

「減容技術與設備手冊及案例彙編(上)」

中華民國九十五年七月

減容技術與設備手冊及案例彙編(上)

經濟部工業局 編著
財團法人 台灣綠色生產力基金會

出版機關： 經濟部工業局

出版日期：中華民國 95 年 7 月

序

國際上許多學者預言，二十一世紀將是爭奪資源的時代，亦即主導人類的經濟活動，除了資本與技術之外，最重要者為資源的擁有。因此，資源的有效利用將是維繫未來人類經濟活動的命脈。目前各國對於廢棄物處理的趨勢，逐步朝向資源化方向，不但可減緩廢棄物處理設施興建的壓力，亦可創造新的利潤，降低企業經營成本，同時使資源得以永續利用。

減容技術係廢棄物資源化過程中之關鍵性技術之一，廢棄物經減容處理後，不僅提升再生利用效率，資源化產品之附加價值亦隨之提高。為推廣應用各項減容技術，本局特委託財團法人台灣綠色生產力基金會針對壓縮、破碎、分選、脫水、乾燥、熔融及熱裂解等7項技術原理與設備作介紹，並彙編成上冊。另將於下冊介紹國內外減容實廠案例及操作維護管理等。冀望提供業者資源化技術經驗，並作為學術研究單位及相關工程業界研究開發之參考，俾利共同促進廢棄物資源化之落實與應用，進而開創資源永續利用。

本手冊編撰過程，感謝義守大學機械系郭振明教授、成功大學資源再生中心陳偉聖研究員、中央大學環工所曾迪華教授、本會黃順明工程師、勤益技術學院化學工程系郭甦隆教授、台灣大學機械系郭景宗教授等參與資料蒐集及編撰，台灣水環境再生協會歐陽嶠暉理事長、台灣大學機械工程學系馬小康教授以及中山大學環境工程研究所楊金鐘教授等之審訂，使本手冊得以付梓。但由於時間匆促，其實務資料蒐集彙整不易，內容如有錯誤漏植之處，尚祈不吝指正。

經濟部工業局 謹識
中華民國九十五年七月

目 錄

第一章 前言

- 1.1 資源再利用之意義 1
- 1.2 減容對廢棄物處理及資源化之重要性 2

第二章 減容原理

- 2.1 壓縮 3
- 2.2 破碎 6
- 2.3 分選 17
- 2.4 脫水 35
- 2.5 乾燥 40
- 2.6 熔融 46
- 2.7 熱裂解 51

第三章 減容技術與設備

- 3.1 壓縮技術與設備 57
- 3.2 破碎技術與設備 61
- 3.3 分選技術與設備 95
- 3.4 脫水技術與設備 167
- 3.5 乾燥技術與設備 184
- 3.6 熔融技術與設備 195
- 3.7 熱裂解技術與設備 206
- 名詞解釋 213
- 參考文獻 217
- 單位換算表 220
- 索引 224
- 設備廠商名錄 226

圖目錄

圖 2.1	壓縮比對體積減少百分比.....	4
圖 2.2	固體廢棄物比重對施重壓力圖.....	5
圖 2.3	顆粒破碎後欲回收物質之暴露與單離.....	7
圖 2.4	金屬、岩石與橡膠材料之應力—應變區線示意圖....	8
圖 2.5	顆粒大小與粉碎能量關係圖.....	10
圖 2.6	各種不同大小球體混合受壓時的破裂機率.....	11
圖 2.7	破碎的機構.....	12
圖 2.8	磨球之間的有效粉碎區域圖.....	12
圖 2.9	破碎機之咬角示意圖.....	15
圖 2.10	正常轉速下磨球之移動情形.....	16
圖 2.11	顆粒過篩示意圖.....	21
圖 2.12	顆粒過篩的倒數與顆粒和篩孔相對尺寸的關係.....	23
圖 2.13	強磁性物質之磁化曲線.....	27
圖 2.14	順磁及反磁性物質之磁化曲線.....	28
圖 2.15	磁滯曲線.....	28
圖 2.16	靜電分選原理.....	31
圖 2.17	顆粒靜電感應帶電.....	31
圖 2.18	靜電分選顆粒所受之作用力.....	32
圖 2.19	高壓靜電分選原理.....	33
圖 2.20	泡沫與固體間之接觸角.....	33
圖 2.21	恆定乾燥條件下的典型乾燥速率曲線.....	43
圖 2.22	水分、材料溫度變化.....	46
圖 2.23	網絡狀結構圖例.....	47
圖 2.24	纖維素熱解途徑示意圖.....	52
圖 3.1	壓縮流程.....	57

圖 3.2	擠壓式壓縮機	59
圖 3.3	卡閘式壓縮機	59
圖 3.4	螺旋式壓縮機	60
圖 3.5	壓濾機	60
圖 3.6	顎形破碎機之構造圖	63
圖 3.7	顎形破碎機之尺寸圖	67
圖 3.8	偏心破碎機之構造圖	69
圖 3.9	偏心破碎機之尺寸圖	73
圖 3.10	轉輪破碎機之構造	75
圖 3.11	轉輪破碎機之尺寸圖	77
圖 3.12	衝擊破碎機之構造圖	78
圖 3.13	渦旋多葉撞擊式破碎機外觀	80
圖 3.14	渦旋多葉撞擊式破碎機內部構造	80
圖 3.15	剪斷破碎機之側視圖	82
圖 3.16	剪斷破碎機之俯視圖	82
圖 3.17	剪斷破碎機之正視圖	83
圖 3.18	複合切斷式破碎機機械外觀圖	84
圖 3.19	單軸回轉式破碎機外觀圖	84
圖 3.20	球磨機之構造	87
圖 3.21	球磨機之尺寸圖	89
圖 3.22	管狀球磨機之構造圖與各部名稱	90
圖 3.23	管狀球磨機之尺寸圖	91
圖 3.24	振動磨機之構造圖	92
圖 3.25	塔磨機之外觀與構造	94
圖 3.26	豎磨機之外觀圖	95
圖 3.27	篩分效率的測定	96
圖 3.28	自調中心震動篩	101

圖 3.29	共振篩的結構示意圖	102
圖 3.30	重力曲面篩原理示意圖	103
圖 3.31	機率篩結構示意圖	104
圖 3.32	水力分級機	105
圖 3.33	渦錐分級機	106
圖 3.34	空氣分級機	106
圖 3.35	手選轉台	107
圖 3.36	光學分選機	108
圖 3.37	Gunson's Sortex MP60 型分選機	109
圖 3.38	簡易型顏色分選機	109
圖 3.39	RTZ 16 型光學分選機	110
圖 3.40	RTZ 19 型挑選機	111
圖 3.41	伽瑪散射分選機系統與原理	112
圖 3.42	豎槽型風力分選機	114
圖 3.43	豎槽型風力分選系統	114
圖 3.44	彎曲管道型風力分選機	115
圖 3.45	水平式風力分選機	115
圖 3.46	氣刀分選機之三種型式	116
圖 3.47	震盪型風力分選機之分選原理	117
圖 3.48	震盪型風力分選機	117
圖 3.49	旋轉型風力分選機	118
圖 3.50	上升水流分選設備	120
圖 3.51	Wemco 公司上升水流分選機	121
圖 3.52	波震分選機剖面圖	121
圖 3.53	平流分選原理圖	123
圖 3.54	尖縮溜槽	125
圖 3.55	雙層圓錐分選機剖面圖	126

圖 3.56	螺紋分選機	127
圖 3.57	溜洗槽	127
圖 3.58	溜洗槽之擋條種類	128
圖 3.59	搖洗桌	129
圖 3.60	帶選機	130
圖 3.61	轉動圓洗桌	130
圖 3.62	重液分選系統	131
圖 3.63	錐形分選機	134
圖 3.64	鼓形分選機	134
圖 3.65	重液渦錐分選機	135
圖 3.66	磁性流體分選機	136
圖 3.67	慣性力分選設備	137
圖 3.68	磁滑輪磁選機之操作原理	138
圖 3.69	電磁筒磁選機	139
圖 3.70	矩形懸掛式磁選機之型式	139
圖 3.71	筒形磁選機	140
圖 3.72	Dings-Roche 帶式磁選機	141
圖 3.73	磁感應筒磁選機操作原理	142
圖 3.74	交叉皮帶磁選機	143
圖 3.75	盤形磁選機	144
圖 3.76	Frantz 磁過濾機	145
圖 3.77	NY 轉筒型磁選機	145
圖 3.78	Jones 轉環型磁選機	146
圖 3.79	罐型高梯度磁選機	147
圖 3.80	轉環型高梯度磁選機	148
圖 3.81	超導磁選機	149
圖 3.82	板式靜電分選機	150

圖 3.83	網式靜電分選機	150
圖 3.84	多部靜電分選機排列成層狀	151
圖 3.85	高壓靜電分選機之內部構造圖	152
圖 3.86	渦電流分選系統圖	153
圖 3.87	Newell 公司之渦電流分選機	154
圖 3.88	柱槽浮選機	155
圖 3.89	WBS 型 S-W 浮選機	156
圖 3.90	泡沫浮選機	157
圖 3.91	各類吸氣型浮選機	158
圖 3.92	Fagergren 浮選機	159
圖 3.93	Denver Sub A 浮選機浮選作用示意圖	160
圖 3.94	Denver 單槽浮選機構造圖	160
圖 3.95	Aker 浮選機構造圖	161
圖 3.96	Aker 浮選機 L 型組合	161
圖 3.97	Aker 浮選機 B 型組合	162
圖 3.98	Agitair 浮選機構造圖	162
圖 3.99	OK-50 型浮選機組	163
圖 3.100	各類攪拌吹氣型浮選機	164
圖 3.101	Sala AS 型浮選機葉輪操作情形	165
圖 3.102	Sala AS 型浮選機尺寸結構圖	165
圖 3.103	熱粘選鹽法	166
圖 3.104	長度分選機	167
圖 3.105	典型曬乾床構造圖	169
圖 3.106	污泥曬乾床之外觀	169
圖 3.107	典型帶濾式脫水機之外觀	171
圖 3.108	典型帶濾式脫水機附屬設備系統圖	171
圖 3.109	帶濾式脫水機行程示意圖	172

圖 3.110	典型帶壓式脫水機構造	175
圖 3.111	典型帶壓式脫水機附屬設備系統圖	175
圖 3.112	帶壓式脫水機內縮式濾板及排泥示意圖	176
圖 3.113	鉢式離心脫水機之外觀	179
圖 3.114	典型鉢式離心脫水機附屬設備系統圖	179
圖 3.115	鉢式離心式脫水機構造	180
圖 3.116	箱式乾燥器	185
圖 3.117	隧道乾燥器	185
圖 3.118	旋轉窯乾燥器工作原理簡圖	186
圖 3.119	雙鼓乾燥器結構示意圖	188
圖 3.120	單級帶式乾燥器結構透視簡圖	189
圖 3.121	盤式連續乾燥器結構	190
圖 3.122	雙螺旋槳葉式真空乾燥器	192
圖 3.123	氣流乾燥基本流程圖	193
圖 3.124	熔融爐分類圖	195
圖 3.125	表面熔融爐示意圖	196
圖 3.126	內部熔融爐示意圖	197
圖 3.127	焦炭熔融爐示意圖	198
圖 3.128	旋窯熔融爐示意圖	198
圖 3.129	電弧 (ARC) 熔融爐示意圖	199
圖 3.130	電阻熔融爐示意圖	200
圖 3.131	電熱熔融爐示意圖	201
圖 3.132	電漿熔融爐	202
圖 3.133	電弧電漿火炬—非傳輸型電漿火炬	202
圖 3.134	電弧電漿火炬—傳輸型電漿火炬	203
圖 3.135	電漿焚化熔融爐系統流程	204
圖 3.136	熱裂解系統進料設備	208

圖 3.137	各種型式之熱解爐示意圖	210
圖 3.138	廢輪胎熱裂解系統示意圖	212

表目錄

表 2.1	金屬、岩石與橡膠材料之破斷應力及應變數值	8
表 2.2	各種球磨機的粉碎能量密度	14
表 2.3	各種球磨機粉碎能量密度與其特點	14
表 2.4	顆粒過篩的機率與顆粒及篩孔相對尺寸的關係	22
表 2.5	文獻中各種污泥的脫水特性	38
表 2.6	不同溫度階段之熱解反應	53
表 2.7	事業廢棄物分類及處理技術	54
表 2.8	反應溫度對於廢棄物熱解產物濃度分佈之影響	56
表 3.1	破碎性質分類及適用破碎機	61
表 3.2	柏克型顎形破碎機各部名稱與主要零件之材質	63
表 3.3	顎形破碎機操作中的故障及排除方法	65
表 3.4	顎形破碎機易磨損零件的使用期限和最低備份數量	65
表 3.5	顎形破碎機之外形	67
表 3.6	顎形破碎機之破碎能力	68
表 3.7	偏心破碎機各部名稱與主要零件之材質	70
表 3.8	偏心破碎機操作中的故障及排除方法	71
表 3.9	偏心破碎機易磨損零件的使用期限和最低備份數量	72
表 3.10	偏心破碎機之外型	73
表 3.11	偏心破碎機之破碎能力	74
表 3.12	轉輪破碎機之外型	76
表 3.13	轉輪破碎機之破碎能力與馬力	77
表 3.14	渦旋多葉撞擊式破碎機規格表	81
表 3.15	複合切斷式與單軸回轉式破碎機性能比較表	85
表 3.16	磨機的故障、原因及排除方法	88
表 3.17	球磨機之規格	89

表 3.18	球磨機之磨礦能力與馬力	89
表 3.19	管狀球磨機之規格	90
表 3.20	管狀球磨機之磨礦能力與馬力	91
表 3.21	篩分設備的分類	98
表 3.22	重力分選準據表	124
表 3.23	搖洗桌可變因素	129
表 3.24	常用之重液	132
表 3.25	常用之重液介質	133
表 3.26	各類金屬導電度與密度之比值表	153
表 3.27	曬乾床法之優點與缺點	170
表 3.28	帶濾式脫水機的優點與缺點	173
表 3.29	帶壓式脫水機的優點與缺點	178
表 3.30	鉢式離心機之優點與缺點	181
表 3.31	各種污泥脫水方式之評估比較表	182
表 3.32	各種脫水方法對環境的影響	183
表 3.33	各種常見乾燥器比較	194
表 3.34	非傳輸型與傳輸型電漿火炬優缺點比較	203
表 3.35	焚化灰渣高溫熔融處理技術比較	205
表 3.36	不同熔融爐綜合評估比較	206
表 3.37	生質廢棄物熱解技術及其操作條件	206
表 3.38	輪胎熱裂解溫度對產物濃度分佈之影響	212

第一章 前 言

1.1 資源再利用之意義

全世界的天然資源蘊藏有限，依照目前資源消耗速率估算，未來數十年間某些資源將被開發耗盡。然面對經濟、科技發展所帶來的享受及需求，都需要許多人力與消耗自然環境的物質和能量。若能保留現有未開發資源，改以思量廢棄物資源再利用有效途徑或提升資源再利用效率，如此不僅可解決需求問題，且可保有較多的潛力(資源)，以期可持續。

工業廢棄物資源回收再利用的貢獻包括：一、減少廢棄物處理所造成的環境負荷；二、減少礦產開採的環境破壞；三、創造新資源供應各產業所需而無匱乏；四、降低原物料開採生產之溫室氣體排放等四大面向。目前國內工業廢棄物資源化量達 1,070 萬公噸/年，再利用率達 73%。也就是不但免除 1,070 萬公噸/年之廢棄物處理，同時創造 1,070 萬公噸的新資源，達到資源永續利用。再就減少製程排放及能源耗用等二方面之廢棄物再利用種類，推估其資源化可減少之溫室氣體排放量約達 483.3 萬公噸/年。由上可見，資源再利用長遠發展之重要性。

資源永續利用與經濟社會的永續發展為世界潮流，推動廢棄物資源化以促進資源有效運用為產業永續發展之重要環節，也是企業內創效益，外塑形象的基礎。致力於資源有效再生、循環使用於產業製造生產與消費使用，建立產業共生之生態體系，將是台灣未來努力之方向。

1.2 減容對廢棄物處理及資源化之重要性

減容之目的有下列三點：

- 1.減量化：經乾燥、脫水處理後之污泥或濕度較高廢棄物之體積減少，相對地減少最終處置的費用，如清運、掩埋之費用。
- 2.安定化：經乾燥處理後之污泥或濕度較高之廢棄物性質安定，不易產生臭味，進而避免再污染之二次公害。
- 3.資源化：經乾燥處理後之污泥或濕度較高之廢棄物，再經分選、摻配、混練、冶煉等適當處理程序，即可達到資源化再利用的目的。

減容影響著廢棄物資源化成本支出以及選擇進行最終處置或資源化再利用之關鍵。尤其這些年來，事業廢棄物管制趨嚴、掩埋場地難覓與處理費用高漲，再加上廢棄物變黃金的觀念以及點石成金之案例一再發生，使廢棄物減容技術開始受到重視。

鑒於上述背景，乃規劃撰寫「減容技術與設備手冊及案例彙編」，並區分上、下冊。上冊內容介紹壓縮、破碎、分選、脫水、乾燥、熔融及熱裂解等 7 項技術原理與設備，並於附錄提供設備商名錄供業界參考。下冊則介紹國內外減容實廠案例及操作維護管理等。期望藉由本手冊提供產業界選用減容設備時的指引，讓不同廢棄物能有效達到有價成份回收及資源轉用等效果，降低廢棄物處理成本，甚至藉由物化特性改善而提昇其經濟價值。

第二章 減容原理

本章節包括壓縮、破碎、分選、脫水、乾燥、熔融及熱裂解等 7 項技術原理介紹，詳述如下：

2.1 壓縮

壓縮(compaction)的目的在於增加廢棄物之密度，減少廢棄物的體積，使之易於運輸、管理及處理。壓縮後的廢棄物亦可降低及防止二次污染，且廢棄物經壓縮後可增加儲存空間的利用，因而降低儲存成本。

廢棄物壓縮成塊時並不會破壞或釋放出廢棄物成分中原有穩定存在之物質或化合物，即不需要附加處理程序來防治被釋放出具污染性的不穩定物質或化合物，因此較無二次污染防治的問題。且因成分緊密結合，微生物生長繁殖條件受阻，廢棄物內部生化作用減緩，可降低廢氣產生率及滲出水之污染。

另外壓縮成品主要形狀為長方體或立方體，可使用較為簡單之機具，即可整齊的排列重疊，儲存空間可充分利用，所需之土地面積可大為減少。另單位運送工具可載送之廢棄物，依比例增加許多，且可用任何運輸工具運輸，如一般小貨車、卡車、拖車或火車皆可使用，因此占廢棄物處理成本相當份量的運輸費即可降低。

2.1.1 原理介紹

壓縮主要是利用外力或本身重力，以降低孔隙率增加密度而減小物體的體積，使資源廢棄物易於運輸及處理。由於增加單位清運車輛容積之載運量與降低總清運車次，因此可降低運輸成本。且壓縮可以處理各種不同類型之固體廢棄物，包括不同性質之垃圾、適燃性垃圾、不適燃性垃圾及一般工業廢棄物等。壓縮廢棄物之壓力一般以 100 psi (0.6895 MPa) 區分為低壓及高壓壓縮，而廢棄物經壓縮後，體積僅有原來之 20~30%，一般未經處理之廢棄物單位容積重約 100~250 kg/m³，視其組成及含水量而不同。但經壓縮後廢棄物壓縮塊的單位容積重可高達 800~1,200 kg/m³，所以壓縮率因此而約為 80%。

廢棄物壓縮處理效果可分別以體積減少百分比及壓縮比，分別說明如下：

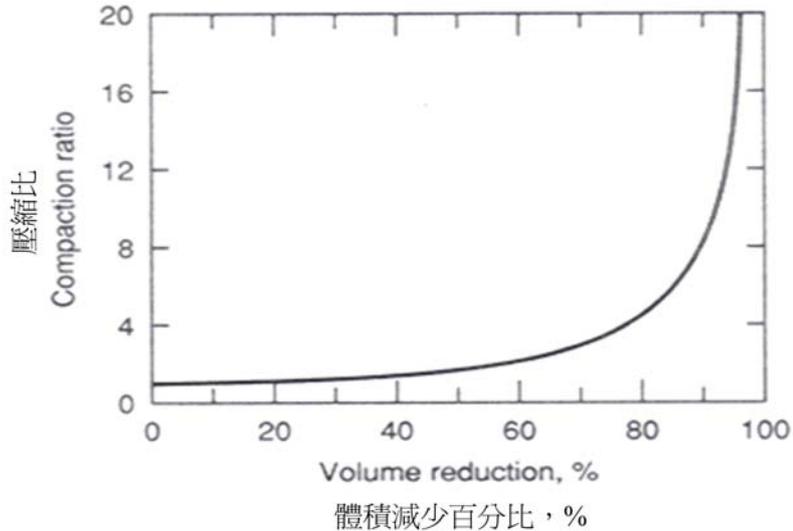
$$\text{體積減少百分比 (\%)} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \dots\dots\dots (2-1)$$

$$\text{壓縮比} = \frac{V_i}{V_f} \dots\dots\dots (2-2)$$

V_i = 壓縮前原體積， m^3

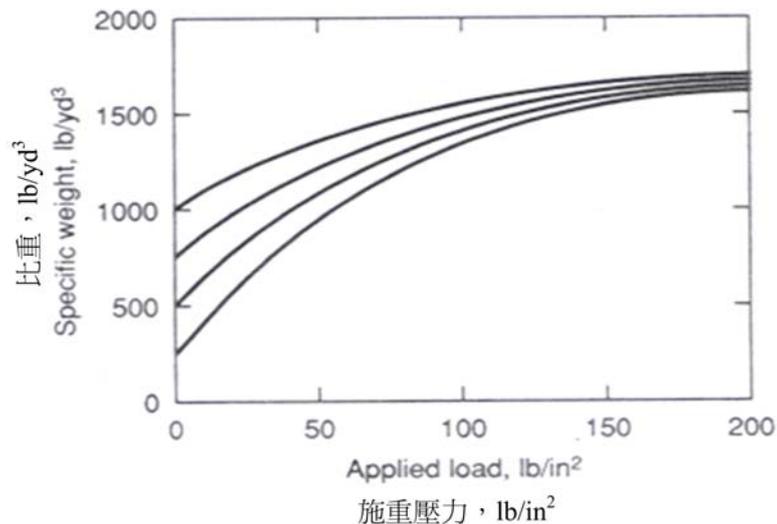
V_f = 壓縮後最終體積， m^3

壓縮比和體積減少百分比之關係為非線性的關係，如圖 2.1 所示，體積減少百分比從 80% 增加至 90%，壓縮比則從 5 增加到 10。固體廢棄物的典型單位重對施重壓力曲線如圖 2.2 所示，這些曲線的漸近值約為 1,800 lb/yd^3 (1,069 kg/m^3)，與高壓壓縮機所得之比重相同。



資料來源：Integrated Solid Waste Management:
Engineering Principles and Management Issues

圖 2.1 壓縮比對體積減少百分比



資料來源：Integrated Solid Waste Management:
Engineering Principles and Management Issues

圖 2.2 固體廢棄物比重對施重壓力圖

2.1.2 壓縮方法及影響因子

壓縮方法主要可依作用力方式及作用力大小分類，說明如下：

1. 依作用力方式可以分為密閉壓縮式及開放壓縮式：

(1) 密閉壓縮式又稱非移動式(stationary)：

將廢棄物貯存於密閉的壓縮設備內，施以大小不同的壓力使體積減小，又可分為三種處理方式：

A. 壓縮式垃圾收集車，使用的是低壓壓縮處理，壓縮後的密度可由 250 kg/m^3 增加到 450 kg/m^3 。

B. 壓縮式貨運搬運車（轉運用）。

C. 固型化壓縮處理（中間處理），為高壓壓縮處理，密度可增加到 $800\sim 1,200 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 開放壓縮式，又稱移動式(movable)或重力式：

主要是藉由壓縮設備之重量，將鋪放之廢棄物加以壓縮，如垃圾掩埋場之壓縮處理，其密度可由 250 kg/m^3 增加至 400 kg/m^3 至 600 kg/m^3 之間。

2. 依作用力大小來區分為低壓壓縮式及高壓壓縮式：

(1) 低壓壓縮式：

以壓力低於 100 psi (0.6895 MPa)之壓縮設備為主。如密閉式壓縮廢棄物清運車，也稱為車上型壓縮器，壓縮器屬於低壓式，按照廢棄物的性質可減少容量為原體積之 $1/2\sim 1/3$ 。另有固定型低壓壓縮機，將廢棄物壓縮減容後，再由其他車輛轉載至處理廠處理。

(2) 高壓壓縮式：

以壓力高於 100 psi (0.6895 MPa)之壓縮設備為主，通常為固定型高壓壓縮機，高壓壓縮機多以鏈帶機引導收集之廢棄物進入進料斗，再進行多段式的壓縮。經壓縮成塊後，直接推入大型貨櫃或卡車，載運至處理廠處理。本型式之壓縮機壓力可高至 $3,000 \text{ psi}$ (20.685 MPa)，所處理後廢棄物之單位容積可高達 $850 \text{ kg/m}^3\sim 1,200 \text{ kg/m}^3$ ，通常需配合使用鐵線高密度壓縮捆紮機或鐵絲網高密度壓縮包紮機來捆紮。

使用壓縮設備將廢棄物壓縮減容，主要的影響考慮因素如下：

1. 廢棄物的性質，如大小、成分、水份、密度等。

- 2.廢棄物運送與填送進入壓縮機的方法。
- 3.壓縮後廢棄物之後續處理方法及用途。
- 4.壓縮機之設計因素，一般考慮的有下列幾點：
 - (1)荷載槽大小：決定可倒入廢棄物最大的體積，其範圍約為 $0.76\sim 8.4\text{ m}^3$ 。
 - (2)回程時間：指從一開始壓縮到壓縮完成後又回到開始所需時間，時間約在 20~60 秒之間，且回程時間的長短相對的將影響到每日壓縮處理的量。
 - (3)機械容量：依每小時所能處理的體積量，其範圍約在 $23\sim 1,147\text{ m}^3/\text{h}$ 。
 - (4)壓縮壓力：壓縮撞擊面壓力，其範圍約在 $1.05\sim 3.52\text{ kg/cm}^2$ 。
 - (5)嵌入深度：撞擊槌刺入廢棄物之程度，其範圍約在 10~66 cm。
 - (6)壓縮比：廢棄物壓縮前與壓縮後的體積比，一般介於 2:1 到 8:1 之間。
- 5.操作因素，如動力數、維修保養、可靠性及其他公害，如噪音、空氣、水污染等。
- 6.空間的需求及放置地點的考量，如面積、高度等環境因素的限制等。

2.2 破碎

2.2.1 破碎之作用力及目的

破碎是使用機械性外力將物質顆粒之塊狀組織破碎成細粒，因此而增加其比表面積之操作。任何一種破碎機都不是只用單一作用力破碎物質顆粒，通常是以某種作用力為主，配合其他種力的合成作用，因此，破碎機施於物質顆粒上的力是複雜的，可分為壓碎、劈開、折斷、磨剝與衝擊等作用力。對壓碎而言應考慮材料的抗壓強度，劈開要注意其抗拉強度，折斷要注意其抗彎強度，磨剝就應考慮其抗剪切強度，衝擊時要考慮其抗衝擊強度。破碎作業的主要目的為下列三項：

- 1.單離或暴露：資源回收或處理程序中(如圖 2.3)，常需要採用分選作業，將有價值之物質分選出來回收再利用，分選前必先將欲回收物質顆粒單離，所謂單離就是成分分離，使後續分選作業得以順利進行。金屬製品都是用裝配而成，使用螺絲鉚釘接合，欲回收金屬無法靠拆解作業而單離，就得使用切割或撕裂，再進行分選。有些金屬回收程序是要靠化學溶解法將部分金屬溶解而達回收目的；此時要回收的金屬必須暴露於容易接觸的地方而不能被包於不溶物之中。在分選或溶解之前，必須先達到單離或暴露，故此為金屬切碎作業的首要目標。
- 2.適合分選作業之大小：每一種分選作業，都有適用的金屬物件大小範圍，有些

分選作業適用愈大件愈好，如人工手選同樣的手選件數之下，單離體愈大，選出物重量愈多，單離體愈大愈好。但是若單離體大到數十公斤而超過人力負荷時，反而不能用手工搬運，因此，手選作業有一定適用的大小範圍。

3.適用產品之大小：有些單離不必經過分選作業的再生資源，為了裝載、搬運或其他使用限制，常常要再予切碎，如廢輪胎做為水泥輔助燃料使用時常將它切成小塊。

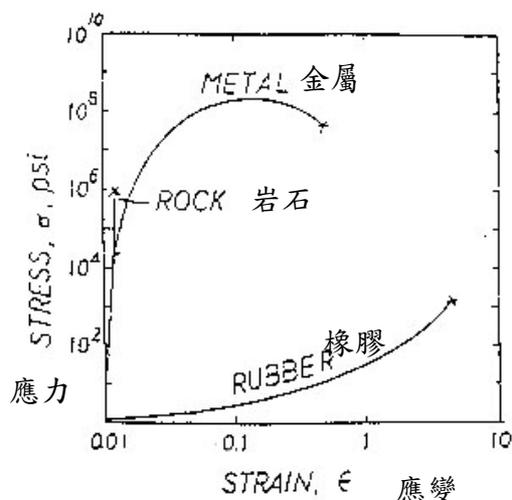


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 2.3 顆粒破碎後欲回收物質之暴露與單離

2.2.2 破碎特性之要求

資源回收程序所涉及的材料可分為金屬類、陶瓷玻璃岩石類及橡膠、塑膠有機製品類。這三大類材料有極大的基本差異，在切割或粉碎作業時，這些材料的基本性質決定機器之作業因素。這三大類材料之性質如圖 2.4 所示，以材料受力時的應力與應變來表示岩石類、金屬類及橡膠類的性質，岩石受力產生應變，超過某一程度即破壞，應力應變變化成直線比例，此比例即為岩石之楊氏模數。金屬的應力應變前稱為彈性變化，和岩石相似的為直線比例，但金屬在破壞以前有相當大比例的塑性變形，變形量達到本身原來大小的 70% 左右時，才產生破壞。橡膠則受力很小即產生很大變形，破壞時，變形量要達到原來大小的七、八倍，這三種材料的破斷應力及應變值如表 2.1。因此，針對各類廢棄物材質特性，應選用不同施力情況的破碎設備，以達到切割目的。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 2.4 金屬、岩石與橡膠材料之應力—應變區線示意圖

表 2.1 金屬、岩石與橡膠材料之破斷應力及應變數值

材料種類	應力(psi)	應變
岩石	106	0.1%
金屬	107	60%
橡膠	103	80%

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

2.2.3 單離(liberation)與暴露(exposure)

單離與暴露的基本觀念來自於高汀(Gaudin)的單離模式。由物理分選的觀點，粉碎後的顆粒可分為單離顆粒及互鎖顆粒。由浸漬分選的觀點，則可分為暴露晶粒與非暴露晶粒。

在物理分選作業中，互鎖顆粒中的異相物質未完全分離，富集後的純度必不高，必須將互鎖顆粒粉碎成為單離顆粒，才有可能繼續提高。其分離程度，可用單離度(degree of liberation)來表示，其定義是：某物質單離顆粒的重量與總重量的比值。單離度愈高表示其中單離顆粒比例愈高，亦即互鎖顆粒比例愈小。即：

$$\text{單離度} = \frac{\text{某物質單離顆粒之重量}}{\text{總重量}} \dots\dots\dots (2-3)$$

若顆粒大小均一時，公式(2-1)可寫為

$$\text{單離度} = \frac{\text{某物質單離顆粒顆粒數}}{\text{總顆粒數}} \dots\dots\dots(2-4)$$

在顆粒中，若回收物露出於顆粒表面，則為暴露型，若完全被包裹在顆粒中，則為未暴露晶粒。暴露度在化學浸漬作業中，只有暴露型才可經浸漬而溶解，因此可用於描述溶出率的指標，一般是以暴露度(degree of exposure)表示，其定義是暴露型重量與所有存在顆粒中的晶粒(包含暴露與未暴露)重量之比。

$$\text{暴露度} = \frac{\text{某物質暴露顆粒之重量}}{\text{總重量}} \dots\dots\dots(2-5)$$

若顆粒大小均一時，公式(2-5)可寫為

$$\text{暴露度} = \frac{\text{某物質暴露顆粒之顆粒數}}{\text{總顆粒數}} \dots\dots\dots(2-6)$$

2.2.4 顆粒強度

粉碎是將顆粒壓碎，在進行壓碎時，施力必須大於顆粒的強度，而顆粒強度之定義為：顆粒破裂的瞬間，單位受力截面積所承受之外力，即：

$$\text{顆粒強度} = \frac{\text{顆粒所受外力}}{\text{顆粒的受力截面積}} \dots\dots\dots(2-7)$$

由於不規則的顆粒其受力面一般比平均截面積要小很多，為得到合理的強度，一般均假設平均截面積等於 10 倍接觸面的大小，因此，不規則顆粒的強度是以實際所測強度的 10 倍計算。試驗顯示，顆粒的強度隨著顆粒大小之降低而增加。其原因可以歸納為下面三個理由：

1. 小顆粒中的裂痕比大顆粒中的裂痕小而且少，因此要在小顆粒中產生裂痕並擴大，應力相對較大。
2. 顆粒在破裂前，可儲存的彈性能量與體積成正比，但是產生裂痕之能量則與顆粒截面積成正比，因此，顆粒的強度與粒徑成反比，亦即顆粒愈小強度愈大。

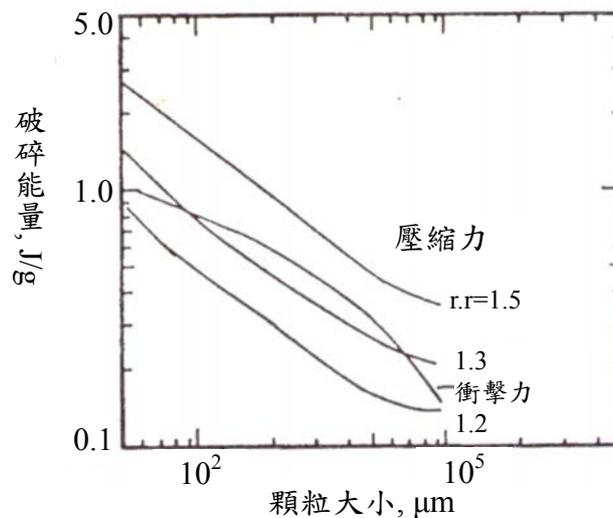
3.異質結構在顆粒粒徑變小時，可能成為均質之單晶顆粒，強度因而增加。

2.2.5 破碎能量

破碎能量是指破碎一單位體積或一單位質量顆粒所需要之能量。在咬碎或壓碎顆粒時，所需應力並非恰等於將顆粒壓碎所需之壓力。因此粉碎機之耗能一般無法由破碎能量之計算獲得。但其可作為分析粉碎機壓碎微小程序的有效方法，像在兩個圓球之間壓碎單一顆粒，兩滾輪壓碎，兩顆粒撞擊，或是槳葉打擊顆粒等。

圖 2.5 所示為石灰石顆粒以壓力及衝擊力打碎所需的破碎能量與粒徑之關係。圖中的縮減比(reduction ratio, r.r)為進料顆粒與出料間隙之比值。顯示縮減比愈大所需破碎能量亦愈高。衝擊試驗是試驗顆粒 50%破碎時的動能。與壓碎的破碎比為 1.3 時很接近衝擊試驗的數值，可以用為代表破碎能量的數值。

圖中顯示破碎能量隨顆粒粒徑之減小而大幅增加，粒徑在 $100\mu\text{m}$ 時石灰石所需破碎能量約為 0.9J/g 。此數值是粒徑 $1,000\mu\text{m}$ 的 6 倍左右。依此趨勢，對於微米大小的顆粒其破碎能量可能將達到 10J/g 左右。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 2.5 顆粒大小與粉碎能量關係圖

2.2.6 粒間破碎(interparticle breakage)

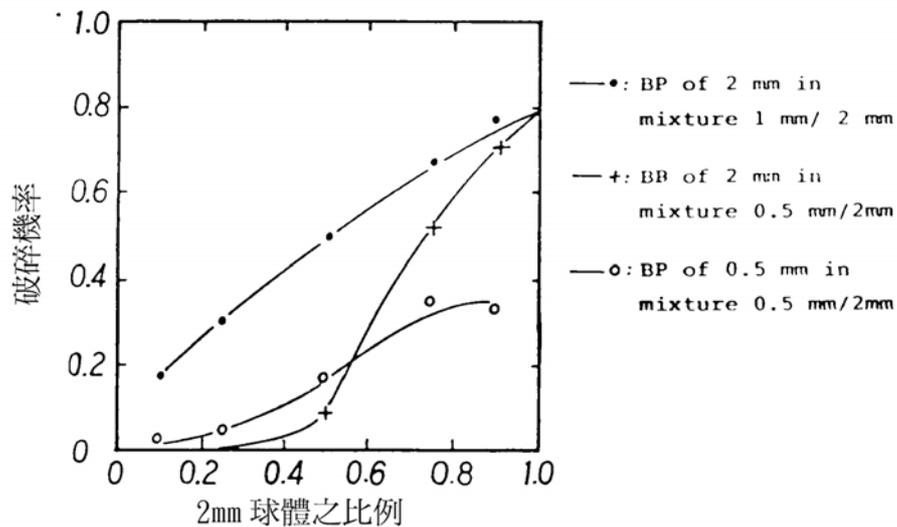
在一般破碎操作中常用發生所謂層狀壓碎的現象，即較大顆粒直接被粉碎面壓碎，但較小的顆粒則被較大顆粒的阻擋而是間接壓碎。在細碎或超微細碎的操作中，此種粒間破碎為主要的破碎方式。它的特點是：

1. 只有部分顆粒被壓碎，雖然四周壓力非常大，仍然很難有全部的粒間顆粒破碎。

2. 壓碎的顆粒大小集中在某一個粉碎極限之上。

3. 餵料中若已有微粉時，再次壓碎的微粉會依次降低。

顆粒在層狀壓碎時受力狀況決定於排列情況。在兩顆粒之間的小顆粒受到的應力要比大顆粒受到兩顆小顆粒擠壓的應力大得多。大顆粒壓小顆粒時，小顆粒受應力是和大小顆粒的比例成二次方正比。在圖 2.6 中，以玻璃珠 2mm，1mm 及 0.5mm 混合壓碎試驗，橫座標為 2mm 大球所占比例，縱座標是玻璃珠破碎之機率，施加的壓力是一定值，顯示了大顆粒玻璃珠被小顆粒所保護。(即大顆粒比例低時，破碎機率非常小)。小顆粒在大顆粒之間的破碎比例則大得多(大顆粒比例大時，破碎機率很大)。

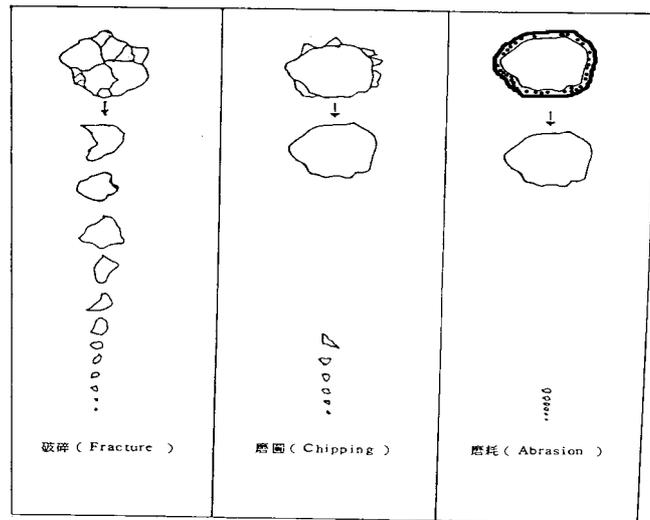


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 2.6 各種不同大小球體混合受壓時的破裂機率

2.2.7 磨耗(abrasion)

粉碎時，顆粒破碎的機構有三種：(1)破碎；(2)磨圓；(3)磨耗；其示意圖如圖 2.7。摩擦力在微粒粉碎時非常重要，不規則的顆粒會因為磨耗作用而變得較圓並產生微小碎塊。這種破碎機構會隨著顆粒變得愈圓而漸漸減少，到此時，要再磨細幾乎不可能了。



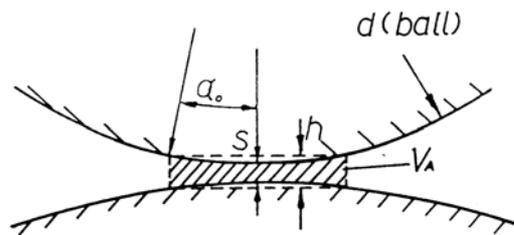
(1)破碎 (2)磨圓 (3)磨耗

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 2.7 破碎的機構

2.2.8 磨球之有效粉碎空間

在磨球之間，顆粒被兩顆磨球壓迫，能夠有效咬住顆粒並予施力的空間如圖 2.8 顯示，假設 α_0 是有效空間的圓心角，則：



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 2.8 磨球之間的有效粉碎區域圖

$$V_A = (\pi h d^2 \alpha_0^2) / 4 \text{ 這個體積很接近圓柱體，高為 } h \text{，圓半徑 } r\alpha_0 = d\alpha_0 / 2 \text{，所以}$$

$$\text{體積} = \pi \cdot (d\alpha_0 / 2)^2 \cdot h \dots\dots\dots(2-8)$$

α_0 數值決定於球直徑 d ，顆粒大小 X ，摩擦係數 u ，及粉末填充比例。在乾磨時， α_0 接近 u 之值，約為 $0.3d/X$ ，在 15 左右。在單一粒子層粉碎時， h 可以用顆粒大小 X 來代替，此時有效的粉碎體積，可以用一個磨球體積 $V_B = \pi d^3 / 6$

的比例來代表，假設上式 V_A 中， $\alpha_0=0.3$ 代入，則

$$V_R=V_A/V_B=3/2(X/d) \cdot \alpha_0^2=0.145X/d \dots \dots \dots (2-9)$$

即磨球與被磨顆粒比例的比例的 14.5% 為有效粉碎體積。若以 d/X 為 15 推算有效粉碎體積大約為球體積的 1% 左右。當磨球愈大，或是被磨顆粒變得小時，有效粉碎體積都變得比較小，全體磨球的粉碎效率因而降低。

2.2.9 磨球之粉碎能量密度

兩顆磨球接近時產生的應力施予被磨顆粒而將之粉碎稱為微觀粉碎程序，這個程序所釋放出的能量施於有效粉碎體積內之顆粒上面，是這些被磨顆粒承受之微觀粉碎能量密度。設磨球的動能為 E_{VB} ，則

$$E_m=E_{VB} \cdot (V_B/V_A)/(\rho_m \cdot (1-\varepsilon_m)V_A) \dots \dots \dots (2-10)$$

式子中 $\rho_m \cdot (1-\varepsilon_m)$ 為有效粉碎體積內之質量， ρ_m 為物質比重， ε_m 為物質在 V_A 之內的孔隙率。磨球的動能 E_{VB} 可以用磨球加速度 a ，球密度 ρ_B ，及磨球平均落下之自由行程 λ 表示為

$$E_{VB}=\rho_B \cdot a \cdot \lambda = \xi \rho_B \cdot a \cdot D \quad ; \quad \xi = \lambda / D \dots \dots \dots (2-11)$$

式中 ξ 為磨球落下行程以磨機直徑 D 為單位之無單位數量，上兩式合成為

$$E_m = \xi (1-\varepsilon_m)^{-1} (\rho_B/\rho_m)(V_B/V_A)(a \cdot D)/V_A \dots \dots \dots (2-12)$$

由此計算出來的能量密度和實際顆粒粉碎所需的能量密度比較，可以得知顆粒所承受能量是否足以被打碎。上式中 ξ 之數值一般在 0.01-0.1 之間，則 E_m 變為

$$E_m = \xi (2/3) (\rho_B/\rho_m)(d/X) \cdot a \cdot D/V_A(1-\varepsilon_m) \dots \dots \dots (2-13)$$

微觀粉碎能量與磨機直徑 D ， d/X 比例及加速度 a 成正比，加速度 a 則來自：
 (1)轉磨機時是重力加速度 g ；(2)振動磨機為振動加速度 $4An^2 \pi^2 = zg$ ， z 在 5-10 之間；(3)行星磨機之離心加速度 zg ， z 在 10-30 之間；及(4)攪拌磨機是攪拌棒外緣的離心加速度 $2U^2/Ds$ ， U 為外緣速度， Ds 為攪棒攪拌直徑。 ξ 數值，在轉磨機部分已經過試驗得到數值介於 0.05-0.15 之間，振動磨機為 0.004-0.3 之間，攪拌磨機則為 0.01，行星磨機接近轉磨機。由此估算得到粉碎能量密度如表 2.2 所示。由表 2.3 的能量密度看來，以行星磨機的數值最大，比其他球磨機大約十倍，這是因為它球體所受的加速度最大。因此這種磨機只能設計出直徑在 100-200mm 的實驗室型，再加大則有機械設計上的困難。在各種機器的能量密度來看，最大數值在 1J/g 左右，而破碎能量在顆粒小於 100 μm 時都超過此數值。因此在磨球之間不是一層的顆粒同時受到磨球壓碎，而只是一些顆粒被壓碎於磨球間。

表 2.2 各種球磨機的粉碎能量密度

種類	ξ	a(加速度)	粉碎能量密度, E_m
轉磨機	0.1	1g	$(0.4-0.08) \cdot D(m)J/g$
振動磨機	0.02	10g	$(0.8-0.16) \cdot D(m)J/g$
行星式磨機	0.1	20g	$(8.0-1.6) \cdot D(m)J/g$
攪拌磨機	0.01	25g(U=110m/sec)	$(1.0-0.2)J/g$

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

表 2.3 各種球磨機粉碎能量密度與其特點

轉磨機	$E_m=(0.4-0.08) \times D(m)J/g$	D可以大至5m， E_m 可以大至2.0J/g，傳動機構最複雜，能量損耗大，充球率50%。
振動磨機	$E_m=(0.8-0.16) \times D(m)J/g$	D最大只能達到0.5m， E_m 最大到0.4J/g，傳動機構最簡單，能量損耗最小，充球率可達90%。
行星式磨機	$E_m=(8.0-0.16)(Dm)J/g$	D大約150mm， E_m 最大1.2J/g機型大小限制了它的發展。
攪拌磨機	$E_m=(1.0-0.2)J/g$	E_m 與機器大小無關，比轉磨機及振動磨機大，適用於微細粉碎。

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

2.2.10 咬角

破碎機的咬角(angle of nip 或 wedge angle)，係給礦與兩碎礦面接觸之點所作切線所成之角，如圖 2.9 之 N。咬角之大小，對碎礦機之操作影響甚大。

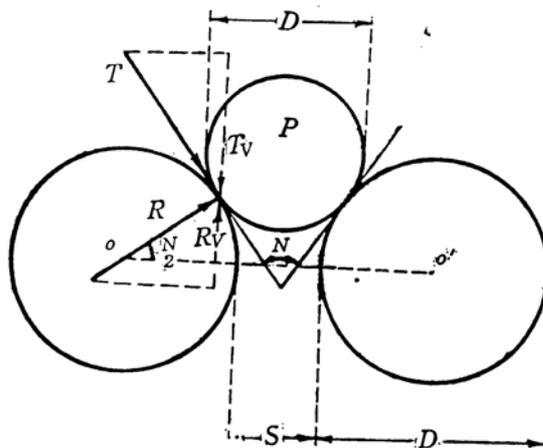
以轉輪機為例，如礦石大小與排礦開口相等，則咬角為 0° ，礦石增大則咬角隨之增大；不僅礦石大小，即轉輪直徑及排礦開口之大小，亦將影響咬角之值，其關係可以下式表之。

$$\cos \frac{N}{2} = \frac{D/2 + S/2}{D/2 + d/2} = \frac{D + S}{D + d} \dots\dots\dots(2-14)$$

即 $N=2\cos^{-1} \frac{D+S}{D+d}$ ，N 為咬角(楔角)，D 為轉輪之直徑，d 為給礦之直徑，S 為排礦開口。

理論上咬角最大限度為 $33^\circ 24'$ ，事實上為碎礦操作順利起見，隨著微細粉末存在，顆粒或碎礦面平滑程度，接觸面會引發許多迴轉而變化咬角小於此數，約

在 11° 至 25° 之間。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 2.9 破碎機之咬角示意圖

2.2.11 轉磨機之轉速及研磨作用

磨機之轉速對磨體之研磨作用，及磨機之效率及能力等，均甚關重要。倘磨機轉速過快，則磨體將附著機殼隨同旋轉，如此則甚少研磨作用。一般都用正常轉速(臨界轉速之 70%~85%)運轉，在此轉速下球有打擊及研磨作用，研磨效率高，能力亦大，而球及襯板之消耗不甚大，動能消耗亦不過多。臨界轉速通常為表示轉磨機轉速之參考數值，是代表磨球在重力加速度為 1G 時的轉速，即：

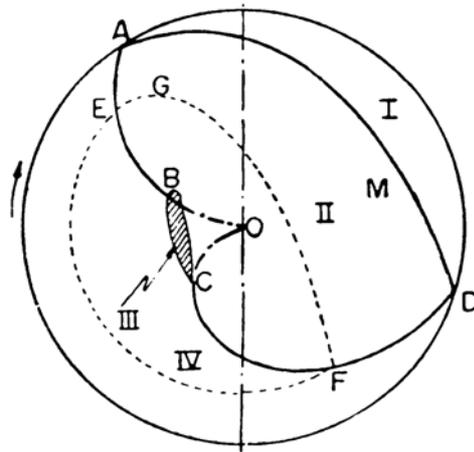
$$N_c = \frac{76.7}{\sqrt{D' - d'}} \quad \text{或} \quad N_c = \frac{42.2}{\sqrt{D'' - d''}} \dots\dots\dots(2-15)$$

其中 N_c 為臨界轉速(rpm)

D 為磨機之直徑(D' 單位為呎)或(D'' 單位為公尺)

d 為磨球之直徑(d' 單位為呎)或(d'' 單位為公尺)

球磨機在正常轉速下，球之移動情形，根據 E.W. Davis 的分析，有四個帶的存在，如圖 2.10，即(I)無球帶，(II)球沿拋物線落下帶，(III)球不活動帶，(IV)球滾動運動帶。球在磨機底部隨機殼作滾動運動，至相當高度如 A(或 E)後，即沿拋物線 AMD(或 EGF)落下，打在機殼 D 或機底部的球上，故 CFD 線為落下時之打擊碎礦區域。又球在滾動運動帶內有滾動及滑動發生，亦當有研磨礦石之作用。惟球在不活動帶內者，則甚少移動，故研磨作用很少。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 2.10 正常轉速下磨球之移動情形

2.2.12 碎磨理論

碎磨理論來自於礦石碎磨現象，即理論上碎磨礦石所需之耗能，目前尚無一致的結論，各方說法不一，但不論其說法如何，都有一相同處，即不論顆粒之大小或形狀如何，碎磨所需之耗能，與產品顆粒大小成正比例。以下是三種最主要的研磨理論：

1. 雷廷格氏理論(Rittinger's Law)：

雷廷格氏認為：外力粉碎物體所作之功，轉化為新生表面積上的表面能，故粉碎過程所消耗的功與新生表面積成一次方正比例，粉碎產品的表面積與顆粒大小成一次方反比例，故關係式可以寫成為：

$$E=K\left(\frac{1}{D_n}-\frac{1}{D_1}\right) \dots \dots \dots (2-16)$$

D：顆粒大小

K：比例常數，即生成一個單位新生面積所需的功

2. 吉克氏理論(Kick's Law)：

粉碎物體的外力所作的功，完全用於使物體發生變形，到了變形應變能儲至極限，物體即被破壞。所以吉克氏認為：幾何上相似的同種物料，粉碎成同樣形狀的產品，所需的功與它們的體積或重量成正比。故粉碎能量與粉碎次數成比例，

$$E=K \cdot \log\left(\frac{D_1}{D_n}\right) \dots \dots \dots (2-17)$$

K：比例係數，即破碎一個單位體積的物體所需的功。

3. 邦德氏理論(Bond's Law)

破碎顆粒時，外力作用之功首先是使物體發生變形，當局部變形超過臨界點，即生成破裂，爾後儲在物體內的變形應變能使破裂擴展成斷面。輸入功的有用部分轉化為新生表面上的表面能，其他部分成為熱損失。因此，破碎所需的功，應當考慮應變能和表面能兩項。應變能和體積成正比，表面能與表面積成正比。假定等量考慮這兩項，所需的功應當與它們幾何平均值成正比，即與 $\sqrt{V \cdot S}$ ($=\sqrt{D^3 \times D^2} = D^{5/2}$) 成比例。對於單位體積的物體，就是與 $D^{5/2}/D^3 = \frac{1}{\sqrt{D}}$ 成比例。

$$E=K \left(\frac{1}{\sqrt{D_n}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right), K \text{ 為比例係數} \dots\dots\dots(2-18)$$

由上面這三個理論各為破碎過程的一個階段。吉克氏注意的是受外力發生形變的階段，邦德氏注意到裂縫的形成和發展，雷廷格氏看到的是破碎後生成新表面。在碎磨時的粉碎比不大，新生表面積不多，應變能占主要部分，因而用吉克氏理論的誤差較小。磨碎時粉碎比大，新生表面積多，表面能是主要的，因而用雷廷格氏理論較適宜。邦德氏理論是用一般碎礦及磨礦設備作實驗定出的，在中等粉碎比的情況下，都大致與它符合。

2.3 分選

從廢棄物中回收資源物質或進行廢棄物之處理時，分選工作往往攸關處理或回收流程之成敗關鍵。廢棄物中之資源物質若不能經由分選之前處理流程將其分離，則可能影響後續回收程序之操作，甚至大大地降低回收之可行性；對於廢棄物之處理也會因有害廢棄物質無法在分選階段加以剔除，而迫使考量其他更昂貴之處理程序。所以分選技術在廢棄物處理及資源回收工作之意義包含以下三項：

1. 將有害物分離出來，可以減少後續處理或回收工作之操作成本，同時也可減少二次公害之發生。如焚化處理時，將含氯之塑膠物質作有效的分選去除，可降低焚化時戴奧辛之排放。
2. 利用分選技術回收資源及再利用資源物質或可用物質，如從廢五金中利用分選技術將資源物質之銅、銀、塑膠等回收再利用。
3. 因廢棄物種類複雜及來源不一，分選技術可以廣泛配合各種不同之處理及回收

方法，使其處理或回收效率得以提高。

正因為廢棄物種類繁多及其物化特性變化很大，在處理及回收技術之選擇上考量因素也很多，且分選技術之選定也攸關處理及回收之效率，故不得不慎重考量。

2.3.1 物質之分選特性

有鑑於此，本技術手冊期望能提供產業界選用分選技術及設備之參考，經由廢棄物之物化特性評析，進而選用適合之分選技術及設備，達到降低廢棄物處理及資源化之成本，將各項分選技術及設備所採用各種物質之分選特性說明如下：

1. 粒度或組成

利用物質本身在廢棄物中之粒度差異或經由粉碎、研磨、篩分及分級等方式予以分選。分選操作方式乃是根據物質在破碎階段所產生物質顆粒之粒度及表面形狀之差異而達到分選。

2. 形狀

利用物質之形狀差異而達分選之目的，所應用之分選方式為顆粒與分離面之間的磨擦力，操作方式為不同形狀之顆粒在分離斜面上之下滑力量，方形顆粒具有較大之摩擦力，而圓形顆粒則較易下滑之差異，而得到分選效果。

3. 顏色及色澤

利用物質之顏色或色澤差異而分選，分選的依據可以是視力(人工方式)或光感應設施(機械方式)。分選操作可以是手選方式(人工)，也可以是機械方式之螢光、反射光之光線選別機來執行。

4. 比重

利用物質間之比重差異而分選輕重物質，分選之根據為質量或比重差異所造成之差異性運動，特別是應用在空氣介質及水介質中。分選操作方式有風力分選機(介質為空氣);也可用水為介質之分選方式，如波震機、溜洗槽、搖洗桌；也有用重液為介質之重液分選設施或磁性流體;最簡單之應用為慣性力之分選設備。

5. 磁性

利用物質間磁性差異而分選出磁性物質及非磁性物質，分選之依據為物質在磁場中所受之磁感應力之強弱。分選操作方式可以是富集磁性物質的方式，也可以是剔除廢棄物中之有害磁性物質(含鐵物質)。

6. 電導性

利用物質之帶電能力差異而分選，分選方式即為物質受靜電感應所產生導電性差異。分選操作方式為讓顆粒通過高電壓區域，使其感應產生導電現象，然後根據電導性之差異而分選成為電導物質及絕緣物質。

7. 物質表面反應性質

物質在水中之表面張力差異也可以用來作為分選之依據，分選操作之方式為必要時加入適當之界面活性劑將物質之表面產生明顯之親水性及疏水性變化，再經由浮起之氣泡，分選成為親水性物質及疏水性物質兩大類。

8. 化學反應性質

利用物質在加入適當化學藥劑後，產生性質變化而分選。分選操作方式可以是加入凝劑或分散劑使物質凝聚沈澱或分散，而達到分選之目的。

9. 輻射特性

利用物質放射出輻射線不同而分選，分選依據為物質放射出來之 α 、 β 及 γ 射線輻射量大小差異而分選。

2.3.2 分選技術之分類

分選技術概可分為人工分選法及機械分選法，惟人工分選法應用在廢棄物之分選上，常因廢棄物中含有各種病原菌、有害物質、易燃物及爆炸物等物質，而增加人工分選之衛生性及安全性問題。此外，當廢棄物量大時，則人工將不勝負荷，故在大規模集中分選作業上，多採用機械法來作分選工作，可以具有較高之分選效率。目前已開發之機械分選技術，主要包括下列各種分選技術：

1. 粒徑分選技術

(1) 篩分技術

(2) 分級技術

2. 揀選技術

3. 重力分選技術

(1) 風力分選

(2) 水力分選

(3) 重液分選

(4)慣性力分選

4.磁選技術

5.靜電分選技術

(1)靜電分選技術

(2)渦電流分選技術

6.泡沫浮選技術

7.其他分選技術

(1)熱粘法

(2)粘著法

(3)形狀分選法

(4)凝集與分散分選法

2.3.3 分選技術之原理

任何一種資源廢棄物在其進行回收再利用之處理程序之前，通常都需要利用分選的手段或程序，將目標資源化物質與其他廢棄物質予以分開。而這個分選程序通常是需能量之消耗，以反抗趨向最大亂度之自然傾向。這些物質當中也都各有其獨特之物理或化學特性，供分選程序之使用。分選之目的為回收廢棄物中可再利用之資源及可用物質；同時也可以配合各種不同之回收處理程序，將目標資源物質予以分選出來，以提高後續回收處理程序之回收處理效率；此外，也可從廢棄物中分選出有害物質或有礙後續回收處理程序之廢棄物，如此可以減少二次公害之發生及提高回收再利用物質之品質。

分選設備所採用之分選特性，有一些是物質之顯性差異，如粒度及顏色等；有的是物質特性經化學藥劑調整後，所顯現之物質特性差異，如浮選時所使用之捕捉劑及起泡劑等。分選操作上所利用之物質分選特性，已於上節中作了說明，本節將針對其中幾個較為重要且應用較廣之特性及其分選原理說明如下：

1.篩分(或粒度分選)

將顆粒大小不同的混合物料，通過單層或多層篩子而分成若干個不同粒度級別的過程稱為篩分。鬆散物料的篩分過程，可以看作兩個階段組成：

(1)易於穿過篩孔的顆粒通過不能穿過篩孔的顆粒所組成的物料到達篩面。

(2)易於穿過篩孔的顆粒穿過篩孔。

要使這兩個階段能過實現，物料在篩面上應具有適當的傳動，一方面使篩面上的物料層處於鬆散狀態，物料層將會產生粒度分層，大顆粒位於上層，小顆粒位於下層，容易到達篩面，並穿過篩孔。另一方面，物料和篩子的傳動都促使堵在篩孔上的顆粒脫離篩面，有利於顆粒穿過篩孔。

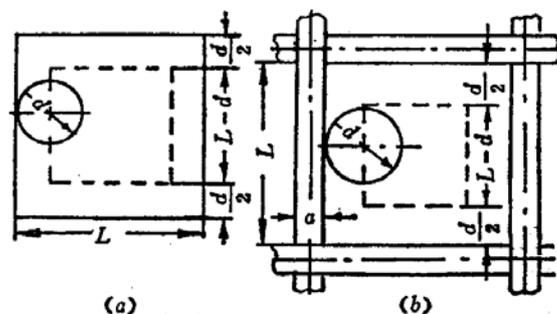
實驗證明，物料粒度小於篩孔 $3/4$ 的顆粒，很容易通過粗粒物料行程的間隙，到達篩面，到達篩面後它就很快穿過篩孔。這種顆粒稱為"易篩粒"。物料粒度大於篩孔 $3/4$ 的顆粒，通過粗粒組成的間隙比較困難，這種顆粒的直徑愈接近篩孔尺寸，它透過篩孔的困難程度就愈大，因此，這種顆粒稱為"難篩粒"。下面用顆粒通過篩孔的機率理論來作說明。

顆粒通過篩孔的可能性稱為篩分機率，一般來說，顆粒通過篩孔的機率受到下列因素影響：(1)篩孔大小；(2)顆粒與篩孔的相對大小；(3)篩子的有效面積；(4)顆粒運動方向與篩面所成的角度；(5)物料的含水量和含泥量。

由於篩分過程是許多複雜現象和因素的綜合，使篩分過程不易用數學形式來全面地描述，這裡僅僅從顆粒尺寸與篩孔尺寸的關係進行討論，並假定了某些理想條件（如顆粒是垂直地投入篩孔），得到顆粒透過篩孔的機率的公式。

鬆散物料中粒度比篩孔尺寸小得多的顆粒，在篩分開始後，很快就落到篩下產物中，粒度與篩孔尺寸愈接近的顆粒，穿過篩孔所需的時間愈長。所以，物料在篩分過程中通過篩孔的速度取決於顆粒直徑與篩孔尺寸的比值。

研究單離顆粒穿過篩孔的機率如圖 2.11 所示。假設有一個由無限細的篩絲製成的篩網，篩孔為正方形，每邊長度為 L 。如果一個直徑為 d 的球形顆粒，在篩分時垂直地向篩孔下落。可以認為，顆粒與篩絲不相碰時，它就可以毫無阻礙地穿過篩孔。換言之，要使顆粒順利地穿過篩孔，在顆粒下落時，其中心應投在繪有虛線的面積 $(L-d)^2$ 內(圖 2.11(a))。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 2.11 顆粒過篩示意圖

由此可見顆粒穿過篩孔或者不穿過篩孔是一個隨機現象。如果顆粒投到篩面上的次數有 n 次，其中有 m 次穿過篩孔，那麼顆粒穿過篩孔的頻率就是

$$\text{頻率} = \frac{m}{n} \dots\dots\dots(2-19)$$

當 n 很大時，頻率總是穩定在某一個常數 P 附近，這個穩定值 P 就叫篩分機率。因此篩分機率也就客觀地反映了顆粒過篩可能性的大小。

$$P = \frac{m}{n} \dots\dots\dots(2-20)$$

既然機率是某事件出現的可能性的的大小，它也就永遠不會小於零，也不會大於 1，總是在 0 與 1 之間，即：

$$0 \leq P \leq 1 \dots\dots\dots(2-21)$$

可以設想有利於顆粒穿過篩孔的次數，與面積 $(L-d)^2$ 成正比，而顆粒投到篩孔上的次數，與篩孔的面積 L^2 成正比。因此，顆粒透過篩孔的機率，就決定於這兩個面積的比值

$$P = \frac{(L-d)^2}{L^2} = \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 \dots\dots\dots(2-22)$$

顆粒被篩絲所阻礙，使它不穿過篩孔的機率之值等於 $(1-P)$ 。

當某事件發生的機率為 P 時，使該事件以機率 P 出現如需要重復 N 次， N 值與機率 P 成反比，即

$$P = \frac{1}{N} \dots\dots\dots(2-23)$$

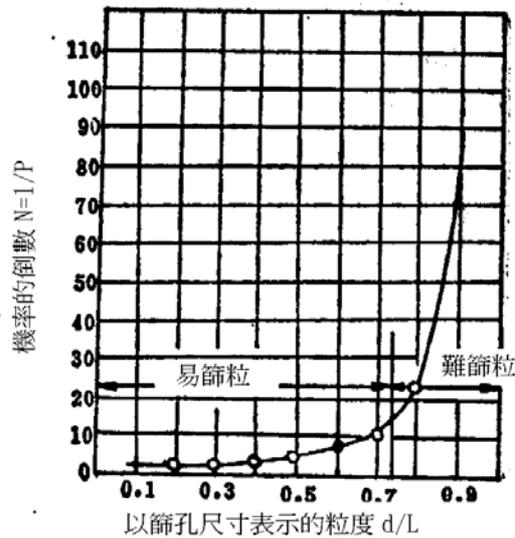
在這裡所討論的問題， N 值就是顆粒穿過篩孔的機率為 P 時必須與顆粒相近的篩孔數目。由此可見，篩孔數目越多，顆粒透過篩孔的機率越小，當 N 值無限增大時， P 愈接近於零。

取不同的 d/L 比值，計算出的 P 和 N 值，見表 2.4，利用這些數據可畫出圖 2.12 的曲線。曲線可大體劃分為兩段，在顆粒直徑 d 小於 $0.75L$ 的範圍內，曲線較平緩，隨著顆粒直徑的增大，顆粒透過篩面所需的篩孔數目有所增加。當顆粒直徑超過 $0.75L$ 以後，曲線較陡，顆粒直徑稍有增加，顆粒透過篩面所需的篩孔數目就需要很多。因此，用機率理論可以證明，在篩分實驗中把 $d < 0.75L$ 的顆粒叫"易篩粒"和 $d > 0.75L$ 的顆粒叫"難篩粒"是有道理的。

表 2.4 顆粒過篩的機率與顆粒及篩孔相對尺寸的關係

d/L	P	N=1/P
0.1	0.81	2
0.2	0.64	2
0.3	0.49	2
0.4	0.36	3
0.5	0.25	4
0.6	0.16	7
0.7	0.09	11
0.8	0.07	25
0.9	0.01	100
0.95	0.0025	400
0.99	0.0001	10,000
0.999	0.000001	1,000,000

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 2.12 顆粒過篩機率的倒數與顆粒和篩孔相對尺寸的關係

若考慮篩絲的尺寸(圖 2.11(b))，與上面所討論的原理一樣，得到顆粒透過篩面的機率公式：

$$P = \frac{(L-d)^2}{(L+a)^2} = \frac{L^2}{(L+a)^2} \cdot \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 \dots\dots\dots(2-24)$$

式中 a：篩絲直徑；L：方形篩孔的邊長。

上式說明，篩孔尺寸愈大，篩絲和顆粒直徑愈小，則顆粒透過篩孔的可能性愈大。

2. 比重(或重力)

利用物質比重分選之技術很多，本節僅就應用廣泛以水為介質之重力分選原理作一說明。物質顆粒在水中沈降速度，不僅由顆粒大小所決定，也受到比重及顆粒形狀等因素之影響。如顆粒比重及形狀均相同之操作條件下，僅利用顆粒大小在水中沈降速度之不同。選用大小顆粒沈降速度差之中間速度上昇水流，沈降速度小之顆粒被上昇水流沖上而形成溢流，沈降速度大者逆著水流下降而分成大小兩群顆粒，如此之操作即為分級，也是分粒操作之一種。但若再加上比重大小或顆粒形狀之不同，來分選各種物質之操作，即為重力分選之操作。

物質顆粒在水中沈降現象在分選操作上，運用很廣泛，其原理及特性甚為重要，分別說明如下：

(1) 沈降理論

物質顆粒在沈降時所受之阻力與其運動速度、運動方向之截面積、流體之黏度以及流體密度等因素有關。此阻力者依流體之流動狀態(以雷諾數 Re 來定義)概可分為下列三種情況：

A. 層流阻力(或黏性阻力)

當物質顆粒小、重量輕、沈降速度慢時，粒子周圍流體並無顯著擾動(即在穩定的層流中)，顆粒沈降所受到之阻力為液體黏性，此阻力大小由 Stokes 導出如下：

$$R_s = 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v \dots\dots\dots(2-25)$$

R_s ：阻力之大小(dyne)，層流阻力

η ：流體之黏性係數(poise)

d ：顆粒直徑(cm)

v ：沈降速度(cm/sec)

B. 亂流阻力(或渦流阻力)

當顆粒變大、沈降速度加快時，顆粒沈降與流體黏性關係不大，顆粒

沈降所受到之阻力為運動顆粒背後形成之旋渦區，所造成負壓阻礙顆粒沈降。此阻力大小由 Newton 導出如下：

$$R_n = (\pi/16) \cdot d^2 \cdot \rho_l \cdot v^2 \dots\dots\dots(2-26)$$

ρ_l ：液體密度(g/cm³)

Rn：阻力大小(dyne)，亂流阻力

C. 層流及亂流間之阻力

Stokes' Law 適用於 $R_e \left(R_e = \frac{V \cdot d \cdot P_\ell}{\eta} \right) < 1$ 之層流情形，而 Newton Law 適用於 $Re=10^3 \sim 10^5$ 之範圍，故 Re 介於 $1 \sim 10^3$ 之間者，既有黏性阻力，又有亂流阻力，可以用 Allen 阻力公式估算：

$$R_a = \frac{5}{4} \pi \cdot d^{1.5} \cdot v^{1.5} \cdot \rho_l^{0.5} \cdot \eta^{0.5} \dots\dots\dots(2-27)$$

(2) 自由沈降

顆粒沈降時，因料漿濃度不同，會形成不同之沈降情形，當料漿濃度稀少(一般是小於 3%)，顆粒沈降除受流體阻力之外，不受其他粒子影響之沈降，是為自由沈降(free settling)。若料漿濃度增大，沈降粒子受周圍粒子影響或細小顆粒沈降緩慢懸浮其中，形成浮沈柱，做其他顆粒之沈降速度減緩，料漿濃度愈大，此干涉作用越強，是為阻礙沈降(hindered settling)。

大球體在流體中沈降產生速度後，即有阻力產生，此阻力將隨速度加快而變大，待速度大到一定程度，其阻力與有效重量相等時，顆粒將作等速下降，是為終端速度(terminal velocity)。顆粒之沈降主要受到重力及亂流阻力的作用，如下式：

質量×加速度=顆粒重-所受浮力-沈降阻力(Rn)

$$m \frac{dv}{dt} = mg - m'g - Rn \dots\dots\dots(2-28)$$

$$\frac{dv}{dt} = g \cdot \frac{\rho_o - \rho_l}{\rho_o} - \frac{3\rho_l \cdot V^2}{8d\rho_o} \dots\dots\dots(2-29)$$

當球體達終速時 $dv/dt = 0$ ，求得自由沈降之終端速度：

$$V_t = \sqrt{\frac{8gd(\rho_o - \rho_l)}{3\rho_l}} \dots\dots\dots(2-30)$$

m：球體質量

m' : 流體質量

ρ_l : 球體密度

細小球粒在流體中沈降，主要受到重力及黏性阻力為主時，依上述之原理，求得其終端速度為：

$$V_t = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_o - \rho_l)}{18\eta} \dots\dots\dots(2-31)$$

(3)阻礙沈降

顆粒沈降時除受到流體阻力外，還受到周圍粒子之摩擦和碰撞，以及微細顆粒所造成之浮沈室而產生之阻力，尤其是料漿中含有大量比重、粒度、形狀不同之顆粒(重力分選的情形)時，所含之影響因素太多，無法直接由上述之沈降公式求得其終速。

在一般分選操作中，不管分級或重力分選，均將混合不同比重和粒徑之顆粒群為處理對象，因此所含之微細顆粒會使流體之黏性與比重提高，使其他顆粒之沈降所受之阻力變大。含微細顆粒之懸濁液，其粘度可由 Einstein 式求得：

$$\eta_s = \eta(1 + 2.5\gamma) \dots\dots\dots(2-32)$$

η_s : 懸濁液之粘性係數

η : 水之粘性係數

γ : 單位容積中之懸濁質之容積

另一方面懸濁液之比重改變如下：

$$\rho_s = 1 - \gamma + \gamma \cdot \rho_o \dots\dots\dots(2-33)$$

ρ_o : 微細顆粒之比重

所以 V_s 及 V_n 改正如下：

$$V_s = \frac{(\rho - \rho_s) \cdot d^2}{18\eta_s} \dots\dots\dots(2-34)$$

$$V_n = C \cdot \sqrt{\frac{d(\rho_o - \rho_s)}{\rho_s}} \dots\dots\dots(2-35)$$

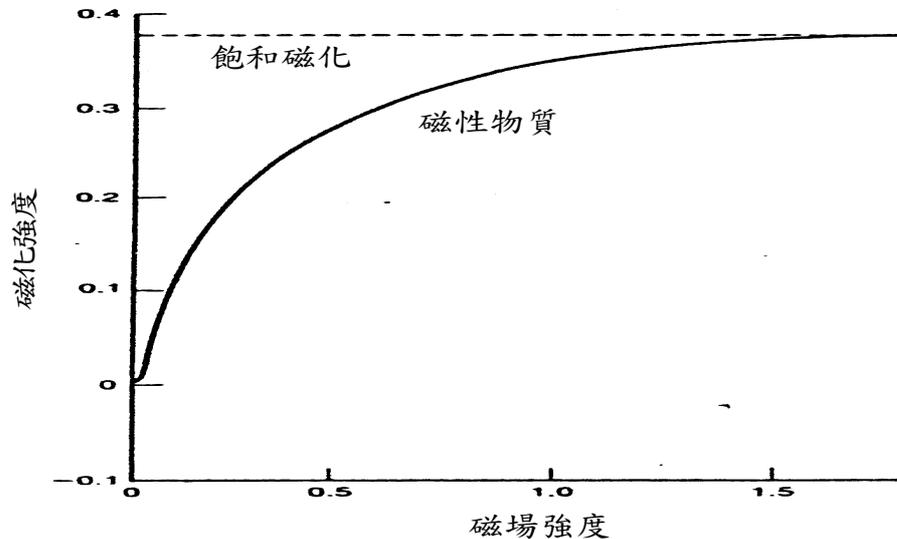
3.磁選

物質具有被磁鐵(磁石)吸引的性質即是具有磁性，磁性吸引力之強度受物

質本身之性質、磁鐵強度及兩者之距離所影響。利用物質磁性強弱之不同，置於磁場內使強磁性物質被磁極吸引而分選之方法，稱為磁力分選法(磁選法)。磁選原理說明如下：

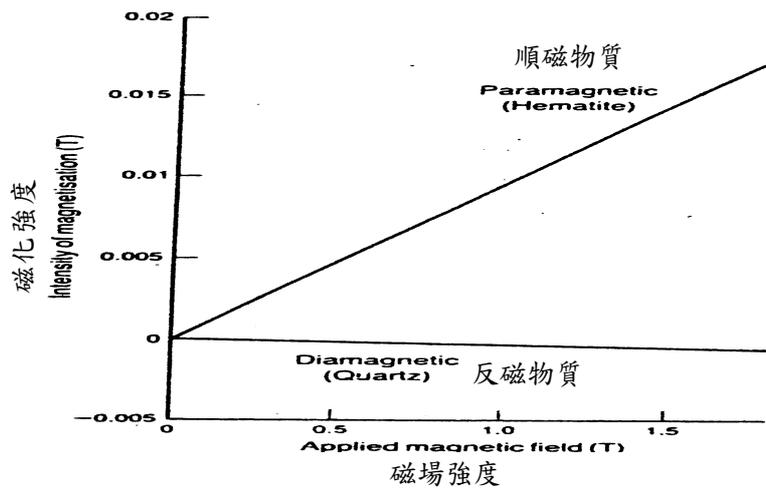
(1)磁性

當物體置於磁場強度(H)內，此物之磁感應強度(B)，即是指被磁化物體內之磁通量密度為磁場強度(H)與磁化強度 μ 之和。若(B)等於(H)，則表示磁化無法進行。對典型之強磁性、順磁或及反磁性等物質，在不同磁場強度下所得之磁化強度表示如圖 2.13 及圖 2.14，其磁化曲線之斜率為帶磁率(K)，即為磁化強度(μ)除以磁場強度(H)之值。其中順磁和反磁物質呈現一簡單的線性關係，對順磁物質而言，帶磁率為一正數，但其磁化強度卻很小;反磁物質之帶磁率為一負數，磁化強度也是負值;強磁物質之帶磁率以曲線方式增加，直至達到飽和磁化。如果將此磁場強度降低，則磁化強度也隨著降低，但不會回至起始值，如此不可回復性稱磁滯現象，如圖 2.15 所示，圖中 J_s 是飽和磁化， J_R 為殘留磁化， H_C 為保磁力。



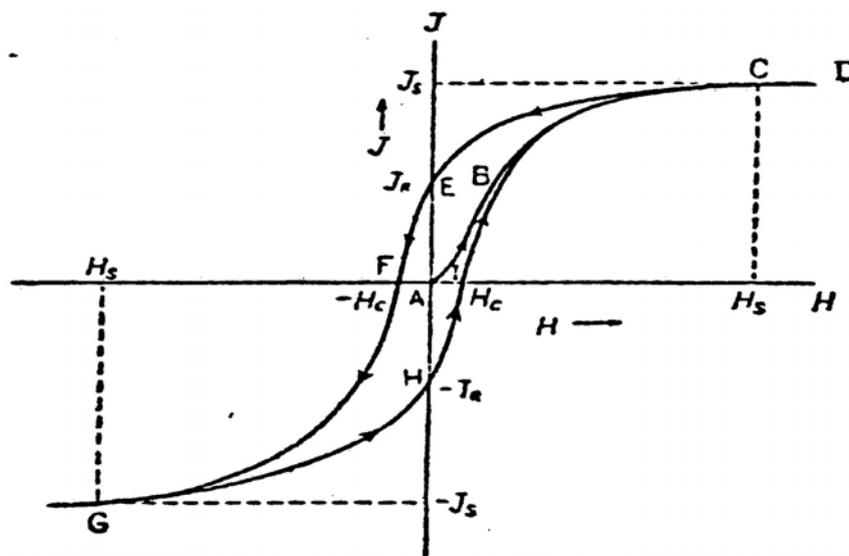
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 2.13 強磁性物質之磁化曲線



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 2.14 順磁及反磁性物質之磁化曲線



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 2.15 磁滯曲線

(2) 磁極之作用力

置於磁場下之磁性物質，會被磁化而吸引至磁極，此吸引力之大小是由下列因素所影響

A. 磁極之強度

- B.感應所生成之物質磁距大小
- C.物質顆粒與磁極間之距離
- D.作用於物質顆粒之重力
- E.磁力線之形狀

磁極強度是以磁束密度(B)來表示，磁極愈強愈容易將磁性顆粒吸引。磁選機所使用的磁極包括永久磁鐵材料與電磁極兩種。若用永久的磁鐵當磁極，則殘留磁化強度(J_R)，即為磁極強度。若使用電磁極，則磁極強度為導入線圈之電流強度、鐵心被磁化強度(J)及磁極間隔等所決定，如下式：

$$H = 4\pi \times (i/10) \dots \dots \dots (2-36)$$

i：道入線圈之電流程度

n：每公分之線圈數

物質顆粒之磁性強度可由殘留磁化(J_r)與帶磁率(K)來決定。物質磁性愈強愈容易被磁極所吸引。同一磁性之物質，其粒度越大感應所生成之磁距也越大($M=J \times V$)越容易被吸引，但粒度與重量有關，因此粒度也不能大過作用於它的磁力。一般磁選操作之顆粒大小範圍以 1~5mm 最為適宜。

粒子被磁極吸引之作用力可用庫倫定律估算，磁力之大小與顆粒—磁極間距離平方成反比，而與磁極強度及磁化強度成正比。

4.電導性

靜電分選技術係利用物質之導電性差異，帶同性電荷相拒，帶異性電荷者相吸之原理，所進行之分選方法。其分選原理如下：

(1)物質之導電性(conductivity)

物質之導電性一般可區分成下列三種：

- A.導體：電阻率為 $10^{-5} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$
- B.半導體：電阻率為 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$
- C.絕緣體：電阻率為 $10^{14} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$

大都數之金屬廢棄物為導電性物質，而非金屬廢棄物多為絕緣性物質，靜電分選即可依此大致分為導電性物質及絕緣性物質。

(2)比導電性(relative conductivity)

電選中顆粒之導電性常用比導電度(相對導電係數)表示，比導電性越小，則導電性越好。顆粒之導電性除與本身之電阻有關外，還與顆粒及電極間之接觸面電阻有關。電位差小時，電子就不能流入或流出導電性差之顆粒；反之，電位差加大後，電子便能流入或流出顆粒，便表現為導體。

(3)顆粒荷電機構

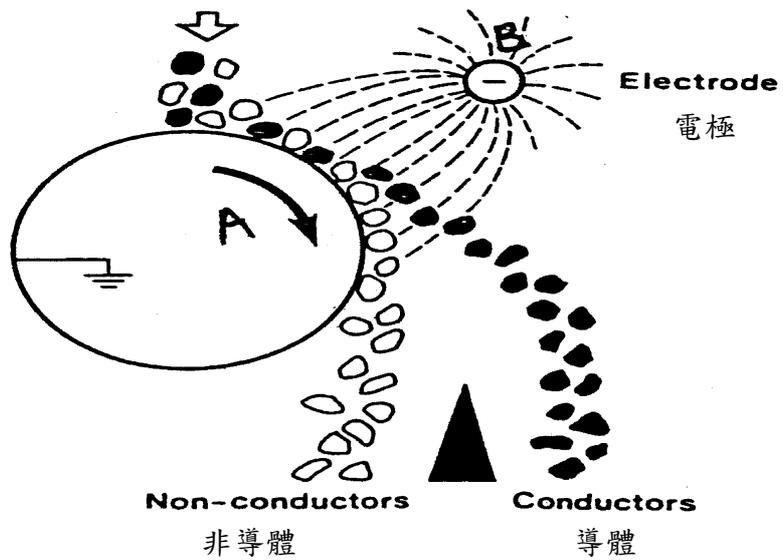
靜電分選中之物質顆粒帶電方式有下列三種：

A. 摩擦帶電

兩種不同物質之顆粒表面互相摩擦，分開後就會分別荷有電量相同，而符號相反之電荷。再進入不同電位電極板間，由於同性電荷相拒、異性相吸，使帶不同電荷之顆粒分開，摩擦荷電方式在靜電分選上並非主要機構。

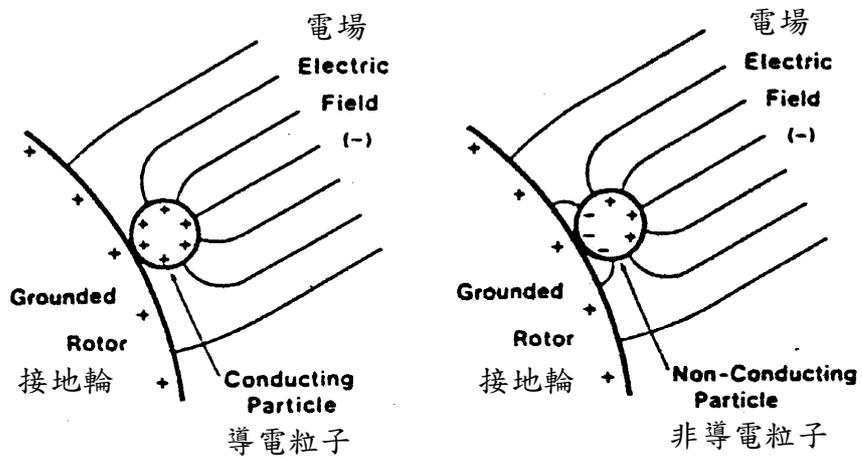
B. 靜電感應帶電

如圖 2.16 所示，A 為金屬之接地轉輪，與此平行置有一荷電電壓之金屬筒 B(可以是正或負電，設帶負電)，稱為高壓電極或對電極，由靜電感應使轉輪 A 帶正電、餵料給入 AB 間之靜電場中，因靜電感應使它分極，靠 A 側帶負電，靠 B 側帶正電。如圖 2.17 所示，若為導電性顆粒與轉輪 A 接觸，則馬上失去負電成為帶正電，而被帶正電之轉輪 A 所排斥；若為絕緣物質與轉輪 A 相接觸，不產生電荷移動之情形，由不同電荷間之吸引力(稱為影像力)，而附著在轉輪 A 上，並隨輪回轉離開靜電場。由此可知分選顆粒受到之作用將包括靜電力、重力、離心力等作用力，而這些作用力之向量合成方向，為顆粒脫離轉輪 A 之方向，如圖 2.18 所示。



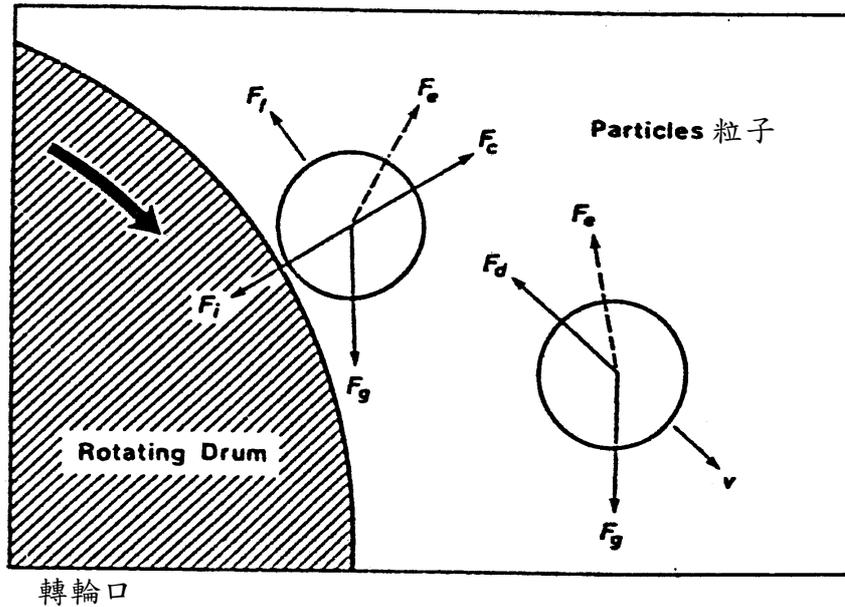
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 2.16 靜電分選原理



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 2.17 顆粒靜電感應帶電



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

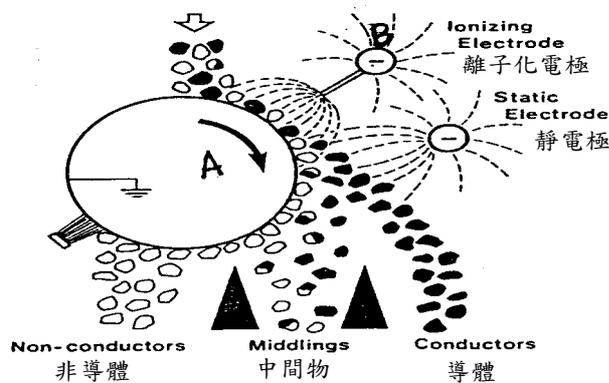
圖 2.18 靜電分選顆粒所受之作用力

C. 電暈放電

荷電構造要件上與靜電感應類似，僅在高壓電極上不同，此型高壓電極(B)之前呈細長線狀，另一(A)電極之曲率半徑則很大，如圖 2.19 所示。慢慢增加(B)電極之電壓，就會使電極發射出大量電子，以高速與空氣分子碰撞，在尖銳前端部份之氣體被電離成離子狀，經不斷之電離，離子數增加，正離子飛向負極，電性被中和。在 B (負) 電極周圍會發出光暈，即形成電暈區，負離子與電子飛向 A (正) 極，使整個電暈區以外之空間充滿荷負電之電體，這稱為電暈放電。因此兩極間會有微少電流通，由電暈放電之安定性而言，此(B)電極之帶電性以帶負電為恰當，則接地轉輪(A)為正電形成靜電場，對顆粒之作用與靜電感應之作用相同。顆粒在電暈場中獲得負電荷，但導體顆粒與接地電極接觸，電荷會被傳走，同時荷上與接地相同符號之電荷產生撥斥力;非導體顆粒則不然，電荷不被傳走，而與接地極互相吸引，隨接地極旋轉再以毛刷強制排除。在電暈極之外，併用電極且離筒面略遠之理由，是將導體顆粒由正極筒面吸向負靜極，並阻止非導體礦粒離開筒面。大多數靜電分選機都利用電暈帶電原理進行分選。

產生電暈放電之電極稱為離子化電極 (ionizing electrode)，由於兩極間有微電流通，在嚴密的立場上不能稱為靜電型，應稱為動電型，因此

在靜電分選上為著與前者區別，後者稱為高電壓分選技術。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

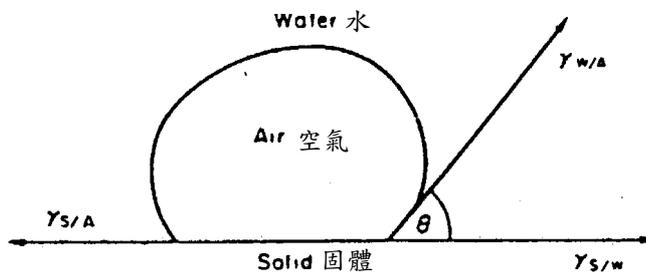
圖 2.19 高壓靜電分選原理

5. 浮選

浮選是將分散在水溶液中之疏水性微細顆粒或膠體吸附或附著於氣泡，使它與氣泡一起浮上，在氣-液界面成泡沫層，得與存在水中之親水性顆粒分離之方法。對於懸濁液中之固體顆粒與氣泡之接著問題以及固體顆粒間不同疏水化程度之形成，都是影響浮選之重要因素。

(1) 接觸角與浮游性

固體顆粒對氣泡之接著與其接觸角之關係甚為密切，所謂接觸角是指固體表面與氣-液之點接觸，從此點沿液相表面所引起之切線與固體表面所形成之角度(如圖 2.20)。固體表面之濕潤程度或固體顆粒之浮游性可用接觸角來表示，接觸角小之親水性顆粒比較難浮;接觸角大之疏水性顆粒比較易浮。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 2.20 泡沫與固體間之接觸角

Young 氏以顆粒與氣泡接著所需之能與氣固液三相界面自由能之關係，在平衡狀態下推得下式：

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a}(1 - \cos\theta) \dots \dots \dots (2-37)$$

$W_{s/a}$ ：固氣之接著能

$\gamma_{w/a}$ ：液氣之界面自由能

θ ：接觸角

1. 當 θ 為 0 時， W 也是 0，表示顆粒無法接著於氣泡，不具可浮性。

2. 當 θ 越大， $\cos \theta$ 越小， $W_{s/a}$ 能越大，顆粒濕潤性小，可浮性增加。

(2) 浮選中之吸附現象

吸附是液體(或氣體)中某種物質在兩相界面，產生濃集之現象。在溶液表面的溶質濃度比溶液內部是過剩或不足之現象，可由 Gibbs 吸附方程式 (Gibbs adsorption) 來求得。該方程式如下：

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \times \frac{dr}{d \ln c} = -\frac{C}{RT} \times \frac{dr}{dc} \dots \dots \dots (2-38)$$

Γ ：表面過剩量或吸附密度(surface excess or adsorption density)，Mol/cm

C ：溶質濃度，Mol/l

$\ln C$ ：濃度之對數

R ：氣體常數，constant

T ：絕對溫度，K

r ：表面張力，dyne/cm

吸附密度可以是正值，表示溶質的濃度在表面增加；若為負值即表示溶質的濃度在表面降低。浮選是一種複雜的物理化學現象，包括各類浮選藥劑在氣-液、固-液與固-氣-液等不同界面的吸附，其中以起泡劑吸附於氣-液界面上，降低氣-液界面的自由能，防止氣泡彼此兼併，從而達到穩定氣泡，促進氣泡礦化和形成穩定泡沫層，以及捕集劑或調整劑(抑制劑與活化劑)吸附在固-液界面上，直接影響顆粒表面的疏水性或親水性性質，從而可以調節顆粒的可浮性。

2.3.4 分選效率

1. 回收率

分選之目的在除去廢棄物中之非資源性物質，而所得富集物中含有資源性物質之比例提高。惟在分選過程中亦希望減少資源物質之損失，應將資源物質回收愈多愈好。這是分選的兩個主要目的及兩個重要決定分選效率之因素。回收率為富集物中資源物質之重量，與原廢棄物餵料中資源物質重量之比，常以%表示之。今以廢棄物過篩為例，篩下物視為富集物，篩上物視為不要物，回收率之計算公式如下所示：

$$\text{回收率}(\%) = \frac{U \cdot w_u}{F \cdot w_f} (100) \dots\dots\dots(2-39)$$

U：經過篩孔落下富集物之重量，kg/h

F：加入篩選機之廢棄物總重量，kg/h

Wu：經過篩孔落下富集物中資源物質所占之重量比率

Wf：加入篩選機廢棄物中資源物質所占之重量比率

2.排斥率

分選之目標為得到高重量百分比之資源物質，且高回收率之富集物，故最理想之操作為餵料之資源物質全部成為富集物回收，且富集物不含任何不要物，如果雖有高回收率，但富集物中所含不要物也多的話，則選別效果還是不好，所以要討論資源物質之回收率之同時，也要考慮非資源物質之回收率。而排斥率則定義如下：

排斥率=1-富集物中非資源物質之回收率

$$\text{排斥率} = 1 - \frac{U \cdot (1 - w_u)}{F \cdot (1 - w_f)} \dots\dots\dots(2-40)$$

3.分選效率

回收率之數值愈大，表示資源物質損失少，亦即資源物回收較多，就資源物質之回收而言，則為分選效率良好。同時，富集物中之非資源物質回收率愈低，則排斥率愈高，分選之效果也會愈好。因此，分選效率之定義如下：

分選效率=回收率×排斥率

2.4 脫水

脫水主要就是要去除水分以減少廢棄物的體積，產生的泥餅類似固體而不再是液體，如此有助於廢棄物的最終處置及再利用，由於廢棄物體積的減少，更能

使廢棄物脫水後的處理及處置成本降低。

一般而言，脫水處理的主要目的可歸納如下：

- 1.減少廢棄物的體積。
- 2.減少廢棄物的含水量，如此可以減少廢棄物焚化所需的燃料成本。
- 3.增加廢棄物的固體物含量，使廢棄物更方便處理及處置，例如：搬運、輸送、掩埋及再利用等。

在應用上，脫水單元最常用於水及廢水處理所產生含大量水分之各種型式污泥的脫水處理。

2.4.1 原理介紹

1.污泥中的水分分佈

污泥中的水分分佈，直接影響污泥脫水之處理成效，亦即脫水污泥餅的含水率。一般生物污泥中水分的型態，大致可分為以下四種：

- (1)自由水(free water)：不附著於固體顆粒，且可自由流動之水分。
- (2)毛細水(capillary water)：污泥中固體顆粒聚集，並在其間形成毛細孔道，其中充滿毛細水。
- (3)膠體水(colloidal water)：又稱為表面水，受到顆粒表面電荷作用所吸附之水分，形成一層表面水薄膜。
- (4)細胞水(intracellular water)：指生物細胞內部的水分。

對於化學污泥而言，除了自由水、毛細水及表面水之外，污泥本身也可能含有膠體水或結晶水。

上述各種污泥水分，在脫水過程中自由水可藉由重力排除；毛細水及膠體水一般在施以污泥調理後，部份可藉由機械脫水加以排除；至於細胞水或結晶水，非一般脫水方式可以排除，必須先施以前處理然後脫水，例如以熱處理法破壞生物細胞，或者直接以污泥乾燥(sludge drying)方式處理。

2.污泥脫水性與濾液阻抗

污泥的脫水性(dewaterability)，簡言之即為水分自污泥中排出之難易程度。在污泥脫水的過程中，污泥顆粒間的水分逐漸排出，顆粒彼此接近而後擠壓，最後形成泥餅(cake)。不論使用的方法為何，在污泥脫水的最後階段，都必須使水分通過污泥餅構成的多孔性介質，因此污泥的脫水性，又可視為泥餅的過濾

性(filterability)。

在泥餅過濾的過程中，濾液分別承受了三種不同的阻抗(resistance)，而泥漿入口(slurry inlet)與濾液出口(filtrate outlet)之間的總壓力落差(total pressure drop)即為此三種阻抗所造成壓力落差總和：

- (1) 渠道阻抗(resistance of channel)：甚小可被忽略。
- (2) 泥餅阻抗(resistance of cake)：初始之阻抗值為零，隨著濾程(filter run)穩定地增加。
- (3) 過濾介質阻抗(resistance of filter medium)：開始操作一定時間後變為一定值，在濾程的初期介質阻抗比較重要，但後來則會小於泥餅阻抗。

根據 Poiseilles 和 Darcy 定律所推導出之泥餅過濾方程式為：

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PA^2}{\mu(rwV + R_m A)} \dots\dots\dots(2-41)$$

- V = 濾液體積，cm³
- t = 時間，sec
- P = 施加真空壓，g/cm²
- A = 過濾面積，cm²
- w = 單位通過濾液體積之固體物量，g/cm³
- r = 比阻抗，sec²/g
- R_m = 過濾介質之初始阻抗，sec²/cm²
- μ = 濾液之黏滯係數，poises，g/cm · sec

將上式積分並重新整理，可用來計算比阻抗值，r，其可描述污泥的過濾性質。(2-41)式積分後得：

$$\frac{t}{V} = \left[\frac{\mu rw}{2PA^2} \cdot V + \frac{\mu R_m}{PA} \right] \dots\dots\dots(2-42)$$

若將 $\frac{t}{V}$ 對應於 V 畫於一算術座標紙上，可得一線性關係直線，其斜率等於 $\frac{\mu rw}{2PA^2}$ ，截距為 $\frac{\mu R_m}{PA}$ 。因此，若直線的斜率定義為 b，則：

$$b = \frac{\mu rw}{2PA^2} \dots\dots\dots(2-43)$$

此時比阻抗則為：

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu w} \dots\dots\dots(2-44)$$

比阻抗值主要可用來比較各種不同污泥的過濾特性和決定某一特定污泥之最佳調理劑量。而布氏漏斗實驗裝置，可用來獲得決定 $\frac{t}{V}$ 和 V 之關係所需的資料，進而可計算比阻抗值。此外，由於許多廢水污泥為可壓縮性泥餅 (compressible cakes)，故其比阻抗和過濾速率皆為通過泥餅間壓力差之函數，因此：

$$r = r_0 P^s \dots\dots\dots(2-45)$$

在此，“s”為可壓縮係數(coefficient of compressibility)，此係數的決定，可將比阻抗，r，和真空壓，P，的關係繪在一對數座標圖上，在 $P = 1$ psi 座標上的截距，則為泥餅常數(cake constant)， r_0 ，而直線的斜率則等於 s。

一般而言污泥的比抗係數值愈大，污泥愈難脫水，亦即污泥的脫水性差，反之，比抗係數值愈小，污泥愈容易脫水。至於污泥的可壓縮係數，一般介於 0.1~1.0 間，其值愈大，表示污泥愈可壓縮。表 2.5 為一些典型污泥的脫水特性。

表 2.5 文獻中各種污泥的脫水特性

污泥類別	比抗係數(sec ² /g)	壓力(lb/in ²)*	可壓縮係數
活性污泥	2.88×10 ¹⁰	7.4	0.81
消化過的家庭污水的污泥	1.42×10 ¹⁰	7.4	0.74
生的家庭污水的污泥	4.7×10 ⁹	7.4	0.54
明礬混凝污泥	5.3×10 ⁹	14.5	——
給水混凝污泥	5.1×10 ⁸	10	——
調理過的活性污泥	1.65×10 ⁸	7.4	0.80
調理過的消化初沈及活性污泥	1.46×10 ⁸	7.4	1.10
調理過的消化污泥	1.05×10 ⁸	7.4	1.19
調理過的家庭污水生污泥	3.1×10 ⁷	7.4	1.00
凝膠狀的 Al(OH) ₃	2.2×10 ⁹	51	——
凝膠狀的 Fe(OH) ₃	1.5×10 ⁹	51	——
凝膠狀的 Mg(OH) ₂	3×10 ⁸	51	——
CaCO ₃	2×10 ⁷	51	——
Fe ₂ O ₃	8×10 ⁷	51	——

* lb/in² = 0.0737 kg/cm²

資料來源：污泥脫水處理，1988 年 4 月

2.4.2 影響污泥脫水性的因素

影響污泥脫水能力的因素很多，其中包括污泥的種類與來源，及污泥脫水之前處理。換句話說，即是污泥的特性，根據文獻指出，影響污泥脫水能力的污泥特性有以下七點：

1. 顆粒的表面電荷與水合作用 (particle surface charge and hydration)

污泥顆粒的表面帶有負電荷，當顆粒相互接近時，會彼此排斥，這種排斥力隨著彼此間的距離而改變，距離愈近排斥力愈大。另外，污泥顆粒對於水分子有微弱的吸引力，可以藉著吸附(adsorption)，或是顆粒間的毛細管作用(capillary action)，將水分子吸引到其表面上。雖然水分子只是被微弱的束縛在顆粒表面，但是卻足夠妨礙脫水。

化學調理劑的使用，能克服表面電荷與表面水合作用的效應。一般，調理劑的作用是減少或消除顆粒間的排斥力，如此顆粒才能夠膠凝在一起，使得爾後在機械脫水中，水分能快速地被去除，藉以提高脫水的效率。

2. 顆粒大小 (particle size)

影響污泥脫水能力的因素中，顆粒大小可說是最重要的因素。顆粒的尺寸減少，相對地每單位質量所擁有的顆粒表面積就增加，表面積增加所產生的影響包括：

- (1) 污泥顆粒間的排斥力變大，這是因為帶負電的表面積增加的緣故。
- (2) 水分子移動的摩擦阻力也增大。
- (3) 較多的水分子被吸附到顆粒表面，這是因為有較多的吸附位置的緣故。

3. 顆粒的機械強度 (mechanical strength)

污泥顆粒的機械強度可分為兩個面向，其一為抵抗壓縮，其二為抵抗剪力破壞。污泥經過壓縮後會使其顆粒間的孔隙變小，進而增大污泥餅阻抗。污泥顆粒被剪力破壞後會產生較小的顆粒，造成泥餅與過介質的阻塞。因此，在泥餅脫水時期望顆粒具有較高的機械強度以改善脫水性。

4. 污泥顆粒的形狀

污泥顆粒的形狀影響了表面積以及孔隙的大小，例如同樣體積的污泥顆粒，針形與平版形的污泥顆粒表面積，就比圓球形顆粒的表面積為大。

5. 污泥的表面性質

污泥顆粒的表面一般都會吸附一層表面水，即使是用脫水的方法也無法去除。如果表面水膜太厚，則作用於污泥的外力會因水膜的變形而發生消散作用，使得作用於污泥孔道(channel)之驅動力減小，同時也有可能因為水分子的位阻作用造成孔隙阻塞，進而降低污泥的脫水性。

6. 濾液之黏滯度

污泥濾液的黏滯度除了受到本身性質的影響外，主要也受到溫度的影響。隨著溫度的上升，液體的黏滯度逐漸下降，因此污泥比阻抗值亦跟著降低。

7. 揮發性固體物含量

一般而言，污泥揮發性固體物含量愈高，污泥的黏滯度愈大，而脫水性則愈差。對於揮發性固體物含量較高的污泥，如都市污水處理廠的初沈污泥或廢棄生物污泥，如能先經消化處理減少揮發性固體物含量，將有助於改善污泥的脫水性。

2.5 乾燥

乾燥是傳統的單元操作之一，在乾燥技術的許多方面存在著“知其然而不知其所以然”的狀況，因此大多數乾燥設備的設計仍然依賴於小規模試驗及實際操作經驗。本節將就乾燥單元共通原理、物料乾燥特性等基本觀念進行介紹。

2.5.1 概述

乾燥通常是指將熱量加於濕物料並排除揮發性濕分(大多數情況下是水，部分情況也可能是其他流體物質)，而獲得一定濕含量固體產品的過程。濕分以鬆散的化學結合形式或以液態溶液存在於固體中，或積集在固體的毛細微結構中。這種液體的蒸汽壓低於純液體的蒸汽壓，稱之為結合水分(bound moisture)。而游離在表面的濕分則稱為非結合水分(unbound moisture)。

當濕物料作熱力乾燥時，以下兩種過程相繼發生：

1. 過程 1：能量(大多數是熱量)從周圍環境傳遞至物料表面使表面濕分蒸發。
2. 過程 2：內部濕分傳遞到物料表面，隨之由於過程 1 而蒸發。

乾燥速率由上述兩個過程中較慢的一個速率控制，從周圍環境將熱能傳遞到濕物料的方式有對流、傳導或輻射。在某些情況下可能是這些熱傳方式聯合作用，工業乾燥器在型式和設計上的差別與採用的主要熱傳方法有關。在大多數情況下，熱量先傳到濕物料的表面然後傳入物料內部，但是介電、射頻或微波乾燥時，供應的能量在物料內部產生熱量然後傳至外表面。

過程 1：液體以蒸汽形式從物料表面排除，此過程的速率取決於溫度、空氣溫度、濕度和空氣流速、暴露的表面積和壓力等外部條件。此過程稱外部條件控制過程。也稱恆速乾燥過程(constant-rate period)。

過程 2：物料內部濕分的遷移是物料性質、溫度和濕含量的函數。此過程稱內部條件控制過程。也稱減速乾燥過程(falling-rate period)。

整個乾燥循環中兩個過程相繼發生，並先後控制乾燥速率。

2.5.2 恆速乾燥過程(外部條件控制的乾燥過程)

在乾燥過程中基本的外部變量為溫度、濕度、空氣的流速和方向、物料的物理形態、攪動狀況，以及在乾燥操作時乾燥器的持料方法。外部乾燥條件在乾燥的初始階段，即在排除非結合表面濕分時特別重要，因為物料表面的水分以蒸汽形式通過物料表面的氣膜向周圍擴散，這種質傳過程伴隨熱傳進行，故強化熱傳便可加速乾燥。但在某些情況下，應對乾燥速率加以控制，例如木質類物料在自由濕分排除後，從內部到表面產生很大的濕度梯度，過快的表面蒸發將導致顯著的收縮，此即過乾燥和過度收縮。這會在物料內部造成很高的應力，致使物料龜裂或彎曲。在這種情況下，應採用相對濕度較高的空氣，既保持較高的乾燥速率又防止出現品質缺陷。

2.5.3 減速乾燥過程(內部條件控制的乾燥過程)

在物料表面沒有充足的自由水分時，熱量傳至濕物料後，物料就開始升溫並在其內部形成溫度梯度，使熱量從外部傳入內部，而濕分從物料內部向表面遷移，這種過程的機制因物料結構特徵而異。主要為擴散、毛細管流和由於乾燥過程的收縮而產生的內部壓力。在臨界濕含量出現至物料乾燥到很低的最終濕含量時，內部濕分遷移成為控制因素，了解濕分的這種內部遷移是很重要的。一些外部可變量，如空氣用量，通常會提高表面蒸發速率，此時則降低了重要性。如物料允許在較高的溫度下停留較長的時間就有利此過程的進行。這可使物料內部溫度較高從而造成蒸汽壓梯度使濕分擴散到表面並會同時使液體濕分遷移。對內部條件控制的乾燥過程，其過程的強化手段是有限的，在允許的情況下，減小物料的尺寸，以降低濕分(或氣體)的擴散阻力是很有效的。施加振動、脈衝、超音波有利於內部水分的擴散。而由微波提供的能量則可有效地使內部水分汽化，此時如輔以對流或抽真空則有利於水蒸氣的排除。

2.5.4 物料的乾燥特性

如上所述，物料中的濕分可能是非結合水或結合水。有兩種排除非結合水的方法：蒸發和汽化。當物料表面水分的蒸汽壓等於大氣壓時，發生蒸發。這種現

象是在濕分的溫度升高到沸點時發生的，在旋轉窯乾燥器中出現的即為此種現象。

如果被乾燥的物料是熱敏性的，那麼出現蒸發的溫度即沸點，可由降低壓力來降低(如真空乾燥)。如果壓力降至三相點以下，則無液相存在，物料中的濕分被凍結，加熱引起冰直接昇華為水蒸汽如冷凍乾燥。

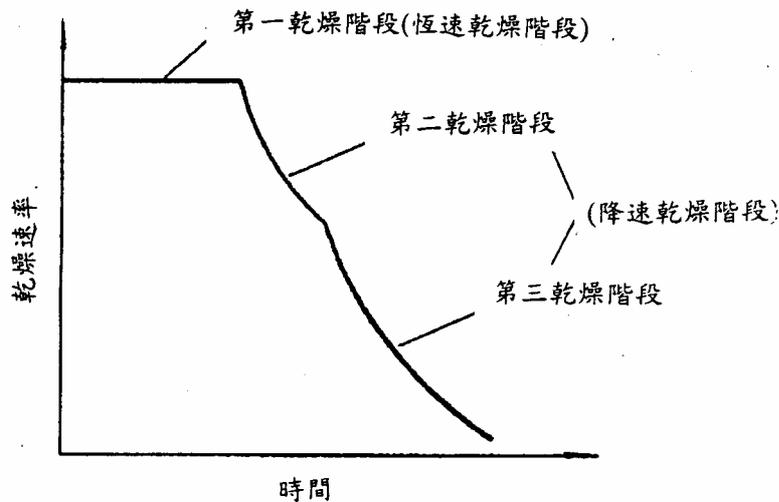
在汽化時，乾燥是由對流進行的，即熱空氣掠過物料。將熱量傳給物料而空氣被物料冷卻，濕分由物料傳入空氣，並被帶走。在這種情況下，物料表面上的濕分蒸汽壓低於大氣壓，且低於物料中的濕分對應溫度的飽和蒸汽壓。但大於空氣中的蒸汽分壓。

選擇適宜的乾燥器及設計乾燥器尺寸，必須了解物料對所採用乾燥方法的乾燥特性(乾燥動力學)，物料的平衡濕分及物料對溫度的敏感性，以及由特定熱源可獲得的溫度極限等。

物料的乾燥特性與採用的乾燥方法也有關，這種特性通常用濕含量和時間函數，即乾燥曲線或乾燥速率曲線表示。

圖 2.21 所示為吸水性物料的典型乾燥速率曲線(drying rate curve)。在第 1 乾燥階段乾燥速率是常數，此時表面含有自由水分。當其完全汽化後，濕表面則從物料表面退縮。此時可能發生收縮。在此階段，控制速率的是水蒸汽穿過空氣—濕分界面(氣膜)的擴散，在此階段的後期，濕分界面可能內移，濕分將從物料內部因毛細管力遷移到表面，且乾燥速率仍可能為常數。當平均濕含量達到臨界濕含量時，進一步乾燥會使表面出現乾點。由於以總物料表面積來計算乾燥速率，故乾燥速率下降。雖然每單位濕物料表面乾燥速率仍為常數。這樣就進入第 2 乾燥階段或減速乾燥階段的第 1 段，即不飽和表面乾燥階段。此階段進行到液體的表面液膜全部蒸發，這部分曲線為整個減速階段的一部分。

在進一步乾燥時(第 2 減速段或第 3 乾燥階段)由於內部和表面的濕度梯度，濕分通過物料擴散至表面然後排除，乾燥速率受到限制。此時熱量先傳至表面，再向物料內部傳遞。由於乾濕界面的深度逐漸增大，而外部乾區的熱傳係數非常小，故乾燥速率受熱傳導的影響加大。但是，如果乾物料具有相當高的密度和小的微孔空隙體積，則乾燥受熱傳的影響就不那麼強。而是受物料內部相當高的擴散阻力影響，乾燥速率受濕分從內部擴散到表面，然後由表面的質傳所控制。在此階段，某些由吸附(adsorption)而結合的濕分被排除。最後由於乾燥降低了內部濕分的濃度，濕分的內部遷移速率降低，乾燥速率下降比以前更快。在物料的濕含量降至與氣相濕度相應的平衡值時，乾燥就停止。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 2.21 恆定乾燥條件下的典型乾燥速率曲線

在實際操作中，最初的原料可能具有很高的濕含量，而產品可能也要求較高的殘留濕含量，那麼整個乾燥過程可能均處於等速階段。然而在大多數情況下，兩種階段均存在。並對難乾物料而言，大部分乾燥是在減速階段進行的。如物料的初始濕含量相當低且要求最終濕含量極低，則減速階段就很重要，乾燥時間就很長。空氣速度、溫度、濕度、物料厚度及床層深度對熱傳速率(也即對等速乾燥階段)全都很重要。當擴散速率是控制因素時，即在減速階段，乾燥速率則隨物料厚度的平方變化，特別當需要很長的乾燥時間以獲得低的濕含量時，用攪拌、振動等方法，使濕粉料顆粒化、降低切片厚度或在穿流乾燥器中採用薄層將有利於減速乾燥過程。

了解採用一定乾燥方法時，物料的乾燥性能在乾燥器設計中是極重要的。通常需經試驗才能獲得這種乾燥性能。就乾燥對象材料而言，除考慮幾何型態外，亦需考慮各材料內之各種水分存在狀態。材料型態區分為固狀、液狀、糊狀等3種，其大小有大如陶瓷胚體，而小至數奈米(nm)之微細粉末者。同一材料也會因型態之不同而左右乾燥特性，進而造成乾燥特性之差異。因材料內部之水分存在狀態影響水分輸送機構，故為把握對象材料之乾燥特性，需進一步從微觀立場去了解材料內部之水分存在狀態。

各種材料中水之存在狀態與乾燥過程水分輸送機構之概況，一般可大類區分為濕潤材料與凍結材料，而濕潤材料又更區分為如磚、紙等具有多孔性之非均質材料，與如肥皂等之均質材料。若再進一步按材料之不同加以分類則可區分如下：

1. 非親水性材料

水分僅因為物理因素而被材料保有，例如砂石等其本身不具備親水性者(外表沾水而內部不吸水，也不與水結合)即為非親水性材料。

(1)單一粒子

在濕潤之固體物質表面附著水分，通常水分為 0.5~1.5%程度。此時蒸氣壓等於通常的水蒸氣壓。

(2)粒徑為數十微米(μm)以上之較粗粒子層

粒子層一旦堆積形成，則孔隙或毛細管即分布其中，其分布形狀相當複雜。乾燥剛開始時，粒子因互相接觸而形成粒子間之孔隙，水即藉毛細管吸引壓力(capillary suction pressure)被保持於此種孔隙，以此狀態存在之水即為毛細管水(capillary water)。若再進一步乾燥，則毛細管現象即逐漸消失，水就成為僅被粒子間之接點所保持之楔狀水(wedge water)，以及粒子表面沾附之懸垂水(pendular water)，而與毛細管吸引壓力無任何關係。

(3)粒徑為 10^{-2} ~1 微米(μm)之微小粒子層

在含有充足水分之狀態下，微小粒子乃懸浮於水中，此時水與粒子乃以微弱電化學力形成結合水之狀態。此時水之保有力，稱為滲透性吸引壓力(osmotic suction pressure)。此時液狀水之輸送驅動力為滲透性吸引壓力之梯度。粒子與粒子隨著脫水而接近，則此力隨之增大，直到粒子與粒子互相接觸，此力就不發生作用，以後接著就由毛細管吸引壓力發生作用。通常，由滲透性吸引壓力推動液態水輸送而進行乾燥脫水時，會引起等於脫水容積的乾燥收縮。

(4)具有微細毛細管構造之材料

磚、陶磁等材料為具有 10^{-2} ~1 微米(μm)之微細孔隙之固型材料，也和(2)(粒徑為數十微米(μm)以上之較粗粒子層)之材料一樣，有毛細管水及懸垂水之狀態存在。但在(2)之材料，因毛細管徑較大之關係，毛細管內液面所示之蒸氣壓即等於自由水所示之蒸氣壓。但對於甚微細之毛細管，則有時無法忽視蒸氣壓之下降。

2.親水性材料

離子活性氧化鋁、矽凝膠粒子等材料均具有 10^{-4} ~ 10^{-2} μm 之細孔，均屬於可以吸附水之親水性材料。

(1)單一粒子

沾附於粒子外部表面之水為自由水。被吸附於粒子內的吸附水量與蒸氣壓之關係，通常可由等溫吸附曲線表示。吸附性材料若含足夠水量時，則除了吸附水外，有時也有毛細管水存在。這種情形下，只有毛細管水才發生水輸送，而吸附水通常無法發生液態水輸送。

(2) 粒子層

被保有於粒子間孔隙的水，其狀態和非親水性材料(2).(粒徑為數十微米(μm)以上之較粗粒子層)之狀況完全一樣，這些水分可藉脫水而被排除，保有於各粒子內之毛細管水亦可隨後排除之，其後，發生吸附水之脫附(de-sorption)。因此，前二者是以液狀水之狀態在粒子層內輸送，而吸附水並不以液狀水的狀態來輸送，而以汽化、蒸氣擴散的狀態輸送之。

(3) 凝膠狀之材料

如黏土，當含充分水分時，水藉滲透性吸引壓力而被保有。通常，由滲透性吸引壓力推動液態水輸送而進行乾燥脫水時，會引起等於脫水容積的乾燥收縮。

(4) 細胞質材料

細胞被水分充分飽和時，細胞質即細胞中均被水飽和。當開始乾燥時，細胞水通過細胞質，向細胞質表面輸送。等細胞中腔之脫水結束，才開始變成細胞質之脫水，隨之會發生細胞質的收縮。

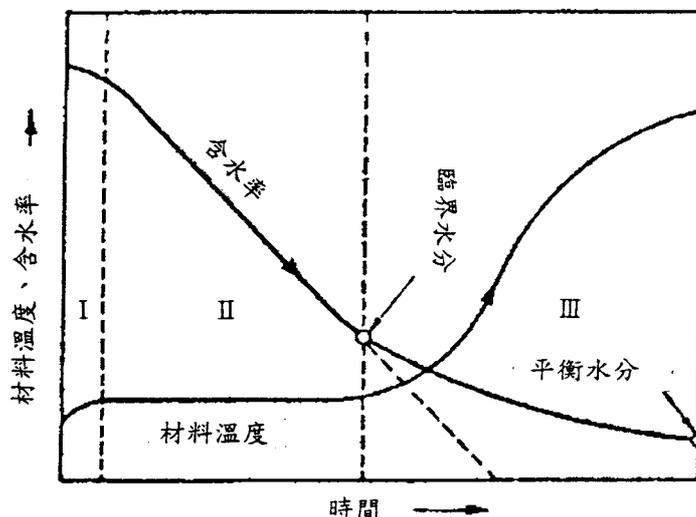
3. 均質材料

在均質材料中，水乃以結合水狀態存在。其可由脫水乾燥而收縮，直到最後脫水結束為止。此過程當中之水分輸送是由於擴散作用所發生。材料所示之蒸氣壓是水分含量之函數，在水分含量較大之處，接近於自由水之蒸氣壓，可是蒸氣壓隨著水分含量的減少而急劇下降。

2.5.5 臨界含水量及平衡含水量

乾燥之進行有兩種情形，一是在非穩定條件下乾燥，二是在穩定條件下乾燥(如逆流連續乾燥)，其程序各有不同。若將材料置於非穩定乾燥條件之環境內，則通常有(I)材料預熱期、(II)恆速乾燥期及(III)減速乾燥期之存在。材料溫度在恆速乾燥期中約略一定，於此時期流入之熱量全部被水分蒸發所消耗。一進入減速乾燥期則材料溫度上升，經常會在內部產生溫度分布。這些變化如圖 2.22 所示。圖中(II)與(III)交界之水分稱為「臨界含水量」(critical moisture content)，此值與處於(III)之期間之曲線型式係依乾燥材料之性質，亦即內在乾燥條件，加熱

方式與熱風條件等外在乾燥條件所決定。乾燥操作結束時，材料保有之含水量稱為「平衡含水量」(equilibrium moisture content)。這是材料特有之值，尤其是細胞質材料，其值既高且易受外部條件所影響。溼度越高，則此值就越大，而溼度的影響比溫度還要顯著。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001 年 12 月

圖 2.22 水分、材料溫度變化

2.6 熔融

固體廢棄物在資源程序之前處理或最終處理時，因物質之性質較為特殊，需將之進行物理及化學行為轉化，利用高溫之方式，使之液化減容，以便後續處理，稱為熔融減容處理技術。

所謂熔融減容處理技術，依其應用廢棄物領域之不同，其使用之名稱亦有所差異，但因操作原理相似，故均以熔融減容法稱之。熔融減容方式有：

1. 燃料加熱式

- (1) 表面熔融爐
- (2) 內部熔融爐
- (3) 焦炭熔融爐
- (4) 旋窯熔融爐

2. 電力加熱式

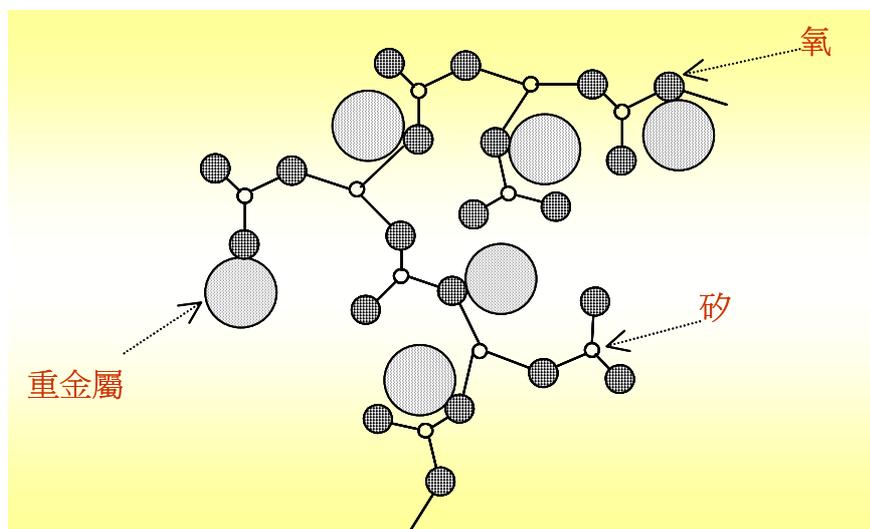
- (1) 電力電弧熔融爐
- (2) 電力電阻熔融爐

(3)電力加熱熔融爐

(4)電漿內部熔融爐

2.6.1 原理介紹

熔融減容技術係將廢棄物，利用添加輔助燃料之燃燒放熱或電氣加熱產生之熱能，將待處理物（如焚化灰渣）於超過其熔點之高溫環境下，使其所含有機物產生熱分解、氣化及燃燒反應；至於重金屬及低沸點鹽類則於高溫下進行揮發，而其他高沸點無機物則於高溫熔化及冷卻凝固過程中，將未揮發之重金屬被包封於 Si-O 網絡狀結構中（如圖 2.23 所示），進而形成高緻密性且低溶出性之玻璃化安定物質，因而即可達到無害化、減量、減容化之目的。



資料來源：熔融技術與資源化評析，2004 年 2 月

圖 2.23 網絡狀結構圖例

由於目前熔融減容之學理及反應機制雖未十分明瞭，但對於熔融減容處理之效果，仍大多可利用待處理物經熔融減容處理後所產生之效應來作為判斷依據。換言之，可從熔渣特性變化來探討其處理效果，其特性項目包括「灼燒減量 (ignition loss)」、「強度」、「孔隙率」、「容積」、「玻璃化」、「金屬揮發」、「重金屬移行率」等，分述如下：

1.灼燒減量

一般經有效地熔融減容處理，其熔渣之灼燒減量檢測值應會低於極限值。

2.強度

此處談及之「強度」係指「抗壓強度」，其抗壓強度變化與熔融減容後處理

之冷卻方式有密切關係。例如氣冷式後處理之熔渣抗壓强度高於水冷式後處理者。

3. 孔隙率

如圖 2.23 之網絡狀結構可發現，熔融處理過程中會產生緻密作用，導致孔隙率降低，達到減容的目的。

4. 容積

經有效地熔融處理後，待處理物（如污泥或焚化灰渣等）體積有減少現象，其原因為有機成分已氧化及孔隙率降低有關。

5. 玻璃化

待處理物（如污泥或焚化灰渣等）經熔融處理後之玻璃化現象，有助於封存重金屬而減少溶出之可能，其反應機制係利用熔融過程中產生之 Si-O 網目結構將重金屬匣限於構造中，而達到穩定化之作用，亦即重金屬取代矽酸鹽礦物中部分離子而被鍵結於矽酸鹽之網絡構造中，而形成難溶性之物質，其反應形成機制如圖 2.23 所示。

6. 金屬揮發

金屬揮發與其蒸氣壓（vapor pressure）、質量、密度、化合物型態及溫度有關。如原欲處理物（如污泥或焚化灰渣等）中含有高量之重金屬，則熔融體中重金屬之熱反應性，即關係熔融減容處理過程中之操作條件與熔渣往後之利用特性。而有關元素與化合物之蒸氣壓一般可以 Antoine's equation 來表示：

$$\log P = (A - B) / (C + t) \dots\dots\dots (2-46)$$

P：蒸氣壓(mmHg)；t:溫度(°C)

式 (2-46) 中之 A、B、C 為元素與化合物之特定參數

7. 重金屬移行率

所謂「重金屬移行率」乃指待處理物中重金屬及其它主要成分，於熔融減容過程存在於熔渣（或其它相）之比率。在熔融減容處理過程，待處理物中重金屬受其物化特性（如蒸氣壓、揮發溫度、熔點、沸點等）、化合物型態、熔融溫度及熔融減容處理設備等因素之影響，而產生不同之移行結果。

另外，談及熔融減容處理過程中之重要控制操作因子，計有「鹽基度

(basicity)」、「熔融操作溫度」、「熔融操作時間」、「熔融爐內氧氣分壓」等，分述如下：

1. 鹽基度

一般而言，在熔融減容處理過程中是以熔流點 (pouring point) 作為熔融減容操作之指標。而熔流點常與待處理物所組成之鹽基度有關。

由於待處理物組成可能複雜，如依鹽基度之基本定義 (即鹽基度 = 鹼性鹽之總重量/酸性鹽之總重量)，可再以待處理物組成之可能主成分，設定有七種鹽基度。其可作為熔融操作溫度 (熔流溫度) 指標，藉由探討其相關性與適宜性。相關定義分別如下：

鹽基度 1 : CaO/SiO_2

鹽基度 2 : $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

鹽基度 3 : $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$

鹽基度 4 : $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

鹽基度 5 : $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

鹽基度 6 : $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5)$

鹽基度 7 : $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$

由於熔渣主要係由氧化物所組成，如按照其化學性質可概分為鹼性氧化物、酸性氧化物及中性氧化物，而其酸鹼性之強弱如下：

$\text{B}_2\text{O}_3 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SnO}_2 > \text{FeO} > \text{MgO} > \text{MnO} > \text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$

酸性	中性	鹽基性(鹼性)
----	----	---------

2. 熔融操作溫度

適當控制熔融減容處理溫度，可改善因溫度而產生之熔渣流動性不足、熔渣之孔隙過高、排渣困難、熔渣品質不良及毒性物質溶出增加等缺點，同時可以避免因溫度過高而產生對爐壁耐火磚之損害或系統熱損失增加或增加輔助燃料消耗等。

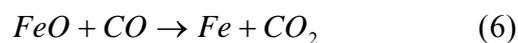
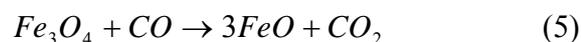
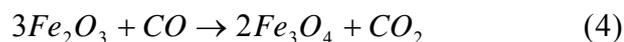
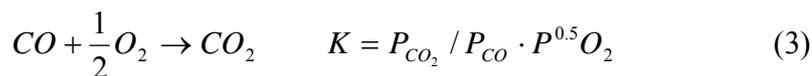
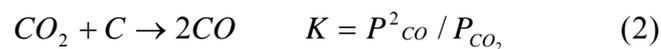
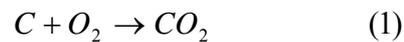
3. 熔融操作時間

待處理物於熔融減容處理爐內之停留時間，與處理爐操作容量及產生熔渣之品質有密切關係。總而言之，操作時間短雖可增加待處理物處理量，減少熱

能用量。但是，其熔渣成分之化學反應會不完全，導致其中可能存在之有害物質(如重金屬)，無法完全包封在熔渣中，進而降低熔渣中有害物質(如重金屬)之安定性。因此，適當熔融操作時間為熔融處理重要之操作因子。

4. 熔融爐內氧氣分壓

金屬於冶煉過程中，爐內氧氣分壓為主要控制因子之一。一般而言，在某一定溫度下，金屬氧化物分解反應的氧氣平衡壓力若大於爐氣中之氧氣分壓，金屬氧化物便會分解而被還原成金屬；若分解反應的氧氣平衡壓力大於空氣中之氧氣分壓，則金屬氧化物在大氣中也很容易就被還原。然而金屬氧化物之分解反應的氧氣平衡壓力，除了 Hg、Ag 等較大外，大部分都非常小，所以必須仰賴還原劑之還原，才能獲得金屬。下列為鐵礦石 (氧化鐵) 受到 CO 還原之反應：



至於 PbO、ZnO 之分解反應的氧氣平衡壓力遠較氧化鐵為大，在爐內還原更為容易，下列各式為 PbO、ZnO 受到 CO 還原之反應式：



如以 Pb-C-O 系、Zn-C-O 系與 Fe-C-O 系作還原平衡比較，可發現爐內氧氣分壓 (相當於 $\frac{CO_2}{CO}$ 或 $\frac{H_2O}{H_2}$) 是構成氧化或還原條件所在，其決定熔渣中金屬元素之化學型態。

2.6.2 熔融減容處理之特性

1. 對廢棄物或灰渣之減容效果佳：都市垃圾焚化灰渣熔融處理後，其體積減為原有之 25~40%。

- 2.重金屬溶出性降低：經熔融處理之熔渣，可有效封存重金屬，減少重金屬溶出之可能。
- 3.資源再利用：熔渣可作為骨材及磚塊等建築材料的考量。
- 4.占地面積小：熔融爐一般為立型，所需之設置面積較小。
- 5.廢氣排放量少：熔融處理所需之空氣量較少，一般而言，排氣量約為一般焚化爐之 1/2-1/10。
- 6.廢氣排放之污染物濃度較低：熔融處理廢氣排放之 NO_x、SO_x 及氯化氫等濃度，較一般焚化爐為低。

2.7 熱裂解

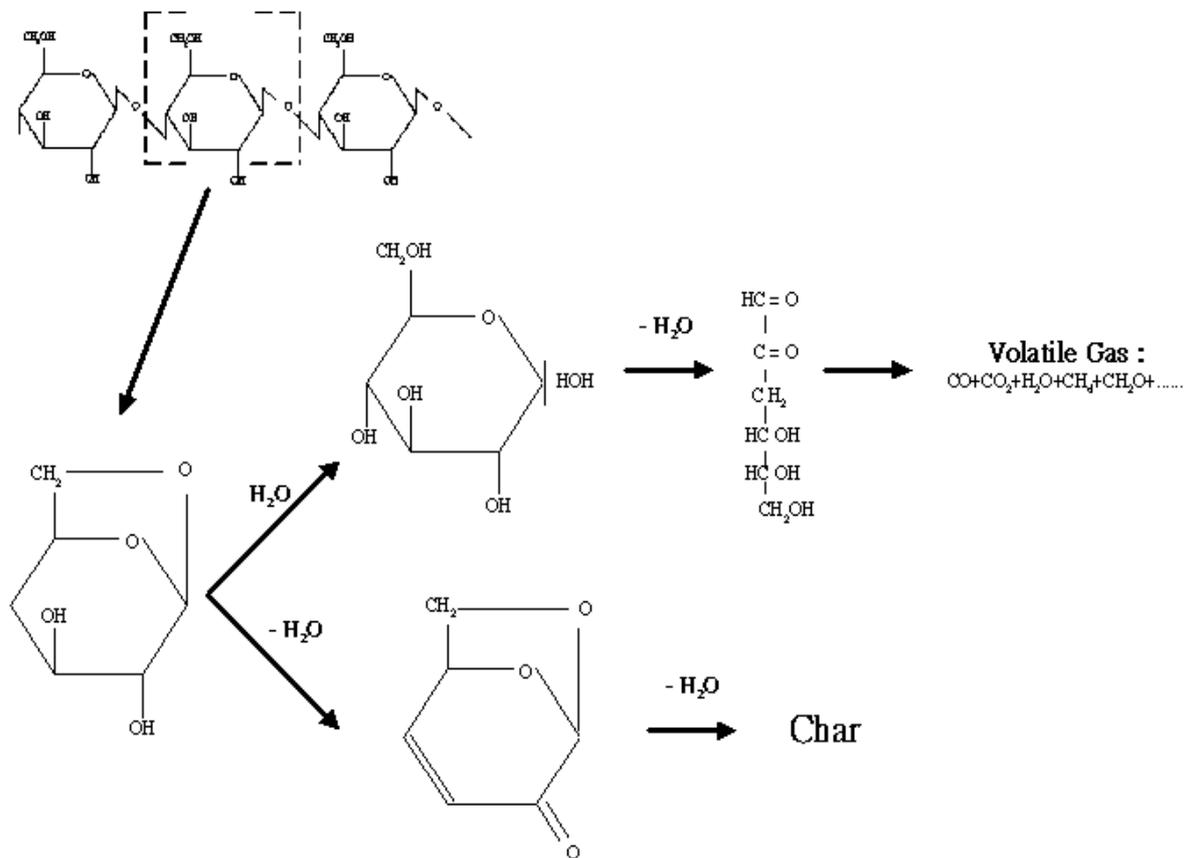
2.7.1 原理介紹

廢棄物的處理方法很多，其中熱處理法是一種能有效達到固體廢棄物減容的方法，且可利用高溫來破壞有害成分。熱處理法又分為焚化法（incineration）、熱解法（pyrolysis）及氣化法（gasification）三大類，可以空氣輸配量予以區分，不同的空氣輸配方式將產生成分及組成不同的高溫氣體產物。一般而言，當進氣量小於 0.2 倍之理論空氣量時，主要為熱解反應；當進氣量達到 0.2-0.4 倍理論空氣量之範圍內，氣化為主要反應；如供給大於 0.4 倍理論空氣量之空氣時，則燃燒反應漸趨重要而成為主要反應之機制。

焚化法為技術最成熟且應用最普遍的方法，係以足夠或過量的空氣供應來使物質進行燃燒反應，主要生成物為完全燃燒後產生的二氧化碳及水，並由放熱反應產生能量；然而焚化系統因完全燃燒而無法回收可燃性產物，僅可回收熱能作為發電或汽電共生之用。氣化法係以低於理論空氣量的空氣，來使物質於氣化爐內產生乾燥（drying）、熱分解（thermal decomposition）、燃燒（combustion）及氣化（gasification）反應，其主要產物為氫氣及一氧化碳。將生質燃料與高溫空氣直接接觸反應，可產生低能階燃料（3.92 ~ 11.78 MJ/Nm³）；若以高溫氧氣直接加熱生質燃料，則可產生中能階燃料（11.78 ~ 27.48 MJ/Nm³）；若改進氣化爐操作狀態，則可產生高能階燃料（27.48 ~ 39.26 MJ/Nm³）。

熱解法又稱熱裂解法，其定義為在無氧的狀態下，以直接或間接的加熱方式，使有機物中較大分子分解為較小分子，產生可燃性之固體（主要為焦炭）與液體（如水與焦油的混合物），以及具有低熱值至中熱值之氣體燃料，其熱值約為 3.9 ~ 15.7 MJ/Nm³，主要成分為 CO、CO₂、H₂O、H₂、CH₄、C₂H₆ 等。因此，熱解技術除了具有將固體廢棄物減容的效果之外，更具有能源轉換回收再利用的效果。

一般而言，當一部分的固體燃料顆粒達到反應溫度（或稱為熱解溫度），則開始進行熱分解反應，固體成分則隨之轉換為氣體及焦炭。有機性固體廢棄物常由一系列的環狀結構，以及乙醚鍵、碳鍵、硫鍵等所連結而組成主結構，並與氫氧基、甲基等官能基，或硫、氮、氯等異原子結合。熱解主要機制為高溫打斷環狀結構之間的鍵結，將大分子結構分解為較小分子，並進行開環反應，而產生氣體及固體焦炭。木材中的主成分纖維素，其結構式及熱解反應途徑如圖 2.24 所示，即為一例。開始進行熱分解反應的溫度隨物質而異，例如煤約在 450~500°C 間；生質(biomass)的熱分解溫度較煤低，約 350°C。有機性物質之熱解於各溫度範圍內之反應如表 2.6 所示：



資料來源: Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals, 1998 年

圖 2.24 纖維素熱解途徑示意圖

表 2.6 不同溫度階段之熱解反應

溫度	相關反應
100~120°C	脫水及乾燥（物理變化）
250°C	脫氧、脫硫、脫除結合水，產生CO ₂ 及H ₂ S氣體，開始熱裂解
340°C	脂肪族化合物開始分解為甲烷或其他較短脂肪族
380°C	乾餾生成物黏結在碳化炭上呈膠著狀態
400°C	含碳-氧及碳-氮化合物開始分解
400-600°C	瀝青化合物分解為乾餾油及焦油狀液體
600	瀝青化合物裂解成氣態短鍵碳氫化合物之熱穩定性物質
> 600°C	依據下列之假設反應產生芳香族（苯之衍生物）化合物：石腦煙裂解成丁烯，脫氫成丁二烯，再與乙烯化合成環己烷、環己烯類，再經高溫脫氫轉化為苯及高沸點芳香族

資料來源：廢棄物加熱分解處理法，1985 年

2.7.2 適用廢棄物種類

依據我國「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」第二條定義，熱解法係指將事業廢棄物置於無氧或少量氧氣之狀態下，利用熱能裂解使其分解成為氣體、液體或殘渣之處理方法。「廢輪胎回收貯存清除處理方法及設施標準」則定義，裂解處理係指在無氧或少氧環境下，利用熱能將廢輪胎裂解，使其分解成油、碳黑及其他氣體、殘渣等之處理方式。

表 2.7 為事業廢棄物之分類及處理方式，事業廢棄物分為一般事業廢棄物及有害事業廢棄物兩大類。在一般事業廢棄物中，除了少數種類如非有害廢觸媒、中間處理後物質等外，其餘種類可利用熱處理法處理之。有害事業廢棄物中除了集塵灰、溶出毒性事業廢棄物、石棉及其製品廢棄物之外，亦可利用熱處理法。惟表 2.7 之熱處理法係包括熱解法、熱熔、熔煉、熔融、燒結、蒸餾、熱蒸發及濕式氧化處理等，如欲以熱解處理法者，則以有機性廢棄物如動植物性廢棄物、廢有機性污泥、廢紙、廢木材等生質廢棄物，以及廢塑膠、廢橡膠等較為適合。

事業廢棄物之中間處理方法，須符合「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」第 17 條相關規定。有害事業廢棄物採熱處理法者，應提出試運轉計畫，報請環保局核可後，依試運轉計畫進行試運轉。試運轉完成前，應經環保署認可之檢驗測定機構或學術、顧問機構依試運轉計畫進行測試，並於測試前通知環保局。測試完成後，應檢具試運轉報告，經環保局核准後始得處理。

事業廢棄物採焚化法以外之熱處理法者，應有堅固之基礎結構；設施與廢棄物接觸之表面，採抗蝕及不透水材料構築；設施周圍應有防止地面水、雨水及地下水流入、滲透之設施或措施；應具有防止廢棄物飛散、流出、惡臭擴散及影響

四周環境品質之必要措施；應有污染防制設備及防蝕措施；並需具有自動監測及緊急應變處理裝置。有害事業廢棄物採焚化法以外之熱處理法，除感染性事業廢棄物外，有機氯化物總破壞去除效率達 99.99% 以上，多氯聯苯(PCBs)及 2、3、7、8 四氯戴奧辛(2,3,7,8-TCDD)、2、3、7、8 四氯聯苯呔喃(2,3,7,8-TCDF)總破壞去除效率達 99.999% 以上，其他毒性化學物質破壞去除效率達 99.9% 以上。

表 2.7 事業廢棄物分類及處理技術

分類	編號	廢棄物名稱	處理機構之技術編碼
一般事業廢棄物	1	動植物性廢棄物	Z03,Z04,Z05,Z09,X03
	2	廢塑膠	Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	3	廢橡膠	Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	4	廢玻璃、陶瓷、磚、瓦(粉、塊、屑等)及黏土廢棄物	Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	5	土木及建築廢棄物	Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	6	廢紙	Z04,Z05,X01,Z09,X03
	7	廢木材	Z03,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	8	廢纖維	Z02,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	9	污泥	Z02,Z03,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,Z99,X03
	10	非有害廢集塵灰	Z04,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,X03
	11	灰渣	Z02,Z04,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,X03
	12	礦渣或爐石	Z02,Z04,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,X03
	13	廢金屬	Z02,Z04,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,X03
	14	非有害廢觸媒	Z02,X01,Z05,Z06,Z09,Z07,Z08,X03
	15	非有害性廢液	Z02,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,Z99,X03
	16	廢皮革	Z02,Z03,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,Z99
	17	廢油	Z02,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,Z99,X03
	18	一般垃圾	Z03,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	19	廢物品	Z04,Z05,X01,Z06,Z09,X03
	20	中間處理後物質	Z02,X01,Z09,Z07,Z08,Z99,X03
	21	一般性醫療廢棄物	Z04,Z05,X01,Z09,X03
	22	廢攝影膠片(卷)(含X光膠片)	Z02,Z04,Z05,X01,,Z06,X03
	23	一般廢化學物質	Z02,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,Z99
	24	其他一般事業廢棄物	Z02,Z03,Z04,Z05,X01,Z06,Z09,Z07,Z08,Z99

表 2.7 事業廢棄物分類及處理技術(續)

分類	編號	廢棄物名稱	處理機構之技術編碼
有害事業廢棄物	1	污泥	Z04,Z05,Z07,Z09
	2	有機之殘留物、過濾物、底渣、重餾份	Z04,Z05
	3	油泥	Z04,Z05
	4	廢液	Z02,Z04,Z05,Z09
	5	集塵灰	Z07,Z09
	6	感染性事業廢棄物	Z04,Z05
	7	溶出毒性事業廢棄物	Z07
	8	石棉及其製品廢棄物	Z07
	9	多氯聯苯有害事業廢棄物	Z04,Z05
	10	其他有害事業廢棄物	依其特性決定之

Z01:滅菌處理 Z02:化學處理 Z03:堆肥處理 Z04:熱處理(焚化除外) Z05:焚化處理
 X01:掩埋處理 Z09:資源化處理 Z06:物理處理 X03:境外處理 Z07:固化處理
 Z08:安定化處理 Z99:其他處理

資料來源：再生資源及廢棄物代碼表 <http://waste.epa.gov.tw>。

事業廢棄物管理制度檢討及管制清理策略規劃推動，2005 年

2.7.3 熱裂解方法及影響因子

影響熱解速率及產物的因素包括：(1)反應物性質，如種類、成分、含水率、尺寸等；及(2)熱解程序之操作條件，如加熱速率、反應溫度、壓力、停留時間、觸媒及其他添加物等二大類。操作條件中又以反應溫度及停留時間二者，為影響熱解產物種類及濃度分布之最重要因素。表 2.8 為數種廢棄物在流體化床熱解爐內，不同溫度對於產物濃度的影響。表中所列之低熱值產氣為 5.89 ~ 11.78 MJ/Nm³，熱解油熱值為 23.3 ~ 27.9 MJ/Nm³。由表 2.8 可知，當熱解溫度提高時，產氣比例隨之上升；反之，熱解油及焦炭比例均隨著熱解溫度提高而下降。

此外，加熱速率對熱解產物亦有顯著的影響。例如在 0.01 ~ 2°C/s 與 500°C 以下的溫度，將得到固體、液體與氣體產物三者產量約相等之熱解產物組合。反之，較高的反應溫度與較長的停留時間，有助於可燃氣體的產生。例如以 10³ °C/s 以上與約達 600°C 之溫度將固體生質燃料進行熱解，並將熱解產物急速淬冷，在液態中間產物尚未進一步裂解為氣態之前即予以冷凝，可得到最高的液體產物比例；在相同的加熱速率下如將溫度提高至 700°C 以上，則可得到最高的氣體產物比例。

表 2.8 反應溫度對於廢棄物熱解產物濃度分佈之影響

廢棄物種類	低熱值產氣百分比 (wt% at°C)			熱解油百分比 (wt% at°C)			焦炭百分比 (wt% at°C)		
	500°C	700°C	900°C	500°C	700°C	900°C	500°C	700°C	900°C
生質固體物	10	26		10	2		12	11	
玉米穗軸	17	65	52	22	7	3	26	14	17
糞肥	20	30	42	18	7	2	28	14	11
都市垃圾	23	36	50	11	6	3		24	13
紙	16	45	70	47	8	3	10	6	4
木片	23	35	53	19	6	2	27	20	22

資料來源: Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals, 1998 年

第三章 減容技術與設備

從上一章節了解基本原理後，本章節主要介紹壓縮、破碎、分選、脫水、乾燥、熔融及熱裂解等 7 項技術流程、設備及構造等。詳述如下：

3.1 壓縮技術與設備

3.1.1 壓縮流程

壓縮的流程見圖 3.1，其中進料的方式有很多種，最常見的是以輸送帶來移動廢棄物至壓縮容器內，再來進行壓縮處理，並視需要做打包處理。打包的設備，其實會跟壓縮設備一起配合使用，主要是在高壓下操作。典型是以 100 psi (0.6895 MPa)到 200 psi (1.379 MPa)之間的壓力，生產小的固體廢棄物或回收物質的壓縮包，以利於儲存、排列及運送等。但其主要是以廢棄物之材料，來做為是否打包依據。材料主要是以無法塑性變形為主，如 PET 瓶之壓縮打包，須考慮彈性回彈及逸散，因此 PET 瓶磚皆以打包方式。典型壓縮包的尺寸是由 48×30×42 in (122×76×107 cm)到 72×30×44 in (183×76×112 cm)。打包手續確認處理完後，最後則為出料，此為壓縮整個流程。

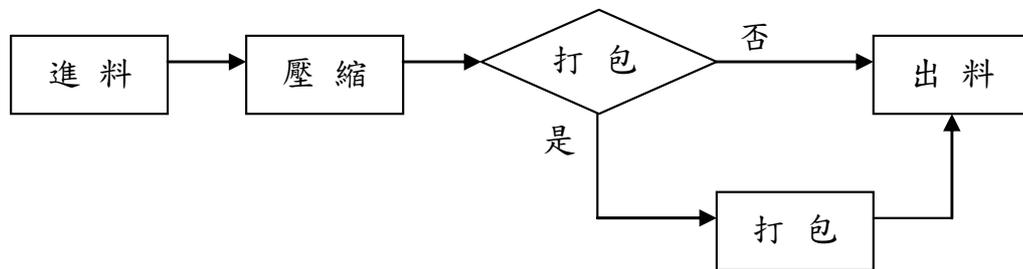


圖 3.1 壓縮流程

3.1.2 壓縮設備及構造

壓縮機的設備，在此把它分類為四種：擠壓式壓縮機、卡閘式壓縮機、螺旋式壓縮機及壓濾機。但壓縮機的形式還有很多種類型，主要也是以這幾種形式，再去做更進一步加強所需的部份，如用在纖維類和紙類的壓縮機，因纖維和紙類無法像一般金屬一樣，壓縮完後即塑性變形，所以額外要再以打包方式來做為處理，否則壓縮物還是會回復一些原本之體積。另外還有都市廢棄物用之壓縮機，因為要防止有機物腐敗減少臭味，所以會再把壓縮機作為調整，但大多都市用壓縮機還是會以擠壓式壓縮機類型為主，來做為設計的參考依據。下列即為這四種

壓縮機的介紹：

1.擠壓式壓縮機

擠壓式壓縮機如圖 3.2 所示，當廢棄物投入儲存槽處理時，分別先從 1、2 按順序利用擠壓方式讓物體體積縮小來進行壓縮處理，最後再由 3 來做為最後的壓縮成型處理，使之成為塊狀，處理完後退出廢棄物，即完成擠壓式壓縮機處理。此類型處理主要用於大型機種上。

2.卡閘式壓縮機

卡閘式壓縮機如圖 3.3 所示，廢棄物從上面投入進料口後，先進行 1 橫向壓縮處理，再由 2 分隔驅動盤，以旋轉的方式來進行上下壓縮成型，最後再經由 3 來進行廢棄物壓縮成型，然後再排出，即完成卡閘式壓縮機處理。主要使用於中型之機種。

3.螺旋式壓縮機

螺旋式壓縮機如圖 3.4 所示，從進料口投入廢棄物後，先從 1 進行壓縮處理，但在處理的過程中，會把多餘的壓縮物利用螺旋的方式進行切斷之處理，同時經由 2 的方向進行壓縮成型，再從出料口排出，即完成螺旋式壓縮機處理。

4.壓濾機

壓濾機如圖 3.5 所示，污水進入後，藉由壓力強迫將水通往濾布，水滴則因壓力透過濾帶滲出，使污泥在板框間截留。固體物則會移留於此，最後在排出泥塊即完成壓濾機處理。

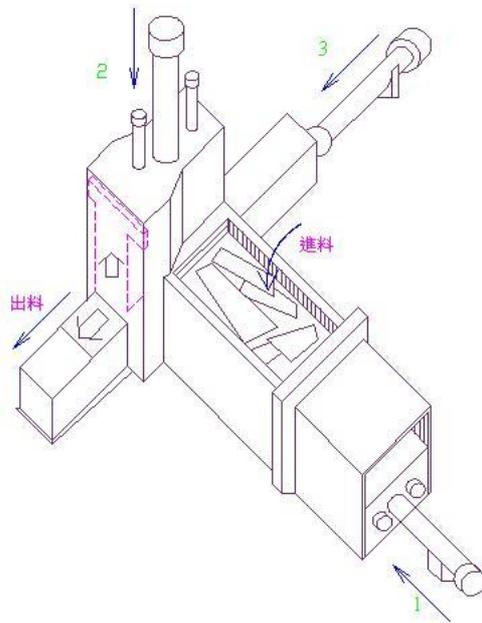


圖 3.2 擠壓式壓縮機

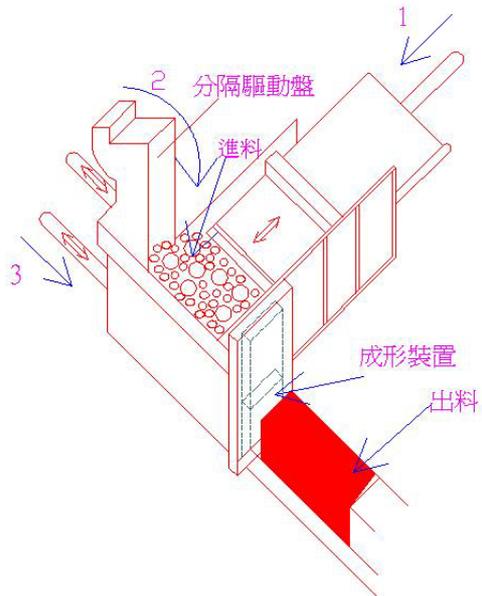


圖 3.3 卡閘式壓縮機

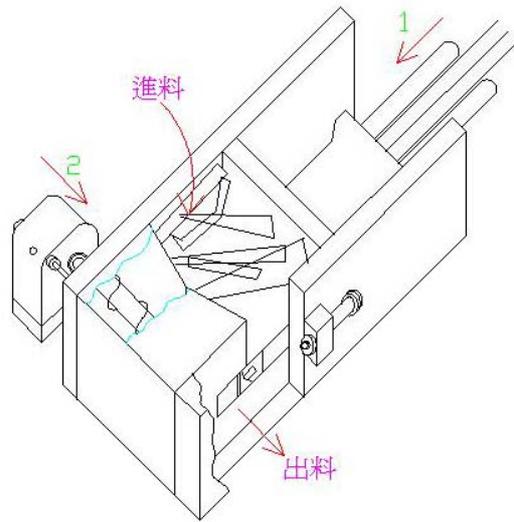


圖 3.4 螺旋式壓縮機

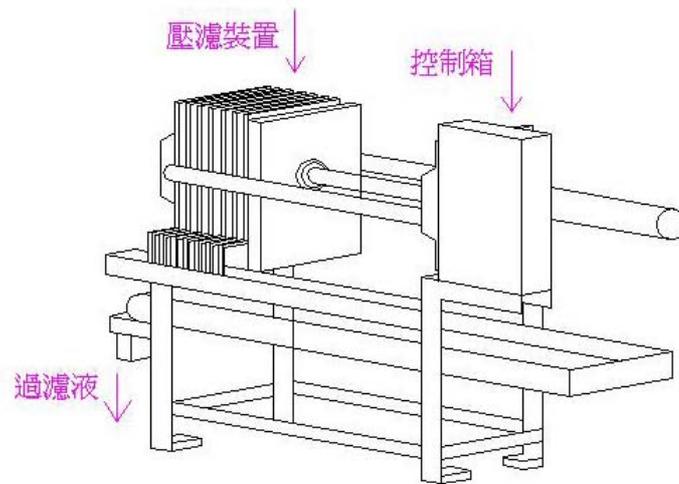


圖 3.5 壓濾機

3.2 破碎技術與設備

破碎是進行廢棄物資源回收分選工作之第一步，藉由破碎技術使欲回收物質達到某一程度的單離，並配合後續之分選技術及設備，提供分選之最佳粒度範圍。一般破碎機之破碎比在 3~10 之間(餵料粒度與產品粒度之比)，故對破碎比大之物質，需利用數段大小程度不同之破碎機串聯分階段完成。各階段之破碎粒度範圍大致如下：

- 1.粗碎：餵料粒徑為 1,500mm~500mm 之間，破碎到 400mm~150mm，通常使用顎形破碎機或偏心破碎機。
- 2.中碎：餵料為粗碎產物，破碎到 100mm~50mm，通常使用之設備有小型顎形破碎機、錐形破碎機等。
- 3.細碎：餵料為中碎產物，破碎到 30mm 以下，使用之設備通常為錐形破碎機、轉輪破碎機、衝擊破碎機等。

此外，選擇破碎機時須注意進料口大小須大於餵料最大粒徑之 125~135% 以上。另以破碎性質分類為脆性材料及韌性材料之破碎機如表 3.1 所示。

表 3.1 破碎性質分類及適用破碎機

破碎對象	廢棄物種類	破碎機
脆性材料	1.廢木材 2.廢石材 3.高密度塑膠 4.廢玻璃	1.顎形破碎機 2.偏心破碎機 3.衝擊破碎機 4.轉輪破碎機 5.渦旋多葉撞擊式破碎機
韌性材料	1.廢金屬 2.廢橡膠 3.低密度塑膠 4.廢纖維類 5.廢 PU 6.大型廢棄物	1.剪斷破碎機 2.複合切斷式破碎機 3.單軸回轉式破碎機 4.球磨機與棒磨機

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

一般採用之破碎機主要為顎型破碎機(jaw crusher)及偏心破碎機(gyratory crusher)兩種；中、細粉碎機有錐形破碎機(cone crusher)、轉輪破碎機(rolls crusher)、衝擊破碎機(impact crusher)。另有一些較適合軟性及韌性材料之破碎機，如剪斷破

碎機、複合切斷式破碎機、球磨機(ball mill)及棒磨機(rod mill)、振動磨機(vibration mill)、攪拌磨機(agitation bead mill)等，分別說明如下：

1. 顎型破碎機(jaw Crusher)

顎形破碎機為最常見之破碎機，其中以柏克型(blake)使用最為普遍，破碎能力佳，通常用於粗碎。由於具有構造簡單，工作可靠，製造容易，維修方便等優點，目前仍廣泛使用。

(1) 構造及原理

顎形破碎機之構造如圖 3.6。表 3.2 為顎型破碎機各部名稱與使用材質。顎形破碎機有數種結構不同的類型，但是工作原理基本上相似，差別在於動顎的運動軌跡。操作時，動顎板對固定顎板作週期性的往復運動，當動顎板靠近固定顎板時，處在兩顎板間的物料受到擠壓、劈裂和彎曲折斷的聯合作用而破碎；當動顎板離開固定顎板時，已破碎的物料在重力作用下，經破碎機的排料口排出。

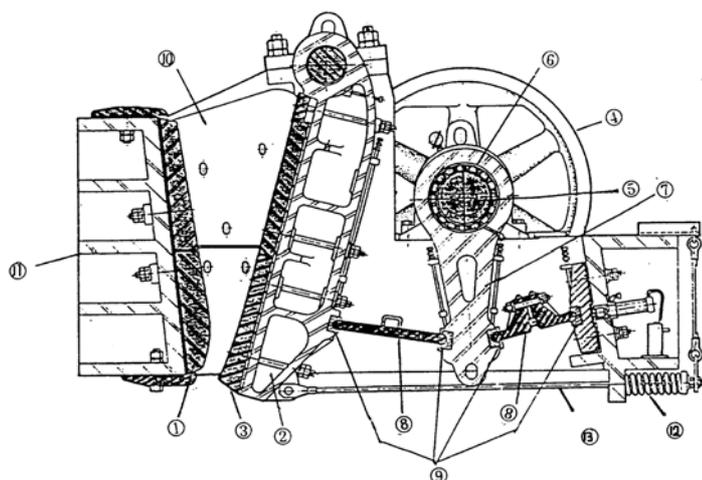
顎形破碎機在操作時，給料速度必須均勻，無法以充塞方式給料，一般都要設置專用的給料設備。為減少喉部阻塞之機會，近年來齒板之縱斷面設計成為凸形的曲齒板，破碎之速度可以加快，故破碎能力增大，且排料大小更加均勻。

(2) 操作

正確的操作是保證破碎機連續正常運轉的重要因素之一，操作不當或者操作過程中的疏忽大意，往往是造成設備和人員事故的重要原因。

啟動前的準備工作：1.在顎形破碎機啟動以前，必須對設備進行全面而仔細的檢查；2.檢查破碎齒板的磨損情況，調整排料口尺寸；3.檢查破碎室內有無給料，若有大塊給料，必須排出；4.螺絲是否鬆動；5.皮帶輪和飛輪的保護外罩是否完整；6.三角皮帶和拉桿彈簧的鬆緊程度是否合適；7.潤滑貯油箱油量和潤滑系統的完好情況。

操作中的注意事項：在啟動破碎機前，應該先開動油泵電動機和冷卻系統，經 3~4 分鐘後，待油壓和油流指示器顯示正常時，再開動破碎機的電動機。啟動以後，如果破碎機發出不正常的聲響，應停止運轉，查明並消除障礙後，重新啟動機器。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 3.6 顎形破碎機之構造圖

表 3.2 柏克型顎形破碎機各部名稱與主要零件之材質

編號	各部名稱	材質名稱	材質記號
1	固定顎	JIS 金屬 4806 高錳鋼鑄造品	SMn75
2	動顎	JIS 金屬 5101 鑄鋼品 2 種	SC45
3	動顎板(齒)	JIS 金屬 4806 高錳鋼鑄造品	SMn75
4	飛輪	JIS 金屬 5501 鑄鋼品 3 種	FC19
5	偏心軸	JIS 金屬 3201 鑄鋼品 5 種 JIS 金屬 3101 一般構造用壓延鋼材 3 種	SF55 SS50
6	偏心軸座	JIS 金屬 6651 青銅鑄物 5 種 1 號或 JIS 金屬 7501 白合金	BC5A 或 WJ4
7	直聯桿	JIS 金屬 5101 鑄鋼品 2 種	SC45
8	橫聯桿	JIS 金屬 5501 鑄鋼品 2 種	FC15
9	橫聯桿座	JIS 金屬 3201 鑄鋼品 2 種	SF55
10	頰板	JIS 金屬 4806 高錳鋼鑄造品	SMn75
11	機座	JIS 金屬 5101 鑄鋼品 2 種	SC45
12	彈簧	—	SMn60
13	拉桿	—	SMn60

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

破碎機必須空載啟動，啟動後經一段時間，顯示運轉正常，方可開動給料設備。操作中必須注意給料速度均勻，不可以充塞給料。運轉中，如果給料太多或破碎室堵塞，應該暫停給料，待破碎室中的給料碎完後，再開動給料機，在此期間破碎機不可停止運轉。如果給料口被大塊給料卡住，應使用專門器具排除，嚴禁用手處理。

破碎機的停機，必須依照下面的順序進行。首先停止給料，待破碎室內的給料全部排出後，再停破碎機和皮帶輸送機。當破碎機停止後，方可停止油泵的電動機。破碎機因故停車，當事故處理完畢，準備開機以前，必須清除破碎室內積存的給料，方可開始啟動重新運轉。

(3) 維護及檢修

顎形破碎機的構造簡單，維修也較易，通常只有與物料接觸的部分，即齒板與破碎室兩側之頰板，由於磨耗較大須定期更換外，較無其他問題；近年來有些襯板已改採用橡膠襯裏以減少磨耗。另外，為防止意外損壞，破碎機大都有安全設施。顎型破碎機偏心軸軸承蓋的螺絲，常設計成為最弱的部份，當遭遇無法破碎的硬物時，此最弱部分最先損壞，以便保護其他機件，所謂「兩害相權，取其輕」之意。此設計上最弱的部份，即為經濟損毀點(cheap breaking point)，此外亦有選橫聯桿作損毀點的，以其易於更換且成本低廉之故。

顎形破碎機在使用操作中，必須重視常維護與定期檢修。顎形破碎機的工作條件是非常嚴苛的，設備的磨損本是不可避免，但機器零件的過度磨損，甚至斷裂，往往是由於操作不當與維護不周所造成的，例如，潤滑不良將會加速軸承的磨損等。表 3.3 所列是常見的故障原因及排除方法。

在正常條件下操作的設備，其零件的磨損是規律的，操作一定時間之後，就需進行修復或更換，這段時間稱為零件的磨損週期，或零件的使用期限。表 3.4 是顎形破碎機主要零件的使用期限及最低備份數量。

表 3.3 顎形破碎機操作中的故障及排除方法

項次	故障內容	產生原因	消除方法
1.	破碎機工作中聽到金屬的撞擊聲，破碎齒板抖動。	破碎室側面襯板和破碎齒板鬆弛，固定螺絲鬆動或斷裂。	檢查襯板固定情況，鎖緊襯板上的固定螺絲，或者更換齒板上的固定螺絲。
2.	橫聯桿座中產生撞擊聲。	彈簧拉力不足或彈簧損壞，橫聯桿座磨損或鬆弛，橫聯桿損壞。	調整彈簧的鬆緊或更換彈簧，更換橫聯桿座或橫聯桿。
3.	直聯桿產生撞擊聲。	偏心軸座磨損。	更換偏心軸座。
4.	破碎產品粒度增大。	破碎齒板下部顯著磨損。	將破碎齒板調轉 180°;或調整排料口，減小寬度尺寸。
5.	劇烈的劈裂聲音，動顎停止震動，飛輪繼續迴轉，直聯桿前後震動，拉桿彈簧鬆弛。	掉入無法破碎的物體，使橫聯桿破壞。直聯桿下部安裝橫聯桿座的凹槽出現裂縫。安裝沒經計算的保險橫聯桿。	鎖緊螺帽，取下直聯桿彈簧，將動顎向前撐起，檢查橫聯桿座，更換橫聯桿。修理直聯桿
6.	震動。	固定螺栓鬆弛，特別是組合機架的螺絲鬆弛。	鎖緊全部螺絲。
7.	飛輪迴轉，破碎機停止工作，橫聯桿從橫聯桿座中脫出。	拉桿的彈簧損壞，拉桿損壞，拉桿螺帽鬆脫。	清除破碎室內給料，檢查損壞原因，更換損壞零件，安裝橫聯桿。
8.	飛輪顯著的震動，偏心軸迴轉漸慢。	皮帶輪和飛輪鬆弛或損壞。	更換皮帶或飛輪。
9.	破碎機下部出現撞擊聲。	拉桿緩衝彈簧的彈性消失或損壞。	更換彈簧。

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

表 3.4 顎形破碎機易磨損零件的使用期限和最低備份數量

易磨損零件名稱	使用壽命(月)	最低儲備量
可動顎的破碎齒板	4	2 件
固定顎的破碎齒板	4	2 件
後橫聯桿	—	4 件
前橫聯桿	24	1 件
橫聯桿座	10	2 套
偏心軸座	36	1 套
動顎的懸掛軸承	12	1 套
彈簧(拉桿)	—	2 件

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

根據磨損週期的長短，還要對設備進行計劃檢修。計劃檢修又分為小修，中修和大修。

A.小修

是設備正常操作期間所進行的維修工作，即設備的日常維護檢修工作。小修主要是檢查及更換嚴重磨損的零件，如，破碎齒板和橫聯桿座等；維修軸座，刮削軸承；鎖緊螺絲；檢查潤滑系統，補充潤滑油等。

B.中修

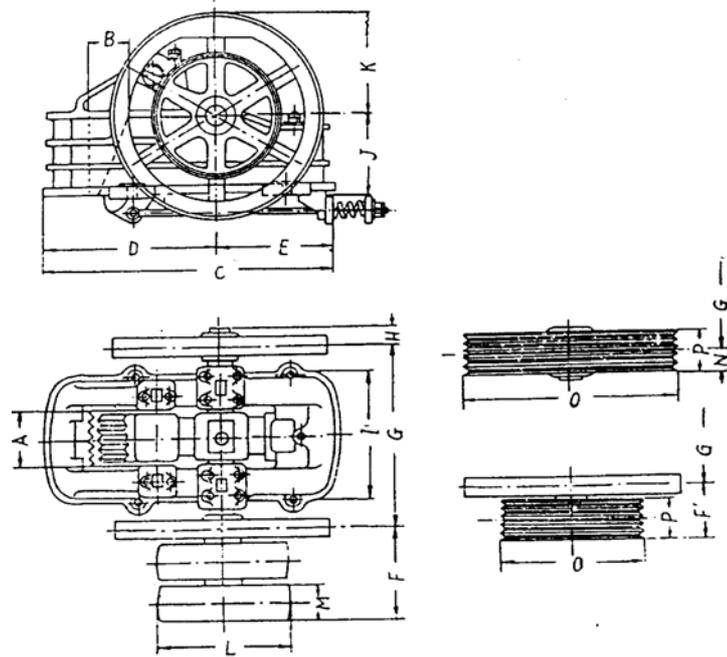
是在小修的基礎上進行的。根據小修中檢查和發現的問題，制定維修計劃，確定需要更換的零件項目。中修時經常要進行機組的全部拆卸，詳細檢查重要零件的使用狀況，並解決小修中不能解決的零件修理和更換問題。

C.大修

是對破碎機進行比較徹底的維修。大修除包括中、小修的全部工作外，主要是拆卸機器的全部部件，進行仔細的全面檢查，修復或更換全部磨損零件，並對機器設備進行全面的工作性能測定，以達到原設備設計的性能。

(4)規格

顎型破碎機的規格及各部分尺寸如圖 3.7 及表 3.5 所示。機號是以進料口寬(A)及顎距(B)的數值用英吋表示之數字。例如 2415 表示 A 的尺寸為 24 英吋，即 600mm，B 的尺寸為 15 英吋，即 380mm。破碎能力、耗用馬力及迴轉速則列於表 3.6。破碎能力除了與機台大小有關以外，也與破碎機出口大小有關。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.7 顎形破碎機之尺寸圖

表 3.5 顎形破碎機之外形

尺寸：mm

尺寸 機號	A	B	C	D	E	F	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
0806	200	150	1,070	620	450	320	160	560	60	420	460	410	500	135	—	720	110
1007	250	180	1,320	770	550	410	220	740	90	500	530	500	640	175	—	720	150
1509	380	230	1,680	990	690	620	200	1,030	100	720	600	575	720	230	—	1,000	120
2010	500	250	1,880	1,100	780	680	230	1,250	120	860	660	650	800	300	—	1,000	140
2415	600	380	2,300	1,380	920	770	330	1,530	140	1,030	820	750	1,000	340	—	1,000	220
3018	750	450	2,680	1,610	1,070	880	—	1,870	160	1,260	950	900	1,250	390	150	1,600	240
3624	900	600	3,400	2,100	1,300	1,000	—	2,400	180	1,550	1,200	1,000	1,600	450	190	1,800	310

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

表 3.6 顎形破碎機之破碎能力

機號	給礦口大小 (mm)	碎礦能力(t/h)											所要動力 (KW)	迴轉速 rpm	
		出口大小(mm)													
		10	15	20	25	30	40	50	65	80	100	125			
0806	200x150	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5								2.5~4	275
1007	250x180		1.7	2.5	3	3.5	5							4~5.5	275
1509	380x230			5	6	7	9	11						6~9	250
2010	500x250					10	12	15	19					10~14	250
2415	600x380						19	23	28	36				18~24	250
3018	750x450							31	38	45	54			25~35	225
3624	900x600								54	63	76	91		40~55	225

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

2. 偏心破碎機(gyratory crusher)

偏心破碎機構造為圓形，以懸軸型最為普遍。主體是由兩個圓錐體(可動圓錐和固定圓錐)組成。粗碎、中碎、細碎的機型皆有。中碎與細碎的機型又稱錐形破碎機(cone crusher)。

(1) 構造及原理

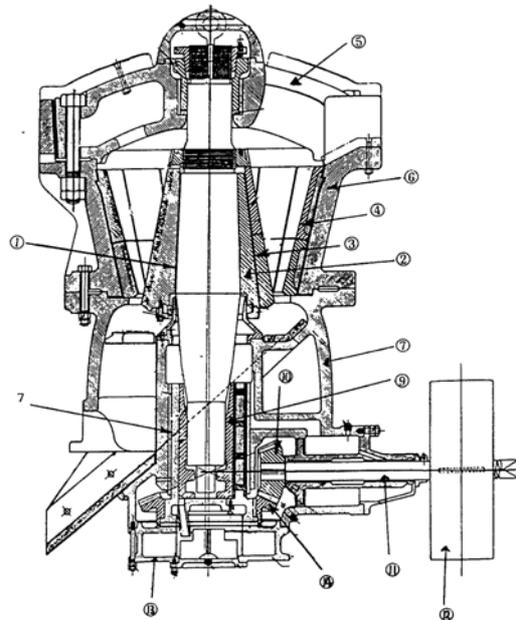
偏心破碎機之外型如圖 3.8 所示。表 3.7 為偏心破碎機各部零件及使用材質。可動圓錐的主軸支撐在破碎機橫樑上面的懸掛點，並且斜插在偏心軸套內，主軸的中心線與機器的中心線夾角約 $2\sim 3^\circ$ 。當可動圓錐靠近固定圓錐時，兩錐體間的物料就被破碎；而另一邊，物料則以重力經排料口排出。這種破碎工作是連續進行的，與顎形破碎機的工作原理不同。物料在偏心破碎機中，主要是受到擠壓作用而破碎，但同時也受到彎曲作用而折斷。

偏心破碎機相較於顎形破碎機的優點為：

- A. 破碎室深度大，工作連續，生產能力高，單位耗電低。
- B. 操作時出力平穩，震動較輕，機器設備的基礎重量較小。
- C. 可充塞給料。
- D. 偏心破碎機易於啟動，不像顎形破碎機需藉由飛輪。
- E. 偏心破碎機的產物多呈塊狀，而顎形破碎機則多片狀。

其缺點為：

- A.機身較高，故廠房的建築費用較大。
- B.機器重量較大，故設備投資費用較高。
- C.不適用於破碎潮濕或含泥物料。
- D.安裝、維護比較複雜，檢修亦不方便。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.8 偏心破碎機之構造圖

表 3.7 偏心破碎機各部名稱與主要零件之材質

編號	各部名稱	材質名稱	材料記號
1	主軸	JIS 金屬 3201 鍛鋼品 5 種	SF55
2	可動圓錐	JIS 金屬 4806 高錳鋼鑄造品	SMn75
3	襯板	JIS 金屬 5501 鑄鐵品 3 種	FC19
4	襯板	JIS 金屬 4806 高錳鋼鑄造品	SMn75
5	錐形壓套	JIS 金屬 5101 鑄鐵品 2 種	SC45
		JIS 金屬 5501 鑄鐵品 3 種	FC19
6	固定圓錐	JIS 金屬 5101 鑄鐵品 2 種	SC45
		JIS 金屬 5501 鑄鐵品 3 種	FC19
7	下機架	JIS 金屬 5101 鑄鐵品 2 種	SC45
		JIS 金屬 5501 鑄鐵品 3 種	FC19
8	中心套筒	JIS 金屬 5201 鑄鐵品 2 種	SC45
		JIS 金屬 5501 鑄鐵品 3 種	FC19
9	偏心軸套	JIS 金屬 6651 青銅鑄物 5 種 1 號	BC5A
		JIS 金屬 7501 白合金 4 種	WJ4
10	小圓錐齒輪	—	—
11	傳動軸	—	—
12	三角皮帶輪	—	—
13	機架下蓋	JIS 金屬 5101 鑄鐵品 2 種	SC45
		JIS 金屬 5501 鑄鐵品 3 種	FC19
14	大圓錐齒輪	JIS 金屬 5101 鑄鐵品 2 種	SC45

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

(2)操作

偏心破碎機的地基應與廠房地基隔離，地基的重量為機器重量的 1.5~2.5 倍。裝置時，首先將下部機架安裝在地基上，然後依次安裝中部和上部機架。在安裝工作中，要注意校準機架套筒的中心線是否同心。接著安裝偏心軸套和圓錐齒輪，並調整間隙。隨後將可動圓錐置入，再裝設懸掛裝置及橫樑。

安裝完畢，進行 5~6 小時的空載運轉。在運轉中須仔細檢查各個機件的聯結情況，並隨時量測油溫是否超過 60°C。空載運轉正常，再進行加載運轉。

在啟動之前，須檢查潤滑系統、破碎室以及傳動機件之狀況。檢查完畢，開動油泵 5~10 分鐘，使破碎機的各傳動部件都有潤滑作用，然後再開動主馬達。先令破碎機空轉 1~2 分鐘後，再開始給料。破碎機工作時，須經常依操作規定檢查潤滑系統，並注意在密封裝置下面不要堆積過多的給料。停機前，先停止給料，待破碎室內的給料完全排出以後，才能停主馬達，最後關閉油泵。停機後，檢查各部件，並進行日常的修理工作。

(3)維護及檢修

潤滑油要保持流動性良好，但溫度不宜過高。氣溫低時，須用油箱中的電熱器加熱。氣溫高時，則須用冷卻過濾器冷卻。潤滑油必須定期更換。偏心破碎機的潤滑系統及設備與顎形破碎機相同。懸掛裝置用黃油潤滑，定期用手壓油泵打入。表 3.8 是偏心破碎機工作中的故障及排除方法。表 3.9 是偏心破碎機主要零件的使用期限及最低備份數量。

表 3.8 偏心破碎機操作中的故障及排除方法

項次	故障內容	產生原因	清除方法
1.	油泵裝置產生強烈的敲擊聲。	油泵與電動機之轉軸不同心。	使其軸線安裝同心。
2.	油泵發熱。	稠油過多。	更換比較稀的油。
3.	油泵工作，但油壓不足。	吸入管阻塞。 油泵的齒輪磨損。 壓力表不精確。	清洗油管。 更換油泵。 更換壓力表。
4.	油的指示器中無油或油流中斷，油壓下降。	油管阻塞。 油的溫度低。 油泵工作不正常	檢查和修理油路系統。 加熱油。 修理或更換油泵。
5.	在循環油中發現顆粒雜質。	濾網破裂。 工作時油未經過濾器。	更換濾網。 使油通過過濾器。
6.	流回的油減少，油箱中的油也顯著減少。	油在破碎機下部漏掉。 排油溝阻塞。 油從密閉管線中漏出。	檢查和消除漏油原因。調整給油量，清洗或加深排油溝。
7.	冷卻器前後溫差過小。	水閥開的過小，冷卻水不足。	開大水閥，正常給水。
8.	冷卻器前後的水與油的壓力差過大。	散熱器堵塞。 油的溫度低於容許值。	清洗散熱器。 將油加熱。
9.	回油溫度超過 60°C。	偏心軸套中摩擦面產生不正常摩擦。	拆開檢查偏心軸套，清除溫度增高原因。
10.	隨著排油溫度的升高，油壓也增加。	油管或破碎機零件上的油溝堵塞。	找出並清除溫度升高的原因。
11.	油箱中發現水或水中發現油。	冷卻水的壓力超過油的壓力。冷卻器的水管破裂，使水滲入油中。	使冷卻水的壓力比油壓低。檢查冷卻器的水管聯接部分。
12.	油被灰塵污染。	防塵裝置未起作用。	清洗防塵及密封裝置，清洗油管並換油。
13.	強烈劈開聲音，可動圓錐停止，皮帶輪繼續轉動。	主軸折斷。	拆開破碎機，找出折斷損壞原因，安裝新的主軸。
14.	破碎時產生強烈的敲擊聲。	可動圓錐襯板鬆弛。	校正鎖緊螺絲。當鑄鋼剝落時，須重新澆鑄。

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

表 3.9 偏心破碎機易磨損零件的使用期限和最低備份數量

易磨損零件名稱	使用壽命(月)	最低儲備量
可動圓錐的上部襯板	6	2套
可動圓錐的下部襯板	4	2套
固定圓錐的上部襯板	6	2套
固定圓錐的下部襯板	6	2套
偏心軸套	36	1件
齒輪	36	1件
傳動軸	36	1件
排礦槽的護板	6	2套
橫樑護板	12	1件
懸掛裝置的零件	48	1套
主軸	—	1件

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

有關偏心破碎機的小修、中修和大修：

A.小修

檢查破碎機的懸掛裝置；檢查防塵裝置零件，並清除塵土；檢查偏心軸套的接觸面及其間隙，清洗潤滑油溝，並清除沉積在零件上的油渣；量測傳動軸和軸套之間的間隙；檢查青銅圓盤的磨損程度；檢查潤滑系統並更換油箱中的潤滑油。

B.中修

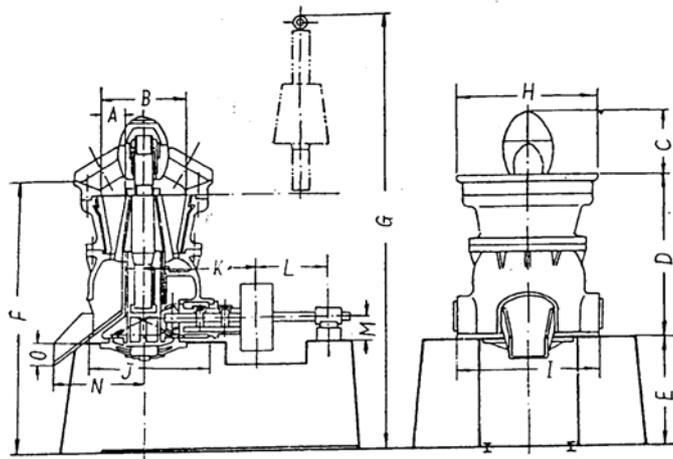
除了完成小修的全部任務外，主要是維修或更換襯板、機架及傳動軸承。一般約半年進行一次。

C.大修

一般為五年進行一次。除了完成中修的全部內容外，主要是維修下列各項零件：懸掛裝置的零件，大齒輪與偏心軸套，傳動軸與小齒輪，密封零件，支撐墊圈以及更換全部磨損零件和部件等。同時，還必須對大修以後的破碎機進行校正和測定工作。

(4)規格

偏心破碎機的規格與各部尺寸如圖 3.9 及表 3.10 所示。機號是以給料口寬(A)及直徑(B)顯示之。破碎能力、所需動力及迴轉速度則列於表 3.11。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.9 偏心破碎機之尺寸圖

表 3.10 偏心破碎機之外型

尺寸：mm

機號 \ 尺寸	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	130	500	280	1,000	760	1,760	2,740	850	860	640	590	410	155	590	190
2	150	620	350	1,150	800	1,950	3,040	1,000	930	740	720	490	155	670	220
3	180	700	365	1,460	1,060	2,520	3,860	1,090	1,120	900	900	550	205	770	250
4	200	850	505	1,690	1,200	2,890	4,470	1,355	1,370	1,120	1,060	650	230	960	300
5	250	1,000	540	2,150	1,400	3,550	5,500	1,600	1,700	1,500	1,250	800	275	1130	350
6	300	1,100	780	2,200	1,500	3,700	5,900	1,800	1,800	1,700	1,450	900	295	1200	400
7	380	1,400	810	2,720	1,800	4,520	7,200	2,240	2,000	1,900	1,650	1,050	350	1400	450
8	450	1,700	930	3,100	2,020	5,120	8,100	2,580	2,300	2,100	1,750	1,100	360	1550	500
9	530	1,900	1,040	3,450	2,250	5,700	9,000	2,880	2,560	2,260	1,900	1,200	405	1740	560
10	600	2,100	1,230	3,700	2,400	6,100	10,000	3,100	2,700	2,400	2,000	1,250	440	1850	600

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

表 3.11 偏心破碎機之破碎能力

機號	給礦口大小 (mm)	碎礦能力(t/h)											所要動力 (KW)	迴轉速 rpm	
		出口大小(mm)													
		10	15	20	25	30	40	50	65	80	100	125			
1	130x500	1.5	3	4.5	6.5	8							3~5	600	
2	150x620			6	8	11	16						7~9	575	
3	180x700				10	13	20	24					10~11	525	
4	200x850					18	26	33	42				17~20	475	
5	250x1,000						31	39	50	60			21~26	450	
6	300x1,100						41	51	66	81			32~40	450	
7	380x1,400							73	94	114	140		46~61	420	
8	450x1,700								115	140	172	210	58~75	400	
9	530x1,900									166	205	252	75~90	350	
10	600x2,100										184	227	280	90~112	350

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

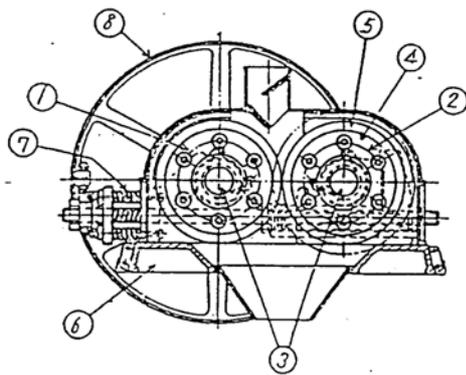
3.轉輪破碎機(rolls crusher)

轉輪破碎機是一種古老的破碎設備，構造簡單，主要作用於中、細碎作業。

(1)構造及原理

轉輪破碎機的構造如圖 3.10 所示。轉輪破碎機之主要構造為水平軸上平行裝置兩個向內對滾之轉輪，其中一轉軸固定，另一轉軸是可動的。操作時兩個轉輪作相向旋轉，由於給料與轉輪之間的摩擦作用，將給入的物料捲入兩輪所形成的破碎間隙內而被壓碎。產品在重力作用下，從兩輪之間的間隙排出。該間隙的大小即決定破碎產品的最大粒徑。

轉輪破碎機的轉輪表面有光滑和粗糙兩種。光面的粉碎作用主要是壓碎，並兼有研磨作用。這種破碎機主要用於中硬物料的中碎及細碎。粗糙面的破碎作用以劈裂為主，同時亦有研磨作用，適用於脆性和軟性物料的粗碎及中碎。轉輪破碎機主要用於中、細碎，由於產品大小不均一，故須採閉路系統破碎(closed-circuit crushing)。縮減比低，濕式或乾式破碎均可，但一般多用乾式。



- (1) 固定轉輪 fixed roll
- (2) 可動轉輪 movable roll
- (3) 轉輪軸 roll shaft
- (4) 轉輪體 roll core
- (5) 轉輪 roll shell (tire)
- (6) 基座 frame
- (7) 彈簧 spring
- (8) 皮帶輪 pulley

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.10 轉輪破碎機之構造

(2) 操作

轉輪破碎機的操作結果決定於輪面的磨損程度，只有當輪面處於良好狀態下，才能獲得較高的產能及產出合格粒徑的產品。因此，影響輪面磨損的因素及操作中應注意的問題須隨時注意，並定期檢查輪面磨損情況，及時進行維修及更換。

在正常破碎物料時，輪面的磨損是逐漸累積，影響輪面磨損的主要因素有：物料的硬度、輪面材料的強度、輪面的粗糙度、規格尺寸以及操作條件、給料方式及物料粒徑等。

輪面的使用期限，視進料在轉輪整個長度上分佈的情形而定。進料分佈如果不均勻，輪面不但很快磨損，而且轉輪表面會出現環狀溝槽，使產品粒徑極不均一。因此，大多數的轉輪破碎機都設有給料機，給料機的寬度與轉輪的寬度相同，以確保物料是均勻分佈在轉輪面上。在破碎機的運轉中，還要注意給料的粒徑大小，給料粒徑大，將產生劇烈的衝擊，輪面會磨損嚴重，此在粗碎時尤其顯著。

為了消除輪面磨損不均的現象，在破碎機運轉時，應經常注意產品的粒徑，而且應定期將其中可動轉輪之輪軸平行移動，移動的距離約等於給料粒徑的 1/3。

當需要改變縮減比而移動轉輪時，必須使轉輪平行移動，嚴防轉輪軸歪斜，否則會導致輪面迅速產生不均的磨損，嚴重時，還會造成事故。

轉輪破碎機工作時粉塵較大，必須裝設密閉的吸塵安全罩。罩上應留有檢查孔，以便檢查轉輪的磨損狀況。

(3) 維修及規格

為了保持破碎機的正常工作，機器的潤滑應特別注意，滑動軸承的潤滑，可採用定期注入黃油或用油杯加油的方式，亦可使用注油器注入稠油的方式。轉輪破碎機的規格與各部分尺寸如圖 3.11 及表 3.12 所示。機號名稱是以轉輪之直徑與寬用英吋表示，如 1810 表示轉輪直徑 18 英吋，即 450mm，轉輪寬 10 英吋，即 250mm。其破碎能力、所需動力、迴轉數及給料最大粒徑列於表 3.13。

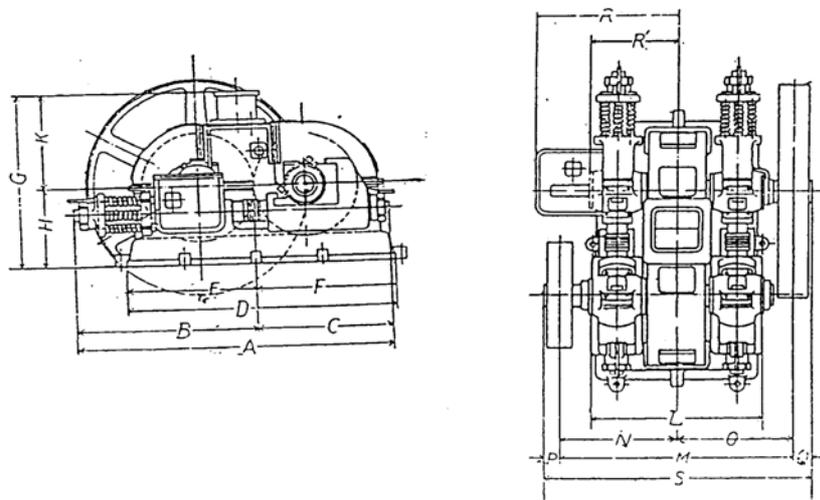
表 3.12 轉輪破碎機之外型

尺寸：mm

機號 \ 尺寸	A	B	C	D	E	F	G	H	K
1810	1,560	940	620	1,180	580	600	860	400	460
2412	2,020	1,210	810	1,580	710	870	1,080	520	560
3014	2,400	1,410	990	1,920	950	970	1,320	600	720
3616	2,820	1,650	1,170	2,290	1,130	1,160	1,520	700	820
4216	3,300	1,900	1,400	2,650	1,290	1,360	1,720	800	920
4818	3,740	2,250	1,490	3,200	1,550	1,650	1,880	900	980
5420	4,000	2,290	1,710	3,430	1,690	1,740	2,110	990	1,120

機號 \ 尺寸	L	M	N	O	P	Q	R	R'	S
1810	860	1,140	570	570	100	100	—	500	1,340
2412	1,110	1,560	770	790	100	110	1,070	640	1,770
3014	1,360	1,940	940	1,000	120	140	1,220	780	2,200
3616	1,490	2,130	1,050	1,080	130	150	1,380	880	2,410
4216	1,570	2,420	1,230	1,190	180	200	1,450	940	2,800
4818	1,750	2,450	1,200	1,250	150	230	1,620	1,010	2,830
5420	1,900	2,830	1,410	1,420	190	250	1,690	1,150	3,270

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.11 轉輪破碎機之尺寸圖

表 3.13 轉輪破碎機之破碎能力與馬力

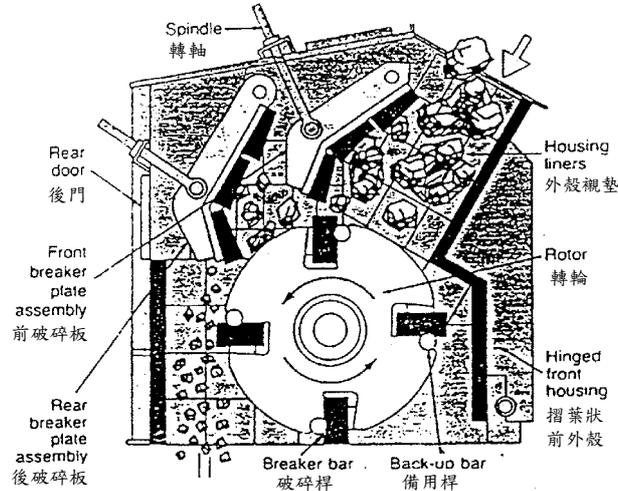
機號	轉輪尺寸 徑 X 寬 mm	回轉數 rpm	破碎能力 t/h 輪間距(a)mm				所須 動力 KW	給料最 大粒徑 mm	轉輪軸尺寸 徑 X 寬	
			3	6	9	12			固定軸	可動軸
1810	450X250	100~150	3~5				4~6	a+11	1,120X175	720X175
2412	600X300	80~125	4~6	8~12			5~13	a+14	1,250X200	800X200
3014	750X350	70~115	5~8	10~16			6~17	a+18	1,800X260	900X230
3616	900X400	65~105		13~21	19~31		13~28	a+22	2,000X300	1,000X260
4216	1,050X400	60~100		14~23	21~34		14~31	a+25	2,400X340	1,120X300
4818	1,200X450	55~95		16~28	24~42	32~56	17~46	a+30	2,500X390	1,250X300
5420	1,350X500	50~90			28~50	37~66	25~55	a+34	2,700X450	1,400X340

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

4. 衝擊破碎機(impact crusher)

衝擊破碎機是應用衝擊力破碎物料的設備(如圖 3.12)。物料進入破碎機後，受到高速迴轉的擊鎚的衝擊，物料即沿著節理面或接界面破裂。被衝擊後的物料獲得巨大的動量，並以高速拋向碎料板，經碎料板的反擊，物料再次被擊碎，從碎料板返回的物料，又遭擊鎚的重新撞擊進一步破碎。當物料在擊鎚和碎料

板之間往返時，除了擊鎚及碎料板的衝擊外，物料間亦發生相互撞擊。上述過程不斷進行，直到破碎後的物料小於擊鎚及碎料板之間的間隙時，才從破碎機下部排出。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.12 衝擊破碎機之構造圖

衝擊破碎機近年來發展極快，主要是因為它具有下述的重要特點：

- (1)縮減比很大，一般破碎機之縮減比最大不超過 10，而衝擊破碎機之縮減比可高至 30~40，最大可達 150，從而簡化破碎流程，節省投資費用。
- (2)破碎效率高，能源消耗低，物料受到擊鎚的高速衝擊之後，沿著節理面或界面破裂。
- (3)產品粒徑均勻，過碎現象少，衝擊破碎機是利用動能($E=mv^2/2$)破碎的，物料所承受之動能與其質量成正比，因此大塊物料受到較大程度之破碎，小塊受到較少程度之破碎，故產品粒徑較均勻。
- (4)可以選擇性粉碎，在衝擊破碎過程中，破裂最易沿不同組成物質間的界面發生，有利於分離。
- (5)適應性大，此種破碎機可以破碎脆性、纖維性和中硬以下之物料，尤以脆性物料之破碎最適合。
- (6)設備體積小，重量輕，結構簡單，製造容易，維修方便。

缺點為：襯板磨耗大。

旋鎚破碎機(hammer mill)亦為衝擊破碎機之一種，特點是排礦口設置篩條，破碎主要靠衝擊，其次靠摩擦。

5. 渦旋多葉撞擊式破碎機

渦旋多葉撞擊式破碎機結構及作用。圖 3.13 為其外觀，圖 3.14 為其內部構造，表 3.14 為其規格表。

(1) 旋轉臂

旋轉臂撞擊固體廢棄物使固體廢棄物在旋轉臂的磨襯板與耐磨棒之間反覆撞擊產生顆粒與顆粒間對撞現象，如同颶風般的破碎效果。

(2) 層板

在每一層間形成破壞層，除非顆粒經反覆撞擊碎解到足以通過層板與旋轉臂中間的設定間隙，否則顆粒不會直通下一破碎層。

(3) 推動塊

維持廢棄物的流動與擾動，與下拉氣流配合動作以控制機體內氣流。

(4) 離心風葉片

產生巨大氣流吸入大量空氣流經機殼內。

(5) 耐磨棒

位在八角形機殼內側，八個對角供作額外撞擊面，並且以楔形鎖定八塊可拆換耐磨襯板。

(6) 耐磨襯板

襯在機體內壁特殊設計耐磨耐撞，可拆換保護機殼外層。

(7) 轉軸總體

一體轉動驅動固體廢棄物在轉軸總體與內側襯板間反覆破碎，降低廢棄物顆粒所占空間。

(8) 剪斷螺栓

旋轉臂受撞擊超出最大預設力量時，剪斷螺栓被剪斷繞旋軸螺栓為中心擺動，避免撞壞主要機件。

(9) 第一、二、三層

在旋轉臂末端產生渦流，使固體廢棄物陷在其中保持碰撞狀態，直到顆

粒度小至可穿越旋轉臂與層板之間可調整間隙。此一過程在各層反覆進行，顆粒愈來愈細穿越板層與各撞擊板間隙。該間隙可調整並且逐層遞減。

(10)第四層

離心風葉位在最下層，產生下降氣流流經機殼內部，並且與旋轉臂產生複雜颶風渦流，使廢棄物在其中粉碎成碎片細條後，推入出料口轉至輸送帶。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.13 渦旋多葉撞擊式破碎機外觀



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.14 渦旋多葉撞擊式破碎機內部構造

表 3.14 渦旋多葉撞擊式破碎機規格表

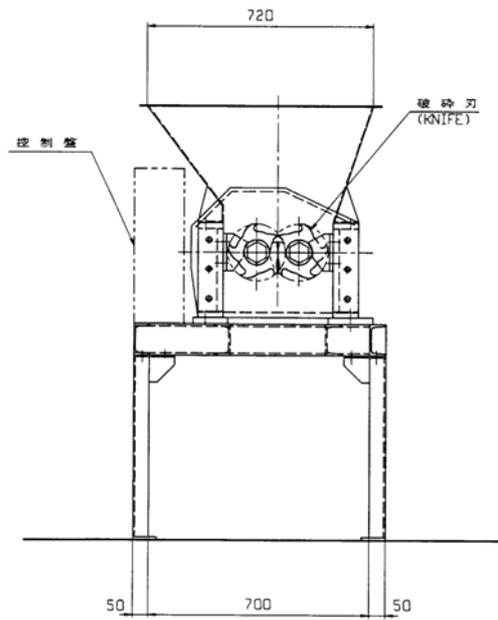
項 目	規 格	備 註
最大處理進料尺寸	大約 5cm ψ 平均粒度	應可處理 10cm~20cm 條狀塑膠、木塊、磚石、玻璃等人工分選不良異物
出料顆粒平均尺寸	大約 5mm ψ	
每小時處理量	最大可達 30t/hr	
使用馬力	500HP	分成 250HP 二台
重量	大約 35,000lb	
中心軸	6" AISI 1045 鋼	
驅動方式	Woods Ultra-V Bonded V Belts	
入口尺寸	72" 寬 X27" 深	
耐磨板	1/4" 耐磨耗鋼材	
空氣流量	最大 16,000cfm	

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

6. 剪斷破碎機

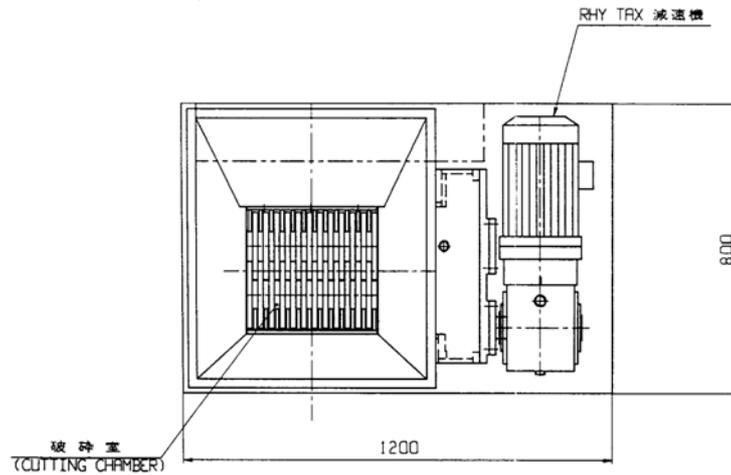
剪斷破碎機屬於較新發展之機種，主要用於軟性與韌性物料之破碎，其結構示於圖 3.15、3.16 及 3.17。此機為二軸剪斷式，其破碎室內有特殊設計的破碎刀刃，與墊圈交互安裝於兩平行轉軸上，二轉軸通過齒輪箱而由一台減速馬達來驅動。此二轉軸是以不同的迴轉數由外向內轉動，將物料投入二軸之間，刀刃即能將之切斷、破碎。如鉤爪般的特殊刀刃，其角度會隨著軸的轉動而變換，故以少許動力就能發揮極大的破碎力，提升效率。此二轉軸的迴轉速極低，故幾乎無噪音、振動、發熱等現象。

此破碎機適宜處理軟性與韌性的材質，不適用於脆性材質，與一般之破碎機不同。塑膠、橡膠、海綿、輪胎等皆可破碎，另外材質組成複雜之廢棄物如電視機、電冰箱、電腦等也可破碎，具有多方面的粉碎功能。



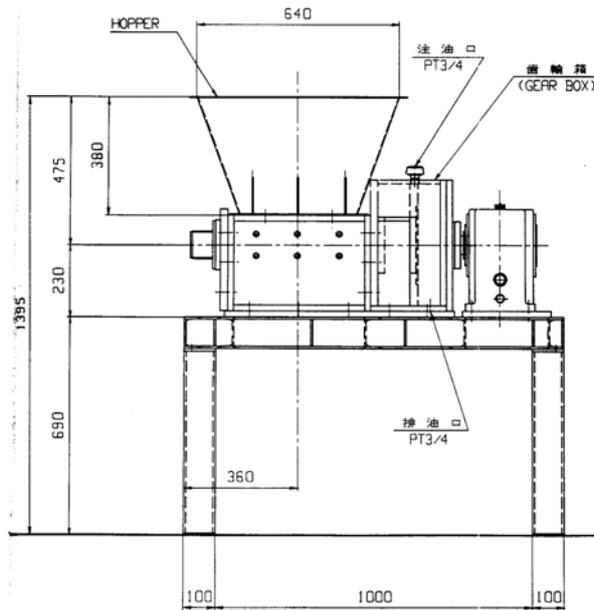
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.15 剪斷破碎機之側視圖



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.16 剪斷破碎機之俯視圖



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.17 剪斷破碎機之正視圖

7. 複合切斷式破碎機與單軸回轉式破碎機

複合切斷式破碎機(如圖 3.18)主要是將大尺寸之可燃物及不可燃物破碎成較小尺寸為目的。其先行之大尺寸之可燃物切斷破碎後，送至焚化爐。再將不可燃物及混合材質之大型廢棄物切斷破碎成較小尺寸，然後送至後處理細破碎。其優點為複合切斷式破碎機其採用油壓慢速切斷，其切斷力有 100T。切斷力非常強，對於大型廢棄物可輕而易舉之處理，同時切斷機之切斷箱尺寸非常大，可以容納大尺寸之廢棄物，由於是慢速切斷，不易產生火花及防止火災之發生。對於後處理之破碎機之刀刃使用壽命可以延長，同時亦增加破碎之效率。而單軸回轉式破碎機(如圖 3.19)之優點是破碎粒徑較小，對於分類效率及純度增加，同時後處理之設備亦可以採用較小尺寸。對於設備之設置費用亦可節省。另外雙軸回轉式破碎機與剪斷破碎機相似。表 3.15 為複合切斷式與單軸回轉式破碎機之性能比較表。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.18 複合切斷式破碎機機械外觀圖



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.19 單軸回轉式破碎機外觀圖

表 3.15 複合切斷式與單軸回轉式破碎機性能比較表

型 式	複合切斷式	單軸回轉式
大型木材較多時：床、廢建材、家俱等...	◎	×
大型金屬較多時：洗衣機、冰箱、腳踏車	○	×
中型物不燃物：容器、電視、雜貨等...	×	◎
垃圾掩埋場、焚化爐、產業廢棄物處理	◎	○併用場合
資源回收系統	◎併用場合	◎併用場合
長尺寸破碎物較多時	◎	×
機台尺寸（相同處理量時）	大	中大
價 格（相同處理量時）	○	△
破碎粒徑	10~40cm W ×1.2-2mL △	φ 15cm 以下 ◎可調整
處理能力（類似尺寸之機械）	○	○
破碎力量	◎	○
消耗電力	◎	△
重 量	重	普通
消耗性零件設備價格(與處理物有關)	高	普通
維修方便性	△	○

備註：上述記號代表適用度為：×不適用、△普通、○好、◎最好。

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

(1)複合切斷式破碎機，其外觀如圖 3.18

推進方式：採用鏈條推進器

處理物最大尺寸：1,000mmW×1,000mmH×3,000mmL

壓縮力：30t

切斷力：100t

推進速度：5m/min(50Hz)

處理量：2T/Hr(依處理物之比重略有不同)

重量：16.9T

動力：22KW

機械尺寸：4,700mmH×2,000mmW×6,000mmL

(2)單軸回轉式破碎機，其外觀如圖 3.19

處理能力：3~5 T/H

投入口尺寸：1,110X1,560mm

動力：150KW

驅動方式：皮帶驅動

重量：31T

8.球磨機(ball mill)與棒磨機(rod mill)

球磨機為最普遍使用之磨機，磨球之形狀，以圓球形者最多，但亦有短柱形、餅形、錐形者。棒磨機之工作原理與球磨機相似，將磨球改用磨棒，棒磨機中鋼棒填充量為磨機容積的 35%~40%，更可高達 45%，所使用之鋼棒長度與磨機內側直徑比例為 1.4~1.6。

(1)構造及原理

球磨機之構造如圖 3.20 所示，磨球大小之選擇，須視材料的性質，物料顆粒之大小，及磨機之直徑與轉速而定。大磨球之衝擊力強，破碎能力大，但磨球數少，亦即衝擊之次數少，總研磨面積亦小，故磨礦效率反而可能不佳。一般而言，物料硬度大，物料粒徑大者，因需較大之破碎力，故常用較大之磨球；此外磨機之直徑及轉速，亦與球之破碎力量有關，磨機直徑大者，打擊力亦大。磨機以其臨界轉速之 75%運轉時，可得最佳之打擊力。

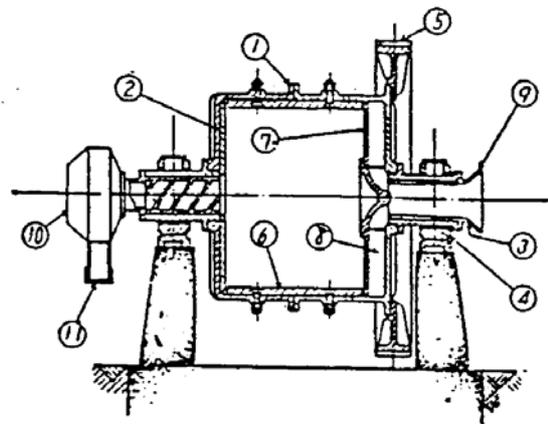
普通球磨機內裝球數量，以占磨機內部容積之 45 至 50%為佳。磨機開始運轉時，應以各種大小不同之球混合裝入，因打擊力靠大球，而小球可增加摩擦面，故混合裝的效率較佳。

磨機開始運轉後，可根據實際情形，每日或每班補充適量之最大磨球，因大球將逐漸磨小，在正常的操作情形下，大小球之數量，可維持最佳之比例；倘有太小或太多破碎的球，即應加以清理，將其剔除。

(2)操作及維修

要使磨機的運轉效率高，研磨效果好，必須嚴格遵守操作和維修規定，在磨機啟動前，應檢查各連接螺栓是否鎖緊，齒輪及給料機的固定狀況。檢查油箱和減速器內的油面是否足夠，潤滑系統及儀表是否正常，油路是否暢通等。

啟動的順序是，先啟動磨機潤滑油泵，當油壓到達 $1.5\sim 2.0\text{kg}/\text{mm}^2$ 時，才啟動磨機，待運轉正常後，才能開始進料。



- (1)機殼
- (2)端板
- (3)耳部
- (4)耳部軸承
- (5)傳動齒輪
- (6)襯板
- (7)篩板
- (8)提升器
- (9)排料口
- (10)給料鼓
- (11)給料匙

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.20 球磨機之構造

停止磨機時，要先停給料機，待磨筒內物料處理完後，再停磨機馬達，最後停油泵。磨機的常見故障原因及其排除方法列於表 3.16 中。

安裝磨機時的工作是磨機能否正常運轉的關鍵。各型磨機的安裝方法和順序大致相同。為確保磨機能平穩地運轉和減少對建築物的危害。必須將它安裝在其重量 2.5~3 倍的鋼筋混凝土機座上。機座應座落在基石的土地上，並與廠房地面最少要有 40~50cm 的距離。

為確保球磨機安全運轉，提高運轉率，延長使用年限，必須做到計劃檢修。檢修可分為三級：

A. 小修

每月進行一次，包括臨時性事故，主要是更換磨損之零件，如球磨機襯板，調整齒輪嚙合狀態，修補漏水處等。

B. 中修

一般每年進行一次，對設備各部件做較徹底的維修及調整，更換大多數易磨損零件。

C. 大修

除完成小修、中修外，著重維修及更換主要零件，如軸承、大齒輪等。大修的時間間隔由主要零件的磨損程度決定。一般襯板壽命大約 6~8 月，軸承 1 年半至 2 年，小齒輪 1 年，大齒輪 3-4 年。

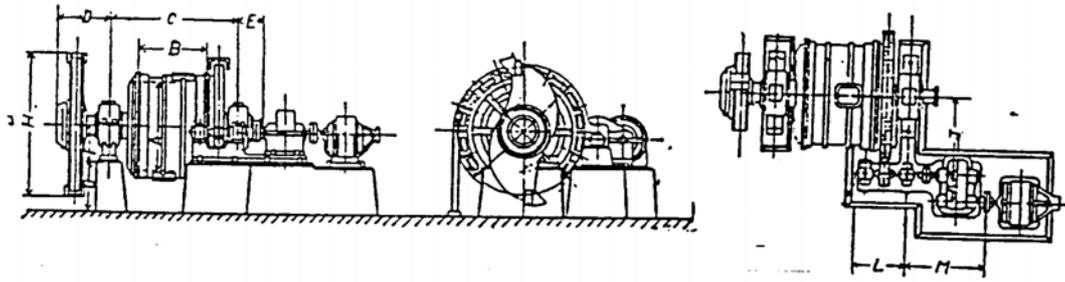
表 3.16 磨機的故障、原因及排除方法

項次	故障內容	原因	消除方法
1.	主軸承熔化，軸承冒煙或電機超負荷斷電	1.供給軸承的潤滑由中斷 2.砂土落入軸承中	更換或清洗軸承並更換潤滑油
2.	油壓過高或過低	1.油管堵塞，油量不足 2.油黏度不合，過濾機堵塞	清除油壓增加或降低的原因
3.	馬達電源不穩定或過高	1.給料機鬆動 2.中空軸潤滑不良 3.排料濃度過高 4.磨筒周圍襯板重量不平衡，或磨損不均勻 5.齒輪過度磨損 6.電機電路上有故障	鎖緊給料機，改善潤滑狀況，更換襯板，調整操作，更換或修理齒輪，排除電路故障
4.	軸承發熱	1.給料過多或不足，油質不合格 2.軸承安裝不正，或有雜物 3.油路不通，潤滑油環不工作	停止給料，查明原因，更換污油，清洗軸承，檢查潤滑油環
5.	球磨機震動	1.齒輪契合不好，或磨損過甚 2.螺絲鬆動 3.傳動軸承磨損	調整齒輪間隙，鎖緊螺絲，修整或更換軸承
6.	突然發生強烈震動和撞擊聲	1.齒輪咬合間隙混入鐵雜質 2.小齒輪軸鬆動 3.齒輪損壞 4.軸承或固定機座之螺絲鬆動	清除雜物，鎖緊螺絲，修整或更換軸承
7.	端蓋和桶體連結處，襯板螺絲處漿料露出	1.連接螺絲鬆動 2.襯板螺絲鬆動，密封墊圈磨損，螺栓斷裂	鎖緊或更換螺絲，加密封墊圈

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

(3)規格

球磨機之尺寸如圖 3.21 所示，規格如表 3.17 所示，球磨機之磨礦能力如表 3.18 所示。而圖 3.22 為管狀球磨機之構造圖及各部名稱，表 3.19 為管狀球磨機之規格尺寸，圖 3.23 為管狀球磨機之尺寸圖，表 3.20 為管狀球磨機之磨礦能力及馬力表。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.21 球磨機之尺寸圖

表 3.17 球磨機之規格

尺寸:mm

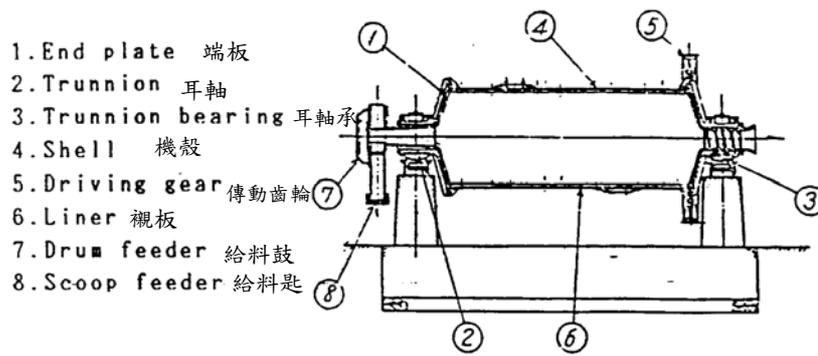
機號	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
43	1,200	1,000	1,850	650	300	530	570	1,800	890	260	750	1,300
54	1,500	1,200	2,100	700	300	580	720	2,100	1,140	360	850	1,400
64	1,800	1,400	2,350	900	400	625	975	2,700	1,410	410	960	1,650
75	2,100	1,500	2,850	1,100	450	650	1,150	3,000	1,590	460	1,080	1,850
86	2,400	1,800	3,350	1,350	600	720	1,380	3,500	1,810	530	1,200	2,000

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

表 3.18 球磨機之磨礦能力與馬力

機號	直徑 X 長度 mm	磨礦能力(t/h)			迴轉數 rpm	磨球裝 入量 t	所需動 力 KW	馬達		
		產品粒徑 mm						KW	迴轉數 rpm	
		25~0.3	10~0.15	5~0.075					1,000	900
43	1,200X1,000	2.1	1.8	1.7	31	1.7	18	25		
54	1,500X1,200	4.2	3.8	3	29	3.3	35	40	1,000	900
64	1,800X1,400	7	5.5	5	26	5.5	60	75	750	720
75	2,100X1,500	11	8.5	7	23	8	90	100	750	720
86	2,400X1,800	17	13	11	21	13	130	175	600	600

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

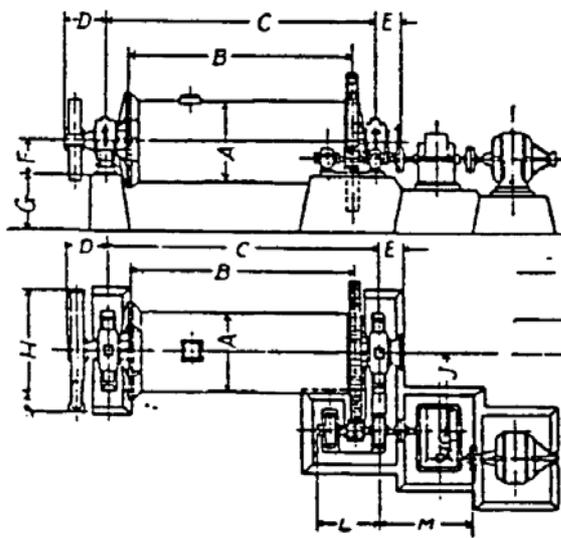
圖 3.22 管狀球磨機之構造圖與各部名稱

表 3.19 管狀球磨機之規格

尺寸：mm

尺寸	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
406	1,200	1,800	2,700	700	400	550	850	2,000	1,100	450	950	1,300
408	1,200	2,400	3,300	700	400	550	850	2,000	1,100	450	950	1,300
410	1,200	3,000	3,900	700	400	550	850	2,000	1,100	450	950	1,300
508	1,500	2,400	3,450	750	500	600	1,000	2,200	1,350	550	1,200	1,560
510	1,500	3,000	4,050	750	500	600	1,000	2,200	1,350	550	1,200	1,560
512	1,500	3,600	4,650	750	500	600	1,000	2,200	1,350	550	1,200	1,560
610	1,800	3,000	4,200	850	550	700	1,150	2,700	1,650	600	1,400	2,100
612	1,500	3,600	4,800	850	550	700	1,150	2,700	1,650	600	1,400	2,100
614	1,800	4,200	5,400	850	550	700	1,150	2,700	1,650	600	1,400	2,100
712	2,100	3,600	4,850	950	600	800	1,300	3,000	1,900	650	1,500	2,250
714	2,100	4,200	5,450	950	600	800	1,300	3,000	1,900	650	1,500	2,250
716	2,100	4,300	6,050	950	600	800	1,300	3,000	1,900	650	1,500	2,250

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.23 管狀球磨機之尺寸圖

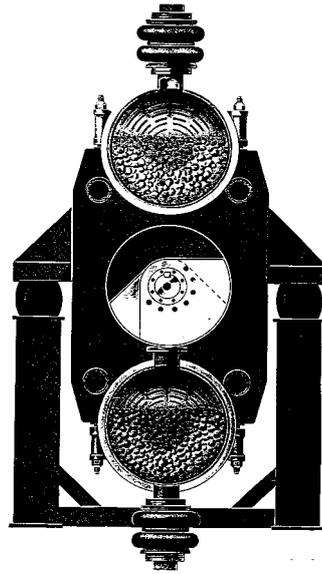
表 3.20 管狀球磨機之磨礦能力與馬力

機號	直徑 X 長度 mm	磨礦能力(t/h)		迴轉數 rpm	磨球裝 入量 t	所需動力 KW	馬達		
		產品粒徑 mm					KW	迴轉數 rpm	迴轉數 rpm
		0.6~ 0.075	0.3~ 0.075						
406	1,200X1,800	1.6	1.8	32	3	27	30	1,000	900
408	1,200X2,400	2.1	2.4	32	4	35	40	1,000	900
410	1,200X3,000	2.7	3.0	32	5	44	50	1,000	900
508	1,500X2,400	3.5	3.9	27	6.5	55	60	750	720
510	1,500X3,000	4.3	4.9	27	8	69	75	750	720
512	1,500X3,600	5.2	5.8	27	10	81	100	750	720
610	1,800X3,000	6.4	7.2	23	12	100	125	600	600
612	1,800X3,600	7.7	8.7	23	14	120	125	600	600
614	1,800X4,200	9	10	23	17	140	150	600	600
712	2,100X3,600	10	12	20	20	160	200	600	600
714	2,100X4,200	12	14	20	23	190	200	600	600
716	2,100X4,800	14	16	20	26	220	250	600	600

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

9.振動磨機(vibration mill)

振動磨機如圖 3.24 所示，由兩管狀磨筒組成，直徑從 200mm 至 650mm 不等，內裝磨球。振動磨機之磨球在磨筒內之運動方式與球磨機不同，它們的運動方向是與磨筒的轉動方向相反，例如磨筒做順時針方向轉動，則磨球做逆時針方向運動。除了這種運動外，尚有自轉運動。送入磨機之物料在高頻衝擊和研磨作用下，被磨細而排出。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999 年 6 月

圖 3.24 振動磨機之構造圖

振動磨機的振動頻率通常在 1,500~3,000 rpm 之間，振幅為 2~4cm，裝球率通常達 75~85%，這三者必須相互配合，才能獲得最佳的衝擊力及良好的研磨效果，否則產品粒徑將變粗，產率也會降低。

振動磨機的磨球是在非常高的頻率下發揮衝擊作用，此高速衝擊力能使物料產生裂縫，並在裂縫中產生高的應力集中，故它能有效地進行超細研磨。進料不宜過粗，而且要均勻加入，通常適用於將 1~2cm 的物料磨至 5~85 μm (乾磨)或 0.1~5 μm (濕磨)。

振動磨機的優點有：

- (1)構造簡單，設備便宜，節省空間。
- (2)轉動範圍不大，磨耗零件少，節省能源。
- (3)噪音小。

振動磨機的缺點有：

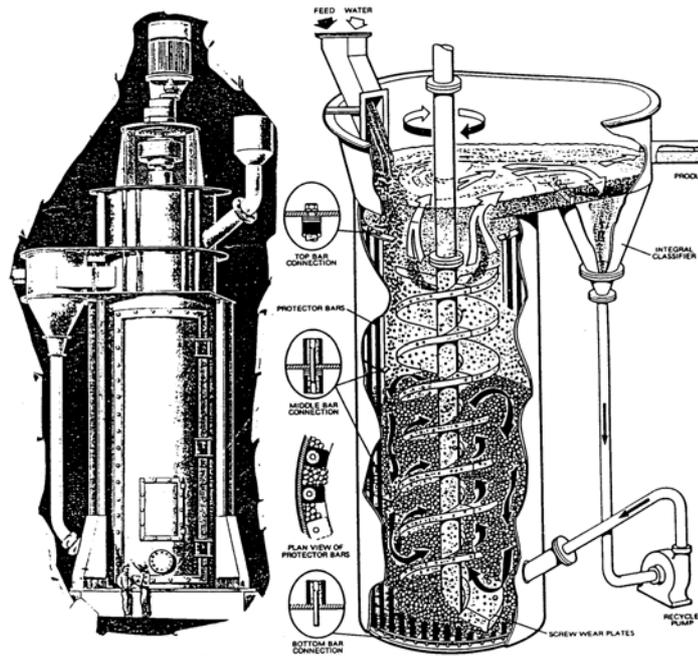
- (1)大顆粒的研磨非常慢，餵料大小，直接影響產品大小。
- (2)機型尺寸有一定限制，不能無限制放大。

10.攪拌磨機(agitation bead mill)與塔磨機(tower mill)

塔磨機屬一種大型的攪拌磨機如圖 3.25 所示，可用於乾磨與濕磨。塔磨機是由日本塔磨機公司設計發展，是一個研磨微細粉末的有效磨機，比傳統的轉磨機節省相當多能源。在細磨時，轉磨機由於球/料比相當大而顯得沒有效率，塔磨機則無此缺點。另外塔磨機運轉時亦沒有噪音及發熱。在日本，塔磨機用於磨石英粉、岩鹽、煤、大理石、石灰石。最有代表性的產品是 99%通過 37 μm ，平均粒徑為 5 μm 的石灰石粉。塔磨機特別適用於研磨 74 μm 以下之產品。在 74 μm 以上，塔磨機與轉磨機的功效沒有特別的區分。

塔磨機之磨筒高度可由 1 米到 10 米，甚至有高達 20 米者。磨球可用鋼球或卵石、瓷球等。內部有一攪拌軸提供攪拌動力。粉碎作用出現在磨球之間的相互運動及帶動粗粒物料下沉的功能。由於欠缺磨球自高處落下的打擊力，故餵料不能超過 5mm，餵料由機器底部的壓力泵餵入，磨機內物料粒徑則為愈細者愈往上流動，產品由上端經過分級後排出。磨球大小由餵料大小來決定，最大不超過 32mm，球可小到 6.4mm，產品 50%通過 2 μm 者可以用連續式操作進行研磨。塔磨機之特點有：

- (1)節省動力，以某一石灰石的粉碎為例，用轉磨機要 3,500 馬力，用塔磨機只要 1,800 馬力。
- (2)較低之設置費用；基礎只要有 30cm 厚水泥地板即可以，比轉磨機的厚重基礎要省事得多。
- (3)節省能源運轉：在阿拉斯加某鋅礦有九座 500 馬力塔磨機，運轉比轉磨機省 50%能源。
- (4)較省地板空間；450 馬力的塔形磨機只要 10'×10' 地板，轉磨機至少要 15'×15' 地板。
- (5)較少過磨。
- (6)低噪音：轉磨機一般噪音 100db，塔磨機 85db。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

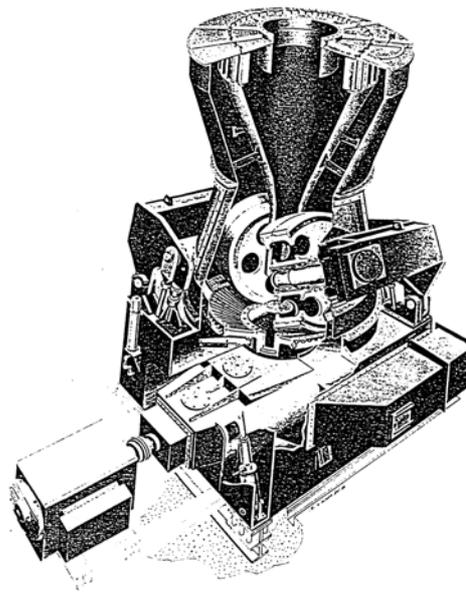
圖 3.25 塔磨機之外觀與構造

11. 豎磨機(loesche mill)

豎磨機適於乾磨較軟之物料(如圖 3.26)，其特點有：

- (1) 粉碎效率高，動力消耗量少，磨損部分少，因此維修保養費用低，特別是啟動和無負荷運轉時動力消耗極少，運轉時無噪音。
- (2) 機體為直立式，占地面積少，基座建設費用也低。
- (3) 主要磨損部分(粉碎盤及粉碎輪的襯板)易於更換，少數操作人員在短時間內即可完成更換工作。
- (4) 容易調整產品之粒徑。

進料從機殼上部的溜槽中定量給入，落在粉碎盤中心附近，並藉離心力甩出，夾在盤和輪之間。熱風用於乾燥和排出磨細之產品，由風機產生，自豎磨機的下部，上吹進入粉碎盤周圍的外環，再進入磨機內部。由粉碎盤外圍溢流出的部分產品，被由刮板附近吹出的熱風帶回到粉碎盤上，其餘則被上升氣流帶至上方，至磨機機殼之上部，因斷面面積加大，風的流速減少，粗粒乃回落機內，繼續研磨；而細粒因為所受之離心力小，和排氣一同排出。由於轉輪是以變速馬達帶動，轉速易於改變，因此可以不受風量變化的影響，任意調整粉碎產品的粒徑。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備-破碎，1999年6月

圖 3.26 豎磨機之外觀圖

3.3 分選技術與設備

分選技術是廢棄物減容與資源物質回收再利用或再生作業之重要步驟，藉由分選技術使欲回收資源物質達到某一程度的富集，或是將欲排除之廢棄物質分選丟棄。以下就應用較廣之篩分、分級、揀選、重力分選、磁選、靜電分選、泡沫浮選及其他分選技術及設備，說明如下：

3.3.1 篩分技術與設備

在使用篩子時，既要求它的處理能力大，又要求盡可能將小於篩孔的細粒物料過篩到篩下產物中去。因此，篩子有兩個重要的工作指標：一個是它的處理能力，即篩孔大小一定的篩子每平方公尺篩面面積每小時所處理的物料噸數($t/m^2 \cdot hr$)，它是表明篩分工作的數量指標。另一個是篩分效率，它是表明篩分工作的質量指標。

在篩分過程中，按理說比篩孔尺寸小的細級別應該全部穿過篩孔，但實際上並不是如此，它要根據篩分機械的性能和操作情況以及物料含水量、含泥量等而定。因此，總有一部分細級別不能穿過篩孔成為篩下產物，而是隨篩上產品一起排出。篩上產品中，未透過篩孔的細級別數量愈多，說明篩分的效果愈差，為了從數量上評定篩分的完全程度，要用篩分效率這個指標。

所謂篩分效率，是指實際得到的篩下產物重量與入篩物料中所含粒度小於篩孔尺寸的物料的重量之比。篩分效率用百分數或小數表示。

$$E = \frac{C}{Q \cdot \frac{\alpha}{100}} \times 100\% = \frac{C}{Q\alpha} \times 10^4\% \dots\dots\dots(3-1)$$

式中 E：篩分效率，%；

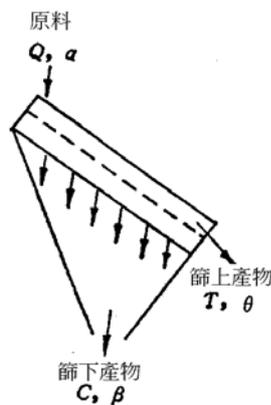
C：篩下產品重量；

Q：入篩原物料重量；

α ：入篩原物料中小於篩孔的級別的含量，%。

但實際生產中要測定 C 和 Q 是比較困難的，因此必須改用下面推導出的結果來進行計算。

按圖 3.27 所示，假定篩下產品中沒有大於篩孔尺寸的顆粒，就可以組成兩個方程式：



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.27 篩分效率的測定

1. 原料重量應等於篩上和篩下產物重量之和，即 $Q=C+T$
2. 原料中小於篩孔尺寸的粒級的重量，等於篩上產物與篩下產物中所含有的小於篩孔尺寸的物料的重量之和。

$$Q\alpha = 100C + T\theta \dots\dots\dots(3-2)$$

式中 T 為篩上產物重量； θ 為篩上產物所含小於篩孔尺寸粒級的含量(%)。

其他符號的意義同前。最後可得

$$E = \frac{C}{Q^\alpha} \times 10^4 = \frac{\alpha - \theta}{\alpha(100 - \theta)} \times 10^4 \% \dots\dots\dots(3-3)$$

必須指出，上式是指篩下產物中不含有大於篩孔尺寸的顆粒的條件下列出的物料平衡方程式；由於實際生產中，篩網常常被磨損，部分大於篩孔尺寸的顆粒總會或多或少的穿過篩孔進入篩下產物，如果考慮這種情況，篩分效率應按下式計算。

$$E = \frac{\beta(\alpha - \theta)}{\alpha(\beta - \theta)} \bullet 100 \% \dots\dots\dots(3-4)$$

式中 β ：篩下產物中所含小於篩孔級別的含量，%。

篩分效率的測定方法如下：在入篩的物料流中和篩上物料流中每隔 15~20 分鐘取一次樣，應連續取樣 2~4 小時，將取得的平均試樣在檢查篩裡篩分，檢查篩的篩孔與生產上用的篩子的篩孔相同。分別求出原料和篩上產品中小於篩孔尺寸的級別的百分含量 α 和 θ ，代入公式中可求出篩分效率 E 。如果沒有與所測定的篩子的篩孔尺寸相等的檢查篩子時，可以用套篩作篩分分析，將其結果繪成篩析曲線，然後由篩析曲線圖中求出該級別的百分含量 α 和 θ 。

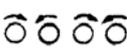
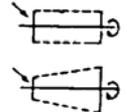
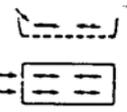
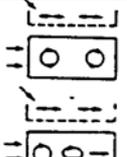
有時用全部小於篩孔物料來計算篩分效率，這樣算得的結果叫總篩分效率。有時只對其中的幾個粒級作計算，算得的結果叫部分篩分效率。全部小於篩孔的物料，包含易篩粒和難篩粒，所以總篩分效率就是這兩類粒子的篩分效率組成的。倘若部分篩分效率是用易篩粒求得的，它必然比總篩分效率大；如果是用難篩粒算出的，它比比總篩分效率小。

工業用篩的種類眾多，各種篩之比較如表 3.21。較常見之工業篩介紹如下：

1. 固定篩

固定篩是由平行排列的鋼條或鋼棒所組成，鋼條和鋼棒稱為篩條，篩條藉橫桿連接。固定篩分為斜篩及格篩，前者為斜置，傾角約 $25^\circ \sim 50^\circ$ ，後者為水平置放。格篩安裝於粗的入口，以除去大塊物料。斜篩則在粗料進入粗碎機前，用於先行除去細料，安裝時傾角的大小應能使物料沿著篩面自動下滑，亦即傾角應大於物料與篩面的摩擦角。視物料的大小及是否含土質成分，傾角可作適當調整。篩條的長度通常為寬度的 2~2.5 倍。固定篩的優點是構造簡單，無運動部份，也不需要動力，但缺點是易於堵塞，所需高度落差大，篩分效率低，篩分效率僅為 50%~60%。

表 3.21 篩分設備的分類

類型	篩面運動方式說明圖	振幅	振動數	適用粒度	傾斜角	篩分量 T/m ² /H(mm)	常用規格
固定條篩				25~200mm	20° ~50°	25mm~75mm 27~40	寬 0.9~1.2m 長 2.4~3.0m
固定曲面篩				100mm 以下	弧形曲率半徑 R=500~600mm	170	1m ²
滾軸篩				500mm~15mm	10° ~15° 平均 12°	50mm~100mm 50~80	寬 1.0~1.5m 長 2.4~3.0m
圓滾篩			臨界轉速的 1/3~1/2，或 15~20rpm	6~60mm 濕式可至 1mm	3° ~15° 平均 5°	乾式 0.2~0.5 濕式 0.5~1.0	直徑 0.9~1.2m 長 1.5~2.5m 馬力 2.5~5HP
搖動篩		10~100	300~600	10mm 以下	10° ~20°	1~4	直徑 0.3~1.5m 長 1.5~6.0m 馬力 0.5~1.0 HP/m ² 篩面
旋轉震動篩		50	150~600	12mm~60Mesh 有可能篩分至 300Mesh	5°	0.2mm 約 10 0.1mm 約 328 篩分效率 60%~80%	
電磁式 垂直震動篩		0.3~0.8	900~700	8~100Mesh	30° ~40°	2~8	
機械式 垂直震動篩		2~12	1000~1800	25mm~150Mesh	乾式 20° 濕式 5~10°	4~5	

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

2. 震動篩

震動篩的應用範圍廣，適用於中、細碎前的進料預先篩分及產物的分粒，具有以下的優點：

- (1) 篩面以低振幅、高振動頻率作強烈震動，消除了物料的堵塞現象，使篩的篩分效率及產能均提高。
- (2) 動力消耗小，構造簡單，操作、維護檢修方便。

(3)由於產率及效率很高，所需的篩網面積小，可以節省廠房面積和高度。

震動篩為資源處理廠普遍採用的分粒設備，根據篩面的運動軌跡，可以分為圓周運動震動篩和直線運動震動篩兩類。圓周運動震動篩包括單軸慣性震動篩、自調中心震動篩和重型震動篩。直線運動震動篩包括雙軸慣性震動篩（直線震動篩）和共振篩。

(1)慣性震動篩

慣性震動篩是由震動器的偏心軸迴轉運動產生的離心慣性力（稱為激振力）傳給篩架，激起篩面的震動，並維持震動之振幅。篩上物料，受篩面向上運動的作用力而被拋起，前進一段距離後，再落回篩面。一般震動篩的迴轉速均選擇遠離共振頻率，即工作轉數比共振轉數大數倍。因此振幅比較平穩，彈簧的剛度可以較小。如此可減少彈簧數量，使機器輕便，而且由於彈簧剛度小，傳給基礎的負荷小，機器的隔振效果好。但是此種震動篩在起動和停止時，篩的轉速都會經過共振範圍，引起系統的瞬間共振，此時，篩架的振幅很大，為克服此瞬間之共振，可安裝能自動移動偏心配重位置的激振器。

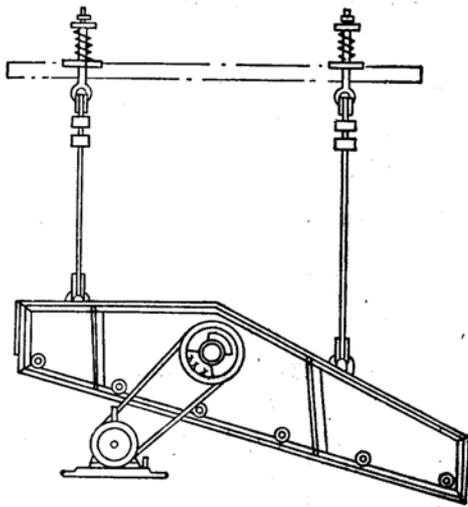
由於震動篩選用的彈簧剛度小，振幅也不大。因此篩架運動過程中，彈簧變形小，作用於篩架上的彈性力也很小，可以忽略不計。如果振動中心是選在彈簧--篩體的靜平衡位置，則可以認為彈簧的作用只是用來抵消篩重的影響，在運動過程中可以不考慮彈簧的作用。這時就好像篩懸空一樣。若保持兩個迴轉質量平衡，它將不受外力的作用進行自由振盪。

慣性震動篩的振動器安裝在篩架上，軸承中心線與皮帶輪中心線一致，隨著篩架的上下振動，從而引起皮帶輪振動，這種振動會傳給馬達，影響馬達的壽命，因此此種篩的振幅不宜太大。此外，由於慣性震動篩振動次數高，啟動中必須十分注意它的操作情形，特別是軸承的狀況。慣性震動篩由於振幅小而振動次數高，適用於篩分中、細粒物料，且給料速度必須均一。因為當負荷加大時，篩的振幅減小，容易發生篩孔堵塞現象；反之，當負荷過小時，篩的振幅加大，物料顆粒會快速的跳躍越過篩面，這兩種情況都會導致篩分效率減低。由於篩分粗粒物料需要較大的振幅，才能把物料帶動，且篩分粗粒物料時，很難做到均勻給料，故慣性振動篩只適宜於篩分中、細粒物料，它的給料粒度一般不能超過 100mm。

(2)自調中心震動篩

圖 3.28 為自調中心震動篩的外觀圖。主要由篩架、振動器、彈簧等部分組成。篩架用鋼板和鋼管銲接而成，篩網用角鋼壓板壓緊在篩架上。在振動器的主軸上；除中間部分製成偏心外，在軸的兩端並裝有可調節配重的皮帶輪和飛輪。馬達以三角皮帶帶動震動器、震動器的偏心效應與慣性震動篩的情形相似，使整個篩產生震動。彈簧是支持篩架用的，同時也減輕了篩在操作時傳給基礎的負荷。自調中心震動篩與慣性震動篩的主要區別為，慣性震動篩的傳動軸與皮帶輪是同心安裝的，而自調中心震動篩的皮帶輪與傳動軸不同心。慣性震動篩在操作中，當皮帶輪和傳動軸的中心線作圓周運動時，篩隨之以振幅為半徑作圓周運動，但裝於馬達上的小皮帶輪中心的位置是不變的，因此大小兩皮帶輪中心距將隨時改變，引起皮帶時鬆時緊，皮帶易於疲勞斷裂，而且這種振動作用也影響馬達的壽命。為了克服這一缺點，發展出自調中心震動篩。

自調中心震動篩在皮帶輪上所開的軸孔的中心與皮帶輪幾何中心不同心。所以不管篩架和轉軸在運動中處於任何位置，皮帶輪之中心總是保持與震動中心線相重合，因而空間位置不變，此即皮帶輪自定中心。大小兩皮帶輪的中心距保持不變，消除皮帶時緊時鬆現象。此外，還有一種軸承偏心式自調中心震動篩。由於軸承與軸的中心線偏離距離約等於振幅，在振動中軸的中心雖有上或下的位移，但皮帶輪相接處的位置卻是不變的。自調中心震動篩實體上與慣性震動篩相同，其區別僅是震動中心線不發生位移，兩者的性能及用途基本上一樣。自調中心震動篩的優點是在馬達的穩定方面有很大的改善，所以篩子的振幅可以比慣性振動篩的稍大一些。篩分效率較高，一般可以達到 80% 以上。但是，在操作中，也和慣性震動篩一樣，表現極為明顯的是篩的振幅變化不定。當篩負荷過大時，它的振幅很小，不能把篩網上的物料全部抖動起來，因而篩分效率顯著下降。當篩子負荷很小時，它的振幅就特別增大，物料抖動得太厲害，很快就跳離篩面，篩分時間短，篩分效率也就降低。因此，使用此種篩時，給料量也不宜波動太大。由於這一缺點，這種結構形式的自調中心震動篩，只適宜於均勻結構的中、細粒物料的篩分。



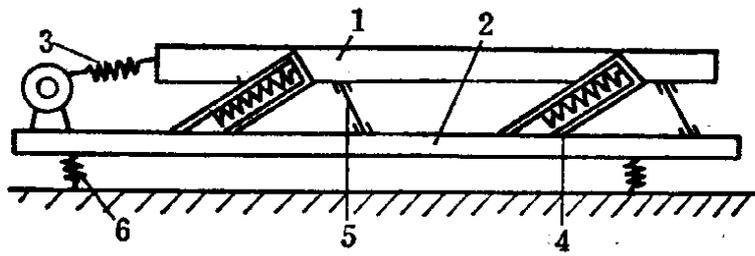
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.28 自調中心震動篩

3. 共振篩

共振篩（也叫彈性連桿式震動篩）是以彈簧的曲柄連桿機構驅動，使篩在接近共振狀態下工作，達到篩分的目的。圖 3.29 是共振篩的原理示意圖，此篩主要由篩架 1、支架 2（即平衡支架）、傳動裝置 3、共振彈簧 4、片狀彈簧 5、避震彈簧 6 等部件組成。當馬達通以皮帶與裝於支架上的偏心軸，偏心軸轉動使連桿作往復運動。連桿通過其端部的彈簧將往復運動傳給篩架，同時支架也受到相反方向的作用，使篩架和支架沿著共振彈簧的方向振動，但它們運動方向相反。篩架和彈簧裝置形成彈性系統，這彈性系統有其振動頻率，傳動裝置也有一強制頻率，當這兩個頻率接近相等時，篩即可在接近共振狀態下工作。

當共振篩的篩架壓縮彈簧時；其運動速度和動能都逐漸減少，被壓縮的彈簧所儲的位能則逐漸增加。當篩架的運動速度和動能等於零時，彈簧被壓縮到極限，它所儲的位能達到最大值，接著篩架向相反的方向運動，彈簧放出所儲的位能，轉化成篩架的動能，篩架的運動速度增加。當篩架的運動速度和動能達到最大值時，彈簧伸長到極限，所儲的位能也就最小。因此共振篩的操作是系統的位能和動能相互轉化的過程。所以在每一次震動中，只需供給克服阻尼所需的能量就可以使篩連續運轉，因此篩雖大但功率消耗卻很小。共振篩是一種在接近共振狀態下操作的工業用篩，具有處理能力大，篩分效率高，振幅大，耗電小以及結構堅固等優點。共振篩目前尚存在一些缺點，如製造比較困難、重量大，振幅不易穩定，調整比較複雜，橡膠彈簧容易老化，使用壽命短。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

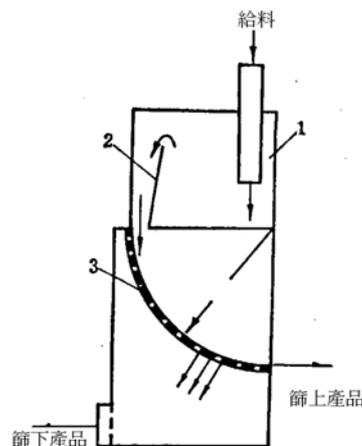
圖 3.29 共振篩的結構示意圖

4. 曲面篩

曲面篩是新型的固定篩設備，結構簡單，沒有運動部件，篩面為弧形，由等距離、相互平行的固定篩條組成，篩條的排列方向不與物料運動方向垂直。篩條為梯形斷面，用不銹鋼製成。亦有以尼龍材料製造者，耐磨性能良好。曲面篩的給料方式有兩種，一種為重力給料，另一種為壓力給料。重力給料的曲面篩如圖 3.30 所示，需篩分的物料置於儲料箱 1，儲料箱內有一塊傾斜的溢流板 2，形成一個上寬下窄逐漸收縮的隔槽，漿料由隔槽的出口藉重力均勻地沿切線方向均勻分布在篩面 3 上下流，然後被分為篩上和篩下產品。

壓力給料則是將漿料泵送入給料箱，給料箱的出口處裝有噴嘴，物料經過噴嘴以切線方向給入。噴嘴應使物料成扁平狀噴入篩面上，形成一均勻的薄層流。曲面篩的工作原理如圖 3.30 所示，物料以一定的速度呈切線方向噴入篩面上，垂直地流過篩條，由於離心力的作用，使得物料層緊貼著篩面運動。當物料層流經一個篩條的間隙時，由於篩條的邊稜對物料層產生切割作用，被切的這一部分物料，在離心力作用下，經過篩縫排出，即為篩下產品；未被切割的那一部分，下流成為篩上產品。曲面篩的篩孔尺寸與分離粒徑的關係，大致是分離粒徑等於篩條間隙寬的一半。由於曲面篩的篩下產品，主要是藉篩條邊稜對漿料的切割所得，因此，篩條邊稜的鋒利程度對篩下量有直接關係，隨著邊稜的磨損，篩下量及分離粒徑均顯著變小，因此經過一定時間磨損以後，須將篩面反轉使用。弧形篩的規格是以篩面的曲率半徑(R)、篩面寬度(B)和弧度(a)表示，即 $R \times B \times a$ ，例如 $R500 \times 700 \times 180^\circ$ 。自流弧形篩的弧度有 45° 、 60° 和 90° 等，其中最常用的是 60° 和 45° 弧形篩。壓力弧形篩的弧度有 180° 和 270° 等，其中 270° 篩主要用於水泥工業。曲面篩與振動篩相比較具有如下特點：結構簡單，沒有任何運動部件，製造容易，生產能力高；但是，曲面篩的效率是較低，重力給料時，效率不超過 40%，壓力給料時效率稍高一些，但仍不如震動篩；

壓力給料時，砂泵所需的功率大約比震動篩的功率大 7 倍；給料的變化範圍不能過大，而且給料的濃度不能低於 30%。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

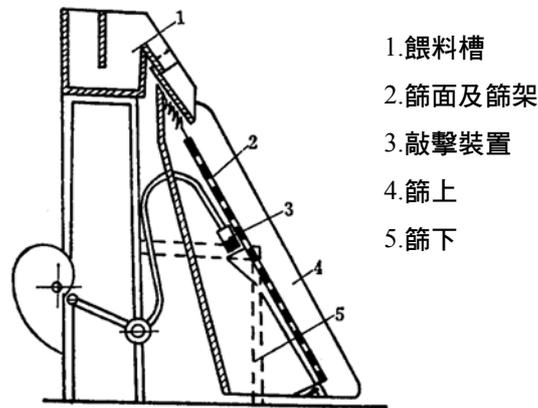
圖 3.30 重力曲面篩原理示意圖

5. 機率篩

此種篩(如圖 3.31 所示)雖然也是一種震動篩，但它的篩分作用與以往的震動篩完全不同，它是利用大篩孔、多層篩面、大傾斜角的原理進行篩分。在相同的篩分粒徑與精度要求下，可篩到 25 目到 400 目，用於細粒者使用篩網可篩分 50 目以下之物料。機率篩是一種具有擊振裝置的細粒篩分設備。擊振裝置分為兩類：一類是利用機械或氣動活塞結構的敲擊裝置；另一類是利用裝在篩架上的偏心馬達產生的振動。這兩類擊振裝置都是通過瞬間的撞擊，使篩面引起振動，藉此來消除篩孔的堵塞。

採用機械敲擊裝置的機率篩結構簡單，它可以在一支軸上裝設數個打擊鏈，同時敲擊一排並列的篩。機率篩的結構如圖 3.31 所示，上部是一個給料機(1)，下部是由鋼板銲接成的篩框，內裝有篩架和篩面(2)，篩架的背面有一敲擊裝置。給料機是由一個緩衝箱及勻料器構成。緩衝箱採用閥門控制，以保持箱內恆壓及調整給料量大小。漿料流到勻料器，即可均勻地流經篩面，並分成篩上和篩下兩種產品。篩面是一條篩，由固定篩條編成。篩條的排列與物料方向垂直。篩面安裝在篩架上，篩架用彈簧懸掛在篩框上，並由篩框與水平撐架將篩支成一可以調節的斜度。在篩架的背面有一敲擊板，敲擊裝置的打擊鏈周期性地在敲擊板上，使篩面產生瞬間振動，以防篩孔堵塞，敲擊機構由馬達及凸輪機構控制，一台馬達串聯可帶動 15 台敲擊器，敲擊次數及幅度可以調節。機率篩的篩面可以用不銹鋼材料或尼龍材料製成。尼龍機率篩篩條的斷面為等

腰梯形，夾角 14° ，有效篩孔面積約占全部篩面積的 10%。尼龍機率篩的優點是篩孔不易堵塞，篩分效率高，耐磨、價廉、尺寸穩定、來源廣泛，製造簡便等。機率篩的工作原理與一般篩分機械不同，而與重力曲面篩的工作原理相似，可以說機率篩是曲面篩的衍生型。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.31 機率篩結構示意圖

3.3.2 分級技術與設備

分級機是利用在水中沈降顆粒的大小，具有不同沈降速度之原理，將大小顆粒分開之分粒機械。分級機所處理之物料，若有比重不同之顆粒在一起時，此機械不但將顆粒依大小分粒，同時也會出現比重之影響。

1. 水力分級機(hydraulic classifier)：將有壓力之水由外部導入機內，使機內產生上昇水流，較上昇水流流速大之沈降顆粒下沈，小者隨水流溢出機外而得到分粒之分級機。如圖 3.32 所示，由料漿導入板(feeding sole)、沈降部份(pocket)、分級部份(sorting column)與壓力水導入箱(pressure box)所構成。給入的料漿經一道不同之上昇水流分級，分出一系列粗細不同之粒度。

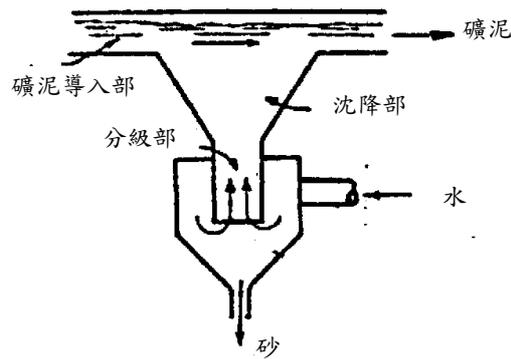
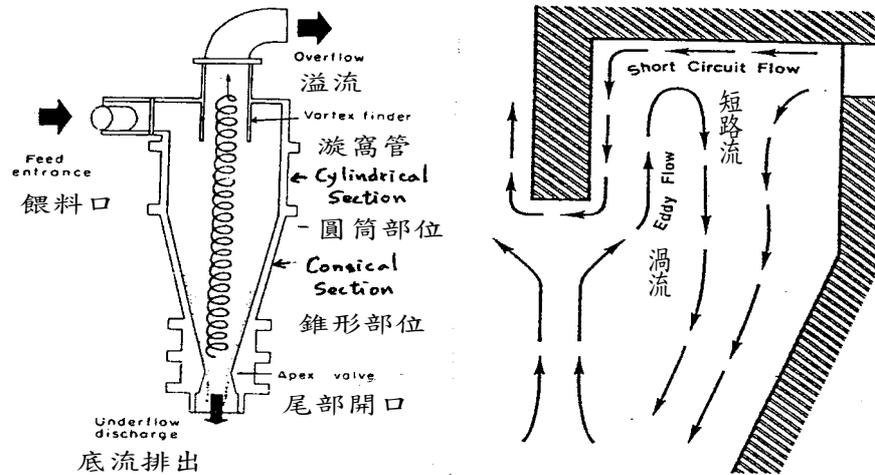


圖 3.32 水力分級機

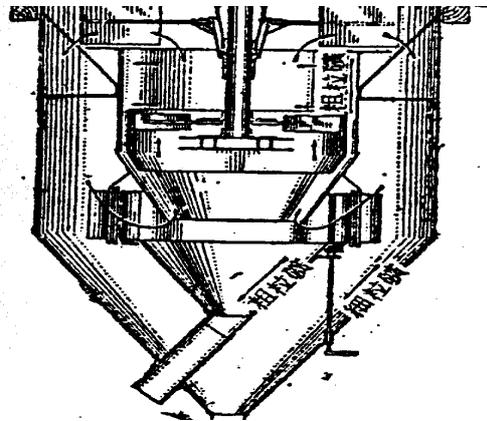
2. 平流分級機(horizontal current classifiers)、沈澱分離機(slime separator)：包括濃縮機(thickener)、沈澱池(settling pond)等，固—液分離或泥與砂分離為目的。將要分離之料漿導入機內不另外加水，使機內之水流保持比較穩靜，讓易沈者下降、不易沈的隨水流溢流而出之分離機。
3. 機械分級機(mechanical classifier)：沈澱部份由機械不斷搬出，細粒(或比重小者)隨水流溢出。螺旋分級機：利用螺旋帶之旋轉將沈積之砂運出、耙式分級機：在耙式沈澱池上加裝一大而淺之盤槽，可加強分級效果、無極帶分級機：利用裝有刮板之無極帶或鏈將沈砂運出、轉筒螺旋分級機：傾斜裝置之圓筒內有螺旋帶，當圓筒旋轉時，螺旋帶將沈於筒底之砂運出。
4. 渦錐分級機(cyclone classifier)：利用漿液之旋渦所生之離心力分出粗細粒，有乾式與濕式。係利用離心力加速顆粒沈澱的連續操作之分級裝置，在分選工程之細粒分粒上是一種很重要之裝置，主要用在閉迴路研磨系統之分級、脫泥濃縮，其構造如圖 3.33 所示，構造簡單、容易製造、設備成本低、占用面積少、可以掛著使用、分級效率高，因此使用率年年提高，是目前最有效的細粒分級設備。將要處理之料漿用壓力(泵)給入與圓筒部尺寸範圍，由 50~1,000mm，常用者為 125~500mm 成切線之進口，使料漿成旋渦狀運動產生離心力，料漿中較粗及較重之顆粒因慣性離心力大被拋向器壁，沿著圓筒壁逐漸向下流動經錐形部由尾部開口排出，而較小及較輕之顆粒則由旋渦管上昇而成為溢流。
5. 空氣分級機(air separator 或 pneumatic dust separator)利用空氣之旋渦所產生之離心力分出粗細粒，與渦錐分級機相似。此機之構造如圖 3.34，由一筒錐形外殼與一筒錐內殼所構成。餵料由給料管給入，落於分散板，因板之旋轉，成薄層散出，下端風扇所產生之上升風流，將分散之餵料吹起，但上端風扇所產生之旋流，因離心力作用，將粗粒帶至筒錐內殼之內壁而沿壁落下，由內錐收集排

出，是為粗粒產品。而細粒則被帶至外殼與內殼之間，亦因離心力之作用，使至外殼內壁，大部份沿壁落下，在外殼之錐部收集。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.33 渦錐分級機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.34 空氣分級機

3.3.3 揀選技術與設備

揀選技術主要分成手選及電子挑選等兩大類，分述如下：

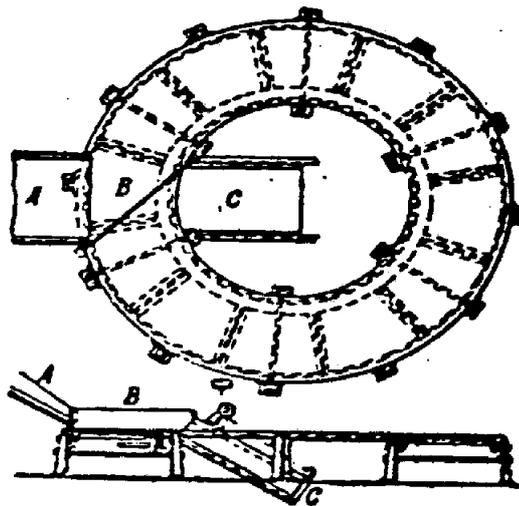
1. 手選

人工手選是靠人工用眼睛與大腦研判廢棄物中，物質之不同顏色、光澤、

比重或其他人類可分辨之特性，而使物質分開。除可利用自然光線外，有時也可利用人為光線(如紫外線)。手選之粒度範 0.5~18 吋之間，但以 0.5~3 吋之間為最好。

手選場所光線要充足，工作台可以是固定或移動，移動桌面有多種，如圖 3.35 為手選轉台(revolving picking table)，餵料由斜槽(A)給入至桌面，其外徑 16~25 呎，桌面緩緩旋轉，外緣速度為 20~40 呎/分。工人 12~26 人圍桌站立，將廢棄物中之有用物質選出，不要物則留在桌面，至刮板(B)才刮入斜槽(C)中。

橡皮輸送帶或鐵盤輸送帶是手選最常用之移動工作面，橡皮帶寬 24~30 吋者，用一排手選工，帶寬 36~48 吋者用二排人工，工人相距 3~6 吋，於其側或對面設置收集槽，以備放入選出之回收物，帶速通常為 10~80 呎/分，速度太快則工作不便，速度太慢則回收量減少，粒徑小時因挑選次數增多，帶之速度須慢，帶之長度亦需增加。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.35 手選轉台

2. 電子挑選法

手選是將廢棄物鋪平成單層，由人的眼睛看，經大腦的判斷、用手揀取選別。若用機械選別代替人工操作，則需靠機械設備完成下列四項動作：

- (1)將餵料鋪成單層之給料機
- (2)區別不同物質之感應器

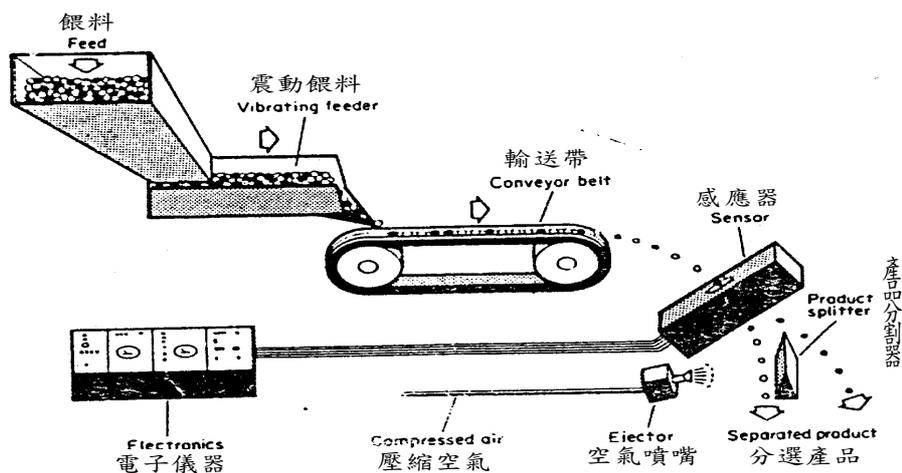
(3) 判別感應資料之電子系統

(4) 利用氣柱或水柱進行分選動作之設備

感應系統是電子挑選技術之最主要部份，將常用之分選感應設施分述如下：

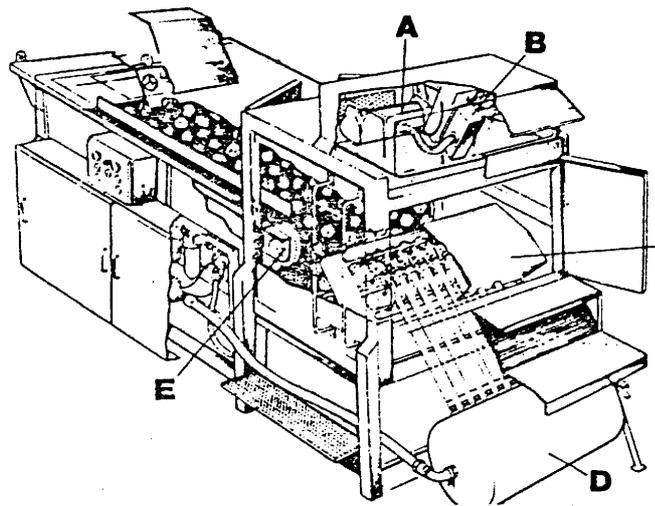
(1) 光學分選機(photometric sorter)

係利用雷射光照射通過挑選帶上單層排列的廢棄物，將不同物質顆粒之反射光，經光電管偵測後轉變成為相異之電訊號，再透過電腦解析進而控制噴出器，適時噴出氣柱(氣流)而將物質分選。此類挑選機(如圖 3.36 所示)對 35~65mm 及 70~150mm 之餵料而言，其處理能力分別為 50 噸/小時及 200 噸/小時。最典型之光學分選機為 Gunson's Sortex MP60 型分選機，如圖 3.37。粒度範圍 10~150mm 之餵料，其處理量為 150 噸/小時。此機是將輸送帶上之餵料震盪成單層，並以一定速度前進，在輸送帶末端用石英—鹵素燈為光源，並以固狀攝影機以每秒一千次掃瞄進料，將所得訊息傳給電腦，並由系統根據訊息作出控制氣體噴出開關來分選。Sortex G414 為簡易型之顏色分選機，如圖 3.38 所示。係利用光學分判器去比較顆粒顏色與背景參考顏色之差異，以控制氣體噴出開關使餵料分選。圖 3.39 為 RTZ 16 型之光學分選機，其雷射掃瞄系統是將雷射光射出經 20 面滾筒之鏡面，反射至輸送帶上欲分選之顆粒表面，經顆粒表面反射回滾筒鏡上，並由光電管偵測，將訊號送由電腦處理，而將物質顆粒加以分選。



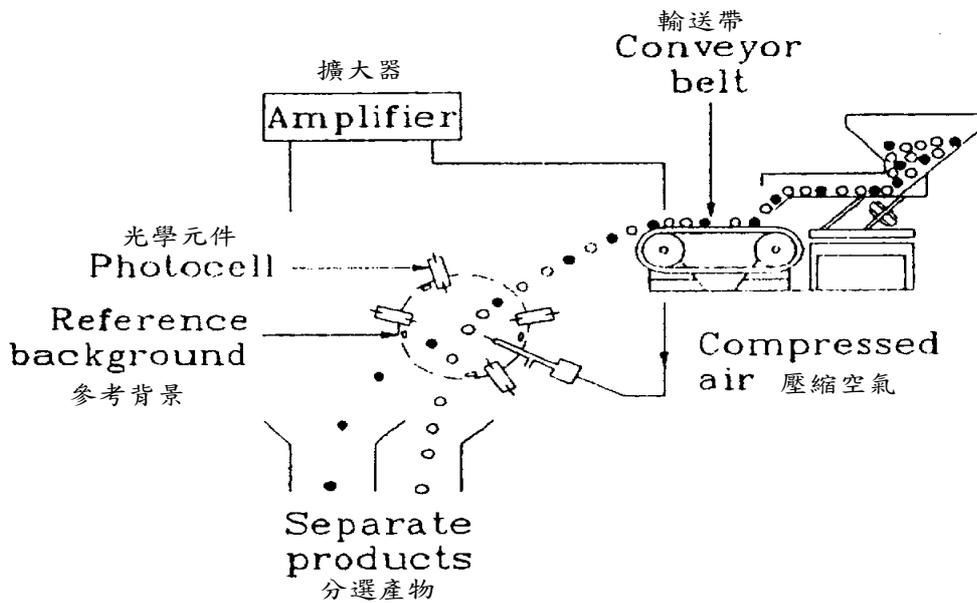
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.36 光學分選機



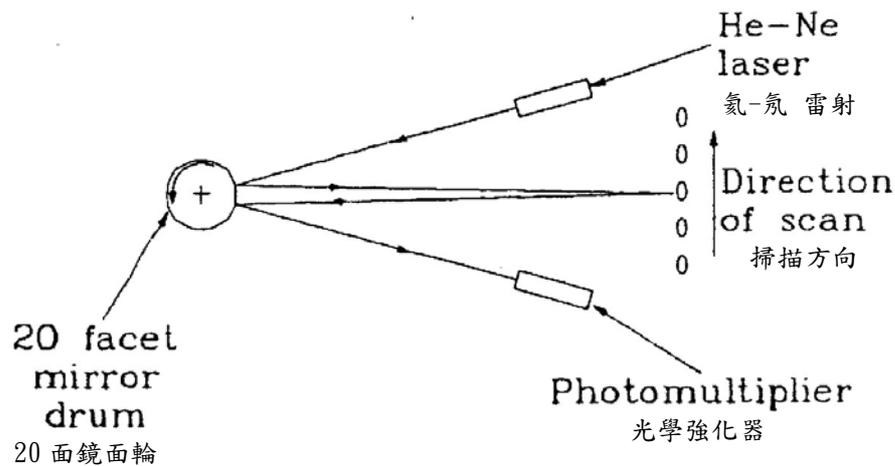
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.37 Gunson's Sortex MP60 型光學分選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.38 簡易型顏色分選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.39 RTZ 16 型光學分選機

(2) X 光分選機

X 光分選機應用在礦物分選工程上之鑽石分選，鑽石在 X 光之照射下，會有螢光反應，再由光電管偵測後加以分選。

(3) 中子吸收分選

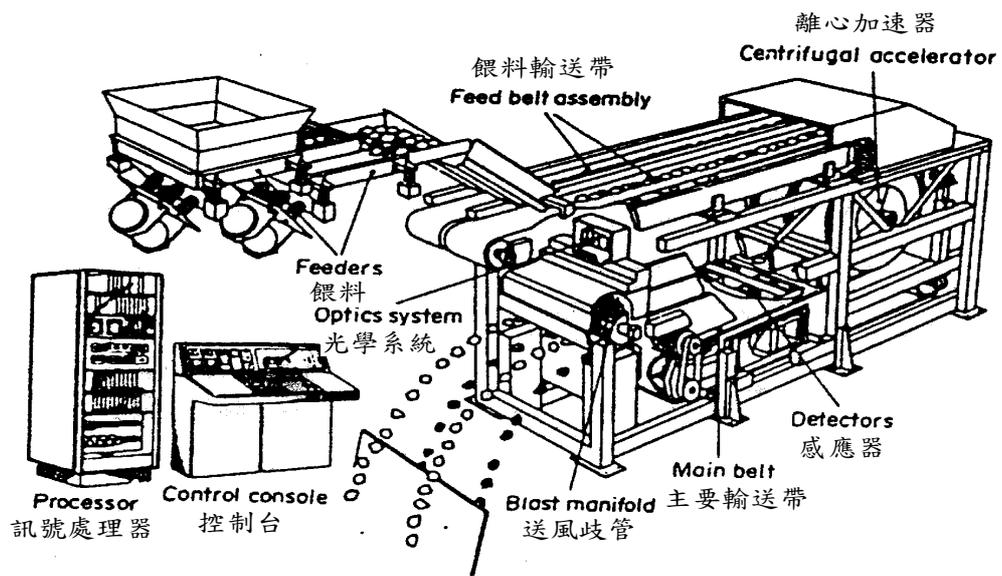
中子吸收分選法曾應用在硼礦之分選上，硼礦具有中子放射源，中子束經偵測器偵收後加以分選，本法在資源回收再利用上並未使用過。

(4) 導電性/磁性反應訊號分選機

若是將物質顆粒之光學訊號，改以導電性/磁性之反應訊號，所設計出來之電子挑選機，如圖 3.40 所示之 RTZ 19 型挑選機，此機可挑選之粒徑範圍為 35~150mm。以 150mm 之粒徑餵料而言，其處理能力為 120 噸/小時。

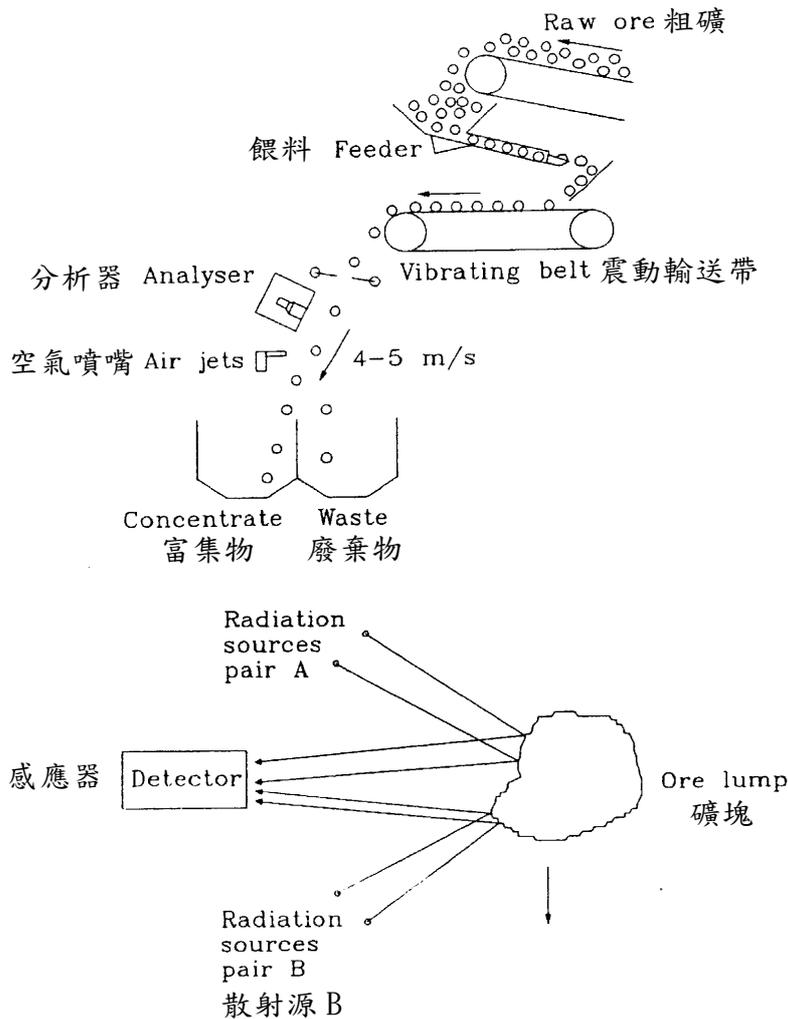
(5) 伽瑪射線分選機

電子挑選機應用於分選放射性物質，係利用物質伽瑪射線作分選之依據。此機主要分選裝置為由 NAI(Th)之閃爍偵測器，接收物質放射出來之伽瑪射線，其裝置與上述之挑選機相類似。另有利用伽瑪射線之散射原理作分選，其機械原理與上述各電子挑選機均相同，Precon 機型即是在芬蘭開發出來之分選機種，本機適合分選含金屬之廢棄物，回收物與不要物之金屬含量差異可在 5%以上，適合分選之金屬包括鉻、鐵、鈷、鎳、銅及鋅，或者是以上任何金屬之混合廢五金。散射分析器每秒可偵測 15 個顆粒，對 150mm 之餵料而言，其處理能力為 40 噸/小時，其分選原理及系統如圖 3.41 所示。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.40 RTZ 19 型導電性/磁性反應訊號挑選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.41 伽瑪散射分選機系統與原理

3.3.4 重力分選技術與設備

利用不同廢棄物間之比重差異，將欲資源回收之物質富集的方法稱為重力分選技術或比重分選技術(gravity concentration)。利用重力分選技術可將廢棄物分為輕質部份及重質部份，且重力分選可在空氣中或在液體中進行，在液體中又以水及重液較為廣泛使用。

若僅利用不同物質本身所具比重差異，分選出不同比重物質群之分選法，稱為絕對分選法(absolute process)，若不僅僅以物質之比重差異為主要分選依據，且就其粒徑大小、顆粒形狀之不同，在流體中以流動以及摩擦阻力所產生之影響為輔助因素，而使物質分離富集的方法，則稱為相對分選法(relative process)。

相對分選法通常在水流中進行，所以又稱為水流分選法，所應用之水流方向可分為垂直流與水平流兩種。垂直水流分選法係利用昇流或降流水流分選之方法；平流分選法係利用與分離面平行的水流分選方法，如以搖洗桌(shaking table)分選法或螺旋運動的水流如螺旋分選法(spiral concentration)。以下分別就在空氣中作重力分選之風力分選技術，在水中作重力分選之水力分選技術及在重液中作重力分選之重液分選技術等項目分別說明。

1. 風力分選

風力分選技術與水力分選技術類似，可以利用水柱或氣柱分別依其粒子在介質中之沈降速度，分選混合固體物質成為兩種或多種物質群。所以本分選技術之重點為需要包含一個分選柱，用以提供穩定速率之上升水流或氣流。物質粒子之沈與浮則視各物質粒子之終端速度是否大於流體介質之上升速度而定。因此分選柱將混合物質分選為下降終端速度小於介質流體上升速度及大於上升速度之兩種物質，分級技術是非常適合應用於比重差異物質之分選技術上。

風力分選技術是一種簡單又有效率之分選技術，而且能廣泛應用於各種不同廢棄物之餵料，但是物質粒子必須以顆粒形態流動，所以長形之纖維物質需要先經剪碎，風力分選設施之投資成本及操作成本都不高。

風力分選技術最早是使用在花生與花生殼之分選上，當然也被用來分選玻璃瓶上之紙質標籤，分選操作上必須避免待分選之物質與風扇有所接觸，所以任何風選系統中，在分選柱與風扇間均包含旋風集塵設施或袋式集塵設施。

風力分選機有下列六種：

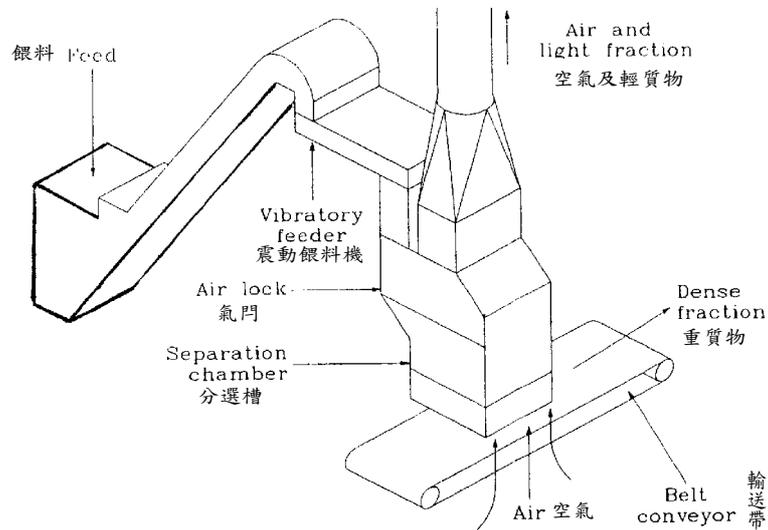
(1) 豎槽型風力分選機(vertical air classifier)

空氣由槽底輸入至頂上，其風力恰僅足以吹送輕質部分之廢棄物，重質部份則掉落至槽底。風力吹送之大小可藉由加入之廢棄物負荷量、送風量的比例及單位面積之風量調整。餵料之方式由分選柱體之上方以氣閘(air lock)控制送入(如圖 3.42)，氣流將輕質物質向上帶出，重質物質則降落至下方之輸送帶上。圖 3.43 之豎槽型風力分選機是開發作為非磁性汽車破碎物質之輕質物質分選設備，本設施也可應用在都市垃圾之非磁性輕質物質之分選，餵料點也是在靠近分選槽頂部之位置。

(2) 彎曲管道型風力分選機(zigzag air classifier)

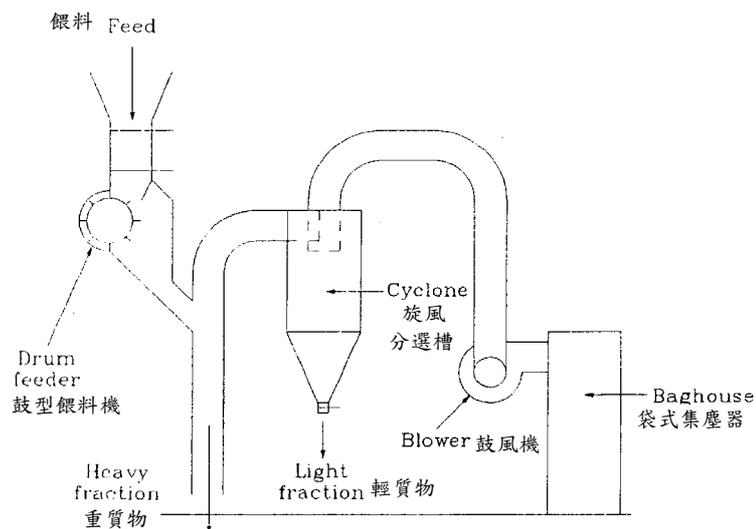
傳統式之豎型分選槽中沒有彎道或緩衝板，空氣由管底急速向上，然而對於集結成團塊之廢棄物，其分選效果必然不佳，因此如果能在分選柱中提

供紊流及剪力，以使結成團塊之粒子分散，達到更清楚之分選作用。彎曲管道型風力分選設施之餵料粒子大小，以不超過管道直徑四分之三粒徑為限(詳見圖 3.44 所示)。



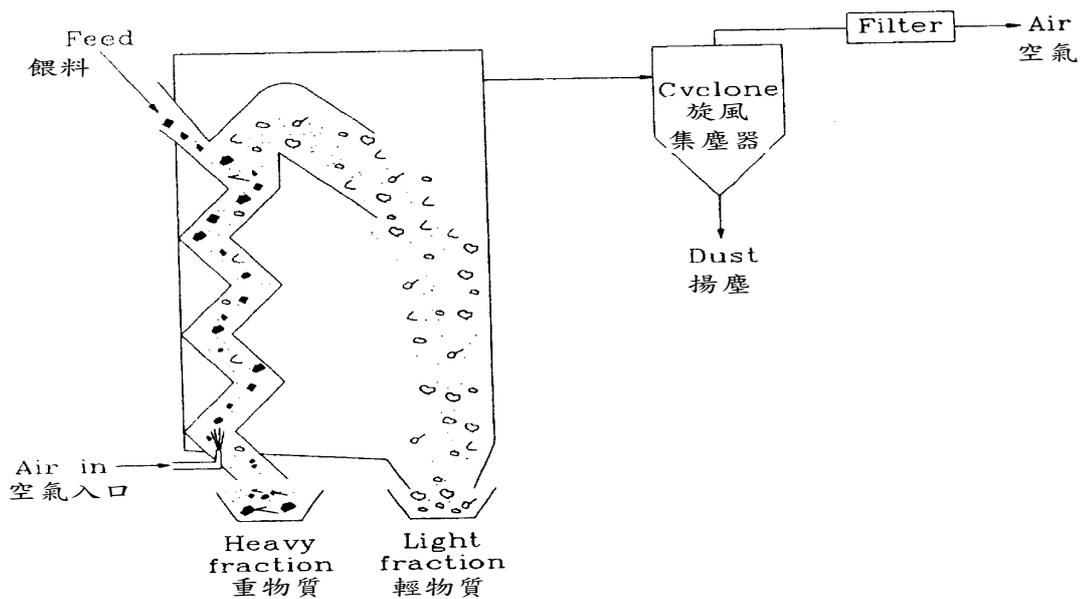
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.42 豎槽型風力分選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.43 豎槽型風力分選系統

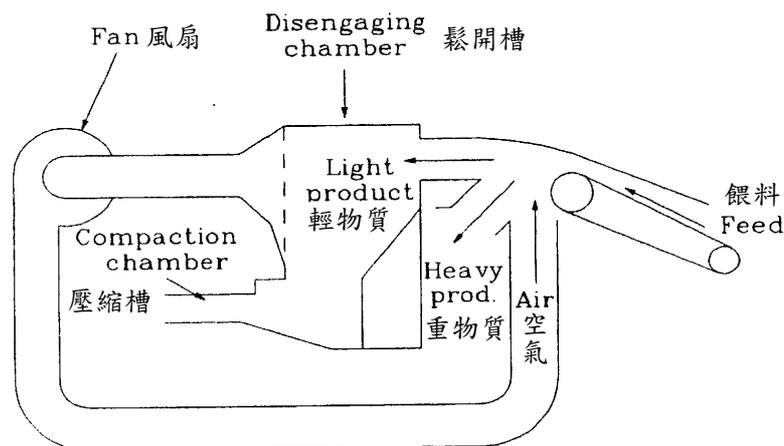


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.44 彎曲管道型風力分選機

(3) 水平式風力分選機 (horizontal air classifier)

傳統豎型槽式分選機僅僅利用氣流分選餵料中之輕質物質，但水平式分選機則可同時利用上升氣流及粒子慣性力，來分選輕質、重質或介於中間之不同物質群。鼓風機在本系統中，同時具有兩種力量，其一方面是拉力，另一方面也有推力，推力可以將餵料中之重質及輕質物質推開，拉力則進一步將輕質物質拉進輕質物質群中。由於這個系統採用空氣循環迴流設計，所以使用本分選系統不需要再增加任何大型空氣污染控制系統(詳見圖 3.45)。

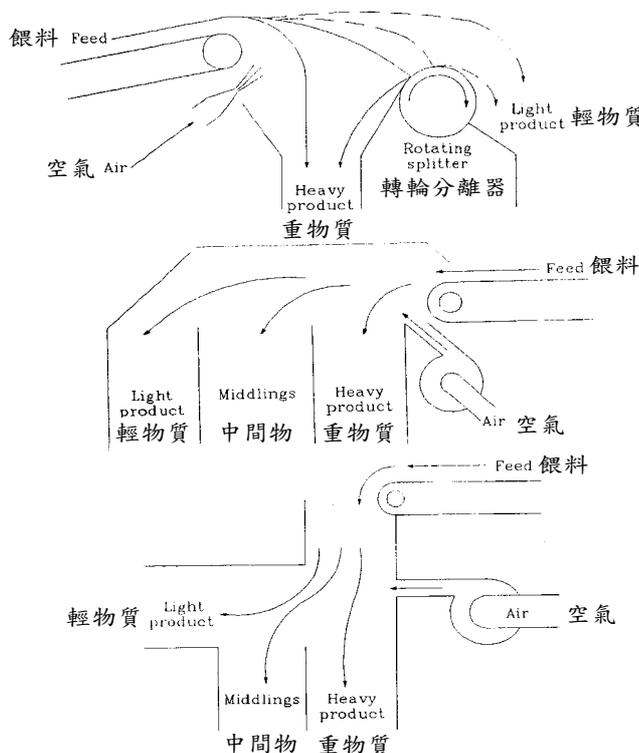


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.45 水平式風力分選機

(4)空氣刀風力分選機(air knives)

本風力分選設施之分選原理及型式與水平式風力分選機相同，且最適合應用於分選醱酵之殘渣，氣刀分選機之型式如圖 3.46 所示，可以是僅分選輕質及重質物或者是可以分選數種不同等級之輕質或重質物。

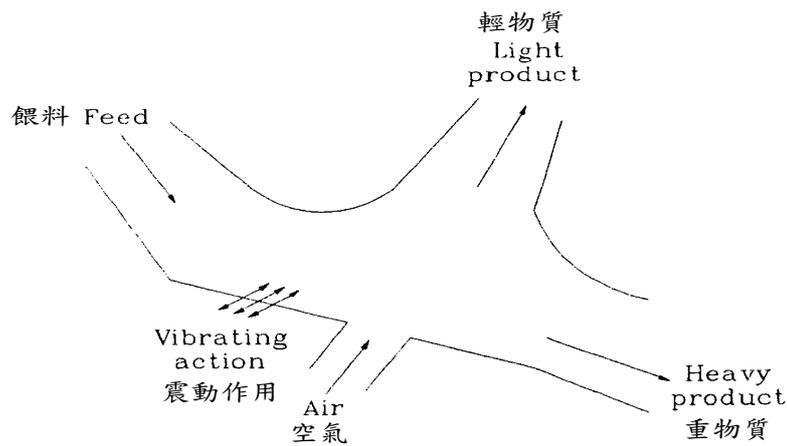


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.46 氣刀分選機之三種型式

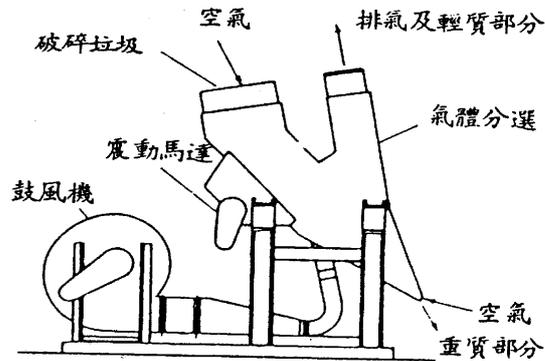
(5)震盪型風力分選機(vibrating air classifier)

本型風力分選機主要是水平式風力分選機結合餵料口之震動作用力，本分選機之分選作用分成三個部份，其一為餵料口之震動力，其作用為將餵入之廢棄物在斜板上先作分層處理，即是使重質物質沈底，而輕質物質上浮，而達到分離為輕質重質兩部分；其二為慣性效應(inertial effect)，當廢棄物餵入落下時，空氣吹力使廢棄物得到重力加速；其三為浮動空氣力(fluidizing air)改變了輕質廢棄物之方向，並隨排氣流向輕質物質群(詳見圖 3.47 及圖 3.48)。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.47 震盪型風力分選機之分選原理

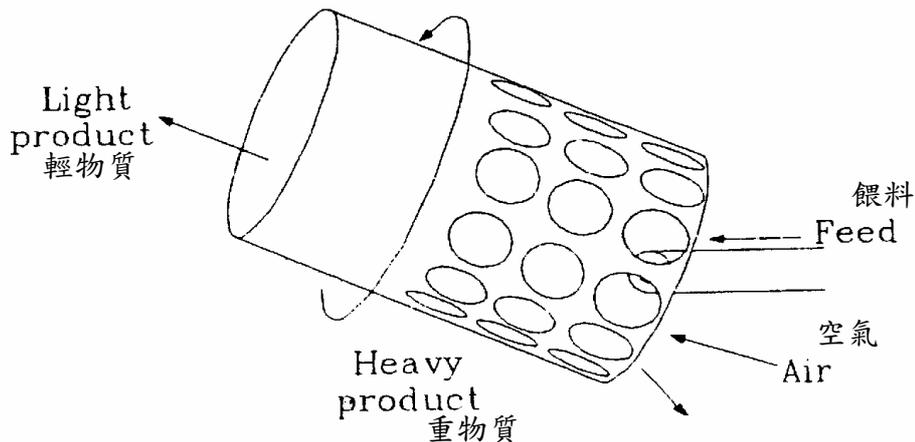


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.48 震盪型風力分選機

(6) 旋轉型風力分選機 (rotary air classifier)

本型風力分選機乃是結合旋轉式圓筒篩與氣流浮力作用而成的。當圓筒篩旋轉時，氣流之浮力作用使輕質部份懸浮在氣流中而向輕質產物之收集端前進；細且重之物質則直接從圓筒篩之篩孔中掉落；至於大又重之物質則是從圓筒篩之底端排出，而達到分選之目的(詳圖 3.49)。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.49 旋轉型風力分選機

風力分選機之浮動流速為風力分選之最重要設計參數，因各種固體廢棄物成分與設備不同而會有所不同，一般採用之固氣比介於 0.2~0.8 之間，但對於破碎紙片可減低至 0.02。Dallavalle 氏曾提出下列方程式，以計算橫式及豎式管中傳送之最小速度。

橫式：

$$V = 6,000 \frac{S}{S+1} d^{25} \dots\dots\dots(3-5)$$

豎式：

$$V = 13,300 \frac{S}{S+1} d^{35} \dots\dots\dots(3-6)$$

式中 V：空氣流速(ft/s)

S：物質之比重

d：最長顆粒直徑(in)

風力分選機之選擇應考慮下列各項因素：

(1)破碎後廢棄物之物質

物質包括大小、等級、形狀、濕度、凝聚性、纖維含量等。

(2)輕質物之規格。

(3)輸送及餵入分選機之方法。

(4)分選機之設計特性。

包括固氣比(kg 固體/kg 空氣)、浮動流速(m/min)、單位容量(m³/hr)、總

氣體流量(m^3/hr)及壓力損失(m, 水柱)等。

(5)操作特性

包括動力大小、經常及特殊維護的需要、操作的難度、業績及可靠度、噪音/水/空氣的污染等。

(6)地點考慮

包括面積、高度、通道、噪音及其他環境限制因素之考量。

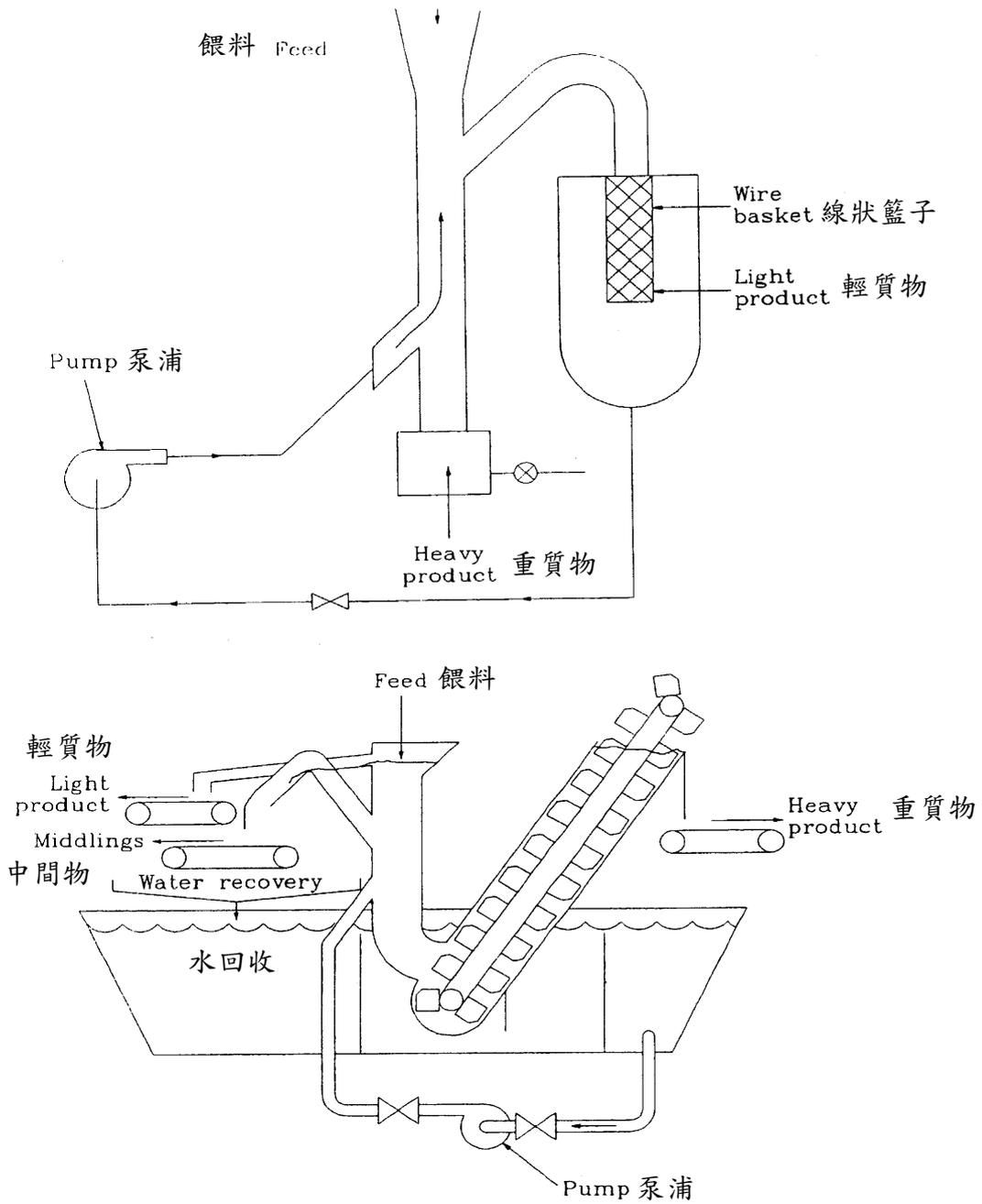
2.水力分選

水力分選技術依水流方向分為垂直流及水平流兩種，分別說明如下：

(1)垂直流(上升水流)分選機

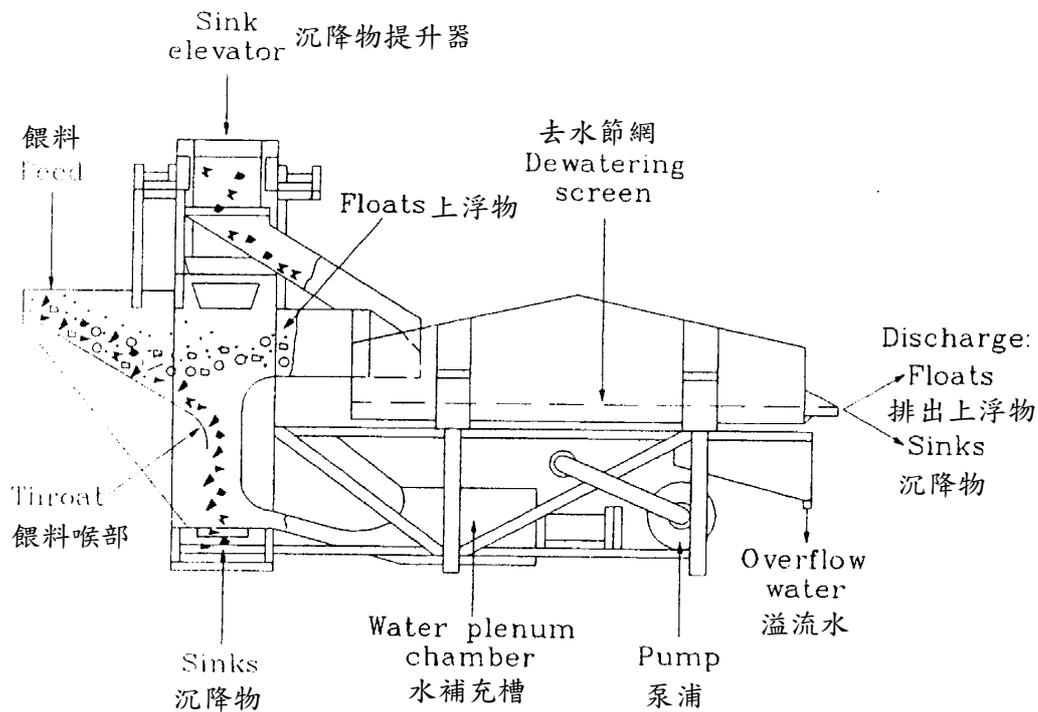
垂直流分選技術亦可稱為上升水流分選法，其分選原理與分級技術與設備相類似；同時也與風力分選機具有相同之分選原理，不同的只是使用的介質不同。水力分選使用上升水流將輕質粒子浮起，而使重質粒子下沉。這種分選技術應用在非磁性物質分選上，也可與重液分選技術一樣具有相當之分選效率，圖 3.50 為典型上升水流分選設備。目前已有數種這類型之分選機開發完成，如圖 3.51 之 Wemco 公司之上升水流分選機或者是 Newell 公司之水流分選機，該機為在鋼槽結構中包含一個輸送設備，且槽內分成兩個槽室，其中一室為具有上升水流能分選汽車廢料中之非鐵金屬及殘渣廢棄物，非鐵金屬因比重較大故下沉，並由輸送設備在水面下收集至第二個槽室，再由另一個輸送帶送至槽外收集；殘餘之廢棄物相對較輕，則收集至槽邊之脫水篩網上，這個系統設施可將廢汽車中之非鐵金屬富集至 40~60%之金屬成分。

另一種在資源回收再利用使用較多之垂直流分選技術為波震分選機(Jig)。本機乃是利用垂直(波震)運動之水流(或空氣流)將比重不同之廢棄物分層，使比重大的廢棄物在下層、比重小的廢棄物在上層，而分別取出重質物質及輕質物質之分選法。波震機之主要部份如圖 3.52 所示(剖面圖)，水槽被隔板區分為兩部份，右邊為波振分選室，內裝有篩網，可以讓水流通過；左邊為隔膜室或活塞室，由偏心輪帶動隔膜或活塞上下運動，使槽內的水流產生昇流與降流之交變水流運動，在此水流作用下，波震分選室內之廢棄物，受到一而再之鬆散昇流與差異沈降運動而按比重分層，餵料由槽之一端不斷地給入，經波震分選室之分層，而從另一端分別分層排出。波震分選機及搖洗桌曾被應用在非磁性之廢汽車元件之分選，尤其是針對粒徑在二分之一英寸以下之廢棄物，只可惜目前為止並沒有獲得較滿意之分選結果。



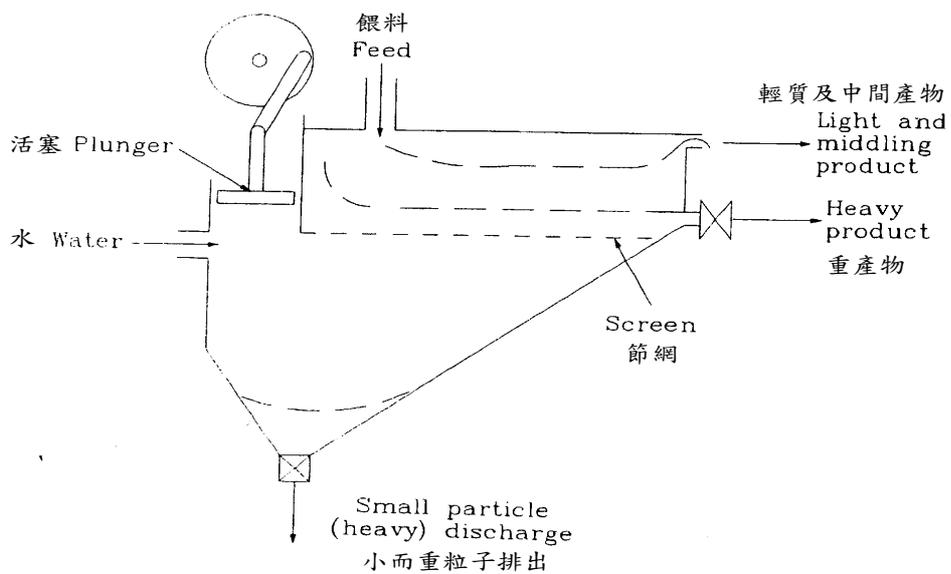
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.50 上升水流分選設備



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.51 Wemco 公司上升水流分選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.52 波震分選機剖面圖

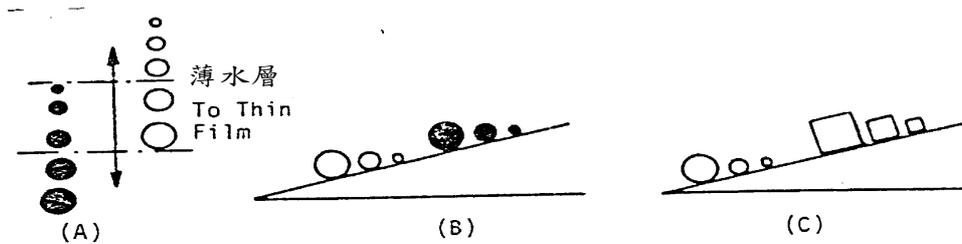
波震分選機之種類主要是依其產生垂直波震水流之方式，定篩波震分選機是由外力之作用使水流產生波震運動，篩面固定不動，而作用於此定篩波震分選機之外力方式包括活塞方式、隔膜方式、壓氣方式及壓力水等。另一大類為動篩波震分選機，是由篩網之上下運動而產生垂直波震水流。另依垂直流之流體介質可分類為空氣波震機及水流波震機。而以富集物質之收集方式，分為篩上收集及篩下收集兩種型式。

波震分選技術之分選原理，主要包括初加速度(initial acceleration)、阻礙沈降(hindered settling)與沈積穿漏(consolidation trickling)等三項作用因素。首先是利用物質顆粒間初加速度之差異而達到分選作用，一般顆粒在水中沈降時，剛開始沈降時，其沈降速度很小，而可以忽略，此時初加速度則比較重要。初加速度僅與顆粒及流體之比重有關，而與粒度大小、形狀等無關。亦即比重大者，其初加速度大；比重小者之初加速度則較小。因此，餵料顆粒經周期短，波震數高之昇降流作用，由於沈降時間短促，初加速度對不同比重顆粒之沈降差異效果要比等速(終速)沈降顯著，使重質顆粒(不管其粒度大小如何)比輕質顆粒具有較大之加速度，沈降在輕質顆粒之下，而達到分層作用。第二個分選作用為阻礙沈降，波震分選機之分選室物質顆粒擁擠，其沈降為阻礙沈降。在此阻礙沈降條件下，兩比重不同之顆粒，若粒徑相同，則比重較大者終端速度大，若終端速度相同，則比重輕者粒徑較大。所以在昇流過程中，輕質顆粒較重質顆粒早開始上昇，重質顆粒到達最高點，則較輕質顆粒早，而且所上升之距離又較輕質顆粒小；在降流過程中，重質顆粒之沈降速度快，距離又短，將先達到篩面，而輕質顆粒沈降速度慢，則落在重質顆粒層之上，因此得到分層之作用。

第三個分選作用為沈積穿漏(consolidation trickling)，顆粒沈降至篩網形成層床，因下降水流之繼續作用，粗顆粒物質受篩網之阻隔無法再下降，而細顆粒物質則由粗粒物質間隙穿過繼續向下沈降，結果細顆粒物質落在粗顆粒物質之下，即所謂沈積穿漏作用。波震分選技術主要是以波震水流給予顆粒之初加速度，僅與欲分選顆粒之比重有關，而與粒徑大小無關，所以重質顆粒加速度快。再加以阻礙沈降可使初加速度之分選效果更為顯著，使重質顆粒之床層形成在輕質顆粒床層之下。再加上沈積穿漏現象之協助，使細粒物質落於粗粒物質之下。由此推論，波震分選機對粒度分布較大之物質分選操作上，應採波震周期短、頻率高，儘量利用初加速度之差異而獲得波震分選效果。

(2)平流(薄流)分選機

兩種不同比重之顆粒若置於微傾斜之分離面上，藉著重力沿斜面向下流的水層，會因比重之差異而使此兩種顆粒產生不同的運動，比重小的顆粒將會被水流沖得更遠，這種利用在薄層水流中的運動差異而進行物質分選之方法稱為平流或薄流分選法，如圖 3.53 所示。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.53 平流分選原理圖

薄流分選之方式可分薄流槽分選與搖動薄流分選兩種，薄流槽分選法之水層較厚，因各種物質顆粒間之比重與粒徑不同，使得沈降槽底的時間也不同，沈至槽底者摩擦力較大，且在槽底之水流流速較小，水之推力也較小，因此形成輕質顆粒在平流之上層流速快，而重質顆粒在下層流速慢之情形，在斜槽之末端用一隔板分離在平流底部之重質物與平流上層之輕質物質。在槽底設置檔條(riffle)或鋪上毛毯作成粗糙面(rough surface)等以沈積較重之顆粒。

搖動薄流分選技術為上述薄流分選原理加上在分離面與水流方向近乎垂直之搖動，使重質顆粒與輕質顆粒分層收集，雖然所用水流較薄，但這薄層水流仍然支配著各種物質顆粒之不同運動情形。重質顆粒靠近分離面摩擦力大，流速慢，受到橫向之搖動力也大，因此較重物質在分離面之運動方向產生差異而由不同位置排出。

此類分選設施主要有搖洗桌(shaking table)、帶選機(vanner)、轉動圓洗桌(revolving round table)等，其中以搖洗桌應用於廢棄物分選上較多，薄流分選所能分選之物質顆粒粒度較波震分選設備為細，以砂粒狀大小最為適宜，因水層薄、推力小，粒子太大不易推動，粒子太小不易沈降也難處理，一般以 $74\mu\text{m}\sim 4\text{mm}$ 為可處理範圍， $0.5\sim 1.5\text{mm}$ 為最有效之處理粒徑。若是重質物之比重與輕質物之比重差異不大，則其分選粒徑也要較大才行。

物質間比重之差異及顆粒之粗細，對重力分選之難易有很大的關係，其中以比重相差大及粒度較粗的，比較容易以重力來分選。重力分選準據 (concentration criteria) 為比重較大的物質比重 (P_1) 與比重較小的物質比重 (P_2)，各減去 1 之後的比值 $C=(P_1-1)/(P_2-1)$ ，此準據可以用作評估這兩種物質在重力分選時的難易程度。表 3.22 為不同分選準據應用水選時可以分選的粒度。

表 3.22 重力分選準據表

分選準據(c)	可分選之粒度
負值或大於 2.50	粒度 200 篩目，尚可分離富集
2.50~1.75	粒度粗於 65~100 篩目尚可分選，但有時困難
1.75~1.50	粒度大於 10 篩目尚可分選，但有時困難
1.50~1.25	粒度大於 0.25 時尚可分選，但有時困難
小於 1.25	相對重力分選法不能應用，須用絕對重力分選技術

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

搖動薄流分選作用原理包括阻礙沉降、沈積穿漏、薄層水流原理及不對稱運動，其中要使物質顆粒在作不對稱運動的搖洗桌上作相對運動，則只有當顆粒的慣性力大於桌面之摩擦力時，才有可能，即

$$ma \geq Gf$$

式中：m：為顆粒之質量

a：顆粒之慣性加速度

G：顆粒在水中之重量

F：顆粒與桌面之摩擦係數

ρ ：為顆粒之比重

ρ' ：為液體之比重

顆粒由靜止至開始沿桌面移動所需最小慣性加速度，稱為臨界加速度(a_c)。

$$a_c = (G/m) \times f$$

其中

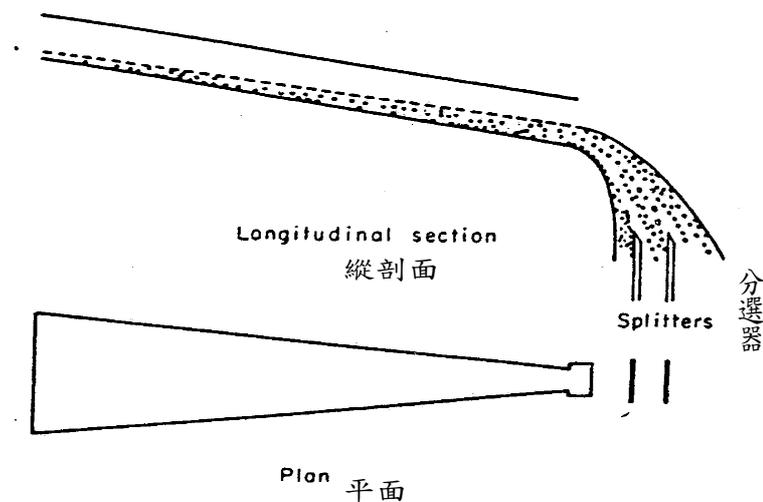
$$G = \frac{\pi d^3}{6} (\rho - \rho') \times g$$

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \rho$$

$$\text{所以 } a_c = \frac{\rho - \rho'}{\rho} \times g \times f$$

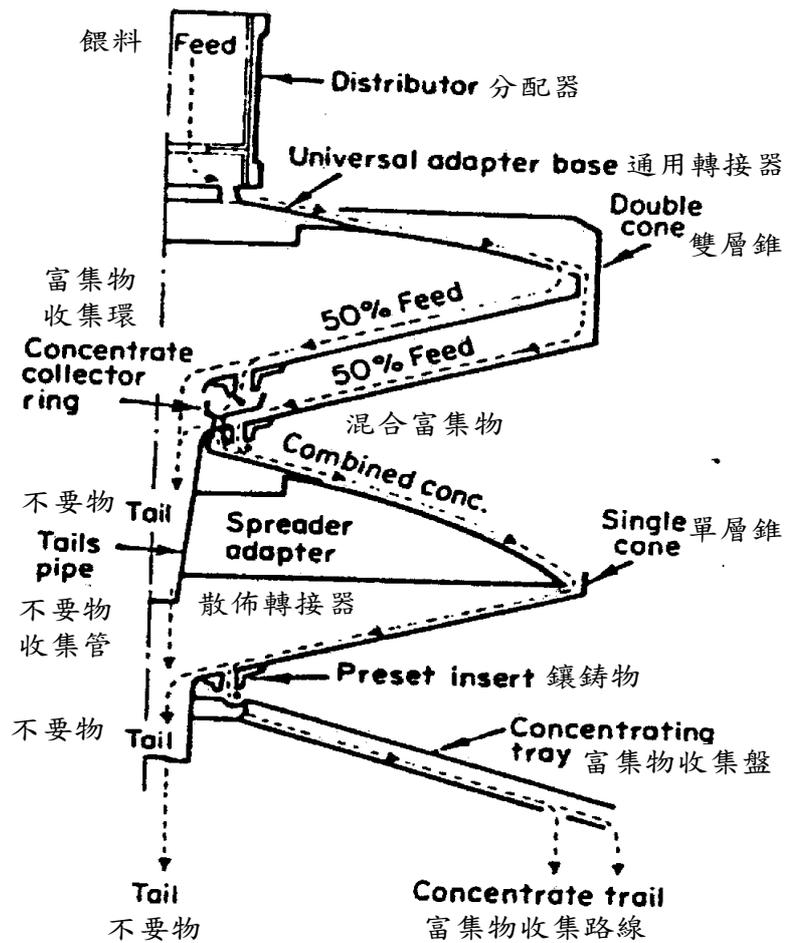
薄流分選機目前應用於礦物工程較多，這類型之分選機包括尖縮溜槽，圓錐分選機、螺紋分選機及溜洗槽等。其中尖縮溜槽是餵料端寬，排出端窄之木製溜槽，其構造如圖 3.54 所示，其兩側壁向內成 1/10 左右之角度收縮，槽底是一光滑平面，適宜長度在 1~1.2m，置於水平傾角 16°~20°，當餵料漿液從溜槽寬的一端給入，流向尖縮之排出端過程中進行輕重物質之分層作用，由於側壁收縮，使水層厚度不斷加大，當到達排出口時，流水層會形成一扇形面流出。上流層帶輕質物質沖出較遠，而下流層帶重質物質則以近似垂直流下。再應用截取器(splitter)將扇面分割，即可分選輕、重物質。

圓錐分選機係由尖縮溜槽演變而來，將尖縮溜槽之餵料端與餵料端，排出端與排出端並排，並去掉側壁，自然形成一倒置之錐面，即為分選中之分選錐，分選原理則與尖縮溜槽完全相同。每一單層分選錐直徑約 2m，分選帶長 75~85cm，錐面坡度 17°，在分選錐面上方設一正面圓錐，其目的是將餵料均勻地分配至分選錐面上，稱為分配圓錐。為提高處理量，大多將兩個分選錐重疊起來，成為雙層圓錐分選機(如圖 3.55)。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.54 尖縮溜槽



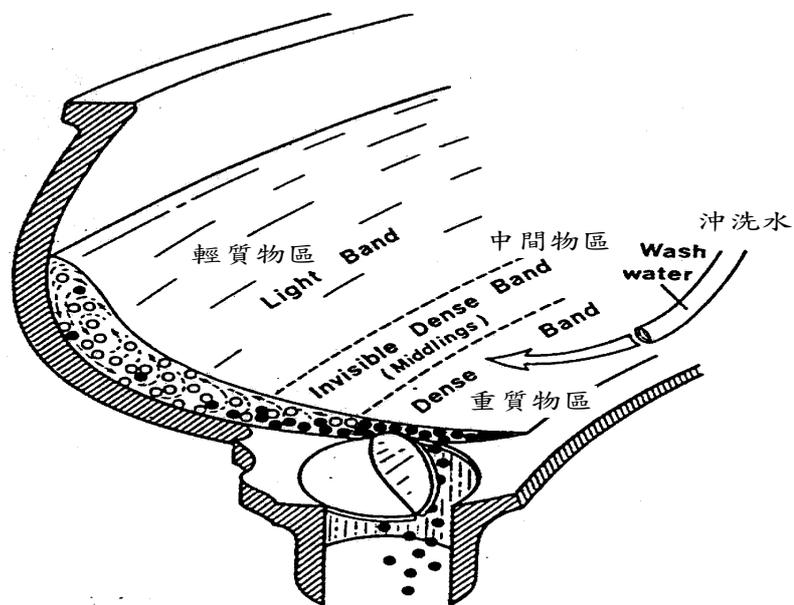
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.55 雙層圓錐分選機剖面圖

螺紋分選機主要是由 3~6 節沿直軸旋繞之螺紋槽，給水設備及重質物截取器所構成。餵料由頂端給入，沿著螺紋槽面向下運動，顆粒受到重力、離心力、摩擦力及水流沖力等作用，因此比重、粒度和形狀不同的顆粒會朝向不同方向運動。比重大的顆粒處於下層，比重小的處於上層，而上層的顆粒會以很快的速度，沿螺紋槽向下運動產生較大之離心力，也因此輕質顆粒橫向移往槽之外側，而重質顆粒受離心力小，且摩擦力大，被推向槽的內側。同理，粒度大的顆粒往槽外側，粒度小者往內側。如此可將不同比重，粒度之顆粒達到分層，如圖 3.56 所示，槽內側之重質顆粒以截取器取下，槽外側之輕質顆粒則由槽之下端排出。此分選機餵料之最大粒徑為 10 篩目，此機設備簡單、占地小，且無可動部份易於保養，每具每小時之處理量為 0.1~1.5 噸，視分選顆粒大小及分選條件而異。

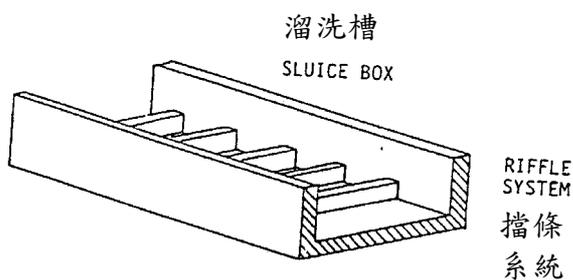
溜洗槽為一木槽，如圖 3.57 所示。其尺寸視處理量及顆粒之粒度而異，

常用者內側寬約 12 吋，每段長 6~10 呎，坡度約 1%，可數段木槽連接使用，槽底置檔條，使成不平之底，以利沈積重質顆粒，檔條之種類甚多，如圖 3.58 所示，槽底通常以棕衣麻布或舊麻氈作為粗糙面。



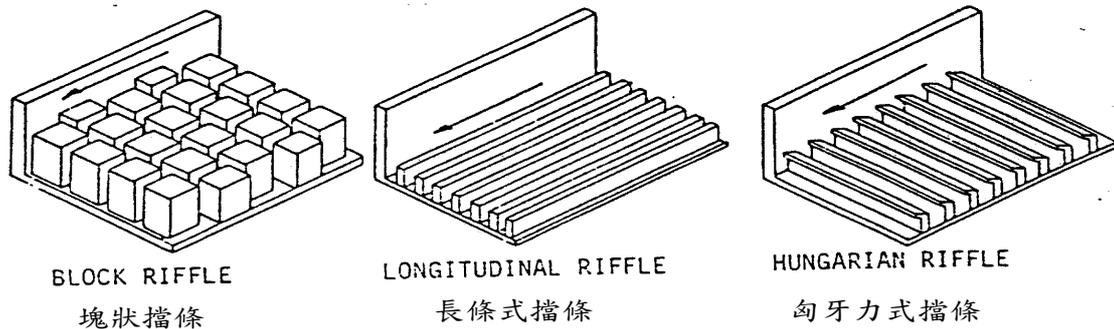
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.56 螺紋分選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.57 溜洗槽

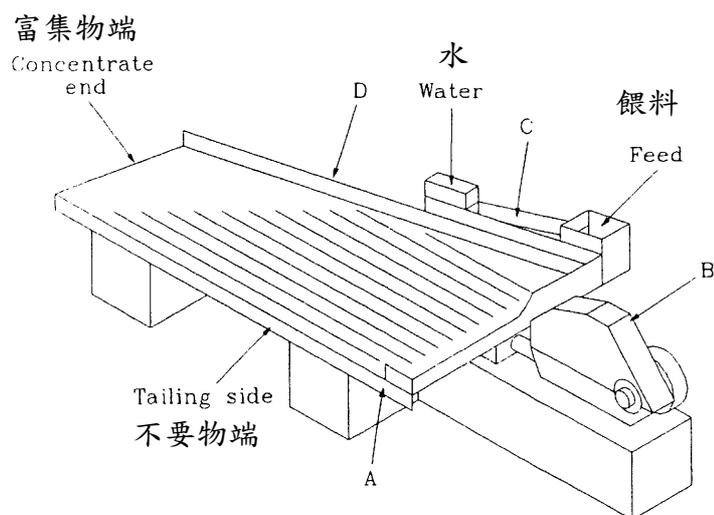


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.58 溜洗槽之擋條種類

(3) 搖動薄層分選機

搖動薄層分選機包括搖洗桌、帶選機及轉動圓洗桌等。搖洗桌是由一長方形桌面，桌面微向排出口側(橫面)傾斜，其坡度約 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ (可以視情況調整)，在桌面上釘有擋條，並有相連接之驅動部份，使沿縱向作緩進急回之不對稱往復運動，構造如圖 3.59 所示。餵料與給水由橫向傾斜桌面之上方靠驅動部份側給入，水流沿傾斜方向成薄水流，再由每分鐘 150~300spm 不對稱之往復運動，在桌面上進行不同比重顆粒之薄層水流分層。擋條阻擋以及縱向搖動之綜合作用使不同比動之顆粒在桌面上呈現扇形分布，因此輕質顆粒受水流影響大，受搖動之影響小，沿接近桌面傾斜之水流方向排出。重而小之顆粒受搖動之影響大，水流之影響小，沿桌面縱向運動，由連接驅動部份之反對邊排出。驅動裝置可由偏心連桿方式、凸槓桿方式、凹輪搖臂方式以及彈簧平衡方式等構成。搖洗桌可處理粒徑範圍為 4~200 篩目，而其可變因素如表 3.23 所示，含洗桌設計、動程大小、速度及操作因素。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.59 搖洗桌

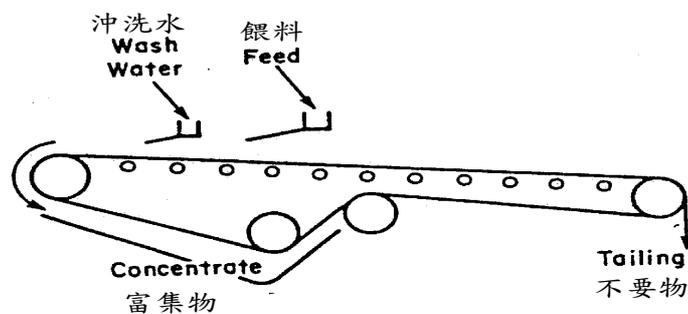
表 3.23 搖洗桌可變因素

設計參數	桌面形狀 桌面之材質 擋條之形狀 擋條之格式 加速及減速方式 餵料方式
操作速度	馬達速度 滑輪大小
驅動裝置	橫連桿 振動座
操作控制	桌面傾斜度 餵料水漿濃度 沖洗水 分選物質排出位置

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

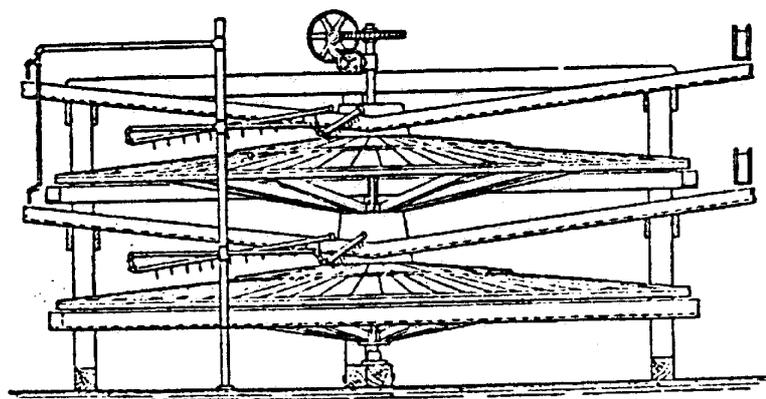
帶選機(vanner)係利用具有些微傾斜角之無極帶作為分離面，由上端給水及給料，而無極帶以緩慢之速度往上端移動，利用薄水層原理讓輕質顆粒隨水流往下端流動，重質顆粒被無極帶移往上端排出，如圖 3.60 所示。另外加機械力震動無極帶協助分離面上顆粒之鬆散分層，增進分選效果。其震動型式分側動型(水平面震動與帶行之方向垂直)、端動型(震動方向與帶行方向平行)、波動型(與帶行方向垂直)、迴旋型(帶面作迴旋運動)。無極帶寬 4~6 呎，帶速 30~150 呎/分，震數約 120~240vpm，震幅在 0.75~1.75 呎之間，主要用於 100 篩目以下之粒度分選。

另有轉動圓洗桌(round table)，其分選原理與搖洗桌均相同，為直徑 10~30 呎之錐形桌面，坡度在 1.25~1.5 呎/呎，以中心軸支持，並由齒輪帶動作 0.33~1rpm 之旋轉，餵料槽在桌面中心，如圖 3.61。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.60 帶選機

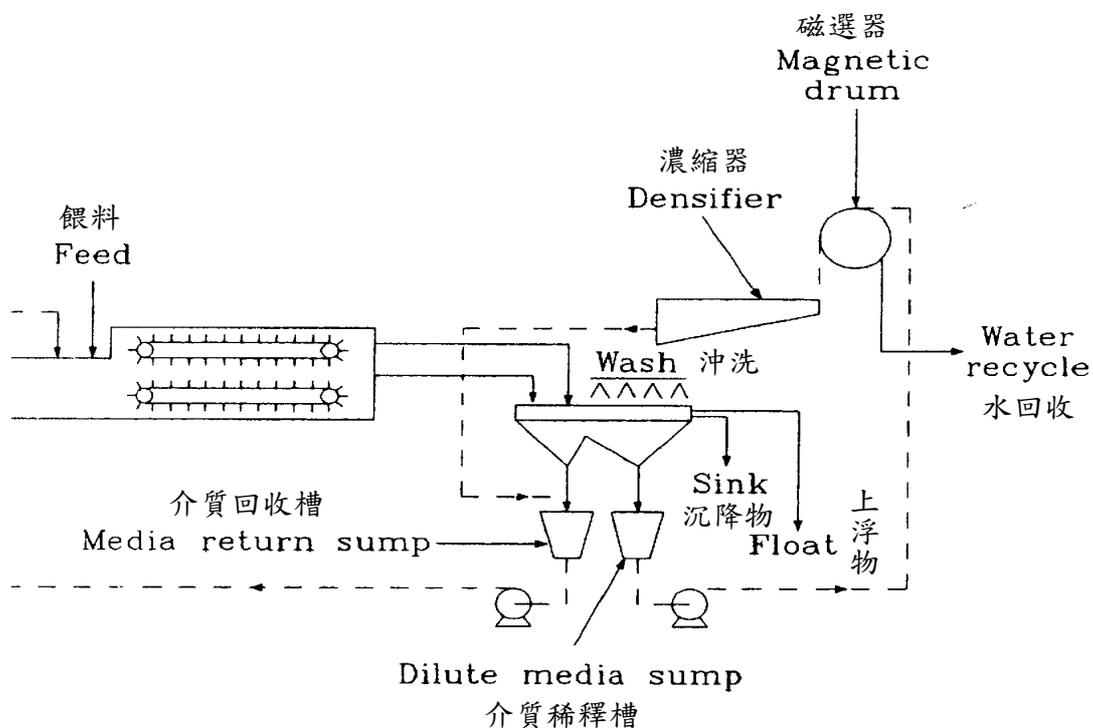


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.61 轉動圓洗桌

3.重液分選

欲分選兩種比重不同之物質，選用具有此兩種物質比重中間比重之重液，將欲分選之廢棄物投入此重液中，比重大者下沉，比重小者上浮，使兩者達到完全之分離。理論上重液分選僅就物質之比重差異而達分選，而與粒度及重液物質無關，但當粒度過小之顆粒，在重液中之沈降速度變小或受重液粘性之影響，而無法達到分離之目的。因此，本分選法除受到顆粒之比重差異及重液比重影響外，處理之顆粒粒度及重液之粘性也是重要的因素。分選粒度範圍在2mm~100mm之間，而離心式可處理0.5mm~20mm。典型重液分選系統如圖3.62所示。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.62 重液分選系統

(1)重液性質

A.真重液

為真正之溶液，可以是各種可溶性大之鹽類所溶成之溶液，或是高比重之有機溶液，常用之重液如表3.24所示。此類重液可保持長時間之物理穩定性，但價格貴，操作損失較難全部回收，使得操作成本提高，而且具有腐蝕性及毒性，在大量操作中較少使用。

B. 擬重液

為一種懸浮液，係由水與懸浮於水中之微細固體所組成，介質懸浮水中之穩定性較不易保持，需設計適當之裝置使其保持懸浮狀態。由於使用介質之價格較便宜，且可回收再使用，無毒性及腐蝕性，可調配 1.58~3.8 之比重液。常用之介質如表 3.25 所示，選用介質首要考慮之因素為比重，以便在適當之容積濃度下(一般為 23%)調製成比重合乎要求之擬重液;其次為便於回收，最好是能用簡單的磁選、浮選或分級將隨產物排出之介質回收再使用;同時也要考慮來源廣泛、價格便宜及不污染產物。其中應用最多的介質為矽鐵，因其硬度大、耐磨、帶強磁性，容易以磁選回收。

表 3.24 常用之重液

藥劑名稱	化學式	比重 Kg/L	配製溶液之最大比重 Kg/L
氯化鈉(鹽)Rock Salt	NaCl	2.1-2.2	1.17
氯化鈣 Calcium Chloride	CaCl ₂	2.15	1.30
三氯乙稀 Trichloroethylene (Ethylene Trichloride)	ClCH : CCl ₂	1.47	1.47
四氯化碳 Carbon Tetrachloride	CCl ₄	1.59	1.59
五氯乙烷 Pentachlorothane(Pentalin)	CHCl ₂ : CCl ₃	1.68	1.68
氯化鋅 Zinc Chloride	ZnCl ₂	2.91	2.07
二溴乙炔 Acetylene Dibromide(Dibromoethylene)	CH ₂ : CBr ₂	2.17	2.17
四溴乙烷 Tetrabromethane	CH ₂ CBr ₄	2.94	2.94
二溴甲烷 Methylene Bromide	CH ₂ Br ₂	2.97	2.96
三溴甲烷(溴仿)Bromoform	CHBr ₃	2.89	2.89
二溴化錫 Stannic Bromide	SnBr ₂	3.34	3.34
碘化鈣汞 Calcium Mercury Iodide	CaHgI ₄	3.10	3.10
二碘甲烷 Methylene Iodide(Diiodomethane)	CH ₂ I ₂	3.3	1.42
碘化鋇汞 Barium Mercury Iodide	BaHgI ₄	3.65	3.65
磺酸胺和氧化鉛混合物 Pb Aminosulphoric Acid	NH ₂ (SO ₃ H)+PbO	4.00	4.00
卡里時溶液 Clerici Solution	CH ₂ (COOTI) ₂ +HCOOTTI	4.06	4.40

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

表 3.25 常用之重液介質

介質名稱	比重	配成重液 最大比重	摩氏硬度
酸性岩石(砂、岩石、燧石)	2.60	1.58	5~7
鹼性岩石(玄武岩)	3.00	1.64	5~7
重晶石(Barite)	4.48	2.05	3~3.5
黃鐵礦(Pyrite)	5~5.2	2.38	6~6.5
磁鐵礦(Magnetite)	5~5.2	2.38	5.5~6.5
方鉛礦(Galena)	7~7.6	2.75	2.5~2.75
細磨矽鐵(Ferrosilicon Si : 12~15%)	6.7	3.20	7.3~7.6
粉狀矽鐵	6.7	3.80	4.2~7.6

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

(2)重液分選機

A.重力式重液分選機

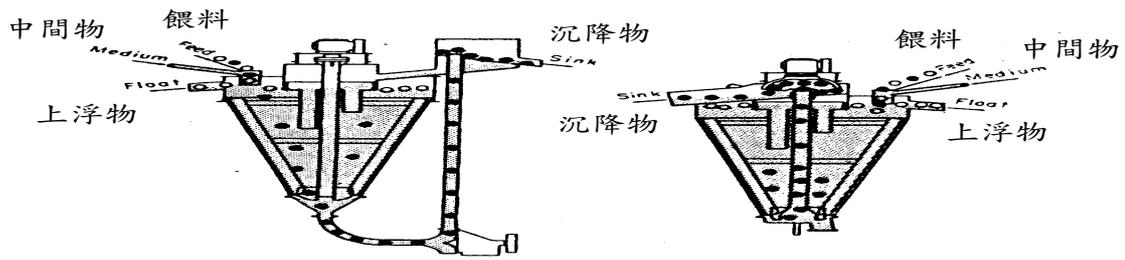
分選機含有餵料、重液之給入口及浮物/沈物之排出設備所構成。其中排出方法，浮物可用耙式或溢流方式排出；沈物之排出則須考慮如何避免同時排出過多之重液，而擾亂容器內比重分層之進行。

a.錐形分選機

如圖 3.63 所示，錐形槽直徑可大至 6 公尺，給料最大粒度可達 10 公分，而處理量約為 500 噸/小時。餵料及補充重液直接給入浮物面下幾公分處，槽中有一主軸可以是空心軸，帶著攪拌片旋轉，使重介質維持均勻的懸浮。浮物溢流排出，沈物下沉至錐間，由泵浦抽出或空心軸之空氣提升機排出。

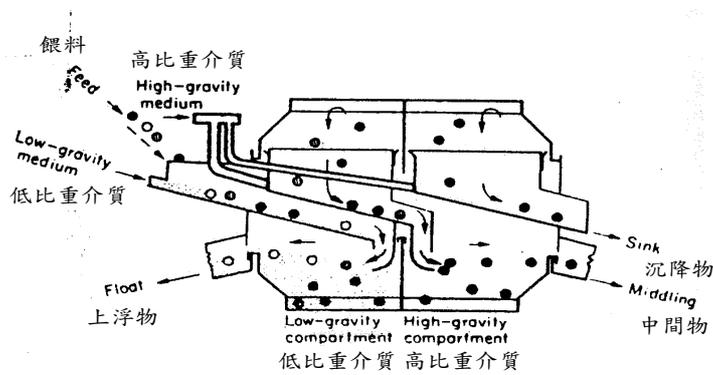
b.鼓形分選機

如圖 3.64 所示，是由直徑 4.3 公尺，高 6 公尺之圓筒，最大處理量可達 4500 噸/小時，可處理最大粒度為 30 公分。圓筒水平安裝，利用齒輪以 2 rpm 之轉速轉動，餵料與重液由筒的另一端給入。在筒內重質顆粒沈至筒底，再由筒壁所焊之揚板提升至沈物溜槽排出機外；浮物則隨重液由另一端溢流排出。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.63 錐形分選機

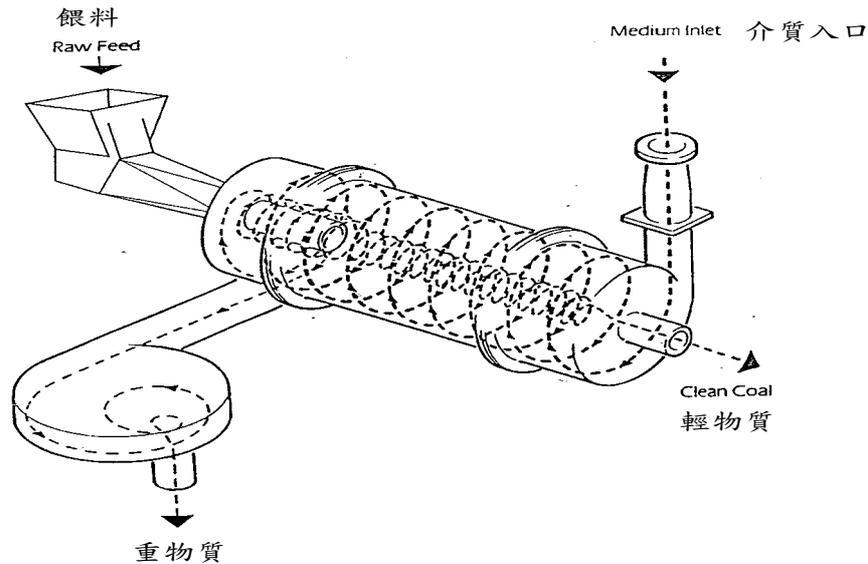


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.64 鼓形分選機

B. 離心式重力分選機

離心式是以離心力取代重力之分選力量，且有效降低重液粘性對分選之阻礙，使其比單純利用重力之重液分選更有效率，分選粒度可以細至 0.5mm 左右。此類裝置之缺點為重液在容器內高速旋轉，使重液介質之泥化程度提高，而增加損失量，同時也使設備容器易於磨損。最具代表性之離心式重液分選機為重液渦錐分選機(dense medium cyclone)，其構造與原理跟一般之濕式渦錐分級機相同，只是所用之介質為重液。進入渦錐器之餵料受離心力之作用，比重大於重液之顆粒所受離心力大，向外側運動集中於器壁，沿錐形部向下由沈物排出口排出。比重小於重液之顆粒所受離心力小，向中心集中由旋渦管排出成為浮物，如圖 3.65 所示。



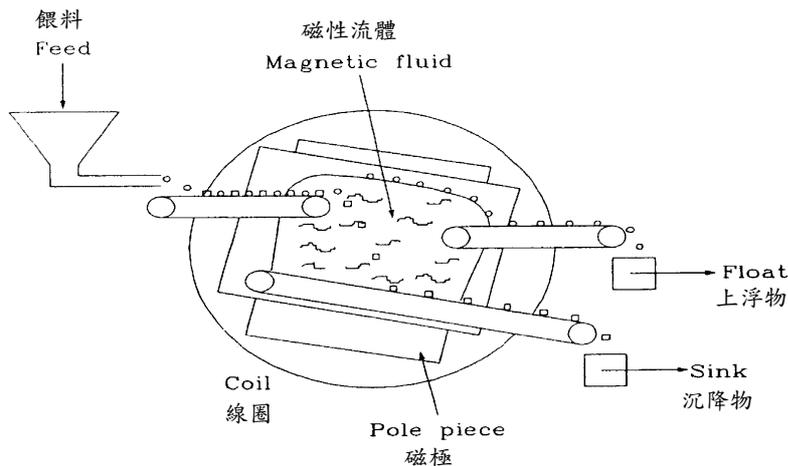
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.65 重液渦錐分選機

(3) 磁性流體之比重分選

在磁性流體中之非磁性物所受之磁性浮力，可由磁場強度之變化使它任意的改變，因此用同一種磁性流體就可分選各種高比重之非磁性物質。利用磁性流體在磁場上所產生之浮力，可分選對象物之比重限制可大幅地擴大，傳統重液分選無法分選之重質物(比重大於 3.8)及金屬類都可進行。本分選技術可應用於汽車切片、電器廢料及焚化爐灰渣等所含有之非磁性金屬類之相互分離。因為利用磁性流體作比重分選之對象應為非磁性物質，所以分選前應先將磁性物質去除。此外還須有一套回收附著於分選對象物之磁性流體與再調製之設備。

磁性流體分選機構造如圖 3.66 所示，分選對象物由輸送帶至分選槽中之磁性流體池，分為浮上物與沈下物，再分別排出，分選槽之大小為每邊 20 公分，此機可應用於鋅合金與黃銅混合廢料之分選，也可用於汽車切片之廢料。此外也可採用 Sr 或 Sn-Co 永久磁鐵為磁場，由 50cmx13cmx5cm 尺寸之兩片磁鐵所構成，採永久磁鐵可使裝置小型化，且不必耗用電力，同時也可改用易回收之水性磁性流體。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.66 磁性流體分選機

(4)慣性力分選

慣性力分選法係利用廢棄物之物理性質(彈性/重量)之不同，分選出其中各種不同成分之方法。本法可分成下列三種分選設備(詳見圖 3.67 所示)：

A.彈力分選機

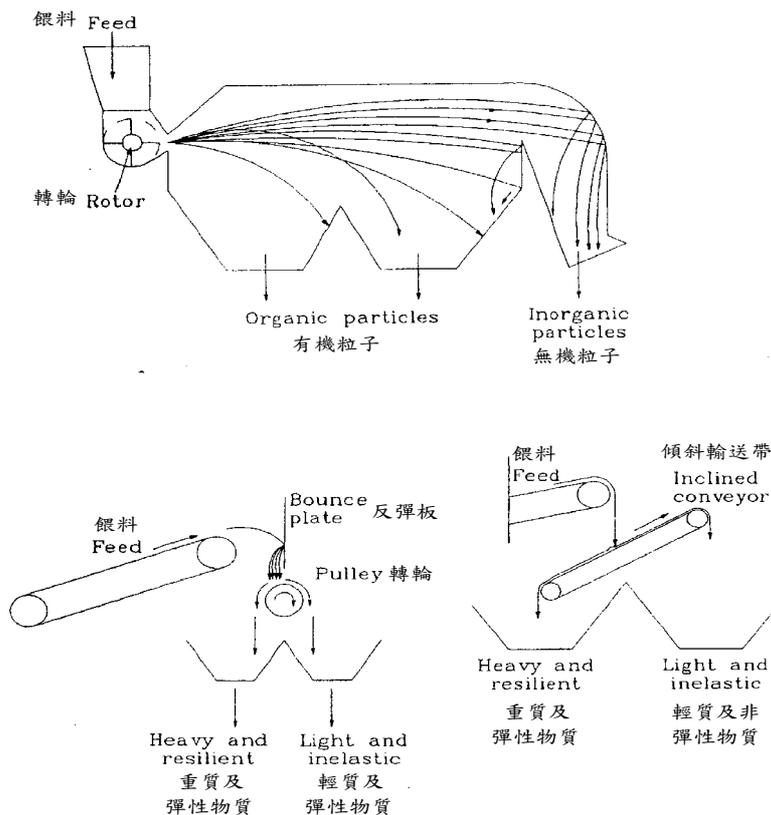
餵料經由滾輪之滾動力彈出，重質顆粒因重量重，慣性力及彈力較大而飛向遠端;反之，輕質顆粒因彈力及慣性力較小，而在近餵料端落下。

B.反彈分選機

餵料藉由輸送帶產生之動量，在碰到反彈板後，依物質顆粒之反彈力大小，而分選輕、重物質之分選設備。

C.傾斜輸送分離機

本機與平流分選機中之帶選機之原理相同，但是本機是用於乾式系統，而不用水作為介質及水流沖洗之作用，僅利用物質顆粒之慣性力，在傾斜輸送帶上之分離面，使重質顆粒靠本身之重力下沈至帶底端之重質顆粒收集區;輕質顆粒則被輸送帶帶至頂端之輕質顆粒集中區排出。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.67 慣性力分選設備

3.3.5 磁力分選技術與設備

利用礦物所具磁性強弱之不同，置於磁場內使強磁性物質被磁極吸引而分選之方法，稱為磁選法。早期採用電磁極產生磁場分選，其後使用永久磁極，然後再用一平面磁極及尖削磁極之組合，使產生磁場梯度(不均勻磁場)，使磁性物質集中於尖削磁極，也讓磁選機之應用日漸廣泛。為分選弱磁性物質，磁選機之發展不斷提高其磁場強度和梯度，也就是在兩磁極之間，充填多層聚磁介質(齒板或小球)，因而製造出高強度磁選機(high intensity magnetic separator, HIMS)與高梯度磁選機(high gradient magnetic separator, HGMS)。目前為再提高磁選機的磁場強度，已對一些超導體材料進行研究，擬利用超導材料零電阻，不耗電能之優點製造超導電磁極，則可獲得體積小、重量輕、磁場強度與梯度大之磁選機。

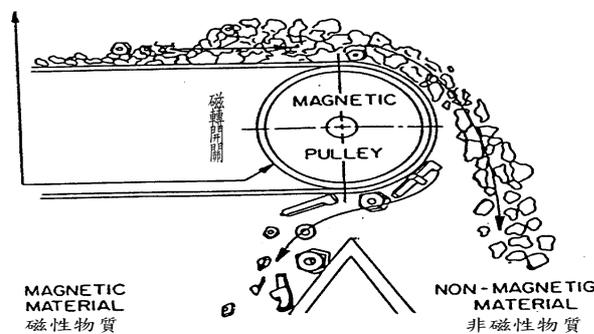
磁選設備若按用途分類，可分為磁選機、磁力脫水機、除鐵器、預磁器及脫磁器等。以結構體來分類，則可分為圓筒式、圓錐式、圓盤式、滾輪式、轉環式與帶式等。所採用之磁場發生方式有永磁與電磁兩種，而且磁場又有強弱之分。

按操作條件有乾式與濕式兩種。依上述之特徵分類不易，故可用磁場條件(即磁場強度與磁場梯度之相成積)作為磁選機之分類標準，再以操作條件及磁選機結構為輔。一般以磁場條件 $10 \times 10^6 (\text{oe}^2/\text{cm})$ 以下為低強度磁選機，以 $10 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6 (\text{oe}^2/\text{cm})$ 為中強度；以 $100 \times 10^6 (\text{oe}^2/\text{cm})$ 以上為高強度磁選機(可再分為高強度及高梯度)。磁選機之磁場條件值小，則表示僅能對強磁性物質有作用；若磁場條件值大之磁選機，對弱磁性物質也可產生分選作用。將常用之磁選機說明如下：

1. 乾式低(中)強度磁選機

(1) 磁滑輪磁選機(magnetic pulleys)

如圖 3.68 所示，主要用於去除混雜在廢棄物中之鐵塊及鐵片等物質。

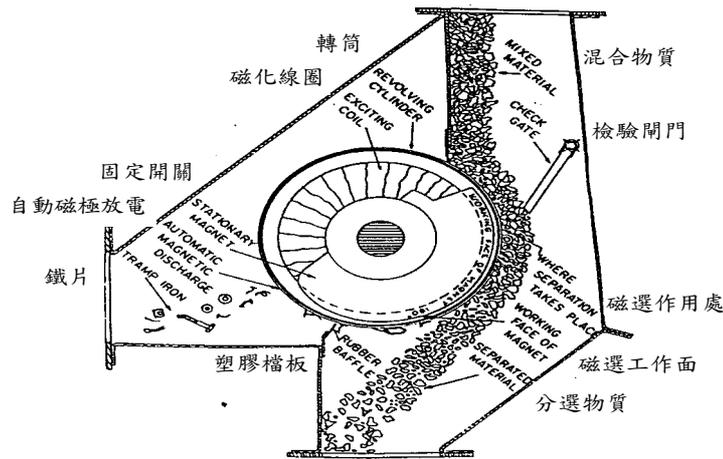


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.68 磁滑輪磁選機之操作原理

(2) 電磁筒磁選機(magnetic drum separator)

如圖 3.69 所示之裝置，也是以分選廢棄物中之含鐵物質為主。由分選機上方餵入欲分選之物質，非磁性物質則直接落入圓筒下方之非磁性物質收集處排出，而磁性物質隨圓筒轉至左側脫離磁場，由圓筒左側排出。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.69 電磁筒磁選機

(3) 矩形懸掛式磁選機 (rectangular suspended magnets)

在皮帶輸送機上懸掛一電磁鐵，用於去除廢棄物中之鐵質物。圖 3.70 所示之懸掛式磁選裝置，包括懸吊磁鐵方式、平行餵料之連續分選裝置及交叉皮帶方式之連續分選裝置等三種型式。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.70 矩形懸掛式磁選機之型式

2. 濕式低強度磁選機

濕式低強度磁選機用於分選強磁性物及重液分選中之重介質回收，其磁極可用永久磁鐵，但若磁場強度要求較高時，也可用電磁鐵。

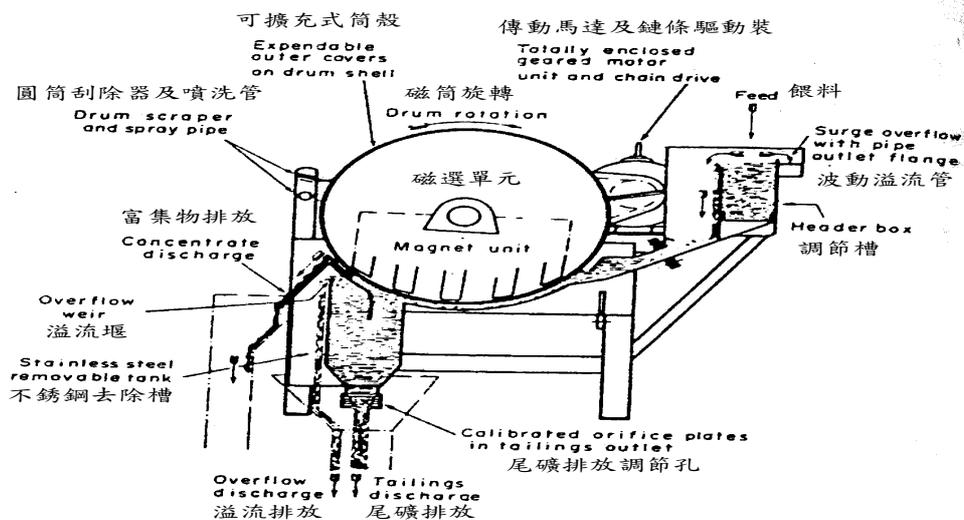
(1) 筒形磁選機 (drum magnetic separator)

此磁選機主要由不銹鋼圓筒，極性沿圓周交替的永久磁鐵、不銹鋼槽及

支架組成，如圖 3.71 所示。磁極數通常有 5 個以上可產生磁極交替之翻動作用。依據槽體構造型式不同，分為順流型、逆流型及半逆流型等三種型式。順流型之餵料方向與圓筒的旋轉方向或磁性產物移動方向一致，非磁性物質由圓筒下方之槽間隙排出，磁性物質被圓筒吸住，隨圓筒旋轉至磁極邊緣之磁場弱處排出。逆流型之餵料方向與圓筒旋轉方向或磁性產物的移動方向相反。半逆流型之餵料進入磁選槽，遇到壓力水使其呈鬆散狀態進入磁場，磁性物質吸住圓筒一起向上移動之過程中，受到磁極交替之翻動作用，夾雜在磁性物質中之非磁性物質易被清除。

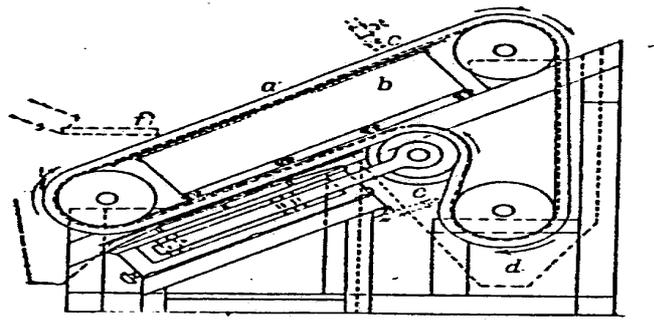
(2)Dings-Roche 帶式磁選機

本磁選機之構造外型與重力分選之帶選機(vanner)相類似，如圖 3.72 所示，也是在一傾斜 30° 左右的無極輸送帶(f)處給入餵料，置於輸送帶下方之 (b) 為 20 個異極排列之電磁極，而輸送帶依照箭頭方向運動，磁性物質隨輸送帶上行，受到異極排列之作用著磁物質產生翻動，再加上(c)的洗淨水，可將夾帶之非磁性物質洗下由下方排出，而著磁物質在(d)水槽被洗下。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.71 筒形磁選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.72 Dings-Roche 帶式磁選機

3. 乾式高強度磁選機

(1) 磁感應筒磁選機(induced roll magnetic separator)

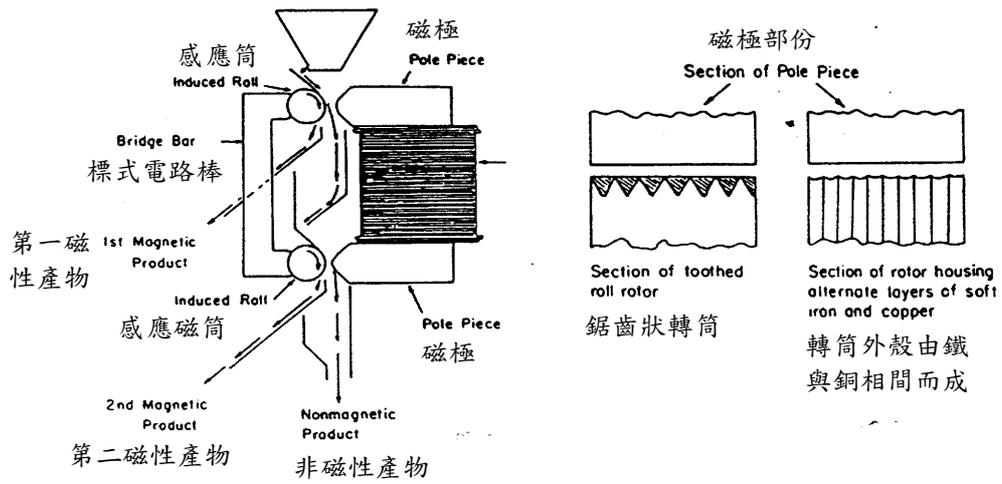
本磁選機主要由磁感應筒、磁軛及激磁線圈所構成，如圖 3.73 所示。餵料進入到快速旋轉的磁感應筒(induced roll)頂部，被帶到轉筒與可調磁極之間的磁場內，餵料中之磁性物質被吸在磁感應筒上，隨著轉筒旋轉至分選擋板之後脫離，此處之磁場強度低。另外，非磁性物質則在磁場內由轉筒的離心力拋出，此磁性物質早離開轉筒而在分選擋板的另一邊成為非磁性產物。若去除含鐵物質，則在第一磁感應筒的非磁性產物，經第二次磁感應筒再選。

(2) 交叉皮帶磁選機(cross-belt magnetic separator)

本機之磁極係由兩個或多個馬蹄形電磁鐵所組成，其磁極一個在輸送帶之上方，一個在下方，上方磁極呈尖狀，下方磁極呈平面，這就會使磁場會聚而使弱磁性質被吸向尖狀磁極，由無極揀選帶排出，如圖 3.74 所示。

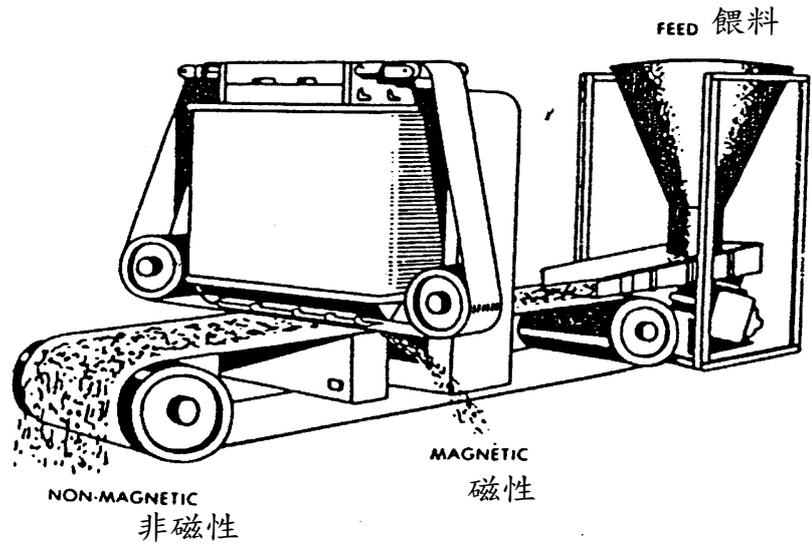
(3) 盤形磁選機(ring type magnetic separator)

盤形磁選機是交叉皮帶磁選機之改良型，將角尖形磁極與交叉皮帶改為帶有溝之圓盤，使兩磁極空隙減小，增加選擇性。目前使用的盤形磁選機有單盤、雙盤及三盤(如圖 3.75)等三種型式。圓盤在安裝時使前緣與輸送帶之空隙稍大於後緣之空隙，如此可使每一圓盤分選兩種導磁率不同之磁性物質。其操作原理與交叉皮帶磁選機相同，盤形磁選機之圓盤直徑稍大於輸送帶寬度，可將磁性物質帶至輸送帶外邊，在磁場中性區被刮入磁性物質收集槽中。

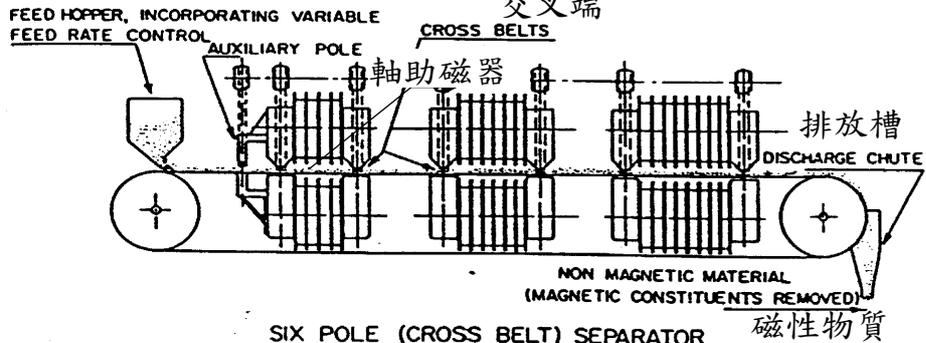


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.73 磁感應筒磁選機操作原理

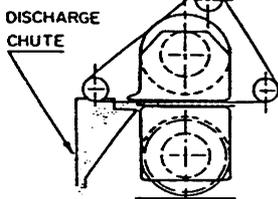


餵料器(可控制不同餵料速度)



SIX POLE (CROSS BELT) SEPARATOR
六個磁極(交叉磁帶)分選器

排放槽



TYPICAL CROSS SECTION
& CROSS BELT ARRANGEMENTS

MAGNETIC CONSTITUENTS
磁性物質

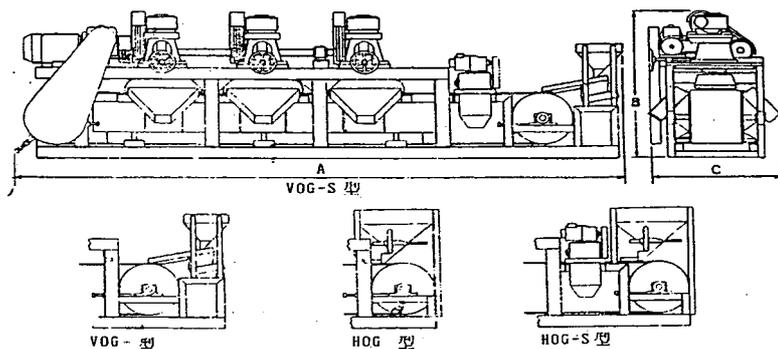
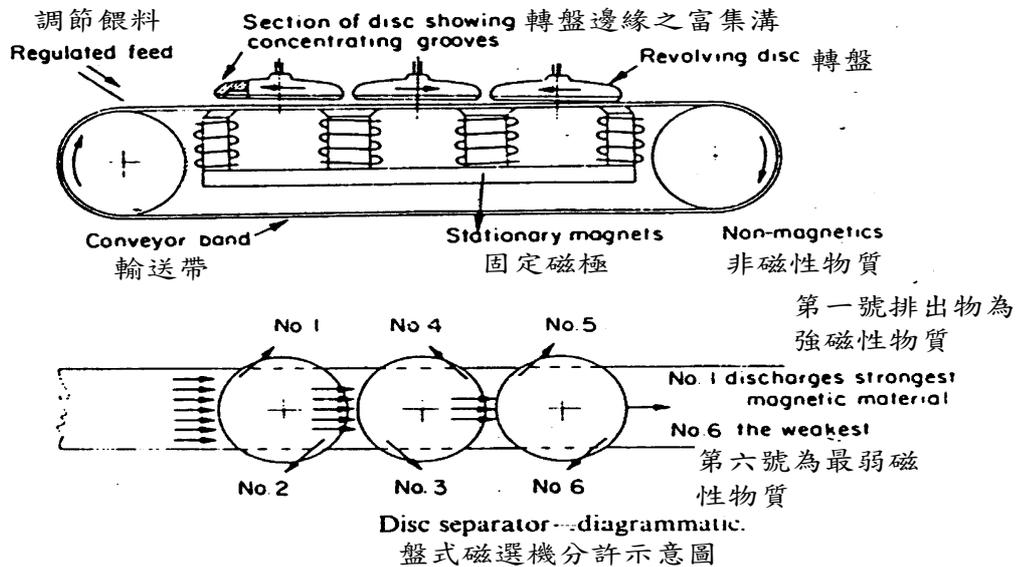
典型交叉皮帶磁選機構造

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.74 交叉皮帶磁選機

磁選及高強度分選機

MAGNETIC AND HIGH-TENSION SEPARATION



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.75 盤形磁選機

4. 濕式高強度磁選機

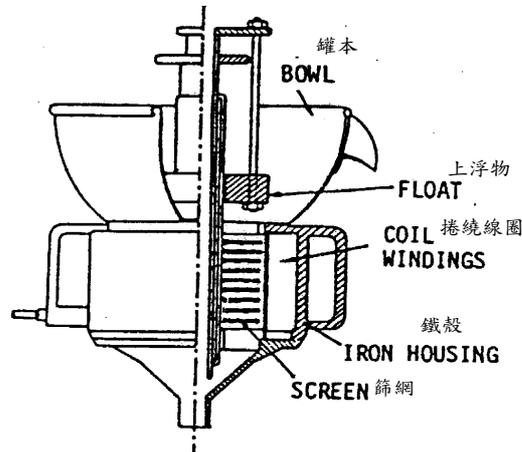
(1) Frantz 磁過濾機

本機在過濾機部份之過濾網是採用不銹鋼絲或篩板，將料漿給入槽內流經過濾網，非磁性物質直接流過，而磁性物質被鋼絲吸引住，採批次方式操作，可得分選效果，也是今日 HGMS 之雛形(如圖 3.76)。

(2) NY 轉筒型磁選機

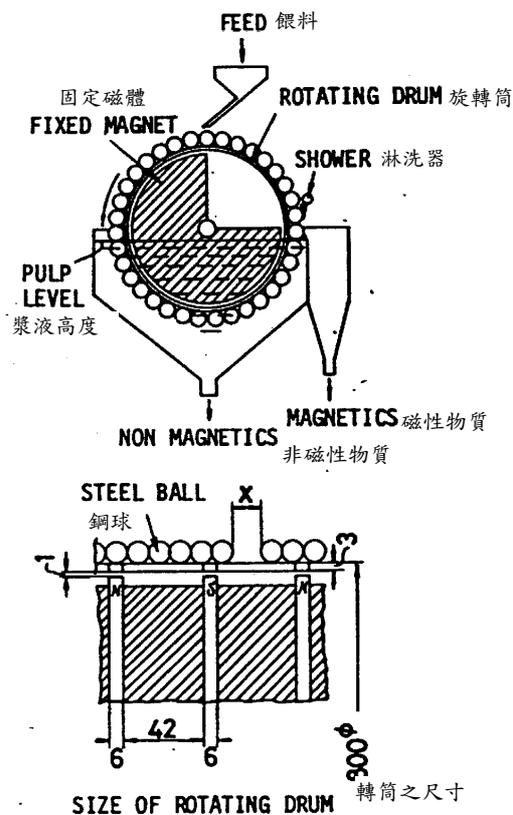
本機之構造與濕式低強度筒型磁選機之基本特徵相似，不同之處是在圓筒表面設置一層磁介質(球或棒)，在分選槽中有篩網以便磁介質循環使用，

如圖 3.77 所示。在圓筒表面呈方格子狀配置高透磁率鋼球，隨著圓筒以一定速度轉進料漿槽中，由於鋼球間都成為點狀磁場，不但加強磁場強度也提升磁場梯度，可將料漿中弱磁性物質吸引在鋼球上隨圓筒轉動至另一邊，由壓力水沖洗而獲得分選。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.76 Frantz 磁過濾機

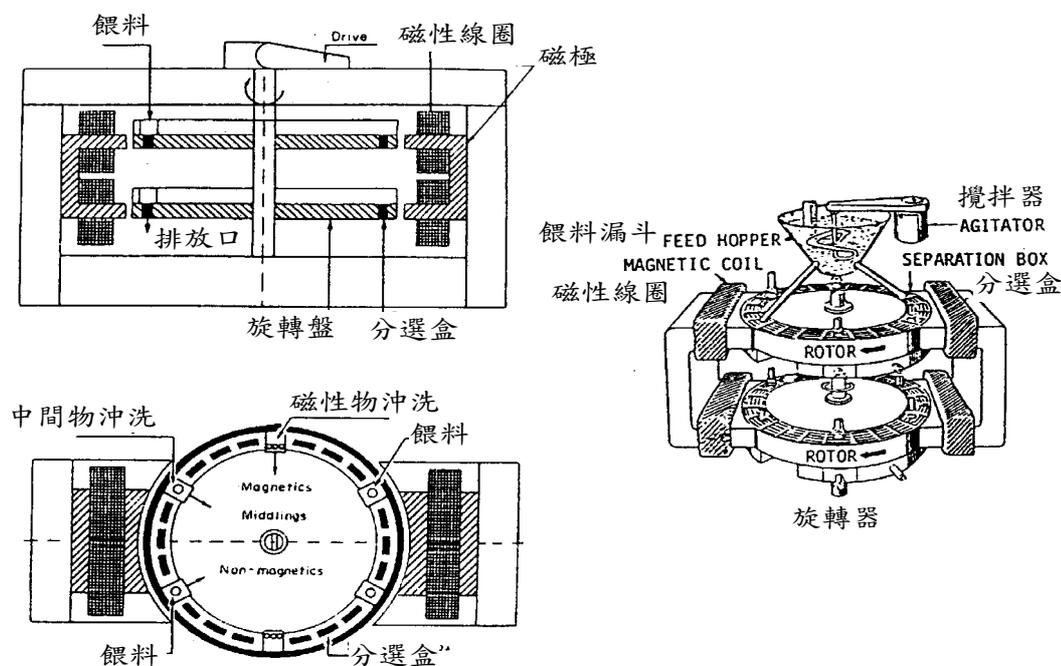


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.77 NY 轉筒型磁選機

(3) Jones 轉環型磁選機(Jones Wet HISM)

機體由鋼製門形框架組成，在框架上裝有兩個 U 型磁軛，在磁軛之水平部份套有勵磁線圈，線圈外部有密封之保護殼，用風扇進行空氣冷卻。由馬達帶動裝有上下兩分選轉盤的垂直軸，安裝在兩 U 形磁軛間(轉盤起鐵蕊作用)與磁軛構成閉合磁回路。轉盤周邊設有分選室，內裝鋸齒狀的不銹鋼聚磁板(板間距 1~3mm 左右)，詳圖 3.78。料漿自磁場進入口處連續給入分選室，隨著轉盤之旋轉而進入磁場內。非磁性物質隨著料漿之流動穿過聚磁板間隙流入下面之非磁性物質收集槽。磁性物質被吸在分選室之聚磁板上，隨轉盤一起轉動，在轉到距給料口 60° 位置時，即脫離磁場之前，以加壓水清洗夾雜之非磁性物質成中間產物。當轉到 120° 位置時，即處於磁場中性區，用高壓水將吸引在聚磁板上之磁性物質洗下成為富集物。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

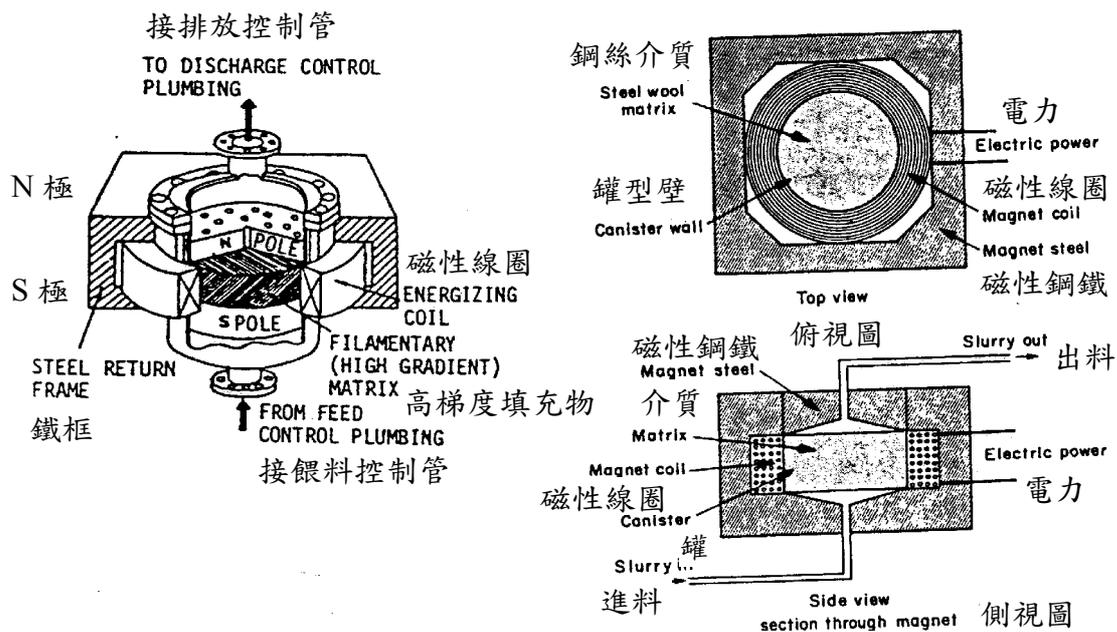
圖 3.78 Jones 轉環型磁選機

5. 高梯度磁選機(HGMS)

(1) 罐型高梯度磁選機(canister type HGMS)

本機(如圖 3.79)使用螺線管型線圈之內部磁作為分選空間，在此分選空間內填充磁介質，如耐磨耗性、耐腐蝕性佳的鋼絲或金屬網。在螺線管線圈之外面以鐵框圍住系構成磁漏少的閉合磁回路，所用之線圈材料為中空銅

線，以利冷卻水對線圈之冷卻，通入低電壓電流激磁，即可獲得強大之磁場力。使通過之弱磁性物質被磁化鋼絲吸引，而非磁性物質不受影響的情形下得到分選。經一段操作時間之後，需要中斷餵料進行清洗，再關掉電源消除磁場，並逆洗清除著磁物質，因而操作是不連續的，工作循環約為 10~15 分，運轉效率並不算太高。

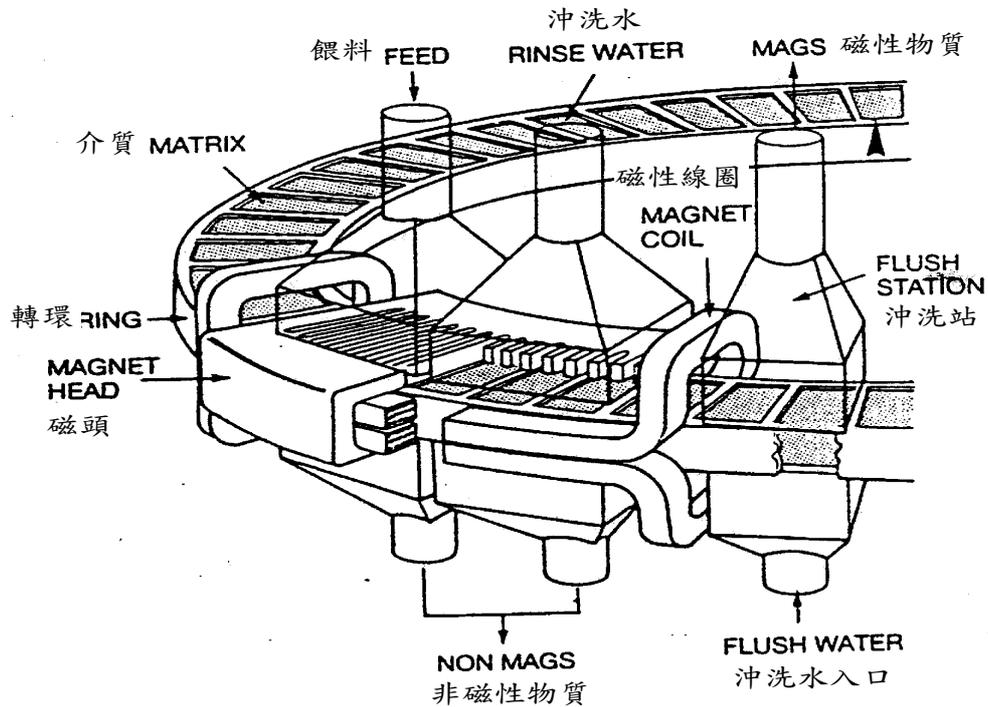


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.79 罐型高梯度磁選機

(2) 轉環型高梯度磁選機(carousel type HGMS)

此機由轉環、馬鞍形螺線管線圈、圍住螺線管之鐵殼與裝有磁介質之分選槽等組成。操作原理與 Jones HIMS 相類似，最大不同點在於磁極的構造上，此機所用之磁極原理與罐型 HGMS 相同，為產生均勻的磁場，由兩個分開上下對稱的馬鞍形螺線管線圈組成，如此裝配也便於轉環通過，在線圈周圍再用鐵框架包圍起來構成閉合磁回路。料漿由磁化區的分選槽給入處送入，非磁性物質隨料漿流過磁介質的間隙，到分選槽之非磁性物質收集區；弱磁性物質被吸引在磁化之聚磁介質上，並隨轉環進入清洗段，進一步清洗掉雜質(非磁性物質)，然後離開磁化區，用壓力水沖洗吸引在介質上之弱磁性物質，而獲得分選。如此之裝置可連續操作及提高操作效率，更可處理較高濃度及弱磁性物質較多之料漿，如圖 3.80 所示。



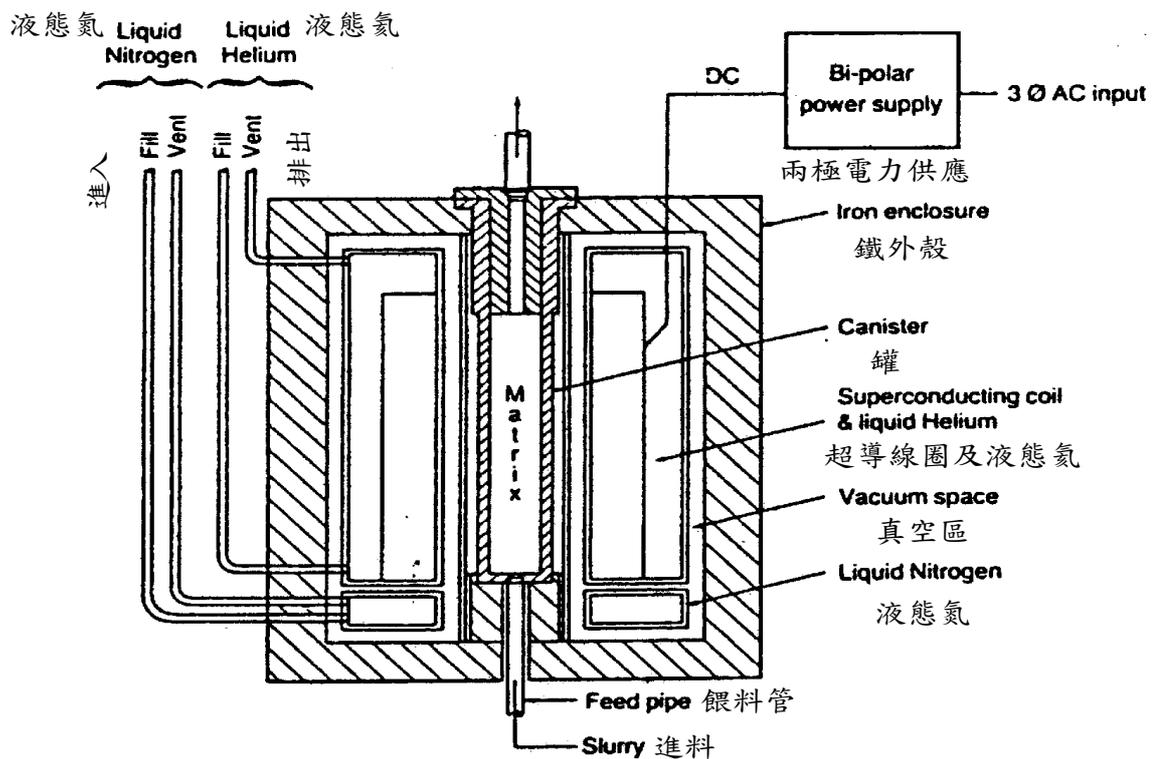
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.80 轉環型高梯度磁選機

6. 超導磁選機

超導磁選機是將超導體作成之超導磁體替代上述之傳統磁體，從而產生很高的磁場強度、能量消耗低、重量輕、體積小的最尖端設備。在目前而言，超導材料價格昂貴，需要高超技術的冷卻設備，因此製造成本相當高，但隨著超導材料與冷卻技術之進步，將來仍有一天會廣泛地應用在實際之磁選作業。

美國 Eriez Magnetics 公司設計有如圖 3.81 之超導磁選機。其構造為鐵框架包裹螺線管，環狀線圈中心之室溫孔直徑為 152mm，長 508mm，可以裝入一直徑 102mm，長 508mm 充填有鋼絲介質的分選罐，此構造與罐形 HGMS 相同，只不過多一套冷卻設備，使用液氮與液氦冷卻。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.81 超導磁選機

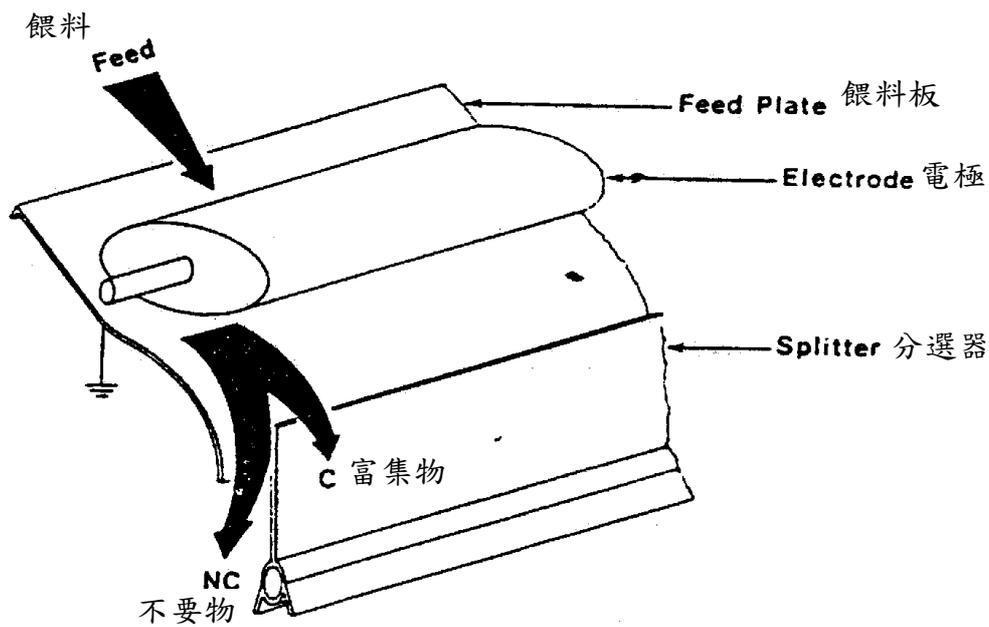
3.3.6 靜電分選技術與設備

1. 靜電分選機

靜電分選法是利用各種物質不同的導電性來進行分選之技術，其餵料大都經重力分選或磁選所得之富集物，因此靜電分選通常應用在精選作業上，以提高富集物品位或分選含兩種以上物質的初步富集物，以便作綜合回收。

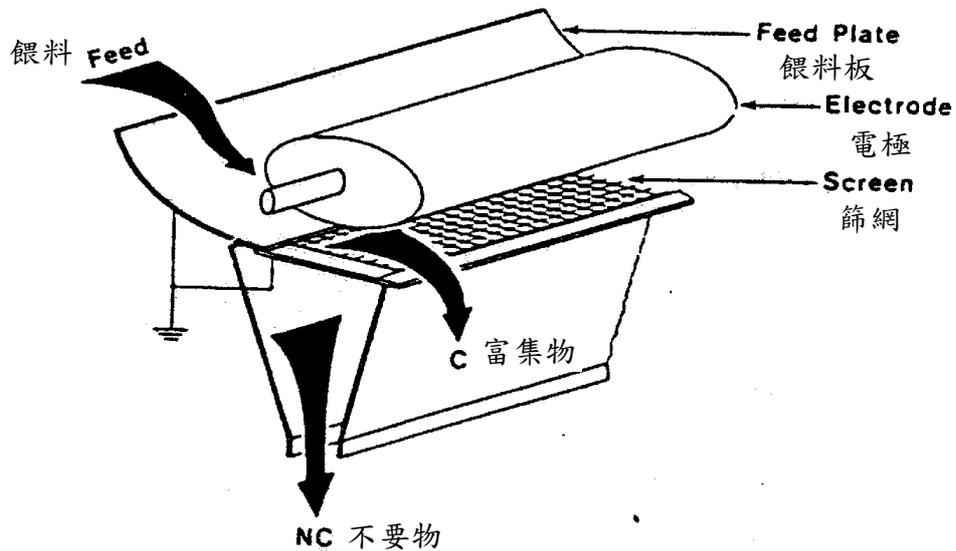
靜電分選機種類很多，由過去的電暈靜電分選機、電暈靜電複合電場靜電分選機發展為高壓靜電分選機，當前之發展趨勢是研製高效率、大處理量的高壓靜電分選機。

靜電分選機之構造特徵有轉輪式、板式(詳圖 3.82)、網式(詳圖 3.83)及箱式；由於靜電分選之餵料通常成層狀給入，無法使每一顆粒都與接地轉輪接觸，因此在單一靜電分選機上，無法得到完全之分離，在實際操作上都是以多部靜電分選機排列成層狀，如圖 3.84 所示。高壓靜電分選機(high tension separator)之內部構造如圖 3.85 所示。



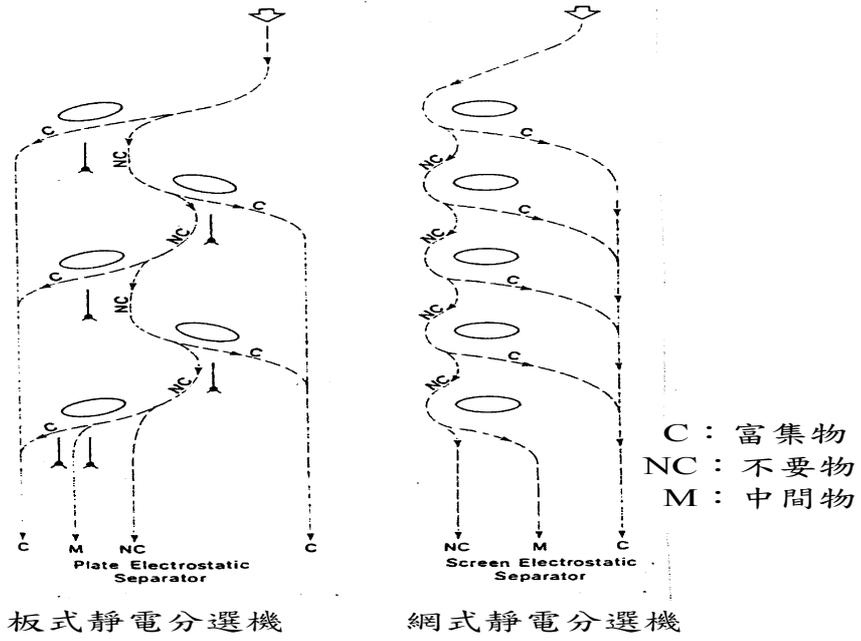
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.82 板式靜電分選機



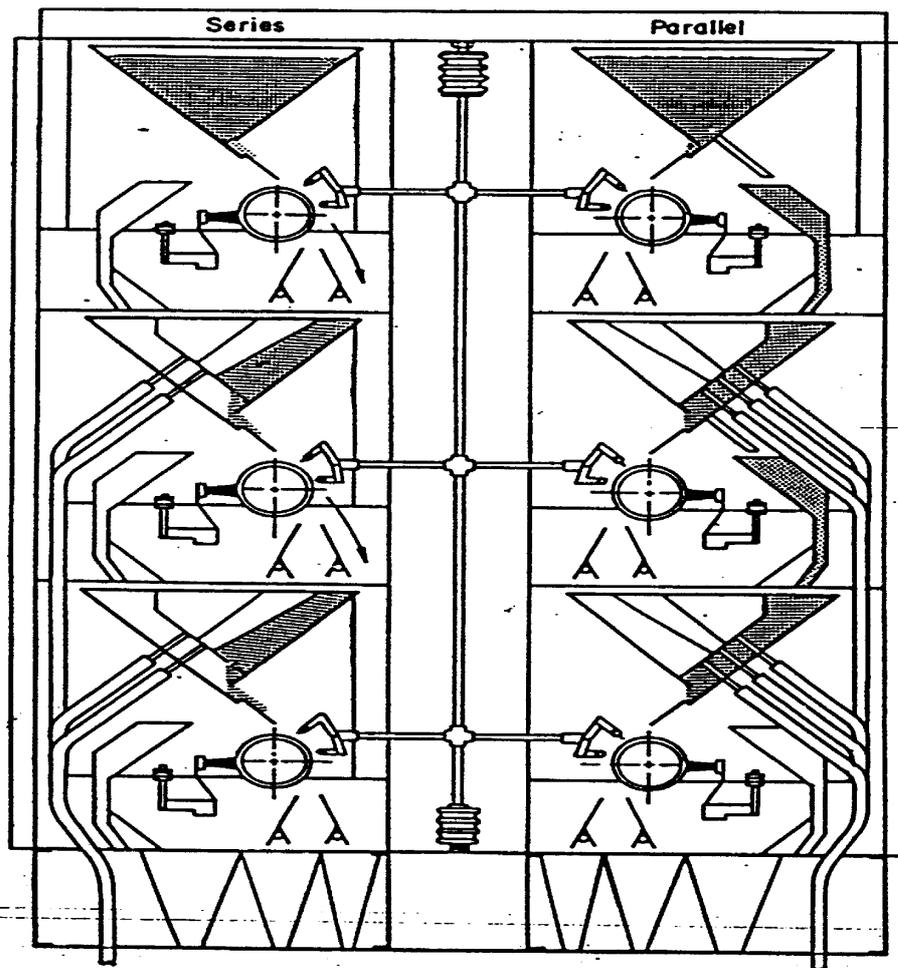
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.83 網式靜電分選機



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.84 多部靜電分選機排列成層狀



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.85 高壓靜電分選機之內部構造圖

2. 渦電流分選

渦電流分選法可用於分選比重差異不大的物質。這種利用磁場來突顯導體間排斥力之分選法，可作為各種金屬間之分選工作，分選指標為電導性(σ)與物質密度(ρ)之比值(σ/ρ)，各金屬之電導性與密度之比值，如表 3.26 所示。

渦電流分選機早期之發展是以線性感應馬達(linear induction motors)為重點，在各種不同設計機型中，皆以線性感應馬達裝設於輸送帶之上方、下方及側面等方式來進行分選，也有配合重力之垂直分選方式，但是這些方式都有耗用較多能量及操作成本太高之缺點。

隨著高強度永久磁極之開發，使得耗能低的非鐵金屬分選系統也跟著開發出來。藉由永久磁極在分選轉筒內之高速轉動(達到 3,000rpm)，則可產生變動磁場以分選從轉筒上經過之餵料，物質以不同之產品離開轉筒，非鐵金屬被圓

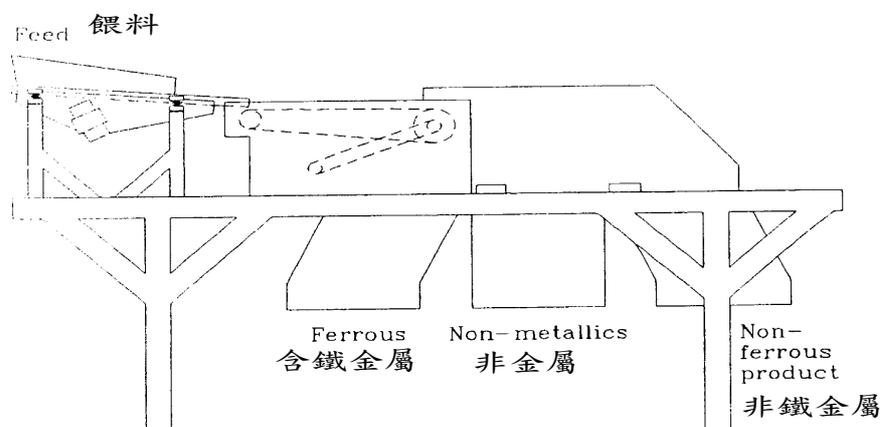
筒之斥力遠遠地拋出;非金屬藉由重力飛離轉筒;鐵金屬附著於轉筒上，最後再刷下富集，如圖 3.86 所示。

Newell 工程公司開發一套非金屬分選系統，也是利用永久磁極之渦電流分選原理，其設備費用比 LIMS 型式者便宜 45%，且節省電能達 98%以上，處理能力為 4~5 噸/小時，詳見圖 3.87 所示。

表 3.26 各類金屬導電度與密度之比值表

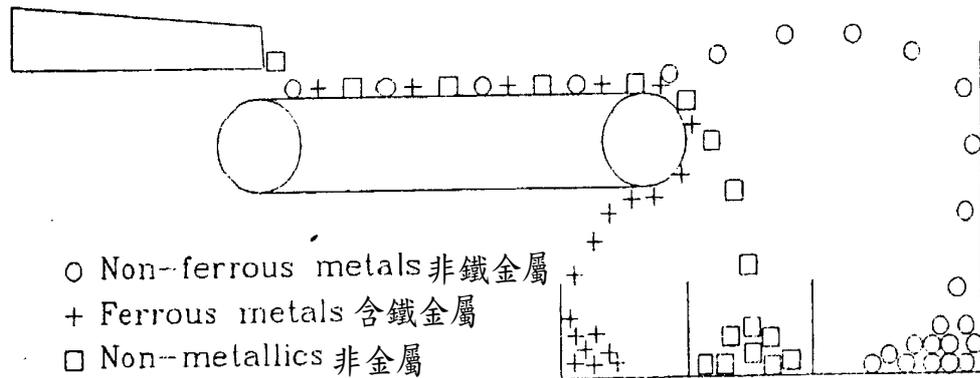
金屬	導電度 σ (mho/m)	密度 ρ (kg/m ³)	$\frac{\sigma}{\rho}$ (mho-m ² /kg)
鋁	0.35×10^8	2.7×10^3	13.0×10^3
銅	0.59×10^8	8.9×10^3	6.7×10^3
銀	0.63×10^8	10.5×10^3	6.0×10^3
鋅	0.17×10^8	7.1×10^3	2.4×10^3
黃銅	0.14×10^8	8.5×10^3	1.7×10^3
錫	0.09×10^8	7.3×10^3	1.2×10^3
鉛	0.05×10^8	11.3×10^3	2.4×10^3

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.86 渦電流分選系統圖



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.87 Newell 公司之渦電流分選機

3.3.6 泡沫浮選技術與設備

浮選機應具備之功能包括使料漿之顆粒在浮選槽內保持懸浮狀態，進入浮選槽內之氣泡能均勻分散，使疏水性顆粒易於附著於氣泡上，保持平衡之泡沫層及避免顆粒脫落，能連續操作及便於控制液面。浮選機之分類以空氣導入法為綱，氣泡之產生方式為目，輔以料漿之流動方式可分類如下：

1. 空氣吹壓法(pneumatic type)

此類型之浮選機是利用壓縮空氣吹進料漿中，形成氣泡之同時也產生料漿之攪拌混合作用。

- (1) 固定隔膜型：槽型及柱槽型。
- (2) 可動隔膜型。
- (3) 無隔膜型。
- (4) 噴射型。

2. 機械攪拌法(mechanical type)

由機械轉動之槳葉攪動料漿，使液面捲進空氣造成氣泡者，也可由槳葉轉動生成負壓吸入空氣者。

- (1) 單純攪拌型。
- (2) 水流瀑布型：幫浦外置型及幫浦內置型。
- (3) 吸氣型。

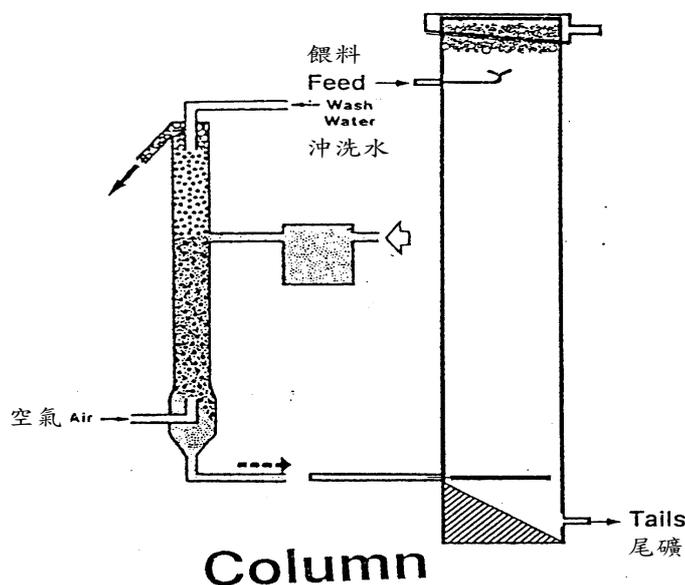
(4)攪拌吹氣型。

空氣吹入式為早期浮選之主要機型，但由於其料漿攪拌混合性較差，目前只有 WBS 型 S-W 還有使用外，其他都被機械式之吸氣型及攪拌吹氣型所取代。然而機械式為目前浮選技術與設備之主流，廣泛使用的有吸氣型與攪拌吹氣型。

1.吹氣式浮選機

(1)柱槽浮選機

本機外型為圓柱形或上方下圓柱分離槽兩種，如圖 3.88 所示。柱槽內無機械攪拌裝置，料漿在富集物溢流口下方 3mm 處泵入，在柱料漿中，將疏水顆粒上浮至泡沫層，因有厚 1~1.5m 泡沫層，可得高品位富集物，不要物下降由底部排出。充氣器為本機的關鍵性主件，直接影響氣泡的分散程度以及浮選效率，其構造型式有爐條式、豎管式、床石式、旋剷式與噴射式等。所送入之空氣壓應保持穩定，一般要求在 $1\sim 1.5\text{kg/cm}^2$ 的風壓， $1.6\sim 2.0\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$ 的風量。本機為構造簡單，製造安裝容易，占地面積小，處理量大，尤其對於微細顆粒的浮選效果特佳。缺點為充氣器在用石灰作調整劑的高鹼度料漿中容易結垢堵塞氣孔，粗顆粒難以浮上，選別效果差。



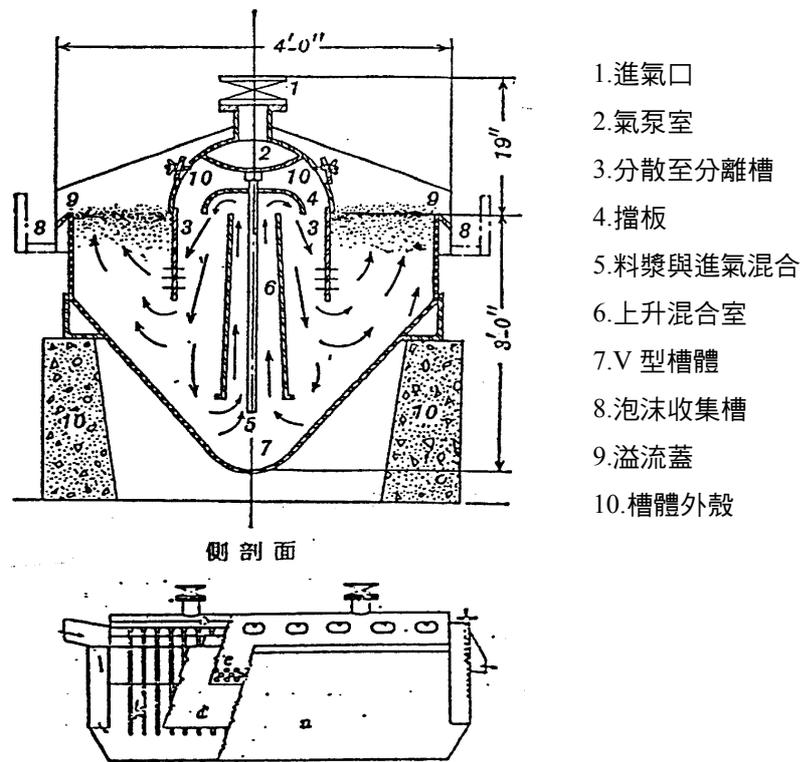
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.88 柱槽浮選機

(2)S-W 空氣浮選機(S-W air flotation machines)

此類浮選機為早期所使用的氣壓式浮選機，其分選作用都是吹入空氣，

利用氣泵(air lift)使氣泡在浮選槽中與料漿產生混合作用，並將疏水物質帶至泡沫層。就 WBS 型浮選機而言，其斷面呈 V 字型之長槽，在中心線上垂直排列多支與主風管連接之進氣管，由此吹入空氣使氣泡與料漿在氣泵室混合上升，遇上擋板改變流向往下，使料漿與液面產生激烈之衝突而獲得充分之混合作用，而後沿著擋板而下，由擋板之下方或細孔流向分離室。此擋板可使混合攪拌不妨害分離室的液面穩定，同時整個擋板剛好形成一密閉室，可由氣壓調整控制料漿流向分離室的量。所生成之泡沫由槽之兩端扒出，不要物則由餵料的另一端設置閘門控制排出，如圖 3.89 所示。



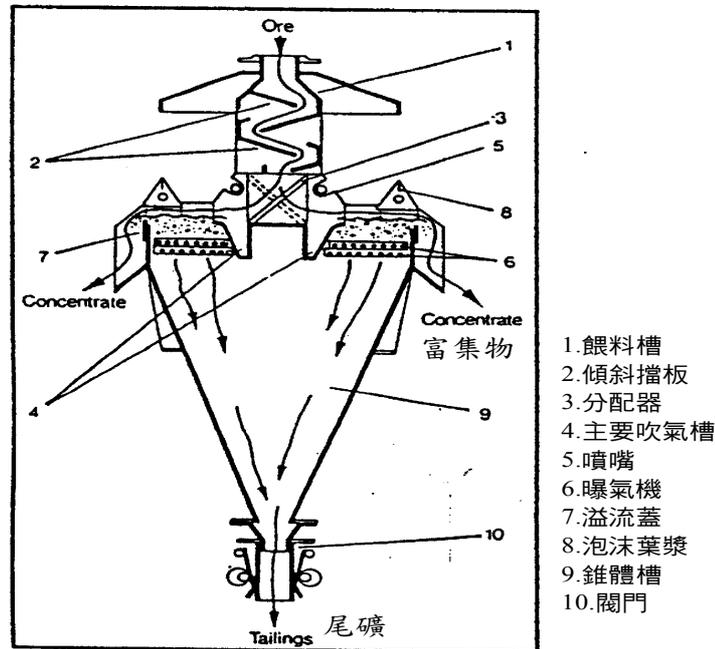
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.89 WBS 型 S-W 浮選機

(3) 泡沫浮選機(froth separator)

本機之分選原理與一般浮選機不同，將調好浮選藥劑的料漿從浮選槽上部的泡沫層給入，讓疏水顆粒就附著在泡沫層，由兩側溢流成為富集物，而親水性顆粒則通過泡沫層，並穿過充氣器之空隙進入錐形槽的料漿中，由排出口排出，如圖 3.90 所示。外形高長寬為 3,000×2,100×1,800mm，充氣器(aerators)安裝在槽的上部，距溢流堰下 200~1,000mm 處。依據浮選作業的要求，可以是淺槽或深槽，為兩排 40~60 孔/cm² 的多孔橡膠管，以 17 lb/in² 的

壓力進氣，氣體消耗量在 $2 \text{ m}^3/\text{min}$ 以下，對餵料濃度 50~70% 的料漿，每小時可處理 50 噸。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.90 泡沫浮選機

2. 機械攪拌或吸氣型浮選機

(1) Booth 浮選機

特徵是浮選槽較淺，在轉動軸上裝有兩個葉輪，上葉輪為吸氣葉輪，靠近料漿液面之下，用來吸入空氣並分散氣泡。下葉輪為攪拌輪，呈螺旋漿形，按裝在軸下端，用來使料漿維持懸浮狀。由於採用上下葉輪的關係，料漿循環有力，液面平穩吸氣量大，適於粗顆粒浮選，如圖 3.91(a) 所示。

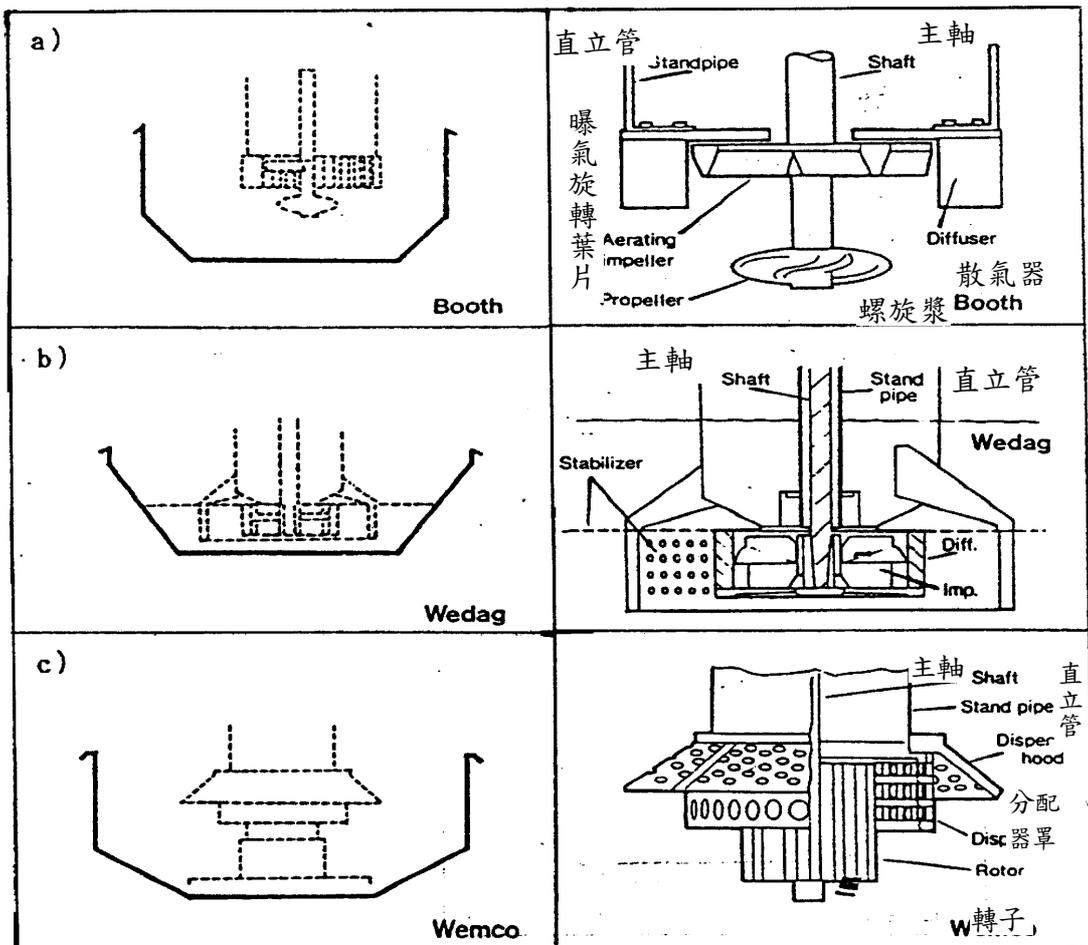
(2) Wedag 浮選機

本機浮選槽淺而寬，採用雙側刮泡方式。其特徵在於葉輪結構新穎，採用多搖擺葉輪，它由數塊垂直的徑向葉片，由盤式扇形體連結起來，每堆交錯的扇形體旋轉相反方向傾斜，葉輪每轉一圈，料漿會產生多次的翻滾，可大大地增加料漿的吸氣量，浮選槽內設計有多道的穩壓風柵，提高泡沫穩定性，如圖 3.91(b)。

(3) Wemco 浮選機

本機適用於金屬物質與非金屬物質的浮選之外，也可用於工業廢料的浮

選分離如舊紙脫墨等，本機的重要改進是在攪拌機構中的迴轉架(rotor)與擴散器(disperser)，採用有 8~10 葉片的星形迴轉架與具有橢圓孔的擴散器，如此可使快速旋轉的迴轉子吹入大量的空氣與維持料漿的懸浮狀，而由擴散器將迴轉架所產生的料漿渦流與泡沫層隔離，保持泡沫層平穩，操作情形如圖 3.91(c)所示。

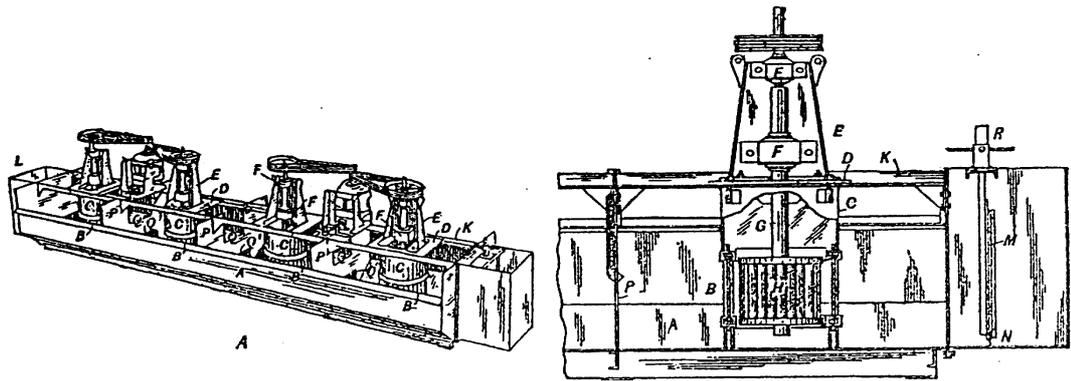


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.91 各類吸氣型浮選機

(4)Fagergren 浮選機

此機種是世界上應用最早最廣的浮選設備之一，屢經改進，現有標準型與改良水平型二種。標準型為圓型或方型浮選槽，槽與槽之間有區隔，依階梯落差排列構成浮選機組，再由一槽再一槽的方式進行浮選。水平型則以數槽為一浮選機組，採用無間隔流通式進行浮選。二者所使用的造泡攪拌機相似，由迴轉架與固定籠架所構成，如圖 3.92 所示。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.92 Fagergren 浮選機

(5) Denver Sub A 浮選機

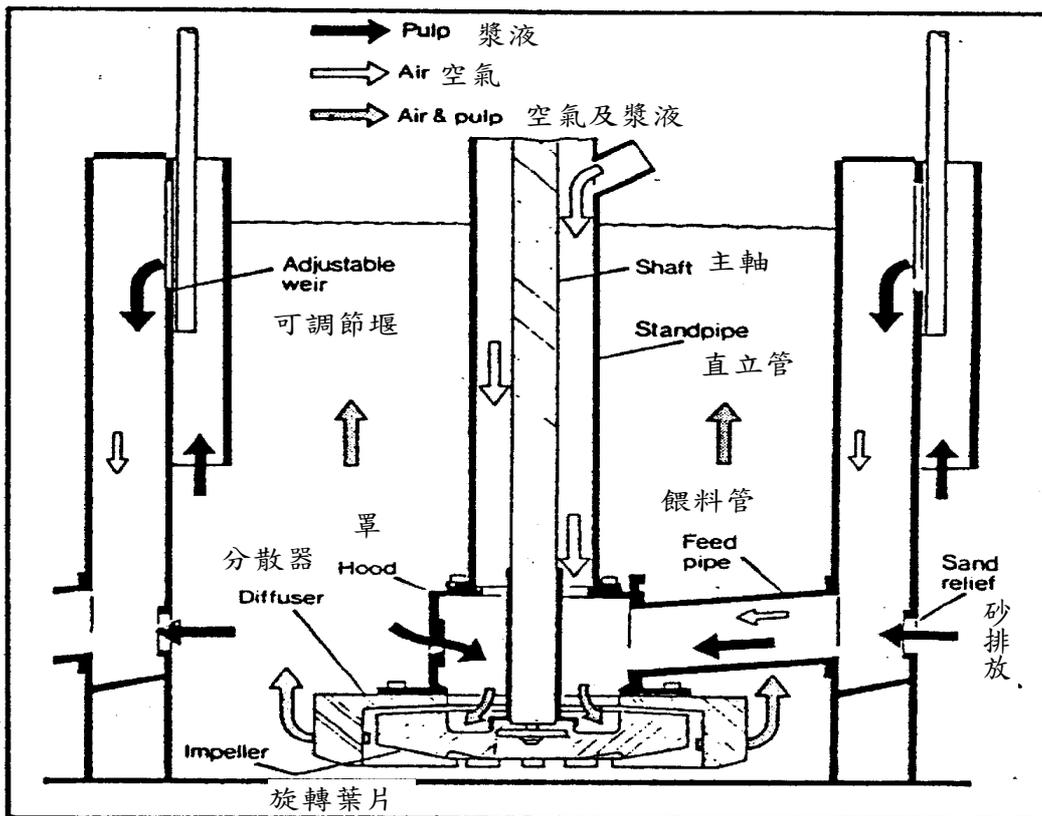
主要由方型槽體、溢流堰閘門與轉軸部份所構成。轉軸為重要部份，裝置在槽中心，用軸承固定在主架上，主軸之外殼為一豎管也就是空氣導入管，最下端裝有葉輪，在葉輪與固定罩之間有分散器因葉輪與分散器之間隙很小，當葉輪轉動產生負壓，有如泵作用一樣，由豎管吸入空氣，同時也將鄰槽溢流過閘門通過餵料管的料漿吸入，在此產生氣-液混合，再由分散器擴散至浮選槽，由於在槽之底部裝有放射狀的四片角翼，可防止渦流使生成的氣泡穩穩上升，而獲得穩定的泡沫層，其作用方式如圖 3.93 所示。溢流堰閘門裝於兩浮選槽之間，用來調節浮選槽液面高度，同時也用來誘導料漿溢流至下一浮選槽的餵料管，或是用來控制不要物的排出。

(6) Denver M 型浮選機

本機為上述 Denver Sub A 標準型的改良型，除了具有 Sub A 標準型葉輪外，在轉軸中間位置增設一攪拌翼，使攪拌力加強，同時也使吸入空氣增大，提高氣泡產生量，因此適於處理較粗粒物質，可用為粗選機或掃選機。M 型機大都以 2~6 個浮選槽組合成一組，採用槽間流通方式，而由末端槽之閘門控制浮選液面，可由幾組連在一起使用，也可與 Sub A 標準型組合一起使用。

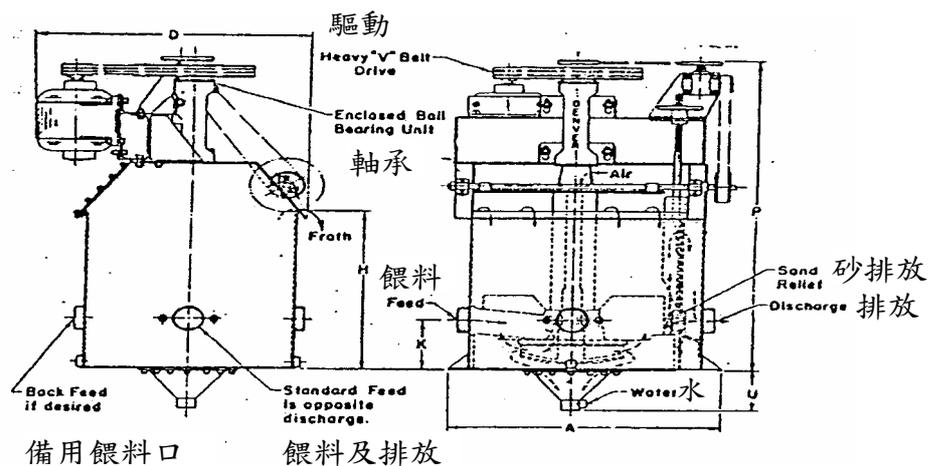
(7) Denver 單槽浮選機

本機主要裝在研磨回路中，將已達解離之顆粒早期分離回收為目的，本機在研磨回路中可發揮極大的效果。其構造如圖 3.94 所示，槽深較淺其餘與 Sub A 浮選機無多大差異，是採用適於粗粒浮選的圓錐盤葉輪與圓錐盤分散器組合，又因料漿直接由磨機導入，粗顆粒以及磨體碎片之混入是不能避免，特地在浮選槽底設一錐形槽，好讓粗顆粒或碎片沈積而排出。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.93 Denver Sub A 浮選機浮選作用示意圖



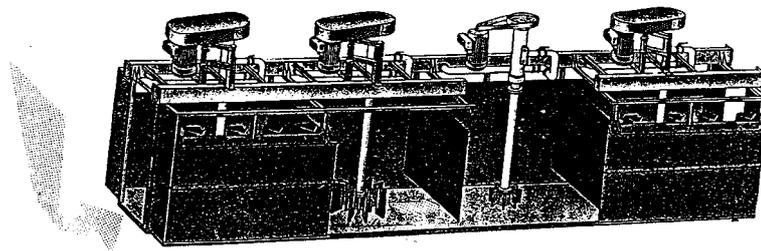
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.94 Denver 單槽浮選機構造圖

3.機械攪拌式吹氣型浮選機

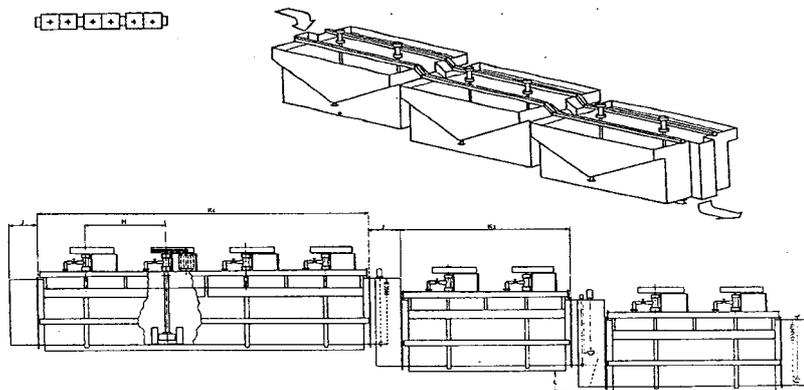
(1)Aker 浮選機

本機造泡機構是由星狀葉輪與輻射狀排列的垂直板型分散器構成，壓縮空氣經連接管通過中空軸給入葉輪腔內，由葉片間的氣孔噴出，同時料漿也由葉輪上下端捲入與空氣混合，經分散器穩定成微細氣泡，均勻地上浮形成平穩的液面(其構造詳圖 3.95)。由於每立公尺料漿中的充氣量可高達 $1\sim 2\text{m}^3/\text{min}$ 。本機使用的組合方法，可分為串聯的 L 型與並聯的 B 型，如圖 3.96 及 3.97 所示。



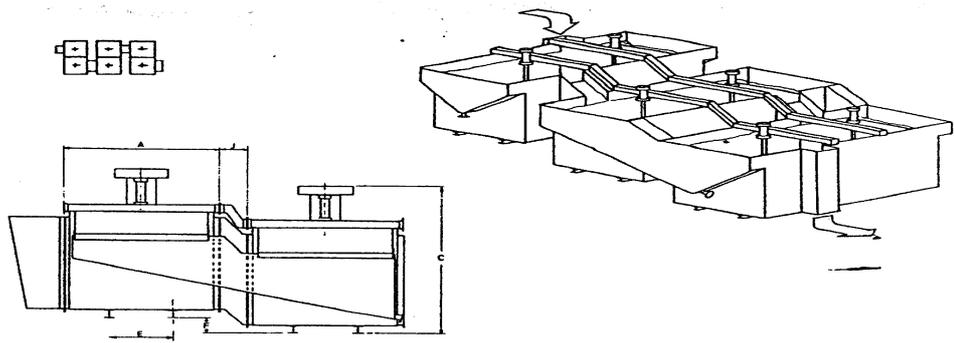
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.95 Aker 浮選機構造圖



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.96 Aker 浮選機 L 型組合

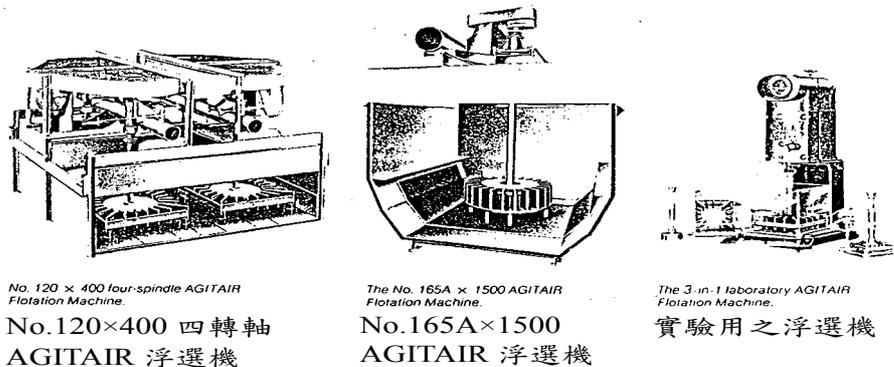


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.97 Aker 浮選機 B 型組合

(2) Agitair 浮選機

其構造如圖 3.98 所示，有單軸槽與四軸槽兩種。其中葉輪與二段所構成的中空軸連結，使葉輪位置易於調整，而 20~30mm 安裝一根垂直鋼棒，鋼棒數量視負荷量不同而定，16~32 根，葉輪周轉速為 4.6~8.9 m/s，壓縮空氣由中空軸進入，向葉輪周邊逸散，與料漿接觸混合，由圍繞葉輪四周的 16 片或 24 片穩流板來防止料漿之渦流，並加強攪拌效果。



No. 120 x 400 four-spindle AGITAIR Flotation Machine.

No.120×400 四轉軸 AGITAIR 浮選機

The No. 165A x 1500 AGITAIR Flotation Machine.

No.165A×1500 AGITAIR 浮選機

The 3-in-1 laboratory AGITAIR Flotation Machine.

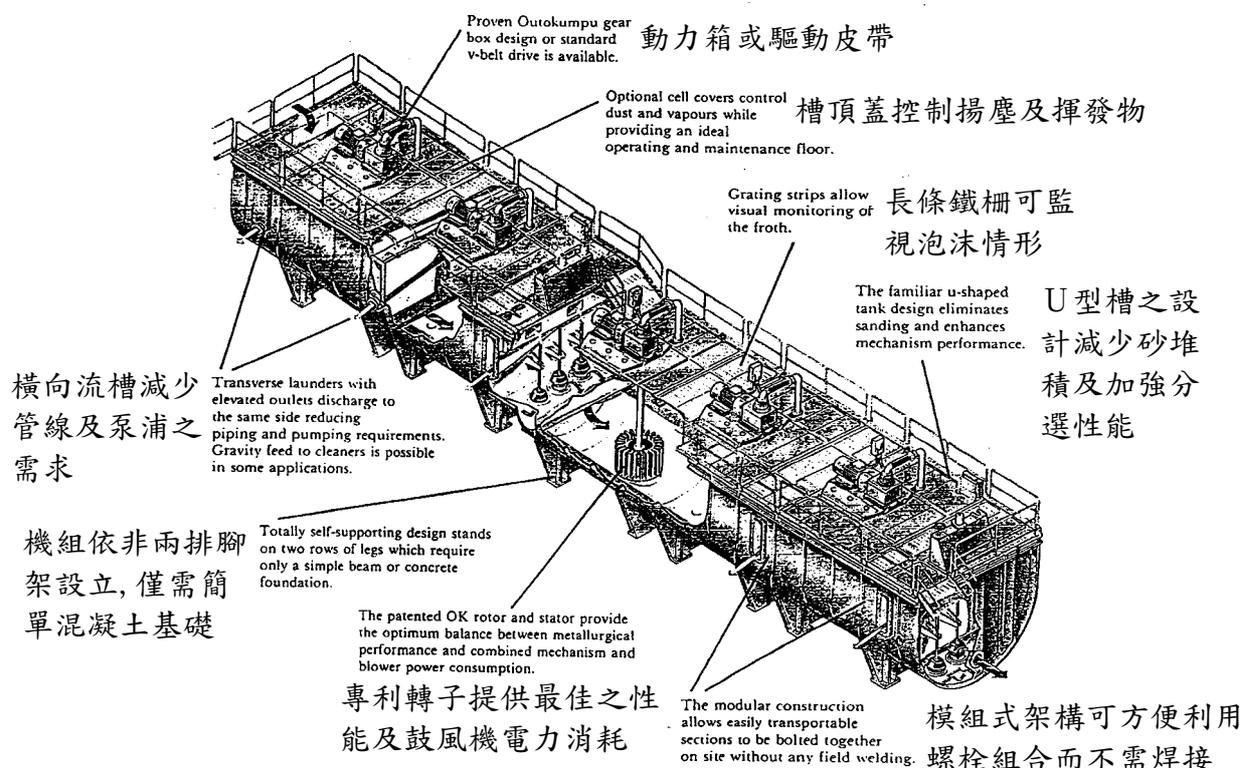
實驗用之浮選機

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.98 Agitair 浮選機構造圖

(3)OK 浮選機

本機主要特點是採用能把大量空氣均勻分散在整個浮選槽各部位的新型葉輪。此葉輪斷面為旋渦狀，其垂直葉片的翼形似一平切的拋物線，底部小而上部大並有頂蓋。葉輪的作用有如泵一樣，可將料漿從其下部吸入，再依螺旋狀使料漿上升，而由空心軸進入的壓縮空氣則從葉輪片間的空隙逸出與料漿混合，再由一圍繞葉輪的放射狀分散器有效地分散成微細氣泡上升達成浮選目的。本機的浮選槽採用 U 形槽，比方形槽輕且堅固，沒有死角幾乎都是有效容積，又可防止料漿短路循環，詳見圖 3.99。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.99 OK-50 型浮選機組

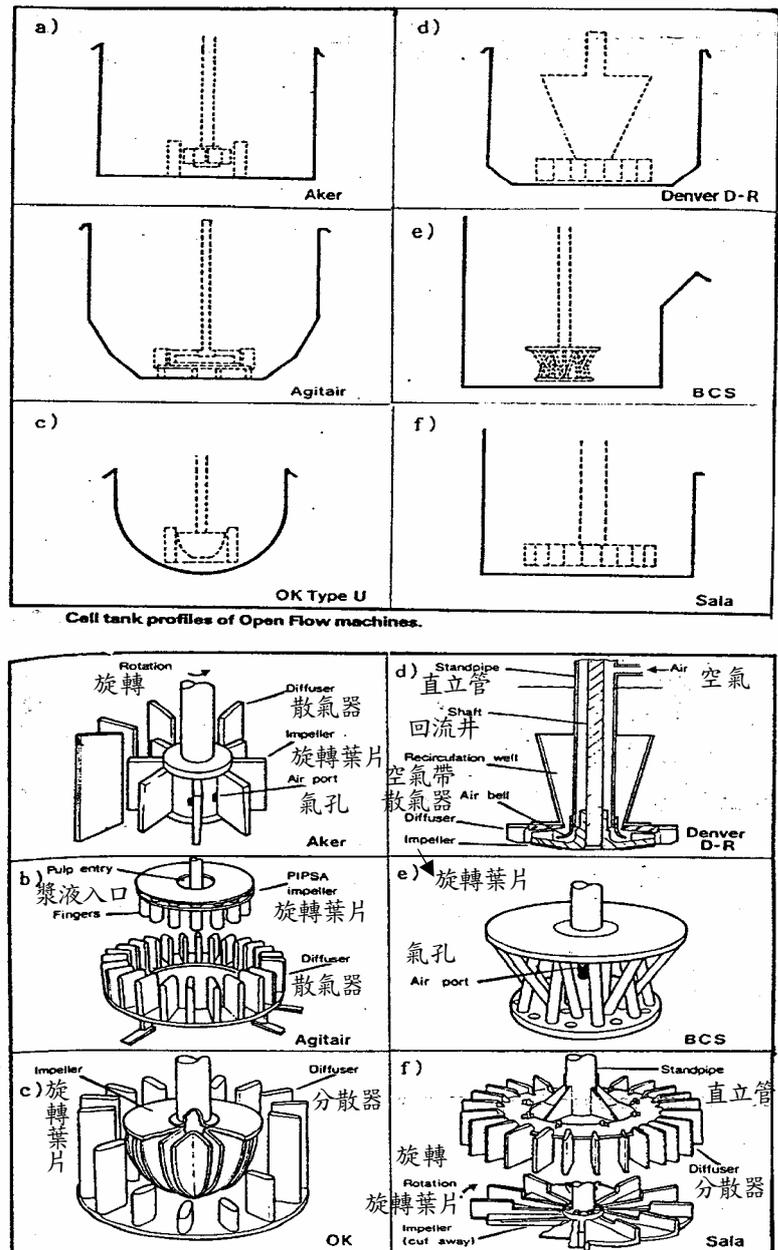
(4)Denver D-R 型浮選機

其外形與結構上基本與 Sub A 相同，在轉軸的套管上加裝一吹氣管接口，以及在分散器上增設料漿循環筒。由鼓風機送入空氣到葉輪，再由葉輪的作用使空氣與料漿混合形成氣泡，因循環式的設置使料漿與氣泡垂直向上形成大循環，促使氣泡上升至料漿表面，如此可達成深槽浮選的目的。本機含 2~6 浮選槽為一浮選機組，在機組內槽與槽之間的料漿流動是採用自流方

式，而機組間增設控制閘門的中間槽以便調節液面。

(5)BCS 浮選機

本機由法國 Minemet 公司所生產，葉輪構造為其特徵，如圖 3.100(e)所示，是由兩組交叉排列的圓棒連接兩個不同直徑的圓盤，形成雙截錐葉輪，因此在葉輪內可將吹入的空氣與料漿充分混合而獲得有效的浮選效果，特別適於粗顆粒的浮選。

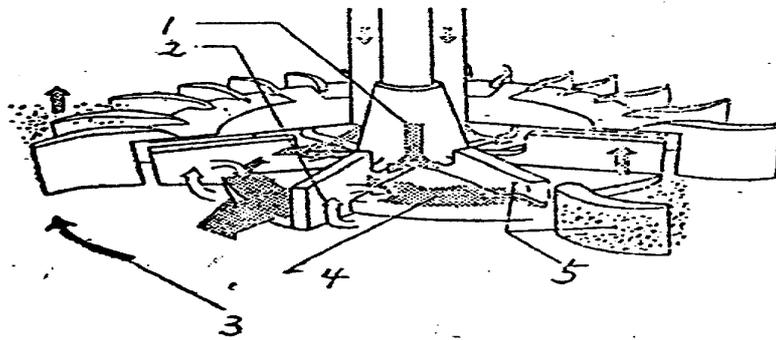


資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.100 各類攪拌吹氣型浮選機

(6)Sala AS 型浮選機

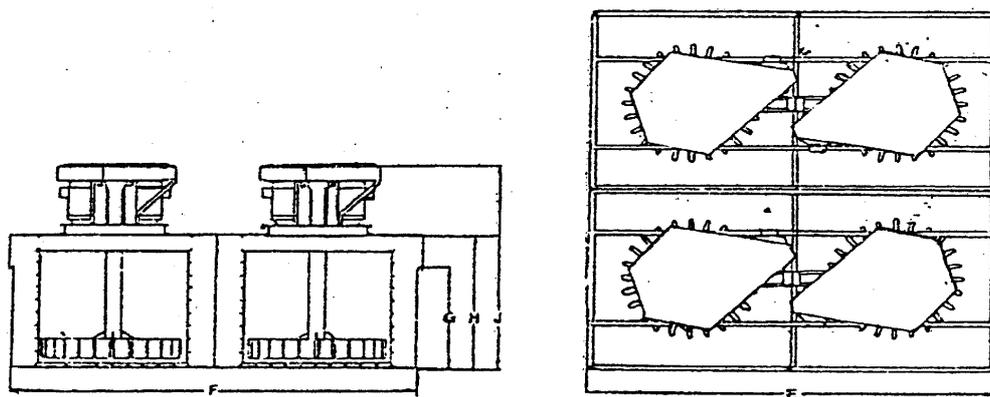
本機之設計原理與其它浮選機不同，大多數浮選機都以料漿的垂直接動來維持理想的顆粒懸浮，而本機之設計則將循環料漿流減至最低，認為料漿自然分層有利於浮選，因此將葉輪設計在緊靠分散器頂盤的下面，使其進入葉輪的料漿都由下面進來。而葉輪由兩面都裝有垂直散射狀的圓盤，在葉片的圓盤邊緣作成缺口，如此可使轉動的葉輪上面葉片攪拌由鼓風機進入的空氣，葉輪下面的葉片攪動槽底的料漿由缺口上昇到葉輪上面與空氣混合，再由分散器擴散成穩定的料漿，其操作如圖 3.101 所示，結構如圖 3.102。



1.空氣 2.礦漿 3.轉動方向
4.氣-液混合 5.氣-液擴散

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.101 Sala AS 型浮選機葉輪操作情形



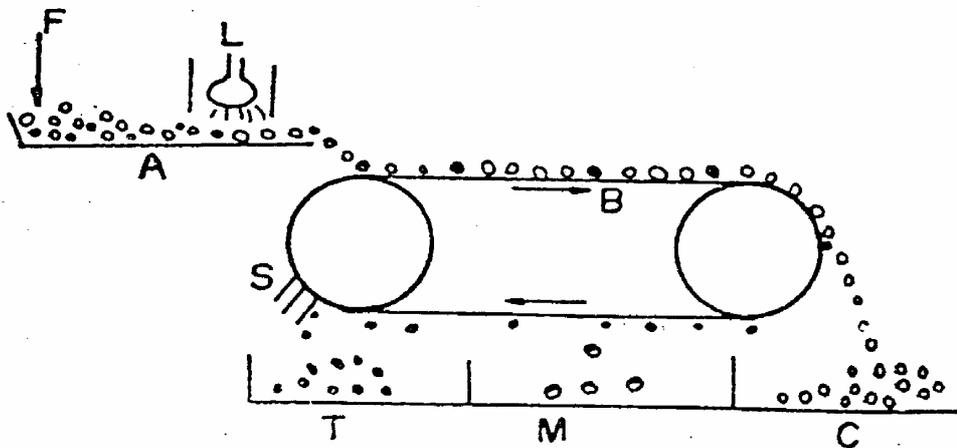
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

圖 3.102 Sala AS 型浮選機尺寸結構圖

3.3.7 其他分選技術與設備

1. 熱粘法(thermoadhesive method)

本法應用在岩鹽之分選上，係利用純淨岩鹽為白色不吸熱，而雜質有顏色會吸收熱能，因而溫度增高，再利用遇熱會熔化的樹脂(heat-sensitive resin)將雜質粘住。如圖 3.103 所示，岩鹽由(F)處給入，在震動給入機(A)前進時，受 240 個 500 瓦的紅外線裝置(L)照射，淨鹽為白色吸熱少，雜質有顏色吸熱上升。岩鹽給入塗有遇熱易熔的樹脂於輸送帶(B)上，淨鹽不被樹脂粘住，在輸送帶之一端，自由落入淨鹽槽(C)中。雜質因溫度升高，會被樹脂粘住，隨輸送帶至線刮器(S)處才被刮下，落入雜質槽中(T)，中砂(M)則可能在中途落下。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003 年 12 月

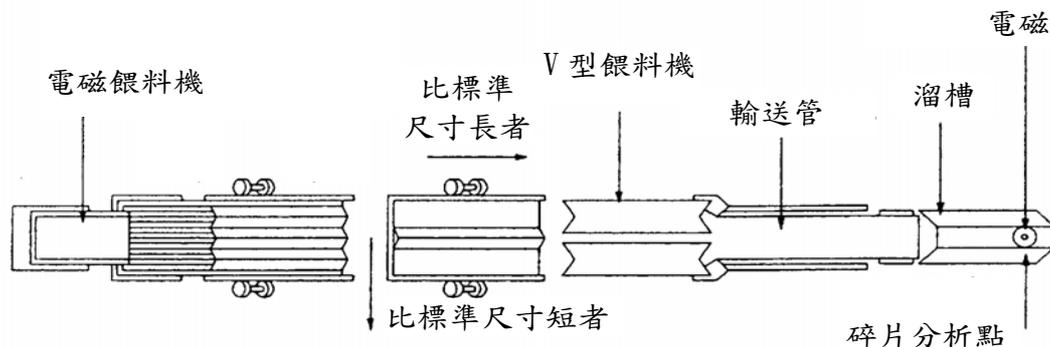
圖 3.103 熱粘選鹽法

2. 粘著法(adhesion method or grease belt process)

本法係利用物質會被油質物粘著之特性來加以分選，如金鋼石會被黃油粘住的特性，南非即是以此技術回收分選金鋼石。其操作方式為在斜桌面上敷以黃油，礦砂在桌面流下、脈石被水流沖走，而金鋼石則被黃油粘住，不致被水沖走，故可以其回收金鋼石之方法。

3. 形狀分選法

長度分選機為形狀分選法之一種，但僅僅利用顆粒之一維(即長度)來作分選，跟用兩維來分選之篩選法有所不同。如圖 3.104 所示，振動床使不同之碎片鋪平後，經過一個分選間隙，短者由間隙中自由落下，長者則通過而達分選效果。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，2003年12月

圖 3.104 長度分選機

4.凝集與分散分選法

物質顆粒在水溶液中，由於顆粒表面之解離或從溶液中吸附一些離子，使其表面荷電形成所謂電雙層(electrical double layer)。表面荷電之顆粒互相接近時，電雙層相互作用，產生排斥力；相反地當懸浮顆粒互相接近時也會出現凡得瓦之吸引力。本分選法即是利用物質顆粒在加入適當之凝集劑或分散劑，以改變物質顆粒之荷電量，而使其顆粒間吸引力大於排斥力，而形成膠羽沈降分離之現象，反之加入分散劑則可使水中之物質顆粒凝聚物分散開來。

故以這種化學劑(凝集劑或分散劑)來改變物質顆粒表面電性，而形成凝聚(或分散)沈降，以達到分選的目的。

3.4 脫水技術與設備

一般來說，污泥脫水依使用設備型式，可分為機械脫水(mechanical dewatering)及污泥乾燥床(sludge drying bed)兩大類，對於事業單位而言，大都採用機械脫水，即設置污泥脫水設備及所需附屬設施；污泥乾燥床雖然有設備成本低、操作簡易等優點，但其占地廣大，清除脫水泥餅耗費人力，較可能用於氣候和土地不受限制之公有自來水淨水場和廢污水處理廠，一般事業單位較少使用。至於機械脫水設備，起初沿用化學、食品、造紙等工業製程之固液分離設備，然後依照污泥特性與處理需求，逐步改進設備構造、材質與操作方式，最後發展為針對污泥設計之固液分離設備。此外，早期的一些污泥脫水設備類型，例如真空脫水機(vacuum

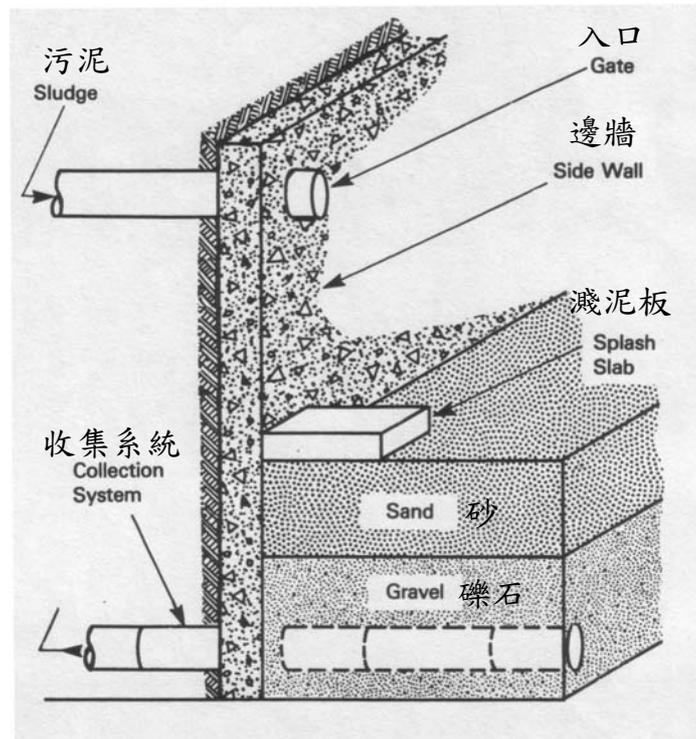
filter)、籃式離心脫水機(basket type centrifuge)等，迄今已大多不採用；而帶濾式脫水機、帶壓式脫水機及鉢式離心脫水機(solid-bowl centrifuge)，經過不斷改良，已成為應用最為成功，而且是國內最常見的污泥脫水設備類型。以下針對污泥乾燥床和目前國內較常使用的脫水技術和設備加以介紹。

3.4.1 污泥乾燥床

污泥乾燥床一般又稱做晒乾床，而晒乾床的構造如圖 3.105 所示，其外觀相片如圖 3.106，一般為四方型，寬 15 至 60 呎(4.5~18 m)，長 50 至 150 呎(15~45 m)，並有垂直邊牆。通常最上層鋪置 4 至 9 英吋(10~23 cm)厚之砂層，其下為 8 至 18 英吋(20~46 cm)厚之礫石層。砂之有效粒徑為 0.012 至 0.05 英吋(0.3~1.2 mm)，均勻係數小於 5；礫石之有效粒徑介於 1/8 至 1.0 英吋(0.3~2.5 cm)。底部排水管一般為陶管，但塑膠管亦有採用，管徑不能小於 4 英吋(10 cm)，管與管間距相隔 8 至 20 呎(2.4~6.0 m)，最小坡度為 1%。

污泥在晒乾床上之乾燥過程包括：水分經由砂床之滲濾作用(percolation)，和在污泥表面之蒸發作用(evaporation)。經由滲濾作用所排除之水分為 20~55%，花費時間 1~3 天，產生之污泥固體含量在 15~25%，其去除率視原污泥固體物含量及其特性而定。水分之蒸發通常較慢，蒸發率與氣溫、相對濕度、風速有關，根據經驗濕污泥水分蒸發率為清水蒸發率之 75%，開始時污泥以定率蒸發，蒸發至臨界水分含量後，遞減其蒸發率至平衡為止。定率蒸發時，污泥表面為潤濕狀態，此時之蒸發率與污泥性質無關；臨界水分含量為水分從污泥內毛細上升至表面之速率等於蒸發率；當污泥表面到達平衡時，污泥因乾燥皺縮而破裂，開始次表層之蒸發乾燥。

晒乾床之設計與應用受氣候影響很大，特別是降雨和蒸發。污泥之乾燥天數依當地之天氣、氣溫、相對濕度、污泥性質、污泥濃度、污泥散積厚度而異，一般設計之乾燥時間為 1~3 星期。



資料來源：Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges，1987年9月

圖 3.105 典型晒乾床構造圖



資料來源：<http://www.iolani.honolulu.hi.us>

圖 3.106 污泥晒乾床之外觀

晒乾後污泥，其固體含量可大於 50~60%，乾燥的良否，依污泥之種類及消化程度等而異，消化程度不良時，不僅乾燥慢也易腐敗而發惡臭，經常需於晒乾床中之污泥表面，定時散播殺蟲劑，以防止蚊、昆蟲等發生，一般晒乾床之操作

步驟如下：

- 1.抽送 8 至 12 英吋(20~30 cm)厚之穩定污泥於晒乾床表面。
- 2.若需加入污泥調理劑，則於抽送污泥至晒乾床時，連續地將化學調理劑注入污泥內。
- 3.當晒乾床充滿污泥後，允許污泥乾燥至所期望的最終固體物濃度。一般，當污泥固體物濃度達到 35~40%時，則形成污泥餅和龜裂(caking and cracking)。
- 4.以機械或人工方法移除脫水污泥。
- 5.重覆 1~4 之步驟而循環操作使用。

因為投資小而又無需昂貴的維持費，因此對一般無土地限制之慮的廢水處理設施而言，大都採行晒乾床的脫水方式，不過晒乾床法亦有其缺點，例如易受氣候影響其效果，影響觀瞻，產生臭味等。表 3.27 列舉了晒乾床法的優點和缺點。

表 3.27 晒乾床法之優點與缺點

優點	缺點
1.當土地容易獲得時，這種方法的投資成本最低。	1.缺乏理論的設計方法，無法做合理的工程經濟性分析。
2.操作人員不需太多的技術及時間。	2.需要較多的土地面積。
3.能量消耗低。	3.需要安定化的污泥(stabilized sludge)。
4.對於污泥改變的敏感度較低。	4.設計時，必須仔細地考慮氣候因素的影響。
5.化學藥品的消耗量較低。	5.影響觀瞻，且對於較不安定的污泥易發生臭氣問題。
6.污泥餅固體物含量比利用機械脫水所獲得的污泥餅高。	6.污泥去除時需要較多的勞力。

資料來源：Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge，1982 年 10 月

廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，1985 年 11 月

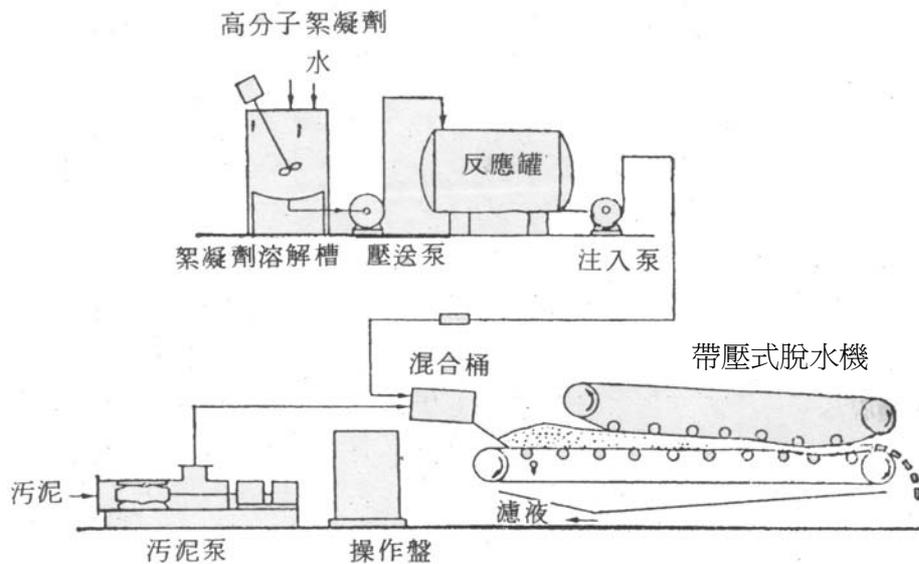
3.4.2 帶濾式脫水機(belt filter)

典型帶濾式脫水機構造外觀及附屬設備系統，如圖 3.107 和圖 3.108 所示。帶濾式脫水機主要構件，一般包括機台框架(frame)、滾輪(roller)、濾帶(filter belt)、驅動裝置(drive unit)、濾帶清洗裝置(belt wash station)及控制盤(control panel)等，濾帶張力(tensioning)及軌跡(tracking)主要由氣壓或油壓裝置(pneumatic or hydraulic control system)調整控制。部份帶濾式脫水機還附有調理攪拌槽(flocculating tank)或篩網滾桶(sieve drum)，做為污泥調理或預先濃縮之用。此外，帶濾式脫水機周圍應設有緊急拉繩，作動後立即切停脫水機，以防止人員不慎捲入或夾傷。



資料來源：[http:// www.chinaep.net](http://www.chinaep.net)

圖 3.107 典型帶濾式脫水機之外觀



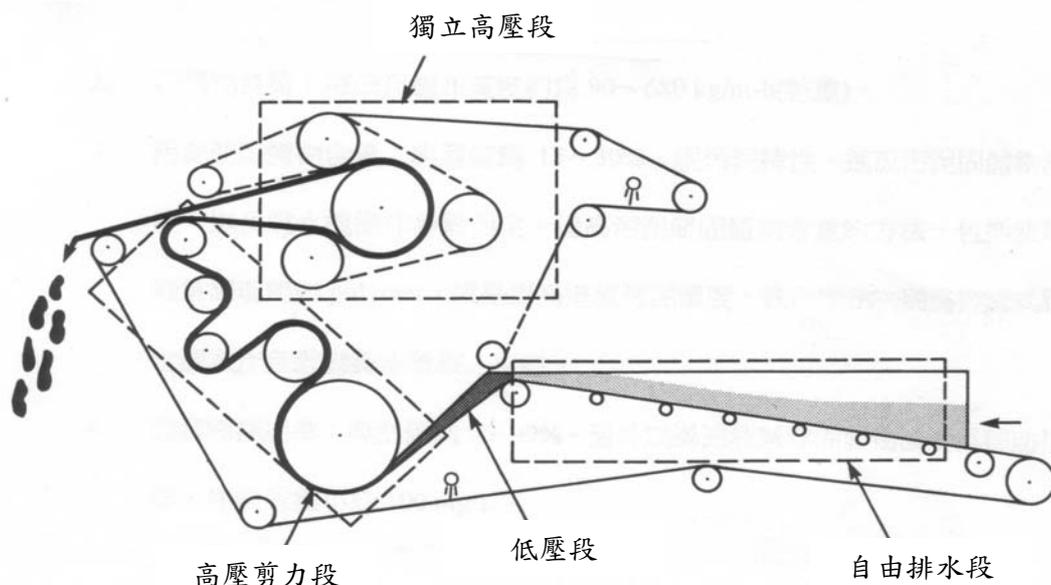
資料來源：水處理工程(上冊)，1989 年

圖 3.108 典型帶濾式脫水機附屬設備系統圖

目前設計上較為新穎的帶濾式脫水機，污泥進入後其行程大致包括以下三階段，如圖 3.109 所示：

1. 重力排水段(gravity drainage zone)：污泥排入一段水平行走的濾帶上，利用固定而交錯的犁片(plow)，不斷將污泥撥開，並使其中的自由水以重力方式排出，此階段排出的水分約占總含水量之 60~70%。

2. 楔形段(wedge zone)：污泥進入二片逐漸閉合的濾帶之間，施於污泥的壓力逐漸增加，並形成穩定的污泥餅，此段排出的水分約占總含水量之 20%。
3. 剪力段(shear zone)或稱為高壓段(high pressure zone)：濾帶在 8 至 14 組滾輪(部份機型滾輪數超過 15 組)間以 S 形繞行，施於污泥餅之壓力約為 3~15 psi，此時污泥餅中的水分持續排出，並在離開濾帶前達到最終含水率。



資料來源：Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges，1987 年 9 月

圖 3.109 帶濾式脫水機行程示意圖

一般帶濾式脫水機之基本設計參數歸納如下：

1. 濾帶寬度：常用範圍為 0.5~3.5 m，依廠商提供型號選擇。
2. 固體物負荷：每公尺濾布寬度約為 90~680 kg/m-h(乾重)。
3. 污泥餅固體物含量：典型值為 15~30%，視污泥特性、進流污泥固體物濃度，以及脫水機操作參數而定。提高污泥餅固體物含量的方法，包括使用適量調理劑，如 polymer，或是提高進流污泥濃度。
4. 固體物捕捉率：典型值為 90~99%。另外以過濾液懸浮固體物濃度為輔助指標，建議值為小於 100 mg/L。

影響帶濾式脫水機性能之操作因素有污泥調理方法、高分子混凝劑劑量、濾帶速度、濾帶張力、反沖洗水流量和壓力、濾帶型式、污泥飼入率等。濾帶移動

的速度增加，可增加脫水機的操作容量，但通常產生的污泥餅固體物含量較小，因為重力排水和擠壓的時間都縮短了。增加濾帶的張力(belt tension)，將產生較乾的污泥餅，但通常固體物的截獲率將減小，同時濾帶的磨損將增加。假如沖洗水不能充分地清洗濾帶，則增加沖洗水的流量和壓力，將會增加污泥餅的固體含量。此外，濾帶孔隙愈多，產生污泥餅愈乾燥，但固體物截獲率愈低。假若濾帶移動速度足以移動污泥，同時高分子調理劑量足以維持固體物截獲，則增加污泥飼入率將增加脫水機單位時間之處理容量。增加高分子調理劑量能同時增加污泥餅固體物含量和固體物截獲量至某一上限值。調理劑之加入點，必須允許調理污泥在進入脫水機之前要有充分的接觸時間。

調理劑量之不足或過量為造成處理失敗之主要因素，劑量不足使污泥在重力脫水或壓縮時被擠出濾布，產生濕潤之泥餅，過量之調理劑使膠凝之污泥在濾布上分佈不均，造成濾布之扭曲、蛇行，並堵塞濾布，污泥餅很難自濾布上剝離。過濾液及濾布沖洗水之懸浮固體物 SS 通常在 100~1,000 mg/L，必須迴流至初沈池或終沈池再處理。由於帶濾式脫水機之軸承、滾筒等可動部分很多，需要儲備較多之零件，可能提高維護費用。帶濾式脫水機雖有上述缺點，其主要特徵為無急劇之外在力，污泥脫水效果可達良好狀況，生成安定之污泥餅，仍不失為良好之脫水機械。表 3.28 所示為帶濾式脫水機之優缺點。

表 3.28 帶濾式脫水機的優點與缺點

優 點	缺 點
1. 除了帶壓式脫水外，能較其他機械脫水法產生較乾的污泥餅。	1. 對於飼入污泥性質和化學調理相當敏感。
2. 所需動力低。	2. 脫水機負荷受限於泥餅產量(throughput)。
3. 低噪音和震盪。	3. 濾帶壽命較其他使用濾布的設備為短。
4. 對於無經驗之操作員而言，易於瞭解其操作，因所有零件皆可看見且操作結果有變化時很容易馬上察覺。	4. 濾帶噴灑所需沖洗水量相當大。
5. 連續式操作。	5. 需要經常清洗加壓帶。
6. 當使用低皮帶張力時，濾帶壽命可以延長(一般都市污泥皆如此操作)。	6. 需要篩除或研磨污泥以去除大塊物質和纖維物質。
	7. 假如污泥沒有適當穩定，會產生惡臭。
	8. 較離心脫水操作員須付出較多注意力。
	9. 刮刀之調整是相當重要，且要經常檢視。
	10. 較離心脫水須要較大的聚合物加藥量。

資料來源：Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge，1982 年 10 月

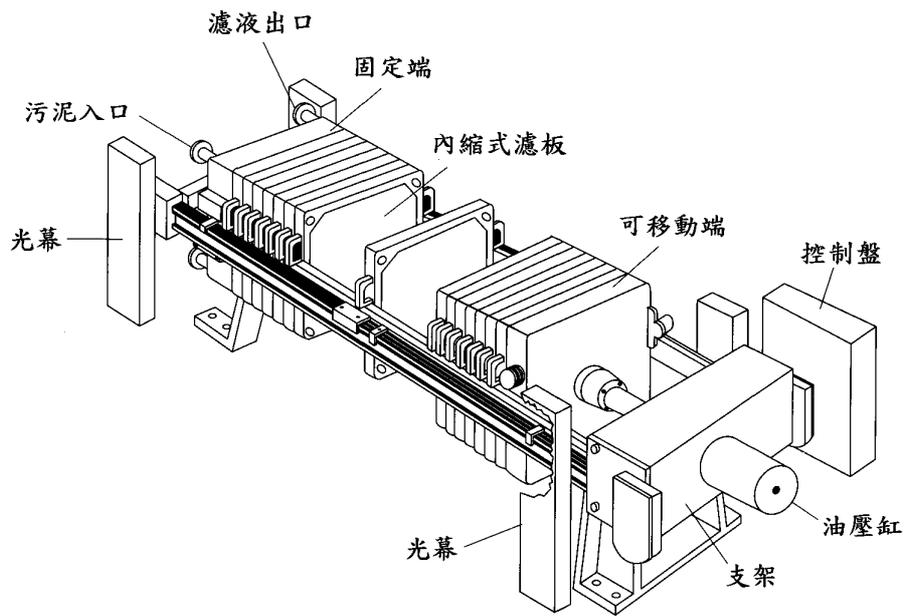
廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，1985 年 11 月

3.4.3 帶壓式脫水機(belt press)

典型帶壓式脫水機構造外觀及附屬設備系統，如圖 3.110 和圖 3.111 所示。帶壓式脫水機主要構件，一般包括框架(frame)、濾板(plate)、濾布(filter cloth)或隔膜(diaphragm)、油壓裝置(hydraulic drive unit)、進料泵(feed pump)及控制盤(control panel)等。較為新式的帶壓式脫水機，其開板、污泥餅剝除、濾布清洗、關板等程序均已自動化，有助於減少所需操作人力；此外在帶壓式脫水機兩側設有光幕(light curtain)，可防止濾板作動時造成人員意外夾傷。

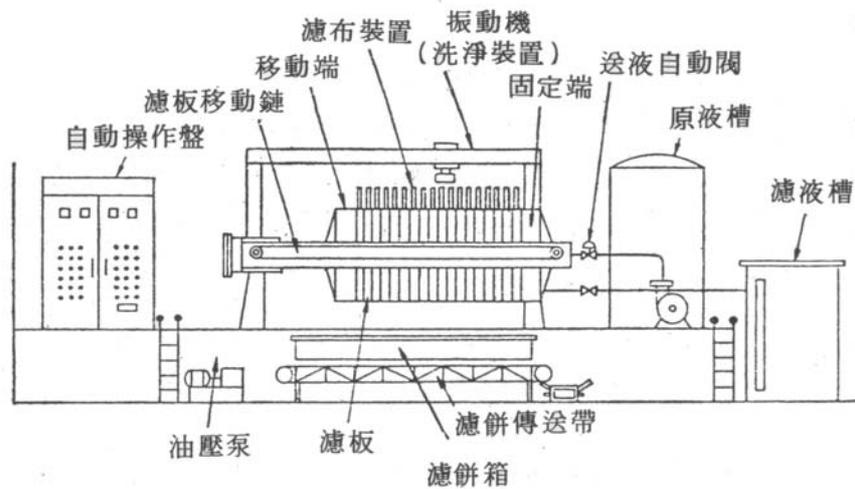
帶壓式脫水機採批次操作，其一批次運轉之各個步驟說明如下：

1. 關板(press closing)：以人工或自動機制，將濾板移往脫水機框架之固定端，再以油壓裝置緊密壓合所有濾板，防止污泥由濾板間縫隙滲漏。
2. 進料(feeding)：目前帶壓式脫水機濾板均採內縮式(recessed type)設計(參見圖 3.112)，二片濾板密合後在其間形成污泥室(chamber)，污泥先以一壓力較低之進料泵，通常為移動腔式泵(progressive cavity pump)，送入並充滿整個污泥室。
3. 擠壓(compression)：提高污泥室壓力，以排除污泥水分，又分為定容式(fixed volume)及變容式(variable-volume)二種。定容式一般採用濾布作為過濾介質，完成進料後改以一活塞泵(piston pump)將進流污泥持續加壓至 100~225 psi，促使水分排出，最後在污泥室中形成污泥餅。至於變容式則需採用具彈性之隔膜作為過濾介質，同樣先以活塞泵加壓至 100~225 psi，然後改用高壓水或空氣於污泥室一側之隔膜背面，加壓至 200~300 psi，進而使污泥餅中水分從另一側隔膜排出，並藉此得到含水率更低的污泥餅。
4. 開板(plate shifting)：完成擠壓程序後，先解除脫水機壓力，然後以人工或自動機制將原本密合的濾板移開。
5. 排泥(sludge discharge)：將附著於濾布的污泥餅剝除，再以輸送機運至污泥餅貯放場所。為防止污泥餅黏著於濾布無法剝除，某些類別的污泥及帶壓式脫水機，需要在進料前先進行濾布預覆(pre-coat)。
6. 濾布清洗(cloth wash)：以高壓水清洗濾布表面，去除阻塞之污泥顆粒。完成後如需再進行下一批次污泥脫水操作，則回到步驟 1。



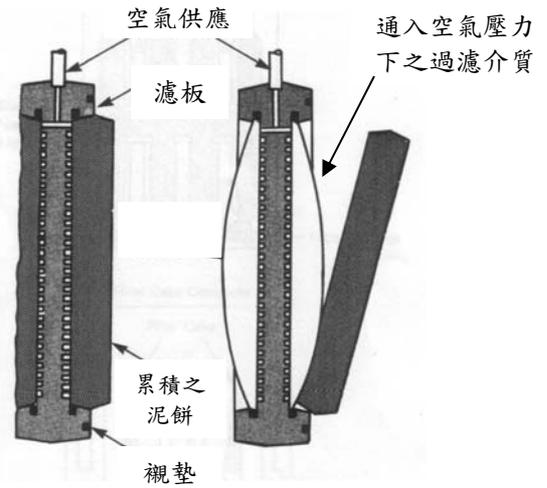
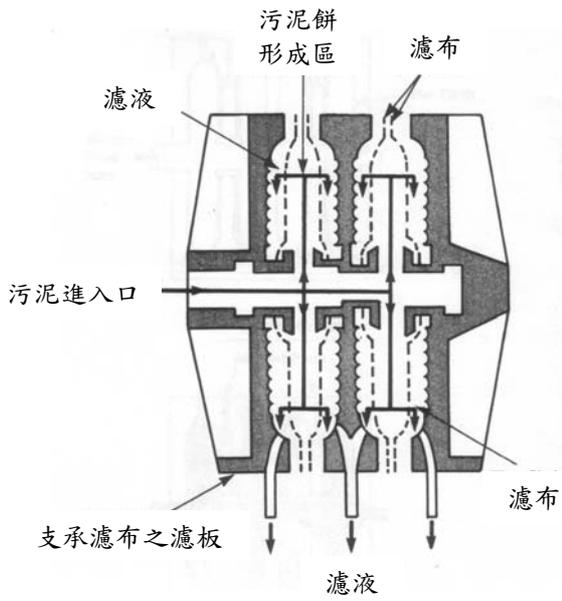
資料來源：Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges，1987年9月

圖 3.110 典型帶壓式脫水機構造

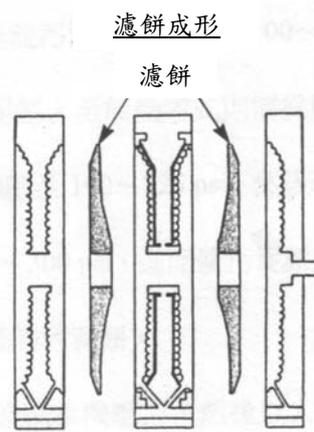
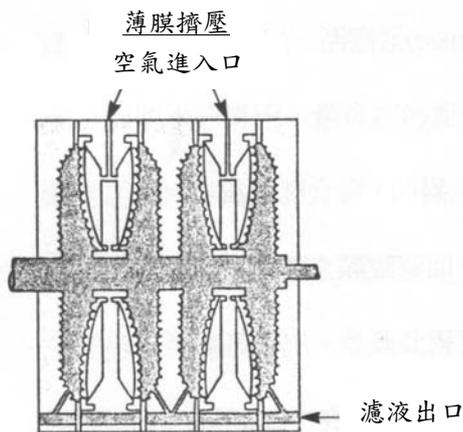
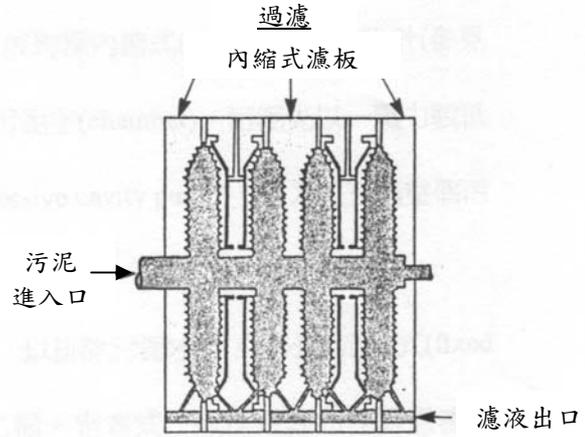
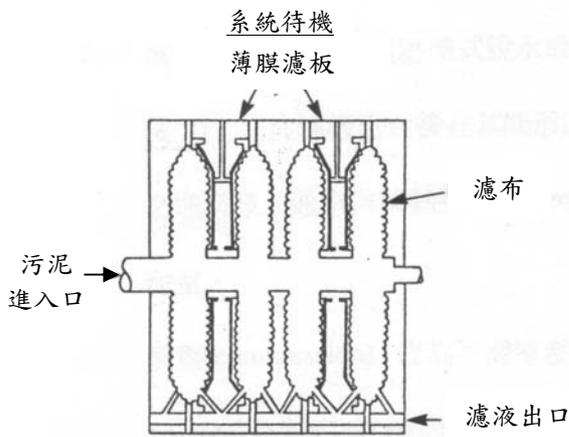


資料來源：水處理工程(上冊)，1989年

圖 3.111 典型帶壓式脫水機附屬設備系統圖



(a) 定容式



(b) 變容式

資料來源：Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges，1987年9月

圖 3.112 帶壓式脫水機內縮式濾板及排泥示意圖

影響壓濾操作之因素主要有壓力、過濾時間、預覆與調理劑之型態及劑量、濾布清洗頻率、濾布型式等。污泥之調理通常以石灰、氯化鐵為主，預覆採用飛灰，而高分子調理劑可能因其膠凝之性質，無法承受較大壓力而不適用。

使用較大的壓力和較長的循環時間，將增加污泥餅固體物含量，不過後者會減小脫水機的處理容量。使用預覆能改善固體物截獲率，減少過濾時間，和維持過濾介質的效率。預覆操作通常使用於消化污泥(digested sludge)的脫水，因其污泥顆粒非常細小，或用於為了達到良好的污泥餅剝離的情況。對於黏稠性(sticky)的污泥，使用預覆操作，可節省操作時間，因其可減少清洗濾布的頻率。污泥調理對於帶壓式脫水而言是一相當重要的因素，通常為了達到良好的泥餅剝離和合理的過濾時間，石灰和氯化鐵為較常使用的調理劑。正確的化學調理劑量，將產生乾燥的污泥餅，而不正確的劑量，將可能因使用超量的化學藥劑而減小了脫水機的處理容量，或將產生較濕的污泥餅。另外，增加清洗濾布的頻率，將會增加脫水機處理容量，污泥餅的乾燥程度，和濾布的壽命，而使用適當的濾布，可增加固體物截獲和脫水機的容量。

一般而言，壓濾機之特徵可得低含水率之污泥餅，泥餅固體物含量約在30~50%，對脫水性困難之活性污泥或期望污泥能脫水至固體含量大於30%以上時，壓濾法特別有效，此外本法對含水分高及纖維素之紙漿廠污泥的脫水特別有效，同時對含有油脂之工業廢水之脫水，也非常有效。

早年版框式的壓濾機由於耗費大量人工、動力而沒落，近年來壓濾機已經大為改進，如自動化操作，增加濾室，改進污泥及濾液之排放，使大宗的工資成本大大地減少。雖然此法仍為分批式操作，但因可得更高的固體含量之泥餅，再配合自動化的推行，此法已為漸趨流行，當然其亦有某些方面的缺點，例如：分批式的操作，需要專人維護，濾布的使用期限，操作上的不能配合等。表3.29所示為壓濾法與其他脫水方法比較之優缺點。

表 3.29 帶壓式脫水機的優點與缺點

優 點	缺 點
<ol style="list-style-type: none"> 1. 可得高固體物含量之污泥餅。 2. 對於難脫水的污泥亦能脫水。 3. 非常高的固體物回收率(recovery)。 4. 機械脫水中，唯一能產生乾污泥餅適合於某些地點之填土要求。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 通常需要大量的無機化學調理劑。 2. 聚合物一般不能單獨使用為調理劑，此乃由於污泥餅剝除和附著於濾布等問題存在。 3. 高投資成本。 4. 若污泥沒有適當調理和非自動化操作，則勞力成本可能很高。 5. 濾布之更換是昂貴且耗時的。 6. 污泥之加壓泵浦會產生很高噪音。 7. 污泥流入濾室之前需要先經研磨或篩除。 8. 如果用石灰當調理劑，可能經常須要用酸洗來去除石灰質的沈澱物，且相當耗時。 9. 分批式操作。

資料來源：Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge，1982 年 10 月
 廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，1985 年 11 月

3.4.4 離心式脫水機(centrifuges)

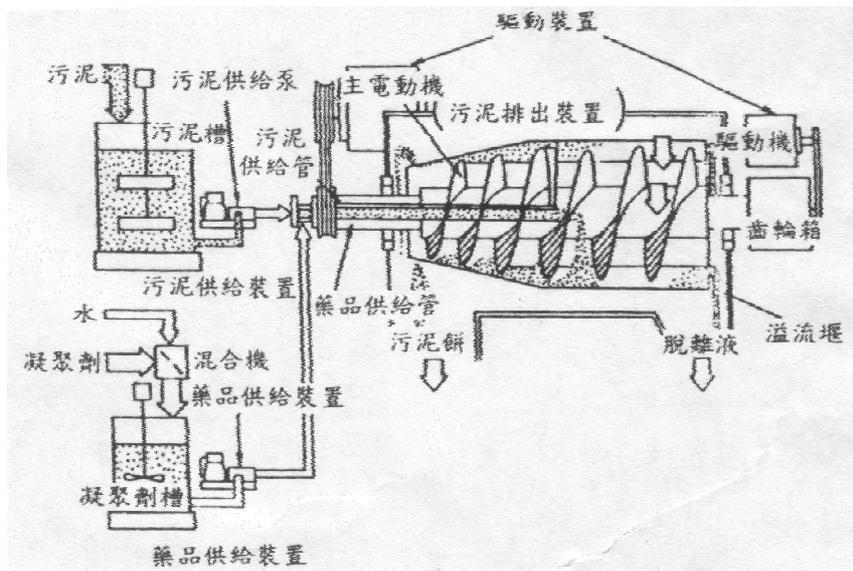
目前實廠上採用的離心式脫水機型式，均為鉢式離心式脫水機(solid-bowl centrifuge)。典型鉢式離心式脫水機構造外觀及附屬設備系統，如圖 3.113 及圖 3.114 所示。其主要構件，一般包括旋轉鉢(rotating bowl)、渦卷(scroll)、主馬達(main motor)、差速齒輪箱(differential speed gear box)、外罩(cover)及控制盤(control panel)等，而污泥調理裝置為其主要附屬設備。其中主馬達驅動高速旋轉的旋轉鉢，並經由差速齒輪箱，帶動低速旋轉但轉向與旋轉鉢相反的渦卷。目前也有一些離心式脫水機，捨棄差速齒輪箱，改以馬力較主馬達小的變頻馬達，來直接驅動渦卷。

離心式脫水機的機制與帶濾式及帶壓式脫水機有所不同，沒有過濾介質與加壓機制，而是以離心力促進固液分離並形成污泥餅。如圖 3.115 所示，污泥進入旋轉鉢後，受到大於 3,000 g 離心力的作用，污泥固體顆粒向外移動，並在旋轉鉢內側形成污泥餅，而與旋轉鉢同軸但反向旋轉的渦卷，以相同於螺旋輸送機(screw conveyor)的作用，將污泥餅移往排泥出口，其間污泥餅不斷受到離心力的作用，顆粒彼此擠壓，並進一步將其間的水分排出。此外，依據旋轉鉢中污泥進流方向與排泥出口方向的異同，鉢式離心脫水機又分為反向流(counter-current)及同向流(co-current)二類型，如圖 3.115 所示。



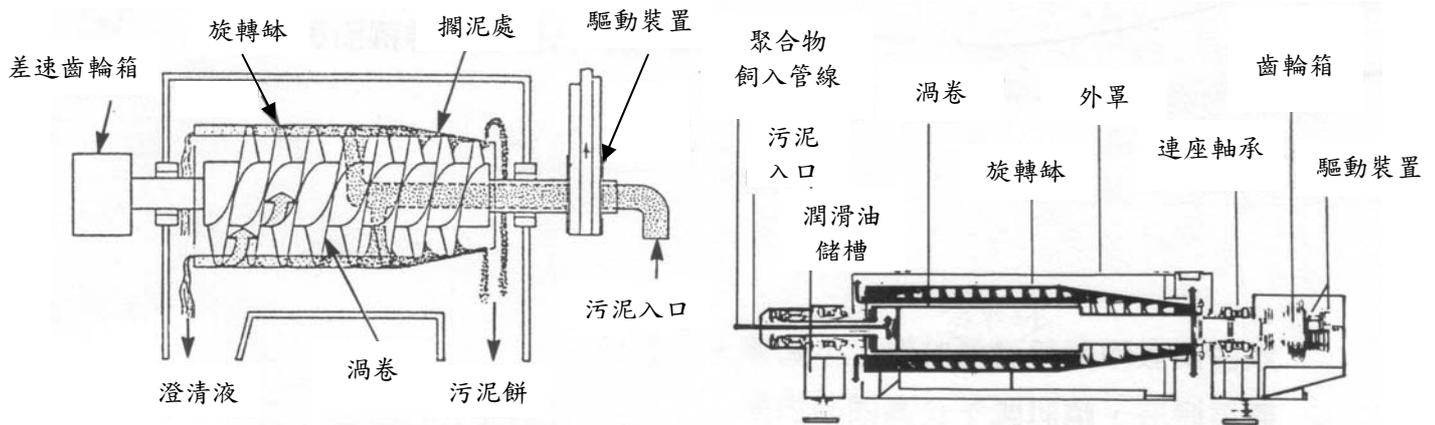
資料來源：www.sgconsulting.co.za

圖 3.113 鉢式離心脫水機之外觀



資料來源：下水道工程學，2000

圖 3.114 典型鉢式離心脫水機附屬設備系統圖



資料來源：Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges，1987年9月

圖 3.115 鉢式離心式脫水機構造

影響鉢式離心脫水機的操作因素有旋轉鉢/渦卷之差速、池深(pool depth)、污泥飼入率、高分子調理劑之劑量和加入點。增加旋轉鉢轉速，理論上將增加污泥餅乾燥程度，此乃因離心力使得污泥顆粒的重力沉降速度增加，然而在有些情況，此將會使得飼入污泥顆粒承受較大的剪力，而減小了增加旋轉鉢轉速所達到的效益。不過若飼入污泥與加入離心機內部的高分子調理劑，在到達離心機最高轉速之同時，形成良好的污泥顆粒，則此種由於增加重力而對污泥顆粒產生剪力的影響，將不會造成問題。當旋轉鉢和渦卷之差速增加時，固體物從離心機中移出的速度增快，此將增加離心機的處理容量，但產生的污泥餅將較濕。又增加池深將增加固體顆粒的截獲量，但通常產生的污泥餅較濕。此外，增加高分子調理劑量一般能增加污泥餅的乾燥程度和固體物截獲量。操作結果顯示，使用鉢式離心脫水機所需之調理劑量，約為使用功能相近帶濾式脫水機之 1.5~2.2 倍。

一般而言，離心脫水機設備體積小，本體外有覆蓋較為衛生，裝置面積小，不必有洗淨水，但操作費用較高，產生噪音，機器磨損較大，修理費龐大。又本法所產生污泥餅含水率比其他脫水機為低，常僅被用為濃縮之目的。表 3.30 為鉢式離心脫水機與其他脫水機比較之優缺點。

表 3.30 鉢式離心機之優點與缺點

優 點	缺 點
1. 潔淨的外觀，幾乎沒有臭味問題，具快速啟動及停機的能力。	1. 渦卷的磨損(scroll wear)可能是一項高維護項目，因此使用表面堅硬和不易磨損的物質保護是非常重要的。
2. 容易裝置，占地面積小。	2. 進流污泥需預篩除或研磨。
3. 操作人員不須連續地監視。	3. 大廠須要熟練的維護人員維護渦卷。
4. 對於多種型式污泥，其飼入固體物濃度變化大時，仍可操作。	4. 噪音非常顯著，特別是在高速離心時。
5. 可作為濃縮或脫水的操作。	5. 在設計電子控制和結構組件時，必須考慮震動問題。
6. 每機可採用高污泥進流率，如此可減少所需設備的數量。	6. 高速離心時動力消耗大。
7. 聚合物的加藥量較其他脫水方法少。	7. 離心液水質不佳時不易察覺，因整個設備是密封的。
8. 當負荷大於設計負荷時，增加聚合物加藥量，則仍可操作，雖然污泥餅固體物含量會減少。	8. 必須廣泛地預先測試，以選擇正確的機組於正常操作。

資料來源：Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge，1982 年 10 月

廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，1985 年 11 月

3.4.5 污泥脫水方法的選擇與評估

在評估或選擇污泥脫水方法時，必須同時考慮前處理方法和後續處置方式的影響，故污泥脫水方法之評估絕不能單獨行之，而必須全盤考慮整個污泥處理系統的所有程序。然而，因污泥之濃縮、穩定、調理、脫水和最終處置，可有許多種不同單元程序的組合，故使得評估工作更形複雜。不過，一般而言，選擇一合適的污泥脫水方法，其策略包含下列五步驟：

1. 初步的篩選脫水方法。
2. 初步成本評估。
3. 實驗室分析。
4. 現場測試。
5. 根據詳細的設計參數進行最後評估。

基本上，初步的篩選脫水方法為相當重要的一步驟，其方式乃是根據所考慮的一些因素，將不適合者先行排除。通常在初步篩選所需考慮的因素包括：

1. 與現有設備之一致性(compatibility)。
2. 與處理廠規模之一致性。
3. 與最終處置方式之一致性。

- 4.二級處理和先前污泥處理的影響。
- 5.化學調理的要求。
- 6.脫水時之固體截獲量(solid capture)。
- 7.勞力需求。
- 8.環境影響的考慮。
- 9.長程的實用性(utility)。
- 10.處理廠之位置。
- 11.其他處理廠現有相同設備之操作經驗。
- 12.個人或主管機關之偏好。

根據前面各小節對各種脫水技術與設備的介紹，表 3.31 為各種污泥脫水方式之綜合評估比較表，可作為選擇污泥脫水方式之參考。

此外，在選擇污泥脫水方法時，必須考慮其對環境可能造成之影響，主要包括能量需求、噪音、震動、臭味、景觀和地下水污染。表 3.32 即為各種脫水方法對環境影響的評估結果。一般而言，機械脫水方法對於能源需求、噪音和震動產生影響較大，而晒乾床對臭味、景觀和地下水污染之影響較需注意。

表 3.31 各種污泥脫水方式之評估比較表

型式 特性	晒乾床法	帶濾式脫水法	帶壓式脫水法	離心式脫水法
凝聚劑種類 及添加量	硫酸鋁、明礬 (視情況需要)	高分子聚合物1.0~1.5%	消石灰30~40%， 氯化鐵5~10%	高分子聚合物1.0~1.5%
脫水方式	半連續式	連續式	分批次	連續式
泥餅含水率	40~50%	70~80%	50~70%	75~85%
優點	1.成本低。 2.操作簡單。 3.省能源。 4.適應性大。 5.省藥品。	1.泥餅含水量尚低。 2.能源消耗低。 3.操作簡單。 4.設備單純，附屬設備少。 5.污泥及藥品混合容易。 6.噪音、震動小。	1.泥餅含水量低，泥餅 量少。 2.脫水SS回收率高。 3.除晒乾床法外，唯一 產生乾泥餅而適合於 某些地點填地。 4.焚化時，可省燃料。 5.泥餅含水量可調整。	1.採密閉式，不易發臭。 2.操作簡單。 3.設備單純，附屬設備 少，裝置容易，占地小。 4.適應性大。 5.污泥及藥品混合容易。 6.注藥設備併於機體內。

表 3.31 各種污泥脫水方式之評估比較表(續)

型式特性	晒乾床法	帶濾式脫水法	帶壓式脫水法	離心式脫水法
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 缺乏理論設計方法。 2. 占地大。 3. 污泥需安定化，否則易發臭。 4. 受氣候影響顯著。 5. 影響觀瞻。 6. 去除污泥耗勞力。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適應性差。 2. 濾帶壽命短，用久效率降低。 3. 需水量大。 4. 需前處理以去除大塊物質和纖維物質。 5. 污泥需安定化，否則易發臭。 6. 刮刀之調整費時。 7. 較離心法言，操作稍難，聚合物用量稍多。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需大量之無機化學調理劑。 2. 投資成本高。 3. 聚合物之使用複雜。 4. 設置面積大。 5. 如無自動化操作，勞力成本高。 6. 濾布更換昂貴且耗時。 7. 操作複雜。 8. 固體物量因加多量石灰而增多。 9. 分批式操作與污泥處理作業不易配合。 10. 噪音大。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 渦卷之維修費高。 2. 進流污泥須前處理。 3. 噪音顯著。 4. 震動、磨損劇烈。 5. 動力消耗大。 6. 離心液水質不易知曉。 7. 需預先試測。
維護	<ol style="list-style-type: none"> 1. 定期移除脫水污泥。 2. 定期補充濾砂。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 清洗濾帶及清洗水噴口。 2. 濾帶蛇行調整、張度調整。 3. 壓力滾輪，支持滾輪調整。 4. 加油。 5. 刮刀調整。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 更換濾布。 2. 檢查濾布洗淨狀態。 3. 濾布蛇行調整。 4. 加油。 5. 更換壓榨齒。 6. 濾板檢查與更換。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 清洗旋轉軸。 2. 軸承等更換。 3. 渦卷更換。 4. 加油。 5. 分離機與電動機之維修。
總評	<ol style="list-style-type: none"> 1. 氣候條件、占地決定了脫水效果及適用性。 2. 操作簡單、成本低廉、效果佳。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可達全自動化操作。 2. 操作尚可，維護不易。 3. 不受氣候影響。 4. 占地小。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可達全自動操作，不受氣候影響。 2. 脫水效果佳，占地小。 3. 分批式作業，難配合。 4. 操作維護不易。 5. 因添加消石灰及氯化鐵致增加污泥量。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 渦卷新開發，使用性提高。 2. 密閉操作，操作管理皆易。 3. 運轉中不易監視。 4. 不受氣候影響，占地小。

資料來源：Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge，1982 年 10 月
 廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，1985 年 11 月
 廢水處理廠操作管理(十)污泥脫水、乾燥，1985 年 4 月

表 3.32 各種脫水方法對環境的影響

脫水方法	與環境有關因素					
	能源需求	噪音	震動	惡臭 ¹	視覺影響	對地下水污染之威脅
晒乾床	低 ²	無 ³	無	高	高	高
帶濾式脫水機	低	低	低	中等	無	無
帶壓式脫水機	中等至高	中等	低	中等	無	無
離心式脫水機	中等至高	中等至高	高	低	無	無

註 1：本項目是以未穩定化處理之污泥為評估標準，若污泥經過預先穩定化處理，則各脫水方法將不致產生任何顯著惡臭。

註 2：所需能源為抽送污泥之電力和從污泥床移除晒乾污泥之機械設備的柴油。

註 3：當重機械在清除晒乾床時，噪音程度可能會很高。

資料來源：Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge，1982 年 10 月
 廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，1985 年 11 月

3.5 乾燥技術與設備

一般而言，可根據不同準則對乾燥器進行分類。第一種分類方法是以傳熱方式為分類基礎，即傳導加熱、對流加熱、輻射加熱、微波和介電加熱等。第二種分類方法是根據乾燥容器的類型進行分類，如托盤、轉鼓、流體化床、氣流或噴霧等。另也可按照物料的物理形狀來分類。

按照物料在乾燥器中的停留時間分類，則有：停留時間很短(小於1分鐘)的有氣流、噴霧、轉鼓乾燥器。停留時間很長的(大於1小時)有隧道、台車或帶式乾燥器。在大多數乾燥器中的停留時間居於其間。以下分別說明常見之乾燥器：

3.5.1 箱式乾燥器

箱式乾燥器(cabinet dryer)中，一般用盤架盛裝物料。優點是：容易裝卸、物料損失少、盤架易清洗。缺點是：物料分散不易，乾燥時間長；若物料量大，所需設備容積也大；人力需求大；如需要定時將物料裝卸或翻動時，粉塵飛揚，環境污染嚴重；熱效率低，一般在40%左右，每乾燥1kg水分約需消耗加熱蒸氣2.5kg以上。因此隨著乾燥技術的發展將逐漸被新型乾燥器所取代。

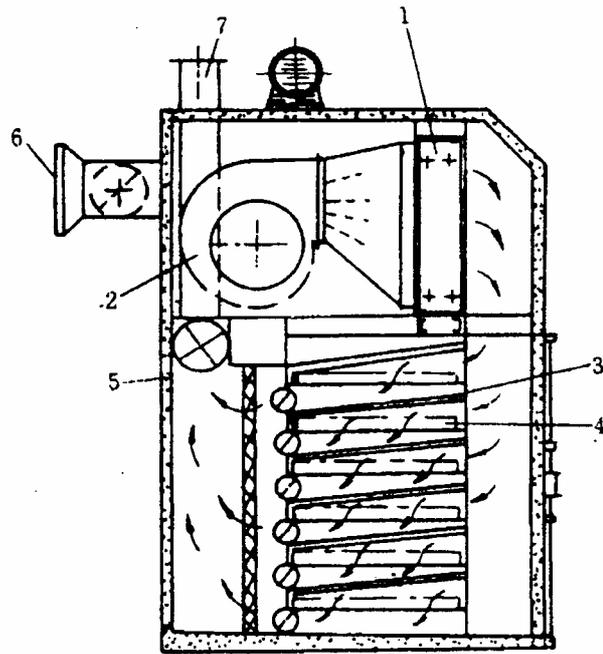
箱式乾燥器是外形像箱子的乾燥器，外壁是絕熱保溫層。根據物料的性质、狀態和處理能力大小分為：水平氣流箱式乾燥器、穿流氣流箱式乾燥器、真空箱式乾燥器等。

箱式乾燥器內部主要結構有：逐層存放物料的盤子、框架、蒸氣加熱管或裸露電熱元件加熱器。由鼓風機產生循環流動的熱風，吹到潮濕物料的表面達到乾燥目的。在大多數設備中，熱空氣被反覆循環通過物料。箱式乾燥器的工作原理和結構，如圖3.116所示。

3.5.2 隧道乾燥器

將被乾燥物料放置在台車內、輸送帶上、架子上或自由的堆置在運輸設備上。物料沿著乾燥室中通道，向前移動，並依次通過通道。被乾燥物料的加料和卸料在乾燥室兩端進行。這種乾燥器稱為隧道乾燥器(tunnel dryer)，如圖3.117所示。其製造和操作都比較簡單，能量消耗也不大。但物料乾燥時間較長，處理能力較低。

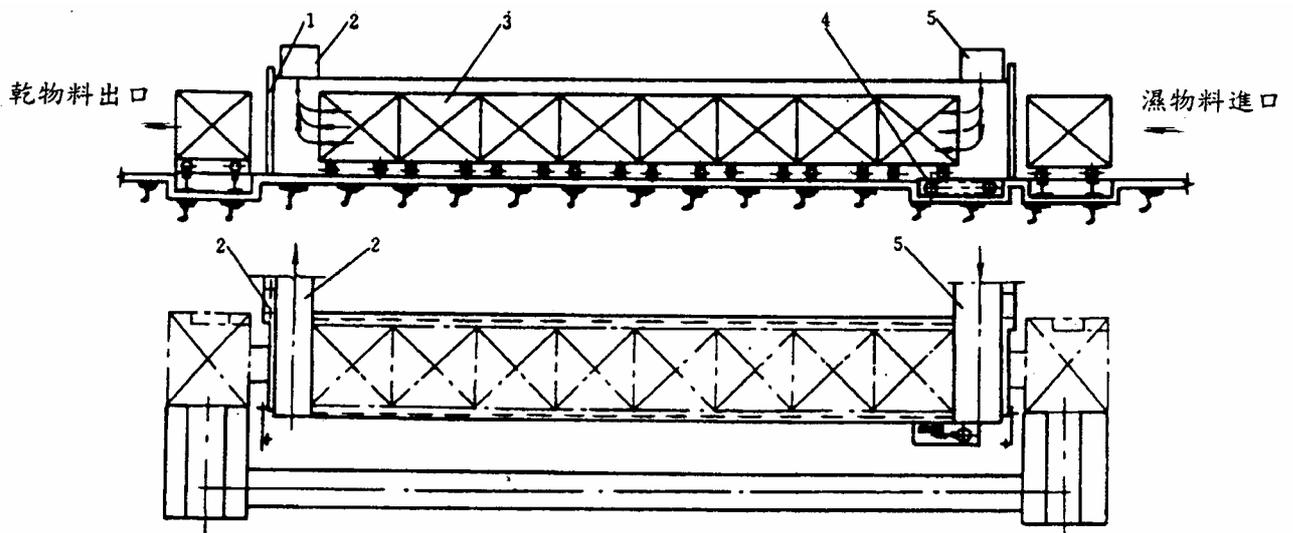
隧道乾燥器的器壁用耐火磚或帶有絕熱層的金屬材料構成。隧道的寬度主要取決於隧道頂所允許的跨度，一般不超過3.5 m。乾燥器長度由物料乾燥時間，以及熱介質流速和允許阻力決定。乾燥器越長，則乾燥越均勻，但阻力亦越大。長度通常不超過50m。截面流速一般不大於2~3 m/s。



- 1-加熱器；2-循環鼓風機；3-乾燥板層；
4-支架；5-乾燥器主體；6-吸氣口；7-排氣口

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 3.116 箱式乾燥器



- 1-拉開式門；2-廢氣出口；3-輸送台車；4-移動台車設備；5-乾燥氣體入口

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

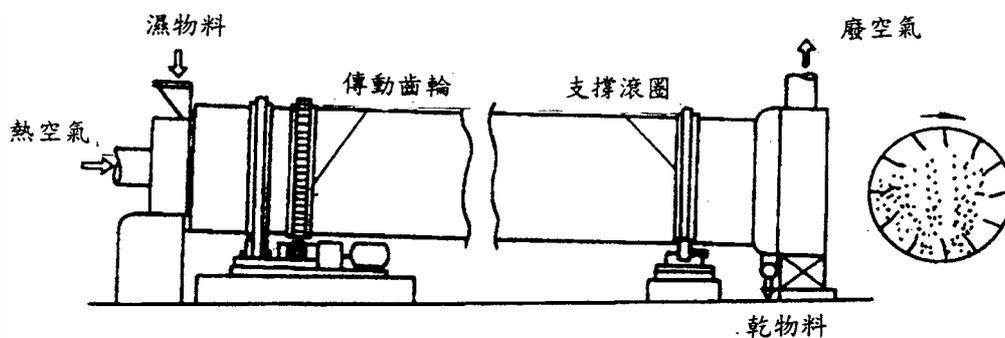
圖 3.117 隧道乾燥器

將被乾燥物料放置在台車上，送入隧道乾燥器內。載有物料在台車佈滿整個隧道。當推入一輛載有濕物料在台車時，彼此緊跟的台車都向出口端移動。台車藉助於軌道的傾斜度(傾斜度為 1/200)沿隧道移動，或藉助於安裝在進料端的推車機推動。推車機具有壓輥，它裝在一條或兩條鏈帶上，這些壓輥焊接在台車的緩衝器上，車身移動一個鏈帶行程後，鏈帶空轉，直至在壓輥運動的路程上遇到新的台車。也有在乾燥器進口處，將載物料在台車相互連接起來，用絞車牽引整個列車或者用鋼索從輪軸下面通過去牽引台車。

隧道乾燥器的熱源可用：廢氣、蒸汽加熱空氣、煙道氣或電加熱空氣等。流向可分為：自然循環、一次或多次循環、以及中間加熱和多段再循環等。其中，自然循環是較不合理的，因為物料在設備中停留的時間一長，會影響物料的品質，而且消耗熱量。多段再循環的主要優點是經濟性高。不管縱向氣流如何，都可使空氣的橫向速度變大，乾燥的效果較好，達到均勻和迅速乾燥的目的。這類乾燥器中，在各區段內空氣的循環，大都依靠設置在器內的鼓風機完成。這種內部鼓風機能減少空氣阻力。因此，允許在大氣量下操作。

3.5.3 旋轉窯乾燥器

旋轉窯乾燥器(rotary dryer)的主體是略帶傾斜並能旋轉的圓筒體。其工作原理簡圖如圖 3.118 所示。濕物料從左端上部加入，經過圓筒窯內部時，與通過窯內的熱風或加熱壁面進行有效的地接觸而被乾燥，乾燥後物料從右端下部收集。在乾燥過程中，物料藉助於圓筒窯的緩慢轉動，在重力的作用下從較高一端向較低一端移動。窯體內壁上中有順向抄板(flight)(或類似裝置)，它不斷地把物料抄起又灑下，使物料的热接觸表面增大，以提高乾燥速率並促使物料向前移動。乾燥過程中所用的熱介質一般為熱空氣、煙道氣或水蒸汽等。如果熱介質(如熱空氣、煙道氣)直接與物料接觸，則經過乾燥器後，通常用旋風除塵器將氣體中挾帶的細粒物料捕集下來，廢氣則經旋風除塵器後排放。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001 年 12 月

圖 3.118 旋轉窯乾燥器工作原理簡圖

旋轉窯乾燥器與其他乾燥設備相比，具有如下優點：

- 1.處理能力大，可連續操作。
- 2.結構簡單，操作方便。
- 3.故障少，維修費用低。
- 4.適用範圍廣，可以用它乾燥顆粒物料，對於附著性大的物料也很有利。
- 5.操作彈性大，允許物料的處理量有較大波動範圍，不致影響物料的品質。
- 6.清理容易。

旋轉窯乾燥器的缺點是：

- 1.設備較龐大，初期投資多。
- 2.安裝、拆卸困難。
- 3.熱容量係數小，熱效率低(但蒸汽管式旋轉窯乾燥器熱效率高)。
- 4.物料在乾燥器內停留時間長，且物料顆粒之間的停留時間差異較大，因此不適合於對溫度有嚴格要求的物料。

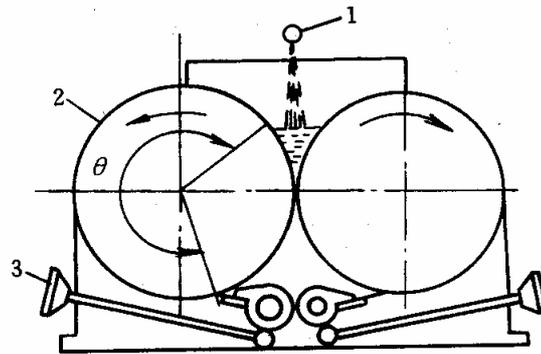
3.5.4 轉鼓乾燥器

轉鼓乾燥器(drum dryer)是一種內加熱傳導型轉動乾燥設備。濕物料在轉鼓外壁上獲得以導熱方式傳遞的熱量，脫除水分，達到所要求的濕含量。在乾燥過程中，熱量由鼓內壁到鼓外壁，再穿過料膜，其熱效率高，可連續操作，故廣泛用於液態物料或帶狀物料的乾燥。液態物料在轉鼓的一個轉動周期中完成布膜、脫水、刮料、得到乾燥物料的全過程。因此，在轉鼓乾燥操作中，可通過調整進料濃度、料膜厚度、轉鼓轉數、加熱介質溫度等參數獲得預期濕含量的物料和相對的處理量。由於轉鼓乾燥器結構和操作上的特點，對膏狀和粘稠物料更適用。如其他乾燥設備一樣，在設計和選用轉鼓乾燥時，需考慮的主要問題是：被乾燥物料的性質、轉鼓乾燥器的型式、熱傳質傳機制、操作條件及其經濟性。

轉鼓乾燥器分為三種型式：單鼓乾燥器(single-drum dryer)、雙鼓乾燥器(double-drum dryer)和多鼓乾燥器(multiple-drum dryer)。其中雙鼓乾燥器按照兩鼓的轉動方向和進料方式又可分為雙鼓與對鼓兩種型式。轉鼓乾燥器亦可根據其操作壓力分為常壓和減壓兩種型式。雙鼓乾燥器結構示意圖，如圖 3.119 所示。

轉鼓由裝有變速機構的減速裝置驅動。除特殊情況外，轉速大都在 4~6 rpm 的範圍內。被乾燥物料由布膜到乾燥、卸料，一般均在 10~15 秒的時間內完成。

加熱介質多採用 $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{Pa}$ 的蒸汽，其溫度約在 $120 \sim 150^\circ\text{C}$ 之間。刮料裝置由刀片、支持架、支承軸和壓力調節器等組成。壓力調節器分為彈性與剛性兩種。刮刀裝置一般安裝在滾筒斷面坐標的第三或第四象限。根據轉鼓的長度，刮刀可組裝成單刀和組合刀。單刀適於轉鼓長度小於 150mm 的乾燥器，組合刀則用於料膜剝落性差、轉鼓長度較大的乾燥器中。刀片材料的選擇需考慮其剛性、耐磨性及耐蝕性等。



1-中心進料管；2-轉鼓；3-刮刀及調節裝置

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 3.119 雙鼓乾燥器結構示意圖

3.5.5 帶式乾燥器

帶式乾燥器(簡稱帶乾機)(conveyer dryer)由若干個獨立的單元段所組成。每個單元段包括循環鼓風機、加熱裝置、單獨或公用的新鮮空氣抽入系統和尾氣排出系統。因此，對乾燥介質數量、溫度、濕度和尾氣循環量等操作參數，可進行獨立控制，從而保證帶乾機工作的可靠性和操作條件的最佳化。

帶乾機操作靈活，濕物料進料，乾燥過程在完全密封的箱體內進行，工作條件較好，避免粉塵的外洩。

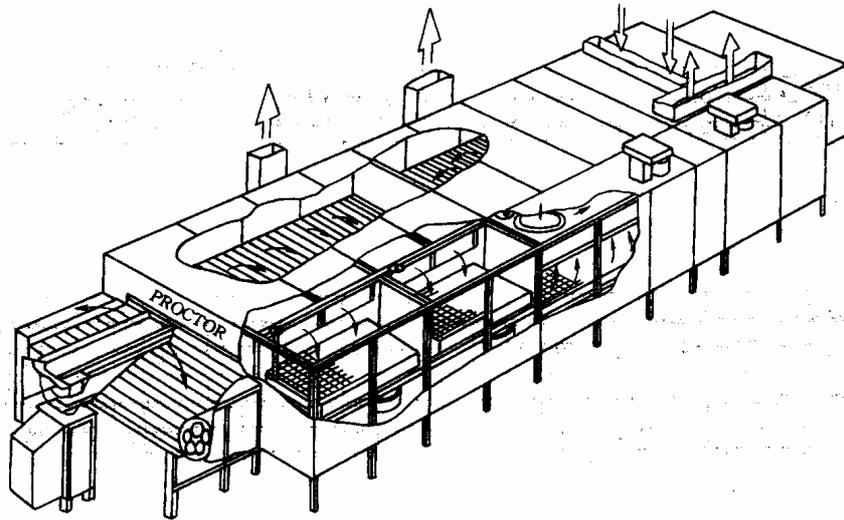
與旋轉窯、流體化床和氣流乾燥器相比較，帶乾機中的被乾燥物料隨同輸送帶移動時，物料顆粒間的相對位置比較固定，具有基本相同的乾燥時間。對乾燥物料色澤變化或濕含量均勻相當重要的某些乾燥過程來說，帶乾機是非常適用的。此外，物料在帶乾機上受到的振動或衝擊輕微(沖擊式帶式乾燥器除外)，物料顆粒不易粉化破碎，因此也適用於乾燥某些不允許碎裂的物料。

帶乾機結構不複雜，安裝方便，能長期連續操作，發生故障時可進入箱體內檢修，維修方便。缺點是占地面積大，操作時噪音較大。

圖 3.120 所示為典型的單級帶乾機(single-conveyer dryer)結構透視簡圖。被乾燥物料由進料端經加料裝置被均勻分布到輸送帶上。輸送帶通常用穿孔的不銹鋼

薄板(或簡稱網目板)製成，由馬達經變速箱帶動，可以調速。最常用的乾燥介質是空氣。空氣用循環鼓風機由外部經空氣過濾器抽入，並經加熱器加熱後，經分布板由輸送帶下部垂直上吹。空氣流過乾燥物料層時，物料中水分汽化，空氣增濕，溫度降低。部分濕空氣排出箱體，另部分則在循環鼓風機吸入口前與新鮮空氣混合再行循環。為了使物料層上下脫水均勻，空氣繼上吹之後向下吹，最後乾燥物料經外界空氣或其他低溫介質直接接觸冷卻後，由出口端卸出。

乾燥器箱體內通常分隔成幾個單元，以便獨立控制操作參數，便於操作。乾燥段與冷卻段之間有一隔離段，在此無乾燥介質循環。乾燥介質以垂直方向向上或向下穿過物料層進行乾燥的，稱為穿流式帶式乾燥器(through-circulation conveyor dryer)。乾燥介質在物料層上方作水平流動進行乾燥的，稱為水平氣流式帶式乾燥器(parallel gas flow conveyor dryer)。



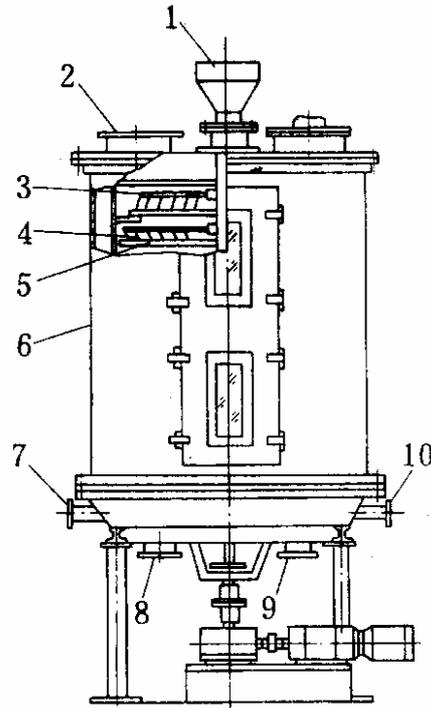
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 3.120 單級帶式乾燥器結構透視簡圖

3.5.6 盤式連續乾燥器

盤式連續乾燥器(disc continuous dryer)是一種高效節能的乾燥設備。該設備主要包括：殼體、框架、大小空心加熱盤、主軸、耙臂(shovel arm)及耙葉(shovel blade)、加料器、卸料裝置、減速機和馬達等組件。其結構如圖 3.121 所示。

空心加熱盤是該乾燥器的主要組件，其內部通以飽和蒸汽、熱水或熱媒油，作為加熱介質。故加熱盤實際是一個壓力容器。因此在其內部以一定排列方式焊有折流隔板或短管，一方面增加了加熱介質在空心盤內的擾動，提高了傳熱效果；另一方面增加了空心盤的剛度並提高了其承載能力。每個加熱盤上均有熱介質的進出口接管。各層加熱盤間保持一定間距，水平固定在框架上。



1-濕物料進口；2-廢氣出口；3-耙臂；4-耙葉；5-加熱盤；
6-外殼；7-蒸汽進口；8、9-乾物料出口；10-冷凝水出口
資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 3.121 盤式連續乾燥器結構

每層加熱盤上均裝有十字耙臂，上下兩層加熱盤上的耙臂呈45度角交錯固定在主軸上。每根耙臂上均裝有等距離排列的耙葉若干個，但上下兩層加熱盤的耙葉安裝方向相反，以保證物料的正常流動。馬達通過減速機帶動乾燥器主軸轉動。物料由乾燥器上方的進料口進入，經各層加熱盤乾燥後由下部出料口排出。乾燥器最外面是一殼體，使整個乾燥過程在一密閉空間內進行。

盤式連續乾燥器的特點如下：

- 1.熱效率高、能耗低、乾燥時間短：盤式連續乾燥器是一種熱傳導式乾燥設備，不存在氣流乾燥中由熱風帶走大量的弊端。同時由於物料在耙葉的機械作用下，不斷被翻炒、攪拌，從而使料層熱阻降低，提高了乾燥強度，其熱效率可達60%以上。由於物料濕含量的不同，單位蒸汽耗量為1.3~1.6kg蒸汽/kg水，乾燥時間一般在5~80min。
- 2.可調控性好：加熱盤的數量、主軸的迴轉速度、加熱介質的溫度和物料停留時間，可根據需要進行調整，因此物料乾燥均勻、品質好。
- 3.被乾燥物料不易破損：雖然這是一種攪拌乾燥設備，但屬低速攪拌，由於耙葉的迴轉速度較低，物料在翻炒過程中不容易破碎。

4.環境整潔：由於是密閉式操作，無粉塵飛揚，改善了工作環境，有利於操作人員的健康。

5.無振動、低噪音、轉動平穩、操作容易、設備直立安裝、占地面積小。

任何一種乾燥設備由於其自身特點，都有一定適用範圍，盤式連續乾燥器也不例外。其適用範圍如下說明：

1.就材料的性狀而言，該乾燥器適用於乾燥散粒狀物料，而不適用於粘稠或膏狀物料。這是因為被乾燥物料在耙葉作用下不斷翻炒，同時被耙葉推動前進，而粘稠或膏狀物料難以被耙葉翻炒，甚至在乾燥盤上結疤，使耙葉不能正常運轉，甚至損壞。

2.就材料的熱性能而言，各種物料均可用該設備進行乾燥。這是因為該乾燥器可以用蒸汽、熱煤油或熱水作熱源，同時該乾燥器還可設計成常壓型、密閉型和真空型等不同型式。因此無論熱敏性物料或需乾燥溫度較高物料，均可用該設備進行乾燥。

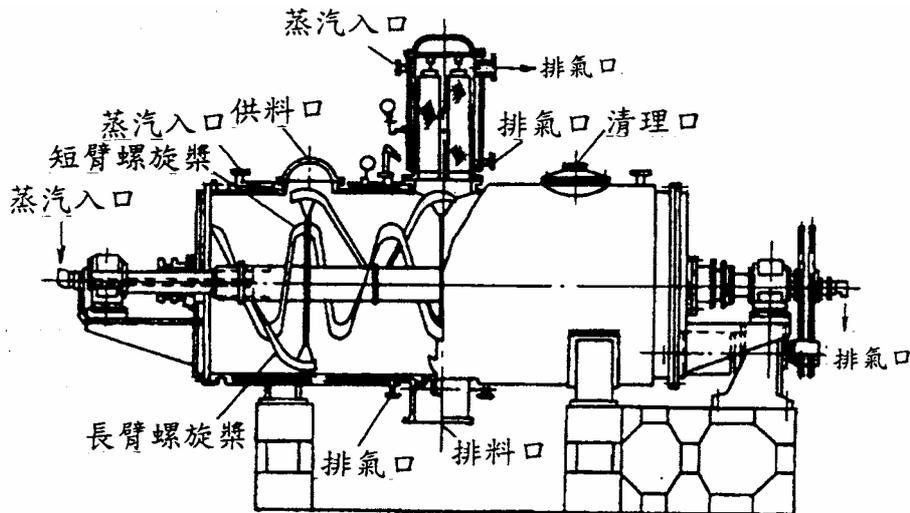
3.5.7 臥式槳葉式乾燥器

在乾燥器內設置各種結構和形狀的槳葉以攪拌被乾燥物料，使物料在攪拌槳翻動下，不斷與乾燥器的傳熱壁面或熱介質接觸，加快傳熱速度和濕分蒸發，達到乾燥目的。這類設備稱為槳葉式乾燥器(paddle dryer)或攪拌型乾燥器(agitated dryer)。

由於固體物料自身沒有流動性，在乾燥器內固體物料的移動完全依靠槳葉推動和自身重力的聯合作用。因此，要使乾燥器內固體物料全部流動，就要設置較多槳葉。根據工程要求，多數槳葉式乾燥器橫臥安置，物料從一端加入，從另一端排出，可減少返混，使物料停留時間分布變窄，有利乾物料乾燥均勻。

為了滿足各種物料特性和乾燥工程條件，槳葉式乾燥器的結構和形式很多。由於槳葉式乾燥器有許多優點，近年還不斷有新型槳葉式乾燥器出現。

圖 3.122 所示為雙螺旋槳葉式真空乾燥器，筒體為帶夾套的圓筒型，內有一根空心旋轉軸，其攪拌槳葉是扁平的螺旋帶。螺旋帶有兩條，分別固定在從軸上伸出的、有長短兩種規格的幾根長臂和短臂上，螺旋帶和臂端用螺栓緊固，組成長臂螺旋槳和短臂螺旋槳。當軸旋轉時，短臂螺旋槳將物料向筒壁方向推，長臂螺旋槳將物料向設備中心方向推，使被乾燥物料得到均勻攪拌。



資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 3.122 雙螺旋槳葉式真空乾燥器

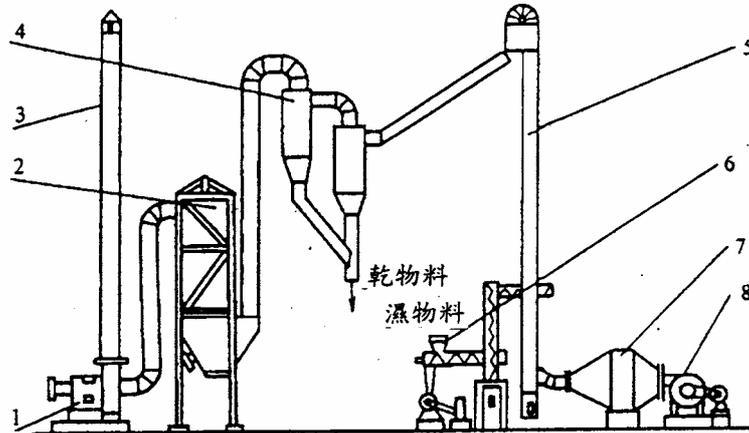
本結構中螺旋攪拌槳不能作加熱面，軸中心可輸入熱介質。乾燥所需熱量依靠夾套壁面和軸的外表面供給。為增加傳熱面積，攪拌槳葉形狀可設計成加熱盤管、空心圓板，或其他可輸入熱介質的空心槳葉，應根據物料性質考慮。熱介質可用熱水、蒸汽或熱煤油。由於在真空狀態下操作，操作溫度不需太高，熱介質多用熱水或蒸汽。

真空槳葉式乾燥設備既有真空乾燥優點，又有攪拌乾燥特點：

1. 對乾燥物料適應性強，應用廣。真空乾燥可在較低溫度下進行，適用於熱敏性物料。由於真空操作，不需由外界輸入乾燥氣體，故可在空氣隔絕情況下操作。對於含有易燃易爆氣體及需回收溶劑的物料乾燥特別適合。
2. 真空槳葉乾燥中物料不斷受到槳葉攪拌，乾燥物混合均勻，避免了物料過熱。同時塊狀和團狀物料不斷被槳葉打碎，增大顆粒表面積，加快濕分汽化和乾燥速率。
3. 槳葉式真空乾燥器中由於增加了槳葉和空心軸表面的傳熱，使設備傳熱面積增加，提高了設備處理能力。另外，還由於槳葉等的傳熱面安置在設備內，沒有向周圍環境散熱，減少了這部分熱損失，提高了熱量利用率。
4. 通常的真空乾燥均為間歇操作，槳葉式真空設備除用作間歇操作外，也可用於連續操作。當連續操作時，在乾燥器前後要設置若干真空度與乾燥器相同的加料斗和出料槽，用旋轉閥或換向閥定量和連續地加料和排料。此外，為了確保物料乾燥所需的停留時間，攪拌槳設置和排料口堰板應安置適當。

3.5.8 氣流乾燥

氣流乾燥也稱“瞬間乾燥”(flash drying)，該法是使加熱介質(空氣、惰性氣體、燃氣或其他熱氣體)和待乾燥固體顆粒直接接觸，並使待乾燥顆粒懸浮於流體中，因而兩相接觸面積大，強化了熱傳質傳過程。氣流乾燥流程圖如圖 3.123 所示。



1-抽風機；2-袋式除塵器；3-排氣管；4-旋風除塵器；
5-乾燥管；6-螺旋加料器；7-加熱器；8-鼓風機

資料來源：廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，2001年12月

圖 3.123 氣流乾燥基本流程圖

氣流乾燥的特點如下：

1. 氣固兩相間熱傳質傳的表面積大

固體顆粒在氣流中高度分散呈懸浮狀態，使氣固兩相之間的熱傳質傳表面積大大增加。由於採用較高氣速(20~40m/s)，使得氣固兩相間的相對速度也較高，不僅使氣固兩相具有較大的傳熱面積，而且體積熱傳係數也相當高。普通直管氣流乾燥器(pneumatic dryer)的體積熱傳係數為 $2,300\sim 7,000\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ，為一般旋轉窯乾燥器的 20~30 倍。

2. 熱效率高、乾燥時間短、處理量大

氣流乾燥採用氣固兩相並流操作，這樣可以使用高溫的熱介質進行乾燥，且物料的濕含量愈大，乾燥介質的溫度可以愈高。例如，乾燥某些濾餅時，入口氣溫可達 700°C 以上，而相對的氣體出口溫度則較低，為 120°C 。從上述情況可以看出，乾燥氣體進出口溫差是很大的。乾物料的出口溫度約比乾燥氣體出口溫度低 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 。高溫乾燥介質的應用可以提高氣固兩相間的熱傳質傳速率，提高乾燥器的熱效率。

氣流乾燥的管長一般為 10~20m，管內氣速為 20~40m/s，因此，濕物料的乾燥時間僅 0.5~2 秒，所以物料的乾燥時間很短。

3. 氣流乾燥器結構簡單、緊湊、體積小，處理能力大

氣流乾燥器結構簡單，在整個氣流乾燥系統中，除鼓風機和加料器以外，別無其他轉動組件，設備投資費用較少。

4. 操作方便

在氣流乾燥系統中，把乾燥、粉碎、篩分、輸送等單元過程聯合操作，流程簡化並易於自動控制。

5. 氣流乾燥的缺點

氣流乾燥系統的流動阻力降較大，一般為 3,000~4,000Pa，必須選用高壓或中壓鼓風機，動力消耗較大。氣流乾燥所使用的氣速高，流量大，經常需要選用尺寸大的旋風分離器和袋式除塵器。氣流乾燥對於乾燥負荷很敏感，固體物料輸送量過大時，氣流輸送就不能正常操作。

3.5.9 各種常見乾燥器比較

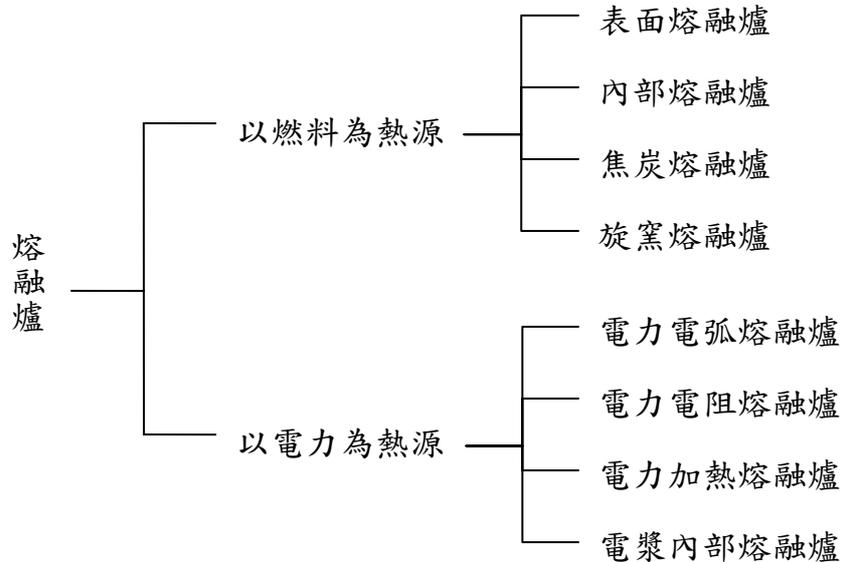
各種常見之乾燥器比較說明如表 3.33 所示。

表 3.33 各種常見乾燥器比較

乾燥器型式	主要傳熱方式	典型能量消耗 (KJ/Kg 水蒸發)	物料在乾燥器內停留時間	適用物料型態
箱式乾燥器	對流加熱	—	1~6 時	濾餅、可流動物料、成型物料
隧道乾燥器	對流加熱	5,500~6,000	10~60 分	濾餅、可流動物料、成型物料
旋轉窯乾燥器	對流加熱	4,600~9,200	10~60 分	濾餅、可流動物料
轉鼓乾燥器	傳導加熱	3,200~6,500	10~30 秒	濾餅、液態物料
帶式乾燥器	對流加熱	4,000~6,000	10~60 分	濾餅、可流動物料、成型物料
盤式連續乾燥器	對流加熱	—	10~60 分	濾餅、可流動物料
臥式槳葉式乾燥器	對流加熱	—	10~60 分	濾餅、可流動物料
氣流乾燥	對流加熱	4,500~9,000	1~10 秒	濾餅、可流動物料

3.6 熔融技術與設備

熔融爐大致可分為燃料式熔融系統與電氣式熔融系統兩大類(詳圖 3.124)，其中燃料式熔融系統以表面熔融爐、內部熔融爐、焦炭熔融爐及旋窯熔融爐等四種為主，而電力式熔融系統則以電弧式、電阻式、電漿式及電熱式熔融爐為發展重點。



資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.124 熔融爐分類圖

1. 第一類：燃料式熔融爐

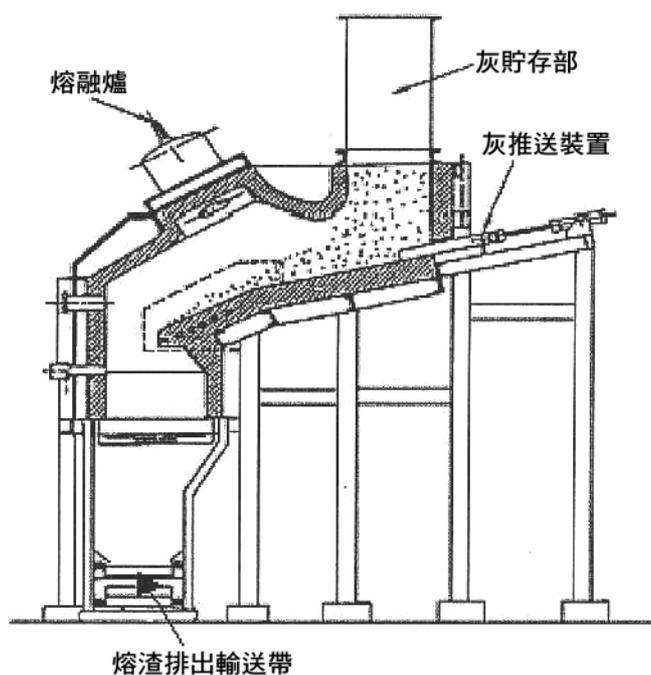
將投入之灰渣污泥、高熱值廢棄物以燃燒器加熱至 1,500°C 後，灰層表面即開始逐漸熔融，並呈膜狀流出，故有時亦稱“膜狀熔融爐”。由於爐內高溫之操作要求，燃料消耗量大，在能源效率上，應考慮設置熱能回收設施，以得較高之經濟效益。

(1) 表面熔融爐

應用原理係以爐內上部加熱之方式，維持高溫（1,300°C 以上）狀態，處理之污泥或其焚化灰渣自表面依次熔融，產生之熔融液則持續落入淬冷槽，形成水冷式熔渣（如圖 3.125）。主要處理對象為焚化灰渣或含水率低於 20% 之脫水污泥，其通常利用石灰系（如河砂）或無基鹽系（如生石灰）作為鹽基度之調整劑。此爐的處理特性有：

A. 可減容為原有體積之 40%。

- B.可混合處理高熱值之廢棄物（如廢輪胎、廢膠、木屑等），並可節省輔助燃料之用量。
- C.熔渣為連續排出、且啟爐及停爐之操作簡便。
- D.可產生玻璃質態之熔渣，重金屬不易溶出。
- E.溶渣可作為路基之材料，具有資源再利用之價值。
- F.可視狀況添加 SiO_2 及硼酸，以增加熔融之發生。

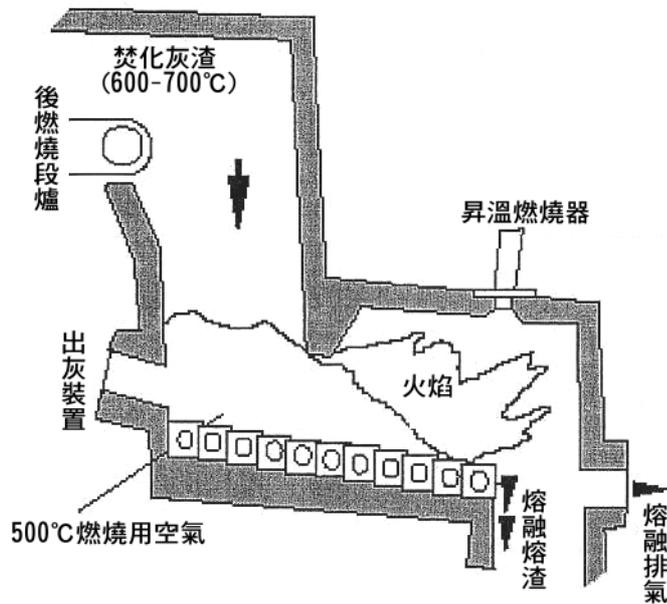


資料來源：特殊資源化技術－堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004年7月

圖 3.125 表面熔融爐示意圖

(2) 內部熔融爐

內部熔融爐主要係以灰渣中殘留碳產生之燃燒熱作為處理灰渣之熱源，一般建造於焚化爐後燃燒段下方，熔融處理過程主要分為進料段、燃燒段、熔融段、以及熔渣排出段等四階段，(如圖 3.126)，其中高溫灰渣（約含殘留碳 10~15%）進入熔爐中，並由爐床噴嘴送入 500°C 之預熱空氣，使殘留碳維持燃燒狀況，燃燒段藉由加熱器維持在 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，至於熔融段則約維持在 $1,300^{\circ}\text{C}$ 左右。



資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004年7月

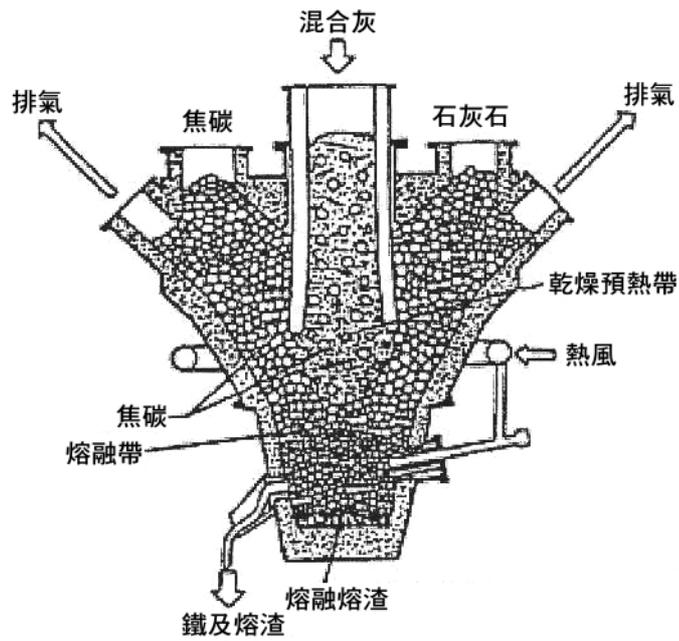
圖 3.126 內部熔融爐示意圖

(3) 焦炭熔融爐

焦炭床熔融爐乃由化鐵爐（cupola）技術研發而成，其處理程序係將焚化灰渣或脫水污泥與焦炭，同時投入於進料斗，並於熔融爐與一次空氣燃燒達 $1,600^{\circ}\text{C}$ ，而灰渣或污泥經乾燥升溫，可燃部分先分解產生可燃性氣體，並達到安全燃燒，熔渣則由排渣口排出（如圖 3.127）。主要適用對象為焚化灰渣或含水率低於 40% 之乾燥污泥餅，另為求較高品質之熔渣，可考慮添加碎石（30~100mm）或石灰石等調整劑來調整其鹽基度。

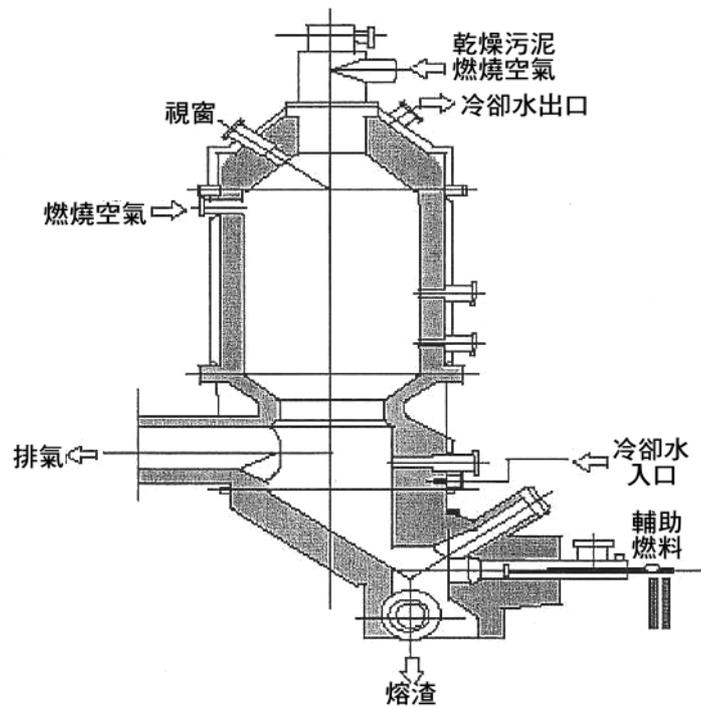
(4) 旋窯熔融爐

旋窯熔融爐之主要構造為一直立式之可旋轉之熔融段、熔渣分離段及熔渣排出段三部分，處理過程係將灰渣，污泥及廢棄物均勻地分散在爐體，一次空氣由爐頂送入，點火燃燒到 $1,000^{\circ}\text{C}$ 左右，二次燃燒空氣則由爐側供給，溫度維持在 $1,300^{\circ}\text{C} \sim 1,500^{\circ}\text{C}$ 左右，爐內採用耐高腐蝕之耐火材。落入的乾燥污泥或廢棄物在爐內，藉由高溫及回旋流作用，以達加熱與熔融效果，熔融後，熔渣由爐底排出，如圖 3.128 所示。



資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004年7月

圖 3.127 焦炭熔融爐示意圖



資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004年7月

圖 3.128 旋窯熔融爐示意圖

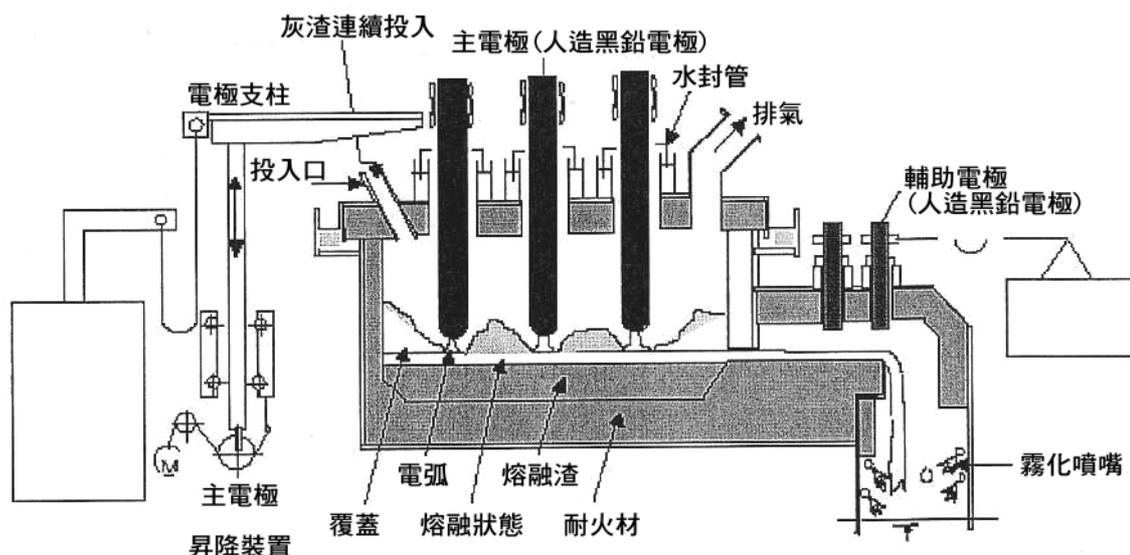
2. 第二類：電力式熔融爐

電力式熔融爐係利用電力加熱的方式，將電能轉變為熱能，使灰渣或廢棄物污泥加熱到 1,500°C 左右，灰渣中或廢棄物中之金屬成分，被熔融，利用比重沈於底部，而灰分或雜質則浮於上層，形成熔渣。熔渣利用氣冷或水冷方式，冷卻去除。電力式熔融爐，熔融過程中，電力能消耗頗大，故電力能的節約使用，在熔融爐設計之初，也需考量。

(1) 電弧(Arc)熔融爐

係以電弧加熱方式，藉由電極與爐床之鹼金屬間，產生高溫電弧(約 3,000 °C)，供給熔融處理之熱源；同時熔融爐內之加熱電極可藉升降機改變在爐體之位置，以便形成良好之電弧機構(如圖 3.129)。其處理之主要特性包括：

- A. 由於溫度較高，灰渣中之重金屬可完全熔融。
- B. 排放廢氣量較少，處理較為容易。
- C. 需要較純熟之操作技巧。
- D. 電力需求量大，需配合其他設備的需求量控制管理。
- E. 熔渣排出口易受損。
- F. 產生之噪音較嚴重。

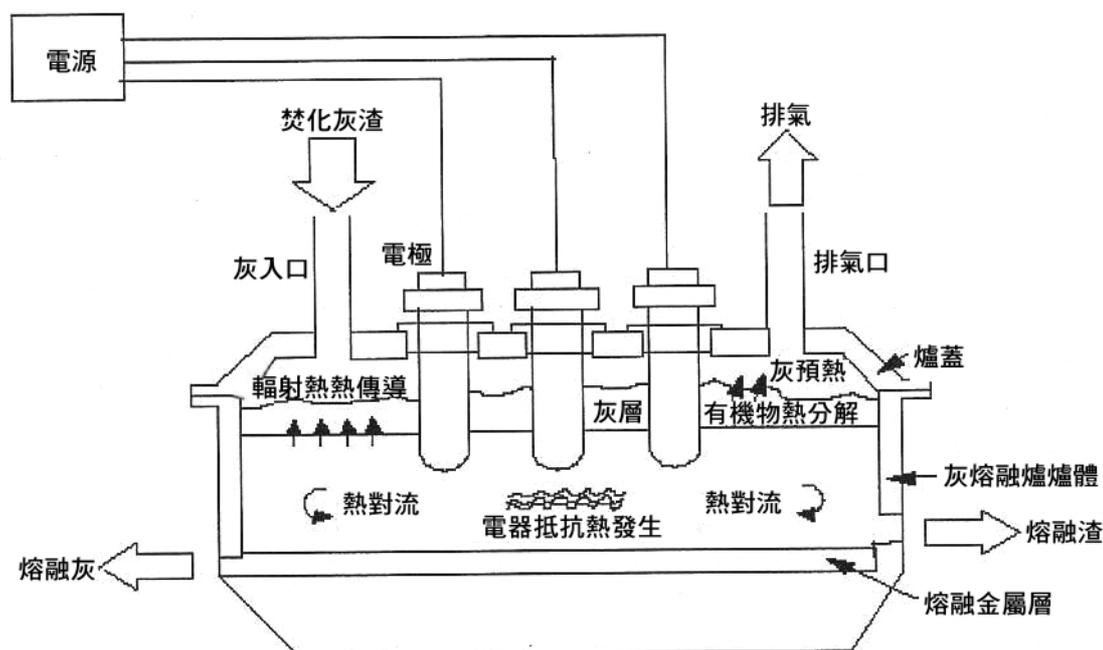


資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.129 電弧 (ARC) 熔融爐示意圖

(2) 電阻熔融爐

其應用原理係利用高壓電力，作用在廢棄物上，利用物質產生的電阻所產生之熱能，作為熔融處理之熱源。電阻式熔融爐係由爐中心之爐蓋頂，將電極表面浸漬於廢棄物及熔融液中，由於污泥或其焚化灰渣中重金屬比重差之關係，重金屬會沉於爐底，而與無機熔融液分離，同時爐底之熔融物，則緩慢冷卻固化，並間歇排出爐外（如圖 3.130）。

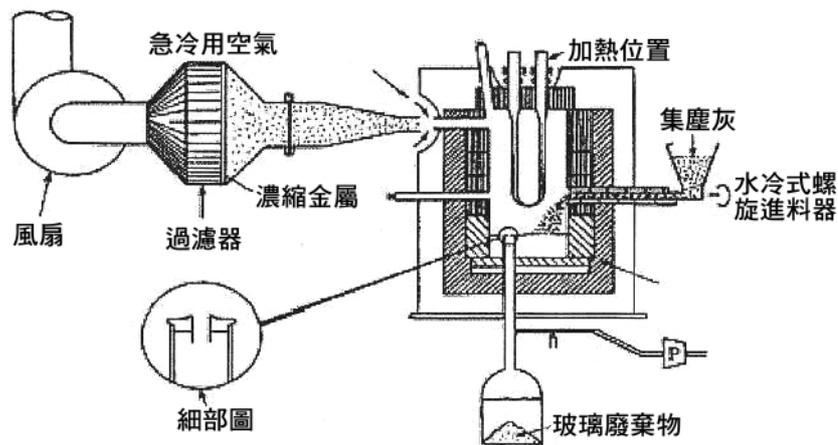


資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.130 電阻熔融爐示意圖

(3) 電熱式熔融爐

電熱式熔融爐主要係以電氣加熱器加熱，利用其輻射熱對污泥或其焚化灰渣間接加熱，以形成熔融現象。圖 3.131 為電熱式熔融爐之設備構造，其中尤以加熱單元及溶渣排出單元為主要設備。



資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004年7月

圖 3.131 電熱熔融爐示意圖

(4) 電漿式(plasma)熔融爐

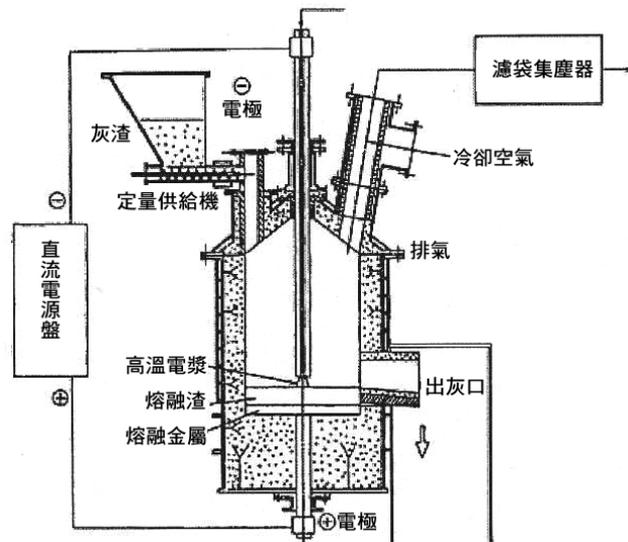
應用電漿處理技術最早起源於金屬工業製程與玻璃製造等方面，而近年來則成功應用於廢棄物之處理，其中尤以放射性廢料處理為主要對象。目前亦經模廠與實廠之試車與運轉，除應用於下水污泥、都市垃圾及其焚化灰渣之中間處理外，亦應用於受污染土壤之玻璃化及掩埋場之污染整治等用途。電漿式熔融爐主要係由爐體、電漿火炬(torch)、直流電源、空氣供給及冷卻水供給等設備所組成(如圖 3.132)。由於電漿之高溫($2,000^{\circ}\text{C}$ 以上)特性，使污泥或其焚化灰渣中有機化合物熱解、揮發或氧化，而無機化合物(如重金屬)則形成重金屬不易溶出之熔渣。至於電漿熔融處理之特性主要包括：

- 可在不同之環境條件下（氧氣、氮氣或其它惰性氣體）處理。
- 電漿熱源無污染之虞，可直接加熱處理。
- 不需前處理，減少處理費用。
- 排放廢氣及污染量較少。

A. 電漿火炬

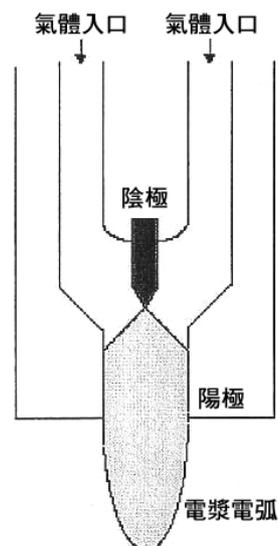
電漿熔融技術係較先進之熔融技術，電漿的產生是藉由電子在電場中加速，使帶高速之電子撞擊其他氣體原子及分子，產生離子化，並經由連鎖反應，使反應區的氣體電漿化。電漿中的離子與電子因電場作用，產生極高的速度與動能，且以高溫呈現。電漿火炬可分為高週波火炬(RF plasma torch)及電弧(arc)電漿火炬，前者利用高週波磁場反覆加速電子撞擊中性原子及分子，產生高熱。後者藉直流電弧作用電子，產生連鎖反應，而

發生高溫火炬。目前只電弧電漿火炬，被用在廢棄物上。電弧電漿火炬又分為傳輸式及非傳輸式。前者火炬中只有一個電極，故火炬可直接作用在被熔融物上。後者則兩個電極均在火炬內，故電漿火炬需藉由高壓氣體吹出火炬之外，作用在熔融物上。如圖 3.133 及 3.134 所示。而此兩種不同火炬傳輸方式之比較。如表 3.34。



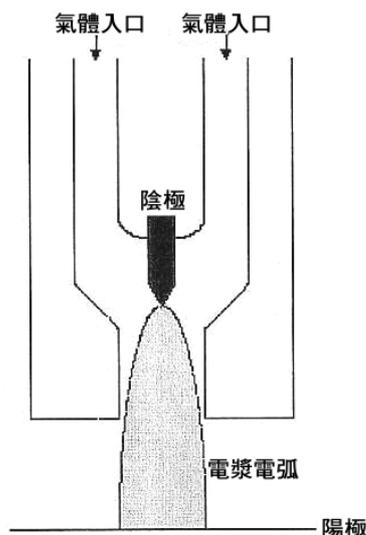
資料來源：特殊資源化技術－堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.132 電漿熔融爐



資料來源：特殊資源化技術－堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.133 電弧電漿火炬－非傳輸型電漿火炬



資料來源：特殊資源化技術－堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.134 電弧電漿火炬－傳輸型電漿火炬

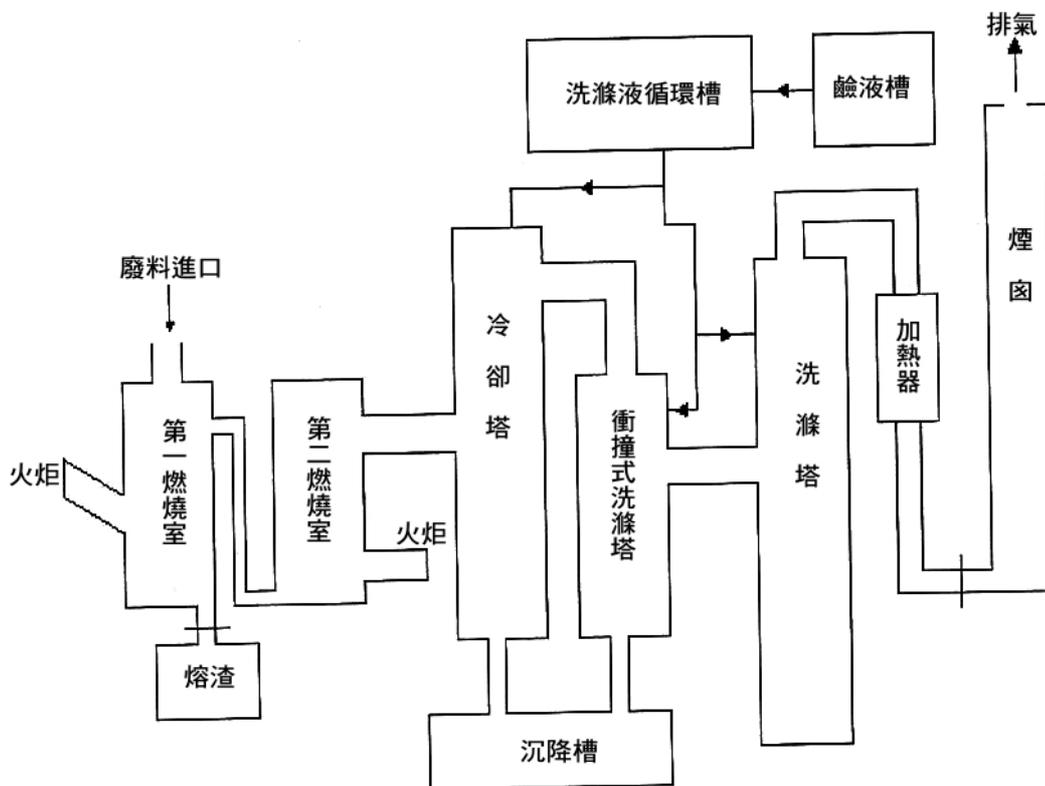
表 3.34 非傳輸型與傳輸型電漿火炬優缺點比較

	優點	缺點
非傳輸型直流電漿火炬 (non-transferred DC plasma torch)	<ol style="list-style-type: none"> 1.熱能經由高溫氣體 (2,000~8,000°C) 直接加熱被處理物，所以不需考慮處理物的性質，可以處理各種特性 (導電/非導電) 之物質。 2.容易控制功率及電漿溫度，無須另外使用填加物即可達到全自動的啟爐程序。 3.火炬工作氣體的流量較大 (約為傳輸型火炬的 10 倍)。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.電漿火炬熱效率較低(85%)，約有 45% 的電能有效加熱熔漿，熔融速度較慢。
傳輸型直流電漿火炬 (transferred DC plasma torch)	<ol style="list-style-type: none"> 1.傳輸型電漿火炬熔融爐的加熱效率(90%)，約有 60%的電能用以加熱熔漿，加熱效率較非傳輸型火炬高。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.電流需直接通過被處理物，所以火炬功率會隨所處理廢料的特性而改變，導致程序控制較困難。 2.當所處理的廢料導電度不良時，就必須用預熱器或在爐底填加導電物質，進而造成啟爐困難。 3.爐底電極直接和高溫熔漿接觸易造成熔融，增加維修頻率。

資料來源：特殊資源化技術－堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

B. 電漿熔融技術程序

一套完整的電漿焚化熔融爐系統必須包括(1)主電漿處理爐(2)第二燃燒室(3)廢棄處理系統(4)進料系統(5)熔漿下料系統(6)儀控系統(7)廢氣監測系統(8)公用設施，如圖 3.135 所示。



資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

圖 3.135 電漿焚化熔融爐系統流程

C. 電漿焚化熔融技術與一般傳統焚化爐比較有下述優缺點。

優點：

- 有最佳的減容效果(有機廢料減容比為 1/40~1/140，不可燃廢料為 1/10)。
- 廢料的熱分解、熔鑄效應同一步驟內完成。
- 固化所成的玻璃化熔岩，其放射性核種或重金屬元素均勻濾出率很低，重金屬元素的平均瀝濾指數介於 8~15 之間，毒性溶出試驗濃度小於 0.01mg/L，其抗壓強度大於 1,000kg/cm²。
- 電漿處理系統之體積比傳統處理設施(如焚化爐)小，自動化容易達成

及前處理步驟很小，總排氣量小，符合嚴格的環保標準。

- e.可同時處理可燃性及不可燃性之氣／液／固態廢料，選擇處理氣氛（氧化／還原／惰性氣氛），達到資源回收的目的。
- f.處理後的產物（熔岩）不必再進行處理即可達到最終處置的要求（放射性廢料）或棄置處理／再利用（工業廢棄物）。

缺點：

- a.電漿熔融爐的操作、啟爐及控制都比傳統焚化爐更為複雜。
- b.由於電漿焚化溫度高，會產生較高濃度的氮氧化物及揮發重金屬。
- c.電極使用壽命短暫，一般而言，電漿火炬的電極使用壽命約 40~1,000 小時。

因上述八種不同種類熔融爐，在高溫熔融處理灰渣及廢棄物污泥上，各具優點，依目前資訊顯示，其相互比較，顯示於表 3.35 及表 3.36。

表 3.35 焚化灰渣高溫熔融處理技術比較

系統	型式	熱源	熔融方式	缺點
燃料 熔 融 爐	表面熔融爐	油、廢氣、分解 生成廢氣	上部加熱使爐內之灰渣 表層熔融	必須先去除灰渣中 較大物質
	內部熔融爐	高溫空氣、未燃 碳之燃燒	通入 500℃ 高溫空氣使 灰渣中殘留碳燃燒	需使用輔助熱源提 高熔融溫度
	焦炭熔融爐	焦炭	利用焦炭產生高溫將灰 渣熔融	需加入新焦炭以補 充消耗之焦炭
	旋窯熔融爐	油、廢氣、分解 生成廢氣	灰渣與火焰分散於爐 內，二次空氣造成迴旋， 燃燒器加熱熔融	必須先去除灰渣中 較大物質
電 力 熔 融 爐	電弧熔融爐	電力	石墨電極與爐床間產生 電弧造成高溫	灰渣中粗大金屬消 耗電極及爐材
	電阻熔融爐	電力	通電於灰渣中產生焦耳 加熱現象	需加設排氣罩將產 生廢氣排出
	電漿熔融爐	電力	電漿火炬噴射高溫氣體 熔融灰渣	熱源集中使灰渣受 熱不均勻
	電熱熔融爐	電力	利用加熱器產生高溫輻 射熱間接加熱	加熱速度慢，消耗能 量較大

資料來源：特殊資源化技術－堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

表 3.36 不同熔融爐綜合評估比較

爐型	技術成熟度	減容效果	無害化	資源再利用 特性	操作處理 成本
表面熔融爐	◎	◎	◎	◎	○
內部熔融爐	○	◎	◎	◎	--
焦炭熔融爐	◎	○	◎	◎	◎
旋窯熔融爐	△	◎	◎	◎	◎
電弧熔融爐	◎	◎	◎	◎	△
電阻熔融爐	△	◎	◎	◎	◎
電漿熔融爐	○	◎	◎	◎	○
電熱熔融爐	○	◎	◎	◎	○

註：◎：佳 ○：次佳 △：尚可

資料來源：特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，2004 年 7 月

3.7 熱裂解技術與設備

3.7.1 熱裂解技術

熱解技術依加熱速率之高低可分為慢速熱解(slow pyrolysis)及急速熱解(fast pyrolysis)兩大類。將木材緩慢加熱來製造焦炭，為慢速熱解技術典型之一例。另一方面，急速裂解係於 400-650°C 間進行反應，停留時間約為數秒至 1 秒以下，並將熱解產物急速淬冷，可得到約 70% 的液體燃料產物。數種典型的生質熱解技術，其操作條件與主要產物間的關係，詳如表 3.37 所示。

表 3.37 生質廢棄物熱解技術及其操作條件

熱裂解技術	停留時間	加熱速率	反應溫度 (°C)	主要產物
傳統碳化	數小時~數天	極低	300~500	焦炭
加壓碳化	15 分鐘~2 小時	中等	450	焦炭
傳統熱解	數小時	低	400~600	焦炭、液體、氣體
傳統熱解	5~30 分鐘	中等	700~900	焦炭、氣體
急速熱解	0.1~2 秒	高	400~650	液體
急速熱解	< 1 秒	高	650~900	液體、氣體
急速熱解	< 1 秒	極高	1,000~3,000	氣體
真空熱解	2~30 秒	中等	350~450	液體
加壓濕式熱解	< 10 秒	高	< 500	液體

資料來源：Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation，1991 年

熱解技術除了利用於生質廢棄物減容及資源能源回收外，亦可應用於塑膠、橡膠及印刷電路板、廢油泥、廢電線電纜等各種固體廢棄物。塑膠熱解技術依反應溫度之高低，可分為三大類：(1)低溫熱解（600°C以下）；(2)中溫熱解（600~800°C）；(3)高溫熱解（800°C以上）。與生質廢棄物熱解技術類似，塑膠熱裂解產物之種類及濃度分布亦由塑膠種類、反應溫度、停留時間等因素所影響。

3.7.2 熱裂解設備系統

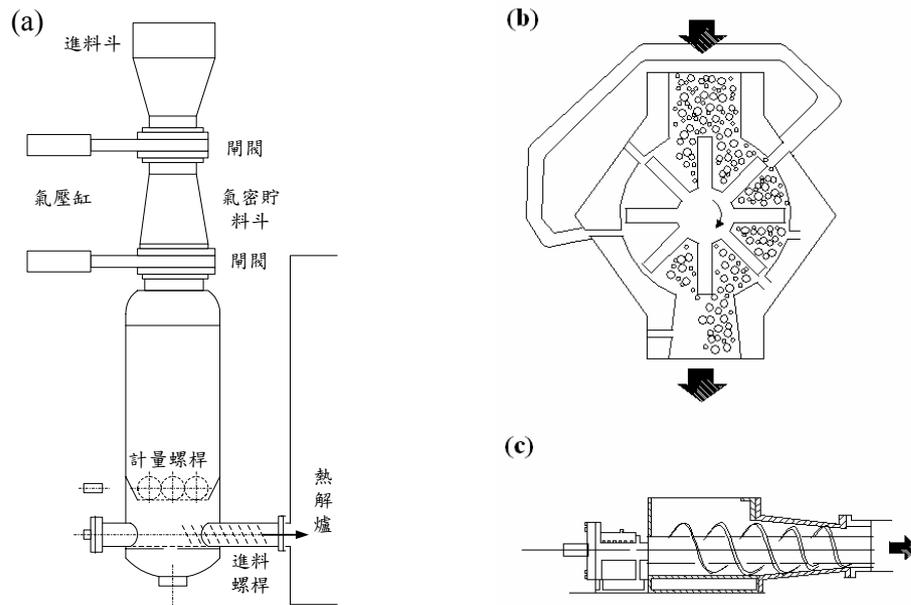
完整的熱裂解處理系統，係由燃料或廢棄物之前置處理（如乾燥、破碎）及貯存設施、進料系統、熱解反應爐本體、氣體及液體冷凝及收集設備、淨化設備、焦炭及灰渣之分選收集設備等不同的單元設備所組成，此外並需設置必要之溫度、壓力之監測及控制設備，系統配置則需由處理項目、處理量需求及熱解技術等因素而決定。

1. 進料系統

進料系統之主要功能為以輸送設備將燃料自貯存設備之處輸送至熱解爐本體處，再以進料設備將燃料送進熱裂解爐內以進行反應。進料系統需保持連續而平穩地輸送燃料，並具有感應燃料高度的功能，以維持進料速率之穩定；同時亦需具備氣密的措施以避免氣體洩漏，並需防止爐內高溫氣體逆流入進料區而使燃料提前熱解。

常用的燃料輸送設備包括空壓式、螺旋式輸送設備、及輸送帶等三種，空壓式輸送設備可有效地長距離傳輸先經切碎為適當尺寸的固體廢棄物，但因需使用高壓氣體而較為耗能；螺旋式輸送設備則適合於較短距離內傳輸先經切碎為適當尺寸的固體廢棄物；輸送帶則可傳送未經破碎處理或尺寸較大之廢棄物。

進料設備主要種類有閘門氣密貯料斗式（lock hopper feeder）、旋轉閘式（rotary-valve feeder）、螺旋式進料器（piston and screw feeder）等三大類型。其中閘門氣密貯料斗式，如圖 3.136(a)所示，為加壓式熱裂解爐所最常用之進料設備，操作範圍以 3.5 MPa 以下為佳。旋轉閘式進料設備如圖 3.136(b)所示，則可應用於 1.5 MPa 以下之固體廢棄物熱裂解系統，然而需注意旋轉葉片轉子卡料，因壓力下降而造成熱解高溫氣體回流等問題。圖 3.136(c)為螺旋式進料器，係以螺旋鑽將固體燃料押入柱塞後送入爐體，適用操作壓力約 0.5~1.5 MPa。燃料尺寸過大或過於潮濕均可能造成架橋或阻塞，因此，上述三種輸送及進料設備均需裝置溫度計及壓力計，以即時監控進料系統是否產生異常。



(a) 閘門氣密貯料斗式；(b) 旋轉閘式；(c) 螺旋式進料器。

資料來源：Review-Ancillary Equipment for Biomass Gasification，2002 年

圖 3.136 熱裂解系統進料設備

2. 熱解爐型式

常見的熱解爐除了固定爐床式 (fixed bed) 之外，尚有下列型式：流體化床式 (fluidized bed)、循環流體化床式 (circulating fluidized bed)、磨削式熱解爐 (ablative pyrolysis)、旋轉錐式 (rotating cone)、渦流式 (vortex reactor)、以及真空熱解爐 (vacuum pyrolysis) 等，數種型式之熱解爐示意圖如圖 3.137。

圖 3.137(a)為流體化床熱解爐，氮氣經預熱後，先經由爐體底部之分配盤整流後再進入熱解爐內，固體燃料則由空壓進料器，由爐頂處送入爐內，與熱砂混合並受熱分解。焦炭由旋風集塵器收集，含油份蒸氣則由冷凝器收集，後端亦可裝置靜電集塵器來收集氣膠。加拿大 Waterloo 大學所設計之流體化床熱解爐，則係將木質燃料從爐體下方送進爐內，反應溫度為 425-625°C，壓力 125 kPa，每小時可熱解 3 公斤，尺寸約 595 μm 的木料，有機性液態產物百分比約 63-68%，熱解氣體則約 8-12%。此項技術之處理量已擴大至每小時 200 公斤。循環式流體化床和傳統式流體化床熱解爐之最大差別為熱砂經旋風集塵器收集後送回熱解爐內，目前國外設計之循環式流體化床快速熱解系統，每小時處理量已可達 1,000 公斤以上。

旋轉錐式熱解爐是一種新穎的熱解技術，如圖 3.137(c)所示，葉片裝置於受熱的旋轉錐體上，固體燃料與惰性介質如砂注入，受熱分解後沿著受熱高溫

之避面螺旋向上排出，焦炭及灰份等殘留物由錐頂排出。荷蘭 Twenty 大學發展之旋轉錐式熱解爐，錐體溫度為 600°C，轉速為 900 rpm，操作容積從 0.25 m³ 降低為 0.003 m³。焦炭和砂排出收集後，將焦炭燃燒處理，砂可再循環使用。以 600°C 等溫加熱及 1 秒之停留時間操作下，可產生重量百分比 60% 的熱解液體產物、25% 的氣體產物，及 15% 的焦炭。旋轉錐式熱解爐除了應用於固體生質廢棄物之外，亦可應用於塑膠類廢棄物，配合較高的加熱速率與急冷方法，可將廢塑膠熱解回收高價值的單體化學品。

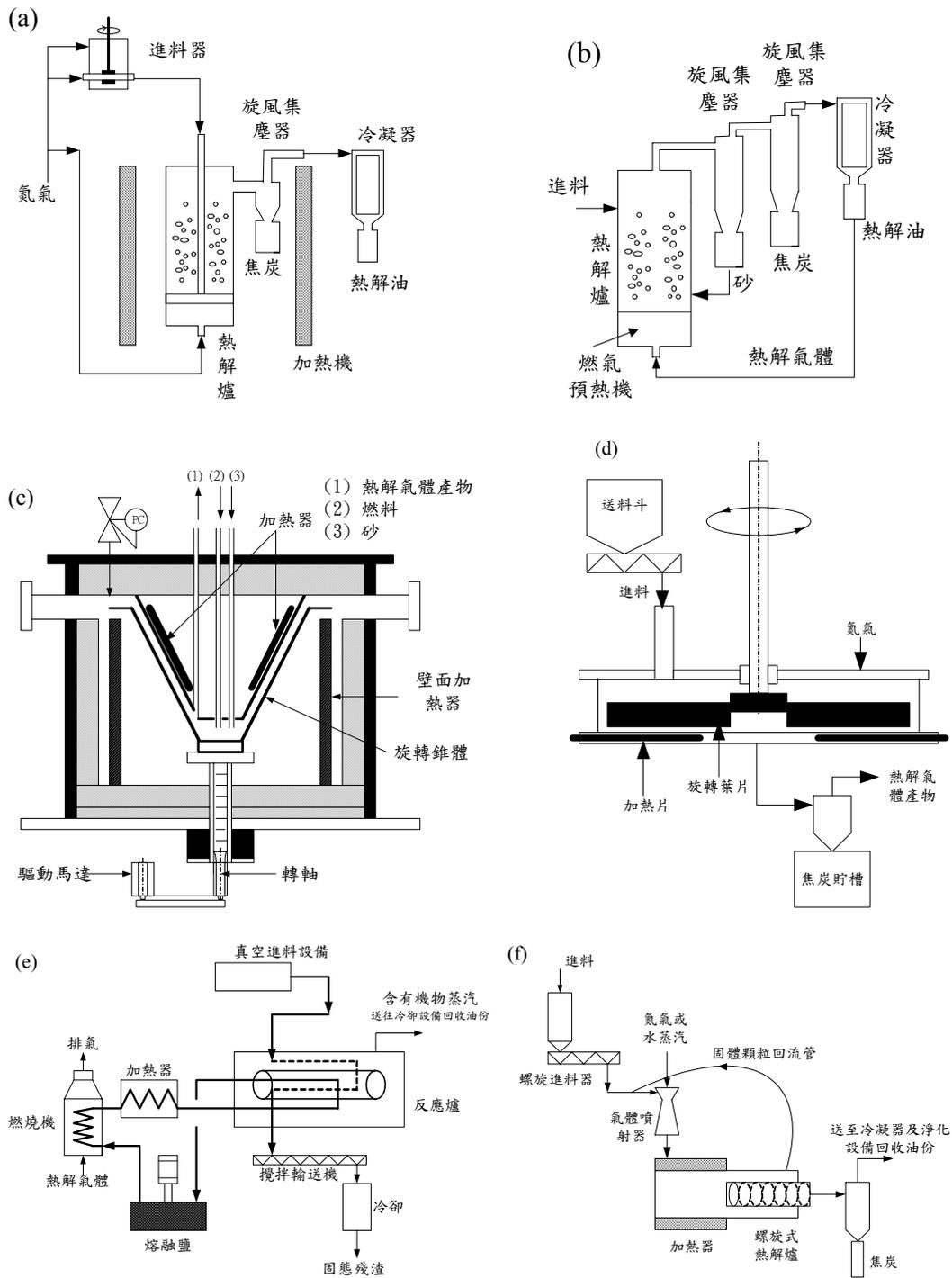
磨削式熱解爐亦為新穎而廣為研究的熱解技術，在每小時 3 公斤的進料下，產油比可達到 80%。此方法係將固體燃料加壓送入反應爐中之高溫的旋轉葉片表面上，以 1.2 m/s 以上的相對速度移動，藉由與高溫之旋轉葉片金屬表面接觸而產生熱裂解反應。以英國 Aston 大學發展之磨削式熱解爐為例，如圖 3.137(d)所示，乾燥後的生質燃料顆粒（約 6.35mm）由螺旋進料器加壓送入充有氮氣的反應爐中，與 200rpm 轉速的高溫旋轉葉片上接觸受熱後，溫度可達 600°C，因而達到熱分解的目的。加拿大 Castle Capital 公司之連續式磨削熱裂解系統，處理量可達每日 50 公噸，操作壓力為 34.5-55.15 kPa，可處理廢輪胎等汽車粉碎廢棄物、廢橡膠、廢塑膠、垃圾衍生燃料等之熱裂解。

真空熱解爐典型之操作條件為 15 kPa 及 450°C，係先將燃料乾燥及切碎後，以真空進料設備送入反應爐。如圖 3.137(e)所示由加拿大 Pyrovac 公司開發之真空熱解系統，燃料送入熱解爐後，由兩片水平板所輸送，水平板由維持等溫約 530°C 之熔融鹽所加熱，其熱量來源則由燃燒熱解氣體產物所產生，燃料受熱分解產生之蒸氣由真空幫浦快速的抽至冷凝設備來回收重油及輕油。本方法可處理之廢棄物種類包括生質廢棄物、廢輪胎、廢粉碎廢棄物，以及醫療廢棄物、廢水污泥、都市垃圾、廢塑膠等，亦可處理受碳氫化合物污染之土壤。

3. 熱解爐加熱方式

熱裂解為吸熱反應，故熱解反應爐需外加能量以維持並促進反應之進行，加熱方式如下：

- A. 以輻射管、電氣加熱器等間接加熱。
- B. 使用循環熱能媒介物質，如熱砂、鋼珠、碳粉、熱廢氣、熔融鹽、熔融金屬等直接加熱。
- C. 以碳素或系統自產之熱解可燃性氣體或補助燃料燃燒產生熱能。
- D. 以電弧通電直接發射熱能。



(a)流體化床；(b)循環式流體化床；(c)旋轉錐式；
(d)磨削式；(e)真空式；(f)渦流式熱解爐。

資料來源：Fast Pyrolysis Processes for Biomass，2000 年

圖 3.137 各種型式之熱解爐示意圖

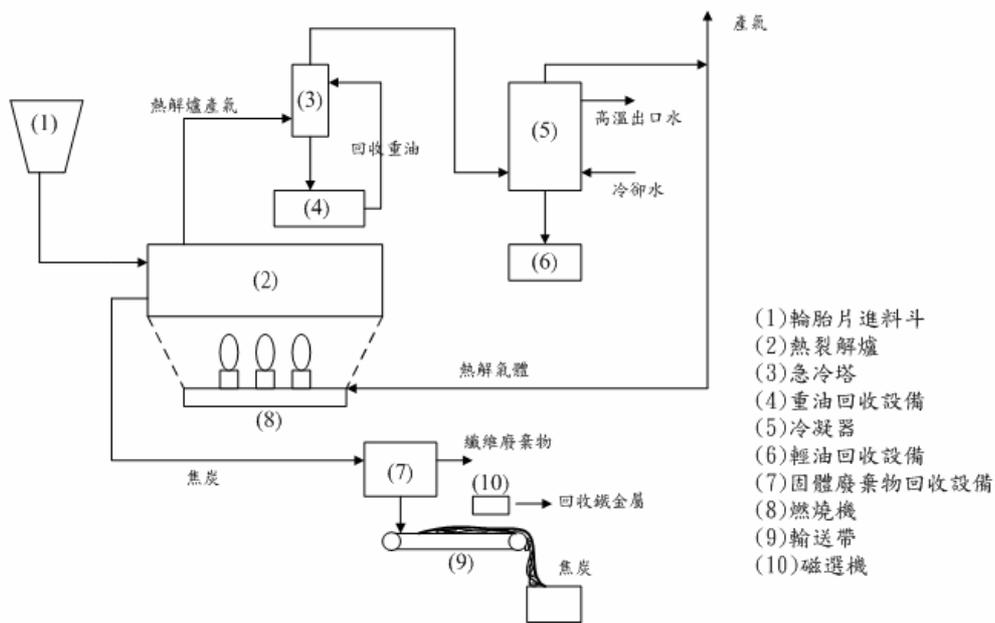
4.廢輪胎熱裂解操作案例

廢輪胎主要材料為廢橡膠，其熱值高達 9,000 Kcal/kg 以上，並含有鋼絲及纖維等成分。廢輪胎切成碎片或磨成粉粒狀後，除了可以作為水泥窯等高溫反應設備之輔助燃料外，亦可利用熱裂解技術將其分解為燃油、氣體及碳黑，並回收鋼絲，而達到減容及資源回收再利用之目的。

圖 3.138 為廢輪胎熱裂解系統設備。廢輪胎預先切為約 2 英吋之碎片後，投入進料斗，再由螺旋進料器或震動式進料器，將其送入熱裂解爐，並依操作條件控制進料速率。進料設備一般由兩道進料閥門所構成，以達到氣密之條件。熱裂解爐溫度介於 237 至 1,000°C 之間，一般而言，須控制在 400°C 以上，以維持足夠的反應速率，提高產物之熱值及再利用價值，並避免碳黑生成過多。由表 3.38 可知，熱裂解溫度提高至 800°C 時，焦炭比例降低為 29% 明顯較 500°C 時為低，且產氣比例自 6% 提高為 31%，熱裂解產油比例自 600°C 後，則略微隨溫度升高而降低。

當熱裂解溫度達到 237°C 以上時，輪胎碎片因受熱開始揮發出碳氫化合物氣體，並抽至急冷塔，將含碳數較高之氣體冷凝並送至回收設備，低碳數的成分未於急冷塔內冷凝，則抽出至後端之冷凝器以回收輕油。輕油可作為添加於汽油中以提高辛烷值，重油則可取代部分六號燃料油之用。熱解產物中所含油份經冷凝回收後，所餘氣體主要為 H_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等，其熱值隨熱解爐型式及操作條件而異，約為 6.3 ~ 88.5 MJ/Nm³ 之間，平均熱值為 31 MJ/Nm³。熱解氣體也可作為熱裂解爐燃燒機的燃料，或是收集後作為鍋爐等設備之輔助燃料。部分設備除了使用燃燒機作為熱裂解反應所需之能量來源外，亦將低量空氣送入熱裂解爐底部，於底部產生燃燒反應，燃燒之放熱可提供爐上方燃料熱解之能量。輪胎熱裂解產生的焦炭，其中含灰份約 15%，並含有鋼絲及纖維廢棄物，且尺寸過大，而無法與商業性碳黑產品之品質相比。利用分選設備篩選鋼絲及纖維廢棄物，所得焦炭可作為染料等用途。

依據美國環保署研究顯示，輪胎熱裂解設備會排放粒狀污染物、揮發性有機物質 (VOC)，以及半揮發性物質、 SO_2 、 NO_x 等，其中揮發性有機物質主要是由閥門桿、泵軸、軸封、管件凸緣、壓縮機、貯槽等部分之鬆脫，或是腐蝕造成的破損處所洩漏。因此除了依據作業程序正常的操作外，亦需定期檢查維護系統設備，尤其是上述容易鬆脫或腐蝕的各項機件設備，才能有效降低 VOC 的洩漏。焦炭會產生粒狀污染物，需妥善收集及貯存，以免造成廠區作業環境之空氣污染。



資料來源：Scrap Tire Technology and Markets，1993 年

圖 3.138 廢輪胎熱裂解系統示意圖

表 3.38 輪胎熱裂解溫度對產物濃度分布之影響

反應溫度	產氣比 (%)	產油比 (%)	焦炭百分比 (%)
500°C	6	42	52
600°C	10	50	40
700°C	15	47	38
800°C	31	40	29

資料來源：Scrap Tire Technology and Markets，1993 年

名詞解釋

1. 壓縮

利用外力或本身重力，以降低孔隙率增加密度而減小物體的體積，使資源廢棄物易於運輸及處理。

2. 密閉壓縮式

又稱非移動式，將廢棄物貯存於密閉的壓縮設備內，施以大小不同的壓力使體積減小。

3. 開放壓縮式

又稱移動式或重力式，主要是藉由壓縮設備之重量，將鋪放之廢棄物加以壓縮，如垃圾掩埋場之壓縮處理。

4. 低壓壓縮式

以壓力低於 100 psi 之壓縮設備為主，也稱為車上型壓縮器，壓縮器屬於低壓式，按照廢棄物的性質可減少容量為原體積之 1/2~1/3。另有固定型低壓壓縮機，將廢棄物壓縮減容後，再由其他車輛轉載至處理廠處理。

5. 高壓壓縮式

以壓力高於 100 psi 之壓縮設備為主，通常為固定型高壓壓縮機，高壓壓縮機多以鏈帶機引導收集之廢棄物進入進料斗，再進行多段式的壓縮。

6. 破碎

使用機械性外力將物質顆粒之塊狀組織破碎成細粒，因此而增加其比表面積之操作。任何一種破碎機都不是只有用單一作用力破碎物質顆粒，通常是以某種作用力為主，配合上其他種力的合成作用。

7. 單離度

某物質單離顆粒的重量與總重量的比值。單離度愈高表示其中單離顆粒比例愈高，亦即互著顆粒比例愈小。

8. 暴露度

是暴露型重量與所有存在顆粒中的晶粒(包含暴露與未暴露)重量之比。

9. 粉碎

在將顆粒進行壓碎時，施力必須大於顆粒單位受力截面積所承受之外力。

10. 破碎能量

破碎一單位體積或一單位質量顆粒所需要之能量。

11. 粒間破碎

在一般破碎操作中常用發生所謂層狀壓碎的現象，即較大顆粒直接被粉碎面壓碎，但較小的顆粒則被較大顆粒的阻擋而是間接壓碎。在細碎或超微細碎的操作中，此種粒間破碎為主要的破碎方式。

12. 雷廷格氏理論

為研磨理論之一，主張外力粉碎物體所作之功，轉化為新生表面積上的表面能，故粉碎過程所消耗的功與新生表面積成一次方正比例，粉碎產品的表面積與顆粒大小成一次方反比例。

13. 吉克氏理論

為研磨理論之一，主張粉碎物體的外力所作的功，完全用於使物體發生變形，到了變形應變能儲至極限，物體即被破壞。所以吉克氏認為：幾何上相似的同種物料，粉碎成同樣形狀的產品，所需的功與它們的體積或重量成正比。

14. 邦德氏理論

為研磨理論之一，主張破碎顆粒時，外力作用之功首先是使物體發生變形，當局部變形超過臨界點，即生成破裂，爾後儲在物體內的變形應變能使破裂擴展成斷面。

15. 篩分

又稱粒度分選，係將顆粒大小不同的混合物料，通過單層或多層篩子而分成若干個不同粒度級別的過程稱為篩分。鬆散物料的篩分過程，可以看作(1)易於穿過篩孔的顆粒通過不能穿過篩孔的顆粒所組成的物料到達篩面；(2)易於穿過篩孔的顆粒穿過篩孔等 2 個階段組成。

16. 篩分機率

為顆粒通過篩孔的可能性，一般來說，顆粒通過篩孔的機率受到下列因素影響：(1)篩孔大小；(2)顆粒與篩孔的相對大小；(3)篩子的有效面積；(4)顆粒運動方向與篩面所成的角度；(5)物料的含水量和含泥量。

17. 自由沈降

在顆粒沈降時，因料漿濃度不同，會形成不同之沈降情形，當料漿濃度稀少(一般是小於3%)，顆粒沈降除受流體阻力之外，不受其他粒子影響之沈降。

18. 終端速度

大球體在流體中沈降產生速度後，即有阻力產生，此阻力將隨速度加快而變大，待速度大到一定程度，其阻力與有效重量相等時，顆粒將作等速下降。

19. 浮選

將分散在水溶液中之疏水性微細顆粒或膠體吸附或附著於氣泡，使它與氣泡一起浮上，在氣-液界面成泡沫層，得與存在水中之親水性顆粒分離之方法。

20. 脫水

去除水分以減少廢棄物的體積，產生的泥餅類似固體而不再是液體，如此有助於廢棄物的最終處置，由於廢棄物體積的減少，更能使得廢棄物脫水後的處理及處置成本降低。

21. 污泥的脫水性

為水分自污泥中排出之難易程度。在污泥脫水的過程中，污泥顆粒間的水分逐漸排出，顆粒彼此接近而後擠壓，最後形成泥餅。

22. 顆粒的表面電荷與水合作用

污泥顆粒的表面帶有負電荷，當顆粒相互接近時，會彼此排斥，這種排斥力隨著彼此間的距離而改變，距離愈近排斥力愈大。

23. 乾燥

是指將熱量加於濕物料以排除揮發性濕分(大多數情況下是水，部分情況也可能是其他流體物質)，而獲得一定濕含量固體產品的過程。當濕物料作熱力乾燥時，以下兩種過程相繼發生：過程1：能量(大多數是熱量)從周圍環境傳遞至物料表面使表面濕分蒸發；過程2：內部濕分傳遞到物料表面，隨之由於過程1而蒸發。

24. 熔融

將廢棄物利用添加輔助燃料之燃燒放熱或電氣加熱產生之熱能，把待處理物(如焚化灰渣)於超過其熔點之高溫環境下，使其所含有機物產生熱分解、氣化及燃燒反應。

25. 焚化法

為技術最成熟且應用最普遍的方法，係以足夠或過量的空氣供應來使物質進行燃燒反應，主要生成物為完全燃燒後產生的二氧化碳及水，並由放熱反應產生能量。

26. 熱裂解

又稱熱解，為在無氧的狀態下，以直接或間接的加熱方式，使有機物中較大分子分解為較小分子，產生可燃性之固體（主要為焦炭）與液體（如水與焦油的混合物），以及具有低熱值至中熱值之氣體燃料，除了具有將固體廢棄物減容的效果之外，更具有能源轉換回收再利用的效果。

27. 篩分效率

指實際得到的篩下產物重量與入篩物料中所含粒度小於篩孔尺寸的物料的重量之比。篩分效率用百分數或小數表示。

28. 重力分選技術

又稱比重分選技術，係利用不同廢棄物間之比重差異，將欲資源回收之物質富集的方法，可將廢棄物分為輕質部份及重質部份，且重力分選可在空氣中或在液體中進行，在液體中又以水及重液較為廣泛使用。

參考文獻

1. 楊盛行、林正芳、王國繼，廢棄物處理再利用，國立空中大學，pp.256~260，2003。
2. 林建三，林建榮，固體廢棄物處理，高立圖書有限公司，第二版，pp.102~110，2005。
3. 林建三，廢棄物處理，文笙書局股份有限公司，第五版，pp.4-9~4-15，2003。
4. 張錦松、黃政賢主編，環境工程概論，新科技書局，pp.184~186，1998。
5. 謝錦松、黃正賢，固體廢棄物處理，高立圖書有限公司，pp.116~119，2001。
6. 王以憲、章裕民，廢棄物處理，文京圖書有限公司，第四版，pp.242~425，1997。
7. 武藤暢夫、菱田一雄、吉持俊太郎，廢棄物的處理技術，株式會社工業調查會，第四版，pp.149~153，1976。
8. 李公哲譯，環境工程，茂昌圖書有限公司，pp.252~253，1990。
9. 廢棄物資源回收與處理設備-破碎，經濟部工業局，1999年6月。
10. 廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編-分選技術與設備篇，經濟部工業局，2003年12月。
11. 曾迪華，污泥脫水處理，工業污染防治技術手冊之十四，經濟部工業污染防治技術服務團，財團法人中國技術服務社編印，1988年4月。
12. 潘時正，污泥脫水原理與常用設備簡介，化工技術，第13卷，第10期，pp.191~203頁，2005年10月。
13. 廢棄物資源回收與處理設備技術手冊-乾燥設備篇，經濟部工業局，2001年12月。
14. 何春松，灰渣熔融技術之發展，國立臺灣大學「台大工程」學刊，第84期，pp.137~152，2002年2月。
15. 曾迪華，廢水處理產生污泥之最佳處理及處分評估-染整業、製革業、紙漿業、食品業，台灣省環境保護局委託研究報告，1985年11月。
16. 曾迪華，污泥脫水處理，工業污染防治技術手冊之十四，經濟部工業污染防

- 治技術服務團，財團法人中國技術服務社編印，1988年4月。
17. 潘時正，污泥脫水原理與常用設備簡介，化工技術，第13卷，第10期，pp.191~203，2005年10月。
 18. 李圭白、馬中漢、張自杰譯，井出哲夫主編，水處理工程(上冊)，科技圖書股份有限公司，1989。
 19. 歐陽嶠暉，下水道工程學，長松文化公司，2000。
 20. 歐陽嶠暉，廢水處理廠操作管理(十)污泥脫水、乾燥，工業污染防治，第4卷，第2期，pp.137~167，1985年4月。
 21. 張旭彰，灰渣熔融處理法的理論與實務，工業防治污染，第48期，pp.95-112，1993。
 22. 何春松，電漿熔融技術處理焚化爐灰渣之實例探討，環保產業月刊，第19期，pp.5~9。
 23. 肖定全，陶瓷材料，新文京開發出版有限公司，2003。
 24. 鄭智和，熔融技術與資源化評析，資源化產業資訊月刊，第9期，2004年2月。
 25. 李昭仁等，化學工程手冊，高立圖書有限公司，1984年2月。
 26. 郭甦隆，特殊資源化技術—堆肥、燒結、熔融及金屬冶煉，資源化產業技術人才培訓班講義，經濟部工業局，2004年7月。
 27. 楊義榮，廢棄物加熱分解處理法，工業污染防治，第15期，pp.109~135，1985。
 28. 事業廢棄物管理制度檢討及管制清理策略規劃推動，行政院環保署，2005。
 29. George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A. Vigil, Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, 2nd edition, McGraw-Hill, 1993.
 30. U.S.EPA, “Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges,” EPA/625/1-87/014, September 1987.
 31. U.S. EPA, Process Design Manual for Dewatering Municipal Wastewater Sludge, EPA-625/1-82-014, October 1982.
 32. D.L. Klass, Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals, Academic

Press, 1998.

33. D.A. Tillman, The Combustion of Solid Fuels and Wastes, Academic Press, 1991.
34. A.V. Bridgwater, G. Grassi, Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation, Elsevier Applied Science, 1991.
35. K.R. Cummer, R.C. Brown, Review-Ancillary Equipment for Biomass Gasification, Biomass and Bioenergy, pp.113~128, 2002.
36. A.V. Bridgwater, G.V.C. Peacocke, Fast Pyrolysis Processes for Biomass, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.1~73, 2000.
37. U.S. EPA, Scrap Tire Technology and Markets, Noyes Data Corp., 1993.
38. Iolani shool, <http://www.iolani.honolulu.hi.us>
39. 中華環保互聯網, <http://www.chinaep.net>
40. Schwarz Global Consulting (SGC), <http://www.sgconsulting.co.za>
41. 再生資源及廢棄物代碼表, <http://waste.epa.gov.tw>。

單位換算表

長度

1 千米(km)=0.621 英哩(mile)	1 米(m)=3.281 英呎(ft)=1.094 碼(yd)	1 釐米(cm)=0.394 英吋(in)
1 英哩(mile)=1.609 千米(km)	1 英呎(ft)=0.3048 米(m)	1 英吋(in)=2.54 釐米(cm)
1 海哩(n mile)=1.852 千米(km)	1 碼(yd)=0.9144 米(m)	1 英呎(ft)=12 英吋(in)
1 碼(yd)=3 英呎(ft)	1 英里(mile)=5280 英呎(ft)	1 海哩(n mile)=1.1516 英哩(mile)

質量

1 噸(t) =1000 千克(kg) =2205 磅(lb) =1.102 短噸(sh.ton) =0.934 長噸(long.ton)	1 千克(kg) =2.205 磅(lb)	1 短噸(sh.ton) =0.907 噸(t) =2000 磅(lb)
1 長噸(long.ton)=1.016 噸(t)	1 磅(lb)=0.454 千克(kg)	1 盎司(oz)=28.350 克(g)

密度

1 千克/米 ³ (kg/m ³) =0.001 克/釐米 ³ (g/cm ³) =0.0624 磅/英呎 ³ (lb/ft ³)	1 磅/英呎 ³ (lb/ft ³) =16.02 千克/米 ³ (kg/m ³)	1 磅/英吋 ³ (lb/in ³) =27679.9 千克/米 ³ (kg/m ³)
1 磅/美加侖(lb/gal) =119.826 千克/米 ³ (kg/m ³)	1 磅/英加侖(lb/gal) =99.776 千克/米 ³ (kg/m ³)	1 磅/(石油)桶(lb/bbl) =2.853 千克/米 ³ (kg/m ³)
1 波美密度 =140/15.5°C 時的比重-130	API =141.5/15.5°C 時的比重-131.5	

壓力

<p>1 兆帕(MPa)=145 磅/英吋²(psi) =10.2 千克/釐米²(kg/cm²) =10 巴(bar) =9.8 大氣壓(at m)</p>	<p>1 磅/英吋²(psi) =0.006895 兆帕(MPa) =0.0703 千克/釐米²(kg/cm²) =0.0689 巴(bar) =0.068 大氣壓(at m)</p>	<p>1 巴(bar) =0.1 兆帕(MPa) =14.503 磅/英吋²(psi) =1.0197 千克/釐米²(kg/cm²) =0.987 大氣壓(at m)</p>
<p>1 大氣壓(at m) =0.101325 兆帕(MPa) =14.696 磅/英吋²(psi) =1.0333 千克/釐米²(kg/cm²) =1.0133 巴(bar)</p>		

面積

<p>1 平方公里(km²) =100 公頃(ha) =247.1 英畝(acre) =0.386 平方英哩(mile²)</p>	<p>1 平方米(m²) =10.764 平方英呎(ft²)</p>	<p>1 公畝(acre) =100 平方米(m²)</p>
<p>1 公頃(ha) =10000 平方米(m²) =2.471 英畝(acre)</p>	<p>1 平方英哩(mile²) =2.590 平方公里(km²)</p>	<p>1 英畝(acre) =0.4047 公頃(ha) =40.47*10⁻³ 平方公里(km²) =4047 平方米(m²)</p>
<p>1 平方英呎(ft²) =0.093 平方米(m²)</p>	<p>1 平方英吋(in²) =6.452 平方釐米(cm²)</p>	<p>1 平方碼(yd²) =0.8361 平方米(m²)</p>

體積

1 立方米(m ³) =1000 升(liter) =35.315 立方英尺(ft ³) =6.290 桶(bbl)	1 立方英尺(ft ³) =0.0283 立方米(m ³) =28.317 升(l)	1 千立方英尺(mcf) =28.317 立方米(m ³)
1 百萬立方英尺(MMcf) =2.8317 萬立方米(m ³)	10 億立方英尺(bcf) =2831.7 萬立方米(m ³)	1 萬億立方英尺(tcf) =283.17 億立方米(m ³)
1 立方英尺(in ³) =16.3871 立方釐米(cm ³)	1 英畝·英尺=1234 立方米(m ³)	1 桶(bbl) =0.159 立方米(m ³) =42 美加侖(gal)
1 美加侖(gal)=3.785 升(l)	1 美夸脫(qt)=0.946 升(l)	1 美品脫(pt)=0.473 升(l)
1 美吉耳(gi)=0.118 升(l)	1 英加侖(gal)=4.546 升(l)	

運動粘度

1 英尺 ² /秒(ft ² /s) =9.29030*10 ⁻² 米 ² /秒(m ² /s)	1 斯(St)=10 ⁻⁴ 米 ² /秒(m ² /s)	1 厘斯(cSt) =10 ⁻⁶ 米 ² /秒(m ² /s) =1 毫米 ² /秒(mm ² /s)
--	---	--

動力粘度

1 泊(P)=0.1 帕·秒(Pa·s)	1 厘泊(cP)=10 ⁻³ 帕·秒(Pa·s)	1 千克力秒/米 ² =9.80505 帕·秒(Pa·s)
1 磅力秒/英尺 ² (lbf·s/ft ²) =47.8803 帕·秒(Pa·s)		

力

1 牛頓(N) =0.225 磅力(lbf) =0.102 千克力(kgf)	1 千克力(kgf)=9.81 牛頓(N)	1 磅力(lbf)=4.45 牛頓(N)
1 達因(dyn)=10 ⁻⁵ 牛頓(N)		

溫度

$K(\text{開爾文度})=5/9(^{\circ}F+459.67)$	$K=^{\circ}C+273.15$	$n^{\circ}F=[(n-32)*5/9]^{\circ}C$
$n^{\circ}C(\text{攝氏度})=(5/9*n+32)^{\circ}F$	$1^{\circ}F(\text{華氏度})=5/9^{\circ}C(\text{溫度差})$	

熱導率

1 千卡(米 ² ·時·°C)[kcal/(m ² ·h·°C)] =1.16279 瓦/(米·開爾文)[W(m·K)]	1 英熱單位/(英呎 ² ·時·°F)[Btu/(ft ² ·h·°F)] =1.7303 瓦/(米·開爾文)[W(m·K)]
---	--

熱功

1 焦耳=0.10204 千克·米=2.778*10 ⁻⁷ 千瓦·小時=3.777*10 ⁻⁷ 公制馬力小時 =3.723*10 ⁻⁷ 英制馬力小時 =2.389*10 ⁻⁴ 千卡=9.48*10 ⁻⁴ 英熱單位	1 卡(cal)=4.1868 焦耳(J)	1 英熱單位(Btu)=1055.06 焦耳(J)
1 千克力米(kgf·m)=9.80665 焦耳(J)	1 英呎磅力(ft·lbt) =1.35582 焦耳(J)	1 米制馬力小時(hp·h) =2.64779*10 ⁶ 焦耳(J)
1 英制馬力小時(UKHp·h) =2.68452*10 ⁶ 焦耳(J)	1 千瓦小時(kw·h) =3.6*10 ⁶ 焦耳(J)	1 大卡=4186.75 焦耳(J)

功率

1 千克力·米/秒(kgf·m/s) =9.80665 瓦(W)	1 米制馬力(hp)=735.499 瓦(W)	1 卡/秒(cal/s)=4.1868 瓦(W)
1 英熱單位/時(Btu/h)=0.293071 瓦(W)		

速度

1 英呎/秒(ft/s)=0.3048 米/秒(m/s)	1 英哩/時(mile/h)=0.44704 米/秒(m/s)
------------------------------	---------------------------------

滲透率

1 達西=1000 毫達西	1 平方釐米(cm ²)=9.81*10 ⁷ 達西
---------------	--

索引

- 玻璃化.....47, 48
- 邦德氏理論.....17
- 比導電性.....29
- 比抗係數.....38
- 比阻抗.....37, 38, 40
- 排斥率.....35
- 平衡含水量.....45, 46
- 摩擦帶電.....30
- 毛細管作用.....39
- 毛細水.....36
- 非結合水.....40, 41
- 非親水性.....43, 44, 45
- 焚化法.....51, 53
- 分選特性.....18, 20
- 浮選.....20, 33, 34
- 帶磁率.....27, 29
- 導電性.....19, 29, 30
- 電暈放電.....32
- 難篩粒.....21, 22
- 雷廷格氏理論.....16, 17
- 亂流阻力.....24, 25
- 乾燥速率曲線.....42, 43
- 可壓縮係數.....38
- 顆粒荷電.....30
- 孔隙率.....3, 13, 47, 48
- 恆速乾燥.....41, 45
- 回收率.....34, 35
- 吉克氏理論.....16, 17
- 機械分選法.....19
- 機械強度.....39
- 結合水.....40, 41, 44, 45, 53
- 膠體水.....36
- 減速乾燥.....41, 42, 43, 45
- 靜電感應帶電.....30
- 氣化法.....51
- 親水性.....19, 33, 34, 44
- 細胞水.....36, 45
- 重金屬移行率.....47, 48
- 沈降理論.....24
- 熱解法.....51, 53
- 熱解速率.....55
- 人工分選法.....19, 221
- 自由沈降.....25
- 自由水.....36, 41, 42, 44, 45
- 阻礙沈降.....25, 26
- 磁極強度.....29

磁滯現象.....	27
層流阻力.....	24
易篩粒.....	21, 22
壓縮.....	3
鹽基度.....	49
污泥的脫水性.....	36

設備廠商名錄

本章整理相關技術或系統設備供應商，以方便工廠在評估回收系統時之參考。工廠在選擇技術或系統設備供應商時，可再依廠商是否具有相當之人員組織、良好之售後服務能力及設備在市場銷售情形等因素再進行評估。另外本章雖已竭力廣集資料，但仍無法涵蓋所有相關業者，如有不及之處，尚祈見諒。

表一、壓縮設備商名錄

公司名稱	地址	電話	網址
大陸水工股份有限公司	台北市承德路二段 137 號 12 樓之 4	02-2553-6015	http://www.pollution.com.tw
大銳機械有限公司	台北縣鶯歌鎮中湖街 303 巷 4 號	02-2670-2414	—
林昇貿易股份有限公司	台北市忠孝東路四段 170 巷 18 弄 18 號 9 樓	02-2775-1806	http://www.limtrade.com.tw/
英碩企業股份有限公司	台北市忠孝東路五段 815 號 4 樓	02-2788-5218	http://www.invax.com.tw/
水美工程企業股份有限公司	台北縣汐止鎮新台五路一 段 79 號 14 樓之 13	02-2698-1698	http://www.supermax-eng.com.tw/
太和環境企業股份有限公司	台北市建國北路一段 58 號 7 樓	02-2518-3499	http://www.dewater.com.tw/
地球村國際股份有限公司	桃園縣蘆竹鄉南山路 一段 440 號	03-357-9599	http://www.gve.com.tw/
洄堡工業股份有限公司	台北縣新莊市頭興街 1 之 23 號	02-2998-1598	—
純淵股份有限公司	桃園縣八德市後壁厝 30 號	03-367-8478	—
海宸(傳德)科技股份有限公司	台北縣新莊市安寧街 76 之 6 號 9 樓	02-8991-0688	—
崧浩工業有限公司	台北市木新路三段 310 巷 6 弄 12 號	02-2234-3283	—
凱祥工程股份有限公司	台南縣仁德鄉成功一路 1 巷 26 弄 13 號	06-268-0112	—
順琿機械有限公司	桃園縣蘆竹鄉中正路 109 巷 1 弄 1 號	03-352-8000	—
群騏實業股份有限公司	嘉義縣民雄鄉頭橋工業區 工業一路 8 之 1 號	05-220-4998	—
勝寰企業有限公司	桃園縣八德市竹高厝 37 號	03-365-6236	—
一同機械工業股份有限公司	台北市承德路三段 113 巷 15 號	02-2594-2116	http://hipage.hinet.net/i-tung

表二、破碎及分選設備商名錄

公司名稱	地址	電話	網址
明杰機械工程有限公司	台北縣永和市永和路2段147號5樓	02-2232-8531	http://www.majorco.com.tw
台灣帝凱股份有限公司	桃園縣龜山鄉樂善村水滸1-1號	03-328-5599	http://www.taiwandiesel.com.tw
久鼎機械股份有限公司	台中縣大甲鎮南北二路3-1號	04-2688-8499	http://www.geording.com.tw
耿勝工業有限公司	台中縣大安鄉東西九路53號	04-2676-3187	http://www.geng-sheng.com
御盟國際貿易有限公司	台北縣新莊市瓊林南路208巷9號	02-2202-1469	http://www.kamen.com.tw/
新勝光興業機電有限公司	台北市復興北路476號3樓	02-2501-8600	http://www.ssk.com.tw
伯登有限公司	台北縣汐止市汐平路一段97號	02-8648-1261	http://www.proten.com.tw
誠開股份有限公司	台北市民權東路三段35號13樓	02-2515-1717	http://www.proaction.com.tw
為勝機械工業有限公司	台中縣梧棲鎮自強三街64巷36弄3號	04-2639-9998	http://www.weisheng.com.tw
昆陞機械有限公司	台中縣龍井鄉龍門路65巷12號	04-2635-4383	http://www.kunsheng.com.tw/
普聯國際股份有限公司	台中縣潭子鄉嘉豐路318巷11號	04-2536-2656	http://www.pulian.com.tw/
遠記機械有限公司	彰化縣埔心鄉源泉路2段157巷12號	04-829-1808	http://www.yj-recycling.com/
朔揚工業有限公司	高雄市三民區九如一路58號9樓之3	07-396-6896	http://my.so-net.net.tw/enpro/
百盈系統科技股份有限公司	台南縣新化鎮中山路808巷10號	06-598-1806	http://www.paiying.com.tw/
明裕機械股份有限公司	桃園縣楊梅鎮上湖裏七之二號	03-478-1168	http://www.minyu.com
啟銘機械股份有限公司	桃園縣八德市介壽路二段535號	03-366-6167	—
圍銓有限公司	台南市安和路二段318巷151號	06-355-9251	http://www.yowchyuan.com.tw
林昇貿易股份有限公司	台北市忠孝東路四段170巷18弄18號9樓	02-2775-1806	http://www.limtrade.com.tw/
龜鼎工程有限公司	高雄市四維三路80號7樓之3	07-336-8463	http://www.jckingtech.com.tw

表二、破碎及分選設備商名錄(續 1)

公司名稱	地址	電話	網址
鄭州大華礦山機械有限公司	鄭州中原路 102 號綠城賓館 708 室	86-0371-7800567	http://zzdhzzdh.ebigchina.com/
鄭州宇通機械製造廠	鄭州市須水工業園區	86-0371-67921201	http://zzdhzzdh.ebigchina.com/
河南方大實業股份有限公司	鄭州市南陽路 239 號	86-0371-66040693	http://www.zytl.com/
河南鑛山機械廠	鄭州市西開發區	86-0371-68172321	http://www.cczgix.com/
浙江省台州市椒江威天塑膠機械廠	台州市椒江洪家開發區(港頭徐)	86-0576-8011156	http://www.zjweitian.com
中國電子科技集團公司第二研究所	中國太原和平南路 159 號	+86-0351-6524057	http://www.ersuo.com/
山東淄博圓海正粉體設備有限公司	山東省淄博市桓台縣經濟開發區(長途汽車北 500 米路西)	+86-0533-8165585	http://www.yuanhaizheng.cn/
無錫市海波乾燥機械設備廠	無錫市惠山區玉祁	+86-0510-3330513	http://http://www.xbftjx.com
Pennsylvania Crusher Corporation	P.O. Box 100, Broomall, PA 19008 USA	+1-6105447200	http://www.penncrusher.com
Henan Liming Road & Bridge Heavy Industry Co.,Ltd	15th, Dingxiangli, National High & New Technical Industry Development Area, Zhengzhou, China	+86-371-67371699	http://www.lmlq.com/
Hosokawa Alpine AG	Postbox 101151, D-86001 Augsburg, German	+49-082159060	http://www.alpineag.com
Aubema GmbH	Kolner Str. 94, D-51702 Bergneustadt, German	+49-226140940	http://www.aubema.de
Steinert Elektromagnetbau GmbH	Postbox 451160, D-50886, Koln	+49-022149840	http://www.steinert.de
SHANGHAI SHIBANG MACHINERY MAKING CO., LTD	877th, Dongfang Rd., Pudong New District, Shanghai, China Postcode: 200122	0086-21-50582656	http://www.21shsb.com/
Alan Ross Machinery Corp	3240 Commercial Ave, Northbrook, IL 60062-1907, USA	+1-847-480-8900	http://www.rossmach.com/
Granutech-Saturn Systems	201 E. Shady Grove Road · Grand Prairie, TX 75050 · USA	+1 972 7907800	http://www.granutech.com/

表二、破碎及分選設備商名錄(續 2)

公司名稱	地址	電話	網址
Hovde Recycling Equipment	PO BOX 12003, CHANDLER, AZ 85248	+1-480-699-2460	http://www.hovderecyclingequipment.com/
JMC Recycling Systems	Harrimans Lane, Dunkirk, Nottingham, England	+44 (0) 115 940 9630	http://www.jmcrecycling.com/
SATRIND S.p.A.	Via F. Baracca, 2 - 20010 Arluno (MI), Italy	+39 02-90376683	http://www.satrind.it/
ATN Environmental Systems bv	Mercuriusweg 1a, Ter Apel, Groningen, 9561 AL, The Netherlands	+31 599 65 25 24	http://atnes.nl/
TiTech Visionsort	Ryensvingen 11b, Oslo, N-0680, Norway	+47-23-30-23-30	http://www.titech.com/
Bakker Maganetic B.V.	Sciencepark Eindhoven 5502 5692 El Son Niederlande	+31 40 2 678 678	http://www.bakkermagnetics.com/
Hydropress Huber AB	Heljesvägen 4, Box 125, 437 22 Lindome	+46-31 99 64 60	http://www.hydropress.se/
INOWA Abwassertechnologie GmbH & CO KG	Traunsteinerstrasse 8 D-83395 Freilassing Deutschland	+49 (0) 86 54-47 90 90	http://www.inowa.at/
K-Pack Water Treatment B.V.	De Wevershilt 33 NL-3831 NN Leusden The Netherlands	+31 (0)33- 4 34 13 33	http://www.k-pack.nl/
Neuenhauser Maschinenbau GmbH	Ladestr. 5 D-49828 Neuenhaus Deutschland	+49(0) 5941 604 -279	http://www.neuenhauser.de/
Passavant-Noggerath Products GmbH	Passavant-Roediger-Str.1 65322 Aarbergen Deutschland	+49(0) 06120-282364	http://www.passavant-noggerath.de/
Picatech-Huber AG	Schweighofstr, 14 6010 Kriens Schweiz	+41(0)4134-9-6868	http://www.picatech.ch
Redox Water & Recycling Technology B.V.	Stevinstraat 11 7102 Winterswijk Niederlande	+31(0)543-53 1030	http://www.redox.nl/
Rs Umwelttechnik KG	Siemensstraat 11 86356 Neus Deutschland	+49(0)821 – 2 4648 -0	http://www.rohrleitungsbausued.de/

表二、破碎及分選設備商名錄(續 3)

公司名稱	地址	電話	網址
Beloh Magnetsysteme GmbH & Co. KG	Georg-Wessel-Str. 5 Ind. Gebiet Süd D-31789 Hameln Deutschland	+49 5151 40 00-0	http://www.beloh.com/index.html
Birim Makina	Kemalpasa Organize Sanayi Bolgesi Buyukalan Mevkii Ataturk Mah. 80 Sokak No:2 Ulucak Izmir TURKEY	+90(0) 232 877 17 77	http://www.birimrecycling.com
Gauss Magneti s.r.l	Via Scaroni,27 25131 Brescia Italien	+39 030-3 58 03 75	—
GOUDSMIT MAGNETIC SYSTEMS B.V.	Petunialaan 19/5582 HA Waalre P.O. Box 18/5580 AA Waalre	+31 (0)40 2213283	http://www.goudsmit-magnetics.nl/
Hamos GmbH Recycling- und Separationstechnik	Im Thal 17 82377 Penzberg Deutschland	+49(0)8856-9 2 61-0	http://hamos.com/
IFE Aufbereitungstechnik GmbH	Patertal 20, 3340 Waidhofen/Ybbs Austria	+43 07442-515-0	http://www.ife-bulk.com/
IMRO Maschinenbau GmbH	Landwehrstr. 2 - Industriegebiet D-97215 Uffenheim	+49 (0)9848 9797-0	http://www.imro-maschinenbau.de/
Lubo Screening & Recycling Systems BV	Phileas Foggstraat 85 7825 AW Emmen	+31(0) 591 668080	http://www.lubo.nl/
Maier&Fabris GmbH Umwelttechnik	Lembergstr,21, D-72072 Tubingen Deutschland	+49(0)7071-7 2748	http://www.maier-fabris.de/
OBM tec Recycling Technique Europe&Bio Made Fluids	Franklinstraat 9 9285 WT Buitenpost Niederlande	+31(0)511-42 4555	http://www.obmtec-rte.com/

表二、破碎及分選設備商名錄(續 4)

公司名稱	地址	電話	網址
S+S Separation and Sorting Technology GmbH	Regener Strasse 130 D-94513 Schönberg Deutschland	+49(0)8554-3080	http://www.ss-metal-detection.com/
Vecoplan Maschinenfabrik GmbH & Co.KG	Vor der Bitz 10 56470 Bad Marienberg Deutschland	+49 (0)2661 6267114	http://www.vecoplan.com/de/
Wagner Magnete GmbH & Co. KG	Obere Str. 15 87751 Heimertingen / Germany	+49 (0) 83 35 / 980 0	http://www.wagner-magnete.de/
Doppstadt. Werner, Umwelttechnik GmbH & Co. KG	Steinbrink 13 42555 Velbert Deutschlan	+49(0)2052-889-0	http://www.doppstadt.com/
GASSNER GmbH & Co. KG · MASCHINENFABRIK	Hauptstr. 16 85655 Göggenhofen Deutschland	+49(0)8095 879-0	http://www.gassner-online.de/
HERBOLD MECKESHEIM GmbH	Industriestr 33 74909 Meckesheim Deutschland	+49(0)6226-932-0	http://www.herbold.com/
Höcker Polytechnik!	Air handling plants Borgloher Straße 1 D-49176 Hilter/ Deutschland	+49 (0) 5409 405 - 0	http://www.polytechnik.de/
Komptech GmbH	----	+43(0)3126-505-0	http://www.komptech.com/
Nestro Lufttechnik GmbH	Hainchen An der Wethau 1 07619 Schkölen Deutschland	+49 (0)3 66 9-4 41-0	http://www.nestro.de/
Sandberger GmbH	Dittersdorf 11 A-4084St. Agatha	+43 (0) 7277/8751-0	http://www.sandberger.com/
Sutco RecyclingTechnik	Britanniahütte 14 51469 Bergisch Gladbach Deutschland	+49(0)02202 / 2005-01	http://www.sutco.de/
Zerkleinerungsmaschinenbau Norken GmbH	Zeno-Platz1 D- 57629 Norken Deutschland	(+49) 02661 - 95 96 0	http://www.zeno.de/
BIG Entsorgungstechnologien	Im Farchet 13 1/2 D-83646 Bad Tölz Deutschland	+49(0) 80 41/ 7 87 70	http://www.big-presse.de

表二、破碎及分選設備商名錄(續 5)

公司名稱	地址	電話	網址
Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH	Kolpingstrasse 8 - D-86916 Kaufering Deutschland	+49-08191-96 52-0	http://www.erdwich.de/
Promeco srl	Via Torriani 17/a 22100 COMO (Italy)	+39 031 267331	http://www.promeco.it/english/company.htm
artech. Recyclingtechnik GmbH	Rombrocker Str. 17a D-58640 Iserlohn Deutschland	+49 (0) 2371 9469-50	http://www.recyclingtechnik.de/
BHS-Sonthofen GmbH	Hans-Böckler-Str. 7 87527 Sonthofen Deutschland	+49 (0)8321- 802-200	http://www.bhs-sonthofen.de/
Bomatic GmbH	Germakehre 7 · D-25479 Ellerau	+49 (0)4106/ 7672-0	http://www.bomatic.de/en/
MOCO Maschinen- und Apparatebau GmbH & Co. KG	Großer Stellweg 19 68519 Viernheim Germany	+49 (6204) 96 85 - 0	http://www.moco-shredder.de/
Synmet	Binnenhaven 43, 7547 BG Enschede, The Netherlands	+31(0) 534 305 620	http://www.synmet.nl/
ERIEZ	2200 Asbury Road Erie, Pennsylvania U.S.A	814-835-6000	http://www.eriez.com/
Magnapower Equipment Limited	11 North St Industrial Estate Droitwich, Worcestershire United Kingdom	44-01905 779157	http://www.magnapower.net
AD Recycling Solutions Ltd	20 Warren House Walk Sutton Coldfield United Kingdom	(+44) 7971 - 78 88 45	http://www.adrecyclingolutions.com/
Apollo Equipment, Inc.	2261 Country Club Rd. Woodburn, OR 97071 USA	(800) 982-2844	http://www.apolloequipment.net/
Cresswood Recycling Systems	Highway 38 Cortland, IL 60112 USA	815-758-5464	http://www.cresswood.com/
CW Manufacturing, INC.	14 Commerce Drive Sabetha, KS 66534 USA	(785) 284-3454	http://www.hogzilla.com/
DuraTech Industries International, Inc.	P.O. Box 1940 Jamestown, ND 58402 USA	(701) 252-4601	http://www.duratechindustries.net/

表二、破碎及分選設備商名錄(續 6)

公司名稱	地址	電話	網址
First American Scientific Corp.	7621 Vantage Way, Unit 26 Delta, British Columbia Canada, V4G 1A6	+1-604-940-6220	http://www.fasc.net/
Franklin Miller Inc.	60 Okner Parkway Livingston, NJ 07039 USA	973-535-9200	—
Titan Process Equipment Ltd.	2025 Guelph Line, Suite 401 Burlington, Ontario Canada L7P 4X4	(905) 331-2910	http://www.titanprocess.com/contact.html
Savona Equipment Ltd	Box 176, Savona, B.C., Canada, V0K 2J0	(250) 373-2424	http://www.savonaequip.com/floatcells.asp

表三、脫水設備商名錄

公司名稱	地址	電話	網址
志品科技股份有限公司	台北市內湖區瑞光路 302 號 8 樓	02-2656-2766	http://www.cotechgroup.com
銓風機械股份有限公司	台中市五權西路二段 1266 巷 11 號	04-2389-0780	http://www.chuanfeng.com.tw
水美工程企業股份有限公司	台北縣汐止市新台五路 一段 79 號 14 樓之 13	02-2698-1698	http://www.supermax-eng.com.tw
川源股份有限公司	台北縣汐止市環河街 206 號	02-2694-2732	—
煒盛廢水處理股份有限公司	台北縣新店市中正路 540 號 3 樓	02-2218-4989	—
啟碩機械廠有限公司	台南縣歸仁鄉大順街 306 號	06-239-2501	http://www.chishun.com.tw
元鋁工業股份有限公司	台中縣清水鎮南社路 181-36 號	04-2623-3287	http://www.ycicl.com
佳耘工業有限公司	台北縣板橋市中山路二 段 89 巷 27 號 21 樓	02-2958-3680	http://www.bubfilter.com.tw
純淵股份有限公司	桃園縣平鎮市崇德街 13 巷 1 弄 27 號	03-367-8478	—
洄堡工業股份有限公司	台北縣新莊市頭興街 1-23 號	02-2998-1598	http://home.kimo.com.tw/hbwdflau
欣鴻實業股份有限公司	桃園縣桃園市富國路 668 之 2 號	03-301-1551	http://www.singhome.com.tw
崧浩工業有限公司	台北縣中和市中山路 3 段 110 號 8 樓之 1	02-2226-8189	http://songhaw.trade-taiwan.org
太和環境企業股份有限公司	台北市建國北路一段 58 號 7 樓	02-2518-3499	http://www.dewater.com.tw
寰寶工程有限公司	桃園縣新屋鄉中華路 274 號	03-335-8497	http://www.itactrade.org/vender/84701060/index.asp
坦克企業股份有限公司	台中市河南路四段 168 號	04-2254-1362	http://www.tanktw.com
宇盛環保機械有限公司	台中縣外埔鄉水美村水 美路 91-2 號	04-2676-1089	http://www.jisen.com.tw
懿鋒實業有限公司	台北市羅斯福路五段 176 巷 33 號 2 樓	02-2933-4329	http://www.hidewater.com/b5/
中營環境工程企業股份有限公司	桃園市中正路 1388 號 4 樓之 7	03-357-2351	http://www.allwin88.com.tw

表三、脫水設備商名錄(續 1)

公司名稱	地址	電話	網址
友弘環保工程股份有限公司	臺北縣鶯歌鎮永昌街212號	02-2677-4588	http://www.yuankai.com.tw
千涵國際股份有限公司	台南縣永康市中華號144-16號6F-1	06-312-7891	http://www.felca.com.tw
帝碩有限公司	台北市和平西路一段86號5樓	02-2365-6052	http://www.tefsa.com.tw
安正鐵工廠股份有限公司	台北縣三重市光復路二段171號	02-2995-1315	http://anntsung.com.tw
邑徽環境工程股份有限公司	高雄市三民區遼寧一街8號1樓	07-315-9171	
薪豐企業有限公司	台北市內湖區內湖路二段103巷106號2樓	02-8792-0090	http://www.chiafua.com.tw
台灣卜力斯股份有限公司		03-313-2846	http://www.passal.com
富產機械有限公司	台南縣仁德鄉上崙村中正路一段656巷19弄27號	06-266-6146	—
台灣迪肯特股份有限公司	新竹縣竹北市沿河街73巷15號	03-551-1236	http://decanter.com.tw
Ashbrook Simon-Hartley	—	800-362-9041	http://www.ashbrookcorp.com
Koch/Infinity Wastewater Technologies	PO Box 3436 Evansville, IN 47733-3436	812-437-5640	http://www.koch-water.com/index.html
Arges Engineering co.	—	312-395-7729	http://www.argesmakina.com/wastewater.htm
Bright Technologies	127 N. Water Street Hopkins Michigan 49328	269-793-7183	http://www.brightbeltpress.com
M.W. watermark	12764 Greenly, Suite 20 Holland, MI 49424 877 4 Water-1	616-399-8850	http://www.mwwatermark.com
Mine Engineer.Com	2286 E. Carson St. #437, Long Beach, CA 90807	562-234-8380	http://www.mine-engineer.com
Ingalls Process Equipment Company	191 Elevator Avenue, Painesville, OH 44077	440-352-9403	http://www.ingallsequipment.com/default.htm
USFilter	Warrendale, PA	800-525-0658	http://www.usfilter.com/en/

表三、脫水設備商名錄(續 2)

公司名稱	地址	電話	網址
Leaucon, Inc.	P.O. Box 291,314 Reynolds Road, Bldg. 43 Malvern, AR 72104	501-844-4221	http://www.leaucon.com
Metallurgical Solutions	—	519-787-0489	http://www.metlabsolutions.com
Ascension Industries, Inc.	1254 Erie Avenue, North Tonawanda, New York 14120	716-693-9381	http://www.asmfab.com
AJM / Polyfilters	PO Box 18, Mirfield, West Yorkshire, WF14 0BX, England	44 (0)1924 496584	http://www.polyfilters.com
Sachin Filtech	Plot # 77 - 4, Phase - 1, G.I.D.C. Estate, Vatva, Ahmedabad - 382 445, Gujarat - India	+91-79-2583- 2204	http://www.sachininternational.com
Latham International Ltd.	Rowhurst Close Industrial Estate, Newcastle-under-Lyme, Staffs ST56BD, England	+44 (0)1782 565364	http://www.lathaminternational.com
Dicalite Europe nv	Scheepzatestraat 100, 9000 Gent, Belgium	+32-9-250-95 -50	http://www.dicalite-europe.com
Arnold Equipment Company	P.O. Box 22960, Cleveland, OH 44122	216-831-8485	http://www.arnoldeqp.com/
NRM Equipment	4771 Sweetwater Blvd. Sugar Land, Texas 77479	281-565-8777	http://www.nrmequipment.com

表四、乾燥設備商名錄

公司名稱	地址	電話	網址
耿晨企業股份有限公司	台北縣蘆洲市民族路 408 巷 90-1 號	02-2285-6 036	http://www.radcure.com.tw/ main/index.sphp?home_func =show
群育科技有限公司	台北縣泰山鄉同義街 37 號	02-8531-5 955	http://www.chemist.com.tw/ com.asp
三左興業股份有限公司	雲林縣二崙鄉大華村 大華路 11 號	05-598-23 06	http://www.sanctity.com.tw/ /
五中機械有限公司	桃園縣八德市廣福路 1016 號	03-367-86 18	http://www.fivem.com.tw/ /
申川機械工廠股份有限公司	宜蘭縣龍德工業區龍 祥一路 2 號	03-990-18 15	http://www.soonstrong.com.t w/ /
吉皇星機電有限公司	桃園縣平鎮市新光路 二段 8 巷 171 號	03-464-19 75	http://www.chsweb.com.tw/ /
百樺國際股份有限公司	台北市石牌路二段 336 號 1 樓	02-2876-2 929	http://www.plastek.com.tw/ /
宏亦機械工業有限公司	桃園縣中壢市工業區 南園路 14 號	03-452-21 43	http://www.hong-i.com.tw/ /
俊嘉工業股份有限公司	台北縣樹林市中正路 496 號	02-2689-3 645	—
唐原股份有限公司	台北縣五股鄉登林路 93 之 1 號	02-2292-9 588	http://www.vibnet.com.tw/ /
絃原工業有限公司	台中市南區大慶街二 段 31 巷 9 號	04-2262-8 215	http://www.goodalltw.com/ /
登峰機械工業有限公司	桃園縣大溪鎮中庄街 309 巷 52 號	03-390-99 99	http://mixer.com.tw/ /
七福工業股份有限公司	桃園縣中壢工業區合 定路 13 號	03-452-91 17	http://www.lucky-7.com.tw/ /
九富企業有限公司	台北縣新莊市新樹路 497 巷 13 弄 21 號	02-2203-8 368	http://www.jofull.com.tw/ /
金陵乾燥設備有限公司	江蘇省常州市焦溪鎮 三河口開發區	(0519)867 0222	http://www.jinlingdry.com/i ndex-1.asp
統一乾燥設備有限公司	—	(0519)867 9228	http://www.tongyidrying.co m/cn/index.asp
三門峽金渠集團化工機械有限公司	河南省三門峽市六峰 路南	(0398) 2817299	—
一步乾燥設備有限公司	—	(0519)890 2618	http://www.yibu.com/ /

表五、熔融設備商名錄

公司名稱	地址	電話	網址
燦環科技有限公司	台南市安平區新義路 24 號	06-263-68 68	—
愷互貿易有限公司	台北市成福路 168 號 2 樓之 5	02-2789-0 526	—
亞炬企業股份有限 公司	高雄縣大寮鄉大發工 業區大有四街 6 號	07-787-23 17	http://www.asia-giant.com.t w/
宇太股份有限公司	台北縣泰山鄉中山路 二段 316 號	02-2297-6 596	http://www.yutay-vacuum.c om.tw/
Shang Li Electric Machine Co., Ltd.	No. 285, Ke Tung Rd., Ho Mei Chen, Chiang hua, Taiwan, R.O.C.	04-735739 8	http://www.asia-shangli.com
Horng Shin Electric Co., Ltd.	No.20 Lane121, Si Lin Rd., Chueh Su Tsun, Yan Chao Hsiang,	07-616373 3	—
北京時代精儀科技 發展有限公司	—	(010)8859 4195	http://show18100861.18sho w.net/Product_4902.html
上海愛斯特電子有 限公司	上海市田林路 191 號	(021)5450 0549	<a href="http://www.eastcc.com.cn/dt
fb1.asp?id=260">http://www.eastcc.com.cn/dt fb1.asp?id=260
上海盛力儀器有限 公司	上海市中漕路 94 號 A 座 301 室	(021)5425 5535	<a href="http://www.instrument.com.
cn/netshow/SH100933/">http://www.instrument.com. cn/netshow/SH100933/
Andritz Group	—	+43 316 6902-0	http://www.andritz.com
Laiwu Steel Group Machinery & Manufacturing Co., Ltd	2 Gangdu Street, Gangcheng District, Laiwu City, Shandong Province, China	0634-6929 229	<a href="http://www.laigang.com/jixi
echang/en_index.htm">http://www.laigang.com/jixi echang/en_index.htm
Pyromet smelting technology and equipment	10 Sherborne Road Parktown Johannesburg 2193 South Africa	+27 11 480-2000	<a href="http://www.pyromet.co.za/de
fault.asp">http://www.pyromet.co.za/de fault.asp

表六、熱裂解設備商名錄

公司名稱	地址	電話	網址
北京佳儀 (JAI-CHINA)分析設備有限公司	北京市海澱區學院路 7 號弘彘大廈 601 室 (100083)	(010)8238 1875	http://jai-china.instrument.com.cn
博賽德科技有限公司	北京市朝陽區望京廣順北大街星源國際 B 座 1205-1206	010-84724 315	http://www.bct-tech.com
德祥科技有限公司	廣州市天河體育東路 138 號金利來數碼網路大廈 2002-04 室	020-38781 378	http://www.tegent.com.cn
上海科創色譜儀器有限公司	上海市嘉定區城中路 20 號(上海大學色譜樓)	021-69982 681	http://www.shupkc.com
Spectronics Corp.	956 Brush Hollow Rd. NY 11590 Westbury USA	+1516 333 4840	http://www.spectroline.com/
Oriel Corp.	250 Long Beach Blvd CT 06497 Stratford USA	+1203 377 8282	http://goliath.ecnext.com/
StellarNet UK Ltd	PO BOX 734, Harston CB2 5FA Cambridge United Kingdom	012238721 97	http://www.stellarneuk.com
Land Infrared	Sheffield S18 6DJ Dronfield United Kingdom	+441246 417691	http://www.motionnet.com/cgi-bin/search.exe?a=sc&no=20624
Jobin Yvon/Instruments S.A.	16-18, rue du Canal BP 118 F-91163 Longjumeau Cedex France	+33164 5413 00	http://www.jobinyvon.com/default.htm
SciTech s.r.o.	Nad Šárkou 75 160 00 PRAHA 6 Czech Republic	224 311 850	http://www.scitech.cz
SHIMADZU GmbH org. složka	Ocelářská 35 190 00 Praha 9 Czech Republic	284 080 221	http://www.shimadzu.cz

國家圖書館出版品預行編目資料

減容技術與設備手冊及案例彙編/經濟部工業局編,財團法人台灣綠色生產力基金會編著,--初版.--台北市：工業局出版；台北縣新店市：台灣綠色生產力基金會發行, 民 95- 250 面：21x29.7 公分
參考書目：217-219 面

含索引

ISBN 986-00-5533-5 (上冊：平裝)

1.廢物技術 2.工業廢物處理

445.97

95011410

減容技術與設備手冊及案例彙編(上)

編 著：經濟部工業局；財團法人台灣綠色生產力基金會

發行人：陳昭義

總編輯：連錦璋

編輯企畫：陳炯立、林政江、余騰耀、張啟達

執行編輯：林冠嘉、林金美

編輯委員：郭振明、郭景宗、郭甦隆、陳偉聖、曾迪華、黃順明(依
姓氏筆畫順序排列)

出版所：經濟部工業局

台北市大安區信義路三段 41 之 3 號

(02)2754-1255

<http://www.moeaidb.gov.tw>

發行所：財團法人台灣綠色生產力基金會

台北縣新店市寶橋路 48 號 5 樓

(02)2910-6067

<http://www.tgpf.org.tw>

出版日期：中華民國九十五年七月初版

設計印刷：信可印刷有限公司

工本費：500 元

GPN：1009501579

ISBN：986-00-5533-5 (平裝)