

以動態吸附實驗評估矽凝膠、活性碳與沸石 之水氣吸附特性

徐樹剛，工業技術研究院 材料化工研究所資深研究員
戴清智，工業技術研究院 材料化工研究所資深研究員
張昭君，工業技術研究院 材料化工研究所研究助理

摘要

自然界可利用之淡水量已低於人類活動需求量，除積極開發新興水資源外，落實節水與回收廢(污)水再利用，為解決水資源短缺所必須執行之措施。於水回收技術中，吸附式水回收技術為一新興之水回收技術，可以廢熱或太陽能驅動回收廢(污)水，為一低耗能水回收技術。本研究以簡易動態吸附測試系統，測試不同表面特性之矽凝膠、活性碳與沸石動態吸附能力。測試結果顯示，以孔洞尺寸達微孔或接近微孔等級之 Fuji RD2060 與 UPO 4A 沸石，有較佳之水氣吸附速率。藉由動態吸附速率測試，可以評估吸附劑之吸水成效，作為吸附式水回收技術選用吸附劑之參考。

關鍵字：矽凝膠、活性碳、沸石、水回收、吸附

一、前言

淡水需求量隨著全球人口增加與經濟成長，每年約以 2% 左右增加，預計至 2030 年，淡水年需求量將達 6.9 兆立方米(Ng et al., 2012)。然自然界水循環可供利用之淡水資源僅約 4.2 兆立方米，顯然無法滿足人類活動所需，面對此一困境，除積極開發新興水資源外，落實節水措施與設法回收廢(污)水再利用，亦為解決水資源短缺問題之重要措施。

吸附式水回收技術為一新興之水回收技術(Thu et al., 2012)，其以吸附劑於相對低溫條件下(20-40 °C)，吸附濃縮廢(污)水所蒸發之水氣，並於相對高溫條件下(55-140 °C)將其自吸附劑脫附、導入冷凝器冷凝回收淡水。由於本技術不與廢(污)水直接接觸，無材料被污染物堵塞問題，且如選擇矽凝膠(silica gel)等低溫即可脫附水氣之吸附劑，即可以廢熱或太陽能驅動脫附程序，大幅降低水回收所需消耗能源。

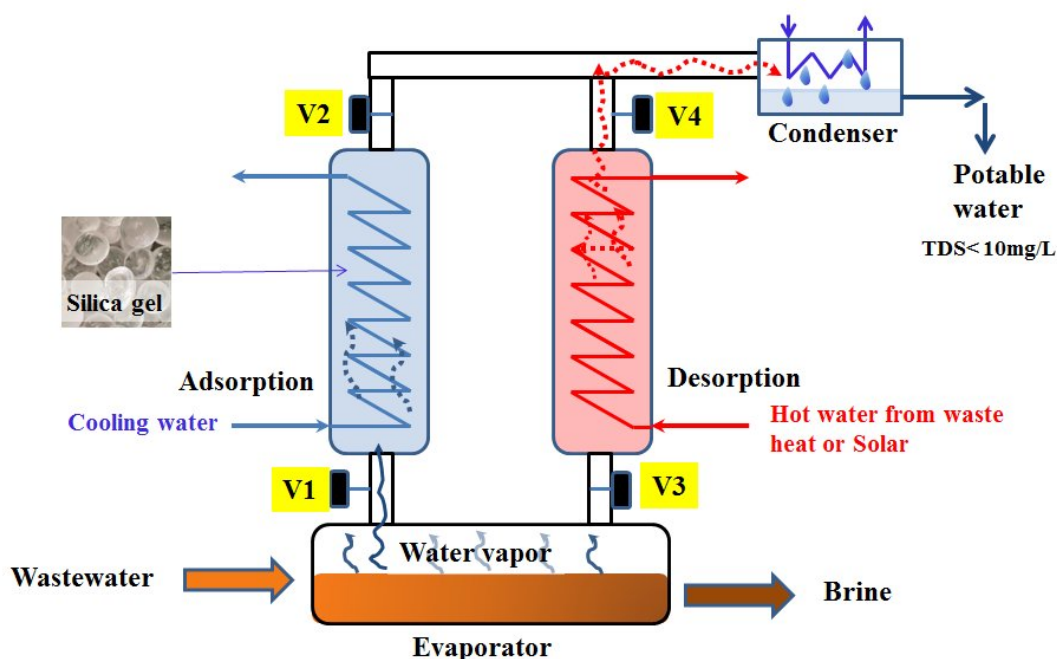


圖 1 吸附式水回收技術示意

吸附式水回收技術為應用吸附劑吸脫附水氣以回收廢(污)水，其水氣吸附能力將對本技術之水回收成效有重要影響。然一般評估吸附劑之水氣吸附能力，常以其表面特性(比表面積、孔洞體積與尺寸等)與水氣吸附量進行推估，不易掌握材料實際水氣吸附特性，並預估產水成效。本研究以一簡易之動態水氣吸附測試系統，測試幾種常見水氣吸附劑(矽凝膠、活性碳與沸石)之動態水氣吸附特性，並進行初步水氣吸脫附應用性比較。

二、材料與方法

1. 實驗材料與設備

本研究所使用之水氣吸附劑與設備分述如下：

- (1) 水氣吸附劑：矽凝膠為 Fuji 公司型號 RD2060 與 Merck 公司型號 Grade 10181 產品，以下分別簡稱矽凝膠(F)與矽凝膠(M)，活性碳為 Puretron® 椰殼活性碳，沸石為 UOP 4A 型號產品。
- (2) 紅外線水分計：A&D MX-50 moisture analyzer。
- (3) 動態水氣吸附測試系統：系統架構如圖 1 所示，各組成元件分述如后：
[1]恆溫烘箱、[2]玻璃真空容器、[3]精密彈簧(1.917 mm 伸長量/g)、[4]吸附劑盛盤、[5]玻璃盛水容器、[6]恆溫水浴槽、[7] K-type 熱電偶、[8]負壓壓力計、[9]網路攝影機。

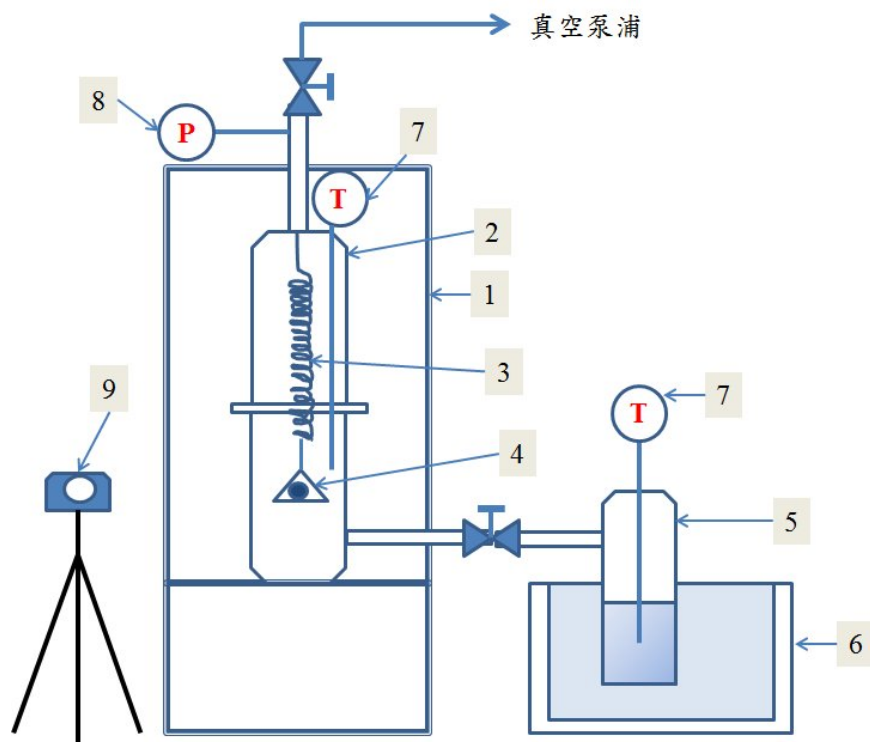


圖 2 動態水氣吸附測試系統示意

2. 實驗方法

- (1) 吸附劑室溫飽和吸水率測試：定量吸附劑(約 1 公克)於 105°C 烘箱乾燥 2 小時後秤重(W_1)，將乾燥後吸附劑與 50 mL 去離子水共同置放於真空乾燥皿中，以真空泵浦抽除乾燥皿內部空氣至壓力低至 1 torr 以下，靜置過夜後吸附劑秤重(W_2)。依 $(W_2 - W_1)/W_1$ 公式計算得室溫飽和吸水率。
- (2) 不同脫附溫度之吸附劑水氣脫除比率測試：將定量吸附劑(約 2 公克)依室溫飽和吸水率測試步驟吸附飽和水氣(重量 W_2)，再置放於紅外線水分計依 55°C → 75°C → 95°C → 105°C → 140°C 等升溫條件進行水氣脫附測試(每一溫度 t 維持 10 分鐘後升至下一溫度條件)，依 $(W_2 - W_t)/(W_2 - W_{140^\circ\text{C}})$ 計算不同脫附溫度之水分脫除比率。
- (3) 吸附劑水氣脫附速率測試：將定量吸附劑(約 2 公克)依室溫飽和吸水率測試步驟吸附飽和水氣(重量 W_2)，再置放於紅外線水分計，於 140°C 條件下進行水氣脫附，紀錄時間與吸附劑重量變化，直至吸附劑重量變化小於 0.2 wt%/分(重量 $W_{140^\circ\text{C}}$)。之後依 $(W_2 - W_t)/W_{140^\circ\text{C}}$ 換算吸附劑於不同時間下之水氣脫附量。
- (4) 吸附劑動態水氣吸附速率測試：將定量吸附劑(約 2 公克)置放於吸附劑

盛盤，於烘箱溫度 105°C、真空玻璃容器壓力 0.1 torr 條件下乾燥 1.5 小時候，烘箱溫度降低至設定測試範圍後，打開玻璃盛水容器開關閥，使定溫條件下水氣通入真空玻璃容器，同時啟動網路攝影機記錄精密彈簧伸長量變化，並依此換算吸附劑於不同時間下之水氣吸附量。

三、結果與討論

1. 吸附劑表面特性：表1為矽凝膠、活性碳與沸石之表面特性與室溫飽和吸水率結果整理(表面特性部分資料為本研究測定值，其他取自參考文獻或供應商網址)。數據顯示，沸石之比表面積雖顯著低於其他吸附劑，但僅其孔徑尺寸達微孔等級；矽凝膠(M)為四種吸附劑中孔洞體積最大者，其室溫飽和吸水率測定結果亦最高。

表 1 矽凝膠、活性碳與沸石之表面特性與室溫飽和吸水率結果整理

項目	矽凝膠(F)	矽凝膠(M)	活性碳	沸石
比表面積(m ² /g)	820 ^[1]	675 ^[2]	791	24.9
孔洞體積(cm ³ /g)	0.4 ^[1]	~0.68 ^[2]	0.16	0.16
平均孔洞尺寸, nm	2.2 ^[1]	4 ^[2]	4	~0.4 ^[3]
顆粒尺寸, mm	0.8-1.0 ^[1]	0.2-0.5 ^[2]	0.1-0.4	~4
室溫飽和吸水率, wt%	32.1	58.1	40.2	15.3

[1]資料來源：Aristov et al., 2006

[2]資料來源：<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/242179?lang=en®ion=TW>

[3]資料來源：<http://www.eltrex.pl/pdf/karty/adsorbenty/ENG-Introduction%20to%20Zeolite%20Molecular%20Sieves.pdf>

2. 不同脫附溫度之吸附劑水氣脫附比率：本研究分別測試各吸附劑於飽和吸水(室溫)狀態下，不同脫附溫度可脫附出之水氣比率，相關實驗結果如圖3所示。測試結果顯示，於脫附溫度55°C時，各吸附劑均有一定比率水氣可被脫附，而矽凝膠(M)與活性碳於脫附溫度95°C時，水氣脫附率均高於94 %以上，對以廢熱或太陽能為脫附驅動熱源之系統，有較佳之水氣脫水成效。

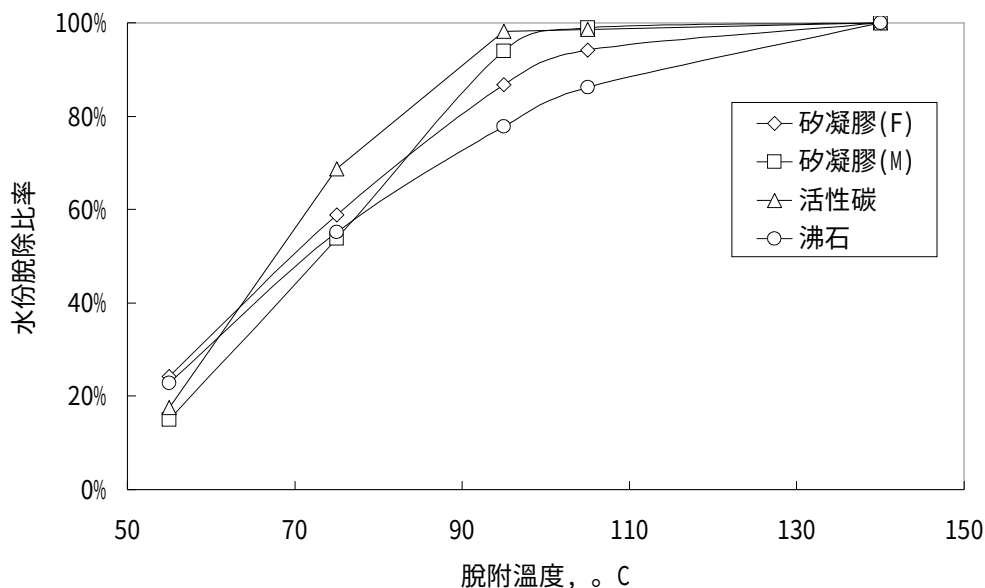


圖 3 不同脫附溫度之吸附劑水氣脫附比率測試結果

3. 吸附劑水氣脫附速率測試：圖4為四種吸附劑於飽和吸水(室溫)狀態下，以140°C溫度進行脫附測試結果，測試結果顯示，活性碳脫附速率最快，於100秒內幾可完全脫除所吸附之水氣。

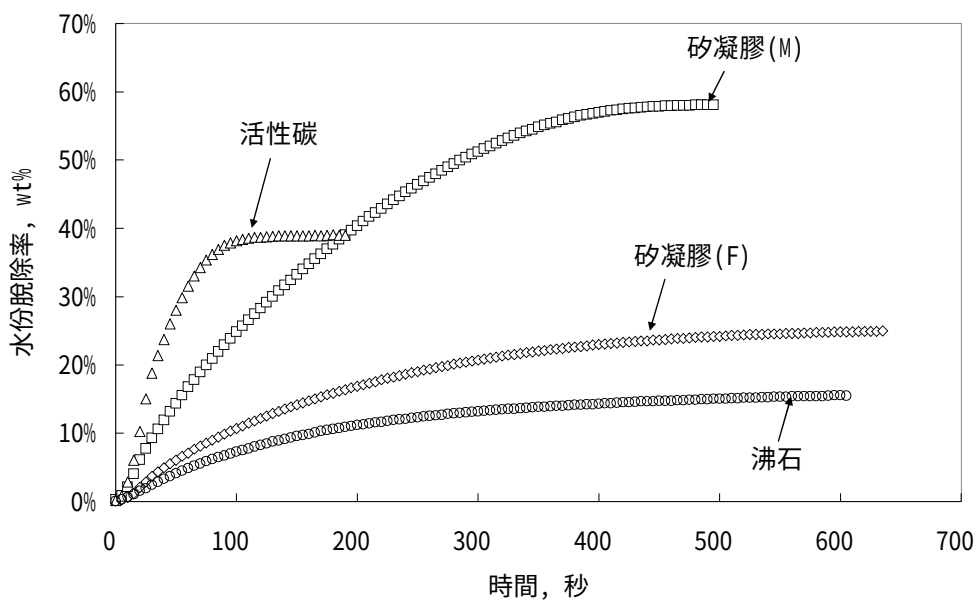


圖 4 吸附劑於 140°C 脫附溫度條件下之水氣脫除率測試結果

4. 吸附劑動態水氣吸附速率測試：本研究分別測試四種吸附劑於溫度28.8°C、水氣壓力2.04 kPa 與溫度38.5°C與水氣壓力4.27 kPa 條件下之水氣吸附速率，所得結果如圖5與圖6所示。此兩測試條件下，矽凝膠(F)均

有最佳水氣吸附量與吸附速率，沸石則有次佳之表現。

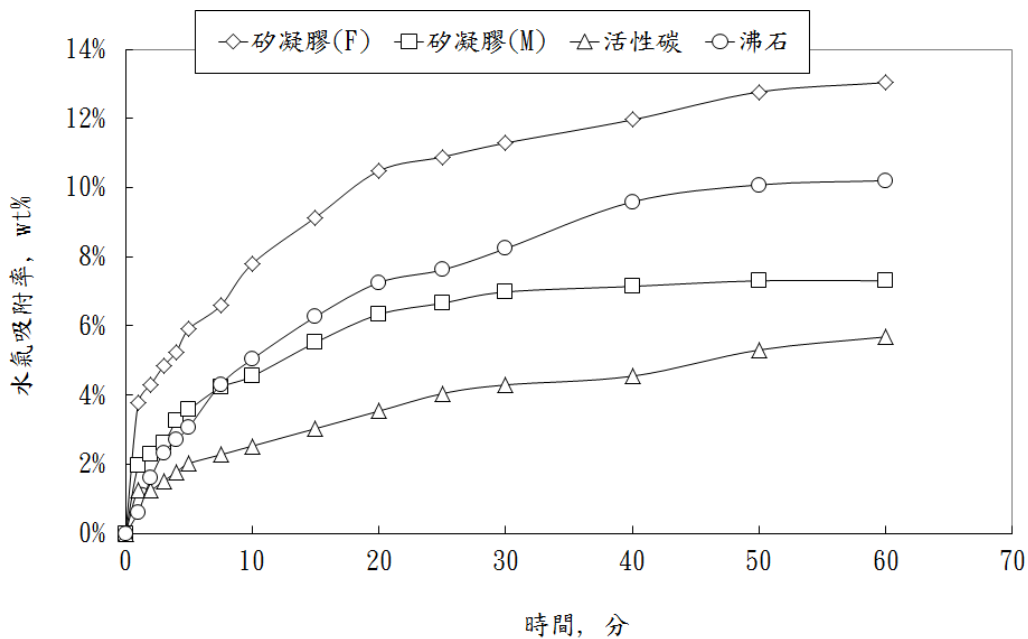


圖 5 吸附劑於溫度 28.8°C、水氣壓力 2.04 kPa 條件下之水氣吸附速率測試結果

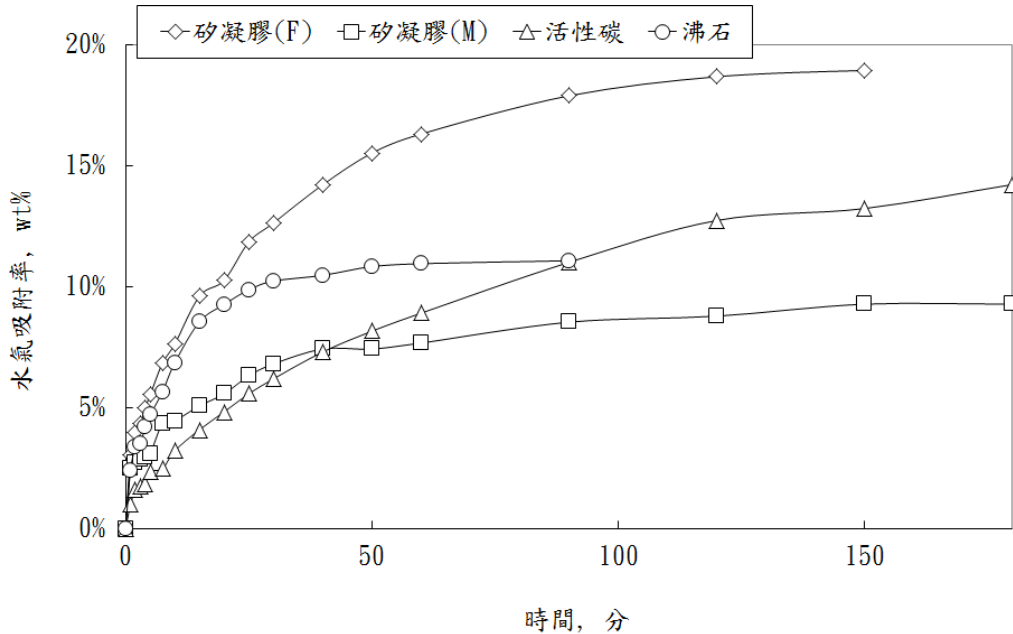


圖 6 吸附劑於溫度 38.5°C 與水氣壓力 4.27 kPa 條件下之水氣吸附速率測試結果

四、結論與建議

1. 本研究以簡易動態吸附測試系統，測試不同表面特性之矽凝膠、活性碳與沸石動態吸附能力。測試結果顯示，以孔洞尺寸達微孔或接近微孔等級之 Fuji RD2060與 UPO 4A 沸石，有較佳之水氣吸附速率。
2. 藉由動態吸附速率測試，可以評估吸附劑之吸水成效，作為吸附式水回收技術選用吸附劑之參考。

參考文獻

1. Kim Choon Ng, Kyaw Thu, Youngdeuk Kim, Anutosh Chakraborty, Gary Amy, “Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method,” Desalination (2012).
2. Kyaw Thu, A. Chakraborty, B.B. Saha, Won Gee Chun, K.C. Ng, “Life-cycle cost analysis of adsorption cycles for desalination,” Desalination and Water Treatment (2012).
3. Yuri I. Aristov, Mikhail M. Tokarev, Angelo Freni, Ivan S. Glaznev, Giovanni Restuccia, “Kinetic of water adsorption on silica Fuji Davison RD,” Microporous and Mesoporous Materials, vol. 96, pp. 65-71 (2006).
4. K.C. Ng, H.T. Chua, C.Y. Chung, C.H. Loke, T. Kashiwage, “Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics”, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1631-1642 (2001).