

文章编号: 1000-8055(2023)08-1793-12

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210629

航空发动机螺栓拧紧力矩系数波动试验

李小强¹, 韩玉杰¹, 陈飞宇¹, 王 辉², 赵 兵²

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084)

摘 要: 围绕表面粗糙度结构参数、表面润滑工艺参数, 结合航空发动机螺栓多次装调工艺特性, 设置表面装配特性差异条件, 基于搭建的 TC4 单螺栓拧紧试验系统开展了试验研究。结果表明: 使用力矩控制法时, 随着拧紧摩擦面表面粗糙度的降低以及表面润滑程度的增大, 拧紧装配时的当量摩擦因数随之减小且趋于稳定, 从而提高了螺栓拧紧力矩系数的稳定性; 拧紧摩擦面充分润滑且表面粗糙度越小、螺纹副充分润滑、使用高温石墨润滑脂可有效降低螺栓拧紧力矩系数的波动量, 提高航空发动机螺栓组连接预紧力的一致性。

关 键 词: 螺栓拧紧力矩系数; 螺栓连接; 表面粗糙度; 润滑; 预紧力一致性

中图分类号: V232.7

文献标志码: A

Experiment on bolt tightening torque coefficient fluctuation of aeroengine

LI Xiaoqiang¹, HAN Yujie¹, CHEN Feiyu¹, WANG Hui², ZHAO Bing²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,

Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the surface roughness structure parameters and surface lubrication process parameters, the differential conditions of surface assembly characteristics were set in combination with the process characteristics of aeroengine bolts for several times. The experimental study was carried out based on the TC4 single bolt tightening test system. Results showed that when torque control method was used, the equivalent friction coefficient of tightening assembly decreased and was prone to stabilize with the decrease of surface roughness and the increase of surface lubrication levels, thus improving the stability of tightening torque coefficient. Sufficient lubrication of tightening friction surface with lower surface roughness, sufficient lubrication of thread pair and use of high temperature graphite grease can effectively reduce the fluctuation of tightening torque coefficient and improve the consistency of preload force of aeroengine bolt set connection.

Keywords: bolt tightening torque coefficient; bolt connection; surface roughness; lubrication; the consistency of preload

螺栓连接结构是航空发动机转静子中的常用结构^[1], 广泛应用于高压压气机、低压涡轮、高压涡轮、中介机匣等关键转静子部件的连接。各部

件结合面的螺栓连接紧度直接影响转子结构与机匣支承结构的动静刚度、临界转速、动力响应特性、密封性能^[2-9], 且因预紧力大小具有时变性和

收稿日期: 2021-11-04

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0010-0104); 基础科研项目(JCKY2019204A004)

作者简介: 李小强(1979—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事先进装配工艺与装备、精密成形工艺与装备研究。

E-mail: lixiaoqiang@buaa.edu.cn

引用格式: 李小强, 韩玉杰, 陈飞宇, 等. 航空发动机螺栓拧紧力矩系数波动试验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 1793-1804. LI Xiaoqiang, HAN Yujie, CHEN Feiyu, et al. Experiment on bolt tightening torque coefficient fluctuation of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1793-1804.

分散性的特点,从而导致动力学参数的时变性和分散性,甚至引发整机振动的分散度较大^[10]。因此研究航空发动机螺栓连接结构预紧力大小变化规律和装配工艺控制技术具有重要意义。

螺栓装配时预紧力并不能直接控制,一般通过使用力矩扳手采用力矩控制法、力矩-转角法与屈服点控制法等拧紧方法,控制输入力矩、旋转角度等拧紧参数间接实现预紧力的加载。我国航空发动机拧紧工艺普遍采用操作简单但精度较低的力矩控制法^[11],通过力矩控制法形成的螺栓预紧力大小一致性较差,螺栓拧紧力矩系数(K)波动较大。在航空发动机实际装配中转静子部件存在假装试错的装配调试方法,部分装配特性是否合格只能依靠整机试车得到间接考量^[12],不合格整机将被拆散并重新装配,因而造成部件间螺栓连接结构的反复拆装,影响表面装配特性的一致性,进而增大 K 的波动量。

国内外学者从表面装配特性出发,针对表面粗糙度、润滑条件、拧紧次数、表面材质与处理方式等多种因素对力矩-预紧力关系、 K 、预紧力一致性与防松性能等的影响进行了理论及试验研究。Nassar等^[13]针对钢和铝两种材料的连接件开展正交试验,研究了表面粗糙度、表面清洁度对螺栓连接力矩-预紧力关系的影响,发现了多次拧紧拧松会增大表面粗糙度,进而影响预紧力的一致性。Fukuoka等^[14]针对碳钢材料螺栓连接结构,在综合考虑结合面表面粗糙度、螺母加载面夹角等因素影响下,提出了螺栓预紧力与螺母转角之间的关系模型。高炳涛等^[15]基于正交设计试验方法,使用电子式螺栓螺纹拉扭摩擦试验机研究了螺栓性能等级、垫片等级、润滑剂种类、拧紧速度4个主要因素对 K 的影响程度。金文伟等^[16]针对机车制动盘紧固件,研究了表面处理方式、表面润滑方式、拧紧方法对 K 波动的影响,发现采用达克罗表面处理方式、螺纹副表面涂抹润滑脂以及采用两次拧紧次数的方法可提高 K 的稳定性。王桃英等^[17]以大型起重机回转支承高强螺栓装配工艺为研究对象,通过试验研究了润滑位置对力矩-预紧力关系的影响,发现全润滑状态下的摩擦因数和 K 波动量最小,螺栓连接的稳定性和可靠性更高。周俊波^[18]与吴向阳等^[19]通过试验系统考察了润滑状态、润滑剂种类、预紧力矩、螺栓/螺母材质、表面处理方式等因素在剪切载荷下对单螺栓连接结构的松动行为的影响,发现表面摩擦因数过大影响预紧力的一致性,表

面摩擦因数过小则易发生螺栓松动。Sanclemente等^[20]通过试验发现低预紧力条件下使用润滑脂易导致连接结构松动,然而在高预紧力条件下使用润滑脂有助于防松。赵兵等^[21-22]针对航空发动机转子法兰止口典型连接结构的瘪螺母紧固控制问题,使用力矩控制法研究了拧紧次数、润滑方式、螺栓螺母自身质量因素对螺栓连接预紧力一致性的影响,提出了含收口自锁力矩的力矩-预紧力关系修正模型,并发现多次拧紧会导致表面粗糙度不断降低,而充分润滑可减小预紧力大小的波动。Zou等^[23]通过试验研究了拧紧次数、拧紧速度、润滑剂种类与润滑位置对预紧力大小和摩擦因数的影响,发现充分润滑会降低预紧力大小与摩擦因数的数值与波动量。李小强等^[24]基于TC4钛合金单螺栓连接工艺试验,研究了拧紧方法、分步拧紧与拧紧速度对预紧力大小及稳定性的影响,探索了螺栓预紧力短时衰减规律,发现使用力矩-转角法、采用分步拧紧和提高转速均可使预紧力的波动趋于平稳,进而提高预紧力控制精度。

综上所述发现:紧固件自身质量的差异、拧紧摩擦面与螺纹接触面摩擦因数的不稳定都是影响 K 波动的关键因素,而造成摩擦因数不稳定的因素主要包括:螺纹表面加工质量、拧紧摩擦面表面粗糙度、表面润滑条件。目前关于表面装配特性对 K 的影响研究,试验对象大多集中在汽车、机车等传统机械领域,且材料多为钢铝,与使用钛合金或者高温合金的轻质薄壁(连接结构厚度不超过10 mm)航空发动机部件有着显著差异。因此迫切需要开展相关研究。

基于此,本文围绕表面粗糙度结构参数、表面润滑工艺参数,结合航空发动机螺栓多次装调工艺特性,设置表面装配特性差异条件,基于搭建的TC4单螺栓拧紧试验系统开展了试验研究,采用超声波预紧力测量系统提取表面粗糙度差异、表面润滑差异及重复拧紧引起的预紧力大小变化,评估 K 的波动范围,从而为航空发动机装配工艺控制技术改进提供参考。

1 单螺栓拧紧试验系统

1.1 试验件设计

航空发动机静子典型螺栓连接结构如图1所示,参考其螺栓连接结构的厚度、孔径及材料进行单螺栓拧紧试验件结构的设计。如图2所示,该结构由钛合金螺栓、钛合金螺母与钛板组成。

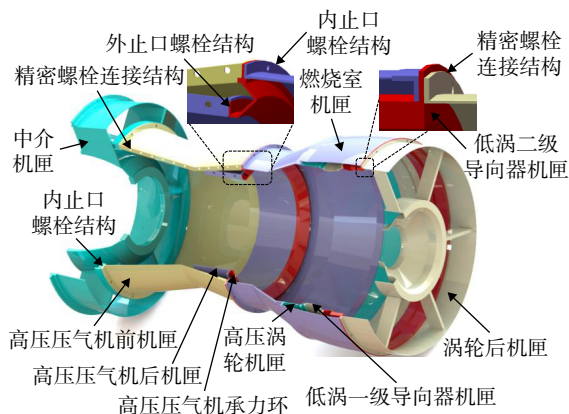


图 1 航空发动机静子典型螺栓连接结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical bolt connection structure for aeroengine stator

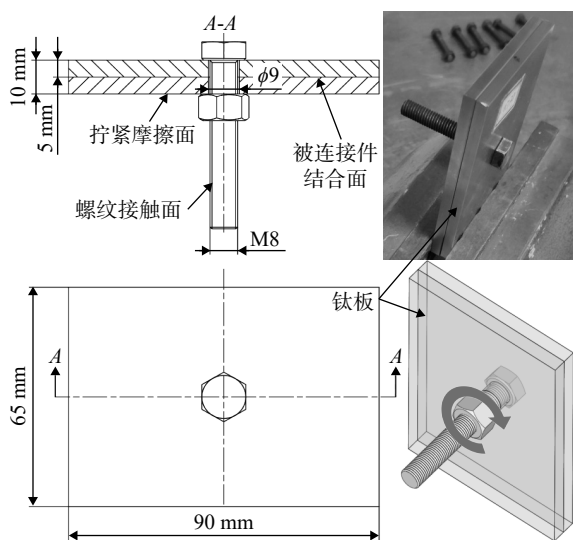


图 2 单螺栓拧紧试验件结构图

Fig. 2 Structure diagram of single bolt tightening specimen

螺栓选用 TC4 钛合金六角头全螺纹螺栓, 规格为 M8, 螺栓长度为 50 mm, 性能等级为 1 100 MPa; 螺母选用钛合金 1 型六角螺母, 规格为 M8; 被连接件选用 TC4 材料, 钛板厚度为 5 mm, 结合面平面度为 0.015, 平行度为 0.01。

如图 3 所示, 共设置 4 种表面粗糙度 $R_a=0.4, 0.8, 1.6, 3.2$, 每个钛板的两个结合面平面表面粗糙度一致。试验前使用 Keyence VK-X 激光扫描显微镜对钛板的表面粗糙度及形貌进行检测, 部分检测结果如图 4 所示。

1.2 螺栓拧紧力矩系数

K 是指在拧紧螺栓时, 拧紧力矩与预紧力的相关系数, 该系数的大小和变化规律对螺栓连接的设计、制造、安装等环节具有重要指导意义。

根据中国航空工业总公司^[25]于 1994 年发布

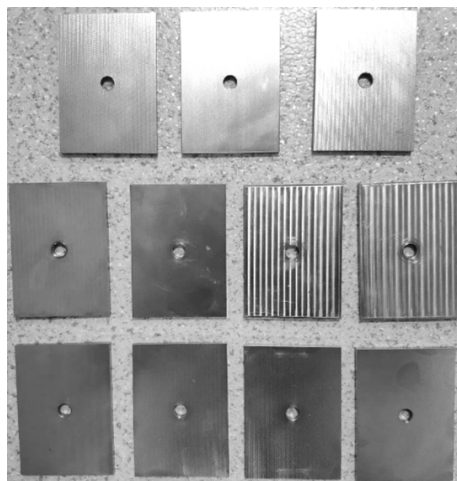


图 3 不同表面粗糙度的钛板

Fig. 3 Titanium plates with different surface roughnesses

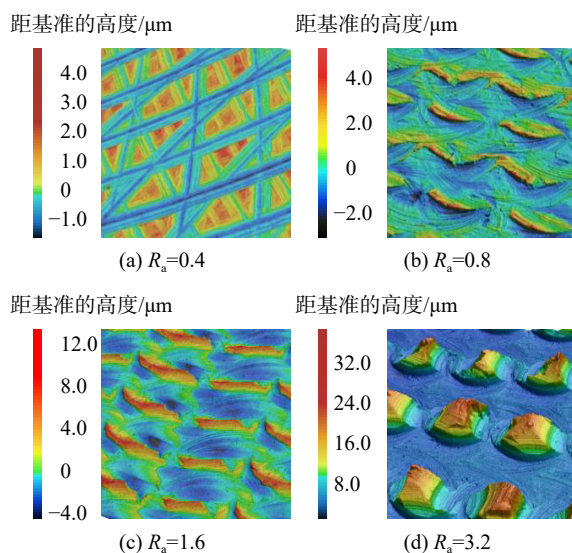


图 4 不同表面粗糙度的钛板微观形貌

Fig. 4 Microstructure of titanium plate with different surface roughnesses

的《螺栓连接拧紧力矩与轴向力的关系》航空行业标准, K 的理论表达式见式 (3)。

螺栓拧紧力矩的理论表达式为

$$M = \left[\frac{2(R^3 - r^3)f}{3(R^2 - r^2)} + \frac{d_2(P \cos \beta + f' \pi d_2)}{2(\pi d_2 \cos \beta - P f')} \right] F \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中 M 为螺栓拧紧力矩; F 为预紧力; d_2 为螺纹中径, 本文为 7.513 mm; P 为螺距, 本文为 0.75 mm; f 为拧紧摩擦面的摩擦因数; β 为螺纹半角, 本文为 30° ; f' 为螺纹接触面的摩擦因数; R 为拧紧摩擦面螺母承力面外半径, 本文为 6.175 mm; r 为拧紧摩擦面螺母承力面内半径, 本文为螺栓孔半径, 为 4.5 mm。因式 (1) 中的 $P f'$ 项很小, 且一般情况

下 $f' = f$, 则式(1)可以简化为:

$$M = \left[\frac{2(R^3 - r^3)f}{3(R^2 - r^2)} + \frac{P}{2\pi} + \frac{fd_2}{2\cos\beta} \right] F \times 10^{-3} = KdF \times 10^{-3} \quad (2)$$

其中

$$K = \frac{1}{d} \left[\frac{2(R^3 - r^3)f}{3(R^2 - r^2)} + \frac{P}{2\pi} + \frac{fd_2}{2\cos\beta} \right] \quad (3)$$

$$f = \left(\frac{M}{F} \times 10^3 - \frac{P}{2\pi} \right) / \left[\frac{2(R^3 - r^3)}{3(R^2 - r^2)} + \frac{d_2}{2\cos\beta} \right] \quad (4)$$

式中 d 为螺纹公称直径。由式(3)可知, K 易受到螺栓自身结构与当量摩擦因数(多个摩擦面耦合作用)的影响, 而当量摩擦因数会受到表面粗糙度结构参数(初始加工精度、多次拧紧磨损后的精度等)、表面润滑工艺参数(润滑剂种类、润滑程度等)的影响。

通过试验分析各类因素对 K 值及其波动范围的影响, 提出降低和控制当量摩擦因数波动量的优化工艺, 进而降低和控制 K 的波动量, 有效提高螺栓组的预紧力大小一致性, 对于提升航空发动机螺栓连接结构性能稳健性具有重要意义。

1.3 预紧力加载与测量系统

为实现拧紧工艺参数高度可控, 满足力矩控制法对拧紧力矩精确控制与检测的要求, 如图 5 所示, 使用瑞典 Atlas Copco 的拧紧工具系统进行力矩加载。该系统可通过 Tools Talk 拧紧编程软件设置拧紧速度、拧紧转角与拧紧力矩等拧紧工艺参数。拧紧工具系统性能参数如表 1 所示。

选用 iFast 超声波预紧力测量系统测量螺栓预紧力, 超声波测量螺栓预紧力的原理示意如



图 5 Atlas Copco 拧紧工具系统

Fig. 5 Tightening tool system of Atlas Copco

图 6 所示, 系统性能指标如表 2 所示。在试验前需要对系统在拉力试验机上开展螺栓的预紧力标定, 以获取螺栓伸长量与螺栓预紧力的对应关系。

表 1 Atlas Copco 拧紧工具系统性能指标

Table 1 Performance index of tightening tool system of Atlas Copco

参数	数值
输出力矩范围/(N·m)	5~55
输出力矩精度/%	±2.5
输出转角精度/(°)	±1
转速范围/(r/min)	0~735

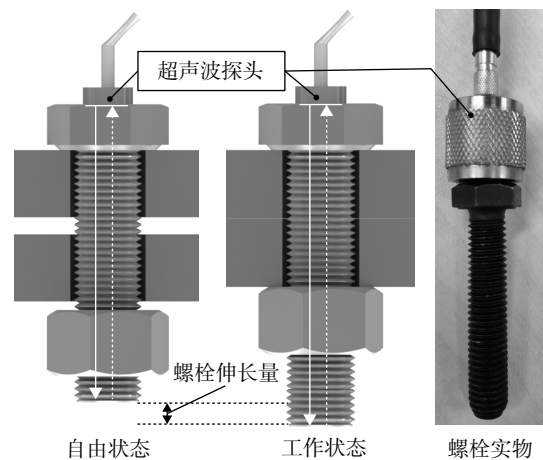


图 6 超声波测量预紧力原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ultrasonic measuring preload

表 2 iFast 超声波预紧力测量系统性能指标

Table 2 Performance index of ultrasonic preload measurement system of iFast

参数	数值
长度测量范围/mm	10~5 000
长度测量精度/ μm	0.05
预紧力测量范围/kN	0.1~1 000
预紧力测量精度/%	±3
测量采样频率/Hz	100~2 000
超声传感器频率/MHz	1~10

2 表面粗糙度对 K 的影响试验

在单螺栓拧紧试验系统中, 螺栓拧紧时发生相对运动的结合面为: 拧紧摩擦面(拧紧的螺母与钛板之间的摩擦结合面)、螺纹接触面(螺栓螺纹与螺母螺纹之间的摩擦接触面)。同时, 单螺栓拧紧试验系统中的其他结合面, 由于理论上不会产生相对运动, 且在探索性的试验中对 K 的影响

微乎其微,故不作为本文的研究对象。

除此之外,由于螺纹接触面的表面粗糙度会随着润滑条件与磨损程度等因素发生变化,参数具有时变性,无法定性分析,因此本节主要研究拧紧摩擦面表面粗糙度对 K 的波动影响。

2.1 试验方案

试验使用单一变量法,首先试验组仅在拧紧摩擦面表面粗糙度设置一定的梯度,然后使用相同的拧紧工艺进行拧紧,最后对 K 进行对比分析。在拧紧摩擦面表面粗糙度对 K 的影响试验中,4 组被连接件钛板的表面粗糙度设置情况如表 3 所示。

试验的拧紧工艺条件如表 4 所示,为减小试验中的随机误差,并且贴近航空发动机螺栓多次拧紧拧松的工艺特性,在每个拧紧力矩梯度条件下,试验重复拧紧 5 次。每个试验组共开展 40 次拧紧试验,1~5 次试验对应 5 N·m 的拧紧力矩,6~10 次试验对应 10 N·m 的拧紧力矩,以此类推,35~40 次试验对应 40 N·m 的拧紧力矩。通过分析相同拧紧力矩下开展的 5 次重复试验,研究重复拧紧次数对 K 的影响。

其中,螺栓预紧力大小 F 由预紧力测量系统直接测量得到,螺栓拧紧力矩 M 由拧紧工具系统

测量得到,螺纹公称直径 d 已知,将 F 、 M 、 d ,代入式(2)计算便可得到 K 。

2.2 试验数据分析

从图 7 和图 8 可以看出,表面粗糙度对 K 的均值有较大的影响:在每个拧紧力矩梯度下,表面粗糙度越小, K 的均值越小,即较低的拧紧摩擦面表面粗糙度有利于拧紧力矩 M 向预紧力 F 的转化;且随着拧紧力矩的增大,不同表面粗糙度间 K 的均值差值逐渐减小,并趋于稳定。按拧紧力矩梯度对比,不同表面粗糙度间 K 的均值的最大差值依次为 0.30、0.29、0.23、0.22、0.18、0.17、0.17、0.16。

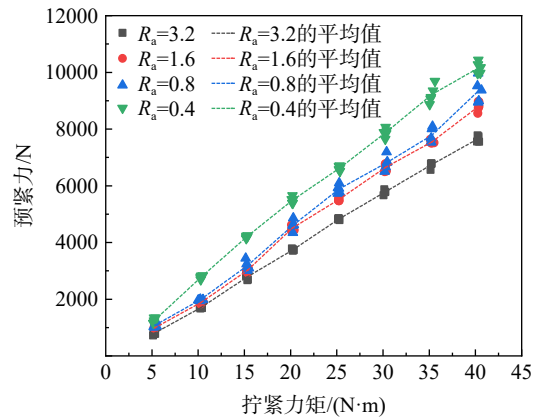


图 7 不同表面粗糙度下的 F - M 曲线

Fig. 7 F - M curves under different surface roughnesses

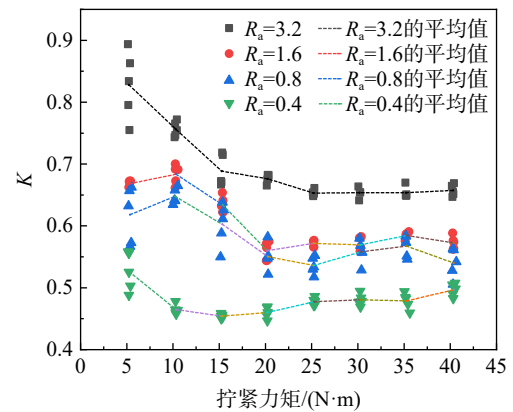


图 8 不同表面粗糙度下 K 的波动曲线

Fig. 8 Fluctuation curves of K under different surface roughnesses

从图 8 和图 9 可以看出,表面粗糙度对 K 的波动有较大影响:随着表面粗糙度的降低, K 的标准差逐渐减小, K 的稳定性逐渐提高,趋于稳定;在单个拧紧力矩梯度下,不同表面粗糙度间 K 的标准差差异较大,但并无明显规律。按拧紧力矩梯度,不同表面粗糙度间 K 的标准差最大倍数依

表 3 钛板的拧紧摩擦面表面粗糙度设置情况

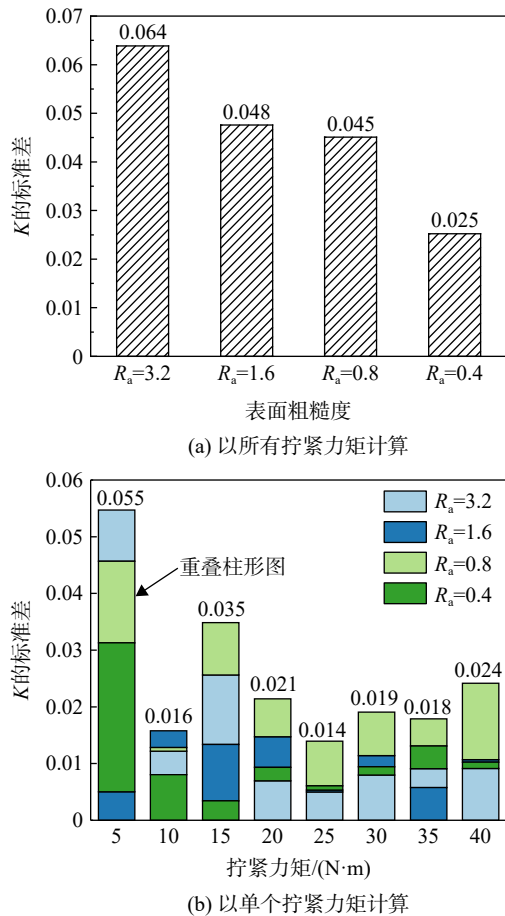
Table 3 Surface roughness setting of tightening friction surface of titanium plate

钛板编号	表面粗糙度/ μm	
	拧紧摩擦面	其余面
1	3.2	1.6
2	1.6	1.6
3	0.8	1.6
4	0.4	1.6

表 4 拧紧摩擦面表面粗糙度对 K 的影响试验工艺条件

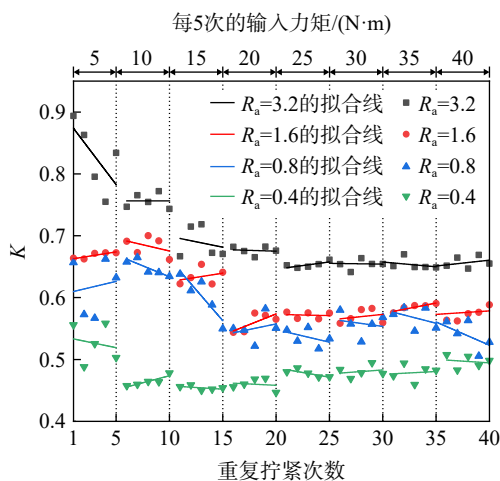
Table 4 Experimental conditions for the effect of surface roughness on K of tightening friction surface

参数	数值及说明
拧紧部位	螺母
表面润滑程度	无润滑
拧紧控制方法	力矩控制法
拧紧力矩/(N·m)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
重复拧紧次数	每个拧紧力矩梯度重复拧紧 5 次
拧紧速度/(r/min)	60
拧紧步数	单步拧紧

图9 不同表面粗糙度下 K 的标准差Fig. 9 Standard deviation of K under different surface roughnesses

次约为 11、2、12、3、2.8、2.4、3、2.7。

如图 10 所示,给出了 4 种不同拧紧摩擦面表面粗糙度下重复拧紧对 K 的影响,按照拧紧次数的递增,每拧紧 5 次对应同一个输入力矩,输入力

图 10 不同表面粗糙度的钛板在多次拧紧下 K 的波动情况Fig. 10 Fluctuation of K in titanium plates with different surface roughnesses under multiple tightening

矩也依次递增。同时给出了 8 个输入力矩下,每拧紧 5 次 K 的波动拟合直线,图中共有 32 段 K 的拟合直线。

从图 10 可知,不同表面粗糙度下重复拧紧对 K 的影响各不相同:不同表面粗糙度的钛板在拧紧次数为 20 之前,4 种拧紧力矩梯度下 K 的变化趋势不一致,无明显规律可循;在拧紧次数为 20 之后的 4 种拧紧力矩梯度下, $R_a=3.2, 1.6, 0.4$ 的拟合直线近乎水平, K 的波动基本保持稳定,即在大拧紧力矩作用下拧紧次数对 K 无显著影响。但 $R_a=0.8$ 的拟合直线斜率一直为负,即随着拧紧次数的增大 K 逐渐减小。

3 表面润滑对 K 的影响试验

文中第 2 节的螺栓拧紧试验中,表面无润滑,但表面润滑会显著影响接触表面摩擦力学状态,理论上会对 K 的波动有较大影响。

在目前航空发动机的螺栓拧紧中,不同于普通机械领域的螺栓螺纹接触面、螺母螺纹接触面与拧紧摩擦面均需涂抹润滑剂,航空发动机螺栓拧紧时仅在螺栓螺纹接触面涂抹润滑脂,拧紧摩擦面依靠连接件和螺母的表面镀层(银或锌)自润滑。因此本节主要研究润滑程度与润滑剂种类对 K 的波动影响。

3.1 试验方案

试验使用单一变量法,首先试验组仅在表面润滑程度和润滑剂设置表面润滑特性差异条件,然后使用相同的拧紧工艺进行拧紧,最后对 K 进行对比分析。

3.1.1 表面润滑程度对 K 的影响试验

在表面润滑程度对 K 的影响试验中,5 组试验的表面润滑程度设置情况如表 5 所示。如图 11 所示,图 11(a)为螺纹接触面涂抹了润滑脂的螺栓,图 11(b)为拧紧摩擦面和螺纹接触面涂抹了润滑脂的螺母,图 11(c)为未涂抹润滑脂的螺母。

试验的拧紧工艺条件如表 6 所示。其中,试验的分组、操作流程、数据获取与数据处理等均与文中第 2.1 节试验方案相同。

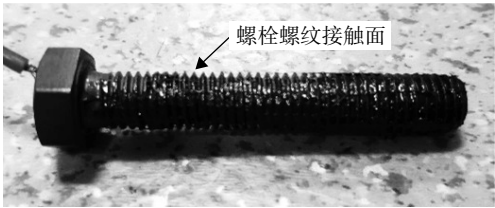
3.1.2 润滑剂种类对 K 的影响试验

在目前航空发动机的螺栓拧紧中,常用的润滑剂种类包括二硫化钼润滑脂、高温石墨润滑脂等。因此在润滑剂种类对 K 的影响试验中,4 组试验的润滑剂种类如表 7 所示,使用的不同种类

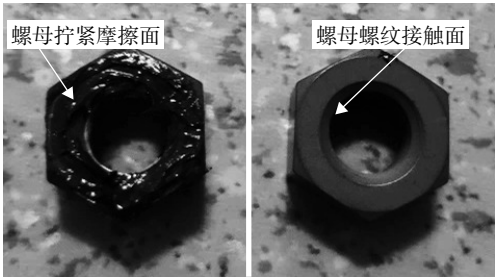
表 5 表面润滑程度对 K 的影响试验设置情况

Table 5 Test setting for the influence of surface lubrication level on K

组号	简称	润滑螺栓 螺纹接触面	润滑螺母 螺纹接触面	润滑螺母 拧紧摩擦面
A	无润滑			
B	仅润滑螺母			√
C	仅润滑螺栓	√		
D	充分润滑	√		√
E	饱和润滑	√	√	√



(a)



(b)

(c)

图 11 螺栓与螺母润滑位置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of lubrication position of bolt and nut

表 6 表面润滑程度对 K 的影响试验工艺条件

Table 6 Experimental conditions for the influence of surface lubrication level on K

参数	数值及说明
拧紧部位	螺母
拧紧温度/℃	25
润滑剂种类	二硫化钼润滑脂
表面粗糙度/ μm	1.6(拧紧摩擦面)
拧紧控制方法	力矩控制法
拧紧力矩/(N·m)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
重复拧紧次数	每个拧紧力矩梯度重复拧紧 5 次
拧紧速度/(r/min)	60
拧紧步数	单步拧紧

润滑脂如图 12 所示。

试验的拧紧工艺条件如表 8 所示。其中, 试验的分组、操作流程、数据获取与数据处理等均

表 7 润滑剂种类对 K 的影响试验设置情况

Table 7 Test setting for the influence of lubricant type on K

试验组号	润滑剂种类
A	无润滑
B	普通锂基润滑脂
C	二硫化钼润滑脂
D	高温石墨润滑脂



(a) 普通锂基
润滑脂

(b) 二硫化钼
润滑脂

(c) 高温石墨
润滑脂

图 12 试验中使用的不同种类润滑剂

Fig. 12 Different types of lubricants used in the tests

表 8 润滑剂种类对 K 的影响试验工艺条件

Table 8 Experimental conditions for the influence of lubricant type on K

参数	数值及说明
拧紧部位	螺母
拧紧温度/℃	25
表面润滑程度	充分润滑
表面粗糙度/ μm	1.6(拧紧摩擦面)
拧紧控制方法	力矩控制法
拧紧力矩/(N·m)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
重复拧紧次数	每个拧紧力矩梯度重复拧紧 5 次
拧紧速度/(r/min)	60
拧紧步数	单步拧紧

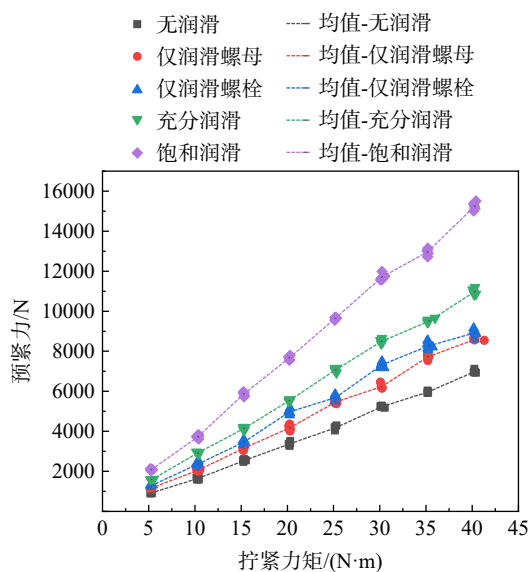
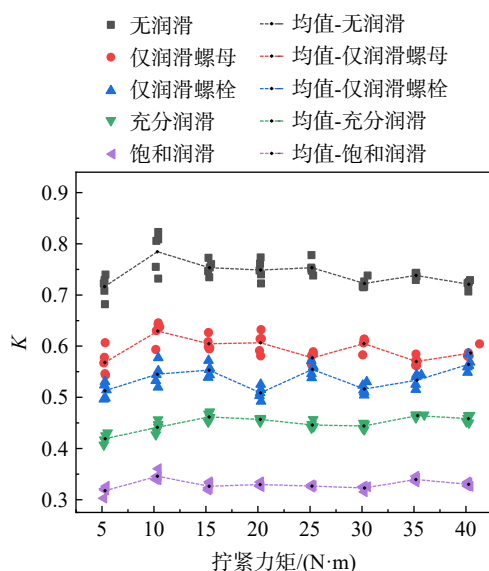
与文中第 2.1 节试验方案相同。

文中第 3.1.1 节与第 3.1.2 节中, 螺栓预紧力大小 F 由预紧力测量系统直接测量得到, 螺栓拧紧力矩 M 由拧紧工具系统测量得到, 螺纹公称直径 d 已知, 将 F 、 M 、 d , 代入式(2)计算便可得到 K 。

3.2 试验数据分析

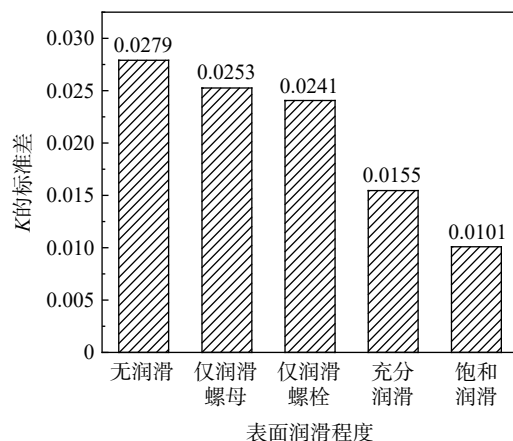
3.2.1 表面润滑程度对 K 的波动影响

从图 13 和图 14 可以看出, 表面润滑程度对 K 的均值有较大的影响: 在每个拧紧力矩梯度下, 表面润滑程度越大, K 的均值越小, 即充分的表面润滑有利于拧紧力矩向预紧力的转化; 拧紧力矩在 10 N·m 之后, 充分润滑和饱和润滑状态下 K 的均值基本保持稳定; 在每个拧紧力矩梯度下, 无

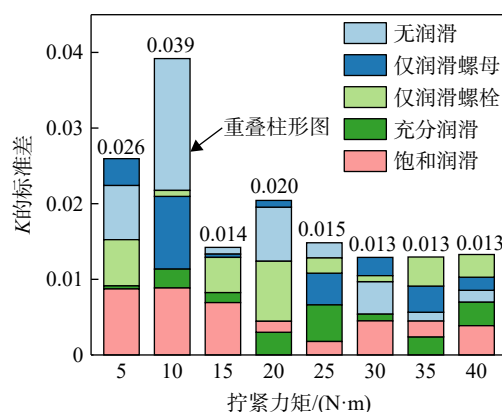
图 13 不同表面润滑程度下的 $F-M$ 曲线Fig. 13 $F-M$ curves under different levels of surface lubrication图 14 不同表面润滑程度下 K 的波动曲线Fig. 14 Fluctuation curves of K under different levels of surface lubrication

润滑状态下 K 的均值约为饱和润滑状态下的 2.3 倍, 可见充分润滑可以有效降低 K 的均值。

从图 14 和图 15 可以看出, 表面润滑程度对 K 的波动有较大影响: 随着表面润滑程度的增大, K 的标准差逐渐减小, K 的稳定性逐渐提高, 波动趋于稳定。在整个拧紧力矩区间, 饱和润滑状态下 K 的标准差是无润滑状态下的 2.8 倍, 即充分润滑可以有效减少 K 的波动量; 在单个拧紧力矩梯度下, 充分润滑和饱和润滑状态下 K 的标准差均小于其他状态下 K 的标准差。



(a) 以所有拧紧力矩计算



(b) 以单个拧紧力矩计算

图 15 不同表面润滑程度下 K 的标准差Fig. 15 Standard deviation of K under different levels of surface lubrication

仅润滑螺母状态、仅润滑螺栓状态与无润滑状态, 在整个拧紧力矩区间 K 的标准差依次为 0.0279、0.0253、0.0241, 三者相差不大。且在单个拧紧力矩梯度下, 拧紧力矩在 10 N·m 之后, 三者间 K 的标准差并无明显的优劣关系, 即螺栓连接结构仅部分润滑状态, 在大的拧紧力矩作用下无法有效地降低 K 的波动量。

如图 16 所示, 给出了 5 种不同表面润滑程度下重复拧紧次数对 K 的影响, 按照拧紧次数的递增, 每拧紧 5 次对应同一个输入力矩, 输入力矩也依次递增。同时给出了 8 个输入力矩下, 每拧紧 5 次 K 的波动拟合直线, 图中共有 40 段 K 的拟合直线。

从图 16 可知, 不同表面润滑程度下重复拧紧对 K 的影响各不相同: 不同表面润滑程度的钛板在拧紧次数为 10 之前, 2 种拧紧力矩梯度下 K 的变化趋势不一致, 无明显规律可循; 在拧紧次数为 20 之后的 4 种拧紧力矩梯度下, 充分润滑状态

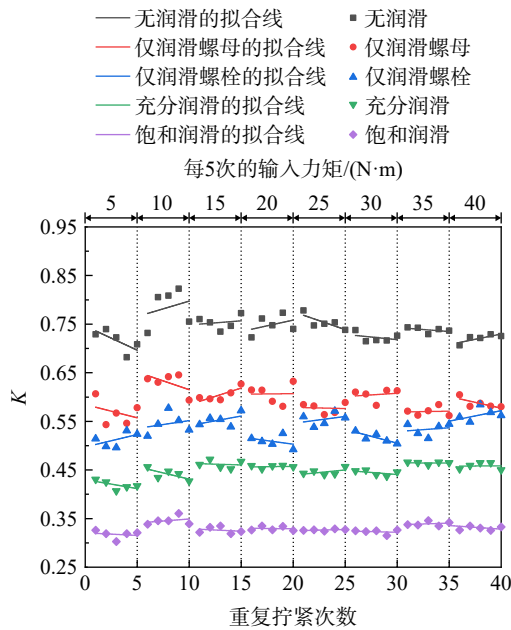


图 16 不同表面润滑程度的钛板在多次拧紧下 K 的波动情况
Fig. 16 Fluctuation of K in titanium plates with different levels of surface lubrication under multiple tightening

与饱和润滑状态下 K 的拟合直线近乎水平, 即 K 的波动量极小, 基本保持稳定, 即充分润滑状态, 在大拧紧力矩作用下, 拧紧次数对 K 无显著影响; 仅润滑螺栓状态与仅润滑螺母状态下 K 的拟合直线并无明显的规律可循, 但 K 的波动量都在 ± 0.025 以内, 即部分润滑状态, 在大拧紧力矩作用下, 拧紧次数对 K 影响较小。

3.2.2 润滑剂种类对 K 的波动影响

从图 17 和图 18 可以看出, 不同的润滑剂对 K 的均值影响差异较大: 在每个拧紧力矩梯度下, 3 种润滑脂按照 K 的均值由大到小依次为普通锂基、二硫化钼、高温石墨, 即高温石墨润滑脂最有利于拧紧力矩向预紧力的转化。

从图 18 和图 19 可以看出, 不同的润滑剂对 K 波动影响差异较大: 在整个拧紧力矩区间, 3 种润滑脂按照 K 的标准差由大到小依次为普通锂基、二硫化钼、高温石墨, 普通锂基润滑脂下 K 的标准差约是高温石墨润滑脂下的 2.6 倍, 即高温石墨润滑脂最能减少 K 的波动量, 提高 K 的稳定性。

在单个拧紧力矩梯度下, 拧紧力矩在 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时, 普通锂基润滑脂 K 的标准差最小, 拧紧力矩在 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之后, K 的标准差按照从大到小依次为普通锂基、二硫化钼、高温石墨, 且 3 种润滑剂间的差异逐渐缩小, 即低拧紧力矩下普通锂基润滑

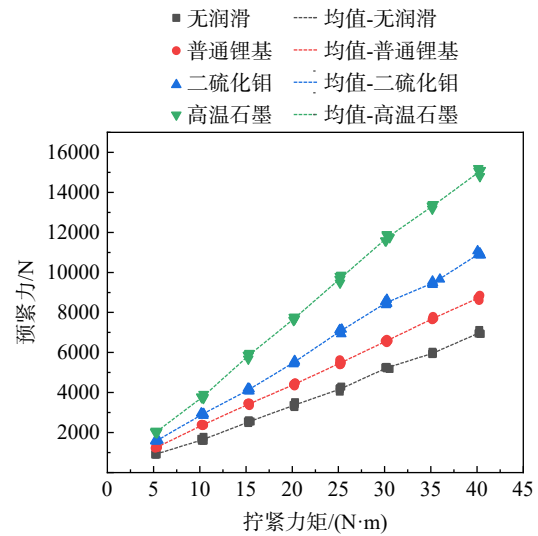


图 17 不同润滑剂下的 F - M 曲线

Fig. 17 F - M curves under different lubricants

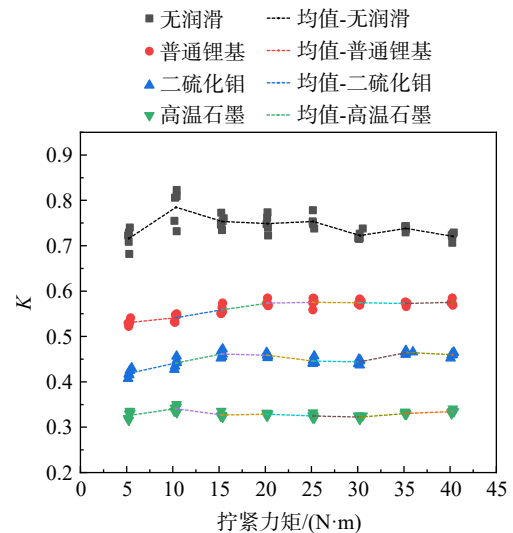


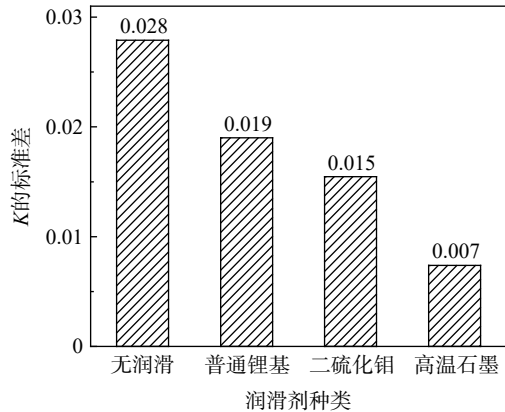
图 18 不同润滑剂下 K 的波动曲线

Fig. 18 Fluctuation curve of K under different lubricants

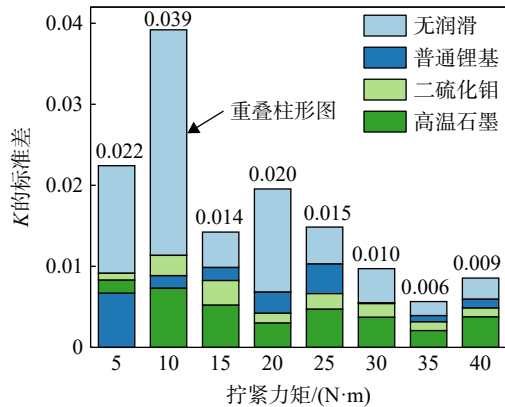
脂最能减小 K 的波动量, 大拧紧力矩下高温石墨润滑脂最能减小 K 的波动量。

如图 20 所示, 给出了 3 种润滑剂下重复拧紧对 K 的影响, 按照拧紧次数的递增, 每拧紧 5 次对应同一个输入力矩, 输入力矩也依次递增。同时给出了 8 个输入力矩下, 每拧紧 5 次 K 的波动拟合直线, 图中共有 32 段 K 的拟合直线。

从图 20 可知, 不同润滑剂下重复拧紧对 K 的影响基本相同: 不同润滑剂下的钛板在拧紧次数为 15 之前, 3 种拧紧力矩梯度下 K 的拟合直线斜率均为负值, 即充分润滑状态下, 在小拧紧力矩作用下, 随着拧紧次数的增大 K 逐渐减小; 不同润滑剂下的钛板在拧紧次数为 15 之后, 5 种拧紧



(a) 以所有拧紧力矩计算



(b) 以单个拧紧力矩计算

图19 不同润滑剂下K的标准差

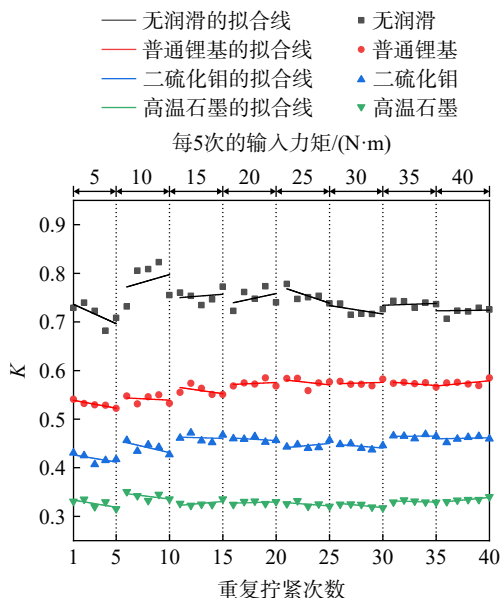
Fig. 19 Standard deviation of K under different lubricants

图20 不同润滑剂下的钛板在多次拧紧下K的波动情况

Fig. 20 Fluctuation of K in titanium plates with different lubricants under multiple tightening

力矩梯度下 K 的拟合直线近乎水平, K 的波动量极小,基本保持稳定,即充分润滑状态,在大拧紧

力矩作用下,拧紧次数对 K 无显著影响。

4 K波动成因分析

由文中第2节、第3节试验数据分析可见,在航空发动机钛合金单螺栓拧紧连接中, K 受表面粗糙度、表面润滑与重复拧紧次数影响较大。根据 K 的理论表达式(式(3))可知,式中参数 R 、 r 、 P 、 d_2 、 β 会因制造偏差及受力变形而略有差异,剩下的当量摩擦因数 f 则是导致实际拧紧过程中, K 产生较大波动的主要原因。如图21所示,给出了 K 产生波动的主要影响因素。

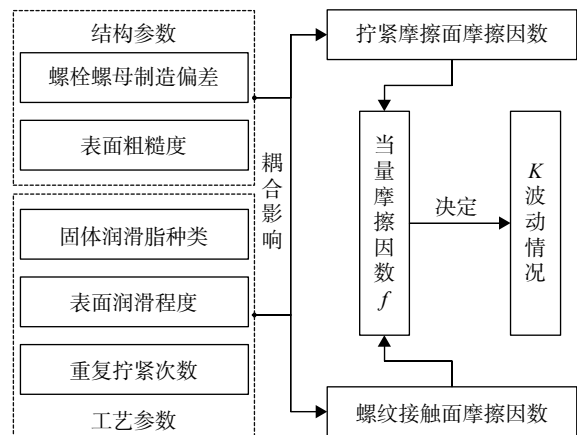


图21 K波动成因分析

Fig. 21 Cause analysis of K fluctuation

在螺栓拧紧过程中有两处相对摩擦面,一个是螺栓螺母的螺纹接触面,另一个是螺母与被连接件之间的拧紧摩擦面。相对摩擦面表面粗糙度与螺栓螺母内部质量制造偏差作为结构影响参数,相对摩擦面表面润滑程度、润滑剂种类与拧紧拧紧的次数作为工艺影响因素,结构参数与工艺参数相互耦合作用,互相影响,导致当量摩擦因数具有时变性和分散性的,因而造成 K 在一定范围内波动。

表面粗糙度、表面润滑与重复拧紧次数之间存在相互影响,但表面润滑是造成 K 波动的最主要因素。根据Bowden等的黏着理论,摩擦力是黏着效应和犁沟效应产生阻力的总和^[26]。无润滑状态下,犁沟效应起主导作用,相对摩擦面凸起的尖峰互相磨损,互相切削,随着拧紧系数的增多,表面逐渐形成规律的沟壑,表面凸起的尖峰也逐渐减少,在这个过程中表面粗糙度发生不规则的降低,导致当量摩擦因数波动较大。

有润滑时,普通锂基润滑脂在金属凹凸表面间形成油膜,降低当量摩擦因数的波动,但在表

面粗糙度较大或者拧紧次数增多后,金属表面尖峰透过油膜直接摩擦,继而导致当量摩擦因数的波动;二硫化钼与高温石墨润滑脂均是在锂基润滑脂的基础上分别添加二硫化钼与石墨固体小颗粒,固体小颗粒填充在金属表面凹槽中会降低表面粗糙度,与油脂形成物理吸附膜。同时,在高温、较大外力与重复拧紧摩擦的作用下,二硫化钼与石墨会与金属发生化学反应,改变表面粗糙度,甚至生成气体或者液体,进而形成化学反应膜,二硫化钼与石墨固体小颗粒的尺寸在接触面金属的作用下不断变化,在相对摩擦面间形成稳定的润滑膜(物理吸附膜和化学反应膜),减少了犁沟效应的发生,从而有效地降低当量摩擦因数的波动量,体现为 K 波动量的减小和稳定。

5 结 论

本文围绕航空发动机螺栓连接工艺特性,开展TC4单螺栓拧紧试验,分析可能存在的由边界条件变化引起的 K 值差异,指出拧紧过程中存在的 K 值波动的来源,并对相关因素引起的 K 值波动量进行评估,在力矩控制法下,得到如下结论:

1) 表面粗糙度对 K 的大小有明显的影响作用,但对 K 的波动无明显规律可循。初始表面粗糙度越小, K 的均值越小,即较低的表面粗糙度有利于拧紧力矩向预紧力的转化。且随着重复拧紧次数和拧紧力矩的增大,初始表面粗糙度会逐渐减小并趋于稳定,此时表面粗糙度对 K 的影响逐渐减小。

2) 重复拧紧会导致相对摩擦面的当量摩擦因数发生变化,进而引起 K 的波动。无润滑与部分润滑状态下,拧紧次数在20次之前,在小拧紧力矩作用下 K 波动较大,无明显规律,在20次之后,在大拧紧力矩作用下 K 的波动量较小,基本保持稳定。充分润滑状态下,随着拧紧次数的增大, K 先减小后趋于稳定。

3) 表面润滑改变了相对摩擦面的摩擦方式及当量摩擦因数,是造成 K 波动的最主要因素,不同润滑程度下 K 的波动差异显著。在整个拧紧力矩区间,饱和润滑状态下 K 的标准差是无润滑状态下的2.8倍,即充分润滑可以有效减少 K 的大小与波动量;在每个拧紧力矩梯度下,充分润滑和饱和润滑状态下 K 的标准差均小于其他状态下 K 的标准差。

4) 不同润滑脂对 K 的大小和波动有着显著

区别。在3种润滑脂中,高温石墨润滑脂下 K 的均值与波动量最小,效果最优,二硫化钼润滑脂其次,普通锂基润滑脂最差。但在小的拧紧力矩下,普通锂基润滑脂 K 的波动量最小。

参考文献:

- [1] SUN Wei, LI Tao, YANG Dongjian, et al. Dynamic investigation of aeroengine high pressure rotor system considering assembly characteristics of bolted joints[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 112: 104510.1-104510.14.
- [2] 洪杰, 徐翕如, 苏志敏, 等. 高速转子连接结构刚度损失及振动特性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(1): 18-25.
HONG Jie, XU Xiru, SU Zhimin, et al. Joint stiffness loss and vibration characteristics of high-speed rotor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(1): 18-25. (in Chinese)
- [3] 刘卓乾, 曹树谦, 郭虎伦, 等. 含螺栓连接转子系统非线性振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(22): 10-16, 37.
LIU Zhuoqian, CAO Shuqian, GUO Hulun, et al. Vibration characteristics of rotor systems with bolt joints[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(22): 10-16, 37. (in Chinese)
- [4] 艾延廷, 来纯强, 郝燕平, 等. 航空发动机安装边螺栓连接密封特性试验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(10): 2315-2323.
AI Yanting, LAI Chunqiang, HAO Yanping, et al. Experiment on sealing characteristics of bolted flanged connections for aero-engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(10): 2315-2323. (in Chinese)
- [5] 陈英涛, 艾延廷, 张云达. 螺栓连接预紧力对涡轮盘静力学特性影响的仿真分析[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2019, 32(1): 26-29.
CHEN Yingtao, AI Yanting, ZHANG Yunda. Simulation analysis on the effect of bolt connection preload on static characteristics of turbine disk[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2019, 32(1): 26-29. (in Chinese)
- [6] 范志强. 螺栓预紧力对航空发动机非连续转子动力学特性影响研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
FAN Zhiqiang. Study on the influence of bolt preload on the non-continuous rotor dynamics of aeroengine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] 胡良伟, 刘文光, 曾天丁. 某型发动机机匣螺栓连接结构力学特性分析[J]. *工程机械*, 2020, 51(9): 22-26, 7.
HU Liangwei, LIU Wenguang, ZENG Tianding. Analysis of mechanical characteristics of bolt connection structure of a certain engine casing[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2020, 51(9): 22-26, 7. (in Chinese)
- [8] 李伦绪, 陈果, 于平超, 等. 止口螺栓连接结构非线性刚度机理分析及数值仿真[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(2): 358-368.
LI Lunxu, CHEN Guo, YU Pingchao, et al. Nonlinear stiffness mechanism analysis and numerical simulation of rabbit-bolted connection structure[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(2): 358-368. (in Chinese)
- [9] CHEN G. Vibration modelling and verifications for whole aero-engine[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 349: 163-176.
- [10] 刘永泉, 王德友, 洪杰, 等. 航空发动机整机振动控制技术分析[J]. *航空发动机*, 2013, 39(5): 1-8, 13.
LIU Yongquan, WANG Deyou, HONG Jie, et al. Analysis of whole aeroengine vibration control technology[J]. *Aeroengine*,

- 2013, 39(5): 1-8, 13. (in Chinese)
- [11] 侯博文. 真实接触表面形貌下螺栓连接结构的力学性能[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2020.
- HOU Bowen. Mechanical properties of bolted connection structure under real contact surface topography[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 闫强. 航空发动机螺栓连接转子装配紧度检测方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- YAN Qiang. Research on assembly tightness detection method for aeroengine bolt-jointed rotor[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [13] NASSAR S A, SUN T S. Surface roughness effect on the torque-tension relationship in threaded fasteners[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J Journal of Engineering Tribology*, 2007, 221(2): 95-103.
- [14] FUKUOKA T. Evaluation of the tightening process of elastic angle control method and proposal of a practical tightening operation[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Series C*, 2006, 72(4): 1370-1377.
- [15] 高炳涛, 王小三, 钟山, 等. 基于正交设计试验方法的螺栓拧紧力矩系数影响因素研究[J]. *宇航计测技术*, 2018, 38(6): 73-77, 86.
- GAO Bingtao, WANG Xiaosan, ZHONG Shan, et al. Research on the influencing factors of bolt tightening torque coefficient based on orthogonal test[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2018, 38(6): 73-77, 86. (in Chinese)
- [16] 金文伟, 杜利清, 王常川. 不同螺纹表面对制动盘紧固件拧紧效果分析[J]. *机车车辆工艺*, 2016(2): 38-39.
- JIN Wenwei, DU Liqing, WANG Changchuan. Analysis of tightening effect of different thread surfaces on brake disc fasteners[J]. *Locomotive and Rolling Stock Technology*, 2016(2): 38-39. (in Chinese)
- [17] 王桃英, 陈泽. 浅析摩擦系数对螺栓连接稳定性的影响[J]. *工程机械与维修*, 2020, 295(增刊1): 61-64.
- WANG Taoying, CHEN Ze. Influence of friction coefficient on stability of bolt connection[J]. *Construction Machinery & Maintenance*, 2020, 295(Suppl.1): 61-64. (in Chinese)
- [18] 周俊波. 剪切载荷下单/双螺栓连接结构的松动机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- ZHOU Junbo. Self-loosening mechanism of single/double bolted joints under dynamic shear load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [19] 吴向阳, 张志毅, 田仁勇, 等. 剪切激励下润滑脂对螺栓连接结构松动行为的影响研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(11): 198-203, 211.
- WU Xiangyang, ZHANG Zhiyi, TIAN Renyong, et al. Effects of lubricating greases on self-loosening behaviour of bolted joints subject to dynamic shear load[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(11): 198-203, 211. (in Chinese)
- [20] SANCLEMENTE J A, HESS D P. Parametric study of threaded fastener loosening due to cyclic transverse loads[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(1): 239-249.
- [21] 赵兵, 张守阳, 王辉, 等. 九级盘装配连接螺栓预紧力评估与分析[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(13): 1570-1576.
- ZHAO Bing, ZHANG Shouyang, WANG Hui, et al. Evaluation and analysis on bolt pre-tightening forces of nine-stage disc assembly[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(13): 1570-1576. (in Chinese)
- [22] 赵兵, 张守阳, 王辉. 航空发动机转子螺栓连接预紧力散差分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(10): 1144-1151.
- ZHAO Bing, ZHANG Shouyang, WANG Hui. Analyses of preload variations in aeroengine rotor bolted connections[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(10): 1144-1151. (in Chinese)
- [23] ZOU Q, SUN T S, NASSAR S A, et al. Effect of lubrication on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners[J]. *Tribology Transactions*, 2007, 50(1): 127-136.
- [24] 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): 231-241.
- LI Xiaoqiang, MENG Qingkuo, DU Yifan, et al. Influence of tightening strategy on pre-tightening force of aero-engine single-bolt connection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13): 231-241. (in Chinese)
- [25] 中国航空工业总公司. HB/Z251-1993螺栓连接拧紧力矩与轴向力的关系[S]. 北京: 航空工业出版社, 1994: 1-10.
- [26] 李万钟. 粗糙表面循环微接触与摩擦学特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- LI Wanzhong. Study on micro-contact and tribological properties between rough surfaces under cyclic loading[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)