

行政院國科會專題研究計劃成果報告

計劃名稱： 替代冷媒應用技術之研究

計劃編號： NSC-88-2212-E-002-049

計劃主持人： 蘇金佳

國立台灣大學機械工程學系

摘 要

本研究以 R600a 異丁烷為冷媒，填充入一套自行匹配設計的小型冷凍系統中，其壓縮機功率約為三分之一馬力(約 250W)左右，並以毛細管長度、內徑、冷凍側負載(鹵水溫度流率)、冷凝側負載(冷卻水溫度流率)、毛細管根數與壓縮機輸入頻率等為變因，探討此小型冷凍系統冷凍能力、COP 等十種性能。

研究結果顯示，系統之 COP 值範圍約為 1 到 4 之間，在可以接受的範圍之內。若毛細管的尺寸選取適當，可得到相當好的冷凍能力，足以應付一般小型家用冰箱的需求。

關鍵字：異丁烷，R600a，碳氫化合物，冷媒，冷凍系統。

前 言

近年來由使用中的冷凍空調設備洩漏或由報廢的機組散逸至大氣中的冷媒，已嚴重危害今天的大氣環境，包括臭氧層被破壞、地球溫度上升等。有鑑於此，世界各國於 1987 年簽訂「蒙特婁議定書」，全面規劃禁用破壞臭氧層的主要化學物質：鹵碳化合物冷媒 CFC，並在 1992 年以「哥本哈根修正案」確定 1996 年禁止生產 CFC-11 和 CFC-12 等冷媒。接著 HCFC 之類的冷媒如 R-22 等亦將於 2030 年完全禁產。

取而代之的 HFC 系冷媒，雖然沒有臭氧層破壞能力，但其卻具有較二氧化碳高三千倍的溫室效應潛能(GWP, Global Warming Potential)。1997 年底世界各國簽署「東京議定書」，明訂管制 HFC 等六種氣體的削減時程，未來也有可能被全面禁產。

因此，找尋不具有破壞臭氧層能力和擁有極低的溫室效應潛能的冷媒，為一刻不容緩之事。碳氫化合物具有安定的化學性質，不具有臭氧層破壞和溫室效應潛力，即使洩漏至空氣中，也容易分解，

不會危害環境。目前在歐洲各國，已成為取代舊冷媒的產品，唯其最大的缺點在於，當異丁烷洩漏至空氣中，與空氣混合體積在 1.4-8.4%時就有可燃的危險，所以美日等國依然禁用異丁烷為冷媒。

1992 Rice[1]等人以數值計算方法模擬出一套以 R600 (丁烷, n-butane) 為冷媒之 Hydraulic Refrigeration System(HRS)系統的性能特性。計算結果顯示，使用丁烷為冷媒者較使用 CFC 冷媒者之性能較好，其 EER 值較高，且丁烷是所有使用於 HRS 系統的碳氫化合物冷媒中，性能表現最佳者。

1996 年 Jung[2]等人研究以 R-290/R-600a 不同重量比例混合，為冷媒所組成之家用冷凍系統，作者首先以熱力循環分析指出，當 R-290 佔總質量之 20%~60%時，其 COP 值會比 R-12 系統增加 1.7%~2.4%。值得注意的是，使用 HC 混合冷媒系統之壓縮機頂蓋溫度較 R12 系統降低 1~3°C，使冷媒油更加穩定。使用混合冷媒的系統，其冷媒填充量約為 R-12 系統的 42%~56%，這是因為 R-290/R-600a 混合物之密度較低的緣故。所以以能源的觀點來看，碳氫化合物混合冷媒是 R-12 冷媒適當的替代品。

1997 年 Purkayastha[3]等人研究分別使用 HCFC22、HC-290(propane)和 LPG 為冷媒的熱泵(heat pump refrigeration)。結果顯示以碳氫化合物(HC-290、LPG)為冷媒之 COP_{HP}大於使用 HCFC22 為冷媒之 COP_{HP}，而使用 LPG 混合物為冷媒之 COP 值又比使用 HC-290 時要來得大。但是就冷凝器的放熱容量而言使用 HC 系冷媒者要比使用 HCFC22 冷媒較低。此外，使用碳氫化合物為替代冷媒時，其性能較 HCFC22 為冷媒時好。

1998 年李[4]以異丁烷為冷媒，建立一套壓縮機為 5HP 的蒸汽壓縮是冷凍循環，以毛細管為膨脹元件，進行系統性能試驗。實驗結果顯示，用於冷藏部份時，系統之 COP 值約在 2.5~4.5，至於冷凍

部份時，系統之 COP 約在 1.3~2.6，均為可接受的範圍。與 R-12 和 R134a 兩系統比較之下，R600a 均有較好之 COP 和較低的壓縮機吐出溫。就性質上而言，R600a 具有取代 R-134a 的潛力，只是安全性是注意的重點，故將 R600a 用於小系統（如家用冰箱）可以減少安全上的顧慮，因為其冷媒填充量通常小於 150 公克。值得注意的是，壓縮機的效率可能降低，是因為 R600 和 R-12 的體積容量不同所致，若改善壓縮機的餘隙體積，或許可以提高壓縮機之效率，是未來值得研究的課題之一。

1998 李[5]以丙烷為冷媒，建立一套壓縮機為 5HP 蒸汽壓縮式冷凍循環，以毛細管為膨脹元件，進行系統性能試驗。結果顯示，冷凍的 COP 大約在 3~5，而冷藏的 COP 約在 5~7，與同系統的 HFC-134a 為冷媒比較，明顯地，R-290 系統的性能較好。

為了針對碳氫化合物冷媒的應用務實化，本實驗係針對 R600a 異丁烷為冷媒，建立一套小型冷凍系統，並填充少量的冷媒，測試系統的性能和安全性，以期提供國內作為推動環保冷媒小系統，如電冰箱和商用小型冰櫃做為參考。

實驗設備與方法

研究之冷媒為異丁烷 R-600a。系統的主要元件為壓縮機、蒸發器、冷凝器和膨脹裝置，本實驗選取毛細管作為膨脹元件，而以毛細管尺寸（長度及內徑）、冷凍側環境狀態（鹵水溫及鹵水流率）、冷凝側環境狀態（冷卻水溫及冷卻水流率）、毛細管根數、壓縮機輸入頻率等變因來探討系統的性能變化，所以架設了一個小系統來探討上述變因對本系統性能的影響，系統的配置圖如圖 1 所示。為量測系統的性能，本實驗中另外架設了一冷凍側恆溫系統（可控制二次冷媒溫度及流率等狀態）以及一冷凝側冷卻水系統（可控制冷卻水溫及流率）。系統之冷媒填充量為 150 公克，以符合小系統低冷媒填充量和高安全性的需求。

結果與討論

本實驗可分為以下四個重點討論：

一、鹵水溫度和冷卻水溫度對系統性能之影響

由實驗結果得知，在同一根毛細管下，不論是在冷藏或冷凍時，冷卻水溫越高時，系統具有較高的高壓、低壓、毛細管壓降和蒸發溫度。冷卻水溫越高，系統的過熱度越小，而過冷度越大，壓縮機吐出溫 and 壓縮機功率也越高，但冷卻水溫對於系統

的冷凍能力和 COP 值並沒有規則的變化，如圖 2 所示。這是因為冷凍能力受許多因素複雜的影響，例如冷媒流率和蒸發溫度等。冷卻水溫越高，毛細管壓降越大，故冷媒流率上升，但相對的冷卻水溫越高，蒸發溫度上升，使得冷媒與鹵水間的溫差變小，冷凍能力下降。由上所述一消一長的變化，使得冷卻水溫對冷凍能力和 COP 變得無一定規則，不過從實驗結果可以發現，當鹵水溫度較高時，冷卻水溫高者冷凍能力較好，反之當鹵水溫度較低時，冷卻水溫低者冷凍能力較好，如圖 2 所示。

無論在冷藏或是冷凍部分，鹵水溫度對系統之高低壓、毛細管壓降、蒸發溫度、過冷度、壓縮機吐出溫及功率並無多大的影響。但鹵水溫度越高時，系統具有較大的過熱度、冷凍能力和 COP 值，如圖 2 所示。與李[4]所作結果比較，雖然使用同一種冷媒，但小系統對冷凍負載及外在環境因素影響的改變要來得敏感許多。

二、毛細管長度和內徑對系統性能之影響

由實驗結果得知，在同一冷卻水溫下，毛細管長度越長時，系統的低壓、高壓、蒸發溫度、壓縮機功率均下降，而毛細管壓降、過熱過冷度、壓縮機吐出溫則隨毛細管長度增長而上升。在冷藏部分，毛細管越長其冷凍能力則越差，如圖 3 所示。這是因為毛細管越長時，冷媒流率越小使得系統冷凍能力變差。但在冷凍部分，當鹵水溫較低時，毛細管越長其冷凍能力和 COP 越好；反之在鹵水溫較高時，毛細管越長其冷凍能力和 COP 越差，如圖 4 所示。這是因為毛細管越長時，冷媒流率降低使冷凍能力變差。但是毛細管越長，使得冷媒蒸發溫度降低，增加了鹵水與冷媒間的溫差，使得熱傳效果變好。這兩種相互抵銷的效應，使得在鹵水低溫與高溫時呈現了完全相反的結果。

在同一冷卻水溫下，毛細管的內徑越大時，系統的低壓、高壓、蒸發溫度以及壓縮機功率越大，而毛細管壓降、過熱過冷度和壓縮機吐出溫則隨毛細管內徑變大而降低。至於冷凍能力和 COP 部分，無論是在冷凍或是冷藏部分，都隨著毛細管內徑變大而較好，這是因為當毛細管內徑較大時，系統的冷媒流率增加所致。值得注意的是，有時在鹵水溫度較低時，毛細管內徑較大者反而冷凍能力較差，這是因為雖然冷媒流率較大，但是冷媒蒸發溫度接近鹵水溫，反而使熱傳能力降低所致，如圖 5 所示。

三、毛細管根數對冷藏時系統性能之影響

在冷藏時，本實驗分別採用單獨一根和兩根等長等內徑並聯的毛細管對系統作測試。實驗結果顯示，使用兩根並聯時，其系統低壓、蒸發溫度、毛細管壓降、過熱過冷度、壓縮機吐出溫等均較使用單獨一根時低，但壓縮機功率則略為提高。至於系統高壓，並沒有明顯的差異。在冷凍能力和 COP 方面，很明顯的在鹵水溫度較高時，使用兩根並聯時會有較好的冷凍能力和 COP，如圖 6 所示。這是因為雖然兩根並聯時毛細管壓降變小，且冷媒蒸發溫度上升，雖然在任何單根毛細管的流率減少，但兩根合起來的流率還是遠超越了只用單獨一根的流率，這個現象可從兩根並聯時系統的過熱度變小很多來解釋。在圖 6 中可以發現，在鹵水溫度低時，當冷卻水溫高時，使用兩根並聯者冷凍能力較使用一根者差，這是因為冷卻水溫高時，冷媒的蒸發溫度和鹵水很接近，所以即使冷媒流率大，但兩者間溫差縮小使得冷凍能力變差所致。

四、壓縮機輸入頻率對系統性能之影響

本實驗於壓縮機電源前加裝一變頻器，改變壓縮機的輸入頻率和轉速，探討其對系統性能的影響。由實驗結果得知，壓縮機輸入頻率越高，系統低壓、蒸發溫度越低，毛細管壓降、系統過熱度與壓縮機功率則越高。頻率的改變對系統高壓、過冷度及壓縮機吐出溫則沒有多大的影響。由於壓縮機的轉速變快，使得系統在低壓時吸入速度較快，所以低壓降低，而冷媒流率增加，系統的冷凍能力也增加。但是相對的壓縮機功率也上升，使得系統之 COP 值隨著頻率變大呈現先遞增後遞減的現象，如圖 7 所示。

結論與建議

1. 實驗結果顯示，以異丁烷為冷媒應用於小型冷凍系統中是可行的，因其擁有不錯且符合需求的系統性能，惟安全性必須特別加強。
2. 使用 R600a 為冷媒時，系統高壓約為五個大氣壓左右，與 R12 和李[5]的 R290 系統約十幾個大氣壓相比要小的很多，所以其壓縮機吐出溫 and 頂蓋溫度也相對降低，使冷凍油較為安定不易起化學變化，也延長了壓縮機的使用壽命。
3. 毛細管雖然價格低廉，但其最大的缺點在於不能針對不同的冷凍負載作調整。實驗結果顯示，在同一根毛細管中，不同的負載使得系統性能變化

很大，COP 值往往相差了兩三倍。與李[4]所作結果比較，雖然使用同一種冷媒，但小系統對冷凍負載及外在環境因素影響的改變要來得敏感許多。

4. 本實驗係使用 R22 冷媒所用之壓縮機，因為 R22 和 R600a 之物理性質不同，故壓縮機之餘隙效率顯得較低，進而使系統之冷凍能力也受到了影響。若要改善這種情形，可從改善壓縮機之餘隙和添加部分的 HC290(丙烷)兩部分著手，因為丙烷有較 R600a 較大的比容所致。

參考文獻

1. Warren Rice and George C. Beakley, 1992, "Characteristic of the hydraulic refrigeration system(HRS) using n-butane as the refrigerant", Energy Convers. V33, No.10, pp.943-950.
2. Dongsoo Jung, Chong B. Kim, Byoung H. Lim and Hong W. Lee, 1996, "Testing of a hydrocarbon mixture in domestic refrigerators", ASHRAE Transaction: Symposia, pp.58-62.
3. Purkayastha, B., Bansal, P.K., 1998, "Experimental study on HC290 and a commercial liquefied petroleum gas(LPG) mix as suitable replacement for HCFC22", International Journal of Refrigeration 21,1, P3-17.
4. 李舜棋, 1998, "環保冷媒異丁烷 R600a 應用於冷凍系統之研究", 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文。
5. 李昭仁, 1998, "環保冷媒 R-290 應用於冷藏、冷凍系統之性能研究", 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文。

附圖

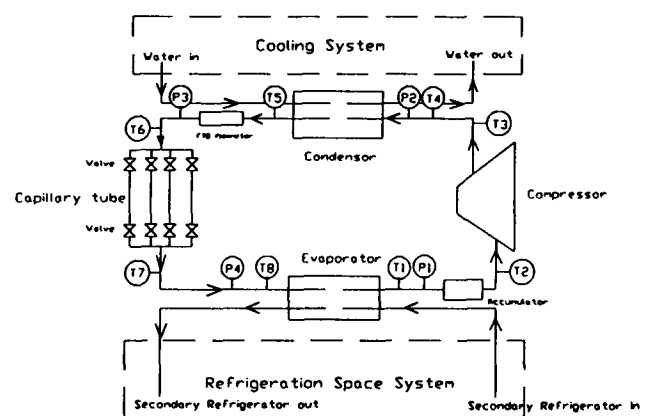


圖 1

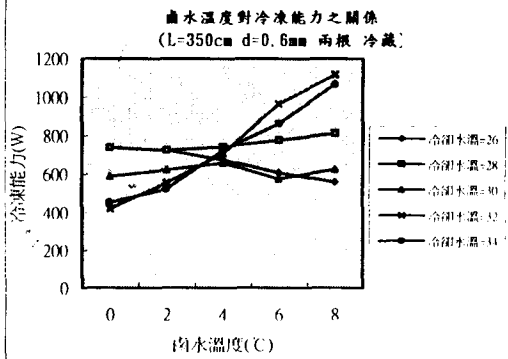


圖 2

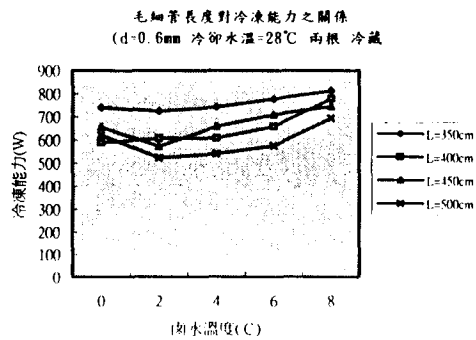


圖 3

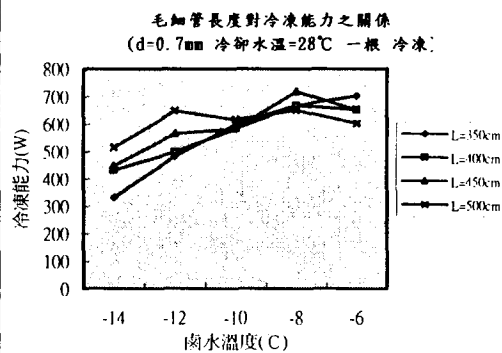


圖 4

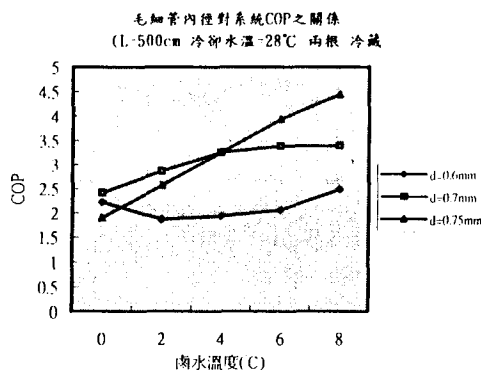


圖 5

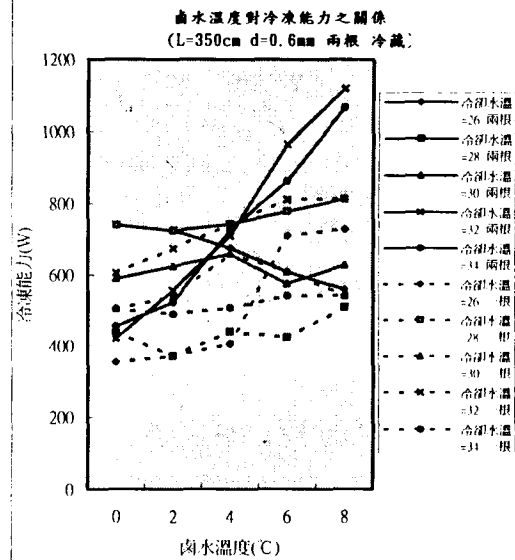


圖 6

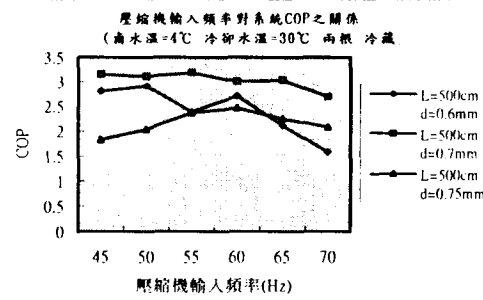


圖 7

Abstract

The research use iso-butane (R600a) as refrigerant to test the performance of domestic refrigeration system. The output power rate of the compressor is about one-third horse power (about 250 Watt). We took the length and inlet diameter of capillary tubes, the temperature of secondary refrigerant and cooling water, the number of capillary tubes paralleled, and the input frequency of the compressor as variable parameters to show the changing of the system.

The results revealed that the refrigeration ability and the coefficient of performance is in acceptable region.

Key words: iso-butane, R600a, Hydrocarbon, refrigerant, refrigeration system.