

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高職組 土木科

第三名

091201

轉廢為寶點石成金

學校名稱：國立花蓮高級工業職業學校

作者：	指導老師：
職二 呂婉榛	張齊憲
職二 宋雅雯	王美惠
職二 蔡岳廷	
職二 涂盛宏	

關鍵詞：石材廢泥、再生粒料、輕質粒料

摘 要

本研究希冀『轉廢為寶 點石成金』，以石材廢泥為研究材料，利用熱處理方式燒製混凝土廣泛使用之常重粒料及輕質粒料，轉危機為商機，減少環境污染與衝擊，傳承永續經營之居住環境。

經化學組成研判本研究之石材廢泥應為花崗石廢泥，且符合燒製輕質粒料之膨脹範圍，以不同的燒結氣氛進行再生粒料之燒製實驗，探討燒結溫度（1050°C、1075°C、1100°C、1125°C、1150°C）及燒結時間（5分鐘、15分鐘、60分鐘）之影響。

試驗結果顯示，常重粒料之燒結溫度至少需達1100°C以上，且燒結溫度控制遠比燒結時間的掌握來得重要，燒結溫度1125°C、燒結時間15分鐘可達燒製常重粒料之最佳效果；而燒製輕質粒料最佳情況為加熱達1100°C，再放入高溫爐中燒結15分鐘，可燒製出比重為1.25之輕質粒料。

壹、研究動機

工程材料課程石材單元中得知，台灣石材加工業幾乎全數集中於花蓮地區，而天然石材在切割、加工過程中產生數量龐大的石材廢棄物，每年超過136萬公噸，其中石材廢料佔31萬公噸，石材廢泥佔105萬公噸（花蓮縣環保局），其雖對經濟發展有顯著之貢獻，但日益增多的事業廢棄物，卻也造成環境上之負擔。

地狹人稠的台灣，自然資源匱乏且廢棄物處置地點日益難求，若可依據廢棄物減量化、安定化、無害化及資源化之原則，將石材廢棄物妥適處理成爲健康安全、低污染，且可再利用之再生綠建材，將可轉『廢』爲『寶』，轉危機爲商機，獲得可觀的經濟價值與社會效益。

鑑於石材廢棄物非屬事業有害廢棄物，且經濟部工業局亦明訂石材廢泥爲事業廢棄物再利用種類之一，故希冀藉此研究，增加石材廢棄物減量方式與提昇資源有效利用技術，讓石材廢泥物盡其用，燒製成可作爲混凝土廣泛使用之『常重粒料』及『輕質粒料』，不僅可提供業者有效處理與應用事業廢棄物的另一個管道，更可減少環境污染與衝擊，維護生態環境平衡，促進建築與環境共生共利，傳承永續經營之居住環境。

貳、研究目的

台灣地區之石材加工多使用進口原石為主，其中花崗石約佔87%、大理石約佔10%及蛇紋石約佔3%，欲將石材廢泥減量化之再利用處理，應針對花崗石廢泥才可達到最大效益。

目前國內已有將水庫淤泥及下水道污泥燒製成輕質粒料之成功經驗，尚無以成分更為穩定之石材廢泥燒製成輕質粒料，故本研究希冀將石材廢泥燒製成再生粒料，主要目的如下：

1. 建立石材廢泥基本性質，作為相關研究之參考。
2. 探討經由不同之熱處理方式燒製常重粒料及輕質粒料時，燒結溫度、燒結時間、燒結氣氛對其之影響。
3. 初步評估其能否做為混凝土之常重粒料及輕質粒料，並找出最佳之燒結溫度與燒結時間。
4. 由燒製結果分析石材廢泥經燒結之可再利用途徑。

參、研究設備及器材



圖 3-1 電熱式高溫爐



圖 3-2 烘箱



圖 3-3 X-Ray 螢光分析儀(XRF)



圖 3-4 X-Ray 繞射分析儀(XRD)



圖 3-5 攪碎機



圖 3-6 電子秤



圖 3-7 李氏比重瓶

肆、研究過程或方法

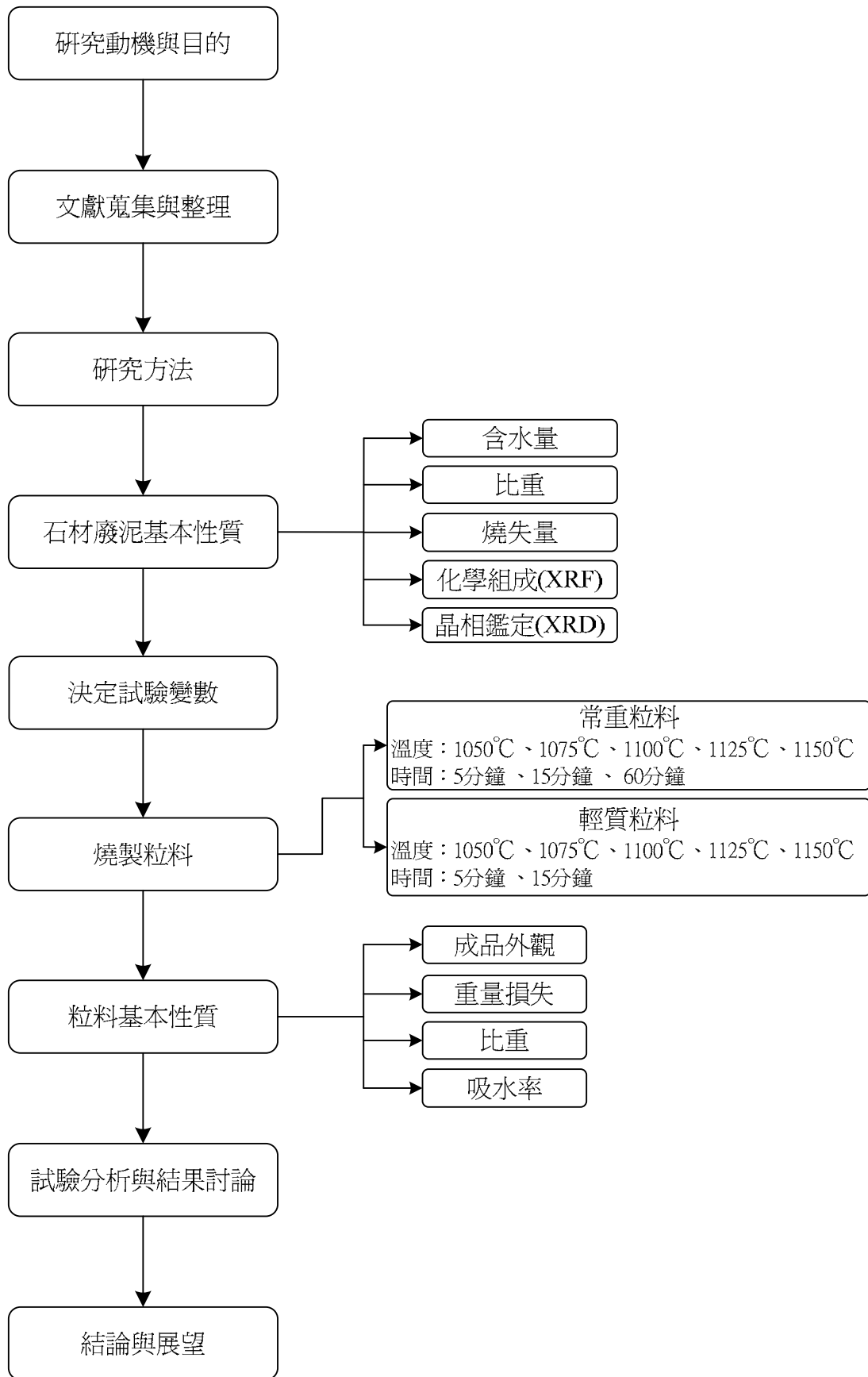


圖 4-1 研究流程圖

一、石材廢泥基本性質

鑑於石材廢棄物非屬事業有害廢棄物（有害事業廢棄物認定標準），且經毒性溶出試驗（TCLP）證實為無毒無害之事業廢棄物，故經濟部工業局亦明訂石材廢泥為事業廢棄物再利用種類之一，可將石材廢泥再利用為再生綠建材。

本研究之石材廢泥（圖 4-3）取自於花蓮石材資源化處理公司，其含水量約 30%~35%。經放置一段時間自然氣乾，含水量降低為 7.7%，且為達到均質化之效果，以攪碎機研磨 60 秒，使其成為均可通過#100 篩之石材廢泥粉末（圖 4-4），並充分攪拌均勻以做為實驗材料。



圖 4-2 花蓮地區石材廢泥堆置情形



圖 4-3 石材廢泥



圖 4-4 通過#100 篩之石材廢泥粉末

本研究將針對石材廢泥基本性質進行探討，相關試驗項目如下[1]：

(一) 含水量

將氣乾狀態之石材廢泥稱重，再放入烘箱中烘乾 24 小時後稱重。

$$\text{含水量}(\%) = \frac{W_{AD} - W_{OD}}{W_{OD}} \times 100\%$$

W_{AD} ：氣乾狀態石材廢泥重(g)

W_{OD} ：乾燥狀態石材廢泥重(g)

(二) 比重

利用李氏比重瓶進行比重試驗。

$$\text{比重} = \frac{W}{V}$$

W：乾燥狀態石材廢泥重(g)

V：試樣排開之體積(g)

(三) 燒失量

將乾燥試樣放置高溫爐中於 $950^{\circ}\text{C}\pm 25^{\circ}\text{C}$ 進行燒結一小時後，取出秤重，重複以上步驟直到重量不再改變，燒結前、後重量差所佔燒結前乾燥的重量之百分比。

(四) 化學組成分析 (XRF)

矽質材料主要成份分析採亞洲水泥花蓮廠之矽質原料主要成份分析方式 (XRF 玻璃熔融法)，係使用助熔劑在高溫下將矽質原料熔融製成玻璃餅後，使用已建立 XRF 標準檢量線，以 X-Ray 螢光分析儀分析試樣之化學組成份。(於亞洲水泥花蓮廠進行實驗)



圖 3-3 X-Ray 螢光分析儀 (XRF, Thermo ARL 8680)



圖 4-5 玻璃餅

(五) 晶相鑑定 (XRD)

將石材廢泥粉末置於 X-Ray 繞射分析儀中，操作電壓 40 KV，電流 35 mA，掃描速度 1.20 Deg/min，操作角度 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。掃描後所得之繞射圖譜，分別比對粉末繞射標準聯合委員會資料庫之標準圖譜，據以進行晶相鑑定與分析，研判石材廢泥之成份種類及可能來源。(於亞洲水泥花蓮廠進行實驗)



圖 3-4 X-Ray 繞射分析儀 (XRD, Scintag PAD 5V)

二、試驗變數及再生粒料編號

(一) 試驗變數

本研究預計燒結常重粒料及輕質粒料，試驗變數為燒結溫度及燒結時間。

燒結氣氛[2]：

1. 常重粒料：將粒料直接放入高溫爐中，再設定預定之燒結溫度及時間進行燒結。
2. 輕質粒料：加熱達預定溫度後，再打開高溫爐將粒料放入達預定之燒結時間。

燒結溫度：1050°C、1075°C、1100°C、1125°C、1150°C

燒結時間：5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘（輕質粒料不燒結 60 分鐘）

(二) 再生粒料編號

為清楚且明顯區別常重粒料與輕質粒料、燒結溫度、燒結時間，故將再生粒料進行編號，常重粒料編號以 A 表示、輕質粒料編號則以 B 表示；燒結溫度在前，燒結時間接續其後。

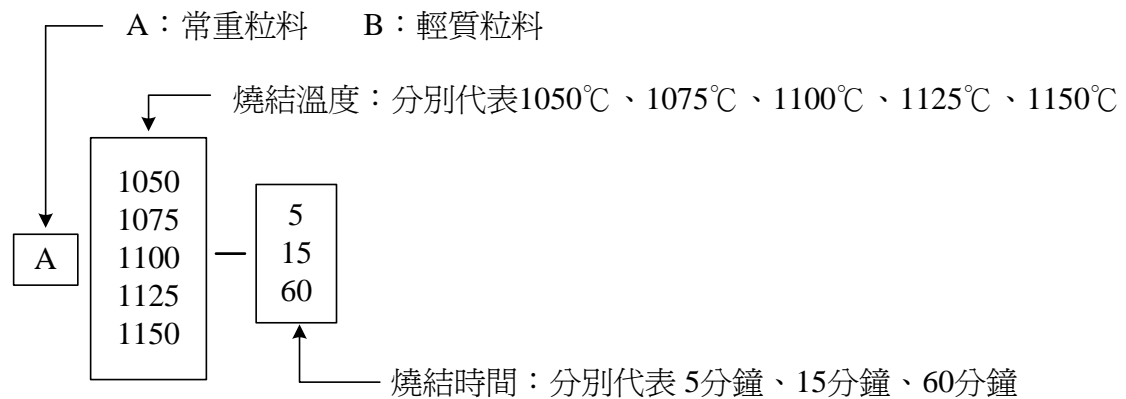


圖 4-6 材料編號說明情形

三、再生粒料基本性質

本研究將再生粒料燒結為常重粒料及輕質粒料，並分析其基本性質，試驗過程及分析項目如下：

(一) 造粒

將均質化之石材廢泥粉加入適量的水進行拌合，秤石材廢泥約 3g (2.8g~3.2g)，以搓湯圓方式進行造粒，其直徑約為 1.2 公分。



圖 4-7 石材廢泥造粒成品

(二) 燒結

1. 常重粒料

取約 550g 造粒試樣（氣乾狀態）置於不鏽鋼盤中，再放入高溫爐內進行燒結。控程分兩段設定，第一段設定到達預定之加熱溫度（1050°C、1075°C、1100°C、1125°C、1150°C），第二段設定持續所需之燒結時間（5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘），待完成後，粒料於高溫爐內緩慢降溫至接近室溫後取出，燒結溫度與燒結時間之關係如圖 4-8。

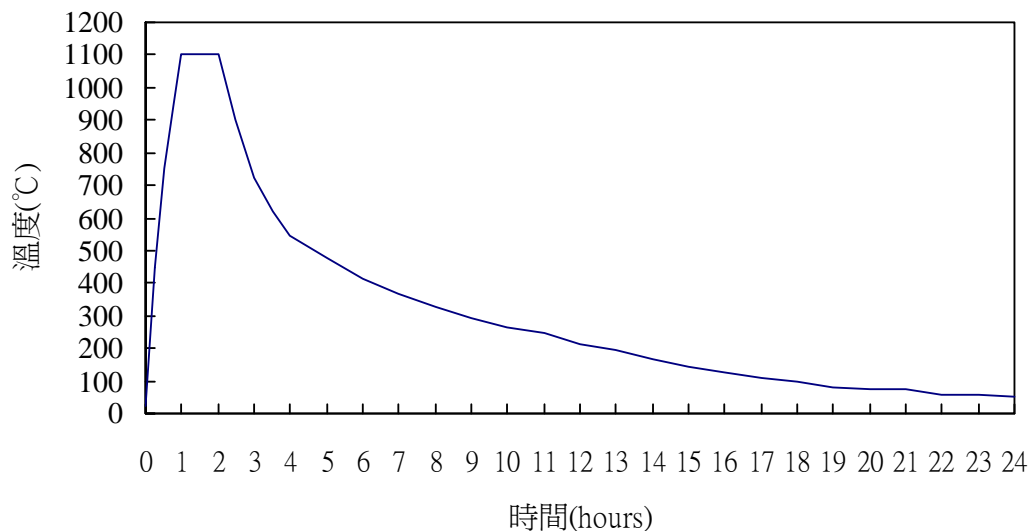


圖 4-8 燒結溫度與燒結時間之關係圖（以燒結 1100°C；60min 為例）

2. 輕質粒料

取約 550g 造粒試樣（氣乾狀態）置於不鏽鋼盤中，待預定加熱溫度（1050°C、1075°C、1100°C、1125°C、1150°C）到達時，迅速將高溫爐開啓，利用長桿將不鏽鋼盤放入高溫爐中進行燒結，此時溫度下降約 50°C~100°C，當溫度確實再到達預定溫度時，再以碼錶計時（5 分鐘、15 分鐘），完成後關掉電源。

輕質粒料之膨脹機理[3]

材料能否熱膨脹為輕質粒料製造上重要的一環，於 1948 年 J.E. Conley 和 H. Wilson 及 1950 年 C.M. Riley 的研究中，均指出原料發泡膨脹必須滿足兩要件。第一條件為材料必須產生高溫玻璃相，且具有足夠之黏滯性以滯含逸出之氣體。第二條件為材料中存在某些成分，在玻璃相形成後的溫度能同時逸出氣體。

材料在高溫下的熱膨脹是固相、液相、氣相三相動態平衡的結果，只有同時具備上述兩個條件，才可能獲得膨脹良好的均質多孔性輕質粒料。

(三) 成品外觀

利用視覺及觸覺觀察燒結後粒料表面及剖面情況，進行分析。

(四) 重量損失

燒結前後之重量損失為燒結前和燒結後的重量差所佔燒結前試樣的重量之百分比。

$$\text{重量損失}(\%) = \frac{W_A - W_B}{W_A} \times 100\%$$

W_A : 燒結前試樣重(g)

W_B : 燒結後試樣重(g)

(五) 比重 (容積比重) [4]

先秤面乾內飽和粒料重量為 W_{SSD} ，再將 1000ml 水裝入量筒內，稱其重量為 W_1 ，倒出約一半的水量，將粒料倒入量筒內，再加入水至刻畫 1000ml 處，稱其重量為 W_2 。

容積比重計算如下：

$$\text{比重} = \frac{W_{SSD}}{W_{SSD} + W_1 - W_2}$$

W_{SSD} : 面乾內飽和粒料重(g)

W_1 : 1000ml 水重+量筒重(g)

W_2 : 粒料重+量筒重+調整水位至 1000ml 之水重(g)



圖 4-9 比重試驗過程

(六) 吸水率[5]

將粒料烘乾(100~110°C)至恆重，冷卻後秤重為 W_{OD} ，再浸水 24 小時後取出，以吸水性之乾布將試體表面水膜擦乾，以達面乾內飽和狀態後秤重 W_{SSD} ，其吸水率計算如下：

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{W_{SSD} - W_{OD}}{W_{OD}}$$

W_{SSD} : 面乾內飽和粒料重(g)

W_{OD} : 乾燥粒料重(g)

伍、研究結果

一、石材廢泥（花崗石廢泥）基本性質

(一) 含水量

石材廢泥放置一段時間後，經含水量試驗測得氣乾含水量為 7.7%。

(二) 比重

以李氏比重瓶進行石材廢泥之比重試驗，石材廢泥比重為 2.70。

(三) 化學組成份及燒失量

石材廢泥化學成份分析

化學成份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Flux							
			Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
%	68.92	14.38	3.72	3.04	1.07	0.11	3.52	3.75	0.34	0.13

Flux = 15.68%

燒失量 L.O.I = 0.13%

經研判本研究取樣之石材廢泥確實為花崗石廢泥，且花崗石廢泥之化學成份符合輕質粒料膨脹範圍的區間內。

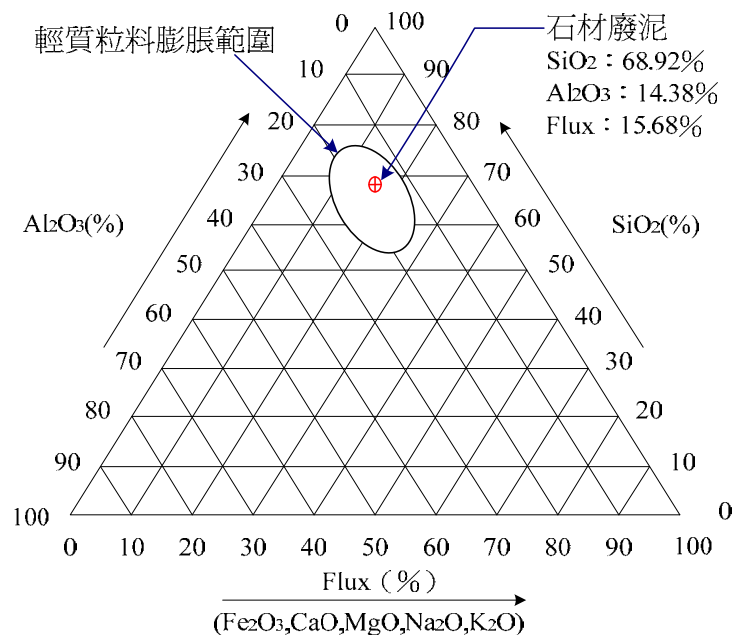


圖 5-1 輕質粒料膨脹區之組成範圍[4]

(四) 晶相鑑定

本研究以 X-Ray 繞射儀 (XRD) 來鑑定石材廢泥之結晶相之物種形態，XRD 分析圖譜如圖 5-2、圖 5-3、圖 5-4 所示，得知其礦物相主要成份為二氧化矽；次要成份為鈉長石與鉀長石。

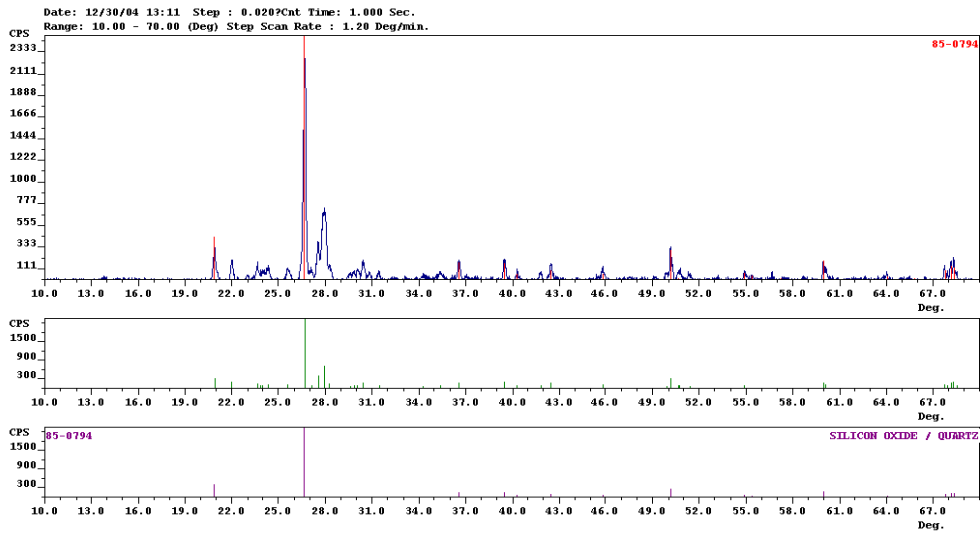


圖 5-2 石材廢泥於 X-Ray 繞射儀中二氧化矽成份比對結果

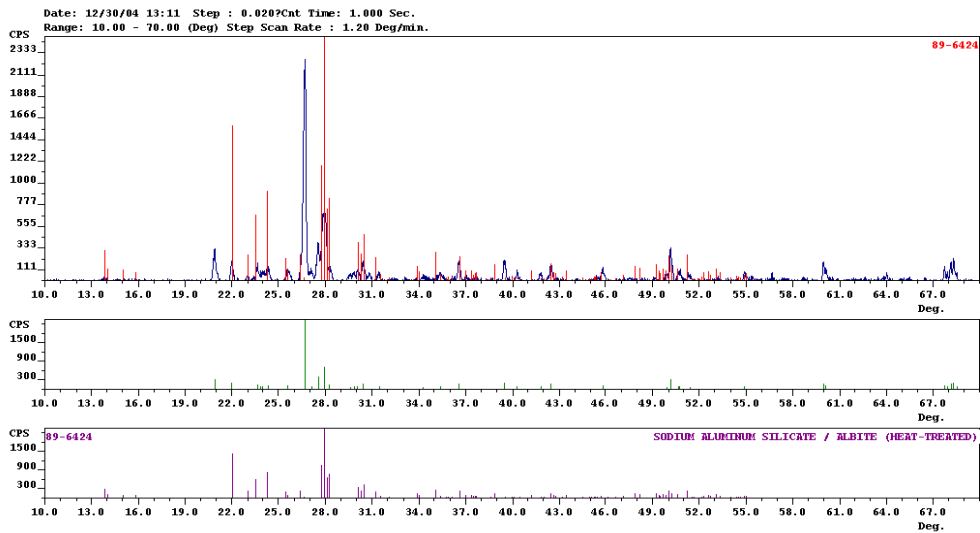


圖 5-3 石材廢泥於 X-Ray 繞射儀中鈉長石成份比對結果

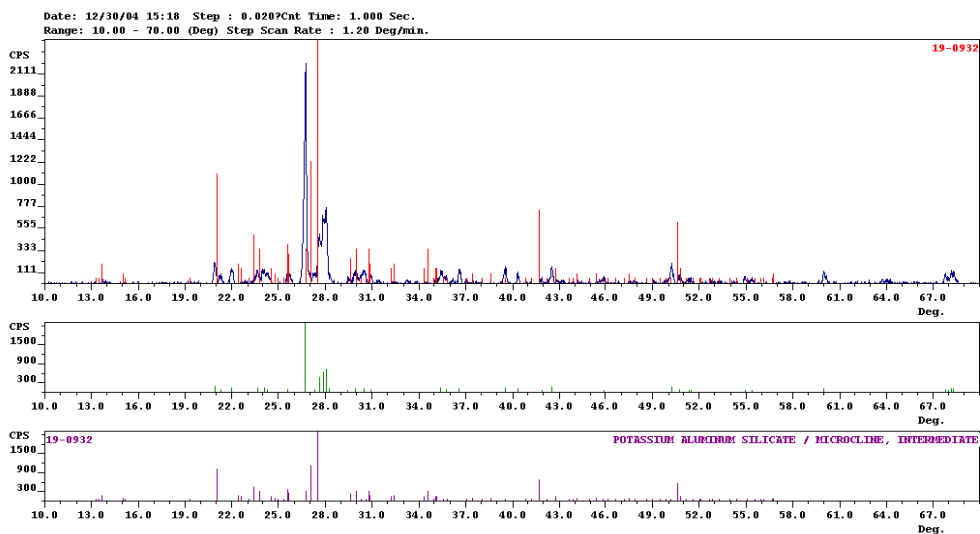


圖 5-4 石材廢泥於 X-Ray 繞射儀中鉀長石成份比對結果

二、再生粒料基本性質

(一)常重粒料

1. 成品外觀

(1)燒結溫度 1050°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘



圖 5-5 A1050-5 常重粒料外觀及剖面



圖 5-6 A1050-15 常重粒料外觀及剖面



圖 5-7 A1050-60 常重粒料外觀及剖面

1. 石材廢泥為灰色，燒結後 A1050-5、A1050-15、A1050-60 卻呈土黃色且略顯紅色，研判顏色改變可能是成份中含有氧化鐵的緣故。
2. 燒結 1050°C 任何時間之粒料，觸摸其表面及剖面內部皆有輕微粉屑，且用指甲刮過會有痕跡，得知粒料硬度比指甲低，確實無法作為混凝土之粒料。
3. 燒結溫度 1050°C，無論燒結時間為何，均無法將石材廢泥燒製成常重粒料。

(2)燒結溫度 1075°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘



圖 5-8 A1075-5 常重粒料外觀及剖面



圖 5-9 A1075-15 常重粒料外觀及剖面



圖 5-10 A1075-60 常重粒料外觀及剖面

1. A1075-5、A1075-15、A1075-60 為土黃色，但隨著燒結時間增加，顏色有加深之情況。
2. 用手觸摸 A1075-5、A1075-15 粒料表面及剖面也有些許粉屑，且硬度比指甲低；A1075-60 表面及剖面亦略微粉狀，但狀況較佳。
3. 研判燒結溫度 1075°C 仍嫌不足，但延長燒結時間可以改善。

(3) 燒結溫度 1100°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘



圖 5-11 A1100-5 常重粒料外觀及剖面



圖 5-12 A1100-15 常重粒料外觀及剖面



圖 5-13 A1100-60 常重粒料外觀及剖面

1. A1100-5、A1100-15 為淺褐色，A1100-60 則為褐色，隨著燒結時間增加，顏色有加深之情況，且燒結時間越長粒料質地更為均勻。
2. 剖面狀況可發現粒料內有黑點分佈其中，研判可能為氧化鐵經由煨燒造成其礦物相之改變所致。
3. A1100-5、A1100-15 表面觸感粗糙，內部尚略微粉狀，但燒結時間達 60 分鐘，可均勻燒透，內部及剖面已無粉狀，且硬度已高於指甲。
4. 由此可知，利用石材廢泥燒結再生之常重粒料，燒結溫度至少應達 1100°C，且燒結時間應達 60 分鐘以上。

(4) 燒結溫度 1125°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘



圖 5-14 A1125-5 常重粒料外觀及剖面



圖 5-15 A1125-15 常重粒料外觀及剖面



圖 5-16 A1125-60 常重粒料外觀及剖面

1. A1125-5 為淺褐色，內部仍略具粉狀物質，燒結 5 分鐘仍不足。
2. A1125-15 為褐色，表面觸感粗糙，內部均勻燒透，初步研判似乎可作為混凝土之粒料。
3. A1125-60 為深棕色，觸感光滑，且其內部極為細緻，敲擊並產生清脆之金屬聲，可得知強度及硬度頗高，但由於表面相當光滑，故應用需考慮對混凝土之影響。
4. 若考量長時間燒結會大幅增加燃料成本，可將燒結溫度提高至 1125°C，燒結間為 15 分鐘以內，故可得知燒結至 1125°C – 15 分鐘應為石材廢泥燒結常重粒料之最佳情況。

(5) 燒結溫度 1150°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘、60 分鐘



圖 5-17 A1150-5 常重粒料外觀及剖面



圖 5-18 A1150-15 常重粒料外觀及剖面

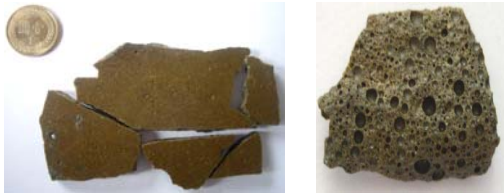


圖 5-19 A1150-60 常重粒料外觀及剖面

1. A1150-5 為棕色；A1150-15 為深棕色，且熔融產生玻璃化之情況；A1150-60 為深棕色，完全熔融成一片，粒料無法成型。
2. A1150-5 僅部分熔融，故表面並非十分光滑，內部均勻燒透，敲擊亦會產生金屬聲，然表面略微光滑是否影響水泥與粒料間之黏結強度？若否，燒結至 1150°C - 5 分鐘則為最佳情況。
3. A1150-15 與 A1125-60 之結果雷同，雖可得知強度及硬度均高，但由於表面相當光滑，故應用需考慮對混凝土之影響。
4. A1150-15 發現已有部分粒料相互黏結，可得知燒結溫度 1150°C，時間應不可超過 15 分鐘。

2. 重量損失

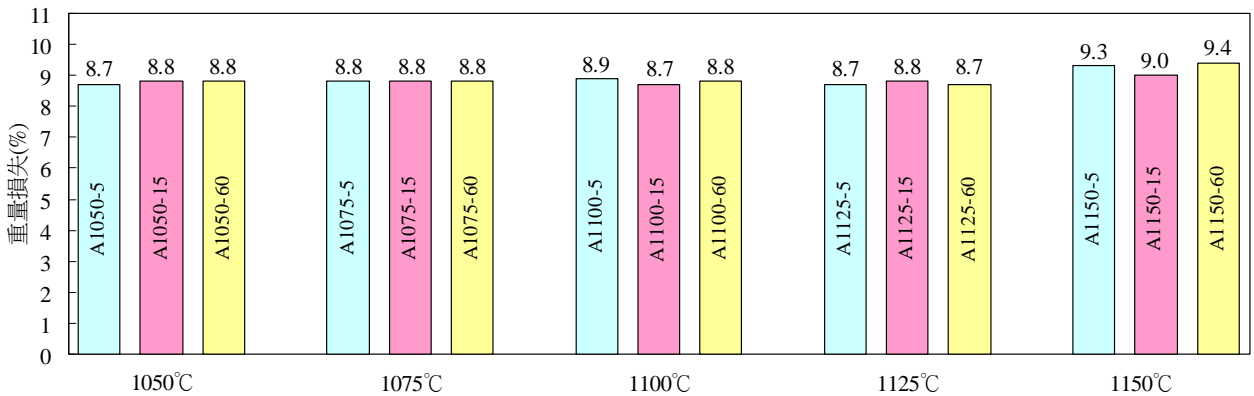


圖 5-20 常重粒料重量損失之結果

常重粒料於燒結溫度 1050°C ~ 1125°C 時，無論燒結時間為 5 分鐘、15 分鐘或 60 分鐘，燒結前後之重量損失為 8.7% ~ 8.9%，但燒結溫度至 1150°C 時，重量損失略增為 9.0% ~ 9.4%。

石材廢泥經造粒後氣乾含水量為 7.7% 應於 100°C 即散失，扣除水份僅剩 1% 之重量損失，故可研判石材廢泥幾乎不含有機物，其他之重量損失可能是硫化物於 400°C 揮發、結晶水於 600°C 時分解、碳化物 700°C 時燃燒產生 CO₂ 或 Fe₂O₃ 約在 1100°C 時釋放出 O₂ 所造成[2]。

3. 比重

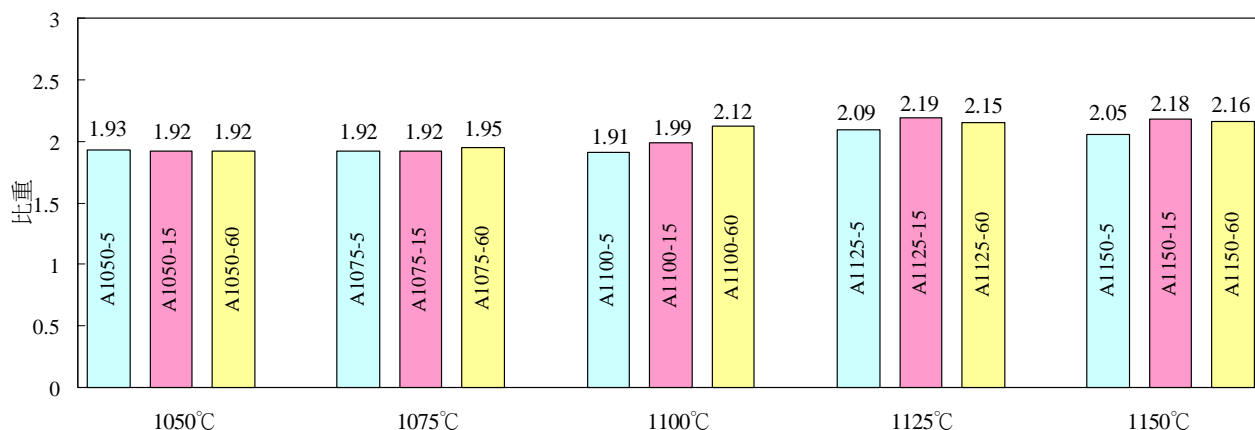


圖 5-21 常重粒料之比重

燒結溫度 1050°C 及 1075°C，常重粒料之比重為 1.91~1.95，可能是燒結溫度不足，故對比重影響不大。

加熱超過 1100°C 時，比重卻隨著燒結時間增加而有略微增大之趨勢，由 1.91 增加至 2.18，研判燒結 1100°C 可能是已達到可製成常重粒料的臨界溫度，粒料變為更緻密，更適合做為混凝土之粒料使用，但應考慮是否已熔融（A1150-15、A1150-60）而無法成型之情況。

4. 吸水率

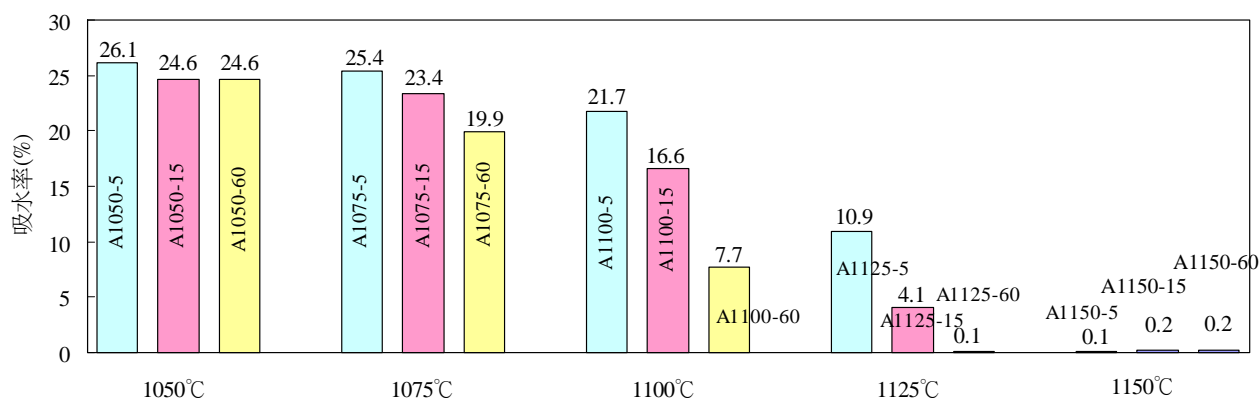


圖 5-22 常重粒料之吸水率

燒結溫度 1050°C 及 1075°C 常重粒料之吸水率幾乎均超過 20%，可能是燒結溫度不足，不適合作為混凝土之常重粒料使用。

加熱超過 1100°C 時，吸水率卻隨著燒結溫度及燒結時間增加而大幅降低。A1100-5 與 A1100-15 吸水率尚超過 15%，亦不適合作為粒料；但 A1100-60、A1125-5、A1125-15 吸水率卻已分別降至 7.7%、10.9% 與 4.1%。

A1125-60、A1150-5、A1150-15 及 A1150-60 已產生玻璃相，粒料幾乎不吸水，吸水率僅有 0.1~0.2%，但由於玻璃相導致表面光滑之情況，是否會影響水泥與粒料間之黏結，仍須進行相關試驗予以確定。

(二)輕質粒料

1. 成品外觀

(1)燒結溫度 1050°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘



圖 5-23 B1050-5 輕質粒料外觀及剖面

1. B1050-5、B1050-15 為淺褐色。
2. 加熱至 1050°C，粒料表面沒有生成黏性之玻璃相，所以無法使粒料內部產生氣體時自封成孔隙，剖面亦可證實內部無產生孔隙之輕質現象，故可得知燒結 1050°C 之溫度不足，無法燒結成輕質粒料。



圖 5-24 B1050-15 輕質粒料外觀及剖面

(2)燒結溫度 1075°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘



圖 5-25 B1075-5 輕質粒料外觀及剖面

1. B1075-5 為淺褐色，B1075-15 為褐色。
2. 粒料表面也沒有生成黏性之玻璃相，但粒料剖面可發現已有少數氣體釋出造成之孔洞，故得知燒結溫度超過 1075°C 就極有可能燒製出輕質粒料。



圖 5-26 B1075-15 輕質粒料外觀及剖面

(3)燒結溫度 1100°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘



圖 5-27 B1100-5 輕質粒料外觀及剖面

1. B1100-5 呈現深褐色，內部已有些許孔洞，但燒結未均勻，一半粒料已具輕質效果，另一半則無，研判可能已達燒結溫度或燒結時間之臨界點，可能增加溫度或時間即可達輕質化之效果。



圖 5-28 B1100-15 輕質粒料外觀及剖面

2. B1100-15 表面為深棕色，發現表面已熔融，內部均勻分佈黑色小孔，證實燒結至 1100°C、15 分鐘已可達到表面需生成黏性之玻璃相，並有足夠時間來封閉自粒料內部釋放出之氣體，確實可以製成輕質粒料。

(4) 燒結溫度 1125°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘



圖 5-29 B1125-5 輕質粒料外觀及剖面



圖 5-30 B1125-15 輕質粒料外觀及剖面

1. B1125-5 與 B1125-15 雷同，顏色為深棕色，外觀光滑且內部孔洞均勻分佈，表示已生成黏性之玻璃相，且可將氣體包覆於其內，但一半以上相互黏結在一起，無法形成單顆獨立之輕質粒料。
2. 由此得知，以電熱式高溫爐燒製輕質粒料，燒結至 1125°C，溫度已過高無法成型，但若使用目前商業生產所使用之旋窯式高溫爐燒結，粒料彼此黏結之情況可能會有所改善，但仍須加以證實。

(5) 燒結溫度 1150°C，燒結時間 5 分鐘、15 分鐘

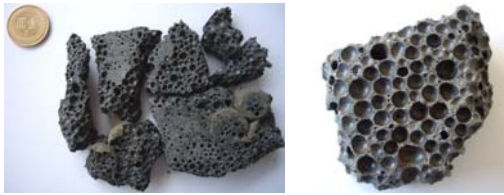


圖 5-31 B1150-5 輕質粒料外觀及剖面

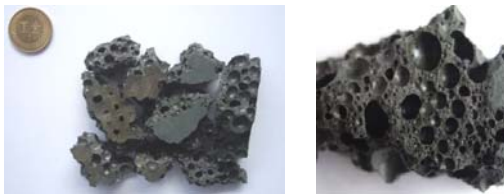


圖 5-32 B1150-15 輕質粒料外觀及剖面

1. B1150-5、B1150-15 均為深棕色且完全熔融，其外觀光滑且內部孔洞均勻分佈，表示已生成黏性之玻璃相，且可將氣體包覆於其內。
2. 燒結至 1150°C 之溫度太高，導致粒料無法成型，熔融成一片，無法燒製成輕質粒料。

綜合以上輕質粒料外觀及剖面情形，可發現在熱處理的過程中，最初粒料變成土黃色，略呈粉紅色；達膨脹溫度後，顏色轉成暗棕色，此顏色轉變表示三價鐵離子 (Fe_2O_3) 在膨脹溫度時減價 (Fe_3O_4) 之現象。

2. 重量損失

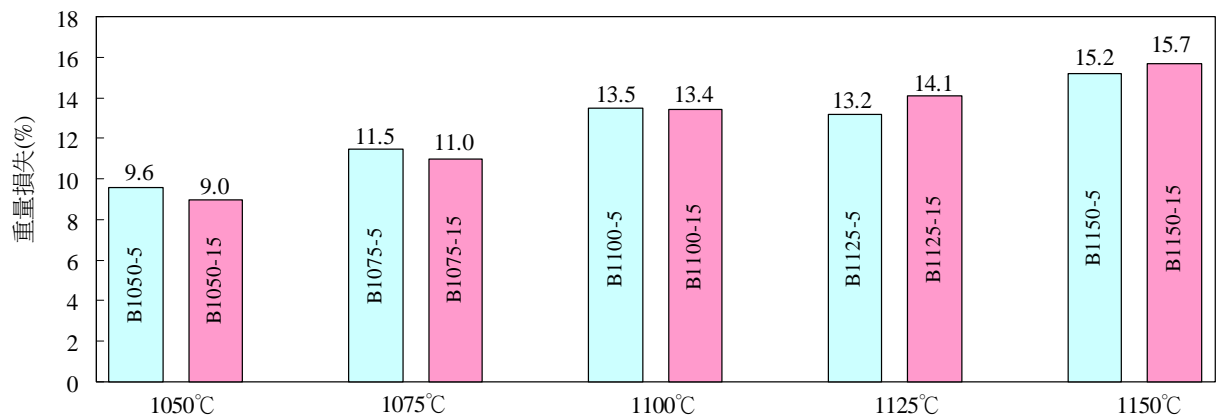


圖 5-33 輕質粒料重量損失之結果

由輕質粒料重量損失之結果中得知，燒結溫度越高，燒結前、後之重量損失亦越大。石材廢泥經造粒後氣乾含水量為 7.7% 應於 100°C 即散失，其餘之重量損失應是石材廢泥不同化學組成於不同燒結溫度中氣體逸出所造成，氣體產生之主要原因及反應方程式如下[2]：

- (1) 硫化物於 400°C 時產生揮發之情況。
- (2) 石材廢泥之結晶水約在 600°C 下分解。
- (3) 含碳之化合物在 700°C 時燃燒產生 CO₂。
- (4) Fe₂O₃ 約在 1000°C ~ 1150°C 時釋放出氧氣。

可能造成氣體產生之反應方程式

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

3. 比重

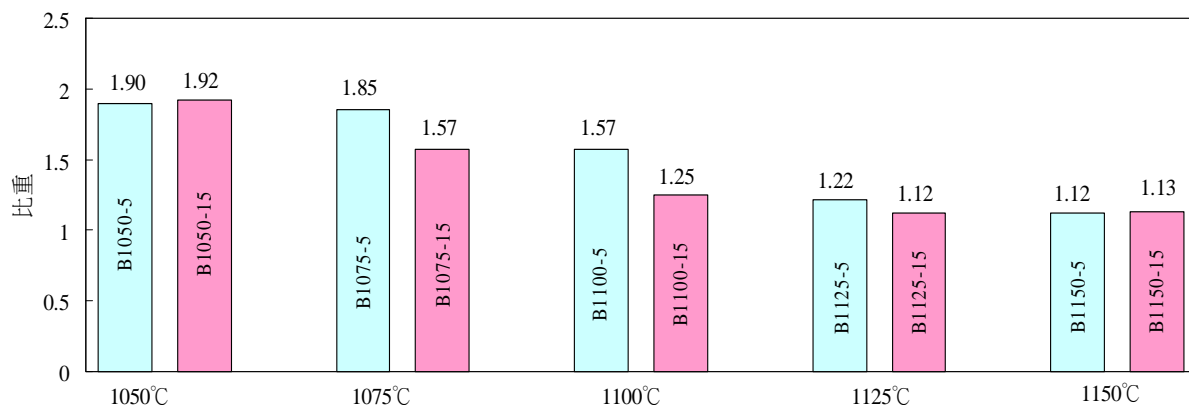


圖 5-34 輕質粒料之比重

石材廢泥（花崗石廢泥）之化學成份中含有可釋放出氣體之物質，加熱至一定溫度時，表面層溫度升高較快，先融成膠體再形成玻璃相表面層，此時因溫度增高致使內部產生高塑性流體，表面生成黏性之玻璃相，且有足夠之時間來封閉自粒料內部釋放出之氣體，當氣體逸出時，一面受到塑性流體之包圍，一方面未能穿透表面玻璃相層，而在內部造成氣泡，使體積增加達到膨脹效果。

由圖5-34 可發現當燒結溫度達到1100°C以上時，粒料確實達到輕質化的效果，比重均小於輕質粗粒料之標準1.6；且燒結時間增長至15分鐘，粒料燒結之情況更為均勻，大幅減小至1.25，若使用於混凝土時，可大幅降低混凝土之自重，應可廣泛使用於高層建築，但應詳加試驗予以確定。

4. 吸水率

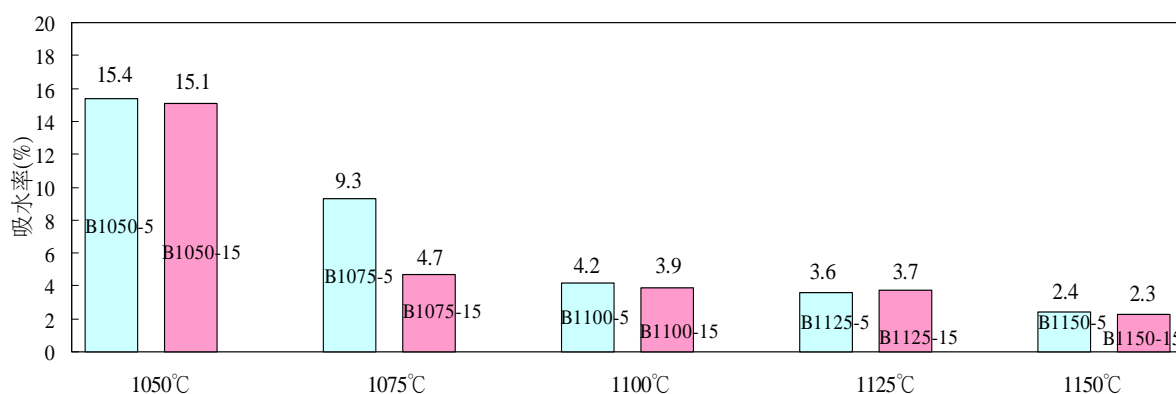


圖 5-35 輕質粒料之吸水率

由圖 5-35 得知輕質粒料之吸水率隨著燒結溫度增加，而有下降之情況，但加熱至 1100°C 以上，下降趨勢卻有所減緩（由 4.2% 下降至 2.3%），燒結溫度達 1100°C，幾乎就可達最佳效果。

陸、結論與展望

一、結論

(一) 欲降低花蓮地區石材廢泥對環境之衝擊應以花崗石廢泥為主，本研究之石材廢泥經化學組成研判應為花崗石廢泥，且花崗石廢泥之化學成份確實可符合輕質粒料膨脹範圍的區間內。

化學成份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Flux							
			Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
%	68.92	14.38	3.72	3.04	1.07	0.11	3.52	3.75	0.34	0.13

Flux = 15.68%

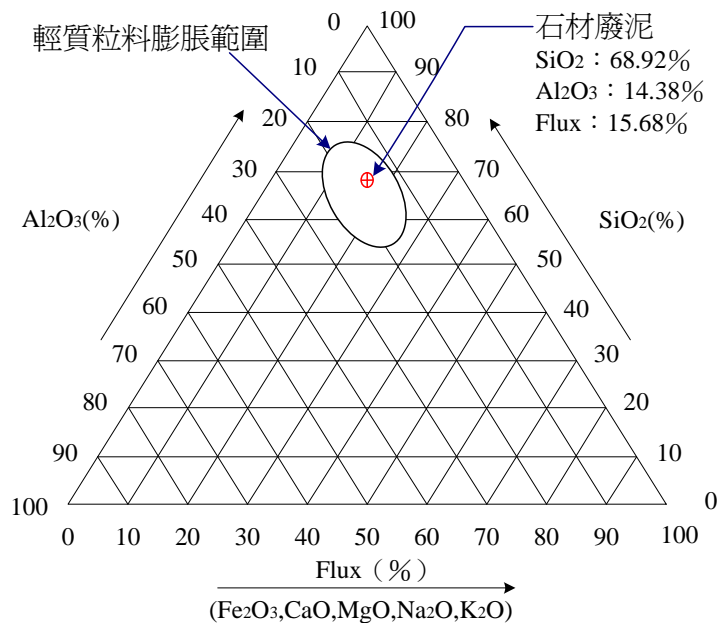


圖 5-1 輕質粒料膨脹區之組成範圍

(二) 利用石材廢泥燒製常重粒料，燒結溫度至少需達 1100°C 以上，但須燒結 60 分鐘，若溫度提高至 1125°C，燒結時間僅需 5 分鐘即可達到相同之效果，故可得知燒結溫度之控制遠比燒結時間的掌握來得重要，燒製再生粒料時應優先考慮燒結溫度。

(三) 燒結溫度 1125°C、燒結時間 15 分鐘可達燒製常重粒料之最佳效果。



圖 5-15 A1125-15 常重粒料外觀及剖面

比重為 2.19，吸水率僅 4.1%，表面觸感粗糙，且內部均勻燒透，初步研判可以做混凝土之粒料，依據此性質甚至可以燒製廢泥磚，進而取代紅磚，但仍須進行相關試驗予以確定。

(四) 燒結溫度 1150°C 之粒料，表面光滑且緻密，敲擊時有清脆之金屬聲，若要將其使用於混凝土之常重粒料，須考慮與水泥黏結時是否會產生不良之效果，但應可作為陶藝所使用之黏土材料，燒製成幾乎不吸水之陶瓷品，如花盆、風鈴、筆筒....等可廣泛應用於日常生活之裝飾藝品。

(五) 燒製輕質粒料最佳情況為加熱達 1100°C，再放入高溫爐中燒結 15 分鐘。



圖 5-28 B1100-15 輕質粒料外觀及剖面

比重為 1.25，吸水率 3.9%，表面為深棕色，發現表面已熔融，內部分佈黑色均勻小孔，證實燒結至 1100°C-15 分鐘已可達到表面須生成黏性之玻璃相，並有足夠時間來封閉自粒料內部釋出之氣體。

二、建議與展望

- (一) 本研究僅對燒製再生粒料之燒結溫度、燒結時間及燒結氣氛進行探討，建立石材廢泥基本性質及常重粒料與輕質粒料基本性質，尚未探討其力學性質及其對混凝土之影響，故建議後續研究可以加以著墨，期使更臻於完備。
- (二) 生產時建議以商業製程所使用之旋窯式高溫爐燒製石材廢泥再生粒料，如此才可轉危機為商機，『轉廢為寶，點石成金』，獲得可觀的經濟價值與社會效益，減少環境污染與衝擊，傳承永續經營之居住環境。

柒、參考資料及其他

1. 蔡得時、李尙成(民 89)。材料試驗。台北市，矩陣圖書。
2. 蔡振球(民 95)。都市下水污泥灰燒結輕質化特性之研究。國立中央大學環境工程研究所博士論文，未出版，桃園縣。
3. 陳豪吉、顏聰、彭獻生、王順元(民 92)。以水庫淤泥燒製人造輕質骨材之產業化技術研究(215~216 頁)。兩岸營建環境及永續經營研討會報告。
4. 林月婷(民 92)。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。國立中央大學環境工程研究所碩士論文，未出版，桃園縣。
5. 林維明、黃兆龍、洪盟峰。輕質骨材特性之試驗(一)。現代營建 288 期 2003 年 12 月，取自<http://www.arch.net.tw/modern/month/288/288-1.htm>。

【評語】 091201

- 1、 試驗樣品之比較具系統性。
- 2、 試驗成果可供工程應用參考。
- 3、 材料試驗對於材料基本性質之探討相對完整。
- 4、 以廢料處理當探討方向符合社會需求。