

复合材料与高温合金螺栓连接结构高温振动防松试验研究

邱恒斌¹, 刘晓华², 肖乃风¹, 武小峰¹, 陈璐¹

(1. 北京强度环境研究所, 北京 100076; 2. 空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘要: **目的** 针对温度补偿垫块和碟形垫片 2 种防松形式的复合材料与高温合金螺栓连接结构, 进行高温振动环境下的防松试验研究。**方法** 推导连接结构预紧力与固有频率的关系, 表明固有频率的变化可作为连接结构是否松动的判据。研究常温环境下螺栓预紧力对复合材料连接结构固有频率的影响, 以及在常温、高温振动环境下温度补偿垫块和碟形垫片 2 种防松形式的热防松效果。**结果** 在常温振动环境下, 2 种防松形式的防松效果接近, 在高温振动环境下, 温度补偿垫块方案的防松效果优于碟形垫片方案。**结论** 复合材料与高温合金螺栓 2 种材料的热膨胀系数不一致引起的热适配问题是导致的螺栓松动的主要原因。

关键词: 复合材料; 高温合金螺栓; 高温振动; 热适配; 防松试验

中图分类号: TB332; V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0038-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.03.005

Anti-loosening Test of Composites and High-temperature Alloy Bolt Connection Structure under High-temperature and Vibration Circumstance

QIU Heng-bin¹, LIU Xiao-hua², XIAO Nai-feng¹, WU Xiao-feng¹, CHEN Lu¹

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct anti-loosening test of temperature compensation gaskets and disc gaskets, which are two forms of composites and high-temperature alloy bolted connection structures in high-temperature vibration environment. The relationship between the pretension force of the connection structure and the natural frequency was derived, indicating that the change of the natural frequency could be used as a criterion for whether the connection structure was loose. The effects of bolt pretension force on the natural frequency of composite connection structure in normal temperature environment were studied. And the thermal anti-loosening effects of temperature compensation gasket and disc gasket in normal temperature and high-temperature vibration environment were studied. The test results showed that the anti-loosening effect of the two forms of anti-loosening was close in the ambient vibration environment, and the anti-loosening effect of the temperature compensation gasket scheme was better than that of the disc gasket scheme in the high-temperature vibration environment. It is concluded that the thermal adaptation problem caused by the inconsistency of the thermal expansion coefficients of the two kinds of composite

收稿日期: 2022-06-08; 修订日期: 2022-07-21

Received: 2022-06-08; Revised: 2022-07-21

作者简介: 邱恒斌 (1991—), 男, 硕士。

Biography: QIU Heng-bin (1991—), Male, Master.

引文格式: 邱恒斌, 刘晓华, 肖乃风, 等. 复合材料与高温合金螺栓连接结构高温振动防松试验研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 038-045.

QIU Heng-bin, LIU Xiao-hua, XIAO Nai-feng, et al. Anti-loosening Test of Composites and High-temperature Alloy Bolt Connection Structure under High-temperature Vibration Circumstance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 038-045.

materials and high-temperature alloy bolts is the main reason for the loosening of the bolts.

KEY WORDS: composite material; high-temperature alloy bolt; high temperature vibration; thermal adaptation; anti-loosening test

复合材料因其耐高温、比强度高、比刚度高、密度小等特点, 目前广泛应用于航空航天领域。由于成形工艺技术水平的限制, 复合材料不可避免地需要通过连接技术连为整体^[1]。应用较多的连接方式包括机械连接、胶接、缝合连接等^[2-5], 其中采用螺栓连接具有可靠性高、承载能力强、便于重复拆装及使用维护简单等优点, 是目前航天领域复合材料结构的主要连接形式^[6-7]。

松动失效是螺栓连接结构最常见的失效模式, 国内外学者对复合材料螺栓连接结构的防松性能进行了试验研究。郝秉磊等^[8]对 C/SiC 陶瓷基复合材料连接件进行了不同预紧力矩下的常温防松性能研究。张振等^[9]对碳纤维/环氧复合材料螺栓连接结构进行了定频振动疲劳试验, 研究了其预紧力松弛的影响因素。上述试验多在常温振动环境下进行, 但航天飞行器一般在高温振动环境下工作^[10], 高温会改变连接结构的热物性质, 影响其防松性能^[11]。因此, 仅通过常温状态的防松试验数据推定其高温的工作状态是不合适的, 需要开展复合材料连接结构在高温振动环境下的防松性能研究。

目前, 针对高温振动环境下复合材料连接结构的防松性能试验, 大多采用复合材料螺栓。曹芝腑等^[12]采用二倍频与基频的振动幅值比值作为松动特性评判的特征量, 研究了复合材料螺钉连接件在高温振动环境下的松动特性。王旻睿等^[13]以固有频率的下降幅度作为松动评判依据, 研究了高温胶、复材沉头螺栓等形式在高温振动环境下的防松效果。闵昌万等^[14]建立了一种高温条件下通过动力学试验获取结构连接刚度的技术途径。然而复合材料的剪切性能较差, 螺牙易被拉脱, 导致螺杆抗拉性能降低^[15]。高温合金螺栓作为复合材料热结构连接螺栓, 具有诸多优势。高温合金螺栓与复合材料的机械连接在航空结构中已得到了较成熟的应用^[16-17], 但金属螺栓作为热结构的连接件时存在一定困难, 需要解决高温下两者热膨胀系数不一致导致的螺栓松动问题^[18]。针对该问题, 目前国内开展了热适配螺栓的研制。谭志勇等^[19]研究了高温合金螺栓作为复合材料热结构连接件时因材料热膨胀系数不同导致的热适配问题, 提出了一种热适配螺栓设计方法。张中原等^[20-21]设计了一种新型分体式金属螺栓, 以解决高温合金连接复合材料结构时的热膨胀不匹配问题。上述文献为解决金属螺栓与复合材料的热适配问题提供了思路, 但并未研究其在高温振动环境下的防松性能。

本文进行了高温振动环境下复合材料与金属螺栓连接结构防松试验研究, 推导了连接结构预紧力与

固有频率的关系, 研究了常温振动环境下金属螺栓预紧力对复合材料连接结构固有频率的影响。针对温度补偿垫块和碟形垫片 2 种防松形式, 在高温振动环境下开展了防松效果试验研究。

1 连接结构振动特性理论

1.1 接触刚度

采用高温合金螺栓连接的 2 个复合材料连接板会形成接触区域。为定性分析接触刚度对试验件频率的影响, 采用赫兹接触理论进行分析, 将 2 球体接触等效为一个刚性半球体和一个弹性平面的接触^[22], 如图 1 所示。

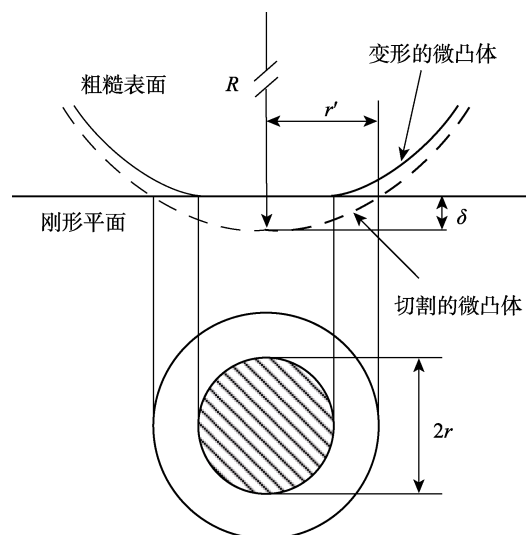


图 1 微凸体接触示意图

Fig.1 Schematic diagram of asperity contact

简化后的等效弹性模量为:

$$E^* = [(1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2]^{-1} \quad (1)$$

式中: ν_1 、 ν_2 和 E_1 、 E_2 分别为 2 个接触微凸体的泊松比和弹性模量。

当微凸体变形较小, 即 $\delta < \delta_c$ 时, 微凸体变形处于完全弹性变形, 单个微凸体的接触面积为:

$$A_c = \pi R \delta \quad (2)$$

单个微凸体的法向载荷为:

$$P = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

单个微凸体的法向接触刚度为^[23]:

$$k_c = \frac{dP}{d\delta} = 2 E^* R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

可以看出,在接触表面状态已知时,微凸体的变形量 δ 只与法向载荷有关,单个微凸体的法向接触刚度与法向载荷呈正相关。可得出:

$$k_e = Cf(P) \quad (5)$$

式中: C 为表面特征参数确定时 k_e 中的常数; $f(P)$ 为有载荷确定的函数。

根据 Greenwood 和 Williamson 模型,接触表面的微凸体高度服从高斯分布:

$$Z(z > d) = N \int_d^\infty \varphi(z) dz = \eta A_n \int_d^\infty \varphi(z) dz \quad (6)$$

式中: η 为微凸体的密度; $\varphi(z)$ 为微凸体高度分布的概率密度函数; A_n 为名义接触面积; N 为微凸体的数目; d 为光滑平面与微凸体平均高度参考平面的距离; δ 为微凸体的变形量。微凸体的高度 $z = d + \delta$ 。

因此,2个粗糙接触表面,总的法向接触刚度可看成是所有接触微凸体法向刚度的总和^[24]。对单个微凸体的法向接触刚度积分,可以得到整个接触面的法向接触刚度:

$$K_z = k_e * \eta A_n \int_d^\infty \varphi(z) dz = C * f(P) * \eta A_n E^* \int_d^{d+\delta_c} \delta^{\frac{1}{2}} \varphi(z) dz = C_a f_a(P) A \quad (7)$$

由式(7)可以知,当接触面积一定时,整个接触面的法向接触刚度与法向载荷呈正相关。

1.2 连接结构振动方程

复合材料与高温合金螺栓连接结构如图2所示。将连接结构的接触区域离散为一系列接触单元,每个接触单元上的接触效应可用刚度系数为 k_n 的分布弹簧来表征,这样连接结构可简化为由分布弹簧单元连接的结构,如图3所示。通过式(7)可计算整个接触面的法向接触刚度 k_j 。

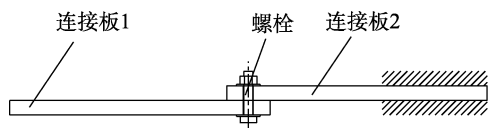


图2 连接结构

Fig.2 Schematic diagram of connection structure

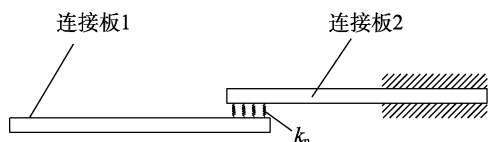


图3 连接结构简化

Fig.3 Simplified schematic diagram of connection structure

因此可以得到整体连接结构的振动方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (8)$$

式中: k 为连接结构的整体刚度, $k =$

$\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_j} + \frac{1}{k_2} \right)^{-1}$; k_1 为连接板1的刚度; k_2 为连接板2的刚度; k_j 为法向接触刚度; m 为质量系数; c 为阻尼系数。

可得到整体连接结构的固有频率为:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

由此可见,连接结构的接触刚度与接触载荷呈正相关。因此,随着高温合金螺栓预紧力的增加,试验件的频率会增加,这与现有试验研究结果^[25]相符,可将试验件频率变化作为试验件松动的判据。

2 试验研究

试验以复合材料改性C/C连接结构为试验对象,研究了试件在常温及高温振动环境下防松性能。防松形式为碟形垫片和温度补偿垫块2种形式。

2.1 试件参数

改性C/C连接板外形如图4所示。2块连接板分为自由端和夹持端小板,小板尺寸为100 mm × 60 mm × 20 mm,螺栓规格为M12高温合金。

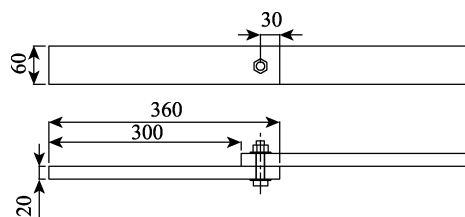


图4 连接板外形

Fig.4 Outline of connection plate

防松形式为碟形垫片和温度补偿垫块2种形式,如图5所示。其中碟形垫片厚度有1.5 mm和1 mm两种规格,温度补偿块为GH2036,厚度有15 mm和12 mm两种规格。碟形垫片防松机理为:在螺栓紧固过程中,碟形垫片被压平,当由于温度变化或者机械振动导致预紧力松弛时,释放势能转化为机械能,对螺栓预紧力进行补偿,使螺栓的预紧力始终保持在所需的范围内。温度补偿垫块防松机理为:金属螺栓与复合材料的热膨胀系数不同,高温下螺栓的热变形量会大于复材连接板而发生预紧力松弛,温度补偿垫块则是根据该特性选择热膨胀系数合适的高温合金垫块,补偿由于温度升高后螺栓与复材板变形量差值。

2.2 试验方案

对复合材料螺栓连接结构进行热振动防松试验,设计了如图6所示的试验系统。试验系统由加热系统、振动系统和测量系统组成。加热系统由石英灯加热器、可控硅、温控系统等组成,用于模拟连接结构

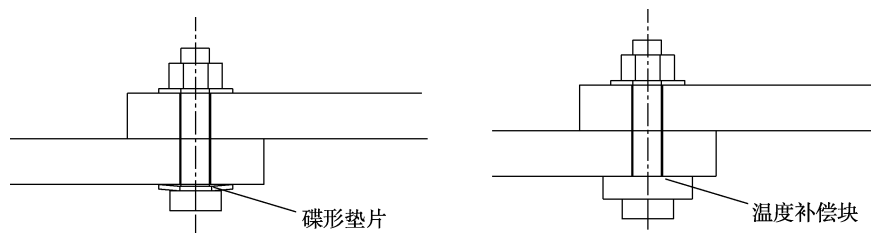


图 5 碟形垫片和温度补偿块防松形式

Fig.5 Anti-loosening form of temperature compensation gasket and disc gasket

的温度环境; 振动系统由航天希尔型号 MPA712/M544A 的 5T 电动振动台、UCON UT-9008 亿恒振动控制系统、PCB 加速度传感器等组成, 用于施加所需的振动载荷; 测量系统由 K 形热电偶温度采集系统、Polytec 非接触激光测量系统组成, 用于测量温度及非接触激光位移。

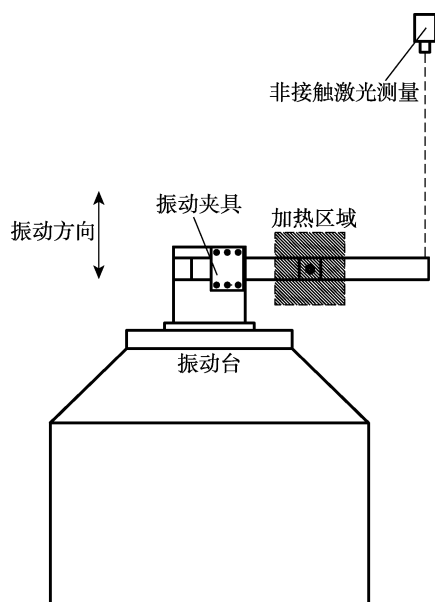


图 6 试验系统

Fig.6 Schematic diagram of test system

试验过程中, 固定端小板与振动工装连接, 通过振动台施加振动载荷, 螺钉连接区域采用石英灯辐射加热。为了使螺栓整体温度稳定, 试验测量螺栓头部 t_1 、中部 t_2 和尾部 t_3 的温度, 加热控制螺栓中部温度 t_2 。自由端小板采用非接触激光测量振动位移, 温度测点位置如图 7 所示。

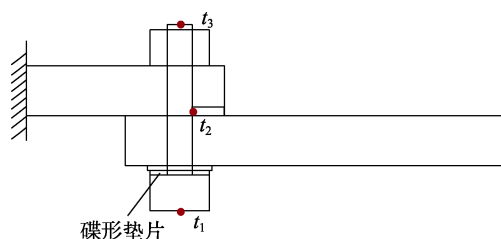


图 7 温度测量示意图

Fig.7 Schematic diagram of temperature measurement

2.3 试验设计与流程

2.3.1 预紧力矩对频率影响试验

正式热振试验前, 首先研究各连接方式下常温螺栓预紧力对频率的影响。试验采用的螺母为自锁螺母, 在拧入过程中, 自锁螺母存在一定的初始力矩。将正好能使 2 块板接触上的力矩定义为自锁螺母的初始力矩, 在此基础上, 增加 0、1、2、3、4、5、10、15、20 N·m, 在每个预紧力矩下进行量级为 0.1g、频率范围为 50~2 000 Hz、2 oct/min 扫频速率的正弦扫频。采用激光测振仪测量自由端小板头部的 1 阶固有频率, 然后进行 3 min 随机振动, 随机振动载荷依据结构在工作状态下的典型载荷谱确定, 如图 8 所示。最后, 采用 0.1g 扫频测量经历随机振动之后连接板的 1 阶固有频率。

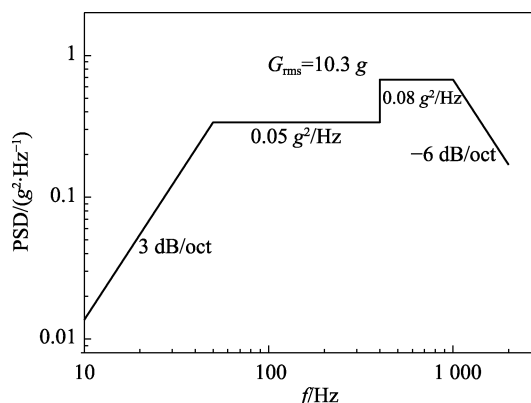


图 8 振动载荷谱

Fig.8 Vibration load spectrum

2.3.2 高温振动试验

在高温振动试验中, 温度条件分为常温及 100、200、300、400、500、650 °C, 共 7 个温度条件。振动激励载荷包括正弦扫频和随机振动 2 种, 在试验前常温、各温度平衡阶段、高温随机振动试验前后对结构进行量级为 0.1g 的正弦扫频。在 650 °C 扫频后, 进行 3 min 随机振动, 振动载荷谱如图 8 所示。其中, 正弦扫频实施时机为螺栓整体在各温度条件的热平衡阶段, 即螺栓头部、中部、尾部 3 个位置的温度均达到要求且热平衡后, 方可进行扫频试验。试验流程如图 9 所示。

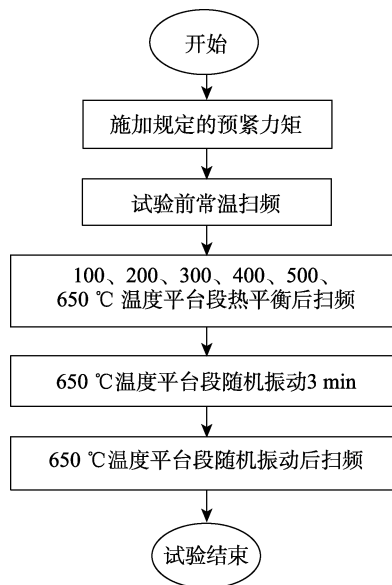


图9 高温振动试验流程
Fig.9 Test process of high temperature vibration

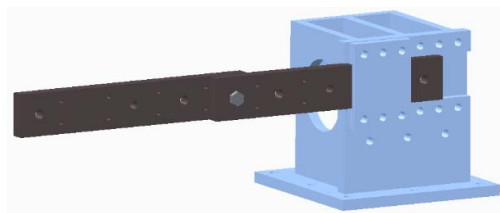


图10 试验三维模型
Fig.10 3D model of test

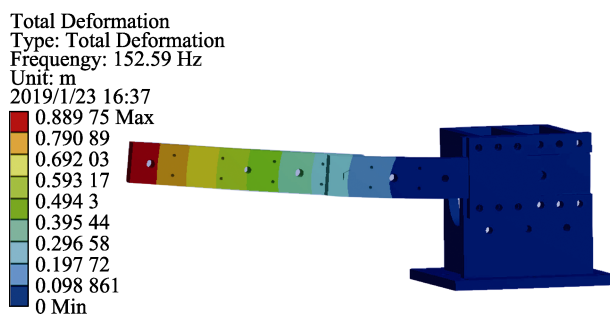


图11 仿真计算结果
Fig.11 Simulation results

3 试验结果及分析

3.1 预紧力对频率影响试验

对试验模型进行建模,如图10所示。工装材料为A3钢,连接板为C/C材料。将连接结构进行刚性简化,连接板与螺钉设置为绑定约束,振动工装与振动连接的孔为固定约束。为与试验结果进行对比,采用ANSYS Workbench仿真计算软件进行模态分析,模态计算结果如图11所示,试验件基频为152.6 Hz。

试验结果见表1。可以看出,连接板之间存在个体差异,连接结构在20 N·m拧紧力矩下的平均基频为155 Hz,与仿真计算结果相接近。连接结构频率与

预紧力的关系如图12所示。可以看出,预紧力从0增加到20 N·m,连接结构的平均频率变化为8.3%。2种连接方式下预紧力对频率变化的影响无明显差异,并且发现,当预紧力为0~5 N·m时,结构的频率变化显著,特别是从0增加至1 N·m时,多数结构的频率发生较大幅度变化。当预紧力增加至10 N·m后,随预紧力增加,结构频率基本不变。这是因为预紧力足够大时,接触面近乎粘合,结构可近似为刚性连接,此时结构频率不再增加。常温10.3g随机振动后,连接结构的频率变化小于3%,出现小幅度下降。从频率变化上看,碟形垫片与温度补偿垫块无明显差异,2种防松形式在常温振动环境下的防松效果接近。

表1 各连接方式预紧力对频率的影响
Tab.1 Effects of pretension force on frequency of each connection method

连接方式	预紧力/(N·m)									随机振动后	频率变化/%
	0	1	2	3	4	5	10	15	20		
15 mm GH2036-1	152.1	155.3	157.2	158.9	160.1	160.7	162.4	163.4	164.3	160.7	2.2
15 mm GH2036-2	124	124.3	125.9	127.2	127.6	128.4	129.9	130.5	130.7	128.7	1.5
12 mm GH2036-1	152.5	157.7	161.8	166.2	166.8	167.3	168.9	170	170.6	167.6	1.8
12 mm GH2036-2	129.1	132.8	135.3	136	137	138	140.6	141.7	142.6	138.5	2.9
1.5 mm 碟形垫片	162.8	164.7	166.2	166.5	167.5	167.8	168.9	169.8	170.2	167.7	1.5
1 mm 碟形垫片	138.6	141.4	144.5	145.2	146.1	146.8	147.8	150.8	152.1	147.5	3.0

3.2 高温振动试验

连接板高温合金螺栓的温度测量如图13所示。可以看出,在每个温度平台段,高温合金螺栓头部、中部和尾部的温度基本一致。试验扫频工作在每个温度平台稳定段进行。

试验件频率随温度的变化见表2和图14。可以看出,碟形垫片防松形式在高于500 °C时出现频率下降现象,此时并未进行高温随机振动,可排除由于高温随机振动对复材结构造成损失引起的频率下降,并在650 °C高温随机振动后,均出现试件松脱情况。温度补偿垫块防松形式在升温过程中均未出现频率下

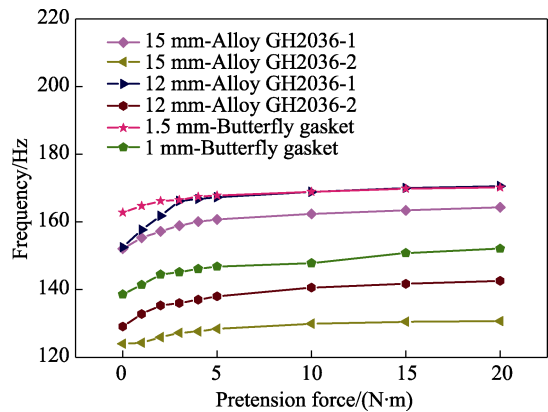


图 12 各连接方式下常温频率与预紧力的关系
Fig.12 Frequency VS pretension force of each connection mode at normal temperature

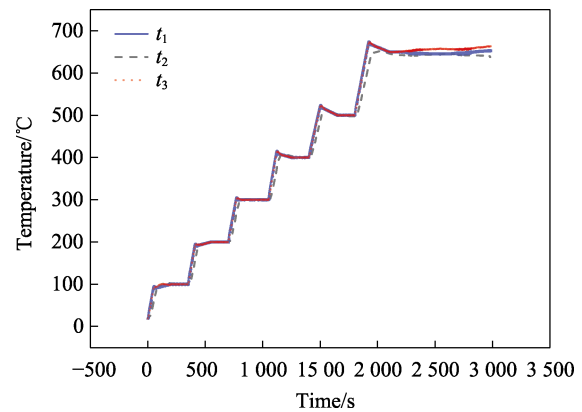


图 13 螺栓温度测量曲线
Fig.13 Temperature measurement curve of bolt

表 2 各连接方式不同温度环境下频率变化
Tab.2 Frequency VS temperature of each connection mode

连接方式	温度/℃							高温随机后	频率变化/%
	常温	100	200	300	400	500	650		
15 mm GH2036-1	162.4	164.4	165.8	167.1	169.1	171.8	175.5	168.9	3.8
15 mm GH2036-2	157.7	158.6	159.7	161.4	163.2	165	167.4	160.9	3.9
12 mm GH2036-1	147.3	148.8	150	151.9	154.0	156.4	160.1	153.0	4.4
12 mm GH2036-2	173	173.7	174.9	176.5	178.2	179.9	182.6	179.2	1.9
1.5 mm 碟形垫片	168.5	168.8	170.1	171.6	174.4	176.2	173.5	试件松脱	/
1 mm 碟形垫片	155.2	154.9	155.7	156.2	160.1	161.7	158.1	试件松脱	/

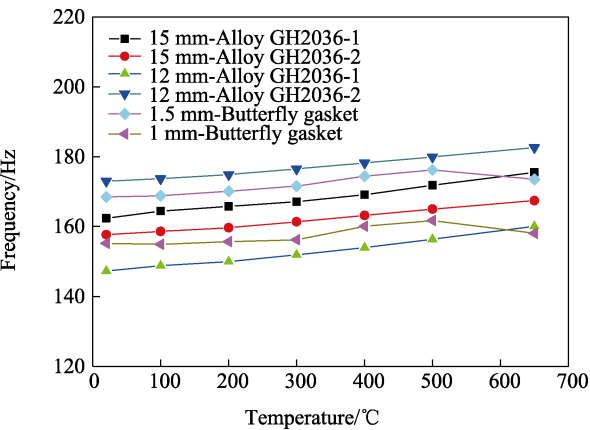


图 14 各连接方式频率与温度关系
Fig.14 Frequency VS temperature of each connection mode

降现象, 高温随机振动后, 频率出现变化小于 4.4% 的小幅度下降情况, 厚度为 15、12 mm 的温度补偿块防松效果无显著差异。因此, 温度补偿块防松形式在高温振动环境下的防松效果明显优于碟形垫片。2 种防松形式在升温过程中出现频率升高情况是因为改性 C/C 复合材料在温度升高时弹性模量增加。

结合常温随机振动后连接结构频率变化, 表明 2 种防松形式仅在振动载荷作用下时防松效果无显著差异, 但在高温振动环境下两者的防松效果出现显著

差异。这说明在高温环境下, 复合材料与高温合金螺栓材料的热膨胀系数不一致引起的热适配问题是导致螺栓松动的主要原因。

4 结论

本文针复合材料与高温合金螺栓连接结构进行了高温振动环境下的防松试验研究。采用频率的变化作为连接是否松动的判据, 研究了常温环境下螺栓预紧力对复合材料连接结构固有频率的影响, 分别研究了在常温和高温振动环境下温度补偿垫块和碟形垫片 2 种防松形式的防松效果。研究结果表明:

1) 连接结构的频率随着预紧力的增加而增大, 当预紧力增加到一定程度时, 接触面近乎粘合, 结构频率基本不增加。

2) 在常温振动环境下, 采用温度补偿垫块和碟形垫, 2 种防松形式的防松效果接近; 在高温振动环境下, 温度补偿块防松形式的防松效果明显优于碟形垫片防松形式。

3) 高温环境下, 复合材料与高温合金螺栓材料的热膨胀系数不一致引起的热适配问题是导致的螺栓松动的主要原因。

参考文献:

- [1] 沃西源. 复合材料连接方法[J]. 航天返回与遥感, 1997, 18(4): 31-39.
WO Xi-yuan. Joint Technology for Composites[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1997, 18(4): 31-39.
- [2] SANTELLA M. A Review of Techniques for Joining Advanced Ceramics[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1992, 71: 947-954.
- [3] DANO M L, GENDRON G, PICARD A. Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates[J]. Composite Structures, 2000, 50(3): 287-296.
- [4] 柯晴青, 成来飞, 童巧英, 等. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料的连接方法[J]. 材料工程, 2005, 33(11): 58-63.
KE Qing-qing, CHENG Lai-fei, TONG Qiao-ying, et al. Joining Methods for Continuous Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2005, 33(11): 58-63.
- [5] 黄志超, 陈伟达, 程雯玉, 等. 复合材料连接技术进展[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(4): 1-6.
HUANG Zhi-chao, CHEN Wei-da, CHENG Wen-yu, et al. Development of Composite Connection Techniques[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013, 30(4): 1-6.
- [6] DANO M L, GENDRON G, PICARD A. Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates[J]. Composite Structures, 2000, 50(3): 287-296.
- [7] THOPPUL S D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of Mechanically Fastened Joints in Polymer-Matrix Composite Structures —A Review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3/4): 301-329.
- [8] 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 Bing-lei, YIN Xiao-wei, LIU Xiao-ying, 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.
- [9] 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 Yan-qing, et al. Preload Relaxation Characteristics in Composite Bolted Joints Based on Vibration Fatigue Test[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(1): 163-173.
- [10] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shan-yi. Advanced Composite Materials and Aerospace Engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [11] FRIEDRICH C, HUBBERTZ H. Friction Behavior and Preload Relaxation of Fastening Systems with Composite Structures[J]. Composite Structures, 2014, 110: 335-341.
- [12] 曹芝鹏, 谭志勇, 姜东, 等. 基于时频分析的高温振动环境螺栓连接件松动判别[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 205-210.
CAO Zhi-fu, TAN Zhi-yong, JIANG Dong, et al. Loosening Discrimination of a Bolted Connector under High-Temperature Vibration Environment Based on Time-Frequency Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 205-210.
- [13] 王旻睿, 谭志勇, 何顶顶, 等. 高温环境复合材料螺栓连接振动的防松试验[J]. 振动测试与诊断, 2018, 38(6): 1169-1175.
WANG Min-rui, TAN Zhi-yong, HE Ding-ding, et al. Anti-Loosening Experiment of Composite Bolted Structures under High Temperature and Vibration Circumstance[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1169-1175.
- [14] 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 Chang-wan, TAN Zhi-yong, FEI Qing-guo. 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.
- [15] 卢子兴, 廖强, 杨振宇, 等. C/SiC 复合材料螺栓螺牙承载能力[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 182-187.
LU Zi-xing, LIAO Qiang, YANG Zhen-yu, et al. Load Bearing Capability of Thread Teeth of C/SiC Composite Bolts[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 182-187.
- [16] YANG J, CHANG Fu-kuo. Detection of Bolt Loosening in C-C Composite Thermal Protection Panels: II. Experimental Verification[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 591-599.
- [17] CACCESI 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.
- [18] WULZ H, STARK H, TRABANDT U. Joining and Load Transfer Technology for Hot CMC Structures[C]//34th Thermophysics Conference. Virginia: AIAA, 2000.
- [19] 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 Zhi-yong, FEI Qing-guo, WU Hong-wei, 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.
- [20] 张中原, 谭志勇, 占续军, 等. 热适配螺栓连接及其配合界面位置影响分析[J]. 强度与环境, 2019, 46(1): 35-41.
ZHANG Zhong-yuan, TAN Zhi-yong, ZHAN Xu-jun, et al. Analysis for Thermal Adaptive Bolt Connection and

- Influence of Coordination Interface Position[J]. Structure & Environment Engineering, 2019, 46(1): 35-41.
- [21] 谭志勇, 张中原, 郑日恒, 等. 飞行器典型结构的热适配分体螺栓连接技术[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 224062.
- TAN Zhi-yong, ZHANG Zhong-yuan, ZHENG Ri-heng, et al. Connection Technique for Thermal Adaptive Bolts with Split-Piece Design in Typical Vehicle Structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 224062.
- [22] JIANG Shu-yun, ZHENG Yun-jian, ZHU Hua. A Contact Stiffness Model of Machined Plane Joint Based on Fractal Theory[J]. Journal of Tribology, 2010, 132(1): 011401-7.
- [23] JONES R E. A Greenwood-Williamson Model of Small-Scale Friction[J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74(1): 31-40.
- [24] 赵丹, 艾延廷, 翟学, 等. 法向接触刚度对螺栓连接结构振动模态的影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 54-57.
- ZHAO Dan, AI Yan-ting, ZHAI Xue, et al. Effect of Normal Contact Stiffness on Vibration Modes of Bolted Structure[J]. Aeroengine, 2012, 38(3): 54-57.
- [25] 陆飞. 振动条件下螺栓连接结构松动机理及试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LU Fei. Loosening Mechanism and Experimental Study of Bolted Structure under Vibration[D]. Nanjing: South-east University, 2017.

责任编辑: 刘世忠