

文章编号 1004-924X(2023)18-2636-11

制备高质量螺旋光纤的四电极宽恒温区特性研究

王 剑¹, 马 超², 王东辉², 王洪业², 苑立波^{1*}

(1. 桂林电子科技大学 光电工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 哈尔滨工程大学 纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了制备高质量螺旋光纤器件,提出一种四电极电弧光纤加热的方法。基于磁流体动力学模型建立四电极电弧等离子放电的有限元仿真模型,研究了电极夹角、电极距离与施加电压对电弧放电温度场的影响。根据实际情况,进行了相应的温度场仿真计算,结果表明四电极电弧放电形成了较宽的恒温区,宽恒温区不仅有利于光纤应力的释放,同时减少了光纤偏移带来的影响。基于仿真结果,研制了四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统,当系统中被加热光纤最高温度约为 1 050 ℃时,被加热光纤轴向上的恒温区长度约为 2.12 mm。用研制的系统制备了不同光纤与不同周期下的螺旋长周期光纤光栅,在波长 1.21~1.3 μm,透射光谱的光强波动小于 1 dB,光强平均值大于 -1 dB;在波长 1.3~1.35 μm,光强平均值大于 -1 dB;最深的透射光谱波谷大于 22 dB。为进一步验证所研系统的性能,用单模光纤、偏芯光纤、偏双芯光纤制备了不同周期的螺旋光纤结构,结果显示加工得到的螺旋光纤结构的包层边界清晰且平直,无显著的螺纹结构;光纤中央芯无显著的螺旋加工痕迹;光纤偏芯光滑且连续。

关 键 词:四电极;电弧;等离子宽恒温场;高温光纤螺旋加工

中图分类号:TG456 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233118.2636

Study on the characteristics of four electrode wide constant temperature region for preparing high quality spiral fiber

WANG Jian¹, MA Chao², WANG Donghui², WANG Hongye², YUAN Libo^{1*}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry of Education of China,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: lbyuan@vip.sina.com

Abstract: To prepare high-quality helical fiber devices, a heating method for an arc fiber with four electrodes was developed. A finite-element simulation model of arc plasma discharge with four electrodes was established based on the magnetohydrodynamics model. The effects of the electrode angle and distance and applied voltage on the temperature field of arc discharge were studied. A temperature-field simulation diagram was created based on the actual situation, and it indicated that the electrode rod with four electrodes formed a wide constant-temperature region. The wide constant-temperature zone was conducive to the release of fiber stress and reduced the influence of fiber migration. Based on the simulation structure, a

收稿日期:2023-02-24;修订日期:2023-04-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61827819,61735009);广西八桂学者资助专项(No. 2019A38)

plasma hot melt torsional-processing system with a wide constant-temperature zone for arc discharge with four electrodes was developed. When the maximum temperature of the heated fiber in the system was approximately $1\,050\text{ }^{\circ}\text{C}$, the axial constant-temperature zone length of the heated fiber was approximately 2.12 mm . Finally, helical long-period fiber gratings with different optical fibers and different periods were prepared by using the developed system. The experimental results revealed that when the wavelength of the prepared helical long-period fiber gratings was $1.21\sim 1.3\text{ }\mu\text{m}$, the intensity fluctuation of the transmission spectrum was less than 1 dB and the average intensity was higher than -1 dB . At wavelengths of $1.3\sim 1.35\text{ }\mu\text{m}$, the average light intensity was higher than -1 dB . The deepest trough of the transmission spectrum was $>22\text{ dB}$. To further verify the performance of the system, helical fiber structures with different periods were prepared using a single-mode, eccentric core optical, and eccentric twin-core fibers. The results showed that the cladding boundary of the fabricated helical fiber structure was clear and straight and no significant thread structure was present. No distinctive helical machining marks were observed in the central core of the fiber. The off-core of the fiber was smooth and continuous.

Key words: four-electrode; arc; plasma wide constant temperature field; high temperature fiber twisting processing

1 引 言

螺旋光纤器件及其制备方法日益受到人们的重视,例如,螺旋长周期光纤光栅(Helical Long Period Fiber Grating, HLPFG)^[1]、螺旋形表面等离子共振光纤传感器^[2]、基于干涉特性的螺旋形光纤传感器^[3]。螺旋光纤器件不仅有着传统光纤器件抗电磁干扰、尺寸小、重量轻、耐腐蚀等特点,且其螺旋特性使其具有许多常规光纤器件不能实现的功能,在传感器、光纤偏振器和滤波器等方面的应用潜力巨大^[4-6]。

螺旋光纤器件,通常是对已拉制好的光纤经二次加工制备而成,主要方法为二种。第一种方法是用热源加热并扭曲光纤形成螺旋结构,如二氧化碳激光制备^[7-9]、氢氧火焰加热制备^[10-12]、电弧放电制备^[13-17]。该方法制备的螺旋光纤器件是光纤传感领域的常用方法。第二种方法是利用飞秒激光器或二氧化碳激光器直接改变光纤结构形成螺旋光纤器件^[18]。

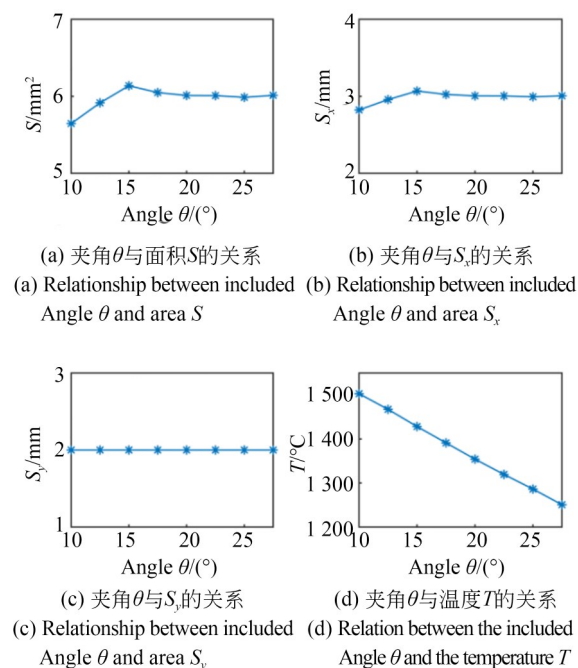
相较于其他制备螺旋光纤器件的方法,电弧放电的制备方法灵活简单。但传统的二电极电弧放电制备螺旋光纤器件时,所产生的恒温区较窄,不利于螺旋结构的应力释放与软化。导致螺旋光纤器件样品的插入损耗与透射光谱波动相对较大,器件性能较差。

针对传统二电极电弧放电存在的问题,本文

开展了基于四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统的研究,文献[19]叙述了该系统温度场的形成方法。为更好了解相关参数对四电极电弧温度场的影响,对四电极电弧的温度场进行了仿真。相关仿真及实验结果表明,该系统形成的恒温区较宽,宽的恒温区不仅有利于光纤应力的释放与软化,同时减少了光纤偏移带来的影响。本文首先以HLPFG为例,采用研制的加工系统制备了不同光纤与相同光纤下不同螺距的HLPFG,以此对研制系统的性能进行评估。接着为更进一步验证所研系统的性能,用不同光纤分别制备了不同周期的螺旋光纤结构。不同验证方法的结果显示加工得到的螺旋光纤结构质量较高。

2 四电极电弧加热光纤方法

本文提出的四电极电弧放电加热光纤结构框图如图1所示,各电极轴线及待加工光纤轴线位于同一平面,电极 A, A', B, B' 的尖端顶点连线为矩形,轴线 C 为该矩形的轴线。电极 A 与电极 A' 的距离定义为 D_x ,电极 A 与电极 B' 的距离定义为 D_y ,电极 A 的轴线与电极 A' 的轴线及电极 B' 的轴线与电极 B 的轴线关于矩形的一轴线对称,电极 A 的轴线与电极 B' 的轴线及电极 A' 的轴线与电极 B 的轴线关于矩形的另一轴线对称,各电极

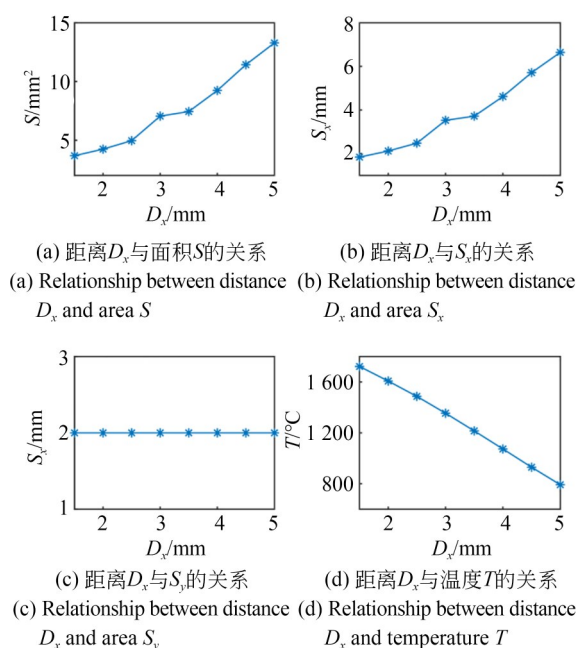
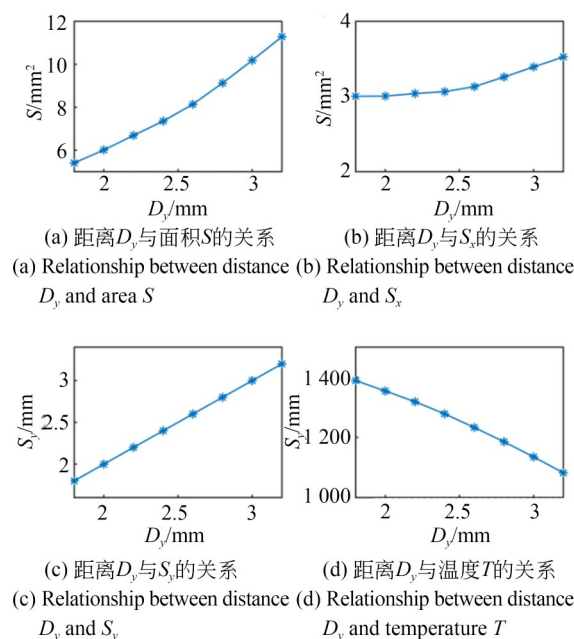
图 2 夹角 θ 对温度场的影响

趋势,随后随着夹角 θ 的增大,面积 S 变化不大,在 6 mm^2 左右变化;图 2(b)中, S_x 在夹角 θ 为 15° 前呈递增趋势,随后随着夹角 θ 的增大, S_x 变化不大,在 3 mm 左右变化。从图中可知,夹角 θ 的变化对 S_x 影响不大;在图 2(c)中,考虑实际光纤加工情况, y 轴的坐标最大只能取 1 mm ,所以 S_y 一直保持为 1 mm ,不随夹角 θ 的变化而变化;图 2(d)表示了温度 T 随着夹角 θ 的增大,单调递减,不利于温度的提高。

以距离 D_x 为变量,对温度场进行仿真,距离 D_x 分别设置为 1.5 mm , 2 mm , 2.5 mm , 3 mm , 3.5 mm , 4 mm , 4.5 mm , 5 mm ,夹角 θ 为 20° ,距离 D_y 为 2 mm ,电压 15 kV ,电阻 $175\ \Omega$,仿真结果如图 3。

在图 3(a)与图 3(b)中,随着距离 D_x 的增大,面积 S 与 S_x 都呈单调递增趋势,且增大明显;在图 3(c)中,考虑实际光纤加工情况, y 轴的坐标最大只能取 1 mm ,所以 S_y 一直保持为 1 mm ,不随距离 D_x 的变化而变化;图 3(d)表示了温度 T 随着距离 D_x 的增大,单调递减,不利于温度的提高。

在图 4(a)中,面积 S 在随着距离 D_y 的增大单调递增,且增大明显;图 4(b)中, S_x 随着距离 D_y 的增大,单调递增,相对于图 3(b), S_x 增大较小;在图 4(c)中, S_y 随着距离 D_y 的增大,单调递增,图 4(d)

图 3 距离 D_x 对温度场的影响图 3 Influence of distance D_x on temperature field图 4 距离 D_y 对温度场的影响图 4 Influence of distance D_y on temperature field

表示了温度 T 随着距离 D_y 的增大,单调递减。

以距离 D_y 为变量,对温度场进行仿真,距离 D_y 分别设置为 1.8 mm , 2 mm , 2.2 mm , 2.4 mm , 2.6 mm , 2.8 mm , 3 mm , 3.2 mm ,夹角 θ 为 20° ,距离 D_x 为 3 mm ,电压 15 kV ,电阻 $175\ \Omega$,仿

真结果如图 4。

以高压交流电源的峰值电压 v 为变量,对温度场进行仿真,电压 V 分别设置为 11 kV, 12 kV, 13 kV, 14 kV, 15 kV, 16 kV, 17 kV, 18 kV, 夹角 θ 为 20° , 距离 D_x 为 3 mm, 距离 D_y 为 2 mm, 电阻 175Ω , 仿真结果如图 5。

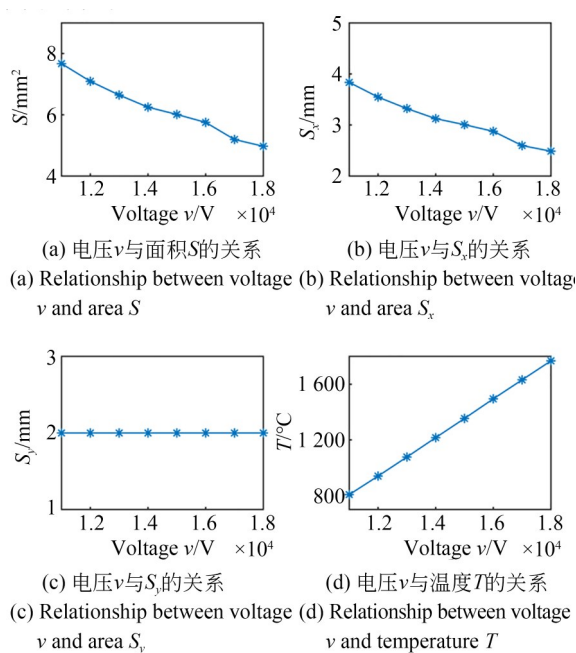


图 5 电压 v 对温度场的影响

Fig. 5 Effect of voltage v on temperature field

在图 5(a) 与图 5(b) 中, 随着电压 v 的增大, 面积 S 与 S_x 都呈单调递减趋势, 但相对图 3(a) 与图 3(b) 变化不大; 在图 5(c) 中, 考虑实际光纤加工情况, y 轴的坐标最大只能取 1 mm, 所以 S_y 一直为 1 mm, 不随电压 v 的变化而变化; 图 5(d) 表示了温度 T 随着电压 v 的增大, 单调递增。

为了增大光纤的恒温加热长度, 需 S_x 的长度尽可能长, 由仿真可知, 影响 S_x 长度的因素主要取决于距离 D_x , 在一定条件下, 距离 D_x 越长, S_x 的长度越长。图 3 与图 4 表明, 随着夹角 θ 与距离 D_y 的增大, 温度 T 单调递减, 但 S_x 变化不大, 在所需的加工温度范围, 过大的夹角 θ 与距离 D_y , 不利于 S_x 的增大。由图 5 可知, 虽然可通过增加电压提高温度 T 的温度, 但这也给装置带来更高的成本。综合考虑四电极棒光纤加工装置中所使用的高压包峰值放电电压、电弧的稳定性、固定电极棒的底座尺寸、装置安装、电极之间

距离过近, 造成的不希望放电回路、所需的恒温场及温度范围、成本, 四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统选取的电极轴线与横轴 C 的夹角 θ 为 20° , 距离 D_x 为 3 mm, 距离 D_y 为 2 mm, 高压包峰值电压为 15 kV, 放电峰值电压可调。

根据上述系统的相关参数, 电阻设置为 175Ω , 仿真得到的温度场如图 6。

由图 6 可得, 恒温区面积 S 为 7.05 mm^2 , 恒温区面积 S 对应的 x 轴坐标为 1.84 mm, 恒温区面积 S 对应的 y 轴坐标为 1 mm, 这将使得光纤恒温加热的长度达到 3.68 mm, 同时随着恒温区的扩大, 光纤在能在较宽恒温区范围内, y 轴方向上存在正负 1 mm 以内的偏移时, 对螺旋光纤光栅的制备基本不受影响, 这使得四电极电弧放电螺旋光纤加工装置实现上变得更加容易。

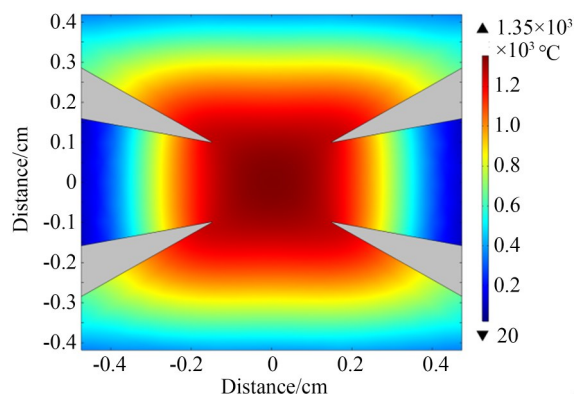


图 6 四电极电弧放电形成的温度场分布

Fig. 6 Temperature distribution of four electrode rod arc discharge

3.2 四电极电弧温度测试

根据以上得到的四电极参数, 搭建四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统, 电极的位置及角度, 通过 CCD 及尺子进行调节。图 7 为四电极电弧放电形成的电弧分区图, 将其分成 3 个区, 分别为离子产生区、离子流经区、辐射热区, 其中辐射热区为光纤的加热区。图中, 上面的电极对形成一组电弧放电路径, 下面的电极对形成另一组电弧放电路径。由于电弧放电时阳极与阴极斑点大小不同, 阳极斑点小, 而阴极斑点大, 所以上面与下面电极棒尖端处较亮的一端为电极棒的阴极, 对应的另一端则为电极棒

的阳极。

从图 8 中可知,在测试电压下,最高温度在 1 050 ℃上下 50 ℃内波动。结合四电极相关尺寸,由图 8(a)、图 8(b)可知,此时光纤的恒温加热长度约为 2.12 mm。

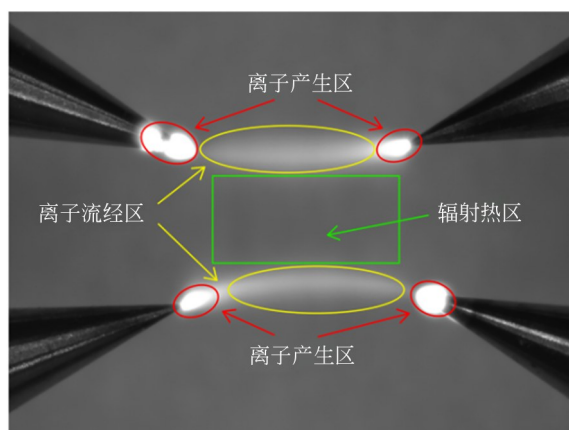
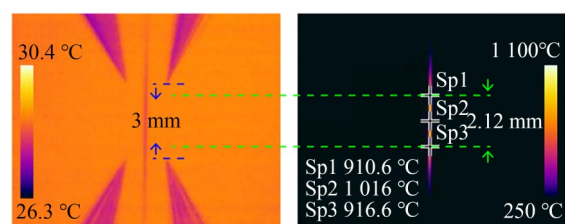
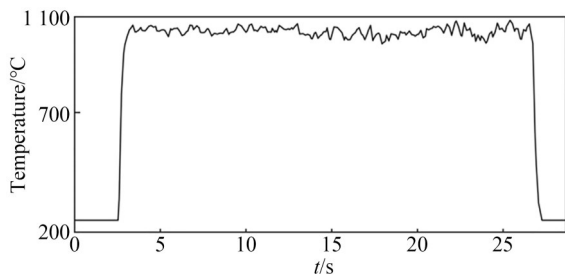


图 7 四电极电弧分区图

Fig. 7 Four electrode rod fiber heating and its temperature



(a) 红外热像仪拍摄的四电极电弧未加热光纤时的温度图
(a) Temperature diagram of optical fiber heated by arc when the four-electrode arc does not heat the optical fiber
(b) 红外热像仪拍摄的四电极电弧加热光纤时的温度图
(b) Temperature diagram of optical fiber heated by arc when the four-electrode arc does not heat the optical fiber



(c) 四电极电弧放电加热光纤时,被加热光纤中间附近最高温度的波动情况
(c) Fluctuation of the maximum temperature near the middle of the heated fiber when the optical fiber is heated by a four-electrode arc discharge

图 8 四电极光纤加热及其温度

Fig. 8 Four electrode rod fiber heating and its temperature

4 四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统及应用结果

4.1 四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统

四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统如图 9 所示。

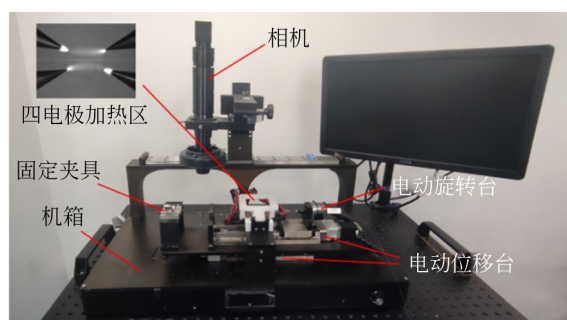


图 9 四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统

Fig. 9 Plasma hot melt torsional processing system with wide constant temperature zone for arc discharge with four electrodes

其主要包括电动位移台、四电极、固定夹具、电动旋转台和相机。一台电动位移台上的夹具采用固定的形式,另一台电动位移台上的夹具置于电动旋转台上,并同电动旋转台上的旋转电机一同旋转。待加工的光纤固定于两个夹具上。四电极电弧放电宽恒温区等离子热熔旋扭加工系统中光纤 V 型槽加工精度为 5 μm ,其他零件加工精度为 50 μm 。制备螺旋光纤器件时,通过控制电动旋转电机的旋转速度,电动位移台的位移速度,四电极电弧放电的温度场温度,可以实现光纤的螺旋加工。整个平台由计算机通过编写的程序进行控制。四电极上方的相机用于观察光纤加工过程及用来调整四电极的位置。

4.2 应用结果

为说明加工系统的性能,用不同光纤的 HLP-FG 透射光谱与相同光纤的不同周期 HLPFG 透射光谱进行了实验验证。首先是对三种不同的光纤进行实验,只是出于考虑不同光纤的制备效果,周期没有特定的进行选取。为了更好地说明论文研制系统的性能,在前述实验的基础上,对康宁单模光纤 HLPFG 的不同周期进行了验证。

图 10 为 HLPFG,它具有沿轴向周期性螺旋折射率调制的特性,图中标注了 HLPFG 的纤芯、包层和螺距。实验中,采用不同的光纤验证四电

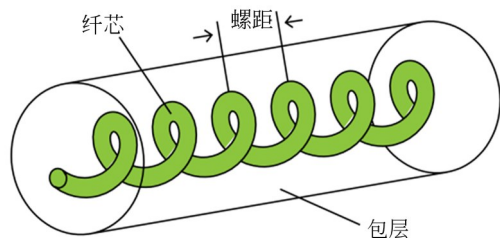


图 10 螺旋长周期光纤光栅

Fig. 10 Helical long period fiber grating

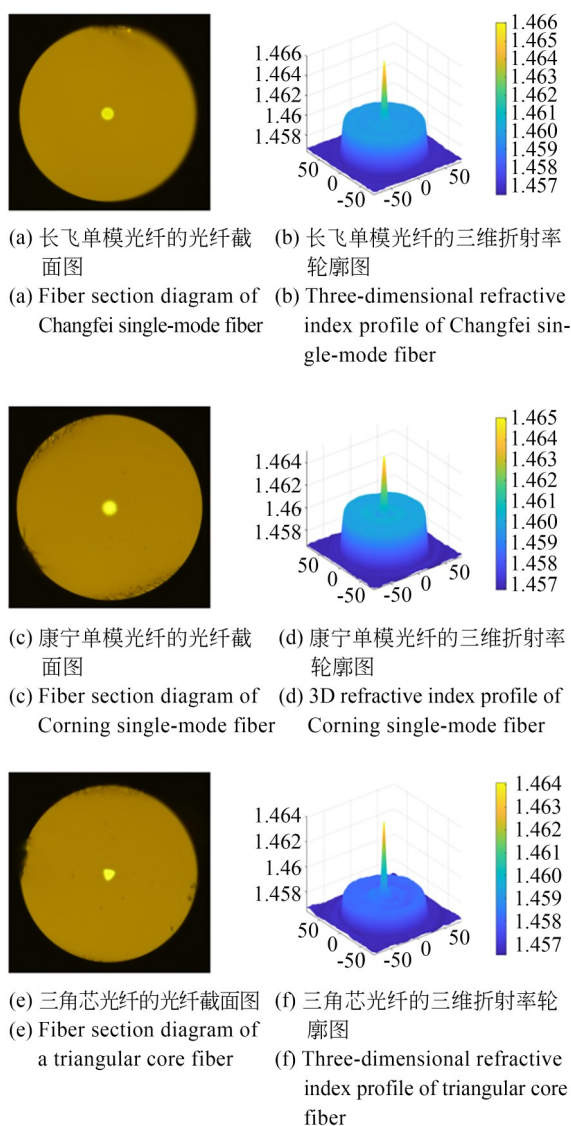


图 11 光纤截面图与三维折射率轮廓图

Fig. 11 Fiber cross section and 3D refractive index profile

极电弧放电宽恒温区等离子热熔扭转加工系统的性能,所用光纤分别为长飞单模光纤、康宁单模光纤、三角芯光纤,采用显微镜与折射率测试仪对它们的端面与折射率进行测量,折射率测量所用的光波长为 532 nm,得到的光纤截面图与三维折射率轮廓图如图 11。

从图 12(a)、图 12(b)、图 12(c)可知,不同光纤与不同周期下制备的 HLPFG 的插入损耗较低,图 12(d)中,在波长 1.21~1.3 μm ,等间隔取

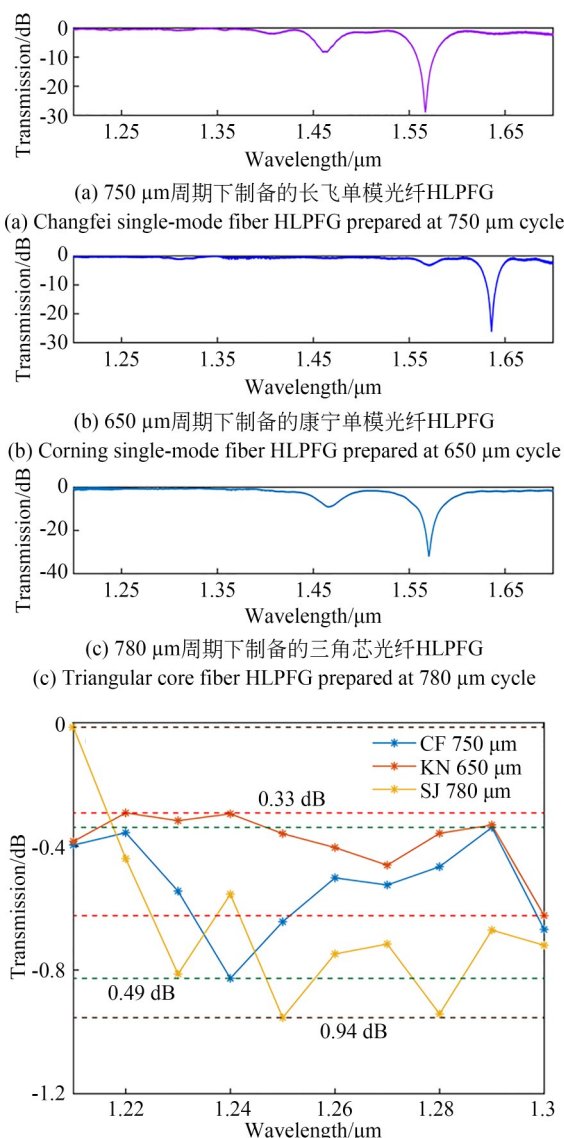


图 12 基于四电极电弧系统制备的不同光纤 HLPFG

Fig. 12 Different fiber HLPFG fabricated based on a four-electrode arc system

10 个数据点,周期 750 μm 的长飞单模光纤 HLP-FG 的透射光谱的波动最大为 0.49 dB,通过计算其平均值为 -0.53 dB 。周期 650 μm 的康宁单模光纤 HLPFG 的透射光谱的波动最大为 0.33 dB,通过计算其平均值为 -0.38 dB 。周期 780 μm 的三角芯光纤 HLPFG 的透射光谱的波动最大为 0.94 dB,通过计算其平均值为 -0.66 dB 。

从图 13(a)、图 13(b)可知,不同周期下制备的 HLPFG 的插入损耗较低,图 13(c)中,在波长 1.21~1.3 μm ,等间隔取 10 个数据点,周期 550 μm 的康宁单模光纤 HLPFG 的透射光谱的波动最大为 0.50 dB,通过计算其平均值为 -0.43 dB ;周期 600 μm 的康宁单模光纤 HLP-FG 的透射光谱的波动最大为 0.29 dB,通过计算其平均值为 -0.19 dB 。

表 1 为前述 5 个透射光谱得到的结果,由于光源存在细微的波动,这里定义最大值为透射光

谱 1.3~1.35 μm 光强的平均值,最低为整个透射光谱的最小值,差值为两者的差。由表可知,透射光谱中最大值大于 -1 dB ,最小值小于 -23 dB ,差值大于 22 dB。

表 1 测试结果
Tab. 1 Test result

序号	光纤	周期/ μm	最高/ dB	最低/dB	差值/ dB
1	长飞单模	750	-0.51	-28.85	28.34
2	康宁单模	650	-0.57	-26.10	25.53
3	康宁单模	600	-0.21	-23.38	23.17
4	康宁单模	550	-0.78	-23.52	22.74
5	三角芯	780	-0.73	-31.91	31.18

由不同光纤与不同周期制备的 HLPFG 可知,四电极电弧放电宽恒温区等离子热熔旋钮加工系统制备的 HLPFG 插入损耗及透射光谱的波动小,同时得到较好的波谷深度。

为了进一步评价本文提出的四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统的性能,表 2 与其他制备方法及其加工得到的 HLPFG 进行了比较。显然,与其他方法相比,本文提出的四电极电弧放电加工光纤的方法不仅得到的 HLPFG 光谱最小损耗小于 1 dB,而且该加工方法简单灵活、恒温区大、价格便宜。通过比较可知,本文提出的加工方法为实现高质量的螺旋光纤器件提供了一种有效的制备方法。

为更充分验证宽恒温区加工系统的性能,进一步的用本文所研制的系统制备了单模光纤、偏芯光纤、偏双芯光纤不同周期的螺旋光纤结构,并用显微镜进行了观察。

从图 14 可知,螺旋光纤器件的包层边界清晰且平直,无显著的螺纹结构;光纤中央芯无显著的螺旋加工痕迹;光纤偏芯光滑且连续。这都是基于加工系统的宽恒温加热区特点得到的。因为宽的恒温加热区不仅更利于被加工光纤的应力释放与软化,而且减少了加工过程中光纤微振动带来的影响。

上述加工结果带来的好处如下:

(1)包层无显著螺纹结构说明包层形变小,光纤中包层模式传输仅受螺旋纤芯的影响,包层边界不对包层模式产生显著调制;

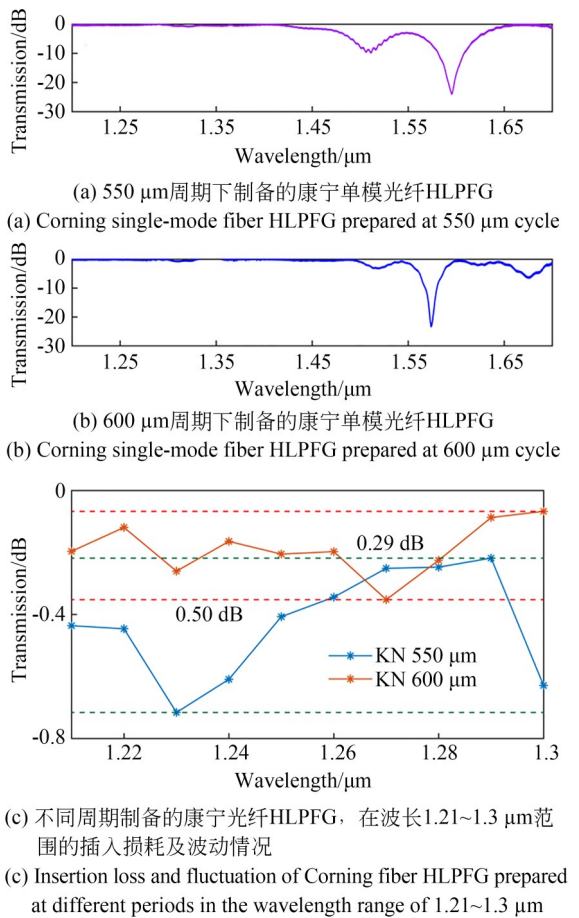


图 13 基于四电极电弧系统制备的不同周期 HLPFG
Fig. 13 HLPFG with different periods fabricated based on four-electrode arc system

表 2 不同加工方法制备 HLPFG 比较

Tab. 2 Comparison of HLPFG prepared by different processing methods

结构	制备方法	透射光谱的最小损耗	说明
单模螺旋长周期光 纤光栅	CO ₂ 激光 ^[8-9]	大于 1 dB	优点:灵活、高品质;
		小于 1 dB	缺点:光路调试费时
	氢氧火焰 ^[11-12]	小于 1 dB	优点:加热面积较宽,加热温度均匀;
		约 1 dB	缺点:氢气有一定危险性
	二电极电弧放电 ^[13-14]	大于 1 dB	优点:简单灵活;
		大于 1 dB	缺点:恒温区较窄
	四电极电弧放电 (本文工作)	小于 1 dB	优点:简单灵活、大恒温区; 缺点:电弧需进一步优化

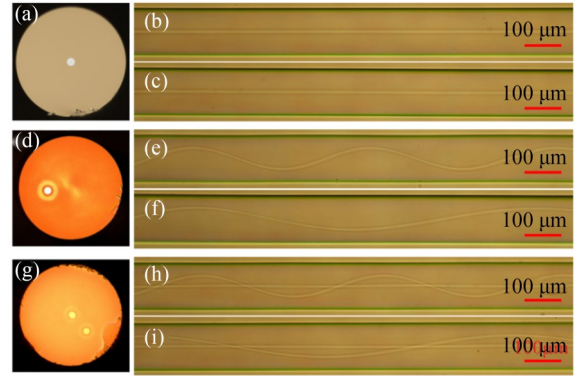


图 14 不同螺距的三种螺旋光纤样品侧面观察图 (a)单模光纤截面图;(b)周期为 450 μm 的单模光纤螺旋结构;(c)周期为 900 μm 的单模光纤螺旋结构;(d)偏芯光纤截面图;(e)周期为 450 μm 的偏芯光纤螺旋结构;(f)周期为 900 μm 的偏芯光纤螺旋结构;(g)偏双芯光纤截面图;(h)周期为 450 μm 的偏双芯光纤螺旋结构;(i)周期为 900 μm 的偏双芯光纤螺旋结构。

Fig. 14 Side view of three spiral fiber samples with different pitch (a) Section of single-mode fiber; (b) single-mode fiber helical structure with a period of 450 μm ; (c) Single-mode fiber helical structure with a period of 900 μm ; (d) Cross-sectional diagram of eccentric fiber; (e) eccentric fiber helical structure with a period of 450 μm ; (f) eccentric fiber helical structure with a period of 900 μm ; (g) partial dual-core fiber section diagram; (h) partial two-core fiber helical structure with a period of 450 μm ; (i) partial dual-core fiber helical structure with a period of 900 μm .

(2)对于中央纤芯来说,其无显著的螺旋加工痕迹,降低了透射光谱的损耗及波动,论文^[14]

间接的说明了这点;

(3)对于离轴纤芯来说,纤芯螺旋结构可分解为具有较大曲率半径的稳定扭转结构和较小曲率半径的局部微弯和结构错位。相比于前者,后者的弯曲程度更高且不均匀,是导致纤芯辐射损耗的主要因素^[23-24]。而四电极电弧宽恒温区螺旋光纤加工系统加工得到的离轴纤芯螺旋轨迹光滑连续,有效降低纤芯在扭转过程中的局部微弯和结构错位,能显著地降低样品的插入损耗。

总结以上三点,四电极电弧放电的宽恒温区等离子热熔扭转加工系统能能有效提高螺旋光纤器件的质量。

5 结 论

本文为制备高质量的螺旋光纤器件,提出一种四电极电弧光纤加热方法,并研制了四电极电弧放电宽恒温区等离子热熔旋钮加工系统,通过仿真分析了四电极各项参数对光纤加热温区特性的影响,以此为基础,得到了系统四电极参数,并通过仿真与实验验证了四电极形成的宽的恒温区。宽的恒温区不仅有利于光纤应力的释放,同时,减少了光纤偏移带来的影响。最后,首先由不同光纤与相同光纤的不同周期下制备的HLPFG验证了四电极电弧放电宽恒温区等离子热熔旋钮加工系统的性能,实验表明本文提出的系统制备的螺旋光纤器件的插入损耗及透射光谱波动小,同时得到了较好的波谷深度。接着为更进一步验证所研系统的性能,用不同光纤分别制备了不同周期的螺旋光纤结构,结果显示加工得到的螺旋光纤结构质量较高。基于本文提出

系统的特点,使得该系统可制备多种高质量螺旋结构的光纤器件,具有广泛的应用前景,如螺旋

光纤滤波器、螺旋光纤涡旋光发生器,为高质量螺旋光纤器件的制备,提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] LIU S, ZHOU M, ZHANG Z, *et al.* Ultrasensitive refractometer based on helical long-period fiber grating near the dispersion turning point[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10): 2602-2605.
- [2] ZHANG M W, ZHANG L, CHEN Q, *et al.* A designed twist sensor based on the SPR effect in the thin-gold-film-coated helical microstructured optical fibers[J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5668.
- [3] WANG J B, ZENG X Z, ZHOU J, *et al.* Highly sensitive torsion sensor based on Mach-Zehnder interference in helical seven-core fiber taper[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(4): 041205.
- [4] NING C, CHENG R W, JIANG Y, *et al.* Helical fiber strain sensors based on triboelectric nanogenerators for self-powered human respiratory monitoring[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 2811-2821.
- [5] XUE L L, TIMOTEO B S M, QIU W, *et al.* Broadband circular polarizer based on chirped double-helix chiral fiber grating[J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3366.
- [6] GAO K Y, ZHANG Z, HUANG B, *et al.* Broadband edge filter based on a helical long-period fiber grating and its application to a power-interrogated torsion sensor[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(4): 1075.
- [7] ZHU C L, WANG P, ZHAO H, *et al.* DC-sampled helical fiber grating and its application to multi-channel OAM generator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(17): 1445-1448.
- [8] ZHANG L, LIU Y Q, CAO X B, *et al.* High sensitivity chiral long-period grating sensors written in the twisted fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4253-4257.
- [9] KONG X D, REN K L, REN L Y, *et al.* Chiral long-period gratings: fabrication, highly sensitive torsion sensing, and tunable single-band filtering[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4702-4707.
- [10] ZHONG J, LIU S, ZOU T, *et al.* High-sensitivity optical fiber-based glucose sensor using helical intermediate-period fiber grating[J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6824.
- [11] LI Z L, LIU S, BAI Z Y, *et al.* Residual-stress-induced helical long period fiber gratings for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24114.
- [12] LIU S, ZHOU M, SHAO L P, *et al.* Torsion-tunable OAM mode generator based on oxyhydrogen-flame fabricated helical long-period fiber grating[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 21085.
- [13] SUN B, WEI W, LIAO C R, *et al.* Automatic arc discharge-induced helical long period fiber gratings and its sensing applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 873-876.
- [14] LIU Y, DENG H, YUAN L. Arc-discharge-induced off-axis spiral long period fiber gratings and their sensing characteristics[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101950.
- [15] LIU Y, YUAN L B. Ultrasensitive temperature sensor based on a urethane acrylate-coated off-axis spiral long period fiber grating[J]. *Optik*, 2020, 223: 165557.
- [16] MA C, WANG D H, WANG J, *et al.* A compact sensor capable of temperature, strain, torsion and curvature measuring[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4896-4902.
- [17] HE X L, ZHOU J, MA C, *et al.* Bend sensor based on Mach-Zehnder interferometer using single-mode fiber with helical structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(1): 15-18.
- [18] CHEN J Y, BAI Z Y, ZHU G X, *et al.* Femto-second laser inscribed helical long period fiber grating for exciting orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 4402.
- [19] TACHIKURA M. Fusion mass-splicing for optical fibers using electric discharges between two pairs of electrodes[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(3): 492.
- [20] 史岩, 陈平, 田浩, 等. 基于 Comsol Multiphysics 的新型高压直流继电器电弧仿真分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 90-97.
- SHI Y, CHEN P, TIAN H, *et al.* Arc simulation analysis of a new high voltage DC relay based on Comsol Multiphysics[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 49(1): 90-97. (in Chinese)

- [21] 吴翊, 荣命哲, 王小华, 等. 触头打开过程中低压空气电弧等离子体的动态分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 12-17
WU Y, RONG M Z, WANG X H, *et al.* Dynamic analysis of low-voltage air arc plasma during contact opening process [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23 (5) 12-17 (in Chinese)
- [22] 胡新宇, 杨廷方, 汪新秀, 等. 基于MHD的改进型保护间隙快速熄弧仿真[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 219-224.
HU X Y, YANG T F, WANG X X, *et al.* Fast arc extinction simulation for improved protective gap based on MHD [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42 (5): 219-224. (in Chinese)
- [23] 宁力. 低串扰弯曲不敏感多芯光纤的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
NING L. *Study on Low Crosstalk and Bend Insensitive Multi-Core Fiber* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [24] HARRIS A, CASTLE P. Bend loss measurements on high numerical aperture single-mode fibers as a function of wavelength and bend radius [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4 (1): 34-40.

作者简介:



王 剑(1986—),男,广西桂林人,博士研究生,2010年于广西师范大学获学士学位,2015年于广西师范大学获硕士学位,主要从事光纤加工仪器研制及光纤传感应用方面的研究。E-mail: wangjian_optics@foxmail.com

通讯作者:



苑立波(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,2003年于香港理工大学获博士学位,主要从事光纤集成器件及光纤传感应用方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com