

非共沸冷媒應用於雙溫冷凍系統 之熱力分析與探討

林謙育

臺北市立南港高級工業職業學校冷凍空調科 科主任
國立台北科技大學能源與冷凍空調研究所 博士班

摘要

本研究主要利用電腦理論模擬方式探討非共沸冷媒應用於雙溫冷凍循環系統之冷媒熱力性質研究，分析不同冷媒在系統內部過冷卻與壓縮機入口之冷媒過熱狀態，探討系統過熱度是否可有效提升系統之 COP。經由理論模擬結果顯示當 R-404A 冷媒在過熱度 0~30°C 時冷媒系統之 COP 是非共沸冷媒當中最好，其次為 R-408A；反而 R-22 冷媒及 R-410A 過熱度增加導致冷媒比容增加，使冷媒質量流率下降而造成冷凍能力受到影響，故使用此二種冷媒與內部過冷卻器進行雙溫冷凍系統過冷卻時，並無法有效提升系統 COP。因此，藉由本研究探討出 R-404A 冷媒若安裝內部過冷卻器時則可有效提升雙溫冷凍機之 COP，希望可藉由本結果作為未來發展與設計雙溫冷凍系統設備之重要參考。

關鍵字：熱交換器、內部過冷卻器、節能、性能係數

壹、前言

隨著工商業的蓬勃發展，科技進步一日千里，平均國民所得大幅攀升，在追求舒適生活品質以及整體生活型態的變遷，國內之超級市場、大型賣場、便利商店與日劇增。近幾年商業場所都必須仰賴著冷凍、冷藏系統來保持物品之新鮮度。且當我們在享受高科技文明所帶來的便利同時，伴隨而來的是種種負面問題，例如：冷凍空調系統及商業用冷凍、冷藏系統耗電量逐年增加，冷凍空調大量使用冷媒造成全球氣候及生態環境的變遷，設備之耗電量及冷媒過度排放對地球生態環境所造成的衝擊與破壞不容小覷，因此，積極合力尋求並研究開發具環保、熱力性質優異且合適性之替代冷媒來提昇冷凍機之性能。

商用雙溫冷凍機在於各領域的應用非常廣泛，然而在冷凍系統使用環保冷媒整體效益上的改善並未實際深入探討研究，因此，追究其原因，目前許多探討環保冷媒在於技術上及個別元件進行模擬與性能分析，因而未有針對使用非共沸冷媒做系統之穩定性及冷媒物理性之研究探討。本研究為提升雙溫冷凍機之性能，探討非共沸冷媒在於過熱度及過冷度的多寡對於冷凍機之整體性能進行評估，且依電腦理論模擬分析非共沸冷媒冷媒及最佳過冷過熱度，可藉由此研究結果提供開發設備工程師理想之參數與條件。

目前文獻中對於非共沸冷媒應用於雙溫冷凍系統做液氣熱交換的研究文獻卻不多 Cavallini [1] 等人主要應用熱學第一定律針對往復式壓縮機進行暫態模擬，利用壓縮機各項輸入參數，計算出流出的冷媒性質、熱傳、作功，並比較在不同工作環境與使用不同冷媒時，壓縮機效率的改變。Chen [2] 利用數值模擬方式分析冷凍系統之動態性能，包含系統啟動過程及因冷凍負荷變化所引起系統反應的製冷過程，並進行最小消耗能源之最佳化分析，並進一步將其數值模擬結果與實驗數據相比較，證實其理論的正確性。Jung[3]針對替代 R22 相關冷媒進行毛細管關係式推導。Kim[4]對 R410A 冷媒進行實驗研究，並提出 R22 與 R410A 毛細管長與冷媒質量流率的關係。Choi [5]研究採用電子膨脹閥於多聯變頻分離空調機之性能分析，並改變電子膨脹閥開度、變化室內負荷以及變化壓縮機轉速等對製冷能力的影響，研究結果顯示，採用電子膨脹閥作為調節冷媒流量，且過熱度需維持 4℃ 左右。陳[6]以數值分析方法探討使用 R407C 與 R410A 冷媒於空調系統毛細管內時之流動特性，在

一、蒸氣壓縮回熱循環基本理論

冷凍系統之過冷卻主要係由膨脹閥前的液態冷媒與離開蒸發器氣態冷媒進行熱交換 (Heat exchangers)，且在液體過冷卻同時亦使回流管之氣態冷媒過熱，此種熱交換方式稱為本文稱為回熱循環，此種熱交換裝置稱為回熱器 (regenerative) 或內部過冷卻器 (internal subcooler)，如圖 2.1 蒸氣壓縮回熱循環系統流程圖。離開冷凝器的液態冷媒經過回熱器與離開蒸發器之氣態冷媒進行熱交換，成為過冷再進行膨脹，由蒸發器流出的氣態冷媒經過高壓液態冷媒熱交換後，提升冷媒回流管之過熱度，再被壓縮機壓縮成高壓高溫氣態冷媒，構成一個回熱循環系統。

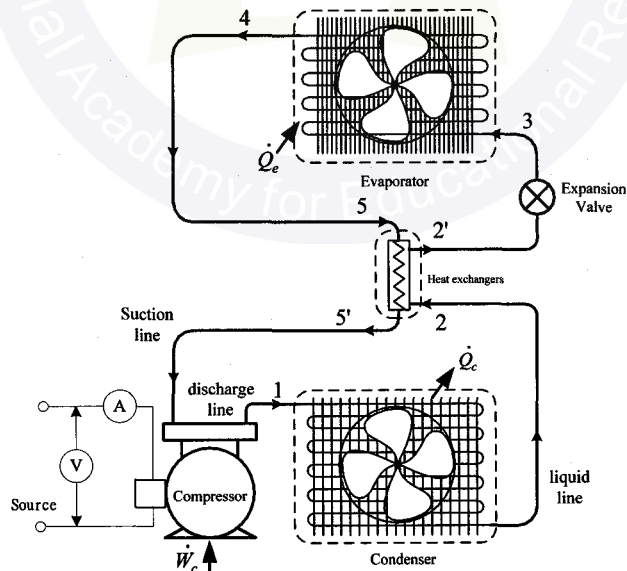


圖 2.1 蒸氣壓縮回熱循環系統流程圖

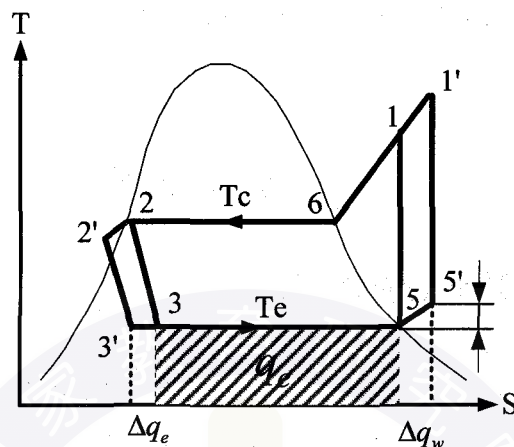


圖 2.2 蒸氣壓縮回熱循環 T-S 圖

二、並聯式雙溫冷凍系統

如圖 2.3 所示為一台並聯式雙溫冷凍系統流程圖，主要使用於不同庫體溫度，如冷藏庫為 $(+5^{\circ}\text{C})$ ，冷凍庫為 (-18°C) ，因此兩個庫體之蒸發溫度（壓力）不相同；冷藏庫的蒸發溫度較為冷凍庫高，且冷藏庫必須保持較高之溼度。兩個庫體共用一台壓縮機，所以壓縮機之低壓壓力取決於冷凍庫之壓力，因此冷藏庫蒸發器出口應裝設蒸發壓力調節閥，使壓力保持在冷藏庫所需求之蒸發溫度。藉由此系統設計可達到兩個工作溫度且有效提高冷藏庫之物品水分的含量。

為提升雙溫冷凍機之性能且找尋合適之環保冷媒，因此本研究之系統設計與圖 2.1 蒸氣壓縮回熱循環系統流程圖相同功能，主要針對冷媒系統之過冷度及過熱度進行系統熱力性質分析探討，且找出適合之環保冷媒。作為本研究未來開發雙溫冷凍系統與設備之重要參考。

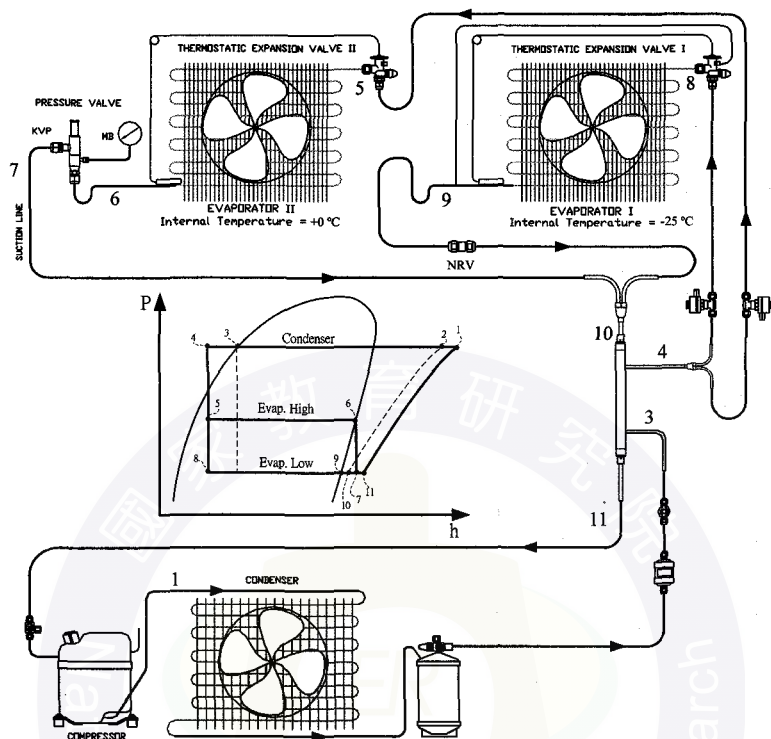


圖 2.3 並連式雙蒸發器冷凍循環系統圖

三、理論模式

為了簡化問題分析之複雜性，以理論模式分析探討整體系統之效率，並採用控制容積法 (Control volume) 來描述各冷凍系統元件之質量守恆、能量守恆與熱力學第二定律，且系統之基本假設如下：

(1).一維流動穩態穩流過程 (Steady State, Steady Flow)，(2).忽略動能、位能之變化，(3).忽略蒸發器與冷凝器中壓降之變化，(4)膨脹過程為絕熱節流，(5).壓縮過程為絕熱等熵。(6)忽略各連接管線之壓降。

若冷凝溫度 T_C 、冷凍庫之蒸發溫度 T_L 、冷藏庫之蒸發溫度為 T_H ，均為已知壓縮機之吸入容積 $\dot{V}$ 為 $2.40 \text{ m}^3/\text{h}$ 。利用以之條件計算式可以表達如下

冷媒系統未考慮過冷及過熱狀態下可用下式求出冷凍系統之冷媒質量流率

$$\dot{m}_r (\text{kg/s}) = \dot{V} (\text{m}^3/\text{s}) \times \frac{1}{v_{10} (\text{m}^3/\text{kg})} \quad (1)$$

其中 v_{10} 代表壓縮機入口狀態比容。

冷凍機之壓縮功與壓縮功率可藉由下式求出

$$q_w (\text{kJ/kg}) = h_2 - h_{10} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{in} (\text{kJ/s}) = \dot{m}_r (\text{kg/s}) \times h_2 - h_{10} (\text{kJ/kg}) \quad (3)$$

其中 h_2 與 h_{10} 代表壓縮機入出口狀態。

利用式(2-1)，冷凝器之熱傳率可以表達如下

$$\dot{Q}_c (\text{kJ/s}) = \dot{m}_r (\text{kg/s}) \times h_2 - h_3 (\text{kJ/kg}) \quad (4)$$

其中 h_2 與 h_3 代表冷凝器入出口狀態。

冷凍庫及冷藏庫之蒸發器熱傳率可以表達如下

$$\dot{Q}_L (\text{kJ/s}) = \dot{m}_r (\text{kg/s}) \times h_9 - h_8 (\text{kJ/kg}) \quad (5)$$

其中 h_9 與 h_8 代表低溫蒸發器入出口狀態。

$$\dot{Q}_H (\text{kJ/s}) = \dot{m}_r (\text{kg/s}) \times h_6 - h_5 (\text{kJ/kg}) \quad (6)$$

其中 h_6 與 h_5 代表高溫蒸發器入出口狀態。

系統之性能係數 (COP, coefficient of performance) 可以定義如下

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{in}} \quad (7)$$

將式(2-3)、(2-5)與(2-6) 代入上式中，可以整理得到

$$COP = \frac{\dot{Q}_L + \dot{Q}_H}{\dot{W}_{in}} \quad (8)$$

冷凍系統利用熱交換器來增加過冷度及過熱度的多寡利用下列代符號來表示：

(1).過熱以 Δq_s 、(2).過冷以 Δq_c 、(3)過熱後之壓縮功以 Δq_w 。

雙溫冷凍系統利用回熱器來提升系統之過熱度及過冷度，可增加冷凍機之冷凍能力，但耗功量也增加，因此，有效過熱循環之性能係數 (COP) 是大於還是小於，可利用下列各式表示：

$$\Delta q_e = h_{11} - h_{10} \quad (9)$$

而壓縮功也增大了

$$\Delta q_w = (h_1 - h_{11}) - (h_2 - h_{10}) \quad (10)$$

因而有效之過熱循環的性能係數 (COP) 可表示為

$$COP' = \frac{q_e + \Delta q_e}{q_w + \Delta q_w} \quad (11)$$

冷凍機使用回熱循環，其性能係數 COP' 要比無回熱循環性能係數 COP 還大，因此使用回熱循環必須滿足下式

$$\Delta q_e > q_e \quad (12)$$

即

$$COP' > COP \quad (13)$$

是否能成立，取決於冷媒的物理性，因此，能夠滿足(13)條件者該冷媒適合採用回熱循環，如不滿足式(13)者不宜採用回熱循環。

參、結果與討論

本研究在蒸發溫度 0°C 及冷凝溫度 45°C 與壓縮機之吸入容積 $\dot{V}$ 為 $2.40\text{ m}^3/\text{h}$ 條件下進行八種冷媒進行模擬，透過電腦理論模擬分析的結果，所得結果如下：

當固定冷凝溫度及蒸發溫度時，模擬系統裝置回熱器來提高系統之過冷卻度，因而亦增加壓縮機吸入端之過熱度，可從圖 3.1 所示，得知過熱度 $0\sim 30^\circ\text{C}$ 時 R-404A 冷凍機之性能係數提高了 6.7%，R-408A 冷凍機之性能係數提高了 2.19%，R-410

與 R-22 冷凍機之性能係數反而下降 0.4% 及 0.84%，結果顯示冷凍系統裝設回熱裝置，欲使過冷度即過熱度提升，不一定每種冷媒都可以提高冷凍機之性能。

欲了解過回熱循環使冷凝器出口冷媒（液管）與蒸發器出口冷媒進行熱交換，使過冷度的增加亦使過熱增加，且過熱度增加多寡使壓縮機排氣口溫度的變化如圖 3-2 所示，得知過熱度 0~30°C 時，R-404A 冷媒從 50.84°C 溫升到 77.99°C，溫差 27.15°C；R-408A 冷媒從 56.85°C 溫升到 85.42°C，溫差 28.57°C；R-410A 冷媒從 64.21°C 溫升到 93.49°C，溫差 29.28°C。結果顯示冷凍系回熱裝置，會使壓縮機排氣管溫度上升隨即使壓縮機機殼溫度升高。

欲了解過回熱循環使冷凝器溫度固定改變蒸發溫度在不同過熱度下的情況下，可之蒸發溫度越低，壓縮機耗功量越大，因此 COP 越小，因而過熱度越大 COP 越高如圖 3-3 所示。

結論與建議

本研究結論共分為三點，分述如下

1. 本研究經過電腦理論模擬分析後得知 R-404A 冷媒經過模擬裝設回熱器後冷凍系統之性能係數有效提升 6.7%，且在冷媒性質各方面比較後，非共沸冷媒使用回熱裝置為 R-404A 冷媒最佳。
2. 從本研究模擬分析得知，R-22 及 R-410A 冷媒使用回熱裝置無法提升冷凍機之性能，反而造成冷凍機之性能下降，追究其原因，冷媒過熱會使冷媒之比熱下降進而使冷媒單位焓值變小，因此造成 COP 下降原因。
3. 過冷度的增加亦使壓縮機入口及壓縮機外殼與壓縮機出口溫度上升，因此裝設回熱裝置時應選用適當之冷媒，R-404A 冷媒在從 50.84°C 溫升到 77.99°C，溫差 27.15°C 是非共沸冷媒當中較低，且有最佳之性能係數。

經由上述的結論，本實驗可將雙溫冷凍系統使用回熱裝置找尋到最佳之非共沸冷媒，因此可用藉由此理論模擬經驗進行實體設備架設及實驗。

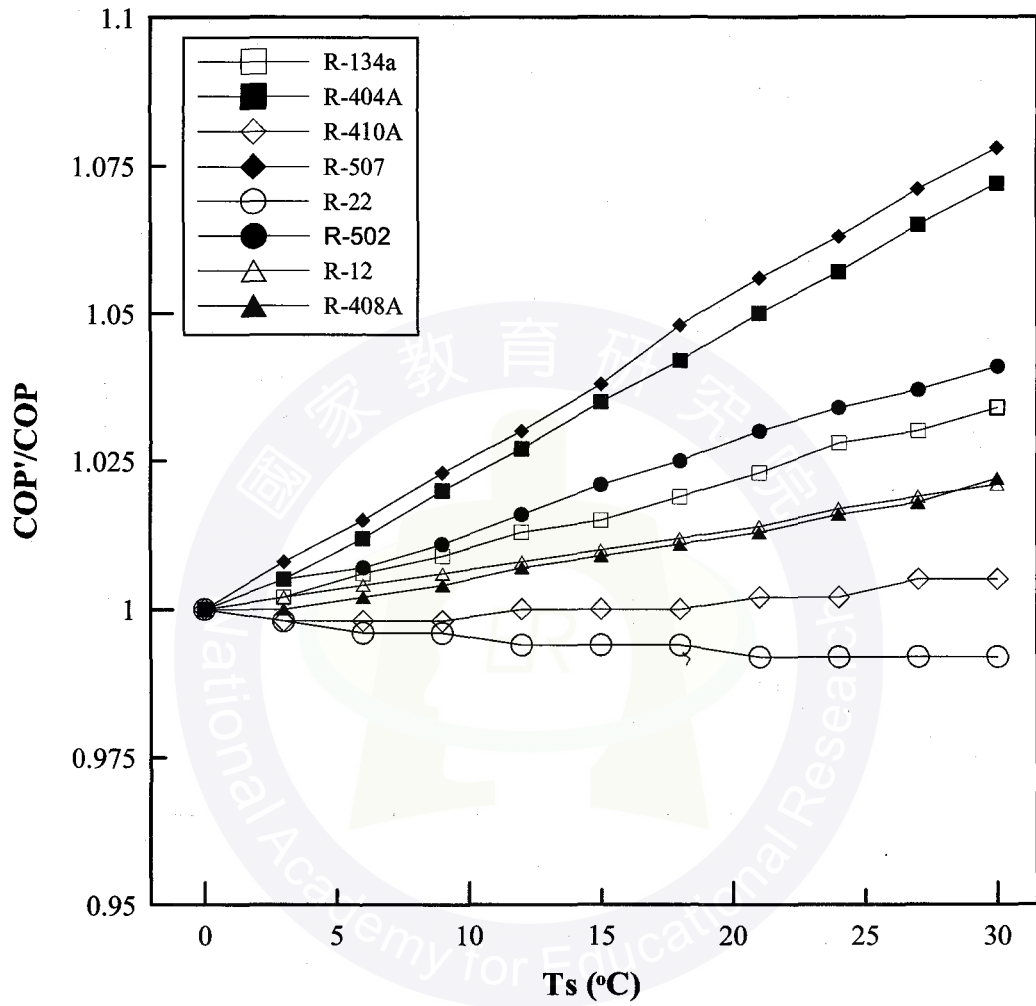


圖 3.1 不同冷媒與不同過熱度時之 COP

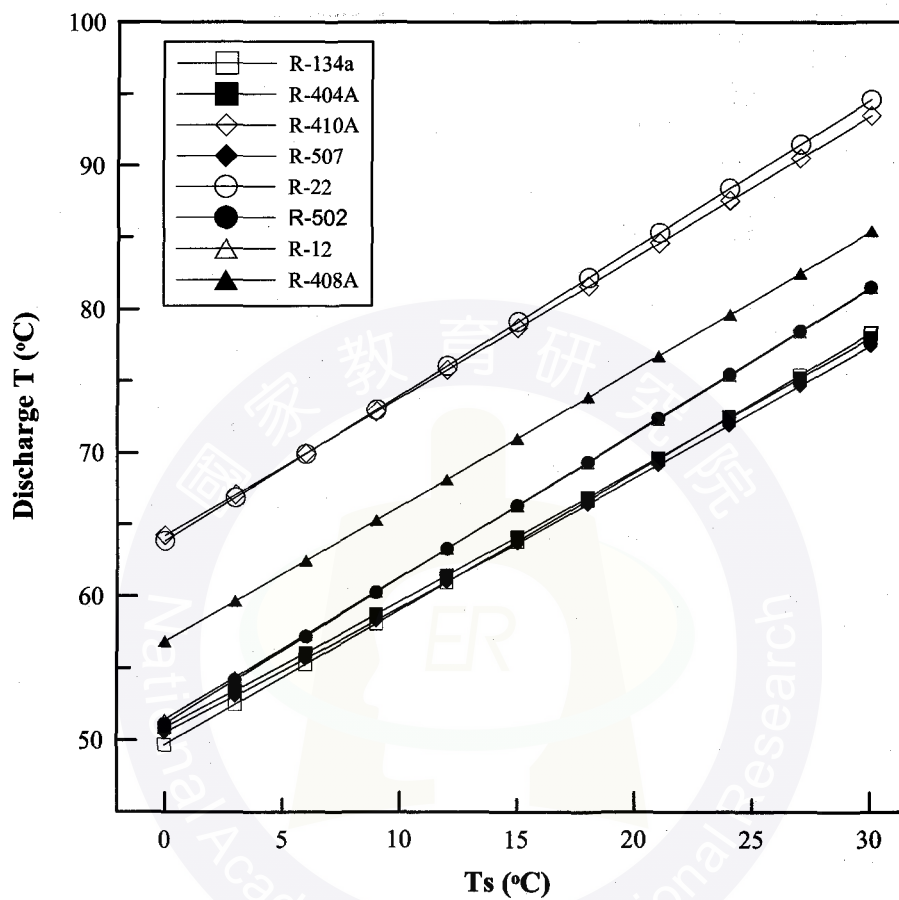


圖 3.2 不同冷媒不同過熱度時之壓縮機吐出溫度

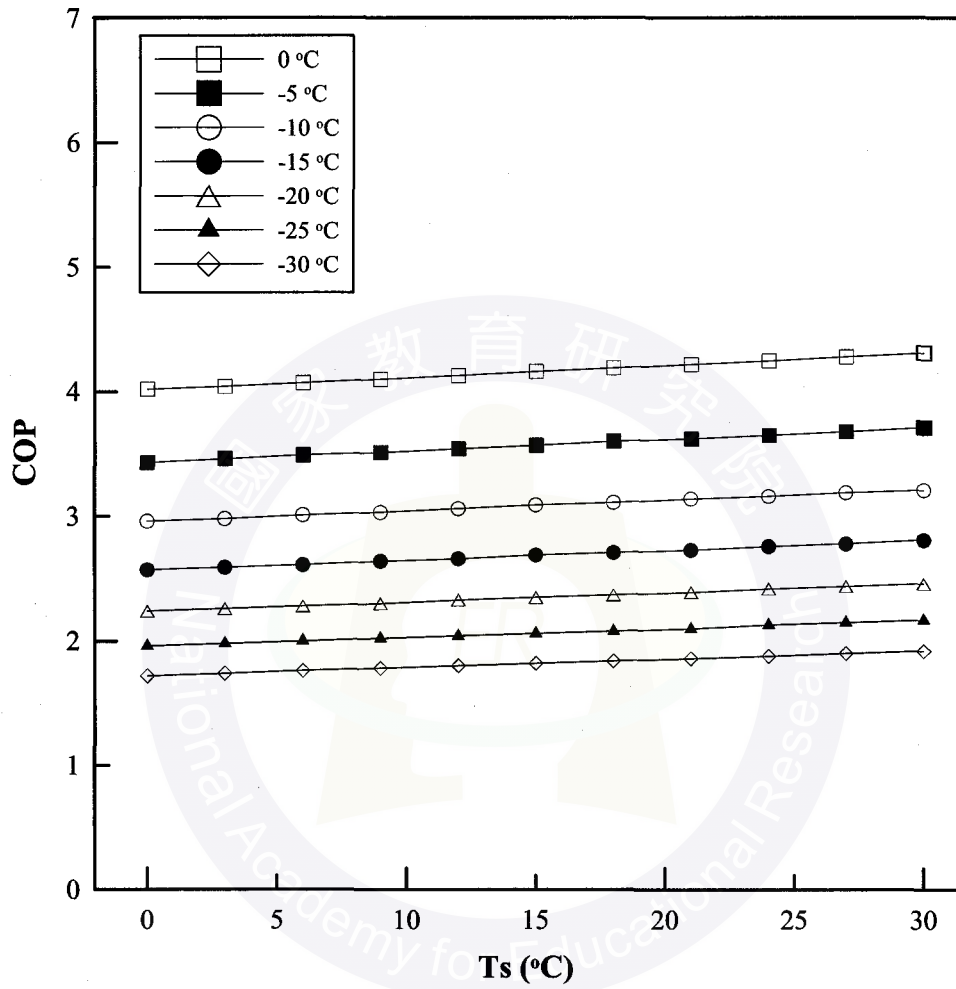


圖 3.2 不同蒸發溫度與不同過熱度時之 COP

肆、參考文獻

- (1) A. Cavallini, D. D. Col, L. Rosstto, Unsteady-State Analysis of the Compression Cycle of a Hermetic Reciprocating Compressor, Proceedings of the 1998 international compressor engineering conference at Purdue, 1998.
- (2) Chen, Z. J. and Lin, W. H. M, Dynamic simulation and optimal matching of a small-scale refrigeration system, Int. J Refrig., Vol. 14, pp. 329-335, 1991.
- (3) Jung, D., Park, C., Park, B., "Capillary tube selection HCFC22 alternative", Int. J. Refrig. Vol.25, pp.521-531, 2002.
- (4) Kim, S. G, Kim, M. S., Ro, S. T., "Experimental investigation of R22, R407C, R410A in several capillary tubes for air-conditioners", Int. J. Refrig. Vol.25, pp. 521-531, 2002.
- (5) J. M. Choi, Y. C. Kim. "Capacity modulation of an inverter-driven multi air-conditioner using electronic expansion valves," Energy 28(2003) 141.155.
- (6) 陳群文，非共沸環保冷媒流經毛細管之理論模式驗證與分析，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，2002。