

文章编号: 0253-2239(2005)08-1013-6

圆芯型边孔光纤双折射的有限元分析*

李智忠 胡永明 杨华勇 孙崇峰 张学亮

(国防科技大学光电学院, 长沙 410073)

摘要: 对圆芯型边孔光纤固有双折射的研究结果进行了报道。在对边孔光纤固有双折射的产生机理和计算原理进行研究的基础之上,采用有限元法分析了圆芯型边孔光纤的内部应力分布和双折射的大小。研究结果表明圆芯型边孔光纤的几何双折射较小,以应力双折射为主;边孔的存在导致光纤纤芯和包层区域的应力分布发生了较大的变化。文章提出了两边孔的连线方向为边孔光纤的快轴方向,并就不同的边孔结构对光纤双折射的影响进行了研究,发现圆芯圆孔型边孔光纤的固有双折射随边孔张角的增加而成指数关系增长,可通过增大边孔半径和减小两孔间距提高边孔光纤的双折射。

关键词: 光纤光学; 双折射; 有限元法; 边孔光纤

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Finite-Element Analysis of Birefringence in Circular-Core Side-Hole Fiber

Li Zhizhong Hu Yongming Yang Huayong Sun Chongfeng Zhang Xueliang

(School of Optoelectronics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: The research results of the intrinsic birefringence of the circular-core side hole fiber are reported. On the basis of the study on the production mechanism and calculation principles of the intrinsic birefringence of the side hole fiber, the finite element method is used to analyze the interior stresses distribution and the birefringence values of the circular-core side hole fiber. The research results indicate that the geometrical birefringence of the circular-core side hole fiber can be neglected, and the birefringence mainly relies on the stress birefringence; the stresses distributions in the core and cladding field have changed greatly because of the presence of the side holes. The conclusion is put forward that the fast axis of the circular-core side hole fiber is parallel to the link line of the two holes. The influence of different physical dimensions of the holes on the intrinsic birefringence of the side hole fiber is also discussed and the results show that the intrinsic birefringence of the circular-core side hole fiber with round holes increases exponentially with the angle of side holes. The birefringence can be improved through increasing the radius of the side holes and reducing the distance between the core and the side hole.

Key words: fiber optics; birefringence; finite-element method; side-hole fiber

1 引 言

边孔光纤具有较高的压力灵敏度和较低的温度灵敏度^[1],因而特别适合进行压力传感,国内外很多学者展开了相应的应用研究^[2,3]。尤其近年来,随着光纤光栅制作技术的逐渐成熟,在边孔光纤上写入光纤光栅之后形成的边孔光纤光栅具有温度自补偿能力^[4],可以克服单模光纤光栅中较为严重的温

度和压力交叉敏感问题^[5],从而引起了人们极大的研究兴趣。其中圆芯型边孔光纤比其它椭圆芯边孔光纤具有更大的压力/温度灵敏度比值,更加有利于克服交叉敏感问题^[6],因而更受青睐。但固有双折射的大小是限制该类圆芯型边孔光纤广泛应用的一个重要参量^[6],而目前国内外并没有较为详细研究该类圆芯型边孔光纤固有双折射的研究报道,本文主要采用有限元法对该类边孔光纤进行了固有双折

* 国家自然科学基金(60377029)资助课题。

作者简介: 李智忠(1979~),男,山东潍坊人,国防科技大学光电学院博士研究生,主要从事光纤信息技术和光纤光栅传感技术研究。E-mail: jirmy@sina.com

收稿日期: 2004-06-26;收到修改稿日期: 2005-01-17

射的计算研究。由于在实际的光纤制作和熔接过程中,圆形边孔的光纤最容易制作和熔接,因此本文主要以自行设计制作的圆芯圆孔型边孔光纤(如图1所示)为例进行研究。

2 边孔光纤双折射的计算原理

边孔光纤是一种新型的保偏光纤,它的结构与熊猫型保偏光纤相类似,不同的是熊猫光纤包层的两个应力区变成以纤芯为中心的两个对称的空洞,如图1所示。由于边孔光纤中不存在高热膨胀系数的应力区,因而与熊猫光纤相比,边孔光纤具有较好的热稳定性;同时由于边孔的存在,可以使得光纤外部各向同性的压力在纤芯内部产生各向异性的应力,从而可以产生较大的应力双折射^[1~3]。

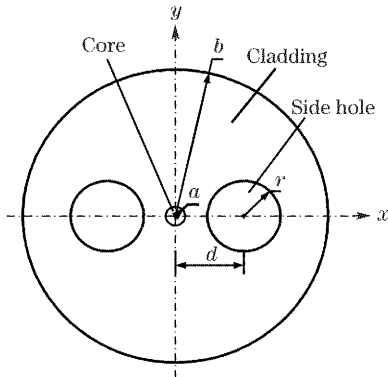


图1 圆芯圆孔型边孔光纤示意图

Fig. 1 The structure of circular-core side hole fiber with circular holes

光纤的双折射主要分为固有双折射和诱导双折射。固有双折射主要是指在光纤制作过程中所形成的双折射,一旦光纤制作完毕,固有双折射的数值就是一个固定值,因此又称为本征双折射。诱导双折射主要是指在光纤制作完毕之后在使用过程中由于外界温度、压力、弯曲等因素所引起的双折射,例如在边孔光纤传感过程中,我们就是通过改变它的诱导双折射来进行传感的。已有相关的参考文献对边孔光纤的诱导双折射进行了详细的研究^[7],本文主要研究边孔光纤的固有双折射(在后文中直接称为双折射),这是一个限制边孔光纤传感应用的重要参量。

根据光纤中的弹光理论,在应力作用下,两个偏振方向的折射率可分别表示为^[8]

$$n_x = n_{x0} + C_1 \sigma_x + C_2 \sigma_y + C_2 \sigma_z, \quad (1)$$

$$n_y = n_{y0} + C_2 \sigma_x + C_1 \sigma_y + C_2 \sigma_z, \quad (2)$$

其中 C_1 和 C_2 为应力弹光系数, n_{x0} 和 n_{y0} 为不存在应力时 x 和 y 方向的有效折射率, σ_x 、 σ_y 和 σ_z 为应力的

三个分量。

将光纤的双折射 B 定义为两个偏振方向折射率的差值,因此根据(1)式、(2)式,双折射可表示为

$$B \equiv n_x - n_y =$$

$$(n_{x0} - n_{y0}) + (C_1 - C_2)(\sigma_x - \sigma_y), \quad (3)$$

(3)式的第一项主要是指不存在应力时由于光纤的几何结构所引起的双折射,称为几何双折射 B_g ;第二项是指由于光纤内部的应力所导致的双折射,因此称为应力双折射 B_s 。

根据光纤理论,光纤的几何双折射主要是由光纤纤芯形状的椭圆度所决定,可表示为^[9]

$$B_g = ne\Delta^2 \frac{\omega^4}{V^2} \times$$

$$\left\{ u^2 + (u^2 - V^2) \left[\frac{J_0(u)}{J_1(u)} \right]^2 + u\omega^2 \left[\frac{J_0(u)}{J_1(u)} \right]^3 \right\}, \quad (4)$$

其中,

$$u = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad \omega = k_0 a (n^2 - n_2^2)^{1/2},$$

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad \Delta = (n_1 - n_2)/n_1,$$

$$e = 1 - a_y/a_x, \quad a = (a_x + a_y)/2,$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0,$$

n 为有效折射率, n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率, a 为纤芯半径, a_x 、 a_y 分别为 x 和 y 方向的纤芯半径, λ_0 为真空中的波长, J_i 为第 i 阶贝塞耳函数。

对于所研究的圆芯型边孔光纤而言,由于纤芯形状是圆对称的而不存在椭圆度,即 $e = 0$,因此该类边孔光纤的纤芯形状不会引入几何双折射 B_g 。同时由于能量主要集中于纤芯中传输,因此包层中边孔的存在对光路影响也不会很大^[10]。经过上述分析可知该类边孔光纤的几何双折射可以忽略不计,即 $B_g \approx 0$,而以应力双折射为主。

在边孔光纤拉制的过程中,当光纤从近千摄氏度的软化温度冷却到室温时,由于纤芯材料和包层材料热膨胀系数的差别使得纤芯和包层内部存在热应力,而边孔的存在改变了光纤自身结构的对称性,使得热应力分布不再具有圆对称性,在光纤纤芯内出现了非对称性的应力分布,从而出现了应力双折射。

进行光纤应力双折射计算的方法有很多种。例如已有的近似解析法^[11]适合对热膨胀系数分布比较规则的光纤进行双折射的计算,而微元算法^[12]适合对存在热应力区的保偏光纤进行双折射计算。由于边孔光纤不存在热应力区,因此采用近似解析法和微元算法等方法很难对其双折射进行计算。同时考虑到有限元法^[13]不存在光纤种类的限制,因此用了有限元法进行边孔光纤双折射计算。

有限元法^[14,15]的基本思想是对整体进行结构离散化,将整体变换为有限多个有限大小的构件在有限多个节点的相互联系下组成。由于光纤径向尺寸相对于光纤长度而言可忽略,因此光纤中的热应力问题就变为二维平面问题,含有三个应变分量、三个应力分量和两个位移分量:

$$\begin{aligned} \text{应力: } \boldsymbol{\sigma} &= \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \\ \text{应变: } \boldsymbol{\varepsilon} &= \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix}, \\ \text{位移: } \boldsymbol{U} &= \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

以边孔光纤纤芯的中心作为坐标原点,以两边孔连线方向作为 x 轴,其垂直方向作为 y 轴建立笛卡儿坐标系,如图 1 所示。将光纤横截面划分为几千个三角形有限单元,每个单元具有 4 个节点,对每个节点而言都存在以上 8 个物理量,通过物理方程、几何方程以及平衡条件就可建立以上 8 个物理量的线性方程组。然后通过边界条件联立求解以上线性方程组,从而可求解出各个节点处的应力、应变和位移。

根据参考文献的研究结果^[8],我们可以将坐标原点 $(0,0)$ 处的应力分量近似作为光纤整个纤芯区域 x 和 y 两个方向的平均应力。因此,忽略几何双折射,光纤内部的双折射 B 的计算公式可以表示为

$$B \equiv n_x - n_y = C(\sigma_x - \sigma_y), \quad (6)$$

其中 σ_x, σ_y 为有限元法所求得的坐标原点处的应力分量; $C = C_1 - C_2$ 为材料的相对应力光学常量,对于石英光纤而言 $C = 3.36 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$ ^[8]。

3 边孔光纤双折射的计算

3.1 方法验证

在采用有限元法进行计算之前一般都要进行方法验证,因此首先对阶跃折射率变化的单模光纤的应力分布进行了计算。图 2 是采用有限元法计算出的阶跃单模光纤的应力分布。所用计算参量为^[13]: $a = 7.8 \mu\text{m}, b = 62.5 \mu\text{m}, E = 7830 \text{ kg/mm}^2, \nu = 0.186, \alpha_1 = 14.85 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \alpha_2 = 5.4 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \Delta T = -1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将图 2 中的结果与已知的理论结果^[13]进行比较,两者基本吻合,误差小于 0.1%。

同时采用有限元法计算了某种结构参量($E = 7830 \text{ kg/mm}^2, \nu = 0.186 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \alpha_1 = 10.05 \times$

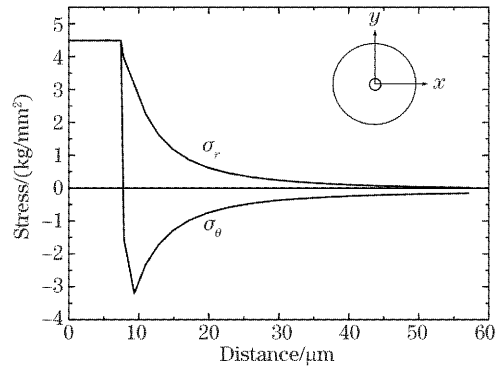


图 2 阶跃单模光纤的应力分布

Fig. 2 The stress distributions in the step index single-mode fiber

$10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \alpha_2 = 5.4 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \Delta T = -800 \text{ }^\circ\text{C}$,包层半径 $b = 62.5 \mu\text{m}$,边孔半径 $r = 10 \mu\text{m}$,边孔中心与纤芯中心的距离 $d = 20 \mu\text{m}$)的熊猫型保偏光纤的双折射。根据文献^[11]理论计算公式给出的计算结果为 6.386×10^{-5} ,采用有限法的计算结果为 6.395×10^{-5} ,两者相差 0.14%。

通过对以上两种光纤计算结果的验证,表明采用有限元法计算光纤双折射的做法是可行的。

3.2 边孔光纤双折射的计算结果

边孔光纤的制作流程是首先在光纤预制棒上按照设计要求加工两个对称的高精度空心边孔,然后在拉丝机上利用改进的工艺拉制边孔光纤,在拉丝过程中必须采取一定的措施保证边孔结构不受破坏。

图 3 为所设计制作边孔光纤的横截面图,其几何尺寸为: $a = 4 \mu\text{m}, b = 62.5 \mu\text{m}, r = 16.49 \mu\text{m}, d = 24.46 \mu\text{m}$ (各标注如图 1 所示)。

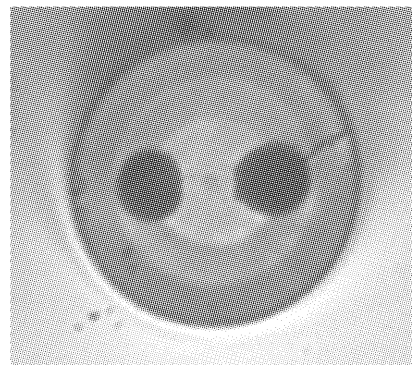


图 3 边孔光纤横截面图

Fig. 3 The cross section of the side hole fiber

另外在计算过程中所采用的其它光纤参量^[13]为:杨氏模量 $E = 7830 \text{ kg/mm}^2$,泊松比 $\nu = 0.186$,纤芯和包层的热膨胀系数分别为 $\alpha_1 = 9.4 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \alpha_2 = 5.4 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \Delta T = -1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

通过有限元法首先计算分析了边孔光纤内部各点的主应力方向分布,如图 4 所示。由于边孔的存在导致光纤包层内部的应力分布产生了较大的变化,且在边孔的周围出现了应力集中。

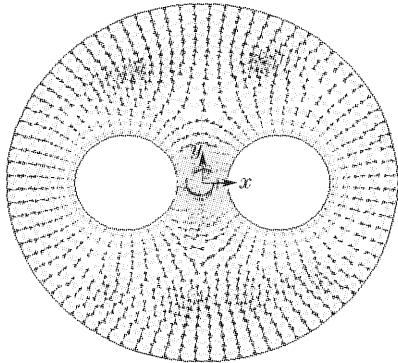


图 4 光纤内部各点主应力方向分布图

Fig. 4 The distribution of principal stresses orientation inside the fiber

通过图 5 可以看出,光纤纤芯内部应力分量 σ_x 和 σ_y 的数值随着坐标的增加而变化,且两者都为正值,表明光纤纤芯内部存在一个向外的拉应力。与不存在边孔的单模光纤的应力分布相比,由于边孔的存在使得边孔光纤纤芯区域的 σ_x 和 σ_y 不再相等,从而导致了光纤双折射的产生。也就是说,边孔的存在对光纤纤芯区域内的应力分布也产生了较大的影响。

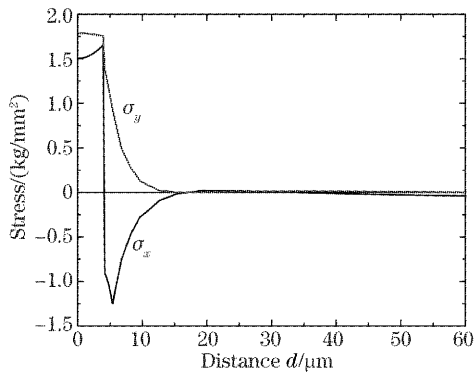


图 5 边孔光纤 y 轴应力分布图

Fig. 5 The stress distribution along y-axis in the side hole fiber

根据有限元计算结果,边孔光纤坐标(0,0)处的应力分量分别为

$$\sigma_x = 1.5042 \text{ kg/mm}^2, \quad \sigma_y = 1.7896 \text{ kg/mm}^2,$$

y 方向的应力分量大于 x 方向的应力分量,则根据光纤双折射的计算公式(6)可知边孔光纤双折射的数值 $B = -0.95894 \times 10^{-5}$ 。双折射为负值,表明该类边孔光纤的两边孔连线方向为光纤的快轴方向,这与实验所测得的结论一致。

4 不同几何结构尺寸的边孔光纤双折射

根据前面的分析,边孔的存在影响了光纤纤芯内部的应力分布,从而产生了光纤双折射。因此对边孔光纤的应力分量和双折射与几何结构尺寸之间的关系进行了研究。

4.1 边孔半径 r 一定,应力和双折射与边孔距离 d 的关系

保持边孔半径 $r = 16.49 \mu\text{m}$ 不变,令 d 的变化范围为:22~42 μm 。则可以计算出纤芯处应力分量和光纤双折射随 d 的变化情况,如图 6 所示。

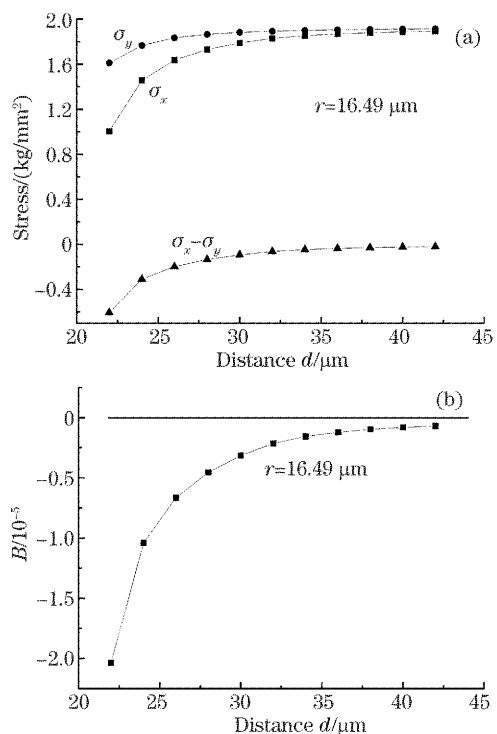


图 6 应力分量(a)和双折射(b)随边孔距离 d 的变化曲线

Fig. 6 Dependence of the stress components (a) and the birefringence (b) on the distance d between the core and the side hole centers

通过图 6 可以看出随着 d 的增加,光纤纤芯处的两个应力分量数值都不断增大,且渐渐趋于相等,光纤双折射 B 趋向为零,这说明随着 d 的增加,边孔对纤芯区应力分布的影响越来越小。当 d 小于 26 μm 时,双折射的绝对值随着 d 的减小而迅速增大。因此要想得到较高双折射的边孔光纤,则必须使 d 小于 26 μm 。

4.2 边孔距离 d 一定,应力和双折射与边孔半径 r 的关系

保持 $d = 24.46 \mu\text{m}$ 不变,令 r 的变化范围为 0~20 μm ,则可以计算出纤芯处应力分量和光纤

双折射随 r 的变化情况,如图 7 所示。

通过图 7 可以看出随着 r 的减小,光纤纤芯处的两个应力分量不断增大,且趋向相等,光纤双折射也趋向为零。当 r 为零时,即不存在边孔,此时双折射为零,则恰好为理想的单模光纤。这说明随着边孔的

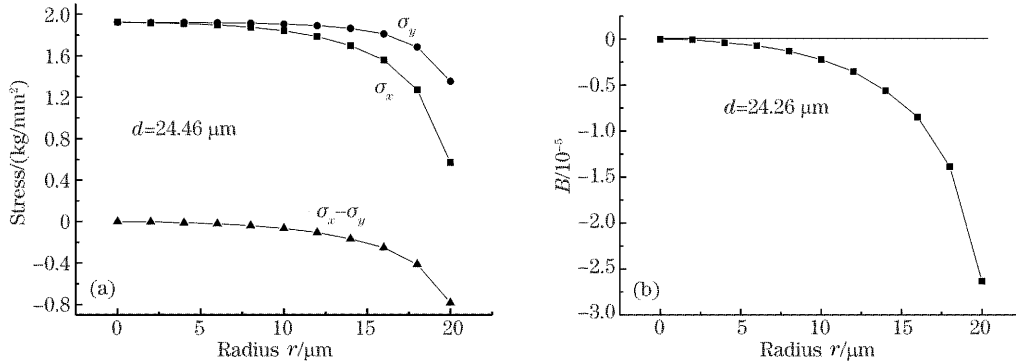


图 7 应力分量(a)和双折射(b)随边孔半径 r 的变化曲线

Fig. 7 Dependence of the stress components (a) and the birefringence (b) on the side hole radius r

4.3 边孔距离 d 与边孔半径 r 的最佳关系分析

进一步的研究发现,无论改变边孔半径还是改变边孔距离,边孔光纤双折射的绝对值与边孔张角 φ (定义见图 8) 成单调递增关系,如图 8 所示。

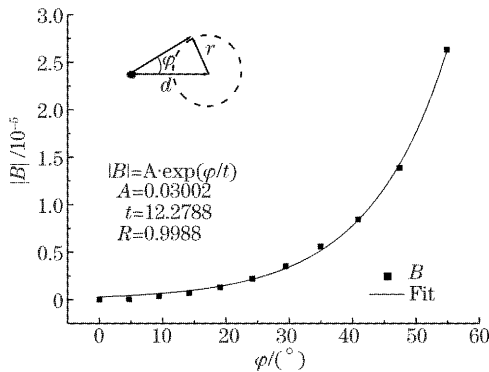


图 8 双折射的绝对值随边孔张角 φ 的变化曲线

Fig. 8 Dependence of the absolute value of the birefringence on angle φ of spread of side hole

采用数据拟合方法得到的结果表明边孔光纤双折射的绝对值 $|B|$ 与边孔张角 φ 成指数函数关系,其关系式如(7)式所示,相关度 $R = 0.9988$,图 8 中的连续曲线为数据拟合结果的曲线。

$$\begin{cases} |B| = A \times \exp(\varphi/t), \\ A = 0.03002, \\ t = 12.2788, \end{cases} \quad (7)$$

前面研究提出的通过增大边孔半径或者减小边孔距离来提高边孔光纤双折射的措施,其实质都是通过增大 φ 的数值来提高光纤的双折射。因此在通过改变光纤结构尺寸来提高边孔光纤双折射时,必须要

不断减小,边孔对纤芯区应力分布的影响越来越小。另外由图可以看出当 r 大于 $16 \mu\text{m}$ 时,双折射的绝对值随着 r 的增加而迅速增大。因此要想得到较高双折射的边孔光纤,则必须使 r 大于 $16 \mu\text{m}$ 。

提高 φ 的数值。另外通过图 8 的数据曲线可以看出,当 $\varphi > 40^\circ$ 时, $|B|$ 随 φ 的增大而迅速增大。

通过增大边孔半径和减小双孔间距可以提高光纤的双折射,但是受到光纤几何结构(包层半径和纤芯半径)的限制,使得边孔半径不可能无限增大,边孔距离也不可能无限制地减小,因而也就限制了光纤双折射的取值范围。同时对于边孔半径较大的边孔光纤,在制作过程中容易受到应力作用而使得边孔的形状发生变化,制作难度加大,因此在进行边孔光纤的几何尺寸设计时,不能片面地追求较高的双折射而忽略边孔光纤的受力问题。

5 结 论

本文主要通过有限元法对圆芯圆孔型边孔光纤的固有双折射进行了研究。结果表明边孔的存在导致光纤纤芯和包层区域的应力分布发生了较大的变化;两边孔的连线方向为边孔光纤的快轴方向。另外研究发现圆芯圆孔型边孔光纤的固有双折射随边孔张角的增加而成指数关系增长,通过增大边孔半径和减小双孔间距可以提高光纤的双折射。要想获得较高双折射的边孔光纤必须使边孔半径大于 $16 \mu\text{m}$,边孔距离小于 $26 \mu\text{m}$,对应边孔张角 $\varphi > 40^\circ$ 。

参 考 文 献

- Magdalena S. Nawrocka, Wojtek J. Bock, Wacław Urbanczyk *et al.*. Highly sensitive fiber-optic sensor for dynamic pressure measurements[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3745**: 293~297
- X. D. Jin, T. Rossmanith, M. Rutherford *et al.*. *Progress*

- towards an orthogonal strain state sensor based optical fiber technology[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3670**: 516~530
- 3 Wojtek J. Bock, Magdalena S. Nawrocka, Wacław Urbanczyk. Application of side-hole fibers for dynamic pressure measurements [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4087**: 1175~1179
- 4 Robert J. S., Tsutomu Yamate, Eric Udd. High pressure and temperature sensing for the oil industry using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3746**: 42~44
- 5 Li Zhizhong, Yang Huayong, Liu Yang *et al.*. Research on solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensing[J]. *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(6): 20~22 (in Chinese)
李智忠, 杨华勇, 刘 阳 等. 光纤光栅交叉敏感解决方案研究 [J]. *光通信技术*, 2004, **28**(6): 20~22
- 6 J. Wojcik, P. Mergo, W. Urbanczyk *et al.*. Possibilities of application of the side-hole circular core fiber in monitoring of high pressures[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1998, **47**(3): 805~808
- 7 J. R. Clowes, S. Syngellakis, M. N. Zervas. Pressure sensitivity of side-hole optical fiber sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 857~859
- 8 Yueai Liu, B. M. A. Rahman, K. T. V. Grattan. Thermal-stress-induced birefringence in bow-tie optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5611~5616
- 9 Juichi Noda, Katsunari Okamoto, Yutaka Sasaki. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(8): 1071~1089
- 10 J. Wojcik, P. Mergo, M. Makara. Anomaly of sensitivity to pressure of side-hole HB optical fiber[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3730**: 2~7
- 11 K. H. Tsai, K. S. Kim, T. F. Morse. General solutions for stress-induced polarization in optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(1): 7~17
- 12 Chen Zhe, Hu Yongming, Li Xiujuan *et al.*. The relation between the structure of panda fibers and their birefringences[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1127~1130 (in Chinese)
陈 哲, 胡永明, 李秀娟 等. 熊猫光纤的结构与双折射特性关系研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1127~1130
- 13 K. Okamoto, T. Hosaka, T. Eda. Stress analysis of optical fibers by a finite element method [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(10): 2123~2129
- 14 Jin Yongxing, Lu Jun, Lu xiang. Analysis of relation between thermal expansion coefficients of cladding an stress birefringence of optical waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 572~574 (in Chinese)
金永兴, 吕 俊, 吕 翔. 光波导覆层热膨胀系数对应力双折射影响的分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 572~574
- 15 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of microstructure fiber by the finite element method[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1337~1342 (in Chinese)
胡明列, 王清月, 栗岩锋. 微结构光纤分析的有限元分析算法 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1337~1342