

高温结构光纤智能螺栓预紧力状态监测方法

王则力¹, 范 刚², 王宇宁³

(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;

3. 航天材料及工艺研究所, 北京, 100076)

摘要: 为了对航天器高温结构的连接状态进行长期监测, 提出了在连接螺栓中嵌入光纤EFPI/FBG复合传感微结构的光纤智能螺栓及高温预紧力状态监测方法。在光纤智能螺栓中, 光纤EFPI微结构用于获取螺栓受到轴向预紧力时的长度变化量, 光纤FBG微结构用于获取螺栓结构的温度。利用这两种参数结合具体分析方法, 可以实现高温下螺栓预紧力载荷的实时监测。采用M8规格螺栓制备了总长度为50 mm样机并通过万能试验机以及高温环境试验箱进行了试验验证。试验结果表明, 在室温至500 °C范围内, 最大升温率为12 °C/min的热载荷状态下, 光纤式智能螺栓能够准确地获得轴向预紧力载荷, 试验最大预紧力载荷10 kN, 最大相对误差3.1%。这种结合有光纤微结构的智能螺栓能够用于高温、缓变温连接结构预紧力状态监测。

关键词: 智能螺栓; 预紧力; 高温环境; 光纤传感; 状态监测

中图分类号: V416.4

文献标识码: A

Tightening Force Monitoring Method of Structures by a Smart Fiber Bolt Under High Temperature Circumstance

WANG Zeli¹, FAN Gang², WANG Yuning³

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing, 100076; 2. Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing, 100076; 3. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing, 100076)

Abstract: A novel smart bolt combined with fiber EFPI/FBG micro-structures is presented to monitor the state of tightening force of a bolted aerospace structure under high temperature circumstance. In this smart fiber bolt, the fiber EFPI micro-structure is applied to obtain the length variation in the direct of bolt axis under the effect of tightening force. And the fiber Bragg grating micro-structure is applied to obtain the bolt temperature. With the parameters obtained by the fiber EFPI/FBG micro-structures, the tightening force can be obtained through the approach presented. Test samples which are 50mm long M8 bolts combined with fiber EFPI/FBG micro-structures are made and tested by a universal testing machine with a heating chamber. The test results show that the smart fiber bolt presented can be used to obtain maximum 10kN tightening force under the temperature of 500 degree centigrade with maximum relative error 3.1%. This smart fiber bolt can be used to monitor the state of structure connection under high temperature circumstance.

Keywords: smart bolt; tightening force; high temperature structure; fiber optical sensing; state monitor

0 引 言

临近空间飞行器、可重复使用飞行器等新型航天器在工作时会经受极其复杂的飞行载荷环境状态。航天器各舱段之间一般会通过螺栓连接成一个整体, 螺栓预紧力的变化会影响整个结构的力学特性^[1]。研究表明, 高温会引起螺栓连接结构之间变形不一致, 由于连接结构的热膨胀系数不同, 温度载荷引起热变形不匹配, 引起接触界面发生相对滑动, 在温度和横向

交变位移载荷的耦合作用下, 螺栓连接面磨损加剧, 螺纹表面涂层发生剥落, 进而加剧螺栓松动^[2]。预紧力是表征结构之间连接状态的关键指标, 预紧力状态实时监测对飞行器结构传力路径及力载荷分配设计、飞行过程中力载荷变化监测、可重复使用连接结构防松监测及维护、成功服役等方面至关重要^[3-4]。

采用螺栓对连接结构之间预紧力以及松动状态监测, 国内外已经有了许多研究, 主要分为离线检测法和在线监测法两类^[5], 常见的方法有扭矩扳手法^[6-7]、

基于电阻应变计的测力销钉监测法^[8]、超声波监测法^[9-10]、基于压电材料的监测方法^[11-13]、图像监测法^[14-15]、基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)的监测法等^[16-19]。这些方法主要用于常温状态下螺栓预紧力监测。

基于光纤传感原理的螺栓预紧力监测技术由于其天然的抗电磁兼容性,使其在复杂环境中应用更有优势。光纤布拉格光栅是利用物理或化学的方式使得光纤纤芯折射率沿轴向呈周期性分布的微型结构^[20]。研究人员可以利用这种微结构对环境温度、应变等状态敏感的特性,把FBG与螺栓^[17-21]、垫片或特制连接结构^[22]等实体相结合,实现连接结构松动状态以及预紧力的监测。Pran等^[21]采用灌胶的方式把FBG埋入了长170 mm的M20螺栓中轴线中,制备成智能监测螺栓用于GRP复合材料连接结构预紧力的长期监测。师琪等^[17]把光纤光栅埋设于螺栓的两侧以监测螺栓表面应力,同时埋设温度传感器以消除温度的影响,实现螺栓轴力的监测。许志强等^[23]针对螺栓预紧力难以精确可靠监测难题,对表贴式和埋入式两种胶封装光纤光栅应变传感器的方法进行了对比研究,制备的螺栓用于阀门中法兰螺栓力监测。Huang等^[24]在长240 mm钢制M20螺栓表面焊接金属封装光纤应变传感器,实现最高500 °C且温度恒定时预紧力监测,为高温下连接结构状态监测提供了新的思路。

由于光纤光栅具有同时对温度和应变交叉敏感的特性,在高温下除了需要单独增加温度补偿以实现螺栓预紧力的监测以外还面临着温度、应变解耦精度较低的问题^[25]。目前基于光纤布拉格光栅的螺栓预紧力监测方法主要适用于室温状态、恒温状态或自然环境变温状态。航天飞行器结构大都处于200 °C以上,甚至达到500 °C的热环境状态中,同时,螺栓连接结构温度状态实时变化。对这种高温变温环境下结构连接螺栓预紧力状态的监测,需要发展新的方法。

光纤非本征法布里-珀罗干涉仪(Extrinsic Fabry-Pérot Interferometry, EFPI)微结构是一种干涉型光纤微结构,其利用光纤端面形成两个平行的光学平面,构成一个腔体微结构,利用相位解调方法对干涉光谱进行解析,可以获得两个平行光学平面之间的绝对距离值^[26]。基于EFPI/FBG复合传感的结构高温应变监测方法适用于高温变温的航天器热环境^[25],能够实现结构件室温至850 °C范围内最高18 °C/s变温率

热载荷下的应变测量。本文提出光纤EFPI/FBG复合传感微结构与螺栓结合的思路,构建出适用于航天器高温结构连接预紧力实时监测的光纤式智能螺栓。这种光纤智能螺栓不仅可以用于高温下螺栓松动状态的监测,还可以准确获取高温下螺栓轴向受力值。本文对M8规格螺栓与光纤EFPI/FBG微结构结合而成的光纤式智能螺栓进行了试验验证。结果表明,这种光纤式智能螺栓能够用于500 °C内变温状态下螺栓轴向预紧力状态的实时监测。

1 光纤智能螺栓结构及高温轴力监测原理

光纤EFPI/FBG高温轴力螺栓结构如图1所示,其由总长度为50 mm的M8合金螺栓以及光纤EFPI/FBG复合微结构构成。光纤EFPI/FBG复合微结构通过耐高温粘接的方式固定于螺栓中轴线孔中。



图1 光纤EFPI/FBG智能螺栓

Fig.1 A smart bolt with optical fiber EFPI/FBG sensing unit

图2a为结构A与结构B通过光纤式螺栓连接以及其中的光纤EFPI/FBG微结构的示意。螺栓中的光纤EFPI微结构位于中心轴线上,其主要由光纤A与光纤B以及两个光纤之间的空腔(简称FP腔)构成。长度为 L_1 光纤A的端面与长度为 L_2 光纤B的端面之间空腔长度称为法珀腔长度(简称FP腔长) D 。光纤A和光纤B分别通过黏接剂与螺栓结构连接固定,两个连接点之间距离称为FP标距 L_0 。从光纤B的一端射入一束探测光,该探测光经过FP腔,形成干涉光信号,该探测光经过FBG微结构,形成散射

光信号。通过对这两种光信号的探测,实现螺栓所处的温度状态以及变形状态的监测,进而实现高温下轴向力载荷的监测。

旋拧螺母实现结构A与结构B紧固连接,此时螺母与结构A接触面与固定B端面之间的螺栓本体长度称为螺母标距 L_B 。在恒温状态下,螺母旋拧紧固时,螺母对螺栓施加轴向预紧力 F 。如图2b所示,螺栓受力伸长量为 ΔL_0 ,螺母标距长度变为 $L_B + \Delta L_0$,FP标距变为 $L_0 + \Delta L_0$,FP腔长变为 $D + \Delta L_0$ 。

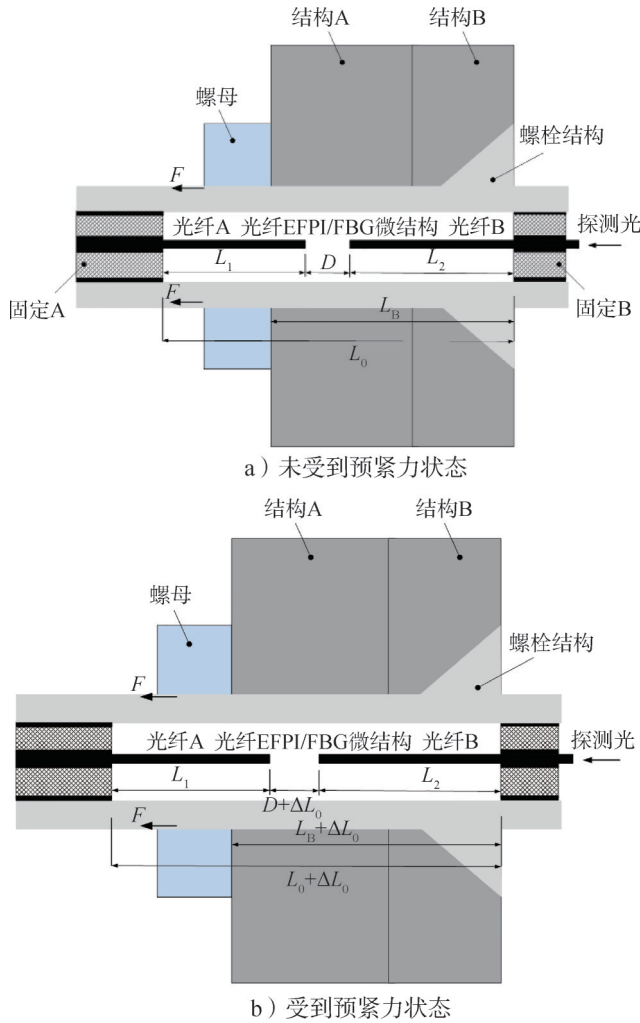


图2 光纤EFPI/FBG智能螺栓结构状态示意

Fig.2 Schematic of the structure status of the smart bolt with optical fiber EFPI/FBG sensing unit

螺栓轴向预紧拉伸力与螺栓伸长量产生的应变之间的关系如式(1)所示:

$$F = AE\varepsilon_B \quad (1)$$

式中 E 为螺栓材质的弹性模量; A 为螺栓的横截面

积; ε_B 为螺母引起螺栓结构的轴向应变。对应图2所示的结构,螺栓上的轴向应变如式(2)所示:

$$\varepsilon_B = \Delta L_0 / L_B \quad (2)$$

定义有效作用系数,其为FP标距与螺母标距的比值。

$$\alpha_B = L_0 / L_B \quad (3)$$

因此,螺栓受到的轴向力与FP腔长变化量之间关系为

$$F = \alpha_B AE \varepsilon_F \quad (4)$$

$$\varepsilon_F = \Delta L_0 / L_0 \quad (5)$$

式中 ε_F 为螺栓FP标距对应的应变值。

螺栓本体采用传热性能较好的金属材料制成,在温度变化较缓慢的状态下,可以假定其长度方向上具有相同的温度。此时,螺栓以及光纤组件会因热膨胀而使得轴向长度变化,进而引起FP腔长度变化。此时,在温度以及轴向预紧力的共同作用下,通过光纤FP微结构获得的综合应变值如下。

$$\varepsilon_{F,T} = \varepsilon_F + \varepsilon_T \quad (6)$$

其中, ε_T 为以FP标距为基准,在无外力作用下因加热使得螺栓及光纤组件热膨胀产生的应变。螺栓受到轴向预紧力产生的应变为综合应变与仅因温度产生应变之差。因此,温度变化状态下,螺栓轴向预紧力计算关系如式(7)所示:

$$F = \alpha_B AE (\varepsilon_{F,T} - \varepsilon_T) \quad (7)$$

定义灵敏度系数 $k = 1/\alpha_B A$, 其与螺栓以及紧固连接位置的几何尺寸有关。此时螺栓轴力为

$$F = \frac{E}{k} (\varepsilon_{F,T} - \varepsilon_T) \quad (8)$$

式中 螺栓材质的弹性模量 E 、应变 ε_T 均是温度的函数。

2 试验验证及数据分析

2.1 试验系统

试验系统如图3所示,其由M8规格的光纤智能螺栓、万能试验机、高温环境试验箱、螺栓轴向力加载工装、光纤信号采集设备组成。试验条件如表1所示,通过环境箱对螺栓加热指定温度后,通过万能试验机及加载工装对螺栓逐级施加轴向拉伸力载荷。在整个试验过程中,通过螺栓中的光纤EFPI/FBG微结构对FP腔长以及螺栓温度进行实时监测。

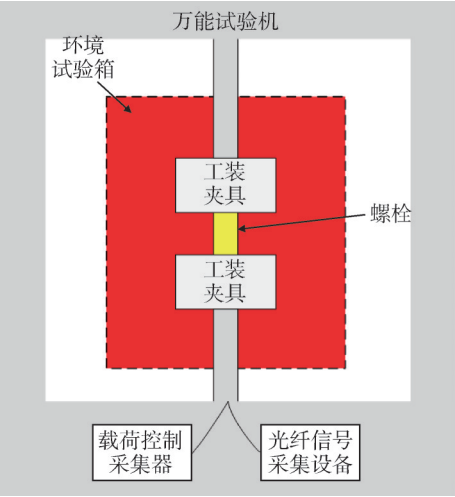


图3 试验系统示意

Fig.3 Schematic of test system

表1 试验条件

Tab.1 Test conditions

温度载荷/℃	力载荷	力载荷重复次数
室温	2 kN、4 kN、6 kN、8 kN、10 kN， 逐级施加	1
100		3
200		3
300		3
400		3
500		3

2.2 数据分析及讨论

试验数据整理如图4所示，整个试验持续时间为9 540 s，最高升温率为12 ℃/min，螺栓温度从室温时序升高至500 ℃。通过实时测量螺栓中的光纤FP腔长，并经过FP标距计算获得式（6）所示的因温度载荷和力载荷综合效应产生的应变，并通过式（8）实时获得轴向机械力载荷值。

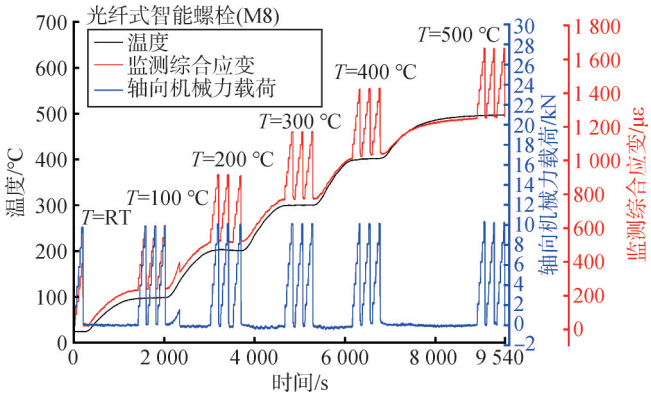


图4 变温状态下逐级施加力载荷的试验结果

Fig.4 Test results of a smart bolt under the effects of thermal and axis force

从图4中可以看出，在没有施加力载荷的时间段内，综合应变的变化趋势与温度变化趋势一致，这是由于螺栓结构自由热膨胀使得光纤FP腔长发生变化而产生热效应信号。螺栓监测综合应变减去热效应信号，获得实际机械力载荷在零值附近，这与实际状态一致。

当螺栓温度升高到一定温度水平而恒定时，因热效应而产生的 ε_T 值保持恒定。此时，逐级施加力载荷，整体测量应变为热效应产生应变与力载荷效应产生应变的叠加，即 $\varepsilon_{F,T} = \varepsilon_F + \varepsilon_T$ 。从综合效应产生的应变中剔除温度效应产生的应变，结合灵敏度系数，获得轴向力载荷。从图4中可以看出，本文所述方法可以很好地识别出500 ℃高温状态下施加的每级2 kN的力载荷。

温度恒定状态下的力载荷监测相对误差为

$$\text{err}_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta F_i - \Delta F_s}{\Delta F_s} \right| \tag{9}$$

式中 N 为加载次数； ΔF_s 为力载荷加载过程中每一级施加的拉伸力值； ΔF_i 为螺栓经过式（8）计算获得第*i*级力载荷。定义温度*T*时，获得的每一级力载荷变化量的标准差为

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta F_i - \Delta \bar{F})^2}{N - 1}} \tag{10}$$

式中 $\Delta \bar{F}$ 为温度*T*时获得力载荷变化量的均值， $\Delta \bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta F_i$ 。光纤式智能螺栓轴力监测数据的相对误差以及标准差整理如表2所示。

表2 轴力监测数据的相对误差以及标准差

Tab.2 Relative errors and standard deviations of monitoring axis-force data by bolt

温度/℃	相对误差/%	标准差
室温	2.20	0.019 5
100	2.46	0.055 7
200	1.60	0.041 2
300	1.70	0.041 8
400	1.77	0.057 6
500	3.10	0.067 0

从表2中可以看出，在室温至500 ℃范围内，制备的光纤式智能螺栓对轴向力监测的相对误差最大值为3.10%，最大标准差为0.067 0。本文中提出的光纤式智能螺栓可用于航天器结构高温、缓变温环境下轴向预紧力状态监测。

3 结 论

本文提出光纤EFPI/FBG复合传感微结构与螺栓相结合的思路,形成了能够用于航天器结构高温、缓变温环境下连接预紧力状态实时监测的光纤式智能螺栓。螺栓中嵌入的光纤EFPI微结构能够对螺栓轴向变形状态进行实时监测,嵌入的光纤FBG微结构能够对螺栓所处的温度状态进行实时监测。这两种状态的实时监测数据通过本文中提出的方法能够准确获得螺栓受到的轴向预紧力载荷。

通过万能试验机以及高温环境试验箱,对采用M8规格螺栓制成的光纤式智能螺栓在高温下的轴向力载荷监测方法进行了试验研究。试验采用时序加热的方式从室温升高至500℃,最大升温率为12℃/min,拉伸力载荷采用每级2kN,逐级加载的方式在温度相对恒定的状态下施加至最大载荷10kN。试验结果表明,光纤式轴力螺栓获得高温轴向力载荷的最大相对误差为3.1%,标准差为0.067。这种结合有光纤EFPI/FBG微结构的光纤式智能螺栓能够用于航天飞行器结构预紧力状态监测。

参 考 文 献

- [1] 南宮自军,陈磊磊,王杰.典型航天结构连接刚度辨识及建模方法研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2022(6):21-25.
NANGONG Zijun, CHEN Leilei, WANG Jie. Research on the modeling and identification of connection stiffness for typical aerospace structure[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(6): 21-25.
- [2] 张德乾,李丰,化俞新,等.热-力耦合作用下螺栓连接松动行为研究[J].润滑与密封,2023,48(6):38-52.
ZHANG Deqian, LI Feng, HUA Yuxin, et al. Loosening behavior of bolted structures under coupled thermo-mechanical loading[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(6): 38-52.
- [3] 陈开颜,徐嘉,陈辉,等.高温合金紧固件拧紧力矩与预紧力关系试验研究[J].导弹与航天运载技术,2021(4):103-107.
CHEN Kaiyan, XU Jia, CHEN Hui, et al. Experimental study on the relationship between tightening torque and bolt stress of superalloy fasteners[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(4): 103-107.
- [4] 张宏宇,刘晓华,范刚,等.考虑附加弯矩后的大直径螺栓承载能力研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2024(1):39-45.
ZHANG Hongyu, LIU Xiaohua, FAN Gang, et al. Strength study on the additional bending moment of large diameter bolt[J]. Missiles and Space Vehicles, 2024(1): 39-45.
- [5] 王庆领,程庆阳,谢隽然.螺栓松动检测的若干关键技术问题[J].科学技术与工程,2021,21(22):9194-9202.
WANG Qingling, CHENG Qingyang, XIE Junran. Several key technical issues of bolt looseness detection[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9194-9202.
- [6] NIKRAVESH S M Y, GOUDARZL M. A review paper on looseness detection methods in bolted structures[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2017, 14(12): 2153-2176.
- [7] 董达善,陈佳亮,刘海洋,等.高强度螺栓扭矩系数研究[J].科学技术与工程,2017,17(16):182-186.
DONG Dashan, CHEN Jialiang, LIU Haiyang, et al. Research on torque coefficient of high-strength bolt[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 182-186.
- [8] 汪厚冰,陈琳,柴亚南.机械连接中螺栓轴向力的测试方法研究[J].航空制造技术,2018,61(22):82-86.
WANG Houbing, CHEN Lin, CHAI Yanan. Study on axial force measurement method for bolt of joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(22): 82-86.
- [9] JHANG K Y, QUAN H H, HA J, et al. Ultrasonic estimation of clamping force in high-tension bolts[J]. Key Engineering Materials, 2006(1): 240-243.
- [10] 王涛,罗毅,刘绍鹏,等.基于压电主动传感方式的螺栓松动检测实验研究[J].传感技术学报,2013,26(8):1059-1063.
WANG Tao, LUO Yi, LIU Shaopeng, et al. Bolt loosening detection based on piezoelectric active sensing technology[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(8): 1059-1063.
- [11] YIN H, WANG T, YANG D, et al. A smart washer for bolt looseness monitoring based on piezoelectric active sensing method[J]. Applied Sciences, 2016, 6(11): 320.
- [12] WANG F, CHEN Z, SONG G. Smart crawfish: a concept of underwater multi-bolt looseness identification using entropy-enhanced active sensing and ensemble learning[J]. Mechanical Systems and Single Processing, 2021(2): 107186.
- [13] NGUYEN T C, HUYNH T C, YI J H, et al. Hybrid bolt-loosening detection in wind turbine tower structures by vibration and impedance responses[J]. Wind Struct, 2017, 24(4): 385-403.
- [14] 贺小琼,肖世德,赵斌,等.基于深度学习的螺栓松动图像检测方法研究[J].计算机与数字工程,2023,51(11):2682-2688.
HE Xiaoqiong, XIAO Shide, ZHAO bin, et al. Research on image detection method of bolt looseness based on deep learning[J]. Computer & Digital Engineering, 2023, 51(11): 2682-2688.
- [15] HUANG Y H, LIU L, YEUNG T W, et al. Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(4): 408-414.
- [16] FILOGRANO M L, GUILLEN P C, RODRIGUEZ-BARRIOS A, et al. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2011(1): 85-92.

- [17] 师琪, 任亮, 尤润州, 等. 基于光纤光栅传感器的智能螺栓开发及应用[J]. 仪表技术与传感器, 2020(12): 10-15.
- SHI Qi, REN Liang, YOU Runzhou, et al. Development and application of smart bolt based on FBG sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(12): 10-15.
- [18] 余伟, 王涛, 邓少华, 等. 基于光纤光栅螺栓松转角测量的螺栓连接状态监测方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(4): 549-554.
- YU Wei, WANG Tao, DENG Shaohua, et al. Bolt connection state monitoring method based on fiber grating bolt loosening angle measurement[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(4): 549-554.
- [19] 李鹏飞, 王胜, 杜飞, 等. 导弹结构健康监测技术研究进展[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 59-70+94.
- LI Pengfei, WANG Sheng, DU Fei, et al. Review of structural health monitoring technology for missiles[J]. Tactical Missile Technology, 2023(3): 59-70+94.
- [20] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication [J]. Applied Physics Letters, 1978(32): 647-649.
- [21] PRAN K, FARSUND O, WANG G. Fiber Bragg grating smart bolt monitoring creep in bolted GRP composite[C]. New York: The 15th Optical Fiber Sensors Conference, 2002.
- [22] LIANG M F, FANG X Q, WU G, et al. A hydraulic fiber Bragg grating force sensor and its monitoring system for axial bolt load measurement in anchorage engineering[J]. Measurement and Technology, 2018, 29(12): 125105.
- [23] 许志强, 王超, 白彬, 等. 监测法兰螺栓力的两种胶封装光纤光栅应变传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(12): 13-19.
- XU Zhiqiang, WANG Chao, BAI Bin, et al. Study on two types of fiber Bragg grating strain sensors packaged using adhesive for monitoring of bolt load in flange joints[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(12): 13-19.
- [24] HUANG Y K, TU Y, TU S T. Real-time monitoring of bolt clamping force at high temperatures using metal-packaged regenerated fiber Bragg grating sensors[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019(3): 119-126.
- [25] 王则力, 王淑玉, 丁镇军, 等. 光纤传感器对合金结构瞬态高温应变测量的适用性研究[J]. 航天器环境工程, 2023, 41(1): 43-48.
- WANG Zeli, WANG Shuyu, DING Zhenjun, et al. Applicability study on optical fiber sensor for transient HT strain measurement of alloy structures[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 41(1): 43-48.
- [26] 巨亚堂, 王则力, 乔通, 等. 光纤法布里-珀罗高温应变传感器技术进展[J]. 强度与环境, 2018, 45(5): 58-64.
- JU Yatang, WANG Zeli, QIAO Tong, et al. Progress of fiber optic Fabry-Perot high temperature strain sensor[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(5): 58-64.

作者简介

王则力 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为结构热强度状态监测与评估、试验及预示分析。

范 刚 (1992—), 男, 工程师, 主要研究方向为飞行器强度设计。

王宇宁 (1990—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为材料力学性能测试技术。