

東海大學環境科學與工程系研究所碩士論文

港區淤泥添加不同廢棄物當作調和劑燒製
輕質骨材之研究

**Influence of different flux adding in harbor sediments on sintering of
lightweight aggregate formation**



研究生：林長遠

指導教授：魏玉麟 博士

中華民國九十九年七月

東海大學碩士班研究生
論文指導教授推薦書

環境科學與工程學系林長遠君所提之論文

題目：廢港區淤泥添加不同廢棄物當作調和劑燒製輕質骨
材之研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授： 魏玉麟 (簽章)

99 年 7 月 29 日

東海大學環境科學系碩士班

論文口試委員審定書

環境科學與工程學系碩士班林長遠君所提之論文

題目：廢港區淤泥添加不同廢棄物當作調和劑燒製輕質骨材
之研究

經本委員會審議，認為符合碩士資格標準。

論文口試委員召集人 王鴻博 (簽章)

委員

喻家駿

魏玉麟

周志儒

蔣立中

中華民國 99 年 7 月 29 日

摘要

台灣各式的污泥數量繁多，若將這些廢棄物視為不可資源化的物質而予以拋棄，實為浪費資源。本研究乃選擇港區淤泥為資源化對象，並添加各廢棄物(玻璃粉、爐渣和集塵灰)來做調理，經壓錠成型後，在 950-1150 °C 予以燒結發泡。研究結果顯示：港區淤泥添加玻璃粉經 1100~1150°C 燒製後顆粒密度範圍為 0.87~1.81 g cm⁻³，吸水率為 1.5~5.5%；港區淤泥添加爐渣經 1100°C 燒製後顆粒密度為 1.35~1.70 g cm⁻³，吸水率為 7.20~11.48%；港區淤泥添加集塵灰於 1100°C 燒製後顆粒密度範圍為 0.94~1.23 g cm⁻³，吸水率為 4.73~6.29%。本實驗結果顯示添加各廢棄物燒製輕質骨材後之試體顆粒密度，經 1100°C 燒製後皆能符合一般輕質骨材之顆粒密度規範 2 g cm⁻³ 以下，且添加玻璃粉有助於降低燒結溫度使試體表面形成玻璃化現象，吸水率因此明顯降低，如此燒製後之骨材可運用於混凝土中，使之與水泥磨合度更佳，混凝土也因此有較大的抗壓強度，兼具良好的輕質骨材特性，且經高溫燒製後各重金屬之 M-TCLP 溶出試驗皆能符合法規標準，對於環境未出現負面之影響，有效達到各種廢棄物資源化之效果。

關鍵詞：輕質骨材、燒結、發泡

Abstract

This study investigates the characteristics of lightweight aggregates sintered from harbor sediment blended with waste (glass powder, electric arc furnace slags and electric arc furnace dust). A pressure of 6760 psi was used to shape the powder mixtures into pellets before the heating processes. The results indicate that adding the waste to harbor sediment with subsequent sintering at 950~1150 °C for 18 minutes can form aggregate. The particle density of the sediment containing glass, after being sintered at 1100~1150 °C, is in 0.87~1.81 g cm⁻³ range and the water absorption rate is 1.5~5.5 %. The particle density of the sediment added with EAFS after heating at 1100 °C is 1.35~1.70 g cm⁻³ and the water absorption rate is 7.20~11.48 %. The particle density of product containing electric arc furnace dust, after heating at 1100 °C is 0.94~1.23 g/cm³ and the water absorption rate is 4.73~6.29 %. All lightweight aggregate samples made from sediments added with different amount of wastes, which were prepared at 1100 °C for 18 min, can meet the <2.0 g/cm³ and 2~20% criteria for LWA in terms of particle density and water absorption, respectively. Leaching levels of trace metals including Cu, Cr, Pb, Zn, Se, Cd, As, and Hg from all lightweight aggregate samples are less than Taiwan Environmental Protection Agency regulatory limits.

Keywords: *lightweight aggregate, harbor sediment, sintering temperature, ash recycling*

目錄

第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.2 研究內容.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 港區淤泥.....	3
2.1.1 港區淤泥之基本性質.....	3
2.2 玻璃粉.....	3
2.3 爐渣.....	4
2.4 集塵灰.....	4
2.5 輕質骨材.....	4
2.5.1 輕質骨材之概要.....	4
2.5.2 輕質骨材之種類.....	5
2.5.3 輕質骨材之造粒方法.....	6
2.5.4 輕質骨材之成型壓力.....	6
2.5.5 輕質骨材之實際運用.....	6
2.5.6 輕質骨材之特性.....	7
2.5.7 輕質骨材之成型機制.....	7

2.5.8 輕質骨材之燒結機制.....	8
2.5.9 輕質骨材之燒結機制.....	9
2.6 國內外輕質骨材之相關研究	10
2.7 國內外煉鋼集塵灰與爐渣之資源用研究	12
第三章 研究設備與方法.....	15
3.1 實驗材料與設備.....	15
3.1.1 實驗材料.....	15
3.1.2 實驗設備.....	15
3.1.3 分析儀器.....	16
3.2 實驗流程.....	17
3.3 實驗分析方法.....	21
第四章 結果與討論.....	25
4.1 廢棄物材料之基本成份分析	25
4.1.1 物理性質.....	25
4.1.2 化學組成.....	25
4.2 港區淤泥添加廢棄物(玻璃粉、爐渣和集塵灰)在不同加熱溫度下 燒製成輕質骨材之特性分析.....	30
4.2.1 港區淤泥及玻璃粉之 DTA/TGA.....	30
4.2.2 重量損失變化.....	32

4.2.3 顆粒密度變化.....	34
4.2.4 吸水率變化.....	38
4.2.5 微結構變化(SEM).....	41
4.2.6 結晶物種分析(XRD).....	44
4.2.7 結晶物種分析.....	45
4.2.8 多次萃取之毒性溶出試驗(M-TCLP).....	47
第五章 結論與建議.....	56
5.1 結論.....	56
5.2 建議.....	57
參考文獻.....	58

圖目錄

圖 3.2.1 港區淤泥添加玻璃粉燒製實驗流程圖.....	18
圖 3.2.2 港區淤泥添加爐渣燒製實驗流程圖.....	19
圖 3.2.3 港區淤泥添加集塵灰燒製實驗流程圖.....	20
圖 4.1.1 港區淤泥、玻璃粉、爐渣(EAFS)及集塵灰(EAFD)之粒徑分佈 比例與累積百分比.....	27
圖 4.1.2.1 Riley 所建議可燒製輕質骨材之三成份圖.....	27
圖 4.1.2.2 玻璃粉/港區淤泥之三成份圖.....	27
圖 4.1.2.3 爐渣/港區淤泥之三成份圖.....	27
圖 4.1.2.4 集塵灰/港區淤泥之三成份圖.....	27
圖 4.2.1 (a)港區淤泥(b)春池玻璃粉之 DTA/TGA 曲線圖.....	31
圖 4.2.5.1 玻璃粉/港區淤泥燒製成骨材後之微結構變化圖 SEM (x100).....	42
圖 4.2.5.2 爐渣/港區淤泥燒製成骨材後之微結構變化圖 SEM (x100)	42
圖 4.2.5.3 集塵灰/港區淤泥燒製成骨材後之微結構變化圖 SEM (x100).....	43
圖 4.2.6.1 玻璃粉/港區淤泥燒製成骨材後之 XRD 圖譜.....	45
圖 4.2.6.2 爐渣/港區淤泥燒製成骨材後之 XRD 圖譜.....	46
圖 4.2.6.3 集塵灰/港區淤泥燒製成骨材後之 XRD 圖譜.....	47

表目錄

表 2.1 各化學成份逸出氣體之種類及溫度	9
表 4.1.2 各廢棄物之化學組成 (Wt % , 以氧化物表示)	28
表 4.1.3 廢棄物/港區淤泥之 LOI ₅₀₀ (%)	29
表 4.2.2.1 玻璃粉/港區淤泥在不同溫度燒製後之重量損失數據	33
表 4.2.2.2 爐渣/港區淤泥在不同溫度燒製後之重量損失數據	33
表 4.2.2.3 集塵灰/港區淤泥在不同溫度燒製後之重量損失數據	33
表 4.2.3.1 玻璃粉/港區淤泥在不同溫度燒製後之顆粒密度數據	37
表 4.2.3.2 爐渣/港區淤泥在不同溫度燒製後之顆粒密度數據	37
表 4.2.3.3 集塵灰/港區淤泥在不同溫度燒製後之顆粒密度數據	37
表 4.2.4.1 玻璃粉/港區淤泥在不同溫度燒製後之吸水率數據	40
表 4.2.4.2 爐渣/港區淤泥在不同溫度燒製後之吸水率數據	40
表 4.2.4.3 集塵灰/港區淤泥在不同溫度燒製後之吸水率數據	40
表 4.2.8.1 港區淤泥、玻璃粉、爐渣、集塵灰之 TCLP 值	49
表 4.2.8.2 港區淤泥於 1100°C 燒製後之 M-TCLP 值	49
表 4.2.8.3 玻璃粉/港區淤泥於 1150°C 燒製後之 M-TCLP 值	49
表 4.2.8.4 爐渣/港區淤泥於 1100°C 燒製後之 M-TCLP 值	51
表 4.2.8.5 集塵灰/港區淤泥於 1050°C 燒製後之 M-TCLP 值	53
表 4.2.8.6 集塵灰/港區淤泥於 1100°C 燒製後之 M-TCLP 值	54

第一章

前言

1.1 研究緣起

近 30 年來，全世界的人口與生活水準逐年大幅成長，各國公共工程與各種營建業蓬勃發展比例逐年大大提升，台灣也搭上經濟成長列車，高樓大廈處處可見，雖在建築這塊藍圖有蓬勃發展，但資源卻漸漸在萎縮當中。近年來，為了解決資源缺乏之困境，已有學者指出利用廢棄淤泥來製成輕質骨材，以便解決有限天然資源的耗竭量。輕質骨材密度低，重量比一般常重骨材少三分之一至二分之一，可大量減少鋼筋的使用。此外，輕質骨材之內部空隙多，具低熱傳導性，有優異之隔熱、隔音及防火功能。興建外牆隔熱效果佳，室內外溫差可達攝氏二至三度，對於建築物落成後之空調用電量，具有節能意義及高度經濟效益。

浚港的航道和港池內常產生泥沙沉積的現象。世界上大小港口都有不同程度的淤積，其後果是減少水深、妨礙航行，淤積嚴重的港口甚至成為廢港，而疏浚維護費用亦常成為沉重的負擔，且廢棄淤泥也會造成環境上的問題。若能將浚港淤泥燒製成輕質骨材，有效的再利用廢棄淤泥，不僅可以減少淤積程度，並可達到資源再利用之目標。

國內主要廢玻璃來源有平板玻璃、容器玻璃、汽車玻璃照明燈管及映像管等等，且每年約有 45 萬公噸之廢玻璃進掩埋場【蘇氏，2000】，相當佔掩埋空間，然而據文獻指出添加玻璃粉燒製輕質骨材可有效降低骨材之顆粒密度、吸水率並可提升骨材之抗壓強度，這是因為玻璃在高溫時會有熔化現象而造成水份無法滲入骨材，而玻璃粉中含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 也可提升骨材強度，另有文獻指出鹼金屬可以有效降低燒結溫度【Ducman *et al*, 2002; Corinaldesi *et al*, 2005; Tsai, 2006; Nemes *et al*, 2006; 林氏，2003】，因此運用玻璃粉來當作輕骨材之調和劑可達廢棄物回收再利用。

此外，台灣煉鋼廠在製成過程中也會產生大量的廢棄物，大致包括廢水污泥、爐渣及集塵灰等三大項，台灣部分煉鋼廠之廢水污泥產生量每年幾千至幾萬

噸，環保署表示集塵灰年產量約為13~15萬公噸，而97年度爐渣業者年產量高達100多萬噸【環保署，2010】，因此若能把港區淤泥混合煉鋼廠的廢棄物來燒製輕質骨材，便能達到資源回收再利用的效果並且也能符合綠建材的概念。

1.2 研究目的

輕質骨材最早起源於40年前，是利用天然的礦物所製成，然而因天然礦物有限，專家們開始研究如何利用廢棄物來燒製輕質骨材。近年來，建築材料使用量日增，輕質骨材重要性因此提升，專家們研究結果顯示許多淤泥之組成份能有效替代礦物來製備輕質骨材，因此本研究使用港區淤泥為主材料並且添加各種不同廢棄物來當作調和劑，並依據Riley所提出之三成份圖理論，盼能將各種廢棄物混合，利用高溫燒製使各廢棄物安定無害化、資源化，並朝燒結發泡之機制與燒製後之物理化學特性做探討。

1.3 研究內容

本研究利用港區淤泥添加廢玻璃粉、爐渣和集塵灰燒製輕質骨材，希望藉由玻璃粉中之鈉降低燒結溫度，經燒製後並可降低吸水率；爐渣和集塵灰為有害環境之事業廢棄物，目前尚未於文獻中提及利用此等廢棄物來燒製輕質骨材，因此若能成功製備輕質骨材，不但能達到廢棄資源再利用的目的，也能大大提升經濟效益。實驗參數包括添加廢棄物種類及其添加量、燒結溫度等，基本分析包括淤泥及廢棄物之元素分析、粒徑分佈及TG/DTA，試體分析包括SEM觀察、XRD物種鑑定、顆粒密度、24小時吸水率、M-TCLP及XAS。預期本研究將可透過這些資料的建立、歸納、研判，進而了解控制燒結發泡的條件，進而改良其技術，以利國內相關輕骨材製造技術之提升。

第二章

文獻回顧

2.1 港區淤泥

港口是漁民經濟運輸來源之命脈，然而因活動力頻繁而造成港口地區環境髒亂。港口沉積物主要來源有三：一為河川排放口注入港池後帶入，二為大海外圍之漂沙帶入，其三為港區工程施工所造成。沉積物一直是運輸業之困擾，不僅造成港口水深減少且妨礙船行；近年來工業發展快速，一些不肖業者將含重金屬之廢水排入河川經匯入大海後含重金屬之淤泥沉積物經潮汐、海浪沖刷進港，因此如何解決港區沉積淤泥也是未來港務局將面臨之挑戰。【高雄港務局，2003；陳氏，2005】。

2.1.1 港區淤泥之基本性質

港區淤泥之基本物理及化學性質與水庫淤泥相似，其 d_{50} 粒徑為 $6.58\mu\text{m}$ ；其主要成分以 SiO_2 和 Al_2O_3 為主， SiO_2 比例為 60~65%， Al_2O_3 比例約為 13~15%， Fe_2O_3 則佔 5~6%，這些成分正符合 Riley 提出之三成份圖最佳燒製範圍【Riley, 1951；莊氏，2005】。

2.2 玻璃粉

廢棄玻璃的來源包括一些平板玻璃、容器玻璃、廢燈管、映像管及汽車照明燈管，理論上玻璃是百分之百可回收之材料，這些廢棄物需要被回收再利用以解決環境問題【Sobolev *et al.*, 2006】。依據台灣環保署的統計每年約有 45 萬噸之廢棄玻璃進掩埋場掩埋，因玻璃不易燃燒成灰燼，並且燃燒易損壞焚化爐體，且玻璃不易被微生物所分解，再加上台灣垃圾掩埋地已趨近飽和，故不適合掩埋處理【蘇氏，2000】。目前為止已有許多成功的案例利用回收之碎玻璃當作生原料並摻雜於混凝土當中運用於鋪路材料(如:停車場、公路兩側)【Chen *et al.*, 2002】，在建築工業上面也有人利用廢棄玻璃來製備骨材，如此並能減少廢棄物

掩埋量，並且降低天然材料的使用量【Rakshvir and Barai, 2006】。

2.3 爐渣

煉鋼鐵礦原料中之黏土雜質和石灰石助熔劑在高溫反應後產生之熔渣稱為煉鋼爐渣；然而爐渣之成份是由鋁、矽、鐵、鉻、硫、錳等元素與氧反應成氧化物所組成。據環保署統計97年台灣爐渣年產量已超過百萬噸，如能善加利用則可達成廢棄物資源化減量之目的。由於爐渣性質接近水泥，故可以混合摻入水泥當作其製造之原料，在土木研究方面也可將其使用於強度較低之混凝土，另有陶瓷公會試驗證實爐渣可作為陶瓷面磚之原料，然而目前世界各國則主要是將水泥運用於道路和水泥為主【鄭氏，2000】。

2.4 集塵灰

電弧爐煉鋼中因原料在高溫與氧反應，使得鋼液中之重金屬揮發且氧化成氧化物，在廢氣中降低溫度凝結成細粒稱作集塵灰【楊氏，2003】。集塵灰之成份主要以鐵和鋅為主，重金屬成分則以鉛、鉻為主，因此集塵灰則被認定為有害事業廢棄物，目前初估台灣集塵灰年產量約為 13~15 萬噸/年，然而台灣鋼聯每年僅能處理 5 萬噸，截於 98 年 9 月底國內已暫時累積達 49 萬公噸集塵灰【環保署，2010】，因此亟需開創新的回收再利用技術。然而據文獻指出國內電弧爐煉鋼集塵灰目前處理方式多以固化或熱處理為主，摻雜於瀝青中用於鋪路，另有文獻嘗試利用高溫燒製法將集塵灰轉變成製磚原料之一，其運用皆必須抑制重金屬之溶出，以確保對於環境之危害【楊氏，2003】。

2.5 輕質骨材

2.5.1 輕質骨材之概要

輕質骨材具質輕、抗震、隔音、隔熱、耐久性高及高強度等特性，因此世界各國在近年來紛紛以輕質骨材來當作營建之材料。約在40年前輕質骨材開始被歐美國家所使用，而美國是世界上最早生產人造輕質骨材的國家，於1917年美國S.J. Hayde 利用膨脹性黏土及頁岩為原料，在旋轉窯高溫下（約1,100℃）燒製人造

輕質骨材，因原料含有特殊成份，使其在高溫時內部開始分解產生氣體，並使試體膨脹，表面因燒結形成堅硬的玻璃層，為輕質骨材研究之開端【Riley, 1951】。1919~1927年第一次世界大戰期間，美國開始使用輕質骨材來營造船隻建造及高樓如聖路易斯和堪薩斯市。二次世界大戰前後，美國大力推動輕質混凝土(Lightweight Aggregate Concrete，簡寫LWAC)之使用，並開始廣泛研究。1950年代房屋構架、橋面版及預鑄構件等普遍使用輕質混凝土，芝加哥的42層高樓(Prudential Life Building)就是以LWAC建造的。歐洲國家則以用在建造道路橋樑居多，而蘇聯更應用輕質骨材建造了33座橋樑。隨後英國、挪威亦將輕質骨材應用在建築物及橋樑結構。第二次世界大戰後，德國利用城市廢墟碎磚製備輕質骨材並參雜於混凝土中來重新建築，此後因而大力發展人造輕質骨材之技術。而日本經濟雖能蓬勃發展，但因天然資源短缺，因此也致力於研究人造輕質骨材，並用於鐵路與道路橋樑建造，更嘗試將輕質骨材應用在建造鐵路高架橋。近年來因人口增加且佔地不足，建築物有往高度發展之趨勢，輕質骨材使用量因而逐年增加。

2.5.2 輕質骨材之種類

輕質骨材可分為天然和人造骨材兩大類。因火山爆發後噴出之岩漿經冷卻形成多孔結構材料稱之天然骨材，然而又依岩漿外噴過程的深度不同，形成不同差異之岩石材料，如浮石、泡沫火山岩等。然而天然輕質骨材礦物有限，人造輕質骨材因而成為發展之重點。人造骨材常用的燒製材料如膨脹頁岩、膨脹黏土、蛭石、珍珠石等，或者利用一些廢棄物如煤灰、焚化飛灰、底灰、等工業廢料為來源，近年來利用水庫污泥與下水污泥、淨水廠淤泥等所燒製成之骨材皆可歸納為人造輕質骨材。然而其機制複雜，因此燒結發泡等骨材特性不易掌控，因而需更進一步深入研究探討【Holm and Valsangkar, 1993; Tay and Show, 1997; 余氏，2000; 陳氏，2006】。

2.5.3 輕質骨材之造粒方法

龔氏根據所原料種類和物理力學性能不同，將原料加工和造粒技術分為乾法、塑化法、粉磨成球法和泥漿成球法等，其生產程序、優缺點如下：

1. 乾燥法→將烘乾後之原料破碎到所需之粒徑，利用高溫燒結法燒製成輕質骨材，其優點為簡單、省成本且節能，缺點是不能額外添加調和劑且只適用於硬材料。
2. 塑化法→生原料經均勻攪拌、加壓造粒後利用高溫燒結法燒製成輕質骨材，其優點為可添加調和劑並適用於較鬆軟且含水率大之黏土生材料，缺點為要去除堅硬物質。
3. 粉末滾動法→將生材料烘乾、破碎、研磨後，滾動造粒成球狀並利用高溫燒結法燒製成輕質骨，其優點為混合均勻可生產出球形之優良骨材，缺點則是成本高。
4. 泥漿法→生原料於泥漿池中均勻攪拌成一定濃度之料漿後直接注入迴轉窯內燒製成球狀骨材，優點為攪拌均勻且可於泥漿池內進行成份調質，優點則是浪費能源。

2.5.4 輕質骨材之成型壓力

王氏等人利用下水污泥灰燒製輕質骨材，藉由觀察試體在不同溫度下燒製之微結構變化，研判污泥灰燒成輕質骨材之機制。結果顯示，當成型壓力越大時，顆粒與顆粒間因應力擠壓使得顆粒間緻密度提升、接觸面積變大，經高溫燒結後後頸部成長快，試體內部產生之黏滯流越易包覆住氣體，同時試體內部因氣體向外逸散形成孔洞，使得試體膨脹而輕質化。經SEM觀察試體之微結構變化，發現當成型壓力越大，試體內部孔洞因完全連結而造成光滑之球化程度越好，反觀成型壓力越低之試體內部，仍存在尚未完全連結之孔洞【王氏等人，2003】。

2.5.5 輕質骨材之實際應用

輕質骨材在實用上依性質、強度單位重及應用可分為三類如下表：【李氏，1996】

性質	使用之原料	單位重(kg/m ³)	強度應用
結構性之輕質骨材 混凝土	膨脹黏土、頁岩、板岩、爐 石及冷凝飛灰	1400~2000	高強度，用來承受載 重之結構
結構兼隔熱性之輕 質骨材混凝土	膨脹頁岩、板岩、 冷凝飛 灰	800~1400	中強度，如空心磚和 實心磚
隔熱性之輕質骨材 混凝土	蛭石、珍珠岩	300~800	低強度，如隔熱板、隔 熱強等隔熱材料

2.5.6 輕質骨材之特性

輕質骨材應具有以下幾種特質【周氏，2005】：

- 一、高強度且低密度。
- 二、多孔性。
- 三、高隔熱、高隔音。
- 四、低吸水性可與混凝土有較高之磨合度。

2.5.7 輕質骨材之成形機制

粒子之成型機制可概分三個階段：

1. 粒子間之滑動(packaging)。
2. 粒子變形(plastic deformation)。
3. 粒子破裂(brittle fracture)。

最初效應為粒子間之滑動，當施力加壓於粒子後，粒子間應力增加，使得粒子與粒子間因擠壓而重新排列，在擠壓過程中因粒子間之空隙減少，造成粒子形變破碎，因而使粒子間之更加緊密，緻密度提升。據Bhatty之研究成果顯示，經加壓成型後之生原料試體因具高緻密性，在燒製過程中易包覆住氣體，使得氣體不易逸散，試體因膨脹而降低顆粒密度，且加壓成型後之生原料經燒製後因均勻燒結所產生之黏滯玻璃層可提高試體抗壓強度，這是因其內部孔洞大小分布較一致，

造成其發泡均勻所致【Bhatty and Redit, 1989；張氏，1999】。

2.5.8 輕質骨材之燒結機制

所謂燒結反應是指在低於物質的熔點下之加熱過程，使得試體內部之顆粒微結構重新排列，達到高強度、高密度之燒結體，並且提升其緻密度【張氏，1999】。燒結反應若依物質或原子於燒結過程中移動方式的不同可再區分為固態燒結、黏滯流燒結及液態燒結【Hupa, 1989；余氏，2000】。

1. 固態燒結(solid-state sintering)：利用表面擴散(surface diffusion)、晶格擴散(lattice diffusion)、粒界擴散(boundary diffusion)或固態物質與周圍氣氛之反應(如昇華-再凝結)之質量傳輸者。
2. 黏滯流燒結(sintering by viscous flow)：燒結是由非結晶(non-crytalline)物質流動所造成的，在矽酸鹽環境下黏滯流燒結為主要之燒結機制【Skrifvars, 1994】。黏滯流燒結會形成密閉孔隙，其原因為液相表面成晶格邊界的擴散而產生收縮【Nowok, 1990】。
3. 液態燒結(liquid phase sintering)：利用熔解及固體再沈澱方式增加顆粒大小及密度。

German 在其著作中建立了燒結機制之模型，其理論將兩粒子間之燒結過程分成四個步驟：

- 一、最初點接觸反應
- 二、初期頸部成長
- 三、後期頸部成長
- 四、最終全融合反應

German認為粒子與粒子間會因高溫燒結過程中發生點接觸反應，當粒子間因高溫而融合初期會伴隨頸部成長效應，形成一新粒子界線稱作粒界（grain boundary），並在高溫燒結下持續反應，最終使兩個粒子融合成單一大粒子，然而此燒結反應是連續不斷的【German, 1996】。

2.5.9 輕質骨材之發泡機制

發泡輕質骨材須具兩項基本條件：一為黏滯現象，當原料因高溫加熱而分且揮發出氣體時，試體內部必須發生熔融現象而產生具黏性之黏滯流以利捕捉住試體內部釋放出之氣體，使氣體無法逸散而形成發泡現象【Riley, 1951；葉氏，2005】。其二是原料中必需含有可分解之氣體(如水氣、二氧化硫、二氧化碳和氧氣)，在高溫燒製過程中到達分解點因氣化而揮發出；例如在400 °C 時硫化物會揮發並分解出SO₂；黏土中之結晶水分解，約為600 °C 時之反應；在700 °C 時，含碳之化合物燃燒產生CO₂；在1100 °C 時因氧化鐵分解會釋放氧氣【Tsai *et al.*, 2006】。Qi等人燒製發泡陶瓷是利用CO、CO₂和O₂等氣體來發泡，其中Fe₂O₃在1000–1100 °C 時會分解出O₂【Qi *et al.*, 2010】，然而一些特殊成份如、硫酸苯丙胺、碳酸鹽類、氧化物、氫氧化碳及有機廢棄物等也會在高溫分解下釋出氣體【Bhatty and Redit, 1989】，對於發泡有良好效果。人造輕質骨材目前主要之原料來源包括黏土、頁岩與板岩和一些經處理後產生的燃煤飛灰等膨脹性物質，利用數種膨脹性及非膨脹性黏土以不同比例混合後進行燒製試驗，發現適當之混合比例，可造就較佳的膨脹性，可用來對非膨脹性黏土進行改質【Hupa *et al.*, 1989】。

表2.1 各化學成份逸出氣體之種類及溫度【Marck, 2001】

反應方程式	反應溫度 (°C)
$\text{FeS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{SO}_2 \uparrow$	350 ~ 450
$4\text{FeS} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2 \uparrow$	500 ~ 800
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{SO}_3 \uparrow$	560 ~ 775
$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 \uparrow$	400 ~ 900
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$	>400
$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$	600 ~ 1050
$\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3 \uparrow$	1250 ~ 1300
$\text{FeCO}_3 + 3\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{CO}_2 \uparrow$	>800
$6\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 \uparrow$	1000 ~ 1550

2.6 國內外輕質骨材之相關研究

林氏將石門水庫淤泥水洗焚化灰燒製輕質骨材，結果顯示，當燒製溫度為 1050°C 時，顆粒密度為 1.8~2.5 g/cm³，並無輕質化現象；當溫度提升至 1100°C 時，試體已有膨脹現象發生，且添加 5~15% 之飛灰能幫助降低顆粒密度 1.5~2.0 g/cm³；然而燒製溫度為 1150°C 時，試體明顯膨脹，顆粒密度為 0.8~1.2 g/cm³，然而當飛灰添加到 25% 以上時，顆粒密度不降反升為 1.3~1.7 g/cm³；當添加 30% 飛灰於 1150°C 燒製輕質骨材時，吸水率約為 1~2%【林氏，2006】。

陳氏利用煤灰燒製發泡輕質骨材，研究出適當的碳/碳鐵含量比值對於煤灰發泡成輕骨材有緊密的相關性。當原料中碳及碳鐵比 (C/Fe) 含量過高時，會提高原料之熔點和黏度，使得氣體雖能充分逸出，但因黏度過高氣體無法造成膨脹現象，發泡因此不完全。然而當 (C/Fe) 含量過低時，試體內部則無充分氣體產生，使得黏滯流包覆住之氣體有限，因而無法膨脹，其最適當的 (C/Fe) 比為 0.5 左右【陳氏，2005】。

楊氏利用自配材料模擬水庫淤泥燒製輕質骨材，結果指出當燒製溫度為 900°C 時因溫度過低並無發泡現象，而當燒製溫度提升至 1100~1150°C 後，於 SEM 可觀察出內部發泡反應而形成之孔洞，其顆粒密度為 0.98~1.37 g/cm³，試體吸水率為 2.49~6.77 %【楊氏，2007】。

莊氏利用水庫淤泥及浚港淤泥並模擬工業廢水添加 NaOH，並額外添加 CaCO₃，發現當 NaOH 量添加至 15% 時，經高溫 950~1100°C 燒製，最低顆粒密度達 0.46 g/cm³，吸水率最低為 1.1%，然而當 CaCO₃ 添加超過 5% 發泡得到反效果，其原因為其共熔溫度太高，導致熔融效果不佳，而無法有效包覆產出之氣體，使

得發泡效果不佳【莊氏，2008】。

Ducman 等人利用 DTA/TGA 觀察膨脹劑之分解，並以 hot-stage microscope 進行觀察來挑選適合發泡之膨脹劑，究結果顯示，該膨脹劑在 600°C 及 700°C 有氣體逸出，因此將挑選之膨脹劑加入廢玻璃粉中，並放入 880°C 之旋轉窯進行加熱燒製，可得到顆粒密度 0.15 g/m³ 及吸水率為 11 % 之骨材，其孔洞直徑大小約為 0.1~1 mm【Ducman *et al.*, 2002】。

Neme 等人利用廢棄玻璃粉添加黏土，經旋轉造粒方式將生材料造粒成不同大小的顆粒狀，經溫度 750~950°C 燒製成骨材，並將骨材用於混凝土中養護 28 天，尋求最佳的骨材與混凝土比例與其抗壓強度之關係【Nemes, 2006】。

Mun 利用黏土混合各比例之廢水污泥經旋轉造粒後置入旋轉爐，燒製溫度為 1050~1150°C，當黏土與廢水污泥混合比例為 10:50 時有最低之顆粒密度和吸水率，比起商業販賣之骨材好【Mun, 2007】。

Huang 等人利用大理石、礦渣、電子廠重金屬污泥及焚化廠飛灰燒製輕質骨材，結果顯示燒製後之試體其單位重為 0.5 ~ 1.6 g/cm³，符合輕質隔間之基本規範。當燒製溫度達 1150°C 以上時，其重金屬皆符合 TCLP 溶出標準【Huang *et al.*, 2007】。

Ducman 等人利用黏土、矽污泥、含錳廢玻璃、碳化矽、長石與曠渣等原料依不同配比混合並於 1150°C~1220°C 燒製輕質骨材，SiC 和 MnO₂ 被用來當做發泡劑，長石和廢玻璃則是為了降低原料之軟化點，結果顯示，當溫度燒製到 1220°C 時有最低的顆粒密度 0.42g/cm³【Ducman *et al.*, 2009】。

Wei等人利用水庫淤泥於高溫1050°C 和1150°C 燒製輕質骨材，其顆粒密度分別為 2.08 g cm^{-3} 和 1.18 g cm^{-3} 。然而利用X光吸收光譜技術分析得知Fe化合物在淤泥中之存在型態，在水庫淤泥中，59 %是以鐵化合物中之 Fe^{2+} 形式存在；然而在1150°C 燒製後之骨材內核，大多被氧化成 Fe^{3+} 的形式，其內核之發泡反應是因 FeSO_4 分解成 FeO 且分解過程中釋放出 SO_2 、 SO_3 和 O_2 氣體與一般發泡現象是由 Fe_2O_3 還原成 FeO ，釋放 O_2 有些出入【Wei *et al.*, 2009】。

2.7 國內外煉鋼集塵灰與爐渣之資源用研究

ACZaid等人探討利用電弧爐集塵灰以0~3%取代水泥製備混凝土，比較新拌與硬固後之混凝土並進行工程特性(抗壓、劈裂、磨損)等試驗。研究結果顯示：(1)混凝土中添加越多的集塵灰需要越久的靜置時間(2)添加電弧爐集塵灰養護後之混凝土進行工程特性(抗壓、劈裂、磨損)等試驗後，沒有嚴重的負面影響，且具有發展之潛力【Al-Zaid *et al.*, 1997】。

LuxaÂn等人利用電弧爐爐渣進行特性分析，包含化學、礦物學、微結構分析、物理特性等。研究結果顯示其電弧爐爐渣化學組成大多以鐵、鈣、矽、錳、鋁和鎂為主。礦物學的化合物有無水的矽酸鈣、矽鋁酸鹽、鈣鋁黃長石、斜硅鈣石、白矽鈣石、鎂鐵礦、氧化鎂、氧化錳。爐渣中含有無水矽酸鈣，特別是斜硅鈣石，可能會降低水泥的的活動力。爐渣透過化學和礦物學的分析結果來看，其含有氧化鈣、氧化鎂，硫化物，硫酸鹽類等，且骨材的測試結果證實用於建築材料沒有不利的影響【LuxaÂn *et al.*, 2000】。

Manso等人利用電壺爐爐渣取代骨材來製備混凝土，研究結果指出取代骨材於混凝土之電壺爐爐渣需經烘乾靜置、混合均勻及破碎，且爐渣添加量需有適當

的混合比例才可以取代骨材，在溶出測試方面以針對Sulfates、Fluorides及總鉻作測試結果皆能符合EN 12457之規範【Manso *et al.*, 2004】。

Manso等人使用電孤爐爐渣當作骨材製備混凝土，分別以不同的水膠比(W/B)及添加不同量之爐渣之混凝土、耐久性質、環境相容性(溶出測試)等相關試驗研究，結果顯示，雖然明顯的略低於傳統混凝土，但添加爐渣之混凝土耐久特性是可接受的。其具有高抗壓強度和低透水之特性，但添加爐渣混凝土高孔隙率是導致低溫測試時較難以去冷凍的主因，未來可考慮適當添加劑來改善之問題。樣品其環境相容性(溶出測試)之結果皆符合溶出規範之標準【Manso *et al.*, 2006】。

Pellegrino等人調查研究利用電孤爐爐渣取代部分傳統骨材製備混凝土，研究結果顯示，電孤爐爐渣即使添加高比例與中等顆粒大小(2-4 mm size)，仍然適合取代添加部份傳統骨材，然而為了製備在長期和短期的水合作用和化學/物理穩定度的混凝土，仍需考慮到混凝土之存放與靜置養護地點及曝露在空氣中溼氣。此外，添加電孤爐爐渣之混凝土在一般環境條件下比傳統混凝土顯示有較好強度特性鑑定【Pellegrino *et al.*, 2009】。

吳氏將氧化渣回收後，經試驗證明無毒不具有腐蝕性，視為一般事業廢棄物，進行資源化再利用，氧化渣是一種人工礦石，經加工後可作為工程骨材配料使用，取代天然材料。吳氏以ICP、EDS 分析證實不銹鋼氧化渣主要是由CaO-SiO₂-Cr₂O₃三成份組成，與卜特蘭水泥之成份相似，可作為水泥之摻料【吳氏，2003】。

楊氏利用電孤爐煉鋼集塵灰取代部分黏土當作製磚副原料，電孤爐煉鋼集塵灰分別以0-40%之不同添加比例與製磚之黏土混合燒結製磚後，結果顯示，單軸抗壓方面，添加15-40 Wt %，燒製後電孤爐煉鋼集塵灰之環保磚皆可達CNS382

建築用一等磚標準(大於150kgf/cm²)；置於吸水率方面，添加20Wt%(含)以下電弧爐煉鋼集塵灰之環保磚其吸水率符合CNS382 建築用二等磚標準(小於19%)，且其TCLP溶出毒性亦符合法定管制標準【楊氏，2003】。

江氏以電弧爐煉鋼還原渣取代部分水泥作為混凝土膠結料與廢鑄砂取代混凝土的細骨材，進行不同的水膠比(W/B)及添加不同量還原渣之混凝土新拌，硬固、耐久性質等相關試驗研究，結果顯示還原渣添加在混凝土可提昇流動性，抗壓強度在齡期兩年略優於混凝土，但稍低於高爐石混凝土。而廢鑄砂應用於細骨材會降低混凝土流動性與長期抗壓強度，並且增加孔隙的滲透性，不利於高性能混凝土需求性能【江氏，2005】。

國內電弧爐煉鋼集塵灰目前處理方式多以固化或熱處理為主。黃氏以XRD分析結果可知集塵灰主要成分為Fe₃O₄、ZnO、PbO 與PbCl₂。結果顯示先經1.0 M H₂SO₄處理，可達到去除集塵灰中有害Cd 之成效，其後再以1.0、2.0 M NaOH 處理，可達到去除集塵灰中有害Pb之較佳成效【黃氏，2007】。

第三章

研究設備與方法

3.1 實驗材料與設備

3.1.1 實驗材料

1. 港區淤泥 (harbor sediment)

本研究所採用之港區淤泥取自台灣地區台中港區之淤泥。港區淤泥採集完成經分類、挑選、烘乾、破碎及過篩 50 mesh 程序後，置於 PE 整理箱中備用。

2. 玻璃粉 (glass powder)

本研究採用之玻璃粉為春池玻璃實業有限公司所提供。玻璃粉採集完成經分類、挑選、烘乾、破碎及過篩 200mesh 程序後，置於 PE 整理箱中備用。

3. 爐渣 (electric arc furnace slags, EAFS)

本研究所採用之爐渣為豐興鋼鐵股份有限公司所提供。爐渣採集後經分類、挑選、烘乾、破碎及過篩 50 mesh 程序後，置於 PE 整理箱中備用。

4. 集塵灰 (electric arc furnace dust, EAFD)

本研究所採用之集塵灰為台灣鋼鐵股份有限公司所提供。爐渣採集後經分類、挑選、烘乾、破碎及過篩 50 mesh 程序後，置於 PE 整理箱中備用。

3.1.2 實驗設備

1. 天平 (Balance): (1) 可精秤至 10^{-4} 克, LIBROR AEX-200B,

SHIMADZU Corp., Japan。

(2) 可精秤至 10^{-2} 克, GF-3000, A&D Company,

Limited, Japan。

2. 恆溫烘箱 (Hot air rapid drying oven) : RHD-120L, max. temperature 200°C, RISEN, USA。
3. 高溫灰化爐: 程式控制器 N4440, WEST Co., UK; max. temperature 1,450°C, 中聯高熱工業有限公司, Taipei, Taiwan。
4. 微波消化器: 微波消化器 (Microwave oven) : MWS-2, Berghof Laborprodukte GmbH, Germany。
5. pH 測定儀 (pH meter) : pH/mV/temp.meter SP-701, SUNTEX, Taipei, Taiwan。
6. 旋轉裝置 (Mixing devices, 30±2 rpm) : TYPE 34R4BFCI-5R, Associated Design, Gearmotor, Chicago, USA。
7. 油壓打片機: Max. shape pressure 25 ton, Pan-Chum Scientific Corp, Taiwan。
8. 毒性特性溶出設備: TYPE 34R4BFCI-5R, Gearmbtor, Associated Design and Mfg Co, Virginia, USA。
9. 濾紙: (1) Ashless Circles #41, 90 mm φ , Whatman Co., England。

3.1.3 分析儀器

1. 感應耦合電漿原子發射光譜儀 (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, ICP-AES) : Optima 3000DV, Perkin Elmer, USA。
2. 火焰式原子吸收光譜儀 (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer, FAAS) : Z-6100, Hitachi, Japan。
3. 環境掃描式電子顯微鏡 (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM) : FEI Quanta 400 F, USA。
4. 多功能 X 光粉末繞射機 (Multipurpose X-ray Powder Diffractometer, XRD) : D8 Advance, Bruker AXS, UK。
5. 熱重-卡量計雙重分析儀 (Thermogravimetry and Differential Thermal

Analysis, TG/DTA) : Prys Diamond TG/DTA, PerkinElmer, USA.

6. 雷射繞射粒徑分析儀 (Laser Diffraction Particle Analyzer) : LS230, Beckman Coulter, Germany.
7. 離子層析儀 (Ion Chromatography, IC) : DX-100, Dionex, USA。

3.2 實驗流程

本研究主要分成三個流程：第一流程依不同比例 0/100~50/100 之爐渣/港區淤泥(玻璃粉/港區淤泥=50/100 表示添加 50g 之玻璃粉於 100g 之港區淤泥內)在 6760 psi 下，不同溫度的燒結發泡情形，盼能降低吸水率；第二流程是依不同比例 0/100~50/100 之爐渣/港區淤泥，經高溫燒製研判是否有燒結發泡之可行性；第三流程依不同比例 0/100~50/100 之集塵灰/港區淤泥，希望能降低發泡溫度，依高溫處理廢棄物的方式燒製成輕質骨材。

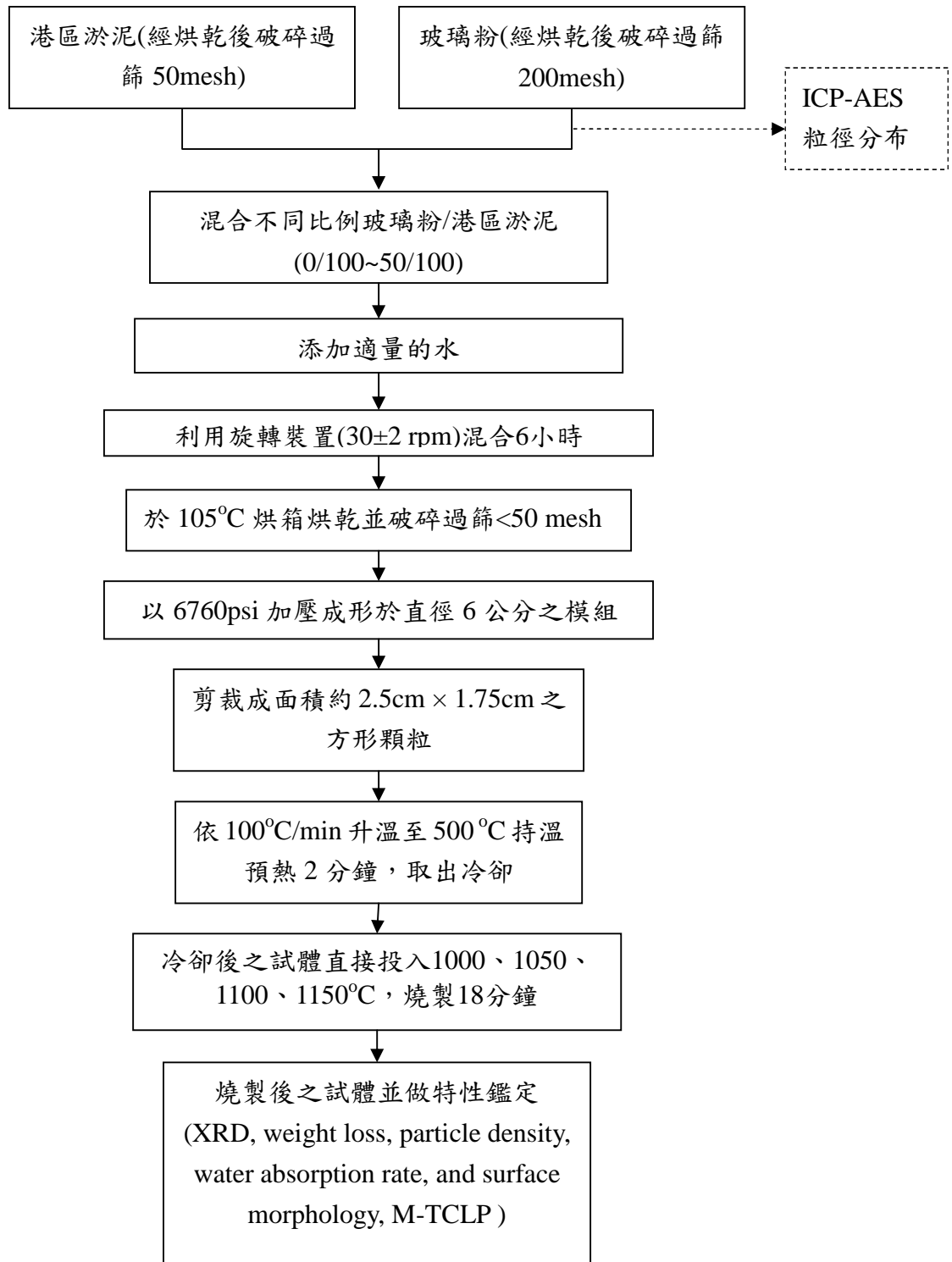


圖 3.2.1 港區淤泥添加玻璃粉燒製實驗流程圖

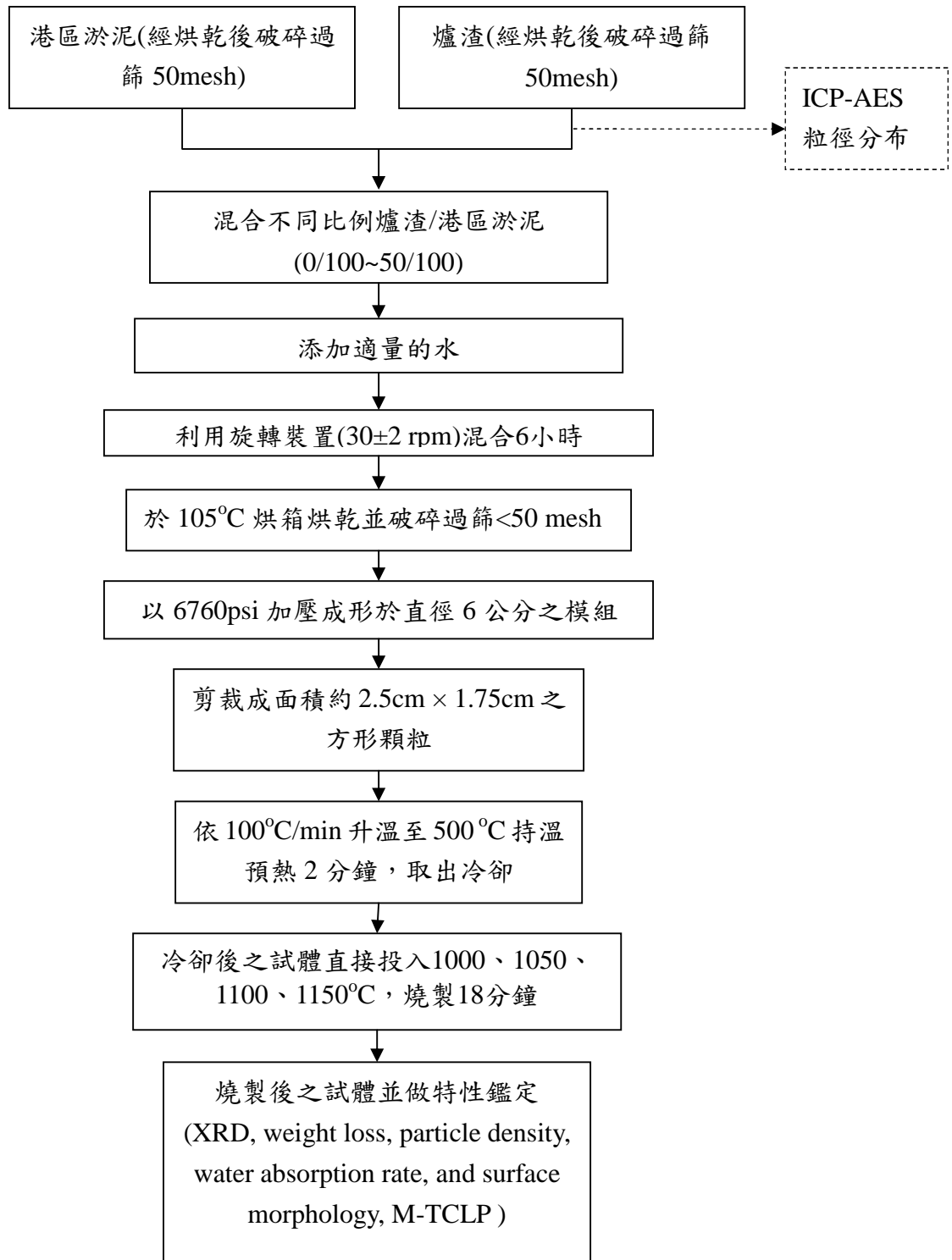


圖 3.2.2 港區淤泥添加爐渣後燒製實驗流程圖

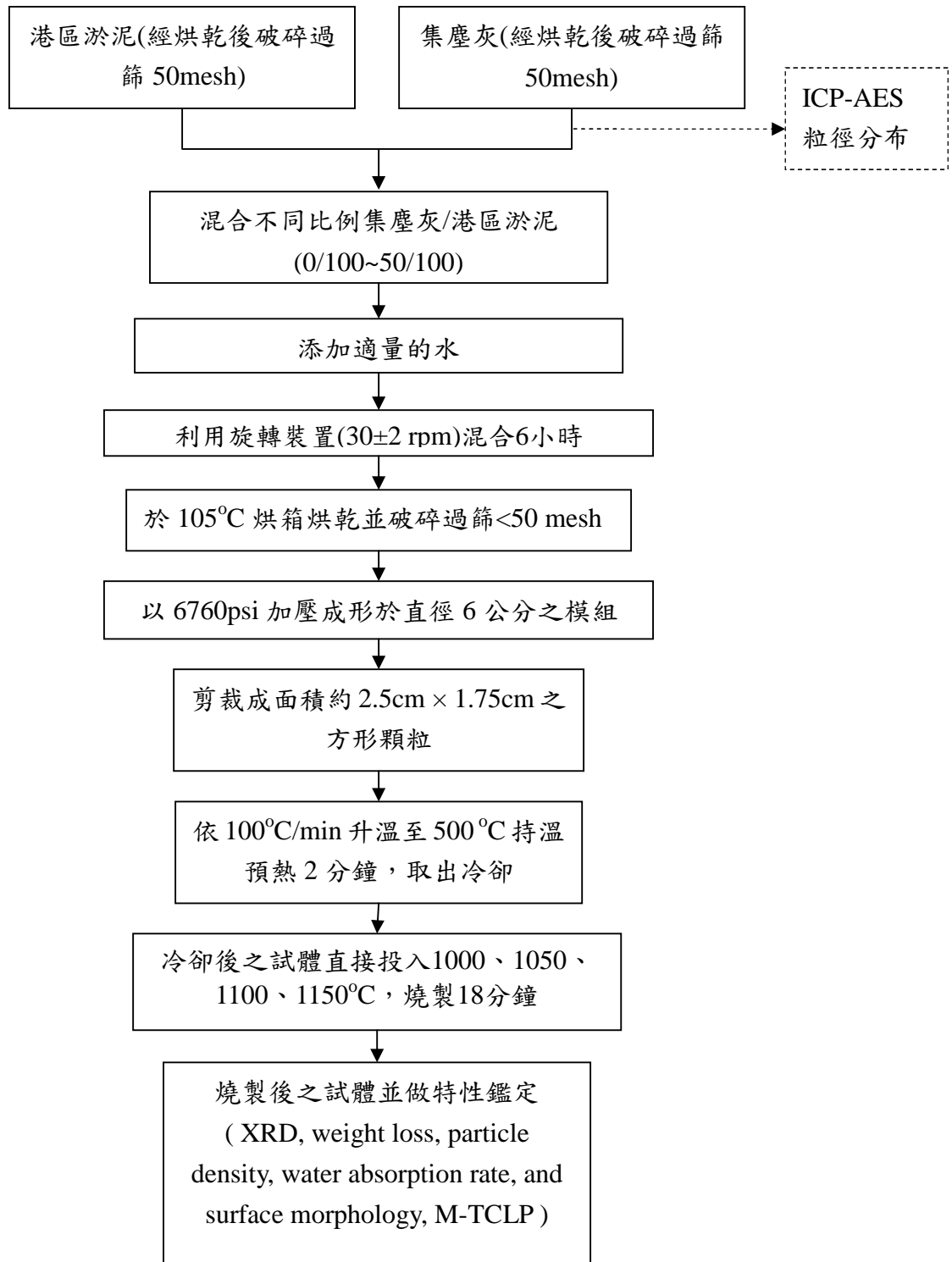


圖 3.2.3 港區淤泥添加集塵灰後燒製實驗流程圖

3.3 實驗分析方法

1. 感應耦合電漿原子發射光譜儀及質譜儀 (ICP-AES)

ICP-AES 的原理為消化後的樣品溶液由氬氣帶入三個同心圓管的石英管，經 Tesla coil 將 Ar 激發為 Ar^{\oplus} 和 e^{\ominus} 。在冷水管的 induction coil 經 27 MHz 交流電 (radio frequency generator) 的振動，產生一個磁場。由於 $[\text{Ar}^{\oplus} + e^{\ominus} + \text{磁場}]$ 可得到高溫 (約 6000—8000°C) 的熱氣團物質 (電漿)，當化合物被分解為元素態後，此電漿可將週期表上約 90% 的元素由基態 (ground state) 激發到激態 (excited state)，當各元素由激態回到基態時，可發射出不同的能量和波長，藉由 emission 的強度可作為定量之用，而不同的發射波長可作為定性 (或鑑別) 之用。

2. 多功能 X 光粉末繞射機 (XRD)

X光射線繞射法由 von Laun 在 1912 年發現，其原理為將 X 光以角度 θ 撞擊樣品內部，由物種內部 K 層電子所反射之 2θ 角度所形成之特定波長，因不同的物種的晶格特性相異，因此可藉由反射回來之特定波長 λ ，依據 Bragg 方程式： $2d \sin\theta = n\lambda$ ，可求得晶格的層間距離 d ，因每種物種之晶體層間距離相異，因此可依此鑑定物種。此外利用繞射線波形及繞射線強度 (Bragg intensity) 可決定晶粒大小、晶格扭曲或晶格應力。掃瞄後所得之繞射圖譜，比對粉末繞射標準聯合委員會 (The Joint Committee on Powder Diffraction Standards, JCPDS) 資料庫之圖譜，依強度及繞射角度 (2θ) 比對判定晶相物種，而本實驗所掃描角度為 $2\theta = 20 \sim 80^\circ$ 。

3. 熱重-卡量計雙重分析儀 (TG/DTA)

本儀器可用於量測試樣於不同溫度所產生之重量變化及吸/放熱值現象。樣品在升溫時發生變化 (包括玻璃轉化、結晶、熔化、氧化與分解等反應)，而伴隨著吸熱或放熱現象，藉由測定樣品與參考樣品在不同溫度時之熱量差異，繪製成溫度與熱流量關係圖，並藉此來判定樣品在加熱過程中發生的反應種類。本研究設定之分析條件為樣品重量 9 mg，空氣流量 100 ml/min，升溫速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ，

最高溫度為 1200°C。

4. 環境掃描式電子顯微鏡 (ESEM)

本研究採用了環境掃描式電子顯微鏡(E-SEM)觀察是體內部之為結構變化，並可藉由內部的孔洞變化來推測解釋燒製過程對於試體物理性質之相關性。本實驗所使用之環境掃描式電子顯微鏡為Quanta 400F, FEI, USA (Scannig Electron Microscope, SEM)，SEM 是利用高能量的電子聚集光束掃描樣品表面，利用正偏訊號收集器將二次電子產生的低能量轉換成陰極管可辨識之訊號，進行SEM 影像之觀察；然而在進行影像觀察前須先將樣品表面鍍金，使樣品之導電性增加，隨後即可觀測樣品結構與與水化產物之生成，以提供佐證巨觀試驗之結果及瞭解微觀結構之組織。

5. 重量損失 (Weight loss)

500°C 前處理後之試體置入高溫爐，在 1050、1100、1150 °C 加熱時間 20 分鐘，燒製成輕質骨材，加熱後之重量差值即定義為重量損失。其計算公式如下：

$$\text{重量損失(\%)} = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100 \%$$

W_1 ：加熱前試體重量 (g)

W_2 ：加熱後試體重量 (g)

6. 燒失重 (Loss of ignition, LOI)

將水庫淤泥置入 900°C 之高溫爐，三小時，加熱後之重量損失即定義為燒失重。其計算公式如下：

$$\text{燒失重(\%)} = [(W_0 - W_d) / W_0] \times 100 \%$$

W_0 ：加熱前淤泥重量 (g)

W_d ：加熱後淤泥重量 (g)

7. 吸水率測量方法 (Water absorption)

不同溫度下燒製之骨材之吸水率變化，係依據中國國家標準【CNS-487 細

粒料比重及吸水率試驗法】進行測試。將試體浸入 23°C 水中 24 小時，取出後，將試體表面水拭乾後，測其重量，可得試體面乾水飽和試體之重量。吸水率計算公式如下：

$$\text{吸水率(\%)} = [(W_s - W_d) / W_d] \times 100 \%$$

W_d ：乾燥試體重量 (g)

W_s ：面乾水飽和試體重量 (g)

8. 顆粒密度測量方法 (Particle density)

以阿基米得 (Archimedes) 原理之排水體積法為原理，求得試體體積後，再與試體重量相除，即可得試體密度，密度計算公式如下：

$$\text{試體體積 } V_s (\text{cm}^3) = V_w - (W_b - W_a) / \rho_w$$

$$\text{試體密度 } \rho_s (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = W_s / V_s$$

V_s ：試體體積 (cm^3) ； ρ_s ：試體密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

W_s ：乾燥試體重量 (g)

W_a ：量筒+燒結試體重量 (g)

W_b ：量筒+燒結試體重量+定量至刻度 100 ml 之水重 (g)

V_w ：定量至刻度之水體積 (cm^3)

ρ_w ：當時氣溫下水之密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

9. 多次萃取之毒性溶出試驗程序

(Multiple Toxicity Characteristic Leaching Procedure, M-TCLP)

依美國環保署方法 1320 之多次萃取之毒性溶出試驗(M-TCLP)測試 Cu、Cr、Zn、Se、Cd、Pb、As 和 Hg 之溶出值。步驟如下：首先決定萃取液之種類，取 5g sample 加入 96.5 ml 去離子水，攪拌五分鐘後測 pH 值，若 pH 值 < 5，則使用萃取液 A。若 pH 值 > 5，則再加入 3.5 ml 1.0 N HCl，在 50 °C 加熱 10 分鐘，冷卻至室溫，測 pH 值，若 pH 值 < 5，則使用萃取液 A；若 pH 值仍 > 5，則使用萃取液 B。萃取液 A 為 CH₃COOH / NaOH 混合液，其 pH 值為 4.93 ± 0.05；而萃

取液 B 則為 CH_3COOH 之水溶液，其 pH 值為 2.88 ± 0.05 。量取 20 倍樣品重之萃取液，針對粉碎至 1mm 以下之試體(5 g)進行 18 小時之萃取 (30 rev/min)，溶出液經高壓濾出後，沉澱物重複上述步驟 7~9 次，高壓過濾出濾液，並使用 ICP-IES 分析溶出液之重金屬濃度。

10. 火焰式原子吸收光譜儀 (FAAS)

樣品經消化、過濾和定量的水溶液藉由伯努力原理，自毛細管被吸入，撞擊霧化器 (nebulizer) 後被分散成噴霧的小水滴，然後與燃料 (乙炔)、氧化劑混合 (空氣)，經由火燄燃燒，使樣品之成份原子化，以中空陰極燈管為光源，當原子蒸氣 (atomic vapor) 吸收該元素特定波長的光，依畢耳定律 (Beer's Law) 此吸光度值與溶液中分析物之濃度成正比。

第四章

結果與討論

4.1 廢棄物材料之基本成分分析

本研究所使用之廢棄物材料為:港區淤泥、玻璃粉、集塵灰(electric arc furnace dust, EAFD)及爐渣(electric arc furnace slags, EAFS)，經文獻整理得知不同的燒製溫度、燒製時間、粒徑大小、化學組成、成型壓力等因子來製備出之輕質骨材將會影響其物理性質【Riley, 1951；王氏, 2004；周氏, 2005；楊氏, 2008；莊氏, 2009】，水庫及浚港淤泥均可成功燒製輕質骨材【Wei *et al.*, 2008；Wei *et al.*, 2009】。本研究之廢棄物採集後經烘乾、破碎、過篩(港區淤泥、集塵灰和爐渣 $< 50\text{mesh}$ ，玻璃粉則 $< 200\text{mesh}$)，進行一系列特性分析(粒徑分析、XRD、ICP-AES)，在燒製成輕質骨材後，則進行下列分析:SEM、XRD、M-TCLP、XAS、重量損失、顆粒密度、吸水率，以探討燒結及發泡之機制。

4.1.1 物理性質

廢棄物材料(港區淤泥、玻璃粉、集塵灰及爐渣)採集後，經分類、挑選、烘乾、破碎、過篩後，粒徑分佈如圖 4.1.1 所示，港區淤泥和集塵灰 d_{50} 平均粒徑分別為 $6.58\ \mu\text{m}$ 及 $3.45\ \mu\text{m}$ ，依土壤粒徑分類指標，港區淤泥和集塵灰主要為粉粒($2\sim 53\ \mu\text{m}$)和粘土(小於 $2\ \mu\text{m}$)；玻璃粉及爐渣則因顆粒較硬較難破碎，經破碎後 d_{50} 平均粒徑分別小於 $28.50\ \mu\text{m}$ 及 $24.94\ \mu\text{m}$ ；集塵灰之平均粒徑比港區淤泥來的更小，其高比例之細粒將有助於燒結反應發生【Riley, 1951；Wei *et al.*, 2008】。

4.1.2 化學特性

Riley提出三成份圖說明化學組成對於輕質骨材生成的影響。三成份圖是由 SiO_2 、 Al_2O_3 及助熔劑Flux (FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO)所組成，當 SiO_2 比例為52~78%， Al_2O_3 比例10~25%，Flux的比例8~28%為輕質骨材燒製最佳成份範圍(圖4.1.2.1虛線的範圍內)【Riley, 1951】。2010年Chen等人也提及當化學組成位

於Riley三成份圖虛線範圍外，骨材的發泡明顯不良，化學組成需經過氧化物調質後才能位於最佳燒製範圍內【Chen *et al.*, 2010】。另有一些文獻也依Riley之三成份圖，尋求最佳的燒結，結果指出配置於三成份圖內之材料燒結發泡效果較佳【Gennaro *et al.*, 2004；Tsai *et al.*, 2006；Fakhfakh *et al.*, 2007；Gennaro *et al.*, 2007】。本研究以港區淤泥添加廢棄物(玻璃粉、爐渣和集塵灰)燒製成輕質骨材，各配比見圖4.1.2.2、4.1.2.3及4.1.2.4。圖4.1.2.2顯示無論有無添加玻璃粉，皆落於最佳燒製範圍內；圖4.1.2.3及4.1.2.4為港區淤泥添加爐渣和集塵灰之三成份圖，由圖中可發現當爐渣(集塵灰)/港區淤泥比為30/100、40/100和50/100時，配比位於適合燒製範圍外。各材料之化學組成如表4.1.2所示，港區淤泥和玻璃粉Flux ($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{MgO}$)分別為11.23和15.49，爐渣和集塵灰則為49.37和59.57，然而在燒結過程中Flux扮演著降低燒結溫度之角色。另有學者提出 SiO_2/Flux 之比例可用來決定在高溫燒製時原料內部產生之黏滯流黏度是否足夠捕捉氣體，當 $\text{SiO}_2/\text{Flux}>2$ 時，有較好的黏度來捕捉住氣體來製備發泡骨材，尤其當 SiO_2/Flux 比在4~7.5之間效果最佳【Fakhfakh *et al.*, 2007】，然而本實驗港區淤泥和玻璃粉之 SiO_2/Flux 比為5.56和4.65落於文獻所提之最佳範圍內。Chen於文中提及， $\text{Flux}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)=\text{Flux}/(\text{S}+\text{A})$ 比例低易造成液相高黏度現象發生，當 $\text{F}/(\text{S}+\text{A})$ 範圍位於0.1~0.285之間且 $(\text{CaO}+\text{MgO})$ 不超過7%，則為製備發泡骨材之良好材料【Chen *et al.*, 2010】。表4.1.3為各廢棄物/港區淤泥經500°C預熱2分鐘後再置入900°C燒製3小時之燒失重(LOI_{500})，可用來推測500~900°C時之燒失重對於骨材發泡之影響，玻璃粉/港區淤泥之 LOI_{500} 位於2.63~3.8%，爐渣/港區淤泥之 LOI_{500} 位於3.19~4.02%，而集塵灰/港區淤泥之 LOI_{500} 則位於4.32~5.55%，然而玻璃粉和爐渣會隨著天加比例越高而 LOI_{500} 越小，反之添加集塵灰則越高。

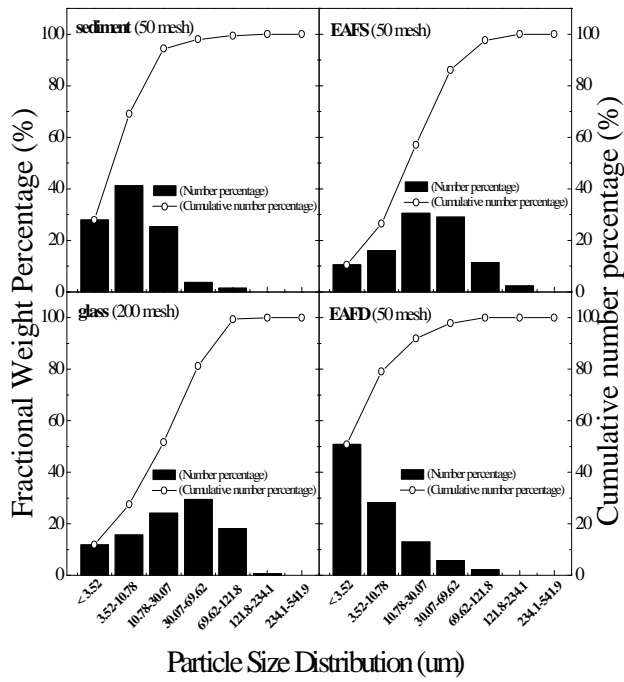


圖 4.1.1 港區淤泥、玻璃粉、爐渣(EAFS)及集塵灰(EAFD)之粒徑分佈比例與累積百分比

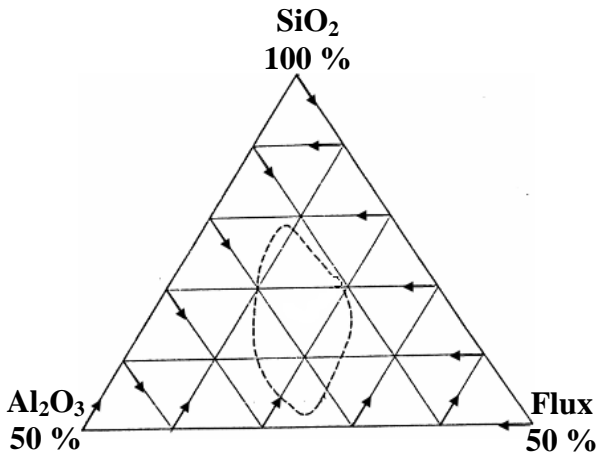


圖 4.1.2.1 Riley 所建議可燒製輕質骨材之三成份圖

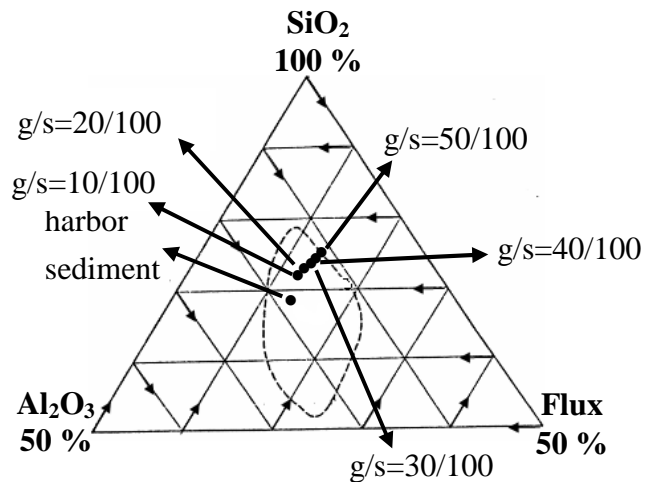


圖 4.1.2.2 玻璃粉/港區淤泥之三成份圖

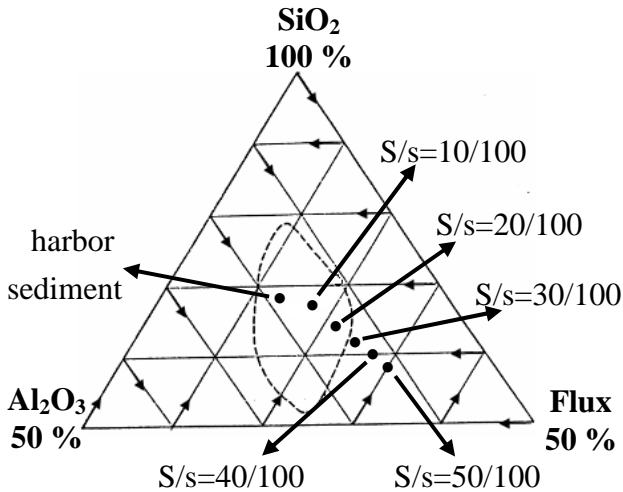


圖 4.1.2.3 爐渣/港區淤泥之三成份圖

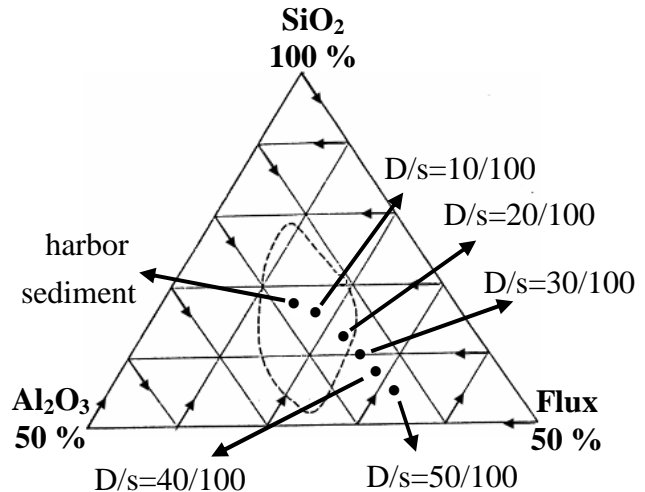


圖 4.1.2.4 集塵灰/港區淤泥之三成份圖

表 4.1.2 各廢棄物之化學組成 (Wt % , 以氧化物表示)

Composition (Wt %)	sediment	glass	EAFS	EAFD	SRM 2710 回收率(%)
SiO ₂ ^a	62.5±1.77	72.10±2.72	16.23±0.42	4.01±0.04	—
Al ₂ O ₃ ^b	14.31±0.84	0.56±0.05	2.38±0.19	1.26±0.07	70.60
Fe ₂ O ₃ ^b	5.79±0.42	0.74±0.01	22.22±0.86	42.86±5.39	96.00
K ₂ O ^b	3.08±0.03	0.56±0.02	0.06±0.01	1.89±0.18	87.11
Na ₂ O ^b	2.03±0.47	6.92±0.17	0.76±0.46	0.67±0.41	115.10
CaO ^b	0.332±0.02	5.53±0.03	21.75±0.11	4.15±0.55	110.00
PbO ^b	0.025±0.00	0.67±0.003	0.02±0.002	1.82±0.08	89.19
NiO ^b	N.D.	N.D	0.02±0.0006	0.02±0.00	92.41
MgO ^b	N.D	1.74±0.52	4.58±0.11	4.00±0.04	33.85
MnO ₂ ^b	N.D	0.01±0.0003	5.03±0.08	2.17±0.20	95.38
CdO ^b	N.D.	N.D	N.D	N.D	—
ZnO ^b	N.D.	0.03±0.003	0.03±0.002	39.92±0.02	89.43
CuO ^b	N.D.	N.D	0.02±0.001	N.D	82.98
Cr ₂ O ₃ ^b	N.D.	0.13±0.01	0.50±0.01	0.31±0.004	116.05
Cl ^c	0.88±0.02	0	0.10±0.02	1.44±0.10	—
SO ₄ ^{2-c}	0.18±0.01	0.02±0.003	0.10±0.02	0.85±0.03	—
LOI ^d	5.72±0.04	2.15±0.02	0	5.75±0.05	—
LOI ₅₀₀ ^e	3.18	0.41	0	5.43	—
Flux ^f	11.23	15.49	49.37	53.57	—
Fe/(S+A)	0.08	0.01	1.19	8.13	—
Flux/(S+A) ^g	0.15	0.21	2.65	10.17	—
CaO+MgO	0.33	7.27	26.33	8.15	—
(F+C+M)/(S+A) ^h	0.08	0.11	2.61	9.68	—
SiO ₂ /Flux	5.56	4.65	0.33	0.07	—
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.37	128.75	6.82	3.18	—

^a : 以矽定量 (CNS11393 石灰石化學分析法) 之方法測得

^b : 以微波消化之方法, 將消化液以 ICP-AES 進行金屬濃度測量 (n=2)

^c : 取 2 g 樣品, 加入 100 ml 的水, 於沸騰的水中煮 30 分鐘, 過濾後
將澄清液以 IC 進行分析

^d : LOI = Loss of ignition at 900°C for 3hr.

^e : LOI₅₀₀ = Loss of ignition at 900°C for 3hr after preheating at 500°C for 2 min
(temp ramp:100°C min⁻¹ for 5 min).

^f : Flux= Fe₂O₃+ K₂O+CaO+Na₂O+MgO 。

^g : Flux/(S+A)= Flux/(SiO₂+Al₂O₃) 。

^h : (F+C+M)/(S+A)=(Fe₂O₃+CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃) 。

*N.D.表示檢測值低於儀器偵測極限 (Cr : 0.005 mg/L ; Cd : 0.008 mg/L ; Cu : 0.003 mg/L ; Mn : 0.007 mg/L ; Zn : 0.005 mg/L ; Ni : 0.011 mg/L ; Mg : 0.018 mg/L)

ps : EAFS 消化完全度為 81.8%

表 4.1.3 廢棄物/港區淤泥之 LOI₅₀₀ (%)

LOI ₅₀₀ (%)	glass/sediment	Slag/sediment	Dust/sediment
10/100	3.8	4.02	4.32
20/100	3.56	3.51	4.49
30/100	3.07	3.43	4.69
40/100	3.03	3.35	5.18
50/100	2.63	3.19	5.55

LOI₅₀₀ = Loss of ignition at 900°C for 3hr after preheating at 500°C for 2 min
(temp ramp: 100°C min⁻¹ for 5 min), pellet formed at 6760 psi.

4.2 港區淤泥添加廢棄物(玻璃粉、爐渣和集塵灰)在不同加熱溫度下燒製成輕質骨材之特性分析

許多文獻指出添加玻璃粉燒製輕質骨材可有效降低骨材之顆粒密度、吸水率並可提升骨材之抗壓強度，這是因為玻璃在高溫時會有熔化現象造成水份無法滲入骨材，然而玻璃粉中含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 因此提升了骨材強度，也有文獻指出鹼金屬可以有效降低燒結溫度【Ducman *et al*, 2002; Corinaldesi *et al*, 2005; Nemes *et al*, 2006; 林氏, 2003; 莊氏, 2008】，因此本研究挑選的玻璃粉含有14%鈉。國內電弧爐煉鋼集塵灰目前處理方式多以固化或熱處理為主，黃氏以XRD分析結果可知集塵灰主要成分為 Fe_3O_4 、 ZnO 、 PbO 與 PbCl_2 【黃氏, 2007】，王氏等人針對國內某遭受電爐渣及電爐集塵灰混合物棄置之場址進行分選減量之研究，結果顯示，粒徑小於 $3/8''$ 約佔50wt%，鉛、鎘皆超過TCLP法規之標準【王氏, 2006; 林氏, 2003】；根據環保署統計97年度台灣再利用廢玻璃申報達4.8萬噸，而環保署表示集塵灰年產量約為13~15萬公噸，98年9月底國內鋼鐵工業之集塵灰累積暫存量約達49萬公噸，而97年度爐渣業者年產量高達100多萬噸【環保署, 2010】這些廢棄物並衍生出戴奧辛問題，因此若能以高溫燒製輕質骨材的方法將集塵灰和爐渣中之重金屬及戴奧辛安定化更能達到廢棄物回收利用的觀念。以下為本研究所製備骨材之實驗參數:以港區淤泥/(玻璃粉、爐渣或集塵灰)混合比例0/100、10/100、20/100、30/100、40/100、50/100，加入適量的水經旋轉(轉速= 30 ± 2 rpm)混合6小時，再經烘乾、破碎、過篩50 mesh後壓錠成型，預熱升溫條件為每分鐘 100°C 當溫度到達 500°C 時持溫燃燒2分鐘、燒製溫度範圍則為 $950^\circ\text{C} \sim 1150^\circ\text{C}$ (當溫度到達燒製溫度時，才將已預熱後的樣品置入持續燒製18分鐘)。燒製成輕質骨材後以SEM觀察微結構變化、做重量損失、顆粒密度、吸水率、M-TCLP及戴奧辛檢測，並以XRD、XAS探討骨材之發泡特性。

4.2.1 港區淤泥及玻璃粉之 DTA/TGA

圖4.2.1(a)為港區淤泥之DTA/TGA，從室溫開始增溫港區淤泥便開始有緩慢

的分解，當溫度達 326.18°C 時DTA曲線出現一放熱峰，而最後當溫度到達 1220°C 時，港區淤泥之總熱重損失達到 8.35% 。圖4.2.1(b)則為玻璃粉之DTA/TGA，藉此可觀察玻璃粉之分解溫度範圍來做發泡劑之挑選依據，判斷玻璃粉之黏度是否能夠捕捉住玻璃粉內部產生之氣體【Ducman *et al*, 2002】。本實驗是以通入空氣來進行DTA/TGA試驗，從室溫開始本實驗使用之玻璃粉就開始有緩慢的分解，當溫度達 427.4°C 時DTA曲線出現一放熱峰，溫度提升至 1147.8°C 時則有一吸熱峰出現，推測是玻璃熔化所造成，最後當溫度達 1226°C 時出現一放熱峰，玻璃粉的總熱重損失達到 4.46% 。

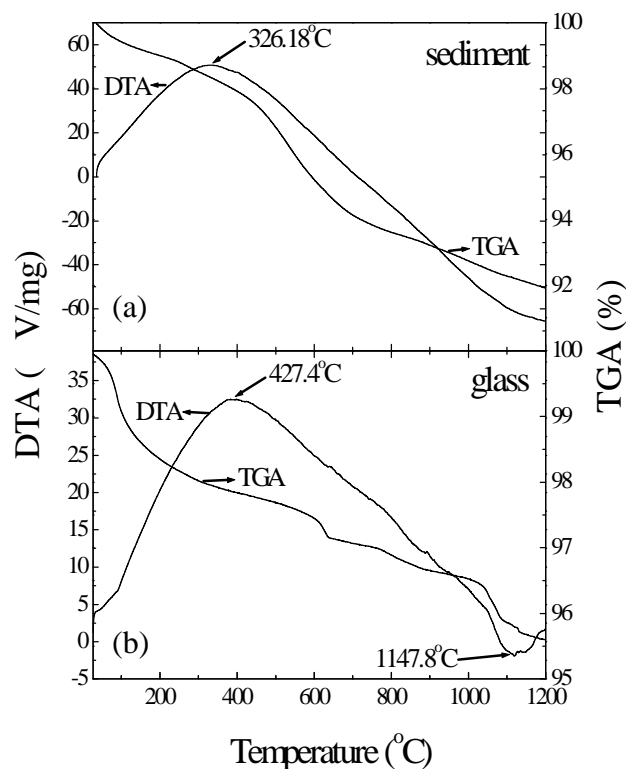


圖 4.2.1 (a)港區淤泥(b)春池玻璃粉之 DTA/TGA 曲線圖

4.2.2 重量損失變化

利用港區淤泥添加各比例不同之廢棄物混合進行造粒所得之生顆粒於高溫燒製過程中，由於水分蒸發、有機物逸散、無機鹽類分解或揮發性重金屬之逸散等因素，而使其重量減損之過程即為骨材之重量損失【Cheeseman *et al.*, 2005；林氏，2003】。在各物質逸散過程中可能導致試體內部微結構遭到破壞，影響到骨材之燒製情形，導致在骨材燒製時會有爆裂現象，因此對骨材重量損失作探討可瞭解其燒製骨材之特性。

由表4.2.2.1、4.2.2.2及4.2.2.3可觀察到各燒製樣品之重量損失變化，當純港區淤泥之重量損失範圍為5.92~6.51%，添加各比例玻璃粉後之範圍為4.67%~5.72%，添加爐渣後為4.19~6.59%，而添加集塵灰後的重量損失為6.70~9.52%，由上述各重量損失範圍可整理出，添加玻璃粉和爐渣後重量損失整體隨著添加量的越高而越低，這是可由表4.1.2、4.1.3成份分析中之LOI、LOI₅₀₀(LOI₅₀₀經500°C預熱2分鐘後再置入900°C燒製3小時之燒失重)和TGA來作推測，因玻璃粉和爐渣之LOI及TGA熱重損失遠低於港區淤泥，因此當玻璃粉及爐渣比例添加越多重量損失就會下降，然而集塵灰的LOI及與港區淤泥相當，因此隨著添加量越大重量損失也隨即增加，此現象也與LOI₅₀₀中之數據呈現同一趨勢。若由燒製溫度來觀看重量損失的變化則可發現，不管港區淤泥是添加各比例的玻璃粉、爐渣或集塵灰當溫度燒製的越高，重量損失就會隨之越大，這是因隨著溫度的增長，試體內部產生的氣體也越多，發泡情形因此越劇烈，導致試體膨脹的率越高，然而溫度越高試體內部的黏滯係數會隨之下降，因此氣體快速從試體內部孔洞逸出，重量損失因而隨溫度提升而增加。

表4.2.2.1 玻璃粉/港區淤泥在不同溫度燒製後之重量損失數據

Temp. (°C)	Weight loss (%)					
	g/s 0/100	g/s 10/100	g/s 20/100	g/s 30/100	g/s 40/100	g/s 50/100
1000	5.92	5.55	5.46	5.15	4.80	4.76
1050	6.16	5.39	5.13	5.18	4.96	5.09
1100	5.98	5.64	5.41	4.85	5.25	4.67
1150	6.51	5.72	5.27	5.53	5.39	—

表4.2.2.2 爐渣/港區淤泥在不同溫度燒製後之重量損失數據

Temp. (°C)	Weight loss (%)					
	S/s 0/100	S/s 10/100	S/s 20/100	S/s 30/100	S/s 40/100	S/s 50/100
950	5.65	6.24	5.18	4.77	4.73	4.19
1000	5.92	6.07	5.77	5.72	5.40	5.21
1050	6.16	6.59	7.20	5.35	5.65	5.22
1100	5.98	6.30	5.88	5.54	6.29	5.62

表4.2.2.3 集塵灰/港區淤泥在不同溫度燒製後之重量損失數據

Temp. (°C)	Weight loss (%)					
	D/s 0/100	D/s 10/100	D/s 20/100	D/s 30/100	D/s 40/100	D/s 50/100
950	5.65	6.70	7.53	7.79	7.50	7.49
1000	5.92	7.05	7.70	7.71	7.68	9.52
1050	6.16	7.41	7.40	7.34	7.99	7.90
1100	5.98	6.81	7.29	7.92	—	—

4.2.3 顆粒密度變化

使用輕質混凝土有很多好處，如有高的強度/重量比例、低的熱膨脹係數、好的抗張力強度、並具隔熱隔音效果這是因輕質骨材內部發泡孔洞可阻絕空氣流動，亦可降低水泥之使用量及成本【Mouli *et al.*, 2008】。

一般而言骨材之顆粒密度是遵循EN 13055-1【EN, 2002】標準規範 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 以下。有文獻指出顆粒密度 $0.1\sim 1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 稱之為輕質骨材，然而土木工程界則把 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 以下定為輕質混凝土，因此為了達到此規範細骨材之顆粒密度必需小於 $2\text{g}/\text{cm}^3$ ，而粗骨材則密度則要小於 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 【李氏，1996】。Wang等人於文獻中提出產品燒結的良好與否和顆粒密度、吸水率及抗壓強度等三種關係是密不可分的【Wang *et al.*, 1998】。當骨材具有低的顆粒密度，且表面的孔隙是緊閉的，那將會有低的吸水率並且有良好的熱隔離性質，並適合用於混凝土中【Nemes *et al.*, 2006】。Wang等人提及燒製溫度與顆粒密度的關係，當燒製溫度為 1050°C 時顆粒密度範圍介於 $1.14\sim 1.28\text{g}/\text{cm}^3$ 但因表面有顆粒狀物體表示燒結並不完全，因此提高溫度至 1080°C 進行燒製然而密度卻變高到 $1.48\sim 1.54\text{g}/\text{cm}^3$ ，這是因為高溫時液相的存在導致試體體積縮小【Wang *et al.*, 2009】。

表4.2.3.1顯示港區淤泥添加玻璃粉經高溫燒製後之顆粒密度變化。純港區淤泥燒製溫度範圍是 $1000\sim 1150^\circ\text{C}$ 然而顆粒密度範圍落於 $1.19\sim 2.32\text{g}/\text{cm}^3$ ，各比例玻璃粉/港區淤泥(10/100~50/100)混合物之燒製溫度為 $1000\sim 1150^\circ\text{C}$ ，顆粒密度範圍為 $0.87\sim 2.46$ ，有文獻指出骨材的發泡氣體來源是因鐵氧化物所引起的作用，而因含鹼金屬的碳酸鹽會在 $650^\circ\text{C}\sim 940^\circ\text{C}$ 分解，其熔點皆低於原料發泡溫度 $1000^\circ\text{C}\sim 1200^\circ\text{C}$ (如: Na_2CO_3 之熔點為 851°C ， K_2CO_3 熔點為 891°C)【林氏，2003】，因此有助於降低骨材之燒結發泡溫度；而Ducman等人使用廢玻璃粉當作發泡劑能有效降低骨材之燒製溫度及其顆粒密度，當未添加玻璃粉試體之燒製溫度於 1220°C 時顆粒密度範圍為 $0.42\sim 0.98\text{g}/\text{cm}^3$ ，然而當添加玻璃粉後燒製溫度於 1150°C 及可將顆粒密度降到 $0.57\sim 0.82\text{g}/\text{cm}^3$ 【V. Ducman *et al.*, 2009】。本研究

港區淤泥添加玻璃粉之實驗數據論點與上述二篇文獻相似，各燒製之骨材皆是隨著燒製溫度越高而密度越低，添加玻璃粉後由表4.2.3.1觀察的確有助降低燒結溫度，當燒製溫度到1100°C時已有良好之發泡現象，而到達1150°C時發泡更是完全，當玻璃粉比例逐漸提昇，顆粒密度也隨之降低，符合文獻中提及玻璃粉中因有鹼金屬可降低試體之燒結溫度，提前包覆住試體內部產生之氣體，因而使顆粒密度降低了。

目前於文獻中尚未發現利用爐渣和集塵灰當作發泡來燒製輕質骨材。爐渣和集塵灰是由煉鋼廠煉鋼後殘留下來的產物，鐵含量極高，然而爐渣和集塵灰中因含有大量重金屬因此評估對環境的危害為一重點【*Manso et al., 2004 ; Laforest et al., 2007*】，爐渣和集塵灰目前處理方式大多以混凝土固化為主，利用爐渣或集塵灰混合瀝青及水泥來作混凝土運用於某些結構建築當中，然而抗壓強度比起傳統混凝土稍差，但經測試已達一定的實用性，然而因爐渣和集塵灰皆含有重金屬【*Manso et al., 2004 ; Rajeh et al., 1997*】，因此如何抑制重金屬溶出不造成環境危害也是一個目標。Riley提出當鐵氧化物與黏土中之鹼性物質相結合時，會產生 K_2CO_3 和 $3K_2Al_2Si_2O_8 \cdot 2CaCO_3$ (鈣霞石)等，這些物質約在1200°C會分解出 CO_2 氣體，使具有黏稠度的原料發生膨脹【*Riley, 1951*】。爐渣和集塵灰中含有極高的鐵，因此本研究將其添加於港區淤泥經高溫燒製嘗試來製備輕質骨材。表4.2.3.2及4.2.3.3可觀察本研究港區淤泥添加各比例爐渣(集塵灰)經高溫燒製後之顆粒密度變化，依各比例爐渣/港區淤泥(10/100~50/100)混合，燒製溫度為950~1100°C時、顆粒密度範圍為1.15~2.51 g/cm³，由表中可看出顆粒密度之規律變化，當燒製溫度為950~1050°C時，顆粒密度緩慢下降此時顆粒密度皆未達輕質骨材規範2 g/cm³，然而燒製溫度提升至1100°C時，顆粒密度則降至1.35~1.70 g/cm³。而各比例集塵灰/港區淤泥(10/100~50/100)混合之燒製溫度則為950~1100°C、顆粒密度範圍則落在0.94~2.71 g/cm³，由表4.2.3.3可知當燒製溫度950~1000°C時，此時顆粒密度皆未達輕質骨材規範2 g/cm³，然而當溫度上升至1050°C，集塵灰/港區淤泥比例40/100及50/100之顆粒密度已降至1.29~1.47 g/cm³，而當溫度

再提升至1100°C時，集塵灰/港區淤泥比例10/100~30/100之顆粒密度則為0.94~1.23 g/cm³，此時集塵灰/港區淤泥比例40/100、50/100因試體熔融現象太過顯著，以致於試體黏在坩堝上，已無法測試顆粒密度。然而依爐渣(集塵灰)/港區淤泥添加比例來觀察，可發現顆粒密度隨著爐渣(集塵灰)添加越高而下降，圖4.1.2.3和4.1.2.4指出當爐渣(集塵灰)/港區淤泥配比為30/100~50/100時是落於Riley所提出之最佳燒製範圍之外，但卻發泡良好密度有降低之效果，因此推測可能因爐渣和集塵灰中含有大量的鐵元素，其中爐渣之Fe/(SiO₂+Al₂O₃)為1.19，集塵灰之Fe/(SiO₂+Al₂O₃)高達8.13，有文獻指出原料中之有機物質會還原Fe₂O₃成FeO並釋出CO₂ 氣體，造成膨脹現象【龔氏，1996】。

表4.2.3.1玻璃粉/港區淤泥在不同溫度燒製後之顆粒密度數據

Temp. (°C)	Particle density (g/cm ³)					
	g/s 0/100	g/s 10/100	g/s 20/100	g/s 30/100	g/s 40/100	g/s 50/100
1000	2.32	2.46	2.27	2.09	1.98	1.85
1050	2.25	2.24	2.15	1.96	1.81	1.66
1100	1.67	1.60	1.81	1.70	1.44	1.30
1150	1.19	1.11	1.08	0.93	0.87	—

表4.2.3.2爐渣/港區淤泥在不同溫度燒製後之顆粒密度數據

Temp. (°C)	Particle density (g/cm ³)					
	S/s 0/100	S/s 10/100	S/s 20/100	S/s 30/100	S/s 40/100	S/s 50/100
950	2.50	2.36	2.53	2.46	2.70	2.70
1000	2.32	2.28	2.44	2.41	2.48	2.61
1050	2.25	2.15	2.29	2.34	2.29	2.37
1100	1.67	1.57	1.70	1.54	1.54	1.35

表4.2.3.3集塵灰/港區淤泥在不同溫度燒製後之顆粒密度數據

Temp. (°C)	Particle density (g/cm ³)					
	D/s 0/100	D/s 10/100	D/s 20/100	D/s 30/100	D/s 40/100	D/s 50/100
950	2.50	2.41	2.44	2.62	2.47	2.71
1000	2.32	2.41	2.44	2.46	2.38	2.33
1050	2.25	1.92	2.06	1.89	1.47	1.29
1100	1.67	1.23	0.99	0.94	—	—

4.2.4 吸水率變化

因為輕質骨材的多孔結構使其有較高的吸水能力，降低輕質混凝土的工作度，將影響混凝土之抗壓強度【**林氏，2003**】，有文獻提及當吸水率較低時混凝土之抗壓強度及抗張力強度比起吸水率較高時來的好【**Bozkurt et al., 2010**】。Wainwright等人利用下水淤泥灰、焚化底灰及煤灰利用燒結法經高溫燒製後之骨材之最低吸水率為4.5%和8.1%【**Wainwright et al., 2001**】。Ducman等人則利用TGA/DTA找出發泡劑並添加於玻璃粉中利用高溫燒結法燒製骨材而其吸水率為11%【**Ducman et al., 2002**】。Acchar等人則利用黏土添加廢棄物材料(花崗石及大理石)經單軸壓錠經高溫燒結法製備出陶瓷顆粒而吸水率為2~15%【**Acchar et al., 2006**】。Mun則用粘土混污泥經球模造粒經旋轉爐燒製成球狀輕質骨材其吸水率5~13%【**Mun et al., 2007**】。Wei等人利用港區沉澱物添加水庫沉澱物經高溫燒結法燒製成輕骨材其吸水率則介於4~14%【**Wei et al., 2008**】。Qi等人利用黏土添加脫水污泥燒結成輕陶瓷顆粒而其吸水率為5.3%【**Qi et al., 2010**】。

目前工業界一般都已24小時之骨材吸水率為指標，而24小時之吸水飽和狀況大概已達80~90%【**余氏，2000**】，因此本研究都是以24小時吸水率為指標，表4.2.4.1為玻璃粉/港區淤泥(0/100~50/100)之吸水率變化，各比例燒製溫度為1000~1150°C，吸水率範圍則位於1.49~17.53%，吸水率會隨著燒製溫度的升高而快速降低，然而再由玻璃粉添加量來觀察，當玻璃粉添加的越多吸水率也降的越多，其中以比例40/100在燒製溫度1150°C時出現最低的吸水率1.49%，據推測是因為玻璃粉能有效降低燒結溫度，再加上玻璃粉本身吸水率極低，因此玻璃粉與港區淤泥混合後，經高溫燒製後因燒結反應使得骨材內外產生玻璃化現象，有低的吸水率。然而Tsai也利用玻璃粉當做添加劑與飛灰和污泥灰做混合，經高溫燒製後之吸水率依表可觀察最低大概為1%左右與本實驗結果相似【**Tasi et al., 2006**】。表4.2.4.2為爐渣/港區淤泥之吸水率變化，變化範圍7.11~21.10%，吸水率大多數也是呈現當溫度越高而越低的趨勢，然而依爐渣添加比例來觀察則吸水

率起伏較不一致，有文獻指出骨材孔隙獨立於內部稱閉鎖孔隙其吸水率較小，而與外面相通者稱開口孔隙，其吸水率較大【Nemes *et al.*, 2006；余岳峰, 2000】，因此判斷添加爐渣並未能充分燒結再加上孔隙變大造成吸水率稍稍上升。表 4.2.4.3 為集塵灰/港區淤泥混合燒製骨材後之吸水率變化，燒製溫度 950~1100°C，其吸水率範圍為 4.73~22.75%，當燒製溫度為 950°C 時，溫度還未能達到骨材反應所需，加上骨材開口孔隙特性，吸水率落於 20% 以上，然而當隨著提高燒製溫度，吸水率有驟降的趨勢，當混合比例 10/100~30/100 燒至溫度為 1100°C 時吸水率範圍落於 4.73~6.29%，比起純港區淤泥燒製骨材之吸水率來的低，因此添加集塵灰於港區淤泥中對於燒製輕質骨材而言不但可降低燒結溫度，也能有低吸水率，將來可嘗試用於混凝土中並測試骨材之吸水率與水泥之接合度對於抗壓強度之影響；而目前一般輕質骨材之吸水率規範則是 2~20%。

表 4.2.4.1 玻璃粉/港區淤泥在不同溫度燒製後之吸水率數據

Temp. (°C)	Water absorption (%)					
	g/s 0/100	g/s 10/100	g/s 20/100	g/s 30/100	g/s 40/100	g/s 50/100
1000	17.5	16.9	16.5	17.3	11.7	11.8
1050	13.2	11.3	10.5	8.3	4.8	4.4
1100	7.1	5.5	4.9	4.1	3.8	2.7
1150	5.6	5.1	3.7	2.5	1.5	—

表 4.2.4.2 爐渣/港區淤泥在不同溫度燒製後之吸水率數據

Temp. (°C)	Water absorption (%)					
	S/s 0/100	S/s 10/100	S/s 20/100	S/s 30/100	S/s 40/100	S/s 50/100
950	21.2	20.93	19.99	18.36	18.54	18.64
1000	17.53	21.10	20.29	18.45	19.87	19.39
1050	13.24	16.33	17.51	16.90	14.18	15.91
1100	7.11	9.10	11.48	8.99	7.20	8.16

表 4.2.4.3 集塵灰/港區淤泥在不同溫度燒製後之吸水率數據

Temp. (°C)	Water absorption (%)					
	D/s 0/100	D/s 10/100	D/s 20/100	D/s 30/100	D/s 40/100	D/s 50/100
950	21.2	20.65	21.55	22.75	21.10	19.10
1000	17.53	17.69	17.13	19.87	14.82	10.67
1050	13.24	10.05	12.26	10.96	11.63	8.26
1100	7.11	6.29	5.05	4.73	—	—

4.2.5 微結構變化(SEM)

圖 4.2.5.1 為玻璃粉/港區淤泥(0/100~50/100)混合燒製後之試體微結構變化圖。當燒製溫度為 1000°C 時可發現0/100~20/100內部孔洞少且試體結構鬆散，此時因未有發泡效果顆粒密度因此較高($2.32\sim 2.46\text{g/cm}^3$)，然而30/100~50/100雖有較多孔洞，但試體結構仍無明顯緻密現象，顆粒密度有稍降之趨勢($1.85\sim 2.09\text{g/cm}^3$)，當溫度提高至 1050°C 時，燒結反應逐漸明顯，顆粒與顆粒間足見緊密結合，而依玻璃粉添加比例越高，內部孔洞逐為多，且因孔洞與孔洞間之結合而形成更大孔洞，整體而言緻密程度比起 1000°C 來的好；當溫度提升至 1100°C 時，玻璃粉添加比例越高燒結反應趨近完成度越高，原料因黏滯性減弱而產生玻璃相，而包覆於試體內部之氣體因無法散逸，因而使孔洞與孔洞間有再結合之現象，此時顆粒膨脹的越大因此顆粒密度也越低($0.87\sim 1.11\text{g/cm}^3$)，也因試體產生玻璃相吸水率因此越低。圖4.2.5.2為爐渣/港區淤泥0/100~50/100)混和燒至後之試體微結構變化圖，當燒製溫度 $950\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 試體內部為結構非常蓬鬆只有少數幾個小孔洞，此時顆粒密度為較高的($2.28\sim 2.70\text{g/cm}^3$)；而當溫度提升至 1050°C 時，試體內部顆粒與顆粒間因燒結反應逐漸融合，在加上內部氣體逐漸產出遭黏滯流所捕捉因此孔洞漸增，然而當燒製溫度上升至 1100°C 時，試體內部孔洞因氣體大量釋出而被黏滯流所捕捉，在加上燒結反應連續不斷使得粒子與粒子不斷融合，造成孔洞間孔壁斷裂形成大孔洞，上述由顆粒密度變化可發現當溫度由 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 時各比例燒製成骨材之顆粒密度急速下降($1.35\sim 1.70\text{g/cm}^3$)。圖4.2.5.3則為集塵灰/港區淤泥(0/100~50/100)混合燒至後之試體微結構變化圖，當溫度為 950°C 時，各比例內部微結構一片鬆散，當溫度提升至 1000°C ，集塵灰/港區淤泥30/100~50/100隨著集塵灰添加量越高，內部孔洞逐漸因孔壁斷裂結合變大，此時有最佳的緻密性，當燒製溫度為 1050°C ，集塵灰/港區淤泥0/100~30/100內部之孔洞也逐漸因孔壁斷裂而變大，此時集塵灰/港區淤泥40/100~50/100內部則因孔洞不斷結合斷裂再結合而形成整片玻璃化現象，由顆粒密度化表對應SEM發現在同一溫度下燒製

成之輕質，集塵灰/港區淤泥40/100~50/100有最低之顆粒密度(1.29~1.47 g/cm³)。

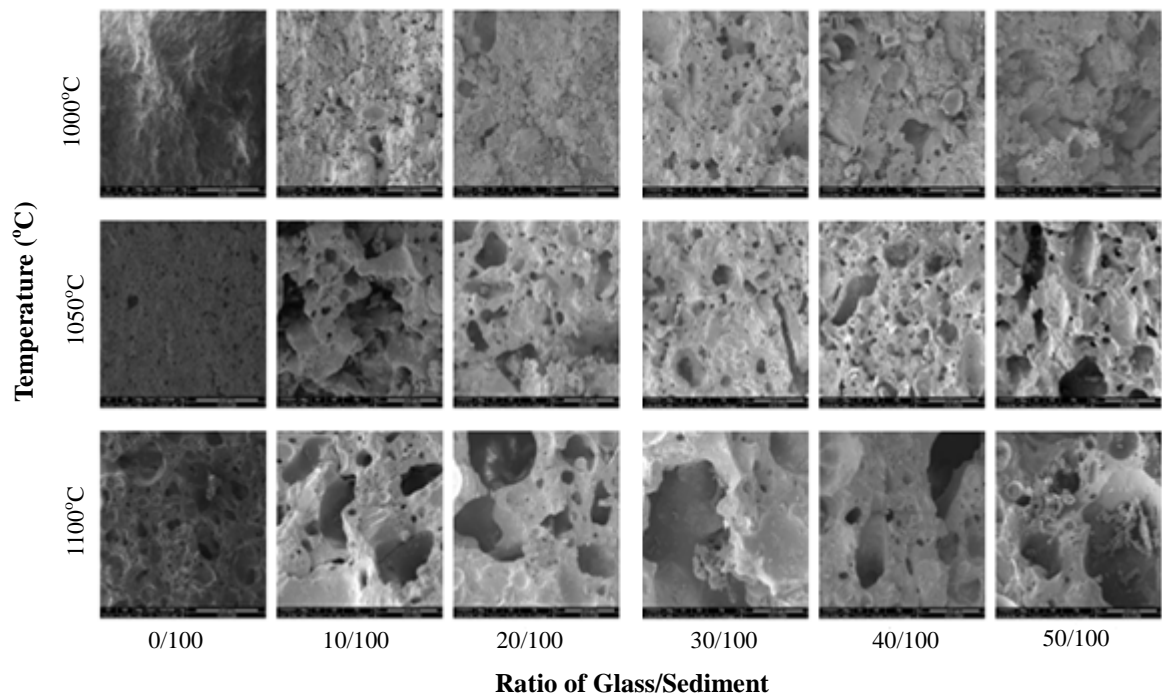


圖 4.2.5.1 玻璃粉/港區淤泥燒製成骨材後之微結構變化圖 SEM (x100)

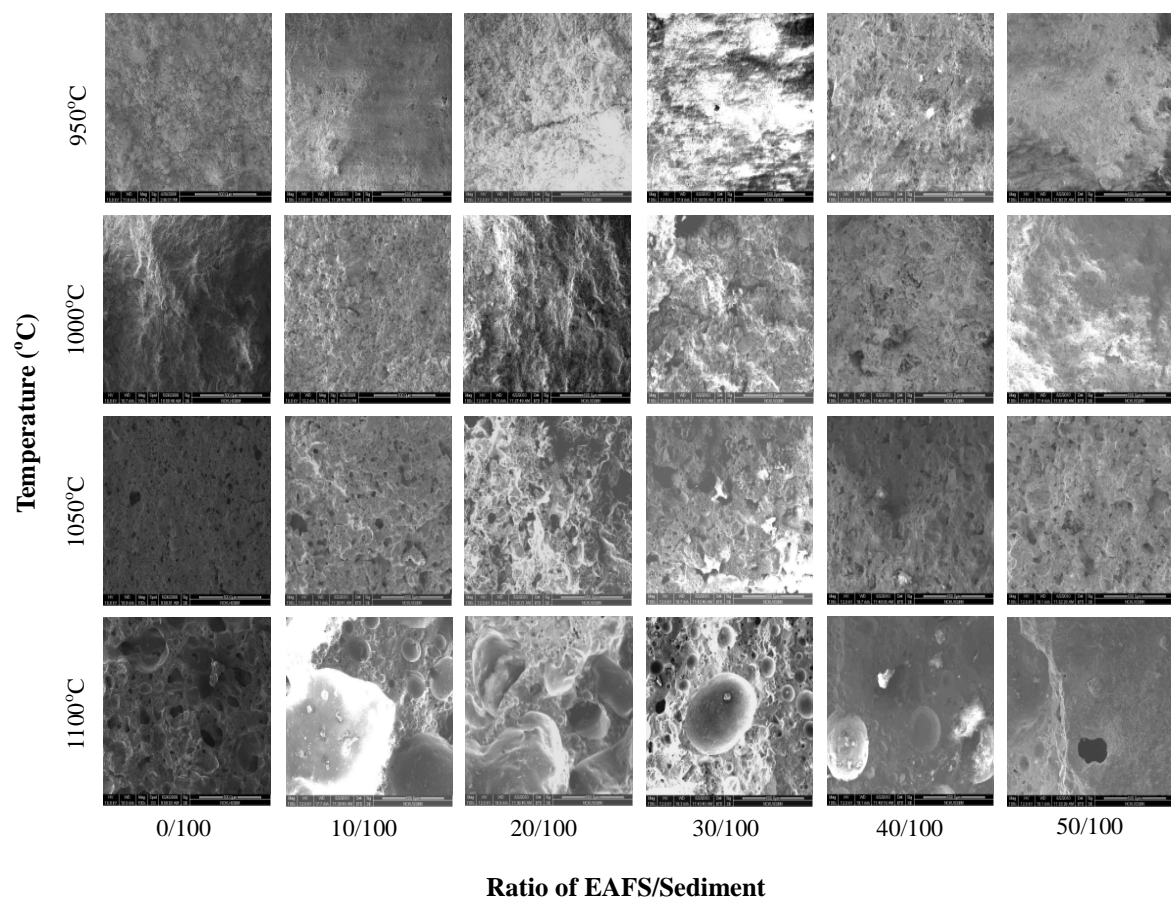


圖 4.2.5.2 爐渣/港區淤泥燒製成骨材後之微結構變化圖 SEM (x100)

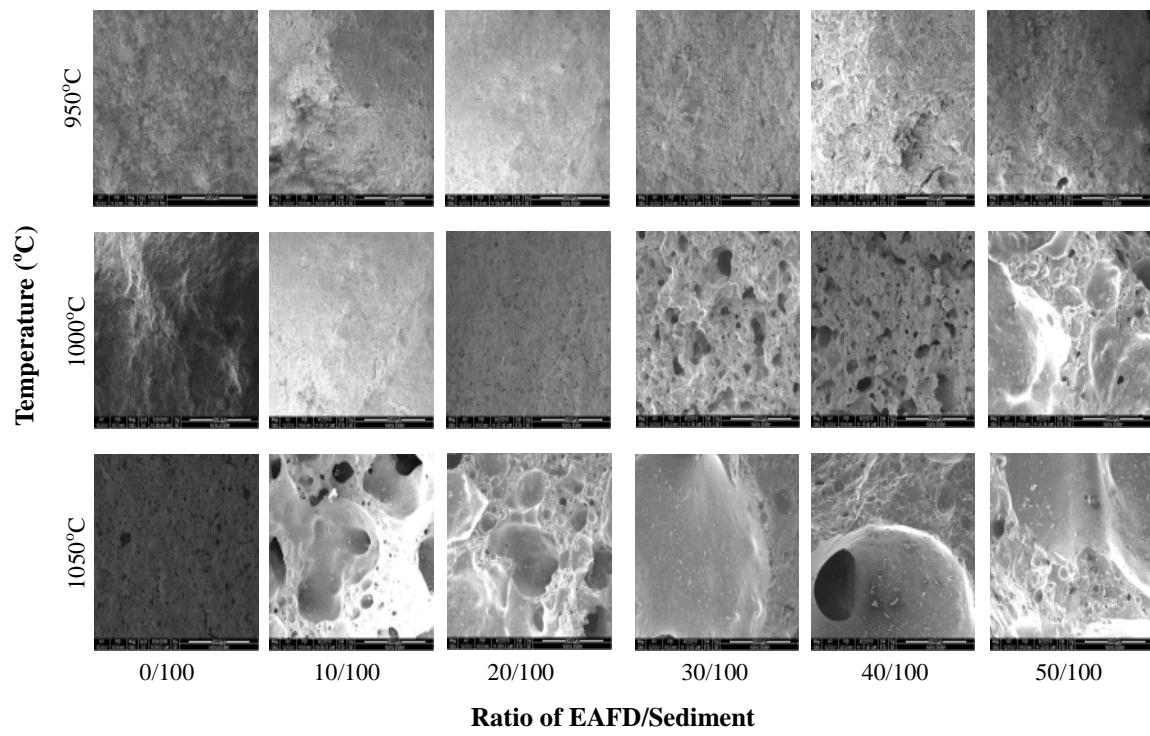


圖 4.2.5.3 集塵灰/港區淤泥燒製成骨材後之微結構變化圖 SEM (x100)

4.2.6 結晶物種分析(XRD)

圖4.2.6.1為港區淤泥及玻璃粉/港區淤泥50/100於1000~1100°C之XRD圖譜。Xu等人利用廢水淤泥添加水玻璃燒製成陶瓷顆粒於XRD結晶物種分析中提及經高溫燒製後陶粒中 Al_2SiO_5 (kyanite)、 SiO_2 (quartz)、Na-Ca (feldspars)、 AlSi_3O_8 (albite-Na)和 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite)為主要的晶相物種，然而sillimanite [$(\text{Al}_{1.98}\text{Fe}_{0.2})\text{SiO}_5$]和enstatite [$\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$]晶相也存在。會形成Na-Ca (feldspars)、sillimanite、enstatite等結構是因為成分組成中之助熔劑像是 Fe_2O_3 、CaO和MgO等在燒結過程中會產生固、液相反應而造成【Xu *et al.*, 2008】。本實驗所用之港區淤泥在未燒製前之結晶物種主要以 SiO_2 及 Al_2O_3 為主，含有一些鋁、矽的結合物種如 Al_2SiO_5 (kyanite)、 Al_2SiO_3 (sillimanite)及 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite)，經添加玻璃粉燒製後之骨材則產生 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 及 CaSiO_3 。Komnitsas等人偵測得爐渣之晶相物種為： FeCr_2O_4 (chromite)、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite)、 Fe_3O_4 (magnetite)、 Mg_2SiO_4 (forsterite)、 Fe_2SiO_4 (fayalite)和 SiO_2 (christobalite–tridymite)【Komnitsas *et al.*, 2008】。而LuxaÂng則於文獻中提到爐渣之複合鹽類主要以 $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_7$ (ehlenite)、 Ca_2SiO_4 (larnite)為主，其他強度較弱也可偵測到 $\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_8$ (bredigite syn)，錳方面則以氧化物型態(Mn_3O_4 , MnO_2)及 MgFe_2O_4 (magnesioferrite)為主，而鐵則是以 Fe_3O_4 (magnetite) 被偵測到【LuxaÂng *et al.*, 2000】。

圖4.2.6.2為爐渣及爐渣/港區淤泥40/100及50/100混和燒製後之XRD，爐渣主要晶相以氧化鐵、氧化鈣所組成，透過XRD可觀察鐵化合物是以 FeO 、 Fe_2O_3 形式存在， CaCO_3 具有高peak，其他成份分析表中測得之元素由XRD觀察也以不同型態形式存在於爐渣中，經爐渣/港區淤泥調配並於1100°C燒製後，物種趨於單純化，主要以 SiO_2 為主，並且發現兩個新品相 CaSiO_3 (Calcium Silicate)及 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite)，其中 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite)為Xu於廢水淤泥添加水玻璃燒製成之陶粒中即已偵測到此物種，據推測是因本實驗所取得之爐渣Si含量低而必須添加港區淤泥後才有此物種出現。

Fernández-Olmo於文獻中提及集塵灰中富含大量的Zn，因此以XRD物種鑑定發現主要以ZnO、Fe₂O₃、CaO及MgO為主要物種晶形存在【Fernández-Olmo *et al.*, 2007】。Menad也於文獻中提到經XRD鑑定後之物種ZnO、Fe₃O₄、ZnOFe₂O₃ (franklinite)等有主要的peak【Menad *et al.*, 2003】。圖4.2.6.3可觀察本實驗所使用之集塵灰經XRD鑑定後主要以ZnO及Fe₂O₃為主要晶相，然而混合集塵灰/港區淤泥，並於1050°C燒製後，物種晶相則以SiO₂及Al₂O₃ (corundum)存在，並且發現一個新晶相CaSiO₃ (calcium silicate)。

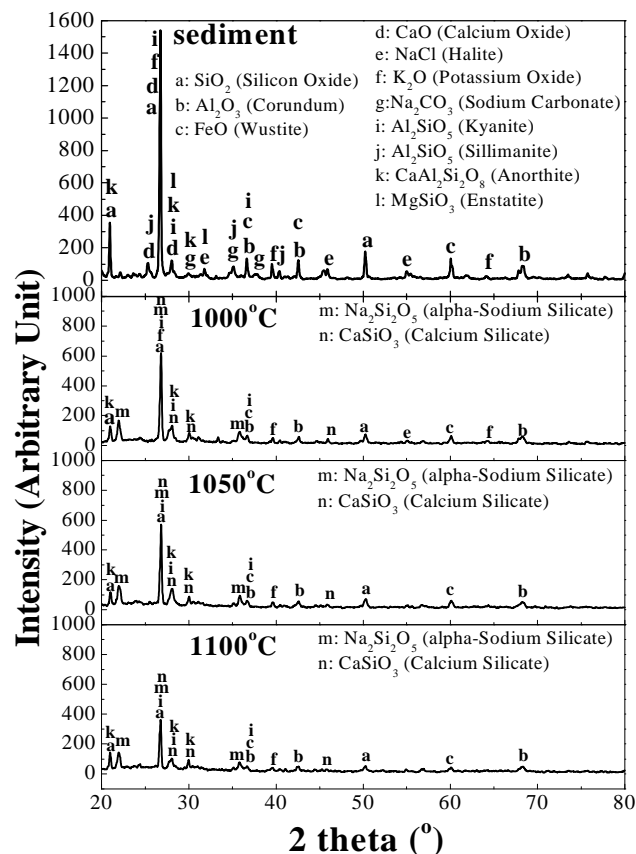


圖 4.2.6.1 玻璃粉/港區淤泥燒製成骨材後之 XRD 圖譜

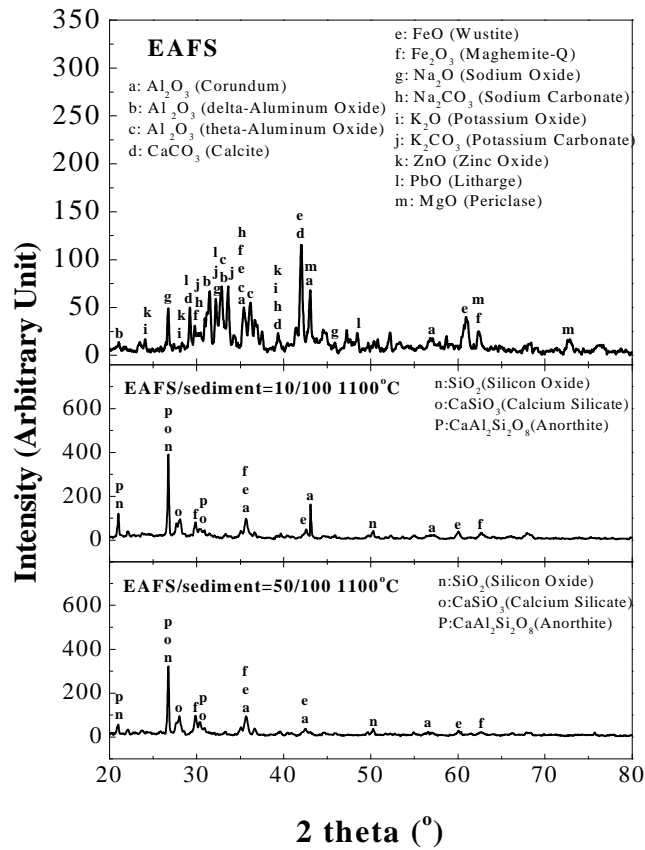


圖 4.2.6.2 爐渣/港區淤泥燒製成骨材後之 XRD 圖譜

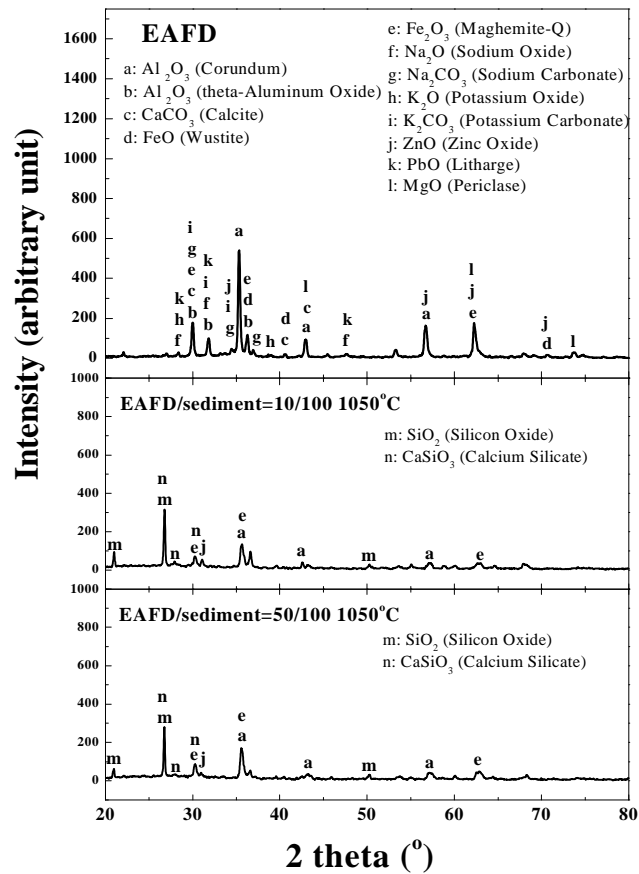


圖 4.2.6.3 集塵灰/港區淤泥燒製成骨材後之 XRD 圖譜

4.2.8 多次萃取之毒性溶出試驗(M-TCLP)

本實驗所使用之港區淤泥及其各種廢棄物因成分複雜予有重金屬對於環境危害之疑慮，且重金屬在各廢棄物中之行為繁瑣複雜，因此從成分分析得知其含量多寡後依舊無法確切了解對於環境之危害性；表 4.2.8.1 為本實驗所選用之廢棄物(港區淤泥、玻璃粉、爐渣和集塵灰)依台灣環保署法規事業廢棄物毒性特性溶出程序 NIEA R201.13C 做重金屬溶出之測試，結果顯示港區淤泥中之 Zn 含量含有 4.07mg/L，玻璃粉 Zn 含量為 3.49 mg/L、Pb 含量高達 4.96 mg/L，集塵灰 Cu 含量為 1.16 mg/L、Zn 含量為 9.77 mg/L、Cr 含量為 1.55 mg/L、Se 含量為 0.27 mg/L、Pd 含量為 1.43 mg/L，其中 Cd 含量為 1.33 mg/L 高過法規標準 1 mg/L；燒製後之輕骨材試體經敲碎後，依環保署公告之各重金屬溶出法規值為指標，並依美國環保署方法 1320 之多次萃取之毒性溶出試驗(M-TCLP)【US EPA, 1986】來做為重金屬溶出對於環境危害之評估依據。

Huang 等人利用礦渣混合飛灰和重金屬污泥燒製成輕質骨材並做 TCLP，結果發現經高溫 1150°C 以上燒製後各重金屬 Cr (III)、Cr、Cd、Cu 及 Pb 等皆能符合 TCLP 之溶出標準【Huang *et al.*, 2007】。Chiou 等人則利用成份類似發泡黏土之污泥灰添加污泥於高溫燒製輕質骨材，然而於燒製溫度 1100°C 以上做 TCLP 各重金屬 Zn、Cr、Cd、Cu 及 Pb 皆能符合法規標準【Chiou *et al.*, 2006】。Chang 等人則利用重金屬污泥添加礦渣經高溫燒製輕質骨材並做其 TCLP，然而 Cr 於 850~1050°C 燒製之骨材中溶出值皆過高，然而所有重金屬 Cr、Cd、Cu 及 Pb 皆需經 1150°C 以上燒製才能符合法規規範，這是因為某些重金屬在高溫燒製過程中並不會完全揮發，然而經更高溫燒製骨材因燒結反應而有玻璃相的產生因此能將重金屬有效處理【Chang *et al.*, 2007】。

本實驗使用之玻璃粉和爐渣屬於一般事業廢棄物，集塵灰則為有害事業廢棄物，經成份分析後含有過量重金屬，因此本研究利用港區淤泥添加玻璃粉(爐渣、集塵灰)燒製成輕質骨材後遵循美國環保署方法 1320 多次萃取之毒性溶出試驗(M-TCLP)【US EPA, 1986】來確定經高溫燒製後各重金屬之溶出，本研究挑選各玻璃粉(爐渣、集塵灰)/港區淤泥(10/100~50/100)發泡最好之溫度(玻璃粉/崗區

淤泥為 1150°C，爐渣/港區淤泥為 1100°C，集塵灰/港區淤泥為 1050°C 和 1100°C) 做 M-TCLP，挑選之重金屬分別有 Cu、Cr、Zn、Se、Cd、Pb、As 及 Hg，由表 4.2.8.2、4.2.8.3、4.2.8.4、4.2.8.5 & 4.2.8.6 顯示，經高溫燒製後，各重金屬之溶出值皆能低於公告標準，據推測可能某些重金屬在高溫燒製過程中會揮發，且可能如 Chang 所提及當骨材有效燒結後產生之玻璃相能有效處理重金屬使之包覆骨材在內部【Chang *et al.*, 2007】，無法溶出，形成無害化，對於環境未出現負面之影響。

表 4.2.8.1 港區淤泥、玻璃粉、爐渣、集塵灰之 TCLP 值

樣品名稱	重金屬 TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
sediment	0.05	0.02	4.07	0.09	N.D	0.49	0.30	N.D	N.D
glass	0.01	0.02	3.49	0.11	0	4.96	1.18	N.D	N.D
EAFS	0.03	0.01	0.05	0.13	0.01	0.18	3.33	N.D	N.D
EAFD	1.16	1.55	9.77	0.27	1.33	1.43	0.58	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

表 4.2.8.2 港區淤泥於 1100°C 燒製後之 M-TCLP 值

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	sediment 1150°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.05	0.03	2.61	0.03	0.03	N.D	2.43	N.D	N.D
2	0.01	0.03	1.80	0.03	0.03	N.D	1.79	N.D	N.D
3	0.01	0.03	2.12	0.05	0.03	N.D	1.88	N.D	N.D
4	0.02	0.03	1.75	0.05	0.04	N.D	2.33	N.D	N.D
5	0.01	0.03	1.96	0.04	0.03	N.D	2.09	N.D	N.D
6	0.06	0.03	2.00	0.04	0.03	N.D	2.63	N.D	N.D
7	0.01	0.03	2.23	0.04	0.03	N.D	2.74	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

表 4.2.8.3 玻璃粉/港區淤泥於 1150°C 燒製後之 M-TCLP 值

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	glass/sediment =10/100 1150°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.04	0.01	1.43	N.D	0.03	0.05	1.44	N.D	N.D
2	0.07	0.01	1.62	N.D	0.03	0.03	1.66	N.D	N.D
3	0.06	0.01	1.68	N.D	0.03	0.03	1.27	N.D	N.D
4	0.03	0.01	1.57	N.D	0.03	0.03	1.84	N.D	N.D
5	0.01	0.01	1.66	N.D	0.03	0.01	1.81	N.D	N.D
6	0.02	0.01	1.74	N.D	0.03	0.02	1.72	N.D	N.D
7	0.05	0.01	1.48	N.D	0.03	0.01	1.64	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	glass /sediment =20/100 1150°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.04	0.01	1.43	N.D	0.02	0.08	1.38	N.D	N.D
2	0.04	0.01	1.60	N.D	0.02	0.05	1.61	N.D	N.D
3	0.04	0.01	1.53	N.D	0.03	0.04	1.26	N.D	N.D
4	0.01	0.01	1.32	N.D	0.03	0.03	1.39	N.D	N.D
5	0.01	0.01	1.28	N.D	0.03	0.03	1.31	N.D	N.D
6	0.02	0.01	1.36	N.D	0.03	0.02	1.33	N.D	N.D
7	0.01	0.01	1.58	N.D	0.02	0.02	1.47	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	glass /sediment =30/100 1150°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.03	0.01	1.36	N.D	0.02	0.4	1.01	N.D	N.D
2	0.02	0.01	1.31	N.D	0.02	0.07	0.31	N.D	N.D
3	0.04	0.01	1.39	N.D	0.02	0.05	1.20	N.D	N.D
4	0.02	0.01	1.40	N.D	0.02	0.04	1.24	N.D	N.D
5	0.01	0.01	1.48	N.D	0.02	0.04	1.64	N.D	N.D
6	0.02	0.01	1.35	N.D	0.01	0.03	1.17	N.D	N.D
7	0.03	0.01	1.52	N.D	0.02	0.02	1.38	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	glass /sediment =40/100 1150°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.02	0.01	1.25	N.D	0.02	0.76	0.94	N.D	N.D
2	0.02	0.01	1.12	N.D	0.01	0.11	1.28	N.D	N.D
3	0.02	0.01	1.12	N.D	0.01	0.07	1.03	N.D	N.D
4	0.04	0.01	1.33	N.D	0.01	0.05	1.12	N.D	N.D
5	0.01	0.01	1.27	N.D	0.01	0.04	1.29	N.D	N.D
6	0.02	0.01	1.18	N.D	0.02	0.04	1.13	N.D	N.D
7	0.03	0.01	1.27	N.D	0.02	0.04	1.17	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	glass /sediment =50/100 1150°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.05	N.D	1.15	0.03	N.D	0.25	0.69	N.D	N.D
2	0.01	N.D	1.23	0.03	0.01	0.03	0.80	N.D	N.D
3	0.01	N.D	1.07	0.02	0.01	0.02	0.81	N.D	N.D
4	0.02	N.D	1.01	0.02	0.01	0.01	0.83	N.D	N.D
5	N.D	N.D	1.17	0.02	0.01	0.01	1.00	N.D	N.D
6	0.01	N.D	1.08	0.03	0.01	0.01	0.87	N.D	N.D
7	N.D	N.D	1.19	N.D	0.01	0.03	0.79	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

表 4.2.8.4 集塵灰/港區淤泥於 1050°C 燒製後之 M-TCLP 值

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =10/100 1050°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.15	N.D	1.57	N.D	N.D	0.06	2.12	N.D	N.D
2	0.14	N.D	2.36	N.D	N.D	0.03	2.02	N.D	N.D
3	0.12	N.D	2.09	N.D	N.D	0.03	1.89	N.D	N.D
4	0.12	N.D	2.13	N.D	N.D	0.03	1.96	N.D	N.D
5	0.11	N.D	2.02	N.D	N.D	0.03	2.05	N.D	N.D
6	0.11	N.D	1.83	N.D	N.D	0.03	1.97	N.D	N.D
7	0.11	N.D	2.10	N.D	N.D	0.02	1.89	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =20/100 1050°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.13	0.01	1.81	N.D	N.D	0.05	2.16	N.D	N.D
2	0.12	N.D	1.87	N.D	N.D	0.04	2.07	N.D	N.D
3	0.11	N.D	1.59	N.D	N.D	0.03	2.13	N.D	N.D
4	0.12	N.D	1.82	N.D	N.D	0.10	1.91	N.D	N.D
5	0.11	N.D	1.66	N.D	N.D	0.02	1.87	N.D	N.D
6	0.12	N.D	2.12	N.D	N.D	0.03	1.96	N.D	N.D
7	0.11	N.D	1.69	N.D	N.D	0.01	1.84	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =30/100 1050°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.12	N.D	1.63	N.D	N.D	0.02	2.17	N.D	N.D
2	0.11	N.D	1.64	N.D	N.D	0.02	2.26	N.D	N.D
3	0.11	N.D	1.62	N.D	N.D	0.03	2.11	N.D	N.D
4	0.11	N.D	1.59	N.D	N.D	0.01	2.07	N.D	N.D
5	0.11	N.D	1.72	N.D	N.D	0.02	2.03	N.D	N.D
6	0.11	N.D	3.85	N.D	N.D	0.02	1.97	N.D	N.D
7	0.11	N.D	1.78	N.D	N.D	0.01	2.05	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =40/100 1050°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.13	0.01	1.60	0.01	N.D	0.02	2.31	N.D	N.D
2	0.13	0.01	2.23	N.D	N.D	0.03	2.12	N.D	N.D
3	0.12	N.D	1.88	N.D	N.D	0.03	2.18	N.D	N.D
4	0.11	N.D	1.66	N.D	N.D	N.D	2.07	N.D	N.D
5	0.12	N.D	1.88	N.D	N.D	N.D	2.22	N.D	N.D
6	0.11	N.D	1.62	N.D	N.D	N.D	2.11	N.D	N.D
7	0.11	N.D	1.74	N.D	N.D	N.D	2.09	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =50/100 1050°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.17	N.D	1.98	N.D	N.D	0.01	2.33	N.D	N.D
2	0.17	N.D	1.90	N.D	N.D	0.01	2.35	N.D	N.D
3	0.12	N.D	2.09	N.D	N.D	0.01	2.29	N.D	N.D
4	0.11	N.D	1.58	N.D	N.D	N.D	2.21	N.D	N.D
5	0.12	N.D	1.84	N.D	N.D	N.D	2.14	N.D	N.D
6	0.11	N.D	1.72	N.D	N.D	N.D	2.27	N.D	N.D
7	0.11	N.D	1.75	N.D	N.D	N.D	2.22	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

表 4.2.8.5 爐渣/港區淤泥於 1100°C 燒製後之 M-TCLP 值

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFS/sediment =10/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.15	N.D	2.74	0.01	N.D	0.05	3.16	N.D	N.D
2	0.15	N.D	2.68	N.D	N.D	0.05	2.72	N.D	N.D
3	0.14	N.D	3.04	N.D	N.D	0.04	2.31	N.D	N.D
4	0.15	N.D	2.62	N.D	N.D	0.03	2.56	N.D	N.D
5	0.13	N.D	2.44	N.D	N.D	0.03	2.07	N.D	N.D
6	0.13	N.D	2.64	N.D	N.D	0.03	2.93	N.D	N.D
7	0.13	N.D	2.82	N.D	N.D	0.03	2.64	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFS/sediment =20/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.18	N.D	2.65	N.D	N.D	0.05	2.42	N.D	N.D
2	0.13	N.D	2.51	N.D	N.D	0.02	2.12	N.D	N.D
3	0.13	N.D	2.24	N.D	N.D	0.02	2.69	N.D	N.D
4	0.12	N.D	1.90	N.D	N.D	0.01	2.63	N.D	N.D
5	0.12	N.D	1.99	N.D	N.D	0.02	2.23	N.D	N.D
6	0.12	N.D	2.55	N.D	N.D	0.02	1.99	N.D	N.D
7	0.12	N.D	2.38	N.D	N.D	0.02	2.29	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFS/sediment =30/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.30	N.D	2.95	N.D	N.D	0.04	1.7	N.D	N.D
2	0.16	N.D	2.29	N.D	N.D	0.02	2.25	N.D	N.D
3	0.14	N.D	1.91	N.D	N.D	0.03	2.21	N.D	N.D
4	0.13	N.D	1.78	N.D	N.D	0.03	1.82	N.D	N.D
5	0.12	N.D	1.78	N.D	N.D	0.02	2.1	N.D	N.D
6	0.12	N.D	1.92	N.D	N.D	0.01	1.77	N.D	N.D
7	0.13	N.D	2.07	N.D	N.D	0.01	1.9	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFS/sediment =40/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.35	N.D	3.95	N.D	N.D	0.12	1.69	N.D	N.D
2	0.15	N.D	1.67	N.D	N.D	0.03	1.59	N.D	N.D
3	0.13	N.D	2.03	N.D	N.D	0.02	2.01	N.D	N.D
4	0.12	N.D	1.83	N.D	N.D	0.01	2.24	N.D	N.D
5	0.12	N.D	1.65	N.D	N.D	0.01	2.52	N.D	N.D
6	0.13	N.D	2.18	N.D	N.D	0.03	2.68	N.D	N.D
7	0.12	N.D	1.79	N.D	N.D	0.01	2.06	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFS/sediment =50/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.29	N.D	4.94	N.D	N.D	0.07	1.57	N.D	N.D
2	0.20	0.05	2.59	N.D	N.D	0.02	2.20	N.D	N.D
3	0.13	N.D	2.02	N.D	N.D	0.01	2.19	N.D	N.D
4	0.13	N.D	2.04	N.D	N.D	0.02	2.11	N.D	N.D
5	0.12	N.D	2.02	N.D	N.D	0.01	2.2	N.D	N.D
6	0.14	N.D	3.37	N.D	N.D	0.04	1.94	N.D	N.D
7	0.12	N.D	1.77	N.D	N.D	N.D	2.02	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

表 4.2.8.6 集塵灰/港區淤泥於 1100°C 燒製後之 M-TCLP 值

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =10/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.23	0.01	2.52	N.D	0.05	0.08	2.56	N.D	N.D
2	0.07	0.01	2.15	N.D	0.05	0.04	1.91	N.D	N.D
3	0.04	0.01	1.99	N.D	0.05	0.04	2.08	N.D	N.D
4	0.03	0.01	1.77	N.D	0.05	0.03	2.27	N.D	N.D
5	0.01	0.01	2.15	N.D	0.05	0.03	2.18	N.D	N.D
6	0.02	0.01	2.04	N.D	0.05	0.03	1.84	N.D	N.D
7	0.01	0.01	1.80	N.D	0.04	0.03	2.09	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =20/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.14	0.01	2.15	N.D	0.04	0.08	2.07	N.D	N.D
2	0.05	0.01	1.81	N.D	0.04	0.05	1.66	N.D	N.D
3	0.04	0.01	1.79	N.D	0.04	0.04	2.03	N.D	N.D
4	0.02	0.01	1.69	N.D	0.04	0.03	1.77	N.D	N.D
5	0.01	0.01	1.99	N.D	0.04	0.03	2.29	N.D	N.D
6	0.02	0.01	1.79	N.D	0.04	0.03	1.78	N.D	N.D
7	0.02	0.01	1.94	N.D	0.04	0.03	2.13	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

TCLP 溶出次序	重金屬 M-TCLP 溶出濃度(mg/L)								
	EAFD/sediment =30/100 1100°C								
	Cu	Cr	Zn	Se	Cd	Pb	Ba	As	Hg
1	0.15	0.01	2.19	N.D	0.04	0.08	2.01	N.D	N.D
2	0.05	0.01	1.86	N.D	0.04	0.04	1.67	N.D	N.D
3	0.04	0.01	1.78	N.D	0.04	0.04	2.04	N.D	N.D
4	0.02	0.01	1.66	N.D	0.03	0.03	1.44	N.D	N.D
5	0.01	0.01	1.79	N.D	0.03	0.03	1.74	N.D	N.D
6	0.02	0.01	1.87	N.D	0.03	0.03	1.72	N.D	N.D
7	0.02	0.01	1.78	N.D	0.03	0.03	1.71	N.D	N.D
法規標準	15	5	25	1	1	5	100	5	0.2

*N.D.表示檢測值低於儀器偵測極限 (Cr : 0.005 mg/L ; Cd : 0.008 mg/L ; Cu : 0.003 mg/L ; Pb : 0.012 mg/L ; Zn : 0.005 mg/L ; Se : 0.021 mg/L ; As : 0.462 mg/L ; Hg : 0.008 mg/L)

第五章

結論與建議

5.1 結論

本研究利用港區淤泥添加不同廢棄物(玻璃粉、爐渣和集塵灰)在不同溫度下，燒製成輕質骨材，得到下列結論：

- (1) 港區淤泥和集塵灰 d_{50} 粒徑分別為 $6.58\ \mu\text{m}$ 及 $3.45\ \mu\text{m}$ ，依土壤粒徑分類指標，港區淤泥和集塵灰主要為粉粒($2\sim 53\ \mu\text{m}$)和粘土(小於 $2\ \mu\text{m}$)，然而粒徑越小則有助於輕質骨材的燒結發泡反應。
- (2) 港區淤泥是以矽氧化物、鋁氧化物佔較大比例，玻璃粉則含有高比例之矽氧化物、鹼金屬族(鈉、鉀)氧化物。鹼金屬含量越高有助於降低骨材燒結溫度；爐渣主要以鐵氧化物和鈣氧化物為主，集塵灰則以鐵氧化物和鋅氧化物為主。
- (3) 本實驗所使用玻璃粉/港區淤泥之配比皆位於Riley之三成份圖最佳燒製範圍內；爐渣(或集塵灰)/港區淤泥比例為30/100、40/100和50/100時，位於Riley之適合燒製範圍外。燒製結果顯示玻璃粉、爐渣或集塵灰添加比例越高，發泡效果越好，與Riley提出之最佳燒製範圍有所出入，推測為爐渣和集塵灰中之大量氧化鐵造成發泡現象的產生。
- (4) 當玻璃粉、爐渣或集塵灰比例添加越高，顆粒密度隨之越小。爐渣和集塵灰中可能會釋放出足量氣體，使試體燒結發泡良好，密度因而降低。
- (5) 玻璃粉添加比例越高有助於降低吸水率，尤其當玻璃粉添加於港區淤泥40/100至40wt%以上，吸水率出現最低數值1.5%。混凝土中骨材吸水率越低有助於和水泥接觸之謀合度，使得混凝土有更好的抗壓強度。
- (6) 隨著提高燒製溫度，港區淤泥添加各廢棄物樣品內部因發泡而形成明顯之孔洞。推測其原因，高溫下氣體劇烈產生，試體黏滯流之黏度越低，且燒結黏滯流之張力小，造成內部孔洞增大、試體膨脹，顆粒密度下降。
- (7) 經高溫燒製後，各重金屬之溶出值皆低於公告標準，推測為高溫燒製過程中部份重金屬可能揮發，且骨材燒結後產生之玻璃相能有效處理重金屬使之包覆在骨材內部，無法溶出，形成無害化，對於環境未出現負面之影響。

5.2 建議

- (1) 由本實驗結果得知爐渣(集塵灰)/港區淤泥比為 30/100、40/100 和 50/100 時，配比位於 Riley 提出之適合燒製範圍外，但卻仍可發泡，因此可嘗試配置不同配比，繼續探討，以便將爐渣(集塵灰)/港區淤泥將可發泡範圍繪出。
- (2) 目前實驗皆利用高壓造粒，因此可嘗試利用手搓常壓造粒，將來運用於實廠可利用滾動造粒技術，或採用擠壓成型機及切割設備做為造粒機。
- (3) 本實驗室利用港區淤泥添加爐渣燒製骨材成果外觀不彰，因此建議可再添加玻璃粉尋求最佳配比進行混合燒製輕質骨材，或將爐渣球磨至與集塵灰類似之 d_{50} ，盼能改善。
- (4) 利用 hot-stage microscope 觀察試體燒製變化，尋求最佳燒製時間，並可配合 TA-MS 尋找出發泡氣體並探討其機制，已達節能目的。

參考文獻

- Acchar, W., Vieira, F.A., and Hotza, D. 2006. Effect of marble and granite sludge in clay materials. *Materials Science and Engineering*. A419:306-309.
- Al-Zaid, R. Z., Al-Sugair, F. H., and Al-Negheimish, A. I. 1997. Investigation of potential uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete. *Cement and Concrete Research*. 27(2):267-268.
- Bhatty, J. I., and Redit, K. J. 1989. Moderate strength concrete from lightweight sludge ash aggregates. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 11(3):179-187.
- Bozkurt, N., and Yazicioglu, S. 2010. Strength and capillary water absorption of lightweight concrete under different curing conditions. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 17:145-151.
- Chang, F. C., Lo, S. L., Lee, M. Y., Ko, C. H., Lin, J. D., Huang, and S. C. Wang, C. F. 2007. Leachability of metals from sludge-based artificial lightweight aggregate. *Journal of Hazardous Materials*. 146: 98–105.
- Cheeseman, C.R., and Viridi, G.S. 2005. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. *Resources, Conservation and Recycling*. 45:18-30.
- Chen, G., Lee, H., Young, K.L., Yue, P.L., Wong, A., Tao, T., Choi, K.K., 2002. Glass recycling in cement production – an innovative approach. *Waste Management*. 22 (7), 747–753.
- Chen, H.J., Wang, S.Y., and Tang, C.W. 2010. Reuse of incineration fly ashes and reaction ashes for manufacturing lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*. 24:46-55.
- Chiou, I. J., Wang, K. S., Chen, C. H., And Lin, Y. T. 2006. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. *Waste Management*. 26:1453-1461.
- Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G., and Montenero, A. 2005. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*. 25: 197–201.

- CEN_2002. "Lightweight aggregates. Part 1: Lightweight aggregates for concrete and mortar." *EN13055-1*, Brussels, Belgium.
- Ducman, V., Mladenovic, A., and Suput, J. S. 2002. Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*. 32:223-226.
- Ducman, V., and Mirtic, B. 2009. The applicability of different waste materials for the production of lightweight aggregates. *Waste Management*. 29:2361-2368.
- Fakhfakh, E., Hajjaji, W., Medhioub, M., Rocha, F., López-Galindo, A., Setti, M., Kooli, F., Zargouni, F., and Jamoussi, F. 2007. Effects of sand addition on production of lightweight aggregates from Tunisian smectite-rich clayey rocks. *Applied Clay Science*. 35:228-237.
- Fernández-Olmo, I., Laso, C., and Irabien, A. 2007. Modeling of zinc solubility in stabilized/solidified electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 144:720-724.
- Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., Gennaro, M., Dondi, M., and Langella, A. 2004. Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates. *Applied Clay Science*. 25:71-81.
- Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., Gennaro, M., Dondi, M., Graziano, S.F. and Langella, A. 2007. Campanian Ignimbrite as raw material for lightweight aggregates. *Applied Clay Science*. 37:115-126.
- German, R. M. 1996. *Sintering theory practice*. An Imprint of Wiley.
ISBN:0-471-05786-X.
- Haro Vazquez, Ma. P., Alcdntar Vazquez, B. C., Villafuerte Castrejon, Ma. E., and G.C. Diaz Trujillo. 2008. Glass-Ceramics Manufacturing from Sludge and Anodized Waste. *American Ceramic Society Bulletin*. 87(1): 50–52.
- Holm, T. A., and Valsangkar, A. J. 1993. Lightweight aggregate soil mechanics: properties and applications. *Transportation Research Record*. 1422:7-13.
- Huang, S. C., Chang, F. C., Lo, S. L., Lee, M. Y., Wang, C. F., and Lin, J. D. 2007. Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge,

- and incinerator fly ash. *Journal of hazardous materials*. 144(1-2):52-58.
- Hupa, M., Skrifvars B. J., and Moilanen, A. 1989. Measuring the sintering tendency of ash by a laboratory method. *Journal of the Institute of Energy*. 131-137.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., and Perdikatsis, V. 2007. Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags. *Advances In Geopokymmer Science & Technology*. 42:3073–3082.
- Laforest, G., and Duchesne, J. 2007. Investigation of stabilization/solidification for treatment of electric arc furnace dust: Dynamic leaching of monolithic specimens. *Cement and Concrete Research*. . 37:1639-1646.
- LuxaÂn, M.P., Sotolongo, R., and Dorrego, F., and Herrero, E. 2000. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. *Cement and Concrete Research*. 30:517-519.
- Manso, J.M., Gonzalez, J.J., and Polanco, J.A. 2004. Electric Arc Furnace Slag in Concrete. *Journal of materials in civil engineering*. 16(6):639-645.
- Manso, J. M., Polanco, J. A., Losanez, M., Gonzalez, J. J. 2006. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 28:523-534.
- Menad, N., Ayala, J.N., Garcia-Carcedo, F., Ruiz-Ayu'car, E., and Herna'ndez, A. 2003. Study of the presence of fluorine in the recycled fractions during carbothermal treatment of EAF dust. *Waste Management*. 23:483-491.
- Mouli, M., and Khelafi, H. 2008. Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and Environment*. 43:31-36.
- Mun, K.J. 2007. Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete. *Construction and Building Materials*. 21:1583-1588.
- Nemes, R., and Józsa, Z. 2006. Strength of Lightweight Glass Aggregate Concrete. *Journal of materials in civil engineering*. 18(5):710-714.
- Nowok, J. W., Benson, S. A., Jones, M. L., and Kalmanovitch, D. P. 1990. Sintering behaviour and strength development in various coal ashes. *Fuel*. 69:1020-1028.

- Pellegrino, C., Gaddo, V. 2009. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement & Concrete Composites*. 31:663–671.
- Qi, Y., Yue, Q., Han, S., Yue, M., Gao, B., Yu, H., and Shao, T. 2010. Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 176:76-84.
- Rakshvir, M., Barai, S.V., 2006. Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research* 24 (3), 225–233.
- Riley, C.M. 1951. Association of chemical process to the bloating clay. *Journal of American Ceramic Scission*. 34(4):121-128.
- Skrifvars, B. J., Hupa, M., Backman, R., and Hiltunen, M. 1994. Sintering mechanisms of FBC ashes. *Fuel*. 73(2):171-176.
- Sobolev, K., Turker, P., Soboleva, S., Iscioglu, G., 2006. Utilization of waste glass in ECO-cement: strength properties and microstructural observations. *Waste Management* 27 (7), 971–976.
- Tay, J. H., and Show, K. Y. 1997. Resource recovery of sludge as a building and construction material-a future trend in sludge management. *Water Science and Technology*. 36(11):259-266.
- Tsai, C.C., Wang, K.S., and Chiou, I.J. 2006. Effect of SiO₂–Al₂O₃–flux ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. B134:87-93.
- US EPA. 1986. Multiple Extraction Procedure. Method 1320.
- Wainwright, P.J., and Cresswell, D.J.F. 2001. Synthetic aggregates from combustion ashes using an innovative rotary kiln. *Waste Management*. 21:241–246
- Wang, K.S., Chiang, K.Y., and Perng, J.K. 1998. The characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes. *J. Hazard. Mater.* 59:201–210.
- Wang, X., Jin, Y., Wang, Z., Nie, Y., Huang, Q., and Wang, Q. 2009. Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash. *Waste Management*. 29:1330–1335.

- Wei, Y.L., Yang, J.C., Lin, Y.Y., Chuang, S.Y., and Wang, H.P. 2008. Recycling of harbor sediment as lightweight aggregate. *Marine Pollution Bulletin*. 57: 867-872.
- Wei, Y.L., and Lin, Y.Y. 2009. Role of Fe compounds in light aggregate formation from a reservoir sediment. *Journal of Hazardous Materials*. 171:111-115.
- Xu, G., Zou, J., and Li, G. 2008. Ceramsite Made with Water and Wastewater Sludge and its Characteristics Affected by SiO₂ and Al₂O₃. *Environmental Science & Technology*. 42:7417-7423.
- 王根元，「有機質和氧化鐵的氧化-還原反應對黏土岩成岩作用和黏土加熱膨脹的影響」，北京市建材所，北京(1979)。
- 王鯤生、胡趙原、蔡振球、張孟弘，「下水污泥灰加壓成形對燒成輕質化微結構變化之探討」，第十八屆廢棄物處理技術研討會論文集，(2003)。
- 王凱中、林正芳，「電爐渣集塵灰混合廢棄物分選減量介紹」，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第十九期 第12-17 頁，(2006)。
- 李俊德，「輕質骨材性質與最佳混凝土強度之研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，(1996)。
- 江奇成，「電弧爐煉鋼還原渣與鑄件廢料摻用於混凝土再生材之模式研究」，博士學位論文，國立台灣科技大學營建工程系，(2005)。
- 余岳峰，「下水污泥焚化灰渣燒成輕質骨材特性之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，(2000)。
- 吳銘誠，「不鏽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，(2003)。
- 林月婷，「下水污泥焚化灰燒製輕質骨材與應用於混凝土材料之性質研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，(2003)。
- 林永揚，「水庫淤泥混合焚化飛灰燒製輕質骨材」，碩士論文，東海大學環境科學與工程研究所，(2006)。
- 周贊祐，「水庫淤泥燒結與發泡之研究」，碩士論文，東海大學環境科學研究所，(2005)。

張毓舜，「下水污泥焚化灰渣燒結特性之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，（1999）。

陳志峰，「高雄港區沉積物及底層水中重金屬之分部探討」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所，（2005）。

陳烈芳，「燒脹粉煤灰陶粒的膨脹機理研究」，第二屆輕質骨材混泥土研討會論文集，（2005）。

陳致銘，「水庫淤泥燒製之中空球及其工程性質」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，（2006）。

黃振維，「電弧爐煉鋼集塵灰Cd、Pb 無害化技術與流程之研究」，碩士論文，國立聯合大學環境與安全衛生工程學系碩士班，（2007）。

莊世鈺，「廢棄淤泥添加發泡熔融劑燒製輕質骨材之研究」，碩士論文，東海大學環境科學與工程研究所，（2008）。

楊金鐘, 2003, “添加電弧爐煉鋼集塵灰當作製磚原料實廠技術開發,” 2003 產業環保工程實務技術研討會論文集，第 411-425 頁, 11 月 27 日, 台北市。

楊景強，「輕質骨材燒結與發泡機制之研究」，碩士論文，東海大學環境科學與工程研究所，（2007）。

葉春如，「臺灣人造輕質骨材原料的開發潛力」，第二屆輕質骨材混泥土研討會論文集，（2005）。

鄭清源，“電弧爐煉鋼爐渣特性及取代混凝土粗骨材之研究”，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，（2000）。

蘇南，「玻璃瀝青混凝土之工程特性與應用實例」，第一屆鋪面工程師生研究成果聯合成果發表論文集，12—26（2000）。

龔洛書及柳春圃，輕集料混凝土，中國鐵道出版社，第82-87 頁，北京（1996）。

<http://sgw.epa.gov.tw/SGM/Public/News.aspx?Page=7>

行政院環境保護署-土壤及地下水管理資訊系統

<http://waste.epa.gov.tw/prog/IndexFrame.asp?Func=5>

行政院環境保護署-事業廢棄物管制資訊網

<http://www.khb.gov.tw/>

交通部高雄港務局全球資訊網