

光纤宏弯损耗性能影响因素的仿真研究

彭星玲, 张 华, 李玉龙

(南昌大学机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘要:为了优选宏弯损耗敏感光纤,研发基于光纤宏弯损耗的光学器件,对影响单模光纤宏弯损耗的主要因素进行了理论分析和仿真研究。基于 D. Marcuse 和 H. Renner 提出的光纤宏弯损耗理论模型,选取 SMF28、SMF28e 和 1060XP 三种单模光纤,仿真研究了涂覆层、弯曲半径、光源波长、MAC 值和弯曲圈数对光纤宏弯损耗性能的影响。结果表明:无涂覆层、带吸收层的单模光纤宏弯损耗随着波长增长而增大、随着弯曲半径增大而减小、随着圈数增多而增大、随着 MAC 值增大而增大;光纤的丙烯酸酯类涂覆层会引起宏弯损耗随弯曲半径变化发生振荡;MAC 值是衡量光纤宏弯损耗敏感性能的指标,也是优选宏弯损耗敏感光纤的重要参数。因此,光纤宏弯损耗器件适合选用 MAC 值大的光纤,去除其涂覆层,增加吸收层,然后选择较长的波长、较小的弯曲半径和适当多的弯曲圈数。

关键词:宏弯损耗;涂覆层;弯曲半径;波长;MAC 值;圈数

中图分类号:TN818;TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.10.014

Simulation study on influencing factors of macrobending loss of optical fiber

PENG Xing-ling, ZHANG Hua, LI Yu-long

(Key Lab of Robot & Welding Automation, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to select fibers which are sensitive to macrobending loss, optical devices based on optical fiber macrobending loss are developed, and the main factors affecting macrobending loss of single mode fibers are analyzed theoretically and simulated. Simulation study is carried out to investigate the impact of coating layers, bend radius, light wavelength, MAC value and the number of bend turns on the macrobending loss of optical fiber, based on two theoretical models of a bend fiber with a core-infinite cladding structure and a bend fiber with a core-cladding-infinite coating layer structure, which are developed by D. Marcuse and H. Renner, respectively. The three types of fibers chosen for the simulation research are Corning SMF28, Corning SMF28e and Nufern 1060XP single mode fiber. Results show: (i) The macrobending loss of a single mode fiber with a core-infinite cladding structure increases with increase of wavelength, decrease of bend radius, increase of bend turns and increase of MAC value; (ii) Oscillation phenomena of macrobending loss for a fiber are induced by the coating layers such as acrylate; (iii) MAC is one parameter to affect the inherent macrobending loss performance of a fiber, while MAC value is the key parameter to reflect the inherent macrobending loss performance, as well as an important parameter to select a fiber that is sensitive to bend loss. Therefore, optical devices based optical fiber macrobending loss are suitable to choose single mode fibers with large MAC value, long wavelength, small bend radius, more bend turns, and especially a core-infinite cladding structure, which is realized by removing the coating layers and adding an absorption layer.

Key words: macrobending loss; coating layers; bend radius; wavelength; MAC value; bend turns

基金项目:国家自然科学基金(No. 61067003);江西省自然科学基金项目(No. 20132BAB206024);江西省教育厅科技项目(No. GJJ13064);

高等学校博士学科点博士基金(No. 20123601110011);高等学校博士点新教师基金(No. 20103601120005)资助项目。

作者简介:彭星玲(1988-),女,博士研究生,主要从事光纤智能材料与结构方面的研究。E-mail: pengxingling0223@163.com

收稿日期:2014-02-21

1 引言

光纤由于直径小、柔韧易弯曲的特点,很容易在使用过程发生弯曲,如果光纤的弯曲半径小于一个临界值 R_c ,将引起光传播途径发生改变,使光从纤芯进入到包层,甚至可能穿过包层向涂覆层、甚至空气层泄露,从而引起宏弯损耗^[1]。在通信光缆中宏弯损耗的主要原因有^[2]:路由转弯和敷设中的弯曲;光纤光缆的各种预留造成的弯曲(预留圈、各种拿弯、自然弯曲);接头盒中光纤的盘留、机房及设备内尾纤的盘绕等。这些宏弯状态被视为光纤通信中的不利因素,因而光纤通信中使用的光纤要求对宏弯损耗不敏感,弯曲半径临界值 R_c 越大越好。然而,在光纤宏弯损耗传感器的研发中,宏弯损耗敏感光纤的应用不仅能够提高传感器的灵敏度和精度,而且非常有利于信号的提取和解调。因此,研究单模光纤宏弯损耗敏感因素,从而优选宏弯损耗敏感光纤,对开发光纤宏弯损耗传感器具有重要意义。目前很多学者^[3-6]研究了光纤宏弯损耗与波长、弯曲半径和圈数的关系,但这些参数不能用于优选宏弯损耗敏感光纤。已有学者^[4,7]提出 $MAC = MFD/\lambda_{cl}$,是用于表征单模光纤弯曲(宏弯和微弯)灵敏度的特征参数,但是涂覆层也会对光纤宏弯损耗产生重要影响。因此,本文综合研究了涂覆层、弯曲半径、波长、MAC 值和圈数对光纤宏弯损耗性能的影响。

2 单模光纤宏弯损耗理论

长度为 L 的单模光纤的宏弯损耗^[8]可以表示为:

$$L_s = 10\log_{10}(\exp(2\alpha L)) = 8.686\alpha L \quad (1)$$

式中, 2α 是光纤宏弯损耗因子,大多数光纤宏弯损耗理论模型都是在预测这个弯曲损耗因子。从式(1)可知,光纤宏弯损耗与宏弯损耗因子 2α 和弯曲总长度有关。

弯曲圈数为 t , 弯曲半径为 R 的光纤宏弯损耗可以表示为:

$$L_t = 8.686\alpha(t \times 2\pi R) = 2\alpha(8.686t\pi R) \quad (2)$$

BELL 实验室的 D. Marcuse 于 1976 最早提出了预测光纤宏弯损耗因子的理论模型^[9],将光纤看成纤芯-无穷大包层模型,推导出宏弯损耗因子计算公式:

$$2\alpha_0 = \frac{\sqrt{\pi}\kappa^2 \exp\left[-\frac{2}{3}\gamma^3/\beta_g^2\right]R}{e_\nu \gamma^{2/3} V^2 \sqrt{RK_{\nu-1}(\gamma a)K_{\nu+1}(\gamma a)}} \quad (3)$$

式中, $\nu = 0$; $e_\nu = 2$ 表示此公式适用于计算单模光纤宏弯损耗因子; a 是纤芯半径; R 是弯曲半径; β_g 是

直光纤基模未受扰动的位相传播常数; $K_{\nu-1}(\gamma a)$ 和 $K_{\nu+1}(\gamma a)$ 是改进的贝塞尔函数; V 是归一化频率。其中:

$$V = \frac{2\pi a \times \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda} \quad (4)$$

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta_g^2} \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta_g^2 - n_2^2 k^2} \quad (6)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 是在波长为 λ 时的真空波数; n_1, n_2 分别是纤芯和包层的折射率。

由于实际使用中的光纤不仅含有纤芯、包层、还有一层或两层提供机械保护的涂覆层,这个模型只能预测去除涂覆层,加上吸收层的模型。这种纤芯-包层-吸收层结构可以近似看成纤芯-无限包层模型。由公式(1)~(6)可以看出,光纤宏弯损耗与弯曲半径、波长、纤芯半径、纤芯折射率、包层折射率有关。

实际使用中光纤涂覆层的存在会产生回音壁效应^[8],为了考虑回音壁效应对光纤宏弯损耗的影响,Hagen Renner^[10]通过一些近似,对 D. Marcuse 的模型进行了修正,提出了计算光纤纤芯-包层-无限涂覆层的宏弯损耗计算公式:

$$2\alpha = 2\alpha_0 \frac{2\sqrt{Z_2 Z_1}}{(Z_3 + Z_2) - (Z_3 - Z_2)\cos(2\theta_0)} \quad (7)$$

其中, Z_q, θ_0 和 $X_q(b, 0)$ 分别表示为:

$$Z_q = -(2k^2 n_2^2 / R)^{2/3} X_q(b, 0), q = 2, 3 \quad (8)$$

$$\theta_0 = \frac{2}{3}[-X_2(b, 0)]^{3/2} + \frac{\pi}{4} \quad (9)$$

$$X_q(b, 0) = \left(\frac{R}{2k^2 n_2^2}\right)^{2/3} [\beta^2 - k^2 q_n^2 (1 + \frac{2b}{R})] \quad (10)$$

结合公式(7)~(10)可知,光纤宏弯损耗与涂覆层的折射率和包层半径也有关系。对于不同种类的光纤,其纤芯、包层和涂覆层的折射率参数往往差别很大,纤芯的尺寸也有差别,而包层、涂覆层尺寸非常相似。由于折射率参数较多,不便于比较,纤芯尺寸虽有差异,但是通常在定义光纤几何参数的时候,多考虑模场直径(MFD),而不是光纤纤芯直径,模场直径略大于纤芯直径。因此,很难用折射率和纤芯尺寸来比较光纤本身的宏弯损耗性能。可以采用相同的弯曲半径、光源波长和圈数比较宏弯损耗值的差异。但是也不能用弯曲半径、光源波长和圈数来衡量光纤本身的宏弯损耗性能。有研究表明

MFD 是衡量光纤将光集中在纤芯中能力的参数,模场直径越小,光纤纤芯束缚光的能力越强,越不容易产生宏弯损耗,反之,模场直径越大,光纤纤芯束缚光的能力越弱,越容易产生宏弯损耗。MAC 值是衡量光纤宏弯损耗敏感性能的参数,MAC 值综合考虑了 MFD 和截止波长对光纤宏弯损耗性能的影响。为此,本文采用三种不同光纤对涂覆层、弯曲半径、波长、MAC 值和圈数对光纤宏弯损耗的影响进行仿真研究和验证。

3 单模光纤宏弯损耗敏感因素的仿真研究

D. Marcuse 的光纤纤芯 - 无限包层结构理论模型可以解释单模光纤无涂覆层、带吸收层的宏弯损耗情况。H. Renner 的光纤纤芯 - 包层 - 无限涂覆层结构理论模型能解释单模光纤带涂覆层的宏弯损耗情况。本文选取 coming SMF28、SMF28e 和 Nufem 1060XP 三种单模光纤,其参数^[11-12]如表 1 所示。

表 1 SMF28 光纤和 1060XP 光纤
在波长 1550 nm 处,温度 20 °C 的参数

光纤参数	SMF28 光纤	SMF28e 光纤	1060XP 光纤
纤芯折射率 n_1	1.4504	1.4490	1.46313
包层折射率 n_2	1.4447	1.4440	1.45642
内涂覆层折射率	1.4786	-	1.4975
外涂覆层折射率	1.5294	-	1.5068
纤芯直径	5.3 μm	8.2 μm	8.3 μm
包层直径	125 μm	125 μm	125 μm
MFD	10.4 μm	10.4 μm	9.5 μm
截止波长	1260 nm	1260 nm	920 nm
MAC 值	8.25	8.25	10.33

基于 D. Marcuse 和 H. Renner 提出的单模光纤宏弯损耗理论模型,通过 matlab 软件仿真得到了不同单模光纤宏弯损耗随涂覆层、弯曲半径、波长、MAC 值和圈数变化的曲线,如图 1~6 所示。

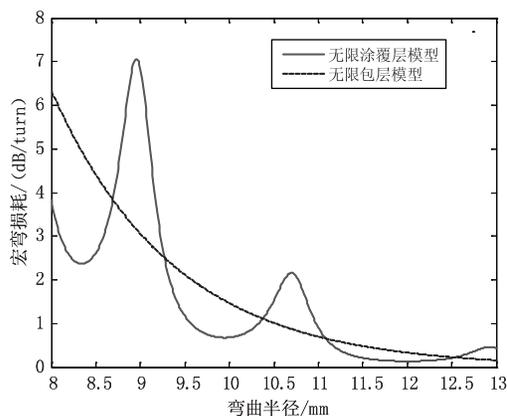


图 1 带涂覆层和不带涂覆层 SMF28 光纤的宏弯损耗对比:光源波长 1600 nm,弯曲半径 8~13 mm

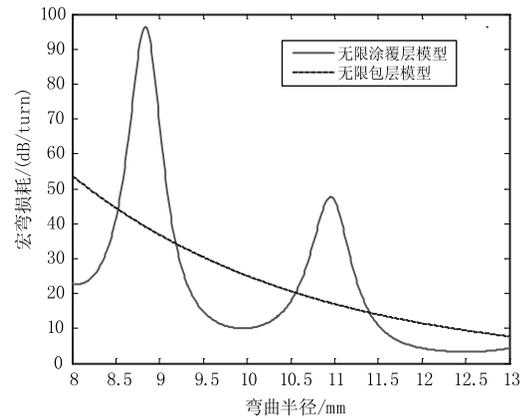


图 2 带涂覆层和不带涂覆层 1060XP 光纤的宏弯损耗对比:光源波长 1600 nm,弯曲半径 8~13 mm

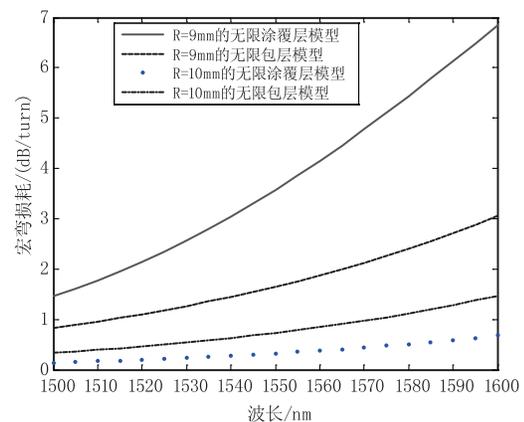


图 3 带涂覆层和不带涂覆层的不同弯曲半径 SMF28 光纤宏弯损耗随波长变化对比:波长 1500~1600 nm

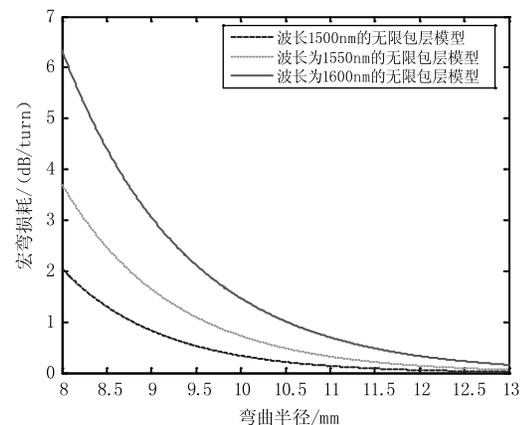


图 4 光源波长分别为 1500 nm 和 1600 nm 的不带涂覆层 SMF28 光纤宏弯损耗对比:弯曲半径 8~13 mm

对图 1 和图 2 分析可知,在工作波长恒定的情况下,无限包层的 SMF28 和 1060XP 两种光纤宏弯损耗都随弯曲半径增大而减小;而带涂覆层的两种光纤宏弯损耗随弯曲半径增大整体呈现下降趋势,同时伴随着损耗振荡现象,弯曲半径越小,振荡越剧烈。这表明涂覆层会使宏弯损耗随弯曲半径变化发生振荡现象,而去除涂覆层,增加有效

的吸收层能够使光纤宏弯损耗随弯曲半径变化不再发生振荡。由图3可以看出,相同的弯曲半径,SMF28 光纤无论是否具有涂覆层,宏弯损耗都随波长增加而增加;弯曲半径9 mm 的光纤宏弯损耗比弯曲半径为10 mm 的光纤宏弯损耗更大。由图4可知,具有无限包层的SMF28 光纤宏弯损耗随弯曲半径增大而减小;弯曲半径相同的情况下,在波长1600 nm 处光纤宏弯损耗值大于1550 nm 波长处和1500 nm 波长处光纤的宏弯损耗,波长越长光纤宏弯损耗越大。

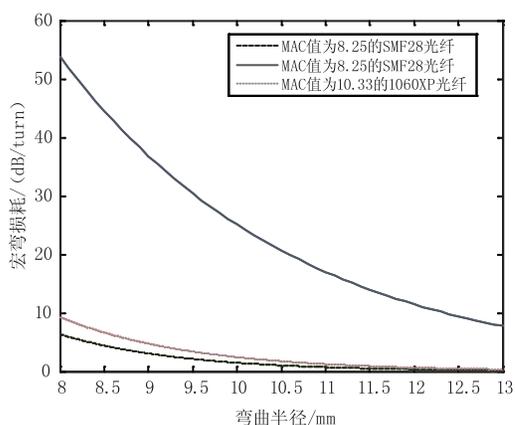


图5 MAC 值分别为 8.25、8.25、10.3 的 SMF28、SMF28e 和 1060XP 光纤无限包层模型宏弯损耗对比:波长 1600 nm,弯曲半径 8~13 mm

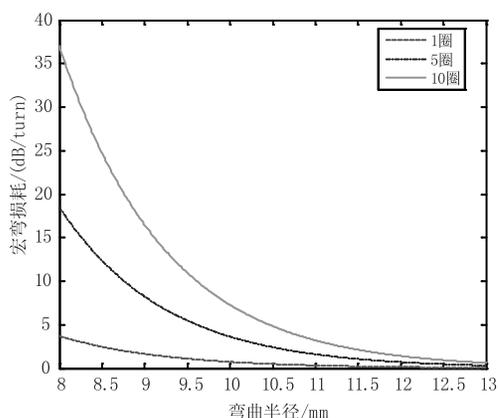


图6 弯曲圈数分别为 1 圈、5 圈和 10 圈的 SMF28 光纤无限包层模型宏弯损耗对比:波长 1550 nm,弯曲半径 8~13 mm

由图5可以看出,三种无限包层光纤宏弯损耗都随弯曲半径增大而减小,但是同样的弯曲半径和波长情况下,1060XP 光纤宏弯损耗值更大,而 SMF28 和 SMF28e 光纤的宏弯损耗值都较小,相差很小。模场直径(MFD)代表光纤对光的约束能力,如果单纯的比较 MFD,1060XP 光纤的 MFD 为 9.5 小于 SMF28 和 SMF28e 的模场直径,同样的弯曲半径和波长下,1060XP 光纤的宏弯损耗应该小于

SMF28 和 SMF28e 光纤,而这与实际情况相反。因此,模场直径不是衡量光纤宏弯损耗敏感性的唯一参数。根据 $MAC = MFD/\lambda_{cf}$,SMF28 和 SMF28e 光纤的 MAC 值都是 8.25,非常接近,而 1060XP 光纤的 MAC 值为 10.3 比 SMF28 和 SMF28e 光纤的 MAC 值大的多,实际上,1060XP 光纤的宏弯损耗也比这两种光纤大很多。因此,MAC 值才是衡量光纤宏弯损耗敏感性的参数。

从图6可以观察到,同样的弯曲半径和波长,弯曲圈数为10圈的光纤宏弯损耗最大,5圈的其次,1圈的最小。这是由于弯曲圈数越多,弯曲总长度L越长,因此,宏弯损耗值也越大。

4 结论

应用经典光纤纤芯-无限包层理论模型和光纤纤芯-包层-无限涂覆层理论模型,选用 Corning SMF28 单模光纤、Corning SMF28e 单模光纤和 Nufern 1060XP 单模光纤,仿真研究了光纤宏弯损耗与涂覆层、弯曲半径、波长、MAC 值和圈数的关系。结果表明:光纤本身的丙烯酸酯类涂覆层会使得光纤宏弯损耗随弯曲半径变化发生振荡;无涂覆层、带吸收层的无限包层结构的光纤宏弯损耗随弯曲半径增大而减小,随着波长的增长而增大,随着 MAC 值增大而增大,随着弯曲圈数的增加而增大;MFD 是影响光纤固有宏弯损耗性能的因素之一,MAC 值才是衡量光纤宏弯损耗敏感性能的参数。因此,光纤宏弯损耗器件适合选用 MAC 值大的光纤,去除其涂覆层,增加吸收层,然后选择较长的光源波长、较小的弯曲半径和适当多的弯曲圈数。

参考文献:

- [1] ZHOU Qing, FENG Guoying, LI Xiaodong, et al. Theoretical analysis and measurement on the character of bending loss in fiber [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 32-35. (in Chinese)
周倩,冯国英,李小东,等. 光纤弯曲损耗特性的理论与实验研究 [J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 32-35.
- [2] LIU Shichun. Optical fiber bending loss at 1310nm and 1550nm and discussion on the measurement of fiber optic cable link [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2001, (1): 39-43. (in Chinese)
刘世春. 1310nm 和 1550nm 波长的光纤弯曲损耗及对光缆线路测试的探讨 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2001, (1): 39-43.
- [3] YOU Shanhong, HAO Sujun, YIN Zongmin, et al. Analysis

- and test of bend Loss in single-mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 409 – 412. (in Chinese)
- 游善红, 郝素君, 殷宗敏, 等. 单模光纤中弯曲损耗的测试与分析[J]. *光子学报*, 2003, 32(4): 409 – 412.
- [4] XUE Mengchi. Research and measurement of optical fibre macrobend Loss [J]. *Telecommunications Science*, 2009, (7): 57 – 62. (in Chinese)
- 薛梦驰. 光纤弯曲损耗的研究与测试[J]. *电信科学*, 2009, (7): 57 – 62.
- [5] P F Wang, Q Wang, G Farrell, et al. Investigation of macrobending losses of standard single mode fiber with small bend radius [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49(9): 2133 – 2138.
- [6] A Zendejnal, M Mirzaei, A Farashiani, et al. Investigation of bending loss in a single-mode optical fiber [J]. *PRA-MANA-journal of Physics*, 2010, 74(4): 591 – 603.
- [7] C Unger, W Stocklein. Characterization of the bending sensitivity of fibers by the MAC-value [J]. *Optics communications*, 1994, 107(5 – 6): 361 – 364.
- [8] Y Powell-Friend, L Phillips, T George, et al. A simple technique for investigating whispering gallery modes in fiber [J]. *Review of Scientific Instrum*, 1998, 69(8): 2868 – 2870.
- [9] D Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1976, 66(3): 216 – 220.
- [10] R Hagen. Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach [J]. *J Lightwave Technol*, 1992, 10(5): 544 – 551.
- [11] P F Wang. Development of fiber bend loss edge filter [D]. Dublin: Dublin Institute of Technology, 2008.
- [12] Q Wang, G Farrell, T Freir. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4476 – 4484.