

耐高温全金属化封装的光纤法布里-珀罗干涉仪和 光纤光栅复合传感器

李杰燕 张东生 周祖德 郭永兴

(武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要 利用非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪(EFPI)和光纤布拉格光栅(FBG)制作了一种温度和应力同时测量的复合光纤传感器。采用超高真空磁控溅射镀膜、电镀及激光焊接技术实现了光纤传感器的耐高温全金属无胶化封装。实验结果表明:在 290 °C 温度条件下传感器的应力灵敏度为 90 pm/N,具备良好的线性测量能力(约 0.9965);传感器的温度灵敏度为 12 pm/°C,线性度可达到 0.9988,其温度补偿效果较好。实验结果同时证明了采用超高真空磁控溅射镀膜及激光焊接技术实现光纤传感器耐高温全金属化封装方法的可行性与有效性。

关键词 光纤光学;EFPI-FBG 传感器;超高真空磁控溅射镀膜;电镀;激光焊接

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s106002

High Temperature Resistant Metal Packaged Multiplexed Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometer and Fiber Bragg Grating Sensor

Li Jieyan Zhang Dongsheng Zhou Zude Guo Yongxing

(National Engineering Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology,
Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract A multiplexed fiber-optic sensor combining the advantages of extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) and fiber Bragg grating (FBG) is presented for simultaneous stress and temperature measurement. Ultra-high-vacuum magnetron sputter system, electroplating technology, and laser welding technology are adopted to realize fiber sensor encapsulation without adhesives, which can improve the resistance to elevated temperatures of the sensor. Experimental results show that the sensor has a stress sensitivity of 90 pm/N and a linearity of 0.9965 at the temperature of 290 °C. FBG of the multiplexed sensor has a temperature sensitivity of about 12 pm/°C and a linearity of about 0.9988. Broad applications based on the metal packaged multiplexed fiber optic EFPI-FBG sensor at higher temperature in this work can be expected.

Key words fiber optics; EFPI-FBG sensor; ultra-high-vacuum magnetron sputter system; electroplating technology; laser welding technology

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

1 引 言

光纤传感器是近几十年发展起来的新型传感器件,具有体积小、重量轻、稳定性好、信号传输距离远和不受电磁干扰等优点,在桥梁、大坝、隧道、钻井和港口翻车机等大型结构工程领域获得了广泛的应用^[1~15]。光纤的主要成分为性质比较稳定的二氧化硅,具有较长的使用寿命。Dong 等^[16]指出 I 类光纤布

拉格光栅(FBG)在 80 °C 的温度下使用寿命仍然在 25 年以上,然而光纤传感器的封装技术却成为了限制其应用的最大制约因素。目前最常用的封装方式是通过环氧胶粘剂将光纤传感器粘贴于传感基体上。但是,常用的有机胶粘剂耐热、耐油及耐磨性能差,极易老化,使用寿命有限^[17]。自然条件下的日照、高温和潮湿的环境都会导致环氧胶粘剂的老化及失效^[18]。

收稿日期: 2012-12-30; **收到修改稿日期**: 2013-03-01

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041203)资助课题。

作者简介: 李杰燕(1985—),女,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: connie851228@126.com

导师简介: 周祖德(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事网络数字制造、数控技术及机电一体等方面的研究。

E-mail: zudezhou@whut.edu.cn

因此在工程应用中,胶粘剂有限的使用寿命成为了限制光纤传感器使用期限的一个重要因素。

基于以上因素,本文制作了一种结合非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪(EFPI)与FBG(EFPI-FBG)的复合传感器,采用超高真空磁控溅射镀膜和电镀技术实现了光纤传感器表面的全金属化。光纤传感器表面的金属化镀膜可以保护传感器,增加其机械强度,同时可以通过激光点焊技术将其固定在传感基体上,实现了光纤传感器的全金属无胶化封装,也克服了环氧胶粘剂不耐高温的问题。全金属化的封装方式改变了保护和封装光纤传感器必须依靠胶粘剂的被动局面。

2 结构与原理

2.1 光纤 EFPI-FBG 的基本结构

光纤 EFPI-FBG 复合传感器由毛细玻璃管和两段端面切割平整的单模光纤(SMF)组成,其中一段顶端刻写有 FBG 传感器基本结构如图 1 所示。玻璃管内径大于裸光纤外径,FBG 在毛细玻璃管中处于自由状态。图 2 为光纤 EFPI-FBG 的整体反射光谱图。从图中可以看出,光谱为 FBG 与 EFPI 反射光谱的叠加。

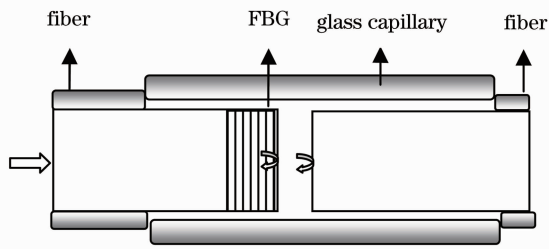


图 1 复合光纤 EFPI-FBG 传感器结构图
Fig.1 Structure diagram of the EFPI-FBG

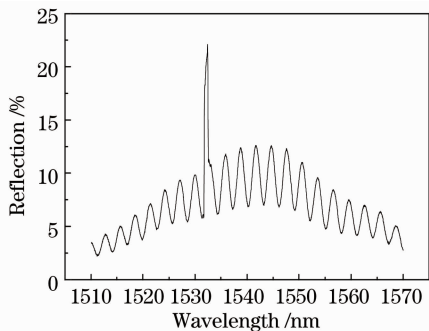


图 2 复合光纤 EFPI-FBG 反射光谱图
Fig.2 Reflection spectrum of the EFPI-FBG

2.2 光纤 EFPI-FBG 的表面全金属化

采用超高真空磁控溅射镀膜以及电镀技术实现

光纤 EFPI-FBG 表面的金属化。图 3 为超高真空磁控溅射镀膜设备。首先使用超高真空磁控溅射镀膜机在 EFPI-FBG 表面溅射一层厚约 20 nm 的钛金属薄膜,然后在钛金属膜上再溅射一层厚度约为 400 nm 的银薄膜。在光纤 EFPI-FBG 的表面镀两种不同的金属薄膜的原因是,钛金属与二氧化硅材料间的亲和力好,不易脱落,但其导电性能较差,金属银的导电性能较好,在钛金属表面再镀银可以为下一步良好的电镀效果提供保障。



图 3 超高真空磁控溅射镀膜机

Fig.3 Machine of ultra-high-vacuum magnetron sputter

磁控溅射镀膜之后的光纤 EFPI-FBG 具有了导电性,使用电镀方式进一步在其表面镀金属铜,使其镀铜后外径约为 0.4 mm。金属铜遇水较易氧化,而金属铬则具有很强的耐腐蚀性,通常镀于金属表面可以起到保护作用。因此,再一次使用超高真空磁控溅射镀膜机在完成电镀铜的光纤 EFPI-FBG 表面镀一层金属铬作为保护膜。图 4 为光纤 EFPI-FBG 全金属化完成后的显微图像,图中虚线右侧为金属化区域,而左侧是未金属化的区域。

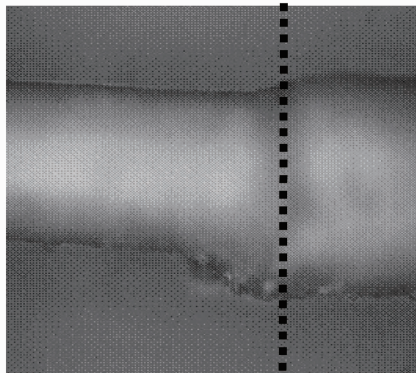


图 4 金属化 EFPI-FBG 的显微图像

Fig.4 Micrograph of metallized EFPI-FBG

2.3 全金属化光纤 EFPI-FBG 的激光焊接封装

全金属化的光纤 EFPI-FBG 穿过金属传感基体固定在图 5 中所示的固定架上,通过夹具对 EFPI-FBG 施加一定的预拉力使其在金属传感基体中处于拉伸状态。激光器通过点焊方式将表面全金属化的光纤 EFPI-FBG 与传感基体焊接固定,完成传感器的封装。图 6 为激光焊接封装完成后的传感器的实物图,图中标注了激光焊接的位置。

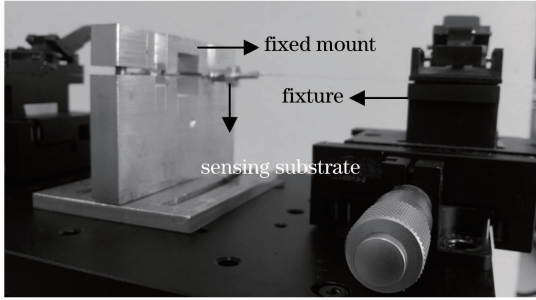


图 5 固定装置

Fig. 5 Detail diagram of fixed installation

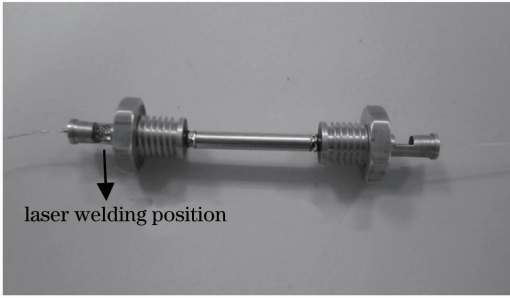


图 6 传感器的实物图

Fig. 6 Laser welding packaged sensor

2.4 光纤 EFPI-FBG 复合传感理论

由于复合光纤 EFPI-FBG 中 FBG 置于毛细玻璃管内部,不受外界应力影响,仅对温度敏感,因此 FBG 中心波长变化 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与温度变化 ΔT 之间的关系可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG}} = a_1 \cdot \Delta T, \quad (1)$$

式中 a_1 为 FBG 的温度灵敏度。

而 EFPI 对于应力与温度均敏感,其单峰峰值变化 $\Delta\lambda_{\text{EFPI}}$ 是由温度变化 ΔT 与应力变化 ΔF 共同作用产生的,可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{EFPI}} = a_2 \cdot \Delta T + b_2 \cdot \Delta F, \quad (2)$$

式中 a_2 和 b_2 分别为 EFPI 的温度灵敏度与应力灵敏度。

因此,外界应力与温度变化引起的 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与 $\Delta\lambda_{\text{EFPI}}$ 可以由矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{EFPI}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F \end{bmatrix}. \quad (3)$$

则温度变化 ΔT 及外力变化 ΔF 与 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 及 $\Delta\lambda_{\text{EFPI}}$ 的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/a_1 & 0 \\ -a_2/a_1 b_2 & 1/b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{FBG}} \\ \Delta\lambda_{\text{EFPI}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中的各灵敏度参数可以通过温度及应变测试分别获得。

3 实验与分析

3.1 温度实验与分析

温度实验中使用的恒温箱的控温范围为室温到 300 °C,温度控制精度为 0.1 °C。实验测量的温度范围为 200 °C~290 °C,温度间隔为 30 °C。温度稳定后分别记录 FBG 的中心波长变化 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 及 EFPI 单峰峰值变化 $\Delta\lambda_{\text{EFPI}}$,温度实验重复两次。

图 7 为复合传感器 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与 $\Delta\lambda_{\text{EFPI}}$ 随温度变化的变化曲线。从图中可以看出, $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与 $\Delta\lambda_{\text{EFPI}}$ 随温度变化均呈线性关系。通过线性拟合可以得到 EFPI 的温度灵敏度为 1010 pm/°C,线性度为 0.9946,FBG 的温度灵敏度为 12 pm/°C,线性度为 0.9988。

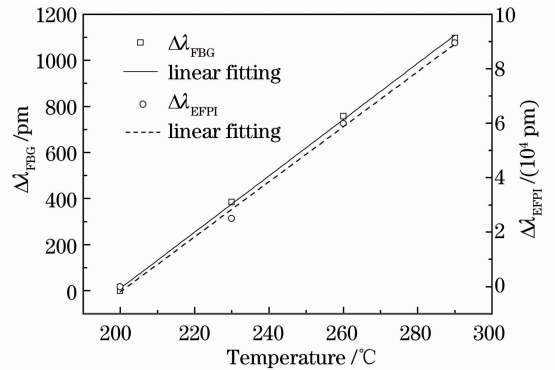


图 7 EFPI-FBG 复合传感器温度特性拟合曲线

Fig. 7 Wavelength response of the sensor with temperature

温度实验数据表明,两次实验中,FBG 的温度灵敏度均为 12 pm/°C,拟合度均在 0.9988 以上。同时,两次实验中 FBG 中心波长变化的最大重复性误差为 2 pm,相当于 0.2 °C。图 8 为两次温度实验中 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 随温度变化的拟合曲线。从图中同样可以看出两次温度实验中 FBG 具有较好的重复性。复合光纤 EFPI-FBG 中 FBG 温度测量的精确度关系着其对 EFPI 温度补偿的准确性。FBG 测温误差越小,其温度补偿效果越佳。因此,温度实验结果表明,FBG 具有为 EFPI 提供有效温度补偿的能力。

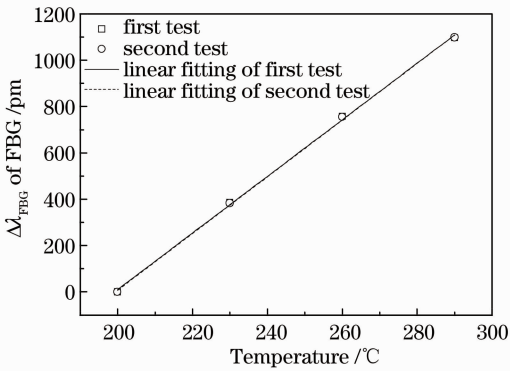


图 8 FBG 温度实验数据拟合曲线

Fig. 8 Wavelength response of FBG with temperature

3.2 高温应力加载实验与分析

应力加载装置放置于恒温箱内部,设定恒温箱温度且待温度稳定后(FBG 中心波长值基本保持不变)进行应力加载。在不同的加载力稳定后记录 EFPI 单峰峰值变化 $\Delta\lambda_{EFPI}$ 。实验分别在 270 °C 及 290 °C 两组不同温度下进行并记录两次不同温度的应力加载实验,FBG 波长值的变化 $\Delta\lambda_{FBG}$ 。

图 9 显示了在 270 °C 及 290 °C 不同温度下加载应力的实验数据的线性拟合曲线。实验结果表明,由于温度的影响,相同加载力的情况下,两组实验数据呈现了巨大的差异。但是,两组实验中 EFPI 的应力灵敏度均约为 90 pm/N。两组应力加载实验数据线性拟合度分别为 0.9965 和 0.9954,线性度均较好。

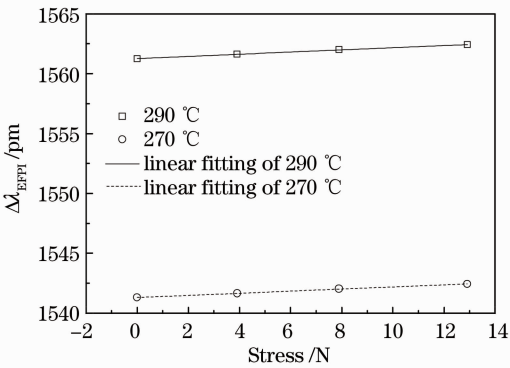


图 9 270 °C 和 290 °C 下的应力加载实验

Fig. 9 Wavelength response of the sensor to stress at different temperatures

根据温度及应力加载实验数据获得(4)式中的各灵敏度参数,计算得到

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/12 & 0 \\ -101/108 & 1/90 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{FBG} \\ \Delta\lambda_{EFPI} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

因此,实际应用中根据复合传感器 EFPI 单峰峰值变化及 FBG 中心波长值变化,通过(5)式可以

计算得到相应的温度及应力变化,实现应力与温度的同时测量。

根据(5)式对 270 °C 及 290 °C 的应力加载实验数据进行相应的温度补偿得到图 10 所示的曲线。从图中可以看出,与图 9 相比,经过温度补偿后,270 °C 和 290 °C 两组数据的差距明显缩小。经过温度补偿后,不同温度的两组应力加载实验数据的最大重复性误差为 72 pm,相当于 0.8 N,占整个测量范围的 6.1%。也就是说,经过温度补偿后,传感器的应力测量误差小于 1 N。

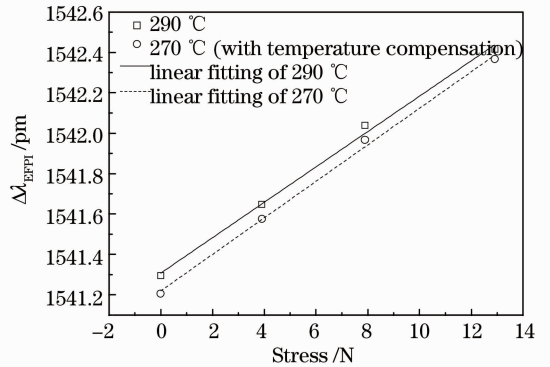


图 10 温度补偿后两组实验数据的变化曲线

Fig. 10 Wavelength response of the sensor to stress with temperature compensation

由以上实验可知,使用此复合光纤 EFPI-FBG 传感器,可以实现温度及应力的同时测量。全金属的封装方式也改变了光纤传感器封装必须依赖胶粘剂的被动局面,并且全金属化封装的传感器可以应用到高温的环境中。

4 结 论

将非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪和光纤光栅相结合,制作了实现温度和应变同时测量的复合光纤传感器。采用超高真空磁控溅射镀膜、电镀及激光焊接技术实现了耐高温的全金属无胶化封装。实验结果表明激光焊接封装的全金属化光纤传感器在 290 °C 的温度下仍然具有较好的应力传感特性。因此,采用超高真空磁控溅射镀膜及激光焊接技术实现的光纤传感器耐高温全金属化封装方法是可行且有效的。

参 考 文 献

1 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang *et al.*, Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305005
李东明, 陈 军, 葛辉良 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305005

- 2 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong *et al.*. Research development of high temperature resistant fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 050003
杨樟成, 徐汉锋, 董新永等. 高温光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(5): 050003
- 3 Liu Hongyue, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Long period fiber grating refractive index sensitivity-based reinforcing rebar corrosion sensor in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806009
刘宏月, 梁大开, 曾捷等. 基于长周期光纤光栅折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0806009
- 4 Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on Stokes parameters of fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605003
叶振兴, 苏洋, 朱勇等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(6): 0605003
- 5 Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal coated long period fiber grating liquid sensor based on dual peak resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305003
顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0305003
- 6 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. 光学学报, 2008, **29**(1): 157~162
- 7 P. A. R. Tafulo, P. A. S. Jorge, J. L. Santos *et al.*. Fabry-Perot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(6): 1159~1162
- 8 C. Gouveia, P. A. S. Jorge, J. M. Baptista *et al.*. Fabry-Perot cavity based on a high-birefringent fiber Bragg grating for refractive index and temperature measurement [J]. *Sensors Journal*, 2012, **12**(1): 17~20
- 9 T. Zhu, T. Ke, Y. Rao *et al.*. Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high temperature measurement [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(19): 3683~3685
- 10 D. W. Duan, Y. J. Rao, W. P. Wen *et al.*. In-line all-fibre Fabry-Perot interferometer high temperature sensor formed by large lateral offset splicing [J]. *Electron. Lett.*, 2011, **47**(6): 401~403
- 11 D. J. J. Hu, Y. Wang, J. L. Lim *et al.*. Novel miniaturized Fabry-Perot refractometer based on a simplified hollow-core fiber with a hollow silica sphere tip [J]. *Sensors Journal*, 2012, **12**(5): 1239~1245
- 12 M. Deng, C. P. Tang, T. Zhu *et al.*. PCF-based Fabry-Perot interferometric sensor for strain measurement at high temperatures [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(11): 700~702
- 13 Yu Qingxu, Wang Xiaona, Song Shide *et al.*. Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic Fabry-Perot interferometer for high temperature oil well measurement [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(3): 299~302
于清旭, 王晓娜, 宋世德等. 光纤 F-P 腔压力传感器在高温油井下的应用研究[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(3): 299~302
- 14 Zhai Xianli, Chen Shuang. Research progress of FBG temperature sensors [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011, **31**(3): 35~43
翟宪立, 陈爽. 光纤光栅温度传感器研究进展[J]. 计测技术, 2011, **31**(3): 35~43
- 15 Meng Zhan, Chen Ruixia, Jin He *et al.*. FBG strain and temperature sensor based on double-material canti-lever beam [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(3): 343~346
孟展, 陈瑞霞, 金何等. 基于双材料悬臂梁的光纤光栅应力与温度传感器[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(3): 343~346
- 16 L. Dong, W. F. Liu. Thermal decay of fiber Bragg gratings of positive and negative index changes formed at 193 nm in a boron-codoped germanosilicate fiber [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(31): 8222~8226
- 17 Gao Yanlei. Study on Environment Behavior and Aging Mechanism of Epoxy Adhesive [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006
高岩磊. 环氧树脂粘合剂环境行为与老化机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006
- 18 Wen Wei. Study on Wathering Behaviors of Epoxy Resin Adhesive in the Atmosphere Environment [D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Materials Protection, 2008
文伟. 环氧胶粘剂大气环境老化行为研究[D]. 武汉: 武汉材料保护研究所, 2008

栏目编辑: 王晓琰