

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.015

钛合金紧固件拧紧力矩与预紧力关系试验研究

吴小军¹, 张学伟², 马玉环³, 丁一凡¹, 李凌铃⁴, 林连斌¹, 倪飞³

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462;

3. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245; 4. 上海无线电设备研究所, 上海 200082)

摘要: 为了研究拧紧力矩和预紧力之间的关系, 以基体材料为 Ti-6Al-4V、表面喷涂铝处理的钛合金紧固件作为研究对象, 通过分组试验研究不同拧紧方式、润滑方式、拧入次数、不同温湿度条件下的拧紧力矩与预紧力的关系。研究结果表明: 在拧紧方式、润滑方式不同条件下 K 值差异较大; 拧紧次数对拧紧力矩影响不定; 低温高湿环境下力矩相对减小, 高温低湿环境下力矩相对增大。

关键词: 钛合金; 紧固件; 预紧力; 拧紧力矩

中图分类号: V416 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0079-04

Experimental Study on Relationship between Tightening Torque and Pre-tightening Force of Titanium Alloy Fasteners

WU Xiaojun¹, ZHANG Xuewei², MA Yuhuan³, DING Yifan¹, LI Lingling⁴, LIN Lianbin¹, NI Fei³

(1. Research Institute of Shanghai Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China; 2. Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China; 3. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China; 4. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200082, China)

Abstract: In order to study the relationship between tightening torque and pre-tightening force, titanium alloy fasteners with Ti-6Al-4V matrix material and aluminum sprayed surface treatment were taken as the research object to study the relationship between tightening torque and pre-tightening force by different tightening and lubrication methods, in number of tightening times and in different temperatures and humidities. The research results indicate that there are significant differences in K values with different tightening and lubrication methods, the influence of tightening times on tightening torque is indefinite. And the torque decreases relatively in low temperature and high humidity environments, but increases relatively in high temperature and low humidity environments.

Keywords: titanium alloy; fasteners; pre-tightening force; tightening torque

0 引言

紧固件安装的可靠性是航空、航天飞行器成功服役的基本保障。钛合金紧固件对比钢铁材料紧固件具有密度小、比强度高、熔点高、无磁和屈服比高以及耐腐蚀和抗蠕变等优异的性能^[1]。在复杂的载荷环境下, 预紧力是影响和反映紧固件安装可靠性、承载能力、部件的密封性能和防松性能的关键因素和指标^[2]。研究拧紧力矩和预紧力之间的关系, 对于指导航空、航天飞行器的拧紧力矩设计具有实际的工程意义^[3]。

本文以基体材料为 Ti-6Al-4V、表面喷涂铝处理^[4]的钛合金紧固件作为研究对象, 研究不同拧紧方式、是否润滑、拧入次数等条件下的拧紧力

矩与预紧力之间的关系, 并对不同温湿度下的螺栓进行拉偏试验, 用于指导实际工程使用中钛合金紧固件拧紧力矩的确定与选用。

1 试验设计

1.1 理论计算

螺栓拧紧力矩与预紧力之间的关系表达式为

$$M = KDF \quad (1)$$

式中: M 为拧紧力矩; K 为拧紧力矩系数; D 为螺栓的公称直径; F 为由拧紧力矩产生的螺栓轴向拉力, 即预紧力。

1.2 试验原理

按照 GJB715.13—90《紧固件试验方法 安装成形紧固件的预紧力》试验方法, 规定了力矩-拉

第一作者简介: 吴小军 (1986—), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为机械制造及其自动化, dyfasc@163.com。

力测试的试验原理。在拧紧力矩和预紧力关系的试验中,为了更好地模拟现场装配环境,采用在试验装置上加实用垫片(即用实际装配的基体材料加工成垫片)的方式,结合扭拉关系式来完全模拟出现场实际的装配环境,以达到最佳的测试状态,测试出在实际装配过程中拧紧力矩与预紧力之间的关系。

本文中螺母与螺栓具体安装关系如图 1 所示。将试验螺栓置入试验装置并露出螺母的自锁部分,将螺母用手旋入螺栓,直至与螺母的自锁部分啮合,然后将六角头螺栓或螺母装入试验套筒,拧紧力矩值从 0 施加到拉伸载荷的 35%,记录螺栓轴向载荷与施加力矩的曲线,应有至少 2~3 螺距螺纹长度伸出螺母的顶面,反向将螺母松开直至试验螺栓产生的预紧力降到“0”,继续松脱螺母,直至螺母回到初始位置(即起始点),然后再反复装拆。试验过程中使用的主要设备为计算机控制扭拉试验机,如图 2 所示。

1.3 试样选取

影响 K 值的因素较多,本文选取钛合金紧固件作为试验对象,研究不同拧紧方式、是否润滑、拧入次数等条件下的拧紧力矩与预紧力之间的关

系,并对不同温湿度下的螺栓进行拉偏试验。分组进行对比性试验用于指导工程实际拧紧力矩方案设计。具体分组情况及试验目的如表 1 所示,拉偏试验工况如表 2 所示。

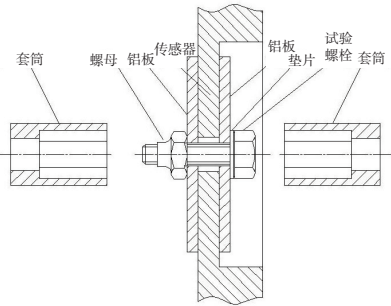


图 1 六角自锁螺母装配试验图

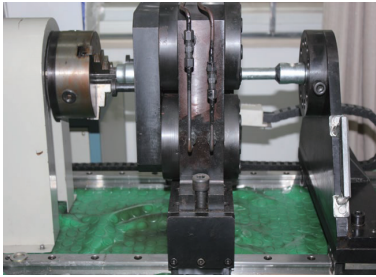


图 2 计算机控制扭拉试验机

表 1 试验工况表

序号	对照组	螺栓规格	螺母规格	拧紧方式	润滑状态	试验目的
试验 1	第 1 组	20×112A	MJ20A×1.5	固定螺栓拧螺母	T12	考核拧紧方式的不同对 K 值的影响
	第 2 组	20×112A	MJ20A×1.5	固定螺母拧螺栓	T12	
试验 2	第 1 组	12×52A	MJ12A×1.5	固定螺母拧螺栓	十六醇	考核润滑方式的不同对 K 值的影响
	第 2 组	12×52A	MJ12A×1.5	固定螺母拧螺栓	T12	
试验 3	第 1 组	12×52A	MJ12A×1.5	固定螺母拧螺栓	十六醇	考核拧入次数对 K 值的影响
	第 2 组	12×52A	MJ12A×1.5	固定螺母拧螺栓	十六醇	
	第 3 组	12×52A	MJ12A×1.5	固定螺母拧螺栓	十六醇	

表 2 拉偏试验工况表

项目	工况条件
温度/湿度	针对拉偏试验,进行了 4 种极端状态下的不同子样试验及同一子样的重复试验: 1) 低温 15℃, 低湿 55%RH; 2) 低温 15℃, 高湿 90%RH; 3) 高温 56℃, 湿度 40%RH; 4) 高温 56℃, 湿度 90%RH
润滑状态	T12
螺母规格	Q/PZ 110.38—MJ12A×1.5
螺栓规格	Q/PZ 110.25—12×52A
拧紧方式	固定螺母拧螺栓

2 拧紧力矩影响因素分析

2.1 拧紧方式对拧紧力矩系数的影响

如表 1 所示,试验 1 的两组对照试验中螺栓、螺母、润滑状态均一致,各选取 5 件样本进行试验,试验结果如图 3 和图 4 所示。在施加拧紧力矩的过程中,横轴代表螺栓在拧紧过程中产生的预紧力,纵轴代表螺栓在拧紧过程中产生的拧紧力矩。从图中数据对比可以看到轴力由 0 施加到拉伸载荷的 35%时,拧六角头螺栓与六角头螺母的拧紧力矩差异比较大,拧六角头螺栓所施加的拧紧力矩明显大于拧六角头螺母施加的拧紧力

矩^[5],该规律与标准 HB6586、QJ2886 所要求的规律一致。标准 HB6586、QJ2886 规定:安装螺栓时,一般应采用旋动螺母的办法拧紧,当必须从螺栓头部拧紧时,拧紧力矩值应处于规定的上偏差范围内。由此可计算拧紧方式不同,稳定段拧紧系数 $K_1=0.10$ (固定螺栓拧螺母), $K_2=0.16$ (固定螺母拧螺栓)。

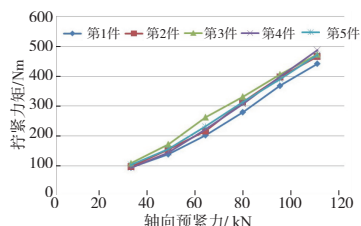


图3 固定螺栓拧螺母

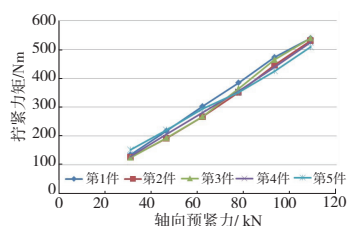


图4 固定螺母拧螺栓

2.2 不同润滑对拧紧力矩系数的影响

如表1所示,试验2的两组对照试验中,螺栓、螺母、拧紧方式均一致,各选取5件样本进行试验,试验结果如图5和图6所示。从图中数据对比可以看到轴力由0施加上到拉伸载荷的35%时,十六醇润滑剂所消耗的总转矩小于涂T12润滑脂所消耗的总转矩。由此可计算不同润滑方式,稳定段拧紧系数 K_1 (十六醇)=0.10, K_2 (T12)=0.16。

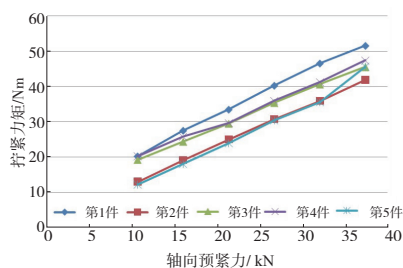


图5 十六醇润滑剂

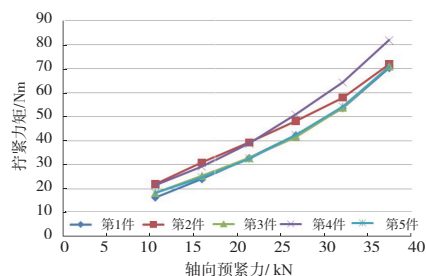


图6 T12 润滑脂

2.3 拧紧次数对拧紧力矩系数的影响

如表1所示,试验3的3组对照试验螺栓、螺母、拧紧方式、润滑方式均一致,3组样本分别进行5次循环拧紧试验,试验结果如图7、图8、图9所示。由图7、图8、图9可以看出转矩随预紧力增加而递增,在涂覆十六醇的试验条件下,第1次循环与后4次循环比较,转矩与循环次数不存在线性关系,波动较大。但预紧力施加上到拉伸载荷的35%时所需转矩第1次循环均小于后4次循环,主要随着拧入次数的增加,螺纹表面状态发生明显变化,螺纹副之间摩擦因数发生改变。建议工程运用中重复拆装3次后更换螺栓、螺母。

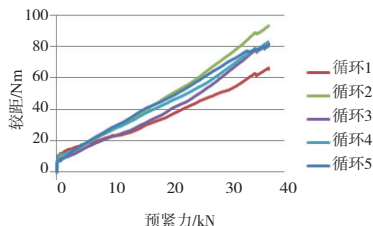


图7 第1组转矩-预紧力曲线

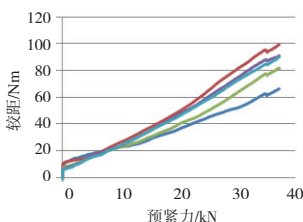


图8 第2组转矩-预紧力曲线

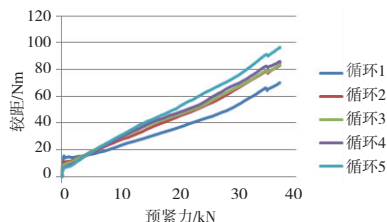


图9 第3组转矩-预紧力曲线

2.4 温湿度拉偏对拧紧力矩系数的影响

针对表2同一子样螺栓的5次循环重复性试验,图10—图13展示了在不同温湿度环境中的同一子样螺栓5次拧入的拧紧力矩与预紧力曲线对比图。随着拧入次数的增加,螺纹表面状态发

生改变,提高了螺纹副之间的摩擦因数,达到同样轴向力时所需的拧紧力矩增加。由此可计算拉偏试验不同,稳定段拧紧系数 $K_1=0.15$ (低温15℃,湿度55%RH); $K_2=0.18$ (低温15℃,湿度90%RH); $K_3=0.21$ (高温56℃,湿度40%RH); $K_4=0.14$ (高

温 56℃,湿度 90%RH); $K_s = 0.16$ (正常温度、湿度下)。从上面数据对比可以看到轴力由 0 施加到拉伸载荷的 35%时,低温高湿环境下力矩相对减小;高温低湿环境下力矩相对增大,主要是加热时温度高达 56℃,在高温低湿环境下产品表面润滑受影响。因此建议在室温下安装,如果必须在高温低湿环境中安装,建议加大安装力矩系数。

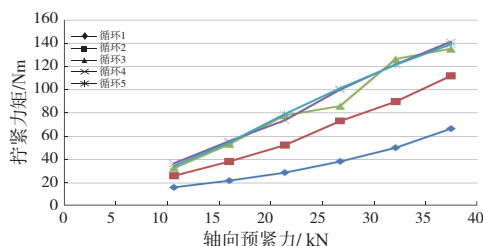


图 10 低温 15℃,湿度 55%RH

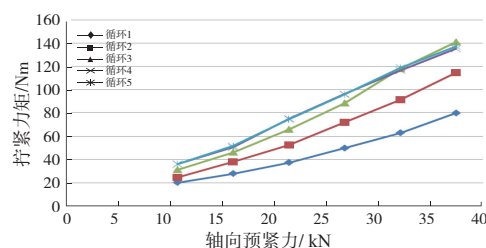


图 11 低温 15℃,湿度 90%RH

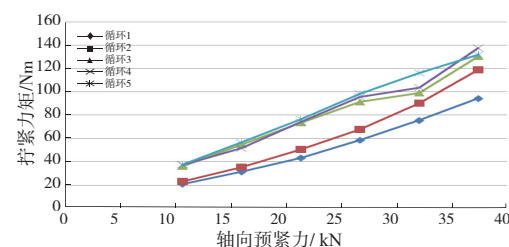


图 12 高温 56℃,湿度 40%RH

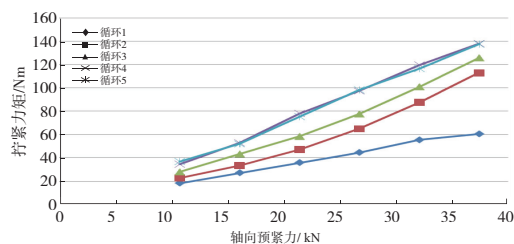


图 13 高温 56℃,湿度 90%RH

2.5 综合分析

根据以上试验结果,综合分析表面喷涂铝的钛合金紧固件拧紧力矩与预紧力之间的关系,分析结果如表 3 所示。

表 3 综合分析结果

序号	试验结论
试验 1	拧螺栓 K 值明显大于拧螺母 K 值,建议采用旋动螺母的办法拧紧
试验 2	使用十六醇润滑的 K 值明显小于使用 T12 润滑脂润滑的 K 值
试验 3	K 值随拧紧次数增加,变化趋势不定,第 1 次 K 值明显小于后续 K 值,建议重复拆装 3 次后更换螺栓螺母
拉偏试验	低温高湿环境 K 值明显小于高温低湿环境 K 值,建议室温下安装;如果必须在高温低湿环境中安装,建议加大安装力矩系数

3 结语

1) K 值受紧固件副的材质和螺纹的表面处理方式影响较大。考虑工程实际的可操作性,钛合金紧固件装配时建议采用旋动螺母的方法拧紧,同时一次装配时润滑方式优先考虑使用十六醇润滑;

2) 拧紧次数对拧紧力矩影响不定,因此在重复装配多次后应更换新标准件,或根据紧固件实际选用情况开展试验,并根据试验结果进行拧紧力矩偏差设计;

3) 开展工程应用时,应对使用环境提出要求,无法满足设计要求的环境需要根据实际环境开展试验,并根据试验结果进行拧紧力矩设计;

4) 对于本文未涉及(表 1 未包括)的规格和材质的紧固件副在进行拧紧力矩设计时,建议综合考虑紧固件材质、润滑方式和拧入次数等多种因素,开展基于工程实际的拧紧力矩试验,并根据试验结果进行拧紧力矩设计。

参考文献:

- [1] 李蒙,风伟中,关蕾,等. 航空航天紧固件用钛合金材料综述[J]. 有色金属材料与工程,2018,39(4):49-53.
- [2] 陈开颜,徐嘉,陈辉,等. 高温合金紧固件拧紧力矩与预紧力关系试验研究[J]. 导弹与航天运载技术,2021(4):103-107.
- [3] 张晓斌,于建政,贾晓娇,等. 某飞行器用紧固件拧紧力矩与预紧力关系研究[J]. 航空制造技术,2016,59(8):81-84.
- [4] 万冰华,林忠亮,魏亮亮,等. 不同前处理方式对钛合金紧固件铝涂层附着力性能影响分析[J]. 航天标准化,2019(3):6-10,38.
- [5] 贾晓娇,张晓斌,于建政,等. 大规格螺栓螺母拧紧力矩与预紧力关系研究[J]. 航天标准化,2015(3):1-5,14.

收稿日期:2023-08-01