

第十六篇

冷凍與空氣調節工程

目 錄 頁

第一章 冷凍原理

文席謀

1.1	名詞釋義.....	16— 1
1.2	冷凍方法概述.....	16— 2
1.3	壓縮式冷凍法.....	16— 3
1.4	其他冷凍方法.....	16— 8

第二章 冷凍應用及負荷量之計算

2.1	食品工業上之應用.....	16— 11
2.2	製冰工業.....	16— 11
2.3	低溫金屬材料處理之應用.....	16— 14
2.4	醫學上之應用.....	16— 15
2.5	化學工業上之應用.....	16— 15
2.6	土木工程上之應用.....	16— 16
2.7	冷凍負荷之計算.....	16— 17
2.8	冷凍機之選用.....	16— 18

第三章 冷凍設備及系統

3.1	冷凍設備.....	16— 20
3.2	壓縮機.....	16— 20
3.3	冷凝器.....	16— 21
3.4	蒸發器.....	16— 23
3.5	冷媒節流器及管路附屬件.....	16— 24
3.6	冷凍系統.....	16— 26
3.7	冷凍系統之平衡.....	16— 28

第四章 冷凍工程材料及施工要點

4.1	冷媒	16— 30
4.2	鹽水	16— 30
4.3	冷凍油	16— 30
4.4	保溫材料	16— 34
4.5	乾燥劑	16— 36
4.6	施工重點	16— 87

第五章 空氣調節工程

陳春錦

5.1	緒論	16— 39
5.2	保健空氣調節	16— 39
5.3	工業空氣調節	16— 40
5.4	空氣調節設備	16— 42
5.5	室內氣候	16— 43
5.6	空氣污染	16— 44

第六章 空氣之性質與空氣線圖

6.1	用語說明	16— 45
6.2	濕空氣	16— 46
6.3	空調裝置內空氣之基本狀態變化	16— 49
6.4	乾球溫度——絕對濕度 ($t-x$) 線圖	16— 55
6.5	中央系統裝置內空氣之狀態變化	16— 62
6.6	雙管式內空氣狀態變化	16— 69
6.7	誘導式內空氣狀態變化	16— 72
6.8	利用乾燥劑減濕之空氣狀態變化	16— 72

第七章 人體生理反應與舒適條件

7.1	人體與環境	16— 74
7.2	人體熱平衡	16— 74
7.3	氣候環境之表示法	16— 77
7.4	公害	16— 81
7.5	空氣污染	16— 82
7.6	空氣污染之來源	16— 82

7.7	空氣污染對人體健康之影響	16—84
-----	--------------	-------

第 八 章 空氣調節負荷

8.1	冷房負荷	16—86
8.2	室外設計溫濕度	16—90
8.3	室內設計溫濕度	16—90
8.4	工業用室內條件	16—93
8.5	用於設計之換氣量	16—95
8.6	外壁及屋頂傳熱量	16—97
8.7	構造物熱貫流率之計算	16—105
8.8	內壁地板(天花板)傳熱量	16—108
8.9	玻璃之傳熱量	16—110
8.10	室內傳熱量	16—113
8.11	照明設備傳熱量	16—115
8.12	室內設備機器傳熱量	16—116
8.13	換氣傳熱量	16—120
8.14	冷却器負荷	16—122
8.15	漏入空氣傳熱量	16—122
8.16	空調機及其他設備之負荷	16—126
8.17	再熱或預冷負荷	16—127

第 九 章 空氣調節裝置之計劃

9.1	空氣調節之計劃	16—130
9.2	計劃上之難點	16—133
9.3	各種空調設備用途之計劃	16—137

第 十 章 空氣調節之方式

10.1	緒論	16—140
10.2	空氣調節機之構成	16—141
10.3	中央系統式與個別式之比較	16—144
10.4	單管式	16—145
10.5	多區個別式	16—152
10.6	雙管式	16—153
10.7	雙誘導式	16—159

10.8	各層個別式	16—160
10.9	誘導式	16—163
10.10	送風機捲管式	16—167
10.11	輻射式	16—170
10.12	箱形個別式	16—171

第十一章 空氣調節之設備

11.1	概說	16—175
11.2	冷凍循環	16—177
11.3	熱交換器內溫度之限制	16—180
11.4	冷媒	16—184
11.5	莫理耳線圖之用法	16—189
11.6	冷凍機	16—191
11.7	蒸發器	16—207
11.8	冷却器	16—210
11.9	凝結器	16—215
11.10	冷却塔	16—219
11.11	貯液器	16—224
11.12	油分離器	16—224
11.13	空氣淨化裝置	16—225
11.14	殺菌裝置	16—230
11.15	洗淨器	16—233
11.16	膨脹閥	16—235
11.17	熱泵	16—240
11.18	暖房方式	16—247

第十二章 通風設備與風管

12.1	通風量與室內壓力及換氣量之關係	16—263
12.2	機械通風	16—264
12.3	送風機	16—264
12.4	風管內之壓力	16—271
12.5	連續方程式	16—271
12.6	風管裝置內壓力之變化	16—273
12.7	風管摩擦阻力線圖	16—274

12.8	風管內局部阻力.....	16-283
12.9	風管設計法.....	16-292
12.10	吹口與吸口.....	16-303
12.11	到達距離與容許吹出風速.....	16-306
第十三章 自動控制裝置		
13.1	總說.....	16-310
13.2	控制儀器.....	16-311
13.3	電動機與電氣回路.....	16-317

第十六篇

冷凍與空氣調節工程

文席謀 陳春錦

第一章 冷凍原理

1.1 名詞釋義

a. 冷凍 (refrigeration): 以人為方法, 自物體或空間內移去熱能, 以降低其溫度, 稱為冷凍。以機械方法產生者稱為機械冷凍; 其所用之設備或系統, 稱為冷凍設備或冷凍系統。傳遞熱能產生冷凍效果之流體媒質稱為冷媒 (refrigerant)。冷凍有直接與間接之分, 在間接冷凍而言, 冷媒分為第一冷媒與第二冷媒。第二冷媒多為液態如水或鹽水, 亦得為固態如冰或乾冰。

b. 冷卻負荷、冷凍能力、冷凍噸 維持物體或空間低於其環境溫度至某特定之程度, 單位時間所需排除之熱能稱為冷卻負荷。冷凍能力為冷凍設備單位時間能夠排除熱能之能力稱為冷凍能力。均以 kcal/hr 或 Btu/hr 為單位。冷凍噸 (ton of refrigeration) 為商業上表示冷凍能力之實用單位。公制之冷凍噸為一公噸 0°C 之純冰在 24 小時內熔化為 0°C 之水所需熱量。其值為 $79.68\text{kcal/kg} \times 1000\text{kg} \times 1/24 = 3320\text{ kcal/hr}$, 折合 13174.8 Btu/hr , 美制及英制冷凍噸因重量及冰之熔解熱取值不同計算結果亦有出入, 如下式:

美制: 1 冷凍噸 = $144\text{Btu/lb} \times 2000\text{lb} \times 1/24 = 12000\text{ Btu/hr}$ 。

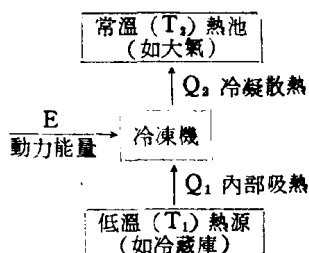
英制: 1 冷凍噸 = $142\text{Btu/lb} \times 2240\text{lb} \times 1/24 = 13253\text{ Btu/hr}$ 。

c. 冷凍性能係數 (coefficient of performance 簡作 cop), 熱泵 (heat pump) 人工冷凍將熱能自低溫之「熱源」, 抽送於高溫之「熱池」(sink), 因與熱能自高溫流向低溫之自然趨向相反, 故須加入功能以冷凍方法完成之。

圖 1.1 為冷凍系統熱流方向示意圖。cop 為所獲之冷凍效果 (Q_1) 與耗用能量 (E) 之比值。圖中:

$$T_1 < T_2, \quad Q_2 = Q_1 + E, \quad \text{cop} = \frac{Q_1}{E} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

用冷凍設備之熱能自低溫輸送於高溫與用水泵將水由低位抽送高水位相似。所謂熱泵乃將冷凍設備視作使熱能逆流之幫浦。特別指冬天將冷氣機之蒸發與冷凝器轉換使用。將室外低溫大氣中熱源之熱能輸送於室內（熱池）以供給暖氣。夏天則以室內為「熱源」室外為「熱池」。



1.2 冷凍方法概述

圖 1.1 冷熱流關係示意圖

產生冷凍方法可分為自然冷凍，機械冷凍及電磁冷凍三類。

a. 自然冷凍

1. 利用固體熔解之潛熱——如冰塊熔化之吸熱。
2. 利用液體蒸發之潛熱——如水或液氮蒸發之吸熱。
3. 利用冰雪與鹽類混合以產生低溫。
4. 利用固體物質昇華之潛熱——如乾冰氣化時之吸熱。

b. 機械冷凍

1. 壓縮式冷凍法。
2. 空氣膨脹冷凍法。
3. 真空蒸發冷凍法。
4. 吸收式冷凍法。

c. 電磁冷凍 係利用電能直接產生冷凍效果。

1. 利用熱電偶之相反原理產生冷凍效果。
2. 利用消除磁場產生冷凍效果。

上述各種冷凍方法，以機械冷凍使用較為普遍，其中又以壓縮式冷凍法在使用上所受限制最少，故目前冷凍工業，以壓縮式冷凍法為主。

1.3 壓縮式冷凍法

a. 冷凍循環 壓縮式冷凍乃利用液態冷媒因壓力降低而蒸發時，吸收附近熱能產生冷凍效果。蒸發成為氣態之冷媒藉壓縮機將其自蒸發器中吸出壓縮至

高壓高溫之氣態，再藉另一媒質（如水或空氣）予以冷卻凝縮成爲液態，再經膨脹閥減壓進入蒸發器而蒸發。如此循環不已，謂之冷凍循環。循環程序見圖 1.2

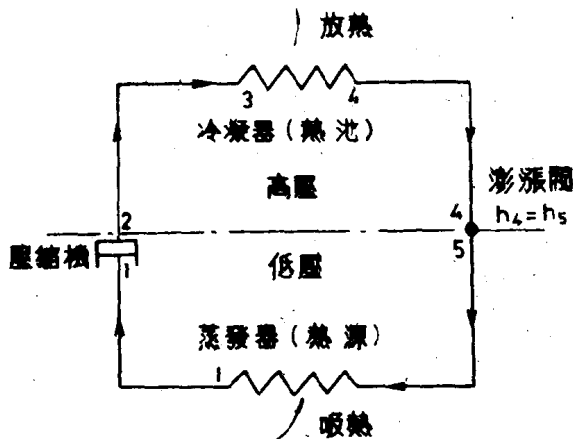


圖 1.2 壓縮冷凍系統基本循環圖

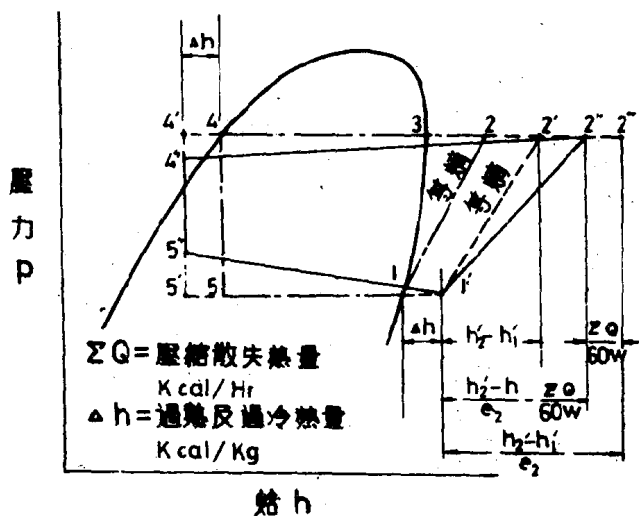


圖 1.3 冷凍系統 $p-h$ 圖解

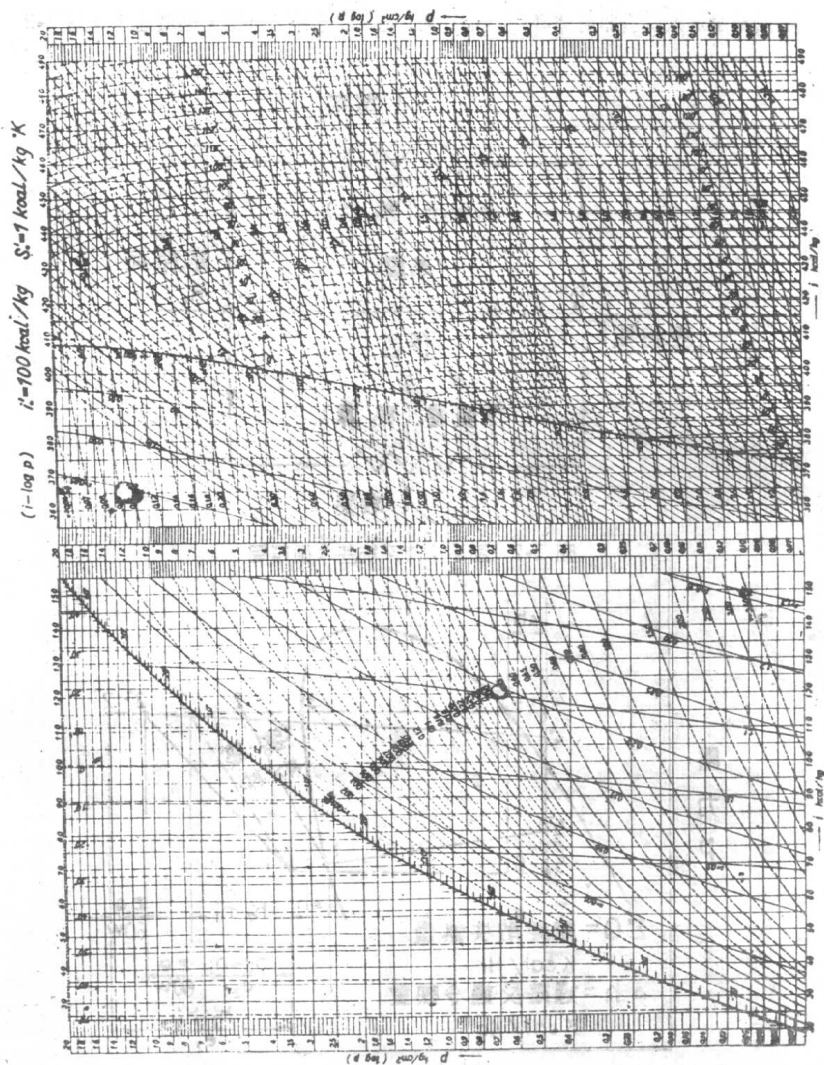


圖 1.4 氨冷媒之 Mollier chart

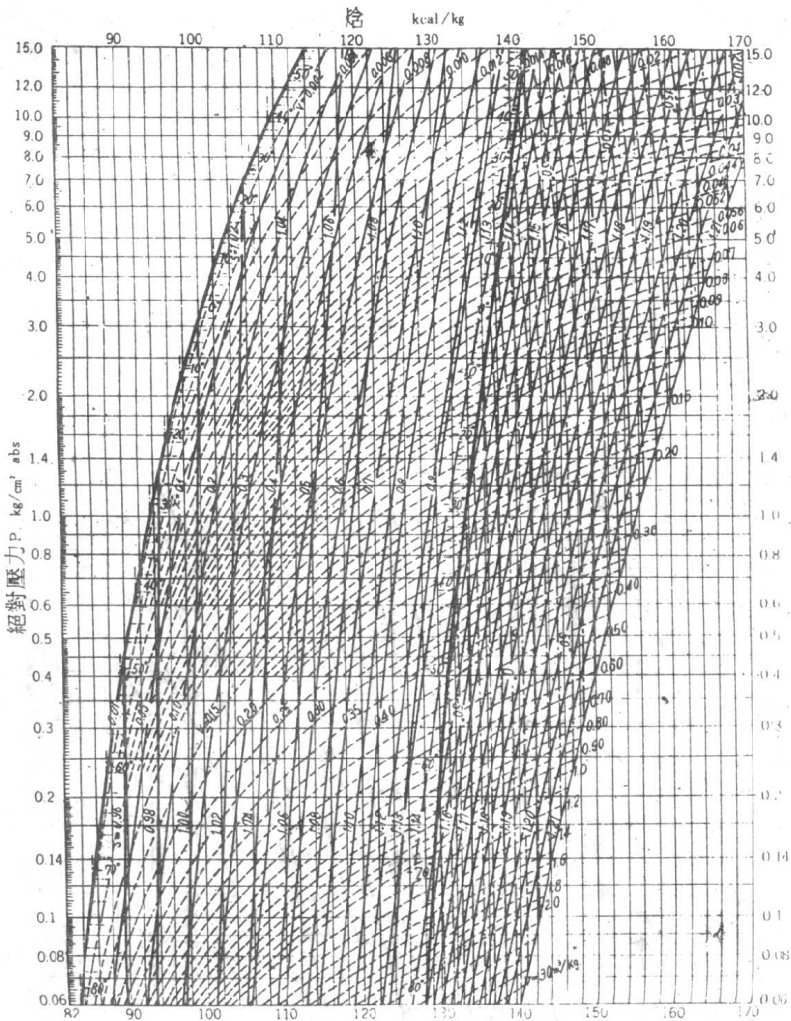


圖 1.5 冷媒 R-12 之 Mollier chart

冷凍循環系統有五主要部份：①壓縮機，②冷凝器，③減壓膨脹及冷媒流量控制器。④蒸發器，⑤冷媒管路。

b. 冷媒循環之圖解 壓縮式冷凍機運轉原理及性能之計算可以 $p-h$ 圖表示之。見圖 1.3。各種冷媒之 $p-h$ 坐標圖上繪出各種重要性質之等量曲線（如等熵，等溫，等比容等）即為 Mollier chart。便於圖解及計算。重要冷媒如氨，R-12，R-22 之 Mollier chart 見圖 1.4，1.5 及 1.6。

圖 1.3 中，1-2-3-4-5-1 表示基本循環，亦稱理論的循環；其中 1-2 表示壓縮，2-3-4 表示冷凝，4-5 表示膨脹，5-1 表示蒸發。基本循環係假定壓縮與膨脹均自冷媒之飽和狀態開始。壓縮循環等熵線，膨脹循環等熵線，而且管路及壓縮機中無壓力與熱能之增減。實際上為免液態冷凍在膨脹前之過早氣化，須予過

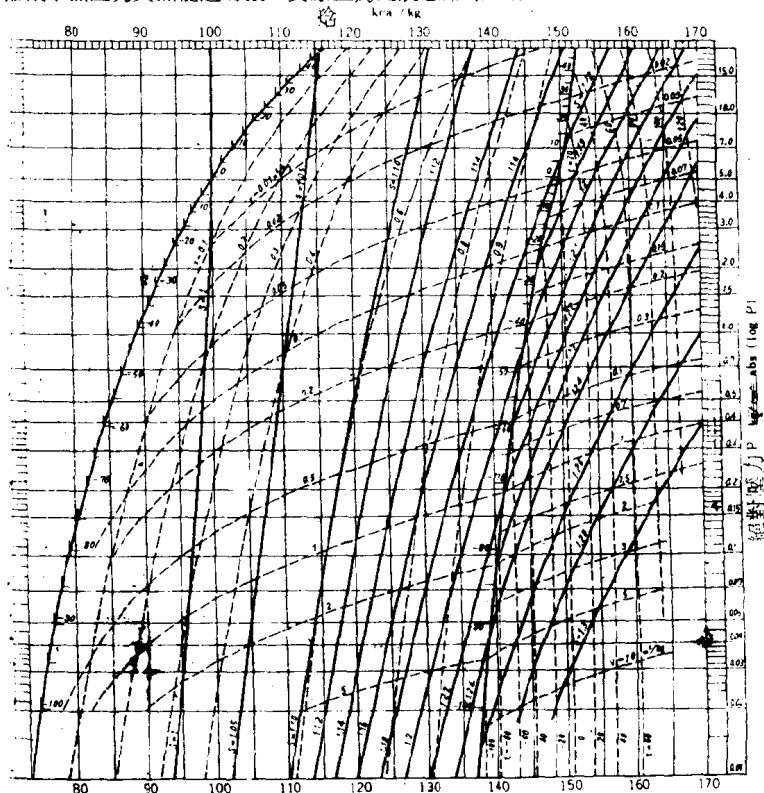


圖 1.6 冷媒 R-22 之 Mollier chart

冷 (sub-cool) 使冷至液化點以下, 如 4-4'。又蒸發後回流之氣態冷媒須予過熱 (super-heat) 使超過氣化溫度以免有液態冷媒進入壓縮機, 如 1-1'。又實際壓縮非等熵方式。而管路及壓縮機中有熱能之增減。故實際循環在 p-h 圖上應如 1'-2''-4''-5''-1'。

c. 冷凍計算 冷凍計算包括①冷凍量之計算, ②壓縮作功量之計算, ③冷凝排熱量之計算, ④冷媒循環量之計算。計算時先按基本循環算出理論數值, 然後根據各種已知之效率數值計算應有實際數值。

d. 理論計算式 (基本循環)

1. 冷凍量, kcal/kg $q_R = h_1 - h_4$
2. 壓縮作功, kcal/kg $q_W = h_2 - h_1$
3. 冷凝排熱, kcal/kg $q_C = h_2 - h_4 = q_R + q_W$

上式中 h 為焓量。如知蒸發壓力 (或溫度) 及冷凝壓力 (或溫度), 各焓量即可自 Mollier 圖或性質數值表中查算。上式數值如乘以冷媒循環率, W kg/hr, 則可算出 kcal/hr 數值。

W 之理論值為 V/v , V 為壓縮移動容積 m^3/hr , v 為冷媒進入前之比容 m^3/kg 。就活塞式壓縮機而言, $V = 60 \times N \times n \times \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L$ 。式中 N 為轉速 rpm, n 為汽缸數, d 為汽缸直徑 (m), L 為衝程 (m)。

e. 實際數值之計算 為改正理論數值之種種誤差, 乃將各種因素歸納為三個效率數值如下:

1. 容積效率 e_1 , 為進氣容積與活塞移動容積之比值, e_1 又可分為二部份 e_v 與 e_c , e_v 為吸氣時密度之減小所致, e_c 為氣缸餘隙之影響所致。通常 $e_v = 0.70 \sim 0.90$, $e_c = 0.75 \sim 0.95$, $e_1 = e_v \times e_c$ 。

2. 壓縮效率 e_2 , 為理論壓縮作功與實際圖示作功之比。通常 $e_2 = 0.65 \sim 0.90$ 。

3. 機械效率 e_3 , 為圖示作功量與壓縮機主軸需要作功量之比。

$$\text{故實際冷媒循環量 kg/hr } w' = \frac{V \times e_1}{v} = \frac{Q'_R}{(h_1 - h_4)}$$

$$\text{實際冷凍效果 kcal/hr } Q'_R = \frac{q_R \times V \times e_1}{v} = \frac{(h_1 - h_4) \times V \times e_1}{v}$$

$$\text{實際壓縮作功 kcal/hr } Q'_W = \frac{q_W \times V \times e_1}{v \times e_2 \times e_3} = \frac{(h_2 - h_1) \times V \times e_1}{v \times e_2 \times e_3}$$

$$\text{實際冷凝排熱 kcal/hr } Q'_C = Q'_R + Q'_W - \Sigma Q$$

式中 ΣQ 為壓縮機耗散於空氣, 水套或潤滑系統中之熱量。

如壓縮機作功以 hp 為單位表示, 且知 $1 \text{ hp} = 642 \text{ kcal/hr}$ 則

$$\text{理論馬力 } thp = \frac{(h_2 - h_1) \times V}{642 \times v}$$

$$\text{圖示馬力 } ihp = \frac{(h_2 - h_1) \times V \times e_1}{642 \times v \times e_2}$$

$$\text{驅動馬力 } bhp = \frac{(h_2 - h_1) \times V \times e_1}{642 \times v \times e_2 \times e_3}$$

1.4 其他冷凍方法

a. 空氣膨脹冷凍法 此法為利用空氣為冷媒以產生冷却效果。高壓空氣減壓而膨脹時，其本身溫度下降，即用此降低溫度之空氣直接供應作為冷氣之用。此法不同於蒸發壓縮式冷媒之需液化與氣化，而僅為氣態時壓力之變化，且實用上冷氣放出後不再循環故為開放式的。此種方法 COP 甚低 (0.75 以下)。且機械體形較他種方法為大，故不用於一般建築。惟在噴氣式飛機，利用本身動力系統現有壓縮空氣導出一極少量經過膨脹設備以產生冷氣供給艙房之用。

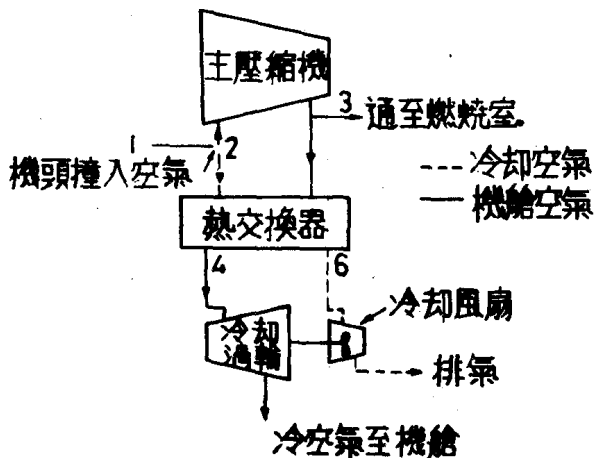


圖 1.7

b. 真空蒸發冷却法 此法為利用水為冷媒，於低壓狀態蒸發吸熱以降低溫度。藉產生之冷水循環以產生冷却作用。此法僅用於空氣調節供給冷氣，而不能用於冷藏。蒸發時低壓之產生，因體積大而需要氣壓甚低，普通真空泵不能適用，故須藉蒸汽噴射 (steam jet) 或離心式抽真空機以產生低壓。有剩餘蒸汽可供利用或燃料低廉之場所而冷氣噸位甚大時用此法最適宜。

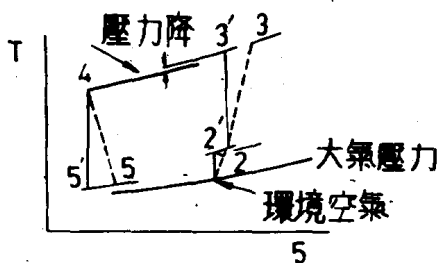


圖 1.8

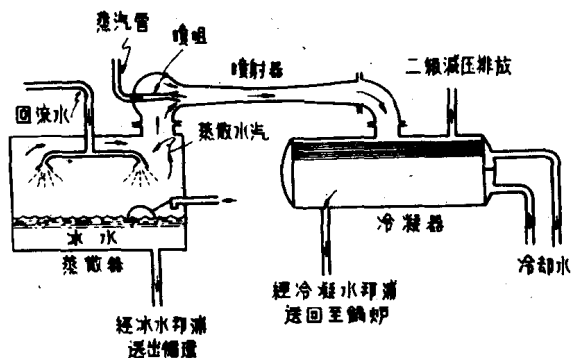


圖 1.9 蒸汽噴射冷却系統圖

c. 吸收式冷凍法 (absorption refrigeration)，此法為利用熱能為主以產生冷凍效果。其作用為一循環之系統。系統中有兩種媒質，一種為冷媒，另一種為吸收劑 (absorbent)。均作用高低二壓力系統之間。冷媒凝縮放熱與蒸發吸熱以產生冷凍效果與壓縮式之冷凍法相同。惟冷媒在蒸發器中壓力之降低與在凝縮器中壓力之提高不用壓縮機而用吸收劑之循環作用，藉熱能之加減及幫浦之運轉以操縱冷媒溶於吸收劑中之濃度與壓力。即低溫低壓低濃度之吸收劑溶液對冷媒具有高度之吸收性，使液態冷媒蒸發而溶入吸收劑中，變成高濃度溶液。此溶液藉幫浦輸送到分離發生器加熱提高壓力後放出高壓氣態冷媒。用其他媒質（如水或空氣）去熱以凝結之。如此循環作用產生冷凍效果。常用之媒質有水（吸收劑）與氨（冷媒），及溴化鋰（吸收劑）與水（冷媒）二類。

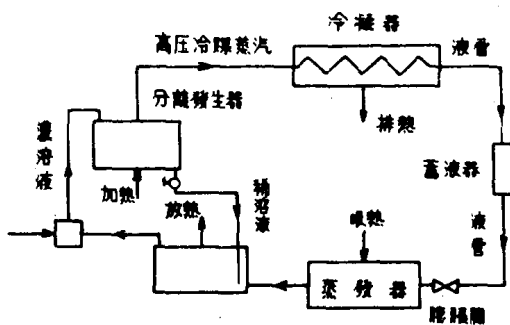


圖 1-10 吸收式冷却法系統圖

第二章 冷凍應用及負荷量之計算

冷凍工業之初期，多用於製冰及製造溫度控制。近代廣用於各種用途之空氣調節，食品加工與冷藏，冶金，醫藥，化工，機械，土木，軍事工程（包括太空模擬）等。冷凍在空氣調節上之應用見本篇第五章以下各章。

2.1 食品工業上之應用

食品工業為冷凍應用最廣者。自加工、儲存、運輸、以至銷售均用之。其目的不外控制細菌之繁殖與本身之化學變化以保持品質或改進品質。另一用途為藉冷凍以脫水。故冷凍可分為三類：1. 普通冷卻（自常溫至 0°C 左右）。2. 低溫冷凍（ 0°C 以下，有快凍與慢凍兩種）。3. 冷凍脫水。

上述第 1、2 兩種應用，庫內溫度、濕度、冷卻速率、保冷時間等因素，對食品品質之控制均極重要。其要求，視食品種類而異。一般而言，快凍較慢凍為佳。因快凍時降溫快，食品內之細菌活動迅速抑制，且食品組織中水份結成之冰屑較小，破壞作用較微。冷凍脫水乃先將食品凍結，然後控制熱源與溫度之壓力使冰屑昇華而乾燥脫水，各種食品之加工與儲藏溫度及比熱、潛熱等值見表 2.1 與 2.2。概略而言，魚肉及冰塊之庫藏約 -18°C 90~95 %RH；乳類蛋類約 2°C (35°F) 75~80 %RH；水菓蔬菜約 2°C (35°F) 85~90 %RH；乾菓乾菜約 10°C (50°F) 55~65 %RH。

2.2 製冰工業

機械製冰按冰塊之形狀可分為罐冰、板冰、及壓型冰三種。按成份可分為清水冰，鹽水冰與乾冰三種。罐冰與板冰均為清水冰。鹽水冰及乾冰均屬壓型冰。又製冰按其方法與設備可分製冰廠與小型製冰機二種。前者生產每塊 300 磅（136 公斤）或 400 磅（181 公斤）之大塊罐冰；後者生產小冰磚，醫院、餐館之自行製冰之用。

罐冰製冰廠分製冰間、冰庫、及雜屋三部份建築，用間接冷凍，以鹽水為第二冷媒。製冰間中裝有冷凍機器、結冰槽、鹽水攪拌器及加水、出冰、送冰等設備。罐冰之製造法係將清水注充於矩形冰罐中，然後將此罐浸入結冰槽中。結冰槽中裝冷凍蒸發管，且盛滿鹽水，藉攪拌器使鹽水在槽中循環流動，加速與冰罐之接觸，使罐中清水結冰，然後起出送至冰庫。