

東海大學環境科學與工程學系研究所碩士論文

利用燃煤飛灰及水庫淤泥研製發泡
玻璃

**Recycling of coal fly ash and sediment for
foam glass**

研究生：徐丞寬

指導教授：魏玉麟 教授

中華民國一零八年七月

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徐丞寬君所提之論文

題目：利用燃煤飛灰及水庫淤泥研製發泡玻璃

Recycling of coal fly ash and sediment for foam glass

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 林凱隆

張芳志

劉守恆

魏玉麟

中華民國 108 年 07 月 02 日

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徐丞寬君所提之論文

題目：利用燃煤飛灰及水庫淤泥研製發泡玻璃

Recycling of coal fly ash and sediment for foam glass

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授：魏玉麟（簽章）

108年07月02日

謝誌

在讀研究所的日子裡，一路上懵懵懂懂，從一個對未來充滿疑惑的大學生轉變成稍微能夠看到方向的研究生，沿途的風景有起有落，但每一幕都將伴隨著我成長、茁壯。要感謝的人、事、物真的太多。首先是我的家人，感謝你們不論在任何時候都能成為我最堅強的後盾；再來就是我的指導教授-魏玉麟老師，感謝老師的包容以及信任，能夠給在學術上有如此成就卻完全沒有架子的老師指導，真的是我一輩子的榮幸；實驗室的助理李姊時常在迷惘時指點經驗，真的十分受用。另外要感謝我的同窗好友：博然、祥頌、時樂、宗儒，學長耀霆、柏君，無論是在課業上或是休閒上，都有你們的幫助與陪伴。學弟妹緯達、陳肯、宥彤、岳樺、欣緯、玟靜、佩青、翊誠，有你們的實驗室顯得更歡樂，也祝你們的未來能夠朝自己想要的方向前進。另外要特別感謝口試委員王鴻博老師、劉守恆老師、林凱隆老師以及張芳志老師，百忙之中前來替我口試，建議都十分寶貴且受用。也要感謝東海環工系的阿梅學姐、欣怡學姐、美君學姐以及昱婷學姐；東海化材系的林月華助教，在實驗上以及各項事務上幫助許多，讓我能夠順利完成學業。

也祝福一路上幫助過我的人，能夠心想事成，諸事順利。

摘要

本研究以回收目的廢棄物並重新賦予這些廢棄物價值為，分別使用燃煤飛灰及水庫淤泥，與廢玻璃、發泡劑及泡沫穩定劑均勻混合用以製備新興的建材—發泡玻璃。將均勻混合之樣品取 7 克左右並使用油壓壓錠機在 4000 psi 的壓力下壓製成型，製作成圓餅狀，並分別使用 4 階段升溫條件，在最高溫度分別為 750°C、775°C、800°C、825°C 及 850°C 的溫度下燒製發泡玻璃。

本研究對成品進行各項物化特性之探討，包含 XRD、ICP、SEM、體密度、吸水率、熱導係數、抗壓強度、孔隙率變化及燒失重等，藉以了解產品及原料之各種性質。閉孔孔隙率之定義為 $(1 - \text{體密度} / \text{粉密度}) \times 100\%$ ，為觀測發泡玻璃是否良好發泡之重要依據，實驗中的成功樣品(體密度 $< 1 \text{ g/cm}^3$)，可接受的型變範圍內)閉孔孔隙率大多介於 70~80%。結果顯示，隨著溫度提升，各種配比之產品密度均下降，抗壓強度也隨之降低，而在 750°C 時，各配比燒製出的產品密度均 $> 1 \text{ g/cm}^3$ ，不符合發泡玻璃之要求。在較高溫度的情況下，可能因為過量發泡導致型變較大，得到較輕且抗壓強度較差的產品。在 800°C 下燒製出的產品其各方面測得之物理性質較佳。其中熱導係數介於 $0.068 \sim 0.073 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 之間，隔熱效果良好。產品經 TCLP 測試，其溶出濃度均符合法律規範，無超標之重金屬，符合綠建材重要的評估指標。

關鍵字：發泡玻璃、綠建材、熱導係數、TCLP、孔隙率

Abstract

In order to recycle wastes and re-assign their value of them, this study uses coal fly ash and reservoir sediment separately, mixed with waste glass, foaming agent and foam stabilizer to prepare emerging building materials—foam glass. The mixture is about 7 grams and pressed, formed under 4000 psi pressure by a hydraulic press machine. The shape of pressed pellets are cylindrical. The temperature rising conditions are in four-stages. The maximum temperatures for foaming reaction are from 750°C, 775°C, 800°C, 825°C and 850°C.

In this study, the physicochemical properties of the finished product were analyzed, including XRD, ICP, SEM, bulk density, water absorption, thermal-conductivity, compressive strength, porosity and loss on ignition, to understand the various properties of the products and raw materials. Closed porosity is an important basis to justify foam glass. The close porosity of the acceptable samples is mostly between 70 and 90%. The results show that as the temperature increases, product density decreases, and the compressive strength decreases. At 750°C, the bulk density of the products is $>1 \text{ g/cm}^3$, which does not conform the requirements of foam glass. At higher temperatures, the product size becomes larger due to excessive foaming, leading to lighter and less compressive strength products. Products fired at 800°C are preferred for comprehensive evaluation of all aspects. The thermal conductivity is between 0.068 to 0.073 $\text{W m}^{-1}\text{k}^{-1}$, indicating a good thermal insulation material. All TCLP concentration meet legal standard, which means the products can be classified as one of green building materials.

Keywords : foam glass, green building materials, thermal conductivity, TCLP, porosity.

目錄

第一章 前言	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的與內容	3
第二章 文獻回顧	4
2.1 綠建材.....	4
2.1.1 何謂綠建材	4
2.1.2 綠建材標準規範	5
2.2 廢玻璃.....	6
2.2.1 平板玻璃.....	8
2.3 燃煤飛灰.....	8
2.3.1 燃煤副產物	8
2.3.2 燃煤飛灰的分類	9
2.3.3 燃煤飛灰再利用	12
2.4 水庫淤泥.....	17
2.4.1 台灣水庫概況	17
2.4.2 水庫淤泥.....	17
2.4.3 石門水庫.....	17
2.4.4 水庫淤泥之再利用	18
2.5 燒結機制.....	18
2.5.1 發泡機制.....	19
2.5.2 影響燒結的因素	20
2.6 發泡玻璃.....	21
2.6.1 發泡玻璃之概述	21
2.6.2 發泡玻璃之國內外相關研究	22
第三章 研究方法及設備	27
3.1 實驗材料及設備	27
3.1.1 實驗材料.....	27
3.1.2 實驗藥品.....	27
3.1.3 實驗設備.....	28
3.1.4 分析儀器.....	28
3.2 實驗流程與方法	29
3.2.1 發泡玻璃製作流程	29
3.3.1 升溫條件.....	32
3.3.2 發泡玻璃.....	35
3.4 實驗分析方法	37
3.4.1 事業廢棄物毒性特性溶出程序 (TCLP).....	37

3.4.2	示差掃描量熱-熱重分析聯用儀 (Simultaneous TGA/DSC).....	37
3.4.3	多功能 X 光粉末繞射機 (X-ray diffraction , XRD).....	38
3.4.4	場發射掃描式電子顯微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscop , E-SEM).....	38
3.4.5	感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-OES).....	39
3.4.6	粒徑分佈 (Particle size distribution).....	40
3.4.7	重量損失 (Weight loss).....	40
3.4.8	吸水率測量方法 (Water absorption).....	40
3.4.9	顆粒密度測量方法 (Particle density).....	41
3.4.10	閉孔孔隙率測量方法 (Closed porosity).....	41
3.4.11	抗壓強度測試 (Compressive strength).....	42
3.4.12	掌上型熱管探針熱導率量測技術(Technology of Thermal Conductivity with a Heat Pipe Probe).....	42
3.4.13	孔徑分佈統計測量軟體(Nano measurer).....	42
第四章	結果與討論.....	43
4.1	原料之粒徑分析.....	43
4.1.1	石門水庫淤泥、燃煤飛灰、廢玻璃之粒徑分佈.....	43
4.2	原料之化學組成.....	45
4.2.1	石門水庫淤泥、燃煤飛灰、廢玻璃之化學組成.....	45
4.3	原料之晶相分析.....	47
4.3.1	石門水庫淤泥、燃煤飛灰、廢玻璃之晶相分析.....	47
4.4	原料之熱重分析.....	49
4.4.1	石門水庫淤泥、燃煤飛灰之 TGA/DSC 分析.....	49
4.4.2	添加劑之 TGA/DSC 分析.....	50
4.5	成品基本性質探討.....	53
4.5.1	燒後重量損失變化.....	53
4.5.2	吸水率變化.....	54
4.5.3	表觀密度變化.....	55
4.5.4	閉孔孔隙率.....	57
4.5.5	熱導係數.....	58
4.5.6	抗壓強度.....	58
4.5.7	毒性特性溶出程序.....	59
4.5.8	結晶物種分析.....	61
4.5.9	外觀與微結構變化.....	63
第五章	75
5.1	結論.....	76
5.2	建議.....	76
參考文獻	77



圖目錄

圖 2-1	傳統發泡玻璃製作流程圖	22
圖 3-1	燃煤飛灰混合廢玻璃與發泡劑燒製發泡玻璃流程圖	30
圖 3-2	石門水庫淤泥混合廢玻璃與發泡劑燒製發泡玻璃流程圖	31
圖 3-3	750°C 之升溫條件	33
圖 3-4	775°C 之升溫條件	33
圖 3-5	800°C 之升溫條件	34
圖 3-6	825°C 之升溫條件	34
圖 3-7	850°C 之升溫條件	35
圖 4-1	石門水庫淤泥粒徑分析	44
圖 4-2	石門水庫淤泥晶相分析	44
圖 4-3	石門水庫淤泥 TGA/DSC 分析	45
圖 4-4	燃煤飛灰粒徑分析	48
圖 4-5	燃煤飛灰晶相分析	48
圖 4-6	燃煤飛灰 TGA/DSC 分析	49
圖 4-7	廢玻璃之粒徑分析	51
圖 4-8	廢玻璃之晶相分析	51
圖 4-9	碳酸鈉之 TGA/DSC 分析	52
圖 4-10	十二水磷酸鈉之 TGA/DSC 分析	52
圖 4-11	樣品於不同溫度下燒製後之重量損失	53
圖 4-12	樣品於不同溫度下的吸水率變化	54
圖 4-13	樣品表觀密度變化	56
圖 4-14	樣品 A ₈₀₀ 之 XRD 分析	61
圖 4-15	樣品 B ₈₀₀ 之 XRD 分析	62
圖 4-16	樣品 C ₈₀₀ 之 XRD 分析	62
圖 4-17	樣品 A 之孔徑分佈	64
圖 4-18	樣品 B 之孔徑分佈	65
圖 4-19	樣品 C 之孔徑分佈	66

圖 4-20 樣品 A 之外觀與剖面	67
圖 4-21 樣品 A-1 之外觀與剖面	68
圖 4-22 樣品 B 之外觀與剖面.....	69
圖 4-23 樣品 B-1 之外觀與剖面	70
圖 4-24 樣品 C 之外觀與剖面.....	71
圖 4-25 樣品 C-1 之外觀與剖面	72
圖 4-26 樣品 C-2 之外觀與剖面	73
圖 4-27 樣品合照	74
圖 4-28 樣品 A、B、C 之 SEM(200 倍).....	75



表目錄

表 2-1	毒性特性溶出程序重金屬濃度標準	6
表 2-2	廢玻璃再利用途徑	7
表 2-3	煤炭中典型化合物	10
表 2-4	台灣、中國、美國及日本飛灰分類規範標準	11
表 2-5	各種產氣化學成分之種類與反應溫度	20
表 3-1	各原料組成分(coal fly ash, waste glass, Na_2CO_3 , $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)之重量比例.....	36
表 3-2	各原料組成在 $750\sim 850^\circ\text{C}$ 燒製之發泡玻璃代號.....	36
表 4-1	各原料之化學組成	46
表 4-2	閉孔孔隙率	57
表 4-3	800°C 各產品之熱導係數	58
表 4-4	抗壓強度	58
表 4-5	樣品 A 之 TCLP 溶出值.....	59
表 4-6	樣品 B 之 TCLP 溶出值.....	60
表 4-7	樣品 C 之 TCLP 溶出值.....	60

第一章 前言

1.1 研究緣起

科技日新月異，人們的生活品質隨著不同的技術逐漸的開發進步，已經越來越多元化且越來越豐富。但是一切的根本依舊仰賴於基本生存需求中的食、衣、住、行。然而在開發越來越發達，資源卻越來越不足的情況下，環保意識逐漸抬頭，世界各國各大政府均致力於推行再生資源的應用。將廢棄物回收再利用製作成新興產品，不僅能減少廢棄物的處理成本還能得到有價值的產物，可謂一舉多得。

玻璃長期以來一直被人類所使用。據考據，人類在石器時代就已經使用天然的火山玻璃作為生活用品。而到了十一世紀，德國發明了平板玻璃的技術，先將玻璃於可塑型時將其吹成球型，然後做成圓筒狀，趁玻璃仍然高溫的時後將其切開並且攤平以便製作成平板玻璃。而玻璃的相關技術陸陸續續的開發進步直到現在也依然在繼續著，但是使用的量多也同時意味著廢棄的量也會較多。為了能夠有效的回收再利用廢玻璃，國內外陸陸續續推行了許多法案，例如國內的資源回收分類，或是日本使用再生的方式，將玻璃製成再生產品，抑或是美國的強制要求廢玻璃轉化為其他有用物質，盡量避免其進入掩埋場【廢玻璃再利用宣導手冊，2009】。

廢玻璃常見的種類可分為平板玻璃、玻璃裝容器、燈管、映像管及廢棄液晶顯示玻璃等等，各種不同種類的玻璃的物理特性及化學組成還是有許多的差異，而且玻璃的單位重量大，不易自然分解，若是不將其有效的再利用，將會對環境造成很大的危害。根據行政院環保署全國事業廢棄物申報統計顯示，與玻璃相關的廢棄物量來到 143,605 公噸，有很大的回收價值【行政院環保署】。

以廢玻璃添加不同種類的廢棄物例如燃煤飛灰、水庫淤泥等來製備新興建材發泡玻璃不失為一種有效再利用之方法，且成本低廉。

近年來環保意識的抬頭，各式各樣的環保團體如雨後春筍般冒出，如何有效

處理廢棄物已成為眾矢之的的議題，根據行政院環保署廢棄物申報系統的境，台灣的燃煤發電廠一年約產出約 2,390,384 公噸的煤灰【行政院環保署】。台灣人口密集且土地資源有限，使得以掩埋作為最終處置並不是一個最佳的選擇，因為廠址不足且操作成本高，如果能夠有效的再利用煤灰，並提升煤灰的附加價值，將可達到安定化、減量、無害化與資源化之長遠的目標。

台灣雖然有著獨特的地形風貌，且降雨量充沛，但是水資源依舊是個難解的問題，其中原因許多，而影響嚴重的一項就是水庫淤泥的沉積。若能夠把水庫淤泥投入再利用的行列，將能夠大量減少淤泥沉積進而使水庫的壽命增長且能獲得良好的產品，可謂一舉數得。



1.2 研究目的與內容

近年來因為資源的逐漸匱乏，使得環保意識逐年抬頭，廢棄物的回收再利用已經成為永續發展不可缺少的一塊。使用各項廢棄物回收再製成有價值的產品已經是國內外各研究的主要方向。本研究以燃煤飛灰或是水庫淤泥混合廢棄平板玻璃，添加發泡劑以及視狀況添加少量的泡沫穩定劑製備發泡玻璃。將混合均勻之樣品在 4000 psi 下壓錠成型，於控制溫度條件下進行燒製，以觀察產品各項特性如抗壓、吸水率、孔隙率、體密度及熱導係數等各項性質並以 TCLP 之公告方法檢測產品是否危害人體，確保能夠使用廢棄物再製成有價值之產品以落實永續發展。



第二章 文獻回顧

2.1 綠建材

2.1.1 何謂綠建材

隨著科技的進步，人類的各方面如食衣住行均有快速的進步。其中我們最常接觸卻也最常忽略的”住”及”行”，而其依賴的正是材料及建築工業技術。由於天然資源快速耗竭，因此”永續發展”的概念已經被廣為推崇。在 1988 年，”綠建材”這個概念首次在一個國際研討會被提出，而到了 1992 年學術界正式為綠建材訂下了明確的定義「在原料採取、產品製造、應用過程和使用以後的再生循環中，對地球環境負荷最小，對人體身體無害的建材，稱為綠建材」【綠色建材產業聯盟】。

目前國際間對綠建材的概念大致上可分為以下幾種概念：再利用(Reuse)、再循環(Recycle)、廢棄物減量(Reduce)以及低污染(Low emission materials)。綠建材的評估較為嚴格，一旦符合標準將是一個良性的指標。綠建材的使用不僅減少化學合成材料的使用與能源的消耗，還能維持生態負荷的平衡且對人體安全。綠建材可細分為以下四種【財團法人台灣建築中心】：

1. 生態綠建材：易於環境分解之天然動植物材料，核心概念為取之自然，用之自然。以低人工處理方法製成具有可循環利用、永續經營之材料。
2. 再生綠建材：使用資源回收再利用進行再製，符合減量、循環利用等原則製之建材。
3. 高性能綠建材：指相較於傳統建材，能夠克服傳統建材上的某些缺陷且更加有效的提升性能之建材。
4. 低逸散健康綠建材：具備低危害性與低毒性等特性，達到能夠提升室內空氣品質之建材。

2.1.2 綠建材標準規範

國際上綠建材的評定主要是以建築的環境品質以及低碳排放為目標，進行分層的管制作業，將再生、生態、低逸散健康、高性能等項目制定為必須符合且共同遵守的部分【財團法人台灣建築中心】。而台灣的綠建材以此為基礎，加以根據台灣的氣候、地形等條件制定出台灣專屬的綠色標章，必須保證以下三點目標達成【財團法人台灣建築中心】：

1. 確保綠建材標章產品在生命週期各階段不會產生危害。
2. 品質應符合產品一般性功能。
3. 對人體不會產生危害。

以上三點包含了綠建材標章的主要精神與合格標準的基本需求，而綠建材的物質限制有另行規範，如下所示【財團法人台灣建築中心】：

一、一般要求：

1. 綠建材應於原料取得、成品運輸、生產階段等階段皆不會造成環境之污染且生產製造廠於申請前一定時間內不得違反環保法規。
2. 綠建材之產品功能需符合國家之既定標準，若尚無規範或國家標準則應明確敘述該產品所該符合之標準範疇，以供查驗。
3. 綠建材安全性及品質應須符合法規標準。

二、限制物質：

綠建材的限制物質(指標污染物)乃對於有害物質之含量限制，將可能危害人體或是環境之物質依照法規以及專家建議加以限定管制，以確保居住空間之環境安全，限制項目如下【財團法人台灣建築中心】：

1. 非金屬材料任何一部分之重金屬成分，依據事業廢棄物毒性特性溶出程序 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)，檢驗值不得超過標準，如表 2-1 所示。

表 2-1 毒性特性溶出程序重金屬濃度標準

項目	溶出標準(ppm)
總汞(Hg)	0.2
總鎘(Cd)	1
總硒(Se)	1
六價鉻(Cr ⁶⁺)	2.5
總鉛(Pb)	5
總鉻(Cr ³⁺)	5
總砷(As)	5
總銀(Ag)	5
總銅(Cu)	15
總鋇(Ba)	100

【環保署 NIEA R201.14C】

2. 不得含有石綿之成分。
3. 不得含有放射線。
4. 不得含有蒙特婁議定書管制之化學品。
5. 水泥相關製品氯離子含量基準<0.1%。
6. 產品內含 PVC 物質之建材應比照 CNS15138 進行磷苯二甲酸酯類可塑劑之總量不得超過 0.1%(wt%)。
7. 使用於室內裝潢之建材，經評鑑後認定有 TVOC 及甲醛逸散者，應進行兩項目之檢驗 (TVOC 逸散速率不得超過 0.19 mg/m².每小時；甲醛逸散速率不得超過 0.08 mg/m².每小時)。

2.2 廢玻璃

在台灣，常見的廢玻璃主要來源有窗型玻璃、平板玻璃、玻璃容器、廢棄燈管、汽車玻璃以及螢幕用顯像玻璃等。玻璃的主要成分為二氧化矽 (SiO₂)，在理論上是一種可以被完全回收再利用的材料。因為廢玻璃的容重大，且搬運因為易破碎等問題導致許多回收廠商並不喜歡且不會主動回收廢玻璃的相關物件，而且廢玻璃無法燃燒且不被微生物所分解，加上台灣的掩埋場已經趨近飽和，故較為傳統的廢棄物處理方法(燃燒、掩埋法)並不適用於廢玻璃。已經有許多研究使

用廢玻璃來回收再製成不同的產品，例如添加廢玻璃粉末於混凝土之中並用於鋪路材料【Chen *et al.*, 2002】，或是做為研磨材料使用【Rakshvir *et al.*, 2006】。表 2-2 為 Rakshvir 等人整理出的常見的廢玻璃再利用的途徑。

表 2-2 廢玻璃再利用途徑

應用方面	取代原料	優點	缺點
玻璃原料之添加劑	高品質矽砂	1. 節省成本 2. 減少污染排放	無
過濾材料	無煙煤等	1. 節省成本 2. 抗菌	需有當地政府機關的核可
吸附劑	黏土、沸石等	1. 降低成本	無
研磨材料	常見研磨材料如氧化鋁、氧化鋯等	1. 節省花費 2. 更具競爭性	無
陶瓷及磚頭用黏著劑	黏土礦物	1. 降低燒結溫度 2. 取代部分材料	無
塑料及填料之填充劑	黏土、碳酸鹽類	1. 可獲得高價值產品	需要研磨步驟，提高成本
水栽培根菜類媒介物	發泡煉石	1. 消毒容易	須小心使用，避免刮傷
路面骨材	碎石及砂礫	1. 降低成本 2. 良好排水性 3. 有好的抗壓及緩衝能力	1. 需有工程認證 2. 可能刮傷
建築用骨材	砂石及砂礫	1. 降低成本	可能因為鹼骨材反應造成強度下降

【R.D.pascoe *et al.*, 2001】

2.2. 平板玻璃

平板玻璃主要包含了桌(平)面玻璃、窗型玻璃及常見的多層建築用玻璃等。成分單純，為二氧化矽及少量的添加劑如碳酸鈉、石灰石等。加入添加劑的目的多在於降低熔點或是改變成色，但因為不同廠商的成分分配比並不同，故回收時需多加留意且可能需要個別處理。不過因為平板玻璃的容重大且搬運時容易破碎，大多數的回收商並不會主動回收廢玻璃，故政府更需要加強回收再利用的宣導，且因為平板玻璃的成分相對單純，更有集中回收再利用的價值。

2.3 燃煤飛灰

2.3.1 燃煤副產物

近五十多年以來，隨著全世界的經濟飛昇般的成長躍進，用電量也隨之上升。依據世界能源年報統計之結果，1989年世界產煤總量為4630百萬公噸，燃煤發電產生之煤灰總量高達562百萬公噸，其中飛灰占414百萬公噸以上【郭淑德，1993】。直到2008年，全球的煤灰年產量估計已經超越7億5000萬噸，而其中中國的成長速度為最快【Ahmaruzzaman, 2010】。且隨著印度等開發中國家的快速崛起，煤灰的產量及產速都將大幅提升。王等人提出煤灰在全球各地的再利用率僅有25%【Wang, 2008】，且有不少比例之煤灰被掩埋或儲存在灰塘之中，可能造成土壤及地下水的污染且無法有效利用【Dewan, 2008】。台灣的地狹人稠，地理資源有限，無法大量的使用再生能源發電，且民國107年統計再生能源發電僅占台灣發電總量的4.06%【經濟部能源局, 2018】，無法供應電力成長的需求；核能發電廠因法律的陸續修改與民眾的觀感，近期也無法成為主要供電來源。核電廠所生產之廢棄物尚需特殊處理，近年國外例如日本福島又發生了令人人心晃恐的核安問題，對於核電廠的興建，民間的反對聲浪一波接一波；相較之下，火力發電廠不僅供電量大，且不論是增建火力發電廠或是維修均比其他兩者便捷，且污染防治設備技術也較為成熟，能夠有效的降低燃燒所帶來的嚴重污染，也是台灣目前用電需求無法取代的一部分。

根據台灣經濟部能源局所統計，台灣 2018 年有 83.54% 仰賴火力發電，而其中以燃煤發電占有比例最高的 46.86%【經濟部能源局, 2018】，燃煤發電時會將煤炭磨成粉末狀，藉以增加表面積使燃燒加速。燃燒後的灰燼會隨煙的氣流上升，之後被空氣污染防護裝置給收集下來，稱之為「飛灰」，另外一部分重量較重、顆粒較大的則直接掉落至鍋爐底層，稱之為「底灰」。

為了充分了解燃煤飛灰之特性以利於再利用，需先了解燃煤飛灰如何燃燒形成。煤炭的三成分包含了水份、灰份以及可燃分。其中水分在燃燒過程中幾乎完全揮發，而燒去之可燃份是為提供能量(例如發電)之主要來源。理論上殘存的灰份應不包含可燃分，但實際上不可能燃燒完全。因此灰分中仍有少量以碳為主的可燃份存在。使用不同種類之燃煤或是鍋爐器具，殘存在煤灰中的可燃份重量比例，其煤炭之燒失重(LOI)也不盡相同。例如煙煤做為原料之 LOI 最高，為 0~15%【Ahmaruzzaman *et al.*, 2010】。煤炭開採之後，會經由破碎等前處理至粉狀，稱為粉煤。燃煤發電廠於產生電力時多會將煤炭先研磨成粉末狀再進行燃燒，也就是所謂的粉煤燃燒方式。目的是為了增加表面積並加速燃燒。將粉煤以噴霧方式送入高溫 1300~1600°C 之鍋爐燃燒之後，會形成飛灰灰渣與少量的較大顆粒之未完全燃燒碳，前者因重量較輕，會順著煙氣氣流而流動，並且被爐體後的空氣污染防制裝置收集攔截，則此部份的煤灰稱做「飛灰」，後者則因為重量較重且顆粒較大而直接沉降至底部，最後則經鍋爐底部排出，該部份的煤灰則稱為「底灰」。底灰與飛灰合稱為「燃煤副產物」，而飛灰與底灰比例約為 80：20【Benavidez, 2003】。

2.3.2 燃煤飛灰的分類

燃煤飛灰依照其中之化學組成或燃燒之煤炭種類之不同，ASTM C618 將其概分為 C 級與 F 級飛灰二種。C 級飛灰通常是燃燒褐煤(lightite)或是次煙煤(sub-bituminous)而產生，外觀大多呈淺褐色，其中 CaO 含量可能 >10% ，SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ 含量則 >50%；F 級飛灰通常是燃燒煙煤(bituminous)或無煙煤

(anthracite)而產生，外觀呈灰色，其 CaO 含量較少，而 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量 $>70\%$ ，表 2-3 為常見煤炭之組成化合物種類【Mark *et al.*, 1999】，表 2-4 為 C 級及 F 級飛灰常見各國之分類規範。

表 2-3 煤炭中典型化合物

化合物種類	褐煤及次煙煤(%)	煙煤(%)
SiO_2	39.9	54.9
Al_2O_3	16.7	25.8
Fe_2O_3	5.8	6.9
CaO	24.3	8.7
SO_3	3.3	0.6
MgO	4.6	1.8

【許氏，2004】

表 2-4 台灣、中國、美國及日本飛灰分類規範標準

適用於各國混凝土 之規範	CNS 3036 (台灣)		GB T1596-2005 (中國)		ASTM C-618 (美國)		JIS A2601 (日本)
	F 級	C 級	F 級	C 級	F 級	C 級	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%、最小值)	70	50			70	50	70
SO ₃ (%、最大值)	5.0	5.0	3.0		5.0	5.0	5.0
CaO (%、最小值)		10		10			6.0
MgO (%、最大值)	5.0	5.0			5.0	5.0	5.0
含水量 (%、最大值)	3.0	3.0	1.0		3.0	3.0	3.0
燒失重 (%、最大值)	6.0	12.0	5.0 - 15.0		6.0	12.0	10.0
細度 - 325 mesh (%、最大值)	34	34	12.0 - 45.0		34	34	6.0

【CNS 3036; GB T1596-2005; ASTM C-618; JIS A2601】

2.3.3 燃煤飛灰再利用

1. 吸附劑

燃煤飛灰作為吸附劑應用於污染控制已經被研究了許多年，早在 1985 年，燃煤飛灰就被應用在處理工業廢水中的銅離子【Pandry *et al.*, 1985】。而後陸續有不同的文獻指出，利用燃煤飛灰可吸附工業廢水中的不同重金屬離子，包含銅、鉛、鋅等等。Hequet 等人的研究指出燃煤飛灰吸附的能力取決於其灰分，表示了燃煤飛灰產出的過程中，燃燒是否完全的程度影響了燃煤飛灰的品質，也就是灰份的多寡，將影響到燃煤飛灰能夠再利用的程度【Hequet *et al.*, 2001】。

Mohan 等人指出燃煤飛灰可以作為一種低成本的吸附劑，其實驗顯示銅、錳、鉛、鋅、鉻的去除率分別為 39%、28%、74%、42% 和 71%【Mohan *et al.*, 2005】。



2. 土壤質地改良

也有研究使用燃煤飛灰做為農地用之土壤改良劑。大多數植物適合生長的 pH 質介於 6.5~7，添加燃煤飛灰可提高農土之 pH 值。Pandey 等人【Pandey *et al.*, 2009】使用燃煤飛灰(0~100%)取代部分土壤並均勻混合，研究結果顯示燃煤飛灰可以使酸性土壤的 pH 值上升，且能提升土壤的保水能力。當添加較低比例的燃煤飛灰(0~25%)，燃煤飛灰中的各種元素如鈣、鈉等有助於植物的生長茁壯，但是當添加的燃煤飛灰比例過高則會對植物產生毒害。實驗結果指出當添加 25% 比例的燃煤飛灰，有助於植物之產量及生長【Pandey *et al.*, 2009】。

Belyaeva 等人利用燃煤飛灰混合堆肥，顯示添加燃煤飛灰可以增加堆肥的保濕能力，但隨著燃煤飛灰添加比例的提高，有機碳、可溶解碳及各種酵素等物質皆隨之下降。研究指出當燃煤飛灰添加比例大於 25% 對於堆肥改良並沒有正面的幫助【Belyaeva *et al.*, 2009】，反而會減少有助於植物生長的物質。

3. 玻璃陶瓷化

由於燃煤飛灰是由 SiO_2 、 Al_2O_3 、及一些金屬氧化物如 FeO 、 CaO 所組成，所以燃煤飛灰也一直被認為是一種低成本可以再利用於製備陶瓷玻璃之原料

【Erol *et al.*, 2003】。Erol 等人將燃煤飛灰以 1773 K 的溫度下加熱 5 小時且不添加任何添加劑，使煤灰熔融並均質化，藉以觀察是否能得到玻璃材料。之後將部分玻璃產品倒入預熱至 1423 K 的溫度下持溫 2 小時進行熱處理，以確保熱處理過程對玻璃性能的影響，其得到的樣品以 DTA、XRD 和 SEM 來觀察。結果顯示，樣品的玻璃轉化溫度(T_g)介於 985~1023 K 之間，且有再經過熱處理的玻璃產品相較於沒經過熱處理的玻璃產品，前者之物化、機械特性均優於後者。SEM 的結果指出經過熱處理之玻璃樣品出現少量玻璃微晶結構。其 XRD 測試結果指出，未經過高溫處理之樣品呈現無晶相，有經過高溫處理樣品晶相僅存在透輝石。經過 TCLP 測試，飛灰中的重金屬可以成功的固定在樣品之中，並無重金屬溶出，表明了燃煤飛灰可以作為陶瓷玻璃材料的回收之無害材料，為一種穩定的再循環

技術【Erol *et al.*, 2007】。

He 等人認為燃煤飛灰可以做為高嶺土的替代品，用以製備堇青石。將燃煤飛灰、工業用氧化鋁、碳酸鎂以及甲基纖維素混合並研磨後置入樣品盤中，在 900~1300°C 的溫度下燒製，結果指出在 1200°C 以上能夠燒製出擁有低線性熱膨脹係數以及高壓縮強度的堇青石，可以取代天然資源，大大的降低了成本。【He *et al.*, 2005】

Benavidez 等人將燃煤電廠的飛灰/底灰，以 1/1、3/1、3/1 混合，樣品於 100~110°C 之烘箱中烘乾。由於底灰有部分粒徑較大，先將之過篩避免影響成果 (15~18wt%)。另外將飛灰、底灰(1/1)以 350、600、880°C 預先加熱 2 小時，將上述的樣品添加 1 wt.% polyvinyl alcohol (PVA) 作為黏著劑。取 1 g 之樣品以直徑 12 mm 的模組在 100 MPa 的壓力下壓製，以 5°C min⁻¹ 加熱至 1100、1150、1200°C 並持溫 2 小時燒製。測其密度 (混合灰密度、壓製試體密度、燒後試體密度)，結果指出，在高於 600°C 的預先加熱可以增加燒結密度。燒製溫度超過 1180°C 稱為液像燒結，會產生熔融現象使試體更加緻密【Benavidez *et al.*, 2003】。

Kim 等人使用燃煤飛灰混合 CaO (10、20、30 wt%) 及 TiO₂ (2、5、7、11 wt%) 以製備玻璃陶瓷，其中 CaO 是來自於貝殼 (CaO : 98.93 wt%、Na₂O : 1.07 wt%)，TiO₂ 作為成核劑。混合均勻之樣品在 1400°C 下加熱 3 小時，將樣品置於模組在玻璃化轉變溫度 (T_g) + 10°C 下退火降溫。CaO 的添加會降低飛灰的熔點。若是持溫時間較長，晶體的 formed 也較為完整。彈性常數與硬度和溫度與時間有關，皆隨溫度的升高而提升，但在超過 1050°C 後會因為熱變形而導致其下降【Kim *et al.*, 2004】。

Sokolar 等人取用 40% 重量的黏土與 60% 的流體化床發電設備所產生之煤灰製備瓷磚，在 1080°C 下燒製後測試了吸水率、表觀密度、堆積密度、孔隙率和彎曲強度。研究指出，此煤灰會降低燒製收縮率，但是增加了孔隙率且降低了彎曲強度【Sokolar *et al.*, 2011】

Yoon 等人將燃煤飛灰與廢玻璃經過 150 mesh 過篩，將玻璃與飛灰以 65 : 35 混合(wt%)，在 1400°C 的溫度下加熱 3 小時，急速水冷卻至室溫，再球磨破碎後壓製成錠，以 5°C min⁻¹ 加熱至 850、900、950、1000、1050°C 並持溫 1 小時，置於爐體內緩慢降溫至室溫。針狀的晶體隨著溫度上升有明顯的增加，抗壓及抗彎強度也隨著溫度上升而增加。表示此針狀晶體的生成有助於機械強度的提昇【Yoon *et al.*, 2013】。

4. 飛灰混凝土

傳統波特蘭水泥需經過 1400°C 以上的燒製，會排放大量二氧化碳，估計水泥業產生的二氧化碳高達人為排放量的 7%【Mehta *et al.*, 2004】，進而造成溫室效應，但水泥在現代的建築業之中是無可取代的，於是有學者將飛灰添加進混凝土之中取代部分水泥，稱為飛灰混凝土。

Yilmaz 等人使用燃煤飛灰取代部分水泥。結果指出，以抗壓強度而言，隨著燃煤飛灰取代量提升其抗壓強度會大幅降低，而以 5~15% 的燃煤飛灰混合 CaCO₃ 或是 5~15% 的 CaCO₃·MgCO₃ 取代水泥，在取代水泥量固定在 20% 時，燃煤飛灰混合 CaCO₃ 較燃煤飛灰混合 CaCO₃·MgCO₃ 的抗壓強度更強【Yilmaz *et al.*, 2008】。

Bentz 的研究指出，在飛灰取代部分水泥製成飛灰混凝土中，可以添加 5% 的氫氧化鈣粉末或是 5~10% 的快混水泥，能夠顯著的縮短凝結時間，較舊的飛灰混凝土雖然可能有高強度等性質，但是成型作用較緩慢，該研究為了瞭解其中機制而研究添加不同比例的飛灰之飛灰混凝土的流變學和應力等條件【Bentz *et al.*, 2010】。

Dinakar 等人利用燃煤飛灰取代水泥，以 10%、30%、50% 以及 70% 的重量比之飛灰取代部分水泥並維持水和黏著劑的比值於 0.3 並對水泥漿體做坍流試驗、V 型漏斗流動試驗、T50 time、L-盒阻斷試驗等試驗。對養護完成之混凝土試體塊做抗壓、拉伸、彈性模數、吸水率、氯離子滲透等試驗。實驗中表示以 30%

燃煤飛灰取代水泥有最佳的效果。【Dinakar *et al.*, 2013】

Siddique 指出燃煤飛灰可以用做生產水泥的原料，也可以使用特定比例與水泥熟料混合進而製作水泥以及相關水泥成品。文獻中也指出一般而言大多數的燃煤副產物是無毒無害的【Siddique *et al.*, 2010】。

5. 輕質骨材

Kockal 等人使用燃煤飛灰混合 5~10% 的皂土、及 5~10% 之廢玻璃，以旋轉盤方式造粒成型，以每分鐘升溫 6.7 升溫 °C 的條件下在 1100、1150 或 1200°C 下燒製 1 小時，結果顯示，添加 10% 皂土以 1200°C 燒製以及添加 10% 廢玻璃以 1200 °C 燒製有最低的密度、最低的吸水率與最高的抗壓強度【Kockal *et al.*, 2010】。

Saraber 等人利用燃煤飛灰與黏土於旋轉盤造粒，並使用旋轉窯燒製骨材，溫度為 500~1200°C 並停留約半個小時，實驗中的產品之顆粒密度為 1630 g/m³ 且性質良好【Saraber *et al.*, 2012】。

王氏等使用不同比例的燃煤飛灰添加廢水淤泥，在 8 MPa 的壓力下製成直徑 20.4 mm、高 14 mm 的圓柱體試樣，以每分鐘 9°C 的升溫速率加熱，在 420°C 下預熱約 20 分鐘後在 1050~1100°C 燒製半個小時。廢水汙泥的有機物質較多，在中溫遇熱分解會產生許多氣體導致許多的孔洞產生。而燃煤飛灰的有機物質含量極低，所以使用以上兩種物質混合燒製輕骨材能夠使孔洞大小更均勻。廢水汙泥之中含有許多助熔劑如 CaO 等，能夠降低的燒結溫度。其中於 1100°C 燒製添加燃煤飛灰 10% 及 18% 時之成品，其吸水率較低及抗壓強度較高【Wang *et al.*, 2009】。

2.4 水庫淤泥

2.4.1 台灣水庫概況

台灣每年的平均降雨量為 2,467 mm，而世界平均降雨量僅 973 mm，台灣的降雨量為世界平均的 2.5 倍左右，但台灣每人每年能分到的雨水量為 4,074 立方公尺，僅為世界平均每人每年 21,796 立方公尺的五分之一【經濟部水利署】。故台灣雖為一降雨豐沛的島嶼，卻因為地形狹長、高山陡峭且常有颱風將雨水迅速帶入海中，水資源儲存不易，實屬一個缺水國家。故水庫的興建極為重要，能夠有效地將水資源妥善儲存，並能夠在枯水期間提供全台的用水。台灣目前大大小小的水庫與大壩總數已經超過 100 座【經濟部水利署】。而每年從水庫上游沖刷進入底層之泥砂量高達 1,400 多萬立方公尺，當泥砂淤積量過高時，將影響水庫的壽命以及功能【陳氏，2007】。

2.4.2 水庫淤泥

台灣的水庫淤泥大多源自於土表上之板岩、頁岩等。因為降雨沖刷以及地震等因素自然而然的散落進水庫之中，且還有自然動植物之屍體以及排泄物等，因為重力沉降而緩緩地累積在水庫底層，其粒徑分佈多屬於砂土、黏土及坩土，且因為重力及水利自然篩選，故分佈範圍較狹窄。其比重落於 2.5~3.0 之間。水庫淤泥的來源源自於地殼，則其化學成分也近似於地殼的元素分佈。以二氧化矽 SiO_2 為主，佔 59~77%(wt%)，其次為氧化鋁 Al_2O_3 ，約為 8~18%，且含水量極高【黃氏，2003；周氏，2005】。而每座水庫因為地貌以及自然環境的不同，所以組成成分也會有些許差異。

2.4.3 石門水庫

石門水庫位於大漢溪中游處，因為溪口處有雙對峙成石門狀，故得其名。石門水庫於民國 52 年開始使用，其功能包含發電、灌溉、防洪、觀光以及公共給水等，對於北部的發展以及民生需求提供了極大的貢獻【經濟部水利署】。石門水庫是一個滾壓油土壩，高 133 m、長 360 m、集水面積達到 763 km^2 。至 104

年為止，淤積量高達 1 億 86 萬立方公尺，佔水庫設計儲水總額之 3.09 億立方公尺的 33 % 左右，已經嚴重影響到其正常功能【經濟部水利署；翁氏，2017】。

2.4.4 水庫淤泥之再利用

水庫淤泥因為長時間的累積，會導致水庫的儲水量下降，根據偵測儀器，當儲水量降至一定程度的時候必須經由人工清除水庫淤泥。而水庫淤泥的清除技術大致上能夠分為以下三種：【王氏，1996】

1. 水力排沙：依照不同的原理機制可分為洩洪、洩降、異重流排砂、空庫排砂等。此方法較為浪費水資源，台灣並不常使用此方法。
2. 水上機械浚淤：依照其原理可分為機械挖泥、水利抽泥、虹吸抽泥與氣力抽泥等。在台灣算是比較常見的方法之一，石門水庫屬之。
3. 陸面機械開挖：於枯水期間直接從水庫路面上使用機械挖取淤泥。

在早期，水庫淤泥在挖取之後常直接運送至岸邊，經由承裝後藉由路面運輸至最終處理場進行掩埋等最終處理。台灣的地狹人稠，資源取得不易，在近年陸續有不同的水庫淤泥再利用的研究以及推廣措施，使得水庫淤泥的再利用已經逐漸普及化，常應用於例如燒磚的原料、鋪路、花卉及農土改良、輕質骨材以及其他不同的用途上【張氏，2001】。

2.5 燒結機制

所謂的燒結指的是在低於物質的熔點之下進行加熱處理，將該試體於高溫的環境下進行重新排列，可以形成較為緻密且堅固的試體【張氏，1999；Saptono *et al.*, 2012】。燒結反應根據樣品中原子的移動可區分成固態燒結、液態燒結以及黏滯留燒結【Bhatty *et al.*, 1989；余氏，2000】。

- 1、固態燒結(Solid state sintering)：利用晶格擴散、表面擴散、粒界擴散或是固態物質與周圍氣氛反應者(例如昇華-再凝結反應)等。
- 2、液態燒結(Liquid phase sintering)：利用溶解和固體再沉澱的方式增加密度以及顆粒尺寸。

3、黏滯留燒結(Sintering by viscous flow)：此反應中的燒結是由非晶相物質的流動所造成，在矽酸鹽環境下此種燒結反應為主要機制【Skrifvars, 1994】。黏滯留燒結會形成閉孔，是因為液相表面形成晶格邊界的擴散，進而收縮【Nowok, 1990】。

German 等人於著作中提出燒結機制的理論，將兩個粒子之間的燒結分為以下四個步驟：

- 1、最初點接觸反應。
- 2、初期頸部成長反應。
- 3、後期頸部成長反應。
- 4、最終全融合反應。

German 等人認為燒結的機制起始為點與點之間的接觸反應，之後伴隨著頸部成長反應，在粒子與粒子之間會形成一個新粒界 (grain boundary)，而時間足夠的話兩粒子將會融合成一個新的大粒子【German, 1996】。

2.5.1 發泡機制

發泡機制指的是在軟化點與最高加熱溫度之間進行加熱，其中某些物質例如碳酸鹽類、氧化物、氫氧化碳及一些有機物會將氣體釋放，將試體形成具有孔隙的結構【Bhatty et al., 1989】。

原料的發泡有兩個重要的條件：

- 1、黏度條件：當試體被加熱到高溫時，必須產生部分的熔融以便形成具有玻璃質的液相。使得產出的氣體得以保存於試體內部，不至於全數逸散至試體外部。
- 2、產氣條件：原料達到一定溫度後會產生黏稠度，其中的產氣物質會產生 CO、CO₂、氧氣、SO₂、H₂O 等物質。會使試體內部形成多孔結構。常見的氣體逸出之種類以及溫度如表 2-5 所示【楊氏，2008】。

表 2-5 各種產氣化學成分之種類與反應溫度

反應方程式	反應溫度(°C)
$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 \uparrow$	400~900
$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O + CO_2 \uparrow$	>400
$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$	600~1050
$CaSO_4 \rightarrow CaO + SO_3 \uparrow$	1250~1300
$6Fe_2O_3 \rightarrow 4Fe_3O_4 + O_2 \uparrow$	>800
$FeS_2 + O_2 \rightarrow FeS + SO_2 \uparrow$	350~450
$Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow Fe_2O_3 + 3SO_3 \uparrow$	560~775
$4FeS + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4SO_2 \uparrow$	500~800
$FeCO_3 + 3CO_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4CO_2 \uparrow$	>800

【Merck, 2001】

2.5.2 影響燒結的因素

影響燒結的主要因素有以下五點：成型壓力、化學組成、粒徑分佈、燒結溫度、持溫時間與升溫速率。

- 1、成型壓力：不同的成型壓力會使得試體中的粒子排列緊密程度的不同。壓力提升會導致緊密程度上升，燒結效果提升【施氏，2010】。
- 2、化學組成：化學組成是一個影響燒結成果很大的因素。一般的鹼金族及鹼土族有較低的熔點，故可以做為助熔劑來使用。化學成分也是決定在高溫燒結的時候是否會產生玻璃相以及氣體【Wang *et al.*, 2009；Shih *et al.*, 2005】。
- 3、粒徑分佈：原料的粒徑越小，表示燒結的同時，粒子與粒子之間的接觸面積越大，燒結效果提升【王氏，2003；施氏，2010】。
- 4、燒結溫度：溫度提供燒結的過程中所需之能量，使試體產生黏滯留，進而透過燒結產生玻璃相，以此包覆住產生的氣體，達到多孔性質。
- 5、持溫時間：指的是在抵達設定的最高溫度之後，持續燒製的時間。持溫時間加長會使粒子間的緻密程度提升，使燒結效果提升。

2.6 發泡玻璃

2.6.1 發泡玻璃之概述

發泡玻璃，又稱為泡沫玻璃，是一種多孔的新興建材。在 1935 年，法國的建材公司首先生產出發泡玻璃，當時的製品使用玻璃粉添加碳酸鈣作為發泡劑於耐火模具中加熱，產生出輕石狀的材料【Liyun *et al.*, 1998】。隨後美國、英國、日本等國家陸續發展有關發泡玻璃的專利與相關研究。而發泡玻璃的特性有低密度(密度 $<1\text{ g/cm}^3$)、導熱係數低、防水性高、防昆蟲及動物侵害、在極端地區(例如寒帶)還有著絕佳的抗凍性質，且隔音、隔熱佳，高耐酸性質(氫氟酸之外)、高耐鹼性質、高抗壓，且對環境友善，能夠被廣泛的應用在許多地方。例如建築、生態園區、高度吸音設施、石化工程、綠建築、園藝、輕隔間等。發泡玻璃的強度取決於氣孔之間的孔壁厚度，厚度大且孔壁多則抗壓強度上升。而發泡玻璃之低吸水性依賴其開孔率低，但其閉孔率十分的高(通常在 60 % 以上)。發泡玻璃的孔洞產生仰賴於發泡劑的添加，使其孔洞均勻分布則仰賴於泡沫穩定劑的添加。製作泡沫玻璃除了基本原料與發泡劑的添加之外，根據原料的不同可能需要添加泡沫穩定劑。泡沫穩定劑的添加十分重要。它的用量較少，泡沫穩定劑是一種表面活性劑，主要有以下三種作用【周氏，1991】：

- 1、乳化作用：降低原料之表面張力，改善原物料組成的混合均勻性。
- 2、成核作用：提升發泡初期核之形成，調節氣泡結構。
- 3、穩定作用：促進原料的流動及穩定性，使其孔洞分布均勻。是否有理想的開孔、閉孔之結構，取決於泡沫形成的過程中燒結反應速度與氣體膨脹速度是否平衡【周氏，1991】。

傳統的發泡玻璃大多是使用純的廢玻璃，並添加發泡劑以及添加劑等進行燒製，並進行退火，以確保產品的強度，避免破裂。傳統的發泡玻璃流程圖如圖 2-1 所示【田氏，2001】。

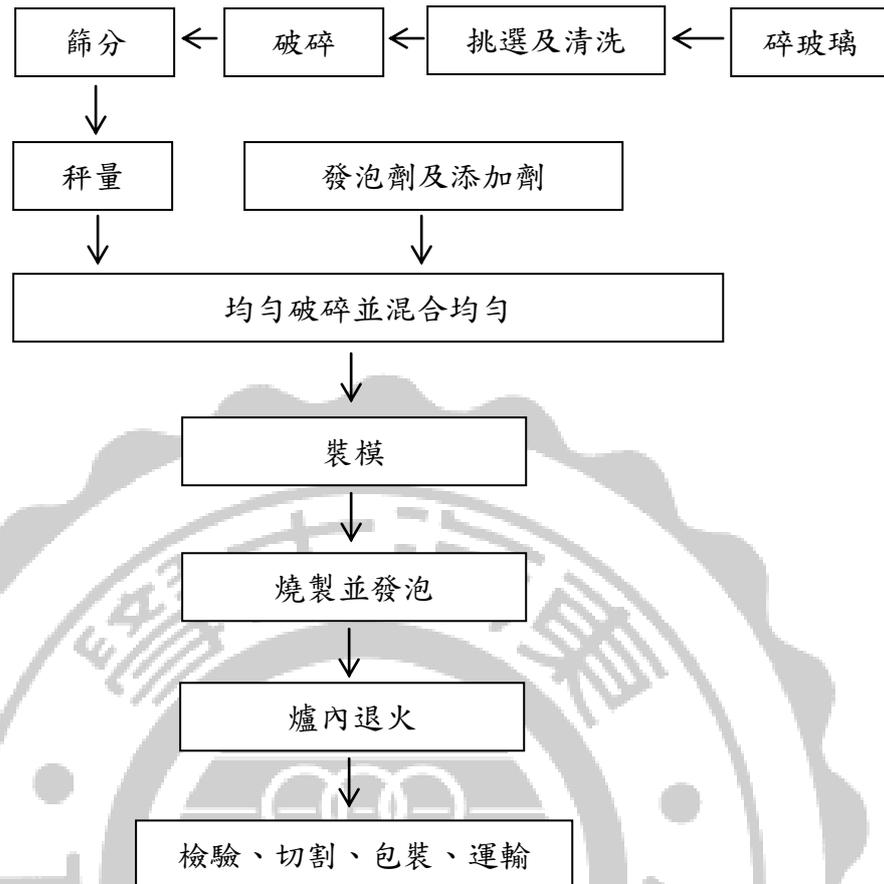


圖 2-1 傳統發泡玻璃製作流程圖

【田氏，2001】

2.6.2 發泡玻璃之國內外相關研究

Chen 等人使用燃煤飛灰作為原料，添加 CaCO_3 做為發泡劑， Na_2HPO_4 作為泡沫穩定劑及 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 作為助熔劑， CaCO_3 本身也具有助熔作用，但效果不佳，故另外添加 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (22.5~37.5%) 作為助熔劑。實驗中以 $3.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升溫速率於室溫提升溫度至 800°C 並燒製發泡玻璃。他們利用 CaCO_3 在 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 下會分解產生 CO_2 之特性將其作為發泡劑，且添加泡沫穩定劑能使產品孔洞分布較均勻，研究中的產品密度為 $0.591\sim 0.876\text{ g}/\text{cm}^3$ 、孔隙率為 52.0~66.1 %、抗壓強度為 2.09~3.95 Mpa。研究也指出升溫速率會影響產品的發泡結果，例如使密度降低【Chen *et al.*, 2012】。

海內斯等人將廢玻璃與發泡劑(碳酸鈣、碳酸鎂、碳酸鋁、碳酸鋰等)與研磨材料(金鋼砂、氧化鋁等)混合成塊狀或是碟狀後將混合物放入 $22 \times 46 \times 5$ 英寸之

不鏽鋼模具中在 1250°F (676°C)燒結 60 分鐘，隨後升溫至 1274~1700°F (690~926°C)燒製 30~40 分鐘後，在 120~360 分鐘內將物體自然退火緩降至室溫，結果顯示發泡劑的添加量以 5% 內效果較佳，且發泡玻璃產品為無毒、耐久的，孔結構為敞開、互相連結且不規則，產品為白色淺灰色。在 570°C 下碳酸鈣開始與二氧化矽產生反應形成矽酸鈣和二氧化碳【海內斯等人，1998】。

Qian 等人製備了以 70% 城市生活垃圾焚化灰渣為原料，以 CaCO_3 做為發泡劑來製作發泡玻璃。實驗中將城市生活焚化灰渣球磨，過 120 目篩，與二氧化矽、碳酸鈉和硼酸調和後裝入氧化鋁乾鍋，以 1400°C 燒 25 分鐘得到垃圾灰渣玻璃，並破碎成粉末狀後過 250 目篩。將該玻璃粉與 0.5~2.5% 的碳酸鈣混合均勻並以 10 Mpa 的壓力壓製出樣品，加以製備泡沫玻璃。結果顯示，隨發泡劑量從 0.5~2.5%，玻璃孔徑逐漸變大，密度及抗壓強度均降低，隨燒製發泡玻璃的溫度升高，氣孔結構變得均勻、表觀密度減小，但過高的溫度會導致氣體逸出，氣孔收縮。實驗中的產品密度最低來到 0.269 g/cm^3 ，抗壓強度為 2.60 Mpa。結果也顯示出較高含量的發泡劑會導致樣品內小氣孔合併成為較大氣孔【Qian *et al.*, 2014】。

Zhou 等人以高鈦渣和廢玻璃為主料，以碳酸鈣，氮化鋁做為發泡劑，硼砂為助熔劑燒製發泡玻璃，結果顯示，玻璃的孔徑隨溫度上升而增大，隨氮化鋁含量的增加而先增大而後減小，隨著溫度的升高和發泡劑含量的增加，容易在產品生成大孔和聯通孔【Zhou *et al.*, 2014】。

Petersen 等人將不同種類的廢玻璃混合金屬鹽類來製備發泡玻璃。實驗中將廢玻璃(98%)與碳酸鈣(2%)使用轉速 150 rpm 球磨 45 分鐘後以 1.5 克樣品在 40 Mpa 下壓製成圓柱型樣品，結果與其他文獻做連結，指出了使用 SiC 做為發泡劑相較於使用以下金屬碳酸鹽類(CaCO_3 、 Na_2CO_3 、 MgCO_3 、 SrCO_3 、dolomite 白雲石等)發泡需要更高一些的溫度【Petersen *et al.*, 2016】。

Fernandes 等人利用破碎後之廢棄平板玻璃並添加燃煤飛灰做為原料以製作發泡玻璃，並添加商業用白雲石及含方解石之大理石研磨汙泥做為發泡劑，討論

在不同溫度(750~950°C)之下，不同配比之產品差異性。產品表觀密度介於 0.36-0.41 g/cm³，抗壓強度介於 2.4-2.8 Mpa。研究結果表明了在没有添加任何發泡劑的情況下，玻璃粉末的添加量及燒製溫度決定了產品的發泡效果。在 900°C 的燒製條件下，含 80/20 的玻璃粉/飛灰以及 90/10 的玻璃粉/飛灰之試體密度，與 800°C 燒製的試體比較，降低了接近 50%，而原料本身所含之碳酸鹽類，有助於發泡。該研究指出，藉由添加兩種發泡劑，會使結晶化程度提升，限制試體的膨脹，使試體之體密度及抗壓強度均提升【Fernandes *et al.*, 2009】。

Huo 等人使用廢玻璃作為原料，利用膠體懸浮發泡法製備泡沫玻璃。實驗中使用廢玻璃與水混合成懸浮液，使用球磨機在 300 rpm/min 下轉 1 至 24 小時，玻璃懸浮液之玻璃添加量由 5~40 (wt%)，將懸浮液在室溫下乾燥並在爐中以 3°C/min 加熱燒製 1 小時。最終溫度 700~750°C。此文章提出了使用膠體懸浮發泡法來製備發泡玻璃，並研究 pH 值、沒食子酸丙酯(添加劑)濃度和球磨時間對泡沫玻璃懸浮液穩定性之影響【Huo *et al.*, 2017】。

Mi 等人以廢玻璃為主要成份(70%)並添加 30% 之飛灰後加入少量 SiC 做為發泡劑及 Na₂B₄O₇ 助熔劑製備發泡玻璃。當 Na₂B₄O₇ 添加比例為玻璃+飛灰之重量的 15% 時，SiC 添加量為 0.5%，可燒製出密度為 0.14~0.4 g/cm³ 之低密度產品，且其燒製溫度較低，約為 680~780°C 之間。產品之孔隙率為 83~94%，抗壓強度為 0.91~6.37 Mpa，熱導係數為 0.070~0.12 Wm⁻¹K⁻¹【Mi *et al.*, 2017】。

李氏等人之專利使用廢玻璃 (90~94%)、添加劑 (高硼矽玻璃熟料粉 1~1.5%)、六偏磷酸鈉 0.5~2%、硼砂 1.0~3.0%、芒硝 0.4~0.8%、碳酸鈣 1.5~4%、發泡劑 1.8~1.9%、穩泡劑 0.6~0.8%、助熔劑 0.2~0.4%、增強劑 0.1~0.2% 經過球磨過篩後，將原料與模具放入工業加熱微波爐內，在 650°C 下預熱 20~30 分鐘，以 4~8 °C/min 升溫至發泡溫度 800~1000°C 持續 60 分鐘後降溫至 650°C 等待泡沫玻璃穩定，持續 60 分鐘，依照 10~15°C/min 的降溫速率降至 25°C 使結晶體冷卻放置 4 小時後取出。其產品抗壓強度較傳統高、熱導係數低、氣孔結構均勻、密度小

【李氏，2017】。

Bai 等人使用燃煤飛灰及玻璃粉末製作泡沫玻璃，添加 SiC 做為發泡劑。研究中的玻璃粉末來源為廢玻璃瓶，經破碎後作為廢玻璃粉末生原料，並以廢玻璃 84.75% (wt%)、燃煤飛灰 14.75%、SiC 0.5% 的比例混合均勻後，經過 100°C 烘箱烘乾後以 5 °C/min 之升溫速率於 950°C 加熱 20 分鐘，在高溫爐中以 4°C/min 之降溫速率將其降至室溫，避免產品因太過快速的接觸到較冷之空氣造成破裂。其結果發現發泡玻璃密度為 267 kg/m³，抗壓強度為 0.983 MPa，孔隙率高達 81.6 % 【Bai *et al.*, 2014】。

König 等使用玻璃粉末，添加活性碳、碳黑/錳氧化物作為發泡劑，並將樣品混合均勻後使用 40 Mpa 壓制成小塊 (30-40 g)。在氫氣/氧氣= 80：20 的條件下每分鐘升溫 10 K，錳氧化物具有不同的氧化作用， $C(s) + 2MnO_2(s) \rightarrow CO_2(g) + 2MnO(s)$ 。錳可以使碳黑在燃燒過程中產出二氧化碳，對人體無害。可獲得良好的發泡產品 【König *et al.*, 2016】。

韓氏等人之專利使用 90~95% (wt%) 之玻璃粉末、發泡劑(碳黑)1~3%、性質改良劑 (Al₂O₃)1~2% 及發泡促進劑 (Ti₂O₃)0.5~3% 混合均勻後將混合物粉末將粉末於 700~850°C 融化之後形成混合物液體，將該液體於 650~720°C 進行均勻發泡 30~50 分鐘後降至 500°C 進行退火，退火 37~38 小時候定型取出。結果指出添加 Al₂O₃ 可以提高抗壓強度 【韓氏，2012】。

Qu 等人使用再生玻璃粉末製備泡沫玻璃，利用生胚可以調整泡沫的微觀結構特徵和性質，並將燒結溫度降至 680~800°C。樣品的發泡過程包含六個連續的燒製階段，所得樣品發泡均勻，表觀密度為 0.129~0.229 g/cm³，孔隙率高達 91~95 %，導熱係數為 0.055~0.077 Wm⁻¹K⁻¹，抗壓強度為 0.85~5.92 MPa 【Qu *et al.*, 2016】。

Tian 等人使用平板玻璃作為原料，碳黑做為發泡劑。實驗中的平板玻璃佔 99.5% (wt%)，碳黑 0.25% 和氧化鎂 0.25%，將原料研磨並混合均勻後，使用陶瓷

乾鍋 (300 ml)作為燒製泡沫玻璃之容器，觀察其燒製後凹陷的程度。研究中表明了凹陷程度與發泡溫度及保溫時間有絕大的關係，在 880 °C 時發泡較均勻而提升溫度來到 900~920 °C 時可以觀察到泡沫玻璃中的氣孔是破裂的，這是因為更高溫使得內部孔洞形成更大的聯通孔，而一旦冷卻時間不夠充分，將導致收縮較為迅速，導致聯孔產生破裂【Tian *et al.*, 2015】。

Xi 等人使用鈦尾礦(20%)混合廢玻璃(80%)與發泡劑 Na_2CO_3 以及助熔劑 B_2O_3 用來燒製發泡玻璃，實驗將樣品混合均勻後壓製成兩公分之小圓柱並以設定好的溫度程式燒製，結果顯示可通過改變燒製時間、燒製溫度以及發泡劑的添加量來改變孔隙結構，且 B_2O_3 的添加有助於降低原料的黏度。產品密度為 $0.30 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$ ，抗壓強度 $1.0 \pm 0.1 \text{ Mpa}$ ，熱導係數為 $0.060 \pm 0.002 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，閉孔孔隙率達到 88%【Xi *et al.*, 2018】。

第三章 研究方法及設備

3.1 實驗材料及設備

3.1.1 實驗材料

1. 燃煤飛灰(Coal fly ash , CFA)

本實驗使用之燃煤飛灰取自於台灣電力公司台中火力發電廠，收集樣品後經過 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾 24 小時，並破碎或研磨至可通過 50 mesh 的篩網過篩，存置於 PE 瓶中備用。

2. 廢玻璃(Waste glass)

本實驗所使用之廢玻璃為窗型平板玻璃，先經過初步破碎之後，再以 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾 24 小時，並破碎到小於 50 mesh (297 μm)，存置於 PE 瓶中備用。

3. 水庫淤泥(Reservoir sediment)

本實驗之水庫淤泥來自於石門水庫，採樣後經過初步挑選，將大型雜物如樹枝等分離後經過 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾 24 小時，並破碎後使用 50 mesh 之篩網過篩，存置於 PE 瓶中備用。

3.1.2 實驗藥品

1. 硝酸 (Nitric acid, HNO_3) : 69 % , G.R.級 , Merck, Germany 。
2. 鹽酸 (Hydrochloric acid, HCl) : 37 % , G.R.級 , Ridel-de Haën, Germany 。
3. 氫氟酸 (Hydrofluoric acid, HF) : 48 % , G.R.級 , Ridel-de Haën, Germany 。
4. 過氧化氫 (Hydrogen peroxide solution, H_2O_2) : 30% , G.R.級 , Ridel-de Haën, Germany 。
5. 碳酸鈉 (Sodium carbonate, Na_2CO_3) : 99.9% , G.R.級 , Showa, Japan 。
6. 碳酸鈣 (Calcium carbonate, CaCO_3) : 99% , G.R.級 , Showa, Japan 。
7. 四硼酸鈉 (Sodium tetraborate decahydrate, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) : 99% , G.R.級 , Showa, Japan 。
8. 十二水磷酸三鈉 (Sodium Phosphate Tribasic Dodecahydrate, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) :

- 99% , G.R.級 , Showa, Japan 。
9. 冰醋酸 (CH_3COOH) : 99.8 % , G.R.級 , Merck, Germany 。

3.1.3 實驗設備

1. 天平 (Balance) :
 - (1) 可精秤至 10^{-2} 克 , GF-3000 , A&D Company, Limited, Japan 。
 - (2) 可精秤至 10^{-4} 克 , LIBROR AEX-200B , SHIMADZU Corp, Japan 。
2. 高溫灰化爐 : 程式控制儀器 N4440 , WEST Co. , UK ; max. temperature 1,450 °C
中聯高熱工業有限公司 , Taipei, Taiwan 。
3. 恆溫烘箱 (Hot air rapid drying oven) : RHD-120L , max. temperature 200 °C ,
RISEN, USA 。
4. 電子密度儀 (Electronic density meter) : TWS-PY , MatsuHaku, Taichung,
Taiwan 。
5. 微波消化器 : 微波消化器 (Microwave oven) : MWS-4, Bergh of Lab orprodukte
GmbH, Germany 。
6. 油壓壓錠機 : Max. shape pressure 25 ton , Pan-Chum Scientific Corp, Kaohsiung,
Taiwan 。
7. 旋轉裝置 (Mixing devices , 30 ± 2 rpm) : Model 3740-6-BRE, Associated Design
and Manufacturing Company, Virginia, USA 。
8. 全自動微電腦抗壓試驗機 : HCH-239A-20T, Controls, Italy 。

3.1.4 分析儀器

1. 熱重-卡量計雙重分析儀 (Thermogravimetry and differential thermal analysis,
TG/DTA) : Prys Diamond TG/DTA , Perkin Elmer, Massachusetts, USA.
2. 場發射掃描式電子顯微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscope,
ESEM) : JSM-7000F, JOEL, USA 。
3. 雷射繞射粒徑分析儀 (Laser diffraction particle analyzer) : N4 Plus, Beckman

Coulter, Washington, USA.

4. 感應耦合電漿光譜儀 (Inductively coupled plasma Optima Emission spectrometer, ICP-OES) : Optima 2000DV, Perkin Elmer, Middlesex, USA.
5. 多功能 X 光粉末繞射機 (Multipurpose X-ray powder diffractometer, XRD) : D2 phaser, Bruker, Germany.

3.2 實驗流程與方法

3.2.1 發泡玻璃製作流程

本實驗以廢玻璃與燃煤飛灰或是石門水庫淤泥以特定比例混合均勻，再依需求將溶化於水中之均勻的發泡劑 (碳酸鈉)及泡沫穩定劑緩緩倒入上述原料中並再次攪拌均勻後於 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 之烘箱蒸發多餘水分並以破碎機破碎至 50 mesh，在 4000 psi 的壓力之下將依照需求將混合原料壓錠一分鐘以成型或是依照試體需求灌入模具之中並放入烘箱中將多餘的水分蒸散，於四階段升溫條件下燒製，觀察其燒結發泡之情形。試體使用廢棄平板玻璃混合燃煤飛灰或是水庫淤泥並使用 Na_2CO_3 作為發泡劑；添加 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 作為泡沫穩定劑，分別以燃煤飛灰、廢玻璃及發泡劑的重量比例為 45~82 : 100 : 18~36 之比例進行混合或是石門水庫淤泥、廢玻璃及發泡劑之重量比例為 64~78 : 100 : 18，在 4000 psi 的壓力下壓錠一分鐘以成型，於四階段升溫條件下燒製成發泡玻璃，觀察其發泡之情形。分別以 750°C 、 775°C 、 800°C 、 825°C 以及 850°C 之最高溫度燒製發泡玻璃，觀測其變化。

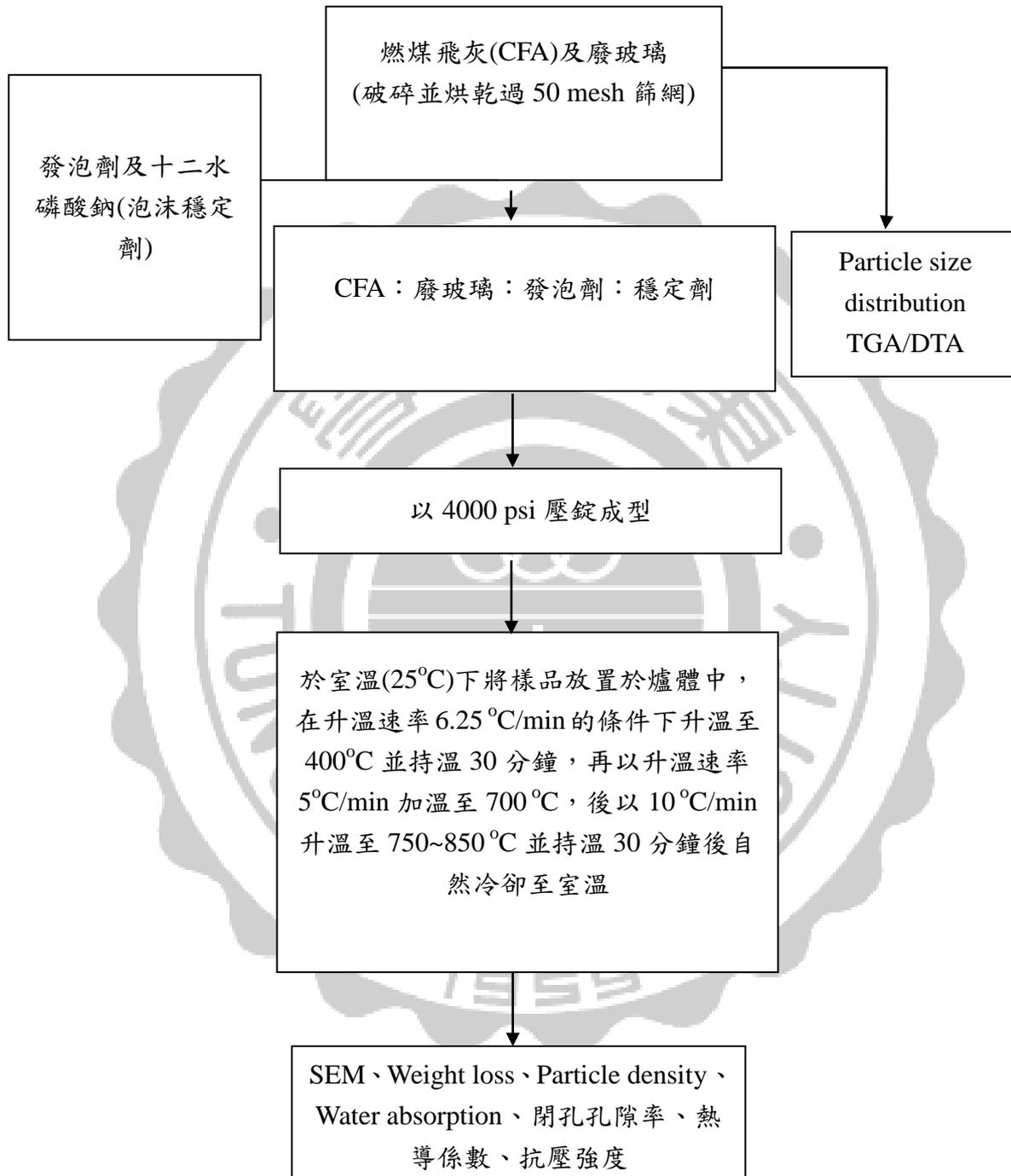


圖 3-1、燃煤飛灰混合廢玻璃與發泡劑
燒製發泡玻璃流程圖

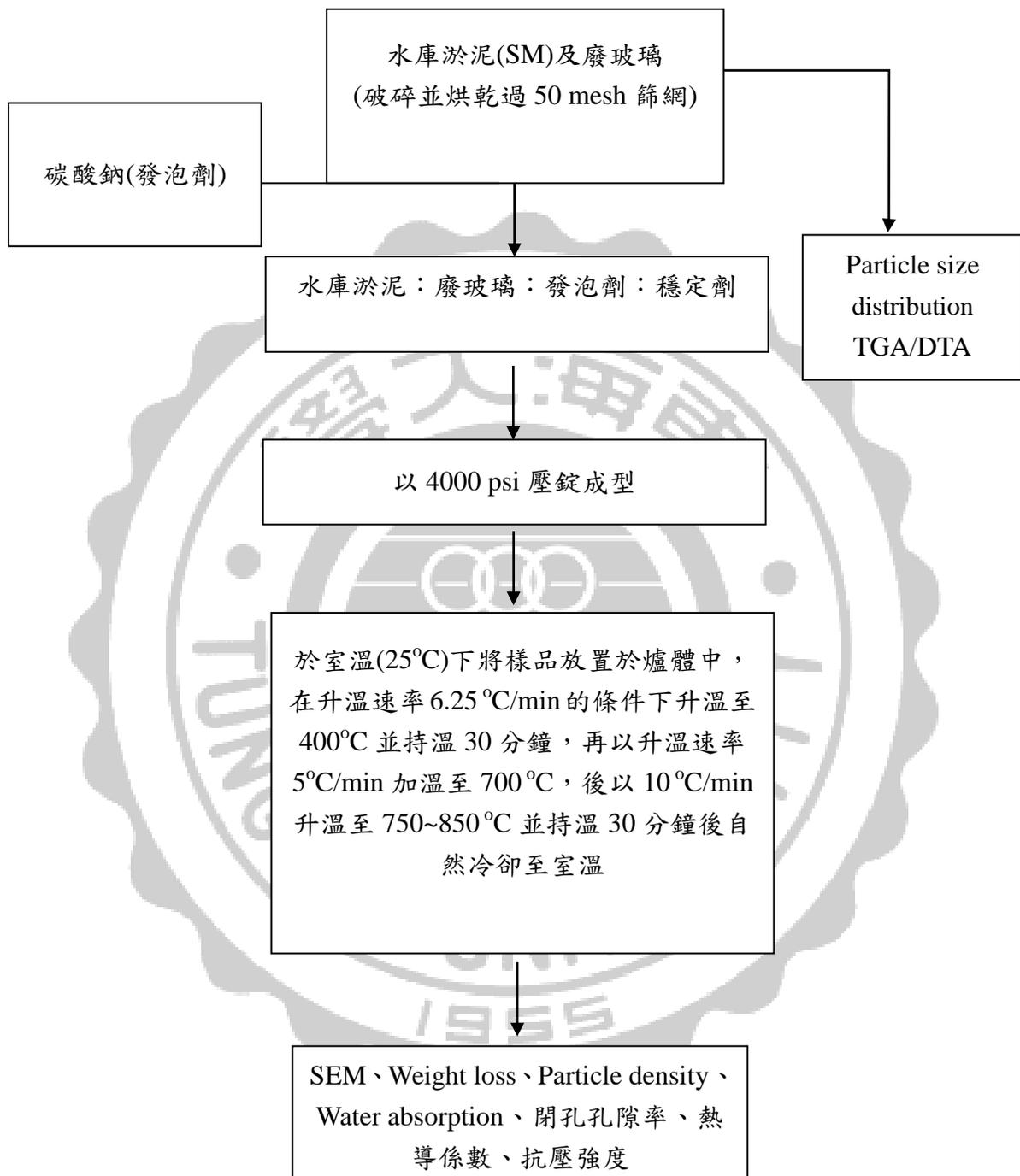


圖 3-2、石門水庫淤泥混合廢玻璃與發泡劑
燒製發泡玻璃流程圖

3.3 成品基本性質探討

3.3.1 升溫條件

實驗中產品的燒製使用中聯高熱之高溫灰化爐，將混合均勻並壓製好的圓錠置於灰化爐中，於特定之升溫條件下進行燒製，將分為四個升溫階段。最高溫度介於 750~850°C。前三段升溫條件皆相同。第一階段為**預熱階段**：將樣品於室溫(約 25°C)開始燒製至 400°C 一個小時，後於 400°C 持溫 30 分鐘，目的在於將樣品中的結合水、吸附水以及一些在相對低溫能夠揮發之物質燃燒乾淨，避免過快的產氣導致樣品氣孔過大或是分布不均，且速度不可過快，使燃燒反應緩慢地進行，有助於產品的完整性；第二階段為**軟化階段**：於 400°C 持溫 30 分鐘後以 10°C/min 之升溫速率升溫至 700°C，目的在於使試體軟化，盡可能地減少氣體逸出；第三階為**發泡/燒結階段**：爐體溫度升至 700°C 之後，以每分鐘 10°C 的升溫速率升溫至目標溫度(750、775、800、825、850°C)後持溫 30 分鐘，使試體中的發泡劑分解出二氧化碳，產生氣孔；第四階段為**退火階段**：燒製完成後，將試體置於爐體中於 10~15°C/min 的降溫速率緩慢降溫，目的在於保持氣孔的完整性，且不致於因為高溫樣品忽然的快速接觸冷空氣導致樣品破裂，降至穩定溫度後取出試體。升溫條件示意圖如下所示。

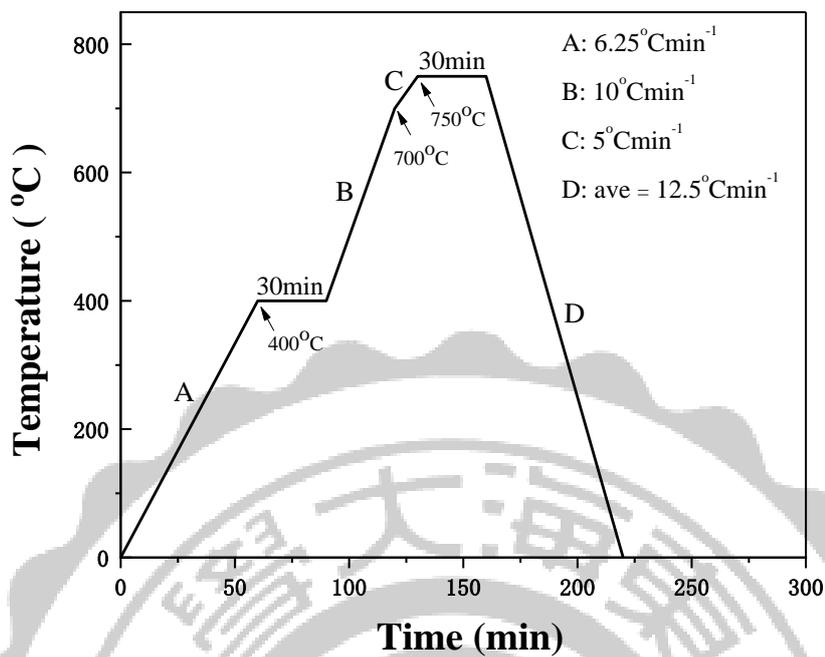


圖 3-3 750°C 之升溫條件

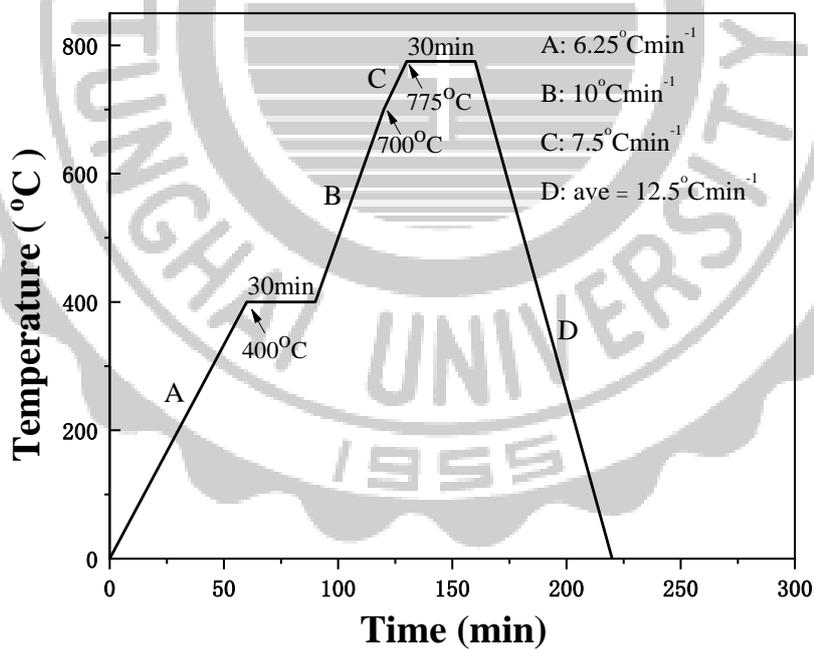


圖 3-4 775°C 之升溫條件

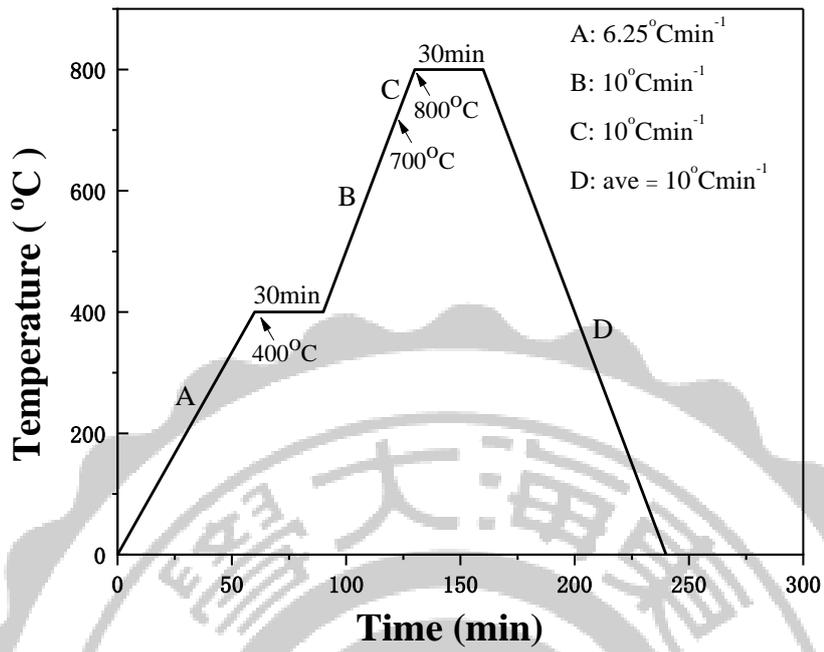


圖 3-5 800°C 之升溫條件

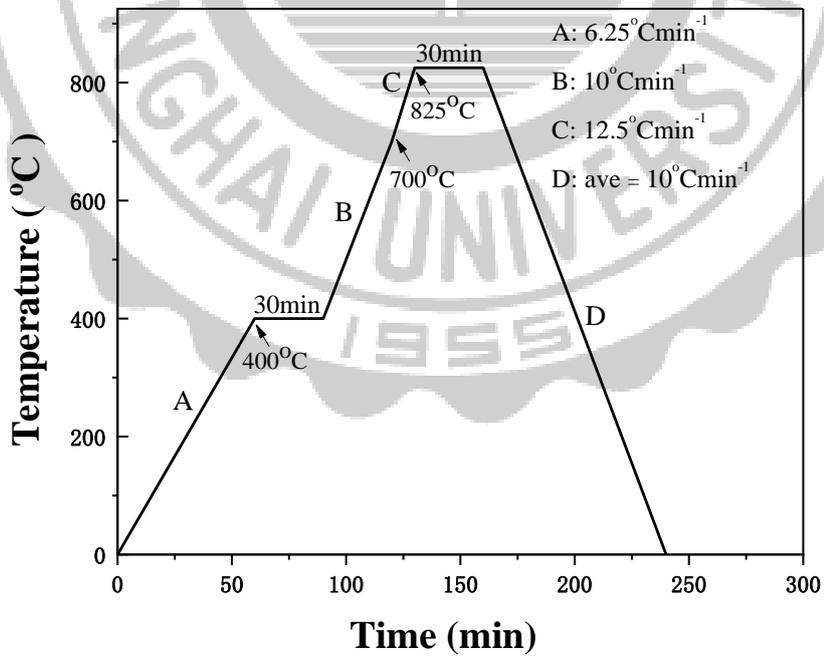


圖 3-6 825°C 之升溫條件

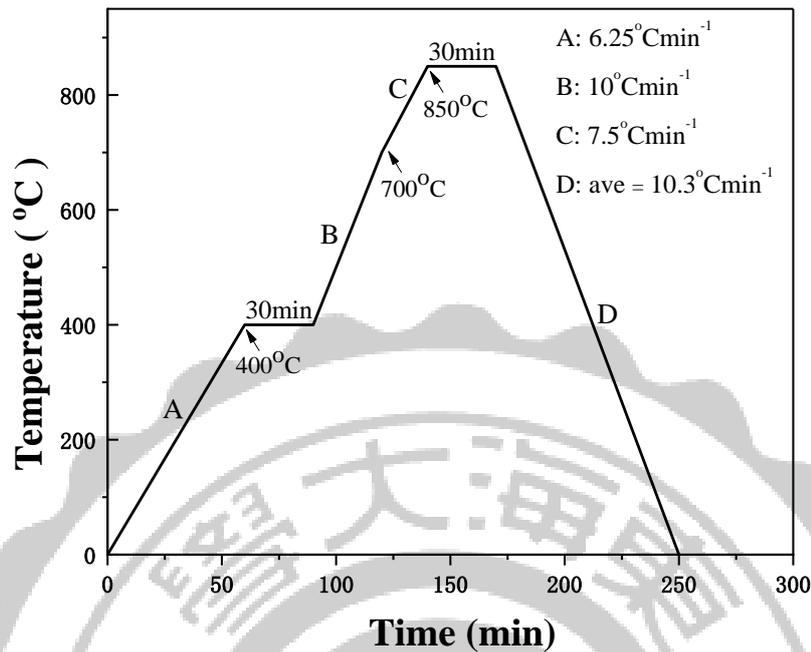


圖 3-7 850°C 之升溫條件

3.3.2 發泡玻璃

本實驗選用之配比經過多次測試，挑選各種配比(表 3-1)進行燒製。A 與 A-1 為取用石門水庫淤泥製作發泡玻璃，結果顯示水庫淤泥有製備發泡玻璃之潛力。C、C-1、C-2 可用於探討燃煤飛灰添加量(Glass : Na₂CO₃ : Na₃HPO₄·12H₂O 之重量比為 100 : 18 : 9，煤灰添加重量比依序為 45、64、82)對於燒製發泡玻璃之影響，呈現於表 3-1。各配比分別在 750°C、775°C、800°C、825°C 及 850°C 燒製，所得之發泡玻璃的代號詳見表 3-2。A-1 與 B 比較，為使用水庫淤泥取代燃煤飛灰。C-1 及 C-2 僅用作與 C 比較，探討增加燃煤飛灰使用量之影響。但其密度皆 >1 g/cm³，不符合輕質之需求，故僅做基本性質探討(密度、吸水率、燒失重)與外型觀察。

表 3-1 各原料組成分(coal fly ash, waste glass, Na₂CO₃, Na₃PO₄·12H₂O)之重量比例

Sample compositions (weight ratio)					
sample notation	sediment	coal fly ash	waste glass	Na ₂ CO ₃	Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O
A	64	0	100	18	0
A-1	78	0	100	33	11
B	0	78	100	33	11
B-1	0	64	100	18	0
C	0	45	100	18	9
C-1	0	64	100	18	9
C-2	0	82	100	18	9

表 3-2 各原料組成在 750~850°C 燒製之發泡玻璃代號

溫度(°C)	發泡玻璃代號						
	A	A-1	B	B-1	C	D	E
750	A₇₅₀	A-1₇₅₀	B₇₅₀	B-1₇₅₀	C₇₅₀	C-1₇₅₀	C-2₇₅₀
775	A₇₇₅	A-1₇₇₅	B₇₇₅	B-1₇₇₅	C₇₇₅	C-1₇₇₅	C-2₇₇₅
800	A₈₀₀	A-1₈₀₀	B₈₀₀	B-1₈₀₀	C₈₀₀	C-1₈₀₀	C-2₈₀₀
825	A₈₂₅	A-1₈₂₅	B₈₂₅	B-1₈₂₅	C₈₂₅	C-1₈₂₅	C-2₈₂₅
850	A₈₅₀	A-1₈₅₀	B₈₅₀	B-1₈₅₀	C₈₅₀	C-1₈₅₀	C-2₈₅₀

3.4 實驗分析方法

3.4.1 事業廢棄物毒性特性溶出程序 (TCLP)

使用事業廢棄物毒性特性溶出程序 (NIEA R201.14C) 來測試重金屬(Ba、Se、Hg、Cd、Cu、Pb、As、Cr)之溶出數值。取待測之樣品約5.0 g，置於500 mL之容器如錐型瓶或燒杯中，並加入96.5 mL乾淨試劑水，使用錶玻璃完全覆蓋之，後以磁石攪拌器劇烈的攪拌大約五分鐘，測量溶液之 pH 值並且記錄數值。若 pH 值小於5.0，則選擇萃取液A，若 pH 值大於5.0，則再加入3.5 mL之1.0 N鹽酸液體，攪拌混合成均勻狀，以錶玻璃完全覆蓋之，加熱到50°C並且維持至少10分鐘，降至室溫後，測量該溶液之 pH 值並且記錄其數值。若 pH 值變成小於5.0，則選擇萃取液A，若 pH 值仍大於5.0，則取用萃取液B。其中萃取液A為NaOH和CH₃COOH之混合液體，其pH值為4.93 ± 0.05，而萃取液B則是CH₃COOH溶於水之水液體，其 pH 值約為2.88 ± 0.05。取用待測樣品之20倍重量的萃取液(液固比20)進行萃取，萃取經過18小時後，溶出液體經高壓過濾後濾出，使用ICP-AES、ICP-OES或是火焰式AA等儀器來分析溶出液體之重金屬濃度。

3.4.2 示差掃描量熱-熱重分析聯用儀 (Simultaneous TGA/DSC)

此儀器可用於量測不同的樣品在不同溫度條件下所產生的重量變化及放-吸熱之現象。樣品會隨著溫度之升高而產生不同的變化(包括分解、結晶、氧化、熔化、玻璃結晶等反應)，並伴隨著吸熱或放熱的現象。藉由待測之樣品與參考之樣品(標準品)在不同溫度時的熱量差異，繪製成熱流量與溫度之間的關係圖，藉此來判定樣品在加熱過程中發生反應之吸放熱種類。溫度範圍設定在室溫~1200°C，升溫速率為3°C/min，樣品置入量需<200 mg。通入氣體為空氣，流量為100ml/min、升溫速率為5°C/min。

3.4.3 多功能 X 光粉末繞射機 (X-ray diffraction, XRD)

知名德國物理學家於西元 1912 年以 X 光射線照射硫酸銅晶體($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)時發現所謂的繞射現象，進而發展出 XRD，也就是 X 光射線繞射法。X 光射線繞射法之原理是將 X 光以不同角度 θ 照射待測樣品內部，藉由觀測物種內部的 K 層電子所反射的 2θ 角度所形成之特定波長，因為不同的物種其晶格特性相異，所以可藉由反射回來之特定波長 λ 來判斷樣品組成。依據 Bragg 方程式： $2d\sin\theta = N\lambda$ ，以此方程式可以求得晶格的層間距離為 d ，因為不同物種之晶體層間距相異，可依此來鑑定不同之物種。除此之外利用繞射線波形以及繞射線的強度可以決定晶粒大小及晶格的應力、扭曲。掃描後所得之繞射圖譜，比對『粉末繞射標準聯合委員會』(The Joint Committee on Powder Diffraction Standards, JCPDS)所建立的資料庫圖譜來判定晶相之物種。本實驗使用桌上型 D2-XRD，使用 Cu (wavelength = 0.15406 nm) 為靶材，掃描範圍介於 $10\sim 80^\circ$ ，掃描速度為每分鐘 3° ，電壓為 30 kV，輸出電流為 10 mA。

3.4.4 場發射掃描式電子顯微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscop, E-SEM)

本實驗是以場發射掃描式電子顯微鏡觀察，經過中高溫燒製後所生產之發泡玻璃的試體內部，觀察其中微結構之變化，藉由發泡玻璃內部之孔洞變化加以推測並解釋燒製過程對於其物理性質之影響。本實驗所使用之顯微鏡是利用電子光束掃描待測樣品表面，利用正偏訊號收集器將二次電子產生之較弱的能量轉換成陰極管可辨識之訊號後觀測樣品之影像。進行影像觀察之前須將樣品表面真空並鍍上黃金，藉以加強樣品之導電性，使樣品利於觀測其結構，以此提供試驗結果及了解微觀結構的形成及狀態。本實驗經過高溫燒製後所生產之發泡玻璃試體，剖半後取其內核之部份並使用碳膠帶黏製於炭片上，經真空鍍金後置於 ESEM 中，抽取至適當之真空狀態，即可開始觀測樣品。放大倍率為 200 倍。

3.4.5 感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-OES)

ICP-OES 擁有良好的偵測極限以及分析精度，干擾基質小，以及樣品處理簡單快速，因此被廣泛的應用於地質、冶金、生技、環工、化學等領域。

ICP-OES 的分析特點如下：

- 1、測定元素範圍廣：從原理上來判斷可以偵測除了氫之外的所有已知光譜元素。
- 2、線性分析範圍廣：帶測物濃度在 1 ppm 以下通常都可以呈現良好的線性關係。
- 3、擁有良好偵測極限：大多數元素都有良好的偵測極限，電漿在高溫下呈現環形結構使得分析物在直徑約 1~3 mm 的狹窄通道充分預熱並且原子化，電離和激發，使元素週期表內的元素在水溶液中的偵測極限達到 0.01~10 ppm。
- 4、可選擇的波長多：每個元素都有不同靈敏度的波長供選擇。
- 5、分析精確度高：分析物由氣體載送入通道內，在一個相當於靜電屏蔽區內進行原子化、電離和激發。分析物組成的不同不會影響到電漿能量的變化保證了偵測的精確程度。
- 6、干擾較少：在這種環境下基本上沒有甚麼干擾，因此一般不使用內標法來確保儀器的精度，低干擾是 ICP-OES 主要的優點之一。

使用 ICP-OES 前先以 1000 mg/L 之混合元素標準品來稀釋並配製檢量線，通常將濃度稀釋至 0、0.1、0.5、1、2、5 及 10 mg/L 以便建立完整的檢量線。儀器開機後先以 10 mg/L 之標準品稀釋液確認各金屬波長之選定範圍是否具有完整波峰，確認完成之後，即可製備檢量線。製作完檢量線後確認各元素檢量線之 R-squared 值大於 0.995 以上，便可開始測定樣品。

3.4.6 粒徑分佈 (Particle size distribution)

雷射粒徑分析儀(Laser Diffraction Submicron Particle Size Analyzer , SPSA)將雷射光射至懸浮於載體 (例如水、酒精等) 的樣品粒子並於使用前先以超音波震盪前處理使粒子分布均勻。隨著樣品顆粒大小的不同而會產生出不同的繞射角度。其中顆粒較小的粒子會產生出較大的繞射角度，相反的，顆粒較大的粒子會產生出較小的繞射角度，再經由探測器收集散射光，藉散射光的強度轉換成電子訊號後將這些資訊傳送至電腦進行分析，可得到粒徑分佈之結果。本次實驗所使用之載體為水，儀器最小可量測至三奈米之樣品粒子的粒徑分佈。

3.4.7 重量損失 (Weight loss)

將試體置入高溫爐加熱，在不同溫度之下燒製成發泡玻璃，加熱後所減少重量差即為重量損失。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)

3.4.8 吸水率測量方法 (Water absorption)

不同溫度下燒製發泡玻璃其吸水率之變化，根據中華民國國家標準CNS-487細粒料比重及吸水率試驗法，進行樣品測試。將試體浸入室溫之水中24小時，24小時之後取出，並將試樣表面水擦乾並秤之重量，即可得擦乾水飽和(面飽和)之試體重量。計算公式如下：

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

W_d ：乾燥試樣體重量 (g)

W_s ：表面乾燥水飽和試樣體重量 (g)

3.4.9 顆粒密度測量方法 (Particle density)

根據阿基米得(Archimedes)原理推導出排水體積法作為原理並求得試體體積，再以試體之體積與試體重量相除，則可以獲得試體密度。公式如下：

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

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

V_s ：試體體積 (cm^3)

ρ_s ：試體密度 (g/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)

W_w ：定量至刻度之水體積 (cm^3)

ρ_w ：當時氣溫下水之密度 (g/cm^3)

3.4.10 閉孔孔隙率測量方法 (Closed porosity)

依照阿基米德法測得試體體密度之後，將該試體破碎成粉末狀，使用電子密度儀TWS-PY之粉末真密度測量方式測其粉末密度，步驟如下：

- 1、將測量容器(空玻璃盆、比重瓶)放置於電子密度儀上並歸零。
- 2、將樣品倒入玻璃盆內，待穩定符號g出現後，紀錄樣品的重量 M_1 。
- 3、將比重瓶注滿水，跟樣品一起放置於秤台上，穩定符號g出現之後紀錄重量 M_2 。
- 4、將比重瓶中水倒出至一半，再將樣品完全倒入比重瓶中。
- 5、依上述處理完畢，再將比重瓶中液體填滿，連同容器一起放置秤台，待穩定符號g出現後，紀錄重量 M_3 。
- 6、粉體真密度值將顯示於電子密度儀(g cm^{-3})。

$$\text{閉孔孔隙率} = (1 - \text{體密度}/\text{粉密度}) \times 100\%$$

3.4.11 抗壓強度測試 (Compressive strength)

將樣品以4000 Psi壓製成圓錠後經由不同溫度下燒製成發泡玻璃，以義大利廠牌Controls之全自動微電腦抗壓試驗機測試其抗壓強度，並記錄其數值，單位為 kgf/cm^2 ，可經換算為常用單位 Mpa。

3.4.12 掌上型熱管探針熱導率量測技術(Technology of Thermal Conductivity with a Heat Pipe Probe)

此技術能夠應用在隔熱建材、保溫材料、塑料、土壤等領域之熱傳導係數量測。乃利用熱管的高導熱均溫與比熱小等特性作為熱探針，解決傳統熱探針容易加熱不均勻與熱慣性的影響，降低量測時的不確定性，且量測時間短，量測範圍廣，樣品相容性高，僅需小型之式樣體，符合目前業界對隔熱材料之檢測需求。

測試溫度介於 $5\sim 85^{\circ}\text{C}$

熱導率量測範圍為 $0.05 < K < 2.00 (\text{W}/\text{m}\cdot\text{k})$

準確度 $< 5\%$

3.4.13 孔徑分佈統計測量軟體(Nano measurer)

Nano measurer是一款尺寸統計軟體，可以應用於一般照片、SEM、TEM等圖片中，最小可統計至奈米等級的尺寸，可以記錄孔徑、直徑、顆粒間距等尺寸相關數據。使用方法為設定完比例尺之後於欲檢測之孔洞上交叉畫出記號，使軟體統計後顯示出累計孔徑大小之數量。

第四章 結果與討論

4.1 原料之粒徑分析

4.1.1 石門水庫淤泥、燃煤飛灰、廢玻璃之粒徑分佈

石門水庫淤泥(Shimen, 簡稱 SM)經過採集後帶回實驗室，使用烘箱於 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 下烘乾至恆重後經過挑選及破碎等處理，並通過 50 號標準篩網($297 \mu\text{m}$)，再使用「粒徑分析儀」量測其粒徑分佈。結果表示於圖 4-1。石門水庫淤泥之粒徑大小主要分布於 $3.06\sim 11.29 \mu\text{m}$ ，為 38.8%；其次是 $11.29\sim 21.7 \mu\text{m}$ 的 24.8% 以及 $<3.06 \mu\text{m}$ 的 24.1%。本次實驗所使用之石門水庫淤泥 D_{50} 約為 $12 \mu\text{m}$ ，且粒徑分布有 90% 集中在 $3.06\sim 55.14 \mu\text{m}$ 之間。

燃煤飛灰(Coal Fly Ash, 簡稱 CA)經過採集後帶回妥善保存，分裝並使用烘箱於 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 下烘乾至恆重後經過挑選及破碎等處理，並通過 50 號標準篩網($297 \mu\text{m}$)，再使用「粒徑分析儀」量測其粒徑分佈。結果表示於圖 4-2。結果顯示主要粒徑大小為 $12.87\sim 33.75 \mu\text{m}$ ，為 36.7%，其次是 $2.98\sim 12.87 \mu\text{m}$ 的 28.4% 以及 $<2.98 \mu\text{m}$ 的 16.2%。

本次實驗所使用之燃煤飛灰之 D_{50} 為 $20 \mu\text{m}$ ，且約有 90% 集中在 $2.98\sim 135.21 \mu\text{m}$ 。

廢棄之窗型平板玻璃(Glass, 簡稱 G)經過清洗後破碎並使用烘箱於 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 下烘乾後，過篩至 50 mesh，以粒徑分析儀分析其粒徑，結果如圖 4-3 所示，累積量最多的介於 $130.3\sim 260.81 \mu\text{m}$ 之間，為 33.6%；其次為 $75.44\sim 130.3 \mu\text{m}$ 之 24.0%。本次實驗之廢玻璃粒徑 D_{50} 約為 $102 \mu\text{m}$ ，粒徑分布相較於石門水庫淤泥及燃煤飛灰為大。

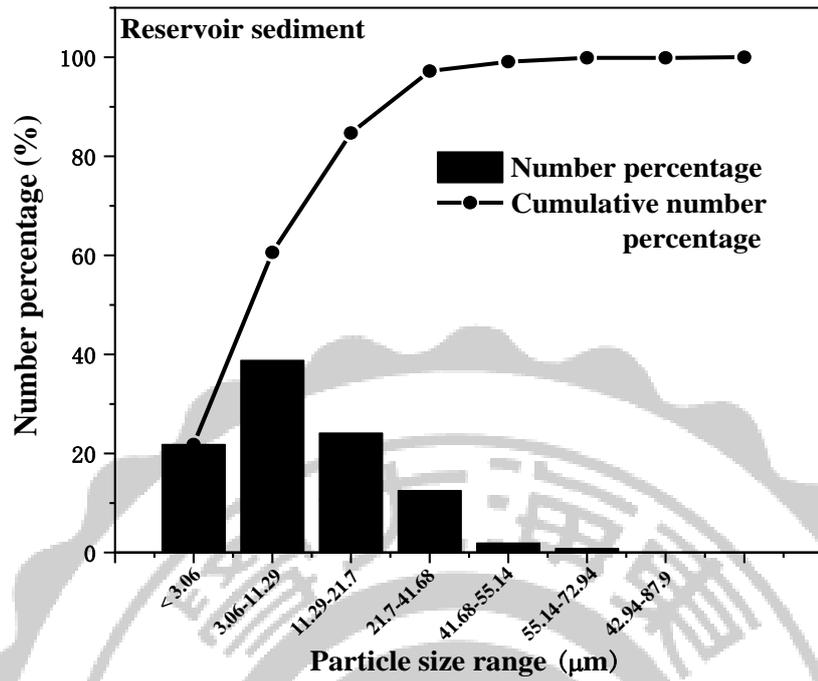


圖 4-1、石門水庫淤泥粒徑分析

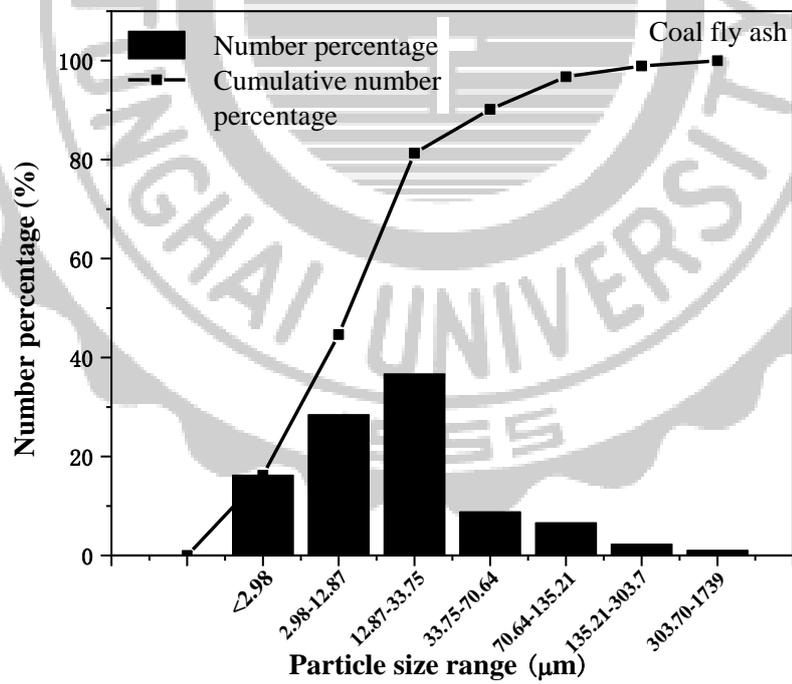


圖 4-2 燃煤飛灰之粒徑分析

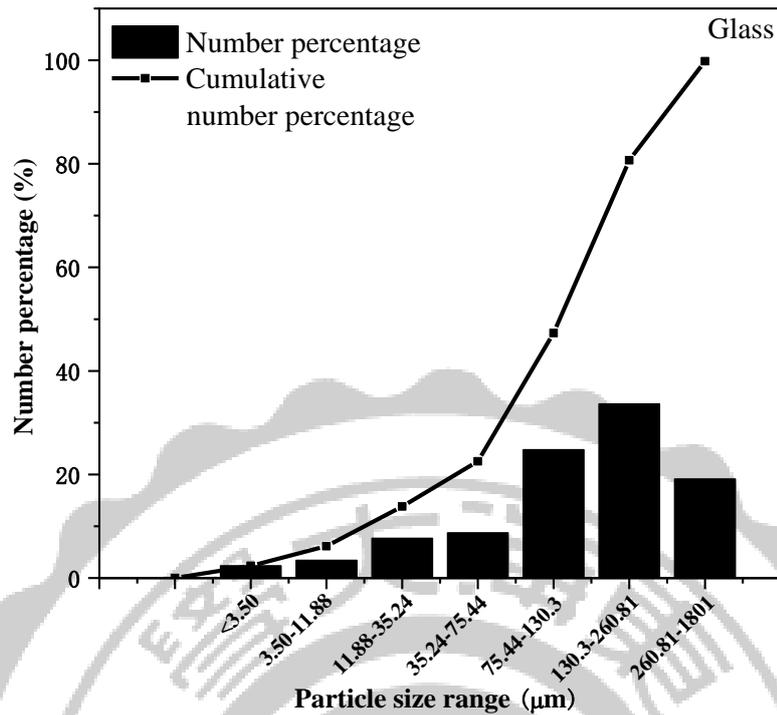


圖 4-3 廢玻璃之粒徑分析

4.2 原料之化學組成

4.2.1 石門水庫淤泥、燃煤飛灰、廢玻璃之化學組成

各樣品之化學組成分析如表 4-1，除了矽的部分是使用 CNS11393 石灰石化學分析法來鑑定之外，其餘成分均為樣品經過微波消化處理之後使用 ICP-AES 進行定量分析。由表 4-1 可得知石門水庫淤泥的主要成分為 SiO_2 之 71.30%，其次為 Al_2O_3 之 15.92% 以及 Fe_2O_3 之 7.34%。燒失重為 5.9%。在製備發泡玻璃時，二氧化矽的存在十分重要。在燒製的過程中，二氧化矽會與其他原料中的物質形成共晶混合物，進而在表面形成緻密的玻璃相。如果二氧化矽的含量不足，會導致無法形成完整且緻密的玻璃相，使得氣體無法被妥善包覆於試體內，使試體較難膨脹以達到良好之發泡效果。燒製發泡玻璃的過程中，助熔劑也是非常重要的，其中 Fe_2O_3 、 K_2O 、 CaO 、 Na_2O 、 MgO 為助熔劑，能夠助熔之比例 Flux 約為 12.66%，足量的助熔劑才能夠使試體有良好的燒製結果。

由表 4-1 可得知燃煤飛灰的主要成分為 SiO_2 之 66.80%，其次為 Al_2O_3 之 16.84% 以及 Fe_2O_3 之 5.49%。燒失重為 3.3%。由成分分析表可得知，燃煤飛灰與石門水庫淤泥在化學組成上面非常相似，有足夠量的二氧化矽來提供成品形成緻密的玻璃相，故能取代部分玻璃粉末來燒製發泡玻璃。且占有 13.97% 的助熔劑 (Fe_2O_3 、 K_2O 、 CaO 、 Na_2O 、 MgO)，畢竟燒製發泡玻璃的過程中必須有足夠的助熔劑才能使燒製結果完善。若二氧化矽不足將導致氣體無法被妥善包覆於試體內，使試體較難膨脹以達到良好之發泡效果。

廢棄平板玻璃之化學組成如表 4-1，主要成分為二氧化矽的 79.04%，其次為 Na_2O 之 13.05%，再來為 CaO 之 5.06%。廢玻璃粉末加熱至 900°C 三小時並無顯著的重量損失，僅 0.25%。平板玻璃採用一般棄置的窗型玻璃，成分較為單純。

表 4-1 各原料之化學組成

化學組成	比例(%)		
	石門淤泥	燃煤飛灰	廢玻璃
SiO_2^{a}	67.41 \pm 2.51	66.80 \pm 1.94	76.60 \pm 2.84
Al_2O_3	15.13 $^{\text{b}}$ \pm 0.31	16.84 $^{\text{c}}$ \pm 0.72	1.29 \pm 0.24
Fe_2O_3	6.94 $^{\text{b}}$ \pm 0.20	5.49 $^{\text{c}}$ \pm 0.22	1.02 \pm 0.02
K_2O	3.17 $^{\text{b}}$ \pm 0.54	0.76 $^{\text{c}}$ \pm 0.03	0.72 \pm 0.01
CaO	0.43 $^{\text{b}}$ \pm 0.21	5.19 $^{\text{c}}$ \pm 0.13	4.90 \pm 0.13
MgO	0.32 $^{\text{b}}$ \pm 0.14	1.42 $^{\text{c}}$ \pm 0.03	2.58 \pm 0.02
Na_2O	1.12 $^{\text{b}}$ \pm 0.26	1.11 $^{\text{c}}$ \pm 0.05	12.65 \pm 0.58
LOI^{d}	5.58 \pm 0.02	3.3 \pm 0.01	0.24 \pm 0.01

a：以矽定量 (CNS 11393 石灰石化學分析法) 之方法測得。

b：【翁氏，2017】。

c：【鄭氏，2013】。

d：Loss of ignition at 900°C for 3h.

4.3 原料之晶相分析

4.3.1 石門水庫淤泥、燃煤飛灰、廢玻璃之晶相分析

以多功能 X 光粉末繞射機 (X-ray diffraction, XRD) 進行石門水庫淤泥的晶相分析，掃描角度 2θ 為 $5\sim 80^\circ$ 。文獻中有提到，水庫淤泥的組成晶相主要為 SiO_2 (quartz)、綠泥石 (chlorites)、伊萊石 (illite) 等為主【Chen *et al.*, 2012】。由圖 4-2 可知石門水庫淤泥的主要結晶物種為 SiO_2 (quartz)，其次還含 Al_2SiO_3 (Kyanite)、 FeO (wustite)、 Al_2O_3 (corundum)、 $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ (mullite)、 $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2$ (Muscovite) 等結晶物種【Wei *et al.*, 2012；Erol *et al.*, 2003；翁氏，2017；賴氏，2014】。

燃煤飛灰經過烘乾後以 XRD 進行晶相分析。掃描角度 2θ 為 $5\sim 80^\circ$ 。觀測結果如圖 4-4 所示，燃煤飛灰所含之主要結晶物種為石英 SiO_2 (quartz) 以及末萊石 $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ (mullite)。其他晶相包含 Al_2O_3 (Corundum)、 Fe_2O_3 (hematite) 及 FeO (wustite) 等。【Kourti *et al.*, 2010；Xu *et al.*, 2010；Wei *et al.*, 2012；Erol *et al.*, 2003；鄭氏，2013】

廢棄平板玻璃經過清洗、破碎過篩並烘乾後之粉末進行 XRD 分析，得到之結果如圖 4-6 所示，結果顯示呈現無明顯晶相。

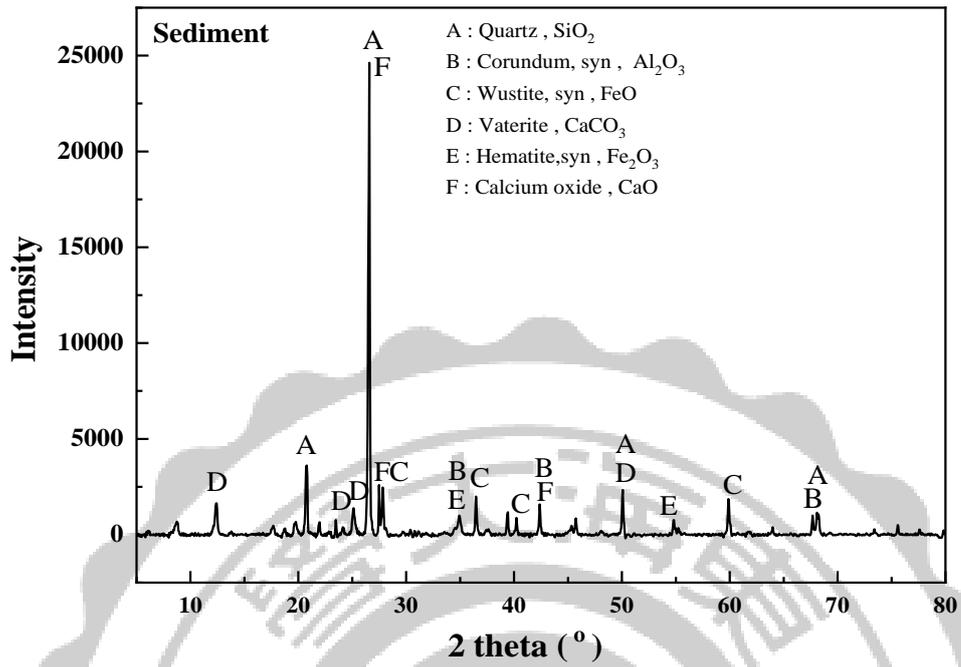


圖 4-4 石門水庫淤泥晶相分析

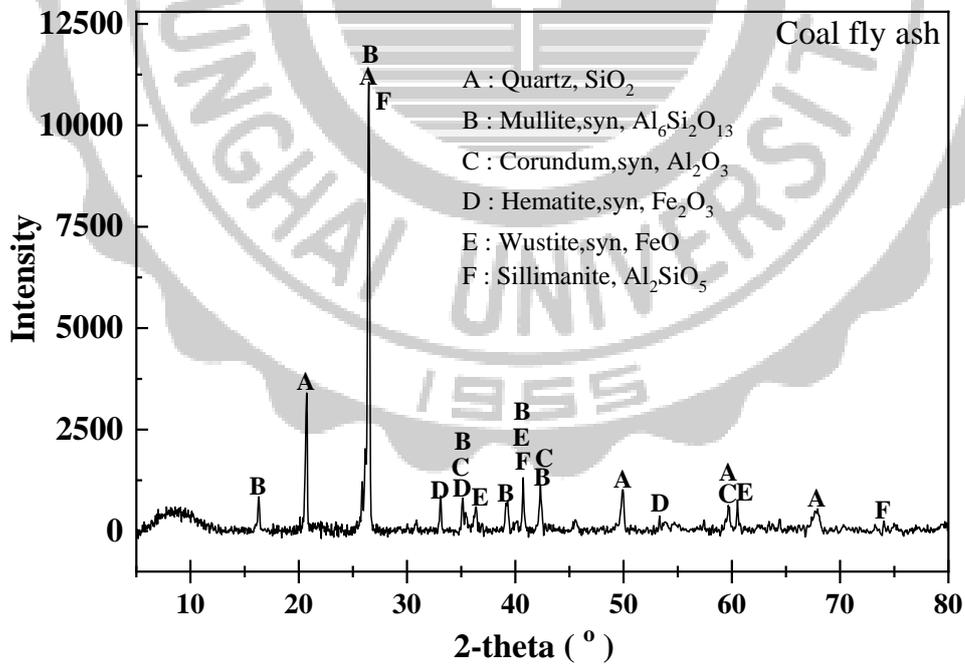


圖 4-5 燃煤飛灰晶相分析

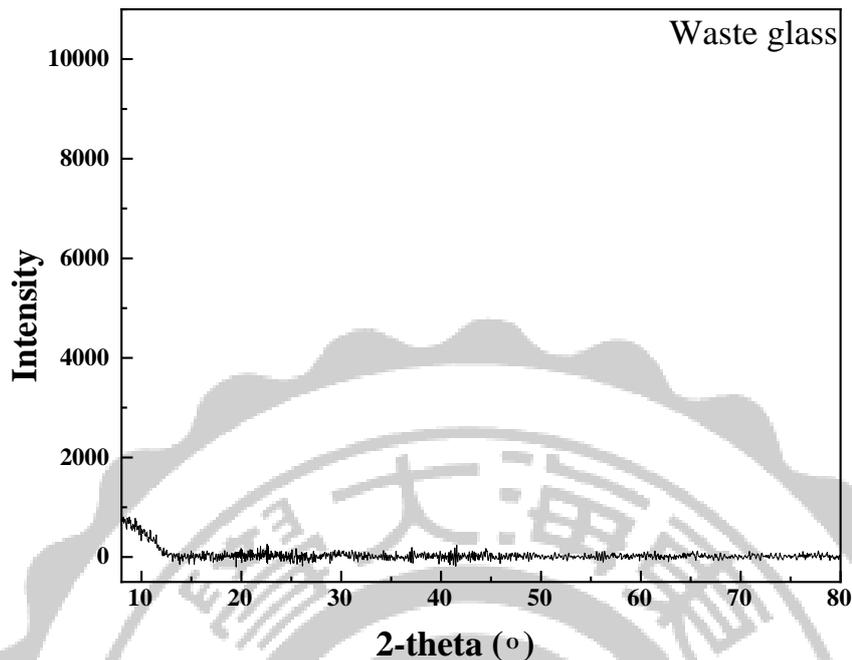


圖 4-6 廢玻璃晶相分析

4.4 原料之熱重分析

4.4.1 石門水庫淤泥、燃煤飛灰之 TGA/DSC 分析

以示差掃描量熱-熱重分析連用量測樣品粉末，觀察樣品從室溫加熱至 1200°C 於升溫的過程中其吸放熱的反應。殘存水份及部分化合物會在升溫的過程中分解。實驗條件為每分鐘升溫 10°C，加熱至 1200°C 其重量損失約為 9.10%。在室溫至 700°C 左右的重量損失較高，接近 7%，推測為淤泥中的吸附水以及結晶水的揮發以及部分有機物在此段溫度下產生反應，導致產氣的發生以致於重量減少。而在 1000~1200°C，根據 DSC 曲線可觀察到有一個吸熱谷，根據文獻，可能為碳酸鈣分解成二氧化碳的吸熱反應。【Klimesch *et al.*, 1998；Toya *et al.*, 2004；Young *et al.*, 2003；Xu *et al.*, 2008】。

以示差掃描量熱-熱重分析連用量測樣品粉末，觀察樣品從室溫加熱至 1200 °C 於升溫的過程中其吸放熱的反應。升溫速率為每分鐘 10 °C。燃煤飛灰加熱至 1200 °C 之重量損失約為 3.5%，大約在 100~120 °C 時，樣品中的結晶水及吸附水會揮發【Gonzalez-Corrochano et al., 2009】，造成重量損失。而燃煤飛灰在 400~500 °C 時，其中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 會發生脫水反應，導致重量損失【張氏, 2011】。在 400~700 °C 之間，燃煤飛灰所含的碳酸鹽類會分解並產生 CO_2 【Huang et al., 2007】，而在 1000~1140 °C 時等較高的溫度下 Fe_2O_3 會進行還原反應而分解，並釋放出氧氣【Gonzalez-Corrochano et al., 2009】。

4.4.2 添加劑之 TGA/DSC 分析

實驗中使用的發泡劑為碳酸鈉(Na_2CO_3)，在使用燃煤飛灰為原料製備產品時有額外添加泡沫穩定劑十二水磷酸三鈉($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)，以確保發泡的穩定性。兩者的 TGA/DSC 分析如圖 4-9、4-10 所示。加熱到 1200 °C 時，碳酸鈉的重量損失約為 39%，在 100~120 °C 時有少量結晶水及吸附水被分解，在 400 °C 之後就會開始有 CO_2 被緩慢分解【Merck, 2018】，重量損失在 800 °C 後開始明顯，在約 800~850 °C 時由 DSC 可見，有一個大的吸熱谷，導致重量損失。十二水磷酸鈉從室溫加熱至 1200 °C 之重量損失約為 40%，在 100~200 °C 之間有很大的吸熱谷，為藥品中的結晶水之分解【Ghule et al., 2001 ; Merck, 2018】。

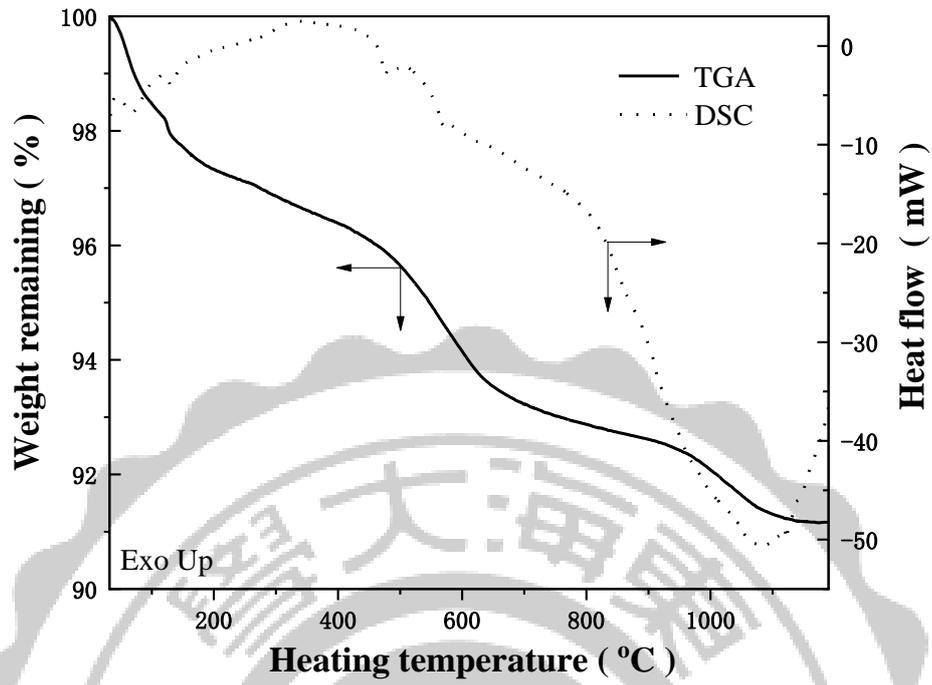


圖 4-7 石門水庫淤泥 TGA/DSC 分析

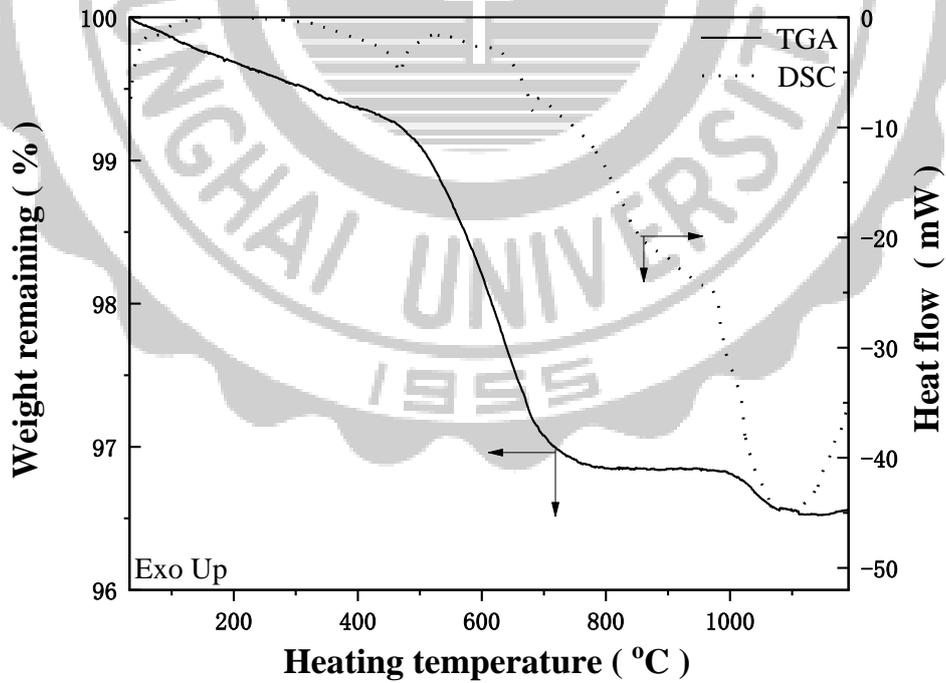


圖 4-8 燃煤飛灰 TGA/DSC 分析

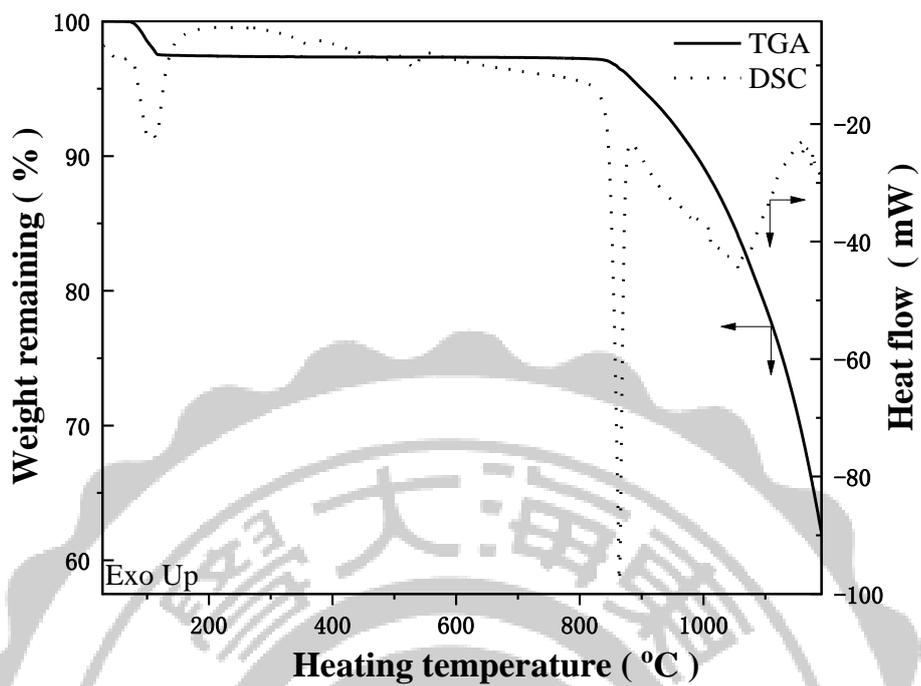


圖4-9 碳酸鈉之TGA/DSC分析

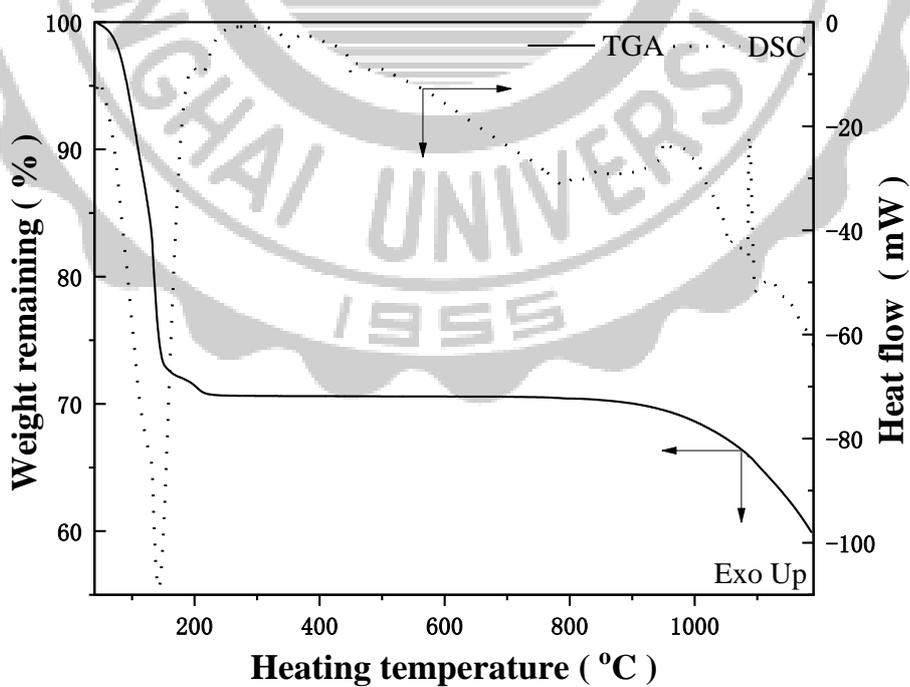


圖4-10 十二水磷酸三鈉之TGA/DSC分析

4.5 成品基本性質探討

4.5.1 燒後重量損失變化

發泡玻璃燒後之重量損失，以百分比來表示。主要可以用來判斷在燒製過後試體內部的氣體釋放量。重量損失通常會隨著溫度提升而提高，而添加較多的發泡劑會使重量損失提高，添加廢玻璃會使重量損失降低【Wei *et al.*, 2016】。各種配比之樣品的燒製後的重量損失結果呈現於圖 4-11，當煤灰添加量提升，重量損失降低。

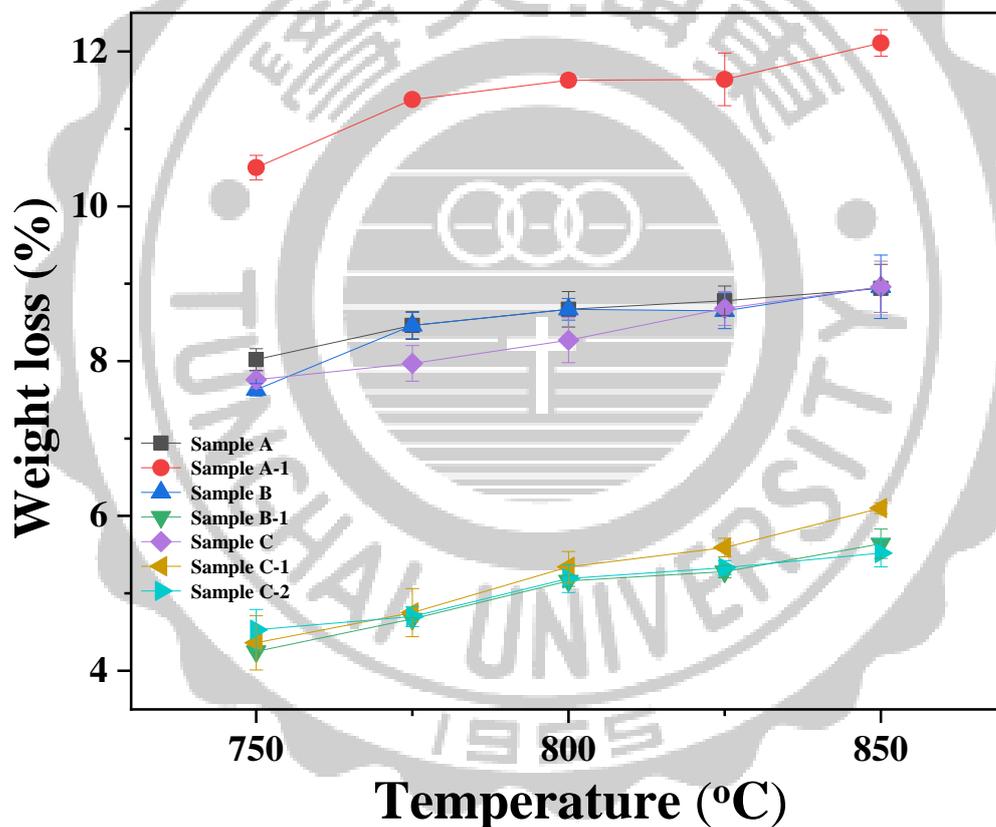


圖 4-11 樣品於不同溫度下燒製後之重量損失

4.5.2 吸水率變化

可以藉由觀測吸水率的變化來了解到表面的孔隙率，甚至可以藉由吸水率來推斷抗壓強度【Wasserman *et al.*, 1997】。並且吸水率過高可能導致產品較容易損壞，且可得知發泡玻璃表面的緻密性。而若添加更多的助熔鹽類，可能導致內外孔因為發泡過程產生聯通，將導致吸水率上升【Qian *et al.*, 2014；鄭氏，2012】。樣品 A-1 吸水率於 775°C 時增加，而後升溫又降低，推測於 775°C 時表面有較多細小深孔使得水份吸入試體內，不易於擦拭時抹除水分；B-1 與 C-1 比較，C-1 另外添加少量十二水磷酸三鈉，使得吸水率稍微提升，推測為助熔效果上升，開孔增加【Zhou *et al.*, 2014】。添加煤灰會使吸水率略為上升，推測為表面可吸水之小細孔增加。吸水率變化如圖 4-12 所示。

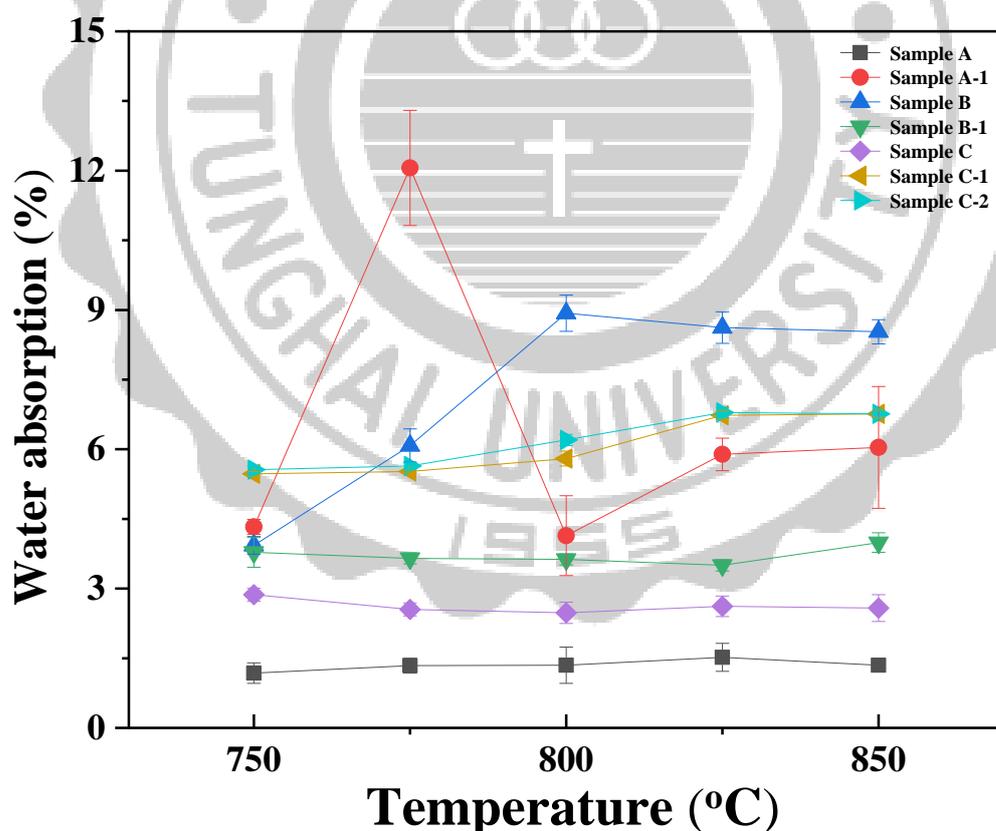


圖 4-12 樣品於不同溫度下的吸水率變化

4.5.3 表觀密度變化

表觀密度是用來判斷材料是否輕質化的重要依據，而發泡玻璃的基本條件為至少要比水還輕質(密度 $<1\text{ g/cm}^3$)。隨著溫度的上升，樣品中能夠產氣的物質分解的越徹底，也熔融的較為明顯，使得樣品在隨溫度上升，表觀密度均下降。隨著發泡劑的添加量上升，氣體分解的量上升，會使得試體內部產生更多氣體，導致密度降低【Qian *et al.*, 2004；Corrochano *et al.*, 2009；Wei *et al.*, 2009】。而添加鹼金族或是鹼土族有助於降低燒結所需要的溫度【Acchar *et al.*, 2006】。各種配比的樣品在低溫 750°C 時密度均 $>1\text{ g/cm}^3$ 。樣品 A-1 密度雖然低，卻是因為發泡過量導致的結果，會有型變過大的問題，在不同配比較高溫度燒製也較容易觀察到此現象。樣品 B-1、C-1 及樣品 C-2 由於添加 CFA 比例較高，且發泡效果相對較差，直到 850°C 燒製之產品均未達到輕質。其餘產品燒製溫度介於 $775\sim 825^\circ\text{C}$ 有著低密度且其他特性相對較佳的產品。密度變化如圖 4-13 所示。

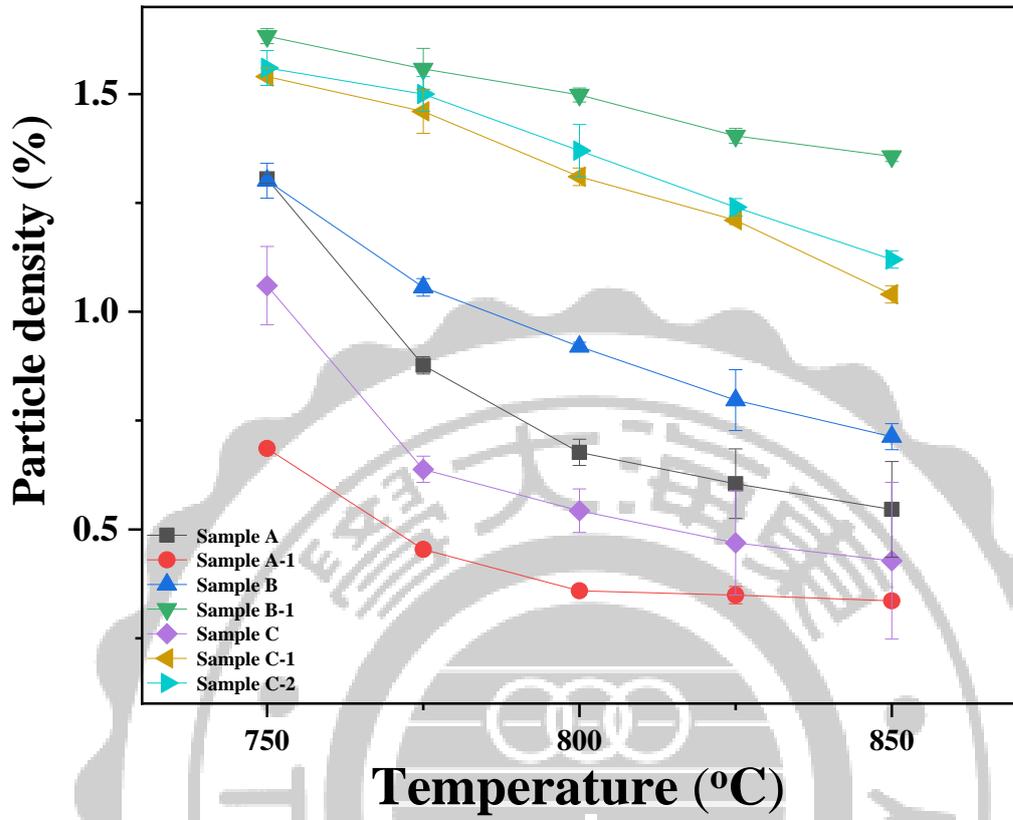


圖 4-13 表觀密度變化

4.5.4 閉孔孔隙率

閉孔孔隙率的定義為： $(1 - \text{bulk density} / \text{powder density}) \times 100\%$ ，bulk density 為其試體密度，powder density 為其粉密度，也稱為真密度。閉孔孔隙率與體密度成反比，與真密度成正比。閉孔孔隙率如表 4-2 所示。閉孔孔隙率與發泡玻璃的性能有很大的關係，當閉孔孔隙率不夠高，表示樣品密度不夠低，單位重較大；而孔隙率過高則時常發生抗壓強度不夠或是型變過大等問題，故閉孔孔隙率介 70~80% 較佳。【田氏，2001；Bai *et al.*, 2014】

表 4-2 閉孔孔隙率

sample identity	閉孔孔隙率(%)
A ₇₅₀	53.7
A ₇₇₅	68.8
A ₈₀₀	77.0
A ₈₂₅	79.1
A ₈₅₀	81.3
B ₇₅₀	58.9
B ₇₇₅	66.5
B ₈₀₀	69.2
B ₈₂₅	73.3
B ₈₅₀	75.6
C ₇₅₀	63.2
C ₇₇₅	77.9
C ₈₀₀	81.1
C ₈₂₅	83.7
C ₈₅₀	85.0

4.5.5 熱導係數

發泡玻璃有隔熱之效果，故有測試熱導係數之。挑選三種配比並於最佳溫度(800°C)下燒製之成品進行熱導係數的測試(A₈₀₀、B₈₀₀、C₈₀₀)，其結果如表 4-3 所示。熱導係數越低導熱程度越差，隔熱效果較好。

表 4-3 800°C 各產品之熱導係數

sample identity	熱導係數(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
A ₈₀₀	0.073
B ₈₀₀	0.068
C ₈₀₀	0.068

4.5.6 抗壓強度

由於部分樣品在特定溫度之燒製結果。其體密度並未小於一(A₇₅₀、B₇₅₀、B₇₇₅、C₇₅₀ 以及、C-1、C-2 全部樣品，不符合發泡玻璃之輕質特性)，故在此沒有測試其抗壓強度。且有部分產品因產氣量過大導致成型不佳，也視為不良品(A₈₅₀、B₈₅₀、C₈₅₀ 及 B-1 全部樣品)，故不測試其抗壓強度。其餘樣品抗壓強度如表 4-4 所示，抗壓強度與最高燒製溫度有很大的關係，若溫度較高，試體內部可能產生較多或較大的氣泡，使得抗壓強度降低。而發泡劑的添加量增加，試體內的小孔可能會產生聯通進而形成較大的孔，使抗壓強度下降【Qian *et al.*, 2004】。

表 4-4 抗壓強度

sample identity	單顆抗壓強度(Mpa)
A ₇₇₅	4.83 _{±0.08}
A ₈₀₀	4.15 _{±0.20}
A ₈₂₅	2.62 _{±0.09}
B ₈₀₀	7.44 _{±0.08}
B ₈₂₅	7.11 _{±0.03}
C ₇₇₅	7.06 _{±0.03}
C ₈₀₀	6.87 _{±0.08}
C ₈₂₅	1.15 _{±0.08}

4.5.7 毒性特性溶出程序

根據綠建材標章的規範，毒性特性溶出程序(TCLP)為一個重要的指標，可以直接了解材料對環境及人體是否會有重金屬方面的危害。本實驗將發泡玻璃試體破碎至符合規範 (<1 mm)，選用輕質之樣品，並依照毒性特性溶出程序之實驗步驟進行操作，得到之數據分別如表 4-5、4-6 及 4-7 所示，均符合法規標準。

表 4-5 樣品 A 之 TCLP 溶出值

sample identity	TCLP concentration (mg/L)								
	Hg	Cd	Se	Cr	Pb	As	Ag	Cu	Ba
A ₇₇₅	-	-	-	0.17	-	-	-	0.062	0.073
A ₈₀₀	-	-	-	0.14	-	-	-	0.10	0.052
A ₈₂₅	-	-	-	0.14	-	-	-	0.11	0.048
legal standard	0.2	1	1	5	5	5	5	15	100

-：偵測極限值為 0.005 mg/L

表 4-6 樣品 B 之 TCLP 溶出值

sample identity	TCLP concentration (mg/L)								
	Hg	Cd	Se	Cr	Pb	As	Ag	Cu	Ba
B ₇₇₅	-	-	-	0.32	-	0.10	-	0.062	0.17
B ₈₀₀	-	-	-	0.48	-	0.12	-	0.056	0.16
B ₈₂₅	-	-	-	0.44	-	0.13	-	0.038	0.16
legal standard	0.2	1	1	5	5	5	5	15	100

-：偵測極限值為 0.005 mg/L

表 4-7 樣品 C 之 TCLP 溶出值

sample identity	TCLP concentration (mg/L)								
	Hg	Cd	Se	Cr	Pb	As	Ag	Cu	Ba
C ₇₇₅	-	-	-	0.16	-	0.11	0.010	0.08	0.082
C ₈₀₀	-	0.016	-	0.18	-	0.13	0.012	0.14	0.092
C ₈₂₅	-	0.014	-	0.17	-	0.13	0.010	0.12	0.093
legal standard	0.2	1	1	5	5	5	5	15	100

-：偵測極限值為 0.005 mg/L

4.5.8 結晶物種分析

取 A₈₀₀、B₈₀₀ 及 C₈₀₀ 進行 XRD 分析 (掃描角度 $2\theta=10\sim 80^\circ$)，如圖 4-14、4-15 及 4-16 所示。與原料相對比可得知，各種晶相的強度均下降，是因為在高溫燒結時，SiO₂ (quartz)的晶相會轉化成非晶相的玻璃態，且高溫燒製的過程中試體會產生熔融，使得晶相強度下降【陳氏，2004；張氏，2005】。因為原料以及添加劑富含矽、鈉、鈣以及鋁等元素，在高溫燒製會產生如石英(Quartz)、霞石(Napheline)、鈉長石(Albite)、矽線石(Sillimanite)、莫萊石(Mullite)等礦物。

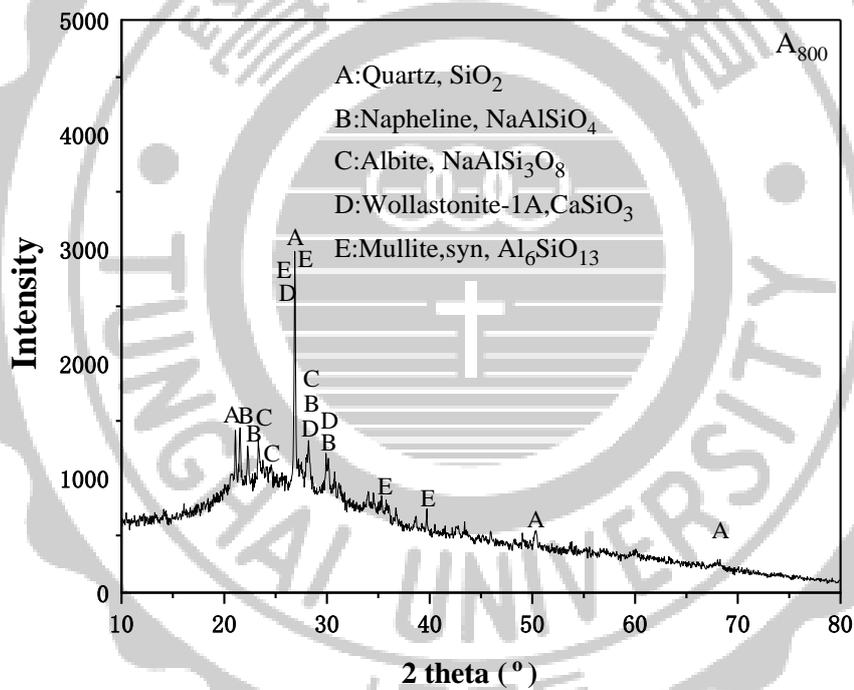


圖 4-14 樣品 A₈₀₀ 之 XRD 分析

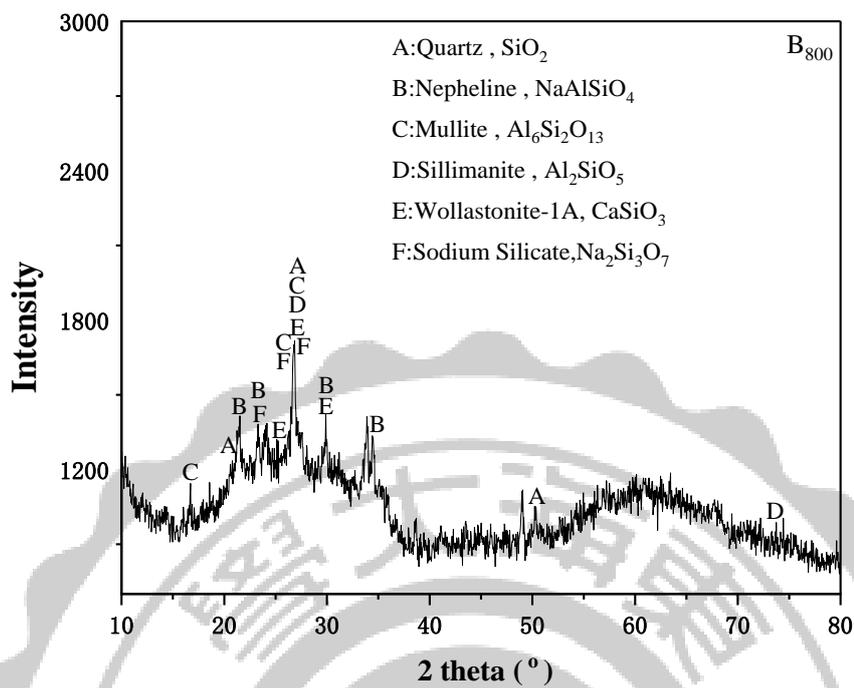


圖 4-15 樣品 B₈₀₀ 之 XRD 分析

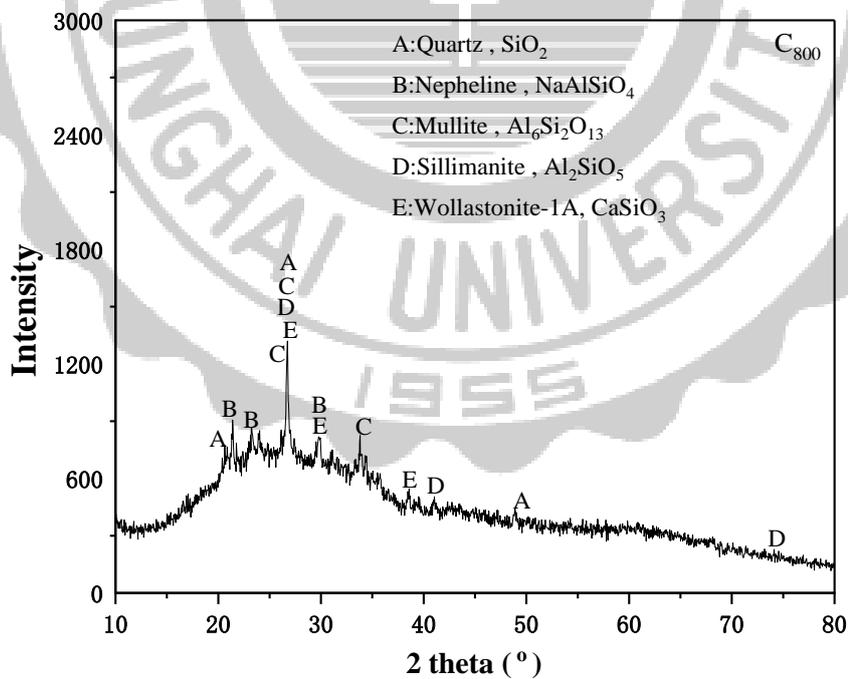


圖 4-16 樣品 C₈₀₀ 之 XRD 分析

4.5.9 外觀與微結構變化

燒製出的產品之外觀如圖所示，圖4-20、圖4-21及圖4-22分別為A樣品、B樣品以及C樣品的外觀以及剖面圖，圖4-26為各樣品在SEM下的特寫。在燒製溫度提升時，試體中的小孔洞會逐漸連通成大孔洞。

經由使用Nano measurer來統計相同面積下微孔的孔徑尺寸分佈，圖4-17、4-18及4-19為孔徑分佈圖，發現樣品A於750°C時孔徑主要分佈於0.4~0.6 mm，有44.98%，最小孔徑介於0~0.2 mm，最大孔徑不超過1.2 mm；775°C時孔徑主要分佈於0.4~0.8 mm，有51.46%，最小孔徑介於0~0.4 mm，最大孔徑不超過2.8 mm；800°C時主要孔徑分佈於0.3~0.9 mm，有73.54%，最小孔徑介於0~0.3 mm，最大孔徑不超過2.7 mm；825°C時孔徑主要分佈於0.3~0.9 mm，有62.3%，最小孔徑為0~0.3 mm之間，最大孔徑不超過3.0 mm；850°C時孔徑主要分佈於0.7~1.4 mm，有43.75%，最小孔徑為0~0.7 mm之間，最大孔徑介於6.3~7.0 mm之間。

樣品B於750°C主要分佈於0.3~0.4 mm，為34.95%，最小孔徑介於0~0.1 mm，最大孔徑不超過0.8 mm；775°C時主要孔徑分佈於0.4~0.6 mm，為40.12%，最小孔徑介於0.2~0.4 mm，最大孔徑不超過1.6 mm；800°C時孔徑主要分佈於0.4~0.8 mm，為47.8%，最小孔徑介於0.2~0.4 mm，最大孔徑不超過2.0 mm；825°C時孔徑主要分佈於0.4~0.8 mm，為41.82%，最小孔徑介於0~0.4 mm，最大孔徑不超過4.0 mm，850°C時主要孔徑分佈於0.5~1.0 mm，為46.59%，最小孔徑介於0~0.5 mm，最大孔徑不超過4.5 mm。

樣品C於750°C時主要孔徑分佈介於0.4~0.6 mm，為41.48%，最小孔徑介於0~0.2 mm，最大孔徑不超過1.4mm；775°C時主要孔徑分佈於0.4~0.8 mm，為46.46%，最小孔徑介於0.2~0.4 mm，最大孔徑不超過1.8 mm；800°C時主要孔徑分佈於0.4~0.8 mm，為41.73%，最小孔徑介於0~0.4 mm，最大孔徑不超過3.6 mm；825°C時主要孔徑分佈於0~1.2 mm，為56.36%，最小孔徑介於0~0.6 mm，最大孔徑不超過6.0 mm；850°C時主要孔徑分佈於0.7~1.4 mm，為40.91%，最小孔徑介

於0~0.7 mm，最大孔徑不超過6.3 mm。

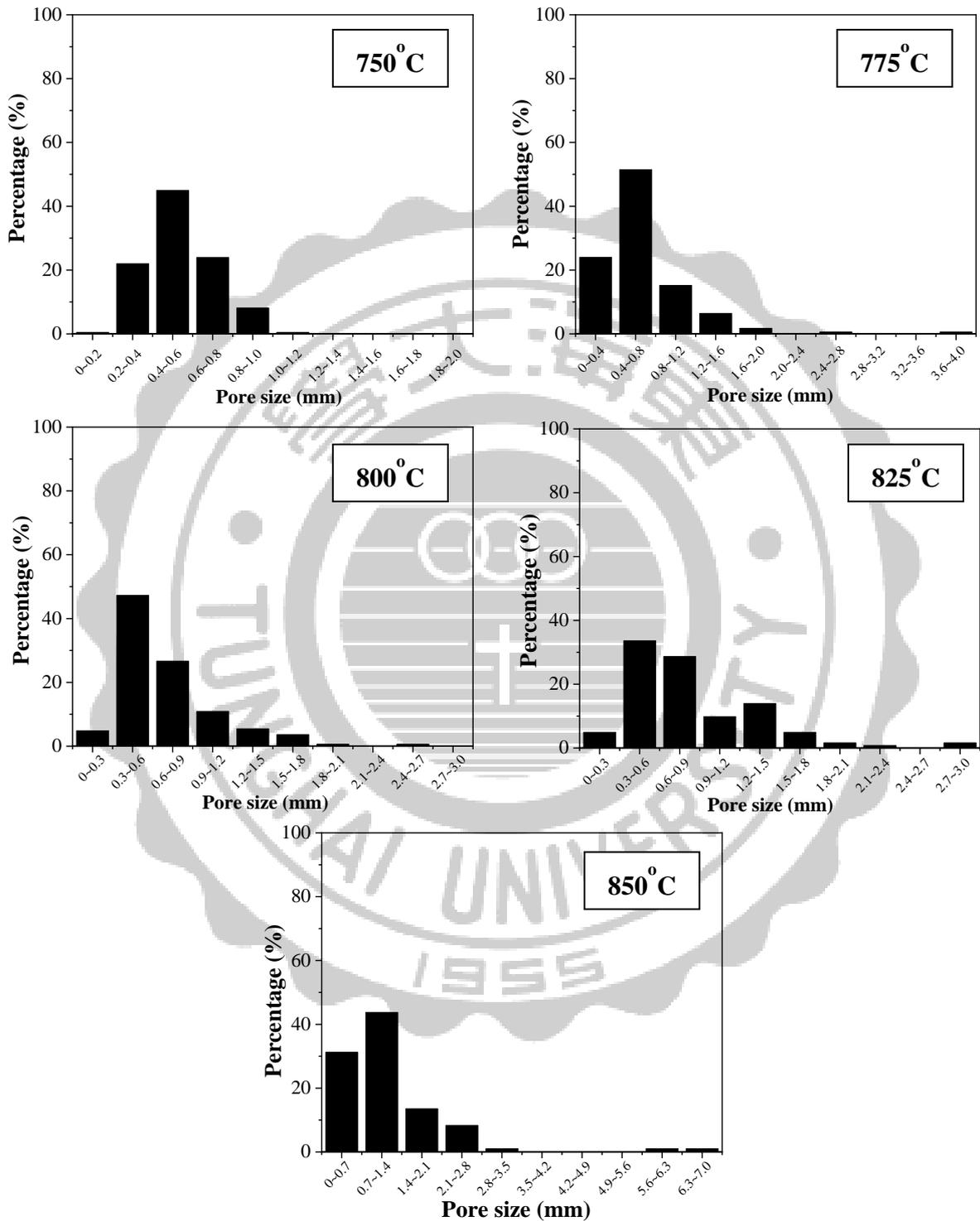


圖 4-17 樣品 A 之孔徑分佈

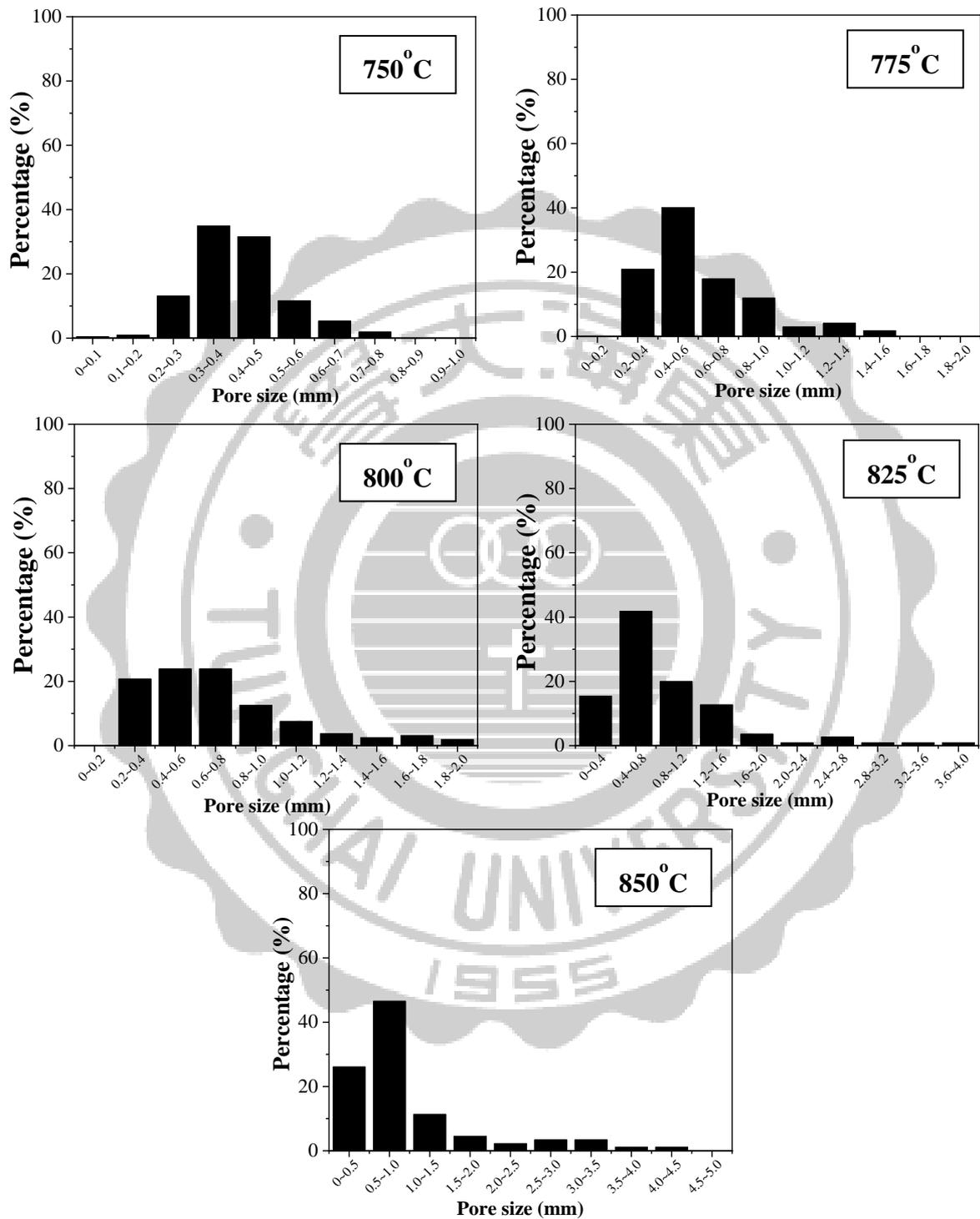


圖 4-18 樣品 B 之孔徑分佈

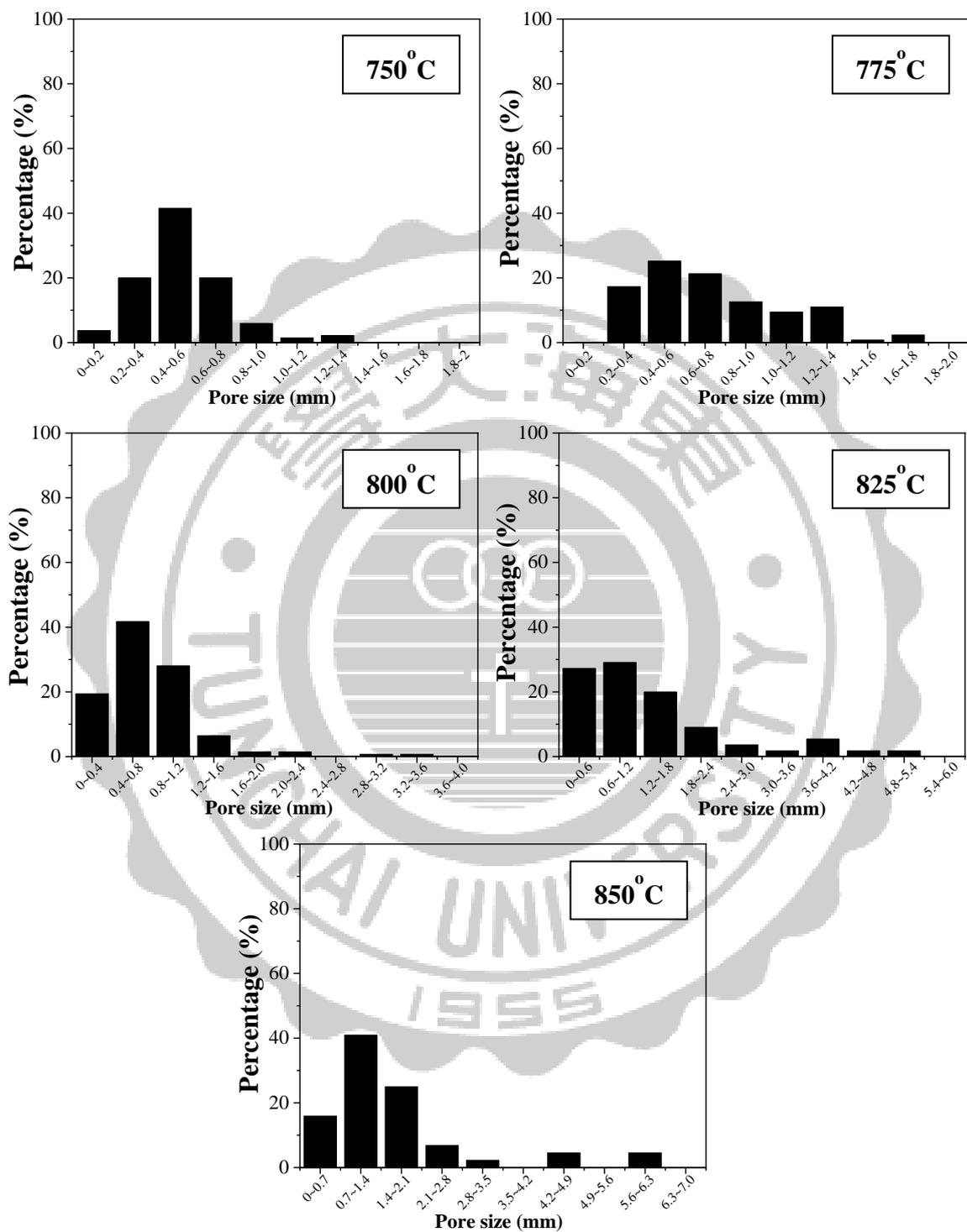


圖 4-19 樣品 C 之孔徑分佈

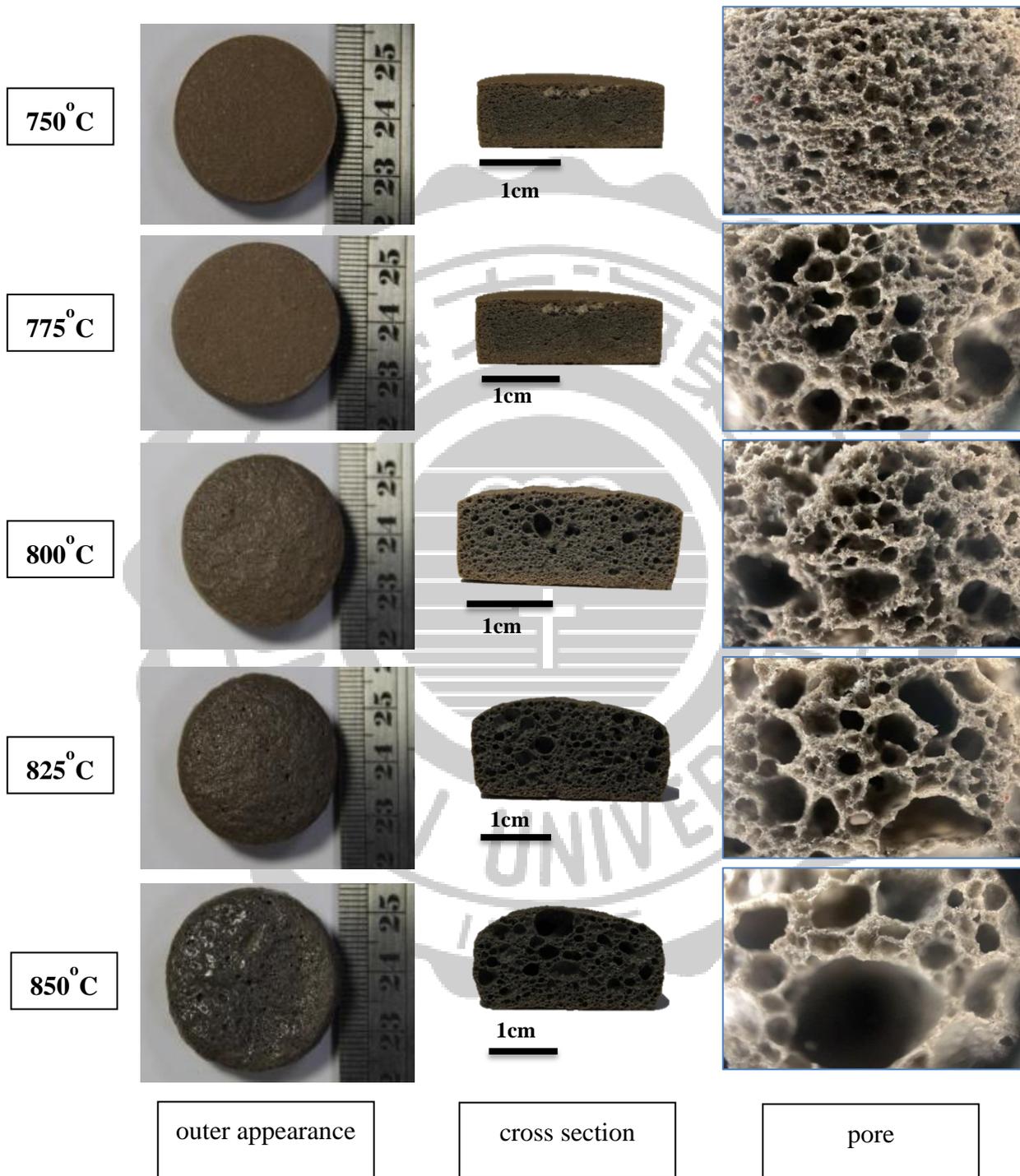


圖 4-20 樣品 A 之外觀與剖面

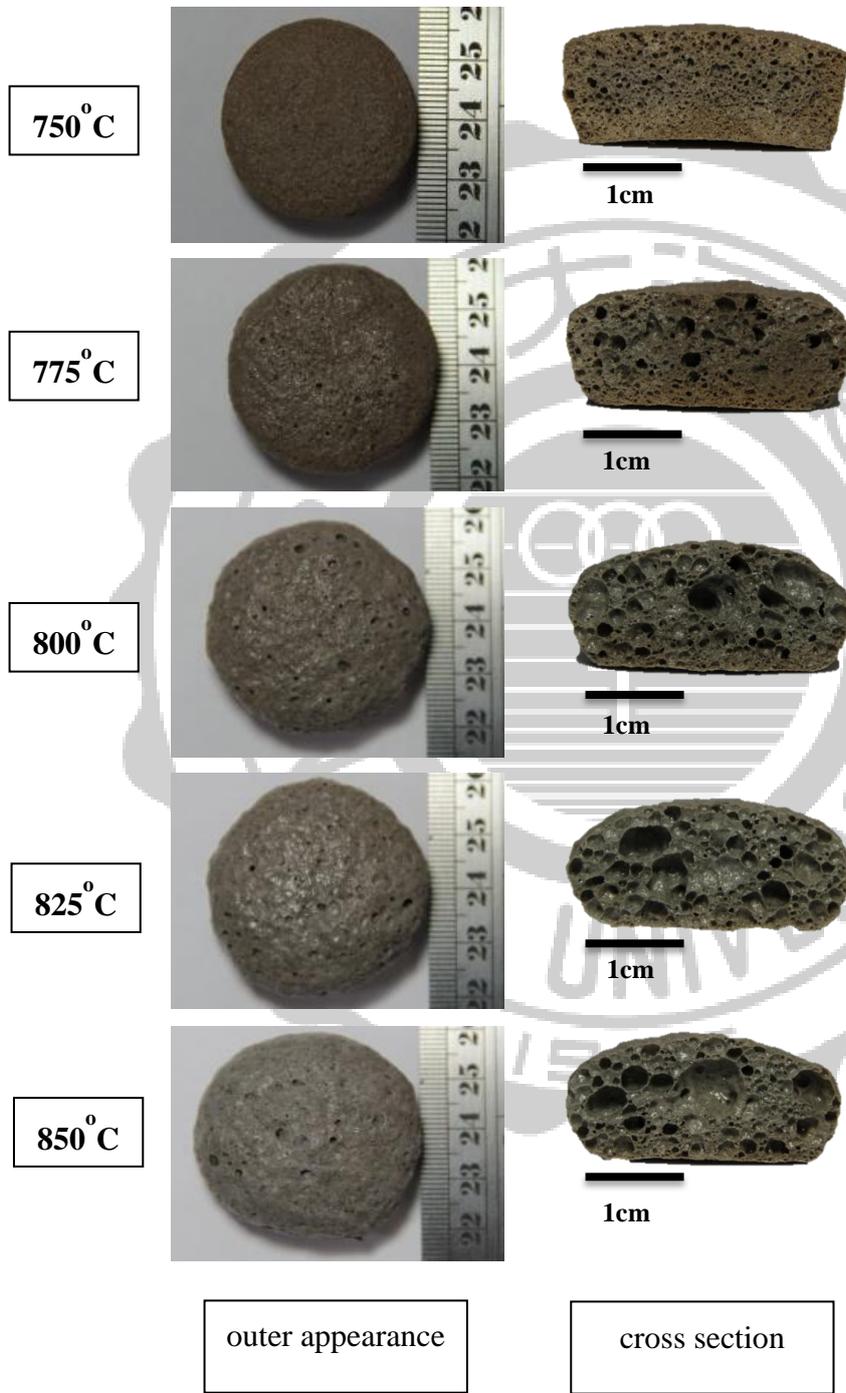


圖 4-21 樣品 A-1 之外觀與剖面

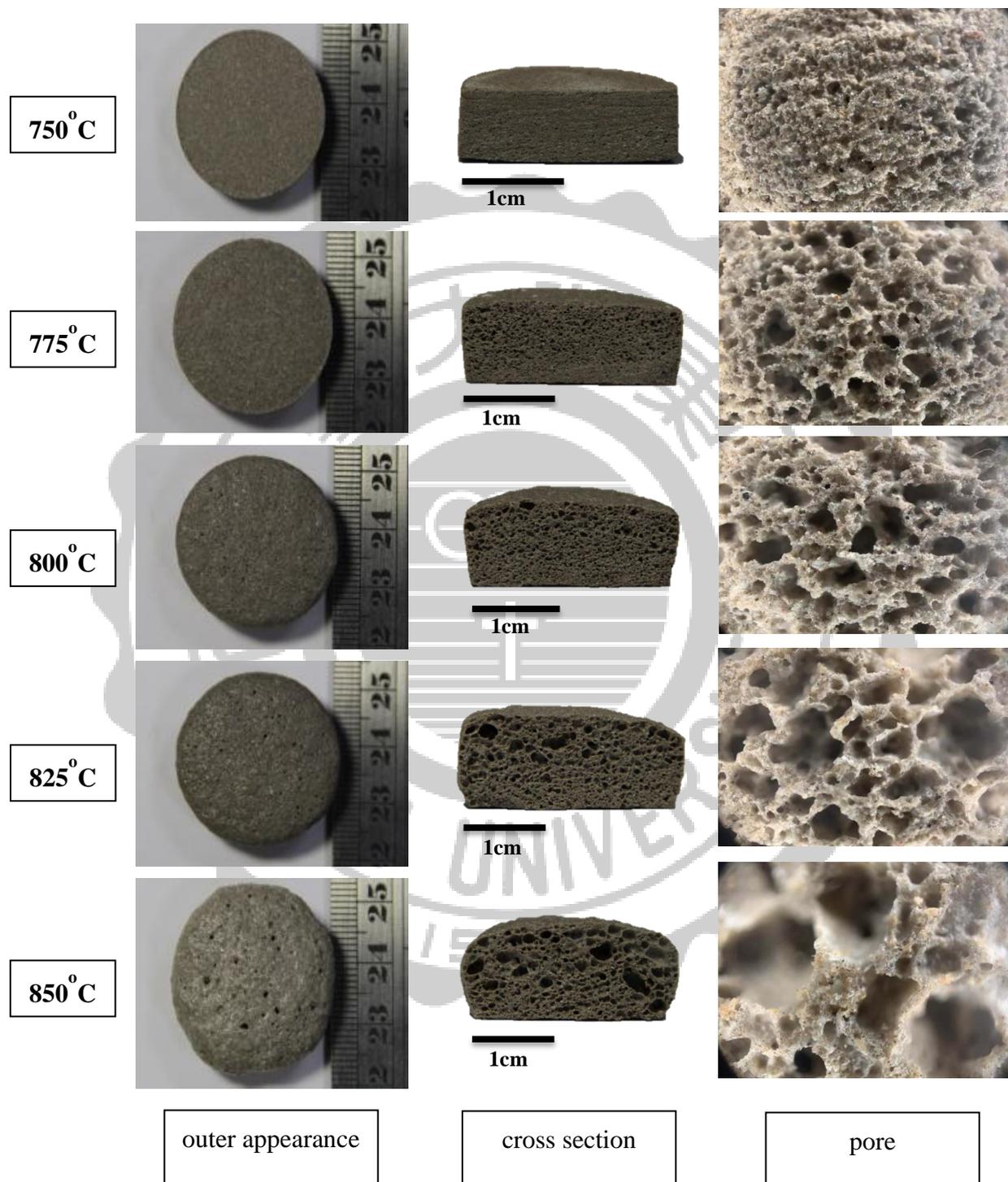


圖 4-22 樣品 B 之外觀與剖面

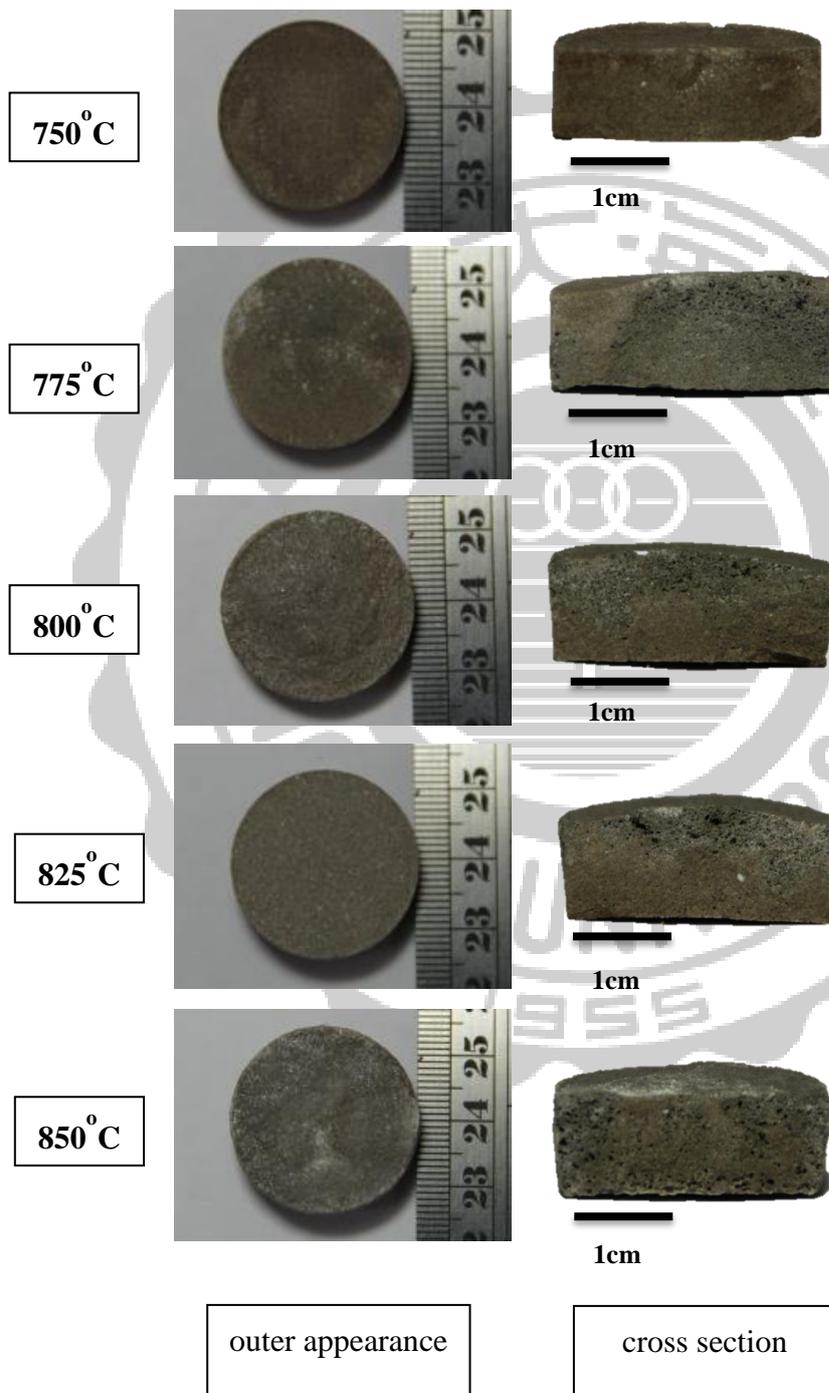


圖 4-23 樣品 B-1 之外觀與剖面

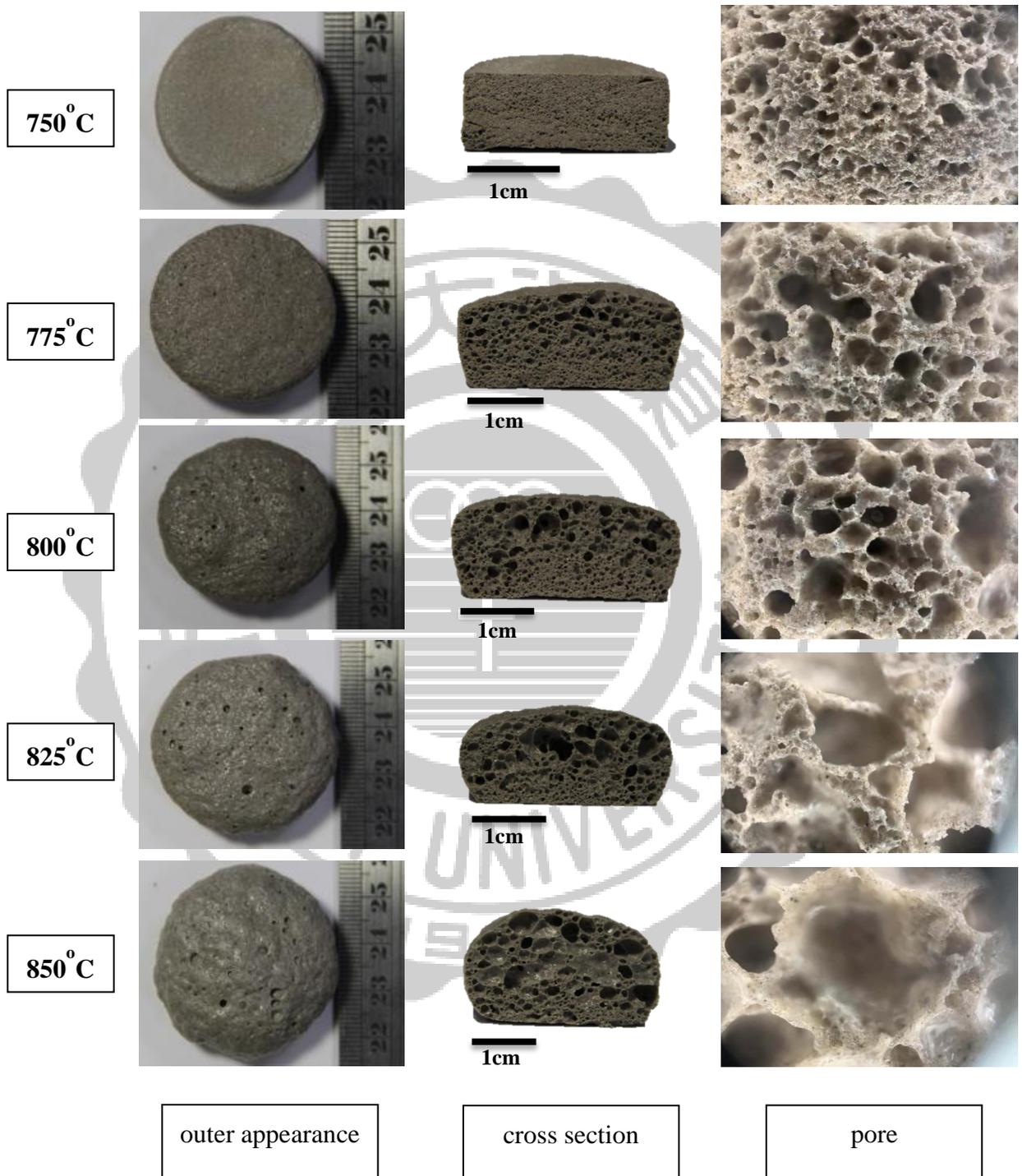


圖 4-24 樣品 C 之外觀與剖面

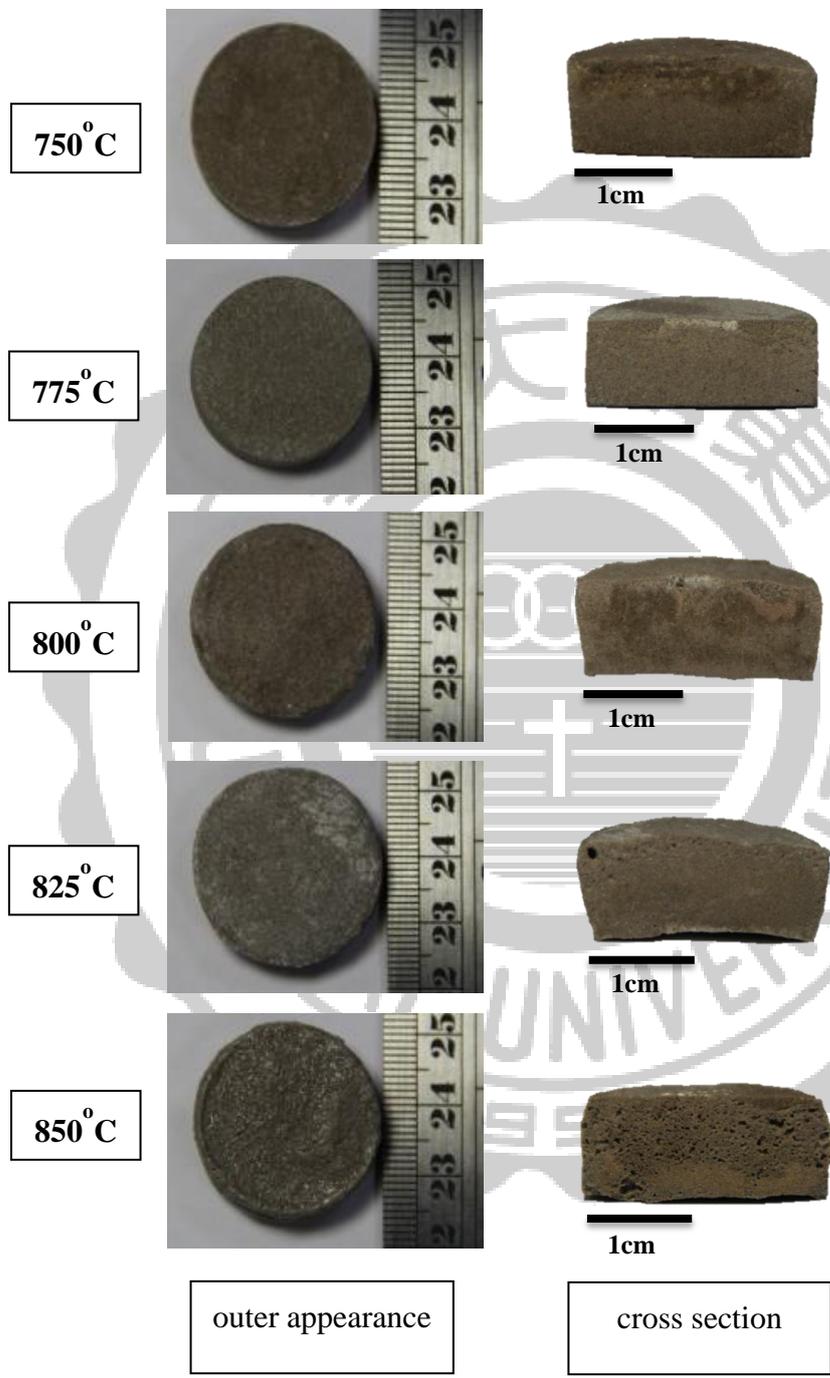


圖 4-25 樣品 C-1 之外觀與剖面

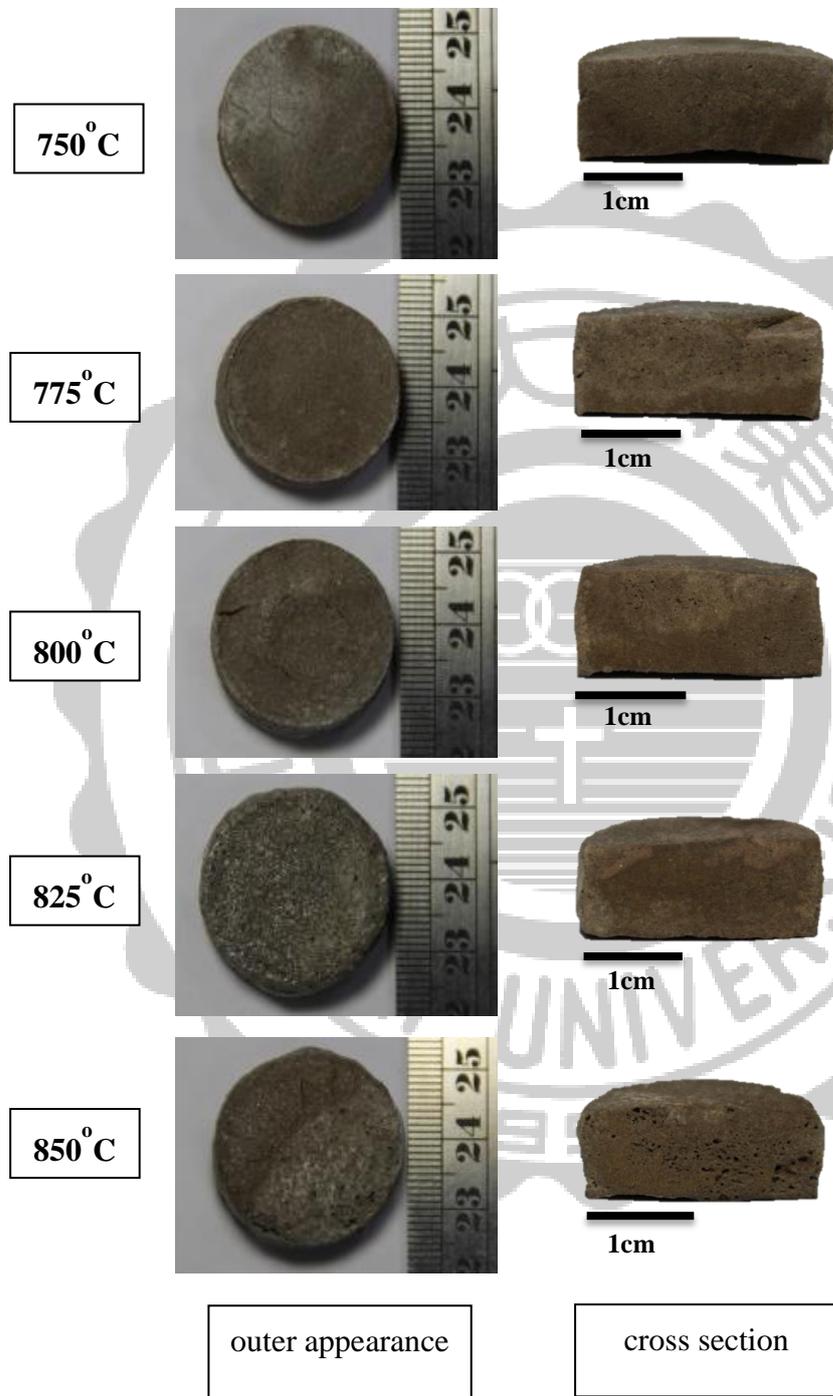


圖 4-26 樣品 C-2 之外觀與剖面

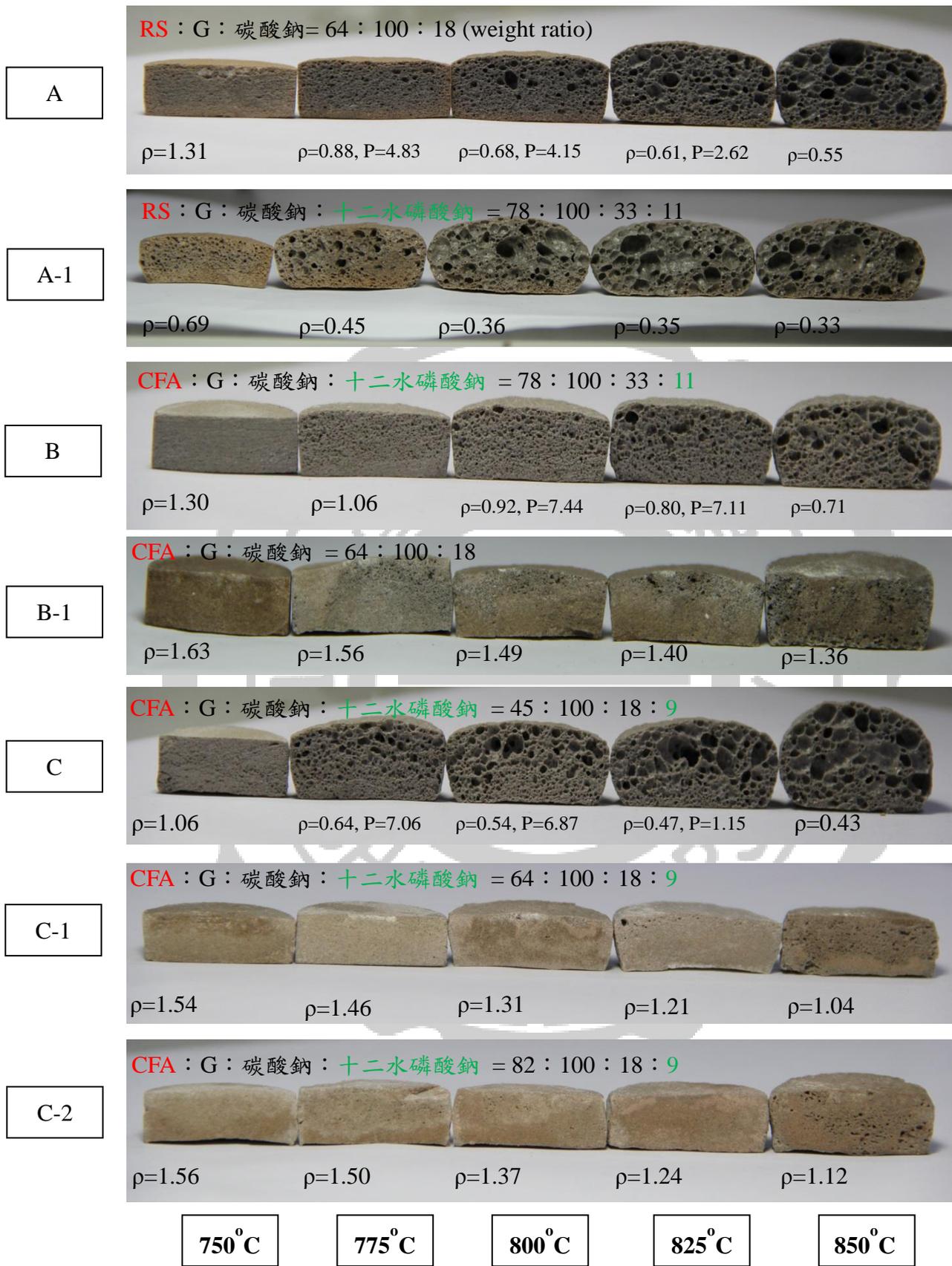


圖 4-27 樣品合照

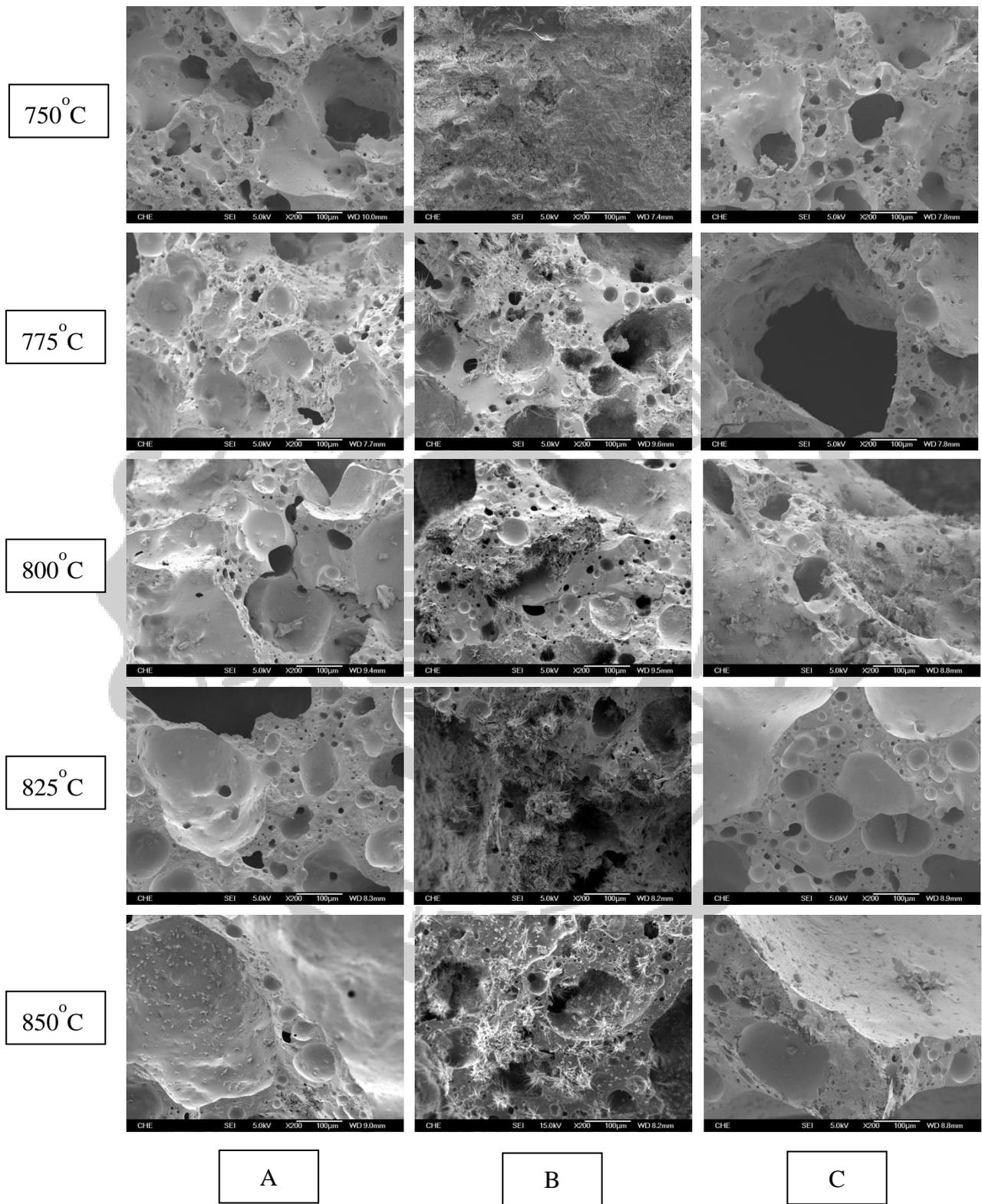


圖 4-28 樣品 A、B、C 之 SEM(200 倍)

第五章

結論與建議

5.1 結論

- 1、當燒製溫度過低時 (750°C)，產品可能無法產生大量氣泡於試體內部，導致表觀密度過高，並不符合發泡玻璃之輕質(<1 g/cm³)需求。
- 2、最終燒製溫度提升時，產氣量上升，使得表觀密度下降、抗壓強度也下降、閉孔孔隙率上升。在 800°C 有平均最好的各項物理性質。表觀密度介於 0.543~0.920 g/cm³，抗壓強度介於 4.15~7.44 Mpa，閉孔孔隙率介於 69.2~81.0%。800°C 之樣品(A₈₀₀、B₈₀₀、C₈₀₀)熱導係數介於 0.068~0.073 Wm⁻¹K⁻¹。
- 3、吸水率與燒製品表面的緻密程度有關，當添加較多的產氣物質(碳酸鈉、十二水磷酸鈉)會使得燒製品表面的細小開孔(open pore)增加，導致吸水率上升。燒製時，玻璃相的充份形成，可以確保氣體被包裹於試體內。
- 4、隨著燒製溫度提升，產氣量上升，使閉孔增加，且孔隙由小孔逐漸連通成大孔，導致密度下降。
- 5、當 Glass : Na₂CO₃ : Na₃HPO₄·12H₂O 之混合物重量比為 100 : 18 : 9 時，煤灰使用之重量比為 45 時，可順利產製發泡玻璃(每個樣品取 7 g)；反之，煤灰重量比例提升至 64、82 時，無法成功產製發泡玻璃。

5.2 建議

- 1、未來發泡劑可以使用廢棄物來取代，如脫硫石膏或是工業用蘇打剩料等，以落實完全的再利用。
- 2、可以嘗試更多配比，甚至添加不同來源之煤灰/淤泥，以解決各方廢棄物之問題。

參考文獻

- Ahmaruzzaman M., “A review on the utilization of fly ash”, *Progress in Energy and Combustion Science*. 36(3), 327–63, 2010.
- Acchar, W., Vieira, F.A., Hotza, D., “Effect of marble and granite sludge in clay materials”, *Materials Science and Engineering*. 419 : 306-309, 2006.
- Bai, J., Yang, X., Xu, S., Jing, W., Yang, J., “Preparation of foam glass from waste glass and fly ash”, *Material Letters*. 136, 52-54, 2014.
- Benavidez, E., Grasselli, C., Quaranta, E., “Densification of ashes from a thermal power plant. *Ceramics International*”, 29, 61–68, 2003.
- Bethanis, S., Cheeseman, C. R., Sollars, C. J., “Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash”, *Ceramics International*, 28 : 881-886, 2002.
- Benavidez, E., Grasselli, C., Quaranta, N., “Densification of ashes from a thermal power plant”, *Ceramics International*. 29, 61-68, 2003.
- Bentz D.P., Ferraris C.F., “Rheology and setting of high volume fly ash mixtures”, *Cem Concr Compos*, 32(4) : 265–70, 2010.
- Bhatty, J. I., Redit, K. J., “Moderate strength concrete from lightweight sludge ash aggregates”, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11(3) : 179-187, 1989.
- Blissett, R.S., Rowsen, N.A., “A review of the multi-component utilization of coal fly ash”, *Fuel*, 971-23, 2012.
- Chen, B., Wang, K., Chen, X., Lu, A., “Study of Foam Glass with High Content of Fly Ash Using Calcium Carbonate as Foaming Agent”, *Materials Letters* , 79 ,263–265, 2012.
- Chen, G., Lee, H., Young, K.L., Yue, P.L., Wong, A., Tao, T., Choi, K.K., “Glass recycling in cement production – an innovative approach”, *Waste Management*,

22 (7), 747–753, 2002.

Chen, H.-J., Yang, M.-D., Tang, C.-W., Wang, S.-Y., “Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments”, *Construction and Building Materials*, 28, 387–394, 2012.

Dewan, S., “Tennessee ash flood larger than initial estimate”, *The New York Times*, 25, 10-11, 2008.

Dinakar, P., Kartik, M., Reddy, M. S., “Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash”, *Materials and Design*, 46, 609-616, 2013.

Erol.M *, Demirler, U., Kucukbayrak, S., Ersoy-Mericboyu, A., Ovecoglu, M. L., “Characterization investigations of glass-ceramics developed from Seyitomer thermal power plant fly ash”, *Journal of the European Ceramic Society*, 23, 757-763, 2003.

Erol.M *, Kucukbayrak., S., Ersoy-Mericboyu, A., “Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production”, *Fuel*, 86, 706–714, 2007.

Fernandes, H.R., Tulyaganov, D.U., Ferreira, J.M.F., “Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents”, *Ceramics International*, 35(1), 229-235, 2009.

German, R.M., “Sintering theory practice, An Imprint of Wiley, ISBN:0-471-05786-X, 1996.

Ghule, A., Murugan, R., Chang, H., “Thermo-Raman studies on dehydration of $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ”, *Thermochimica Acta*, 371, 127-135, 2011.

González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J., Rodas, M., “Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes”, *Journal of Environmental Management*, 90, 2801-2812, 2009.

- Gonzalez-Corrochano, B., Alonso-Azcarate, J., Rodas, M., “Characterization of lightweight aggregates manufactured from washing aggregate sludge and fly ash”, *Resources Conservation and Recycling*, 53, 571-581, 2009.
- Hequet, V., Ricou, P., Lecuyer, I., Le, C.P., “Removal of Cu²⁺ and Zn²⁺ in aqueous solutions by sorption onto mixed fly ash”, *Fuel*, 80(6), 851–856, 2001.
- He, Y., Cheng, W., Cai, H., “Characterization of a-cordierite glass–ceramics from fly ash. *J Hazard*”, *Mater*, 120(1–3), 265–9, 2005.
- Huo, W., Yan, S., Wu, J.-M., Liu, J., Chen, Y., Qu, Y., Tang, X., Yang, J., “A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure”, Doi : 10.1111/jace.15089, 2017.
- Königa, J., Petersen, R.R., Yue, Y., Danilo, S., “Gas-releasing reactions in foam-glass formation using carbon and Mn_xO_y as the foaming agents, 2016.
- Klimesch, D.S., Ray, A., “DTA-TGA of unstirred autoclaved metakaolin–lime–quartz slurries”, *Thermochimica Acta*, 316(2), 149–154, 1998.
- Kim, J.M., Kim, H.S., “Processing and properties of a glass–ceramic from coal fly ash from a thermal power plant through an economic process”, *J Eur Ceram Soc*, 24(9), 2825–2833, 2004.
- Kourti, I., Cheeseman, C.R., “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from lignite coal fly ash and recycled glass”, *Resources Conservation and Recycling*, 54, 769-775, 2010.
- Kockal, N.U., Ozturan, T., “Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes”, *Journal of Hazardous Materials*, 179, 954-965, 2010.

- Mohan, S., Gandhimathi, R., “Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent”, *J Hazard Mater* , 169(1-3), 351-359, 2009.
- Mucahit, S., Sedat, A., Alican, B., Uluc, U., “Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition”, *Ceramics International* , 38,1033–1041, 2012.
- Mi, H., Yang, J., Su, Z., Wang, T., Li, Z., Huo, W., Qu, Y., “Preparation of ultra-light ceramic foams from waste glass and fly ash”, *Advances in Applied Ceramics : Structural, Functional & Bioceramics*, 116(7), 400-408, 2017.
- Nowok, J.W., Benson, S.A., Jones, M.L., Kalmanovitch, D.P., “Sintering behaviour and strength development in various coal ashes, *Fuel*, 69, 1020-1028, 1990.
- Niyazi, U.K., Turan, O., “Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes”, *Journal of Hazardous Materials*, 179, 954–965, 2010.
- Panday, K.K., Prasad, G., Singh, V.N., “Copper(II) removal from aqueous solutions by fly ash”, *Water Res*, 19(7), 869–873, 1985.
- Pascoe, R.D., et al., “Autogenous grinding of glass cullet in a stirred mill, proceeding of the international symposium organized by the concret technology unit, The University of Dundee, UK, pp.17, 2011.
- Petersen, R.R., König, J., Yue, Y., “The viscosity window of the silicate glass foam production”, *Journal of Non-Crystalline Solid*, 456, 49-54, 2017.
- Qu, Y.-N., Xu, J., Su, Z.-U., Ma, N., Zhang, X.-Y., Xi, X.-Q., Yang, J.-L., “Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green sphereshollowing technique”, *Ceramics International*, 42, 2370–2377, 2016.

- Qian, S., LIN, J., TANG, B., “Preparation of Glass Foams from Vitrified Municipal Solid Waste Incinerator Ash”, *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 42(01), 108-112, 2014.
- Rakshvir, M., Barai, S.V., “Studies on recycled aggregates-based concrete”, *Waste Management & Research*, 24 (3), 225–233, 2006.
- Rahmat, S., “International Conference on Advances Science and Contemporary Engineering”, *Procedia Engineering*, 50, 369 – 380, 2012.
- Saraber, A., Overhof, O., Green, T., Pels, J., “Artificial lightweight aggregates as utilization for future ashes – A case study”, *Waste Management*, 32, 144–152, 2012.
- Shih, P.-H., Chang, J.-E., Lu, H.-C., Chiang, L.-C., “Reuse of heavy metal-containing sludges in cement production”, *Cement and Concrete Research* 35 (11), 2110-2115, 2005.
- Skrifvars, B. J., Hupa, M., Backman, R., Hiltunen, M., “Sintering mechanisms of FBC ashes”, *Fuel*, 73(2), 171-176, 1994.
- Sobolev, K., Turker, P., Soboleva, S., Iscioglu, G., “Utilization of waste glass in ECO-cement : strength properties and microstructural observations”, *Waste Management* 27(7), 971–976, 2006.
- Siddique, R., “Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials”, *Resources Conservation and Recycling*, 54, 1060–1066, 2010.
- Sokolar, R., Vodova, L., “The effect of fluidized fly ash on the properties of dry pressed ceramic tiles based on fly ash-clay body”, *Ceram Int*, 37(7), 2879–2885, 2011.

- Saraber, A., Overhof, R., Green, T., Pels, J., “Artificial lightweight aggregates as utilization for future ashes - A case study”, *Waste Management*. 32, 144-152, 2012.
- Toya, T., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., “Preparation and properties of glass-ceramics from wastes (Kira) of silica sand and kaolin clay refining”, *Journal of European Ceramic Society*, 24, 2367–2372, 2004.
- Tian, Y., Lu, P., Zhang, S., Cheng, J., Wu, D., “Mechanism of Surface Depression on Foam Glass”, DOI 10.1007/s11595-016-1406-8, 2015.
- Wasserman, R., Bentur, A., “Effect of Lightweight aggregate Fly Ash Aggregate Microstructure on the Strength of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 27(6), 525-537, 1997.
- Wu, L., Liu, L., Zhang, J., Tian, Y., Yang, Y., “The Technical and economical discussion on the production of a new environmental material Foam glass, *Journal of Beijing polytechnic university* vol.24 Sep, 1998.
- Wang, X., Jin, Y., Wang, Z.; Mahar, R.B., Nie, Y., “A research on sintering characteristics and mechanisms of dried sewage sludge”, *Journal of Hazardous Materials*, 160, 489-494, 2008.
- Xi, C., Zheng, F., Xu, J., Yang, W., Peng, Y., Li, Y., Li, P., Zhen, Q., Bashir, S.; Liu, J.L., “Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials”, *Construction and Building Materials*, 190, 896–909, 2018.
- Xu, G. R., Zou, J.L., Li, G.B., “Ceramsite Made with Water and Wastewater Sludge and its Characteristics Affected by SiO_2 and Al_2O_3 ”, *Environmental Science & Technology*, 42, 7417-7423, 2008.

- Wang, X., Jin, Y., Wang, Z., Nie, Y., Huang, Q., Wang, Q., “Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash”, *Waste Management*, 29, 1330-1335, 2009.
- Xu, K., Deng, T., Liu, J., Peng, W., “Study on the phosphate removal from aqueous solution using modified fly ash”, *Fuel*, 89, 3668–3674, 2010.
- Young, J.P., Soon, O.M., Jong, H., “Crystalline phase control of glass ceramics obtained from sewage sludge fly ash”, *Ceramics International*, 29(2), 223–227, 2003.
- Yılmaz, B., Olgun A., “Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone”, *Cement & Concrete Composites*, 30, 194-201, 2008.
- Yoon, S. D., Lee, J. U., Lee, J.H., Yun, Y. H., Yoon, W.J., “Characterization of Wollastonite Glass-ceramics Made from Waste Glass and Coal Fly Ash”, *J. Mater. Sci. Technol*, 29(2), 149-153, 2013.
- Zhou, Y., Feng, K., Wang, H. *et al.*, “Influence of Sintering Temperature on the Preparation of Foam Glass-ceramics from High Titanium Blast Furnace.Slag”, *Journal of Sichuan University*,46, 192-199, 2014.
- 周惠琴,付開元, 1991。有機硅泡沫穩定劑的研究和應用。江蘇化工。
- 郭淑德, 1993。“世界各地煤灰利用之近況”, 臺電工程月刊, 541, pp.44~48,
- 王文江, 1996, 中國水庫清淤方式對台灣水庫適用性, 財團法人中興工程顧問社, 編號 R-HY-97-02。
- S.C.海內斯,T.B.比克斯拜,H.奧特,C.E.佛拉梅。1998。用於製作表面的泡沫玻璃及其用途和製備方式。中華人民共和國專利局, 公開號 CN 119462。
- 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。
- 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。
- 王順元，2001，淤泥輕質骨材燒製研究，碩士論文，國立中興大學工程研究所。
- 黃中和，陳豪吉，謝宗翰，2003，以台灣地區水庫淤泥燒製人造輕質骨材之研究，第十八屆廢棄物處理技術研討會論文集。
- 陳彥鳴，2004，廢玻璃資源化再利用技術及潛勢分析，碩士論文，國立台北科技大學環境規劃與管理研究所。
- 許豐億，2004，以多元線性迴歸法探討燃煤飛灰中礦物組成對其吸附水中有機物之影響，碩士論文，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系暨研究所。
- 周贊祐，2005，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。
- 張家碩，2005，水庫淤泥燒製輕質骨材的燒結行為之研究，碩士論文，國立成功大學資源工程研究所。
- 張育誠、吳國光、焦鴻文，2011，「氣電共生減碳技術-飛灰中燒失量檢測技術評析」，工研院綠能與環境研究所，冷凍空調&熱交換。
- 林永揚，2006，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。
- 楊景強，2008，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。
- 行政院環境保護署，2009，廢玻璃再利用技術宣導手冊。
- 施維裡，2010，添加助熔劑於淨水場污泥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。
- 韓萬軍、萬光輝、韓松、曹亞彬，2012。一種泡沫玻璃及其生產方式。中華人民共和國國家知識產權局，公開號 CN 102875027A
- 鄭少翔，2012，燃煤飛灰回收再利用成輕質骨材之研究，碩士論文，東海大學環境科學與工程研究所。
- 賴彥博，2014，提升廢棄物燒結發泡研製輕質骨材效率之探討，碩士論文，東海

大學環境科學與工程研究所。

李明賢，2014，廢玻璃資源化應用於輕質節能磚可行性之研究，碩士論文，逢甲大學工業工程與系統管理學系。

錢帥、林建、唐寶山。2014。用熔融法固化生活垃圾焚燒灰渣並製備泡沫玻璃。TQ171/TU55，文章編號：0454-5648(2014) 01-0108-05。

李宏光、朱學斌、鈺艳華，2017。一種高抗壓強度泡沫玻璃的製備方式。中華人民共和國專利局，公開號 CN107500552A

翁少笛，2017，一種鹽類作為添加劑的輕質骨材製備的研究，碩士論文，東海大學環境科學與工程研究所。

李浩銘，2017，玻璃粉粒徑及添加 LiF 對多孔玻璃微結構之影響，碩士論文，國立台北科技大學資源工程所。

經濟部能源局，「中華民國 106 年能源統計手冊」，臺北：集思創意顧問股份有限公司，2018。

經濟部水利署，e 河川知識服務網，瀏覽於 2019/4/29。

經濟部水利署，石門水庫及其集水區，瀏覽於 2019/4/29。

ASTM C-618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

CNS11393，「石灰石化學分析法」，中國國家標準。

CNS3036，「混凝土用飛灰或煅燒卜作嵐攪和物」，中國國家標準。

ICP/OES 原理概論，博精儀器股份有限公司。

GB/T-1596-2005，「用於水泥和混凝土中的粉煤灰」，中華人民共和國國家標準。

財團法人台灣建築中心，綠建材章：<http://gbm.tabc.org.tw/modules/pages/ecology>

綠色建材產業聯盟，何謂綠建材：

<http://sroof-rcets.tw/green-building-materials-standard/what-is-green-building-materials.html>

行政院環境保護署，事業廢棄物毒性特性溶出程序(NIEA R201.14C)

行政院環保署，民國 103 年全國事業廢棄物申報統計。

十二水磷酸鈉，安全資料表(SDS)，台灣 Merek 股份有限公司修訂於 2018。

碳酸鈉，安全資料表(SDS)，台灣 Merek 股份有限公司修訂於 2018。



附錄

JCPDS 資料庫

```

eta-Al2O3
Aluminum Oxide

Rad: CuKα1      Lambda: 1.54056      Filter:          d-sp: D.S. -114.0
Cutoff:         Int: Visual          I/Icor:
Ref: Stumpf et al., Ind. Eng. Chem., 42 1398 (1950)

Sys:
a:              b:              c:              A:              C:
A:              B:              C:              Z:              mp:
Ref:

Dx:             Dm:             SS/FOM:
    
```

4- 875 JCPDS-ICDD Copyright 1994 QM=

10 reflections in pattern. Page 1 of 1. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
19.279	40				
31.936	20				
37.441	60				
39.672	30				
46.034	80				
60.897	20				
66.761	100				
79.077	10				
85.015	20				
96.808	10				

Al

Aluminum

Aluminum, syn [NR]

Rad: CuK α 1 Lambda: 1.54056 Filter: Ni d-sp:
Cutoff: Int: Diffractometer I/Icor: 3.619
Ref: Swanson, Tatge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 1 11 (1953)

Sys: Cubic S.G.: Fm $\bar{3}m$ (225)
a: 4.0494 b: c: A: C:
A: B: C: Z: 4 mp:
Ref: Ibid.

D \times : 2.70 D m : SS/FOM: F9=93(.011,9)

9 reflections in pattern. Page 1 of 1. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
38.472	100	1 1 1			
44.738	47	2 0 0			
65.133	22	2 2 0			
78.227	24	3 1 1			
82.435	7	2 2 2			
99.078	2	4 0 0			
112.041	8	3 3 1			
116.569	8	4 2 0			
137.455	8	4 2 2			

CaO

Calcium Oxide

Rad: CuK α Lambda: 1.5418 Filter: Ni d-sp:
Cutoff: Int: Diffractometer I/Icor:
Ref: Kovgan, Nakhodnova, Russ. J. Inorg. Chem. (Engl. Transl.), 18 208 (1973)

Sys: S.G.:
a: b: c: A: C:
A: B: C: Z: mp:
Ref:

D \times : D m : SS/FOM:

8 reflections in pattern. Page 1 of 1. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
24.164	40				
26.749	100				
29.756	100				
35.597	20				
39.491	60				
43.253	40				
47.568	60				
48.375	60				

Al O
2 3

Aluminum Oxide

Corundum, syn

Rad: CuK α 1 Lambda: 1.54056 Filter: Mono. d-sp: Diff.
Cutoff: 15.0 Int: Diffractometer I/Icor: 1.00
Ref: Welton-Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo,
North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1989)

Sys: Rhombohedral (Hex) S.G.: R-3c (167)
a: 4.7588(1) b: c: 12.992(1) A: C: 2.7301
A: B: C: Z: 6 mp: 2050°
Ref: Ibid.

Dx: 3.99 Dm: 4.05 SS/FOM: F30=221(.004,31)

ea: 1.7604 nwB: 1.7686 ey: Sign: - 2V:
Ref: Winchell, A., Winchell, H., Microscopic Character of Artificial Inorg.
Solid Sub., 60 (1964)

49 reflections in pattern. Page 1 of 2. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
25.576	70	0 1 2	76.880	13	1 0 10
35.150	97	1 0 4	77.234	6	1 1 9
37.784	42	1 1 0	80.423	2	2 1 7
41.683	1	0 0 6	80.692	5	2 2 0
43.362	100	1 1 3	83.217	1	3 0 6
46.183	1	2 0 2	84.366	4	2 2 3
52.558	42	0 2 4	85.144	<1	1 3 1
57.502	82	1 1 6	86.356	4	3 1 2
59.772	2	2 1 1	86.500	3	1 2 8
61.133	5	1 2 2	88.997	5	0 2 10
61.303	7	0 1 8	90.705	2	0 0 12
66.520	30	2 1 4	91.190	6	1 3 4
68.207	45	3 0 0	95.248	12	2 2 6
70.417	1	1 2 5	98.393	2	0 4 2
74.300	1	2 0 8	101.064	9	2 1 10

SiO ₂					
Silicon Oxide			Cristobalite, syn		
Rad: CuK α 1 Lambda: 1.540598 Filter: Mono. d-sp: Diff. Cutoff: 17.7 Int: Diffractometer I/Icor:					
Ref: Wong-Ng, W., McMurdie, H., Paretzkin, B., Hubbard, C., Dragoo, A., NBS (USA), ICDD Grant-in-Aid, (1988)					
Sys: Tetragonal S.G.: P41212 (92)					
a: 4.9732(4) b: c: 6.9236(8) A: C: 1.3922					
A: B: C: Z: 4 mp:					
Ref: Wong-Ng, W. et al., Powder Diffraction, 3 253 (1988)					
Dx: 2.33 Dm: SS/FOM: F30=84(.010,36)					
40 reflections in pattern. Page 1 of 2. Radiation= 1.54056					
2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
21.984	100	1 0 1	57.082	3	3 0 1
25.319	<1	1 1 0	57.506	1	2 1 3
28.438	8	1 1 1	58.678	<1	3 1 0
31.461	9	1 0 2	58.868	<1	2 2 2
36.079	13	2 0 0	60.302	2	3 1 1
36.380	4	1 1 2	62.017	2	3 0 2
38.409	<1	2 0 1	65.100	2	3 1 2
42.655	2	2 1 1	65.648	1	2 0 4
44.842	2	2 0 2	66.811	1	2 2 3
47.062	4	1 1 3	68.674	2	2 1 4
48.610	4	2 1 2	69.418	<1	3 2 1
51.939	<1	2 2 0	69.788	<1	3 0 3
52.868	<1	0 0 4	70.540	1	1 0 5
54.155	2	2 0 3	72.688	1	3 1 3
56.218	<1	1 0 4	73.906	1	3 2 2
41-1370 JCPDS-ICDD Copyright 1994 QM=*					
Ca(Mg,Al)(Si,Al) ₂ O ₆					
Calcium Magnesium Aluminum Silicate			Diopside		
Rad: CuK α Lambda: 1.54178 Filter: Mono. d-sp: Diff. Cutoff: 8.9 Int: Diffractometer I/Icor: 0.8					
Ref: Keller, L., Arizona State University, Tempe, Arizona, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1988)					
Sys: Monoclinic S.G.: C2/c (15)					
a: 9.732(3) b: 8.867(3) c: 5.2787(5) A: C:					
A: B: 105.92(1) C: Z: 4 mp:					
Ref: Ibid.					
Dx: 3.29 Dm: SS/FOM: F30=102(.009,32)					
ea: 1.679(15) nwB: 1.686(14) ey: 1.707(13) Sign: + 2V: 56(7)°					
Ref: Deer, W., Howie, R., Zussman, J., Rock Forming Minerals, 2A 198 (1978)					

91 reflections in pattern. Page 1 of 4. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
13.750	1	-1 1 0	37.734	2	1 3 1
18.935	3	2 0 0	38.455	1	4 0 0
20.009	6	0 2 0	39.116	14	3 1 1
20.114	3	-1 1 1	40.452	4	-3 1 2
24.258	2	1 1 1	40.547	9	1 1 2
26.676	6	0 2 1	40.662	5	0 4 0
27.681	50	-2 2 0	40.912	6	-2 2 2, 0 2 2
29.909	100	-2 2 1	42.070	16	-3 3 0
30.346	55	-3 1 0	42.506	18	-3 3 1
30.905	30	-3 1 1	42.994	12	-4 2 1
31.715	2	-1 3 0	43.715	1	-4 2 0
35.093	20	-1 3 1	44.553	12	0 4 1
35.307	20	-2 0 2, 0 0 2	44.879	7	-4 0 2
35.451	16	-1 1 2	45.020	7	2 0 2
35.714	30	2 2 1	45.233	3	-2 4 0

Ca Al SiO
2 2 7

Calcium Aluminum Silicate

Gehlenite, syn

Rad: CuK α 1 Lambda: 1.540598 Filter: Mono. d-sp: Diff.
Cutoff: 17.7 Int: Diffractometer I/Icor:
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 21 50 (1985)

Sys: Tetragonal S.G.: P-421m (113)
a: 7.6858(2) b: c: 5.0683(2) A: C: .6594
A: B: C: Z: 2 mp:
Ref: Ibid.

Dx: 3.04 Dm: SS/FOM: F30=248(.004,32)

73 reflections in pattern. Page 1 of 3. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
16.302	4	1 1 0	41.152	2	3 1 1
17.483	3	0 0 1	42.707	1	2 0 2
20.978	2	1 0 1	44.373	9	2 1 2
23.131	1	2 0 0	46.155	2	3 2 1
23.986	15	1 1 1	47.270	8	4 0 0
25.905	2	2 1 0	48.815	4	4 1 0
29.131	21	2 0 1	49.113	2	2 2 2
31.422	100	2 1 1	50.328	8	3 3 0
32.932	5	2 2 0	50.782	<1	4 0 1
35.395	4	0 0 2	52.094	25	3 1 2
36.953	17	3 1 0	52.246	17	4 1 1
37.328	11	1 0 2	53.256	6	4 2 0
37.532	12	2 2 1	53.685	3	3 3 1
39.190	7	1 1 2	54.262	<1	0 0 3
39.367	11	3 0 1	55.664	<1	1 0 3

Al Si0
2 5

Aluminum Silicate

Kyanite

Rad: CuK α 1 Lambda: 1.5405 Filter: Mono. d-sp: D.S. -114.6
Cutoff: Int: I/Icor:
Ref: de Wolff, P., Technisch Physische Dienst, Delft, The Netherlands, Private
Communication

Sys: Triclinic S.G.: P-1 (2)
a: 7.112 b: 7.844 c: 5.574 A: 0.9067 C: 0.7106
A: 90.09 B: 101.1 C: 105.9 Z: 4 mp:
Ref: Ibid.

D \times : 3.67 D $_m$: 3.65 SS/FOM: F30=32(.014,65)

ea: 1.713 n w B: 1.722 ey: 1.728 Sign: - 2V: 82°
Ref: Winchell, A., Elements of Optical Mineralogy

65 reflections in pattern. Page 1 of 3. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
13.203	3	1 0 0	34.439	3	-1 3 0
15.029	3	-1 1 0	35.597	30	0 1 2
20.073	5	1 1 0	35.758	20	0 3 0
20.639	25	-1 1 1	36.495	5	2 -2 1
23.579	20	0 2 0	37.999	<1	-1 3 1
25.879	5	-2 1 0	38.083	<1	-2 0 2
26.586	65	2 0 0	38.184	30	-2 1 2
28.036	100	-2 1 1	38.268	30	-2 3 0
29.554	15	0 2 1	38.592	20	1 -3 1
30.304	20	-2 2 0	39.636	11	0 -2 2
32.148	1	2 1 0	40.958	9	0 3 1
32.815	9	-1 0 2	40.719	15	2 2 0
33.165	25	2 -1 1	41.364	7	-2 -2 1
33.228	25	-2 -1 1	41.623	5	1 1 2
34.303	7	-1 1 2	41.724	20	-2 -1 2

CaO

Calcium Oxide

Lime, syn

Rad: CuK α 1 Lambda: 1.540598 Filter: Mono. d-sp: Diff.
Cutoff: 17.7 Int: Diffractometer I/Icor:
Ref: McMurdie, H. et al., Powder Diffraction, 1 266 (1986)

Sys: Cubic S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)
a: 4.81059(9) b: c: A: C:
A: B: C: Z: 4 mp:
Ref: Ibid.

D \times : 3.35 D $_m$: SS/FOM: F13=146(.007,13)

13 reflections in pattern. Page 1 of 1. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
32.203	36	1 1 1			
37.346	100	2 0 0			
53.854	54	2 2 0			
64.152	16	3 1 1			
67.373	16	2 2 2			
79.662	6	4 0 0			
88.522	6	3 3 1			
91.456	16	4 2 0			
103.339	12	4 2 2			
112.627	6	5 1 1			
129.873	6	4 4 0			
142.634	10	5 3 1			
147.766	16	6 0 0			

Fe 0
2 3

Iron Oxide

Maghemite-0, syn

Rad: CoK α Lambda: 1.7902 Filter: d-sp:
Cutoff: Int: Visual I/Icor:
Ref: Brown, X-Ray Identification and Crystal Structures of Clay, (1961)

Sys: Tetragonal S.G.: P
a: 8.34 b: c: 25.02 α : C: 3.0000
 β : B: C: Z: 32 mp:
Ref: Ibid.

Dx: 4.88 Dm: SS/FOM: F30=5(.031,187)

35 reflections in pattern. Page 1 of 2. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
11.177	1	1 0 1	40.415	2	3 1 6
12.745	2	1 0 2	43.340	15	0 0 12
15.003	6	1 0 3	48.789	1	4 0 6
16.619	1	1 1 2	50.077	3	2 1 12
18.392	6	1 1 3	53.852	9	2 2 12
20.687	2	1 0 5	54.935	2	5 0 0
23.836	6	2 0 3	57.400	20	1 1 15
26.188	7	1 1 6	59.597	2	2 0 15
27.857	3	2 0 5	60.676	3	2 1 15
30.272	30	2 0 6	63.011	40	4 0 12
32.172	3	2 1 6	71.526	6	2 0 18
33.955	4	1 0 9	74.539	8	3 3 15
35.684	100	1 1 9	75.513	3	6 2 6
37.312	2	2 2 6	79.549	5	4 4 12
38.870	2	2 0 9	87.392	6	6 2 12

Al Si O
6 2 13

Aluminum Silicate

Mullite, syn

Rad: CuK α 1 Lambda: 1.54056 Filter: Ni d-sp:
Cutoff: Int: Diffractometer I/Icor:
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 3 3 (1964)

Sys: Orthorhombic S.G.: Pbam (55)
a: 7.5456 b: 7.6898 c: 2.8842 A: 0.9812 C: 0.3751
A: B: C: Z: .75 mp:
Ref: Ibid.

D \times : 3.17 D $_m$: 3.00 SS/FOM: F30=60(.014,37)

ea: 1.637 nwB: 1.641 ey: 1.652 Sign: + 2V: 45-50°
Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 2 401

63 reflections in pattern. Page 1 of 3. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
16.432	50	1 1 0	47.227	2	0 4 0
23.554	8	2 0 0	48.184	8	4 0 0
25.971	95	1 2 0	48.845	<2	1 4 0
26.267	100	2 1 0	49.468	10	3 1 1
30.960	20	0 0 1	50.812	<2	3 3 0
33.228	40	2 2 0	53.462	6	2 4 0
35.278	50	1 1 1	53.883	14	3 2 1
36.993	14	1 3 0	54.093	10	4 2 0
37.554	<2	3 1 0	57.561	20	0 4 1
38.992	4	0 2 1	58.412	12	4 0 1
39.276	20	2 0 1	58.994	2	1 4 1
40.874	60	1 2 1	59.763	2	4 1 1
42.590	25	2 3 0	60.711	35	3 3 1
42.908	8	3 2 0	61.492	<2	1 5 0
46.059	2	2 2 1	62.674	<2	5 1 0

NaAlSiO
4

Sodium Aluminum Silicate

Nepheline, syn

Rad: CuK α Lambda: 1.54178 Filter: Mono. d-sp: Diff.
Cutoff: Int: Diffractometer I/Icor:
Ref: Keller, L., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North
Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1984)

Sys: Hexagonal S.G.: P63 (173)
a: 9.978(1) b: c: 8.330(3) A: C: .8348
A: B: C: Z: 8 mp:
Ref: Ibid.

D \times : 2.63 D $_m$: 2.61 SS/FOM: F30=184(.005,30)

Al SiO
2 5

Aluminum Silicate

Sillimanite

Rad: CuK α Lambda: 1.54178 Filter: Mono. d-sp: Diff.
Cutoff: 17.7 Int: Diffractometer I/Icor:
Ref: Keller, L., Rask, J., Buseck, P., Arizona State University, Tempe,
Arizona, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1987)

Sys: Orthorhombic S.G.: Pbnm (62)
a: 7.486(1) b: 7.675(1) c: 5.7729(6) A: 0.9754 C: 0.7522
A: B: C: Z: 4 mp:
Ref: Ibid.

Dx: 3.24 Dm: 3.25 SS/FOM: F30=50(.016,38)

ea: 1.6575 nwB: 1.66 ey: 1.678 Sign: + 2V: 25°
Ref: Deer, W., Howie, R., Zussmann, J., Rock Forming Minerals, 1 121 (1962)

90 reflections in pattern. Page 1 of 3. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
16.506	12	1 1 0	39.010	2	0 2 2
19.386	2	1 0 1	39.329	3	3 0 1, 2 0 2
23.149	14	0 2 0	40.358	1	1 3 1
23.752	3	2 0 0	40.912	30	1 2 2
26.071	100	1 2 0	41.127	2	3 1 1, 2 1 2
26.458	35	2 1 0	42.780	12	2 3 0
27.893	1	0 2 1	43.210	1	3 2 0
30.388	1	1 2 1	45.701	1	2 3 1
30.731	1	2 1 1	46.151	1	3 2 1, 2 2 2
30.960	7	0 0 2	48.609	2	4 0 0
33.407	16	2 2 0	48.825	1	1 0 3
35.278	20	1 1 2	49.019	1	1 4 0, 1 3 2
36.962	3	2 2 1	49.698	2	3 1 2
37.104	20	1 3 0	50.092	1	0 4 1, 4 1 0
37.883	1	3 1 0	51.089	2	3 3 0

CaCO
3

Calcium Carbonate

Vaterite

Rad: CuK α Lambda: 1.5418 Filter: Ni d-sp: D.S.
Cutoff: Int: Visual I/Icor:
Ref: Rouse, R., Department of Geological Sciences, Univ. of Michigan, Ann
Arbor, Michigan, USA, Private Communication, (1980)

Sys: Hexagonal S.G.: P63/mmc (194)
a: 7.1473 b: c: 16.917 A: C: 2.3669
A: B: C: Z: 12 mp:
Ref: Ibid.

Dx: 2.66 Dm: SS/FOM: F30=4(.045,156)

ea: nwB: 1.559 ey: 1.659 Sign: + 2V:
Ref: Meyer, Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., 128
183 (1969)

38 reflections in pattern. Page 1 of 2. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
21.004	25	0 0 4	59.853	5	4 0 1
24.900	60	1 1 0	61.344	1	2 2 6
27.047	100	1 1 2	62.868	10	3 0 8
32.778	90	1 1 4	66.068	2	0 0 12
38.817	5	2 1 1	68.651	10	2 2 8
39.455	2	2 0 5	69.522	1	4 1 0
40.758	5	1 1 6	70.478	1	4 1 2
41.764	2	2 1 3	71.967	20	1 1 12
42.759	20	0 0 8	73.593	20	4 1 4
43.848	60	3 0 0	80.676	5	3 3 0
49.098	30	3 0 4	82.954	5	3 0 12
50.077	70	1 1 8	84.466	10	3 3 4
51.037	5	2 2 0	85.199	10	4 1 8
52.228	2	2 2 2	87.986	10	2 2 12
55.805	30	2 2 4	93.562	5	0 0 16

CaSiO

3

Calcium Silicate

Wollastonite-1A, syn

Rad: CoK α Lambda: 1.7902 Filter: d-sp: Guinier
 Cutoff: Int: Visual I/Icor:
 Ref: United Steel Companies, Ltd., Research & Dev. Dept., Swinden Labs.,
 Rotherham, England, UK, Private Communication, (1967)

Sys: Triclinic S.G.: P1 (1)
 a: 7.894 b: 7.371 c: 7.037 A: C:
 A: 90.02 B: 95.32 C: 102.93 Z: 6 mp:
 Ref: Matsueda, Mineral. J., 7 180 (1973)

D α : 2.91 D β : 2.88 SS/FOM: F30=5(.090,69)

ea: 1.620 nwB: 1.632 ey: 1.634 Sign: - 2V: 39°
 Ref: Ibid.

69 reflections in pattern. Page 1 of 3. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
11.513	50	1 0 0	31.889	20	-1 -2 1
16.190	40	-1 0 1	32.053	40	-2 2 1
19.801	20	1 -1 1	32.533	20	2 1 1
21.873	20	-1 -1 1	33.001	40	-2 0 2
23.156	60	2 0 0	34.631	20	-3 1 0
25.354	70	-2 0 1	34.854	20	3 0 0
26.110	20	-2 1 1	35.121	50	[0 -2 2]
26.897	80	-1 0 2	35.567	40	-1 2 2
27.611	40	0 -2 1	35.743	20	-3 1 1
27.902	40	2 -1 1	36.342	60	2 0 2
28.153	40	0 2 1	36.727	40	-1 3 0
28.966	70	1 0 2	38.336	50	-1 -2 2
29.736	20	1 2 0	38.472	40	0 0 3
30.001	100	-2 2 0	38.609	50	3 0 1
30.883	20	-1 -1 2	39.222	60	-1 0 3

Na Si O
2 3 7

Sodium Silicate

Rad: Lambda: Filter: d-sp:
Cutoff: Int: I/Icor:
Ref: Williamson, Glasser, Phys. Chem. Glasses, 7 127 (1966)

Sys: Orthorhombic S.G.: Cmc21 (36)
a: 20.6 b: 6.50 c: 4.90 A: C:
A: B: C: Z: 4 mp:
Ref: Ibid.

Dx: 2.452 Dm: 2.467 SS/FOM: F22=2(.145,76)

ea: nwB: 1.501 ey: Sign: 2V:
Ref: Ibid.

26 reflections in pattern. Page 1 of 1. Radiation= 1.54056

2-theta	Int.	h k l	2-theta	Int.	h k l
17.340	10	4 0 0	38.268	5	7 1 1
17.941	10		40.415	5	4 0 2
18.785	80	3 1 0	42.194	5	6 2 1
21.765	40		45.067	20	5 1 2
22.962	80	1 1 1	46.009	5	1 3 1
23.453	5		47.279	10	2 2 2
25.726	100	5 1 0	51.068	60	5 3 1
26.110	100	3 1 1	52.422	10	7 3 0
26.914	40		53.955	10	6 2 2
31.249	5	5 1 1	59.938	10	0 4 1
33.666	10	7 1 0	64.326	10	2 2 3
34.061	5	2 2 1			
35.022	5	8 0 0			
36.342	5	0 0 2			
37.120	5	4 2 1			



熱導係數委測結果

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer							
Test Method: ASTM D7984						環境溫度 : (22.0 ± 3.0) °C	
Project: 發泡材熱導率方案評估						相對溫度 : (55 ± 10) %	
Material: 001 石						Report Generated on: 2019/3/28	
#	Sensor	Start	k (W/m.K)	R ²	Ambient (°C)	T0 (°C)	DeltaT (°C)
1	T332	2019/3/28 13:34	0.073	0.9978	25.2	23.7	1.3
2	T332	2019/3/28 13:35	0.073	0.9979	25.3	23.6	1.3
3	T332	2019/3/28 13:36	0.073	0.9978	25.4	23.6	1.3
4	T332	2019/3/28 13:37	0.073	0.9978	25.4	23.7	1.3
5	T332	2019/3/28 13:39	0.073	0.9978	24.4	23.7	1.3
平均值			0.073				

樣品 A₈₀₀

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer							
Test Method: ASTM D7984						環境溫度 : (22.0 ± 3.0) °C	
Project: 發泡材熱導率方案評估						相對溫度 : (55 ± 10) %	
Material: 002 CA35						Report Generated on: 2019/3/28	
#	Sensor	Start	k (W/m.K)	R ²	Ambient (°C)	T0 (°C)	DeltaT (°C)
1	T332	2019/3/28 13:54	0.068	0.9978	26.1	24.1	1.3
2	T332	2019/3/28 13:56	0.069	0.9979	25.4	24.0	1.3
3	T332	2019/3/28 13:57	0.068	0.9978	26.0	23.9	1.3
4	T332	2019/3/28 13:58	0.068	0.9978	25.6	24.0	1.3
5	T332	2019/3/28 13:59	0.068	0.9978	25.4	24.0	1.3
平均值			0.068				

樣品 B₈₀₀

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer							
Test Method: ASTM D7984						環境溫度 : (22.0 ± 3.0) °C	
Project: 發泡材熱導率方案評估						相對溫度 : (55 ± 10) %	
Material: 003 CA25						Report Generated on: 2019/3/28	
#	Sensor	Start	k (W/m.K)	R ²	Ambient (°C)	T0 (°C)	DeltaT (°C)
1	T332	2019/3/28 14:25	0.068	0.9977	26.5	24.2	1.3
2	T332	2019/3/28 14:26	0.068	0.9977	26.5	24.2	1.3
3	T332	2019/3/28 14:27	0.068	0.9977	26.5	24.3	1.3
4	T332	2019/3/28 14:29	0.068	0.9977	25.4	24.2	1.3
5	T332	2019/3/28 14:30	0.068	0.9977	26.6	24.3	1.3
平均值			0.068				

樣品 C₈₀₀