

doi: 10.3788/gzxb20124105.0532

评估环圈光纤机械可靠性的模型

梁小红, 刘笑东, 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:为评估应用于光纤陀螺和光纤电流传感器等传感领域的光纤环圈的机械可靠性, 排除光纤涂覆和环圈灌胶等因素, 必须评估所用光纤在弯曲状态下的机械可靠性. 在已被广泛接受的均匀拉伸应力状态下通信光纤的机械可靠性模型基础上, 根据这种环圈光纤在弯曲状态下的一般应力分布, 对于绕环张力和弯曲应力同时存在的情形, 建立了评估这种环圈光纤的机械可靠性的一种模型. 该模型通过采用弯曲状态下光纤表面的最大弯曲应力值, 和由于一般情况下弯曲中轴内侧的压缩应力远小于外侧拉伸应力的这一事实而忽略内侧的压缩应力, 从而简化了弯曲应力的不均匀分布; 同时通过该模型中所含的多个参量的选择给出了最为保守的结果. 利用该模型进行的数值计算预测了采用不同直径的光纤分别绕制的不同环圈直径的环圈光纤在不同服役条件下的机械可靠性. 结果表明, 除了光纤半径和疲劳因子等这些光纤自身的固有因素外, 绕环张力、环圈半径和筛选张力等工艺参量对环圈光纤的机械可靠性也是有重要影响.

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(2012)05-0532-4

0 引言

众所周知, 光纤在现代通信和传感技术中扮演着重要角色^[1-5]. 作为一种光波导, 光纤的光学性能也就自然而然地成为了一直以来的研究重点^[6-10]. 相比之下, 对于光纤的力学性能, 也就是机械可靠性的研究则投入较少^[11-12]. 此外这些仅有的机械可靠性研究也大多集中于对通信光纤在平直拉伸状态下的机械可靠性的评估^[13-19]. 随着光纤传感技术的成熟, 各种类型的光纤传感器的应用也日益广泛. 光纤在这些传感器中的服役状态与通信应用的一个相当大的区别是, 传感光纤大多处在以一定应力绕成环圈的弯曲状态; 尤其是在诸如光纤陀螺和光纤电流传感器等器件中, 传感部分的构型本身就是光纤环圈. 这就自然地引出了光纤在环圈构型中的机械可靠性的评估问题.

尽管传感光纤所处的弯曲状态不同于通信应用中的平直状态, 但在这两种情形中光纤本身的机械可靠性都是基于相同的基本原理, 即在 Griffith 提出的最薄弱环节理论的基础上建立的微裂纹生长速率的幂法则定律及其统计外推^[11-20]. 据此本文借鉴在通信光纤中已被验证的可靠性模型 COST-

218^[15], 进行了必要的修正以纳入绕环张力和弯曲本身所产生的应力^[20], 从而建立了描述光纤在弯曲状态中的机械可靠性的一种简化模型. 根据该模型可以评估目前已被广泛应用的, 以不同条件绕制的各类光纤环圈在服役期间的机械可靠性, 从而为光纤环圈的设计、绕制和使用提供参考.

1 模型

根据 Griffith 评估光纤机械可靠性的最薄弱环节理论, 熔融二氧化硅光纤表面的最大微裂纹(即最薄弱环节)决定了该光纤的断裂应力^[16-17]. 该裂纹在断裂之前经历了与其寿命直接联系的在应力状态下的裂纹生长过程^[18-19]. 利用这一裂纹生长机制评估通信光纤在受到拉伸应力的平直状态下的十余个模型, 最终被统一成一个 COST-218 模型^[15]

$$\sigma_a = \left(\frac{t_p}{t_a}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\left\{ 1 - \frac{l}{L} \ln(1-F) \cdot \left(\frac{BS_0^{n-2}}{\sigma_p^n t_p}\right)^{\frac{m}{n-2}} - 1 \right\}^{\frac{n-2}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \sigma_p \quad (1)$$

式中: σ_a 是通信光纤在服役期间处于平直拉伸状态下的均匀应力, t_p 是光纤在张力筛选过程中所负载的恒定应力的持续时间, t_a 是服役时间; σ_p 是筛选应力, B 和 n 分别是光纤的腐蚀常量和疲劳因子; F 是

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

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

收稿日期: 2011-09-07; 修回日期: 2012-01-11

光纤在该模型中的一些均匀服役应力下持续一段时间后的失效概率, S_0 为光纤的初始惰性强度, l 是 Weibull 参量 m 的定义长度, L 是光纤长度。

易于看到, 该模型的推导所采用的均匀服役应力 σ_a 显然仅适于光纤在平直状态下的均匀拉伸, 也就是通信光纤的应用状态. 当在光纤传感器中的传感光纤被以一定的绕环张力绕制在环圈骨架上, 尽管恒定的绕环张力类似于通信光纤的拉伸应力那样均匀分布, 但是弯曲本身所产生的应力分布却并不均匀, 二者的叠加显然也是不均匀的。

弯曲产生的不均匀应力分布如图 1 所示. 这种弯曲应力在光纤表面垂直于光纤中轴的两点处分别为最大值 $\sigma_{\max} = E \cdot r/R$ 和最小值 $\sigma_{\min} = -E \cdot r/R$, 这两个极值决定于光纤包层半径 r , 光纤弯曲半径 R 和光纤材料的 Young 模量 E . 在其它各点处, 弯曲应力表达为 $\sigma_\theta = \sigma_{\max} \sin \theta$, 其中 θ 是该点的径矢与中轴的夹角。

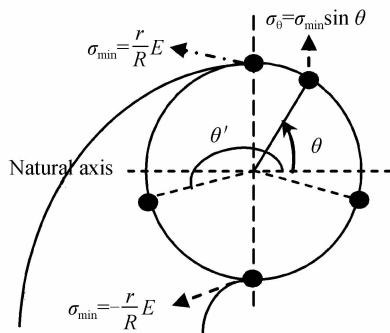


图 1 弯曲光纤的应力分布

Fig. 1 Stress distribution in bending fibers

如上所述, 由于位于光纤中轴上方的光纤表面各点的弯曲应力 σ_θ ($0 < \theta < \pi$) 是不均匀的拉伸应力, 它在绕环张力 σ 上的叠加引起了环圈光纤上表面的总的拉伸应力分布不均匀. 与此同时, 易于看到在中轴下方的光纤表面存在零应力临界角 $\theta' = \sin^{-1}(R\sigma/rE)$ 和 $\pi + \theta'$. 在这两个点处, 弯曲导致的压缩应力等于绕环张力的拉伸应力, 二者抵消从而产生零应力临界点. 而在这两个角度之间, 压缩应力大于拉伸应力, 不产生裂纹生长导致的强度退化. 所以原则上只需考虑这两个临界点上方的光纤表面。

由于上述弯曲光纤表面的不均匀应力分布, 导致裂纹生长的速率不同, 进而导致的各点可靠度的表达式不同, 再相乘之后求和就过于复杂. 事实上, 本文可以用弯曲光纤表面的最大应力值作为光纤全表面所受的均匀应力而简化模型, 从而作出在实际工程应用中最具有参考性的保守评估. 这一简化使得通信光纤的 COST218 模型可以直接应用于光纤环圈构型中的弯曲光纤. 这只需要在方程(1)中把服役应力 σ_a 代替为绕环张力 σ 与最大弯曲应力 σ_{\max} 的

和, 经过简单的数学变换之后就得到弯曲光纤失效概率的表达式为

$$F = 1 - \exp \left\{ \frac{L}{l} \left(\frac{BS_0^{n-2}}{t_p \sigma_p^n} \right) \left[1 - \left(1 + \frac{t_a}{t_p \sigma_p^n} \cdot \left(\frac{r}{R} E + \sigma \right)^n \right)^{\frac{m}{n-2}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中各符号的意义与上文相同。

通过这一模型就可以对大多数传感器应用的环圈构型中的光纤, 也就是处于弯曲状态下的光纤的机械可靠性给予考察. 这里需要指出的是为简化该模型以便于计算而采用的两层保守措施, 即在固定条件下给出的最短寿命和最大失效概率的措施. 一是对光纤机械可靠性评估模型中的众多参量值的采用, 选择了各种文献中能给出最保守评估结果的值; 二是通过以下三个方面的简化使得服役条件在理论上更为苛刻. 这些简化是, 光纤在弯曲状态下:

1) 只有光纤表面的最外侧(理想状态下是无穷小宽度的一条线上的线元)受到最大拉伸应力, 光纤表面的其它部分受到的应力均小于这一最大应力值, 而上面建立的模型(2)则简化为, 弯曲条件下光纤受到的拉伸应力为均匀的, 且等于最大拉伸应力。

2) 只有光纤中轴外侧的光纤表面以及中轴内侧零应力临界点以上的光纤表面受到的弯曲应力是拉伸的, 内侧表面的弯曲应力是压缩的; 而在进行应力分析时, 简化模型则按照整个表面都受到拉伸的弯曲应力去考虑。

3) 光纤环圈的各层光纤事实上具有不同的弯曲半径, 从内而外弯曲半径依次增大(不考虑垫纸等因素时, 弯曲半径的增量即为涂覆光纤的外径); 而在简化模型中, 假定光纤的弯曲半径是恒定的, 全长度的光纤都按照最小的弯曲半径进行考虑。

第一层保守措施解决了当前各文献中给出的光纤的腐蚀因子等数值差异问题^[24-28]; 第二层既简化了理论计算的复杂性, 也给出了在工程应用中具有参考性的最保守的结果. 这两层保守措施共同保证了该简化模型所预测结果的可参考性。

2 评估

利用前文建立的光纤在弯曲状态下的机械可靠性模型方程(2), 就可以通过数值计算来评估光纤环圈的机械可靠性. 以下三个数值例子将在光纤长度、张力筛选应力持续时间、绕环张力、Weibull 参量及其定义长度、疲劳因子、腐蚀常量和服役时间这 8 个量取为共同常量的前提下, 分别研究失效概率要求, 初始强度(亦即筛选张力), 和光纤半径这 3 个因素的变化对环圈光纤的机械可靠性的影响。

这 3 个数值例子所取的共同参量分别为: 光纤长度 $L=1\ 000\ \text{m}$, 绕环张力 $\sigma=10\ \text{g}$, 服役时间 $T=20\ \text{yr}$, 筛选张力负载时间 $t=0.28\ \text{s}$, Weibull 参量 $m=60$ 及其定义长度 $l=10\ \text{m}$ ^[14], 光纤的疲劳因子和腐蚀常量分别为 $n=20$ 和 $B=10^5$ ^[17].

图 2 给出的是在恒定的失效概率要求下, 具有相同筛选张力, 也就是具有相同初始强度的光纤, 绕制成光纤环圈后在服役时间内的机械可靠性对环圈半径的依赖关系. 作为比较, 该图给出了三个不同的失效概率所对应的曲线, 这三个失效概率值分别为 $F_1=10^{-4}$, $F_2=10^{-5}$ 和 $F_3=10^{-6}$.

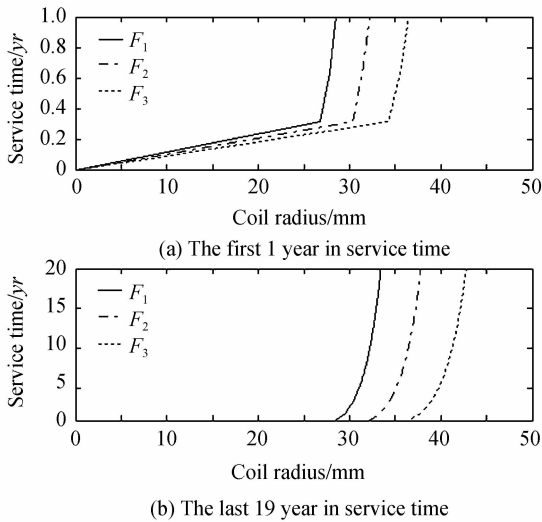


图 2 失效概率对服役时间和圈半径的依赖
Fig. 2 Relation between failure probability and coil radius

从图 2 中的这三条曲线所具有的共同趋势可以明显地看出, 在恒定的失效概率要求下, 具有相同筛选张力或初始强度的光纤, 在弯曲后的寿命也就是服役时间随着弯曲半径的增大而单调增加. 曲线拐点的存在表明同一曲线的拐点两侧的单调性相差较大, 这意味着小于临界半径的弯曲对失效概率的影响不再显著, 这正是断裂镜面区附近的大失效概率情形, 与裂纹生长的两区域模型^[7,10]一致.

与此同时, 图 2 中这三条曲线的相对位置也显示了不同失效概率对环圈半径的依赖关系: 即期望的失效概率值越小, 相应地环圈半径就应该设计得越大. 这显然是由于越大的弯曲半径产生越小的弯曲应力, 进而导致越小的裂纹生长速率.

类似地, 图 3 给出了在筛选张力也就是初始强度恒定时, 具有相同的失效概率要求的光纤环圈的服役时间对环圈半径的依赖关系. 机械可靠性的影响. 作为比较, 给出了筛选应变为分别为 $P_1=0.5\%$, $P_2=1.0\%$ 和 $P_3=1.5\%$ 的三条曲线. 可以看到在同一失效概率要求下, 张力筛选应力水平的提高也单调地增加服役时间, 证实了提高筛选张力是

提高环圈可靠性的有效途径.

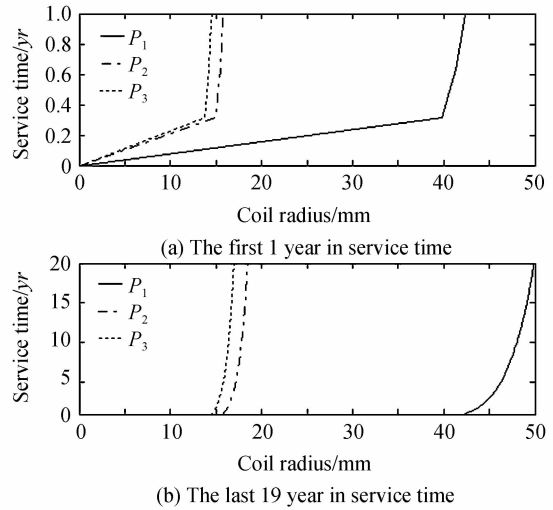


图 3 筛选张力对环圈可靠性的影响
Fig. 3 Relation between service time and coil radius

同样地, 图 4 给出了在其他条件固定时, 光纤自身直径(石英部分)的大小对环圈光纤可靠性的影响. 作为比较给出了三种半径分别为 $r_1=125\ \mu\text{m}$, $r_2=80\ \mu\text{m}$, 和 $r_3=45\ \mu\text{m}$ 的曲线. 可以看到在同样的失效概率和服役时间下, 光纤直径的减小使其容许更小的弯曲半径, 这也验证了未来环圈光纤的细径化趋势.

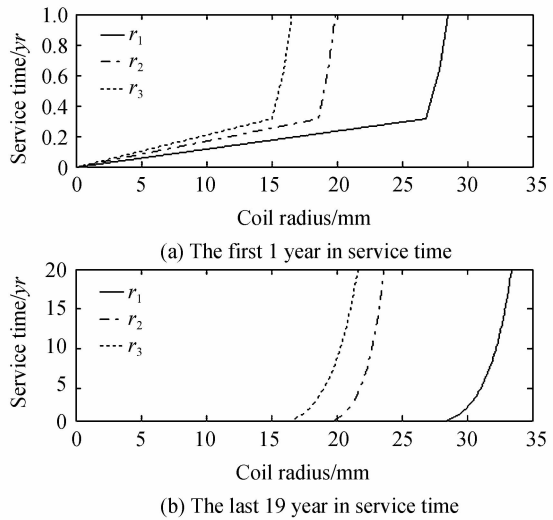


图 4 光纤半径对环圈可靠性的影响
Fig. 4 Relation between service time and coil radius

3 结论

在通信光纤平直应用的机械可靠性模型的基础上, 通过分析光纤在弯曲状态下的应力状态, 建立了评估光纤在环圈状态中长期服役的机械可靠性的简化模型. 基于该模型数值计算了诸如筛选张力、环圈半径和光纤半径等因素对环圈光纤的机械可靠性的影响. 结果表明, 除了光纤半径和疲劳因子等这些光纤自身的固有因素之外, 绕环张力、环圈半径和筛选

张力等工艺参量对环圈光纤的机械可靠性也具有重要影响,实际应用中需要根据环圈可靠性的具体要求而综合考虑。

参考文献

- [1] SENIOR J M. Optical fiber communications principles and practice[M]. 3rd ed. London: Pearson Education Limited, 2009.
- [2] KAMINOW I P, LI T, WILLNER A E. Optical fiber telecommunications VB: systems and networks[M]. Academic Press, 2008.
- [3] AGRAWAL G P. Fiber-optic communication systems[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [4] YIN S, RUFFIN P B, YU F T S. Fiber optic sensors[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [5] RIGHINI G C, TAJANI A, CUTOLO A. An introduction to optoelectronic sensors [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
- [6] GHATAK A, THYAGARAHAN K. Introduction to fiber optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [7] ROGERS A. Polarization in optical fibers[M]. Nowood: Artech House, Inc., 2008.
- [8] HUI R, O' SULLIVIAN M. Fiber optic measurement techniques[M]. San Diego: Elsevier Inc., 2009.
- [9] BLACK R J, GAGNON L. Optical waveguide modes: polarization, coupling, and symmetry [M]. New York: McGraw Hill, 2010.
- [10] KUMAR A, GHATAK A. Polarization of light with applications in optical fibers[M]. Bellingham: SPIE Press, 2011.
- [11] SCHLESINGER J C. Optical fibers research advances[M]. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2007: 355-367.
- [12] MITSCHKE F. Fiber optics physics and technology[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009: 91-100.
- [13] HANSON T A, GLAESEMANN G S. Incorporating multi-region crack growth into mechanical reliability predictions for optical fibers[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, **32** (20): 5305-5311.
- [14] GLAESEMANN G S. Advancements in mechanical strength and reliability of optical fibers[C]. *SPIE*, 1999, **CR73**: 12-21.
- [15] GRIFFIOEN W, BREULS T, COCITO G, *et al.* COST 218 evaluation of optical fiber lifetime models[C]. *SPIE*, 1992, **1791**: 190-201.
- [16] MATTHEWSON M J. Optical fiber reliability moels[C]. *SPIE*, 1993, **CR50**: 3-31.
- [17] SEMJONOV S L, GLAESEMANN G S, BUBNOV M M. Fatigue behavior of silica fibers of different strength[C]. *SPIE*, 1999, **3848**: 102-107.
- [18] SEMJONOV S L, GLAESEMANN G S, CLARK D A, *et al.* Fatigue behavior of silica fibers with different defects[C]. *SPIE*, 2001, **4215**: 28-35.
- [19] CSATILONE R J, GLAESEMANN G S, HANSON T A. Relationship between mirror dimensions and failure stress for optical fibers[C]. *SPIE*, 2002, **4639**: 11-20.
- [20] MATTHEWSON M J, PADIYAR V. Cyclic fatigue of high strength optical fibers in bending[C]. *SPIE*, 2001, **4215**: 53-59.

A Model for Evaluating the Mechanical Reliability of Coiled Fibers

LIANG Xiao-Hong, LIU Xiao-Dong, LIU Jun-Hao

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

Abstract: It is necessary to evaluate the mechanical reliability of the coiled fibers to evaluate the mechanical reliability of fiber coils applied in sensing fields, such as fiber-optic gyroscope and current sensors, besides the causes of fiber coatings and loop glues. A model is proposed for evaluating the mechanical reliability of the coiled fibers, which is based on the mechanical reliability model of the haul-distance telecommunication fibers by incorporating the bend-induced stress and the coiling tension. The model can simplify the inhomogeneous bending stresses distribution with the maximum stress value and the fact that the compressed stress in the inner side of the fiber natural axis is far small than the stretch stress outside. By these and the choosing of the parameters involved in the model, the conserved results are given using this simplified model. Several numerical caculations of mechanical reliability of various fiber coils with different fiber and bending radius are carried out using this model. The results show that besides fiber own inherent factors including the fiber radius and the fatigue factor, some process parameters, such as the circling tension, the ring radius and the screening tension also have a major impact on the mechanical reliability of coiled fibers.

Key words: Optical fibers; Failure probability; Mechanical reliability