

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0098-07

# X 射线检测光纤缠绕缺陷理论分析及实验研究

崔 骥<sup>1</sup> 崔 勤<sup>2</sup> 徐振华<sup>1</sup> 白晓宇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京理工大学理学院信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)  
(<sup>2</sup>中国电子科技集团南京五十五研究所, 江苏 南京 210016)

**摘要** 利用 X 射线检测制导光纤在缠绕过程中产生的各种缺陷。通过对传统 X 射线仪拍摄图像的分析以及对点 X 射线扫描检测的模拟, 从理论上分析了 X 射线扫描检测光纤缠绕缺陷的可行性, 并进一步提出通过二维扫描对缺陷进行定位, 同时考虑了适当的匝间间隙对检测结果的影响, 并最终给出了相关的部分实验结果, 对实验中出现的有关问题进行了分析研究。

**关键词** X 射线光学; 制导光纤; 缠绕缺陷; 扫描; 匝间间隙

**中图分类号** TN06      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0098

## Theoretical Analysis and Experimental Research of the Optical Fiber Imperfections' X-Ray Inspection

Cui Ji<sup>1</sup> Cui Qin<sup>2</sup> Xu Zhenhua<sup>1</sup> Bai Xiaoyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Physics and Engineering, College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China  
<sup>2</sup>The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210016, China

**Abstract** Detect guided optical fiber's some imperfections which are produced in the winding process with X-ray. Through the analysis of traditional X-ray image and the simulation of point X-ray scanning, the feasibility of optical fiber imperfection scanned by X-ray is confirmed theoretically, and propose that through the two-dimensional scanning of flaw to locate it, then the influence of suitable winding gap is analyzed. Finally the relevant experimental results are given, the relevant issues of the experiments are analyzed.

**Key words** X-ray optics; guided optical fiber; winding imperfection; scan; winding gap

## 1 引 言

光纤制导技术是近 20 年来迅速发展起来的一种导弹制导技术, 它已经成为延长有线制导导弹攻击距离和提高导弹命中率的重要途径<sup>[1]</sup>。但是目前光纤制导技术尚面临着几项关键技术的限制, 其中之一就是缠绕光纤的内部缺陷测试。在光纤缠绕过程中会产生各种缠绕缺陷以及由于储存环境(温度、湿度和振动环境)及时限的限制, 将会使线包内部产生裂纹<sup>[2~5]</sup>, 这些线包内部缺陷将会使导弹在飞行过程中造成断纤现象, 这势必会造成重大损失, 因此

在缠绕线包使用前必须先对其进行精密检测。目前国内对缠绕线包检测的研究还处于起步阶段, 主要是利用常规 X 射线仪拍摄或光纤时域反射计检测缠绕线包<sup>[6,7]</sup>。这些传统检测方式由于各种因素的影响, 精度难以保证。本文提出利用点 X 射线束对缠绕线包进行扫描检测, 并对该方案进行了理论分析及实验研究。

## 2 光纤缠绕缺陷图片检测及分析

图 1 为利用 X 射线仪检测光纤缠绕样品得到

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-12

基金项目: 国防预研基金项目资助课题。

作者简介: 崔 骥(1972—), 男, 副教授, 主要从事激光技术及光电测试等方面的研究。E-mail: cuiyangji2001@yahoo.com.cn

的相关图片。光纤缠绕样品的绕线管为塑料管,缠绕 23 圈光纤即 46 层,光纤直径为 0.3 mm。图 1(a),(c) 是用丹东奥龙射线仪器有限公司的微焦点 X 射线检测仪直接拍摄的图像,实验管电压为 63 kV;管电流为 0.532 mA;曝光时间为 128 frame/s。图 1(b),(d) 为经过一定算法处理后的图像。通过观察上面各图可以较为清晰地看到光纤绕组左右两侧光纤层数的区别以及绕组左侧多缠绕的一匝,且绕组边沿出现了坍塌。

上述实验光纤层数为 46 层且缠绕管为塑料管,

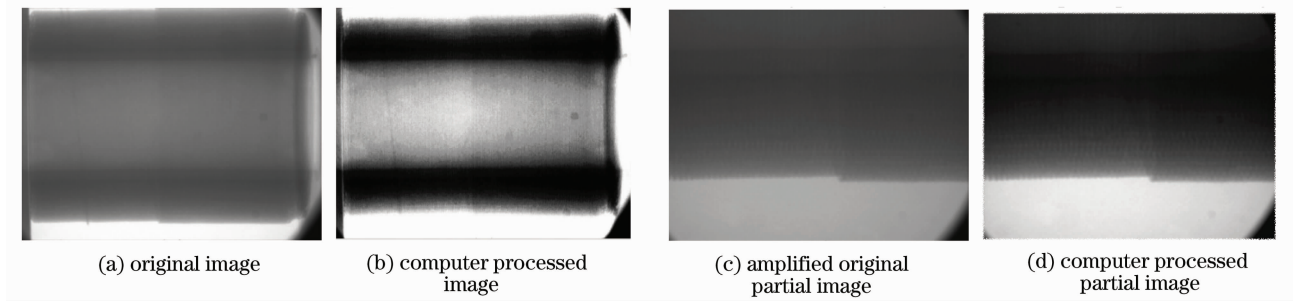


图 1 X 射线仪拍摄的光纤缠绕样品图像

Fig. 1 Sample images of fiber winding detected by X-ray detector

### 3 X 射线轴向扫描检测模拟分析

点状 X 射线束轴向扫描检测光纤缺陷基本原理如图 2 所示,由 X 射线源出射的 X 光垂直经过缠绕线包后,被检测装置接收,射线源与强度检测装置同步沿线包轴向移动,就可以扫描到整个线包的一个截面。线包缺陷处对射线的吸收与正常部分会有微小的差别,因而透射的 X 射线强度就会存在差异,通过检测装置检测出这种差别,就可以发现光纤缠绕的各种缺陷。点状 X 射线扫描检测将会大大降低检测的几何不清晰度,此种方法还可去除胶片的固有不清晰度,从而提高了缺陷的对比度及可检测性。

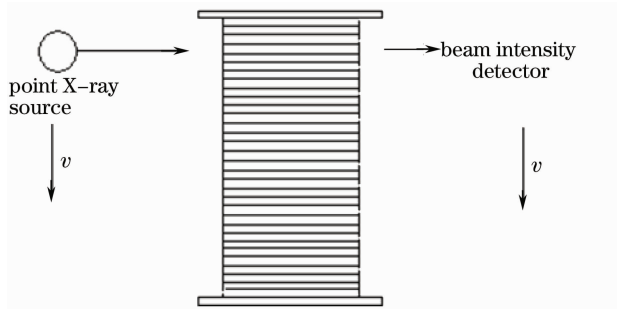


图 2 X 射线轴向扫描检测光纤缠绕缺陷基本原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical fiber winding imperfection's X-ray axial scanning inspection

而实际绕线管为碳合金材料,其对 X 射线的吸收远大于塑料,而且实际光纤绕制的层数远不止 46 层,因此利用常规的射线检测效果将明显降低,进而会增大检测图像的不清晰度,降低图像的分辨率及对比度,这将影响尺寸较小细节的可识别性,很难检测出绕线包中一两层细微缠绕缺陷<sup>[8-10]</sup>。

因此,要检测实际缠绕线包,必须提高射线检测的分辨率,降低不清晰度,提高检测对比度。这里设想了一种方案:即利用点状 X 射线束对缠绕光纤样品进行扫描检测。

#### 3.1 光纤线衰减系数分析

图 3 为 X 射线轴向扫描检测光纤缠绕缺陷示意图,在进行进一步理论模拟过程中,做如下假设: 1)探测光斑为光强均匀分布的平行光;2)不考虑 X 射线的发散角及射线的散射;3)忽略缠绕光纤匝间间隙和光纤匝间应力变化所产生的光纤形变;4)光纤各部分对 X 射线吸收密度相同;5)光纤缠绕管均匀,有效衰减长度固定。

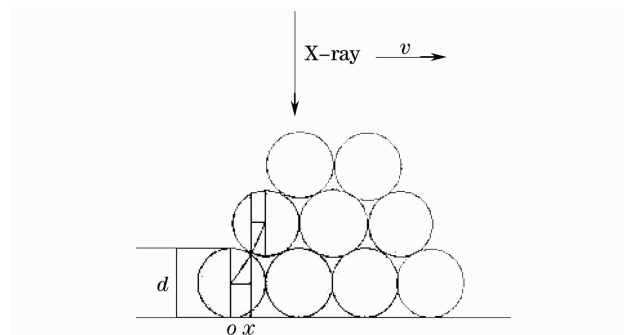


图 3 X 射线轴向扫描检测光纤缠绕缺陷剖面示意图

Fig. 3 Section plane schematic drawing optical fiber winding imperfections' X-ray axial scanning inspection

采用点状 X 射线束扫描检测光纤缠绕缺陷时设光纤直径为  $d$ ,光纤层数为  $n$ ,线衰减系数为  $\mu$ ,初始 X 射线强度为  $I_0$ ,对于层数不同的光纤,透射 X 射线强度分别为  $I_1, I_2$ ,缠绕管有效衰减长度  $y_0$ ,衰

减系数  $\mu_0$ ,

$$I_1 = I_0 \exp(-\mu y_1), \quad (1)$$

$$I_2 = I_0 \exp(-\mu y_2), \quad (2)$$

其中  $y_1$  和  $y_2$  分别为不同层数光纤的有效衰减长度。根据射线检测经验,光纤绕组对 X 射线的衰减作用不能太强,否则难以探测,一般应有  $I_1/I_0 \geq 1\%$ ; 并且  $I_1, I_2$  之间的差别不能太小,一般可取对比度  $\Delta D = (I_1 - I_2)/I_1 \geq 1\%$  作为判断是否可检测的条

件。以 1/70 作为模拟所要达到的检测精度,即应该可以检测出 70 层光纤与 69 层光纤的区别。因此,  $I_1, I_2$  分别取为透过 70 层光纤与透过 69 层光纤后的 X 射线强度。

在此以单侧 70 层与 69 层光纤作为模拟对象,当单侧光纤层数  $n$  为偶数时, X 射线垂直穿越光纤时的有效衰减长度为

$$y = \begin{cases} n \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} + n \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & (x < \frac{d}{2}) \\ n \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - (d-x)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + n \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( x - \frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & (\frac{d}{2} < x < d) \end{cases}, \quad (3)$$

当单侧光纤层数  $n$  为奇数时,有效长度为

$$y = \begin{cases} (n+1) \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - x^2 \right]^{\frac{1}{2}} + (n-1) \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & (x < \frac{d}{2}) \\ (n+1) \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - (d-x)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + (n-1) \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( x - \frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & (\frac{d}{2} < x < d) \end{cases}, \quad (4)$$

利用(3),(4)式可求得单层光纤所对应的最大有效衰减长度

$$y_{\max} = \frac{\sqrt{3}nd}{2} + y_0. \quad (5)$$

对于 70 层光纤和 69 层光纤,对应于最大有效衰减长度的透射 X 射线强度分别为  $I_{1\min}, I_{2\min}$ ,

$$I_{1\min} = I_0 \exp[-(35\sqrt{3}d\mu + y_0\mu_0)], \quad (6)$$

$$I_{2\min} = I_0 \exp[-(34.5\sqrt{3}d\mu + y_0\mu_0)], \quad (7)$$

利用(6),(7)式可得对比度

$$\Delta D = \frac{I_{2\min} - I_{1\min}}{I_{1\min}} = \exp[(\sqrt{3}d/2)\mu - 1], \quad (8)$$

按照一般判据  $\Delta D \geq 1\%$ , (8)式可化为

$$d\mu \geq 0.0115, \quad (9)$$

透射 X 射线强度不能太小,否则难以探测,一般应有  $I_1/I_0 \geq 1\%$ , 即

$$\exp[-(35\sqrt{3}d\mu + y_0\mu_0)] \geq 1\%, \quad (10)$$

$$35\sqrt{3}d\mu \leq 4.6052 - y_0\mu_0, \quad (11)$$

由(9),(11)式便即可确定光纤可以利用 X 射线轴向扫描检测的衰减系数的范围。化简之,有

$$0.0115 \leq \mu d \leq 0.0762 - \frac{y_0\mu_0}{35\sqrt{3}}, \quad (12)$$

取光纤直径  $d$  为 0.3 mm, 可得

$$0.0383 \leq \mu \leq 0.2540 - \frac{y_0\mu_0}{10.5\sqrt{3}}. \quad (13)$$

当光纤的衰减系数在(13)式所示的范围内时,

X 射线扫描光纤缠绕缺陷的方法有可能是可行的,其中  $y_0\mu_0$  与缠绕管的材料与结构有关。实际应用中缠绕管采用碳合金,其厚度  $y_0 \approx 1.5$  mm, 衰减系数在  $\mu_0 < 0.5$  的范围内,因此(13)式的最后一项  $\frac{y_0\mu_0}{10.5\sqrt{3}} < \frac{0.75}{10.5\sqrt{3}} \approx 0.04$ , 将该项忽略,则(13)式可近似为

$$0.0383 \leq \mu \leq 0.254. \quad (14)$$

从(8)式可以得到  $\mu$  值越大,对比度越大的结论。 $\mu$  值由光纤的材料性质及 X 射线的波长决定,光纤的材料性质是确定的,因此在实际检测中,在合理的范围内应尽量选择波长较长也即能量较低的射线,以适当地增大光纤对其的衰减作用,增强对比度<sup>[11~13]</sup>。

### 3.2 检测模拟结果分析

对于  $n$  层光纤( $n > 1$ ), X 射线垂直穿越光纤横向扫描时的有效衰减长度关系(3),(4)式已给出,对上面(3),(4)式按照周期平移即可得全部的透射 X 射线强度分布。

利用计算机可以模拟出不同光纤绕组情况下透射 X 射线强度分布图。一般 X 射线源发出的是圆形 X 射线斑,由于该圆形射线斑的强度分布必然具有高斯分布的性质,即斑的边缘部分强度较弱,而中心较强,因此可以用正方形光斑作为近似而对最终的模拟结果不产生很大的影响。在下面模拟过程

中,取 X 射线为边长 1 mm 的正方形 X 射线斑。

模拟过程中忽略光纤缠绕管的影响,因为从 3.1 节的理论计算中可见在满足(14)式时,考虑绕线管与否并不影响对比度,而  $I_1/I_0 \geq 1\%$  的条件并不影响出射 X 射线的强度分布。

图 4(a)是在取光纤衰减系数  $\mu=0.2 \text{ mm}$ ,光纤直径  $d=0.3 \text{ mm}$ ,左右两边为 70 层光纤,中间有两匝宽度的光纤为 69 层条件下,[如图 5(a)所示],X 射线轴向扫描绕组后的模拟光强分布图。而图 4(b)是左右两边为 70 层光纤中间有一匝宽度的光纤为 69 层的情况[如图 5(b)所示],其他条件同图 4(a)所述的 X 射线轴向扫描绕组后的模拟光强分布图。在图 4(b)中,对比度只

有 1.46%,而图 4(a)中,高低两段的最低点的对比度为 2.40%。此外还对线宽分别为 0.1 nm 和 0.5 mm 的射线进行了模拟计算,得出其射线透射图是一致的,只是在对比度上存在差异。对于中间缺单匝光纤而言,其对比度分别为 4.75%,2.74%,即射线线宽越小,对比度越大,检测精度越高。但在检测过程中光斑不能太小,否则会影响检测光强,降低检测效率;而光斑过大,同样将会降低对比度,影响检测结果。因此在实际检测过程中必须选择合适的光斑及光强进行检测。

综上所述,这样的检测方式有着较高的检测精度。

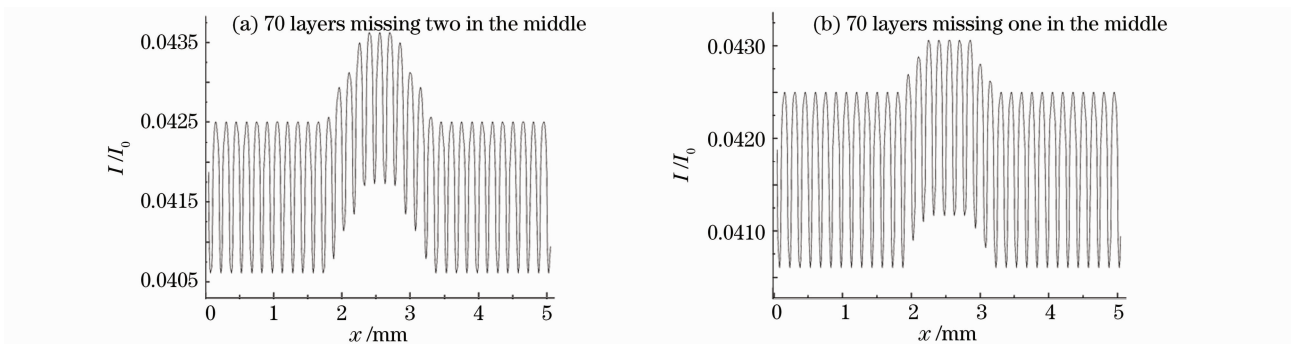


图 4 X 射线轴向扫描透射图

Fig. 4 X-Ray axial scanning transmission diagram

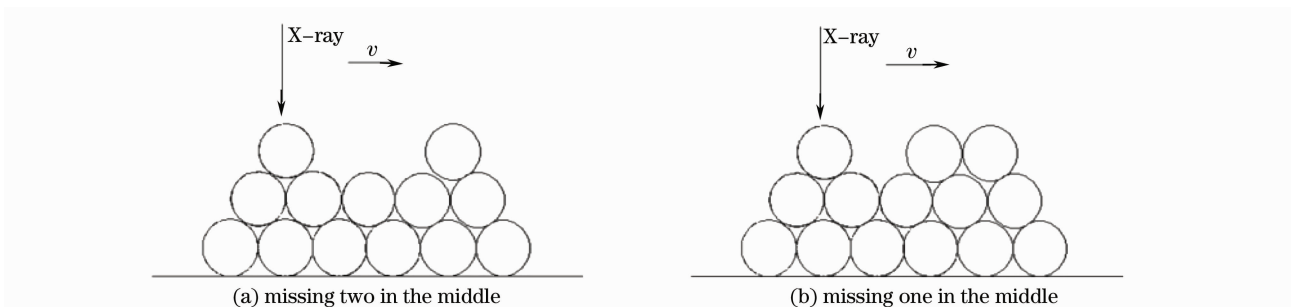


图 5 轴向扫描剖面示意图

Fig. 5 Axial scanning section plane schematic drawing

#### 4 X 射线斜向扫描模拟分析

点 X 射线扫描光纤绕组时,每次可以扫描一个平面,对一个方向扫描只能定性分析有无缺陷,如果在同一平面上分两次从两个不同的方向扫描,就可以对缺陷进行定位。

如图 6 所示,当 X 射线沿与轴成  $60^\circ$  斜向穿过光纤层时,有效衰减长度的关系式为

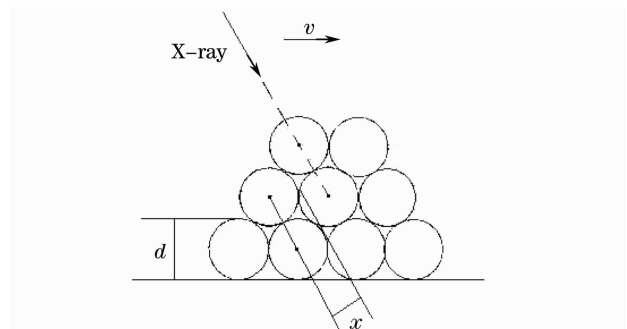


图 6 斜向扫描剖面示意图

Fig. 6 Oblique scanning section plane schematic drawing

$$y = \begin{cases} 2n \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & (0 < x < \frac{\sqrt{3}d}{2}) \\ 2n \left\{ \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - \left( \frac{\sqrt{3}+1}{2}d - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} & (\frac{\sqrt{3}d}{2} < x < d) \end{cases}, \quad (15)$$

对(15)式中在区间  $\left[ \left( \frac{2-\sqrt{3}}{2} \right)d, d \right]$  的部分按周期  $(\sqrt{3}/2)d$  平移即可得到全部的射线强度分布。

图 7(a), (b) 是斜向扫描的模拟结果, 其条件同图 4 时所述。计算得上面两图有无缺陷处的对比度

分别为 2.86% 与 1.66%, 与图 4 所得结论相仿。其对比度比轴向扫描大, 也就是说, 沿  $60^\circ$  扫描缺陷检测能力要比轴向扫描高。

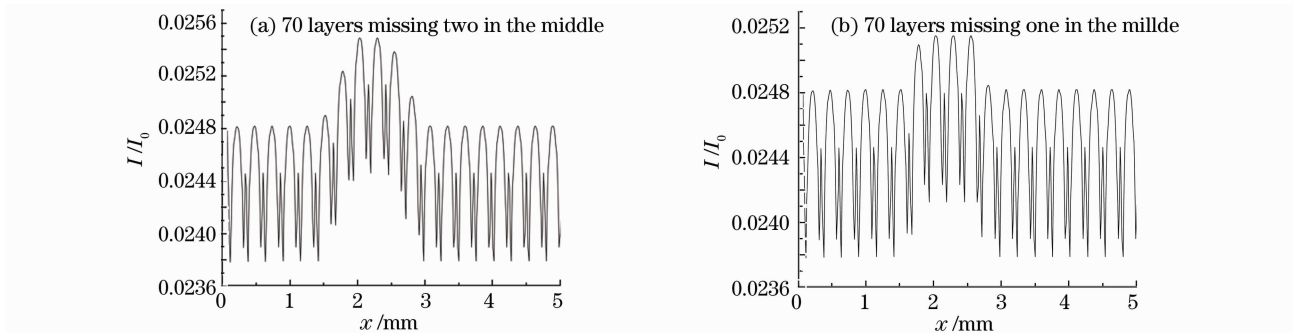


图 7 斜扫描透射图

Fig. 7 Oblique scanning transmission chart

## 5 考虑光纤匝间间隙的模拟分析

4 节数值模拟的过程中, 忽略了光纤匝间间隙。在实际缠绕过程中, 由于自动缠绕机绕纤轮的补偿速度与转动速度不可能完全匹配, 使得光纤之间总会有一定的间隙。假设各层光纤之间的间距都相同, 并考虑实际情况, 设间距  $a = d/10 = 0.03$  mm,

对其进行 X 射线轴向扫描模拟, 条件同图 4 时所述, 得图 8(a), (b)。

从图 8 与图 4 的比较中可以看出两图在强度分布的趋势上并无差别, 图 8 的对比度分别为 3.02% 和 1.53%, 与图 4 的结果相仿, 说明一般的匝间间隙对检测结果影响不大。

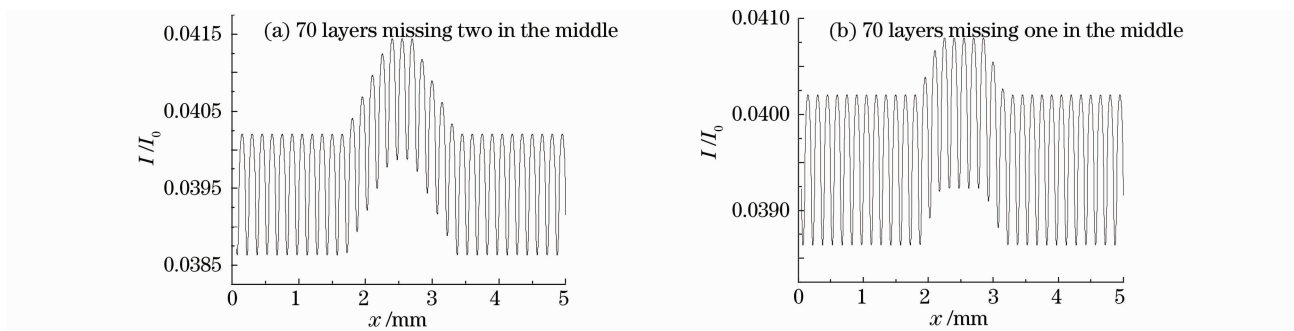


图 8 考虑匝间间隙后的轴向扫描透射图

Fig. 8 Axial scanning transmission chart considering the inter-turn gap

## 6 实验模拟检测

利用如图 9 所示的实验装置, 对光纤缠绕样品进行实验检测。

实验中的射线源为 X 射线晶体分析仪, 管电压  $10 \sim 60$  kV (1 kV/div), 管电流  $5 \sim 80$  mA

(1 mA/div), 管电压、管电流稳定度小于等于 0.01%, 额定输出功率 3 kW, 采用水循环冷却装置, 系统综合稳定度小于等于 0.5%, 采用高密度和高透光性的铅玻璃作为 X 射线防护装置。

点 X 射线对缠绕光纤样品进行扫描, 在缠绕光

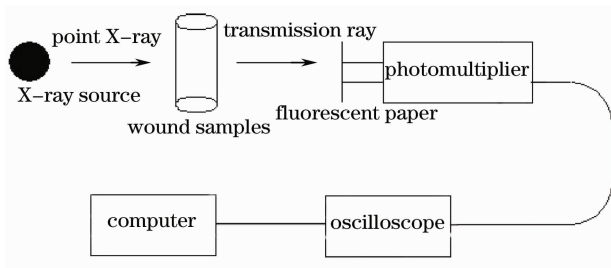


图 9 实验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental apparatus

纤差异处,透射射线强度会发生变化,用荧光屏将射线转变成可探测光,并用光电倍增管进行探测,然后通过示波器显示得出相关的电压信号,对该信号进行存储记录,并对数据进行处理分析。那么在缠绕差异处,其电压信号必定存在较大的涨落,通过该特性来判断缺陷的存在。

对缠绕 58,60 层光纤进行轴线扫描测试,设置管电压 30 kV,管电流 20 mA;示波器采样时间为 1 ms;扫描步距为 1 mm;无样品时电压为 3.28 V;出射射线直径约为 1 mm;所测数据如图 10 所示。

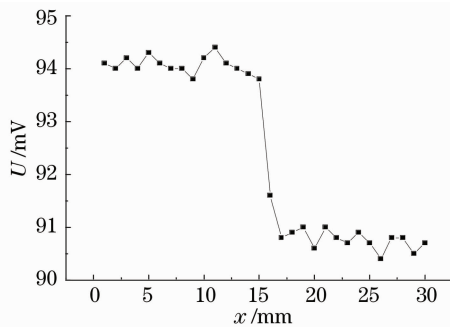


图 10 58,60 层扫描电压图

Fig. 10 58,60 layers scanning voltage chart

由图 10 可见对于不同层数的光纤,透射 X 射线的强度有着较大的差别。通过对图 10 中数据进行分析计算,得出光纤衰减系数  $\mu=0.069 \text{ mm}$ 。

对 60 层光纤中间多一匝差异处轴向扫描测试:示波器采样时间为 1 ms;扫描步距为 0.1 mm;设置管电压为 20 kV,管电流为 15 mA;无样品时电压为 2.00 V;出射射线直径约为 0.5 mm;所测数据如图 11 所示。从图 11 中见明显的峰谷,此处即为 60 层光纤多一匝差异处。通过对图 11 中数据进行分析计算,得出光纤衰减系数  $\mu=0.221 \text{ mm}$ 。

通过以上两组实验分析可知,利用点 X 射线检测光纤缠绕缺陷是可行的,且光纤衰减系数与理论分析的衰减系数范围相吻合,间接证明了实验的准确性及可行性。在实验中应尽量选择管电压较小状态进行测试,从而提高缺陷检测的对比度,但这同时

受到透射光强的限制,因此必须选择合适的管电压和管电流;在实验中还应调节不同的光斑直径进行检测,从而选择最合适的光斑尺寸进行测试;在实验中还需尽量选择较小的扫描步距,这样可以提高检测对比度,以及避免细小缠绕缺陷的漏测。

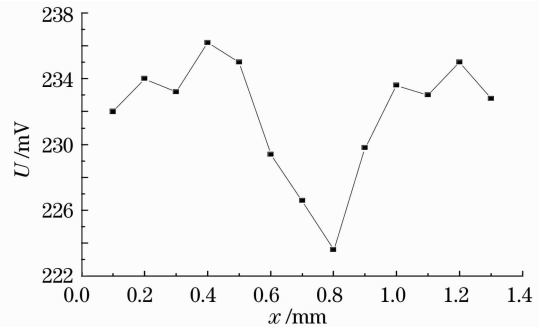


图 11 60 层多一匝扫描电压图

Fig. 11 60 layers surplus one scanning voltage chart

## 7 结 论

从理论及实验上分析了合理的光纤衰减系数范围内 X 射线扫描检测缠绕缺陷的可行性。利用不同角度对缠绕线包进行扫描,从而对缠绕线包内部缺陷进行定位检测,而且缠绕缺陷的尺度越大,产生的对比度就越大,越容易被检测出来,这对实际检测是有利的。只对轴向扫描情况做了实验验证,并与理论分析相吻合,其他角度的扫描并没进行实验验证,即对缠绕缺陷还不能精确定位检测。后续工作就是要对实验部分进行进一步研究,即对不同角度及光斑进行实验验证;同时制作其他不同类型缺陷样品进行上述检测,并对实际线包进行扫描检测;最终对各类缺陷通过不同角度扫描检测后进行重建,得出缺陷的具体特性。从而为下一步整个光纤缺陷诊断系统的研制打下基础。

## 参 考 文 献

- 1 Cao Ziqiang. Technology of fiber-optical guidance and its application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(supl.): 53~55  
曹自强. 光纤制导技术及其应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(supl.): 53~55
- 2 Cui Dedong, Hao Chongyang, Ning Jing. Research on bending losses of guidance optical fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(supl.): 1~5  
崔得东, 郝重阳, 宁瑾歌. 制导光纤弯曲损耗研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(supl.): 1~5
- 3 Li Maochun, Liu Tiegen, Jiang Junfeng et al.. Transient characteristic testing of fiber optic gyro fiber coil based on temperature excitation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 435~441  
李茂春, 刘铁根, 江俊峰等. 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 435~441
- 4 Kang Weirui, Ma Baoji, Chen Ruining. Analyse of faculties and

- cause in the optical fiber precision winding [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, **25**(4): 246~249
- 康葳蕤, 马保吉, 陈瑞宁. 光纤精密缠绕的缺陷及其原因分析 [J]. *导弹与制导学报*, 2005, **25**(4): 246~249
- 5 Wang Baozhu, Deng Honglin, Li Xiaorui *et al.*. Life time prediction for the optical fiber in guidance optical cable [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, **26**(6): 41~45
- 王宝珠, 邓宏林, 李小瑞等. 制导光缆中光纤寿命预期 [J]. *应用光学*, 2005, **26**(6): 41~45
- 6 Zhou Yongmin, Zhang Qing, Wang Xionghai *et al.*. The application of OTDR to the test of optical fiber [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Magazine*, 2004, **21**(4): 27~29
- 周勇敏, 张青, 汪雄海等. 光时域智能测试仪在光纤测试中的应用 [J]. *机电工程*, 2004, **21**(4): 27~29
- 7 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654
- 宋牟平, 鲍翀, 裘超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 650~654
- 8 Zhou Xian, Liu Yilun. A study of automatic extraction method of defects on X image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1016~1020
- 周贤, 刘义伦. X光图像中缺陷自动提取方法的研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1016~1020
- 9 Yuan Peixin, Sun Yan, Chen Bo *et al.*. Identify defects of the radiograph by image processing [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2006, **30**(5): 23~26
- 原培新, 孙岩, 陈波等. 图像处理在X射线胶片缺陷识别中的应用 [J]. *CT理论与应用研究*, 2006, **30**(5): 23~26
- 10 Ren Dahai, You Zheng. The improvement of the image quality in radiography [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001, (1): 36~37
- 任大海, 尤政. X射线检测中的图像质量的改善 [J]. *仪表技术与传感器*, 2001, (1): 36~37
- 11 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen *et al.*. The penetration of X-rays optical filters: structure, principles and some characteristics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, **38**(11): 27~30
- 高鸿奕, 谢红兰, 陈建文等. X射线的穿透深度光滤波器: 结构、原理与特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2001, **38**(11): 27~30
- 12 Sun Yi, Zhu Peiping, Yu Jian *et al.*. Absorption, refraction and extinction contrast computerized tomography of X-ray diffraction enhanced imaging method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 749~754
- 孙怡, 朱佩平, 于健等. X射线衍射增强成像中吸收、折射以及散射衬度的计算层析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 749~754
- 13 Wang Tongquan, Wei Xiaodong, Li Hongjie *et al.*. Calculation of X-ray attenuation and energy deposition [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2007, **41**(4): 399~403
- 王同权, 魏晓东, 李宏杰等. X射线的衰减和能量沉积计算 [J]. *原子能科学技术*, 2007, **41**(4): 399~403