

引文格式:高学敏,石大鹏,冯韶伟,等.基于振动条件下的不同垫圈结构防松性能研究[J].航空制造技术,2022,65(13):105-109.
GAO Xuemin, SHI Dapeng, FENG Shaowei, et al. Study on anti-loosening performance of different gasket structures based on vibration[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 105-109.

基于振动条件下的不同垫圈结构防松性能研究*

高学敏^{1,2},石大鹏^{1,2},冯韶伟³,关悦^{1,2},闫路³,杨冬梅^{1,2}

- (1. 河南航天精工制造有限公司, 信阳 464000;
(2. 河南省紧固连接技术重点实验室, 信阳 464000;
3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

[摘要] 分析了航天某型号用紧固件在不同垫圈结构状态下的防松性能,以 M16 规格紧固件为研究对象,着重研究了 M16 紧固件在模拟航天某型号部段实际安装环境下,不同垫圈结构对防松性能以及支撑面摩擦系数、螺纹摩擦系数、预紧力等相关参数的影响及其相应变化的规律。结果表明,在装配条件一致的情况下,垫圈结构不同造成支撑面摩擦系数出现较大变化,同时相同安装力矩条件下轴向预紧力出现了极大的差异; NordLock 垫圈和双面斜齿垫圈防松性能最好,平垫圈+弹簧垫圈组合虽具有一定的防松能力,但失效的概率大,而平垫圈、HS 垫圈防松性能最差。

关键词: 振动; 航天型号; 摩擦系数; 预紧力; 防松性能

Study on Anti-Loosening Performance of Different Gasket Structures Based on Vibration

GAO Xuemin^{1,2}, SHI Dapeng^{1,2}, FENG Shaowei³, GUAN Yue^{1,2}, YAN Lu³, YANG Dongmei^{1,2}

- (1. Henan Aerospace Precision Machining Co., Ltd., Xinyang 464000, China;
2. Henan Key Laboratory of Fastening Connection Technology, Xinyang 464000, China;
3. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] The anti-loosening performance of fasteners for a certain type of aerospace under different gasket structures is analyzed. Taking the fasteners of M16 specification as the research object, the influence of different gasket structures on the anti-loosening performance, friction coefficient of support surface, friction coefficient of thread and clamp force and the corresponding variation of M16 fasteners under the actual installation environment of a certain type of spaceflight are studied. The results show that: under the same assembly conditions, the coefficient of friction between bearing surface changes greatly due to the different gasket structures, and there is a great difference in the axial clamp force under the same tightening torque. The anti-loosening performance of NordLock gasket and double-sided oblique gear gasket is best. Although the combination of flat gasket and spring gasket has a certain anti-loosening ability, the failure probability is high. However the anti-loosening performance flat gasket and HS gasket is the worst.

Keywords: Vibration; Aerospace model; Friction coefficient; Clamp force; Anti-loosening performance

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.13.105

在航空航天领域,紧固件产品以“数以万计、类以群分、连结构、接系统、小物大为”的特点,保障了装备的

质量可靠性。垫圈主要用于紧固件支撑面与被连接部位之间,起着保护被连接件表面、防止紧固件松动作用

* 基金项目: 中国科协青年托举人才工程资助项目(2017QNRC001)。

及其他特殊用途^[1]。运载火箭芯级捆绑助推器的捆绑连杆一般采用紧固件连接,紧固件经常采用螺栓与垫圈组合的防松方式。运载火箭在服役和运输过程中,经常受到振动、冲击和交变温度载荷等复杂外部载荷的作用发生紧固件松动失效,造成助推器与芯级之间的捆绑连接技术可靠性直接影响火箭发射。而针对不同垫圈结构在振动环境下的防松性能相关研究很少,相关学者从理论方面也提出了一些观点,刘检华等^[2-5]通过有限元分析了结构的防松性能,表明楔形垫圈在振动条件下具有良好的防松性能。王崑等^[6-8]对双螺母结构防松性能进行了一些研究,揭示了双螺母防松的原理。研究人员从原理上分析了联接松动的原因,介绍了螺纹联接的防松方法^[9-12]。GB/T10431标准详细介绍了紧固件横向振动试验方法,为进行防松性能验证提供相应操作方法^[13-15]。虽然学者们通过仿真和理论分析了部分防松结构的有效性,但是仅停留在学术探讨层面,并没有在工业界得到广泛应用。

基于上述原因,本文以某型运载火箭捆绑连杆用螺栓与不同结构垫圈组合为例,开展不同垫圈结构在振动条件下的防松性能研究。同时通过开展不同垫圈防松方式下的横向振动试验,分析不同垫圈结构条件下螺栓摩擦系数及预紧力相关规律,考核螺栓与不同垫圈组合在振动环境下防松性能,其研究成果不仅保障国家型号的质量可靠性,也具有重要学术理论价值和广泛的应用前景。

1 测试材料与方法

1.1 测试材料

本次试验采用的垫圈结构及螺栓螺母标准见表1,规格为M16,产品表面处理、热处理等性能参数一致,产品结构见图1。

1.2 测试方法与原理

不同垫圈振动试验方法为《紧固件横向振动试验方法》GB/T 10431—2008,横向振动试验是研究分析紧固件防松性能的重要手段。1969年德国Junker研

究发现了容克振动防松原理,设备原理图见图2,即往返的横向振动是紧固件产生松脱的主要原因。试验装置见图3。

2 防松性能评估

按照GB/T 10431—2008规定方法进行试验,5种不同结构垫圈残余预紧力百分比平均值如图4所示。

(1)平垫圈测试:抽样5件,采用扭矩法安装,实测轴向夹紧力为120~143 kN,平垫圈5件试样在振动500次左右时失去紧固能力,轴力急速衰减。

(2)弹垫+平垫圈测试:抽样5件,采用扭矩法安装,实测轴向夹紧力为110~114 kN,弹垫+平垫圈组合试样在振动1000次时失去紧固能力,轴力急剧衰减。

(3)HS垫圈测试:抽样5件,采用扭矩法安装,实测轴向夹紧力为105~115 kN,HS垫圈5件试样在500次时失去紧固能力,轴力急速衰减,1000次时全部衰减为0。

(4)双面斜齿垫圈测试:抽样5件,采用扭矩法安装,实测轴向夹紧力为74~92 kN,双面斜齿垫圈5件试样在完成3000次振动试验后,残余轴力与初始轴力的值仍保持在74%~82%,防松性能优良。

(5)NordLock垫圈测试:抽样5件,采用扭矩法安装,实测轴向夹紧力为75~86 kN,NordLock垫圈5件试样在完成3000次振动试验后,残余轴力与初始轴力的值仍保持在75%~84%,防松性能优良。



图1 不同垫圈产品结构

Fig.1 Different gasket product structure

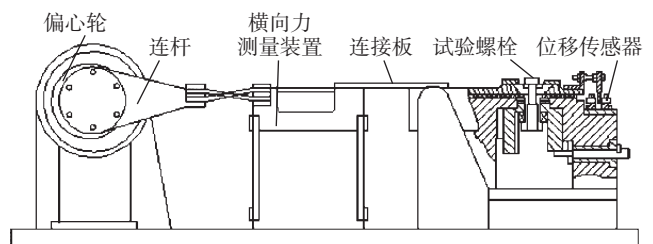


图2 横向振动试验设备原理图

Fig.2 Schematic diagram of transverse vibration test equipment

表1 试验材料属性

Table 1 Test material properties

序号	垫圈结构	螺栓标准	螺母标准
1	标准弹垫+平垫	GB/T 5782—2000	ISO 7042
2	平垫	GB/T 5782—2000	ISO 7042
3	Nordlock 垫圈	GB/T 5782—2000	ISO 7042
4	双面斜齿垫圈	GB/T 5782—2000	ISO 7042
5	HS 垫圈	GB/T 5782—2000	ISO 7042

同等试验条件下的横向振动测试表明, NordLock 垫圈和双面斜齿垫圈防松性能最好; 平垫圈加标准弹簧垫圈组合虽具有一定的防松能力, 但失效的概率大; 而平垫圈、HS 垫圈抗震防松能力最差。取不同垫圈试样各 10 件进行对比测试, 结果见图 5。

3 防松性能差异机理分析

3.1 紧固件拧紧时力学模型

如图 6 所示, 紧固件及垫圈在安装的过程中, 内外螺纹形成螺旋副, 在驱动力矩和轴向力作用下相对运动。力学模型可以简化为作用在中径上的直线运动,

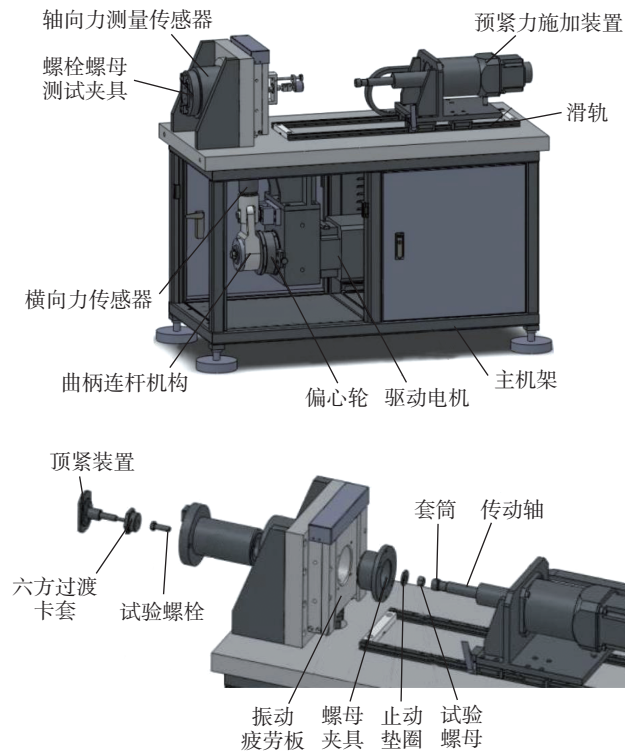


图 3 横向振动试验装置

Fig.3 Transverse vibration test device

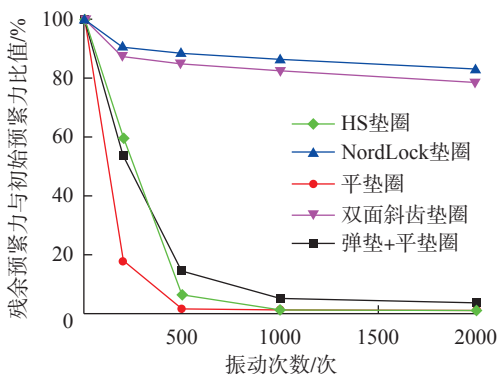


图 4 不同结构垫圈残余预紧力百分比曲线

Fig.4 Percentage curve of residual clamp force with different structures

即水平推力推动滑块沿中径展开的斜面上的运动 (图 6 (a))。

拧紧时等效为滑块沿斜面匀速上升, 维持滑块匀速运动所需的推力为 $F = F_a \tan(\psi + \rho)$, 产生的螺纹扭矩为

$$T_{th} = F \frac{d_2}{2} = F_a \frac{d_2}{2} \tan(\psi + \rho) \text{ (图 6 (b))。}$$

拧松时等效为滑块沿斜面匀速下降, 维持滑块匀速

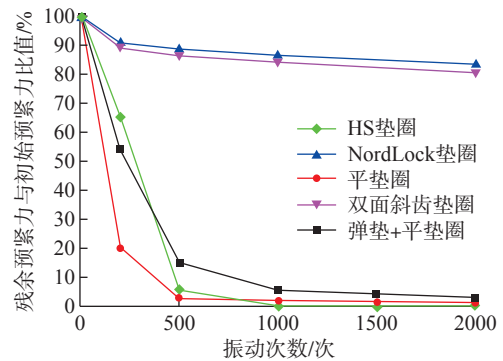


图 5 不同垫圈各 10 件的结构残余预紧力测试均值

Fig.5 Average value of residual clamp force per 10 pieces with different gasket structures

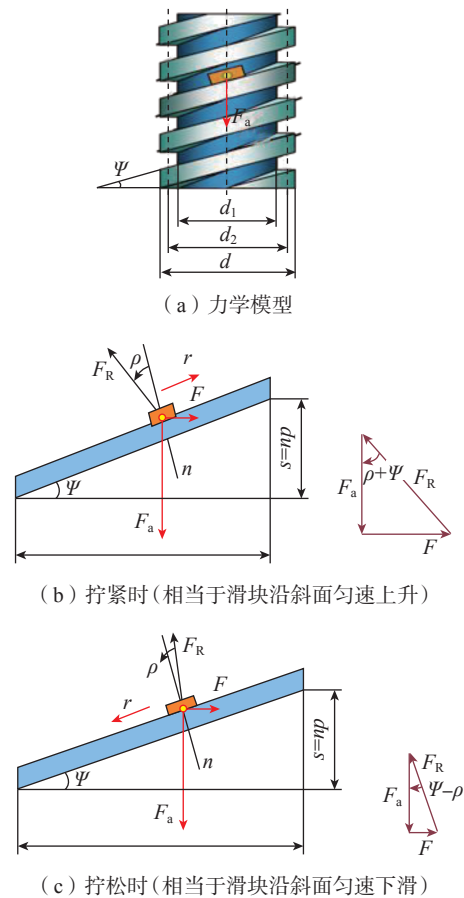


图 6 力学模型图

Fig.6 Diagram of mechanical model

运动所需的平衡力为 $F = F_a \tan(\Psi - \rho)$ 。产生的螺纹扭矩为 $T_{th} = F \frac{d_2}{2} = F_a \frac{d_2}{2} \tan(\Psi - \rho)$ (图 6 (c))。

理论上,螺栓拧紧过程中安装扭矩 T 、螺栓预紧力 F_y 与摩擦系数及螺纹尺寸之间有如下关系:

$$T = \frac{F_y}{2} \left\{ d_p \frac{\frac{\mu_s}{\cos \alpha'} + \tan \beta}{1 - \frac{\mu_s}{\cos \alpha'} \tan \beta} + d_w \mu_w \right\} \approx \frac{1}{2} F_y \left\{ d_p \frac{\mu_s}{\cos \alpha'} + d_p \tan \beta + d_w \mu_w \right\}$$

式中, T 为施加的扭矩; F_y 为扭矩产生的轴向拉力; μ_w 为支撑面摩擦系数; μ_s 为螺纹副摩擦系数; d_p 为螺栓有效直径; d_w 为支撑面摩擦圆等效直径; α' 为垂直截面内的螺纹牙形半角; β 为螺纹升角。

3.2 防松性能差异的原因分析

采用多功能螺栓紧固分析系统测试紧固件及垫圈在拧紧过程中的预紧力及摩擦系数等相关参数,设备见图 7,试验装置见图 8。

测试方法按 GB/T 16823.3—2010《紧固件 扭矩—

夹紧力试验》,测试结果见图 9。

通过对支撑面摩擦系数及螺纹摩擦系数对比发现,5种垫圈组合支撑面摩擦系数较螺纹摩擦系数变化大,在支撑面上表现出了极为明显的差异分化,其支撑面摩擦系数排序为: NordLock 垫圈 > 双面斜齿垫圈 > 平垫圈 > HS 垫圈 > 弹垫 + 平垫圈,即 NordLock 垫圈与双面斜齿垫圈为第 1 梯队,平垫圈为第 2 梯队,HS 垫圈和弹垫 + 平垫圈为第 3 梯队。

3.3 防松性能差异的主要因素

通过对比分析 Nordlock 垫圈、双面斜齿垫圈、平垫圈、HS 垫圈、弹垫 + 平垫圈 5 种不同防松结构形式的横向振动试验,并考核其防松性能。

采用多功能螺栓紧固分析系统测试紧固件及垫片在拧紧过程中的支撑面摩擦系数及螺纹摩擦系数等相关参数,发现 NordLock 垫圈和双面斜齿垫圈支撑面摩擦系数及螺纹摩擦系数均较其他结构摩擦系数大,由力学模型中螺栓拧紧过程中安装扭矩 T 、螺栓预紧力 F 与摩擦系数 μ 及螺纹尺寸之间形成的经典扭拉关系式可知, NordLock 垫圈和双面斜齿垫圈结构所承载的支撑



图 7 多功能螺栓紧固分析系统

Fig.7 Multi function screw fastening analysis system

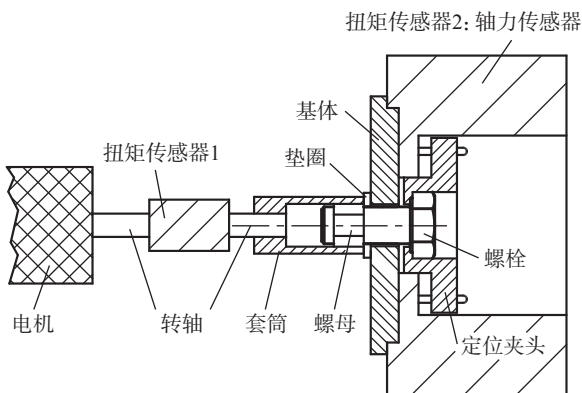
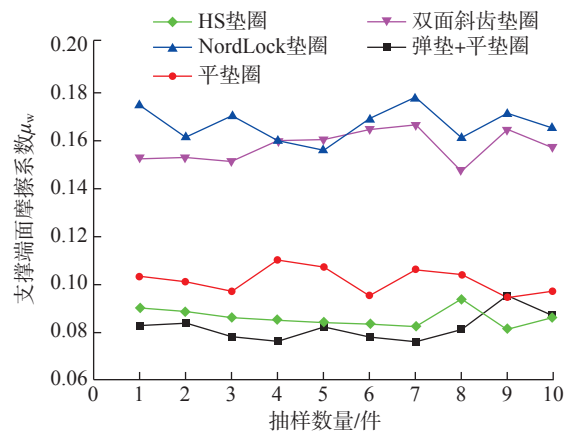
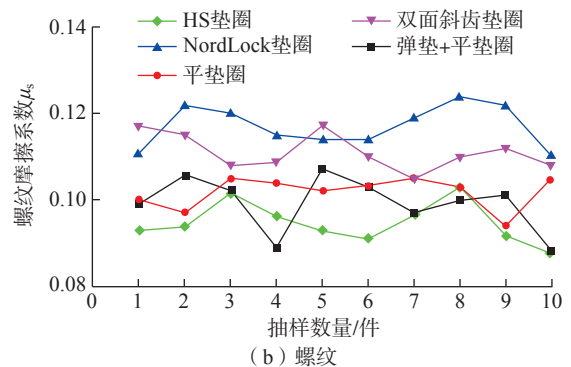


图 8 试验装置图

Fig.8 Diagram of test device



(a) 支撑面



(b) 螺纹

图 9 不同结构垫圈支撑面和螺纹摩擦系数

Fig.9 Friction coefficient of support surface and thread of gasket with different structures

面扭矩与螺纹扭矩较其他 3 种结构大,因此在振动、冲击等条件下,松脱过程中所要克服的摩擦扭矩,防松性能最佳。而摩擦系数不仅与产品结构有关,与产品材料、硬度、表面处理、润滑条件、表面粗糙度等因素也息息相关。

4 结论

本文以 M16 规格紧固件为研究对象,分析了航天某型号用紧固件在不同垫圈结构状态下的防松性能,着重研究了 M16 紧固件在模拟航天某型号部段实际安装环境下,不同垫圈结构对防松性能以及支撑面摩擦系数、螺纹摩擦系数、预紧力等相关参数的影响及其相应变化的规律。

(1) 在装配条件一致的情况下,垫圈结构不同造成支撑面摩擦系数出现较大变化,同时相同安装力矩条件下轴向预紧力出现了极大的差异;

(2) NordLock 垫圈和双面斜齿垫圈防松性能最好,平垫圈+弹簧垫圈组合虽具有一定的防松能力,但失效的概率大,而平垫圈、HS 垫圈防松性能最差;

(3) 得出了不同垫圈结构对防松性能以及支撑面摩擦系数、螺纹摩擦系数、预紧力相应变化的影响规律,为航天型号可靠性装配中防松垫圈的选择提供指导意见。

航天型号紧固件在运输及服役过程中,受震动、冲击等外力因素影响在所难免,因此型号用紧固件及垫圈要考虑防松性能。影响防松性能的摩擦系数等参数不仅与产品结构有关,与产品材料、硬度、表面处理、润滑条件、表面粗糙度等因素也息息相关。为有效保障型号用紧固件质量可靠性,分析研究其相关防松可靠性对提升型号装配水平具有极其重要意义。

参考文献

- [1] 李英亮. 紧固件概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
LI Yingliang. Fasteners basics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [2] 刘检华, 巩浩, 丁晓宇. 振动条件下楔形垫圈的防松性能 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 38-44.
LIU Jianhua, GONG Hao, DING Xiaoyu. Anti-loosening performance of wedge under vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 38-44.
- [3] 张翼, 吴云峰, 方红荣, 等. 楔形螺纹紧固件性能试验研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2020, 372(1): 123-126.
ZHANG Yi, WU Yunfeng, FANG Hongrong. Experimental research on characters for wedging screw thread locknuts[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020, 372(1): 123-126.
- [4] 周润芬. 紧固件连接设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
ZHOU Runfen. Fastener connection design manual[M]. Beijing:

National Defense Industry Press, 1990.

[5] 王先逵, 李旦. 机械加工工艺手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

WANG Xiankui, LI Dan. Machining process manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

[6] 王崑, 徐浩, 马跃, 等. 振动工况下的螺栓连接自松机理研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 198-202.

WANG Wei, XU Hao, MA Yue, et al. Self loosening mechanism of bolted joints under vibration[J]. Journal of Shock and Vibration, 2014, 33(22): 198-202.

[7] 李宏天, 王宗彦. 双螺母防松联接螺母合理使用研究 [J]. 矿山机械, 2013, 41(3): 117-119.

LI Hongtian, WANG Zongyan. Study on reasonable application of nuts double-nut anti-loosening connection[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(3): 117-119.

[8] 王崑, 徐浩, 马跃, 等. 螺距和孔距对螺栓连接自松弛的影响 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2014, 15(1): 87-90.

WANG Wei, XU Hao, MA Yue, et al. The effect of thread pitch and clearance on self-loosening of bolted joints[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(1): 87-90.

[9] 侯亚萍. 螺纹联接的防松方法 [J]. 机械工程师, 2010(7): 18-19.

HOU Yaping. The loosening prevention methods of threaded connection[J]. Mechanical Engineer, 2010(7): 18-19.

[10] IZUMI S, YOKOYAMA T, KIMURA M, et al. Loosening-resistance evaluation of double-nut tightening method and spring washer by three-dimensional finite element analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 18: 1510-1519.

[11] YOKOYAMA T, IZUMI S, SAKAI S, et al. Loosening-resistance evaluation of double-nut tightening method spring washer and conical spring washer finite element study[C]//ASME Pressure Vessel and Piping Division Conference. Chicago IL, 2008.

[12] IZUMI S, SAKAI S, KIMURA M, et al. Evaluation of loosening proof performance of plain washer and flange nut by three-dimensional finite element analysis[J]. Journal Solid Mechanical Material Engineering, 2006, 72: 1292-1295.

[13] IZUMI S, YOKOYAMA T, IWASAKI A, et al. Three-dimensional finite element analysis of tightening and loosening mechanism of threaded fastener[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(4): 604-615.

[14] BICKFORD J. Handbook of bolts and bolted joints[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.

[15] 中国机械工业联合会. 紧固件横向振动试验方法: GB/T 10431—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

China Machinery Industry Federation. Test method for lateral vibration of fasteners: GB/T 10431—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

通讯作者: 高学敏, 高级工程师, 研究方向为试验技术与失效分析。

(责编 七七)