

應用碳酸化程序進行二氧化碳捕集與煉鋼爐渣再利用

Implementation of Carbonation Process for Carbon Dioxide Capture and Steelmaking Slag Utilization

蔣本基，國立臺灣大學環境工程學研究所特聘教授
潘述元，國立臺灣大學環境工程學研究所博士候選人
鍾岱均，國立臺灣大學碳循環永續技術與評估研究中心專任助理
陳劭立，國立臺灣大學環境工程學研究所碩士研究生
蔣坤安，國立臺灣大學碳循環永續技術與評估研究中心實習生

計畫編號：MOST 103-E-3113-007-002

摘要

根據國際能源總署報告，「提升能源效率」、「應用碳捕存技術」、「發展再生能源技術」為溫室氣體減量最重要之關鍵策略。應用加速碳酸化程序可將工業產生之鹼性廢棄物與二氧化碳反應，產生碳酸鈣沉澱，相當有潛力之技術；同時，固體廢棄物通過加速碳酸化後，可對其中重金屬溶出（例如：鎘、鉛、鎳...等）具約束與減少效果，反應後固體廢棄物中自由氧化鈣與氧化鎂亦可被有效去除，提升廢棄物之物化性質，有助於後續再利用作為水泥取代之原料。據此，為能有效整合碳捕集程序於鹼性廢棄物再利用供應鏈，本專欄針對相關技術包括：加速碳酸化、廢棄物再利程等研究進展進行蒐研，評析其現階段各自發展困境，並提出未來可努力之方向。

關鍵字：煉鋼爐渣、冷軋廢水、超重力旋轉填充床、綠色水泥、碳酸鈣

壹、前言

近百年來，大氣中人為二氧化碳濃度增加嚴重影響全球氣候，根據國際能源總署之「2012年能源技術展望」報告，若欲在2050年將全球升溫控制於 2°C 範圍內，「提升能源效率」、「應用碳捕存技術」、「發展再生能源技術」為最重要之關鍵策略，對於溫室氣體之減量貢獻程度達90%。目前國內政府及民間，參採國際倡議，已努力陸續推動各項措施，如鼓勵節能減碳、發展再生能源、導入綠色科技等，均各有效果。

鹼性固體廢棄物通過加速碳酸化後，可減少工業二氧化碳之排放量，同時對廢棄物中重金屬溶出具約束與減少效果，產生顯著化學和物理性質改善，方便其殘留物重新使用在多種應用程序，或進一步再利用於水泥填料或海拋供海洋生物使用。水泥在混凝土中佔有約7-15%（體積比），而水泥與水拌合形成水泥漿可

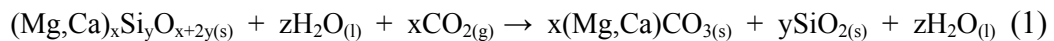
成為混凝土之黏結材。黏結材於混凝土中之主要功用包括：包裹骨材、填充骨材間之空隙、未凝固前提供混凝土之流動性等。傳統以來水泥被視為混凝土強度的來源，故其用量及品質均頗為重要，但近年來研究顯示水泥用量越多，對耐久性將造成不良影響，若能取代部分水泥（例如：卜作嵐摻料），則可改善其耐久性，而混凝土之品質也由水灰比（W/C ratio）控制改為由水膠比（W/B ratio）控制。

由於碳酸化程序可將轉爐渣中 free-CaO 含量減少，改良爐渣之物理化學性質，並產生碳酸鈣結晶，應可使未來取代水泥時，與骨材堆積更為緻密、孔隙更少，減少混凝土發生泌水及析離等現象；又其拌合用水量減少，則黏性與塑性增加。據此，為能有效整合碳捕集程序於鹼性廢棄物再利用供應鏈，本專欄蒐研相關技術包括：加速碳酸化、廢棄物再利用等研究進展，評析其現階段發展困境，並提出未來可努力之方向。

貳、碳酸化程序進行碳捕集

2.1 碳酸化原理

鹼性固體廢棄物可當做加速碳酸化（Accelerated Carbonation）之原料，並將氣態 CO₂ 固定成為固態碳酸鹽沉澱（例如：碳酸鈣）。假設轉爐渣中主要鈣系成分以 C₂S、C₁S、CaO 為主，此類含鈣系物質於水中解離，生成鈣離子，而產生之鈣離子再與水中之碳酸，生成碳酸鹽類沉澱，其通示如式(1)所示：



金屬氧化物形成碳酸物沉澱之偏好程度，係與各氧化物對 CO₂ 化學吸收強度與表面上鹼基數量多寡有關係，通常最容易碳酸化之化合物為鹼性氧化物（例如：CaO 與 MgO），再來是中性氧化物（例如：Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂, MnO 與 Fe_xO_y 等），最後才是酸性氧化物（例如：SiO₂）（Bonenfant et al., 2009）。因此，爐渣之最大碳酸化容量決定於其中所含之鹼性氧化物（即 CaO 與 MgO）和氫氧化物（即 Ca(OH)₂ 與 Mg(OH)₂）比例。

鹼性固體廢棄物（例如：煉鋼爐渣、燃燒底渣、水泥底渣、飛灰等）富含氧化鈣（CaO）或氧化鎂（MgO），當做 CO₂ 吸附材具有許多優點，包括：（1）廢棄物常產生於 CO₂ 排放源附近，因此運輸成本非常低；（2）鹼性固體廢棄物因其高鹼特性，必須經過適當前處理才可掩埋或再利用；（3）其年產量相當多；（4）透過碳酸化程序處理後，鹼性廢棄物之性質提昇並改善。

2.2 碳酸化程序開發

由於自然碳酸化的反應速率比較慢，因此利用物理/化學/生物等方法加速碳

酸化反應，係是研究的重點。碳酸化第一步為鈣離子從固相中溶出至液體中，煉鋼爐渣中鈣離子的溶出速率與程度，發現與粒徑、pH 呈現逆相關，亦即粒徑越小，則溶出速率越快且溶出量也越多。鈣離子溶出後，會在爐渣週圍留下一層矽酸層 (Ca-depleted SiO₂ phase)，此矽酸層會限制更內部之鈣-矽酸物溶出，造成後期鈣離子溶出限制 (擴散限制)。碳酸化第二步為氣體 CO₂ 溶解於水中，此步驟速率決定於氣液間質傳速率，然而，CO₂ 在高溫下，溶解度較低，通常會使得碳酸化反應速率變慢，溶解量極限可用亨利定律來計算。碳酸化第三步為碳酸鈣沉澱反應發生，當水中之鈣離子與碳酸根離子接觸，碳酸鈣之濃度積約為 3.7–8.7×10⁻⁹ (25 °C)，即會造成碳酸鈣沉澱；另一方面，溶液 pH 值之維持，亦是另一個重點因子，此會影響鈣離子溶出、CO₂ 溶解、及碳酸鈣之沉澱速率。

因此，反應器選擇上應考慮本身碳酸化反應速率受限制許多，需選擇具有高質傳效果之反應器，以減少其質傳上之限制。使用超重力旋轉填充床進行二氧化碳吸附技術為一相當有潛力之技術，超重力旋轉填充床可有效地產生小水滴與微米層級之水膜，因此，比起傳統填充床，旋轉填充床之氣-液間質傳係數高至少一倍 (Tan et al., 2006)。根據本團隊測試結果 (Chang et al., 2012)，發現其反應效果較傳統反應器優越許多，且反應時間、溫度與壓力也相對低；此外，反應前轉爐渣存在氫氧化鈣，且碳酸鈣含量較少 (原始碳酸化轉換率約 10%)；反應後轉爐渣氫氧化鈣含量消失，碳酸鈣含量則明顯上升 (反應後碳酸化轉換率可達 27%)。理論上該批轉爐渣之每公斤轉爐渣 CO₂ 捕獲量約為 290 公克，實驗結果每克轉爐渣 CO₂ 捕獲量約為 80 公克，未來應改變關鍵操作參數，例如：提高氣體流量與減少轉爐渣投入量，透過反應曲面法建立最適化模式，以提高其實質碳捕獲量。

此外，水泥漿之不安定性係凝結以後體積變化過大引起。碳酸化後轉爐渣 free-CaO 減少，可避免因過量之 free-CaO 造成遲緩水化作用，並影響未來再利用於建築水泥填料、路面基材等層面可能產生之影響，例如：材料吸收空氣水氣造成膨脹，使材料受損並降低其使用壽命；另一方面，水泥熟料中含有 C₃A 晶相，C₃A 與 CaCO₃ 可反應生成水合碳鋁酸鈣，增加水合碳鋁酸鈣產物，並抑制鈣礬石 (AFt) 向單硫型鋁酸鈣 (AFm) 轉變，因此可知轉爐渣中若含有碳酸鈣，則可有效抑制其發生。根據本團隊研究成果顯示 (Chang et al., 2012)，原始爐渣料中約含 5% 之 free-CaO，然而，使用冷軋廢水與轉爐渣進行 CO₂ 吸附，經過碳酸化反應後爐渣 free-CaO 含量降為 0%。

參、廢棄物安定化與再利用技術

3.1 廢棄物安定化技術

國內煉鋼產業每年所產生之爐渣量相當多，由於煉鋼製程原料投入關係，使得爐渣內常含有自由基氧化鈣與氧化鎂；若將此爐渣直接進行再利用於土木材料，

長來下來恐有吸收空氣水氣導致膨脹之虞，造成材料龜裂與損毀，進而使得人民財產損失或安全問題。據此，爐渣安定化處理技術之開發相當重要，除了能有效去除自由基氧化鈣與氧化鎂，尚必須考慮能源消耗問題與技術成本之降低。

目前，爐渣安定化技術擁有明顯地域分布特性且相當多元，詳如表1所示，以下分別簡述常見之爐渣安定技術：

1. 高壓與常壓養生法：於日本SMI鋼鐵廠使用，適用於各種液渣，其安定後產品可用於道路給配與AC骨材。高壓法若以每月12,000噸之工作量需550 m²用地面積，設備成本約為9000萬元，處理成本每噸約為103元，常壓法每月處理量30,000噸所需佔地面積3,800 m²，設備成本約5400萬元，處理成本每噸約240元。
2. HK水淬粒化法：於柳州鋼鐵廠使用，其操作性受液渣流動性影響，只可以目視方法判斷，且處理用約僅有40-50%，其餘殘留部分需以傳統潑地法，安定後資源化途徑亦僅可廠內燒結回收，但其佔地面積小、設計簡易操作與維護亦十分簡易。
3. 滾筒法：於中國大陸使用，目前最新技術已發展出配備扒渣機之設備，於渣液處理中，若為舊式設備僅可選流動應較高之A、B渣，而配備扒渣機之新設備則可適用C渣處理，滾筒法最大優勢在於流程短且鋼渣後續加工處理費用，流程每桶渣僅需約30分鐘處理時間，而處理後可用於道路級配、鋼渣微粉、鋼渣型砂、混凝土製品。
4. 悶罐法：於中國大陸使用，已更新至第三代技術，其渣液可選擇各式渣液，唯須液渣處理進行熱固態渣處理，安定操作時間每批次需時12小時以上，安定後產品可用於道路給配、AC骨材與鋼渣微粉，廠房所佔面積滾筒法廠房大。
5. 改質法：使用改質法地區以德國為主，適用於流動性質較佳之渣液，流程時間短每桶渣僅需約30分鐘，資源化後應用途徑亦廣可用於道路級配、AC骨材、混凝土製品與水泥混合礦物摻料，以每月12,000噸之工作量設備計算設備用地面積需550 m²，處理成本僅需每噸約29.82元。
6. 超重力碳酸化法：鹼性固體廢棄物通過加速碳酸化後，可對其中重金屬溶出（例如：鎘、鉛、鎳等）具約束與減少效果，可產生的顯著的化學和物理處理改善，且方便其殘留物可以重新使用在多種應用程序，應可進一步再利用於取代水泥原料、混凝土材料、海拋供海洋生物使用、透水磚材料等。

表1、爐渣再利用安定方法比較

項目	渣液選擇	資源化途徑	操作特性	空間需求	設備成本 (新台幣)	處理成本 (新台幣)
高壓蒸氣 養生	<ul style="list-style-type: none"> 加工後冷渣料 適用各種渣 	<ul style="list-style-type: none"> 道路級配 AC 骨材 	<ul style="list-style-type: none"> 50 噸/盤 需時 3 小時 	<ul style="list-style-type: none"> 550 m² (處理量 12,000 噸/月) 	~9,000 萬	~103 元/噸
常壓蒸氣 養生	<ul style="list-style-type: none"> 加工後冷渣料 適用各種渣 	<ul style="list-style-type: none"> 道路級配 AC 骨材 	<ul style="list-style-type: none"> 1300 噸/批次 需時 6 天 	<ul style="list-style-type: none"> 3,800 m² (處理量 30,000 噸/月) 	~5,400 萬	~240 元/噸
HK 水淬 粒化法	<ul style="list-style-type: none"> 流動性影響操作率 以目視判斷 	<ul style="list-style-type: none"> 場內燒結回收 	<ul style="list-style-type: none"> 每桶投入 40~50% 其餘用傳統潑地法 	<ul style="list-style-type: none"> 設計簡易佔地小 操作簡單易維護 	-	-
悶罐法	<ul style="list-style-type: none"> 液/熱固態渣處理 適用各種渣 	<ul style="list-style-type: none"> 道路級配/AC 骨材 鋼渣微粉 	<ul style="list-style-type: none"> 每批次約時 12 小時 	<ul style="list-style-type: none"> 用地較滾筒法大 	-	-
滾筒法	<ul style="list-style-type: none"> 液渣處理 適用 A/B 渣流動性高 配用扒渣機可適用 C 渣 	<ul style="list-style-type: none"> 道路級配 鋼渣微粉 鋼渣型砂 混凝土製品 	<ul style="list-style-type: none"> 約 30 分鐘/每桶渣 流程短 	<ul style="list-style-type: none"> 900 m² (不含水處理) 處理量 1.5 噸/小時 	~1 億/套	流程短 處理費低
改質法	<ul style="list-style-type: none"> 液渣處理 適用流動性佳(未濺渣護爐)之渣 	<ul style="list-style-type: none"> 道路級配/AC 骨材 混凝土製品 水泥混合礦物摻料 	<ul style="list-style-type: none"> 約 30 分鐘/每桶渣 流程短 	<ul style="list-style-type: none"> 100 m² (處理量 25,000 噸/月) 	~2.5 億/2 站	~30 元/噸
超重力碳 酸化法	<ul style="list-style-type: none"> 加工後冷渣料 適用各種渣 	<ul style="list-style-type: none"> 水泥取代 礦物摻料 	<ul style="list-style-type: none"> 常溫常壓流程短 可連續處理 	<ul style="list-style-type: none"> 設計簡易佔地小 	尚未商業化	流程短 處理費低

參考資料：李育成 (2013)；Pan et al. (2012)

3.2 廢棄物再利用途徑

韓國政府近年來積極推動資源再利用化，其國內鋼鐵大廠浦項鋼鐵，將爐渣製成人工魚礁，投放至海洋中，除了提供生物棲息的環境，改善海底環境，藻類跟著附著在上面且數量增加，其也將爐渣當作養殖底泥之改質材料，除了可抑制硫化氫與磷酸鹽的釋出，以達到改善水質的效果，並可以增加藻類的生長，達到固碳的作用，人工魚礁及底泥改質材料已廣泛使用。

廢棄物經碳酸化（CO₂ 吸附程序）後，將作為人工骨材等建設用途，且碳酸化程序可將爐渣中 free-CaO 含量減少，改良爐渣之物理化學性質，並改善爐渣再利用於建築水泥填料、路面基材等層面可能產生之缺點：爐渣中含有 free-CaO，以電弧爐氧化渣為例，其 free-CaO 含量約 1.5%，若再利用則材料恐會吸收空氣中水氣而造成膨脹，損壞材料並降低其使用壽命，但細粉爐渣對後續再利用困難，且會產生額外能源消耗。

3.2.1 骨材（混凝土）

「電弧爐氧化渣」再利用研究較多，例如：鄭清元（2000）研究指出，以電弧爐煉鋼爐渣取代混凝土粗骨材，並與一般天然骨材混凝土進行比較，結果顯示以適當電弧爐渣取代量製作混凝土，除不會對環境造成影響外，強度發展（例如：抗壓、抗彎等）亦較一般使用天然骨材之混凝土佳；然而，在混凝土膨脹與硫酸鹽侵蝕方面，由於電弧爐渣本身的不穩定性的關係，使得以電弧爐渣取代的混凝土的膨脹情況比天然骨材混凝土嚴重，當取代量越高，膨脹的情形越嚴重。因此體積膨脹與穩定的有待解決。

根據 Abu-Eishah 等人（2012）研究指出，摻雜電弧爐渣的混凝土具有高度工作度，可被運用於幫浦當中，並且用電弧爐渣作為取代材料的混凝土跟傳統的混凝土比較具有較高的強度。另外，在混凝土的耐久度部分，根據 Manso 等人（2006）研究指出，若將電弧爐氧化渣摻雜於混凝土當中，混凝土的耐久度雖然有些微的降低，但是在可接受的範圍內，只要使用適當的比例摻雜電弧爐渣於混凝土當中，不論是力學結構或是耐久度方面，皆可獲得滿意得結果。根據李大慶（2002）研究顯示，使用氧化渣取代量愈多，強度也愈強。

此外，根據中央大學陳立的博士論文(2003)「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性評估」研究指出，氧化渣具有卜作嵐作用，並且氧化渣顆粒的表面因為粗糙、多稜角，間接提升了漿料界面與骨材間之鍵結力，使得氧化渣混凝土強度較單純混凝土優。經過X光繞射分析，齡期九十天之混凝土產品，其 Ca(OH)₂ 波峰較七天低，推測已有部分Ca(OH)₂ 被消耗，生成 Ca₃Si₂O₇H₂O (即為C-S-H)，使得C-S-H物質之波峰略有增高。此外，各齡期均有發現Ca(OH)₂ 存在，而齡期愈久，爐渣混凝土生成之C-S-H也較多，導致混凝土摻雜電弧爐渣之抗壓強度比

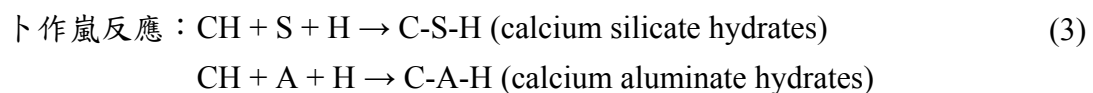
天然骨材混凝土的抗壓強度為高。

另一方面，於「電爐還原渣」再利用研究，由中央大學傅國柱的碩士論文(2002)「還原渣取代部分水泥之研究」的研究結果得知，水泥摻雜還原渣混凝土的強度趨勢，隨著還原渣的取代量提升，該強度的發展會越緩慢，在早期強度較為明顯，試驗中以還原渣取代20%之效果最佳。此外，中央大學蕭遠智的碩士論文(2002)「鹼活化電弧爐還原渣之水化反應特性」，利用鹼活化技術來提升還原渣的活性。

李宜桃碩士論文(2003)「鹼活化還原渣漿體之收縮及抑制方法研究」，利用加入各種劑如輸氣劑或是減水劑將還原渣鹼活化。根據以上的研究中發現到，經過鹼活化後的還原渣跟一般波特蘭水泥做比較，擁有較高的早期強度、較優耐久性，以及較低的水化熱等特性，但同時也有其他如速凝、乾縮等負面效應有待克服。

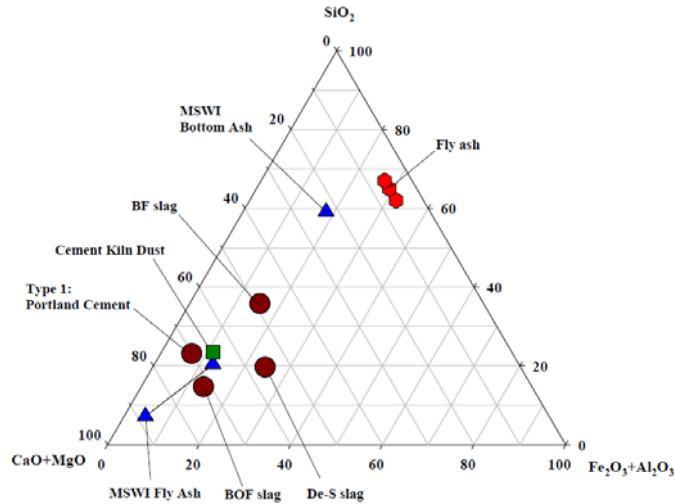
3.2.2 水泥取代原料

卜作嵐材料 (Pozzolan) 是指爐渣、飛灰、矽灰或是其他可作為水泥的摻料物質，各物質均具有不同程度的形成膠體、結合硬固的功用。除此之外，也可增加水泥晚期強度、提升耐久性、降低用料成本等等的其它用處。卜作嵐材料本身不具有膠結性，但是會與水泥中的氫氧化鈣反應，並生成C-S-H與C-A-H 膠體，填充混凝土中的孔隙，使混凝土更為緻密，反應機制說明如式(2)與(3)所示：



其中，C 代表氧化鈣 (CaO)，S 代表氧化矽(SiO₂)，A 代表氧化鋁(Al₂O₃)以及 H 代表水，CH 則是代表氫氧化鈣(Ca(OH)₂)。

圖 1 為常用卜作嵐材料和普通波特蘭水泥的成分比例，波特蘭水泥中的鈣/矽(C/S)的含量，較一般卜作嵐材料高，而波特蘭水泥的水化產物 C-S-H 膠體的 C/S 範圍在 1.5–2.0，電弧爐渣所含的 C/S 比例相較波特蘭水泥低。因此需要補充鈣的含量才能形成緻密之 C-S-H 膠體。



資料來源：Pan et al, 2012

圖1、常見適用於水泥摻配料之 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三相圖

卜作嵐反應是藉由消耗易溶於水的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，而生成膠體 C-S-H 膠體 ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)，而該膠體與波特蘭水泥 (Portland cement) 中，矽酸鈣礦物進行水化反應所產生的 C-S-H 膠體近似，因此可以用作為取代部分水泥的材料。水泥為構成混凝土的主要材料，水泥的水化反應控制了混凝土固結後的性質與強度等特性。根據 Chengzhi 等人(1996)的實驗結果證明，在水泥中添加卜作嵐材料，除了可以減少膠體孔隙間的水，也增加表面層的水，並減少水泥中的孔隙，強度可以因此而提升。若爐渣中含大量石灰 CaO ，可使 CaO 本身的水化作用而產生更多的水化生成物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，藉此加速卜作嵐反應，提高早期強度。

根據吳銘誠 (2003) 研究顯示，不銹鋼電弧爐氧化渣的組成成分與卜特蘭水泥相似，可作為水泥取代骨材。而取代 5% 氧化渣的試體抗壓試驗符合 ASTM C109 規範。此外，在 Muhmood 等人 (2009) 研究顯示，利用電弧爐渣取代水 15% 以及 20% 的情況下，與純水泥對照組做比較，抗壓強度並沒有明顯的降低，但是在取代 30% 的情況下，抗壓強度卻有顯著的降低。根據 Hekal 等人 (2013) 研究指出，使用純水泥與摻雜不同比例成分電弧爐氧化渣之不同水化齡期之抗壓強度與水化學結合鍵值比較；由實驗結果顯示，將電弧爐氧化渣摻雜於水泥當中，隨著摻雜的電弧爐氧化渣量上升，水泥在各個水化齡期的抗壓強度 (Compressive strength) 皆減弱；此外，電弧爐氧化渣的摻雜比例提升，水泥在各個水化齡期所形成的水化學結合鍵 (Chemically combined water) 值皆下降。綜合以上結果，顯示電弧爐氧化渣並無明顯之卜作嵐反應。

另一方面，於「電爐還原渣」再利用研究，根據曾仕文 (2012) 研究報告，使用材料主要膠結材料為水泥與爐渣粉，並加入還原渣，以 5%、10%、15% 的比例取代部分細粒料，製成控制性低強度回填材料 (Controlled Low Strength

Materials，簡稱 CLSM)。實驗成果顯示，以還原渣取代 10 % 細粒料應於 CLSM 中，不論是工作性、凝結時間或是 28 天的抗壓強度，皆符合國內的工程規範，但是還原渣取代量增加，會造成凝結時間延長及早期強度較低的現象。

肆、結論與建議

4.1 結論

煉鋼爐渣碳酸化後表面結構與性質產生改變，成為低孔隙度、低曲折及低孔隙面積之方解石充填孔隙空間的固體，這些變化有益於後續利用。大部分煉鋼爐渣應用需被碾碎及過篩成相當小顆粒，以供水泥添加物所需之極細研磨。因此，可避免供 CO₂ 封存之耗能和成本。另一方面，新鮮爐渣中 CaO 和 MgO 水化現象，在碳酸化過程中將會被排除，因此碳酸化作用為一有效提高混凝土與碳酸化爐渣混合物之耐久性之方法；此外，由於凝聚作用，碳酸化顆粒變得更粗糙，這可能將有利於骨材製造之使用。

4.2 建議

未來研究目標建議如下：

- 1- **開發新穎鹼性廢棄物吸附劑**：開發新穎鹼性廢棄物，結合工業製程廢液提昇吸附容量；改變操作條件，透過模式鑑定分析，探討碳酸化機制。
- 2- **研擬產物再利用途徑於綠色供應鏈**：進行廢棄物再利用材質功能測試，分析碳酸化後物化特性改變；評估不同粒徑於捕獲效能及再利用潛能影響。
- 3- **系統最佳化提昇吸附量及再利用潛力**：利用反應區面法與生命週期評估，建立預測模式，以最大化 CO₂ 捕獲量，最小化程序操作成本與環境衝擊。
- 4- **建立產學合作平台，設置吸附法示範工廠**：放大吸附技術規模，驗證實驗室數據，提出工程技術規範，落實二氧化碳實質減量。

致謝

非常感謝科技部「燃燒後二氧化碳捕獲技術之開發」計畫（編號：MOST 103-3113-E-007-002）經費之支持。

參考資料

1. Abu-Eishah S.I., A.S. El-Dieb and M.S. Bedir, "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region", *Construction and Building Materials*, (2012) 34, 249 – 256.
2. Bonenfant, D., L. Kharoune, et al., "molecular analysis of carbon dioxide adsorption processes on steel slag oxides", *International Journal of Greenhouse Gas Control* (2009), 3, 20-28.

3. Chang, E.E., S.Y. Pan, Y.H. Chen, C.S. Tan and P.C. Chiang, "Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed", *J Hazard Mater* (2012), 227-228, 97-106.
4. Chengzhi, Z., W. Aiqin, and T. Mingshu, "The Filling Role of Pozzolan Material", *Cement and Concrete Research* (1996), 26, 6, 943-947.
5. Hekal, E.E., S.A. Abo-El-Enein, S.A. El-Korashy, G.M. Megahed, T.M. El-Sayed, "Hydration characteristics of Portland cement – Electric arc furnace slag blends", *HBRC Journal* (2013) 9, 118-124.
6. Manso, J.M., J.A. Polanco, M. Losanez and J.J. Gonzalez, "Durability of Concrete made with EAF Slag as Aggregates", *Cement and Concrete Composite* (2006).
7. Muhmood, L., S. Vitta, and D. Venkateswaran, "Cementitious and pozzolan behavior of electric arc furnace steel slags", *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 102-109
8. Pan, S.Y., E.E. Chang and P.C. Chiang, "CO₂ Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications", *Aerosol and Air Quality Research* (2012), 12, 770-791.
9. Tan, C.S. and J.E. Chen, "Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixtures in a rotating packed bed", *Sep. Puri. Technol.* (2006), 49, 174–180.
10. 李育成,「中鋼轉爐渣安定化與資源化再利用研究」,技術與訓練,38:1,42-49 (2013)。
11. 鄭清元,「電弧爐煉鋼爐渣特性及取代混凝土粗骨材之研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢(2000)。
12. 陳立,「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」,博士論文,國立中大學土木工程研究所,中壢(2003)。
13. 李大慶,「電弧爐氧化渣砂漿物化特性之研究」,碩士論文,國防大學中正理工學院軍事工程研究所,桃園(2002)。
14. 傅國柱,「還原渣取代部份水泥之研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,桃園(2002)。
15. 吳銘誠,「不銹鋼電弧爐氧化渣之再利用研究」,碩士論文,國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系,高雄(2003)。
16. 曾仕文,「電弧爐還原渣應用於控制性低強度材料及其安定化成效評估研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢(2012)。
17. 蕭遠智,「鹼活化電弧爐還原渣之水化反應特性」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢(2002)。
18. 李宜桃,「鹼活化還原渣漿體之收縮及抑制方法研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,中壢(2003)。