紧固件 · 预紧力 · 拧紧力矩 · 性能等级 · 旋合长度 · 技术参考文档 · 公开

螺栓连接 设计参考

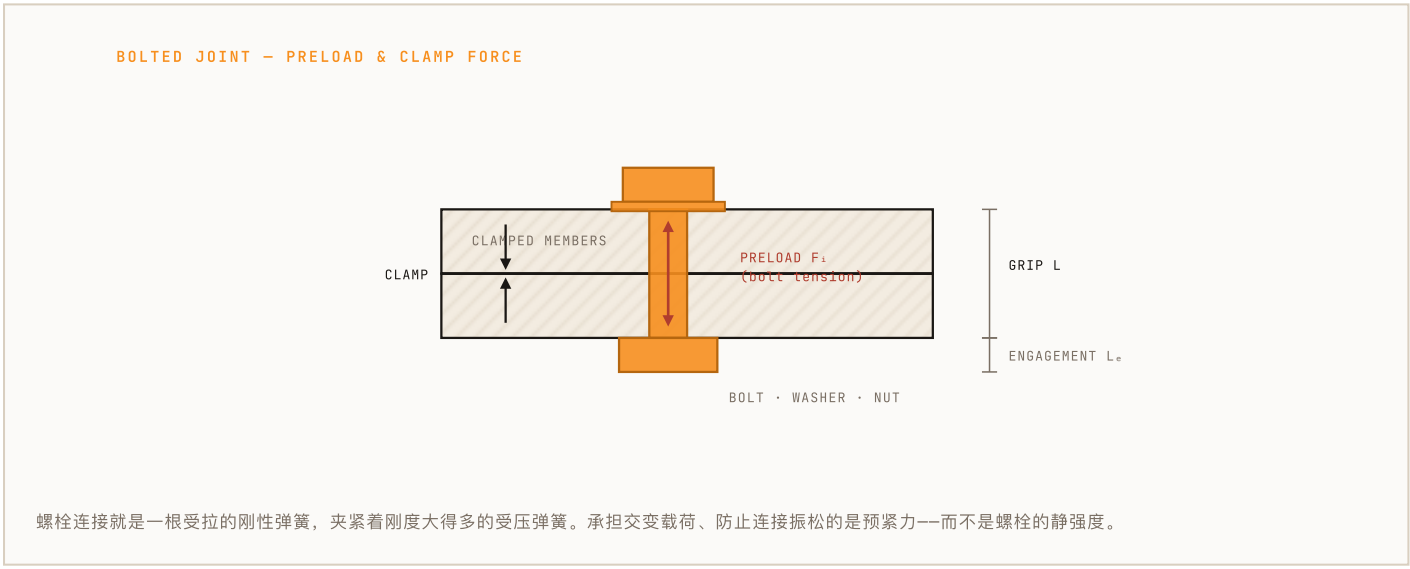
围绕预紧力设计螺栓连接——性能等级、力矩与预紧力的换算、螺纹旋合长度、防松方法，以及夹紧力不当导致的各种失效形式。

修订	发布	负责	附件
1.0	June 2026	Ideambox 工程团队	PDF 参考资料

摘要

螺栓连接靠预紧力（夹紧力）传递载荷，而不是让螺栓充当受剪销。拧紧螺栓使其伸长，储存的拉力把被连接件夹紧。由于被夹紧的连接件比螺栓刚硬得多，任何外加拉伸载荷的大部分只是减小夹紧力，而不是增加螺栓应力——这就是为什么预紧得当的连接几乎不受疲劳影响，也不会自行松脱。

第 1 节解释连接的工作原理。第 2 节介绍性能等级与材料。第 3 节为预紧与拧紧（力矩与预紧力换算、拧紧系数、各拧紧方法的精度）。第 4 节为螺纹旋合与脱扣。第 5 节为连接设计准则。第 6 节介绍松动与防松方法。第 7 节为失效形式与拧紧检查清单。



螺栓连接就是一根受拉的刚性弹簧，夹紧着刚度大得多的受压弹簧。承担交变载荷、防止连接振松的是预紧力——而不是螺栓的静强度。

目录

1. 螺栓连接的工作原理
2. 性能等级与材料
3. 预紧与拧紧
4. 螺纹旋合与脱扣
5. 连接设计准则
6. 松动与防松
7. 失效形式与检查清单

1. 螺栓连接的工作原理

拧紧螺栓时，螺栓像弹簧一样被拉长；储存的拉力就是**预紧力**（F_i），被连接件中大小相等、方向相反的压力就是**夹紧力**。静止时两者平衡。

当施加外部拉伸载荷 F_e 时，它按刚度比例在螺栓和被连接件之间*分配*。由于被夹紧的连接件比细长的螺栓刚硬得多，螺栓只分担很小一部分——即**载荷系数** Φ = k_bolt / (k_bolt + k_members)，通常为 0.1–0.3。F_e 的其余部分只是减小夹紧力。因此，预紧力高的螺栓在交变载荷下只承受很小的应力*幅*——这是疲劳寿命的关键——并且只要 F_e 始终不超过预紧力，连接就保持夹紧。

1.1 关键术语

预紧力（F_i）	拧紧后的螺栓拉力——即外载荷为零时的夹紧力
保证载荷	螺栓不产生永久变形所能承受的最大拉力（设计上限）
螺纹应力截面积（A_s）	螺纹段用于计算应力的有效面积（不是公称直径对应的面积）
载荷系数（Φ）	外载荷中叠加到螺栓拉力上的比例（k_bolt / (k_bolt + k_members)）
夹紧长度	从螺栓头下表面到螺母支承面之间被夹紧的厚度
性能等级	标在螺栓头上的强度等级（如 8.8、10.9）

设计经验法则：**预紧力要高（≈ 保证载荷的 75%），外载荷要低于预紧力，并给螺栓足够的夹紧长度以便伸长。** 这三项决定足以应对大多数连接。

2. 性能等级与材料

公制钢制螺栓按**性能等级**分级，标在螺栓头上。第一个数字 ×100 ≈ 抗拉强度（MPa）；第二个数字 ×10 ≈ 屈服强度占抗拉强度的百分比。

等级	保证应力 S_p（MPA）	屈服强度 0.2%（MPA）	抗拉强度 S_u（MPA）	说明
4.8	310	340	420	低碳钢，一般用途
8.8	580（≤M16）/ 600	640	800	中碳钢，调质处理——最常用的主力等级
10.9	830	940	1040	合金钢调质，结构紧凑、承载高
12.9	970	1100	1220	最高标准等级；对氢脆敏感
A2-70（304 不锈钢，06Cr19Ni10）	—	450	700	奥氏体不锈钢，冷作硬化
A4-80（316 不锈钢，06Cr17Ni12Mo2）	—	600	800	海洋 / 腐蚀环境

默认选用 8.8 级；只有空间受限、必须用更小更高强度的螺栓时才升到 10.9/12.9 级——并注意镀层高强度零件的氢脆问题。不锈钢（A2/A4）以强度换取耐蚀性，在干燥状态下拧紧时容易咬死。

3. 预紧与拧紧

对于可重复拆装的连接，目标预紧力通常为≈ **保证载荷的 75%**：$F_i = 0.75 \cdot S_p \cdot A_s$。永久性的屈服控制连接可以更高。

拧紧力矩是达到该拉力的常用但间接的方法：

$T = K \cdot F_i \cdot d$——其中 d 为公称直径，**K** 为拧紧系数（扭矩系数），主要取决于螺栓头下和螺纹中的摩擦。

螺纹 / 支承面状态	拧紧系数 K
清洁干燥的钢	0.20–0.30（不锈钢会咬死）
出厂状态，轻微涂油	0.20（默认假设）
镀锌	0.20–0.22
发黑	0.15
涂油 / 润滑脂润滑	0.12–0.15
MoS_2 / 防咬合剂 / 蜡	0.10–0.12
PTFE 涂层	0.10–0.12

由于 K 变化很大，**用力矩控制预紧力的离散性很大**——润滑状态与扳手同样重要：

拧紧方法	预紧力离散度
凭手感拧紧	±35%
经校准的扭力扳手	±25%
扭矩 + 转角法	±15%
屈服点控制法	±8%
测螺栓伸长量 / 超声波 / 液压拉伸器	±3–10%

参考拧紧力矩，8.8 级，K = 0.20，约 75% 保证载荷（按你的 K 值求精确值，请使用*螺钉拧紧力矩与预紧力*工具）：

规格	拧紧力矩 (N·M)	规格	拧紧力矩 (N·M)
M3	1.3	M8	25
M4	3.0	M10	51
M5	6.0	M12	89
M6	10.5	M16	215

10.9 级乘以 ≈1.4；12.9 级乘以 ≈1.7。润滑状态务必保持一致，否则同样的力矩会得到相差悬殊的预紧力。

4. 螺纹旋合与脱扣

旋合长度要保证**螺栓先于螺纹脱扣而断裂**——螺栓断裂是韧性的、看得见的；螺纹脱扣则是悄无声息的失效。最小旋合长度取决于*螺母/内螺纹材料*，而不是螺栓：

螺母 / 内螺纹材料（钢制螺栓）	最小旋合长度 L_e
钢，≥ 螺栓等级	0.8–1.0 × d
铸铁	~1.25 × d
铝	1.5–2.0 × d
镁 / 塑料	2.0–2.5 × d

盲螺纹孔要另加 1–2 个螺距，以补偿不完整的导入螺纹。*螺纹旋合长度*工具可针对给定的螺栓等级和母材精确计算 L_e。

5. 连接设计准则

- **给螺栓足够的夹紧长度。** 长而细的螺栓能储存更多伸长量，因此在嵌入沉降和热循环中能保持预紧力，承受的疲劳应力幅也更小。短而粗的螺栓会因微小的沉降而丧失预紧力。
- **疲劳工况下避免软连接。** 垫片和多层涂层会蠕变，使夹紧力松弛。尽可能采用金属对金属的贯穿螺栓连接，或规定在预紧后复紧。
- **垫圈**可分散支承载荷并保护转动件下方的表面——长圆孔、软材料和超大间隙孔上一定要使用。
- **间距与边距：** 边距 ⩾ 1.5–2 × d，螺栓间距 ⩾ 2.5–3 × d。
- **受剪连接：** 确定是摩擦型（预紧力通过摩擦传递剪力）还是承压型（栓杆承压于孔壁）。摩擦型需要足够且经验证的预紧力。
- **孔的间隙不要过大**——大间隙加上软的被连接件容易导致滑移和嵌入沉降。

6. 松动与防松

自松动是由**横向振动**引起的：横向振动瞬间克服螺纹摩擦，使螺母回转（Junker 机理）。第一道防线始终是**足够高且能保持的预紧力加上足够的夹紧长度**——大多数"松动的螺栓"实际上是预紧力不足的螺栓。

防松方法	原理	抗振保持能力	可重复使用
正确的预紧力 + 夹紧长度	夹紧摩擦	高	是
尼龙嵌件锁紧螺母	嵌件摩擦	中	有限（≤ ~120 °C）
全金属有效力矩型锁紧螺母	变形螺纹	中–高	可重复使用几次
楔形锁紧垫圈对（如 Nord-Lock）	头下楔面凸轮作用	很高	是
螺纹锁固胶	固化树脂填充螺纹	高（视型号）	一次性；先脱脂
弹簧垫圈	—	对横向振动几乎无效	—
双螺母（锁紧螺母）	螺纹受力方向反转	中–高	是
开槽螺母 + 开口销 / 保险丝	形锁合	很高	开口销一次性

注：现代试验表明，常见的弹簧垫圈**并不能**可靠地防止横向自松动——振动场合不要依赖它。

7. 失效形式与检查清单

失效形式	原因	对策
疲劳断裂（头部圆角 / 第一扣螺纹）	预紧力低、夹紧长度短、应力集中	预紧至约 75% 保证载荷，加长夹紧长度，滚压螺纹，头部圆角
螺纹脱扣	旋合长度不足、螺母过软、拧紧力矩过大	增加 L_e，采用更硬的螺母/螺纹护套，控制力矩
嵌入沉降 / 松弛	粗糙或软的接触面、涂层、垫片沉降	预紧后复紧，减少接合面，提高接触面硬度
拧紧过度屈服	K 值错误，润滑不一致	控制拧紧方法，使用正确的 K 值
氢脆	镀层高强度螺栓（≥10.9）	电镀后除氢烘烤，机械镀锌，避免用于含氢环境
咬死（不锈钢）	干燥螺纹在旋入时卡死	防咬合剂，降低转速，异种合金配对
电偶腐蚀	异种金属 + 电解质	匹配材料/带涂层的紧固件，绝缘隔离

7.1 拧紧检查清单

- **等级**——默认 8.8 级；只有空间受限需用更小螺栓时才选 10.9/12.9 级；有腐蚀要求选 A2/A4。
- **规格与预紧力**——按螺纹应力截面积 A_s 确定规格；目标预紧力 ≈ 75% 保证载荷。
- **拧紧规范**——按 $T = K \cdot F_i \cdot d$ 用*实际* K 值计算力矩，或为提高精度采用转角 / 屈服点 / 伸长量控制。
- **旋合长度**——针对母材核查 L_e（第 4 节 / 工具）。
- **夹紧长度与垫圈**——足够的夹紧长度；转动件下加垫圈；疲劳工况下避免软连接/带垫片的连接。
- **防松**——根据振动、温度和重复使用要求选择方法。
- **在图纸上注明**——等级、表面处理/镀层、拧紧力矩（及方法）、防松措施、垫圈。

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

Designing something that needs this? ideambox.com/contact