航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 25 2019 Vol. 30 No.05 20-24

航空发动机螺纹连接拧紧力矩应用分析

董红莉*，李少龙，黄南
中国航发湖南动力机械研究所，湖南 株洲 412002

摘　要：拧紧力矩的准确施加是航空发动机螺纹连接件正常工作的保障。本文分析航空发动机螺纹连接件的松动机理，并以航空发动机螺纹连接件不同使用工况为基础，探讨了螺纹连接摩擦因数、工作温度、被连接件刚度、自锁螺母锁紧性能等因素对螺纹连接拧紧力矩及预紧力的影响。结合螺纹连接件不同的应用需求，本文还简要分析了螺纹连接件分段加载和伸长量法加载两种不同装配方式对拧紧力矩的影响。

关键词：航空发动机；螺纹连接；松动机理；拧紧力矩；预紧力

中图分类号：V232　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.004

在航空发动机设计、制造、运输及维修过程中，螺纹连接件是航空产品不可缺少的基础元件，但螺纹连接件在工作时易产生松动是航空发动机设计面临的难题。为了防止螺纹松脱，拧紧螺纹副时需要施加一定的预紧载荷，即通过拧紧力矩来实现，因此如何确定螺纹连接件拧紧力矩是实际应用中必须重视的问题[1~7]。将螺纹连接的拧紧力矩准确控制在适当的范围内，对提高发动机连接可靠性、降低外场维修故障、提高整机装配质量非常重要。

国外航空、航天、机械等行业自20世纪50年代起即采用了控制预紧力的力矩安装技术及控制精度、摩擦性能的紧固件制造技术，针对螺纹连接结构安装拧紧力矩和预紧力要求的标准制定较早。20世纪80年代后，我国航空行业也开展了力矩法控制预紧力技术的研究，国内航空行业标准有HB 6125《航空发动机螺纹连接紧固件拧紧力矩》、HB/Z 251《螺栓连接紧固件拧紧力矩与轴向力的关系》等。而上述标准和规范虽然对螺纹连接件拧紧力矩做出相应的规定，但对涉及拧紧力矩和预紧力的诸多影响因素未根据具体情况予以区分，且与航空发动机螺纹连接件的实际应用特点存在较大的差异，对航空发动机研制的应用指导范围有限。

本文结合航空发动机螺纹连接件拧紧力矩的实际应用，对拧紧力矩影响因素进行简要分析，并从螺纹连接件装配、工况条件等方面说明拧紧力矩准确施加的重要性，从而为提高航空发动机连接可靠性提供应用指导。

1 螺纹连接件拧紧力矩影响因素分析

螺纹连接件的拧紧力矩主要是克服螺纹副及支撑面的摩擦力，并产生一定的轴向力，使得螺栓连接件与被连接件成为整体，满足连接结构在实际工况条件下的强度要求。

1.1 螺纹连接件松动的机理

螺纹连接是在内外螺纹的接触面和螺纹紧固件支撑面与被连接件的接触面之间产生摩擦力。当螺纹连接开始松转时，抵抗内外螺纹接触面摩擦所需的力矩为M_1，拧紧螺纹紧固件后，由螺母或螺栓头部支撑面与被连接件接触面摩擦产生的力矩为M_2，因此螺纹连接开始松动时的总力矩M为[8]：

$$M = M_1 + M_2 = Q\left[\frac{d_2}{2}\tan(\rho - \alpha) + \frac{\mu_2 D_2}{2}\right]$$

式中：Q为作用于螺栓或螺钉上的预紧力；d_2为螺纹中径；ρ为三角形螺纹摩擦角；α为螺纹螺旋线的升角，又称导角；μ_2为螺母或螺栓头部支撑面与被连接件接触面间的摩擦因

收稿日期：2019-01-07；退修日期：2019-04-09；录用日期：2019-04-20
*通信作者. Tel.：0731-28590460　　E-mail：dhl0717@163.com
引用格式：Dong Hongli, Li Shaolong, Huang Nan. Study on the application of force moment of screwing of aero-engine threaded joint[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 20-24. 董红莉，李少龙，黄南. 航空发动机螺纹连接拧紧力矩应用分析[J]. 航空科学技术，2019，30(05)：20-24.

数；D_2为螺母或螺栓头部支撑面的平均直径。

对于螺纹连接，承受静载荷作用时，其摩擦角始终大于升角，满足螺纹的自锁条件，螺纹紧固件就不会松动。但受到动载荷作用时，螺纹连接件在螺纹和支撑面上产生了微观滑移，这种相对的微观运动使摩擦因数由相对高的静态值变为很低的动态值，螺纹连接在各个方向上处于自由摩擦状态，使得螺母开始松动。多次的动载循环耗尽了螺纹连接的摩擦阻力，使其从细微的松动直到完全松脱。

从螺纹连接件松动机理可以看出，螺纹连接开始松动的总力矩主要受螺纹副及支撑面摩擦影响较大，即与螺纹连接件、被连接件的材料、表面质量、润滑条件等因素密切相关。

1.2 摩擦系数的影响

为分析摩擦因数对拧紧力矩与预紧力的影响，开展了无润滑和有润滑两种状态在室温条件下的装配模拟试验，试验数据见表1~表4，试验过程曲线如图1、图2所示。结果表明：(1)随着拧紧力矩的不断增大，预紧力基本呈线性增加，数据分布较为稳定，离散较小；(2)相同拧紧力矩条件下，有润滑条件下产生的预紧力比无润滑时的预紧力大。

表1 无润滑条件下的M5规格螺纹试验数据

Table 1 The test data of M5 screw thread without lubrication conditions

序号	拧紧力矩/(N·m)	预紧力/kN
1	4.01	3.14
2	4.02	3.79
3	4.01	2.84
4	4.01	3.05
5	4.02	2.78

表2 润滑条件下的M5规格螺纹试验数据

Table 2 The test data of M5 screw thread with lubrication conditions

序号	拧紧力矩/(N·m)	预紧力/kN
1	4.02	4.52
2	4.01	4.61
3	4.03	4.19
4	4.01	4.67
5	4.02	4.53

1.3 温度条件的影响

某发动机常温状态安装边螺栓拧紧力矩规定为：5.2～5.6N·m，而工作温度在450℃以上高温部位用同一规格的连接螺栓拧紧力矩为7.9～8.4N·m。通过螺栓材料屈服极限强度分析与拧紧力矩理论计算结果得出，当该螺栓拧紧力矩为7.9～8.4N·m时，同样满足螺栓连接静强度要求。

表3 无润滑条件下的M6规格螺纹试验数据

Table 3 The test data of M6 screw thread without lubrication conditions

序号	拧紧力矩/(N·m)	预紧力/kN
1	6.41	6.89
2	6.40	7.19
3	6.41	7.10
4	6.40	7.32
5	6.40	7.03

表4 润滑条件下的M6规格螺纹试验数据

Table 4 The test data of M6 screw thread with lubrication conditions

序号	拧紧力矩/(N·m)	预紧力/kN
1	6.41	7.45
2	6.40	7.44
3	6.41	7.93
4	6.40	7.21
5	6.40	7.30

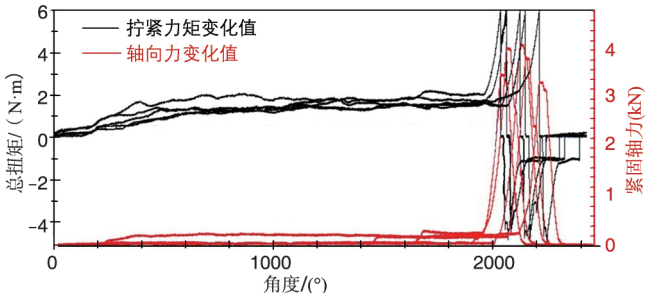

图1 M5规格螺纹模拟装配试验曲线

Fig.1 The simulated assembly test curve of M5 screw thread

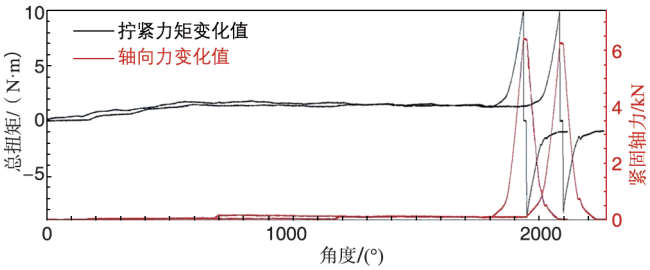

图2 M6规格螺纹模拟装配试验曲线

Fig.2 The simulated assembly test curve of M6 screw thread

在设计高温部位使用的螺栓连接时，须防止温度变化导致螺栓蠕变松弛而失效，所以在满足连接要求和螺栓弹性变形范围内，可适当增大拧紧力矩值，既能防止螺栓高温

蠕变失效，又可以保证整体连接结构的强度要求。但此时拧紧力矩不能无限制地增大，在综合分析连接件与被连接件材料的线膨胀系数及力学性能的基础上，建议施加的拧紧力矩所产生的预紧力不超过螺栓理论破坏拉力的60%。

1.4 被连接件的影响

在预紧力和静工作拉力作用下，螺栓受拉伸长，被连接件受压缩短。当承受工作拉力后，螺栓中拉力增加为总拉力：

$$Q = Q_p + \frac{C_b}{C_b + C_m} F$$

式中：Q 为螺栓总拉力；Q_p 为螺栓所受预紧力；C_b 为螺栓拉伸刚度；C_m 为被连接件压缩刚度；F 为螺栓工作拉力。

由此可知，被连接件刚度对螺栓承受的总拉力是有影响的。当被连接件中有橡胶垫圈等柔性物时，被连接件的刚度较小，螺栓相对刚度系数变大，当螺栓预紧力（或拧紧力矩）一定时，此时螺栓所承受的总拉力较大，会导致螺栓承受较大的应力，反而削弱了螺栓连接强度，因此，应减小施加的拧紧力矩值。

1.5 自锁螺母锁紧力矩的影响

自锁螺母是目前最为常用的螺纹连接件防松方式，自锁螺母装配时的拧紧力矩由螺母的自锁力矩和有效拧紧力矩两部分组成，即拧紧力矩是自锁力矩与有效拧紧力矩之和。所以，拧紧力矩取值时应注意最小值不低于自锁螺母自锁力矩的最大值。

自锁螺母的自锁性能是逐渐衰减的（如图3所示），使用到一定程度就会丧失防松功能，给出自锁螺母的使用寿命对发动机工作安全是十分重要的。装配时的各种因素、不同的工况会使同规格自锁螺母使用次数相差很大，使用次数的限定有局限性。所以，在使用自锁螺母的情况下，需要在装配及分解时检测自锁螺母自锁力矩的衰减情况，确定自锁螺母的自锁力矩后，再根据装配需求施加合适的拧紧力矩值。

2 螺纹连接件装配过程分析

螺纹连接件的预紧力一般是通过施加拧紧力矩来实现的，而相同的拧紧力矩值在不同的加载方式下得到的预紧力也不尽相同。常用的加载方式包括单纯扭矩法、转角法及伸长量法等，结合航空发动机工程实际，对分段加载与伸长量法两种装配过程作简要分析。

2.1 分段加载力矩

对于转子件上的长螺栓及自锁螺母，一般使用对称并分段施加拧紧力矩以保证转子的平衡性和受力均匀。对某发动机压紧螺母的拧紧力矩分别进行了分段加载与直接加载两种不同拧紧方式的模拟试验，并测量被连接件的压缩量变化，试验结果如图4所示。

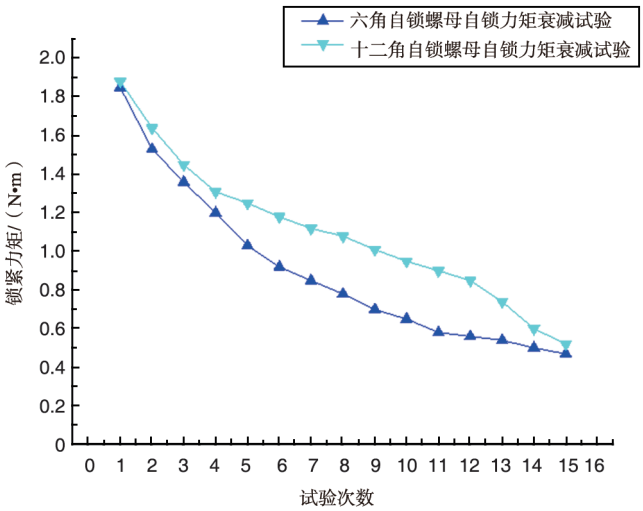

图3 自锁螺母锁紧力矩衰减变化趋势

Fig.3 The attenuation trend of locking torque of self-lock nut

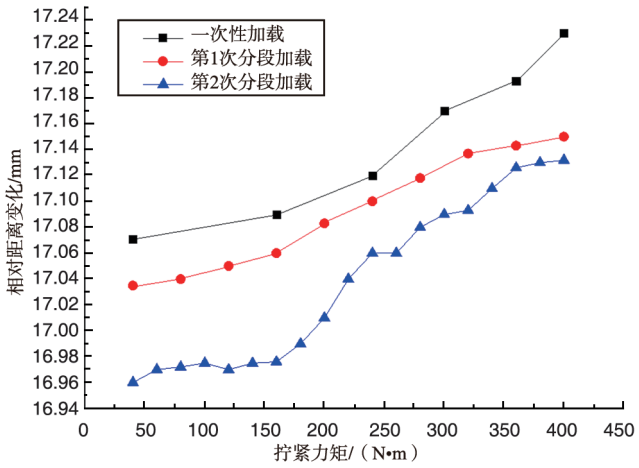

图4 螺纹连接件拧紧力矩分段加载与一次性加载对比

Fig.4 The comparison of stepped loading and one-off loading of force moment of threaded joint

从试验结果可知，被连接件在分段加载过程中所产生的压缩量比直接加载相对较小。所以，在航空产品设计及装配过程中，对于关键部位或重要部位的螺纹连接件，尤其是当拧紧力矩较大时，须综合分析分段加载与直接加载对被连接件及整体连接结构工作状态的影响。

此外，在试验过程中发现，拧紧速度对被连接件的压缩

量变化也有显著影响，慢速加载比快速加载所产生的变化小。

2.2 伸长量法加载力矩

对于预紧力精度有特殊要求的连接部位，目前国内外工程应用上较精确的测量方法是螺栓伸长量法，螺栓伸长量法根据螺栓材料特性及预紧力要求计算出螺栓伸长量，同时也要保证螺栓伸长必须在材料弹性范围内。

拧紧螺母或螺栓以便获得在材料极限下的螺栓伸长量 ΔL 计算如下：

$$\Delta L = \sigma/E\left(M + 3H/4 + Ld_3^2/d^2 - L\right)$$

式中：σ 为螺栓轴向强度；L 为被连接件长度；E 为螺栓弹性模量；M 为螺栓杆长度；H 为螺母高度；d_3 为螺纹部分最大的根部直径；d 为螺栓杆直径。

用伸长量法进行装配前，需要先进行拧紧试验，一般通过拉力机对螺栓进行“载荷—伸长”试验，做出“载荷—伸长”标定曲线。安装时，根据测得的伸长量可得出预紧力及拧紧力矩，从而实现精确的拧紧力矩值。

3 结束语

螺纹连接件拧紧力矩的研究涉及螺纹连接理论、预紧力控制、摩擦因数、防松锁紧、疲劳性能、工作温度、材料特性、连接件的力学性能等多方面因素，基于螺纹连接松动的原理，简要分析了多种因素对拧紧力矩的影响，并对螺纹连接件装配过程进行了探讨，得出以下结论：

(1)润滑条件对螺纹连接件拧紧力矩具有较大影响，涂有润滑剂比无润滑条件所产生的预紧力大。

(2)在综合考虑连接件材料特性、力学性能及连接强度的基础上，高温部位工作的螺纹连接件拧紧力矩可适当增大。

(3)被连接件刚度对拧紧力矩及预紧力的影响是显著的。

(4)对于关键或重要部位的螺纹连接件，在装配过程中须采用较精确的拧紧力矩加载方式，确保获得合理、有效的螺纹连接预紧力。

AST

参考文献

[1] 李贵轩,李建辉.螺纹联接的松动分析与防松措施[J].煤矿机械,2003(10):97-99.
Li Guixuan, Li Jianhui. Loose analysis and proof measures of thread joint[J]. Coal Mine Machinery, 2003(10): 97-99.（in Chinese）

[2] 王莉霞,马玉钦,李亚青.螺纹联接防松综述[J].贵州工业大学学报：自然科学版,2008(5):21-23.
Wang Lixia, Ma Yuqin, Li Yaqing. A survey of preventing loosing of threaded connection[J]. Journal of Guizhou University of Technology:Natural Science Edition,2008(5):21-23.(in Chinese)

[3] 殷明霞,史淑娟,江海峰.螺纹结构力矩及其衰退机理分析[J].强度与环境, 2013,40(4):31-35.
Yin Mingxia, Shi Shujuan, Jiang Haifeng. The analysis of screw connection and the torque degeneration[J]. Structure & Environment Engineering,2013,40(4):31-35.(in Chinese)

[4] 高希光,宋迎东,朱如鹏,等.航空发动机低压涡轮转子连接螺栓预紧力分析[J].机械科学与技术,2011,30(4):543-547.
Gao Xiguang, Song Yingdong, Zhu Rupeng,et al. A method for calculating the preload of connecting bolts in Aero-engine rotors[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2011,30(4):543-547.(in Chinese)

[5] 李东宁,安中彦,刘伟强.某型螺旋桨发动机连接螺栓预紧力研究[J].航空发动机,2007,33(4):26-29.
Li Dongning, An Zhongyan, Liu Weiqiang. Pretightening force investigation of joint bolt in a turboprop[J].Aeroengine,2007,33(4): 26-29.(in Chinese)

[6] 刘存.航空发动机转子连接螺栓预紧力与疲劳寿命研究[D].南京：南京航空航天大学,2008.
Liu Cun. Research on preload and fatigue life of connecting bolts in aeroengine rotors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008.(in Chinese)

[7] 王自勤.螺栓应力应变及疲劳寿命分析[J].航空制造技术,2001(4):44-46.
Wang Ziqin. Analysis of stress-strain and fatigue life of bolts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2001(4):44-46.(in Chinese)

[8] 《紧固件连接设计手册》编写委员会.紧固件连接设计手册[M].北京：国防工业出版社,1990.
Fastener Connection Design Manual Writing Committee. Fastener connection design manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.(in Chinese)

(责任编辑 皮卫东)

作者简介

董红莉(1985—) 女,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机结构设计。

Tel: 0731-28590460

E-mail: dhl0717@163.com

Study on the Application of Force Moment of Screwing of Aero-engine Threaded Joint

Dong Hongli*, Li Shaolong, Huang Nan

AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China

Abstract: The accurate application of force moment is the guarantee for normal operation of threaded joint of aero-engine. The loosing mechanism of aero-engine threaded joint is analyzed. Based on different working conditions of threaded connectors of aero-engine, the influence factors of force moment of screwing and tightening force are discussed, including friction coefficient, working temperature, stiffness of joint piece and locking performance of self-locking nut. And two assembly methods of stepped loading of force moment of screwing and elongation loading of threaded joint are researched briefly according to the different application requirements of threaded joint.

Key Words: aero-engine; threaded joint; loosing mechanism; force moment of screwing; tightening force

Received:2019-01-07; **Revised:** 2019-04-09; **Accepted:** 2019-04-20

***Corresponding author.Tel. :** 0731-28590460 **E-mail:** dhl0717@163.com