

結構物專用螺栓的 緊固策略

結構物不一定只有建築物和橋樑，任何東西，包括透過大型產線組裝以及有搭載電路板的結構體都算在內，例如起重機、叉車、風力渦輪機、儲罐、遊樂設施等。每種結構都有特殊的裝配需求，以確保成品的安全和性能。

測量扣件的實際拉伸量，是唯一能得出可預測之夾緊載荷的準確作法，可以透過幾種不同方法和誤差較小的產品來實現。這些方法包括秤重傳感器、載荷墊圈、可指示載荷的帶帽螺絲、超音波傳感器，甚至透過螺帽旋轉法。

使用秤重傳感器來鑑定現場螺栓和螺帽的預期性能。當然，這需要與數位或聲響式扭力扳手搭配使用。這種方法和其他方法一樣，由於存在一些外部變量，不能保證安裝性能。但是，誤差率很低。

可指示載荷的墊圈或直接張力指示器 (DTI) 使用方式非常簡單，價格稍貴，但對關鍵性的組裝作業非常有用。其準確性取決於操作人員。

超音波傳感器也是測量扣件拉伸的一種極為精確的方法。這種方法非常昂貴，而且不像負載墊片那樣是永久固定裝置。傳感器的頭可以從一個扣件移動到下一個扣件，但唯一的缺點是，帶帽螺絲的頭部和尖尾必須滑順平整，才能容納傳感器頭。這代表要磨掉螺絲的等級標記和製造商的識別標記，消除扣件的所有可追溯性。

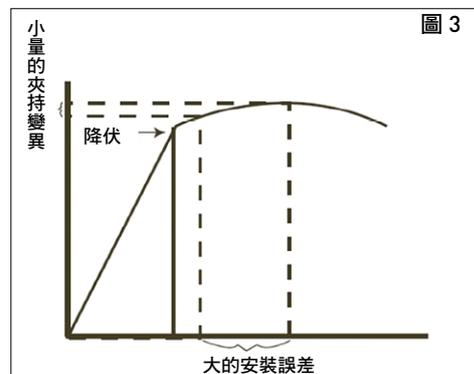
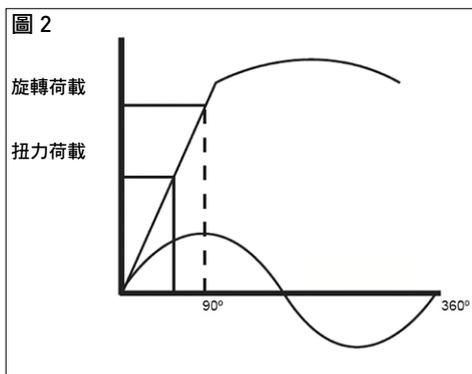
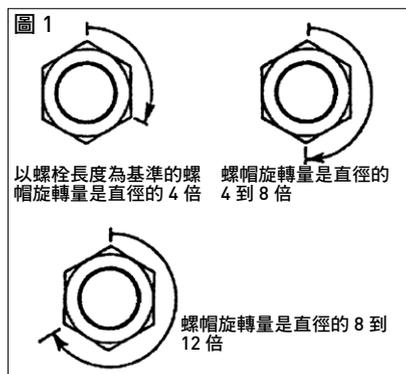
扭力倍增器對於需要高扭力值的大直徑螺栓非常有用且精確。隨著扭力值的增加，對扳手手柄的要求也隨之增加。扭力的測量是將力道（例如磅）乘以手柄的長度（例如英尺），得出了磅尺單位。有些扭力扳手長達三英尺，以提供鎖固螺帽或螺栓時所需的槓桿作用。除此之外，還要使用扭力倍增器。

扭力倍增器在安裝風力發電機平台或旋轉起重機時非常有用。有些設備是手動操作的，而有些則是電動或氣動操作的。

另一種在結構物上使用的好工具是完全不使用扭力，而是將螺帽旋轉一定的角度。這種方法僅適用於粗牙扣件，以及用短柄扳手預緊後已消除接合部位壓縮力的金屬對金屬的牢固連接。此方法不能直接用於公制螺栓，因為其他公制螺栓直徑也使用相同的螺紋間距。需要對特定尺寸、螺紋間距和接合部位厚度進行實際試驗。

這種方法之所以如此有效，是因為任何標準螺栓的螺紋都是完美的螺旋線。因此，當螺帽的螺紋沿著螺栓的螺紋旋轉時，螺帽的線性移動方向一致。當螺帽對著堅固的連接表面旋轉時，螺栓受到的張力與螺帽的旋轉成比例。

這一原理源於胡克扣件定律。工件是在“線性”刻度上進行的。如果螺帽每次移動的距離相同，或者連接中的所有螺帽移動的距離相同，則扣件的拉伸量在每個扣件上都相同。這種經過測量的拉伸量將產生更大、更一致的夾緊力，並且在任何扣件等級、表面條件或使用普通裝配方法的扣件長度下都更可預測。



那麼，扭力會發生什麼變化呢？扭力仍然存在，只是我們不對其進行這樣的測量。扭力始終以摩擦的形式存在，因為它是我們必須克服的能量，以便將螺帽移動一定的距離。這裡不測量扭力，因為我們更關心的是螺帽移動的距離，而不是如何移動的。

例如：考慮使用四個 1/2-13 8 級扣件，其中三個有鍍層，第四個未鍍層。在電鍍螺栓中，一個摸起來是乾的，一個是潤滑過的，最後一個有螺紋缺口。如果所有四個螺栓都安裝在一個連接埠中，並以相同的 105 lb-ft 扭力擰緊，由於存在各種摩擦變量，沒有一個螺栓的夾緊載荷會彼此非常接近。

潤滑後的螺栓最緊，因為摩擦力大大降低。該螺栓可能產生超過 18,000 磅的夾緊載荷，且剛剛進入降伏階段。乾鍍螺栓最接近能產生 12,800 磅的夾緊載荷，而有螺紋缺口的螺栓將產生約 10,000 磅的夾緊載荷。未電鍍的螺栓由於表面粗糙，只能產生約 8,000 磅。這差距幅度保守估計為 10,000 磅。

確保接合部位被充分壓緊且螺栓頭被限制轉動後，透過從相同角度旋轉螺帽來擰緊所有四個 UNC 螺栓，那麼所有扣件都將受到等量拉伸。這樣產生的夾緊力僅相差幾百磅，而不是幾千磅。

對操作者來說，區別在於必須消耗多少能量才能使螺帽旋轉到規定的角度。未電鍍的扣件和螺紋有缺口的扣件需要更大的“扭力”能量才能使螺帽旋轉到與其他扣件相同的距離 X。當然，潤滑扣件所需的力道最小。

這裡的關鍵因素是所有螺帽都旋轉到 X，而不是 X-1 或 X+2。這就是螺帽旋轉法 (TON) 的原理。

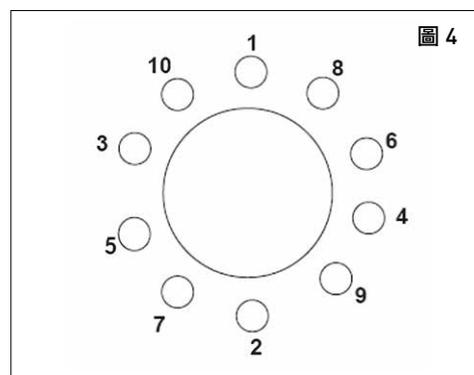
結構物的接合部位使用 ASTM A325 和 A490 扣件。由於胡克定律指出應力與應變成正比，並使用鋼的彈性模量，我們發現如果螺栓每加載一英寸被拉伸 0.001 英寸，它將產生大約 30,000 psi 的載荷。

因此，根據 AISC 手冊，螺帽旋轉法以螺栓總長度為基準，使用施加在螺帽上的旋轉量作為螺栓直徑的函數。如圖 1 所示，該方法提供了以下三種與扣件直徑和接合部位厚度相關的一般旋轉量。

首先，如果扣件長度不大於扣件直徑的 4 倍，則會在擰緊螺帽後旋轉 1/3 圈或 120 度。扣件長度更長以及其旋轉情況見圖 1。

透過圖 2，我們可以看到使用標準扭力和旋轉法時，螺旋螺紋與螺栓拉伸的關係。扭力值可能會將螺栓拉伸到不到 90 度，而使用旋轉方法將螺帽旋轉 90 度會產生更高的夾緊載荷。

將螺栓擰緊到 120 度的旋轉法如圖 1 所示，會將螺栓拉伸至降伏狀態，如圖 3 所示。這樣，螺栓將產生最大的夾緊載荷，夾緊載荷散佈最小，而輸入誤差無關緊要。



由於扣件已進入降伏狀態，因此不能再重複使用。這也是引擎製造商和其他公司採用的「扭力進入降伏狀態」(TTY) 原理，以最大限度提高接合部位的載荷並最小化載荷散佈。

首先，必須讓接合部位有剛性，以消除所有初始壓縮。之後，在旋轉螺帽時，確保扣件立即進入拉伸狀態。TTY 法是使用預緊扭力來固定接合部位，旋轉法使用短柄手動扳手來“擰緊”螺帽，直到感覺到接合部位已連接在一起，並且所有接合部位的壓縮都已消除。

同樣，這些裝配方式將所有扣件置於降伏狀態。這種用於 ASTM 結構扣件等級 (ASTM A325 和 A490) 的方法也可用於強度等同的 SAE J429 5 級和 8 級。A325 或 5 級的彈性曲線比 150 ksi 的 A490 長，因此這兩個級別可以使用相同的旋轉。

在多螺栓模式下使用上述任何一種方法時，唯一要注意的是用交叉模式，漸增地擰緊螺栓。■