

保偏光纤断裂形式分析

韩志辉, 张 勇, 庞 璐, 姚 庚
(中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

摘 要: 通过对于光纤断裂机理的分析, 确认了目前影响保偏光纤的断裂两种形式, 发现了不同于常规“延展性断裂”的“脆性断裂”, 通过对于断裂形式的分析及研究, 明确了“延展性断裂”与“脆性断裂”的差异, 最终通过实验得到了“脆性断裂”产生原因及表现形式, 对于保偏光纤应用过程中的机械损伤控制起到了指导作用。

关键词: 延展性断裂; 脆性断裂; 延时断裂

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.08.016

Fracture form analysis of polarization maintaining fiber

HAN Zhi-hui, ZHANG Yong, PANG Lu, YAO Geng
(The 46th Research Institute of CETC, Tianjin 300220, China)

Abstract: Through the analysis of the fracture mechanism of optical fibers, the current fracture modes affecting polarization maintaining optical fibers are confirmed, and the "brittle fracture" which is different from the conventional "ductile fracture" is found out. Finally through the analysis and study of the fracture modes, the difference between "ductile fracture" and "brittle fracture" have been made clear. The causes and manifestations of brittle fracture are obtained through experiments, which play a guiding role in the mechanical damage control of polarization maintaining optical fibers.

Keywords: brittle fracture; ductile fracture; delayed fracture

1 引 言

所谓材料的理论强度, 就是从理想状态下分析材料所能承受的最大应力。从原子(离子)间的结合的情况看, 是分离原子(离子)所需最小的力。图1所示为晶格能和应力随原子间距的变化。

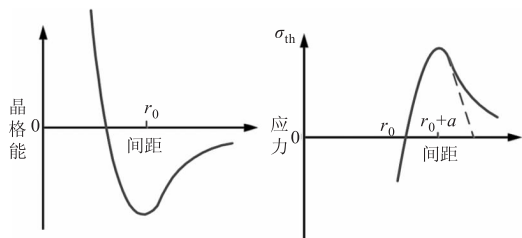


图1 晶格能和应力随原子间距的变化

Fig. 1 Changes of lattice energy and stress with atomic spacing

当原子间距 $r = r_0$ 时, 原子间相互作用力为零, 此时 r_0 称为平衡距离。当 $r = r_0 + a$ 时, 原子间的合力为最大, 此时表示物质具有最大的强度, 即理论强度 σ_{th} 。

由材料在断裂时形成新表面所作的功可得到下列表达式:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma}{\alpha}} \quad (1)$$

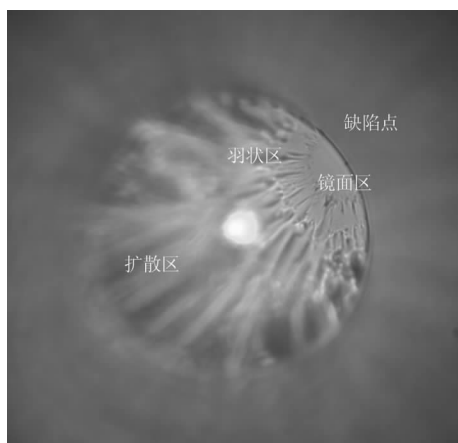
其中, α 为每一紧邻原子对的间距; E 为弹性模量; γ 为表面能。对于石英(SiO_2)而言, $E = 72.2 \text{ GPa} = 7367 \text{ kg/mm}^2$, $\alpha = 2 \text{ \AA} = 2 \times 10^{-7} \text{ mm}$, $\gamma = 7 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}$ 。

由于该模型基于石英光纤, 代入可得光纤其理论断裂力为 $\sigma_{th} = 16050 \text{ N}$ 。实际同直径保偏光纤的强度会远低于该理论值, 实际强度与理论强度的巨

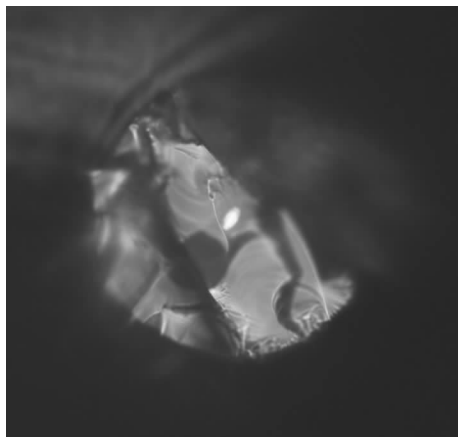
大差距的原因,是由于石英玻璃的脆性,石英表面或内部存在有微裂纹,以及受到强外力造成的力学受创点(薄弱点)所引起,由于石英玻璃内部或外部应力作用时不会产生流动及塑性变形,表面上的微裂纹或力学受创点便会扩展并且应力集中以致破裂,通常根据断裂时间^[1]及断裂现象,我们将其称为“延展性断裂”和“脆性断裂”。

2 断裂的形式及分析

石英玻璃材料为脆性材料,光纤断裂实际上是裂纹形成和扩展的过程。对于“延展性断裂”和“脆性断裂”。前者在断裂前其表面无大范围形变、损伤,而是由于极微小内部或外部缺陷点,断裂时形成缺陷点、镜面区、羽状区、扩散区^[2]四个部分,最终形成如图 2(a)所示的标准图;图 2(b)则是受到强外力“钝性冲击”在极短的时间内发生断裂或重大损伤,其断裂表现没有明显的范围性、没有延展性变形的痕迹,最终断面会出现层次感很强的“碎裂断面”,下面我们对两种形式的断裂进行具体分析。



(a) 延展性断裂特征图



(b) 脆性断裂特征图

图 2 断裂形式特征图

Fig. 2 Characteristic diagrams of fracture form

2.1 延展性断裂过程分析

对于延展性断裂的分析,我们基于格里菲斯(Greifith)的裂纹发展理论。该理论认为:材料中有微小裂纹存在引起应力集中,使得光纤自身断裂强度下降。对应一定尺寸的裂纹,存在临界应力 σ_c ,当外应力小于 σ_c 时裂纹不能扩展,只有当外应力大于 σ_c 时裂纹才能扩展并导致断裂,保偏光纤也适应该原理。

断裂产生新的表面所需的表面能是由于材料内部的弹性储能减小来补偿的,当对平板弹性体施加负荷时,若裂纹半长为 α ,在裂纹长度增加 $d\alpha$ 时。其表面能增加:

$$U_1 = 4\alpha\gamma^* \quad (2)$$

式中, γ^* 为单位长度裂纹的表面能,此时,弹性应变能减小:

$$U_2 = -\pi\alpha^2\sigma^2/E \quad (3)$$

其中, E 为弹性模量。图 3 中表示出了 $U_1, U_2, U_1 + U_2$ 和裂纹长度的关系。如果裂纹长度超过了 $U_1 + U_2$ 的极大值所对应的长度,它便可以扩展,反之,则不能扩展。对存在一个宽度为 2α 的裂纹,可以由 $d(U_1 + U_2)/d\alpha = 0$ 求出一个临界应力 σ_c ,并且有:

$$\sigma_c = (2E\gamma^*/\pi\alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

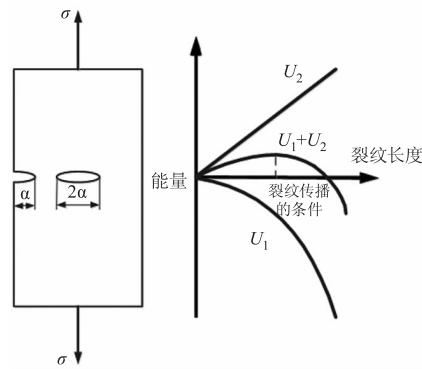


图 3 格里菲斯裂纹及其能量关系

Fig. 3 Griffith crack and its energy relationship

当外应力大于这一临界值时裂纹便开始扩展。格里菲斯理论中的“应力集中概念”是非常重要的概念,它是“延展性断裂”的典范。裂纹的尖角处存在着应力集中,即尖角处的应力远大于受应力体内的其他部位,在外负荷的作用下,经过一段时间后,裂纹尖角处的应力越来越大,超过临界应力时,裂纹会迅速扩展,使石英光纤断裂。由此可见,“应力集中”是“延展性断裂”的根源,典型的格里菲斯模型

断裂图如图4所示。

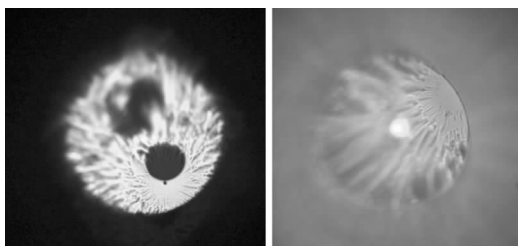


图4 典型“格里菲斯”(Griffith)的裂纹发展图例

Fig. 4 Typical Griffith's crack development legend

2.2 脆性断裂过程分析

对于保偏光纤而言,常采用下式来表征断裂强度与裂纹尺寸^[3-4](即形状)的关系:

$$\alpha_c = \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_f} \right)^2 \quad (5)$$

式中, α_c 为临界裂纹尺寸; K_{IC} 为临界应力强度因子,为 0.79 GPa; Y 为几何形状因子,对于垂直于光纤轴半圆形的裂纹(影响保偏光纤最重要的裂纹形状)来说, Y 为 1.25^[4]; σ_f 为测得的拉伸强度。用式(5)经简单计算结果如表1所示。

表1 石英光纤临界微裂纹计算值

Tab. 1 Calculation value of critical microcrack of quartz optical fiber

机械筛选应变/%	对应的应力 σ_f /GPa	裂纹的尺寸 α_c / μm
0.5	0.345	3.36
0.75	0.518	1.49
1.0	0.690	0.83
1.25	0.863	0.53
1.5	1.035	0.37
1.75	1.208	0.27
2.0	1.380	0.21

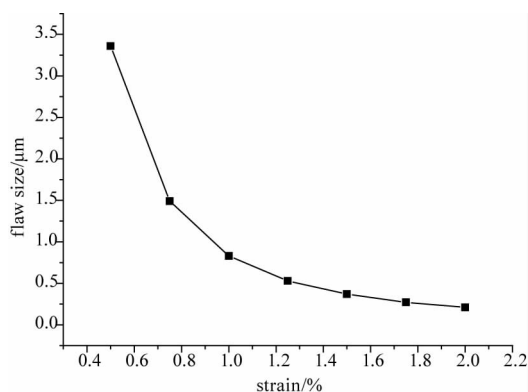
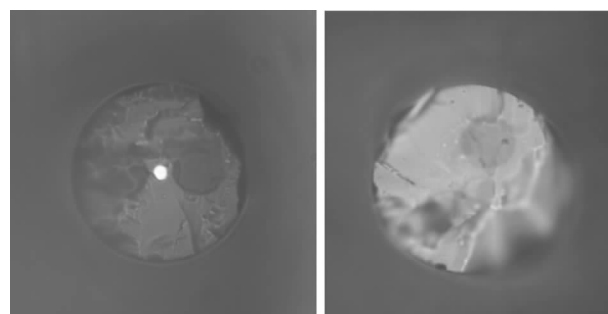


图5 筛选应变与临界微裂纹的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between stretching strain and critical microcrack

通过分析,如果理论拉伸强度无限大,即便在没有微裂纹的情况下,光纤依然会发生断裂或崩裂,这种断裂在极短时间内完成,力作用效果极大,以时间角度描述,该现象属于“瞬时断裂”,以力学作用结果角度描述,该现象就是我们所说的“脆性断裂”,对于典型的“脆性断裂”,其典型特征图从显微镜^[5](奥林巴斯 BX51)呈现如图6所示。实际在保偏光纤应用的过程中存在意外的情况,光纤有可能出现大强度损伤,从而加重了断裂效果。

同时,如果式(5)几何形状因子 Y ,由于在极短时间内达到非常小的极限值,即存在大尺寸崩坏、结构损伤,在此种状态下,即便外力在很小的状态下,也会发生无延时断裂,瞬间崩碎,形成图5所示结果。此类断裂成像亦无“缺陷点、镜面区、羽状区、扩散区”四部分,为“非延展性断裂”。形成如图6所示的断面形状。



(a) 脆性断裂图像1

(b) 脆性断裂图像2

图6 典型脆性断裂图像

Fig. 6 Typical brittle fracture image

故形成保偏光纤“脆性断裂”的原因,主要有以下三点:

(1)在保偏光纤制备过程中,由于预制棒加工过程产生力学弱点或结构损伤,特别是残存的大尺寸微裂纹,都会大幅降低 Y 值,进而最终产生“脆性断裂”;

(2)在保偏光纤拉制过程中,由于光纤收纤时可能存在高应力光纤挤压、不规则叠压,形成深层次结构损伤,也是造成“脆性断裂”的重要因素;

(3)测试及使用过程中,无规则随机大强度外力施加于光纤,造成光纤内部石英部分应力失衡、结构损伤及形变,形成“受创区域”,如果光纤在此种状态下受到剧烈的环境变化、或受到远大于所能承受拉力或长期置于小半径弯曲状态,便会直接导致光纤“脆性断裂”,使其失效。

后续我们将通过实验,验证“脆性断裂”的成因,找出规避“脆性断裂”的方法。

3 对于“脆性断裂”成因的验证

本实验主要通过对无缺陷保偏光纤进行破坏性试验,找出造成“脆性断裂”的原因。实验方法汇总于表 2。

表 2 “脆性断裂”实验方法汇总

Tab. 2 Summary of “brittle fracture” test methods

序号	项目	实验方法 1	实验方法 2	实验方法 3
1	目的	单纯大幅降低 Y 值	结构损伤后,大幅增加 σ_f	单纯大幅增加 σ_f
2	步骤 1	用钝器对光纤表面进行挤压	用钝器对光纤表面进行挤压	采用同类保偏光纤,成“十字交叉差叠加状”
3	步骤 2	切割挤压处形成断面	用大张力直接拉断该光纤	各光纤所在面对向而行,使光纤互相切割,形成断面
4	实验示意图	如图 7	如图 8	如图 9
5	步骤 3	用 BX51 显微镜观察断面	用 BX51 显微镜观察断面	用 BX51 显微镜观察断面
6	结果	涂层受到挤压,断面为崩碎,无标准“四区”	涂层受到挤压,断面为崩碎,无标准“四区”	涂层有破损,无挤压,断面为崩碎,无标准“四区”

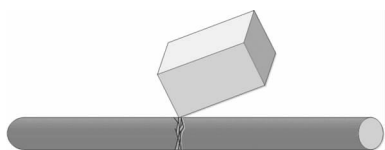


图 7 实验 1 断裂方式示意图

Fig. 7 Schematic diagram of fracture mode in experiment 1

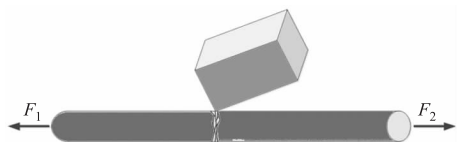


图 8 实验 2 断裂方式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of fracture mode in experiment 2

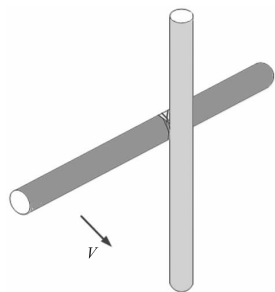
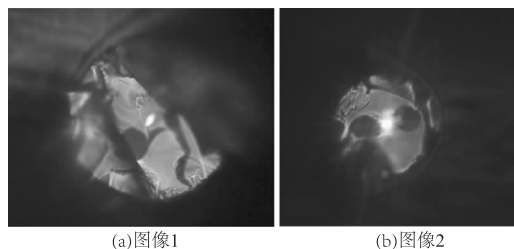


图 9 实验 3 断裂方式示意图

Figure 9 Schematic diagram of fracture mode in experiment 3

通过显微镜 (BX51) 得到的测试结果如图 10 ~ 图 12 所示。

(1) 图 10 为实验方法 1 所得图像。

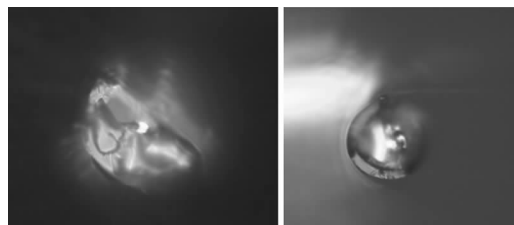


(a) 图像1 (b) 图像2

图 10 实验方法 1 测试图

Fig. 10 Test diagram of experiment method 1

(2) 图 11 为实验方法 2 所得图像。

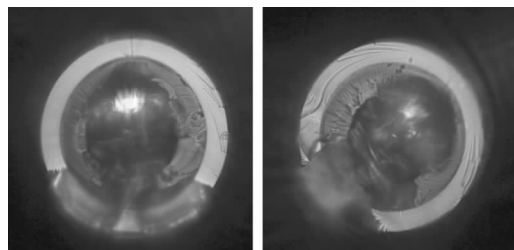


(a) 图像1 (b) 图像2

图 11 实验方法 2 测试图

Fig. 11 Test diagram of experiment method 2

(3) 图 12 为实验方法 3 所得图像。



(a) 图像1 (b) 图像2

图 12 实验方法 3 测试图

Fig. 12 Test diagram of experiment method 3

4 结 论

通过“脆性断裂”实验,测试图像能够有效反映保偏光纤应用过程中“脆性断裂”成像吻合,证明保偏光纤的脆性断裂与外力造成的力学受创点的形状、深度密切相关,也与所施加的外力大小关系密切,因此在保偏光纤制备中,应当通过设备升级、工艺优化,尽量避免大尺寸微裂纹的产生;同时在收纤、使用中尽量避免不必要的接触式高强度外力冲击,提高操作人员能力、加强过程控制管理水平。

综上,本文通过对于光纤断裂机理的分析,明确

了保偏光纤的断裂形式,通过对于断裂形式的分析及研究,我们明确了“延展性断裂”与“脆性断裂”的差异,最终通过实验验证得到了“脆性断裂”产生原因及表现形式,对于今后保偏光纤应用过程中的机械损伤控制及损伤原因分析,起到了一定的指导作用。

参考文献:

- [1] Mecholsky J J , Gonzalez A C. Fractographic analysis of delayed failure in Soda-Lime glass[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1979, 62: 577 - 580.
- [2] Linda K Baker, G Scott Glaesemann. Break source analysis: alternate mirror measurement method [C]. International Wire & Cable Symposium Proceedings, 1998: 934 - 937.
- [3] Henry P, Kirchner, James W, Kirchner. Fracture mechanics of fracture mirrors [J]. Journal of The American Ceramic Society, 2010, 62(3 - 4): 198 - 202.
- [4] Torbjörn Svensson & Anton Breuls. Strength and fatigue of different kind of weak spots from the manufacture of optical glass fibres [J]. Proc. SPIE 2290, Fiber Optic Materials and Components, 1994.
- [5] XU Hongjie, HU Yongkang, SONG Ningfang. Simulation research on side-looking imaging alignment technique of PMF [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 99 - 104. (in Chinese)
徐宏杰, 胡永康, 宋凝芳. 保偏光纤侧视成像定轴技术仿真研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 99 - 104.