

doi:10.13756/j.gtxyj.2015.05.009

光纤光缆技术与应用

高湿环境对光纤动态疲劳的影响

陆云清¹, 陆 懿¹, 王 瑾¹, 张 驰², 蒋新力^{3,4}

(1. 南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023; 2. 南通大众燃气有限公司, 江苏 南通 226001;
3. 中天科技光纤有限公司, 江苏 南通 226009; 4. 江苏中天科技股份有限公司, 江苏 如东 226463)

摘要:为了探究高湿环境对光纤动态疲劳的影响, 实验选取多组光纤, 分别在高湿和一般环境下采用两点弯曲法测量光纤的动态疲劳。通过对动态疲劳曲线和实验数据进行分析发现, 在高湿环境下, 光纤所能承受的断裂应力会下降, 且测试时的应力速率越高, 断裂应力下降越明显, 进而影响光纤动态疲劳参数 N_d 值。

关键词:环境湿度; 动态疲劳; 光纤

中图分类号: TN818 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2015)05-0029-03

Effects of high humidity on optical fiber dynamic fatigue

Lu Yunqing¹, Lu Yi¹, Wang Jin¹, Zhang Chi², Jiang Xinli^{3,4}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;
2. Nantong DaZhong Gas Corporation, Nantong 226001, China; 3. Zhongtian Technology Fiber Optic Co., Ltd.,
Nantong 226009, China; 4. Zhongtian Technology Co., Ltd., Rudong 226463, China)

Abstract: In order to investigate the effects of high humidity on the dynamic fatigue of optical fibers, we select multiple groups of fibers in experiments and measure their dynamic fatigue in high humidity and normal environments by the two-point bending method. On the basis of analyzing the dynamic fatigue curves and the experimental data, we find that the fracture stress that fibers can endure is reduced in a high-humidity environment and that the higher the stress rate, the more distinct the fracture stress is decreased, thus affecting the N_d values of the fiber dynamic fatigue parameters.

Key words: environmental humidity; dynamic fatigue; optical fiber

0 引 言

随着光纤的广泛使用, 其应用环境变得越来越苛刻, 例如航空航天系统中的低温环境, 地震监测系统的高压、高腐蚀环境, 以及海洋探测系统中的高湿环境等^[1]。为了了解特殊环境下光纤的可靠性和使用寿命, 有必要对光纤的动态疲劳性能进行探究。所谓动态疲劳是指, 给光纤施加一个恒定的应力速率, 测量光纤断裂时的断裂应力和时间, 求出动态韦伯参数和动态疲劳因子, 进而预测光纤的可靠性和寿命^[2-4]。在实际情况中, 外加应力及光纤表面所存在的裂纹和微裂纹都会影响光纤的动态疲劳。本文主要关注高湿环境对光纤的影响, 当光纤表面有裂纹和微裂纹存在时, 由于环境湿度的原因, 水会与光纤在裂纹处发生一系列的化学反应, 导致光纤受到一定程度的腐蚀, 进而影响其动态疲劳^[5]。因此, 在现代的生产制备过程中, 一般会使用硅橡胶、聚氨酯或丙烯酸酯等材料涂覆在光纤表面, 阻止水气的侵蚀以起到保护光纤的作用, 延长光纤的使用寿命, 提

高光纤的可靠性^[6]。然而, 光纤表面的涂覆层并不能完全阻止水气对光纤的侵蚀, 所以, 对比常湿和高湿环境下测量的光纤动态疲劳值 N_d , 研究高湿环境对已制备成型光纤的动态疲劳的影响非常有必要。

1 光纤动态疲劳测量实验

1.1 样品准备

实验中使用的光纤测试样本是在相同的温度和湿度等生产环境下生产的、具有双涂覆层的单模光纤, 涂覆材料为丙烯酸酯。在测试光纤动态疲劳值 N_d 之前, 首先对所抽取的各批次光纤的涂覆层固化度进行测试, 测试环境温度为 $21 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度为 50%, 测试设备为 Thermo 红外光谱仪 (Nicolet iS10), 筛选出固化度高于 93% 的光纤; 然后对筛选出的光纤再进行涂覆层可剥性测试, 测试环境温度为 $21 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度为 50%, 测试设备为拉力机和剥离器 (方法和标准参考国标^[7]), 筛选出涂覆层剥离力平均值为 1~5 N、峰值为 1.3~8.9 N 的光纤; 最后从固化度和涂覆层可剥性都达到要求的光纤中随

收稿日期: 2015-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61275067); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012830, BK20131383); 江苏省科技型中小企业技术创新基金资助项目 (BC2014138); 江苏省产学研前瞻性联合研究基金资助项目 (BY2014013)

作者简介: 陆云清 (1977—), 男, 江苏扬州人。工学博士, 主要研究方向为衍射微光学器件设计和研究, 新型激光、光纤材料与器件研究。

机抽取实验样本,用于 N_d 的测试。

实验中共抽取 8 根单模光纤,其中 7 根为未着色光纤,1 根为着色光纤(蓝色),每根光纤被分为两组,共 16 组,每组光纤分为 64 段,每段长为 3 cm,分别用于常湿(50%)和高湿(95%)环境中动态疲劳的测试。在测试光纤动态疲劳前,将两组待测光纤分别静置在温度为 $21\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下约 12 h,第一组环境湿度为 50%,第二组环境湿度为 95%。

1.2 动态疲劳值 N_d 的测量

光纤动态疲劳值 N_d 的测试方法通常有两种,分别为拉伸法和两点弯曲法。由于拉伸法需要使用复绕成盘的光纤,在静置实验环境的过程中,复绕成盘的待测光纤不能与实验环境充分接触,因此本文选择两点弯曲法测试光纤的动态疲劳。两点弯曲法实验装置如图 1 所示,将光纤置于两压板间,用计算机控制步进电机以确定的速率驱动压板,直到光纤断裂,通过测出光纤断裂时的压板间距来测量光纤呈两点弯曲几何形状断裂时所需要的应力值。

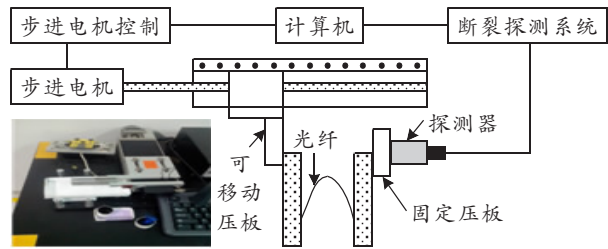


图 1 两点测弯仪装置图

实验中,将每组 64 段光纤再分为 4 组,采用 1、10、100 和 1 000 $\mu\text{m/s}$ 四种不同的移动速率来驱动压板,测试环境的温度为 $21\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,湿度为 50%,测试时长 2 h。记录光纤断裂时的压板间距,并计算光纤断裂应力 σ_f 。计算公式为^[8]: $\sigma_f = E_0 \cdot \epsilon_f(1 + 0.5\alpha'\epsilon_f)$, 式中, $\epsilon_f = \frac{1.198d_f}{d - d_c + 2d_g}$, $\alpha' = 0.75\alpha - 0.25$, E_0 为杨氏模量, ϵ_f 为光纤弯曲顶点的断裂应变, α 为非线性应力(典型值为 6), d_f 为单模光纤直径, d 为光纤断裂时压板间距, d_c 为测试光纤的总直径(包括涂层), $2d_g$ 为两个压板槽的总深度。

光纤动态疲劳参数值 N_d 的计算公式如下:
$$\lg\sigma_f(0.5) = \frac{1}{N_d - 1} \cdot \lg \frac{\nu}{r} + \text{截距}$$
 式中, $\sigma_f(0.5)$ 为 中值断裂应力, r 为单模光纤半径, ν 为压板移动速率, 截距为压板速率为 1 $\mu\text{m/s}$ 时断裂应力的对数, 即截距 = $\bar{Y} - (\text{斜率})\bar{X}$, $\bar{Y}$ 、 $\bar{X}$ 均为估算值, 其计算方式可参照标准 GB/T 15972.33-2008。又斜率 = $1/(N_d - 1)$, 由上述公式即可计算出 N_d 的值。

2 实验结果及分析

图 2 所示为随机抽取的两组光纤样本的动态疲劳值曲线,分别为测试光纤 2#、5# 和 8#(着色)。图中, s_f 为断裂应力, u 为应力速率。通过比较常湿(50%)和高湿(95%)环境中两组光纤的动态疲劳曲线可以看出,在高湿环境下,湿度越大,拟合曲线斜率越小。由于环境湿度的影响,光纤的断裂应力发生了明显的改变,从而导致了光纤动态疲劳值 N_d 的改变。

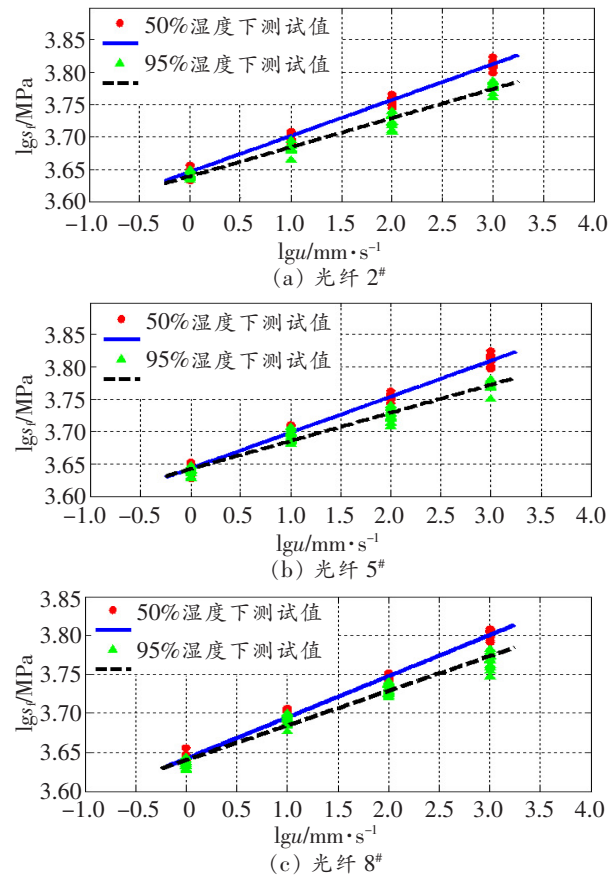


图 2 动态疲劳值曲线

根据前文公式,可以由断裂应力对数与应力速率对数的线性曲线,即动态疲劳曲线的斜率求出动态疲劳值 N_d 。 N_d 与斜率成反比,线性曲线的斜率越小, N_d 值越大。表 1 所示为由所抽取的 8 根光纤测得的动态疲劳曲线计算出的动态疲劳值 N_d 。通过对比可以发现,静置后高湿环境中光纤的动态疲劳值 N_d 均大于在一般湿度环境中光纤的动态疲劳值 N_d 。同时,在不同的测试速率下,环境湿度对断裂应力的影响也不同。实验记录了测试光纤 2#、5# 和 8#(着色)在速率 1 和 1 000 $\mu\text{m/s}$ 下的断裂应力值,每个速率下分别测试 15 次,从中随机抽取 5

组数据,如表 2~4 所示。

表 1 在不同湿度环境下静置后的
光纤动态疲劳值 N_d

样品号	动态疲劳值 N_d	
	湿度 50%	湿度 95%
测试光纤 1 [#]	19.0	19.8
测试光纤 2 [#]	19.0	23.2
测试光纤 3 [#]	20.6	24.0
测试光纤 4 [#]	19.2	22.8
测试光纤 5 [#]	19.0	23.9
测试光纤 6 [#]	19.9	25.4
测试光纤 7 [#]	19.1	21.7
测试光纤 8 [#] (着色)	19.9	23.4

表 2 光纤 2[#] 在不同测试环境下的断裂应力 σ_f

测试 次数	速率 1 $\mu\text{m/s}$		速率 1 000 $\mu\text{m/s}$	
	湿度 50%	湿度 95%	湿度 50%	湿度 95%
1	4 392.6	4 338.4	6 524.4	5 981.1
2	4 431.9	4 355.8	6 582.9	6 013.8
3	4 446.4	4 373.2	6 508.9	5 958.3
4	4 453.6	4 385.6	6 421.6	5 958.3
5	4 529.5	4 470.4	6 459.3	6 104.1

表 3 光纤 5[#] 在不同测试环境下的断裂应力 σ_f

测试 次数	速率 1 $\mu\text{m/s}$		速率 1 000 $\mu\text{m/s}$	
	湿度 50%	湿度 95%	湿度 50%	湿度 95%
1	4 340.1	4 312.7	6 482.1	5 926.1
2	4 359.2	4 312.7	6 260.6	5 994.1
3	4 380.3	4 321.2	6 501.3	5 869.1
4	4 426.5	4 361.0	6 444.1	5 997.4
5	4 439.1	4 433.7	6 512.8	5 926.1

表 4 光纤 8[#] 在不同测试环境下的断裂应力 σ_f

测试 次数	速率 1 $\mu\text{m/s}$		速率 1 000 $\mu\text{m/s}$	
	湿度 50%	湿度 95%	湿度 50%	湿度 95%
1	4 322.9	4 238.8	6 410.3	5 923.0
2	4 354.0	4 288.9	6 325.5	5 692.4
3	4 392.6	4 333.2	6 314.6	5 945.4
4	4 406.8	4 335.0	6 384.3	5 865.9
5	4 527.6	4 408.6	6 373.2	5 958.3

对比表中数据可以看出,在较高的测试速率下,断裂应力下降幅度较大,约在 500~600 MPa;而在较低的测试速率下,所测得的断裂应力值下降幅度相对较小,约在 50~100 MPa。在对被测光纤进行动态疲劳测试之前,我们已经对光纤的涂覆层固化度以及剥离性进行过筛选,基本上排除了涂层固化不佳导致光纤动态疲劳下降的可能性。

根据裂纹顶端应力强度的线性断裂机理:外部应力强度 $K=Y\sigma\sqrt{a}$,式中, Y 为几何形状因子, σ 为施加应力, a 为裂纹深度。 K 用来表征集中在裂纹

尖端的应力,当 K 达到临界值 K_c ,即断裂应力时,光纤发生断裂。在施加相同应力的情况下,测试得知,在高湿环境中处理过的光纤有较低的断裂应力值,意味着在恒定的测试速率下光纤会在更短的时间内断裂。导致此现象的一个重要因素便是湿度,由于在高湿环境下,水气会与裂纹尖端的硅氧键发生水解作用,加速裂纹的生长,降低了光纤所能承受的断裂应力。根据裂纹扩张速率定律: $V=AK^{N_d}$,式中, V 为裂纹生长速度, A 为裂纹生长速度的比例系数,结合表 1~4 和动态疲劳参数值 N_d 计算公式,可以看出在不同测试速率下,断裂应力下降幅度不均匀,致使在高湿环境下测试所得的拟合曲线斜率小于常湿环境下的拟合曲线斜率。因此在高湿环境下所测得的动态疲劳值 N_d 均增大,意味着高湿环境下光纤表面存在的裂纹具有更快的生长速度^[9-10]。

在静置于高湿环境 12 h 后,着色光纤所能承受的断裂应力值也明显减小,进而改变了其动态疲劳值,并且测试速率越高,断裂应力下降越明显。由此可以看出,高湿环境对着色和未着色光纤的动态疲劳都存在一定的影响。

3 结束语

通过实验研究我们可以得出以下结论:即使光纤有涂覆层的保护,依然无法绝对阻止潮气对光纤的影响。在高湿环境下,水气会透过涂覆层对光纤产生一定的腐蚀作用,使得光纤所能承受的断裂应力下降,并导致光纤动态疲劳参数 N_d 增大。实验结果对光纤在海洋探测系统、石油勘探系统等高湿环境下的应用,有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 胡思晨. 光纤通信技术的应用及发展分析 [J]. 电子技术与软件工程,2015,(05):49.
[2] 王宝珠,邓宏林,李小瑞,等. 制导光缆中光纤寿命预期 [J]. 应用光学,2005,(06):44-48.
[3] 竺逸年. 高强度二氧化硅玻璃光纤的疲劳机理 [J]. 光纤与电缆及其应用技术,1997,(04):3-6,11.
[4] Hakan H, Kapron Felix P. Use of fatigue measurement for fiber lifetime prediction [J]. SPIE, 1990, 1366:144-156.
[5] Sudipta Bhaumik. 拉丝环境湿度对高强度光纤动态疲劳的影响 [J]. 光通信研究,2005,(03):49-52.
[6] 潘志勇,任军江,黄剑平,等. 大长度高强度碳涂覆光纤的研制 [C]//全国第十三次光纤通信暨第十四届集成光学学术会议论文集. 南京:中国电子学会,中国通信学会,中国光学学会,2007:146-150.

(下转第 66 页)