

國立勤益科技大學  
冷凍空調與能源系碩士班

碩士論文

真空凍結乾燥二級壓縮  
系統設計分析

研究生：戴仕欣

指導教授：許守平 老師

中華民國 99 年 7 月

真空凍結乾燥二級壓縮系統設計分析

The vacuum freeze drying two-stage compression system design and  
analysis

研 究 生：戴仕欣

指導教授：許守平 老師

國立勤益科技大學

冷凍空調與能源科技研究所碩士班

碩士論文

A Thesis

Submitted to

Refrigeration, Air Conditioning and Energy Engineering

National Chin-Yi University of Technology

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

in

Refrigeration Air Energy Engineering

June 2010

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國九九年七月

國立勤益科技大學  
冷凍空調與能源系碩士在職專班  
論文口試委員會審定書

本校冷凍空調與能源系碩士班戴仕欣君

所提論文真空凍結乾燥二級壓縮系統設計

分析

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

胡耀祖

許守平

郭

指導教授：

許守平

系(所)主管：

論文係

中華民國 99 年 7 月

國立勤益科技大學  
冷凍空調與能源系碩士在職專班  
論文口試委員會審定書

本校冷凍空調與能源系碩士班戴仕欣君

所提論文真空凍結乾火柴二級壓縮系統設計

分析

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

胡耀祖

許守平

郭

指導教授：

許守平

系(所)主管：

論文係

中華民國 99 年 7 月

## 摘要

本論文研究使用真空凍結乾燥機組分別為典型壓縮系統凍乾機組，與多段壓縮系統凍乾機組，探討其適用性，將所得數據進行迴歸分析做交叉比對，並以四物湯做為實驗品，先量測出其共晶點以兩個系統的最大極限來將物料凍結至共晶點以下-10°C。因在一次的凍乾製程裡時間相當的稍長藉由本次的研究來探討兩個製程時間上的差異性，並找出如何縮短整個製程的工作時間，及會造成凍乾物料在凍乾製程裡有哪些不良的後遺症。

本論文的研究結果可提供工程師在設計凍乾機時重要的參考，及製程上所需注意的幾項要點以期減少設計上失敗手段避免浪費的過多的時間及精神。

關鍵詞：真空凍結乾燥、共晶點、凍乾系統

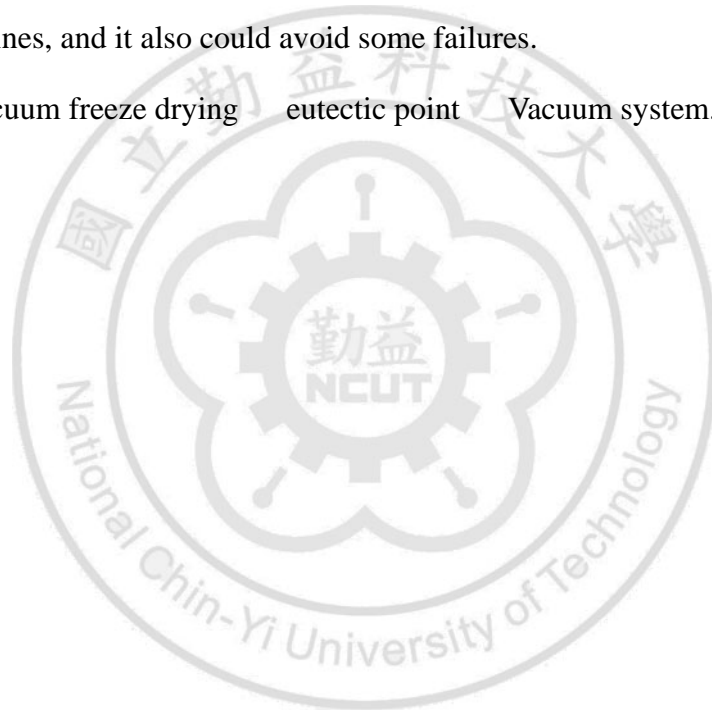


## ABSTRACT

In this study, vacuum freeze drying units were separated into the typical compression system freeze dryer group, and the multi-segment compression system freeze dryer group, to discuss its applicability, and then doing Regression Analysis with the statistic. Using Siwu medication as an experimental, we measure the maximum of eutectic point from two groups to freeze materials below  $-10^{\circ}\text{C}$ . Due to the long process, the study present the investigation between two groups to find the way to abbreviate the process, and avoid some adverse effects during the freezing process.

The consequence will be an important reference while engineers design a freezing machines, and it also could avoid some failures.

Keywords: vacuum freeze drying    eutectic point    Vacuum system.



# 致 謝

本文能夠順利完成，首先要感謝指導教授許守平老師於在學期間給予我觀念上的啟發與指導，以及勤益科技大學冷凍空調與能源研究系所師長們的教導。此外，亦感謝諸位口試委員對論文提供寶貴的意見，使本文內容更加完備。

另外要感謝堃霖冷凍機械公司曾總經理仲國先生及研發部潘經理泳坤先生、林經理政德先生、陳副理志泓先生、李課長明澤先生及碩士班同學…等於求學期間的協助與指導。

最後感謝父母多年來含辛茹苦的栽培與養育之恩、無怨無悔的付出、支持與鼓勵，使我得以無後顧之憂能夠全心全意的投入知識與學問的追求，完成此碩士論文的研究與撰寫。

僅以本文獻給我最親愛的家人、敬愛的師長及摯友們，謝謝您們不斷的鼓勵、關心與支持。

目錄	頁次
中文摘要 -----	i
英文摘要 -----	ii
致謝 -----	iii
目錄 -----	iv
表目錄 -----	vi
圖目錄 -----	vii
符號說明 -----	ix
一、 序論 -----	1
1.1 前言 -----	1
1.2 研究動機 -----	4
1.3 文獻回顧 -----	5
二、 真空冷凍乾燥基礎理論 -----	8
2.1 物理真空技術 -----	8
2.2 水分在真空下之特性 -----	12
2.3 冷阱特性 -----	14
2.4 典型冷凍循環系統 -----	16
2.5 冰昇華的條件 -----	19
2.6 真空凍結乾燥原理 -----	21
2.6.1 預凍前處理階段 -----	22
2.6.2 預凍階段 -----	22
2.6.3 初級乾燥階段 -----	24
2.6.4 解析乾燥 -----	27
2.6.5 乾燥後處理 -----	29
三、 凍乾設備系統組成分析 -----	30
3.1 壓縮機特性 -----	30
3.2 真空腔體 -----	31
3.3 凍乾機冷阱 -----	35
3.4 真空系統 -----	37
3.5 控制系統 -----	38
四、 凍乾實驗差異性分析 -----	41
4.1 真空凍結乾燥前共晶點量測 -----	41
4.2 典型蒸汽壓縮系統凍乾機流程 -----	43
4.3 雙段蒸汽壓縮系統凍乾機流程 -----	48
4.4 實驗後數據差異分析 -----	53
五、 結論與展望 -----	57
5.1 結論 -----	57
5.2 展望 -----	58

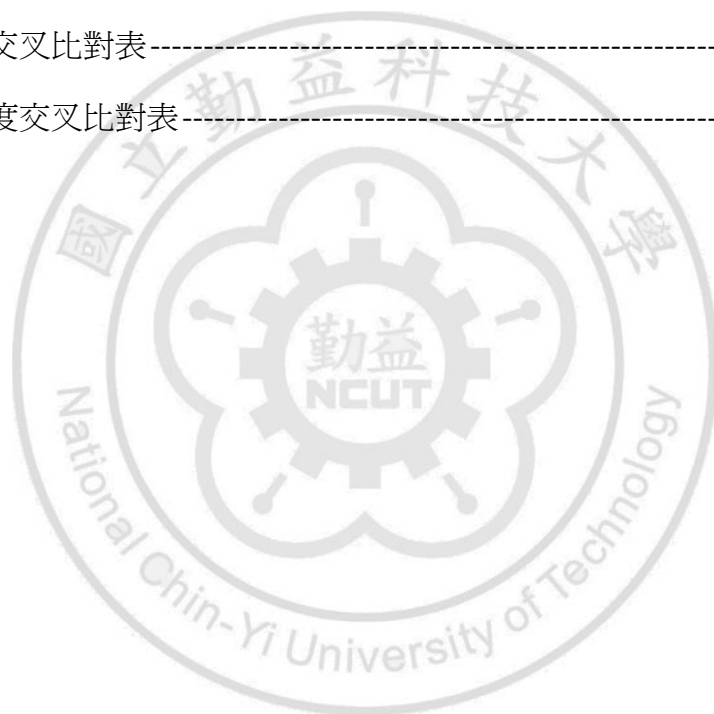


參考文獻	59
附錄一	62



## 表 目 錄

表 1. 乾燥氣體成分表-----	8
表 2. 水在不同壓力下的沸點表-----	12
表 3. 冰在不同溫度之蒸汽壓表-----	12
表 4. 水在不同溫度時之蒸汽壓表-----	13
表 5. 水在不同蒸汽壓之比容積表-----	13
表 6. 共晶點溫度點阻值表-----	42
表 7. 統時間交叉比對表-----	55
表 8. 系統溫度交叉比對表-----	55



## 圖目錄

圖 1. 我國能源消費結構	3
圖 2. 大氣壓力與距離地球表面距離之關係	9
圖 3. 典型蒸氣壓縮冷凍循環	16
圖 4. 二段壓縮冷凍系統循環	17
圖 5. 二元冷凍系統循環	18
圖 6. 水的狀態平衡圖	19
圖 7. 水的相圖	20
圖 8. 各種乾燥法應用範圍	21
圖 9. 製品乾燥後切面狀態	24
圖 10. 崩解模擬過	25
圖 11. 單段全密渦卷式壓縮機	30
圖 12. 乾燥腔體外觀	31
圖 13. 乾燥腔體內部	32
圖 14. 腔體安裝於潔淨室	32
圖 15. 腔門由矽橡膠密封	33
圖 16. 觀察視窗	34
圖 17. 真空凍結乾燥機冷阱	35
圖 18. 簡易共晶點測量圖	41
圖 19. 單段系統流程圖	44
圖 20. 單段系統物品凍結速率	45
圖 21. 中藥真空冷凍乾燥實驗曲線	46
圖 22. 中藥凍結情形(-20°C)	47
圖 23. 凍乾後的物品發生崩解現象	47
圖 24. 二級壓縮系統流程	49

圖 25. 雙段系統物品凍結速率	50
圖 26. 中藥真空冷凍乾燥實驗曲線	51
圖 27. 中藥凍結情形(-40°C)	51
圖 28. 凍乾後的物品外觀	52
圖 29. 系統物品 1 凍結速率比較圖	53
圖 30. 系統物品 2 凍結速率比較圖	53
圖 31. 系統物品 3 凍結速率比較圖	54
圖 32. 系統入熱量差異性	56



## 符號說明

$\gamma$ : 氣體比熱比，為定壓與定容比熱之比

$R$ : 氣體摩爾常數， $J/kmol \cdot K$

$M$ : 氣體的相對分子量， $kg/kmol$

$T$ : 氣體的溫度， $K$

$P$ : 氣體在溫度  $T$  對應的壓力， $Pa$

$w_t$ : 乾燥時間為  $t$  時之樣品重

$w_i$ : 樣品初重

$w_o$ : 樣品固形物(乾物)重



## 一、緒論

### 1.1 前言

2008年3月，世界糧食計劃署執行幹事希蘭說，自2007年6月以來，穀物價格上漲近40%，全球食品儲備僅夠53天應急供應。4月，IMF總裁斯特勞斯卡恩更是嚴厲警告：食品價格急劇上漲將可能引發戰爭。一些評論家認為，問題不在於糧食減產，而是一些大國因國內天災而限制出口糧食，一些小國因不能外購糧食而為自保所以也限制出口糧食，如此就形成惡性循環。

聯合國糧農組織的最新預測說，今年世界糧食總產量預計為18.21億噸，將比消費總量少8300萬噸。

今年世界主要糧食出口國的糧食生產不同程度地受到了旱災或水災的影響。旱災和9月份的暴雨使世界第一大小麥出口國美國的收穫季節推遲，而且影響了小麥的品質。世界第二大小麥出口國澳大利亞今年小麥收成是18年來最低的，預計比上年減產20%。世界第三大小麥出口國加拿大今年糧食生產受到了40年來最嚴重的旱災的影響。但是，歐盟成員國今年糧食生產獲得豐收。俄羅斯和烏克蘭今年糧食產量基本與上年持平。

由於世界糧食產量持續低於消費量，世界糧食庫存量不斷下降，糧食價格在上漲。小麥庫存量已下降到不足年消費量的23%，大米庫存量是年消費量的28%，玉米的庫存量已下降到年消費量的15%以下。目前，世界市場小麥價格比今年年初上漲了25%，是近5年來的最高價格，玉米價格上漲了30%。專家預測，2002—2003貿易年度，世界糧食市場價格堅挺的形勢仍將持續。

糧食增產而價格不降反漲，原因當然就是需求及消費增長得更快。但真正令人擔憂的不是汽車與人爭食，全球變暖才是對食為天的問題。聯合國氣候科學家說，由於全球變暖，水災和旱災發生的週期在不斷地縮短，將導致更大的糧食危機。一項最新研究結果，當溫度上升到30攝氏度以上時，稻米產量就會下降。

今年以來，糧食危機已取代石油危機和環境危機，成為最熱門的討論

話題。高漲的糧價讓人民上街抗議，動亂四起，全球各個國家傾全力確保糧食供應無缺，但另一方面，糧食也成為國際談判籌碼之一。探討這場糧食危機的成因和可能的解決方案。



而延長食物的儲存期限則可幫助世界各國來脫離糧食危機的風暴，延長食物的保存期限有冷凍、冷藏、乾燥、鹽漬、煙燻。其中又以乾燥方式最佳，因水分是細菌孳生的必要條件若減少食品的含水量則可延長食品的保存期限。

乾燥程序是一個耗能非常大的單元程序，而我國能源極為貧乏，我國能源供給量從 1990 年的 5,873 萬公秉油當量成長至 2008 年的 14,247 萬公秉油當量，年平均成長率達 5.05%，然而，由於我國自產能源匱乏，因此進口能源比例亦逐年提升，由 1990 年的 95.84.%增為 2000 年的 98.71%，2008 年更增加到 99.34%。

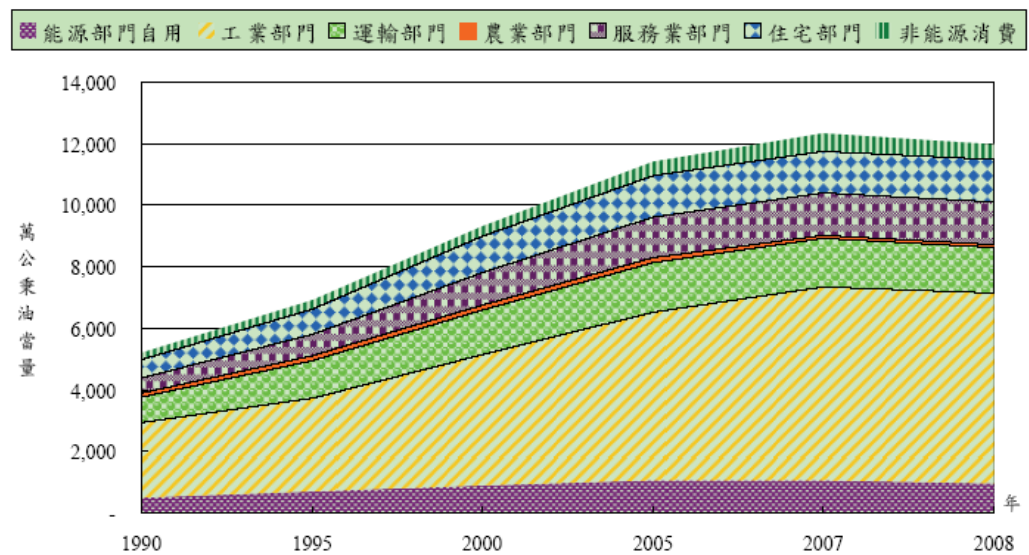


圖1.1 我國能源最終消費結構<sup>[1]</sup>

資料來源：經濟部能源局網站資訊，能源局統計月報，2009



## 1.2 研究動機

現今因氣候變遷問題造成世界各地災害不斷，在台灣海島型國家又處於地震帶上，災害是無可避免的，只能預防。去年八八風災它所挾帶的強大風雨，將一年累積的雨量，傾倒在中南部地區，造成嚴重災害。無數家園、土地與生命遭土石流掩埋；家，已不是家；地，也不再是昔日熟悉的模樣。而慈濟證嚴上人一念悲心升起，心想若白米可變成沖泡式的乾燥飯，人人就有一碗飯或粥可以享用。此一想法就是利用真空乾燥法來製作食品命名為「香積飯」，延長食品保存時間及提高食用的便利性。

又因當下處在糧食危機的時代裡，我們可以著手研究如何儲存生產過剩的食物，及延長糧食的實用壽命，如此將可減少產量過剩而造成隱性的浪費。水分，是附著於食品，用離心、過濾，和一般乾燥溫度容易乾燥和除去者，又因其被微生物利用亦為造成乾燥食物腐敗的因素之一。

乾燥是保持物質不致腐敗變質的方法之一。乾燥的方法許多，如曬乾、煮乾、烘乾、噴霧乾燥和真空乾燥等。但這些乾燥方法都是在 0°C 以上或更高的溫度下進行。乾燥所得的產品，一般是體積縮小、質地變硬，有些物質發生了氧化，一些易揮發的成分大部分會損失掉，有些熱敏性的物質，如蛋白質、維生素會發生變質。微生物會失去生物活力，乾燥後的物質不易在水中溶解等，更談不上外觀或性能的恢復，因此乾燥後的產品與乾燥前相比在性狀上有很大的差別。冷凍乾燥就是把含有大量水分的物質，預先進行降溫凍結成固體，然後在真空的條件下使水蒸汽直接昇華出來，而物質本身剩留在凍結時的冰架中，因此它乾燥後體積不變，疏鬆多孔，如此乾燥後的產品可被微生物利用水分含量極低，如此便可延長其保存期限，但在凍乾製程中，乾燥後成品的含水率及製程的時間都會因製程的條件不同而有所改變，本文將探討設備的設計製作及最適當的製程方式來縮短製程時間及提升乾燥良率減少食品乾燥時所消耗的能源。

### 1.3 文獻回顧

本文即針對以真空凍結乾燥設備及製程在各種不同的條件狀況下做探討以得到最佳品質的產品得以延長糧食的儲存時間及提高乾燥程度。因此本章節將對乾燥及真空冷凍乾燥法的發展研究來做文獻回顧。

Kobayashi[3]認為某些冷凍乾燥設備，腔壁或腔門與棚板溫度之間是有溫差的存在，這將會使在棚板邊緣處的物料在冷凍過程會比較慢。在初級乾燥(昇華乾燥)時，只要棚板溫度加熱到 $+15^{\circ}\text{C}$ 或 $+25^{\circ}\text{C}$ ，壁溫的影響就很小，如果初級乾燥棚板溫度在於 $-10^{\circ}\text{C}$ 時，則處在邊緣的物料將會發生崩解現象的可能性。

Bardat 等人[4]指出壓力升高時，乾燥產品會有崩解或熔化的危險。

Thijssen 和 Rulken[5,6]的論點是慢速冷凍和快速凍乾可很好的保持被乾燥物品的香氣，以 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率冷凍的20%麥芽糖水溶液中孔的尺寸約為 $3\mu\text{m}$ ，然而當已 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率冷凍時孔的尺寸為 $1.8\mu\text{m}$ 。孔徑為 $3\mu\text{m}$ 和 $1.8\mu\text{m}$ 時凍乾速度的比率為0.17:0.07。另外隨著固體成份的增加香氣的殘留性也會增加，固體含量為10%溶液香味的殘留性幾乎為零，但固體含量在20%~30%之間時香味的殘留度則增加到45%~60%。

Hsu[10]發現已包裝的產品也有可能發生分解，設想凍乾結束時只具有單分子層的水，且不是均勻分布的，但是在有些位置分子可能連成串，在乾燥和儲存過程中，這些水提供最好的保護以防止變質。

Spiess[13]建議用乾燥空氣儲存花椰菜和藍莓，但紅蘿菠和辣椒應該儲存在含氧量小於 $0.1\text{mg}(\text{O}_2)/\text{g}$ (乾燥物料)的氣體中。

Heldner 等人[15]指出不同的冷媒在使用棚板上及凝結器上會顯現出不同的溫度。R-502 冷煤棚板溫度大於 $-55^{\circ}\text{C}$ ；凝結器溫度為大於 $-75^{\circ}\text{C}$ ，R-22 冷煤棚板溫度大

於-50°C ;凝結器溫度為大於-70°C , R-404A 冷煤棚板溫度大於-55°C ;凝結器溫度為大於-75°C 。

Kapsalis 等人[16]的研究表明,碗豆中的殘留水分含量(RM)既不能太多也不能太少。在+43°C和 RM 低於 5%的條件下可儲存 84 天,維生素 B 的含量幾乎沒有減少,但胡蘿蔔素含量降至約 36%。另一方面,RM 為 33%的條件下,維生素 B 含量降至 81%,而胡蘿蔔素含量保留在 50%。

Medas 和 Simatose[17]、Sauvageot 和 Simatose[4-14]等人研究發現關於草莓和柳橙汁的結論是類似的;冷凍速率不同則影響不同種類水果的 RM 值和復水情況,香氣的殘留不謹取決於冷凍速率,也與果汁層的厚度、濃度和工作壓力相關。故產品的種類不同,所有的製程參數亦不同。

Gegov[18]研究了在常溫的條件下分別在,大氣、氮氣的環境下儲存在密封罐中的和在真空條件下儲存的凍乾紅蘿蔔,評價了 15 項參數,發現他們可以與冷凍紅蘿蔔做比較,真空下儲存胡蘿蔔素是最適合保存的。

Meryman[19]在 1968 年提出了他的關於「最小細胞容積」的假說,並假設冷凍過程細胞的破壞分兩步。最初,水從細胞裡向四周擴散滲透出,冷凍溶液使細胞內的容易濃縮。然而有一定的水可以從細胞移出,細胞縮到最小以後,不可能在從細胞裡抽出水,剩下的是細胞結構的基礎部份。這些水的遷移導致細胞膜結構無法還原。

Girlich[20]用 NMR 研究了糖水溶液的分子動力學。當濃度下降到固體含量為 30%時,糖分子之間彼此不受影響,然而隨著溫度的降低,已存在的氫價鍵阻礙水分子的在定位。溶解的糖分子能破壞氫鍵,從而有可能過冷。在固體含量大於 40%時,可形成糖分子的結合。水受氫價鍵的束縛增加,失去移動和旋轉運動。隨溶液濃度增加,糖分子交叉結合,結合水獲得自由,導致濃度降低。

Poulsen[21]建議先用冷凍乾燥法去除 60%以上的水分,其餘則在一個空氣循環乾燥器中乾燥。在這種製程中,較長的復水時間被認為是必要的。乾燥製品的密度較高、脆性較小、對氧氣的敏感性較弱。生產成本優勢可望達到 20%左右。

Karel[22]研究了儲存的乾燥食品中含水量的影響,發現不僅水的多寡對儲存有影響,水與固體鍵合的方式也有影響。

Kozak 和 Lis[23]研究壓力在 0.63mbar 和溫度 0~60°C 條件下凍乾芹菜中的維生素 C 的含量,發現 50~60°C 是維生素 C 的最佳保存條件。



## 二、真空冷凍乾燥基礎理論

### 2.1 物理真空技術

真空基本的定義是指有一密閉空間內的氣體分子利用外力將其移走，則此時該密閉空間內之壓力已低於一大氣壓力稱之為真空。但實際上要將一密閉空間之氣體完全抽至真空是不可能的，氣體排出量的多寡，而來決定此密閉空間的真空度。

空氣是在所有系統在抽真空時，最常碰見的氣體，事實上它是無所不在。空氣的成分若加以分析，將發現起碼有十二種不同原子在內。每一種原子佔的比例不盡相同，表 2-1-1 所顯示的資料乃是一個乾燥的空氣在海平面的高度下所測得結果。數據顯示空氣中以氮氣的比例佔最大部分。一大氣壓力為 101,323Pa 時，氮氣的分壓為 79117Pa。在此處我們並沒有將水氣的分壓考慮進來，因為水氣的壓力會隨著溫度不同而有所變化，例如在室溫 20°C，且溼度為 50%時，水氣的分壓為 1165Pa。

表 2-1-1 乾燥氣體成分表

種類	成份		壓力 (Pa)
	Vol%	ppm	
N <sub>2</sub>	78.084		79.117
O <sub>2</sub>	20.946		21.223
CO <sub>2</sub>	0.033		33.437
Ar	0.934		946.357
Ne		18.18	1.842
He		5.24	0.51
Kr		1.14	0.116
Xe		0.087	0.009
H <sub>2</sub>		0.5	0.051
CH <sub>4</sub>		2	0.203
N <sub>2</sub> O		0.5	0.051

資料來源：空氣調節與空氣污染工程學[2001]

大氣的壓力隨著與地球的表面高度的不同有很大的變化，圖 2-1-1 乃是其壓力與高度之變化圖。當我們針對一個腔體進行真空抽取時，當壓力降至 10Pa 時，材料表面所溢出氣體分子的速度可能會比腔體內原有的氣體由幫浦抽出去的速度還要

快，如此一來，若幫浦的抽氣速度無法增加，則該系統的壓力將會達到一個極限，除非我們改進幫浦，否則該腔體的壓力將會無法更動。然而在考慮更換幫浦之前，我們也必須對於製造腔體所使用的材料做一考量，換句話說選擇一個溢氣量不高的材料以及小心處理連接點的連結技術也可以解決一個腔體無法將真空降的更低的問題。

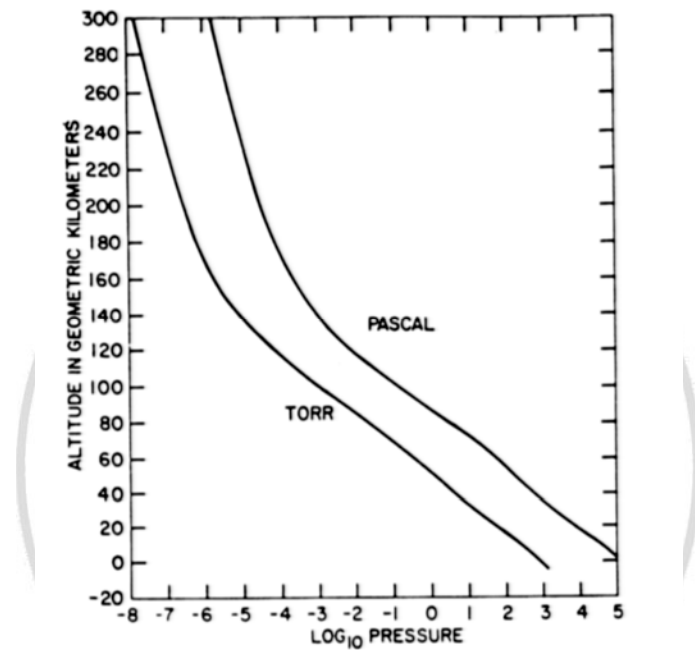


圖 2-1-1 大氣壓力與距離地球表面距離之關係  
資料來源：空氣調節與空氣污染工程學[2001]

由於在真空技術中研究的氣體大多數處於常溫和低壓狀態下，因此在工程計算中應用這些定律基本上是符合實際的。現就有關問題分述如下：

#### 氣體定律

氣體的壓力  $p$ (Pa)、體積  $V$  ( $m^3$ )、溫度  $T$  (K) 和品質  $m$  (kg) 等狀態參量間的關係，下述氣體實驗定律：

波義耳—馬略特定律：一定品質的氣體，當溫度維持不變時，氣體的壓力和體積的乘積為常數。即：

$$pV = \text{常數} \quad (2-1)$$

給呂薩克定律：一定品質的氣體，當壓力維持不變時，氣體的體積與其絕對溫度成正比，即：

$$PV=nRT \quad (2-2)$$

查理定律：一定品質的氣體，當體積維持不變時，氣體的壓力與其絕對溫度成正比，即

$$\frac{V}{T} = \text{常数} \quad (2-3)$$

上述三個公式習慣上稱為氣體三定律。具體應用方式常為針對由一個恒值過程連結的兩個氣體狀態，已知 3 個參數而求第 4 個參數。例如：初始壓力和體積為  $P_1$ 、 $V_1$  的氣體，經等溫膨脹後體積變為  $V_2$ ，則由波義耳—馬略特定律，即可求出膨脹後的氣體壓力

$$v = \frac{1}{4} \bar{nv} = \frac{p}{\sqrt{2\pi m_0 kT}} = \frac{P \cdot N_A}{\sqrt{2\pi MRT}} \quad (2-4)$$

所謂蒸汽(又稱可凝性氣體)，是相對於永久氣體(或稱非可凝性氣體)而言的。對於任何一種氣體，都存在著一個臨界溫度，在臨界溫度以上的氣體，不能通過等溫壓縮發生液化，稱為永久氣體；而在臨界溫度以下的氣體，靠單純增加壓力即能使其液化，便是蒸汽。

空間中的蒸汽分子返回到液體內去的過程叫凝結。蒸汽的凝結率  $W[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ，即單位時間內在單位面積液面上凝結的蒸汽品質，可借助(2-4)式計算

真空技術中，氣體沿管道的流動狀態可劃分為如下幾種基本形式：從大氣壓力下開始抽真空的初期，管道中氣體壓力和流速較高，氣體的慣性力在流動中起主要作用，流動呈不穩定狀態，流線無規則，並不時有旋渦出現，這種流動狀態稱為湍流(渦流，紊流)；隨著流速和氣壓的降低，在低真空區域內，氣流由湍流變成規則的層流流動，各部分具有不同速度的流動層，流線平行於管軸，氣體的黏滯力在流動中起主導作用，此時氣體分子的平均自由程  $\lambda$  仍遠小於導管最小截面尺寸  $d$ ，這種流態叫做粘滯流；當氣體流動進入高真空範圍，分子平均自由程  $\lambda$  遠遠大於導管最小尺寸  $d$  時，氣體分子與管壁之間的碰撞占居主要地位，分子靠熱運動自由地直

線前進，只發生與管壁的碰撞和熱反射而飛過管道，氣體流動由各個分子的獨立運動疊加而成，這種流動稱作分子流；發生在中真空區域內，介於粘滯流與分子流之間的流動狀態叫做中間流或過渡流。





## 2.2 水份在真空下之特性

在一大氣壓力下，水的冰點是 0°C，冰點會隨著壓力減少時而下降，當水的蒸氣壓等於外界壓力時，此時的狀態稱之為沸騰；在一大氣壓下，水在不同壓力時的沸點如下表 2-2-1 水在不同壓力下的沸點。

表 2-2-1 水在不同壓力下的沸點表

壓力(mmHg)	沸點(°C)	壓力(atm)	沸點(°C)
680	96.7	1	100
700	97.7	2	120
720	98.5	4	143
740	99.3	6	158
760	100	8	170
780	100.7	10	180
800	101.5	20	211

資料來源：空氣調節與空氣污染工程學

水蒸汽的臨界溫度為 374°C，臨界壓力為 217.7 大氣壓，溫度降低時水蒸氣容易液化，水和冰在不同的溫度時有不同的蒸氣壓，當溫度蒸氣壓降低時，溫度也會跟著降低如下表 2-2-2 與 2-2-3。

表 2-2-2 冰在不同溫度之蒸汽壓表

溫度(°C)	壓力(mmHg)	溫度(°C)	壓力(mmHg)	溫度(°C)	壓力(mmHg)
0	4.579	-9	2.131	-25	0.4760
-1	4.217	-10	1.990	-30	0.2859
-2	3.880	-11	1.785	-40	$9.7 \times 10^{-2}$
-3	3.568	-12	1.632	-50	$3 \times 10^{-3}$
-4	3.280	-13	1.490	-60	$8.1 \times 10^{-3}$
-5	3.013	-14	1.311	-70	$1.9 \times 10^{-4}$
-6	2.765	-15	1.241	-80	$4 \times 10^{-4}$
-7	2.537	-18	0.939	-90	$7 \times 10^{-4}$
-8	2.326	-20	0.7760	-100	$1 \times 10^{-5}$

資料來源：冷凍乾燥技術與凍乾機[2005]

表 2-2-3 水在不同溫度時之蒸汽壓表

溫度 (°C)	壓力 (mmHg)	溫度 (°C)	壓力 (mmHg)
0	4.579	40	55.32
5	6.543	45	71.88
10	9.209	50	95.21
15	12.79	60	149.4
20	17.54	70	233.7
25	23.76	80	355.1
30	31.82	90	525.7
35	42.18	100	760

資料來源：冷凍乾燥技術與凍乾機[2005]

然而水蒸汽在不同的壓力之下比容積也會跟隨著壓力下降而升高，如下表 2-2-4

表 2-2-4 水在不同蒸汽壓之比容積表

容積 (l)	壓力 (mmHg)	容積 (l)	壓力 (mmHg)
944000	0.001	236	4.0
189000	0.005	210	4.5
94400	0.01	189	5.0
18900	0.05	172	5.5
9440	0.1	157	6.0
1890	0.5	135	7.0
944	1.0	118	8.0
630	1.5	95	10
472	2.0	63	15
378	2.5	47	20
315	3.0	38	25
270	3.5	32	30

資料來源：冷凍乾燥技術與凍乾機[2005]

由表 2-2-4 可看出壓力每減少十倍時，比容積則跟著被放大十倍，故在在應用於真空冷凍乾燥時，在應用之真空範圍內來詳細計算後慎選真空設備是非常重要的。

### 2.3 冷阱(Cold Trap)特性

在冷凍乾燥於初級乾燥過程時，由機械式真空泵降低系統壓力至冷阱。在 0.5 mmHg 下 1kg 的冰會產生 1.89m<sup>3</sup> 的水蒸氣，而在 0.05 下會產生 18.9 m<sup>3</sup>(見表 2-2-4) 如此將需要非常大容量的真空泵才能維持在真空冷凍乾燥的工作壓力。冷阱必須滿足下列幾點要求：

- (1) 表面積需有足夠使凝結厚度可達到最大補水量
- (2) 管壁溫度分布均勻，使結冰厚度無太大偏差
- (3) 乾燥室與凝結裝置之間的管道必須設計容許大量水蒸氣通過

每一時期霜層表面溫度各不相同，共可分為三個時期，即晶體生長期、霜層生長期和霜層充分生長期，表面溫度逐漸升高，由此霜層密度也逐漸升高，霜厚度及密度則向外足漸增長，靠近冷表面處密度最小，而霜表面處密度最大。霜密度不僅與時間有關也隨著物品含濕量、冷卻面溫度、主流溫度、濕度等亦有所不同，冷表面溫度越低，形成霜層的密度越低，在冷卻面的不同位置密度並不相同，在低溫處其霜的密度愈低。霜層的總體結構可分為四種結構的隨機混合，冰柱、冰球、冰層、空氣泡為主要結構，霜層綜合導熱係數則由其混合模型計算的空氣-冰有效導熱係數和水蒸氣有效導熱係數之和，由於其模型中複合了四種基本結構並考慮了壁面溫度對成霜的影響，該模型具有較大的適用範圍。

當氣體分子的平均自由程變得和氣體流動的特徵長度相當時，氣體流動導熱在加強。大多數低溫工程中，在自由分子的條件下，氣體熱量傳遞可以由下式給出：

$$\frac{Q_{gc}}{A_1} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left( \frac{R}{8\pi MT} \right)^{1/2} \alpha p (T_2 - T_1) \quad (2-5)$$

$\alpha$  - 熱適應係數，可以定義為

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_2 + \alpha_1 (1 - \alpha_2) (A_1 / A_2)} \quad (2-6)$$

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  - 冷熱表面的熱適應係數，據冷熱面材料等因素定；

$\gamma$  - 氣體比熱比，為定壓與定容比熱之比；

$R$  - 氣體摩爾常數， $J/kmol \cdot K$ ；

$M$  - 氣體的相對分子量，kg/kmol；

$T$  - 氣體的溫度，K；

$P$  - 氣體在溫度 $T$ 對應的壓力，Pa；



## 2.4 典型冷凍循環系統

凍乾機中常用的冷凍循環有單段壓縮、雙段壓縮、二元冷凍系統，典型的冷凍循環系統即為單段壓縮，主要由四大元件所組成的如下圖 2-4-1：

- (1) 壓縮機(Compressors)
- (2) 冷凝器(Condenser)
- (3) 冷媒控制器(Refrigerant Control)
- (4) 蒸發器(Evaporator)

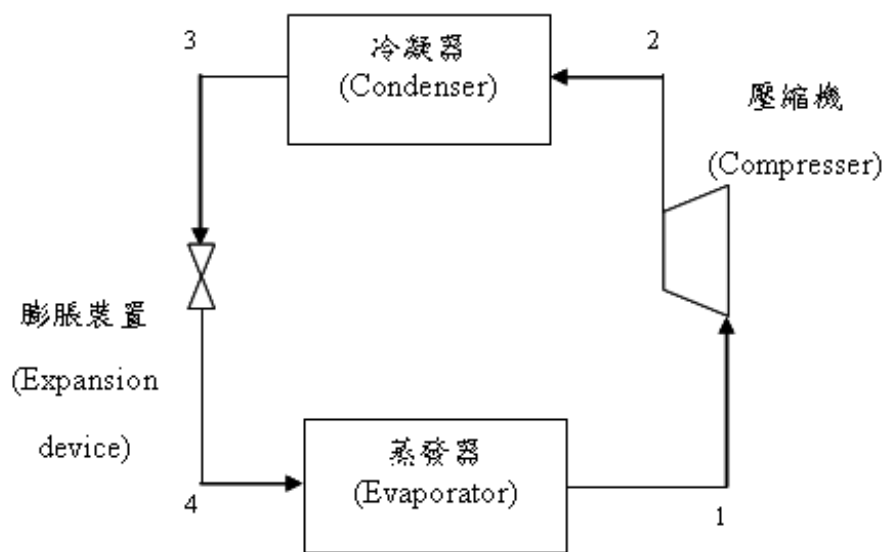


圖 2-4-1 典型蒸氣壓縮冷凍循環

其最低蒸發溫度為 $-30^{\circ}\text{C}$ ，若採用低溫型壓縮機及適當的冷媒則蒸發溫度可達 $-45^{\circ}\text{C}$ ，但單段壓縮容量小又受限於蒸發溫度過高，利用其來製作凍乾時為有限，僅用以實驗性凍乾機較為恰當。

根據能量守衡定律，冷媒在一次循環過程中所獲得的能量與所排出的能量相等即所謂的“熱平衡”，這樣才能從某一狀態點經過潛熱及顯熱變化後還能回覆到原來的狀態，即

$$q_{in}=q_{out}+W_0 \quad (2-7)$$

而理想的冷凍循環係數為

$$\varepsilon =q_0/ W_0 \quad (2-8)$$

當冷凝溫度為  $35^{\circ}\text{C}$  時,其蒸發溫度範圍在  $-27.3^{\circ}\text{C}$  至  $-35.2^{\circ}\text{C}$  ,而食品用凍乾機凝結器的工作溫度在  $-35^{\circ}\text{C}$  至  $-40^{\circ}\text{C}$  ,生物科技凍乾機的凝結器工作溫度在  $-50^{\circ}\text{C}$  至  $-65^{\circ}\text{C}$  ,因此典型的單段冷凍循環並不適用,必需採用二段壓縮冷凍循環系統則可降低系統壓縮比、耗電量及增加冷凍效果。

二段壓縮冷凍循環系統如圖.2-4-1,當第一段的壓縮機自回流管吸氣壓縮排出後,經中間冷卻器,將第一段壓縮出的高壓高溫過熱氣體,降低過熱溫度到飽和溫度,排出後,進入冷凝器散熱液化成高壓中溫液體,經膨脹閥流入蒸發器蒸發,此時因壓降及多能獲得極低的蒸發溫度,以 R-404A 為例約在  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $-60^{\circ}\text{C}$  之間。

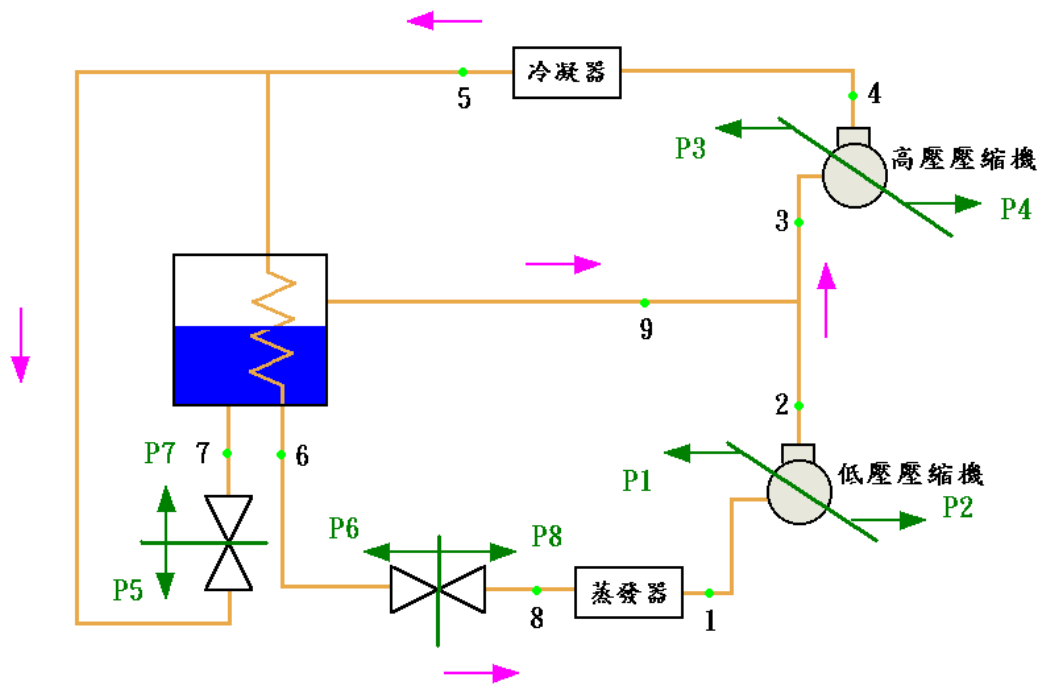


圖 2-4-1 二段壓縮冷凍系統循環

這是因為在常溫下能冷凝成液體的中溫冷媒再  $-65^{\circ}\text{C}$  以下所對應的飽和壓力很低,此時低壓端吸氣閥片的阻力損失對壓縮機性能影響很大,甚至都落在  $10\text{KPa}\sim 1\text{KPa}$  之間,此持低壓吸氣閥片不容易開啓而使冷媒吸入量減少,此時便需採用二元冷凍系統來做低溫的冷凍系統。

二元冷凍系統簡單的說是由兩個不同的冷媒系統所組成的如圖 2-4-3，分為高溫部份冷媒系統及低溫部分冷媒系統，高溫度通常採用 R-404A、R-22、R-134a、R-502，低溫部分則用 R-23 及 R508，在由中間冷卻器作熱交換，如此低溫側便可達  $-60^{\circ}\text{C}$  至  $-80^{\circ}\text{C}$ 。

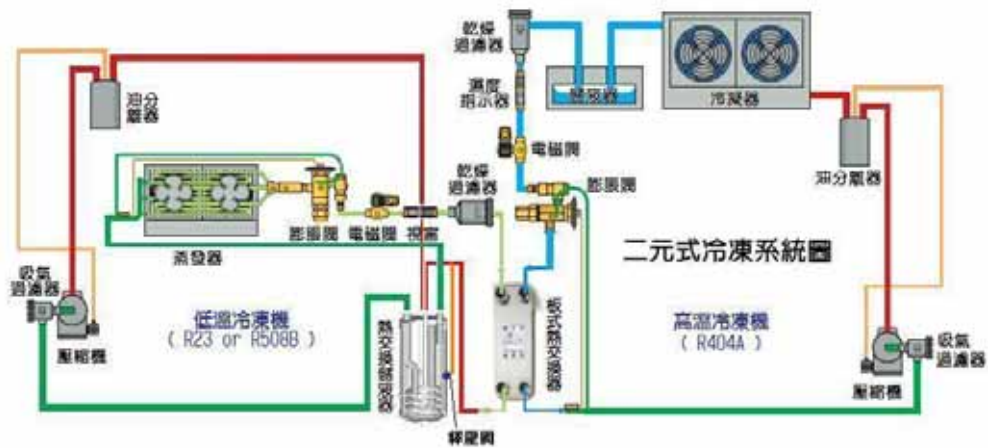


圖 2-4-2 二元冷凍系統循環

資料來源:佳光公司提供

## 2.5 冰昇華的條件

物質有三種型態存在於自然界裡，水的狀態與其溫度和壓力有關。圖 2-5-1 為水的狀態平衡圖，圖中 OA、OB、OC 三條曲線分別表示冰和水、冰和水蒸汽、水和水蒸汽兩項共存時期壓力和溫度之間的關係。分別有融化線、沸騰線和昇華線。此三條曲線將圖面分成 I、II、III 三個區域，分別稱為固相區、液相區和昇華區。箭頭 1、2、3 分別代表固態冰溶化成液態水、液態水蒸發成水蒸汽和固態冰昇華為水蒸汽。K 為臨界，其溫度為  $374^{\circ}\text{C}$ ，若水蒸汽溫度高臨界點，無論壓力在怎增加水蒸汽都無法凝結成水。

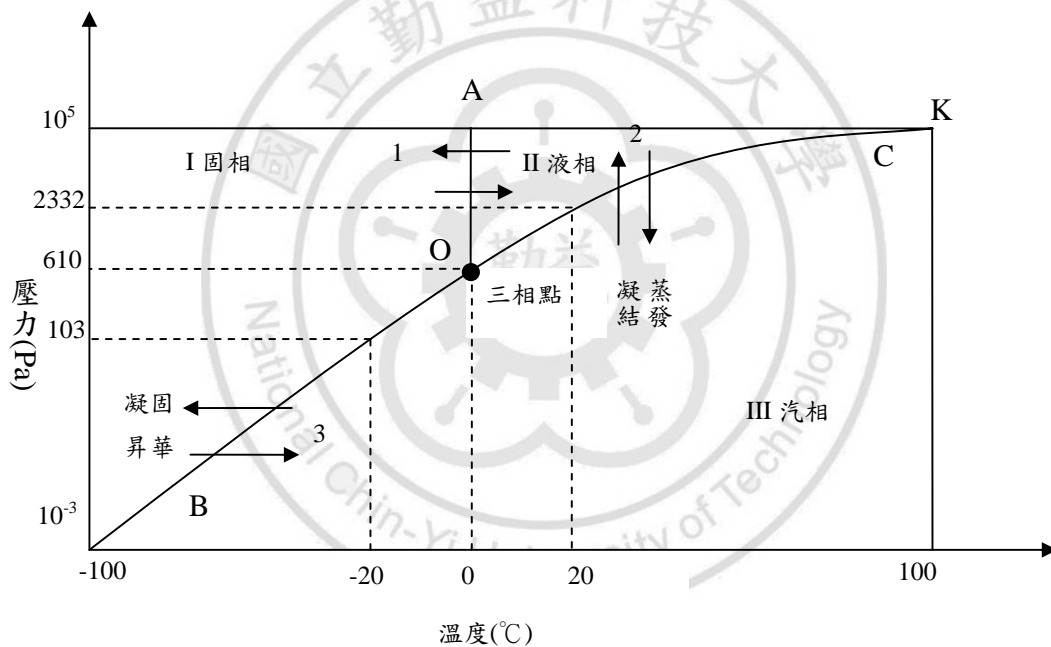


圖 2-5-1 水的狀態平衡圖



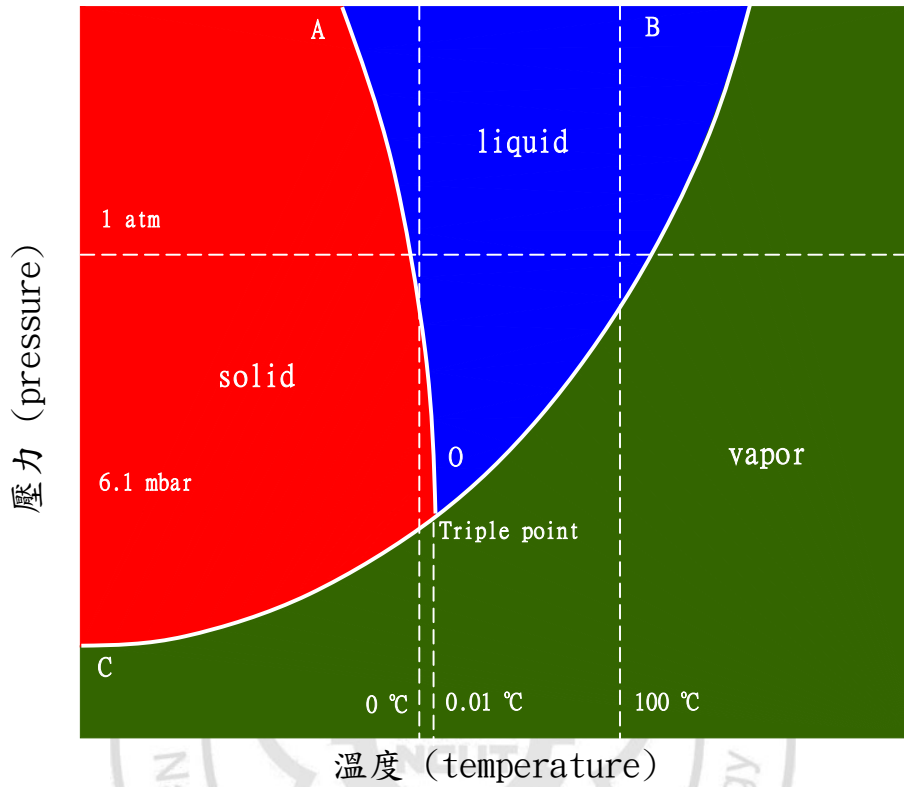


圖 2-5-2. 水的相圖 (the phase diagram of water)

根據熱力學平衡理論，水的三相點，在這樣的溫度和水蒸氣壓下，水、冰、水蒸氣三者可共存且相互平衡，如圖 2-5-1、溫度為 0.01 °C，水蒸氣壓為 6.11 mbar (4.58 mmHg, 611 Pa)，在水的相變化過程中，若持續的把壓力保持低於 611 Pa 且不斷對加熱即可由固態的冰不經液相變為汽態的水蒸氣昇華。

## 2.6 真空凍結乾燥原理

當溫度或壓力變化，就會發生一相到另一相的突變。冷凍到固態的水溶液，改變溫度或壓力就會發生由固態到氣態的相變-昇華。從理論上說，真空凍結乾燥的操作區域只需在水的三相點以下即可。但實際的操作條件要苛刻得多，通常在0.5~1.5mbar的真空度和-25°C左右溫度下如圖.2-6-1。故利用這些水分這項特點應用於真空冷凍乾燥(Lyophilization)中先把物料預凍成型，再以「低溫昇華」脫水，乾燥完成後便可使物料形體保持跟乾燥前幾乎相同。

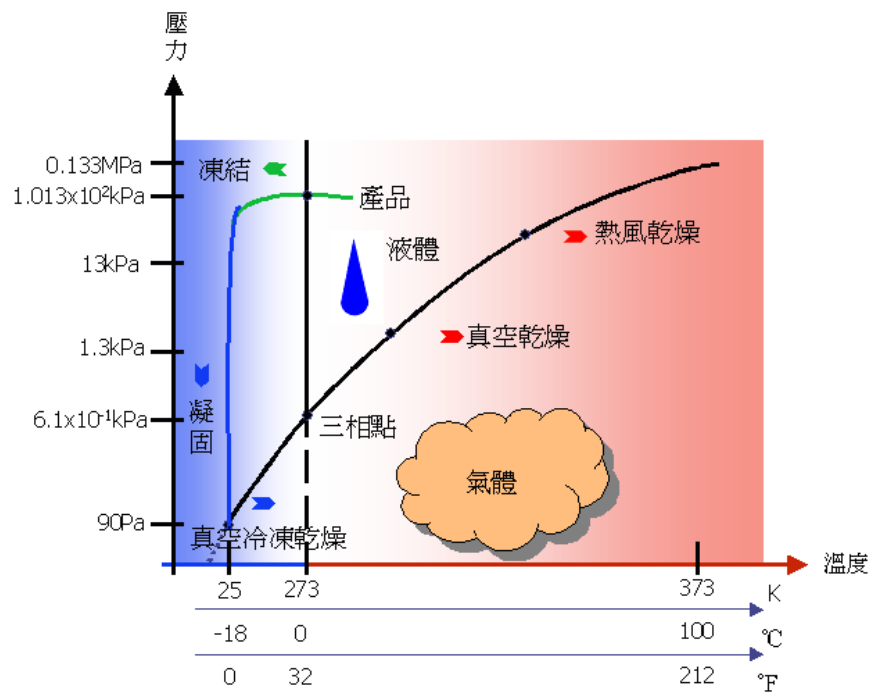


圖2-6-1 各種乾燥法應用範圍

### 2.6.1 預凍前處理階段

預凍前應對乾燥設備做消毒處理，常採用的方式有 1. 氣體殺菌法 2. 高溫殺菌法 3. 輻射殺菌法。需乾燥之食品亦須消毒處理例如一些蔬果可以利用殺菁來作為乾燥前的消毒工作，肉品亦可用紫外線做殺菌的工作而所要乾燥之產品厚度不宜過厚這些都將造成未來在乾燥製程中有極大的影響故在預動前處理階段就須有所注意。

### 2.6.2 預凍階段

在凍結過程中，物品的顯熱及潛熱的傳遞方式皆由傳導、對流及輻射來完成。預凍主要是將自由水凝固成冰晶，亦要保持產品再乾燥時，使在乾燥過程中外型不致於崩塌，因壓力降低，水的蒸發溫度也隨之降低，故預凍可避免在抽真空時表面的水分因壓力降低而水分沸騰而致使乾燥後產品外表的不美觀。過程需要急速凍結的方式進行，溫度降越低越快越好可使產品內部的冰核顆粒變小而多，不至於撐破細胞膜而改變產品在乾燥後的風味，但過低的溫度則會拉長乾燥的時間，一般皆取凍結至共晶點以下 5~10°C 即可。在水溶液溫度降到一定時，根據溶液共晶濃度，濃度淡溶液裏開始凍結，這個溫度就叫凍結點。一般來說凍結點受濃度的支配與濃度一起下降。溶液溫度低於結冰點時，溶液中的一部分會結晶析出，剩下的溶液濃度將會上升，就這樣結冰點下降，接著繼續冷卻，冰結晶隨著冷卻而增加，剩下的溶液濃度隨之而增大。可是溫度降到某一點時剩下的溶液就全部凍結，這時的凍結物裏混雜著冰晶體，這時的溫度就是共晶點。

溶液需要到達過冰點以後，其內產生晶核以後，自由水才會開始以冰的形式結晶，同時放出結晶熱使其溫度上升到冰點，隨著晶體的生長，溶液濃度的增加，當濃度達到共晶濃度，溫度下降到共晶點以下時，溶液就會全部凍結。

溶液結晶的晶粒數量和大小除了與溶液本身的溶液及溶質比例有關以外，還與晶核生成速率和晶體生長速率相關。而晶核成長速率和晶體生長速率這兩個因素又是隨溫度和壓力的變化而變化的，因此，我們可以通過控制溫度和壓力來控制溶液

結晶的晶粒數量和大小。一般來說，冷卻速度越快，過冷溫度越低，所形成的晶核數量越多，晶體來不及生長就被凍結，此時所形成的晶粒數量越多，晶粒越細；反之晶粒數量越少，晶粒越大。

溶液結晶的形式對凍乾速率有直接的影響。冰晶昇華後留下的空隙是後續冰晶昇華時水蒸氣的逸出通道，大而連續的六方晶體昇華後形成的空隙通道大，水蒸汽逸出的阻力小，因而製品乾燥速度快，反之樹枝形和不連續的球狀冰晶通道小或不連續，水蒸汽靠擴散或滲透才能逸出，因而乾燥速度慢。因此僅從乾燥速率來考慮，慢凍為好。



### 2.6.3 初級乾燥階段

凍結乾燥實際上是相當費時的，須慢慢的進行，而且凍結乾燥熱源供給也相當困難。

最初乾燥物料為冰塊昇華從表面開始。乾燥進行中物料分為乾燥部份和未乾燥凍結部分，在交接處進行昇華，昇華面漸漸往後退，乾燥部份的厚度會增加，但是凍結乾燥的固定程序會造成昇華潛熱供給的阻礙如圖 2-6-2。

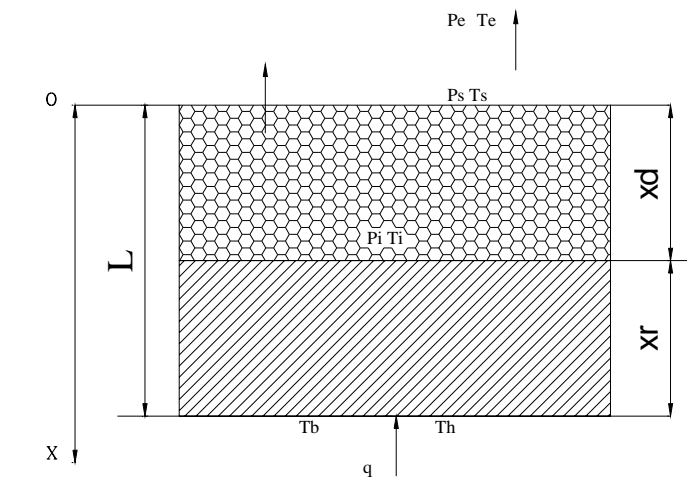


圖 2-6-2 製品乾燥後切面狀態

乾燥層內的傳質方程式為

$$G_1 = \frac{D}{RTx_d} (p_i - p_s) \quad (2-9)$$

以乾燥的通氣阻抗，昇華面的真空度降低，由於熱供給給昇華產生，昇華面的冰變成水蒸氣，但是，水蒸氣被以乾燥部分將通路阻塞而無法移除，從物品水蒸氣的蒸發而形成海綿狀的構造，對水蒸氣的通行造成阻礙。

設加熱溫度的接觸熱阻為  $1/\alpha (m^2 \cdot K/W)$ ，製品凍結層厚度為  $x_r (m)$ ，凍結層導

熱係數為  $\lambda_r \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$ ，熱量全部從凍結層傳入昇華介面，則從加熱板到昇華介面的總熱傳系數  $k_r$  為

$$k_r = \frac{\alpha \lambda_r}{\lambda_r + \alpha \chi_r} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (2-10)$$

當熱源供給的結果高於共融溫度時，昇華面的水蒸氣大量溢出，這結果造成真空被破壞凍結的部分被溶解，造成凍結乾燥失敗。

在理想的真空環境下。冰是不會融解的，但即使乾燥腔體的真空不管如何良好，昇華面的真空不好的話，凍結狀態也會突然崩解，凍結乾燥熱量的供給也變的困難，這就是乾燥時間會拉長的最大原因。

冰的昇華後會殘存濃縮體，超過共晶固化溫度，就會開始軟化，空洞脫離的出路也將被封閉，導致乾燥凍結失敗的原因，這個臨界溫度稱為崩解溫度如圖 .2-6-3。

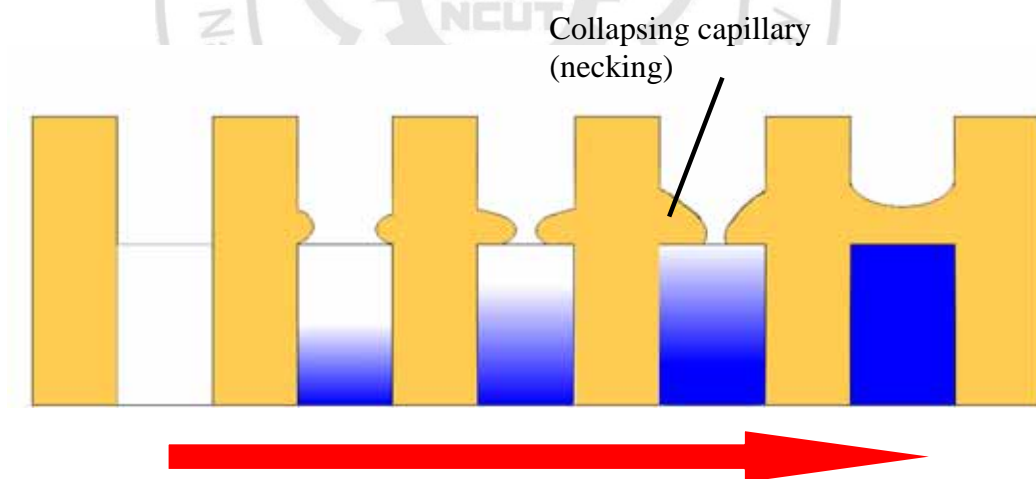


圖2-6-3.崩解模擬過

昇華乾燥室將水分以固態的冰晶下直接給予能量而漸漸昇華成汽態水蒸氣逐漸與乾燥物分離，因此溫度及壓力都必須相當的注意並控制在工作範圍內，才不致使冰晶溶化。乾燥物昇華受下列幾點因素影響：

- (1)產品本生溫度是否低於共晶溫度
- (2)壓力是否在水份為固態形式的工作壓力

### (3) 棚板加熱是否高於崩解溫度

爲了提高動乾層內氣體導熱係數，腔體內壓力愈高愈好，但過高的壓力會使水蒸氣不易從昇華面蒸發，造成昇華面溫度過高，建議一般壓力控制在 30~60Pa 即可。



#### 2.6.4 解析乾燥

解析乾燥也稱第二階段乾燥。在昇華乾燥結束後，產品內還存在 10%左右的水分以毛細現象吸附在乾燥物質的毛細管壁和極性壁面上，這一部分的水是未被凍結的。當它們達到一定含量，就會成為微生物的生長繁殖所需的養分和某些化學反應提供了條件。即使是單分子層吸附以下的低含水量，也可以成為某些化合物的溶液，產生與水溶液相同的移動性和反應性。因此為了改善產品的貯存穩定性，延長其保存期，需要除去這些水分，這就是解析乾燥的目的。

由於這一部分水分是由共價鍵相互連結要從物品中剝離是相當困難，因此要除去這部分水，需要克服分子間的力，需要更多的能量。此時可以把製品溫度加熱到其允許的最高溫度以下（產品的允許溫度視產品的品種而定，一般為 25℃ 至 40℃ 左右），維持一定的時間（由製品特點而定），使殘餘水分含量達到預定值，整個凍乾過程結束。

如果製品共晶點較高，系統的真真空度也能保持良好，凝結器的製冷能力充裕，則也可採用一定的升溫速度，將擱板溫度升高至允許的最高溫度，直至凍乾結束，但也需保證製品在大量昇華時的溫度不得超過共晶點。

在解析乾燥階段由於產品內逸出水份的減少，冷凝器溫度的下降又引起系統內水蒸氣壓力的下降，這樣往往使凍乾箱的總壓力下降到低於 10Pa，這就使凍乾腔體內對流的熱傳遞幾乎消失。為了改進凍乾腔體傳熱，使產品溫度較快地達到最高允許溫度，以縮短解析乾燥階段時間，要對凍乾箱內的壓強進行控制。

產品溫度到達許可溫度之後，為了進一步降低產品內的殘餘水份含量，需要恢復高真空度，同時，冷凝器由於負荷減少也達到了極限低溫，這樣凍乾腔體和冷凝器之間水蒸氣壓力差達到了最大值。這種狀況非常有利於產品內殘餘水份的逸出。

由於凍乾物品中的殘留水分對凍乾物品的影響很大，殘留水分過多，生化活性



物質容易失活，大大降低了穩定性。控制凍乾品中的殘留水分，關鍵在於第二階段再乾燥的控制。在這一階段中，溫度要選擇能允許的最高溫度；真空度的控制盡可能提高，有利於殘留水分的逸出；持續的時間越長越好，一般過程需要 4-6 小時；對自動化程度較高的凍乾機可採取壓力升高試驗對殘留水分進行控制，保證凍乾物品的水分含量少於 3%。在這階段物品加熱的容許溫度(一般約為 30°C)，需要精確的溫度監控裝置，並確定二次乾燥的最終溫度，乾燥時間過長將導致能源浪費、成本升高的不良後果。從另一個方面看，如果二次乾燥的溫度偏低，真空腔體真空度偏高，乾燥速度會很慢，當二次乾燥時間過短時，又會使產品水分含量超過標準，一般水真空乾燥完全後水份僅剩餘 5%左右。無因次水分含量可由下列式計算：

$$MC = (w_t - w_o) / (w_i - w_o) \quad (2-11)$$

$w_t$ : 乾燥時間為  $t$  時之樣品重

$w_i$ : 樣品初重

$w_o$ : 樣品固形物(乾物)重



### 2.6.5 乾燥後處理

當物品乾燥後水分含量相當低，故因利用真空包裝迅速與空氣隔離，避免乾燥物品在次吸收空氣中的水分，真空包裝的原理是通過抽取包裝內的空氣，然後使用非滲透性包裝膜進行密封包裝。其目的在於使密封空間內一直處於低氧、低濕的狀態，從而杜絕金屬製品表面發生銹蝕。

真空包裝法也稱減壓包裝法或排氣包裝法。在容器封口之前抽真空，這種包裝可阻擋外界的水汽進入包裝容器內，也可防止在密閉著的防潮包裝內部存有潮濕空氣，在氣溫下降時結露。



### 三、凍乾設備系統組成分析

產品的冷凍乾燥需要在一定裝置中進行，這個裝置叫做真空冷凍乾燥機。凍乾機主要由製冷系統、真空系統、熱媒系統、控制系統及箱體等組成。

製冷系統在凍乾設備中最為重要，被稱為“凍乾機的心臟”。製冷系統由製冷壓縮機、冷凝器、膨脹閥和蒸發器所構成，主要是為乾燥箱內製品前期預凍供給冷量；以及為後期冷阱吸收昇華後水汽熱量來供給製冷。

#### 3.1 壓縮機特性

本設備為單段全密渦卷式壓縮機如圖 3.1.1，渦卷式壓縮機主要由一對具漸開線型的渦卷件所組成，



圖 3.1.1 單段全密渦卷式壓縮機

其中一只繞動渦卷相對於另一只固定渦卷以公轉繞動的方式進行嚙合運動，運轉間可同時存在數個相互對稱的壓縮室，為目前唯一在運轉間能同時存在多個相互對稱壓縮室的壓縮機，其運轉平穩性遠優於一般傳統的壓縮機，尤其在省能型的變頻壓縮機上之應用，更具效益。因此，『效率高、靜音與良好的可靠度』是此新型壓縮機的特點，可謂為目前中小型冷凍空調產品的最佳心臟。下列為凍乾機所使用的壓縮機特性如附錄一。

### 3.2 真空腔體

乾燥腔體是凍乾機中非常重要的一環，它的性能好壞會影響到整個凍乾機的性能。凍乾箱外型可以是一個矩形或圓型的如圖 3.2.1 及 3.2.2，既能夠耐低溫到 $-60^{\circ}\text{C}$ 左右，又可以加熱到 $+60^{\circ}\text{C}$ 左右的真空密閉的高、低溫箱箱體且受到冷熱的衝擊下不至於使之變形或毀損。凍乾箱用不銹鋼製成，箱內表面粗糙度 $R\leq 0.6\mu\text{m}$ ，箱體內角均為滿足 GMP 條件的大圓角（ $R\geq 50\text{mm}$ ）。箱體底面略向後方傾斜，排水口設計在最低點，以利於排水。製品的冷凍乾燥是在乾燥箱中進行，在其內部主要有擱置製品的棚板。棚板採用不銹鋼製成，內部有並非實心而是有份佈均勻的流道分佈其中，可對製品進行冷卻或加熱，棚板溫度範圍 $-45^{\circ}\text{C}\sim+65^{\circ}\text{C}$ ，棚板溫度均勻度為 $\leq\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，拋光度 220grit，。



圖 3.2.1 乾燥腔體外觀



圖 3.2.2 乾燥腔體內部

凍乾箱可與無菌室的牆壁安裝如圖 3.2.3，箱門口使用特殊形狀矽橡膠條密封如圖 3.2.4，箱門口與凍乾箱內部有同樣的光潔度。



圖 3.2.3 腔體安裝於潔淨室



圖 3.2.4 腔門由矽橡膠密封

箱門的材料同樣採用優質不銹鋼製成，與凍乾箱內部具有同樣的光潔、平整度，能與密封條緊密貼合，確保了在真空下的密封。門中央應裝有觀察視窗如圖 3.2.5，材質應用雙層的強化玻璃可避免於低溫時有外部凝結水呈現冒汗現象玻璃厚度也應列於設計考量當中，防止再冷熱交替時造成玻璃碎裂。凍乾箱的箱門應有適當的開啓角度避免妨礙工作人員作業，便於在潔淨室觀察製品狀態。





圖 3.2.5 觀察視窗

箱門的平整性高，配有矽質單密封條的門封，箱門開啓方向爲順時針右開門（面對箱門鉸鏈在門右側）。真空腔體應有測試真空探頭，多支測試產品溫度用PT-100及破空閥。

### 3.3 凍乾機冷阱(Cold trap)

冷阱是一個真空密閉容器。在它內部有一個較大表面積的金屬吸附面，吸附面的溫度能降到 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下，並且能恒定地維持這個低溫。在製冷系統中，冷阱的作用是把凍乾箱內物品昇華出來的水蒸汽凝結吸附在其金屬箔片上，。從製品中昇華出來的水蒸氣能充分地凝結在與冷盤管相接觸的不銹鋼柱面的內表面上如圖 3.3.1，其各點溫度應保持均勻如此在凍乾過程時水份便能均勻的吸附在其表面上從而保證凍乾過程的順利進行。通常在冷阱捕水之前應先降溫，在行使抽真空如此便可避免部分水蒸氣未被凝結吸附在管壁時而使真空泵抽取至少許的不凝結氣體，當冷管表面溫度降至 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下。



圖 3.3.1 真空凍結乾燥機冷阱



冷阱結構，主要特點為：一是要捕水，管子外表面要結上一定厚度的霜，因此，鰭片或管壁間距要大於一般的熱交換器；二是結霜之後，不可有不凝結氣體通過冷阱被真空泵抽走，實際上冷阱的特點是：冷負荷變化大，其最小負荷與最大負荷的差距甚大，也即在解析乾燥後期，冷凍機幾乎處於“零負荷”下工作；所有冷凝盤管在凍乾週期中不能停止供冷，否則會出現被凝結水的遷移，而在被乾燥物品吸收造成乾燥失敗；工作溫度低，時間長；每一凍乾週期均需由常溫降至工作溫度。



### 3.4 真空系統

製品中的水分只有在真空狀態下才能很快昇華，達到乾燥的目的。凍乾機的真空系統由凍乾箱、冷凝器、真空閥門、真空泵、真空管路、真空測量元件等部分組成。

系統採用真空泵組，組成強大的抽吸能力，在乾燥腔室和冷凝器形成真空，一方面促使乾燥腔室內的水份在真空狀態下蒸發（昇華），另一方面該真空系統在冷凝器和乾燥腔室之間形成一個真空度梯度（壓力差）。使前箱水分昇華後被冷凝器捕獲。

真空系統的真空度應與製品的昇華溫度和冷凝器的溫度相匹配，真空度過高或過低都不利於昇華，乾燥箱的真空度應控制在設定的範圍之內，其作用是可縮短製品的昇華週期，對真空度控制的前提是真空系統本身必須具有很少的洩漏率。真空泵有足夠大的功率儲備，以確保達到極限真空度。



### 3.5 控制系統

凍乾機的控制系統是設備的下命令的中樞。冷凍乾燥的控制包括製冷機、真空泵和加熱泵的起、停，加熱功率的控制，溫度、真空度和時間的測試與控制，自動保護和報警裝置及歷史資料紀錄與收集等。根據所要求自動化程度不同，對控制要求也不相同，可分為手動控制（ON-OFF），半自動控制、全自動控制和微機控制四大類。

冷凍乾燥過程對控制系統的要求：

- (1)能夠將凍乾曲線數值存儲在硬碟中，並能在電腦螢幕上進行即時顯示和歷史資料顯示，且支援即時列印。這些曲線包括：A：物料溫度曲線；B：板層溫度曲線；C：凝結器溫度曲線；D：真空度曲線；
- (2)控制系統的測量誤差：溫度 $+1.0^{\circ}\text{C}$ ，真空度 $+10\text{Pa}$ ·產品最終含水量 $+1\%$
- (3)該系統能根據不同的產品設定或修改物品凍乾曲線即配方表，在凍乾過程中通過調節加熱板的溫度、供熱量、箱體真空度、水汽凝結器的溫度使物料跟蹤設定曲線；
- (4)對水汽凝結器的溫度進行設定，通過控制製冷機能量調節器來跟蹤設定溫度和時間與溫度的分段控制；
- (5)對箱體內真空度能夠設定，並通過二通電動閥來調節所要求真空度的開度；
- (6)系統需有自我檢測功能
- (7)故障報警及處理，包括真空機組啟動壓力，凍乾過程中真空度超過設定值的報警和有關資料顯示；
- (8)可遠端監控即透過網路可從任何地方達成監視甚至可監控。

利用可程式控制編程式，與其他儀錶相配合，控制整個凍乾過程，直到凍乾結束後自動停車並通知相關人員，這樣的凍乾機控制系統稱為微處理控制系統。微處理機控制系統由可編程式控制器、觸摸屏(HMI)、記錄儀、PC機、印表機、輔助繼電器，感測器等設備組成。

#### 1. DDC（直流數位控制器）

微處理機控制系統的核心是可程控制器，它的輸出部分主要用於控制各種閥類和驅動電機。另有一路DDC控制輸出控制乾燥箱製冷電磁閥、加熱回路的輔助繼電器。其輸入部分主要接收各類保護繼電器的動作信號。其通訊介面普遍用RS-485、RS232或RJ45的方式，進行資料交換。DDC本身有基本的I/O點並可在有限的空間下擴充I/O模組，本身配備已有RS-485及RJ-45的介面。DCC是設備的控制中樞，負責各元件與電控系統之間的通信工作。

## 2. 控制電腦（PC機）

控制電腦用來運行自動程式，顯示並記錄現場的溫度、壓力、真空度等資料。凍乾結束後列印資料或儲存於硬碟中做為歷史檔案。

## 3. 觸摸屏（HMI）

觸摸屏本身是一台電腦，因此它具有電腦的所有特徵。但又不同於電腦，它的操作是靠按接觸螢幕。可以用形象化的圖形或文字來提示按鍵的作用，因此操作非常簡單。觸摸屏主要是在現場人員對凍乾機進行溝通操作故又稱為人機，是設備的主控平臺，在螢幕上可控制主機及各閥門元件。觸摸屏能運行手動或自動程式，且能記錄曲線資料。

## 4. 溫度感測器

考慮要求的控制精度較高，溫度感測器選用pt100 型鉑熱電阻溫度感測器。pt100測溫精度高、穩定性好，非常適合-200~+650℃溫度範圍的精確測量，由於感測器電阻 $r_t$ 和溫度 $t$ 之間的關係是非線性的，為消除非線性對測溫精度的影響，設計非線性的校正電路，且考慮採用四線制接法來消除引線電阻的影響。

## 5. 壓力感測器

真空壓力感測器採用電阻矽管，測量範圍在0.1~10Torr之間經儀錶轉換成4-20mA信號送到DDC，蒸汽壓力感測器測量範圍在0~40Bar直接轉換成4~20mA信號送到DCC。

## 6. 壓力保護開關

系統中用於保護作用的高壓、低壓、油壓差、水壓、壓縮空氣壓力、電子熱

保護等控制器。由於系統中有電腦的存在，因此要求用戶的供電電網波動及波的干擾小。控制系統專門為冷凍乾燥機而設計，系統具有連鎖保護，以防止不必要的誤動作。

凍乾機各個組成系統的正常工作是凍乾機運行的基礎。充分運用微機處理機技術對各個組成的控制進行合理的監控是一種節能而又高效的方法。



#### 四、凍乾實驗差異性分析

強制通風式凍乾系統與接觸式凍結式凍乾系統在凍乾過程中及凍乾後產品優劣及各項數據差異性比較。

##### 4.1 真空凍結乾燥前共晶點量測

本實驗將需乾燥物品中藥量測其共晶點方法數據如下，溶液的結冰過程與純液體也不一樣，純水在 0°C 時結冰，水在相變化過程溫度並不下降，直到全部水結冰之後溫度才下降，這說明純液體有一個固定的結冰點。而溶液卻不一樣，它不是在某一固定溫度完全凝結成固體，而是降至某個溫度點晶體慢慢釋出，溫度愈低，晶體就愈多凍結至某個溫度點溶液中已無液體，此溫度稱為共晶點。

共晶點於真空冷凍乾燥是極為重要的參數也是影響凍乾後成品良窳關鍵點，亦是真空凍結乾燥預凍過程的最終溫度，假使最終溫度過高在凍乾抽真空時容易造成股泡現象，倘若最終溫度過低則始製程時間拉長耗損不必要之能源、時間及人力，故測量出共晶點時為凍乾製程步驟中極為重要的一環。

共晶點簡易的量測法為利用高阻計及溫度測量設備，如下圖 4.1.1.



圖 4.1.1. 簡易共晶點測量圖

純水並不會導電，而水溶液中有些許的礦物質，導致水溶液電阻值偏低有導電特性，而溶液晶體少時原子間的活動較為激烈，當溶液降至共晶溫度，晶體多原子間的活動也較為穩定，此時電阻值趨大，故此點為溶液之共晶溫度。

表 4.1.1. 共晶點溫度點阻值表

溫度(°C)	阻值(MΩ)	溫度(°C)	阻值(MΩ)	溫度(°C)	阻值(MΩ)
-1	0.000	-11	0.030	-21	0.310
-2	0.001	-12	0.035	-22	0.410
-3	0.002	-13	0.036	-23	0.530
-4	0.003	-14	0.042	-24	0.650
-5	0.005	-15	0.055	-25	0.680
-6	0.008	-16	0.075	-26	0.860
-7	0.010	-17	0.105	-27	0.990
-8	0.012	-18	0.130	-28	1.250
-9	0.020	-19	0.180	-29	1.850
-10	0.025	-20	0.240	-30	2.500

由上表看出溫度愈低中藥本身的阻值亦隨溫度降低而增加，當凍結至-2°C時高阻計已可以明顯的讀出數值為 0.001MΩ。當溫度凍結至-27°C 阻抗為 0.99 MΩ，-28°C 阻抗為 1.250MΩ 之間相差 0.26 MΩ。-29°C 阻抗為 1.850MΩ 與-19°C 阻抗相差 0.6 MΩ。-30°C 阻抗為 2.500MΩ 與-29°C 阻抗相差 0.65 MΩ，發現電阻差至-21°C 後並沒有增大，即-27~-28<-28~-29=-29~-30。故在-29°C 時冰晶的生長率並無明顯的增加因此判斷此點為中藥之共晶點。

## 4.2 典型蒸汽壓縮系統凍乾機流程

凍乾機是由上述各部元件製冷系統、真空泵、熱媒系統及微電腦控制系統所組合而成的，然而在系統上的搭配會因設計點的不同而造成性能上的差異。此流程為高溫高壓氣態冷媒經由冷凝器將冷媒冷凝成高壓常溫液態冷媒，在經由膨脹閥將高壓常溫的液態冷媒膨脹為低壓低溫的液態冷媒，再經由蒸發器低壓低溫的液態冷媒由風車將要凍乾的物料降溫至共晶點，此時冷媒已在蒸發器蒸發為低壓低溫的氣態冷媒在回到壓縮機，圖 4.2.1 為流程圖，當被乾燥物料也被凍結至設定溫度此時由為電腦控制器下命令來啟動真空泵當真空度到達 0.3Torr 時，在由熱媒泵來提供熱源已提昇乾燥速率。





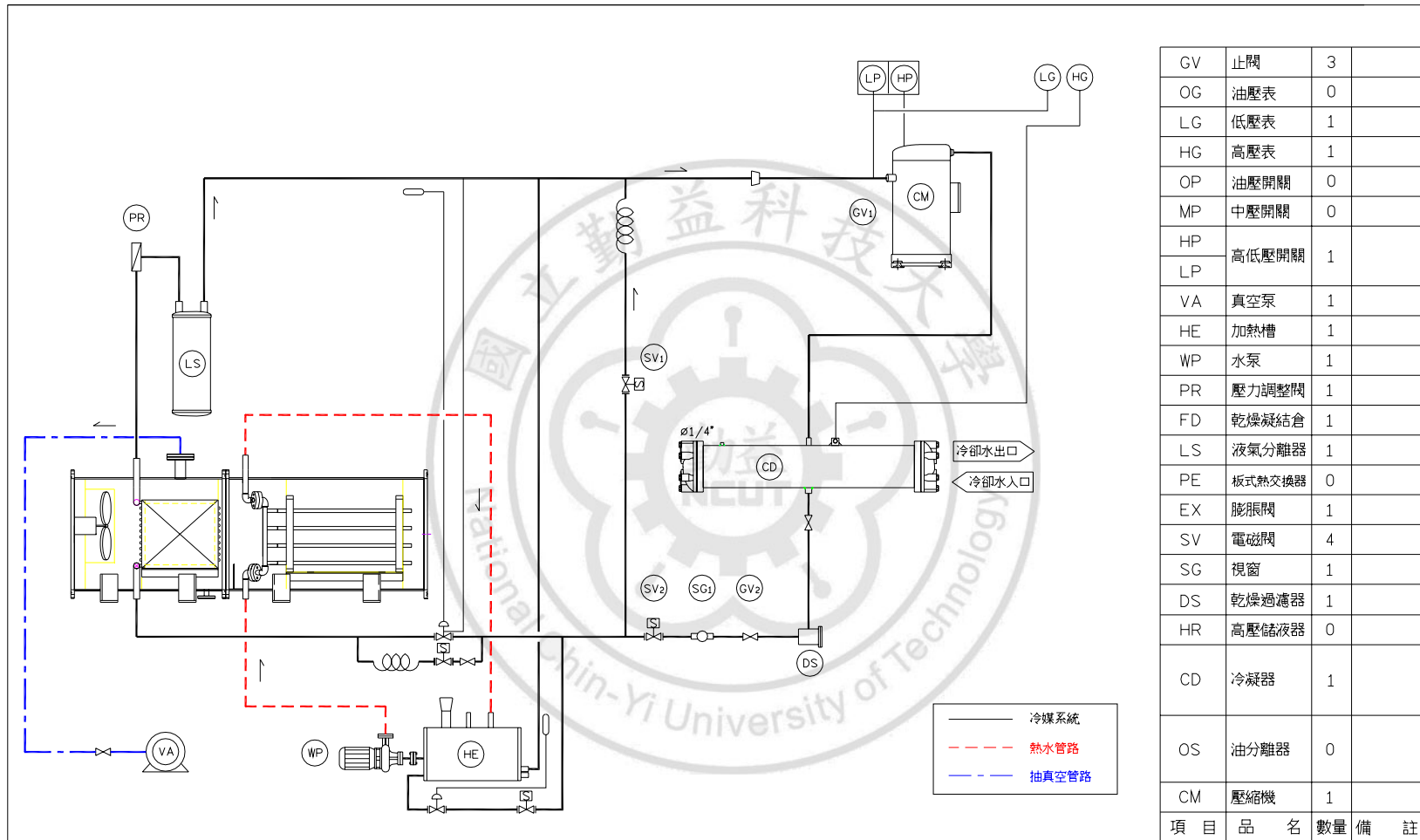


圖 4.2.1 單段系統流程圖

此製冷系統為典型的蒸氣壓縮製冷系統，冷卻物料方式為強制通風冷卻，此系統在冷凍物料厚度皆在 1cm 以內至所需溫度上時間頗長且吸收物品熱量有限，僅可把物料溫度在 288 分鐘內由常溫降至 -22°C，如圖 4.2.2。此系統不管在能源上，時間上皆是相當的浪費及物料乾燥的程度上、捕捉水氣的效率上，乾燥物品製作種類皆相當有限故此系統有相當大的改善空間。

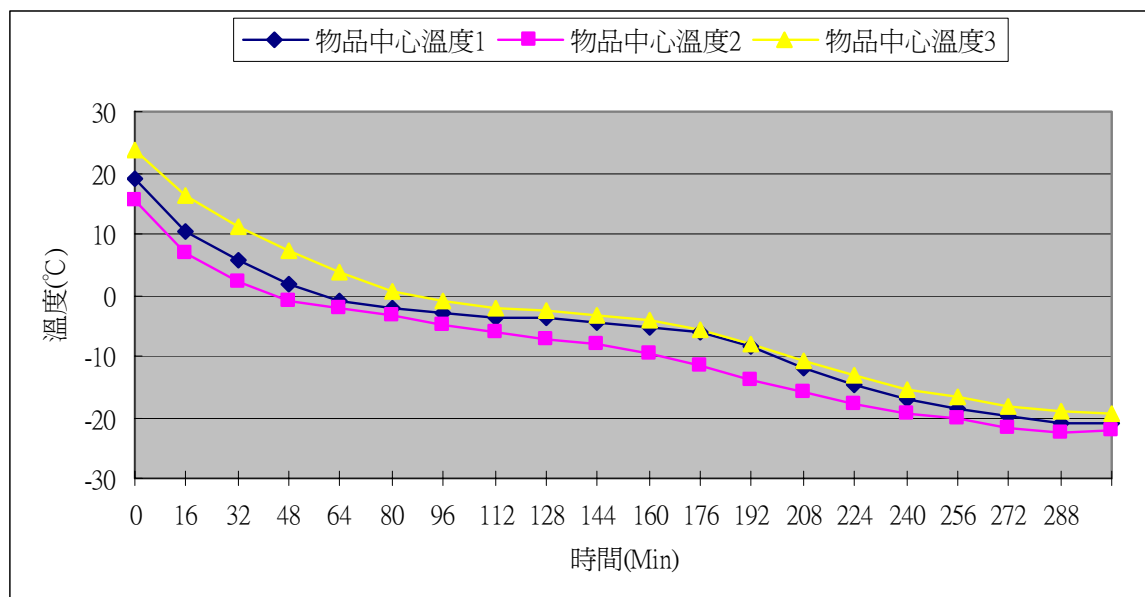


圖 4.2.2 單段系統物品凍結速率

上述系統缺失裡整理出了有四項：

1. 凍結時間過長
2. 能源浪費過甚
3. 捕水效率過差
4. 乾燥物料種類過少

凍結時間過長凍乾機為強制通風冷卻導致乾燥物料無法得到良好的熱交換導致物料溫度無法迅速降至設定點。因空氣的熱傳系數較差使過多的能量不知不覺的流失而延長了設備運轉的時間，造成了無形的浪費。捕水效率過差及乾燥物料種類過少皆與先前第二章第四節所討論冷凍系統的特性相關。

真空凍乾製程

真空凍結乾燥分為：1. 預凍前處理 2. 預凍階段 3. 初級乾燥 4. 解析乾燥。

- a. 量測出乾燥物品之共晶溫度點
- b. 將欲凍乾之物品取 10 克凍結至低於共晶點

- c. 完成預凍過程後再由真空泵抽真空至 0.3~0.6mTorr 之間
- d. 真空度到達後啟動熱水循環系統
- e. 量測各點的溫度狀況紀錄時間
- f. 量測乾燥後重量

量測出共晶點後將中藥放入真空凍乾設備，因共晶點為  $-29^{\circ}\text{C}$  但強制通風凍乾系統僅可把品溫降至  $-20^{\circ}\text{C}$  左右故把凍結溫度設定為  $-20^{\circ}\text{C}$ ，當物品到達設定溫度時，真空泵立即啟動將真空度抽取至 0.3~0.6mTorr 之間再利用真空冷凍的特性使產品溫度再降至  $-30^{\circ}\text{C}$  左右在啟動熱媒泵來增加凍乾物品昇華所需的熱量後，在觀察物品再凍乾期間的變化及完成後的結果，凍乾曲線如下圖 4.2.3

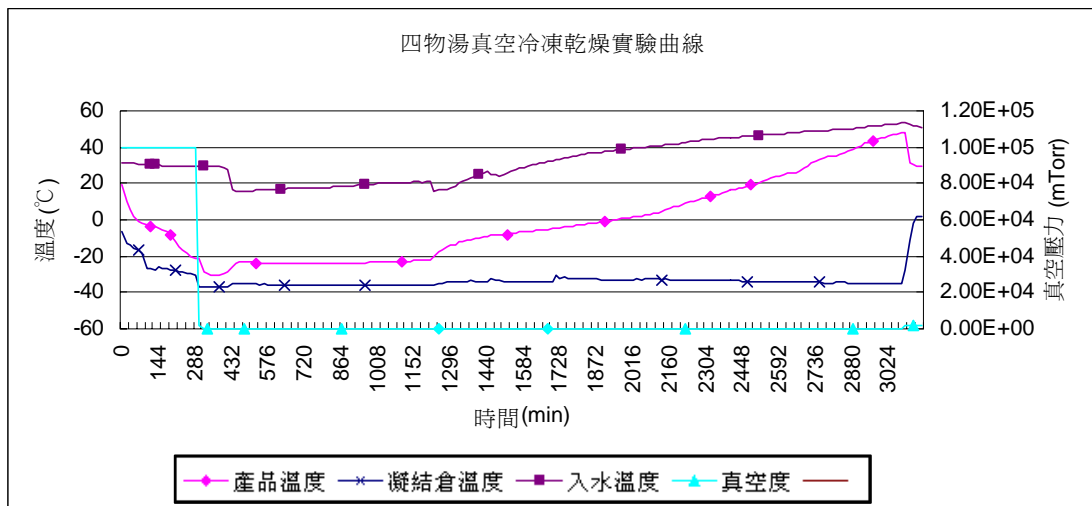


圖 4.2.3 中藥真空冷凍乾燥實驗曲線

因系統僅可把產品溫度降至  $-20^{\circ}\text{C}$  在配合真空冷凍的特性再將物品降溫至  $-30^{\circ}\text{C}$  如圖 4.2.4。



圖 4.2.4 中藥凍結情形(-20°C)

在啓動真空泵，因物品無法降溫至低於共晶點 5~10°C 之安全範圍值，此時並不適合開啓熱媒泵來提供熱源，因熱媒溫度高於共溶溫度時會發生崩解現象如圖 4.2.5，如此加熱溫度已高於產品的共溶溫度導致產品溶解造成乾燥物變形。



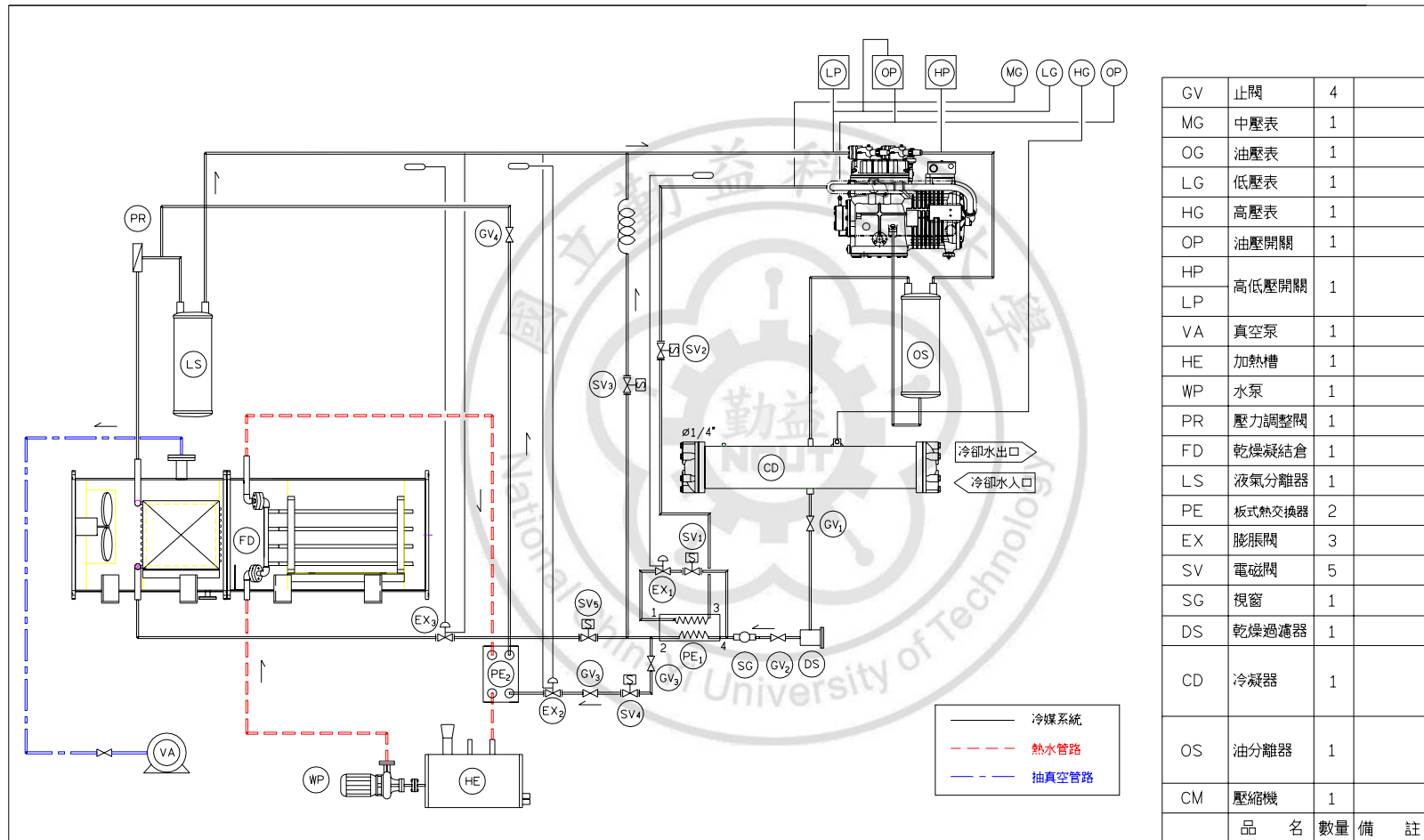
4.4.5 凍乾後的物品發生崩解現象

乾燥後物品僅剩 3 克，此系統熱媒溫度無法降溫使棚板加熱量溫度過高，而導致產品的崩解，亦是此系統缺點之一。

#### 4.3 雙段蒸汽壓縮系統凍乾機流程

此流程為高溫高壓氣態冷媒經由冷凝器將冷媒冷凝成高壓常溫液態冷媒在通過板式熱交換器前部分冷媒分流至中壓膨脹閥後降壓再與板式熱交換器裡的高壓常溫的液體冷媒做熱交換的，熱交換後的冷媒再回中壓吸入端，此時液管冷媒也為低溫狀態液態冷媒，再經由低溫膨脹閥降壓後可將蒸發溫度降為 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下。因前系統利用強制通風把被乾燥物品熱量帶走此方法造成了，凍結時間拉長、能源耗損故雙段系統更改為利用接觸式凍結的方式來把物品的熱量帶走，此時液管冷媒也為低溫狀態液態冷媒在經由低溫膨脹閥降低壓力與溫度後再與板式熱交換器與滷水槽裡的滷水做熱交換在利用滷水泵將 $-50^{\circ}\text{C}$ 的滷水送往棚板內部流動直接接觸來吸收乾燥物品之熱量，圖 4.3.1 為流程圖，





4.3.1 二級壓縮系統流程

此製冷系統為雙段壓縮製冷系統，冷卻物料方式為接觸式凍結方式，此系統在冷凍物料厚度皆在 1cm 以內可把物料溫度在 320 分鐘內由常溫降至 -40°C 以下,如圖 4.3.2.。

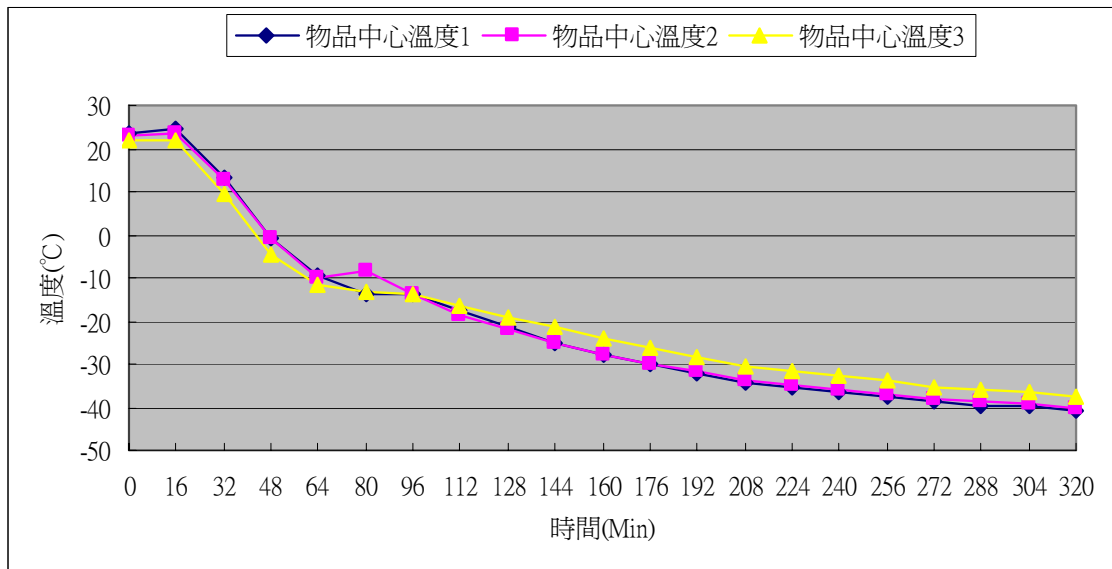


圖 4.3.2 二級系統物品凍結速率

#### 真空凍乾製程

真空凍結乾燥分為:1.預凍前處理 2.預凍階段 3.初級乾燥 4.解析乾燥。

- a. 量測出乾燥物品之共晶溫度點
- b. 將欲凍乾之物品取 10 克凍結至低於共晶點
- c. 完成預凍過程後再由真空泵抽真空至 0.3~0.6mTorr 之間
- d. 真空度到達後啟動熱水循環系統
- e. 量測各點的溫度狀況紀錄時間
- f. 量測乾燥後重量

量測出共晶點後將中藥放入真空凍乾設備，因共晶點為 -29°C，此系統為雙段壓縮直接接觸凍結方式故可將品溫降至 -40°C，可降低崩解現象的機率，凍乾曲線如下圖 4.3.3

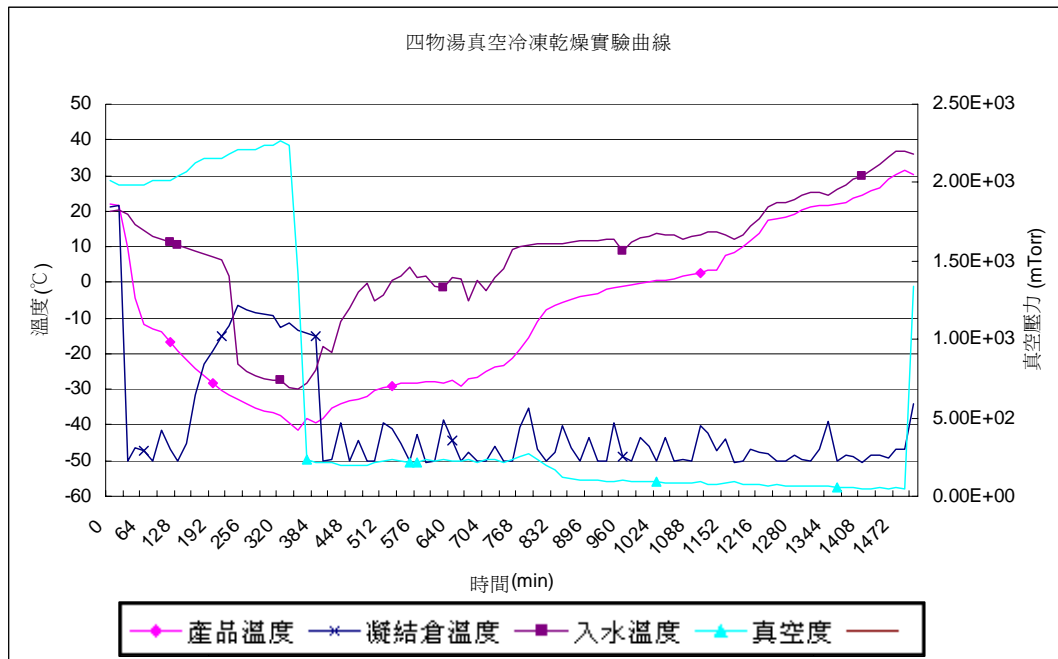


圖 4.3.3 中藥真空冷凍乾燥實驗曲線

製作過程中先把物料預凍至 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下再進行抽真空如圖 4.3.4。抽真空後 8 分鐘抽至 0.3Torr 後加熱泵隨之運轉。



圖 4.3.4 中藥凍結情形( $-40^{\circ}\text{C}$ )



乾燥後物品僅剩 3 克，因凍結時是靠接觸式凍結的方式，滷水以先行被降溫至  $-30^{\circ}\text{C}$ ，故在啓動滷水泵時，可減少崩解的現象。因棚板加熱量為  $-10^{\circ}\text{C}$  為緩慢的加熱無劇烈的變動，故減少了崩解之現象，如圖 4.3.5



4.3.5 凍乾後的物品外觀



#### 4-4 實驗後數據差異分析

以兩個不同凍乾系統在各歷史趨勢中，擷取在預凍時及凍乾後的相關數據做交叉分析比對各系統的憂劣。

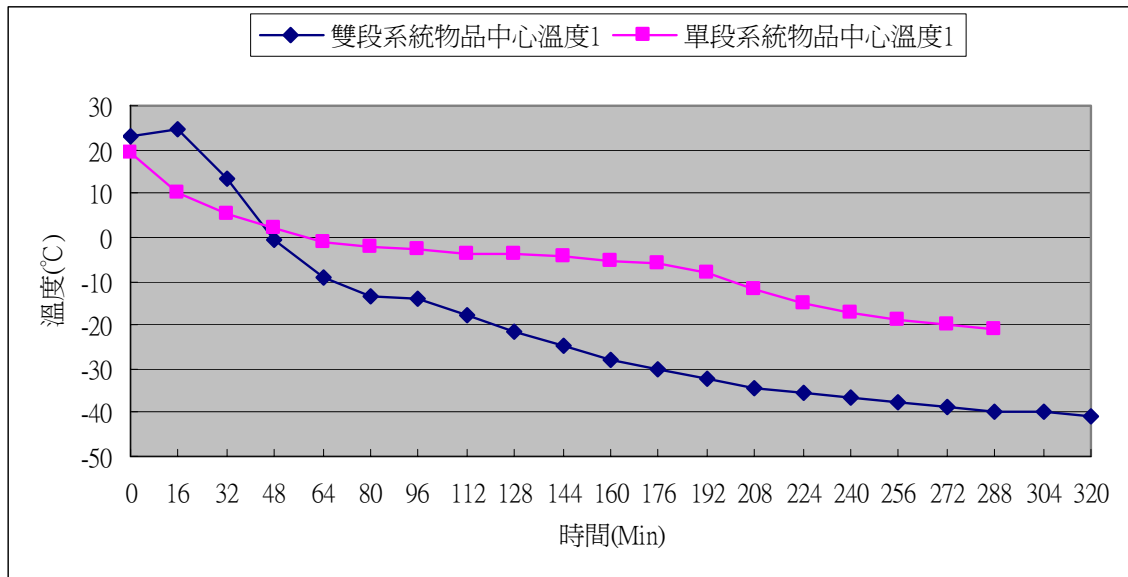


圖 4.4.1 系統物品 1 凍結速率比較圖

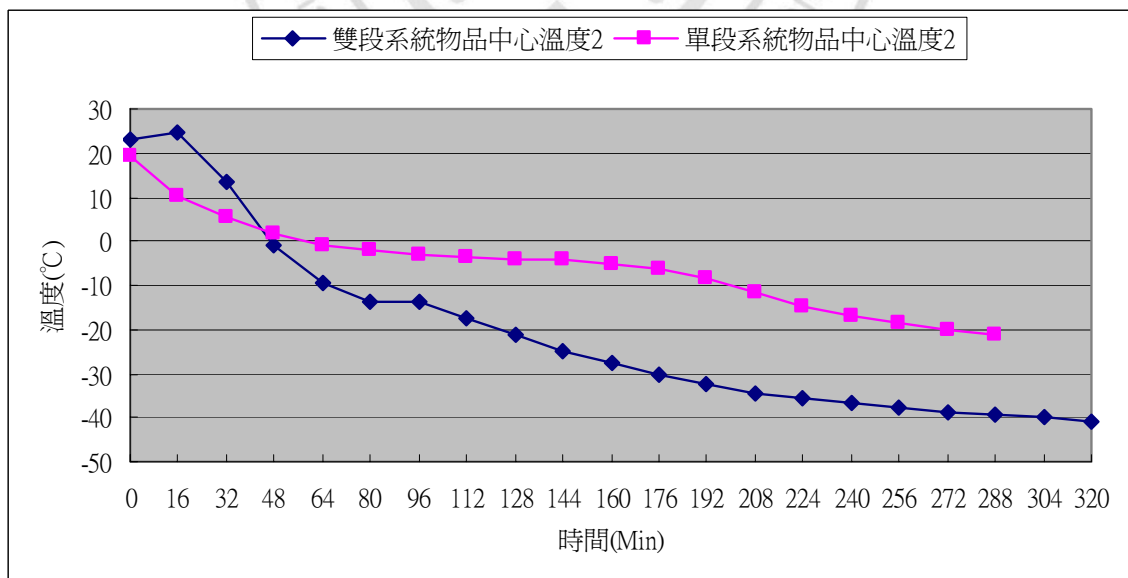


圖 4.4.2 系統物品 2 凍結速率比較圖

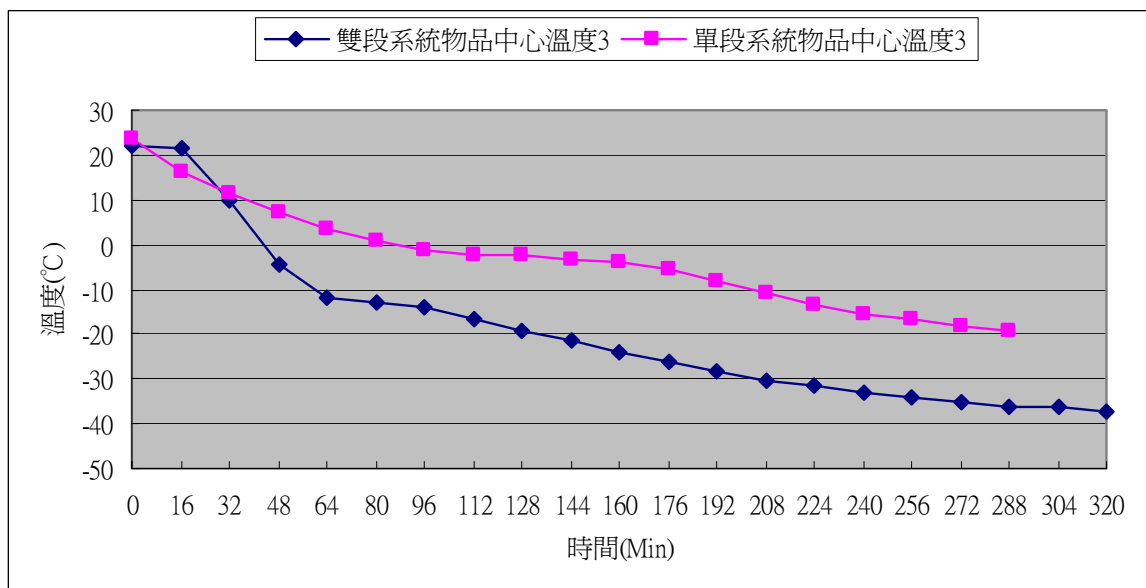


圖 4.4.3 系統物品 3 凍結速率比較圖

由圖 4.4.1~4.4.3 顯現出物品的凍結點相差了 20°C，在雙段壓縮機接觸式冷凍系統中我們可看到物品的凍結溫度可到達 -40°C 而單段壓縮機強制通風冷凍系統中僅可把產品溫度降至 -20°C 如下表 4.3.1，而花費的時間上雙段壓縮機接觸式冷凍系統將溫度降至 -20°C 所需花費時間僅需要 128 分鐘，而較單段壓縮機強制通風冷凍系統的 288 分鐘縮短了 160 分中的時間如下表 4.3.2，如此所節省下的時間與能源是相當可觀的，再者單段壓縮機強制通風冷凍系統凍結溫度僅只能到達 -20°C 故共晶點低於 -20°C 的物品並不適用所能乾燥的產品種類也是有限的，而雙段壓縮機接觸式冷凍系統可到達 -40°C 甚至更低故市面上所看到的物品皆可凍結至其共晶點。

表 4.4.1 系統時間交叉比對表

類型 時間(min)	單段壓縮機強制通風冷 凍系統品溫(°C)	雙段壓縮機接觸式冷 凍系統品溫(°C)
48	0	0
288	-21.05	-38.76
320	-21.05	-40.12

表 4.4.2 系統溫度交叉比對表

類型 溫度(°C)	強制通風冷凍系統凍結 時間(min)	接觸式冷凍系統凍結 時間(min)
0	48	48
-20	288	128
-40	無法達到	320

在凍乾過程中，棚板加熱量的控制亦是成敗的關鍵相當重要的一環，穩定的棚板加熱量是可減少凍乾物品發生崩解的機率，單段系統中初始棚板加熱量為常溫 30 °C，此溫度有可能高於凍乾物品的共溶溫度造成局部的崩解及內部塌陷，影響水分析出的通路，導致凍乾製程時間拉長甚至乾燥失敗。而在雙段系統裡，入熱溫度為凍結溫度，產品溫度與棚板加熱量小，且可控制，故入熱溫度無高於共溶溫度之困擾如圖 4.4.4。

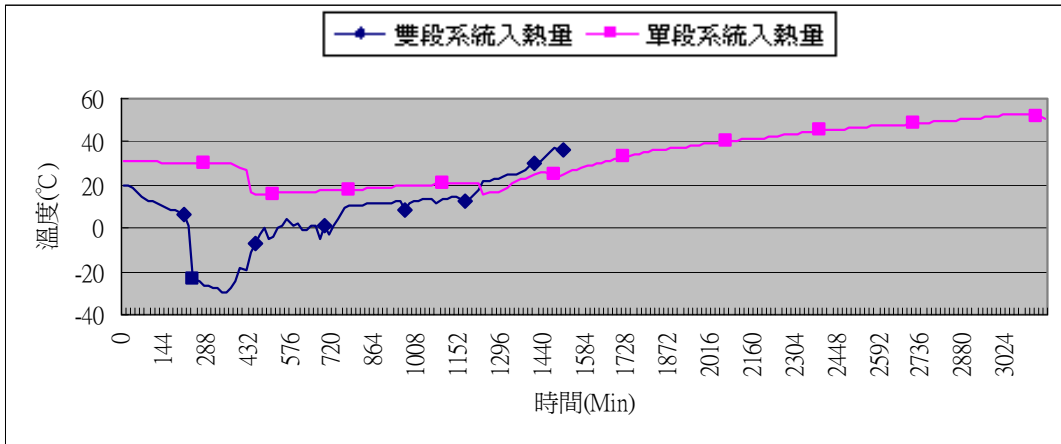


圖.4.4.4 系統棚板加熱量差異性



## 五、結論與展望

### 5.1 結論

本研究在單段系統裡蒸發溫度僅可到達 $-30^{\circ}\text{C}$ ，則產品凍結溫度約只能凍結至 $-20^{\circ}\text{C}\sim-25^{\circ}\text{C}$ ，此範圍可製作的凍乾物品有限，低凍結溫度之產品並不適用。在預凍過程中時間過長，對系統的效率大打折扣，棚板加熱量為常溫 $30^{\circ}\text{C}$ 過高且不易控制，容易使物品在初級乾燥過程中，會有崩解現象發生。

而我們把系統修改更換了雙段壓縮機使系統蒸發溫度達到 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下，改善了凍結溫度過高的缺點使產品凍結溫度可達到 $-40^{\circ}\text{C}\sim-45^{\circ}\text{C}$ 之間和系統管路上增加了板式熱交換器使控制棚板加熱量的滷水可以與冷媒做熱交換而可得到穩定的棚板加熱量。而初始的棚板加熱量也從 $30^{\circ}\text{C}$ 改善為 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下，可減少乾燥局部加熱量過高而塌陷的現象。

在凍乾時間上原始系統因棚板加熱量過高，使凍乾物品造成塌陷，如此擋住了水分析出的通路，而拉長了凍乾製程的時間。因修改後的系統凍乾物品無崩解現象發生，在乾燥過程相當順利，水分析出的通路也未被阻擋住，因此凍乾製程時間也因此而大大的縮短。而在現今能源匱乏的時代裡，如此在系統上稍做改善便提高設備的性能可減少不必要能源的浪費，並提高凍乾物的品質，延長保存期限。

## 5.2 展望

冷凍真空乾燥過程包括冷凍、昇華乾燥和解析乾燥三個階段。這三個階段中每個階段都包含著複雜的傳熱傳質過程。凍乾理論研究實際上就是研究每個階段的傳熱傳質特性和控制、強化傳熱傳質速率的方法。理論研究不僅可以指導工藝試驗，優化凍乾工藝，減少新產品的開發時間，而且還有助於提高產品品質，降低生產成本，改進凍乾設備結構和性能。

凍乾設備在硬體上及技術上已有相當的程度；但每一批次的製程時間稍長，往往都要有專業的技術人員在一旁觀察乾燥過程的情形來改變製程，若在控制上增加了”配方的控制”如此便可減少不必要的人力資源，且現今網路如此發達，要從世界各地來監看該設備的狀態亦非難事，現今凍乾機若結合了「配方」及「遠端監控」之功能，如此便可讓凍乾的製程上事半功倍。



## 參考文獻

1. 經濟部工業局,2003,11月「乾燥技術效率提升手冊」,.
2. 李良梧,2001,8月,空氣調節與空氣污染工程學,全華科技圖書出版社
3. 蘇清森,1990,真空技術,東華書局
4. 趙鶴皋,鄭效東,黃良瑾,季樹廣,2005,冷凍乾燥技術與設備,華中科技大學出版社
5. 許敦復,鄭效東,2005,冷凍乾燥技術與凍乾機,化學工業出版社
6. Kobayashi,M,1991:Vial variance of the sublimation rate in shelf freeze-drying.Paper 312.International Institute of Refrigeration(IIR),Montreal.
7. Bardat,A.,Biguet,J.,Chatenet,E.,Courteille,F,1993:Moisture measurement:a new method for monitoring freeze-drying cycles.PDA j.Parenteral Sci.Technol.47,293-299.
8. Thijssen,H.A.C.,Rulkens,W.H,1969:Effect of freezing rate on rate of sublimation and flavour retention in freeze-drying,pp.99-114.  
Thijssen,H.A.C.,Rulkens,W.H.1968:Retention on aromas in drying food liquids.De Ingenieur,Chemische Techniek (Niederlande)80,45-56.
9. H.-P. Cheng, C.-T. Lin 78 (2007).The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process, Journal of Food Engineering .569 - 576.
- 10.Wu, Takahiro Orikasa , 83 (2007)Journal of Food Engineering 422 - 429.
- 11.V. Fernandez-Pereza, J. Tapiadorb, A. Martnc, M.D. Luque de Castro, 2004.Optimization of the drying step for preparing a new commercial powdered soup,Innvative Food&Emerging Technologies.
- 12.Hsu,C.C.,Ward,C.A,Pearlman,R.,Nguyen,H.M.,Yeung;D.A,Curley,G,1992:Det ermining the optimum residual moisture in lyophilized protein pharmaceuticals.In Developments in Biological Standardization,Vol.74,pp.255-271.



13. F. Nastaj, K. Witkiewicz, B. Wilczyska 2008. Experimental and simulation studies of primary vacuum freeze-drying process of random solids at microwave heating  
 , International Communications in Heat and Mass Transfer Vol.35 430 – 438.
14. Katrin Heinzemann, Knut Franke .1999 “Using freezing and drying techniques of emulsions for the microencapsulation of fish oil to improve oxidation stability” Colloids and Surfaces B: Biointerfaces Vol.12. 223-229.
15. Spiess, W, 1974: Verfahrensgrundlagen der Trocknung bei niedrigen Temperaturen. VDI-Bildungswerk Vol.2229, p5.
16. Willem F. Wolkers , Fern Tablin , John H. Crowe. 2002 “From anhydrobiosis to freeze-drying of eukaryotic cells” Comparative Biochemistry and Physiology Part A 131 .535 – 543.
17. Heldner, M., Steinkamp, H., Spreckelmeyer, J. 2000: Einsatz von neuen Kaltemitteln und der LN-Technik bei Lyophilisationsanlagen. APV-Symposium, Bonn, September.
18. Kapsalis, J.G., Wolf, M., Driser, M., Walker, J.E, 1971: The effect of moisture on the flavor content and texture stability of dehydrated foods. ASHRAE j. 13, 93-99.
19. Medas, M., Simatose, D, 1971: Freeze-drying and reconstitution of raspberries, influence of the chemical content and variety. International Institute of Refrigeration, pp.605-610, Washington, DC.
20. Gegov, Y.P, 1998: Changes in freeze-dried vegetables during their production and storage. III. Carrots. Nauchni Tr. Vissh. Inst. Khranit. Vkusova Promst., Plovdiv 43, 213-221.
21. Merryman, H.T, 1968: The minimum cell volume modes of freezing injury. Nature 218, 333.
22. Girlich, D, 1991: Multikernresonanzuntersuchungen zur molekularen Dynamik

wasseriger Saccharidlosungen.Dissertation .Naturwissenschaftliche Fakultät III, Biologie and vorklinische Medizin der Universität Regensburg.

23.Karel,M.:Basic principles of moisture equilibria.6th International Course of Freeze-Drying and Advanced Food Technology ,Burgstock,1973.

24.KONA .1996 Powder and Particle .Published by Hosokawa Powder Technology Foundation.



附錄一

**RATING CONDITIONS**

65 °F Return Gas  
0 °F Subcooling  
95 °F Ambient Air Over

60 Hz Operation

**LOW TEMPERATURE**

HFCs Require Use of Polyol Ester  
Lubricant Approved on Form 93-11

**ZF18K4E-TF5**

HFC-404A  
COPELAND SCROLL®  
TF5 200/230-3-60

		Condensing Temperature °F (Sat Dew Pt Pressure, psig)			Liquid Injection Evaporating Temperature °F (Sat Dew Pt Pressure, psig)						
		140	-40 (4.5)	-35 (7.1)	-30 (9.9)	-25 (13)	-20 (16)	-15 (20)	-10 (24)	-5 (28)	0 (33)
(402)	C										23100
	P										6350
	A										19.2
	M										590
130	C	10900	12400	14000	15700	17500	19500	21600	23900	26400	
	P	4900	4960	5050	5150	5250	5350	5500	5650	5850	
	A	16.1	16.2	16.4	16.6	16.8	17.1	17.4	17.7	18.1	
	M	241	274	310	348	390	435	485	540	600	
120	C	12000	13700	15400	17400	19400	21600	24000	26700	29600	
	P	4490	4540	4610	4700	4810	4930	5050	5200	5350	
	A	15.2	15.3	15.5	15.6	15.9	16.1	16.4	16.7	17.1	
	M	240	274	311	350	393	440	491	545	610	
110	C	12900	14800	16800	18900	21200	23700	26400	29300	32600	
	P	4100	4150	4220	4300	4400	4520	4650	4790	4950	
	A	14.4	14.5	14.7	14.8	15	15.3	15.6	15.9	16.2	
	M	239	274	311	352	396	444	496	555	615	
105	C	13400	15400	17400	19700	22100	24700	27500	30600	34000	
	P	3910	3960	4030	4110	4210	4330	4460	4600	4750	
	A	14.1	14.2	14.3	14.5	14.7	14.9	15.2	15.5	15.8	
	M	239	274	312	353	397	445	499	555	620	
100	C	13900	15900	18100	20400	22900	25600	28600	31900	35400	
	P	3740	3780	3850	3930	4030	4140	4270	4410	4560	
	A	13.7	13.8	13.9	14.1	14.3	14.5	14.8	15.1	15.4	
	M	239	274	312	353	398	447	500	560	625	
90	C	14800	17000	19300	21800	24500	27500	30800	34300	38200	
	P	3400	3450	3510	3590	3690	3800	3930	4060	4210	
	A	13.1	13.2	13.3	13.5	13.7	13.9	14.1	14.4	14.7	
	M	239	274	313	354	400	450	505	565	630	
80	C	15700	18000	20500	23200	26100	29300	32900	36700	40900	
	P	3090	3140	3200	3280	3380	3490	3620	3750	3900	
	A	12.6	12.7	12.8	12.9	13.1	13.3	13.5	13.8	14.1	
	M	238	274	313	355	401	452	510	570	635	
70	C	16600	19000	21600	24500	27700	31100	34900	39000	43500	
	P	2810	2860	2920	3000	3100	3210	3340	3480	3630	
	A	12.1	12.2	12.3	12.5	12.6	12.8	13	13.3	13.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	17600	20000	22700	25700	29000	32600	36500	40700	45300	
	P	2510	2560	2620	2700	2800	2910	3040	3180	3330	
	A	11.6	11.7	11.8	12	12.1	12.3	12.5	12.8	13.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	18600	21000	23800	26900	30300	34000	38000	42300	47000	
	P	2260	2310	2370	2450	2550	2660	2790	2930	3080	
	A	11.1	11.2	11.3	11.5	11.6	11.8	12	12.3	12.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	19600	22000	24900	28100	31600	35400	39500	44000	48900	
	P	2060	2110	2170	2250	2350	2460	2590	2730	2880	
	A	10.6	10.7	10.8	11	11.1	11.3	11.5	11.8	12.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	20600	23000	26000	29300	33000	37000	41300	46000	51100	
	P	1960	2010	2070	2150	2250	2360	2490	2630	2780	
	A	10.1	10.2	10.3	10.5	10.6	10.8	11	11.3	11.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	21600	24000	27000	30400	34200	38300	42800	47700	53000	
	P	1860	1910	1970	2050	2150	2260	2390	2530	2680	
	A	9.6	9.7	9.8	10	10.1	10.3	10.5	10.8	11.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	22600	25000	28000	31500	35400	39600	44300	49300	54700	
	P	1760	1810	1870	1950	2050	2160	2290	2430	2580	
	A	9.1	9.2	9.3	9.5	9.6	9.8	10	10.3	10.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	23600	26000	29000	32600	36600	40900	45700	50800	56300	
	P	1660	1710	1770	1850	1950	2060	2190	2330	2480	
	A	8.6	8.7	8.8	9	9.1	9.3	9.5	9.8	10.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	24600	27000	30000	33700	37800	42300	47200	52400	58000	
	P	1560	1610	1670	1750	1850	1960	2090	2230	2380	
	A	8.1	8.2	8.3	8.5	8.6	8.8	9	9.3	9.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	25600	28000	31000	34800	39000	43600	48600	53900	59500	
	P	1460	1510	1570	1650	1750	1860	1990	2130	2280	
	A	7.6	7.7	7.8	8	8.1	8.3	8.5	8.8	9.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	26600	29000	32000	35900	40200	44900	50100	55700	61700	
	P	1360	1410	1470	1550	1650	1760	1890	2030	2180	
	A	7.1	7.2	7.3	7.5	7.6	7.8	8	8.3	8.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	27600	30000	33000	37000	41400	46200	51500	57200	63300	
	P	1260	1310	1370	1450	1550	1660	1790	1930	2080	
	A	6.6	6.7	6.8	7	7.1	7.3	7.5	7.8	8.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	28600	31000	34000	38000	42400	47200	52500	58200	64300	
	P	1160	1210	1270	1350	1450	1560	1690	1830	1980	
	A	6.1	6.2	6.3	6.5	6.6	6.8	7	7.3	7.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	29600	32000	35000	39000	43400	48200	53500	59200	65300	
	P	1060	1110	1170	1250	1350	1460	1590	1730	1880	
	A	5.6	5.7	5.8	6	6.1	6.3	6.5	6.8	7.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	30600	33000	36000	40000	44400	49200	54500	60200	66300	
	P	960	1010	1070	1150	1250	1360	1490	1630	1780	
	A	5.1	5.2	5.3	5.5	5.6	5.8	6	6.3	6.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	31600	34000	37000	41000	45400	50200	55500	61200	67300	
	P	860	910	970	1050	1150	1260	1390	1530	1680	
	A	4.6	4.7	4.8	5	5.1	5.3	5.5	5.8	6.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	32600	35000	38000	42000	46400	51200	56500	62200	68300	
	P	760	810	870	950	1050	1160	1290	1430	1580	
	A	4.1	4.2	4.3	4.5	4.6	4.8	5	5.3	5.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	33600	36000	39000	43000	47400	52200	57500	63200	69300	
	P	660	710	770	850	950	1060	1190	1330	1480	
	A	3.6	3.7	3.8	4	4.1	4.3	4.5	4.8	5.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	34600	37000	40000	44000	48400	53200	58500	64200	70300	
	P	560	610	670	750	850	960	1090	1230	1380	
	A	3.1	3.2	3.3	3.5	3.6	3.8	4	4.3	4.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	35600	38000	41000	45000	49400	54200	59500	65200	71300	
	P	460	510	570	650	750	860	990	1130	1280	
	A	2.6	2.7	2.8	3	3.1	3.3	3.5	3.8	4.1	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	36600	39000	42000	46000	50400	55200	60500	66200	72300	
	P	360	410	470	550	650	760	890	1030	1180	
	A	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6	2.8	3	3.3	3.6	
	M	238	274	313	356	402	453	510	570	640	
	C	37600	40000	43000	47000	51400	56200	61500	67200	73300	
	P	260	310	370	450	550	660	790	930	1080	
	A	1.6	1.7	1.8	2	2.1	2.3	2.5	2.8	3.1	
	M	238	274	313	356	402	453	5			

## ZF18K4E-TF5

HFC, R-404A, Mid Point, 60 Hz, 3 - Phase, 200/230 V  
Low Temp, Liquid Injected



**Production Status:** Available for sale to all U.S. customers. Please check with your local Emerson Climate Technologies representative for international availability.

### Performance

<u>Evap(°F)/Cond(°F)</u>	<u>-25/105</u>	<u>-40/105</u>
<u>RG(°F)/Liq(°F)</u>	<u>65/105</u>	<u>65/105</u>
Capacity (Btu/hr):	19700	13400
Power (Watts):	4110	3910
Current (Amps):	14.5	14.1
EER (Btu/Wh):	4.8	3.4
Mass Flow (lbs/hr):	353.0	239.0
Sound Power(dBA):	80 Ave 85 Max	
Vibration (mils(peak-peak)):	2.0 Ave 3.0 Max	
Record Date:	2005-06-14	

### Mechanical

Number of Cylinders:	0	Displ (in <sup>3</sup> /Rev):	5.983
Bore Size (in):	0.0	Displ (ft <sup>3</sup> /hr):	727.1020
Stroke (in):	0.0		
Overall Length (in):	11.16	Mounting Length (in):	7.5
Overall Width (in):	9.67	Mounting Width(in):	7.5
Overall Height (in):	18.5	Mounting Height (in):	19.25*
Suction Size (in):	7/8 Stub		
Discharge Size (in):	1/2 Stub		
Initial Oil Charge (oz):	64		
Oil Recharge (oz):	60		
Net Weight (lbs):	87.0		
Internal Free Volume (in <sup>3</sup> ):			
HorsePower	6.0		

\* Overall compressor height on Copeland Brand Product's specified mounting brackets.

### Electrical

LRA-High*:	156	MCC (Amps):	30.5	UL File No.:	SA-2337
LRA-Half Winding:		25.0 RPM:	3500	UL File Date:	15-Jun-1994
LRA-Low*:		Max Operating Current:			
RLA(=MCC/1.4; use for contactor selection):	21.8				
RLA ( =MCC/1.56; use for breaker & wire size selection):	19.6				

\*Low and High refer to the low and high nominal voltage ranges for which the motor is approved.

### Alternate Applications

Refrigerant	Frequency(Hz)	Phase	Voltage	Application
R-134a HFC	50	3	200/220	High Temperature
R-134a HFC	50	3	200/220	Low Temp, Liquid Injected
R-134a HFC	50	3	200/220	Medium Temp, Liquid Injected
R-22 HCFC	50	3	200/220	Low Temp, Liquid Injected
R-22 HCFC	50	3	200/220	Medium Temp, Liquid Injected
R-404A HFC	50	3	200/220	Low Temp, Liquid Injected
R-404A HFC	50	3	200/220	Medium Temp, Liquid Injected
R-507 HFC	50	3	200/220	Low Temp, Low Condensing
R-507 HFC	50	3	200/220	Low Temp, Liquid Injected
R-507 HFC	50	3	200/220	Medium Temp, Liquid Injected
R-134a HFC	60	3	200/230	High Temperature
R-134a HFC	60	3	200/230	Low Temp, Liquid Injected
R-134a HFC	60	3	200/230	Medium Temp, Liquid Injected
R-22 HCFC	60	3	200/230	Low Temp, Liquid Injected
R-22 HCFC	60	3	200/230	Medium Temp, Liquid Injected
R-404A HFC	60	3	200/230	Low Temp, Low Condensing
R-404A HFC	60	3	200/230	Medium Temp, Liquid Injected
R-507 HFC	60	3	200/230	Low Temp, Liquid Injected
R-507 HFC	60	3	200/230	Medium Temp, Liquid Injected

JEN-YUNG, HUANG.  
1/13/2010

Page 1 of 1

Copyright © 2008 Emerson Climate Technologies, Inc. All rights reserved.

壓縮機特性表

