

埋入式光纤智能金属结构研究进展

饶春芳^{1,2} 张华¹ 冯艳¹ 李玉龙¹

(¹南昌大学机电工程学院机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)
(²江西师范大学物理与通信电子学院光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要 介绍了埋入式光纤智能金属结构研究遵循的步骤,即光纤传感器的金属化保护、保护后及埋入后传感器的特性、埋入宿主金属及埋入方法的研究。为减少保护过程中热应力对光纤传感性能的影响,主要采用常温下进行的化学镀结合电镀方法进行光纤金属化保护;而选择适当的涂层厚度、杨氏模量、热膨胀系数、泊松比可使热应力最小化;金属层对光纤传感器可起到明显的保护作用,并能增强其可焊性;金属化保护后及埋入后的光纤传感器均能保持良好的传感的特性。但目前所使用的光纤传感器大都集中在热稳定性较差的布拉格光纤光栅上,埋入的宿主金属及埋入方法都受到了限制,因此,突破瓶颈的关键在于找到适合于埋入恶劣环境的光纤传感器。

关键词 光纤光学;光纤智能金属结构;金属化保护;光纤传感器

中图分类号 O439

OCIS 280.4788 060.2370

文献标识码 A

Review of Embedded Optical Fiber Smart Metal Structure

Rao Chunfang^{1,2} Zhang Hua¹ Feng Yan¹ Li Yulong¹

(¹Key Laboratory of Robot & Welding Automation, School of Mechanical & Electrical, Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)
(²Key Laboratory of Optoelectronics & Communication, School of Physical & Electrical, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China)

Abstract The main steps of studying embedded optical fiber smart metal structure are introduced, which are metal coating for protecting the optical fiber sensors, analysis of the physical characteristics of the sensors after being metalized and embedded, and the choices of embedded metal. An electroless-electroplating method is used to protect the optical fiber for less thermal stress, which can be minimized by proper coat thickness, Young's modulus, Poisson ratio and thermal expansion. Experiments show that the metal coats can protect the optical fiber and make the optical fiber weldable. The optical fiber sensors present good sensitivity characteristics after being metalized and embedded. However, the fiber Bragg gratings are used in most research, and their bad thermal stability makes only few methods and few host metals used in embedding the optical fiber sensors. It is believed that research of the better optical fiber sensors which can endure rugged environment when it is embedded in metal is the key problem for the study.

Key words fiber optics; optical fiber smart metal structure; metalized protection; optical fiber sensors

1 引言

光纤具有径细、柔韧、质轻以及优良的可埋入性、集信息传输与传感于一体、抗电磁干扰、固有的安全性、耐高温、抗腐蚀等优良的特性,是智能结构首选的信息传输与传感的载体,称之为“光纤智能结构”^[1]。目前光纤智能结构已成功地应用于桥梁、机器人、大坝中^[2~4];所传感的物理量由早期的温度和应力,拓展到了更多的方面^[5~7]。传感方式也由开始的单点式向分布式发展^[8,9]。光纤传感器可贴于基体表面,也可埋入基体

收稿日期: 2010-04-28; 收到修改稿日期: 2010-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(50905082)、江西省自然科学基金(2007GQW0158)和江西省研究生创新专项资金资助课题。

作者简介: 饶春芳(1975—),女,博士研究生,副教授,主要从事光纤智能金属结构及光波导传感等方面研究。

E-mail: rcf0322@163.com

导师简介: 张华(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光智能金属结构、焊接自动化、工业机器人智能化和水下移动焊接机器人技术等方面的研究。E-mail: zhanghua_lab@163.com

内部,但埋入式光纤传感器由于能感知结构内部的物理量的变化而备受青睐。

目前埋入式的光纤智能结构的基体多为复合材料,原因是复合材料熔点低,易于光纤的埋入。而以金属为基体(不包括金属复合材料)的埋入式光纤智能结构研究中,由于金属的熔点远高于复合材料,光纤传感器必须面对埋入过程中高温及大的热应力^[10]。因此,此项研究有别于光纤埋入复合材料的研究,研究内容更为复杂,困难也更大。埋入式光纤智能金属结构的研究思路大多遵循以下顺序:首先,将光纤涂层加以金属化,以加强光纤传感器的高温耐受性、可焊性及与金属基体的相融性;然后寻找适当的方法将其埋入金属中以形成智能结构,最后研究其传感特性。相关的研究主要包括以下几个方面的内容:1)光纤传感器涂敷层金属化方法的研究;2)金属涂敷后光纤及光纤传感器物理特性的研究;3)涂敷层金属化光纤传感器埋入方法的研究;4)埋入后的带金属涂敷层光纤传感器的传感特性的研究。

2 光纤传感器涂敷层金属化方法

光纤智能金属结构中一般使用的石英光纤的基本结构由内层的纤芯和外层的包层组成。光纤原有的起保护作用的有机聚合物涂敷层,由于只能耐受 100 °C 以下的温度,因此不能在光纤智能金属研究中使用。但石英是脆性材料,裸光纤虽然有强的抗拉强度,但稍加剪切应力,光纤即会断裂,因此必须对光纤重新进行保护。考虑后期埋入金属时的耐高温需求并加强与金属的相融性,有必要对裸光纤表面进行金属化涂敷。

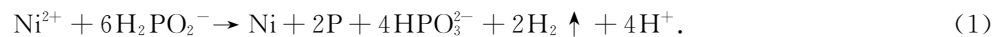
早期的光纤传感器金属化涂敷采用溅射和气相喷射的方法。C. E. Lee 等^[11]最早将光纤传感器埋入金属基体,他们用磁控溅射的方法将二氧化钛(TiO₂)涂敷在法布里-珀罗(F-P)光纤传感器上,李晓春等^[12~14]在光纤布拉格光栅(FBG)上用电磁气相喷镀金属镍或钛,再用电镀的方法镀一层镍来进行保护,H. Bartelt^[15]等用阴极溅射的方法在 II 型 FBG 上镀铝。但这些方法都会产生较大的残留应力,进而对光纤传感器本身的传感特性有较大的影响。近来,室温下进行的化学镀结合电镀对光纤传感器的金属化保护方法被普遍采用^[12~14,16~22]。保护过程如图 1 所示。



图 1 光纤的化学镀结合电镀保护流程

Fig.1 Flow chart for optical fiber protection using electroless-electroplating method

光纤属于难镀非金属,因此在其化学镀前,需经预处理以获得适合于化学镀的洁净催化过渡表面,预处理包括除油、敏化和活化三个步骤。去除涂敷层的光纤除去油污后,首先放入敏化液(SnCl₂·2H₂O 的质量浓度:10 g/L;HCl 的体积比:40 mL/L)约 10 min,再放入活化液(PdCl₂ 的质量浓度:0.5 g/L;HCl 的体积比:5 mL/L)约 10~15 min,以获得适合于化学镀的洁净催化过渡表面。然后经化学镀后获得金属保护镀层。由于化学镀镍-磷合金技术成熟,使用的化学试剂相对安全,因此被普遍采用,化学镀镍-磷合金的配方及工艺条件如下:硫酸镍(NiSO₄·6H₂O):25~45 g/L,次磷酸钠(NaH₂PO₂·H₂O):20~37 g/L,乙酸甲酰胺(C₃H₆O₂):20~37 mL/L,硼酸(H₃BO₃):20~37 g/L,pH 值 4.2~4.8、温度 82 °C~86 °C,反应机制为



化学镀后可获得厚度均匀、表面光洁平整的保护层。本实验室在传统化学镀镍-磷合金的基础上,还进行了镍-磷-二氧化锆(Ni-P-ZrO₂)化学复合镀^[23]和镍-铜(Ni-Cu)双金属镀层的研究^[24],进一步提高了化学镀层对光纤保护功能和光纤传感器的传感性能。化学镀后光纤外观如图 2(a)^[18]所示,侧切截面如图 2(c)^[18]所示。

由于化学镀层较薄,为更好地保护光纤,需在化学镀层上进一步进行电镀,电镀液配方及工艺条件如下:NiSO₄·6H₂O:180~300 g/L,氯化镍(NiCl):30~50 g/L,H₃BO₃:35~40 g/L,十二烷基硫酸钠(C₁₂H₂₅SO₄Na):0.1~0.3 g/L,糖精:1~3 g/L,pH 值 3.9~4.2、温度 50 °C~60 °C、电流密度 0.03~0.04 A/cm²。电镀后光纤外观如图 2(b)^[18]所示,横截面如图 2(d)所示^[18]。

实验证明,裸光纤经化学镀结合电镀后,光纤表面与金属镀层能很好的结合;并能对光纤产生良好的保护作用^[16];而且由于保护过程在常温下进行,产生的热应力很小因而不会破坏光纤传感器的性能。

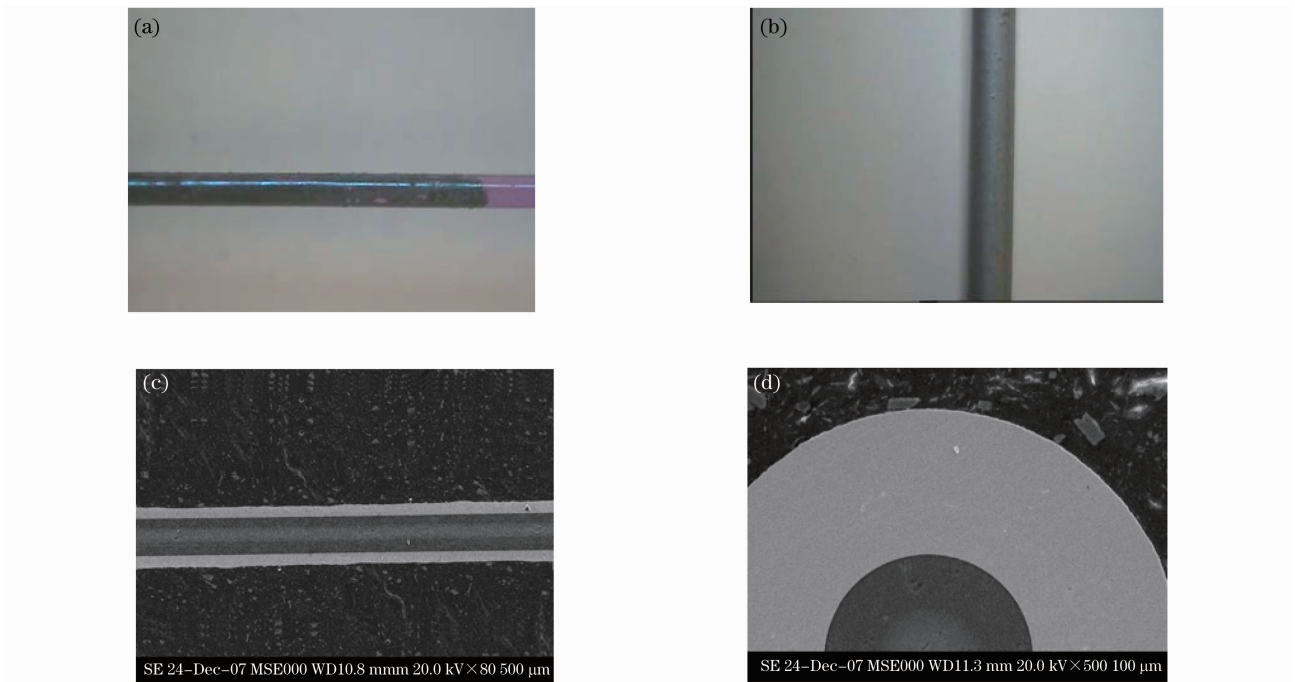


图2 光纤镀镍-磷合金保护。(a)化学镀镍-磷外观,(b)电镀镍-磷外观,(c)化学镀光纤侧切截面,(d)电镀光纤横截面
Fig.2 Ni-P coating for optical fiber. (a) overview of the optical fiber after electroless, (b) overview of the optical fiber after electroless-electroplating, (c) longitudinal cross-section of the coated fiber after electroless, (d) radial cross-section of the coated fiber after electroless-electroplating

3 金属涂敷后光纤及光纤传感器的物理特性

经金属化保护后的光纤在其特性上将会有变化,这源于两方面的因素:1)金属化保护过程中产生的热应力对光纤的影响;2)当外界环境变化时(如温度、应力),由于石英光纤与金属涂敷层材料的不一致对光纤的影响。S. T. Shiuea 等^[25~28]对金属包层的热应力进行了深入的研究,利用弹性理论,系统研究了杨氏模量、热膨胀系数、泊松比及包层厚度对金属化保护的光纤热应力的影响,给出了以上参数对光纤与金属包层介面的剪切应力、径向压力,轴向力、轴向应力和径向压应力的准确计算关系。给出了各参数变化时对不同的力之间的变化趋势。研究表明:1)表面涂铅(焊料)的FBG的中心波长将变小,原因是在金属包层应力的作用下,光栅周期压缩;2)光栅透射谱出现了旁瓣,原因是金属涂层使光纤出现了微弯损耗,或是由于金属涂层产生的各向异性产生了辐射模;3)对金属化保护光纤的热循环测试表明直接涂层后的FBG出现了较明显的迟滞现象;4)经过适当的退火过程以后,以上现象均得到了有效的改善;5)虽然铅(焊料)的热膨胀系数比光纤的热膨胀系数大50多倍,但实际金属涂层光纤的FBG灵敏度只提高了近5倍。

C. Lupi 等^[29~32]总结了几种金属涂敷FBG的方法及其利弊:物理气相沉积会产生较大的热应力,且涂敷的厚度也不能达到要求;而铸造的方法也会产生较大的热应力且只局限于少数几种熔点低的金属,如锡(熔点为 $231.9\text{ }^{\circ}\text{C}$),锌(熔点为 $419.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)和铅(熔点为 $327.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)。电沉积(一种从矿物质中提纯金属的方法,主要是是电镀过程)过程由于能在室温下进行,不会产生较大的热应力,且沉积厚度也可根据需要控制,是一种较好的金属涂敷FBG方法,缺点在于必须经过预处理,且电沉积过程比较长。同时,该小组系统地研究了铸造、电沉积等方法使FBG涂敷层金属化对FBG在超低温下进行温度传感特性的影响。FBG保护方法是:经蒸镀后,FBG预涂一层铝,然后再经过10h的电沉积,金属锌的厚度达到 $0.4\text{ }\mu\text{m}$,电沉积铜厚度为 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ 。在进行预涂层铝及以后的电沉积锌、铅和铜的过程中,FBG的中心波长及布拉格反射峰或会发生变化,这说明在这些处理过程中产生的应力对于FBG的物理特性有可能产生影响,进而影响其传感特性。因此定量地研究金属涂敷过程中的应力对深入研究FBG的传感特性是非常必要的。对其进行超低温温度传感测试表明:裸FBG在 $-267\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-233\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下不能进行温度传感,而在 $-267\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下,涂层铜和铅的FBG显示出能进行温度传感的特性,而涂层锌的FBG在大于 $-233\text{ }^{\circ}\text{C}$ 表现了良好的传感性

能。对于浇铸方法使光纤金属化的实验中发现,浇铸铅过程不会对 FBG 造成损伤,且其波长漂移相对于温度的变化也显示较好的线性,但浇铸锌就会完全改变 FBG 的波长选择性。

4 涂敷层金属化光纤传感器埋入方法

目前,以光纤为传感器的智能结构以复合材料为主。而以金属为基体的光纤智能结构报道较少,主要原因是金属熔点很高,光纤不易埋入。以下几个研究小组进行了相关工作:1991年 C. E. Lee 等^[11]用浇铸的方法将保护好的 F-P 干涉仪埋入铝中;X. C. Li 等^[13]用激光粉末烧结方法将 FBG 埋入不锈钢中;S. Sandlin 等^[33,34]用真空焊接方法将 FBG 埋入镍材料中,FBG 保护方法是采用制镜工艺镀一层薄银后电镀镍;C. Mou 等^[35]和 C. Y. Kong 等^[36]用超声波焊接方法将 FBG 埋入铝合金中,李玉龙等^[37]用软钎焊的方法将 FBG 埋入 42CrMo 结构钢中,如图 3 所示。

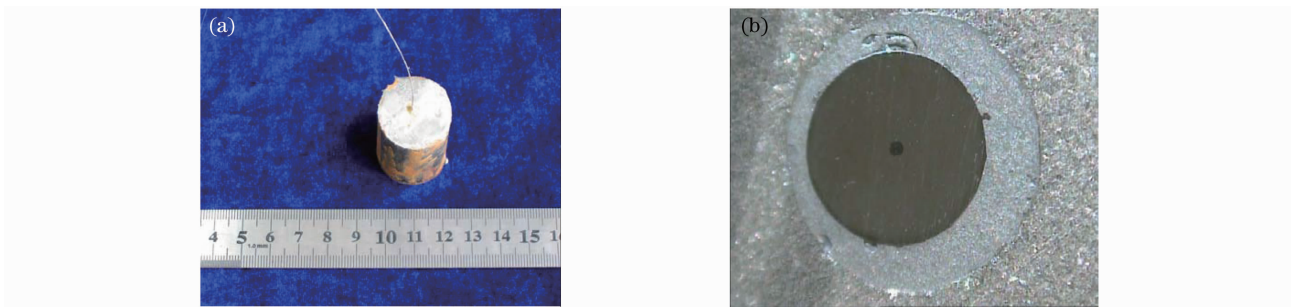


图 3 镀镍-磷合金的 FBG 软钎焊埋入 42CrMo 钢。(a)外观图,(b)截面图

Fig. 3 FBG with Ni-P coating embedded in 42CrMo steel by brazing method. (a) overview, (b) radial cross-section

5 埋入前后的带金属涂敷层光纤传感器的传感特性

由于光纤传感器外涂敷层与光纤材料之间的差异,金属化保护后及埋入后的光纤传感器的传感特性都会发生变化。其中,金属层在温度传感方面起到了增敏的作用。C. E. Lee 等^[11]埋入的 F-P 干涉计的温度灵敏度提高 2.9 倍;李晓春等^[12,38]埋入的 FBG 温度灵敏度提高了 1 倍,压力灵敏度变化不大,但到 260 °C 时,波长的变化相对温度变化滞后;S. Sandlin 等^[33]使 FBG 从室温到 600 °C 的半年温度循环测试中,温度传感灵敏度提高 1 倍;英国的 C. Y. Kong 等埋入的温度灵敏度为原来的 3 倍,0~3 kg 的负载响应约为 0.1 nm/kg,弯曲灵敏度为 0.73 nm/m⁻¹;冯艳等^[39]将 42CrMo 结构钢中埋入 FBG 后,发现其温度灵敏度为原来的 2 倍,如图 4 所示,并建立了与实验结果符合较好的温度传感理论模型。

对于金属化保护后的光纤传感器,H. Bartelt 等^[15]研制的阴极溅射方法镀铝后的 II 型 FBG 从室温到 450 °C 的热循环传感实验中没有出现滞后等现象;姜德生等^[19]用化学镀结合电镀方法保护的 FBG 在 -70 °C ~ 0 °C 的低温下温度灵敏度提高了 2 倍多,在 200 °C ~ 800 °C 的高温下光纤的可焊性及塑性均较好^[20]。申人升等^[21,22]用同样的方法研制的 FBG 对 0~40 MPa 的压力测试灵敏度为 0.0493 nm/MPa,同时,传感器能耐受 50 °C ~ 240 °C 的温度。

6 结束语

目前出现过的光纤金属涂敷层的方法(物理气相沉积、铸造、磁控溅射和化学镀加电镀)之中,化学镀加电镀的方法由于设备简单,易于实现,不产生大的温度梯度进而不会产生大的热应力,近年来得到了更广泛

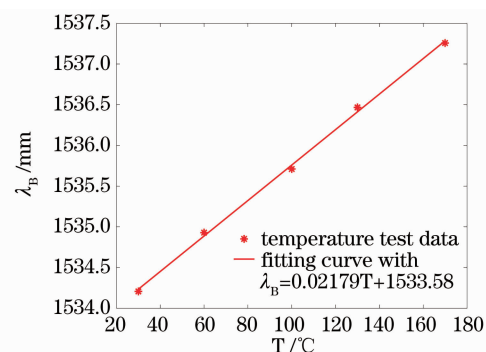


图 4 镀镍-磷合金的 FBG 软钎焊埋入 42CrMo 钢后温度实验结果

Fig. 4 Experimental result for FBG with Ni-P coating embedded in 42CrMo steel by brazing method

的使用。金属化涂敷可使光纤传感器受到有效的保护,增加其与金属基体的相融性及可焊性。金属涂层对温度传感有很好的增敏作用,涂敷后的光纤传感器的力学传感特性能也能保持良好。温度适当的涂敷过程不会使FBG中心波长发生变化,但较高的温度将使FBG的中心波长发生偏移,甚至完全损坏其波长的选择性。目前光纤金属化涂敷层的物理性能的研究主要研究集中在涂层所产生的热应力和残留应力上。选择适当的涂层厚度、杨氏模量、热膨胀系数、泊松比可使热应力最小化。由于FBG具有较差的热稳定性,目前出现的埋入方法中,高温埋入方法有激光粉末烧结、真空焊接;低温埋入方法有:超声波焊接和软钎焊;而使用浇铸方法埋入只限于如铅、铝等低温金属。因此FBG较差的热稳定限制了埋入方法的使用,也限制了宿主金属的选择,它是阻碍光纤传感器用于智能金属结构的主要原因。因此,突破目前限制光纤智能金属结构研究的瓶颈在于找到适合于埋入的耐高温光纤传感器,进而拓展更多的埋入方法。

参 考 文 献

- 1 Tu Yaqing, Liu Xingchang. Intelligent Structure Based on Optical Fibers[M]. BeiJing: Advanced Education Press, 2005. 7
涂亚庆, 刘兴长. 光纤智能金属结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 7
- 2 Lü Chenggang, Zhang Wu, Ge Chungfeng *et al.*. The estimation of static load test on root type caisson foundation based on FBG sensor networks[J]. *Chinese J. Sens. Actualors*, 2010, **23**(2): 282~286
吕辰刚, 张 武, 葛春风 等. 基于光纤光栅传感网的根式沉井静载实验研究[J]. 传感器技术, 2010, **23**(2): 282~286
- 3 Zhu Honghu, Yin Jianhua, Hong Chengyu *et al.*. Fiber optic based monitoring technologies of slope engineering[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, **3**: 7~10
朱鸿鹄, 殷建华, 洪成雨 等. 基于光纤传感的边坡工程监测技术[J]. 工程勘察, 2010, **3**: 7~10
- 4 Y. L. Park, S. C. Ryu, R. J. Black *et al.*. Exoskeletal force-sensing end-effectors with embedded optical fiber-bragg-grating sensors[J]. *IEEE Trans. Robot.*, 2009, **25**(6): 1319~1331
- 5 Zhao Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. Reseach on optical current transformer based on the fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953
赵燕玲, 赵 洪, 张 剑 等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 949~953
- 6 Liu Yuliang, He Jun, Wang Yongjie *et al.*. Progress of science wave detection by fiber-optic sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 21~28
刘育梁, 何 俊, 王永杰 等. 光纤地震波探测的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(11): 21~28
- 7 Zhang Weigang. Design on fiber cavity ring-down spectroscopy system and investigating on liquid sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, **47**(3): 030601
张伟刚. 光纤腔衰减谱系统设计及流体传感研究[J]. 激光与光电子学进展, 2001, **47**(3): 030601
- 8 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance brillion optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard sing-mode optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958
宋牟平, 裘 超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊时域反射计[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 954~958
- 9 Hong Xiaobin, Guo Hongxiang, Wu Jian. A Brillion optical time dimain analysis based distributed fiber optical fiber intrusion sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1037~1041
洪小斌, 郭宏翔. 伍 剑. 基于布里渊时域分析的光纤传感入侵定位系统[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1037~1041
- 10 Xie Jianfeng. Research on fiber protected technics and temperature sensing proterties of smart structure[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. 25
谢剑峰. 智能结构光纤光栅保护方法及温度传感性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007. 25
- 11 C. E. Lee, W. N. Gible, R. A. Atkins *et al.*. Metal-embedded fiber-optic Fabry-Perot sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1990~1992
- 12 X. C. Li, F. Prinz. Analytical and experimental study on noncontact sensing with embedded fiber-optic sensors in rotatin metal parts[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(7): 1720~1727
- 13 X. C. Li, J. Johnsen, J. Groza *et al.*. Processing and microstructures of fiber Bragg grating sensors embedded in stainless steel[J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2002, **33**(9): 3019~3024
- 14 X. C. Li, W. L. Tang, A. Golnas. Embedding and characterization of fiber-optic and thin-film sensors in metallic structures [J]. *Sens. Rev.*, 2004, **24**(4): 370~377
- 15 H. Bartelt, K. Suhuster, S. Unger *et al.*. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(17): 3417~3424
- 16 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber bragg grating with metal coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
冯 艳, 张 华, 李玉龙 等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 336~341

- 17 J. F. Xie, H. Zhang, Z. Q. Zhu *et al.*. A study of the temperature sensitivity of fiber Bragg grating after metallization[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2007, **16**: 1837~1842
- 18 Y. L. Li, H. Zhang, Y. Feng *et al.*. Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**: 391~397
- 19 Guo mingjin, Jiang Desheng. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensor with plating gold[J]. *Chin. J. Low Temp. Phys.*, 2006, **28**(2): 138~141
郭明金, 姜德生. 镀金光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *低温物理学报*, 2006, **28**(2): 138~141
- 20 Jiang Desheng, Xu Haipeng, Li Xiaopu. Research of quartz optic fiber surface metallization for using in high-temperature[J]. *J. Wuhan University of Technology*, 2008, **30**(4): 1~4
姜德生, 徐海鹏, 李小甫. 适合于高温的石英光纤表面金属化的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, **30**(4): 1~4
- 21 R. S. Shen. Research of metal-coated and sensing technology applications on FBG[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. 40~53
申人升. FBG的金属化封装及其传感技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. 40~53
- 22 R. S. Shen, J. Zhang, Y. Wang *et al.*. Study on high-temperature and high-pressure measurement by using metal-coated FBG[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2008, **50**(5): 1138~1140
- 23 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Technology for electroless plating Ni-P₂-ZrO₂ composite coating for bragg fiber grating[J]. *J. Mater. prot.*, 2008, **41**(12): 59~60
冯艳, 张华, 李玉龙等. 光纤Bragg光栅Ni-P₂-ZrO₂化学复合镀工艺[J]. *材料保护*, 2008, **41**(12): 59~60
- 24 Peng Gang, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Research on electroless Cu-plating on fiber Bragg grating sensor[J]. *Mater. Rev.*, 2008, **22**(9): 77~79
彭刚, 张华, 李玉龙等. 光纤Bragg光栅传感器化学镀铜研究[J]. *材料导报*, 2008, **22**(9): 77~79
- 25 S. T. Shiue, Y. S. Lin. Thermal stress in metal-coated optical fibers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(11): 5719~5723
- 26 S. T. Shiue. Thermal stressed in hermetically double-coated optical fibers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(6): 3044~3050
- 27 S. T. Shiue. Effect of coating thickness on thermal stresses in tungsten-coated optical fibers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(8): 3759~3762
- 28 T. Shiue, C. H. Yang, R. S. Chu *et al.*. Effect of the coating thickness and roughness on the mechanical strength and thermally induced stress voids in nickel-coated optical fibers prepared by electroless plating method[J]. *Thin Solid Film*, 2005, **485**: 169~174
- 29 C. Lupi, F. Felli, A. Brotzu *et al.*. Improving FBG sensor sensitivity at cryogenic temperature by metal coating[J]. *IEEE Sens. J.*, 2008, **8**(7): 1299~1303
- 30 C. Lupi, F. Felli, L. Lppoliti *et al.*. Metal coating for enhancing the sensitivity of fibre bragg grating sensors at cryogenic temperature[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2005, **14**: N71~N76
- 31 M. Ciotti, V. Nardelli, M. A. Caponero *et al.*. An optical system for cryogenic temperature measurements[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2007, **16**: 1708~1711
- 32 C. Lupi, F. Felli, M. A. Caponero *et al.*. The effectiveness of metal coating on FBG sensors sensitivity at cryogenic temperature[C]. *SPIE*, 2007, **6619**: 661916
- 33 S. Sandlin, A. Hokkanen. Embedding optical fibers in metal alloys[J]. *IEEE Instru. Meas. Mag.* 2003, **6**: 31~36
- 34 S. Sandlin, T. Kinnunen, J. Rämö *et al.*. A simple method for metal re-coating of optical fiber bragg gratings[J]. *Surf. Coa. Technol.*, 2006, **201**: 3061~3065
- 35 C. Y. Kong, R. Soar. Method for embedded optical fibers in an aluminum matrix by ultrasonic consolidation[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30): 6325~6333
- 36 C. Mou, P. Saffarz. D. Li *et al.*. Smart structure sensors based on embedded fibre Bragg grating arrays in aluminium alloy matrix by ultrasonic consolidation[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(3): 034013
- 37 Li Yulong, Feng Yan, Zhang Hua *et al.*. Fiber bragg grating sensor metallization and embedding into 42CrMo steel by soldering[J]. *Trans. Chin. Welding Ins.*, 2008, **29**(3): 69~72
李玉龙, 冯艳, 张华等. 光纤光栅传感器金属化保护及钎焊嵌入42CrMo钢[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(3): 69~72
- 38 X. C. Li, F. Prinz, J. Seim. Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating sensor[J]. *Smart Materials Struct.*, 2001, **10**(4): 575~579
- 39 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong. Experiment on embedding FBG sensor into intelligent metal structures[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(3): 334~336
冯艳, 张华, 李玉龙. 智能金属结构中FBG传感器的埋入实验[J]. *压电与声光*, 2009, **31**(3): 334~336