

知識物件上傳表

計畫名稱：節能綠色吸附材料關鍵元件及設備技術開發計畫(1/3)

上傳主題：矽膠除濕輪去污除濕性能試驗

提報機構：行政院原子能委員會核能研究所

資料時間：2022.3

與計畫相關	<input checked="" type="checkbox"/> 是
國別	<input checked="" type="checkbox"/> 國內
能源業務	<input type="checkbox"/> 總體能源 <input type="checkbox"/> 化石能源 <input type="checkbox"/> 電力 <input type="checkbox"/> 核能 <input type="checkbox"/> 新及再生能源 <input checked="" type="checkbox"/> 節約能源
能源領域	<input type="checkbox"/> 政策與法規 <input type="checkbox"/> 環境衝擊與調適 <input type="checkbox"/> 經濟及產業 <input checked="" type="checkbox"/> 科技 <input type="checkbox"/> 統計資訊
決策知識類別	<input type="checkbox"/> 建言 <input checked="" type="checkbox"/> 評析 <input type="checkbox"/> 標竿及統計數據 <input type="checkbox"/> 其他
重點摘述	<p>近年來，室內空氣品質越來越受關注，而室內空氣品質包含溫度、濕度及空氣潔淨度。旋轉除濕輪系統透過總揮發性有機化合物(TVOC)和濕度數值控制，能夠改善室內空氣品質，為了分析除濕輪的實際吸附性能，本文建置了一個實驗裝置，討論矽膠乾燥除濕輪對於總揮發性有機化合物(TVOC)和水分之去除能力，通過對總揮發性有機化合物(E_c)和水分(E_d)去除效率來評價除濕輪之性能。首先在溫和的溫濕度比下進行實驗，分析主要參數對揮發性有機化合物去除效率的影響，發現 E_c 隨著再生溫度的升高而增大，在同樣實驗條件下，去除揮發性有機化合物所需的再生空氣溫度範圍與除濕的再生溫度相匹配。本文也討論了在上海夏季時，相同再生空氣溫度下總揮發性有機化合物(TVOC)和水分的去除能力。結果顯示，在實驗條件下建議再生溫度高於 100℃，以減輕總揮發性有機化合物(TVOC)和濕度去除之負荷，在這種情況下，系統的除濕能力受環境濕度比的影響很大，但隨著持續修正總揮發性有機化合物(TVOC)濃度也能進行調整，因此，總揮發性有機化合物(TVOC)去除能力受環境濕度條件和污染物濃度的影響。</p>
詳細說明	<p>1. 簡介</p> <p>空氣潔淨度對於室內空氣品質是非常重要的，隨著生活水平提高及健康生活意識增強，如何建立一個乾淨健康的室內環境變得越來越重要。傳統的蒸汽壓縮空調系統，可以輕鬆控制溫度，並直接冷凝除濕，然而，實現空氣淨化是比較困難的。因此，在現今社會，單機的空氣淨化器被廣泛</p>

採用，據報導，在過去 5 年內，關於空氣淨化器在中國的市場的規模幾乎每年翻一倍，實際上，潛在的消費者是期待能整合系統。在 1950 年代提出的旋轉乾燥除濕輪系統能提供解決此問題的方案，此系統採用矽膠、沸石等固體吸附劑吸附潮濕空氣中的水分，並具有良好的除濕能力。據報導，固體吸附劑不僅可以吸附水蒸氣，還可以有效去除幾種污染物。例如：Popescu 等人利用矽膠、分子篩和疏水分子篩的 1 M 型固體乾燥劑，實踐了同時去除水分和一些污染物，實驗證明，循環開始後一分鐘內就可以去除大量的污染物。Regeet 等人分析了 13X 沸石、 γ - Al_2O_3 、天然斜髮沸石、K-斜髮沸石及鈣離子斜髮沸石在吸附中低壓範圍內的 CO_2 、 H_2O 和 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等碳氫化合物的性能，顯示了不同乾燥劑對苯、甲苯、鄰二甲苯、對二甲苯及間二甲苯等不同物質的吸附原理。而 Wang 等人研究了活性炭、矽膠和 BX 型合成沸石對揮發性有機化合物的吸附，在實驗條件下，發現相同芳香化合物對不同吸附劑的吸附性能依次為活性炭大於矽膠大於 BX 沸石。Fang 等人透過實驗和模擬研究了矽膠轉輪對於總揮發性有機化合物 (TVOC) 吸附及脫附，當採用甲醛、乙醇、甲苯及新型 1,2-二氯乙烷作為揮發性有機化合物時，實驗顯示當再生溫度高於 60°C 時，化學物質去除率高於 94%，但水分受限於揮發性有機化合物去除效率的影響。Yamauchi 等人，在 180°C 的高再生空氣溫度下，將疏水性矽沸石與矽膠結合，並測試了商用旋轉除濕輪，發現透過不同量有最佳效果，可以去除超過 95% 的 TVOC（丙酮、異丙醇、甲乙酮、甲苯），而本篇論文所使用除濕輪與其相同。Chang 等人研究發現去除總揮發性有機化合物 (TVOC) 的最佳轉速，同時實驗結果發現沸石輪對四種揮發性有機化合物的吸附效率依次為 PGMEA、PGME、IPA 和丙酮。Wolfrum 等人研究矽膠除濕輪在總揮發性有機化合物 (TVOC) 50-150 ppb 範圍內的甲苯和正己烷去除性能，發現總揮發性有機化合物 (TVOC) 去除性能在入口總揮發性有機化合物 (TVOC) 濃度、入口流入溫度、流入濕度比和輪轉速等參數上變化不大。Sheng 等人研究了結合矽膠轉輪和熱泵的清潔空氣熱泵 (CAHP) 淨化器的空氣淨化效果。化學測量實驗發現，當再生溫度為 60°C 時，單向去除車內空氣污染物的效率超過 92%，並且除濕輪的再生溫度會影響 CAHP 的空氣淨化性能。在除濕輪上沒有觀察到總揮發性有機化合物 (TVOC) 的積累，Nie 等人建立了一個模型來預測新型熱泵輔助固體乾燥冷卻系統 (HP-SDC) 的總揮發性有機化合物 (TVOC) 去除和性能，結果發現 HP-SDC 可以有效清潔空氣中的污染物，可以在通風下有更節能的選擇。Ncube 等人，研究了矽膠在動態條件下使用柱狀乾燥劑從空氣中去除總揮發性有機化合物 (TVOC) 之能力，並開發了一個模型來預測任何吸附劑對於總揮發性有機化合物 (TVOC) 之曲線。Dobre 等人，研究了丙酮在固定後的矽膠的脫附和熱動力學。在三個溫度水平（ 60°C 、 70°C

和 80°C) 和兩個粒徑值 (0.21 和 0.54 cm) 下，研究了丙酮從廢矽膠中的吸附。吸附效率 (63-81%) 對於更細的顆粒，最大可再增加 14%，並且隨著脫附溫度的增加而增加。Yoon，研究了液體乾燥劑應用於除濕機對顆粒物和揮發性有機化合物的去除效果。結果顯示，對於較大的顆粒，可以有更好的吸附能力。甲苯的總體去除效率為 23.9%，還有一些其他相關研究集中在固定乾燥劑對於總揮發性有機化合物(TVOC)之去除能力和總揮發性有機化合物(TVOC)在焓除濕輪中的吸附轉換。經過這些文獻回顧表明，除濕輪的總揮發性有機化合物(TVOC)去除能力已經得到驗證，並且一些代表性參數對整體系統性能的影響已經揭示。然而，這些文獻僅對乾燥劑在濕度和總揮發性有機化合物(TVOC)去除能力方面的實際性能進行了少量實際測試工作，但實際測試工作這對於設計是非常重要的。另一方面，除濕輪的同時除濕和淨化性能取決於不同的運行條件，以及實現除濕和空氣淨化的最佳再生空氣溫度是多少，及如何淨化空氣，為了回答這些問題，本文建立了矽膠除濕輪系統的實驗裝置。然後進行了實際的實驗測試，研究了矽膠旋轉除濕輪的去污性能和去污、去濕綜合性能。研究之結果可用於指導除濕及淨化一體之系統開發。

2. 實驗系統說明

2.1 工作原理說明

旋轉除濕輪空氣處理系統的配置如圖 1 所示。除濕輪的橫截面分為兩部分：處理區和再生區。在處理空氣區，水蒸氣和總揮發性有機化合物(TVOC)氣體都被多孔基質內的浸漬固體吸附劑吸附，換句話說，空氣被除濕和淨化。同時，由於吸附時熱的釋放，空氣溫度升高。再生側加熱的再生空氣可實現吸附劑中水蒸氣和總揮發性有機化合物(TVOC)氣體的脫附，使吸附劑能重複利用。

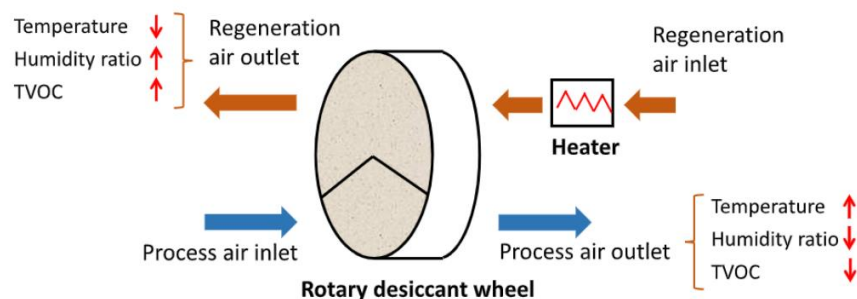


圖 1 旋轉除濕輪作為空氣處理單元的示意圖

2.2. 實驗系統說明

實驗系統如圖 2 所示，測試旋轉除濕輪的污染物去除和水分去除性能，該系統主要由除濕輪、1 條風道和 1 條再生風道這三部分組成。除濕輪作為

核心部件完成水分和污染物的去除，在該系統中採用了厚度為 200mm、直徑為 550mm 的蜂窩狀陶瓷矽膠除濕輪。系統採用電動機驅動輪體轉動，速度為 2 r/min。除濕輪的橫截面被絕熱隔板分成兩部分：一部分與風道相連，而另一部分與再生風道相連。本系統空氣與再生空氣的面積比為 3:1，兩個空氣通道均為圓柱體通道，由於截面積不同，空氣管道直徑為 250mm，再生空氣管道直徑為 150mm。對於空氣通道而言，在出口處安裝風扇用以驅動氣流，對於再生風道，除出口處安裝風機外，還在入口附近安裝最大功率為 1kW 的電加熱器，模擬不同再生風溫度的熱源，除此之外，空氣和再生空氣的體積流量可以調整為 1800m³/h 和 1080m³/h 兩個數值。整體實驗裝置安裝在恆定濕度及溫度的實驗室中，以模擬不同的環境溫度和濕度。污染物模擬採用總揮發性有機化合物(TVOC)產生速率為 0 至 1000mg/h 的總揮發性有機化合物(TVOC)發射器（品牌：Suzhou AROS，型號：SPG-ATOJ）。此實驗還應注意，整體實驗系統安裝在實驗室中，並且假定空氣和再生空氣來自相同的環境狀態，在實際操作中，首先將實驗室室內環境調節到給定的溫度、濕度比和總揮發性有機化合物(TVOC)濃度，然後透過加熱器控制再生溫度到給定值，並打開電動機和風扇以驅動除濕輪和控制空氣及再生空氣的旋轉和流動，在這些準備工作完成後，對空氣以及再生空氣的入口和出口處的污染物、濕度比及溫度進行測試和收集，實驗系統如圖 3 所示。

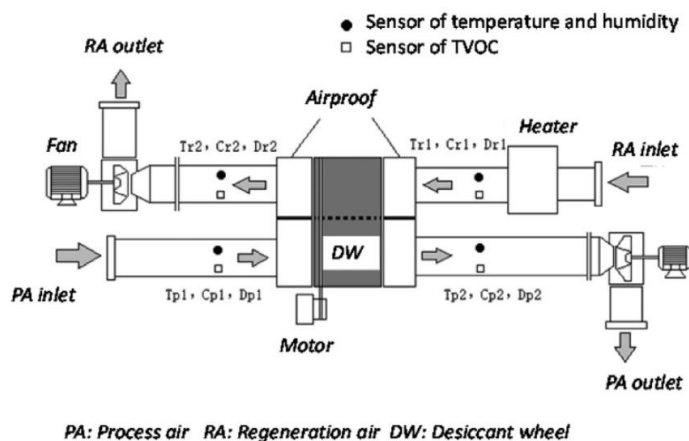


圖 2 實驗裝置示意圖

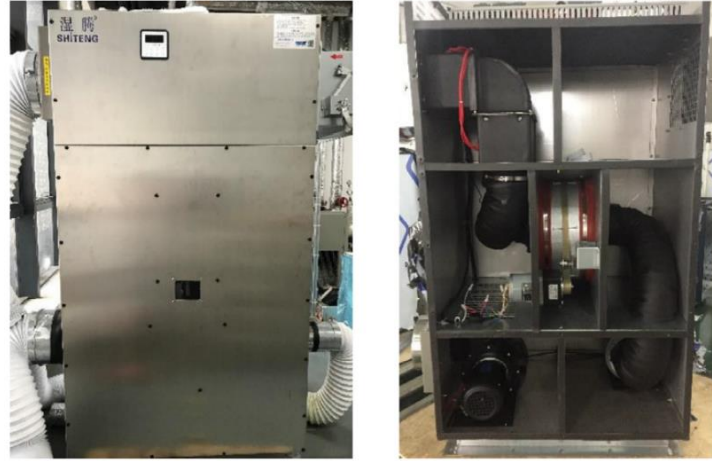


圖 3 實驗系統的照片

2.3. 測量和誤差分析

如實驗操作中所述，測試空氣中的污染物、濕度比和溫度，實驗採用表 1 所示的兩種傳感器，由此表可以得知，使用一種傳感器（MIK-TH202）同時測試溫度和濕度比，而另一種傳感器（BR-HOL-1 210）用於同時採集甲醛和總揮發性有機化合物(TVOC)的濃度。為了評價實驗系統對總揮發性有機化合物(TVOC)和水分的去除能力，採用下列式子計算的總揮發性有機化合物(E_c)和水分(E_d)去除效率為性能指標：

$$E_c = \frac{C_{p,in} - C_{p,out}}{C_{p,in}} \quad (1)$$

$$E_d = \frac{D_{p,in} - D_{p,out}}{D_{p,in}} \quad (2)$$

其中 $C_{p,in}(\text{mg}/\text{m}^3)$ 和 $C_{p,out}(\text{mg}/\text{m}^3)$ 分別是空氣入口和出口的揮發性有機化合物濃度， $D_{p,in}(\text{g}/\text{kg})$ 和 $D_{p,out}(\text{g}/\text{kg})$ ，是濕度比。在實驗中直接測得的參數，例如：溫度及總揮發性有機化合物(TVOC)濃度之準確度可以透過傳感器的誤差值來獲得，如公式中所示的去除效率，方程式(1)和(2)，基於以下誤差方程進行誤差分析：

$$\Delta y = \left[(\partial f / \partial x_1)^2 (\Delta x_1)^2 + (\partial f / \partial x_2)^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + (\partial f / \partial x_n)^2 (\Delta x_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\Delta y / y = \left[(\partial f / \partial x_1)^2 (\Delta x_1 / y)^2 + (\partial f / \partial x_2)^2 (\Delta x_2 / y)^2 + \dots + (\partial f / \partial x_n)^2 (\Delta x_n / y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中 f 是自變量的函數 x_1 、 x_2 等代表函數的變量， Δx_1 、 Δx_2 等是與變量相關的絕對誤差，而 $\Delta y / y$ 表示相對誤差。基於這些關係，誤差分析顯示 E_c 和 E_d 的最大不確定度分別為 $\pm 4.58\%$ 和 $\pm 8.42\%$ ，除了傳感器，傳感器的密封性和位置也可能導致實驗結果的偏差，而透過空氣和再生空氣之間的質量平衡可以檢查此偏差。圖 4 顯示了在 $1800\text{m}^3/\text{h}$ 相同流量下空氣和再生空氣入口和出口的水分和總揮發性有機化合物(TVOC)的差異，可以看出誤差在可接受的範圍內，使得實驗結果更可靠。

表 1 實驗中感應器工作範圍

Properties of sensors in experiments.			
	Type	Range	Accuracy
Temperature	MIK-TH202	-20 - 100°C	± 0.5 °C
Humidity ratio	MIK-TH202	0-100% RH	$\pm 2\%$ RH
TVOCs	BR-HOL-1210	0-2.5 mg/m ³	± 0.05 mg/m ³

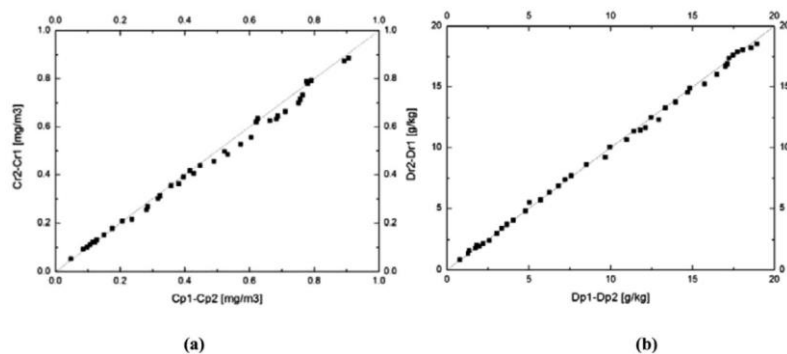


圖 4(a) TVOC 和 (b) 空氣及再生空氣之間的濕度比平衡

3. 結果與討論

在此部分進行了兩組實驗來分析矽膠除濕輪的性能，一組是在溫和的環境條件下，有著溫和的溫濕度比，分析主要參數對總揮發性有機化合物(TVOC)去除的影響。橢圓效率，另一個是在上海夏季條件下，使用相同再生空氣溫度下總揮發性有機化合物(TVOC)和水分的綜合去除能力。

3.1.總揮發性有機化合物(TVOC)去除性能測試與分析

固體乾燥材料的吸附和脫附能力受再生空氣溫度的影響很大，同時空氣流量和進氣條件等操作參數，包括總揮發性有機化合物(TVOC)濃度和空氣濕度比也會影響總揮發性有機化合物(TVOC)之去除性能，接下來會報告在溫和條件下測試和討論這些參數對總揮發性有機化合物(TVOC)去除性能的影響。

3.1.1.再生空氣溫度的影響

實驗選擇溫度和濕度比為 25°C 及 40% 的溫和條件來研究再生溫度對 E_c 的影響，得到的結果繪製於圖 5，從中可得知， E_c 隨再生溫度升高，例如，當再生溫度從 60°C 增加到 100°C 時， E_c 從 0.62 增加到 0.94，變化趨勢與除濕輪的除濕能力相同，主要是因為總揮發性有機化合物(TVOC)和水分的去除都是根據多孔吸附原理進行的，隨著再生溫度的升高，矽膠內的孔隙可以脫附至較低平衡狀態分壓（吸附質量），從而能提高吸附容量，而考慮再生風溫度的範圍，可以發現矽膠除濕所需的再生風溫度也在 60°C 至 100°C 之間，而總揮發性有機化合物(TVOC)去除和水分去除所需的再生空氣溫度範圍相互吻合，使得使用一個矽膠除濕輪能實現除濕和總揮發性有機化合物(TVOC)去除之功效。

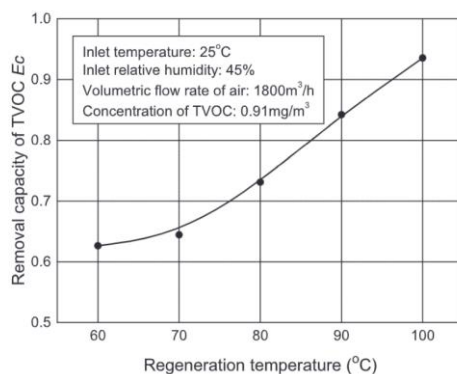


圖 5 再生溫度對 E_c 的影響

3.1.2. 總揮發性有機化合物(TVOC)濃度和體積流量的影響

在圖 6 中，測試並總結了污染物濃度對兩種不同空氣流速對 E_c 的影響，用以分析污染物濃度和空氣流速的影響。結果顯示，在兩種空氣流量不同的條件下， E_c 隨著總揮發性有機化合物(TVOC)入口濃度的增加而減小，這可以解釋為矽膠在恆定運行條件下存在吸附飽和的狀態，當矽膠接近這個吸附飽和點時，容量不能再增加，即使被吸附物的濃度增加，吸附量也不能再增加，從而導致去除效率下降。另一方面，與較小的空氣流量

相比，在較大的空氣流量下， E_c 的下降趨勢更為明顯，例如，當總揮發性有機化合物(TVOC)的濃度從 0.3 mg/m^3 左右增加到 1.2 mg/m^3 ，相對應的 E_c 分別從 0.83 下降到 0.75 和從 0.83 下降到 0.63，這可以用 總揮發性有機化合物(TVOC)質量的淨增加來解釋此現象。除此之外，還發現在實驗條件下，當濃度相對較低（低於 0.5 mg/m^3 ）時，改變空氣的流量不會影響 E_c ，因為使用矽膠還未飽和，具有足夠的吸附能力去除污染物。如圖 7 所示，測試了不同再生空氣流量下污染物濃度對 E_c 的影響，在實驗條件下，再生空氣流量的定性影響與空氣流量的變化相反，即再生空氣越少，空氣越多，那麼 E_c 隨著再生空氣流量的減小而降低，因為再生空氣越多，矽膠的吸附能力就越強。

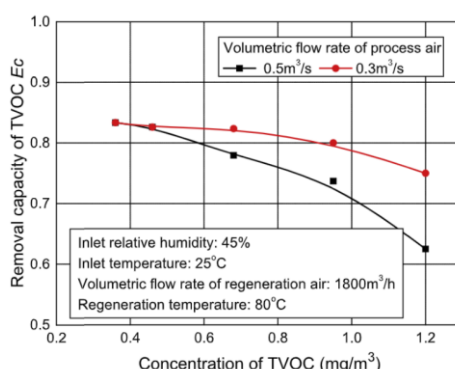


圖 6 空氣的不同體積流量及總揮發性有機化合物(TVOC)濃度對 E_c 的影響

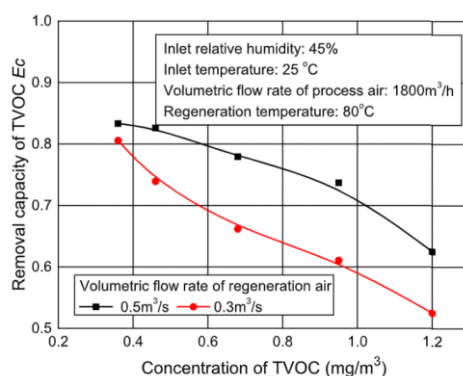


圖 7 揮發性有機化合物濃度對 E_c 的影響，並對應不同體積流量的再生空氣

3.1.3. 濕度比的影響

圖 8 顯示了 E_c 對於不同入口空氣相對濕度的變化，結果顯示， E_c 隨著空氣相對濕度的增加而降低，這可能是因為在較高濕度比的條件下，矽膠內部更多的孔隙被水蒸氣佔據，導致可用於吸附總揮發性有機化合物(TVOC)氣體的孔隙減少，此外，矽膠除濕輪的總揮發性有機化合物(TVOC)和除濕去除能力將在下面討論。

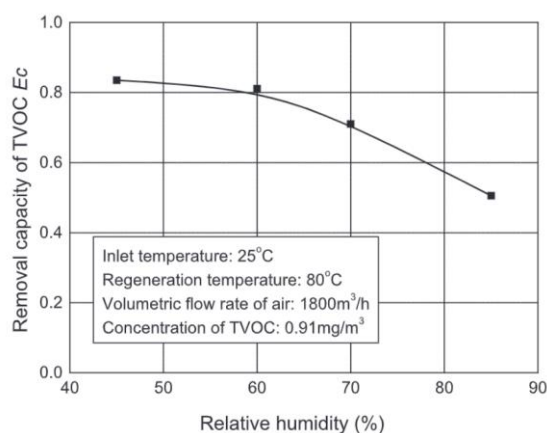


圖 8 進風濕度比對 E_c 的影響

3.2. 綜合總揮發性有機化合物(TVOC)和除濕性能測試與分析

根據前面的分析，總揮發性有機化合物(TVOC)和除濕所需的再生空氣溫度範圍處於同一水平，並且在除濕輪的實際運行中，可同時去除總揮發性有機化合物(TVOC)和水分，此部分除單獨分析總揮發性有機化合物(TVOC)去除能力外，還對綜合淨化除濕能力進行了進一步分析，試驗是在炎熱潮濕的夏季條件下進行，溫度為 37°C 且相對濕度為 65%，設定濃度為 1.15 mg/m^3 進行測試，並結合除濕能力進一步分析總揮發性有機化合物(TVOC)濃度的影響。

3.2.1. 再生溫度分析

此次實驗進行了測試，並將再生空氣溫度對於 E_c 和 E_d 的影響繪製在圖 9 (a) 中，結果顯示，在實驗條件下，隨著再生溫度從 60°C 升高到 100°C ， E_c 和 E_d 均增加，這是因為除濕輪內的浸漬的矽膠在較高的再生溫度下可以更好地再生並重複使用，從而提高吸附能力。除了去除效率，總揮發性有機化合物(TVOC)濃度和濕度比的出口數值也總結在圖 9 (b) 中，這直接證明了出口空氣是否能夠達到淨化及除濕的目的，從中可以發現，總揮發性有機化合物(TVOC)和濕度比的淨值隨著再生溫度的升高而減小，從圖 9 (a) 可以很容易地得出此結論。從總揮發性有機化合物(TVOC)的數值，可以得知在實驗條件下，再生溫度需要高於 90°C 才能滿足總揮發性有機化合物(TVOC)去除的需要 (GB 50,325-2010，室內空氣濃度應低於 0.5mg/m^3)，而濕度比的部分，建議再生溫度高於 100°C (室內空氣約 11g/kg)。綜上所述，在實驗條件下，應選擇高於 100°C 的再生溫度，以同時滿足總揮發性有機化合物(TVOC)和除濕的需要。

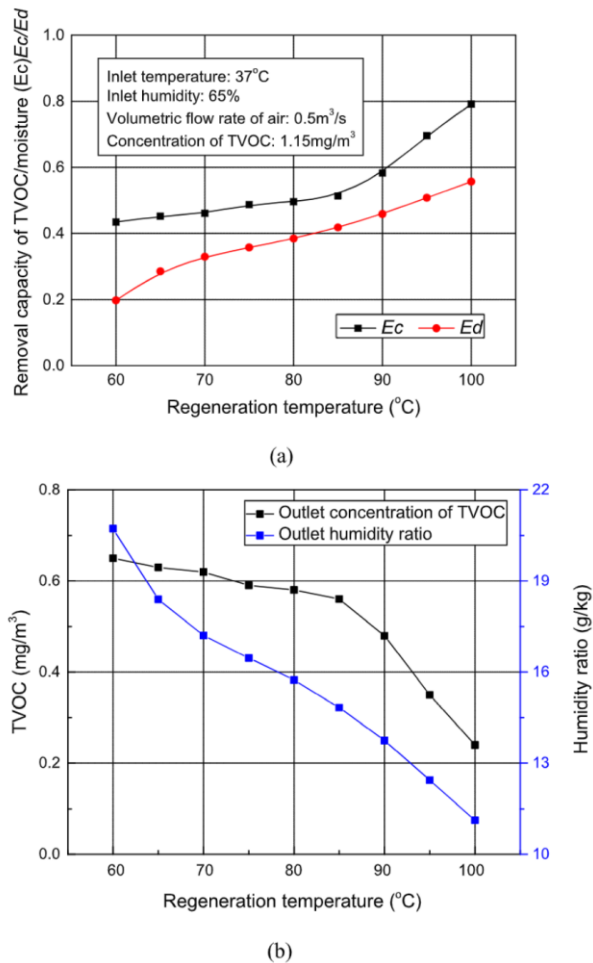


圖 9 再生溫度對 (a) E_c 和 E_d (b) 出口空氣狀態的影響

3.2.2. 總揮發性有機化合物(TVOC)濃度和空氣相對濕度的影響

圖 10 總結了總揮發性有機化合物(TVOC)濃度對 E_c 和 E_d 的影響，可以看出， E_c 的變化趨勢與圖 6 中解釋的一致，但有趣的是，除濕效率 E_d 在實驗下幾乎保持不變，這顯示在上海夏季條件下，總揮發性有機化合物(TVOC)濃度的變化範圍對矽膠除濕輪的除濕能力沒有影響，此外，環境空氣相對濕度對 E_c 和 E_d 的影響如圖 11 所示，隨著入口空氣相對濕度的增加， E_c 和 E_d 均降低，這也可以透過矽膠在恆定條件下存在著飽和吸附來解釋，綜上所述，實驗條件下矽膠除濕輪的除濕性能受環境相對濕度的影響很大，但隨著總揮發性有機化合物(TVOC)濃度的變化而保持不變，而總揮發性有機化合物(TVOC)的去除能力受環境濕度條件和污染物濃度的影響。

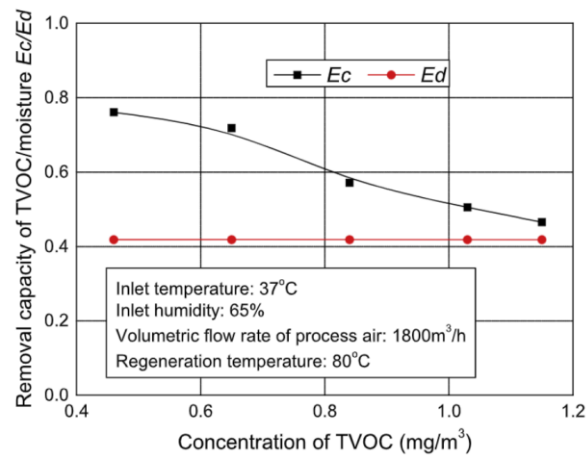


圖 10 總揮發性有機化合物(TVOC)濃度對 E_c 和 E_d 的影響

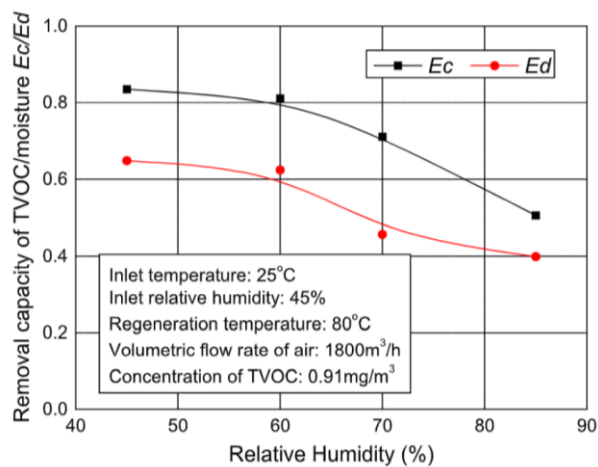


圖 11 濕度比對 E_c 和 E_d 的影響

4. 結論

在本文中，建立了一個實驗裝置來測試傳統矽膠除濕輪的總揮發性有機化合物(TVOC)和濕度比的去除能力，系統性能透過總揮發性有機化合物(E_c)和水分(E_d)的去除效率來評估。結果顯示，在滿足實驗溫濕度的環境條件下， E_c 隨再生溫度的升高而增大，脫附總揮發性有機化合物(TVOC)和除濕所需的再生空氣溫度範圍互相吻合，而在系統設計的條件下，會推薦相同的空氣淨化和除濕工作之溫度範圍，此外， E_c 隨著總揮發性有機化合物(TVOC)濃度和再生空氣流量的增加而降低。實際實驗是在上海夏季條件（37°C，65%），而總揮發性有機化合物(TVOC)濃度為 1.15 mg/m³，發現再生溫度建議高於 100°C，以滿足總揮發性有機化合物(TVOC)和濕度負荷的需求，同時，在此條件下，除濕性能受環境濕度比的影響較大，然而總揮發性有機化合物(TVOC)濃度改變影響不大。總揮發性有機化合物(TVOC)去除能力仍受環境濕度條件和污染物濃度的影響，因此在類似條件下的實際系統設計中，除濕應主要考慮環境濕度比，但對於空氣淨化，環境濕度比和總揮發性有機化合物(TVOC)濃度應慎重考慮。

關鍵字	總揮發性有機化合物(TVOC)去除、除濕、矽膠除濕輪
-----	----------------------------

註：1.請計畫執行單位上傳提供較具策略性的知識物件，不限計畫執行有關內容。

2.請計畫執行單位每季更新與上傳一次，另有新增政策建議可隨時上傳。

3.文字精要具體，量化數據盡量輔以圖表說明。