

拧紧工况对螺栓连接预紧力的影响规律研究

杜坤鹏¹ 王天立¹ 史建猛¹ 邱建平¹ 齐振超²

(1 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

(2 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

文 摘 针对螺栓连接的预紧力一致性差、短期松弛等问题,以复合材料螺栓连接结构为研究对象,以普通螺栓预紧力形成机理为基础,结合高锁螺栓结构特点分析预紧力产生原理,推导了高锁螺栓扭矩-预紧力关系,通过螺栓拧紧试验确定了高锁螺栓扭矩法工艺中锁紧力矩、拧断力矩等参数,并且拟合了高锁螺栓扭矩-预紧力关系曲线;通过设计单因素试验分析了拧紧速度、润滑条件、拧紧步数等工况对螺栓连接预紧力一致性的影响。试验表明拧紧速度和润滑条件对螺栓预紧力一致性影响较大,高拧紧速度和施加润滑可以获得较大的预紧力,但是预紧力一致性会变差;针对螺栓拧紧后产生预紧力短期衰减问题,设计螺栓预紧力48 h自然松弛试验探究了拧紧速度、润滑条件、拧紧步数等工况下复合材料叠层结构螺栓预紧力自然松弛规律,结果表明润滑条件对复合材料叠层结构螺栓预紧力自然松弛影响最显著。

关键词 复合材料,预紧力,自然松弛,拧紧速度,润滑条件,拧紧步数

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.017

The Study on Influence Law of Tightening Condition on the Pretightening Force of Bolted Connection

DU Kunpeng¹ WANG Tianli¹ SHI Jianmeng¹ QIU Jianping¹ QI Zhenchao²

(1 AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., LTD., Xi'an 710089)

(2 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing 210016)

Abstract Addressing issues such as inconsistent preload and short-term relaxation in bolted connections, this study focused on composite bolted connection structures. Based on the formation mechanism of preload in conventional bolts, the principles of preload generation in high-lock bolts was analyzed, deriving the torque-preload relationship for high-lock bolts. Through bolt tightening tests, the study determined key parameters such as locking torque, breakaway torque, and fitted the torque-preload relationship curve for high-lock bolts. Single-factor experiments were designed to analyze the effects of tightening speed, lubrication conditions, and tightening steps on the consistency of bolt connection preload. The tests show that tightening speed and lubrication conditions have a significant impact on the consistency of bolt preload force. Higher tightening speeds and the application of lubrication can achieve greater preload force, but the consistency of preload force deteriorates. To address the issue of short-term preload decay after bolt tightening, a 48 h natural relaxation test was designed to investigate the natural relaxation patterns of bolt preload in composite laminated structures under various conditions such as tightening speed, lubrication conditions, and tightening steps. The results indicate that lubrication conditions have the most significant impact on the natural relaxation of bolt preload in composite laminated structures.

Key words Composite, Preload force, Natural relaxation, Tightening speed, Lubrication conditions, Tightening steps

0 引言

航空航天领域对产品主承力结构件的抗拉、抗

收稿日期:2023-04-23

第一作者简介:杜坤鹏,1983年出生,硕士,高级工程师,主要从事飞机装配工艺研究工作。E-mail:nuaa416@163.com

剪、抗扭转、抗剥离等各项严格要求,一般采用承载性能好、可靠性高的螺栓紧固件进行连接^[1-2],螺栓连接的可靠性关系到整体产品的正常运行。碳纤维增强复合材料具有高比强度、比模量特点,在航空、航天领域中得到了广泛应用,螺栓连接是复合材料叠层结构最常用的连接方式之一,复合材料螺栓连接技术备受关注。如何在复合材料叠层结构中获得更好的连接性能,对提高结构整体稳定性和可靠性具有重要的意义。

螺栓拧紧工艺是控制螺栓预紧力一致性的重要工艺,特别是航空航天领域,要求对螺栓连接结构的预紧力控制更为精准、严格。常用的拧紧工艺包括扭矩法、扭矩-转角法、屈服点法、伸长量法,其中扭矩法、扭矩-转角法由于其操作方便、精度较高被广泛应用。

刘晓石^[3]针对发动机连杆结构比较了扭矩法、扭矩-转角法等预紧力控制方法对装配质量的影响,结果表明:扭矩转角法具有更高的控制精度。ZOU等^[4]研究了拧紧次数、拧紧速度和润滑剂类型对摩擦因数和预紧力大小的影响规律。结果表明,润滑对螺纹紧固件的摩擦因数和螺栓预紧力大小有显著影响。

螺栓在拧紧之后短期内不受外载荷激励,预紧力会发生快速衰减,螺栓连接载荷发生变化,预紧力自然松弛是导致复合材料叠层结构螺栓连接疲劳失效、破坏结构完整性的主要原因之一。导致自然松弛的因素很多,LIU等^[5]认为是内外螺纹滑移、弹塑性变形综合导致螺栓在拧紧后短期内,螺栓载荷发生快速衰减,其采用有限元方法建立了精确的三维模型,并考虑了螺纹升角对数值分析的影响,提出了一种分析自松动行为的新方法,对比分析了不同变形阶段螺栓连接的弹性和塑性引起的自松动行为。分析结果表明,螺纹的扭转变形导致了内外螺纹的相对滑移,这导致弹性状态下的螺纹自松。在弹塑性变形条件下,自松行为是由内外螺纹的相对滑动和塑性变形引起的,塑性变形的程度更大。李小强等^[6]通过试验探究了螺栓拧紧后 30 min 内的螺栓预紧力衰减规律,不同扭矩下的螺栓预紧力衰减趋势大致保持一致,且预紧力衰减比例在 1%~5%,预紧力衰减主要集中在 25 min 前,25 min 后基本趋于稳定,但是没有进一步对预紧力衰减的原因进行探索。王灿等^[7]通过建立螺栓拧紧-自松弛-振动过程有限元模型,模拟了螺栓预紧力产生及松弛的三个阶段:螺栓拧紧、拧紧后短时间内螺栓自松弛、外部载荷下螺栓预紧力松弛,撤销约束与外载荷后,预紧力大幅度下降,螺栓发生扭转回弹,原本受扭转的螺栓变得“松弛”,螺栓的轴向力减小,上下连接板的夹紧力随

之变小,预紧力下降。庆光蔚等^[8]以应变频响函数作为响应特征指标,提出了一种基于模型修正思想的螺栓连接结构松动识别方法,能够有效识别螺栓连接结构的松动程度。前面研究都是基于螺栓本身材料的变化,当螺栓连接复合材料时,由于复合材料的树脂基体具有黏弹性,表现出蠕变、松弛和迟滞等力学特性随时间而变化的行为,使螺栓预紧力随时间历程逐渐发生自然松弛。HU等^[9-10]提出了螺栓预紧和预紧松弛的机理模型,研究了热效应下复合材料螺栓干涉连接预紧力松弛规律,发现干涉连接界面摩擦阻碍了预紧力从螺母侧到螺栓头侧的传递,并导致配合部件两个表面上的夹紧力不相等,但它有助于通过降低预紧力水平和防止蠕变变形来减轻预紧力松弛。CACCESE等^[11]进行了复合材料-金属螺栓连接中应力松弛对夹紧载荷影响的试验研究,结果表明螺栓夹紧载荷的损失可能会影响连接件的强度和疲劳寿命。

目前国内外对螺栓预紧力形成机理、螺栓预紧力松弛等方面已有了相应的研究成果,但是主要研究对象是金属叠层结构螺栓连接预紧力的松弛行为,对复合材料叠层结构螺栓连接预紧力自然松弛行为研究较少。本文针对复合材料叠层连接结构,对扭矩拧紧工艺过程中高锁螺栓预紧力与扭矩关系进行理论推导和试验拟合,并分析螺栓预紧力形成一致性的影响因素,最后,探究拧紧速度、润滑条件、拧紧步数等工况对复合材料叠层结构螺栓预紧力自然松弛规律的影响。

1 螺栓拧紧试验

1.1 试验材料

螺栓拧紧试验中紧固件为中国航空工业标准件制造有限责任公司生产的高锁螺母和抗剪型钛合金螺栓,螺栓的材料、尺寸、螺纹规格和高锁螺母保持一致,尺寸规格如图 1(a)所示,螺栓、螺母表面经过涂层处理,其材料为 Ti6Al4V。被连接件采用 T800 碳纤维复合材料板。

在进行螺栓拧紧试验过程中,考虑到拧紧试验的试验量较大,对试验材料要求较多,复合材料板设计尺寸规格如图 1(b)所示,CFRP 层合板上带有 $\phi 6.0$ mm 的初孔,为了满足螺栓连接复合材料叠层板工艺要求,需要保证复合材料叠层板制孔的同轴度,采用压板、夹具压紧复合材料叠层结构进行制孔。该复合材料板是由 18 层厚度为 0.14 mm、两层厚度为 0.22 mm 的单向预浸料对称铺层形成的层合板,铺层顺序为 $[45^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ 。纤维体积分数为 50.5%,复合材料板采用热压

罐在高温、高压环境中固化而成。

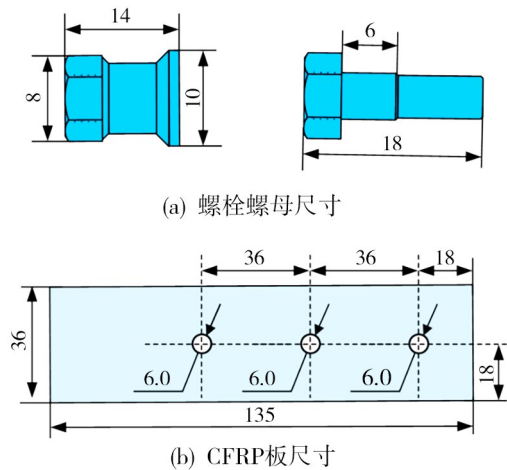


图1 试验件尺寸
Fig. 1 Size of specimens

1.2 试验设备

螺栓拧紧试验使用的设备为自研平台,由电动拧紧设备、超声测量预紧力系统、可调节工装组成,如图2所示,通过将复合材料叠层构件放置于固定夹板内侧且处于电动拧紧机的下方,即可进行拧紧实验,达到了方便螺栓对准电动拧紧机、提高拧紧效率、防止错位的效果。

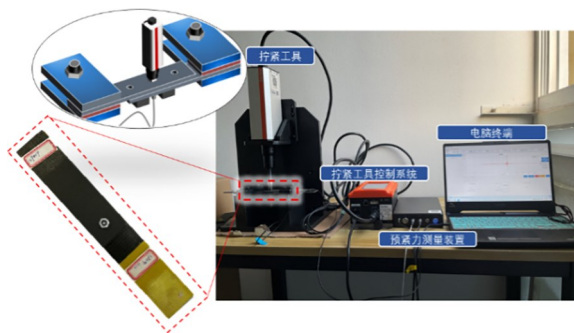


图2 拧紧试验平台
Fig. 2 Tightening platform

试验平台拧紧设备采用丹尼克尔智能拧紧工具,该设备通过硬件和软件结合可以设定不同拧紧策略,实现螺栓拧紧全过程的扭矩精确控制,扭矩精度可达7.5%,并且实时反馈拧紧过程数据,分为两个部分:拧紧工具 and 控制系统,如图3所示。

相较于其他预紧力测量方法,超声波测量螺栓预紧力只需要在螺栓头部通过化学方式集成压电材料或者贴陶瓷垫片,不需要改变螺栓结构,实现对服役螺栓的无损检测,尽可能保持高锁螺栓与实际工况一致。

超声测量螺栓预紧力设备采用北京爱法斯特提供的 iFast-Expert 螺栓预紧力测量系统,如图4所示,该系统通过超声波测量预紧力技术,测量系统发射

和接受超声波脉冲信号的时声差,通过理论计算得到螺栓预紧力大小。



图3 螺栓拧紧设备
Fig. 3 Bolt tightening equipment



图4 螺栓预紧力测量设备及其结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of bolt preload measuring equipment and its structure

2 螺栓扭矩拧紧工艺研究

螺栓在实际工程应用过程中,拧紧步骤是控制螺栓预紧力一致性的重要工艺。常用的拧紧工艺包括扭矩法、扭矩-转角法、屈服点法。高锁螺栓由于自身结构特点通常采用扭矩法进行拧紧,本文针对高锁螺栓的扭矩拧紧工艺进行探究。

高锁螺母与普通外六角螺母结构不同,高锁螺母是由圆螺母和六角头两部分组成,中间有一个断槽结构,断槽结构在拧紧力矩达到一定扭矩之后会被拧断,起到定力矩作用,圆螺母收口部位螺纹直径稍微小于螺栓螺纹,用于锁紧螺栓。高锁螺母拧紧过程中用来控制预紧力的关键参数与普通螺母也不一样。普通六角螺栓产生的预紧力的大小受拧紧力矩、螺纹间摩擦力矩、端面摩擦力矩综合影响。高锁螺栓螺母在拧紧过程中预紧力大小受锁紧力矩、拧断力矩、螺纹间摩擦力矩、端面摩擦力矩等因素的综合影响,拧紧过程如图5所示,拧紧工具上六角扳手插入高锁螺栓外端内六角槽内进行止动,同时内六角套筒卡在高锁螺母六角头,拧紧螺母,当拧紧力矩

达到高锁螺母设计拧断力矩时,断槽结构被拧断,高锁螺母完成安装。其中,拧断力矩是指在高锁螺母拧紧过程中,将高锁螺母外六角部分从断颈槽处拧断时,拧紧工具所施加的力矩。锁紧力矩指的是高锁螺栓在没有产生轴向力时由螺母的收口螺纹部分与螺栓挤压摩擦产生的摩擦力矩^[12]。

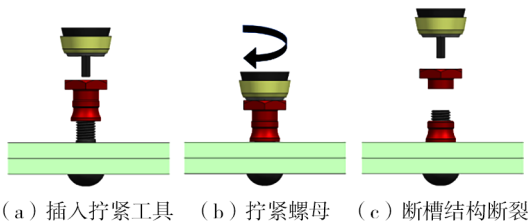


图5 高锁螺栓拧紧过程

Fig. 5 Tightening process of high lock bolt

普通螺栓拧紧预紧力与拧紧力矩有一套成熟理论公式,普通六角螺母在进行拧紧过程中的拧紧力矩 T 用来克服螺栓螺母端面与被连接件接触面之间的摩擦力矩 T_1 和螺母与螺栓之间的螺纹面摩擦力矩 T_2 ,三者之间的关系如下^[6]:

$$T = T_1 + T_2 \quad (1)$$

$$T_1 = F_0 \frac{d_0}{2} \tan(\varphi + \phi) \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} F_0 \mu \times \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \quad (3)$$

式中, D 为螺母外径, F_0 为螺栓预紧力, d 为螺母端面螺纹孔直径, d_0 为螺纹中径, μ 为螺母端面和被连接件之间的摩擦因数, φ 为螺纹升角, ϕ 为当量摩擦角。

综合公式可得,普通外六角螺栓预紧力和扭矩之间的关系为:

$$T = \left[\frac{d_0}{2d} \tan(\varphi + \phi) + \frac{\mu}{3d} \times \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right] F_0 d \quad (4)$$

$$= K F_0 d$$

式中, K 为拧紧力矩系数。

高锁螺母结构与普通外六角螺母结构不同,普通螺栓连接理论公式不适用于高锁螺栓,但是可以作为高锁螺栓连接理论公式参考。其中,高锁螺栓的拧断力矩可以近似看成普通螺栓预紧力和扭矩关联关系中的拧紧力矩,高锁螺栓在拧紧过程中,螺母的螺纹收口处与螺栓螺纹挤压会发生变形,产生普通螺母中没有的锁紧力矩,不会对整体螺栓连接结构造成影响。扭矩系数不会因为收口部位而发生改变,锁紧力矩是线性叠加到拧紧力矩上的^[13]。故拧断力矩 T 、锁紧力矩 T_3 以及预紧力满足如下关系。

$$T = K F_0 d + T_3 \quad (5)$$

高锁螺母由于其结构的特殊性,拧紧过程中螺纹受力区别于普通螺栓,预紧力的形成规律也与普通螺栓有一定区别,因此在探究拧紧工况对预紧力

影响规律试验之前,需要通过螺栓拧紧试验确定式(5)中的锁紧力矩、拧断力矩等参数,方便接下来进一步确定螺栓扭矩-预紧力关系,拧紧试验以扭矩拧紧工艺为研究对象,以 $11 \text{ N}\cdot\text{m}$ 为目标扭矩,拧紧速度为 120 r/min ,无润滑的工艺条件下,对M6螺栓进行拧紧,并记录每次拧紧过程的扭矩曲线,以获得高锁螺栓的拧断力矩和锁紧力矩,为减小试验不确定性,提高试验准确性,采用三个螺栓重复上述试验。

试验均在搭建的螺栓拧紧-预紧力测量平台进行,螺栓端部为六角头螺栓,在拧紧过程中可以采用棘轮扳手进行止动。

扭矩-时间曲线如图6所示,可以看出高锁螺母拧紧过程的两个阶段:第一阶段,0 s开始螺母开始转动,螺纹之间发生接触,扭矩迅速增大,达到锁紧力矩并保持稳定;第二阶段,2.4 s时,螺母端面开始接触到被连接件上表面,螺母和被连接件接触面开始产生摩擦力,扭矩迅速增大直至达到高锁螺母设计的拧断力矩,然后六角头螺母拧断,扭矩迅速下降至零。0~2.4 s为第一阶段,该阶段实际扭矩/目标扭矩维持在1.3%左右,实际扭矩为 $1.43 \text{ N}\cdot\text{m}$,该扭矩是螺栓不产生预紧力之前,用来克服螺母的收口螺纹部分与高锁螺栓挤压摩擦产生的摩擦力矩为锁紧力矩,即锁紧扭矩为 $1.43 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。2.4 s实际扭矩迅速增大,实际扭矩/目标扭矩达到95%,实际扭矩为 $10.45 \text{ N}\cdot\text{m}$,该扭矩为高锁螺母外六角部分从断颈槽处拧断时的力矩为拧断力矩,即拧断力矩为 $10.45 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

将试验所测得的锁紧力矩代入公式(5),则扭矩、锁紧力矩及预紧力满足如下关系。

$$T = K F_0 d + 1.43 \quad (6)$$

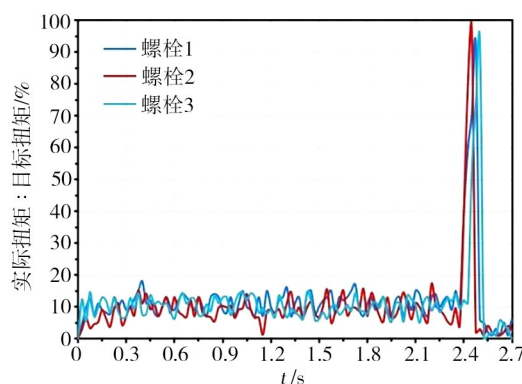


图6 扭矩-时间曲线

Fig. 6 Torque-time curves

由公式(5)可知,螺栓预紧力-扭矩是线性关系,为了获得扭矩拧紧工艺的扭矩-预紧力曲线,进一步进行螺栓扭矩拧紧工艺试验,以确定拧紧系数 K ,M6钛合金高锁螺栓,试验过程中拧紧工艺条件为:拧紧速度为 120 r/min ;以 $4.45, 6.45, 8.45, 10.45 \text{ N}\cdot\text{m}$ 为

目标扭矩;试验重复3次。

对试验结果数据进行拟合,可得到拧紧力矩-预紧力曲线如图7所示,符合线性关系,经过计算可得此工艺条件下 $K=0.138$,拧紧力矩-预紧力曲线为。

$$F_0 = 1207.7T - 1727 \quad (7)$$

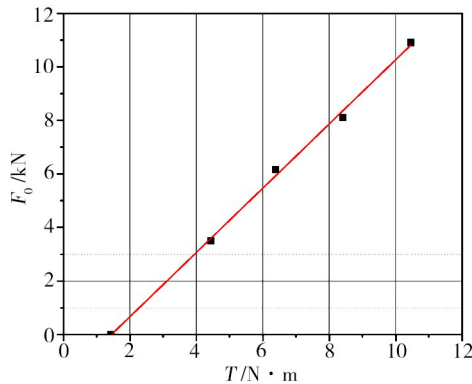


图7 扭矩-预紧力曲线
Fig. 7 Torque-preload curve

3 螺栓预紧力一致性及自然松弛试验

工程实际中,对于一些重要结构的关键连接部位对于螺栓预紧力的一致性具有很高要求,螺栓连接复合材料叠层结构拧紧过程中的拧紧速度、润滑条件、拧紧步数都会显著影响扭矩系数,从而影响螺栓预紧力的一致性,这些因素统称为拧紧工况。考虑到复合材料由于厚度方向树脂基体会产生蠕变和应力松弛,会导致复合材料叠层结构螺栓拧紧后出现短期预紧力衰减现象,这种短期预紧力衰减现象统一采用自然松弛描述。同时拧紧过程中螺纹受力状态、螺栓材料等都会影响螺栓预紧力自然松弛。

研究拧紧速度、润滑条件、拧紧步数等因素对螺栓预紧力一致性及预紧力短期松弛规律的影响,其中拧紧速度包括80、120、160、200 r/min,润滑条件包括油润滑、脂润滑、无润滑,拧紧步数包括一步拧紧、两步拧紧、三步拧紧。试验条件以及工艺参数如1所示,按照表1不同拧紧工艺对螺栓进行拧紧,然后检测螺栓48 h之内的预紧力变化趋势,并记录数据。

试验1[#]、2[#]、3[#]、4[#]主要用于探究拧紧速度对螺栓预紧力影响;试验2[#]、5[#]、6[#]主要用于探究润滑条件对螺栓预紧力影响;试验2[#]、7[#]、8[#]主要用于探究拧紧步数对螺栓预紧力影响。

通过设计多步拧紧试验,探究拧紧步数对螺栓预紧力影响:一步拧紧,直接拧到目标扭矩的100%;两步拧紧,第一步先拧到目标扭矩的50%,第二步再拧到目标扭矩的100%;三步拧紧,第一步先拧到目标扭矩的35%,第二步拧到目标扭矩的70%,第三步拧到目标扭矩的100%。

表1 拧紧工况探究试验设计表

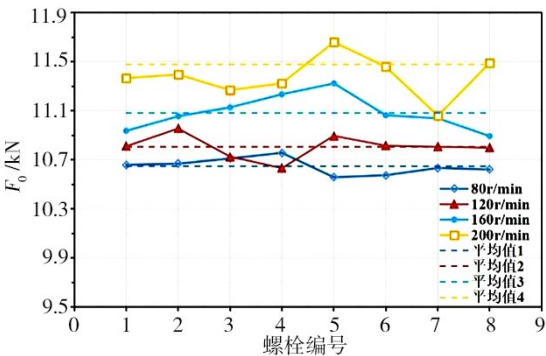
Tab. 1 Test design table of tightening conditions			
试验方案	润滑条件	拧紧速度/r·min ⁻¹	拧紧步数/步
1 [#]	无润滑	80	1
2 [#]	无润滑	120	1
3 [#]	无润滑	160	1
4 [#]	无润滑	200	1
5 [#]	油润滑	120	1
6 [#]	脂润滑	120	1
7 [#]	无润滑	120	2
8 [#]	无润滑	120	3

4 结果与讨论

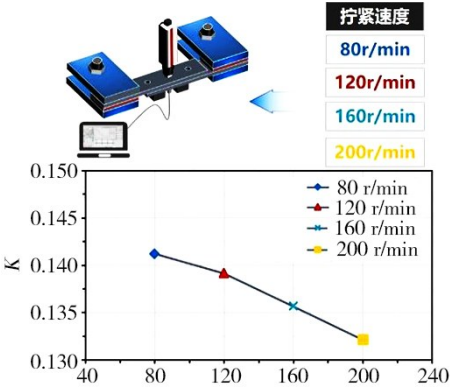
4.1 拧紧工况对预紧力一致性产生的影响

4.1.1 拧紧速度的影响

将试验1[#]、2[#]、3[#]、4[#]结果绘制曲线,如图8所示。



(a) 预紧力分布



(b) 平均扭矩系数变化

图8 不同拧紧速度螺栓预紧力、扭矩系数变化图
Fig. 8 Variation of preload force and torque coefficients of bolts with different tightening speeds

可以看出,80、120、160、200 r/min 拧紧速度下螺栓平均预紧力分别为10.647、10.805、11.082、11.376 kN,可以明显得知随着拧紧速度的增大螺栓预紧力也是增加的,值得注意的是80、200 r/min 拧紧速度下预紧力相差729 N,四种拧紧速度水平预紧力标准差分别为61.9、91.8、133.4、164.0 N,以80 r/min 拧紧速度拧紧螺栓,获得的预紧力一致性更好且预紧力较小,虽然以160、200 r/min 拧紧速度拧紧时形成的预紧力较大,但是预

紧力波动较大,一致性变差。

综合看 120 r/min 拧紧速度可以获得较大的预紧力,同时一致性也较好,是相对较好的一种选择。从图 8(b)可以看出,扭矩系数随拧紧速度增大减小,与公式(7)中预紧力-扭矩系数关系吻合。导致这一结果的原因是拧紧速度影响螺纹啮合面的摩擦因数,螺栓拧紧过程中螺纹接触面相对滑移,随着拧紧速度的增加产生摩擦磨损引起摩擦因数变化,除此之外拧紧速度还会影响螺纹接触面的温度^[14],会使接触面生成氧化膜进一步影响摩擦因数,从而影响预紧力。

4.1.2 润滑条件的影响

将试验 2#、5#、6# 结果数据绘制曲线,如图 9 所示。

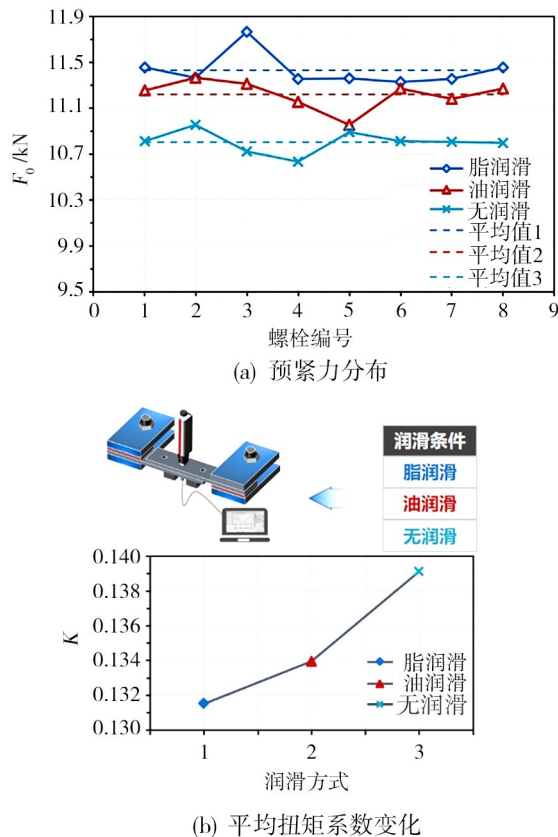


图9 不同润滑条件下螺栓预紧力、扭矩系数变化图

Fig. 9 Variation of bolt preload force and torque coefficient under different lubrication conditions

可以看出,三组不同润滑条件的高锁螺母拧断时螺栓预紧力大小,脂润滑、油润滑、无润滑对应平均预紧力分别为 11.430、11.222、10.805 kN,可以得知相较于无润滑条件的螺栓,施加润滑的螺栓预紧力显著增加,螺栓拧紧过程中,螺纹之间会发生严重挤压和摩擦,会使螺纹表面的镀层脱落,螺纹表面粗糙度增加,使得摩擦因数显著增加,根据上述螺栓预紧力产生原理,螺纹间摩擦力增加会使扭矩克服摩

擦力矩做功增加,而转化为预紧力的部分扭矩变小,从而预紧力减小。

高锁螺母的拧断力矩是固定的,当施加润滑改变螺纹表面接触状态时,显著减小螺纹之间摩擦因数,使拧紧过程中拧紧扭矩克服摩擦力矩做功减少,而转化为预紧力的部分扭矩增加,从而预紧力变大^[15]。其中,脂润滑效果更好,可以获得更大的预紧力,对应的扭矩系数最小,油润滑的螺栓产生的预紧力最小,如图 9(b)所示。脂润滑、无润滑对应的平均预紧力差值为 625 N,脂润滑、油润滑、无润滑三种润滑条件下预紧力标准差分别为 133.6、118.5、91.8 N,无润滑条件下获得预紧力一致性更好。无润滑与油润滑对应预紧力相差 417 N,可以看出润滑条件对预紧力影响较大,原因是润滑状态直接改变螺纹接触面的摩擦因数。

4.1.3 拧紧步数的影响

将试验 2#、7#、8# 结果绘制曲线,如图 10 所示。

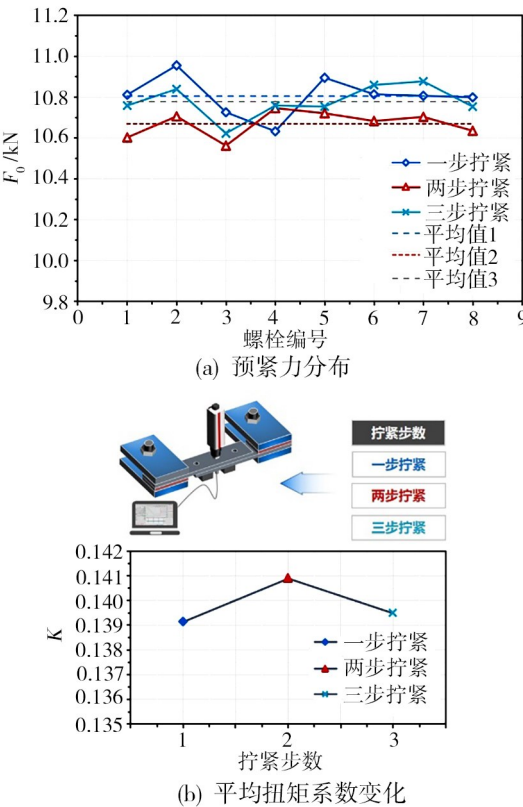


图10 不同拧紧步数下螺栓预紧力、扭矩系数变化图

Fig. 10 Variation of bolt preload force and torque coefficient under different tightening steps

可以看出,一步拧紧、两步拧紧、三步拧紧三种拧紧条件下高锁螺母拧断时螺栓预紧力大小,分别对应平均预紧力为 10.805、10.669、10.777 kN,三种拧紧步数对应平均预紧力差值最大相差 136 N,由此可得知拧紧步数对预紧力大小的影响没有拧紧速度、润滑条件的显著,但是一步拧紧、两步拧紧、三步

拧紧对应的预紧力标准差分别为91.8、59.2、76.0 N,分步拧紧相较于一步拧紧法获得的预紧力一致性较好。分布拧紧通过影响螺纹接合面的粗糙度和摩擦因数,从而改变扭矩系数,提高扭矩系数稳定性,实际工程领域对预紧力要求较高的场合通常会采用分步拧紧的方式。

4.2 拧紧工况对预紧力自然松弛的影响

在航空领域,某些结构重要连接部位螺栓不仅严格控制拧紧工艺,而且会对拧紧后48 h的残余预紧力进行再次测量,防止预紧力衰减幅度过大对复合材料构件力学性能产生较大影响,如果预紧力发生较大衰减会对其进行二次拧紧。

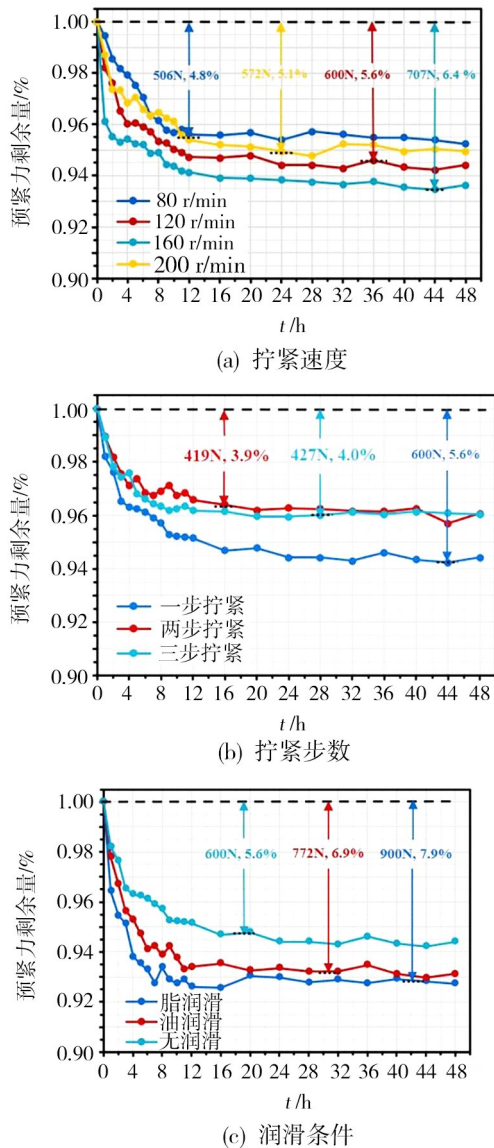


图11 不同拧紧工况下螺栓预紧力自然松弛曲线
Fig. 11 Natural relaxation curves of bolt preload force under different tightening conditions

不同拧紧工况对螺栓预紧力自然松弛影响如图11所示。可以看出,整个自然松弛过程主要可以分为两个阶段:第一阶段,螺栓预紧力快速松弛,松弛

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第4期

量较大,这一过程主要在拧紧后的12 h内完成,这主要是螺栓拧紧后螺栓非均匀受力使微观组织产生滑移、位错,导致局部区域弹性变形转变为塑性变形,进而螺栓内部弹性应变随时间减少,预紧力发生衰减^[16],同时在这个阶段,复合材料处于快速蠕变阶段;第二阶段,螺栓预紧力几乎保持稳定,缓慢松弛,此时复合材料叠层结构预紧力基本达到稳定,复合材料处于稳态蠕变阶段。

整体来看,拧紧速度、拧紧步数对螺栓自然松弛并没有明显规律,不同拧紧速度、拧紧步数的工况条件下螺栓预紧力松弛量保持在4%~6%,而润滑后的螺栓预紧力松弛量相对较大,能够达到7%~8%,这可能是因为润滑后螺纹、螺母之间更容易产生滑移。值得注意的是,无论何种工艺条件下48 h内的预紧力松弛量是由第一阶段松弛导致,第二阶段预紧力基本保持稳定不变。

5 结论

(1)高锁螺母与普通外六角螺母结构不同,通过试验确定使用高锁螺栓锁紧力矩为1.43 N·m、拧断力矩为10.45 N·m,并且拟合出拧紧扭矩-预紧力曲线。

(2)拧紧工况对螺栓预紧力一致性的影响试验表明:拧紧速度和润滑条件对螺栓预紧力一致性的影响较大。其中,随着拧紧速度的增加螺栓预紧力一致性变差,试验表明120 r/min的拧紧速度可以获得更大的预紧力,同时一致性也较好;润滑虽然可以获得更大的预紧力,但是预紧力一致性较差,无润滑条件下获得预紧力一致性更好;相比于一步拧紧和三步拧紧,两步拧紧的螺栓预紧力一致性更好。

(3)拧紧工况对螺栓预紧力自然松弛的影响试验表明,螺栓拧紧后48 h内预紧力自然松弛过程主要分为两个阶段:螺栓预紧力快速松弛,螺栓预紧力保持稳定;拧紧速度、拧紧步数对螺栓自然松弛的影响并没有明显规律,而润滑后的螺栓预紧力松弛量相对较大,松弛量将近达到7%~8%。

参考文献

[1] WANG T, TAN B, LU G, et al. Bolt pretightening force measurement based on strain distribution of bolt head surface[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2020, 33(04): 04020034.
[2] GAO D, GONG J, TIAN Z, et al. Research on bolt pre-tightening and relaxation mechanism under transverse load[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(12): 1687814020975919.
[3] 刘晓石. 发动机连杆螺栓拧紧工艺的试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(05): 3.

LIU Xiaoshi. Experimental study on tightening technology of engine connecting rod bolt[J]. Machine Building & Automation,

2012,41(05):3.

[4] ZOU Q, SUN T S, NASSAR S A, et al. Effect of lubrication on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners[C]//International Joint Tribology Conference, 2006,42592:591-602.

[5] LIU Z, WANG B, LI Y, et al. Analysis of self-loosening behavior of high strength bolts based on accurate thread modeling[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105541.

[6] 李小强, 孟庆阔, 杜一凡, 等. 拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13):11.

LI Xiaoqiang, MENG Qingkuo, DU Yifan, et al. Effect of tightening strategy on preload of single bolt connection of aeroengine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13):11.

[7] 王灿, 丁振军, 韩帅帅, 等. 基于精确螺纹建模的螺栓紧固工艺研究[J]. 工程机械, 2020, 51(02):9.

WANG Can, DING Zhenjun, HAN Shuaishuai, et al. Research on bolt fastening technology based on precise thread modeling[J]. Construction Machinery and Equipment, 2020, 51(02):9.

[8] 庆光蔚, 郭勤涛, 展铭, 等. 螺栓松动应变频响模型修正识别方法[J]. 机械设计与制造, 2023, 383(01): 208-211, 217.

QING Guangwei, GUO Qintao, ZHAN Ming, et al. Identification method of bolt loosening response model modified by frequency conversion[J]. Machine Building & Automation, 2023, 383(01):208-211, 217.

[9] HU J, ZHANG K, CHENG H, et al. Mechanism of bolt pretightening and preload relaxation in composite interference-fit joints under thermal effects[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(30):4929-4946.

[10] HU J, MI S, YANG Z, et al. An experimental

investigation on bearing behavior and failure mechanism of bolted composite interference-fit joints under thermal effects[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131: 105830.

[11] CACCESE V, BERUBE K A, FERNANDEZ M, et al. Influence of stress relaxation on clamp-up force in hybrid composite-to-metal bolted joints[J]. Composite Structures, 2009, 89(2):285-293.

[12] 鲍星. 高锁紧固件的关键性能试验性研究及有限元分析[D]. 景德镇:景德镇陶瓷学院, 2015.

BAO Xing. Experimental Study and Finite Element Analysis of Key Performance of High Lock Fasteners[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute, 2015.

[13] 吴南星, 成飞, 廖达海, 等. 高锁螺栓连接力学参数关系的试验研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(01):4.

WU Nanxing, CHENG Fei, LIAO Dahai, et al. Experimental study on mechanical parameters of high lock bolt connection[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(01):4.

[14] NASSAR S A, GANESHMURTHY S, RANGANATHAN R M, et al. Effect of tightening speed on the torque-tension and wear pattern in bolted connections[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(03):1669-1681.

[15] 蔡跃波, 安鲁陵, 王楚凡, 等. 螺栓拧紧过程中工况对复合材料连接结构夹紧力的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(02):812-822.

CAI Yuebo, AN Luling, WANG Chufan, et al. Effect of operating conditions on the clamping force of composite material structure during bolt tightening process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(02):812-822.

[16] 黄伟强. 航发低压转子连接螺栓组螺栓装配预紧力研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.

HUANG Weiqiang. Research on Bolt Assembly Preload of Bolt Group for Aero Low Pressure Rotor Connection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.