

多模梯度石英光纤拉丝、涂复技术及 对光、力学性能的影响

王建国 陈惠民 秦 晨
(中国科学院上海硅酸盐研究所)

提 要

本文描述了多模梯度石英光纤的拉丝、涂复技术及其对光纤性能影响,对于 $\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ 三元系采用该技术可望获得强度 ~ 100 kpsi, $0.85\ \mu\text{m}$ 损耗 ~ 2.5 db/km, $1.30\ \mu\text{m}$ 损耗 ~ 0.7 db/km, 丝径 $125\pm 3\ \mu\text{m}$ 的涂复均匀、同心度良好的一次涂复光纤。文后列有一批反映工艺重复性的数据。

一、拉丝、涂复技术

拉丝、涂复是光纤制造过程中的重要环节,它们对光纤光、力学性能均有相当影响。要获得长度超过一公里以上的优质光纤须对其中各个细节作谨慎的考虑,特别是拉丝炉的温控与清洁、丝径的监控、涂层及其同心度的监测、拉丝、收丝张力等方面的问题更需要研究。

1. 拉丝炉

从实用经济角度考虑,我们研制了可达 2000°C 以上的石墨电阻拉丝炉^[1]。炉子的中心部件是一个经高温处理的具有迷宫式结构型式的高纯石墨发热元件,阻值在 $70\sim 90\ \text{m}\Omega$, 炉子高温区具有 $40^\circ\text{C}/\text{mm}$ 的温度梯度。炉子充氩气保护,为了测量高温,选用了 WDL-31 型光电高温计直接瞄准发热元件高温区外表面,并将采到的信号由 PID 实现温度自控。在名义温度 2200°C 下,拉丝全过程中温度波动可在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内。

2. 丝径测控

为测光纤外径,选用 GY-O 型光纤外径测控仪。该仪器通过分光光路使激光束对被测光纤与计量光栅同时进行扫描,以从光栅获得的信号作为计量基准。为定量描述 $\phi 125\ \mu\text{m}$ 的公里长度光纤的直径变化,将 ZD-065 型微机与测径仪联用^[2],对几万个数据(每米取 28 个以上数据)进行采集处理,迅速准确地算出丝径平均值、标准偏差,并提供超差值及所处的位置,从而全面地反映出制作光纤的几何均匀程度。为使丝径波动达到国际上的统一标准,又采取了微机反馈回控的办法,一旦丝径测量值与设定值 $125\ \mu\text{m}$ 之间存在 $0.2\ \mu\text{m}$ 的偏差时,便通过微机发反馈信号调整牵引轮与收线筒的速度,这样做的效果十分明显,已使丝径标准偏差稳定地降到 $1\ \mu\text{m}$ 以下,最小可达 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右。

3. 涂层及其同心度

已证明硅酮树脂和紫外光固化丙烯酸环氧均具有较快的固化速度,可使拉丝速度达到 $30\ \text{m}/\text{min}$ 。涂复时涂层树脂盛器下端配用的锥形模的出口端,形似柱状,其口径大小与拉

制光纤的直径、树脂粘度、温度有关, 我们采用 GX-107 硅酮树脂时, 拉 $125\ \mu\text{m}$ 丝径的光纤选用了 $\phi\sim 380\ \mu\text{m}$ 的口径。树脂在盛器中的回流运动产生了一种将光纤推向模子中心的会聚力, 不过光靠此作用, 不能保证涂层的同心, 为此研究了激光同心度监视系统^[8]。该系统利用二面可以在二个平面上微调的反光镜, 将一束激光分成二束基本正交的光束打到尚未固化的涂层光纤上, 受照光纤产生的前向散射图型的对称程度可用盛器的 X-Y 微调架予以调节, 利用这个方法一般可获得全长偏心率 $<15\ \mu\text{m}$ 的涂层光纤。

4. 低张力收丝

过大的收丝张力可能诱导微弯曲附加损耗, 这对硬涂层已不容置疑, 故采取了悬挂的状态来达到低张力收丝, 通过精确调节牵引与收丝轮的速度比, 已能实现 20~30 克的低张力收丝。

二、光纤的损耗

光纤损耗主要取决于原材料纯度, 坯棒制作工艺, 也和材料系统有关, 然而在制造低损耗光纤时则有必要了解一下拉制中某些因素对损耗的影响。这种影响很可能来自三个方面:

1. 光纤涂层的质量

曾发现由于盛器下端配用的模子口径偏大, 在光纤的个别地方产生了严重聚珠, 对损耗带来极不利的影晌, 这种情况示于图 1, 该图中右边的散射峰正是由于严重聚珠所造成。不过这种缺陷只要认真检查模子的口径以及做好涂层同心度监视是很易解决的。

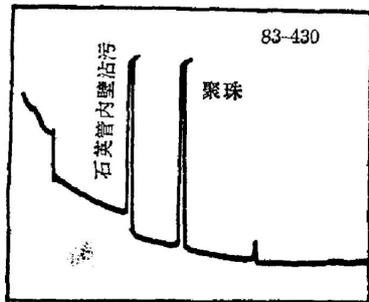


图 1 涂层聚珠在背向散射光曲线上引起第二个散射峰

Fig. 1 Beading of coating lead to second scattering peak in back-scattering light curve

2. 拉丝张力与收丝张力

拉丝张力的测量是用一只 CM 型手提式电子张力仪在牵引轮上方进行。测量时涂层树脂的液面高度基本相同, 因而涂复引入的张力基本为一常量。这样拉丝张力的变化主要受拉丝温度的影响。Smithgall 和 Yoshida^[4] 曾分别证明过拉丝张力对 $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系和 $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ 系多模梯度光纤的损耗没有影响, 但有人证明过对于阶跃型单、多模光纤, 拉丝张力则有一定的影响。而我们的试验结果则与 Smithgall 等人的相一致。图 2 中同时考察

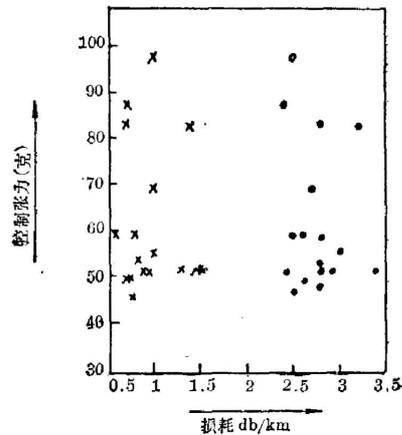


图 2 拉丝张力与光损耗的关系

Fig. 2 Relation of drawing tension and optical loss
x— $1.3\ \mu\text{m}$ o— $0.85\ \mu\text{m}$

了 $0.85\mu\text{m}$ 与 $1.3\mu\text{m}$ 两个波长的损耗,从图上的数据分布可知,在 $40\sim 100$ 克的拉丝张力范围内(包括涂复张力 25 克),它并不对光纤的损耗产生影响,平均在 $0.85\mu\text{m}$ 损耗 < 2.8 db/km ,在 $1.3\mu\text{m}$ 损耗 < 1 db/km 。这样的结果可以解释为:在多模梯度光纤内,光能基本上在离开芯/皮界面的芯区内传输,因此在界面上即使存在少许残余内应力也影响不大。

图 3 表示了收丝张力对损耗的影响,从结果来看对于具有厚度近似 $60\sim 80\mu\text{m}$ 的涂有硅酮树脂涂层的光纤在 $20\sim 80$ 克的收丝张力范围内并不诱导附加微弯曲损耗,证明了硅酮树脂涂层有很好的缓冲作用,当然这归功于这种涂层的低弹性模量。

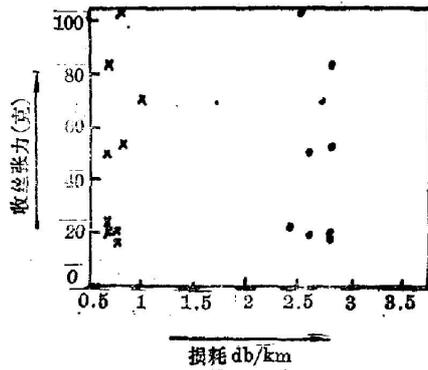


图 3 收丝张力对光损耗的影响

Fig. 3 Influence of winding tension on optical loss (drawing tension $50\sim 60$ g)
 × — $1.3\mu\text{m}$ ○ — $0.85\mu\text{m}$

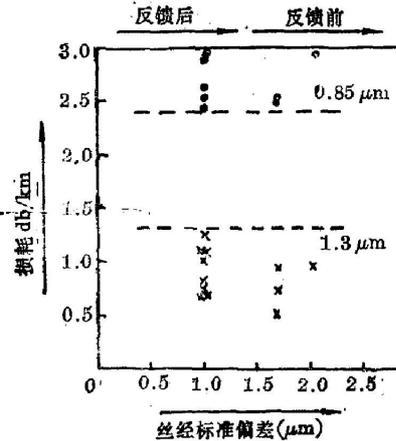


图 4 纤径控制前后,纤径波动与光损耗的关系
 Fig. 4 Relation of fiber diameter variation and optical loss before and after diameter control

3. 丝径波动的影响

图 4 中对波长 $0.85\mu\text{m}$ 的损耗达到 3db/km 以下的光纤比较了丝径反馈前后的损耗。看来两种情况下都可以得到低的损耗。丝径反馈前的丝径波动 $\geq \pm 6\mu\text{m}$ (标准偏差 $\leq 2\mu\text{m}$),丝径反馈之后的丝径波动 $\leq \pm 3\mu\text{m}$ (标准偏差 $\leq 1\mu\text{m}$)。可见对于损耗来讲可以允许稍大的丝径波动,但是从光纤连接的角度出发,当然要求丝径波动小些为好。

顺便按 $L = A/\lambda^4 + D$ 估计了一根典型的丝径波动在 $\pm 3\mu\text{m}$ 之内的光纤的波导结构损耗 D 值(图 5)。为避开水吸收峰的影响,只对 $0.85\mu\text{m}\sim 1.15\mu\text{m}$ 波长范围的数据进行处理,得到 D 的估计值为 0.2db/km ,由于 D 值中包括光纤中数值孔径波动及其它波导缺陷的影响,因此实际上由丝径波动引起的损耗应 $< 0.2\text{db/km}$ 。

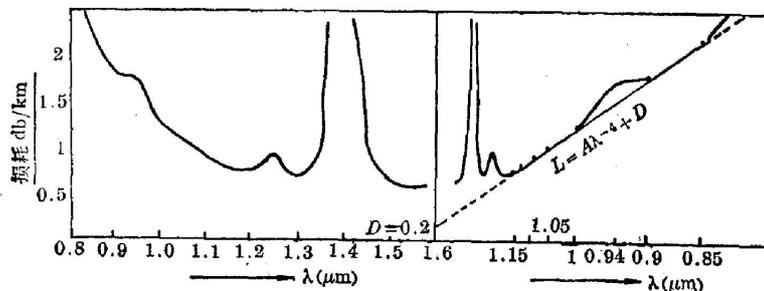


图 5 波导结构损耗 D 值的近似估计

Fig. 5 Approximate calculation of waveguide structure loss D value

三、光纤的强度

光纤的强度已证明与制造全过程中的每一步都有密切的关系。众所周知, 光纤的强度主要是由其表面的微裂纹与内部的外来夹杂物缺陷所决定。对于后者, 通过低强度断裂面的扫描电镜观察指出了石英支撑管中夹杂物缺陷的严重性(图 6)。所以要制造高强度光纤应采用波导级的石英管。

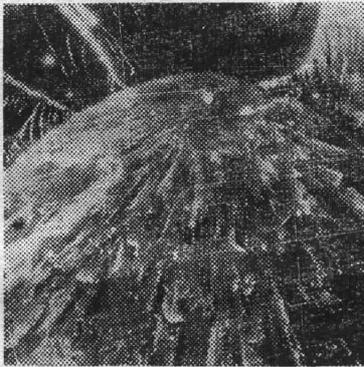


图 6 石英衬管中的夹杂物引起的低强度

Fig. 6 An inclusion of silica support tube leads to low strength ($\sim 0.15 \text{ GN/m}^2$)

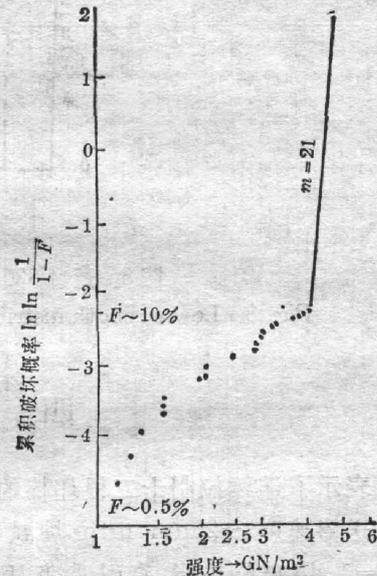


图 7 纤维强度分布(在 35 克拉丝张力下)
Fig. 7 Fiber strength distribution
(under 35 g drawing tension)

至于光纤表面裂纹则是一个更须注意的问题, 如果以直径 $125 \mu\text{m}$ 的一公里长的光纤计算, 它有近半个平方米的面积。如要得到 100 kpsi 的强度, 则需避免在这么大的面积上产生大于 $1 \mu\text{m}$ 长的裂纹, 这确不容易做到。我们曾试验过仅 10 克的显微刻痕压力便可使光纤强度降低几个数量级^[5]。为了防止表面裂纹的产生, 我们除了对控制坏棒表面进行火焰抛光、注意拉丝炉和树脂的清洁之外, 还采取了高温下低张力拉丝。另外, 第一节中所提到的同心涂层技术则防止了拉制之后光纤的表面损伤。

图 7 为一根一公里长光纤在威布尔概率纸上描绘的强度分布曲线。测试长度为 5 米, 应变速率为 $10\% \text{ min}^{-1}$, 纤维在 35 克张力下拉丝。

从图 7 可知, 此光纤的强度呈多模分布, 但在累积破坏概率 $F > 10\%$ 以后, 断裂强度 $> 4 \text{ GN/m}^2$ ($\approx 570 \text{ kpsi}$, 即 $125 \mu\text{m}$ 单丝可承受 5.7 公斤拉力), 斜率 $m \sim 21$ 。这些数据表明此光纤的强度还是相当高和相当集中的。不过仍应看到在 $F < 10\%$ 以后强度数据比较分散, 其最低一点的强度 $\sim 1 \text{ GN/m}^2$, 这说明在光纤的表面仍存在着微小的裂纹, 如要得到更好的强度, 在拉丝工艺上还须采取更完善的措施。

图 8 是另一根在 ~ 60 克张力下拉制的光纤, 它顺利通过了 820 克的筛选强度 ($\sim 0.67 \text{ GN/m}^2$) 后进行了强度试验。图上仅取低强度区的强度分布。曲线证实此光纤的强度确实大

于筛选应力,这一点说明长光纤的强度分布可以反映光纤的强度特性,而经过筛选的光纤则有一定的强度保证。

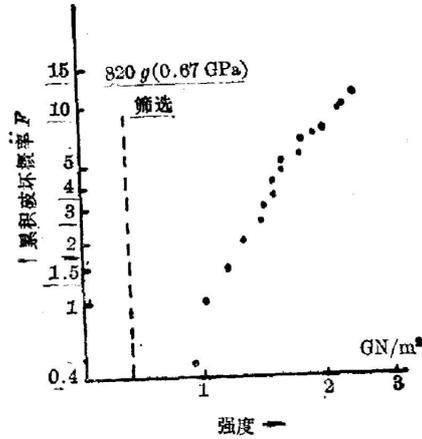


图 8 通过 820 克筛选试验后的低强度分布区

Fig. 8 Low strength distribution region after passing 820 g proof test

四、工艺稳定性

表 1 表示了连续拉制十二根坏棒的情况,坏棒材料属 $\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ 三元系。拉丝参数为:送棒速度 $\sim 2\text{ mm/min}$,炉温 $> 2000^\circ\text{C}$,控温精度 $\pm 5^\circ\text{C}$,丝径 $\sim 125\ \mu\text{m} \pm 3\ \mu\text{m}$,一次厚涂 $n=1.43$ 硅酮树脂,牵引速度 $15\ \text{m/min}$,拉丝张力 ~ 65 克,收丝张力 ~ 20 克。

由表可知,除 8 号坏棒外都得到了超低损耗、丝径均匀的光纤。因而可以认为通过对拉丝涂复技术的研究所确定的一些制造技术参数是可行的。事实上这套技术已在实验室内成功地用于制造三次群与四次群 $\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ 系多模梯度光纤。

参加本工作的还有沈崇德、吴惠芳同志。

表 1

编 号	拉丝张力(克)	损 耗 (db/km)			外径 (μm) A~B 端	长度(m)
		0.85 μm	1.30 μm	1.55 μm		
III-1	60	2.84	0.98	1.04	125~124	1356
2	45	2.52	0.79	0.76	127~127	1285
3	87	2.42	0.71	0.63	126~127	1350
4	62	2.54	0.77	0.73	127~128	1400
5	68	2.97	1.10	0.79	126~127	1190
6	68	2.53	0.69	0.63	127~126	1370
7	74	2.43	0.74	0.73	125~126	1500
8	60	3.35	1.50	1.38	125~126	1500
9	63	2.59	0.83	1.38	125~126	1427
10	74	2.50	0.71	0.63	127~127	1500
11	60	2.50	0.70	—	127~127	1500
12	60	2.57	0.69	—	—	1500

参 考 文 献

- [1] 王建国等;《1978年中国硅酸盐学会、上海硅酸盐学会资料汇编》, p. 34.
 [2] 王建国;《中国激光》, 即将发表。
 [3] 王建国等;《激光》, 1982, 9, No. 12, 768~782.
 [4] D. H. Smithgall; "Electronics letters", 1979, 15, No. 2, 56~57.
 [5] 王建国等;《特种玻璃》, 即将发表。

Drawing and coating techniques of multi-mode grade silica optical fiber

WANG JIANGUO CHEN HUIMIN AND QIN CHEN
 (Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

(Received 24 April 1984; revised 17 October 1984)

Abstract

Drawing and coating techniques of multi-mode graded-index silica optical fiber and their influences on the optical, mechanical properties are described. High-quality optical fibers with short wavelength loss (at $0.85 \mu\text{m}$) $\sim 2.5 \text{ db/km}$, long wavelength loss (at $1.3 \mu\text{m}$) $\sim 0.7 \text{ db/km}$, strength $\sim 100 \text{ kpsi}$, fiber diameter $125 \pm 3 \mu\text{m}$ and good coating concentricity may be fabricated by this technique for ternary system of $\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$. In addition, technological repeat was identified by some of the new data given in the end of this paper.

(上接 169 页)

加速向高束流、高束质量发展

这次会议表明自由电子激光的进一步发展,主要是加速器的工作。电子束的质量是影响自由电子激光的主要因素。美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的 Szoke 博士指出:对于自由电子激光器来说,低劣的束质量和巨大的耗资是两个大难题。事实上,这也是劳伦斯·利弗莫尔实验室自由电子激光放大器的主要问题。

为了获得高质量的电子束,只能走发展加速器的道路,因为脉冲电子束为改善束质量必须引入一个引导场。虽然引导场的引入改善了原有器件的电子束质量,但却又妨碍了束质量的进一步提高。正如斯坦福大学的 Smith 博士指出的:对于一个高质量的电子束来说,一定不能用引导场。那么发展加速器能不能提高束质量和加大工作电流呢?回答是肯定的。这就是这次会议的一个爆炸性新闻,即统治加速器的 Lawsen 定律被推翻了!确切地说,是人们证明 Lawsen 定律不是普遍适用的,而是在一定条件下的一个关系。在另一些条件下,加速器却可以工作在远离 Lawsen 定律预言的区域。事实上人们已经研制出具有高质量电子束和大工作电流的加速器。美国的洛斯·阿拉莫斯实验室报告了他们的射频直线加速器(RF Linac),已做到平均电流为 100 A,准连续工作。因此绝大多数的与会者都对此很感兴趣,成为这次会议的一个热门话题。会上有几篇报告是专门讨论如何提高电子束质量的,甚至提出了电子束亮度的概念并建议用它作为全面衡量电子束质量的一个参量。

(下转 186 页)