

真空保溫低溫流體輸送與儲存設備之冒水及結霜現象

概要

真空隔熱輸送管道、管件及儲槽的外部表面溫度總是低於周遭環境氣溫。工程師一般將此溫差稱為「溫度差」。當外部表面溫度低於露點時會出現冒水現象，而當溫度低於 32°F (0°C) 時則會結霜。部件外部表面出現冒水及結霜現象通常被視為瑕疵品的跡象。然而，此情況並非全然如此。強制氣流及／或除濕通常可除去低溫部件的冒水現象。

熱傳基礎

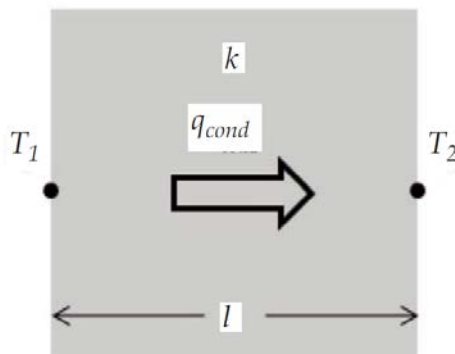
真空隔熱槽為經常用於防止低溫流體在儲存或輸送過程中蒸散的裝置。溫度較高的載體 (即周遭空氣) 與溫度較低的載體 (即低溫流體) 之間都會發生熱傳。只要存在溫差時，熱傳速度 q [W 或 J/秒] 都有可能降低但不可消除。我們亦可從周遭環境傳到低溫流體的總能量的角度思考， ΔU [J]。

$$\Delta U = \int_{t_i}^{t_f} q \, dt \quad (1)$$

為降低熱傳速度，我們必須瞭解熱傳的三個主要機制：導熱、對流及輻射 (Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine, 2006)。

導熱為直接接觸的物體之間 (即固體內與固體之間) 的熱傳導，其可應用傅利葉導熱定律的方程式 (算式2)，如圖A所示。

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \approx kA \frac{T_1 - T_2}{l} \quad (2)$$

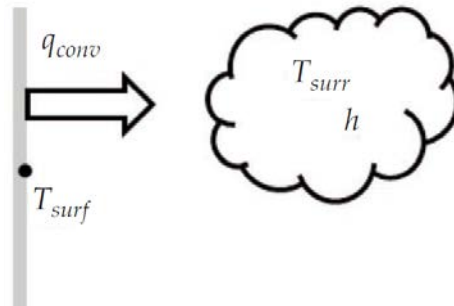


圖A. 導熱熱傳

為降低導熱的影響，我們可選擇熱導係數較低的材料 (k)，減少熱導面積 (A)，或降低溫度梯度 (dT/dx)。應明確表明，我們可能無法同時個別控制每個因素。

對流為表面流體的熱傳導，其可應用牛頓冷卻定律 (算式3)，如圖B所示。

$$q_{conv} = hA(T_{surf} - T_{surr}) \quad (3)$$



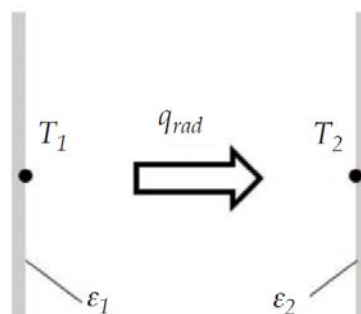
圖B. 對流熱傳

為降低對流的影響，我們將盡可能減少熱傳係數 (h)。熱傳係數並非任何材料的性質，而是由多項因素 (如流速、流體性質、表面特性) 決定的一種特定流動特性。一般而言，於氣體自然對流中的係數最低，於液體強制對流中的係數最高。

相變化發生時 (如沸騰及凝結) 可產生極高的 h 值。我們可以透過除去所有流體 (即真空狀態) 或以其他方式防止流體流動 (如泡沫及隔熱) 而有效消除對流熱導，在此情況下則僅需處理減少一般導熱的問題。我們亦可減小導熱面積 (A) 或降低表面與環境流體的溫差 ($T_{surf}-T_{surr}$)。

幅射為透過電磁波的熱傳導，其不需中間介質即可在真空中發生。兩個平行表面 (或間隔緊密的圓柱殼) 之間的幅射傳遞 (如圖C所示) 可根據擴散、灰表面的特例計算如下：

$$q_{rad} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$



圖C. 幅射熱傳

其中， σ 為波茲曼常數，以 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$ 計算。為降低幅射的影響，我們可減少表面的發射性。光亮、金屬表面均具有低發射性的特性。我們亦可使用由多層低發射性材料組成中間層的幅射屏，以降低整體幅射影響。

熱阻迴路

我們一般可從阻力路徑的角度思考熱傳問題，即熱能從溫度較高的載體傳到溫度較低的載體所需依循的路徑。電阻與熱阻的關係如下：

$$I = \underbrace{\frac{V_1 - V_2}{R_{el}}}_{\text{歐姆定律}} \Rightarrow q = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad (5)$$

在此情況下，以溫差取代電壓差，而熱傳則為電流。因應用於低溫情況的溫差甚大，故降低整體熱傳速度需要極大的熱阻。

經參考算式2至4，我們可釐定導熱、對流及幅射的阻力為：

$$R_{cond} = \frac{l}{kA} \quad (6)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (7)$$

$$R_{rad} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}{\sigma A (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)} \quad (8)$$

我們更進一步將極複雜的熱傳問題簡化如圖 D 所示。熱流的主要路徑為從溫度較高的周遭空氣通過儲槽的隔熱壁傳到溫度較低的低溫流體。我們亦考量熱流的寄生路徑，其可能為通過結構性部件或連結件，並可能涉及以上任何熱傳機制。

相應的熱阻迴路如圖 E 所示。此應用設計目的為盡可能提升整體阻力。我們可從外部對流阻力開始討論。根據算式 7，我們希望盡可能降低熱傳係數。增加儲瓶周遭的流速不利於部件阻力。由於內部與外部的導熱阻力，我們應尋求低導熱係數的厚材料，其常見者為隔熱紙或隔熱棉。金屬外殼 (即為薄材料且具高 k 值者) 不利於熱流阻力不佳。

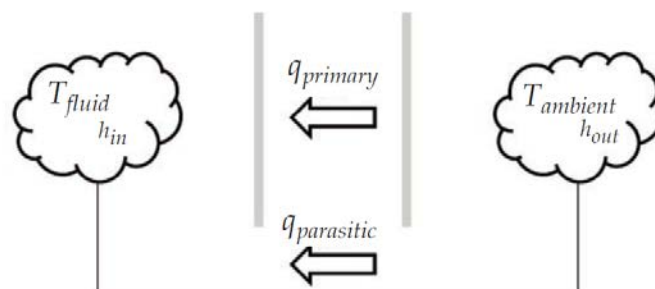


圖 D. 熱流從周遭空氣通過真空隔熱瓶傳到低溫流體的簡化模型。

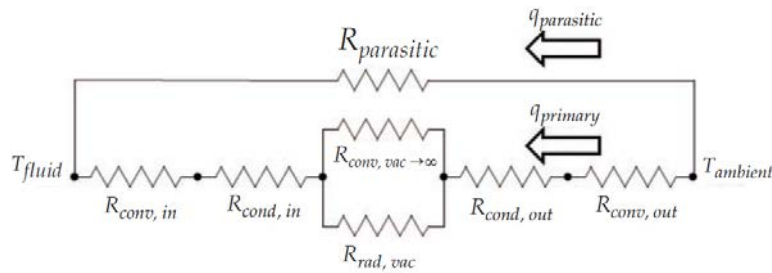


圖 E. 熱流從周遭空氣通過真空隔熱瓶傳到低溫流體的簡化熱阻迴路。

真空隔熱槽壁為我們應用設計的最大阻力來源。排除此部分的氣體則會實際消除任何因對流產生的熱傳，阻力幾乎可提升至無限大。熱傳僅剩的路徑則為透過幅射。如算式 8 所示，選擇發射係數極低的材料可將此阻力提升到極大值。多層此類的壁體（如幅射壁）可按比例提升阻力。我們較無法控制內部對流阻力。這有可能是一個相變區域，在其中表面溫度會比低溫流體的汽化溫度高出許多，因此導致沸騰。這主要將取決於上游熱阻。

熱傳控制

用於控制低溫儲存與輸送設備中熱傳的方法均為知名，而且各製造商所用方法均性質類似。這些方法均適用於杜瓦瓶、管線和儲槽。低溫槽會吸收其環境中的熱能，並用 McIntosh (1998, 269 頁) 曾探討過的知名技術方法，透過一條曲流路徑將所吸收的熱能傳到低溫劑內：

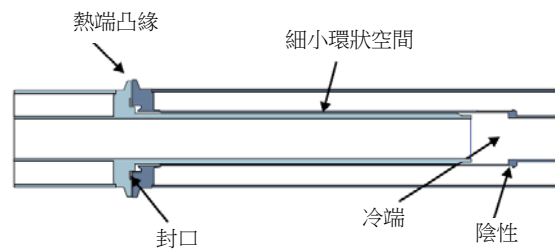
1. 冷管或儲槽需具備高反射性表面，具備多層隔熱，或兩者兼具。
2. 內槽與溫度較高的真空夾層需以漏熱構件或隔片分隔。
3. 內部組件周遭需設有真空密閉夾層。
4. 內槽或外夾層需以伸縮構件補償熱收縮。
5. 附有真空夾層的管路需具備低漏熱端件以連結各管道及接至杜瓦瓶。
6. 需配有真空閥門以將環狀空間排空。
7. 需以冷熱集氣劑維持儲槽或管道環狀空間的靜態真空。

部分熱性能較差的低溫管件及部件只有以低導熱性的隔熱材包覆低溫導管。若將熱能傳到低溫劑並非系統使用者／擁有人的優先考量，泡沫與玻璃纖維則為常見的使用材料。

卡口

管道接口一直為低溫系統工程師特別感興趣的部分，因其涉及的挑戰為打造熱效率高又容易裝設及重複使用的低成本連結器。Herrick Johnston 博士原先設計的卡口接合 (Barron, 1966) 一般用於需經常拆卸或以非焊接方式在現場裝設的管道。卡口接合由陽

性部分嵌進陰性部分組成。為壓制氣體對流，陽性與陰性管之間一般保持極小間隙。陽性與陰性管在環狀空間分層氣體中與溫度較高的凸緣間形成溫度梯度，因此可產生極小漏熱而足以防止熱端凸緣的封口結凍(McIntosh, p. 275)。



典型的緊密卡口接合

於管道中斷處，典型的卡口可使液體在內道流動且不受重大影響。陽性與陰性隔離管在環狀空間分層氣體中與冷端凸緣間形成溫度梯度。無論卡口為頂端封口或凸緣封口，其設計均為盡量減少熱能洩漏到熱端凸緣。

卡口接合有趣的部分在於因其設計性質，其漏熱較高於其一般所連結的套管或管線。由於漏熱較高，故外部溫度一般會低於所連結的管線或套管。因此相較於典型低溫輸送系統中的其他真空隔熱部件，其將更經常產生冒水與結霜現象。

冒水與結霜的原因

所有低溫儲存與輸送槽、管道及其他設備一般存在於可無限供應熱能的環境中。舉例而言，大型儲瓶會處在大氣可無限供應熱能的戶外空間。儲槽內低溫劑的熱沉有限，僅可維持至溫度達到環境溫度為止。

熱傳阻力 (R 係數) 逾小，熱流則逾大。熱流會從環境傳到儲槽中的低溫劑。當熱能從環境 (通常為空氣) 流出，氣溫則會下降，這是從任何物體移除熱能的正常結果。如果我們假設低溫槽周遭的空氣並無流動，則當熱能從儲槽周圍的空氣中移除，其溫度下降則為合理的。

除去的熱能逾多，則氣溫愈低。若我們再引入時間因子，我們可推論在某單位時間內從儲槽周遭空氣中移除一定的熱能則將產生某單位的熱傳 (漏熱)，即形成單位氣溫下降與時間之間的關係。簡單來說，漏熱逾大，儲槽周遭氣溫逾低。若並無氣流補充傳到儲槽內的熱能，則氣溫將隨時間下降。

氣溫下降可導致儲槽表面產生水滴，即為「冒水」現象。當儲槽表面溫度低於周遭空氣的露點則會形成水。「露點」為在一定空氣量為凝結成水所需下降的溫度。凝結的水則稱為「露水」。

露點為飽和點。當露點溫度降到冰點以下，水氣不再形成露水而是結霜，則一般稱為「霜點」 ("Dew Point" n.d.)。平常生活中有許多因高濕度而常見的冒水現象，包括家裡地下室無隔熱的冰水管或停車場的潮濕混凝土地板。

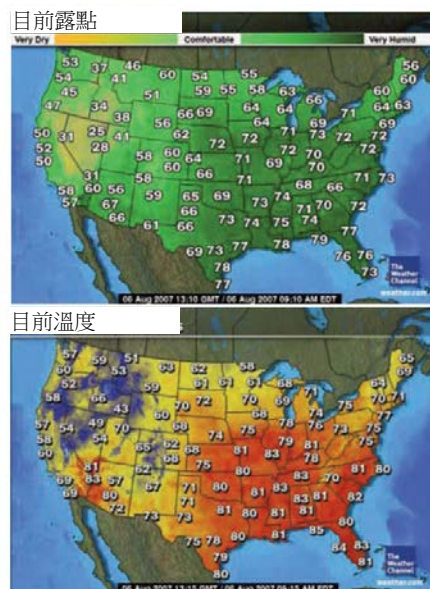
全球均有在一般天氣狀況下，露點幾乎與環境溫度等值的案例，人類對此情況的感覺

為相對較高的濕度。於露點僅些微低於周遭溫度的環境中 (屬非常「潮濕」情況)，低溫槽的表面溫度僅需稍微降至周遭溫度即會呈現冒水現象。這情況發生於或低於32°F (0°C) 時則會結霜。相對溫度高於50%時，露點可計算如下：

$$\text{露點溫度(攝氏度)} = \text{環境溫度(攝氏度)} - (100 - \text{相對溼度}(\%)) / 5$$

由此可推，如果儲槽外部表面溫度僅些微低於環境溫度即可結霜，則結霜或冒水現象並不是低溫槽性能品質的絕對指標。儘管極差的熱性能會更頻繁導致結霜現象，此現象並不絕對表示熱性能較差。在一些常見的大氣情況下，極高熱性能品質的儲槽亦可能結霜。

第23頁表1為美國氣況圖，顯示環境與露點溫度之間的比較。國家氣象局數據顯示，明尼阿波利斯冬天與舊金山夏天的戶外相對濕度將近為100%，意指只要低溫槽的表面溫度稍微降至環境溫度即會形成濕氣。



右側地圖顯示幾個美國城市於 2007 年 8 月 6 日的溫度及露點。若低溫槽表面溫度降至各所示城市的露點則會出現冒水現象。若降至 32°F (0°C) 則會結霜。

城市	1月1日	8月1日
阿特蘭大	4	12
丹佛	21	15
波特蘭	4	15
鳳凰城	7	20
明尼阿波利斯	1	23
舊金山	4	1
坦帕	3	3

圖 1. 根據美國國家氣象局，不同美國城市於一月及八月的露點及環境溫度的溫差。

表一顯示所選的幾個美國城市於一月及八月的露點及環境溫度的溫差 (以華氏度計)。應注意的是，所顯示的數據僅為一時的數據，每日之間可能有所不同。

目前我們僅在假設低溫槽表面周遭並無氣流的情況下討論冒水與結霜現象，因有許多裝設低溫槽環境的氣流極小或不存在。這些應用情況包括於頂樓、夾層及實驗室等密閉空間的管道。

低溫槽外部表面出現強制氣流則為一個不同的情境。儲槽仍會將熱能從外層空氣傳到內部低溫劑，但氣體流動可在儲槽外部表面周圍提供更多可傳導的熱能。

不斷流動的空氣可持續為儲槽供應熱能，滿足其需不斷轉移熱能的特性。相較於從停滯的空氣中移除熱能而降低溫度，不斷流動的空氣則可補充其熱能供應，因此溫度降低幅度會明顯有所減少。

如果將此邏輯放大，則熱性能極差的儲槽可在高氣流環境中將大量熱能傳到其內含物，而不會使其外部表面氣溫大幅下降。

與此情況類似的常見狀況為將冰淇淋拿在移動車輛的窗戶外，其融化速度比在車輛內慢速流動的空氣中更為快速。在車輛內，冰淇淋會形成冷空氣的外層，隔絕含有大量熱能的空氣。

應注意的是，熱阻極低的儲槽 (瑕疵品) 會從環境中極快吸取熱能。當產品有瑕疵時，幾乎不會有足夠空氣可提供足量熱能將儲槽周遭氣溫維於露點及／或水的凝固點之上。

亦可採用其他方法為狀況良好的低溫槽除去冒水或結霜現象。單單使環境空氣乾燥而降低露點即可減少冒水及結霜發生的機會，此方法通常可透過使用一般除濕機達成。

在空氣流動的環境中，透過增加儲槽的表面面積即可將儲槽夾層暴露於更多可吸取的熱能，藉此降低濕氣形成的機會。

我們亦可以在儲瓶外部表面以風扇 (即產生強制對流) 防止或減少凝水或結霜現象。此作用會減少對流阻力而降低表面與周遭環境空氣的溫差。然而，此方法會造成降低整體熱阻的副作用，因此加快熱傳到低溫劑的速度。

在低溫槽表面增加泡棉或玻璃纖維隔層將進一步降低傳到儲槽的熱能，有助於減少冒水現象。然而，此方法通常並無作用，因真空環境的熱流阻力相對遠大於增加隔熱層所能提供的熱阻。增加隔熱層如同以一根火柴提升宇宙的溫度。

最後，這一切意味著什麼？

- 在對的環境情況下，熱性能佳及熱性能差的儲槽均會出現冒水及結霜現象。
- 在對的環境情況下，強制氣流可減少或除去冒水及結霜現象。
- 在對的環境情況下，除濕可減少或除去冒水及結霜現象。
- 真空品質較差的儲槽因熱導短路或並無輻射阻力，因此幾乎在所有環境中均會出現結霜或冒水現象。
- 為真空隔熱槽增加泡棉或玻璃纖維隔層通常並無作用。

參考資料
[略]