

# 局長序

產業的穩定成長是國家經濟發展與國家競爭力的重要指標。國家經濟的升級需要企業生產力的持續成長；而企業生產力的提高除必須藉著提高產品品質、增加產品特性、改善生產技術及提高生產效率外，如何藉著提升企業環保績效以提升企業整體經營效益，已成為另一重要關鍵因素。

綜觀全球環境保護之演進趨勢可知，世界各國之環境保護工作皆由廢水領域、廢氣領域開始，進而擴及廢棄物及其他領域。目前，我國已面臨廢棄物處理之關鍵時期。

經濟部工業局為工業主管機關，扮演協助輔導改善的角色，為協助產業導入正確的環保觀念及技術，以提昇企業環保及經營績效，多年來結合產、官、學、研的力量，積極推動各項宣導、輔導及推廣措施，希望能協助產業界降低環境污染風險，提昇企業形象，更期藉由「工業減廢」、「清潔生產」、「環境管理」及「綠色設計」等預防措施的推行，同時達到降低生產成本，提升競爭力。

本設備手冊以廣泛使用之乾燥設備為專題，佐以多類常見廢棄物之應用案例，或可作為各界推動廢棄物妥善處理與資源化工作時，有關設備選用之參考，並期能引起各界對於推動廢棄物資源化工作之迴響，以紓解國內廢棄物處理之壓力。

經濟部工業局局長

施 顏 祥

中華民國九十年十二月

# 目 錄

	頁次
第一章 前言 .....	1
1.1 資源再利用之意義 .....	1
1.2 乾燥對廢棄物處理及資源化之重要性 .....	2
第二章 乾燥原理 .....	3
2.1 概述 .....	3
2.2 恆速乾燥過程(外部條件控制的乾燥過程) .....	4
2.3 減速乾燥過程(內部條件控制的乾燥過程) .....	4
2.4 物料的乾燥特性 .....	5
2.5 臨界含水量及平衡含水量 .....	10
第三章 乾燥設備 .....	13
3.1 箱式乾燥器和隧道乾燥器 .....	13
3.2 旋轉乾燥器 .....	23
3.3 轉鼓乾燥器 .....	31
3.4 帶式乾燥器 .....	37
3.5 盤式連續乾燥器 .....	45
3.6 臥式槳葉式乾燥器 .....	53
3.7 流體化床乾燥器 .....	71
3.8 改型流體化床乾燥器 .....	83
3.9 氣流乾燥 .....	94
3.10 太陽能乾燥 .....	98
第四章 乾燥附屬設備 .....	105
4.1 乾燥器的加料及排料裝置 .....	105
4.2 乾燥器的熱風系統 .....	114

4.3 乾燥器的除塵系統 .....	118
第五章 乾燥器的選定 .....	125
5.1 概述 .....	125
5.2 乾燥器的分類 .....	125
5.3 乾燥器的選擇 .....	126
5.4 乾燥器尺寸估算 .....	132
第六章 廢棄物乾燥處理及資源化案例 .....	135
6.1 皮革下腳料蒸煮乾燥轉製有機肥案例 .....	135
6.2 水產下腳料蒸煮乾燥轉製飼料及肥料案例 .....	137
6.3 水淬高爐石生產爐石水泥案例 .....	142
6.4 含金屬廢棄物高溫熔煉資源回收案例 .....	148
6.5 電鍍污泥回收鉻酸鈉及鐵黑案例 .....	152
6.6 重金屬污泥高效率電熱式乾燥減量案例 .....	157
6.7 自然低溫法污泥乾燥減量案例 .....	164
6.8 電能低溫法污泥乾燥減量案例 .....	167
參考資料 .....	171

# 圖目錄

	頁次
圖 2.1 恆定乾燥條件下的典型乾燥速率曲線.....	6
圖 2.2 水分、材料溫度變化.....	11
圖 3.1 箱式乾燥器.....	14
圖 3.2 溼度--溫度圖(採空氣反覆加熱方式的乾燥操作).....	15
圖 3.3 水平氣流箱式乾燥器.....	16
圖 3.4 穿流氣流箱式乾燥器.....	18
圖 3.5 真空箱式乾燥器結構.....	20
圖 3.6 隧道乾燥器.....	21
圖 3.7 被乾燥物料在台車上放置的示意圖.....	23
圖 3.8 旋轉乾燥器工作原理簡圖.....	24
圖 3.9 葉片式穿流旋轉乾燥器.....	27
圖 3.10 通氣管式旋轉乾燥器.....	27
圖 3.11 常規間接加熱旋轉乾燥器.....	29
圖 3.12 熱風和物料走向示意圖.....	30
圖 3.13 蒸汽管間接加熱旋轉乾燥器.....	30
圖 3.14 複式加熱旋轉乾燥器.....	31
圖 3.15 雙鼓乾燥器結構示意圖.....	32
圖 3.16 帶壓輥的單鼓乾燥器.....	34
圖 3.17 雙鼓乾燥器.....	34
圖 3.18 帶密閉罩的對鼓乾燥器.....	35
圖 3.19 單級帶式乾燥器結構透視簡圖.....	38
圖 3.20 單級帶式乾燥器操作原理圖.....	38
圖 3.21 多級帶式乾燥器流程簡圖.....	39

圖 3.22 多層帶乾機的結構和操作原理.....	40
圖 3.23 沖擊式帶式乾燥器結構和操作原理圖.....	41
圖 3.24 輸送帶節點結構.....	42
圖 3.25 尾氣餘熱回收系統.....	44
圖 3.26 盤式連續乾燥器結構.....	45
圖 3.27 盤式連續乾燥器工作原理圖.....	48
圖 3.28 加熱盤結構.....	49
圖 3.29 耙葉的結構型式.....	52
圖 3.30 安裝角度可調的耙葉.....	52
圖 3.31 W 型楔形槳葉式乾燥器基本結構.....	54
圖 3.32 蜂窩狀夾套結構.....	55
圖 3.33 熱軸結構.....	57
圖 3.34 楔形槳葉結構.....	57
圖 3.35 間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器(低速).....	61
圖 3.36 間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器(高速).....	62
圖 3.37 間接加熱槽型槳葉式乾燥器.....	63
圖 3.38 間接加熱 U 形槽型槳葉式乾燥器.....	63
圖 3.39 熱風式槽型槳葉式乾燥器.....	65
圖 3.40 熱風式槽型槳葉式乾燥器(內設返料輸送器).....	66
圖 3.41 真空耙式乾燥器結構.....	67
圖 3.42 槳葉(耙齒)形狀.....	68
圖 3.43 雙螺旋槳葉式真空乾燥器.....	69
圖 3.44 單層圓筒型流體化床乾燥流程圖.....	73
圖 3.45 多層流體化床乾燥器流程.....	74
圖 3.46 三級流體化床乾燥器.....	75
圖 3.47 穿流板式多層流體化床乾燥器.....	76
圖 3.48 臥式多室流體化床乾燥流程圖.....	77

圖 3.49 塞流式流體化床乾燥器 .....	79
圖 3.50 雙級塞流式流體化床乾燥器 .....	80
圖 3.51 周期性變換氣流位置的脈沖流體化床乾燥器 .....	81
圖 3.52 噴氣層流體化床乾燥器 .....	82
圖 3.53 最常見的振動流體化床乾燥器示意圖 .....	84
圖 3.54 對流型振動流體化床乾燥器 .....	85
圖 3.55 臥式攪拌流體化床乾燥器 .....	86
圖 3.56 回轉攪拌流體化床乾燥器 .....	88
圖 3.57 內熱攪拌流體化床乾燥器 .....	89
圖 3.58 立式局部攪拌流體化床乾燥器 .....	91
圖 3.59 臥式局部攪拌流體化床乾燥器 .....	91
圖 3.60 離心流體化床乾燥器 .....	92
圖 3.61 臥式離心流體化床的進風方式 .....	93
圖 3.62 立式離心流體化床乾燥器 .....	93
圖 3.63 氣流乾燥基本流程圖 .....	94
圖 3.64 帶有分散器的氣流乾燥裝置 .....	97
圖 3.65 帶有粉碎機的氣流乾燥裝置 .....	98
圖 3.66 溫室型太陽能乾燥器的結構 .....	101
圖 3.67 水蓄熱太陽能乾燥器 .....	102
圖 4.1 閘板 .....	106
圖 4.2 旋轉式供料器 .....	106
圖 4.3 鎖氣料斗式供料器 .....	107
圖 4.4 圓盤加料器 .....	107
圖 4.5 立式螺旋供料器 .....	108
圖 4.6 帶式供料器 .....	108
圖 4.7 板式供料器 .....	109
圖 4.8 鏈式供料器 .....	109

圖 4.9 螺旋加料器 .....	110
圖 4.10 柱塞式供料器 .....	110
圖 4.11 往復板式供料器 .....	111
圖 4.12 搖擺式供料器 .....	111
圖 4.13 浮動式供料器 .....	112
圖 4.14 振動供料器 .....	112
圖 4.15 噴射器 .....	113
圖 4.16 空氣槽 .....	113
圖 6.1 皮革下腳料蒸煮乾燥處理流程 .....	136
圖 6.2 水產加工下腳料蒸煮乾燥轉製飼料及肥料製程 .....	139
圖 6.3 高爐水泥生產流程圖 .....	143
圖 6.4 含金屬廢棄物高溫熔煉回收處理流程 .....	150
圖 6.5 電鍍污泥資源化回收鉻酸鈉及鐵黑處理流程 .....	154
圖 6.6 F 工廠製程與污染來源 .....	157
圖 6.7 廢水處理流程 .....	160
圖 6.8 F 廠污泥乾燥處理流程 .....	163
圖 6.9 G 廠污泥乾燥處理流程 .....	166
圖 6.10 H 廠污泥乾燥處理流程 .....	168

# 表 目 錄

	頁次
表 3.1 通氣管式與常規式旋轉乾燥器性能比較.....	28
表 4.1 熱源的特點及分類.....	115
表 4.2 各種乾燥飛揚物的控制設備.....	119
表 4.3 四大類型除塵器的比較.....	119
表 5.1 以原料型態選擇乾燥器.....	126
表 5.2 對流和傳導傳熱乾燥器中物料的停留時間.....	127
表 5.3 乾燥器典型的乾燥能力和能量消耗.....	129
表 5.4 某些乾燥器中被乾燥物料的處理方法.....	131
表 5.5 各種型式乾燥器的體積熱傳係數( $h_a$ )近似值.....	133
表 6.1 高爐水泥節省資源效益評估.....	146
表 6.2 高爐水泥降低二氧化碳生成量效益評估.....	146
表 6.3 含金屬廢棄物高溫熔煉回收產品主要成份.....	151
表 6.4 電鍍污泥資源化回收鉻酸鈉之效益評估.....	156
表 6.5 F 工廠槽液組成份與原物料使用量.....	158
表 6.6 F 工廠廢水特性.....	159
表 6.7 設計水質與實際處理水質.....	160
表 6.8 高效率電熱式污泥乾燥規格.....	162
表 6.9 電熱式污泥乾燥機之效益評估.....	163
表 6.10 H 廠污泥乾燥減量效益評估.....	170



# 第一章 前 言

國內廢棄物之產生量逐年成長當中，然而此現象對於國內長久以來所面臨地狹人稠的既存壓力，不啻是雪上加霜而難以因應。本章將簡要的介紹廢棄物(資源)再利用之意義，以及乾燥處理對廢棄物處理及資源化之重要性。

## 1.1 資源再利用之意義

廢棄物是人們棄廢之不用的東西。棄之不用，只反映人們在特定的時空條件下對所廢棄物質的主觀認識和態度，即視其為無用而寧願拋棄，並不反映所廢棄物質客觀上有無實用價值。研究及經驗證明，任何一種廢棄物質都可能有其實用價值，只是由於暫時對其知識不足或受某些條件的限制，一時尚未找到合適的用途，或者暫時尚無條件付諸應用罷了。從合理、經濟的利用自然資源的觀點來看，一切被稱為“廢物”或“廢棄物”的物質，都是有價值的自然資源和物質財富，都應設法尋求合理利用的途徑，予以充分有效地利用。棄之不用，不但浪費了有限的自然資源和到手的物質財富，而且還會給人類帶來沉重的環境負擔和災難。

資源回收與再生利用是人類社會急需建構的一個導向。資源回收與再生利用可使廢棄物中可用資源循環再利用，達到廢棄物減量與節省蘊藏資源開採之目的，也是人類企盼獲得更豐富的生活物質與更完善的生活環境所必須要建立的科技。正如二百年前發生的工業革命，人們發展製程建立消費流程(動脈工業)，在二十一世紀，我們必須再建立一相對應的回收再生流程(靜脈工業)，以維持人類社會與自然環境的調合。

## 1.2 乾燥對廢棄物處理及資源化之重要性

廢棄物前處理攸關其最終處理處置或資源化再利用之可行性，而一般前處理之單元操作可概略區分為破碎、分選及乾燥等單元，其中乾燥單元主要被應用為去除濕份之用途，尤其對於污泥或濕含量較高之廢棄物的前處理更形重要。乾燥處理之主要目的有下列幾點：

1. 減量化：經乾燥處理後之污泥或濕含量較高之廢棄物之體積減少，相對的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含量較高之廢棄物之性質安定，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含量較高之廢棄物，再經分選、摻配、混練、冶鍊等適當處理程序，即可達到資源化再利用的目的。

廢棄物乾燥雖然有很多成熟的技術，但以往在國內卻很難推廣。最主要癥結在於事業機構認為經濟效益不高，與其花費數百萬甚至千萬購置乾燥設備，不如以一噸 2000~3000 元不等的費用外包進行清運。這兩年來，因為廢棄物清理法的修訂、事業廢棄物的管制趨嚴、掩埋場地難覓與清理費用持續高漲、廢棄物資源化潛力提昇、廢棄物可能轉化為有價物.....等因素，使廢棄物乾燥處理技術開始受到重視，但是否要購置乾燥設備？選用何種乾燥設備？乾燥到何種程度？則又是另一個令業者困擾的問題。

鑒於上述背景，乃規劃撰寫「廢棄物資源回收與處理設備技術手冊—乾燥設備篇」，期望藉由本技術手冊提供產業界選用乾燥設備時的指引，經由廢棄物物化特性評析，進而選用適合的乾燥設備，達到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 乾燥原理

乾燥是傳統的單元操作之一，然而它也是最複雜、人們了解最淺的技術，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。本章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。

### 2.1 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。濕份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。

## 2.2 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。

## 2.3 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。

## 2.4 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 2.1 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，濕分介面可能內移，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。

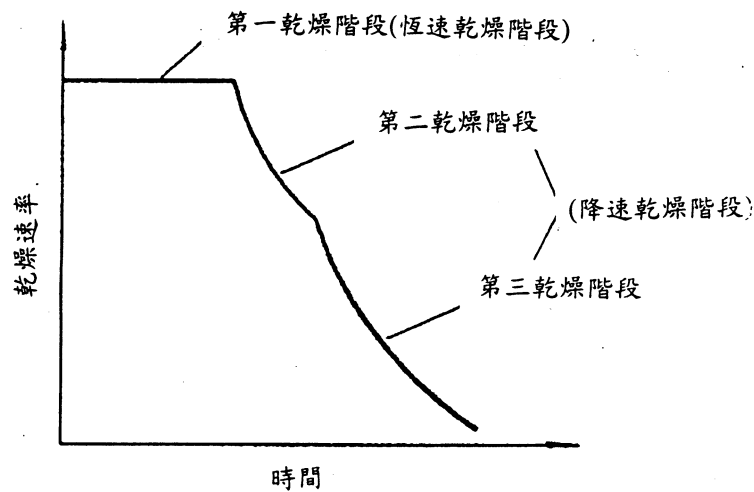


圖 2.1 恆定乾燥條件下的典型乾燥速率曲線<sup>(1)</sup>

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(absorption)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。

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，而小至數微米( $\mu\text{m}$ )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：

### 2.4.1 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( $\mu\text{m}$ )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( $\mu\text{m}$ )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( $\mu\text{m}$ )之微細孔隙之固型材料，也和 2.(粒徑為數十微米( $\mu\text{m}$ )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。

#### 2.4.2 親水性材料

離子活性氧化鋁、矽凝膠粒子等材料均具有  $10^{-4}$ ~ $10^{-2}$   $\mu\text{m}$  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( $\mu\text{m}$ )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。

#### 2.4.3 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 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 2.2 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。

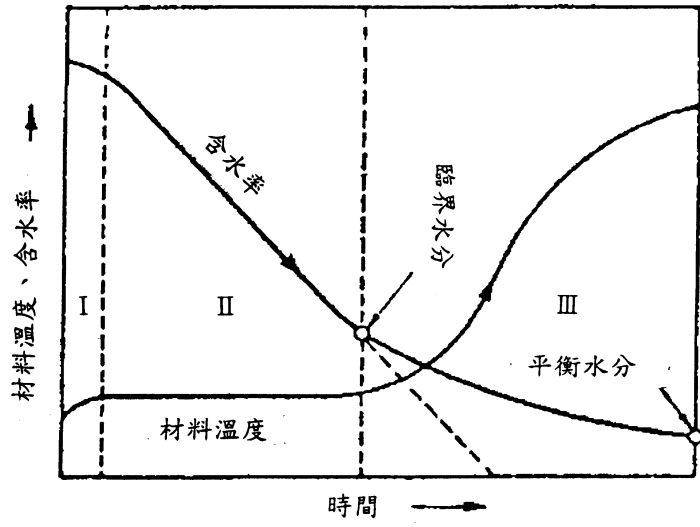


圖 2.2 水分、材料溫度變化<sup>(1) (2)</sup>

## 第三章 乾燥設備

乾燥設備種類不勝枚舉，各種設備適合應用之場合亦稍有異同，舉凡生技、食品、化工、……等相關產品，以及廢棄物之乾燥處理均可應用。本章將介紹適合應用於廢棄物乾燥處理領域之相關乾燥設備。

### 3.1 箱式乾燥器和隧道乾燥器

#### 3.1.1 概述及乾燥機制

##### 1. 概述

隧道乾燥器(tunnel dryer)和箱式乾燥器(cabinet dryer)是相當傳統的乾燥設備，適用於濾餅、粒狀、漿狀、和易破碎物料的乾燥。

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。因此對於經常需要更換物料、高價的物料或小批量物料，箱式乾燥器的優點十分顯著。現今隨著新型乾燥設備的不斷出現，箱式乾燥器和隧道乾燥器在乾燥處理中仍佔有一席之地。

箱式乾燥器(cabinet dryer)的主要缺點是：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。此外，物料品質不穩定。因此隨著乾燥技術的發展將逐漸被新型乾燥器所取代。

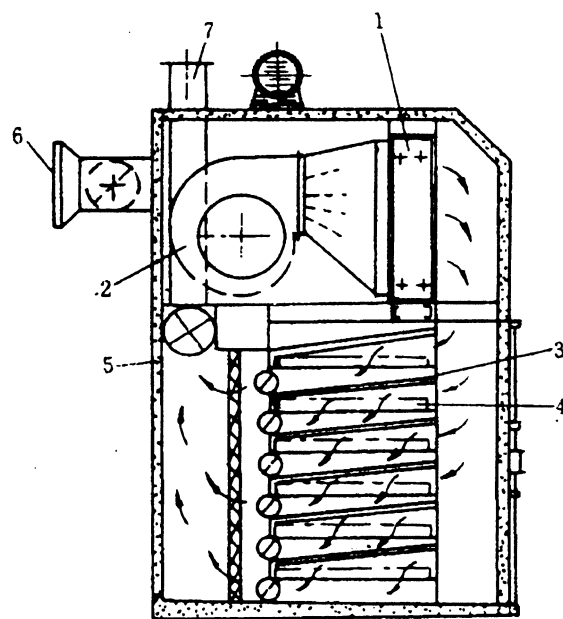
##### 2. 乾燥機制

箱式乾燥器(cabinet dryer)是外形像箱子的乾燥器，外壁是

絕熱保溫層。根據材料的性質、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、隧道式乾燥器、網帶式乾燥器等。

箱式乾燥器(cabinet dryer)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(cabinet dryer)的工作原理和結構，如圖 3.1 所示。箱內空氣的工作狀態可用溼度—溫度圖表示，如圖 3.2 所示。



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

圖 3.1 箱式乾燥器<sup>(1)</sup>

假設絕對溫度為  $y_1$  的空氣(A 點)在加熱管上通過，溫度上升到  $T_1$ (B 點)，而絕對溼度(absolute humidity)不變。加熱過程用 AB 線表示。然後空氣通過潮濕物料層，在達到接近飽和狀態

( $y_1=90\%$ )後流出(C點)。這時它的溫度已經下降到  $T_2$  值，空氣吸濕過程用 BC 線表示。空氣溼度增加到  $y_2$ 。可認為 BC 線是一個絕熱冷卻(adiabatic cooling)過程。每一 kg 空氣可以除去( $y_2 - y_1$ ) kg 水。因此，可以計算除去物料中的一定數量水分所需要的空氣量。再將溫度為  $T_2$  的空氣用加熱蛇管加熱到溫度  $T_1$ (D點)。這一過程用 CD 線表示。於是當再度加熱的空氣通過第二個盤架的濕物料時，將吸取濕份，直到相對溼度升到 90%，而溫度下降到  $T_3$ (E點)為止。按照這種過程，每一 kg 空氣所能帶出的水分將達到( $y_3 - y_1$ ) kg。

因此，1 kg 空氣所帶走的濕份可比單程增加很多。例如空氣在物料上通過三次後，1 kg 空氣所除掉的水分總量為( $y_4 - y_1$ ) kg。如果，熱空氣單程通過烘箱內的物料表面，而其他條件基本相同(即排除同樣水分，排出空氣相對溼度為 90%)，則溼度為  $y_1$  的空氣開始將加熱到  $T_5$ ，如 GHF 線所示。

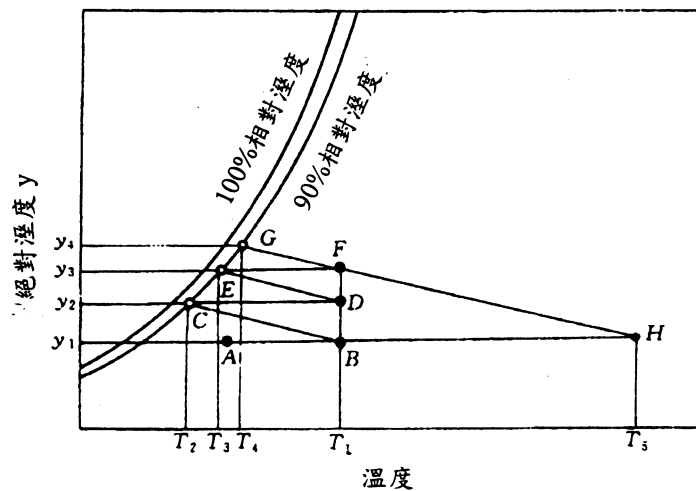


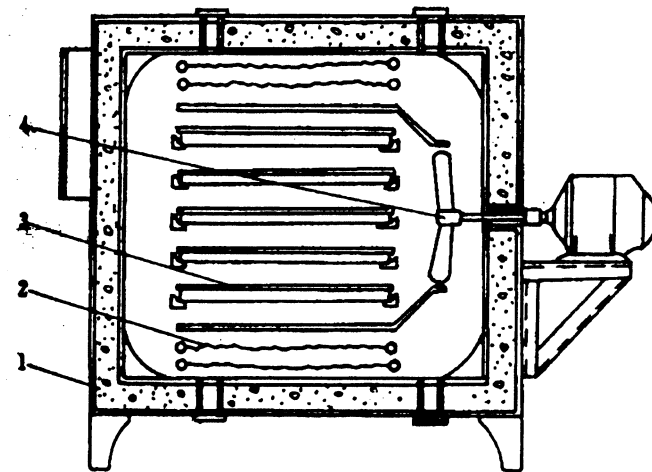
圖 3.2 溼度－溫度圖(採空氣反覆加熱方式的乾燥操作)<sup>(1)</sup>

由圖 3.2 可以看出，再加熱的方法有兩個主要的優點。一是需要的空氣量少。因為 1 kg 空氣帶出的水分比在單程方式中多。

二是在單程方式中，為了帶走同樣多的水分，就必須把空氣加熱到一個較高的溫度  $T_5$ 。由於空氣量的減少和加熱溫度的下降，使得加熱系統設備大為簡化，也使箱體內風速減低，減少細粉塵的逸出。

### 3.1.2 箱式乾燥器結構和分類

箱式乾燥器(cabinet dryer)分為熱風沿著物料表面通過的水平氣流(parallel gas flow)箱式乾燥器(如圖 3.3 所示)和熱風垂直穿過物料層的穿流氣流(through gas flow)箱式乾燥器。當乾燥室內的空氣被抽成真空狀態時，就成為真空箱式乾燥器(vacuum cabinet dryer)。現分述如下：



1-保溫層；2-電加熱；3-料盤；4-風扇

圖 3.3 水平氣流箱式乾燥器<sup>(1)</sup>

#### 1. 水平氣流箱式乾燥器

##### (1) 熱風的速度

為提高乾燥速度，需有較大的熱傳係數  $h$ ，為此加大熱風的速度。但為了防止物料帶出，風速應小於物料帶出速度。因此，被乾燥物料的密度、粒徑以及乾燥結束時的狀態等成

為決定熱風速度的因素。

## (2) 物料層の間距

在乾燥器內，空氣流動的通道大小，對空氣流速影響很大。空氣流向和在物料層中的分佈與流速有關。因此，適當考慮物料層の間距和控制風向是保證流速的重要因素。

## (3) 物料層的厚度

為了保證乾燥物料的品質，常常採取降低烘箱內循環熱風溫度和減薄物料層厚度等措施來達到目的。物料層的厚度通常為 10~100mm。

## (4) 鼓風機的風量

鼓風機的風量根據計算所得的理論值(空氣量)和乾燥器內洩漏量等因素決定。但是在有台車的箱式乾燥器(cabinet dryer)內，乾燥室和台車之間有一定的空隙，尤其在空氣阻力小的安裝車輪的空間內，通過的空氣量多。所以在決定風量時，應考慮這些因素。一般用下式求取熱風量：

$$W=3600 \cdot u \cdot A / \rho_v$$

式中，W 為熱風量，kg/h；u 為風速，m/s；A 為斷面積，m<sup>2</sup>； $\rho_v$  為空氣的濕比容，m<sup>3</sup>/kg 乾空氣。

為了使氣流不出現死角，水平氣流箱式乾燥器的鼓風機應安置在適當的位置。同時，在器內安裝整流板，以調整熱風的流向，使熱風分布均勻。

## 2. 穿流氣流箱式乾燥器

在水平氣流箱式乾燥器中，氣流只在物料表面流過。它的缺點是：熱傳係數較低，熱利用率較差，物料乾燥時間較長等。為了克服以上缺點，開發了穿流氣流箱式乾燥器。為了要使熱風在料層內形成穿流，必須將物料加工成型。由於物料性質的不同，成型的方法有幾種：溝槽成型、泵擠條成型、滾壓成型、搓碎成



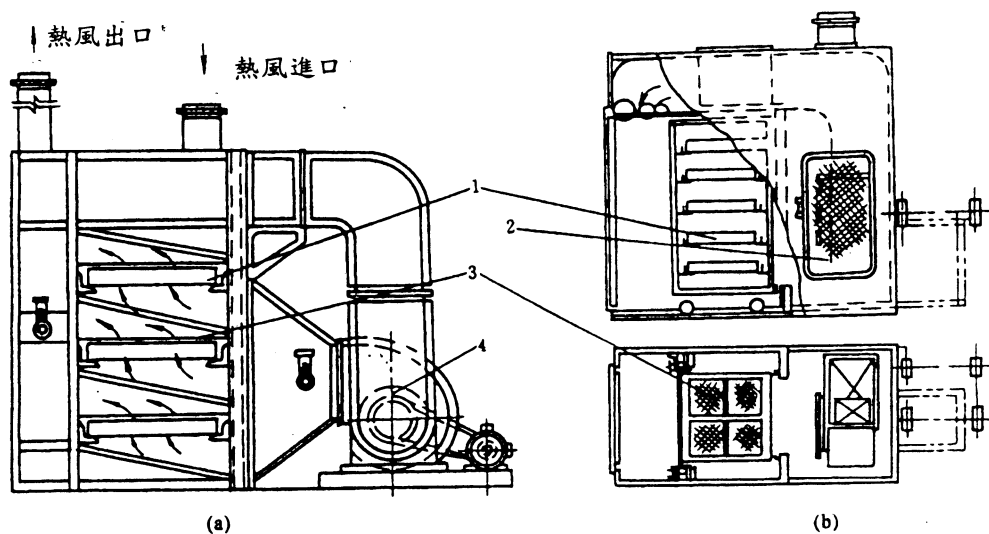
型等。

### (1) 乾燥物料的飛散

熱風行成穿流氣流，容易引起物料的飛散，對於小顆粒物料更為明顯。必須控制物料盤中的風速，以防止物料的飛散。需要合理選擇鼓風機功率和壓降損失。一般取鼓風機的靜壓降為 400~650Pa。為了防止物料飛散，在料盤上蓋有金屬網，如圖 3.4 所示。

### (2) 熱風的洩漏

熱氣流穿過物料時的壓降損失較大(約 500Pa 左右)，洩漏可能性也大。因此，鼓風機的壓力要比水平氣流時高。為了防止和減少熱風的洩漏，對設備的密封結構有較高要求。此外，在選擇鼓風機、加熱面積時也要考慮熱風洩漏問題。



(a)料盤上蓋有金屬網型；(b)台車料盤上蓋有金屬網型

1-料盤；2-過濾器；3-蓋網；4-鼓風機

圖 3.4 穿流氣流箱式乾燥器<sup>(1)</sup>

### (3) 物料層的厚度

物料層的鋪設厚度由熱風通過的速度、物料乾燥速度和

操作成本，以及物料價值等因素決定。物料在乾燥器內厚度較大時，鼓風機的功率相對增加。通常物料層厚度取 25~50mm 較適宜。當風速在 0.7~1.0m/s 時，物料層厚度取 45~65mm。

#### (4)熱風量的調節

在穿流氣流乾燥器內，可安裝導流葉片以調節熱風量。同時，在各層物料的排風部位上安裝調節擋板。

### 3.真空箱式乾燥器

當真空乾燥時，將被乾燥物料置於真空條件下進行加熱乾燥。利用水封式真空泵或水噴射泵抽氣、抽濕，使乾燥室內形成真空狀態。真空乾燥適用於乾燥不耐高溫、易於氧化的物料，或以有機溶劑作為熱介質(heat media)的泥狀、膏狀物料。其優點是：提高乾燥速度、縮短乾燥時間、確保物料品質。

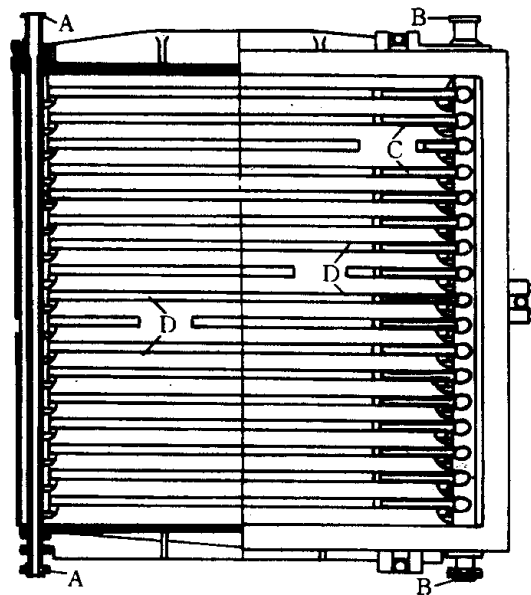
#### (1)真空乾燥器的結構及特點

真空箱式乾燥器(vacuum cabinet dryer)結構如圖 3.5 所示。它有一個鋼製外殼，斷面為長方型或圓筒型，內有許多空心隔板，在隔板中通入蒸汽或熱水。短管 C 連接空心隔板和支管。總管 A 通入蒸汽。B 管排出冷凝水。將鋪有待乾燥物的料盤放置在隔板上，關閉室門，用真空泵將箱體內抽成真空。隔板內的蒸汽漸漸將盤中物料加熱到指定的溫度，水分即在室內壓力下汽化，並在冷凝器中冷凝。冷凝器安裝在乾燥器和真空泵之間，如果採用水封式真空泵，則可不用冷凝器。

真空箱式乾燥器的主要特點是：

- A.當加熱溫度恆定時，提高真空度能提高乾燥速度；
- B.當真空度恆定時，提高加熱溫度能提高乾燥速度；
- C.物料中蒸發的溶劑通過冷凝器回收；
- D.熱源採用低壓蒸汽、廢熱蒸汽、熱水或其他介質；

- E. 乾燥器熱損耗少，熱效率高；
  - F. 乾燥過程中，無雜物混入，物料不受污染；
  - G. 被乾燥的物料處於靜止狀態，形狀不易損壞。
- 真空箱式乾燥器的主要缺點是：
- A. 操作較複雜，操作費用較高；
  - B. 設備結構較複雜，造價較高。



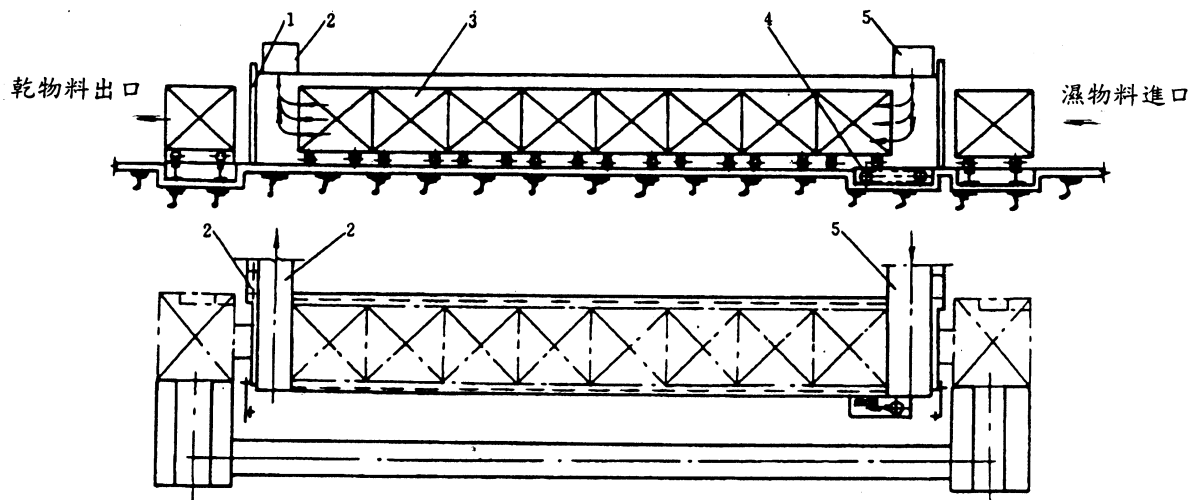
A-進汽多支管；B-冷凝液多支管；C-連接多支管與空心隔板的短管；D-空心隔板

圖 3.5 真空箱式乾燥器結構<sup>(1)</sup>

### 3.1.3 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，並一次通過通道。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 3.6 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。



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

圖 3.6 隧道乾燥器<sup>(1)</sup>

### 1. 隧道乾燥器的結構和分類

隧道乾燥器(tunnel dryer)通常由隧道和台車兩部分組成。

#### (1) 隧道乾燥器

隧道乾燥器(tunnel dryer)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 3.5m。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 2~3m/s。

將被乾燥物料放置在台車上，送入隧道乾燥器(tunnel dryer)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。

此外，也有將台車吊在單軌上，或吊在特別的平車上。隧道乾燥器(tunnel dryer)的門可根據隧道洞口的大小設計成雙扉式、旁推式或升降式。對於旁推式或升降式的門，轉車盤或轉向平車可以緊靠乾燥器，但需在門開啟時留有能放置一輛或二輛車的餘地。

隧道乾燥器(tunnel dryer)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。

## (2) 乾燥器台車

箱式或隧道乾燥器(tunnel dryer)中常將被乾燥物料放置在台車上進行乾燥。可以根據被乾燥物料的外型和熱介質的循環方向，設計不同結構和尺寸在台車。

圖 3.7 所示是台車上放置被乾燥物料的示意圖。(a)是將鬆散狀物料放置在淺盤中的情況。(b)、(c)是平板上放置磚的情況。(d)是在支架上懸掛柔軟片狀物料的情況。(e)是將短纖維狀物料放在台車托盤上的情況。(f)是將長纖維狀物料掛在支架上的情況。(g)是在木質墊板上放置木材的情況。(h)是在台

車上放置鋸開的長木板的情況。

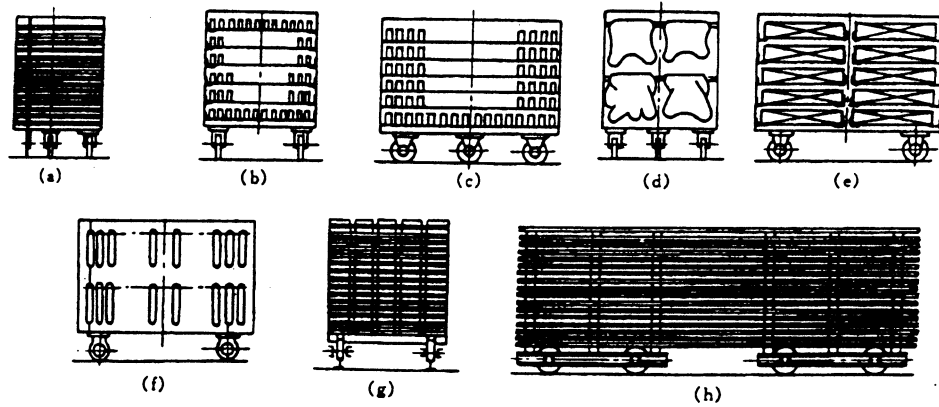


圖 3.7 被乾燥物料在台車上放置的示意圖<sup>(1)</sup>

## 3.2 旋轉窯乾燥器

### 3.2.1 概述

#### 1. 旋轉窯乾燥器的工作原理

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 3.8 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，使物料的熱接觸表面增大，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。

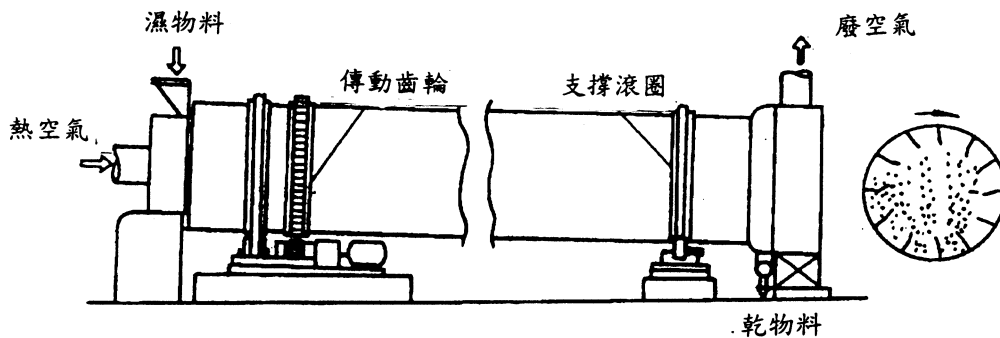


圖 3.8 旋轉窯乾燥器工作原理簡圖<sup>(1)</sup>

## 2. 旋轉窯乾燥器的特點

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。

### 3.2.2 旋轉窯乾燥器的分類和適用範圍

按照物料和熱介質的接觸方式，將旋轉窯乾燥器分為三種類型，即直接加熱式、間接加熱式、複合加熱式。現分述如下：

#### 1. 直接加熱旋轉窯乾燥器

##### (1) 常規直接加熱旋轉窯乾燥器

常規直接加熱旋轉窯乾燥器如圖 3.8 所示。在這種乾燥設備中被乾燥物料與熱風直接接觸，以對流熱傳的方式進行乾燥。按照熱風與物料之間的流動方向，分為並流式(concurrent flow)和逆流式(counter flow)。在並流式中熱風與物料流動方向相同，入口處溫度較高的熱風與濕含量較高的物料接觸。因物料處於表面汽化階段，故物料溫度仍然大致保持濕球溫度(wet bulb temperature)。出口側的物料雖然溫度在升高，但此時的熱風溫度已經降低，故物料的溫度升高不會太大。因此選用較高的熱風入口溫度，不會影響物料的品質。這對於熱敏性物料及含易揮發成份物料的乾燥是適宜的。另外，對於附著性較大的物料，選用並流乾燥也十分有利。在逆流式中熱風流動方向和物料移動方向相反。對於耐高溫的物料，採用逆流乾燥，熱利用率高。乾燥器的空氣出口溫度在並流式中一般應高於物料出口溫度約 10~20°C。在逆流式中空氣出口溫度沒有明確規定，但設計時採用 100°C 作為出口溫度比較合理。常規直接加熱旋轉窯乾燥器的窯體直徑一般為 0.4~3m，窯體長度與窯體直徑之比一般為 4~10。乾燥器的圓周速度為 0.4~0.6m/s，空氣速度在 1.5~2.5m/s 範圍內。

##### (2) 葉片式穿流旋轉窯乾燥器

按照熱風吹入方式，將葉片式穿流旋轉窯乾燥器分為端面吹入型和側面吹入型兩種。圖 3.9 所示為端面吹入型的簡



圖，其窯體水平安裝，沿著窯體內壁圓周方向等距離裝有許多從端部入口側向出口側傾斜的葉片，熱風從端部進入窯體底部，僅從下部有料層的部分葉片間隙吹入窯內，因此能有效地保證乾燥在熱風與物料的充分接觸下進行，不會出現短路現象。物料則在傾斜的葉片和窯體的旋轉作用下，由入口側向出口側移動，其滯留時間可用出口調節隔板調節。側面吹入型與端面吹入型不同的是，窯體略帶傾斜安裝，大部分熱風從開有許多小孔的窯體外吹入筒內，其方向與筒內物料的移動方向成直角，再穿過三角形葉片的百葉窗孔進入料層。在旋轉窯窯體外壁四周裝有箱型殼體，並沿旋轉窯窯體長度方向分成 3~4 個獨立的室。每個室都有獨立的鼓風機、空氣加熱器以及進氣口和排氣口。熱風溫度以及循環風量、排氣量均能自行調節。這種類型的乾燥器體積熱傳係數大，約有  $349\sim 1745\text{W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ，乾燥時間短，約為 10~30min，物料的填充率較大，約為 20%~30%。裝置容積相對較小。料層阻力為 98~588Pa 通過風速一般為 0.5~1.5m/s，窯體的轉速約為常規直接加熱旋轉窯乾燥器的 1/2 左右，使用的熱風溫度為 100~300°C。

### (3) 通氣管式旋轉窯乾燥器

通氣管式旋轉窯乾燥器如圖 3.10 所示。窯體設計和安裝與常規式相同，不同的是窯體內沒有安裝抄板(flight)，物料自進口端向出口端移動的過程中，始終處於窯體底部的空間中，形成一個穩定的料層，因而減少粉塵的飛揚。熱空氣則從端部進入不隨窯體轉動的中心管後，高速地從埋在料層內的分支管小孔中噴出，與物料強烈接觸。由於分支管是沿著中心管長度方向均勻分布，而沿著圓周方向則主要集中於中心管下部分布。所以這種設計不僅保證熱風與物料的有效接

觸，強化了熱傳及質傳過程，而且與葉片式穿流旋轉窯乾燥器相比，氣體在乾燥器長度上的分布則更加均勻。通氣管式乾燥器的體積熱傳係數約是常規式的兩倍。窯體的圓周速度約是常規式的 1/2。在相同的處理能力下，窯體的長度僅是常規式的 1/2，因此設備費用大大降低。通氣管式旋轉窯乾燥器與常規直接加熱旋轉窯乾燥器性能比較，如表 3.1 所示。

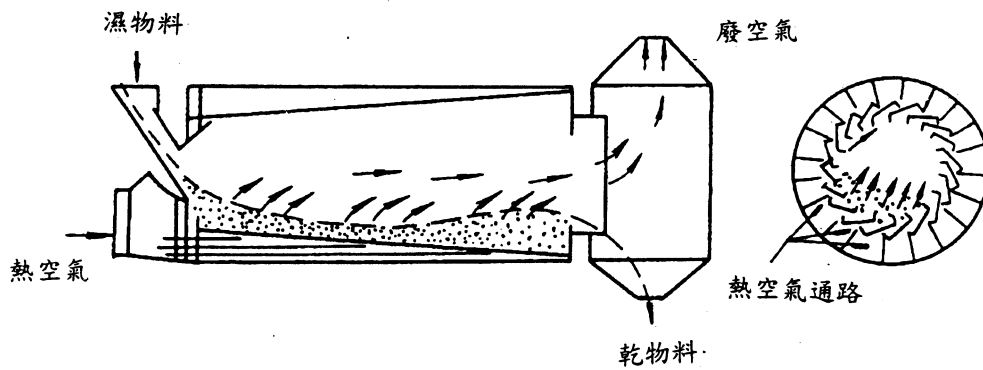


圖 3.9 葉片式穿流旋轉窯乾燥器<sup>(1)</sup>

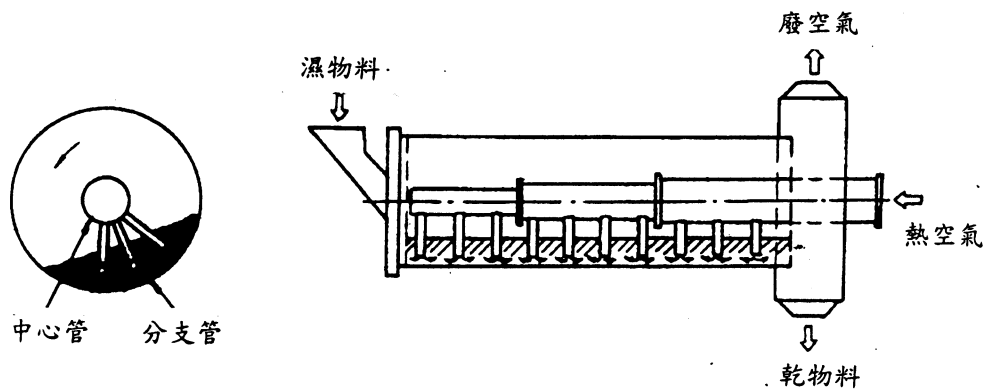


圖 3.10 通氣管式旋轉窯乾燥器<sup>(1)</sup>

表 3.1 通氣管式與常規式旋轉窯乾燥器性能比較<sup>(1)</sup>

乾燥器的類型	常規式旋轉窯乾燥器	通氣管式旋轉窯乾燥器
空氣流動方式	平行流動	穿流流動
體積熱傳係數 (kW/m <sup>3</sup> ·°C)	0.175~0.23	0.36~1.75
乾燥時間	長	短
填充率(%)	10~20	15~25
轉筒轉數	N	N/2
乾燥速率	w	2w
乾燥器體積 (對於同樣處理量)	V	V/2
處理量 (對於同樣尺寸乾燥器)	G	2G
顆粒磨損	多	少
粉塵量	大	小

## 2. 間接加熱旋轉窯乾燥器

間接加熱旋轉窯乾燥器中，熱介質不直接與被乾燥物料接觸，而乾燥所需的全部熱量都是經過傳熱壁傳給被乾燥物料的。間接加熱旋轉窯乾燥器根據熱介質的不同，分為常規式和蒸汽管式兩種。

### (1) 常規間接加熱旋轉窯乾燥器

常規間接加熱旋轉窯乾燥器如圖 3.11 所示。整個乾燥窯砌在爐內，用煙道氣加熱外殼。此外，在乾燥窯內設置一個同心圓筒。熱風和物料走向如圖 3.12 所示。煙道氣進入外殼和爐壁之間的環狀空間後，穿過連接管進入乾燥窯內的中心管，然後折返到外殼和爐壁的環狀空間，被乾燥的物料則在外殼和中心管之間的環狀空間通過。為了即時排除從物料中汽化出的水分，可以用鼓風機向乾燥器中引入適量的空氣，

但所需的空氣比直接加熱式要小得多。由於風速很小(一般為 $0.3\sim 0.7\text{m/s}$ )，所以廢氣挾帶粉塵量很少，幾乎不需氣固分離設備。在許多場合下，也可以不用鼓風機而直接採用自然通風除去汽化出的水分。常規間接加熱旋轉窯乾燥器特別適用於減速乾燥階段較長的物料。因為它可以在相當穩定的乾燥溫度下，使物料有足夠的停留時間，同時可以藉窯體的旋轉作用，有效地防止物料結塊。

## (2) 蒸汽管間接加熱旋轉窯乾燥器

蒸汽管間接加熱旋轉窯乾燥器如圖 3.13 所示。在乾燥窯內以同心圓方式排列 1~3 圈加熱管，其一端安裝在乾燥器出口處及管箱的排水分離室上；另一端用可熱膨脹的結構安裝在通氣頭的管板上。蒸汽、熱水等熱介質則由蒸汽軸頸管加入，通過集管箱分配給各加熱管，而冷凝水則藉乾燥器的傾斜度匯集至集管箱內，由蒸汽軸頸管排出。物料在乾燥器內受到加熱管的昇舉與攪拌作用而被乾燥，並藉助乾燥器的傾斜度從較高一側向較低一側移動，從設在端部的排料斗排出或用自然通風方法除去。蒸汽管間接加熱旋轉窯乾燥器具有常規間接加熱旋轉窯乾燥器的所有優點，它的單位容積乾燥能力是常規直接加熱式旋轉窯乾燥器的 3 倍左右，熱傳係數約為  $40\sim 120\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ ，熱效率高達  $80\%\sim 90\%$ ，物料的填充率為  $0.1\sim 0.2$ 。

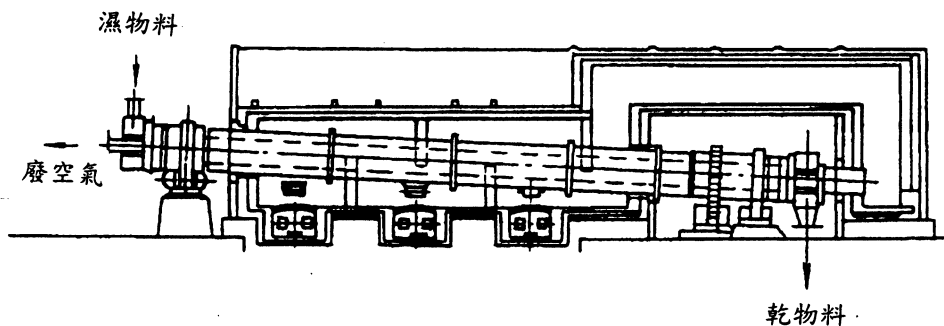


圖 3.11 常規間接加熱旋轉窯乾燥器<sup>(1) (2)</sup>

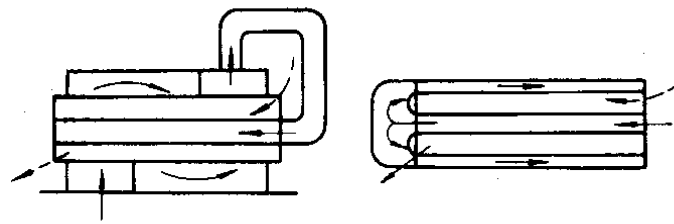


圖 3.12 熱風和物料走向示意圖<sup>(1)</sup>

### 3. 複式加熱旋轉窯乾燥器

複式加熱旋轉窯乾燥器主要由轉筒和中央內管組成，如圖 3.14 所示。熱風進入內筒，由物料出口端折入外筒後，由原料供給端排出。物料則沿看外殼壁和中央內筒的環狀空間移動。乾燥所需的熱量，一部分由熱空氣經過內筒傳熱壁面，以熱傳導的方式傳給物料；另一部分通過熱風與物料在外殼壁與中央內筒的環狀空間中逆流接觸，以對流傳熱的方式傳給物料。這種結構的優點是：熱風先通過內筒，可以把挾帶的粉塵沉降下來，同時減少了對於周圍環境的熱損失，提高了熱量的有效利用率

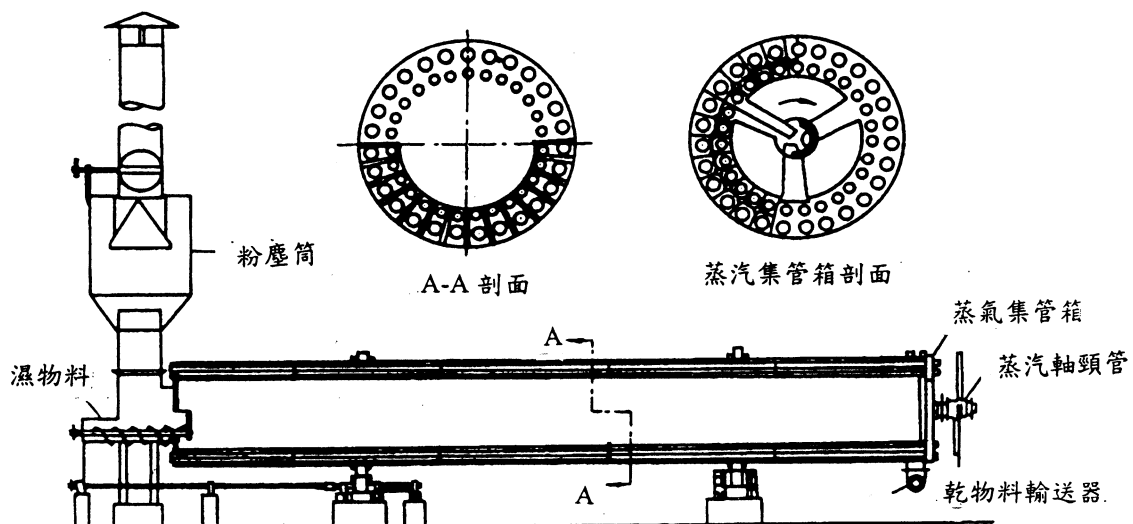


圖 3.13 蒸汽管間接加熱旋轉窯乾燥器<sup>(1)</sup>

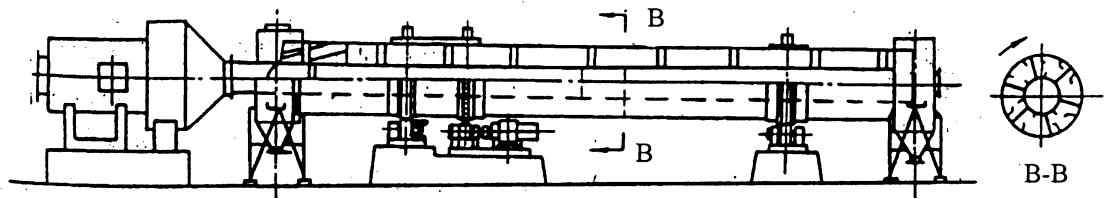


圖 3.14 複式加熱旋轉窯乾燥器<sup>(1) (2)</sup>

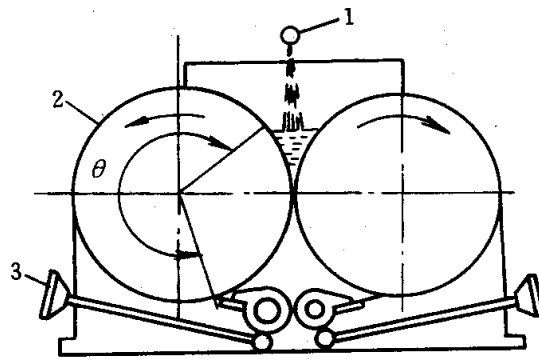
### 3.3 轉鼓乾燥器

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產量。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：被乾燥物料的性质、轉鼓乾燥器的型式、熱傳質傳機制、操作條件及其經濟性。

#### 3.3.1 轉鼓乾燥器的結構型式和特點

##### 1. 結構型式

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 3.15 所示。



1-中心進料管；2-轉鼓；3-刮刀及調節裝置

圖 3.15 雙鼓乾燥器結構示意圖<sup>(1)</sup>

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 4~6rpm 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  $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$  Pa 的蒸汽，其溫度約在 120~150°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。

## 2. 特點

### (1) 操作彈性大、適應性廣

轉鼓乾燥器的操作彈性很大。在影響轉鼓乾燥的諸多因素中改變其一，而不會使其他因素對乾燥操作產生影響。例如，影響轉鼓乾燥的幾個主要因素有加熱介質溫度、物料性質、料膜厚度、轉鼓轉速等。如改變其中任一參數都會對乾燥速率產生直接的影響，而諸因素之間卻沒有牽連。這給轉鼓乾燥的操作帶來了很大的方便，使之能適應多種物料和不同處理量的要求。

## (2) 轉鼓乾燥的熱效率高

轉鼓乾燥的熱效率約在 80%~90%之間。這是因為轉鼓乾燥的熱傳機制屬熱傳導，熱傳方向在整個操作周期中保持一致。除端蓋散熱和熱輻射損失外，其餘熱量都用在鼓外壁料膜的水分蒸發上。

## (3) 乾燥時間短

轉鼓外壁上的被乾燥物料在乾燥開始時所形成的濕料膜一般為 0.5~1.5mm，整個乾燥周期僅需 10~15 秒。濕物料脫除水分後，用刮刀卸料，所以轉鼓乾燥器適用於粘稠的漿狀物料。此類物料的乾燥用其他乾燥設備是比較困難的。至於減壓條件下操作的轉鼓乾燥器可使物料在較低溫度下實現乾燥。

## (4) 乾燥速率大

由於料膜很薄，且熱傳質傳方向一致，料膜表面可保持 30~70kgH<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·h)的汽化強度。

### 3.3.2 常用的轉鼓乾燥器

#### 1. 單鼓乾燥器

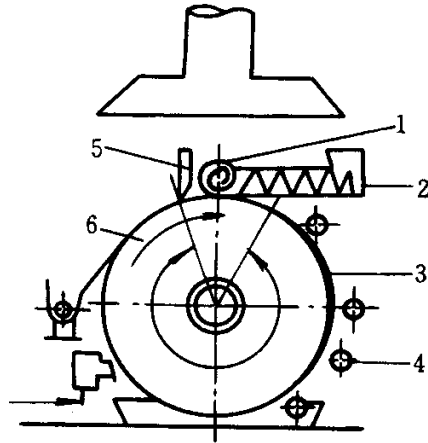
單鼓和多個壓輥的組合裝置多用於處理薄而密實的片狀乾物料。單鼓和壓輥的組合結構是防止被乾燥物料在轉鼓表面成膜不均勻而設計的，如圖 3.16 所示。同時，壓輥的應用還可使料層和轉鼓的外壁接觸良好，降低熱傳熱阻，提高乾燥效率。液態物料的進料方式分為輔輥式、飛濺式和浸沒式。料膜厚度為 0.5~1.5mm。轉鼓的直徑為 0.6~4.8m。

#### 2. 雙鼓乾燥器

近幾十年以來，由於人們增強了對乾燥過程中乾燥時間和物料溫度關係的了解，利用雙鼓乾燥器除去泥狀物料中的濕分獲得了廣泛應用。雙鼓乾燥器大多為飛濺式和浸液式進料，如圖 3.17

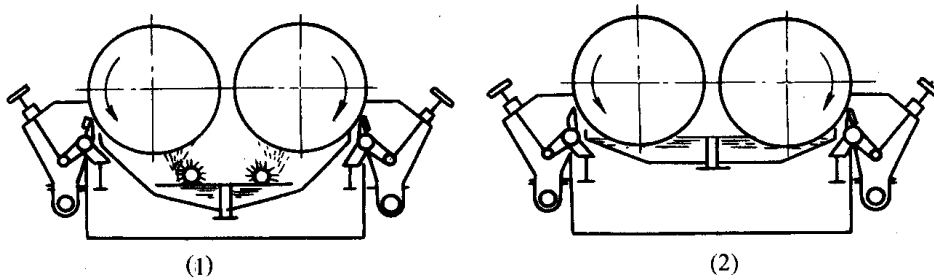


所示。物料可以從上、下不同方向進入乾燥器，但浸液式進料無論是從上下哪個方向進入乾燥器，均以鼓間隙控制料膜厚度。



1-輔輓；2-進料器；3-料膜；4-壓輓；5-刮刀；6-轉鼓

圖 3.16 帶壓輓的單鼓乾燥器<sup>(1)</sup>



(1)飛濺進料；(2)浸液進料

圖 3.17 雙鼓乾燥器<sup>(1) (2)</sup>

### 3. 對鼓乾燥器

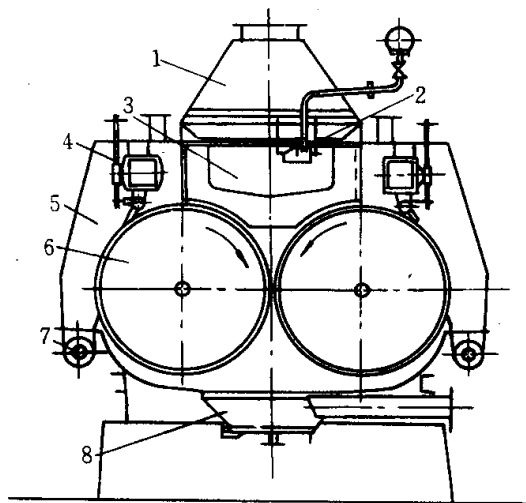
對鼓乾燥器除轉鼓旋轉方向與雙鼓乾燥器相反外，其餘結構型式完全相同。對鼓乾燥器有中心進料、飛濺進料、浸液進料和滾筒進料 4 種進料方式。卸料由安裝在頂部的刮刀完成。由於對鼓乾燥器的兩個鼓是相對向外旋轉，更適用於在乾燥過程中溶液濃縮時產生結晶或形成漿狀物料。雙鼓乾燥器在進行此類物料乾燥時，由於結晶物的存在，有可能在雙鼓間隙最小處使雙鼓產生

附加的機械壓力，即產生所謂不適當濃縮點和對乾燥設備操作的不良影響。

對鼓乾燥器亦可與另一連續乾燥設備(通常是旋轉窯乾燥器)組合為複合乾燥裝置。先用對鼓乾燥器去除大部分濕分，在尚未達到預期的最終濕含量時，將物料轉移到旋轉窯乾燥器中繼續乾燥，以達到乾燥物料的預期要求。這種複合乾燥裝置頗具經濟效益，它避免了單獨使用其中一種乾燥設備的缺點。

#### 4. 帶密閉罩的對鼓乾燥器

轉鼓乾燥器(drum dryer)配置密閉罩的主要作用有三方面：(1)實現轉鼓乾燥的真空操作；(2)防塵或回收乾燥過程所蒸發出的有毒或價值高的溶劑；(3)隔絕空氣，防止易燃物料與空氣接觸，造成火災事故。圖 3.18 所示為帶密閉罩的對鼓乾燥器。



1-罩子；2-原料加入裝置；3-加料器；

4-刮刀機械；5-側罩；6-轉鼓；7-成品輸送器；8-底罩

圖 3.18 帶密閉罩的對鼓乾燥器<sup>(1)(2)</sup>

顯然，轉鼓乾燥設備附加密閉罩以產生負壓會增加設備費。因此，這類設備只是在乾燥物料的成本允許時才使用。對一些特

殊廢棄物的乾燥，如從廢棄物中回收貴重溶劑等，也都採用此項技術。在回收高沸點組分時，如乙二醇，為了降低沸點，在真空下操作更為有利。

對於粉塵多的乾燥操作場合，增設密閉罩可防止空氣污染和提高收率。為了使被乾燥物料中溶劑殘留量降到最小，或消除可能在刮刀上積存的被乾燥物料，也可將轉鼓乾燥器部分密封。當然，部分密封會使設備結構複雜。這時轉鼓乾燥器的部分或大部分裸露在密封罩外。

### 5. 多鼓乾燥器

多鼓乾燥器(multiple-drum dryer)主要應用於帶狀物料的乾燥。多鼓乾燥器除物料種類、轉鼓轉速以及為保證被乾燥物料的變形限度有特殊要求外，在結構和原理上與單鼓、雙鼓乾燥器無根本區別。因此，在多鼓乾燥器的設計中應特別注意轉鼓運動時對加熱介質的阻力和轉鼓表面的光潔度等內容。

### 3.3.3 轉鼓乾燥器的設計和選用

轉鼓乾燥器的設計和選用主要決定於所處理物料性質、濕含量等因素。其基本原則為：

1. 成膜不均勻的物料宜選用帶壓輥的單鼓乾燥器，因為壓輥有助於物料在轉鼓外壁上均勻布膜。
2. 需精確控制溫度的物料宜選用雙鼓乾燥器。
3. 乾燥過程中粉塵大、汽化的溶劑需回收的或與空氣接觸易燃易爆的物料，宜選用帶密閉罩轉鼓乾燥器。
4. 乾燥過程中易產生結晶的物料，宜選用對鼓乾燥器，以免結晶粒度大於鼓間隙產生附加壓力。
5. 帶狀物料宜採用多鼓乾燥器。

在確定轉鼓形式後，轉鼓乾燥器設計的主要內容是確定轉鼓面積和長度。

## 3.4 帶式乾燥器

### 3.4.1 概述

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部檢修，維修方便。缺點是佔地面積大，操作時噪音較大。

### 3.4.2 帶式乾燥器的結構和操作原理

#### 1. 單級帶式乾燥器

圖 3.19 所示為典型的單級帶乾機(single-conveyer dryer)結構透視簡圖。圖 3.20 所示為其操作原理圖。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。

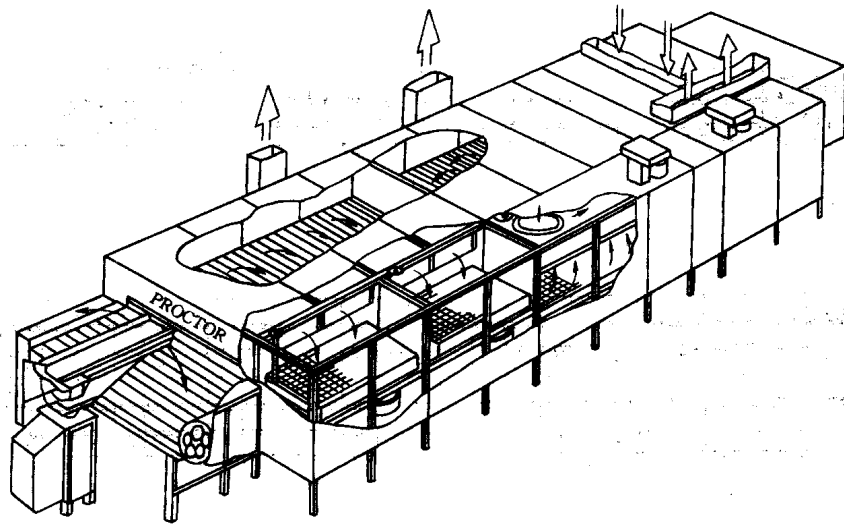


圖 3.19 單級帶式乾燥器結構透視簡圖<sup>(1)</sup>

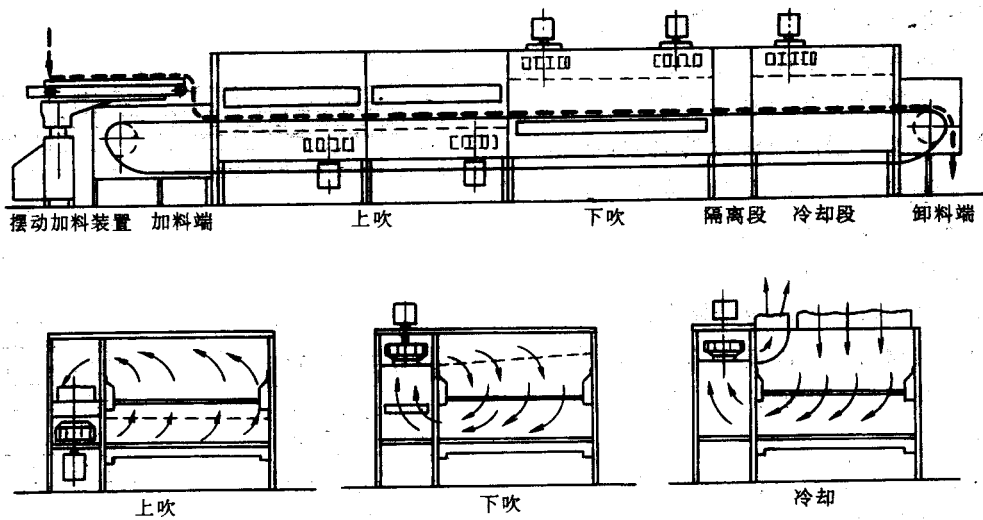


圖 3.20 單級帶式乾燥器操作原理圖<sup>(1)</sup>

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)。

## 2. 多級帶式乾燥器

多級帶乾機(multistage-conveyer dryer)實質上是由數台(多至4台)單級帶乾機串聯組成，其操作原理與單級帶乾機相同。

多級帶乾機流程簡圖如圖 3.21 所示。對某些物料，由於在乾燥初期收縮性很大，且“濕強度”差，在輸送帶上堆積較厚將導致壓實而影響乾燥介質穿流。此時可採用多級帶乾機。採用多級帶乾機後，在前後兩台帶乾機的卸料和進料過程中，物料將被鬆動，空隙度增加，阻力減小，物料比表面積增大。這時通過物料層的乾燥介質流量和總熱傳係數將增大，使乾燥機組的總處理能力提高。

某些粘性物料，在原料層乾燥時將形成塊結料。為了減少結塊，可在第一級內呈薄料層進行預乾燥，當除去相當數量的表面水分後轉入下一級進一步乾燥。

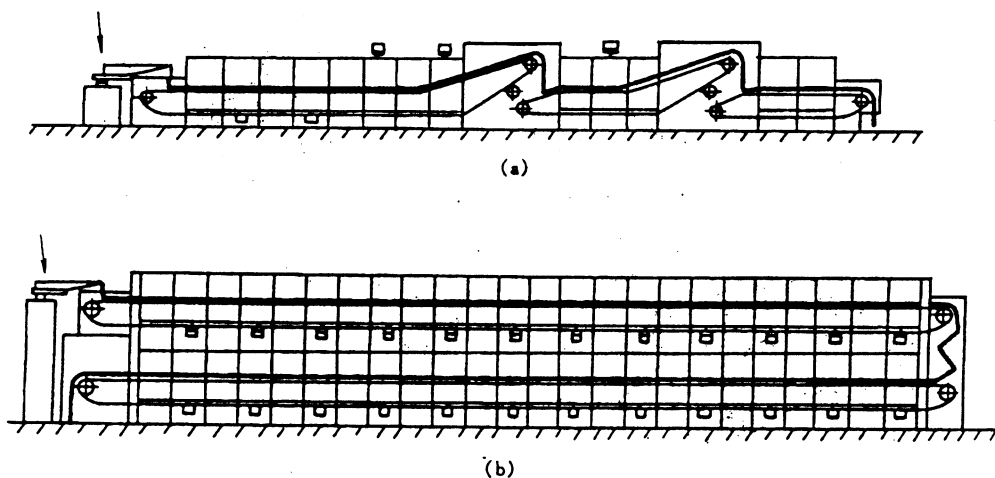


圖 3.21 多級帶式乾燥器流程簡圖<sup>(1)</sup>

### 3. 多層帶式乾燥器

多層帶乾機(multiple-conveyer dryer)的結構和操作原理如圖 3.22 所示。多層帶乾機常用於乾燥速度要求較低、乾燥時間較長，在整個乾燥過程中操作條件(如乾燥介質流速、溫度及濕度等)能保持恆定的場合。乾燥室是一個不隔成獨立控制單元段的加熱箱體。層數可達 15 層，最常用 3 至 5 層。最後一層或幾層的輸送帶操作速度較低，使料層加厚，這樣可使大部分乾燥介質流經開始的幾層較薄的物料層，以提高總乾燥效率。層間設置隔板以組織乾燥介質的定向流動，使物料乾燥均勻。多層帶乾機佔地少，結構簡單。但由於操作中要多次裝料和卸料，因此不適用於乾燥易粘著輸送帶及不允許碎裂的物料。

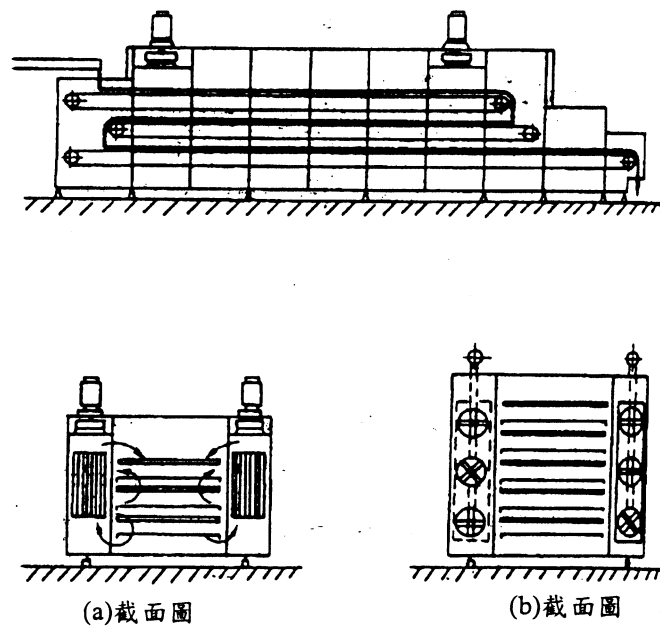


圖 3.22 多層帶乾機的結構和操作原理<sup>(1)</sup>

### 4. 沖擊式帶式乾燥器

圖 3.23 所示為沖擊式帶乾機(impingement conveyer dryer)結構和操作原理圖。沖擊式帶乾機通常由兩條輸送帶組成。上部帶由不穿孔的薄鋼板製造，乾燥介質經聯箱由噴嘴向下噴向乾燥物

料表面及料層內部，由於噴流速度很大(5~20m/s)，邊界層極薄，熱傳和質傳總係數大大高於水平氣流接觸時的情況，因而乾燥速度較高。沖擊式帶乾機的下部輸送帶由網目板組成，乾燥介質穿流經物料進行最終的乾燥。沖擊式帶乾機可分隔成單元段進行獨立控制。乾燥介質增濕後，部分排出，另部分返回摻入新鮮乾燥介質後再行循環。

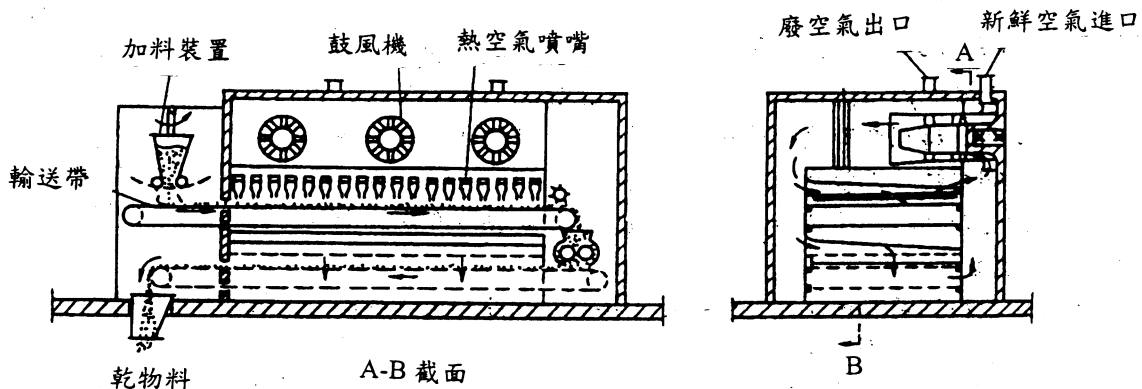


圖 3.23 沖擊式帶式乾燥器結構和操作原理圖<sup>(1)</sup>

### 3.4.3 帶式乾燥器設計要求

#### 1. 輸送帶

通常輸送帶由不銹鋼薄板(厚度 1mm)製成，板上沖有長條孔(如 1.5mmx6mm)，開孔率 6%~45%，輸送帶也常用不銹鋼絲網製造。絲網可在 500~700℃ 下長期工作。輸送帶的開孔率根據乾燥物料顆粒尺寸，是否易於粘著等因素確定。料層厚度通常是數十到數百毫米，由於物性不同也有幾毫米到一米以上的，負荷一般不超過 600kg/m<sup>2</sup>；乾燥介質穿流流速(按空床計算)為 0.25~2.5m/s，通常取 1.25~1.5m/s；通過輸送帶和物料層的總阻力不超過 250-500Pa，以避免單元段間的泄漏；輸送帶寬度為 1.0~4.5m，長度相對為 3~60m。

圖 3.24 所示為常用的穿孔銅板(網目板)輸送帶節點結構



圖。輸送帶是裝配式的，節距為 200mm 的組裝件用絞鏈連接，在每一聯接點上裝有垂直的加強筋以減小帶上因受負荷引起絞鏈處的彎曲。組裝件兩端由特殊設計的滾柱式鏈條上的組件所支撐。支撐組件外部裝有隨輸送帶一起操作的保護罩。保護罩之間部分互相搭蓋，防止物料在輸送帶上，特別在卸料鏈輪周圍處的側邊漏料。在整個輸送帶兩側裝有彈性耐磨的金屬密封罩。一邊固定在乾燥器的箱體上，另一邊搭蓋在滾柱式鏈條的保護罩上，以防止漏料和漏風。輸送帶進料和卸料端亦有設計精良的密封設施，減少在此處的漏風。

輸送帶卸料端通常裝有撥料裝置輔助卸料，有時還裝有破碎機，物料經粉碎後送至下一單元。在輸送帶迴轉部位裝有網孔清掃機，以清除粘附在網孔上的物料。

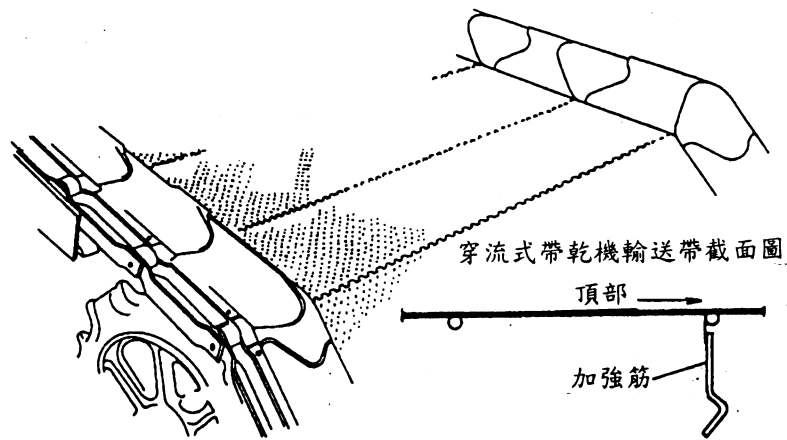


圖 3.24 輸送帶節點結構<sup>(1)</sup>

## 2. 加料裝置

輸送帶上料層若厚薄不均，將引起乾燥介質短路，使薄料層過度乾燥，而厚料層乾燥不足，影響物料品質。因此加料裝置的設計是相當重要的。

最簡單的加料裝置是加料漏斗。漏斗下料口的寬度等於輸送

帶的有效寬度，下料口裝有閘板調節加料量。與此相似的一類加料裝置是漏斗下裝有一端可來回擺動的溜槽或小輸送帶，物料由漏斗經此均佈到乾燥器輸送帶上。此類加料裝置適用於顆粒狀、塊狀等有流動性的固體料。

另一類最常用的是滾筒擠壓式加料裝置。加料裝置是一對在一個弧形穿孔板上能來回擺動和升降的包覆橡膠的金屬滾筒，貯料斗則固定在滾筒之間並隨之擺動。貯料斗內常裝有攪拌器，在貯料斗的長度範圍內攪勻物料。

此類加料裝置適用於膏狀物料。膏狀物料經貯料斗流入滾筒之間，隨之被擠壓成表面積很大的直徑為 3~8mm 的條形料，均勻佈落到輸送帶上。對於濕糊狀料和觸變性料，應先經預熱乾燥或真空轉鼓過濾脫水呈膏狀物後，再採用擠壓加料。

### 3. 循環鼓風機和尾氣排風機

根據循環風量和系統阻力選擇循環鼓風機。通常，選用後彎葉片輪型中壓或較高壓離心式鼓風機。這種類型鼓風機的優點是效率較高和操作時噪音較小。當要求風量大，風壓較小時，可選用軸流式鼓風機。尾氣排風機也採用後彎葉片輪型離心式風機。

通常每 2.5~4m<sup>2</sup> 輸送帶面積設置一台循環鼓風機。尾氣排風機只設置一台，負責排送乾燥器的全部尾氣。

### 4. 乾燥介質加熱裝置

乾燥介質溫度在 150°C 左右的，常採用翅片蒸汽加熱器。翅片間距為 5~8mm，熱傳性能良好，阻力不大。但長期操作後，需清洗翅片間結垢。翅片加熱器和循環鼓風機安裝在乾燥器箱體內。翅片蒸汽加熱器的管程通入飽和蒸汽，蒸汽冷凝熱傳係數很大 (7,000~12,000W/(m<sup>2</sup>·K))，因此總熱傳係數主要由管外空氣側控制。可利用由經驗數據繪製的圖表，根據翅片管幾何尺寸、空氣平均溫度、翅片管當量直徑和空氣流經管束最小截面處的質量

流速求取總熱傳係數。缺乏數據時通常取  $50\sim 150\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

乾燥介質溫度在  $250^\circ\text{C}$  左右的，可採用安裝在乾燥器箱體內的熱油加熱裝置。熱油與蒸汽比較，溫度高，但壓力低，對流熱傳係數小，需要較大傳熱面積的熱交換器。

此外，有用燃氣及燃油直接加熱乾燥介質，操作溫度更高。但應注意加熱介質接觸物料會引起污染。

為了節約能量，乾燥機排出的尾氣在其露點(dew point)溫度以上，可經外部換熱器與新鮮乾燥介質進行熱交換，乾燥介質經預熱後再進入乾燥機。其典型流程如圖 3.25 所示。

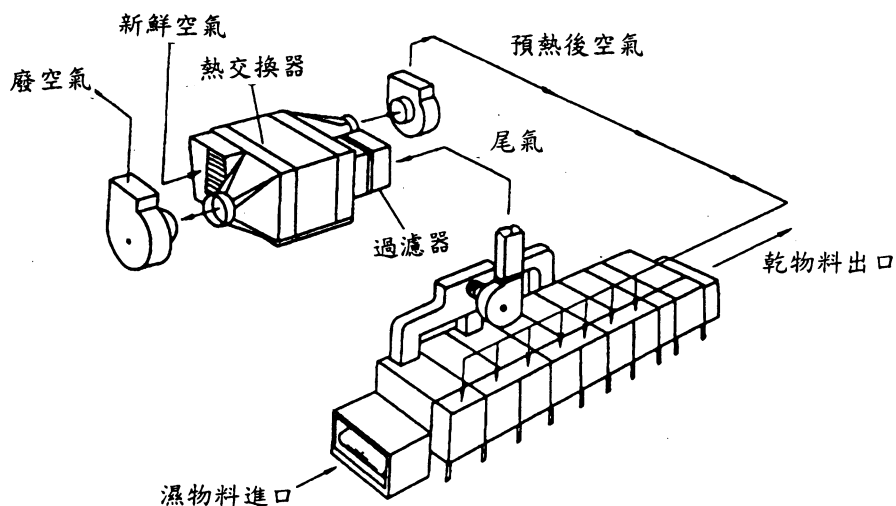


圖 3.25 尾氣餘熱回收系統<sup>(1)</sup>

## 5. 操作過程的調節控制

帶式乾燥器操作的優劣，主要取決於乾燥介質的分布和調節控制系統的設置。工程設計中通常有以下控制點。

- (1) 乾燥介質(空氣)經箱體側的百葉窗式進風口，與部分尾氣混合後通過加熱裝置被加熱後，穿過網帶與物料接觸。穿經網帶前的乾燥介質溫度由蒸汽流量控制。
- (2) 根據乾燥介質穿過物料層的阻力降控制網帶操作速度，以便在投料量變動(一般應盡量固定)時，阻力降能保持恆定。

(3)由尾氣濕度或其濕球溫度調節尾氣排出量。

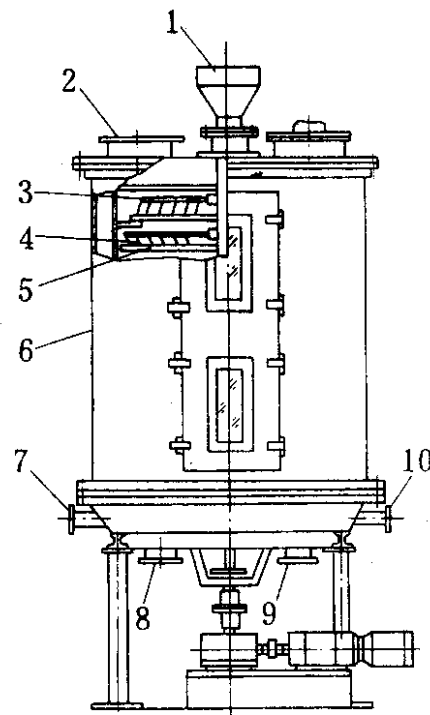
(4)當設備或操作發生事故時，事故停車系統確保從擠壓成型裝置—輸送帶—循環鼓風機到尾氣排風機的順序停車。

### 3.5 盤式連續乾燥器

#### 3.5.1 盤式連續乾燥器的結構與特點

##### 1. 盤式連續乾燥器的結構

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 3.26 所示。



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

圖 3.26 盤式連續乾燥器結構<sup>(1)</sup>

空心加熱盤是該乾燥器的主要組件，其內部通以飽和蒸汽、熱水或熱煤油，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。

每層加熱盤上均裝有十字耙臂(shovel arm)，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(shovel blade)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。

## 2. 盤式連續乾燥器的特點和適用範圍

盤式連續乾燥器(disc continuous dryer)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、佔地面積小。

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)就物料的性狀而言，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)就物料的熱性能而言，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。

### 3.5.2 盤式連續乾燥器的工作原理

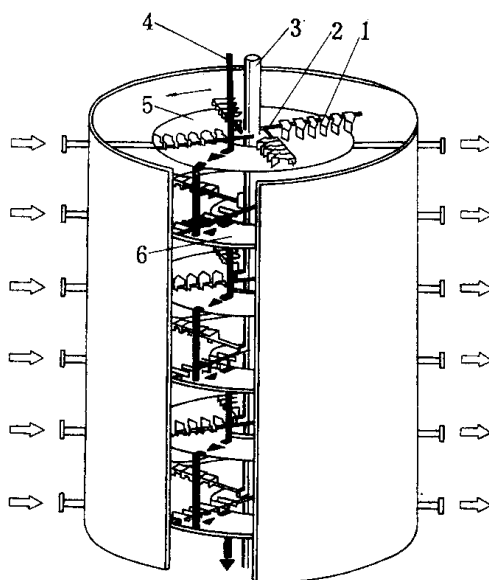
盤式連續乾燥器(disc continuous dryer)工作原理圖如圖 3.27 所示。乾燥器最上面一層是小加熱盤，第二層是大加熱盤，後小盤大盤依次交替排列。盤數視加熱面多少而定。小加熱盤的直徑比大加熱盤直徑小 200mm。小加熱盤內緣有一圍堰使物料不能從盤的內緣向下跌落、大加熱盤則在盤的外緣有一圍堰，使物料不能從盤外緣向下跌落。操作時位於乾燥器中心的主軸在馬達帶動下，連同固定在主軸上的耙臂、耙葉一起轉動。被乾燥物料自乾燥器頂部加料口進入乾燥器最上層小加熱盤內緣處的盤面上，在迴轉的耙葉作用下，一邊翻動攪拌，一邊從加熱盤內緣向外緣呈螺旋線形移動。物料在盤面上形成若干個截面呈鋸齒形的料環。

被乾燥物料由加熱介質經盤面傳導的熱量加熱升溫後，由小加熱盤外緣跌落到下一層大加熱盤外緣盤面上。在反向安裝的耙葉推動下，物料由盤外緣向內緣呈螺旋線狀移動，並從內緣跌落到下一層小加熱盤內緣盤面上。如此內外交替，物料逐層自上而下移動，被加熱乾燥。最後在最下一層加熱盤上被耙葉刮到底部卸料口處連續排出，成為合格的乾燥物料。汽化的濕分由乾燥器頂部出口自然排出或由抽風機引出。

### 3.5.3 加熱盤的結構

加熱盤是盤式連續乾燥器的重要組件，其作用是盤內通以加熱介質，為被乾燥物料提供熱源。其結構較複雜，加工費用較高，加熱盤的成本佔盤式連續乾燥器總成本的 70%~80%。因此，對加熱盤的結構和設計應予重視。加熱盤的結構主要有以下幾種形式。

#### 1. 支撐柱式加熱盤



1-耙葉；2-耙臂；3-主軸；4-物料；5-小加熱盤；6-大加熱盤

圖 3.27 盤式連續乾燥器工作原理圖<sup>(1)</sup>

支撐柱式加熱盤上下板之間均勻分布著許多支撐圓柱，如圖 3.28 所示。其中(a)是支撐圓柱分布示意圖；(b)是支撐柱與加熱盤上下板連接結構圖。支撐圓柱一般由圓鋼經加工製成，上端有一高約 3mm 的小凸台。該凸台裝在加熱盤上板的小盲孔中，它在安裝加工下板時達到定位作用。在安裝焊接下板時，支撐圓柱能順利穿過下板的圓孔。由圖 3.28(b)可知，支撐圓柱的上端和下端分別與加熱盤的上下板焊接在一起。雖然支撐圓柱的主要作用是提高加熱盤上下板的剛度和強度，同時增加了盤內加熱介質的擾動性，提高傳熱效果。

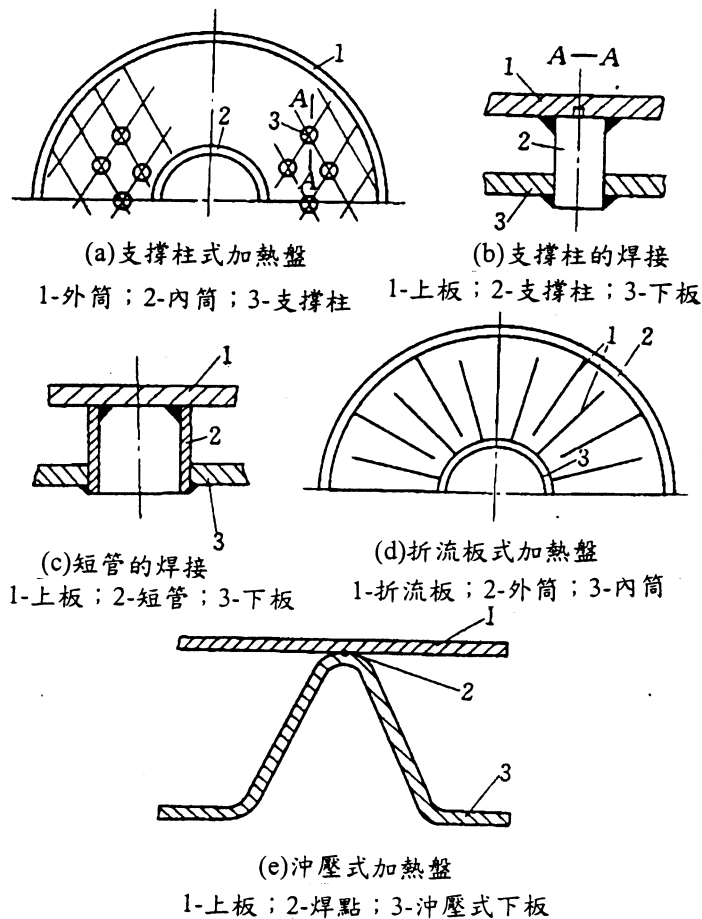


圖 3.28 加熱盤結構<sup>(1)</sup>



這種結構的加熱盤安全耐用，但製造加工較困難、材料消耗多、成本高。然而，由於加工製造不需專門設備，使用中無需特別維護，在小批處理中仍被採用。

支撐圓柱加熱盤的改進型是用一短管代替支撐圓柱，這樣不僅降低了材料消耗，而且使加工製造大為簡化。可以省去加熱盤上板定位盲孔的加工、支撐圓柱的加工。只要按要求在下板上鉗孔，將上、下板組裝，短管穿過下板上的圓孔與上、下板通過焊接在一起即可。缺點是加熱盤加熱面積的損失(減小)比支撐圓柱式大。如圖 3.28(c)所示。

## 2. 折流板式加熱盤

對於採用熱水、熱油等無相變介質為載體(carrier)的乾燥過程，採用折流板(commutator plate)式加熱盤是比較合適的。這種加熱盤上下板之間均佈著許多輻射狀的折流板，如圖 3.28(d)所示。折流板不僅達到增加加熱盤上下板剛度和強度的作用，而且對熱介質還有導流作用。在折流板作用下，加熱介質沿折流板形成的通道流動，使流道加長，提高了加熱介質的利用率和乾燥器熱效率。這種加熱盤的缺點是加工製造麻煩、成本較高，只適用於小批處理。

## 3. 沖壓式加熱盤

沖壓式加熱盤是一種較新的形式，其有節省材料、加工方便、成本低等優點。由於這種加熱盤的製造需專門的沖壓設備和模具，設備投資較大，適用於較大批量處理的場合。這種加熱盤的下板加工時，按需要沖出若干凸起，然後上下板疊在一起，下板各凸起分別與上板壓焊固定，如圖 3.28(e)所示。加熱盤的下板凸起可以按一定規律(如正三角形等)分布的凹點式、呈輻射狀分布的凹槽式，或根據特殊要求沖壓成其他形式。下板與上板壓焊在一起的各凸起部分，同樣具有增加板的剛度和強度，增加熱

介質擾動以提高熱效率的作用。

加熱盤材料的選擇，要綜合被乾燥物料的腐蝕性、濕分的腐蝕性、熱介質的腐蝕性，以及乾燥物料潔淨度要求、乾燥器的成本、壽命等多方面因素，合理確定。

### 3.5.4 耙葉的結構

盤式連續乾燥器(disc continuous dryer)中，耙葉(shovel blade)是重要組件。耙葉的結構型式、尺寸和安裝排列方式，直接影響著乾燥器的熱傳質傳性能。應當根據物料的不同，選擇合適的耙葉結構，並進行正確的安裝。

耙葉的型式主要有以下幾種，如圖 3.29 所示。

- 1.圖 3.29(a)是出現最早，結構最簡單的一種。耙葉上有兩個開有圓孔的耙耳，耙耳穿在耙臂上與耙臂相接。在耙臂運動的前進方向上，刮板後表面與加熱盤盤面的夾角應在 60~90 度之間。
- 2.圖 3.29(b)的耙耳上開有橢圓孔，刮板的上部去掉一角，安裝時缺角的一側位於小加熱盤的內側(或大加熱盤的外側)。由於耙葉重心偏於平肩的一方，耙葉重力產生一個力矩。運轉中耙葉不易發生傾斜。這種耙葉適用於內摩擦力較大的物料。
- 3.圖 3.29(c)所示的耙葉，其耙耳與刮板之間用鉚釘鬆動連接。與上述兩種耙葉相比，除有耙葉繞耙臂轉動的自由度外，多了一個刮板繞耙耳轉動的自由度。因此，運轉中刮板與加熱盤盤面貼合的更好。

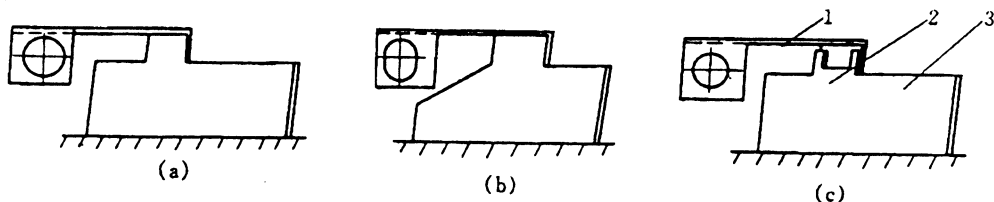
上述三種耙葉有一個共同的缺點，即刮板與耙耳之間是剛性固定連接，耙葉的安裝角度(刮板與耙臂之間的夾角)不可調，限制了它們的使用範圍。因此，出現了一種改進型的耙葉，如圖 3.30 所示。

- 4.安裝角度可調的耙葉。由圖 3.30 可看到，這種耙葉的刮板和耙耳分別為兩個獨立的組件，兩者用螺釘螺母連接。這種連接結

構使耙葉又多了一個自由度。使用時可根據物料性質的不同，鬆開螺母將耙葉刮板調至需要的安裝角度後再固定，這樣就擴大了耙葉的使用範圍。

圖 3.30(a)中，耙葉刮板為平面，適用於一般物料。較圖 3.30 (b)和圖 3.30 (c)中耙葉的刮板為曲面，提高了耙葉的翻炒功能，使冷、熱、乾、濕物料混合充分，乾燥速率提高。其中，圖 3.30 (b)刮板為圓柱形曲面、結構簡單、加工方便，適用於內摩擦力較小的物料。圖 3.30 (c)刮板為螺旋形曲面，物料在刮板上以螺旋軌跡運動，適用於內摩擦力較大的物料。

設計和製造耙葉時，要保證耙葉刮板的刃部有較高的直線度；加熱盤盤面有較高的平面度；同時安裝耙臂時，要求耙臂與加熱盤盤面有較高的平行度。這是為了保證耙葉刮板與加熱盤面能很好地貼合，否則耙葉刮板與加熱盤面會有較大縫隙，乾燥過程中盤面上將有一層相對靜止的物料，使乾燥效率下降，甚至使被乾燥物料過熱而影響物料品質。



1-耙耳；2-鉚釘；3-耙葉刮板

圖 3.29 耙葉的結構型式<sup>(1)</sup>

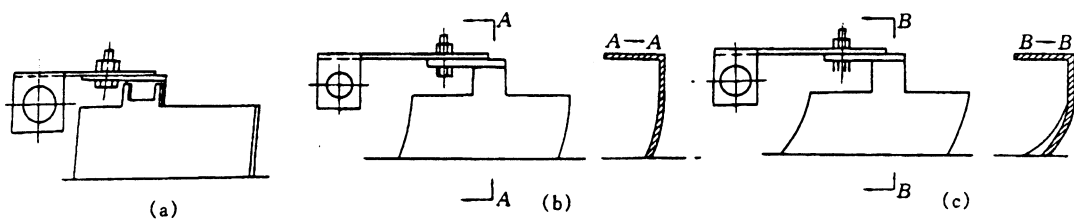


圖 3.30 安裝角度可調的耙葉<sup>(1)</sup>

## 3.6 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。有的在傳統乾燥器中再設置攪拌槳，如在流體化床乾燥器內再設置可通入熱介質的空心軸和空心槳葉，以增加乾燥器內傳熱面，減少流體化氣體用量，提高熱量利用率。但是，在工業上使用得比較成功的槳葉式乾燥器種類還是有限。

### 3.6.1 楔形槳葉式乾燥器

在眾多的槳葉式乾燥器中，應用最廣的是楔形槳葉式乾燥器。楔形槳葉式乾燥器的特點是作為攪拌用的槳葉結構較特殊，空心的扇形槳葉一端寬，另一端呈尖角，其投影像楔子。槳葉的兩側面均有一定傾斜度的斜面，這種斜面隨軸轉動時，既可使固體物料對斜面有撞擊作用，又可使斜面上物料易於自動清除，不斷更新傳熱表面，強化熱傳。因此，它是一種高效的乾燥設備。

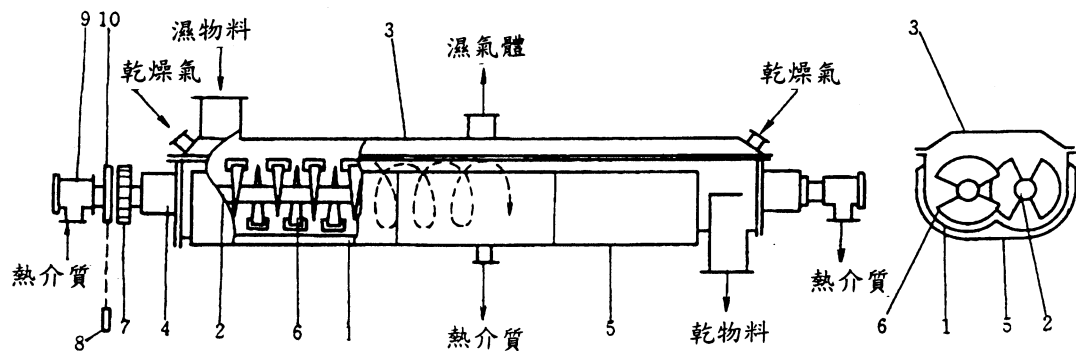
此設備乾燥物料所需熱量不是依靠介質(如熱氣體)直接與物料接觸進行加熱，而是向空心槳葉和夾套輸入熱介質，通過壁面熱傳導對乾燥過程提供熱量，它減少了用氣體加熱時被出口氣體

帶走的熱損失，提高了設備的熱量利用率。因此它屬於節能型乾燥設備。

### 1. 楔形槳葉式乾燥器結構

這種乾燥設備有 W 型和 T 型兩種。根據物性和乾燥工程，具體應用時，結構上有一些差異。其基本結構由帶夾套的槽形殼體、上蓋、空心熱軸和焊接在空心軸上的許多對楔形槳葉，以及與熱介質相連的旋轉接頭和傳動裝置等。W 型有兩根空心軸，槽形殼體形狀呈 W 型。T 型由 4 根空心軸組成，它有兩套傳動裝置，安置在乾燥器左右兩側，各拖動兩根空心軸，所以它實際上是兩台 W 型乾燥設備組合在一起。這裡只介紹 W 型楔形槳葉式乾燥器。

W 型楔形槳葉式乾燥器基本結構如圖 3.31 所示。



1-W 型槽體；2-空心熱軸；3-上蓋；4-軸承及填料箱；

5-夾套；6-楔形槳葉；7-齒輪；8-減速裝置；9-旋轉接頭；10-鏈輪

圖 3.31 W 型楔形槳葉式乾燥器基本結構<sup>(1) (2)</sup>

#### (1) 帶夾套的 W 型殼體

其殼體是由設備內壁和外夾套組成，如圖 3.31 所示。為了防止乾燥物料在攪拌時有死角，內壁底部用兩圓弧組成，呈 W 形。這類乾燥設備長度均在 2m 以上。為了提高傳熱效

果，設備夾套可根據長度分割成幾個室。

為了減少殼體厚度和增加夾套內熱流體的湍流程度以增加熱傳速率，夾套外形設計成蜂窩狀。即在夾套壁面上有規律地沖出許多翻邊向裡的凹形圓孔，如圖 3.32 所示。翻邊與內壁焊接，增加強度。若圓孔太小，不易翻邊，也可用短管將夾套與內壁殼體焊接連在一起。對於較大的乾燥設備，除了軸向可以分割成幾室，徑向也同樣可以用隔板沿圓周分割幾室，以縮短熱介質停留時間。

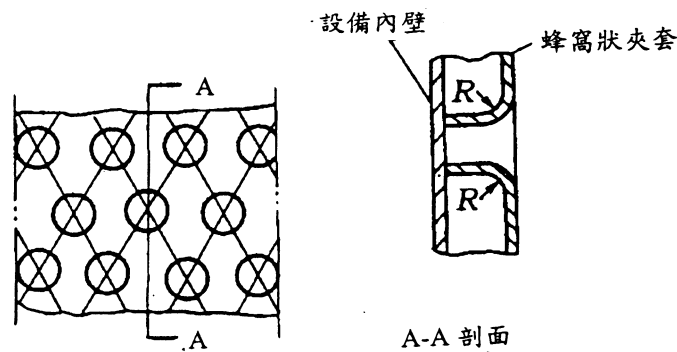


圖 3.32 蜂窩狀夾套結構<sup>(1)</sup>

## (2) 空心熱軸和空心槳葉結構

這是楔形槳葉式乾燥器的關鍵組件。W 型設備有兩根空心軸，兩軸旋轉方向相反，均向著設備中心線方向旋轉，借助於槳葉上的補助攪拌葉片，把物料從中心推向壁面，又從壁面將物料向上提升，越過空心軸，擠到設備中央。在軸兩端各連接一個旋轉接頭，熱介質從進料口的旋轉接頭輸入，而從出料口一側的旋轉接頭排出。為了保證軸的強度和剛性，通常軸設計得較粗。軸的外表面在乾燥器內也有一定的傳熱作用，在熱軸設計中，選用材料和考慮結構均應從有利於傳熱出發。通入軸內的熱介質可以用蒸汽、熱水或者熱煤油，根據乾燥溫度確定。通常儘量用蒸汽加熱，因為蒸汽是

最容易得到的熱源，冷凝潛熱大。

根據通入熱軸內的熱介質是液體或氣體，熱軸結構分為液體(L)型和氣體(G)型兩種。熱軸結構如圖 3.33 所示。G 型熱軸(如圖 3.33(b))由於蒸汽冷凝給熱係數大，空心軸壁面的傳熱由壁面熱傳導和固體物料側的顆粒運動控制，不考慮提高軸內蒸汽側的冷凝給熱係數。所以兩根空心軸內腔設計成空的，結構較簡單。為了讓軸與葉片之間的蒸汽和冷凝液流動暢通，在每個葉片內腔與軸內腔之間有兩根長短不一的短管相連。其中一根較長的管子內通蒸汽。為了防止軸內冷凝液由這根管子流向葉片或葉片內冷凝液從這根管子流向軸，會阻塞蒸汽的正常流動，這根管子一端伸入軸內，另一端伸出軸外。其伸入軸內和伸出軸外的長度分別根據軸內可能積存的冷凝液深度和葉片旋轉一周能產生的冷凝液量來設計，保證冷凝液不淹沒管口。另一根較短管的作用是及時將槳葉內的冷凝液排入軸腔，管子的一端與軸外表面齊平，葉片內一有冷凝液就能及時排掉，另一端伸入軸內一定長度是為了防止軸內冷凝液倒灌到葉片內，造成蒸汽無法進入葉片。由於這兩根管子的作用，使蒸汽和冷凝液各行其道，保證了槳葉的傳熱作用。

當用熱水或熱煤油等液體作熱介質時，空心軸應採用 L 型結構。L 型空心軸結構如圖 3.33(a)，軸內設置了中間隔板，將進入空心軸的熱流體與釋放熱量後降溫的冷流體隔離，不相混合。這樣，軸與葉片之間的流體通道變得簡單，只要在軸上開孔就行。

對於空心軸較粗的大型設備，當採用 L 型熱軸結構時，流體在軸內流速很慢。為了充分利用軸表面的傳熱作用，應提高軸內流體的速度，不能簡單地設置隔板。否則，這部分傳熱面就損失了。

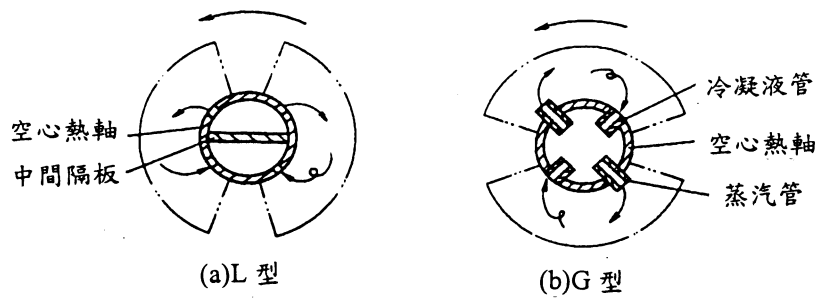


圖 3.33 熱軸結構<sup>(1) (2)</sup>

此外，根據物料性質不同，兩根平行空心熱軸安置的相對位置可以不同。處理無粘性、鬆散性物料乾燥時，兩軸中心線距離可以略大於槳葉外徑，即軸上的葉片互相脫離；對於流動性不太好的物料，兩軸中心線距離應小於槳葉外徑，使兩軸葉片相互成交錯狀。這樣，可以借助對方軸上葉片將滯留在葉片上的物料擠下來。

楔形槳葉式乾燥器的主要傳熱面是焊接在兩根空心軸上的許多對空心槳葉。具體結構如圖 3.34 所示。它是由兩片扇形斜面的側板一個三角形圓弧蓋板和三角形底部的矩形後蓋板，以及與矩形後蓋板相連接的輔助攪拌葉片等 5 塊薄板製成。其中，前四塊薄板是主要傳熱壁面。

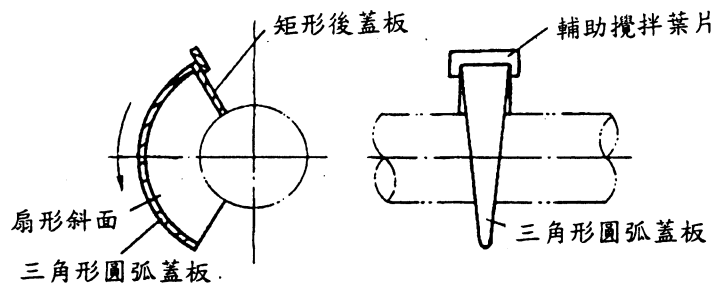


圖 3.34 楔形槳葉結構<sup>(1) (2)</sup>



為了保證傳熱效果，設計槳葉時，板材不能太厚，特別是對於槳葉直徑較大的設備，葉片上的兩塊扇形側板面積較大，採用太厚的板，將增加熱阻，降低熱傳係數，而採用太薄的板，將承受不了壓力強度。故在設計槳葉外徑為 900mm 和 1100mm 的設備時，在結構上作了一些改進，使薄板厚度不因設備增大而加厚，解決了設備放大問題。

楔形空心葉片的兩塊扇形斜板的傾斜度相同，方向相反，對稱於軸法線。葉片在乾燥器內主要起攪拌和傳熱作用，不對物料起輸送作用。

在乾燥器操作中，物料由入口向出口的移動主要是借助設備安裝時有一定傾斜角和入口到出口固體料層厚度不同的聯合作用。

### (3) 上蓋

上蓋與筒體用條形法蘭連接。在蓋上除設有排氣孔和加料口外，通常還設置人孔。有些物料容易造成槳葉面結垢，需要經常清理，上蓋要設置多個清理人孔，以便定期把槳葉面上的料清除掉。否則，因結垢而影響槳葉的傳熱。此外，在有些乾燥過程中，被旋風除塵器捕集的物料需返回乾燥器，也需要另外單獨開孔。所以上蓋結構的設計應根據處理物料和乾燥要求的不同而定。

### (4) 軸承座和填料箱

旋轉軸的密封採用方形填料，兩根旋轉軸的軸承座和填料箱均安置在設備兩端的同一個密封盒內。兩端的兩個密封盒焊在兩塊厚側板上，厚側板與殼體連成一體。這樣，兩根旋轉軸的重量全部由殼體兩端的兩塊厚側板來支承。這種軸與殼體結構的整體性好，有利於設備平穩運轉。

此外，在乾燥器的物料出口處，設有放料板和溢流堰。

放料板設在旋轉軸下面。操作時關閉，阻止物料流出，使乾燥器內積存一定料層。停車時打開，將乾燥器內積存料排淨。為此在乾燥器外設有操作桿。溢流堰設置在放料板上部，使乾燥器內積存更多的料層，增加物料在乾燥器內的停留時間。操縱桿可以安置在設備兩側或上蓋上。溢流堰高度可根據操作工程條件進行調節。

## 2. 設備特點

### (1) 設備結構緊湊，裝置佔地面積小

由設備結構可知，乾燥所需熱量主要是由密集地排列在空心軸上的許多空心槳葉壁面提供，而夾套壁面的傳熱量只佔少部分。所以單位體積設備的傳熱面大，可節省設備佔地面積，減少基礎建設投資。

### (2) 熱量利用率高

乾燥所需熱量不是靠熱氣體提供，減少了熱氣體帶走的熱損失。由於設備結構緊湊，且輔助裝置少，散熱損失也減少。熱量利用率可達 80%~90%。

### (3) 楔形槳葉具有自淨能力，可提高槳葉熱傳作用

旋轉槳葉的傾斜面和顆粒或粉末層的聯合運動所產生的分散力，使附著於加熱斜面上的物料易於自動地清除，使槳葉保持著高效的熱傳功能。另外，由於兩軸槳葉反向旋轉，交替地分段壓縮(在兩軸槳葉斜面相距最近時)和膨脹(在兩軸槳葉斜面相距最遠時)斜面上的物料，使傳熱面附近的物料被激烈攪動，提高了熱傳效果。楔形槳葉式攪拌乾燥器熱傳係數較高，為  $85\sim 350\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### (4) 氣體用量少，可相對的減少或省去部分輔助設備

由於不需用氣體來加熱，因此，極大地減少了乾燥過程中氣體用量。採用楔形槳葉式乾燥器只需少量氣體用於攜帶

蒸發出的濕分。氣體用量很少，只須滿足在乾燥操作溫度條件下，乾燥系統不凝結露水。

由於氣體用量少，乾燥器內氣體流速低，被氣體挾帶出的粉塵少，乾燥後系統的氣體粉塵回收方便，可以縮小旋風分離器尺寸，省去或縮小袋濾除塵器。氣體加熱器，鼓風機等規模都可縮小，節省設備投資。

#### (5) 物料適應性廣，物料乾燥均勻

乾燥器內設溢流堰，可根據物料性質和乾燥條件，改變溢流堰高度，調節乾燥器內物料滯留量。可使乾燥器內物料滯留量達筒體容積的 70%~80%，增加物料的停留時間，以適應難乾燥物料和高水分物料的乾燥要求。此外，還可調節加料速度、軸的轉速和熱介質溫度等，在幾分鐘與幾小時之間任意選定物料停留時間。因此對於易乾燥和不易乾燥的物料均適用。濕含量高達 75%(濕基)物料被乾燥到物料濕含量只有 0.1%，已有工業應用實例。另外，乾燥器內雖有許多攪拌槳葉，物料混合均勻，但是，物料在乾燥器內從加料口向出料口流動基本呈活塞流流動，停留時間分布窄，物料乾燥均勻。

#### (6) 適用於多種乾燥操作

前已述及楔形槳葉式乾燥器可通過多種方法來調節乾燥操作條件，而且它的操作要比流體化床乾燥、氣流乾燥的操作容易控制，所以適用於多種操作。如連續操作、多級操作、間歇操作、減壓操作等。

#### (7) 用作冷卻和加熱

當向夾套和旋轉軸內輸送冷水或冷凍鹽水之類冷卻劑時，通過壁面可向設備內物料輸送冷量，降低設備內物料溫度。上述的多級乾燥中，也可將其中一台設備作為物料乾燥後的冷卻設備，這已在工業上被採用。同樣，當不向乾燥器

內輸送氣體時，對夾套和槳葉輸送熱介質，可用作加熱器。

### 3.6.2 其他形式槳葉式乾燥器

根據攪拌槳葉形狀、設備結構和熱介質的不同，可以設計出各種形式的槳葉式乾燥器。除上述楔形槳葉式乾燥器外，已被工業上採用的主要有下列幾種：1.間接加熱圓筒型和槽型槳葉式乾燥器；2.熱風式槽型槳葉式乾燥器；3.真空槳葉式乾燥器。

#### 1.間接加熱圓筒型和槽型槳葉式乾燥器結構和特點

##### (1)結構形式

間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器有兩種結構，如圖 3.35 和圖 3.36 所示。這兩種乾燥設備的筒體均為帶夾套的圓筒形。

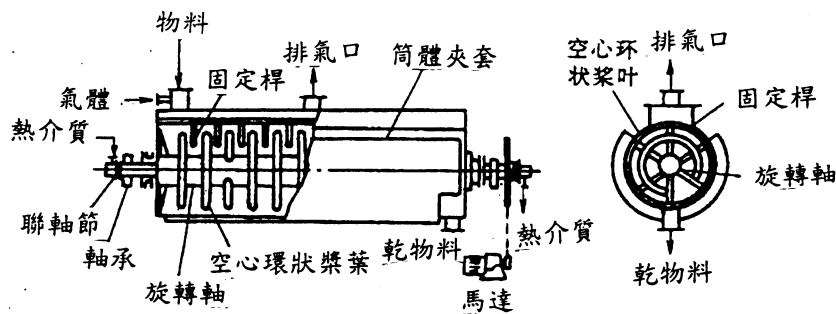


圖 3.35 間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器(低速) (1) (2)

圖 3.35 的設備中心軸上焊接了幾組用作攪拌和傳熱的圓環狀槳葉，每組空心圓環由內環和外環兩個圓環組成。空心環和中央的旋轉空心軸之間由輻射管連通，可輸入熱介質。乾燥所需熱量由夾套和圓環表面通過熱傳導傳入。在兩組圓環之間，有一根與圓筒相連的固定桿，用來清除粘附在圓環上的物料，防止粘性物料隨圓環一起旋轉。

圖 3.36 是另一種圓筒型槳葉式乾燥器。在水平安裝的帶有夾套的圓筒體內，沿設備中心設置一根旋轉軸，軸上裝有許多攪拌槳葉，軸的兩端由筒外兩側的軸承支承。加熱面為

圓筒夾套，中心旋轉軸內不通熱介質。在物料出口處可以藉改變攪拌槳葉方向和角度來調節物料在筒體內的滯留時間。圖 3.36 與圖 3.35 的區別是前者係慢速攪拌(外周速度 0.1~1.5m/s)。後者是高速攪拌(外周速度 5~15m/s)。藉高速攪拌槳葉旋轉產生的離心力，將濕物料分散到容器內表面的夾套部位，與加熱面反覆接觸而被加熱。

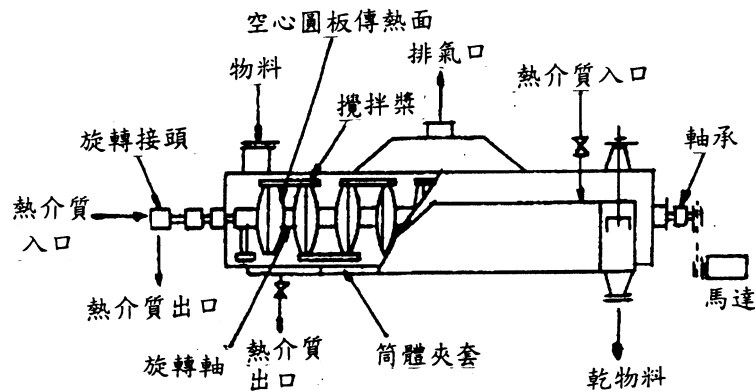


圖 3.36 間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器(高速)<sup>(1) (2)</sup>

就間接加熱槽型槳葉式乾燥器而言，前面介紹的楔形槳葉式乾燥器也是這類乾燥設備的一種。除此之外，尚有兩種不同槳葉形狀，均為空心圓板(圓盤)型槳葉式乾燥器，依靠壁面熱傳導來間接加熱，其結構如圖 3.37 和圖 3.38 所示。槽體均有加熱夾套，筒體內有一根可通熱介質的空心軸，軸上焊接有許多個空心圓板(圓盤)作為傳熱面。乾燥所需熱量均有夾套壁面和圓板壁面提供。

圖 3.37 所示，相臨兩圓板之間用一個作為槳葉的短桿相連，每個圓板上焊接兩個槳葉。一個短桿槳葉與相臨的左邊圓板相連，另一個短桿槳葉與相臨的右邊圓板相連，兩短桿槳葉互相錯開 180 度。殼體上蓋與殼體連成一體，物料從上部加入，從另一側的底部卸出。乾燥所需氣體在物料入口處

加入。在設備的上部中間有一擴大區，沒有排氣口，擴大區使排出氣體在這裡減速，減少粉塵帶出。在軸的加料口端，有三通旋轉接頭，熱介質進、出均通過這個接頭。傳動裝置設在出料口側。在出料口處，設有溢流堰控制物料滯留量。溢流堰高低可通過設備蓋外面的手輪來調節。

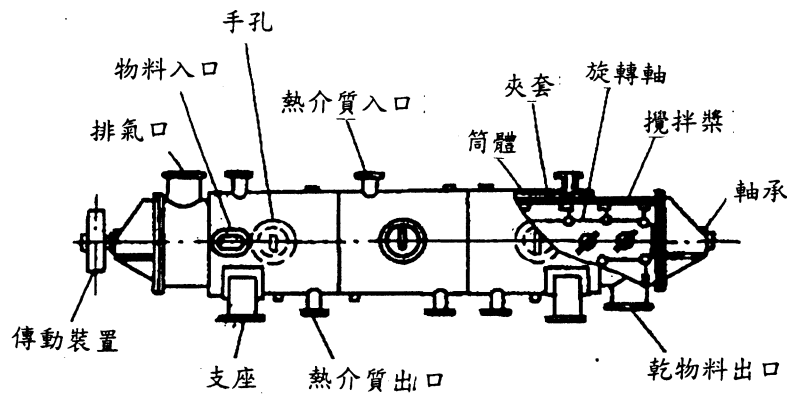


圖 3.37 間接加熱槽型槳葉式乾燥器<sup>(1) (2)</sup>

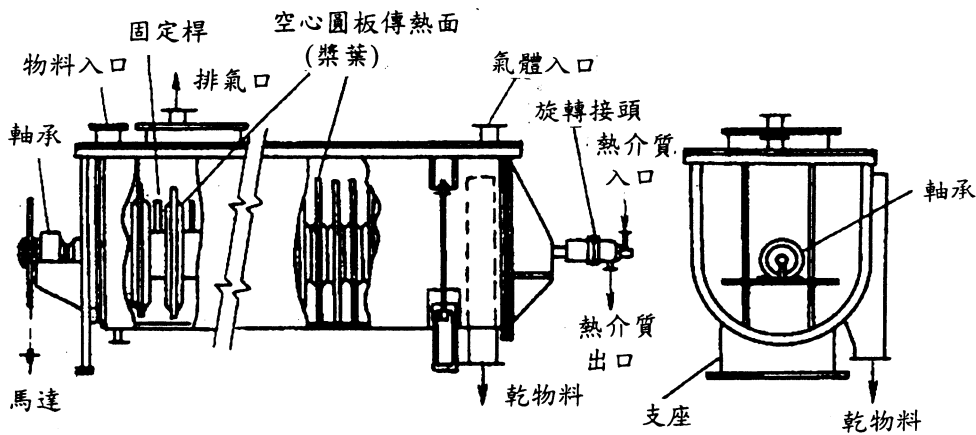


圖 3.38 間接加熱 U 形槽型槳葉式乾燥器<sup>(1) (2)</sup>

圖 3.38 所示槽型槳葉式乾燥器的筒體為 U 形。槳葉形狀為扁平空心圓板，在兩圓板之間有焊接在殼體上的固定桿，防止物料隨圓板旋轉形成圓餅，影響乾燥。熱介質進、出口

也採用三通旋轉接頭，設置在出料口一側。

## (2)特點

它們都有熱傳導設備所共有的特點。間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器和間接加熱槽型槳葉式乾燥器雖然殼體結構形狀不相同，但殼體都帶夾套，內部都設有攪拌槳葉，槳葉都可以作傳熱面。因此，設備性能也類似。另外，根據槳葉旋轉速度，它們都有高速攪拌型(外周速度 5~15m/s)和低速攪拌型(外周速度 0.1~1.5m/s)兩種。楔形槳葉式乾燥器就是低速攪拌型一種典型例子。

下面介紹高速攪拌型的特點。

A.借助於槳葉的高速攪拌，使物料以較快速度與夾套加熱面頻繁接觸。隨熱介質種類和濕物料特性，熱傳係數值約為  $120\sim 460\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，比低速攪拌型熱傳係數高。但是，高速攪拌型軸內不輸入熱介質，槳葉表面也不作傳熱面，所以高速攪拌型乾燥器單位容積的傳熱面積比低速攪拌型少得多。因此高速攪拌型設備處理能力並不比低速攪拌型設備高。

B.與低速攪拌型設備一樣，乾燥所需氣體量少，可減少除塵、加熱等輔助設備。

C.由於槳葉攪拌速度快，乾燥器內物料滯留量少，滯留時間短，通常為 1~5min，不適用於難乾燥物料。可用槳葉的方向和角度調節物料滯留量。

D.可在加壓、減壓下操作，但只適用於連續操作，不能用作間歇操作。

## 2.熱風式槽型槳葉式乾燥器

### (1)結構型式

這是一種直接加熱的乾燥設備，它與前面介紹的利用傳熱壁面間接加熱的供熱方法不同，利用熱風直接與被乾燥物

料接觸進行加熱。

結構示意圖如圖 3.39 所示。在水平安裝的筒體內的下部物料層設置兩根旋轉軸，軸由筒體外兩端的軸承支承而高速旋轉。軸上焊接許多攪拌槳葉和圓隔板，隨軸一起旋轉。在設備筒體上設置固定隔板，固定隔板上有百葉窗孔口，可通入氣體。出料口處設有溢流板。

加入的濕物料一面被高速旋轉的攪拌槳葉激烈的攪動，一面依次通過與主軸一起旋轉的圓隔板和固定隔板之間的間隙以及設在固定隔板上的百葉窗口向出口端移動。通常，熱風與物料順流操作，熱風由加料口一側引入，與物料接觸放出熱量，並通過各隔板的百葉窗排出。到達出口端的物料則受離心力作用，越過堰板而排出。

圖 3.40 是另一種熱風式槽型槳葉式乾燥器。它的結構與圖 3.39 的結構基本相似，但它的機內設置了返料螺旋輸送器，可以乾燥濕含量較高的物料。通常，當物料濕含量大時，易粘附在攪拌槳葉上或筒體內壁上。在乾燥器內設置內返料機構，將部分乾物料返回濕物料加入口，與濕物料混合後進行乾燥，防止物料在乾燥過程中粘壁。

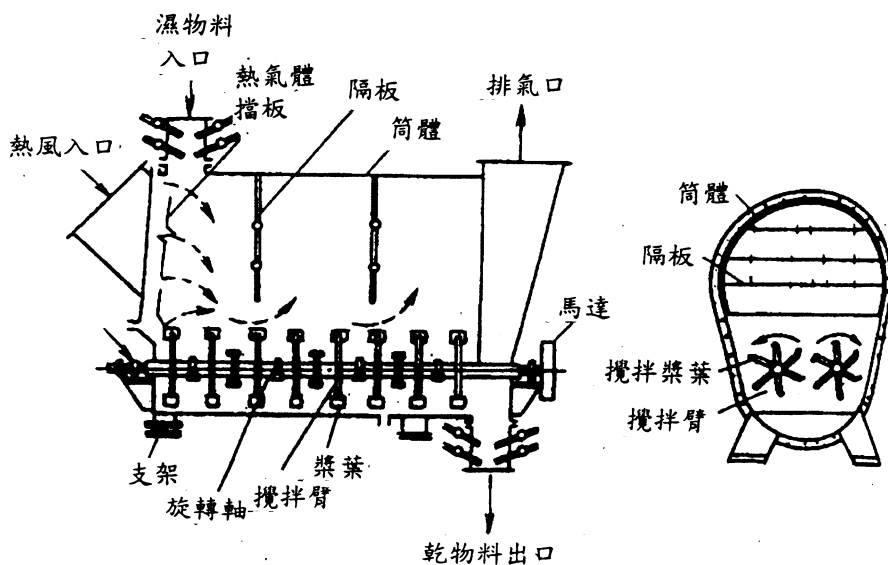


圖 3.39 熱風式槽型槳葉式乾燥器<sup>(1) (2)</sup>



## (2)特點

A.攪拌槳葉轉速高(槳葉外徑速度 5~15m/s)。濕物料與熱風直接接觸，接觸良好，因此臨界濕含量(critical moisture content)低。一般物料的臨界濕含量為 2%~3%。容積熱傳係數為 350~1200W/(m<sup>2</sup>·K)。

B.在乾燥器前半部分水分蒸發較快，設備內熱風溫度急劇下降。因此，即使用高溫熱風，物料溫度也不會升高。

C.乾燥時間短，一般為 2~10min，乾燥器內物料的滯留量少。

D.即使加入的物料呈塊狀或濕含量較高，都可藉改變操作條件得到乾燥的粉粒狀物料。

E.只適用於連續操作，不能用於間歇操作。此外，熱量利用率低，氣體用量大，輔助設備多。

## 3.真空槳葉式攪拌乾燥器

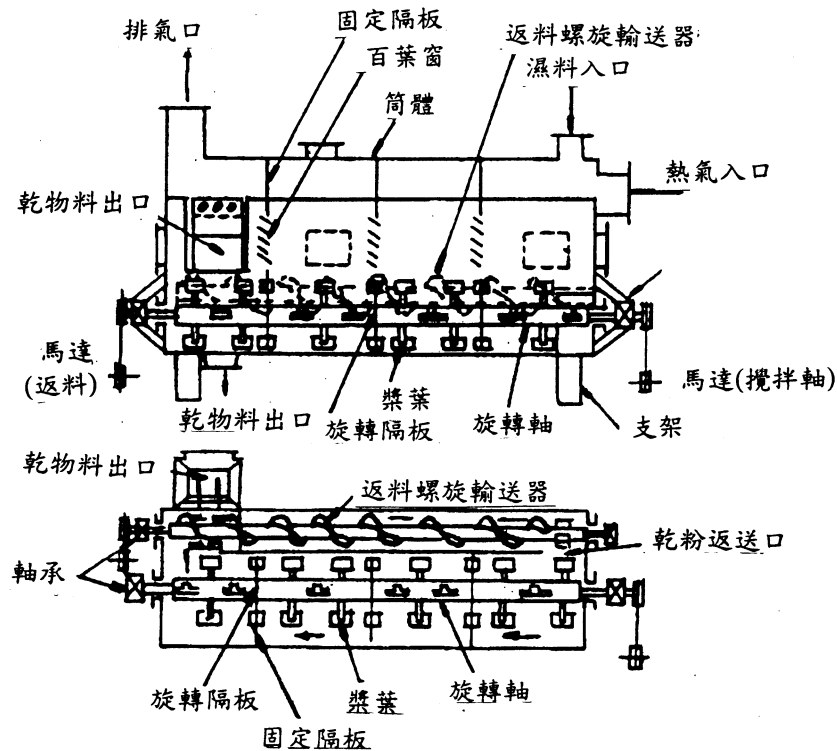


圖 3.40 熱風式槽型槳葉式乾燥器(內設返料輸送器)<sup>(1) (2)</sup>

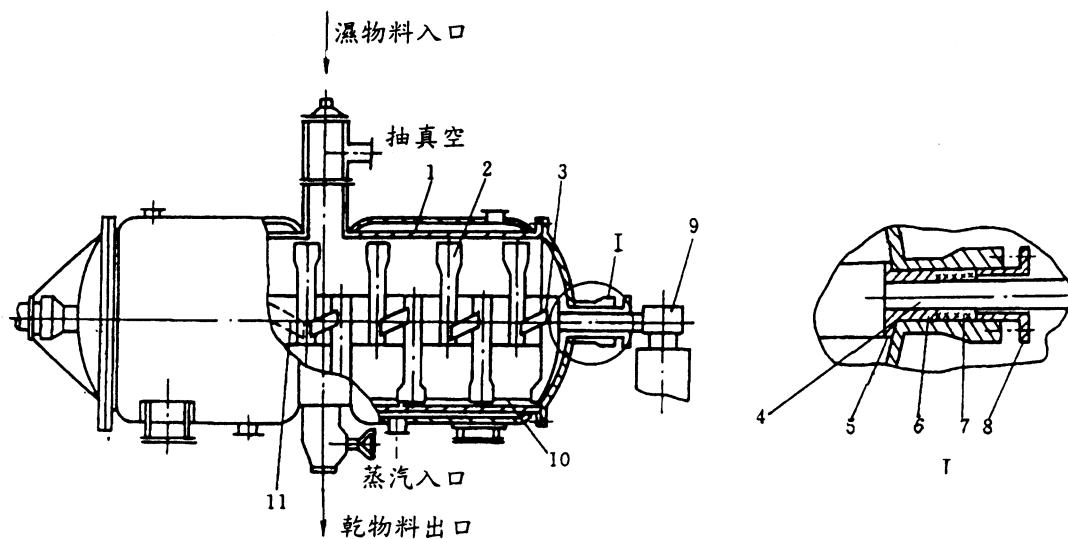
### (1)結構型式

由於真空乾燥可以在較低溫度下進行操作，具有保質及不破壞物料固有性能的優點，已越來越為人們所重視。各種真空乾燥設備也不斷出現。

槳葉式真空乾燥用得較多的是真空耙式乾燥器，其結構如圖 3.41 所示，它由下列組件組成。

#### A.筒體

它是一臥式圓筒，並帶有蒸汽加熱夾套，兩端有兩個封頭。封頭與筒體用法蘭連接。封頭與圓筒的中心線不在同一水平面，它比圓筒中心線低幾毫米。這樣設計是希望將軸中心線放低後，軸旋轉時耙齒能攪拌底部物料，也便於卸出底部物料。筒體被安放在兩個鞍形支座上，考慮到夾套加熱時設備要膨脹，因此其中一個支座與基礎不固定，允許溫度上升時設備有軸向移動。



1-殼體；2、3、11-耙齒；4-旋轉軸；5-壓緊圈；

6-封頭；7-填料；8-壓蓋；9-軸承；10-無縫鋼管

圖 3.41 真空耙式乾燥器結構<sup>(1)</sup>

## B. 槳葉(耙齒)

由圖 3.42 可知，耙齒有 a 型和 b 型兩種形狀。兩種形狀的耙齒頭部均有一方孔，固定在旋轉軸上。每種耙齒都由左向和右向兩種不同角度組成，裝配時相鄰耙齒之間相差 90 度位置。a 型耙齒是特有方孔的頭部扭轉一定角度的條形平板，安置在設備中部，是主要攪拌耙齒。b 型耙齒結構基本和 a 型差不多，也是條形平板，但它是安裝在設備兩端封頭附近，為配合封頭的圓弧形內壁。b 型耙齒的一個側邊設計成圓弧狀，和圓弧封頭吻合。

將左向耙齒沿軸安裝在一排，將右向耙齒沿軸安裝成另一排。當筒體內有物料時，耙齒正反旋轉，就能使被乾燥物料輪換著向夾套壁面方向和設備中心方向移劫，如此反複，使物料受到均勻攪動。這樣，一方面使物料與殼體內壁反複接觸，不致過熱，另外能將物料破碎，增大固體表面，加快乾燥速度。

此外，有 4 根和主軸平行的無縫鋼管均勻分布在靠近筒體的圓筒周圍，作為敲擊器壁之用。它對物料卸出和破碎均有一定作用。

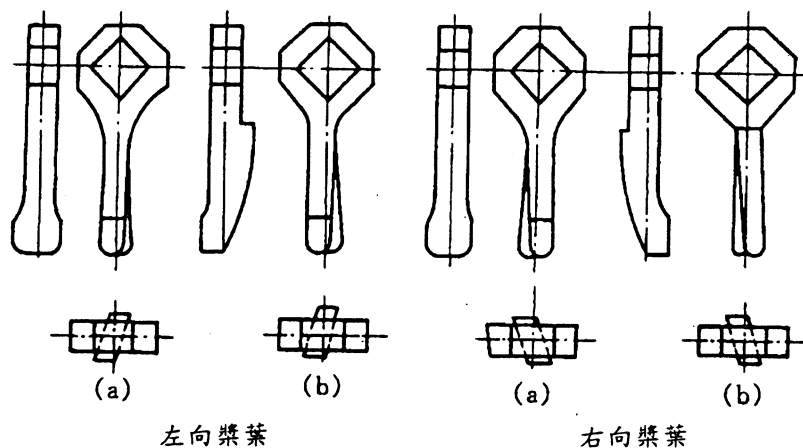


圖 3.42 槳葉(耙齒)形狀<sup>(1)</sup>

### C. 軸的密封

旋轉軸與殼體之間的密封好壞，將極大地影響設備內真空度。密封不好，設備外的冷空氣會洩漏進來。真空度不夠，溫度會降低，影響乾燥。圖 3.41 的節點圖是本乾燥器的密封結構。

真空耙式乾燥器的旋轉軸內不通熱介質，耙齒也不作加熱面。

圖 3.43 是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，組合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。

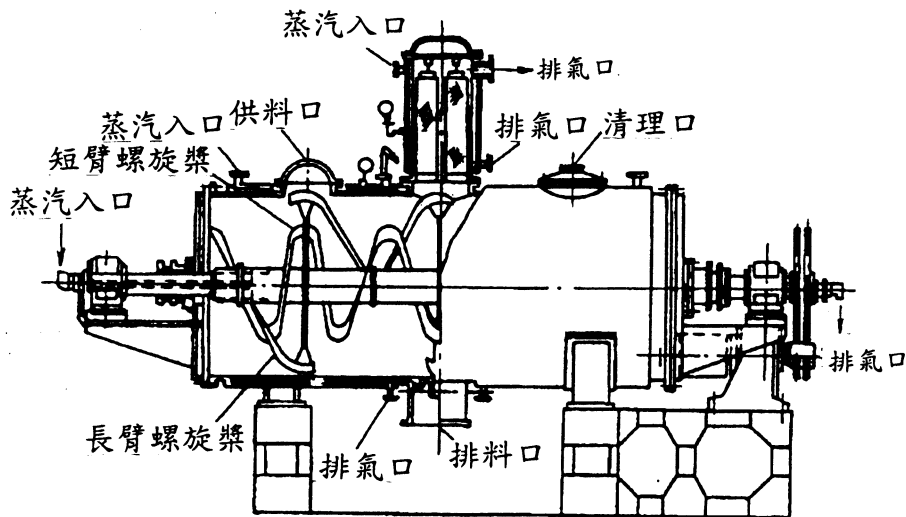


圖 3.43 雙螺旋槳葉式真空乾燥器<sup>(1)(2)</sup>

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。

上述真空乾燥的槳葉式攪拌乾燥器的筒體均為圓筒型。從真空操作設備要承受外壓的條件來考慮，圓筒型設備承受外壓能力強，加熱面積也大，比較適合於真空操作。但若從清理及維修方面考慮，圓筒型結構不如槽型結構。

專門用於真空乾燥的槳葉式乾燥器近年來發展較快，多數都是從增大設備規模、提高攪拌速度、利用槳葉作傳熱面等方面來考慮。除上述兩種結構外，還有其他形式結構。如一種叫作水平真空旋轉乾燥器。在帶夾套的圓筒形殼體內設置了較粗的中心旋轉軸，在軸上除焊接許多 T 形結構的槳葉外，在規模較大的設備上還設置幾組與軸平行的加熱管，以增加設備傳熱面積。加熱管長度基本上與設備內的旋轉軸長度等同。軸上的 T 形槳葉與加熱管在圓周方向交錯排列，加熱管除作傳熱面外，隨軸一起旋轉，也起攪拌作用。旋轉軸為空心，可通入蒸汽等熱介質。

## (2)特點

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。

A.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。

B.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。

C. 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。

D. 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。

## 3.7 流體化床乾燥器

### 3.7.1 概述

流體化床(fluidized bed)是 60 年代發展的一種乾燥技術，由於乾燥過程中固體顆粒懸浮於乾燥介質中，因而流體與固體接觸面積較大，熱容量係數可達  $8,000\sim 25,000\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ (按乾燥器總體積計算)，又由於物料劇烈攪動，大大地減少了氣膜阻力，因而熱效率較高，可達  $60\%\sim 80\%$ (乾燥結合水時為  $30\%\sim 40\%$ )。流體化床乾燥裝置密封性好，傳動機械又不接觸物料，因此不會有雜質混入。目前，流體化床乾燥裝置，從其類型看主要分為單層、多層(2~5)，臥式和噴霧流體化床、噴動流體化床等。從被乾燥的物料來看，大多數的物料為粉狀、顆粒狀、結晶狀。被乾燥物料的濕含量一般為  $10\%\sim 30\%$ ，物料顆粒度在 120 目以內。

單層流體化床可分為連續、間歇兩種操作方法。連續操作多應用於比較容易乾燥的物料，或乾燥程度要求不很嚴格的物料。單層流體化床也可用於濕含量較高物料的乾燥。操作是間歇式

的，卸料時分布板翻轉 90 度，物料在床層下部卸出。對於一些顆粒度不均勻並有一定粘性的物料，多採用在床層內裝有攪拌器的低床層操作。

多層流體化床乾燥裝置與單層相比，在相同條件下設備體積較小，物料乾燥程度亦較為均勻，物料品質也比較好控制。多層床因氣體分布板數增多，床層阻力也相對增加。多層床熱利用率較高，所以適用於減速階段的物料乾燥。多層流體化床操作的最大困難，是由於物料與熱風的逆向流動，各層既要形成穩定的沸騰層，又要定量地移出物料到下層，如果操作不妥，則沸騰層即遭破壞。目前將物料送到下一段的構件，有溢流管式和穿流多孔板式兩種。

由於多層流體化床乾燥器製造較為複雜，操作控制也不容易掌握，故近年來有將其改為多室流體化床的趨勢，即改為低風速的臥式多室流體化床乾燥器。這種設備高度可以降低，結構也簡單，操作又比較方便。臥式流體化床乾燥器停留時間可任意調節，壓力損失小，並可得到乾燥均勻的物料。它的主要缺點是熱效率低於多層床，尤其是採用較高風溫時。但如果能夠調節各室的進風溫度和風量，並逐室降低之；或採用熱風串聯通過各室的辦法，那麼熱效率也是可以提高。

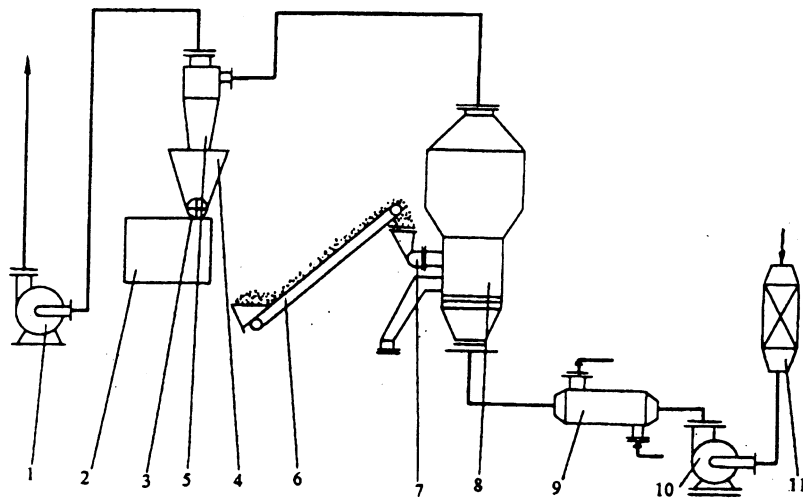
目前大多數臥式流體化床採用負壓操作。對於大面積臥式流體化床乾燥器，可採用隔板把乾燥室分成 6~8 室，物料從隔板與分布板之間的間隙中穿過，操作較為穩定，效果良好。流體化床氣體分布板的型式有篩板、篩網以及燒結密孔板等。

### 3.7.2 流體化床乾燥器的類型與操作過程

目前工業上常用的流體化床乾燥器的類型，從其結構上來分，大體上可分如下幾種：單層圓筒型、多層圓筒型、臥式多室型、噴霧型、惰性粒子式、振動型和噴動型等。

## 1. 單層圓筒型流體化床乾燥器

圖 3.44 所示，為一台流體化床乾燥裝置。濕物料由皮帶輸送機運送到拋料機加料斗上，然後均勻地拋入流體化床內，與熱空氣充分接觸而被乾燥。乾燥後的物料由溢流口連續溢出。空氣經鼓風機、加熱器後進入篩板底部，並向上穿過篩板，使床層內濕物料流體化進而形成沸騰層。尾氣進入 4 個旋風分離器並聯組成的旋風分離器組，將所夾帶的細粉除下，然後由排氣機排到大氣。在該流程中，主要設備為單層圓筒型流體化床，其結構如圖 3.44 所示。設備材料為普通碳鋼。氣體分布板是多孔篩板，板上鑽有直徑 1.5mm 的小孔，正六角形排列，開孔率為 7.2%。與旋轉窯乾燥器相比，流體化床操作簡單，勞力需求低，工作條件好，檢修方便，運轉周期長。處理能力由旋轉窯乾燥器的 200t/d，提高到 310t/d。建造每台乾燥器需用鋼材，也由旋轉窯的 30 多噸降低到流體化床的 5~6 噸。設備運轉提高 35%，電力消耗也降低許多，由於床層溫度平穩，乾燥效果也比較好。



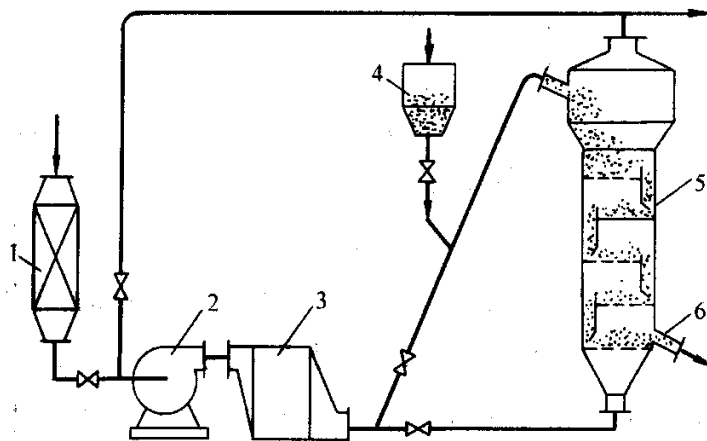
1-抽風機；2-料倉；3-星形卸料器；4-集灰斗；5-旋風分離器；6-皮帶輸送機；7-拋料機；8-流體化床；9-換熱器；10-鼓風機；11-空氣過濾器

圖 3.44 單層圓筒型流體化床乾燥流程圖<sup>(1)</sup>



## 2. 多層流體化床乾燥器

單層流體化床乾燥器的缺點，是物料在流體化床中停留時間分布不均勻，所以乾燥後得到的物料濕度不均勻。為了改善此種狀況，發展了多層流體化床乾燥器。在此設備中濕物料從床頂加入，並逐漸往下移，由床底排出。熱空氣則由床底送入，並向上通過各層，由床頂排出。這樣，就形成了物流與氣流成逆向流動的狀況，因而物料的停留時間分布，物料的乾燥程度都比較均勻，物料的品質也比較容易控制。又由於氣體與物料多次接觸，使廢氣的水蒸汽飽和度提高，熱利用率也提高。因此，多層流體化床乾燥器比較適用於乾燥減速階段的物料，或乾燥那些要求物料的最終濕含量很低的物料。



1-空氣過濾器；2-鼓風機；3-加熱器；4-料斗；5-乾燥器；6-卸料管

圖 3.45 多層流體化床乾燥器流程<sup>(1)</sup>

多層流體化床乾燥器的結構，與板式蒸餾塔相似，其乾燥流程如圖 3.45 所示。物料由料斗經氣流輸送到乾燥器的頂部，由上溢流而下，最後由卸料管排出。空氣經過濾器、鼓風機送到電加熱器，由乾燥器底部進入，將濕物料流體化乾燥。為了提高熱

利用率，除了將部分氣體循環使用外，其餘的排放。採用多層流體化床乾燥物料與傾斜式真空轉鼓乾燥器相比，不僅實現了連續處理，提高了處理能力，而且節約設備的投資費(僅為真空轉鼓的 10%~15%)。

圖 3.46 所示為一個三級流體化床乾燥器，它是由一尺寸為  $2,500 \times 1,250 \times 3,800\text{mm}$  的矩形室組成。整個室分三段，上面兩段為乾燥段，下面一段為冷卻段。篩板與水平面成  $2\sim 3$  度傾斜角。篩孔直徑為  $1.4\text{mm}$ ，乾燥段篩板面積為  $3.12\text{m}^2$ ，冷卻段為  $3.6\text{m}^2$ 。物料由床頂進入，逐漸往下移，並與熱空氣接觸而被乾燥。當其達到冷卻段時，被由床底進入的冷空氣所冷卻，最後由卸料管出料。

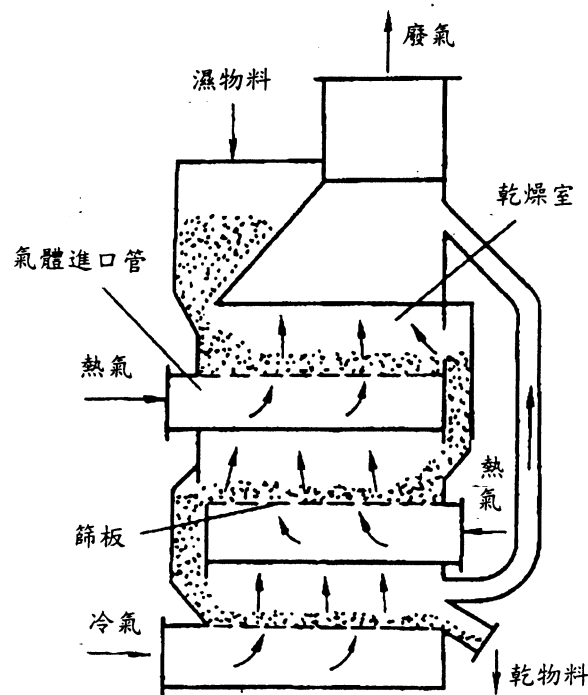


圖 3.46 三級流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

### 3.穿流板式多層流體化床乾燥器

圖 3.47 所示是一新的乾燥塔型，帶多孔篩的多段流體化床

設備，它類似於穿流式蒸餾塔。在每一篩板上均形成一流體化床層，固體顆粒邊流體化邊從篩孔自上而下地移動，氣體則經過同一篩孔自下而上地流動，篩板孔徑比顆粒孔徑約大 5~30 倍，通常為 10~20mm。篩板開孔率為 30%~40%。大多數情況下，氣體的空塔氣速與顆粒帶出速度之比約為 1.1~1.2，最大為 2。顆粒粒徑為 0.5~5mm。

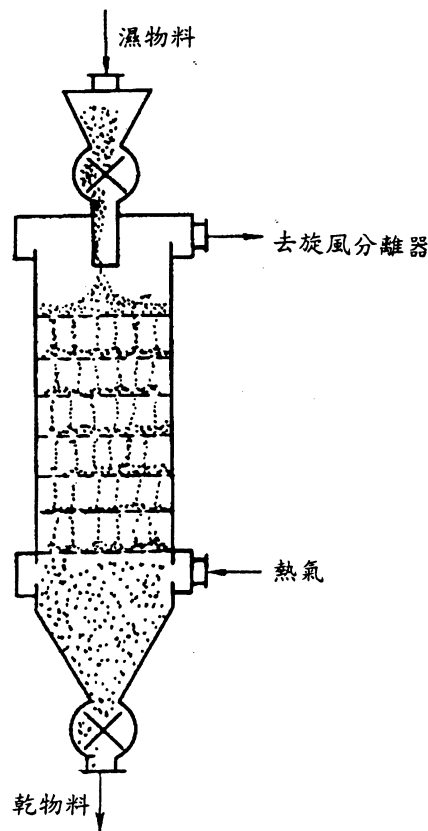


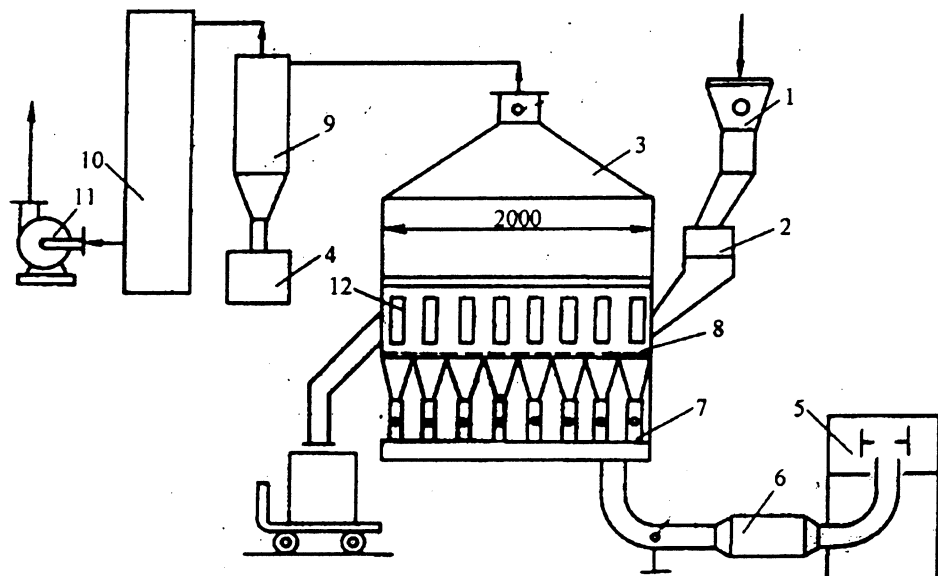
圖 3.47 穿流板式多層流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

#### 4. 臥式多室流體化床乾燥器

為了克服多層流體化床乾燥器的結構複雜、床層阻力大、操作不易控制等缺點，以及保證乾燥後物料品質，後來又開發出一種臥式多室流體化床乾燥器。這種設備結構簡單、操作方便，適用於乾燥各種難乾燥的粒狀物料和熱敏性物料，並逐漸推廣到

粉狀、片狀等物料的乾燥領域。圖 3.48 所示為臥式多室流體化床乾燥器。

乾燥器為一矩形箱式流體化床，底部為多孔篩板，其開孔率一般為 4%~13%，孔徑一般為 1.5~2.0mm。篩板上方有豎向檔板，將流體化床分隔成 8 個小室。每塊檔板均可上下移動，以調節其與篩板之間的距離。每一小室下部有一進氣支管，支管上有調節氣體流量的閥門。濕料由搖擺顆粒機連續加入乾燥器的第一室，由於物料處於流體化狀態，所以可自由地由第一室移向第八室。乾燥後的物料則由第八室之卸料口卸出。



1-搖擺顆粒機；2-加料斗；3-流體化乾燥室；4-乾品貯槽；5-空氣過濾器；6-翅片加熱器；7-進氣支管；8-多孔板；9-旋風分離器；10-袋式過濾器；11-抽風機；12-視鏡

圖 3.48 臥式多室流體化床乾燥流程圖<sup>(1)</sup>

空氣經過濾器，經加熱器加熱後，由 8 個支管分別送入 8 個室的底部，通過多孔篩板進入乾燥室，使多孔板上的物料進行流體化乾燥，廢氣由乾燥室頂部出來，經旋風分離器，袋式過濾器後，由抽風機排出。

臥式多室流體化床乾燥器所乾燥的物料，大部分是經造粒機預製成 4~14 目的散粒狀物料，其初始濕含量一般為 10%~30%，最終濕含量約為 0.02%~0.3%，由於物料在流體化床中摩擦碰撞的結果，乾燥後物料粒度變小(12 目的為 20%~30%；40~60 目的為 20%~40%；60~80 目的為 20%~30%)。當物料的粒度分布在 80~100 目或更細小時，乾燥器上部需設置擴大段，以減少細粉的夾帶損失。同時，分布板的孔徑及開孔率也應縮小，以改善其流體化品質。

臥式多室流體化床乾燥器的優點如下：

- (1) 結構簡單，製造方便，沒有任何運動組件；
- (2) 佔地面積小，卸料方便，容易操作；
- (3) 乾燥速度快，處理量幅度寬；
- (4) 對熱敏性物料，可使用較低溫度進行乾燥，顆粒不會被破壞。

臥式多室流體化床乾燥器的缺點如下：

- (1) 熱效率與其他類型流體化床乾燥器相比，較低；
- (2) 對於多品種小量物料適應性較差。

為了克服上述缺點，常用的措施有：

- (1) 採用柵式加料器，使物料儘量均勻地散佈於床層上；
- (2) 消除各室篩板的死角；
- (3) 操作為求平穩，有些工廠採用“電震動加料器”可使床層沸騰良好，操作穩定。

## 5. 塞流式流體化床乾燥器

當想要得到其濕含量比臨界濕含量低得多的物料時，全混式流體化床是不適用的，尤其是要求乾燥時間長時，來自全混式流體化床的物料與排氣接近平衡，這意味著，空氣必須保持低的濕度，這樣就造成大的空氣需要量，從而增加了乾燥成本。另外，全混式流體化床中被乾燥的顆粒有不同的停留時間，而大部分物

料不是過乾就是未乾。

為了克服上述的全混式流體化床乾燥器的缺點，可採用具有控制粒子停留時間的塞流式流體化床乾燥器(plug flow fluid bed dryer)，如圖 3.49 所示。這裡，給料必須是完全可流體化的，物料從流體化床中心輸入，而流體化的粒子被強制沿著一條長的窄道流動(沿著一螺旋形折流板)一直到達流體化床的周邊，乾的物料由此越過溢流堰卸出，在這裡粒子停留時間得到很好控制，而卸出的物料與熱的乾燥氣體接近平衡，物料濕含量可以達到很低，而物料無過熱。

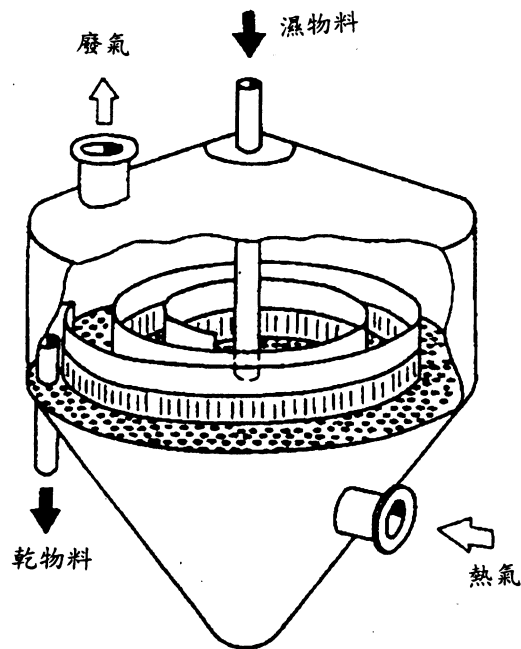


圖 3.49 塞流式流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

圖 3.50 所示的雙級塞流式流體化床是一種更加緊湊的乾燥設備，它是通過採用全混式流體化床作為預乾燥器，以取代氣流乾燥器設計而成。在塞流式流體化床的頂部安裝了全混式流體化床，物料與乾燥氣流反向流動，因此，空間需求量、安裝成本以及熱消耗量都降低了。

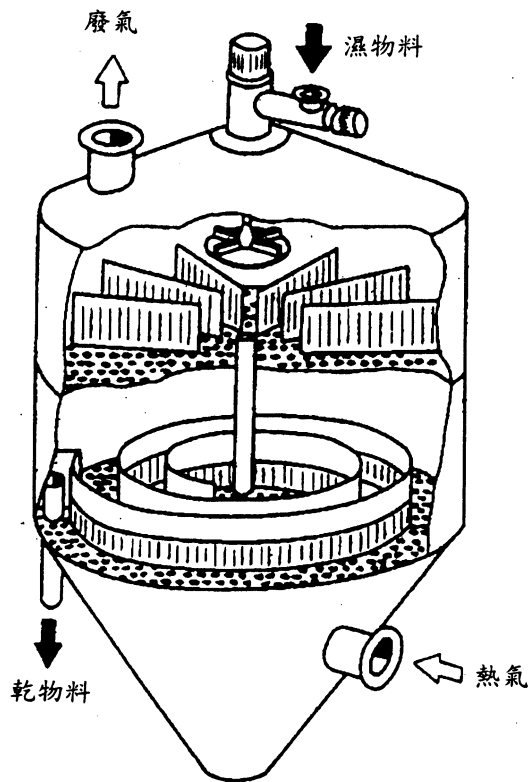


圖 3.50 雙級塞流式流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

## 6. 脈衝式流體化床乾燥器

脈衝流體化床(pulsed fluid bed dryer)是流體化床技術的一種改型，其流體化氣體是按周期性方式輸入。在一大的矩形床內，脈衝流體化區可以隨著與氣流的周期性易位而在某有利條件範圍內進行變化，雖然氣體“易位”用來消除細顆粒流體化床中溝流的想法起源於30年以前，但它始終未得到廣泛的應用。

圖 3.51 所示為周期性地改換氣流位置的脈衝流體化床乾燥的工作原理，熱空氣流過旋轉閥分布器，而分布器周期性地遮斷空氣流並引導它流向強制送風室的各個區段，送風室是位於常規流體化床支承網的下面。在“活化”室內的空氣流體化了位於活化室上的床段。當氣體朝著下一個室時，床層流體化段幾乎變成

停滯狀態。實際上，由於氣體的壓縮性和床層的慣性，整個床層在活化區還能進行很好的流體化。

如與常規流體化床乾燥器相比，具有「易位」氣流的脈衝流體化床具有如下優點：

- (1)異向性的大顆粒(例如直徑為 20~30mm，厚度為 1.5~3.5mm 的物料)也能良好流體化；
- (2)壓降降低(約 7%~12%)；
- (3)最小流體化速度減小(約 8%~25%)；
- (4)改善床層結構(無溝流，較好的粒子混合)；
- (5)淺床層操作；
- (6)能量節省最高達 50%。

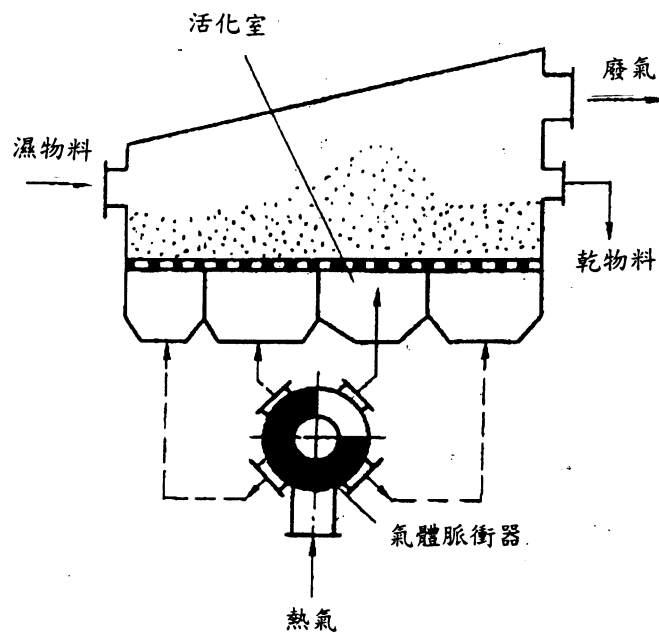


圖 3.51 周期性變換氣流位置的脈衝流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

## 7. 噴氣層流體化床乾燥器

圖 3.52 所示為噴氣層流體化床乾燥器，此床特點採用了一



連串空氣噴嘴把熱空氣導向無孔帶式傳送機的表面上，或振動的硬板上。熱空氣由加壓氣室通過一連串噴嘴進入振動傳送機的面，因此在顆粒群的下面和四周形成了「空氣床」。當散粒狀物料經過乾燥器時，空氣射流也就緩慢地懸浮在「反射」空氣床上的顆粒，空氣流垂直地從傳送機噴嘴周圍升起並且攜帶物料進入旋風分離器，在這裡懸浮於空氣的顆粒被分離。對整個空氣流速的確切控制，使得在乾燥器任何區段均可建立起良好的狀態，因此確保了全部粒子都能均勻地“暴露”在乾燥介質中。乾燥器也可分隔成許多不同空氣溫度的區域以作為過程控制。

噴氣層乾燥器的主要優點是：

- (1)可均勻控制乾燥過程；
- (2)良好的清潔度；
- (3)較少的運動組件；
- (4)可快速更換物料。

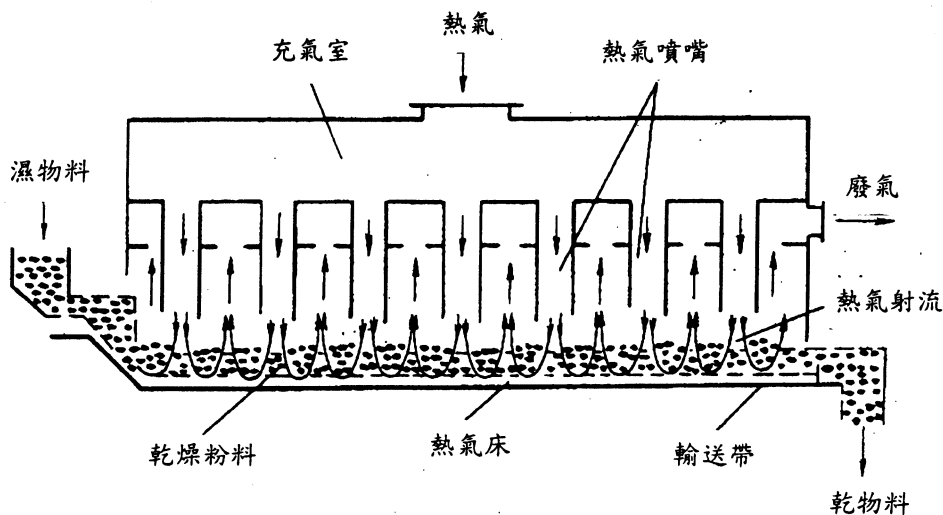


圖 3.52 噴氣層流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

噴氣層流體化床乾燥器能夠處理一些顆粒尺寸、形狀以及密度很不一樣的物料。此乾燥器操作範圍：溫度極限為 400°C，輸

送機速度為 0.3m/s，空氣噴射速度為 70m/s，空氣通過顆粒床層速度為 2m/s，單機處理量為 90~41,000kg/h。

## 3.8 改型流體化床乾燥器

### 3.8.1 振動流體化床乾燥器

#### 1. 工作原理

普通流體化床乾燥器在乾燥顆粒物料時，可能會存在下述問題：當顆粒粒度較小時形成溝流或死區；顆粒分布範圍大時夾帶會相當嚴重；由於顆粒的返混(back-mixing)，物料在機內滯留時間不同，乾燥後的顆粒含濕量不均；物料濕度稍大時會產生團聚和結塊現象，而使流體化惡化等。為了克服上述問題，出現了數種改型流體化床，其中振動流體化床就是一種較為成功的改型流體化床。

振動流體化床，就是將機械振動施加於流體化床上。調整振動參數，使返混較嚴重的普通流體化床，在連續操作時能得到較理想的活塞流(plug flow)。同時，由於振動的導入，普通流體化床的上述問題會得到相當大改善。

工業應用中已出現了許多不同結構形式的振動流體化床，圖 3.53 為最有代表性的幾種。

對流型振動流體化床工作時，由振動馬達或其他方式提供的激振力，使物料在空氣分布板上跳躍前進，同時與分布板下方送入之熱風接觸，進行熱、質傳遞。下箱體為床層提供了一個穩定的具有一定壓力的風室。調節抽風機，使上箱體中床層物料上部保持微負壓，維持良好的乾燥環境並防止粉塵外洩。空氣分布板支撐物料並使熱風分布均勻。

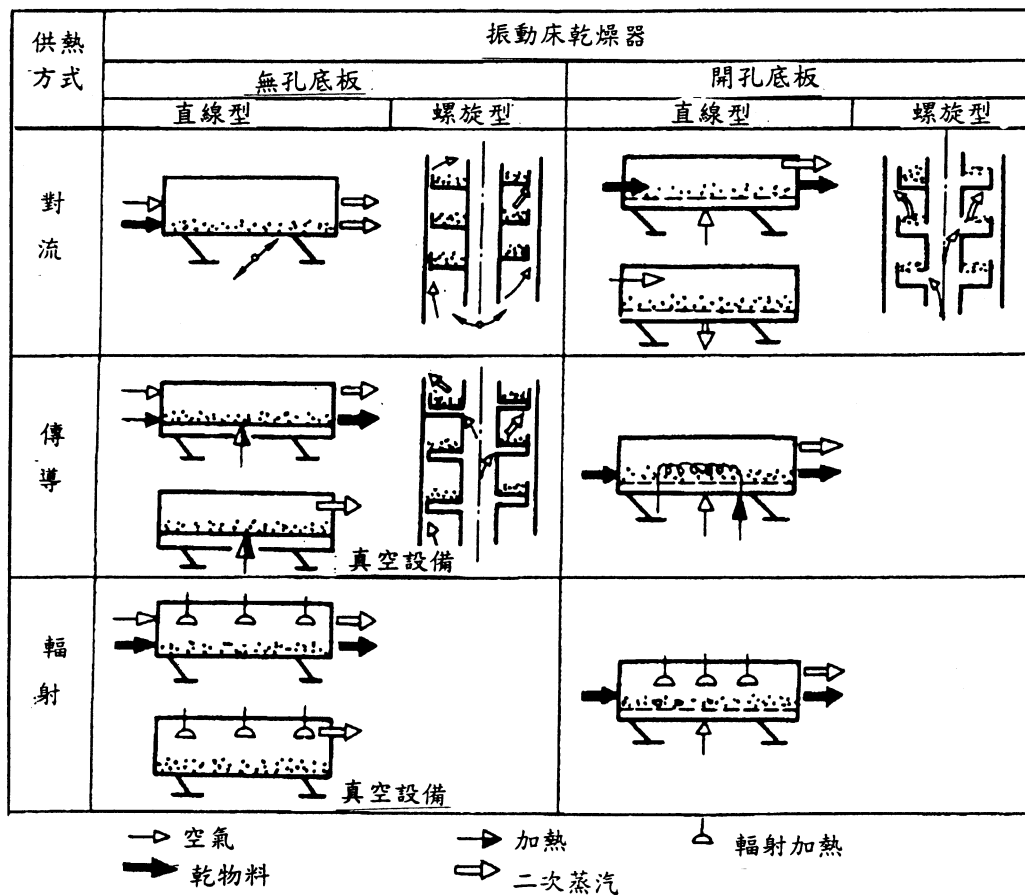


圖 3.53 最常見的振動流體化床乾燥器示意圖<sup>(1)</sup>

圖 3.54 為振動流體化床乾燥器示意圖。操作時，物料經給料器均勻連續地加到振動流體化床中，同時，空氣經過濾後，被加熱到一定溫度，由給風口進入乾燥器風室中。物料落到分布板上後，在振動力和經空氣分布板均風的熱氣流雙重作用下，呈懸浮狀態與熱氣流均勻接觸。調整好給料量、振動參數及風壓、風速後，物料床層形成均勻的流體化狀態。物料粒子與熱介質之間進行著激烈的湍動，使熱傳和質傳過程得以強化，乾燥後的物料由排料口排出，蒸發掉的水分和廢氣經旋風分離器回收粉塵後，排入大氣。調整各有關參數，可在一定範圍內方便地改變系統的處理能力。

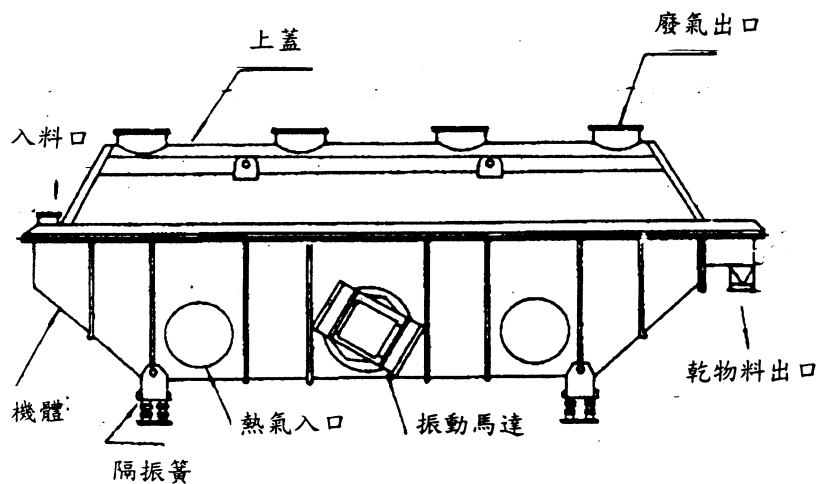


圖 3.54 對流型振動流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

## 2. 振動流體化床乾燥器的特點

- (1) 由於施加振動，可使最小流體化氣速降低，因而可顯著降低空氣需要量，進而降低粉塵夾帶，配套熱源、鼓風機、旋風分離器等也可相對縮小規格，成套設備造價會較大幅度下降，節能效果顯著。
- (2) 可方便地依靠調整振動參數來改變物料在機內滯留時間，其活塞流式的操作降低了對物料粒度均勻性及規則性的要求，易於獲得均勻的乾燥物料。
- (3) 振動有助乾物料分散，如選擇合適振動參數，對普通流體化床易團聚或產生溝流的物料有可能順利流體化乾燥。
- (4) 由於無激烈的返混，與流速度較之普通流體化床也較低，對物料粒子損傷小。
- (5) 由於施加振動，會產生噪音。同時，機器個別零件壽命短於其他類型乾燥器。

### 3.8.2 機械攪拌流體化床乾燥器

某些初始含濕量大、粒度小且不均，又不能耐高溫的物料，在用普通流體化床乾燥時會遇到很多困難。在解決這些問題中開

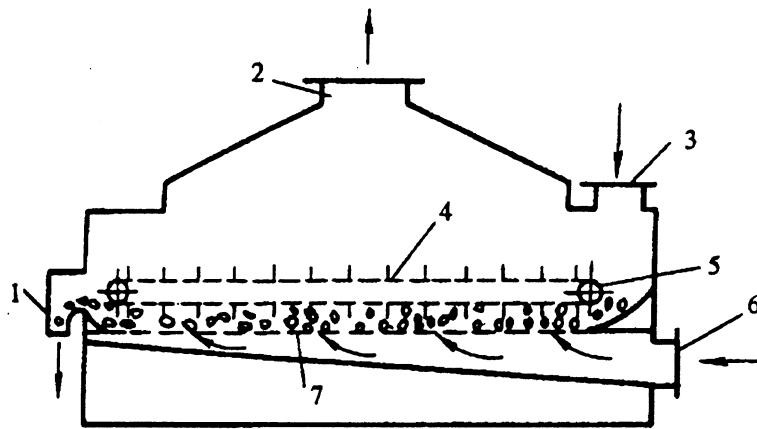
發出了另一種改進型流體化床—攪拌型流體化床。即在流體化床層中加設攪拌裝置，彌補普通流體化床在處理特殊物料時呈現的不足。

### 1. 臥式攪拌流體化床乾燥器

#### (1) 結構特徵及原理

如圖 3.55 所示，在分布板上方安裝類似帶式乾燥器的鏈條傳送機構，鏈條上均勻布置若干攪拌耙軸，隨著鏈條的傳動，插入料層的耙軸對物料施以連續的攪拌。根據物料含濕量、透氣性、附聚性及操作氣速的不同，該機構覆蓋整個床面，也可只覆蓋前半部。

很明顯，由於攪拌作用，對不能流體化的物料作翻動，提高了床層透氣性。



1-排料口；2-排氣口；3-進料口；

4-攪拌耙軸；5-鏈條傳送機構；6-進風口；7-分布板

圖 3.55 臥式攪拌流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

#### (2) 特點

A. 拓寬了普通流體化床的適用範圍。對高含水粉粒狀物料，或有團聚傾向、粒度不均物料都能適用。

B.靜態床高比流體化床大，乾燥速率高。

C.結構較簡單。

D.可在較小操作氣速下運轉，最低操作氣速只有普通流體化床的 25%~30%，因而粉塵挾帶少。

E.攪拌耙移動速度直接影響物料運行速度，因而調整乾燥時間方便，易於獲得均勻物料。

F.比普通流體化床更易於實現大型化。

### (3)應用

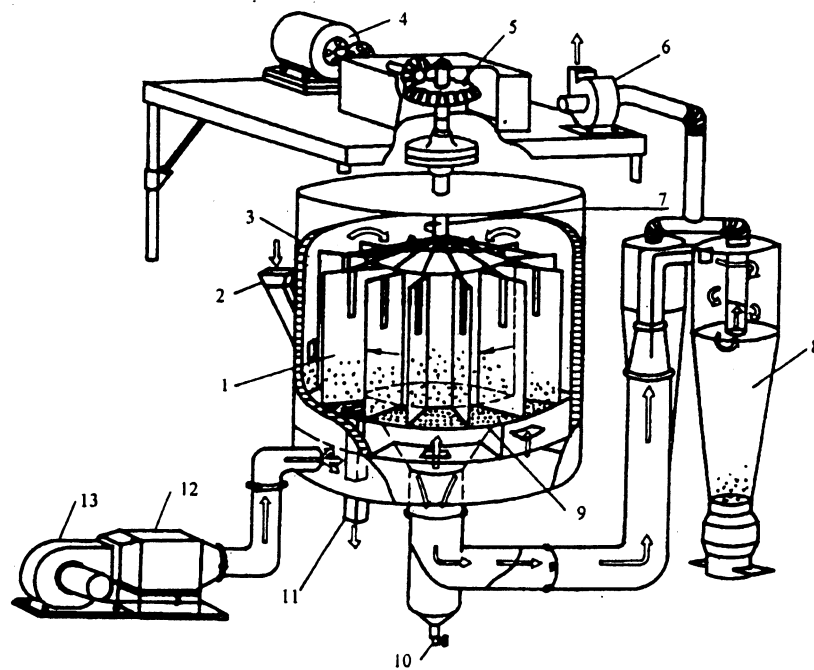
除普通流體化床的適用範圍外，它還適用於含水量高、團聚性較大的粉粒狀物料，如造紙廢液渣、下水污泥、活性污泥等。

## 3.迴轉攪拌流體化床乾燥器

在普通圓塔式流體化床基礎上發展了一種隔板式迴轉攪拌流體化床，如圖 3.56 所示。它將圓塔分為內外兩部分，中心為排風通道，外部環帶為乾燥區。乾燥區沿鉛垂線方向設有若干分隔板，將乾燥環帶區分隔成若干相對獨立的小乾燥區(或冷卻區)，隔板在馬達驅動下繞軸心迴轉，帶動由進料口加入的物料，依次通過各乾燥區，直到從排料口排出。熱空氣通過分布板送入床層，使物料流態化，並與之進行熱、質交換。

迴轉攪拌流體化床乾燥器之特點如下：

- (1)床層被分割成若干小區，在隔板帶動下依次通過排料口，各小區間無返混，物料不會殘留在分布板上。
- (2)通過調節隔板的旋轉速度，可任意調整物料在機內滯留時間，應用範圍廣。
- (3)可在同一機內進行乾燥及冷卻處理。
- (4)隔板的攪拌作用避免了普通流體化床易發生的溝流等現象，流體化品質好。



1-隔板；2-進料口；3-筒體；4-馬達；5-齒輪；6-排風機；7-迴轉軸；  
8-除塵器；9-分布板；10-排污口；11-排料口；12-加熱器；13-給風機

圖 3.56 迴轉攪拌流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

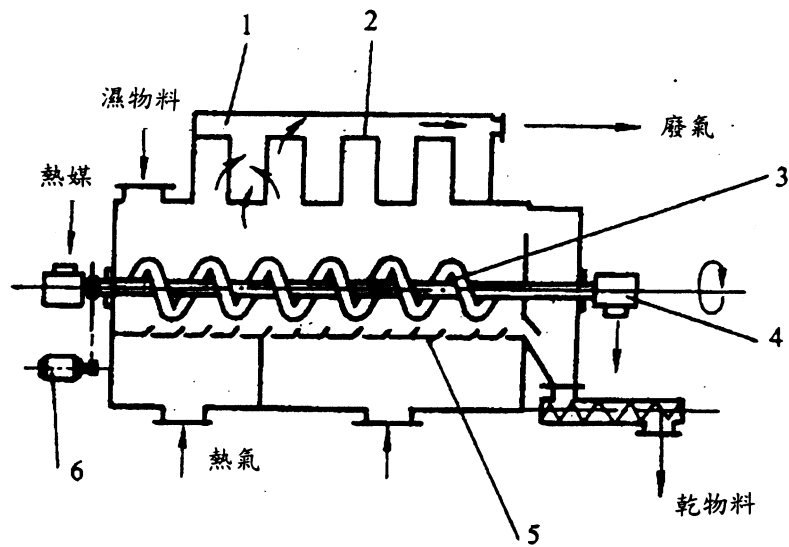
#### 4. 內熱攪拌流體化床乾燥器

眾所周知，間接加熱式乾燥器以其能耗低、排氣量小、污染低、操作費用少而被看作效率較高的乾燥方法，其理論熱效率可達 100%。可否將間接加熱式乾燥方法的優點移植到流體化床中呢？人們在力圖改進對流式乾燥方法中找到一種途徑，即在普通流體化床中設置能轉動的傳熱管，可大幅度降低風量，減小能量消耗。

##### (1) 結構特徵及原理

如圖 3.57 所示，與傳統流體化床不同的是，內熱攪拌流體化床乾燥器在槽形氣體分布板上方裝有一中空迴轉軸，軸上裝有若干圈螺旋形傳熱管，軸的兩端分別裝有進汽和排冷凝水旋轉接頭。當機器工作時，熱風通過分布板被送入床層，

傳熱管隨主軸在床層中轉動。受熱風和傳熱管攪拌的雙重作用，物料能在較小風速下實現流體化。尤其是在進料端，物料濕含量稍大時，普通流體化床難以流體化，而內熱攪拌流體化床卻可以。在該機中，熱傳通過兩個途徑進行，一個是熱風與物料的直接加熱過程；另一個是傳熱管的傳導加熱過程，因而能克服普通流體化床熱效率低、回收裝置龐大的缺點，也克服了純傳導加熱型乾燥器的攪拌力矩大、單機處理率低、設備複雜等問題。



1-上箱體；2-過濾器袋；3-傳熱管；4-旋轉接頭；5-分布板；6-馬達

圖 3.57 內熱攪拌流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

## (2)特點

A.由於採用對流和傳導兩種熱傳方式，加之機械攪拌作用，比普通流體化床氣速低、氣流量小、熱效率高、能耗低。

B.排氣處理設備負荷小，污染低。

C.攪拌力矩遠比一般攪拌式傳導加熱乾燥器低，約為其1/10~1/3左右，動力消耗小，結構簡單，造價較低。填充率提高使單機處理能力大大提高。



D.由於螺旋傳熱管的攪拌及推進作用，流體化床中物料呈擠出流型，縱向返混小。即使物料粒度不一，也能得到均勻的乾燥物料。

E.改變轉速即可方便調節物料乾燥時間。

F.選擇合適的操作參數，甚至高水分濾餅不經預處理也能順利流體化。此時，床層內已去掉部分水分的物料，在熱氣流和機械攪拌作用下，激烈地沖擊和混拌濕濾餅，使之很快分散到床層中去，從而保證乾燥過程的正常進行。

### (3)應用

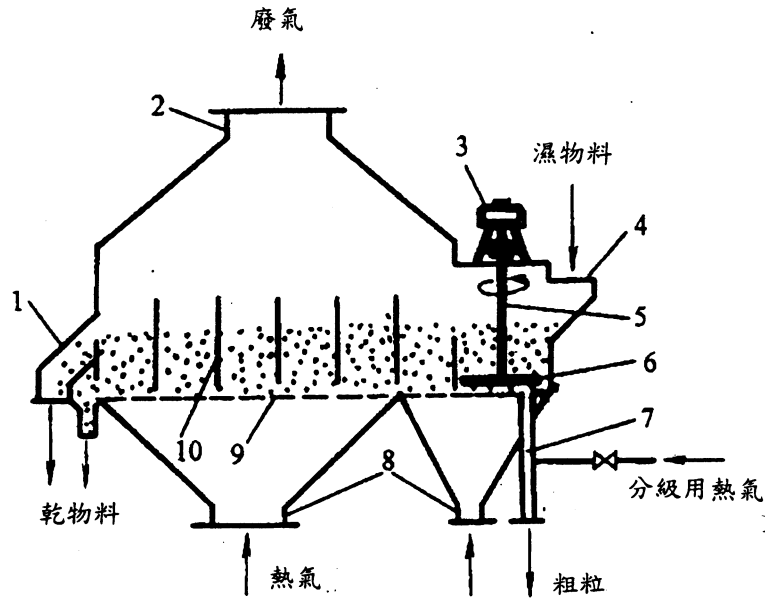
內熱攪拌床的應用範圍相當廣，許多用普通流體化床和氣流乾燥方法能處理的物料，都能用這種方法乾燥。尤其是密度小、允許溫度低或低軟化點物料，更適合這種乾燥器。

## 5.進料端設攪拌裝置的流體化床

一般流體化床在物料含水、粒度適中時，可能只在進料端出現流體化困難，因而有時只在該部位加裝攪拌裝置，即可使整個床面流體化趨於均勻。這種局部攪拌裝置可分為立式和臥式兩種，如圖 3.58 和圖 3.59 所示。

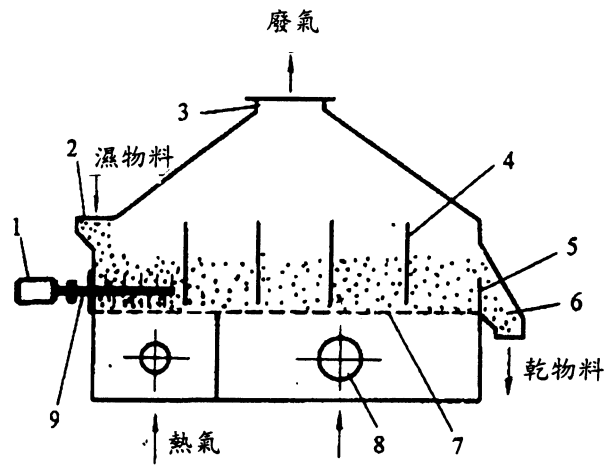
立式攪拌裝置的耙葉和耙軸為可拆式結構，更換與清洗方便。其攪拌區域為一圓形面積，但流體化床為矩形截面，因而有攪拌死區，可通過調整落料點來消除死區的影響。

臥式攪拌裝置為一排並列的攪拌軸，按流體化床寬度的不同，通常為 4~8 根軸，每根軸上裝有攪拌棒若干。各軸以齒輪傳動，相鄰兩軸均反向或相向運轉。顯而易見，它的攪拌區可和流體化床截面重合，無攪拌死區，攪拌效果好。在攪拌軸的首端裝有單片推料螺旋葉片，可推動靠近流體化床端板的物料儘快進入攪拌區。整個攪拌裝置連同驅動馬達，安裝在三角形滑道上，可快速由床內移出，方便清洗和維修。



1-排料口；2-上箱；3-馬達；4-給料口；5-攪拌軸；  
6-耙；7-粗粒排口；8-給風口；9-分布板；10-隔板

圖 3.58 立式局部攪拌流體化床乾燥器<sup>(1)(2)</sup>



1-馬達；2-給料口；3-排風口；4-隔板；  
5-溢流堰；6-排料口；7-分布板；8-給風口；9-攪拌軸

圖 3.59 臥式局部攪拌流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

## 6. 離心流體化床乾燥器

離心流體化床乾燥器，按其乾燥轉鼓軸線方位分為臥式和立式兩種。

### (1) 臥式離心流體化床乾燥器

圖 3.60 所示為臥式離心流體化床乾燥器的結構圖。乾燥轉鼓通常是一個不鏽鋼圓筒，圓筒壁均勻開有若干小圓孔，筒內襯有高目數篩網。因離心力有使物料均勻分布於內筒表面的特性，且離心流體化床一般壓降又比較大，故離心流體化床轉鼓開孔率通常比普通流體化床高得多。

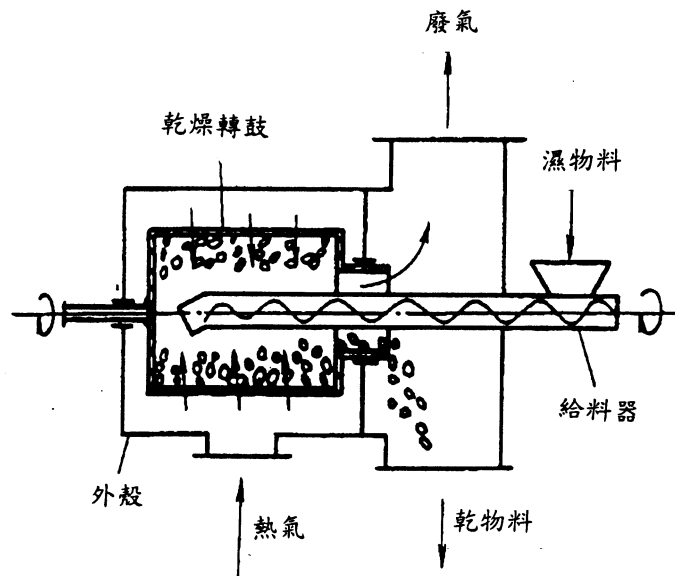


圖 3.60 離心流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

臥式離心流體化床乾燥器的進風方式有兩種，全角進風和半角進風，如圖 3.61(a)和(b)所示。全角進風時，熱風沿轉鼓徑向四周吹入筒內，物料在轉鼓上各點均受到相同且方向相反的離心力和風力作用，流體化均勻，界面清晰，床層穩定。半角進風時，熱風沿轉鼓徑向單側給入，從另一側排出。因而迎風側(給風側)床層受到的風力和離心力與全角進風時相似，會形成流體化床層。排風側，物料受到的離心力和風作用力方向相同，均壓向筒壁，故變為固定床，但由於氣體兩次通過床層，熱效率會有提高。但床層流體化不均，熱傳質傳速率會受到一定影響。

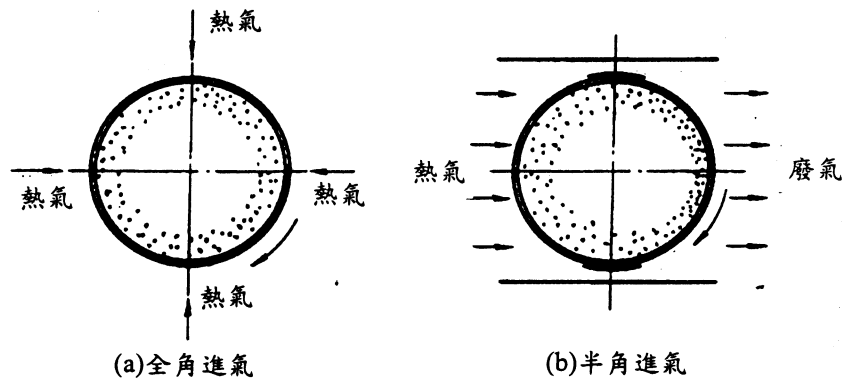


圖 3.61 臥式離心流體化床的進風方式<sup>(1)</sup>

## (2) 立式離心流體化床乾燥器

立式離心流體化床乾燥器結構原理如圖 3.62 所示。與臥式不同的是，它的乾燥轉鼓是垂直安裝的。物料通過一高速迴轉的布料盤，均勻布於轉鼓內筒表面上。在立式離心流體化床中，物料滯留時間很短，一般只有幾秒到十幾秒，乾燥時間相對較難控制。由於物料重力方向與風力方向不一致，流體化均勻性較難控制，顆粒大、密度大的物料較難在該裝置中處理。

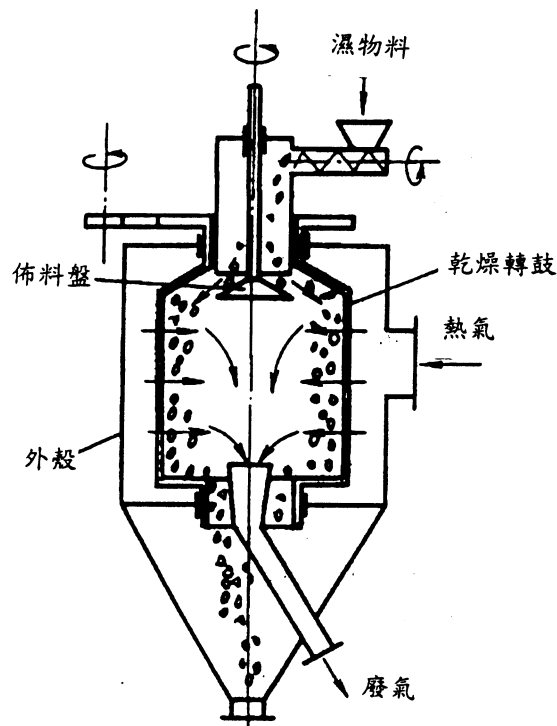


圖 3.62 立式離心流體化床乾燥器<sup>(1)</sup>

### 3.9 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 3.63 所示。

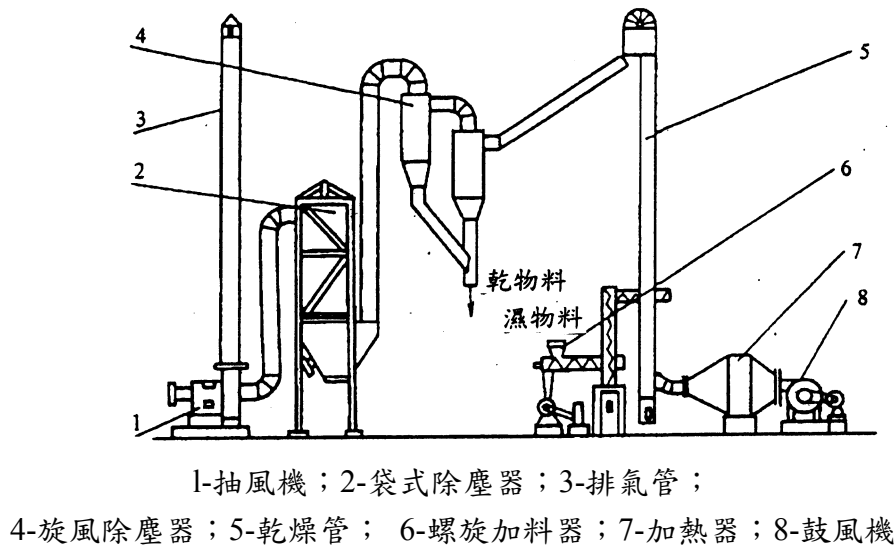


圖 3.63 氣流乾燥基本流程圖<sup>(1)</sup>

#### 3.9.1 氣流乾燥的特點

##### 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，使氣固兩相之間的热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  $h_a$  也相當高。普通直管氣流乾燥器(pneumatic dryer)的  $h_a$  為 2,300~7,000W/(m<sup>3</sup>·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 20~30°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

氣流乾燥器的體積可以下式計算

$$V=q/h_v \Delta t_m$$

式中，V 為乾燥器的體積，m<sup>3</sup>；q 為熱流量，KJ/h；h<sub>v</sub> 為單位乾燥器體積熱傳係數，KW/(m<sup>3</sup>·K)；Δt<sub>m</sub> 為進出口氣固相的溫差，°C。

由於氣固兩相並流，有些物料的氣流乾燥進口處氣固兩相的溫差可達 400~500°C，故 Δt<sub>m</sub> 值很大，同時氣流乾燥的體積熱傳係數 h<sub>v</sub> 值也很大，於是在所需求的熱量 q 值為某一定值時，氣流乾燥管體積必定很小。換句話說，體積很小的氣流乾燥器可以處理大量的濕物料。

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。

### 3.9.2 氣流乾燥的適用範圍

#### 1. 物料狀態

氣流乾燥要求以粉末或顆粒狀物料為主，其顆粒粒徑一般在0.5~0.7mm以下，至多不超過1mm。對於塊狀、膏糊狀及泥狀物料，應選用粉碎機和分散器與氣流乾燥串聯的流程，使濕物料同時進行乾燥和粉碎，表面不斷更新，以利於乾燥過程的連續進行，或者採用將一部分乾燥合格的物料返回料口與濕物料相混合，使濕膏狀物料、泥狀物料分散成粉狀物料後進行氣流乾燥。

#### 2. 濕分和物料的結合狀態

氣流乾燥採用高溫高速的氣體作為乾燥介質，且氣固兩相間的接觸時間很短。因此氣流乾燥僅適用於物料濕分進行表面蒸發的恆速乾燥過程；待乾物料中所含濕分應以潤濕水、孔隙水或較粗管徑的毛細管水為主。

### 3.9.3 氣流乾燥裝置的種類

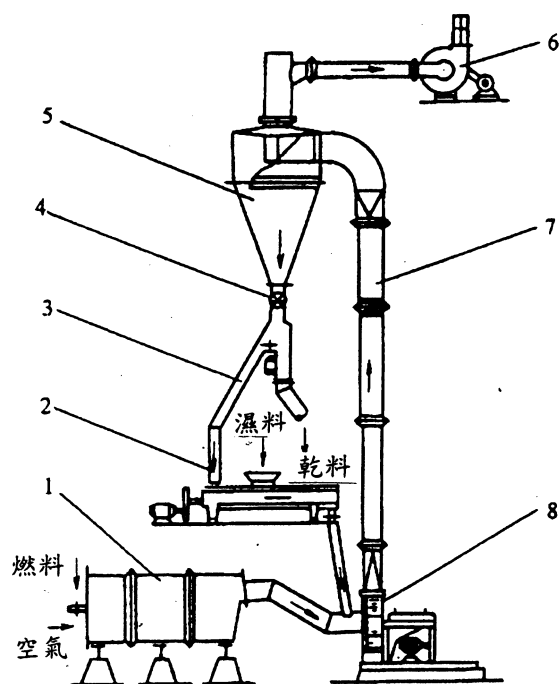
氣流乾燥裝置可分直接進料的、帶有分散器的和帶有粉碎機的。另外，還可分為有返料、熱風循環以及並流或環流操作的氣流乾燥裝置。

#### 1. 直接進料的氣流乾燥裝置

它是目前應用最廣泛的一種，適用於濕物料分散性良好和只除去表面水分的場合。若濕物料含水量較高，加料時容易結團，可以將一部分已乾燥的成品作為返料，在混合加料器中和濕物料混合，以利乾燥操作。

## 2. 帶有分散器的氣流乾燥裝置

帶有分散器的氣流乾燥裝置流程如圖 3.64 所示。其特點是乾燥管下面裝有一台鼠籠式分散器打散物料。它適合於含水量較低、鬆散性尚好的塊狀物料，如離心機、過濾機的濾餅。如含水量較多，可用返料法改善操作。



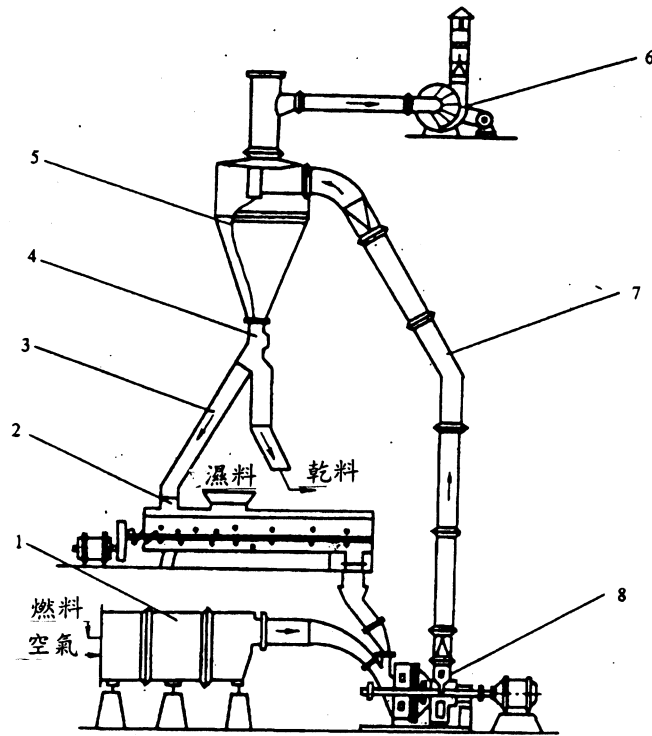
1-燃燒室；2-混合器；3-乾料分配器；4-加料器；  
5-旋風除塵器；6-排風機；7-乾燥管；8-鼠籠式分散器

圖 3.64 帶有分散器的氣流乾燥裝置<sup>(1)</sup>

## 3. 帶有粉碎機的氣流乾燥裝置

帶有粉碎機的氣流乾燥裝置流程如圖 3.65 所示。其特點是在氣流乾燥管下面裝有一台沖擊式錘磨機，用以粉碎濕物料，減小粒徑，增加物料表面積，強化乾燥。因此，大量的水分在粉碎過程中得到蒸發，在一般情況下，可完成氣化水分量的 80%。這樣，便於採用較高的進氣溫度，以獲得大的處理能力和高的熱傳效率。





1-燃燒室；2-混合器；3-乾料分配器；4-加料器；  
5-旋風除塵器；6-排風機；7-乾燥管；8-沖擊式錘磨機

圖 3.65 帶有粉碎機的氣流乾燥裝置<sup>(1)</sup>

### 3.10 太陽能乾燥

太陽能乾燥是利用太陽輻射的熱能，將濕物料中的水分蒸發除去的乾燥方法。自古以來就廣泛地採用這一乾燥方法，但由於其勞力需求、大面積曬場、乾燥過程及物料品質無法控制等因素而限制了大批量物料的乾燥。近年來新的太陽能乾燥技術的開發為有效利用太陽能進行乾燥作業提供了可能性。

採用太陽能乾燥設備進行物料乾燥，可以充分利用太陽輻射能，有效地提高乾燥介質溫度，使乾燥時間縮短。太陽能乾燥裝置屬於低溫乾燥裝置，乾燥器操作溫度在 40~70°C 範圍內。

### 3.10.1 太陽能乾燥的特點

太陽能乾燥裝置在使用上的優點和缺點主要是由太陽輻射的特殊性決定的。與利用其他能源的乾燥方法相比，太陽能乾燥有下列優點：

1. 乾淨衛生，對物料和環境沒有污染；
2. 太陽能取之不盡，不存在能源枯竭問題；
3. 太陽能處處都有，不需開採和運輸；
4. 乾燥過程中其他能源消耗低，操作費用低。

然而，有效地利用太陽能進行乾燥也並非容易，太陽能乾燥存在下列缺點：

#### 1. 分散性大，熱值低

太陽常數為  $1,353\text{W/m}^2$ ，在天氣較為晴朗的情況下，中午垂直投射於  $1\text{m}^2$  面積上的太陽能最多在  $1\text{kW}$  左右，陰雨天更低。如果乾燥器的處理量大，那麼，就需要較大面積的集熱器，佔地面積大，設備投資費用高。

#### 2. 溫升小，乾燥速度低

完全依靠太陽能，乾燥介質(熱空氣)的溫升低，僅能使空氣的溫度上升至  $40\sim 70^\circ\text{C}$ 。所以，一般情況下，太陽能只能用於低溫乾燥。

#### 3. 間歇性和不穩定性

太陽的輻射強度受緯度、季節、天氣及時間的影響大。低緯度地區太陽輻射強度高，高緯度地區太陽輻射強度低。冬季及陰雨季節太陽輻射強度很弱，無太大利用價值。一天中不同時間，太陽能輻射強度不斷變化，由此造成了乾燥介質溫度不穩定，給乾燥過程的控制帶來了不少困難。

#### 4. 乾燥效率低

太陽能空氣集熱器的熱效率一般在  $60\%\sim 80\%$  之間，乾燥裝

置系統效率為 20%~40%。

### 3.10.2 太陽能乾燥器的類型及結構

太陽能乾燥器(solar dryer)的結構隨被乾物料的批量和特性的變化而變化。乾燥器結構的設計可有多種選擇。根據乾燥器內氣流的流動方式，可將太陽能乾燥器分為自然對流型和強迫對流型兩種。根據集熱器與乾燥室的配置方式，可將太陽能乾燥裝置分為溫室型、集熱器型和溫室-集熱器型 3 種。

#### 1. 自然對流型太陽能乾燥器

自然對流型太陽能乾燥器中無附加鼓風機，氣流靠溫差的作用在乾燥室內流動。根據結構的不同，主要有箱式、棚式、溫室式、盤架式和煙囪式幾種。

箱式太陽能乾燥器結構最簡單，太陽輻射通過透明的蓋板進入乾燥器，其餘的壁板是不透明的，而且絕熱，內壁塗以黑色太陽能吸收材料。待乾物料被均勻的放在物料盤中，氣流通過底部小孔進入，與物料對流換熱後從上部排氣孔排出。由於其結構簡單、投資小，適合小批量(10~20kg)粒狀物料的乾燥，通常乾燥面積為 1~2m<sup>2</sup>。

溫室型太陽能乾燥器的結構示意圖如圖 3.66 所示。進氣口配置在下方，採用排氣筒增加乾燥室內氣流速度。溫室頂為強化玻璃，晚間用保溫蓋帘覆蓋。夏季晴天室內最高溫度可達 65℃，比室外氣溫高 31℃。冬季晴天室內最高溫度為 24℃，比室外溫度高 20℃。

#### 2. 強迫對流型太陽能乾燥器

靠溫差和氣流出口和進口的高度差作為氣流流動動力的自然對流型太陽能乾燥器受到多方面的限制。特別是當料層較厚、顆粒細、孔隙度小時，氣流阻力大，僅靠自然對流不能滿足對氣流速度的要求。一些改進型的太陽能乾燥器，氣流需通過附加的

裝置如蓄熱器、空氣集熱器及管道等，沒有附加動力，氣流是不能實現有效流動的。此外，自然對流型太陽能乾燥器的排氣溫度較高，熱利用率低。應利用鼓風機來實現廢熱利用。根據常規能源使用情況可將強迫對流型太陽能乾燥器分為普通強迫對流型、蓄熱型和附帶常規能源的太陽能乾燥器。

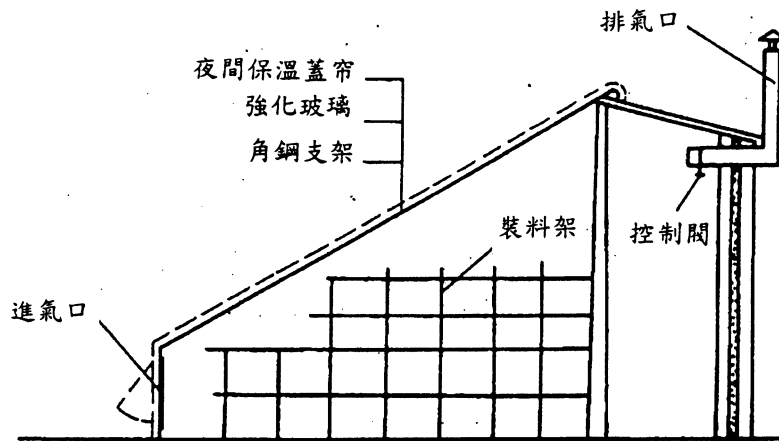


圖 3.66 溫室型太陽能乾燥器的結構<sup>(1)</sup>

#### (1) 普通強迫對流型太陽能乾燥器

該類型乾燥器不需其他能源加熱空氣，空氣的加熱只靠太陽能集熱器，由馬達驅動風扇保證乾燥器內氣流的流動。普通強迫對流型太陽能乾燥器主要有溫室型、集熱器型和溫室-集熱器型 3 種類型。溫室型強迫對流太陽能乾燥器與自然對流型溫室太陽能乾燥器相似，所不同的是前者結構較複雜，設計更合理。氣流在風扇的作用下沿一定的流道流動，氣流的方向得到有效的控制，熱利用率較高。

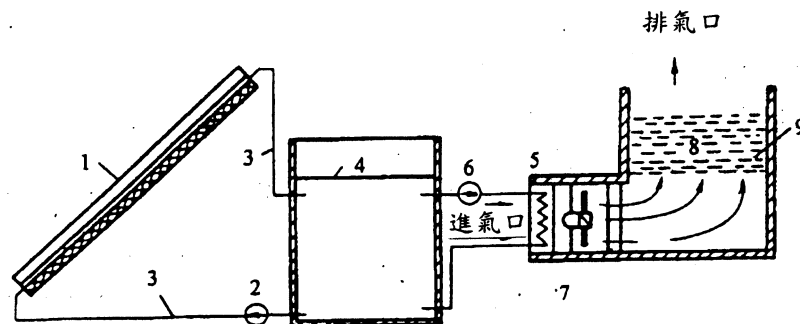
集熱器型強迫對流太陽能乾燥器的集熱器與乾燥室是分開配置的，通過管道和鼓風機連接起來。集熱器和乾燥室分開使乾燥系統的安裝方便，移動靈活。單獨的乾燥室有利於加強保溫，避免太陽光的直接曝曬。分開的集熱器結構設計

更靈活，集熱器位置和角度調節方便。

## (2)蓄熱型太陽能乾燥器

在太陽能乾燥器中加蓄熱器的目的主要是為了延長乾燥時間。太陽輻射強時，貯存部分能量，控制熱空氣溫度，避免過度乾燥。太陽輻射弱或無太陽輻射時，提取貯存的熱量進行乾操作業。使用附加蓄熱裝置的缺點之處是增加了投資和操作費用。

圖 3.67 所示的是以水作為蓄熱介質的顯熱蓄熱乾燥器，該乾燥器是一個非直接乾燥系統。利用泵使蓄熱介質在集熱器、管路和貯液槽中循環。外部空氣在熱交換器中被加熱，由鼓風機送到物料層。熱交換器和貯液槽之間的液體循環由泵實現。該類型的太陽能乾燥器結構複雜，投資大。



1-集熱器；2-泵；3-管路；4-貯液槽；

5-熱交換器；6-泵；7-鼓風機；8-物料層

圖 3.67 水蓄熱太陽能乾燥器<sup>(1)</sup>

## (3)附帶常規能源的太陽能乾燥器

由於夜晚和陰雨天無陽光可用，太陽能乾燥是間歇過程。雖然可在乾燥系統中加蓄熱裝置，但所蓄的熱量也是有限的。又因為太陽能的分散性，太陽能空氣集熱器加熱的熱空氣溫度較低。因此，對於一些需要連續乾燥或在較高溫度

下乾燥的物料，需加輔助能源。在乾燥系統中增加常規能源加熱有兩種方式，一種方式為有陽光時利用太陽輻射加熱空氣，增加的常規能源只在夜晚或陰雨天使用，常規能源只是對太陽輻射加熱的輔助；另一種方式是太陽能集熱器只作為預熱器，主要能源為常規能源。在這種情況下，太陽能只作為輔助熱源。

## 第四章 乾燥附屬設備

完整的乾燥系統，除了乾燥設備本體外，尚需其他附屬設備妥善搭配，方可充分發揮乾燥系統最佳操作性能及經濟效益。本章將介紹乾燥附屬設備包括加料及排料裝置、熱風系統、除塵系統等。

### 4.1 乾燥器的加料及排料裝置

#### 4.1.1 概述

在粉碎、混合及乾燥等裝置中，供給或排出粉狀、顆粒狀及塊狀物料的機械，一般統稱為供料器，有加料器(feeder)和排料器之分。對後續裝置而言，排料器也就成了加料器。在乾燥過程中，加料器所處理的往往是濕物料，而排料器處理的往往是較乾物料。

加料器的用途主要是定量連續或間斷地供給物料。排料器的用途主要是不定量連續或間斷地排出物料。

供料器應具有下列特點：(1)能定量供料；(2)不洩漏物料和空氣；(3)不產生粒子破損；(4)能適用多種物料，供料量可調節；(5)消耗功率小；(6)運轉可靠、操作簡單、維修方便；(7)佔地面積小、高度低。

上述要求並不是任何場合都必須，也不是所有型式供料器都能全部滿足，應根據主要要求選擇適用的供料器。

#### 4.1.2 供料器的分類

供料器從機制上可以分成以下 4 種型式。

##### 1. 重力作用式

###### (1) 閘板

閘板，如圖 4.1 所示。分為沿水平、垂直或傾斜方向作直線運動的擋板(圖 4.1a)；旋轉的絞鏈式閘門(圖 4.1b、c、d、e)；使弧形板作旋轉運動的切斷式閘門(圖 4.1f)以及旋轉彎成特殊形狀的彎管(圖 4.1g)等形式。開閉的方式分直接傳動或由齒輪、鏈條傳動等；作用方式分手動、電動和氣動等。

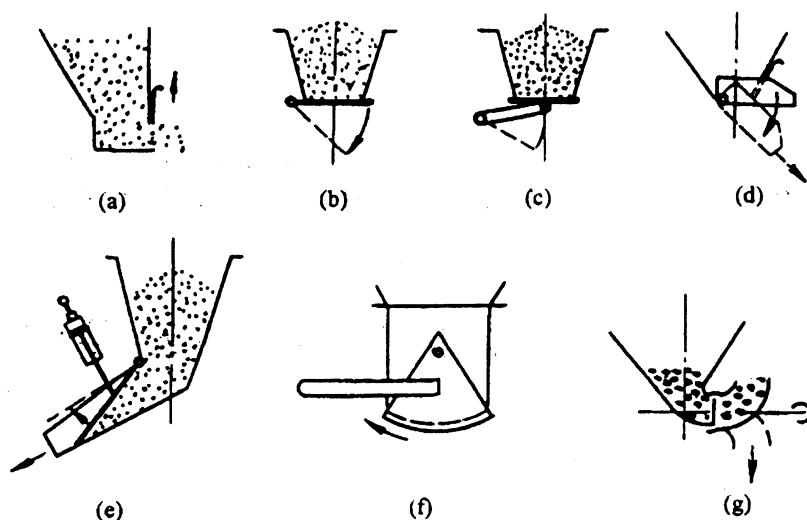


圖 4.1 閘板<sup>(1)</sup>

## (2) 旋轉式供料器

旋轉式供料器，如圖 4.2 所示。根據其使用目的不同，也可稱為迴轉閘或旋轉式鎖氣供料器，是應用最廣泛的供料器。

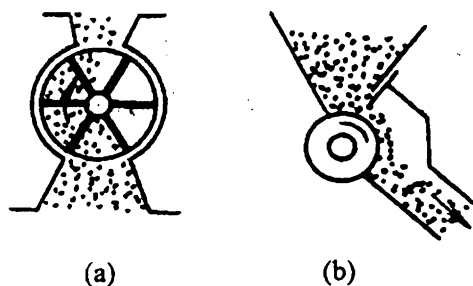




圖 4.2 旋轉式供料器<sup>(1)</sup>

(3)鎖氣料斗式(雙重排料閥式)供料器

鎖氣料斗式(雙重排料閥式)供料器，如圖 4.3 所示。它有上下兩個料斗，靠上下檔板交替開閉進行供料。適用有壓差場合的供料和排料。開閉的方式分為：馬達為動力的凸輪式；氣動活塞式；開啟用凸輪、關閉靠重錘；開啟靠物料自重、關閉靠重錘等。

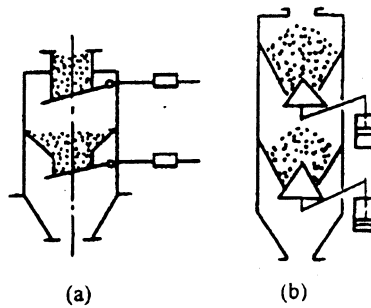


圖 4.3 鎖氣料斗式供料器<sup>(1)</sup>

(4)圓盤加料器

圓盤加料器，如圖 4.4 所示。在料斗下方安裝一件水平方向旋轉的圓形平板，靠刮板將旋轉圓盤上的物料定量刮落。故卸料量可由刮板進退位置調節。對流動性較好的粒狀物料有一定的定量性。

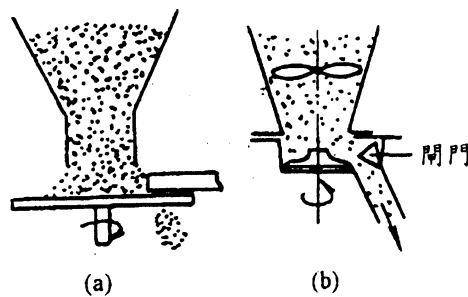
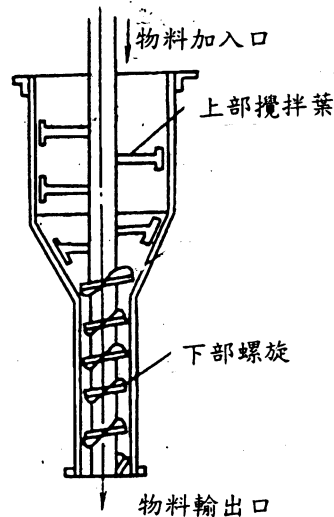


圖 4.4 圓盤加料器<sup>(1)</sup>

### (5) 立式螺旋供料器

立式螺旋供料器，如圖 4.5 所示。其結構分為兩部分，上部呈攪拌葉片狀，用以防止物料架橋，下部呈螺旋狀，將物料擠入另一螺旋給料器。可用於膏糊狀物料的定量加料，誤差小於 5%。用於膏糊狀物料時，轉速不宜快，否則失效，



以 8-12rpm 為宜。

圖 4.5 立式螺旋供料器<sup>(1)</sup>

## 2. 機械力作用式

### (1) 帶式供料器

帶式供料器，如圖 4.6 所示。在兩個旋轉軸之間，以橡膠板組成環帶，物料從料斗落下，隨環帶運動而排出。改變料斗與環帶間隙或改變環帶行走速度，可以調節物料輸送量。

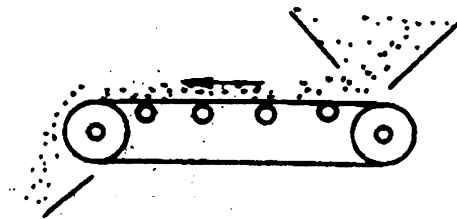


圖 4.6 帶式供料器<sup>(1)</sup>

### (2) 板式供料器

板式供料器，如圖 4.7 所示。用鋼板絞接形成環帶輸送物料。適用輸送重型、大塊及高溫物料。

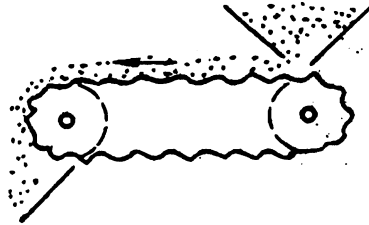


圖 4.7 板式供料器<sup>(1)</sup>

### (3) 鏈式供料器

鏈式供料器，如圖 4.8 所示。物料通過鏈條的返回側下落到輸送側上進行供料。在通過返回側時將物料散開，所以具有一定程度的定量性。並且可以將兩種物料邊混合邊輸送。

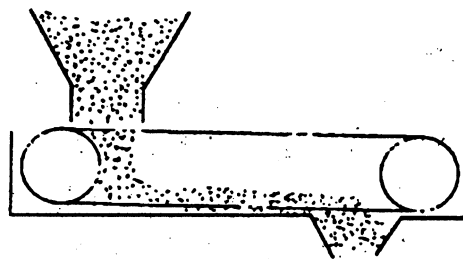


圖 4.8 鏈式供料器<sup>(1)</sup>

### (4) 螺旋加料器

螺旋加料器 (screw feeder)，如圖 4.9 所示。螺旋安裝在圓筒形的機殼內，靠螺旋旋轉時產生的送進作用，使物料從一端向另一端移動進行供料。具有較好的定量性，並能向有壓差處供料。一般多水平方向供料，也可垂直方向由低處向高處供料。

### (5) 斗式供料器

用鏈條或鋼絲繩將料斗由低處提升到高處進行連續或間

隙供料。

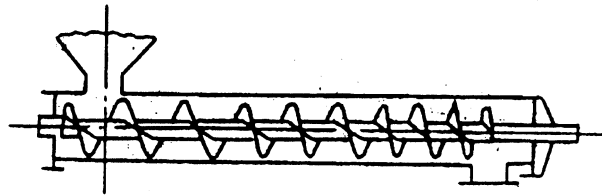


圖 4.9 螺旋加料器<sup>(1)</sup>

### 3. 往復式及振動式

#### (1) 柱塞式供料器

柱塞式供料器，如圖 4.10 所示。靠柱塞的往復運動將物料推出，適用於較小顆粒物料供料。

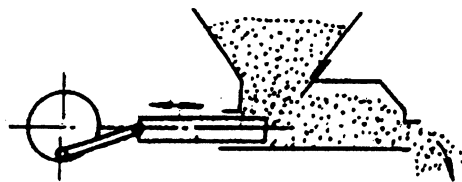


圖 4.10 柱塞式供料器<sup>(1)</sup>

#### (2) 往復板式供料器

往復板式供料器，如圖 4.11 所示。在往復運動底板上的物料，當底板向圖的右方運動時，將物料送出；向左方運動時，靠料斗左側擋板的阻力，物料從底板右側排下。

#### (3) 搖擺式供料器

搖擺式供料器，如圖 4.12 所示。它是使水平或稍微向供料方向傾斜的輸送槽作往復運動和小範圍的上下運動，從而將物料向前方拋出而進行供料。

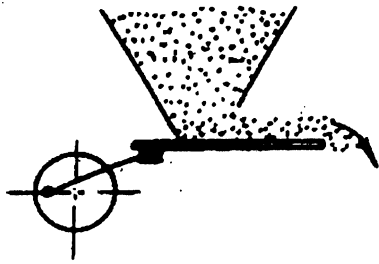


圖 4.11 往復板式供料器<sup>(1)</sup>

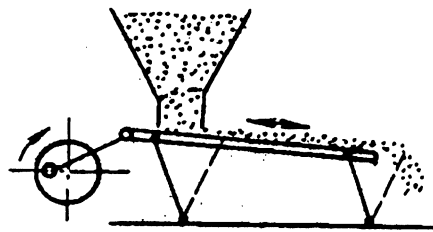


圖 4.12 搖擺式供料器<sup>(1)</sup>

#### (4) 浮動式供料器

浮動式供料器，如圖 4.13 所示。在受料口下部安裝了一塊留有一定間隙的振動板，當振動板處於靜止狀態時，物料由於具有靜止角而停滯在此間隙中；當振動板振動時，由於物料流體化並在料倉內物料壓力的作用下而流出。適用於流動性好的物料。有一定的料封作用。

#### (5) 振動供料器

振動供料器，如圖 4.14 所示。依靠電磁振動器或振動馬達使輸送槽產生斜向的上下振動，而使物料產生斜向上下跳躍運動進行供料。供料器結構簡單、磨損小。

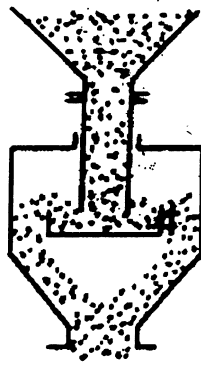


圖 4.13 浮動式供料器<sup>(1)</sup>

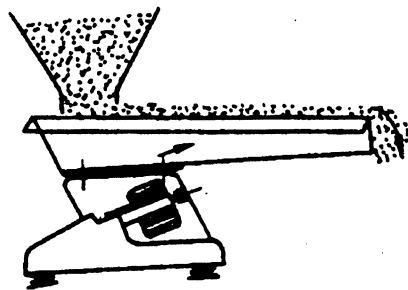


圖 4.14 振動供料器<sup>(1)</sup>

#### 4. 氣壓式及流體化式

##### (1) 噴射器

噴射器，如圖 4.15 所示。利用噴射器的作用，靠噴出的高速空氣在出料口縮頸處產生負壓而進行壓送物料。噴射器可單獨使用，也可與旋轉式供料器或螺旋供料器組合使用。

##### (2) 空氣槽

空氣槽，如圖 4.16 所示。它是一個稍傾斜的輸送槽，用多孔板將槽體分隔成上下兩部分。多孔板上覆蓋絲網或帆布。當下部通入低壓空氣時，空氣透過帆布使上部粉狀物料流體化而從板上流下進行供料。

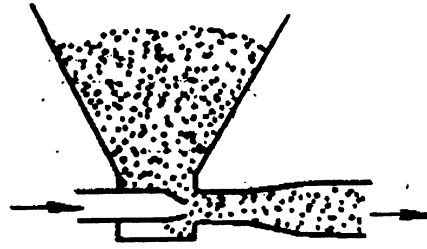


圖 4.15 噴射器<sup>(1)</sup>

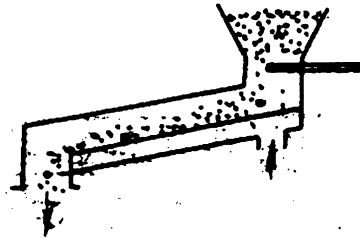


圖 4.16 空氣槽<sup>(1)</sup>

### 4.1.3 供料器設計及選用準則

應根據物料性質、使用狀態、密封要求等初始條件設計或選用具有所需特點的供料器，這就是供料器設計及選用準則。

#### 1. 物料的性質

必須對物料的物理和化學性質，包括物料水分、堆積密度、粒度及粒度分布、黏附性、吸濕性、破損性、磨損性、腐蝕性、熱敏性和休止角等進行測定和查詢，並對其在進出料過程中的物性變動情況進行研討。

#### 2. 使用狀態

必須充分注意下列實際使用條件，採取適當措施滿足使用要求。

(1) 供料器前段及後段裝置情況：包括裝置種類、操作壓力、濕

度、溫度、氣體介質種類及組成、料倉中物料貯量、壓力和流動性等。

- (2)物料加料量及允許誤差。
- (3)輸送距離。
- (4)聯鎖裝置和自動控制條件。
- (5)連續或間斷運轉的時間。
- (6)混入異物的可能性及其種類形態和數量。
- (7)架橋現象、噴料現象的可能性及其程度。

### 3. 密封問題

當供料器前後有壓差時，要採取措施在不漏氣的情況下供給物料，一般通過下列方法達到目的。

- (1)充分利用物料本身的重量所形成的料柱壓降。
- (2)壓緊物料，以保持氣密，如採用雙級串聯供料器。
- (3)將前段料斗改成密閉的結構。
- (4)安設壓力平衡罐，採用雙層排料閥。

## 4.2 乾燥器的熱風系統

熱風發生器是氣流乾燥、噴霧乾燥、流體化床乾燥以及旋轉窯乾燥等熱風型乾燥裝置中不可缺少的輔助設備之一。被乾燥物料中的水分主要是借助於熱風來傳遞熱量、蒸發水分。所以熱風生成方式除與乾燥物料的性質、成品品質要求、乾燥操作以及燃料供應條件外，還要結合裝置投資費用及操作、自動化控制程度等各方面因素綜合考慮，合理選擇適當的熱風加熱型式。通常有兩種加熱型式：直接煙道氣式和間接換熱式。各熱源特性及分類如表 4.1 所示。



表 4.1 熱源的特點及分類<sup>(1)</sup>

熱源的種類	加熱方式	操作性	經濟性		熱風的潔淨度	備註
			設備費	運轉費		
固體燃料	煙道氣	普通	大	小	差	直接利用煙氣
	間接熱風	普通	大	小	最佳	利用廢棄物的焚燒熱
液體燃料	煙道氣	佳	小	最小	普通	最普通的熱源，利用率高
	間接熱風	佳	大	小	最佳	
氣體燃料	煙道氣	佳	中	中	佳	燃料費較高
	間接熱風	佳	大	大	最佳	熱風潔淨度好，煙道氣的利用價值高
蒸氣 (熱介質)	空氣加熱 傳導加熱 乾燥	最佳	大	小	最佳	由翅片加熱器等所得到的熱風，用作傳導加熱乾燥的熱源
		最佳	大	小	最佳	
電	電熱	最佳	大	大	最佳	近於直接火，是電熱管的間接熱風
	紅外線	佳	大	大	最佳	利用輻射熱

#### 4.2.1 直接式熱風加熱裝置

所謂直接式熱風加熱裝置，就是採用燃料直接燃燒形成熱風。它將直接與物料接觸加熱乾燥。該種方法燃料的消耗量約比用蒸汽或其他間接加熱器減少一半左右。因此，在不污染物料原則下，儘量使用直接式煙道氣。

燃料可分為：固體燃料，如煤、焦炭。液體燃料，如柴油、

重油。氣體燃料，如煤氣、天然氣、液化石油氣。燃料經燃燒反應後得到的高溫燃燒氣體進一步與外界空氣接觸，混合到某一溫度後直接進入乾燥室，與被乾燥物料相接觸、加熱、蒸發水分，從而獲得乾燥產品。為了利用這些燃料的燃燒反應熱，必需設置一套燃料燃燒裝置。

### 1. 氣體燃料燃燒裝置

氣體燃料燃燒過程可分三個階段，即混合、著火及燃燒。燃料的混合過程比燃燒過程要緩慢得多。因此，決定氣體燃料燃燒方式的主要因素是混合過程。故氣體燃燒噴嘴按其燃料與空氣的混合方式分成擴散式煤氣噴嘴、噴射式煤氣噴嘴、半噴射式煤氣噴嘴。

燃料氣燃燒時，最應注意的是爆炸和氣體中毒。使用時必須注意以下幾點：(1)點火前與滅火後的清理；(2)燃燒中火焰的觀察；(3)必須先開抽風機或助燃鼓風機後再開燃料氣閥門。停車時必須先關燃料氣閥門，後再關抽風機或助燃鼓風機。

### 2. 液體燃料燃燒裝置

液體燃料包括：重油、柴油。在乾燥裝置中直接燃燒時，大部分採用柴油。

液體燃燒裝置通常稱燃油噴嘴，可分為蒸發式或霧化式。工業上用的大部分是霧化式噴嘴。霧化的方法大致可分為：(1)油壓式；(2)空氣或蒸汽式；(3)旋轉圓盤式。燃油噴嘴雖形式各異，但正確的霧化最為重要。它將直接影響到是否能完全燃燒及燃後氣體中有無明顯灰分並將直接影響乾燥產品的純度及顏色。

### 3. 固體燃料燃燒裝置

煤的燃燒方法有兩種：塊煤的層狀燃燒法和粉煤的懸浮燃燒法。

塊煤的層狀燃燒法，即煤在爐篦上燃燒時，在爐篦上保持一

定的厚度。根據煤的燃燒過程和特點，層狀燃燒爐有各種不同型式。

由於加煤方式不一樣可分為人工爐、鏈條爐、往復爐等爐型。要保證燃燒正常操作，爐內空氣量供應要充分，一般爐膛出口過剩空氣係數，對於中小型層狀燃燒爐可按下列範圍選擇：人工燒煤爐為 1.3~1.4，機械化爐篦煤爐為 1.2~1.3。

煤粉噴焰燃燒爐之燃燒室可分為立式噴燃燃燒室及臥式噴燃燃燒室。其最大特點是能適用於各種煙煤和貧煤，煤粉容易點火，火焰燃燒穩定，煤粉燃盡度高，熱效率高，節能效果顯著，操作方便，維護檢修容易等優點。是一種較為理想的燃燒爐。主要缺點是要將塊煤預先進行破碎，加工比較麻煩。

#### 4.2.2 間接式熱風加熱裝置

間接式熱風加熱裝置，主要適用於被乾燥物料不允許被污染或應用於溫度較低的熱敏性物料的乾燥。此種加熱裝置，即是將蒸汽、熱煤油、煙道氣等作介質，通過翅片加熱器、層板式加熱器或多頭導向螺旋槽管換熱器等金屬壁的傳熱來加熱空氣。根據具體的條件及物料性能來進行合理選擇及設計。

##### 1. 蒸汽(熱煤油)間接翅片加熱裝置

翅片加熱器是由裝在隔熱的金屬殼體內帶葉片式或螺旋形翅片式的散熱排管製成。通常裝在供氣鼓風機的排風端或是裝在乾燥器前端(全負壓操作條件下)。往往由好幾組串聯排列而成。由於金屬材質及翅片結構型式不同，它有各種型式。

##### 2. 熱風爐換熱器—煙道氣間接加熱裝置

熱風爐是獲得熱風的一種最新型設備。它是將加熱金屬板做成各種型式，直接放入煙道室，依靠金屬壁傳熱來加熱空氣。一般而言，有燃煤式熱風爐換熱器及燃油式熱風爐換熱器二大類。

### 3. 電加熱器

電加熱器由電熱元件和加熱箱體二部分組成，電熱元件主要通過電阻元件如電阻絲、碳化矽棒等使電能轉變成熱能的一種加熱形式。其主要特點：使用方便，無環境污染，結構簡單，製作方便，控制溫度精度較高。

### 4.3 乾燥器的除塵系統

物料在乾燥過程中，在各種不同場合將會有粉塵的產生，其中絕大部分的粉塵就是產品。通常，由於乾燥過程是整個產品處理的最後一道單元，它將直接能獲得固體產品。所以粉塵回收好壞，不僅為了防止污染環境、改善操作條件，更主要的是能最大限度地獲得更多的優質產品，減少損失，提高產率，有效地降低處理成本。因此在乾燥系統中對除塵系統的選型、設計必須認真考慮。對於各種乾燥飛揚物的控制設備的選型如表 4.2 所示。

除塵系統的選擇主要考慮以下幾個因素：(1)含塵氣體的性質，如氣體量、氣體的溫度和濕度、氣體含塵濃度、粉塵的性質和粒級分布範圍；(2)環境對淨化程度的要求；(3)除塵設備本身的特性。常用除塵器有四大類型，其性能如表 4.3 所示。

#### 4.3.1 重力除塵器

由於重力除塵器的沉降速度太小，因此只用於分離  $5\mu\text{m}$  以上的粗塵粒。對順流型噴霧乾燥塔來說，其下部擴大段及錐體部分即就是一個重力除塵器，一般可獲得 50%~80% 產品。較細粉塵將隨氣流一起進入二級除塵器，進一步回收成品。

表 4.2 各種乾燥飛揚物的控制設備<sup>(1)</sup>

設備型式	飛揚物分類			設備型式	飛揚物分類		
	粉塵	氣體	臭味		粉塵	氣體	臭味
旋風除塵器	○			吸收		○	○
織物過濾器	○			凝聚		○	○
濕法洗塵	○			濕法洗塵反應		○	○
靜電除塵	○			生物過濾			○
焚燒				氣體中和			○
吸附		○	○	空氣沖淡			○

表 4.3 四大類型除塵器的比較<sup>(1)</sup>

除塵器類型		適用粉塵粒徑 ( $\mu\text{m}$ )	製造安裝費	操作管理費	說明
機械 力除 塵器	重力除塵器	大於 100	低	低	佔地面積龐大，除塵效率過低
	慣性除塵器	大於 50	中	低	除塵效率偏低
	旋風分離器	大於 5	中	中	分離小於 $5\mu\text{m}$ 顆粒較困難
濕式除塵器		大於 0.1	高	高	需要處理洗滌污水
過濾除塵器		大於 0.1	高	高	需要有清灰裝置
靜電除塵器		大於 0.05	很高	中	對於高濃度粉塵運轉費很高

### 4.3.2 慣性除塵器

慣性除塵器是利用粉塵在運動中慣性力大於氣體慣性力的作用，將粉塵從含塵氣體中分離出來的裝置。該除塵器結構簡單，阻力較小，但除塵效率較低。

### 4.3.3 旋風除塵器

旋風除塵器是利用旋轉的含塵氣體所產生的離心力，將粉塵從氣流中分離出來的一種乾式氣固分離裝置。對於捕集、分離 5~10  $\mu\text{m}$  以上的粉塵效率較高，被廣泛地應用。旋風除塵器具有以下幾個優點：

1. 設備結構簡單，設備無運動組件，不需要特殊的附屬設備，佔地面積小，製造安裝投資費用較省。
2. 操作維修簡便，維護費用低。
3. 壓力損失不大，動力消耗省，運轉費用較低。
4. 對溫度及壓力極限只要從材質上來考慮，在高溫條件下，可採用特殊耐熱合金或襯(噴塗)耐溫材料。
5. 操作彈性大，性能穩定，不受氣體的濃度及其物理、化學性質的限制，可根據產品的要求，選用不同材料製作。
6. 乾燥產品能得到較好回收及安置。

旋風除塵器具有以下幾個缺點：

1. 對回收粒徑小於 5~10  $\mu\text{m}$  時效率較低。
2. 對大氣量要採用組合式旋風除塵器，否則將影響收率。
3. 對過分黏性物料不適合，容易引起黏壁，另外對粒子有附聚長大，容易堵塞進出口物料，亦不適用。
4. 為符合排放標準，一般需要二級除塵。

### 4.3.4 袋式除塵器

袋式除塵器是一種高效率的乾法除塵器，其適用於捕集非黏

結、非吸濕性及非纖維性的粉塵，處理初濃度為  $0.0001\sim 1,000\text{ g/m}^3$ ，粒徑為  $0.1\sim 200\ \mu\text{m}$ 。濃度太高或粒徑大於  $200\ \mu\text{m}$  的粉塵須先經旋風除塵器收集。袋式除塵器的除塵效率高，可達 99% 以上，而且比較穩定，在乾燥系統由於氣體中含有水蒸汽，應避免出現結露現象，所以必需採取保溫措施。對於吸濕性較強或黏性較大物料選用時要慎重。

袋式除塵器是依靠編織的或毯織的濾布(多孔纖維材料)作為過濾材料來達到分離含塵氣體中粉塵的目的。它的工作原理是粉塵通過濾布時產生的篩分、慣性、黏附、擴散和靜電等作用而被捕集。

按清灰方法袋式除塵器分為：人工拍打、機械振動、氣環反吹、脈衝反吹等。按含塵氣體進氣方式，可分為內濾式或外濾式。內濾式係含塵氣體由袋內向濾袋外流動，粉塵被分離在濾袋內。外濾式係含塵氣體由濾袋外向濾袋內流動，粉塵被分離在濾袋外；由於含塵氣體由濾袋外向濾袋內流動，因此濾袋必須設置骨架，以防濾袋被吹扁。按照含塵氣體與被分離的粉塵下落方向分為順流式和逆流式。順流式為含塵氣體與被分離的粉塵下落方向一致。逆流式則相反。

濾袋材料有毛、棉織品、玻璃纖維、多孔燒結陶瓷等，如果濾布選用恰當，風速合適，袋式除塵器的除塵效率一般可達 99% 左右。

#### 4.3.5 濕式除塵器

使含塵氣體與水或其他液體相接觸。利用水滴和塵粒的慣性碰撞、黏合、黏附、凝集等作用，而把微米級塵粒從氣流中分離出來的設備稱為濕式除塵器。

濕式除塵器具有投資少，結構簡單，操作及維修方便，佔地面積小等優點。除塵效率高，能捕集極細塵粒，在操作時它不會

使捕集到的粉塵再飛揚。往往作二級除塵器使用。達到環保排放要求。其主要缺點是在使用過程中不能得到乾燥產品，設備容易腐蝕，會造成水的二次污染。

當氣體濕擊到濕潤的器壁時，塵粒被器壁所黏附或者當氣體與噴灑的液滴相遇時，液體在塵粒質點上凝集，增大了質點的重量，而使之降落。在濕式除塵器中，氣體與液體的接觸方法有兩種：一種是氣體與水膜或已被霧化了的水滴接觸，如文氏管除塵器、水膜式除塵器、噴淋式除塵器等；另一種是氣體沖擊水層時鼓泡形成細小的水滴或水膜，如沖擊式除塵器、自激式除塵器等。

#### 4.3.6 靜電除塵器

靜電除塵器是使含塵氣體在通過高壓電場進行靜電分離的過程，使塵粒荷電，並在電力的作用下，使塵粒沉積於電極上，將塵粒從含塵氣體中分離出來的一種除塵設備。

靜電除塵器主要優點如下：

1. 除塵效率高，理論上可達到將近 100%，即使是處理微細粉塵，也能達到很高的除塵效率。
2. 可適應處理大的煙氣量，現在靜電除塵每小時處理  $10^5 \sim 10^6 \text{m}^3$  的煙氣量是很普通的。
3. 所收集粉塵顆粒的範圍大，對於小於  $0.1 \mu\text{m}$  的粉塵仍有較高的效率。同時粉塵濃度也允許高達數十克甚至千克每立方米。
4. 可適用於高溫煙氣，一般常規處理 350~400K 以下煙氣，如進行特殊設計可以處理 500K 以上的煙氣。
5. 消耗的電能少，因而可以減少操作費用。雖然靜電除塵器在供給高壓放電上需要消耗部分電能，但由於除塵器阻力小(通常僅 200~300Pa)，因此在鼓風機的電能上都可大為節省，因而總的能耗要比其他類型除塵器要低，按每小時處理  $1,000 \text{m}^3$  煙氣量計算，電能消耗約為 0.1~0.8kW。



6. 自動化程度高。

靜電除塵器的缺點如下：

1. 初期投資高，鋼材消耗量也較大。
2. 對粉塵的敏感性大，最適宜的範圍是比電阻  $10^4 \sim 5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。  
在此範圍以外，就需要採取一定的措施才能取得必要的效率。
3. 對製造、安裝、操作要求較嚴格，否則不能維持必需的電壓，除塵效率將降低。
4. 佔地面積較大。

## 第五章 乾燥器的選定

乾燥器選定所需考量因素甚為複雜，諸如物料本身的物化特性；加熱方法、操作溫度、操作壓力對乾燥過程的影響；能源種類及價格；操作過程的環保及工安等因素，均需詳加考量。本章將針對上述相關因素進行介紹，另亦簡略的介紹乾燥器尺寸的估算，俾提供基本的選用參考。

### 5.1 概述

廢棄物焚化處理時，總是必需加熱到很高的溫度，使其順利燃燒。進入焚化爐之前，在較低溫度下進行乾燥前處理對節省能源將有很大的貢獻。另部分廢棄物資源化再利用通常需要進行乾燥前處理，使其保有特定的濕含量以便加工、成型或造粒，進而順利再製成再生產品。但過度乾燥則是一種浪費，不僅消耗更多熱能，而且過度乾燥經常導致資源化產品品質下降。故對於採用的乾燥設備，應力求乾燥過程中的節能和保證資源化產品品質的措施。

物料最終濕含量決定了乾燥時間和乾燥操作的條件。物料應該避免過度乾燥，另物料顆粒內部的濕分梯度和顆粒間濕含量的均勻性亦須審慎考量。再者，由於物料變質、相變、污染、可燃性和其他因素，使得溫度限制可能需更加嚴格考量。

### 5.2 乾燥器的分類

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(1)傳導加熱；(2)對流加熱；(3)輻射加熱；(4)微波和介電加熱等。而冷凍乾燥可歸納為傳導加熱

的一種特殊情況。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。

表 5.1 所示為適用於廢棄物或資源化產品乾燥處理之乾燥器類型和相對應的物料類型。物料區分為糊狀、膏狀、濾餅、粉末、顆粒、結晶、片狀物或纖維、成型物料等。表 5.2 所示為對流和傳導乾燥器的分類。這種分類對在較窄的範圍內選擇乾燥器可作參考。表 5.3 所示為乾燥器典型的乾燥能力和能量消耗。

### 5.3 乾燥器的選擇

乾燥器的選擇受諸多因素的影響，下面將針對各種影響乾燥器選擇的因素作一綜合的介紹。

#### 5.3.1 加熱方法對乾燥過程的影響

##### 1. 對流

對流乾燥器有流體化床、氣流、旋轉窯、帶式、台車-隧道乾燥器等。對流加熱是乾燥顆粒、糊狀或膏狀物料最通用的方式。由熱空氣或其他氣體流過物料表面或穿過物料層提供熱量，而蒸發的濕分由乾燥介質帶走。空氣(最常見)、惰性氣體(如  $N_2$  在乾燥物料濕分為有機溶劑時採用)、直接燃燒氣體或過熱蒸汽(或溶劑蒸氣)均可用作對流乾燥系統的加熱介質。

這種乾燥器也稱作直接(加熱)乾燥器，在初始等速乾燥階段(在此階段表面濕分被排除)，物料表面溫度為對應加熱介質的濕球溫度(wet bulb temperature)。在減速乾燥階段，物料的溫度逐漸逼近介質的乾球溫度(dry bulb temperature)，在乾燥熱敏性物

料時，必需考慮這些因素。

表 5.1 以物料型態選擇乾燥器<sup>(1)</sup>

物料性質	液態		濾餅			可自由流動的物料					成型物件
	溶液	糊狀	膏狀	離心分離濾餅	過濾濾餅	粉狀	顆粒	易碎結晶	片料	纖維	
<b>對流乾燥器</b>											
帶式乾燥器							○	○	○	○	○
氣流乾燥器				○	○	○	○			○	
流體化床乾燥器	○	○		○	○	○	○		○		
旋轉窯乾燥器				○	○	○	○		○	○	
托盤乾燥器(間歇)				○	○	○	○	○	○	○	○
托盤乾燥器(連續)				○	○	○	○	○	○	○	
<b>傳導乾燥器</b>											
轉鼓乾燥器	○	○	○								
蒸汽夾套旋轉窯乾燥器				○	○	○	○		○	○	
蒸汽管式旋轉窯乾燥器				○	○	○	○		○	○	
托盤乾燥器(間歇)				○	○	○	○	○	○	○	
托盤乾燥器(連續)				○	○	○	○	○	○	○	

表 5.2 對流和傳導傳熱乾燥器中物料的停留時間<sup>(1)</sup>

乾燥器	在乾燥器內停留時間				
	0~10 秒	10~30 秒	5~10 分	10~60 分	1~6 時
<b>對流乾燥器</b>					
帶式乾燥器				○	
氣流乾燥器	○				
流體化床乾燥器				○	
旋轉窯乾燥器				○	
托盤乾燥器(間歇)					○
托盤乾燥器(連續)				○	
<b>傳導乾燥器</b>					
轉鼓乾燥器		○			
蒸汽夾套旋轉窯乾燥器				○	
蒸汽管式旋轉窯乾燥器				○	
托盤乾燥器(間歇)					○
托盤乾燥器(連續)					○

表 5.3 乾燥器典型的乾燥能力和能量消耗<sup>(1)</sup>

乾燥器類型	典型的蒸發能力 (kg H <sub>2</sub> O/h • m <sup>2</sup> 或 kg H <sub>2</sub> O/h • m <sup>3</sup> )	典型的能量消耗 (kJ/kg H <sub>2</sub> O 蒸發)
隧道乾燥器	~	5,500~6,000
帶式乾燥器	~	4,000~6,000
旋轉窯乾燥器	30~80 /m <sup>3</sup>	4,600~9,200
流體化床乾燥器	~	4,000~6,000
氣流乾燥器	5~100 /m <sup>3</sup> (取決於顆粒尺寸)	4,500~9,000
轉鼓乾燥器(對膏狀物料)	6~20 /m <sup>2</sup>	3,200~6,500

註：數字是近似的，較好的結果可由操作條件最佳化和技術改良而得到。

## 2. 傳導

傳導或間接乾燥器更適用於薄層物料或很濕的物料。蒸發熱由通過安置在乾燥器內的加熱面(靜態的或移動的)供給。蒸發出的濕分由真空操作或少量氣流帶走。在對流乾燥器中，由於焓隨乾燥空氣逸失是很大的，故其熱效率很低，而傳導乾燥器熱效率就較高。乾燥膏狀物料的漿式乾燥器(paddle dryer)，內部裝有蒸汽管的旋轉窯乾燥器(rotary dryer)、乾燥薄層糊狀物的轉鼓乾燥器(drum dryer)均屬間接乾燥器。

對某些操作，可結合直接和間接兩種加熱的優點，例如在流體化床乾燥器中裝有浸沒加熱管組或蛇管，這種乾燥器的尺寸僅為單純對流流體化床乾燥器完成同樣作業時的 1/3。

值得注意的是，有時某些設備可以直接方式、間接方式或聯合方式操作。例如振動流體化床乾燥器可以是單純對流的，單純

傳導的或者是直接—間接結合的。

### 3. 輻射

各種電磁輻射源具有的波長從太陽頻譜到微波(0.2m~0.2  $\mu$  m)，太陽能輻射僅僅照射在物料的表層上，它僅吸收一部分入射能，吸收能量僅取決於入射能的波長。雖然大多數濕物料是50~60Hz電流的不良導體，但對輻射頻率(radio frequency, RF)其阻抗都顯著地下降；這種輻射可用於容積性的加熱物料，因此降低了對傳熱的內部阻力。由於水分子選擇性地吸收能量，使物料乾燥時消耗較少的能量。但由於投資和操作費用較高，故這種技術較少應用於廢棄物乾燥處理。

#### 5.3.2 操作溫度和操作壓力對乾燥過程的影響

大多數乾燥器在接近大氣壓時操作，微弱的正壓可避免外界向內部洩漏，在某些情況下，如果不允許向外界洩漏則採用微負壓操作。

真空操作是昂貴的，僅僅當物料必需在低溫、無氧或在中溫或高溫操作時產生異味的情況下才採用。高溫操作是更為有效的，由此對於給定的蒸發量可採用較低的氣體流量和較小的設備。在可獲得低溫度熱或從太陽能收集器獲得熱能時，可選擇低溫操作。

#### 5.3.3 乾燥器中物料的處理方法

被乾燥物料的處理方法對乾燥器的選擇是關鍵的因素之一，說明如表5.4所示。在某些情況下物料需經預處理或預成型以使其適宜在某種特殊乾燥器中乾燥。例如，造粒後在流體化床中乾燥。當然額外的花費必需計入總費用中。當處理物料的性质在乾燥時顯著地變化或在乾燥過程中其熱敏性發生變化時，採用兩種或多種不同類型乾燥器的組合可能是最佳的方案。

表 5.4 某些乾燥器中被乾燥物料的處理方法<sup>(1)</sup>

方法	典型的乾燥器	典型的物料
物料不運送	托盤乾燥器	膏狀物料、顆粒物料
物料因重力而降落	旋轉窯乾燥器	可流動的顆粒物料
物料由機械運送	螺旋輸送乾燥器、槳葉式乾燥器	糊狀物、膏狀物
在台車上運送物料	隧道乾燥器	各種物料
形成糊狀的物料、貼在滾筒上	轉鼓乾燥器	糊狀物、膏狀物
在輸送帶上運送物料	帶式乾燥器	各種固體物料
物料懸浮在空氣中	流體化床、氣流乾燥器	可流動的顆粒

#### 5.3.4 能源價格、安全操作和環境因素對乾燥器選擇的影響

乾燥器的最終選擇通常在設備價格、操作費用、物料品質、安全及便於安裝等方面提出一個折衷方案，在不肯定的情況下，應作一些初步的試驗以驗證設計和操作數據及對特殊操作的適應性。對某些乾燥器，作大型試驗是建立可靠設計和操作數據的唯一方法。

逐漸上升的能源價格、污染防治、改善工作環境和安全性等方面日益嚴格的法規規範，對設計和選擇乾燥器具有直接的影響作用。

對某一給定的乾燥系統(包括預處理)，如機械脫水、離心分離、蒸發、成型及後處理(物料收集、冷卻、造粒及清洗)，一般情況下，可作出幾種不同的節能分析流程圖。諸如氣體再循環、封



閉循環操作、多級乾燥、排氣的充分燃燒等相關措施，在法規要求、衛生作業和能量利用率之間可能存在有衝突。在確定採用的系統時，不必要的提高物料的技術或品質要求，會造成乾燥成本的顯著提高，不論對初期投資，或是操作費用都是不合適的。

乾燥裝置可能因粉塵和氣體的排放而造成空氣污染，在某些情況下，甚至潔淨的水蒸氣也會造成污染。在排氣中顆粒含量應低於  $20\sim 50\text{mg}/\text{m}^3$ ，因而應採用高效除塵裝置或採用多級除塵。旋風分離器、袋式過濾器 and 靜電除塵器通常用於顆粒狀污染物的收集。

為消除有害氣體的污染，可採用吸收、吸附或焚化等處理方式。對於具有爆炸風險物料(如含有機溶劑的廢棄物)的乾燥時必須小心防火，降低氧含量(作再循環)可抑制爆炸危險。如果會出現爆炸，一定要設置相對的爆炸排氣通道，以避免在系統中形成極高的壓力。僅消除著火源作為預防著火和消除爆炸風險並不可靠，當存在爆炸危險時，必須避免在乾燥器或收集器中堆積物料。

最後，在選擇和設計階段必須考慮噪音問題。通常鼓風機是主要的噪音源。此外，如泵、變速箱、壓縮機、燃燒器及混合器也都會產生噪音。要使鼓風機噪音較低就應使系統的壓降較低。

以上是討論影響乾燥設備選擇的一些特殊因素，這些因素在乾燥系統選擇階段應予考慮。

## 5.4 乾燥器尺寸估算

選擇的乾燥器必需能滿足物料要求的條件，在最終選定一種乾燥器型式之前應對可替代系統的性能特徵作出評審。幾乎總是需要作某些小型試驗以了解物料的乾燥特性，並進而預測在選定乾燥器中可否完成乾燥要求。

關於乾燥器尺寸的初步估算，可依下述簡便方法估算。

對流乾燥器由下式確定熱傳速率(kcal/h)：

$$q=h_a V(t_g-t_m) \quad \text{間歇式}$$

$$q=h_a V(t_g-t_m)_{ln} \quad \text{連續式}$$

傳導型乾燥器由下式確定熱傳速率(kcal/h)：

$$q=KA(t_k-t_m)$$

表 5.5 各種型式乾燥器的體積熱傳係數( $h_a$ )近似值<sup>(1)</sup>

類型	$h_a$	$\Delta t_{ln}(^{\circ}\text{C})$	進口熱空氣溫度( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>對流型：</b>			
旋轉窯乾燥器	100~200	逆流 80，150 並流 100，180	200~600 300~600
氣流乾燥器	2000~6000	100~180	400~600
流體化床乾燥器	2000~6000	50~150	100~600
隧道乾燥器	200~300	逆流 30~60 並流 50~70	100~200 100~200
噴流乾燥器	$h=100\sim 150$	30~80	60~150
<b>傳導型：</b>	$U(\text{kcal}/\text{h} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$	$t_k-t_m(^{\circ}\text{C})$	
轉鼓乾燥器	100~200	50~80	
帶蒸汽管的攪動穿過 旋轉窯乾燥器 (黏性物料較小)	60~130	50~100	

式中， $t_m$  為物料溫度，K； $t_g$  為進氣溫度，K； $(t_g-t_m)_{ln}$  為進出口處熱空氣和物料之間溫度差的對數平均值，K； $h_a$  為體積熱傳係數， $\text{kcal}/(\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^3)$ ； $K$  為總熱傳係數， $\text{kcal}/(\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2)$ ； $A$  為與

物料接觸的加熱面積， $m^2$ ； $t_k$  為熱源溫度，K。

表 5.5 所示為近似的體積熱傳係數  $h_a$  及總熱傳係數  $k$  值，此處的體積包含乾燥器佔有的各種內部空間，例如流體化床乾燥器上方和底下的體積。必需對通過乾燥器時空氣溫度的降低和物料溫度的上升作出估計，可以應用表 5.5 粗略地估算乾燥器的尺寸。

## 第六章 廢棄物乾燥處理及資源化案例

近年來，隨著廢棄物妥善處理與資源化的需求與日俱增，利用乾燥設備進行廢棄物之乾燥處理已廣為業界所採用。本章將例舉國內外廢棄物乾燥處理相關案例進行探討，諸如皮革下腳料轉製有機肥、水產下腳料轉製飼料及肥料、水淬高爐石生產爐石水泥、含金屬廢棄物高溫熔煉、電鍍污泥回收鉻酸鈉及鐵黑、污泥減量等案例。

### 6.1 皮革下腳料蒸煮乾燥轉製有機肥案例

#### 6.1.1 前言

台灣地區的皮革廠以中小企業居多，在分佈上有 60%之皮革廠集中於南部地區，尤其以台南縣居多，佔總數之 25%，極為適合集中處理各工廠所產生的同類事業廢棄物。為使業者能集中處理自己產生的工業廢棄物以符合處理的經濟規模，行政院環保署與經濟部於民國 82 年共同訂定「推動工業廢棄物處理體系輔導要點」。A 工廠為首宗依據此要點所設立之皮革業廢棄物聯合處理體系，該廠係以資源化方式處理皮革下腳料，該廠之設計處理容量為每年處理 10,000 公噸之削邊皮及皮粉；年產能為 3,300 公噸蒸製皮革粉。

#### 6.1.2 製程與原理

該廠設立之目的係將皮革業所產生廢棄物中之削邊皮和皮粉等下腳料經加工處理後，資源化作為台肥公司特一號有機肥料的原料。資源回收廠之處理流程可分為進料、蒸煮、粉碎、乾燥及

包裝等流程，以下針對各製程予以說明，處理流程如圖 6.1 所示。

### 1. 進料

將削邊皮及皮粉進行分類貯存，並分別送進不同的蒸煮器。

### 2. 蒸煮

削邊皮或皮粉之蒸煮原理均一樣，係以  $3\sim 4\text{kg}/\text{cm}^2$  壓力蒸氣通入密閉的蒸煮器中，直接蒸煮 30~40 分鐘。

蒸煮器的洩壓閥與臭味集氣管路連接，直接將臭味抽吸至濕式洗滌塔處理。

### 3. 粉碎及乾燥

蒸煮後的削邊皮和皮粉可同時或分別經輸送皮帶送至粉碎機一次粉碎成粒徑 10mm 大的細顆粒，再經由雙螺旋送料機送入乾燥器進行乾燥。

該乾燥器係採蒸汽連續間接乾燥方式進行乾燥，其示意圖如圖 3.36 所示(間接加熱圓筒型槳葉式乾燥器(高速))，蒸氣壓力為  $6\sim 7\text{kg}/\text{cm}^2$ ，使皮革細顆粒含水率由 80% 降至 12%。

採蒸汽連續間接乾燥器，除可以縮短乾燥時間外，亦可減少廢氣之產生。乾燥過程所產生之含粉塵廢氣係以袋濾集塵機處理。處理後之廢氣符合現行排放標準。

### 4. 二次粉碎及包裝

含水率合格的皮革粉，經二次粉碎使成 4mm 以下的皮革粉後，加以包裝、儲存供銷售。

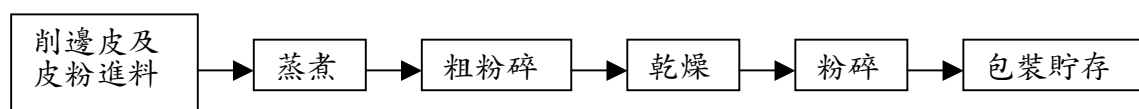


圖 6.1 皮革下腳料蒸煮乾燥處理流程

### 6.1.3 資源化成效

皮革工業屬高污染工業，因而成為近年來政府機關加強輔導與嚴格取締的產業之一。該廠即為延續以往的減廢輔導，更進一步輔導業者成立廢棄物資源回收處理體系，並建造一可實際運轉的資源化示範廠，以解決皮革業廢棄物處理處置之窘境。

該廠係以資源化方式處理皮革下腳料，設計處理容量為每年處理 10,000 公噸之削邊皮及皮粉；年產能為 3,300 公噸蒸製皮革粉。皮革粉之粒徑為 2mm~4mm；含水量小於 12%；含氮量大於 12%，可用以調製有機質複合肥料，或直接施肥用。

該廠之經營雖不以營利為目的，但仍須以企業經營的精神經營，以確保資源化廠經營體質之健全。依工程經濟之原則進行財務分析的結果顯示，如不收取處理費用，則該廠的經營將處於虧損狀況，且回收年限長達 12.56 年，現值報酬率僅 4%。為改善營運狀況，且依該公司股東會決議核定該廠之淨利為年銷售額之 30%，經試算結果顯示處理費用收取 500~1000 元/噸原料即可達盈餘目標，且回收年限縮短至 4.5 年以下，現值報酬率則提升至 23% 以上。

### 6.1.4 結語

該廠之營運，不僅解決了南部皮革業者削邊皮及皮粉廢棄物之處理處置問題，其成功的營運模式並具有拋磚引玉的功能，提昇了中、北部有意籌組廢棄物處理體系者的意願，其所獲致的經濟效益及節省的社會成本難以估計。

## 6.2 水產下腳料蒸煮乾燥轉製飼料及肥料案例

### 6.2.1 前言

國內冷凍水產加工所產生的廢棄物如魚頭、魚肚、蝦殼、蝦

頭、魷魚肚以及下雜魚等，一般均交由魚粉製造工廠處理，製成魚溶漿及飼料用魚粉。然大部份處理廠規模很小，且屬於地下工廠，因處理過程中會產生嚴重臭味問題，並可能產生廢水污染，小型處理廠因經濟規模不足，且魚粉價格又不佳，根本不可能投資污染防治設備，致使此類工廠逐漸被淘汰。

B 廠位於宜蘭縣龍德工業區內，自民國七十七年起即協助水產加工業處理其下腳料。為了確保冷凍水產加工業所產生的下腳料能繼續得到妥善的處理，回收有用的資源，不致成了無用的廢棄物，造成產源工廠的廢棄物處理困擾，乃於民國八十一年接受行政院環保署及經濟部工業局輔導組成聯合處理體系，由廢棄物產生源自行處理此類廢棄物。

### 6.2.2 製程與原理

B 廠冷凍水產加工廢棄物資源回收廠處理流程可分為：進料前處理、魚粉製程、魚溶漿製程與有機粒肥製程四大系統，處理流程如圖 6.2 所示，說明如下：

#### 1. 進料前處理系統

進料前處理系統為將魚下腳分批從原料貯存區鏟入蒸煮機蒸煮，在 100°C 高溫下將原料煮熟(30~40 分鐘)，以破壞魚下腳的分解酵素。蒸煮後將出料輸送到榨汁機做固液分離，固形物部分再送入魚粉製程，液體部分則送到貯槽暫時貯存，再經振動篩選機將魚汁中的顆粒物質篩除，然後進入魚溶漿製程。

#### 2. 魚粉製程系統

魚粉製程為將蒸煮後之魚下腳固形物部分送入連續式快速乾燥器中進行乾燥，在此過程固形物含水率約由 65%降至 30%。快速乾燥器出料再輸送到批次式乾燥器進行第二次乾燥，含水率再降至 10~12%。第二次乾燥後的魚粉經過振動篩選機過篩，魚粉穿過篩網，魚骨則留在網上而被分離，然後魚骨經由粉碎機加

以粉碎，再與原先之魚粉混合，經由包裝機出料、包裝成成品。

### 3. 魚溶漿製程系統

進料前處理時所產生的魚汁送到發酵槽內進行發酵，發酵溫度約 45~50°C，所需時間約 5~8 小時。

發酵槽的出料首先經過離心分離機將固、液分離，固形物部分送入魚粉製程，液體部分則送至濃縮罐進行濃縮處理。濃縮罐的操作溫度約為 100°C，發酵過的魚汁濃縮後其含水率由 95% 降至 35~45%，濃縮後在濃縮罐上層的為魚油，下層則為魚溶漿，將上層浮油抽出，剩下的即為魚溶漿成品。

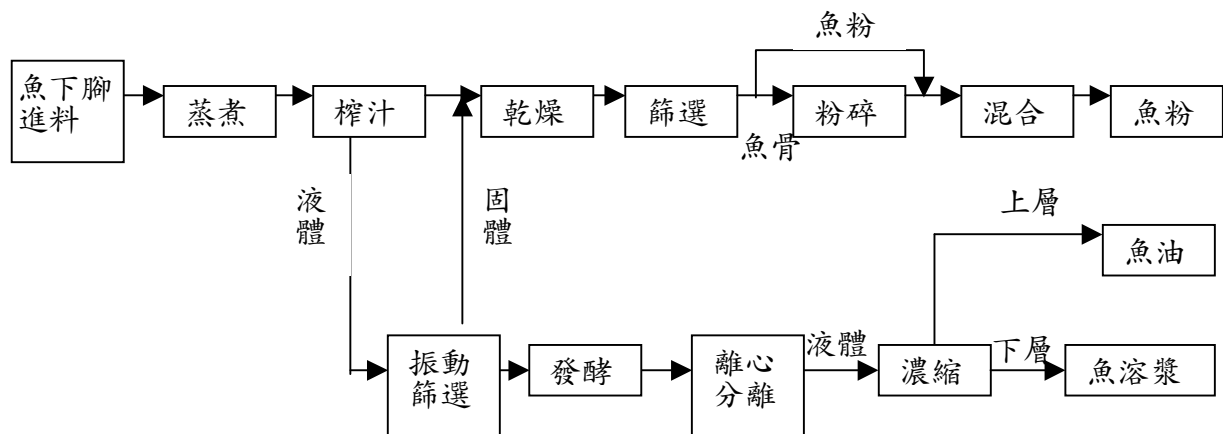


圖 6.2 水產加工下腳料蒸煮乾燥轉製飼料及肥料製程

### 4. 有機粒肥製程系統

由於魚粉、蝦蟹殼粉含有豐富的氮、磷、鉀以及幾丁質，可以當作肥料使用。將魚粉、蝦蟹殼粉、海草粉、苦土石灰、菜籽粕、尿素、糖蜜與澱粉、米糠等各種原料依照配方成份比例混合，經過粉碎，再擠壓造粒即成為粒狀肥料。



### 6.2.3 製程改善與污染防治措施

冷凍水產加工廢棄物資源回收廠自設廠以來即不斷進行製程改善、產品開發以及污染防治設施之設置改善，俾能降低生產成本、提高產品價值，以及減少污染之發生。

#### 1. 製程改善

##### (1) 快速乾燥器的增設

原先魚粉製程中採用一段批式(楔形槳葉)乾燥器處理，每批次生產產品 500 公斤，需 4~5 小時之乾燥時間，且常造成臭味之產生及耗費大量能源。經添購一部連續進料快速(圓盤槳葉)乾燥器(生產產品 1000 公斤/時)做為第一次乾燥，原批式乾燥器做為二次乾燥用，使得乾燥時間縮短為 1~2 小時。快速(圓盤槳葉)乾燥器的增設不僅縮短乾燥時間、產能增加數倍，而且達到自動化的效果，降低操作及生產成本。

##### (2) 設備密封化

根據資源回收廠以往的操作經驗，整廠操作過程中大部份均有臭味產生的問題，而且開放式製程設備產生的臭氣不易收集處理，因此設備的密封化有其必要性，資源回收廠對於蒸煮、乾燥、發酵與濃縮製程等主要臭氣產生源加以密封化，使產生的臭氣易於收集處理，而且對作業環境品質亦有提昇之作用。

#### 2. 污染防治措施

資源回收廠主要的污染為臭味空氣污染，資源回收廠對於臭味氣體的 control 首先是由製程和生產管理來預防，儘量將設備密閉化，減少臭氣的發生，對於產生的臭氣則以集氣系統收集，採用濕式洗滌法加以處理。

資源回收廠既設的廢氣處理設備為六座濕式洗滌塔，原先設置於廠房屋頂上，因平時操作維護極為不便，配合臭氣集氣系統

的重新規劃，將其移至室內，並將六座獨立的洗滌塔改成二組，第一組負責處理蒸煮、發酵與濃縮製程廢氣，第二組負責處理乾燥製程廢氣，如此，操作彈性加大，且維修容易。

因為魚下腳處理過程中產生的臭味，並無法百分之百被洗滌塔去除，雖然排氣之臭味已可符合環保標準，資源回收廠仍進一步進行生物濾床(除臭)設備的增設，把洗滌塔排氣再經生物脫臭二次處理，一方面可以降低首段水洗塔的操作負荷，另一方面也可將排氣臭味濃度降至最低。

#### 6.2.4 資源化成效

資源回收廠每年實際處理量約為 1 萬 2 仟公噸，約佔台灣地區水產加工業每年產生的魚下腳料量的 15%。資源回收廠主要的產品為魚粉、蝦蟹殼粉、魚溶漿，每處理 1 公噸魚下腳，可得到 0.25 公噸的魚粉與 0.1 公噸魚溶漿，資源回收廠每年生產魚粉、蝦蟹殼粉 3,000 公噸，魚溶漿 1,200 公噸，資源化產品年總產值約 5 仟萬元。

魚粉、魚溶漿為含高蛋白質的水產飼料，蝦殼粉則可做為養蝦的水產飼料。產品的另一種用途為做為肥料，其中蝦蟹殼粉富含幾丁質，對於農作物蟲害防治極具效果。該資源回收廠生產的魚粉、魚溶漿已製造成商品化魚肥行銷國內、外。魚肥屬於有機肥料，不僅可以增加農產品的產量，同時也有提高農產品品質的效用，由於效果良好，頗受農友好評。尤其是魚溶漿所製成的魚肥(氨基酸肥料)，更是一種高經濟價值的資源化產品。

#### 6.2.5 結語

該廠原先魚粉製程中採用一段批式(楔形槳葉)乾燥器處理，每批次需 4~5 小時之乾燥時間，且常造成臭味之產生及耗費大量能源。經添購一部連續進料快速(圓盤槳葉)乾燥器做為第一次乾燥，

原批式乾燥器做為二次乾燥用，使得乾燥時間縮短為 1~2 小時。快速(圓盤槳葉)乾燥器的增設不僅縮短乾燥時間、產能增加數倍，而且達到自動化的效果，降低操作及生產成本。

## 6.3 水淬高爐石生產爐石水泥案例

### 6.3.1 前言

C 工廠為國內一家利用高爐煉鐵所產出之水淬高爐石為原料，資源化生產高爐水泥及爐石粉之專業工廠。該廠係配合政府推動之廢棄物減量及資源化政策，經由輔導成立之重大投資工廠。該廠為中國鋼鐵公司轉投資事業之一，由中國鋼鐵公司、中國鋼鐵結構公司、中鋼碳素化學公司及國內三大水泥公司—台灣水泥公司、亞洲水泥公司及嘉新水泥公司共同合資設立。該廠成立於民國 80 年 5 月 25 日，總投資額為 20 億 950 萬元，採用德國 Krupp Polysius 公司發展之高壓研磨系統，研磨水淬高爐石，每年可生產研磨爐石粉 60 萬噸，並與普通水泥拌合，每年可生產卜特蘭高爐水泥 120 萬噸。

### 6.3.2 製程與原理

高爐煉鐵過程中，有大量的爐石產出，一般而言生產一噸銑鐵約可伴生 0.3 噸以上的高爐石。以往國內皆以拋海及道路級配等來處理氣冷高爐石，資源化價值偏低，而在歐美日先進國家，皆視爐石為高價值資源產物。以熔融爐渣經高壓水流噴射之水淬設備處理後，造粒成為水淬高爐石，具有十分穩定而優異的物理及化學性質，其主要成份為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{MgO}$  等，其他成份則為少量之  $\text{MnO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{TiO}$ ，及 S 等，很類似水泥熟料(clinker)成份，因水淬高爐石含有高量玻璃質，故具有潛在的膠結能力，若加以適當的催化作用如氫氧化鈣或石膏等鹼鹽，以激發其水化

活性，會與石灰進行波索蘭反應(Pozzolanic reaction)形成類似水泥熟料的水化物 C-S-H 膠體，又因其含極低的鹼性物質，因而可製成抗蝕性極佳的高爐水泥。

水淬高爐石資源化製造高爐水泥製程如圖 6.3 所示。該工廠的主體包括水淬高爐石原料貯存、石膏原料貯存、水淬高爐石乾燥研磨處理、爐石粉存放筒倉、普通卜特蘭水泥存放筒倉、混拌處理及高爐水泥出廠等。

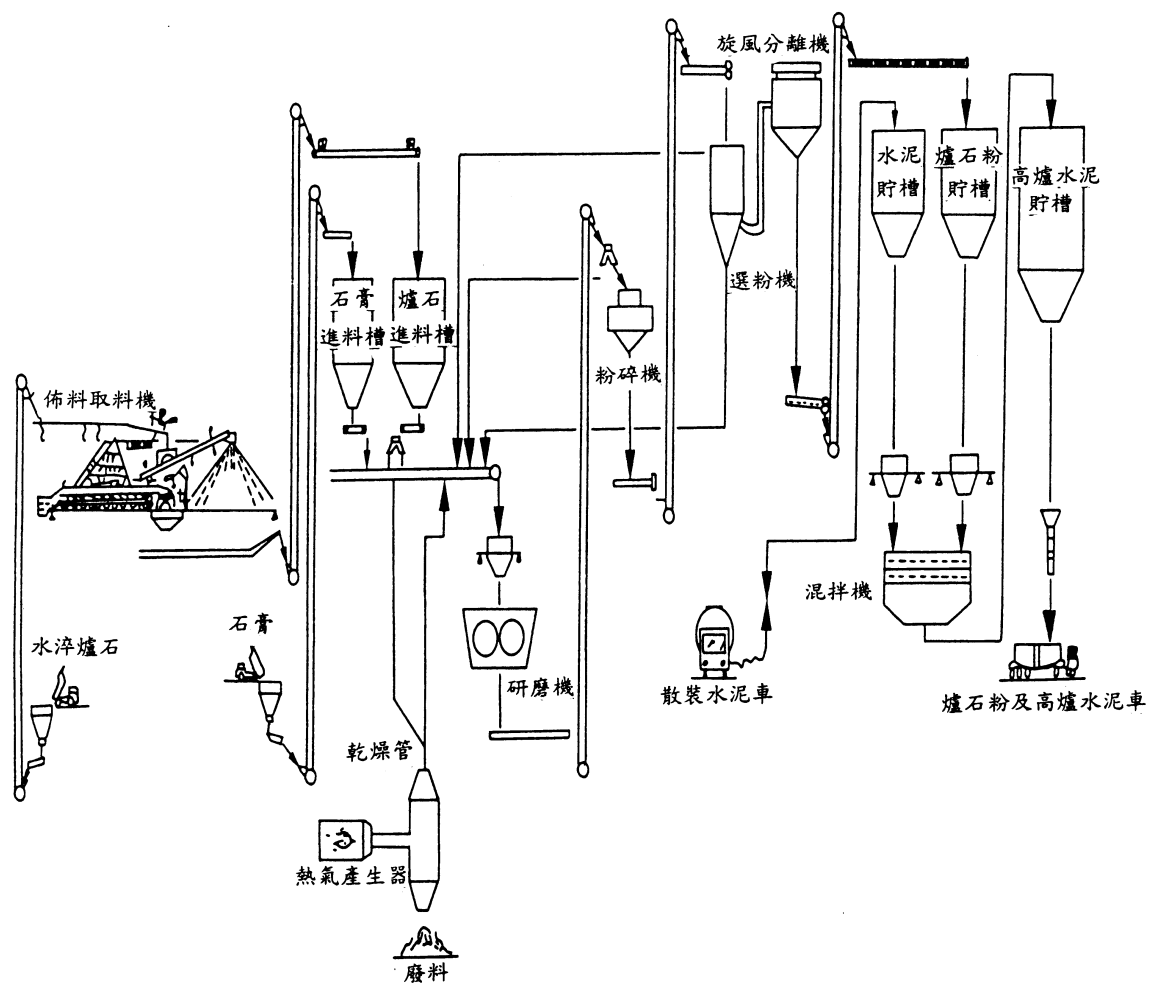


圖 6.3 高爐水泥生產流程圖<sup>(5)</sup>

### 1. 水淬高爐石原料貯存

卡車運送水淬高爐石至資源化廠，傾卸進入接收筒槽，爐石

落入輸送帶，輸送至垂直筒形斗昇機，再送爐石入輸送帶，後送至佈料機堆料成錐形。再由取料機在錐形堆料取爐石，送入輸送帶輸送至筒形斗昇機，再經由輸送帶送入配料筒槽。

## 2. 石膏原料貯存

卡車運送石膏至資源化廠，傾卸進入接收筒槽，石膏落入輸送帶，輸送至斗昇機，再經由輸送帶送入配料槽。

## 3. 水淬高爐石乾燥、研磨處理

由配料筒槽下料經由配料系統控制爐石與石膏混合。若爐石含水份低於 12%，則直接由輸送帶輸送經稱重機，控制輸送量後送入滾輪研磨機研磨。

若爐石含水份高於 12%，則給料閥打開，爐石落入乾燥器進行乾燥，粗粒爐石經由乾燥管底部排出，細粒爐石由熱風吹入旋風分離機。藉離心力原理使較粗之爐石從旋風離心機落入輸送帶，而較細之粉末由風扇抽出送至選粉機。爐石經由滾輪研磨機研磨後，形成爐石餅落入輸送帶，輸送至垂直筒形斗昇機，並進入粉碎機粉碎。經粉碎後之爐石粉落入氣滑槽，輸送至垂直筒形斗昇機，再輸送至選粉機，分離粉末與粗粒爐石。粗粒爐石經磁選器分離殘留鐵屑，並再經研磨。而粉末則由排氣機抽送至除塵器收集，再出氣滑槽輸送至筒形斗昇機。

該乾燥器屬氣流乾燥器的一種，其內部直徑為 1m，高度為 24m，內部鋪設耐磨磚，熱風溫度為 300~600℃，其示意圖如 3.70 所示。

利用氣流乾燥器乾燥高爐石具有以下特點：

### (1) 氣固兩相間熱傳質傳的表面積大

高爐石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。

### (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，所以物料的乾燥時間很短，同時，處理量亦可愈大。

### (3)氣流乾燥器結構簡單、緊湊、體積小

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、輸送、篩分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，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。

## 4. 爐石粉貯槽

爐石粉末經由筒形斗昇機輸送至可換位擺門，可選擇輸送路線，然後爐石粉末經由氣滑槽輸送至貯槽存放。

## 5. 普通卜特蘭水泥貯槽

壓縮空氣機提供壓縮空氣經由氣輸總管，接上裝滿卜特蘭水泥卡車，將卜特蘭水泥打入貯槽中，以便與爐石粉混合調配成高爐水泥。

## 6. 混拌處理

貯槽內的爐石粉與卜特蘭水泥經由出口設備排入氣滑槽，並送入混合機混拌調製高爐水泥。調製完成之高爐水泥經氣滑槽輸送至筒形斗昇機，再輸送至成品貯槽中存放備用。

### 6.3.3 資源化成效

該廠水淬高爐石資源化供做水泥原料之具體成效明顯的反映在節約燃料、電力、石灰石等資源消耗及降低二氧化碳產生等各方面。普通卜特蘭水泥之生產，乃是電力及燃料消耗十分鉅大的工業，電力主要消耗在原料及熟料的研磨及運搬上，燃料則消耗於燒成作業上。而水淬高爐石生產高爐水泥和水淬爐石粉則不須再經燒成作業，僅需經乾燥及研磨作業即可，因此可節省石灰石資源之開採，燒成作業之燃料消耗，避免燒成作業石灰石分解產生二氧化碳及燃料燃燒過程產生之二氧化碳排放和節省電力消耗等。

以日本水泥工業界之經驗數據為基礎，試算生產卜特蘭水泥與高爐水泥之能源消耗，相關燃料、電力、石灰石之比較如表 6.1 所示。由於水淬爐石粉製造高爐水泥之摻配比率可達 50%，若以該廠水淬爐石粉總產出量達 60 萬噸/年計，每年可節省之當量煤料為 57,600 噸/年；電力為 24,000,000KWH/年；石灰石為 720,000 噸/年。

至於二氧化碳生成量之降低，亦可由卜特蘭水泥與高爐水泥之生產所產出之二氧化碳量比較如表 6.2 所示。若以該廠水淬爐石粉總產出量 60 萬噸/年計，可減少二氧化碳之生成量約  $600,000 \times 0.79 = 474,000$  噸/年。

表 6.1 高爐水泥節省資源效益評估<sup>(5)</sup>

消耗之資源	單位	卜特蘭水泥	高爐水泥	差額
當量煤料	公斤/噸產品	110	14	96
電力	KWH/噸產品	110	70	40
石灰石	公斤/噸產品	1,200	0	1,200

表 6.2 高爐水泥降低二氧化碳生成量效益評估<sup>(5)</sup>

二氧化碳發生源	單位產出量	卜特蘭水泥	高爐水泥	差額
石灰石分解	噸/噸產品	0.48	0	0.48
煤料燃燒	噸/噸產品	0.28	0.035	0.245
電力消耗相當之二氧化碳產出	噸/噸產品	0.12	0.055	0.065
合計	噸/噸產品	0.88	0.090	0.790

高爐水泥已經是一項十分成熟的產品，具有優異的特性如下：

1. 具有優異的後續強度增延性

以爐石粉或高爐水泥拌合生產之混凝土，於 14~28 日材齡時，其強度水準與普通卜特蘭水泥相比，已達相等或更高的強度。而長期強度更是凌駕其他種類的水泥，故可建造持久而耐用的各類土木工程構造物。

2. 具低水合熱的特性

爐石粉及高爐水泥之水合熱遠比普通卜特蘭水泥為低，因此高爐水泥之水合熱隨著高爐石粉之置換混合比率之增加而逐漸降低，近年來隨著土木結構建物之大型化，巨積混凝土溫度裂紋問題亦日益受到矚目，高爐水泥即可有效地克服此困擾。

3. 提升混凝土的耐久性

處於酸雨威脅地區、溫泉地帶、具有侵蝕性土壤之環境、或是下水道設施及海岸構造物等，皆要求具備化學耐久性。水泥的化學抵抗性中，主要考慮由硫酸鹽引起的劣化崩壞現象。這種現象是水泥水化物中的游離  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  與硫酸鹽反應而產生硫酸鈣。

高爐水泥混凝土與普通卜特蘭水泥混凝土比較，得知水化物中之  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  較少，所以高爐水泥混凝土比較適合於海水、污水



及溫泉水等，有化學腐蝕性的環境，爐石粉含量愈高，對化學抵抗力愈好。

#### 4. 可獲得高緻密性的混凝土

高爐水泥混凝土，因高爐石粉的滲入，大幅提昇新拌混凝土的工作度，且固化後的混凝土因具有波索蘭反應效果故緻密性極佳，因此擁有優異的水密性及耐磨性。

#### 5. 預防混凝土鋼筋腐蝕

以保護層 70mm 厚度的高爐水泥混凝土而言，其鋼筋開始腐蝕期遠較普通卜特蘭水泥(Type 1)混凝土延後約 100 年。

### 6.3.4 結語

將高爐石有效的推廣應用於水泥工業，非但增加爐石資源化利用途徑，並對國內資源保育、能源節約、污染防治及生態環境改善等均具有相當顯著的效益。再者，因高爐水泥及水淬爐石粉具有多項優於普通卜特蘭水泥的特性，對於提昇各項工程建設之品質及耐久性亦有正面的效益。

## 6.4 含金屬廢棄物高溫熔煉資源回收案例

### 6.4.1 前言

D 廠是日本九州一家含金屬廢棄物資源回收處理廠，該廠設立於 1975 年，處理之廢棄物包括電弧爐爐塵灰、鋅熔煉渣、銅熔煉爐塵灰、銅銀熔煉渣、廢觸媒、廢橡膠及其他相關廢棄物，回收之資源化產品包括粗氧化鋅、合金、熔渣及蒸汽等。

該廠係利用三井專利半鼓風爐(Mitsui Furnace ,MF)處理工業廢棄物並回收資源，MF 爐為三井金屬礦業公司於 1965 年所開發應用的技術，初期主要應用處理直立式鋅蒸餾礦渣(vertical retort residue)，至 1985 年止 20 年期間，該廠已處理回收 210 萬噸鋅蒸餾礦渣。1985 年以後，該廠開始大量處理回收電弧爐爐塵灰。

## 6.4.2 製程與原理

該廠回收電弧爐爐塵灰等含金屬廢棄物之處理流程如圖 6.4 所示。處理流程可約略區分為：前處理製程、高溫熔煉製程、低熔點金屬回收製程、高熔點金屬回收製程等四部分。

### 1. 前處理製程

通常塊狀廢棄物可直接投入 MF 爐內，而濕泥狀及粉體狀廢棄物則需先經製塊後方可投入爐內進行熔煉。

在製塊程序中，爐塵灰、鋅蒸餾礦渣及其他廢棄物與砂砂、煤炭等定量配比混合，並添加紙漿廢液(亞硫酸鹽母液)做為黏結劑，隨後送入旋轉窯中乾燥至含水率約 8~10%。再以桿狀研磨機 (rod mill) 粉碎後送入製塊機 (briquette machine) 中壓製成團塊。

旋轉窯乾燥器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 3.8 所示。濕物料從進料端(左端)上部加入，經過圓筒內部時，與通過筒內的熱風或加熱壁面進行有效的地接觸而被乾燥，乾燥後物料從出料端(右端)下部收集。在乾燥過程中，物料藉助於圓筒的緩慢轉動，在重力的作用下從較高一端向較低一端移動。筒體內壁上中有順向抄板，它不斷地把物料抄起又灑下，使物料的熱接觸表面增大，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為熔煉製程所產生之煙道氣。

採用旋轉窯乾燥器之優點如下：(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，可以乾燥顆粒物料，對於附著性大的物料也適用；(5)操作彈性大，允許處理的物料量有較大波動範圍，不致影響物料的乾燥品質；(6)清理容易。

採用旋轉窯乾燥器之缺點如下：(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；(4)物料在乾燥器內停留時間長，且物料顆粒之間得停留時間差異較大。

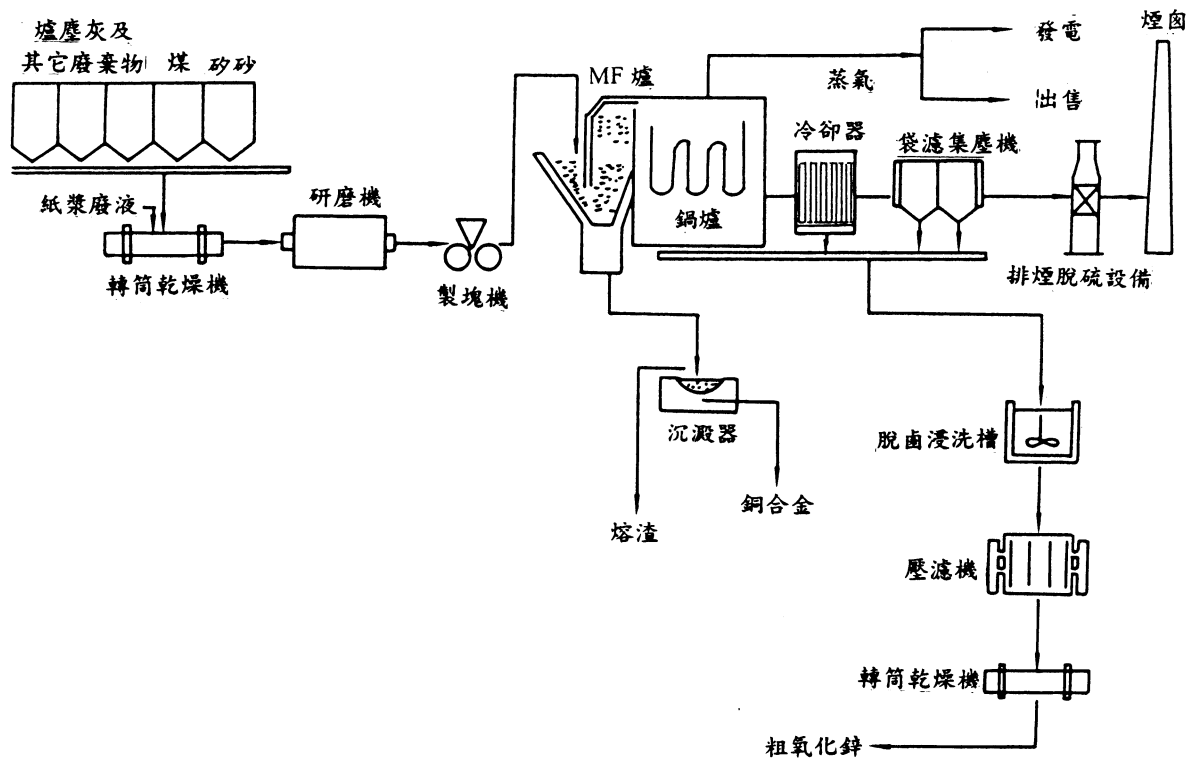


圖 6.4 含金屬廢棄物高溫熔煉回收處理流程<sup>(5)</sup>

## 2. 高溫熔煉製程

壓製之團塊以輸送帶輸送至 MF 爐腹部之進料斜槽中，與部份焦化區爐氣接觸而預熱乾燥。預熱後，進一步進入爐內之熔煉區。熔煉區係藉由爐體一側配置一系列噴口，將預熱至 300°C 左右的空氣吹入爐體內，並使團塊本身之煤炭等可燃成份燃燒放熱，再進一步還原團塊中之金屬成份。

## 3. 低熔點金屬回收製程

鋅及鉛等低熔點金屬在爐內還原揮發，再與爐體上方導入之二次空氣接觸而再次氧化生成氧化物，並隨排放之廢氣經過蒸汽鍋爐，氣體冷卻器及袋濾集塵機而被收集。集塵後之廢氣尚含有 SO<sub>x</sub> 約 400ppm，經脫硫設備處理後則可將其降低至少於 5ppm，

而符合排放標準。被收集之粉塵中殘留氯及氟元素，因此需經浸洗、壓濾及乾燥等程序，即可獲得粗氧化鋅產品，並售予其他鋅製品精煉業者。

#### 4. 高熔點金屬回收製程

銅及部份鐵金屬經還原後，逐漸沉積至爐底並濃縮成銅合金液，與熔渣一起經由渣道連續排出，再利用比重差異之原理，藉由沉澱器(settler)將兩者分離。銅合金液經冷卻鑄塊後即可售予銅精煉業者；熔渣再以水淬方式處理成細顆粒狀並售予水泥業者供作水泥原料使用。

#### 6.4.3 資源化成效

該廠每年處理回收之電弧爐爐塵灰 70,000 噸、鋅熔煉渣 10,000 噸及其他渣類合計 90,000 噸。其中鋅以 85~90%、鉛以 90~95%之回收率回收成粗氧化鋅，銅以 85%、銀以 70%之回收率回收至銅合金液(Matte)中。其各項回收產品主要成份如表 6.3 所示。

表 6.3 含金屬廢棄物高溫熔煉回收產品主要成份<sup>(5)</sup>

成分 產品	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Fe (%)	Ag (g/t)
粗氧化鋅	56	11	0.1	0.8	120
銅合金	2	0.3	55	20	1,900
爐渣	3.5	0.3	0.5	35	30

#### 6.4.4 結語

日本於 1975 年左右，開始將電弧爐煉鋼爐塵灰加以資源化處理供作鋅及氧化鋅原料。經回收處理後的剩餘殘渣則可符合重金

屬溶出試驗標準，亦可資源化再利用為工程骨材或水泥原料等。因此，就污染防治及資源再生的觀點，電弧爐爐塵灰回收鋅等重金屬資源乃是必然發展的方向。

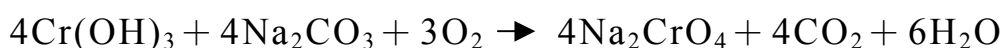
## 6.5 電鍍污泥回收鉻酸鈉及鐵黑案例

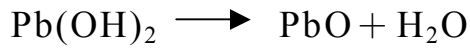
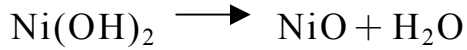
### 6.5.1 前言

E 工廠為國內一家電鍍污泥集中資源化示範廠，該廠係響應行政院環保署與經濟部共同頒佈的「推動工業廢棄物處理體系輔導要點」而成立之電鍍業廢棄物聯合處理體系，投資成員為電鍍相關業者，計 61 家。該廠位於桃園縣大園工業區內，初期設計處理量為每日 1 噸濕電鍍污泥(乾基約 200 公斤)，資源化產品主要為鉻酸鈉溶液，可售予顏料工廠製成鉻黃，另製程之殘渣則可供做鐵黑顏料，資源化產品產量視電鍍污泥成份而定。該廠係定位在能自給自足的條件下，以處理投資工廠廢棄物為初期營運目標，同時，研發相關資源化技術，期望未來能成為電鍍工業廢棄物資源化處理中心。

### 6.5.2 製程及原理

該廠利用鹼性高溫氧化法進行鉻系電鍍污泥資源化回收鉻酸鈉及鐵黑，其主要原理乃是將電鍍污泥與  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ，充分混合，並於  $700\sim 1000^\circ\text{C}$  的高溫下燒焙，使污泥中主要成份  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  及次要成份  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Pb}(\text{OH})_2$  等雜質，分別生成  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  及  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{PbO}$  等金屬氧化物。由於  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  為水溶性，而其他金屬氧化物為非水溶性，因此藉由水萃程序，可分別製取鉻酸鈉溶液及鐵黑產品。其化學反應方程式如下所示。





該廠電鍍污泥資源化回收鉻酸鈉及鐵黑之處理流程如圖 6.5 所示。處理流程可約略區分為：混練乾燥製程、高溫焙燒製程、水草分離製程等三部分。

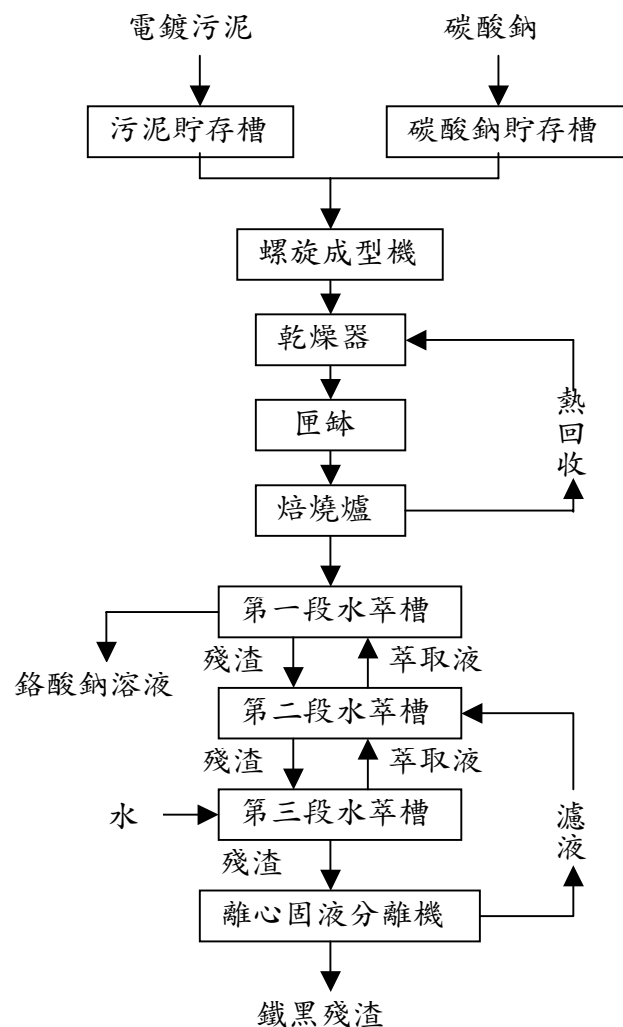


圖 6.5 電鍍污泥資源化回收鉻酸鈉及鐵黑處理流程

### 1. 混練、乾燥製程

將含水率 85% 以下且  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  含量 15% (乾基) 以上之電鍍污泥及純度 99% 以上之碳酸鈉，分別置入貯存槽備用。以螺旋輸送機分別將污泥及碳酸鈉加入混練成型機中混練，碳酸鈉之添加量為污泥中  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  成份質量之 1.5~2.0 倍，以台中電鍍廢液處理示範中心之污泥為例，每 1000 公斤污泥約添加 320 公斤碳酸鈉。經混練之混合物，由擠出口擠壓出直徑約 2cm 之條狀物，此時條狀混合物之含水率約 55%，需連續送入乾燥器中乾燥之。乾燥器係採連續輸送式乾燥器，其長度為 240cm，寬度為 120cm，高度為 150cm。操作時，先行調整溫度約 200°C 待用，從混練成型機擠出的混合條狀物則連續送入乾燥器的輸送帶上，速度保持每分鐘 35cm，乾燥時間 20 分鐘，則可得到含水率 15% 的混合物每小時約 350 公斤。

### 2. 高溫焙燒製程

將此條狀混合物裁切至長度約 29cm，並盛入匣鉢中，匣鉢係謨來石材質 (Mullite;  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )，耐火度約 1,600°C，尺寸為 36cm×26cm×16cm，因此每只匣鉢可盛裝約 4 公斤的條狀混合物，且其盛裝高度不宜超過 15cm，以免觸及上層匣鉢。將盛裝條狀混合物之匣鉢堆放於台車上，並推入焙燒爐中，焙燒爐為 Muffle 式，內容積約 1m<sup>3</sup>，以有效內容積 80% 計，可裝載 55 只匣鉢，共約可裝入條狀混合物 300 公斤。焙燒爐啟始溫度控制於 200°C 以下，加溫速度則控制每小時 150°C，達到 800°C 時，恆溫保持 2 小時，使條狀混合物內之各種成份充分反應。待充分反應後，關閉熱源，使爐內溫度緩緩降溫至 200°C 以下即可打開爐門，進行匣鉢台車置換。

### 3. 水萃、分離製程

經焙燒完成的反應物，於空氣中完全冷卻後即可進行水萃程

序。水萃程序係採三段串聯水萃方式，焙燒反應物以批次操作，將每批 100 公斤的反應物逐一置入第一段水萃槽中，同時以逆流方式由第三段水萃槽逐一加入 500 公升的水，如此經三段逆流萃取及過濾分離循環程序，即可分別於第一段水萃槽分離回收濃度約 10~20%的鉻酸鈉溶液及離心固液分離機回收鐵黑殘渣。

### 6.5.3 資源化成效

該廠係定位於非營利為目的，在能夠自給自足的條件下，以處理投資工廠廢棄物為初期營運目標，並達技術驗證及示範之效，同時，逐步擴大資源化處理容量並提昇處理技術，如利用氨浸萃取技術回收硫酸鎳、硫酸銅、硫酸鋅、鉻酸鈉及鐵黑等資源化產品，藉以提昇資源化效益，降低處理成本，甚或完全免除處理費用，更而創造經濟利益。

該廠為一示範廠，由於現階段設計處理容量較低而未達經濟規模，因此初期投資成本較低，但單位污泥處理成本較高，相對尚需收取較高之處理費用。依設計處理量每年 300 噸濕污泥，即約每年 60 噸乾污泥，且可生產資源化產品鉻酸鈉溶液每年約 355.5 噸及鐵黑每年約 6.3 噸為基準，初步核算該廠初設成本為 8,417,500 元，每年操作維護費用為 2,048,400 元，每年回收利益為 3,390,000 元，每年淨利為 87,400 元，回收期限約為 6.27 年，相關之效益評估如表 6.4 所示。



表 6.4 電鍍污泥資源化回收鉻酸鈉之效益評估<sup>(6)</sup>

項次	項 目	單位費用	費 用
初設 成本	• 廠房建築	2,000,000 元	2,000,000 元
	• 機械設備	4,800,000 元	4,800,000 元
	• 水電工程	300,000 元	300,000 元
	• 污染防治設備	500,000 元	500,000 元
	• 雜項費用	817,500 元	817,500 元
	合計		8,417,500 元
每年 操作 維護 費用	• 碳酸鈉	9,000 元/噸	507,600 元
	• 瓦斯	13.5 元/m <sup>3</sup>	218,700 元
	• 電力	2.0 元/kw · hr	12,000 元
	• 冷卻水	12.5 元/度	3,800 元
	• 勞力	2,250 元/日	675,000 元
	• 設備維護費用	約初設費用之 5%	420,900 元
	• 雜項費用	約初設費用之 2.5%	210,400 元
	合計		2,048,400 元
每年 投資 費用	• 設備折舊費用	*CRF=0.149	1,254,200 元
	• 操作維護費用	—	2,048,400 元
	合計		3,302,600 元
每年 回收 利益	• 鉻酸鈉溶液	200 元/噸	71,100 元
	• 鐵黑(鐵鉻渣)	3,000 元/噸	18,900 元
	• 污泥處理費用收入	11,000 元/噸	3,300,000 元
	合計		3,390,000 元
每年淨利：3,390,000 元－3,302,600 元=87,400 元			
回收期限：8,417,500 元÷(3,390,000 元/年－2,048,400 元/年)=6.27 年			

註：\*CRF(設備投資還原因子)= $i(1+i)^n/(1+i)^n-1$ ，i(年利率)=8%，n(設備使用年限)=10 年

#### 6.5.4 結語

國內大部份電鍍廠規模並不大，各廠廢水處理產生之污泥量並不多，但是以一區域性而言，其污泥量則不容忽視。因此，由電鍍業者自行籌組共同或聯合處理體系，則能穩定提供足夠的污泥量，俾利提昇污泥資源化技術，降低污泥處理成本，並規避資源化廠營運風險。該廠係落實「推動工業廢棄物處理體系輔導要點」的典範，為電鍍污泥提供一更具效益的處理處置模式，對於

處理體系的籌組運作及電鍍污泥之實際處理技術具有拋磚引玉的功能。

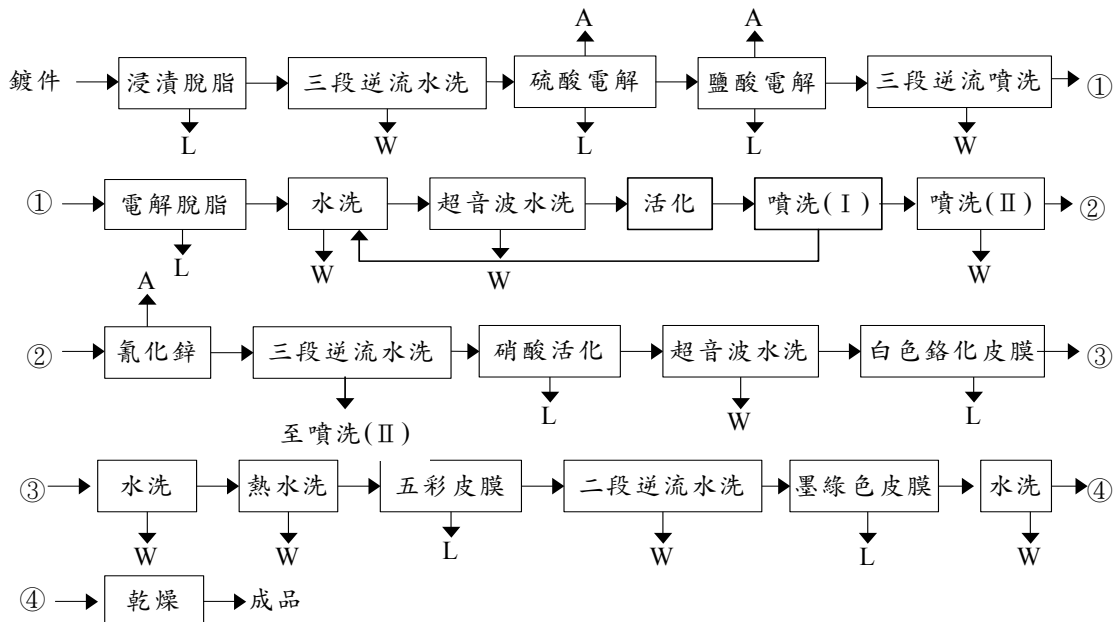
## 6.6 重金屬污泥高效率電熱式乾燥減量案例

### 6.6.1 前言

F 工廠主要以汽機車零件電鍍為主，鍍層種類包括銅、鎳及鉻鍍層。工廠為了落實環保工作，推行多項廠內管理、製程減廢及廢水、廢氣處理，並妥善處理處置事業廢棄物；同時，為了達到有害事業廢棄物減量目標，工廠自行研發高效率電熱式污泥乾燥機，使有害事業廢棄物減量達 77% 以上，大幅降低廢棄物處理成本，並減輕對環境之衝擊。

### 6.6.2 製程與污染來源

工廠位於工業區內，主要從事汽機車零件之鍍鋅加工。工廠主要製造流程及污染源如圖 6.6 所示。



註：W 表廢水產生源，L 表廢液產生源，A 表廢氣來源

圖 6.6 F 工廠製程與污染來源

### 6.6.3 製程原物料種類與使用量

工廠製程中之槽液種類、組成份與原物料使用量如表 6.5 所示，原物料種類主要有脫脂劑、酸劑、氰化鋅、氰化鈉、鉻酸鹽等種類。

表 6.5 F 工廠槽液組成份與原物料使用量

種 類	槽體 體積 (m <sup>3</sup> )	槽液組成及濃度	原物料使用量 (kg/月)
浸漬脫脂槽	9.0	NaOH：60~80g/L	350
硫酸電解槽	2.9	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ：98%，90~140g/L	300
鹽酸電解槽	8.0	HCl：35%，250~350ml/L	3500
電解脫脂槽	3.5	NaOH：60~80g/L	250
酸 洗 槽	0.95	HCl：35%，40~70ml/L	500
鍍 鋅 槽	25	Zn：15~25g/L NaCN：40~65g/L NaOH：70~90g/L	Zn：2000 NaCN：500 NaOH：250
硝酸活化槽	0.95	HNO <sub>3</sub> ：67%，0.5~1ml/L	5
白色鉻化槽	0.91	CrO <sub>3</sub> ：5% HNO <sub>3</sub> ：17%，5~6ml/L 硫酸鹽：30%	140
五彩皮膜槽	0.91	CrO <sub>3</sub> ：30% HNO <sub>3</sub> ：8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ：5%，6~7ml/L	200
墨綠色鉻化槽	1.82	CrO <sub>3</sub> ：32% HNO <sub>3</sub> ：5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ：7%，35~45ml/L	100

#### 6.6.4 廢水污染特性與處理成效

工廠之綜合廢水量平均約 102 m<sup>3</sup>/日，各類型廢水量及廢水水質如表 6.6 所示。

表 6.6 F 工廠廢水特性

項 目	廢水量 (CMD)	廢水水質(mg/L)				
		SS	COD	Cr <sup>6+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	CN <sup>-</sup>
氰系廢水	15	--	--	--	405	166
鉻系廢水	51	--	--	130	--	--
一般酸鹼廢水	36	180	342	--	36	--
綜合廢水	102	140	326	87	265	111

工廠設有一座化學沈澱處理設施，設計總處理量為 320 m<sup>3</sup>/日，廢水處理流程如圖 6.7 所示。主要廢水種類區分為氰系廢水、鉻系廢水、一般酸鹼廢水，廢水處理設施之設計廢水量與實際處理水質如表 6.7 所示。工廠廢水處理設施設備投資金額計為 1,050 萬元，操作維護費用約 250 萬元/年。氰系廢水氧化處理效率約 99.97%、鉻系廢水還原效率約 99.89%、化學混凝沉澱處理效率約 34~99%，綜合廢水處理水質均可符合工業區污水下水道納管標準。廢水處理流程重點如下：

1. 製程之酸鹼廢液收集作為廢水處理之酸鹼劑使用。
2. 各股廢水均設置進流水控制堰，控制適當進流量。
3. 氰系廢水氧化、鉻系廢水還原處理後，均排至調勻槽調勻，以穩定後續化學混凝系統，並控制最佳之操作參數；調勻槽內進行充分攪拌並調整 pH 值至鹼性環境。
4. 為降低廢水處理成本及污泥產生量，定期進行杯瓶試驗，以建

立最佳之操作條件。

5. 廢水處理系統均採用自動化控制系統，穩定各處理單元。
6. 廢水污泥經濃縮後採用板框式壓濾機脫水，污泥含水率約 75~77 %。

表 6.7 設計水質與實際處理水質

項目	pH	SS	COD	Zn <sup>2+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	CN <sup>-</sup>
設計水質	2.8	140	326	265	87	111
實際處理水質	7.0	8	120	0.8	ND	0.105

註：單位 mg/L，pH 除外

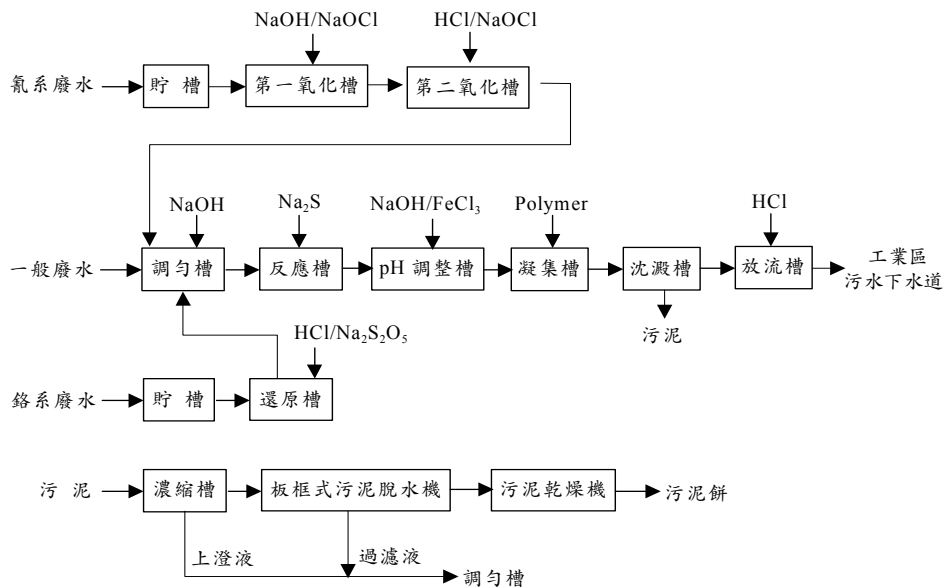


圖 6.7 廢水處理流程

## 6.6.5 污泥乾燥系統

電鍍廢水污泥因含有害重金屬成分，在廢棄物分類上屬於有害事業廢棄物，因此若委託清除處理業清理時，其成本較一般事業廢棄物高出數倍，因此除需藉由污泥減容、降低污泥含水率以減少污泥量外，若能將脫水後之污泥進一步乾燥，將可大幅減少有害事業廢棄物量並降低處理處置成本。

### 1. 污泥乾燥設備特性

F 工廠為減少有害事業廢棄物量並降低處理處置成本，乃設置一套高效率電熱式污泥乾燥機，該乾燥機係利用電能，將置放於台車之污泥中之水分在良好通風條件下蒸發，以達到污泥乾燥之目的。高效率電熱式污泥乾燥之特性包括：

- (1) 設備佔地面積小。
- (2) 採用夜間離峰用電，不增加正常動力負荷。
- (3) 特殊設計，熱風流動性高；無二次公害。
- (4) 污泥乾燥後，含水率低於 10%。
- (5) 經濟效益高，減少污泥體積及污泥處理費用。
- (6) 全自動操作，定時運轉完成，操作簡便。
- (7) 安全性高，多段安全跳脫警報、停機裝置。

### 2. 污泥乾燥設備規格

該乾燥設備係由工廠自行研發並經多次改良之設備，因此設備性能及操作特性均能符合電鍍業之需求。F 工廠使用之乾燥機設備規格及周邊設施彙整如表 6.8 所示。

表 6.8 高效率電熱式污泥乾燥機規格

項目	規格
污泥處理量	750Kg/批次
爐體外型尺寸	2070mmW×1525mmL×2740mmH，外殼厚度 100mm，耐溫 600°C 以上
台車容量	1100mmW×1600mmL×1250mmH，容量：1.4m <sup>3</sup>
電氣特性	最大功率 80Kw，電熱 72Kw，加熱溫度：100~200°C 可調式，SCR 溫度控制
乾燥時間	6~12 小時
周邊設施	循環風車、氣風車、電熱系統、進氣系統、排氣風管、全自動控制系統、過熱保護裝置

### 3. 污泥乾燥處理流程

F 工廠之廢水污泥採用板框式脫水機脫水，將污泥含水率降至 75~77%後，污泥餅先以台車承接，再於下班後利用離峰時段進行乾燥處理，每批次污泥處理量約 700~750 公斤，乾燥時間約 6~8 小時，乾燥後污泥量約 160~170 公斤，污泥乾燥流程如圖 6.8 所示。

### 4. 經濟效益評估

F 工廠實際應用成效，經脫水機脫水後之污泥含水率約 77%，年污泥產生量為 156 公噸；採用該乾燥設備後，污泥含水率降至 1%，年污泥產生量為 36 公噸，污泥減量 120 公噸/年。經濟效益依有害事業廢棄物委外清除處理費用 1.5 萬元/公噸計算，其經濟效益達 180 萬元/年，設備回收期限約 6.2 個月，每公噸污泥乾燥成本約 1.2 元。經濟效益詳細評估如表 6.9 所示。

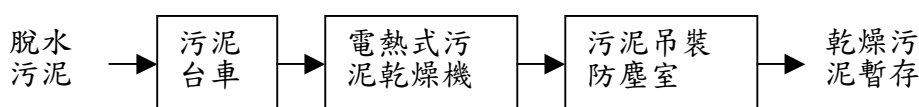


圖 6.8 F 廠污泥乾燥處理流程

表 6.9 電熱式污泥乾燥機之效益評估

項次	項目	單位費用	費用
初設成本	乾燥設備(含週邊設備/安裝)	800,000 元/組	800,000 元
	合計		800,000 元
每年操作 維護成本	電力費(離峰時段單位電價)	*0.76 元/Kw.hr	40,000 元
	維護費	50,000 元	50,000 元
	合計		90,000 元
每年投資 費用	設備折舊	**CRF=0.185	148,000 元
	總操作維護費用	--	90,000 元
	合計		238,000 元
每年可節 省費用	污泥處理處置費用	15,000 元/噸	1,800,000 元
	合計		1,800,000 元
每年總淨節省費用 = 1,800,000 元 - 238,000 元 = 1,562,000 元			
回收期限 = 800,000 元 ÷ 156,200 元 = 6.1 個月			

註：CRF(設備投資還原因子) =  $i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$ ， $i$ (年利率) = 7%， $n$ (設備使用年限) = 7 年

### 6.6.6 結語

F 工廠向來重視環境保護工作，並由製程管理制度、工業減廢及管末處理等多層次進行規劃執行，並自行研發高效率之污泥乾燥機，其對環保工作之用心頗值得效法。同時，此案亦顯示，良好之環保規劃設計能降低產業之環保成本，使產業更有利於永續發展。



## 6.7 自然低溫法污泥乾燥減量案例

### 6.7.1 前言

G 工廠為國內一家印刷電路板製造廠。該廠位於桃園縣蘆竹鄉內，目前廢水量約 300~400 CMD，產生的污泥分成一般污泥及無機(含銅)污泥兩種，含水率約為 73~79%。該廠一般污泥產量約 150~300 Kg/日，無機污泥產量約 800~1200 Kg/日，所有污泥皆委外清理，目前的清理費用，前者為 5.5 元/kg，後者為 9 元/kg。

在設置污泥乾燥設備前，該廠的污泥清理費用約新台幣 1 萬元/日。若以污泥平均含水率 75%計算，每日花在「水」的清運費高達七千多元，在不景氣的衝擊下如何有效節流成為該廠及相關業者重要課題之一。

該廠一般污泥因含有 VOC，不適合使用高溫法之污泥乾燥機，為了讓所設置的污泥乾燥機能同時處理兩種污泥，該廠設置「自然低溫法」污泥乾燥機，不但操作簡易安全，也沒有二次污染(空污、水污等)的問題，加上操作維護費用低廉，設備回收時間快，值得提供其它有污泥乾燥需求之業者設置參考。

### 6.7.2 設備原理

「自然低溫法」污泥乾燥機所利用的原理與除濕機類似，是利用「空氣在溫度愈高時所含飽和水份愈高」的特性，將空氣經過冷凝器(俗稱「熱排」)加溫，以將空氣中的含水量提昇至飽和狀態，再將此高溫高濕的空氣通過蒸發器(俗稱「冷排」)加以冷卻，此時，空氣中的水份就會因急速冷卻而凝結成水份而與空氣分離，即可達到「乾燥」的目的。該系統就是利用此原理，在污泥乾燥機內以高溫空氣通過污泥，來將污泥中所含的水份吹出移除。

根據經驗，當物體(污泥)受一固定高溫空氣乾燥一段時間後即無法再繼續乾燥，但若再以低溫之乾燥空氣吹拂時，物體本身會

自動散熱而將體內之水份排出，此水份可由乾燥之冷空氣吸收並帶走，污泥便可更加乾燥。

此外，污泥在受低溫乾燥空氣吹拂一段時間後，若再進一步以高溫氣體吹拂，則已冷卻之污泥會吸收熱量，而使殘餘於污泥內部之水份向外蒸發，污泥可以繼續乾燥。

該設備即是利用此種高低溫互換的高效率乾燥原理，設置一個乾燥室，使溫度分別在 15~25°C 及 50~60°C 間定時「冷熱交替循環」操作，便可以提高污泥乾燥效率。

### 6.7.3 操作說明

該廠污泥脫水機位於 1 樓地面，為了操作方便，該乾燥機(設計處理量為 1400 kg/日)置於脫水機左前方空地上，占地面積 3.6M×2.4M，污泥乾燥處理流程如圖 6.9 所示。操作步驟說明如下：

1. 將污泥台車推至脫水機出口處以承接污泥。
2. 台車盛滿污泥後，用堆高機將台車送到污泥乾燥機內再推至定位。
3. 接上風管後，關緊乾燥機門再啟動電源，乾燥機之系統即自動定時高低溫交循環操作。
4. 到達設定時間時關閉電源，進入乾燥室內拆除風管，並將污泥台車推至門口。
5. 以堆高機將台車移到污泥斗架上方，抽開台車底板，乾污泥即掉入太空包內。
6. 污泥盛滿後綁緊袋口，集中置於暫存區至一定數量後即可委外清理。

以上作業平均每日僅花半個多小時做出入料操作，即可將該廠 1000~1400 Kg 污泥乾燥並減重約 2/3。

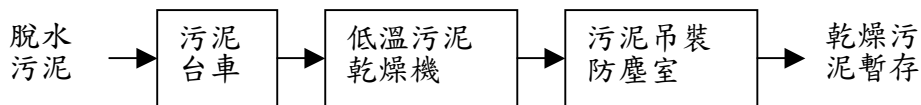


圖 6.9 G 廠污泥乾燥處理流程

#### 6.7.4 設備規格及特點

「自然低溫法」污泥乾燥機最大的特色是構造簡單維修容易。系統包括一座密閉式乾燥室(SUS304 加隔熱泡棉)、壓縮機(含冷熱排裝置)、風扇、進出料裝置(如台車或螺旋輸送機)及溫度時間控制器等。設備本體尺寸及進出料方式全依個案需求及現場環境而彈性設計。

由於操作溫度最高僅到 60°C 左右，又在密閉室中進行乾操作業，加上污泥中的水份是以冷凝方式可經由排水管導回原廢水處理廠中，因此，即使污泥中含有 VOC 或其它臭味、毒性物質，也不會在乾燥過程中對周遭環境造成影響，更不會有二次污染的問題發生。

#### 6.7.5 經濟效益分析

以 G 廠污泥處理為例，一般污泥產生量為 200 kg/日，含銅污泥產生量為 1,000 kg/日，污泥清理費合計約 10,100 元/日。兩者含水率均自 75% 乾燥至 30%，重量減少 64.3%，則污泥清理費約減為 3,605.7 元/日。每日平均操作電費約 624 度 × 1.342 元/度(尖離峰平均工業電價) = 837.4 元。每日可以節省的清理費用為 10,100 元 - (3,605.7 元 + 837.4 元) = 5,656.9 元(較未設乾燥機節省 56% 費用)。每月操作 25 日，則每月可以節省的清理費用為 141,423 元，每年可以節省的清理費用為 169.7 萬元。

## 6.7.6 結語

目前國內各事業單位的污泥大多委外清理，由於污泥在脫水後含水率大多仍高達 70~85%，造成清理費用的浪費。如何降低污泥清理費用成為各事業單位當務之急。

減少污泥清理量是降低污泥清理費用最直接的方法，在做法上除了減少廢水處理加藥量外，就是減少污泥含水率，但前者所能減少的污泥產生量有限；後者則可藉由乾燥技術大幅減少污泥清理量及清理費用。

污泥乾燥的方法很多，G 廠案例所使用的自然低溫乾燥法最大的優點是任何種類(有機、無機、含 VOC 或臭味)的污泥都可以處理，且不會造成二次污染問題的發生，而且操作簡單，操作成本低廉，設備設置費用的回收迅速。

## 6.8 電能低溫法污泥乾燥減量案例

### 6.8.1 前言

H 工廠為一生產汽車及相關原物料、設備之專業汽車製造廠，其產品涵括齊全的商用車、休旅車及轎車產品及零組件線，製程包括鋼板沖壓、車身製造、塗裝前處理、塗裝、車身組立等五大製程。該廠廢水、廢液主要來自於塗裝前處理及塗裝兩大製程，汽車製造過程所排放的廢液及廢水種類複雜，主要污染物有 BOD、COD、SS、 $Zn^{+2}$ 、 $Cr^{+6}$ 、油脂等，須經由妥善之廢水處理流程後，方能排入承受水體中。

該廠設有一座大型廢水處理廠，各類廢水及廢液經中和、快混、慢混、沉澱及 pH 調整、曝氣氧化、沉澱、砂濾、活性炭吸附等廢水處理程序後放流，而產生之污泥經污泥濃縮、污泥脫水處理，每日產生之污泥量約 2,000kg (含水率 72-75%)。

## 6.8.2 污泥乾燥程序及原理

該廠之廢水處理場目前每日產生之污泥量約 2,000kg (含水率 72-75%)，其乾燥減量之流程如圖 6.10 所示。通常在日間將廢水生物處理產生之污泥經壓濾式脫水機擠壓脫水，產生之污泥餅輸送至烘乾箱，每日 2 批次，第二批次污泥餅導入烘乾箱後，隨即啟動乾燥機系統，利用鼓風機將乾熱空氣送入濕污泥餅中將水氣帶出，隨即導入冷凝設備將空氣中所含水分冷凝排出，此股低溼度之空氣再導入熱交換器，以冷凝壓縮機產生之廢熱加熱該股空氣使之再度成為乾熱空氣(約 60°C)並循環導入濕污泥餅中。以該廠之污泥餅性質而言，採用功率 15KW 之乾燥機烘乾 12 小時可將 2,000kg 含水率 75% 之污泥餅乾燥至含水率 15%，即剩約 590kg，減少重量達 1,410kg，即減重 70%。此種形式之乾燥機因回收壓縮機之廢熱來加溫循環空氣而達到節省能源之效果，又因該廠作業方式採日間收集泥餅，夜間進行乾燥之方式，更可避開尖峰用電時段，節省用電量及污泥乾燥處理費用。

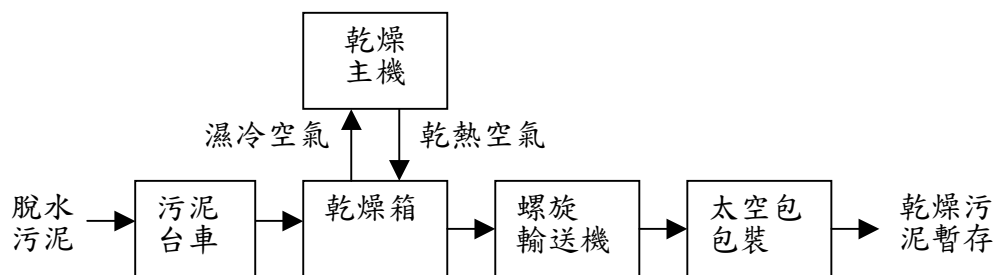


圖 6.10 H 廠污泥乾燥處理流程

## 6.8.3 污泥乾燥成效

該廠廢水處理產生之污泥係屬一般污泥，最終處置方式為衛生掩埋。台灣目前因掩埋場址尋覓不易及既有掩埋場負荷逐漸飽

和，污泥處置成本居高不下，因此污泥乾燥減重不失為大幅降低污泥處置成本之適當方法。再者，污泥若欲朝向資源化再利用之方向，乾燥處理亦經常為首要之前處理步驟。

該廠之乾燥設備投資效益如表 6.10 所示，說明如下：

#### 1. 比較基準

未經乾燥處理污泥產生量：2,000 kg/日，含水率 75%；經乾燥處理後污泥量：590kg/日，含水率 15%。

#### 2. 節省污泥處置費用

污泥處置費以 4.5 元/kg 計，每月節省污泥處置費為  $(2,000\text{kg} - 590\text{kg})/\text{日} \times 30 \text{ 日/月} \times 4.5 \text{ 元/kg} = 190,350 \text{ 元/月}$ 。

#### 3. 乾燥機運轉費用

乾燥機運轉所耗用之電費為  $0.4\text{KWH/kg-H}_2\text{O} \times 1,410\text{kg-H}_2\text{O} / \text{日} \times 1 \text{ 元/KWH} = 564 \text{ 元/日}$ 。

#### 4. 投資效益評估

乾燥機初設費用約 480 萬(未扣除投資抵減)；每月運轉費用約  $564 \text{ 元/日} \times 30 \text{ 日/月} = 16,920 \text{ 元/月}$ ；每月節省污泥處置費為 190,350 元/月；故每月實際節省費用為  $190,350 \text{ 元/月} - 16,920 \text{ 元/月} = 173,430 \text{ 元/月}$ ；設備回收年限為 2.8 年(33.6 月)。

### 6.8.4 結語

污泥乾燥具有許多效益，但目前採用廠商尚不普遍，主要為乾燥過程中衍生的惡臭難以控制，且操作維護費用仍偏高所致。目前乾燥設備型式有多種，且技術亦十分成熟，但以高溫熱風為熱源之乾燥處理方式者，其衍生之臭氣及水蒸氣尚有除臭的困擾。本案例所介紹之設備係採用電能及熱交換方式操作，且最高操作溫度僅約 60°C，並不會產生臭氣及安全上之問題，且操作維護上亦具有相當之便利性，為一甚具市場競爭力之污泥乾燥機，尤其適用於中小型規模工廠作業使用。

表 6.10 H 廠污泥乾燥減量效益評估

項次	項目	單位費用	費用
初設成本	乾燥機設備(含週邊設備)	4,800,000 元/套	4,800,000 元
每年操作維護費用	動力電費	564 元/日	203,040 元
每年投資費用	設備折舊費用	*CRF=0.149	715,200 元
	操作維護費用	—	203,040 元
	合計		918,240 元
每年可節省費用	節省污泥處理費	6,345 元/日	1,903,500 元
每年總淨節省費用：1,903,500 元－918,240 元=985,260 元			
回收期限：4,800,000 元÷(1,903,500 元－203,040 元) = 2.8 年 (33.6 個月)			

註：CRF(設備投資還原因子)= $I(1+i)^n / (1+i)^n - 1$ ，i(年利率)=8%，n(設備使用年限)=10 年

## 參考資料

1. 潘永康等，現代乾燥技術，化學工業出版社，中國大陸，1998。
2. 廖明隆譯，乾燥裝置手冊，大行出版社，民國 77 年 9 月。
3. 李昭仁等，化學工程手冊，高立圖書有限公司，民國 73 年 2 月。
4. 廖明隆編譯，食品化學乾燥，文源書局，民國 80 年 11 月。
5. 鋼鐵業廢棄物資源化案例彙編，經濟部工業局工業污染防治技術服務團，財團法人中國技術服務社編印，民國 85 年 5 月。
6. 電鍍業廢棄物資源化案例彙編，經濟部工業局工業污染防治技術服務團，財團法人中國技術服務社編印，民國 85 年 3 月。
7. 「事業廢棄物減量資源回收及處理示範計畫－電鍍污泥回收金屬資源化示範計畫」期末報告，行政院環境保護署，民國 86 年 6 月。
8. 「事業廢棄物減量資源回收及處理示範計畫－食品業(冷凍水產)廢棄物資源化示範計畫」期末報告，行政院環境保護署，民國 82 年 6 月。
9. 黃嘉宏等，污泥乾燥技術特性與經濟效益評估，廢棄物妥善處理與資源化技術研討會論文集，PP.74~97，民國 90 年 5 月。
10. 黃振隆等，皮革業廢棄物資源化示範計畫，第四屆(1994)工業減廢技術與策略研討會論文集，PP.553~563，民國 83 年 6 月。



11. 廖錦聰等，電鍍污泥資源化回收示範廠實例，1999 工業污染防治工程實務技術研討會論文集，PP.191~203，民國 88 年 12 月。
12. 桐榮良三編，乾燥裝置，日刊工業新聞社，日本東京，1982。
13. 川合純夫，特集－乾燥裝置的最適設計與適用事例－總論，化學裝置，PP.23~27，1995 年 6 月。
14. 水谷榮一等，特集－乾燥裝置的最適設計與適用事例－振動流動乾燥裝置，化學裝置，PP.28~34，1995 年 6 月。
15. 小町篤，特集－乾燥裝置的最適設計與適用事例－媒體流動乾燥裝置，化學裝置，PP.35~39，1995 年 6 月。
16. 山本仁己，特集－乾燥裝置的最適設計與適用事例－圓筒攪拌型真空乾燥裝置，化學裝置，PP.40~44，1995 年 6 月。
17. 片倉正行等，特集－乾燥裝置的最適設計與適用事例－攪拌型氣流乾燥裝置，化學裝置，PP.45~49，1995 年 6 月。
18. 直原英彥等，乾燥裝置的最適設計與適用事例，化學裝置，PP.86~90，1995 年 12 月。

## 國家圖書館出版品預行編目資料

廢棄物資源回收與處理技術手冊－乾燥設備篇  
/經濟部工業局，財團法人台灣綠色生產力基金會－初版  
－台北市：工業局，民 90  
200 面：21×29.7 公分  
ISBN：957-02-9884-7

### 廢棄物資源回收與處理技術手冊－ 乾燥設備篇

---

出版日期：中華民國九十年十二月初版  
發行人：施顏祥  
總編輯：林志森  
編輯企劃：林坤讓、陳萬財、黃順明、林金美、盧俊澄  
發行所：經濟部工業局  
          台北市信義路三段 41-3 號  
          TEL：(02) 2754-1255  
          FAX：(02) 2704-3753  
          <http://www.moeaidb.gov.tw>  
出版所：財團法人台灣綠色生產力基金會  
          台北市忠孝東路四段 310 號 11 樓  
          TEL：(02) 8773-8515  
          FAX：(02) 8773-8516  
          <http://www.tgpf.org.tw>  
設計印刷：信可印刷有限公司  
          TEL：(02) 2221-5259  
          FAX：(02) 2225-5947  
GPN：1009004997  
ISBN：957-02-9884-7  
版權所有 翻印必究  
工本費：新台幣肆百圓整

---