

扣件博士

螺栓失效與預防方法



1 螺栓是如何失效的？

答：要回答這個問題，您必須先了解，螺栓（或螺紋扣件）並非獨立存在的元件，而是更複雜系統的一部分，我將這個系統稱為「螺栓（或緊固）接合」。作為一個系統，螺栓接合處由多個變因組成，其中包括扣件組件（螺栓、螺帽、墊圈…等）、被夾緊的材料、施加的載荷，以及周圍的環境條件。工程師在設計接合處時，必須將所有這些因素納入考量，以確保接合處結構堅固且不會失效。然而，若設計出現任何疏失，則扣件組件或被夾緊的材料可能會失效，進而導致接合處失效，甚至可能引發該接合處所屬之更大系統性失效。

那麼，接合處是如何失效的呢？我們可以將失效原因歸納為六種可能的成因。



1. **該接合處的設計未能滿足其必須承受的使用環境要求。**這方面的幾個簡單例子包括：使用低強度螺栓代替高強度螺栓，或是當需要不鏽鋼時卻使用鍍鋅鋼製零件。由此導致的常見扣件失效原因包括過載和腐蝕。

2. **接合處失去預緊力。**接合處失去預緊力的原因有各種，但較常見的原因包括因「軟接合」狀態所導致的鬆弛，以及扣件的嵌入。當接合處失去預緊力時，便容易發生自主鬆動或疲乏等漸進性失效。

3. **扣件安裝不當。**在此情況下，扣件可能出現「過度」或「不足」的鎖緊狀況。過度鎖緊的扣件通常會在安裝過程中因過載而失效，儘管過度安裝也可能引發脆性斷裂。鎖緊不足則可能導致接合處缺乏足夠的預緊力，使其容易因疲乏或剪力過載而失效。

4. **材料容易出現特定的失效模式。**例如，某些材料在長時間暴露於高溫環境下會產生蠕變和應力斷裂現象，或是易受氫脆影響的扣件。

5. **扣件存在缺陷。**當然，缺陷不僅限於螺栓或扣件組件，也可能是系統中的任何零件或組件。就螺栓或扣件失效而言，扣件組件的製造與工藝缺陷都可能導致失效。常見會導致螺栓失效的扣件缺陷包括：螺紋重疊、裂紋、爆裂、折疊，以及「不潔」的原材料。

6. **扣件可能被濫用。**雖然這種情況並不常見，但若因不當使用或維護而導致系統被濫用，可能會造成過載或漸進性失效（例如：疲勞失效）。





2 這些原因之中，是否有某一種比其他原因更常見？

答：我並未見過任何針對此問題進行深入探討的研究或數據。在我過去任職於扣件製造商的那段時期，我習慣認為大多數螺栓（扣件）的失效都是某種製造缺陷所致。然而，這根本不是事實。事實上，十五年前我曾看到一項數據，恰恰印證了這一點。該數據指出，所有扣件失效案例中，有 95% 是因選用或安裝不當所致。若此數據屬實（而我相信確實如此），這意味著 95% 的失效案例，皆可歸因於缺乏建立堅固螺栓接頭所需的專業知識或正確執行方式。



3 何謂過載失效？

答：簡而言之，過載狀態是指施加在扣件組件上的應力超過其承受能力。扣件通常會在拉力、剪力和扭力上發生過載。當螺栓安裝並產生拉力時，螺栓會開始伸長。初期，伸長量（拉伸）與產生的拉力之間呈線性關係。我們稱此階段為螺栓的彈性拉伸。這種狀態無法無限期持續，最終將達到其彈性極限。一旦螺栓超過彈性極限，便會開始產生永久塑性變形。若彈性極限被大幅超過，螺栓可能會達到其極限強度並發生斷裂。此即拉伸過載。當垂直於螺栓軸線且極端的載荷存在時，螺栓可能會被「剪斷」成兩段。這稱為剪切過載。當安裝扭力非常高時，零件可能會因扭轉過載而斷裂。

過載失效可謂利弊參半。若過載發生於安裝階段，失效的影響通常微乎其微，頂多只需更換損壞的扣件或報廢該產品。顯然，此類措施會造成成本上的負面影響，但在這個階段，相關成本通常不會太高。然而，過載失效的不幸之處，在於當其於使用期間發生失效時才會顯現。過載通常發生在系統承受意外應力時。例如：接合處吸收衝擊或碰撞；因鄰近另一組件的漸進式失效，導致接合處必須意外分擔周邊接合處的載荷；或是系統遭遇地震或龍捲風等極端且意料之外的自然災害。在這些情況下，接合處可能會在毫無預警的情況下迅速失效。最糟糕的情況下，這些過載失效將導致人員傷亡及過度的財產損失。



4 何謂疲乏失效？

答：根據 ASM 手冊的定義：「失效是指材料在承受反覆或波動應變時，於名義應力（其最大值小於且通常遠小於該材料的靜態屈服強度）下所發生的漸進性、局部性且永久性的結構變化。」稍作闡釋，這意味著當易受疲勞影響的零件持續承受動態載荷時，會隨時間推移（通常是相當長的一段時間）而發生此類失效。疲乏失效機制包含三個階段：1. 裂紋萌生、2. 裂紋擴展，以及 3. 快速失效。

要發生疲乏失效，必須先產生裂紋。這通常發生在應力集中點或小型表面缺陷處，例如裂紋或螺紋重疊處。一旦裂紋形成，便會隨著每個載荷週期而擴展，在施加载荷時向前擴展，在卸除載荷時停止擴展。此過程會持續進行，直到裂紋擴展到足以使剩餘的未受損材料無法再承受載荷，此時零件便會在過載狀態下迅速失效。



5 是否有任何方法可以防止疲勞失效？

答：有許多措施可以做來降低扣件疲勞風險。預防螺栓疲勞的絕對最佳方法，是妥善設計接合處，並確保施加的預緊力大於所有使用載荷之總和。然而，採取額外的製造措施，例如以高精度的工藝製造零件、在熱處理後進行螺紋滾軋、在熱處理後滾軋過渡圓角、增大半徑、採用 UNJ 或 MJ 螺紋，以及平滑螺紋跳轉過渡處，都是降低疲勞風險的有效手段。



6 該如何避免產生過大因而導致螺栓因過載而斷裂的拉力？

答：最簡單的解答在於理解扭力與拉力之間的關係，並正確執行安裝作業。扭力與拉力之間存在著關聯，其關係由公式 $T = kdP$ 表示，其中 T 為扭力， d 為扣件直徑， P 為預緊力（或拉力），而 K 則是一個稱為「摩擦係數」的常數。摩擦係數是接合處所有摩擦變數的函數。雖然有些書籍會提供 K 的參考值，但實際上 K 值在每種情況下都會有所不同，因此要準確掌握實際的關係，唯一的方法就是透過實驗來確定 K 值。

若能準確理解扭力與拉力的關係，便能制定一套安裝流程，透過一貫且精確地使用鎖緊扭力值，來達到預期的預緊力。這未必困難，但確實需要有計劃地執行。



7 生鏽的零件會造成問題嗎？

答：若僅是輕微腐蝕，可能不會造成問題，但**完全受腐蝕且已開始鏽蝕的零件則構成重大風險**。正在腐蝕的零件有點像蛀洞不斷擴大的牙齒。一旦腐蝕程度足夠嚴重，零件的機械完整性便會受損，進而容易發生疲勞或過載等失效模式。預防此問題的方法是採用有效的電鍍或塗層；若環境條件極為嚴苛，則應選用更適合該環境的材質，例如不鏽鋼或鎳合金。

8 什麼是氫脆？

答：當零件因氫脆而失效時，人們往往將其視為根本原因。這種看法是錯誤的。氫脆僅僅是一種失效機制。**氫脆的根本原因始終是材料的氫脆敏感性**。氫脆是指金屬或合金因氫與應力（無論是外部施加的應力或內部殘餘應力）相互作用，而導致延展性永久喪失的現象。進一步說明，當易受氫脆影響的材料接觸到原子氫來源，且承受的拉伸應力超過臨界值時，氫便會使零件脆弱區域的晶界脆化，進而導致零件斷裂。氫脆主要分為兩種形式：內部氫脆（IHE），其氫源是在製造過程中引入的，通常發生於電鍍工序；以及環境氫脆（EHE），其氫源是在使用過程中引入的，通常由活性腐蝕電池引起。

9 氫脆是可被預防的嗎？

答：是的，但要避免這個問題，需要具備相關知識並有條不紊地執行。首先，必須區分高風險與標準風險的情況。**任何硬度高於洛氏硬度 39 的零件，都會自動被視為易受影響的材料**，應格外謹慎處理。必須辨識出高風險零件，並對其進行適當且時間充足的烘烤處理、進行持續載荷測試，並採用具備完善製程控制的電鍍工藝進行處理。

結論

本文探討的問題雖能對此主題提供良好的基本概覽，但僅是略窺一二。製造商和供應商應配備具備了解這些失效機制並掌握如何有效降低風險或完全防止其發生相關知識與專業素養的人員。

著作權所有：惠達雜誌 / 撰文：Laurence Claus



FASTENER WORLD

專業服務

**B2B廣告刊登
線上採購媒合**

**專業扣件採購平台
扣件專業展會代理**

2,000+
供應商加入
我們的行列

500+
參加過的國際展會

50,000+
每月電子報發量

70,000+
採購主看見您的廣告



