

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0770

边孔相移光纤光栅测量压力温度的仿真及优化

梁 磊^{1*}, 任启鹏¹, 王 辉², 戴 澍¹, 陈 重¹

(1. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司, 湖北 潜江 433124)

摘要: 油井内压力及温度的测量是智能完井系统的重要组成部分。为了能在井下环境实现单点、压力温度双参量测量,且最高压力可达 30 MPa,温度可达 120 ℃,本文提出一种在圆心边孔光纤(side hole fiber, SHF)上刻写 π 相移光栅的压力温度传感器。首先对边孔 π 相移光纤光栅同时测量压力及温度进行了理论推导,证明同时检测压力温度的理论可行性。其次,在理论的基础上,对 SHF 进行了仿真优化,并引入断裂极限限定条件,得到 SHF 的最优尺寸为孔中心距 27 μm ,孔半径 21.5 μm 。结果表明:SHF 能实现单点双参量的测量, π 相移光栅的引入提高了测量分辨率;SHF 的孔半径越大孔越靠近纤芯,压力灵敏度越高,但考虑光纤断裂情况则并不是半径越大越好。该研究对特定压力测量范围下的边孔光栅压力温度传感器设计有指导意义。

关键词: 边孔光纤; π 相移光栅; 压力温度测量; 仿真分析

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)08-0785-07

Simulation and optimization of pressure and temperature measurement with side hole phase shift fiber grating

LIANG Lei^{1*}, REN Qipeng¹, WANG Hui², DAI Shu¹, CHEN Zhong¹

(1. National Engineering Laboratory of Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 2. SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Qianjiang, Hubei 433124, China)

Abstract: The measurement of pressure and temperature in oil well is an important part of intelligent completion system. In order to realize single point and double parameter measurement of pressure and temperature in downhole environment, and the maximum pressure can reach 30 MPa and the temperature can reach 120 ℃, a pressure and temperature sensor with π phase shift grating in center-shaped side hole fiber (SHF) is proposed in this paper. Firstly, the theoretical derivation of simultaneous measurement of pressure and temperature with side hole π phase shift fiber grating is carried out to prove the theoretical feasibility of simultaneous measurement of pressure and temperature. Secondly, based on the theory, the SHF is simulated and optimized, and the fracture limit is introduced. The optimal size of the SHF is obtained as 27 μm from the center of the hole and 21.5 μm from the radius of the hole. The results show that the SHF can realize the measurement of single point and double parameters, and the introduction of π phase shift grating improves the measurement resolution. The larger the hole radius of the SHF, the closer the hole to the core is, the higher the pressure sensitivity, but considering the fiber fracture, the larger the radius is not the better. This research has guiding significance for the design of edge hole grating pressure and temperature sensor in a specific pressure measurement range.

Key words: side hole fiber (SHF); π phase shift grating; pressure and temperature measurement; simulation analysis

* E-mail: 130130@126.com

收稿日期: 2021-11-16 修订日期: 2021-12-18

基金项目: 三亚崖州湾科技城管理局 2019 年、2020 年度科技计划 (SKJC-KJ-2019KY02, SKJC-2020-01-016) 和中石化攻关项目 (P21052) 资助项目

1 引 言

目前,智能完井^[1]已经成为油气开发的重要研究方向,其主要目标是完善油藏动态监测、实施优化采油。为实现此目标,大多油井采用的一个重要的技术手段就是对油井井下的生产动态实施多参数实时监测,其中至关重要的参数为井下油管所处的环境的压力及温度参数。实时监测获取井下压力及温度状况,对油藏实施有效管理和提高油井安全性至关重要。

现有的温度、压力传感器可主要分为电类传感器和非电类传感器两大类^[2]。然而,在高温、高压、腐蚀、强电磁干扰、狭小空间等极端恶劣环境的油气井下,传统电类传感器的可靠性和长期稳定性极其有限^[3],不适合作为智能完井的传感器。光纤传感器因其具有体积小,质量轻,抵抗井下高温、高压等极限恶劣环境的能力强等优势成为井下永久测试传感仪器的首选^[4]。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感因波长编码、测量范围广、抗电磁干扰、长期稳定性好、耐腐蚀,尤其是能阵列复用等优点,在工程结构、石油化工、电力系统等诸多领域的监测中有着十分广泛的应用,是目前最为成熟的光纤传感器^[5]。普通裸光纤光栅的压力灵敏度非常低,仅为 3.04 pm/MPa^[6],同时会有压力温度交叉敏感问题,因此通常需要特殊增敏及温度补偿设计,然而增敏及温度补偿设计会增大传感器的体积。另外油气井井下可利用空间狭小,过低的压力灵敏度、存在压力温度交叉敏感以及需要较大铺设空间的光纤光栅压力温度传感器与工作在井下的传感器的需求相违背,并不能满足实际应用中的测量要求。边孔光纤(side hole fiber, SHF)是近年来广受关注的新型光纤^[7],SHF 光栅相对于普通单模光纤光栅来说,其压力灵敏度更高,且能够区分压力与温度的作用,能够实现单点双参量测量,因此,SHF 光栅更适合井下压力与温度双参量同时检测的传感器。

光纤光栅反射带宽表示光栅对波长的选择范围。窄的带宽才能更清楚地显示出被测量的微小移动^[8,9]。波长漂移的测量分辨率受光谱的线宽影响,正常情况下的 FBG 的线谱相对较宽^[10](通常 > 100 pm),较大的线宽很难观测到较小的压力导致的波长差。 π FBG 有一个极窄光谱缺口^[11](通常 < 5 pm),在 SHF 中刻制 π FBG 能够更容易观察到波长的分离。

本文基于光纤传感原理,设计并研究了一种基于 SHF 的压力温度单点双参量同时检测的边

孔 π 相移光纤光栅压力温度传感器。通过对 SHF 的理论公式推导和有限元仿真,确定了 SHF 的最优结构。

2 边孔 π 相移光纤光栅压力-温度传感基本原理

2.1 SHF 的双折射原理

传统单模光纤两个偏振态表现为两个正交、独立的简并模式。保偏光纤通过多种不对称,如纤芯椭圆化、包层内设计不对称的应力区,从而使两个偏振态不再简并,两者的有效折射率不再相同,形成不同的模式,这种差异称为光纤的双折射 B :

$$B = n_x - n_y = (\beta_x - \beta_y)/k_0, \quad (1)$$

式中, n_x 、 n_y 为两正交偏振态的有效折射率, β_x 和 β_y 为两正交偏振模的传播常数, k_0 为光波在真空中的波数。

SHF 是一种新型的应力双折射光纤。其纤芯两侧存在两个对称的孔,如图 1 所示。与熊猫光纤存在差别,熊猫光纤的纤芯两侧为实心应力区,SHF 纤芯两侧为空孔。

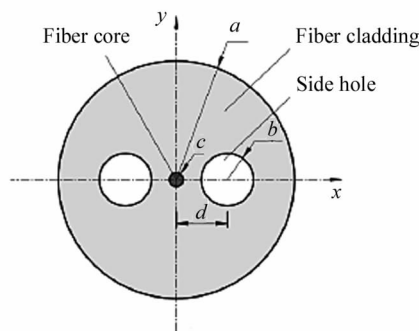


图 1 圆心型 SHF 横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross section with center-shaped SHF

根据弹光理论,光纤受到应力作用时,其互相垂直的两个偏振方向的折射率^[12]可分别表示为:

$$n_x = n_{x0} + C_1\sigma_x + C_2\sigma_y + C_2\sigma_z, \quad (2)$$

$$n_y = n_{y0} + C_2\sigma_x + C_1\sigma_y + C_2\sigma_z, \quad (3)$$

式中, 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 方向上的有效折射率, σ_x 、 σ_y 和 σ_z 分别为应力在 X、Y、Z 3 个方向上的应力分量。对于 SHF,将式(2)、(3)代入式(1),得双折射为:

$$B = (n_{x0} - n_{y0}) + (C_1 - C_2)(\sigma_x - \sigma_y), \quad (4)$$

SHF 纤芯形状是圆对称的,不存在椭圆度,即没有任何双折射,只有光纤内部应力所引起的应力双折射。

另简记 $C=C_1-C_2$, C 为光纤的相对应力光学常量, 是一个常量, 与光纤的材料有关, 对于石英光纤而言^[13], $C=3.36 \times 10^{-5} \text{ nm}^2/\text{kg}$ 。综上, SHF 内部的双折射 B 可表示为:

$$B = C(\sigma_x - \sigma_y). \quad (5)$$

从式(5)中可以看出, SHF 的双折射由纤芯在 X, Y 两个方向上的应力分量差值大小决定。根据参考文献[13]的结论, 可以用纤芯圆心处的应力分量近似作为光纤整个纤芯区域 X, Y 两个方向的平均应力, 方便接下来的仿真计算。

2.2 SHF 光栅压力传感原理

FBG 的反射波中心波长 λ_B 与有效折射率 n_{eff} 及光栅周期 Λ 之间的关系为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (6)$$

对式(6)微分, 得到中心波长变化与有效折射率及光栅周期之间的关系为:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda. \quad (7)$$

双孔光纤每个偏振模式同样符合上述关系, 则各偏振方向上中心波长可表示为:

$$\begin{cases} \lambda_x = 2n_x\Lambda \\ \lambda_y = 2n_y\Lambda \end{cases}, \quad (8)$$

结合式(5)、(8)可以得到两偏振模式中心波长差值, 可表示为:

$$\lambda_x - \lambda_y = 2\Lambda(n_x - n_y) = 2B\Lambda = 2\Delta C(\sigma_x - \sigma_y). \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 两偏振模式中心波长差是取决于边孔光纤的双折射, 由于边孔的存在, 在外界压力作用下纤芯受到的应力为各向异性分布, 此时产生双折射。而温度对折射率的影响主要在两个方面: 一是热光效应, 二是热应变。对于 SHF, 热光效应是各向同性的, 另外光纤材料的热膨胀系数是各向同性的, 因此热应变也是各向同性的, 最终结论为双折射与外部压力有关, 与外部温度无关。 σ_x 与 σ_y 是由外界压力 P 引起的, 设:

$$\begin{cases} \sigma_x = K_{(P\sigma x)}P \\ \sigma_y = K_{(P\sigma y)}P \\ \sigma_x - \sigma_y = K_{P\sigma}P \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $K_{(P\sigma x)}$ 、 $K_{(P\sigma y)}$ 、 $K_{(P\sigma)}$ 是由光纤结构及材料属性决定的一个参量, 对于某确定结构, 可以通过仿真获得其具体形式, 在极限条件下, 即 SHF 不存在边孔时, $K_{(P\sigma x)}=K_{(P\sigma y)}=-1$, $\sigma_x=\sigma_y=-p$ 。

将式(10)带入式(9)可得:

$$P = \frac{1}{2\Delta CK_{(P\sigma)}}(\lambda_x - \lambda_y) = K_P(\lambda_x - \lambda_y), \quad (11)$$

式中, $K_P = \frac{1}{2\Delta CK_{(P\sigma)}}$ 为压力灵敏度系数。

2.3 SHF 光栅温度传感原理

分析某一偏振方向上(以 X 方向为例)波长的规律。首先对式(7)求偏导可得:

$$\Delta\lambda_x = 2\left[\left(n_x \frac{\partial \Lambda}{\partial P} + \Lambda \frac{\partial n_x}{\partial P}\right)\Delta P + \left(n_x \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_x}{\partial T}\right)\Delta T\right], \quad (12)$$

公式表明, 中心波长的变化包括两部分: 压力导致的折射率变化、光栅周期变化, 温度导致的折射率变化、光栅周期变化。

当只有各向同性的压力作用在双孔光纤上时, 中心波长位移 $\Delta\lambda_{Px}$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{Px} &= \lambda_x \left[\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_x}{n_x} \right] = \\ &= \lambda_x \left[-\frac{n_x^2}{2}(P_{11}\epsilon_x + P_{12}\epsilon_y + P_{12}\epsilon_z) + \epsilon_z \right] = \\ &= K_{Px}\Delta P, \end{aligned} \quad (13)$$

式中, P_{11} 、 P_{12} 为弹光系数; K_{Px} 为 X 方向上中心波长移动的压力灵敏度系数, 可以通过标定测出。

当只有温度作用时, 温度不会导致 SHF 双折射, SHF 温度变化所引起的中心波长位移为:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda \left[\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \right] = \\ &= \lambda \left[\xi - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}(P_{11} + 2P_{12})\alpha + \alpha \right] \Delta P = \\ &= K_T\Delta T, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, ξ 为热光系数, α 为热膨胀系数; K_T 为 SHF 光栅中心波长位移的温度灵敏度系数, 可以通过标定测出。

在同时有温度和压力作用时, 某一偏振方向上(以 X 方向为例)波长的变化 $\Delta\lambda_x$ 是两个参量单独作用下的叠加:

$$\Delta\lambda_x = \Delta\lambda_{Px} + \Delta\lambda_T = K_{Px}\Delta P + K_T\Delta T. \quad (15)$$

因此可以将公式变换可得温度的表达式:

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{\Delta\lambda_x - K_{Px}\Delta P}{K_T}, \quad (16)$$

式中, ΔP 可由式(11)波长差的变化算出。

2.4 边孔 π 相移光纤光栅压力-温度传感原理

从概念上讲, π FBG 可以看成有两个普通 FBG 构成的法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)谐振器^[14], 在反射光谱中形成两个窄缺口, 每个缺口对应一个偏振态。 X, Y 两个偏振态上光谱缺口的波长 $\lambda_{\pi x}$ 、 $\lambda_{\pi y}$ 由以下式表示:

$$\begin{cases} \lambda_{\pi x} = 2n_x \Delta \\ \lambda_{\pi y} = 2n_y \Delta \end{cases} \quad (17)$$

上述讨论的 SHF 光栅波长对压力、温度的响应适用于光谱缺口波长。即:

$$P = K_{\pi P} (\lambda_{\pi x} - \lambda_{\pi y}), \quad (18)$$

$$T = T_0 + \frac{\Delta \lambda_{\pi x} - K_{\pi P x} \Delta P}{K_{\pi T}}, \quad (19)$$

式中, $K_{\pi P}$ 、 $K_{\pi P_x}$ 、 $K_{\pi T}$ 分别为边孔 π 相移光纤光栅光谱缺口的波长差对应的压力灵敏度系数、 X 偏振态上光谱缺口的波长对应的压力灵敏度系数、边孔 π 相移光纤光栅光谱的波长对应的温度灵敏度系数。

3 SHF 的仿真设计及优化

为了仿真分析压力及温度对 SHF 双折射的影响, 本文使用 ANSYS 中的 APDL 模块对光纤进行仿真分析, 模拟分析给定压力下光纤横截面上的应力分布。所用的计算参量为 $a = 62.5 \mu\text{m}$, $c = 4 \mu\text{m}$, 弹性模量 $E = 7900 \text{ kg/mm}^2$, 泊松比 $\nu = 0.186$, 施加的力为 30 MPa , 均匀作用于外表面。所需优化的变量为边孔的大小和边孔的位置, 即边孔半径 b 与边孔中心与纤芯中心距 d 。结合实际情况, 设置两变量初始值为: $b = 0.5 \mu\text{m}$, $d = 5 \mu\text{m}$ 。约束为边孔在包层内, 目标函数为纤芯圆心处的 X 、 Y 两方向应力分量差值最大。边孔光纤的优化数学模型为:

$$\begin{aligned} \text{目标 } f &= \max |\sigma_x - \sigma_y|, \\ \text{约束 s. t. } &= \begin{cases} 4 < d < 62.54 \\ 4 < d - b \\ d + b < 62.54 \end{cases}. \end{aligned} \quad (20)$$

得益于光纤端面结构的圆对称性, 且光纤长度与光纤端面间相差 6 个数量级, 因此本文选择构建简化的四分之一的二维模型, 以达到减少运算量和程序处理时间的效果。划分网格及施加约束后的模型如图 2 所示。

在分析边孔半径 b 、边孔中心与纤芯中心距 d 对纤芯圆心处的 X 、 Y 两方向应力分量差值的影响时, 通常会采用固定某一变量值再改变另一变量从而得到此变量对优化目标的影响的方法, 然而该方法虽然节省了工作量, 但是忽略了两个变量同时变化对优化目标的影响, 进而可能会带来误差, 得到的结果可能不是最优解。因此, 本文选取两变量同时变化的方案研究边孔半径 b 与边孔中心与纤芯中心距 d 对纤芯圆心处的 X 、 Y 两方向应力分量差值的影响。具体的实施方案为: 在 APDL 所写的命令流中加入

循环嵌套, 依次改变边孔半径 b 、边孔中心与纤芯中心距 d 的值, 每次步进的值为 $1 \mu\text{m}$, 实现对边孔半径 b 、边孔中心与纤芯中心距 d 两个参量的全历遍, 最终得到应力差和孔大小、位置之间的关系。图 3 列举了孔半径为 $10 \mu\text{m}$, 中心距为 $40 \mu\text{m}$ 的情况下 SHF 的应力分量。应力差值随孔大小、位置变化关系如图 4 所示。

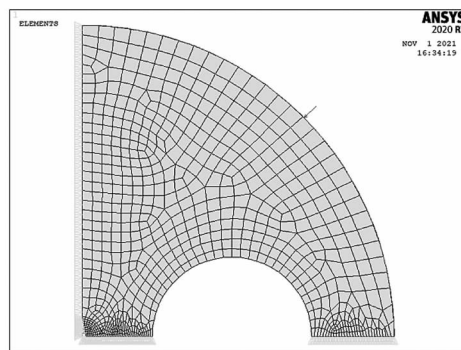


图 2 SHF 四分之一二维平面模型图

Fig. 2 Quarter-dimensional plane model of SHF

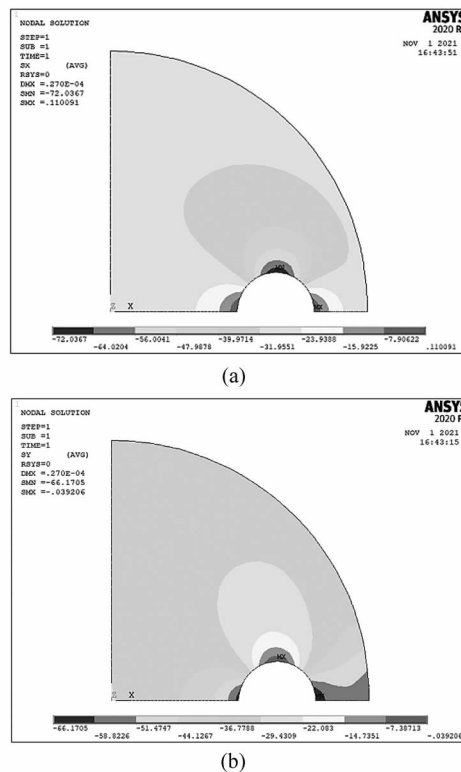


图 3 SHF 应力分布 (孔半径为 $10 \mu\text{m}$, 中心距为 $40 \mu\text{m}$): (a) X 方向应力分量; (b) Y 方向应力分量

Fig. 3 Stress distribution of the SHF (hole radius: $10 \mu\text{m}$, center distance: $40 \mu\text{m}$): (a) Stress component in the X direction; (b) Stress component in Y direction

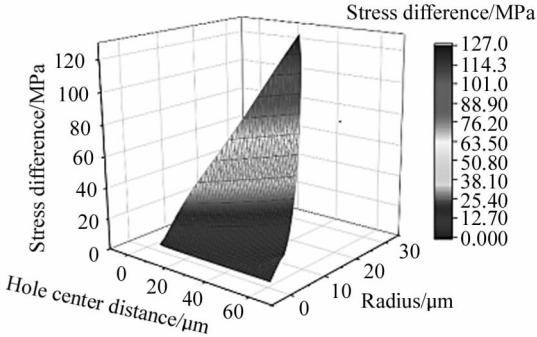


图 4 应力差值随边孔中心距及边孔半径变化趋势图
Fig. 4 Variation trend diagram of stress difference with center distance and radius of edge hole

由三维图得出结论:孔径越大,孔中心距越小,应力差越大,并且孔径大小对应力差值的影响程度要大于孔中心距对应力差值的影响。在孔中心距为 33 μm ,孔半径为 27.5 μm ,应力差达到最大为 126.6 MPa。

上述最优解是在不考虑使用环境的理想状态获得的,实际使用中必须考虑使用环境的影响。本文所设计的传感器使用环境是井下高压环境,最高压力可达 30 MPa,需要考虑在如此大的压力情况下光纤承受的最大应力。图 5 显示了在施加 30 MPa 压力情况下光纤最大应力值随孔径及孔间距的变化趋势图。

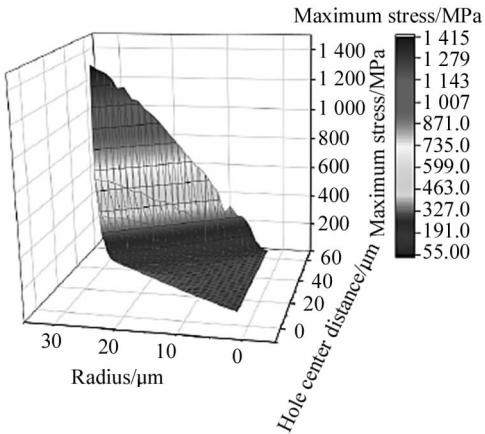


图 5 施加 30 MPa 压力情况下光纤最大应力值随孔径及孔间距变化的趋势图
Fig. 5 The trend diagram of the maximum stress of optical fiber with pore size and hole spacing under 30 MPa pressure

从图中可以看出,在最大应力超过 190 MPa 的范围内,最大应力变化趋势突增,在最大应力低于

190 MPa 范围内,最大应力变化平缓。为保证传感器制作的稳定性,需将设计范围限定在最大应力变化较为平缓的区域,即最大应力低于 190 MPa 的范围。另外,要保证传感器的使用安全以及保证正常使用寿命,需要对光纤的强度进行校核。采用的校核原则是:在承受 30 MPa 压力时,光纤最大应力小于光纤断裂强度。裸光纤的主要成分是石英,根据 Griffith 理论,光纤的理论断裂强度 σ_0 由下式^[15]确定:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{E\gamma}{\alpha}}, \quad (21)$$

式中, E 为光纤的弹性模量, γ 为石英的表面能, $\gamma = 7 \times 10^{-5} \text{ J/mm}^2$, α 为 Si-O 化学键的键长,即原子间距 $\alpha = 2 \times 10^{-7} \text{ J/mm}$ 。将数据代入公式可以得到光纤的理论断裂强度 $\sigma_0 \approx 16\,630 \text{ MPa}$ 。在 Griffith 理论中,由于光纤总存在许多细小裂纹及缺陷,实际强度 $[\sigma]$ 比式(21)推出的强度低 1—3 个数量级,现将 $[\sigma]$ 定为 166 MPa。最终许用应力 σ' :

$$\sigma' = [\sigma]/f_b, \quad (22)$$

式中,安全系数 f_b 选取在 1.3—1.5 之间。最终许用应力定为 140 MPa。

修改 APDL 命令,将许用应力条件带入进行判断,若光纤上的最大应力大于许用应力值,则此时的孔半径及孔心距的值不满足设计要求,例如前文获取的最大应力差时(孔中心距为 33 μm ,孔半径为 27.5 μm ,应力差达到最大为 126.6 MPa),光纤上最大应力达到了 679.5 MPa,因此舍去该设计方案。最终,剔除最大应力不满足条件的设计点后,可得到如图 6 所示满足条件的应力差值随边孔中心距及边孔半径变化趋势图。

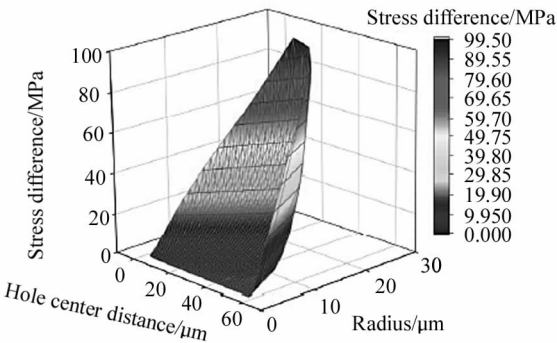


图 6 满足条件的应力差值随边孔中心距及边孔半径变化趋势图
Fig. 6 Variation trend diagram of stress difference with center distance and radius of edge hole

从图中可以确定应力差最大值为 99.22 MPa, 此时孔中心距为 27 μm , 孔半径为 21.5 μm , 该方案即为最终选取的 SHF 尺寸方案, SHF 的实物图如图 7 所示。忽略制作工艺及测量误差, 该 SHF 基本符合设计尺寸。

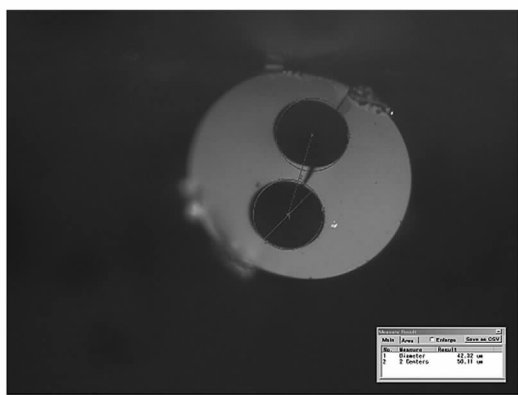


图 7 SHF 电镜观测图

Fig. 7 Observation diagram of SHF electron microscope

对于前文提到的 σ_x 与 σ_y 是由外界压力 P 引起的, 本研究通过 ANSYS 进行了仿真分析, 仿真各参数与上文参数相同, 孔中心参数设置为上述获取的最优值, 即孔中心距为 27 μm , 孔半径为 21.5 μm , 改变施加的外部压力, 施加压力范围为 0—30 MPa, 每次变化 1 MPa, 得到结果如图 8 所示。X、Y 方向的应力随施加压力变化图验证了前文所述, σ_x 、 σ_y 与由外界压力 P 之间存在线性关系, 且由于边孔的存在, 使得 σ_x 与 σ_y 受外界压力 P 影响程度不同, 即斜率 ($K_{(P_{ax})}$ 、 $K_{(P_{ay})}$) 不同。

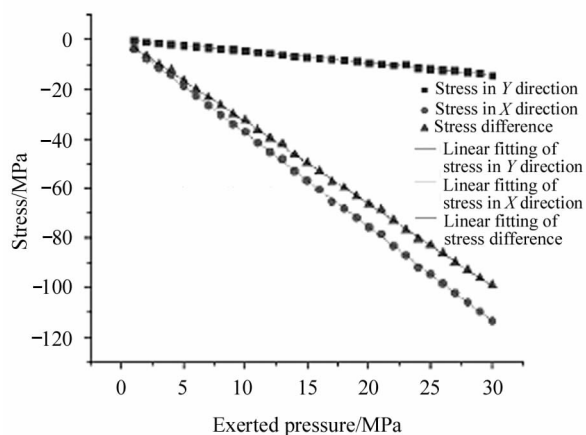


图 8 X、Y 方向的应力及两方向差值随施加压力变化图

Fig. 8 The stress in X and Y directions and the difference between the two directions change with the applied pressure

4 结 论

本文提出基于双孔 π 相移光纤光栅的压力温度传感器。通过理论计算证明了单栅同时测量压力及温度的可行性。并通过仿真分析得到边孔半径及边孔位置对双折射的影响; 孔半径越大, 孔越靠近纤芯, 双折射越高; 孔半径对双折射的影响高于孔中心距的影响。同时, 考虑测量压力可达 30 MPa, 针对此限制条件得到最优方案为孔中心距 27 μm , 孔半径 21.5 μm 。当测量目标变化时, 可按照此过程及方法进行参数修改。

参考文献:

- [1] MA H Y, YU C G, DONG L L, et al. Review of intelligent well technology[J]. Petroleum, 2019, 6(3): 226-233.
- [2] DUTTA C, KUMAR J, DAS T K, et al. Recent advancements in the development of sensors for the structural health monitoring (SHM) at high-temperature environment; a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(14): 15904-15916.
- [3] QIAO X G, SHAO Z H, BAO W J, et al. Fiber Bragg grating sensors for the oil industry[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(3): 429.
- [4] ONUR M, ULKER G, KOCAK S, et al. Interpretation and analysis of transient-sandface-and wellbore-temperature data[J]. SPE Journal, 2017, 22(4): 1156-1177.
- [5] JIANG D S, HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(4): 420-430.
- [6] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [7] DASH J N, CHENG X, TAM H Y. Low gas pressure sensor based on a polymer optical fiber grating[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 933-936.
- [8] ANUSZKIEWICA A, MARTYNKIEN T, OLSZEWSKI J, et al. Polarimetric sensitivity to hydrostatic pressure and temperature in a side-hole fiber with squeezed microstructure[J]. Journal of Optics, 2015, 17(12): 125609.
- [9] LI J, WANG H, SUN L P, et al. Etching Bragg gratings in Panda fibers for the temperature-independent refractive index sensing[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31917-31923.
- [10] SULEJMANI S, SONNENFELD C, GEERNAERT T, et al. Control over the pressure sensitivity of Bragg grating-based sensors in highly birefringent microstructured optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(6): 527-529.

- [10] ZHANG Q, HU L, QI Y, et al. Fiber-optic refractometer based on a phase-shifted fiber Bragg grating on a side-hole fiber [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 16750-16759.
- [11] XIAO R L, SHI Y C, GUO R J, et al. Periodic structural defects in Bragg gratings and their application in multiwavelength devices[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(2): 35-40.
- [12] YU Z Y, LANG T T, HU J, et al. High sensitivity temperature sensor based on a side-hole fiber[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(12): 3474-3481.
- [13] LIU Y, RAHMAN B M A, GRATAN K T V. Thermal-stress-induced birefringence in bow-tie optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(24): 5611-5616.
- [14] KAI L, SUN J, GAO Y. High-resolution detection of wavelength shift induced by an erbium-doped fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 39(1): 275-281.
- [15] XIE S F, LIU B, CHANG C, et al. Characterization and properties of large-core fluorine-doped fibers based on depressed inner on cladding design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148013.
- 折胜飞, 刘波, 常畅, 等. 基于下陷内包层设计的大芯径掺氟光纤表征及性能[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148013.

作者简介:

梁磊 (1963—), 男, 博士, 博士生导师。主要从事光纤光栅传感方面研究。