

# 大芯径光纤温度特性研究

马洪虎<sup>1</sup> 王金忠<sup>1</sup> Alhadi Mohammed Alarabi Abakar<sup>1</sup> 杨明超<sup>1</sup> 赵霞<sup>2</sup> 刘礼华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

<sup>2</sup>江苏法尔胜光子有限公司, 江苏 江阴 214433

**摘要** 利用高低温设备实验研究大芯径光纤在 $-100\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内温度对大芯径光纤传输损耗的影响。实验结果表明,大芯径光纤在光纤传输第1窗口(850 nm波段)传输损耗系数随着温度随机波动,在整个温度区间内其传输损耗系数在 $2.543\text{ dB/km}\sim 4.237\text{ dB/km}$ 范围内波动;研究还发现,经过高低温循环实验测试后,光纤纤芯与包层处未产生顺磁性缺陷,说明在此温度范围内光纤化学键未发生断键情况。通过建立相应的应力模型解释了大芯径光纤在高低温两端传输损耗系数波动较大的原因,并提出了减少温度对大芯径光纤传输损耗影响的相应措施。

**关键词** 光纤光学;高低温循环;大芯径光纤;传输损耗系数;应力模型

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.051204

## Temperature Characteristics of Large-Core Optical Fiber

Ma Honghu<sup>1</sup> Wang Jinzhong<sup>1</sup> Alhadi Mohammed Alarabi Abakar<sup>1</sup>

Yang Mingchao<sup>1</sup> Zhao Xia<sup>2</sup> Liu Lihua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup>Jiangsu Fasten Photonics Co., Ltd., Jiangyin, Jiangsu 214433, China

**Abstract** Using the high-low temperature equipment, we study the influence of temperature on the transmission loss of the large-core optical fiber in the range of  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  by experiment. The experimental results show that the transmission loss coefficient at the first window (850 nm waveband) of the large-core optical fiber fluctuates randomly with temperature. The transmission loss coefficient in the whole temperature range is in the range of  $2.543\text{ dB/km}$  to  $4.237\text{ dB/km}$ . The results also show that, after high-low temperature cycle, the paramagnetic defects are not found in the optical fiber core and the cladding layer, therefore, the chemical bands of the fiber are not broken. In addition, the corresponding stress model is established to explain why the transmission loss coefficient fluctuates too much at the ends of high-low temperature, and the corresponding measures to reduce the effect of the temperature on transmission loss are proposed.

**Key words** fiber optics; high-low temperature cycle; large-core optical fiber; transmission loss coefficient; stress model

**OCIS codes** 120.6780; 060.2310; 310.4925

## 1 引言

伴随着工业革命的不断发展和,尤其是第三次工业革命,新材料技术得到不断突破,实现了信息与能量传输媒介由传统的电缆传导方式向光纤传导方式的跨越式发展,而新一代的传导方式也为其提供了源源不断的动力。作为新一代传输媒介的大芯径光纤,其本质是一种高度透明的玻璃丝,直径范围为 $100\sim 1000\text{ }\mu\text{m}$ ,传输的激光功率在百瓦级以上,结构与普通通信光纤一样,由纤芯和包层两部分构成。大芯径光纤相对传统

**收稿日期:** 2015-12-11; **收到修改稿日期:** 2015-12-21; **网络出版日期:** 2016-04-15

**基金项目:** 国家863计划(2013AA031502)、科技支撑计划(2015BAI01B05)

**作者简介:** 马洪虎(1989-),男,硕士研究生,主要从事特种光纤与器件方面的研究。E-mail: mahonghu2011@163.com

**导师简介:** 王金忠(1970-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高效太阳能电池材料设计、制备与性能,发光薄膜材料,特种光纤与器件等方面的研究。E-mail: jinzhong\_wang@hit.edu.cn(通信联系人)

电缆,传输信号以及高密度能量具有体积小、所需空间有限、传输损耗少、机械强度高、耐辐射、化学稳定性高、通过光纤传输后光斑能量分布均匀等优点<sup>[1]</sup>。作为一种特种光纤,大芯径光纤在军事、航天航空飞行器以及工业等领域<sup>[2]</sup>得到了广泛的应用。特殊的应用环境要求环境性能能够保持长期稳定,满足光纤正常工作(数据传输与能量传递)需求。大芯径光纤在应用期间常处于各种复杂恶劣的环境条件之下,尤其在军事和航天航空飞行器的应用领域,常处于极热与极冷相互交替的环境下,如何提高其在复杂恶劣的环境条件下的性能稳定性和服役寿命,深入研究其影响机理以及提出相应合理化解决方案是亟需解决的问题。

目前国内外针对高低温循环对光纤性能影响的研究主要集中在光纤链路延差、光纤陀螺仪、功率传输特性、折射率分布以及光纤光栅传感器等领域<sup>[3-10]</sup>,而对大芯径光纤高低温循环实验却鲜有报道。因此,作为地面模拟实验可为相关应用提供原始数据,通过建立相应的模型解释温度对大芯径光纤传输损耗的影响,并据此提出减少温度对大芯径光纤传输损耗影响的措施,进而提高大芯径光纤在相关应用中性能的稳定性的稳定性。

## 2 实验部分

### 2.1 高低温实验材料与设备

实验采用的大芯径光纤为标准商用大芯径光纤,其规格参数如表 1 所示,表中  $NA$  表示数值孔径。

表 1 大芯径光纤规格参数

Table 1 Specifications of large-core energy optical fiber

Item	Indicator
Operating wavelength /nm	800~1600
Core NA	0.22±0.02
OH level	low
Coating diameter / $\mu\text{m}$	320±10
Cladding diameter / $\mu\text{m}$	220±3
Core diameter / $\mu\text{m}$	200±4
Core/clad offset / $\mu\text{m}$	<5
Coating material	Acrylate
Working temperature / $^{\circ}\text{C}$	-55~85
Core material	Pure silica glass
Cladding material	Fluorine doped
Refractive	Step index

大芯径光纤高低温循环实验采用哈尔滨工业大学空间材料及环境国家级重点实验室模拟空间环境高低温循环实验平台,整个高低温循环测试装置如图 1 所示,主要包括光源(380~2500 nm)、高低温循环实验平台、高低温循环控制系统、光谱仪以及数据采集系统等 5 部分,图中 SMA 表示同轴连接器的一种型号。

### 2.2 高低温实验温度设置与数据采集

设置高低温循环测试温度范围为 $-100\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度循环路径为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 100\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 0\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -100\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 0\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在实验过程中通过调节高低温设备加热功率以及液氮的流量,进而控制设备温度升降速率,使其保持升降温速率均为 $0.9\text{ K/min}$ ,并且每间隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 $10\text{ min}$ ;同时为了使光纤所处温度场最大限度均匀,在实验进行前采用铝箔将光纤整体覆盖住,并在保温期间将温度控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度随时间变化如图 2 所示。对于数据的采集,本次实验采用型号为 AvaSpec-ULS2048 XL-USB 爱万提斯可见近红外光谱仪,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对数据采集一次,并以室温( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下 $2\text{ m}$ 标准光纤跳线的透射率作为参照值, $100\text{ m}$ 待测光纤光透射率作为实验数据。

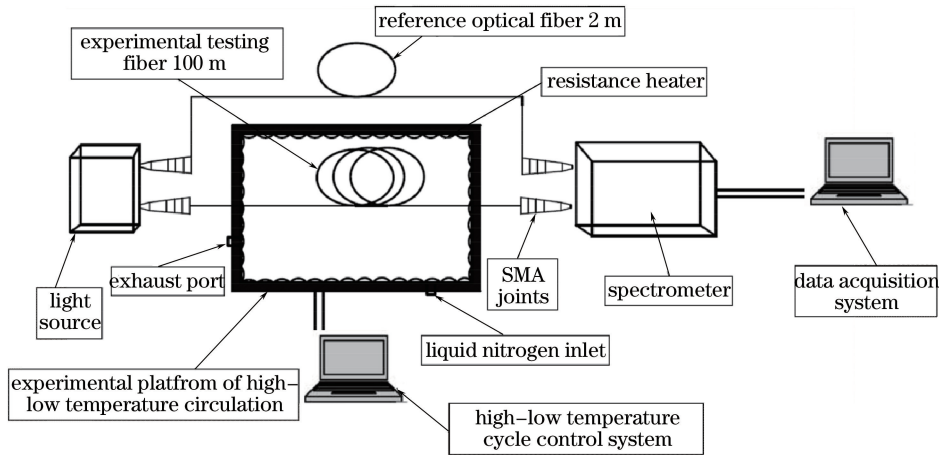


图 1 大芯径光纤高低温循环测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-low temperature cycle test of large-core energy optical fiber

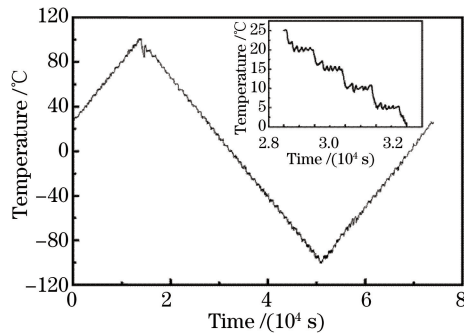


图 2 高低温循环实验温度与时间关系图

Fig. 2 Relationship between experimental temperature and time of the high-low temperature cycle

### 3 实验结果

#### 3.1 850 nm 波段传输损耗分析

将不同温度下的光纤透射率转化为在相应温度下的光纤传输损耗系数,即

$$A(\lambda) = 10 \lg \left[ \frac{P_{\text{in}}(\lambda)}{P_{\text{out}}(\lambda)} \right], \quad (1)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} = \frac{10 \lg \left[ \frac{P_{\text{in}}(\lambda)}{P_{\text{out}}(\lambda)} \right]}{L}, \quad (2)$$

式中  $P_{\text{out}}(\lambda)$  为输出功率,  $P_{\text{in}}(\lambda)$  为输入功率,  $A(\lambda)$  为衰减,  $\alpha(\lambda)$  为衰减系数。  $A(\lambda)$  与光纤长度以及入射光波长  $\lambda$  有关,  $\alpha(\lambda)$  为单位长度的衰减, 仅与入射光波长和光纤本身有关。 由于光纤透射率与功率呈正比例关系, 因此光纤衰减系数可以表示为

$$A(\lambda) = 10 \lg \left[ \frac{T_{\text{ref}}(\lambda)}{T_{\text{out}}(\lambda)} \right], \quad (3)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} = \frac{10 \lg \left[ \frac{T_{\text{ref}}(\lambda)}{T_{\text{out}}(\lambda)} \right]}{L}, \quad (4)$$

式中  $T_{\text{ref}}(\lambda)$  为参照光纤在室温 25 °C 下的透射率,  $T_{\text{out}}(\lambda)$  为待测光纤在不同测试温度下的透射率。

由图 3 可得, 大芯径光纤在 -100 ~ 100 °C 温度范围内, 传输损耗系数在 2.543 dB/km ~ 4.237 dB/km 范围内波动, 其中在 -75 ~ 60 °C 温度范围内, 大芯径光纤传输损耗系数在 2.500 dB/km ~ 3.353 dB/km 范围内波动, 传输损耗系数波动较小, 但是在高低温两端光纤传输损耗系数波动相对较大。

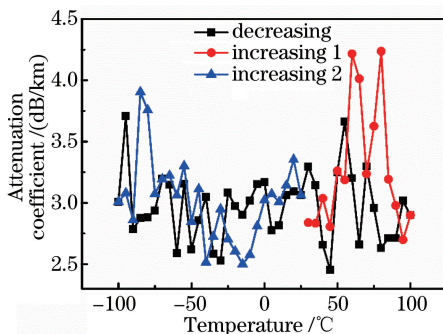


图 3 850 nm 波段传输损耗系数

Fig. 3 Transmission loss coefficient of 850 nm wavelength

### 3.2 电子顺磁共振研究

由于光纤存在顺磁性缺陷(NBOHC、Si-E'与 OHC),在弱磁场强度(0.312~0.355 T)条件下会出现明显的顺磁性共振信号现象<sup>[11-12]</sup>,针对此种效应,本次实验采用型号为 X band A200(德国)电子顺磁共振光谱仪对高低温循环之前与高低温循环之后裸光纤进行了电子顺磁共振信号采集,得到如图 4 所示电子顺磁共振(EPR)一次微分谱。由 EPR 一次微分谱分析可得,经过高低温循环之后,大芯径光纤没有出现明显的顺磁共振信号,说明经过此次高低温循环测试,大芯径光纤纤芯与包层部位极少或者不存在顺磁性缺陷,由此说明大芯径光纤在此温度范围内化学键未发生断键,也说明大芯径光纤制备过程中产生的顺磁性缺陷极少或者不存在。

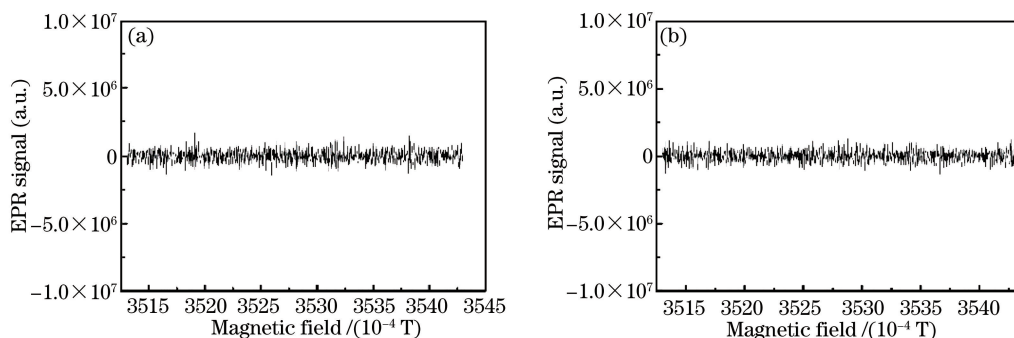


图 4 大芯径光纤高低温循环 EPR 一次微分谱。(a) 高低温循环之前;(b) 高低温循环之后

Fig. 4 EPR differential spectra of large-core optical fiber of high-low temperature cycle.

(a) Before high-low temperature cycle; (b) after high-low temperature cycle

## 4 分析与讨论

由于实验光纤弯曲半径为 15 cm,远远大于 G.651.1 多模光纤宏观弯曲半径 15 mm,因此其宏观弯曲损耗可以忽略不计。然而丙烯酸树脂作为光纤涂覆层存在热胀冷缩的特性:高温伸长、低温收缩,其线膨胀系数约为  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ m}/^\circ\text{C}$ ,而大芯径光纤纤芯线膨胀系数约为  $10^{-7} \text{ m}/^\circ\text{C}$ ,两者线膨胀系数相差 3~4 个数量级,因此温度对二者伸缩影响不同,高温时,涂覆层较光纤长,使光纤产生拉应力;低温时,涂覆层较光纤短,使光纤产生压应力,产生如图 5 所示的应力分布。当光纤受到的应力达到一定的程度(弯曲半径与光纤纤芯直径在同一量级)时,光信号在光纤中的传导模式发生改变,由传导模转变为辐射模进入包层,造成微弯曲损

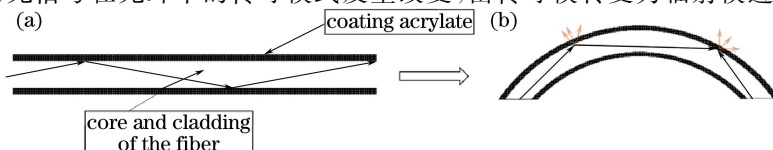


图 5 大芯径光纤所受应力示意图

Fig. 5 Stress schematic of large-core optical fiber

耗,进而产生光纤附加传输损耗。

针对大芯径光纤传输损耗系数在高低温两端(DSC)波动较大和在 $-75\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动较小的现象,本次实验采用差示扫描量热仪(DSC)对光纤涂覆层进行玻璃化转变温度分析,其中设置升温速率为 $10\text{ K/min}$ ,初始温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测试结果如图6所示,可得外推起始温度为 $39.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,中点温度为 $65.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,外推终止温度为 $91\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此得到涂覆层的玻璃化转变温度为 $65.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于当温度高于高分子玻璃化转变温度时,高分子形变量会发生明显变化,产生较大的应力,进而产生较大的微弯曲损耗。在进一步的升温过程中,伴随着涂覆层与纤芯的应力的释放,降低了其弯曲损耗,由此造成了在高温端传输损耗系数较大、同时其波动较大的情况;在低温端由于涂覆层收缩率较大,同时伴随着应力的不断释放,也造成了在低温端传输损耗系数较大、同时其波动较大的情况。但是由于在低温端不存在玻璃化转变温度相似现象,材料变形量相对高温端较小,反映在传输损耗系数上,可以得出其传输损耗系数比高温端的小。当温度由高温端下降到玻璃化转变温度时,涂覆层由粘弹态转变为玻璃态,其形变量减小,从而减小光纤应力,进而降低传输损耗系数;同时由于温度较低,分子运动不剧烈,涂覆层伸长率或者收缩率较小,产生应力较小,对光纤传输损耗系数变化影响较小,解释了大芯径光纤在 $-75\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 传输损耗系数波动较小的原因。

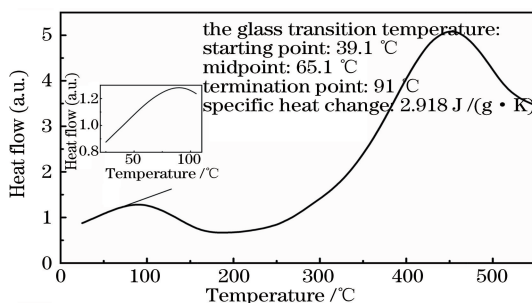


图6 大芯径光纤涂覆层玻璃化转变曲线

Fig. 6 Glass transition curves of large-core optical fiber coating

由于高分子达到玻璃化转变温度以上时,高分子中的半结晶物质转变为结晶态物质,然而本次实验测试温度未达到涂覆层熔点( $106\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),二次结晶是不可逆的,所以大芯径光纤经过高低温循环之后返回到室温时,会产生一定的永久性变形,因此相比较高低温循环测试之前,涂覆层有所伸长,对光纤产生一定的应力作用,进而增大了光纤传输损耗系数,由此可解释第2段升温阶段处于室温下的光纤传输损耗系数比实验初期传输系数较大的原因。

## 5 结论

1)大芯径光纤在光纤传输第1窗口(850 nm波段)传输损耗系数随着温度的变化随机波动,在整个温度区间内其传输损耗系数在 $2.543\text{ dB/km}\sim 4.237\text{ dB/km}$ 范围内波动,通过建立应力模型解释了传输损耗系数在高低温两端波动较大和在 $-75\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动较小的原因;

2)经过高低温循环实验,大芯径光纤纤芯与包层部位未发现顺磁性缺陷的产生,实验测试结果表明大芯径光纤制备过程中产生的顺磁性缺陷极少或者不存在。

若大芯径光纤长期处于高低温循环状态下工作,为克服其不利影响,可采取如下措施:

1)提高光纤涂覆层玻璃化转变温度,降低其熔点,减少涂覆层与裸光纤之间的线膨胀系数之差等;

2)在光纤表面覆盖一层柔性隔热层,间接性减少剧烈变化的温度对光纤传输性能产生的影响,从而提高大芯径光纤在相关应用场合的性能稳定性以及服役寿命。

## 参考文献

- 1 Chen Wei, Li Shiyu, Wang Yanliang, *et al.*. Special optical fiber technology and its development trend[J]. Network Telecom, 2010, 12(7): 29-32.

陈伟,李诗愈,王彦亮,等.特种光纤技术及其发展趋势[J].网络电信,2010,12(7):29-32.

- 2 Wang Yibo, Wang Baohua, Zhang Zhiyan, *et al.*. 7 kW fiber-coupled output stage solid state laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108003.  
王奕博, 王宝华, 张志研, 等. 7 kW 级光纤耦合输出全固态激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108003.
- 3 Yeung W F, Johnston A R. Effect of temperature on optical fiber transmission[J]. Applied Optics, 1978, 17(23): 3703-3705.
- 4 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui, *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 232-235.  
黄锐, 蔡海文, 瞿荣辉, 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 232-235.
- 5 Zhang Guicai, Yang Qingsheng. Study on temperature characteristics of interferometric fiber-optic gyro [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2001, 14(1): 17-22.  
张桂才, 杨清生. 干涉式光纤陀螺的温度特性研究[J]. 光电子技术与信息, 2001, 14(1): 17-22.
- 6 Honda A, Toh K, Nagata S, *et al.*. Effect of temperature and irradiation on fused silica optical fiber for temperature measurement[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370: 1117-1121.
- 7 Yabuta T, Yoshizawa N, Ishihara K. Excess loss of single-mode jacketed optical fiber at low temperature[J]. Applied Optics, 1983, 22(15): 2356-2362.
- 8 Dils R R. High-temperature optical fiber thermometer[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1198-1201.
- 9 Huang Huang, Wu Guiling, Hu Liang, *et al.*. Influence of temperature on the precision of bidirectional TDM based fiber-optic time transfer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506006.  
黄璜, 吴龟灵, 胡亮, 等. 温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506006.
- 10 Sha Jianbo, Gao Kan, Dong Xiaopeng. Investigation of the power transmission characteristics of fundamental mode of large-core fiber and their relation with the type of refractive index profile[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030601.  
沙剑波, 高侃, 董小鹏. 大芯径光纤基模功率传输特性与折射率分布形式关系的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030601.
- 11 Zhang H C, Liu H, Xue H J, *et al.*. Effects of 160 keV electron irradiation on the optical properties and microstructure of "Panda" type Polarization-Maintaining optical fibers[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 4779-4784.
- 12 Griscom D L. Electron spin resonance in glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1980, 40(1): 211-272.