

光纤寿命与疲劳参数的关系研究

张立岩^{1,2},李婧^{1,2},段建彬^{1,2},严长峰^{1,2},刘璐^{1,2}

(1.光纤光缆制备技术国家重点实验室,武汉 430073;2.长飞光纤光缆股份有限公司,武汉 430073)

摘要:自光纤诞生之日起,光纤寿命一直是人们关注的问题。然而光纤寿命的理论复杂,较难理解。光纤寿命和疲劳参数之间的关系缺乏试验数据。介绍了光纤寿命的数学理论模型及其影响因素,并详细介绍了动态疲劳参数 n_d 和静态疲劳参数 n_s 的测试方法。采用不同的测试方法测试了光纤疲劳参数 n 值,通过设计试验验证了 n_d 与 n_s 之间的关系,以及疲劳参数与光纤寿命之间的关系。试验结果证明:疲劳参数越大,光纤寿命越长。

关键词:光纤寿命;静态疲劳参数;动态疲劳参数

中图分类号:TN915.62 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)02-0054-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on relationship between optical fibre lifetime and optical fibre fatigue parameter

ZHANG Liyan^{1,2}, LI Jing^{1,2}, DUAN Jianbin^{1,2}, YAN Changfeng^{1,2}, LIU Lu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Wuhan 430073, China;

2. Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430073, China)

Abstract: Optical fibre lifetime has been concerned since the invention of optical fibers. However, the lifetime theory is complex and not easy to understand. The relationship between optical fibre lifetime and optical fibre fatigue parameter n is lack of experimental data. This paper outlines the mathematical model of fiber lifetime and its effects. Then introduces the detailed test methods of dynamic fatigue parameters n_d and static fatigue parameter n_s . Through measurement of n values based on different methods and experiment design, the relationship between n_d and n_s , as well as the relationship between fatigue parameters and fiber lifetime have been studied. The experimental results show that optical fibre has higher fatigue parameters can get a higher fiber lifetime.

Key words: optical fibre lifetime; dynamic fatigue parameter; static fatigue parameter

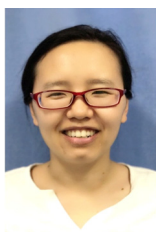
0 引言

光纤寿命表征的是光纤的机械强度。自光纤诞生之日起,光纤寿命一直是光纤性能研究的主要问题之一。为此,人们对影响光纤寿命的问题进行了大量的研究^[1-4]。光纤疲劳参数作为光纤寿命的主要影响因素,其测试也引起了光纤研究者、制造者和用户的广泛关注。光纤疲劳参数有多种测试方法,根据测试加

收稿日期:2018-03-13。

基金项目:湖北省自然科学基金(批准号:2017CFB673)资助。

作者简介:张立岩(1984-),女,硕士研究生,工程师,2010年进入长飞公司,主要从事通信光纤及特种光纤的测试技术研究、测试平台开发工作,研究方向包括新型光纤的测试技术研发、光纤光缆寿命、光纤系统传输和光纤涂料测试等。曾获湖北省科学技术成果推广奖二等奖。



载力的方式不同,光纤疲劳参数可以分为动态疲劳参数 n_d 和静态疲劳参数 n_s 。其中国际和国内相关产品标准规范对 n_d 有指标要求,而 n_s 测试由于比较耗时且鲜有商用化设备,少有数据报道。因此对于 n_d 和 n_s 的关系缺乏足够的数据支撑。此外,光纤寿命和疲劳参数之间的关系虽然不乏理论研究,但是缺乏直观的试验数据。

本文采用不同的测试方法测试了光纤的疲劳参数 n 值,包括均匀弯曲静态疲劳参数、两点弯曲静态疲劳参数、两点弯曲动态疲劳参数和轴向张力动态疲劳参数,从而验证了动态疲劳参数和静态疲劳参数之间的关系。并通过静态疲劳参数测试平台,测试了不同 n 值水平光纤的寿命,从而寻找疲劳参数和光纤寿命之间的关系。

1 光纤寿命

1.1 光纤寿命理论模型

大多数通信光纤是由石英玻璃纤芯、包层和高分子涂敷层组成的。石英玻璃是脆性材料,在受力作用时,玻璃光纤的断裂理论遵从脆性材料断裂理论——幂定律^[5-7]。玻璃光纤在受到外力作用时,利用幂定律,可以推导出光纤的寿命模型:

$$t_f = \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_a} \right)^n \left[t_p \left(\left(\frac{L_p}{L} \ln \frac{1}{1-F} + 1 \right)^{\frac{n-2}{m_e}} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

其中, t_f 为光纤寿命, F 为失效概率, σ_a 为加载应力, σ_p 为筛选应力, t_p 为筛选时间, L_p 为平均筛选长度, L 为光纤有效长度, n 为疲劳参数, m_e 为静态疲劳得到的威布尔分布斜率值。

国际电工委员会标准 IEC TR 62048 中详细介绍了由幂定律推导出光纤寿命理论模型的复杂过程。从光纤寿命计算模型可以看出, 光纤寿命 t_f 和失效概率 F 是同时存在的概念。在描述光纤寿命时, 必须给出假定的失效概率才可以计算光纤寿命。在寿命模型中有些参数是给定的(如失效概率)或外加的(如加载应力、光纤长度等), 而疲劳参数 n (应力腐蚀敏感性参数) 是反映光纤自身性能的, 是一个无量纲的量。 n 体现了光纤在外应力作用下, 光纤表面微裂纹扩展速度。在其它条件相同时, n 的数值越大, 微裂纹扩展越慢, 光纤寿命就越长。

光纤寿命计算模型是理论推导, 需进行很多假设, 如假设环境条件不发生变化, 光纤只受单一不变的力等, 这是一种理想情况下的模型。该模型适用于光纤受力较小的情况, 此时光纤寿命一般都是数十年, 很难进行试验验证。但是该模型给出光纤寿命的发展趋势是对的, 这在短期实验中得到了证实^[8,9]。

1.2 光纤寿命影响因素

从式(1)的光纤寿命理论模型中, 可以得出影响光纤寿命的一些因素: ①光纤自身耐应力腐蚀的性能, 可以通过测试 n 值来评价; ②光纤筛选过程, 包括筛选应力 σ_p 、筛选时间 t_p 以及得到的平均筛选长度 L_p ; ③受力情况, 光纤受外力越大, 越容易断裂; ④受力光纤长度,

受力长度越长则失效概率越大; ⑤环境, 潮湿或者高温会加速微裂纹扩展。

IEC TR 62048 标准针对 4 种受力情况对寿命计算模型进行了一一阐述。4 种受力情况分别是: ①轴向拉应力, 反映了光纤在干线光缆中的受力情况; ②均匀弯曲, 反映了光纤在接入网中, 以及接头盒中打圈盘留时的受力情况; ③弯曲和拉应力共同作用, 反映了光纤在接入网敷设转角处等场景下的受力情况; ④两点弯曲, 反映了光纤在接入网敷设场景的受力情况。

对于轴向拉伸受力情况, 因为光纤每一部分受力均匀, 可以直接使用式(1)计算光纤寿命; 对于另外 3 种弯曲的情况, 因为光纤受力是不均匀的, 计算光纤寿命时, 需要将光纤受力长度乘以一个系数 C_b 来得到等效均匀受力情况下的光纤长度 L_{eff} , 才能进行计算。

2 疲劳参数测试方法

2.1 测试方法概述

标准 IEC 60793-1-33 中规定的 5 种疲劳参数的测试装置如图 1 所示。图 1(a)和图 1(b)中的测试方法测量的是光纤的动态疲劳参数; 图 1(c)、图 1(d)和图 1(e)中的测试方法测量的是光纤的静态疲劳参数。

2.2 动态疲劳参数 n_d 测试

动态疲劳参数 n_d 测试要求以一定的应力速率 V_σ

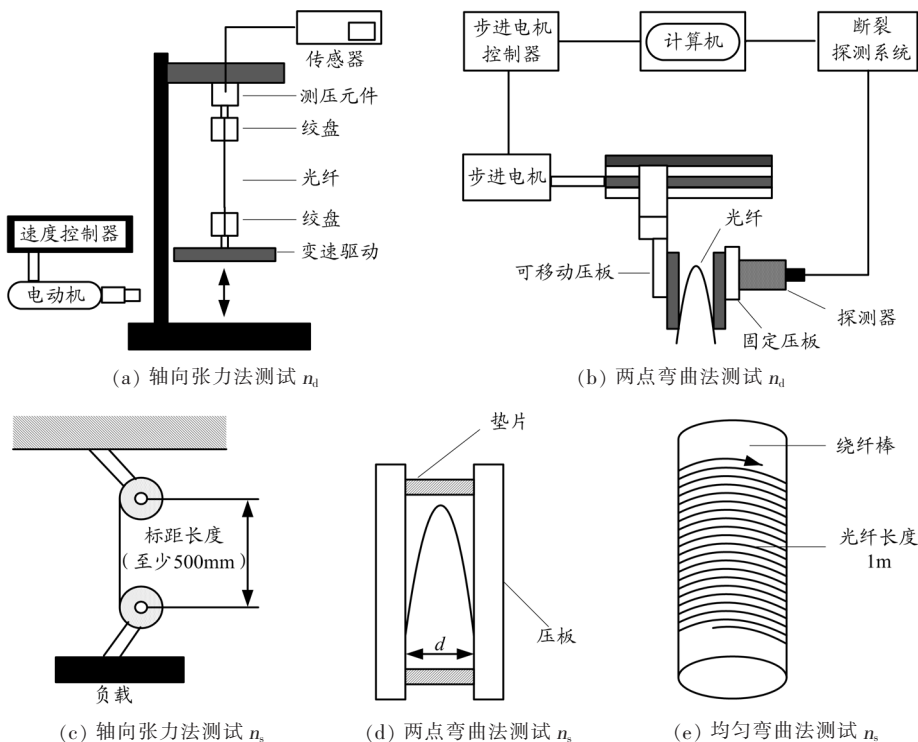


图 1 疲劳参数测试装置示意图

对长度为 L 的光纤施加应力直至光纤断裂为止,记录光纤断裂应力 σ_f ; 在同一速率条件下,进行多次测试 (≥ 15),对得到的多个 σ_f 进行威布尔分布排序,计算出 50% 概率的断裂应力值 $\sigma_{f0.5}$; 采用一系列不同的应力速率 V_σ ,对光纤进行动态疲劳测试,得到一系列不同的 50% 概率光纤断裂应力 $\sigma_{f0.5}$,通过式(2)拟合直线,根据拟合斜率计算得到 n_d 。

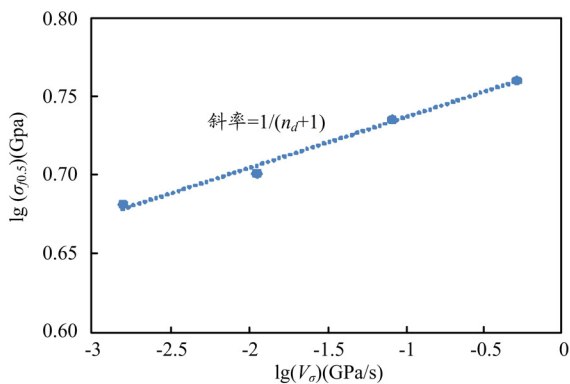
$$\lg(\sigma_{f0.5}) = \frac{1}{n_d + 1} \times \lg(V_\sigma) + \text{截距} \quad (2)$$

2.3 静态疲劳参数 n_s 测试

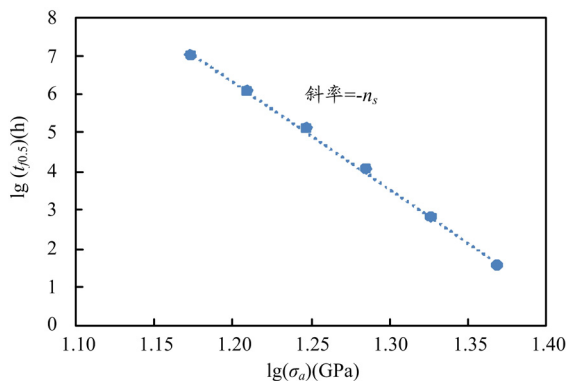
对长度为 L 的光纤施加恒定应力 σ_a ,直至光纤断裂为止,记录光纤断裂所用的时间 t_f ; 在同一应力条件下,进行多次测试 (≥ 15),对得到的多个 t_f 进行威布尔分布排序,计算出断裂中值时间 $t_{f0.5}$; 采用一系列不同的恒定应力 σ_a ,对光纤进行静态疲劳测试,得到一系列不同的光纤断裂中值时间 $t_{f0.5}$,利用式(3)拟合直线,用拟合直线斜率计算得到 n_s 。

$$\lg(t_{f0.5}) = -n_s \lg(\sigma_a) + \text{截距} \quad (3)$$

图 2(a)和图 2(b)分别是动态疲劳参数和静态疲劳参数测试得到的拟合曲线示意图。 n_d 和 n_s 都是通过拟合直线的斜率计算得到的,拟合值和实际值往往存



(a) 动态疲劳参数



(b) 静态疲劳参数

图 2 光纤疲劳参数拟合曲线

在一定偏差,因而标准规定拟合斜率的标准偏差要足够小,才能保证测试得到的 n_d 和 n_s 是可信的,否则,得到的 n 值会存在比较大的误差。对于 n_d 测试拟合斜率标准偏差要求小于 0.0017; 对于 n_s 测试,拟合斜率标准偏差要求小于 1。

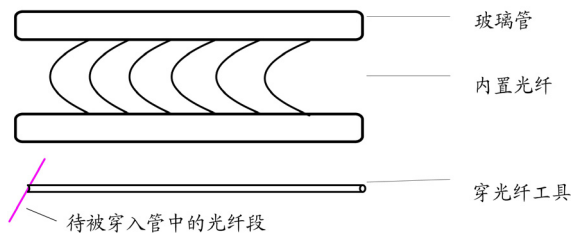
3 n 值和光纤寿命关系

3.1 试验设计

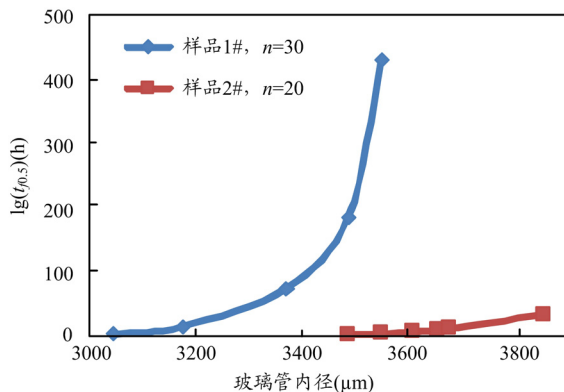
从光纤寿命理论模型可知, n 值越大,光纤寿命越长。本文对这一理论进行了试验验证。分别选择一盘 n 值接近 30 的光纤样品(1#)和一盘 n 值在 20 附近的光纤样品(2#)进行对比测试,比较了两光纤在两点弯曲和均匀弯曲受力条件下的寿命。

3.2 两点弯曲寿命测试对比

两点弯曲寿命测试装置如图 3(a)所示。通过专用工具将光纤送入一定管径的玻璃管中,使光纤处于两点弯曲状态,此时光纤受弯曲应力,通过声音传感器和玻璃管相连。当光纤发生断裂时,声音传感器便会发送信号给电脑,记录断裂时间,从而得到光纤寿命,如图 3(b)所示。从光纤寿命曲线可以看出,随着玻璃管内径的增大,光纤的断裂寿命也呈指数增长;在相同的玻璃管径条件下, n 值较大的 1# 样品寿命要远远大于 n 值较小的 2# 样品;随着玻璃管径的增大,两者之间寿命差异也越拉越大。以上结论成立的前提是,



(a) 测试装置示意图



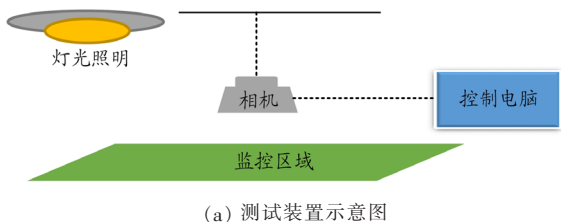
(b) 光纤寿命曲线

图 3 两点弯曲法测试光纤寿命

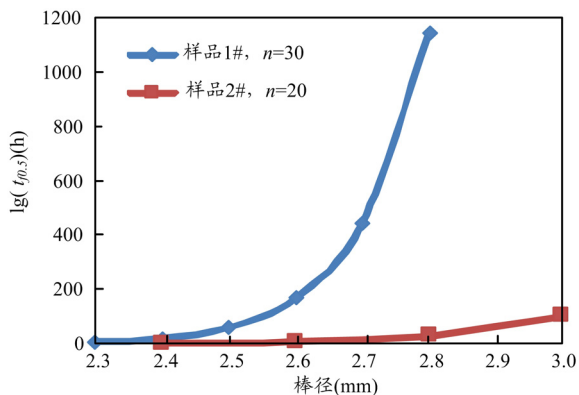
光纤 n 值测试结果是可靠的,且两光纤所处的环境是相同的。

3.3 均匀弯曲寿命测试对比

均匀弯曲寿命测试装置如图 4(a)所示。长度为 1m 的光纤,以一定的张力绕到玻璃棒上,通过相机监控绕好光纤的多批玻璃棒上的光纤断裂情况,从而获得光纤寿命数据。其测试结果如图 4(b)所示。可以看出,该方法与两点弯曲法的情况相同, n 值较大的 1# 样品寿命要远远大于 n 值较小的 2# 样品。



(a) 测试装置示意图



(b) 测得的光纤寿命曲线

图 4 均匀弯曲法测试光纤寿命

4 n_d 和 n_s 的关系

光纤的产品标准只对光纤的动态疲劳参数 n_d 的指标提出了具体的要求,但没有对光纤的静态疲劳参数 n_s 的指标提出要求。 n_d 测试装置成熟、测试速度快捷,从而得到广泛使用;而 n_s 既没有成熟的测试装置,又耗时(每盘光纤测试周期至少一个月)费力,少有使用和测试报道。光纤业界一直没有探明对于 n_d 和 n_s 之间的关系。本文利用几种不同的测试方法对静态疲劳参数 n_s 和动态疲劳参数 n_d 进行测试,找出了 n_d 和 n_s 之间的关系。

我们共选择了 5 个不同的光纤样品,分别采用轴向张力法和两点弯曲法进行了动态疲劳参数 n_d 测试,采用均匀弯曲和两点弯曲法测试静态疲劳参数 n_s 。测试结果如表 1 所示。可以看出,采用不同的测试方法获得的 n 值之间差异非常小,标准偏差不超过 1。因

此,可以认为不同方法测试的 n 值是等效的, n_d 和 n_s 也是等效的。

表 1 不同测试方法的 n 值对比

参数与其测试方法		样品 A	样品 B	样品 C	样品 D	样品 E
n_s	均匀弯曲法	28.4	21.3	—	—	—
	两点弯曲法	28.0	22.6	27.4	28.9	27.3
n_d	轴向张力法	29.2	22.5	—	—	—
	两点弯曲法	29.4	21.5	28.3	29.7	26.8
标准偏差		0.660	0.670	0.636	0.566	0.354

5 结束语

为了确保光缆的使用寿命超过 25 年,研究光纤寿命是一件非常有意义的工作,深入研究光纤寿命离不开试验数据验证,试验数据来源于高效的检测装置和长时间的测试跟踪。本文通过光纤寿命疲劳测试装置,用试验数据验证了采用不同测试方法得到的疲劳参数结果基本一致,动态疲劳参数与静态疲劳参数结果等效;光纤疲劳参数越大,光纤寿命越长。光纤寿命疲劳测试装置为现在和未来深入研究光纤寿命创造了良好的条件。

参考文献:

- [1] MITSUNAGA Y, KATSUYAMA Y, KOBAYASHI H, et al. Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(7): 4847–4853.
- [2] KURKJIAN CR, KRAUSE JT, MATTHEWSON MJ. Strength and fatigue of silica optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(9): 1360–1370.
- [3] 竺逸年. 通信光纤可靠性问题的研究[J]. 光通信技术, 1991, 15(3): 29–36.
- [4] 刘泰, 翟庆诗, 刘红峰. Analysis of factors affecting optical fiber reliability[J]. 光通信研究, 2012(5): 33–36.
- [5] GRIFFIOEN W W. Evaluation of optical fiber lifetime models based on the power law[J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 488–497.
- [6] 国际电工委员会. 光纤可靠性 - 幂定律研究报告: IEC TR 62048-2014[S]. Geneva: International Electronics Commission, 2014.
- [7] MATTHEWSON M J. Models for fiber reliability [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1993, CR50: 3–31.
- [8] ZHANG L, JING L, YAN C, et al. Static fatigue parameter measurement of optical fibre based on uniform bending [C]//Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 10–13, 2017, Guangzhou, China. Guangzhou: OSA, 2017.
- [9] DUAN J, ZHANG L, LI J, et al. Environmental effects on static n value of silicon optical fibre [C]//International Cable & Connectivity Symposium (IWCS), Oct. 9–12, 2017, Orlando, USA. Orlando: IWCS, 2017.