

「扣件事故/起因/方策」連載講座

推進器軸的接頭損壞 ～傳遞巨大扭力的絞孔螺栓～

文/ 福岡俊道

歐美有時會把螺紋接合的部位統稱為「栓合件(bolted joint)」。栓合件上有許多不同的外力在作用，會引發栓合件的疲勞失效或螺紋的鬆脫。在所有作用於栓合件的荷載當中，如果是剪力荷載(shear load)作用在螺栓軸的直角方向，那麼被栓合的介面、螺帽座面、螺栓頭部的座面上有可能會發生滑脫的現象。剪力荷載導致的滑脫現象，其主因就是疲勞失效或螺紋的鬆脫。軸用接頭是巨大的剪力荷載作用在螺栓上的一種典型的機械要素。透過軸傳遞的扭力會使巨大的剪力作用在鎖固住軸用接頭的螺栓上，此時若用一般的螺栓來鎖固的話，接頭的介面上有可能會發生滑脫的現象，因此會使用「絞孔螺栓(reamer bolt)」，這種特殊螺栓的軸部的直徑等同於螺絲的孔徑。雖然絞孔螺栓的使用廣泛，但它的力學特性卻鮮少人知道。本文會解說絞孔螺栓這種螺紋零件的特徵、鎖固方式，以及荷載在作用時的力學動向。

什麼是絞孔螺栓？

圖1是JIS規格軸用接頭的其中一例。這個接頭的尺寸比較小，所以用來鎖緊它的絞孔螺栓只有4支，尺寸若是越大，使用的螺栓數量就會增加。兩個軸分別固定在兩個接頭上，軸用接頭就是要用來傳遞這兩個軸之間的扭力。此時，非常大的剪力就會作用在圖1所示的兩個接頭的介面上。與它相抗的摩擦力值會等同於螺絲軸力的總合與介面摩擦係數相乘後的數值。如果扭力導致的剪力大過了摩擦力，接頭的介面上就會發生滑脫，成為螺絲鬆脫或疲勞失效的主因。此時的對策就是使用絞孔螺栓。如圖2所示，絞孔螺栓的軸部直徑比一般螺絲的還要大。基本上直徑 d_{rm} 長度會等同於螺絲的孔徑，但實際上大多會被加工，使長度比螺絲的孔徑再大幾個mm，這是因為對螺絲施加軸力時就會沿著直徑方向稍微收縮的緣故。例如以M20的螺絲來說，若以200MPa的軸應力鎖緊的話，直徑會減少約6mm。圖1中用在軸的接頭上的絞孔螺栓，其軸部會與螺絲孔接觸並傳遞扭力。圖2是扭力產生的剪力作用在絞孔螺栓軸部與接頭的接觸面上的樣貌。例如針對船的推進器軸的專用接頭，在標準程序上就會使用絞孔螺栓，以傳達巨大的扭力。

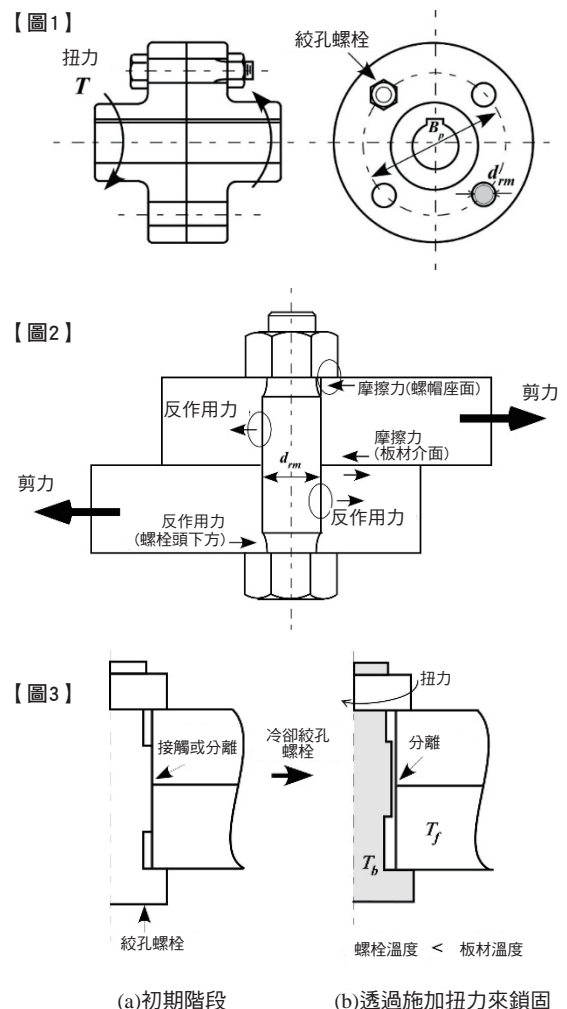
絞孔螺栓的鎖固

由於絞孔螺栓的軸部直徑會等同或稍微大於螺絲的孔徑，所以會用特殊的方式來鎖固。一般會使用乾冰或氮讓螺絲冷卻收縮，在此狀態下把絞孔螺栓插入螺絲孔並施加扭力。為了更容易插入絞孔螺栓，以往會加熱螺絲孔的周圍使之膨脹，但近年來會廣泛使用冷卻法，以避免材料的特性產生變化。圖3顯示絞孔螺栓的鎖固過程。圖3(a)是鎖固前的初期狀態，但實際上因為前述的理由，所以已經無法插入絞孔螺栓，此時就會將絞孔螺栓冷卻，把它插入螺絲孔後施加扭力圖3(b)。至此，作業就算是完成了，但是鎖固的精密度方面的關鍵問題仍然存在。問題就在於，鎖固的作業完成時，絞孔螺栓仍處於低溫狀態。至於是哪種程度的溫度，取決於該使用乾冰抑或是液態氮，這會有很大的不同。此外，從冷卻螺絲一直到完成鎖固作業所需要的時間長短也會造成變化。換句話說，鎖固的精密度方面的問題就在於，作業完成後，螺絲的溫度因為恢復到常溫而長度變長，其軸力就跟著降低。假設鎖固作業完成時絞孔螺栓的平均溫度與

室溫的差是DT，那麼溫度的上升導致的軸力降幅 ΔF_b 可透過以下公式計算出來。

$$\alpha_b \Delta T L_f = \Delta F_b \left(\frac{1}{k_{th}} + \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_{cyl}} + \frac{1}{k_{hd}} + \frac{1}{k_f} \right)$$

上述的公式，以及上一篇連載中說明的熱膨脹法(Thermal Expansion Method)鎖固過程的公式，是相同的。詳細的說明就在此省略了。 α_b 是螺栓材料的線膨脹係數， L_f 是握固長度，括弧內的五個項目是栓合件各部位的彈簧常數。圖4是透過上述公式計算出的「每升溫1度而下降的軸力」與握固長度之間的關係。橫軸是握固長度與公稱直徑 d 之間的比。透過該圖得知，每升溫1度時的軸應力降幅與螺絲的尺寸無關，而是隨著握固長度而變大，範圍在1 MPa至2 MPa之間。筆者在研究室以負80度的乾冰做的實驗中，鎖固作業完成時絞孔螺栓的平均溫度是負30到40度。假設平均溫度為負30度，室溫為20度的話，通常絞孔螺栓的軸應力會相當大，所以那種程度的軸應力下降鮮少會是造成問題的原因。以負196度的液態氮來冷卻並在短時間內完成作業的話，軸應力會大幅降低，必須要注意。



(a)初期階段

(b)透過施加扭力來鎖固

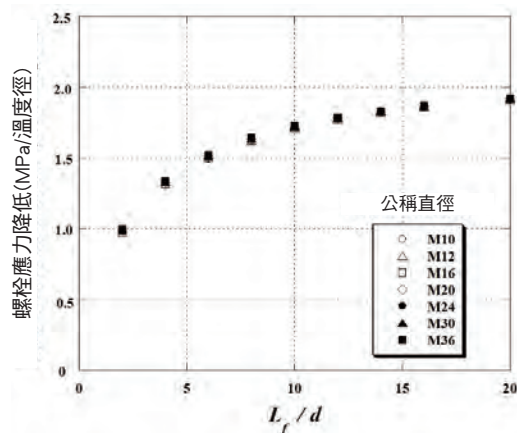
承受剪力荷載時絞孔螺栓的變化

本文第二小節中的圖2是使用了絞孔螺栓的接頭承受剪力荷載時的力平衡，螺栓軸部與螺栓孔緊密接合。與此相反的是，一般螺栓的軸部與螺栓孔之間會有間隙。因此施加在接頭上的剪力會承受被鎖固物的介面螺帽座面以及螺栓頭部座面的摩擦力。如果剪力變得比摩擦力還大，介面上就會發生滑動的現象，可能導致螺栓鬆動或栓合件的疲勞失效。為了避免這種滑動，建築業可能會特意提高被鎖固物表面的摩擦係數。另一方面，若使用類似圖2的絞孔螺栓，大部分的剪力會被螺栓的軸部承擔。換句話說，作用於絞孔螺栓的剪力是靠垂直於螺栓軸部的力道與介面的摩擦力來支撐的。這兩者的比例會隨著絞孔螺栓與螺栓孔的適配、接觸面的摩擦係數，以及螺栓軸應力的尺寸，而有大幅的變化。圖5顯示「緊配(interference fit)」與「餘隙配合(clearance fit)」的狀態。前者的螺栓軸部直徑大於螺栓孔，後者留有些微的隙縫。絞孔螺栓作為船的推進器軸的專用接頭，它的目標緊配範圍是數個mm至10mm左右，但經過實際量測，它最多會在正負20mm之間的範圍內變動。此外為了得出前述「透過垂直於螺栓軸部的力道與介面的摩擦力來承擔剪力的比例」，必須使用進階的非線形解析。

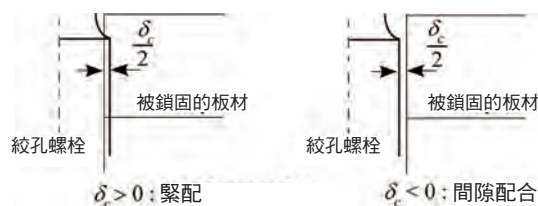
結語

本文介紹了絞孔螺栓這種特殊螺栓的基本特性，它廣泛使用於接頭，會有巨大剪力荷載施加在螺栓上。以絞孔螺栓鎖固接頭，作用在接頭上的剪力不僅是由垂直於螺栓軸部的力道來承擔，也會像一般的螺栓一樣由介面的摩擦力來承擔。我的下一篇投稿會透過有限元素解析(finite element analysis)來說明上述絞孔螺栓的力學特性。此外還會說明反覆施加剪力荷載引起的絞孔螺栓疲勞失效，這也是最大的重點。 ■

【圖4】



【圖5】



參考文獻：

1. Toshimichi Fukuoka, "Threaded Fasteners for Engineers and Design - Solid Mechanics and Numerical Analysis -", pp. 290-304, Corona Publishing Co., Ltd. (2015)
2. Fukuoka, T. and Nomura M., "Evaluation of Tightening Process of Reamer Bolts by Cooled Fitting," ASME PVP 2011 (Baltimore), Paper No.57121 (CD-ROM).

線材表面缺陷的延伸

文/孫宏誠

一、前言

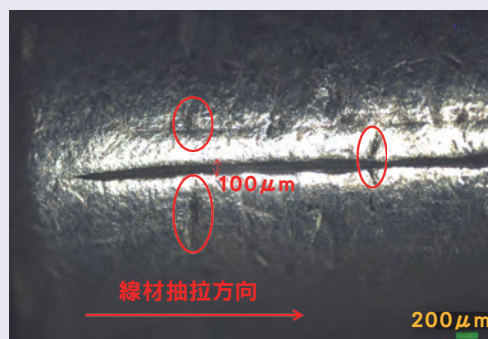
盤元線材，常可能因為前端製程的鋼胚研磨量不足，導致後續在軋延時，於盤元的表面形成缺陷（線縫），線縫較深者或者鍛件外型較嚴苛者，則有可能在鍛打過程中，因為線縫產生直線式的開裂。此為一般所知的線材缺陷，除此之外，本文亦希望藉此，討論另一線材的表面缺陷，晶界氧化。

晶界氧化，多數被討論於滲碳熱處理中的氣氛控制不良，而此現象常會造成淬火後，工件表面的硬度不符合要求，更甚者將會影響工件的使用壽命，造成提早下線。然而，晶界氧化的現象，不僅僅只存在於滲碳熱處理製程，也存在於線材的球化退火製程（氣氛控制不良）。過去，較少討論此現象於線材製程，推測原因可能是，一般認為，晶界氧化存在於線材上，並不會造成災難性的缺陷，因而較少受到關注。然而，隨著扣件產業的高值化，吾等有必要進一步了解

晶界氧化對於扣件的影響。因此，本文藉由一表面失效，做一簡單報告，也希望能做到拋磚引玉之作用。

二、何謂晶界氧化

簡單說明，在高溫的加熱環境中，氧藉由晶界進行擴散，並且與合金元素形成氧化物，造成淬硬性的下降，這也就是為什麼晶界氧化的產生常會造成淬火後的表面硬度不足。然而，當晶界氧化發生在線材的球化退火時，會產生什麼現象？本文利用40ACR鍛件的表面失效來討論之，如圖一所示，可發現縱向及橫向的傷痕。此盤元經由：酸洗→球化→抽線→冷鍛(表面不良)。



圖一 鍛後表面傷痕