

保偏光纤应力分布与双折射特性的数值分析

黄姝一

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月17日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

通过有限元仿真对熊猫型保偏光纤(PMF)内部的应力分布以及双折射特性进行分析, 得出提升PMF双折射特性的方法。根据光纤内部各部分温度特性不同, 得出了减小外界环境温度能增强光纤双折射的结论。利用COMSOL有限元仿真软件建立了PMF截面应力-双折射模型。结果表明: 当应力区半径增加 $10\ \mu\text{m}$ 时, 双折射值增加 5.753×10^{-4} ; 当应力区中心点距纤芯中心点增加 $4\ \mu\text{m}$ 时, 双折射值减少 2.6121×10^{-4} ; 应力区热膨胀系数、杨氏模量以及泊松比分别增加时, 光纤的双折射效应也随之增加; 光纤内部双折射值与外界温度变化率为 -4.94×10^{-7} 。该研究结论为改进基于级联保偏光纤的传感器提供了理论依据。

关键词

保偏光纤, 应力区, 双折射, 环境温度

Numerical Analysis of Stress Distribution and Birefringence Characteristics of Polarization-Maintaining Fiber

Shuyi Huang

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 17th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

The stress distribution and birefringence characteristics of Panda polarization-maintaining fiber were analyzed by finite element simulation, and the method to improve the birefringence characteristics of PMF was obtained. According to the different temperature characteristics of each part inside the fiber, it is concluded that reducing the ambient temperature can enhance the birefringence of the fiber. The PMF cross-section stress-birefringence model was established by COMSOL

finite element simulation software. The results show that the birefringence value increases by 5.753×10^{-4} when the stress radius increases by $10 \mu\text{m}$. When the distance between the center point of stress zone and the center point of fiber core increases by $4 \mu\text{m}$, the birefringence value decreases by 2.6121×10^{-4} . When the coefficient of thermal expansion, Young's modulus and Poisson's ratio increase respectively, the birefringence effect of fiber also increases. The change rate between the internal birefringence value and the external temperature is -4.94×10^{-7} . The conclusion of this study provides a theoretical basis for improving the sensor based on stage joint polarization fiber.

Keywords

Polarization Maintaining Optical Fibre, Stressed Zone, Birefringence, Environment Temperature

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1978年,美国密歇根大学首次提出改变纤芯形状来实现双折射效应,从而维持光纤的偏振态的模型[1]。这一想法成为制作保偏光纤(PMF)的理论基础,随后领结型[2]、熊猫型[3]、D型[4]、光子晶体型[5]保偏光纤问世,在具体实验中实现了几十公里上的偏振态稳定传输。目前,已有许多研究人员通过对改造后的PMF进行仿真,以期在光纤内部实现更大的双折射效应。

2010年Hu Bin [6]等人采用有限元方法对斜方形空气孔光子晶体光纤(PCF)的高双折射特性进行了数值分析,得出菱形孔PCF的双折射大于椭圆孔PCF的结论。2019年,Ren Fang [7]等人提出了一种结合椭圆纤芯和“伪矩形”应力区的偏振保持少模光纤,并研究了椭圆纤芯尺寸和应力区位置对模式的影响,计算了应力分布、模双折射和弯曲损耗。同年,Li Haoyu [8]提出了一种“叶形”纤芯结构,该结构结合了椭圆和菱形纤芯的优点,通过使用有限元方法分析了不同形状纤芯对几何双折射的贡献,这种PMF在熊猫型和领结型结构中的双折射值分别达到 7.692×10^{-4} 和 7.732×10^{-4} ,适合传感应用。2020年,Song Weijun [9]等人设计并仿真分析了一种结合椭圆环形纤芯和两个应力棒的少模光纤,能够支持10种模式。2021年,Zhang Shuai [10]等人提出开发一种新型的固芯反谐振光纤,光纤的横截面有六个环绕核心的管状结构,通过调整管道的厚度,来优化双折射和限制损耗。2022年该团队设计了一种固体芯反谐振光纤使用嵌套的圆管结构,在3微米波长下实现了保偏性能。通过计算弯曲损耗,显示出了良好的双折射性能和出色的光限制能力,结构变形使双折射系数从 2×10^{-5} 提升到 6.93×10^{-5} [11]。Li Meng [12]等人通过在外椭圆芯内部加入三个圆形孔,并结合领结型应力施加部分,实现了较高的双折射率,比传统的保偏光纤提高了一倍左右。本文通过改变PMF的应力区结构、材料和外界环境温度三个变量来仿真分析对双折射效应的影响,为PMF实际应用提供依据并优化光器件设计。

2. 保偏光纤双折射理论

保偏光纤作为一种能维持光偏振态的特殊光纤,它的最主要核心特性源于双折射效应。如图1所示,光在PMF中沿z轴传播,其中x轴上等效折射率高且传播速度慢,所以称x轴为PMF的慢轴。同样,线偏振光经过y轴时,等效折射率较低且传播速度较快,所以y轴为PMF的快轴。外界环境变化时分别导致x轴和y轴方向上的受力不同,由于光弹效应的存在,使得x轴与y轴方向的折射率差异明显,即 $n_x \neq n_y$,此为PMF的应力双折射。

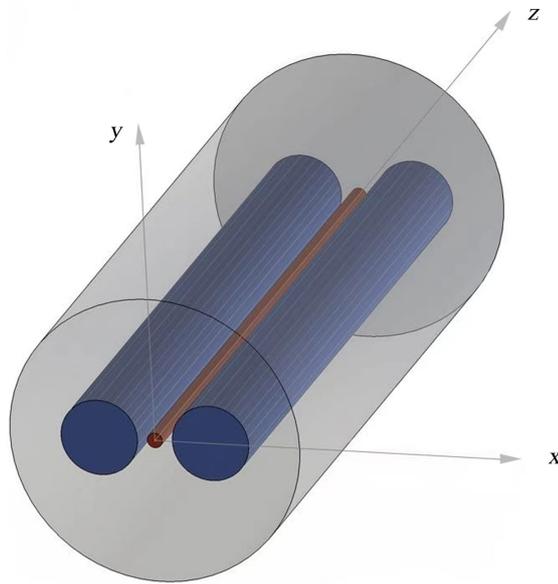


Figure 1. Panda PMF three-dimensional structure
图 1. 熊猫型 PMF 三维结构

PMF 的内部应力可用应力张量来表示, 由于对称结构可表示为对称张量, 同时光纤内部应力分布存在一个主轴坐标系, 由于光弹效应存在, 各向折射率不同也可表示为一个主轴坐标系, 则可表示为[13]:

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (1)$$

式中, x 、 y 、 z 分别对应 PMF 中 x 轴、 y 轴与 z 轴, n_x 、 n_y 、 n_z 分别对应沿各轴的有效折射率。根据该形式, 其应力在这个坐标系中也可表示为一个球形坐标系, 即:

$$\sigma_x x^2 + \sigma_y y^2 + \sigma_z z^2 = 1 \quad (2)$$

式中, σ_x 、 σ_y 与 σ_z 分别为光纤内部沿各轴方向上的主应力。光纤纤芯、应力区以及包层在 x 轴、 y 轴与 z 轴方向上所受主应力不同, 在光弹效应下, 该三轴方向上的材料折射率发生改变, 即应力所对应折射率的表达式为:

$$n_x = n - C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y + \sigma_z) \quad (3)$$

$$n_y = n - C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x + \sigma_z) \quad (4)$$

$$n_z = n - C_1 \sigma_z - C_2 (\sigma_x + \sigma_y) \quad (5)$$

式(3)~(5)中 n 为光纤不受内应力时所对应的折射率, n_x 、 n_y 与 n_z 分别为光纤内部 x 、 y 、 z 向上的等效折射率, C_1 和 C_2 分别为第一光弹系数与第二光弹系数, 双折射可用 x 轴与 y 轴的折射率差来表示:

$$n_x - n_y = (C_1 - C_2) (\sigma_x - \sigma_y) \quad (6)$$

保偏光纤的双折射只与光弹系数和 x 、 y 方向上的应力有关。式(6)适用于不同类型的保偏光纤, 熊猫型保偏光纤产生的双折射具体可表示为[14]:

$$B_p = \frac{2k_0 C_0}{1-\nu} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T \left(\frac{r_1}{d} \right)^2 \left[1 - 3 \left(\frac{d}{r_2} \right)^4 \right] \quad (7)$$

式(7)中, ν 为光纤材料的泊松比, C_0 为 C_1 与 C_2 之间的差值, α_1 和 α_2 为保偏光纤中包层与应力区的热膨胀系数, $\Delta T = T_0 - T$ 表示 PMF 熔融拉制时的温度与冷却后实际使用场景温度之间的差值。 r_1 表示纤芯两旁应力施加部分的半径, d 表示应力施加部分中心到纤芯中心的距离, r_2 为光纤包层的半径。

3. 仿真结果与分析

仿真采用熊猫型保偏光纤(PMF, PM1550-HP)进行仿真分析。如图 2 所示, 分别将纤芯直径 $2r_0$ 设为 $6.5 \mu\text{m}$, 应力区直径 $2r_1$ 设为 $33 \mu\text{m}$, 包层直径 $2r_2$ 设为 $125 \mu\text{m}$, 纤芯中心点与应力区中心点的距离 d 设为 $24 \mu\text{m}$ 。分别设置截面内材料的杨氏模量 $E = 7.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 泊松比 $\nu = 0.18$, 密度 $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ 。应力区热膨胀系数 α_1 设置为 $2.25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 纤芯热膨胀系数 α_0 设置为 $1.38 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。将参考温度 T_0 设为 1493.15 K , 代表光纤拉制时的温度, 并将冷却时光纤的实际工作温度 T 设为 293.15 K 。

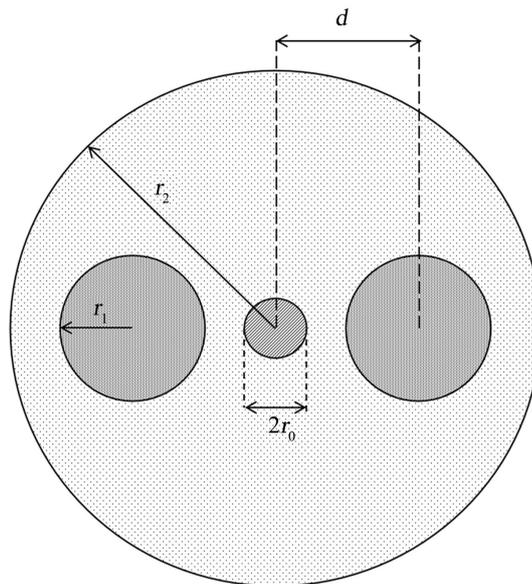


Figure 2. PMF 2D model diagram

图 2. PMF 二维模型图

计算得出 PMF 截面等效应力分布, 以及沿 x 轴、 y 轴以及 z 轴方向上的应力分布, 如图 3 所示, 其中图 3(a)为 PMF 截面上的等效应力分布, 其中等效应力值最大出现在应力区与纤芯相临近的包层部分, 值为 $2.4 \times 10^8 \text{ Pa}$, 等效应力值最小出现在远离应力区与纤芯的包层部分, 其值为 $0.6 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

由于光弹效应的存在, 可根据公式(3)~(5)计算出光纤内部各部分折射率的值, 再根据式(6)可计算出光纤中各点双折射的值, 其中第一光弹系数 $C_1 = 0.757245 \times 10^{-12}$, 第二光弹系数 $C_2 = 4.18775 \times 10^{-12}$ 。

计算结果如图 4 所示, 在光纤截面内双折射值最大在应力区与纤芯中间包层部分, 在其余包层位置上双折射值较小。这是因为应力区与纤芯的热膨胀系数较高, 所以带动中间包层受到压缩或拉伸的力越大, 进而计算出的双折射值也就越大。

为了进一步探究, 分别计算了 x 方向与 y 方向具体双折射的值, 如图 5 所示, (a)为 PMF 截面沿 x 直线方向的双折射, 图 5(b)为沿 y 直线方向的双折射。通过计算结果可知包层区域中靠近纤芯与应力区的部分双折射值最大, 在纤芯中沿 x 方向产生的双折射要大于沿 y 轴方向的。将纤芯 x 方向与 y 方向的值进行均值计算, 可得出纤芯平均双折射的值等于纤芯中心点双折射的值, 由于均值与中心点相等, 所以在探讨不同参量对纤芯影响时可用该中心点代表。

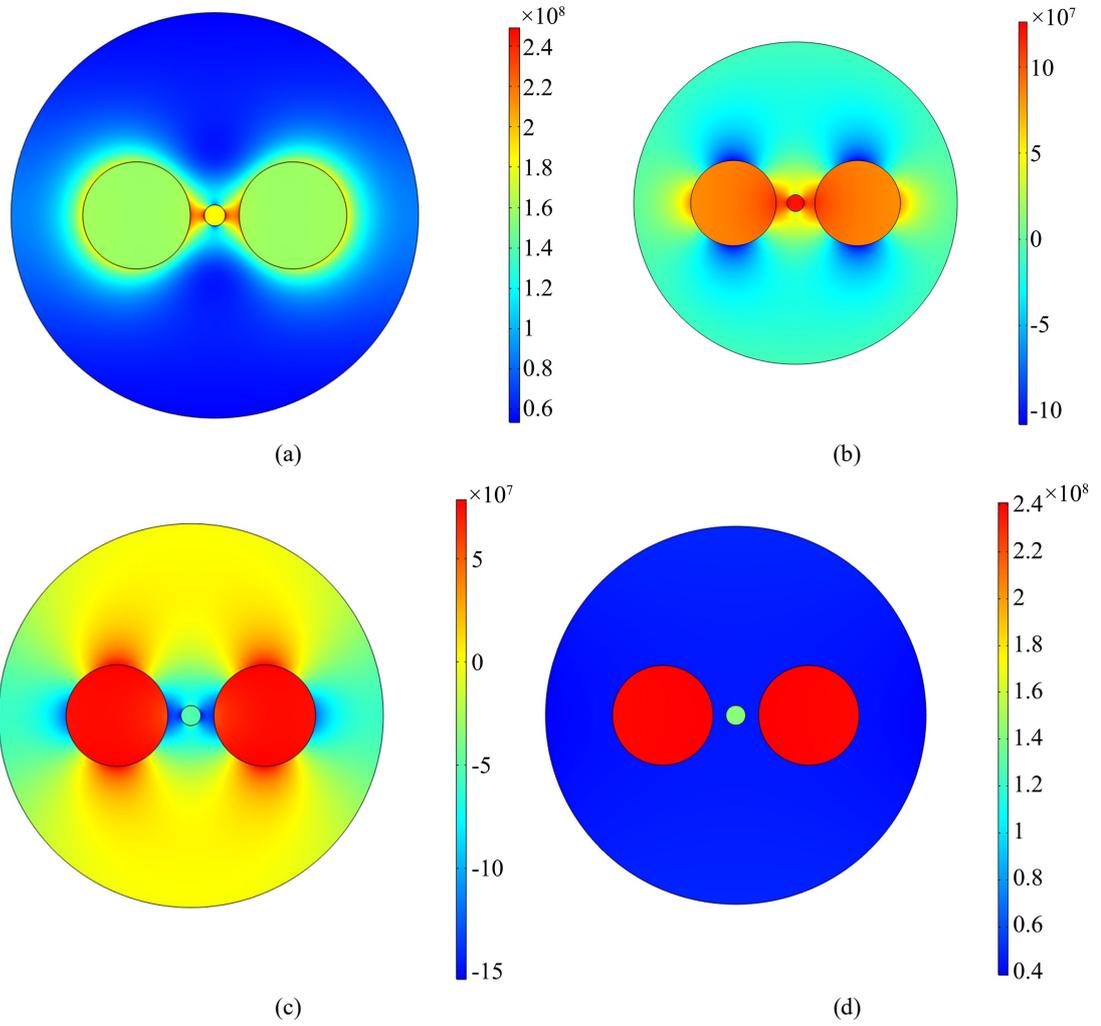


Figure 3. PMF cross-section stress distribution diagram. (a) equivalent stress distribution; (b) Stress along the x direction; (c) Stress along the y direction; (d) Stress along the z direction

图 3. PMF 截面应力分布图。(a) 等效应力分布; (b) 沿 x 方向应力; (c) 沿 y 方向应力; (d) 沿 z 方向应力

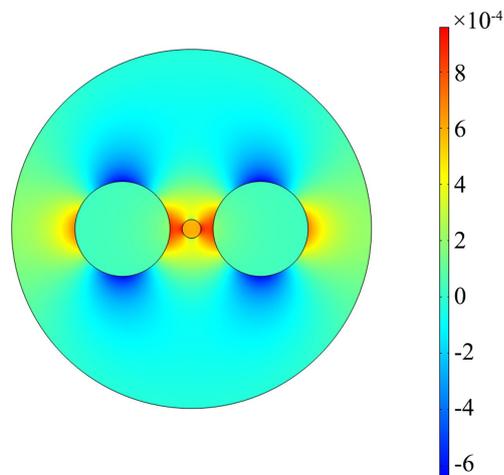


Figure 4. PMF birefringence distribution

图 4. PMF 双折射分布

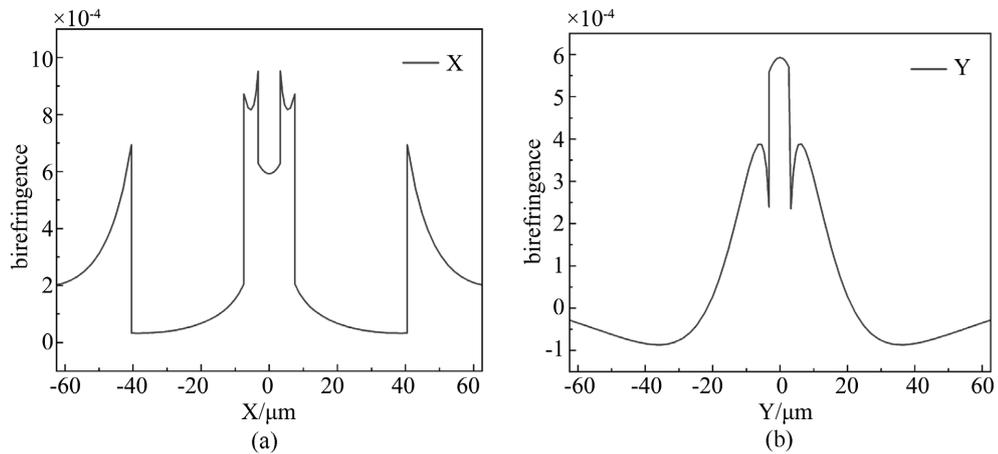


Figure 5. PMF birefringence along x and y lines
图 5. 沿 x、y 直线方向 PMF 双折射

3.1. 应力区结构对双折射的影响

仿真过程中分别将纤芯大小设置为 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.75\ \mu\text{m}$ 、 $3.0\ \mu\text{m}$ 以及 $3.25\ \mu\text{m}$ ，目的是探究不同纤芯结构下仿真出的双折射趋势是否具有相同特点。

讨论应力区半径 r_1 对双折射的影响时，分别将其设置为 $8\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 、 $14\ \mu\text{m}$ 、 $16\ \mu\text{m}$ 、 $18\ \mu\text{m}$ ，计算出的双折射效应值如图 6(a)所示，随着应力区半径的不断增大，纤芯中点处的双折射效应也不断加强，这是因为应力区体积增大且该区域材料热膨胀系数高于其他部分，所以对纤芯的拉伸或挤压力变大，由于光弹效应，折射率变化随之增加，进而在纤芯处引起更大的双折射值。

探究应力区中点到纤芯中点的距离对双折射的影响时，先将应力区的半径固定为 $16.5\ \mu\text{m}$ ，设置 d 的大小为 $21\ \mu\text{m}$ 、 $22\ \mu\text{m}$ 、 $23\ \mu\text{m}$ 、 $24\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ ，所仿真出纤芯平均双折射值变化趋势如图 6(b)所示，当 d 为 $21\ \mu\text{m}$ 纤芯半径为 $3.25\ \mu\text{m}$ 时，光纤取得最大的双折射值为 8.0952×10^{-4} ，应力区中心到纤芯中心为 $25\ \mu\text{m}$ 时，此时双折射值为 5.4831×10^{-4} ，说明随着应力区远离纤芯，纤芯中的平均双折射会逐渐减小。这是由于纤芯与应力区距离较远，对纤芯的拉伸挤压效果逐渐减弱，导致折射率沿两轴方向上的差值较小，所以计算出的双折射值减小。

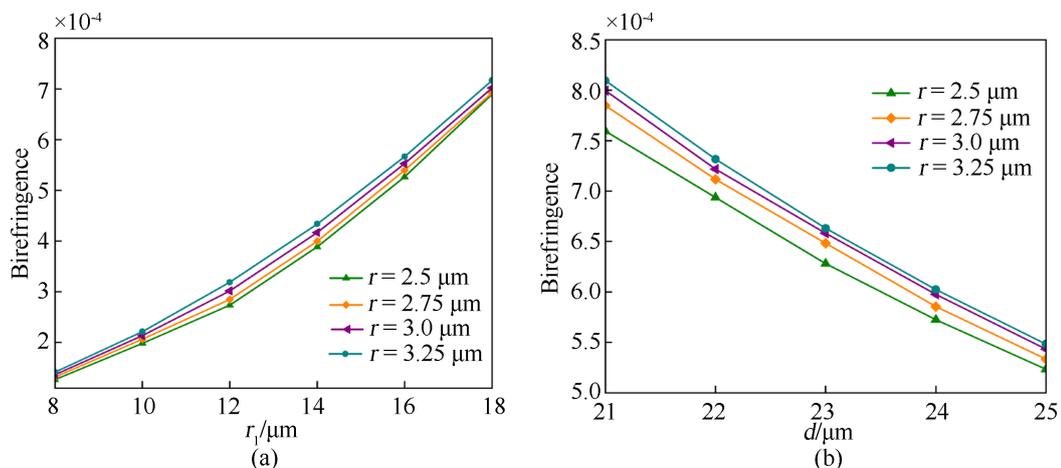


Figure 6. PMF birefringence varies with the stress zone parameters
图 6. PMF 双折射随应力区参数变化

3.2. 应力区材料对双折射的影响

分别探究三个材料参量即热膨胀系数、杨氏模量以及泊松比对双折射效应的影响。热膨胀系数代表光纤材料随温度变化发生膨胀或收缩的程度。在仿真过程中，分别将杨氏模量和泊松比设置为 7.8×10^{10} Pa 和 0.185 并且保持数值不变。设置热膨胀系数范围为 $2 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。由图 7(a)可知，当纤芯半径为 $3.25 \mu\text{m}$ 热膨胀系数为 $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 时，双折射值为 5.1736×10^{-4} ，在该曲线中双折射效应最小。当热膨胀系数变成 $7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，双折射效应增大到 22.8915×10^{-4} ，此时双折射为原来的三倍多。应力区的热膨胀系数越大，纤芯内部所受到的力越大，双折射效应也就越大。所以在设计保偏光纤时要在石英中掺杂硼，使应力区具有较大的热膨胀系数，产生更高的双折射效应。

光纤材料的杨氏模量，反映了光纤的刚性以及抗应变能力。仿真时将热膨胀系数与泊松比设置为 $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 0.185。设置杨氏模量的范围为 $2 \times 10^{10} \sim 12 \times 10^{10}$ Pa。由图 7(b)可知，纤芯半径为 $3.25 \mu\text{m}$ 这条曲线上，杨氏模量为 2×10^{10} Pa 时对应的双折射为 2.9517×10^{-4} 。不断扩大杨氏模量到 12×10^{10} Pa，此时对应的双折射为 7.2686×10^{-4} 。此趋势说明杨氏模量和双折射呈正相关，所以在保偏光纤设计时应力区要选用杨氏模量尽可能大的材料。

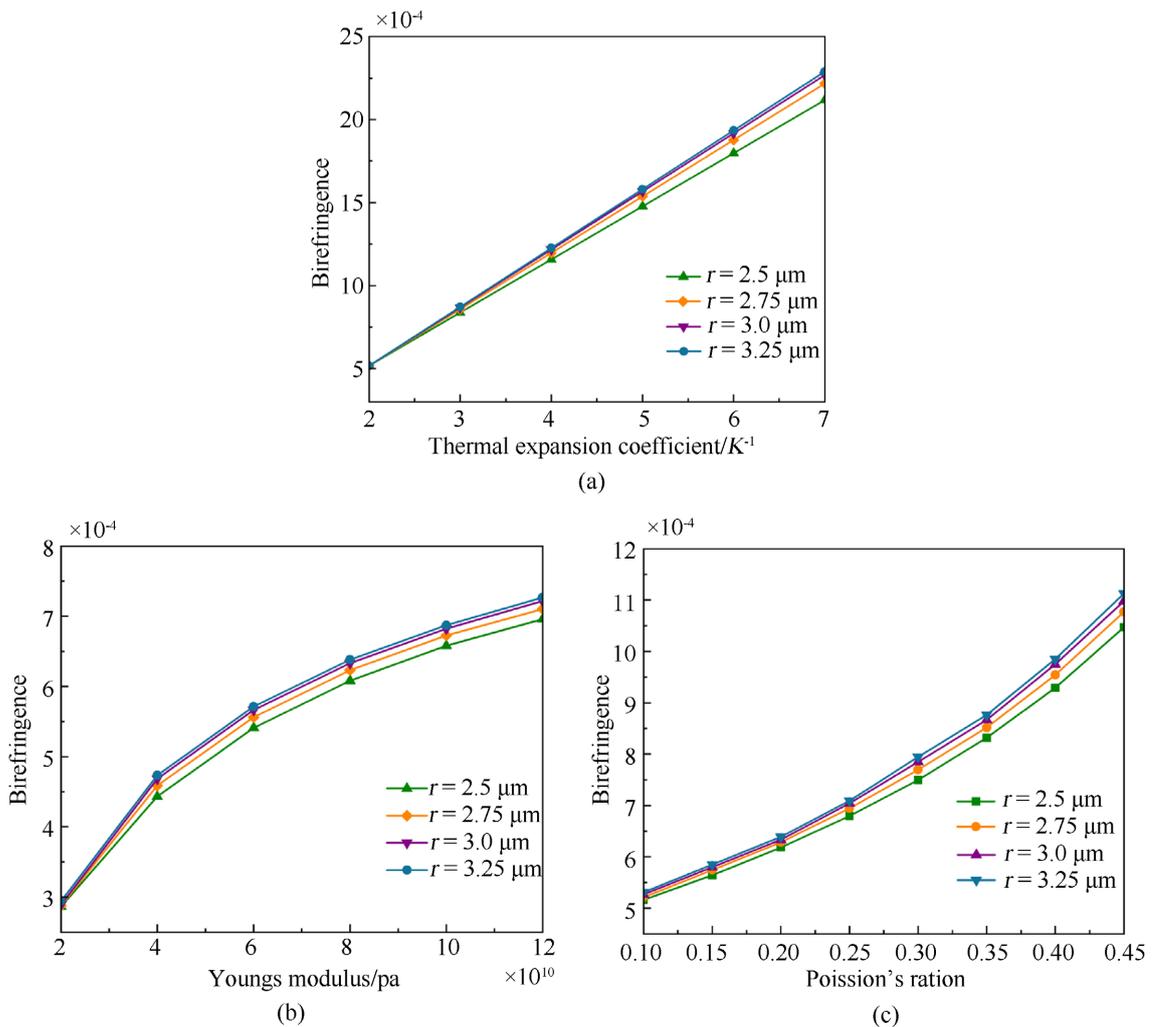


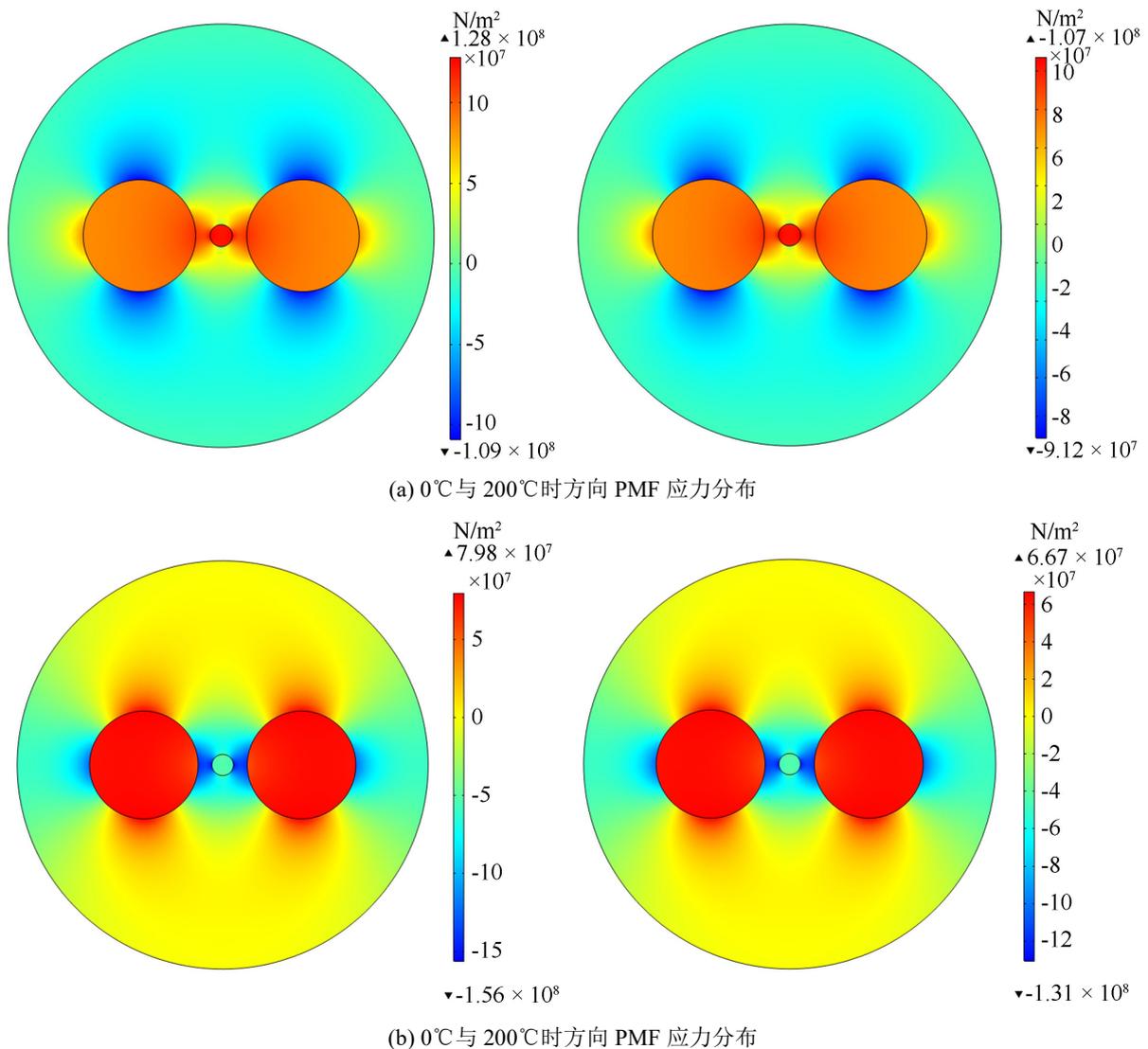
Figure 7. PMF birefringence varies with the material in the stress zone

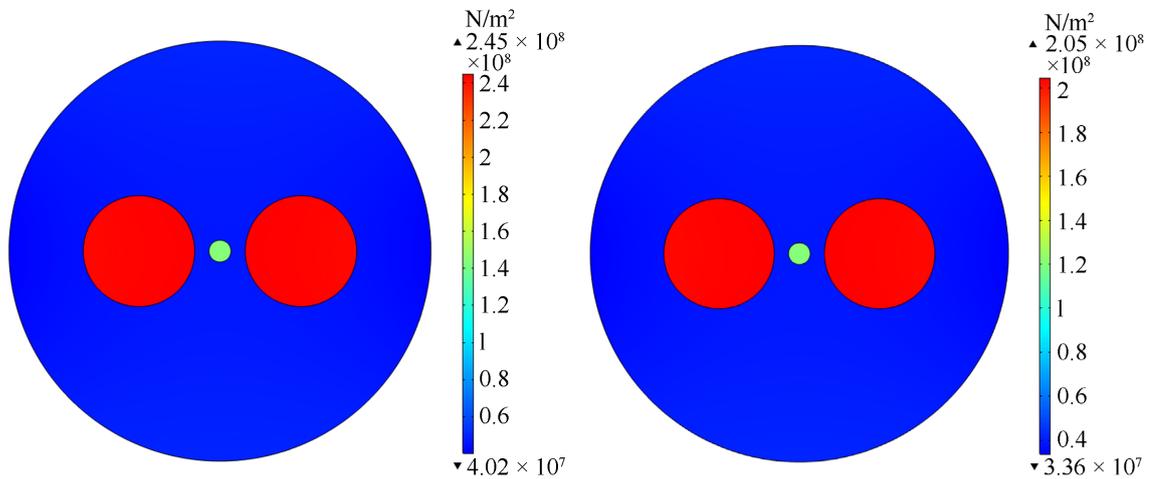
图 7. PMF 双折射随应力区材料变化

泊松比反映了其在拉伸或压缩过程中横向收缩或膨胀的特性，直接影响光纤的机械性能。仿真过程中，分别将热膨胀系数与杨氏模量的值设置为 $2.25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $7.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 且保持不变，泊松比设置在 0.1~0.45 范围内来探究双折射效应的变化规律，由图 7(c)可知，随着泊松比逐渐增大，光纤双折射也随之增大，从 5.31×10^{-4} 变化到 11.128×10^{-4} 。综上所述，要想使 PMF 获得较高的双折射值，就要选择热膨胀系数、杨氏模量以及泊松比较大的材料。

3.3. 环境温度对双折射的影响

通过改变固体力学模块下的模型输入温度 T ，来对整个截面进行应力和双折射分析。图 8 中分别仿真了实际温度为 0°C 和 200°C 时，光纤截面沿 x 、 y 与 z 方向上的应力分布情况。 0°C 时界面内最大的应力值为 $1.28 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ， 200°C 时对应的应力值为 $1.07 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，随着温度的升高光纤截面的应力值变小，此外 y 方向与 z 方向也展现出同样的规律。这是由于光纤在拉制时，从熔融状态迅速冷却到室温所带来的温度差较大，引入的残余应力较大，此时应力区拉伸与收缩力更剧烈。当环境温度升高时，原有的温度差减小造成残余应力减小，所以温度升高时光纤内部应力分布会出现减小的情况。





(c) 0°C与 200°C时方向 PMF 应力分布

Figure 8. PMF birefringence varies with the material in the stress zone

图 8. 0°C与 200°C时不同方向 PMF 应力分布

应力的改变会引起双折射的变化，图 9 中仿真计算出 0°C 和 200°C 时 PMF 截面的双折射分布。随着温度增加光纤双折射的值减小，由 0°C 的 9.76×10^{-4} 减小到 200°C 的 8.16×10^{-4} 。

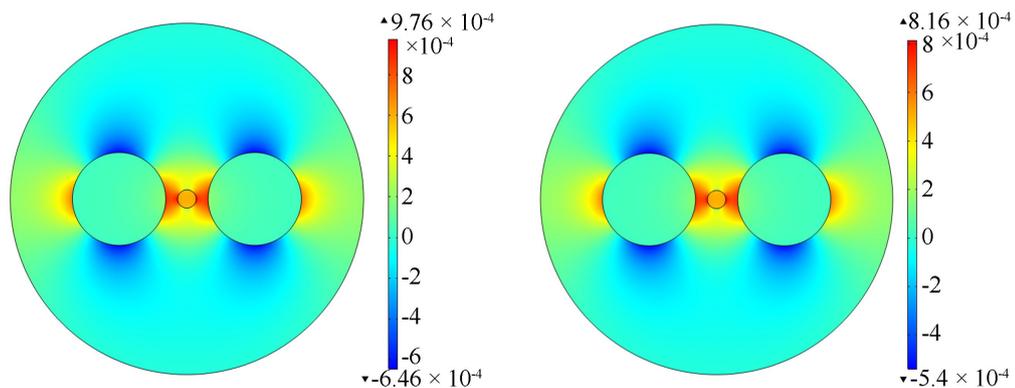


Figure 9. PMF birefringence distribution at 0°C and 200°C

图 9. 0°C与 200°C时 PMF 双折射分布

为深入了解温度变化对双折射的影响，以 20°C 为阶梯从 0°C 到 200°C 进行仿真分析，分别计算出纤芯处等效双折射的值，如表 1 所示，并进行线性拟合，如图 10 所示，二者的变化关系为：

$$y = -4.94 \times 10^{-7}x + 6.02 \tag{8}$$

纤芯双折射与温度的变化率为 $-4.94 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，所以当温度升高时，PMF 的双折射效应会以固定速率减小。

Table 1. PMF birefringence changes with temperature

表 1. PMF 双折射随温度变化仿真数据值

序号	温度	双折射
1	0°C	6.02119

续表

2	20°C	5.92249
3	40°C	5.82378
4	60°C	5.72507
5	80°C	5.62636
6	100°C	5.52765
7	120°C	5.42895
8	140°C	5.33024
9	160°C	5.23153
10	180°C	5.13282
11	200°C	5.03411

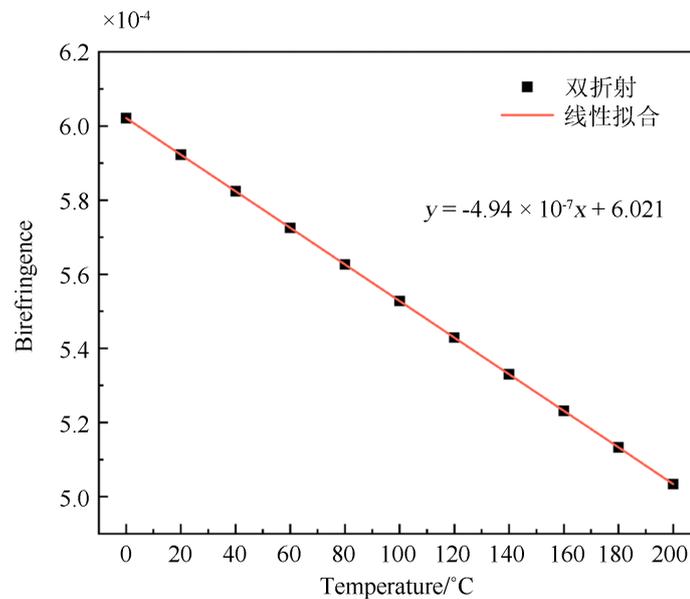


Figure 10. The fitting curve of PMF birefringence with temperature
图 10. PMF 双折射随温度变化的拟合曲线

4. 结论

对 PMF 进行有限元仿真，构建截面应力与双折射模型，通过改变 PMF 中应力区形状、材料以及外界环境温度等参数，来探究对双折射效应的影响。仿真结果表明：应力区半径的增大且其中心点距纤芯中心点距离缩短可有效提升 PMF 双折射效应，此外光纤拉制时，要尽量选用热膨胀系数、杨氏模量与泊松比都偏大的材料。同时本文探究了环境温度对双折射效应的影响，得出纤芯平均双折射与温度的变化率为 $-4.94 \times 10^{-7} \text{°C}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] Ramaswamy, V., French, W.G. and Standley, R.D. (1978) Polarization Characteristics of Noncircular Core Single-Mode Fibers. *Applied Optics*, 17, Article No. 3014. <https://doi.org/10.1364/ao.17.003014>

-
- [2] Yu, Q.R., *et al.* (2004) Temperature Dependence of Brillouin Frequency, Power, and Band-Width in Panda, Bow-Tie, and Tiger Polarization-Maintaining Fibers. *Optics Letters*, **29**, 17-19.
- [3] Zheng, K., *et al.* (2007) Design and Fabrication of Panda-Type Erbium-Doped Polarization-Maintaining Fibres. *Chinese Physics*, **16**, 478-484. <https://doi.org/10.1088/1009-1963/16/2/032>
- [4] Zhang, X., Jiang, Y., Xu, Y., Chen, R., Wang, A., Ming, H., *et al.* (2019) Polarization-Maintaining Fiber Composed of an Elliptical Ring Core and Two Circular Air Holes. *Applied Optics*, **58**, 8865-8870. <https://doi.org/10.1364/ao.58.008865>
- [5] Zhao, H., *et al.* (2012) Temperature Dependence of Birefringence in Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fibres. *Chinese Physics B*, **21**, Article ID: 068404.
- [6] Hu, B., Lu, M., Li, W., Zou, K., Zhou, Z., Lin, A., *et al.* (2010) High Birefringent Rhombic-Hole Photonic Crystal Fibers. *Applied Optics*, **49**, 6098-6101. <https://doi.org/10.1364/ao.49.006098>
- [7] Ren, F., Zhangsun, T., Huang, X., Zhang, Y., Fan, X., Chen, W., *et al.* (2019) Design of 20-Polarization-Maintaining-Mode “Pseudo-Rectangle” Elliptical-Core Fiber for Mimo-Less MDM Networks. *Optical Fiber Technology*, **50**, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.03.005>
- [8] Li, H.Y., *et al.* (53) Design of High Birefringence Stress-Induced Polarization-Maintaining Fiber Based on Utilizing Geometrical Birefringence. *Optical Fiber Technology*, **53**, Article ID: 102065.
- [9] Song, W., Chen, H., Wang, J., Liu, C., Chen, Y., Li, Z., *et al.* (2020) Panda Type Elliptical Ring Core Few-Mode Fiber. *Optical Fiber Technology*, **60**, Article ID: 102361. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102361>
- [10] Zhang, S., Sun, S., Sheng, Q., Shi, W., Yan, Z. and Yao, J. (2021) Low-Loss Polarization-Maintaining Solid-Core Anti-Resonant Fiber in Mid-Infrared Region. *Results in Physics*, **26**, Article ID: 104439. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104439>
- [11] Zhang, S., Sun, S., Sheng, Q., Shi, W., Yan, Z., Tian, H., *et al.* (2022) Polarization-Maintaining Performance of Solid-Core Anti-Resonant Fiber with Nested Circular Tubes in 3 μm Wavelength. *Journal of Lightwave Technology*, **40**, 1137-1143. <https://doi.org/10.1109/jlt.2021.3124265>
- [12] Li, M., Li, X., Li, H. and Zhang, W. (2022) Bow-Tie Holes-Aided Elliptical-Core Polarization-Maintaining Fiber with High Birefringence. *Optical Fiber Technology*, **73**, Article ID: 103073. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103073>
- [13] Karimi, M. (2014) Experimental and Theoretical Analysis of Polarization-Maintaining Fibre for Sensing Applications.
- [14] 张晓光, 等. 光纤通信系统中的偏振光学通讯[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.