

低分壓下二氧化碳吸附劑吸附效能評估

周豐志¹ 吳淑姿² 涂瑞澤² 余世宗^{1*}

¹大葉大學環境工程學系

²大葉大學生物產業科技學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本研究自行設計二氧化碳吸附設備，評估四種吸附劑：活性碳、沸石、silica xerogel、amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳之吸附效能，以應用於吸附去除室內低分壓二氧化碳。silica xerogel 與 amine-grafted silica xerogel 由實驗室自行合成。為模擬室內環境，吸附試驗之起始二氧化碳濃度介於 1,000-4,000 ppm，溫度 20-45°C。沸石因易吸附水分，對二氧化碳吸附能力弱，其他三種吸附劑，隨吸附溫度增加，對二氧化碳去除率有增加趨勢。amine-grafted silica xerogel 在 35°C 下對二氧化碳有較佳的吸附效率，當二氧化碳起始濃度 1,000 ppm，經過吸附平衡後，去除效率可達 35%。活性碳、silica xerogel 與 amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳吸附容量，隨二氧化碳初始濃度增加而有升高的趨勢。溫度升高，這三種吸附劑對二氧化碳之平衡吸附量亦增加，其中以 amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳有最高平衡吸附量，5.46 µg/g，其次分別為 silica xerogel (4.52 µg/g) 和活性碳 (0.37 µg/g)。amine-grafted silica xerogel 於低二氧化碳分壓下對二氧化碳具吸附能力，應用於室內吸附去除二氧化碳頗具潛力。

關鍵詞：活性碳，沸石，silica xerogel，amine-grafted silica xerogel，室內二氧化碳

Evaluation of CO₂ Adsorption Performance under Low CO₂ Partial Pressures

FENG-JYH JOU¹, SHWU-TZY WU², JUI-RZE TOO² and SHIH-TSUNG YU^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University

²Department of Bioindustry Technology, Da-Yeh University

168, University Rd., Da-Tsuen, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

A new apparatus for simulating indoor carbon dioxide adsorption was designed to evaluate 4 adsorbents: active carbon, zeolite, silica xerogel, and amine-grafted silica xerogel. Silica xerogel and amine-grafted silica xerogel were synthesized in the laboratory. The simulated indoor conditions were controlled for CO₂ concentration and temperature at 1000-4000 ppm and 20-43°C, respectively. The zeolite easily absorbs moisture, which decreases its ability to adsorb CO₂. CO₂ adsorption in the other 3 adsorbents increased in conjunction with temperature. Amine-grafted silica xerogel showed the best



CO₂ adsorption capability (35%), with an initial CO₂ concentration of 1000 ppm at 35 °C. The CO₂ adsorption capabilities and equilibrium adsorption in active carbon, silica xerogel, and amine-grafted silica xerogel increased with a higher initial concentration of CO₂ and a higher temperature. The amine-grafted silica xerogel showed the best equilibrium adsorption (5.46 µg/g). The equilibrium adsorption of silica xerogel and active carbon were 4.52 µg/g and 0.37 µg/g, respectively. The absorption capabilities of amine-grafted silica xerogel have potential applications to adsorb indoor carbon dioxide under low CO₂ partial pressure..

Key Words: active carbon, zeolite, silica xerogel, amine-grafted silica xerogel, indoor carbon dioxide

一、前言

在地狹人稠地形多為盆地的台灣地區，都市內頻繁的貿易與商業活動促使鄉下人口大量湧入，在高人口密度與商業貿易型態的需求下，高樓大廈林立則是台灣都市活動最典型的特徵。平均每人一天約有 80~90% 的時間幾乎都在室內，不論是室內辦公的業務、學生就學的學校與補習班、休息的商務旅館或者是下班後乘坐的捷運與放假後休閒消費的百貨公司、博物館與世貿展覽館等，已成為大眾活動的主要範圍。新式的現代建築物多半採用密閉式的空調系統，空氣的交換率低，因此常造成室內不良空氣累積無法消散的問題。室內空氣品質的好壞，直接影響人們工作品質與效率，嚴重時亦將影響健康，因此室內空氣品質已受到人們的重視。

室內二氧化碳主要為生物呼吸作用產生，被視為空氣品質是否良好的重要指標。研究顯示 [1]，當二氧化碳濃度過高時，刺激呼吸中樞造成呼吸費力或困難等感覺，亦會產生頭痛、嗜睡、反射反應減退、倦怠等症狀，因此長期待在二氧化碳濃度過高，會使工作與學習效率明顯降低，影響個人的競爭能力。根據環保署室內空氣品質的建議法規標準，第一類指對室內空氣品質有特別需求場所，包括學校及教育場所、兒童遊樂場所、醫療場所、老人或殘障照護場所等，二氧化碳建議值為 600 ppm。第二類指一般大眾聚集的公共場所及辦公大樓，包括營業商場、交易市場、展覽場所、辦公大樓、地下街、大眾運輸工具及車站等室內場所，二氧化碳建議值為 1,000 ppm。室內二氧化碳濃度會影響生理 [2]，人們聚集或空間小會快速增加二氧化碳，若換氣不足時，當人體吸入過量的二氧化碳，即會造成單純窒息性氣體，因此在室內二氧化碳濃度若超過 800 ppm，人會開始感到不舒服、疲倦甚至頭痛，一旦超過 1,000 ppm，就可能影響呼吸、循環器官及大腦機能，人體內血液的 pH 值下降，造成呼吸性酸中毒，進而危害人體。

目前常見的二氧化碳處理技術，包括化學溶劑吸收法（chemical solvent absorption methods）、化學吸附（chemisorption）及物理吸附（physical adsorption）[6]。化學溶劑吸收法所使用的化學溶劑主要為氫氧化鈉、碳酸鈉、氫氧化鎂、氧化鈣、氨水及醇胺等溶液 [6, 8-10]。化學吸附是二氧化碳分子吸附在吸附劑的表面與孔隙內，並有鍵結生成。這種現象與化學反應很相似，分子內電子重組，使吸附物牢牢吸附於吸附劑表面，因被吸附分子與吸附劑的表面官能基進行化學反應，這類吸附為不可逆性，很難脫附再生。物理吸附是被吸附分子以凡得瓦爾力（Van der Waals forces）吸附於固體表面，屬於物理性的吸引能力，物理吸附的強弱，與吸附劑結構與被吸附物的物理性質有很大的關係 [3]。物理吸附為可逆反應，當吸附劑周圍溫度改變時，吸附劑表面之被吸附分子便會產生脫附現象（desorption）。

常用於吸附二氧化碳的材料包括活性碳、silica 和沸石等 [4-5, 7]。近年來國內學者利用氫氧化鈉或其他鹼性化合物改質活性碳，大幅提昇改質活性碳吸附二氧化碳的能力。沸石表面結構亦可使用硫亞胺（imidazolate）修改吸附性表面官能基，如 ZIFs（zeolitic imidazolate frameworks）[5]、SBA-12（Santa Barbara Amorphous-12）與 SBA-15（Santa Barbara Amorphous-15）等，使官能基具有鹼性的 amine 基團 [11]，增加其吸附二氧化碳的能力。二氧化碳吸附劑會受一些因素影響，（1）壓力會影響吸附劑吸附氣體的量，吸附劑吸附氣體的量與氣體壓力成正比關係；（2）氣體的吸附量受溫度變化影響，因吸附過程是放熱反應。當熱能過量時，使其吸附量趨於緩和；（3）吸附劑在相對濕度高的環境下，大量的吸附氣體，在低濕度下吸附氣體的量減少。

本研究自行設計二氧化碳吸附設備，評估四種吸附劑（活性碳、沸石、silica xerogel 和 amine-grafted silica xerogel）對二氧化碳吸附效能，期能應用於吸附去除室內低分壓二氧化碳。研究包括 silica xerogel 及 amine-grafted silica xerogel



吸附材料之合成、不同二氧化碳濃度和吸附溫度對二氧化碳吸附的影響。

二、材料與方法

本研究以不同的吸附劑，活性碳（購自 Sigma-Aldrich，100 mesh）、沸石（購自 Sigma-Aldrich， $<45\mu\text{m}$ 粉末）、silica xerogel（購自 Sigma-Aldrich）、amine-grafted silica xerogel（表面官能基鹼性改質）吸附二氧化碳，探討於不同吸附條件（不同二氧化碳分壓和吸附溫度）下，吸附劑對二氧化碳之吸附效能，並計算吸附劑吸附二氧化碳的平衡吸附量。

（一）實驗系統的配置

二氧化碳吸附試驗裝置如圖 1 所示。反應槽為一圓柱形密封容器（直徑 12 cm、高 18 cm、內部容積 2.4 L），配置二氧化碳偵測器、溫度與濕度計，監測二氧化碳分壓、溫度與濕度。

（二）Silica xerogel 的合成

合成 porous silica xerogel 的步驟，50 g PEO₂₀ PPO₇₀ PEO₂₀ (polyethylene oxide)₂₀ (polypropylene oxide)₇₀ (polyethylene oxide)₂₀，購自 Sigma-Aldrich 公司) 和 110.4 g TEOS (tetraethoxy-silane, C₈H₂₀O₄Si)，加入 166 ml 的鹽酸和 1440 g 的蒸餾水攪拌均勻，於 30°C 的水浴反應 20 h，95°C 水浴反應 24 h。以 4 公升的蒸餾水清洗過濾。70°C 烘乾 24 h。乾燥的產物，於 550°C 煅燒 8 h 以去除界面活性劑。

（三）Amine-grafted silica xerogel 的合成

取 20 g 的 SBA-15 以水溶解，於 95°C 水浴 2 h。過濾，於 125°C 烘箱乾燥 6 h，冷卻。加 42.5 ml 3-aminopropyltriethoxysilane 與 207.5 ml 甲苯，接上冷凝設備並通入氫氣，在 110°C 水浴反應 24 h。以 200 ml 的甲苯

清洗過濾，在 60°C 烘箱中乾燥 24 h。

（四）吸附劑預處理與吸附試驗

將吸附劑以 100°C 加熱 2 小時，冷卻，通入氫氣 5 min 以移除吸附劑表面之其他氣體，待吸附裝置反應槽內二氧化碳達平衡，將吸附劑加入圓柱反應槽進行二氧化碳吸附試驗。所有實驗均為四重覆結果之平均值。

（五）吸附劑之二氧化碳平衡吸附量計算

吸附劑與二氧化碳平衡試驗後，以下式計算吸附劑之二氧化碳平衡吸附量。

吸附劑之二氧化碳平衡吸附量 = $(C_0 - C_e) \times V$ / 吸附劑使用量

其中

C_0 ：起始二氧化碳濃度

C_e ：二氧化碳平衡濃度

V ：反應槽體積

二氧化碳吸附總量為 $(C_0 - C_e) \times V$

三、結果與討論

以自行設計的吸附設備、商業用吸附劑及自行合成之吸附劑，在不同溫度下進行二氧化碳吸附試驗。吸附劑包括活性碳、沸石、silica xerogel 和 amine-grafted silica xerogel。溫度為吸附過程中重要控制參數，不同溫度會影響吸附劑顆粒固氣邊界與內部孔隙的擴散速率，為了瞭解不同溫度對二氧化碳吸附的影響，在不同溫度下進行平衡吸附試驗，量測二氧化碳吸附量與時間變化的關係，以瞭解不同溫度對吸附效果的影響。

（一）活性碳吸附二氧化碳

以活性碳當吸附劑，探討不同溫度與起始二氧化碳濃度對二氧化碳吸附量的影響。起始二氧化碳分壓為 1,000-4,000 ppm，加入活性碳 10 g，反應時間 60 min。實驗後以烘箱 100°C 脫附吸附劑吸附的二氧化碳，每組吸附劑進行四重覆試驗。不同溫度下之二氧化碳分壓分別調整為 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 ppm 進行試驗。經 60 min 吸附平衡，結果如圖 2 所示。吸附溫度為 26°C 時，不同分壓下活性碳之二氧化碳去除率分別為 11.9、9.9、16.3、19.2%。吸附溫度為 35°C 時，不同分壓下活性碳之二氧化碳去除率分別為 7.7、16.2、20.2、21.0%。吸附溫度為 45°C 時，不同分壓下活性碳之二氧化碳去除率分別為 12.3、13.5、19.4、20.9%。實驗結果

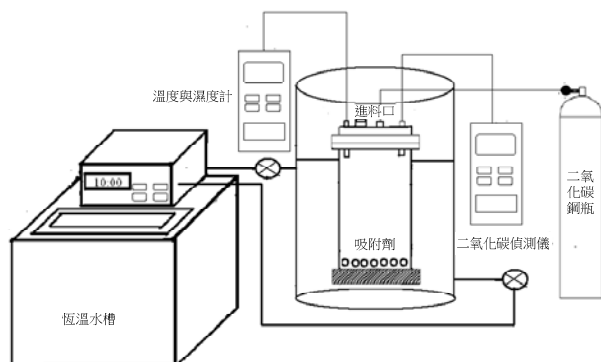
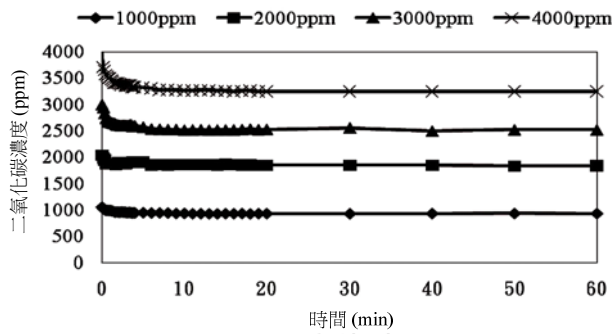
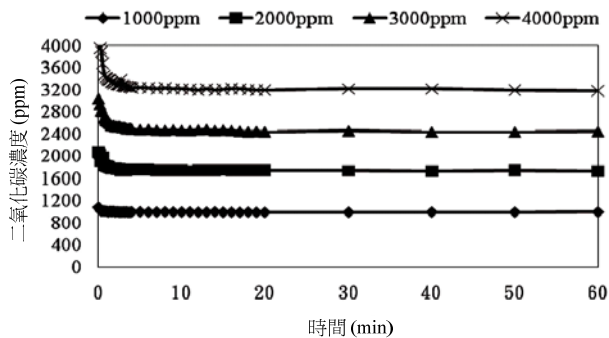


圖 1. 二氧化碳吸附裝置

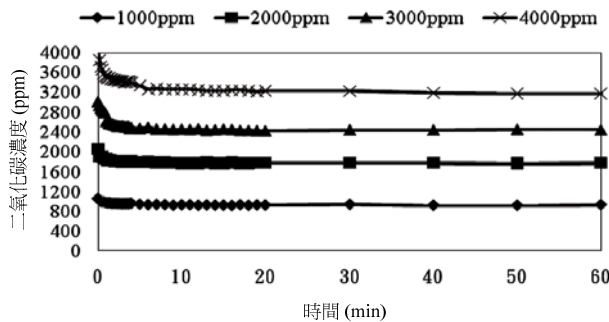




(a) 26°C



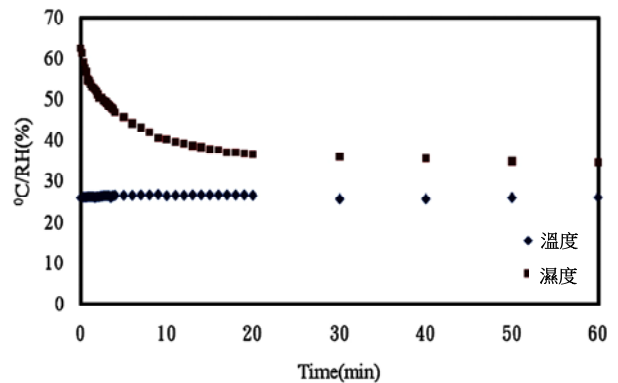
(b) 35°C



(c) 45°C

圖 2. 活性碳於不同起始二氧化碳濃度之吸附變化

顯示，活性碳對二氧化碳吸附量隨溫度與二氧化碳分壓上升而增加，在二氧化碳分壓高時，都具有較佳的吸附效果。起始吸附溫度為 26°C 時，試驗期間之溫度與濕度的變化如圖 3(a) 所示，濕度隨吸附時間增加有減少的趨勢，溫度則無明顯變化。不同溫度下，活性碳對二氧化碳之平衡吸附量與平衡濃度之關係如圖 3(b) 所示，吸附溫度為 26°C 時，分別為 0.06、0.09、0.22、0.34 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 35°C 時，分別為 0.04、0.15、0.27、0.37 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 45°C 時，分別為 0.05、0.12、0.25、0.36 $\mu\text{g/g}$ 。隨著吸附溫度提高及二氧化碳分壓增加，活性碳對二氧化碳之平衡吸附量有增加之



(a) 溫度與濕度變化，起始溫度 26°C，起始二氧化碳濃度 1,000ppm，相對濕度 62.5%；RH 相對濕度

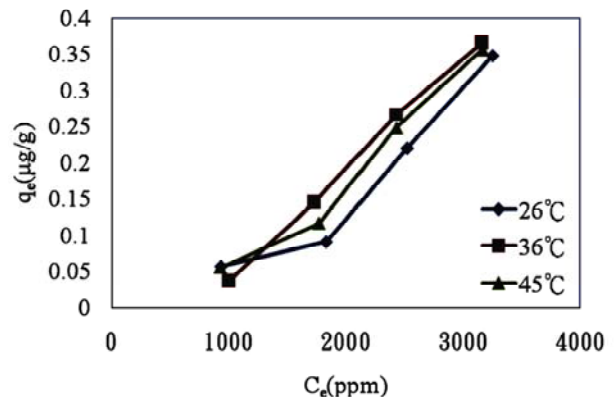
(b) 活性碳之二氧化碳的平衡吸附量； C_e ：二氧化碳平衡濃度， q_e ：二氧化碳平衡吸附量

圖 3. 活性碳吸附二氧化碳之溫度、濕度與平衡吸附量之變化

趨勢。不同溫度下，在較高的二氧化碳分壓（4,000 ppm）下，活性碳對二氧化碳之平衡吸附量均可達約 0.37 $\mu\text{g/g}$ ，以 35°C、CO₂ 4,000 ppm 時具有最佳的平衡吸附量，0.37 $\mu\text{g/g}$ 。溫度低，分子動能低，降低氣體擴散速率，因而吸附量較低。提昇溫度，分子具備足夠的擴散動能，因而吸附量增加，若溫度提昇至 45°C 時，分子的擴散動能過高，無法使二氧化碳分子與吸附劑間有穩定的吸附作用，分子容易脫附，因此平衡吸附量下降。

(二) 沸石吸附二氧化碳

以商業用沸石當吸附劑，探討不同溫度與起始二氧化碳濃度對二氧化碳吸附量的影響。起始二氧化碳分壓調控於 1,000-4,000 ppm，加入沸石 1.0 g，反應時間為 120 min。實驗結果之二氧化碳吸附與濕度的變化如圖 4 與圖 5 所示。沸石對二氧化碳吸附能力差。吸附溫度為 26°C 時，幾乎沒有



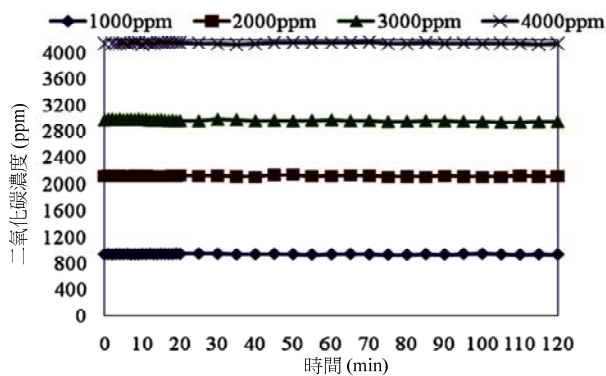


圖 4. 沸石於不同起始二氧化碳濃度之吸附變化，溫度 26°C

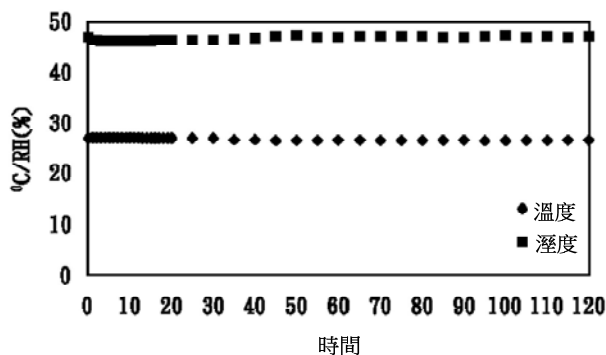


圖 5. 沸石吸附二氧化碳 (1000ppm) 之溫度與濕度變，起始溫度 26°C，相對濕度 47.1 %

吸附能力。試驗期間，沸石之相對濕度稍有增加，因沸石對水分子的親和力強，只要有水分存在，沸石表面會先與水分子結合，因而減少對二氧化碳之吸附，若要以沸石吸附二氧化碳必須在無水的狀況，所以沸石較不適合作為處理室內二氧化碳的吸附劑。

(三) Silica xerogel 吸附二氧化碳

本試驗以 silica xerogel 當吸附劑，在不同溫度下進行試驗，二氧化碳起始分壓分別為 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 ppm，吸附劑 silica xerogel 0.45 g，反應時間為 120 min。實驗結果如圖 6 所示，當吸附溫度為 20°C 時，經 120 min 吸附平衡，不同分壓下 silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 5.0、4.5、3.0、3.1%。吸附溫度為 26°C 時，silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 10.2、11.2、5.4、4.5%。吸附溫度為 30°C 時，silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 12.6、10.0、15.8、6.1%。吸附溫度為 35°C 時，silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 21.8、16.5、12.3、9.8%。實驗結果顯

示，silica xerogel 對二氧化碳吸附量隨溫度上升而增加，35°C 時具有較佳的吸附。不同溫度下增加二氧化碳分壓，silica xerogel 對二氧化碳去除率有下降趨勢。

吸附溫度為 20°C 時，試驗期間濕度的變化如圖 7(a) 所示，濕度之變化隨吸附時間增加先減少而後趨於平衡不變。不同試驗溫度下，silica xerogel 對二氧化碳之平衡吸附量與平衡濃度之關係如圖 7(b) 所示。當吸附溫度為 20°C 時，經 120 min 吸附平衡，不同分壓下 silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量分別為 0.49、0.89、0.88、1.10 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 26°C 時，silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量分別為 1.04、1.91、1.42、1.60 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 30°C 時，silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量分別為 1.64、2.65、4.52、2.18 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 35°C 時，silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量分別為 1.96、1.83、3.07、3.56 $\mu\text{g/g}$ 。silica xerogel 對二氧化碳之平衡吸附量隨溫度上升而增加，以 30°C 起始二氧化碳濃度為 3,000 ppm 時具有最佳的平衡吸附量，4.52 $\mu\text{g/g}$ 。增加二氧化碳分壓，silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量有增加趨勢。溫度增加，提升二氧化碳氣體分子的流動性及造成吸附劑內部結構膨脹，使二氧化碳氣體分子更易附著於吸附劑表面，因而增加吸附效果。

(四) Amine-grafted silica xerogel 吸附二氧化碳

本試驗以實驗室自行合成之 amine-grafted silica xerogel 為吸附劑，吸附劑量為 0.45 g，總反應吸附平衡時間為 120 min，二氧化碳分壓 1,000-4,000ppm，實驗結果如圖 8 所示。當吸附溫度為 20°C 時，不同分壓下 amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 26.4、17.0、10.3、9.6%。吸附溫度為 26°C 時，不同分壓下 amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 21.8、15.0、12.8、11.6%。當吸附溫度為 30°C 時，不同分壓下 amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 28.3、15.4、15.3、10.8%。當吸附溫度為 35°C 時，不同分壓下 amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳去除率分別為 34.64、21.7、19.5、13.1%。結果顯示，提高溫度，增加 amine-grafted silica xerogel 吸附二氧化碳能力，以在低二氧化碳分壓之吸附較顯著。amine-grafted silica xerogel 是以化學方法修改，具有鹼性的官能基 amine，增加吸附二氧化碳的能力，對二氧化碳去除率比其他三種吸附劑效果好。



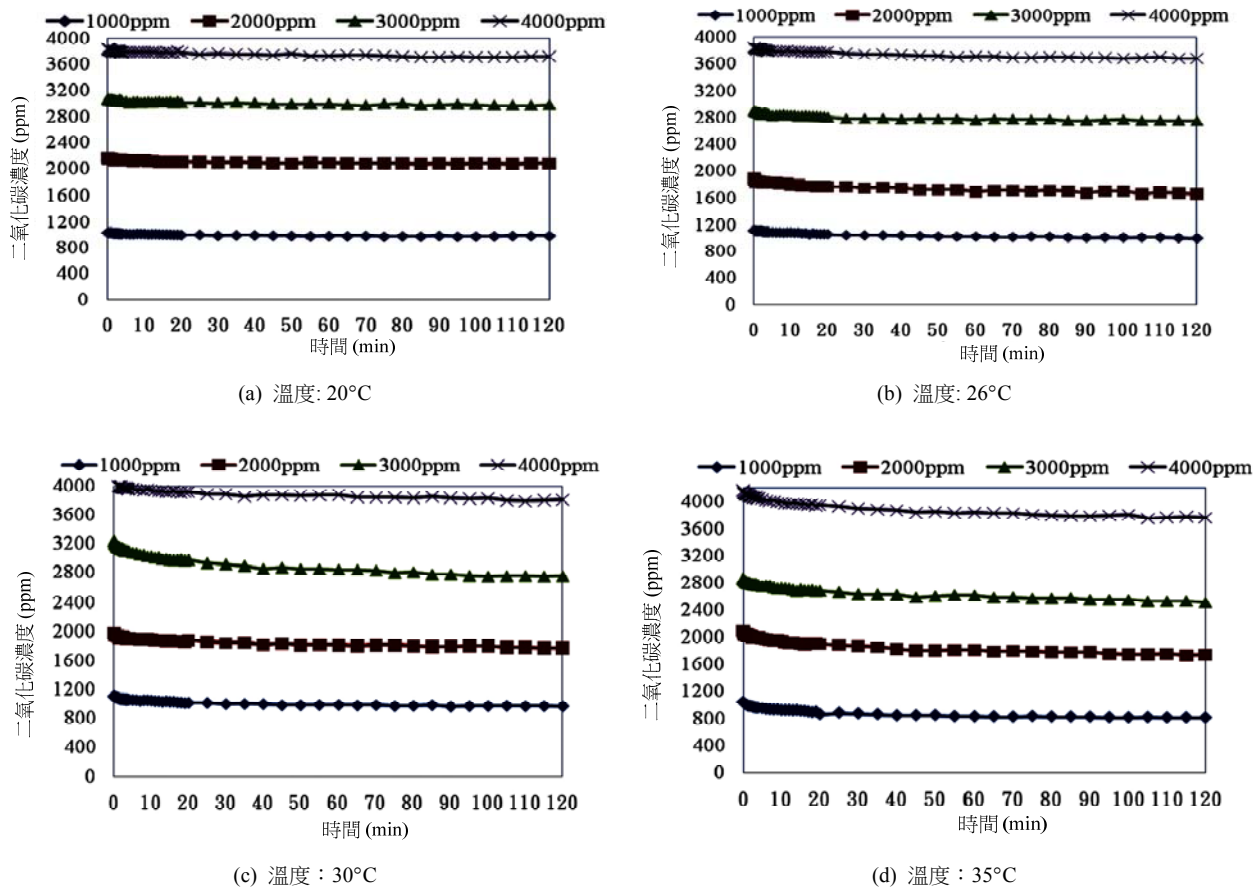
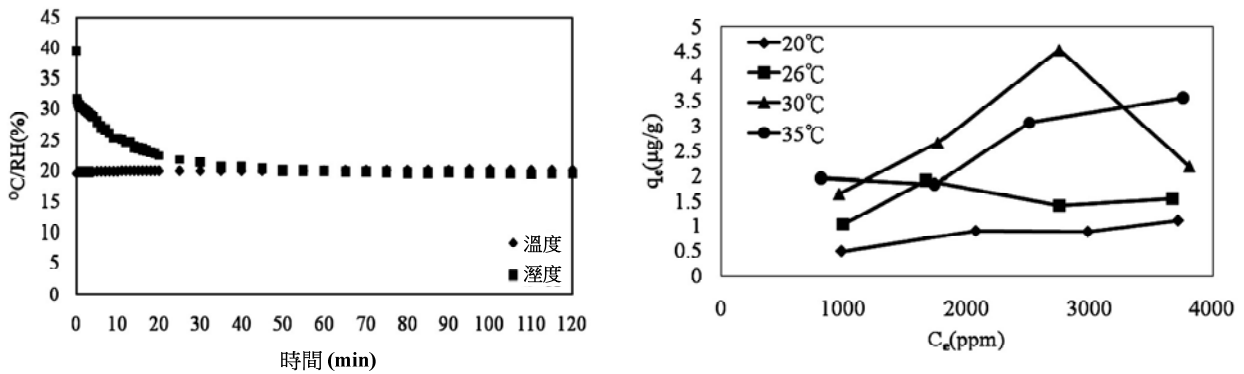


圖 6. Silica xerogel 於不同起始二氧化碳濃度之吸附變化



(a) 溫度、濕度變化，起始溫度 20°C，起始二氧化碳濃度 1000ppm，相對濕度 39.4% (b) silica xerogel 之二氧化碳之平衡吸附量

圖 7. Silica xerogel 吸附二氧化碳之溫度、濕度變化與平衡吸附量

溫度為吸附過程中重要控制參數，不同溫度下會影響吸附劑顆粒固氣邊界與內部孔隙的擴散速率。amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳之平衡吸附量與濕度變化之關係如圖 9 所示。吸附的程序是屬於放熱的反應，增加溫度，吸附

劑濕度稍有減少的趨勢，但變化不大。當吸附溫度為 20°C 時，經 120 min 吸附平衡，不同分壓下 amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量分別為 2.68、3.27、2.94、3.76 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 26°C 時，amine-grafted silica xerogel 之二



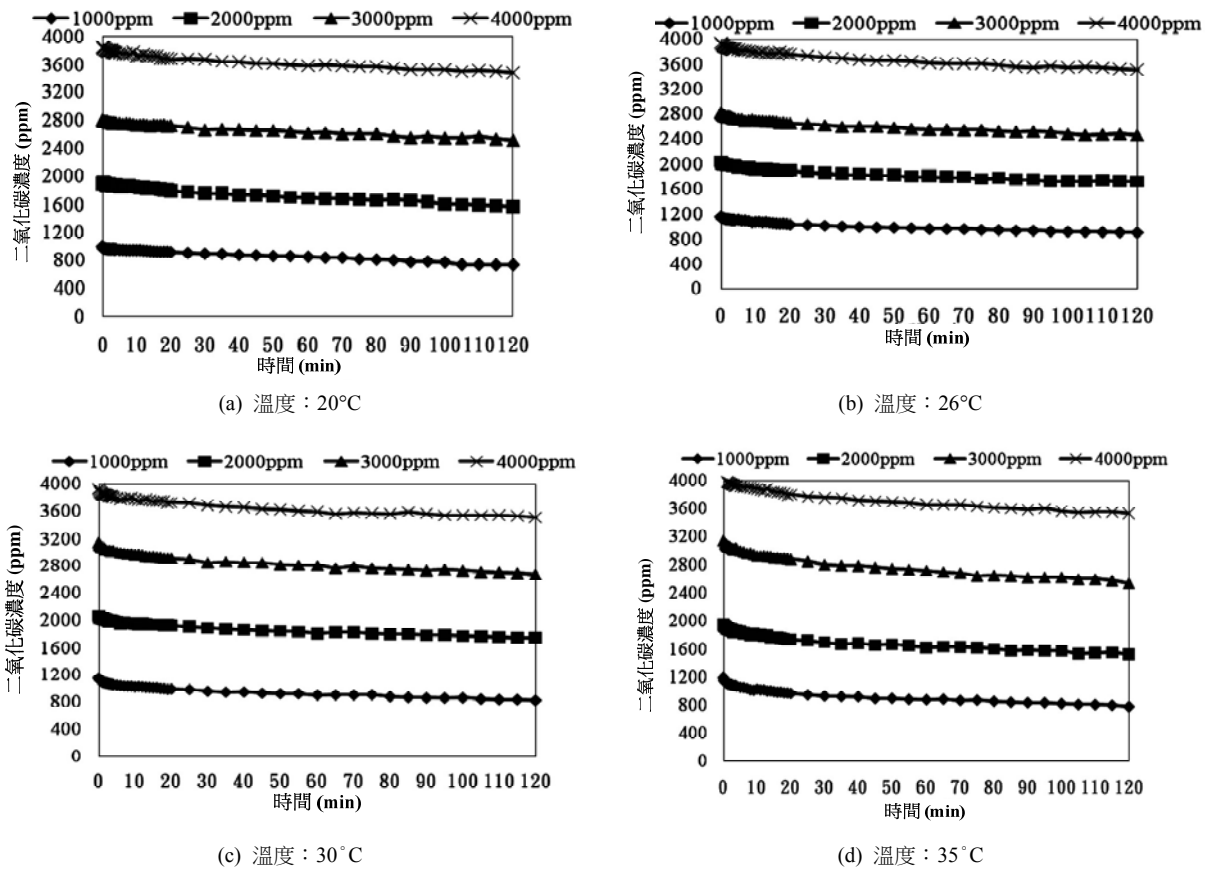


圖 8. Amine-grafted silica xerogel 於不同起始二氧化碳濃度之吸附變化

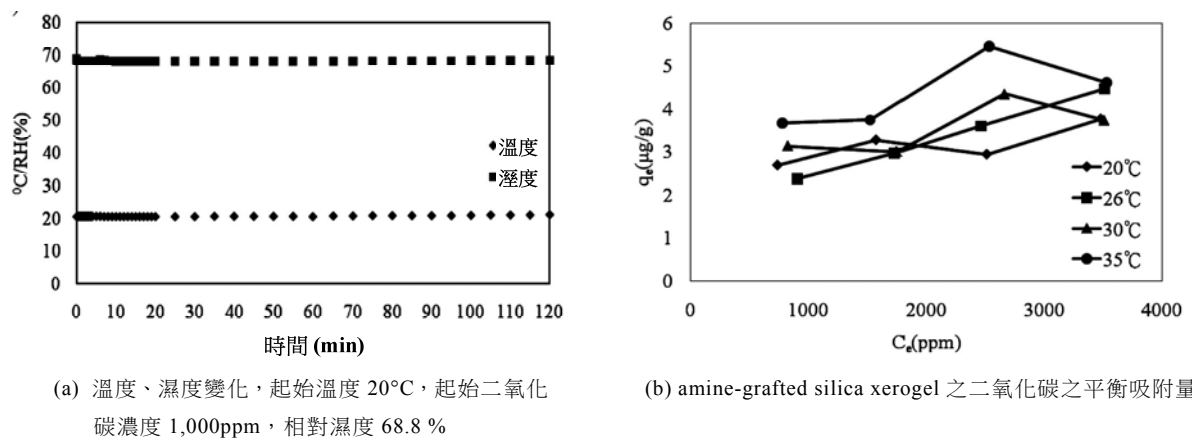


圖 9. Amine-grafted silica xerogel 吸附二氧化碳之溫度、濕度變化與平衡吸附量

氧化碳平衡吸附量分別為 2.36、2.96、3.60、4.47 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 30°C 時，amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量分別為 3.13、3.00、4.35、3.74 $\mu\text{g/g}$ 。吸附溫度為 35°C 時，amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量

分別為 3.67、3.74、5.46、4.61 $\mu\text{g/g}$ 。amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳之平衡吸附量隨溫度上升而增加，以 35°C 起始二氧化碳濃度為 3,000 ppm 時具有最佳的平衡吸附量，5.46 $\mu\text{g/g}$ 。在較低溫 (20 和 26°C) 下，增加二氧化碳分壓，



amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量隨分壓增加而增加。在溫度 30 和 35°C 下，增加二氧化碳分壓，amine-grafted silica xerogel 之二氧化碳平衡吸附量隨分壓增加先增加而後下降。溫度提高，增加二氧化碳氣體分子的流動性及吸附劑內部結構的膨脹，吸附劑表面提供更大的表面積，使二氧化碳氣體分子更容易接觸吸附劑，反應速率加快，平衡吸附量增加，因而增加吸附效果。amine-grafted silica xerogel 於試驗期間濕度變化不大，適宜用於處理吸附室內二氧化碳氣體。

四、結論

本研究評估此四種吸附劑（活性碳、沸石、silica xerogel、amine-grafted silica xerogel）於低二氧化碳分壓下對二氧化碳的吸附能力。實驗結果顯示，沸石因易吸附水分，對二氧化碳吸附能力弱，其他三種吸附劑，隨吸附溫度增加，對二氧化碳去除率有增加趨勢。amine-grafted silica xerogel 在高溫（35°C）低二氧化碳分壓（1000 ppm）下，二氧化碳去除率可達約 35%。amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳之吸附效果亦最佳，在 35°C 起始二氧化碳濃度為 3,000 ppm 時具有最佳的平衡吸附量，5.46 $\mu\text{g/g}$ 。其次分別為 silica xerogel（4.52 $\mu\text{g/g}$ ，30°C、3,000 ppm）和活性碳（0.37 $\mu\text{g/g}$ ，35°C、4,000 ppm）。amine-grafted silica xerogel 因具有 amino 基團，有助於二氧化碳的吸附。活性碳、silica xerogel 與 amine-grafted silica xerogel 對二氧化碳吸附容量，因氣固平衡的關係，隨二氧化碳初始濃度增加而有升高的趨勢。增加二氧化碳濃度，吸附劑吸附速率增加使吸附飽和時間縮短，有利增加二氧化碳之吸附量。本研究 amine-grafted silica xerogel 吸附劑對水分子有弱的親和力，於低二氧化碳分壓下對二氧化碳具吸附能力，可應用於室內吸附去除二氧化碳。

參考文獻

1. 邱瑞宇、邱春惠、賴東璟、林佳昫、許湘翎（民 98），以 VOC、CO、CO₂ 及總菌落數探討大班教室室內空氣品質，2009 空氣污染控制技術研討會，中華民國環境工程學會，雲林。
2. 陳海曙（民 79），空氣品質不佳之案例研究，中華民國建築學會第三屆建築學術研究發表會論文集，台北。
3. 李明澤（民 81），非均勻系觸媒反應的理論與應用，復文書局，台灣。
4. 謝祝欽、陳怡茜、郭柏成（民 98），利用沸石觸媒轉化二氧化碳之研究，2009 空氣污染控制技術研討會，中華民國環境工程學會，雲林。
5. Banerjee, R., A. Phan, B. Wang, C. Knobler, H. Furukawa, M. O’Keeffe and O. M. Yaghi (2008) High-throughput synthesis of zeolitic imidazolate frameworks and application to CO₂ capture. *Science*, 319, 15.
6. Darmana, D., R. L. B. Henket, N. G. Deen and J. A. M. Kuipers (2007) Detailed modeling of hydrodynamics, mass transfer and chemical reactions in a bubble column using a discrete bubble model: Chemisorption of CO₂ into NaOH solution, numerical and experimental study. *Chemical Engineering Science*, 62, 2556-2575.
7. Fadhel, B., M. Hearn and A. Chaffee (2009) CO₂ adsorption by PAMAM dendrimers: Significant effect of impregnation into SBA-15. *Microporous and Mesoporous Materials*, 123, 140-149.
8. Lee, S. C., J. C. Ho, S. J. Lee, B. Y. Choi, C. K. Yi, J. B. Lee, C. K. Ryu and J. C. Kim (2008) Development of regenerable MgO-based sorbent promoted with K₂CO₃ for CO₂ capture at low temperatures. *Environmental Science Technology*, 42, 2736-2741.
9. Li, Y., C. Zhao, C. Qu, L. Duan, Q. Li and C. Liang (2008) CO₂ capture using CaO modified with ethanol/water solution during cyclic calcination/carbonation. *Chemical Engineering Technology*, 31(2), 237-244.
10. Song, H. K., K. W. Cho and K. H. Lee (1998) Adsorption of carbon dioxide on the chemically modified silica adsorbents. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 242, 69-80.
11. Zelenak, V., D. Halamova, L. Gaberova, E. Bloch and P. Llewellyn (2008) Amine-modified SBA-12 mesoporous silica for carbon dioxide capture: Effect of amine basicity on sorption properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, 116, 358-364.

收件：101.02.03 修正：101.03.19 接受：101.04.23

