

「何謂超高強度螺栓？」

優缺點與經驗談

文/Ralph White

前言

超高強度螺栓又稱為奧氏體等溫淬火螺栓，硬度與拉伸強度高於ISO 898-1¹ 特性等級的螺栓。2011年8月，德國汽車工業協會(VDA)發布名為VDA 235-205² 的物質安全資料表，為汽車業界定了使用貝氏體熱處理的特性等級14.8、15.8與16.8。這些螺栓的使用接受度增加，也開放應用到汽車，因此便需要記載一些預防措施以及接合處設計上的影響，並指配一個特別的特性等級。

比起標準的油淬火與回火，以奧氏體等溫淬火處理數量較少的螺栓耗時較長，成本會增加。螺栓通過火爐的處理時間約要16分鐘，然後要做約40分鐘鹽浴。在火爐中處理的時間則依零件的尺寸與重量而不同。建議使用的火爐帶處理通常是適用於厚度為單層的螺栓。其他奧氏體等溫淬火處理的扣件包括六角法蘭螺帽、多重螺紋的U形螺帽與防鬆墊片。

概覽奧氏體等溫淬火處理

奧氏體等溫淬火程序是使用鹽浴，而非用油來將接觸過火爐高溫的零件淬火降溫。最後會產生下貝氏體層結構，其成形溫度低於傳統油淬火產生的馬氏體結構。作者Laurence Claus寫了一篇很好的文章，標題為「奧氏體等溫淬火的基本觀念(Basics of Austempering)」⁴，詳細描述了冶金程序以及奧氏體等溫淬火程序。

扣件製造商表示，為實現一致的效果，他們偏好使用SAE 8640鋼材來將螺栓進行奧氏體等溫淬火。有些製造商會稍微修改SAE 8640鋼材的化學性質來輔助冷打頭作業，在奧氏體等溫淬火處理後形成集中化的物理特性。他們也調查過SAE 6150、5140、4340、4140

基於該螺栓增加的強度與性能，國際汽車工程師協會(SAE)、美國汽車研究委員會(USCAR)與美國工業扣件協會(IFI)以VDA 235-205為基礎，為超高強度外螺紋扣件建立了一套USCAR - IFI方針³。這套技術性方針為材料、奧氏體等溫淬火處理、檢測與特性等級的辨識提供了一致性。這些超高強度螺栓適合高產量、可預測的物理特性(疲勞特性、拉伸強度、降伏強度)，這些特性不同於工業標準的油淬火螺栓與回火螺栓。指配特性等級之後，螺栓上會有獨特的「U字」頭部標記來表示它是超高強度螺栓(14.8U、15.8U與16.8U)。此方針也為該螺栓的加工和接合處設計上的影響提供了預防措施。

超高強度螺栓常用於關鍵性用途，透過採用公稱直徑較小的螺栓達到大直徑螺栓的拉伸強度，來優化夾持荷載。尤其面對汽車的關鍵引擎和車底盤等等需要高夾持荷載的部位，這些螺栓能減輕其重量。面對以屈服扭矩動力工具進行組裝的特殊作法，這些螺栓的彈性部位擁有的延展性也能優化夾持荷載。相同公稱直徑的14.8U(特性等級)螺栓的強度，比特性等級10.9螺栓(有特性等級8.8的延展性)高出約25%。超高強度螺栓在某些用途中，被認為是可能為邊緣設計以及對加工作業較敏感的應用提供解決。



和SAE 4130鋼材，但還是8640鋼材的性能比較好。SAE 8640鋼材未提及之物質微量元素，例如鈦與硫的變動可能會需要調整火爐。此外，零件的核心硬度增加可能是因為改變了抽線的顯微結構。對螺栓做冷成形時，線材的退火方式對熱處理效果(例如球化、次臨界球化、應力消除退火)的一致性很重要。為了能輔助奧氏體等溫淬火處理程序，扣件製造商提供的零件必須很乾淨(無磷酸鹽)且含有薄薄一層水基性防鏽劑。

超高強度螺栓對氫脆化(氫導致的應力腐蝕龜裂)的敏感度等同或低於工業標準的油淬火螺栓與回火螺栓，但沒有完全消除氫脆化。請參照ISO 15330測試程序文件「扣件 — 用於檢測氫脆的預加載試驗 — 平行軸承表面法」。⁵ 因此推薦的防腐蝕作法是避免電鍍，考慮使用浸旋塗佈。許多汽車代工廠會要求要在熱處理後做烘烤。有鑑於此，某些汽車代工廠研發了核心硬度34~39 HRC的12.8U螺栓。

奧氏體等溫淬火處理程序一般是在量產前，基於AIAG CQI-9「特殊程序：熱處理系統評估」⁶；第四部份：作業審核」的文件做評估。檢測程序包括符合工業標準的硬體度檢查，拉伸力檢查和貝氏顯微結構測試。顯微結構的檢測是對環氧樹脂材質的安裝用潤滑劑樣本使用偏亞硫酸氫鈉(SMB)浸蝕劑分析法，檢測貝氏體和馬氏體。在出貨給客人前，某些扣件製造商會在做完防腐蝕塗佈後進行扭力與拉伸力測試。

由於硬度增加了，超高強度螺栓接觸到磁性的給料設備時可能會因此磁性化。有疑慮的是，螺栓若磁性化就會吸引小金屬分子而干擾組裝。雖然還不清楚確切的工業標準，但一般都接受0到3高斯的零件磁性等級，可避免吸起碎屑，且不干擾車體的電器。建議的做法是在使用磁性的給料設備時也安裝消磁器。

奧氏體等溫淬火是多年來經過驗證的熱處理程序，用於彈簧、夾子、U形螺帽、長棒、小直徑的長螺栓、墊片、小型組裝等等。此程序可用來為汽車產業量產特性等級為14.8U的螺栓長達十年以上。

奧氏體等溫淬火螺栓的特性：比起特性等級為10.9的螺栓，特性等級為14.8U的螺栓的疲勞強度在經過熱處理之後軋紋可增加20%。比起馬氏體結構，(較低溫成形的下貝氏體結構的優點是在晶體顯微結構中的內部應力較低，在可比較的強度下有較佳的延展性，基於ISO - 3800⁷有更高的疲勞特性，殘留應力較少所以比較不會被奧氏體等溫淬火作業處理到扭曲變形，淬裂的可能也較低。此外，特性等級為MJ16 x 2.5的14.8U螺栓是基於ISO 148-1⁸做夏氏衝擊評估，結果如圖1。比起

特性等級14.9的馬氏體，14.8U奧氏體等溫淬火螺栓在夏氏衝擊測試中被吸收的能量等級大幅提升。

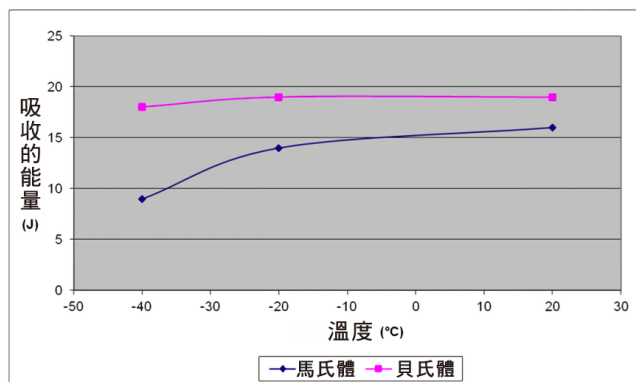


圖1. MJ16 x 2.50特性等級的 14.8U貝氏體螺栓 vs 14.9馬氏體螺栓做夏氏衝擊評估的結果

車輛應用

12.8U與14.8U螺栓透過動力工具，採用屈服扭矩與扭力角度的鎖固策略，因此關鍵的內部引擎、動力傳動系統、動力裝置和、車底盤都會使用它們。某些銜接桿螺栓會採用多種鎖固策略，在第二次鎖固過程中，讓超高強度螺栓在達到降伏點時增加夾持荷載。長的降伏曲線會優化動力工具的斷開精準度。此外，內部引擎使用的超高強度扣件可能尺寸較小(例如M7取代M8)。車底盤的接合件比較會用到14.8U超高強度扣件，因為接合件的咬合區塊較長，得以優化螺栓原本很高的拉伸強度。

此外，若加長了公稱直徑卻無法組裝，就可採用超高強度螺栓。它們符合輕量化，用於接合件需要更多強度之處。如前所述，超高強度螺栓在某些用途中，被認為是可以為邊緣設計以及對加工作業較敏感的應用提供解決。

重要的設計與應用因素

設計

螺紋頭下的魚骨紋設計之所以重要，是因為螺栓的圓柱本體與相對較大的頭部之間的質性面積和保熱度有了改變。面對疲勞相關的用途，要考慮到魚骨紋半徑長度與/或其形狀的特定要求，例如透過有限元素分析模擬出的特殊設計魚骨紋(兩倍半徑或橢圓)。另一個重要項目，是考量到接合件外型 and 荷載力道而設定的螺紋尾部位置(第一條螺紋到螺栓頭部下方的承力面之間的距離)。以比較大的夾持荷載來增加頭部下方承力面的壓力，可能會超出接合件的抗壓強度。



超高強度螺栓若有MJ規格的螺紋(依循ISO 5855的航太級MJ螺紋^{9,10}, MJ12-1.25), 而且是在熱處理過後做滾牙, 會比較理想。MJ螺紋的拉伸應力面積會稍大於擁有同樣尺寸與牙距的ISO標準M規格螺紋(M12-1.25)。基於MJ螺紋的外形, 模具磨耗的成本較高。熱處理後將它滾牙會急遽降低搓牙模的壽命。有些以M42工具專用鋼材製成的搓牙模, 對硬化完成的扣件進行搓牙, 其壽命會比較長。經熱處理然後搓出的螺紋會有更長的抗疲勞壽命, 優化了超高強度螺栓的用途。

超高強度扣件一般都指定使用浸旋式表面塗佈作為保護, 可產生一致的摩擦特性, 使扭力與夾持荷載的性能可以被預測。這種塗佈的厚度一致, 提供更好的抗腐蝕力, 而且這種塗佈程序不會產生氫脆化。

用途

若要以超高強度螺栓取代現有的ISO螺栓(假設是10.9級螺栓), 可能必須調整鎖固的條件, 來優化超高強度螺栓的特殊特性。關鍵的設計原則是螺栓斷成兩段時螺帽不會滑牙(圖2), 螺帽的滑牙是無法令人接受的。耦合零件的材料與內螺紋的咬合也是使用超高強度螺栓時要考慮的重要事項。通常會增加螺紋的咬合來優化超高強度螺栓的高拉伸強度。材料的物理特性有很多種, 所以鋁質的攻孔可能會有問題。建議進行動力工具的扭力失效測試, 為失效的模式設置安全係數。其中一個例子是用電動工具把鋁製轉向節進行內螺紋咬合直到在一支M10X1.5等級14.8U的螺栓上至失效。內螺紋上發生滑牙的位置是在2 x 直徑、2.5 x 直徑、2.75 x 直徑的位置(圖3)。在3.5 x 直徑的位置, 螺栓斷成兩半。此外, 超高強度螺栓較高的夾持荷載增加了承力面的壓力, 可能使螺栓埋入耦合表面。

總結

奧氏體等溫淬火超高強度螺栓的夾持荷載和延展性之增加, 對引擎、動力傳動系統、車底盤零件的輕量化趨勢貢獻很大。比起特性等級為10.9的馬氏體油淬火回火螺栓, 超高強度螺栓要多付出成本。這是因為超高強度螺栓使用SAE 8640鋼製線材, 其量化的奧氏體等溫淬火處理速度較慢, 會形成MJ螺紋外形, 而且是在熱處理完成後進行搓牙。

它在汽車關鍵應用方面的未來市場需求可望逐漸擴大。超高強度螺栓是用來支援輕量化, 被認為是可以為邊緣設計以及對加工作業較敏感的應用提供解決辦法。有證據顯示, 透過擴大德國汽車工業協會制定的分類以追加納入12.8U特性等級, 超高強度螺栓逐漸邁向主流且被汽車工程師使用。■



圖2. 預想中的螺栓在3.5 x 直徑的螺紋咬合位置斷成兩半。



圖3. 鋁製內螺紋上發生滑牙的位置在2 x 直徑、2.5 x 直徑、2.75 x 直徑的位置。

參考文獻

1. ISO 898-1: Fifth edition 2013-01-15, "Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel" Part 1: Bolts, screws, and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread
2. VDA 235-205, August 2011, "Ultra strength fasteners with bainitic heat treatment for automotive industry – property classes 14.8 to 16.8"
3. "USCAR – IFI Guide, November 23, 2015, for Ultra-High Strength Externally Threaded Fasteners GUIDE Number: UHSFG-1416U-2014"
4. "Basics of Austempering" by Laurence Claus, President NNI Training and Consulting Inc., Fastener Technology International, February 2014.
5. ISO – 15330: First edition 1999-09-01, Fasteners – Preloading test for the detection of hydrogen embrittlement – Parallel bearing surface method.
6. AIAG CQI-9: Version 3, Special Processes: Heat Treatment Systems Assessment.
7. ISO – 3800: 1993, Confirmed in 2021, Threaded fasteners – Axial load fatigue testing – Test methods and evaluation of results
8. ISO – 148-1: Third edition 2016-10-15, Metallic materials – Charpy pendulum impact test.
9. ISO – 5855-1: 1999, Confirmed in 2021, Aerospace – MJ threads - Part 1: General requirements
10. ISO – 5855-2: 1999, Confirmed in 2021, Aerospace – MJ threads - Part 2: Limit dimensions for bolts and nuts.

