

高温环境复合材料螺栓连接振动的防松试验*

王旻睿^{1,2}, 谭志勇³, 何顶顶¹, 姜东^{1,4}, 费庆国¹

(1. 东南大学空天机械动力学研究所 南京, 211189) (2. 东南大学工程力学系 南京, 210096)

(3. 北京临近空间飞行器系统工程研究所 北京, 100076) (4. 南京林业大学机械电子工程学院 南京, 210037)

摘要 具有耐高温、轻质、高强等特点的复合材料及其连接结构可满足航空航天领域的迫切需求, 已广泛应用于工程中。为比较高温振动环境下不同复合材料螺栓连接形式的防松效果, 进行了常/高温条件复合材料搭接板的随机振动试验研究。以搭接结构固有频率为评判量, 通过对比试件承受振动载荷作用前后的固有频率变化, 研究了常/高温环境下高温胶、双螺母防松形式, 以及沉头螺栓张角等因素在给定随机振动载荷下对搭接结构连接刚度的影响。研究表明: 常温随机振动条件下双螺母防松、60°沉头螺栓的防松性能更好; 高温环境下, 高温胶防松、30°沉头螺栓连接形式性能较优。

关键词 复合材料; 搭接结构; 高温振动试验; 连接性能; 螺栓防松

中图分类号 TB332; TH113.1

引言

螺栓连接具有拆装方便、易于检修等优点, 广泛应用于工程结构的连接中。与传统的金属螺栓连接相比, 复合材料螺栓连接在复杂载荷条件下具有高强度、耐高温等优势。为保证复合材料螺栓连接结构的安全及可靠性, 需对复杂的工作环境下螺栓连接的性能进行测定及评估。

针对螺栓连接性能的测试一般基于经典的 Junker 试验开展^[1-2], 此方法通过对试件施加横向交变载荷激励、测量试件夹紧力大小变化, 以激励循环次数、夹紧力下降比例作为衡量螺栓防松能力的指标。Junker 试验的激励频率一般是固定的, 但螺栓连接的防松性能对于不同频率的激励存在差异^[3-4]。Zadoks 等^[3]开展的螺栓防松试验显示, 螺栓受扫频形式振动载荷时其预紧力在某一频率段出现突降。基于上述情况, 对于实际承受随机荷载的连接件应开展直接对结构施加随机振动荷载的试验^[5-6]。针对复合材料构件的连接, 金属螺栓连接方式作为成熟的连接技术, 已应用在复合材料构件连接中^[7-8]。高温环境下, 由于金属螺栓和复合材料板的热物理性质存在巨大差异, 两者之间存在的热匹配问题造成板-螺栓膨胀率不一, 使预紧力降低, 对

连接可靠性产生负面影响^[9-10]。为避免此类问题, 热性质相近或相同的复合材料螺栓连接得到应用。

航空航天器为降低结构质量、提高比强度, 大量使用碳纤维复合材料。由于这些结构往往工作在高温环境下, 其连接特性无法简单地由常温状态下的连接特性推定, 需要测试连接结构在高温、振动环境下防松性能。国内对于复合材料连接的振动试验研究尚处于起步阶段, 相关试验研究文献多见常温试验^[11-15]。郝秉磊等^[11]制备了 C/SiC 复合材料螺栓及搭接板, 测试了其不同预紧力下的常温防松性能。裴瑞光等^[12]研究了温度载荷对螺栓预紧力松弛的影响, 该试验温度最高为 70°C、松弛时间为数十小时, 与航天器发射时面临的短时、高温环境存在较大差异。张振等^[13]对复合材料螺栓连接件开展了定频率振动疲劳试验, 该试验的低频率、长时间激励也不能覆盖航天器面临的载荷环境。已有针对复合材料螺栓的高温连接性能试验^[16-18]多测试其静力性能, 而未对其在振动下的防松性能做出评估。Böhrk 等^[17]对某再入防热结构的复合材料螺栓进行了高温静态扭转试验, 评估了高温循环加载对螺栓紧固力矩的影响。

笔者针对复合材料连接件, 研究不同防松形式和螺栓参数对其高温环境下振动防松性能的影响。设计利用热振动试验系统, 开展了不同载荷组合下

* 国家自然科学基金资助项目(11572086, 11602112)
收稿日期: 2017-07-31; 修回日期: 2017-09-19

的高温随机振动试验,并比较了防松形式和螺栓参数对连接件受载前后基频的影响,以评估搭接板的连接性能。

1 理论基础

固有频率是结构的基本动力学特性之一,扫频测试作为对结构固有频率的测试方法,操作简单易行。结合已有文献^[19-20]的理论分析,螺栓搭接板结构的固有频率与螺栓的预紧力之间存在正相关关系,因此可将结构固有频率的变化作为定性判断螺栓预紧力变动的依据。

根据赫兹接触理论和 Greenwood-Williamson 接触模型,两粗糙表面间接触可简化为一等大而不等高微凸体组成的粗糙表面与理想平面的接触,粗糙表面微凸体峰高服从正态分布。此时的法向接触刚度^[19]表示为

$$k_n = 2\eta AE' (\beta\sigma)^{\frac{1}{2}} \int_h^{\infty} (s-h)^{\frac{1}{2}} \varphi^*(s) ds \quad (1)$$

其中: η 为表面微凸体密度; A 为法向接触面积; E' 为两接触材料的合成弹性模量; β 为微凸体半径以及; σ 为微凸体高度标准差。

$$E' = \left(\frac{1+\nu_1^2}{E_1} + \frac{1+\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中: $E_n, \nu_n (n=1,2)$ 分别为两材料的弹性模量和泊松比。

η, β, σ 均由两粗糙表面形貌测量值合成,积分部表征了高斯分布下发生接触微凸体的相关参数

$$\int_h^{\infty} (s-h)^{\frac{1}{2}} \varphi^*(s) ds \quad (3)$$

对式(1)代入适当的数值即可得到各类接触面的法向接触刚度。根据文献^[19]给出的实例,由式(1)得到的界面连接刚度随界面夹紧力的增大而递增,但增幅逐渐减小,最终趋于恒定。此变化趋势同已有的试验结论^[21-22]相吻合。

将螺栓连接界面简化为弹簧质量系统^[20],连接界面的微凸体接触振动方程为

$$mz'' + cz' + k_n(z+z_F) = F \quad (4)$$

其中: z_F 为螺栓连接界面静变形量; m, c 分别为连接结构质量及阻尼系数。

因此该振动模型固有频率为

$$\omega_s^2 = k_n/m \quad (5)$$

其中: k_n 为螺栓连接界面在平衡位置的等效法向接触刚度。

由于有意义的频率值恒为正,式(5)可写成

$$\omega_s = \sqrt{k_n/m} \quad (6)$$

由于式(6)中 k_n 随预紧力单调增加,连接界面

的固有频率 ω_s 与预紧力存在正相关关系。

考察整个螺栓搭接板的法向刚度,搭接板的刚度可分为连接区域及其两侧共三部分,三部分间为串联关系^[23],即

$$k = \left(\frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_n} \right)^{-1} \quad (7)$$

其中: k_a, k_b 为连接区域两侧板的刚度。

由于式(7)仅有 k_n 为变量,故整体法向刚度 k 、搭接板整体固有频率 ω 的变化趋势与 k_n 和 ω_s 相同,即与预紧力呈正相关关系。

根据上述理论分析,可得到螺栓预紧力与搭接板结构固有频率 ω 的定性关系。在搭接板各部分弹性模量等材料参数恒定的情况下,螺栓预紧力越大,搭接板的固有频率越高。这一结论与以往的有限元及试验研究结果是一致的^[24-26],故本试验通过对比加载前后试样固有频率变化判断其松动情况。

2 试验研究

以复合材料搭接板为试验对象,实现试样在常/高温条件下的随机振动加载以及防松性能测试。试验包括高温胶、双螺母两种防松形式,30°和60°两种沉头螺栓;试验温度包括常温(12℃)和高温(950℃);载荷包含高、低量级随机振动载荷的组合。

2.1 试样参数

螺栓搭接板试样如图1所示,在板对角处开孔,螺栓位于板上2/3位置处,螺栓直径为10mm。板上开孔直径依据螺栓杆及沉头尺寸决定。

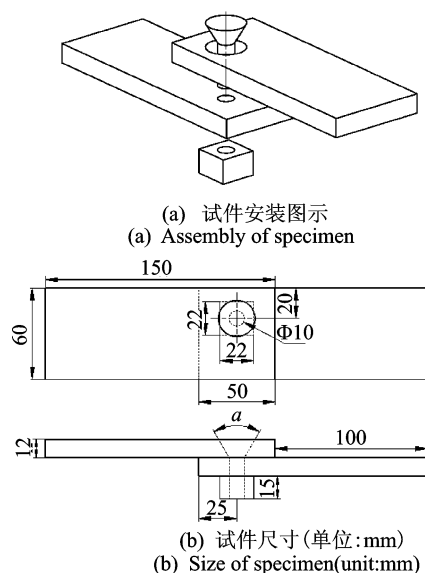


图1 搭接板连接示意图

Fig. 1 Sketch of bolted plates

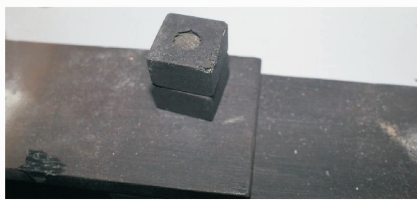
防松形式包括高温胶防松和双螺母防松,高温胶连接为螺钉-螺孔板连接(无螺母),双螺母连接采用螺栓螺母连接,螺母为方形螺母。沉头螺栓张角 α 为 30° 和 60° 。搭接板实物如图 2 所示。



(a) 试样正面
(a) Front of specimen



(b) 高温胶试样背面
(b) Back of high temperature adhesive specimen



(c) 双螺母试样背面
(c) Back of double-nutting specimen

图 2 搭接板实物图

Fig. 2 Test sample of bolted plates

2.2 振动试验

为实现复合材料连接结构的高温随机振动及数据采集,笔者设计了如图 3、图 4 所示的热振动试验系统,该系统由温控系统、激振系统和采集系统构成。高温环境箱及测温、控温设备构成温控系统;振动试验台及控制电脑构成激振系统;光幕式激光位移计及采集、分析电脑构成采集系统。在激振端施加随机载荷,通过温度控制系统对试件加热区域进行温度控制,利用光幕式激光位移计对悬臂端位移进行测量。其中,高温环境箱由 2 块电炉丝加热板和 2 块隔热板交错拼接而成,试件全部置于高温环境箱内,搭接板上下表面与电炉丝相对。温控系统实物如图 5 所示。

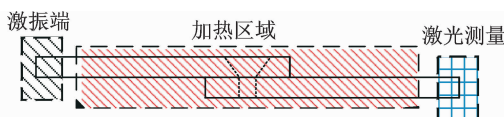


图 3 热振动试验示意图

Fig. 3 Sketch of high-temperature test

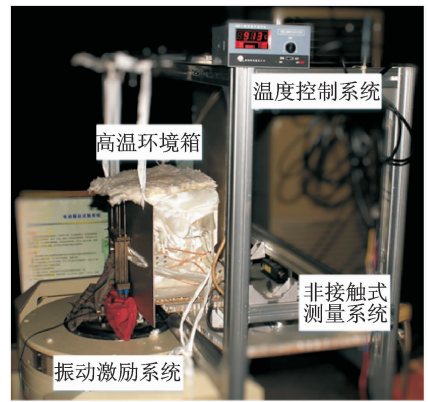
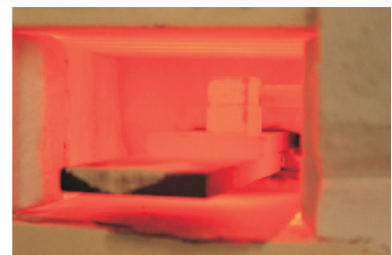


图 4 热振动试验系统

Fig. 4 Thermal vibration system



(a) 未工作状态
(a) Post-running status



(b) 工作状态
(b) Running status

图 5 高温环境箱

Fig. 5 High temperature environmental chamber

试验过程中,振动信号在连接件的一端加载,高温环境箱置于连接件中部并包裹连接件,板的另一端与非接触式位移计接触。通过高温环境箱对试验件进行高温加热,利用振动激励系统给试验件施加激励载荷(对数扫频、随机激励),利用非接触式激光位移计测量结构的振动响应,最终得到复合材料试验件的高温振动试验数据。

具体试验装置如下:

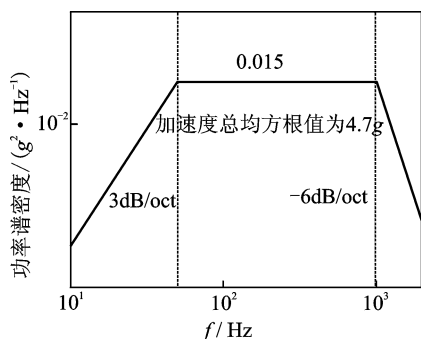
1) 振动激励系统,电动振动试验台的型号为 D-600-5,试验频率为 $5 \sim 3\ 000$ Hz,额定加速度为 $100g$;

2) $1\ 000^\circ\text{C}$ 高温环境箱,控制精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$;

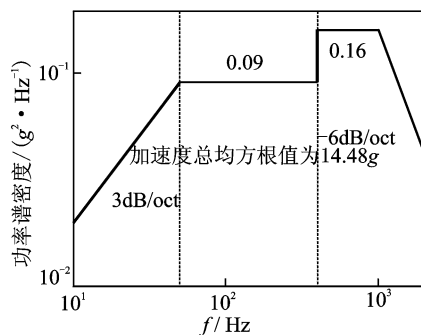
3) 温度控制系统,利用温度传感器和功率放大器,手动控制加载温度环境;

4) 非接触式测振控制系统,包括 ODC 1200-10 光幕式激光位移传感器(德国 Micro-Epsilon 公司)、基于 LabVIEW 自行开发的非接触式激光振动频率和振幅实时测控软件。

试验中振动激励系统加载的载荷含扫频测试信号与随机振动测试信号两种。扫频测试信号为对数扫频,由低到高扫频一次。随机振动测试信号的大小与持续时间依据该结构在工作状态时的典型载荷信号包络确定,通过高、低量级两种载荷谱组合而成。两激励信号组分的激励谱函数如图 6 所示。



(a) 低量级载荷谱
(a) Low-level load spectrum



(b) 高量级载荷谱
(b) High-level load spectrum

图 6 随机振动激励谱函数

Fig. 6 Spectrum of random vibrational excitation

2.3 试验设计与流程

试件工况为两种沉头尺寸的螺栓(钉)与两种防松形式的组合,如表 1、表 2 所示。为保证不同试件的预紧力水平具有可比性,使用数显式扭力扳手控制螺栓连接件的扭矩。

由上面理论推导可见,在排除试件本身材料参数影响后,搭接板结构的固有频率变化与其预紧力水平呈正相关。该搭接板材料弹性模量随温度变化幅度很大,如图 7 所示。为排除温度对搭接板固有频率的影响,在试验过程中的每个阶段,即升温过程

前后、随机振动加载前后,分别对搭接板试样进行扫频试验,以区分温度变化和随机荷载加载对搭接板固有频率的影响。试验流程如图 8 所示。

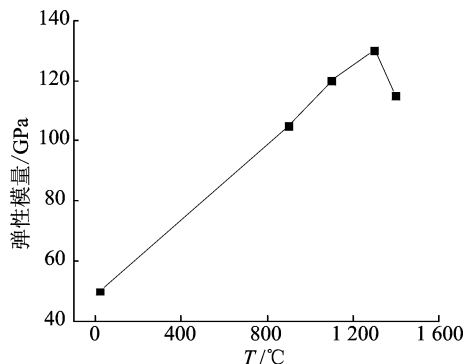


图 7 该复合材料温度-弹性模量曲线

Fig. 7 Elasticity modulus - temperature curve of current composite material

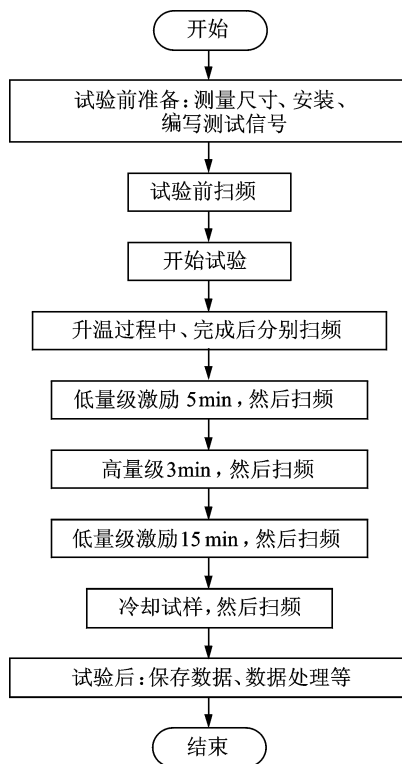


图 8 试验流程图

Fig. 8 Test flow chart

关键步骤如下:

- 1) 试验前对试样进行扫频;
- 2) 升温完成后、施加随机激励前进行扫频;
- 3) 在每步随机激励施加完成后,均进行扫频;
- 4) 降温至室温后进行扫频。

表 1 高温试验工况

Tab. 1 Cases of high-temperature test (CH₁ ~ CH₅)

试样编号	螺栓参数	防松形式	拧紧力矩/ (N·m)	试验 温度/°C
CH ₁	30°螺钉	高温胶	4.0	950
CH ₂		无	4.0	
CH ₃	60°螺钉	高温胶	4.0	
CH ₄		无	2.7	
CH ₅	60°螺钉	双螺母	4.0	

表 2 常温试验工况

Tab. 2 Cases of normal-temperature test (CN₆ ~ CN₉)

试样编号	螺栓参数	防松形式	拧紧力矩/ (N·m)	试验 温度/°C
CN ₆	30°螺栓	双螺母	4	12
CN ₇	60°螺栓	双螺母	4	
CN ₈	30°螺钉	高温胶	4	
CN ₉	60°螺钉	高温胶	4	

3 结果与分析

由非接触式测振控制系统经数字滤波、放大等处理,导出包含频响函数曲线数据的 LabVIEW 数据文件,然后根据各工况的频响函数曲线,得到对应的频率值。

试验选择了 2.3 节所述 9 种工况依次进行了试验,分别分析了防松措施、螺栓参数两个因素对于该搭接板的承受随机荷载前后的频响特性变化的影响,以判断各因素对螺栓防松的影响。

3.1 常温随机振动试验

常温随机振动试验开展了针对高温胶、双螺母两种防松形式试样的随机振动荷载试验,试验结果如图 9(a,b)所示。

对比图 9(a) 30°螺栓(钉)双螺母、高温胶两种防松形式下的试验结果,可见常温下承受随机振动荷载后,搭接板固有频率整体呈现下降的特征。其中,高温胶试样受载后频率下降明显,下降比例为 13.8%,而双螺母试样受载后频率下降仅 1.2%。

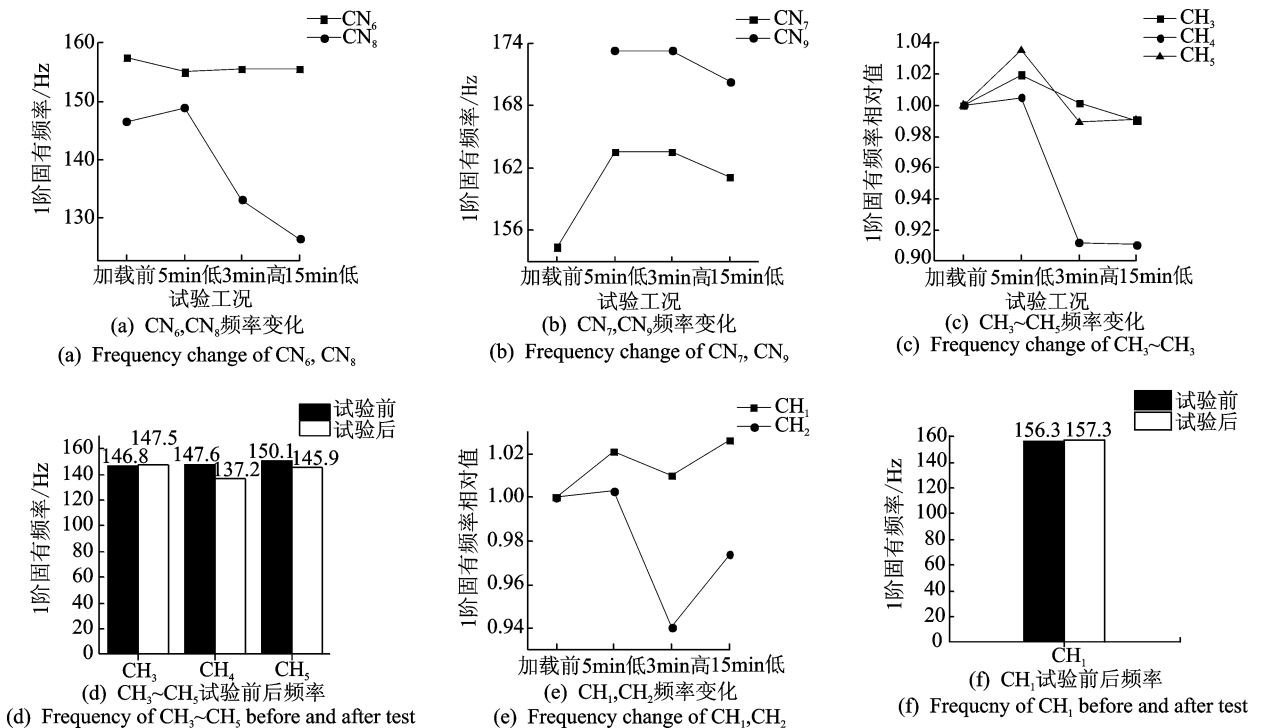


图 9 搭接板常/高温振动防松测试结果对比

Fig. 9 Result comparison of normal/high temperature vibration anti-loosening test

对比图 9(b) 60°螺栓(钉)双螺母、高温胶两种防松形式下的试验结果,可见承受随机振动荷载后,两试样固有频率整体未出现下降,双螺母试样受载

后固有频率还出现了明显上升。

通过上述对比分析,可见常温随机振动试验中,高温胶防松试样对螺栓松动的抑制作用劣于双螺母

防松试样,且60°沉头螺栓(钉)对松动的抑制作用优于30°沉头螺栓(钉)。

3.2 高温随机振动试验

高温随机振动试验包括高温胶、双螺母两种防松措施处理的搭接板试样及未进行防松处理的螺钉连接对照组。为便于比较各试件承受随机荷载前后固有频率变化比例,以各试件升温完成后(950℃)扫频频率为基准,受载后扫频频率均表示为相对值。试验结果如图9(c~f)所示。

60°螺栓(钉)试验结果如图9(c,d)所示,可见3件试样在受载前后固有频率变化特征一致,均呈现“升高-降低-降低”的特点。经历全部载荷过程后,3件试样的固有频率较受载前均出现下降,其中高温胶试样最大下降幅度最小(0.9%),无防松措施的对照组最大下降幅度最大(8.9%)。双螺母及对照试样冷却后的固有频率相较升温前也有降低,说明随机荷载对试样的固有频率的损失效果是永久的。

30°螺钉高温胶试样及对照组(见图9(e,f))的试验结果与60°试样有所不同,受载前后的固有频率呈现“升高-降低-升高”的特点,且高温胶试样受载后固有频率未见下降,冷却后相比试验前固有频率也未见下降。

通过上述对比分析,可见高温随机振动试验中,两种防松措施均有效果,且高温胶防松试样对螺栓松动的抑制作用优于双螺母防松试样,30°沉头螺栓(钉)防松效果稍优于60°沉头螺栓(钉)。

4 结论

1) 常温振动条件下,采用双螺母防松形式、60°沉头螺栓连接形式的试样试验后固有频率下降程度分别小于采用高温胶防松、30°沉头螺栓的试样。因此,常温随机振动条件下双螺母防松、60°沉头螺栓的防松性能较优。

2) 高温振动条件下,两种防松形式均有效减小了螺栓松动程度。采用高温胶防松形式、30°沉头螺栓连接形式的试样试验后固有频率下降程度分别小于双螺母防松、60°螺栓试样。因此,高温环境下高温胶防松形式、30°沉头螺栓连接形式性能较优。

参 考 文 献

[1] 于泽通,刘建华,张朝前,等. 轴向交变载荷作用下螺栓联接结构的松动试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015,

35(6):732-736.

Yu Zetong, Liu Jianhua, Zhang Chaoqian, et al. An experimental study on self-loosening of bolted joints under axial vibration[J]. Tribology, 2015,35(6):732-736. (in Chinese)

[2] Bhattacharya A, Sen A, Das S. An investigation on the anti-loosening characteristics of threaded fasteners under vibratory conditions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010,45(8):1215-1225.

[3] Zadoks R I, Yu Xiong. An investigation of the self-loosening behavior of bolts under transverse vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 208(2): 189-209.

[4] Ramey G E, Jenkins R C. Experimental analysis of thread movement in bolted connections due to vibrations[R]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 1994.

[5] 李海江, 田煜, 孟永钢, 等. 横向振动作用下螺纹联接松动过程的实验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2016, 56(2): 171-175, 184.

Li Haijiang, Tian Yu, Meng Yonggang, et al. Experimental study of the loosening of threaded fasteners with transverse vibration[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2016, 56(2): 171-175, 184. (in Chinese)

[6] 周文强, 肖黎, 屈文忠. 基于经验模式分解的框架结构螺栓松动检测实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 201-206.

Zhou Wenqiang, Xiao Li, Qu Wenzhong. Detection of bolt looseness in frame structures using empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 201-206. (in Chinese)

[7] Yang Jingyu, Chang Fukuo. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: I. diagnostic principle[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 581-590.

[8] Caccese V, Mewer R, Vel S S. Detection of bolt load loss in hybrid composite/metal bolted connections[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 895-906.

[9] 谭志勇, 费庆国, 吴宏伟, 等. 复合材料与高温合金螺栓连接的热适配技术[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2017, 47(2): 337-342.

Tan Zhiyong, Fei Qingguo, Wu Hongwei, et al. Thermal adaptive technique for connecting composite material and high-temperature alloy bolt[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2017, 47(2): 337-342. (in Chinese)

[10] Friedrich C, Hubbertz H. Friction behavior and pre-load relaxation of fastening systems with composite

- structures[J]. *Composite Structures*, 2014, 110: 335-341.
- [11] 郝秉磊,殷小玮,刘小瀛,等. C/SiC 陶瓷基复合材料螺栓连接件的振动响应特性及防松性能[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 653-660.
Hao Binglei, Yin Xiaowei, Liu Xiaoying, et al. Vibration response characteristics and looseness-proof performances of C/SiC ceramic matrix composite bolted fastenings [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 653-660. (in Chinese)
- [12] 裴瑞光,肖毅,陈豪麟,等. 复合材料螺栓连接预紧力松弛的温度-时间依存行为[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(4): 768-778.
Pei Ruiguang, Xiao Yi, Chen Haolin, et al. Temperature-time dependent behavior for preload relaxation in bolted composite joints[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(4): 768-778. (in Chinese)
- [13] 张振,肖毅,刘彦清,等. 基于振动疲劳试验的复合材料螺栓连接预紧力松弛特性[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(1): 163-173.
Zhang Zhen, Xiao Yi, Liu Yanqing, et al. Preload relaxation characteristics in composite bolted joints based on vibration fatigue test[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(1): 163-173. (in Chinese)
- [14] 李俊,矫桂琼,王刚,等. 室温下 C/SiC 复合材料螺纹紧固件的拧紧特性[J]. *复合材料学报*, 2012(5): 164-170.
Li Jun, Jiao Guiqiong, Wang Gang, et al. Tightening characteristic of C/SiC composite threaded fasteners at room temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012(5): 164-170. (in Chinese)
- [15] Zhang Zhen, Xiao Yi, Liu Yanqing, et al. A quantitative investigation on vibration durability of viscoelastic relaxation in bolted composite joints[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(29): 4041-4056.
- [16] 闵昌万,谭志勇,费庆国. 复合材料热结构螺栓连接刚度试验分析方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(6): 876-880.
Min Changwan, Tan Zhiyong, Fei Qingguo. Experimental analysis on connection stiffness of bolt for thermal structures of composite material[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(6): 876-880. (in Chinese)
- [17] Bohr H, Beyermann U. Secure tightening of a CMC fastener for the heat shield of re-entry vehicles[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(1): 107-112.
- [18] Xie Weihua, Zhang Boming, Du Shanyi, et al. Experimental investigation of bolt loosening detection in thermal protection panels at high temperature[C]// *Structural Health Monitoring 2007: Quantification, Validation, and Implementation - Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2007*. United States: Stanford, CA, 2007: 1480-1490.
- [19] Sherif H A. Parameters affecting contact stiffness of nominally flat surfaces[J]. *Wear*, 1991, 145(1): 113-121.
- [20] Xiao Huifang, Brennan M J, Shao Yimin. On the undamped free vibration of a mass interacting with a Hertzian contact stiffness [J]. *Mechanics Research Communications*, 2011, 38(8): 560-564.
- [21] Dekoninck C. Experimental investigation of the normal dynamic stiffness of metal joints [J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1969, 9(3): 279-292.
- [22] 蔡力钢,郝宇,郭铁能,等. 螺栓结合面法向静态刚度特性提取方法研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(16): 18-23.
Cai Ligang, Hao Yu, Guo Tieneng, et al. Method of extracting normal static stiffness of bolted joint interfaces[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(16): 18-23. (in Chinese)
- [23] Liang Robert Y, Hu Jialou, Choy F. Theoretical study of crack-induced eigenfrequency changes on beam structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(2): 384-396.
- [24] 刘志恩,胡雅倩,颜伏伍,等. 发动机排气歧管热模态分析及试验研究[J]. *汽车工程*, 2015, 37(3): 359-365.
Liu Zhien, Hu Yaqian, Yan Fuwu, et al. Thermal modal analysis and modal tests of engine exhaust manifold[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(3): 359-365. (in Chinese)
- [25] Huda F, Kajiwara I, Hosoya N, et al. Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 40(2): 589-604.
- [26] Kerley J J. An application of retrodution to analyzing and testing the backing off of nuts and bolts during dynamic loading, NASA-TM-4001 [R]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 1987.



第一作者简介:王旻睿,男,1994年8月生,硕士生。主要研究方向为结构动力学。

E-mail: 220160928@seu.edu.cn

通信作者简介:费庆国,男,1977年1月生,教授、博士生导师。主要研究方向为空天机械动力学。

E-mail: qgfei@seu.edu.cn