

# 自製Y-ZEOLITE運用於室內空氣污染物的吸附效能之研究

翁文彬<sup>\*</sup> 謝祝欽<sup>\*\*</sup> 鄭鑫漢<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>國立雲林科技大學工程科技研究所  
<sup>\*\*</sup>國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系

## 摘 要

行政院環保署於 2006 年 1 月 26 日召開室內空氣品質座談會，研擬其建議值及管理法草案，針對粒狀污染物、氣狀污染物及生物性污染等提出十個指標項目予以管制，同時亦進入立法作業程序。然而目前市面上之空氣淨化產品玲瓏滿目，一般常見被用來過濾空氣之原料和方法有活性炭、靜電集塵器、奈米光觸媒、負離子等，雖然都標榜著除塵脫臭之功能，但依據消基會針對市面上所販售的 15 台市售的空氣清淨設備進行效能評價，其結果發現卻有 9 台處理揮發性有機物的效率不到 20%。因此經本研究評估後發現「沸石」之吸附能力已獲國內外學者證實，且具有吸附對象廣、可再生脫附及不易著火等特點，但目前由國外購置成本高昂，致其應用受限，因此乃積極著手開發自製設備及技術，目前已成功研發出具有高吸附能力、再生特性、不易受水氣影響及成本相對低廉的「奈米級沸石」。經實測得知其二次吸附量 (84 mg/g、78 mg/g) 明顯高於市售沸石之吸附量 (54 mg/g、5 mg/g)，且經四次脫附再生後使用率仍可達 86 % 以上，證明本研究自製之沸石具其優越性能。然考量其於室內空間的實用性，本研究乃呈現所開發「沸石轉輪系統」與「沸石玻纖濾網」等兩套處理系統，並以模擬室內空間的艙室實際進行甲醛吸附效能評估後發現兩者皆得於反應時間內有效將甲醛予以吸附。同時本研究亦掌握其相關操作參數、特性分析及建置吸附動力方程式等，未來得提供自製沸石吸附甲醛上實際應用之重要參考依據。

**關鍵詞：** 甲醛、沸石轉輪系統、沸石玻纖濾網、艙室模擬實驗、吸附

## 1. 前 言

隨著社會科技多元化的發展，因應人類不同需求的居住建築環境日趨複雜，且現代建築為保護人們免受外界惡化的環境品質所影響，更加强建築本身的密閉性，導致室內空氣通風循環不良，進而衍生相關後續問題。一般室內場所包括住宅、辦公室、工廠、學校、餐廳以及戲院等建築物，或是汽車、火車、飛機等交通工具，其中尤以住宅、辦公室、工廠和人們的日常生活息息相關。各種裝潢材料之使用例如：表面塗裝材料、黏著劑、填縫劑等，為求施工上的塗膜特性、光澤性等，其組成中添加不少有機溶劑，然而大多數的溶劑於施用後常未經妥善處理而直接揮發逸散，因此造成室內環境中揮發性有機氣體 (volatile organic compounds, VOCs) 產生，其他如烹飪、抽菸等室內最普遍的燃燒行為或使用殺蟲劑、髮膠、油漆、立可白等用品都是 VOCs 來源。大多數人每天在不同室內地點活動和居處的時間高達 90% 以上，人體長期暴露於室內所逸散出來的 VOCs 中輕者易導致咳嗽、胸部產生壓迫感、頭部有壓力感

等；重者可能引發癌症及其它急性或慢性症狀。根據國外調查資料顯示，在密閉之辦公大樓裡之員工，常有疲勞、頭暈、頭痛、喉嚨痛及眼睛與鼻子受刺激等症狀發生，這些症狀被研究學者統稱為病態大樓症候群 (sick building)。

有鑑於此，環保署 (2006) 針對此室內空氣品質的重要議題修訂「一般場所室內空氣品質參考標準建議值草案」，明訂室內的二氧化碳、一氧化碳濃度及揮發性有機化合物，連續檢測八小時的平均值，分別不得超過 1000 ppm、9 ppm、3 ppm；此外針對建築材料逸散之致癌物甲醛，連續檢測一小時最大值不得超過 0.1 ppm。然而消基會 (2004) 將市售家用室內空氣清淨機進行懸浮微粒及揮發性有機氣體去除功能的測試，抽查發現，約有六成以上的空氣清淨機去除揮發性有機氣體功能不佳，若欲以其做室內環境中空氣污染物防制設備，恐將無法發揮其具體成效。因此，實需投入室內空氣防制技術之開發及建置完整配套措施，俾能落實管制成效。

沸石為一具有物種選擇性吸附、耐水氣、用途廣泛、可塑性高與再生使用率佳等優點之吸附劑，相當適合用於吸附 VOCs, Aguado, et al. (2004) 針對低濃度下 (2-230 ppmv) 的甲醛、正己烷、苯等進行連續式實驗，靠著反應器的運作以及擴散通量為3300、1300、30 mg/(m<sup>2</sup>h)，顯示沸石薄膜能有效阻隔及去除污染物。Pires, et al. (2001) VOCs 吸附在Y型沸石和柱狀黏土上，吸附量與表面積及孔隙大小有關，而Esswein and Boeniger (1994) 利用臭氧空氣清淨機評估去除甲醛之效能，而甲醛起始濃度為2.5 ppm，溫度為21 °C。結果顯示，臭氧空氣清淨機對於甲醛之去除效率普遍欠佳，因此本研究以自行製作沸石針對常用於塗料、黏著及合板之室內空氣污染物進行吸附實驗，並探討不同矽鋁配比之沸石對VOCs吸附量所造成的差異，藉此找出最適合用於吸附、移除室內空氣污染物的製作摻配比例，並且藉由實驗求出最佳操作參數，進而由不同脫附方式找出最適合用於室內設備的脫附方式，同時開發出「沸石轉輪系統」與「沸石玻纖濾網」用於模擬槽體內，藉此將其應用於處理甲醛等室內空氣中常見之污染物，並進一步利用吸附動力模式進行對甲醛之吸附動力式擬合及探討，冀望得以提供相關複合吸附材料實際應用於室內防制設備之參考依據。

## II. 沸石介紹與其特性

沸石在1756年首先為瑞典礦冶學家克朗斯提 (B. Cronstedt) 發現，它是一種低密度軟性的礦石，由氧化矽、氧化鋁與鹼或酸性溶液在水汽壓力下作用所形成的結晶性矽鋁酸鹽。結構中含有大約20 %的水分，因水分會受熱而失去，溫度降低而再吸收，使得它在水中煮沸時會冒泡泡，故以希臘語“Zein” (沸騰) 和“lithos” (石頭) 命名稱為Zeolite (沸石)。沸石屬於多孔性物質，因為具有極高的表面積，而被廣泛的應用作為吸附劑、觸媒及觸媒載體。一般將多孔性物質之孔洞結構區分為三類：孔徑 < 2 nm 為微孔結構 (micropore)，孔徑在2-50 nm 範圍之間為中孔結構 (mesopore)，孔徑大於50 nm 以上的為大孔結構 (macropore)。

依據高嘉宏 (2000) 及顏秀慧 (1998) 提到沸石屬天然無機礦物質，它是一種低密度軟性的礦石，由氧化矽、氧化鋁與鹼在水汽壓力下作用所形成的結晶性矽鋁酸鹽。其主要結構是以矽或鋁氧化物的四面體 (SiO<sub>4</sub>或AlO<sub>4</sub>) 為基本單元，以氧原子連接矽、鋁的四面體所構成的三度空間骨架結構。顏秀慧 (1998) 研究指出，Y型及ZSM-5型沸石對於吸附VOCs效果較其他種類沸石為佳，較常被用來當實驗之吸附劑，其結構如圖1、圖2 所示。而此兩種沸石吸附劑又以Y型沸石價格較便宜；李琪華 (2003) 研究中發現ZSM-5

型沸石其吸附效果較Y型沸石差，原因可能是運用具疏水特性的二氧化矽 (SiO<sub>2</sub>) 作為沸石之黏合劑 (binder)，於製作過程中造成ZSM-5上的孔洞造成表面積損失，導致ZSM-5型沸石之吸附效果較Y型沸石差，因此本研究選用Y型沸石做為吸附劑。另外有鑑於林宏端 (1993) 實驗結果中發現沸石的矽鋁比影響沸石對有機溶劑之吸附能力及其吸附特性，本研究亦將藉由不同矽鋁配比等摻配條件製備實用性沸石，探討不同矽鋁比沸石對室內甲醛之吸/脫附能力，以進一步探討其應用可行性。

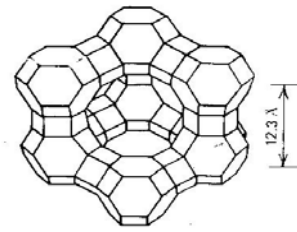


圖1 Y型沸石結構

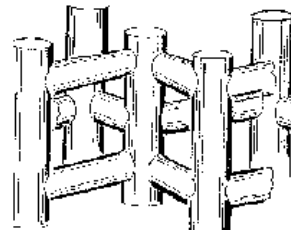


圖2 ZSM-5型沸石之結構圖

## III. 研究方法與設備

本研究目的為自製出有效沸石吸附劑，並經測試掌握其最佳摻配比例後，繼而開發出沸石轉輪設備及沸石玻纖濾網，再用以去除甲醛等室內空氣污染物，並且探討沸石的 BET、SEM/EDS及XRD等特性分析、單成份吸附特性、最佳脫附方法與轉輪設備及沸石玻纖濾網的吸附實驗結果。

### 3.1 自製沸石吸附劑

本研究設定目標為針對台灣海島型氣候和封閉式建築，藉由自行開發之吸附劑去除甲醛等室內空氣污染物，甲醛本身是高極性的分子，所以目前常用之吸附劑幾乎皆無法發揮吸附效能，因此本研究以70%矽鋁酸鈉+30% SiO<sub>2</sub> (稱配比I)、65%矽鋁酸鈉+35% SiO<sub>2</sub> (配比II)、35%矽鋁酸鈉+65% SiO<sub>2</sub> (配比III)、30%矽鋁酸鈉+70% SiO<sub>2</sub> (配比IV) 等四種不同摻配條件製備沸石，並各別針對甲醛等室內空氣污染物進行吸/脫附試驗，並與市售沸石 (Fluka) 進行吸附效能進行比較，以瞭解不同配比之沸石對甲醛之吸附能力與影響，並確認最佳自製沸石之摻配比例並做後續相關研



究之基礎。其製程如圖3所示。首先將欲調配比例之疏水性黏著劑SiO<sub>2</sub> (PPG Industries) 與矽鋁酸鈉 (GRACE Davison) 均勻混合, 再加入適量鹼性溶液, 待形成膠體狀, 再攪拌、揉合成麵團狀, 最後放入擠壓成型機中製成中空圓柱狀之沸石吸附劑。爾後將其放入烘箱中乾燥後, 再以高溫鍛燒數小時, 便完成沸石製作。

### 3.2 吸/脫附設備

#### 1. 甲醛氣體產生系統

甲醛氣體是藉由甲醛溶液以氣提之方式產生。首先將甲醛溶液倒入氣體衝擊瓶內, 將其放置恆溫水浴槽中以溫度控制 25 °C, 之後利用空氣壓縮機產生的空氣, 並經過流量控制器進入衝擊瓶內, 以曝氣的方式將甲醛氣體吹出, 並在氣體緩衝槽內與載流空氣混合, 利用浮子流量計控制混合氣體總進流量為 1 l/min。其甲醛濃度分析是在吸附固定床前後設置進流取樣口 (C<sub>0</sub>) 和出流取樣口 (C), 利用 GC-FID (Shimadzu GC-14B, Japan) 隨時間測定甲醛濃度,

並將所得數據做圖統計, 即得甲醛之吸附貫穿曲線。

#### 2. 吸附固定床

吸附固定床管柱為pyrex製圓柱型管柱, 內徑為3 cm, 長度 31 cm。取20 g沸石與適當克數之惰性玻璃珠, 以分層之方式填充固定床管柱之有效高度, 並於其管柱上下填滿惰性玻璃珠。

#### 3. 脫附系統及最佳脫附方式探討

本研究以高溫水氣進行沸石脫附實驗, 並控制進氣流量為 1 l/min, 然為提高沸石之脫附效率在進流氣體進入固定床前設置一預先加熱器, 使脫附氣流達到預設溫度後進入固定床, 並且在固定床後設置採樣口採樣分析之濃度, 直到出口氣體濃度降低後實驗即完成。其吸/脫附實驗設備如圖4所示。並針對沸石再使用率進行實驗, 利用不同的脫附方式來進行比較, 使沸石上的污染物脫附、焚化或去除, 使其有較高的再次使用的吸附能力, 並探討影響脫附能力的原因, 達到降低成本、符合經濟性之目的。

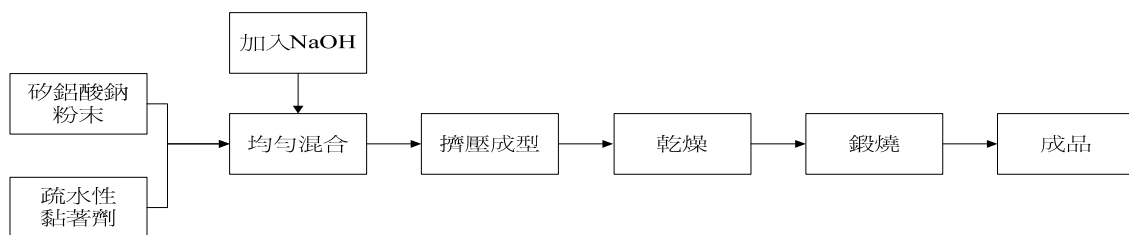


圖3 自製沸石製備流程

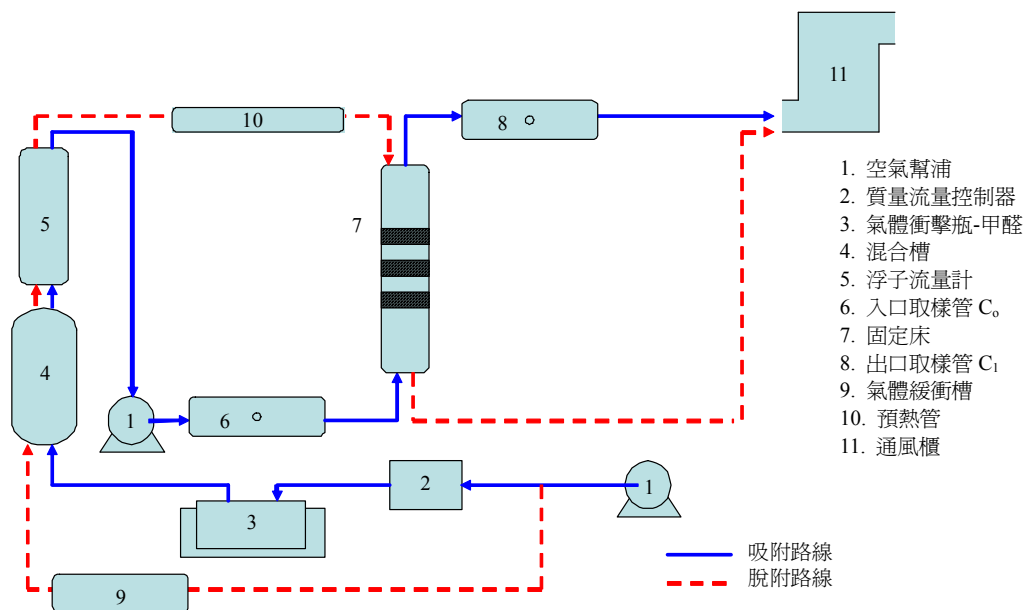


圖4 吸脫附設備示意圖

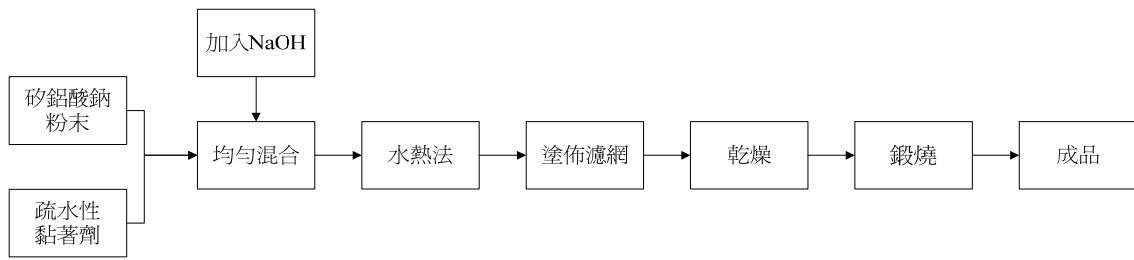


圖5 自製沸石玻纖濾網製備流程

### 3.3 自製沸石玻纖濾網

製備沸石玻纖濾網同樣以疏水性黏著劑SiO<sub>2</sub>與矽鋁酸鈉為原料，並添加NaOH溶液後於100°C水熱環境合成，再將其塗佈於玻璃纖維，並進行乾燥與鍛燒等步驟 (Larlus, et al., 2002)，其製作過程 (Tosheva and Valtchev, 2005) 如圖5。

### 3.4 沸石轉輪系統

轉輪系統由馬達帶動，同時分別有兩個開口，進氣口為利用往復式空氣幫浦，將模擬艙室內的污染空氣抽出後送入轉輪設備，而實驗時轉輪內填適當的沸石與惰性玻璃珠，含有甲醛的廢氣將經沸石吸附後，由排氣口藉由另一空氣幫浦抽出後，送回至模擬艙室內。

### 3.5 模擬艙室

沸石轉輪系統之模擬艙室為不鏽鋼製，長60 cm，寬50 cm，高40 cm，內容積為120 L之艙室，為避免不銹鋼表面吸附，造成實驗誤差，於艙室內層覆蓋鐵弗龍布 (Teflon)，同時內有一不鏽鋼製攪拌風扇，來使內部污染物混合均勻，而應用於沸石轉輪系統實驗模擬艙室各如下圖6所示。而沸石玻纖濾網之模擬艙室為玻璃製長44 cm，寬30 cm，高30 cm，內容積約為40 L之艙室，其內亦設有不鏽鋼製攪拌風扇，並且利用往復式抽氣幫浦進行實驗，其幫浦流量為11.3 l/min、換氣量為5.6 次/hr，模擬艙室如圖7所示。

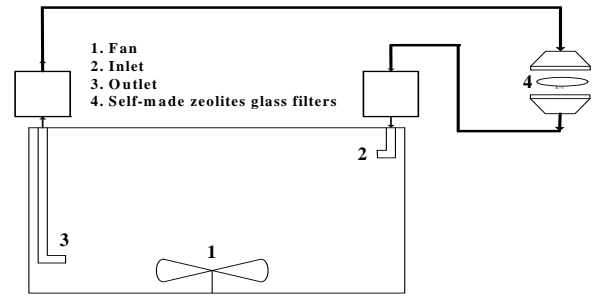


圖7 沸石玻纖濾網之實驗模擬艙室圖

## IV. 結果與討論

本研究成果主要分為四部分其一最佳沸石製備條件及操作方式掌握，其二為沸石特性分析，再者為沸石轉輪設備及沸石玻纖濾網的測試，茲分別彙整如下。

### 4.1 自製沸石及其測試

#### 4.1.1 不同配比沸石之單成分吸附結果

本研究將自製沸石於4900 ppm甲醛濃度下進行其吸附實驗，以瞭解不同配比沸石之吸附能力並探討其各別吸附量與再生使用能力，其操作條件為各種不同摻配比例之沸石與市售沸石各為20 g，固定床內氣體流率設定為1 l/min。實驗時以GC/FID分別測量吸附管柱之入流與出流甲醛濃度，可得到單成份之吸附貫穿曲線如圖8-A，之後將自製沸石進行高溫水氣脫附後再進行第二次吸附實驗，其貫穿曲

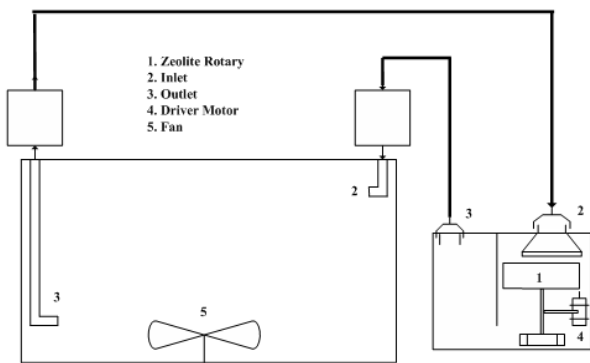
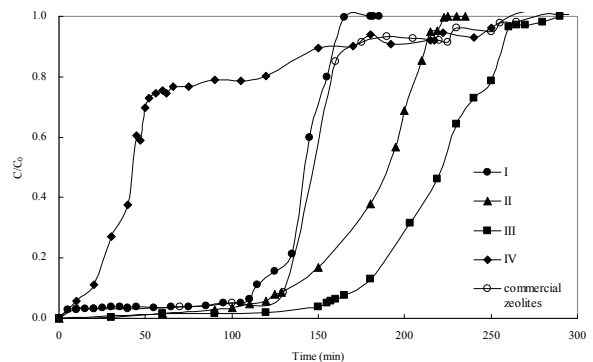


圖6 沸石轉輪之實驗模擬艙室圖

(A) 第一次吸附



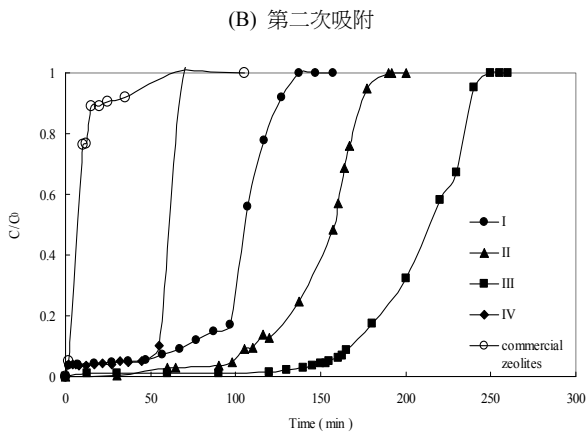


圖8 自製不同摻配比例之沸石對甲醛二次吸附/脫附結果

線如圖8-B,此外本研究亦購買市售沸石並在相同操作條件下進行吸/脫附實驗,以確認自製沸石最佳摻配比例。

#### 4.1.2 不同濃度下單成分吸附量分析

由質量平衡 (Mass Balance) 估算飽和吸附量,其公式如下所示:

$$Wq = Q_f \int_{t=0}^{t=t_e} (C - C_0) dt \quad (1)$$

$$= Q_f \Delta C t$$

- 其中 W: 填充沸石克重 (g)
- q: 平衡濃度下的吸附量 (mg/g)
- Q<sub>f</sub>: 進氣氣體總流量 (l/min)
- ΔC: 污染物濃度 (mg/l)
- t: 貫穿時間 (min)

由實驗結果可得配比 III 沸石其兩次吸附量依序為 84 mg/g、78 mg/g 為最高,其次為配比 II 沸石為 63 mg/g、51 mg/g,再其次為配比 I 沸石為 50 mg/g、37 mg/g,以配比 IV 沸石為 28 mg/g、21 mg/g 為最低,因此可知適當的調整矽鋁比可達到理想的摻配比例;而市售沸石吸附量依序為 54 mg/g、5 mg/g,其各別吸附量整理於表1。進一步分析造成此吸附量差異之可能性,在本研究自製沸石部分由於比例不同造成其各別沸石結構及強度上之差異,致其影響對甲醛之吸附與再生能力;而市售沸石部分除本身摻配比例異同外,探究其原因乃是市售沸石脫附後仍未將甲醛全部帶出導致其吸附位置減少,使得其再生能力效果不彰。因此證實本研究自製配比 III 沸石之吸/脫附能力明顯優於市售沸石與其他沸石,然而本研究亦得以確認配比 III 沸石乃是較適合之製作比例,因此後續皆針對配比 III 沸石進行特性分析與探討,並以其摻配比例製作沸石玻纖濾網,並評估其可行性。

表1 自製不同摻配比例之沸石及市售沸石對甲醛二次吸附/脫附結果

	甲醛吸附量 (mg/g of zeolite)				
	I	II	III	IV	市售沸石
第一次吸附	50	63	84	28	54
第二次吸附	37	51	78	21	5

## 4.2 自製沸石特性分析

確認配比 III 沸石之摻配比例為本研究之最佳自製沸石摻配條件後,乃將其進行特性分析,以瞭解其基本特性進而探討其對甲醛吸附能力之影響。

### 4.2.1 EDS分析

本研究利用EDS分析觀察自製沸石所含元素及其含量,以計算其沸石之SAR (silicon and aluminum ratio, 矽鋁比)。因此將配比 III 沸石進行EDS分析,其結果如表2,得其Si原子數為27.8%、Al原子數為4.6%,若依Si與Al含量來看可得其依序為39.2%與6.2%,將其各別除分子量後,亦得以確認自製沸石之SAR為6,因此證實本研究最佳自製沸石摻配比例之SAR為6,後續皆將配比 III 沸石稱為SAR 6沸石。

表2 配比 III 沸石EDS分析結果

mix proportion	Element	Weight (%)	Atomic (%)	SAR
35 % 矽鋁酸鈉 + 65 % SiO <sub>2</sub> (配比 III)	O	53.3	66.4	
	Na	1.3	1.2	
	Si	39.2	27.8	6
	Al	6.2	4.6	
	Total	100.00	99.9	

### 4.2.2 Brunauer Emmett Teller比表面積分析

吸附為表面作用現象,吸附劑吸附能力大小與其表面積有關,表面積增加其吸附能力亦相對提升,此乃判斷吸附劑吸附能力大小之基本特性方法之一。將本研究自製SAR 6沸石進行BET分析,結果可得知本研究自製沸石之BET比表面積為482 m<sup>2</sup>/g,優於一般國內常用沸石之400 m<sup>2</sup>/g。

### 4.2.3 孔徑分佈

吸附劑的孔徑大小,也扮演著影響吸附劑吸附能力一個重要的因素,若吸附劑的孔洞直徑過小,大分子將無法進入,小分子則可被吸附,因為可以進行篩選不同大小的分子,故稱此種物質為分子篩。沸石本身就是一種分子篩。對於吸附劑孔隙直徑小於目標吸附質分子時,吸附質分子將無法進入孔隙中,進行吸附反應,故吸附劑孔隙直徑須較吸附質氣體分子大,以利於吸附作用。本研究所使用製造出的沸石經測量後,其孔徑分佈情況如圖9所示,其孔徑大小可看出,矽鋁比較高者其孔隙約分佈於20 Å。根據國際純粹與應用化學聯合組織 (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) 對於多孔性物質的分類,屬微孔性,且屬奈米級材料因此可得知適當控制矽鋁比,能使微孔隙的增加亦使其吸附表面積增加。

#### 4.2.4 XRD分析

本研究利用X-ray繞射分析觀察吸附前後沸石晶相之結構變化；並藉由XRD來探討再生過程對沸石結晶破壞情形。因此乃將未經吸附試驗之SAR 6沸石進行XRD分析如圖10-A所示，為觀察其經過二次吸附/一次脫附實驗後晶體結構之變化，亦將其進行分析如圖10-B所示，結果得經吸脫附後之沸石在2θ所產生的特徵峰仍與未經吸脫附沸石出現角度一致，且兩者特徵峰強度幾乎無改變外亦無其他晶相產生，也就是說沸石的晶體結構未因二次吸脫附甲醛而遭受到改變，然而本研究亦得以確認SAR 6 乃是較適合之沸石製作比例且具再生使用效能，因此後續皆針對SAR 6 沸石進行探討，並以其摻配比例製作沸石玻纖濾網，評估其應用於室內之可行性。

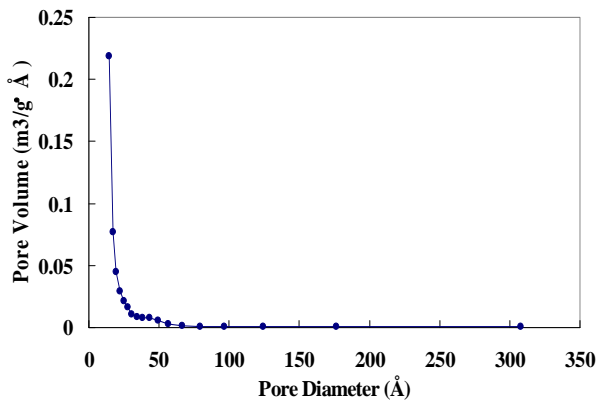


圖9 配比III沸石孔徑分析結果

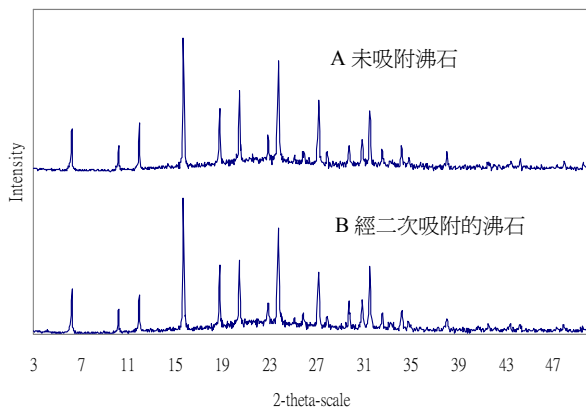


圖10 配比III沸石XRD分析結果

#### 4.3 發展沸石轉輪系統與其吸附實驗結果分析

本研究主要乃是為開發一空氣清淨設備來搭配經過吸附實驗後基本特性與吸附能力最適用之沸石，藉著模擬艙室吸附實驗，一方面能測試吸附設備的去除能力，更能求出設

備之最佳操作參數，以便日後將設備放大，用於大型室內公共空間上，以達到清淨空氣、去除污染物及提升生活品質之效。

##### 4.3.1 甲醛於艙室內濃度變化量

在進行沸石轉輪設備吸附實驗前，必須先進行與吸附實驗時相同甲醛濃度，在艙室內濃度變化量，以利進行比較及數據解析。此狀態下的濃度變化量可稱為自然衰減率（衰退率），發生狀態可能為艙室槽體、攪拌風扇、送氣管路的吸附量或槽體洩漏逸散量。而室內空氣清淨機檢測標準係依據美國家電協會（The U.S. Association of Home Appliance Manufacturers）所制定且通過美國國家標準機構（ANSI）認可之檢測標準，其定義乃是當室內空氣清淨機使用時，會增加污染物去除效能，通常將其量化定義為clean air delivery rate (CADR)，為空氣清淨機對污染物去除效能的效率評估模式，依據CADR計算理論，在吸附實驗間的濃度變化量必須列入計算式中，方能計算出正確之CADR值。

CADR之理論基礎，假設於體積大小為V之完全密閉空間內，即無滲透及外洩風量，將通風換氣之干擾因素忽略，且無其它粉塵產生源，則粉塵濃度的質量守恆方程式為

$$\frac{dC}{dt} = -K_n - \frac{Q(C_{in} - C_{out})}{V} \quad (2)$$

$C_{in}$ 、 $C_{out}$ ：進出口污染物濃度

Q：清淨機運轉風量

$K_n$ ：未開機衰減常數

V：測試空間體積

$$\text{未開機實驗 (Cleaner Off)} \quad K = K_n \quad (3)$$

$$\text{開機實驗 (Cleaner On)} \quad K = K_n + \frac{\eta E_d Q}{V} = K_a \quad (4)$$

$$CADR = (K_a - K_n) \times V = \eta E_d Q \quad (5)$$

CADR 為考慮空氣清淨機效率 ( $\eta$ ) 及短循環係數 (Ed) 兩種因子，所得之空氣清淨機有效處理風量。由於  $\eta$  及Ed不易藉由計算得知。便進行未開機實驗及空氣清淨機開機實驗，將所得之實驗數據進行迴歸分析即可求得 $K_a$  (開機衰減常數)、 $K_n$  (未開機衰減常數)，再帶入方程式 (2.3)，即可得知空氣清淨機之CADR 值。如圖11所示，可觀察出不論濃度高低，甲醛濃度在此艙室內皆會有減少的趨勢，將此趨勢統計，並且經過指數回歸運算後，便可求得 $K_n$ 值。



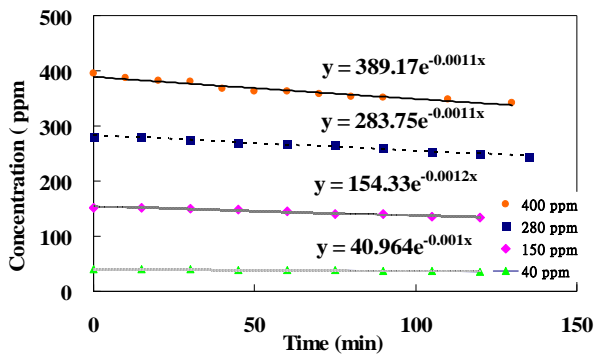


圖 11 穩定狀態下不同濃度甲醛於艙室內濃度變化量情形

#### 4.3.2 不同濃度下艙室吸附實驗

本研究目的為去除室內甲醛，因此便藉模擬艙室來進行實驗，而為能達到與實際室內空氣污染濃度相近，因此設定吸附實驗濃度分別為400 ppm、280 ppm、150 ppm及40 ppm。先將甲醛氣體曝入直至所需濃度後，將所有閥件關閉，並且讓風扇攪拌半小時後，接上轉輪吸附系統，開始進行吸附，以比較艙室內濃度自然衰減變化量，如圖12，可明顯看出開始處理前30分鐘，去除效率都超過60%，並能在120分鐘後，將艙室內的甲醛去除至95%以上。進而將吸附曲線進行統計整理，並利用指數回歸運算後，便可求得Ka值。若已知Ka及Kn便能得到攸關空氣清淨機效率之CADR值，計算400 ppm實驗組的CADR值為5.3 L/hr。

同時為探討室內污染物甲醛之濃度是否去除，將圖表利用C/C<sub>0</sub>表示，由圖12可發現一趨勢，在轉輪吸附系統啟動時，至60分鐘後，可以發現不論濃度高低均有相當好的去除效率，推測原因可能為轉輪速度為每30分鐘繞圈一週，同時艙室與抽氣幫浦設定為每30分鐘艙室換氣一次，因此在實驗起使始30分鐘前，沸石可確實接觸污染物進而吸附之，徹底發揮轉輪之功效，而有不錯之去除效率表現。在吸附實驗進行前，由固定床單成分吸附實驗結果來進行評估，利用質量平衡計算，在已知條件的情況下，於實驗前預測吸附曲線，並和實際實驗值進行一比較，由圖13可得知，固定床吸附值和艙室實際實驗值相近，兩者誤差可推測為艙室及轉輪實驗的自然衰退、轉輪速度不穩與管線洩漏，因此固定床數據模擬，能提供實驗設計或實驗進行前一個參考依據，以便能更精確的設計實驗設備。

#### 4.4 發展沸石玻纖濾網與其吸附實驗結果分析

本研究重點即為開發出一複合材料-沸石玻纖濾網，去除甲醛等室內空氣污染物，然確認SAR 6沸石是最佳自製沸石摻配比例後，為提高其應用於室內之便利性，乃將此沸石摻配比例塗佈於玻璃纖維以自製沸石玻纖濾網，並將其進行XRD和SEM基本特性分析，進一步瞭解其改質後之基本

特性，藉此獲得最佳條件之沸石玻纖濾網製作條件。

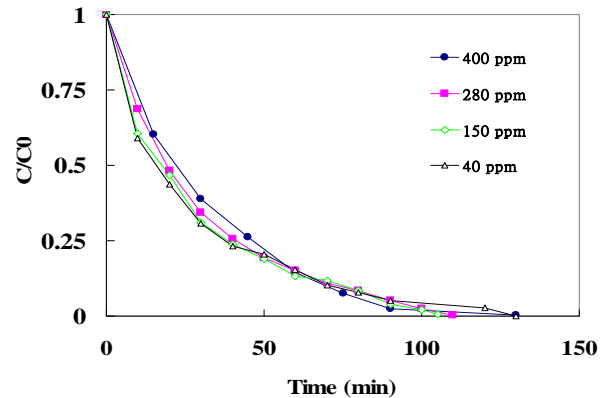


圖 12 不同濃度下沸石轉輪系統吸附結果

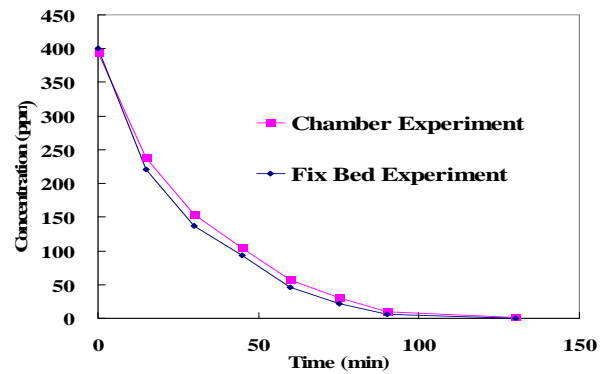


圖 13 固定床吸附和艙室實驗比較結果

#### 4.4.1 XRD分析

Y-type沸石在2θ角度有其特屬之特徵峰，而玻璃纖維本身並無明顯之特徵峰，因此本研究將不同水熱法合成時間之沸石玻纖濾網進行XRD分析，以作為是否成功將沸石合成於玻璃纖維上之依據，並藉由其特徵峰強度探討其合成結果。本研究利用水熱法於30、50及90分鐘等三種合成時間進行SAR 6沸石玻纖濾網之製作，並將其進行XRD分析，然在探討分析結果前先將沸石玻纖濾網之XRD分析結果(如圖14)與Y-type沸石之圖譜比對，結果顯示本研究自製之沸石玻纖濾網出現特徵峰與Y-type沸石圖譜一致，且無其他晶相出現由此可確認本研究已成功在玻璃纖維上合成沸石，然依據圖14結果顯示水熱法合成30分鐘之整個晶化初期過程中沸石特徵衍射峰已出現，雖其峰強度很弱但表明已有沸石晶核形成；而水熱法合成50分鐘之整個生長期晶化過程中，其沸石特徵峰強度增強，表明形成的沸石結晶度增加；當合成時間延長為90分鐘，其結晶強度比合成50分鐘略減少一點，其並未隨增加合成時間而提高結晶強度。因此合成時間不同將影響自製沸石玻纖濾網之特性。

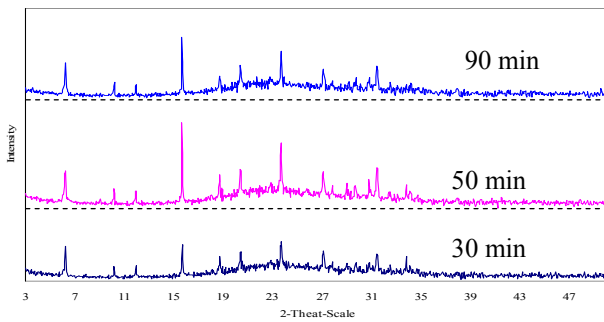


圖14 不同水熱法合成時間之沸石玻纖濾網進行XRD分析結果

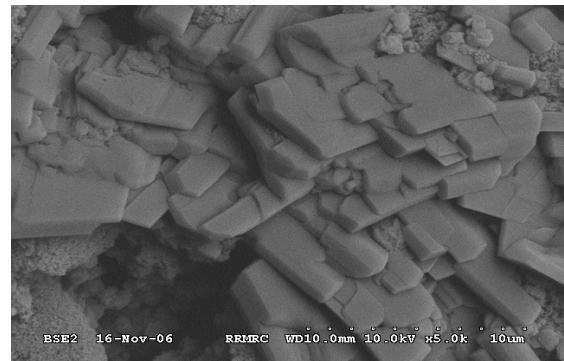


圖17 沸石玻纖濾網SEM圖 (5,000倍)

#### 4.4.2 SEM繞射分析

將本研究自製之SAR為6沸石玻纖濾網進行SEM分析，並以10 KV能量掃描其樣品，未進行塗佈之玻璃纖維表面亦將其進行SEM分析如圖15，其他各樣品的放大倍率分別為2,000倍、5,000倍和7,000倍如圖16-圖18，進而觀察其表面之微觀現象，由此可看出其表面相當光滑平整。比較在相同放大倍率下可看出玻璃纖維上有出現結晶物，搭配XRD分析結果可確認此為沸石之結晶，再將放大倍率提高至5,000倍可在局部放大圖中，可看出結晶形成應為一層層堆積而成。

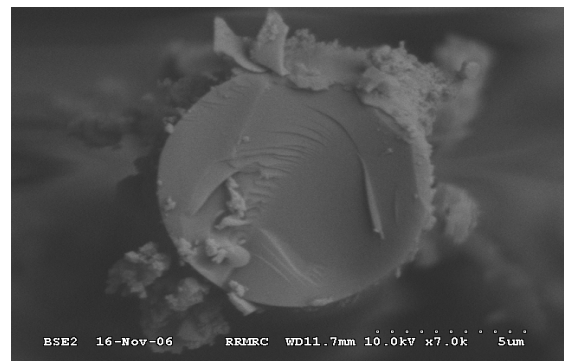


圖18沸石玻纖濾網SEM圖 (7,000倍)

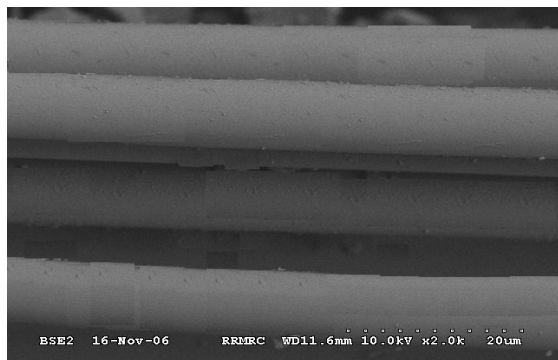


圖15 空白玻纖濾網SEM圖 (2,000倍)

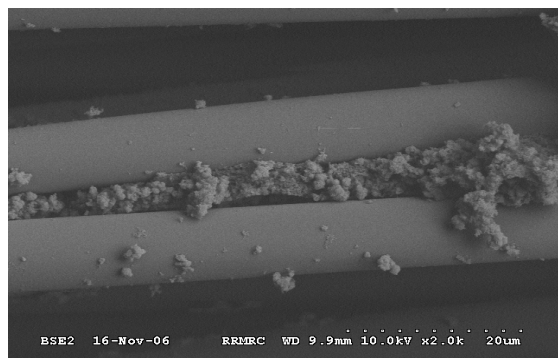


圖16 沸石玻纖濾網SEM圖 (2,000倍)

#### 4.4.3 自製沸石玻纖濾網吸附甲醛之研究

為提高於室內之便利性本研究於不同水熱合成時間下製備SAR為6之沸石玻纖濾網，並將其針對250 ppm甲醛濃度進行吸附實驗，以探討不同合成條件製法對甲醛之吸附結果，實驗開始先將甲醛氣體曝入艙室直到所需濃度，並在無裝置自製沸石玻纖濾網情形下進行實驗，在操作條件為沸石玻纖濾網：12x12 cm<sup>2</sup>、塗佈沸石：1 g、甲醛濃度：250 ppm、艙室體積40 L，其目的乃為探討甲醛之自然衰退率如圖19所示，結果顯示在無裝置自製沸石玻纖濾網時其濃度經兩小時後仍維持在250 ppm左右。本研究在水熱法加熱30、50及90分鐘等三種條件下製備沸石玻纖濾網，並將其分別進行吸附實驗，由實驗結果可知水熱法加熱30分鐘之沸石玻纖濾網經兩小時吸附甲醛後，其艙式內甲醛濃度由250 ppm降至80 ppm；而水熱法加熱50分鐘之沸石玻纖濾網經兩小時後，其艙式內甲醛濃度由250 ppm降至58 ppm，水熱法加熱90分鐘之沸石玻纖濾網經兩小時後，其艙式內甲醛濃度由250 ppm降至74 ppm，由此可得水熱法加熱50分鐘之沸石玻纖濾網其對甲醛吸附能力優於其他兩者。

由XRD結果得各別合成條件在玻璃纖維上合成之沸石強度不同，其所造成沸石結晶效果亦有差異，其中以水熱法合成50分鐘最好，因此對甲醛之吸附能力也較佳，其吸附實驗結果亦得以前後呼應。





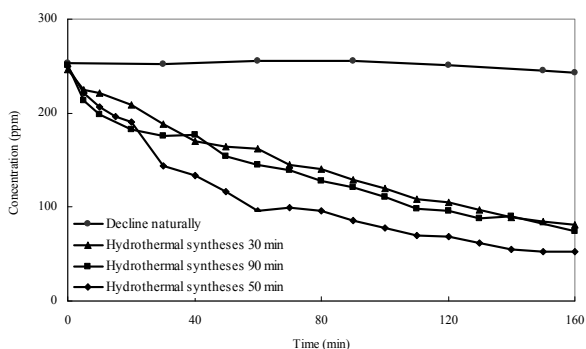


圖19 不同水熱法合成時間製備之沸石玻纖濾網的吸附曲線

## V. 結 論

1. 本研究以不同摻配比例之沸石進行甲醛吸附實驗，發現其二次吸附能力與再生能力以自製沸石配比35 % 矽鋁酸鈉 + 65 % SiO<sub>2</sub>者明顯較市售沸石更具優越性。且經 SEM、BET、XRD及孔徑分析等相關特性分析證實本研究自製之沸石具有優越的吸附性能及再生能力，具實用之競爭力。
2. 掌握最佳沸石摻配比例後，乃以此操作條件為基礎發展出沸石轉輪系統及沸石玻纖濾網等處理設備，未來若持續完成相關實驗應得有效減少室內空污染物，其中前者得配合實際需求應用於公共場所，後者得配合家用空調系統增設此一濾網，如此應可改善室內空氣污染物對人體所致的危害。
3. 本研究利用一模擬艙室實驗作為測試自行開發之沸石轉輪系統的效能評估；將400 ppm、280 ppm、150 ppm及40 ppm甲醛進行沸石轉輪系統吸附實驗，結果得知反應120分鐘後艙室內的甲醛去除至95%以上。
4. 沸石玻纖濾網乃利用水熱法合成30、50及90分鐘等條件進行製備，並將其進行XRD分析證實吸附前後 $2\theta$ 角度出現之特徵峰與Y-type沸石一致，且經甲醛吸附實驗發現水熱法50分鐘的濾網有較高的去除效率同時亦證實其具有良好的實用優勢。

## VI. 致 謝

本研究承蒙國科會 (94-2622-E-224-006-CC3) 補助與元科技股份有限公司在設備與技術上所提供的資源，使研究得順利進行，在此深表謝意。

## VII. 參考文獻

- 李琪華, 2003, 沸石吸附劑之製備、性能測試與特性分析, 國立中正大學化學工程研究所, 碩士論文。
- 林宏端, 1993, 沸石吸附有機溶劑甲苯之研究, 國立台灣大學環境工程學研究所, 碩士論文。
- 消基會, 2004, 市售家用室內空氣清淨機功能測試結果。
- 高嘉宏, 2000, MFI沸石薄膜的合成、鑑定與應用, 國立清華大學化學系研究所, 碩士論文。
- 環保署, 2006, 一般場所室內空氣品質參考標準建議值草案。
- 顏秀慧, 1998, 沸石對揮發性有機物吸附行為之研究, 國立台灣大學環境工程學研究所, 博士論文。
- Aguado, S., et al., 2004, Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes, *Journal of Membrane Science*, Vol. 240, pp. 159-166.
- Esswein, E. J. and Boeniger, M. F., 1994, Effect of an ozone-generating air-purifying device on reducing concentrations of formaldehyde in air, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 9, pp. 139-146.
- Larlus, O., et al., 2002, Preparation of silicalite-1/glass fiber composites by one- and two-step hydrothermal syntheses, *Microporous and Mesoporous Material*, Vol. 56, pp. 175-184.
- Pires, J., et al., 2001, Adsorption of volatile organic compounds in Y zeolites and pillared clays, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 43, pp. 277-287.
- Tosheva, L. and Valtchev, V., 2005, Silicalite-1 crystallization on glass fiber filter discs, *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 81, pp. 11-18.
- Xu, W. Y., et al., 1990, A novel method for the preparation of zeolite ZSM-5, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, pp. 755 - 756.

Received 7 December 2008  
Accepted 21 April 2008

## **ADSORPTION PERFORMANCE OF SELF-MADE Y-TYPE ZEOLITES FOR REMOVING INDOOR FORMALDEHYDE**

Wen-Pin Weng\*, Chu-Chin Hsieh\*\* and Hsin-Han Cheng\*

\*Graduate School of Engineering Science and Technology  
\*\*Department of Safety Health and Environmental Engineering  
National Yunlin University of Science and Technology  
Yunlin, Taiwan 64002, R. O. C.

### **ABSTRACT**

In order to control the particulate pollutants, gas-phase pollutants, biological pollutants and protect human health, Environmental Protection Administration (EPA) had promulgated a protocol of indoor air quality standards in 2006. In Taiwan, most studies of air cleaners focus on the removal of particulate matter, rather than the gaseous pollutants. The common absorbent such as activated carbon can adsorb odors and VOCs. However, not only its amount adsorbed is insufficient, but also its adsorption capacity is easily being influenced by aqueous vapor. The object of this study is to develop a zeolite to absorb the indoor formaldehyde, which is an economy, effective and feasible technology. The adsorption experiments showed that the first adsorption capacity of commercial zeolites is 54 mg/g and second adsorption capacity is 5 mg/g. This result pointed that the regeneration capacity of commercial zeolites was not good enough. On the other hand, the first adsorption capacity of self-made zeolite was 84 mg/g and second adsorption capacity was 78 mg/g, the result is obviously superior to the commercial zeolite. After 4 time adsorption experiments, the reuse rate of self-made zeolite was up to 86%. In order to improve the practicability of self-made zeolite, the study continues to develop “zeolite rotor-wheel” and “zeolite glass filter”, and to simulation chamber experiment which object was to remove the formaldehyde in the indoor environment. The experiments proved that two control systems can effectively removed the formaldehyde in chamber. At the same time, the study had already confirmed the best operating conditions, characteristic analyzes and established adsorption kinetic model. The results can be used as an basis and apply it to the adsorption materials of the indoor environment.

**Keywords** : indoor air quality, formaldehyde, zeolite rotor-wheel, zeolite glass filter, simulation chamber experiment, adsorption kinetic model

