

金属镀层光纤环的热应力及其引起的弹光效应

彭星玲 张 华 李玉龙

(南昌大学机电工程学院江西省机器人及焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘要 为了研究金属镀层对光纤宏弯损耗性能的影响,建立了带金属镀层的光纤环所受热应力及热应力引起的弹光效应的数学模型。计算了金属镀层光纤环的热应力系数和折射率热应力系数。仿真分析了光纤环向热应力系数 K_{θ} 、径向热应力系数 K_r 和折射率热应力系数 K_n 的主要影响因素。结果表明: K_{θ} 远大于 K_r , 光纤主要受到环向热应力, 径向热应力可忽略;热应力及其引起的折射率变化与径向位置和镀层厚度有关, 与光纤环的弯曲半径基本无关;镀层厚度在 $0 \sim 2000 \mu\text{m}$ 范围内, 随着厚度增加, K_{θ} 和 K_n 均会先快速增大, 再缓慢增大并趋于稳定; K_n 为负值, 随着温度增加, 热应力将引起光纤折射率逐渐减小。该模型从理论上解释了金属镀层光纤环的热应力会引起光纤折射率变小, 从而改变光纤的宏弯损耗。

关键词 光纤光学; 金属镀层; 光纤环; 热应力; 弹光效应

中图分类号 TN818; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.1106004

Thermal Stress and the Associated Photoelastic Effect of the Metal Coated Fiber Loop

Peng Xingling Zhang Hua Li Yulong

(Key Laboratory of Robot and Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical and Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract In order to study effect of the metal coating on the macrobending loss properties of a fiber loop, two mathematical models of the thermal stress and the associated photoelastic effect of the metal coated fiber loop are established. The thermal stress coefficients and thermal stress dependent refractive index coefficients of the fiber loop with metal coating are calculated. Impact factors of the thermal stress coefficients K_{θ} , K_r and the thermal stress dependent refractive index coefficient K_n are simulated. The results indicate that K_{θ} is much greater than K_r at the same circumstance. Consequently, the metal coated fiber loop mainly suffers the annular thermal stress and the radial thermal stress can be ignored. The thermal stress and its induced refractive index change alter with the reference radial position and thickness of the coating rather than the bend radius of the loop. When the thickness of the metal coating increases from 0 to $2000 \mu\text{m}$, K_{θ} and K_n both undergo a process of a sharp increase, and then transfer to a slow growth and tend to a stable value. Since K_n is negative, refractive index decreases as the temperature increases. The presented models are feasible to explain that refractive index of the fiber decreases with the increase of temperature, thus altering the macrobending loss of the metal coated fiber loop.

Key words fiber optics; metal coating; fiber loop; thermal stress; photoelastic effect

OCIS codes 060.1810; 060.2310; 060.2400

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(51265035)、高等学校博士学科点专项科研基金(20123601110011)、江西省自然科学基金(20132BAB206024)、江西省教育厅 2013 年度科学技术研究项目(GJJ13064)、2013 年度江西省研究生创新专项资金项目(YC2013-B012)

作者简介: 彭星玲(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤传感、光纤智能材料与结构等方面的研究。

E-mail: pengxingling0223@163.com

导师简介: 张 华(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤智能材料与结构、机器人技术等方面的研究。

E-mail: zhanghua_phd@163.com

1 引 言

光纤宏弯损耗传感器是利用光纤发生宏弯曲时,外界参量(如温度、应力、位移等)使得光纤弯曲尺寸或者光纤本身特征参数(如折射率、数值孔径、归一化频率等)发生改变,从而引起光纤宏弯损耗变化来进行传感^[1-2]。目前利用光纤宏弯损耗性能进行传感时,通常是将光纤表面的丙烯酸酯类涂覆层去除,增加有效吸收层来抑制回音壁效应带来的光纤宏弯损耗振荡现象^[3-6]。然而石英光纤具有很高的弹性模量和较大的脆性^[7-8],去除涂覆层后,光纤弯曲时非常容易断裂,形成的裸光纤环也很脆弱。因此,对裸光纤环进行有效的保护是十分必要的。在光纤表面均匀地镀上金属是一种常见并且有效的保护方法,使光纤不仅能够承受高温,还易于埋入金属基体,形成智能金属结构。然而由于金属镀层与光纤的热膨胀系数不同,温度变化会产生热应力和热应变,从而引起光纤折射率改变;折射率的变化又会进一步引起数值孔径、归一化频率等参数发生变化,从而改变光纤的宏弯损耗性能。因此,热应力引起的弹光效应对光纤宏弯损耗的准确计算具有重要影响。

目前,对宏弯光纤的弹光效应分析多是集中在机械应力弯曲引起的弹光效应^[9-10],而没有分析温度变化时热应力引起的弹光效应。本文提出了一种简化的计算带金属镀层的宏弯光纤环所受热应力及其引起的折射率变化的方法,并仿真分析了光纤环向热应力系数 K_{θ} 、径向热应力系数 K_r 和折射率热应力系数 K_n 与光纤径向位置、镀层厚度和弯曲半径之间的关系。

2 金属镀层光纤环的热应力分析

物体在外力的作用下要发生变形,从而在内部产生应力和应变。但是物体的变形不仅仅由外力作用引起,温度的变化也能够引起变形,称为热变形。当弹性体温度发生变化引起的膨胀或收缩受到约束时,就会在弹性体内产生热应力。这种无外力作用,由于温度变化引起的热变形受到约束而产生的应力,称为热应力或者温度应力^[11]。由于光纤和金属镀层的热膨胀系数不同,在热载荷的作用下将产生热应力。在分析宏弯光纤热应力前,先做如下假设:

- 1) 仅研究温度稳定、均匀分布的情况,宏弯光纤不同位置之间不存在温度差异;
- 2) 光纤和镀层都处于线性热膨胀区,忽略温度对热膨胀系数的影响,认为热膨胀系数在测量温度

范围内是常数;

3) 金属镀层和光纤之间完全接触,既不相互脱离也不发生相对移动;

4) 光纤环是一个轴对称问题,环向位移为零,忽略切向应力和轴向应力,认为各个部分切向应力和轴向应力为零,仅考虑径向应力和环向应力。

以裸光纤环表面通过化学镀镍结合电镀镍方法形成的 Ni 层为例进行热应力分析。将 Ni 镀层视为空心圆环,径向上靠近曲率中心的部分可看成内 Ni 层,远离曲率中心的部分可看成外 Ni 层,空心圆环两端是不受外力作用的自由端,宏弯光纤可视为实心圆环。图 1 将带金镀层光纤弯曲模型示意图以柱坐标形式进行了表示。

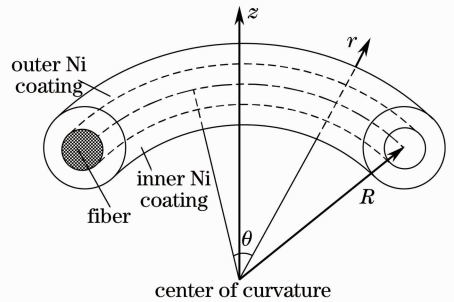


图 1 带金属镀层的光纤弯曲模型示意图

Fig. 1 Schematic of a part of the metal coated fiber loop

将热应力分解为径向热应力 σ_r 和环向热应力 σ_{θ} 进行分析。在径向上,镀层和光纤可简化为三层组合圆环,如图 2 所示。用 $\alpha_i, E_i, \mu_i (i = 1, 2, 3)$ 分别表示内 Ni 层、光纤层和外 Ni 层的线性热膨胀系数、弹性模量和泊松比。材料 1 区域范围为 $r_0 \leq r \leq r_1$, 代表内 Ni 层,材料 2 区域范围为 $r_1 \leq r \leq r_2$, 代表光纤层,材料 3 区域范围为 $r_2 \leq r \leq r_3$, 代表外 Ni 层。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

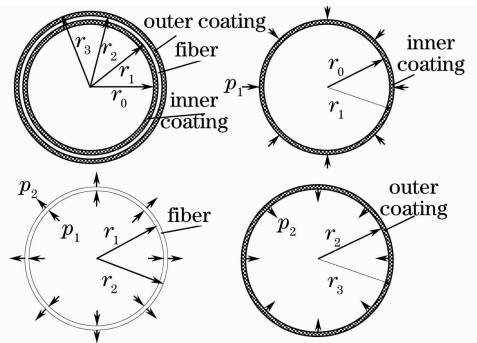


图 2 镀层与光纤径向受力示意图

Fig. 2 Schematic of the radial stress on the fiber and coating

力载荷作用下的位移场问题^[11]。根据边界条件和拉梅公式,可以求出带金属镀层的光纤环受到的热应力。

以温度变化 $\Delta T > 0$ 为例进行分析。字母 $\Delta \varepsilon_{1r_1}$, $\Delta \varepsilon_{2r_1}$, $\Delta \varepsilon_{2r_2}$ 和 $\Delta \varepsilon_{3r_2}$ 分别表示内 Ni 层外径、光纤层内径、光纤层外径和外 Ni 层内径的自由径向伸长,它们可表示为

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{1r_1} &= \alpha_1 r_1 \Delta T, \quad \Delta \varepsilon_{2r_1} = \alpha_2 r_1 \Delta T, \\ \Delta \varepsilon_{2r_2} &= \alpha_2 r_2 \Delta T, \quad \Delta \varepsilon_{3r_2} = \alpha_1 r_2 \Delta T. \end{aligned} \quad (1)$$

镍的热膨胀系数远大于光纤的热膨胀系数,当温度升高时,内镍层对光纤膨胀起到促进作用。因此,内镍层外表面受到均匀的外压力 p_1 作用,如图 2 所示。根据拉梅解^[12],可得到内 Ni 层的外径向热位移 u_{1r} 为

$$u_{1r} = -\frac{1}{E_1} \left[\frac{(1-\mu_1)r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_0^2} r + \frac{(1+\mu_1)r_0^2 r_1^2 p_1}{(r_1^2 - r_0^2)r} \right], \quad r_0 \leq r \leq r_1, \quad (2)$$

令 $r=r_1$,得到内 Ni 层外径的最终伸长量为

$$\Delta r_{1r_1} = \alpha_1 r_1 \Delta T - \frac{p_1 r_1 [(1-\mu_1)r_1^2 + (1+\mu_1)r_0^2]}{E_1 (r_1^2 - r_0^2)}. \quad (3)$$

光纤层可视为内径为 r_1 ,外径为 r_2 的圆环。其内表面受到均匀压力 p_1 ,而光纤层的热膨胀系数小于 Ni 层的热膨胀系数,Ni 层起到促进光纤层外表面自由膨胀的作用,因此,光纤层外表面受均匀拉力 p_2 ,如图 2 所示。根据拉梅解^[12],可得到光纤层的径向热应力 σ_{2r} 、环向热应力 $\sigma_{2\theta}$ 和径向热位移 u_{2r} 为

$$\sigma_{2r} = \frac{p_1 r_1^2 (r^2 - r_2^2) - p_2 r_2^2 (r_1^2 - r^2)}{r^2 (r_2^2 - r_1^2)}, \quad r_1 \leq r \leq r_2, \quad (4)$$

$$\sigma_{2\theta} = \frac{p_1 r_1^2 (r^2 + r_2^2) + p_2 r_2^2 (r_1^2 + r^2)}{r^2 (r_2^2 - r_1^2)}, \quad r_1 \leq r \leq r_2, \quad (5)$$

$$u_{2r} = \frac{1}{E_2} \left[\frac{(1-\mu_2)(r_1^2 p_1 + r_2^2 p_2)}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{(1+\mu_2)r_1^2 r_2^2 (p_1 + p_2)}{(r_2^2 - r_1^2)r} \right], \quad r_1 \leq r \leq r_2. \quad (6)$$

在(1)式和(6)式中,令 $r=r_1$,温度变化 ΔT ,在 p_1 和 p_2 作用下,光纤层内径的最终伸长量为

$$\Delta r_{2r_1} = \alpha_2 r_1 \Delta T + \frac{p_1 r_1 [(1-\mu_2)r_1^2 + (1+\mu_2)r_2^2] + 2p_2 r_1 r_2^2}{E_2 (r_2^2 - r_1^2)}, \quad (7)$$

令 $r=r_2$,得到光纤层外径的最终伸长量为

$$\Delta r_{2r_2} = \alpha_2 r_2 \Delta T + \frac{2p_1 r_1^2 r_2 + p_2 r_2 [(1-\mu_2)r_2^2 + (1+\mu_2)r_1^2]}{E_2 (r_2^2 - r_1^2)}. \quad (8)$$

外 Ni 层也可视为一个内、外径分别为 r_2 和 r_3 的圆环,其内表面受到均匀的拉力 p_2 作用,外表面呈自由状态。外 Ni 层的内径向热位移 u_{3r} 为

$$u_{3r} = -\frac{p_2 r_2^2 [(1-\mu_1)r^2 + (1+\mu_1)r_3^2]}{E_3 (r_3^2 - r_2^2)r}, \quad r_2 \leq r \leq r_3. \quad (9)$$

在(1)式和(9)式中,令 $r=r_3$,可以得到外 Ni 层内径的最终伸长量为

$$\Delta r_{3r_2} = \alpha_1 r_2 \Delta T - \frac{p_2 r_2 [(1-\mu_1)r_2^2 + (1+\mu_1)r_3^2]}{E_1 (r_3^2 - r_2^2)}. \quad (10)$$

根据边界条件: $\Delta r_{1r_1} = \Delta r_{2r_1}$, $\Delta r_{2r_2} = \Delta r_{3r_2}$,可以得到关于 p_1 、 p_2 的二元方程组:

$$\begin{cases} J_3 \Delta T = J_1 p_1 + J_2 p_2 \\ J_6 \Delta T = J_4 p_1 + J_5 p_2 \end{cases}. \quad (11)$$

解之得

$$p_1 = \frac{J_2 J_6 - J_3 J_5}{J_2 J_4 - J_1 J_5} \Delta T = J_{11} \Delta T, \quad (12)$$

$$p_2 = \frac{J_3 (J_2 J_4 - J_1 J_5) - J_1 (J_2 J_6 - J_3 J_5)}{J_2 (J_2 J_4 - J_1 J_5)} \Delta T = J_{22} \Delta T, \quad (13)$$

式中

$$\begin{aligned} J_1 &= E_1 (r_1^2 - r_0^2) (1 - \mu_2) r_1^2 + E_1 (r_1^2 - r_0^2) (1 + \mu_2) r_2^2 + E_2 (r_2^2 - r_1^2) (1 - \mu_1) r_1^2 + E_2 (r_2^2 - r_1^2) (1 + \mu_1) r_0^2, \\ J_2 &= 2E_1 (r_1^2 - r_0^2) r_2^2, \quad J_3 = E_1 E_2 (r_2^2 - r_1^2) (r_1^2 - r_0^2) (\alpha_2 - \alpha_1), \quad J_4 = 2E_1 (r_3^2 - r_2^2) r_1^2, \end{aligned}$$

$$J_5 = E_1(r_3^2 - r_2^2)(1 - \mu_2)r_2^2 + E_1(r_3^2 - r_2^2)(1 + \mu_2)r_1^2 + E_2(r_2^2 - r_1^2)(1 - \mu_1)r_2^2 + E_2(r_2^2 - r_1^2)(1 - \mu_1)r_3^2,$$

$$J_6 = E_1E_2(r_3^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)(\alpha_2 - \alpha_1).$$

因此,可以得到光纤 σ_{2r} 和 $\sigma_{2\theta}$ 的表达式:

$$\sigma_{2r} = \left[\frac{J_{11}r_1^2(r^2 - r_2^2)}{r^2(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{J_{22}r_2^2(r_1^2 - r^2)}{r^2(r_2^2 - r_1^2)} \right] \Delta T = K_{r1} \Delta T, \quad r_1 \leq r \leq r_2, \quad (14)$$

$$\sigma_{2\theta} = \left[\frac{J_{11}r_1^2(r^2 + r_2^2)}{r^2(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{J_{22}r_2^2(r_1^2 + r^2)}{r^2(r_2^2 - r_1^2)} \right] \Delta T = K_{\theta1} \Delta T, \quad r_1 \leq r \leq r_2. \quad (15)$$

3 金属镀层光纤环所受热应力的仿真研究

选用美国康宁通信光纤 SMF28,其参数值为^[7,13]: 纤芯半径 $a=4.15 \mu\text{m}$,包层半径 $b=62.5 \mu\text{m}$,热膨胀系数 $\alpha_2=0.55 \times 10^{-6} (\text{C})^{-1}$,弹性模量 $E_2=7.4 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu_2=0.17$,弹光系数 $p_{11}=0.121, p_{12}=0.27$ 。取镀镍层的参数值为^[14]:热膨胀系数 $\alpha_1=1.42 \times 10^{-5} (\text{C})^{-1}$,弹性模量 $E_1=1.96 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu_1=0.31$ 。其中, $r_0=R-b-h, r_1=R-b, r_2=R+b, R$ 代表光纤的弯曲半径, h 代表镀镍层厚度。通过 Matlab 可模拟出径向热应力系数 K_{r1} 和环向热应力系数 $K_{\theta1}$ 与光纤径向位置 r 、镀镍层厚度 h 和弯曲半径 R 之间的关系。

由图 3 可知,镀层厚度均为 $100 \mu\text{m}$ 时, $K_{\theta1}$ 在三种弯曲半径处差别很小,变化趋势相似, $K_{\theta1}$ 始终大 0, 随着远离曲率中心而逐渐减小,在温度升高时,光纤始终受到环向拉应力。由图 4 可知,镀层厚度均为 $100 \mu\text{m}$ 时, K_{r1} 在三种不同弯曲半径处略有差别,变化趋势相似, K_{r1} 随着远离曲率中心先逐渐减小到 0,再由 0 逐渐增大,在温度升高时,光纤弯曲内侧受到径向压应力,外侧受到径向拉应力。光纤任意径向位置 r 处 K_{r1} 都远小于 $K_{\theta1}$,因此,径向热应力 σ_{2r} 远小于环向热应力 $\sigma_{2\theta}$,光纤主要受到的是环向热应力; $K_{\theta1}$ 和 K_{r1} 随着光纤径向位置 r 增加,呈准线性增加或减少的趋势,因此,可取光纤纤芯中心处的热应力系数 $K_{\theta1}$ 和 K_{r1} 表示光纤的平均热应力系数。

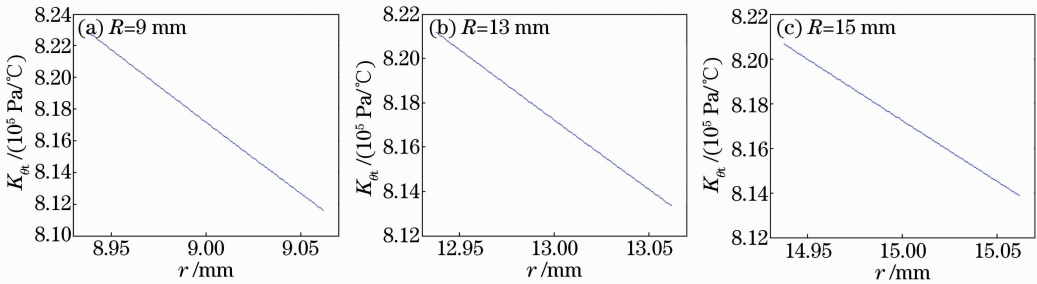


图 3 模拟 $K_{\theta1}$ 与光纤径向位置的关系

Fig. 3 Modeling the relationship between $K_{\theta1}$ and radial position of the fiber

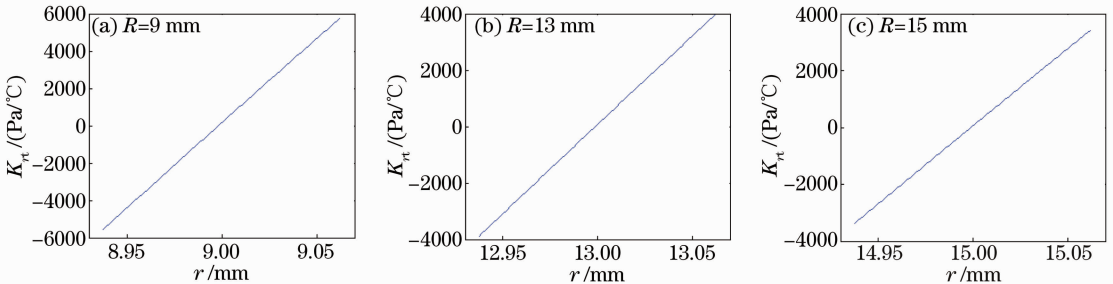


图 4 模拟 K_{r1} 与光纤径向位置的关系

Fig. 4 Modeling the relationship between K_{r1} and radial position of the fiber

从图 5 可以看出,在镀层厚度 $0 \sim 2000 \mu\text{m}$ 范围内, $K_{\theta1}$ 随着镀层厚度增加先快速增大,再缓慢增

大后趋于稳定值; K_{r1} 则随着镀层厚度增加而逐渐增大,但是 K_{r1} 远小于 $K_{\theta1}$; 在弯曲半径 $9 \sim 15 \text{ mm}$ 范围

内, $K_{\theta t}$ 随着弯曲半径增大而略有增加, 变化不明显; $K_{r t}$ 随着弯曲半径增大而逐渐减小, 但是 $K_{r t}$ 仍是远小于 $K_{\theta t}$ 。

综合图 3~5 可知, 光纤受到的环向应力远远大于

径向应力, 径向应力可忽略不计; 随着镀层厚度增加, 环向应力先快速增加, 再缓慢增加后趋于稳定; 光纤的环向应力几乎不变随着弯曲半径而改变。因此, 要减小光纤环的热应力, 应该尽可能地减小镀层厚度。

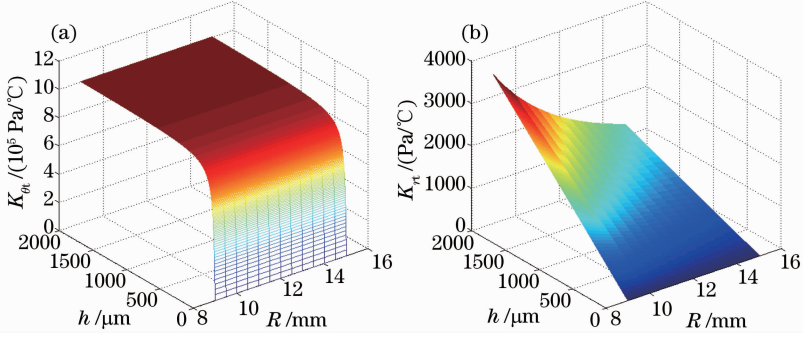


图 5 模拟 $K_{\theta t}$ 和 $K_{r t}$ 。(a) $K_{\theta t}$ 与 R 和 h 的关系; (b) $K_{r t}$ 与 R 和 h 的关系

Fig. 5 Modeling of $K_{\theta t}$ and $K_{r t}$. (a) Relationship of $K_{\theta t}$ with bend radius and coating thickness; (b) relationship of $K_{r t}$ with bend radius and coating thickness

4 宏弯光纤热应力引起的弹光效应

光纤受力发生弹性形变, 通过光弹性效应引起折射率的变化。由于形变将引起折射率指数的变化, 在受力后折射率指数由 n 变为 $n + \Delta n$, 引用抗渗介电常数的参量 $1/n^2$, 求出 $\Delta(1/n^2)$, 就能求出 Δn , 由于:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \frac{1}{(n + \Delta n)^2} - \frac{1}{n^2} \approx -\frac{2\Delta n}{n^3}, \quad (16)$$

式中考虑到 Δn 远小于 n 而作了近似, $\Delta(1/n^2)$ 与光纤的应变可以通过光弹性效应^[15-16]建立联系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_r \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_\theta \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{bmatrix}, \quad (17)$$

式中 p_{11} 和 p_{12} 是光纤的弹光系数, 推导出光纤折射率变化与应变的关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_r \\ \Delta n_\theta \\ \Delta n_z \end{bmatrix} = -\frac{n^3}{2} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{bmatrix}. \quad (18)$$

当光纤环受温度变化产生热应变时, 在线弹性范围内, 由广义胡克定律^[17]可知光纤所受应变与应力的关系为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \end{bmatrix}. \quad (19)$$

而对光纤环而言 $\sigma_z = 0$, 因此, 折射率变化为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_r \\ \Delta n_\theta \\ \Delta n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{n_2^3}{2E_2} \{ (p_{11} - 2\mu p_{12})\sigma_{2r} + [(1 - \mu)p_{12} - \mu p_{11}]\sigma_{2\theta} \} \\ -\frac{n_2^3}{2E_2} \{ [(1 - \mu)p_{12} - \mu p_{11}]\sigma_{2r} + (p_{11} - 2\mu p_{12})\sigma_{2\theta} \} \\ -\frac{n_2^3}{2E_2} [(1 - \mu)p_{12} - \mu p_{11}](\sigma_{2r} + \sigma_{2\theta}) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

由于 σ_r 远小于 σ_θ , 可以忽略 σ_r , 因此, $\Delta n_r \approx \Delta n_z$, 忽略双折射效应, 可得光纤平均折射率变量 Δn 为

$$\Delta n = \Delta n_r = \Delta n_z = -\frac{n_2^3}{2E_2} [(1 - \mu)p_{12} - \mu p_{11}] \left[\frac{J_{11} r_1^2 (r^2 + r_2^2)}{r^2 (r_2^2 - r_1^2)} + \frac{J_{22} r_2^2 (r_1^2 + r^2)}{r^2 (r_2^2 - r_1^2)} \right] \Delta T = K_n \Delta T. \quad (21)$$

r 包含了纤芯和包层的区域, 因此, 折射率增量是与温度、光纤径向位置和镀层厚度有关的。

SMF28 光纤的折射率参数^[13]为: 纤芯折射率 $n_{co} = 1.4504$, 包层折射率 $n_{cl} = 1.4447$ 。结合(15)式和

(21)式,可知光纤折射率热应力系数 K_n 始终小于 0,因此,当 $\Delta T > 0$ 时, Δn 始终小于零,光纤折射率增量为负。用 Matlab 模拟了 K_n 与光纤径向位置 r 、镀层厚度 h 和弯曲半径 R 之间的变化情况。

由图 6 可知, $R=9\text{ mm}$, $h=100\text{ }\mu\text{m}$ 时, K_n 始终小于 0,温度增加时,热应力会引起光纤的折射率减小;在光纤区域 $r_1 \leq r \leq r_2$,光纤包层和纤芯处的折射率不再是均匀分布,而是渐变形分布;纤芯的 K_{nco} 和包层处 K_{ncl} 都会随着其径向位置 r 增大而呈准线性减小的趋势,可取 r_1 和 r_2 处折射率热应力系数的平均值表示包层的平均折射率热应力系数 K_{ncl} ;纤芯本身尺寸很小,可取纤芯中心线处,即 R 处的折射率应力系数 K_{nco} 表示纤芯的平均折射率热应力系数。从图 7 可以看出,镀层厚度和弯曲半径相同时, K_{nco} 略微大于 K_{ncl} ; K_{nco} 和 K_{ncl} 与弯曲半径和镀层厚度的变化规律相似,都几乎不随弯曲半径变化而改

变,而随着镀层厚度增加先快速增加,再逐渐趋于稳定;当 $\Delta T > 100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,即使镀层厚度仅为 $10\text{ }\mu\text{m}$,由热应力引起的折射率变化可超过 -0.0001 ,此时热应力引起的弹光效应已经比较明显,必须加以考虑。因此,要合理控制镀层厚度,这样既能减轻热应力引起的弹光效应,又能起到保护宏弯光纤的作用。

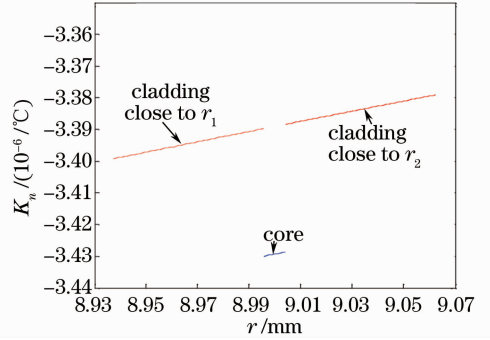


图 6 K_n 与光纤径向位置的关系

Fig. 6 Relationship between K_n and radial position of the fiber

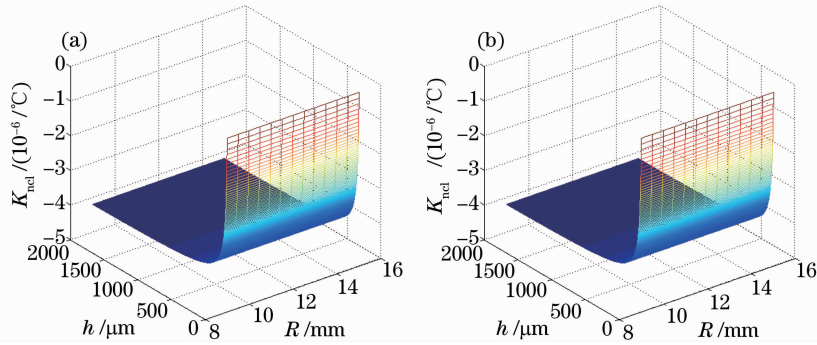


图 7 模拟 K_{nco} 和 K_{ncl} 。(a) K_{nco} 与弯曲半径和镀层厚度的关系; (b) K_{ncl} 与弯曲半径和镀层厚度的关系

Fig. 7 Modeling of K_{nco} and K_{ncl} . (a) Relationship of K_{nco} with bend radius and coating thickness; (b) relationship of K_{ncl} with bend radius and coating thickness

5 结 论

分析了温度变化稳定后带 Ni 镀层光纤环的热应力,也适用于其他单一金属镀层的光纤环热应力分析。在镀层热应力的作用下,光纤纤芯和包层的折射率都发生了变化,由均匀分布变成了渐变形分布。在镀层厚度 $0\sim 2000\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,随镀层厚度增大,光纤环所受的热应力及其引起的折射率变化都会先快速增大,再缓慢增大后逐渐趋于稳定。随着温度增加,热应力会引起光纤的折射率减小,从而影响光纤的宏弯损耗性能。对光纤环进行金属化保护时,需要合理控制镀层厚度,并对光纤折射率的变化进行适当修正,从而使得光纤宏弯损耗的计算更为准确。对于不同合金镀层对光纤环产生的热应力及其对光纤宏弯损耗性能影响的分析还有待进一

步研究。

参 考 文 献

- 1 Liao Yانبiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 90-95.
- 2 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 90-95.
- 3 Fan Yuqiang, Yuan Yufeng, Wei Wanting, *et al.*. Fiber bending sensor based on LP₂₁ mode [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (11): 1128005.
- 4 范宇强, 袁余锋, 魏婉婷, 等. 基于 LP₂₁ 模式的光纤弯曲传感器 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128005.
- 5 G Rajan, Y Semenova, J Mathew. Experimental analysis and demonstration of a low cost fibre optic temperature sensor system for engineering applications [J]. Sens Actuators A, 2010, 163 (1): 88-95.
- 6 A Zandehnam, M Mirzaei, A Farashiani, *et al.*. Investigation of bending loss in a single-mode optical fiber [J]. Pramana-J Phys, 2010, 74(4): 591-603.
- 7 P Wang, G Brambilla, Y Semenova, *et al.*. A simple

- ultrasensitive displacement sensor based on a high bend loss single-mode fibre and a ratiometric measurement system [J]. *J Opt*, 2011, 13(7): 1–5.
- 6 A Martinez-Rios, D Monzon-Hernandez, I Torres-Gomez, *et al.*. An intrinsic fiber-optic single loop micro-displacement sensor [J]. *Sensors*, 2012, 12(1): 415–428.
- 7 Yao Shun, Pang Xiaolin, Dai Jingjing, *et al.*. Transmission efficiency of bending fiber with small radius [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106001.
尧舜, 庞晓林, 代京京, 等. 小半径弯曲条件下传能光纤传输效率研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106001.
- 8 Rao Chunfang, Zhang Hua, Feng Yan, *et al.*. Stress in metal coating fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060601.
饶春芳, 张华, 冯艳, 等. 光纤布拉格光栅金属化保护中的应力[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060601.
- 9 J H Hannay. Mode coupling in an elastically deformed optical fibre [J]. *Electron Lett*, 1976, 12(7): 173–174.
- 10 Wang Xuezheng, Bian Baomin, Ji Yunjing, *et al.*. Theoretical model modify of bending loss of mono-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6): 819–823.
王雪珍, 卞保民, 纪运景, 等. 单模光纤弯曲损耗理论模型的修正[J]. *光子学报*, 2006, 35(6): 819–823.
- 11 Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. Analysis and Application of Thermal Stress Theory [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 59–68.
李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 59–68.
- 12 Wang Zhongren, Yuan Shijian, Hu Lianxi, *et al.*. Fundamentals of Elasticity and Plasticity [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007. 134–139.
王仲仁, 苑世剑, 胡连喜, 等. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007. 134–139.
- 13 P Wang, Y Semenova, G Farrell. Temperature dependence of macrobending loss in all-fiber bend loss edge filter [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(17): 4312–4316.
- 14 Pi Haoyang, Liu Qiong, Ye Qing. Analysis and experimental study of inner stress for metallized fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0305008.
皮浩洋, 刘琼, 叶青. 金属化光纤光栅内应力的分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0305008.
- 15 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.
- 16 Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Zhou Zude, *et al.*. Welding-packaged accelerometer based on metal-coated FBG [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(7): 070604.
- 17 Yang Haibo, Cao Jianguo, Li Hongbo. Introduction to Elasticity and Plasticity [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. 45–47.
杨海波, 曹建国, 李洪波. 弹性与塑性力学简明教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011. 45–47.

栏目编辑: 王晓琰