

文章编号: 0258-7025(2009)03-723-04

高分辨率光纤传像束的制备及其光学性能

周德春¹ 于凤霞¹ 谭芳²

(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 从酸溶法光纤传像束所需原料的配方确定开始, 合理设计了纤芯玻璃、包层玻璃和酸溶玻璃三种材料之间物化性能的匹配性。这三种玻璃材料的物化性能将直接影响到所制备的高分辨率光纤传像束的成像质量。通过开展酸的浓度、温度、酸的种类以及酸溶时间等量化关系研究, 确定了最适合光纤传像束酸溶的一系列工艺参数, 这对于降低传像束的断丝率, 提高光纤传像束的成像质量有较大作用。通过大量的实验研究、性能测试和理论分析, 确定了多种提高传像束光学性能的有效方法, 为光纤传像束的广泛应用奠定了良好的基础。

关键词 光纤传像束; 酸溶法; 分辨率; 性能测试

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CLJ20093603.0723

Preparation and Optical Performance of High Resolution Optical Fiber Image Bundle

Zhou Dechun¹ Yu Fengxia¹ Tan Fang²

¹ School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;
² College of Science, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract This article determined three kinds of raw materials: fiber-core glass, cladding glass, acid-leaching glass and designed the match of the physical and chemical performances of these materials, which directly influence the imaging quality of bundle. The quantitative relationship between the concentration, the temperature, the type and the resolution time of acid are studied to determine a series of suitable technical parameters, which are crucial to decrease the broken rate and improve imaging quality of image bundle. Through a large number of experimental studies, performance tests and theoretic analyses, many effective methods are identified to improve the optical properties of fiber image bundle, which laid a good foundation for wider application.

Key words optical fiber image bundle; acid-leaching method; high resolution; performance test

1 引 言

在现有技术中, 光纤传像束的制作技术主要有层叠法和酸溶法两种。由于层叠法工艺复杂、成本高, 用层叠法制备的光纤传像束的单丝直径只能做到 14~15 μm , 分辨率比较低, 只能达到 38~40 lp/mm。与层叠法工艺相比, 用酸溶法制备的光纤传像束具有单丝直径细, 可达 8 μm 以下, 分辨率高, 大于 50 lp/mm, 柔软性能好, 数值孔径大等优

点^[1,2]。因此, 用酸溶法工艺制备的光纤传像束在各种高清晰度光纤医疗成像仪器、工业探测、军事、航天等领域有着广阔的应用。

2 酸溶法光纤传像束制备工艺实验

2.1 光纤传像束材料的制备及性能测试

2.1.1 材料配方的确定

制备酸溶法光纤传像束要求纤芯玻璃应具有较

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-10-18

基金项目: 吉林省教育厅重点项目(129519)资助课题。

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

E-mail: zhodechun0912@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方面的研究。

E-mail: fengxiayu2003@yahoo.com.cn

高的折射率,包层玻璃应具有较低的折射率,而酸溶层玻璃的折射率应比包层玻璃的折射率稍低,只有这样才能保证光在光纤内传播时不泄漏出去^[3]。

为满足这些要求,在确定纤芯玻璃的基本组成时,引入了质量分数达到 40% 以上的 PbO,以提高

表 1 纤芯、包层和酸溶玻璃的基本组成范围

Table 1 Composition parts of core glass, cladding glass and acid-leaching glass(mass fraction, %)

Component	SiO ₂	B ₂ O ₃	ZnO	Al ₂ O ₃	R ₂ O	BaO	PbO	Sb ₂ O ₃
core glass	18-23	10-15	—	—	11-15	—	40-45	—
cladding glass	61-65	11-15	4-7	0-5	11-15	—	—	0.5
acid-leaching glass	20-25	28-35	5-9	1-5	10-15	10-16	—	0.5

2.1.2 玻璃材料的性能测试

按照表 1 确定的玻璃配方,配制出混合料并分别制成 $\Phi 20 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 的具有一定表面光洁度的纤芯玻璃棒;内径为 $\Phi 21 \text{ mm}$ 、外径为 $\Phi 27 \text{ mm}$ 、

表 2 酸溶法光纤传像束玻璃材料性能参数

Table 2 Glass materials performance parameters of acid-leaching image bundle

Parameters	Refractive index	Expansion coefficient $\times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$	Softening temperature
Core	1.6160	97	486
Cladding	1.5160	92	536
Acid leaching	1.5216	89	524

2.1.3 玻璃材料匹配性的理论分析

为满足光纤拉丝工艺的要求,避免热应力过大而引起光纤炸裂,一般要求纤芯玻璃的热膨胀系数应比包层玻璃的热膨胀系数大十几个单位,而包层玻璃的热膨胀系数也要比酸溶玻璃的热膨胀系数高几个单位,这样才能保证光纤的机械强度和几何结构的完整^[4]。

此外,纤芯玻璃和包层玻璃还应满足其他一些要求,如拉丝温度下纤芯玻璃和包层玻璃的粘度-温度关系的匹配,纤芯玻璃和包层玻璃间的化学性质的匹配,也要确保光纤界面的完好,互不渗透等。

以上分析以及从表 2 测试结果可以看出:本实验所用的三种玻璃材料的光学性能、热学性能(软化温度、热膨胀系数等)具有较好的匹配性,满足了光纤传像束制备工艺的要求。

2.2 单丝、复丝的控制及排丝工艺实验

2.2.1 单丝拉制

单丝的拉制是制备高分辨率光纤传像束工艺中最重要的几个环节之一,在本文的实验中主要采用棒管法控制单纤维。棒管法的优点是能在较低温度下进行拉丝,单丝直径易于控制,而且可以避免纤芯

纤芯玻璃的折射率;在包层玻璃中加入 60% 以上的 SiO₂ 作为玻璃的生成体;在酸溶玻璃材料中将 B₂O₃ 和 BaO 的总量控制在 40% 以上,在确保其具有较低折射率的同时,主要是为了使其具有较快的酸溶速率。其基本组成见表 1。

长度为 300 mm 的包层玻璃管和内径为 $\Phi 28 \text{ mm}$ 、外径为 $\Phi 30 \text{ mm}$ 、长度为 300 mm 的酸溶玻璃管备用。并对这三种玻璃材料的性能参数进行了测试,其测试结果如表 2 所示。

与包层玻璃材料在高温拉制时因为相互扩散而影响光纤界面的光学特性的致命弱点,从而可以提高传像束的性能,棒管法拉制单丝的工艺如图 1 所示。

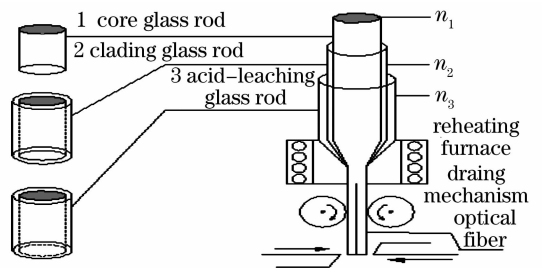


图 1 棒管法拉丝工艺示意图

Fig. 1 Sketch map of wire drawing technique

2.2.2 排丝工艺

传像束的单纤维排列主要有两种形式:即正方形排列和六角形排列。在光学绝缘良好的情况下,基于 Nyquist 理论,紧密六角形排列的传像束,其极限分辨率值比正方形排列的分辨率值提高 1.15 倍^[5,6],所以我们采用六角形排丝工艺进行排丝。将直径为 200 μm 、长度为 300 mm 的数万根单纤维,相关紧密地排列在正六方形模具内,并将两端捆扎固定好使之成为复合丝棒。

2.2.3 复丝的拉制及影响因素分析

复丝拉制与单丝拉制的不同之处是被加热的复丝棒是由数万根单丝组成的集合体,在二次加热的过程中,传像束的结构和性能可能受到很多因素影响而被破坏,其中包括拉丝温度、下料体积、拉丝速度、拉丝张力等。拉丝张力为^[7,8]

$$F = 2\eta s \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (1)$$

式中 s 为截面积, η 为粘滞系数, $\partial v_z / \partial z$ 为速度梯度。(1)式表明,在丝根部位,拉丝张力和截面积、速度梯度及粘滞系数成正比。

拉丝张力和各工艺参数之间的关系式为

$$F = 2u \ln M^2 / \int_0^L \eta^{-1} dz, \quad (2)$$

式中 u 为单位时间的下料体积, M 为拉伸比,分母的积分决定于料的热性能和拉丝炉的结构特性,在拉丝过程中是一个常数。

粘度 η 与温度 T 的关系为

$$\eta = A \exp(BT^{-2}), \quad (3)$$

表3 酸溶结果($d=1.2$ mm)

Table3 Acid resolution results ($d=1.2$ mm)

Concentration/N	Temperature/°C	Time/min	Result
0.1	25~30	195	0.1mm hard core, three dark fibers
	35~40	155	0.1 mm hard core, two dark fibers
0.5	25~30	165	0.02mm hard core
	35~40	135	two dark fibers
1.0	25~30	148	three dark fibers
	35~40	111	fourteen dark fibers

2.3.2 实验结果分析

从表3的实验结果可以看出:将硬质的光纤传像束放置在0.5 N的HCl溶液中加热到35~40 °C之间,经过135 min左右,酸溶效果比较理想;而在相同温度下,浓度太低不能完全溶掉单纤维外面的酸溶玻璃层,传像束内还有少量的硬芯存在;而浓度太高,难以掌控时间,以至于酸溶液对光纤包层玻璃产生了腐蚀作用,并出现了较多暗丝。

硬质传像束之所以能够被酸溶,是由于单纤维外面的酸溶层玻璃处于酸溶液中发生了离子交换过程,酸溶层玻璃表面层中的大半径的 Na^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} 等会与酸溶液中半径较小的 H^+ 发生交换。结果, Na^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} 进入溶液,玻璃表面上出现孔洞, H^+ 进入孔洞导致了这些孔洞的扩大,随后玻璃结构骨架被破坏,玻璃被酸溶。

其中 A 和 B 是与材料组成有关的常数。

从公式(1)可以看出,拉丝张力和体积下料速度成正比,在其他条件相同的情况下,体积下料速度越大,速度梯度就越大,拉丝张力就越大。公式(2)揭示了拉丝张力与各工艺参数的关系。这时

$$F = 2\eta \frac{-u \ln M^2}{L}, \quad (4)$$

式中 η , u , M 和 L 为决定拉丝张力的四要素。因此,在高分辨率光纤传像束复丝拉制工艺中,对张力进行控制是一项重要的工艺手段,可以通过调整 u , M , L 和 T 的数值以使工艺过程处于最佳状态。除此之外,单丝圆整,丝径均匀,内部单丝排列紧密整齐,是保证复丝拉丝质量必不可少的条件。

2.3 酸溶工艺实验与结果分析

2.3.1 酸溶工艺实验

为了寻找酸溶的规律,将直径为1.2 mm的硬质传像束放置在0.1 N,0.5 N,1.0 N的HCl溶液中进行酸溶实验,酸溶结果如表3所示。

3 光纤传像束的性能测试与分析

3.1 传像束的性能测试

选取了五根光纤传像束,对其数值孔径、透射率及分辨率进行了测试,测试结果见表4。

表4 传像束的测试结果

Table 4 The test result of image bundles

Number	Diameter	Length	NA	Transmittance/%
1#	1.590	350	0.545	53.3
2#	1.370	650	0.552	47.8
3#	1.370	1000	0.566	42.6
4#	1.600	1200	0.559	39.5
5#	1.403	1500	0.545	35.9

3.2 影响光纤传像束性能的理论分析

由数值孔径定义: $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ 可知,光纤

的数值孔径与纤芯和包层材料的折射率有关。而这组被测光纤传像束的纤芯材料折射率为 $n_1 = 1.62$, 包层材料的折射率为 $n_2 = 1.52$ 。根据公式可计算出传像束的理论数值孔径值 $NA = 0.56$, 由以上的测试结果可以计算出数值孔径的平均值 $NA_{\text{average}} = 0.553$ 。可见其理论值与实际测量值是非常接近的。

影响光纤透射率的因素很复杂,但主要是由光纤芯玻璃的吸收引起的损失,在纤芯玻璃中含有铁、钴、镍、铬、铜等过渡金属离子,它们的电子跃迁能级位于材料的能隙中。如果有入射光波长满足

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} \quad (5)$$

式中 E_2 和 E_1 是原子或电子振动能级初态和终态, h 是普朗克常数。则可能被激发,产生很强的吸收损耗^[9]。其次,如果光学纤维不是理想的光学界面,当光线从空气射入纤芯和包层的界面时,并不是全部光都进到纤芯中,而是有一部分光线会穿透包层被泄露掉,也就是由纤芯和包层界面的缺陷引起的光漏损使光纤的透射率降低。因此,在光纤材料和制作等因素不变的情况下,光纤的光透射率将随着光纤芯层直径的增大而增大,随着光纤长度的增加而减小。

光纤传像束分辨率的测试可采用平行光管和读数显微镜组成的测试系统间接测量,通过该系统测试出的数据由公式 $R_N = \frac{60}{B}KN$ 就可计算出传像束分辨率。式中 B 为图案的基线长(以 mm 为单位), N 为图案单元的编号, KN 为与图案单元编号有关的系数。经测试: $N = 29$, 查表得: $KN = 4.6$; $B = 4.8$; 则有

$$R_N = \frac{60}{8}KN = \frac{60}{4.8} \times 4.6 = 57.5 \text{ lp/mm} \quad (6)$$

传像束分辨率的大小主要决定于传像束内的单纤维尺寸及排列方式,分辨率越高被传递图像的能力就越强,图像就越清晰^[10]。因此,在传像束的制作过程中,光纤芯径的不均匀、排列错位、断丝、光纤破损等问题以及光纤之间的串光都会降低传像束的分辨率。

4 结 论

1) 设计并成功制备出物化性能匹配的纤芯玻

璃、包层玻璃和酸溶玻璃材料。

2) 利用自行研制的酸溶玻璃制备出了满足拉丝工艺要求的酸溶玻璃管,从而实现了两管一棒(棒管)法拉工艺(由于酸溶玻璃通常为钡、硼、硅系统玻璃,其料性较差,不易成型)。

3) 酸溶实验结果表明,硬质的光纤传像束放置在 0.5 N 的 HCl 溶液中加热到 35~40 °C 之间,经过 135 min,酸溶效果比较理想。

4) 采用酸溶法工艺成功制作出单丝直径小于 8 μm , 分辨率达到 57.5 Lp/mm 的高分辨率柔性光纤传像束。

参 考 文 献

- 1 Yu Fengxia, Zhou Yanyan. Study of dark wire problem of acid-leaching fiber image bundle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30** (suppl): 116~118
于凤霞, 周艳艳. 酸溶法光纤传像束暗丝问题研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(增刊): 116~118
- 2 Meng Jia, Hou Lantian *et al.*. Fabrication and study on the small-core index-guiding photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1350~1354
孟 佳, 侯蓝田 等. 小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1350~1354
- 3 Zhang Zhenyuan, Sun Lei, Li Li *et al.*. Study of Integration large array fiber image bundle experiment [J]. *Class Fiber*, 2004, **4**: 1~6
张振远, 孙 磊, 李 莉 等. 集成大陣面光纤传像束实验研究[J]. *玻璃纤维*, 2004, **4**: 1~6
- 4 Yi Xin. Statistical of fiber bundle imagery of wavelength multiplexing [J]. *SPIE*, 1994, **2302**: 244~252
- 5 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua college publishing house, 2000. 3: 1~18
廖延彪. *光纤光学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 3: 1~18
- 6 A. Komiyama, M. A. Hashimoto. New class of crosstalk in imaging fibers [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **6**(107): 49~53
- 7 Hu Xingchun. Study of fiber drawing technique strain [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1998, **26**(3): 359~364
扈性纯. 光纤拉丝工艺张力研究[J]. *硅酸盐学报*, 1998, **26**(3): 359~364
- 8 Hu Xingchun. Study of acid-leaching image bundle technology [J]. *Optical fiber*, 1998, **3**: 20~23
扈性纯. 酸溶法传像束工艺研究[J]. *光学纤维*, 1998, **3**: 20~23
- 9 Tan Zongwei, Li Bing, Wang Yanhua *et al.*. Background loss of the fiber induced by the ultraviolet light exposure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 239~242
谭中伟, 李 彬, 王艳花 等. 光纤的紫外曝光引起的背景损耗[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 239~242
- 10 Xu Mingquan, Lu Xiaojian. Detection of fiber image bundle limiting resolution [J]. *Glass Fiber*, 1999, **3**: 56~58
徐明泉, 陆小健. 光纤传像束极限分辨率的测试[J]. *玻璃纤维*, 1999, **3**: 56~58