

doi:10.3788/gzxb20134204.0427

环圈光纤的失效预测

梁小红, 刘军号

(中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

摘要:以光纤的机械可靠性为主线综述了光纤材料中固有裂纹的生长和传播所导致的光纤断裂机制. 在该断裂力学的基础上推导了传统通信光纤在平直应用中的寿命预测模型, 继而分析了处于弯曲构型中的传感环圈光纤表面的应力分布, 然后在与传统理论相同的基本断裂机理下, 类比于通信光纤可靠性模型的推导, 据此应力分析给出了评估这种环圈光纤的机械可靠性的一般模型. 进而从工程应用的角度简化了所推导出的一般模型, 使之能够快速简单地给出环圈光纤失效概率的保守评估. 在此简化模型的基础上, 数值计算了目前常见的几种传感环圈中的光纤在服役期间的累积失效概率; 其结果同时也显示了该环圈光纤的失效概率对光纤参量、环圈参量以及工艺参量的依赖关系. 根据这一依赖关系, 不仅可以快速评估在各种服役应力条件下具有不同寿命要求的光纤环圈的失效概率, 同时也能对这些环圈的设计提供参考.

关键词: 光纤; 失效概率; 机械可靠性

中图分类号: TQ342+.82

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0427-5

Failure Prediction of Coiled Fibers

LIANG Xiao-hong, LIU Jun-hao

(The 46th Research Institute, China Electronics Technology Group Company, Tianjin 300220, China)

Abstract: The mechanism of crack occurrence and propagation in optical fibers were reviewed with emphasis on the reliability of optical fibers. The lifetime prediction model of communication optical fibers were given on the basis of the fracture mechanics. The stresses distribution of optical fibers in the configuration of fiber coils was analyzed. A general model was derived for evaluating the mechanical reliability of this kind of coiled sensing fibers. The model was then simplified to an alternative model for engineering applications. This simplified model would bring the conserved results out rapidly and simply. Several numerical calculations of the failure probability in service time of various fiber coils with different fiber radius and bending radius were carried out using the simplified model. The results displayed the dependence of the failure probability on the parameters of the fibers, coils, and the process. According to the relation, the failure probability and the lifetimes could be estimated for fiber coils installed. Meanwhile, the relations provided the guidelines to various design solutions of the fiber coils with deferent geometric configurations and service conditions in the future.

Key words: Optical fibers; Failure probability; Mechanical reliability

0 引言

光纤的出现不仅引起了通信技术的革命, 同样为传感技术提供了新的实现途径; 经过近半个世纪

的研发, 已经形成了光纤通信^[1-2]和光纤传感^[3-4]这两大应用领域, 同时也被发现在未来光网^[5-6]中潜在着重要应用. 许多国家都已经对光纤光缆进行了大量的检查, 并且未来的检查也被期望将急剧增加. 光

第一作者: 梁小红(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为光纤制造技术. Email: yuqishenliujunhao@yahoo.com.cn

责任作者(通讯作者): 刘军号(1980—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为光纤光学. Email: deishi5204@163.com

收稿日期: 2012-07-30; 录用日期: 2012-09-04

纤光缆需要具有充分长的寿命这一点是非常重要的,这就自然地引出了光纤的可靠性问题.光纤系统失效的一个可能而重要的原因是光纤本身,它能够由于静态疲劳情形中应力导致的光纤包层表面原有微裂纹的生长而断裂^[7-10].然而对于光纤的机械可靠性研究,过去大多集中于通信光纤在恒定且均匀分布的拉伸应力状态下的分析,并且前后提出了数十种光纤可靠性模型^[11],之后被统一为一个基本模型并进行了适当简化^[12].随着光纤传感技术的成熟,大量光纤环圈被应用在诸如光纤陀螺和光纤电流传感器的系统中.这种系统中的传感光纤几乎全都处在弯曲状态,这使得传统的光纤可靠性模型明显地不再适用.因为物理上,即使无拉伸应力的纯粹弯曲也必然导致在光纤表面不均匀分布的弯曲应力^[13-16].因此有必要从基本原理出发重新推导弯曲状态下光纤的机械可靠性模型.本文就旨在完成这一推导过程,以给出新近报导的环圈光纤机械可靠性模型^[16]的物理原理及其在实际应用中的参考意义.在此基础上通过数值模拟验证这一模型,然后以该模型为基础,数值预测目前主要应用的几种环圈光纤在服役期间不同服役条件下的失效概率.同时预测了几种可能出现的不同设计方案中环圈型中的传感光纤的可靠性.

1 传统光纤的寿命模型

1.1 经典断裂力学和传统寿命模型

材料的断裂涉及两个独立的序列过程:裂纹产生和裂纹传播.一般地,这两个过程的其中一是决定性的;尽管有时候认识到这两个过程对失效都有显著贡献也是重要的.在诸如光纤等大多数结构重要的陶瓷材料中,存在的原有尖锐裂纹使得裂纹传播通常是决定性失效过程^[7-8].这样,对于裂纹传播的分析将能够预测材料到达失效的时间(当裂纹产生也是必须的时候,这将是保守评估)^[9-10].

传统光纤是由具有硅氧四面体环状结构的二氧化硅玻璃制成的,这些四面体的力学键将导致约 20 GPa 的强度(即所能承受的最大应力),但是在裂纹尖端处的由裂纹几何结构导致的应力集中引起了光纤在较低应力水平断裂^[7-12].这一应力集中被用如下定义的应力强度因子 K_I 刻画^[8-12]

$$K_I = \sigma_a Y \sqrt{a} \quad (1)$$

式中 a 是裂纹深度, σ_a 是外加应力; Y 是依赖于裂纹几何的常量,对于玻璃光纤最为关键的表面裂纹,有 $Y = \sqrt{\pi}^{[8]}$.当 K_I 达到 $8 \times 10^5 \text{ N/m}^{3/2}$ 的临界值 K_{IC} 时就发生断裂,因而在裂纹深度与材料强度之间存在

唯一的联系^[10].把方程(1)的两边平方后对时间求导给出^[7]

$$\frac{dK_I}{dt} = \left(\frac{\sigma_a^2 Y^2}{2K_I} \right) \frac{da}{dt} \quad (2)$$

该式分离变量后就得到在恒定应力下到达失效的时间为^[9]

$$t_i = \left(\frac{2}{\sigma_a^2 Y^2} \right)_{K_{II}}^{K_{IC}} \left[\frac{K_I}{da} \right] dK_I \quad (3)$$

式中 K_{II} 是玻璃光纤表面最严重裂纹处的初始应力强度因子, K_{IC} 是临界应力强度因子.

裂纹生长速率 da/dt 与外加应力强度因子 K_I 之间的众所周知的幂法则关系已经被证明对于诸如玻璃的一大类陶瓷材料经验地成立^[7-9,11]

$$AK_I^n = \frac{da}{dt} \quad (4)$$

式中是 A 依赖于试验环境的常量;而 n 是基本上独立于环境的应力腐蚀率参量,而且经常被认为是材料性质.把方程(4)带入方程(3)就得到失效时间的很好近似

$$t_i = \left[\frac{2}{AY^2(n-2)\sigma_a^n} \right] K_{II}^{2-n} \quad (5)$$

在方程(5)的推导中, K_{IC}^{2-n} 被相对于 K_{II}^{2-n} 而忽略,因为在玻璃中, $10 < n < 50$ 且 $K_{II} < 0.9K_{IC}^{[8]}$.由于应力强度因子与外加应力是如方程(1)所示的线性关系,所以初始应力强度因子可以被表示为

$$K_{II} = \frac{\sigma_a}{S_i} K_{IC} \quad (6)$$

式中 S_i 是初始光纤在惰性环境中的断裂强度,即所谓初始惰性强度,它表征了光纤的初始强度.把方程(6)带入方程(5),得到失效时间为

$$t_i = \left[\frac{2}{AY^2(n-2)K_{IC}^{n-2}} \right] S_i^{n-2} \sigma_a^{-n} = BS_i^{n-2} \sigma_a^{-n} \quad (7)$$

方程(7)中的失效时间简单地表示了一条裂纹从初始的亚临界尺寸生长到突然传播(导致瞬时断裂)而所需的时间,该初始裂纹尺寸在方程中被惰性环境中的断裂强度所刻画.方程中引入的 B 是疲劳参量,在 B 值和初始强度 S_i 已知时,该方程就是预测光纤(处在平直拉伸状态中的)外加应力下的寿命的基本方程.

1.2 强度分布导致的失效概率评估

众所周知,光纤的初始强度具有双参量 Weibull 分布^[9-12],该分布同时也给出了不存在疲劳时光纤材料在应力 σ 下的累积失效概率为^[17]

$$F(\sigma, A) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \frac{A}{A_0} \right] \quad (8)$$

式中的 A 是样品的表面积, A_0 是表示线度面积和尺寸统一性的参量, σ_0 给出了应力线度.对于一个

面元 dA , 这一概率变为^[13]

$$dF(\sigma, dA) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \frac{dA}{A_0} \quad (9)$$

把方程(7)中的初始强度 S_i 代为方程(9)中的应力 σ 即得到该面元上的初始分布为

$$dF(t_i, dA) = \left(\frac{t_i \sigma_a^n}{B \sigma_0^{n-2}}\right)^{\frac{m}{n-2}} \frac{dA}{A_0} \quad (10)$$

方程(10)中的外加应力在样品表面上的积分, 就给出样品在外加应力 σ_a 下的失效概率为

$$F(t_i, dA) = 1 - \exp \left[- \int \left(\frac{t_i \sigma_a^n}{B \sigma_0^{n-2}}\right)^{\frac{m}{n-2}} \frac{dA}{A_0} \right] = 1 - \exp \left[- \int f(t_i, \sigma_a) \frac{dA}{A_0} \right] \quad (11)$$

这是传统光纤在服役期内的不同时刻的累积失效概率预测的基本方程. 该方程中的被积函数

$$f(t_i, \sigma_a) = \left(\frac{t_i \sigma_a^n}{B \sigma_0^{n-2}}\right)^{\frac{m}{n-2}} \quad (12)$$

描述的是一定的试验环境(即 B 值一定)下, 某种试验样品(即 σ_0 和 m 确定)在外加应力 σ_a 下的寿命 t_i . 如下文所要讨论的, 通过分析弯曲应力在光纤表面的不均匀分布, 该模型就可以涵盖处在弯曲构型中的环圈光纤.

2 环圈光纤的寿命模型

2.1 弯曲光纤的应力分布

光纤由于弯曲而产生的表面应力完全地依赖于弯曲构型. 最简单的弯曲情况是一定长度的光纤整个地以恒定的半径弯曲, 这也就是以零张力绕环的情形. 如图 1 所示, 假设骨架半径为 R , 光纤包层半径为 r , 涂覆半径为 r' . 在光纤中轴也就是 $\theta=0$ 处, 弯曲产生的应力 σ 等于零. 在 $\theta=\pi/2$ 时弯曲应力达到最大, 为 $\sigma_{\max} = rE/(R+r')$. 在其他位置处的弯曲

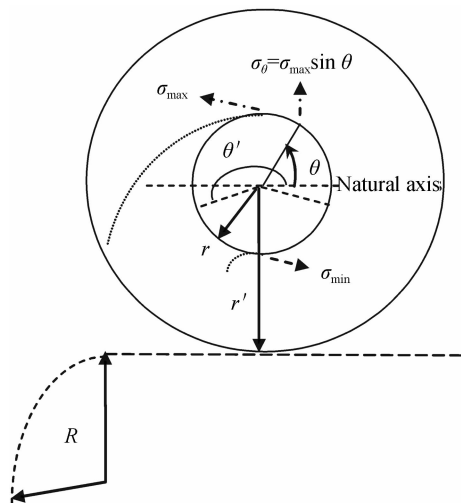


图 1 环圈光纤的应力分布

Fig. 1 Stress distribution in coiled fiber

应力为 $\sigma = \sigma_{\max} \sin \theta$. 如果将这些值带入方程(11)并利用 $dA = r d\theta$, 就可以得到这种纯弯曲情形的 Weibull 累积失效概率, 也就是以恒定半径弯曲的光纤的强度分布函数为^[14-15]

$$F = 1 - \exp \left[- \int_0^{l_b} \left(\frac{\sigma_{\max} \sin \theta}{\sigma_0}\right)^m \frac{r d\theta}{A_0} \right] \quad (13)$$

同时在光纤长度 l_b 上积分可将上述方程简化为

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_0}\right)^m \frac{r l_b}{A_0} \int_0^{\pi} \sin^m \theta d\theta \right] \quad (14)$$

如果令^[13,15]

$$G(m) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \sin^m \theta d\theta = \int_0^{\pi/2} \sin^m \theta d\theta = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{m+1}{2}\right)}{2 \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)} \quad (15)$$

式中 $G(m)$ 是利用多项式近似易于得到的 Gamma 函数^[13,15], 然后将方程(15)代入方程(14)就可以得到纯弯曲光纤的累积失效概率为

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}\right)^m \frac{2 r l_b}{A_0} G(m) \right] \quad (16)$$

然而, 在目前诸如光纤陀螺等传感系统中所采用的光纤环圈, 为保证环圈的均匀性和规则性, 一般地均以某一恒定的轴向拉伸应力 σ_c 绕制而成^[16]. 当不考虑环圈用胶和空气中的水汽通过涂层的渗透等因素时, 这种光纤环圈的失效概率就简单地是以一定张力 σ_c 弯曲成半径为 R 的环圈光纤的失效概率为

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{\max} + \sigma_c}{\sigma_0}\right)^m \frac{2 r l_b}{A_0} G(m) \right] \quad (17)$$

方程(17)就是光纤环圈中的光纤初始强度分布函数, 形式上该方程也是 Weibull 分布, 由此可以逆向推断得到环圈光纤在服役期间承受的外加应力分布为

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} + \sigma_c) \frac{2 r l_b}{A_0} G(m) \quad (18)$$

得到了处于环圈构型中的传感光纤表面的应力分布, 就可以按照上文推导其可靠性模型.

2.2 环圈光纤的寿命模型

根据 COST218 建议模型, 以持续时间为 t_p 的恒定张力 σ_p 筛选过的通信光纤, 在其服役期间处在一定的外加应力 σ_a 下的失效概率与服役时间 t_a 的关系为^[12]

$$\sigma_a = \left(\frac{t_p}{t_a}\right)^{\frac{1}{n}} \left\{ \left[1 - \frac{l}{L} \ln(1-F) \cdot \left(\frac{B S_0^{n-2}}{\sigma_p^n t_p}\right)^{\frac{m}{n-2}} \right]^{\frac{n-2}{m}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} \sigma_p \quad (19)$$

式中 l 是 Weibull 参量 m 的定义长度, L 是环圈光

纤的长度, F 是失效概率, B 和 n 分别是光纤的腐蚀常量和疲劳因子, S_0 为光纤的初始惰性强度。

在模型(19)中带入上文得到的环圈光纤的应力分布方程(18), 易于得到评估环圈光纤机械可靠性的模型为^[16]

$$F = 1 - \exp \left\{ \frac{L}{l} \left(\frac{BS_0^{n-2}}{t_p \sigma_p^n} \right)^{\frac{n-2}{m}} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{t_a}{t_p \sigma_p^n} \times \left[\left(\frac{r}{R+r'} E + \sigma_c \right) \frac{2rl_b}{A_0} G(m) \right]^n \right]^{\frac{m}{n-2}} \right\} \right\} \quad (20)$$

该方程即为本文旨在推导的环圈光纤的机械可靠性的一般模型. 由于该模型评估也就是方程计算的复杂性, 从工程应用角度, 我们建议可以通过合理假设而对该模型加以简化。

首先, 忽略张力筛选的应力卸载过程中的裂纹生长, 则筛选后的光纤具有筛选应力的最小强度, 以此最小强度作为环圈光纤的初始惰性强度将得到保守结果^[7,16]. 换句话说, 在方程(20)中可取 $S_0 = \sigma_p = eE$; 其中 e 是筛选应变。

其次, 从上文弯曲光纤的应力分布可知, 忽略涂层厚度导致的弯曲半径的增大部分也将给出保守结果, 也就是说, 还可取 $r' = 0$ 。

最后, 假设光纤表面受到其最大弯曲应力的均匀拉伸. 这三条假设均以不同方式不同程度地增大了失效概率, 也就是说, 在这些假设下的评估将给出保守结果^[16]. 这样, 得到的用于环圈光纤失效预测的保守评估的简化模型为

$$F = 1 - \exp \left\{ \frac{L}{l} \left[\frac{B}{t_p (eE)^2} \right]^{\frac{n-2}{m}} \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \frac{t_a}{t_p (eE)^n} \left(\frac{r}{R} E + \sigma_c \right)^n \right]^{\frac{m}{n-2}} \right\} \right\} \quad (21)$$

该简化模型与平直光纤的模型是易于比较的, 这提供了环圈光纤可靠性保守评估的一种等效方法. 即在可靠性的评估中, 可以把处在弯曲状态的环圈光纤等效为处在平直状态的通信光纤. 这一等效在工程上更便于应用, 这为未来环圈光纤可靠性评估提供了一种更易于操作的可能性。

3 数值评估

采用简化模型(21), 就可以方便地评估传感器中的环圈光纤在服役期间的失效概率. 下文给出的数值例子分为三种不同情形区别考虑(注意为方便图示, 图2和3中的部分失效概率分别放大了不同的倍数)。

1) 筛选张力(亦即初始强度)的影响—以不同张力筛选的同种光纤绕制在相同直径的骨架上(图2);

2) 弯曲半径(亦即弯曲应力)的影响—以相同张

力筛选的同种光纤绕制在不同直径的骨架上(图3);

3) 光纤半径(以及不同光纤)的影响—以相同张力筛选的不同光纤绕制在相同的骨架上(图4)。

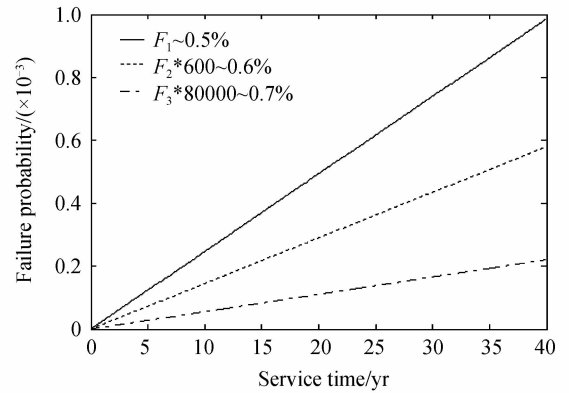


图2 筛选张力对环圈光纤可靠性的影响

Fig. 2 The effect on mechanical reliability of proof test

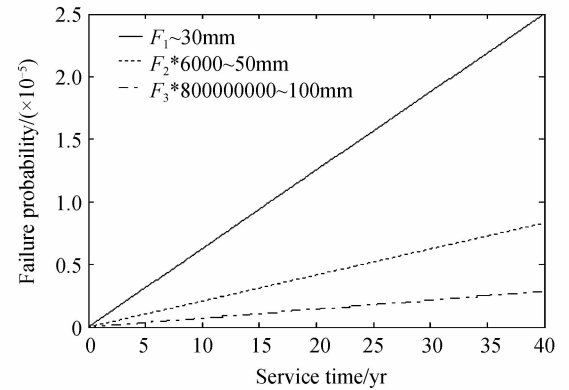


图3 弯曲半径对环圈光纤可靠性的影响

Fig. 3 The effect on mechanical reliability of bending radius

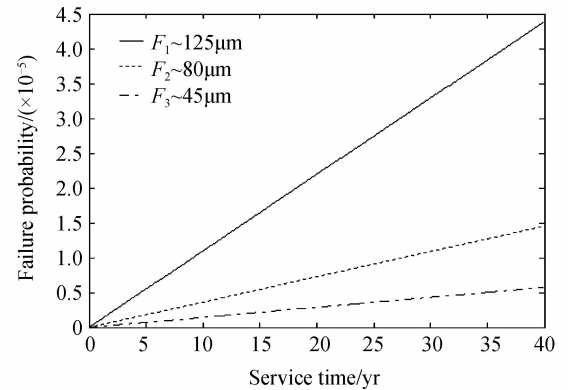


图4 光纤直径对环圈光纤可靠性的影响

Fig. 4 The effect on mechanical reliability of fiber radius

这三个数值例子所取的共同参量为: 光纤长度 $L = 1\ 000\ \text{m}$; Weibull 参量 $m = 2$, 其定义长度 $l = 0.5\ \text{m}$, 腐蚀率 $n = 20$, 疲劳常量 $B = 10^{-1.4}\ \text{GP}^2\ \text{s}$, 张力筛选应力的居留时间 $t_p = 0.28\ \text{s}$, 光纤玻璃的 Young 模量 $E = 70\ \text{GPa}$, 绕环张力均取为 $10\ \text{g}$ 承重。

在例1中, 弯曲半径取 $R = 100\ \text{mm}$; 筛选应变分别取 0.5% , 0.6% , 0.7% ; 结果如图2所示, 服役期间的失效概率随着筛选应变的增加而急剧降低。

注意为方便演示,图中以通过了 0.6% 和 0.7% 应变筛选的光纤绕制的环圈的失效概率分别是实际值的 600 和 8×10^4 倍. 在例 2 中,光纤直径取普通光纤的标准值 $r=0.125$ mm; 光纤的弯曲半径也就是环圈骨架的内径分别取 30 mm, 50 mm, 100 mm; 结果如图 3 所示. 同样的原因, 50 mm 和 100 mm 弯曲半径的光纤的失效概率分别是实际值的 6 000 和 8×10^7 倍; 这表明同样条件下, 弯曲半径的增大对可靠性的提高是非常显著的. 在例 3 中, 弯曲半径取 $R=100$ mm; 光纤直径分别取 125 μm , 80 μm , 45 μm ; 结果如图 4 所示. 从图中曲线很显然, 光纤半径的减小虽然有助于降低失效概率, 但是较之于筛选应力的和弯曲半径的增大而引起的效果不是很显著.

4 结论

通过理论推导表明了决定环圈光纤初始惰性强度的张力筛选应力水平, 和影响环圈光纤表面应力的环圈半径和光纤半径, 对于环圈光纤的机械可靠性都具有不同程度的影响. 评估用于传感的光纤环圈中的光纤机械可靠性, 不宜直接采用过去为平直应用的通信光纤而建立的模型. 本文给出的一般模型将平直和弯曲情形作为两种特殊情形而包括, 即同时适用于通信光纤传感光纤. 在该一般模型基础上的简化模型对弯曲应用中的环圈光纤的机械可靠性给出了的评估结果.

参考文献

- [1] NOE R. Essentials of modern optical fiber communication [M]. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] LECOY P. Fiber-optic communications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [3] YIN S, RUFFIN P B, YU F T S. Fiber optic sensors[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [4] RIGHINI G C, TAJANI A, CUTOLO A. An introduction to optoelectronic sensors [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
- [5] AZADEH M. Fiber optics engineering [M]. New York: Springer Science+Business Media, 2009.
- [6] SIVALIGAM K M, SUBRAMANIAM S. Emerging optical network technologies [M]. New York: Springer Science + Business Media, 2005.
- [7] EVANS A G. A simple method for evaluating slow crack growth in brittle materials [J]. *International Journal of Fracture*, 1973, **9**(3): 267-275.
- [8] EVANS A G, WIEDERHORN S M. Proof testing of ceramic materials-An analytical basis for failure prediction [J]. *International Journal of Fracture*, 1974, **10**(3): 379-392.
- [9] RITTER J E Jr. Probability of fatigue failure in glass fibers [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1978, **1**(4): 387-399.
- [10] KALISH D, TARIYAL B K. Static and dynamic fatigue of a polymer-coated fused silica optical fiber [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1981, **61**(12): 518-523.
- [11] MATTHEWSON M J. Optical fiber reliability models [C]. *SPIE*, 1993, **CR50**: 3-31.
- [12] GRIFFIOEN W, BREULS T, COCITO G, *et al.* COST 218 evaluation of optical fiber lifetime models [C]. *SPIE*, 1992, **1791**: 190-201.
- [13] GLAESEMANN G S. Optical fiber failure probability predictions form long-length strength distributions [C]. *International Wire and Cable Symposium Proceedings*, 1991, **40**: 819-825.
- [14] MATTHEWSON M J, KURKJIAN C R, GULATI S T. Strength measurement of optical fibers by bending [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1986, **69**(11): 815-821.
- [15] MATTHEWSON M J, KURKJIAN C R. Static fatigue of optical fibers in bending [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1987, **70**(9): 662-668.
- [16] LIANG Xiao-hong, LIU Xiao-dong, LIU Jun-hao. A model for evaluating the mechanical reliability of coiled fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 532-535.
梁小红, 刘笑东, 刘军号. 评估环圈光纤机械可靠性的模型 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 532-535.
- [17] WEIBULL W. A Statistical distribution function of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, **18**(3): 293-297.