

『讓我們的冰箱”凍”起來』實驗研究

李宜臻

摘要

冷凍設備根據應用溫度分為：冷卻、冷藏（ 0°C 以下）、低溫（ $0^{\circ}\text{C}\sim-60^{\circ}\text{C}$ ）與超低溫（ -60°C 以下）。超低溫冷凍系統大部分應用在食品冷凍與醫療/化學冷凍。目前，超低溫冷凍系統以大型冷凍設備（電壓 220V）為主，若此冷凍設備使用兩種冷媒在兩個冷凍系統內相互進行熱交換，進而達到超低溫條件時，我們謂之「超低溫二元冷凍系統」。

本專題透過冷凍實習課程，運用不同的冷媒配對，試著以小型冷凍設備（電壓 110V）一家用冰箱，進行超低溫二元冷凍實驗。探討二元冷媒 R-134a / R-502 與 R-22 / R-502 運用在家用冰箱之特性，並記錄與計算熱力性質，進而比較「超低溫二元冷凍系統」運用在電壓 110V 與運用在電壓 220V 的差異。

專題小組採用小型家用冰箱進行二元冷凍系統實驗，發現以 R-134a、R-502、R-22 三種冷媒配對，最後冷凍庫溫度僅能降低約 -35°C 左右。且 R-134a / R-502 的冷媒配對，在冷房能力（R）、性能係數（COP）或能源效率比（EER）等方面，皆比 R-22 / R-502 的冷媒配對佳。

關鍵詞：超低溫冷凍、二元冷凍、莫利爾線圖計算

壹、研究動機

冷凍空調，在我們的日常生活或科學工業中，均有極廣泛的應用，例如：窗型/箱型冷氣、家用冰箱、中央空調系統、低溫冷凍設備...等。冷凍空調設備根據應用溫度的不同可分為冷卻、冷藏（ 0°C 以下）、低溫（ $0^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ ）與超低溫（ -60°C 以下）設備。然而，超低溫冷凍系統大部分應用在食品保存（例如：肉類、魚類之保鮮冷凍）、工業用冷凍（例如：製冰場、冷藏倉庫）、醫療/實驗用冷凍（例如：人體細胞的保存、化學藥物的實驗）。

目前，超低溫冷凍系統以大型冷凍設備（ 220V ）為主，配合特殊的單一冷媒（例如：超低溫專用冷媒 R-408、R507...等），才能降低至 -60°C 的冷凍溫度，若使用一般的冷媒（例如：冷氣用的 R-22、冰箱用的 R134a...等）是無法降低至超低溫。除非需要使用兩種冷媒在兩個冷凍系統內相互進行熱交換，根據兩種冷媒的熱力特性，進而使冷凍溫度降低至 -60°C 以下，而此種系統謂之「超低溫二元冷凍系統」。

基於目前超低溫二元冷凍系統以大型冷凍設備（ 220V ）為主，在市場上很少看到小型冷凍設備（ 110V ）的超低溫系統。故專題小組藉由高二冷凍實習課程，想要透過不同的一般冷媒配對（R-22、R134a...等），試著以小型冷凍設備（ 110V ）進行超低溫二元冷凍系統實驗，並探討與記錄其熱力性質。進而比較「超低溫二元冷凍系統」運用在電壓 110V 與電壓 220V 之冷凍設備的差異。

貳、研究目的

一、研究目的

1. 探討二元冷凍系統 R-134a / R-502 冷媒運用在家用冰箱之冷凍特性。
2. 探討二元冷凍系統 R-22 / R-502 冷媒運用在家用冰箱之冷凍特性。
3. 比較二元冷凍系統 R-134a / R-502 冷媒與 R-22 / R-502 冷媒運用在家用冰箱之冷凍特性。
4. 比較二元冷凍系統運用在電壓 110V 與電壓 220V 之冷凍設備的差異。

二、名詞解釋

(一) 二元冷凍系統 (cascade refrigerating systems)

二元冷凍系統 (cascade refrigerating systems) 又稱為串級冷凍系統 (附圖 1.)，係由 2 個或 2 個以上之獨立冷凍系統組合而成。其利用高壓段蒸發器冷卻低壓段冷凝器，達到低溫蒸發之目的，蒸發溫度一般可達 -46°C 以下 (連錦杰、蕭明哲，民 82)。

(二) 莫利爾線圖 (Mollier Chart)

莫利爾線圖 (Mollier Chart) 是用來表示冷媒狀態變化特性圖，屬於壓力-焓線圖 (P-h 線圖)。其縱座標為絕對壓力 (P)，橫坐標為焓值 (h)，為目前最常採用的冷媒狀態特性曲線圖。只要在實用之溫度及壓力範圍內，都可由圖中查得冷媒的各種狀態數值，包括溫度、壓力、比容積、焓...等。在冷凍工程熱力分析上，實為不可或缺工具 (許祺清、陳聰明，民 90)。

莫利爾線圖根據不同冷媒、使用單位有所不同。例如：附圖 2.為 R-22 之公制莫利爾線圖、附圖 3.為 R-134a 之公制莫利爾線圖、附圖 4.為 R-502 之公制莫利爾線圖。

參、研究設備及器材

一、研究設備	
超低溫二元冷凍系統	

二、研究器材	
<p>1. 實驗冷媒 (R-134a、R-22、R-502)</p>	
<p>2. 複合壓力錶</p>	
<p>3. 真空泵</p>	
<p>4. 單相瓦特計/瓦時計</p>	

<p>5.冷媒回收機</p>	
<p>6.夾式電流表</p>	
<p>7.紅外線溫度計</p>	

肆、研究過程或方法

一、 如圖 1.所示，為本專題之研究流程圖。

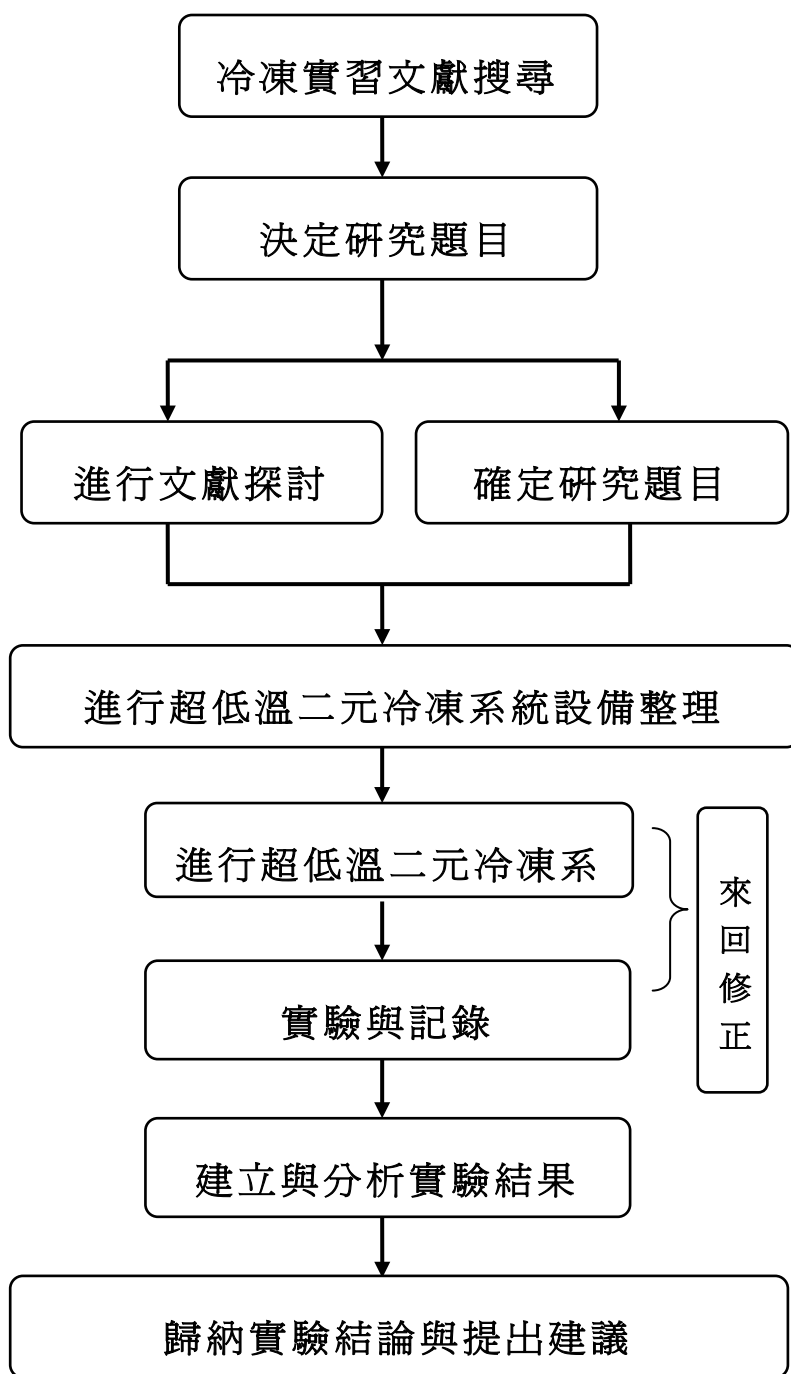


圖 1. 研究流程圖

二、如表 1.所示，為本專題之實施進度甘特圖。

表 1. 超低溫二元冷凍系統實驗之實施進度甘特圖

工作進度	2006		2006		2006		2007		2007		2007		2007	
	日期	12/11 12/17	12/18 12/24	12/25 12/31	2007 01/01 01/07	2007 01/08 01/14	2007 01/15 01/21	2007 01/22 01/28	2007 01/29 02/04	2007 02/05 02/11	2007 02/12 02/18			
討論主題		■												
建立主題		■												
收集資料			■											
資料分析					■									
主題研究									■					
成果整理												■		
成果展示													■	

三、 本專題小組在確定研究題目後，即進行相關文獻的探討與冷凍設備整理。再運用本科現有冷媒 R-22、R134a、R-502，瞭解其冷媒熱力性質後，進行超低溫二元冷凍系統實驗。茲將實驗流程描述如表 2.所示。

表 2. 超低溫二元冷凍系統實驗之實驗流程說明

實 驗 流 程	流 程 說 明
1.決定冷媒。	<p>(1)本實驗利用 R-22、R-134a、R-502 分別進行超低溫二元冷凍系統實驗，其就同一設備進行兩回實驗，分別為高壓段冷媒 R-134a/低壓段冷媒 R-502 與高壓段冷媒 R-22/低壓段冷媒 R-502 兩回實驗。</p> <p>(2)高壓段與低壓段冷媒的取決原則：就同一蒸發溫度而言，以壓力低的冷媒當作一元系統的主要冷媒（高壓段），以壓力高的冷媒當作二元系統的主要冷媒（低壓段）。</p>
2.抽真空。 (抽除管路設備內的水分與雜質)	<p>決定運轉冷媒後，即進行設備管路的清潔與檢查。研究小組利用真空泵，抽除管內的水份與雜質，時間約為 2 小時，真空壓力為 76cmHg.VAC (29.92 inHg.VAC)。</p>
3.站空。	<p>抽真空結束後，即進行站空。站空目的為，若管路有破裂或管路接合處不良，此時大氣空氣會跑進管路，使系統內的壓力回升。若系統管路正常，此時壓力仍維持在真空壓力 76cmHg.VAC(29.92 inHg.VAC)。</p>
4.破空與排氣。	<p>站空結束後，若壓力正常，代表設備可進行充灌冷媒。此時，須將設備、壓力錶與冷媒瓶接好，進行破除系統真空壓</p>

	力與排除壓力錶管內空氣的工作，即可準備充灌冷媒。
5.灌冷媒。	於設備停機狀態，進行高壓段與低壓段系統的冷媒充灌，充灌至平衡壓力止。
6.設備運轉。	啓動超低溫二元冷凍系統，爲避免低壓過低，須先將低壓開關短路。爲避免短路過載現象，啓動時，須掛上夾式電流錶，觀察電流情形。
7.補充冷媒。	設備啓動後，即進行高壓段與低壓段系統的冷媒補充，補充至正常運轉壓力爲止。
8.進行測試與記錄。	本研究小組設定冷凍庫溫度爲 -40°C ，啓動設備，在運轉 1 個小時後，開始進行記錄，每 30 分鐘記錄一次，共運轉 3 小時，根據記錄值進行熱力計算。

伍、研究結果

一、 如表 3.所示，為高壓段（一元）冷媒 R-134a 與低壓段（二元）冷媒 R-502 的實驗記錄值。

運轉 1 小時後記錄，每 30 分鐘記錄一次								
時間		2007/02/05 (一) 10:00a.m.開始記錄						
		10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	平均
實驗記錄值								
運轉電壓 (V)		115	115	115	115	115	115	115
運轉電流 (A)		11.28	10.45	10.6	10.5	10.5	10.6	10.66
運轉功率 (W)		875	800	800	800	700	825	800
高壓 ($kg/cm^2.G$)	一元	8	9	10	10	10	7.8	9.13
	二元	13	8.2	8.8	7.8	7.4	9.8	9.17
低壓 ($kg/cm^2.G$)	一元	0	0	0	0	0	0	0
	二元	0.2	0	0	0	0	0	0.03
冷凍庫溫度 (°C)		-24	-34	-35	-36	-37	-37	-33.83
壓縮機出口溫度 (°C)	一元	51	56	60	65	70	71	62.1
	二元	67	80	82	85	87	88	81.5
毛細管入口溫度 (°C)	一元	16.5	21	22.5	22	23	23.5	21.42
	二元	20	23	25	27	29	29	25.5

二、 如表 4.所示，為高壓段（一元）冷媒 R-22 與低壓段（二元）冷媒 R-502 的實驗記錄值。

運轉 1 小時後記錄，每 30 分鐘記錄一次								
時間		2007/02/06 (二) 01:00p.m.開始記錄						
		01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	平均
實驗記錄值								
運轉電壓 (V)		115	115	115	115	115	115	115
運轉電流 (A)		11.2	11.58	11	11.15	11.07	10.75	11.13
運轉功率 (W)		850	925	875	925	900	850	887.5
高壓 ($kg/cm^2.G$)	一元	13	13.5	13.5	14.5	14	13.5	13.67
	二元	10.2	11.2	9.6	11.8	10.8	7.8	10.23
低壓		一元	0	0	0	0	0	0

($kg/cm^2.G$)	二元	0	0.2	0	0.2	0	0	0.67
冷凍庫溫度 ($^{\circ}C$)		-30	-30	-32	-33	-33	-37	-32.5
壓縮機出口溫度 ($^{\circ}C$)	一元	70	64	80	92	90	68	77.33
	二元	60	82	82	87	83	69	77.17
毛細管入口溫度 ($^{\circ}C$)	一元	21.5	26.5	27	24.5	22.5	23.5	24.25
	二元	25	29	30	29	37	41	31.83

陸、討論

一、 專題小組根據高壓段（一元）冷媒 R-134a / 低壓段（二元）冷媒 R-502 的實驗記錄（表 3.），整理如下。

（一）高壓段冷媒的莫利爾線圖，如圖 2.所示；低壓段冷媒的莫利爾線圖，如圖 3.所示。

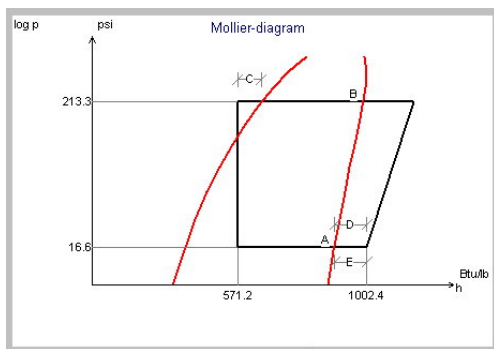


圖 2. 高壓段冷媒 R-134a

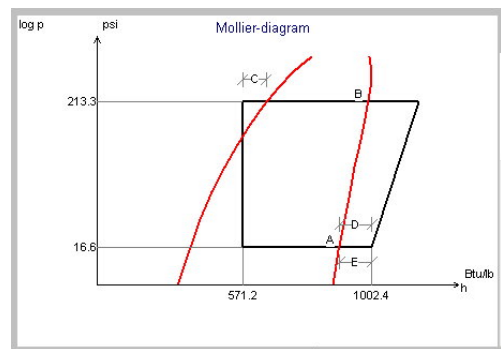


圖 3. 低壓段冷媒 R-502

（二）根據圖 2.，高壓段系統的熱力性質計算如下。

1. 每公斤冷媒的冷凍效果 $r = h_2 - h_1 = 146 - 107 = 39kcal/kg$ 。
2. 每公斤冷媒的壓縮能力 $q_w = h_3 - h_2 = 158 - 146 = 12kcal/kg$ 。
3. 每公斤冷媒的散熱能力 $q_c = r + q_w = h_3 - h_1 = 158 - 107 = 51kcal/kg$ 。
4. 因本研究所使用的壓縮機為 0.5Hp，故高壓段系統的冷媒循環量 $G = \frac{Hp \times 642}{q_w} = \frac{0.5 \times 642}{12} = 26.75kg/hr$ 。
5. 高壓段系統的冷房能力 $R = G \times r = 26.75 \times 39 = 1043.25kcal/hr$ 。
6. 高壓段系統的壓縮能力 $Q_w = G \times q_w = 26.75 \times 12 = 321kcal/hr$ 。
7. 高壓段系統的散熱能力 $Q_c = G \times q_c = 26.75 \times 51 = 1364.25kcal/hr$ 。
8. 性能係數 $COP = \frac{r}{q_w} = \frac{R}{Q_w} = \frac{1043.25}{321} = 3.25$ 。

9. 平均功率 $P = \frac{W}{\text{運轉時間}} = \frac{800}{3\text{hrs}} = 266.7W$ 。

10. 能源效率比 $EER = \frac{R}{P} = \frac{1043.25}{266.7} = 3.91$ 。

(三) 根據圖 3.，低壓段系統的熱力性質計算如下。

1. 每公斤冷媒的冷凍效果 $r = h_2 - h_1 = 136 - 108 = 28\text{kcal/kg}$ 。
2. 每公斤冷媒的壓縮能力 $q_w = h_3 - h_2 = 147 - 136 = 11\text{kcal/kg}$ 。
3. 每公斤冷媒的散熱能力 $q_c = r + q_w = h_3 - h_1 = 147 - 108 = 39\text{kcal/kg}$ 。
4. 因本研究所使用的壓縮機為 0.5Hp，故低壓段系統的冷媒循環量 $G = \frac{Hp \times 642}{q_w} = \frac{0.5 \times 642}{11} = 29.18\text{kg/hr}$ 。
5. 低壓段系統的冷房能力 $R = G \times r = 29.18 \times 28 = 817.04\text{kcal/hr}$ 。
6. 低壓段系統的壓縮能力 $Q_w = G \times q_w = 29.18 \times 11 = 320.98\text{kcal/hr}$ 。
7. 低壓段系統的散熱能力 $Q_c = G \times q_c = 29.18 \times 39 = 1138.02\text{kcal/hr}$ 。
8. 性能係數 $COP = \frac{r}{q_w} = \frac{R}{Q_w} = \frac{817.04}{320.98} = 2.55$ 。
9. 平均功率 $P = \frac{W}{\text{運轉時間}} = \frac{800}{3\text{hrs}} = 266.7W$ 。
10. 能源效率比 $EER = \frac{R}{P} = \frac{817.04}{266.7} = 3.06$ 。

二、 研究小組根據高壓段（一元）冷媒 R-22 / 低壓段（二元）冷媒 R-502 的實驗記錄（表 4.），整理如下。

(一) 高壓段冷媒的莫利爾線圖，如圖 4.所示；低壓段冷媒的莫利爾線圖，如圖 5.所示。

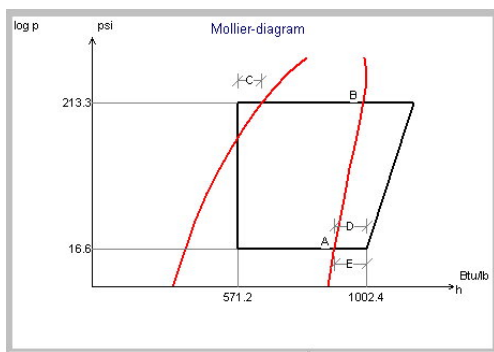


圖 4. 高壓段冷媒 R-22

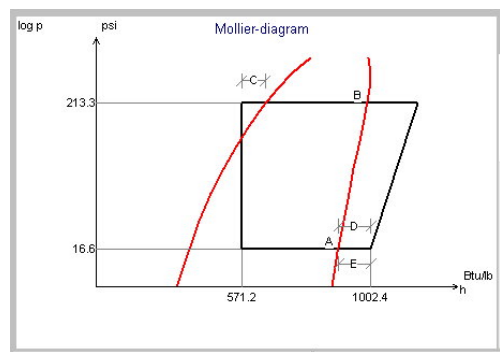


圖 5. 低壓段冷媒 R-502

(二) 根據圖 4.，高壓段系統的熱力性質計算如下。

1. 每公斤冷媒的冷凍效果 $r = h_2 - h_1 = 145 - 108 = 37\text{kcal/kg}$ 。
2. 每公斤冷媒的壓縮能力 $q_w = h_3 - h_2 = 162 - 145 = 17\text{kcal/kg}$ 。
3. 每公斤冷媒的散熱能力 $q_c = r + q_w = h_3 - h_1 = 162 - 108 = 54\text{kcal/kg}$ 。
4. 因本研究所使用的壓縮機為 0.5Hp，故低壓段系統的冷媒循環量

$$G = \frac{Hp \times 642}{q_w} = \frac{0.5 \times 642}{17} = 18.88 \text{ kg/hr} \circ$$

5. 高壓段系統的冷房能力 $R = G \times r = 18.88 \times 37 = 698.56 \text{ kcal/hr} \circ$
6. 高壓段系統的壓縮能力 $Q_w = G \times q_w = 18.88 \times 17 = 320.96 \text{ kcal/hr} \circ$
7. 高壓段系統的散熱能力 $Q_c = G \times q_c = 18.88 \times 54 = 1019.52 \text{ kcal/hr} \circ$
8. 性能係數 $COP = \frac{r}{q_w} = \frac{R}{Q_w} = \frac{698.56}{320.96} = 2.18 \circ$
9. 平均功率 $P = \frac{W}{\text{運轉時間}} = \frac{887.5}{3 \text{ hrs}} = 295.83 \text{ W} \circ$
10. 能源效率比 $EER = \frac{R}{P} = \frac{698.56}{295.83} = 2.36 \circ$

(三) 根據圖 5，低壓段系統的熱力性質計算如下。

1. 每公斤冷媒的冷凍效果 $r = h_2 - h_1 = 136 - 109 = 27 \text{ kcal/kg} \circ$
2. 每公斤冷媒的壓縮能力 $q_w = h_3 - h_2 = 147 - 136 = 11 \text{ kcal/kg} \circ$
3. 每公斤冷媒的散熱能力 $q_c = r + q_w = h_3 - h_1 = 147 - 109 = 38 \text{ kcal/kg} \circ$
4. 因本研究所使用的壓縮機為 0.5Hp，故低壓段系統的冷媒循環量 $G = \frac{Hp \times 642}{q_w} = \frac{0.5 \times 642}{11} = 29.18 \text{ kg/hr} \circ$
5. 低壓段系統的冷房能力 $R = G \times r = 29.18 \times 27 = 787.86 \text{ kcal/hr} \circ$
6. 低壓段系統的壓縮能力 $Q_w = G \times q_w = 29.18 \times 11 = 320.98 \text{ kcal/hr} \circ$
7. 低壓段系統的散熱能力 $Q_c = G \times q_c = 29.18 \times 38 = 1108.84 \text{ kcal/hr} \circ$
8. 性能係數 $COP = \frac{r}{q_w} = \frac{R}{Q_w} = \frac{787.86}{320.98} = 2.45 \circ$
9. 平均功率 $P = \frac{W}{\text{運轉時間}} = \frac{887.5}{3 \text{ hrs}} = 295.83 \text{ W} \circ$
10. 能源效率比 $EER = \frac{R}{P} = \frac{787.86}{295.83} = 2.66 \circ$

柒、結論

一、 專題小組根據高壓段（一元）冷媒 R-134a / 低壓段（二元）冷媒 R-502 的實驗結果討論，整理結論如下。

1. 超低溫二元冷凍系統為藉由兩種冷媒在一系統內進行熱交換，使一元冷媒吸收二元冷媒的熱量，再由二元冷媒降低冷凍庫的溫度。故由以上結論發現二元冷媒的散熱能力(1138.02kcal/hr)與一元冷媒的吸熱能力(即冷房能力 1043.25kcal/hr)幾乎相同。

2. 當專題小組運用 R-134a 與 R-502 冷媒進行超低溫二元冷凍實驗時，其冷凍庫溫度僅能降低 -33.83°C ，沒有達到設定溫度 -40°C 。
3. 專題小組運用小型家用冰箱進行超低溫二元冷凍實驗，其性能係數 COP 值為 2.55，能源效率比 EER 值約為 3.06。

二、 專題小組根據高壓段（一元）冷媒 R-22 / 低壓段（二元）冷媒 R-502 的實驗結果討論，整理結論如下。

1. 超低溫二元冷凍系統為藉由兩種冷媒在一系統內進行熱交換，使一元冷媒吸收二元冷媒的熱量，再由二元冷媒降低冷凍庫的溫度。故理論上二元冷媒的散熱能力與一元冷媒的吸熱能力幾乎相同。但此實驗卻發現低壓段系統的散熱能力（ 1108.84kcal/hr ）不等於高壓段系統的吸熱能力（ 698.56kcal/hr ）。
2. 當專題小組運用 R-22 與 R-502 冷媒進行超低溫二元冷凍實驗時，其冷凍庫溫度僅能降低 -32.5°C ，沒有達到設定溫度 -40°C 。
3. 專題小組運用小型家用冰箱進行超低溫二元冷凍實驗，其性能係數 COP 值為 2.45，能源效率比 EER 值約為 2.66。

三、 根據以上兩組實驗結論，專題小組綜合比較如表 5.所示。

表 5. R-134a/R-502 與 R-22/R-502 超低溫冷凍系統實驗比較

	一元冷媒 R-134a / 二元冷媒 R-502	一元冷媒 R-22 / 二元冷媒 R-502
運轉 3 小時之 冷凍庫溫度	-33.83°C	-32.5°C
冷房能力	817.04 kcal/hr	787.86 kcal/hr
性能係數	2.55	2.45
能源效率比	3.06	2.66

5. 一般的超低溫二元冷凍系統皆以大型冷凍設備為主，而本專題採用小型家用冰箱系統進行二元冷凍系統實驗，發現其冷凍庫溫度僅能降低約 -35°C 左右。
6. 若以 R-134a、R-502、R-22 三種冷媒而言，研究發現 R-134a/R-502 的冷媒配對，無論是冷房能力、性能係數或能源效率比，其產生的結果皆比 R-22/R-502 的冷媒配對佳。

四、完成超低溫二元冷凍系統實驗後，專題小組建議如下。

1. 因材料有限，故僅能運用現有冷媒進行實驗。若不同配對的冷媒，可能會將冷凍庫溫度降的更低。
2. 本專題特別以小型家用冰箱系統進行實驗，其能源效率比的確比大型冷凍設備偏低，但在未來仍有改善的空間。

參考文獻及其他

連錦杰、蕭明哲（民 82）。冷凍空調實習（三）（再版）。臺北市：全華。

王文博、胡興邦（民 87）。冷凍空調原理（上）（11 版）。臺北市：。

許祺清、陳聰明（民 90）。冷凍空調原理 I。臺北市：大中國。

許祺清、陳聰明（民 90）。冷凍空調原理 II。臺北市：大中國。

陳聰明、許祺清（民 91）。冷凍實習 II。臺北市：大中國。

歐洲之 HCFC 替代經驗。民 96 年 2 月 15 日，取自：

<http://refrigerant.itri.org.tw/Docs/%E6%AD%90%E6%B4%B2%E6%9B%BF%E4%BB%A3%E5%86%B7%E5%AA%92%E7%B6%93%E9%A9%97.pdf>

家電小常識-冰箱保鮮知多少（民 95 年 9 月 8 日）。新華電子報。民 96 年 2 月 15 日，取自：

http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/news.xinhuanet.com/tech/2006-09/08/content_5065419.htm