

量產製備之 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑應用於高溫固態脫硫研究

簡郁展¹ 簡綉雲² 邱耀平^{3*}

摘 要

氣化技術使用氣化爐將固態燃料轉化為合成氣(syngas)，在轉化過程中產生的污染物則經由淨化程序一併去除；而獲得之潔淨氣體產物可供作後續多元應用，如複循環發電、轉化成化工產品、發展氫能源等。本文撰述重點為固態脫硫技術，希望能提升系統節能與程序優化。煤炭氣化後產生的硫化物以硫化氫(H_2S)與硫化羰(COS)為主要成分。目前中高溫脫硫技術採用具再生特性的金屬氧化物作為吸附劑，進行硫化物的吸附與再生程序；相較於低溫洗滌方式，除了避免廢水二次污染問題，可有較佳的系統熱效率，還具備再生的成本優勢。本研究團隊已成功以濕式含浸法製備 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑，並於實驗級反應器中反覆試驗展現良好效能，遂進行吸附劑大規模化生產。經團隊研發量產機台所製備之吸附劑，其氧化物負載比例為20.14%，比表面積為 $192 \text{ m}^2/\text{g}$ ，硫吸附容量為 $6.81 \text{ g-S}/100 \text{ g sorbent}$ ，其物性特徵與化學性能測試結果，皆與實驗室規模所合成之吸附劑特性相似。另亦透過多次再生循環試驗，展現其良好吸附穩定性，十次循環穩定性皆能維持90%以上。透過該大規模生產程序吸附劑除保有原優良脫硫品質，其具有穩定供貨量、縮短製備時間及降低製程成本等優點，使團隊自行研發吸附劑的發展更具競爭優勢，未來亦可推廣至既有的發電廠、化工廠或煉鋼廠等產業使用。

關鍵詞：吸附劑、硫化氫、貫穿時間、吸附容量

1. 前 言

火焰(燃燒)將大多數人們帶離了黑暗，但不可避免地帶來環境問題。碳基燃料在二十一世紀仍是人類社會不可或缺的能源供應選項，但若直接燃燒會排放大量的污染物，如 NO_x 、 SO_x 、懸浮微粒等，向來被視為環境衝擊的主要元兇；因此，彼等之潔淨利用實為一項必須高度優先關注之議題。政府在2016年宣示「520能源轉型」，規劃2025年的目標是具有更多的

「綠色」能源。在未來十年，再生能源將提升至總發電量的20%；更具體地，固態燃料之直接利用將大幅減少，但仍是不可缺少的選項，而氣態燃料將成為能源利用之主流選項。比較各類型發電技術的性能顯示，燃氣複循環之污染排放與系統熱效率皆優於燃煤蒸汽動力廠。最佳可行性的污染控制技術(Best Achievable Control Technology, BACT)概念展現環境友好方面的卓越性能(Chyou, 2016)。氣化技術使用氣化爐將固態燃料轉化為合成氣(syngas)，在轉

¹核能研究所化學組 前助理研發師

²核能研究所化學組 研究助理

³核能研究所化學組 簡任研究員兼能源科專計畫主持人

*通訊作者, 電話: 03-471 1400 #5050, E-mail: ypchyou@iner.gov.tw

收到日期: 2017年03月01日

修正日期: 2017年05月02日

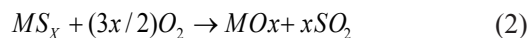
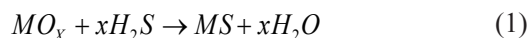
接受日期: 2017年05月15日

化過程中產生的污染物則經由淨化程序一併去除，而獲得之潔淨氣體產物可供作後續多元應用，如複循環發電、轉化成化工產品、發展氫能源等。換言之，「綠色」能源技術同時滿足永續發展所需的環境保護和經濟發展需求，亦協助人們更靠近「地球村」的理念；因此，氣化技術是潔淨能源技術中一個重要的選擇，其將成為碳基能源潔淨利用的關鍵解鎖。

氣化技術是將固態燃料，如煤炭、生質物等，轉化為合成氣，其操作溫度介於800°C至1,800°C範圍之間；因為使用的進料中通常都含有N、S、P等物質，在轉化的過程中不免產出氮化物、硫化物或是懸浮微粒等污染源。若以傳統的淨化工藝去除硫污染物，則須將氣體降溫至室溫再進行除硫程序；而隨後依不同的應用領域再次加熱至操作溫度，其可用能之損耗相當可觀。因此，為了提高合成氣應用的整體效率，故將中高溫脫硫淨化技術定為研發方向。本文撰述重點為固態脫硫技術，希望能提升系統節能與程序優化。

固態燃料在氣化過程中所產生的硫化物包含硫化氫(H₂S)、硫化羰(COS)和二硫化碳(CS₂)等成分。傳統濕式脫硫技術以有機溶劑洗滌來去除硫化物，雖可重複使用，但效率會逐漸降低，而且有廢液二次污染問題(黃亮維及邱耀平，2013a)。而本研究撰述於乾式固態脫硫技術，此技術至今已被研究多年，固態吸附劑以採用過渡金屬氧化物為主(Westmoreland and Harrison, 1976)，其中氧化鐵取得容易，是最早被進行研究的材料，其具有極快的吸附反應速率、以及高的吸附容量，極具發展價值(Zhang *et al.*, 2003)。固態脫硫反應與再生循環機制分

別如反應式(1)與(2)所示(Vamvuka *et al.*, 2004)：



吸附劑應用於工業上需具備良好的反應動力與熱力學特性、限度內的硫化物排放濃度、硫化物吸附容量、化學穩定再生特性及機械強度抗磨耗特性等(Atimtay, 2001)。在技術與成本考量下，本團隊已成功用濕式含浸法製備氧化鋅、氧化錳及氧化鐵系吸附劑，如圖1所示，其具有製程簡單、設備便宜及材料成本低等優點(黃亮維及邱耀平，2013b)，於實驗級反應器中反覆試驗展現良好效能；最後基於取得容易與高吸附容量特性，選用氧化鐵吸附劑作為研究對象。為響應團隊未來整合氣化、氣體淨化與終端應用之一體化整合驗證系統執行方針，遂進行吸附劑大規模化生產，以符合大型脫硫反應器需求。

2. 實驗方法

2.1 實驗室規模脫硫吸附劑製備

本研究以濕式含浸法製備Fe₂O₃/SiO₂脫硫吸附劑，氧化鐵前驅物選用硝酸鐵(Alfa-Aesar, Fe(NO₃)₃ · 9H₂O, 99.5%)，另以中孔徑30~50 mesh二氧化矽(Alfa-Aesar, SiO₂, 95%)作為基材擔體，藉以提高金屬氧化物在反應時的熱穩定性，增加比表面積、孔隙率與機械強度，減少因高溫重複性操作所造成的團聚現象(Oğuz *et al.*, 2009；朱敬平，2011)。首先取用固定克數Fe(NO₃)₃ · 9H₂O作為前驅物，以適量溶劑溶

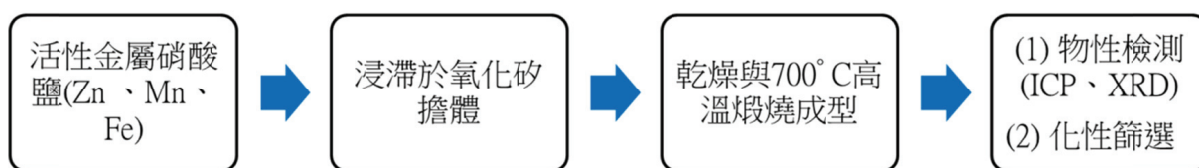


圖1 實驗室規模合成脫硫吸附劑材料製備與物/化性分析流程
資料來源：黃亮維及邱耀平，2013b

解。將該溶液潤濕於SiO₂擔體上，分別置於室溫與80°C下乾燥一天，而後於高溫700°C煅燒6小時，獲得20wt% Fe₂O₃/SiO₂脫硫吸附劑，如圖2所示。



圖2 實驗室規模合成20wt% Fe₂O₃/SiO₂脫硫吸附劑
資料來源：本研究繪製

2.2 量產機台

吸附劑量產機台由溶液攪拌槽、粉末攪拌槽、液體輸送幫浦、排風設備及控制面板等組成，如圖3所示。首先將Fe(NO₃)₃•9H₂O與DI water置入溶液攪拌槽中；SiO₂擔體置於粉末攪拌槽，待溶液均勻混合後，啟動液體輸送幫浦，將溶液導入粉體攪拌槽中含浸，之後將粉末攪拌槽加熱系統開啟乾燥，取出樣品置973 K高溫爐中煅燒，即獲得吸附劑。此機台每次生產量約為0.5 kg，本研究另針對粉體攪拌速度及液體輸送速度進行參數探討，如表1所示，該參數選擇依據則因應設備控制之上下限，取其中4點進行初期測試，藉以尋求大規模生產之最佳操作參數。

2.3 材料性能分析

物理性能分析包含以感應耦合電漿原子發射光譜分析儀(inductively-coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-AES)測量材料金屬元素含量、表面特性分析儀測試吸附劑並以BET (Brunauer-Emmett-Teller)法分析表面積變化、X



圖3 大規模吸附劑生產機台
資料來源：本研究繪製

表1 粉體攪拌速度及液體輸送速度參數設定

粉體攪拌速度(rpm)	30	60	90	120
液體輸送速度(mL/min)	14	50	85	120

資料來源：本研究繪製

光繞射儀(X-ray diffractometer, XRD)鑑定材料結晶結構及掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察表面微觀結構。

脫硫效能分析分別對吸附劑進行單次吸附反應及多次吸附-再生循環性能測試，藉以了解吸附劑反應性能及其穩定性。脫硫效能分析反應程序設計如圖4所示，含合成氣模擬裝置、固定床反應器及後端的氣體組成分析設施。合成氣氣氛組成以前期團隊研究發表之最佳氣氛條件進行(Huang *et al.*, 2012)，如表2所示；吸附劑取1.5 g填充於固定床反應器中，吸脫附反應溫度設於973 K；後端的氣體組成分析設施使用氣相層析儀(Agilent Technologies 7890B Gas Chromatography, GC)進行硫化物濃度分析，硫檢測器採用火焰光度偵測器(Flame Photometric Detector, FPD)，搭配內建軟體取得進氣濃度訊

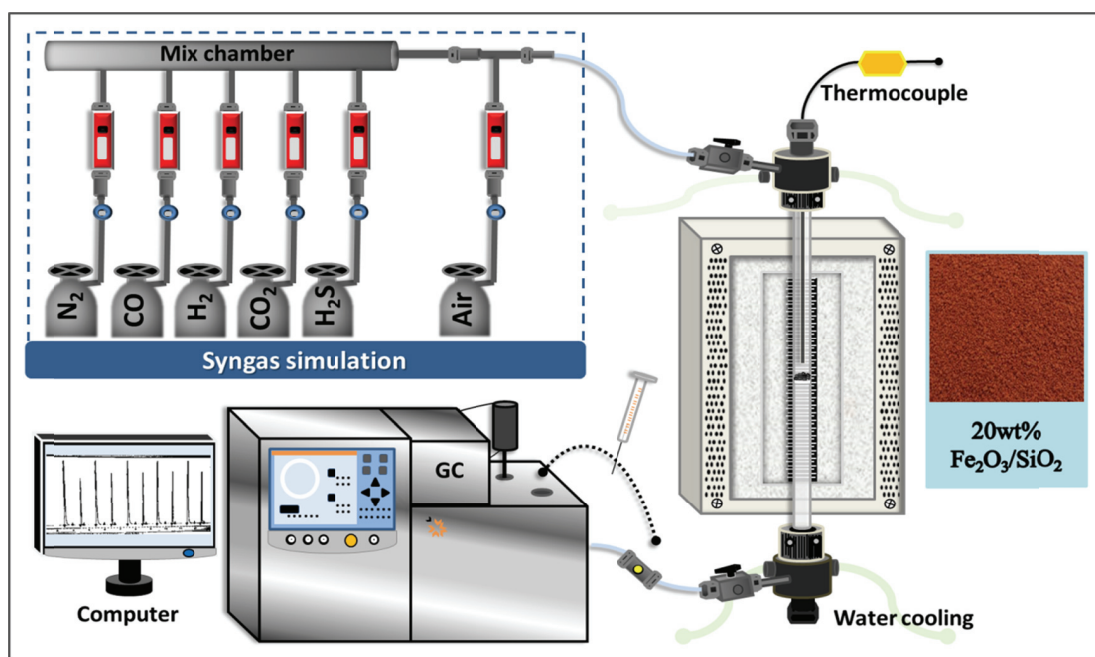


圖4 脫硫分析反應程序
資料來源：本研究繪製

表2 脫硫反應模擬合成氣組成

	進口氣體組成					總氣體流速
脫硫反應	CO	H ₂	H ₂ S	CO ₂	N ₂	200 mL/min
	30%	10%	1%	5%	balance	
再生反應	Air					

資料來源：本研究繪製

號，繪製成硫化貫穿曲線圖，用以評估出口濃度與計算硫吸附容量。

2.4 硫化物吸附容量

硫化物吸附容量是評估吸附劑化學效能的指標，文獻中硫化氫出口濃度除以入口濃度(1% H₂S)約0.03至0.17，本單位設定於0.05，即為500 ppm為貫穿點(breakthrough point)，用於評估吸附劑再生使用的基準點。吸附容量定義指的是在出口濃度達貫穿點時，吸附劑表面吸附硫化物所占的重量百分比，單位用 g-S/100g sorbent表示。計算硫容量的公式(3)如下(Sánchez *et al.*, 2005)：

$$M_{H_2S} = \left(MW_{H_2S} \times \frac{PF_{gas} y_{H_2S}}{R_g T} \right) \times t_s \quad (3)$$

式中 M_{H_2S} ：脫硫劑中實際捕捉硫化氫之含量、 MW_{H_2S} ：硫化氫之分子量、 P ：絕對壓力(kg/cm²)、 F_{gas} ：氣體體積流量(mL/min)、 y_{gas} ：進氣 H₂S 莫耳分率、 R_g ：理想氣體常數、 T ：操作溫度(K)、 t_s ：實際貫穿時間(min) (當貫穿曲線中硫化氫濃度達到500 ppm之時間)。

3. 結果與討論

3.1 量產參數探討

本研究首先針對量產製程參數(粉體攪拌速度和液體輸送速度)進行探討。參數選擇粉體攪拌轉速選用30、60、90及120 rpm進行測試，結果呈現於表3；可以看出回收量由轉速30 rpm的522 g下降至120 rpm的375 g，這是因當粉體

表3 粉體攪拌速度與總回收量之關係

粉體攪拌速度(rpm)	30	60	90	120
總粉體回收量(g)	522	474	441	375

資料來源：本研究繪製

攪拌速度越快，與桶槽磨耗頻率增加，造成吸附劑顆粒細化，較不易回收，故選用低轉速 30 rpm做為後續粉體攪拌速度參數。另以 14、50、85及120 mL/min之液體輸送速度測試，結果顯示於表4，14 mL/min速度慢，相較於其他輸送速度能使擔體與溶液含浸較均勻，但所需時間成本較高；而滴流速度120 mL/min，雖含浸反應較快，但均勻度、化學性能與其他速度相比差異極小，又所需時間成本較低，故選用此參數。綜合以上之結果，最佳參數以粉體攪拌速度30 rpm及120 mL/min之液體輸送速度進行大規模生產(如圖5)。

表4 液體輸送速度與總時間成本之關係

液體輸送速度(mL/min)	14	50	85	120
總時間成本(min)	43	12	7	5

資料來源：本研究繪製



圖5 大規模生產製程
資料來源：本研究繪製

3.2 吸附劑物性分析

實驗室規模與量產機台所製備吸附劑皆經過高溫973 K煅燒6小時之XRD分析結果如圖6所示，與標準JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) Card比對得知吸附劑為α- Fe₂O₃晶相結構組成，且經高溫煅燒後所得Fe₂O₃/SiO₂吸附劑並未有其他雜相生成。

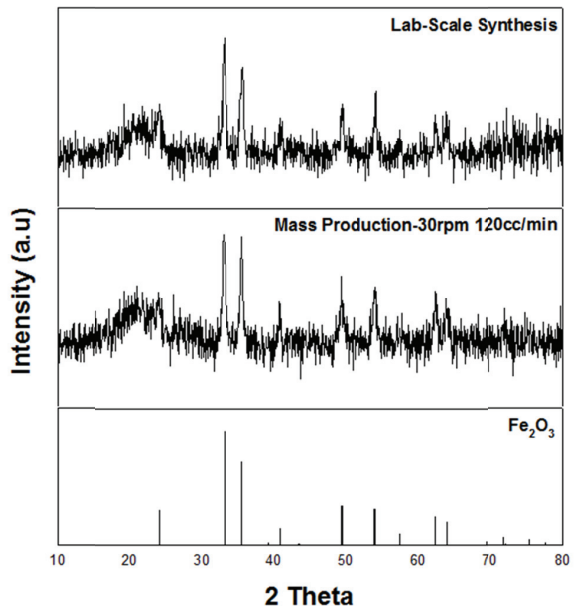


圖6 高溫煅燒後的Fe₂O₃/SiO₂吸附劑XRD圖譜
資料來源：本研究繪製

表5顯示ICP-AES分析結果，從ICP-AES數據可以看出實驗室規模生產與量產機台所製備的吸附劑之真實氧化物負載比例與理論計算值相當，分別為19.38%及20.14%，此結果也說明使用濕式含浸法不易造成活性金屬損失的優點。表面特性BET分析結果如表6所示，因擔體採用二氧化矽多孔隙材料，具有高的比表面積，實驗室規模及量產製備之吸附劑分別為197 m²/g及192 m²/g。另外由孔隙尺寸大小分布，介於2 nm至50 nm屬於中孔隙材料。

表5 20wt%-Fe₂O₃/SiO₂吸附劑ICP-AES分析結果

ICP-AES (fresh)	Lab-scale synthesis	Mass-production Process
Effective metal oxide (%)	19.38	20.14

資料來源：本研究繪製

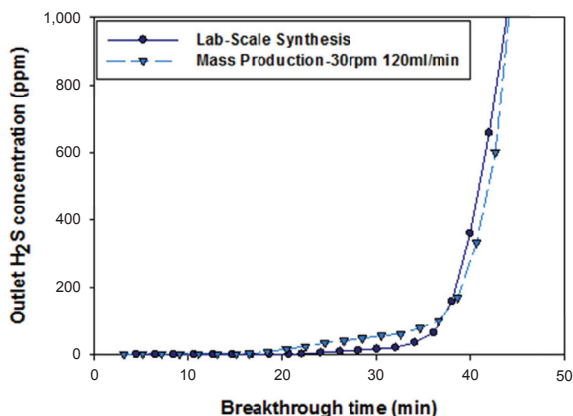
表6 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑比表面積與孔隙結構結果

BET (fresh)	Lab-scale synthesis	Mass-production Process
Surface area (m^2/g)	197	192
Pore volume (cm^3/g)	0.69	0.77
Pore size (\AA)	123.5	140.2

資料來源：本研究繪製

3.3 吸附劑化性分析

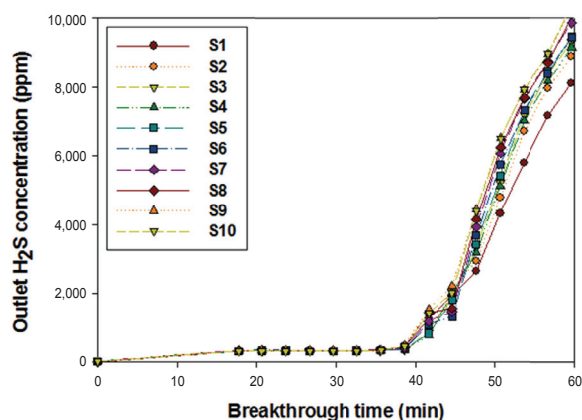
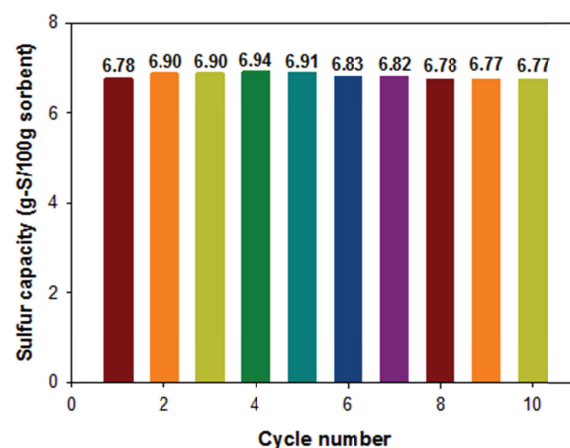
實驗室規模及量產製備的20wt%- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑初步以表2之模擬合成氣、溫度於973 K進行單次化性測試，驗證脫硫效能，結果如圖7所示。在定義硫化氫500 ppm為貫穿濃度下，貫穿時間分別為38及39 min，將貫穿時間帶入公式(3)中計算，則硫吸附容量分別為6.63與6.81 g-S/100g sorbent，與計算理論值8 g-S/100 g sorbent相近。

圖7 實驗室規模製備及大規模生產的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑固態脫硫貫穿曲線
資料來源：本研究繪製

綜合上述結果，說明於粉體攪拌速度30 rpm及液體輸送速度120 mL/min條件下所量產的20wt%- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑，具有良好的物理性能，且能與實驗室規模製備的吸附劑效能相似，另外吸附劑產量可達單次0.5 kg，穩定提供未來大型反應器的脫硫試驗需求。

3.4 脫硫-再生循環反應

針對量產製備之20wt%- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑進行十次脫硫-再生循環反應，脫硫反應條件選擇的合成氣氛與表2相同；再生條件氣氛則為空氣(含21% O_2)。另外脫硫與再生反應溫度皆在973 K下進行。貫穿曲線如圖8所示，可觀察到量產的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑十次循環在反應時間40 min前，其出口硫化物濃度皆能控制於300 ppm附近。另外曲線隨循環次數的增加斜率趨陡，說明吸附劑效能逐漸下降，但對於整體趨勢差異不大。為了更有效表達吸附劑的穩定性特徵，由圖9循環次數與硫吸附容量之關係圖可以看出，變動範圍僅為平均值 $\pm 1.5\%$ ，且無明顯吸附劑性能衰減現象，展現其相當優良穩定性。

圖8 十次再生循環固態脫硫貫穿曲線
資料來源：本研究繪製圖9 十次再生循環與硫載量之關係圖
資料來源：本研究繪製

3.5 反應後吸附劑物性分析

一次吸附反應後吸附劑之XRD分析如圖10所示，主要訊號硫化鐵(FeS)晶相；十次脫硫-再生循環反應後吸附劑之XRD分析如圖11所示，再生後吸附劑晶相結構再度轉變回α- Fe₂O₃晶相。一般常見的副反應如反應式(4)與(5)，由圖10與圖11中可發現經硫化與再生反應後並無觀察到任何還原態或硫氧化物存在，表示無副反應的發生。證實吸附劑能夠承受合成氣的還原性攻擊而不失去活性，而於高溫下進行再生反應有助於減少硫酸鹽雜質的生成(Perry and Chilton, 1973)。

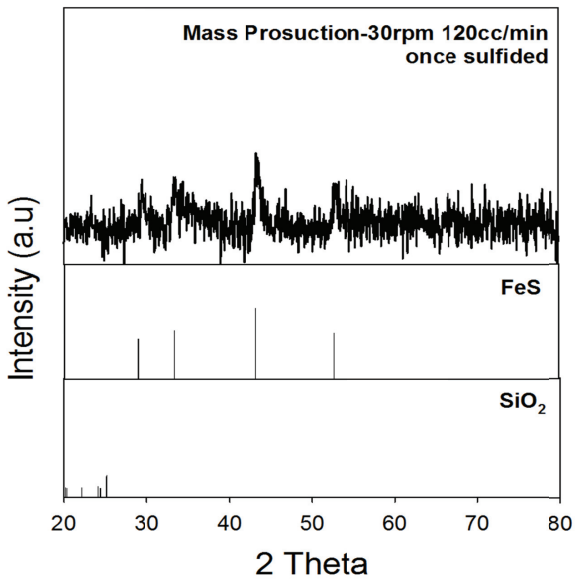
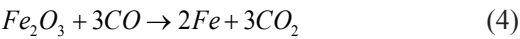


圖10 Fe₂O₃/SiO₂吸附劑一次吸附反應後XRD晶相結構變化
資料來源：本研究繪製

脫硫-再生循環測試後的吸附劑表面微觀結構討論，由SEM觀測結果圖12顯示，Fe₂O₃/SiO₂吸附劑為不規則長條型，且量產製備的吸附劑經過多次循環反應後，表面微觀結構變得較緻密平整。若進一步對照BET分析結果表7，可以觀察到經反應後，比表面積明顯從吸192下降至60 m²/g；而孔隙體積也從0.77下降至0.35 cm³/g，

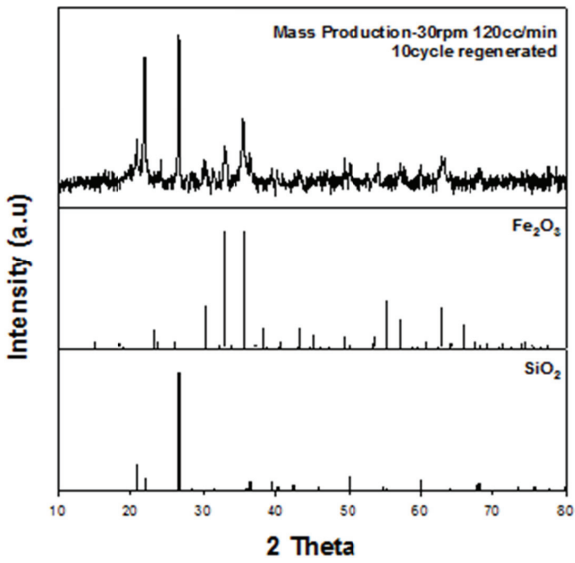


圖11 Fe₂O₃/SiO₂吸附劑十次再生循環反應後XRD晶相結構變化
資料來源：本研究繪製

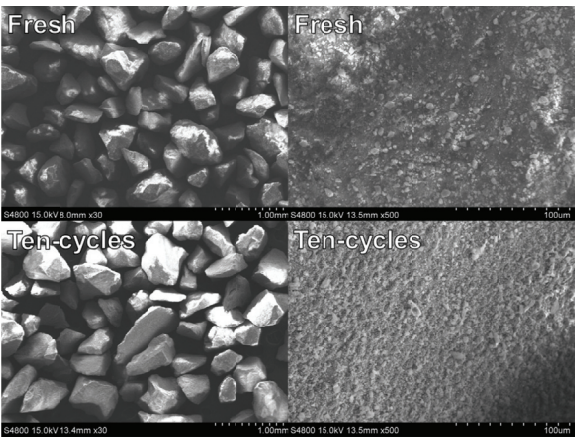


圖12 量產製備Fe₂O₃/SiO₂吸附劑循環反應前後於SEM下表面微觀結構
資料來源：本研究繪製

表7 循環測試反應前後後BET分析

Mass-production Process	Fresh	Ten-cycles
Surface area (m ² /g)	192	60
Pore volume (cm ³ /g)	0.77	0.35
Pore size (Å)	140.2	259.6

資料來源：本研究繪製

這是因為長時間於高溫下反應，吸附劑的多孔性SiO₂擔體發生燒結現象，另可由圖11中觀察擔體SiO₂晶相明顯增強，這使得孔隙體積下降減少可吸附比表面積，其結果與表面特性微結

構互相呼應。在本研究十次循環試驗中尚無觀察到微結構變化對於吸附劑化性之影響，未來可透過更長時間的循環測試，進行吸附劑機械強度的探討。

4. 結 論

本研究已成功使用濕式含浸法大規模生產 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 吸附劑，最佳量產參數為粉體攪拌速度 30 rpm 及 120 mL/min 之液體輸送速度，其物性特徵與化學性能測試結果皆與實驗室規模合成之吸附劑相似，顯示量產製程的精確性。吸附劑在十次脫硫-再生循環試驗中，展現其良好吸附穩定性，硫吸附容量皆能維持於起始狀態之 90% 以上，且無明顯劣化現象產生。透過大規模生產程序吸附劑除保有原優良脫硫品質，其具有穩定供貨量、縮短製備時間及降低製程成本等優點，使團隊自行研發吸附劑的發展更具競爭優勢，未來亦可推廣至既有的發電廠、化工廠或煉鋼廠等產業使用。

參考文獻

黃亮維、邱耀平，2013a，煤炭氣化中高溫脫硫程序發展簡介，化工技術，第21卷(第3期)，142-157頁。

黃亮維、邱耀平，2013b，以氧化矽基吸附劑捕獲先進燃料轉化程序中硫化物的研究，第三十一屆臺灣觸媒與反應工程研討會，國立成功大學，臺南，六月27~28日。

朱敬平，2011，化學迴圈燃燒技術發展概況簡介，中興工程季刊，第110期，63-72頁。

Atimtay, A. T., 2001, Cleaner energy production with integrated gasification combined cycle systems and use of metal oxide sorbents for H_2S cleanup from coal gas, Clean Products

and Processes, 2(4), p. 197-208.

Chyou, Y. P., 2016, Strategic planning on clean utilization of coal complied with domestic energy transition, Journal of the Taiwan Energy, 3(4), p.417-434.

Huang, C. Y., Huang, L. W., Chyou, Y. P., 2012, Discussion of high-temperature desulfurization reaction parameters, In Proceedings of the 19th Regional Symposium of Chemical Engineering (RSCE2012). Bali, Indonesia, 11/7-11/8, No. A45.

Oğuz, K., Ahmet, S., Hüsnü, A., 2009, Investigation of nano-CuO/mesoporous SiO_2 materials as hot gas desulphurization sorbents, Fuel Processing Technology, 90(12), p. 1452-1458.

Perry, H. R., Chilton, C. H., 1973, Chemical engineer's handbook, 5th Edition, McGraw-Hill, New York.

Sánchez, J., Ruiz, E., Otero, J., 2005, Selective removal of sulfide from gaseous streams using a zinc-based sorbent, Industrial Engineer Chemistry Research, 44, p. 241-249.

Vamvuka, D., Arvanitidis, C., Zachariadis, D., 2004, Flue Gas Desulfurization at High Temperatures: A Review, Environmental Engineering Science, 21(4), p. 525-548.

Westmoreland, P. R., Harrison, D. P., 1976, Evaluation of Candidate Solids for High Temperature Reaction between H_2S and Selected Metal Oxides, Environmental Science and Technology, 10, p.659-661.

Zhang, J., Wang, Y., Runyu, Ma., Wu, D., 2003, A study on regeneration of Mn-Fe-Zn-O supported upon $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ sorbents for hot gas desulphurization, Fuel Process Technology, 84, p. 217-227.

Study on Solid Desulfurization at Elevated Temperature with $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ Sorbents from Large-scale Production

Yu-Jhan Jian¹ Hsiu-Yun Chien² Yau-Pin Chyou^{3*}

ABSTRACT

Gasification technology utilizes gasifiers to convert carbonaceous solid fuels into syngas that needs gas cleanup for subsequent applications, such as conversion for chemicals, power generation, hydrogen production, etc. This work is devoted to the study of solid desulfurization technology that can increase thermal efficiency, reduce power generation cost, and protect the environment. During gasification processes, most of the sulfur in coal is turned into hydrogen sulfide (H_2S) and carbonyl sulfide (COS). Dry desulfurization technology at elevated temperature can be implemented with regenerable metal oxides as sorbents, undergoing desulfurization-regeneration cyclic processes; as compared to low-temperature options with solvents, it avoids waste water issues, while features better system thermal efficiency and cost advantage via regeneration. Preliminary studies on the performance of desulfurization sorbents, synthesized by incipient wetness impregnation method, have been successfully carried out at the Institute of Nuclear Energy Research (INER) for years. In response to the desulfurization tests for a large-scale reactor in the future, mass production of sorbents is required. In this paper, desulfurization performance of iron-based sorbents by the mass-production process will be discussed. In this study, the physical properties of mass-produced sorbents were analyzed by various characterization apparatus; moreover, the chemical properties were tested by removing hydrogen sulfide from simulated syngas down to ppm levels in a fixed-bed reactor. The result showed that the iron-based sorbents exhibited good sulfur capture ability and could maintain the similar properties like those from lab-scale synthesis. The main components of mass-produced sorbents are Fe_2O_3 and silica, in which the content of effective metal oxides reached approximately 20% and the sorbent featured a high surface area around $192 \text{ m}^2/\text{g}$; furthermore, the breakthrough time was about 39 minutes, corresponding to sulfur capacity of $6.81 \text{ g-S}/100 \text{ g sorbent}$. Following the characterization studies, redox cycling tests were conducted and good stability was achieved, from which the 10-cycle stability maintained beyond 90%. Through large-scale production process, the synthesis time and process cost could be reduced, which provides competitive advantage for indigenously developed sorbents. The H_2S removal properties of the mass-produced sorbent seem promising for application in clean coal technology fields.

Keywords: Sorbent, Hydrogen sulfide, Breakthrough time, Sulfur capacity

¹ Former Assistant Research & Development Engineer, Institute of Nuclear Energy Research.

² Research Assistant, Institute of Nuclear Energy Research.

³ Senior Researcher & Principal Investigator, Institute of Nuclear Energy Research.

*Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400 #5050, E-mail: ypchyou@iner.gov.tw

Received Date: March 1, 2017

Revised Date: May 2, 2017

Accepted Date: May 15, 2017