

光纤的机械可靠性及断裂形貌分析研究

齐永恒, 韩云钊, 王旭涛, 李卫可, 刘乃常, 胡凯

(中航光电科技股份有限公司, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为了分析影响光纤机械可靠性和寿命的主要因素, 通过模拟试验条件对比分析了引起光纤断裂的原因; 将试验光纤断裂表面形貌与在实际工作状态下出现的光纤断裂源形貌特征进行对比, 定性分析了引起光纤断裂形成的主要原因。分析认为是在外加应力的作用下, 工作环境中水分或水汽的存在加速了光纤表面裂纹的生长、扩展, 最终导致光纤断裂。

关键词: 裂纹; 应力腐蚀; 断裂形貌

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)04-0053-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis and research on mechanical reliability and fracture morphology of optical fiber

QI Yongheng, HAN Yunzhao, WANG Xutao, LI Weike, LIU Naichang, HU Kai

(China Aviation Optical-Electrical Technology Co., Ltd., Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In order to analyze the main factors that affect the mechanical reliability and lifespan of optical fiber, through the simulating test conditions, the causes of optical fiber fracture are analyzed. The surface morphology of the experimental fiber fracture was compared with the morphology characteristics of the optical fiber fracture source that appeared in actual working conditions, and the main reasons for the formation of optical fiber fracture were qualitatively analyzed. Analysis suggests that the presence of water or vapor in the working environment under external stress accelerates the growth and propagation of surface cracks on the optical fiber, ultimately leading to fiber fracture.

Key words: crack, stress corrosion, fracture morphology

0 引言

光纤光缆是光纤通信网络中最重要的元件, 然而由于其应用环境的复杂性和严酷性, 例如: 在航空航天系统中的低温环境, 地震监测系统中的高压、高腐蚀环境, 以及海洋探测系统中的高温、高湿环境等, 使其成为整个通信网络中最薄弱的环节。因此, 光纤光缆的可靠性是保证光纤网络建设正常运行及影响光纤机械寿命的重要因素^[1-2]。

光纤可靠性主要包括光学可靠性和机械可靠性, 本文主要研究光纤的机械可靠性。机械可靠性主要取

决于原材料、制造工艺、成缆工艺、敷设方式、应用环境等因素。通常情况下, 光纤的抗拉强度可以达到 5 GPa 以上, 但是由于光纤在实际生产制造过程中不可避免地存在裂纹等缺陷, 极大地降低了光纤的强度^[3-6]。目前, 国内外对光纤机械可靠性的研究相对较少, 特别是在特定的技术环境下出现的光纤断裂原因及影响因素分析。因此, 本文结合在实际使用环境中断裂的原始光纤, 通过试验复现断纤现象, 分析探究影响光纤机械可靠性及光纤寿命的主要因素。

1 光纤及插头基本结构和安装使用环境

光纤试样为美国康宁公司生产的 0.25 mm 裸光纤, 涂覆层材料为丙烯酸酯, 包层外径为 125 μm , 涂覆层外径为 245 μm 。在实际安装使用时, 装配好的蓝色转接插头(如图 1 所示)会被装在通信基站的射频拉远单元(RRU)上与光模块对接, 外面通过防水外壳体防护, 整体与外界隔离可以实现 IP66&67 密封。

收稿日期: 2022-08-31。

作者简介: 齐永恒(1987—), 男, 机械设计及理论专业硕士, 工程师, 现就职于中航光电科技股份有限公司, 主要从事光纤连接器、光纤和光缆组件的产品研发和光通信技术研究。参与完成河南省科学技术厅科学技术成果和中国电子元件行业协会科技成果各 1 项。



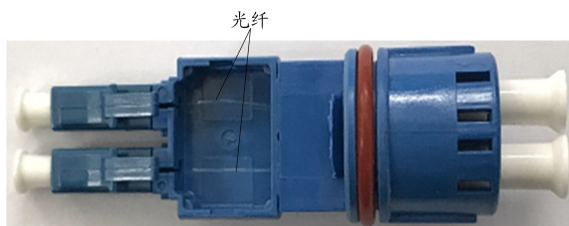


图 1 转接插头

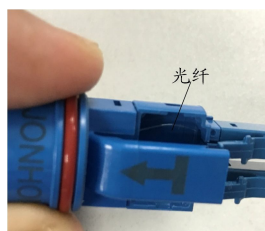
产品主要用于印度南方临海城市科钦地区,该地区每年 4~6 月为热季,7~9 月为雨季,室外气温高达 50 ℃。产品在安装使用之前存放在仓库中,转接插头自身没有密封功能,会受到外界高温高湿环境的影响。当转接插头安装到室外通信基站 RRU 上与模块对接时所处的环境更加恶劣,在高空中受到太阳的直射和 RRU 设备散发出的热量影响,使得产品在实际使用环境中的温度可高达 70 ℃以上。本次出现断纤的产品是在当时热季(4~5 月)安装到 RRU 上,安装使用 3 个月左右后,在 8 月初基站报警,经查看发现转接插头中的光纤断裂。

根据产品的自身结构和实际使用环境进行综合分析,认为本次断纤的主要原因如下:因光纤在连接器内留有一定的余量(弯曲余量产生一定的弯曲应力),当连接器插头与光模块对接后,连接器内部光纤弯曲应力增加,导致光纤在弯曲最严重的位置产生应力集中点,应力集中点在高温高湿环境影响下,光纤表面产生裂纹,随着时间的累积,裂纹逐渐扩展,直至出现断纤。因此,本文首先模拟仿真光纤在连接器内的应力情况,然后通过试验对比分析验证光纤断裂的主要原因。

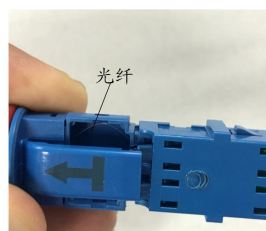
2 试验方法

2.1 有限元模拟仿真光纤在连接器内的应力

依据光纤在连接器内的实际弯曲状态(如图 2 所示),包括光纤在连接器内未受力情况下的自然弯曲状态(如图 2(a)所示)和连接器与斜面物理接触(APC)工装对接后,光纤在受力情况下的弯曲状态(如图 2(b)所示),本文采用 Abaqus 仿真分析软件模拟计算光纤在连接器内的受力情况。模拟试验参数设置如下:光纤



(a) 自然弯曲状态



(b) 受力时的弯曲状态

图 2 光纤在连接器内的 2 种弯曲状态

属性,如杨氏模量(72 GPa)、泊松比(0.25)、光纤能够承受的最大应力(5.7 GPa)等由康宁公司提供。光纤的原始长度为 13.32 mm,压缩总量为 1.54 mm,压缩后光纤长度由 13.32 mm 变化到 11.78 mm。模拟压缩试验分为 2 次压缩:第 1 次压缩量为 0.84 mm(模拟光纤在装上插头后光纤的一次压缩量),第 2 次压缩量为 0.7 mm(模拟插头与 APC 工装插头对接后光纤的二次压缩量)。

2.2 试验条件及分组

本文选用在基站安装连接器中发生断纤的产品(G.657A2 裸光纤)作为标准断裂源(A 组),编号为 1#~5#。该产品的存放、安装使用环境为高温高湿环境,为了复现和验证断纤的主要原因,将不同试验条件下的试验样品分为 2 组(B 组和 C 组),每组测试数量为 100 件,均参照 GR326 标准测试。具体试验条件及分组编号如表 1 所示,试验中所有的被测插头均与 APC 工装对接测试(模拟转接插头与 RRU 上的光模块对接),使得连接器内光纤弯曲量达到最大。

2.3 测试过程

试验前在图 3(a)所示的电荷耦合器件(CCD)显微镜下查看光纤表面的状态,保证试验前光纤涂层表面没有损伤。试验过程中每隔 24 h 查看光纤通断情况,使用笔式可视故障探测仪(如图 3(b)所示)通光检测光纤的通断情况及断纤位置。将试验过程中断裂的光纤及在实际使用过程中发生的断纤样品放在电子显微镜(SEM,型号为 JEM 2100,如图 3(c)所示)下查看光纤端面的断裂状态,分析引起断裂的主要原因。

表 1 试验条件及分组编号

组别	编号	试验项目	试验条件	测试设备	测试时间/h
A 组	1#~5#	高温高湿环境	70 ℃,室外雨季	—	—
B 组	6#~105#	高温低湿试验	75 ℃,相对湿度为 15%	高温箱	168
C 组	106#~205#	高温高湿试验	75 ℃,相对湿度为 95%	潮湿箱	168

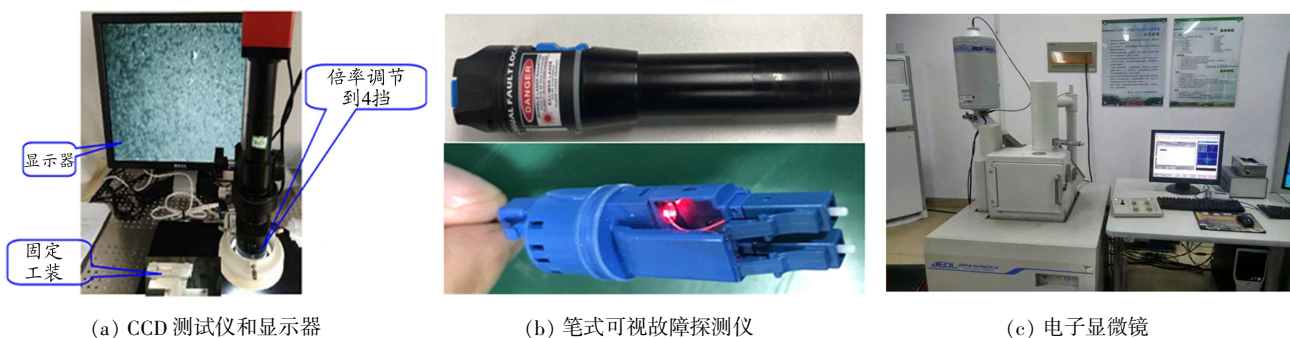
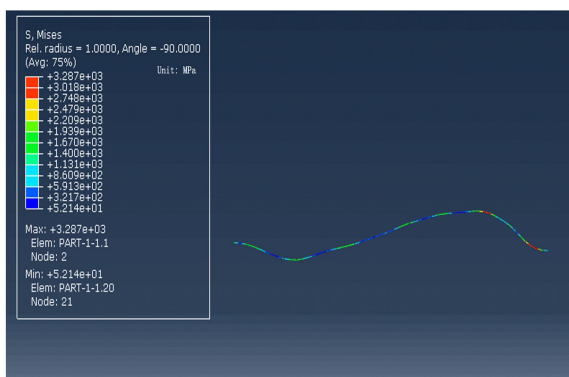


图3 分析测试工具

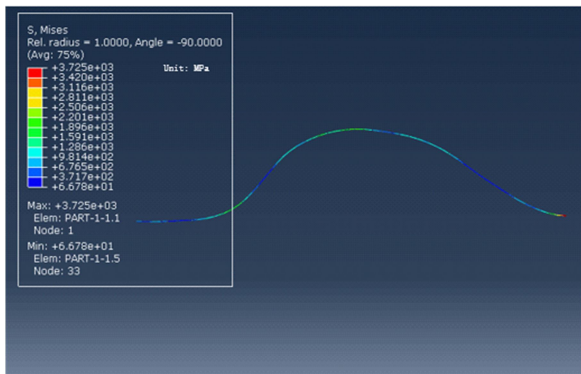
3 结果讨论

3.1 有限元模拟仿真分析结果

有限元模拟仿真光纤在连接器内的应力分析结果如图4所示。其中右端固定,第一次压缩(X 方向压缩量为 0.84 mm)的分析结果如图4(a)所示。可以看出,光纤的应力集中点在右端固定点附近,对应光纤连接器的法兰盘尾部,应力大小为 3.287 GPa ;右端固定,模拟第二次压缩(X 方向压缩量为 0.7 mm)的分析结果如图4(b)所示。可以看出,插头与APC工装对接后,光纤在外力的作用下,应力集中更加明显,应力大小增



(a) 一次压缩(压缩量为 0.84 mm)



(b) 二次压缩(压缩量为 0.7 mm)

图4 有限元模拟仿真光纤在连接器内的应力分析结果

加到 3.725 GPa 。文献[7]研究表明,光纤在静态负荷条件下玻璃强度会随时间的累加而降低,并且静态疲劳与玻璃表面原来存在的裂纹缓慢扩张有关。由此可知,光纤在连接器内产生应力集中时最大应力为 3.725 GPa ,小于光纤的极限断裂强度(光纤厂家提供的光纤极限断裂强度为 5.7 GPa),但是光纤一直处于受到外力作用的状态下,这是引起光纤断裂的一个重要因素。

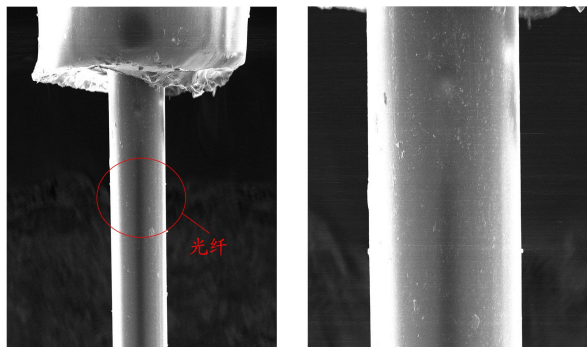
3.2 试验结果及分析

3.2.1 高温低湿试验结果及分析

高温低湿试验(B组)168 h后没有发生断纤的情况。对高温低湿试验后的光纤表面进行SEM分析,结果如图5所示。可以看出,光纤涂覆层表面相对比较光滑,没有发现明显的裂纹,也没有出现光纤表面裂纹扩展的现象。这表明即使在高温环境下,只要空气中没有水分影响光纤,即使是在长期受力的情况下,只要涂覆层没有破坏,光纤仍然可以正常地工作而不会出现断纤的现象,由此可知高温对光纤的机械可靠性及机械寿命影响较小。

3.2.2 高温高湿试验结果及分析

高温高湿试验(C组)在试验进行48 h后开始出现断纤的情况,随着试验时间的延长,断纤的数量逐渐增加,当试验168 h后,断纤的数量增加到10根,故



(a) 高温低湿试验后光纤表面 SEM 图 (b) 局部放大图

图5 高温低湿试验后光纤表面 SEM 图及其放大图

齐永恒,韩云钊,王旭涛,等. 光纤的机械可靠性及断裂形貌分析研究

障率约为 10%。这是因为高温高湿环境中含有水分并且会产生水蒸汽,当水汽透过光纤涂覆层渗入光纤包层到达纤芯后会与 SiO_2 (光纤纤芯和包层的组分) 发生化学反应 (光纤的 Si-O 结合键在水 H-OH 的作用下发生断裂),导致芯层表面裂纹的快速生长,裂纹生长到一定程度后就会出现断裂,这表明光纤强度在水和潮气的作用下会显著下降^[8-9]。

通过对比高温低湿试验和高温高湿试验结果可知,导致光纤断裂的主要因素是水分或水汽的存在会促进光纤表面裂纹扩展,在外力的作用下,经过时间累积,裂纹逐渐生长变大最终达到光纤的断裂极限而发生断裂。

3.3 光纤断裂截面形貌分析

在实际安装使用过程中,A 组光纤断裂截面的 SEM 图及断裂区域放大图如图 6 所示。可以看出,I 区域所在的环形截面为光纤涂覆层,断裂截面相对较平整,玻璃体断裂截面高出涂覆层断裂面;II 区域和 III 区域为光纤纤芯和包层,其中 II 区域玻璃体断裂截面不规则,出现明显的局部破碎,而 III 区域玻璃体断裂截面平整。断裂源截面出现以上形貌的原因如下:1) 光纤在连接器内受到插件压缩而产生弯曲应力,由有限元分析可知光纤在法兰盘尾部产生的应力最大值为 3.725 GPa;2) 由于弯曲导致光纤局部受力不均匀,光纤的外侧承受着拉应力,内侧承受着压应力,在外力及高温高湿环境的作用下,经过时间的累积,光纤表面出现断裂并且断裂表面呈现出一半平整一半破碎的状态。



图 6 A 组光纤断裂截面的 SEM 图及断裂区域放大图

模拟实际使用环境,高温高湿试验(C 组)进行 48 h 后出现断纤,被测试样样品光纤断裂截面的 SEM 图及断裂区域放大图如图 7 所示。可以看出,I 区域所在的环形截面为光纤涂覆层,断裂截面出现一小段撕裂的块状碎屑,其它涂覆层断裂区域断裂截面十分整齐没有碎屑;II 区域为光纤纤芯和包层,玻璃体断裂截面较平整,没有出现局部破碎的情况。本文分析认为:在外力作用下,弯曲应力超过光纤涂覆层的断裂极限应力,

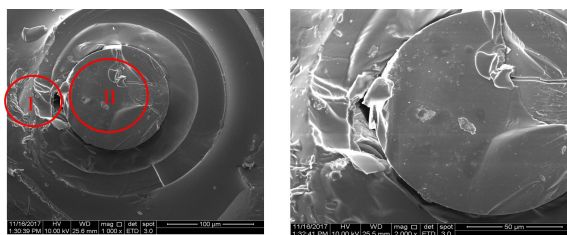


图 7 C 组 6# 光纤断裂截面图及断裂区域放大图

光纤表面涂覆层最先开裂;裂纹在外力及高温高湿环境的影响下有较大的扩展动力,光纤表面的 H_2O 、 $-\text{OH}$ 、极性气体或液体等活性物质会进入到光纤裂纹深处,加速裂纹的生长,导致光纤涂覆层和玻璃体同时断裂。因此,断裂截面相对较平整,基本上没有破碎的玻璃体残留,随着应力的不断变化,最终导致剩余的一部分涂覆层断裂,直到光纤全部断开。

3.4 光纤表面裂纹生长的动态过程

为了了解光纤表面在试验过程中的动态过程,本文采用 CCD 显微镜观察高温高湿试验(C 组)中的光纤表面,观察时间为 0 h (试验前)、12 h、24 h、36 h、48 h,并对各个时间段内光纤表面的变化情况进行记录,裂纹生长的动态过程如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,试验前光纤表面没有裂纹;随着试验时间的增加,光纤表面在应力集中区域(光纤跳线法兰盘尾部附近)出现损伤,如图 8(b)所示;然后,光纤表面涂覆层出现了微小的裂纹,在外加应力(主要是弯曲应力)和环境水分的共同作用下,裂纹逐渐扩展、生长变大,如图 8(c)和图 8(d)所示。最后,裂纹生长的速度加快,导致光纤断裂,如图 8(e)所示。

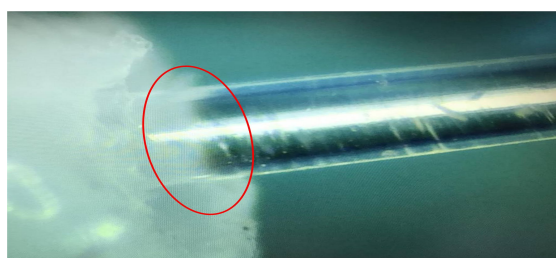
4 减少光纤断裂措施

减少光纤断裂措施如下:

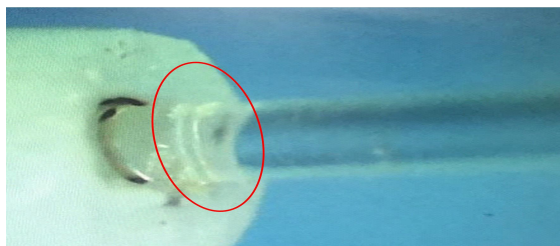
1) 避免应力集中。为了避免光纤与胶粘剂界面应力集中导致涂覆层损伤,可以采用束管或者热缩管等材料将光纤与胶粘剂隔离,也可以在光纤与胶粘剂界面使用硅胶或者光纤保护胶保护,使得界面应力平缓过渡,避免出现应力损伤。

2) 采用密封结构。潮湿环境加速了光纤的断裂,应该尽量避免光纤直接暴露在潮湿环境下使用,可以采用一些密封结构尽量减少水汽的侵扰。

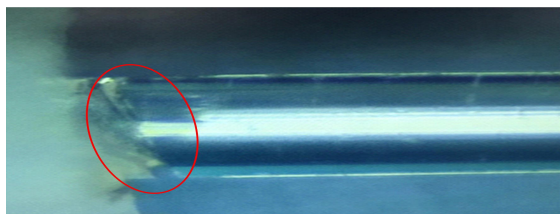
3) 选用高强度光纤。在保证产品性能的情况下,避免使用 0.25 mm 裸光纤,尽量选用强度更高、抗微弯性能优良的紧包光纤。



(a) 0 h, 无裂纹



(b) 12 h 后出现损伤痕迹



(c) 24 h 后出现微裂纹



(d) 36 h 后裂纹生长



(e) 48 h 后裂纹扩展、断裂

图 8 光纤表面裂纹生长的动态过程

5 结束语

本文针对真实自然环境中(温度、潮气、酸碱度和交变应力等)发生光纤断纤的情况,模拟试验复现了光纤断裂现象,并对断裂光纤表面形貌进行 SEM 分析,得出以下结论:

1)通过有限元模拟仿真可知光纤在连接器内产生应力集中时最大应力为 3.725 GPa,虽然小于光纤的断裂极限强度,但是光纤一直受到外力的作用,是引起光纤断裂的一个重要原因。

2)高温低湿环境对光纤的机械可靠性及机械寿命影响较小,但光纤若长期受到高温的作用,其机械可靠性及其它性能还有待进一步探讨。

3)通过高温低湿试验和高温高湿试验结果对比分析可知,导致光纤断裂的主要原因是工作环境中存在的水分或水汽促进了光纤表面裂纹的扩展,在外力及高温环境的作用下使-OH 运动加速,应力集中点经过时间的累积,裂纹逐渐生长、扩展直至断裂。

4)通过对光纤断裂表面的形貌分析可知,光纤断裂的过程是一个缓慢进行的动态变化,光纤表面的裂纹随着应力的不断变化而加剧。

参考文献

- [1] 陈炳炎. 光纤光缆的设计和制造[M]. 杭州:浙江大学出版社,2003.
- [2] 陆云清,陆懿,王瑾. 高湿环境对光纤动态疲劳的影响[J]. 光通信研究,2015(5):29-32.
- [3] 王彦亮,李昌民. 光纤强度与加压涂覆技术[C]// 中国通信学会. 第八次光通信会议论文集. 武汉:中国通信学会,1997:542-543.
- [4] 于福熹. 现代玻璃科学技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.
- [5] TARYAL B K. Effect of zero stress aging on the strength of optical fiber [C]//SPIE. Proceedings of Fiber Optics Advances in Research and Development, New York: SPIE, 1979: 113-126.
- [6] CARTER A, SAMSON B, TANKALA K, et al. Damage mechanisms in components for fibre lasers and amplifiers[C]//The International Society for Optical Engineering. Proceedings of SPIE. Bellingham: The International Society for Optical Engineering, 2005: 561-571.
- [7] 竺逸年. 高强度硅基玻璃通信光纤的疲劳机理 [J]. 光通信技术, 1998,22(4):297-301.
- [8] 陈黎明,刘 骋,侯继勇,等. 光纤的机械可靠性及寿命评估[J]. 光通信研究,2016(4):22-26.
- [9] 张晖,阳建红,李海斌,等. 高温高湿环境对环氧树脂性能影响研究[J]. 兵器材料科学与工程,2010(3):41-43.