

光纤熔融拉锥后抗拉强度增强研究

黄建滨^{1,2*}, 初单萍², 张大鹏², 王兴龙²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²珠海光库科技股份有限公司, 广东 珠海 519080

摘要 通过控制光纤熔融拉锥参数, 实现了光纤熔融拉锥后的抗拉强度增强。利用有限元方法进行模拟与仿真, 结果表明光纤熔融拉锥后, 光纤内应力的分布与光纤熔融拉锥完成后光纤被加热区域的降温时间有关, 降温时间越长, 内应力越小, 且被加热区域边缘处的内应力值明显高于其他区域的内应力值。根据仿真结果设计实验, 实验结果表明, 当光纤熔融拉锥完成后光纤被加热区域的降温时间为 10、600、1200、1500 s 时, 光纤熔融拉锥后抗拉强度将逐渐增强。

关键词 光纤光学; 熔融拉锥; 内应力; 抗拉强度; 有限元

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2006002

Tensile-Strength Enhancement of Optical Fibers after Fused Biconical-Taper Processing

Huang Jianbin^{1,2*}, Chu Danping², Zhang Dapeng², Wang Xinglong²

¹School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Advance Fiber Resources (Zhuhai), Ltd., Zhuhai, Guangdong 519080, China

Abstract In this paper, we describe the tensile-strength enhancement of optical fibers obtained by controlling the parameters of the fused biconical tapering process used to produce them. Numerical simulations using the finite-element method show that the internal stress in an optical fiber is related to the cooling time after the tapering process. This stress is reduced by increasing the cooling time, although the internal stress at the edge of the heated area remains significantly higher than that of other areas. Experimental studies based on the simulation results show that the tensile strength of a tapered optical fiber is gradually enhanced as the cooling time is increased from 10 s to 600, 1200, and 1500 s.

Key words fiber optics; fused biconical taper; intra-stress; tensile strength; finite element

OCIS codes 060.2400; 060.2310; 220.4610

1 引言

光纤熔融拉锥是指光纤在可燃气体与氧气混合燃烧的环境下, 由微机拉伸形成锥形结构^[1-2]。目前熔融拉锥法被广泛应用于光纤探针制作^[3-4]、光纤耦合器制作^[5-7]、光纤合束器制作^[8-9]、传感^[10-11]、光子晶体光纤研究^[12]等领域。然而, 一方面, 熔融拉锥时, 由于光纤经过火焰燃烧的区域与未经火焰燃烧的区域存在温度差, 两者之间存在热应力^[13]。另一方面, 当熔融拉锥完成后, 光纤离开火焰区域, 光纤被加热区域的温度迅速下降, 这个骤冷过程使得光纤的内部应力得不到有效释放, 导致光纤抗拉强度

下降, 严重时甚至造成光纤的断裂。研究表明, 退火可以有效地释放光纤内应力, 改善光纤的脆性^[13-16]。但是, 光纤熔融拉锥制作器件时, 剥除涂覆层的区域只有数个厘米的长度, 光纤其余部分表面仍涂有涂覆层, 由于涂覆层对高温的耐受有限, 导致现有的退火装置难以用于光纤熔融拉锥后的退火。本文通过理论分析以及实验验证提出了一种可以增强光纤熔融拉锥后抗拉强度的方法。

2 理论分析

目前, 氢气作为一种清洁能源常被用作光纤熔融拉锥的可燃气体。首先基于有限元(FEM)法对

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-06-30; 录用日期: 2020-07-10

* E-mail: jianbinhuang@fiber-resources.com

氢气和纯氧气形成的混合气体燃烧时的光纤温度场进行仿真。仿真模型如图 1(a)所示,氢气出口位于氧气出口的正上方,且它们的中心处于同一条直线上,氢气和氧气将在中间混合并燃烧。在模拟过程中,氢气流量设置为 130 mL/min(标况下),氧气流量设置为 25 mL/min(标况下)。氢气和氧气的混合气体燃烧时火焰温度分布如图 1(b)所示,火焰呈中心对称结构,且内焰温度高于外焰温度。

后续的模拟与实验过程中光纤所处的位置对应图 1(b)中的横向虚线处($Y=4$ mm),图 1(b)中纵向虚线($X=0$ mm)表示火焰的中心。图 1(c)和图 1(d)分别展示了图 1(b)中横向和纵向虚线处的温度分布。从图 1(c)可以看出光纤位于 $Y=4$ mm 处时温度分布近似为高斯分布。从图 1(d)可以看出,在 $X=0$ mm, $Y=4$ mm 的位置处火焰温度的梯度较小。

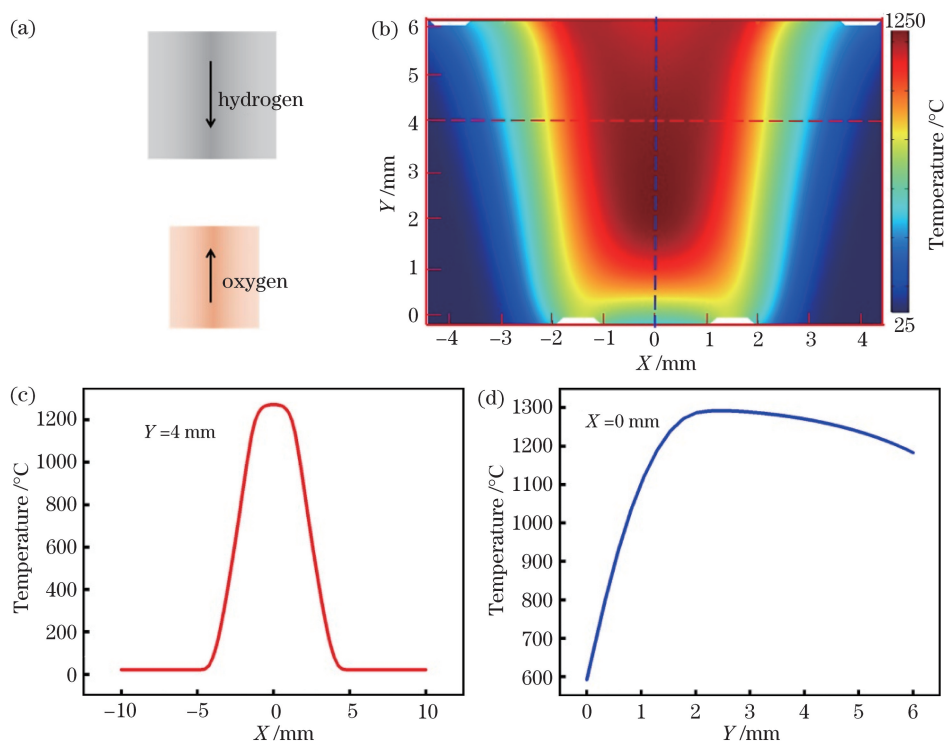


图 1 氢气和纯氧气形成的混合气体燃烧时的温度仿真结果。(a)仿真模型;(b)火焰温度分布;(c) $Y=4$ mm 处火焰温度分布;(d) $X=0$ mm 处火焰温度分布

Fig. 1 Simulation results for the combustion of hydrogen-oxygen mixture. (a) Simulation model; (b) temperature distribution of flame; (c) temperature distribution at $Y=4$ mm; (d) temperature distribution at $X=0$ mm

当光纤位于火焰中时,由于温度梯度的存在,光纤内部产生内应力。同样采用有限元的方法来模拟仿真这一过程。图 2(a)展示了仿真模型,光纤在水平方向上固定于两侧的支架上,火焰中心位于两支架中间,火焰宽度为 8 mm,火焰边缘距离夹具边缘的距离为 26 mm。为了简化模型,把图 1(c)中呈近高斯分布的火焰温度分布简化为图 2(b)中实线的方形分布,即在火焰处的温度为 1250 °C,在火焰外的温度为 25 °C。我们把光纤加热及冷却的过程分为如图 2(c)中所示的 3 个过程:Ⅰ火焰加热过程、Ⅱ光纤降温过程、Ⅲ到达室温后的静置过程。其中,过程 I 的持续时间设置为 60 s,过程 II 的持续时间设定为 t_A ,过程 III 的持续时间设置为 60 s。图 2(d)是当降温时间 t_A 为 5 s 时,光纤的应力分布

图,可以看出在火焰边缘处的应力大于其他区域的应力,这是由于火焰边缘处的温度梯度大于其他区域的温度梯度。因此,该区域的抗拉强度小于其他区域的抗拉强度。随着降温时间 t_A 从 0.5 s 逐渐增大到 50 s,如图 2(e)和图 2(f)所示,光纤上的应力随着 t_A 的增大而减小,同时火焰边缘处的应力仍大于其他区域的应力。从图 2(f)位于 $X=0$ mm 处应力变化趋势可以看出,随着冷却时间的增加,应力减少的速度趋于平缓,即减少相同数量的应力值所需的冷却时间较长。火焰边缘处应力即 $X=2$ mm 与其他区域应力差的变化趋势有相同的规律。由图 2 可知,可以通过增加光纤被加热区域的降温时间,减小光纤内应力,从而增加光纤熔融拉锥后的抗拉强度。

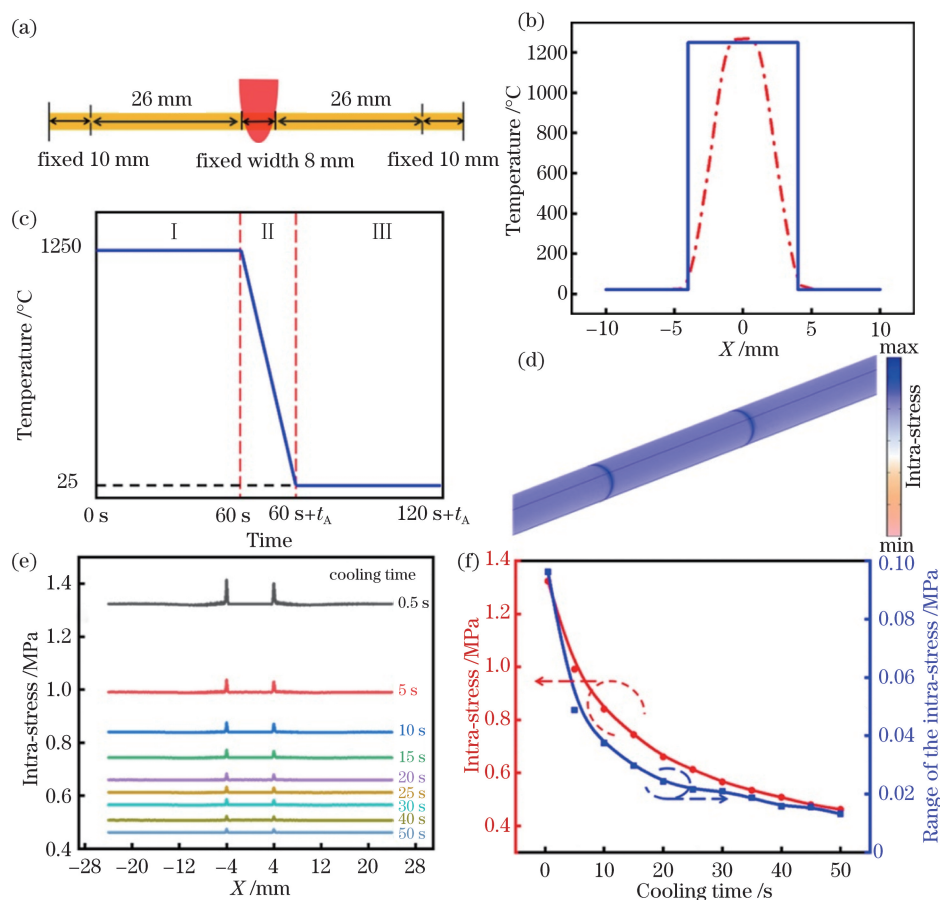


图 2 光纤内应力分布仿真。(a) 仿真模型; (b) 仿真所使用的温度分布; (c) 火焰处光纤的降温曲线; (d) 降温时间为 5 s 时光纤应力分布; (e) 冷却时间变化时光纤应力分布变化; (f) 冷却时间变化时位于火焰中心 ($X=0$ mm) 光纤应力的变化趋势及火焰边缘处 ($X=2$ mm) 应力与其他区域应力差变化趋势

Fig. 2 Simulation results of intra-stress distribution of optical fiber. (a) Simulation model; (b) temperature distribution used during simulation process; (c) cooling curve of the fiber; (d) intra-stress distribution when the cooling time is 5 s; (e) intra-stress distribution varying with the cooling time; (f) tendency of intra-stress at $X=0$ mm with cooling time and tendency of intra-stress difference between $X=2$ mm and $X=0$ mm

3 实验结果

理论分析结果表明: 增加光纤被火焰加热区域的降温时间可以减少光纤上的应力, 进而提升了熔融拉锥后光纤的抗拉强度。实际生产中, 可以通过调节光纤熔融拉锥参数来调节光纤的降温时间。

不失一般性, 实验中使用 Nufern 公司纤芯为 $200\ \mu\text{m}$ 、包层为 $220\ \mu\text{m}$ 的双包层光纤进行实验。为了避免光纤拉锥后因光纤直径变化引起的光纤抗拉强度变化对实验结果的影响, 在光纤加热过程中光纤两端的夹具保持不动, 这样可以保证光纤不会被拉细。实验装置如图 3(a) 所示, 光纤中间部分涂覆层的剥除长度为 59 mm, 光纤被固定于夹具上, 两边夹具夹在剥口外 0.5 mm 处, 即夹具间距为 60 mm, 使用氢氧燃烧火焰作为加热热源。采用弯

曲法对实验后的光纤进行抗拉强度检验, 检验装置如图 3(b) 所示, 光纤固定在夹具上, 两端夹具都置于剥口外 50 mm 处, 夹具初始宽度为 80 mm, 光纤弯曲直径可以通过减小夹具间距来控制, 夹具间距由丝杆控制, 丝杆的精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$, 光纤断裂时弯曲直径越大表明光纤的抗拉强度越小。由于夹具自身大小的限制, 该装置测得光纤最小弯曲直径为 24 mm。当夹具间距达到 24 mm 时, 若光纤不断, 则光纤的断裂直径记为小于 24 mm, 实际的统计及计算中将其断裂直径记为 23 mm, 而光纤在装夹过程中断裂时, 则断裂直径记为大于 80 mm, 实际的统计及计算中将其断裂直径记为 81 mm。同时记录相应的断点位置, 断点位置定义为断点与光纤去除涂覆层的中心即加热时位于火焰中心位置间的距离。

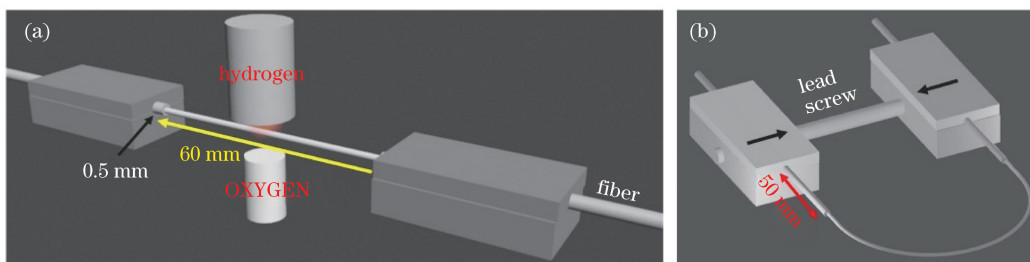


图 3 实验装置图。(a)光纤加热示意图;(b)光纤弯曲检验示意图

Fig. 3 Experimental setup. (a) Heating setup; (b) bending setup

图 4 是光纤经过火焰加热 60 s 后,迅速关闭火焰,光纤静置 60 s 后,对光纤进行弯曲检验的结果,在这种情况下光纤被加热部分温度将在 10 s 左右内从 1250 °C 降到室温。

图 4(a)是光纤断裂时的弯曲直径分布情况,从断裂直径分布频数来看,光纤断裂弯曲直径主要集中在 50 mm 以上,但仍有 6 条光纤断裂直径在 30 mm 或者以下。对光纤断裂弯曲直径分布作正态

分布拟合,可以看出正态分布的中心值为 55.8 mm。图 4(b)是相应的断裂位置的分布图,从图中可以看出,断点位置主要集中在距离火焰中心 3.5~6.0 mm 处。对断点位置分布进行正态分布拟合可以看出断点位置的正态分布中心为 4.75 mm。从理论分析可知,此时火焰边缘处的应力值大于其他区域的应力值,因而,在做弯曲试验时该区域比其他区域更容易断裂。

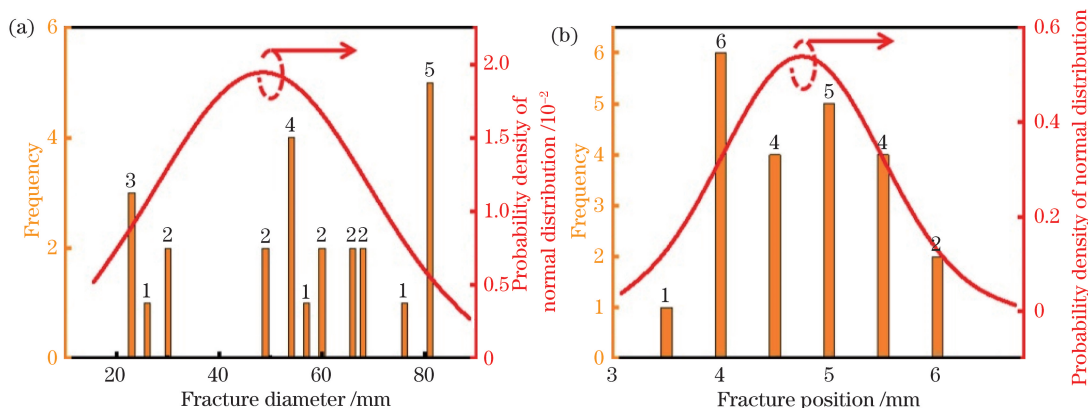


图 4 光纤快速降温时对光纤进行弯曲试验结果。(a)光纤断裂时弯曲直径分布;(b)光纤断点位置分布

Fig. 4 Results of the bending test when the cooling time is 10 s. (a) Distribution of the bending diameter when the fiber is fractured; (b) distribution of the distance between the fiber fracture point and the flame center

通过改变光纤熔融拉锥参数,可以增加光纤被加热区域的降温时间,即从 1250 °C 降低到室温的时间。图 5 是降温时间分别为 600、1200 和 1500 s 时,对光纤进行弯曲试验的结果。图 5(a)是当冷却时间为 600 s 时光纤断裂弯曲直径分布情况,从光纤断裂弯曲直径分布频数来看,未断裂的有 8 根,断裂的 12 根中断裂弯曲直径分布在 35~60 mm。对断裂弯曲直径分布作正态分布拟合,可以看出正态分布的中心值位于 37.3 mm。与图 4 相比,断裂弯曲直径的中心值减少 18.5 mm,表明光纤抗拉强度增强。图 5(b)是相应的断点位置分布,断点位置与加热时火焰中心的距离从 1.5 mm 到 7.5 mm,中心值为 4.8 mm,与图 4 相比中位数相差 0.05 mm,但

分布更为分散,这是由于当降温时间延长时,加热时处于火焰边缘处的应力值与其他区域的应力差减少。图 5(c)是降温时间为 1200 s 时光纤断裂弯曲直径分布情况,从断裂弯曲直径分布频数来看,未断裂的有 14 根,断裂的 6 根中断裂弯曲直径分布在 28~52 mm,对断裂弯曲直径分布作正态分布拟合,可以看出正态分布的中心值在 27 mm,与降温时间为 600 s 相比,中心值减少 10.3 mm,表明光纤抗拉强度有了进一步的增强。图 5(d)是降温时间为 1500 s 时光纤断裂弯曲直径分布情况,从断裂弯曲直径分布频数来看,未断裂的有 18 根,断裂的 2 根中断裂直径分别为 26~30 mm,对断裂弯曲直径分布作正态分布拟合,可以看出正态分布的中心值在

23.5 mm,与降温时间为 1200 s 相比,中心值减少 3.5 mm,表明光纤抗拉强度有了更进一步的增强。

图 5 表明,随着光纤被加热区域降温时间的增加,光纤抗弯曲直径减少,即光纤抗拉强度增强。

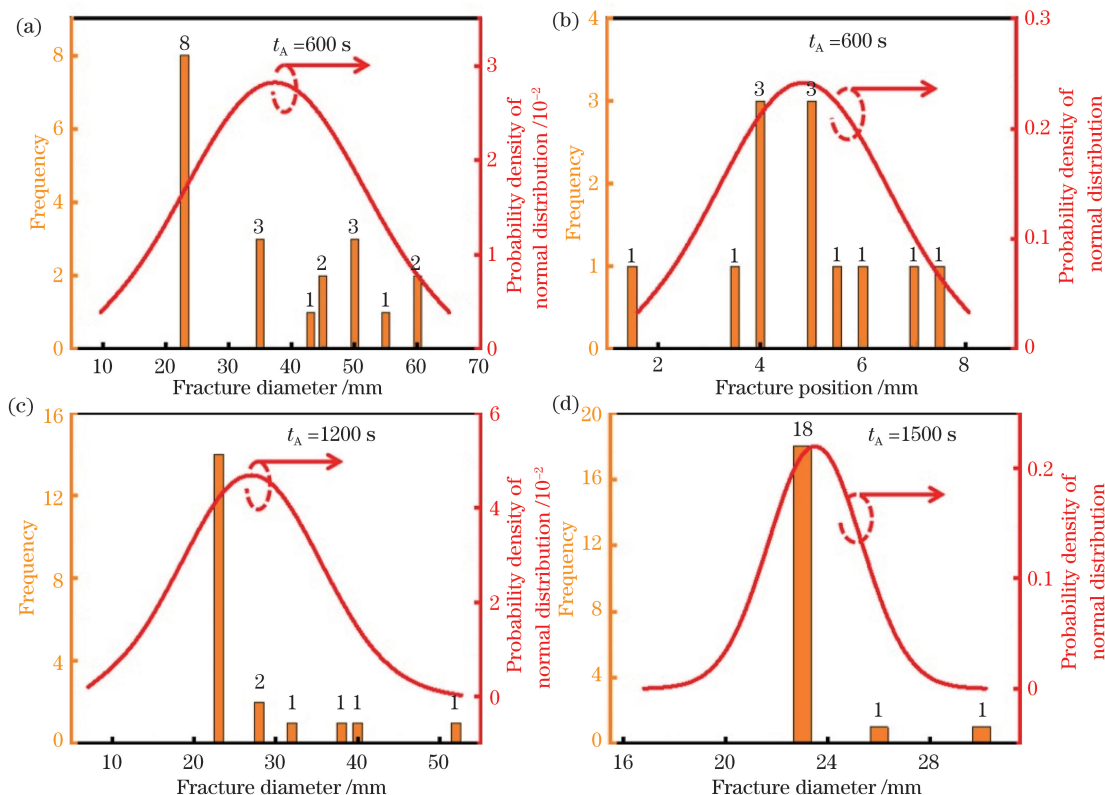


图 5 光纤降温时间变化时光纤的弯曲性试验结果。(a)降温时间为 600 s 时,光纤断裂弯曲直径分布;(b) 降温时间为 600 s 时,光纤断点位置分布;(c)降温时间为 1200 s 时,光纤断裂弯曲直径分布;(d) 降温时间为 1500 s 时,光纤断裂弯曲直径分布

Fig. 5 Results of the bending test when the cooling time is 600, 1200, 1500 s. (a) Distribution of the bending diameter when the fiber is fractured with the cooling time of 600 s; (b) distribution of the distance between the fiber fracture point and the flame center with the cooling time of 600 s; (c) distribution of the bending diameter when the fiber is fractured with the cooling time of 1200 s; (d) distribution of the bending diameter when the fiber is fractured with the cooling time of 1500 s

4 结 论

通过理论分析和实验验证表明,当光纤熔融拉锥完成后,增加光纤被加热区域的降温时间可以有效地增强光纤的抗拉强度。该结果有望应用于基于光纤熔融拉锥的光纤耦合器和合束器制作,对于提高器件抗拉强度有积极意义。

参 考 文 献

[1] Jdrzejewski K. Biconical fused taper: a universal fiber devices technology[J]. Opto-electronics Review, 2000, 8(2): 153-159.
 [2] Shuai C J, Duan J, Wang J, et al. Viscoelastic modeling and analysis of optical fibre coupler in process of fused biconical taper[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006,

37(1): 79-83.

帅词俊, 段吉安, 王炯, 等. 光纤耦合器熔融拉锥粘弹性建模与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(1): 79-83.

[3] Huang J B, Liu X S, Zhang Y, et al. Optical trapping and orientation of Escherichia coli cells using two tapered fiber probes[J]. Photonics Research, 2015, 3(6): 308.
 [4] Li Y C, Liu X S, Li B J. Single-cell biomagnifier for optical nanoscopes and nanotweezers[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 61.
 [5] Kawasaki B S, Hill K O, Lamont R G. Biconical-taper single-mode fiber coupler[J]. Optics Letters, 1981, 6(7): 327-328.
 [6] Li A, Ye J, Chen X, et al. Fabrication of a low-loss fused fiber spatial-mode coupler for few-mode transmission[J]. IEEE Photonics Technology Letters,

- 2013, 25(20): 1985-1988.
- [7] Yu Y, Bian Q, Zhang X L, et al. All-optical intensity modulation characteristics of optical microfiber coupler based on light induced thermal effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0606003.
于洋, 卞强, 张学亮, 等. 微纳光纤耦合器光致热引起的全光强度调控特性[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0606003.
- [8] Zhou X F, Chen Z L, Wang Z F, et al. High power incoherent beam combining of fiber lasers based on a 7×1 all-fiber signal combiner[J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 056103.
- [9] Choi I S, Park J, Jeong H, et al. Fabrication of 4×1 signal combiner for high-power lasers using hydrofluoric acid[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30667-30677.
- [10] Fu X H, Xie H Y, Yang C Q, et al. High-sensitivity refractive index sensors based on fused tapered photonic crystal fiber [J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(3): 166-168.
- [11] Guo Z, Chu F H, Fan J Y, et al. Study of macro-bending biconical tapered plastic optical fiber for relative humidity sensing [J]. Sensor Review, 2019, 39(3): 352-357.
- [12] Wu Y J, Ye H Q, Han J, et al. Analysis and improvement of photonic crystal fiber tapers for spectral broadening degradation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106006.
吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 拉锥光子晶体光纤光谱展宽性能退化的分析与改进[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106006.
- [13] Zhang L, He Z W, Song J, et al. Influence of annealing process on the properties of optical fiber[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(1): 47-50.
张良, 贺作为, 宋君, 等. 退火工艺对光纤性能的影响[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(1): 47-50.
- [14] Xiang X, Zheng W G, Yuan X D, et al. Effects of annealing parameters on transmission wavefront and damage threshold of fused silica [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2396-2400.
向霞, 郑万国, 袁晓东, 等. 退火参数对熔石英透射波前和损伤阈值的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2396-2400.
- [15] Mohanna Y, Saugrain J M, Rousseau J C, et al. Relaxation of internal stresses in optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(12): 1799-1802.
- [16] Zhang C C, Liao W, Zhang L J, et al. Investigation of control of residual stress induced by CO_2 laser-based damage mitigation of fused silica optics[J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 1-5.