扣件 · 預緊力 · 鎖緊扭矩 · 強度等級 · 螺紋嚙合 · 技術參考文件 · 公開

螺栓接合 技術參考

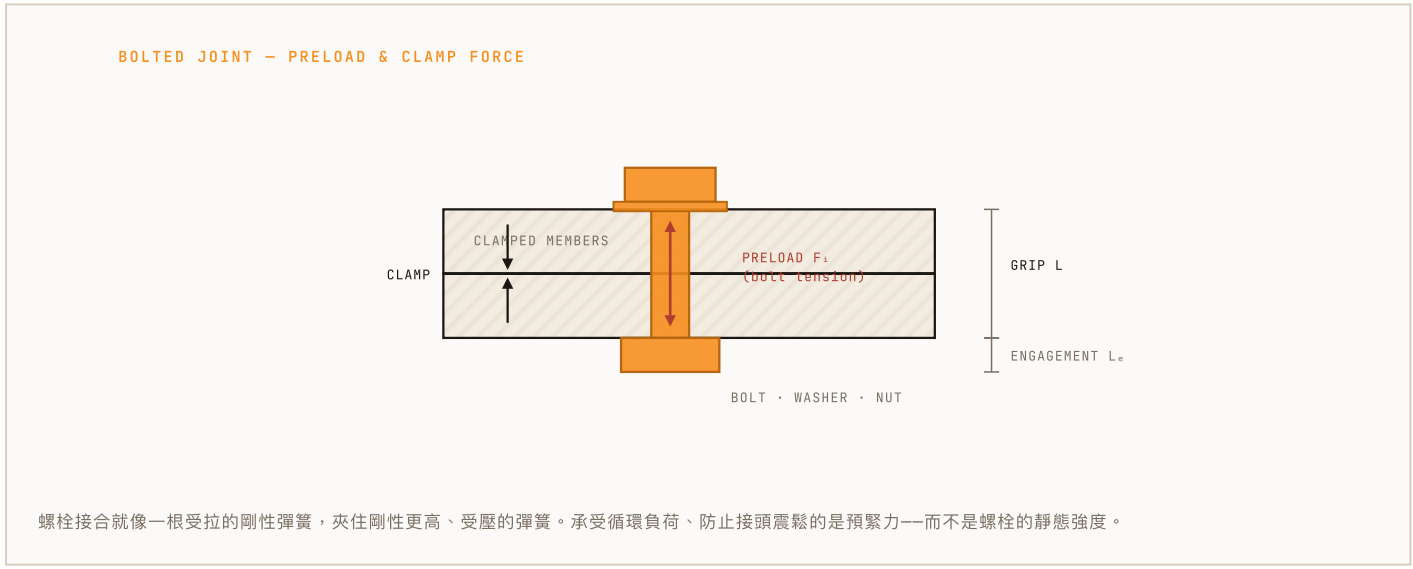
以預緊力為核心設計螺栓接合——強度等級、扭矩與軸力的換算、螺紋嚙合長度、防鬆方式，以及夾緊力設定錯誤所導致的失效模式。

修訂	發行	負責	附件
1.0	June 2026	Ideambox 工程團隊	PDF 技術參考

摘要

螺栓接合是靠預緊力（夾緊力）傳遞負荷，而不是把螺栓當成剪力銷。鎖緊螺栓就是把它拉長；儲存的張力把被夾件夾緊。由於被夾接頭遠比螺栓剛硬，任何外加拉伸負荷大多用於釋放夾緊力，而不會增加螺栓應力——這正是預緊得當的接頭幾乎感受不到疲勞、也不會自行鬆脫的原因。

第 1 節說明接頭如何運作。第 2 節探討強度等級與材料。第 3 節為預緊與鎖緊（扭矩與軸力換算、扭矩係數、各方法的精度）。第 4 節為螺紋嚙合與滑牙。第 5 節為接頭設計原則。第 6 節探討鬆脫與防鬆方式。第 7 節為失效模式與鎖緊檢核清單。



螺栓接合就像一根受拉的剛性彈簧，夾住剛性更高、受壓的彈簧。承受循環負荷、防止接頭震鬆的是預緊力——而不是螺栓的靜態強度。

目錄

1. 螺栓接合如何運作
2. 強度等級與材料
3. 預緊與鎖緊
4. 螺紋嚙合與滑牙
5. 接頭設計原則
6. 鬆脫與防鬆
7. 失效模式與檢核清單

1. 螺栓接合如何運作

鎖緊螺栓就像拉長一根彈簧；儲存的張力就是**預緊力**（F_i），被夾件中大小相等、方向相反的壓縮力就是**夾緊力**。靜止時兩者平衡。

施加外部拉伸負荷 F_e 時，負荷會依剛性比例由螺栓與接頭*分擔*。由於被夾件遠比細長的螺栓剛硬，螺栓只分到一小部分——**負荷係數** Φ = k_bolt / (k_bolt + k_members)，一般為 0.1–0.3。其餘的 F_e 只是釋放夾緊力。因此高預緊力的螺栓在循環負荷下只承受很小的應力*振幅*——這是疲勞壽命的關鍵——而且只要 F_e 不超過預緊力，接頭就會保持夾緊。

1.1 重要名詞

預緊力（F_i）	鎖緊後的螺栓張力——外部負荷為零時的夾緊力
保證負荷	螺栓不產生永久變形所能承受的最大張力（設計上限）
拉應力面積（A_s）	用於計算應力的螺紋部有效面積（不是公稱直徑 Ø）
負荷係數（Φ）	外部負荷中加到螺栓張力上的比例（k_bolt / (k_bolt + k_members)）
夾持長度	從頭部下方到螺帽承壓面的被夾厚度
強度等級	標示在頭部的強度等級（例如 8.8、10.9）

設計經驗法則：**預緊力要高（≈ 保證負荷的 75%）、外部負荷保持在預緊力以下、給螺栓足夠的夾持長度以利伸長。** 這三項決定足以撐起大多數接頭。

2. 強度等級與材料

公制鋼製螺栓以**強度等級**分級，標示於頭部。第一個數字 ×100 ≈ 抗拉強度（MPa）；第二個數字 ×10 ≈ 降伏強度占抗拉強度的百分比。

等級	保證應力 S_p（MPa）	0.2% 降伏（MPa）	抗拉 S_u（MPa）	說明
4.8	310	340	420	低碳鋼，一般用途
8.8	580 (≤M16) / 600	640	800	中碳鋼調質——主力等級
10.9	830	940	1040	合金鋼調質，小尺寸高負荷
12.9	970	1100	1220	最高標準等級；對脆化敏感
A2-70（304 不鏽鋼）	—	450	700	沃斯田鐵系不鏽鋼，冷加工
A4-80（316 不鏽鋼）	—	600	800	海洋 / 腐蝕環境

預設使用 8.8 級；只有空間迫使使用更小、更高強度的螺栓時才升到 10.9/12.9——並注意電鍍高強度零件的氫脆。不鏽鋼（A2/A4）以強度換取耐蝕性，乾鎖時容易咬死。

3. 預緊與鎖緊

可重複使用的接頭，目標預緊力通常為**≈ 保證負荷的 75%**：$F_i = 0.75 \cdot S_p \cdot A_s$。永久性、以降伏控制的接頭可更高。

扭矩是達到該張力最常用、但屬間接的方法：

$T = K \cdot F_i \cdot d$ ——其中 d 為公稱直徑，**K** 為扭矩係數（螺帽係數），主要由頭部下方與螺紋中的摩擦決定。

螺紋 / 頭下狀態	扭矩係數 K
乾淨乾燥的鋼	0.20–0.30（不鏽鋼會咬死）
出廠狀態，薄油	0.20（預設假設）
鍍鋅	0.20–0.22
黑染（發黑處理）	0.15
油 / 潤滑脂潤滑	0.12–0.15
MoS_2 / 防卡劑 / 蠟	0.10–0.12
PTFE 塗層	0.10–0.12

由於 K 變化很大，**用扭矩設定預緊力的離散很大**——潤滑狀態和扳手一樣重要：

鎖緊方法	預緊力離散
憑手感鎖緊	±35%
校正過的扭力扳手	±25%
扭矩 + 角度（轉角法）	±15%
降伏點鎖緊	±8%
螺栓伸長量 / 超音波 / 拉伸器	±3–10%

建議鎖緊扭矩，8.8 級、K = 0.20、約 75% 保證負荷（依您的 K 求精確值請用 *Screw torque & preload* 工具）：

尺寸	扭矩（N·M）	尺寸	扭矩（N·M）
M3	1.3	M8	25
M4	3.0	M10	51
M5	6.0	M12	89
M6	10.5	M16	215

10.9 級乘以 ≈1.4；12.9 級乘以 ≈1.7。潤滑狀態務必一致，否則相同扭矩會得到差異極大的預緊力。

4. 螺紋嚙合與滑牙

嚙合長度要讓**螺栓先斷、螺紋不先滑牙**——螺栓斷裂是延性且看得見的；滑牙則是無聲的失效。最小嚙合長度取決於*螺帽／螺紋孔的材料*，而不是螺栓：

螺帽／螺紋孔材料（鋼製螺栓）	最小嚙合長度 L_e
鋼，≥ 螺栓等級	0.8–1.0 × d
鑄鐵	~1.25 × d
鋁	1.5–2.0 × d
鎂／塑膠	2.0–2.5 × d

盲孔螺紋要再加 1–2 個螺距，以涵蓋不完全牙。*Thread engagement* 工具可依螺栓等級與母材精確計算 L_e。

5. 接頭設計原則

- **給螺栓足夠的夾持長度。** 細長的螺栓能儲存更多伸長量，因此在嵌入沉陷與熱循環下仍能保持預緊力，疲勞應力振幅也較小。短而粗的螺栓會因微小的沉陷而喪失預緊力。
- **疲勞場合避免軟接頭。** 墊片與多層塗層會潛變並使夾緊力鬆弛。盡可能金屬對金屬直接鎖緊，或規定壓緊後再鎖緊一次。
- **墊圈**可分散承壓負荷並保護旋轉元件下方的表面——長孔、軟材料與過大間隙孔一定要使用。
- **間距與邊距：** 邊距 ≥ 1.5–2 × d，螺栓間距 ≥ 2.5–3 × d。
- **剪力接頭：** 決定採用摩擦型（預緊力藉摩擦承受剪力）或承壓型（螺桿抵住孔壁）。摩擦型需要完整且經驗證的預緊力。
- **孔的間隙不要過大**——間隙大又搭配軟質被夾件，容易產生滑移與嵌入沉陷。

6. 鬆脫與防鬆

自行鬆脫是由**橫向（側向）振動**所驅動，振動瞬間克服螺紋摩擦，讓螺帽退轉（Junker 機制）。第一道防線永遠是**足夠的夾持長度加上高且能維持的預緊力**——大多數「鬆掉的螺栓」其實是預緊力不足的螺栓。

防鬆方式	機制	抗振保持力	可重複使用
正確的預緊力 + 夾持長度	夾緊摩擦	高	是
尼龍嵌入螺帽（尼龍螺帽）	嵌件摩擦	中	有限（≤ ~120 °C）
全金屬有效扭矩型螺帽	變形螺紋	中–高	可用數次
楔形防鬆墊圈組（例如 Nord-Lock）	頭下楔形凸輪	非常高	是
螺絲固定膠	固化樹脂填滿螺紋	高（依等級）	一次性；先脫脂
彈簧墊圈（開口型）	—	對橫向振動幾乎無效	—
雙螺帽（鎖緊螺帽）	螺紋張力反轉	中–高	是
槽形螺帽 + 開口銷 / 保險鋼絲	形狀鎖定	非常高	銷為一次性

注意：現代試驗顯示，常見的開口彈簧墊圈**無法**可靠地防止橫向自行鬆脫——振動場合不要依賴它。

7. 失效模式與檢核清單

模式	原因	對策
疲勞斷裂（頭部圓角 / 第一牙）	預緊力低、夾持長度短、應力集中	預緊力約 75% 保證負荷、加長夾持長度、輾牙螺紋、頭部圓角
滑牙	嚙合不足、螺帽太軟、扭矩過大	增加 L_e、更硬的螺帽 / 螺紋襯套、控制扭矩
嵌入沉陷 / 鬆弛	粗糙或軟質接合面、塗層、墊片沉陷	壓緊後再鎖緊、減少介面、提高接合面硬度
扭矩過大而降伏	K 值錯誤、潤滑不一致	控制鎖緊方法、使用正確的 K
氫脆	電鍍的高強度件（≥10.9）	電鍍後烘烤除氫、機械鍍鋅、避免用於 H_2 環境
咬死（不鏽鋼）	乾燥螺紋在旋入時卡死	防卡劑、降低轉速、異種合金搭配
電位腐蝕	異種金屬 + 電解質	相匹配 / 有塗層的扣件、絕緣隔離

7.1 鎖緊檢核清單

- **等級**——預設 8.8；只有空間迫使使用較小螺栓時才用 10.9/12.9；耐蝕用 A2/A4。
- **尺寸與預緊力**——依拉應力面積 A_s 決定尺寸；目標預緊力設為 ≈ 保證負荷的 75%。
- **鎖緊規格**——以 $T = K \cdot F_i \cdot d$ 搭配*實際的* K 求扭矩，或以角度 / 降伏 / 伸長量控制以提高精度。
- **嚙合**——依母材確認 L_e（第 4 節 / 工具）。
- **夾持長度與墊圈**——足夠的夾持長度；旋轉元件下方加墊圈；疲勞場合避免軟質 / 有墊片的接頭。
- **防鬆**——依振動、溫度與重複使用需求選擇方式。
- **標註於圖面**——等級、表面處理 / 塗層、扭矩（及方法）、防鬆方式、墊圈。

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/zh-hant/downloads/bolted-joint-reference/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact