

用于航天环境的布拉格光栅温度传感器灵敏度与精度研究

韩 放, 廖 韬, 苏新明, 邓俊武, 刘 阳

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 光纤光栅温度传感器具有着电隔离、抗干扰、载荷量小等优点, 极其适合工程领域的传感测量; 目前光纤光栅温度传感器已在我国民用领域得到了广泛的应用, 但在其航天领域中的研究才刚刚起步; 理论上, 光纤光栅传感器是可以应用于航天领域中, 但由于太空中不同于地面的复杂特殊的空间环境: 低温、真空、辐射等, 在应用时必须考虑这些因素对传感造成的负面影响; 提出使用金属化技术对光纤光栅进行增敏, 制作了金属涂覆增敏的光纤布拉格光栅温度传感器, 并研究了其在低温环境下的温度灵敏度与精度, 其在低温环境下的温度灵敏度在 $6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 以上, 重复精度约为 $\pm 1.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 可为光纤传感技术在航天领域应用等相关研究提供参考。

关键词: 光纤光栅; 温度传感器; 金属化; 航天环境

Study on Sensitivity and Accuracy of Bragg grating Temperature Sensor for Spacecraft Environment

Han Fang, Liao Tao, Su Xinming, Deng Junwu, Liu Yang

(Beijing Institute of Spacecraft Environment and Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The Fiber Bragg Grating sensor has the advantages of electrical isolation, anti-interference, and small load, which is extremely suitable for sensing measurement in engineering fields. At present, FBG sensors have been widely used in China's civil field, but research in aerospace field has just begun. In theory, FBG sensors can be used in the aerospace field, but due to the complex and special space environment different from the ground inspace: low temperature, vacuum, radiation, etc., the negative impact of these factors on sensing must be considered in the application. In this paper, we use the electroless metal plating technology to fabricate a metal-coated sensitized fiber Bragg grating temperature sensor, and study its temperature sensitivity and accuracy under low temperature environment, the temperature sensitivity in low temperature environment is above $6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, and the repetition accuracy is about $\pm 1.7 \text{ }^\circ\text{C}$, which can provide reference for the aerospace research of FBG sensors technology.

Keywords: FBG sensor; temperature sensor; metallization; aerospace environment

0 引言

国外 NASA、ESA 等机构早在 20 世纪 70 年代就开始了航天器用光纤传感系统的研究。在航天航空领域, 光纤传感器主要是应用在航天器的结构健康监测、复合智能材料等领域。相较电传感器, 光纤传感器具有电隔离、抗干扰、耐受恶劣环境、重量轻等优点, 尤其是可以有效减小载荷, 能在复杂环境下高精度、稳定、实时监测航天器结构的温度、应变等参数, 全方位感知航天器结构的状态数据, 从而有效保证航天器的正常运行和航天员的生命安全, 提高航天任务的可靠性和安全性。

1998 年, NASA 在 X-33 航天飞机上采用了基于光纤布拉格光栅传感器了结构检测系统, 用来测量燃料储箱、保温层以及机体结构的应变、温度等参量, 取得的较好的

效果^[1]。2001 年, 在后续的 X-38 项目中, NASA 又使用 12 支光纤布拉格光栅传感器制作了准分布式光纤光栅结构检测系统, 可以测量机体结构的力学载荷^[2], 量程达 -1000 到 $3000 \mu\epsilon$ 。

2009 年, ESA 在 Proba-2 卫星上安装了首台光纤传感样机, 用于推进器的高温光纤传感器的解调。据报道该传感器可在高达 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下工作, 稳定超过 50 小时^[3]。

2011 年, JAXA 将光纤光栅传感器嵌入到碳纤维塑料复合材料中用于结构的损伤检测。实验证明了通过检测传感器的应变可以间接地实现结构的冲击、应力、损伤检测^[4]。

目前, 国外已经将光纤传感技术成功应用到多类航天器上, 例如运载火箭, 卫星, 载人仓等, 技术相对成熟。而国内对于光纤传感技术在航天领域的研究才刚刚起步, 与国外尚有不小的差距。另外, 有报道的应用在航天器、航天领域的光纤传感研究大多是用在检测航天器的结构健康, 材料的应力、应变、嵌入式智能材料等, 而用于温度测量的相关研究较少见, 根据报道^[5], NASA 已经能够做

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-04-21。

基金项目: 载人航天预研项目(040401)。

作者简介: 韩放(1982-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 工程师, 主要从事航天器环境工程方向的研究。

到在 $-253 \sim 280$ °C 的宽温度范围内做到准确的测量，而国内鲜见相关研究。

国内对于光纤光栅的研究大多是在民用领域。目前，应用于公路、桥梁、铁路、地铁等工程上的光纤光栅温度、应变传感器已经很成熟了，能够达到较高的精度，应用较为广泛。但是，国内有报道的光纤光栅温度传感器都仅仅能在常温下工作，无法适应航天环境中的低温以及恶劣环境。

我们利用光纤光栅的金属化技术制作了利用镍增敏的光纤光栅温度传感器。此前，光纤光栅金属化技术大多是用用于光纤光栅的无胶化封装，以及高温下光纤光栅的保护。我们提出了使用该技术对光纤光栅进行增敏以适用于航天环境中的应用。经过试验，制成的传感器有着较高的温度灵敏度和精度。

1 理论

FBG，即光纤布拉格光栅，是一种在光纤纤芯中制作形成周期性折射率调制结构的光无源器件。首个光纤布拉格光栅是在 1978 年，加拿大渥太华通信研究中心的 K. O. HILL 等人在一根掺锗光纤上制成的^[6]。

布拉格光纤光栅的结构与平面光栅类似，都是周期性的重复结构，以实现光的调制。光学特性上，光纤布拉格光栅表现为类似一个窄带光滤波器，当一束宽带光入射进光纤光栅，特定波长附近的光线会被反射回来，其工作原理示意图由图 1 所示，图 1 (b) 是反射光的光谱，图 1 (c) 是透射光的光谱。

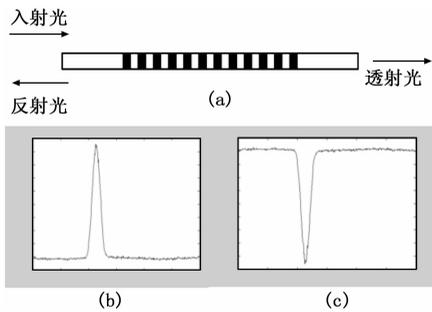


图 1 光纤布拉格光栅原理

该现象可以用耦合模理论来解释。反射光谱中，强度最高对应的波长称为光纤光栅的中心波长，也叫布拉格波长， λ_B ，可用 (1) 式表示^[7]：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中， Λ 是光纤光栅的折射率调制周期， n_{eff} 是纤芯的有效折射率。这两个参量会受到外界环境变化影响，进一步说，外界环境参量的变化会引起光纤光栅反射光谱中心波长发生变化，检测光纤光栅的中心波长就可以反过来实现对环境因素的传感测量。这就是光纤布拉格光栅传感器的基本原理。

经过一系列的数学推导^[8]，我们可以得到光纤布拉格光栅的温度传感模型：

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (2)$$

式 (2) 中，可以设 $\xi = \frac{dn_{eff}}{dT}$ ，即光纤布拉格光栅的折射率

温度系数，这是光纤材料的热光效应引起的。而显然 $a = \frac{1}{\Lambda}$

$\frac{d\Lambda}{dT}$ ，这是光纤布拉格光栅的热膨胀系数。再设 $a_T = \left(\frac{1}{n_{eff}} \xi \right) + a$ ，可以得到式 (3)：

$$d\lambda_B = a_T \lambda_B dT \quad (3)$$

称 a_T 为光纤光栅的温度灵敏度系数，即环境温度变化 1 °C，造成的光纤布拉格光栅中心波长的漂移大小。室温下，对于 1550 nm 波段的裸光纤布拉格光栅， a_T 通常约为 9.6 pm/°C^[8]。

常温环境下，光纤布拉格光栅温度传感器的温度灵敏度约为 9.6 pm/°C，普通光纤光栅解调仪分辨率一般为 1 pm，因此温度分辨率约为 0.1 °C。但是，随着温度的下降，光纤光栅的温度灵敏度会逐渐降低。当温度低于 -80 °C 是，光纤光栅的温度灵敏度只有 5.41 pm/°C^[9]，仅为室温条件下的一半左右。温度越低，光纤光栅的温度灵敏度也越低，精度也随之变差。然而，航天器表面、内部温度最低可达 -200 °C，这远远超出了普通布拉格光纤光栅的测温范围，必须解决这个问题。

从式 (2) 可以知道，温度使光纤布拉格光栅的中心波长发生漂移的原因主要有两个方面：光纤光栅的热膨胀 $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ ，以及热光效应 $\frac{dn_{eff}}{dT}$ 。随着温度的降低，热膨胀效应和热光效应都变得不活跃。实际上，当温度下降到液氮温度时，光纤光栅的热膨胀系数 $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ 几乎为零， $\frac{dn_{eff}}{dT}$ 约为常温下的十分之一^[9]，因此光纤光栅在低温下失去了测温的能力。

一个可行的解决方案是对光纤光栅进行增敏。即使用具有较高热膨胀系数的材料作为裸光纤光栅的基底或者涂覆，当温度改变时，增敏材料随着温度的变化膨胀或者收缩，带动光纤光栅膨胀或收缩，引起布拉格波长的漂移。由于选取的材料热膨胀的程度要比光纤光栅本身高，所以起到了增敏作用。

常见的增敏材料有各种金属以及高分子材料。使用高分子材料进行增敏，通常的做法是将增敏材料做成基底，然后将布拉格光纤光栅粘接在基底上面。这种方法操作简单易行，但是胶粘剂寿命较短，容易发生蠕变，严重影响布拉格光纤光栅测温的精度与稳定性。金属材料也可使用基底的方式增敏，但是利用金属本身延展性好这一特性，我们可以将布拉格光纤光栅表面制作一层金属涂层，这既可以克服胶粘法的一些缺陷，也可以达到增敏的目的。常见金属的热膨胀系数见图 2。

从图 2 可以看出不同金属的热膨胀系数也不同，铅、锌、钢等金属具有着极高的热膨胀系数，铝、银、铜则适中，镍的热膨胀系数最低。但即使是最低的镍金属，其热膨胀系数也比石英要高出一个数量级以上^[10]。考虑到现有

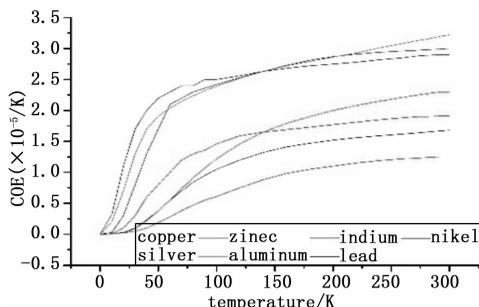


图 2 常见金属的热膨胀系数

的工艺, 将镍涂镀到光纤表层是最经济、简易的, 因此我们选择了镍金属作为增敏材料。

2 实验与测试

2.1 镍涂层光纤光栅的制作

为了对布拉格光纤光栅进行增敏, 我们采用化学镀的方式将光纤光栅表面镀上一层薄金属镍。从理论上说, 化学镀实际上是一种氧化还原反应, 与电镀工艺相同, 是金属盐中的阳离子被还原剂还原成金属单质的过程。但是化学镀能够在不导电的绝缘体表面实现, 而电镀只能用于金属导体上。整个工艺流程如图 3 所示。

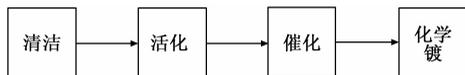


图 3 金属化工流程图

我们采用的光纤光栅是杭州光佑公司生产的光纤布拉格光纤光栅, 中心波长约为 1 563 nm, 反射率 90%, 带宽 0.3 nm, 光纤光栅上的涂覆已经使用机械手段除去。首先, 将光纤光栅浸泡在 10% 的 NaOH 溶液中, 去除附着的油污与灰尘, 10 min 后取出, 在超声波清洗机中清洗 3 min。

由于光纤光栅的材质是石英, 即使金属单质被还原出来, 也不易沉积到光纤光栅表面。因此我们采用钯催化剂对光纤光栅表面进行活化和催化。实际上, 这种活化-催化两步法最早是用于对于塑料表面进行化学镀的处理工艺^[11], 但也可以应用到光纤光栅上^[12]。活化剂与催化剂的配方如表 1

表 1 活化-催化配方

活化液	
浓盐酸	20ml/L
SnCl ₂	10g/L
催化液	
浓盐酸	10ml/L
PdCl ₂	1g/L

将清洁后的光纤光栅在活化液中处理 20 min, 取出, 立即放入催化液中处理 10 min, 然后用流动的去离子水洗净。注意在清洗时必须将光栅表面与空气充分接触, 以便催化液中的 Pd²⁺ 离子充分被氧化形成光纤光栅表面的纳米集团, 形成有利于金属镍吸附的基团, 在化学镀时才能使镍镀层牢固吸附于光纤光栅表面。这也是催化后不用超声

波清洗机清洗的原因。

经过活化、催化后的光纤光栅就可以进行化学镀处理了。我们采用酸性镀镍工艺, 镀液配方如表 2。

表 2 镀液配方

硫酸镍	20~30g/L
次亚磷酸钠	25~30g/L
苹果酸	22~30 g/L
醋酸钠	10~15g/L
碘化钾	5~20mg/L

称取相应质量的化学试剂溶于去离子水加入大烧杯中, 再使用 NaOH 调节 PH 值到 4.0~5.0。此时, 溶液呈蓝绿色, 烧杯底部有部分沉淀, 如图 4 (a) 所示。

将光纤光栅固定在烧杯内部, 放入水浴锅中加热。在开始时, 将水浴锅的温度控制在 95 ℃, 随着温度的升高, 镀液温度开始升高, 颜色逐渐变深 (图 4 (b)), 最后稳定在约 86 ℃。持续水浴 50 min 后, 镀液沸腾, 颜色逐渐加深, 最终变为蓝黑色, 且由透明液体逐渐变为不透明, 见图 4 (c)。镀液沸腾后, 保持镀液沸腾的状态 10 min, 然后将水浴锅的温度降低到 80 ℃, 保持 1 h。化学镀结束后, 最后镀液的颜色为蓝黑色, 比较透明, 肉眼可见烧杯中有金属镍析出, 见图 4 (d)。

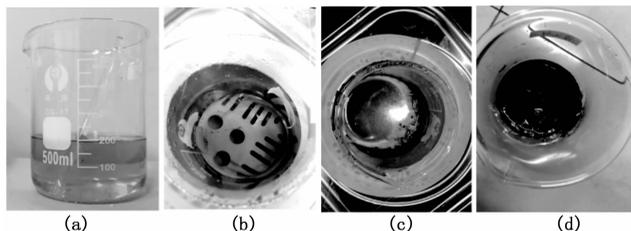


图 4 镀液状态图

在显微镜低倍状态下观察镀镍完成的光纤布拉格光栅, 见图 5。左端较厚的部分是未去除的涂覆层 (成分为丙烯酸酯), 中间较细的部分是去掉涂覆后光纤光栅, 上面是金属镍镀层, 肉眼可见反光明亮。镍镀层厚度均匀, 表面光滑, 未见肉眼可见缺陷。

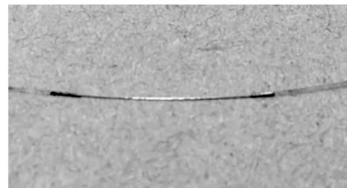


图 5 镀镍光纤布拉格光栅

在显微镜较高倍数下的制作好的镀镍布拉格光纤光栅如图 6。镀层非常光滑, 没有粗糙的毛刺, 与布拉格光纤光栅结合完好, 明显反光, 厚度均匀。根据图像计算出的镍涂层的厚度约为 5 μm。证明化学镀工艺用于制作光纤光栅的金属化涂层是完全可行的。

2.2 温度灵敏度和精度测试

目前对布拉格光纤光栅温度传感的研究主要着重于对

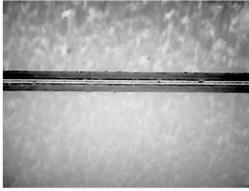


图 6 镀镍布拉格光纤光栅的高倍视图

布拉格光纤光栅进行增敏。前文已经提过，普通未经增敏处理的布拉格光纤光栅的温度灵敏度大约在 9.6 pm/℃，普通光纤光栅解调仪分辨率一般为 1 μm，即温度分辨率约为 0.1 ℃，相比铂电阻等电类温度传感器，这个数值并不高，因此，大多数研究都是致力于提升布拉格光栅光纤的温度灵敏度，使用各种手段进行增敏，以达到更高的测温精度。

现在广泛使用对布拉格光纤光栅进行增敏的技术主要是将膨胀系数较高的材料作为基底或者涂覆到布拉格光纤光栅上，间接提升布拉格光纤光栅的温度灵敏度。但是，实际应用中很难使增敏材料与布拉格光纤光栅理想结合，二者之间极易发生相对滑动，这样，布拉格光纤光栅的测温重复性与精度就会受到极大影响，产生较大的误差。

理论上来说，相比传统的使用胶粘封装增敏的布拉格光纤光栅温度传感器，我们使用化学镀镍制作的金属增敏布拉格光纤光栅稳定性更好，更不易发生蠕变，有着更长的寿命。我们实验测试了制作好的增敏布拉格光纤光栅的性能。

我们使用 sm125 光纤光栅解调仪解调光栅，KM3 型环境模拟设备模拟宇宙空间环境（真空，低温），测试了制作的镀镍光栅。我们控制设备内的温度在 80 ℃ 到 -110 ℃ 之间升降，循环 4 次，以尽可能仿真布拉格光纤光栅在宇宙空间中的环境温度变化，测试得到镀镍光纤布拉格光栅的温度精度。模拟舱内的环境温度变化见图 7。

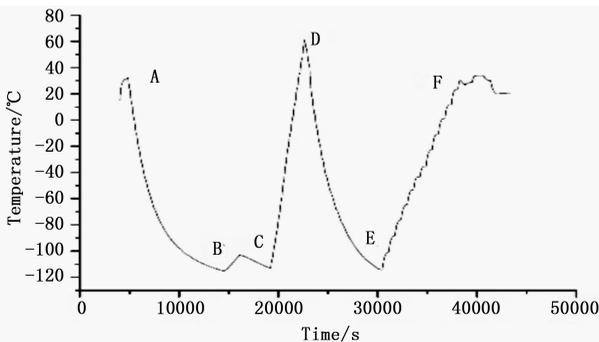


图 7 舱内温度变化曲线图

舱内温度升降有 4 个阶段，图 8 上用字母标注了各阶段转折点。为了模拟实际情况，设备内的温度升降速度不是均匀的。记录各阶段的温度数据和布拉格光纤光栅的中心波长数据，将各阶段记录的温度—光纤光栅中心波长数据作图，见图 8。图上共有四条曲线，对应温度升降的 4 个阶段，其中 Down1 对应的曲线是 AB 阶段，Up1 对应的曲线是 CD 阶段，Down2 对应的曲线是 DE 阶段，Up2 对应

的曲线是 EF 阶段。

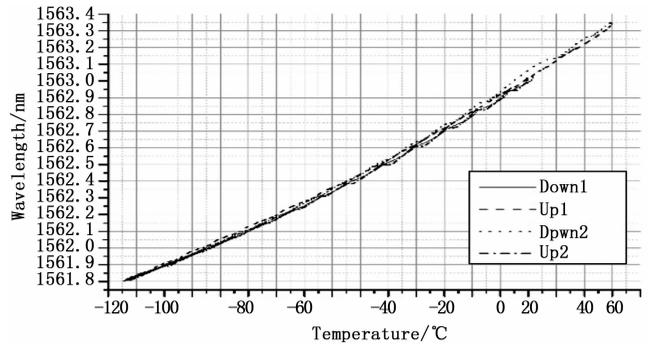


图 8 光纤光栅中心波长

将 4 条曲线分别进行三次多项式拟合，得到表 3，其中，拟合曲线用 $y = Intercept + B1 \times X^1 + B2 \times X^2 + B3 \times X^3$ 表示。

表 3 拟合结果曲线拟合结果

曲线	拟合结果	
Down1	<i>Intercept</i>	1562.69838
	<i>B1</i>	0.00971
	<i>B2</i>	1.61103E-5
	<i>B3</i>	-1.97083E-9
Up	<i>Intercept</i>	1562.71767
	<i>B1</i>	0.00947
	<i>B2</i>	1.41566E-5
	<i>B3</i>	8.83018E-9
Down2	<i>Intercept</i>	1562.72841
	<i>B1</i>	0.00988
	<i>B2</i>	1.20241E-5
	<i>B3</i>	-3.47583E-8
Up2	<i>Intercept</i>	1562.70311
	<i>B1</i>	0.00974
	<i>B2</i>	1.75208E-5
	<i>B3</i>	1.39411E-8

从表 3 中可以看出，三次多项式可以较好地拟合布拉格光纤光栅的中心波长与温度的变化情况，这与理论研究较符合^[9]。对四条曲线求一阶导数，作图得到图 8。从物理意义上来说，图 9 的曲线就代表镀镍布拉格光纤光栅的温度灵敏度，单位是 nm/℃，即温度每变化 1 摄氏度，光纤光栅的中心波长的变化量。从图中可以看出，室温时，光纤光栅的温度灵敏度约为 0.010~0.011 nm/℃ 左右，即 10~11 pm/℃ 左右，比裸光纤光栅略高一些；随着温度降低，温度灵敏度也降低，-120 ℃ 时约为 6 pm/℃，仍比裸光纤光栅高^[9]。

考虑 -110~0 ℃ 范围内的精度。对图 8 中最上面的曲线 Up1 和最下面的曲线 Up2 做减法（即两条相差最大的曲线），得到图 10。在 -110~-40 ℃ 范围内，光纤光栅的重复误差约为 pm，考虑到该温度范围内的温度灵敏度约为 7 pm/℃，则光纤光栅传感器的温度精度约为 1 ℃。在 -40~0 ℃ 范围内，光纤光栅的重复误差稍大，约为 15 pm，考虑

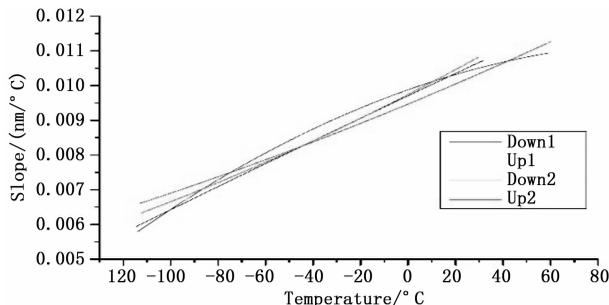


图 9 光纤光栅温度灵敏度

到此时光纤光栅的温度灵敏度也略高,按 9 pm/°C 计算,则光纤光栅传感器的温度精度约为 1°C。

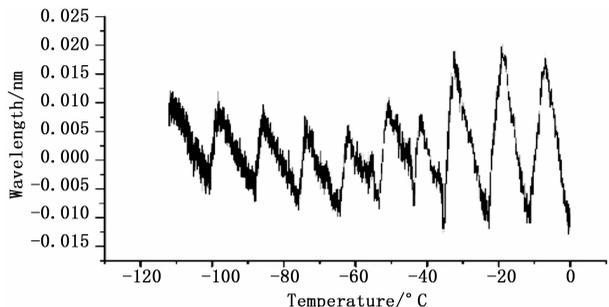


图 10 光纤光栅的波长误差

3 结论

我们使用化学镀镍工艺制作了镍增敏的光纤布拉格光栅,实验证明了化学镀工艺能够成功地在光纤光栅表面沉积一层镍镀层,且能够起到有效的增敏作用。实验结果与理论预测比较符合,经过增敏后的光纤布拉格光栅温度灵敏度在 7~11 pm/°C 之间,重复精度较高,在 -110~ -40 °C 范围内精度可达 ±1 °C。

目前,对光纤光栅金属封装的研究大多都是针对提高布拉格光纤光栅的温度灵敏度与高温下的保护封装,而我们开创性的研究了低温下布拉格光纤光栅的温度传感性能以及增敏后的布拉格光纤光栅的重复精度,可为布拉格光纤光栅的航天应用提供参考。

参考文献:

[1] Garbos R, Mouyos W. X-33/RLV system health management/vehicle health management [A]. Proceedings of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit [C]. 1998.

[2] Ecke W, Latka I, Willsch R, et al. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12 (7): 974.

[3] Haddad E, Kruzelecky R, Zou J, et al. Fiber optic high temperature sensors for re-entry vehicles [A]. proceedings of the 6th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles [C]. 2009.

[4] Takeda S I, Aoki Y, Nagao Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors [J]. Composite Structures, 2012, 94 (3).

[5] 邵 飞, 杨 宁, 孙 维, 等. 基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究 [J]. 航天器工程, 2018, 27 (02): 95-103.

[6] 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 (10).

[7] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15 (8).

[8] 贾宏志. 光纤光栅传感器的理论和技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001.

[9] 尹泽霖. 低温下光纤布拉格光栅温度灵敏性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[10] Lupi C, Felli F, Ippoliti L, et al. Lead coating to improve fiber bragg grating sensitivity at cryogenic temperatures [A]. Proceedings of the 17th International Conference on Optical Fibre Sensors [C]. International Society for Optics and Photonics, 2005.

[11] 吴伟杰. 塑胶电镀离子钡活化工艺的开发及应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[12] Li Y, Yang K, Li X. Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45 (3): 68-75.

[10] Drew J, Zhang J, Calvez J L. The impact of channel count on microseismic event detection for a surface array [A]. 2014 SEG Annual Meeting. [C] Society of Exploration Geophysicists, 2014.

[11] Gibbons S J, Nasholm, S P, Ruigrok E, et al. Improving slowness estimate stability and visualization using limited sensor pair correlation on seismic arrays [J]. Geophysical Journal International, 2018, 213 (1): 447-460.

[12] Langston, Charles A. Spatial gradient analysis for linear seismic arrays [J]. Bulletin of the seismological society American, 2007, 97 (1): 265-280.

[13] Gibbons Steven J, Ringdal Frode. The detection of low magnitude seismic events array-based waveform correlation [J]. Geophysical Journal International, 2006, 165 (1): 149-166.

(上接第 288 页)

[5] 于海英, 朱元清. 上海地震台阵的 F-K 分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 2002, 23 (2): 55-64.

[6] 刘 旭, 朱元清, 佟玉霞. 地震台阵滤波及子台分布对聚束效果的影响 (II)——子台分布及聚束效果的分析 [J]. 2003, 25 (4): 293-297.

[7] Gibbons, et al. Considerations in phase estimation and event location using small-aperture regional seismic arrays [J]. Pure and Applied Geophysics, 2010, 167 (4/5): 381-399.

[8] Gal M, Reading A M, Ellingsen S P, et al. Improved implementation of the f-k and Capon methods for array analysis of seismic noise [J]. Geophysical Journal International, 2014, 198 (2): 1045-1054.

[9] Chiou S J, Bolt B A. Seismic wave slowness-vector estimation from broad-band array data [J]. Geophysical Journal Interna-