經濟部
Ministry of Economic Affairs

經濟部產業發展署 114 年度
國內外工廠管理技術參考手冊
食品冷藏與冷凍設備參考手冊

專案計畫名稱：食品產業競爭力強化與國際鏈結推動計畫

- 食品工廠管理能力提升

主辦單位：經濟部產業發展署

承辦單位：台灣優良食品發展協會

中華民國 114 年 11 月

目錄

壹、 前言 1
貳、 基礎理論與系統組成 2
一、 冷媒性質與分類 2
二、 冷凍循環系統 7
參、 零件與設備 9
一、 壓縮機種類 9
二、 冷凝器種類 10
三、 膨脹閥種類 11
四、 蒸發器種類 13
五、 偵測器與監控裝置 15
肆、 設計與安裝 17
一、 冷凍空調負荷計算 17
二、 管路設計與冷媒配管 18
伍、 檢查與維修 21
一、 常見故障判斷與排除 21
二、 壓力表判讀與冷媒洩漏檢查 22
三、 定期保養作業 23
四、 日常檢查 23
陸、 食品與冷凍機械介紹 25
一、 食品冷凍的目的與重要性 25
二、 冷凍對食品品質的影響 25
三、 食品冷凍機械設備 26
四、 小結 27
柒、 冷凍冷藏庫與 IQF 設計實例 28
一、 1,000 公噸低溫肉類冷藏庫設計範例 28
捌、 參考文獻 32

壹、 前言

冷凍與空調技術在現代生活與工業領域中扮演著極為重要的角色，從食品保存、醫療藥品冷鏈運輸，到建築物的環境調節與人類舒適度維護，皆無一不與此相關。隨著能源需求的增加與氣候變遷的挑戰，冷凍空調技術的正確應用與持續創新更顯重要。

然而，冷凍空調系統的運作往往涉及熱力學、流體力學與傳熱學等多重領域，使其在理解與設計上顯得相對複雜。若要正確掌握冷凍空調系統的運轉機理與應用，必須具備相關的基礎知識，並熟悉熱力學定律、控制方程式、單位系統與邊界條件等要素，以確保分析、設計與效能評估的正確性。

基於上述需求，提供一個完整且系統化的技術指南是相當必要的。首先自基礎理論與系統組成談起，介紹冷媒的性質與分類，並說明冷凍循環系統在食品冷凍設計中的應用。將會針對壓縮機、冷凝器、膨脹閥、蒸發器及監控裝置等零件與設備進行說明，協助讀者了解其功能與差異。

在設計與安裝部分，本手冊將帶領讀者進行冷凍空調負荷計算與管路設計，並探討冷媒配管的要點。實務操作，檢查與維修章節將提供常見故障的判斷與排除方法，如不冷、不啟動、過載、結霜與壓力異常，同時涵蓋壓力表判讀、冷媒洩漏檢查及電子檢漏技巧，以協助讀者或從業人員快速找出問題、提升系統運行效率，並確保食品冷凍設備的安全與可靠性。

本手冊亦將介紹食品冷凍加工所需的相關機械與應用，在食品產業中，冷凍與空調技術不僅是維持品質的重要環節，更是確保食品安全與延長保存期限的關鍵。從漁獲物的急速冷凍、肉類與乳製品的低溫儲存，到冷鏈物流與零售端的展示櫃，冷凍空調技術幾乎參與了食品從產地到餐桌的每一個環節。隨著消費者對食品新鮮度與營養價值的要求不斷提升，以及全球冷鏈物流的快速發展，使食品冷凍技術的重要性更加凸顯。

貳、 基礎理論與系統組成

一、冷媒性質與分類

冷媒 (Refrigerant) 是冷凍空調系統運行的關鍵媒介，其主要功能在於透過相變化過程吸收並循環傳遞熱量，以達到製冷或保鮮效果。冷媒通常具有較低的沸點，使其能夠在相對較低的溫度下蒸發並冷卻周圍環境。當處於液態時，冷媒吸收熱量並蒸發成氣體。接著透過壓縮和冷凝過程，冷媒釋放熱量並返回液態，為下一個循環做好準備。

冷媒廣泛應用於冷凍、空調與熱泵系統。不同冷媒在能效、環境影響及安全性方面各有差異，因此冷媒的選擇對於製冷系統的效能與永續性發展具有深遠影響。理想的冷媒應具備下列性質：

1. 熱力學性質良好：蒸發潛熱大、蒸發壓力適中，能在常見操作條件下提供高效的製冷效果。
2. 物理化學穩定：化學性質穩定、不易分解、不與材料反應，且沸點、臨界溫度等性質適合工業操作。
3. 安全性：冷媒應具有良好的安全性能，包括低毒性和低可燃性，對操作人員及環境友善。
4. 環境影響低：臭氧消耗潛勢值 (Ozone Depletion Potential, ODP) 低、全球暖化潛勢值 (Global Warming Potential, GWP) 低，符合永續發展的要求。
5. 經濟性：來源容易、成本合理，且具備成熟的應用與回收技術。

(一) 冷媒的種類

冷媒主要可分為以下五大種類：

1. 鹵代烴 (Halocarbons)：

鹵代烴，含有氯、氟或溴這三種鹵素中的其中一種或多種，廣泛作為冷凍和空調系統中的冷媒。其中，由氯、氟和碳組成的鹵烴是最常用的冷媒，即所謂的氯氟烴 (CFCs)。CFCs 通常用作冷媒、溶劑和發泡劑。最常見的 CFCs 是 CFC-11 (R-11)、CFC-12 (R-12)、CFC-113 (R-113)、CFC-114 (R-114) 以及 CFC-115 (R-115)。然而，由於 CFCs 對環境造成影響，其使用量正在迅速減少。

2. 碳氫化合物 (Hydrocarbons)：

碳氫化合物 (HCs)，主要由碳和氫組成的化合物。HCs 包括甲烷、乙烷、丙烷、環丙烷、丁烷和環戊烷。儘管 HC 極易燃，但由於其生產成本低、臭氧消耗潛勢值為 0、全球暖化潛勢值極低且毒性低，因此作為潛在的冷媒具有一些優勢。

在冷凍應用中，多種碳氫化合物，例如甲烷 (R-50)、乙烷 (R-170)、丙烷 (R-

290)、正丁烷 (R-600) 和異丁烷 (R-600a)，均被視為實用冷媒，廣泛應用於各行各業。

3. 無機化合物 (Inorganic Compounds)：

無機化合物如氨 (NH_3，R-717)、二氧化碳 (CO_2，R-744)、空氣 ($0.21O2 + 0.78N_2 + 0.01Ar$，$R-729$) 和二氧化硫 ($SO_2$)。其中，氨在實際應用方面最受關注。

4. 共沸混合物 (Azeotropic Mixtures)：

共沸混合物是由兩種或多種物質組成的特殊混合物，在特定比例和特定壓力時，其沸騰或冷凝過程中的溫度與壓力保持定值，表現如同單一純物質的冷媒。因此無法用蒸餾或分餾的方法將其成分分離。最常見的共沸冷媒是 R-502，其成分為 48.8% 的 R-22 和 51.2% 的 R-115。R-502 的 COP 高於 R-22，且毒性較低，使其有機會應用於家用冷凍系統和食品冷藏行業。

5. 非共沸混合物 (Non-azeotropic Mixture)：

非共沸混合物是由兩種或多種物質組成的特殊混合物，其特性是在定壓蒸發或冷凝過程中，冷媒的溫度會隨著相變而呈現漸變的滑移溫度。

(二) 冷媒的選擇

冷媒選擇可考慮三個面向，分別是：「安全性」、「環境負擔」、「可得性」

1. 安全性

著重可燃性/毒性分級、充注量限制、運轉壓力等級、材料/油品相容性與現場人員/空間條件。

(1) 分級：依 ASHRAE 34/ISO 817，第一碼 A/B 表毒性（A 低毒、B 較高毒），第二碼 1/2L/2/3 表可燃性（1 不燃、2L 低燃速、3 高可燃）。

(2) 充注量與場域：A2L/A3 在有人佔用空間時，常需檢漏、強制通風、切電/排風連動與充注量上限計算；B 類需加強毒性監測與應變。

(3) 壓力：高壓系統（如 R-410A、CO_2 超臨界）需要更嚴格的耐壓、排放與維修流程管理；低壓側（如 R-1233zd(E)）則要注意外氣入侵與真空側管理。

(4) 相容性：改冷媒涉及油品、密封件、膨脹閥與控制策略；不當改造會引發油回不良、過熱或漏點風險。

(5) 現場條件：機房 vs 室內、房間容積、通風條件、人員密度，皆會影響冷媒的選擇及其安全性。

2. 環境負擔

可考量直接排放（冷媒的 ODP/GWP、洩漏率）與間接排放（能耗）。

(1) 指標：ODP（臭氧消耗潛勢）、GWP（溫室效應係數）。

(2) 整體評估：可以使用全部排放（TEWI/LCCP）進行評估，可注意的是低 GWP 不等於低總排放，若能效差、維修差導致年耗電高或洩漏率高，總排放仍可能較高。

3. 可得性

包含設備與零件供應、技術人力、維修體系、耗材價格/配額與法規面。

(1) 設備/零件：是否有足夠品牌/機型支援、壓縮機與膨脹閥選型是否成熟。

(2) 人員與訓練：A2L/A3/B 類需要額外訓練與施工規範（防爆等級、動火管理、氨系統管理等）。

(3) 供應與成本：冷媒價格、鋼瓶規格、配額與關稅；替代冷媒的在地存量與交期。

(4) 規範：建築、電氣與消防規定的適配度（室內 A2L/A3 是否允許、機房條件、檢測與通風要求）。

表一、常見的冷媒表

冷媒	安全性（分級/風險）	環境負擔（ODP/GWP）	可得性	備註（應用）
R-410A	A1 不燃、低毒；高壓系統，需過壓防護	ODP 0；GWP ≈ 2088（高）	市場成熟、零件齊；但受配額/碳壓力	家用/商用空調與 VRF 既有系統
R-32	A2L 低燃速；充注量/通風/檢漏要求	ODP 0；GWP ≈ 675（中）	機種日益充足；需 A2L 施工/維運規範	新款家用/小商用空調
R-454B	A2L；性能接近 410A，燃性管理同 A2L	ODP 0；GWP ≈ 466（中低）	作為 410A 平台替代的供應逐步增加	新世代空調平台
R-134a	A1 不燃；中壓	ODP 0；GWP ≈ 1430（高）	舊機普遍；新案多以低 GWP 替代	舊式離心/螺桿、冷藏櫃
R-513A	A1 不燃；134a 兼容性佳	ODP 0；GWP ≈ 631（中）	替代料可得性提升；價格視品牌	134a 系統替代
R-1234ze(E)	A2L；機房需檢漏/通風	ODP ~0；GWP < 10（極低）	大型主機供應成熟；需 A2L 管控	低壓離心主機
R-1233zd(E)	A1 不燃；低壓側真空管理	ODP~0；GWP≈1（極低）	主機品牌供應穩定；零件相容性需審核	低壓離心主機
R-514A	B1 不燃但 B 類毒性；加強監測	ODP~0；GWP<5（極低）	專業度高，供應穩定度依品牌	低壓離心主機替代
R-404A / 507A	A1 不燃；中高壓	ODP 0；GWP ≈ 3922/3985（極高）	舊案常見；新案受強烈限制	商用冷凍舊系統
R-448A / 449A	A1 不燃；有溫度滑移	ODP 0；GWP ≈ 1387/1397（中高）	作為 404A 過渡替代，零件相容需調校	超市/餐飲改造
R-452A	A1 不燃；平台	ODP 0；GWP ≈	交通冷凍常見	冷凍車/冷藏櫃

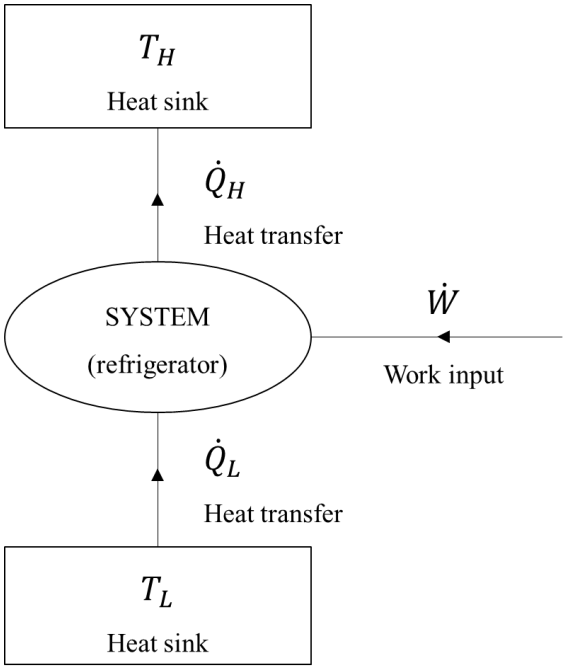
	相容佳	2140（高）	替代料	
R-744（CO_2）	A1 不燃；超高壓、超臨界運轉	ODP 0；GWP = 1（極低）	系統成熟；需高溫高濕熱設計與專業維護	超市、冷鏈、工業冷凍
R-717（NH_3）	B2L 可燃且有毒；需專業分區/通風	ODP 0；GWP = 0（極低）	高效率；需專責人員與防爆設計	工業冷凍、加工廠
R-290（丙烷）	A3 高可燃；嚴格充注量上限	ODP 0；GWP ≈ 3（極低）	小充注機型成熟；需防爆元件	插電展示櫃、小型商用
R-600a（異丁烷）	A3 高可燃；充注量小	ODP 0；GWP ≈ 3（極低）	家電主流；維修需安規	家用冰箱/冷櫃

二、冷凍循環系統

冷凍是將物質中（固體、液體或氣體）的熱量移除，使其溫度下降並可能發生相變的過程。此過程同時涉及顯熱與潛熱的傳遞，其中冰晶形成等相變行為對系統效率與產品品質具有關鍵影響。

在早期的方法中，是利用降低溫度使氣體在減壓下快速膨脹來達到製冷效果；另一種方式是將硝酸鈉、硫代硫酸鈉、亞硫酸鈉等鹽類加入水中，也能產生降溫作用，但若僅使用食鹽或氯化鈣，效果則較弱。隨著科技日新月異，目前工業上常見的冷凍系統透過機械方式製冷，利用冷媒來達到製冷的效果，因冷媒具有吸收環境中熱能的能力。

製冷系統的主要目標，即為熱機的逆循環作用，是將低溫介質中的熱源移除，並將其傳遞至高溫熱源（散熱端）。熱源 (Heat Source) 的絕對溫度為 T_{L}，由熱源轉移出的熱量稱為製冷效應（或製冷負荷）$\dot{Q}_{\mathrm{L}}$；另一方面，於溫度 T_{H} 的熱匯中，所釋放的熱量為 $\dot{Q}_{\mathrm{H}}$。這兩個過程皆需透過功輸入 $\dot{\mathrm{W}}$ 來完成。為使系統持續運轉，必須套用熱力學第一定律來檢驗能量平衡是否滿足。



圖一、製冷循環系統

冷凍是食品加工中重要的低溫保存技術，其所依據的製冷循環原理亦廣泛應用於空調調節與各類低溫設備。此類系統的核心在於冷媒作為介質，透過熱量傳遞達到降溫目的。冷媒的蒸發溫度低於熱源 (Heat Source)，使其能吸收熱能並蒸發，隨後升溫至超過熱匯 (Heat Sink)，並將熱能釋放。

在機械製冷循環系統中的構成，主要是由四個零件組成：

- 蒸發器 (Evaporator)：冷媒在低壓下吸收熱源的熱量並汽化，提供製冷效應。
- 壓縮機 (Compressor)：將蒸發器出的低壓蒸氣壓縮，提高壓力與溫度，為冷媒進入冷凝器做好準備。
- 冷凝器 (Condenser)：冷媒在高壓下釋放熱量至熱匯並液化，使熱能得以排出系統。
- 膨脹閥 (Expansion Valve)：降低冷媒壓力，使其溫度下降，回到蒸發器再次吸熱，形成閉合循環。

此外，系統通常配備輔助管路與控制裝置，如：冷媒配管、壓力與流量控制閥、儲液器與累積器，以維持冷媒流動的穩定性與系統運行的安全性。並透過上述四種零件並搭配冷媒配管及控制裝置，藉由冷媒在蒸發器吸熱汽化 → 壓縮機加壓升溫 → 冷凝器放熱液化 → 膨脹閥降壓回到蒸發器，形成循環系統。

食品冷凍循環系統需要快速降溫與長時間低溫保存，在冷凍過程中同樣遵循蒸發吸熱 → 壓縮升壓 → 冷凝放熱 → 膨脹降壓的循環原理，達到高效能的製冷效果，而食品冷凍與一般冷凍空調不同之處在於設計需更強調效率、溫度均勻性及衛生安全。

參、　零件與設備

一、壓縮機種類

壓縮機是製冷系統中唯一需要做功的元件，以運作原理分類主要可分為容積式與動態式：

1. 容積式壓縮機 (Positive Displacement Compressors)：

透過將固定量的氣體吸入一個封閉空間，再縮減此空間的體積以壓縮氣體。即藉由機械移動直接減少氣體的容積，進而提升壓力。該類型壓縮機適用於中小型設備，每次輸入的冷媒量是固定的。

2. 往復式 (Reciprocating)：

這類壓縮機的運作原理是透過活塞在氣缸內的往復運動來壓縮氣體。在吸氣行程中，氣體經由吸氣口進入氣缸；當轉子轉動時，活塞會將氣體壓縮，然後壓縮後的氣體會從對應的排氣口排出。

3. 迴轉式 (Rotary)：

滾動活塞式壓縮機及葉片旋轉式壓縮機為較常見的類型，此類壓縮機利用活塞或帶有伸縮葉片的轉子在偏心軸上旋轉或進行圓周運動以壓縮冷媒。當轉子在腔體內轉動時，形成密封空間，冷媒被吸入後隨著轉子旋轉在腔體內被壓縮體積，壓力進而提升。

4. 渦旋式 (Scroll)：

渦旋式壓縮機是一種相對較新的壓縮機技術。它透過一個固定渦旋和一個由電動機軸組件驅動的偏心或軌道運動的動渦旋來壓縮冷媒。動渦旋的軌道運動會將氣體從周邊吸入，形成氣囊，並在向固定渦旋中心移動的過程中進行壓縮，最終從排氣口排出。由於壓縮過程連續，噪音和振動較可明顯降低。

5. 螺旋式 (Screw)：

螺旋式壓縮機透過單個或兩個螺桿轉子相互齧合來壓縮氣體。在運作時，氣體從吸氣側進入，被旋轉的螺桿捕獲並沿軸向壓縮，最終從排氣口排出。這種壓縮機在高可靠性和性能方面優於往復式壓縮機，並且在大型商業和工業應用中廣泛使用，被認為是未來冷水機發展的首選。大容量的雙螺桿壓縮機是其典型代表。

6. 動態式壓縮機 (Dynamic Compressors)：

其運作原理為透過高速旋轉的扇葉將動能傳遞給氣體，然後再將動能轉換為壓力能，進而壓縮氣體。此類壓縮機適用於需要處理大流量氣體但壓縮比相對較低的設備，因此更適合應用於大型設備或較具規模之工廠。

7. 離心式 (Centrifugal)：

離心式壓縮機的運作原理與離心泵相似，是透過連續的動能交換，將冷媒加壓。當冷媒從蒸發器進入壓縮機時，高速旋轉的扇葉將動能傳遞給氣體提升其流速，隨氣體輸出至後段殼體時流速減緩，且一部分的動能轉換為靜態壓力，使冷媒形成高壓狀態。

這類壓縮機主要利用旋轉速度和葉片尖端速度的組合來產生所需的壓力差，但其單次壓縮之壓差可能不及容積式壓縮機壓縮機，常會以多組葉扇串聯以增加其壓縮能力。

8. 軸流式 (Axial)：

氣體進入壓縮機後，沿著與轉軸平行的方向通過高速旋轉的葉片（轉子）時，獲得動能而使流速提升，隨後氣體擴散至下一排固定不動的葉片（靜子）時，部分動能轉換為壓力以達到增壓。但此類設備壓縮比低且成本高，主要應用於燃氣渦輪機，於傳統的製冷系統較不常見。

壓縮機根據外殼與內部元件之密封性可分為以下三種：

1. 開放式壓縮機 (Open Compressors)：

壓縮機與驅動馬達各自獨立，以皮帶或鍊條驅動，而這類壓縮機需要外部軸封來防止冷媒洩漏，但其優點是壓縮機與馬達兩個元件可以獨立維護或更換，一般會用於大型設備。

2. 半封閉式壓縮機 (Semi - hermetic Compressors)：

此種設備的馬達與壓縮機安裝在同一個可拆式裝置內，但與全密閉式不同的是，其外殼設計方便在現場進行拆卸和維修，也能達到兩階段壓縮，同時可有效控制冷媒洩漏，但需個別加裝冷卻裝置。

3. 封閉式壓縮機 (Hermetic Compressors)：

封閉式壓縮機顧名思義馬達與壓縮機密封在同個外殼中，通常用於高效能的緊湊型盤管空冷冷凝機組中，在家用冷氣機與冰箱較常見。

封閉式的設計意味著整個機組是完全密封的，這有助於防止冷媒洩漏，而冷媒同時也負擔整座機組的散熱，因此效率會最差，過熱時通常會停止運轉以降溫。此種壓縮機在運行期間通常不需要進行維護，相對的，當機器損壞時也無法維修。

二、冷凝器種類

利用熱交換帶走冷媒的熱，在選擇冷凝器時一般會優先考慮介質的熱交換量，依照冷卻方式可分為以下三種：

1. 水冷式 (Water - Cooled)：

透過水流來傳遞熱量，以冷卻冷媒，其運作時，熱量會從冷媒傳遞到水流中。

在熱力學分析中，水冷式冷凝器通常被假定為絕緣的，即與環境的熱量交換可忽略不計。

2. 空冷式 (Air - Cooled)：

利用空氣作為冷卻介質，運作原理為透過空氣來冷卻來自壓縮機的過熱冷媒，並將熱量排出。其優點為無需用水，不會有結冰、結垢和腐蝕等問題，同時也省去了水管、循環泵和水處理的需求。

3. 蒸發式 (Evaporative)：

結合了水冷和氣冷的原理，透過水蒸發到流動的氣流中來進行冷卻。冷媒在管內循環，水則透過噴淋系統流過這些管子。當空氣強制向上通過盤管時，一小部分水會蒸發，並在蒸發過程中吸收製冷劑的汽化潛熱，將熱量排放到大氣中，其效率取決於空氣的溫溼度、氣流體積以及空/水介面的效率。然而，此設備需要大量用水，且為避免溶解性固體積聚而污染表面，冷卻水之處理是必要的。

水冷式冷凝器常見的類型有殼管式、套管式及殼盤管式；空冷式則以鰭管式與板式較普遍。

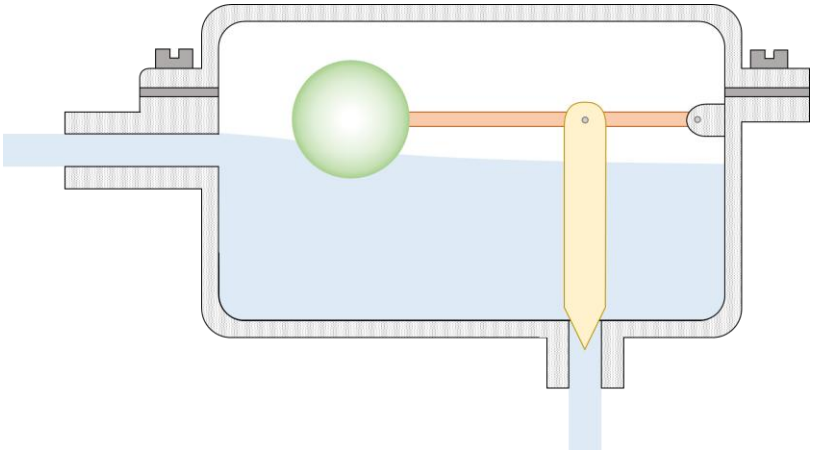
三、膨脹閥種類

膨脹閥也被稱作節流裝置，是用來控制冷媒流量的主要元件，讓冷媒從高壓處流至低壓處，使其能蒸發帶走熱量，下列為常見的膨脹閥類型：

1. 浮球式膨脹閥 (Float Valve)：

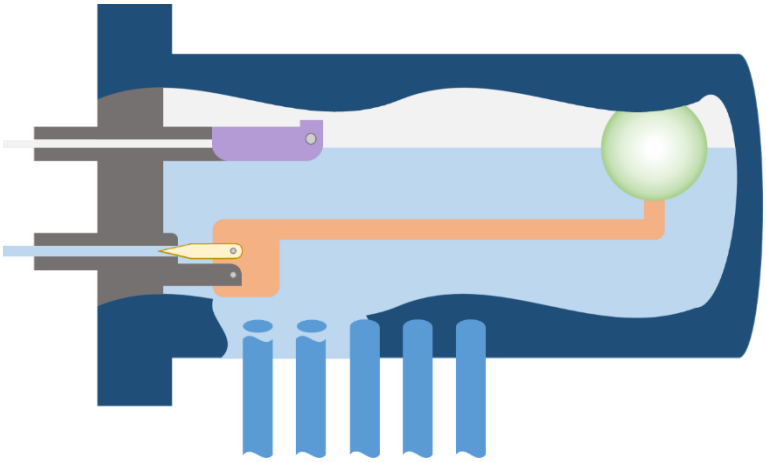
此種膨脹閥構造類似馬桶水箱中之浮球，常用於控制滿液式冷凝器之冷媒流量，並分為高壓側與低壓側兩種。而在某些情況下，浮球閥會與一個電氣開關連動，這個機制可以讓液態冷媒週期性地進入蒸發器，使液位在預設的限制範圍內波動。

- 高壓側：膨脹閥位於高壓處，當冷媒流入暫存槽至一定高度時，浮球會向上帶動蒸發器入口的開關打開，使冷媒流入蒸發器。使用此種裝置的製冷系統中，一般僅會有單個蒸發器、壓縮機與冷凝器。



圖三、膨脹閥高壓側示意圖

- 低壓側：膨脹閥位於低壓處，當冷媒低於暫存槽的特定高度時浮球會下降，促使冷凝器出口之開關打開，使冷媒能流入蒸發器。此種裝置可用於含有多個蒸發器的製冷系統。



圖二、膨脹閥低壓側示意圖

2. 恆壓式膨脹閥 (Constant - Pressure Expansion Valves)：

恆壓式膨脹閥是恆溫式膨脹閥的前身，屬於一種壓力調節裝置，由於其無需任何外部機械輔助即可自動開啟和關閉，因此被稱為自動膨脹閥。此種裝置主要透過感測蒸發壓力並維持出口壓力恆定，以控制液態冷媒進入蒸發器的流量。但由於此設備所承載的冷凍負荷是恆定的，因此應用範圍較受限。

3. 恆溫式膨脹閥 (Thermostatic Expansion Valves)：

恆溫膨脹閥為製冷系統中最廣泛使用的節流裝置，可以說是製冷系統中高壓側與低壓側之間的減壓閥。一般而言，控制閥門會裝在冷凝器出口與蒸發器入口之間，而溫度感測器則設在蒸發器出口，感測器透過偵測離開蒸發器之蒸汽冷媒

溫度，進而自動控制液態冷媒流向蒸發器的流量。正常情況下冷媒的輸入量是恆定的，若冷媒過早汽化形成過熱蒸汽，感測器會促使控制閥開啟，加大冷媒從冷凝器輸入的流量。

4. 毛細管式膨脹閥 (Capillary Tubes)：

毛細管是最簡單的冷媒流量控制裝置，常用於小型密閉式製冷系統，當液態冷媒從冷凝器經由一條內徑極小的銅管（直徑 0.4～3 mm，長度 1.5～5 m）流入蒸發器時，冷媒壓力會從高壓狀態降低至蒸發壓力，並且此種設備能夠維持恆定的蒸發壓力不受製冷負荷影響。由於其簡單性與效能，毛細管式膨脹閥廣泛應用於小型密閉式製冷系統，甚至在家用冰箱中也被視為熱交換器的一部分。

四、蒸發器種類

蒸發器主要功能為製造冷能，將目標物冷卻，依據冷媒冷卻目標物之型式可分為直接冷卻與間接冷卻兩種型式，直接冷卻式之冷媒透過直接汽化而使目標物降低；間接冷卻式則是利用冷媒冷卻介質，再由介質冷卻目標物，而這類介質以液體居多。

一般常見的蒸發器以移除熱的對象作區分，有液體冷卻式 (Liquid Coolers) 與空氣與氣體冷卻式 (Air and Gas Coolers) 兩種：

1. 液體冷卻式 (Liquid Coolers)：

此種蒸發器主要用於冷卻液體，無論是乾式蒸發器或滿液式蒸發器，殼管式熱交換器是最典型的範例。這些冷卻後的液體可以作為二次冷媒，也可以直接作為最終產品，其核心功能都是將熱量從液體（如：水、牛奶、鹽水）中移除。由於這些冷卻後的液體 （中間介質或液態產品）之後多用於冷卻其他物品或被消費，因此液體冷卻器被歸類為間接冷卻蒸發器。

液體冷卻式蒸發器依照冷媒在管路中的狀態又分為以下兩種：

(1) 乾式蒸發器 (Dry Evaporator)：也稱作直接膨脹蒸發器，其運作原理是讓冷媒在管內沸騰汽化，蒸發器入口為飽和液態冷媒及部分蒸汽冷媒，透過膨脹閥控制流量後，確保出口處為過熱蒸氣並維持 100% 飽和蒸汽狀態，使液體則在管路外部被冷卻，藉由熱交換達到降溫目的。此類蒸發器所需冷媒量較少，可降低成本，也廣泛用於食品與製冷工業，如飲用水、空調冷卻水、巴氏殺菌後的牛奶冷卻及各類製程冷卻操作。

(2) 滿液式蒸發器 (Flooded Evaporator)：其運作原理是讓冷媒充滿殼內，大部分為飽和液態冷媒液，而待冷卻的液體則在管內流通，這種蒸發器一般由浮球式膨脹閥控制流量，通常會裝設鰭管以提升熱傳效率並縮小設備尺寸。由於

冷媒會在殼內快速沸騰，需設置蒸氣分離槽，以確保只有 100%飽和蒸汽冷媒會被吸入壓縮機。此類型蒸發器通常應用於大型設備中，製冷效果更好，但需要大量冷媒充住。

2. 空氣與氣體冷卻式 (Air and Gas Coolers)：

空氣與氣體冷卻式之冷媒直接在管路內部沸騰，並透過鰭片將熱量從被冷卻的介質（如：空氣）傳遞給冷媒，符合「直接冷卻空氣，空氣再冷卻產品」的定義。因此，空氣與氣體冷卻式蒸發器被歸類為直接冷卻蒸發器。

五、偵測器與監控裝置

1. 冷媒混合物儲液槽 (Accumulators)：

儲液槽主要用於保護壓縮機免於液態冷媒回流的損害，因為壓縮機是設計來壓縮氣態冷媒而非液態冷媒。液態冷媒進入壓縮機會稀釋潤滑油、沖刷軸承，甚至導致液擊 (Slugging)，這會造成壓縮機的閥簧片、活塞、連桿和曲軸等部件損壞。

而儲液槽可以作為一個暫時的儲存槽，容納過多的冷媒與油混合物，以壓縮機可以安全處理的速率將其回流，有些儲液槽會內建熱交換盤管 (Heat - Exchanger Coil)，將液態冷媒汽化以提高系統效率。最後，在選擇儲液槽時應考量設備噸位、蒸發器溫度和儲液量等條件。

2. 冷媒接收槽 (Receivers)：

其功能類似緩衝區，主要用於儲存冷凝器無法容納的多餘液態冷媒，確保膨脹閥在負載變化下仍能獲得穩定的液態冷媒供應，特別適用於冷媒需求量超過 3.6 公斤的系統，一般有臥式與立式兩種設計。

3. 潤滑油分離 (Oil Separators)：

其作用是將壓縮機排出的高壓氣態冷媒中夾帶的潤滑油分離出來，保持冷媒循環的純淨，以避免系統效率降低或零件受損。常見的聚結式分離器透過特殊設計，使油粒聚結沉降。所有的分離氣都需裝設外部浮子組件將油導回壓縮機，適用於氨、R-134a、丙烷等多種冷媒。

4. 濾網 (Strainers)：

透過物理過濾方式，攔截冷媒管路中的固體雜質，如：污垢和金屬屑，以避免堵塞流量控制閥孔或止回閥而造成壓縮機損壞。常見類型有直通密封式、可清潔的角式及 Y 型濾網。

5. 乾燥器 (Dryers)：

用於去除冷媒中的水分，避免機器內部結冰、腐蝕或產生化學反應。其內部含有乾燥劑，可吸收微量水分，並根據乾燥能力與冷媒流量選擇適當尺寸，大多數製冷系統在安裝時都會配置乾燥器。

6. 止回閥 (Check Valves)：

主要為確保冷媒單向流動，引導冷媒經過流量控制裝置或讓冷媒繞過流量控制裝置的迴路是其兩個主要功用。止回閥通常只會在壓力方向正確時打開，因此安裝時必須確保箭頭指向正確的冷媒流動方向。

7. 電磁閥 (Solenoid Valves)：

電磁閥是製冷系統中的自動控制閥門，與手動截止閥功能相同，但以電子訊

號控制，在通電時打開或關閉閥門，以精確控制冷媒或水路的流量，且具備遠端控制的便利性，因而在製冷系統中被廣泛應用。

8. 除霜器 (Defrost Controllers)：

主要應用於低溫冷凍系統，用來清除蒸發器盤管的表面結霜，以保持熱交換效率。除霜器通常以計時器控制，並能依序執行抽氣、輸入熱風、壓力平衡與風扇延遲啟動等步驟，確保冰霜有效清除。

肆、　設計與安裝

一、冷凍空調負荷計算

1. 庫體（六面）侵入的熱量：

壁體負荷

熱負荷＝隔熱材料 k 值 × 面積 × 溫度差

庫體總熱負荷＝天花板熱負荷＋地板熱負荷＋四面牆體熱負荷

- 面積（m^2）
- 溫度差（K）
- 隔熱材料 k 值（熱灌流率 W/$m^2 \cdot K$）

2. 開關門空氣進入的熱量：

$$\text{熱負荷} = \frac{\text{空氣體積流量}}{\text{空氣比體積}} (\text{庫外焓熱} - \text{庫內焓熱})$$

- 空氣體積流量（m^3/s）
- 空氣比體積（m^3/kg）
- 焓熱（kJ/kg）

3. 入庫物品冷卻/凍結得熱量：

熱負荷＝入庫量 × 結凍前比熱 × (初溫 − 凍結點)＋入庫量 × 潛熱＋入庫量 × 結凍後比熱 × (凍結點 − 終溫)

- 入庫量（kg/s）
- 凍結前比熱（$kJ/kg \cdot K$）
- 凍結後比熱（$kJ/kg \cdot K$）
- 潛熱（kJ/kg）
- 初溫（℃）
- 終溫（℃）
- 凍結點（℃）

4. 蔬果類的呼吸熱：

熱負荷＝換氣量 × 焓熱

- 換氣量（m^3/s）
- 焓熱（kJ/m^3）

5. 作業人員的人體發熱量：

熱負荷＝人體發熱量 × 人數 × 作業時間比

- 人體發熱量（W）
- 人數：作業人員人數
- 作業時間比：實際作業時間 ÷ 設計基準時間

6. 機電設備與其他的發熱量：

照明：

$$\text{熱負荷} = \text{單位面積發熱量} \times \text{地板面積} \times \text{照明時間比}$$

- 單位面積發熱量（W/m^2）
- 地板面積（m^2）
- 照明時間比：實際照明時間 ÷ 設計基準時間

冷卻扇：

$$\text{熱負荷} = \text{電器容量} \times \text{作用時間比}$$

- 電氣容量（W）
- 作用時間比：實際作用時間 ÷ 設計基準時間

7. 安全係數：

$$\text{冷凍冷藏負荷}(W) = \text{總熱負荷}(W) + \text{總熱負荷}(W) \times \text{安全係數}(20\%\sim30\%)$$

二、管路設計與冷媒配管

1. 管徑與壓降目標：

(1) 吸氣線 (Suction Line)：在最低負荷時也必須確保油能回到壓縮機。若為立管，當為了滿足低負荷回油而使滿載壓降過大，則應採用雙立管 (Double Riser)。

(2) 排氣線 (Discharge Line)：應控制線速與壓降，常用設計線速 10～18 m/s。機組端應設置避震軟管 (Vibration Absorber)，並配置油分離器 (Oil separator)，其進出口須與主管同徑。

(3) 液體線 (Liquid Line)：設計重點是避免閃蒸。液體線的等效飽和溫降≤ 0.5～1 K。若管線過長或經過高溫區段，必須提供過冷 (Subcooling) 或加裝液冷卻器。

(4) 等效長度 (Equivalent Length)：所有彎頭、三通與閥件的等效長度必須計入總壓降。若壓降逼近上限，應優先增加過冷、加大管徑或調整管路。

(5) 設計原則：以油回+壓降雙目標決定管徑。如：單立管無法同時滿足，則採用雙立管。

2. 油管理

吸氣線水平段應保持 0.5 ~ 1% 坡度。在蒸發器出口或轉垂直處設置油封彎

(Trap)，避免啟停或除霜時液體回流。

(1) 雙立管 (Double Riser)：小管以最低負荷能回油為準，滿載由大小管同時分擔，以降低壓降立管底部設油封，立管應自上方接入總管。
(2) 油分離器 (Oil Separator)：回油管接吸氣側，並設視液鏡 (Sight Glass)、節流閥與電磁閥，回油流量需調至略大於正常回油量。排氣線進出油分離器時不得縮徑。良好設計可將油帶出率降至 0.0003%～0.001%。
(3) 吸氣蓄液器 (Suction Accumulator)：主要用途是防液擊與緩衝回液。適用於大型蒸發器或啟動時易傾倒液體的系統。容量應依噸數、蒸發溫度與蓄液需求選型。

3. 液路與供液控制

(1) 毛細管 (Capillary Tube)：適用於小型、負荷固定的系統（如：展示櫃）。容量範圍約 1～5 kW。無主動調節功能，負荷變動時過熱度波動大。
(2) 熱力膨脹閥 (TXV)：最常見；適用於 3～200 kW。以蒸發器出口過熱度進行控制。開啟過熱度約 2～4 K。低蒸發溫度時需修正容量。
(3) 電子膨脹閥 (EEV)：適用於 ≥100 kW、變負荷大、或精度要求高的系統。能維持小且穩定的過熱度，對非共沸冷媒尤佳。
(4) 液線附件與抽庫 (Pump-Down)：液線典型順序：電磁閥 (SOL) → 過濾乾燥器 (Filter Drier) → 視液鏡 (Sight Glass) → 膨脹裝置。乾燥器前後應設取壓口，停機時執行抽庫，將冷媒抽回至液體儲液器 (Receiver) 或冷凝器。儲液器容量需涵蓋季節變化與抽庫量；當系統充注量 ≥ 3～4 kg 或採用膨脹閥控制時，幾乎必須設置。

4. 長配管與高低差

(1) 超長液線：需增加過冷或加裝液冷卻器。仍有閃蒸風險時，應改用次級流體（鹽水或乙二醇）輸送冷量。
(2) 高低差：
(3) 蒸發器高於機組 → 必須確保低負荷回油，多採雙立管＋油封彎。
(4) 蒸發器低於機組 → 注意液柱靜壓，並檢核抽庫能力與吸氣蓄液器容量。
(5) 匯流幹管與總管：支路應採上進下出或頂部接入，避免偏流。必要時使用分配器 (Distributor) 確保均流與攜油。

5. 材料、保溫與支撐

(1) 材料：中小型系統以銅管 Type L 為主；大徑或高壓場合可用鋼管。
(2) 保溫：吸氣管全程保溫，並確保防潮層 (Vapor Barrier) 連續密封。液體線若經高溫或日曬路段，應加保溫避免閃蒸。

(1) 支吊架：依管徑與重量決定間距，並考慮熱伸縮。穿牆或樓板時加設套管與防火封堵。機組端需設避震軟管。

6. 施工工法

(1) 焊接：銅管焊接必須全程氮氣保護，避免管內壁氧化。完工後需乾燥與清潔。

(2) 測點配置：應設壓力錶座、測溫套管、乾燥器差壓取壓口於方便檢修與讀取的位置。

(3) 油分離器與吸氣蓄液器連接：應有回油節流閥、電磁閥、視液鏡。排氣經過油分離器時不得縮徑。透過溫控或過熱度邏輯避免冷凝液回流至壓縮機。

7. 設計要點、現場檢查與常見錯誤

(1) 設計要點：管徑必須以線速＋壓降雙目標決定，優先考慮油回與防液擊，吸氣線需保持坡度，立管若不合格則改採雙立管，液體線需具備過冷並設視液鏡＋乾燥器壓差監測。

(2) 現場檢查：檢查坡度、雙立管、油封彎是否齊備，保溫與防潮層收頭是否完整，穿牆處是否有套管與防火封堵，油分離器與回油管件是否齊全並可維護。

(3) 常見錯誤：

A. 等效長度漏算 → 壓降過大

B. 液體線過長未過冷 → 閃蒸

C. 吸氣線未保溫或防潮層破口 → 結露滲水

D. 未設儲液器或抽庫 → 停機液擊

伍、 檢查與維修

一、常見故障判斷與排除

1. 庫溫無法下降

(1) 可能原因：

冷媒不足或洩漏

蒸發器結霜、風循環不良

冷凝器散熱效率低下（灰塵、油污堆積）

開關庫門過於頻繁，高溫物直接入庫

(2) 影響：食材無法保持低溫，造成品質下降或腐敗。

(3) 排除方式：

確認冷媒量是否充足，必要時補充或檢查洩漏

檢查風機與蒸發器，若結霜需進行除霜

清潔冷凝器，保持散熱通暢

加強人員管理，避免頻繁開門或將高溫食材直接放入

2. 無法啟動（壓縮機或系統不運轉）

(1) 可能原因：

電源中斷或保險絲熔斷

控制系統或溫控器故障

壓縮機過熱，保護裝置啟動

(2) 影響：冷庫完全喪失制冷功能，食材面臨高溫風險。

(3) 排除方式：

檢查電源、保險絲及接線

測試控制系統及溫控器是否正常

確認壓縮機溫度，若過熱則檢查散熱系統或冷卻風扇

3. 過載（壓縮機或電流異常增高）

(1) 可能原因：

庫存量過高 (≥ 70%) 阻礙冷氣循環

冷凝器髒污堵塞導致壓縮機負荷加重

壓縮機零件老化或潤滑不足

(2) 影響：壓縮機過熱燒毀，冷庫停機。

(3) 排除方式：

調整庫內存放量，保持理想在 60% ~ 70%以下

清潔冷凝器與過濾網

檢查壓縮機狀態，必要時加注潤滑油或維修

4. 結霜/結冰

(1) 可能原因：

庫門頻繁開啟導致濕氣進入

除霜裝置故障

高溫或高濕物品直接放入庫內

(2) 影響：蒸發器被冰霜覆蓋，氣流受阻，制冷效率大幅下降。

(3) 排除方式：

減少庫門開啟次數，縮短開啟時間

檢查自動除霜系統（電熱管、熱氣除霜、定時器）是否正常

要求作業人員將高溫物預冷後再入庫

5. 壓力異常（壓縮機高壓或低壓異常）

(1) 可能原因：

冷媒不足（壓力過低）

冷媒過量或冷凝器堵塞（壓力過高）

管路結冰或油污造成阻塞

(2) 影響：制冷效率降低，壓縮機容易損壞。

(3) 排除方式：

使用壓力表比對運轉壓力是否落在正常範圍

若壓力過低，檢查有無冷媒洩漏並補充

若壓力過高，檢查冷凝器散熱情況或釋放冷媒

二、壓力表判讀與冷媒洩漏檢查

1. 壓力表正常運轉範圍

(1) 低壓側：顯示蒸發器的蒸發壓力，應維持在設計值（不同冷媒有不同範圍）。

(2) 高壓側：顯示冷凝器壓力，正常範圍內波動即可。

(3) 異常判斷：

壓力過低 → 冷媒不足、蒸發器結冰、膨脹閥故障

壓力過高 → 冷凝器堵塞、冷媒過多、環境溫度過高

2. 冷媒洩漏檢查方法

(1) 電子檢漏法：用電子檢漏儀在接頭、閥門、焊點檢測是否有微量洩漏。

(2) 肥皂水法：將肥皂水塗於管路接頭，觀察是否有氣泡。

(3) 壓力監控法：長期比對壓力表數據，若逐漸下降表示可能洩漏。

(4) 視覺檢查：觀察管路是否有油漬（冷媒油隨冷媒滲漏出來）。

三、定期保養作業

1. 除霜作業

(1) 定期檢查蒸發器霜層厚度，過厚會影響冷氣循環。

(2) 確認自動除霜系統正常（定時、溫控或手動）。

(3) 避免人工除霜時損壞蒸發器銅管。

2. 冷凝器清潔

(1) 每月至少清洗一次冷凝器表面，去除灰塵與油污。

(2) 保持通風良好，避免堆放雜物堵塞散熱氣流。

3. 過濾網清潔與更換

(1) 應定期拆下過濾網沖洗或更換，以確保氣流順暢。

(2) 髒污堵塞的過濾網會增加系統負荷，導致耗電量上升。

4. 冷媒補充與更換

1. 根據壓力值與運行狀況，判斷是否需要補充冷媒。

2. 使用正確型號的冷媒，避免不同冷媒混合。

3. 定期進行真空測試，確保系統密封性。

5. 系統測試與運轉紀錄

(1) 每日紀錄庫溫、壓縮機電流、壓力值等數據，建立運轉日誌。

(2) 定期測試壓縮機運轉聲音、震動是否正常。

(3) 檢查散熱風扇、油面高度及顏色，防止潤滑不足。

四、日常檢查

1. 每日檢查

(1) 檢查壓縮機運轉聲音、震動及溫度是否異常。

(2) 保持冷凝器散熱片或水管清潔，避免灰塵、油污影響散熱效率。

(3) 檢查蒸發器是否結霜過厚，必要時除霜。

(4) 檢查冷媒管路接頭、閥門是否有油漬（可能代表洩漏）。

(5) 比對高壓、低壓壓力表與標準範圍。

(6) 檢查潤滑油之油位及顏色是否正常，防止潤滑不足。

2. 每月檢查

(1) 清理冷凝器散熱片或冷卻水塔。

(2) 測試電流與電壓，確保在額定範圍。

(3) 檢查自動除霜系統運作是否正常。

3. 每季檢查

(1) 測試冷凍油酸值，必要時更換。

(2) 檢查膨脹閥、濾乾機是否堵塞。

(3) 檢查皮帶張力與馬達軸承。

4. 每年檢查

(1) 放空並更換冷凍油。

(2) 清理蒸發器、冷凝器內部水垢或沉積物。

(3) 檢測保護裝置（高低壓開關、過載保護）

陸、　食品與冷凍機械介紹

食品冷凍技術是現代食品加工與保存上最常使用的技術之一。透過冷凍，能有效降低食品中微生物與酵素活性，延長保存期限，並維持營養與風味，因此在各類海鮮、生鮮蔬果及即時食品等各種產品中被廣泛運用。前幾章介紹了冷凍原理、零件與設備等設計，本章將著重於冷凍技術在食品產業中的實際應用。

一、食品冷凍的目的與重要性

冷凍是一種歷史悠久且廣泛應用於食品工業的保鮮技術。其基本原理在於將食品的溫度迅速降低，以抑制食品內部與表面腐敗微生物的活動，並延緩化學與酵素反應的進行，從而有效維持食品的新鮮度、感官品質與營養價值 (Xiong *et al*., 2025)。雖然商業冷凍工藝僅能殺死大部分病原菌，不過冷凍食品的整體安全品質一向穩定 (Archer, 2004)。除了品質與安全性的保障外，冷凍食品也因便於保存、運輸與烹調，為現代飲食提供了便利性與穩定性。冷凍技術更是在食品產業與全球供應鏈中的關鍵，其透過延長食品保存期限與降低運輸過程中的損耗，使得農產品與水產品得以跨越地理限制進行流通，支撐國際貿易與食品工業的發展。同時，研究顯示冷凍能有效保留大部分營養素，使食品在長期保存後仍具營養價值與健康益處，顯示冷凍技術不僅是保存手段，更是確保食品營養安全的重要工具。

二、冷凍對食品品質的影響

冷凍技術能顯著延長食品保存期限及確保安全性，但此過程也會對食品的品質造成一定的影響。主要與冰晶生成、組織結構變化、滴液流失及營養感官特性的改變有關。當冷凍條件不當時，可能由上述原因導致食品口感劣化、色澤改變或營養流失。

水是食品的主要成分，在冷凍過程中會因溫度變化由液態轉為固態的冰晶，此種相變是決定冷凍效率和冷凍食品品質的關鍵因素 (Tian *et al*., 2020)。當食品能夠在 30 分鐘內通過最大冰晶生成帶 (-1°C～-5°C) 時，稱作急速冷凍；反之，為慢速冷凍。前者所產生的冰晶微小且分布均勻，後者所產生的冰晶較粗大，造成細胞壁與組織結構的破壞，解凍後容易出現質地鬆軟、滴液損失的情況 (Alabi *et al*., 2024)，在營養與感官層面上，部分水溶性維生素與風味成分也會損失 (Liu *et al*., 2024)。

隨著科技進步，冷凍技術正逐漸融入數位監測與人工智慧工具。透過視覺模擬與即時監控，可以更精準地掌握食品品質。此類新興技術的應用，為冷凍工藝

在食品工業中的優化與創新提供了新的可能性 (Xu *et al*., 2017)。

三、食品冷凍機械設備

隨著冷凍技術在食品工業中的廣泛應用，各種冷凍設備的選擇與使用方式，對食品的品質維持與生產效率具有重要影響。不同類型的冷凍設備，不僅在操作原理、冷卻速度與容量上有所差異，也會因適用食品的特性而有所區分。因此，在了解冷凍對食品品質的影響之後，掌握各類設備的功能與特性，對於實務操作及食品品質管理具有實際意義。

1. 隧道式冷凍機 (Tunnel Freezers)

隧道式冷凍機中的冷空氣會從傳送帶上方吹送，使食材能均勻受到冷風作用。並藉由風扇控制系統，在食物表面形成一層薄冰保護層，減少內部形成粗大冰晶對細胞結構的破壞，並能在不破壞細胞膜的情況下達到快速冷卻與冷凍的效果。隧道式冷凍機主要設計用於對各種食品進行單體急速冷凍 (Individual Quick Freezing, IQF)，如蔬果、水產品等。常見有拖曳式冷凍機 (Drag - Thru Dolly Freezers)，可將食品放在托盤或推車上，透過可調節的食品級不銹鋼網狀輸送帶裝置運輸，穿過冷凍區域並透過冷空氣循環進行凍結，其內部循環的冷空氣具有避免向門口吹出的設計，能夠在減少冷空氣流失的同時，也有效率的冷凍食品。常用於大塊肉類或蔬果。

2. 螺旋式冷凍機 (Spiral Freezers)

螺旋式冷凍機（Spiral Freezers）是一種以垂直圓筒結構為核心的連續式冷凍設備，特別適合廠房空間受限、但需要較長冷凍時間的食品加工環境。設備以垂直放置的滾筒為中心，沿著圓周安裝食品級不銹鋼網狀輸送帶，輸送帶可依需求由下向上或由上向下以螺旋方式搬運食品，並於過程中以強冷風進行冷卻與凍結，確保食品能充分凍結並維持穩定的加工效率。常用於蔬果、水產品及加工食品，如：油炸製品、蒸製品、粉體製品、魚漿製品等。

3. 接觸式冷凍機 (Contact Plate Freezers)

接觸式冷凍 (Contact Freezing, CF) 是一種利用冷卻金屬板直接接觸食品的技術，藉由金屬的高導熱性，能快速將低溫傳遞至食品內部，加速降溫與冷凍。與空氣冷凍相比，可以大幅度減少冰晶生成對細胞結構的破壞，保持食品的組織與口感，同時縮短處理時間並提升加工效率，常應用於肉類、魚類及速食產品的保存與加工。

板式冷凍機 (Plate/Tray Freezers)是屬於接觸式冷凍的一種，使用-35°C 的冷媒流過金屬板表面以達到冷凍效果，將食品放入凍結盤，並夾於更大的金屬凍結

板中間，透過油壓裝置施加一定壓力，讓凍結盤和金屬凍結板接觸而造成食品凍結，此種方式可以使其避免產生乾燥失重或氧化。常用於包裝及尺寸一致的塊狀食品，如：冷凍麵糰、切塊或切片的水產品及肉品等。

4. 浸沒式低溫冷凍機 (Immersing Cryogenic Freezers)

浸沒式低溫冷凍機是將食品直接浸入液態氮或二氧化碳中，利用瞬間降溫達到快速凍結的技術。由於冷卻速度極快，可有效抑制冰晶生成，避免細胞膜受損，保持食品的原始風味、口感與營養。此方法適合高經濟價值的食品，如海鮮與精品肉類等，能確保其維持高品質與鮮度。雖然成本較高，但因冷凍時間極短，故在許多精緻且價值高的食品加工業與出口產業中廣泛應用。

四、小結

食品冷凍技術是維持食品品質、安全與營養的重要方式，而不同類型的冷凍設備在實務應用中扮演不同的角色，因其冷卻速度與操作原理不同，故能針對各類食品提供最佳的保存方式，並且直接影響組織結構、口感與保存效果。隨著 AI 人工智慧與新興技術的導入，食品的冷凍過程不僅提升了效率與精準度，也進一步支撐全球食品供應鏈的穩定與永續發展。

柒、 冷凍冷藏庫與 IQF 設計實例

本章節將透過兩個具體的工業設計案例：1,000 公噸的低溫肉類冷藏庫與 5,000 kg/h 的 IQF 速凍隧道，展示從熱負荷計算到設備選型的完整流程。設計過程中，必須嚴格區分「冷藏」(維持溫度)與「速凍」(移除相變熱)的本質差異。

一、1,000 公噸低溫肉類冷藏庫設計範例

1. 設計參數與邊界條件 (Design Parameters)

本案例設計一座用於儲存冷凍牛肉與禽肉的低溫冷藏庫，地點設定於熱帶/亞熱帶氣候區。

(1) 儲存容量：1,000 公噸 (MT)

(2) 庫內設計溫度 (T_{in})：-25°C

(3) 環境設計溫度 (T_{out})：+40°C (夏季極端值)

(4) 庫體尺寸：長 30m × 寬 20m × 高 10m (容積約 6,000 m³)

(5) 隔熱材料：150mm PIR (聚異氰脲酸酯)，導熱係數 k = 0.023 W/m K

(6) 地板溫度：+20°C (設有防凍脹加熱系統)

(7) 日吞吐量：50 公噸 (總容量的 5%)

2. 熱負荷計算 (Heat Load Calculation)

(1) 穿透負荷 (Q_{trans})

穿透負荷來自於庫內外溫差導致的熱傳導。

計算牆面與天花板的總傳熱係數 (U)，忽略薄膜熱阻：

$$U = \frac{K}{X} = \frac{0.023}{0.15} \approx 0.1533\ W/m^2K$$

- 牆面與天花板熱負荷 ($A \approx 1{,}600\ m^2$) ：溫差 $\Delta T = 40 - (-25) = 65\ K$

$$Q_{wall/ceil} = 0.1533 \times 1600 \times 45 \approx 15.94\ kW$$

- 地板熱負荷($A \approx 600\ m^2$)：

地板下設有加熱層以防凍脹，故溫差以地板下土壤溫度 +20°C 計算。

$\Delta T = 20 - (-25) = 45K$

$$Q_{floor} = 0.1533 \times 600 \times 45 \approx 4.14\ kW$$

- 總穿透負荷：15.94+4.14=20.08 Kw

(2) 產品負荷 (Q_{prod})

假設產品進貨時中心溫度為 -18°C，需降溫至庫溫 -25°C。

- 日進貨量 $m = 50{,}000\ kg/day$
- 凍結肉類比熱 $C_p \approx 1.67 kJ/kg \cdot K$
- 溫差 $\Delta T = 7K$

假設壓縮機每日運行 18 小時：

$$Q_{prod(kW)} = \frac{584{,}500}{18 \times 3600} \approx 9.02\ \text{kW}$$

(3) 內部負荷 (Q_{int})

包含照明、人員、堆高機及蒸發器風機馬達的發熱。

- 照明 ($2\text{W}/\text{m}^2$) 1.2 Kw(8hr/day) →平均 0.4 kw
- 人員 (2 人)：約 0.18 kW
- 堆高機：約 0.83 kW

風機馬達 (關鍵熱源)：假設配置 3 台冷風機，每台 3 kW，運行係數 0.9。

$$Q_{fans} = 3 \times 3 \times 0.9 = 8.1\ \text{kW}$$

- 總內部負荷: ≈ 9.51 kW

(4) 滲透負荷 (Q_{inf})

來自開門時的冷熱空氣交換。對於 6,000 m^3的庫體，假設每日換氣 2 次。

- 空氣焓差 (40°C/60%RH 到 -25°C/95%RH) ≈ 115 kJ/kg
- 空氣密度 $\approx 1.42\ \text{kg}/m^3$

$$Q_{\text{inf}\,(daily)} = 6000 \times 2 \times 1.42 \times 115 = 1{,}959{,}600\ \text{kJ/day}$$

功率 (18hr)：30.24 kW

(5) 總負荷彙整

$$Q_{\text{total}} = 20.08 + 9.02 + 9.51 + 30.24 = 68.85\ \text{kW}$$

加上 10% 安全係數：設計需求製冷能力≈ 76 kW

3. 關鍵設備選型 (Equipment Selection)

(1) 壓縮機：選用半密閉螺旋式壓縮機 (Semi-hermetic Screw Compressor)。

A. 工況：蒸發溫度 (SST) -32°C / 冷凝溫度 (SCT) +45°C。

B. 建議配置：2 台壓縮機並聯機組。單台在該工況下約提供 45-50 kW 冷量，雙機可滿足 76 kW 需求並具備備援能力。

C. 配備經濟器 (Economizer) 以提升低溫運轉效率。

(2) 蒸發器 (冷風機)：

A. 選擇大片距 (7mm - 10mm) 的鰭片設計，以防止在低溫高濕環境下快速結霜阻塞。

B. 除霜方式：熱氣除霜 (Hot Gas Defrost) 效率較電熱除霜高，適合大型冷庫。

二、5,000 kg/h 豌豆/蝦類 IQF 速凍隧道設計

1. 設計參數
   (1) 產品：豌豆 (Peas) / 蝦仁
   (2) 產能：5,000 kg/h
   (3) 入料溫度：+15°C
   (4) 出料溫度：-18°C (中心溫度)
   (5) 凍結方式：流態化床 (Fluidized Bed) 隧道式凍結
2. 凍結負荷計算 (Enthalpy Method)

   豌豆含水量高 (≈ 79%)，潛熱負荷巨大。
   (1) 預冷 (Sensible Heat, +15°C → -0.6°C)：

   甲、$Q_1 = 5000 \times 3.31 \times (15 - (-0.6) \approx 258{,}120\ \text{kJ/h}$
   (2) 相變 (Latent Heat, -0.6°C)：

   甲、$Q_2 = 5000 \times 264 = 1{,}320{,}000\ \text{kJ/h}$
   (3) 過冷 (Sub-cooling, -0.6°C → -18°C)：

   $$Q_3 = 5000 \times 1.76 \times (-0.6 - (-18) \approx 153{,}120\ \text{kJ/h}$$
   (4) 產品總熱負荷：$1{,}731{,}300\ \text{kJ/h} \approx 481\ \text{kW}$
   (5) 設備負荷：IQF 風機需產生極高風壓使產品懸浮，風機熱約佔產品負荷的 25%。$Q_{fan} \approx 120\ \text{kW}$
   (6) 總設計負荷：設備規格估算 $481 + 120 + 10\% \approx 661\ \text{kW}$
3. 設備規格估算
   (1) 凍結時間計算 (Plank's Equation 修正)：

   雖然 Plank 方程式可用於估算相變時間，但實務上豌豆的總滯留時間通常設定為 5~8 分鐘 以確保中心溫度達標。採用保守值 8 分鐘 (480 秒)。
   (2) 輸送帶尺寸：

   A. 隧道內持料量：$5000\text{kg/h} \times (8/60)h = 667\text{kg}$
   B. 流態化鋪料密度：約 $25\text{kg}/m^2$
   C. 所需網帶面積：$667/25 \approx 26.7\text{m}^2$
   D. 若選用 1.25 米 寬的網帶，則有效長度需約 22 米
   (3) 製冷系統：

   A. 建議使用氨 (Ammonia, R-717) 系統，因其在大冷凍負荷下具備優異的傳熱性能與較低的運行成本。
   B. 壓縮機選型：配置 3 台開啟式螺桿壓縮機 (Open-drive Screw Compressors)，在蒸發溫度-40°C 下運行。

三、設計端的故障預防分析

在進行上述設計時，必須同步考量常見的失效模式並納入預防措施：

1. 液壓縮 (Liquid Slugging) 防護：
   (1) 成因：IQF 產線急停或除霜後，蒸發器內積存的液態冷媒可能被吸入壓縮機，造成閥片碎裂或連桿斷裂。
   (2) 設計對策：必須在吸氣管路安裝大容量的氣液分離器 (Suction Accumulator)。對於氟利昂系統，建議採用電子膨脹閥 (EEV)，其反應速度快，能在負載劇變時迅速關閉供液。
2. 回油失效 (Oil Return Failure)：
   (1) 成因：低負載運行時（如冷庫僅存貨 10%），吸氣管內冷媒流速不足以將潤滑油帶回壓縮機，導致壓縮機缺油縮缸。
   (2) 設計對策：垂直吸氣管應採用雙立管 (Double Riser) 設計。在低負載時，流體僅通過小管徑管路，維持高速攜油能力。
3. 地基凍脹 (Frost Heave)：
   (1) 成因：-25°C 冷庫長期吸熱，導致地板下土壤水分結冰膨脹，破壞地基結構。
   (2) 設計對策：地板保溫層下必須設置通風層 (Ventilation pipes) 或主動加熱網（利用壓縮機排氣廢熱或電熱），並配置溫度感測器監控，確保土壤溫度維持在 0°C 以上。

捌、 參考文獻

Alabi, K. P., Adeola, A. A., & Aworh, O. C. (2024). Supercooling phenomenon of magnetic field-assisted freezing and its impacts on quality preservation of frozen fruits and vegetables. *Food Biophysics*, 19, 833–844.

Archer, D. L. (2004). Freezing: an underutilized food safety technology?. International journal of food microbiology, 90(2), 127-138.

Dincer, I., & Kanoglu, M. (2010). Refrigeration systems and applications (Vol. 436). New York: Wiley.

Liu, J., Qi, Y., Hassane Hamadou, A., Tufail, T., Guo, Q., Zhang, J., & Xu, B. (2024). Effects of dough sheets resting on textural properties of long-life noodles via moisture migration and gluten network development. International Journal of Food Science and Technology, 59(5), 3167-3175.

Tian, Y., Chen, Z., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2020). Effects of tissue pre-degassing followed by ultrasound-assisted freezing on freezing efficiency and quality attributes of radishes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105162.

Xiong, X., Cao, X., Xu, X., & Zhuo, Q. (2025). The Effects of Water Migration on Fresh Food Freezing Processing. Food Engineering Reviews, 1-22.

Xu, J. C., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Adhikari, B. (2017). Recent developments in smart freezing technology applied to fresh foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(13), 2835-2843.