

# 高溫捕碳劑合成與反應器測試技術研究

陳威錦

核能研究所化學組副研發師

余慶聰

核能研究所化學組副研究員

邱耀平

核能研究所化學組副研究員

## 摘 要

防止全球氣候暖化繼續惡化，世界各國已達成削減溫室效應氣體之共識，並採取相關對策及技術開發。目前，二氧化碳捕捉及封存技術 (CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CCS) 為降低二氧化碳濃度的方法之一，即利用捕碳劑將二氧化碳與其他氣體分離，得到較高純度的二氧化碳，以利後續的應用與儲存。高溫 CO<sub>2</sub> 捕獲可廣泛用於氣化(Gasification)相關程序，其性能與捕碳劑活性及穩定性有關，如何在較高溫度維持高捕碳量與其結構有重要關係，可藉由反應器測試以建立基本性能。

本研究已成功建置高溫二氧化碳捕獲反應系統含有二氧化碳混合系統、高溫捕捉反應系統、分析及數據擷取系統並針對自製吸附劑進行二氧化碳捕捉測試實驗；由反應器參數測試結果可發現在相同粒徑，經不同溫度測試後得捕獲量隨著溫度增加而有增加之趨勢，在捕獲溫度>750°C 時則隨著溫度增加而下降；經不同粒徑測試，最佳捕獲溫度皆在 650~750°C 範圍內；經穩定度測試，Ca-Al-CO<sub>3</sub> 在高溫下結構仍穩定，綜合上述結果可得此材料可應用於高溫二氧化碳捕獲固定床反應系統，期許將來可應用於更大型之反應系統，以符合實際需求。

關鍵字：二氧化碳、捕捉、固定床、粒徑

## 一、前言

近年來，全球暖化問題日益嚴重其主要原因歸咎於溫室效應。溫室氣體是指大氣中促成溫室效應之氣體，可分為自然溫室氣體及人造溫室氣體，二氧化碳



(CO<sub>2</sub>)對全球升溫貢獻所占百分比為 55%，大氣中二氧化碳濃度增加，主要原因為化石燃料燃燒及森林砍伐，而以化石燃料對二氧化碳排放所占的比重最高，為防止全球氣候暖化繼續惡化，世界各國已達成削減溫室效應氣體之共識，並採取相關對策及技術開發。目前，二氧化碳捕捉及封存技術(CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CCS)為降低二氧化碳濃度的方法之一，即利用捕捉劑將二氧化碳與其他氣體分離，得到較高純度的二氧化碳，以利後續的應用與儲存；此外，吸附劑之結構及活性決定吸附劑之再生性及穩定性，其活性越高，越具有商業化之價值。

氧化鈣除吸附量遠高於其他吸附劑之外，更有大量存在於環境中且價格便宜的優勢，但缺點為此類材料容易於循環測試過程中發生劣化燒結現象，使其再生後對二氧化碳的吸附容量逐漸減少，因此目前之研究重點在於如何對氧化鈣進行適當之改質，以減緩其劣化情形<sup>(1-5)</sup>；近期發展另外一種常見的化學吸附劑-層狀水滑石(Hydrotalcite-like compounds, HTlcs)，此種材料可用於 400°C 以上 CO<sub>2</sub> 捕捉應用，因此，研究目的在探討製備鈣/鋁層狀水滑石以固定床反應器分析應用於中高溫(600~800°C)環境下之二氧化碳之捕捉技術開發。

## 二、文獻回顧

溫室氣體中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)對全球升溫貢獻所占百分比為 55%，大氣中二氧化碳濃度增加，主要原因為化石燃料燃燒及森林砍伐，其中又以化石燃料對二氧化碳排放所占的比重最高，為防止全球氣候暖化繼續惡化，世界各國已達成削減溫室效應氣體之共識，並採取相關對策及技術開發，捕捉二氧化碳之方法，可依燃料燃燒方式分為三種捕獲路徑：燃燒前捕獲(pre-combustion capture)、燃燒後捕獲(post-combustion capture)及富氧燃燒(oxy-fuel combustion)<sup>(6)</sup>；固態化學吸收法是將二氧化碳捕捉一固體物上，並在其表面形成新物種以固定下來的技術，由於二氧化碳屬於弱酸性的氣體，因此可用具有鹼性特性的材料與其中和而捕獲，此類材料通常為鹼金或鹼土金屬的氧化物，其操作溫度恰巧介於發電廠煙道氣流的溫度範圍，如此可減少去除二氧化碳時的能量消耗，節省其操作成本，有效克服其循環利用時的劣化問題，以及藉由合宜之反應器設計，並考量其吸附後體積膨脹與減少其能量損失等問題，則預期氧化鈣在用以捕獲二氧化碳的發展前景應十分看好<sup>(6)</sup>。

### (一) 高溫捕碳劑

金屬氧化物進行二氧化碳吸收反應時，可能因為溫度控制不當而產生可逆反應。而不同的金屬氧化物對二氧化碳的吸收容量亦不相同。我們可以通過平衡常數的計算從金屬氧化物和金屬氫氧化物中選出高溫下能與二氧化碳反應的化合物。在 25°C 時，各金屬氧化物與二氧化碳反應的平衡常數關係為： $\text{CaO} > \text{MgO} > \text{MnO} > \text{PbO}(\text{紅}) > \text{Ag}_2\text{O} > \text{PbO}(\text{黃}) > \text{ZnO} > \text{FeO}$ <sup>(7)</sup>。同樣條件下，金屬氫氧化物與二氧化碳反應的平衡常數關係為： $\text{Ca}(\text{OH})_2 > \text{LiOH} > \text{Cd}(\text{OH})_2 > \text{Mg}(\text{OH})_2 > \text{Pb}(\text{OH})_2 > \text{Co}(\text{OH})_2$ 。 $\text{CaO}$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  在高於 450°C 時仍有較大的平衡常數，容易在高溫下與二氧化碳發生反應。而  $\text{MgO}$  和  $\text{MnO}$  在高於 450°C 時不易與二氧化碳發生反應。由於  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  在高於 380°C 時會分解為  $\text{MgO}$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ，使得在 450°C 以上溫度條件下， $\text{Mg}(\text{OH})_2$  不適合做為二氧化碳的吸收劑；因此  $\text{CaO}$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  最適合做為高溫吸收劑<sup>(7)</sup>。

氧化鈣除吸附量遠高於其他吸附劑之外，更有大量存在於環境中且價格便宜的優勢，但缺點為易於循環測試過程中發生劣化燒結現象，再生後對二氧化碳的吸附容量逐漸減少，為避免劣化情況產生，在氧化鈣的改質過程中即加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，使氧化鈣與鋁於製備時會反應生成耐熱、不參予反應的新物種，如此避免了循環測試過程中氧化鈣的燒結，氧化鈣經 50 次循環測試後捕碳量仍維持在 87% 初始捕碳量<sup>(8)</sup>。近期發展另外一種常見的化學吸附劑-層狀水滑石 (Hydrotalcite-like compounds, HTlcs) 圖 1，利用共沉法 (co-precipitation)，將鎂/鋁層狀水滑石 (Mg-Al-LDH) 結構中的  $\text{Mg}^{+2}$  以  $\text{Ca}^{+2}$  置換，利用其結構模板製成  $\text{CaO}$  結構粉體<sup>(9)</sup>。此種材料可用於 400°C 以上  $\text{CO}_2$  捕捉應用。

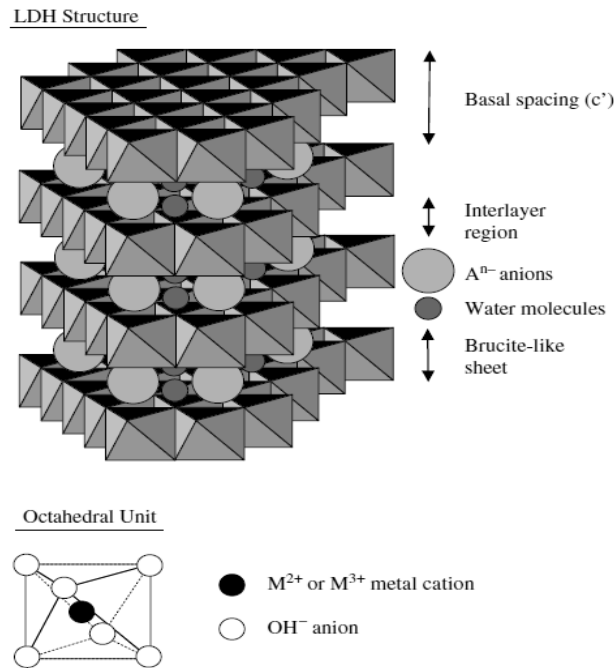


圖1 層狀水滑石結構<sup>(9)</sup>

## (二)固定床反應器

固定床反應器 (Fixed-Bed Reactor) 又稱為填充床反應器，內裝填有固體催化劑，是用以實現多相反應過程的一種反應器，固體催化劑通常呈顆粒狀，堆積成一定高度（或厚度）的床層。床層靜止不動，流體通過床層進行反應，它與流化床反應器及移動床反應器的區別，在於固體顆粒處於靜止狀態，固定床反應器其主要用於氣固相催化反應，其中捕獲溫度、氣體流量、粒徑、填充重量等對捕捉效果有著一定的影響；Ying-jie Li et al.<sup>(10)</sup>利用固定床反應系統進行二氧化碳捕捉之試驗，以改質白雲石(Dolomites)作為二氧化碳吸附劑，粒徑為 0.125mm，反應溫度為 550~750°C，進流二氧化碳氣體濃度為 15%；Masoud Mofarahi et al.<sup>(11)</sup>利用 U 型管固定床進行二氧化碳捕捉之試驗，以氧化鈣作為二氧化碳吸附劑，粒徑約為 3.000mm，反應溫度為 650~750°C，進流二氧化碳氣體為濃度 3%；Binlin Dou et al.<sup>(12)</sup>利用固定床反應系統進行二氧化碳捕捉之試驗，以工業用氧化鈣作為二氧化碳吸附劑，粒徑約為 0.450~1.000 mm，反應溫度為 400~550°C，進流二氧化碳氣體濃度為 5~10%；Cong Luo et al.<sup>(13)</sup>利用固定床反應系統進行二氧化碳捕捉之試驗，以改質氧化鈣作為二氧化碳吸附劑，反應溫度為 650°C，進流二氧化碳氣體濃度為 15%；Rongyue Sun et al.<sup>(14)</sup>利用固定床反應系統進行二氧化碳捕捉之試驗，以改質

氧化鈣作為二氧化碳吸附劑，粒徑約為 0.125 mm，反應溫度為 650~750°C，進流二氧化碳氣體濃度為 15%；上述文獻所得之參數彙整如表 1 所示，由表中可得在固定床粒徑範圍為 0.125~1.000mm，反應溫度為 400~750°C 及二氧化碳進流濃度為 3~15%，因此本研究將探討不同粒徑之吸附劑、在不同高溫下 (600~850°C) 且在較高二氧化碳進氣濃度(40%)下進行高溫二氧化碳捕獲固定反應之試驗以建立高溫二氧化碳捕獲反應系統之相關參數。

表 1 固定床二氧化碳捕捉之相關研究

文獻	吸附劑	捕獲溫度 (°C)	吸附劑粒徑 (mm)	二氧化碳濃度 (%)
Ying-jie Li et al. <sup>(10)</sup> (2008)	Dolomites	550~750	0.125	15
Masoud Mofarahi et al. <sup>(11)</sup> (2009)	Calcium Oxide	650~750	3.000	3
Binlin Dou et al. <sup>(12)</sup> (2010)	Calcium Oxide	400~550	0.450~1.000	5~10
Cong Luo et al. <sup>(13)</sup> (2010)	Calcium Oxide	650	--	15
Rongyue Sun et al. <sup>(14)</sup> (2012)	Calcium Oxide	650~750	0.125	15

### 三、研究方法

#### (一) 高溫捕碳劑合成

本研究分別使用自製 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 吸附劑作為兩種捕碳材料。配製酸液的 Calcium precursors 與 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 9H<sub>2</sub>O，調配適當莫耳比。再配製鹼液 NaOH 與 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>。將鹼液倒入酸液中快速攪拌後，靜置 24hr 後將溶液進行過濾，利用去離子水洗滌三次後烘乾，並於溫度 400°C 以上進行煅燒，以獲得自製二氧化碳吸附劑(Ca-Al-CO<sub>3</sub>)，利用不銹鋼研砵將 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 研細，倒入不同號篩之篩網以篩出不同粒徑範圍之吸附劑(Ca-Al-CO<sub>3</sub>)進行試驗。

#### (二) 高溫二氧化碳捕獲反應系統

利用高溫二氧化碳捕獲反應系統進行二氧化碳捕捉測試實驗，以了解中高溫反應系統的捕碳效果，裝置如圖 2 所示，可分為下列幾個部份：CO<sub>2</sub> 混合系統、高溫反應爐體系統、CO<sub>2</sub> 分析系統等三部份。(1) CO<sub>2</sub> 混合系統：本實驗 CO<sub>2</sub> 混合系統包括：氣體鋼瓶、質量流量器(Mass flow meter)及氣體混合槽(Mixing chamber)。反應氣體和稀釋用之氮氣於混合器內混合而配製成不同濃度二氧化碳，可配製 CO<sub>2</sub> 濃度範圍為(0~100%)，此次測試 CO<sub>2</sub> 濃度為 40%，



總流量為 150 mL/min。(2) 高溫固定床系統：此系統包含 1kW 垂直式高溫爐體(最高溫度可達 1000°C)及直徑 1 吋石英管反應管，其中在石英管以一個 200 mesh 石英床為支撐，為了避免捕碳劑顆粒阻塞篩網上的細孔而產生過大之壓力降，同時避免吸捕碳劑漏出，於篩網上鋪設一層石英棉。捕碳劑可填充測試範圍為 15~60g。本次測試捕碳劑填充量 15g，測試溫度範圍為 600~850°C。(3) CO<sub>2</sub> 分析系統：CO<sub>2</sub> 氣體通過捕碳劑後經降溫後進入二氧化碳分析儀(ADC SB1000)進行分析，分析前二氧化碳分析儀先進行零點(zero)與全幅(span)校正，以獲得 CO<sub>2</sub> 濃度與訊號強度(response)之線性關係，進而將分析所得訊號轉換成濃度以獲得 CO<sub>2</sub> 濃度與時間之捕獲貫穿曲線圖，並根據公式(1)求得捕碳劑捕獲體積量，依據  $PV=nRT$  (其中 P 為壓力 1atm，V 為體積(L)，R=0.082，T 為絕對溫度(K)，n 為莫耳數)之理想氣體方程式進行轉換求得捕獲二氧化碳之重量。

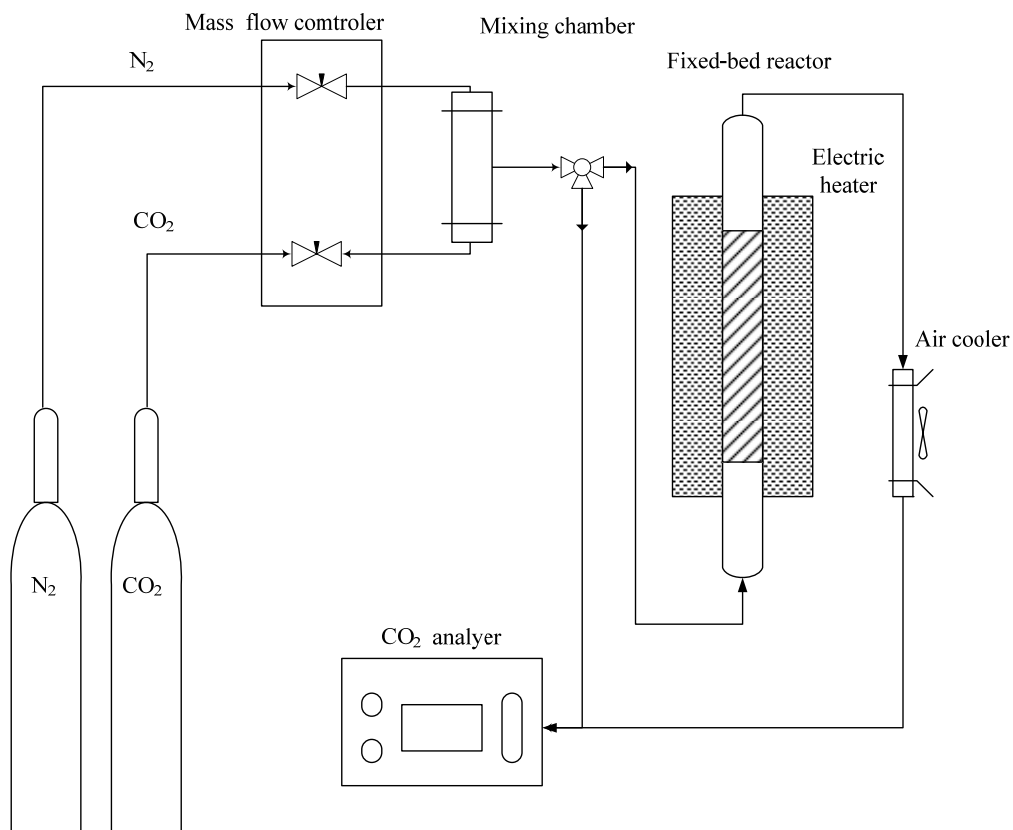


圖 2 高溫二氧化碳捕獲反應模擬系統

$$Q_{CO_2} = \int_0^t (C_0 - C_t) \times V \times dt \quad (1)$$

式中  $Q_{CO_2}$  : 捕獲  $CO_2$  的體積量 (mL)

$t$  : 捕獲時間 (min)

$V$  : 捕獲流量 (mL/min)

$C_0$  :  $CO_2$  進流濃度 (%)

$C_t$  : 在  $t$  時間時  $CO_2$  出流濃度 (%)

## 四、結果與討論

### (一)反應溫度測試

本研究將  $Ca-Al-CO_3$  材料平均粒徑小於  $180\mu m$  進行不同反應溫度 ( $600\sim 850^\circ C$ ) 之  $CO_2$  捕獲試驗，所得不同溫度下體積累積量趨勢圖如圖 3 所示，由圖 3 中，可發現在固定床反應器中、系統流量為  $150\text{ mL/min}$  及  $CO_2$  濃度為  $40\%$  下， $Ca-Al-CO$  在  $600^\circ C$ 、 $650^\circ C$ 、 $700^\circ C$ 、 $750^\circ C$ 、 $800^\circ C$  及  $850^\circ C$  捕獲  $CO_2$  之體積分別為  $2813.0\text{ mL}$ 、 $2854.8\text{ mL}$ 、 $3265.9\text{ mL}$ 、 $2743.2\text{ mL}$ 、 $1628.9\text{ mL}$  及  $563.4\text{ mL}$ ，其捕獲體積隨著溫度增加而有增加之趨勢但等反應溫度到達  $700^\circ C$  後其趨勢隨之下降；此外從圖 3 中就不同溫度之捕獲動力行為可發現在  $600^\circ C$  及  $650^\circ C$  皆在 50 分鐘後斜率變緩， $700^\circ C$  在 60 分鐘後斜率變緩， $750^\circ C$  在 50 分鐘後斜率變緩， $800^\circ C$  及  $850^\circ C$  皆在 10 分鐘後斜率變緩，由動力亦可發現反應溫度在  $700^\circ C$  後其斜率出現轉折(變緩)的時間隨著溫度的增加而有往前移之現象，由於曲線斜率變緩時間越提前表示其所捕獲  $CO_2$  的量也越少，因此由上述之結果初步可得  $700^\circ C$  為最佳溫度；此外將不同溫度下  $Ca-Al-CO_3$  材料捕獲  $CO_2$  之重量進行比較如圖 4 所示，由圖中可得在  $600^\circ C$ 、 $650^\circ C$ 、 $700^\circ C$ 、 $750^\circ C$ 、 $800^\circ C$  及  $850^\circ C$  下捕獲  $CO_2$  之重量分別為  $5.1\text{ g}$ 、 $5.1\text{ g}$ 、 $5.9\text{ g}$ 、 $4.9\text{ g}$ 、 $2.9\text{ g}$  及  $1.0\text{ g}$ ，由此結果可發現在  $700^\circ C$  之捕獲  $CO_2$  之重量為最佳，隨著溫度增加亦有下降之趨勢；綜合上述結果可得在高溫二氧化碳捕獲反應模擬系統溫度對  $Ca-Al-CO_3$  材料捕  $CO_2$  之影響為在最佳溫度以下，捕獲量隨著溫度增加而有增加之驅勢，而在最佳溫度以上時則捕獲量隨著溫度增加而有下降之驅勢；推究其原因可能為越高之反應溫度易造成含鈣捕碳劑燒結(sintering)現象之產生<sup>(14)</sup>。

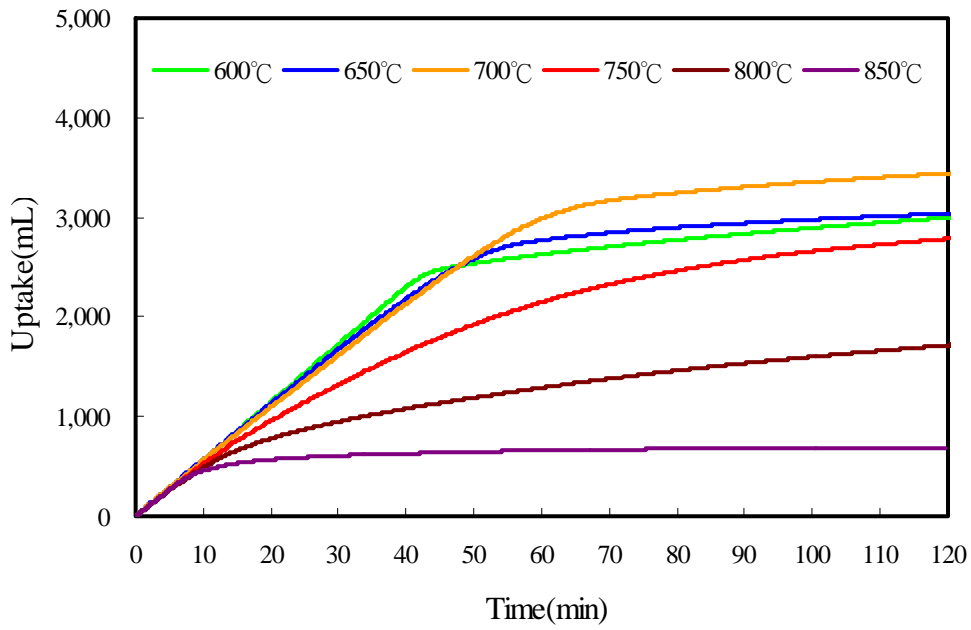


圖 3 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 捕捉 CO<sub>2</sub> 之體積累積量趨勢圖

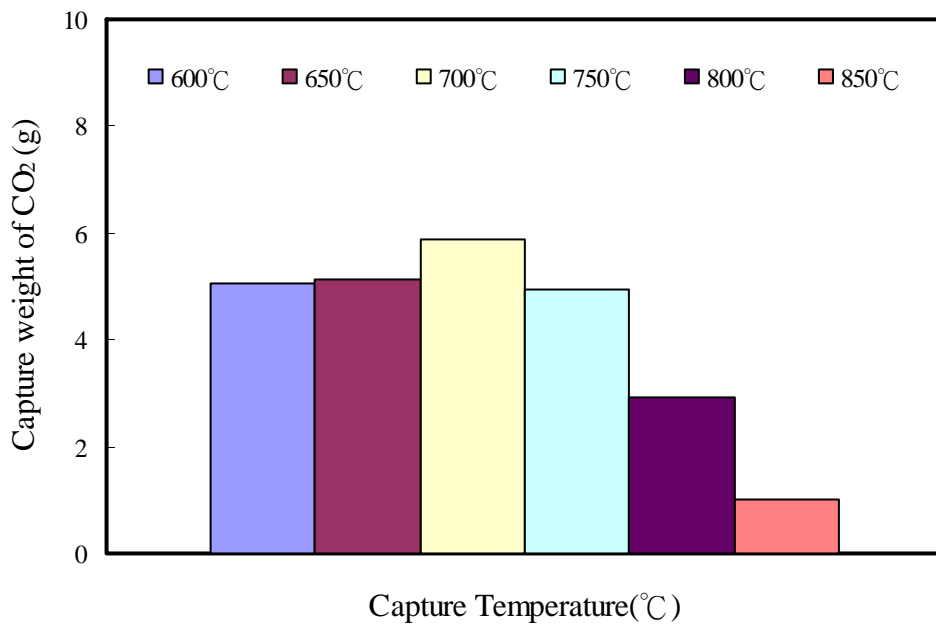


圖 4 不同溫度下，Ca-Al-CO<sub>3</sub> 捕捉 CO<sub>2</sub> 之捕獲量比較圖



## (二)粒徑測試

本研究將  $\text{Ca-Al-CO}_3$  材料不同平均粒徑範圍分別為粒徑  $< 180\mu\text{m}$ 、 $180\mu\text{m} < \text{粒徑} < 300\mu\text{m}$  及  $300\mu\text{m} < \text{粒徑} < 600\mu\text{m}$  進行不同反應溫度( $600\sim 850^\circ\text{C}$ )之  $\text{CO}_2$  捕獲試驗,所得不同溫度及不同粒徑範圍下捕捉  $\text{CO}_2$  之捕獲量比較圖如圖 5 所示,由圖 5 中,可發現在固定床反應器中、系統流量為  $150\text{mL}/\text{min}$  及  $\text{CO}_2$  濃度為 40% 下,由圖中可得粒徑  $< 180\mu\text{m}$  在  $600^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$  及  $850^\circ\text{C}$  下捕獲  $\text{CO}_2$  之重量分別為 5.1 g、5.1 g、5.9 g、4.9 g、2.9 g 及 1.0 g,  $180\mu\text{m} < \text{粒徑} < 300\mu\text{m}$  在  $600^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$  及  $850^\circ\text{C}$  下捕獲  $\text{CO}_2$  之重量分別為 4.1 g、6.6 g、6.7 g、6.4 g、3.8 g 及 2.9 g,  $300\mu\text{m} < \text{粒徑} < 600\mu\text{m}$  在  $600^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $750^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$  及  $850^\circ\text{C}$  下捕獲  $\text{CO}_2$  之重量分別為 4.9 g、5.5 g、6.2 g、7.9 g、4.8 g 及 1.5 g, 由此結果可得在粒徑  $< 180\mu\text{m}$ 、 $180\mu\text{m} < \text{粒徑} < 300\mu\text{m}$  及  $300\mu\text{m} < \text{粒徑} < 600\mu\text{m}$  下其最佳操作溫度範圍分別為  $600^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$ 、 $650^\circ\text{C}\sim 750^\circ\text{C}$  及  $700^\circ\text{C}\sim 750^\circ\text{C}$ , 其最佳操作溫度隨著粒徑增加而有增加之趨勢,推究其原因可能為粒徑越大其所需熱能也越大其捕碳劑核心溫度才能達到最佳之溫度,因此其反應溫度也越高;此外,在相同溫度下捕獲量隨著粒徑增加而有增加之趨勢且在較高溫度( $>700^\circ\text{C}$ )更為明顯,但在粒徑介於  $300\sim 600\mu\text{m}$  之  $850^\circ\text{C}$  時似乎有偏低之現象,但就整個趨勢而言為粒徑越大,其在較高溫度( $>700^\circ\text{C}$ )之捕獲量亦越大,推究其原因可能為在固定床反應器中填充之粒徑越大其孔系隙也越大,更有利於二氧化碳氣體與捕碳劑之接觸,因此提高其氣固反應。

## (三)穩定性測試

本研究將  $\text{Ca-Al-CO}_3$  材料平均粒徑小於  $180\mu\text{m}$  並以粒徑測試所得最佳溫度  $700^\circ\text{C}$  進行捕獲  $\text{CO}_2$  之 10 次循環測試,結果如圖 6 所示,由圖 6 可發現,  $\text{Ca-Al-CO}_3$  材料在第 1 次至第 10 次循環測試之捕碳量依序分別為 7.3g、3.6g、3.1g、2.9g、2.6g、2.6g、2.6g、2.5g、2.4g 及 2.4g,可發現整體吸附量呈現下滑趨勢,這可能是因為二氧化碳吸附包含物理吸附與化學吸附,部分化學吸附後的  $\text{CO}_2$  衍生  $\text{CaCO}_3$  而燒結於材料表面<sup>(1,15)</sup>,因此導致吸附效率降低;另外,其可能原因為  $\text{Ca-Al-CO}_3$ ,在經過高溫多次的吸附/脫附後,氧化鈣會聚集在一起易形成較大顆粒<sup>(1,15)</sup>,因此  $\text{Ca-Al-CO}_3$  之孔洞阻塞而造成捕碳量下降;此外,將  $\text{Ca-Al-CO}_3$  之 10 次循環測試前後進行 BET 比表面積分析(BET)及孔體積(Pore volume)分析,可得 10 次循環測試前後之 BET 分別為  $17.3\text{ m}^2/\text{g}$  及  $3.5\text{ m}^2/\text{g}$ ,孔體積(Pore volume)分別為  $0.061\text{cc}/\text{g}$  及  $0.005\text{cc}/\text{g}$ ,由此可得



Ca-Al-CO<sub>3</sub> 之 10 次循環測試後比表面積及孔體積確實下降，此結果與上述文獻相應証。從時間的觀點來看，可發現在 40 小時仍可維持 2.4 g 之 CO<sub>2</sub> 捕獲量，換言之 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 在高溫下結構仍穩定；綜合上述結果可得 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 可應用於高溫二氧化碳捕獲固定床反應系統。

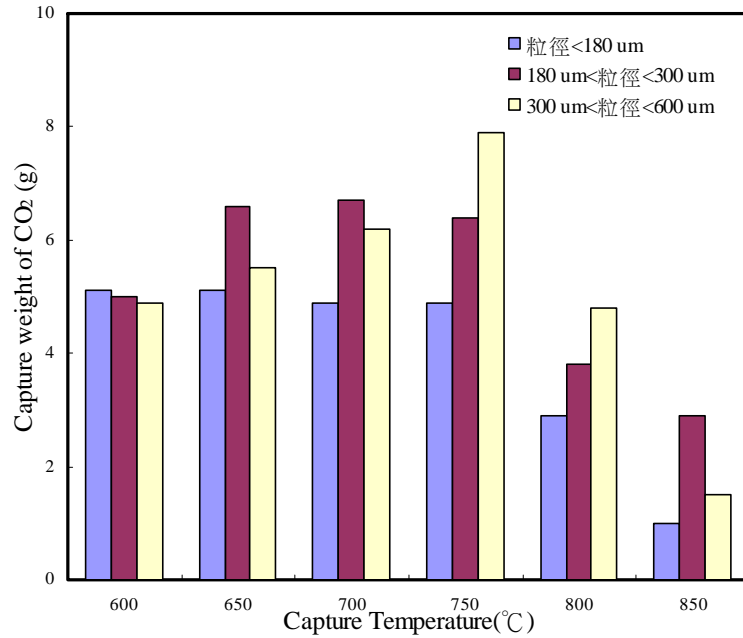


圖 5 不同溫度及不同 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 粒徑捕捉 CO<sub>2</sub> 之捕獲量比較圖

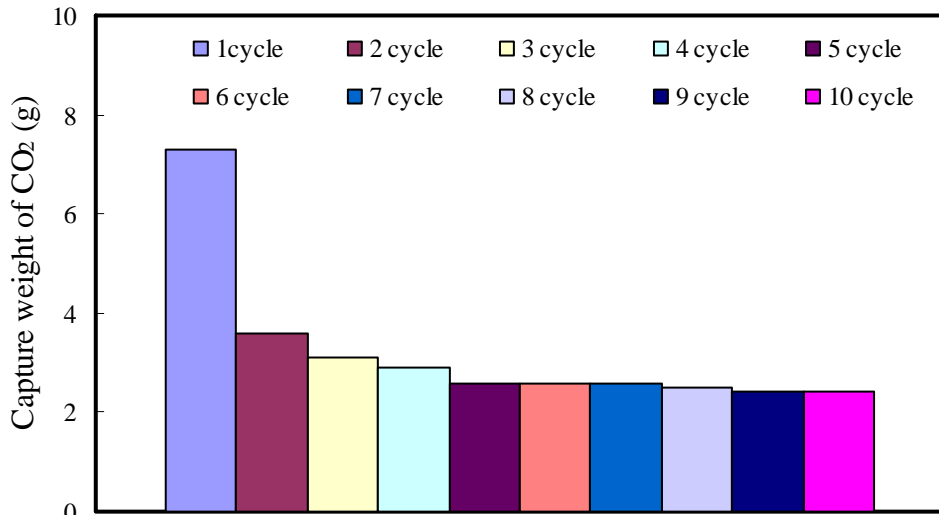


圖 6 Ca-Al-CO<sub>3</sub> 10 次循環測試捕獲量比較圖

## 五、結論與建議

本研究已成功建置高溫二氧化碳捕獲反應系統含有二氧化碳混合系統、高溫捕捉反應系統、分析及數據擷取系統並針對自製吸附劑進行二氧化碳捕捉測試實驗；將自製吸附劑進行固定床反應器進行捕捉驗證測試，在相同粒徑，經不同溫度測試後得捕獲量隨著溫度增加而有增加之趨勢，但在捕獲溫度 $>750^{\circ}\text{C}$ 時則隨著溫度增加而下降；經不同粒徑測試，在相同溫度下捕獲量隨著粒徑增加而有增加之趨勢且在較高溫度( $>700^{\circ}\text{C}$ )更為明顯，但在粒徑介於 $300\sim 600\mu\text{m}$ 之 $850^{\circ}\text{C}$ 時似乎有偏低之現象，但就整個趨勢而言為粒徑越大，最佳捕獲溫度皆在 $650\sim 750^{\circ}\text{C}$ 範圍內；經穩定度測試，可發現在40小時仍可維持2.4g之 $\text{CO}_2$ 捕獲量，換言之 $\text{Ca-Al-CO}_3$ 在高溫下結構仍穩定；綜合上述結果可得此材料可應用於高溫二氧化碳捕獲固定床反應系統，期許將來可應用於更大型之反應系統，以符合實際需求。

## 參考文獻

- 1.陳奕岑，白曠綾，以改質氧化鈣捕獲二氧化碳氣體之循環再生能力研究，國立交通大學環境工程研究所，碩士學位論文，中華民國97年7月。
- 2.Florin, N.H.; Harris, A.T., Reactivity of CaO derived from nano-sized  $\text{CaCO}_3$  particles through multiple  $\text{CO}_2$  capture-and-release cycles, *Chemical Engineering Science*, Vol.64, pp.187-191, 2009。
- 3.Grasa, G.S.; Abanades, J.C.,  $\text{CO}_2$  Capture Capacity of CaO in Long Series of Carbonation/Calcination Cycles, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.45, pp.8846-8851, 2006。
- 4.Li, Z.S.; Cai, N.S.; and Huang, Y.Y, Effect of Preparation Temperature on Cyclic  $\text{CO}_2$  Capture and Multiple Carbonation-Calcination Cycles for a New Ca-Based  $\text{CO}_2$  Sorbent, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.45, pp.1911-1917, 2006。
- 5.Manovic, V.; Anthony, E., CaO-Based Pellets Supported by Calcium Aluminate Cements for High-Temperature  $\text{CO}_2$  Capture, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.43, pp.7117-7122, 2009。
- 6.Olajire, A.A.,  $\text{CO}_2$  Capture and Separation Technologies for End-of-pipe Applications-A review, *Energy*, Vol.35, pp. 2610-2628, 2010。
- 7.高綾君，朱信，以爐石在高溫下去除二氧化碳之研究，國立成功大學環境工程學系，碩士學位論文，中華民國98年6月。
- 8.Wu, S.F.; Li, Q.H.; Kim, J.N.; and Yi, K.B., Properties of a Nano  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$   $\text{CO}_2$  Sorbent, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.47, pp.180-184, 2008。



9. Ram Reddy, M.K.; Xu, Z.P.; Lu, G.Q.; and Diniz da Costa, J. C., Layered Double Hydroxides for CO<sub>2</sub> Capture: Structure Evolution and Regeneration, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.45, pp.7504-7509, 2006。
10. Li, Y.J.; Zhao, C.S.; Duan, L.B.; Liang, C.; Li, Q.Z.; Zhou, W.; and Chen, H.C., Cyclic calcination/carbonation looping of dolomite modified with acetic acid for CO<sub>2</sub> capture, *Fuel Processing Technology*, Vol. 89, pp.1461–1469, 2008。
11. Mofarahi, M.; Roohi, P.; and Farshadpoor, F., Study of CaO Sorbent for CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gases, *Chemical Engineering Transactions*, Vol.17, pp.403-408, 2009。
12. Dou, B.; Song, Y.; Liu, Y.; and Feng, C., High temperature CO<sub>2</sub> capture using calcium oxide sorbent in a fixed-bed reactor, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.183, pp.759–765, 2010。
13. Luo, Cong; Zheng, Ying; Ding, Ning; Wu, Qilong; Bian, Guan; and Zheng, Chuguang, Development and Performance of CaO/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sorbents during Calcium Looping Cycles for CO<sub>2</sub> Capture, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.49, pp.11778-11784, 2010。
14. Sun, Rongyue; Li, Yingjie; Liu, Hongling; Wu, Shuimu; and Lu, Chunmei, CO<sub>2</sub> Capture Performance of Calcium-based Sorbent Doped with Manganese Salts during Calcium Looping Cycle, *Applied Energy*, Vol.89, pp.368-373, 2012。
15. 陳俞君，「中孔洞複合材料之合成。分析與對二氧化碳吸附之研究」，國立交通大學材料工程學系碩士學位論文，2010。