

长飞 EasyBand® 系列光纤的机械可靠性及使用寿命

韩庆荣，陈苏，杨晨，李婧

2010 年 7 月

1. 引言

如今，FTTH 网络的建设得到了迅猛的发展。在 FTTH 应用中，光纤在墙角、管内或用于存储光纤余长的出线盒内可能会遇到很严重的弯曲，而弯曲不敏感的 G. 657 光纤在 FTTH 中已经逐步得到广泛的应用。

当光纤处于弯曲状态时，会有两个不利的效应产生：一是因为弯曲引起的附加衰减（弯曲损耗），这将会影响传输系统的性能；二是因为光纤自发断裂而造成网络的服务中断。在传统的传输系统中，通常将光纤的最小弯曲半径控制在 30mm 以上，以保证光纤的传输性能以及 20 年内光纤极低的断裂几率。在接入网系统中，必须解决上述两个问题，使得当光纤被如同“铜线”对待时，其抵抗风险的能力能够得到提高。在国际电信联盟 ITU-T 于 2009 年 11 月修订的 G. 657 建议中，G. 657. A1 类光纤的最小弯曲半径要求可以达到 10mm，G. 657. A2 和 G. 657. B2. 类光纤的最小弯曲半径要求达到 7.5mm，而 G. 657. B3 类光纤的最小弯曲半径甚至要求达到 5mm。在这样小半径的弯曲情况下，光纤将主要承受由弯曲引起的张应力，其机械可靠性的评估就显得极其重要。为了使光纤在实际的通信线路上使用，应保证光纤具有足够的机械强度，使其在恶劣的环境条件下不会因疲劳而断裂，以保证光纤足够长的使用寿命，这也是 G. 657 光纤的关键性能参数。本文在介绍影响光纤可靠性主要参数的基础上，结合光纤的具体

应用介绍了光纤使用寿命模型，并介绍了长飞提高光纤机械可靠性的方法。

2. 影响光纤机械可靠性的主要参数

当光纤处于应用环境中时，光纤缺陷的尺寸会因为应力的持续作用而增大。即使光纤处于惰性的环境中，在一定的应力大小和缺陷尺寸下，经过一定的时间，这些微裂纹的增长也将导致光纤的断裂。光纤中裂纹随环境和时间增长，直接影响光纤的使用寿命，我们也称之为光纤的机械可靠性。石英光纤的理论强度是由 Si-O 之间的键结合力所决定的。然而，石英光纤中玻璃基体存在的微小的不均匀性、拉丝中高温熔融骤冷使表面形成的分布不均的应力及环境尘埃、机械损伤等致使光纤表面产生的微裂纹等都影响光纤的机械强度。同时，涂覆层对光纤强度也起着至关重要的作用。涂覆层的粘附力越强，阻止裂纹生长的作用就越明显，光纤的强度就越高。影响光纤机械可靠性的参数主要有疲劳参数、筛选张力和光纤使用中承受的应力。

2.1 疲劳参数

光纤疲劳参数又称应力腐蚀敏感性参数，是影响光纤寿命的主要参数之一。光纤会受到潮湿、尘埃、化学物质作用等因素的影响使其表面微裂纹扩张，从而导致光纤的断裂。在非惰性环境下的光纤（如高温、潮湿、环境中有水分或化学物质），施加任何应力都会使裂纹生长，特别是在潮湿环境中，水分子对微裂纹有一定的尖劈作用，易

使微裂纹扩展。在一定应力条件下，光纤表面微裂纹扩展至光纤断裂的过程称为光纤的疲劳。在同样应用环境下，疲劳参数 n 值越大，裂纹扩展就越慢，光纤的使用寿命就越长。

光纤疲劳参数根据施加应力的不同可分为动态疲劳参数 n_d 值和静态疲劳参数 n_s 值。由于静态疲劳测试需要较长的时间（一般为几个月），所以更多的是采用动态疲劳测试 n_d 值用于评估光纤的机械可靠性和寿命^[1]。

2.2 筛选张力 σ_p

筛选试验的目的是将整个光纤制造长度上的强度低于或等于筛选应力的点去除，保证光纤的机械可靠性。ITU-T G.650.1 规定的筛选试验的基准试验方法为纵向应力法。纵向应力试验法测量原理是施加张力至拉丝涂覆后的整根光纤长度上，将强度不好的点或光纤段筛选出。设定筛选应力为 σ_p ，筛选试验中所施加的应力大小始终应超过规定的筛选应力 σ_p ，以保证光纤有一个最低的强度。

筛选过程中光纤只受到拉应力的作用，且光纤在筛选过程中都会被拉长（如 100kpsi 对应的应变为 1%，200kpsi 对应的应变为 2%）。对于大张力筛选，光纤被拉长后容易被损伤，尤其是刚生产的光纤，光纤涂覆层和玻璃结合面需进一步完善结合，大张力筛选可能会在其界面上产生缺陷。筛选过程中光纤只受到拉应力的作用，而光纤弯曲下受到的是张应力，玻璃材料的特点是抗拉不抗张，同样应力作用下，张应力对光纤的损伤更大。对于以张应力为主应用的光纤，大张力筛选并不能确保光纤的机械性能，因而在实际应用中，并非筛选张力越大越好。提高筛选张力的前提是需要合理的筛选工艺以确保筛选过程中不损伤光纤。

2.3 光纤承受的应力 σ_a

光纤在使用过程中，无法避免的要承受一定的应力作用。例如弯曲引起的附加应

力，大气环境中的水和水蒸气分子对光纤表面的侵蚀，以及成缆后不合理敷设光缆时残留下来的应力长期作用等。作用在光纤上的应力将加速光纤微裂纹的扩展，减少光纤的使用寿命。

3. 光纤的使用寿命

当光纤弯曲时，应力将会附加到光纤上。由弯曲引起的应力（ σ ）的大小可以根据下面的方程进行计算：

$$\sigma = \frac{E \cdot r}{(R + C_{th} + r)} \quad (1)$$

式中， E 是杨氏模量， r 是光纤的半径， R 是弯曲半径， C_{th} 是光纤涂层的厚度。

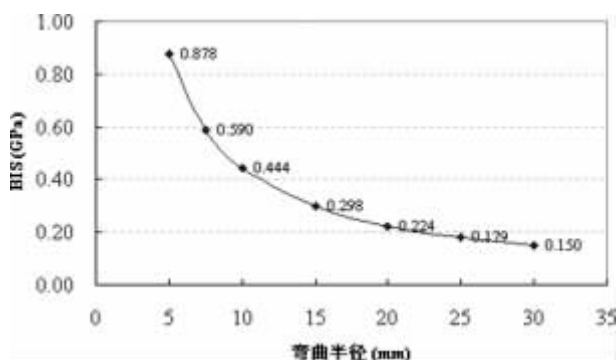


图1 弯曲在光纤外侧引起的附加张应力（BIS）与弯曲半径的关系

根据上述方程，可以计算得出处于 7.5mm 弯曲半径的 250 μ m 涂层直径的 125 μ m 标准光纤，其所受到的由弯曲引起的应力可以达到 86kpsi，所以，经过了 100kpsi 强度筛选的光纤在施工安装过程中是不会出现断裂的情况的。

然而，光纤在应用环境中，光纤中的微裂纹会因为承受的应力而逐渐生长扩大，最终导致光纤的断裂。光纤在承受张应力作用下，有两种源于以下两类缺陷（裂纹）分布的失效（断裂）模式：一是本征缺陷（表面没有被损伤）；二是石英光纤表面有损伤的非本征缺陷。前者能很容易进行评估和测试，后者则需要通过实验来模拟且是引起光纤失效（断裂）的主要原因。采用两点弯曲

方法以不同速度来夹断光纤，测得的动态疲劳参数适用于光纤在弯曲状态下使用寿命的评估。

两点弯曲下，由光纤非本征缺陷引起的失效概率 F 可用以下公式来计算^[2]：

$$F = 1 - \exp \left\{ C_b L_{eff} N_p \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma_a^n t_a}{\sigma_p^n t_p} \right)^{\frac{m_e}{n-2}} \right] \right\} \quad (2)$$

其中： σ_a 是石英光纤表面在使用期 t_a 内承受的张应力， σ_p 是筛选张力， t_p 为筛选应力施加时间， N_p 是筛选中每单位长度的断点数， n 是疲劳参数， m_e 是非本征缺陷光纤的威泊参数， L_{eff} 为承受应力部分光纤的有效长度， C_b 是（静态）弯曲光纤有效长度的修正因子。对两点弯曲，有效长度 L_{eff} 可用以下公式计算：

$$L_{eff} = C_{2pb} R_{min} \quad (3)$$

式中， R_{min} 为两点弯曲中最小弯曲半径， m_e 可取 3， C_b 和 C_{2pb} 可分别取 0.2 和 2.24， σ_a 可通过以下简要公式计算：

$$\sigma_a = E \frac{r_f}{R_{min}} \quad (4)$$

式中， r_f 为石英光纤的半径 $62.5\mu\text{m}$ 。由公式（2）至公式（4），按 25 年的使用寿命，对于 1ppm 的失效概率（故障率），两点弯曲下不同弯曲半径对应的 n_d 值要求如图 2 所示，当弯曲半径为 5mm 时失效概率随 n_d 值的变化如图 3 所示。

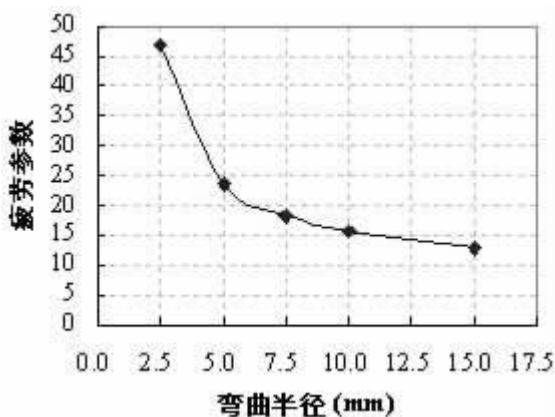


图 2 不同弯曲半径下要求的动态疲劳参数 (1ppm 失效概率)

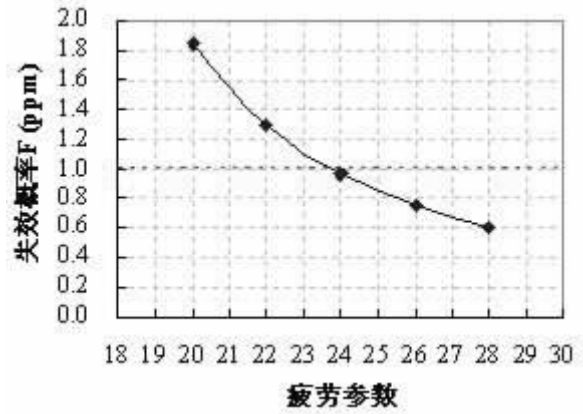


图 3 弯曲半径为 5mm 时失效概率随 n_d 值的变化

由图 2 和图 3 可知，当弯曲半径达到 5mm 时，只要光纤的 n_d 值达到 24 及以上，即可维持 1ppm 及以下的失效概率。考虑到测试误差，为确保光纤的机械可靠性，建议 G.657 光纤的 n_d 值最好能控制在 25 及以上。

当弯曲半径小于 5mm 时，光纤的本征缺陷对失效概率的影响逐渐超过了非本征缺陷，此时的失效概率 F 的计算公式为

$$F = 1 - \exp \left[- \frac{C_{2pb} R_{min}}{L_0} \left(\frac{\sigma_a^n t_a}{BS_{i0}^{n-2}} \right)^{\frac{m_i}{n-2}} \right] \quad (5)$$

此时的 F 值随弯曲半径的减小急剧上升，要提高这种情况下的光纤使用寿命，就不仅仅是更大的 n 值能够达到的了。

4. 长飞提高光纤机械性能的方法

4.1 先进的 PCVD 制造技术

长飞采用最为先进的等离子体化学气相沉积工艺 (PCVD) + RIC 复合 (Hybrid) 技术制造光纤预制棒。光纤的玻璃部分为 100% 的合成石英玻璃（如图 4 所示），波导部分由 PCVD 制造，该工艺具有以下优势：

- ◆ 对折射率剖面的精准控制
- ◆ 实现锗、氟、硼等掺杂剂的高掺杂
- ◆ 材料均匀性好

在 PCVD 工艺中，通过控制反应气体的流量，可实现光纤的波导结构、材料组成和结构设计的有机统一。对于 EasyBand®

系列光纤而言，采用了锗氟共掺以及功能梯度材料的设计思想，用以提高光纤的机械可靠性和抗弯曲的能力。

预制棒由非常精细的薄层一层一层地沉积而成，因此，预制棒可以看成是一种多涂层（coating）的材料。对于多层涂层的材料而言，内部残余的应力可以由公式（6）^[3]进行计算：

$$\sigma_1 = \frac{\sum (\alpha_1 - \alpha_i) \Delta T E_i}{\sum E_i / E_1 + K} \quad (6)$$

式中， α_1 、 E_1 和 σ_1 分别为心轴的热膨胀系数，弹性模量以及热应力， α_i 和 E_i 分别是涂料的热应力和弹性模量。 ΔT 为温度的变化量（ $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ）， K 是心轴与涂料之间的厚度比。从公式3可以看出，内部应

力的大小主要与各层之间热膨胀系数的差值有关。如果材料组成的变化很大，必定会有大量的残余应力产生。若采用功能梯度材料的设计思想，即通过合理的工艺，使得材料的组成和结构的变化沿着预制棒或光纤的横截面的径向逐渐缓慢的变化，则在横截面上不会产生明显的界面。因此，光纤的残余应力得到了控制，这将非常有利于提高光纤的机械可靠性。

机械包层部分（衬管和套管）采用纳米颗粒沉积的外部气相沉积（OVD）工艺。该部分材料均匀性好，经过等离子体抛光，可有效控制预制棒表面缺陷的尺寸及数量。结合先进的拉丝工艺，使得光纤表面的缺陷降至最低。

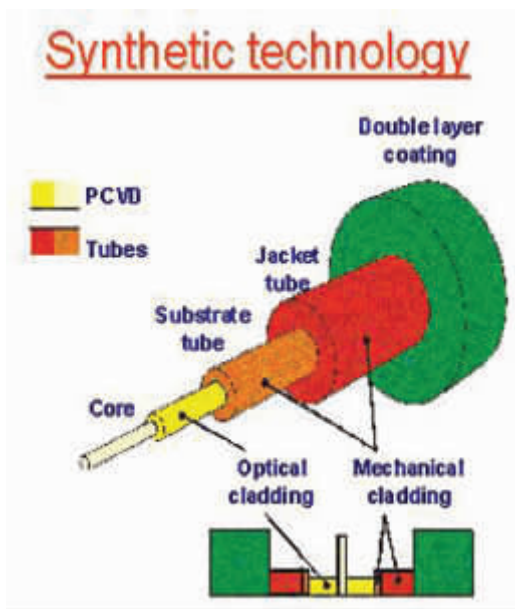
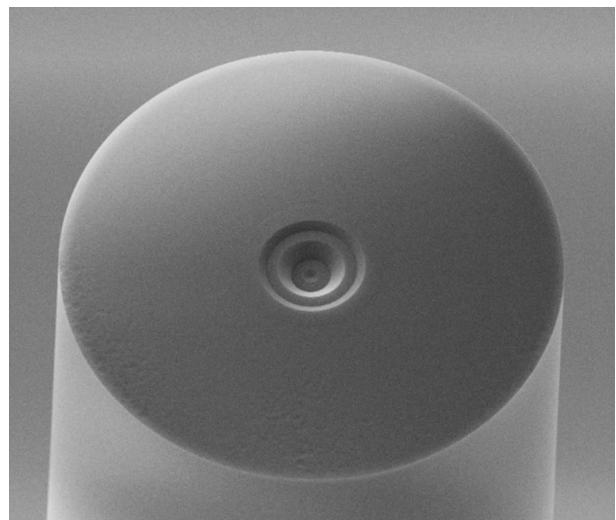


图4 EasyBand®系列光纤的结构以及端面的电子显微镜扫描的结果（经过氢氟酸腐蚀）



4.2 长飞专有的特殊设计的涂料

长飞采用了特殊设计的光纤涂层材料，用于提高光纤的动态疲劳参数（ n_d ），以进一步保证光纤在弯曲状态下的长期使用寿命。考虑到应力持续作用在光纤上会使得光纤产生静态疲劳并加速裂纹的生长和扩张，在内层涂料中添加某些特殊的成分，可有效阻止这种缺陷的生长和扩张，同时不会对光纤的其它性能产生不利的影响。这种涂料体

系可以为光纤提供最为可靠的保护，能够满足要求更为严格的紧套光缆、小尺寸光缆、气吹微缆等应用，表现出极其卓越的抗微弯性能。并且，在很宽的环境变化范围内（ $-60^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ），光纤涂料的剥离力都可以保持稳定，方便剥离。

4.3 可靠的光纤测试

为了评估光纤在一定弯曲半径下的断裂风险，需要采用可靠的测试手段和方法来评

估光纤的机械可靠性。筛选测试可以将大尺寸和强度差的缺陷点剔除。然而，通过了筛选测试的缺陷也必须得到综合的测试和评估，以评价光纤的可靠性^[4]。长飞采用两点弯曲法测试动态疲劳参数，以及抗张强度测试等方法来评估光纤的机械性能。两点弯曲法的动态疲劳参数测试更为接近光纤的实际使用情况，非常有利于分析光纤在小弯曲半径下的断裂几率。两点弯曲法测试的示意图如图 5 所示。具体的测试装置和步骤参看长飞公司白皮书 YOFC_10009_WP（光纤的疲劳参数）^[5]。

光纤的抗张强度测试装置和步骤参看长飞公司白皮书 YOFC_10010_WP（光纤的抗张强度测试）^[6]。

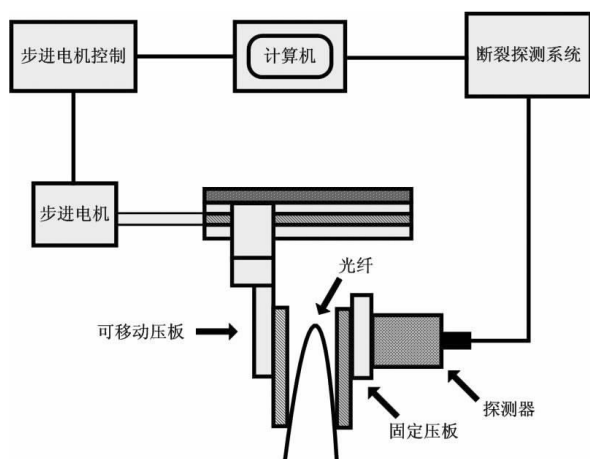


图 5 动态疲劳参数的测试（两点弯曲法）

5. 小结

由于 G. 657 光纤使用时有可能处于长

期弯曲状态下，因此其机械性能和使用寿命受到广泛的关注。

长飞 EasyBand® 系列光纤通过先进的材料设计和制造工艺控制，加上特殊设计的性能优越的光纤涂料，使得光纤的机械性能得以改进。作为影响光纤寿命的主要参数之一的光纤疲劳参数 (n_d 值)，EasyBand® 系列光纤的 n_d 值可以达到 25 以上，完全可以保证光纤在 5mm 弯曲半径以上时，25 年以上的使用寿命。

References

- [1] IEC 60793-1-33 Optical Fibres - Part 1-33: Measurement methods and test procedures - Stress corrosion susceptibility
- [2] P. Matthijsse, W. Griffioen, Matching optical fibre lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fibre storage, J. of Optical Fibre Technology, Vol. 11, Issue 1, Jan 2005
- [3] Han Qingrong et al., "Material Composition and Structure Design in PCVD Silica-Based Single-Mode Fibre," Proc. of SPIE, 2006 (10), Vol. 6352
- [4] G. S. Glaesemann et al., "Method for Obtaining Long-Length Strength Distributions for Reliability Prediction," Opt. Eng. 30 [6], pp746-748 (1991)
- [5] YOFC_10009_WP（光纤的疲劳参数）
- [6] YOFC_10010_WP（光纤的抗拉强度测试）

长飞光纤光缆有限公司

YANGTZE OPTICAL FIBRE AND CABLE COMPANY LTD.

地址：中国武汉关山二路四号

ADD: 4# Guanshan Er Road, Wuhan, China

邮编：Zipcode: 430073

电话：TEL: +86 27 67887266

+86 27 87802541

传真：FAX: +86 27 87801760

Http://www.yofc.com.cn