

金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型

冯 艳 张 华 李 玉 龙 彭 刚

(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)

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)传感器是智能金属结构首选的信息传输与传感的载体, 埋入金属材料内部的 FBG 传感器必须要经过适当保护, 金属镀层是最有效的保护方法之一。FBG 经过镀前预处理, 通过化学镀方法可获得均匀的金属保护镀层。针对金属保护镀层, 应用弹性力学基本原理分析了由于镀层与 FBG 传感器的热膨胀系数不同而产生的热应力, 建立了镀层厚度对 FBG 温度传感性能影响的数学模型。镀镍 FBG 的升温和降温传感实验表明, 升温时的实际温度灵敏度系数与模型值之间误差为 6.22%, 降温时的实际温度灵敏度系数与模型值之间误差为 6.75%。与裸 FBG 相比, 化学镀镍后的 FBG 温度灵敏度系数提高 1 倍多。结果表明该温度模型从理论上解释了镀层金属热应力对 FBG 起到的温度增敏作用。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 金属保护镀层; 热应力; 温度增敏

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092902.0336

Temperature Sensitization Model of Fiber Bragg Grating with Metal Coating

Feng Yan Zhang Hua Li Yulong Peng Gang

(*Key Lab of Robot & Welding Automation, School of Mechanical & Electrical Engineering,*
Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract The optical fiber Bragg grating (FBG) sensor has great potential to be used for measuring temperature, strain, or even detecting fracture in metal materials. Embedding FBG sensor into metal materials is difficult and changing. Metal coating is one of the most efficient methods to protect FBG. Uniform metal coating can be applied in FBG sensor using electroless plating. The temperature changes induce thermal stress between the metal coating and the FBG due to their different thermal expansion coefficients. For the nickel-clad FBG, the thermal stress was analyzed and the math model about the coating thickness influencing temperature sensitivity was built. Temperature increase and decrease sensing experiment of the nickel-clad FBG shows, for increasing temperature and decreasing temperature, the errors between the practical temperature sensitivity coefficient and the model coefficient are 6.22% and 6.75% respectively. Compared with the naked FBG, the temperature sensitivity of the nickel-clad FBG is increased to two times and more. The results show the model is feasible to explain the temperature sensitivity enhancing mechanism.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; metal coating; thermal stress; temperature sensitization

1 引 言

将传感器件通过某种方法集成、封装在金属基体中, 可以获得智能金属结构。光纤布拉格光栅

(FBG)传感器具有反应灵敏、抗干扰能力强和能耗低等特点, 是智能金属结构首选的信息传输与传感的载体。通过检测埋入金属结构内部的 FBG 传感

收稿日期: 2008-05-13; **收到修改稿日期:** 2008-08-07

基金项目: 国家 973 计划前期基础研究专项(2005CCA04300), 国家自然科学基金(60844005)和江西省自然科学基金(2008GQC0013)资助项目。

作者简介: 冯 艳(1976—), 女, 博士研究生, 工程师, 从事光纤保护及智能金属结构方面的研究。

E-mail: confirmfyan@163.com

导师简介: 张 华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事光纤智能金属结构, 焊接过程自动化, 工业机器人智能化和水下移动焊接机器人技术方面的研究。E-mail: zhanghua_lab@163.com

器波长变化,就可以监测结构内部的温度和应变等参数的变化情况,及时发现潜在的故障^[1],采取相应措施。为了成功地将 FBG 传感器埋入金属基体,必须对其进行金属化保护以避免埋入过程中高温对 FBG 传感器的直接破坏^[2],通过镀金、银、镍、铜等可以实现对 FBG 传感器的金属化保护^[3~6]。由于金属保护层与 FBG 传感器的热膨胀系数不同,当温度变化时会产生热应力。目前,金属镀层的热应力对 FBG 温度传感性能影响的相关研究报道还不多。本文分析了热应力对金属化保护后的 FBG 传感器温度传感性能的影响,建立了镀层厚度对 FBG 温度传感性能影响的数学模型,并用实验验证了该模型的合理性。

2 FBG 传感机理

FBG 传感器是利用两种介质面上光的全反射原理制成的光导元件,具有径细、柔韧和优良的可埋入性,集信息传输与传感于一体,并且具有抗电磁干扰、抗腐蚀等特性,便于实现分布式传感或多点传感器复用。从麦克斯韦经典方程出发,结合光纤耦合模理论,FBG 的 Bragg 波长 λ_B 为

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

式中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为栅格周期。由 (1) 式可见, λ_B 随 n_{eff} 和 Λ 的改变而改变。这是基本公式,它是 FBG 传感器研究与开发的基础。FBG 传感器是波长编码传感器,通过测其中心波长的变化就可以获知外界因素的变化,如温度、应力等。在引起布拉格波长变化的外界因素中,最直接的是应力、应变和温度参数。当 FBG 受到外界应力作用时,无论是对光栅拉伸还是挤压,都会引起栅格周期 Λ 的变化,而且光纤本身的弹光效应会使得有效折射率 n_{eff} 随着外界应力状态的变化而变化。温度变化既引起 FBG 有效折射率 n_{eff} 的变化(热光效应),同时由于热膨胀也引起栅距 Λ 的变化(热膨胀效应)。FBG 的中心波长 λ_B 在温度和热应力引起的应变作用下的漂移 $\Delta\lambda_B$ 为^[7,8]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T +$$

$$\lambda_B\{\epsilon_z - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[(p_{11} + p_{12})\epsilon_r + p_{12}\epsilon_z]\}, \quad (2)$$

式中 $\alpha = \frac{d\Lambda}{\Lambda dT}$ 为线性热膨胀系数, $\xi = \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}} dT}$ 为热光常数, p_{11}, p_{12} 是材料的弹光常数, ϵ_z, ϵ_r 分别热轴向应变、热径向应变。

3 热应力分析

当弹性体的温度改变时,它的每一部分都将趋于膨胀或收缩。但由于弹性体所受的外在约束以及各个部分之间的相互约束,这种膨胀或收缩并不能自由地发生,于是就产生了所谓的热应力。由于温度变化引起的热变形受到约束而产生的应力称为热应力或温度应力^[9]。由于光纤光栅和金属镀层的热膨胀系数存在差异,在热载荷作用下将产生热应力。在分析 FBG 热应力前,做以下假设:

- (1) 仅研究温度均匀分布的情况,光纤光栅不同位置之间没有温差效应,即温度不随 Z 轴变化;
- (2) 光纤光栅和镀层均处于线性热膨胀区,忽略温度对它的热膨胀系数的影响,认为热膨胀系数在测量温度范围内始终保持常数;
- (3) 光纤材料的热光系数始终保持不变;
- (4) 金属镀层和 FBG 之间完全接触,即不互相脱离也不发生相对移动;
- (5) 仅考虑温度场变化稳定后的情形;

用 $\alpha_i, E_i, \mu, r_i (i = 1, 2)$ 分别表示金属镀层和 FBG 的线性热膨胀系数、弹性模量、泊松比、半径。将镀层视为内径 $r_{i1} = a$, 外径 $r_{e1} = b$ 的圆筒,圆筒两端是不受外力作用的自由端,FBG 是内径 $r_{i2} = 0$, 外径 $r_{e2} = a$ 的实心圆柱,它的力学性质可视作是各向同性的,如图 1 所示。根据杜汗梅-诺衣曼原理,在热弹性情况下,可以把热应力的位移问题转化为求解等温弹性体受等效外力载荷的作用下的位移场问题^[9]。本文将热应力分解为轴向热应力 σ_z 和径向热应力 σ_r 进行分析。

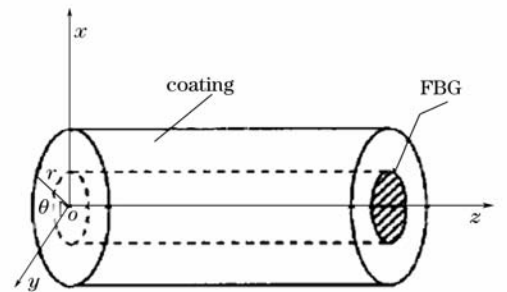


图 1 金属镀层保护的 FBG 模型示意图

Fig. 1 Schematic of metal coated FBG

3.1 σ_z 分析

镀层与 FBG 互相约束的轴对称剖面图,可简化为两根长度都等于 L 但材料不同的两棒粘接在一起,如图 2 所示。以温度变化 $\Delta T > 0$ 为例。若镀层和 FBG 之间没有相互约束,它们的自由膨胀量 $\Delta l_1, \Delta l_2$ 分别为

$$\Delta l_1 = \alpha_1 \Delta T L, \Delta l_2 = \alpha_2 \Delta T L, \quad (3)$$

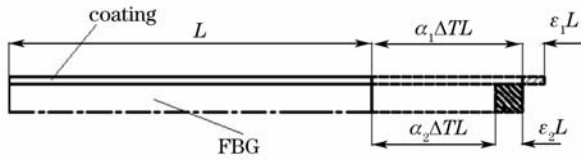


图 2 镀层与 FBG 互相约束轴对称示意图

Fig. 2 Axisymmetric schematic of restriction on FBG and coating

因 $\alpha_1 > \alpha_2$, 镀层的自由膨胀量大于 FBG 的自由膨胀量。但镀层与 FBG 结合紧密, 不发生相对移动, 使得镀层的实际膨胀量将小于自由膨胀量, 而 FBG 的实际膨胀量将大于自由膨胀量。即金属镀层受压应力 σ_{z1} 作用, 应变为 $\epsilon_1 = \frac{\sigma_{z1}}{E_1}$, 缩短量为 $\epsilon_1 L$; 而此时 FBG 受拉应力 σ_{z2} 作用, 应变为 $\epsilon_2 = \frac{\sigma_{z2}}{E_2}$, 伸长量为 $\epsilon_2 L$ 。则镀层最终的伸长量为

$$\alpha_1 (t_1 - t_0) L - \epsilon_1 L = \alpha_1 \Delta T L - \frac{\sigma_{z1}}{E_1} L, \quad (4)$$

FBG 最终的伸长量为

$$\alpha_2 (t_1 - t_0) L + \epsilon_2 L = \alpha_2 \Delta T L + \frac{\sigma_{z2}}{E_2} L, \quad (5)$$

由(4)式等于(5)式可得

$$\alpha_1 \Delta T L - \frac{\sigma_{z1}}{E_1} L = \alpha_2 \Delta T L + \frac{\sigma_{z2}}{E_2} L, \quad (6)$$

又因为镀层与 FBG 处于平衡状态, 镀层所受的压力与 FBG 所受的拉力在数值上应该相等, 即有

$$\sigma_{z1} A_1 = \sigma_{z2} A_2, \quad (7)$$

式中 A_1, A_2 分别为镀层、FBG 的横截面积。

由(6)式和(7)式可解得

$$\sigma_{z2} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) E_1 E_2 A_1}{E_1 A_1 + E_2 A_2} \Delta T. \quad (8)$$

FBG 在这个均匀轴向应力 σ_{z2} 作用下, 轴向应变为

$$\begin{aligned} \epsilon'_{z2} &= \frac{\sigma_{z2}}{E_2} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) E_1 A_1}{E_1 A_1 + E_2 A_2} \Delta T = \\ &= \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) E_1 (h^2 + 2ha)}{E_1 (h^2 + 2ha) + E_2 a^2} \Delta T; \end{aligned} \quad (9)$$

而根据广义 Hooke 定理, 其径向应变为

$$\begin{aligned} \epsilon'_{2r} &= \frac{-\mu_2 \sigma_{z2}}{E_2} = \frac{-\mu_2 (\alpha_1 - \alpha_2) E_1 A_1}{E_1 A_1 + E_2 A_2} \Delta T = \\ &= \frac{-\mu_2 (\alpha_1 - \alpha_2) E_1 (h^2 + 2ha)}{E_1 (h^2 + 2ha) + E_2 a^2} \Delta T, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 h 为镀层厚度。

2.2 σ_r 分析

仍以温度变化 $\Delta T > 0$ 为例, 因 $\alpha_1 > \alpha_2$, 热膨胀时 FBG 受到镀层的拉力 p_2 作用, 对镀层而言则是内表面 $r_{i1} = a$ 处受内压力 p_1 , 外表面 $r_{e1} = b$ 处呈自由状态, 令 $p_1 = p_2 = p$, 如图 3 所示。根据拉梅公式^[9], 有

$$\begin{cases} \sigma_{1r} = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r_1^2}\right) p \\ \sigma_{1\theta} = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r_1^2}\right) p \end{cases}, \quad (11)$$

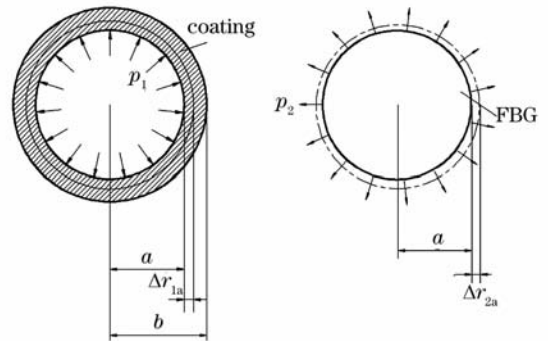


图 3 镀层与 FBG 径向受力示意图

Fig. 3 Schematic of coating and radial stress of FBG 镀层的径向位移为^[8]

$$u_{1r} = \frac{pa^2}{E_1 (b^2 - a^2) r_1} \left[(1 - \mu_1) r_1^2 + (1 + \mu_1) b^2 \right], \quad (12)$$

由此可得到镀层的径向应变量为

$$\begin{aligned} \epsilon_{1r} &= \frac{du_{1r}}{dr_1} = \\ &= \frac{pa^2}{E_1 (b^2 - a^2) r_1^2} \left[(1 - \mu_1) r_1^2 - (1 + \mu_1) b^2 \right], \end{aligned} \quad (13)$$

而在 $r_{i1} = a$ 处的自由膨胀应变为 $\alpha_1 a \Delta T$, 因此镀层的径向改变 Δr_{1a} 为

$$\begin{aligned} \Delta r_{1a} &= \frac{pa}{E_1 (b^2 - a^2)} \times \\ &= \left[(1 - \mu_1) a^2 - (1 + \mu_1) b^2 \right] + \alpha_1 a \Delta T. \end{aligned} \quad (14)$$

对于 FBG, 根据广义 Hooke 定理, 可求出光纤径向的应变为^[10]

$$\epsilon_{2r} = (1 - \mu_2) \frac{P}{E_2}, \quad \epsilon_{z2} = -2\mu_2 \frac{P}{E_2}; \quad (15)$$

而在 $r_{e2} = a$ 处的自由应变为 $\alpha_2 a \Delta T$, 因此 FBG 的径向改变 Δr_{2a} 为

$$\Delta r_{2a} = (1 - \mu_2) \frac{Pa}{E_2} + \alpha_2 a \Delta T. \quad (16)$$

根据位移连续条件: $\Delta r_{1a} = \Delta r_{2a}$ 可得

$$p = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)E_1E_2(b^2 - a^2)}{[(1 + \mu_1)E_2 + (1 - \mu_2)E_1]b^2 - [(1 - \mu_2)E_1 + (1 - \mu_1)E_2]a^2}\Delta T, \quad (17)$$

将(17)式代入(15)式可得

$$\begin{aligned} \epsilon_{2r}^* &= \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)E_1(1 - \mu_2)(h^2 + 2ah)}{[(1 - \mu_2)E_1 + (1 + \mu_1)E_2](a + h)^2 - [(1 - \mu_1)E_2 + (1 - \mu_2)E_1]a^2}\Delta T, \\ \epsilon_{2z}^* &= \frac{-2(\alpha_1 - \alpha_2)\mu_2E_1(h^2 + 2ah)}{[(1 - \mu_2)E_1 + (1 + \mu_1)E_2](a + h)^2 - [(1 - \mu_1)E_2 + (1 - \mu_2)E_1]a^2}\Delta T. \end{aligned} \quad (18)$$

3.3 FBG 的总热应变

在轴向热应力和径向热应力的共同作用下,金属化保护后的 FBG 总热应变应为两者的叠加,结合(9)式,(10)式和(18)式整理后可得

$$\begin{aligned} \epsilon_{2r} &= \frac{J_4(h^2 + 2ah)}{J_1(a + h)^2 - J_2a^2}\Delta T - \frac{J_3(h^2 + 2ah)}{E_1(h^2 + 2ah) + E_2a^2}\Delta T, \\ \epsilon_{2z} &= \frac{(J_3 + J_4)(h^2 + 2ah)}{E_1(h^2 + 2ah) + E_2a^2}\Delta T - \frac{2J_3(h^2 + 2ah)}{J_1(a + h)^2 - J_2a^2}\Delta T, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } J_1 &= (1 - \mu_2)E_1 + (1 + \mu_1)E_2, \\ J_2 &= (1 - \mu_1)E_2 + (1 - \mu_2)E_1, \\ J_3 &= (\alpha_1 - \alpha_2)\mu_2E_1, \\ J_4 &= (\alpha_1 - \alpha_2)(1 - \mu_2)E_1. \end{aligned}$$

4 金属化保护的 FBG 温度传感模型

将(19)式代入(2)式中,可得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} &= (\alpha_2 + \xi)\Delta T + (1 + p_{12})\epsilon_z - \\ \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}(p_{11} + p_{12})\epsilon_r &= S_T\Delta T + S_z\Delta T + S_r\Delta T, \end{aligned} \quad (20)$$

其中 S_T 是温度灵敏度系数, S_z 轴向热应变灵敏度系数, S_r 是径向热应变灵敏度系数,它们只与 FBG 材料本身性能、镀层材料的厚度和性能有关,与外界温度变化无关,即温度传感性能在热应力作用下仍保持线性关系。由(20)式可知,只要 $S_z + S_r > 0$,热应力对 FBG 就可以起到温度增敏作用。其中 $S_T = \alpha_2 + \xi$,

$$\begin{aligned} S_z &= (1 + p_{12})\left[\frac{(J_3 + J_4)(h^2 + 2ah)}{E_1(h^2 + 2ah) + E_2a^2} - \frac{2J_3(h^2 + 2ah)}{J_1(a + h)^2 - J_2a^2}\right], \\ S_r &= \frac{-n_{\text{eff}}^2}{2}(p_{11} + p_{12})\left[\frac{J_4(h^2 + 2ah)}{J_1(a + h)^2 - J_2a^2} - \frac{J_3(h^2 + 2ah)}{E_1(h^2 + 2ah) + E_2a^2}\right]. \end{aligned} \quad (21)$$

4.1 FBG 的金属化保护

光纤属于难镀非金属基材,为了成功地将金属

保护层镀到 FBG 传感器上,须经镀前预处理获得适合于化学镀的洁净催化过渡表面,经化学镀使光纤获得金属保护镀层。镀前预处理的具体方案为:

(a) 去除涂敷层:通常,光栅只是位于光纤的某一位置处,而光纤外面通常包裹一层硅烷树脂或环氧树脂类的包层。为了增强传感效果又不损坏光栅,去除涂敷层不能采用剥离方法。采用丙酮浸泡光纤 15~30 min 左右,然后用浸沾有酒精的棉花团轻轻除去涂敷层。

(b) 除油:在敏化之前,必须清除裸光纤光栅传感器表面上的油污,以确保其表面能均匀地浸蚀。用超声波酒精清洗 5~10 min,然后用超声波蒸馏水洗 5~10 min。

(c) 敏化:敏化就是在光纤表面上,吸附一层容易氧化的物质,以便在活化处理时被氧化,在光纤光栅表面形成催化膜,保证化学复合镀的顺利进行。敏化时间为 10~15 min,然后用蒸馏水清洗 3~5 min。

(d) 活化:活化处理的目的是使光纤光栅产生表面一层很薄而具有催化性的金属层,作为化学镀时氧化还原反应的催化剂,以便在化学沉积中加速反应。活化时间为 10~15 min,而后也要用蒸馏水清洗 3~5 min。

FBG 传感器经过预处理后,放入化学镀镍溶液

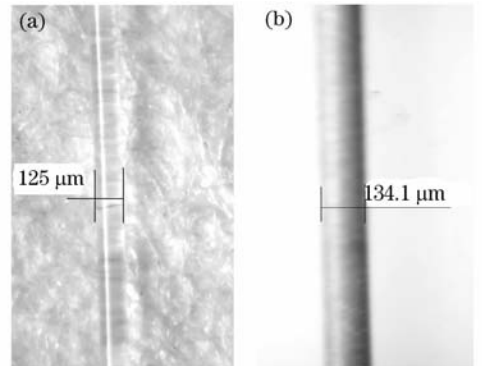


图 4 FBG 化学镀镍后外观对照图

(a) 裸 FBG; (b) 化学镀镍后 FBG

Fig. 4 Stereograph of naked (a) and Ni coated FBG (b)

中进行化学镀。化学镀 3 h 后取出自然晾干。用体视显微镜(上海光学仪器厂 型号:XTZ-E)分别测量裸光纤光栅和化学镀后的光纤光栅的直径,测量结果如图 4 所示。化学镀后的光纤光栅直径为 $134.10 \mu\text{m}$,从而可以得到化学镀层的厚度为 $h = 5.05 \mu\text{m}$ 。

4.2 温度传感实验及分析

将化学镀镍后的 FBG 放在恒温水浴箱中进行温度传感实验,温度从室温 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始加热,温度间隔为 $6 \text{ }^\circ\text{C}$,一直加热到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。然后进行相同温度间隔的降温实验。待温度稳定后,用光纤光栅网络分析仪记录反射波长值,每分钟记录一个数据,每个温度值保持 $15 \sim 20 \text{ min}$,波长取平均值,实验拟合结果如图 5 所示,图中实线表示升温拟合曲线,虚线表示降温拟合曲线。FBG 的主要参数值由光纤制造商美国康宁公司和 FBG 制造商北京品傲光电科技有限公司提供,FBG 参数值为:泊松比 $\mu_2 = 0.17$ 、热膨胀系数 $\alpha_2 = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、弹性模量 $E_2 = 7.4 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、热光系数 $\zeta = 6.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,中心波长 $\lambda_B = 1529.694 \text{ nm}$,弹光系数 $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.27$, $n_{\text{eff}} = 1.4682$,光纤光栅半径 $a = 62.5 \mu\text{m}$ 。取镀镍层的参数值为^[11]:热膨胀系数 $\alpha_1 = 1.42 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,泊松比 $\mu_1 = 0.31$,弹性模量 $E_1 = 1.96 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。把材料参数及 $h = 5.05 \mu\text{m}$ 代入(21)式,可以得到化学镀镍后 FBG 波长漂移为 $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 8.57 \times 10^{-6} \Delta T$,即温度灵敏度系数的理论值为 $8.57 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,则理论的中心波长漂移为 $13.11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

从图 5 中可看出,无论是升温还是降温过程其中心波长和温度变量之间保持着良好的线性关系,相关系数均达到 0.999 以上。实验拟合结果显示升

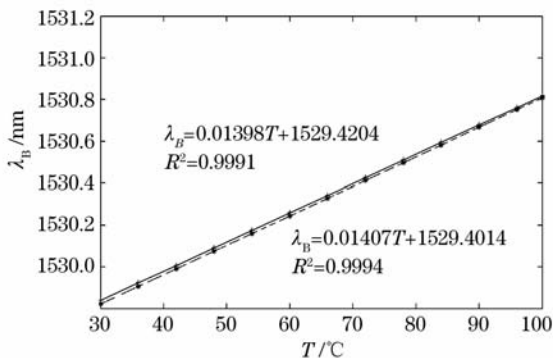


图 5 化学镀镍后 FBG 温度传感实验拟合结果

Fig. 5 Fitting results for Ni-coated FBG with increasing and decreasing temperature experiment

温时的中心波长漂移为 $13.98 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,温度灵敏度系数为 $9.14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,实验值与理论值相对误差为 6.22% ;降温时的中心波长漂移为 $14.07 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,温度灵敏度系数为 $9.19 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,实验值与理论值相对误差为 6.75% 。通过实验发现,升温和降温过程波长变化存在着程度较小的迟滞现象,这种迟滞现象主要是由 FBG 和镀镍层两种不同材料所致。任何弹性材料在工作时都存在不同程度的弹性迟滞^[9],镀镍层在温度变化时也存在弹性迟滞,这种弹性迟滞效应通过光纤光栅 Bragg 波长变化反映出来。用适当的热处理工艺可提高镀层结合力以减小甚至消除迟滞现象^[12]。从实验数据拟合结果来看,镀镍后 FBG 的中心波长 λ_B 略有减小。从镀镍光纤的微观机理考虑,非金属基体上化学镀层与基体表面是机械咬合^[12],当温度变化时,镀镍层和 FBG 边界上存在的摩擦和形变使 λ_B 有所变化。

5 结 论

本文分析了温度变化稳定后化学镀 Ni 光纤光栅(FBG)的热应力,也适用于其它单一金属镀层的 FBG 热应力分析。在镀层热应力的作用下,FBG 的温度传感性能仍保持良好的线性关系,同时金属镀层的热应力使光纤光栅传感器的温度灵敏度系数相对于裸 FBG 提高了一倍多。化学镀后,FBG 谐振波长改变的原因以及不同金属复合镀层对 FBG 产生的热应力及其对 FBG 传感性能影响的分析还有待深入研究。

参 考 文 献

- Zhang Wentao, Liu Lihui, Li Fang *et al.*. Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9):507~508
- Zhou Changzun, Chen Yang, Peter Kung. Research on thermal stability of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):434~437
周长尊,陈 阳, Peter Kung. 布拉格光纤光栅热稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):434~437
- Kuang Ge, Zhang Jiyu, Zhong Yunhui. A Study of the metallization on quartz of optical fiber[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2004, **24**(2):32~34
旷 戈, 张济宇, 钟贇辉. 光纤表面金属化工艺的研究[J]. *电镀与环保*, 2004, **24**(2):32~34
- Li Xiaofu, Jiang Desheng, Yu Haihu *et al.*. Electroless nickel2phosphor plating process on surface of quartz optical fiber[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2005, **56**(1): 126~129
李小甫,姜德生,余海湖 等. 石英光纤表面化学镀镍磷合金工艺[J]. *化工学报*, 2005, **56**(1): 126~129
- Stefan Sandlin, Tuomo Kinnunen, Jaakko Rämö *et al.*. A

- simple method for metal re-coating of optical fiber Bragg gratings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, **201**: 3061~3065
- 6 Li Bin, Tan Zhongwei, Liu Yan *et al.*. The dispersion of fiber Gratings can be tunable by using nonuniform copper plating technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2133~2138
李 彬, 谭中伟, 刘 艳 等. 利用非均匀镀铜技术实现光纤光栅的色散可调[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12):2133~2138
- 7 Liao yanbiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2000. 197~205
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 197~205
- 8 Li Dongshen, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Experimental study of fiber Grating smart layer system based on fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1166~1170
李东升, 梁大开, 潘晓文. 基于光纤布拉格光栅传感器的光纤光栅智能夹层试验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1166~1170
- 9 Zhou Yichun. Solid Mechanics in Materials [M]. Beijing: Science Press, 2004. 79~152
周益春. 材料固体力学[M]. 北京:科学出版社, 2005. 79~152
- 10 Li Chuan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui *et al.*. Fiber Grating: Principles, Techniques, and Sensing Applications[M]. Beijing: Science Press, 2005. 108~116
李 川, 张以馍, 赵永贵 等. 光纤光栅:原理、技术与传感应用[M]. 北京:科学出版社, 2005. 108~116
- 11 Jiang Xiaoxia, Shen Wei. Fundamentals and Practice of Electroless Plating[M]. Beijing: Defense industry press, 2000. 100~112
姜晓霞, 沈 伟. 化学镀理论及实践[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. 100~112
- 12 He Jianbo, Wu Xiaolan, Huang Hui *et al.*. Study of electroplating of amorphous Ni-P alloy and prospects of its applications [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 1999, **27**(1):62~70
何建波, 吴肖安, 黄 辉 等. 电镀镍磷合金研究现状及前景[J]. *浙江工业大学学报*, 1999, **27**(1):62~70