

吸附式製冷循環系統技術

羅凱帆^{1*} 黃蓓芸² 李建宏³ 康育豪⁴

摘要

吸附式製冷是由吸附劑吸附冷媒，經由冷媒的蒸發吸熱達到製冷目的，再由65℃以上熱源再生即可重複使用，溫度範圍可應用於200℃以下的低階工業廢熱回收，減少冷卻系統的耗電，如果是一般家庭使用，也可利用太陽能為再生熱源。吸附式製冷系統分成雙床式、多床式和多階段式，雙床式系統較簡單，較為普遍；多床式可提高循環速度，體積較大；多階段式可將再生溫度降低，吸附量較小，本文將介紹各種吸附式製冷循環系統技術之特點。

關鍵詞：廢熱、吸附、製冷

1. 前言

近年由於石油蘊藏量減少，加上產油國戰爭影響，造成原油價格居高不下，其他能源如煤炭、天然氣價格也隨之升高。臺灣是一海島型國家，能源礦產產量不高，根據中華民國101年能源統計手冊，高達97.82%以上的能源須由國外進口，能源需求量達年均3.52%的成長率，而發電能源大多來自進口，因此未來電價升高是不可避免，其中能源最大用戶為工業部門的38.16% (圖1)，依據能源查核資料步初統計 (表1)，工業部門廢熱量約320萬公秉油當量，占工業總耗能之7.05%，其中200℃以下的廢熱占總廢熱量55.7%，合計約178.5萬公秉油當量，所以在經濟及能源有效應用的考量下，若能有效利用廢熱的回收製冷，將可提高能源使用率，並減少冷凍空調所耗費之電能，達到節能減碳的目的。

在生活中有著各式製冷系統應用在不同的

地方，如食物的冷藏、物品冷凍應用、溫度的舒適、電子產品冷卻等，不只是一般家庭會用到，很多商業或是工業應用也很多，市面上製冷多以壓縮機為主，需耗費大量能源，如周雅文及洪敏郎(2010)文中提到，住宅用電中有35%是用在冷凍空調，Navarro-Esbria *et al.* (2007)提到全世界約有30%的能源，都是使用在空調系統，且空調系統使用的冷媒也是一種會破壞臭氧層的溫室氣體，因此使用非電力驅動並且無汙染的空調系統，對於環境保護和節能上是一個重要的解決方法。

近幾年的製冷研究，主要在開發減少能量消耗、降低能源成本且不降低所須舒適條件的技術，相對於需要耗電的壓縮機系統，吸附式製冷系統就是一個非電力驅動的製冷技術，利用吸附劑吸附環境中之氣態冷媒，加速液態冷媒揮發，同時帶走周遭環境之熱量，達到製冷之目的，當吸附劑吸滿冷媒後，利用低階廢熱源或是太陽能，將吸附的冷媒脫附再生，如此

¹工研院南分院 研究員

²工研院南分院 正研究員

³工研院南分院 工程師

⁴工研院綠能所 資深研究員

*通訊作者, 電話: 06-6939049, E-mail: kayfan@itri.org.tw

收到日期: 2013年10月15日

修正日期: 2013年11月12日

接受日期: 2013年12月28日

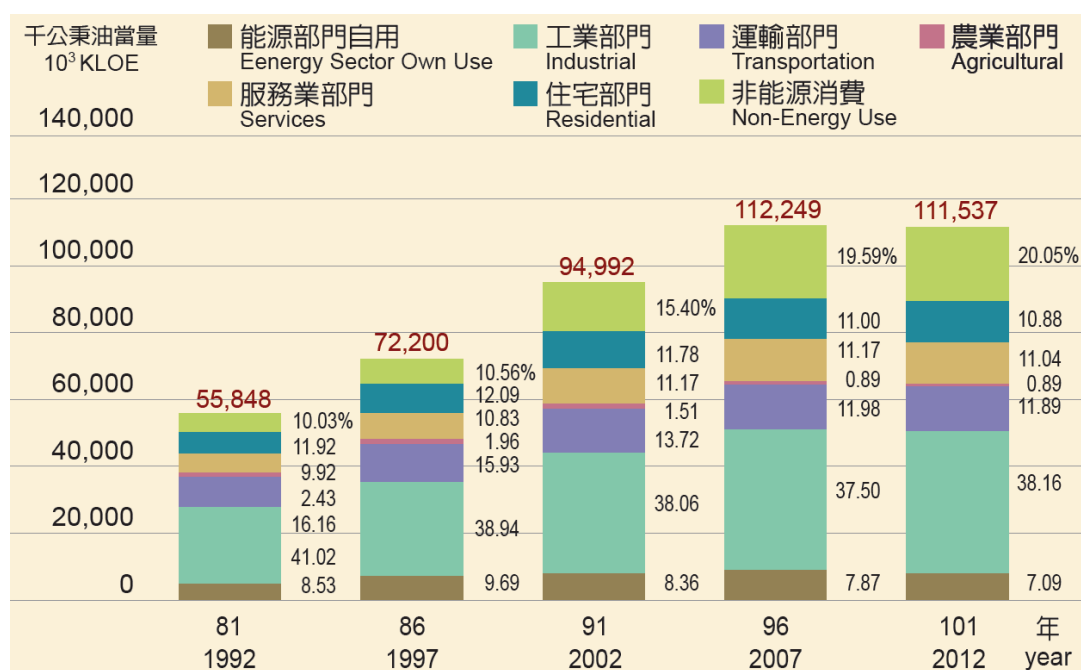


圖1 各部門能源消費比例(能源統計手冊)

表1 不同溫度範圍內之工業廢熱量(單位：公秉油當量，資料來源：能源查核統計資料)

溫度梯度(°C)	化工業	金屬基本工業	食品業	紡織人纖業	造紙業	電機電子業	水泥業	玻陶業	其他	占比(%)
~130	58,808	10,075	40	5,503	704	9,451	23,704	3,593	8,850	3.77
131~160	326,605	60,297	2,875	16,249	11,094	9,234	12,393	4,472	8,432	14.10
161~200	1,102,132	11,437	12,137	15,522	4,088	35,859	7,045	7,567	17,233	37.86
201~250	38,275	18,475	8,420	17,471	1,581	76,403	22,472	11,403	29,306	6.99
251~350	41,306	219,769	598	35,925	2,286	52,404	-	83,881	6,300	13.81
351~450	1,927	55,219	-	2,481	-	3,123	11,315	23,491	18,428	3.62
451~650	947	35,739	-	-	-	3	-	13,241	2,943	1.65
651~	1,282	570,929	-	-	-	244	-	4,931	5,740	18.20
推估總廢熱量	1,571,282	981,940	24,070	93,151	19,753	186,721	76,929	152,579	97,233	100

循環製冷，可減少電力的消耗，具有很大的節能潛力；而氣態冷媒會自行擴散，因此不需動件也不會產生噪音，如果選用適當的冷媒(例如水)，它可以完全沒有腐蝕性和毒性，對環境也不會造成汙染。

吸附式製冷主要由吸附劑和冷媒兩者配對使用，可分為物理式和化學式兩種，Poniec *et al.* (1974)書中指出物理式吸附，主要是因為吸附劑和冷媒間的凡得瓦力吸附在一起，通常物

理吸附的吸附劑是多孔狀的固體，針對不同之冷媒進行吸附，Zhang *et al.* (1989)書中提到吸附劑可由不同的媒介或氣體蒸氣製造孔洞，進而吸附特定的冷媒。化學式是由吸附劑和冷媒間產生反應進行吸附，Gasser *et al.* (1991)書中提到如電子轉移、原子的斷裂與排列或是化學鍵的形成，都是化學吸附中會產生的反應，在反應過程中吸附劑或冷媒不會維持原本型態，如氯化物和氨之間的絡合反應、鹽類的溶解和

凝聚或金屬氫化物的形成等，其中產生熱質傳的現象都可作為化學式吸附。

由於化學式吸附本身常使用有腐蝕性的配對，或是再生時會有結晶產生的鹽類，在保養上較為困難，物理式吸附製冷吸附劑本身型態不會改變，常用配對為矽膠和水，使用上較無限制，因此越來越受到重視。但不論化學式或物理式，在使用上都須考慮其系統熱傳，吸附劑之吸附時間、再生時間，因此在系統設計上有很多延伸變化，以利系統正常運作，提高整體製冷效率，本文將為常見之吸附製冷技術作介紹，並了解技術發展現況。

2. 吸附式製冷系統發展

吸附式製冷原理主要是由一工作對(吸附劑和冷媒)相互間吸附，圖2 (Szarzynski *et al.*, 1997)是理想的吸附製冷循環圖，一個完整的吸附製冷循環過程分為四個過程：A→B是等容的升溫過程，B→D是等壓的升溫過程，也是吸附劑的再生過程，吸附劑經由高溫將冷媒脫附，並由冷卻端將冷媒蒸氣冷卻為液態；D→F是等容的降溫過程，F→A是等壓的降溫過程，此時就是製冷過程，吸附劑吸附環境中之冷媒蒸氣，造成環境中冷媒分壓降低，冷媒開始由液相轉成氣相，並由周遭吸收大量的蒸發淺熱，產生製冷效果；C↔E為冷媒在循環過程中，在製冷和再生時之壓力和溫度變化。

對於吸附式製冷技術最重要的參數有兩

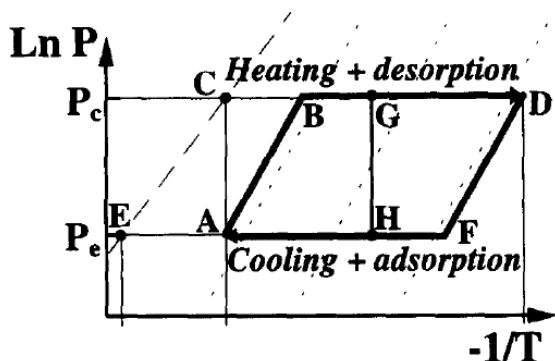


圖2 理想吸附製冷循環(Szarzynski *et al.*, 1997)

項，一為COP (coefficient of performance)，代表系統的製冷效率；一為SCP (specific cooling power, W/kg)，代表每公斤吸附劑所能產生的製冷瓦數，其公式如下：

$$\text{COP} = \text{製冷能力} / \text{系統吸收能量} \quad (1)$$

$$\text{SCP} = \text{製冷瓦數} / \text{吸附劑重量} \quad (2)$$

常見之吸附劑主要有活性碳、矽膠和沸石，MOFs近幾年也開始大量被研究，每種吸附劑適用之條件不盡相同，使用者可以根據使用條件選用。由於吸附劑需要再生時間，所以通常設計為雙槽式，用於製熱或製冷系統設計也不同，圖3是日本Mitsubishi公司設計之吸附式製冷機循環圖，也是典型之吸附製冷系統示意圖，為了提高系統之COP值，每個系統都有其不同之設計方式，下列將針對不同之系統設計作介紹。

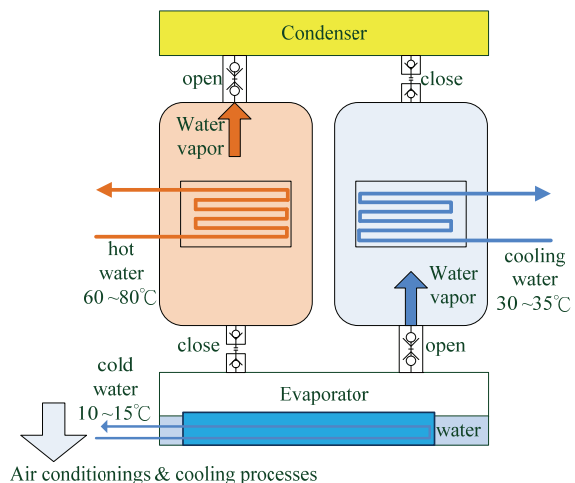


圖3 吸附製冷完整循環系統

2.1 雙吸附床吸附製冷系統

吸附式系統在1960年首次被提出，之後慢慢開始有各種應用的研究，由於研究剛剛起步，還是以單一的吸附床(adsorption bed)為主，Critoph (1989)設計一單槽式的吸附系統，以太陽能為再生熱源，圖4為其設計之系統，左方吸附槽內為石墨，右方熱交換區放置不

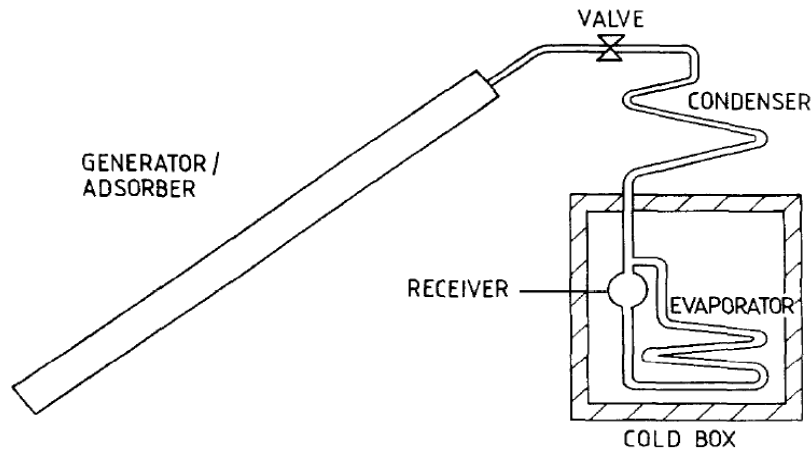


圖4 太陽能驅動之單槽吸附式製冷系統(Critoph, 1989)

同之冷媒(如甲醇、氨、二氧化氮等)，在製冷溫度-10°C時，甲醇有最好之COP約0.58。吸附式製冷系統主要運作方式就是吸附劑吸收冷媒，當吸附飽和後經高溫再生，將冷媒由吸附劑中脫附。吸附過程是一放熱過程，吸附床需降溫，再生過程吸附床需升溫，在單一吸附床再生時無法製冷，因此又衍生出雙吸附床之設計。Hamamoto *et al.* (2006)提出一雙吸附

床搭配四個熱交換器之吸附系統，圖5是四個熱交換器(兩個吸附床熱交換器、一個蒸發區(evaporator)、一個冷凝區(condenser))系統設計圖，當吸附床2進行吸附時，冷水進入吸附床2進行降溫，冷媒由蒸發區揮發被吸附並製冷，此時吸附床1通入熱水進行再生，冷媒蒸氣由冷凝區冷凝為液體，如此系統運作便不須停止製冷，且蒸發和冷凝區相通，可提高冷凝區壓力

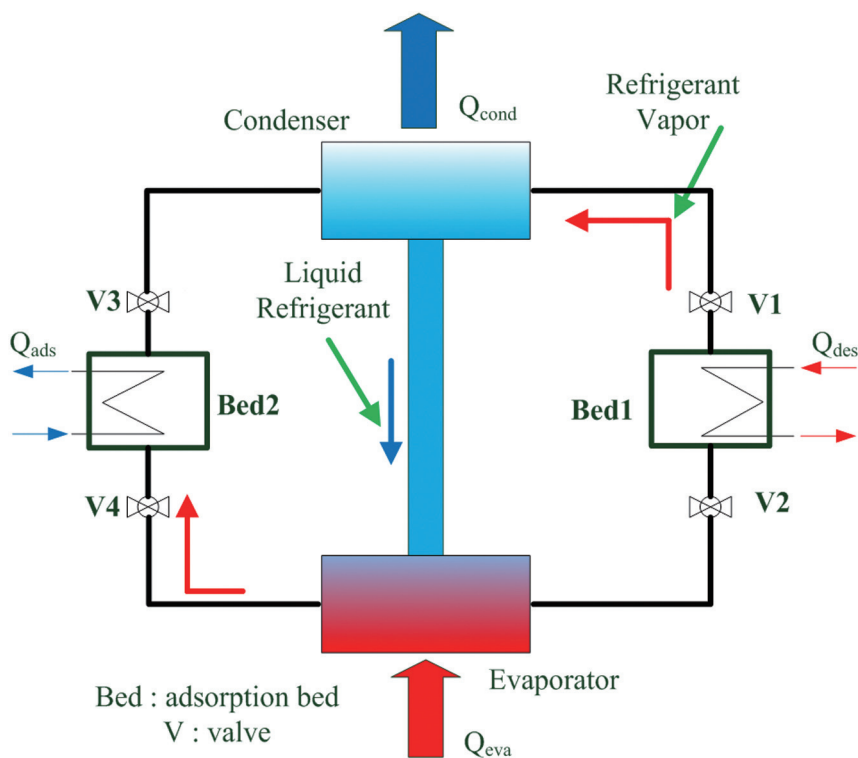


圖5 雙吸附床搭配四個熱交換器之吸附系統

幫助吸附，系統設計重點主要在冷熱水的切換和溫度控制，其工作對為活性碳纖維和甲醇。

2.2 整合式吸附製冷系統

整合式吸附系統是由兩個單床式吸附系統結合，其系統類似於雙床式吸附系統，都可循環使用，兩者之間不同點在於整合式系統每個吸附系統都有獨立的蒸發和冷凝區，Liu *et al.* (2005)提出一整合式吸附系統，由兩個獨立的單床吸附系統組成，圖6為吸附系統之吸附和再生過程，由於兩吸附床有各自獨立之蒸發區和冷凝區，內部完全不需要閥門控制，由外部控制冷熱水流向，即可完成系統的運作，讓系統運作更加簡單，由於減少閥門使用系統可靠度也更高，在維護上也更方便，其工作對是矽膠和水，製冷溫度約 13°C ，COP約0.5。Chen *et al.* (2010)將整合式吸附系統搭配封閉的濕式冷卻塔使用，如圖7所示，如此可確保循環水的清潔，在裝設上也可省略冷卻水來源，工作對是矽膠和水，其製冷溫度 15°C 時，COP約0.51，圖8為其COP和製冷瓦數與製冷溫度之曲線圖，製冷溫度越高系統COP值和製冷瓦數都會提高。Chang *et al.* (2009)將熱水來源由太陽能供應，搭配整合式吸附系統使用，在實驗室中製

冷溫度 14°C 時，COP約0.37，戶外是在台灣7月到10月間量測，COP約0.34~0.5間，平均0.45。

2.3 三吸附床吸附製冷系統

雙吸附床系統主要目的是為了讓系統可以連續運轉，但吸附過程為放熱反應，再生過程也需要將溫度升高，期間就需要時間將吸附劑溫度降低至冷卻溫度，需要一恢復時間，因此就有三吸附床的設計，藉此拉長循環時間，讓吸附劑可以回到最佳操作溫度，Saha *et al.* (2003)提出三個吸附床的吸附製冷系統，包括三個吸附床、一個冷凝區和一個蒸發區，圖9為三吸附床示意圖，當一吸附床吸附、兩吸附床再生時，先再生之吸附床熱水可再流入較慢再生的吸附床，預先提高吸附床溫度，吸附時的冷卻水也可以再進入下一個吸附床，降低吸附床溫度，以利接下來的吸附過程，如此可提高系統熱效率，並維持吸附劑在最佳吸附溫度，此系統在製冷溫度 14°C 時，COP約0.38。Khana *et al.* (2007)以三個吸附床的吸附製冷系統進行各種模式循環，表2是三個吸附床在不同模式下各種反應過程，其實驗結果顯示有質量再生的模式SCP較高，約 95 W/kg ，此時再生溫度 85°C ，沒有質量再生的模式約 75 W/kg ，但因

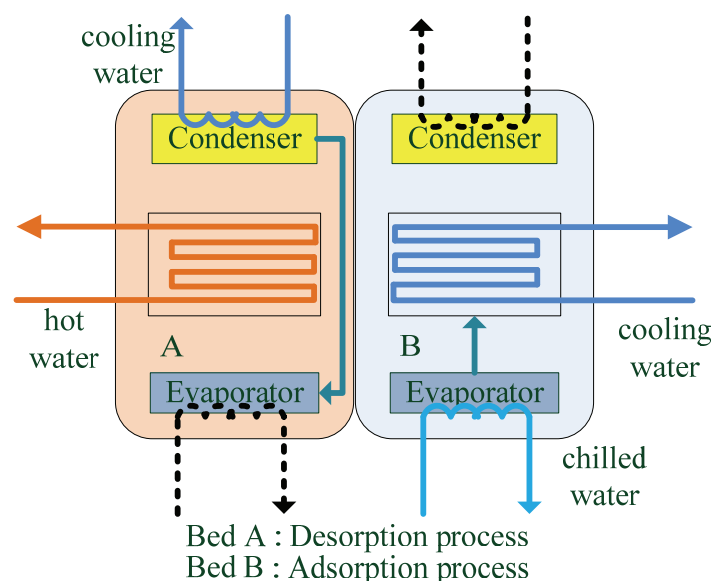


圖6 整合式吸附系統

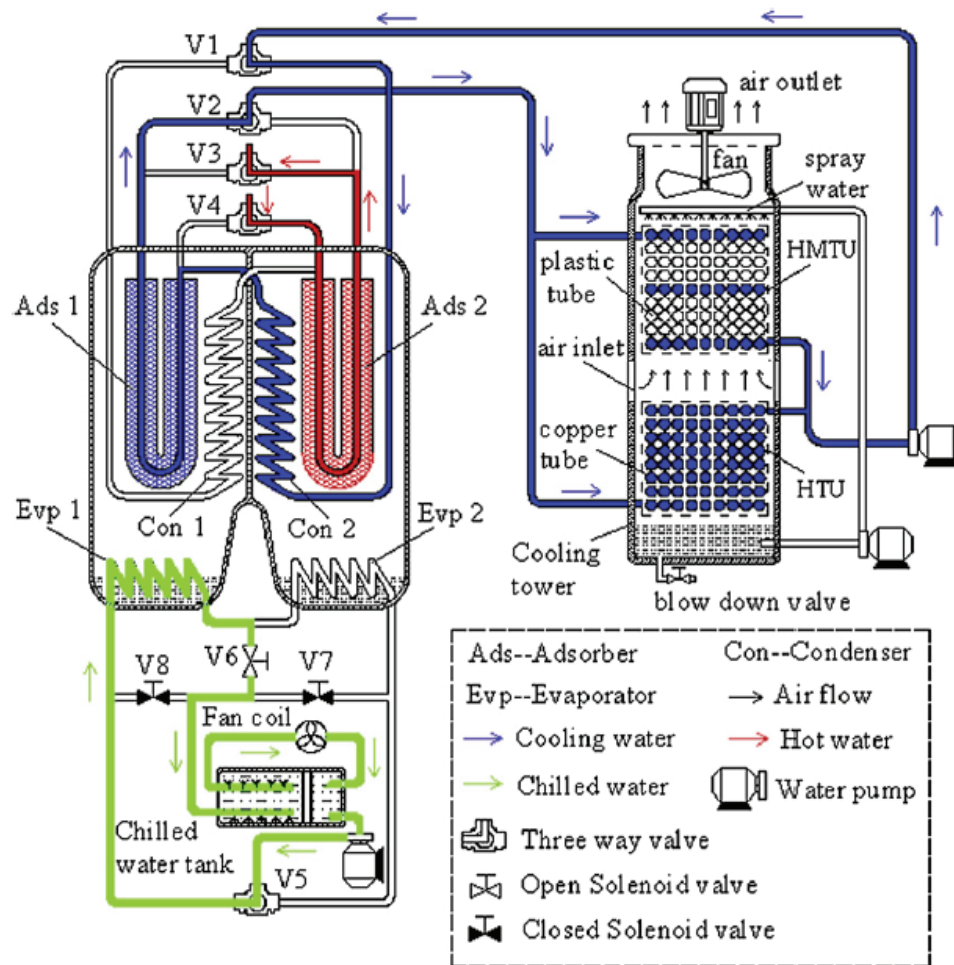


圖7 整合式吸附系統搭配封閉式冷卻塔

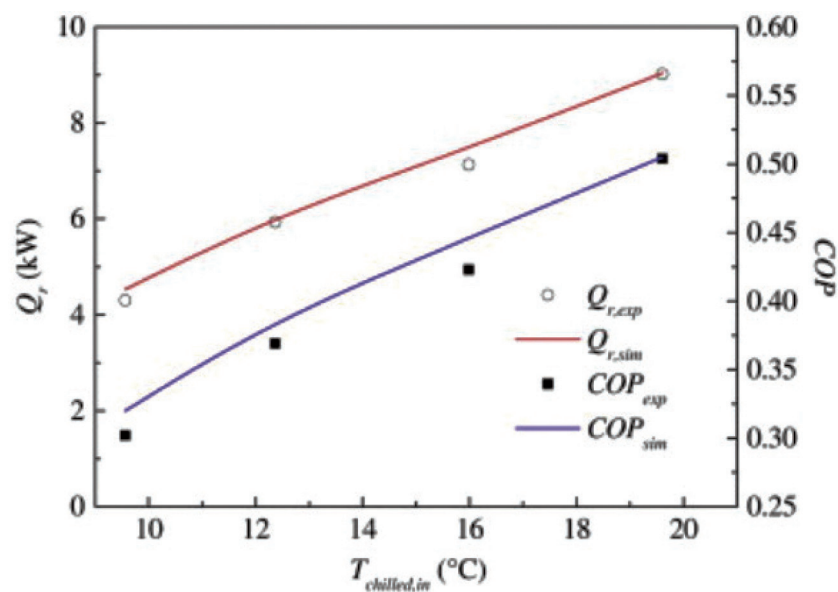


圖8 搭配封閉式冷卻塔系統之COP和製冷瓦數與製冷溫度之曲線圖

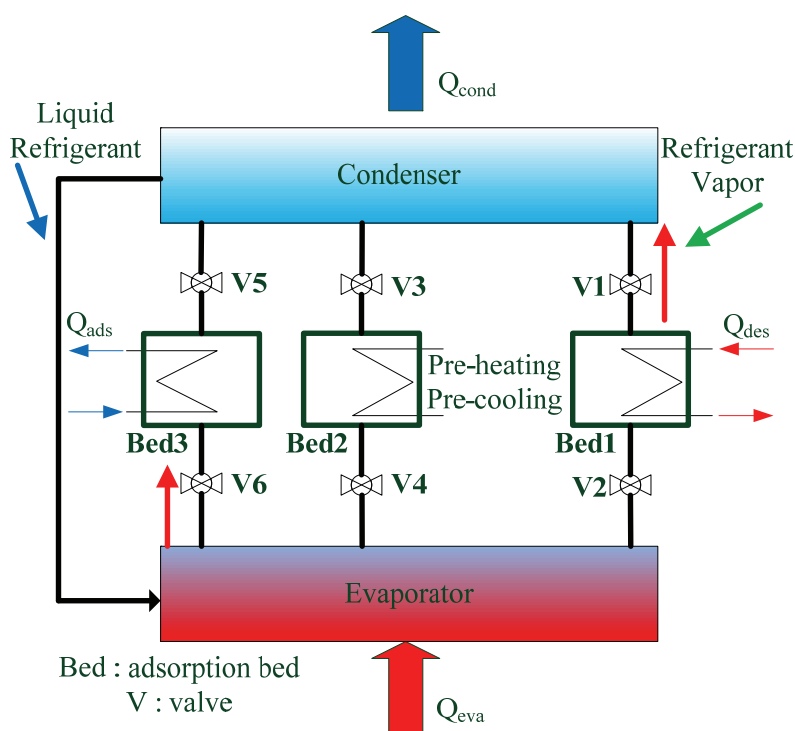


表2 三吸附床吸附製冷系統反應模式表

[illegible]

為部分能量用於質量再生，COP會略低一點約0.7，沒有質量再生的模式約0.72，製冷溫度維持在大約7~10°C，質量再生模式確實可以提高SCP約40%。

2.4 三吸附床兩蒸發區吸附製冷系統

為了提高系統效能，Miyazaki *et al.* (2010) 提出一三吸附床吸附系統，搭配兩蒸發區一高壓一低壓，其示意圖如圖10，一般吸附過程中冷媒蒸氣壓與製冷溫度相關，此一方式為設計兩蒸發區，分別供應不同溫度之冷水，較低溫之蒸氣壓較低，當吸附劑吸收一端時間後切換

至較高溫的冷水，此時蒸氣壓也較高，讓吸附劑可以吸收更多的冷媒，表3為其各種反應模式，經由高壓可以提高系統之SCP，因為提高了高壓區的製冷溫度，所以COP也會跟著提高，SCP和COP分別較沒有兩蒸發區提高了1.5和1.7倍，圖10(1)為此方式與傳統雙床式系統COP之比較，由於增加了高低蒸發區，COP值是高於傳統雙床式的系統，製冷溫度對於COP的影響也相對較小。

2.5 多段式吸附製冷系統

上述幾種系統不管幾個吸附床，在吸附過

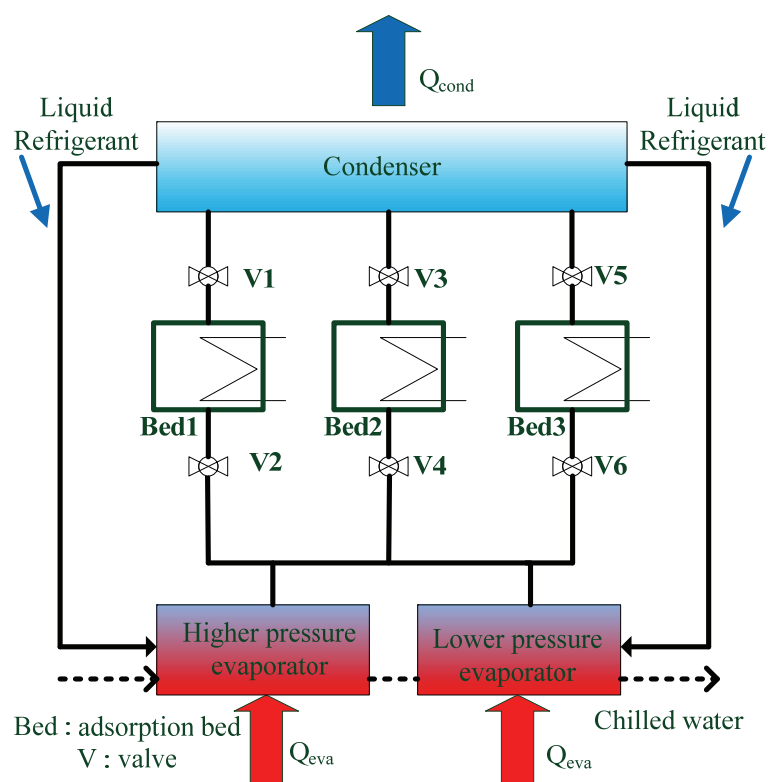


圖10 三吸附床搭配兩蒸發區之吸附製冷系統

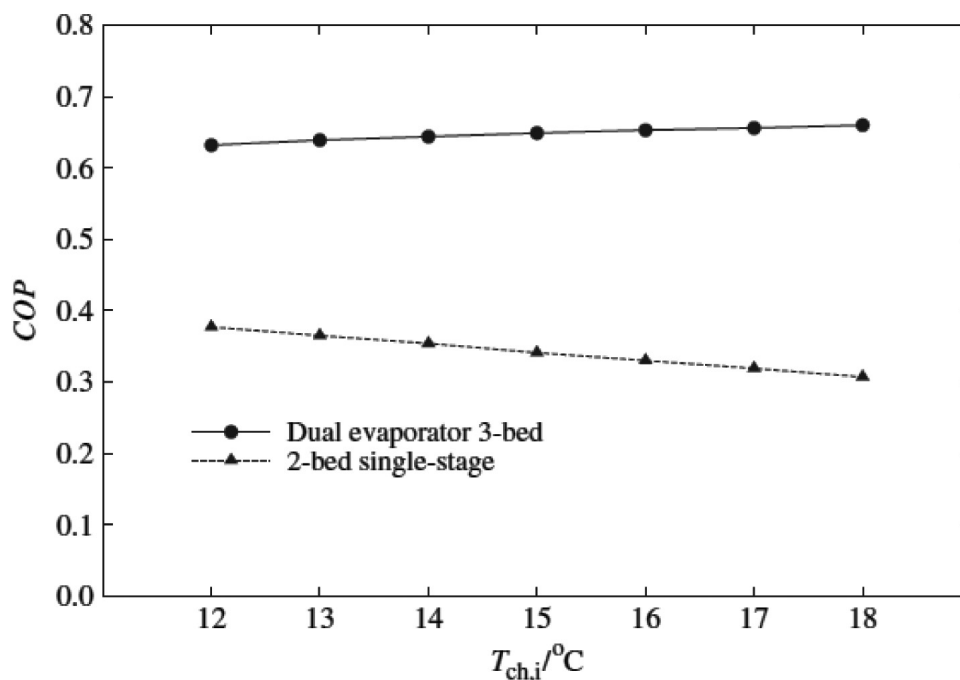


































圖10(1) 三吸附床搭配兩蒸發區與傳統雙床式之COP比較

程都屬於單段式吸附如圖2，而多段式的吸附過程如圖10(2)，由上半部較低的蒸氣壓，提高吸附劑脫附的壓力差，讓吸附劑在較低溫的再生

溫度即可完成脫附，降低再生熱源溫度，與單段式差異如圖10(3) P-T圖所示。Hamamoto *et al.* (2005)以模擬兩段式吸附系統計算其效能，其

表3 三吸附床搭配兩蒸發區吸附製冷系統反應模式表

Mode	A	B	C	D	E	F
Bed1						
Bed2						
Bed3						
冷凝區						
高壓蒸發區						
低壓蒸發區						
	低壓蒸發區運作			預熱		
	高壓蒸發區運作			預冷		
	脫附					

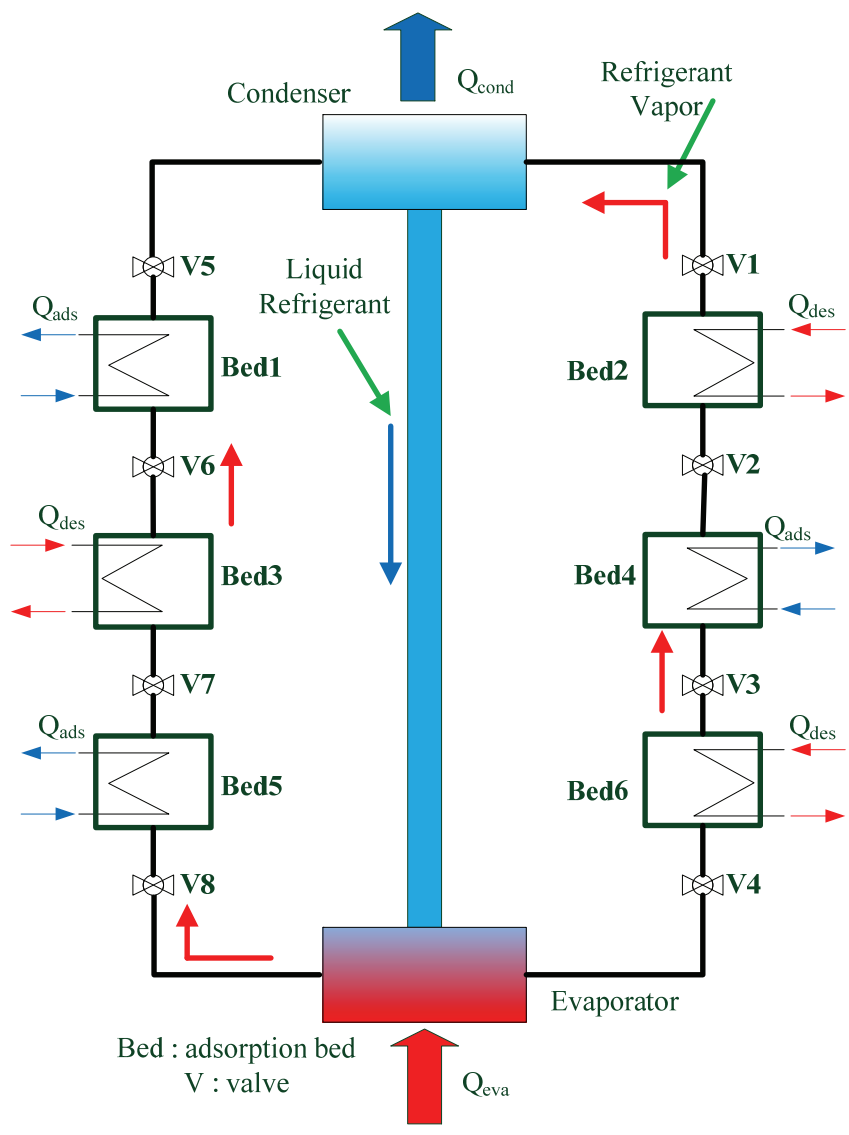


圖10(2) 多段式吸附製冷循環

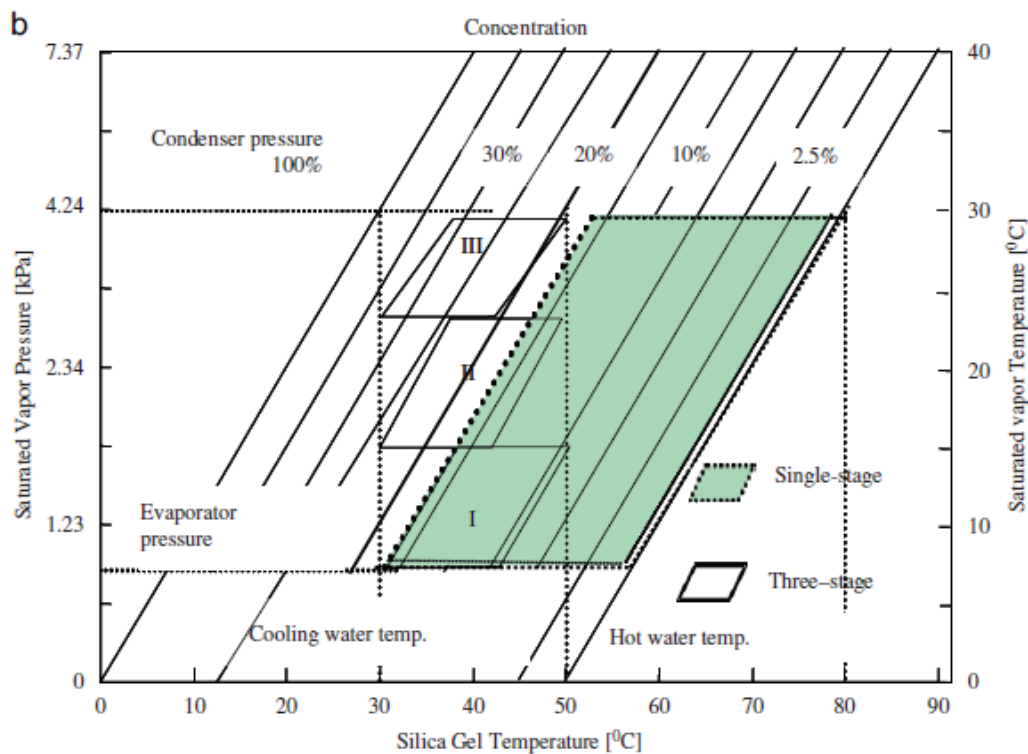


圖10(3) 多段式吸附製冷循環P-T圖(Khana *et al.*, 2008)

兩段式流程如圖10(4)，第一段吸附床進行再生時，第二段吸附床將第一段脫附之蒸氣吸附，因壓力降低可讓第一段吸附床在較低再生溫度的情況下進行再生脫附，當第二段與第一段吸附量為1:2時，有最好的SCP，但對於COP並沒有太大的影響，而再生溫度也可以降至55°C。Saha *et al.* (2006)設計一三段式吸附系統，讓再生溫度可以更降低，吸附為多段式，其系統體積也較為龐大，再生溫度為40~90°C，此時COP和SCP都會大幅降低，如圖10(5)多段式COP值大幅減少，圖10(6)為其三段式吸附製冷系統之實體照片。

3. 吸附式製冷系統比較

吸附製冷系統早期由實驗室發展，單純只有單一吸附床設計，在進入到實用階段就必須考慮到再生的問題，因此發展出了雙吸附床式的系統，藉由兩個吸附床一吸附一再生，連續進行製冷，其設計優點是簡單，且可以連續

運作，但由於只有單一的冷凝和蒸發區，需較多的閥門控制蒸氣流向，閥門長期操作會有洩漏問題，後來又發展了整合式吸附製冷系統，其特點是每個吸附床有獨立的冷凝和蒸發區，不須閥門控制蒸氣流向，可依蒸發和冷凝的壓力差形成一封閉循環，減少了閥門的控制和失效。

吸附劑再生時須由外部熱源加熱，因此再生前升溫、再生完後降溫都需一段時間，為了加快循環速度，就有了三吸附床的系統設計，讓兩個吸附床吸附、再生，剩下的一個就預備吸附或預備再生，提高吸附劑使用效率。吸附劑使用久了會有部分冷媒無法完全脫附，降低系統效能，此時也可以在第三吸附床進行復原動作，讓吸附劑性能恢復。

一般吸附製冷系統都是運行單一段的吸附再生循環，其再生溫度須高於60°C，為了應用於40~60°C的再生熱源，因此研發了多段式的系統，藉由第二階段的吸附，提高第一階段的再生時的壓力差，讓冷媒更容易脫附，再生熱

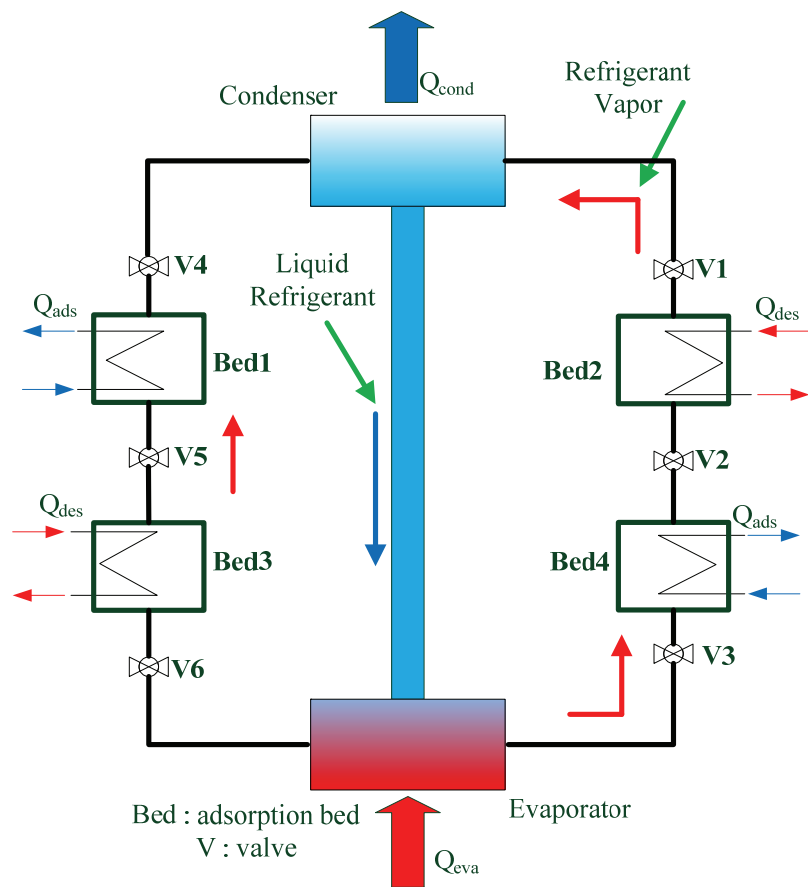


圖10(4) 兩段式吸附製冷系統

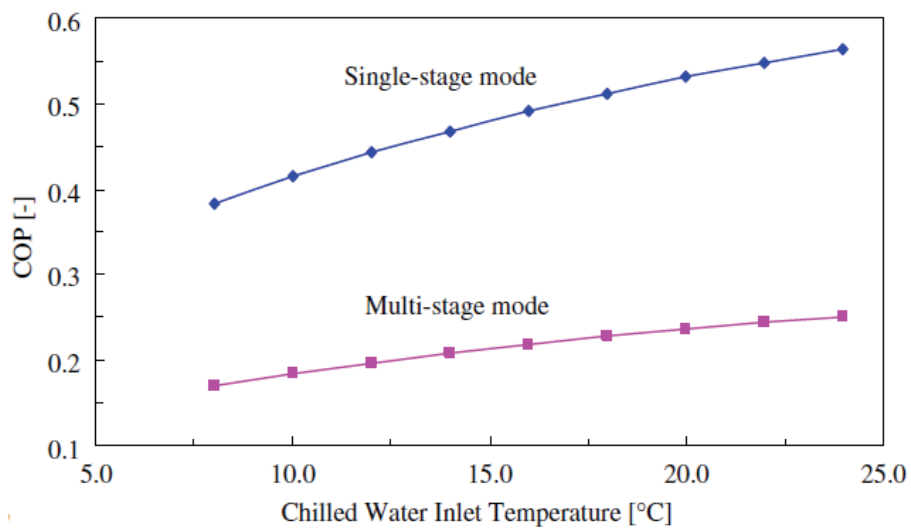


圖10(5) 單段式和多段式COP差異

源溫度也可以降低，雖然可以降低再生熱源溫度，其效能也會大幅降低，表4是由文獻整理出各系統的比較。

4. 結 論

隨著環境的變遷、時代的進步，電力輸

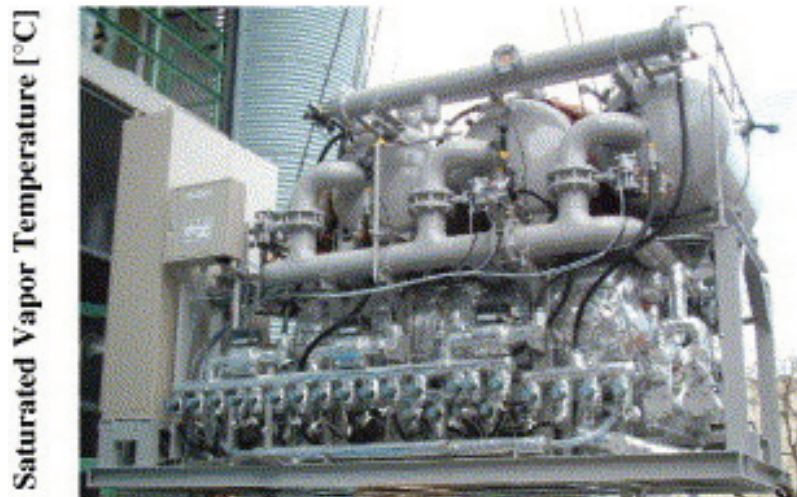
圖10(6) 三段式吸附系統實體照片 (Saha *et al.*, 2006)

表4 各系統特點

系統	特點
雙吸附床式	設計簡單，可連續運作，一般商業應用廣泛，需較多可動氣體閥門控制。
整合式	設計簡單，為真空封閉系統，沒有可動閥件，可多床並聯，維護較為方便。
三吸附床式	可預熱預冷，提高回復再生效率，吸附劑再生完全，用量較少，連續操作性高。
三吸附床搭配兩蒸發區	有高低壓蒸發區，提高三吸附床式系統吸附劑性能，分段供給不同溫度冷水。
多段式	可降低再生熱源溫度，但體積龐大，效能不佳。

出也在不斷的增加，尤其在台灣有97%以上能源是由國外進口，廢熱與再生能源運用比例提高，是節省能源的做法之一。吸附式製冷是一種不需消耗電力的能源利用方式，雖然其COP值只有0.3~0.4，遠比傳統壓縮機2~3以上來的低，但其驅動熱源來自廢熱與再生能源，無壓縮機、不使用氟氯碳化物冷媒，且不受熱源穩定影響，經由系統的設計，同時供冷及供熱，可作為區域冷熱電整合的三生系統策略，以達成節能減碳的目的，受到國際普遍關注投入發展。

目前已有小型家用的機種問市，圖10(7)為市售之吸附製冷系統SorTech AG-eCoo，製冷能力12 kW，可取代一般1噸(3.6 kW)大小之室內空調3台，一噸室內空調年耗電量約1,170度，因此可節省年耗電量約3,510度。



圖10(7) SorTech AG-eCoo製冷系統

影響吸附式製冷系統普及應用的主要障礙為系統設置成本過高與COP值過低。吸附製冷技術的研究重點包含：1.吸附劑-吸附質(working pair)的選擇及開發(優化)；2.吸附床的熱質傳：包含吸附劑的附載技術與熱交換元件設計；系統設計：循環結構、熱源部份的設計。目前工研院南分院綠能生態系統中心與綠能所聯合以新型態吸附劑的開發及系統的設計創新從根本上改變吸附製冷技術提高吸附空調系統製冷能力，減小設備體積，降低系統成本成為加速吸附式空調商品化推向實用的關鍵。

5. 誌 謝

本研究計畫承蒙經濟部能源局提供研究經費，謹表誌謝。

參考文獻

- 周雅文、洪敏郎，2010，熱電技術於熱泵系統之應用，冷凍空調&熱交換，99: 19-24。
- Chang, W.S., C.C. Wang, C.C. Shieh, 2009, Design and performance of a solar powered heating and cooling system using silica gel/water adsorption chiller., *Appl. Therm. Eng.*, 29(10): 2100-2105.
- Chen, C.J., R.Z. Wang, Z.Z. Xia, J.K. Kiplagat, 2010, Study on a silica gel-water adsorption chiller integrated with a closed wet cooling tower., *Int. J. Therm. Sci.*, 49: 611-620.
- Critoph, R.E., 1989, Activated carbon adsorption cycles for refrigeration and heat pumping., *Carbon*, 27(1): 63-70.
- Gasser, R.P.H., 1991, The chemical adsorption and catalysis of metal., Publishing House of Beijing University, Beijing, China.
- Hamamoto, Y., K.C.A. Alam, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2005, Performance evaluation of a two-stage adsorption refrigeration cycle with different mass ratio., *Int. J. Refrig.*, 28(3): 344-352.
- Hamamoto, Y., K.C.A. Alam, B.B. Saha, S. Koyama, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2006, Study on adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers. Part 2. Cycle performance evaluation, *Int. J. Refrig.*, 29(2): 315-327.
- Khana, M.Z.I., B.B. Sahab, K.C.A. Alam, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2007, Study on solar/waste heat driven multi-bed adsorption chiller with mass recovery., *Renewable Energy*, 32: 365-381.
- Khana, M.Z.I., B.B. Sahab, K.C.A. Alam, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2008, Performance evaluation of multi-stage, multi-bed adsorption chiller employing re-heat scheme., *Renewable Energy*, 33(1): 88-98.
- Liu, Y.L., R.Z. Wang, Z.Z. Xia, 2005, Experimental performance of a silica gel-water adsorption chiller., *Appl. Therm. Eng.*, 25(2-3): 359-375.
- Miyazaki, T., A. Akisawa, B. B. Saha, 2010, The performance analysis of a novel dual evaporator type three-bed adsorption chiller., *Int. J. Refrig.*, 33: 276-285.
- Navarro-Esbria, J., V. Berbegall, G. Verdub, R. Cabello, R. Llopisa, 2007, A low data requirement model of a variable-speed vapour compression refrigeration system based on neural networks., *Int. J. Refrig.*, 8(30): 1452-1459.
- Ponec, V., Z. Knor, S. Cerny, 1974, Adsorption on solids., Butterworth Group, London, England.
- Saha, B.B., S. Koyama, J.B. Lee, K. Kuwahara, K.C.A. Alam, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2003, Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller, *International Journal of Multiphase Flow*, 29: 1249-1263.

- Saha, B.B., S. Koyama, K.C. Ng, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2006, Study on a dual-mode, multi-stage, multi-bed regenerative adsorption chiller, *Renewable Energy*, 31(13): 2076-2090.
- Szarzynski, S., Y. Feng, M. Pons, 1997, Study of different internal vapour transports for adsorption cycles with heat regeneration., *Int. J. Refrig.*, 20(6): 390-401.
- Zhang, Y.H., 1989, *Adsorption function*, Publishing House of Scientific and Technological Literature in Shanghai, Shanghai, China.

Technologies of Adsorption Refrigeration System

Kay-Fan Lo^{1*} Chien-Yun Huang² Jian-Hong Lee³ Yu-Hao Kang⁴

ABSTRACT

The adsorption refrigeration system consists of the working pair adsorbent and refrigerant, and relies on the evaporation and endothermic reaction of the refrigerant to cool. The adsorbent can be recovered by the heat source above 65°C. The temperature range is suitable to the low-grade industrial waste heat which are lower than 200°C. The method can reduce the power consumption. The method can use the solar for recovering on home use. The adsorption system is switched into two-bed, multi-bed and multi-stage. The two-bed is the simplest and generally. The multi-bed can increase the recovery speed, and has larger volume. The multi-stage temperature can decrease the recovery temperature, and has lower adsorption capacity. In this paper, we will introduce the technologies and current systems of adsorption refrigeration cycles.

Keywords: waste heat, adsorption, refrigeration

¹ Researcher, ITRI South

² Principal Researcher, ITRI South

³ Engineer, ITRI South

⁴ Senior Researcher, Green Energy & Environment Research Laboratories, ITRI

* Corresponding Author, Phone: 886-6-6939049, E-mail: kayfan@itri.org.tw

Received Date: Oct. 15, 2013

Revised Date: Nov. 12, 2013

Accepted Date: Dec. 28, 2013