光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20241129001

基于光纤光栅激光器传感螺栓应力测试方法研究

黄俊伊[1,2]，何　巍[1,2*]，李邵德[1,2]

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室；2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100192）

摘　要： 针对螺栓在长期工作中出现松动、蠕变，提出一种基于光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）传感的螺栓应力测试方法。首先，利用飞秒激光加工技术透过光纤涂层制作FBG，基于该光纤光栅设计线性腔结构的掺铒光纤激光器，实现具有高信噪比的激光输出；其次，分别设计并制备不同尺寸的不锈钢和铝材质的螺栓垫片，并对其受力特性进行仿真分析；然后，将FBG分别嵌入不锈钢和铝材质垫片槽中并结合螺栓构建应力测试系统，通过对垫片表面施加应力，使得FBG产生相应的形变，从而导致激光波长出现漂移。实验中，分别对槽深为1，1.5 mm的不锈钢和铝材质垫片的螺栓应变测试系统施加0～10 N·m应力，随着应力的增加，激光波长出现红移，1 mm槽深的不锈钢和铝垫圈传感器中心波长分别共移动了41和61.8 pm，灵敏度分别为4.05和6.13 pm/（N·m）；1.5 mm槽深的不锈钢和铝垫圈传感器波长分别漂移141.7和180.5 pm，灵敏度分别为14.12和18 pm/（N·m），线性度达到0.99。

关键词： 螺栓；光纤激光传感；垫圈；光纤光栅；飞秒激光

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0350－10

Bolt Stress Testing Method Based on Fiber Bragg Grating Laser Sensing

HUANG Junyi[1,2], HE Wei[1,2], LI Shaode[1,2]

（1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN）

Abstract: In this study, a bolt stress test method based on Fiber Bragg Grating (FBG) sensing is proposed to solve the problems of loosening and creep of bolts in long-term service. First, a femtosecond-laser processing technology was used to fabricate an FBG through fiber coating, and an erbium-doped fiber laser with a linear cavity structure was designed based on the fiber grating to achieve a laser output with a high signal-to-noise ratio. Second, bolt gaskets of different sizes made of stainless steel and aluminum were designed and fabricated, and their mechanical characteristics were simulated and analyzed. Next, the FBG was embedded in the stainless steel and aluminum gasket grooves and combined with the bolts to build a stress test system. Applying stress to the surface of the gasket deformed the FBG was accordingly, causing the laser wavelength to drift. In the experiment, stress of 0～10 N·m was applied to the bolt strain test system made of stainless steel and aluminum gasket with groove depths of 1 and 1.5 mm. As the stress increased, the laser wavelength showed a red shift, and the center wavelength of the stainless steel and aluminum washer sensors with groove depths of 1 mm moved by 41 and 61.8 pm, respectively; their sensitivities were 4.05 and 6.13 pm/（N·m）, respectively. The 1.5 mm groove-depth stainless steel and aluminum gasket sensors

收稿日期：2024－11－29.

基金项目：国家自然科学基金项目（52105540）.

* 通信作者：何　巍

showed wavelength drifts of 141. 7 and 180. 5 pm, respectively, and sensitivities of 14. 12 and 18 pm/(N·m), respectively, along with a linearity of 0. 99.

Key words: bolt; fiber laser sensing; washer; fiber Bragg grating; femtosecond laser

0　引言

常见的螺栓连接方法广泛应用于风力发电、航空航天、铁路运输等领域[1-3]。但易受振动和环境变化影响，导致连接处出现松动、断裂、疲劳等问题，降低结构安全性和可靠性[4-5]。现有测量方法包括应变计法[6]、扭矩转角法[7]、超声波法[8]和电阻应变计法[9]，但上述方法复杂且容易受测试环境干扰。

近年来，光纤传感技术已广泛应用于结构健康监测、应变测量、温度监测等领域[10-12]。其中，光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）传感器[13]因其高精度、高灵敏度和抗电磁干扰性而受到广泛关注。光纤光栅应变传感系统凭借FBG灵敏度高[14]，能够精确测量和监测结构应变，为结构健康监测和损伤检测提供关键数据。Deng等[15]研究了具有温度自补偿、自动复位和简单多路复用的FBG角度传感器，测量灵敏度约为109. 6 pm/°，螺栓松动角度最大分辨率为0. 38°。Ben等[16]提出一种可以多路复用的V型缠绕智能垫圈，加载和卸载过程分别用三次函数和二次函数拟合。Guo等[17]提出一种基于微型滚动轴承结构，并将其应用于应变测量单元，所设计的螺栓预紧力传感器灵敏度为5. 564 pm/kN，线性度为0. 999 4。Duan等[18]设计一种带有嵌入式FBG探头的智能螺栓，灵敏度为0. 77 pm/kN，线性度为0. 983。鉴于光栅光谱线宽较宽，且制备高信噪比的光栅难度较大，这对光纤传感测试技术的发展构成一定的困难；然而，光纤激光系统因其具有高信噪比和窄线宽的特点，因此，将光栅传感技术与光纤激光系统相结合，能够进一步提升测试系统的准确性。

本文提出一种基于FBG的激光系统，用于螺栓应力测量。搭建了基于FBG选频的掺铒光纤激光系统，并将FBG作为传感单元集成到螺栓垫圈的环形槽中。实验结果表明，所提出的基于FBG的光纤激光传感系统能有效测试螺栓垫圈的应力变化，展现出简单、可行且高效的特点。

1　传感系统原理

当螺栓受外界作用力（如拉力、压力或扭矩）时，其内部产生应变场，力的传递使螺栓垫圈表面产生应力分布。在螺栓垫圈周向开槽嵌入传感核心FBG，当垫圈受力时，FBG随之发生形变。轴向应变会拉伸或压缩FBG，改变光栅周期，导致反射波长产生移动；而横向应变则可能通过光纤的泊松效应或光弹效应间接影响折射率。如图1所示为垫圈受力分析侧视图及光纤传感原理图。

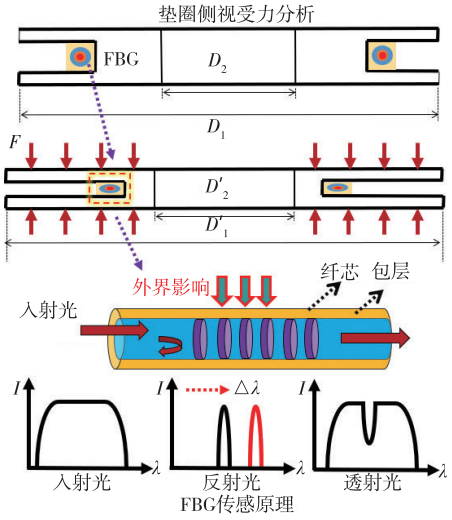


图1　垫圈受力分析侧视图及光纤光栅传感原理图

FBG工作原理是基于光的干涉与布拉格衍射效应，其纤芯折射率沿轴向周期性调制，形成一系列微小的光栅结构，当入射光通过FBG时，满足布拉格条件的光波（即中心波长）会被反射回来，而其他波长的光则继续传输，在受到外界影响时，随着FBG周期的变化，反射波长会产生相应的改变。

为实现高信噪比的激光输出，设计基于FBG选频的线性腔结构掺铒光纤激光螺栓应力传感系统，原理如图2。该系统由980 nm泵浦半导体激光器（S27-7402-460，Lumentum）、波分复用器（1×2，OE Photonics）、4 m长度的掺铒光纤作为激光器增益（FGC-980-L2，Ixblue）、分光比为50∶50的光纤耦合器（1×2，Necero）以及光谱分析仪（Anritus Ms9710c）组成。泵浦光通过波分复用器耦合到掺铒光纤中进行放大，将耦合器两端相对熔接构成全反镜作为激光器谐振腔的一端，谐振腔另一端采用FBG进行选频，产生特定波长激光。将FBG嵌入到螺栓垫片中，当垫片受力传递至FBG时，激光光谱的中心波

长发生相应的漂移。设计采用扭矩扳手的对螺栓进行定量加载和卸载，从而螺栓垫圈的上表面和下表面受力传导至FBG产生形变，测试光谱中心波长的变化，最终达到定量检测螺栓受力的变化，并分析不同槽深和材料的垫圈对传感效果的影响。

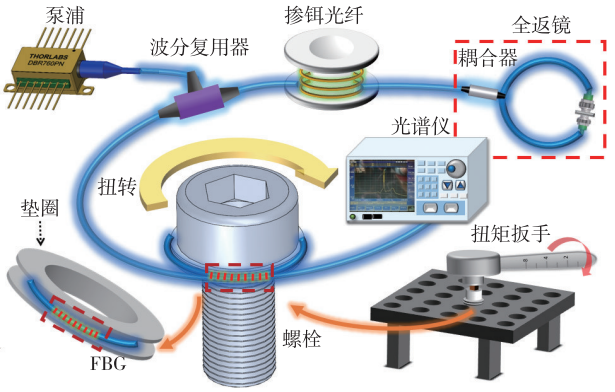


图2 基于激光传感的螺栓应力传感系统原理图

首先，建立力学模型推导螺栓垫圈的受力与FBG中心波长的关系，在实际应用中，螺栓所受预紧力可以表示为：

$$F=\frac{T}{kd} \tag{1}$$

式中，T是螺栓的轴向预紧力，F是施加的扭矩，k是扭矩-轴向载荷系数，d是螺栓的直径。螺栓垫圈所受应力变化$\Delta\varepsilon$与其应变变化$\Delta\sigma$之间的关系可以表示为：

$$\Delta\varepsilon=\frac{\Delta\sigma}{E} \tag{2}$$

式中，$\Delta\sigma$是垫圈的轴向应力变化，E是垫圈的杨氏模量。嵌入的布拉格波长变化$\Delta\lambda$与垫圈应变变化$\Delta\varepsilon$之间的关系可以表示为：

$$\Delta\lambda_{\omega}=k_{\omega}\Delta\varepsilon \tag{3}$$

式中，k_{ω}是应变传递常数系数，螺栓的应力变化可以表示为：

$$\Delta\sigma=\frac{F}{\pi(d/2)^2} \tag{4}$$

将方程(1)～(3)代入方程(4)可得到施加的扭矩与FBG中心波长变化量之间的关系为：

$$\Delta\lambda_{c}=k_{\omega}\mu\frac{T}{\pi Ekd(d/2)^2} \tag{5}$$

在力学传递模型的理论基础上，分别对不同槽深和不同材料的垫片表面受力形变特性进行了仿真分析。采用Comsol软件分别模拟了槽深为1和1.5 mm的不锈钢和铝制垫片表面受到0～15 N·m扭矩加载的受力情况，其应力分布如图3所示。从图中可以看到铝制垫圈比不锈钢垫圈的应力更明显，因此凹槽深度为1.5 mm的垫圈比槽深为1 mm的垫圈具有更明显的受力响应。在相同的载荷下，1.5 mm槽深的螺栓垫圈具有更好的传感效果，但也更容易发生形变。当加载扭矩为15 N·m，可以看出垫圈发生明显变形，因此实验设计加载范围为0～10 N·m。

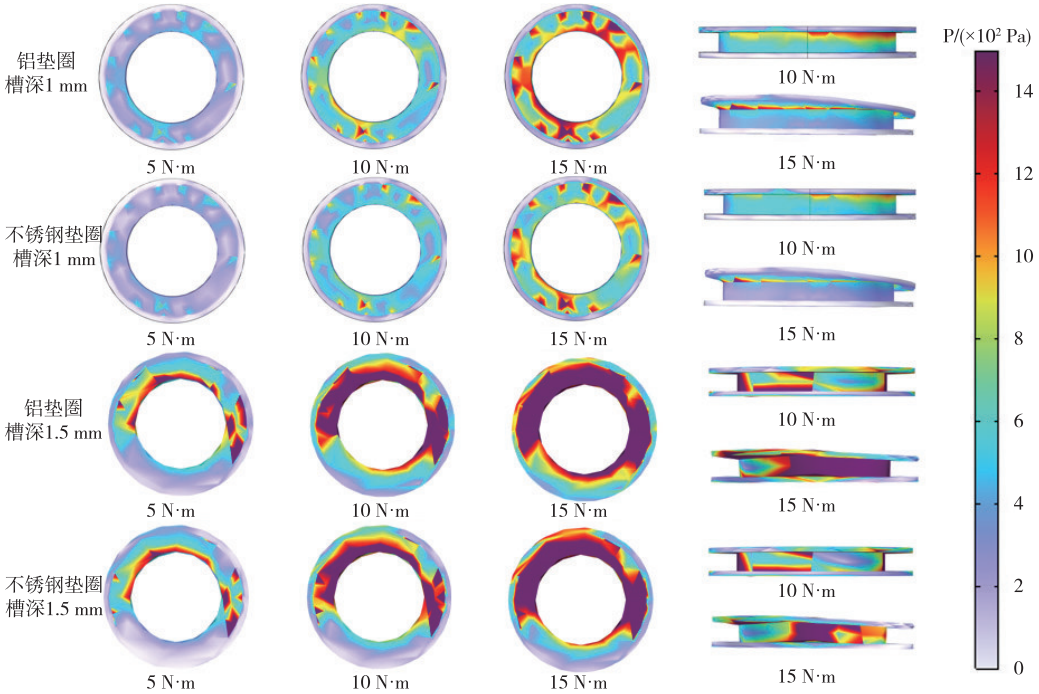
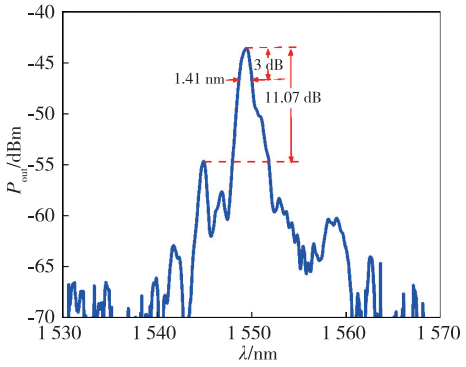


图3 螺栓垫圈受力仿真分析图

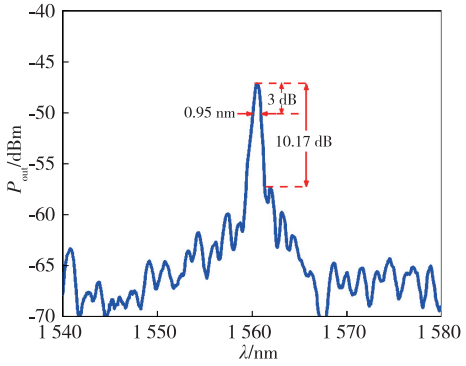
2　螺栓应力测试及结果分析

实验中，首先采用飞秒激光加工技术制备高强度光纤光栅，所采用的飞秒激光器为 Coherent 公司生产的 Astrella 激光器，能够产生重频为 1 kHz、波长为 800 nm、脉宽为 35 fs 的飞秒激光。设计光栅周期为 536 和 540 nm，栅区长度设定为 3 mm，飞秒激光经过光开关、分光镜、64 倍油镜透过光纤涂覆层和包层聚焦在纤芯中进行逐点扫描刻写。将光纤固定在位移台上，通过控制位移平台移动速度实现不同周期的 FBG 制备。

采用 $C+L$ 波段宽带光源与光谱分析仪对光栅光谱信号进行采集，中心波长为 1 549.41 nm 的 FBG 光谱图如图 4(a)所示，3 dB 带宽为 1.41 nm，信噪比为 11.07 dB；实验中通过改变刻写速度实现了 1 560.47 nm 波长的 FBG 制备，3 dB 带宽为 0.95 nm，信噪比为 10.17 dB，如图 4(b)所示。



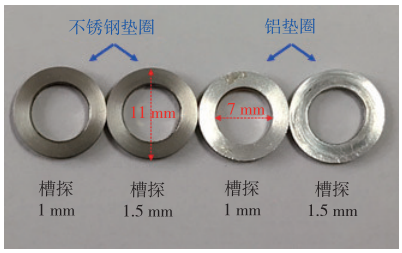
(a) 1 549.41 nm 反射光谱



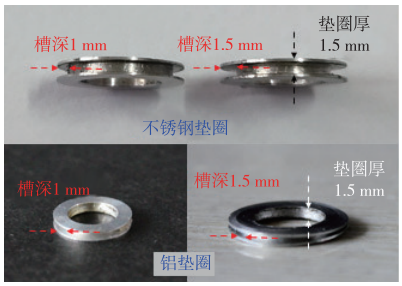
(b) 1 560.47 nm 反射光谱

图 4　飞秒激光刻写 FBG 反射光谱

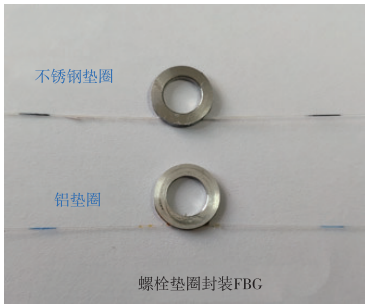
其次，针对 M6 螺栓设计 4 种不同材质和尺寸的螺栓垫圈，实物正视图如图 5(a)所示，依次为不锈钢和铝材料的螺栓垫圈，其外径均为 11 mm，内径为 7 mm。图 5(b)所示为制备的四种螺栓垫圈的侧视图，螺栓垫圈的厚度均为 1.5 mm，不锈钢和铝制垫圈均具有两种槽深，分别为 1 和 1.5 mm。通过胶封工艺将 FBG 与螺栓垫圈结合构成螺栓应力传感器，传感器封装实物图如图 5(c)所示，分别为不锈钢和铝制传感器，封装过程首先用酒精清洗擦拭垫圈，干燥 10 min 后，通过 502 胶水将刻有 FBG 的光纤嵌入垫圈槽中，在整个过程中保持垫圈的稳定性，直至 FBG 被稳定固定在槽中。



(a) 螺栓垫圈正视图



(b) 螺栓垫圈侧视图

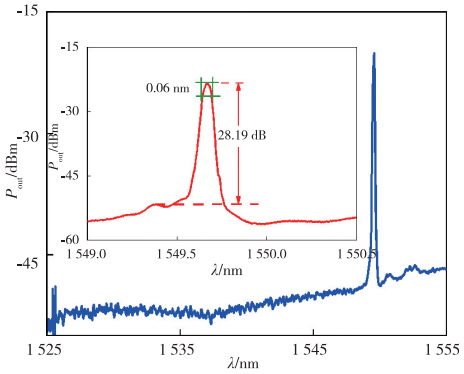


(c) FBG 封装入螺栓垫圈实物图

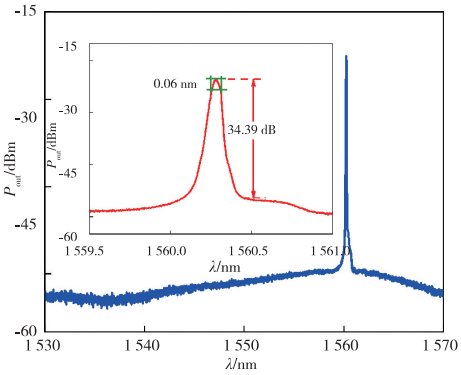
图 5　螺栓垫圈实物图

接下来，按照图 2 所示结构搭建掺铒光纤激光器构建螺栓垫片应力传感实验系统。将飞秒激光刻写的 FBG 作为激光器谐振腔的一端，与全反镜共同组成谐振腔，系统中采用不锈钢和铝制垫圈并分别嵌入不同中心波长的 FBG，通过光谱仪观察激光光谱，如图 6 所示，得到的激光波长与刻写的 FBG 中心波长相对应，没有产生其他波长的激光，且具有良好的稳定性。不锈钢垫圈中采用的 FBG 中心波长为 1 549.41 nm，其激光阈值为 20 mW，当泵浦功率增加到 47 mW 时，激光 SNR 为 28.19，3 dB 带

宽为0.06 nm，光谱如图6(a)所示；铝制垫圈中采用波长为1 560.47 nm的FBG，激光阈值为31 mW，泵浦功率为58 mW时激光SNR为34.39 dB，3 dB带宽为0.06 nm，光谱如图6(b)所示。



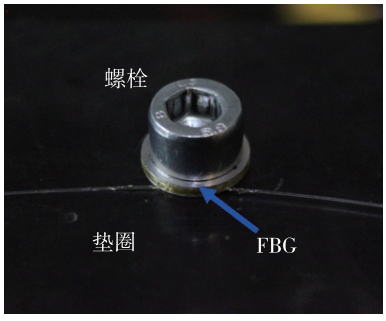
(a) 1 549.41 nm激光输出光谱



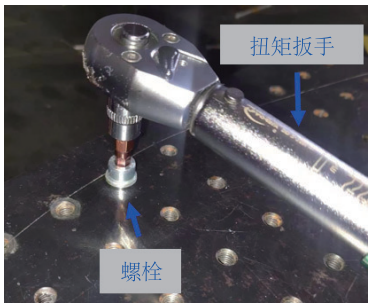
(b) 1 560.47 nm激光输出光谱

图6 激光输出光谱

在获得稳定的激光输出后，进行应力测试实验。先将垫圈平稳放置，再将螺栓穿过垫圈固定在光学平台上，保证垫圈尚未受到来自螺栓预紧力的显著压缩作用，螺栓及垫圈组装实物如图7(a)所示。随后开展加载卸载应力测试实验，使用扭矩扳手对螺栓进行加载及卸载，扭矩扳手施加应力装置实物如图7(b)所示，实验中将扭矩扳手调整为2 N·m，每施加2 N·m记录一次激光光谱数据。



(a) 螺栓垫圈正视图



(b) 扭矩扳手对螺栓加载图

图7 螺栓垫圈实物图

在螺栓应力激光传感实验系统组建完成后进行激光波长数据采集，实验中分别对螺栓垫圈施加2,4,6,8,10 N·m的加载，用光谱仪记录光谱数据。对不锈钢1 mm槽深的螺栓垫圈实施加载，随着加载扭矩的逐步增加，其光谱变化如图8(a)，出现红移现象，如图8(b)所示波长漂移为41 pm，其光谱波长漂移二维图。如图8(c)所示，对波长进行拟合分析，显示出具有良好的线性度，线性拟合误差为1.1 pm，灵敏度为4.1 pm/(N·m)，线性度为0.996 8，线性拟合方程为：

$$\lambda = 4.10x + 1\,549.61 \tag{6}$$

实验中对铝制1 mm槽深的螺栓垫圈进行应力加载实验，随着施加应力的增长，激光波长向长波方向移动，其波长漂移如图9(a)所示。相较于不锈钢垫圈，铝制垫圈表现出更为显著的光谱漂移，如图9(b)所示，波长漂移为61.8 pm。如图9(c)所示，光谱漂移与加载扭矩之间仍存在显著的线性关系，线性拟合方程如公式(7)所示，灵敏度为6.13 pm/(N·m)。

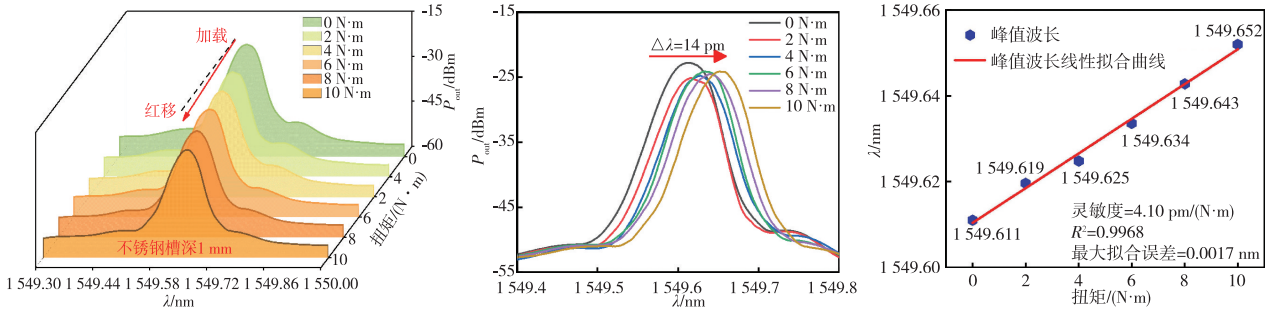
$$\lambda = 6.13x + 1\,560.36 \tag{7}$$

实验中对比分析了不锈钢1.5 mm槽深的螺栓垫圈，加载实验中的光谱漂移趋势与1 mm槽深垫圈相同，其三维光谱漂移图如图10(a)所示，波长漂移显著增加为141.7 pm，如图10(b)所示，拟合误差较小为1 pm，R^2值为0.999 8，灵敏度为14.12 pm/(N·m)，如图10(c)所示，其线性拟合方程为：

$$\lambda = 14.12x + 1\,549.56 \tag{8}$$

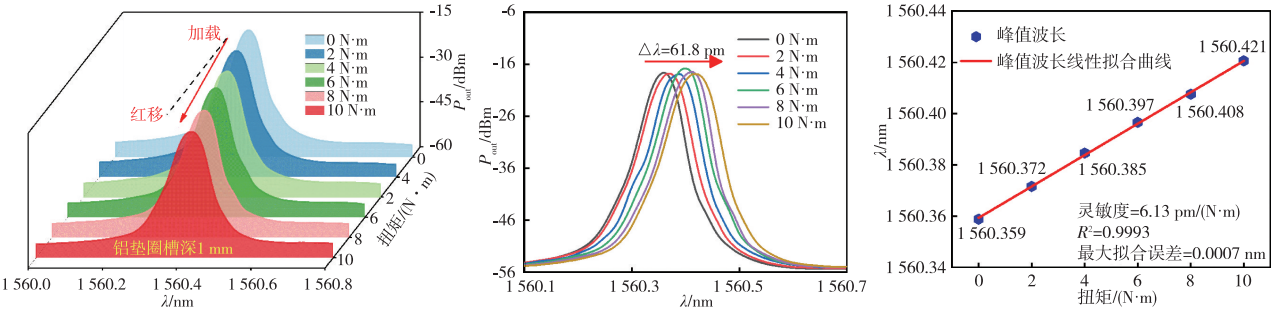
铝制1.5 mm槽深的螺栓垫圈加载实验光谱同样发生红移，如图11(a)所示，光谱波长漂移180.5 pm，具有最大程度偏移，如图11(b)所示。线性拟合结果显示拟合误差为0.9 pm，R^2值为0.999 7，灵敏度为18 pm/(N·m)，如图11(c)所示，光谱漂移与加载扭矩之间的关系为：

$$\lambda = 18.00x + 1\,560.47 \tag{9}$$



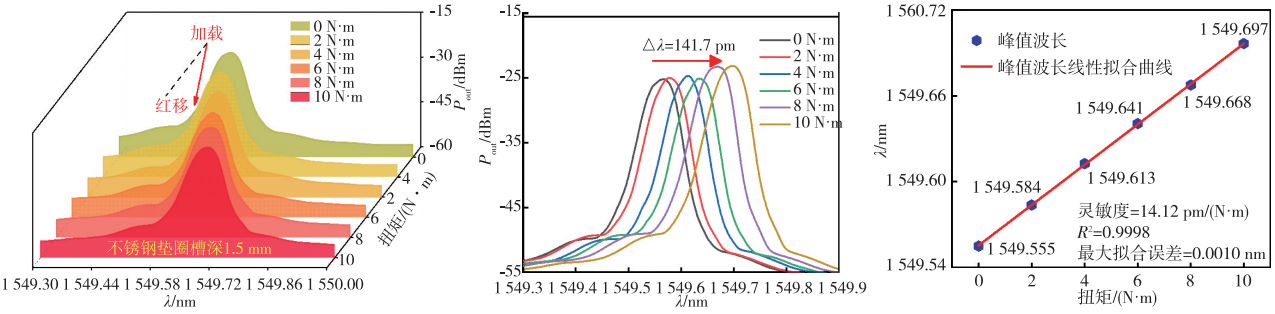
（a）不同应变下激光光谱　（b）激光在0～10 N·m范围内的光谱变化　（c）峰值波长与应变的关系

图8　槽深为1 mm的不锈钢垫圈加载实验



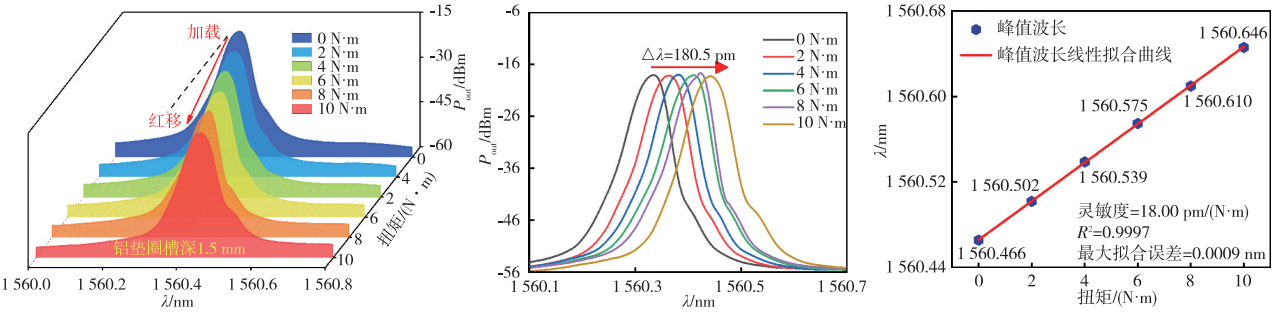
（a）不同应变下激光光谱　（b）激光在0～10 N·m范围内的光谱变化　（c）峰值波长与应变的关系

图9　槽深1 mm的铝垫圈加载实验



（a）不同应变下激光光谱　（b）激光在0～10 N·m范围内的光谱变化　（c）峰值波长与应变的关系

图10　槽深1.5 mm的不锈钢垫圈加载实验



（a）不同应变下激光光谱　（b）激光在0～10 N·m范围内的光谱变化　（c）峰值波长与应变的关系

图11　槽深1.5 mm的铝垫圈加载实验

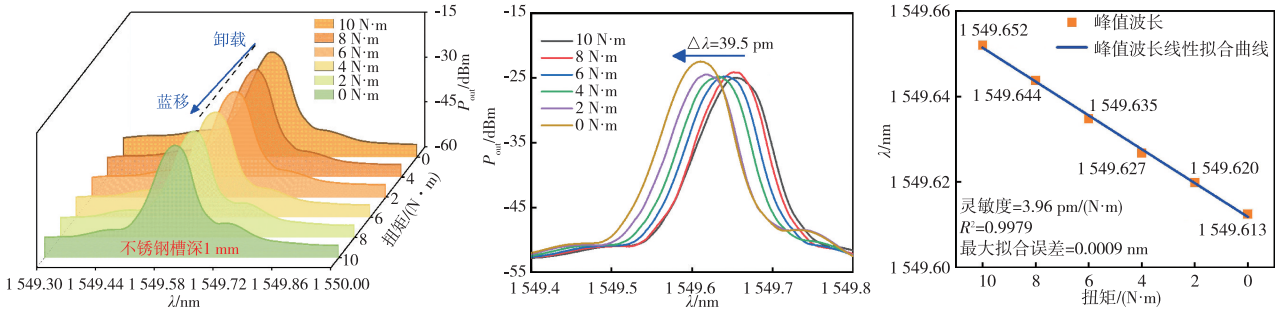
实验中对垫片应力卸载情况进行测试与分析。在卸载过程使用扭矩扳手每间隔 2 N·m 逐步将应力由 10 N·m 减小至零，持续监测并记录卸载过程中的光谱数据。对 1 mm 槽深不锈钢和铝制螺栓垫圈进行卸载，其光谱随着卸载扭矩的递减均向短波方向移动，如图 12(a)和 13(a)所示，最终光谱波长分别漂移了 39.5 和 56 pm，如图 12(b)和 13(b)所示，通过线性拟合，1 mm 槽深不锈钢垫圈的拟合误差为 0.9 pm，R^2值为 0.997 9，灵敏度为 −3.96 pm/(N·m)，如图 12(c)所示，1 mm 槽深不锈钢垫圈卸载过程波长随扭矩的变化可表示为：

$$\lambda = -3.96x + 1\,549.61 \tag{10}$$

同样实验条件下 1 mm 槽深铝制垫圈卸载过程中拟合误差为 1 pm，灵敏度为 −5.57 pm/(N·m)，R^2为 0.999 8，如图 13(c)，扭矩与波长的关系为：

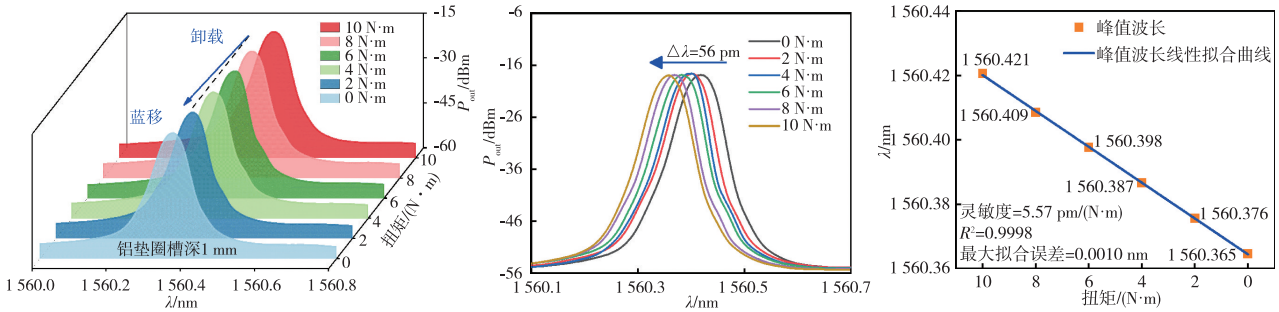
$$\lambda = -5.57x + 1\,560.36 \tag{11}$$

通过实验可知铝材对卸载扭矩的敏感性更高，且具有稳定的线性关系。



(a) 不同应变下激光光谱　(b) 激光在 0～10 N·m 范围内的光谱变化　(c) 峰值波长与应变的关系

图 12　槽深 1.5 mm 的不锈钢垫圈卸载实验



(a) 不同应变下激光光谱　(b) 激光在 0～10 N·m 范围内的光谱变化　(c) 峰值波长与应变的关系

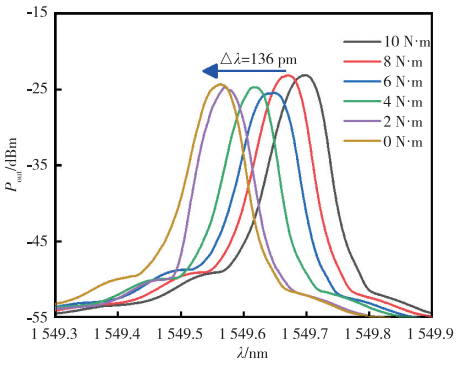
图 13　槽深 1.5 mm 的铝垫圈卸载实验

对槽深为 1.5 mm 的垫圈进行卸载实验，1.5 mm 槽深不锈钢和铝垫圈传感器光谱均发生蓝移，如图 14(a)和 15(a)所示，波长偏移分别为 136 和 175.2 pm，由于槽深加深波长漂移显著增加，如图 14(b)和 15(b)所示，槽深 1.5 mm 不锈钢垫圈传感器灵敏度为 −13.6 pm/(N·m)，R^2为 0.999 7，拟合误差为 1.1 pm，卸载过程拟合方程为：

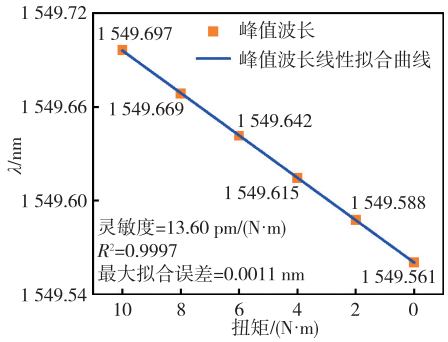
$$\lambda = -13.60x + 1\,549.56 \tag{12}$$

对 1.5 mm 槽深铝垫圈光谱数据进行线性拟合，灵敏度为 −17.3 pm/(N·m)，拟合误差为 0.8 pm，R^2为 0.998 6，其拟合函数为：

$$\lambda = -17.30x + 1\,560.47 \tag{13}$$

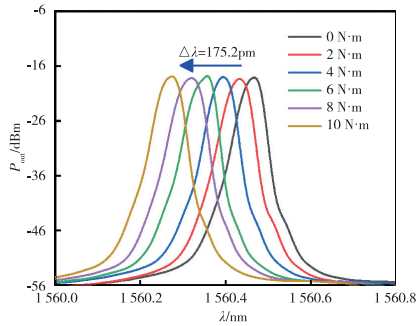


(a) 激光在 0～10 N·m 范围内的光谱变化

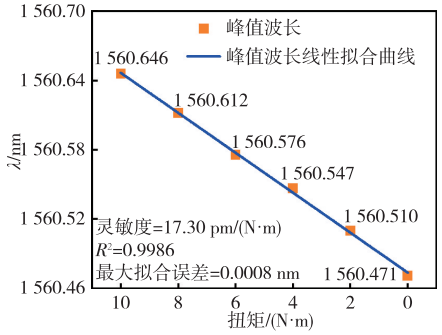


（b）峰值波长与应变的关系

图 14　槽深 1.5 mm 的不锈钢垫圈卸载实验



（a）激光在 0～10 N·m 范围内的光谱变化



（b）峰值波长与应变的关系

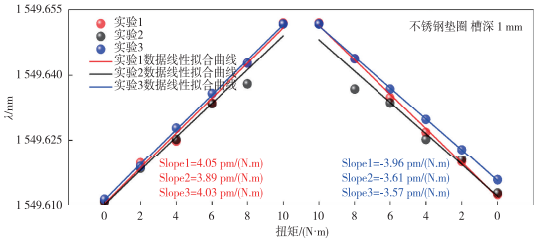
图 15　槽深 1.5 mm 的铝垫圈卸载实验

通过对不同材质和不同槽深的螺栓垫片进行应力加载与卸载测试分析，得到如表 1 所示的灵敏度对比情况，其中 1.5 mm 槽深铝制垫圈具有最大传感灵敏度，这是由于铝材料垫圈相比于不锈钢材料传感器更容易产生形变，且槽深的增加导致应力更易集中，进一步提高传感系统的灵敏度，证明所设计的不锈钢和铝材垫片在加载及卸载过程中的线性传感特性，实验结果与仿真分析结果相符合。

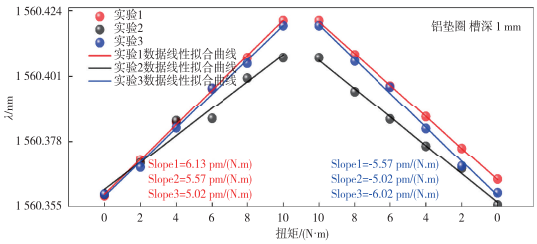
表 1　四种螺栓垫圈灵敏度表

材料	槽深/mm	加载灵敏度/(pm/(N·m))	卸载灵敏度/(pm/(N·m))
不锈钢	1	4.10	−3.96
不锈钢	1.5	14.12	−13.60
铝	1	6.13	−5.57
铝	1.5	18.00	−17.30

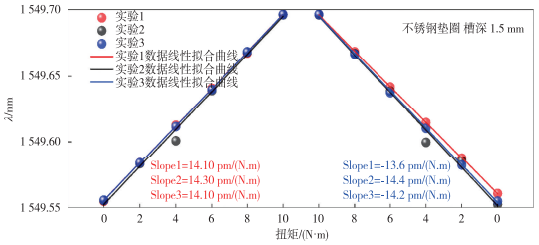
对螺栓垫圈传感系统在动态载荷下的传感特性进行了分析，开展了稳定性实验与迟滞性分析。应变传感器会因循环负载和过载而失效，因此实验中通过三次循环负载实验对传感系统进行了测试。实验结果表明，1 mm 深不锈钢垫圈传感器的螺栓在加载和卸载过程平均灵敏度分别为 3.99 和 −3.71 pm/(N·m)，其循环实验数据如图 16(a)所示；对于相同深度的铝垫圈传感器，其加载和卸载平均灵敏度分别为 5.97 和 −5.54 pm/(N·m)，实验结果如图 16(b)所示；同时，1.5 mm 槽深不锈钢传感垫片传感器的平均灵敏度分别为 14.17 和 −14.1 pm/(N·m)，线性拟合结果如图 16(c)所示；对于具有 1.5 mm 深的铝垫圈传感器，平均灵敏度分别为 18.58 和 −16.43 pm/(N·m)，三次循环实验结果如图 16(d)所示。



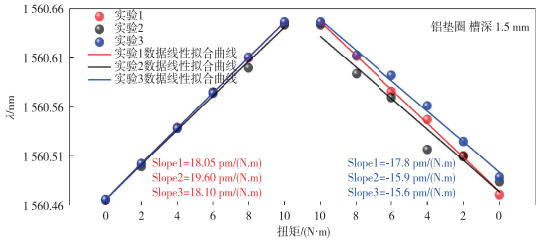
（a）槽深为 1 mm 的不锈钢垫圈



（b）槽深为 1 mm 的铝制垫圈



（c）槽深为 1.5 mm 的不锈钢垫圈

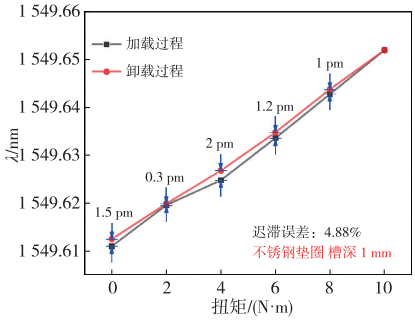


（d）槽深为 1.5 mm 的铝制垫圈

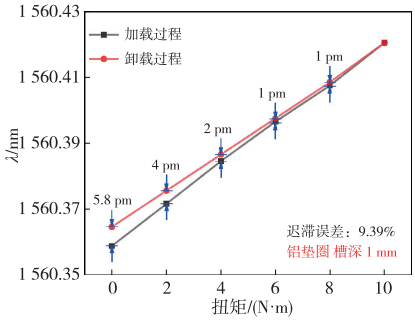
图 16　循环实验测试波长漂移情况

通过对传感数据进行分析可知，当经历扭矩增加与减小的循环变化过程时，传感器的输出响应呈现出一致性与重复性。1 mm槽深不锈钢和铝垫圈传感器的最大迟滞误差分别为1.5和5.8 pm，其迟滞性分析如图17(a)和(b)所示。

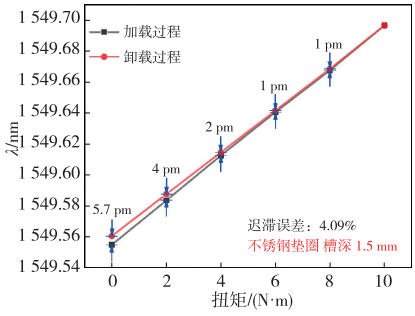
槽深为1.5 mm传感器的最大迟滞误差略有增加，分别为5.7和8 pm，迟滞性分析如图17(c)和(d)所示；这表明在多次循环测试里，该传感器对于相同加载扭矩所产生的波长变化量接近，迟滞误差水平较低。



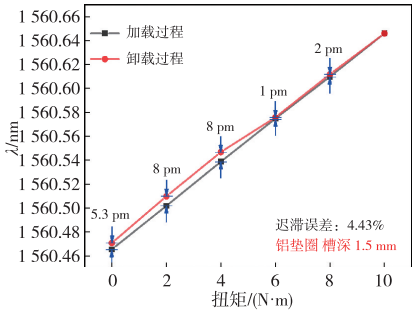
(a) 槽深为1 mm的不锈钢垫圈



(b) 槽深为1 mm的铝制垫圈



(c) 槽深为1.5 mm的不锈钢垫圈



(d) 槽深为1.5 mm的铝制垫圈

图17 迟滞性分析

3 结论

本文提出一种基于飞秒刻写FBG嵌入螺栓垫圈周向开槽结构的螺栓应力测试方法，通过Comsol软件平台得到槽深1和1.5 mm的不锈钢和铝制垫圈在施加扭矩情况下的力学分布，分析不同槽深及材料的力学场变化，确定施加扭矩的范围；采用激光传感系统以获得信噪比高、窄带宽的输入信号，光谱增益可达到34.49 dB，3 dB带宽0.06 nm；建立了螺栓加载扭矩-波长关系，并对其应变特性和稳定性进行了实验验证；其中，采用中心波长为1 549和1 560 nm的FBG分别与不锈钢和铝制垫圈结合，设置槽深为1和1.5 mm的螺栓垫圈组成四种参数的传感器；在0～10 N·m扭矩范围内，分别研究了槽深为1 mm的不锈钢和铝制垫圈传感器的灵敏度为4.05和6.13 pm/(N·m)，槽深为1.5 mm的不锈钢和铝制垫圈传感器的灵敏度为14.12和18 pm/(N·m)，加载和卸载过程有良好的逆向关系，卸载灵敏度分别为－3.96，－13.6，－5.57和－17.30 pm/(N·m)，灵敏度绝对值相近；在循环加载卸载过程中表现出良好的稳定性和迟滞性，所设计的螺栓应力传感结构能够有效实现螺栓应变测量。

参考文献：

[1] Huang H, Wang Y, Pang Q. Analysis and prediction of wind turbine bolts based on GPR method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(3): 1155-1164.

[2] 慕聪颖，胡曙阳，武 丹，等. 基于植入式光纤传感网络的固体火箭发动机结构健康监测[J]. 半导体光电，2024，45(1)：145-151.
Mu Congying, Hu Shuyang, Wu Dan, et al. Structural health monitoring of solid rocket motor based on embedding optical fiber sensing networks [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 145-151.

[3] Shen X, Lu L, Zeng D. Fatigue failure analysis of high strength bolts used for high-speed railway vehicle braking discs [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104661.

[4] Jiménez-Peña C, Lavatelli A, Balcaen R, et al. A novel contactless bolt preload monitoring method using digital image correlation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40(2): 54.

[5] Zhang H, Chen T, Ji K, et al. Study on preload of bolted connections in pitch bearing based on vibration modal analysis

[J]. Shock and Vibration, 2023(1): 6653564.

[6] 尚秋峰, 向方宇, 樊　松. 基于轴向应变误差修正的FBG形状重构算法[J]. 半导体光电, 2023, 44(6): 972-980.
Shang Qiufeng, Xiang Fangyu, Fan Song. FBG shape reconstruction algorithm based on axial strain error correction [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(6): 972-980.

[7] 周　靖, 张卫平, 邹　阳, 等. 面向扑翼微飞行器的扭矩传感器研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 355.
Zhou Jing, Zhang Weiping, Zou Yang, et al. Research on torque sensor for flapping wing micro aircraft [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 355.

[8] Luo L, Fan J, Ma J, et al. A nonlinear ultrasonic wave mixing method for looseness detection of bolted joints [J]. Ultrasonics, 2024, 142: 107402.

[9] Jia J, Yu X, Zhang X, et al. Bolt body axial stress detection based on nut axial stress [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 211: 108190.

[10] Liu P, Lu Y, Zhang W, et al. Customized-accuracy simultaneous sensing of temperature, pressure and acoustic impedance based on FBS in optical fiber [J]. Optics Communications, 2024, 563: 130571.

[11] Zhou Z, Tian L, Han Y, et al. Distributed vibration and temperature simultaneous sensing using one optical fiber [J]. Optics Communications, 2021, 487: 126801.

[12] Fu G, Wang K, Liu C, et al. Study on the sensing characteristics of salinity-temperature-depth based on SNS-FBG cascade [J]. Optics Communications, 2024, 552: 130092.

[13] Xu T, Gao W, Yu H. Dual-parameter measurements of torsion and temperature based on the tilted Bragg grating in few-mode fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2024, 88: 103836.

[14] Jauregui-Vazquez D, Alvarez-Chavez J A, Lozano-Hernandez T, et al. Fiber laser sensor configurations for refractive index, temperature and strain: A review [J]. Photonics, 2023, 10(5): 495.

[15] Deng S, Wang T, Yu W, et al. A multiplexed fiber Bragg grating angle sensor for bolt loosening monitoring [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 22661-22669.

[16] Cloostermans B, Pronk D, Bruckenburg B, et al. Spiral wound gaskets with fiber Bragg grating sensors [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181: 109475.

[17] Guo Y, Hu Z, Xiong L, et al. Fiber Bragg grating based quasi-distributed bolt force sensor with torque resistance [J]. Measurement, 2022, 195: 111063.

[18] Duan C, Zhang H, Li Z, et al. FBG smart bolts and their application in power grids [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5): 2515-2521.

作者简介：

黄俊伊(1998—)，女，黑龙江省人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感；

何　巍(1986—)，男，北京市人，博士，教授，主要研究方向为光纤传感系统。