

廢棄物類

無機聚合技術製備環保多孔防火材料之研發

林凱隆*、羅康維**、林雅雯**、鄭大偉****

摘 要

本研究利用碳化矽污泥 (SiC sludge, SCS) 和廢玻璃纖維 (Waste glass fiber, WGF)，以雙氧水發泡製備環保多孔防火材料，並分析 SCS 和 WGF 對熱機械和微觀性能的影響。結果顯示，SCS 取代率為 10%、WGF 添加量為 0.5% 和 2.0% 的樣品，1 天的抗壓強度分別為 0.32 MPa 和 0.46 MPa。當碳化矽污泥取代量為 10%，隨著廢玻璃纖維添加量由 0.5% 增加至 2.0% 時，其應力位移曲線由 0.28 mm 增加至 0.79 mm，顯示荷重從無機聚合物轉移至纖維中，使其應力位移曲線有所延伸。當 SCS 取代率為 10%、WGF 添加量從 0.5% 增加到 2.0% 時，樣品其應力-應變曲線從 0.28 mm 增加到 0.79 mm。當 WGF 添加量為 0.5% 和 2.0% 時，樣品的背板溫度分別為 238°C 和 262°C，顯示添加適量的 WGF 能有效降低環保多孔防火材料的背板溫度。此外，本研究利用 H₂O₂ 與碳化矽污泥能產製具良好韌性（位移曲線 0.7 mm）及良好防火性能（281°C < 背板溫度 < 311°C）之環保多孔防火材料。本研究分析發現碳化矽污泥與 H₂O₂ 含量對環保多孔防火材料之力學特性及微觀性質具顯著影響，且利用廢玻璃纖維能增強環保多孔防火材料之效能。

【關鍵字】碳化矽污泥、廢玻璃纖維、應力-應變曲線、環保多孔防火材料、微觀特性

*	國立宜蘭大學環境工程學系	教授
**	國立台北科技大學資源工程研究所	博士生
***	國立台北科技大學資源工程研究所	教授

一、前言

台灣地區近年來產業逐漸轉往光電產業發展，其中包括發光二極體（Light-emitting diode, LED）光電產業、半導體產業及矽晶圓產業、太陽能產業等快速發展，製程中所產生之廢棄物如碳化矽污泥等，伴隨產業發展而快速增加，卻缺乏適當之處理及再利用方式。此外，隨 LED 藍寶石基板大量生產下，其相對產生的污染物總量伴隨著增加，所產生之廢棄物其處理處置等相關問題亦相當棘手，而如何將其回收再利用及讓此資材能夠永續發展，將是未來發展之主要目標。其中，LED 藍寶石基板製造業所生產之藍寶石基板係由矽晶棒經線鋸切片而成，在切割的過程中會產生大量的碳化矽（Silicon carbide, SiC）污泥，根據環保署統計每年約有 6,916 公噸碳化矽污泥產生。目前碳化矽污泥大都以掩埋處置為主，不僅增加藍寶石基板製造業的成本，同時對環境造成負荷。因碳化矽污泥含氧化鋁（ Al_2O_3 ）及 SiC，為天然高嶺土之主要成分，若能回收再利用，不僅能降低生產成本，同時亦可減少對環境的污染。符合環境部零廢棄、零掩埋資源化之目標。

此外，由於台灣地區因電子資訊業的產業蓬勃發展，以國內台玻集團之玻璃纖維廠總產量為每年 320,000 噸，包括電子級玻璃纖維絲（Yarn）162,000 噸，強化塑膠級玻璃纖維製品 50,000 噸。資料顯示，目前國內的南亞及台玻玻璃纖維布（Cloth）的產能與產量已凌居世界之冠亞軍（地區性單家工廠而言），台灣廢棄的玻璃纖維每年推估超過 30 萬公尺（以織布損耗 6% 計）[白方正，2013]，根據環保署統計之資料指出，2022 年事業廢棄物申報量總計約 2,075 公噸。目前再利用方式主要以控制性低強度回填材料（Controlled-Low-Strength-Materials）為主。

無機聚合物是具有三維網狀結構的新型環保型無定形或半結晶矽鋁酸鹽無機聚合物，由於無機聚合物這類膠凝材料具有傳統水泥所不具備的優良性能，比如：早強、體積穩定性佳、耐化學腐蝕、界面結合能力強、抗滲性好、耐高溫性好、耐水熱作用及耐久性佳等特點 [GÖRHAN et al., 2022]。其獨特的性能以及在建築材料、高強材料、固核固廢材料、密封材料和耐高溫材料等方面具應用之潛力，也日益受到重視 [Lan and Wang, 2020]。此外，在製備過程中與卜特蘭水泥相比，無機聚合物具有很大的優勢。製備無機聚合物不需要高溫煅燒或燒結，無機聚合反應在常溫下即可完成，且在生產過程中幾乎沒有 NO_x 、 SO_x 和 CO 的產生， CO_2 的排放量亦低。而目前甚少

有學者以碳化矽污泥和廢玻璃纖維作為無機聚合物之原料，故本研究以碳化矽污泥和廢玻璃纖維製備無機聚合物並藉由無機聚合物良好的防火特性達到作為環保防火材料的再利用潛力。此外，本研究提出廢玻璃纖維優化製備多孔環保防火材料。使用最佳鹼性溶液條件，並添加碳化矽污泥、變高嶺土、 H_2O_2 發泡劑及廢玻璃纖維等材料，作為合成多孔環保防火材料之原料。將分析物理特性如抗壓強度、抗彎強度及熱傳導係數與防火性能，藉以建立多孔環保防火材料之品質特性。

二、無機聚合物之特性與應用

2.1 無機聚合物之特性

無機聚合物 (Geopolymer) 主要是用於描述鋁矽酸鹽無機聚合物，而通常無機聚合物可以藉由卜作嵐材料或富含鋁矽酸鹽的材料與強鹼性溶液混合產生，而生成之無機聚合物以 SiO_4 、 AlO_4 之四面體組成架狀結構，其結構相似於沸石。沸石主要為結晶相，但無機聚合物主要是由不定形所組成。無機聚合物擁有極好的機械特性、低收縮、耐火和抵抗酸能力，這些特性使無機聚合物擁有與卜特蘭水泥建築材料競爭之能力，其耐久性也符合混凝土之耐久性。惟製造卜特蘭水泥在燒製過程中至少需要 $1,400^\circ C$ 的高溫燒製而成，而無機聚合物的製備在低於 $100^\circ C$ 的環境中即可合成，不需花費太多的能量合成；傳統上製造 1 公斤卜特蘭水泥需要消耗 1.6 公斤的石灰石，即產生 0.53 公斤之 CO_2 ；而無機聚合物所排放 CO_2 約比傳統卜特蘭水泥少約 55% [Carreño-Gallardo et al., 2018]，僅產生 0.29 公斤之 CO_2 ，故無機聚合物為對環境友善的建築材料，如表 1 所示。

表 1 無機聚合物和水泥熟料生產過程中的總 CO_2 排放量

單位	無機聚合物	水泥熟料
kJ/g	0.306	1.059
kWh/kg	0.085	0.294
kg CO_2 (Energy)	0.056	0.192
kg CO_2 (Decarbonation)	0.237	0.342
Total kg CO_2 emitted	0.293	0.534

資料來源：本研究自行整理，2023。

根據 Glukhovsky 所建立 Glukhovsky 模型 (Glukhovsky Model)，當材料主要是由矽酸鹽及鋁酸鹽所組成時，會發生破壞－凝結－濃縮－結晶化 (Destruction-Coagulation-Condensation-Crystallization) 所連結而成的反應；其第一步為共價鍵之 Si-O-Si 和 Al-O-Si 鍵結崩解，而此反應會發生在於鹼性溶液中之 pH 提高時，此官能機物轉變為膠體相 (Colloid Phase)，之後當破壞的產物出現時會開始堆積 (Accumulation)，而其之間會相互作用而形成凝固結構 (Coagulated Structure)，導致第三階段的濃縮結構和結晶 [Li et al., 2010]。

2.2 無機聚合物之應用

無機聚合物因原料來源相當廣泛，例如天然礦物 (高嶺土、變高嶺土) 與工業固體廢棄物 (煤灰、爐石等) 富含矽鋁酸鹽材料者皆可做為無機聚合物之原料，且因於最初合成無機聚合物系統中所含的成分不同，而產生不同的結構之無機聚合物。根據最初原料中所含的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比例不同，而應用於不同領域。在 Si : Al=1 : 1 時，可應用於磚、陶瓷與防火材料等方面；在 Si : Al=2 : 1 可做為綠色水泥混凝土 (與卜特蘭水泥比較 CO_2 排放較低) 與固定有害與輻射廢棄物；Si : Al=3 : 1 時，可發展防火玻璃纖維複合材料與耐熱複合材料 (200~1,000°C)；而當 Si : Al > 3 : 1 又可應用不同的領域。

無機聚合材料與目前大量用於營建材料的卜特蘭水泥比較具有環保性、安全與舒適性和經濟性等。在環保性方面，在整個製程中所產生的 CO_2 遠低於卜特蘭水泥，其排放的 CO_2 小於 0.5 kg CO_2/kg ；在安全與舒適性方面，因無機聚合材料具有多孔隙結構，故可做為防火材料，且無機聚合物具有防火效能 (可承受 1,000°C 左右的高溫)，於 80°C 之高溫下其抗壓強度為 77.7 MPa；於 600°C 之高溫下其抗壓強度為 83.9 MPa；於 800°C 之高溫下其抗壓強度為 30.5 MPa；暴露於 1,000°C 下其抗壓強度為 28.5 MPa [Saxena et al., 2017]；在經濟方面，因可將富含鋁矽酸鹽廢棄物做為原料使用，故可降低其成本。

無機聚合物在應用於修補材料上係屬較新穎的技術，藉由外層鋪上含有纖維的複合材料來修補建築物結構，而修補的建築結構有石材建築、混凝土與磚等，或將纖維

複合材料應用於建築物之地基上。美國與日本已經開始將此技術應用於建築物與橋梁上，來增加建築物抗震的能力（Geopolymer Institute）。利用無機聚合物修補石材建築，主要原理是利用無機聚合反應（Geopolymerisation），藉由化學轉換的方式將粉末於短時間內轉換成固體。一般而言，通常先將黏土進行預處理（脫羟基），而此時黏土內所含的鋁酸鹽其配位基會從六配位轉變為四配位，之後再添加富含鈉或鉀與矽酸於系統中，其混合物結構會由二維結構轉變為三維結構，所合成的物質類似於卜特蘭水泥的膠結性材料，此材料可用於修補花崗岩、玄武岩、石灰岩和其他種類的岩石。

三、防火材料之特性及應用

3.1 防火材料之特性

防火材料（Fireproof Materials）是指用以阻止熱流傳遞及減少熱能損失的所有材料總稱，不僅可防火亦可有保冷之效能，其具有體積密度小、孔隙率及熱傳導係數低之特性。一般防火材料按使用溫度使用可分為 4 種類型：（1）低溫防火材料：使用溫度低於 900°C。主要產品有矽藻土磚、膨脹珍珠岩、輕質粘土磚及矽酸鋁纖維等。（2）中溫防火材料：使用溫度於 900~1,200°C，主要產品有矽藻土磚、泡沫石棉、膨脹蛭石、礦渣棉、玻璃棉及泡沫玻璃等。（3）高溫防火材料：使用溫度大於 1,200°C，主要產品有輕質高鋁磚、輕質剛玉磚、輕質鎂磚及高純矽酸鋁纖維等。（4）常溫防火材料：使用溫度於常溫及常溫以下，主要產品有輕質混凝土、石膏製品、泡沫塑料及其他有機防火材料等。常用的防火材料按其成分可區分為有機、無機及其他類。

3.2 防火材料之應用

防火材料指具有火災預防及火災防護功能之材料，其防火性能可分為 3 類；防焰性、耐燃性，以及耐火性。防火材料即是防焰材料、耐燃材料，以及耐火材料的總稱。當火災發生時，防火建築與裝修（飾）材料即使觸碰到火源或熱源，也不會立即燃燒，可以延緩火勢的蔓延，並保護其它易燃材料不會受火源影響而燃燒。圖 1 為防火材料之應用示意圖。

關於建築與裝修（飾）材料的使用與其防火能力的規範，於建築設計規則施工編有詳細的規定與說明。防火建築材料主要用於分間牆，使用不燃之無機材料做為防火層，例如珍珠岩、氯化鎂、氧化鎂、石膏或水泥等無機礦材所形成之多層結構，或使用纖維或不織布等軟性基材，摻混 50~80 wt.% 無機不燃材料，並添加難燃劑與發泡劑，形成質地堅硬的防火板材。而裝修（飾）材料則多用於天花板、門板與塗料等裝潢材，除了使用無機不燃材料外，此類材料多半使用有機高分子主體，添加大量的發泡劑、碳化劑、難燃劑及黏著劑，在燃燒時能夠促進複材發泡膨脹與碳化，以做為主要的防火機制，有效隔絕火焰與熱量傳遞，但此種碳化層結構極為蓬鬆且具有大量孔洞，在持續加熱或遭受外力的情況下，有可能會產生龜裂，甚至出現剝落與分解的現象，而無法有效地持續保護內部的材料。

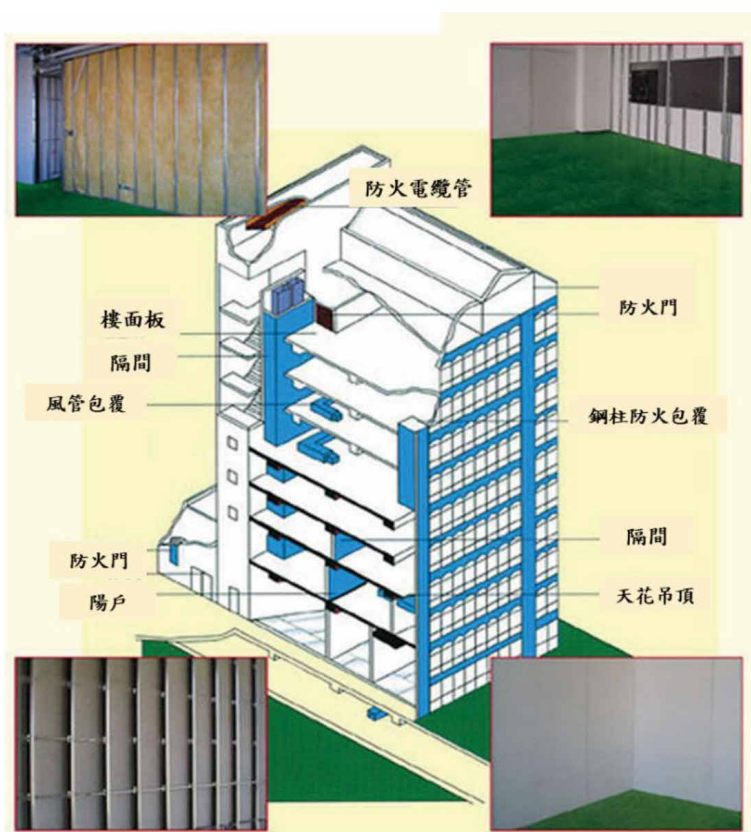


圖 1 防火材料之應用示意圖（資料來源：江榮裕建築師事務所，2008）

四、實驗材料與方法

本研究使用變高嶺土 (Metakaolin, MK) 為高嶺土經由 650°C 煅燒 3 小時而成。藍寶石基板之 SCS 污泥取自於北部某面板廠，將其細度控制在 $300\sim 400\text{ m}^2/\text{kg}$ ，作為初始材料以製備碳化矽污泥基無機聚合物。廢玻璃纖維來自塑膠公司生產玻璃纖維布的副產物，較長的廢玻璃纖維在作為混合前被切割成長度為 5 mm 的纖維。其中，SCS 污泥中主要成分為 SiO_2 (75.40%) 及 SiC (23.00%)，其他成分包含 Al_2O_3 (0.8%)、 Fe_2O_3 (0.58%) 及 CaO (0.09%)。而變高嶺土之主要成分為 SiO_2 (59.60%) 及 Al_2O_3 (38.00%)，其他成分包含 Fe_2O_3 (1.30%)、 CaO (0.25%) 及 K_2O (0.32%)。另外，變高嶺土之主要成分為 SiO_2 (59.60%) 及 Al_2O_3 (38.00%)，而廢玻璃纖維之主要成分為 SiO_2 (59.90%)、 CaO (23.40%) 及 Al_2O_3 (14.70%)。

本研究流程主要係將碳化矽污泥取代部分變高嶺土製成無機聚合物，無機聚合物漿體中矽鈉莫耳比為 1.6、液固比為 0.75、 SiC 污泥 (SCS) 取用量為 0%~20%，而發泡輕質無機聚合物中發泡劑 (H_2O_2) 的重量比 0%~2.0% 及添加 0.5%~2.0 wt.% 廢玻璃纖維作為優化製備多孔發泡無機聚合物。製備環保多孔防火材料之流程圖如圖 2 所示。並探討無機聚合物於養護齡期 1~56 天之抗壓強度發展，並將試驗完之試體終止反應以進行孔隙率、抗壓強度、抗彎強度、應力位移及防火絕熱分析。

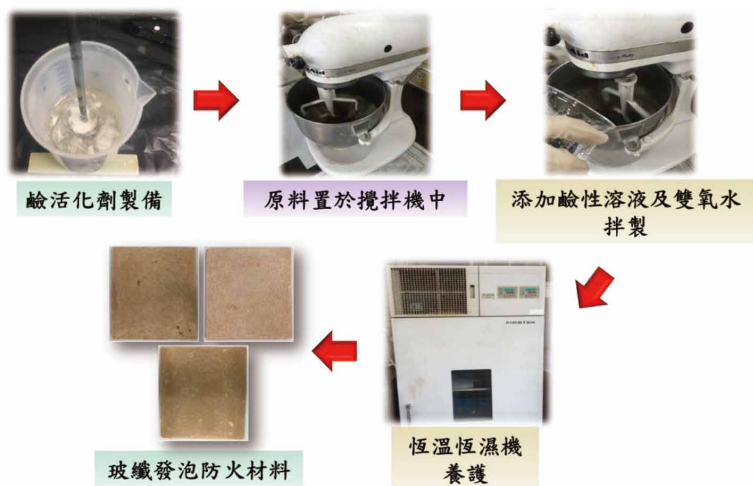


圖 2 製備環保多孔防火材料之流程圖

五、結果與討論

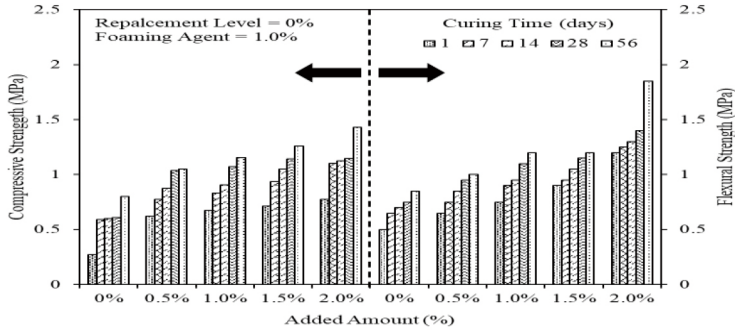
5.1 環保多孔防火材料之孔隙率分析

當養護齡期為 1 天、碳化矽污泥取代量為 0% 時，隨著廢玻璃纖維添加量至 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 後，環保多孔防火材料其孔隙率分別為 39.18%、38.31%、38.22% 及 37.42%；當養護齡期為 28 天時、廢玻璃纖維添加量為 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 時，環保多孔防火材料其孔隙率分別下降為 36.90%、36.57%、36.01% 及 33.40%。此外，當廢玻璃纖維添加量為 2.0%、碳化矽污泥取代量為 10% 及 20% 時，其孔隙率分別為 28.13% 及 39.67%。結果顯示，廢玻璃纖維之添加量為影響環保多孔防火材料孔隙率之重要參數。Novais 等人利用風力發電葉片所產生的玻璃纖維廢棄物用來作為無機聚合物之增強劑，其結果顯示隨著纖維含量 (0-3 wt.%) 的增加，表現出較高的抗壓強度，係因纖維與無機聚合物基體良好結合 [Novais et al., 2017]。故當廢玻璃纖維添加量越多時其反應加劇，因此其環保多孔防火材料其孔隙率會隨著廢玻璃纖維的增加而有逐漸下降之現象。

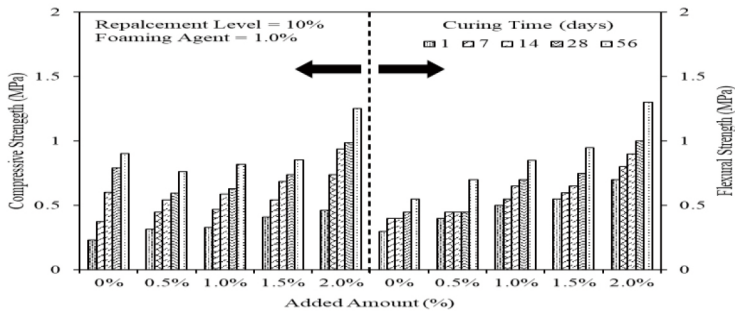
5.2 環保多孔防火材料之機械強度分析

圖 3 為不同碳化矽污泥取代量於不同廢玻璃纖維添加量下環保多孔防火材料其機械強度分析。由圖中可知，於養護齡期為 1 天時，未添加廢玻璃纖維之環保多孔防火材料其抗壓強度為 0.27 MPa，隨著廢玻璃纖維添加至 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 後，環保多孔防火材料其抗壓強度分別為 0.62 MPa、0.67 MPa、0.71 MPa 及 0.77 MPa；可見環保多孔防火材料其抗壓強度會隨著廢玻璃纖維的添加而有增加之趨勢。當碳化矽污泥取代量為 10%、廢玻璃纖維添加量為 0.5% 和 2.0% 時其抗壓強度分別為 0.32 MPa 與 0.46 MPa；當養護齡期為 56 天時，其抗壓強度分別為 0.82 MPa 與 1.25 MPa。另外，當廢玻璃纖維添加量為 1.5% 和 2.0% 時，抗彎強度分別為 0.95 MPa 與 1.30 MPa。結果顯示，添加廢玻璃纖維之環保多孔防火材料相比能有效提升強度，且透過添加韌性材料能改善抗彎特性。此外，當碳化矽污泥取代量為 20% 時，廢玻璃纖維添加量為 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 時，環保多孔防火材料其抗彎強度分別增加

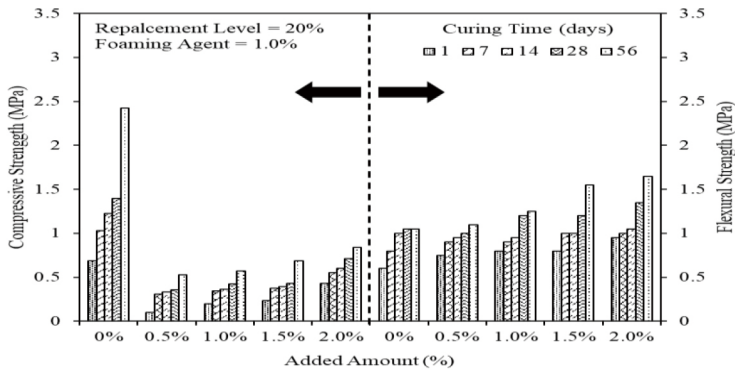
為 1.10 MPa、1.25 MPa、1.55 MPa 及 1.65 MPa，顯示荷重從無機聚合物轉移至纖維中增加其抗彎強度發展。與未添加廢玻璃纖維之環保多孔防火材料相比，相當於分別提升 4.8%、19.0%、47.6%、57.1%。



(a) Replacement Level= 0%



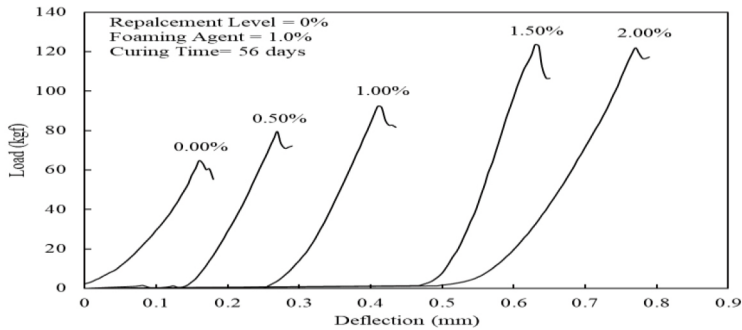
(b) Replacement Level= 10%



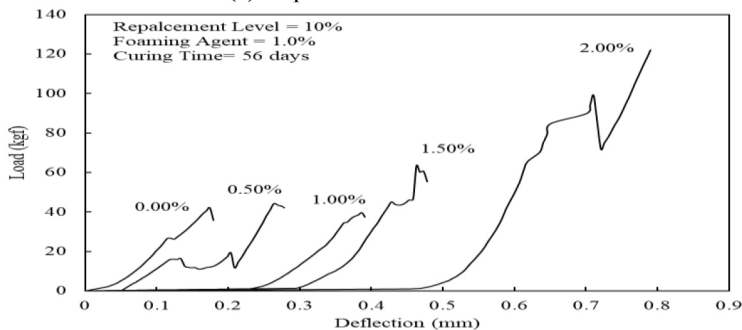
(c) Replacement Level= 20%

圖 3 不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料強度圖 [Lo et al., 2021]

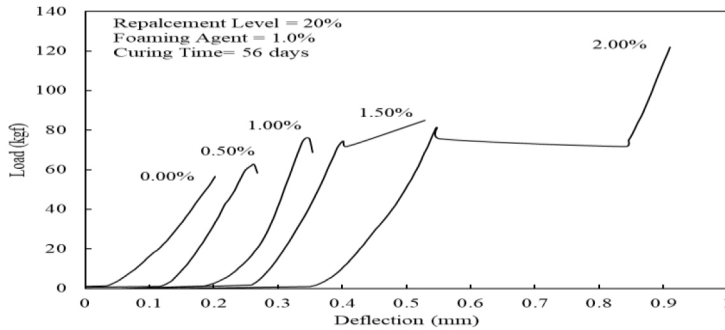
圖 4 為不同碳化矽污泥取代量於不同廢玻璃纖維添加量下環保多孔防火材料其晚期應力位移曲線圖。由圖中得知，當碳化矽污泥取代量為 0%、廢玻璃纖維添加量為 2.0% 時，顯示應力達到最高值後逐漸緩慢下降。同時，觀察到應力位移曲線較為延伸。當碳化矽污泥取代量為 10%，隨著廢玻璃纖維添加量由 0.5% 增加至 2.0% 時，其應力位移曲線由 0.28 mm 增加至 0.79 mm，顯示荷重從無機聚合物轉移至纖維中，使其應力位移曲線有所延伸，本研究結果與 Al-mashhadani 等人研究結果一致 [Al-mashhadani et al., 2018]。另外，當碳化矽污泥取代量為 20% 時，其應力位移曲線由 0.27 mm 增加至 0.91 mm。根據 Novais 等人 (2017) 研究顯示，添加 0~3 wt.% 玻璃纖維廢棄物作為無機聚合物之增強劑，隨著纖維含量增加，其無機聚合物強度增強並增加開裂後延展性，使更高的應力能量被吸收，防止試體的完全破壞 [Novais et al., 2017]。因此，顯示增加廢玻璃纖維含量其應力位移曲線有所延伸。



(a) Replacement Level= 0%



(b) Replacement Level= 10%



(c) Replacement Level= 20%

圖 4 不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料應力位移曲線圖 [Lo et al., 2021]

5.3 環保多孔防火材料之防火絕熱性質

表 1 為不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料其背板溫度變化分析。由表中可知，當養護齡期為 1 天、碳化矽污泥取代量為 0% 時，隨著廢玻璃纖維添加量至 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 後，其背板溫度分別降低為 238℃、227℃、260℃ 及 262℃，顯示添加廢玻璃纖維能有效降低其背板溫度。當養護齡期為 56 天、廢玻璃纖維添加量為 0.5%、1.0%、1.5% 與 2.0% 時，環保多孔防火材料其背板溫度分別為 219℃、251℃、259℃ 及 283℃，顯示隨著養護齡期越大其背板溫度明顯降低。此外，由表 1 中得知，當養護齡期為 28 天、廢玻璃纖維添加量為 2.0%、碳化矽污泥取代量為 10% 及 20% 時，其背板溫度分別下降為 268℃ 及 304℃，顯示廢玻璃纖維添加量的增加，其背板溫度有明顯下降之現象，其可能原因為系統中同時受到 SiC 顆粒及廢玻璃纖維存在的影響，促使漿體黏度增加，而產生更多的毛孔 [Bergamonti et al., 2018]，提升其絕熱性能。故隨著廢玻璃纖維添加量增加其背板溫度下降，且優於碳化矽污泥取代量為 0% 之環保多孔防火材料。另外，Shiu 等人 (2014) 也使用類似的發泡過程，進行廢玻璃製備發泡無機聚合物其結果顯示，當廢玻璃取代量為 10%、泡劑添加量為 1.5% 及 2.0% 其背板溫度分別為 362℃ 及 367℃ [Shiu et al., 2014]，其背板溫度皆高於本研究結果。故本研究所製備之環保多孔防火材料具有作為防火材料之潛力。

表 1 不同廢玻璃纖維添加量之環保多孔防火材料其絕熱試驗結果 [Lo et al., 2021]

SCS (wt. %)	WGF Addition (%)	Reverse-Side Temperature (°C)		
		1 day	28 days	56 days
0	0.0	322	252	306
	0.5	238	216	219
	1.0	227	218	251
	1.5	260	244	259
	2.0	262	253	283
10	0.0	340	301	298
	0.5	225	255	243
	1.0	218	255	202
	1.5	244	259	253
	2.0	254	268	265
20	0.0	367	333	255
	0.5	261	281	244
	1.0	241	261	241
	1.5	284	284	245
	2.0	303	304	300

六、結論與建議

本研究探討不同碳化矽污泥取代量與廢玻璃纖維添加量，以雙氧水發泡劑製備環保多孔防火材料，並分析環保多孔防火材料物理特性、機械強度、防火性能及微觀結構的影響。彙整開發環保多孔防火材料之產業應用優勢如下：本研究經驗活化合成法應用於環保多孔防火材料之製備方法，透過添加玻纖能夠改善其無機聚合物脆性破裂模式與增加應力位移曲線，並藉由碳化矽取代所製備環保多孔防火材料，已掌握有效提升高韌性（位移曲線 0.7 mm）及降低其背板溫度之特點。本研究開發新式再利用途徑及提供相關市場需求（市價 200~300 元 /m²），本研究成本為 100 元 /m² 提高產品性價比，與此同時解決大量碳化矽污泥（3,000~4,000 元 / 公噸）及玻璃纖維（20,000~25,500 元 / 公噸）等處理成本問題，進而提升防火材料於相關產業競爭能力。而後續建議可選擇不同之纖維添加至碳化矽污泥基多孔環保防火材料中，探討不同纖維對於碳化矽污泥基多孔環保防火材料其性能優化。

參考文獻

- Al-mashhadani M.M., Canpolat O., Aygörmez Y., Uysal M., Erdem S. (2018), Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 167: p505–513.
- Bergamonti L., Taurino, R., Cattani L., Ferretti, D., Bondioli, F. (2018). Lightweight hybrid organic-inorganic geopolymers obtained using polyurethane waste. *Construction and Building Materials*, 185: p285-292.
- Carreño-Gallardo C., Tejeda-Ochoa A., Perez-Ordóñez O.I., Ledezma-Sillas J.E., Lardizabal-Gutierrez D., Prieto-Gomez C., Valenzuela-Grado J.A., Hernandez F.C.R., Herrera-Ramirez J.M. (2018) In the CO₂ emission remediation by means of alternative geopolymers as substitutes for cements, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6: p4878–4884.
- GÖRHAN G., KÜRKLÜ, G. (2023). Investigation of the effect of metakaolin substitution on physicomechanical properties of fly ash-based geopolymer mortars. *Materials Today: Proceedings*, 81: p35-42.
- Lan X., and Wang Z. (2020). Efficient high-temperature electromagnetic wave absorption enabled by structuring binary porous SiC with multiple interfaces. *Carbon*, 170: p517-526.
- Lo K.W., Lin K.L., Cheng, T.W., Lin Y.W. (2021). Elucidating the effects of silicon carbide sludge and waste glass fiber on the characteristics of porous eco-fireproof materials. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(6), e13682.
- Novais R.M., Carvalheiras J., Seabra M.P., Pullar R.C., Labrincha J.A., 2017, Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste, *Journal of Cleaner Production*, 166: p. 343–349.
- Saxena S.K., Kumar M., Singha N.B., (2017). Fire Resistant Properties of Alumino

Silicate Geopolymer cement Mortars, *Materials Today: Proceedings*, 4: p5605–5612.

Shiu, H.S., Lin, K.L., Chao, S.J., Hwang, CL., Cheng, T. W. (2014). Effects of foam agent on characteristics of thin-film transistor liquid crystal display waste glass-metakaolin-based cellular geopolymer. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2): p538-550.

江榮裕建築師事務所，健康的綠建材—矽酸鈣板，2008，<https://roychiang.pixnet.net/blog/post/29597034>.

白方正 (2013)，聚乳酸生質材料合膠之韌性與導熱性研究，逢甲大學化學工程學系碩士論文，台中。

Li C., Sun H., Li L. (2010), A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 40: p. 1341–1349.