

大口径超柔韧空芯光纤的制作和特性研究

张 峘 郜诗佳 于 晶 朱晓松 石艺尉

复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 采用聚碳酸酯管材拉丝制作了空芯光纤的基管,基管内面的光滑特性有效降低了损耗。采用聚碳酸酯基管制作的大口径空芯光纤便于与光源的高效耦合。光纤柔韧性好即使被折断也不会产生玻璃碎片,具有很高的安全系数。搭建开发了完整的拉丝和控制系统,优化了系统部件和制作参数,成功控制尺寸可控的大口径超柔韧空芯光纤基管。试制了均匀型空芯光纤和渐变型空芯光纤。初步实验证明均匀型空芯光纤在直线与弯曲时对传输光线的发散角并无影响;而渐变型光纤对输出光斑具有整形作用,即大端入射光束发散,小端入射光束汇聚。

关键词 材料;光学器件;空芯光纤;聚碳酸酯;大口径;柔韧;发散角

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081603

Fabrication and Characterization of Flexible Large-Bore Hollow Fiber

Zhang Huan Gao Shijia Yu Jing Zhu Xiaosong Shi Yiwei

Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract A polycarbonate base tube is fabricated by using glass-draw technique. The base tube is of smooth inner surface, which guarantees low-loss properties for the hollow fiber. The big-bore polycarbonate hollow fiber is flexible and provide convenient and efficient coupling with various light sources. The fiber is of high safety because no debris comes out even when it is broken. A glass-draw tower and a corresponding control system are developed. Components and the fabrication parameters are optimized. Big-bore and flexible polycarbonate silver-coated hollow fiber is fabricated. Both uniform and gradually tapered base tubes are successfully used. Preliminary tests show that uniform hollow fiber has a constant output divergence angle. Gradually tapered hollow fiber has larger output divergence angle when laser light input from big end, and it has a smaller output divergence angle when laser light input from small end.

Key words materials; optical devices; hollow fiber; polycarbonate; large bore; flexible; divergence angle

OCIS codes 160.2290; 160.5470; 230.7370

1 引言

空芯光纤作为一种中远红外光纤,适用于波长大于 $2\ \mu\text{m}$ 的大能量和超短脉冲激光传输,是应对传统石英光纤在该波段损耗大的一种解决方案。其具有传输波长适用范围宽,无端面反射损耗等优点。空芯光纤在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ 的波长范围内实现了对Er:YAG、CO和CO₂等工业和医疗常用激光的低损耗传输特性,经过优化可以进一步实现多波长的低损耗传输^[1-2],使它在红外激光广泛应用的医学领域及机械加工等方面有十分优秀的表现。

空芯光纤在内部镀膜前,并不具有十分良好的传输特性,此时的光纤主体称为光纤的基管,文中的基管即是指拉丝后镀膜前的光纤。目前绝大部分特性指标较好的空芯光纤均采用玻璃毛细管作为基管。玻璃基管有非常光滑的内表面,容易形成高质量的金属和介质光学薄膜,传输损耗较低。这种光纤经过优化后作为光学吸收腔用在传感检测系统中时,能够通过光谱吸收法对化学气体液体检测,具有灵敏度高、气体针

收稿日期: 2015-03-08; 收到修改稿日期: 2015-03-31; 网络出版日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61201062)

作者简介: 张 峘(1990—),男,硕士研究生,主要从事大口径柔韧材料空芯光纤方面的研究。

E-mail: 12210720092@fudan.edu.cn

导师简介: 石艺尉(1963—),男,博士生导师,教授,主要从事光传输传感的研究。

E-mail: ywshi@fudan.edu.cn(通信联系人)

对性强、响应速度快和无损检测等特点^[3-7]。同时,在太赫兹波的传输领域,介质/金属空芯光纤作为传输波导在太赫兹辐射应用方面起着重要的作用,已有研究表明内径2 mm、长度90 cm镀有聚苯乙烯和银膜的(PS/Ag)空芯光纤的损耗为0.95 dB/m^[8]。但在以上的研究应用及在工业和医疗现场使用时,由于操作原因导致光纤弯曲过度等情况时,可能会造成光纤破损有玻璃碎片溅出,污染破坏设备造成较严重的伤害。目前已有利用柔性空芯光纤在红外传能^[9]及基于医学临床应用为目标的研制研究^[10],其结果为空芯光纤的研究提供了理论与实践上的支持。为了能够在实验室环境下制作并优化柔性空芯光纤,做了一定尝试。使用的聚合物为聚碳酸酯作为基管材料,具有优越的柔韧性、安全性等特点,是代替玻璃基管的有力候选材料之一^[11-13]。作为未来空芯光纤领域的另一种可能选择,聚碳酸酯拉制工艺中所需的温度低,较为容易实现并且可控性较高,易于在实验室条件下制作。为进一步探究光传输传感领域有着十分重要的研究价值。在实验室搭建了拉丝系统并开发相应的控制软件,研究了拉制聚碳酸酯基管的工艺参数,并在基管中镀金属银光学薄膜,测量了镀银空芯光纤的损耗特性。实验拉制了均匀和渐变型两类基管,对均匀和渐变型镀银空芯光纤的光学特性进行了测量。初步实验验证了均匀和渐变型镀银空芯光纤的光束整形作用。

2 柔性材料空芯光纤基管的制作

2.1 拉丝原理分析

大口径超柔韧空芯光纤的拉丝制作原理可以部分类比传统通信光纤预制棒拉丝原理,其中采用聚碳酸酯管作为初始材料。拉丝系统采用拉丝塔上端送料将聚碳酸酯管送入加热炉中受热熔融,下端拉丝牵引的方法进行制作^[14]。拉丝实验的基本原理为上端送料与下端拉丝在单位时间内下降的体积相等,如(1)式所示。

$$\pi(R_1^2 - R_2^2)V = \pi(r_1^2 - r_2^2)v, \quad (1)$$

式中 R_1 和 R_2 分别是聚碳酸酯管的外径和内径, V 是送料速率, r_1 和 r_2 分别是空芯光纤的外径和内径, v 是拉丝速率。

假设在整个拉丝过程中聚碳酸酯管与空芯光纤的内外径比始终相等,即满足(2)式。

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2)$$

由(1)和(2)式可知,速率之比与外径之比的平方成反比,如(3)式所示。

$$\frac{R_1^2}{r_1^2} = \frac{v}{V}. \quad (3)$$

在聚碳酸酯管尺寸已知、目标空芯光纤尺寸确定的情况下,能够计算得到送料速率与拉丝速率的比值。结合实际的材料特性和实验环境因素,设计出合理的送料速率与拉丝速率后,将具体实验参数输入控制程序面板中启动,即可拉制出粗细均匀、直径可控的空芯光纤。而改变拉丝速率的变化模式时,便能够控制光纤基管直径的变化模式,从而为拉制渐变型光纤提供理论支持。

2.2 拉丝系统搭建与优化

2.2.1 拉丝系统搭建

实验系统搭建在一个高3.5 m的合金支架上。由上到下依次为卡盘、加热炉与温控装置、测径仪、收纤轮,系统框图如图1所示。卡盘将聚碳酸酯管垂直向下夹紧,送入加热炉中受热;温控装置通过热电偶实时测量加热炉内炉温,控制加热炉加热与否,从而使加热炉内部能够稳定在实验所需正确的温度附近;测径仪能够实时反馈出通过它的光纤的外径数值,使得光纤外径的精确控制成为可能;而收纤轮控制光纤的下落速度,与步进电机控制的卡盘下降速度两者协调,从而完成空芯光纤的拉制工作。控制程序是一个基于VC6.0编程的MFC控制界面,其程序流程图如图2所示。程序启动后会初始化板卡及其他预设参数,检测设备是否正常运转。之后进入控制面板,根据输入的参数控制步进电机的运动,并能够在串口打开后实时监控测径仪发回的数据。在拉丝结束后可手动停止程序运行并将数据清零。

加热炉采用功率为600 W的铸铜加热圈,尺寸为8 cm×4.5 cm×2 cm(外径×内径×高度)。测径仪采用郑州市明锐电子科技有限公司生产的LDM-25XY型号产品,该仪器采用激光扫描法,搭载红色可视半导体激光器。其有效测量范围为0~25 mm,分辨率达到0.001 mm。步进电机采用上海联谊光纤激光器械厂生产的三轴步进电机,采用MPC08控制卡以脉冲为位移单位精确控制三轴的运动。其中送料轴竖直方向的速率

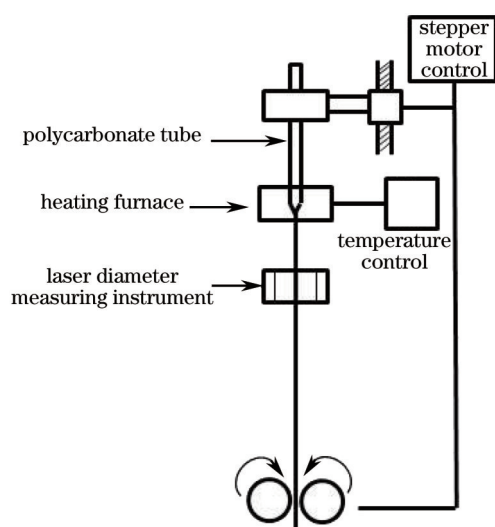


图1 拉丝系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of base tube drawing system

范围在 0.0002~0.8 mm/s。

2.2.2 拉丝系统及制作工艺优化

聚碳酸酯材料的热变形温度为 135 °C, 熔点在 220 °C 附近, 同时考虑聚碳酸酯的管材尺寸等, 加热炉的大小、功率的选取需要配合优化。最初, 实验中采用 12 cm×10 cm×15 cm 的功率为 1200 W 的陶瓷片加热炉进行实验, 如图 3 中左图所示。发现功率过大且热场体积较大, 导致拉丝温度难以稳定, 过热时聚碳酸酯管熔化过快, 光纤拉制状态不易控制。之后尝试采用 10 cm×8 cm×10 cm 的功率为 800 W 的陶瓷片加热炉进行加热实验, 结果发现 800 W 功率仍然过大。经过多次调整加热炉参数观察加热结果, 最终选择 600 W 的铸铜加热圈作为拉丝系统的加热装置, 并在加热圈上方罩一个 10 cm×3 cm×0.5 cm 的铁盖对加热炉内部热场进行均匀优化, 如图 3 右图所示。在温控装置的配合下, 工作时炉内腔温度能够较为稳定地控制在 160 °C, 从而保证拉丝系统的可控正常工作。



图3 加热炉实物图

Fig.3 Pictures for heating furnaces used in the experiment

另外, 因为聚碳酸酯的吸水特性, 在未处理状态下的聚碳酸酯管材受热将会在壁内产生大量气泡。这会导致光纤内表面极不平整且整体线性度较差, 如图 4 左图所示。因此, 在实验之前需要对聚碳酸酯管材进行干燥预处理。使用的预制棒所采用的干燥温度设定为 90~100 °C, 时间为 24~72 h。干燥处理后的聚碳酸酯管在加热过程中几乎没有气泡产生, 干燥预处理后的拉丝管材如图 4 右图所示。

相较于工业上常见的通信用石英光纤拉丝工艺中加热炉炉温高达 2150 °C, 大口径柔韧空芯光纤拉制时 160 °C 的炉温使预制棒对于炉内热场分布更加敏感。当聚碳酸酯管未能处于热场对称中心时, 会出现因为管壁受热不均导致的光纤形状不对称, 图 5 左图能够较明显观察出左右管壁拉伸程度不同。其结果将造成光纤管壁薄厚不均, 截面形状非正圆等结果。通过校准, 使聚碳酸酯管、铁盖、加热炉三者的中心处于同一竖直直线方向上, 聚碳酸酯管不同侧面的受热均匀情况出现良好的改善, 图 5 右图能够明显看出前后的优化效果。

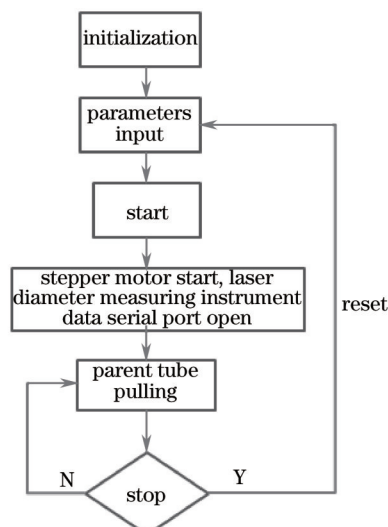


图2 控制程序流程图

Fig. 2 Flow chart for the control program

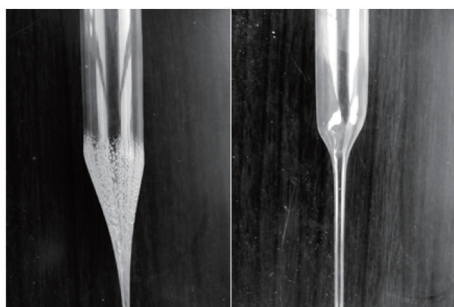


图4 工艺优化前后管壁内气泡对比图

Fig.4 Polycarbonate tubes with and without pre-curing process

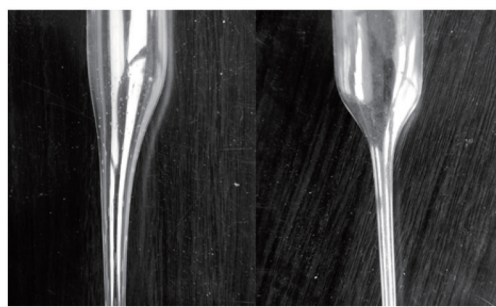


图5 聚碳酸酯管在加热炉中位置校准前后的对比图

Fig.5 Polycarbonate tubes with and without alignment in the heating furnace

实验中为使得牵引拉丝部分能够在不影响光纤形状的情况下更好的工作,对图1中牵引轮进行了二次加工。改造后,左右两轮均有一深3 mm,宽6 mm的凹槽,凹槽用海绵充满。这样在拉丝过程中对已基本冷却的基管利用海绵的摩擦力下拉而不会造成光纤的二次形变。

3 光纤基管特性分析

3.1 基管的线性度分析

在大量实验中,针对线性度较好的实验结果进行了具体的数据测量、拟合与分析。首先是均匀型光纤基管的拉制。拉丝管材采用内外径尺寸为18 mm×20 mm,壁厚2 mm的聚碳酸酯管。实验拉制目标光纤直径为2.5 mm。定送料速率为0.28 mm/s时,根据(1)、(2)式得到拉丝速率为18 mm/s。以此为参数设定依据实验拉制了一批基管并进行测量。图6(a)为拉制所得大口径空芯光纤与外径700 μm石英空芯光纤的对比图,图中上方为长度1.4 m、外径2.5 mm的大口径空芯光纤。图6(b)为此光纤镀银后的弯曲表现情况,在曲率半径为8 cm以上时能够自由弯曲,有较好的柔韧性表现。

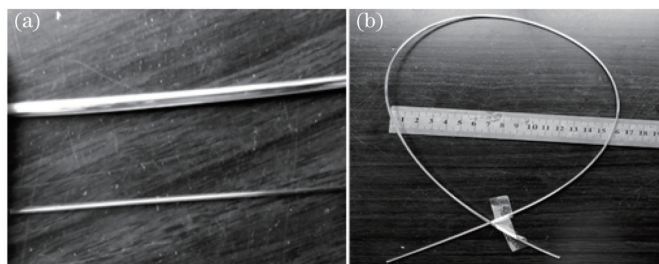


图6 均匀型光纤基管和镀银光纤实物图。(a) 2.5 mm与700 μm外径基管的对比;(b)外径2.5 mm的镀银光纤柔韧性

Fig.6 Pictures of the base tube and silver-coated hollow fiber. (a) Comparison between 2.5 mm- and 0.7 mm-bore base tubes; (b) flexibility of the 2.5 mm-bore silver-coated hollow fiber

拉丝制作的光纤在电子显微镜下通过拍照截图的方式,将数据采集至电脑中,利用标尺等比例放大在电脑屏幕上定标后,手动测量光纤外径的数据值。图7中数据采集显示了每隔3 cm测量一次的外径值,图7(a)为长度1.4 m的光纤基管,共取45个数据点进行拟合。得到外径均值为2.5068 mm,计算得标准差为0.0551,相对误差为0.92%。图7(b)为长度为2 m的基管的外径测量图,共65个数据点进行拟合。得到外径均值为2.447 mm,计算得标准差为0.0664,相对误差为2.12%。从实验数据来看,基本能够可控拉制出径值均匀的基管,每段可用基管长度在2 m以内能够保证较好的质量。对比实验数据发现,拉制所得的基管线性度随着基管长度的减小而上升,在对基管线性度要求较高的场合,所截取的基管长度有限。进一步严格制作条件和环境,例如防止室内空气流动的干扰等,预计可以得到更加稳定的制作结果。

在试制均匀型光纤基管之后,尝试了渐变型光纤基管的拉制。所谓渐变型光纤,是指光纤外径随着基管长度的变化而单调递增或递减的空芯光纤。拉制时通过均匀型光纤的制作经验,在送料速率保持不变的情况下,改变拉丝速率,使拉丝速率随时间线性增加,从而形成渐变型光纤。整个实验过程中通过测径仪实时监测基管外径变化,从而能够人为控制拉制出基管的结果。

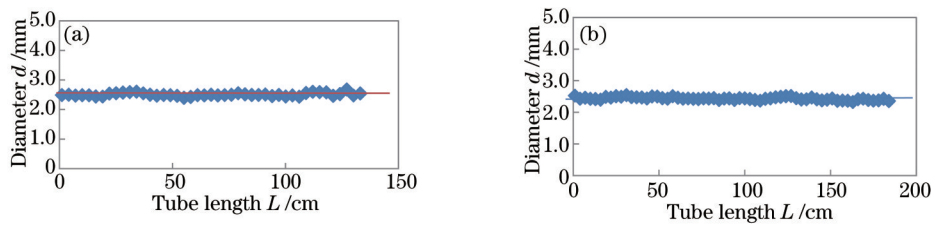


图7 均匀型光纤基管外径实测值。(a) 基管长度 1.4 m; (b) 基管长度 2.0 m

Fig.7 Measured diameter for the base tube along the fiber. (a) Fiber length is 1.4 m; (b) fiber length is 2.0 m

图8为实际制作的渐变型光纤的外径随长度的曲线图,外径由 3.62 mm 减小至 0.73 mm 的光纤。由图中曲线变化可以看出,外径的变化趋势基本呈现出单调递减,但均匀度不足直接表现为拉制的基管在某几处会出现“外径突变”的情形。另外,对比发现在同样长度的光纤上,渐变范围较小的渐变趋势也较为平缓,更少出现“外径突变”现象。

分析推论可知,在同样长度上若要求变化的径值范围越大,单位时间内拉丝速率的变化越大。在实际拉丝的过程中,操控的时间越短,难度越大,也越不精细。同时由于变速拉丝导致的机械抖动影响拉丝的稳定性,从而不易产生理想的拉丝结果。后续实验中将会通过大量实验数据优化并细分不同情况下的拉丝参数,保证加热炉温、送料速率与拉丝速率三者达到最优的配合。同时将改进拉丝塔控制程序,通过程序实时微调拉丝参数达到去抖动的效果。进一步净化拉丝环境,减少气流对拉丝塔底部光纤的干扰,从而得到径值变化更加稳定的渐变型光纤。后续的实验中截取了光纤均匀性较好的部分进行了特性测量实验。

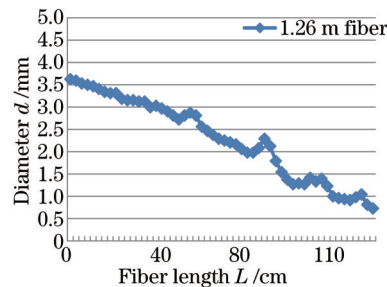


图8 渐变型光纤外径分布实测结果

Fig.8 Measure douter diameter along the gradually tapered hollow fiber

3.2 镀银基管的光学特性分析

在拉制光纤基管的内壁镀银^[15-16]后,在可见光范围内实验测量了均匀型光纤与渐变型光纤对传输光的作用效果。实验采用输出波长为 532 nm 的绿光半导体激光器作为光源,测试系统如图9所示。

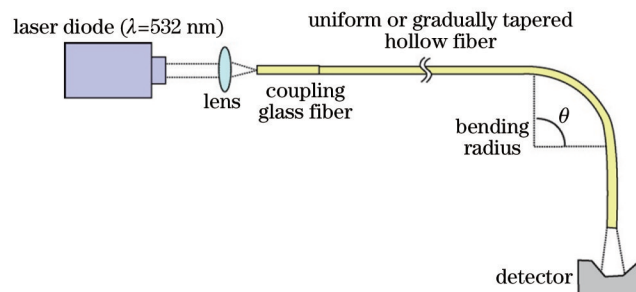


图9 均匀与渐变波导传输特性测试系统

Fig.9 Measuring system for the uniform and gradually tapered hollow fiber

测量结果显示,对均匀型光纤(外径 2 mm),在光纤未弯曲及弯曲 90°时分别测量出射光的发散角,发现发散角并无明显变化。对渐变型光纤的实验测量,根据图8截取了光纤大口径端 60 cm 长度线性变化较好的部分。测量在不同弯曲角度情况下,光纤大端入射与小端入射所得出射光发散角的变化情况,如图10所示。可以看出实验结果与理论计算基本相符^[17-18],即小端入射时光纤对光有会聚作用,且随着弯曲角度的变大,光路变长,发散角逐渐变小,会聚作用越来越明显;大端入射时光纤对光有发散作用,且发散角随着弯曲角度的变大而变大。

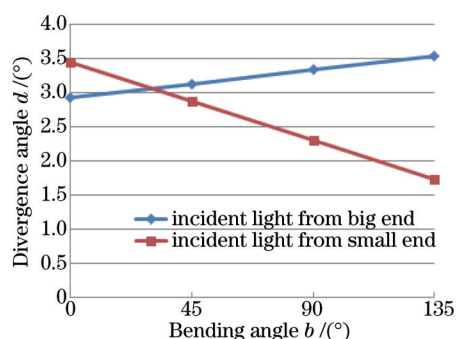


图10 输出光发散角随光纤弯曲角度变化

Fig.10 Measured divergence angle for the output beam versus bending angle

4 结 论

搭建了完整的拉丝塔系统,改进加热炉、牵引轮等部件,改善了管材预处理等制作工艺参数。开发了相应的软件控制程序,成功拉制大口径超柔韧空芯光纤的基管。采用拉制的聚碳酸酯基管,制作了内面镀银的空芯光纤。外径为2.5 mm的均匀型光纤线性度良好,采用发光波长532 nm半导体激光器的实测结果显示,均匀型空芯光纤在未弯曲与弯曲时出射光发散角度无变化。对于渐变型空芯光纤,实验拉丝并制作了外径由3.62 mm变化至0.73 mm的镀银空芯光纤。选择外径线性渐变均匀的部分实际测量,实验验证光纤弯曲角度与光束发散角的关系。得到随着弯曲角度变大,小端入射发散角变小,光束会聚;大端入射发散角变大,光束发散的结论。

参 考 文 献

- Hongo A, Morosawa K, Matsumoto K, *et al.*. Transmission of kilowatt-class CO₂ laser light through dielectric-coated metallic hollow waveguides for material processing[J]. Appl Opt, 1992, 31(24): 5114-5120.
- Sui Kerong, Zhu Xiaosong, Tang Xiaoli, *et al.*. Study on material dispersion of dielectric layer in hollow fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2062-2066.
隋可融, 朱晓松, 汤晓黎, 等. 空芯光纤中介质层材料色散的研究[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2062-2066.
- Beiza M, Dress P, Sukhtskiy A, *et al.*. Linearity and effective optical path length of liquid waveguide capillary cells[C]. SPIE, 1999, 3856: 271-281.
- Young C, Kim S S, Luzinova Y, *et al.*. External cavity widely tunable quantum cascade laser based hollow waveguide gas sensors for multianalyte detection[J]. Sensors and Actuators B, 2009, 140(1): 24-28.
- Charlton C, Temelkuran B, Dellemann G, *et al.*. Midinfrared sensors meet nanotechnology: Trace gas sensing with quantum cascade lasers inside photonic band-gap hollow waveguides[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(19): 194102.
- Shi Yiwei, Zhou Zhiyun, Tang Xiaoli, *et al.*. Design and fabrication of infrared hollow fibers for spectroscopic gas sensing[J]. Infrared Millim, Waves, 2009, 28(2): 111-114.
石艺尉, 周志云, 汤晓黎, 等. 吸收式气敏传感空心光纤的设计和制备[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 111-114.
- Zhou Jiaqi, Lu Weijia, Sun Bangshan, *et al.*. Optimization of hollow fiber as absorption cell for gas sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222008.
周佳琦, 陆维佳, 孙帮山, 等. 空芯光纤气体传感气室的优化设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222008.
- Tang Xiaoli, Shi Yiwei. Characterization of terahertz hollow fiber with an absorptive inner-coating dielectric layer[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2681-2685.
汤晓黎, 石艺尉. 吸收介质膜/金属空芯光纤的太赫兹传输特性[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2681-2685.
- Shi Yiwei, Zhu Xiaosong, Yuji Matsuura, *et al.*. Flexible bundled hollow fiber used in the transmission of thermal infrared image[J]. Infrared Millim, Waves, 2008, 27(1): 12-15.
石艺尉, 朱晓松, 松浦祐司, 等. 用于红外图像传输的柔性空芯光纤束[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(1): 12-15.
- Zhu Xiaosong, Zhou Zhiyun, Shi Yiwei. Flexible infrared hollow fiber used in endoscopic laser light delivery[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2123-2127.
朱晓松, 周志云, 石艺尉. 内窥镜的红外激光传输用柔性空芯光纤的研制[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2123-2127.

- 11 Alaluf M, Dror J, Dahan R, *et al.*. Plastic hollow fibers as a selective infrared radiation transmitting medium[J]. *J Appl Phys*, 1992, 72(9): 3878–3883.
- 12 Wei Zhonghan, Sheng Xiaoxia, Liu Binghong, *et al.*. Spectroscopic sensing system for colored solution concentration based on metallic hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706001.
魏中晗, 盛小夏, 刘炳红, 等. 基于金属膜空芯光纤的有色溶液浓度传感系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706001.
- 13 Nakazawa M, Shi Y W, Matsuura Y, *et al.*. Hollow polycarbonate fiber for Er: YAG laser light delivery[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(10): 1373–1375.
- 14 Matsuura Y, Ryosuke K, Takashi K, *et al.*. Hollow infrared fibers fabricated by glass-drawing technique[J]. *Opt Express*, 2002, 10(12): 488–492.
- 15 Lou Jingyi, Tong Limin. Study on hollow waveguides of polystyrene coated silver-glass for transmission of infrared laser energy[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2001, 20(3): 2329–232.
楼静漪, 童利民. 红外激光传输用聚苯乙烯-银-玻璃基体空心波导研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(3): 229–232.
- 16 Zeng Xuan, Liu Binghong, He Yujing, *et al.*. Fabrication of low-loss AgI/Ag hollow fibers for laser light delivery in the near infrared region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0306001.
曾旋, 刘炳红, 何宇婧, 等. 近红外低损耗AgI/Ag空芯光纤的制作[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0306001.
- 17 Gibson D J, Harrington J A. Gradually tapered hollow glass waveguides for the transmission of CO₂ laser radiation[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(11): 2231–2235.
- 18 Bledt C M, Melzer J E, Harrington J A. Theoretical and experimental investigation of infrared properties of tapered silver/silver halide-coated hollow waveguides[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(16): 3703–3712.

栏目编辑: 张浩佳