

Doi:10.3969/j.issn.1672-0105.2019.02.0014

基于双LPFGs传感器的混凝土氯离子浓度激光测量*

金露凡, 曹哲昊

(浙江工贸职业技术学院 材料工程系, 浙江温州 325003)

摘要: 氯离子渗透腐蚀是主要钢筋混凝土结构中损伤之一, 极大降低混凝土结构的耐久性。为了检测混凝土中氯离子浓度, 本文提出了一种简单、灵敏、可用于混凝土氯离子浓度检测的双长周期光纤光栅传感器及其检测方法。基于新的理论模型, 通过测量经过双长周期光纤光栅的传输光功率, 可以很容易地计算出溶液中氯离子浓度, 测量范围可达5g/L~35g/L, 误差范围为0.18%, 同时克服测量过程中温度变化的影响。设计了一种微流体通道, 可以克服弯曲和应变的影响。因此, 本文所报道的双长周期光学光栅传感器有助于混凝土氯离子浓度的长期精确监测。

关键词: 长周期光纤光栅; 微流体通道; 氯离子浓度; 光功率

中图分类号: TN241

文献标识码: A

文章编号: 1672-0105(2019)02-0059-06

Concrete Chloride Ion Concentration Laser Measuring Based on Two-LPFGs Sensor

CAO Zhe-hao, JIN Lu-fan

(Department of Material Engineering, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou, 325003, China)

Abstract: Chloride ion permeation corrosion is one of the main damages in reinforced concrete structures, which greatly reduces the durability of concrete structures. A simple sensitive double long period fiber grating sensor and its detection method were proposed to detect the chloride ion concentration in concrete. The chloride ions concentration in the solution can be easily calculated by measuring the optical power through the double-long-period fiber Bragg grating. The measurement scope goes from 5g/L to 35g/L, and the margin of error range is 0.18%. Meanwhile, based on the new theoretical model, the influence of temperature change in the measurement process can be overcome. A microfluidic channel was designed to overcome the effects of bending and strain. Therefore, the double long period optical grating sensor reported in this paper is helpful for the long-term accurate monitoring of chloride ion concentration in concrete.

Key Words: long period fiber gratings; microfluidic channel; chloride concentration; laser power

0 前言

中国有着广阔的海岸线, 沿海城市及建筑较多, 钢筋混凝土结构是当前被广泛应用的建筑材料。对于这些地区来说, 钢筋混凝土结构耐久性远未达到设计使用年限, 其主要损伤原因之一就是氯离子渗透腐蚀。监测混凝土结构中氯离子浓度的需求与日俱增。因此, 为实时、无损、准确掌握健康

状况, 保证钢筋混凝土构筑物的耐久性和服役安全性, 有必要研制开发能够准确的定量监测混凝土中氯离子浓度及其深度分布的监测传感器。^[1-2]

近年来, 光纤传感技术在基础设施建设监测、评价等工业生产领域得到广泛的应用。由于光纤传感能够实现实时长期地在线监测, 而长周期光纤光栅传感器是在光纤上制备几十至几百微米的光栅, 基于不同的氯离子浓度, 其透射光谱特性调制不同

收稿日期: 2019-02-28

基金项目: 温州市公益性工业项目“新型可调谐光纤激光器及其稳定性的研究”(G20160014); 2017年浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划“基于双LPFGs传感器的混凝土氯离子浓度测量”(2017R446005)

作者简介: 金露凡(1990—), 男, 浙江金华人, 浙江工贸职业技术学院教师, 硕士, 主要研究方向: 激光与光电子技术; 曹哲昊(1997—), 男, 浙江嘉兴人, 浙江工贸职业技术学院学生, 主要研究方向: 激光制造与应用。

来监测混凝土中的氯离子浓度,具有现有市售传感器所不具备的诸多优点,主要表现在:1)能够定量监测混凝土中的氯离子浓度及其深度分布,实现钢筋锈蚀诱导期的精确预测;2)光纤主要是由SiO₂等无机材料组成,具有长的使用寿命;3)长周期光纤光栅传感器是基于光的折射原理,具有良好的抗电磁干扰能力且不受混凝土电阻率的影响;4)体积小、安装灵活方便;5)价格相对现有市售传感器更为便宜。^[3-4]

本文首先通过激光标定长周期光纤光栅(long period fiber gratings, LPFGs)的透视光谱从而确定合适的工作范围,并以此选择最佳工作波长。在标定溶液折射率与溶液浓度关系基础上,建立LPFGs传输光功率与氯离子浓度的对应关系,并对测量结果进行精度确定。在此过程中,基于双LPFGs传感器创建新的理论计算模型,通过实验结果验证,相比单个LPFG,其测量精度有所提高,并且克服了一次测量过程中温度变化的影响。设计了一种特殊的微流控通道,将LPFG置于通道中从而克服应变和弯曲及水流冲击的影响。该光纤光栅传感器能够实现准确的定量监测混凝土中氯离子浓度及其深度分布,解决耐久性监测的技术瓶颈。

1 模型计算

1.1 温度和应变效应影响

长周期光纤光栅的温度敏感性和应变敏感性是由于纤芯模的能力耦合到包层模,在此过程中由于包层模式有效折射率系数较为容易受到外界环境影响,使得特定波长发生了能量的损耗,其结果是谐振波长峰值对外界环境折射率变化非常敏感^[5-6]。此外,长周期光学光栅的光栅周期变化也会影响其敏感性,这些扰动共同导致光栅谐振波长的光谱位置发生偏移,这些都能通过相应设备测量得到。

由于波长漂移与温度 T 和轴向应力 ε 有关,可以通过式(1)和式(2)来测得漂移^[7]

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left[\frac{dn_{eff}}{dT} - \frac{dn_{cl}}{dT} \right] + \dots \frac{d\lambda}{dL} \frac{dL}{dT} \quad (1)$$

$$\frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left[\frac{dn_{eff}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{cl}}{d\varepsilon} \right] + \dots \frac{d\lambda}{dL} \quad (2)$$

式中 δn_{eff} 为波导模式与包层模式的微分有效系数。

基于公式(1)和公式(2),通过MATLAB模拟计

算温度从0℃上升到100℃过程中长周期光学光栅的谐振波长变化情况,得到如图1所示结果。

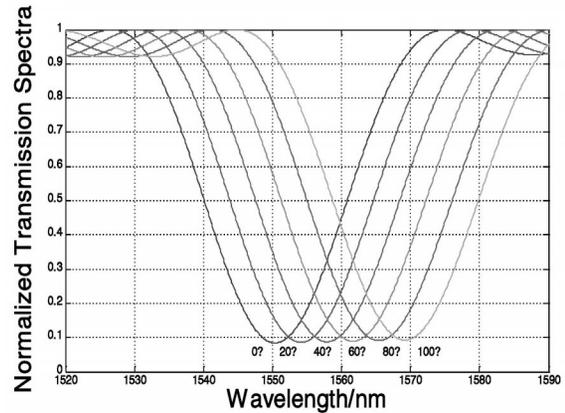


图1 谐振波长随温度变化的情况

可以明显看出,在应变条件不变的情况下,随着温度升高,共振波长发生红移。波长稳定性对于测量结果有着至关重要的意义,温度升高将会极大影响测量精度。此外,也对应力影响进行了模拟分析,得到相似的结果。为了保证测量精度,在测量过程中应保证温度和应力条件恒定不变。

1.2 浓度计算原理

传统的基于长周期光纤光栅浓度测量通常只使用单个长周期光纤光栅,无法去除温度和应力的干扰。故采用双LPFG来克服单个测量中温度和应力变化的影响。通过模拟计算来分析使用对于测量精度的影响。图2给出了计算原理。

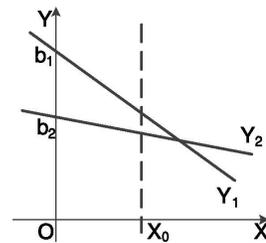


图2 计算原理

保持温度不变的情况下,对于一种确定浓度的溶液,其折射率是一个固定的值。而当溶液浓度发生变化时,溶液折射率也会发生变化。研究发现^[8],很多溶液的溶液浓度与折射率之间的对应关系可以用经验公式来进行描述。一般而言折射率与氯离子浓度基本呈线性关系。 Y_1 和 Y_2 分别表示所使用的两个LPFG传感器1和2的测量结果, X 表示氯离子浓度。图中两个表达式分别为

$$Y_1 = a_1 X + b_1 \quad (3)$$

$$Y_2 = a_2 X + b_2 \quad (4)$$

式中, a_1 和 a_2 表示斜率, b_1 和 b_2 表示截距。通过上式我们可以得到两个氯离子浓度

$$X_{10} = \frac{Y_{10} - b_1}{a_1} \quad (5)$$

$$X_{20} = \frac{Y_{20} - b_2}{a_2} \quad (6)$$

其中, Y_{10} 和 Y_{20} 分别为两次实验的结果。通过计算两次计算结果求平均值可以得到实验结果。

上述计算结果为一般精度, 而更为准确的计算结果, 我们将公式3和公式4联立, 得到其精确解:

$$X_0 = \frac{(Y_{10} - Y_{20}) - (b_1 - b_2)}{|a_1 - a_2|} \quad (7)$$

与公式(5)和公式(6)相比, 公式(7)所得结果更为准确, 误差更小。此外, 通过该公式, 利用双LPFGs可以克服一次测量过程中温度变化的影响。图3给出了改变浓度温度后的计算原理。

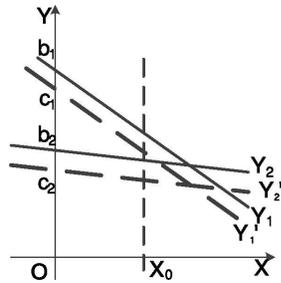


图3 改变温度后的计算原理图

由于温度影响, 无法在改变温度的同时用一个LPFG来测量浓度。利用双LPFGs传感器可以有效地解决了这一问题。在图3中, Y'_1 、 Y'_2 和 Y_1 、 Y_2 定义为

$$Y'_1 = a_1 X + c_1 \quad (8)$$

$$Y'_2 = a_2 X + c_2 \quad (9)$$

式中 a_1 和 a_2 , c_1 和 c_2 分别表示温度波动引起的斜率和截距。其联立解为

$$X_0 = \frac{(Y'_{10} - Y'_{20}) - (c_1 - c_2)}{|a_1 - a_2|} \quad (10)$$

从图3中, 可以总结得到

$$c_1 - c_2 = \frac{Y'_{10} - Y'_{20}}{Y_{10} - Y_{20}} \times (b_1 - b_2) \quad (11)$$

代入到公式(10)中, 可以得到

$$X_0 = \frac{(Y'_{10} - Y'_{20})}{|a_1 - a_2|} \left(1 - \frac{b_1 - b_2}{Y_{10} - Y_{20}}\right) \quad (12)$$

通过比较公式(12)和公式(7), 我们可以明显

得到, 利用两个LPFGs可以有效克服一次测量过程中温度波动的影响, 从而提高计算测量精度。

2 实验结果

2.1 折射率和浓度关系标定

一般而言, 含在混凝土的水分中化学物质的含量通常用盐度来表示, 盐度是指溶解在1L水中的固体物质的数量。水分的盐度和折射率之间存在一定的关系, 所以盐度可以通过测量折射率来测量。而水分中包含更多的是NaCl, 因此绝大多数情况下采用测量NaCl中氯离子浓度来标定盐度。因此, 我们主要测量NaCl溶液的浓度。本实验中使用的溶液是蒸馏水和NaCl配置的, 一共配置了9种不同浓度的NaCl溶液, 浓度分别为1、2、5、10、15、20、25、30、35g/L。分别测量这些NaCl溶液的折射率, 折射率与NaCl溶液浓度的关系如图4所示。图中, 黑色点为实验测量结果, 红线为拟合曲线。

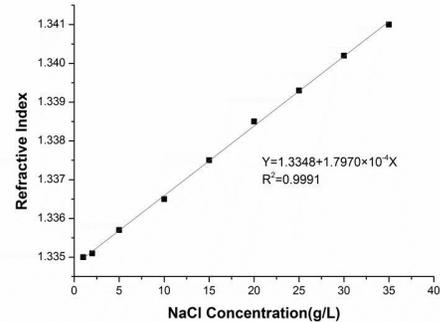


图4 实验用NaCl溶液折射率与浓度的关系

测量折射率范围从1.334 5到1.341 0, 所对应的实验设定测量范围为0‰~35‰, 其原因是考虑到海水中的浓度范围是0‰~36‰。则折射率Y和溶液浓度之间的关系如下:

$$Y = 1.3348 + 1.7970 \times 10^{-4} X \quad (13)$$

拟合确定性系数 R^2 为0.999 1, 说明实验结果和理论计算结果非常接近。

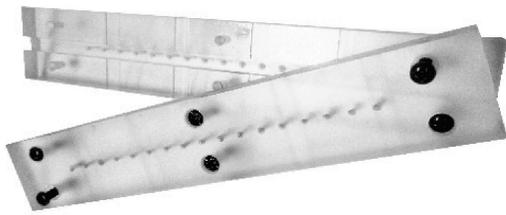
2.2 LPFG传感器制备

为了避免或者减轻应变和弯曲对测量结果的影响, 特别设计了一种特殊的微流控通道, 将两个LPFG笔直放置到微流控通道中, 并用氰基丙烯酸酯胶粘剂粘结, 使光栅截面固定在通道中心。

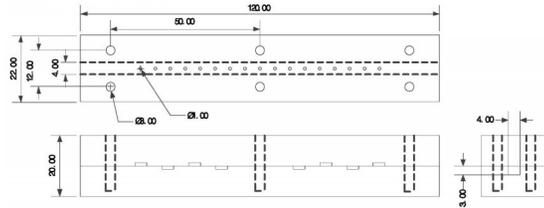
微流控通道是由聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 制成, 长宽高尺寸分别为120mm、宽22mm、高

20mm。在每个微通道中心开有一定数量的反应微通道，尺寸为3*4*12mm，其目的是让溶液通过微

通道与光纤光栅接触，从而能够避免水流对长周期光纤光栅的冲击。



(a)实物图



(b)尺寸图

图5 微流控通道结构

2.3 实验系统设计

实验分为两个部分。第一部分通过测量长周期光纤光栅透射光谱图来监测 NaCl 溶液浓度变化。使用的仪器包括超连续发光二极管(SLED), 光谱分析仪(OSA)。第二部分通过实验来测量单一波长透射光功率，从而实现 NaCl 溶液浓度监测。使用的实验器材包括可调谐激光器光源和两个功率计分别代替超连续发光二极管和光谱分析仪。使用 VB 语言编写了一个电脑程序控制光源输出，记录并处理实验结果。

1) 实验一

实验装置包括超连续发光二极管光源和光栅周期为 550μm 的长周期光纤光栅，光谱分析仪(AQ6375A)。将 SLED 光源发出的光接入长周期光纤光栅，并将长周期光纤光栅放置到溶液中，长周期光纤光栅输出端接入到光谱分析仪中，得到室温 23℃ 下的长周期光纤光栅传输透视图，范围从 1 350nm 到 1 650nm，如下图 6 所示。

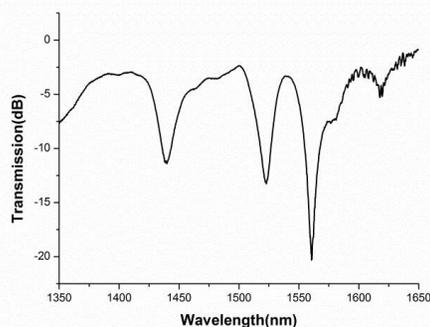


图6 长周期光纤光栅传输谱

从图6看出，长周期光纤光栅的透视图谱图中存在4个谐振损耗峰，分别位于1 435 nm、1 520 nm、

1 560 nm 附近。查阅文献可知，当外界折射率的变化量相同时，高阶次的中心波长变化量比低阶次的中心波长变化量要大的多。低阶次的包层模谐振损耗峰变化较为缓慢，变化范围小。高阶次的包层模的谐振损耗峰对环境折射率变化的响应更灵敏，变化更快，变化范围更大。对于应用于传感领域的长周期光纤光栅来说，灵敏度是非常重要的参数。因此，在使用长周期光纤光栅进行折射率传感时，应选用较高的谐振阶次，来提高传感灵敏度。综上，我们选用 1 561nm 作为测量峰，其信噪比大于 20dB。

2) 实验二

实验二中，我们采用可调谐激光光源来代替 SLED，选用的是安捷伦可调谐激光光源(8 164A)，并用两个光功率计代替光谱仪，这个系统更容易操作且价格低廉。实验装置如下图 7 所示。将可调谐激光光源的光利用光纤耦合器(OFC-1*2)分成两束，分别入射到两个不同的折射传感器中，利用两个光功率计(OPM1 和 OPM2)来监测通过传感器的传输光功率的变化情况。使用 VB 语言编写程序来控制光源输出，采集并处理从两个功率计所测量的数据。为了保障精确测量，将实验装置和样品溶液的温度维持在(23.0±1.0)℃。

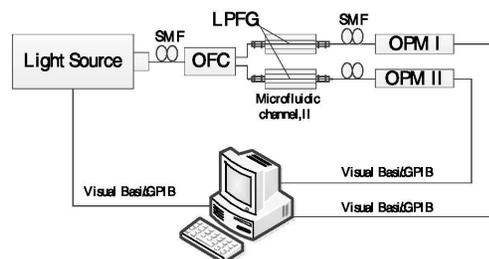


图7 实验装置图

实验所用 NaCl 溶液浓度以每次 5g/L 的变化量从

5g/L增加到35g/L。实验过程中,保持温度不变,保证实验结果不受到除浓度变化外的其他因素影响。

考虑可调谐激光源的工作波长范围,得到的1500~1600 nm的透射光谱,实验结果如图8所示。

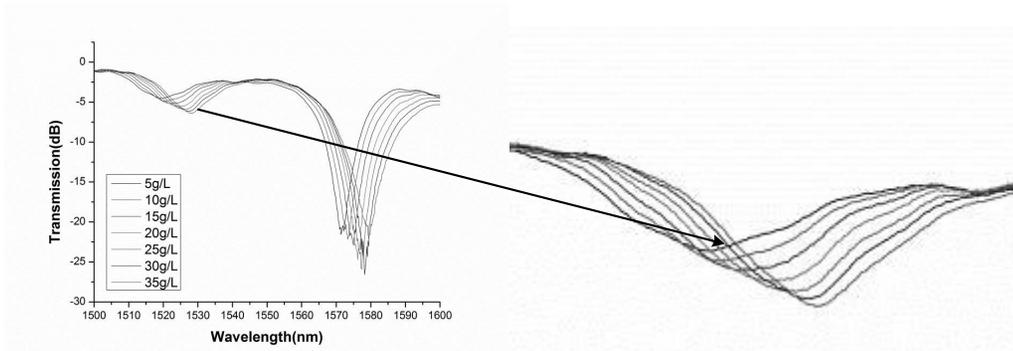
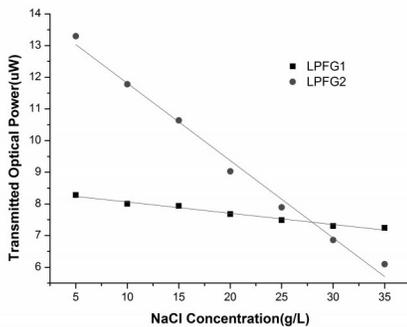


图8 长周期光纤光栅透射光谱图及部分放大图

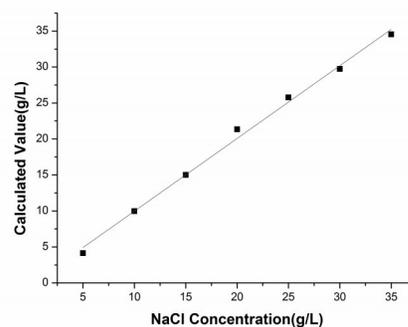
吸收峰的形状变化主要受应力的影响。当应力较大时,吸收峰明显而深。随着应力的减小,吸收峰的形状变得又圆又浅。当得到最佳的透射光谱时,用氰基丙烯酸酯胶粘剂固定LPFG,此时,实验表明,1575 nm附近的曲线峰值较高,带宽较小,但是吸收峰非常尖锐,使得传输的光功率变得不稳定,容易受到其他因素的影响。另一方面,在1530 nm附近有一个宽峰,功率较小,但很稳定。

在传感器的应用中,稳定性因素更为重要,所以我们选择了1530 nm附近的吸收峰。

当NaCl溶液浓度从5g/L变化到35g/L时,利用光功率计测量每个浓度下经过两个LPFG的透射光功率。可调谐激光器光源输出波长为1530 nm,功率为100μw的激光器。计算机控制整个过程,包括数据的收集、处理和输出。传输光功率与两种LPFGs测得溶液浓度的关系如图9(a)所示。



(a)NaCl溶液浓度与透射峰峰值关系



(b)NaCl溶液浓度与计算值的关系图

图9 传输光功率与两种LPFGs测得溶液浓度的关系

对实验结果进行线性拟合,得到

$$P_1 = -0.035 \times C + 8.415 \tag{14}$$

$$P_2 = -0.244 \times C + 14.253 \tag{15}$$

其中C是NaCl溶液浓度,单位为g/L,P是透射峰值,单位为mw。线性系数R²分别为0.976 21和0.988 18。在测量NaCl溶液浓度从5g/L变化到35g/L的过程中达到了很高的准确度。在此基础上,利用公式(7)去计算NaCl溶液浓度的,其结果如图9(b)

所示。线性系数R²等于0.994 43,相较于公式(14)和公式(15)计算结果,其准确度有了进一步的提升。为了分析双LPFGs传感器的测量结果,我们计算了在给定NaCl溶液浓度下的误差百分比。图10左图为给定NaCl溶液的误差百分比曲线。

图10中,红色和蓝色分别为LPFG1和LPFG2的误差分析结果,黑色为双LPFGs的误差分析结果,可以明显看出,利用双LPFGs传感器整体误差

范围小于单个LPFG,说明其测量精度优于使用单个LPFG。

在测量过程中,为了分析温度对实验测量结果的影响,通过改变溶液温度来测量两个透射光功率值变化的影响,以此来说明其克服温度变化的影响。我们重新进行一组新的实验,实验过程不变,通过给溶液升温,使其保持在30℃。然后用同样的

过程重新测量溶液的浓度。经过多次实验,误差分析图如图11所示。比较图10和图11可以看出,对于给定浓度的NaCl溶液,在利用双LPFGs传感器测量不同温度下的溶液浓度时,测量精度基本没有发生变化,处于误差范围之内,也即温度变化对测量结果没有影响。

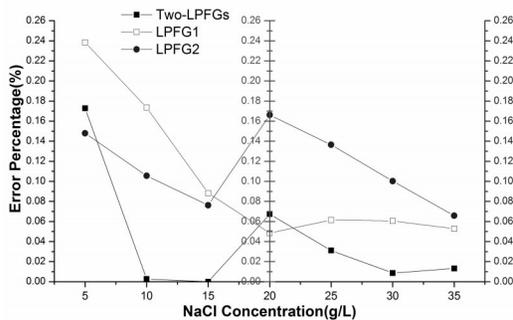


图10 对于给定NaCl溶液其浓度与误差百分比曲线溶液

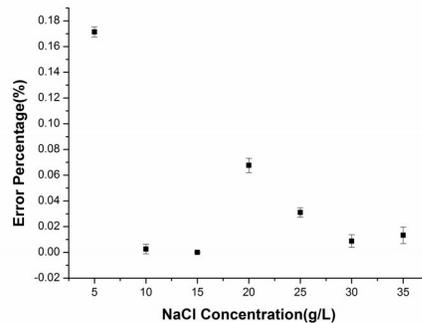


图11 温度为30℃时的测量结果

3 总结

本文采用双长周期光学光栅来测量溶液中NaCl浓度,从而来监测氯离子腐蚀情况。从理论及实验结果证明了,相比传统单LPFG,基于双LPFGs的传感器测量精度有所提升,此外还能避免温度波动

的干扰。项目组还设计一种特殊的微流控通道,避免水流冲击,且能够减弱甚至去除应力及弯曲对测试结果的影响。编写计算机程序控制激光输出及数据采集处理,基本实现自动化操作。该传感器系统在混凝土建筑养护中具有广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] 赵勇. 光纤传感原理与应用技术[M]. 北京:清华大学,2007.
- [2] 荣民,张连水. 光纤光栅传感器检测液体浓度[J]. 激光与光电子学进展,2008,45(5):66-68.
- [3] Srimannarayana, K., et al., Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects[J]. Optica applicata, 2008,38(3).
- [4] Gwandu, B., et al., Simultaneous and independent sensing of arbitrary temperature and bending using sampled fibre Bragg grating[J]. Electronics Letters, 2001, 37(15): 946-948.
- [5] Humbert, G. and A. Malki, Characterizations at very high temperature of electric arc-induced long-period fiber gratings[J]. Optics communications, 2002,208(4): 329-335.
- [6] Han, Y.-G., et al., Simultaneous measurement of temperature and strain using dual long-period fiber gratings with controlled temperature and strain sensitivities. Optics Express[J]. 2003,11(5):476-481.
- [7] Bhatia, V., et al., Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures[J]. Optical Engineering, 1997,36(7): 872-1876.
- [8] Vengsarkar, A.M., et al., Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Lightwave Technology, Journal of, 1996,14(1): 58-65.

(责任编辑:李勇)