

轉爐石應用於水泥生料使用手冊



CHINA STEEL



DRAGON STEEL

中國鋼鐵股份有限公司

中龍鋼鐵股份有限公司

中華民國 109 年 1 月 13 日

摘要

鋼鐵為國家經濟發展不可或缺之原料，鋼鐵工業係為生產各類鋼鐵製品的行業，其規模與技術為衡量國家工業發展重要指標。中鋼集團，年平均鋼鐵生產量約為 1,600 萬噸，而由煉鋼過程所產出之副產物量亦相當可觀，其中轉爐石年產量約 160 萬噸，而轉爐石具有耐磨損、高硬度及比重大等優良材料特性，歐盟、美國及日本等國家均已將轉爐石產品做多元化之使用。

由於轉爐石主要化學成分為氧化鈣、氧化鐵及二氧化矽，以及少許氧化鋁及氧化鎂等化學成分，皆係為組成水泥的化學成分，與水泥的礦物相具有相似性，國內外的研究結果亦確認轉爐石應用為水泥生料具相當的可行性，例如日本自 2001 年起就持續提供轉爐石給水泥製造業做為生料使用，歐盟及美國亦有一定的比例使用於水泥生料。

中鋼集團為宣導轉爐石之正確使用觀念，確保轉爐石應用於水泥生料之品質規範，特彙整相關研究成果及應用實績，研擬「轉爐石應用於水泥生料使用手冊」(以下簡稱本手冊)，並實際委託水泥廠協助測試生產，以及委託第三方專業機構驗證符合「CNS 61 卜特蘭水泥」標準。而轉爐石作為生產水泥原物料的應用推廣，對於煉鋼廠而言，可提高產品多元化使用性，降低堆置場所造成的土地浪費；對水泥廠而言，則可減少天然礦物開採。

本手冊主要內容包括轉爐石物化特性與應用為水泥生料之供料管理、含轉爐石原料之水泥生產品管、轉爐石為水泥生料之注意事項，可做為水泥製造業等相關產業參考遵循，提供使用轉爐石做為水泥生料之正確使用方法，避免材料誤用與錯用，除確保水泥產品品質外，亦具有循環經濟之效益，有利於促進永續發展政策之推行及確保公共工程之品質。

目錄

摘要.....	I
目錄.....	II
圖目錄.....	IV
表目錄.....	V
第一章 總則.....	1
1.1 緒論.....	1
1.1.1 緣起	1
1.1.2 目的	2
1.1.3 名詞定義	2
1.1.4 適用範圍	3
1.2 轉爐石多元化推廣發展	4
1.3 煉鋼爐渣於水泥生料使用	5
1.4 內容說明	9
第二章 轉爐石產出與原料之加工處理	10
2.1 產出.....	10
2.2 原料之加工處理技術	11
2.2.1 安定化程序	12
2.2.2 物理處理程序	12
2.3 物理及化學特性	13
2.3.1 物理性質	13
2.3.2 化學性質	14
2.4 環境相容性	15
第三章 轉爐石物化特性與應用為水泥生料之供料管理	18
3.1 水泥生料概要	18
3.2 允收標準	19
3.3 進廠檢驗管控	24
3.3.1 轉爐石收受方式	24
3.3.2 轉爐石入廠水分及粒徑量測成果	25
3.3.3 轉爐石入廠注意事項	26

3.4 堆儲之庫容要求	27
第四章 含轉爐石原料之水泥生產品管	28
4.1 配料原則與配料方法	28
4.1.1 水泥生料配料技術原理	28
4.1.2 水泥配料係數	29
4.1.3 轉爐石取代水泥生料配料評估	30
4.2 生料研磨與入磨稱飼精度	32
4.2.1 生料入磨管理	32
4.2.2 生料品質檢驗	32
4.2.3 製程設備影響	34
4.3 燒成熟料管制	35
4.4 含轉爐石原料的水泥品質	40
4.4.1 水泥成品檢驗成果	40
第五章 應用轉爐石為水泥生料之注意事項	45
5.1 原物料允收建議	45
5.2 使用生產建議	45
5.3 其他效益	46
參考文獻.....	47
附錄一 水泥生產設備說明	附錄-1
附錄二 CNS 61 卜特蘭水泥成分標準規定	附錄-7

圖目錄

圖 1.3-1 各國煉鋼爐渣再應用情形	6
圖 2.1-1 一貫作業煉鋼流程圖	11
圖 2.2-1 轉爐石加工程序	12
圖 2.3-1 堆置區的轉爐石粒料外觀	13
圖 2.3-2 轉爐石成分三相圖	15
圖 3.1-1 水泥生產概述圖	18
圖 3.1-2 使用原物料的選擇與進廠檢驗示意圖	19
圖 3.2-1 轉爐石化學成分含量分析比較圖	21
圖 3.2-2 轉爐石之 CaO 含量管制圖	22
圖 3.2-3 轉爐石之 Fe_2O_3 含量管制圖	22
圖 3.2-4 轉爐石之 MgO 含量管制圖	22
圖 3.2-5 轉爐石之 Cl 含量管制圖	22
圖 3.3-1 轉爐石原料進入水泥廠及驗收流程示意圖	25
圖 3.3-2 進廠堵料位置示意圖	26
圖 3.3-3 卸料坑格柵加裝振動器	27
圖 4.2-1 生料研磨製程	32
圖 4.2-2 生料品管作業流程	32
圖 4.2-3 水泥生料成分最大及最小值比較柱狀圖	34
圖 4.3-1 燒成熟料品管作業流程	35
圖 4.3-2 水泥熟料成分最大及最小值比較柱狀圖	37
圖 4.3-3 水泥熟料礦物成分最大及最小值比較柱狀圖	39
圖 4.4-1 水泥研磨及出廠品質管制品管作業流程	40
圖 4.4-2 水泥成品抗壓強度平均統計柱狀圖	44
附錄圖 1-1 水泥生料軋碎機種類一覽表	附錄-1
附錄圖 1-2 不同廠商滾輪豎磨系統示意圖	附錄-2
附錄圖 1-3 各類集塵機示意圖	附錄-4
附錄圖 1-4 旋窯系統主要設施示意圖	附錄-5
附錄圖 1-5 各類熟料冷卻機示意圖	附錄-5
附錄圖 1-6 水泥磨球磨機示意圖	附錄-6

表目錄

表 2.3-1 世界各國轉爐石化學成分比較表	14
表 2.4-1 轉爐石毒性溶出值	16
表 2.4-2 轉爐石粒料放射性檢測結果	17
表 3.2-1 轉爐石個案進廠化學成分分析	19
表 3.2-2 轉爐石化性含量變異分析結果	21
表 3.2-3 轉爐石原料建議允收標準及品質檢驗方法	23
表 3.3-1 中鋼集團轉爐石報告格式及檢測成果案例	24
表 3.3-2 轉爐石進廠水分結果	25
表 3.3-3 轉爐石進廠篩分析檢驗結果	26
表 4.1-1 配料所參考採用之水泥係數及其說明	30
表 4.1-2 典型水泥化學組成	31
表 4.1-3 轉爐石取代部分水泥配料設計	31
表 4.2-1 未添加轉爐石之水泥生料成分(BOFS-0%)	33
表 4.2-2 添加約 1.5%轉爐石之水泥生料成分(BOFS-1.5%)	33
表 4.2-3 水泥生料添加轉爐石與未添加之成分比較表	34
表 4.2-4 製程設備影響情形	35
表 4.3-1 未添加轉爐石之水泥熟料成分(BOFS-0%)	36
表 4.3-2 添加約 1.5%轉爐石之水泥熟料成分(BOFS-1.5%)	36
表 4.3-3 水泥熟料添加轉爐石與未添加之成分比較表	37
表 4.3-4 未添加轉爐石之熟料礦物成分(BOFS-0%)	38
表 4.3-5 添加約 1.5%轉爐石之熟料礦物成分(BOFS-1.5%)	38
表 4.3-6 水泥熟料礦物添加轉爐石與未添加之比較表	39
表 4.4-1 水泥成品化學成分比較成果表	41
表 4.4-2 水泥成品比表面積比較成果表	41
表 4.4-3 水泥成品空氣含量比較成果表	42
表 4.4-4 水泥成品凝結時間比較成果表	42
表 4.4-5 水泥成品熱壓膨脹比較成果表	43
表 4.4-6 水泥成品抗壓強度比較成果表	44
表 4.4-7 水泥成品抗壓強度規範值及平均值	44

附錄表 1 化學成分標準規定	附錄-7
附錄表 2 化學成分任選規定	附錄-8
附錄表 3 物理性質標準規定	附錄-9
附錄表 4 物理性質任選規定	附錄-10

第一章 總則

1.1 緒論

1.1.1 緣起

環境保護與永續發展近年來深受全球重視，隨著工業的發展，如何有效的利用工業副產品，在臺灣有限的土地資源中更顯重要。近年來在產官學界的努力下，各類工業副產物加工設備及技術均較過往有長足進步，將工業副產物轉換成有益之綠色資源材料，以降低對環境生態的衝擊及天然資源的耗費。

轉爐石係一貫作業煉鋼廠轉爐煉鋼之副產品，在轉爐煉鋼過程中，添加生石灰等副原料，並通入純氧去除鋼液之含碳、矽及其他雜質。生石灰因其多孔特性會吸附雜質而結合形成轉爐石，並懸浮於鋼液之上。最後分離轉爐石及鋼液，藉此達到去除雜質，純化鋼液之效果，轉爐石具有高硬度、高比重、高強度及低磨損率等工程性質，平均每生產 1 噸鋼鐵，約產出 112 公斤之轉爐石，臺灣轉爐石年產量共約 160 萬公噸[1]。此外，根據英國標準協會（BSI）盤查轉爐石產品碳足跡為 1.58kg CO₂e/1000kg，遠低於天然粒料 7.24 kg CO₂e/1000kg 以及水泥生料中石灰石 5.35kg CO₂e/1000kg(環保署產品碳足跡服務平台公告)，故使用轉爐石具節能減碳效益[2]。

國外的研究亦顯示，轉爐石除可作為粒料外，亦可作為水泥生產生料，與水泥廠的其他水泥生料一起研磨與窯燒，經過完整的水泥製程可完全再利用轉爐石，因此，中鋼集團為確保轉爐石能適材適用且符合工程品質，特彙整相關研究成果及應用實績，研擬「轉爐石應用於水泥生料使用手冊」(以下簡稱本手冊)，以作為產業參考遵循，俾利共同推行循環經濟政策及轉爐石材料的有效利用。

1.1.2 目的

轉爐石為一貫作業煉鋼廠在煉製鋼液時，將鐵水及副原料加入轉爐後，以純氧吹煉而產出鋼液及熱熔渣，其中經冷卻之熱熔渣稱為轉爐石；該副產物經成功大學永續環境科技中心分別根據美國多重毒性特性溶出試驗：模擬 1,000 年之重金屬溶出符合標準，及依據歐盟營建材料法令 BMD 之 Column Test NEN7343、Tank Leaching Test NEN7345 試驗，模擬 100 年重金屬及 pH 值環境釋出量符合標準；根據日本 Japanese leaching test No.13 (JLT-13) 與 Japanese leaching test No.46 (JLT-46)，測試轉爐石長期穩定性與環境相容性亦符合相關要求，綜合前述所有測試結果皆確認轉爐石為可利用的原物料。

此外，轉爐石主要化學成分為 CaO (約 35~49%)，其次為 Fe_2O_3 (約 17~35%) 及 SiO_2 (約 8~18%)，另含有少許 Al_2O_3 及 MgO ...等，其主要成分皆為組成水泥的化學成分；從礦物相的角度分析，轉爐石之主要化學成分為鈣、鎂、鋁、鐵及矽等元素組成的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 三相系統，為介於矽酸鹽水泥熟料與高爐石之間的產物，與水泥的礦物相相似，因此國內外的研究結果亦確認轉爐石應用為水泥生料具相當的可行性，例如澳洲學者經研究後已將轉爐石歸類為穩定材料[3]。

轉爐石作為生產水泥生料的應用推廣，對於煉鋼廠而言，可提高產品多元化使用性，並降低堆置所造成的土地浪費；對水泥廠而言，則可減少天然礦物開採，為雙贏的作法；因此，本手冊編撰之目的，即在提供水泥製造業使用轉爐石做為水泥生產生料之正確使用方法，避免材料誤用與錯用，除確保水泥產品品質外，亦具有循環經濟之效益。

1.1.3 名詞定義

臺灣鋼鐵產業產出之爐石（渣）大致可分為一貫作業煉鋼之高爐石 (blast-furnace (BF) slag)、轉爐石 (basic-oxygen-furnace (BOF) slag) 及電弧爐煉鋼之電爐石（渣） (electric-arc-furnace (EAF) slag) 3 種。一般常稱呼之煉鋼爐渣 (steel slags 或 steelmaking slags) 係包含轉爐石與電爐石（渣）之泛稱，以下將針對相關用詞進行說明。

(1) 轉爐石

本手冊所稱之「轉爐石」為一貫作業煉鋼廠在煉製鋼液時，由高爐產生的鐵水運送至轉爐，轉爐吹煉成鋼液時須再加入生石灰等原料作為助熔劑，藉此去除鐵水中的雜質而形成鋼液，其中經冷卻之熱熔渣稱之為轉爐石。

(2) 煉鋼爐渣

為非金屬產品，係與鋼同時在轉爐或電弧爐之煉鋼爐中所產生，其係由氧化鐵、氧化鋁、氧化錳、氧化鈣、氧化鎂及氧化矽等氧化物熔融組合而成之矽酸鹽及鐵氧化物，包含轉爐石、電弧爐煉鋼爐渣(石)。

(3) 鋼渣

轉爐、電爐、精煉爐熔煉過程中排出的由金屬原料中的雜質與助熔劑、爐襯形成的以矽酸鹽、鐵酸鹽為主要成分的渣。該鋼渣用詞主要為中國大陸用語，即臺灣之轉爐石、還原渣或氧化渣統稱。

(4) 電弧爐煉鋼爐渣(石)

電弧爐煉鋼爐渣(石)一般可分為碳鋼製程與不銹鋼製程。電弧爐煉鋼爐渣(石)係以回收之廢鐵、廢鋼為主要原料，經由電弧爐高溫熔煉後製成鋼材，生產過程所產生之爐石統稱為電弧爐煉鋼爐渣(石)。電弧爐熔煉過程必須經過氧化期與還原期兩個階段，於氧化期出渣，即為氧化渣(石)，於還原期出渣，即為還原渣(石)。

(5) 水泥

本手冊所稱之「水泥」係指「卜特蘭水泥」，係以水硬性矽酸鈣類為主要成分之熟料研磨而得之水硬性水泥，通常並與一種或一種以上不同型態之硫酸鈣為添加物共同研磨。

1.1.4 適用範圍

本手冊適用於中鋼集團的一貫作業煉鋼廠所產出之轉爐石成品，主要導入水泥廠做為水泥生料再利用，除本手冊列述事項外，使用轉

爐石做為水泥生料之水泥品質規範參照「CNS 61 卜特蘭水泥」國家標準，以管制轉爐石作為水泥生產生料使用之參考依據。

1.2 轉爐石多元化推廣發展

鋼鐵為國家經濟發展不可或缺之原料，具有改善工業結構與促進國家整體經濟發展之功能，因此素有「重工業之母」之稱呼，中鋼集團在一貫作業煉鋼過程所產出的副產物，其中轉爐石年產量約 160 萬噸。經國內外相關研究得知，轉爐石具耐磨損、高硬度、內摩擦角大、抗剪性佳、比重大、抗壓强度高及加州承載比(California Bearing Ratio, CBR)高等優良材料特性[4]。因此中鋼集團針對轉爐石相關特性擬訂使用手冊，其應用範圍說明詳述如下：

(1) 瀝青混凝土

轉爐石應用於瀝青混凝土，於國內已有多項工程實績，國內於 99 年 12 月 30 日首次出版「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊」，此期間公共工程委員會施工綱要規範第 02742 章「瀝青混凝土鋪面」已更新，中鋼集團為確保轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之績效以及提升鋪面工程品質，因此於 106 年 6 月 7 日更新「轉爐石瀝青混凝土使用手冊」，並新增轉爐石瀝青混凝土之應用實例及使用狀況，提供轉爐石資源化應用於瀝青混凝土鋪面之相關技術，促進永續發展政策之推行及確保公共工程之品質。

(2) 海事工程

轉爐石應用於相關海事工程，先進國家已有成功案例，中鋼集團彙整國內外研究文獻及應用實績，於 106 年 11 月 22 日編製「轉爐石海事工程使用手冊」，其適用於中鋼集團所產出之轉爐石或拌合其他材料所製造而成的成品，可應用於海事工程作為回填資材（轉爐石或轉爐石可拌合其他材料）、鋪面材料（整地應用）、港灣施工便道、堤後背填、地盤改良（礫石樁、擠壓砂樁及海域軟弱地盤土方置換）、斜坡堤（拋石與消波塊）及人工魚礁等應用。

(3) 鋪面磚

轉爐石透過滾筒法及改質法等安定化製程，使其物性、化性穩定，可取代天然砂石作為工程材料。中鋼集團為宣導滾筒轉爐石及改質轉爐石應用於高壓磚/透水磚正確使用觀念，提升鋪面磚工程品質，於 107 年 5 月 30 日編製「滾筒轉爐石及改質轉爐石鋪面磚使用手冊」，作為工程主辦機關、設計及施工單位、營造業及預拌混凝土廠等相關產業參考遵循。

(4) 控制性低強度回填材料

依據相關研究結果及實務經驗顯示，轉爐石熱熔碴送入滾筒內，經過適當安定化減低膨脹特性，可取代天然砂石而應用於工程作為填方材料、基底層級配料及瀝青混凝土面層材料等，而做為控制性低強度回填材料（Controlled Low Strength Material, CLSM）使用之粒料，可為混凝土用粒料、現場開挖土石方或再生粒料，因此，將滾筒轉爐石當成材料，不但可節省環境及工程成本，並同時解決天然砂石缺乏及鋼鐵工業副產物使用之問題。因此中鋼集團於 107 年 9 月 25 日以滾筒轉爐石應用於控制性低強度回填材料編製「滾筒轉爐石 CLSM 使用手冊」品質規範。

(5) 道路基底層

為提升道路基底層工程品質，確保轉爐石應用於道路基底層之績效，中鋼集團正擬訂「轉爐石道路基底層使用手冊」，作為工程主辦機關、設計及施工單位、營造業等相關產業參考遵循外，亦可提供轉爐石資源化應用於道路基底層之相關規範，有利於促進永續發展政策之推行及確保公共工程之品質。

1.3 煉鋼爐碴於水泥生料使用

煉鋼爐碴是在 1,500°C~1,700°C 高溫下形成，冷卻後，液態變成固態塊狀。一般為深灰和深褐色，主要有鈣、鐵、鎂、矽、鋁等元素之氧化物組成。其鐵含量與鐵礦尾砂相當，主要礦物相有氫氧化鈣、矽

酸三鈣、矽酸二鈣、鐵鋁酸鈣等，與水泥熟料相似，作為生產水泥之替代生料是為良好選擇。

目前，世界各先進國家均對煉鋼爐渣進行回收與資源化，主要應用於道路面層與基底層級配材料、土木工程、水利工程、回填材料及肥料等，用途相當廣泛，其中做為水泥生料使用各國約占 4-6%，如圖 1.3-1 所示[5]。而中國大陸亦將以水泥熟料加入適量鋼渣、水淬爐石和石膏，共同研磨或分別研磨後混拌製成的「鋼渣水泥」，並已建立相關「鋼渣水泥」產品規範包括：「GB13590-2006 鋼渣矽酸鹽水泥」、「GB/T 20491-2006 用於水泥和混凝土中的鋼渣粉」、「GB 25029-2010 鋼渣道路水泥」、「GB/T 28293-2012 鋼鐵渣粉」、「JC/T 1082-2008 低熱鋼渣矽酸鹽水泥」、「YBT 057-1994 低熱鋼渣礦渣水泥」。

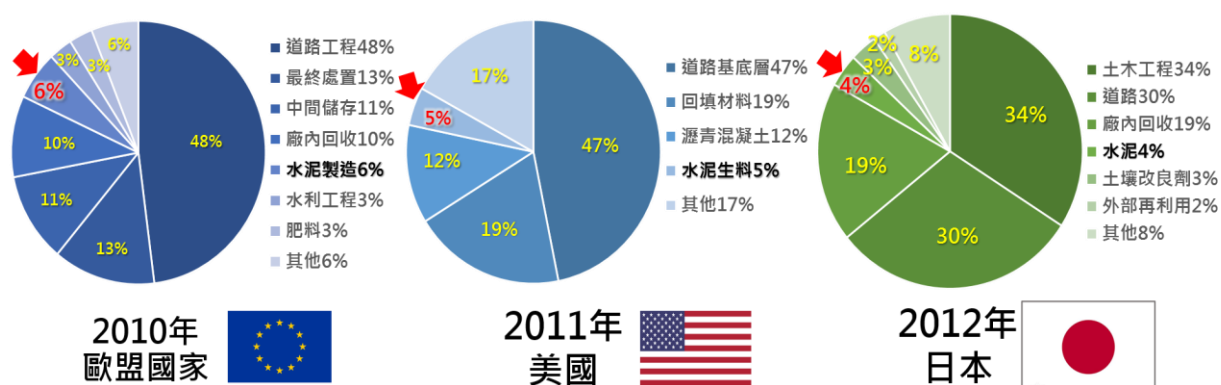


圖 1.3-1 各國煉鋼爐渣再應用情形

早在二十世紀 1970 年，國外就有煉鋼爐渣代替石灰石原料煅燒水泥熟料的報導；1980 年中期，有些單位做了一些工業性試驗及生產，由於配製生料中氧化鐵過高，使煅燒熟料存在一定困難；煉鋼爐渣物料就化學組成而言， Fe_2O_3 和 FeO 含量約為 28%~30%。波特蘭水泥協會[6] (Portland Cement Association, PCA)指出許多水泥廠已用鋼鐵廠的副產物做為水泥熟料的原料。安賽樂米塔爾(ArcelorMittal) [7] 為全球最大的鋼鐵生產公司，位於巴西美景市(Belo Horizonte)的鋼鐵廠，曾研究發現煉鋼爐渣因製程關係而有不同成分或性質，其中轉爐石成分含有 CaO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 SiO_2 及 Al_2O_3 ，占主要成分約 85-90%，其中有穩定的 $\text{C}_2\text{S}(2\text{CaO}-\text{SiO}_2)$ 礦物相與水泥熟料相似，當取代 15%轉爐石於水泥生料配料或熟料的摻料時，具有減碳效益。美國國

家煉鋼爐渣協會(National Slag Association, NSA)[8,9]，則推廣使用煉鋼爐渣於建築材料中，其煉鋼爐渣可在水泥產業扮演重要角色，可節省原料開採，認為煉鋼爐渣可提供水泥的 Fe_2O_3 成分，進一步研究指出轉爐石做為原料燒成水泥熟料過程中，其熟料礦物 C_2S 可由轉爐石成分提供，且生產水泥熟料時，產能可增加 10%；排碳量可降低 7%； NO_x 排放可降 40%，同樣具有節能減碳之效益存在。

中國李文等[10]以鋼渣替代鐵粉配製生料製備矽酸鹽水泥熟料，對比研究了不同石灰石飽和係數條件下，常規鐵粉配料和鋼渣配料製備的生料的易燒性，並採用 XRD 繞射和岩相分析研究了燒成熟料的礦物組成和微觀結構。結果表明：當煅燒溫度小於 $1,350^\circ\text{C}$ 時，鋼渣配料燒製的熟料樣品 $f\text{-CaO}$ 含量略高於鐵粉配料的樣品；當煅燒溫度在 $1,400^\circ\text{C}$ 以上時，兩種配料生料的易燒性相當。和鐵粉配料相比，鋼渣配料沒有改變燒成熟料的礦物組成，而且使阿利特礦物(Alite)晶粒發育更加完整、顆粒平均尺寸增大、分佈更加均勻。鋼渣能夠完全代替鐵粉配料燒製出礦物組成相同、礦物發育良好的優質熟料。

此外，中國李晃等[11]針對鋼渣替代配料煅燒熟料進行研究工作，並獲得以下 3 個結論：

1. 鋼渣是煉鋼過程中，為除去鐵中的硫、磷等有害元素，加入石灰石、螢石 (CaF_2)、矽鐵粉最後形成的廢渣，鋼渣的化學組分與矽酸鹽熟料成分較為接近，目前常使用的轉爐鋼渣，其主要礦物組成是 C_2S 、 C_3S 及 RO 相，還有少量的 C_4AF 、鐵酸鈣 (C_2F) 和 $f\text{-CaO}$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及單質鐵等，具備代替生料的條件。
2. 鋼渣成分中的 FeO 、 P_2O_5 、 CaO 在熟料煅燒中起到礦化和晶種作用， Fe_2O_3 的熔點為 $1,560^\circ\text{C}$ ，而 FeO 的熔點為 $1,420^\circ\text{C}$ ，因此能降低熟料的液相生成溫度和液相黏度，提高 C_2S 與 CaO 在液相中的擴散，促進 C_3S 晶體的發育成長， P_2O_5 含量較少，一般在 1.5%，摻入後不會影響水泥性能，而且 P_2O_5 是 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 的晶格穩定劑，能夠阻止 $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ 在 675°C 時轉變為 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ ，防止熟料粉化， CaF_2 是一種良好的礦化劑， CaO 不需分解直接參與固相反應，不僅能夠降低熟料的熱耗，同時還能誘導 C_3S 的形成。

3. 由於鋼渣是經過高溫煅燒後的產物，所以具有相對比較高的活性，使用鋼渣配料可以較明顯的提高生料的易燒性，從而可以大幅度提高生料配料 KH 值，進而提高熟料中 C_3S 含量。由於鋼渣中 MgO 含量較高，用鋼渣配料後，熟料中 MgO 的含量較原來高出 0.6% 左右，使熟料的液相量增多，物料的最低共熔點降低。所以使用鋼渣配料可以較明顯的提高生料的易燒性。

在煉鋼爐渣取代水泥之建議取代量方面，中國王明輝[12]以鋼渣做為鐵質校正原料進行水泥製程，結果顯示鋼渣能滿足水泥生料配料要求，對於組成無明顯影響，且鋼渣有與水泥熟料相似的矽酸鹽礦物，可在熟料階段加速 C_3S 形成，降低 f-CaO 含量，改善熟料的安定性，有利於早期強度發展。中國金強等[13]指出，鋼渣中 CaO、 SiO_2 和 Fe_2O_3 含量相當豐富，3 者之總和達到 75%，其作用可做為水泥生料之鐵質校正料，在中國水泥工業中已被大量使用，建議鋼渣之添加量約 10% 以下較佳。希臘 P.E. Tsakiridis et al.[14]以煉鋼爐渣 10.5%之用量替代部分生料，結果表示使用煉鋼爐渣不會影響水泥熟料之礦物性質，在物理及力學性質方面，亦對於煉鋼爐渣於水泥之生產不會造成負面影響。

綜上文獻研究成果，煉鋼爐渣取代水泥生料比例於 10.5%以內，其試驗成果均有良好之物理及力學性能，且對於水泥之生產不會造成負面影響，故煉鋼爐渣在取代水泥生料時，對於生產或品質應有一定之效益存在。

1.4 內容說明

本手冊內容包含轉爐石作為水泥之生產生料所需資訊，第二至第五章的內容架構，簡述如下：

(1) 第二章 轉爐石產出與原料之加工處理

本章主要介紹轉爐石從一貫作業煉鋼廠產出過程，並說明安定化（自然風化、改質及滾筒等）及物理處理（破碎、磁選及篩分）等流程，另彙整轉爐石檢測所得之物理性質、化學性質及環境相容性。

(2) 第三章 轉爐石物化特性與應用為水泥生料之供料管理

本章說明轉爐石之物化特性資料及抽樣測試之試驗結果等，並探討水泥配料技術原理與設計方法以及燒製熟料反應原理。另外，亦建議轉爐石於水泥廠應用之允收標準、收受堆儲要求以及進廠檢驗管控等各階段的作業程序。

(3) 第四章 含轉爐石原料之水泥生產品管

本手冊之轉爐石主要做為次級之石灰石及鐵渣，取代水泥生料中的鐵或鈣成分原料，故本章說明含轉爐石原料水泥製程的品質檢驗方法及抽樣試驗結果，建議轉爐石原料導入水泥生產製程之檢驗方法；內容包含試產過程水泥生料品質波動、熟料品質波動及與水泥成品變異等之檢驗結果，確保生產之水泥品質符合「CNS 61 卜特蘭水泥」國家標準。

(4) 第五章 應用轉爐石為水泥生料之注意事項

轉爐石係指中鋼公司與中龍公司在煉鋼過程中所產生之副產品，基於落實循環經濟之政策，本手冊於前述各章已針對基本性質及應用範圍等內容，提出詳細之敘述，本章係綜合前述各章再次提列轉爐石應用於水泥生料時所需之注意事項等，作簡要說明，期望有助於業界參酌應用。

第二章 轉爐石產出與原料之加工處理

本章介紹轉爐石從一貫作業煉鋼廠產出過程，並說明安定化（自然風化、改質及滾筒等）及物理處理（破碎、磁選及篩分）等流程，另彙整轉爐石檢測所得之物理性質、化學性質及體積穩定性性質。

2.1 產出

臺灣鋼鐵產業產出之爐石大致可分為一貫作業煉鋼之高爐石、轉爐石及電弧爐煉鋼之電爐石 3 種。一貫作業煉鋼廠過程產出之副產物，高爐石經急速水冷即形成所謂之水淬高爐石，水淬高爐石再經研磨成粉即為爐石粉，爐石粉可摻配水泥成為高爐水泥，可取代一般水泥廣泛應用於各種營建工程。少部分高爐石以空氣自然冷卻方式產出即為氣冷高爐石，氣冷高爐石大部分用於道路級配使用。一貫作業煉鋼製程中，鐵水於轉爐吹煉成鋼液時須再加入石灰石、白雲石等原料作為助熔劑，藉此去除鐵水中的雜質而形成鋼液，此過程所產生的副產品為轉爐石（如圖 2.1-1 所示）[1]，民國 88 年中鋼公司已將轉爐石登記為產品項目之一[15]，此為本手冊所稱之「轉爐石」。轉爐石經過破碎、磁選及篩分等程序加工後常成為級配粒料，國內外已廣泛應用於道路鋪面、地盤改良、施工便道、填築材料及填海造陸等，另有少部分可作為土壤改良劑、石灰質肥料、廢水處理等用途，本手冊主要為轉爐石做為水泥生料之使用建議。

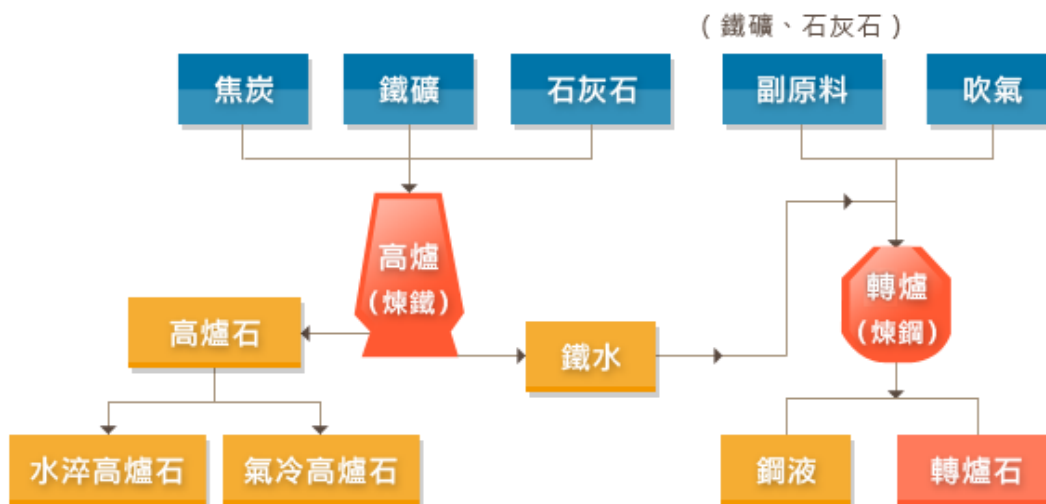


圖 2.1-1 一貫作業煉鋼流程圖

轉爐石為一貫作業鋼鐵廠於煉鋼過程產出之副產物，由中鋼、中龍高爐產生的鐵水運送至轉爐，轉爐吹煉成鋼液時須再加入石灰石等原料作為助熔劑，藉此去除鐵水中的雜質而形成鋼液，此過程所產生的爐石即為轉爐石。

中鋼集團每年產出量約 160 萬噸，因其物性、化性穩定、具環境相容性，用於農業土壤改良、工程整地、道路級配、施工便道、填海造陸、背填材料及水泥製造原料已有數十年經驗及實績，由於轉爐石已是中鋼公司登記的產品項目，相關應用甚廣，故可參照相關國家標準及施工綱要規範進行使用，以轉爐石應用於道路工程為例，可參照「CNS 15310 瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料」及「施工綱要規範 02742 章瀝青混凝土鋪面」等多項規範，做為道路施工之依循標準[16]。

2.2 原料之加工處理技術

轉爐石再利用前，應先進行安定化，再經破碎、磁選及篩分等處理程序，即可達到工程所需之材料品質規格，如圖 2.2-1 所示。

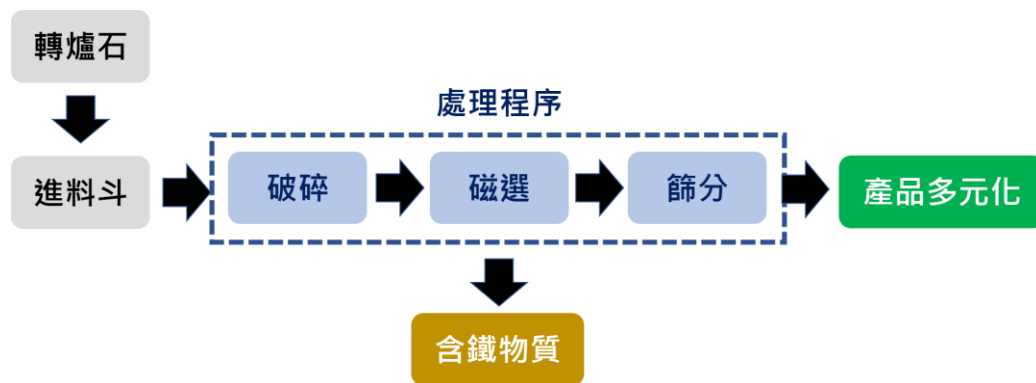


圖 2.2-1 轉爐石加工程序

2.2.1 安定化程序

為穩定煉鋼爐渣之膨脹性，將冷卻硬固的煉鋼爐渣破碎後，使其與空氣及水接觸反應，這種性質穩定化之處理程序稱為安定化，如自然風化法、餘熱自解法、熱潑法、淺盤潑法、改質法及滾筒法，若轉爐石當作粒料使用時，應進行安定化程序處理，若做為水泥生料時則無須該程序。

2.2.2 物理處理程序

(1) 破碎

破碎處理係指利用外力的施予，使大塊的轉爐石碎裂，讓顆粒大小及級配符合工程需要，並利於用磁選機去除含鐵成分。目前國內普遍使用機械破碎方式，利用破碎機具，以震動或槌擊等方式進行處理。

(2) 磁選

磁選處理係指利用電磁原理以回收轉爐石內含鐵物質，如殘鋼等，該類含鐵物質經過精製後可用於工業用途，且於後端使用時可避免鏽蝕情形發生。

(3) 篩分

篩分處理係指將已經完成破碎與磁選處理程序的轉爐石，利用篩分機篩成不同粒徑規格之粒料。轉爐石經過該程序後，可供作工程粒料使用。

2.3 物理及化學特性

2.3.1 物理性質

煉鋼廠產出之轉爐石物質，粒徑大小不一，粗顆粒呈不規則狀，目視可見鐵塊殘渣，含水量高。以下針對轉爐石粒料之物理性質、化學性質及環境相容性進行說明。

(1) 外觀

轉爐石呈現灰色或灰黑色，以塊狀顆粒為主，次為粗顆粒，粉末狀顆粒僅占少數，其粒型凹凸有菱角，且表面粗糙多孔，具孔隙結構，堆置區之轉爐石粒料外觀如圖 2.3-1 所示。

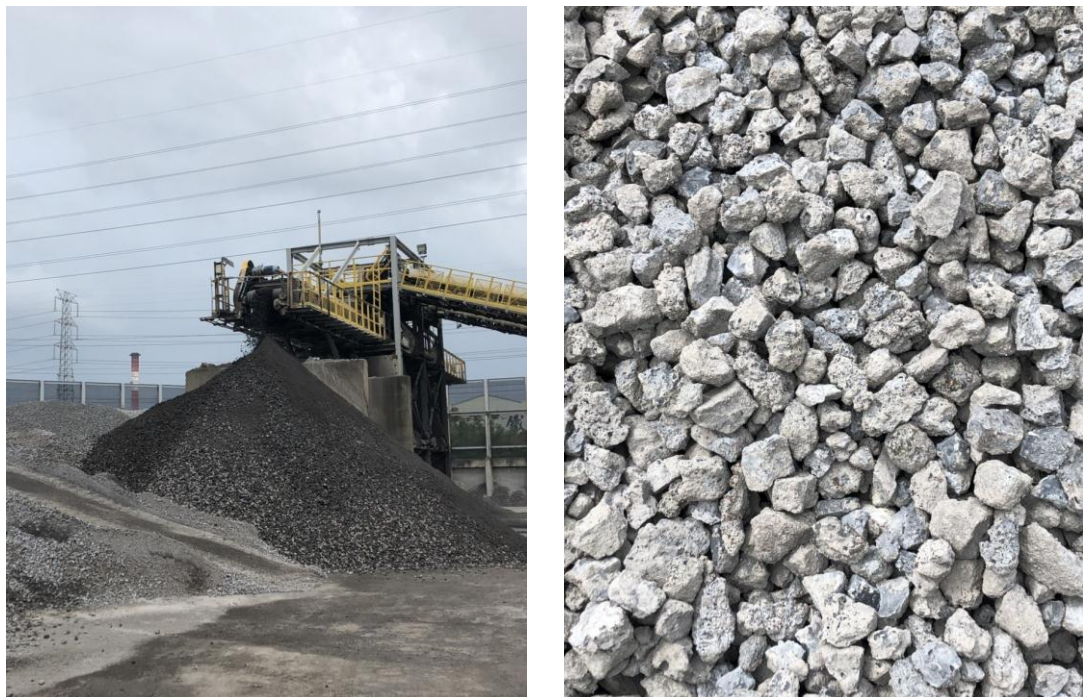


圖 2.3-1 堆置區的轉爐石粒料外觀

(2) 比重

轉爐石因鐵質氧化物含量較高，比重介於 3.2~3.4 之間，比重較天然粒料高，洛杉磯磨損率(約 11.35%)及健性損失率皆較天然砂石低 [15]。

(3) 吸水率

轉爐石吸水率平均值為 2.6%，較天然粒料之吸水率(約 1.69%)高，此係為轉爐石多孔隙所造成。

2.3.2 化學性質

轉爐石是由多種礦物所組成，因製程條件不同，而會有不同的物化性質，大致主要化學成分為 CaO、SiO₂、Al₂O₃、FeO 及 MgO 等，歐美及我國轉爐石之化學成分符合表 2.3-1 資料內容。[4]。

表 2.3-1 世界各國轉爐石化學成分比較表

化學物質	含量 ^(註1) (%)	含量 ^(註2) (%)	含量 ^(註3) (%)	含量 ^(註4) (%)	
				平均	標準差
氧化鈣 (CaO)	42~52	40~52	42	40.8	2.43
二氧化矽 (SiO ₂)	10~20	10~19	15	10.4	1.74
氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	15~35	10~40	24	28.2	4.62
氧化錳 (MnO)	3~10	5~8	5.0	2.05	0.59
氧化鎂 (MgO)	1~8	5~10	8.0	6.90	1.24
三氧化二鋁 (Al ₂ O ₃)	0.5~3	1~3	5.0	3.40	1.14
五氧化二磷 (P ₂ O ₅)	1.5~4	0.5~1	0.8	2.60	0.3
硫 (S)	0.25	< 0.1	0.08	—	—
氧化鉻 (Cr ₂ O ₃)	< 2	—	—	0.20	0.04
CaO/ SiO ₂	4	—	—	4.00	0.62
f-CaO	3~13	—	—	3.90	1.73
資料來源					
註1：Samaris, Literature Review of Recycling of By-Products in Road Construction, Europe, 2007.					
註2：Turner Fairbank Highway Research Center, Material Description for Steel Slag, USA, 2007					
註3：National Slag Association, Steel Slag-A Premier Construction Aggregate, USA, 2013.					
註4：中聯資源(股)公司，中鋼、中龍101-105 年度統計資料共60 筆數據，臺灣(2016)。					
備註：中鋼、中龍轉爐石的化學組成約為 94.55%，其餘 5.45%主要為金屬鐵及氧化亞鐵等。					

取樣 30 組中鋼集團轉爐石原料進行 XRF 成分分析，由檢驗結果得知轉爐石之化學組成包含 CaO(約 38.0%)、Fe₂O₃(約 32.5%)、SiO₂(約 11.5%)及 Al₂O₃(約 5.83%)，與水泥之主要成分相同，如圖 2.3-2 所示，故可取代部分水泥生料用以生產水泥，其他尚有 MgO、P₂O₅、SO₃、

TiO₂、Na₂O 及 Cl⁻等成分。由於 CaO 為轉爐石之主要成分，CaO 能生成矽酸鹽類，與活性反應有其關聯性，另外 Cl⁻含量僅 0.01%，低於中鋼集團品質管制值 0.1%甚多，故無需擔心因氯離子造成鋼筋腐蝕。

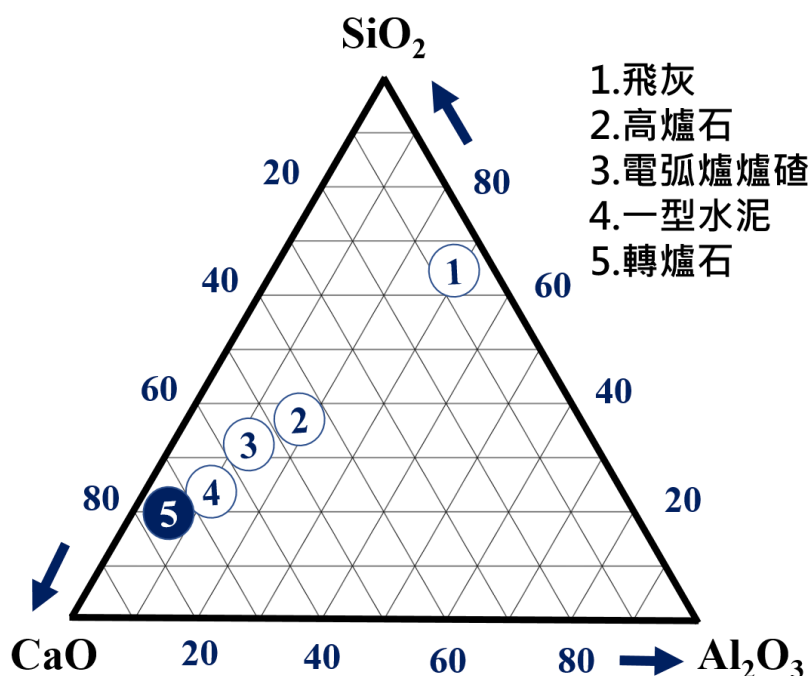


圖 2.3-2 轉爐石成分三相圖

綜觀而論，轉爐石其外觀尺寸大小不一，需進行加工處理，以提高使用性，就三相平衡圖而言，轉爐石主要成分與水泥相似，故取代水泥生料應具有可行性，然而成分中鐵質及鈣質含量較高，可取代水泥生料中之石灰石及鐵渣。

2.4 環境相容性

(1) 酸鹼度 (pH)

轉爐石之主要成分為 CaO，故為鹼性物質，依 NIEAR208.04C pH 值試驗結果，pH 值約為 11~12.4，與水泥的 pH 值 12.46 相近。

(2) 毒性特性溶出程序 (TCLP)

轉爐石原料依經濟部函文解釋可視為工廠設立登記之產品，但仍參考環境安全性評估對應規範與作法進行檢測，而轉爐石依環保署

「有害事業廢棄物認定標準」及「事業廢棄物毒性特性溶出程序」進行 TCLP 品質管理，檢驗結果皆符合法規要求，參見表 2.4-1 所示。

表 2.4-1 轉爐石毒性溶出值

毒性 溶出	轉爐石(mg/L)			檢驗方法	法規 管制值 (mg/L)
	樣品 (1)	樣品 (2)	樣品 (3)		
砷	ND(MDL=0.033)			NIEA R306.13C/M104.02C	<5.0
鉍	0.155	0.119	0.112	NIEA R306.13C/M104.02C	<100.0
鎘	ND(MDL=0.010)			NIEA R306.13C/M104.02C	<1.0
鉻	ND(MDL=0.018)			NIEA R306.13C/M104.02C	<5.0
六價鉻	ND(MDL=0.01)			NIEA R309.12C	<2.5
銅	ND(MDL=0.017)			NIEA R306.13C/M104.02C	<15.0
汞	ND(MDL=0.0004)			NIEA R309.12C	<0.2
鉛	ND(MDL=0.016)			NIEA R306.13C/M104.02C	<5.0
硒	0.054	0.048	0.06	NIEA R306.13C/M104.02C	<1.0

備註: (1)低於方法偵極限之測定值以 ND 表示，並註明其方法偵測極限 (MDL)。

(2)事業廢棄物毒性特性溶出程序參照 NIEA R201.15C 檢測方法。

(3) 戴奧辛

戴奧辛為環保署「有害事業廢棄物認定標準」之一，其總毒性濃度當量不得超過 1.0 ng I-TEQ/g。轉爐石經送環保署認可實驗室檢測試驗結果戴奧辛僅測得 0.001~0.003 ng I-TEQ/g，甚至低於臺灣一般農業用地土壤環境背景值(平均為 0.00389ng I-TEQ/g)[15]。

轉爐石係由煉鋼製程在高溫約 1,500°C 以上所產出，在高溫下戴奧辛已完全被分解，亦無再合成條件，故轉爐石不含戴奧辛。

(4) 放射性

「放射性物質含量」係指鉀(⁴⁰K)、鈾(²³²Th)及鈾系(²³⁸U)等天然放射性物質的含量。為確認轉爐石可合理使用於建築材料上，並防止其原有的天然放射性物質含量，不致危害環境輻射安全，以維護人體健康。測試程序採用 RML-OS-02，儀器則採用純鍍加馬能譜分析系統，

當比活度(AI) ≤ 1 時則符合綠建材評定原則(依財團法人台灣建築中心『100/12/21 中建環字第 1000005724 號函』，而檢驗結果比活度皆小於 0.12 皆符合綠建材評定原則。

表 2.4-2 轉爐石粒料放射性檢測結果

轉爐石粒料	核種活度(貝克/公斤)			比活度 (AI)	備註
	⁴⁰ K	²³² Th 系	²³⁸ U 系		
樣品(1)	<100	<0.12	20 \pm 2	<0.12	比活度(AI) ≤ 1 符合綠建材 評定原則
樣品(2)	<100	0.1	15 \pm 2	<0.10	
樣品(3)	<100	0.1	13 \pm 1	<0.10	

備註：比活度(AI)= $^{40}\text{K}/4810+^{232}\text{Th}/259+^{238}\text{U}/370$ 。

第三章 轉爐石物化特性與應用為水泥生料之 供料管理

本章說明轉爐石之物化特性資料及抽樣測試之試驗結果等，並探討水泥配料技術原理與設計方法以及燒製熟料反應原理。另外，亦建議轉爐石於水泥廠應用之允收標準、收受堆儲要求以及進廠檢驗管控等各階段的作業程序，水泥生產設備說明則詳如附錄一說明。

3.1 水泥生料概要

水泥係為石灰石與含鈣、矽、鋁及鐵等氧化物之矽砂黏土或頁岩礦物等生料研磨後之混合物，經高溫旋窯煅燒而得。煅燒過程中，生料部分形成液態，反應即在固-液相或固-固相間進行。若生料配方恰當、細度足夠並均勻混合，則在窯中經適當之燒結溫度、停留時間及冷卻後，可得到水泥熟料礦物—矽酸三鈣 (C_3S)、矽酸二鈣 (C_2S)、鋁酸三鈣 (C_3A)、鐵鋁酸四鈣 (C_4AF)；熟料添加石膏並研磨即為水泥，流程概述參考圖 3.1-1 所示[17]。

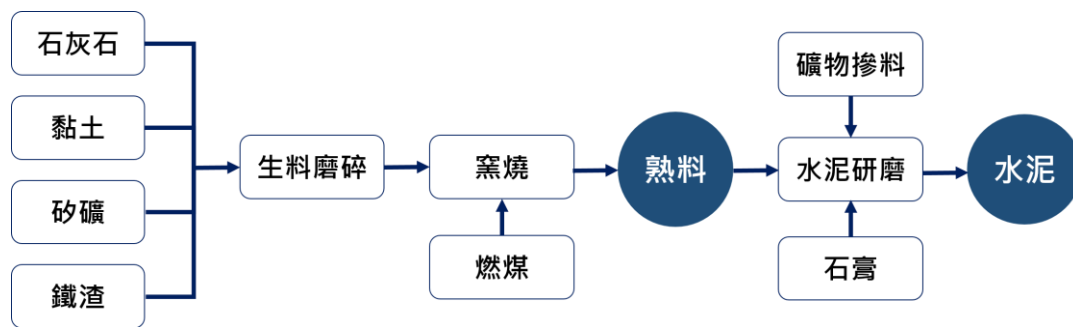


圖 3.1-1 水泥生產概述圖

製造水泥之主要原料有石灰石、黏土、矽礦及鐵渣等 4 種，另於研磨水泥時須加入適量之石膏。其中，石灰石約佔所有水泥生料用量的 80~90%，黏土原料佔 10~20%，用以供應水泥中 SiO_2 及 Al_2O_3 的成分，矽礦通常在黏土原料無法充分供應 SiO_2 時，才適量添加予以調和，鐵渣則佔 1~5% 之間，用來供應水泥的 Fe_2O_3 成分，石膏則做為緩凝劑，約佔水泥的 5%。

上述石灰石、黏土、矽礦及鐵渣做為水泥主要生產生料，在經正確配比、適當研磨及混合均勻後，並以適當的溫度及時間燒結，此一產物稱為水泥熟料。水泥的性能主要決定於熟料的質量，優質熟料應該具有合適的礦物組成和良好的岩相結構。因此，按預定要求控制熟料的化學成分，是水泥生產的中心環節之一。

一般卜特蘭水泥熟料主要由氧化鈣（CaO）、氧化矽（SiO₂）、氧化鋁（Al₂O₃）和氧化鐵（Fe₂O₃）4種氧化物組成，通常這4種氧化物總量在熟料中佔94%以上，其餘的6%以下為少量氧化物，如氧化鎂（MgO）、三氧化硫（SO₃）、氧化鈦（TiO₂）、氧化磷（P₂O₅）以及鹽類（K₂O及Na₂O）等，是以化學成分為水泥生料之管控要點；以石灰石為例，說明工廠採購流程如圖3.1-2所示[17]。

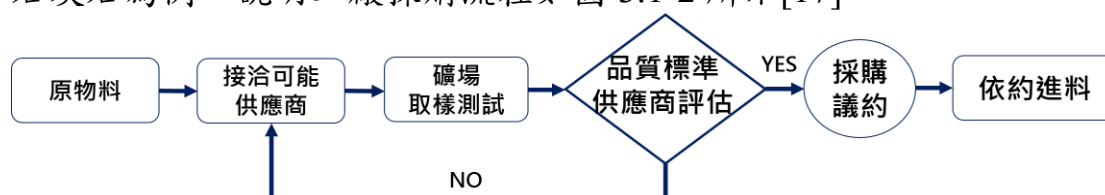


圖 3.1-2 使用原物料的選擇與進廠檢驗示意圖

3.2 允收標準

轉爐石做為水泥生料的替代成分，要求的物、化特性應具一定的標準，而本手冊所指的轉爐石主要為取代部分水泥生料，茲以水泥生料所需的化學成分檢驗，轉爐石化學成分分析結果如表3.2-1所示。

表 3.2-1 轉爐石個案進廠化學成分分析

編號	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	總鹼分 (Na ₂ O +0.658K ₂ O)
1	38.5	31.3	10.9	5.68	6.71	0.18	0.006	0.06
2	38.2	29.9	15.6	5.66	6.74	0.16	0.021	0.04
3	38.9	30.8	10.8	6.40	7.06	0.17	0.021	0.08
4	38.5	31.8	10.9	6.03	7.05	0.18	0.017	0.10
5	35.4	39.9	9.9	4.90	6.21	0.13	0.011	0.06
6	37.0	35.0	11.2	5.51	6.52	0.15	0.012	0.06
7	36.8	30.1	14.1	6.75	6.46	0.15	0.016	0.14
8	38.5	29.2	11.6	6.61	6.80	0.22	0.011	0.07

編號	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	總鹼分 (Na ₂ O +0.658K ₂ O)
9	38.1	32.9	10.8	5.83	6.38	0.14	0.013	0.07
10	38.6	32.3	10.6	5.88	6.58	0.13	0.013	0.05
11	38.8	31.0	10.7	6.03	6.65	0.16	0.015	0.05
12	38.4	32.9	10.8	5.16	6.44	0.13	0.012	0.06
13	39.4	33.4	10.9	4.89	6.57	0.12	0.016	0.04
14	38.0	33.8	10.6	5.58	6.62	0.14	0.012	0.07
15	36.8	34.4	12.8	5.30	6.43	0.14	0.014	0.10
16	37.9	31.1	12.0	6.15	6.74	0.17	0.012	0.10
17	37.3	33.1	12.3	5.72	6.58	0.17	0.016	0.06
18	38.0	32.9	10.9	5.91	6.65	0.15	0.015	0.07
19	38.0	31.4	11.9	6.22	6.70	0.15	0.015	0.10
20	38.5	30.7	12.4	5.91	6.84	0.17	0.016	0.06
21	38.5	30.8	12.4	6.03	6.95	0.17	0.020	0.07
22	37.6	34.2	10.5	5.78	6.77	0.16	0.018	0.08
23	36.9	35.6	10.6	5.48	6.59	0.15	0.015	0.07
24	36.4	35.0	11.7	5.72	6.40	0.14	0.014	0.09
25	37.4	31.4	12.3	6.29	6.59	0.17	0.012	0.09
26	37.8	30.7	12.1	6.40	6.55	0.17	0.013	0.09
27	38.4	31.5	11.0	6.11	6.59	0.16	0.012	0.06
28	38.5	32.1	10.7	5.91	6.54	0.14	0.014	0.05
29	38.6	32.1	10.7	5.69	6.56	0.14	0.013	0.05
30	38.9	32.4	10.8	5.36	6.55	0.14	0.014	0.05
平均	38.0	32.5	11.5	5.83	6.63	0.16	0.01	0.07

轉爐石成分主要以 CaO(約 38.0%)及 Fe₂O₃(約 32.5%)為主，檢視水泥使用材料成分中，以石灰石之 CaO 平均含量 49%及鐵渣之 Fe₂O₃ 平均含量 57.1%，含量較為相近，可知當轉爐石取代水泥生料時，可做為次級之石灰石及鐵渣，取代水泥生料中的鐵或鈣成分原料。

轉爐石應用於水泥生料上時需考量材料之變異係數，當變異係數愈大則會影響水泥產品之性質穩定性，而一般為管控水泥生產品質之標準差多控制在一定的水準以下。轉爐石之各成分應符合水泥生產之品質，標準差如表 3.2-2 所示。

轉爐石之 CaO、Fe₂O₃、MgO 及 Cl⁻成分含量趨勢如圖 3.2-2 至圖 3.2-5 所示，結果顯示均在允收標準內。

表 3.2-2 轉爐石化性含量變異分析結果

轉爐石成分	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Cl ⁻
最大值 (%)	39.4	39.9	15.6	7.06	6.75	0.22	0.021
最小值 (%)	35.4	29.2	9.90	6.21	4.89	0.12	0.006
平均值 (%)	38.0	32.5	11.5	6.63	5.83	0.16	0.014
標準差 (%)	0.88	2.13	1.18	0.19	0.45	0.02	0.003

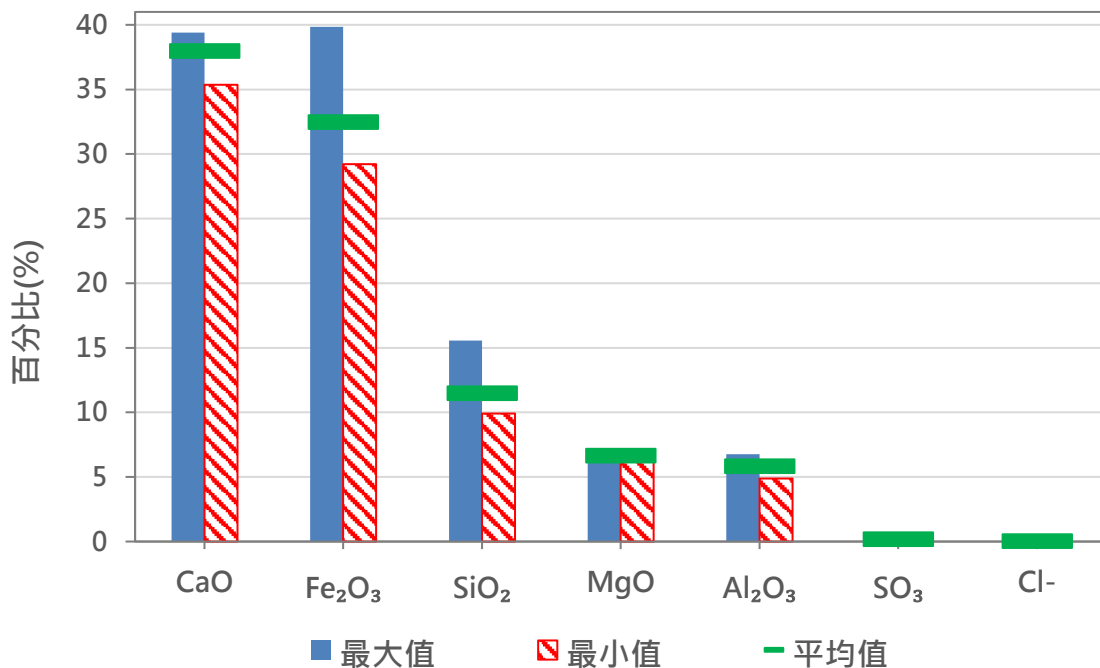


圖 3.2-1 轉爐石化學成分含量分析比較圖

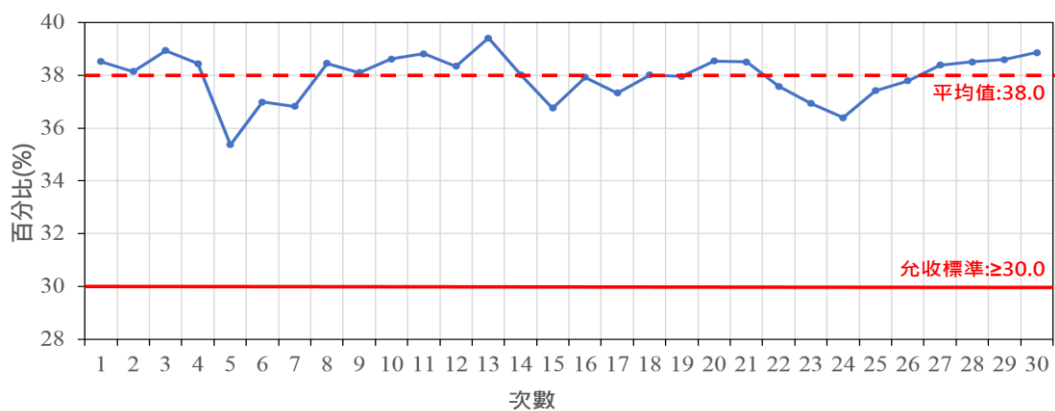


圖 3.2-2 轉爐石之 CaO 含量管制圖

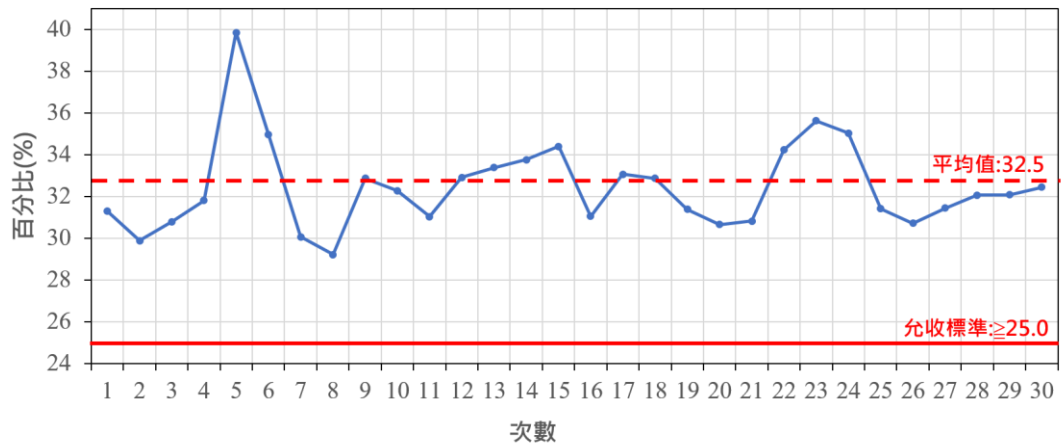


圖 3.2-3 轉爐石之 Fe₂O₃ 含量管制圖

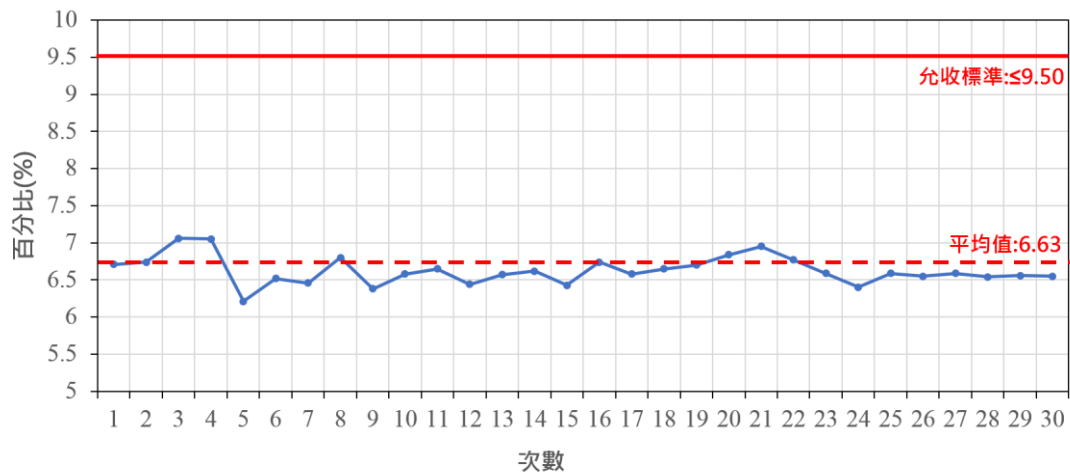


圖 3.2-4 轉爐石之 MgO 含量管制圖

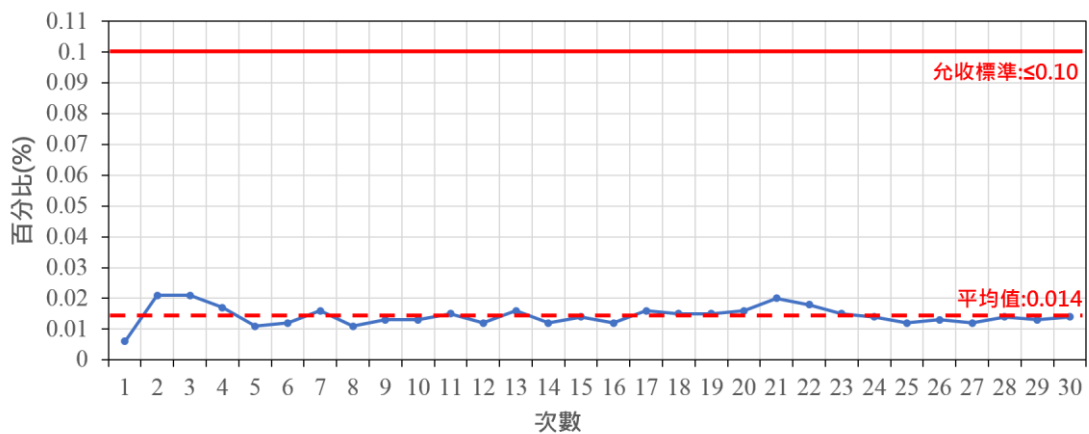


圖 3.2-5 轉爐石之 Cl 含量管制圖

當轉爐石運輸車進入水泥廠後，卸料至卸料坑前，每天需進行取樣檢測，轉爐石進料時可初步判斷之項目為顆粒大小以及水分含量，其餘化學成分項目則以檢測報告予以驗證，其轉爐石建議允收標準及品質檢驗方法如表 3.2-3 所示，因轉爐石可做為次級之石灰石及鐵渣，取代水泥生料中的鐵或鈣成分原料，故需管控其成分含量，另外 MgO 成分遇水可能會產生膨脹情形，但對於「CNS 61 卜特蘭水泥」而言，其水泥生料並未限制 MgO 用量，僅對於水泥成品有其限制(<6%)，故應有所注意及區別。

表 3.2-3 轉爐石原料建議允收標準及品質檢驗方法

驗收項目	烘乾基組成(水分為原樣基)	
	允收標準(%)	檢測方法
SiO ₂ (%)	-	CNS1078 水硬性水泥化學分析法
Al ₂ O ₃ (%)	-	
Fe ₂ O ₃ (%)	≥ 25.0	
CaO(%)	≥ 30.0	
SO ₃ (%)	-	
MgO(%)	≤ 9.50	
總鹼分(%)	≤ 0.30	
Cl ⁻ (%)	≤ 0.10	
水分(%)	≤ 12.0	CNS 489 細粒料表面含水率試驗法
粒徑(mm)	≤ 10.0	CNS 486 粗細粒料篩析法

備註：(1)允收標準係參考中鋼集團於 104~107 年轉爐石品管數據，並基於統計原理採用平均值+3 倍標準差制訂。
 (2)可依各廠實際需求調整允收標準值。
 (3)收料端檢測頻率依各水泥廠品質要求自行訂定。

3.3 進廠檢驗管控

3.3.1 轉爐石收受方式

中鋼集團每月均會定期檢測一次轉爐石物化特性(檢測格式及成果如表 3.3-1 所示)，確保轉爐石出料之品質狀況，而轉爐石原料進入水泥廠及驗收流程則如圖 3.3-1 所示，首先由運輸車運送進入廠內時需先過磅，由廠內人員進行取樣作業，水分及粒徑量測可現場即時檢測，化性檢測則為留樣後進行試驗，驗收合格後由水泥廠正式收受，作為後續水泥生料之使用。

表 3.3-1 中鋼集團轉爐石報告格式及檢測成果案例

中聯資源股份有限公司

物化性試驗報告

委託單位：

採樣地點：

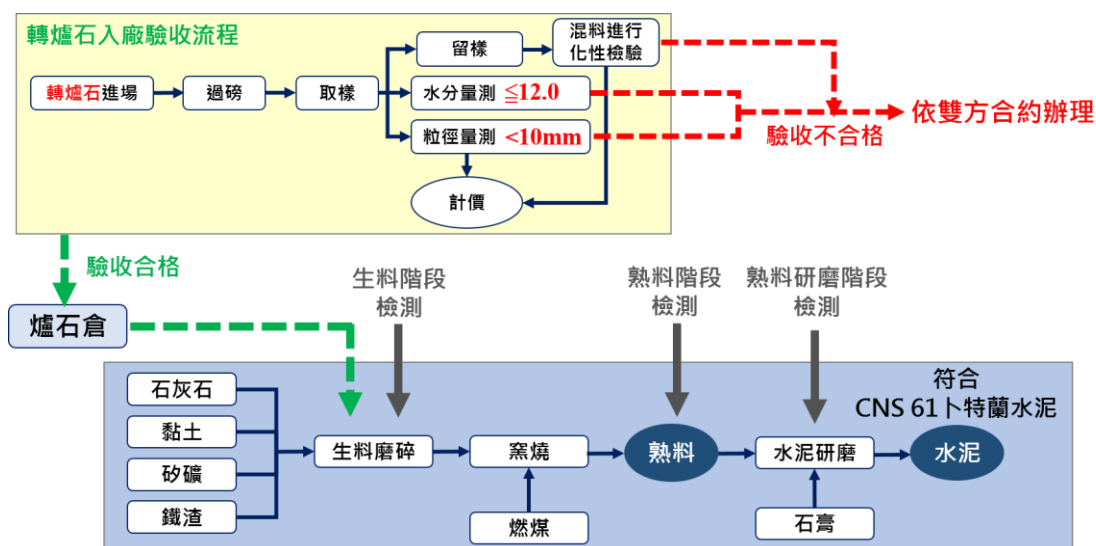
樣品名稱：爐石骨材(轉爐石細粉料) 採樣日期：

篩分析				
篩號/粒徑	檢測值			規範值
	停留量		通過率 (wt.%)	通過率 (wt.%)
	留篩(wt.%)	累積(wt.%)		
3/8" / 9.52 mm	0.0	0.0	100.0	100
#4 / 4.75 mm	2.9	2.9	97.1	—
#8 / 2.36 mm	32.1	35.0	65.0	—
#16 / 1.18 mm	23.0	57.9	42.1	—
#30 / 0.6 mm	18.7	76.6	23.4	—
#50 / 0.3 mm	11.5	88.1	11.9	—
#100 / 0.15 mm	6.1	94.2	5.8	—
底盤	5.8	100.0	0.0	—
試驗項目		分析結果		規範值
氧化鈣 / CaO (wt.%)		36.5		≥30.0
氧化鎂 / MgO (wt.%)		7.0		≤9.50
氧化鐵 / Fe ₂ O ₃ (wt.%)		38.1		≥25.0
總鹼/ (Na ₂ O+0.658K ₂ O) (wt.%)		0.01		≤0.30
氯離子 / Cl ⁻ (wt.%)		0.01		≤0.10
含水率(wt.%)		3.8		≤12.0
輻射(nSv/h)		119.0		≤200
備註	1. 茲證明本表所列試驗結果均按本公司存檔資料記載，正確無誤。			
	2. 本試驗樣品結果所列記錄僅對樣品本身負責。			

報告格式版本：v3.0

分析人員：

覆核：



備註:各階段之檢測內容及方法，依各水泥廠自主管理為原則。

圖 3.3-1 轉爐石原料進入水泥廠及驗收流程示意圖

3.3.2 轉爐石入廠水分及粒徑量測成果

實際將轉爐石送至水泥廠，並檢測轉爐石水分及粒徑情形，水分檢驗期間平均約 4.6%(105°C 烘乾之結果)，符合允收標準小於 12%之要求，如表 3.3-2 所示，粒徑部分則 100%通過 9.5 mm 篩號，亦符合允收標準小於 10mm 之要求，如表 3.3-3 所示，故尚無需擔心卡料問題。

表 3.3-2 轉爐石進廠水分結果

檢驗日期	檢驗值(%)	允收標準(%)
2019/2/21~28	4.2	≤ 12.0
2019/3/1~10	3.5	
2019/3/11~20	5.5	
2019/3/21~31	5.2	
平均值	4.6	

表 3.3-3 轉爐石進廠篩分析檢驗結果

篩號	留篩重 (g)	累積停留 篩重(%)	累積停留篩 百分比(%)	過篩百分比 (%)
9.5mm	0	0	0	100
4.75 mm	6.0	1.2	1.2	98.8
2.36 mm	29.5	5.9	7.0	93.0
1.7 mm	136.4	27.1	34.1	65.9
0.6 mm	94.5	18.8	52.9	47.1
0.3 mm	69.1	13.7	66.6	33.4
0.15 mm	51.2	10.2	76.8	23.2
底盤	116.9	23.2	100.0	—
合計	503.6	100.0	FM=2.39	

3.3.3 轉爐石入廠注意事項

若供應之轉爐石含水量高時，可能使轉爐石有結塊情形，導致進料時可能堵料在卸料坑格柵、提運機袖斗、儲桶下料口等 3 處，如圖 3.3-2 所示。



圖 3.3-2 進廠堵料位置示意圖

為解決卡料問題，水泥廠可在卸料坑格柵加裝振動器(如圖 3.3-3 所示)，以利轉爐石順利入料。在轉爐石含水量控制與防範方面，轉爐石運送途徑中主要從一貫作業煉鋼廠出廠、運輸路程、抵達水泥廠，共 3 階段。因此，在一貫作業煉鋼廠端應將轉爐石儲放至室內，並在室內或有遮蔽處將轉爐石裝上運輸車。而運輸車在運送過程應加裝遮雨設備，以防止天候在運送過程中造成轉爐石含水量過

高。最後，在水泥廠端建議將轉爐石卸料並儲放於室內以避免含水量提高之情況發生，藉由上述的改善方法，堵料問題得以妥善解決。



圖 3.3-3 卸料坑格柵加裝振動器

3.4 堆儲之庫容要求

因轉爐石 pH 值約為 11~12.4，屬鹼性物質與水泥 pH 值相近，故當轉爐石從一貫作業煉鋼廠出廠並抵達水泥廠時，其儲存堆置庫容之要求，建議優先儲放於廠內空間，建議工廠設置可符合下列規定：

1. 廠房之建築應堅固，地面應採用水泥混凝土或其他易清理材料。
2. 工廠廠區周圍應設置高結構體圍牆或其他適當阻隔之設施，廠內及廠外連接主要交通之道路可鋪設瀝青混凝土或水泥混凝土路面。
3. 廠內各作業場所應明確區隔，製造作業區與行政作業區應明確劃分。
4. 原料、物料、半成品及成品之儲存場所，應適當隔離。
5. 工廠內部應有充分採光、照明與通風設備。

第四章 含轉爐石原料之水泥生產品管

因本手冊之轉爐石主要做為次級之石灰石及鐵渣，取代水泥生料中的鐵或鈣成分原料，故本章說明其含轉爐石原料水泥製程的品質檢驗方法及抽樣試驗結果，並建議轉爐石原料導入為水泥生產製程之檢驗方法；內容含括試產過程水泥生料品質波動、熟料品質波動及與水泥成品變異等之檢驗結果，並實際委由國內某水泥廠執行試燒作業，確保生產之水泥品質符合「CNS 61 卜特蘭水泥」國家標準。

4.1 配料原則與配料方法

4.1.1 水泥生料配料技術原理

所謂水泥生料係由石灰質原料、黏土原料及少量校正原料（有時還加入適量的礦化劑及晶種等）按比例配合，粉磨到一定細度的物料，稱為生料。原料可以採用天然礦山開採，或採用其他工業副產物所組成。生料化學成分隨水泥產品型別、生產方法、燃料品質、窯型及其他生產條件等不同而有所差異。而所謂水泥生料配料係據水泥型別、原料與燃料品質、生產設備條件等選擇合理的熟料礦物組成及率值，並由此計算所用原料的配比，稱為生料配料，簡稱配料。

水泥生料的配料設計，是以原料的可用性與經濟合理性，以決定原料種類及配比，並選擇合適的生產方法及產製技術流程，計算水泥廠的物料平衡，作為水泥廠產製技術的依據。

配料的基本原則係為使配製的生料易磨易燒，生產的熟料品質穩定，充分利用礦物資源，生產過程易於操作控制和管理，並盡可能簡化產製流程。配料計算的依據是物料平衡。任何化學反應的物料平衡係指反應物的量應等於生成物的量。隨著溫度的升高，生料煅燒成熟料伴隨著生料乾燥之蒸發物理吸附水、黏土礦物分解放出結晶水、有機物質的分解揮發、碳酸鹽分解放出 CO_2 、液相出現使熟料燒成。因為有水分、 CO_2 以及揮發物的逸出，所以計算時必須採用統一基準。

4.1.2 水泥配料係數

一般水泥生料之配料係數，主要為氧化物的比值，由水泥生料中 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 含量，可以推算出水泥係數 (Cement Modulus) HM、SM、IM 及 LSF，而水泥係數的高低變動，可以間接影響燒成後熟料之單礦物多寡、成分組成，以及水泥的易燒性與易磨性，因此常用來作為控制水泥品質指標。可由 LSF 控制配料來調整，或一般以 HM、SM 及 IM 等係數進行配料控制即可穩定控制水泥之成分。

目前常用之水泥配料係數如下：

$$\text{水硬係數 (Hydraulic Modulus, HM)} = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (\text{公式 4.1})$$

$$\text{矽氧係數 (Silica Modulus, SM)} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (\text{公式 4.2})$$

$$\text{鋁鐵係數 (Iron Modulus, IM)} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (\text{公式 4.3})$$

石灰飽和度 (lime saturation factor, LSF)

$$= \text{CaO} / (2.8\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (\text{公式 4.4})$$

水泥生料之成分複雜，如何將已知使用量做適當之配合使生料之成分以合乎要求，則有賴於各配料公式 (水泥係數) 之合理運用，常用水泥係數如下，另所參採之水泥係數規範值及說明如表 4.1-1 所示。

1. 水硬係數 (HM)

水硬係數最初由 Michaelis 提出： $\text{HM} = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$

2. 矽氧係數 (SM) 與鋁鐵係數 (IM)

Kuhl 利用下列公式表示 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 之關係：

$$\text{SM} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{IM} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$$

此兩公式亦用以做為配料之準則。

3. 石灰飽和度 (LSF)

石灰飽和度指生料 (熟料) 中酸性氧化物所能化合之最大石灰量。

表 4.1-1 配料所參考採用之水泥係數及其說明

水泥係數	定義	說明
水硬係數 (HM)	$HM = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	一般水泥，水硬係數約在 1.7-2.3，優等水泥水硬係數約為 2， $HM < 1.7$ 之水泥強度大都不充分， $HM > 2.4$ 則體積多不安定。
矽氧係數 (SM)	$SM = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	矽氧係數一般介於 1.9-3.2，較佳之範圍為 2.2-2.6，但矽氧係數有時亦有較高之情況，如高矽含量之水泥及白水泥。矽氧係數提高，熔相含量相對減少，熟料燒成能力受損。
鋁鐵係數 (IM)	$IM = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$	鋁鐵係數一般介於 1.3-2.0，高 Al_2O_3 之水泥的鋁氧係數可達 2.5 以上，低三氧化鋁水泥則可能低於 1.5（鐵質水泥）。
石灰飽和度 (LSF)	$LSF = \text{CaO} / (2.8\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$	一般而言，石灰飽和度在 0.9-0.95 之間。熟料之石灰欲達飽和狀態時，全部 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 必須結合成 C_3S 、 C_3A 及 C_4AF 所須之量。

4.1.3 轉爐石取代水泥生料配料評估

如前述水泥生產製程來看，水泥主要係將石灰質原料（ CaCO_3 ）及黏土原料（ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）按化學成分及欲製成水泥品種決定原料配料比例，經研磨、燒結成熟料再加石膏研磨至所需細度而成。故根據水泥應用類別的不同，水泥生料在配料時，各原料用量比例亦會有所差異，就典型熟料而言，各主要成分 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 之使用比例如表 4.1-2 所示。因此通常各水泥廠在進行配料作業時，均以達成表列成分建議用量為目的，進行配料設計。

水泥配料設計方法因應環境條件的不同，亦有不同的設計方案，而本手冊轉爐石導入水泥生料應用時，在符合成分要求之前提下，其

添加比例之決定擬採取水泥係數配料設計或一定比例直接添加的方式，進行配料設計。本手冊以水泥係數配料設計法為例，透過實驗及實際研製進行成分分析，探討轉爐石導入水泥生料應用之較佳設計方法及使用比例，作為水泥廠產製時設計參考之依據。

表 4.1-2 典型水泥化學組成

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
用量比例 (%)	64.8	21.6	5.80	4.50

由國內外應用文獻得知，水泥業藉由水泥生料中 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 及 Fe₂O₃ 含量，計算出 LSF、SM 及 IM 水泥係數，以控制水泥的品質。水泥係數的高低，可間接預測出生料的易燒性以及燒成後熟料中水泥礦物的多寡，藉以評斷水泥品質的優劣。根據轉爐石及其他水泥生料（石灰石、黏土、矽礦及鐵渣）中 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 及 Fe₂O₃ 分析結果，並以配成適用卜特蘭一型水泥為目標，並依據表 4.1-1 所列 HM、SM 及 IM 計算式，來決定轉爐石之添加量。實驗設計共分為 2 種配比，分別為未添加轉爐石（實驗編號 BOFS-0%）及添加轉爐石（實驗編號 BOFS-1.5%）。各組 HM、SM 及 IM 之計算值，及各原料組成比例如表 4.1-3 所示。由表可知當添加轉爐石用量時，矽質原料及鐵渣之用量略各分別減少 0.5% 及 1% 之使用量，其因轉爐石鐵含量高，並配合原料成分變動因素，摻用時為維持配料係數穩定，故需減少矽質原料使用，可預期轉爐石之應用能有效協助水泥廠完全取代鐵渣之用量。

然而轉爐石添加與否之成分變動，並不一定會如手冊表 4.1-3 之結果所示，端視各水泥廠之原料種類而訂，且各水泥廠水泥生料成分皆不相同，且製程中須定時依成分比例調整用量，建議水泥廠視自行需求做調整，故亦無建議轉爐石的取代添加比例。

表 4.1-3 轉爐石取代部分水泥配料設計

實驗編號	原料成分 (%)										水泥係數		
	轉爐石	石灰石	鋁質原料	矽質原料	鐵渣	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	HM	SM	IM
BOFS-0%	0	88	3	8	1	41.2	13.4	2.84	3.52	1.99	2.27	2.77	1.43
BOFS-1.5%	約 1.5	88	3	7.5	-	41.4	13.5	2.85	3.46	2.15	2.25	2.69	1.33

4.2 生料研磨與入磨稱飼精度

4.2.1 生料入磨管理

秤量機為生產管制之核心，將石灰石、黏土、矽礦及鐵渣等原料以適當比例配料，在研磨機內加以粉碎再經選粉、收塵後存於生料庫中，如圖 4.2-1 所示[17]。

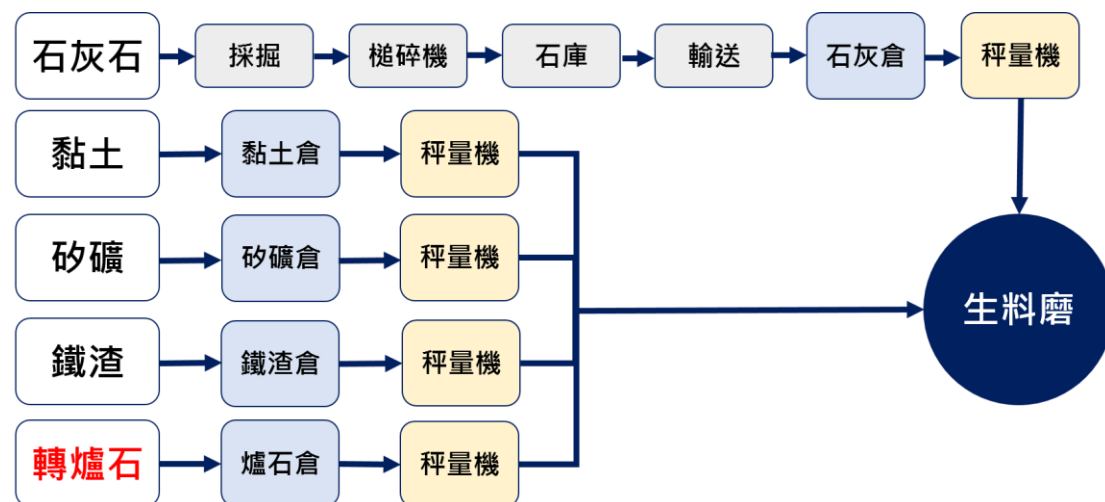


圖 4.2-1 生料研磨製程

4.2.2 生料品質檢驗

生料的細度越細及各成分混合均勻時，煅燒時各組成成分能夠充分接觸並進行熱交換，使發生 CaCO_3 的分解反應、固相反應及熱化學反應的速度加快，有利於水泥熟料的煅燒。故當轉爐石取代部分水泥生料並進行生料研磨時，除要控管細度外，並須確認各水泥係數目標值及偏差在一定標準差區間內，而定時取樣目的為確認入出庫生料各水泥係數目標值及偏差在一定標準差區間內，如圖 4.2-2 所示。

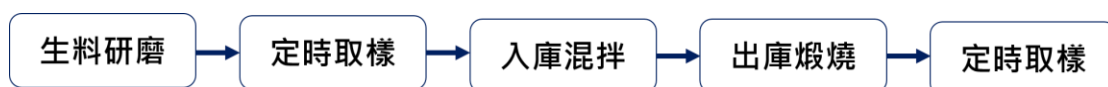


圖 4.2-2 生料品管作業流程

水泥廠檢驗水泥生料成分時，將轉爐石添加至約 1.5%。未添加轉爐石之水泥生料成分檢驗結果如表 4.2-1 所示。並與在水泥廠試燒之添加轉爐石之水泥生料成分檢驗結果進行比較如表 4.2-2 所示。

表 4.2-1 未添加轉爐石之水泥生料成分(BOFS-0%)

編號	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	氧化鎂 (MgO)	三氧化硫 (SO ₃)	總鹼分 (%)
1	41.2	13.3	3.00	2.06	3.36	0.19	0.55
2	41.1	13.5	3.02	2.20	3.42	0.19	0.57
3	41.3	13.5	2.85	2.11	3.32	0.17	0.56
4	41.0	13.5	2.92	2.03	3.46	0.16	0.54
5	40.9	13.5	2.95	1.95	3.62	0.16	0.55
6	41.1	13.2	2.86	1.83	3.71	0.15	0.54
平均	41.1	13.4	2.93	2.03	3.48	0.17	0.55

表 4.2-2 添加約 1.5%轉爐石之水泥生料成分(BOFS-1.5%)

編號	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	氧化鎂 (MgO)	三氧化硫 (SO ₃)	總鹼分 (%)
1	41.1	13.3	2.81	2.18	3.72	0.14	0.43
2	41.2	13.5	2.87	2.19	3.54	0.14	0.44
3	41.5	13.5	2.86	2.14	3.42	0.14	0.46
4	41.6	13.5	2.85	2.13	3.38	0.15	0.47
5	41.7	13.4	2.85	2.10	3.36	0.16	0.48
6	41.6	13.5	2.85	2.15	3.36	0.16	0.51
平均	41.4	13.5	2.85	2.15	3.46	0.15	0.46

比較結果如表 4.2.3 及圖 4.4-3 所示，各項成分差異不大，整體而言，成分差異均在可接受之範圍內，且能符合配料之需求，可作為轉爐石部分取代水泥生料的可行依據。

表 4.2-3 水泥生料添加轉爐石與未添加之成分比較表

生料成分	最大值 (%)		最小值 (%)		平均值 (%)		標準差 (%)	
	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%
CaO	41.3	41.7	40.9	41.1	41.1	41.4	0.13	0.23
SiO ₂	13.5	13.5	13.2	13.3	13.4	13.5	0.13	0.10
Al ₂ O ₃	3.02	2.87	2.85	2.81	2.93	2.85	0.07	0.02
Fe ₂ O ₃	2.20	2.19	1.83	2.10	2.03	2.15	0.13	0.03
MgO	3.71	3.72	3.32	3.36	3.48	3.46	0.15	0.14
SO ₃	0.19	0.16	0.15	0.14	0.17	0.15	0.02	0.01
總鹼份	0.57	0.51	0.54	0.43	0.55	0.46	0.01	0.03

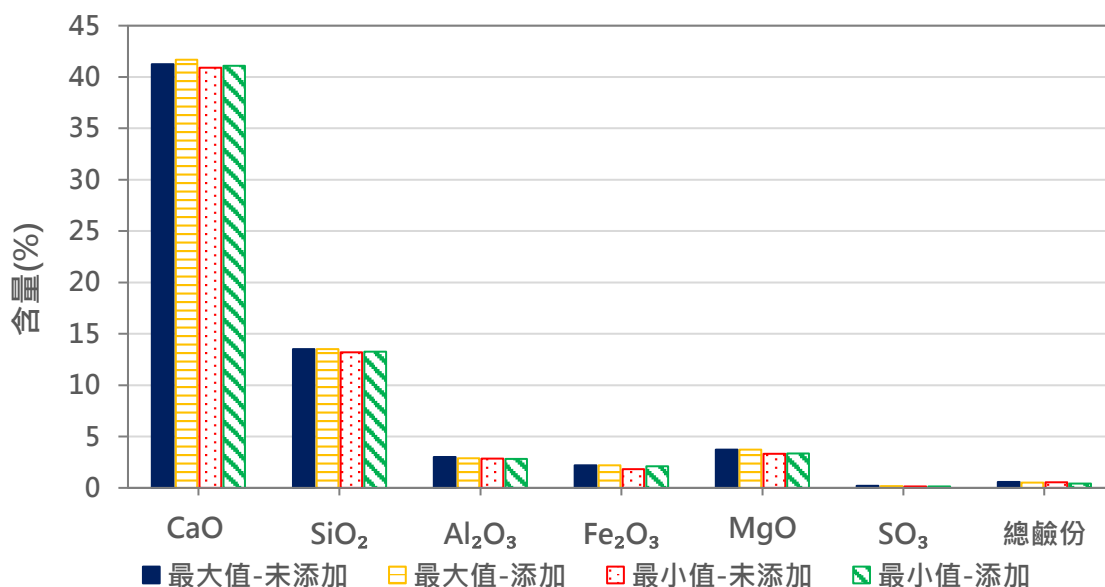


圖 4.2-3 水泥生料成分最大及最小值比較柱狀圖

4.2.3 製程設備影響

添加轉爐石時對於碎石機出口風壓、研磨生料耗電及磨耗情形，測試期間均無明顯差異。對於環境影響面，依據「水泥業空氣污染物排放標準」中的不透光度及氮氧化物之數據評估，均在合格範圍內且無異常狀況，其相關監控數據如表 4.2-4 所示。

表 4.2-4 製程設備影響情形

轉爐石添加比例	碎石機出口風壓(mbar)	研磨生料耗電(kwh/公噸-生料)	磨耗數據	不透光率(%)	氮氧化物(NO _x)
				<20%	<450ppm
BOFS-0%	-40.0	12.4	測試期間短，尚無明顯差異。	11.0	261
BOFS-1.5%	-36.0	12.5		10.0	298

4.3 燒成熟料管制

當轉爐石取代部分水泥生料並進行生料研磨後，並燒成熟料時，需定時檢測 f-CaO 之含量，為確保熟料之品質，f-CaO 在一定區間內，如圖 4.3-1 所示。

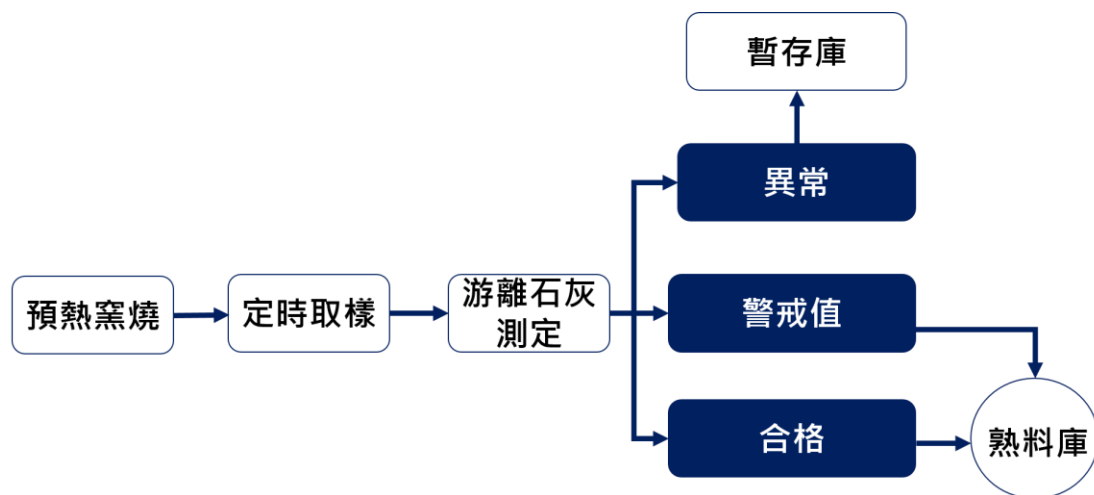


圖 4.3-1 燒成熟料品管作業流程

水泥廠檢驗水泥熟料成分如表 4.3-1 所示，導入轉爐石之水泥熟料成分檢驗結果如表 4.3-2 所示。並與水泥廠導入轉爐石試燒期間之前未添加轉爐石之水泥熟料成分檢驗結果進行比較。

表 4.3-1 未添加轉爐石之水泥熟料成分(BOFS-0%)

編號	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	氧化鎂 (MgO)	三氧化硫 (SO ₃)	總鹼分 (%)	f-CaO (%)
1	63.1	21.0	5.14	3.09	5.23	0.39	0.84	0.51
2	62.7	20.9	5.16	3.29	5.38	0.44	0.89	0.83
3	63.0	21.0	4.78	3.16	5.16	0.38	0.85	0.63
4	62.8	21.4	5.01	3.04	5.50	0.38	0.85	0.83
5	62.6	21.2	5.10	2.95	5.75	0.38	0.87	0.22
6	62.9	21.1	4.95	2.80	5.86	0.34	0.82	0.63
平均	62.8	21.1	5.02	3.06	5.48	0.39	0.85	0.61

表 4.3-2 添加約 1.5%轉爐石之水泥熟料成分(BOFS-1.5%)

編號	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	氧化鎂 (MgO)	三氧化硫 (SO ₃)	總鹼分 (%)	f-CaO (%)
1	62.7	21.0	4.69	3.29	5.86	0.41	0.67	0.65
2	63.0	21.0	4.76	3.39	5.60	0.29	0.68	0.55
3	63.0	21.4	4.73	3.30	5.39	0.30	0.67	0.51
4	63.4	21.7	4.73	3.25	5.38	0.36	0.72	0.43
5	63.6	21.6	4.69	3.21	5.31	0.75	0.75	0.61
6	63.7	21.1	4.68	3.30	5.27	0.33	0.77	0.55
平均	63.2	21.3	4.71	3.29	5.47	0.41	0.71	0.55

比較結果顯示，各項成分差異甚小，如表 4.3-3 及圖 4.3-2 所示。整體而言，成分差異均在合理之範圍內，且氧化鎂含量均小於 CNS 61 規定值 6%內，故可作為轉爐石部分取代水泥生料的可行依據。當添加約 1.5%轉爐石於水泥熟料時，其 f-CaO 含量與未添加轉爐石接近，顯示使用轉爐石做為水泥生料並不影響熟料燒成狀況，故應可長期使用轉爐石於水泥生料中。

表 4.3-3 水泥熟料添加轉爐石與未添加之成分比較表

熟料成分	最大值 (%)		最小值 (%)		平均值 (%)		標準差 (%)	
	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%
CaO	63.1	63.7	62.6	62.7	62.8	63.2	0.21	0.39
SiO ₂	21.4	21.7	20.9	21.0	21.1	21.3	0.19	0.30
Al ₂ O ₃	5.16	4.76	4.78	4.68	5.02	4.71	0.14	0.03
Fe ₂ O ₃	3.29	3.39	2.80	3.21	3.06	3.29	0.17	0.06
MgO	5.86	5.86	5.16	5.27	5.48	5.47	0.28	0.22
SO ₃	0.44	0.75	0.34	0.29	0.39	0.41	0.03	0.18
總鹼分	0.89	0.77	0.82	0.67	0.85	0.71	0.02	0.04
f-CaO	0.83	0.65	0.22	0.43	0.61	0.55	0.23	0.08

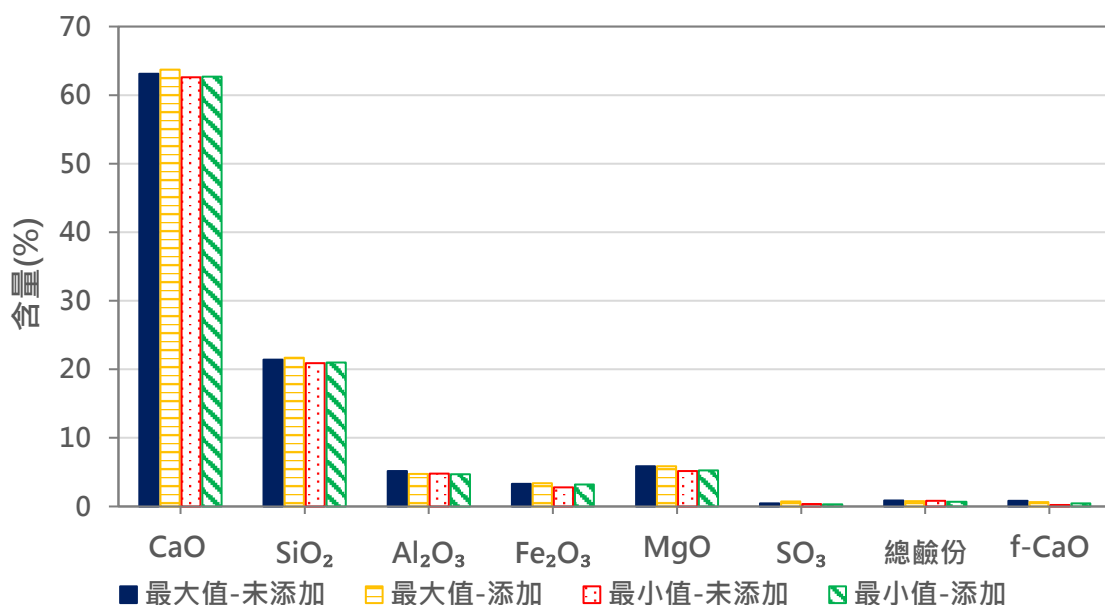


圖 4.3-2 水泥熟料成分最大及最小值比較柱狀圖

水泥廠使用 XRD 檢驗熟料礦物其成分如表 4.3-4 所示，導入轉爐石之水泥組成礦物成分檢驗結果如表 4.3-5 所示，其成分檢驗結果進行比較。其中 C₃A 略有差異性，探究其因原料為天然礦物，成分會略有變動所導致，當添加轉爐石時生料中的 Fe₂O₃ 增加，為控制配料係數 SM，需使 Al₂O₃ 含量下降，故減少熟料中 C₃A 生

成，並轉為 C₄AF，因此熟料中 C₃A 含量略有降低，C₄AF 則略增情形，但不影響水泥品質，且 C₃A 降低可適於低水合熱特性之水泥。

表 4.3-4 未添加轉爐石之熟料礦物成分(BOFS-0%)

編號	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	水泥係數			
					LSF	HM	SM	IM
1	55.7	20.0	7.90	9.9	0.94	2.16	2.55	1.66
2	61.4	15.8	7.60	10.3	0.94	2.14	2.47	1.57
3	55.9	21.0	7.40	11.5	0.95	2.18	2.64	1.51
4	61.8	16.4	6.90	10.4	0.93	2.13	2.66	1.65
5	56.7	20.6	7.00	10.7	0.93	2.14	2.63	1.73
6	58.3	18.4	8.00	9.80	0.94	2.18	2.72	1.77
平均	58.3	18.7	7.50	10.4	0.94	2.15	2.61	1.65

表 4.3-5 添加約 1.5%轉爐石之熟料礦物成分(BOFS-1.5%)

編號	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	水泥係數			
					LSF	HM	SM	IM
1	60.6	17.1	4.80	12.4	0.94	2.16	2.63	1.43
2	56.8	21.5	5.20	11.8	0.95	2.16	2.58	1.40
3	59.0	19.0	6.20	10.2	0.93	2.14	2.67	1.43
4	58.8	18.3	3.20	11.7	0.93	2.14	2.72	1.46
5	61.5	17.3	4.90	11.5	0.93	2.16	2.73	1.46
6	65.9	12.6	5.20	12.2	0.95	2.19	2.64	1.42
平均	60.4	17.6	4.90	11.6	0.94	2.16	2.66	1.43

比較結果顯示，各項差異不大，如表 4.3-6 及圖 4.3-7 所示。整體而言，成分差異均在合理範圍內，並可作為轉爐石部分取代水泥生料的可行依據。

表 4.3-6 水泥熟料礦物添加轉爐石與未添加之比較表

熟料成分	最大值 (%)		最小值 (%)		平均值 (%)		標準差 (%)	
	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%	未添加 BOFS-0%	添加 BOFS-1.5%
C ₃ S	61.8	65.9	55.7	56.8	58.3	60.4	2.73	3.12
C ₂ S	21.0	21.5	15.8	12.6	18.7	17.6	2.22	2.94
C ₃ A	8.00	6.20	6.90	3.20	7.50	4.90	0.47	0.96
C ₄ AF	11.5	12.4	9.80	10.2	10.4	11.6	0.62	0.78
LSF	0.95	0.95	0.93	0.93	0.94	0.94	0.01	0.01
HM	2.18	2.19	2.13	2.16	2.15	2.16	0.02	0.02
SM	2.72	2.73	2.47	2.58	2.61	2.66	0.09	0.06
IM	1.77	1.46	1.51	1.40	1.65	1.43	0.10	0.02

備註:矽酸三鈣 (C₃S)、矽酸二鈣 (C₂S)、鋁酸三鈣 (C₃A)、鐵鋁酸四鈣 (C₄AF)
石灰飽和度 (LSF)、水硬係數 (HM)、矽氧係數 (SM)、鋁鐵係數 (IM)

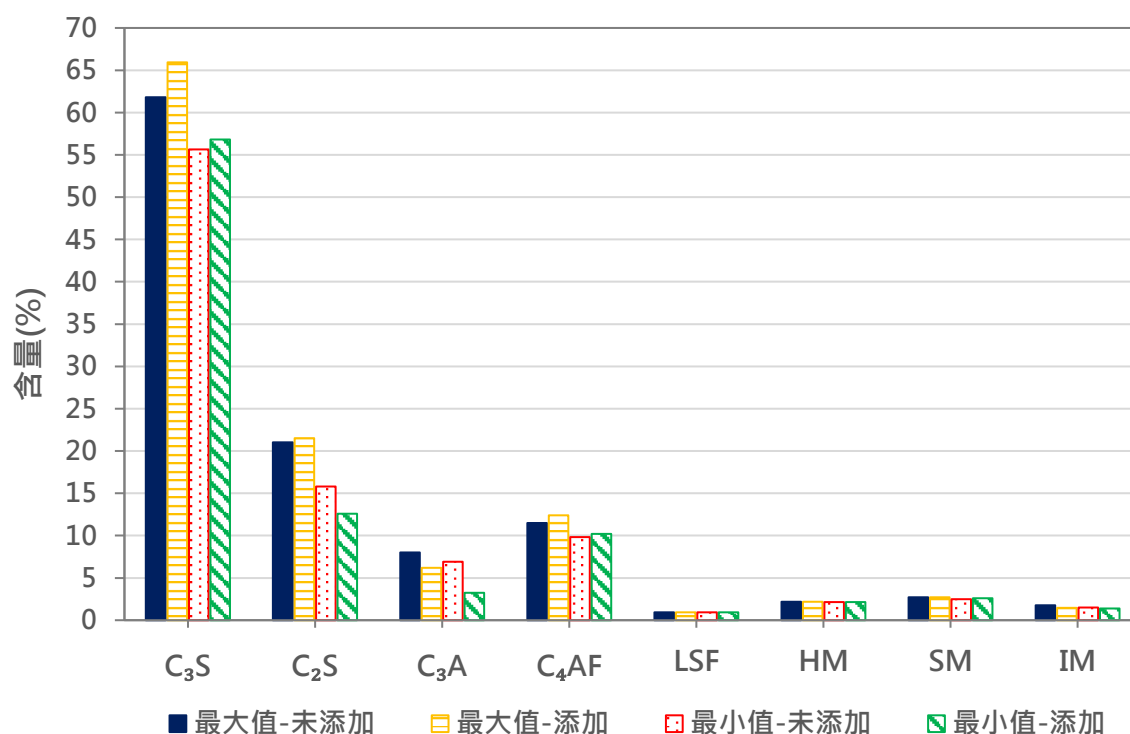


圖 4.3-3 水泥熟料礦物成分最大及最小值比較柱狀圖

4.4 含轉爐石原料的水泥品質

水泥研磨為水泥製造的最後作業，當轉爐石取代部分生料並燒成熟料後，添加石膏做為緩凝劑共同研磨，且需達一定的細度，以增大其水化面積，調節水化反應進程，滿足水泥漿體凝結、硬化要求，並再進行包裝作業。如圖 4.4-1 所示[17]。

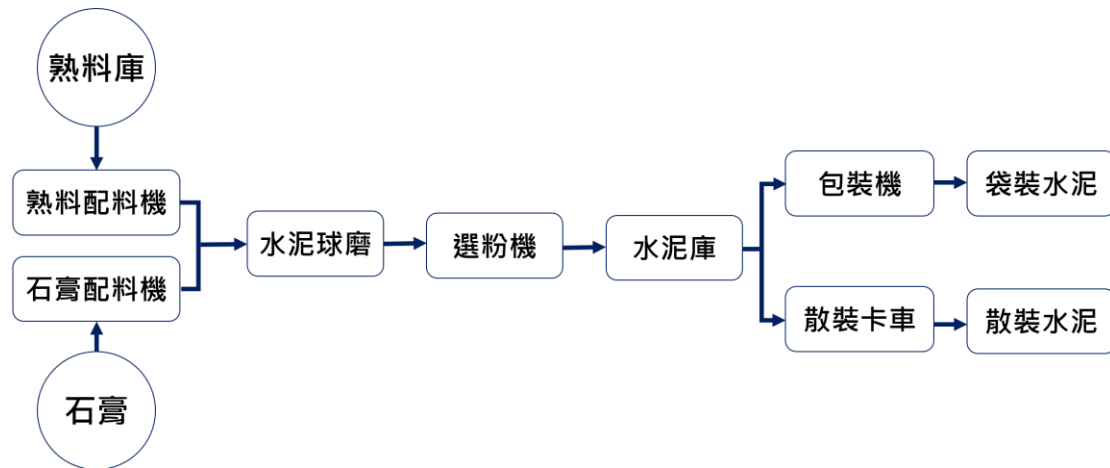


圖 4.4-1 水泥研磨及出廠品質管制品管作業流程

4.4.1 水泥成品檢驗成果

(1) 化學成分分析

根據「CNS 1078 水硬性水泥化學分析法」(仲裁法)試驗結果顯示，當添加約 1.5%轉爐石於水泥時，其水泥成品之各項化學成分差異甚小，且均符合「CNS 61 卜特蘭水泥」之規範值，故可確認轉爐石取代水泥生料之可行性，試驗結果詳如表 4.4-1 所示。

表 4.4-1 水泥成品化學成分比較成果表

編號	氧化鈣 (CaO)	二氧化矽 (SiO ₂)	氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	氧化鎂 (MgO)	三氧化硫 (SO ₃)	氯 (Cl ⁻)
BOFS-0%(1)	62.1	20.1	4.30	2.80	4.90	2.40	0.004
BOFS-0%(2)	61.5	21.0	4.30	2.80	5.00	2.34	0.004
BOFS-0%(3)	61.8	20.8	4.20	2.80	4.90	2.44	0.011
BOFS-0%平均	61.8	20.6	4.27	2.80	4.93	2.39	0.006
BOFS-1.5% (1)	62.6	19.6	4.40	3.10	4.70	2.22	0.006
BOFS-1.5% (2)	62.0	20.4	4.50	3.00	4.30	2.41	0.005
BOFS-1.5% (3)	61.7	20.9	4.40	3.00	4.30	2.40	0.005
BOFS-1.5%平均	62.1	20.3	4.43	3.03	4.43	2.34	0.005
CNS61 一型水泥 規範值	-	-	-	-	<6	<3.0 ^註 <3.5 ^註	<0.02
是否符合規範值	-	-	-	-	是	是	是

備註:當 C₃A≤8.0%時最大值為 3%，當 C₃A>8.0%時最大值為 3.5%。

(2) 比表面積

根據「CNS 2924 卜特蘭水泥細度檢驗法(氣透儀法)」試驗結果顯示，當添加約 1.5%轉爐石於水泥時，其細度與未添加之水泥相似，試驗結果詳如表 4.4-2 所示。

表 4.4-2 水泥成品比表面積比較成果表

樣品	細度(m ² /kg)	
	BOFS-0%	BOFS-1.5%
A ₁	368	376
A ₂	370	377
A ₃	366	374
B ₁	364	367
B ₂	367	369
B ₃	364	365
CNS61 一型水泥 規範值	最小值：260 m ² /kg 最大值：無規定	
是否符合規範值	是	是

備註:本試驗委由第三方實驗室(A)及水泥廠(B)進行試驗。

(3) 空氣含量

根據「CNS 787 水硬性水泥壩料之空氣含量檢驗法」試驗結果顯示，當添加約 1.5%轉爐石於水泥時，其空氣含量試驗結果符合標準，試驗結果詳如表 4.4-3 所示。

表 4.4-3 水泥成品空氣含量比較成果表

樣品	空氣含量(%)	
	BOFS-0%	BOFS-1.5%
A ₁	10	10
A ₂	12	10
A ₃	11	9
CNS61 一型水泥 規範值	最大值：≤12% 最小值：無規定	
是否符合規範值	是	是

(4) 初終凝結果

根據「CNS 786 水硬性水泥壩凝結時間檢驗法(費開氏針法)」試驗結果顯示，當添加約 1.5%轉爐石於水泥時，在初凝及終凝之凝結時間差異性不大，且均符合「CNS 61 卜特蘭水泥」之規範值，試驗結果詳如表 4.4-4 所示。

表 4.4-4 水泥成品凝結時間比較成果表

樣品	初凝時間(min)		終凝時間(min)	
	BOFS-0%	BOFS-1.5%	BOFS-0%	BOFS-1.5%
A ₁	117	142	225	270
A ₂	108	123	210	270
A ₃	195	122	345	255
B ₁	120	106	255	260
B ₂	121	108	290	250
B ₃	117	106	245	255
CNS61 一型水 泥 規範值	>45 min <375 min		-	
是否符合 規範值				
	是	是		

備註:本試驗委由第三方實驗室(A)及水泥廠(B)進行試驗。

(5) 熱壓膨脹

根據「CNS 1258 卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法」分析無添加轉爐石之水泥及添加約 1.5%轉爐石之水泥，如表 4.4-5 所示，結果顯示，均能符合「CNS 61 卜特蘭水泥」之要求。

表 4.4-5 水泥成品熱壓膨脹比較成果表

樣品	熱壓膨脹率(%)	
	BOFS-0%	BOFS-1.5%
A ₁	0.32	0.20
A ₂	0.33	0.18
A ₃	0.23	0.18
B ₁	0.28	0.27
B ₂	0.30	0.23
B ₃	0.44	0.21
CNS61 一型水泥 規範值	<0.8%	
是否符合規範值	是	是

備註:本試驗委由第三方實驗室(A)及水泥廠(B)進行試驗。

(6) 抗壓強度

添加約 1.5%轉爐石於水泥產品，根據「CNS 1010 水硬性水泥埧料抗壓強度檢驗法」(用 50 mm 或 2 in 立方體試體)製作水泥方塊試體，其試驗齡期分別為 1 天、3 天、7 天、14 天及 28 天，試驗結果如表 4.4-6 所示。綜觀而論，當添加約 1.5%轉爐石於水泥產品時，與未添加轉爐石之各齡期抗壓強度相差甚小，且試驗強度均高於「CNS 61 卜特蘭水泥」之規範值，顯示添加轉爐石於水泥產品時，仍具有優良之抗壓強度能力，詳如表 4.4-7 及圖 4.4-2 所示。

表 4.4-6 水泥成品抗壓強度比較成果表

序號	1 天		3 天		7 天		14 天		28 天	
	BOFS -0%	BOFS- 1.5%	BOFS -0%	BOFS -1.5%	BOFS -0%	BOFS -1.5%	BOFS -0%	BOFS -1.5%	BOFS -0%	BOFS -1.5%
A ₁	-	-	204	191	248	252	-	-	334	346
A ₂	-	-	200	201	274	268	-	-	354	340
A ₃	-	-	210	208	272	265	-	-	362	353
B ₁	109	107	238	234	335	332	351	355	421	413
B ₂	114	118	240	244	338	345	363	366	429	429
B ₃	122	117	244	238	352	337	375	361	430	428

備註:本試驗委由第三方實驗室(A)及水泥廠(B)進行試驗。單位:kgf/cm²

表 4.4-7 水泥成品抗壓強度規範值及平均值

齡期	平均值 (kgf/cm ²)		CNS61 一型水 泥規範值 (kgf/cm ²)	添加 1.5% 轉爐 石超過規範倍數 (%)
	BOFS-0%	BOFS-1.5%		
1 天	115.0	114.0	-	-
3 天	222.7	219.3	122.3	79.3
7 天	303.2	299.8	193.6	54.8
14 天	363.0	360.7	-	-
28 天	388.3	384.8	285.3	34.9

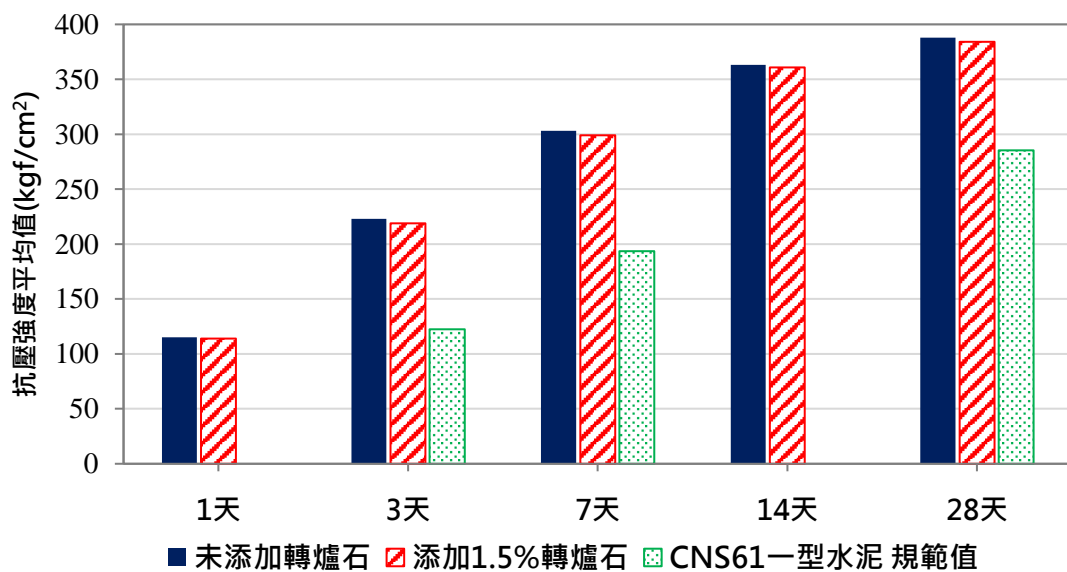


圖 4.4-2 水泥成品抗壓強度平均統計柱狀圖

第五章 應用轉爐石為水泥生料之注意事項

轉爐石係指中鋼公司與中龍公司在煉鋼過程中所產生之副產品，基於落實經濟循環之政策，本手冊於前述各章已針對基本性質及應用範圍等內容，提出詳細之敘述，本章係綜合前述各章再次提列轉爐石應用於水泥生料時所需之注意事項等，作簡要說明，期望有助於業界參酌應用。

5.1 原物料允收建議

- (1)轉爐石導入水泥廠應用處理前，應包括轉爐石的破碎篩分及磁選作業，主要目的係過濾大型之雜物及金屬等物質，以利後端水泥生料之均化與摻配作業。
- (2)轉爐石於破碎磁選之階段中能夠去除大部分之金屬鐵，但仍會存在少量鐵，因此採用粒徑較小之轉爐石，可降低金屬鐵被轉爐石爐渣包覆的情形，採用金屬鐵含量較低之轉爐石，可降低對生料研磨系統磨耗情形。
- (3)轉爐石含 MgO 成分，建議各廠可依使用需求自行規範 MgO 允收標準。

5.2 使用生產建議

- (1)於水泥生料中添加約 1.5%轉爐石對於生產影響不明顯，當增加添加量時，於熟料燒成階段，其液相溫度提前，燒成帶固相反應加快，因此須加強風、料、煤之控制，以維持燒成熟料穩定。
- (2)雖然轉爐石 Fe_2O_3 成分約 32.5%故較為耐磨，但添加轉爐石約 1.5%後，其生料產量為 378 公噸/小時，與一般生料磨之產量相近(380 公噸/小時)，尚無發現產量降低情形。

- (3)轉爐石堆儲建議規劃獨立料倉並優先儲放於室內空間，若堆置於室外時，須符合相關法規規定。
- (4)當提高轉爐石比例於水泥生料生產時，轉爐石成分穩定性係為需注意之項目，可考量利用儲料倉分隔每次進料之轉爐石，以均化方式降低轉爐石化學性質的變異性，使其水泥產品之性質依然具有穩定性且不受影響。
- (5)摻用轉爐石可取代部分現有鐵渣及矽質原料等，因轉爐石含MgO，應注意摻配比例及產出水泥成品是否符合CNS 61 卜特蘭水泥標準(MgO<6.0%)。
- (6)本手冊轉爐石僅取代約 1.5%於水泥生料之使用，經相關文獻探討及實務狀況瞭解，得知轉爐石取代水泥生料比例於 10.5%以內，其試驗成果均有良好之物理及力學性能，對於水泥之製程亦不會造成負面影響，故建議使用單位可依需求自行調配轉爐石之取代量。

5.3 其他效益

- (1)轉爐石導入水泥部分生料，可節省生料之成本，具有經濟價值。
- (2)轉爐石產品碳足跡為 1.58kg CO₂e/1000kg，低於水泥生料中石灰石 5.35kg CO₂e/1000kg 或事業副產物飛灰爐石粉 48.2 kg CO₂e/1000kg(環保署產品碳足跡服務平台公告)，故在使用轉爐石做為水泥生料時具節能減碳效益，並可減輕水泥廠製程之耗能。

參考文獻

- [1]中聯資源股份有限公司，<https://www.chc.com.tw/aboutSlag.html>。
- [2]中聯資源股份有限公司，企業社會責任報告書，pp59，2015。
- [3]A.S. Brand, J.R. Roesler, Steel Furnace Slag Aggregate Expansion and Hardened Concrete Properties, Cement and Concrete Composites, Vol.60, pp1-9, 2015.
- [4]中鋼集團，轉爐石海事工程使用手冊，2017版。
- [5]經濟部工業局，電弧爐還原渣安定化技術手冊，2016。
- [6]Portland Cement Association, Portland Cement Association Sustainable Manufacturing Fact Sheet, 2005.
- [7]J.M. Delbecq, Steel Slags as Cementitious Materials, ArcelorMittal, 2010.
- [8]National Slag Association, The Use of Steelmaking Slag in Cement Manufacturing, 2009.
- [9]National Slag Association, <https://www.nationalslag.org>.
- [10]李文、楊凱敏、盧都友、嚴生，鋼渣替代鐵粉製備硅酸鹽水泥熟料，江蘇建材，第4期，2012。
- [11]李晃、安曉鵬、史才軍、劉豫、焦登武，粗顆粒鋼渣與生料高溫煅燒生產水泥熟料實驗研究，材料導報，第29卷第11期，2015。
- [12]王明輝，鋼渣替代鐵粉配製水泥生料的研究，湖南省湘潭鋼鐵公司水泥廠，1997。
- [13]金強、徐錦引、高衛波，寶鋼鋼渣處理工藝及其資源化利用技術，寶鋼科協鋼渣研究學會，第3期，2005。
- [14]P.E. Tsakiridis, G.D. Papadimitriou, S. Tsivilis, C. Koroneos, Utilization of Steel Slag for Portland Cement Clinker Production, Journal of Hazardous Materials, Vol.152, pp805-811, 2008.
- [15]陳信榮、張簡國禎，轉爐石對環境相容性之探討，2011年轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會，高雄，pp1-9，2011。
- [16]林志棟、蔡瑋倫、郭孟鑫，轉爐石在道路工程應用的相關國家標準及綱要規範，鋪面工程，第10卷第4期，pp69-82，2012。
- [17]潤泰精密材料股份有限公司，水泥品管議題簡報資料。


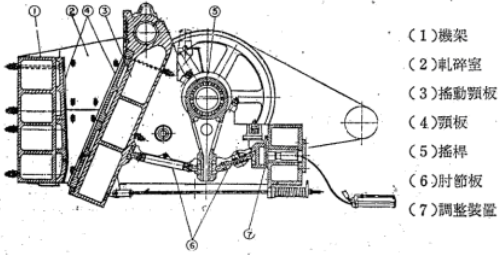
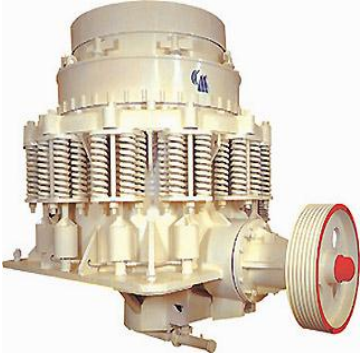
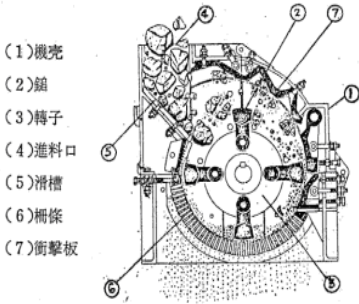

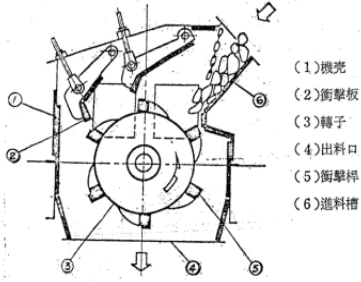
附錄

附錄一 水泥生產設備說明

目前國內水泥廠商之水泥製程與設備皆相同，惟部分使用設備系統有異，如軋碎機、生料磨系統、水泥窯系統及集塵機等，以下針對各機型發展與特色來進行說明。

(1) 軋碎機

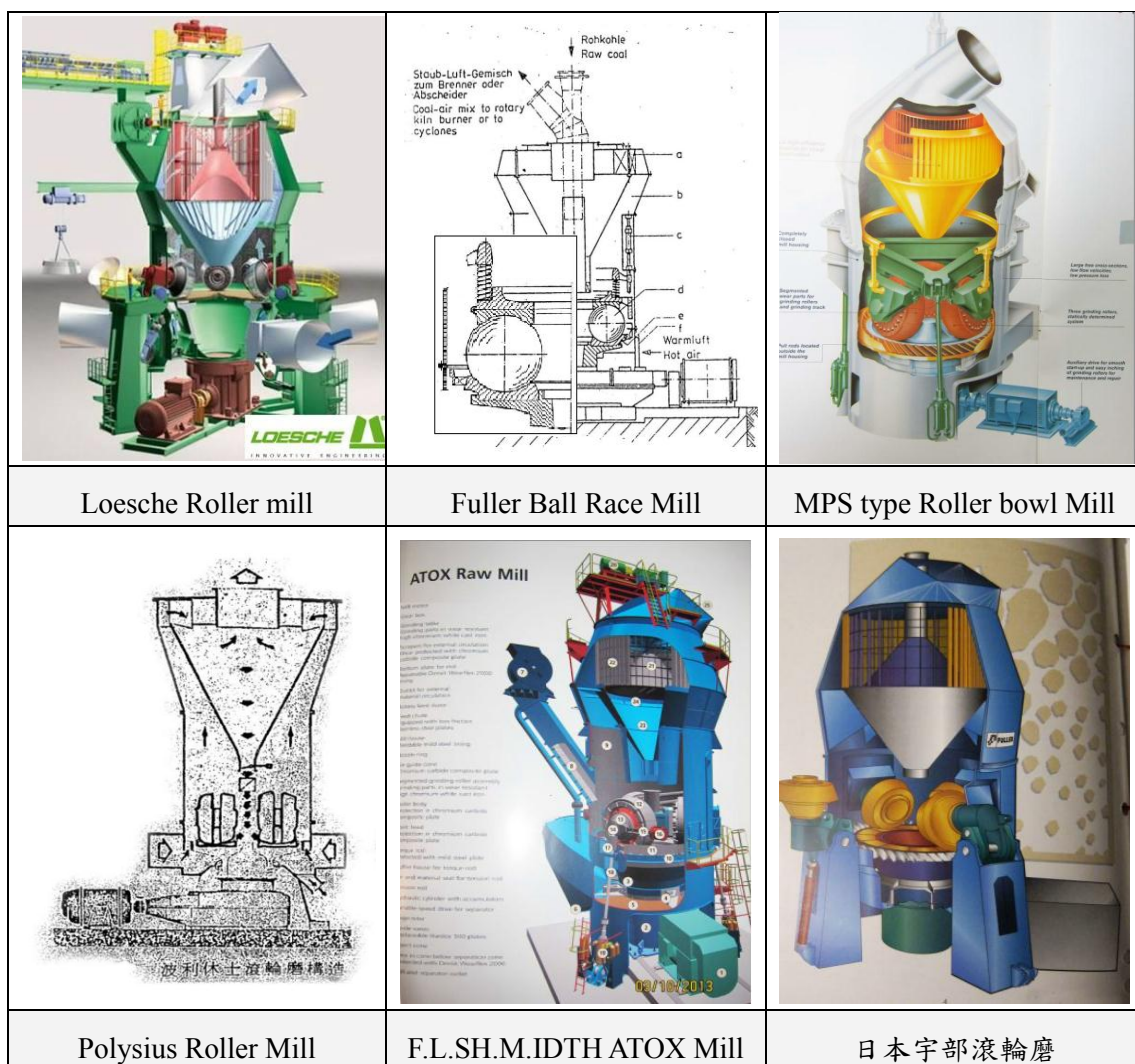
使用目的為減小原料之顆粒尺寸以配合不同型式磨機之需求，如管磨機則顆粒較小，豎磨顆粒較粗些。使用設備有多種類型，從粗碎到細碎分別有顎碎機(粗碎機)、錐碎機(中碎機)、衝碎機等(細碎機)等，如附錄圖 1-1 所示。

顎 碎 機		 <p>(1)機架 (2)軋碎室 (3)搖動顎板 (4)顎板 (5)搖桿 (6)肘節板 (7)調整裝置</p> <p>圖 a 雙肘顎式軋碎機</p>
錐 碎 機		 <p>(1)襯壳 (2)鎊 (3)轉子 (4)進料口 (5)滑槽 (6)柵條 (7)衝擊板</p> <p>圖 b 錐碎機</p>
衝 碎 機		 <p>(1)機壳 (2)衝擊板 (3)轉子 (4)出料口 (5)衝擊桿 (6)進料槽</p> <p>圖 c 擊碎機</p>

附錄圖 1-1 水泥生料軋碎機種類一覽表

(2) 生料磨系統

使用生料磨系統之目的為將原料經配料後之生料進行碾磨，以便後續熟料燒成有較高之效率。傳統多利用球磨機乾燥輾磨系統磨輾生料，其在粉碎時同時乾燥，球磨機依據外型可分短筒型球磨機、錐型球磨機及管磨機等。隨著技術的演進，目前國內外逐漸由豎磨系統或滾輪豎磨系統取代球磨系統，其相對於前者可適合原料中含水分更高 20%(一般為 15%)，且具單位產能耗電較低並佔地面積小之特色，滾輪豎磨系統依據不同廠商生產有不同之形式，然其工作原理皆同，惟因作用於研磨之滾輪組件的幾何形狀不同，其產生粉磨壓力的方法略有差異。目前生產商有 Loesche、Fuller、MPS、Polysius、FLSmidth 及日本宇部等，可參考附錄圖 1-2 之配置。

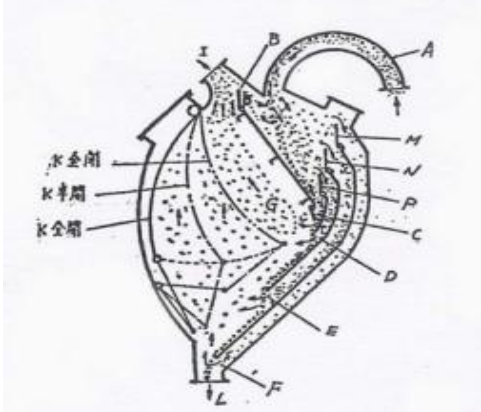


附錄圖 1-2 不同廠商滾輪豎磨系統示意圖

(3) 集塵機

當研磨料高於生料磨的擋料環時，將由選粉機進行篩選，其中細粉通過選粉機收到集塵機收集進庫，而未通過選粉的粗粉部分，則回到磨盤再磨，如此之反覆完成研磨，常見集塵機類型包含旋風筒集塵(離心分離作用)、袋式集塵機(織布與不織布過濾收集法)、多筒式旋風集塵器(離心分離用於高溫收塵用)、靜電集塵機(粉料電擊陰陽，不同性相吸原理)、KVS 離析機(粗細粉分離分篩離心原理)，參考附錄圖 1-3 目前普遍使用靜電集塵機，此外靜電集塵機亦使用在熟料燒成階段。



多筒式旋風集塵器	靜電集塵機
	
KVS離析機	

附錄圖 1-3 各類集塵機示意圖

(4) 水泥旋窯系統

旋窯之種類大致可分為 3 類：(1)SP(suspension preheater system kiln)，指利用旋窯排放之高溫熱氣流，經懸浮式多級旋風筒所組成之預熱裝置，將生料與熱氣流進行長時間之熱交換，使生料在飼入旋窯前已達充份預熱之一種預熱系統旋窯；(2)NSP(new suspension preheater system kiln)，於 SP 的底部旋風器旁，加裝一組二次燃燒系統，將已經預熱之生料藉二次預煅增加熱交換作用，使飼料達到接近燒成狀態後再送入旋窯，以節省熟料燒成時間(可縮短旋窯長度)之一種預熱系統旋窯，目前國內水泥廠均屬 NSP 旋窯；(3)RSP(reinforced suspension preheater system kiln)，屬於 NSP 旋窯，惟在其預煅爐之熱能輸入高於主燃燒器，更可節省熟料燒成時間。(參考附錄圖 1-4)。

<p>預熱式旋窯系統流程</p>	<p>懸浮式預熱機</p>
<p>NSP預熱式旋窯系統</p>	<p>旋窯</p>

附錄圖 1-4 旋窯系統主要設施示意圖

(5) 熟料冷卻機

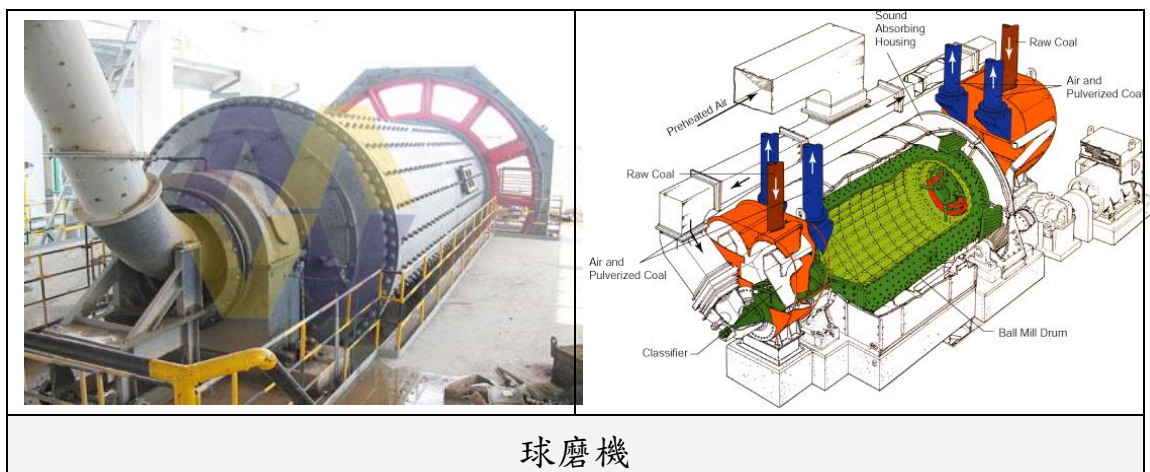
高溫熟料通過熟料冷卻機以空氣急速冷卻，如此可阻止水泥熟料中的礦物晶體長大，並可提高水泥熟料活性。冷卻機類型有筒式冷卻機、籠式冷卻機等類型，一般而言單筒式冷卻機適於中小型水泥廠配套使用，籠式冷卻機適用於大中型水泥廠興建和改造(參考附錄圖 1-5)。

<p>單筒式冷卻機</p>	<p>籠式冷卻機</p>

附錄圖 1-5 各類熟料冷卻機示意圖

(6) 水泥磨系統

將熟料儲庫之出庫熟料，經由秤量機稱重後，混合石膏送入水泥磨中研磨成水泥粉。研磨機之使用類型與生料研磨系統類似，因產品之粒徑要求較生料為細，因此國內皆採用球磨機，以控制較佳的粒度。而豎磨機方面，由於產品粒度控制不易，故於此階段未大量使用，但因其具耗電少且產能大之優點，國外方面致力相關試驗與研究，目前已有豎磨機與球磨機合併使用(日本 Osaka Cement's Kohchi 廠)、單獨操作(美國 Onoda 廠)，及將滾壓磨與球磨機合併使用 (法國 Cle 廠)的成功案例(參考附錄圖 1-6)。



附錄圖 1-6 水泥磨球磨機示意圖

附錄二 CNS 61 卜特蘭水泥成分標準規定

附錄表 1 化學成分標準規定

水泥型別 ^(a)		I 及 IA	II 及 II A	II (MH)及 II (MH)A	III 及 III A	IV	V
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	最大值，%	-	6.0	6.0	-	-	-
氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	最大值，%	-	6.0 ^(b)	6.0 ^{(b)(c)}	-	6.5	-
氧化鎂(MgO)	最大值，%	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
三氧化硫(SO ₃) ^(d)	最大值，%						
當 C ₃ A ^(e) 為 8%以下時		3.0	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
當 C ₃ A ^(e) 大於 8%時		3.5	^(f)	^(f)	4.5	^(f)	^(f)
燒失量	最大值，%	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
不溶殘渣	最大值，%	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
矽酸三鈣(C ₃ S) ^(e)	最大值，%	-	-	-	-	35 ^(c)	-
矽酸二鈣(C ₂ S) ^(e)	最大值，%	-	-	-	-	40 ^(c)	-
鋁酸三鈣(C ₃ A) ^(e)	最大值，%	-	8	8	15	7 ^(c)	5 ^(b)
矽酸三鈣加 4.75 倍之鋁酸 三鈣(C ₃ S+4.75 C ₃ A) ^(g)	最大值，%	-	-	100 ^(b)	-	-	-
鋁鐵酸四鈣加 2 倍之鋁酸三鈣 (C ₄ AF+2C ₃ A) 或 固 溶 體 (C ₄ AF+C ₂ F)，採用兩者中之合 適者 最大值，%		-	-	-	-	-	25 ^(b)

註 ^(a)在某些地區，符合規定之所有型水泥並非有存貨可供載運，事先規定使用第 I 型以外之水泥，應確認建議型別之水泥是否為現有或可生產購得者。

^(b)若表 4 之硫酸鹽膨脹限制有規定時，此項不適用。

^(c)若表 4 之水合熱限制有規定時，此項不適用。

^(d)若依附錄 A 試驗，證實超過本標準含量之水泥，其 14 天之膨脹量不超過 0.020%，在此條件時，SO₃ 含量得超過此規定含量。製造廠商在此規定下供應水泥時，必須提供此證實資料給購買者(參照第 6 節之備考 2)。

^(e)依附錄 B 之 B.1 計算。

^(f)此項不適用。

^(g)表 1 中矽酸三鈣加 4.75 倍之鋁酸三鈣總和之限制規定，係供作水泥之水合熱控制，其與依 CNS 2248 實驗方法 7 天水合熱限值 335 kJ/kg 相當。

^(h)須至少每 6 個月依 CNS 2248 方法執行 7 天水合熱之試驗一次，此種試驗不用於水泥之允收或拒收，但其報告之結果應作為資訊用途。

附錄表 2 化學成分任選規定

水泥型別	I 及 IA	II 及 II A	II (MH) 及 II (MH)A	III 及 III A	IV	V	備註
鋁酸三鈣 ^(b) (C ₃ A) 最大值，%	-	-	-	8	-	-	適用於抵抗中度硫酸鹽侵蝕
鋁酸三鈣 ^(b) (C ₃ A) 最大值，%	-	-	-	5	-	-	適用於抵抗高度硫酸鹽侵蝕
鹼 (Na ₂ O+0.658K ₂ O) 最大值，%	(c) 0.60	(c) 0.60	(c) 0.60	(c) 0.60	(c) 0.60	(c) 0.60	低鹼水泥
氯離子(Cl ⁻) ^(d) 最大值，%	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	-
註 ^(a) 本任選規定，僅適用於特殊要求時，在訂購前查明可得性。 ^(b) 依附錄 B 之 B.1 計算。 ^(c) 當水泥擬用於具潛在反應性粒料之混凝土中，且無其他防範措施以保護混凝土免受具有害反應性粒料之危害時，須規定此一限值。有關粒料潛在反應性之資訊參照 CNS 1240。 ^(d) 氯化物含量之限制，當考慮結構物之耐久性需求而須要求更低之限值時，由買賣雙方協議訂定之。							

附錄表 3 物理性質標準規定

水泥型別 ^(a)	I	IA	II	II A	II (MH)	II (MH)A	III	III A	IV	V
壕料之空氣含量 ^(b) ， 體積百分率： 最大值，% 最小值，%	12 -	22 16	12 -	22 16	12 -	22 16	12 -	22 16	12 -	12 -
細度，比表面積 m^2/kg (兩法任選用其一) ^(c) 濁度計法： 最小值 最大值	150 -	150 -	150 -	150 -	150 245 ^(d)	150 245 ^(d)	- -	- -	150 245	150 -
氣透儀法： 最小值 最大值	260 -	260 -	260 -	260 -	260 430 ^(d)	260 430 ^(d)	- -	- -	260 430	260 -
熱壓膨脹： 最大值，%	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
強度，各試驗齡期強度 不得少於下列各值 ^(e) ： 抗壓強度 MPa 1 天 3 天 7 天 28 天	- 12.0 19.0 28.0	- 10.0 16.0 22.0	- 10.0 17.0 28.0	- 8.0 14.0 22.0	- 10.0 17.0 28.0 22.0 ^{(f)(g)}	- 8.0 14.0 22.0 18.0 ^{(f)(g)}	12.0 24.0 - -	10.0 19.0 - -	- - 7.0 17.0	- 8.0 15.0 21.0
凝結時間 ^(b) ，費開氏 (Vicat)針法： 凝結時間(分鐘) 不小於	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
凝結時間(分鐘) 不大於	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375
註 ^(a) 參照第一節備考 2。 ^(b) 符合本規定者，並不足以保證所需之空氣含量存在於混凝土內。 ^(c) 細度測定之方法可由試驗室任意選用二者之一為之，但樣品以氣透儀法之測定不合格時，則應以濁度計法測定之，並以表中濁度計法之規定值為準。 ^(d) 如果矽酸三鈣加 4.75 倍鋁酸三鈣之和小於或等於 90 時，則細度最大限值不適用。 ^(e) 任何規定試驗齡期之強度必須高於前一規定試驗齡期之強度。 ^(f) 這些強度規定適用於當表 4 之水合熱有規定時。 ^(g) 此強度有規定時，表 1 內 $\text{C}_3\text{S}+4.75\text{C}_3\text{A}$ 和之限制不適用。 ^(h) 凝結時間係指依 CNS 786 之試驗方法中所述之初凝時間。										

附錄表 4 物理性質任選規定

水泥型別	I 及 II	IA 及 II A	II (MH)	II (MH)A	III 及 III A	IV	V
假凝結(False Set)終入度 最小值, %	50	50	50	50	50	50	50
水合熱:							
7 天, 最大值, kJ/Kg	-	-	290 ^(b)	290 ^(b)	-	250 ^(c)	-
28 天, 最大值, kJ/Kg	-	-	-	-	-	290 ^(c)	-
硫酸鹽膨脹(d):							
14 天, 最大值, %	_(e)	_(e)	_(e)	_(e)	-	-	0.040
古爾摩氏(Gillmore)針法:							
初凝(分鐘), 不小於	60	60	60	60	60	60	60
初凝(分鐘), 不大於	600	600	600	600	600	600	600
註 ^(a) 本任選規定僅適用於特殊要求時, 在訂購前查明可得性, 參照第 1 節備考 2。 ^(b) 當此任選規定有所要求時, 表 1 中 $C_3S+4.75C_3A$ 之和不必規定。但強度要求仍須滿足。 ^(c) 當水合熱要求有所規定時, 此即代替表 1 內所列之 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 Fe_2O_3 之限制。 ^(d) 當硫酸鹽膨脹有所規定時, 此即代替表 1 內所列之 C_3A 、 C_4AF+2C_3A 及 Fe_2O_3 之限制。 ^(e) 水泥符合第 V 型高度抗硫酸鹽侵蝕規定時, 即可視為符合第 II 型及 II (MH) 中度抗硫酸鹽要求。							