

大数值孔径传像光纤的制备及其光学性能研究

周德春¹ 于凤霞¹ 谭芳² 刘景和¹ 崔媛¹

(¹长春理工大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)
(²长春大学理学院, 吉林 长春 130022)

摘要 引入 La_2O_3 等阳离子半径大的材料作纤芯, 用低折射率材料作包层, 开展了物化性能相匹配的高光学质量纤芯和包层玻璃的制备。采用棒管法拉丝工艺开展了光纤传像束单丝的拉制实验, 并对所拉制的双包层光纤进行了测试。实验得到了单根光纤直径为 $30\ \mu\text{m}$, 透过率为 $48\%/m$, 芯包同心度误差 0.01% , 数值孔径为 0.82 的传像光纤。实验结果表明, 该材料的光接收角达到了 110° , 光纤的集光能力显著提升。

关键词 光纤光学; 传像光纤材料; La_2O_3 ; 数值孔径; 透过率

中图分类号 TN253

OCIS 060.2310 060.2290 060.2280

文献标识码 A

Preparation and Optical Performance of Large Numerical Aperture Image Transfer Fiber

Zhou Dechun¹ Yu Fengxia¹ Tan Fang² Liu jinghe¹ Cui Yuan¹

(¹School of Materials Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
(²College of Science, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract High quality core and clad glass with good physicochemical matching properties is prepared, La_2O_3 as core glass for its large cationic diameter and low refractive index material as clad glass. Rod-tube draw technique is adopted to prepare image transfer single fiber which, a kind of double clad fiber, is tested afterwards. This experiment gains image transfer fiber material, whose single fiber diameter is $30\ \mu\text{m}$, transmittance is $48\%/m$, core-clad concentricity error is 0.01% , and numerical aperture is 0.82 . These results indicate optical acceptance angle of this fiber material reaching 110° . Optical collection ability is greatly improved.

Key words fiber optics; image transfer fiber material; La_2O_3 ; numerical aperture; transmittance

1 引言

在描述光纤的耦合、连接损耗以及弯曲特性时, 要重点考虑数值孔径的大小, 当光纤的数值孔径(NA)较小时, 光纤对弯曲较为敏感, 不利于光纤的连接封装和操作^[1]。利用大数值孔径光纤集光性能好、接续性高的特点, 可用于激光的耦合与传输、微光检测、医疗等领域^[2,3]。用大芯径大数值孔径光纤制做的小型化传感器探头, 能有效收集微弱的信号光, 已被广泛用于光纤液位传感器和光纤温度传感器, 在工业自动化检测设备中具有广阔的应用前景^[4,5]。

据报道, 国外多组分玻璃光纤的 NA 已经达到 0.866 , 光的接受角为 120° ; 而国内玻璃光纤的 NA 最大做到 0.67 , 光的接受角为 84° ^[6]。国内多组分玻璃光纤的 NA 已不能满足成像仪器视觉观察范围的特殊需要。本文在材料设计和热力学分析的基础上, 开展了光学性能的研究, 同时对材料的主要性能指标进行了检

收稿日期: 2010-06-05; 收到修改稿日期: 2010-07-15

基金项目: 吉林省科技厅基金项目(20020321)和吉林省教育厅重点项目(129519)资助课题。

作者简介: 周德春(1964—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事光纤材料与器件等方面的研究。

E-mail: zhoudchun0912@cust.edu.cn

导师简介: 于凤霞(1950—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤材料与器件等方面的研究。

E-mail: fengxiayu2003@yahoo.com.cn

测和评价。

2 实 验

纤芯玻璃采用 $\text{SiO}_2\text{-BaO-La}_2\text{O}_3$ 系统,包层玻璃采用 $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-RO}$ 系统,其组成范围见表 1。按照表 1 的原料配方,配制出混合料,在硅碳棒电炉内熔融。纤芯玻璃的熔制温度在 $1450\text{ }^\circ\text{C}$,熔化 4 h,降低炉温至 $980\text{ }^\circ\text{C}$,将玻璃液浇注在钢模中成型退火再冷却到室温,样品经切割、抛光后,加工成尺寸为 $\Phi 20\text{ mm}\times 280\text{ mm}$ 的纤芯预制棒备用;而包层玻璃的熔制温度控制在 $1520\text{ }^\circ\text{C}$,熔化 2 h,逐渐降低炉温至 $950\text{ }^\circ\text{C}$,用人工拉制成 $\Phi 27\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 包层玻璃管备用。将纤芯棒、包层管组成棒管组合体,采用棒管单丝拉制的方法,拉制出单丝直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的双包层传像光纤束,棒管拉丝工艺如图 1 所示。

表 1 纤芯、包层玻璃的原料配方(单位:质量分数,%)

Table 1 Raw material formulas of core and clad glasses (unit: mass fraction, %)

Components	SiO_2	B_2O_3	ZnO	Al_2O_3	R_2O	BaO	PbO	La_2O_3
Core glass	10~15	8~12	2~5	3~5	1~3	35~38	5~8	18~23
Clad glass	60~67	12~16	2~3	3~6	15~20	—	—	—

根据图 1 所示,丝径的控制遵守质量守恒定律,即送入炉内棒管组合体的体积和拉出的光纤单丝体积相等这一原理,得到

$$V_2 = V_1(\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3)/d, \quad (1)$$

式中 Φ_1 为包层玻璃管的外径, Φ_2 为包层玻璃管的内径, Φ_3 为纤芯预制棒的直径; d 为光纤单丝的直径, V_1 为组合体的进炉速度(拉丝机的送料速度), V_2 为拉丝机的拉丝速度。在拉丝过程中,通过控制送棒速度和收丝筒的收卷速度,使其达到所要求的丝径范围^[7]。根据(1)式,选取 V_1 和 V_2 (拉丝速度比)为 $8\sim 10$,就可拉制直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤单丝。

掺镧纤芯玻璃、包层玻璃的特征温度采用型号为 CRY-2 差热分析仪测量,测量范围 $50\sim 1200\text{ }^\circ\text{C}$ 、升温速率 $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$;纤芯和包层玻璃的热膨胀系数采用 DIL402 型膨胀仪测量,升温速率 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$;通过 V 棱镜折射仪测量玻璃的折射率;采用日本产 SP13800N 型扫描探针显微镜观察并分析双包层光纤的界面扩散、断丝、芯包同心度等;此外,还采用光纤透过率仪、数值孔径测试仪等进行光学性能的测试。以上所有的测量,如果没有特别说明均在室温下进行。

3 结果分析与讨论

3.1 材料的设计与分析

提高传像光纤 NA 的有效途径是在纤芯层掺入高折射率材料,在包层掺入降低折射率的材料,以提高芯、包层间的折射率差^[8,9]。所以,在确定纤芯玻璃的基本组成时,要引入高价大半径离子氧化物。由于镧元素的特征氧化价态是 +3 价,离子半径为 106.1 pm ,其电离能不是很大,成键时释放出来的能量足以弥补原子在电离时能量的消耗,可见 La^{3+} 的氧化态是稳定的,使用 La_2O_3 充填网络空间会使玻璃结构趋于紧密,有利于提高玻璃的折射率及化学稳定性。因此,在材料样品中引入质量分数 $18\%\sim 23\%$ 的 La_2O_3 以提高纤芯层玻璃的折射率。

3.2 差热分析

玻璃的热力学稳定性 ΔT 通常用玻璃的析晶开始温度 T_x 和转变温度 T_g 之间的差值大小来衡量,即

$$\Delta T = T_x - T_g. \quad (2)$$

从(2)式可知, ΔT 越大,玻璃的热稳定性就越好; ΔT 越小,玻璃的热稳定性就越差。一般情况下,当 $\Delta T > 100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,玻璃的热稳定性较好^[10,11]。为了研究 La_2O_3 掺杂对玻璃的热稳定性影响,测试了纤芯、包层玻璃

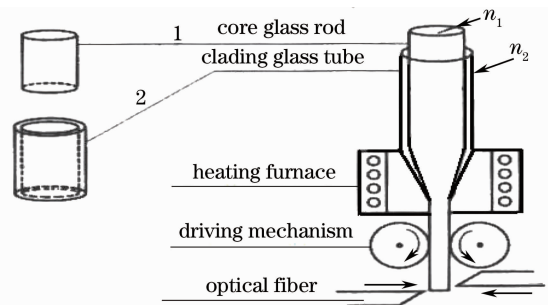


图 1 棒管法拉丝工艺示意图

Fig. 1 Sketch map of rod-tube method drawing technique

的差热曲线,如图 2 所示。纤芯和包层玻璃的转变温度 T_g 分别为 612 °C 和 598 °C,软化温度 T_f 分别为 685 °C 和 668 °C,析晶开始温度 T_x 分别为 850 °C 和 957 °C。由 (2) 式计算可知,两者 ΔT 均大于 200 °C,玻璃的热稳定性较好。此外,纤芯和包层玻璃的 T_g 相差不超过 15 °C,转变温度接近,符合光纤拉制的要求。

为防止光纤在冷却过程中由于纤芯和包层的热膨胀系数不匹配而产生应力破坏,要求纤芯玻璃的热膨胀系数比包层玻璃的热膨胀系数大十几个单位^[12],其热膨胀系数曲线如图 3 所示。纤芯和包层玻璃的热膨胀系数上升趋势一致。在拉丝温度下,纤芯玻璃的热膨胀系数为 $92 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,包层玻璃的热膨胀系数为 $83 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,两者差值为 $9 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,保证了纤芯、包层玻璃的软化点接近、拉丝温度一致,从而易于拉制成型。

3.3 光学性能分析与讨论

由于所制备的传像光纤材料是一种阶跃型折射率光纤,纤芯折射率是均匀分布的。对所制备的纤芯玻璃棒和包层玻璃管的折射率进行测试,其结果为纤芯材料折射率 $n_1 = 1.735$ 、包层材料折射率 $n_2 = 1.519$,两者的折射率相差 0.216,因此满足了光线在光纤纤芯内的传输条件,可以匹配成大数值孔径光纤。

传像光纤材料的数值孔径表示光纤的集光能力,NA 越大,光纤的集光能力就越强^[13]。其关系式为

$$NA = n_0 \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3)$$

式中 n_0 为光纤周围媒质的折射率(当光纤位于空气中时, $n_0 = 1$); α_{\max} 为光线最大入射角。由 (3) 式可知,NA 与纤芯和包层材料的折射率有关。将已测纤芯材料折射率 $n_1 = 1.735$ 、包层材料折射率 $n_2 = 1.519$ 代入 (3) 式,得到传像光纤的理论数值孔径 $NA = 0.838$ 。

实验中截取了 5 根不同长度、单丝直径为 30 μm 的光纤传像束来进行 NA、芯/包同心度、断丝或暗丝测试,其编号分别为 1#~5#,它们的测试结果如表 2 所示。由表 2 得到该组传像束数值孔径的实测平均值为 0.82,光的接收角为 110°,透过率的实测平均值 48%/m,芯/包同心度误差不足 0.01%。从理论数值孔径与实测平均值的比对分析可见,实测值比理论值低,这是因为在光纤制备过程中,存在诸如光纤入射端面不平、芯/包同心度不均匀导致双折射等因素,从而引起 NA 的下降。

表 2 传像束的 NA、芯/包同心度、断丝或暗丝测试结果($n_0 = 1$)

Table 2 Results of numerical aperture, core/clad concentricity error, broken and dark wires of image transfer bundle ($n_0 = 1$)

Code	length /m	Core/clad concentricity error /%	Numbers of broken and dark wire	Aperture angle /($^\circ$)	NA
1#	0.20	0.009	0	110.31	0.821
2#	0.50	0.011	1	109.71	0.818
3#	1.00	0.008	0	110.48	0.822
4#	2.00	0.010	0	109.92	0.819
5#	2.50	0.011	1	110.17	0.820

4 结 论

通过分析 La^{3+} 的氧化态特征,研究确定了符合棒管法拉丝工艺要求的材料配方,制备了数值孔径为 0.82、透过率为 48%/m 的高质量光纤传像束。研究发现,1) 光纤的 NA 只与光纤纤芯和包层材料的折射率

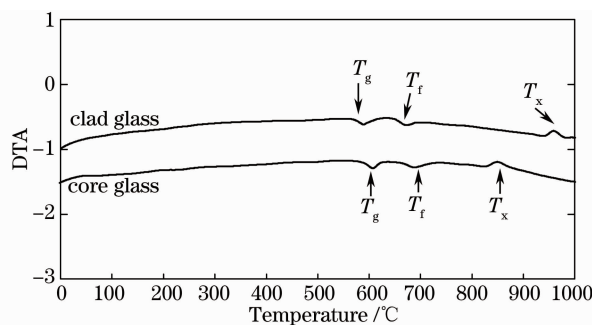


图 2 纤芯和包层玻璃的差热分析曲线

Fig. 2 Differential thermal analysis (DTA) curves of core and clad glasses

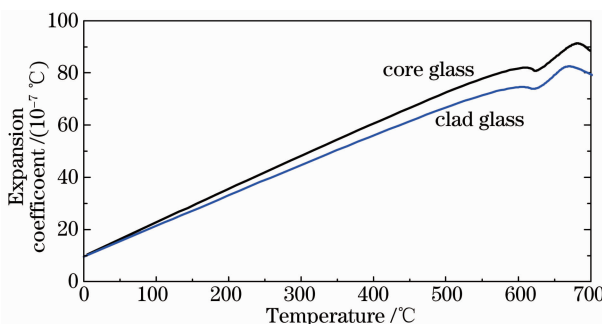


图 3 纤芯和包层玻璃的热膨胀系数

Fig. 3 Thermal expansion coefficient of core and clad glasses

有关,而与光纤的长度和束径没有关系;2)提高光纤 NA 的有效途径是在材料配方和工艺参数的选择上,即提高纤芯材料的折射率、降低包层材料的折射率,同时在保证顺利拉丝的前提下尽量降低拉丝温度,防止材料间的扩散导致玻璃折射率不均匀现象的发生;3)同一截面不同长度的传像光纤透过率随着长度增加呈降低趋势,且不是线性关系。

参 考 文 献

- 1 Yuan Yanyang, Gong Mali. Analysis and design of refractive-index and dopant distributions for large-mode-area fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1355~1359
袁艳阳, 巩马理. 大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1355~1359
- 2 Fan Guangzhao, Li Ruijun, Song Xinming. An innovative micro-3D measurement system with fiber image transmission[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(4): 302~307
范光照, 李瑞君, 宋欣明. 一种新型光纤传像微三维测量系统[J]. 纳米技术与精密工程, 2004, **2**(4): 302~307
- 3 Zhou Dechun, Yu Fengxia, Lu Jingjuan *et al.*. Design of Yb-doped all-fiber laser device based on optical fiber gratings resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 389~392
周德春, 于凤霞, 卢敬娟 等. 基于光纤光栅谐振腔的掺镱全光纤激光器设计[J]. 光子学报, 2010, **39**(3): 389~392
- 4 Cao Yuqing, Wang Tiejun, Yan Changkun. Preparation of large core diameter and NA multi-mode fiber of PCVD technique [C]. *Fiber & metal cable academic annual conference symposium*, 2002. 39~42
曹宇青, 王铁军, 闫长鹏. PCVD 工艺制做大芯径大 NA 值多模光纤[C]. 光缆电缆学术年会论文集, 2002. 39~42
- 5 Huang Huijie, Zhai Junhui *et al.*. Multi-probe fiber-optic evanescent wave biosensor and its characterization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 718~722
黄惠杰, 翟俊辉 等. 多探头光纤倏逝波生物传感器及其性能研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(6): 718~722
- 6 Yu Fengxia, Zhou Yanyan *et al.*. Research on craft of large numerical aperture multiple-composition glass flexible fiber[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2003, **33**(10): 47~49
于凤霞, 周艳艳 等. 大数值孔径多组份玻璃非相干光纤材料的研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2003, **33**(10): 47~49
- 7 Zhang Liyong, Liu Li, Chen Haibing. Fabrication and properties of G. 657 fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1471~1475
张立永, 刘 利, 陈海斌. G. 657 光纤的制备及其性能[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1471~1475
- 8 Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang. Preparation and optical performance of high resolution optical fiber image bundle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 723~726
周德春, 于凤霞, 谭 芳. 高分辨率光纤传像束的制备及其光学性能[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 723~726
- 9 Zhou Dechun, Yu Fengxia, Tan Fang *et al.*. Study and synthesis of large section soft image transfer fiber photonic material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 836~841
周德春, 于凤霞, 谭 芳 等. 大截面柔性传像光纤光子材料的研制[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 836~841
- 10 Chen Dongdan, Zhang Qinyuan *et al.*. Fabrication and characterization of amplified spontaneous emission from Er³⁺-doped single-mode tellurite fiber[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, **22**(6): 1095~1098
陈东丹, 张勤远 等. 掺铒碲基单模光纤的制备及其放大自发辐射光谱[J]. 无机材料学报, 2007, **22**(6): 1095~1098
- 11 Wang Xuejun, Xia Haiping. Study of near infrared emission property of GeO₂-Bi₂O₃-MO_x (MO_x = WO₃, BaO) glasses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2725~2730
王雪俊, 夏海平. GeO₂-Bi₂O₃-MO_x (MO_x = WO₃, BaO) 玻璃近红外超宽带发光的研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(5): 2725~2730
- 12 De Chunzhou, Feng Xiayu, Fang Tan *et al.*. Preparation and optical performance detection of acid-leaching optical fiber image bundle[C]. *SPIE-Advanced Optical Manufacturing Technologies*, 2008, **7282**(4): 72823K
- 13 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering optics*[M]. Beijing: Mechanical Industrial Publishing House, 2006. 177~179
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 177~179