

保偏光纤热处理的研究

张京城 廖延彪* 冯铁荪 金国藩

(清华大学, 北京 100084)

摘要: 本文主要研究应力致高双折射 PMF 的温度特性, 对 bow-tie 型 PMF 进行的热处理实验表明, 退火后双折射增加了 46%, 这一点亦被退火前后拍长的测试结果所证实。

关键词: 保偏光纤, 双折射, 热处理

Study on heat treatment of polarization-maintaining fibers

Zhang Jingcheng, Liao Yanbiao, Feng Tiesun, Jin Guofan

(Tsinghua University, Beijing)

Abstract: This paper primarily deals with the temperature characteristics of stress-induced high birefringence polarization-maintaining fibers (PMF). The heat treatment on the type of bow-tie PMF shows that its birefringence has increased by 46% after annealing, this result has been proved by the beat-length measurements before and after annealing.

Key words: polarization-maintaining fibers, birefringence, heat treatment

一、引 言

近年来, 保偏光纤(PMF)在相干光通讯和光纤传感器, 特别是光纤陀螺中得到了越来越广泛的重视和应用。在设计和制造 PMF 时, 通过人为地增加光纤中的固有双折射, 并使之远远大于光纤内部缺陷(如纤芯不圆和残余应力等)和外界无规扰动(如光纤受压、弯曲、扭转等)带来的双折射, 从而使沿 PMF 双折射主轴入射的线偏振光, 在光纤中传输的保持线偏振态不变。PMF 固有双折射 B (或拍长 $L_p = \lambda/B$) 的大小, 是衡量 PMF 保偏能力的一个重要指标, 该双折射一般分为几何形状(如椭圆芯)和应力致高双折射(如椭圆包层、Panda 和 bow-tie 型 PMF), 而后者近年来尤为常见。

应力致 PMF, 当温度超过 200°C 时, 会逐渐出现固有双折射的非线性现象。国外文献^[1,2]对此虽有报道, 但都缺乏满意的理论解释。我们对 PMF 进行的理论分析表明, 在转变温度 T_c 附近, 热膨胀系数的非线性导致双折射-温度 ($B-T$) 曲线的非线性, $B-T$ 曲线的回滞现象起因于控制 PMF 时的淬火过程。其它常数(如杨氏模量 E 、泊松比 ν 、应力光学常数 O) 近似为温度的线性函数, 它们的影响是, 在不同的温度下, 对 $B-T$ 曲线加以不同的斜率增量。

我们对 PMF 进行的后续热处理实验表明,退火后 PMF 双折射增加 46%,此结论并得到退火前后拍长测试结果的验证。

二、理论分析

制造应力致 PMF 预制棒时,通常在 SiO_2 中掺入一定浓度的 B_2O_3 、 GeO_2 或 P_2O_5 以获得高热膨胀系数的应力区。拉制 PMF 时,由熔融态到固态,光纤截面内不同成分的区域收缩率不同,导致应变双折射^[3],对于 bow-tie 型 PMF,应变双折射 B 为

$$B = \frac{2}{\pi} \frac{EC}{1-\nu} (\Delta\alpha) (T - T_s) \sin(2\phi) \left\{ \ln\left(\frac{a}{b}\right) - 0.75(a^4 - b^4) \right\} \quad (1)$$

其中, $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$, α_2 和 α_1 分别为应力区和应力区周围材料或纤芯的热膨胀系数, T 和 T_s 分别为环境温度和光纤的凝固点温度; b 、 a 、 ϕ 分别为应力区的归一化内外半径及幅角(设光纤外径为 1)。

在低温区域内,理论上掺杂材料的热膨胀系数可以通过加和法计算得到^[4],即

$$\alpha_{q+\text{SiO}_2} = g_q \alpha_q + (1 - g_q) \alpha_{\text{SiO}_2} \quad (2)$$

其中 g 代表某种掺杂氧化物, g_q 为该氧化物的重量百分比浓度, $\alpha_{\text{SiO}_2} = 0.5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 。如果已知 PMF 的结构尺寸、应力区的掺杂成分和浓度,理论上由(1)式和(2)式可以计算出光纤的固有双折射 B 。实际上,由于: 1) 光纤的凝固点温度 T_s 往往难以确定; 2) 硼的反常现象,使得用(2)式计算掺 B_2O_3 应力区的热膨胀系数 α_2 , 误差较大; 3) 常数 E 、 C 、 ν 、 α 一般与温度区间或热历史有关,所以难以得到准确的解析值。

实际的热膨胀系数 α , 一般是通过作图求解实测热膨胀曲线($\Delta L/L_0 \sim T$)的斜率而得到。材料的热膨胀率 $\Delta L/L_0$ 既是化学成分和浓度的函数,又与温度区间和热历史有关,在化学成分和浓度一定的情况下,温度区间和热历史起主导作用。本文主要考察掺硼的情形,图 1 为硼硅酸盐玻璃退火和淬火的热膨胀曲线^[5]。曲线 1, 2 分别对应退火和淬火后的热膨胀曲线, T_g 为转变温度。可以看出,无论热历史是退火还是淬火,在远离转变温度 T_g 的低温区内,平均热膨胀率近似为温度的线性函数,热膨胀系数近似为一个常数。当温度升至 T_g 附近,热历史为淬火的材料出现体积收缩,热膨胀系数出现负值的现象,这是由于在玻璃快速冷却过程中,粘度急剧增大,质点来不及作规律性的排列而形成晶体,未能释放出结晶潜热所致。对于热历史为退火的材料而言,上述现象并不存在。拉制 PMF 时,由熔融态在十分之一秒的瞬间内变成固态,也属于淬火过程。尽管由于掺杂的影响,应力区热膨胀系数较纤芯热膨胀系数 α_1 高,掺硼应力区的转变温度 T_{2g} 较纤芯的转变温度 T_{1g} 低,但它们的热膨胀曲线同样具有图 1 曲线 2 所示的特征。

(1)式中的其它常数,如 E 、 C 、 ν , 也与成分、热历史和温度区间有关。由于 PMF 掺杂浓度一般都较低,所以掺杂对上述常数的影响并不显著。退火玻璃的杨氏模量一般较淬火玻璃高 2~7%,所以在讨论上述参数时,我们也忽略热历史的影响,而主要考察温度区间的影响。

杨氏模量 E 直接反映材料的抗变形能力,在 $T < T_g$ 时,它基本上满足虎克定律,即 $E = \sigma/\epsilon$, 其中 σ 和 ϵ 分别为应力和应变。杨氏模量与材料的内部质点间的化学键强度有关,键力愈强,变形愈小,杨氏模量愈大。当温度上升时,一般硅酸盐玻璃的杨氏模量随之下降。而石

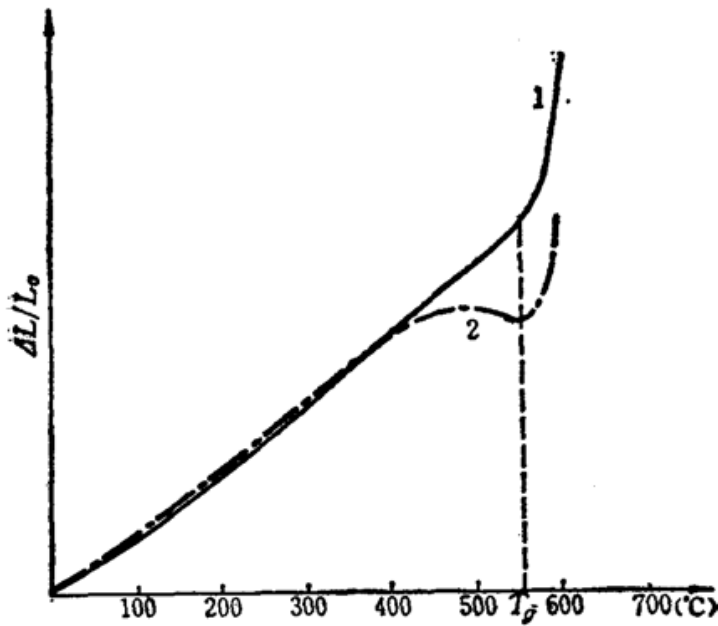


Fig. 1 Heat expansion curves of glass
1—annealing; 2—quenching

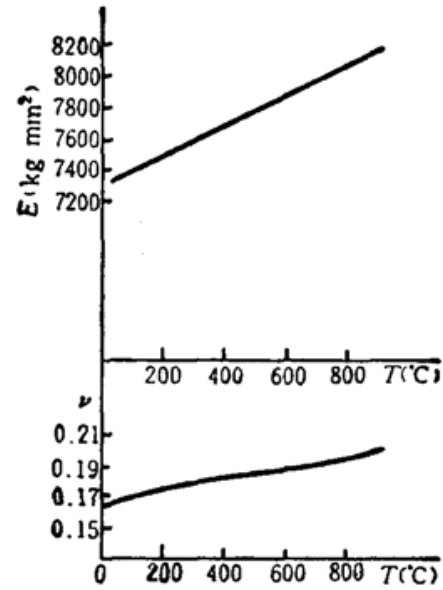


Fig. 2 Temperature dependence of Young's modulus E and Poisson's ratio ν in fused silica

英玻璃, 杨氏模量出现反常现象, 它随温度的升高而增大, 泊松比 ν 亦单调增大^[6], * 如图 2 所示。应力光学常数 C 一般为 $-3.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, 在转变温度 T_g 以下, 一般以 $dC/dT = -4.31 \times 10^{-15} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 的速率线性变化^[7]。

综合 E, ν, C 随温度变化的特征, 我们用温度的线性函数分别表达它们, 即

$$E = E_0 + K_E T = 7.3 \times 10^9 + 9.77 \times 10^5 T \text{ (kgm}^{-2}\text{)} \quad (3)$$

$$\nu = \nu_0 + K_\nu T = 0.164 + 4.23 \times 10^{-5} T \quad (4)$$

$$C = C_0 + K_C T = -3.30 \times 10^{-11} - 4.31 \times 10^{-15} \text{ (m}^2 \text{ kg}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

将(3)~(5)式代入(1)式得

$$B = -K [(A + D)(\alpha_2 - \alpha_1)] (T_s - T) \quad (6)$$

其中,

$$K = \frac{2}{\pi} \sin(2\phi) \left\{ \ln\left(\frac{a}{b}\right) - 0.75(a^4 - b^4) \right\} \quad (7)$$

$$A = \frac{E_0 C_0}{1 - \nu_0} = -2.882 \quad (8)$$

$$D = \frac{E_0 C_0 + (C_0 K_E + E_0 K_C) T + K_E K_C T^2}{1 - (\nu_0 + K_\nu T)} - \frac{E_0 C_0}{1 - \nu_0} \quad (9)$$

Table 1

$T(^\circ\text{C})$	0	100	200	300	400	500	600	700	800
D	0	-0.032	-0.045	-0.068	-0.091	-0.114	-0.139	-0.163	-0.188
$D/A \cdot 100\%$	0	0.76%	1.5%	2.4%	3.2%	4.0%	4.8%	5.7%	6.5%

从表 1 可以看出, 随温度的增加, D 单调上升, 它代表 E, C, ν 随温度线性变化的综合增

[6] 中图 7.67 将杨氏模数 E 与扭变模数 G 的位置颠倒了。

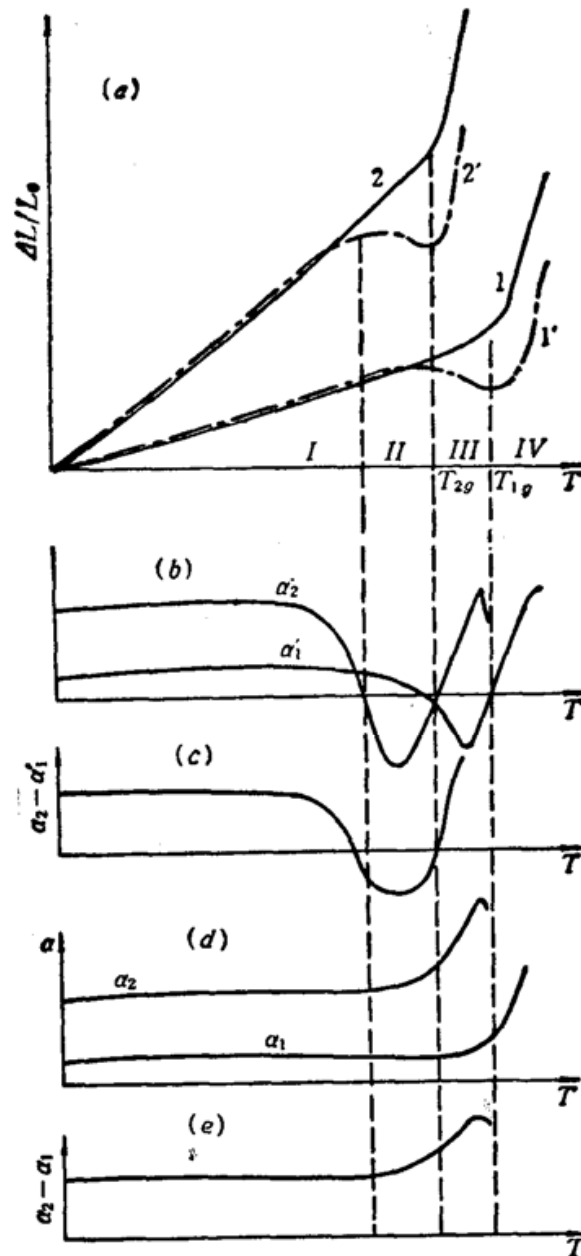


Fig. 3 Schematic diagrams of: (a) heat expansion curves showing stress applied parts and the core of PMF after quenching (dash and dot line) and annealing (solid line); (b) and (d) heat expansion coefficients; (c) and (e) heat expansion coefficient differences

量,同时又以斜率增量的形式施加给双折射 B , D 的单调性不可能使 $B-T$ 曲线产生回滞。

由于 α_1 和 α_2 在远离 T_g 的低温区域近似为常数,在 T_g 附近变化较复杂,所以我们以图 3 表示之。图 3(a) 中,曲线 1 和曲线 1' 分别代表纤芯退火和淬火的热膨胀曲线,曲线 2 和曲线 2' 分别为掺 B_2O_3 应力区退火和淬火的热膨胀曲线,将温度分成 I、II、III、IV 区间。图 3(b) 为淬火 PMF 应力区和纤芯的热膨胀系数。图 3(c) 为它们的差值;图 3(d) 为退火 PMF 应力区和纤芯的热膨胀系数;图 3(e) 为它们的差值。

由图 3(c)、(e) 可知,在远离 T_{1g} 和 T_{2g} 时,无论热历史为淬火还是退火, $\alpha_2 - \alpha_1$ 或 $\alpha_2 - \alpha_1$ 恒定且大于零,所以在此温度范围内,双折射 B 应以一定的速率和以 D 为代表的速率增量,随温度的升高而下降。对于淬火 PMF,在 T_{2g} 和 T_{1g} 附近 α_2 和 α_1 先后出现负值,由于 T_{1g} 的滞后及 $\alpha_2 > \alpha_1$,所以 $\alpha_2 - \alpha_1$ 也在某一温度区域内出现负值。在 $\alpha_2 - \alpha_1$ 第一个零值附近, B 出现

极小值。由于 $\alpha_2 - \alpha_1 < 0$ 的出现, B 将随温度的升高而变大, 出现 $B-T$ 曲线的回滞现象。当 $\alpha_2 - \alpha_1$ 出现第二个零值时, B 将出现极大值。对于退火 PMF, α_2 , α_1 和 $\alpha_2 - \alpha_1$ 皆无负值出现, 在 T_{20} 和 T_{10} 附近 α_2 和 α_1 急剧变大, 由于 T_{10} 的滞后及 $\alpha_2 > \alpha_1$, 所以 $\alpha_2 - \alpha_1$ 点为正值且在 T_{20} 和 T_{10} 之间出现凸峰, 这使得退火后 $B-T$ 曲线不会产生回滞, 在 T_{20} 附近, B 随温度下降的速率加快。

三、实验结果

我们用北京玻璃研究所生产的拍长为 2 mm ($\lambda = 0.633\ \mu\text{m}$) bow-tie 型 PMF 进行了热

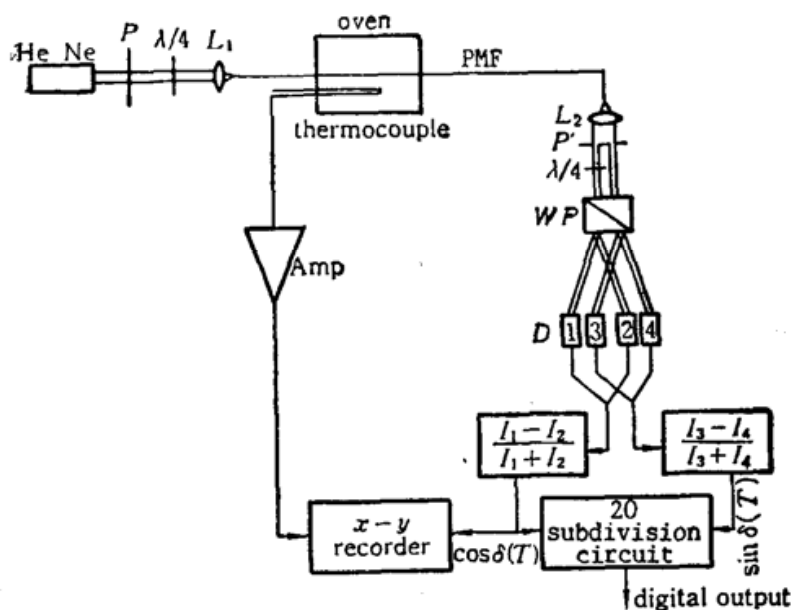


Fig. 4 Experimental arrangement for heat treatment and signal processing

处理实验, 实验装置见图 4 所示。长为 $1\sim 2\text{ m}$ 的一段光纤, 中间 30 cm 放入管式炉中, 炉中温度用热电偶监视。四探测器系统^[8]分别读取水平、垂直线偏振光和左、右旋圆偏振光, 经运算电路, 得到 $\sin \delta(T)$ 和 $\cos \delta(T)$ 两对比度信号, 该周期信号输入 20 细分电路(以 2 递增计数), 以数字形式输出细分计数值 N , N 每变化 40 对应 $\sin \delta(T)$ 变化一周。 $\cos \delta(T)$ 和热电偶输出电压信号同时输入 $x-y$ 记录仪, 实验结果如图 5 所示, 与我们进行的理论分析完全一致。

首次升温时, 在 200°C 以内, $B-T$ 曲线 1 单调下降并呈现良好的线性, 这一点恰好可以使 PMF 作为功能光纤传感温度^[8]。在 450°C 附近 B 出现极小值, 说明此时 $\alpha_2 - \alpha_1$ 出现第一个零值。超过 450°C 以后, B 随温度的升高单调增大, 说明此时 $\alpha_2 - \alpha_1 < 0$ 。当 $\alpha_2 - \alpha_1$ 出现第二个零值时, B 达到极大值, $T \approx 714^\circ\text{C}$, 我们认为此时温度在 T_{20} 附近, 于是关闭管式炉电源, 用自然降温法将 PMF 退火, $B-T$ 曲线 1' 获得最大的回滞。当再次升温时, 曲线 2 单调下降, 不存在 $B-T$ 曲线的回滞现象。两次退火以后从曲线中可见双折射 B 增加 46%。

退火前后, 我们就同一段光纤用磁光调制法进行了拍长测试, 结果见表 2。

退火后, PMF 的时效稳定性很好, 两个月后重新测量拍长, 其数值不变。

光纤的后续热处理虽然有效地减小了拍长, 提高了光纤的保偏性能, 但也使光纤的外涂敷层碳化, 失去了对光纤的保护能力, 因此光纤容易折断。如果拉丝时, 在丝径控制和一次涂敷之间加入光纤退火装置(如从 700°C 至 400°C

Table 2

Heat treatment	Before annealing	After annealing
$L_p(\text{mm})$	2.08	1.12
$\Delta L_p/L_p$	$(2.08 - 1.12)/2.08 = 46.15\%$	

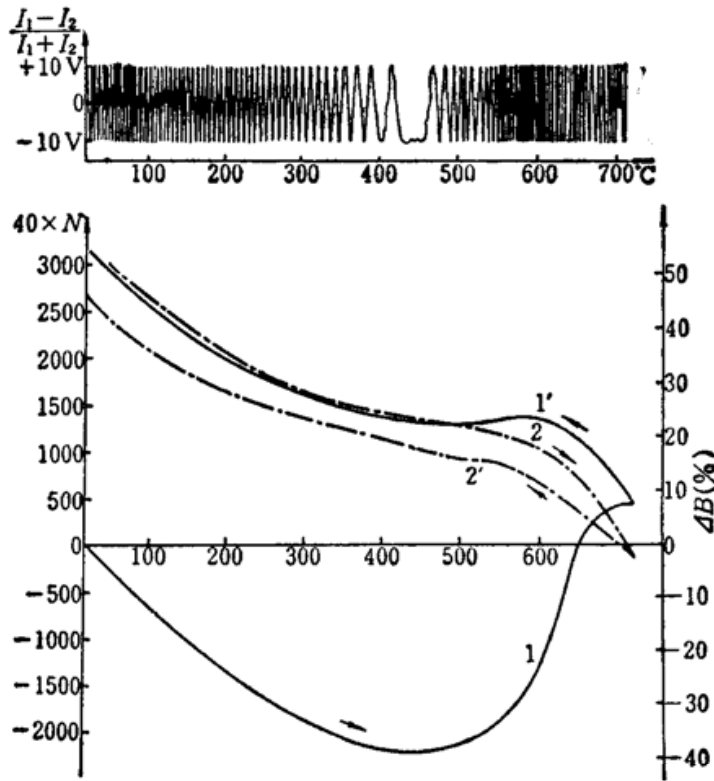


Fig. 5 Measured polarization contrast versus temperature when heating quenched PMF (above) and plots of PMF birefringence with respect to the temperature (below). 1 and 1' are heating and annealing of the first time respectively, 2 and 2' are those of the second time

左右的区域性渐变退火炉),既可以有效地减小 PMF 的拍长,提高其保偏性能,又不致降低 PMF 的机械强度,拉丝速度一般只影响退火深度。实时退火工艺,不是本文所着重讨论的。国外 A. Ourmazd 等人^[2]用总长为 1 m 的 4 个区域温度(550°C, 500°C, 450°C 和 400°C)退火炉实时地对 PMF 进行了退火,结果表明,尽管拉丝速度高达 24 m/min,归一化拍长减小为 0.75; 拉丝速度减至 2 m/min,归一化拍长减小到 0.61,故实时地对 PMF 进行退火处理是完全可行的。

参 考 文 献

- 1 S. C. Rashleigh *et al.*, *Opt. Lett.*, **8**(2), 127 (1983)
- 2 A. Ourmazd *et al.*, *Electr. Lett.*, **19**(4), 143 (1983)
- 3 M. P. Varnham *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, **LT-1**(2), 332 (1983)
- 4 I. P. Kaminov *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **34**(4), 268 (1979)
- 5 G. W. Morey, *The Properties of Glass*, Reinhold Publishing Corporation, 1954, 265~267.
- 6 作花济夫等著(蒋国栋译), *玻璃手册*, 中国建筑工业出版社, 1985, 518
- 7 A. J. Barlow *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**(5), 834 (1983)
- 8 张京城 *et al.*, 首届全国敏感元件与传感器学术会议, 北京, 1989, 18~20