

## 光纤微弯损耗的新测试方法仿真算法及验证

薛梦驰<sup>1,2\*</sup>, 左琼华<sup>3</sup><sup>1</sup>成都泰瑞通信设备检测有限公司, 四川 成都 610062;<sup>2</sup>电信科学技术第五研究所, 四川 成都 610062;<sup>3</sup>国家传送网产品与系统安全质量检验检测中心, 四川 成都 610062

**摘要** 为清晰了解光纤微弯损耗的产生机理, 并对其进行有效地估算和测试, 对产生光纤微弯损耗的两种机理——纯弯曲致微弯及耦合致微弯进行了分析, 简述了与此最相关且最有效的理论公式, 指出了影响微弯损耗最重要的因素; 提出金属网覆盖光纤盘法及双槽平板法; 基于截向应变及纯弯曲理论, 针对两种机理, 分别建立了两种对应的仿真算法, 通过对被测光纤在测试平台中产生的微小畸变和弯曲进行分解和仿真, 实现了对两类微弯损耗的估算; 建立测试平台并进行实际测试, 结果表明, 所提仿真算法的计算值与实测结果的一致性较为满意, 所提测试方法可以用于制订标准并加以推广。

**关键词** 光纤光学; 测试方法; 仿真算法; 微弯; 弯曲损耗; 敏感性

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1806001

## Simulation Algorithms and Verification for New Test Methods of Microbending Loss in Optical Fibers

Xue Mengchi<sup>1,2\*</sup>, Zuo Qionghua<sup>3</sup><sup>1</sup> Chengdu Tairui Telecommunication Equipment Test Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610062, China;<sup>2</sup> The Fifth Research Institute of Telecommunication Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610062, China;<sup>3</sup> National Transmission Network Product and System Security Quality Inspection and Testing Center,

Chengdu, Sichuan 610062, China

**Abstract** To make clear the generation mechanism of microbending loss in optical fibers and effectively estimate and test microbending loss, this paper analyzed two mechanisms, i. e., microbending caused by pure bending and that by coupling, briefly described the most relevant and effective theoretical formulas, and pointed out the most important factors affecting the microbending loss. Two methods to test microbending loss were proposed for the first time, respectively using an optical fiber reel covered by metal mesh and a double-slot plate. In light of the transverse strain and pure bending theory, two corresponding simulation algorithms were established respectively. Depending on the decomposition and simulation of microdistortion and microbending of the tested optical fibers in test platforms, the microbending loss was estimated. The established platforms were then used for testing. The verification results show that the calculated values of the proposed simulation algorithms are in good agreement with the measured results, and the proposed test methods can be employed for standard formulation and extended.

**Key words** fiber optics; test method; simulation algorithm; microbend; bending loss; sensitivity

**OCIS codes** 060.2300; 060.2310; 060.2330; 230.2285

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-03-17; 录用日期: 2021-04-01

基金项目: 中国通信标准化协会团体标准项目(2020-CCSA-23)

通信作者: \*xuemengchi@cdtr-lab.cn

# 1 引言

光纤的弯曲损耗一直是一个影响光纤传输性能的重要参数。其中,宏弯损耗性能的设计与测试,在过去十多年随着光纤入户及接入网的迅猛发展、G. 657 弯曲不敏感光纤的大量应用,已受到电信运营商、光纤光缆制造商、科研及光纤测试机构的广泛关注及深入研究。近期已有研究者利用光纤的宏弯损耗特性进行了传感<sup>[1]</sup>。虽然微弯损耗同样也已被国际领先的光纤机构关注很久,但由于其不如宏弯损耗那样直观易感,因而长期被国内大多数使用、制造及测试光纤光缆的机构所忽视。实际上,随着近年来高密度小尺寸轻型光缆、干式光缆、G. 654E 大有效面积光纤及小直径光纤等新型光纤光缆逐渐增多,光缆和光纤受到更多的外部压力使微弯损耗对网络性能的影响日益突显。

同时,由于微弯损耗的微观性及统计性,对其进行准确测试也是一个难题,国际上至今尚没有统一的测试方法。国际电工委员会(IEC)在技术报告 62221 中虽然推荐了 4 种测试方法<sup>[2]</sup>,但其可膨胀圆筒法(方法 A)和交叉重叠缠绕法(方法 D)机构复杂、可操作性差,金属网平板法(方法 C)则反应微弱、不易观测,固定直径圆筒法(方法 B)虽应用较多,但仍具有石英筒不圆度和砂纸易磨损造成重复性差、石英筒不易获得、易破裂、成本高等缺点。本文从微弯损耗的理论入手,提出了两种新测试方法及其计算模型,并实际构建了测试平台,验证表明本文的理论模型及算法与实测结果具有较好的一致性。

## 2 光纤微弯损耗的理论

### 2.1 微弯损耗的定义

光纤弯曲损耗分为宏弯损耗和微弯损耗两种。宏弯损耗是由整个光纤轴线弯曲造成的附加损耗;而微弯损耗是由光纤轴线发生一些随机的、曲率半径与光纤的横截面尺寸相比拟的微小畸变造成的附加损耗。

微弯曲是指光纤在其正常(直的)位置附近以微小偏移作随机振荡。尽管偏移量小,但振荡周期一般也很小,因而可能发生急剧的局部弯曲。微弯损耗有两种来源<sup>[3]</sup>:一种是由  $LP_{01}$  模、漏泄模及辐射模之间发生固定耦合产生的;另一种是由  $LP_{01}$  模的纯弯曲损耗效应产生的,这种效应使  $LP_{01}$  模在弯曲光纤的某个径向距离变为漏泄模。综合行业的认

知:本文称第一种为耦合致微弯,可理解为由于光纤侧面受到不均匀外力作用,光纤轴线产生微米级的偏移,模式耦合使  $LP_{01}$  模的光功率沿光纤长度不断地从光纤内部向外辐射,从而导致微弯损耗。称第二种为纯弯曲致微弯,可以理解为急剧的局部弯曲(即受弯长度极短、但弯曲半径极小),通常其曲率半径可以与光纤的横截面尺寸相比拟。图 1 示出了产生光纤微弯的上述两种机制,即光纤芯层以微米级偏离光纤轴或产生小于毫米级的弯曲,两者均导致大量随机分布的微小弯曲。

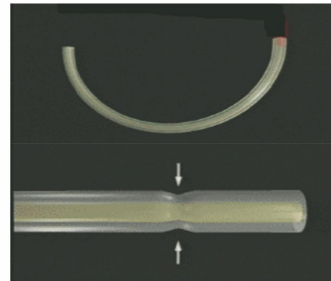


图 1 光纤微弯的两种机制示意图

Fig. 1 Two mechanisms of optical fiber microbending

关于扰动幅度,有文献认为它是当扰动幅度(Prysmian)<sup>[4]</sup>或者弯曲半径(Corning)<sup>[5-6]</sup>不超过 1 mm 时所导致的微弯损耗,这已远低于宏弯损耗急剧增加时对应的临界弯曲半径  $R_c$ <sup>[7]</sup>。

关于扰动周期,一般认为长周期的扰动(大于 1 mm)不会产生微弯损耗,但会导致光功率耦合到包层的高阶模中,引起宏弯损耗;而短周期的扰动(小于 200  $\mu\text{m}$ )一般不会增强光纤的衰减。对于微弯损耗而言,0.2~1 mm 周期的扰动对光纤传输的影响最大,这是因为这种扰动会影响包层的传输模式<sup>[5,8]</sup>。本研究认为这可用单模光纤中模式耦合的拍长来解释,纤芯中的传导模和包层中的包层模沿光纤轴向传输时存在传播常数差,其表达式为

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 - n_2), \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为使用波长, $n_1$  和  $n_2$  为纤芯和包层的折射率。(1)式可以近似理解为,在纵向均匀的单模光纤中,传导模与包层模之间的相位差为  $2\pi$  时,传导模与包层模最容易发生模式耦合,此时光在光纤中所传输的距离  $\Lambda$  为一个拍长,又称耦合长度或相干长度,表达式为

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{n_1 - n_2} = \frac{\lambda}{\Delta n}, \quad (2)$$

式中, $\Delta n = (n_1 - n_2)$  为纤芯折射率  $n_1$  与包层折射率  $n_2$  之差。通常,通信使用的单模光纤的  $\Delta n$  在

0.003~0.01 之间,使用的波长在 1300~1700 nm 之间,故拍长为 130~567  $\mu\text{m}$ 。

结合具体应用场景,微弯主要是由光纤光缆制造和安装过程中的尺寸失配、应变变化以及温度变化引起的材料尺寸变化造成的,例如纤芯与包层的分界面不光滑(几何的微观凸起或凹陷)、光纤受到的侧压力不均匀、光纤温度变化、因热胀冷缩而形成光纤轴的微小不规则弯曲等。其结果均是使传导模转换为辐射模,进而造成光功率损耗。

## 2.2 耦合致微弯损耗

在相同的机械环境下,单模光纤与具有相同外径的阶跃折射率多模光纤(芯径为 50,数值孔径 NA 为 0.2)的微弯损耗关系为<sup>[3]</sup>

$$\frac{\alpha_{\text{sm}}}{\alpha_{\text{mm}}} = 2.53 \times 10^4 \cdot \left(\frac{\omega_0}{a}\right)^6 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^4 \frac{\lambda_c^2}{(\Delta n)^3}, \quad (3)$$

$$\lambda_c = 2\pi a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / 2.4048, \quad (4)$$

式中, $\alpha_{\text{sm}}$  和  $\alpha_{\text{mm}}$  分别为单模及多模光纤的微弯损耗, $\omega_0$  为模场半径, $\lambda_c$  为中心波长, $a$  为纤芯半径。(3)式表明,当给定截止波长和工作波长(即固定  $\lambda_c/\lambda$ ,并因而固定  $\omega_0/a$ )时,微弯损耗将随芯折折射率差的增加而急剧减小。

Olshansky 建立畸变损耗的模型,并求得由随机畸变及模耦合引起的微弯损耗(dB)为<sup>[9]</sup>

$$A_m = N \langle h^2 \rangle \frac{a^4}{b^6 \Delta^3} \left(\frac{E}{E_f}\right)^{3/2}, \quad (5)$$

式中, $N$  为随机微弯的个数, $h$  为微弯突起的平均高度, $\langle \cdot \rangle$  为统计平均符号, $b$  为光纤外半径, $E$  是涂料层杨氏模量, $E_f$  是光纤玻璃体杨氏模量。

## 2.3 纯弯曲致微弯损耗

针对折射率突变型单模光纤,设曲率半径为  $R$ ,则每单位长度的弯曲损耗(dB/m)可表示为<sup>[7]</sup>

$$\alpha_c = A_c R^{-1/2} \exp(-UR), \quad (6)$$

以及近似公式

$$U \approx 0.705 \frac{\Delta n^{3/2}}{\lambda} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^3, \quad (7)$$

$$A_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{a}\right)^{1/2} 3.7 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2. \quad (8)$$

当  $1 \leq \lambda/\lambda_c \leq 2$  时,由(6)~(8)式计算出的弯曲损耗的准确度是可以接受的。

此外,美国 Bell 实验室使用夫琅禾费衍射理论,计算了阶跃折射率光纤 LP<sub>01</sub> 模每单位长度的弯曲损耗,并给出近似公式<sup>[10]</sup>,即

$$\alpha = \frac{a(\kappa/V)^2}{\sqrt{\pi\gamma R}} \exp\left(2\gamma a - \frac{2\gamma^3 R}{3\beta^2}\right), \quad (9)$$

式中: $V$  为归一化频率, $V = Ka \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ ;  $K$  为自由空间波数, $K = 2\pi/\lambda$ ;  $\gamma$  和  $\kappa$  为过程参数, $\kappa = \sqrt{n_1^2 K^2 - \beta^2}$ ,  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 K^2}$ ; 传播常数<sup>[3]</sup>  $\beta \approx Kn_2(1+B\Delta)$ ,其中  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ ,参数  $B \approx (1.1428 - 0.4141\lambda/\lambda_c)^2$ 。

由(3)、(5)、(6)、(9)式可见:1)增大折射率差能使单模光纤的弯曲损耗急剧减小,两者呈强负相关;2)减小纤芯半径  $a$ [相应地减小单模光纤模场直径(MFD, $d_{\text{MF}}$ )]或增大截止波长,均能使弯曲损耗降低,因此本研究常用模截比(MAC)值来表征单模光纤的弯曲灵敏度( $\eta_{\text{MAC}} = d_{\text{MF}}/\lambda_c$ )。但增大折射率差将使传输带宽减小,减小芯径将使接续匹配度降低,故必须根据具体情况进行均衡。由于光纤石英玻璃杨氏模量比内涂料层材料的杨氏模量大三个数量级以上,由(5)式可见,这种杨氏模量的差异可减小由模耦合造成的微弯损耗。微弯损耗随着光纤外径的增大而急剧减小,因此容易观察到 200  $\mu\text{m}$  小直径光纤的微弯敏感性比 245  $\mu\text{m}$  标准光纤大得多。

## 3 微弯损耗的新测试方法及仿真算法

相应于前述的耦合致微弯及纯弯曲致微弯两种原理,本研究首次提出两种测试方法:金属网覆盖光纤盘法、双槽平板法。

考虑金属网覆盖光纤盘法模拟耦合致微弯的情形。本方法由 IEC 方法 B 固定直径圆筒法改进而来<sup>[2]</sup>,使用无缓冲层的光纤盘代替石英筒、金属网代替砂纸,从而克服了上述缺点。光纤的缠绕张力  $F$  恒定,其在金属丝上的压力使光纤产生截向应变。本文基于此建立图 2 所示的仿真模型。

在该模型下,有以下等式成立:

$$x^2 + (d/2 - \epsilon d)^2 = (d/2)^2, \quad (10)$$

$$S = 2x \cdot \theta Dq, \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{N_F}{S \cdot E_f} = \frac{2F \cdot \cos[(2\pi - 2\theta)/4]}{S \cdot E_f}, \quad (12)$$

$$\theta = P/R, \quad (13)$$

$$q = (400 - R)/75, \quad (14)$$

式中: $P$  为网格节距; $d$  为光纤包层直径; $D$  为金属丝直径; $S$  为光纤和金属丝之间交叉的受力面积; $q$  为接触弧长修正因子(适用于  $R \leq 325 \text{ mm}$ ); $N_F$  为缠绕所致的金属丝上压力; $\epsilon$  为压力所致的光纤截向应变; $W$  为槽开口宽度; $H$  为槽深度; $r$  为金属棒半径; $L$  为弯曲长度; $\theta$  为单节距角度。结合(10)~



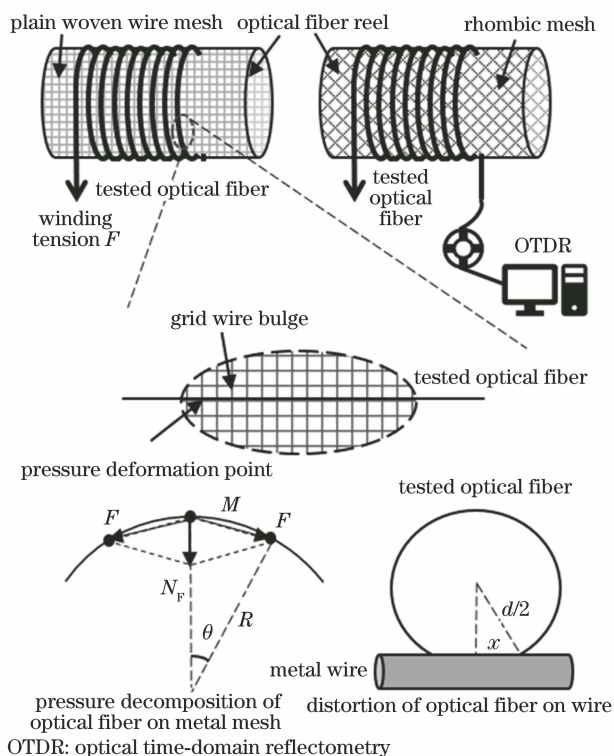


图 2 金属网覆盖光纤盘法示意及仿真模型 (直网或斜网两种)

Fig. 2 Schematic diagram and simulation model of metal mesh covered optical fiber reel method (two types: plain woven wire mesh and rhombic mesh)

(14)式,可用(5)式计算在此方法模型下的耦合致微弯损耗。

考虑双槽平板法模拟纯弯曲致微弯的情形。本方法是一种全新的方法,在开有微型浅槽的金属板上,用金属棒或带有匹配齿形的顶板压在被测光纤上,产生微弯。此方法克服了 IEC 方法 C 中可观测性差的问题,并且使测试更加简便、快捷、易于推广。本文基于纯弯曲理论建立图 3 所示的仿真模型。

金属棒使光纤产生急剧的局部弯曲,其半径必定介于  $R_{max}$  和  $R_{min}$  之间,在此模型下,有以下等式成立:

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{H}{W/2 - b}, \quad (15)$$

$$R_{max} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{W}{2} - b, \quad (16)$$

式中  $\varphi$  为金属棒压迫光纤的接触弧度。当  $H \rightarrow H_{min}$  及  $W \rightarrow W_{min}$  时,  $R \rightarrow R_{min} \rightarrow r$ , 故有

$$L = \varphi \cdot (R_{max} + R_{min})/2. \quad (17)$$

结合(15)~(17)式,可用(6)式或(9)式计算在此方法模型下的纯弯曲致微弯损耗。

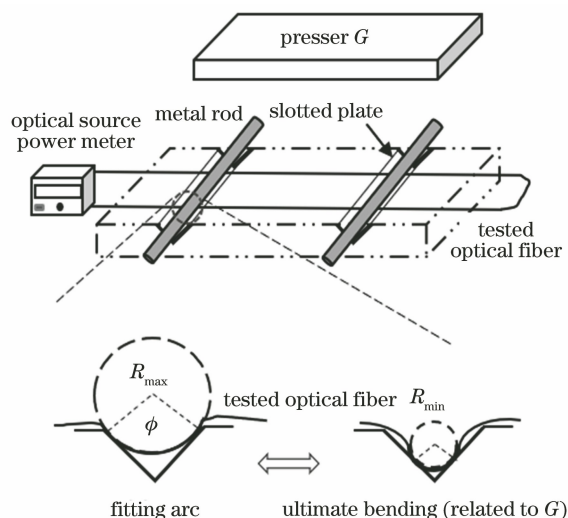


图 3 双槽平板法示意及仿真模型

Fig. 3 Schematic diagram and simulation model of double-slot plate method

#### 4 实验验证与讨论

根据上述设计的两种模型,分别构建两种微弯测试平台,分别参见图 4 及图 5。平台实测的微弯附加损耗值见图 6~图 10。

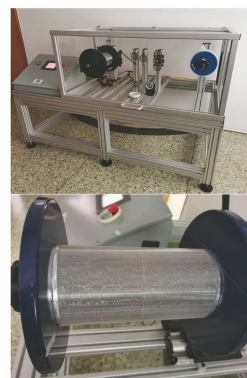


图 4 金属网覆盖光纤盘法测试平台

Fig. 4 Test platform of metal mesh covered optical fiber reel method

图 6 及图 7 中采用同一组 G. 652D 光纤,分别缠绕在金属网覆盖卷筒上测试 300 m 光纤的微弯附加损耗,金属网分为斜格及直格两种,卷筒分为半径为 70.5 mm 及 140.5 mm 的两种,光纤 C 使用抗微弯涂层料,光纤 D 使用普通涂层料。从测试结果可见:1)对于同一盘光纤的多次测试,其实测结果的一致性较好,这说明基于图 4 所示测试平台的方法重复性较好。2)对于不同盘光纤的多次测试,其实测结果差异较大,这说明虽然同为 G. 652D 光纤,但其结构材料等的不同仍然会造成光纤微弯敏感性差

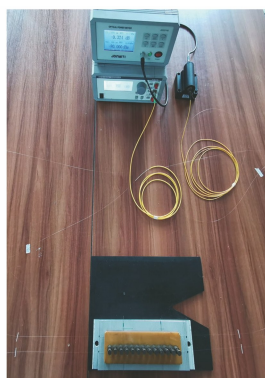


图 5 双槽平板法测试平台

Fig. 5 Test platform of double-slot plate method

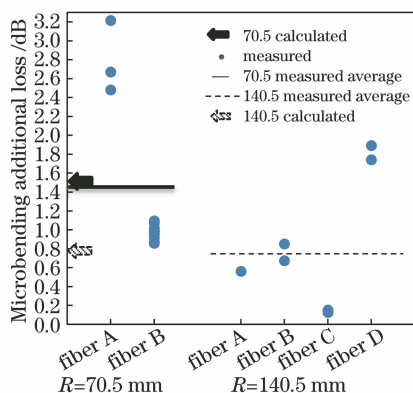


图 6 金属斜网覆盖卷筒上 G. 652D 光纤微弯附加损耗实测值

Fig. 6 Measured values of additional loss of G. 652D optical fiber microbending on the reel covered by metal rhombic mesh

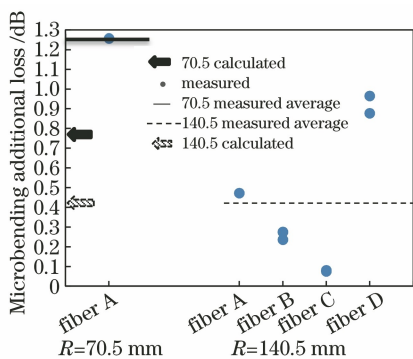


图 7 金属直网覆盖卷筒上 G. 652D 光纤微弯附加损耗实测值

Fig. 7 Measured values of additional loss of G. 652D optical fiber microbending on the reel covered by plain woven metal wire mesh

异。3)除图 7 中在半径  $R$  为 70.5 mm 时光纤盘直网上的计算值与实测平均值偏差较大之外,其他 3 种情况下计算值与实测平均值均十分接近。其原因是本文采用了统一的、常用的光纤参数,例如折射

率差、芯径、杨氏模量等,这些参数的确能代表 G. 652D 光纤的典型参数。4)图 7 中在半径  $R$  为 70.5 mm 时偏差较大的原因可能是纤 A 的相对折射率差  $\Delta n$  显著小于常用值,或涂覆层综合模量  $E$  显著大于常用值。同样图 6 中半径  $R$  为 70.5 mm 时纤 A 的实测值也偏离平均值较远。5)图 6 及图 7 还显示出卷筒半径越小,微弯附加损耗越大,这与(10)~(14)式中的理论分析相符,即卷筒半径越小,光纤的截向畸变越大。

图 8~10 则将 G. 657A2 和 G. 652D 两类光纤按照某一个对比参数(其他参数相同)区分为两至三组,包括抗微弯涂料与普通涂料、涂层直径 245  $\mu\text{m}$  与 200  $\mu\text{m}$ (其他未指明的均为 245  $\mu\text{m}$ )、MAC 值大与小各一盘。槽板 A、B、C 的槽深度分别为 0.15, 0.30, 0.50 mm。

结果显示,在畸变较小时(图 6 及图 7),抗微弯涂料对光纤微弯损耗有明显的改善,但当畸变较大时(图 8 及图 9),抗微弯涂料与普通涂料的差异很可能被光纤的其他参数差异所掩盖,这是因为(5)式中指数项量级不同所致。

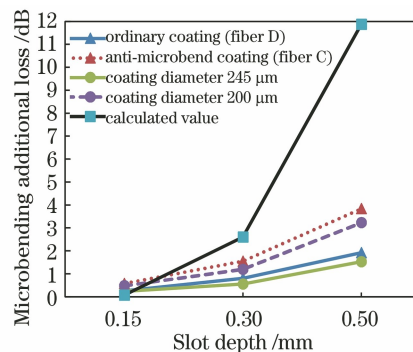


图 8 双槽平板法 G. 657A2 光纤微弯附加损耗实测值随槽深度的变化

Fig. 8 Measured values of microbending additional loss versus slot depth of G. 657A2 fiber by double-slot plate method

从图 8 到图 10 可以看出:1)光纤 MAC 值仍然是能表征其微弯敏感性差异的典型参数,MAC 值大或小的光纤,其微弯敏感性最大或最小;2)涂覆层直径越小(厚度越薄),微弯敏感性越大;3)槽深度对微弯敏感性的影响剧烈,但棒直径的影响很小。总体而言,在槽的深度适中时,本文提出的双槽平板仿真算法的计算值与实测值的一致性较好,但在浅槽时偏小,在深槽时显著偏大。从图 3 可以看出,与光纤实际发生的弯曲程度相比,对微小弯曲半径的仿真估算,在浅槽时可能估计不足(估算半径偏大),而在深槽时可能出现过估计(估算半径偏小),这可能

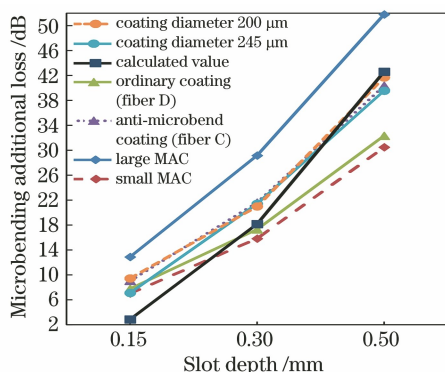


图 9 双槽平板法 G. 652D 光纤微弯附加损耗实测值随槽深度的变化

Fig. 9 Measured values of microbending additional loss versus slot depth of G. 652D fiber by double-slot plate method

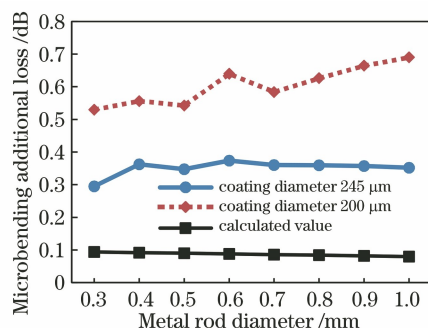


图 10 A 板 G. 657A2 光纤微弯附加损耗实测值随棒直径的变化

Fig. 10 Measured values of microbending additional loss versus metal rod diameter of G. 657A2 fiber on plate A

是造成中间合适、两头偏离的原因。光纤的实际弯曲程度,除了受图 3 所示的几何估计影响之外,压块受到的重力  $G$  也会迫使光纤产生过度弯曲,光纤的弯曲模量又会对弯曲有一定的抵抗,故需引入这些因素,结合力学、几何学及光学来综合考量平衡点,这有待进一步研究。

此外,图 6 至图 10 所列数据均为在 1550 nm 波长的测试结果。本课题组还将研究光纤微弯附加损耗与波长的关系,探究微弯损耗是否也和宏弯损耗一样,也会受到涂覆层中 Whispering Gallery 模的影响,使弯曲损耗与波长存在周期性振荡关系<sup>[11-12]</sup>。

## 5 结 论

光纤微弯附加损耗的产生机理及计算可以从弯曲损耗的传统理论中找到依据,但这些理论须结合实际,才能建立适配于实际应用或测试环境的仿真模型。本文从耦合致微弯及纯弯曲致微弯两种机理出发,设计出金属网覆盖光纤盘法和双槽平板法两

套模型,并构建了适用的算法及实际的测试平台。

研究及测试表明,微弯损耗的大小与光纤的折射率差、涂覆层的外径、畸变的大小、内涂覆层的杨氏模量等呈正相关,与弯曲半径、纤芯半径、MAC 值等呈负相关。与使用波长的关系,从理论公式来看是整体呈正相关的,但是否存在振荡还有待进一步验证。

本文仿真算法的计算值与实测结果的一致性,总体而言较为满意,能够起到指导实际工作的目的。对槽板中微小弯曲程度(半径)的仿真估算有待进一步深入研究,以提高测量精确度。本文仿真算法及其支持的两种新测试方法,借助金属网覆盖光纤盘、开槽板使得测试方法变得简单易行、极易推广、重复性好,弥补了以往方法需要使用复杂机构且材料不可重复使用的缺点,为制订标准提供了参考。本课题组下一步将在前期研究及实验成果的基础上,开展了测试方法标准的制订工作。随着微弯损耗机理的进一步明晰、测试方法的进一步标准化、规避方法的进一步成熟,其对光纤骨干网、接入网及全光布线网的影响将日益引起重视并得到抑制。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng Y, Xiao W, Zhu Z W. Research on an optical fiber linear displacement sensor based on bending loss for use over large range [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206002.  
郑勇,肖旺,朱正伟.一种大量程光纤弯曲损耗型线性位移传感器研究[J].光学学报,2020,40(12):1206002.
- [2] The International Electrotechnical Commission. Optical fibres-measurement methods-microbending sensitivity: IEC/TR 62221 (Ed. 2.0) [R]. Geneva: IEC Technical Report, 2012.
- [3] Jeunhomme Luc B. Single-mode fiber optics [M]. Zhou Y Y, Transl. Nanning: Guangxi Normal University Press, 1988: 31-128.  
热纳奥姆(Jeunhomme Luc B.).单模纤维光学原理与应用[M].周洋溢,译.南宁:广西师范大学出版社,1988:31-128.
- [4] Daniele C, Bertil A. Microbend test methods comparison[C]//The 61st International Wire & Cable Symposium (IWCS), November 11-14, 2012, Providence, Rhode Island, USA. Shrewsbury: IWCS, 2012: 107-110.
- [5] Jay J A. An overview of macrobending and microbending of optical fibers: white paper-1212 [R]. New York: Corning Incorporated, 2010.

- [6] Davis I, Schmid S. The second problem of optical fiber bending not to be ignored: microbending [J]. Ma J G, Zhao J D, Transl. Lightwave communication, 2013(4/5): 18-19.  
Ian Davis, Steven Schmid. 不容忽视的光纤弯曲问题: 微弯[J]. 马建高, 赵建东, 译. 光波通信, 2013(4/5): 18-19.
- [7] Xue M C. Research and measurement of optical fibre macrobend loss [J]. Telecommunications Science, 2009, 25(7): 57-62.  
薛梦驰. 光纤弯曲损耗的研究与测试[J]. 电信科学, 2009, 25(7): 57-62.
- [8] Marcuse D. Microdeformation losses of single-mode fibers[J]. Applied Optics, 1984, 23(7): 1082-1091.
- [9] Barnoski M K. Fundamentals of optical communications[M]. Liu S H, Liang M J, Wang G Y, et al, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 47-48.  
巴诺斯基. 光纤通信基础[M]. 刘时衡, 梁民基, 王广阳, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 1981: 47-48.
- [10] Marcuse D. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(12): 2957-2961.
- [11] Renner H. Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(5): 544-551.
- [12] Haran F M, Ono K, Barton J S, et al. Bend loss oscillations in single mode optical fibre: higher order recoupling[J]. Optics Communications, 1994, 108(1/2/3): 55-59.