

震動對栓合的影響

1977 年夏季，一場上世紀最災難性的事件降臨紐約市。7 月 13 日晚間 8 時 37 分，一場源自美國東北部風暴的雷擊，摧毀了一處變電站，進而引發電網連鎖故障，導致紐約市幾乎全境及周邊威徹斯特郡陷入停電。電力系統耗時近二十五小時才完全恢復，期間近一千六百間商店與住宅遭洗劫、破壞及焚毀。據估算，此次事件造成的損失總額超過三億美元。

在這場災難過後，官員們追查到最初變電站故障的元兇。令人驚訝的是，一切竟源於一枚幾分錢大小的「鎖緊螺帽」鬆脫，導致其所在的開關設備無法正常運作。美國能源部聯邦能源監管委員會在《1977 年 7 月 13 日至 14 日康尼島電力公司停電事件報告》中指出：「設備故障導致四條受影響線路中有三條無法正常自動恢復供電，進而直接引發更多輸電迴路中斷。肇因在於 Millwood West 變電站內：斷路器控制桿上的鎖緊螺帽鬆脫，以及保護繼電器的觸點彎曲。」

儘管這是個極端案例，設計師仍需持續面對工程接合設計與選擇精密扣件的挑戰，以抵禦因震動、接頭構件彎曲、熱循環及其他可能導致接頭鬆動的機制所引發的扣件自鬆現象。事實上，扣件工程領域正是催生整類扣件的源頭，此類產品通稱為「鎖固扣件」。儘管存在多種循環載荷類型，震動是最常見的載荷形式，理論上所有載荷皆遵循相同原理。本文將從高層次視角探討震動（及其他循環載荷）如何影響螺栓接合，以及如何選擇最適宜的扣件。

背景

簡單來說，傳統螺栓接合工程學指出螺栓必須具備彈簧特性。這意味著設計、材料與加工方式的選擇必須精準結合，方能製造出本質具彈性的扣件。當螺栓被拉伸（即所謂「預緊」）時，會產生與預緊力相反的壓縮力，進而使螺栓頭與螺帽的承載面之間產生壓縮力或「夾緊力」。我們能獲得的**預緊力越大，所產生的夾緊力就越強**。

當然，當我們想像彈簧時，螺栓並不會立刻浮現腦海。事實上，螺栓是極其剛硬的彈簧。為使其在緊固時發揮預期作用，我們會施加顯著的張力、扭轉力，甚至彎曲能量，使螺栓產生伸長、扭轉與彎曲變形。當停止擰緊時，這股累積能量僅能透過螺帽承載面、螺栓頭部與接合處的摩擦力，以及內外螺紋接觸面的摩擦力得以維持。若因任何原因導致這些摩擦力消失，儲存在扣件中的能量（特別是拉伸能量）便會釋放。**若預緊力損失過多，接合處將面臨疲勞、自主鬆脫等漸進性失效機制的威脅**。某些情況下，若預緊力完全消失，扣件可能徹底分離並遺失。在一般應用中這僅是困擾，但在更多關鍵應用中，扣件遺失可能導致災難性後果。

什麼是自主鬆脫？

若深入探究此議題，便會發現關於螺栓自主鬆脫現象的實際機制存在多種專家觀點與理論。儘管某些理論更具說服力或擁有更充分的實證支持，我們仍無法確知

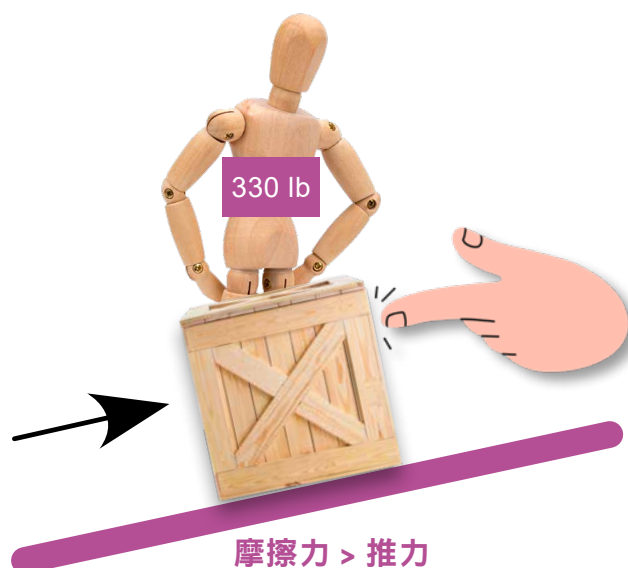
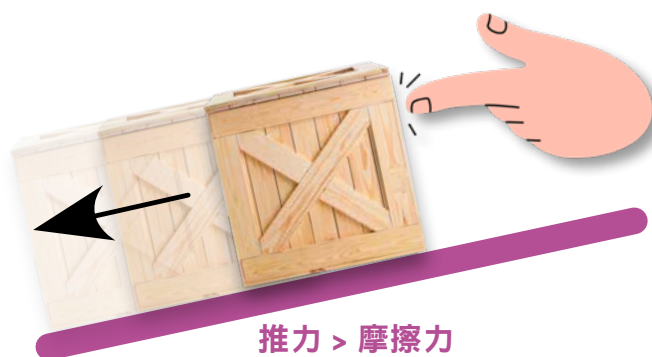


是否僅存在單一作用機制，而歸根究底，這或許並非關鍵所在。我們都認同震動（及類似載荷）會導致接合鬆脫。在Bickford的《螺栓接合設計與行為導論（第三版）》中，他承認：「眾所周知，螺紋扣件不會自行鬆脫，除非作用於螺栓與接合的外部機制削弱或消除了公螺紋與母螺紋間的摩擦力。」換言之，唯有當接觸面之間的摩擦力降低或消失時，才會發生自行鬆脫現象。

試想一下，我們有一只木箱靜置在極緩的斜坡上。由於箱體重量在底部與斜坡接觸面之間產生摩擦力，它並不會自行移動。然而，當我朝下滑動方向輕推時，便能克服這些輕微的摩擦力，將木箱滑至斜坡底部。現在設想相同情境，但箱子頂端站著一位 150 公斤（330 磅）的成年人。新增的重量會產生顯著增強的摩擦力，因此原本輕而易舉的任務，此刻卻成了艱鉅的挑戰。

那麼，震動因素如何影響？讓我們回到前面提到箱子靜置於斜坡的描述。假設施加在箱子上的力恰好足以突破摩擦力對箱子的束縛。木箱會發生什麼變化？失去摩擦力的阻抗後，木箱便會沿斜坡滑落。同樣地，這也闡明了 Bickford 在前述引文中傳達的觀點：**當螺紋間存在極微弱或完全缺乏摩擦力時，若遭受震動作用，螺紋便可能產生位移，進而引發自行鬆脫現象。**

對於承受剪切載荷的接合而言，震動問題比拉伸載荷更為嚴重。事實上，沿螺栓軸向作用的震動可能僅使預緊力降低 30% 至 40%，而**橫向振動（即震動載荷垂直於螺栓軸向的震動）**則可能導致預緊力完全喪失。某些情況下，震動載荷可能同時沿軸向與橫向複合作用。此類載荷模式可能導致螺栓鬆脫、緊固，或完全無效。因此，橫向震動正是設計者與使用者必須特別注意的關鍵因素。



抵抗震動

自主鬆脫現象取決於兩個關鍵要素的存在：循環載荷作用，以及螺紋與接觸面之間的相對滑動。基於上述原理，針對因震動導致的自主鬆脫現象，可採取以下四種對策加以抑制：

- 使螺紋與接觸面之間的摩擦力大於試圖鬆開它們的震動力。這可透過維持足夠的預緊力來實現。
- 防止內外螺紋與接觸面之間產生滑動。
- 降低螺紋的螺旋角。
- 產生預置扭矩或創造鎖固作用，以抵銷作用於系統上的扭矩，防止接合中的扣件鬆脫。

保持適當預緊力

傳統上，維持接合完整性最經濟且最簡便的方法，是採用設計得當的接合結構，使其保持足夠的預緊力以抵禦所有可能作用於接合的力。為此，設計師可選擇充分發揮扣件的潛能，將緊固程度調整至實際可行的屈服點附近。然而基於多種因素，此方法未必總是可行或實用，尤其在使用較小尺寸螺絲或僅作為「定位件」的螺絲時，此限制更為明顯。



預置扭力扣件



最常見的「鎖固」扣件形式為預置扭力扣件。預置扭力指扣件在達到任何程度夾緊力前所產生的抗轉動阻力。這意味著預置扭力的特點並非旨在產生或維持任何夾緊力，而僅是提供額外的抗轉動阻力。**預置扭力扣件的性能受行業標準規範，通常同時規定初始鎖緊扭矩與第三次（或第五次）鎖緊扭矩值**，以確保安裝扭矩不過度且預置扭力充足。常見的預置扭力扣件類型包括：

- **全金屬鎖固螺栓 / 螺絲**— 此類產品採用偏移螺紋設計，通常可將螺紋間干涉降至最低。
- **外螺紋尼龍薄片**— 此類扣件僅在單側特定螺紋處塗覆尼龍層。安裝時，薄片會將對側螺紋楔入配合的內螺紋中，從而增大摩擦力並產生預緊扭矩。
- **外螺紋尼龍顆粒或條狀嵌件**— 此類扣件經改製後，可在螺紋單側安裝圓形塑料顆粒或方形條狀物。與前述補片原理相同，這些嵌件會將螺紋扣件的相對側楔入配合內螺紋中。
- **側向鎖緊螺帽**— 側向鎖緊螺帽在一個或多個螺帽平面上壓入圓形或方形凹痕。若定位精準，這些凹痕會在螺帽內部形成凸起，從而產生干涉作用與殘餘扭矩。
- **頂部鎖緊螺帽**— 頂部鎖緊螺帽在頂部兩至三側設置彎折結構。這些結構能壓縮該區域的螺紋，或將圓形螺紋轉變為橢圓形。無論何種設計，皆會與配合外螺紋產生干涉，從而產生預緊扭力。
- **嵌入式鎖緊螺帽**— 嵌入式鎖緊螺帽在頂部環繞尼龍或聚四氟乙烯嵌件。外螺紋螺栓或螺絲必須咬合此環狀結構，藉此產生干涉作用與預置扭力。

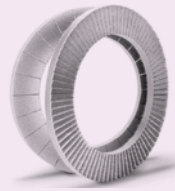
黏著劑



另一種常見的扣件固定方法是採用黏著劑。這類厭氧黏著劑透過與金屬接觸而活化，促使嵌入黏著劑黏合劑中的球形微粒釋放封裝化學物質。其黏著強度分為不同等級，從輕微耐重型到極強耐重型不等。儘管這些黏著劑在二次使用時仍能提供少量效能，但其設計初衷是供一次性使用。

楔形鎖緊扣件

斜面鎖緊墊圈



許多現有方法雖有助於固定扣件位置，卻無法保證維持夾緊力。斜面鎖緊墊圈是其中例外，堪稱維持夾緊力的卓越方案。斜面鎖緊墊圈採用雙組件系統。這對配對墊圈的一側帶有鋸齒狀凸緣，可咬合旋轉緊固元件的承載面與被夾緊元件的接觸面；另一側則設有斜面楔形結構，兩者相互咬合。當扣件旋轉時，這些斜面楔形結構會相互凸輪作用，直至系統鎖定到位。該系統不依賴摩擦力，而是透過斜面梯狀的幾何結構與外螺紋扣件的導角實現鎖固。斜面梯狀的凸輪角（斜面角度）大於螺紋導角，此設計可防止楔形結構在震動載荷作用下鬆脫。

楔形鎖緊螺帽

螺帽螺紋形狀經過特殊設計的專利很多，其把外螺紋部位拉升至內螺紋根部的楔形斜面上。此設計旨在消除螺紋配合時的任何滑動間隙。為使楔形結構發揮作用，此類螺帽的安裝扭矩需高於傳統螺帽。然而其優勢在於：據實證顯示，此類螺帽能更均勻地分散螺帽負荷，顯著降低傳統螺帽接合前三圈螺紋承受的高負荷集中現象。



鎖緊扣件

儘管有人可能主張螺栓接合最關鍵在於確保預緊力正確，但在某些情況下，防止扣件鬆脫同樣至關重要。為此，為確保扣件無論預緊狀態如何皆能穩固定位，通常會採用以下幾種常見技術：

- **鎖線固定法**— 在螺帽頂部鑽孔，穿入特殊安全線並編織固定，以防止螺帽發生大幅旋轉、螺栓鬆脫或斷裂時零件遺失。此法看似簡單，但線材編織技術需專業訓練與經驗方能正確安裝。
- **開口銷與開槽螺帽**— 於外螺紋扣件的螺紋處鑽孔，將開槽螺帽鎖入定位後，將楔形銷穿過孔洞，並將其突出端纏繞於開槽螺帽的凸耳上。
- **卡榫墊圈**— 採用帶有卡榫或防旋轉特徵的特殊墊圈，防止螺帽轉動。

總結

震動與自主鬆脫現象對產品設計師而言可能構成重大挑戰。所幸現有眾多解決方案可供選擇，其中部分方案僅能帶來輕微改善，而另一些則專為關鍵應用設計，確保扣件絕不鬆脫。理解這些解決方案的優勢與侷限性至關重要，方能確保選用適當技術。■

