

「扣件事故 / 起因 / 方策」連載講座

解析低溫流體 專用管線法蘭的洩漏現象

文 / 福岡俊道

前言

輸送流體的配送管線通常會在管內流體溫度較高時發生洩漏。但近年來低溫流體都有使用在各種不同用途，結果有時會發生低溫流體專用管線出現洩漏的狀況。因此業界期望能解開低溫流體專用管線發生洩漏的機制，並確立防範方式。跟一般市井小民最相關的低溫流體，就是液化天然氣，也就是瓦斯的主要成分。液化天然氣的溫度約在攝氏負163度，而液化石油氣的溫度約在攝氏負45度。本文將針對液化天然氣管線所使用的專用法蘭，透過冷卻實驗與有限元素的分析結果，解說發生洩漏的基本機制，並提供可預防洩漏的有效資訊。

栓合件承受低溫熱荷載時的軸力變化

圖1(a)和1(b)顯示螺栓從初期鎖固的狀態開始一直承受熱荷載時，發生的軸力變化。在螺栓、螺帽和被鎖固物的材質相同的狀況下，若從被緊固物的周圍開始加熱，被緊固物的延展性就會大幅增加，甚至大過螺栓和螺帽的延展性，因此螺栓的軸力就會上升。反之，若從被緊固物的周圍開始冷卻，被緊固物就會大幅收縮，軸力就會下降。圖2就是反映後者的狀況，顯示管線專用法蘭內部低溫流體流動的狀態。管線內部接觸到流體時，靠近管線法蘭內側表面的地方會大幅降溫。因此，裝有螺栓的外側表面溫度會比內側表面高出很多。從以上結果得知，雖然管線法蘭各部位的溫度下降，但被緊固物的收縮量會比螺栓和螺帽多，所以推測螺栓的軸力會下降。前一篇投稿說明過，承受高溫熱荷載的管線法蘭，它的螺栓軸力下降是大大受到密封墊片剛性降低的影響。另一方面，與承受高溫熱荷載的狀況相比，承受低溫熱荷載時，密封墊片的剛性變化會小很多。透過冷卻實驗和有限元素解析，螺栓軸力變化的量化結果會在以下的章節中向大家報告。

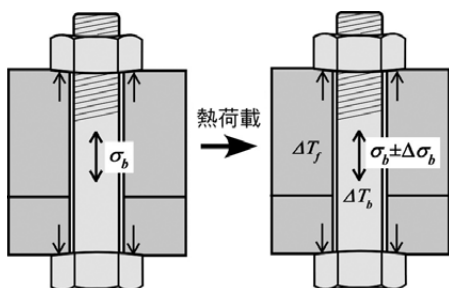


圖1 $\Delta T_f, \Delta T_b$: 溫度增減
 $\Delta \sigma_b$: 螺栓應變異

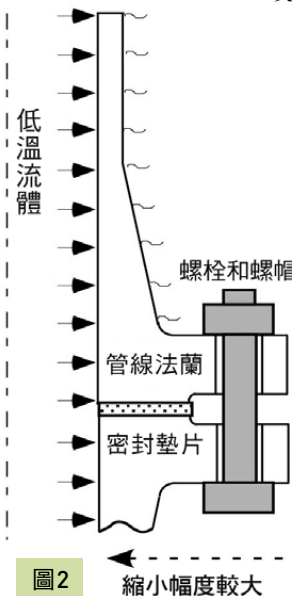


圖2 縮小幅度較大

管線專用法蘭的冷卻實驗

圖3是實驗裝置的概略圖。下方的管線法蘭的圓柱部位，其端口加裝了蓋子，以留住圓柱內部注入的流體。使用的低溫流體是相對比較好處理的液態氮。液態氮的溫度約在攝氏負196度，比液化天然氣溫度還更低。實驗用的管線法蘭是依照JIS規格的公稱壓力20K與公稱直徑65製成的。管線法蘭是透過8支M16的螺栓來鎖固，並對其中4支螺栓裝上用來測溫的熱電偶和用來測量軸力的應變力量規。上下兩片管線法蘭的中間插入了低溫流體用的氟化乙烯樹脂製密封墊片。參照了應變力量規的輸出量，將螺栓鎖緊，直到軸應力變成100MPa為止。此時密封墊片的平均表面壓力為22MPa。圖4顯示管線法蘭在實驗中的樣態，有不少的冰霜附著在上面。由於液化天然氣注入管線法蘭就會沸騰和蒸發，所以為了在實驗中保持住液面高度，連續不中斷注入了液化天然氣。圖5是螺栓的軸部溫度和軸應力的測量結果。各時間點標示的螺栓軸應力b是其除以初期螺栓軸應力i之後的結果。橫軸是管線法蘭灌滿液化天然氣之後所經過的時間。冷卻十分鐘後，螺栓的溫度降到攝氏負155度。此外，螺栓軸應力下降到初期狀態的65%。以管線法蘭的性能來說，這數值是不能忽視的。在實際的管線中，流動的狀態會有不同，所以螺栓軸力的下降率也會有變化，不管如何，螺栓的軸應力會大幅下降。量測18,000秒之後，停止注入液化天然氣，螺栓的溫度就接著會回到初期狀態。過了足夠的時間，螺栓的溫度回復到室溫，但螺栓軸應力只回復到初期狀態的93%。其原因在於密封墊片的壓縮特性：遲滯現象。

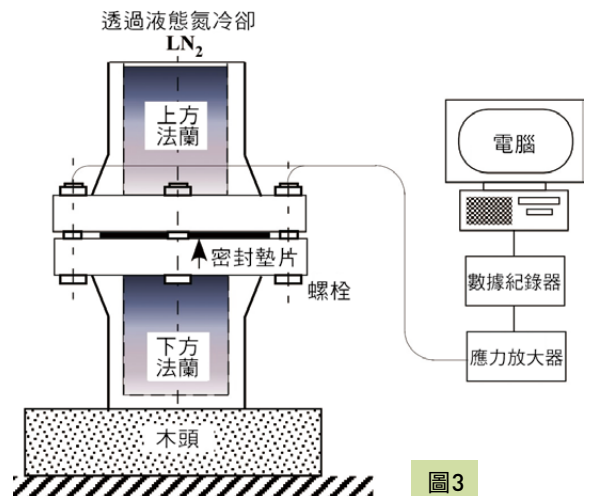


圖3





圖4

管線法蘭的螺栓軸力變化的有限元素解析

本章節會進行符合冷卻實驗的有限元素解析。圖6是用於解析的有限元素模型。考量到管線法蘭形狀的對稱性，將整體的八分之一部份模型化。模型的規格形狀有配合實驗用的裝置。由於我們解析的對象並不是螺紋的鬆脫，所以我們假定螺紋的外形呈軸向對稱，並將之模型化。有關溫度場域界線的條件設定，管線法蘭的內側表面設定為熱傳遞界線，能流通攝氏負196度的液態氮，而外側表面也設定為熱傳遞界線。由於液態氮注入管線法蘭時就會沸騰，所以難以正確推測表面傳遞率。因此讓表面熱傳遞率在5,000 W/m²K至15,000 W/m²K之間變化，將它定為能夠得出近似實驗值的8,000 W/m²K。管線法蘭的外表面熱傳達率設定為8 W/m²K。假定栓合件(不含密封墊片)為一個彈性體。氟化乙烯樹脂製密封墊片的應力和應變力是呈現非線性的關係，加載和卸載時會出現不同作動的遲滯現象。有關密封墊片的力學特性請參閱參考文獻的詳細解說。

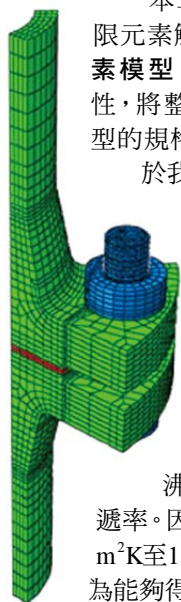


圖6

圖7是螺栓軸部溫度和軸應力的解析值和實驗值比較的結果。在恆常狀態下，螺栓不論是軸部溫度或軸應力，兩者的值都相當一致。但另一方面，在停止供應液態氮並回復到常溫的過程中，兩者的值會有些微的差異。這是因為我們假設，管線法蘭內的液面在實驗中會慢慢下降但在進行解析時液態氮會瞬間消逝。不論如何，在螺栓軸應力下降的狀態下，兩者的值會相當一致，可以判定我們使用的解析方式是有效的。另外，有關管線法蘭結霜所造成的影響，雖然我們連同冰霜也模型化並進行了解析，但結果在圖表上認不出什麼差異。所以結霜的影響可以忽視，沒什問題。

圖7是螺栓軸部溫度和軸應力的解析值和實驗值比較的結果。在恆常狀態下，螺栓不論是軸部溫度或軸應力，兩者的值都相當一致。但另一方面，在停止供應液態氮並回復到常溫的過程中，兩者的值會有些微的差異。這是因為我們假設，管線法蘭內的液面在實驗中會慢慢下降但在進行解析時液態氮會瞬間消逝。不論如何，在螺栓軸應力下降的狀態下，兩者的值會相當一致，可以判定我們使用的解析方式是有效的。另外，有關管線法蘭結霜所造成的影響，雖然我們連同冰霜也模型化並進行了解析，但結果在圖表上認不出什麼差異。所以結霜的影響可以忽視，沒什問題。

圖5

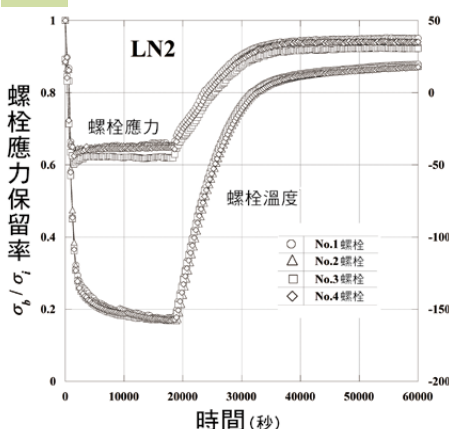
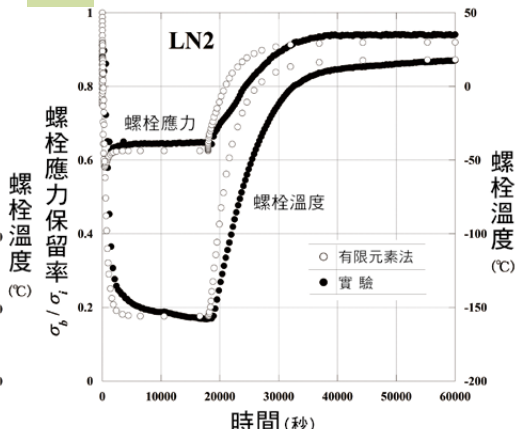


圖7



螺栓軸力變化的有限元素解析

前一章節中，確認了有效的解析方式適用於低溫流體為液化天然氣的狀況。液化天然氣的主要成分是甲烷，所以在計算過程中使用甲烷的物理性數值。此外，管線法蘭內側表面的熱傳遞率，是透過圓管內強制對流的亂流區域的推測公式來計算。

$$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$$

這裡的Nu、Re、Pr分別是努塞爾數(流體力學中的一個無量綱數)、雷諾數(用來表徵流體流動情況的無量綱數)、普蘭特數(無因次的純量)。考量到實際的流動狀態，透過流速0.5、1.0、1.5、2.0m/s時的努塞爾數來計算的話，表面熱傳遞率會是1013、1674、2440、3071 W/m²K。在有限元素解析中，液化天然氣的溫度定為攝氏負163度，表面熱傳遞率在1000、2000、3000 W/m²之間變換。圖8是解析的結果，冷卻相當一段時間後，螺栓的軸部溫度約為負135℃，軸應力殘留率為70%。這和使用液態氮的狀況有所差異，主因就是流體的溫度差異。

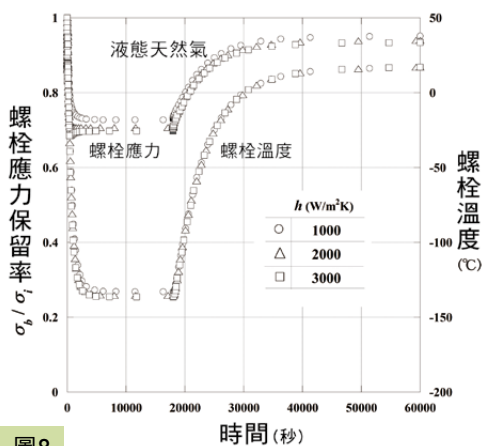


圖8

結語

即使兩者機制會有所不同，但低溫流體的管線和高溫流體的管線一樣，螺栓軸力都會下降，這一點已透過冷卻實驗和有限元素解析呈現出來了。本文介紹的實驗和解析結果顯示，即使我們設定了不同於實際管線的管線模型，讓低溫流體不會在其中流動，但結果軸力降低的幅度是我們不可忽視的。而在實際的管線中，軸力降低的現象是發生在低溫流體開始流動、液面上升的時候，以及液體灌注完畢、液面下降的時候。筆者在研究室，以平放的液態氮管線為對象做解析之後，得出的結果是液面上升時，螺栓的軸力可能會下降到40%以下。有機會的話，我也會解說此現象。

參考文獻

Fukuoka, T., Evaluation of Thermal and Mechanical Behaviors of Pipe Flange Connections for Low Temperature Fluids by Numerical Analysis and Experiments, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference (2016), PVP2016-63212, Vancouver, Canada.

