

廢鑄砂再利用作為水泥生料之研發

林凱隆

國立宜蘭大學環境工程學系教授

鄭敬融

國立宜蘭大學環境工程學系碩士

張家祥

國立宜蘭大學環境工程學系研究生

摘 要

根據台灣區鑄造品同業工業公會所統計，台灣鑄造品年產量約一百四十萬噸，佔世界第十二位。若以每生產一公噸鑄件會棄置一公噸廢鑄砂來推估，台灣地區每年約產生一百四十萬噸之廢鑄砂。廢鑄砂中之主要成份為矽砂 (SiO_2)、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 ，故資源化再利用技術可依照廢鑄砂來源性質、技術、法規政策、經濟市場而有不同的發展方向。目前國內外廢鑄砂資源化技術主要包括再利用於掩埋用之阻水層、掩埋場覆土、公路鋪面、瀝青混凝土以及混凝土製品等。有鑒於廢棄物資材化的觀念，因此本研究係以廢鑄砂 (殼模砂與水玻璃砂)、石灰石及鐵砂等進行環保水泥熟料之燒製，原料前處理研磨後，經由電腦配料系統求解聯立方程式來配置生料，各配比設計之環保水泥生料以實驗室高溫爐燒結處理，燒成之各組環保水泥熟料，進行各項材料特性分析、工程性質及水化反應行為之探討。實驗燒製之各組環保水泥熟料，其游離石灰量皆小於 1，且製程燒失量介於 32.61% - 34.61% 間，符合實廠窯燒水泥之品管規範。研究中所燒製各組環保水泥熟料與波特蘭水泥成份相同，其單礦物組成主要含有 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 等晶相物種。環保水泥漿體較 OPC 漿體之水化程度緩慢，其中以 FEC-IV 水化程度最低，但在 28 天養護齡期其水化程度均可達到 59% 以上，養護 60 天水化程度可高達 72%，甚至超越 OPC 漿體，養護齡期 90 天其水化程度則呈現較平緩之趨勢。綜合上述結果顯示：廢鑄砂具資源化利用作為取代水泥生料之潛力。

關鍵字：廢鑄砂、環保水泥、熟料、游離石灰、孔隙體積

一、前 言

根據臺灣區鑄造品工業同業公會所提供資料，台灣鑄造品年產量約一百四十萬噸，占世界第十二位，產值達九百億台幣，專事生產各種高品質鑄件，支撐國



內機械、電子等相關產業之基礎。台灣地區生產的鑄件以灰口鑄鐵和球模鑄鐵鑄件為主，約占 80%，其餘為鑄鋼與非鐵鑄件，約各占 10%。而造模方法主要以溼砂模鑄造和自硬性模鑄造為主⁽¹⁾。

鑄造業為國內機械製造業之根本，其重要性不容忽視。鑄造業製程所排出之廢鑄砂，因生產製程所添加之化學成分各有不同，故無法認定其屬於一般事業廢棄物，造成代處理業者哄抬價格，甚至無法執行鑄造廠廢鑄砂清運處理工作，嚴重影響鑄造業的競爭力及生存空間。另外根據經濟部公告之「一般事業廢棄物再利用類別及管理方式」，廢鑄砂乃公告再利用之事業廢棄物，如能資源回收再利用，必能有效解決廢鑄砂清除處理問題⁽¹⁾。

近年來，全球經濟迅速成長，建設工程蓬勃發展，全球水泥產量的比重逐年穩定成長。根據全球水泥報告 (Global Cement Report)統計指出，2010 年全球水泥產量為 32.94 億公噸，較 2009 年 (29.98 億公噸)成長 9.9%，其中約有 60%其中在亞洲⁽²⁾。如何利用現有資源製造如同水泥般的材料，並有效降緩製造水泥時所使用之原物料，以減緩天然資源的耗損，更是現階段水泥產業必須面臨思量克服的問題。而環保水泥就是一個解決的方法，環保水泥係以廢棄物為主要原料以調整水泥特性，與普通水泥配料所採用之天然原料不同，其化學與礦物特性亦與普通水泥有所差異⁽³⁾。

環保水泥 (Eco-cement)一詞乃是日本秩父小野田株式會社與株式會社荏原製作所於 90 年代中期共同研發並由太平洋水泥株式會社於 2001 年正式將之商業化營運^(4,5)。環保水泥係採用廢棄物為主要原料並添加石灰石等天然礦物以調整其成分，故其化學及礦物特性與一般水泥有所差異，但生產流程與一般水泥工廠相似⁽⁶⁾。因為水泥為民生建設之基本需求，需求量及供給量皆大，但因一般水泥製造流程會造成嚴重之環境污染，而環保水泥技術不僅能降低對環境的破壞，亦能減少生產成本，是一種頗具前景之處理技術。

本研究首先調查鑄造業現況、廢鑄砂廢棄物產量與來源及其物化特性，最後再進行環保水泥資源化技術闡明，盼望能建立廢鑄砂之化學組成條件及其作為水泥之替代生料對環保水泥之影響，冀望能在處理廢棄物處置問題的同時，亦能開發出新的環保水泥材料，達到廢棄物減量及資源化再利用的目標。

二、廢鑄砂之來源特性與產量

根據臺灣區鑄造品工業同業公會所提供資料表示，台灣鑄造品年產量約一百四十萬噸，占世界第十二位，生產各種高品質鑄件，支撐國內機械、電子等相關產業之基礎，對於台灣創造經濟奇蹟，居功厥偉。目前國內約

有 600 多家鑄造廠，加入鑄造品工會的有 351 家，其中北區約有 103 家，中區為 139 家，南區則有 109 家。生產的鑄件以灰口鑄鐵和球墨鑄鐵鑄件為主，約占 80 %，其它為鑄鋼和非鐵鑄件，約各占 10 %。鑄造方式主要為砂模鑄造、壓鑄、精密鑄造及重力鑄造等，至於生產模式則是大中小型鑄件、多樣少量及大量生產等，其產業結構如圖 1 所示。

依經濟部 100 年公告 55 項事業廢棄物再利用種類及管理方式，編號第十一『廢鑄砂』之定義說明如下：廢鑄砂為金屬基本工業、金屬製品製造業或機械設備製造修配業在鑄造製程產生之廢棄鑄砂，包含集塵設備收集之粉末物質，其主要成分為 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 。鑄造廢棄物之種類與產出地點如圖 2 所示，鑄造廠的主要廢棄物為廢鑄砂、爐渣與集塵灰等，鑄造物件使用過後之廢鑄砂，通常於鑄造過程中混砂(前段)、澆鑄與拆模(中段)、成品表面處理(後段)時所產生。而廢鑄砂的種類依製造貯存與回收處理的方法不同而異，一般而言，依造模方法不同分類來區分，主要可分為濕模砂、水玻璃砂、 α -SET 樹脂砂、酚醛樹脂殼模砂、矽喃砂、 β -SET 樹脂砂及陶瓷殼模砂等。各類廢鑄砂比例如圖 3 所示^[1]。

模砂係由基砂加黏結劑再調和各種不同之添加劑混練而成。例如濕模砂，係由含主要成份為二氧化矽 (SiO_2) 之矽砂、火山黏土與水混練而成，這三種組成分子使濕模砂具有相當之強度、通氣性及耐久性，如果再混合其它添加劑，則能使模砂之某些特性更加強。鑄砂性質具有各種不同之顆粒型態、粒徑及分佈，以及良好之耐火度與熱穩定度。鑄造物件使用過之模砂稱為廢鑄砂，而廢鑄砂內之主要成份為矽砂，並依模砂內之黏結劑不同而有所差異。廢鑄砂之物化性質如表 1 與 2 所示^[1]。

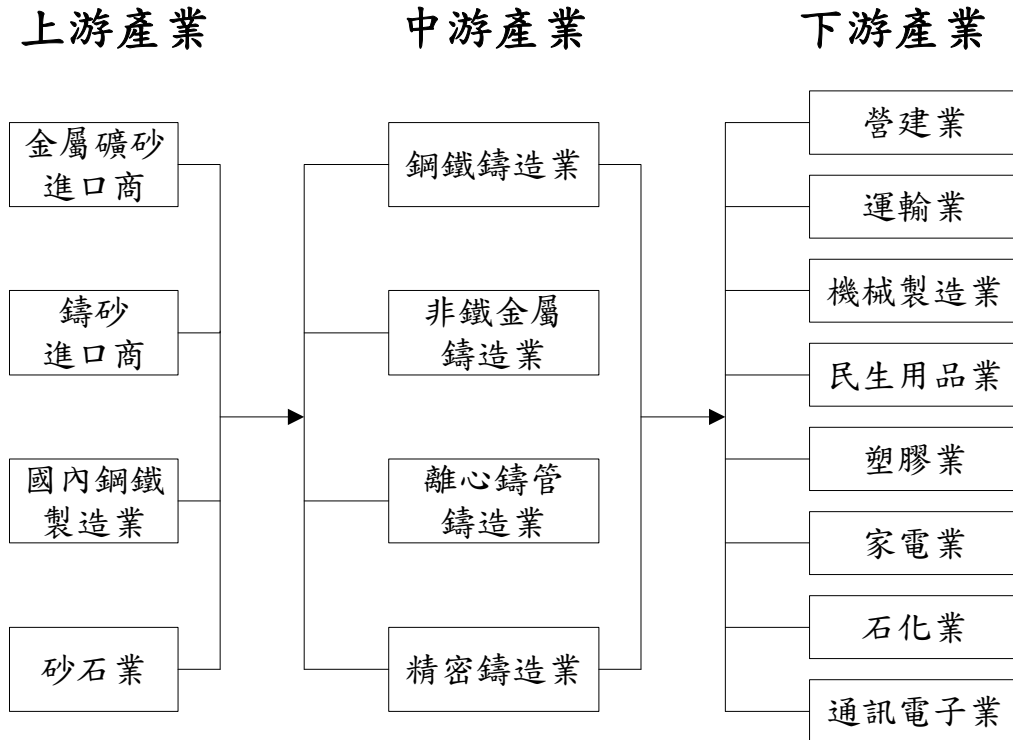


圖 1 鑄造產業結構圖

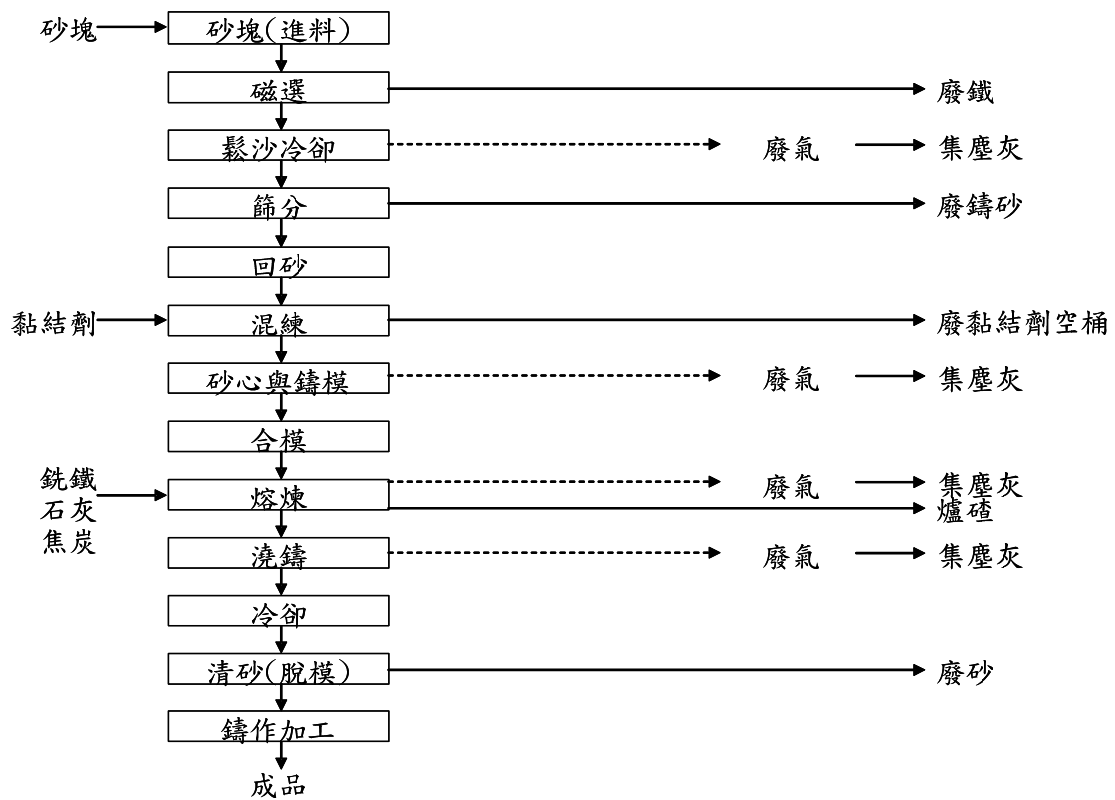


圖 2 鑄造廢棄物之種類與產出地點

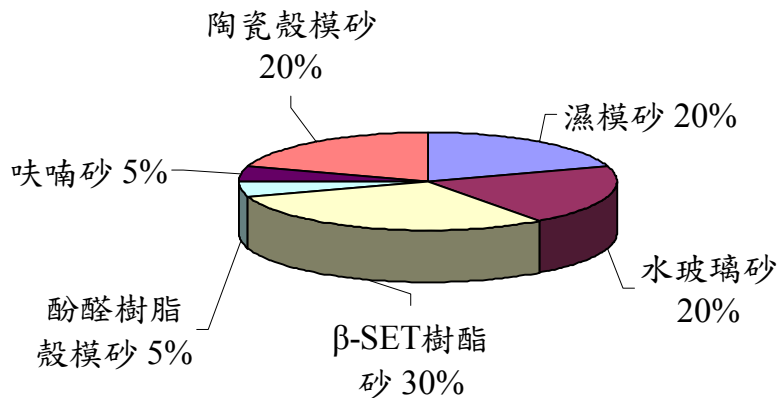


圖 3 各類廢鑄砂產量比例

表 1 廢鑄砂物性分析

製程	鑄砂種類	pH	莫氏硬度	比重 (g/cm ³)	飽和含水量 (%)	含水率 (%)	篩分析 (FM)	乾搗單位重 (kg/m ³)	輻射量 (微西弗/hr)
精密鑄造	陶瓷殼模砂	8.05	4	1.92	8.37	15.14	過粗	1,062	0.02
濕砂模	酚醛樹脂砂	8.16	—	2.5	17.25	0.13	1.31	1,469	0.02
濕砂模	濕模砂	7.39	—	2.4	63.30	3.63	2.60	1,360	0.02
自硬性	水玻璃砂	10.85	5	2.63	8.99	0.22	2.63	965	0.02
自硬性	矽喃砂	2.93	—	2.17	61.59	6.89	過細	598	0.02

表 2 廢鑄砂化性試驗分析

鑄砂種類	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	K ₂ O	Na ₂ O	Clay	Cl-
陶瓷殼模砂	64.9	0.91	31.78	0.46	0.04	0.08	0.24	0.27	1	0.003
酚醛樹脂砂	92.1	0.37	3.25	0.22	0.13	0.07	2.49	0.25	13.2	0.0043
濕模砂	67.6	8.53	11.33	0.74	0.97	0.3	1.23	1.85	3.9	0.0899
水玻璃砂	87.2	4.03	4.39	0.4	0.69	0.09	1.01	1.26	5.9	0.023
矽喃砂	21.1	7.15	5.27	0.64	0.27	1.85	0.44	0.24	100	0.023



三、廢鑄砂之處置與再利用

廢鑄砂的成份與性質因鑄造廠的製程、化學添加劑及後續處理方法的不同，因而有所差異，但大部分廢鑄砂中之主要成份仍為矽砂 (SiO₂)、Al₂O₃ 及 Fe₂O₃，故資源化再利用技術可依照廢鑄砂來源性質、技術、法規政策、經濟市場，及各國民情的需求而有不同的發展方向。

表 3 國內外廢鑄砂資源化技術⁽⁷⁾

應用層面	再利用技術及產品
大地工程 (Geotechnical Applications)	阻水層 (Barriers)
	公路築堤 (Highway Embankments)
	掩埋覆土 (Landfills)
	路基材料 (Road Bases)
土木材料 (Civil materials)	建築填材 (Structural Fills)
	瀝青 (Asphalt)
	混凝土 (Concrete Products)
	Flowable Fill & CLSM
農業產品 (Agricultural Products)	波特蘭水泥 (Portland Cement)
	土壤改良劑 (Soil Amendment)
	堆肥 (Compost)

在國外廢鑄砂再利用研究計劃已經鑽研近 20 年的時間，由美國鑄造學會贊助，Wisconsin 大學土木工程與環境工程系進行研究，研究結果證實以廢鑄砂作為土木資材再利用對環境並不會造成嚴重威脅，將來運用於路基材料與道路工程上具有很大的潛力。而國內對廢鑄砂之處置本以掩埋棄置為主，但受到國外之資源化利用之影響，近兩年來亦開始積極投入廢鑄砂再利用資源化技術之研發，且部份已有良好成效。彙集國內外廢鑄砂資源化技術，如表 3 所示，並分述如下。

(一) 大地工程之應用 (Geotechnical Applications)

1. 廢鑄砂再利用於掩埋用之阻水層 (Barrier Layers)

Kunes 與 Smith⁽⁸⁾曾利用廢鑄砂於阻水層使用，其研究考慮顆粒分佈、壓密曲線、水力傳導特性等，結果指出使用廢鑄砂的水力傳導與一般黏土層一樣好具有取代的潛力，可減少環境中黏土用量。

2. 廢鑄砂再利用於掩埋場覆土

廢鑄砂基本特性與水泥替代物及細粒料相似，且已被環保署公告為已回收再利用之資源化物質，根據國內外參考文獻顯示，廢鑄砂亦可應用於掩埋場之覆土使用。由於廢鑄砂具有較一般砂石質輕、吸水性低之特點，當廢鑄砂使用於掩埋場之每日覆土時，其強度與透水性與使用天然黏土之覆土效果相同。

3. 廢鑄砂再利用於公路鋪面

Mast⁽⁹⁾利用廢鑄砂於 Indiana 206 號公路上建造一段長 900ft 之道路鋪面，並評估其對大地結構上之影響（包括變形、強度、滲透性、建造限制），結果證實其具可行性。Yucel⁽¹⁰⁾等人利用廢鑄砂與石英砂、有機添加和膨潤土共同混合後應用於高速公路之路基上，發現不僅能節省大量的成本，且更加的致密，能有效的防止水滲透進去，且其強度較高。重要的是，透過溶出試驗，發現利用廢鑄砂作為路基材料對環境不會有危害性。

(二) 土木材料之應用 (Civil Materials)

1. 廢鑄砂再利用於瀝青混凝土

瀝青路面自上而下可分為面層、底層和基層，鋪築於路基上。瀝青路面自最簡單之砂石底層加上表面處理，以至於路面全厚均用高級瀝青拌和料，利用廢鑄砂細粒料之特性可以用來做為瀝青混凝土填充料或細骨材之替代物，影響瀝青混凝土最大的因素為骨材的特性、形狀、以及密度。Javed⁽¹¹⁾利用五種不同來源之廢鑄砂做適用性研究，探討其耐久性、健性、顆粒形狀、及表面結構之影響，研究中廢鑄砂以 0%、15%、20%、30% 取代瀝青混凝土中的細骨材部分，結果顯示以 5.75% 取代最佳，取代量 15% 以內無太大差異，超過 15% 則會造成孔隙增大、流度降低、碎化等現象。

2. 混凝土製品 (預鑄管、人行磚、鋪面用材) 之細骨材替代物

主要是利用廢鑄物細粒料之特性與混凝土中其他摻配料一起拌合使用於混凝土製品，如預鑄管、磚及鋪面用材等，根據國外文獻實驗資料顯示，在混凝土中可加入大約 15% 之鑄造廢砂取代砂石粒料，但不能含有皂土，因皂土可能使混凝土變硬。混凝土產品包括混凝土管、磚、停車場用材或作為其它用途。在磚品的製造方面，廢鑄砂之化學性質與物理性質對於製造磚塊而言都是最好的材料。Gurpreet^(14,15)利用廢鑄砂來取代混凝土中的砂，結果發現當廢鑄砂取代量達 15% 時，能明顯的提升混凝土之機械強度，且在養護 28 和 91 天時，其機械強度的提升幅度最大。且混凝土中含有廢



鑄砂時會增加 C-S-H 膠體的含量，使得混凝土之抗壓強度更高且可抵抗環境的酸腐蝕。

3. 廢鑄砂再利用於 flowable fills

Flowable fills 即為一般所熟知的 controlled low strength material (CLSM) 其為一種可自平、無需滾壓、高流動性路基填充材料，自壓密最大單位重可達 95 ~ 100 %，一般規定其 28 天無圍抗壓強度不超過 1200 psi，若考慮其可再開挖性則抗壓強度必須小於 150 psi，常利用於狹小或機具難以進入的地方，例如狹窄溝渠之回填、地下儲槽、路面或建築下面孔洞之回填等。Javed 與 Lovell⁽¹⁶⁾對於廢鑄砂用於 CLSM 做研究，以確認廢鑄砂的物理特性及再利用於建築工程上之適用性。研究結果亦發現廢鑄砂最大使用量為 55.5 %，且 CLSM 可依廢鑄砂的物化特性用試誤法求出最適配比。Yucel 等人⁽¹⁷⁾發現，廢鑄砂取代 CLSM 中的砂為 10%時，其試驗結果幾乎與參考組相同，但 CLSM 的流度與工作性會隨著廢鑄砂的增加而減少。

四、實驗材料與方法

本研究之廢鑄砂採自台灣地區北部某鑄造廠，為金屬製品製造與機械設備運作於鑄造製程產生之廢棄鑄砂，主要為鑄造過程前段混砂與後段表面處理，以及中段澆鑄與拆模後之混合廢砂，包含殼模砂與水玻璃砂兩種，殼模砂係於精密鑄造時使用之砂心鑄模廢砂，水玻璃砂為鑄造模型時所常使用之矽酸鈉材料，經脫模之後廢棄之模砂部分。

本研究中利用表 4 之水泥配料係數規值之石灰飽和度 (L.S.F.)、水硬係數 (H.M.)、矽氧係數 (S.M.) 及鋁鐵係數 (I.M.) 等水泥係數為邊界條件，利用大理石污泥及廢鑄砂摻配適量之石灰石及鐵砂，以電腦程式計算混合配置不同類型之環保水泥生料。

表 4 配料所用之水泥係數及其規範值

水泥係數	定義	規範值
石灰飽和度	$\text{CaO}/(\text{SiO}_2+1.18\text{Al}_2\text{O}_3+0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$	0.8-0.95
水硬係數	$\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	1.7-2.3
矽氧係數	$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	1.9-3.2
鋁鐵係數	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.5-2.5

接著將混合均勻的生料進行壓錠，並置入高溫爐中於 3 小時內升溫至 1400 °C 並持溫 45 分鐘以燒製環保水泥熟料。之後進行游離石灰之測定，確定環保水泥熟料之游離石灰含量小於 1% 之限制值。

本實驗參照 ASTM C109 規範於 1 立方英吋鋼模中將環保水泥和適量之石膏充分混合後加水拌製漿體，待 24 小時凝固後進行拆模，並以 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 恆溫飽和石灰水中養護於不同齡期下，進行抗壓強度等工程性質之實驗分析，並與一般市售波特蘭 I 型水泥進行比較。生料中廢鑄砂取代比例的不同造成生料組成份之變異，導致不同型別環保水泥出現其特定之水化反應行為，本實驗藉由水化程度的發展趨勢，加以解析水泥水化所造成的變化，並與市售波特蘭 I 型水泥之水化反應比較。

表 5 水泥生料之 XRF 成份分析結果

Raw	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
石灰石	1.73	1.31	0.46	50.71	1.15	0.20	0.17	0.11	0.24
殼模砂	39.45	38.88	5.38	0.16	0.17	0.41	N.D.	0.27	N.D.
水玻璃	82.97	N.D.	3.16	N.D.	1.72	0.40	3.26	0.87	3.83
鐵渣	31.20	8.34	56.47	N.D.	N.D.	N.D.	0.07	0.06	0.11

單位：%

表 6 環保水泥之配方

	FEC-I	FEC-II	FEC-III	FEC-IV
石灰石	80.26 %	79.26 %	78.26 %	77.26 %
殼模砂	6.64 %	7.64 %	8.64 %	9.64 %
水玻璃	10.87 %	10.87 %	10.87 %	10.87 %
鐵渣	2.23 %	2.23 %	2.23 %	2.23 %
水泥規範係數				
石灰飽和度 (L.S.F.)	0.92	0.87	0.84	0.80
水硬係數 (H.M.)	2.05	1.94	1.85	1.76
矽氧係數 (S.M.)	2.23	2.15	2.07	2.00
鋁鐵係數 (I.M.)	1.64	1.76	1.88	2.00



五、結果與討論

(一) 替代性生料之基本特性

本實驗使用兩種事業廢棄物、天然石灰石礦粉與鐵砂共四種材料進行環保水泥生料之配置，表 5 為四種配料之 XRF 化學組成分析結果。結果顯示殼模砂主要以 SiO_2 與 Al_2O_3 成份居多，可用來取代水泥原料中所需之黏土礦物；而水玻璃砂主要以 SiO_2 成份為主，具有取代水泥原料中不足的矽質原料之潛力。經由電腦程式計算發現替代生料中 CaO 、 Fe_2O_3 含量不足，再加上硫酸鹽、及鹼基含量等亦為配料之限制，故無法由純廢棄物百分之百取代水泥生料，仍需搭配適當之石灰石與鐵質原料，以符合 CNS 61 水泥化性與水泥配料係數之規範值。由程式配置出之環保水泥生料如表 6 所示。

(二) 水泥熟料基本性質分析

表 7 為環保水泥熟料主要之基本物化性質包括比重、細度、pH 值測定以及游離石灰量之測定等。由基本材料性質分析結果可以看出，環保水泥熟料的比重約介於 3.1 - 3.5 之間，與一般波特蘭水泥相近；pH 值則大多呈鹼性反應，與一般波特蘭水泥之 pH 相同；游離石灰量為實驗室判斷熟料燒結反應是否完全之依據，大致上都小於 1% 以下，低於實場規範值（通常為 1% 以下，水泥實廠操作 $\text{max} \leq 1.8\%$ ），顯示熟料燒製的反應完全，所產出的水泥熟料後續可供研磨使用。

表 7 環保水泥熟料基本物化性質

	FEC-I	FEC-II	FEC-III	FEC-IV
比重	3.18	3.37	3.41	3.22
細度 (m^2/kg)	320	317	312	326
pH	12.27	12.30	12.38	12.16
f-CaO (%)	0.9	0.8	0.5	0.2

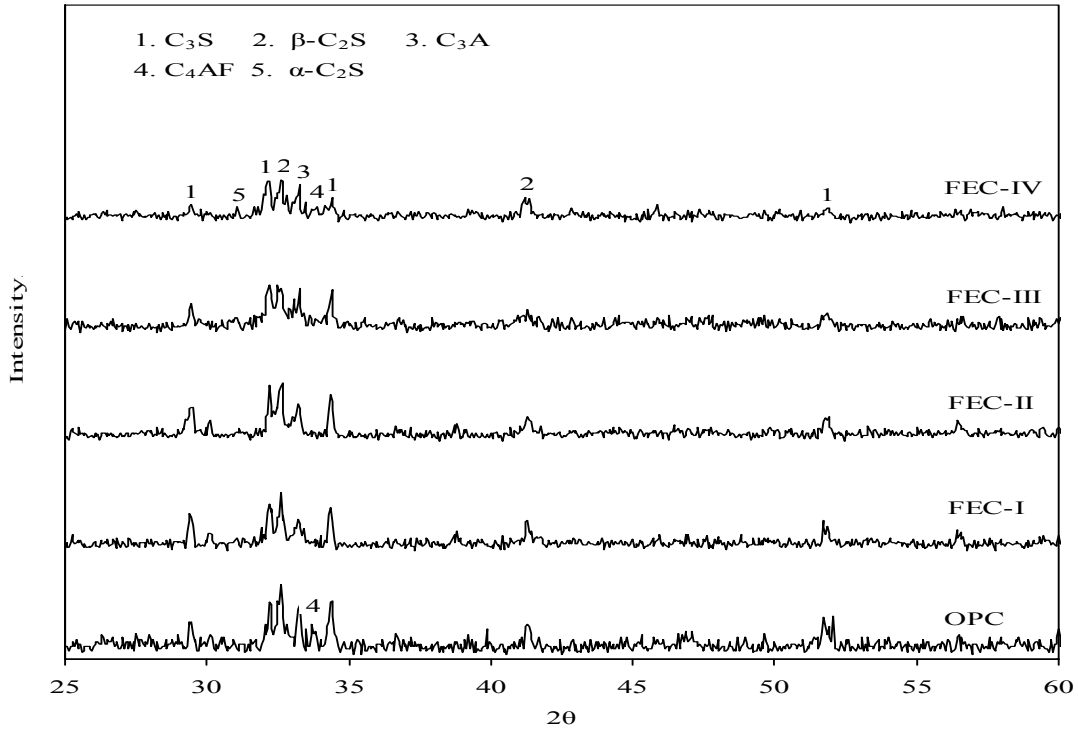


圖 4 環保水泥之熟料 XRD 圖譜

如圖 4 所示，與 OPC 相比較，研究所燒製之各組環保水泥熟料皆含有 C₃S、C₂S、C₃A 及 C₄AF 晶相物種，在環保水泥熟料部分，熟料之 C₃S 與 C₃A 晶相有隨殼模砂增加特徵峰強度下降之趨勢，C₄AF 晶相特徵峰強度較不明顯，而熟料之 C₂S 晶相特徵峰強度呈現小幅增加的趨勢，此系列環保水泥熟料大部分 C₂S 單礦物乃是以 β-C₂S 的型態存在，然而 FEC-IV 環保水泥熟料所生成之 C₂S 單礦物，則部分是以水化強度較低之 α-C₂S 形式存在。



表 8 水泥規範品管化學成分規定

Sample	FEC-I	FEC-II	FEC-III	FEC-IV	OPC	規範值
Clinker chemical composition						
Oxide (Wt. %)						
CaO	66.21	65.07	64.07	63.03	64.5	—
SiO ₂	22.25	22.67	23.28	23.63	21.32	—
Al ₂ O ₃	5.63	6.21	6.51	6.98	6.17	—
Fe ₂ O ₃	3.34	3.6	3.68	3.9	3.1	—
MgO	2.2	2.35	2.33	2.31	1.37	—
Clinker mineral composition (according to Bogue)						
Mineralogical constituent (Wt. %)						
C ₃ S	57.8	45.7	34.86	24.49	55	—
C ₂ S	20.19	30.52	40.45	49.27	19	—
C ₃ A	9.27	10.37	11.02	11.9	10	—
C ₄ AF	10.16	10.95	11.2	11.87	7	—
Moduli (%)						
L.S.F.	0.93	0.89	0.85	0.82	—	0.80 ~ 0.95
H.M.	2.12	2	1.91	1.83	—	1.7 ~ 2.3
S.M.	2.48	2.31	2.28	2.17	—	1.9 ~ 3.2
I.M.	1.69	1.73	1.77	1.79	—	1.5 ~ 2.5
f-CaO (%)	0.9	0.8	0.5	0.2	—	< 1
LOI (%)	0.99	0.99	0.98	0.97	—	< 3

(四) 環保水泥漿體之物理組成

水泥燒製成熟料後需經過粗碎與研磨程序，一般來說研磨時間愈長水泥顆粒愈細，細度也相對愈大，在 CNS 61 規範中水泥熟料之細度為 280 m²/kg，水泥之細度與初終凝及其水化反應息息相關，因此本實驗將熟料研磨過 mesh # 175 號篩，以符合規範標準，並將細度控制在與實廠水泥相近之細度 331 m²/kg 附近，以利後續水化反應分析之探討。

本研究分別針對環保水泥製作水泥試體，測試之養護齡期為 3 天、7 天、28 天，進行抗壓強度試驗，水泥規範對於水泥漿體 3、7、28 天抗壓強度的物理要求，分別為 126、197 及 281 kg/cm² 以上，大抵而言各組環保水泥漿體皆能符合標準規範值，除了 FEC-IV 在 3 天 (110.74 kg/cm²) 與

7 天 (158.16 kg/cm²) 時的強度無法達到規範要求。最主要可能在於 FEC-IV 中單礦物晶相部分 C₃S 的含量較少，造成其早期強度發展較弱的影響，但其 28 天時的強度發展就能符合規範。

由凝結時間試驗結果顯示，各組環保水泥漿體初凝時間皆大於 45 分鐘以上，終凝時間皆小於 375 分鐘以下，均能符合國家標準 CNS 61 規範。

本研究配置各組環保水泥生料，經適當配比混合後以高溫爐進行環保水泥熟料之燒製，在燒製過程中由於生料組成份會在高溫反應時形成酸性氣體，或是微量元素而逸散至系統外導致重量減少，稱之為製程燒失量。表 9 為本實驗各組水泥熟料在燒製過程中所對應之製程燒失量，實驗結果顯示，本研究所燒製各組環保水泥熟料，製程燒失量介於 32.61 % - 34.61 % 之間，皆符合實廠品管規範需小於 40 % 之範圍。

表 9 水泥規範品管物理性質規定

Sample Name	FEC-I	FEC-II	FEC-III	FEC-IV	規範值
細度 (m ² /kg)	320	317	312	326	> 280
抗壓強度 (kg/cm ²)					
3 天	361.90	358.12	277.77	110.74	> 126
7 天	497.62	486.81	360.47	158.16	> 197
28 天	752.75	724.71	663.33	471.01	> 281
凝結時間 (min)					
初凝	225	236	264	283	> 45
終凝	329	319	343	349	< 375
製程燒失量 (%)	34.61	34.43	33.45	32.61	< 40

(五) 環保水泥漿體抗壓強度

本研究係以固定水灰比 0.4 之拌製環保水泥漿體，於不同養護齡期下進行抗壓強度試驗，以評估各組環保水泥特性與廢棄物取代水泥生料對水泥漿體抗壓強度發展之影響。如圖 5 所示，純水泥漿體 (OPC) 與環保水泥漿體之抗壓強度皆隨齡期發展而逐漸增加。在水化初期 OPC 漿體強度發展迅速，而 FEC-IV 漿體抗壓強度於各齡期皆小於 OPC 漿體，且各組環保水泥漿體抗壓強度有隨殼模砂取代量增加而有降低之趨勢，顯示此系列環保



水泥具有延緩早期水化反應之現象；然而齡期 28 天後環保水泥漿體發展趨勢增強，除了 FEC-IV 以外，60 天抗壓強度皆已接近 OPC，齡期 90 天時 FEC-II、FEC-III 抗壓強度也與 OPC 相當，FEC-I 甚至已經小幅超越 OPC。而齡期 28-90 天之間以 FEC-I 漿體強度發展趨勢最佳。

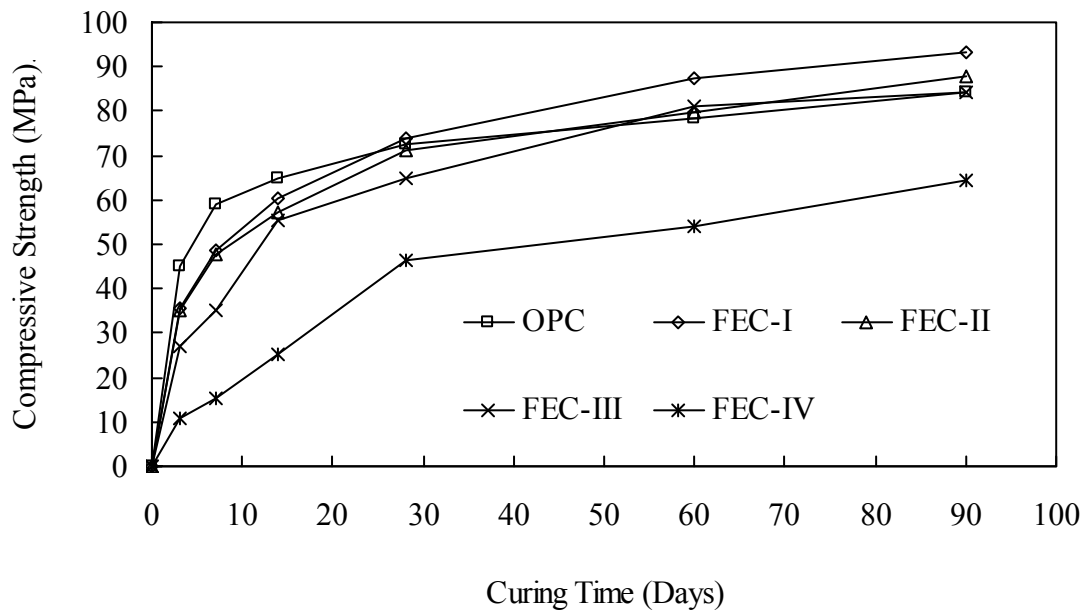


圖 5 環保水泥抗壓強度發展圖

(六) 環保水泥漿體水化程度

在水化過程中水泥漿體會隨時間反應，逐漸生成 C-S-H、CH、AFt、AFm 及其他化合物等水化產物，而使得水泥顆粒逐漸減小，並開始填塞水泥漿體內部之孔隙，增加水泥漿體之緻密度，因而水泥漿體物理強度產生，故水化程度可定義為水泥顆粒水化之量與水泥顆粒原始量之比。由於水泥顆粒在水化過程中不易被量化，Bentur (1980) 認為水化程度係水化膠體成長之結果，因無適當之定量方式，一般採用燒失法計算求得水化程度，本研究採用燒失法轉換方式，以求得環保水泥漿體在不同養護齡期之水化程度，所得環保水泥漿體隨齡期之發展如圖 6 所示。

由圖 6 環保水泥漿體之水化程度在不同齡期之變化情形，顯示環保水泥漿體之水化程度皆有隨齡期增加而增加之趨勢。於養護早期 (0-28 天) 時，環保水泥漿體較 OPC 漿體之水化程度緩慢，其中以 FEC-IV 水化程度最低，但在 28 天養護齡期其水化程度均可達到 59% 以上，養護 28 天之後水化程度持續上升，其 60 天水化程度可高達 72%，甚至超越 OPC 漿體，養護齡期 90 天其水化程度則呈現較平緩之趨勢。

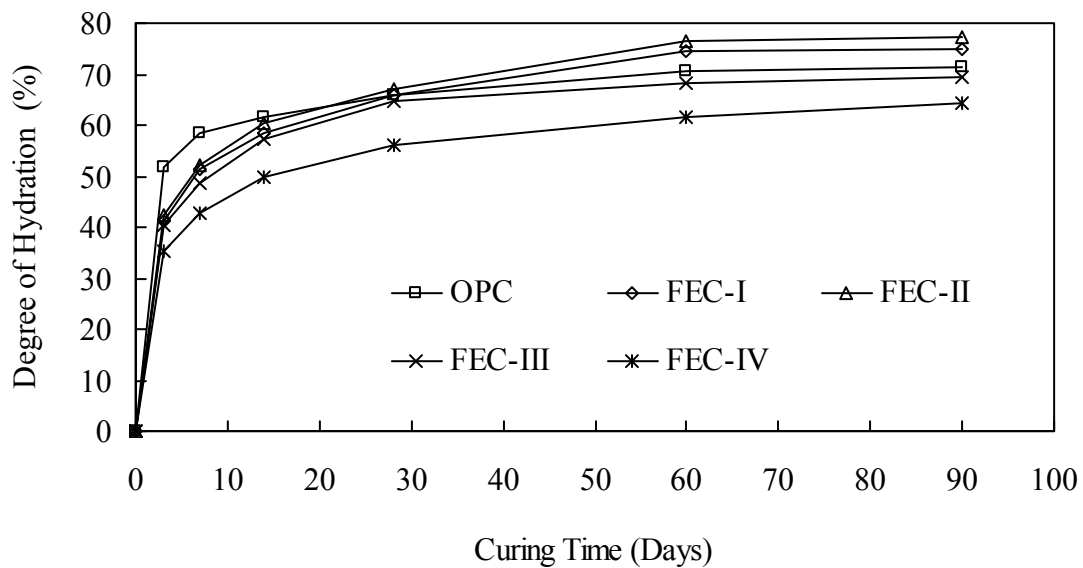


圖 6 環保水泥漿體之水化程度變化

五、結 論

廢鑄砂中之主要成份為矽砂 (SiO_2)、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 ，故資源化再利用技術可依照廢鑄砂來源性質、技術、法規政策、經濟市場而有不同的發展方向。目前國內外廢鑄砂資源化技術主要包括再利用於掩埋用之阻水層、掩埋場覆土、公路鋪面、瀝青混凝土以及混凝土製品等。本實驗燒製水泥熟料之條件升溫速率為 6.75 小時由室溫升至 1400°C ，並持溫 45 分鐘。實驗燒製環保水泥熟料，其游離石灰量皆小於 1，且製程燒失量介於 32.61% - 34.61% 間，符合實廠窯燒水泥之規範。環保水泥熟料與波特蘭水泥成份相同，其單礦物組成皆含有 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 等晶相物種。環保水泥熟料組成份皆符合 CNS61 水泥規範品管化學成分規定；水泥規範品管物理性質規定則僅有 FEC-IV 環保水泥漿體之 3 天與 7 天抗壓強度較弱，無法符合規範要求。環保水泥漿體抗壓強度早期 (0~28 天) 發展趨勢較 OPC 漿體緩慢，齡期 28-90 天之間強度發展趨勢較為明顯，以 FEC-I 強度發展最佳，FEC-II 與 FEC-III 次之，90 天強度則可與純水泥漿體相當；而



FEC-IV 漿體抗壓強度於各齡期皆小於 OPC 漿體。環保水泥漿體較 OPC 漿體之水化程度緩慢，其中以 FEC-IV 水化程度最低，但在 28 天養護齡期其水化程度均可達到 59 %以上，養護 60 天水化程度可高達 72%，甚至超越 OPC 漿體，養護齡期 90 天其水化程度則呈現較平緩之趨勢。結果顯示，廢鑄砂具資源化利用作為取代水泥生料之潛力。

參考文獻

- 1.中興顧問社，廢鑄砂資源化應用技術手冊，90 年度經濟部工業局專案計畫執行結果報告，台北，2001。
- 2.International Cement Review, Global Cement Report 9, 2010。
- 3.林忠逸，水處理工程廢棄污泥及煉鋼廢爐渣燒製環保水泥之材料特性研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2003。
- 4.Ono, Y., Ohmori K., Taguma Y., Eco cements produced from urban garbage incinerated ash, Cem. Concr. 586 pp. 1- 8, Japanese, 1995.
- 5.Ampadu K.O, Kazuyuki Torri, Characterization of ecocement pastes and mortars produced from incinerated ashes, Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 431-436, 2001.
- 6.Shimoda T., Yokoyama S., Eco-cement: A new Portland Cement to solve municipal and industrial waste problems, Proceedings of the International Congress on Creating with Concrete, pp. 17- 30, Dundee, 1999.
- 7.林明鋒，廢鑄砂及石材污泥取代水泥生料之研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，2006。
- 8.Kunes, T., Smith, M., Waste disposal considerations for green sand use in the foundry industry, Proc., AFS-CMI Conf. on Green Sand-Productivity for the '80s, Cast Metals Inst., Am. Foundrymen's Soc., Des Plaines, Ill., pp. 143-165, 1983.
- 9.Patrick J. Fox David G. Mast, Geotechnical Performance of Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand, Joint Transportation Research Program, 1998.
- 10.Yucel Guney, Ahmet H. Aydilek, M. Melih Demirkan, Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases, Waste Management, Volume 26, Issue 9, Pages 932-945, 2006.
- 11.Javed S., C. W. Lovell, L. E. Wood., "Waste Foundry Sand In Asphalt Concrete". Transportation Research Record. ASTM STP 1437. pp. 27-34, 1994.
- 12.Gurpreet Singh, Rafat Siddique, Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of

- concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 26, Issue 1, Pages 416-422, 2012.
13. Rafat Siddique, Albert Noumowe, Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 55, Issue 11, Pages 885-892, 2011.
14. Javed, S. Lovell, C.W., "Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction". Report JHRP/INDOT/FHWA-94/2J Final Report. West Lafayette: Purdue School of Engineering, 1994.
15. Yucel Guney, Yasin Dursun Sari, Muhsin Yalcin, Ahmet Tuncan, Senayi Donmez, Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete, *Waste Management*, Volume 30, Issues 8-9, Pages 1705-1713, 2010

參考網址：

1. International Cement Review : <http://www.cemnet.com/>
2. 行政院環境保護署 : <http://www.epa.gov.tw>