

廢棄物類

## C 級煤灰調質廢觸媒燒製多孔陶瓷 對環境調濕性能之研究

林凱隆\*、藍如穎\*\*

### 摘 要

台灣各城市隨經濟發展逐漸擴大，能源需求量也不斷增加。目前台灣發電來源主要為火力發電廠，電廠利用煤炭燃燒發電後產生大量煤灰，除部分做為資源回收外，其餘大多以掩埋處置為主，因此造成掩埋場用地日漸飽和，導致廢棄物隨意棄置並影響環境品質。有鑑於本研究運用製坯燒結技術，以煤灰做為基材，並以不同比例(0~40%)之廢觸媒做為取代材，於不同燒結溫度(850~1,000°C)製備調濕性多孔陶瓷，藉由巨觀檢測燒結體是否達 CNS 3298 陶質壁磚之抗彎試驗規範。結果顯示，廢觸媒可有效提升燒結體之調濕性能，隨燒結溫度的提高可使燒結體具有較好的機械特性，並符合 CNS 3298 規範陶質壁磚之抗彎強度(> 61.2kgf/cm<sup>2</sup>)且符合日本工業規範調濕建材之吸濕量(> 29g/m<sup>2</sup>)及平均平衡含水率規範(> 5kg/m<sup>3</sup>)，顯示廢觸媒及煤灰混合燒製之多孔陶瓷具資源化再利用為綠建材之潛力。

【關鍵字】 煤灰、廢觸媒、燒結、多孔陶瓷

\*國立宜蘭大學環境工程系 教授

\*\*國立宜蘭大學環境工程系 碩士

## 一、前言

隨著工業發展與現代科技的日新月異，能源使用已成為人類生活不可或缺的要項之一，電能更是經濟建設與優質生活的必要條件。目前台灣的電能主要來自火力發電、核能發電、水力發電與風力發電，其中火力發電因發電容量與供電調配性能優越，而為台灣地區目前主要的電力供應方式，約占 32% 以上；而台灣電力公司所屬的火力發電廠，所使用的燃料分為煤炭、石油與天然氣等，煤炭燃燒後所剩下的灰燼則稱為「煤灰」<sup>[1]</sup>。

原油在煉油程序中，常壓塔底油因含有較高的金屬及含硫量，必須先經過重油加氫脫硫工廠，將油料中的重金屬、硫及氮等含量降低，再經過重油裂解轉化工廠 (Residual Oil Cracking, ROC)，將重油裂解轉化成為汽油與柴油，以符合市場需求之功能，並可提升重油之經濟價值<sup>[2]</sup>。而反應器所裝填的加氫處理觸媒，常因積碳或無機鹽類物質累積污垢，導致反應處理的時間增長而逐漸失去活性。積碳通常可以利用反應器外控制燃燒的方式去除，但經過 2~3 次再生循環後，觸媒會隨著催化性質或機械性質的喪失而無法繼續使用進而成為廢觸媒。另外，對於特定使用於提升重油品質之加氫處理觸媒而言，原油分解後產生的硫化鈮與硫化鎳，會吸附於觸媒表面使得觸媒的活性降低，汽油產量將因此減少；或是原油本身所含之有機金屬成分毒害觸媒，使得加氫處理觸媒僅能進行一次再生循環，此時便須添加大量新觸媒以替代活性低的觸媒，而這些無法再生或遭毒化之觸媒即為待回收處理的「廢觸媒」<sup>[3、4]</sup>。綜合上述，既有煤灰及廢觸媒目前並無有效回收處理方法，而掩埋或焚化等方式，亦無法對其有效進行處置，未來恐將造成嚴重之環境問題。因此，開發相關再利用技術將亟具市場價值。

## 二、煤灰來源特性與再利用現況

燃煤飛灰 (Coal Fly Ash) 主要產生來源包括燃煤火力發電廠及工業汽電共生鍋爐，為發電過程中所產生之副產物，其中經由廢氣排放而為空氣污染防制設備所捕集者稱為飛灰，經重力自然沉降於鍋爐底部者稱為底灰。

飛灰由於其煤碳來源不同，所生產之飛灰等級亦有異，可分為 F 級煤灰(氧化鈣含量低於 10%)與 C 級煤灰(氧化鈣含量為 10~40%)；燃煤飛灰的物理與化學性質受煤碳來源、磨煤細度、燃燒控制、機組負荷、空氣污染防制設備及飛灰收集方式等因素的影響而有所差異。燃煤飛灰之外觀顏色包括淺灰色、灰色、深灰色、暗灰色、黃土色、褐色以至灰黑色等，通常取決於煤源及燒失量含量。F 級飛灰通常為淺灰色或灰色，C 級飛灰通常為淡褐色，而未燃碳常是飛灰呈現黑色的原因<sup>[5]</sup>。

依據國際能源機構統計結果，2014 年世界產煤總量為 6,505 百萬公噸，發電產生之煤灰總量達 780 百萬公噸，其中飛灰達 580 百萬公噸以上<sup>[6]</sup>。根據 103 年全國事業廢棄物申報統計資料顯示燃煤飛灰之申報總量為 485 公噸，而 100~102 年燃煤飛灰之申報總量分別為 544、558 及 482 公噸<sup>[7]</sup>，反映每年因發電所產生之大量飛灰，往往在處理處置上常造成極大之困擾，亟待尋求有效之解決方案。

燃煤飛灰係燃煤火力發電廠及鍋爐之副產物，其處理處置與資源化潛力往往未受正視，1970 年石油危機發生之後，多數火力發電廠改採燃煤發電；加上全球每年消耗量以百萬噸計之煤炭經使用後產生大量的飛灰，造成棄置困難，世界各國方才重視飛灰利用技術之研發。在各國核能電廠建設遭受重大阻力之今日，煤灰之產量在可預見的未來仍將持續增加，其處理處置與資源化成為各國燃煤電廠主要環保課題之一<sup>[8]</sup>。依過去許多研究及工程試驗結果，煤灰已廣泛應用做為工程材料；相關國內煤灰資源化再利用之研究整理如表 1。

表 1 國內煤灰資源化再利用之研究整理

作者	研究成果
黃兆龍 等人	以飛灰取代混凝土中水泥及砂各 10%的飛灰混凝土，因膠結料減少，故早期強度較弱。晚期因卜作嵐反應，故其抗壓強度皆較純混凝土強。飛灰材料對混凝土防水效能的提升有相當的功效。
吳萬全 等人	煤灰中所含鋁、鐵、鈦等有價金屬可經由鹽酸直接浸漬法、鈣熔結法、高度氯化法及氫氟酸法等方式進行回收再利用，且剩餘之廢灰也可當做高價值之飛灰來利用。
郭淑德 等人	利用煤灰研製人工魚礁，以抗壓強度測試及化學溶出試驗做為篩檢配方之依據，將所研發之魚礁投放海中，經長達 8 年之研究，其與海洋相容性、耐久性與集魚效果均獲良好效果。
郭淑德 等人	以低鈣鹼性飛灰施用量為 3、5、6、9 及 10 公噸/公頃，對酸性農地進行改良。實驗結果顯示，土壤中之重金屬含量皆低於法規值。在測試植物生長方面並無明顯差異，稻穀產量略增，而毛豆產量則大幅增加。
黃兆龍 等人	飛灰細度愈大，水泥漿抗壓強度愈佳。在 5% 飛灰取代量下，有較佳的工作性。飛灰取代水泥會延長水泥砂漿之凝結時間，而造成早期強度較弱，並降低水泥漿之沁水量。
黃兆龍 等人	水泥漿體工作性、沁水性與飛灰取代量成反比，但添加 5% 飛灰略有提升其工作性。強塑劑劑量隨飛灰取代量增加而增加，凝結時間、黏滯性與飛灰取代量成正比。在高溫高壓養護時，以 40% 飛灰量之混凝土可獲致最佳強度。
林三賢 等人	飛灰與皂土依不同配比可獲致不同物理性質與化學性質之混合物，經測試，飛灰與皂土比例為 80：20 有最佳之經濟效益；比例為 60：40 經解壓後有最小之回脹量；比例為 40：60 之剪力強度則為最佳。
陳富英 等人	在粉質土壤可提高 pH 值為 0.6~1.2 及鈣、鎂含量；砂質土壤可提高 pH 值為 0.4，而鈣、鎂含量變化不大。
楊志華 等人	煤灰在去除廢水中銅離子的過程中反應 3hr 後達到平衡，煤灰對 $\text{Cu}^{2+}$ 的去除率隨煤灰投加量的增加而提升。

資料來源：本研究室整理，2015

### 三、廢觸媒來源特性與再利用現況

原油煉油程序中，先經過重油加氫脫硫工廠，將油料中的重金屬、硫及氮等含量降低，再經過重油裂解轉化工廠(Residual Oil Cracking, ROC)，將重油裂解轉化為汽油與柴油，而反應器所裝填的加氫處理觸媒，常因積碳或無機鹽類物質累積污垢，導致反應處理的時間增長而逐漸失去活性<sup>[4]</sup>。積碳通常可以利用反應器外控制燃燒的方式去除，但是在經過 2~3 次再生循環後，觸媒會隨著催化性質或機械性質的喪失而無法繼續使用進而成為廢觸媒。

另外，對於特定使用於提升重油品質之加氫處理觸媒而言，原油分解後產生的硫化釩與硫化鎳，會吸附於觸媒表面使得觸媒的活性降低，汽油產量將因此減少，或是原油本身所含之有機金屬成分毒害觸媒，使得加氫處理觸媒僅能進行一次再生循環，此時便須添加大量新觸媒替代活性低的觸媒，而這些無法再生或遭毒化之觸媒即為待回收處理的「廢觸媒」<sup>[3、4]</sup>。

根據 102 年全國事業廢棄物申報統計資料，廢鈷錳觸媒申報量為 820 噸、廢沸石觸媒申報量為 19,366 噸<sup>[7]</sup>，合計國內約有 20,186 噸的廢觸媒，傳統處理法皆以安定化固化掩埋處置為主。有鑒於近年來廢棄物掩埋處置的合法場地不易取得，因此，廢觸媒資源化回收技術已是刻不容緩的問題。

目前廢觸媒之資源化技術亦須視各類觸媒之成分而定，但資源化回收之技術，大致皆遵循冶金方法回收，包括為乾式冶煉法、濕式冶煉法及乾濕併法等 3 種。目前再生法主要為 DEMET 程序，DEMET 法可降低廢觸媒產量至五分之一<sup>[9]</sup>，此法雖可處理大部分廢觸媒，但剩餘廢觸媒仍須以其他方法處理；且若投資建廠，每年僅能處理數千噸，並不符合經濟效益。近年來國內學者專家對於廢觸媒再利用研究甚多，一般皆以探討其添加於混凝土中強度及相關耐久性研究為主，或是做為瀝青混凝土填充料、面磚或地磚等陶瓷建材，以及可鑄耐火材料等<sup>[10、11]</sup>，表 2 為國內廢觸媒資源化的相關研究。燒結製磚除可產生化性極安定之燒結物外，且所耗能源較熔融法少，燒結磚體之穩定性較水泥固化法為優，並兼具資源回收之利，因此

### 34 C 級煤灰調質廢觸媒燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究

廣受矚目，成為極具潛力技術之一。廢觸媒所含之  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{CaO}$  等氧化物，在燒結製磚過程中伴隨熱分解及固相反應，產生玻璃化、收縮、緻密化及再結晶等作用，使粒子間相互結合固化，增加燒結體強度<sup>[12、13]</sup>。

表 2 國內廢觸媒資源化再利用相關研究

作者	研究成果
陳又瑄 等人	將廢觸媒進行活化前處理，並與二氧化矽混合製備吸附材，利用四乙炔戊胺 (Tetraethylene-pentamine, TEPA) 進行改質，提升吸附材對二氧化碳的吸附能力。
謝雅敏 等人	利用篩選技術從燃煤飛灰中分選出未燃碳，再利用水蒸氣活化處理未燃碳；製成之吸附劑具有高孔隙度、吸附量大、吸附效率佳、成本低廉，可做為處理廢水之吸附材料。
曾鑾生 等人	評估石油裂解廠之廢觸媒[靜電集塵觸媒(EPcat) 及平衡觸媒(Ecat)]，結果顯示 EPcat 及矽灰比高嶺土及 Ecat 具有較高的卜作嵐活性指數，且其砂漿的抗壓強度均較高。
陳佳蓁 等人	可改善工作性、提高抗壓強度和增加混凝土氯離子滲透之耐久性。
吳榮修 等人	含廢觸媒的水泥漿體比不含者產生較多的 C-S-H 膠體，但卻較少氫氧化鈣，證實廢觸媒確實有卜作嵐活性存在。
呂恩錫 等人	利用廢觸媒、飛灰與爐石取代水泥之自充填混凝土，進行混凝土之工作性、耐久性 & 微觀結構探討。
陳秀娘 等人	評估石油裂解廠之 EPcat 卜作嵐活性及合成一種水性改質磺化酚醛聚合物 (SPEP) 做為混凝土化學摻料。

資料來源：本研究室整理，2015

## 四、燒結資源化技術

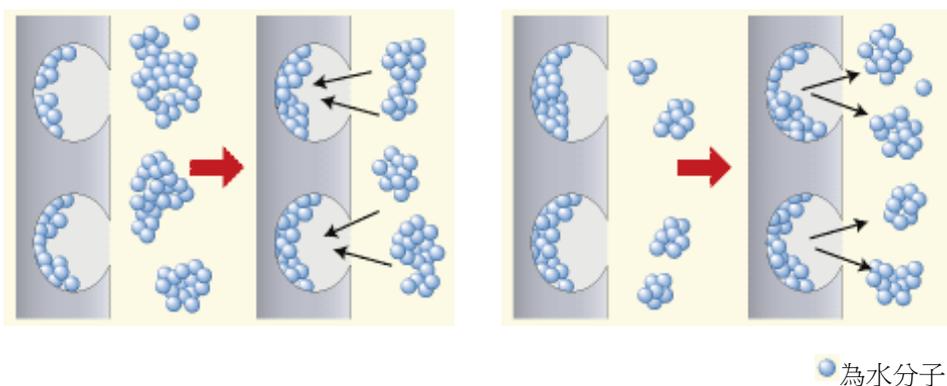
傳統之成形燒結法運用於粉末冶金與陶瓷燒結工業，係將粉體鞏固成形與燒結處理後，使其機械強度明顯增加，若達建材最低規範標準，則可做為建築材料使用。

依照以往觀念，當粉體經鍛燒、研磨、成形及燒結等程序後即可稱為陶瓷<sup>[14]</sup>。而一般應用於氧化物陶瓷材料之燒結為常壓燒結，表示在大氣壓狀態下坯體自由燒結的過程，當無外加驅動力下，溫度通常需達到材料熔點(絕對溫度)的 0.5~0.8 倍，而燒結程序乃應用熱力學理論中系統趨於最低能量之趨勢，藉由燒結體顆粒間表面能量之不同，使燒結過程顆粒中之原子向顆粒間接觸點移動、聚集，以降低能量，因而形成顆粒間之頸部，形成燒結體之強度<sup>[15]</sup>。

燒結過程中，整個系統的能量要趨於最低，故顆粒間接觸所產生之凹凸表面，在高溫下，試體顆粒的表面能高於內部自由能，整個系統的能量由高往低，進而趨於平衡；且須減少表面能以產生互相連結的現象<sup>[16]</sup>，藉此發展顆粒間較穩態的平衡模式，這過程即為燒結。

## 五、調濕原理與調濕建材

調濕原理可由調濕材料剖面圖來說明，如圖 1(a)所示。當環境相對濕度較高時，平衡含濕量會急速增加，調濕材料吸收環境中的水分，阻止環境相對濕度的增加；反之，當環境中相對濕度較低時，如圖 1(b)，平衡含濕量急速降低，調濕材料釋出水分於空氣中加濕，阻止環境相對濕度的降低<sup>[17,18]</sup>。



(a) 吸濕反應

(b) 放濕反應

圖 1 吸放濕示意圖

### 36 C 級煤灰調質廢觸媒燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究

台灣屬於亞熱帶海島型氣候，終年溫暖潮濕，炎熱的氣候與潮濕的水汽，容易造成黴菌的孳生，根據日本學者福水浩史研究，人體最舒適的相對濕度範圍為40~70%，如圖 2 所示。若室內相對濕度高於 70%時，因高溫高濕的環境，易使細菌、病毒及過敏原大肆蔓延，引發過敏、氣喘、香港腳、異位性皮膚炎等症狀；另，高濕度狀態會加速建材中的化學毒物釋放，污染室內空氣品質<sup>[20、21]</sup>；相反的，若相對濕度低於 40%，則可能產生靜電、皮膚乾燥不舒服。目前控制濕度的方法包括，太陽輻射照射、風的引導或植栽種植等，但成效慢而效果有限，因此市面上大多使用耗費能源的除濕機或加濕機以平衡室內的相對濕度。

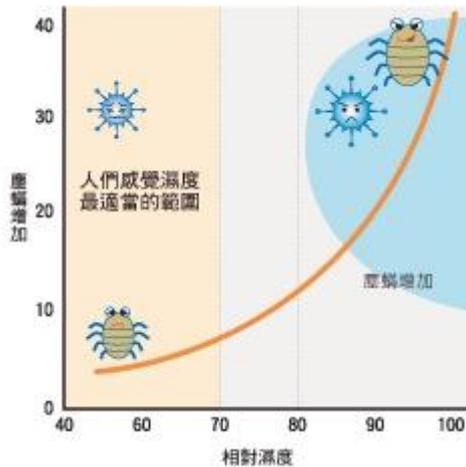


圖 2 相對濕度對人體之影響<sup>[19]</sup>

若能利用廢棄物製備具有調濕性能之建材，不僅可調節環境濕度並降低環境中各種污染，且無須耗費能源或使用其他設備，只要利用毛細現象原理，藉由材料本身的吸濕與放濕特性進行室內濕度調節(如圖 3(a)所示)。當室內相對濕度較高時，調濕材料能自動從較潮濕的環境中吸收水分並儲存於調濕材料內；當環境濕度較低時則釋放水分，達到控制濕度的目的<sup>[22、23]</sup>。圖 3(b)為普通矽藻土之調濕效果，其孔徑皆大於 50nm，由於孔洞特性不具調濕性能，故室內相對濕度變動時，普通矽藻土無法吸附環境中水分。至於普通活性炭之吸放濕性能如圖 3(c)所示，因普通活

性碳之孔徑小於 2nm，當室內相對濕度較高時，普通活性碳能快速吸收環境中的水分，但因孔徑太小，當室內相對濕度較低時，則較難釋出水分<sup>[24, 25]</sup>。

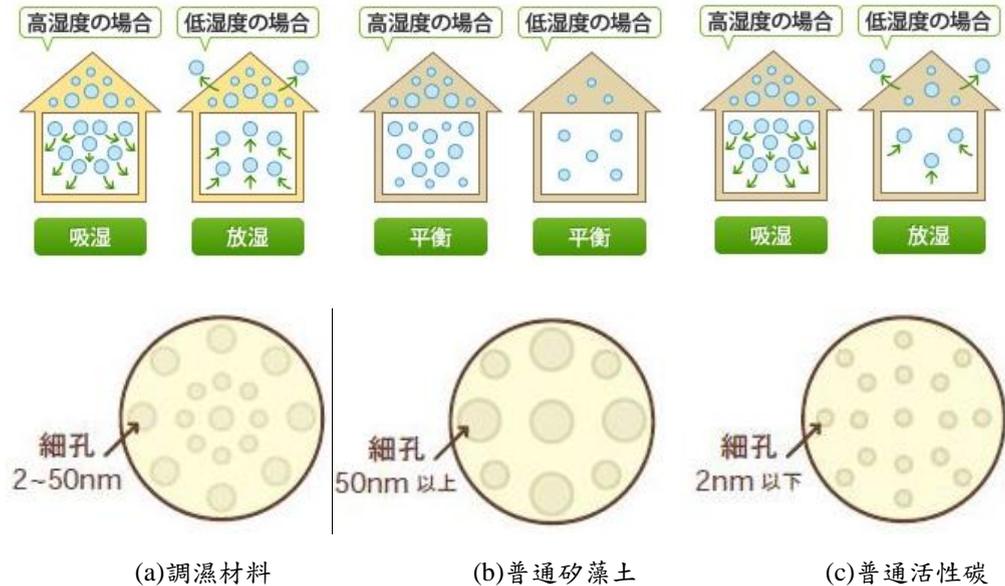


圖 3 調濕材料比較圖

## 六、實驗材料與方法

### 6.1 實驗材料

1. 煤灰：取自台灣北部某一火力發電廠。煤粉送進鍋爐燃燒後所產生的細緻顆粒狀粉末係伴隨燃燒所產生的煙氣，於煙囪排放前，由空氣污染防制設備所捕獲。本研究使用之材料屬 C 級煤灰。
2. 廢觸媒：採自台灣北部某一煉油廠。為石化產業石油裂解過程中，反應器內所裝填的加氫處理觸媒，因無法再生或遭毒化而歸入待回收處理的「廢觸媒」。

### 6.2 實驗方法

### 38 C 級煤灰調質廢觸媒燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究

本研究透過大量採樣(採集 100 公斤以上),經 105°C 烘乾 24 小時,再藉 0.149mm 見方(100mesh)之篩網過篩以平均粒徑,經充分混合後,可得製備調濕性多孔陶瓷之試樣材料。C 級煤灰與廢觸媒依環檢所公告之 NIEA R208.03C 標準方法,以 1:10 比例添加蒸餾水測得材料之 pH 值,並以比重瓶法測量材料於煤油中之比重;另使用篩分析法分析材料之粒徑分布。本研究分別使用 NIEA R355.00C 和 NIEA R201.14C 方法,以火焰式原子吸收光譜儀(FLAA)測定材料之重金屬總量及重金屬 TCLP 溶出濃度。

本研究使用廢觸媒以 0~40%等 4 種比例取代煤灰製備調濕性多孔陶瓷。首先以半乾式加壓成形法,將材料粉體加壓成型,並分別以 850°C、900°C、950°C 和 1,000°C 等 4 種溫度進行燒結。利用孔隙率及抗彎強度等實驗探討燒結體之巨觀特性,以及日本工業規格 JIS A JIS A 1275 及 JIS A 1270 檢測燒結體之平衡含水率及 48 小時吸放濕試驗以探討其調濕特性。

## 七、結果與討論

### 7.1 材料基本特性

本研究以煤灰為基材,廢觸媒做為取代材,各材料之基本物理性質分析結果如表 3 所示。依 NIEA R208.03C 公告標準方法,與蒸餾水固液比為 1:10 攪拌後,測得煤灰之 pH 值為 8.93,故本研究所使用之基材皆為偏鹼性的材料;另外,廢觸媒取代材 pH 值為 7.89;此外,經由比重瓶法測量煤灰及廢觸媒之比重分別為 2.01 及 1.49。各材料之粒徑分布累積曲線如圖 4 所示,煤灰之粒徑分布主要介於 90~15 $\mu$ m 之間,占整體之 97.81%;廢觸媒之粒徑主要分布於 200~20 $\mu$ m 之間,占整體之 99.77%,粒徑小於 37 $\mu$ m 者約占 12.86%。可見各材料之粒徑分布集中,主要分布於 20~100 $\mu$ m 之間。

表 3 材料之基本物理性質

	pH (1 : 10)	Specific Gravity	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Moisture (%)	Loss on Ignition (%)
Coal Fly Ash	8.93	2.01	1.58	0.05	0.02
Waste Catalyst	7.89	1.49	1.21	0.10	0.01

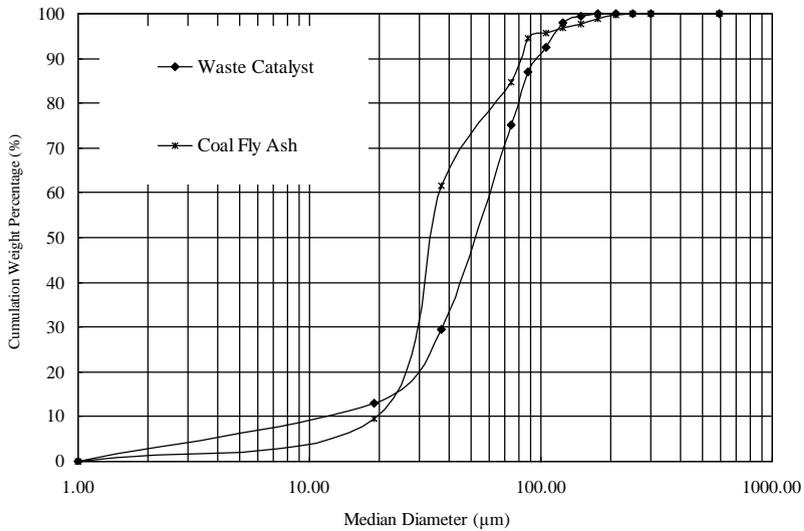


圖 4 煤灰與廢觸媒之粒徑分布分析

本研究使用 XRF 螢光分析儀測定材料之化學組成，分析結果如表 4 所示。C 級煤灰之化學主要組成元素為 SiO<sub>2</sub>，其含量為 47.41%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為 19.78%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為 7.73%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為 16.51%，因 CaO > 10% 故屬 C 級飛灰。在化學成分中，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O 及 K<sub>2</sub>O 常扮演著助熔劑的角色，如比較鹼金屬族的 Na<sub>2</sub>O 及 K<sub>2</sub>O 與鹼土金屬族的 CaO 及 MgO 之助熔效果。另外，廢觸媒主要成分為 SiO<sub>2</sub>(34.53%) 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(60.19%)，顯示廢觸媒之化學成分以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為主。

表 4 C 級煤灰與廢觸媒之化學組成

Chemical Composition	Coal Fly Ash	Waste Catalyst
SiO <sub>2</sub> (%)	47.41	34.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	19.78	60.19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7.73	0.94
CaO (%)	16.51	0.64
MgO (%)	4.02	0.58
SO <sub>3</sub> (%)	—	2.55
Na <sub>2</sub> O (%)	—	0.11
K <sub>2</sub> O (%)	1.32	0.05

## 7.2 重金屬總量與溶出濃度

本研究依 NIEA R317.10C 之微波輔助酸消化法，各種材料經微波消化後，以 FLAA 測定各材料之重金屬總量，重金屬總量分析結果如表 5 所示。由表 5 可知，煤灰重金屬總量之 Cu 和 Zn，含量分別為 42.86mg/kg 和 14.26mg/kg，廢觸媒之重金屬總量中之 Ni 及 Zn 含量分別 3,820mg/kg 及 88mg/kg。TCLP 溶出試驗結果則顯示，煤灰之 TCLP 溶出量之 Cu 為 0.09 mg/L，遠低於法規標準；另外，廢觸媒之重金屬總量之 Ni 為 1.83mg/L，而 Ni 屬有價金屬，目前台灣及美國對於 Ni 之溶出標準尚無規範，其餘之重金屬溶出量則皆符合法規標準，印證煤灰及廢觸媒皆具資源化之潛力。

表 5 C 級煤灰與廢觸媒之重金屬總量及 TCLP 溶出濃度

Total Metal (mg/kg)	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Ni
Coal Fly Ash	N.D.	N.D.	42.86	14.26	N.D.	N.D.
Waste Catalyst	N.D.	N.D.	N.D.	88.0	N.D.	3,820
TCLP (mg/L)	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Ni
Coal Fly Ash	N.D.	N.D.	0.09	N.D.	N.D.	N.D.
Waste Catalyst	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.83
Regulatory Limits	5	5	15	—	1	—

N.D.:Pb<0.015 mg/L; Cr<0.009 mg/L; Cd<0.021 mg/L;Zn<0.074 mg/L; Cu<0.089 mg/L; Ni<0.112 mg/L

### 7.3 燒結體之機械特性

圖 5 為燒結體之孔隙率分析。結果顯示，煤灰主要含有 MgO、CaO 和適量的 K<sub>2</sub>O，含有 MgO 與 CaO 有降低燒結溫度之助熔效果，在高溫燒結時，可形成黏滯流燒結機制大量填補孔隙，使燒結體孔隙率明顯降低。圖 5 為廢觸媒取代煤灰燒結體之孔隙率變化。當燒結溫度為 850°C 時，廢觸媒取代量為 10% 和 40% 的燒結體之孔隙率分別為 45.49% 和 52.63%；當燒結溫度升至 1,000°C 時，廢觸媒取代量為 5~20% 之燒結體，其孔隙率分別為 13.34%、22.54%、32.68% 和 38.67%，顯示燒結體之孔隙率隨廢觸媒取代量的提高而呈現增加趨勢。

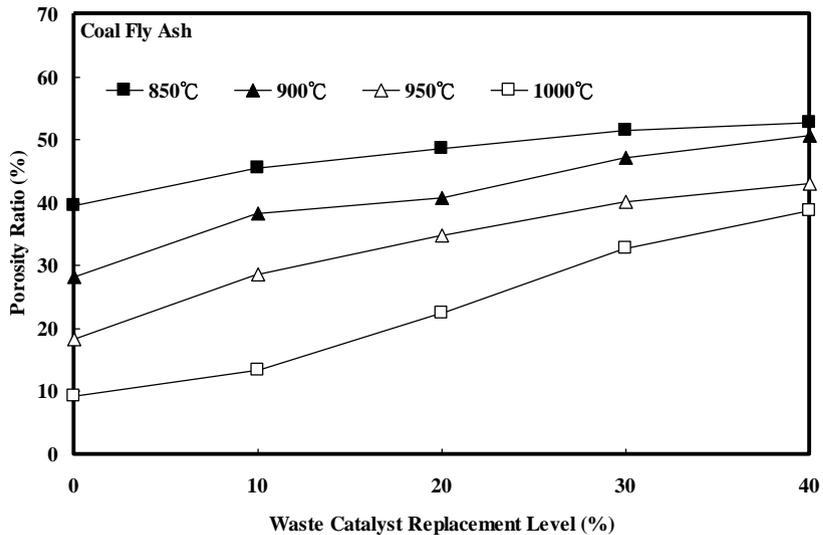


圖 5 燒結體之孔隙率

圖 6 為煤灰之抗彎強度變化。純煤灰燒結體之抗彎強度原由燒結溫度 850°C 的 58.49kgf/cm<sup>2</sup>；隨著燒結溫度提升至 950~1,000°C 時，由於含有 MgO、CaO 和適量的 K<sub>2</sub>O，有降低燒結溫度之助熔效果，致使燒結體結構趨於緻密化，燒結體之抗彎強度亦隨之提升至 243.18~337.49 kgf/cm<sup>2</sup>。圖 6 為廢觸媒取代煤灰之燒結體抗彎強度變化。由圖 8 中可知，當燒結溫度為 850°C 時，廢觸媒取代量為 10% 和 40% 之燒結體抗彎強度分別為 4.39 和 1.32kgf/cm<sup>2</sup>，顯示抗彎強度隨取代量提升而下降；當燒結溫度為 1,000°C 時，廢觸媒取代量為 10~40% 之燒結體，其抗彎強度分別為 289.99、203.49、113.37 和 76.49kgf/cm<sup>2</sup>，反映隨燒結溫度之提升，試體內部結構受到熱力影響而趨於緻密，進而增加燒結體之抗彎強度。

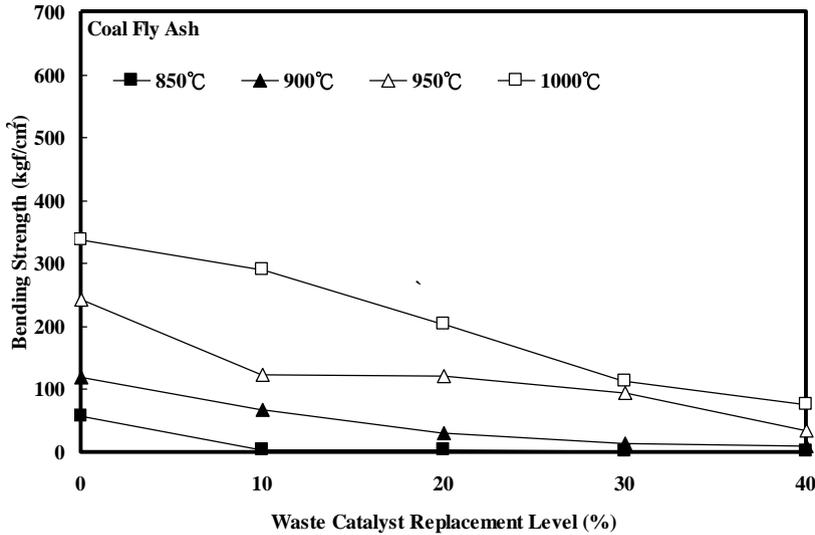


圖 6 燒結體之抗彎強度

#### 7.4 燒結體之平衡含水率曲線與調濕性能

圖 7 為廢觸媒取代煤灰燒結體之平衡含水率吸放濕曲線圖。當燒結溫度為 850°C 時，廢觸媒取代量為 40% 之燒結體於相對濕度為 95% 下，有最高平衡含水率為 4.03kg/kg，水蒸氣吸脫附曲線顯示出遲滯環；當燒結溫度提高達 1,000°C 時，廢觸媒取代量為 40% 之燒結體於相對濕度為 95% 下之平衡含水率降低至 3.63kg/kg。另外，由圖得知廢觸媒取代煤灰燒結體於相對濕度大於 55% 時之平衡含水率明顯提升，當燒結溫度為 1,000°C 時，各取代量之平衡含水率皆高於純煤灰燒結體。根據 Kelvin Equation 毛細凝聚理論，控制相對濕度 75~85% 所對應的水蒸氣凝聚與蒸散的孔洞直徑介於 7.48~13.2nm，而 85~95% 的孔洞直徑為 13.2~42nm，由 BET 孔洞分析可知，廢觸媒取代煤灰燒結體孔洞直徑分別介於 10.56~19.48nm，顯示廢觸媒燒結體對中和高濕度區域有明顯的吸附量。

#### 44 C 級煤灰調質廢觸媒燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究

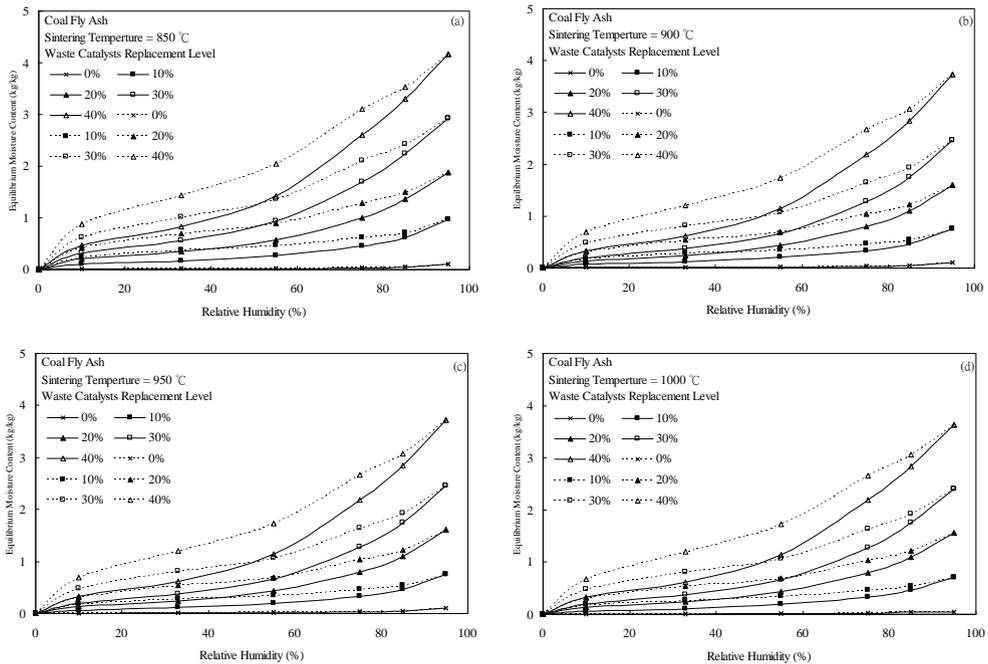


圖 7 燒結體之平衡含水率吸放濕曲線

圖 8 為廢觸媒取代煤灰燒結體，於不同燒結溫度下，進行 48 小時之連續吸放濕試驗結果。當燒結溫度為 850°C 時，廢觸媒不同取代量為 10~40% 之燒結體，於 24 小時之吸濕量介於 27.02~100.83g/cm<sup>2</sup> 之間，遠大於純煤灰燒結體的 1.48g/cm<sup>2</sup>。當燒結溫度上升至 950°C 時，燒結體於 24 小時之吸濕量降至 22.71~83.77g/cm<sup>2</sup> 之間，顯示燒結體之吸脫濕量隨廢觸媒取代量的增加而提升。成因或是當燒結溫度為 950°C 時，由於試體內部結構受到熱力影響而趨於緻密，故隨燒結溫度提高而導致燒結體內部之孔容積呈現下降趨勢，造成純煤灰燒結體之吸濕量介於 14.37~75.44g/cm<sup>2</sup> 之間。

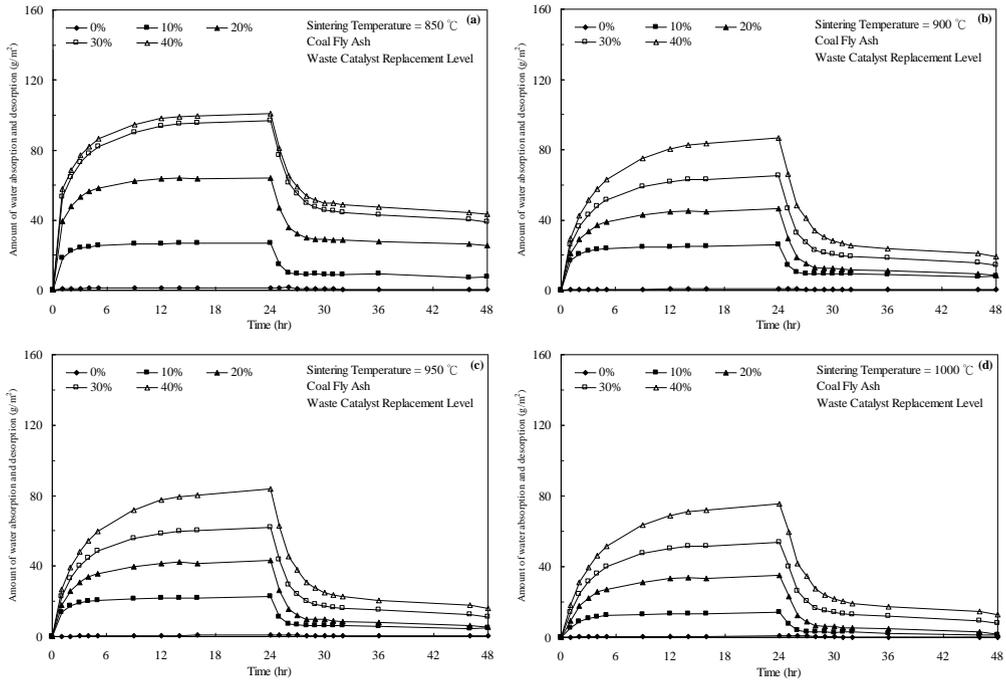


圖 8 燒結體之 48 小時連續吸放濕試驗

## 八、應用範圍及成本分析

調濕建材的研究與發展趨勢可分為，增加調濕效率、加快吸放濕速度、調濕範圍可控制性與自調濕性能方向。考量台灣四面環海，終年多半高溫高濕，建築物為保持長久的使用性，必須著重具調節濕氣之建材使用比例。目前調濕性多孔陶瓷大多鋪設於室內牆壁壁面上(如圖 9 所示)，如客廳、臥室或浴室之天花板及走廊等，並隨壁面基底材質不同，調節濕氣之建材所需條件亦異，相關條件如表 11 所示。



圖 9 調濕性多孔陶瓷應用

表 11 調濕性多孔陶瓷應用條件

基底材料	條件
石膏板	厚度 9.5mm 以上
普通合成板、結構用合成板	厚度 9.0mm
矽酸鈣板	厚度 6mm 以上
砂漿	需使用輔助材料 粘接劑進行施工
混凝土	需使用輔助材料 粘接劑進行施工

緩和與適應氣候變遷是全球人類所必須共同面對的議題，從地球環境生態的面向來看，在滿足民眾生活舒適與確保經濟發展需求下，再生能源應用、能源有效利用、耗能系統效能提升等，無疑是全球政府在制定經濟發展政策時的最高指導原則。目前台灣對於調濕性多孔陶瓷的研究較少，大部分學者研究粉末狀的調濕材料，或將調濕材料混入水泥或石膏中，而研究調濕功能性者，現今僅日本實際將調

濕材料應用於室內建材中，台灣目前所使用的調濕建材則皆仰賴日本進口。對照日本市售價格約為 2,965~3,032 元/m<sup>2</sup>，台灣調濕材料仰賴日本進口，故市售價格較高，約為 3,941 元/m<sup>2</sup>，若將廢棄物資源化再利用於調濕性多孔陶瓷時，其成本約為 775 元/m<sup>2</sup>，節約成本效果明顯；就經濟面向而言，因台灣屬於亞熱帶海島型氣候，終年溫暖潮濕，調整濕度之相關設備需求高，未來如能廢棄物再利用製成調濕性多孔陶瓷，除可減少掩埋場及能源使用量外，更可減少環境中的細菌、病菌、黴菌及寄生蟲總數，降低呼吸道疾病感染風險，顯見日後調濕材料將為生活環境中不可或缺的一環。

## 九、結論

本研究利用煤灰和廢觸媒以不同取代比例利用製坯燒結技術燒製成多孔調濕性材料陶瓷。本研究結果歸納如下：隨燒結溫度之提升，試體內部結構受到熱力影響而趨於緻密化，燒結體之抗彎強度則隨燒結溫度提升而增加，尤以廢觸媒取代量 10~20% 燒結體之抗彎強度增加最為明顯。廢觸媒隨取代量的增加可明顯提高燒結體之平衡含水率。燒結體經燒結處理會破壞孔洞結構，並導致遲滯環之範圍變窄及降低平衡含水率，而燒結體之平衡含水率隨燒結溫度的提高而下降。廢觸媒取代量為 40% 之燒結體且在相對濕度為 95% 時，其平衡含水率斜率呈明顯上升之趨勢。廢觸媒取代煤灰之燒結體在 3 小時之內大量且快速的吸附，10~12 小時之間的吸附速度則較緩慢。經由 24 小時平衡含水率與 48 小時連續吸放濕試驗分析結果，廢觸媒取代煤灰於較高的燒結溫度仍保留良好的調濕性能。綜上可知以廢觸媒取代煤灰燒結體，廢觸媒取代量為 20~30%，於燒結溫度為 950~1,000°C 之燒結體皆符合陶質壁磚規範之抗彎強度與調濕建材規範之標準。

## 十、參考文獻

1. 陳重叡，火力發電廠不同性質粉煤對燃燒效率之影響探討-以台中電廠為例，逢甲大學環境工程學系博士論文，逢甲大學 (2009)。

#### 48 C 級煤灰調質廢觸媒燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究

2. 胡興中，A 型沸石合成動力學研究，清華大學環境工程學系博士論文，清華大學 (1994)。
3. 黃南星，廢觸媒添加於高性能混凝土對耐久性之影響，雲林科技大學營建工程系碩士論文，雲林科技大學 (1990)。
4. 陳秀娘，石油工業廢觸媒的波索蘭活性評估與改質磺化酚醛樹脂之合成，國立臺灣師範大學碩士論文，臺灣師範大學 (2002)。
5. 林建榮，燃煤飛灰去除水中污染物行為之研究，成功大學環境工程學系博士論文，成功大學 (2000)。
6. American coal ash association, <http://www.acaa-usa.org/>, (2015).
7. 行政院環境保護署，<http://www.epa.gov.tw/> (2015)。
8. 鄭少翔，燃煤飛灰與玻璃廢棄物燒製輕質骨材之研究，東海大學環境科學與工程學系碩士論文，東海大學 (2012)。
9. 曾鑿生，石油工業廢觸媒作為波索蘭材料之可行性研究，國立臺灣師範大學碩士論文，臺灣師範大學 (2001)。
10. Basegio, T., Berutti, F., Bernardes, A., Bergmann C. P., Environmental and Technical Aspects of the Utilization of Tannery Sludge as a Raw Material for Clay Products., J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 22, pp.2251-2259(2002).
11. 林有銘，觸媒與石油煉製及石油化學工業 (1991)。
12. Isobe T., Kameshima Y., Nakajima Akira., Okada K., Hotta Y., Gas permeability and mechanical properties of porous alumina ceramics with unidirectionally aligned pores., J. Eur. Ceram. Soc., 27, 53-59 (2007).

13. Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J., Handbook of Heterogeneous Catalysis , Vol.3, VCH D-69451 Weinheim, 1508 (1997).
14. 張毓舜，下水污泥焚化灰渣燒結特性之研究，國立中央大學環境工程所碩士論文，國立中央大學 (1999)。
15. 伍祖聰、黃錦鐘，粉末冶金，高立圖書有限公司 (1996)。
16. 汪建民編，『陶瓷技術手冊』，中華民國產業技術發展促進會/粉末冶金協會 (1994)。
17. Anthony V. Arundel, Elia M. Sterling, Judith H. Biggin, Theodor D. Sterling, Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments, Environmental Health Perspectives, 65, 351-361 (1986).
18. El-Sabaawi M., D. C. T. Pei, Moisture isotherms of hygroscopic porous solids, Ind. Eng. Chem. Fundamen., 16[3], 321-326 (1977).
19. Lixil Japan, <http://www.lixil.com.tw/>, (2015).
20. 福水浩史、橫山茂，アロフェン系調湿建材に関する研究—実住宅における調湿性能評価—，環境資源工学，第 52 期，第 59-64 頁(2005)。
21. 福水浩史、橫山茂、北村和子，アロフェン系調湿建材に関する研究—調湿建材の材料設計—，環境資源工学，第 52 期，第 128~135 頁 (2005)。
22. 王吉會、王志偉，調濕材料及其發展概況，科技資訊，第 25 期 (2007)。
23. 許明發、郭文雄，複合材料纖維學，全威圖書有限公司 (2002)。
24. 王松永編，木材物理學，國立編譯館出版，第 35~58 頁 (1986)。
25. 王松永編，木質環境科學，國立編譯館出版 (2003)。