



# 煉鋼爐渣對混凝土之影響與防制探討

張俊鴻／財團法人台灣營建研究院工程服務組專案經理

徐敏晃／財團法人台灣營建研究院工程服務組組長

## 建築誤用有害爐渣時有所聞

「爐渣」泛指煉鋼廠再生產過程的副產物，國內鋼鐵廠依生產製程可分成高爐廠及電弧爐廠，前者原料以鐵礦砂為主，以中鋼公司、中龍公司為代表，後者原料來源以廢鋼為主，又分不鏽鋼廠及碳鋼廠，不鏽鋼廠如華新麗華、燁聯，碳鋼廠如東和、豐興，鋼鐵業為國內重要產業，鋼鐵消費量被視為國家工業化的指標，然由於鋼鐵在生產時耗用的原料及能源甚為龐大，因此生產過程拌生的「副產物」數量亦甚為龐大。其中，高爐爐渣經處理技術的進步，已被製成水淬高爐爐渣粉，廣泛的用於混凝土中，為高經濟價值的再生材料。然而「電弧爐渣」過往多次發生未妥善再利用而發生非法棄置情形，因此政府在「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」中，訂定「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」據以管控這類爐渣的來源、處理、用途、品質。

依 100 年 2 月 9 日版的「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」，電弧爐渣可用於「非結構性混凝土粒料原料」，但在「CNS 1240 混凝土用粒料」國家標準中，對於此類可再利用之固體一般事業廢棄物卻規定必須要先經「毒性特性溶出程序 (TCLP)」及「建築材料用事業廢棄物之放射線含量限制要點」檢驗合格，並經必要之安定化處理程序，確保體積穩定性，在物性化性符合該標準品質要求下，若使用者同意才可使用。由於電弧爐渣中的還原渣含有部分游離氧化鈣 (f-CaO) 及游離氧化鎂 (f-MgO)，由水反應後會導致體積膨脹將近兩倍，若被加入混凝土中，則會在一段時間後於表面爆出，形成類似「青春痘」情形，造成外觀瑕疵。這類案件過往就時有所聞，但在今年 3 月初因媒體對於電弧爐渣事件的深入報導，加入有部分知名建築受害，引使社會大眾的關注，更有預拌

業者因而被求償千萬，使得政府加強對電弧爐渣的管制，甚至公告暫停國內電弧爐煉鋼爐渣（包括還原渣與氧化渣）的使用 3 個月，除了研擬更嚴謹的管制措施外，亦希望業者（包含鋼鐵業及預拌業）能提出良好的管制辦法。

新修訂的「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」及「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」已於 105 年 6 月 20 日正式公告，將電弧爐渣再利用用途刪除「非結構性混凝土粒料原料」，並規定更嚴格的品質管制措施及主管機關監督機制，後續成效尚待時間驗證。

惟國內土木工程對砂石需求量龐大，以電弧爐渣一年將進 200 萬噸的產出量而言，實有被混用到混凝土的風險，因此除了靠鋼鐵廠與再利用業者的流向管控外，預拌混凝土業者及工地現場工程師有必要瞭解爐渣特性，建立起簡易快速的管控措施，以避免工程誤用到有害爐渣。

## 電弧爐渣材料特性

電弧爐煉鋼廠在熔煉過程依化學反應分成三個階段：熔解期、氧化期及還原期，熔解期指廢鐵原料經初步分類、稱重後加料，熔解成液態鋼液，氧化期指再通入高壓氧氣以加速氧化作業，此時部分的鐵及其他雜質（如矽、錳）生成氧化物和先其投入的少量石灰開始形成少量的氧化渣，再通入更多的氧氣，雜質則氧化升成更多量的固態氧化渣。此時鋼液中含氧化量過高，因此須加入大量石灰石、碳粉等副原料加以還原造渣，此階段即為還原期。製程中所產生的爐渣因其比重較小與鋼液分離，成為電弧爐渣，氧化期產出稱氧化渣，還原期產出稱還原渣，有關電弧爐渣生產流程詳圖 1。

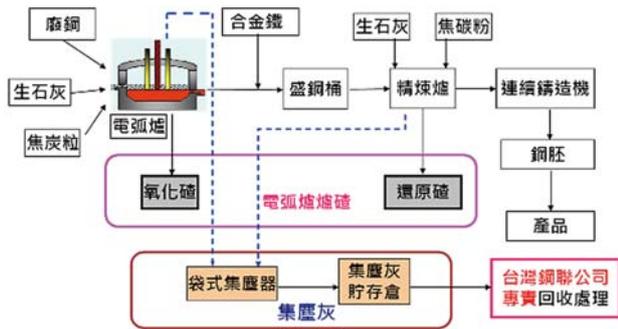


圖 1 電弧爐渣生產流程

氧化渣外形構造呈現粗糙之黑褐色，表面凹凸富有稜角且多孔洞，類似天然火成岩（如圖 2 所示），體積穩定，有關氧化渣之化學組成如表 1 所列，由於氧化渣表面含有鐵質殘留，若鋼爐渣再利用機構未妥善破碎與磁選處理，經再利用後易有繡斑情況，造成對其使用觀感不佳的負面態度。



電弧爐氧化渣（細粒料） 電弧爐氧化渣（細粒料）

圖 2 電弧爐氧化渣外觀

表 1 電弧爐氧化渣之化學成份分析（%）

SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr
16 ~ 20	24 ~ 35	34 ~ 38	2 ~ 8	3 ~ 6	0.7

還原渣外觀外觀多呈現灰白色粉末狀（如圖 3 所示），內含成份中的游離氧化鈣（f-CaO）和游離氧化鎂（f-MgO）極易與 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 發生反應，係為造成還原渣體積膨脹的主因，此水化反應將隨反應時間減緩，有關還原渣之化學組成如表 2 所列。另氧化鈣為高鹼度之物質，故經檢測其酸鹼值（pH）高達 12 ~ 13 左右。



電弧爐還原渣 電弧爐還原渣

圖 3 電弧爐還原渣外觀

表 2 電弧爐還原渣之化學成份分析（%）

SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S
22 ~ 29	48 ~ 50	1 ~ 2	6 ~ 10	14 ~ 18	0.8 ~ 1.5

## 電弧爐渣摻混細粒料檢驗

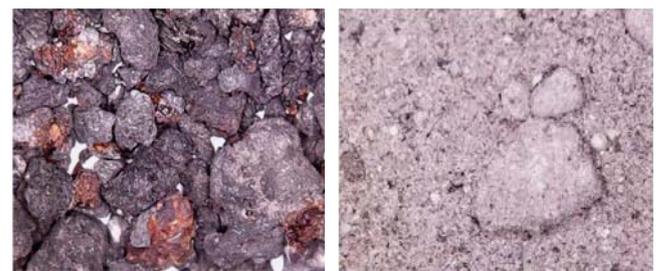
由於 CNS 國家標準尚未針對電弧爐渣的安定化訂定檢測方法與標準，因此現階段為協助預拌混凝土廠以既有品管儀器研擬合適快速的簡易篩檢法，營建研究院特針對電弧爐渣進行一系列物性試驗，試驗結果說明如下：

### 外觀檢測

氧化渣細粒料顏色偏黑色，呈顆粒狀，比重重；還原渣偏粉狀，顏色為灰白色。但若以少比例添加到天然細粒料中，則不易從外觀判別。

### 顯微觀測

分別以 45X 放大鏡及 500X 顯微鏡觀測，45X 適合攜帶，檢測單顆較大顆粒用；500X 顯微鏡須連接電腦、平板或手機，適合數量較多之粒料。500 倍放大觀測氧化渣可見空隙及鐵鏽，還原渣表面則為灰白色粉狀，如圖 4。



500X 氧化渣 500X 還原渣

圖 4 氧化渣及還原渣微觀檢視

### 篩分析試驗

氧化渣粒徑集中在 #4 ~ #16 之間，還原渣粒徑則多為 #50 ~ #200，有關篩分析結果詳表 3。

### 磁吸測試

電弧爐渣含有鐵質成分，以強力磁鐵幾乎都可吸附起來，詳圖 5。

表 3 氧化碴分析

篩號	電弧爐氧化碴		
	累積留篩重量 g	累積留篩 %	累積過篩 %
9.5 mm (3/8 in)	0	0	100
4.75 mm (No.4)	21.6	4	96
2.36 mm (No.8)	181.6	33	67
1.18 mm (No.16)	329.5	60	40
600 μm (No.30)	421.5	76	24
300 μm (No.50)	480.0	87	13
150 μm (No.100)	518.9	94	6
75 μm (No.200)	539.9	97.8	2.2
底盤	552.1	---	---
細度模數 FM :	3.54		



氧化碴磁鐵吸附

還原碴磁鐵吸附

圖 5 氧化碴及還原碴磁吸反應

### pH 試驗

電弧爐碴因摻有生石灰，為強鹼性，故可由 pH 值檢測棒快速的檢測砂石的酸鹼度來作為爐碴判別，營建院針對不同試驗條件對 pH 之影響說明如下。

1. 添加比例影響：以不同比例（1%、5%、10%）的電弧爐氧化碴及還原碴摻入天然砂石，再以 1：1 的比例浸泡於蒸餾水中，測酸鹼度之結果，即便僅添加 1% 都比純天然砂石之 pH 值高出甚多。詳表 4。

表 4 pH 檢測結果

添加比例	100% 爐碴	20% 爐碴	10% 爐碴	5% 爐碴	1% 爐碴
氧化碴	12.0	11.7	11.6	11.6	11.4
還原碴	12.7	11.9	11.5	11.6	11.5

註 1：純水 7.0、細粒料 8.8  
 註 2：所用爐碴為碳鋼廠電弧爐碴、以玻璃電極式 pH 計檢測

2. 浸泡時間影響：將電弧爐碴於水中浸泡 72 小時後試驗，pH 值並無變化，與初始值差異不大，詳表 5。

表 5 浸泡後 pH 值變化

浸泡時間	0 分鐘	1 小時	24 小時	48 小時	72 小時
細粒料	8.8	8.8	8.6	8.6	8.6
1% 還原碴	11.5	11.6	11.6	11.5	11.5
5% 還原碴	11.6	11.8	11.8	11.8	11.7
10% 還原碴	11.5	11.5	11.7	11.7	11.6
20% 還原碴	11.9	11.9	11.9	12.0	11.9

3. 清洗影響：(1) 參考 CNS 491 含泥量清洗法：參考 CNS 491 第 7 節 A 程序乾淨水掏洗法，若將細粒料置於 #200 篩上以清水清洗至乾淨為止後，再測 pH 值發現天然砂石會趨近於 7；清洗氧化碴其 pH 值會降低，但仍然較正常值有明顯差異，清洗還原碴其 pH 值降低程度更有限。(2) 參考 CNS 13407 細粒料水溶性氯離子試驗法：參考 CNS 13407 第 3 節 (b) 直接以兩手握持瓶子，將頂部及底部予以反轉搖振 3 次，再旋開瓶蓋，將混濁水倒出後，重新注入清水至瓶內八分滿後再旋緊瓶蓋，依前述操作方法反覆執行，至瓶內上澄液目視約略呈清澈止。發現氧化碴及還原碴的 pH 值會略為下降，若是添加到細粒料中則下降會較多。

不同清洗方法對電弧爐碴的 pH 值確實稍有影響，但基本所測出數據皆大於 10，超出一般砂石之合理範圍。

4. 顆粒粗細影響：無論將還原碴以 #16 篩篩分成粗細兩種粗細粒料，或是以 #4 篩篩分成兩種尺寸粒料，分別測其 pH 值，發現粉狀還原碴之 pH 值雖然大於顆粒狀還原碴，但差異不大。若再將兩種不同顆粒之還原碴置於 #200 篩上以清水清洗至乾淨為止後再測 pH 值，發現粉狀還原碴僅降一點點，顆粒狀還原碴雖然降較多，但差距仍未超過 1。若是以細粒料水溶性氯離子試驗法進行清洗亦得到類似結果。無論如何，還原碴顆粒粗細對 pH 值影響有限。

5. 小結：因 pH 值差距為 10 倍濃度，實測粒料樣品的含水量高低、是否須面乾內飽和或先炒乾、是否先洗淨、是否先浸泡、取粉或取顆粒，對試驗結果並無關鍵性影響，綜合前述試驗結果，建議廠內細粒料進廠後直接取樣加水測 pH 值即可。若想要更快速的檢測細粒料的 pH 值，則可利用酚酞在 pH 大於 9



酚酞噴劑 酚酞變色

圖 6 酚酞檢驗

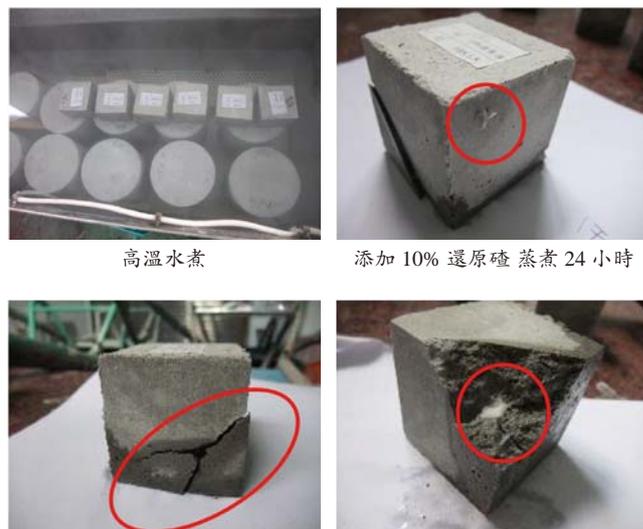
的環境下會變成粉紅色的特性，以酒精將酚酞稀釋成 1% 濃度，每次進料時噴灑於表面，以變色與否作為爐渣檢測知初步判斷，如圖 6。

### 高溫水槽蒸煮試驗

還原渣因含 f-CaO，遇水反應後會變成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，膨脹約 2 倍，但反應時間緩慢，以高溫高壓蒸煮時即會加速反應。然預拌廠內大多無 CNS 1258 熱壓膨脹試驗用的模具及高壓蒸煮鍋，因此本院特以不同還原渣添加比例混拌之水泥漿砂方塊，置於 90°C 保溫水槽中，蒸煮 72 小時，觀察表面變化。在經過 24 小時後，添加 5% 還原渣的方塊試體表面可見爆突情形，添加 10% 還原渣的方塊試體除表面爆突外另有崩塊情形，崩裂處中心可見白色物質。經過 48 小時後與 24 小時時無太大差異，72 小時情形亦同。本院另嘗試將方塊試體浸於水中置入 100°C 烘箱中蒸煮，24 小時後 5% 還原渣方塊及 10% 還原渣方塊有爆突情形，但 48 小時後並無其他再爆突情形。同時本院亦有拌製不同添加比例的氧化渣方塊試體，但因高溫水槽蒸煮後表面並無異常。由試驗結果可知，含有還原渣之細粒料製成水泥砂漿方塊經高溫水槽蒸煮後，24 小時內即可見爆突情形，惟爆突部位僅限 2 公分以內，且為較大之顆粒，約大於 #8 篩網網目，若僅是粉狀還原渣則無爆突情形。高溫水煮試驗結果詳圖 7。

### 電弧爐渣簡易篩檢措施

綜合前項試驗結果，可歸納出預拌混凝土廠品管人員簡易檢測爐渣之方式如下，流程圖詳圖 8：



添加 10% 還原渣 蒸煮 24 小時 添加 10% 還原渣 蒸煮 24 小時

圖 7 還原渣水泥方塊高溫水煮結果

- (1) 每日上下午各於細粒料進場時取樣進行爐渣檢測，若廠內有不同供應商，則每供應商應至少取樣一次。
- (2) 先以磁鐵檢測，看有無吸附物質，有的話以 500X 顯微鏡觀察表面是否有鐵鏽、孔隙、或灰白物質等異常狀況。一般而言天然砂石或大陸機制砂石有可能含有少量鐵質，但比例不至超過 1%。
- (3) 以水砂 1:1 比例混拌後檢測 pH 值，若 pH 值較基準值（純天然砂或大陸砂）高許多或 pH 值超過 10，則屬異常。

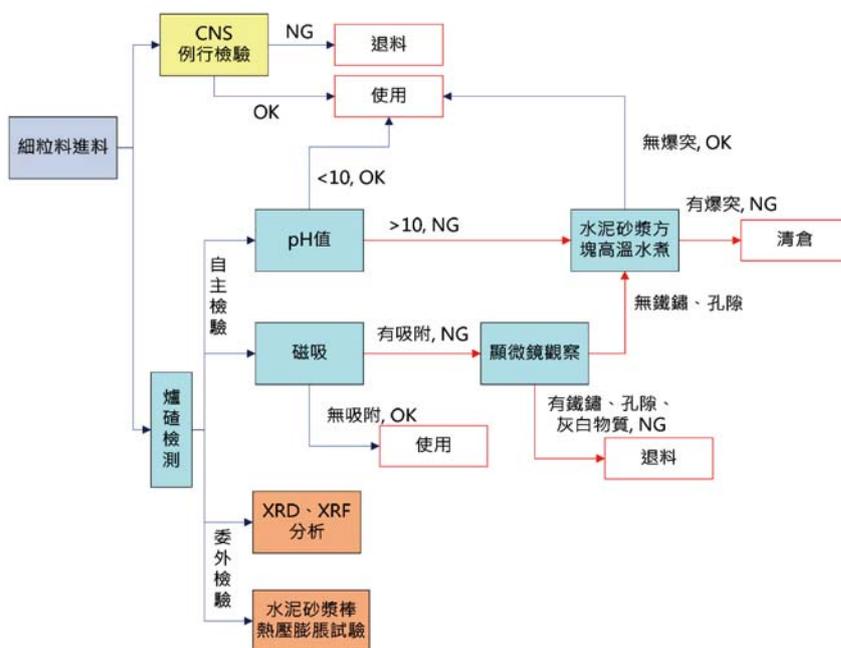


圖 8 預拌廠細粒料品管檢驗流程

- (4) 經表面顯微觀察及 pH 值檢測屬異常者，應暫停該車次細粒料使用，以該試樣進行水泥砂漿方塊，拆模後置於高溫水槽蒸煮 24 小時，確認有無異狀。無異常後可繼續使用，但仍應請供料商檢討 pH 值超標原因，並進行改善。若有爆突情形則應立即清倉處理。
- (5) 天然砂石的 pH 值主要會受到表面游離水的影響，與砂石場內製程有關，故本院檢測各廠砂石及所用水的 pH 皆不太相同，故各廠應先建立砂石 pH 值背景資料及允收範圍，建議允收範圍可以 3 倍標準差當警戒值，6 倍標準差當行動值。
- (6) 有鑑於還原渣對混凝土品質之危害，檢測標準應從嚴而訂。
- (7) 若真還有疑慮，可送往 TAF 實驗室進行 XRD、XRF 分析試驗及水泥砂漿棒熱壓膨脹試驗，可得較正式之試驗結果。

## 預拌廠源頭管理

不管取樣頻率多麼頻繁，仍有取樣代表性問題，預拌廠仍應加強源頭砂石場管理及運輸過程管理，建議措施如下：

### 源頭管制

針對預拌廠進料砂石廠首要確保供料源頭端無收受可疑廢棄物。若為出口方來計價，應要求供應商提報供料的砂石場，由廠內品管人員赴廠檢核後，方得供料，檢核重點在於確認砂石場有無收其他不明料源砂石，例如剩餘土石方（如磚瓦廢混凝土塊）、事業廢棄物再利用處理廠（如爐渣、底灰），廠內粒料成品堆置應妥善分類，不得混料。另因應砂石場常標取不同河川砂石，驗廠石所取樣之砂石不代表往後都會送相同品質，故應要求砂石商穩定料源，若有更換應通知預拌廠，取得同意後方得供料。此外，砂石進料單除數量及種類外，應標示來源砂石場以茲追溯，並與砂石供應商簽訂之合約應明規定品質規格及允收標準，並納入穩定料源之規定。

### 運輸管制

針對砂石運輸過程之管理，主要是確保砂石料能由經核可的砂石場載運抵預拌廠內。對此，建議委託

固定可靠之運輸公司辦理相關工作，另可於砂石車上加裝 GPS 定位設備，以確認砂石車的出場地，以及車行過程無進行私自混料的動作。

## 工地對電弧爐渣之防制措施

對工地現場工程師而言，則難以用 pH 值檢測或外觀目視來判斷混凝土中是否有摻用爐渣，因此最有效的管制還是「源頭管理」，挑選有信譽的預拌廠，請其提供爐渣自主管制紀錄，若真還是有所疑慮，則可在抽樣作圓柱試體時，多作一組，拆模後即可放於高溫水槽中蒸煮，看表面是否有爆突物質，一般若有添加還原渣，則 24 小時以內即會有爆突發生。對於已成屋的混凝土，亦可以鑽心取樣將試體進行高溫水煮，觀察表面變化。

倘若建築物真的發生爆突現象，則可先觀察爆突時間點、數量、位置，於爆突處鑽孔取樣，對異物進行 XRF 及 XRD 分析，釐清異物種類，再鑽心取樣進行抗壓試驗，確認強度是否符合設計要求，若不足則須修復補強，取樣之異物亦應送樣進行重金屬（TCLP）檢測及戴奧辛檢測，確認對環境之影響性。

依營建院過往所辦理之結構物爆突鑑定案，爆突物質多屬電弧爐還原渣，混凝土鑽心抗壓強度多能達到設計規範要求，環境面檢驗亦符合法規規定，然而確有長達兩年的時間面臨混凝土表面持續爆突的問題，帶給建商及住戶極大的困擾，預拌廠不僅要負連帶賠償責任，對商譽影響更是難以估計。

## 結語

混凝土所需砂石用量龐大，儘管品管人員每日執行砂石進料檢驗，但仍有代表性的問題，因此政府法令對於鋼鐵廠及再利用處理廠的流向管制更形重要，電弧爐渣應朝多元化發展為目標，探詢可穩定且大量的再利用方式，並透過完善的管理機制，採驗證專廠處理過程的方式，將廢棄資源導入適切的用途中，例如氧化渣可往瀝青混凝土用途使用，而還原渣可用於水泥廠取代石灰石，以市場機制將電弧爐渣導到合理合適的去化用途，讓廢棄物能適材適所的再利用，方能創造廢棄物之價值性，從源頭讓預拌混凝土能免於電弧爐渣的危害。