

環境管理規劃類

製程空調系統導入吸附除溼填充轉輪節能
效益分析

陳志杰*、林文祥**、謝維晃***、劉士軒****

摘 要

台灣地處海島型亞熱帶季風氣候，溼度控制為空調耗能重要影響因素。傳統空調系統以冷凝除溼過程來處理空氣溼度，即將空氣溫度降至其露點溫度以下達到空氣冷凝除溼的功效，後段再搭配再熱裝置，將除溼後低溫的空氣加熱至適當的送風溫度，兩段空氣處理流程能源耗用非常可觀。由文獻結果可知，若將溫度與溼度分開控制具有較佳的節能效益，而傳統中央空調系統受限於冰水出水溫度，處理空氣的乾度條件有其極限，而利用吸附除溼技術則可將空氣乾度處理至中央冰水系統無法達到的乾度條件；基於此特性將吸附除溼技術導入傳統空調，分別進行控溼及控溫，與傳統空調系統控制相較，可降低約 35 % 之能耗。本文分析探討吸附除溼空調設備為填充式除溼轉輪，具有設置成本低及後續維護簡單等優勢，使吸附除溼技術於系統運行上具備經濟競爭性，利於廣泛推廣至製程無塵室、精密加工廠及製藥廠等，須穩定將溫溼度控制在適當範圍條件的場域。

【關鍵字】 吸附除溼、填充式轉輪、低溫再生

* 財團法人台灣綠色生產力基金會 專業五處
** 財團法人台灣綠色生產力基金會
*** 財團法人台灣綠色生產力基金會 專業五處
**** 財團法人台灣綠色生產力基金會 專業五處

經理
副執行長
處長
工程師

一、前言

全球暖化使得地球環境溫度逐年攀升，世界各國相繼提出解決方案及訂定相關管理規範，期能減緩地球暖化問題，淨零碳排成為近年備受重視之議題。為與國際接軌因應淨零碳排趨勢，我國政府於 2022 年提出 2050 淨零轉型十二項關鍵戰略（國發會，2022），其中至 2030 年以前，節能技術為最重要發展項目之一。根據生產性質能源查核年報資料（2023），在工業領域空調系統平均耗能約占整體的 12%，電機電子產業空調耗能更是達到 24%，因此如何提高空調系統整體能效是發展淨零碳排的關鍵因子之一。

台灣地處海島型亞熱帶季風氣候，夏季氣候高溫高溼，冬季寒冷多雨，全年氣候潮溼，傳統空調系統大都以冷凝除溼過程來處理空氣溼度；即利用冷凍循環中的蒸發器來冷卻空氣，當空氣溫度降至其露點溫度時，空氣中的水蒸氣會冷凝成水，達到空氣冷凝除溼的功效，後段再搭配再熱裝置，將除溼後低溫的空氣加熱至適當的送風溫度，兩段空氣處理流程耗用能源非常可觀。由以上可知除溼過程占空調系統耗能很高的比例，尤其在工業製程方面，半導體無塵室、鋰電池製程與生技製藥業等，對於製程溼度控制的要求更是嚴謹，因此能滿足溼度控制又可達到節能成效的空調技術已成為重要發展趨勢。

在高溫潮溼環境下，由文獻得知（B. Guan et al., 2020），空調系統將溫度與溼度分開控制具有較佳的節能效益，空氣的顯熱負荷可由冰水盤管或是冷媒盤管處理，溼度則藉由吸附除溼系統處理，冰水主機因無需處理空氣潛熱負荷，可將冰水出水溫度提高抑或是降低系統冰水流量，藉而降低整體冰水系統耗能。潛熱負荷則交由吸附除溼系統處理，吸附除溼過程主要透過材料與空氣接觸時，利用吸附材料表面水分壓與空氣中水分壓的差異來進行空氣除溼，如圖 1 所示，並透過高效率熱泵、廢熱或是太陽能產生高溫空氣對材料進行還原再生，使系統操作上可重複循環運作。

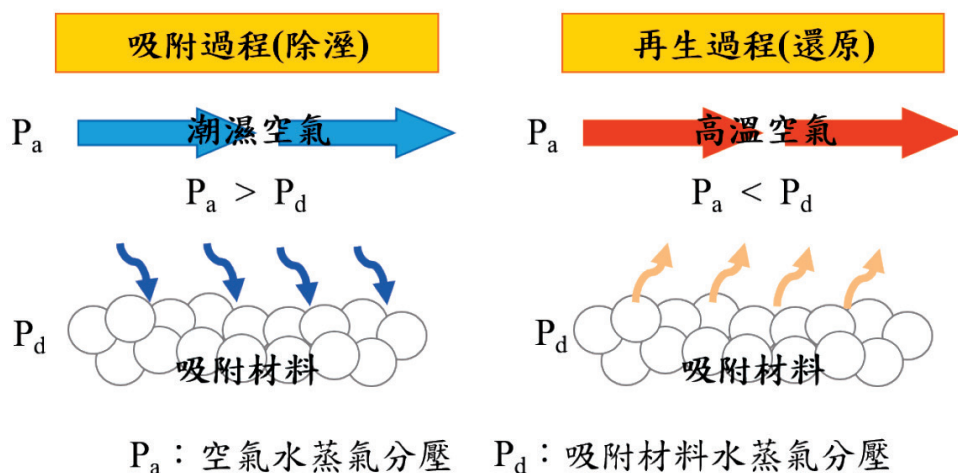


圖 1 吸附材料除溼與再生過程示意圖

Chien 等人 (2020) 將吸附除溼設備導入某醫院既有空調系統，評估傳統空調系統與傳統空調系統搭配吸附除溼設備之操作耗能比較，實驗結果顯示相較於傳統空調系統，將吸附除溼設備搭配傳統空調系統進行環境之溫度及溼度分開控制，可呈現約 16.5% 以上之節能成效。此外，Angrisani 等人 (2011 及 2012) 進行吸附式除溼空調系統性能分析，利用太陽能和微發電機之廢熱作為再生空氣之熱源，探討再生空氣溫度及處理空氣溫溼度條件，對系統除溼效率、水份移除率之影響，並且與傳統 HVAC (Heating, Ventilation, Air-conditioning and Cooling) 系統進行節能效益與環境效益評估比較，由結果顯示結合除溼轉輪之系統，可節省約 30% 之能耗及約 40% 之二氧化碳排放量。

工業領域滿足溫溼度控制又可達到節能成效的空調技術已成為重要發展方向。由以上文獻整理可知，利用傳統空調系統控制溫度，搭配吸附除溼系統控制溼度，將溫度與溼度分別由 2 套系統來分開控制，對於空調系統在節約能源方面提供了一有利的途徑。而過往將吸附式除溼技術導入空調系統的設計中，常見的吸附元件為蜂巢式除溼轉輪，它是利用玻纖材料製作成蜂巢型式的基底，表面再批覆一層矽膠或氧化鋁等

吸附材料薄膜，如圖 2 所示，流道均勻與空氣接觸面積大，吸附空氣中水份的效果顯著。但此類蜂巢式轉輪造價昂貴，後續維護成本高，且系統操作上，再生側常以電熱方式加熱產生 70~150 °C 以上之再生空氣，進行除溼轉輪之還原再生，系統耗能量大，故此技術目前僅於部分溼度要求相對嚴苛之場域導入應用。

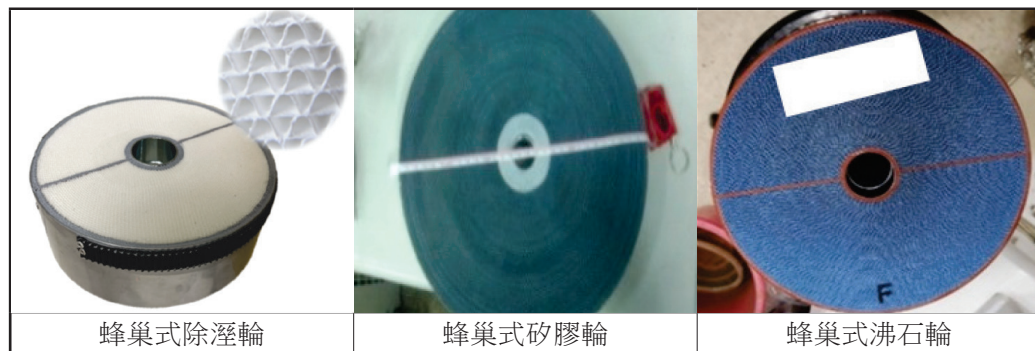


圖 2 蜂巢式除溼輪

本文針對上述除溼轉輪設備運轉的劣勢，評估探討一整合熱泵與填充式除溼轉輪之吸附除溼設備，導入工業空調系統之效益評估分析，期以更高之性價比系統應用技術，為工業空調節能開創一創新節能方案。

二、節能方案與評估分析

2.1 結合熱泵吸附式除溼轉輪運作原理

填充式除溼轉輪為固態吸附除溼的應用技術，有別於蜂巢式轉輪，填充式轉輪為使用固體吸附顆粒，如矽膠、氧化鋁或分子篩顆粒，以填充的方式製成除溼床體，如圖 3 所示。除溼轉輪於設備運轉過程中會以固定的轉速旋轉，與空氣接觸面分為除溼側及再生側兩個部分。除溼側吸附顆粒與空氣接觸做熱質傳的交換，吸收空氣中的水氣，因此可將出口的空氣變成乾燥的狀態，而吸附顆粒因為吸收了空氣中的水分，過程中會逐漸趨於飽和狀態，需透過旋轉過程進入再生側，與另一道熱空氣進行熱質傳交換，將吸附的水分排出，方能完成周而復始的運作。而再生側所需要約 50 °C 熱空氣即透過熱泵機組產生，熱空氣相對溼度較低（水蒸氣分壓低），與飽和的吸附顆粒接

觸，可促使水分離開吸附顆粒，達到還原的目地；而熱泵機組製熱的過程亦同時製冷，可將除溼側之空氣降溫，冷空氣相對溼度高(水蒸氣分壓高)，與乾燥的吸附顆粒接觸，可增加顆粒吸附水分的效果，上述系統運作示意如圖 4 所示。

本研究探討之吸附除溼空調設備具有以下特色：(1) 利用熱泵產生還原所需之熱空氣，運作過程可同時製冷降溫除溼側之空氣，大幅提升整體系統之能源使用效率；(2) 利用顆粒填充於填充床轉輪，與蜂巢式吸附除溼系統相比可大幅降低設置成本；(3) 填充式轉輪後續維護簡單，若吸附顆粒效能衰退，僅需將顆粒更新替換，與蜂巢式轉輪須將整座模組更換，相較簡易，利於廣泛推廣至製程無塵室、精密加工廠及製藥廠等，需穩定將溫溼度控制在適當範圍條件的場域。

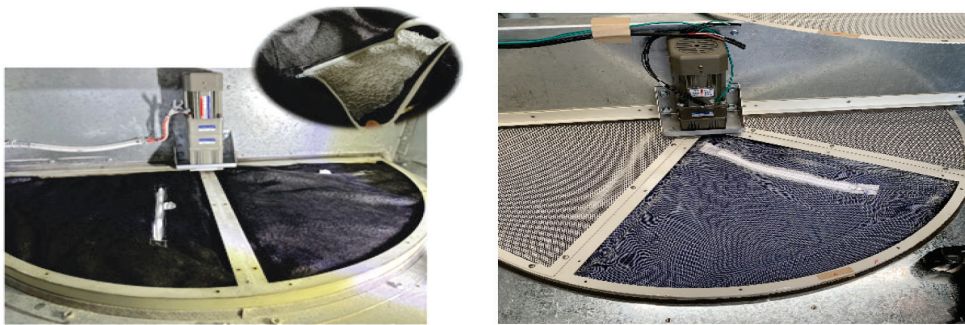


圖 3 填充式除溼輪

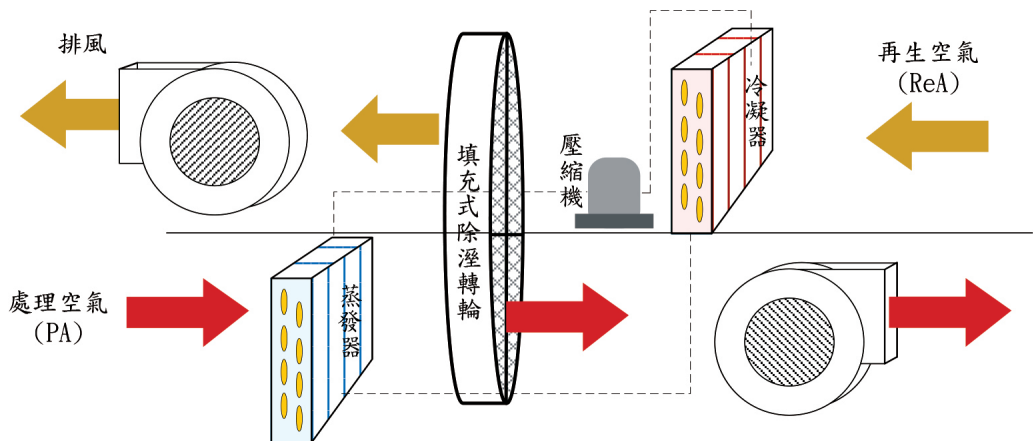


圖 4 結合熱泵吸附式除溼轉輪設備運作示意圖

2.2 結合熱系吸附式除溼轉輪導入製程空調系統

製程空調系統配置方式主要可分為 2 種，一種為空調室內循環，搭配引進部分比例的室外空氣，調節室內壓力為微正壓；另一種為全換氣系統，製程過程需全時換氣，故空調系統全時引進室外空氣。2 種空調系統配置控溫及控溼的方式，均是透過空調箱配置的冰水盤管及加熱裝置交互作用來達成，利用低溫冰水將空氣降至室內需求溼度之露點溫度以下，進行除溼的動作，後端搭配電熱器或熱水盤管再熱回溫，進行控溫的動作，而此種控制方式，常見的狀況即是冰水流量全開，後端再熱裝置也是滿載，且通常這類需要恆溫恆溼的場域，空調是全年全時運轉，能源消耗相當可觀；另外於控制過程中，冷熱盤管也會產生相互牽引的影響，易造成控制不穩定的現象。

上述傳統中央空調系統利用冰水進行除溼，受限於冰水溫度多半設定於 5~7 °C，熱交換後空氣露點溫度約 9~10 °C，此時空氣的乾度條件已達冰水系統能處理的極限，而吸附式除溼轉輪是透過水蒸氣分壓差進行吸附空氣中的水分，熱質傳後能將空氣露點溫度降至 5 °C 甚或 0 °C 以下。利用此優勢特性，將吸附式除溼轉輪設備導入至上述既設空調系統，系統配置如圖 5 所示，將外氣藉由吸附除溼設備處理至冰水系統無法處理的低溼狀態，乾燥的空氣與系統內其餘循環風混合，空氣絕對溼度條件已可滿足現場的環控需求，此時空調箱冰水盤管不需進行降溫除溼的動作，僅需進行顯熱溫度調節，可大幅降低冰水的需求量，也因為沒有透過冰水盤管進行過冷除溼，亦可大幅節省後端再熱裝置的作動，降低空調箱整體能源的消耗量，此種配置方式即是將溫度及溼度由原先單套設備控制，轉為 2 套設備個別控制，將溼度控制交由吸附除溼設備負擔，既設空調箱則進行溫度控制，除可有效提升處理空氣的能源效率，亦可降低單套系統控制的不穩定性。

而導入吸附除溼設備此節能方案，應用上為在既設系統上增設空調箱，故執行上容易遇到現場安裝空間的難題，依系統規格需求吸附除溼設備規格尺寸約為 3m(長)3m(寬)2m(高)以上，為因應安裝空間的難題，設備樣式可調整為臥式、立式或其他樣式，亦可吊掛安裝，以減少安裝執行上的阻礙。

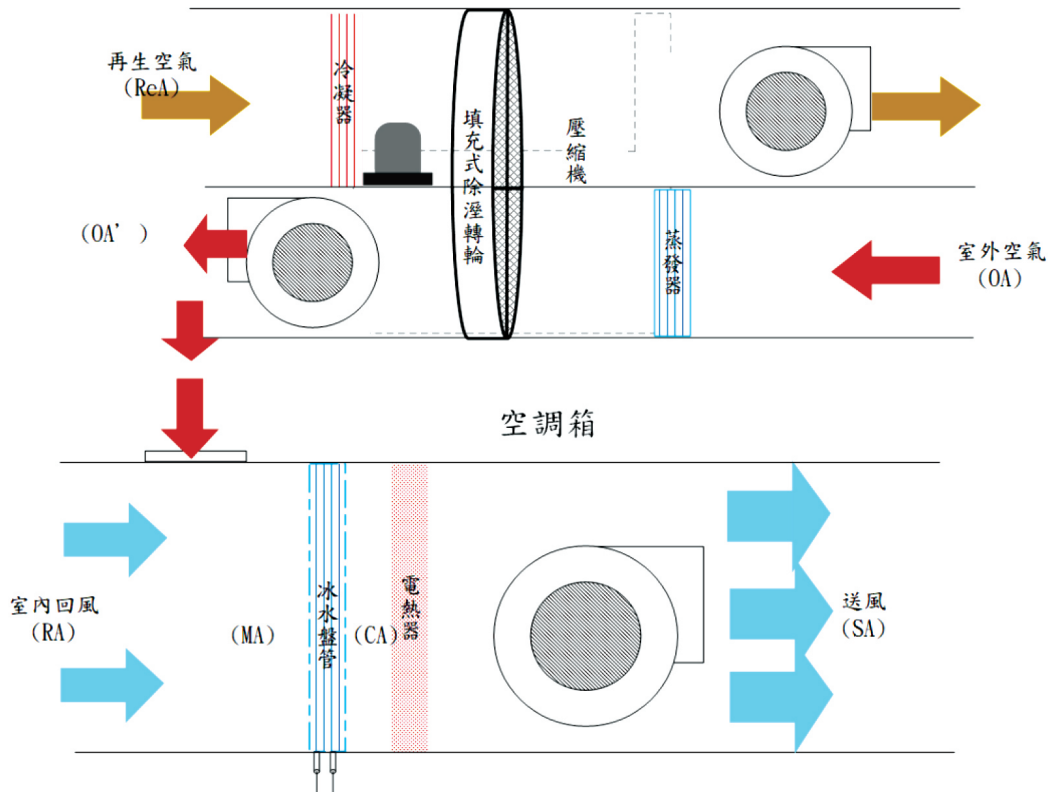


圖 5 吸附式除溼轉輪設備導入既設空調系統配置示意圖

2.3 案例應用分析探討

某光學廠製程無塵室環境設定為 20°C ，相對溼度 55%，無塵室由 2 台空調箱供應空調維持環境需求，2 台空調箱總風量為 56,400 CMH，為維持室內微正壓狀態，引入 13,000 CMH 之外氣量（約總風量 23%），空調冰水系統性能係數 (kW/RT) 為 1，空調系統年使用時間為 8,500 小時，過去利用空調箱的冰水盤管及電熱器進行控溼及控溫，現階段導入 1 台「結合熱泵吸附式除溼轉輪設備」搭配既設 2 台空調箱進行操作，系統配置如圖 6 所示，針對上述改善前後之操作差異，進行空調全年運轉之節能效益與環境效益分析探討。

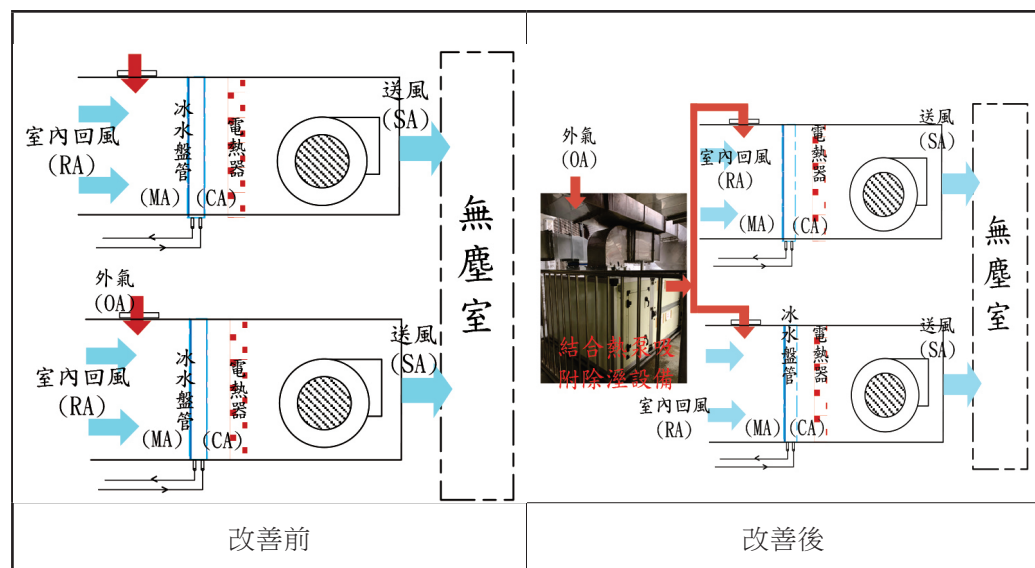


圖 6 吸附式除溼轉輪設備導入既設空調系統配置示意圖

在此操作條件下無塵室露點溫度需求為 $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，於夏季外氣乾球溫度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相對溼度 60% ，引入空調箱與室內回風 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相對溼度 55% 混合後，透過 $5\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之冰水進行熱交換，控制出風露點溫度達 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相對溼度 100% 的狀態（過冷），完成溼度的控制，此段空處理的焓差為 30.1 kJ/kg ，後段再透過電熱器加熱（再熱），控制乾球溫度達 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此段空處理的焓差為 5.7 kJ/kg ，空氣處理流程如圖 7 所示，經導入吸附式除溼轉輪設備後，先將外氣處理至露點溫度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之低溼狀態，乾燥的空氣再送入空調箱與室內回風混合，此時混合後的空氣露點溫度為 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，已達到送風溼度需求，後端僅需再透過冰水將空氣降溫至乾球溫度 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此段空氣處理的焓差降為 7.1 kJ/kg ，與改善前相較，可有效減少空調箱冰水用量，空氣處理流程圖如圖 8 所示。

經實際監測記錄 30 日改善前後之環境溫濕度及空調箱電熱器逐日變化，結果如圖 9 及圖 10 所示，改善前透過冰水排及電熱器交互調節控制，整月平均溫濕度為 $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相對溼度 55.8% ，電熱器整月消耗平均功率為 43.9 kW ；改善後溼度由吸附除溼設備控制，因空氣沒有過冷處理，空調箱電熱器整月消耗平均功率大幅降低至 1.3

kW，無塵室整月平均溫濕度依舊穩定維持在適當的條件 (20 °C，相對溼度 55.1%)。

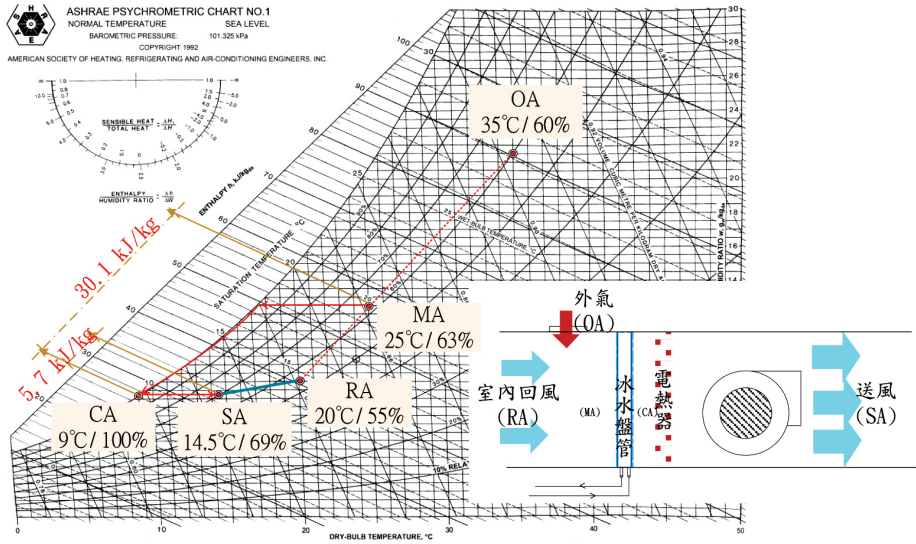


圖 7 傳統空調箱系統空氣處理流程圖

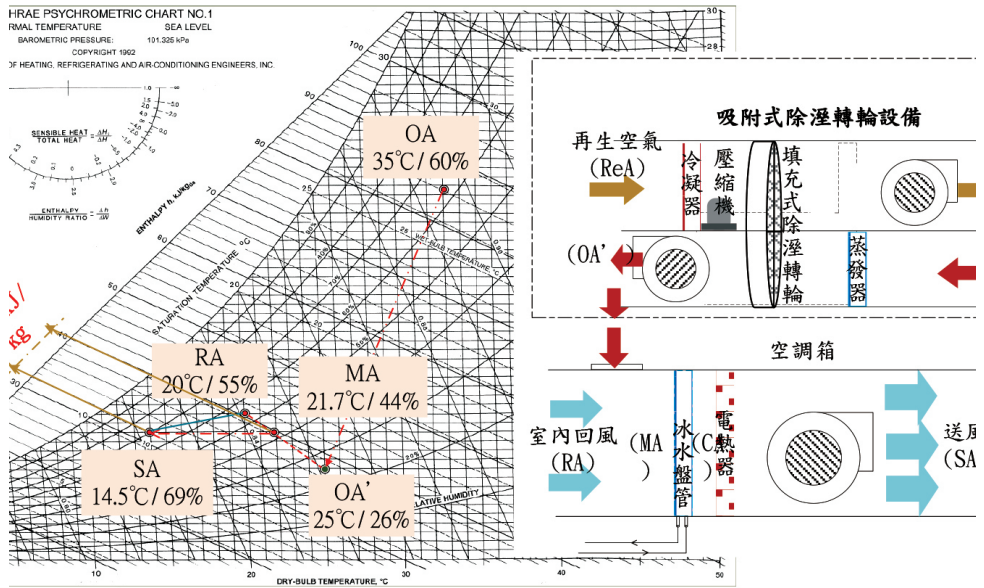


圖 8 導入結合熱泵吸附式除溼轉輪設備空氣處理流程圖

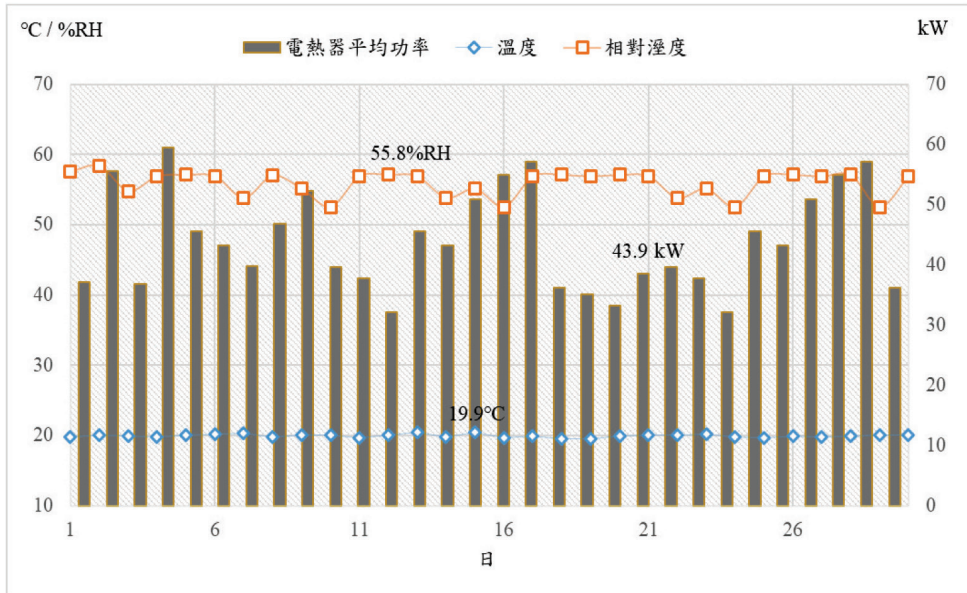


圖 9 改善前無塵室環境溫濕度及空調箱電熱器逐日變化

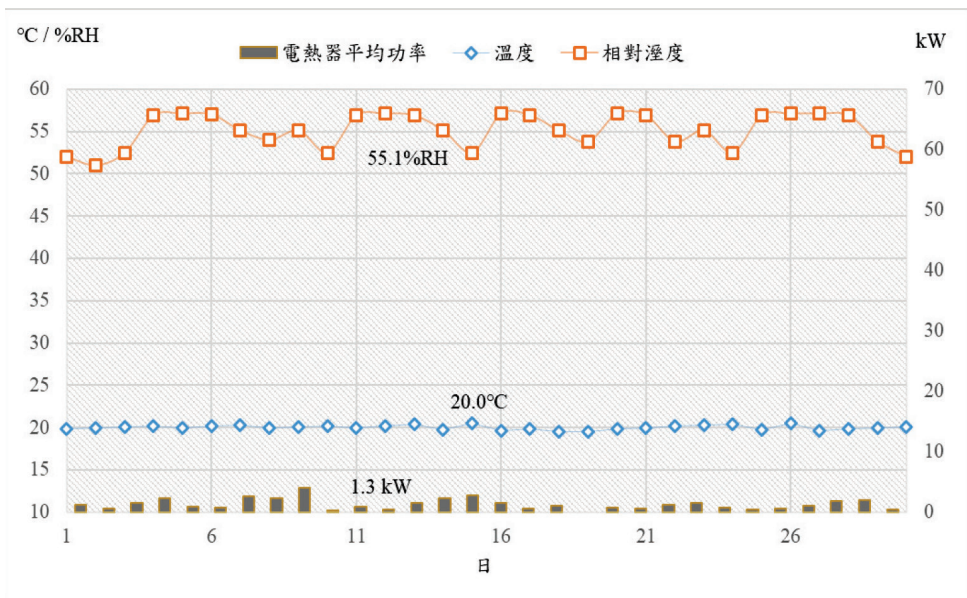


圖 10 改善後無塵室環境溫濕度及空調箱電熱器逐日變化

藉由每段處理過程空氣的焓差值可計算出整體的能源耗用量，其計算方式如下：

空調箱冰水盤管製冷需求能力計算：

$$\text{盤管製冷能力 (RT)} = \dot{m} \times (h_{ma} - h_{ca}) / 3.516$$

\dot{m} 為空調箱之空氣質量流率 (kg/s)， h_{ma} 為空調箱混風之空氣焓值 (kJ/kg)， h_{ca} 為空調箱冰水盤管後之空氣焓值 (kJ/kg)。

盤管製冷所消耗之功率計算：

$$\text{盤管製冷消耗功率 (kW)} = \text{盤管製冷能力 (RT)} \times \text{冰水系統之性能係數 (kW/RT)}$$

空調箱電熱器再熱需求能力計算：

$$\text{電熱器制熱能力 (kW)} = \dot{m} \times (h_{ca} - h_{sa})$$

h_{ca} 為空調箱電熱器後之空氣焓值 (kJ/kg)，而電熱器加熱效率為 1，故電熱器制熱需求能力約等於電熱器耗功率。

改善前空氣側消耗功率計算：

$$\text{改善前空調箱消耗功率 (kW)} = \text{空調箱風車消耗功率 (kW)} + \text{盤管消耗功率} + \text{空調箱電熱消耗功率 (kW)}$$

改善後空氣側消耗功率計算：

$$\text{改善後空調箱消耗功率 (kW)} = \text{空調箱風車消耗功率 (kW)} + \text{盤管消耗功率} + \text{空調箱電熱消耗功率 (kW)} + \text{吸附式除溼轉輪設備耗電 (kW)}$$

透過上述評估計算方式，空調系統導入吸附式除溼轉輪設備全年效益分析結果如表 1 所示。全年平均氣候條件約 24.5 °C，相對溼度 65%，傳統空調系統全年需求冷凍噸數約 91.6 RT，導入吸附式除溼轉輪設備後，系統全年需求冷凍噸數可降為約 62 RT，而傳統空調系統電熱需求量約 62.1 kW，改善後則大幅降低，僅部分外氣溫度過低時，須作動輔助調節室內溫度；而增設吸附式除溼轉輪設備約增加 38 kW 耗電功率，考量參差因子為 0.7，整體而言導入吸附除溼設備可呈現約 34.9 % 之節能效益，系統

年運轉時數為 8,500 小時，全年可節省 456,110 kWh 的空調運轉耗電量。若以電費平均單價 3 元 /kWh 計算，可減少約 137 萬元之電費支出，而設備成本與安裝建置工程費用合計約 430 萬元，回收年限約 3.1 年。另參考經濟部能源署公佈之 112 年電力排碳係數 0.494 kg CO₂ e/kWh 計算，可減少 225 公噸 CO₂ 排放量。由以上分析結果可知，此項節能改善措施具有優異節能減碳效益及回收年限。

表 1 導入結合熱泵吸附式除溼轉輪設備全年運轉效益評估

全年平均外氣條件 24.5 °C，65% RH 全年運轉時數 8,500 小時	改善前	改善後
系統平均需求冷凍噸數 (RT)	91.6	62.0
系統冷凍噸數耗電量 (kWh)	778,260	527,000
系統平均需求再熱量 (kW)	62.1	0.0
再熱耗電量 (kWh)	527,850	0
吸附除溼耗功率 (kW)	-	38.0
吸附除溼耗電量 (kWh)	-	323,000
年運轉耗電量 (kWh/year)	1,306,110	850,000
年運轉費用 (NT/year)	3,918,330	2,550,000
能源節省比例	34.9%	
年節省費用 (NT/year)	1,368,330	

三、結論

工業領域提升空調系統整體能效是發展淨零碳排的關鍵因子之一，滿足溫溼度控制又可達到節能成效的空調技術已成為重要發展方向。由本文分析結果可知，利用傳統空調系統控制溫度，搭配吸附除溼系統控制溼度，將溫度與溼度分別由 2 套系統來控制，對於空調系統在節約能源方面提供了有效的方案，同時也可解決空調冰水因需低溫除溼而調低供水溫度 (5~6 °C)，導致冰水主機效率下降的問題 (效率約下降 5%)，空調冰水系統亦無需區分為 2 套供水系統 (5 °C 及 9 °C)。本文探討之吸附除溼設備利用熱泵產生還原所需之熱空氣，運作過程可同時製冷降溫除溼側之空氣，大幅提升整體系統之能源使用效率，且除溼輪為填充式的轉輪，與一般傳統蜂巢式除溼輪相較，有設置成本低與後續維護簡單的優點，利於廣泛推廣至製程無塵室、精密加工廠及製藥廠等，需穩定將溫溼度控制在適當範圍條件的場域。整體而言，導入吸附式除溼轉論設備，可實現約 35% 之節能率，對於企業降低運作成本及製程過程中所產生的溫室氣體排放，具有一定程度的功效。

參考文獻

國家發展委員會 (2022) , 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明。

生產性質能源查核年報 (2023)。

B. Guan, X. Liu, Q. Zhang, T. Zhang(2020), Performance of a temperature and humidity independent control air-conditioning system based on liquid desiccant for industrial environments, *Energy and Buildings*, Vol. 214, p109869.

T.-Y. Chien, C.-C. L, F.-J. Wu, C.-T. Chen, T.-H. Pan, G.-H, Wan(2020), Comparative Analysis of Energy Consumption, Indoor Thermal-Hygrometric Conditions, and Air-Quality for HVAC, LDAC, and RDAC System Used in Operating Rooms, *Applied Sciences*, Vol. 10, Article 3721.

G.Angrisani , A. Capozzoli , F. Minichiello , C. Roselli and M. Sasso(2011), “Desiccant wheel regenerated by thermal energy from a microcogenerator: Experimental assessment of the performances” , *Applied Energy*, Vol. 88, p1354-1365,.

G. Angrisani , F. Minichiello , C. Roselli and M. Sasso(2012), “Experimental analysis on the dehumidification and thermal performance of a desiccant wheel” , *Applied Energy*, Vol. 92, p563-572.