

doi: 10.3788/gzxb20184704.0406001

# 剪扭作用下塑料光纤力光转换特性试验研究

包腾飞<sup>1,2</sup>, 赵津磊<sup>3</sup>, 李涧鸣<sup>1,2</sup>

(1 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(2 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

(3 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

**摘 要:** 为了研究滑开型和撕开型裂缝条件下塑料光纤的光学感知特性, 分别进行了剪切和扭转作用下塑料光纤的力光转换特性试验. 结果表明, 在错动位移由 0 增加至 0.5 mm 的过程中, 光损耗值和菲涅尔反射值与错动位移呈近似线性关系, 灵敏度分别达到 15.6 dB/mm 和 5.9 dB/mm. 塑料光纤内部的光损耗特性对剪切作用较敏感, 而对扭转作用不敏感, 光损耗水平保持在 1 dB 左右. 滑开型和撕开型裂缝条件下塑料光纤具有相似的光学感知特性, 菲涅尔反射值和光损耗值都可以作为裂缝错动位移的监测指标, 其中, 光损耗水平变化幅度更大, 对裂缝的感知更敏感.

**关键词:** 塑料光纤; 光时域反射; 裂缝监测; 光损耗; 菲涅尔反射

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)04-0406001-8

## Experiment of Optical Response Characteristics of Plastic Optical Fibers under Shear and Torsion Loading

BAO Teng-fei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jin-lei<sup>3</sup>, LI Jian-ming<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

(2 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

(3 Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co. Ltd, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

**Abstract:** Experiments to study the optical response characteristics of plastic optical fibers under shear and torsion conditions are conducted respectively which are correspond to the conditions when sliding type and tearing type cracks occurred in structures. Results indicate that during the process when the shear displacement increase from 0 to 0.5 mm, the optical loss and Fresnel reflection are linear related to the shear displacement, and the sensitivity of which are 15.6 dB/mm and 5.9 dB/mm respectively, indicating that plastic optical fibers have better optical sensibility to cracks under shear loading conditions, while the sensitivity is low under torsion loading, the optical loss of which is about 1 dB. It can be concluded that plastic optical fibers have the same optical response characteristics when sliding mode or tearing mode cracks occurred in structures. Both Fresnel reflection and optical loss can be used as crack monitoring index among which optical loss is considered to be more sensitive.

**Key words:** Plastic optical fiber; Optical time domain reflect; Crack monitoring; Optical loss; Fresnel reflection

**OCIS Codes:** 060.2300; 060.2370; 060.3510; 140.3510

基金项目: 国家重点研发计划(No.2016YFC0401601), 国家自然科学基金(Nos.51579086, 51739003, 51479054, 51379068, 41323001), 江苏省杰出青年基金项目(No.BK20140039)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(No.YS11001)资助

第一作者: 包腾飞(1974-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为水工建筑物安全监控、评估及反馈分析, 光纤传感器在结构健康监测中的应用. Email: baotf@hhu.edu.cn

收稿日期: 2017-10-30; 录用日期: 2017-12-26

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

开裂现象在混凝土结构建造和使用中较为普遍,其发展到一定程度,会降低混凝土的性能,破坏结构的整体性和安全性.因此,对裂缝进行动态和长期监测对保障结构安全具有重要意义<sup>[1]</sup>.现有的裂缝监测技术主要以点式电测传感器为主,但其仅能对少数测点进行观测,且易受电磁场等环境因素干扰<sup>[2]</sup>,信息较为受限,难以适应裂缝的随机性和不确定性的特点.相比之下,光纤传感技术由于具有分布式连续监测的潜力,且可实现远程实时监控,近年来日益受到关注.目前工程应用主要以石英光纤为主<sup>[3-5]</sup>,但其纤芯的主要材料为二氧化硅,是典型的脆性材料,在使用过程中容易发生脆性断裂,限制了此类传感器在实际工程中的应用能力.相比之下,塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)弥补了石英光纤易发生断裂的不足,且具有大纤芯、良好韧性、低成本等优势,在混凝土结构裂缝监测方面具有广阔的应用前景<sup>[6-8]</sup>.

为利用塑料光纤的光学特性进行结构裂缝监测,需研究开裂状况下塑料光纤将局部应力变化转换成可探测的光学信息的特性,称为力光转换特性.Takeda 等<sup>[9]</sup>、Kuang 等<sup>[10,11]</sup>、Liehr 等<sup>[12-15]</sup>对塑料光纤在张开型裂缝下的力光转换特性进行了研究,但上述研究多局限于张开型裂缝且塑料光纤与开裂方向垂直的情况,此时塑料光纤受轴向拉伸作用.实际工程中,混凝土结构开裂形式多样,不同开裂形式下,塑料光纤的受力特点并不相同,相应的力光转换特性也必定存在差异.因此有必要针对不同开裂形式的受力特点进行研究.

通常情况下,结构除了产生张开型裂缝以外,常见的开裂形式还有滑开型和撕开型.混凝土滑开型和撕开型裂缝与张开型裂缝最明显的区别就是裂缝处的两个缝面不再是相对分离而是相互错动,裂缝处塑料光纤受到的不再是拉伸作用,而是两裂缝面相互错动时的剪切作用.撕开型与滑开型开裂下裂缝处塑料光纤的受力情况也稍有区别,表现为撕开型裂缝处的塑料光纤会受到一定的扭转作用,不过在裂缝开度较小的情况下,该扭转作用的角度较小.为研究滑开型和撕开型裂缝条件下塑料光纤的力光转换特性,本文采用 POF 专用的光时域反射传感系统(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)研究 POF 分别在剪切和扭转作用下的光学感知能力.

## 1 POF-OTDR 光学探测

光纤内部光的散射分为 3 种类型,分别是瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射.三种散射产生的原因不同.瑞利散射是由光纤材料微观分子密度不同导致微观折射率差异造成的.拉曼散射为光子与光纤材料分子发生振动、转动等相互作用而引起的.布里渊散射为入射光子与光纤内部声学声子相互作用而产生的.图 1 为光纤内部散射光频谱的示意图,可以看出拉曼散射与布里渊散射分别拥有两个波段的频谱,分别位于瑞利散射光频谱两侧.瑞利散射只有一个频谱,但是瑞利散射的强度是最高的.

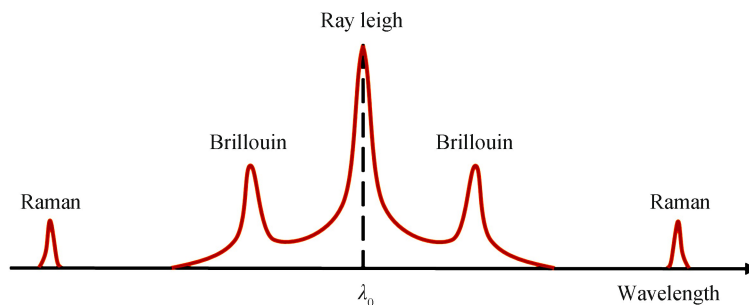


图 1 光纤内部散射光频谱  
Fig.1 The scattering optical spectrum in fibers

OTDR 技术利用的是光在光纤内部发生瑞利散射的原理.OTDR 首先向光纤内部发射一束脉冲光.在传输过程中该脉冲光经过的每处都会发生瑞利散射,瑞利散射返回入射端.通过检测光纤内部每处的瑞利散射即可获得脉冲光在传播过程中的强度变化情况.OTDR 技术的光发射端和接收端均位于光纤的一端,方便了该项技术的应用.从脉冲光的入射到各处瑞利散射波的返回,光线所用的时间相当于行走了 2 倍从入射段到各处测点的距离.

POF 内任意一点  $x$  处的后向散射光功率为

$$P_r(x) = \frac{1}{2} S \alpha_s v \tau P_0 e^{-2\alpha x} \quad (1)$$

式中,  $S$  为后向散射系数,  $\alpha_s$  为 POF 内瑞利散射衰减系数,  $v$  为光在 POF 内的传播速度,  $\tau$  为脉冲宽度,  $P_0$  为脉冲光的初始光功率,  $\alpha$  为光在 POF 内的衰减系数,  $x$  可由式(2)确定。

$$x = \frac{ct}{2n} \quad (2)$$

式中,  $c$  为光速,  $t$  为光从入射端到事件点来回的时间,  $n$  为纤芯的有效折射率。

从式(1)可以看出光纤线路各点瑞利散射强度的返回曲线应该为一条指数衰减曲线,该曲线反映了光纤线路各点的瑞利散射情况。在外界因素影响下,当光纤内部某处光强度降低时,该处的瑞利散射强度也会降低,导致瑞利散射强度返回曲线出现局部下降的情况。图 2 即为典型 OTDR 测试曲线,可以看出,除了瑞利散射特性之外,测试曲线中还体现了光的菲涅尔反射特性(即图 2 中曲线的局部反射峰),菲涅尔反射是由几何突变或者断裂面影响下折射率的突变引起,这些引起折射率突变的因素往往是人们所关心的事件点,所以 OTDR 技术可以依靠菲涅尔反射来对事件点进行定位。

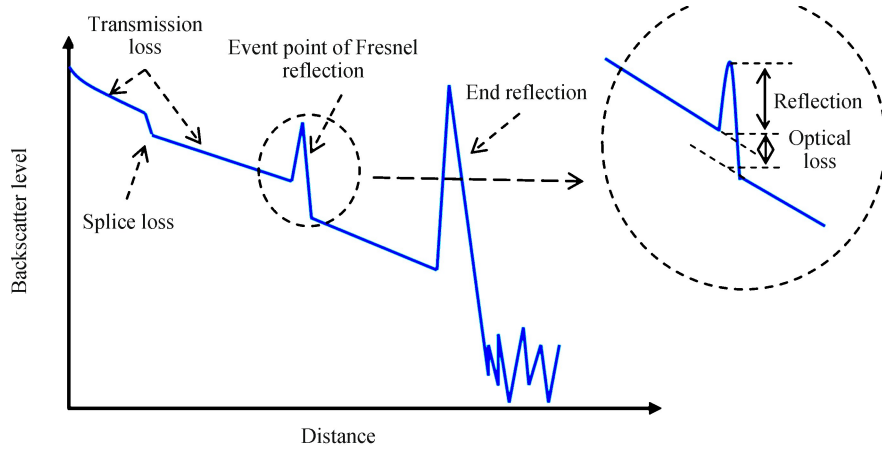


图 2 典型 OTDR 测试曲线

Fig.2 The typical monitoring curve of OTDR

POF 内任意一点  $x$  处的菲涅尔反射强度可以表示为

$$P_f(s) = R \cdot P_0 \cdot e^{-2\alpha x} \quad (3)$$

式中,  $R$  为反射事件的反射系数,影响该系数的主要因素为光纤断裂面或者端面的粗糙程度,对于表面平整、光滑、与光纤轴线垂直的理想断裂面,反射系数可以表示为

$$R = \frac{(n_1 - n_0)^2}{(n_1 + n_0)^2} \quad (4)$$

式中,  $n_0$ 、 $n_1$  分别为空气和纤芯的折射率。

当平整、光滑的理想断裂面与光纤轴线呈一定夹角  $\theta$  时,反射系数表示为

$$R = \frac{(n_1 - n_0)^2}{(n_1 + n_0)^2} \cdot \frac{b}{2\pi a} \left\{ 2\theta \sqrt{1 - \left(\frac{b\theta}{2a}\right)^2} + \frac{4a}{b} \cdot \frac{1}{\sin \sqrt{1 - \left(\frac{b\theta}{2a}\right)^2}} - 4\theta \sqrt{1 - \left(\frac{b\theta}{2a}\right)^2} \right\} \quad (5)$$

式中,  $a$ 、 $b$  分别为纤芯和包层半径。

在实际应用中,外力作用下光纤断裂面的情况不可能为上述理想的端面情况,反射系数是较难确定的,因此从理论上准确计算菲涅尔反射强度是十分困难的。

图 3 为本文所使用的 POF-OTDR 光学传感系统和典型测试界面图。该系统中的主要设备有:数据采集电脑,POF 光时域反射仪(OTDR-2100POF-650-4),塑料光纤(SH2001-J)。图 3 右侧为 OTDR 对 POF 内部典型探测结果的界面。图中曲线即为 OTDR 监测到的 POF 内部后向散射水平,横坐标代表距离(单位:米),纵坐标代表后向散射水平值(单位:dB)。

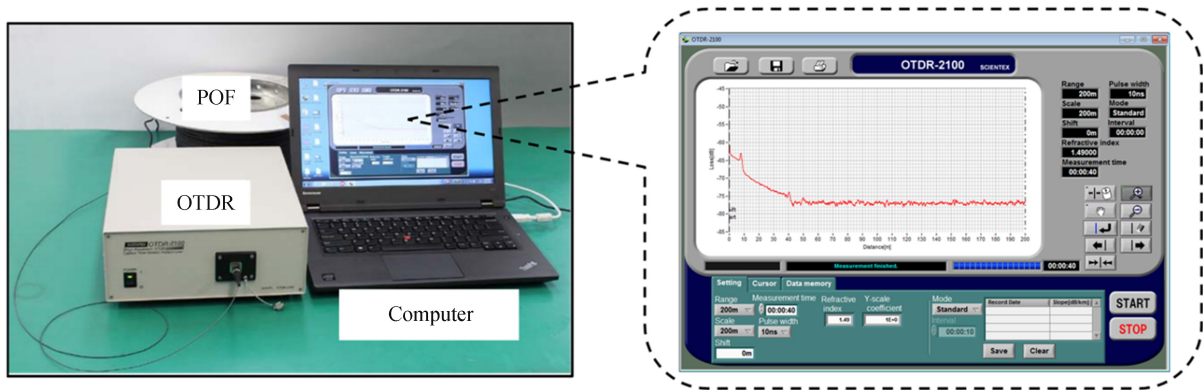


图3 POF-OTDR 光学传感系统及典型测试界面  
Fig.3 POF-OTDR sensing system and typical test interface

本文选用的 POF 型号为日本三菱公司生产的 SH2001-J, 相关参数指标见表 1.

表 1 SH2001-J 纤芯和涂覆层的相关参数

Table 1 Related parameters of core and cladding of SH2001-J

Composition	Material	Outside diameters/mm	Refractive index
Fiber core	Polymethyl methacrylate	0.5	1.492
Coating	Fluorinated polymer	1.0	1.407

## 2 剪切作用下 POF 力光转换特性试验

### 2.1 剪切试验设计

为了模拟撕开型裂缝受力条件下的 POF 的特性,设计了一套 POF 受剪切作用的模拟装置,该装置由一套特定形状的有机玻璃板和一台手动位移平台组成.有机玻璃板包括 2 块 L 型有机玻璃板及 4 块小型长方形玻璃板.设备的实物及结构示意图如图 4.其中一块 L 型玻璃板通过直角拐角及一组螺丝固定于位移控制平台的基座,另一块 L 型玻璃板通过一组螺丝固定于位移控制平台的移动模块,当初始时紧靠的两块 L 型玻璃板中间竖直相接段相对移动,可实现滑开型裂缝的模拟.POF 放置于两 L 型有机玻璃板组成的长方形中面,并用环氧树脂胶将 4 块长方形玻璃板两两粘贴于 POF 两侧的 L 型玻璃板上同时夹紧 POF.其中,两组长方形有机玻璃板相接处与两 L 型玻璃板竖直相接处位于同一竖直面.该位移平台配有位移数显标尺,可准

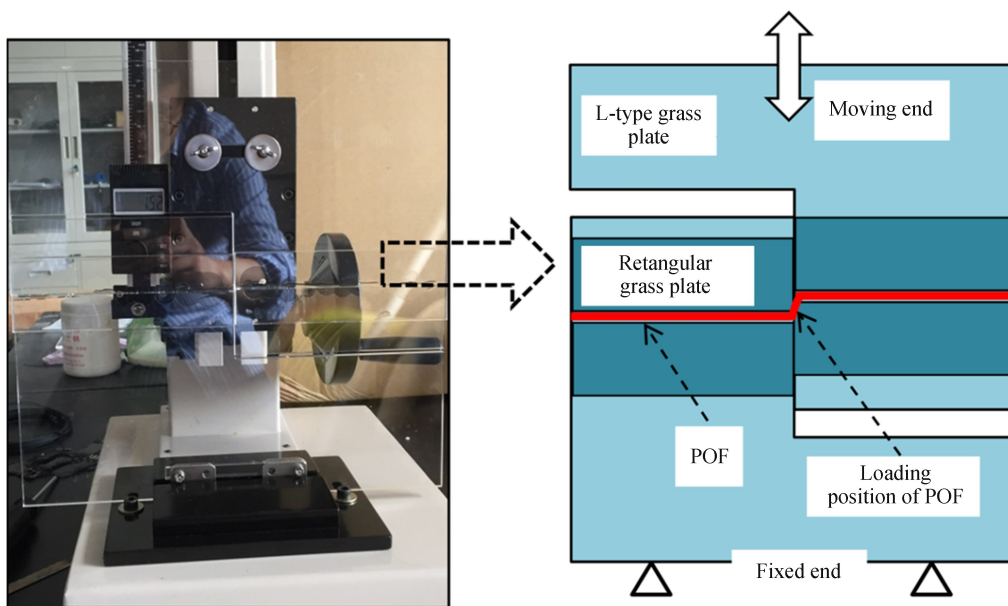


图 4 POF 剪切试验装置及结构示意图  
Fig.4 The schematic diagram of shearing test devices



确记录位移模块的移动位移,精度为 0.01 mm.

将 POF 的一端连接 OTDR 设备,另一端连接— 50 m 的 POF 线圈(尾纤),OTDR 设备连接数据采集电脑后即可开始试验.试验过程中通过转动位移控制平台一侧的转轮控制上方 L 型玻璃板缓慢竖直向上移动,实时记录位移标尺和位移传感器的位移值和对应时刻 OTDR 所监测到的 POF 内部背向散射情况.

## 2.2 试验结果及分析

试验结果如图 5 所示,5(a)为原始后向散射水平测试曲线,5(b)为各错动位移下后向散射水平与初始后向散射水平的差值,5(c)为各错动位移下的光损耗值和菲涅尔反射值.由试验结果可以看出,在错动位移逐渐增大的过程中,POF 内部的后向散射水平逐渐降低,并且在错动位移达到 0.7 mm 时,光损耗量即达到了 OTDR 设备的动态范围.由图 5(c)可以看出,在错动位移逐渐增加的过程中,光损耗值和菲涅尔反射值均出现了明显的增加趋势,在错动位移由 0 增加至 0.5 mm 的过程中,这两个光学量与错动位移呈近似线性关系,光损耗值和菲涅尔反射值的灵敏度分别达到 15.6 dB/mm 和 5.9 dB/mm.表明 POF 内部的光损耗特性对剪切作用较敏感.由于剪切作用下光损耗的形式主要是微弯损耗,当剪切发生到一定程度时,POF 的弯曲变形无法继续开展,仅仅发生拉伸变形,而 POF 材料的弹光系数较小,数量级仅为  $10^{-11}$ ,则拉伸作用下光损耗和反射值较小<sup>[16]</sup>,故 0.5 mm 错位后变化较小.在本试验中,POF 发生了拉伸变形和两端局部弯曲变形,由于 POF 受力方向与轴向垂直,因此由于外力作用产生的局部弯曲变形比较明显,这也是损耗较大的主要原因.另外,从图 5(c)可以看出,而且这两个光学量与错动位移呈近似线性关系,因此菲涅尔反射值和光损耗值都可以作为裂缝错动位移的监测指标,其中,光损耗水平变化幅度更大,对裂缝的感知更敏感.

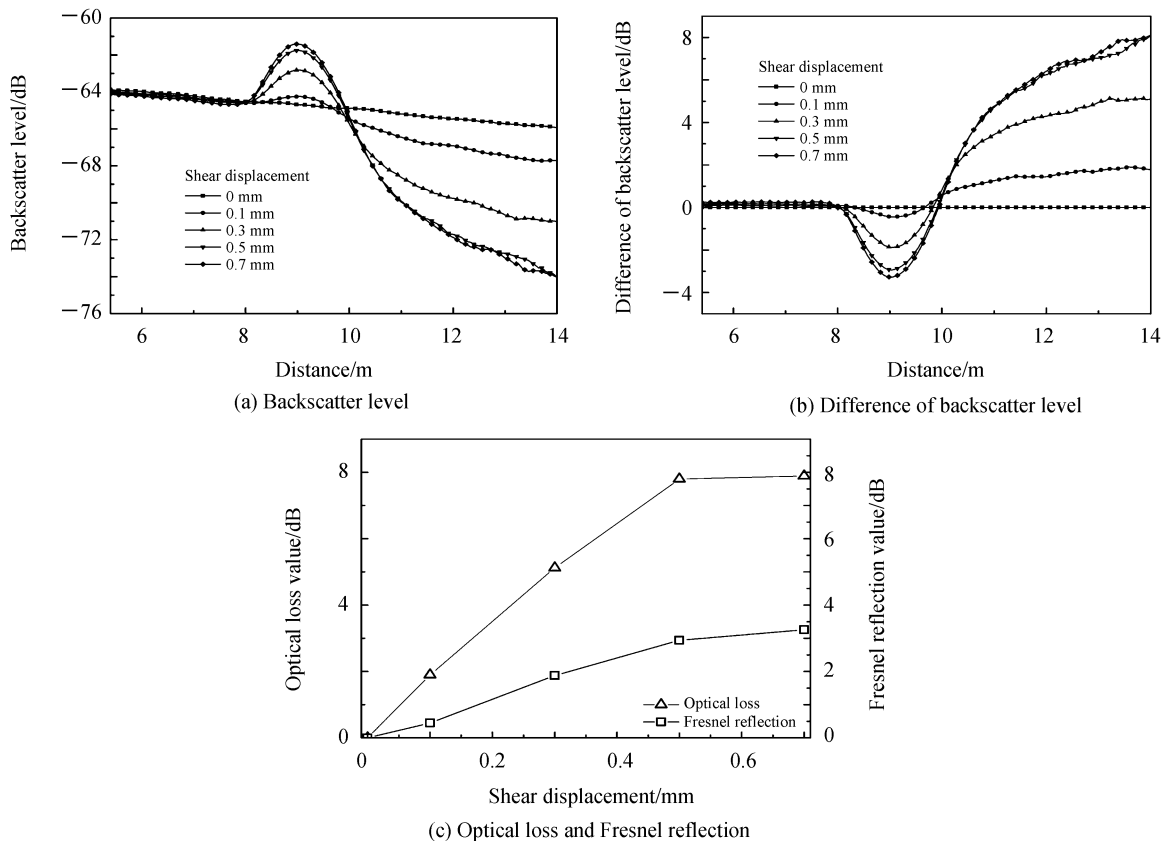


图 5 剪切作用下 POF 内部光学特性

Fig.5 The optical characteristics of POF in shearing test

## 3 扭转作用下 POF 力光转换特性试验

### 3.1 扭转试验设计

撕开型与滑开型裂缝最大的区别是开裂对 POF 除了剪切作用外还存在一定程度的扭转作用.由于 POF 内菲涅尔反射和光损耗水平对剪切作用非常敏感,为避免 OTDR 在测试中过早达到测试量程,设计了扭转

试验对 POF 仅受扭转作用时进行模拟,以此考察扭转变形对 POF 内部光学特性的影响.

为避免 POF 在夹持力的作用下发生形状变化而产生误差,将 POF 埋设于两环氧结构胶-碳纤维布复合体中,利用环氧结构胶对 POF 的粘结作用来传递轴向扭转力.测试试件及测试方法示意图如图 6,两环氧结构胶-碳纤维布复合体中间 POF 的长度为 10 mm.另外,试验中使用的 POF 长度为 50 m 且配有 FC 接头与 POF-OTDR 连接.试验中,将一端环氧结构胶-碳纤维布复合体固定,并保证两环氧结构胶-碳纤维布复合体和 POF 在一条直线上,另一端环氧结构胶-碳纤维布复合体则绕 POF 轴向旋转.试验中实时记录 POF 绕轴向扭转的角度及相应时刻 POF 内部光后向散射水平.

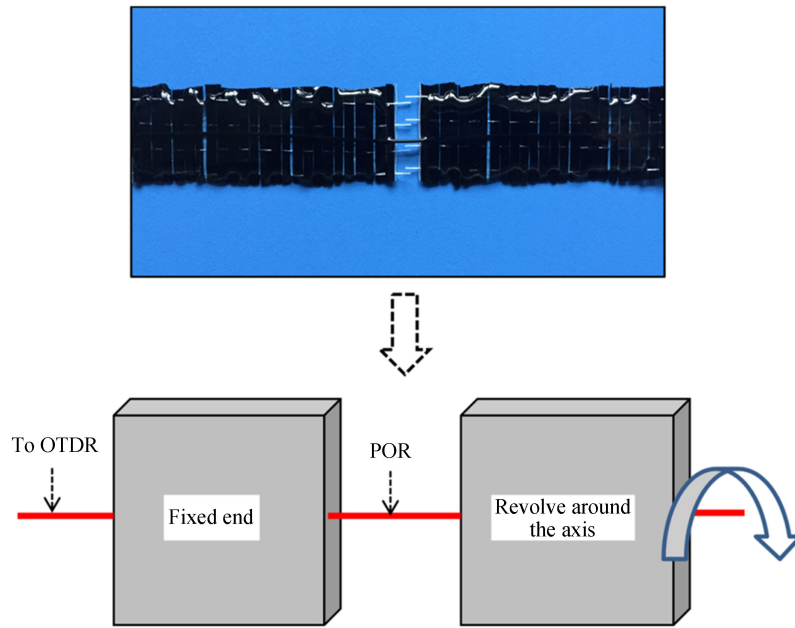
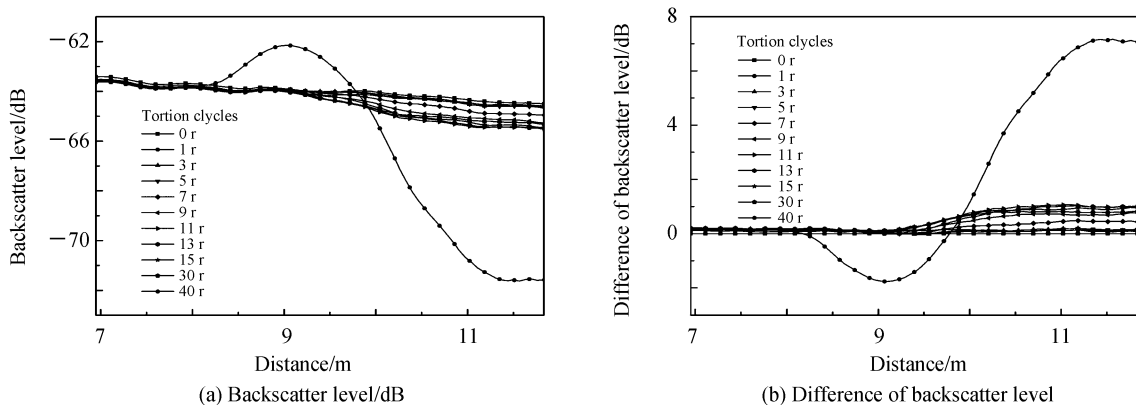


图 6 POF 绕轴向扭转试验实物及示意图

Fig.6 The specimen and its schematic diagram in torsion test

### 3.2 试验结果及分析

测试以扭转的周数为单位进行.试验结果如图 7,7(a)为原始后向散射水平测试曲线,7(b)为扭转作用下后向散射水平与初始后向散射水平的差值,7(c)为扭转作用下的光损耗值.试验结果显示,扭转变形对 POF 内部光传输的影响较小,扭转周数在 5 以内时其内部光损耗值基本为零,从扭转周数为 10 开始 POF 内部光损耗水平接近于 1 dB.当扭转变形超过 11 周时,中间段 POF 与环氧结构胶相接处会出现局部脱粘情况,在一定程度上缓解了中间段的扭转程度,所以此时光损耗水平出现了回落的趋势.之后光损耗水平一直保持在 1 dB 左右,直至扭转周数接近于 40 周时,中间段 POF 变形过大出现收缩于一点的现象,此时出现了明显的菲涅尔反射值和光损耗值,且光损耗值达到 OTDR 量程,但是 POF 依然没有断裂.



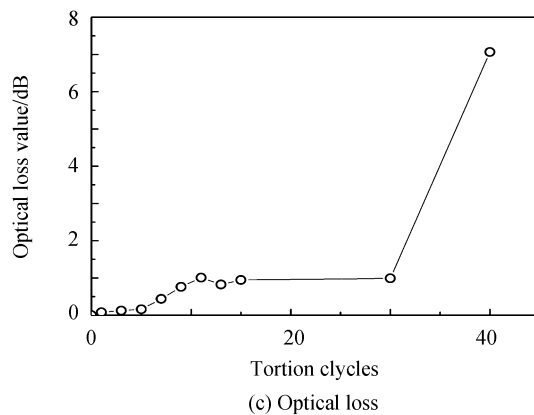


图7 扭转作用下POF内部光学特性

Fig.7 The optical characteristics of POF in torsion test

从试验结果可以看出,POF 具有较好的扭转变形能力,在轴向扭转作用下不易发生断裂.另外,POF 内部光学特性受扭转作用的影响较小,在扭转变形 5 周以内其光损耗和菲涅尔反射水平几乎无明显变化.因此当结构出现撕开型裂缝时,由于其对 POF 产生的扭转变形十分有限,所以其对 POF 内部光学特性的影响与滑开型裂缝类似.

## 4 结论

本文根据 POF 在滑开型和撕开型条件下可能出现的受力形式,利用 OTDR 光传感系统分别对 POF 在剪切和扭转作用下的力光转换特性进行了研究.针对 POF 的结构和材料特点,分别设计了适合 POF 剪切和扭转测试的试验方法.通过剪切试验研究了试件错动位移和对应时刻 OTDR 所探测到的背向散射光及光损耗量的关系.试验结果显示,在错动位移逐渐增加的过程中,菲涅尔反射值和光损耗值均出现了明显的增加趋势,且呈近似线性关系.光损耗值和菲涅尔反射值的灵敏度较高,分别达到 15.6 dB/mm 和 5.9 dB/mm.可见光损耗值和菲涅尔反射值都可以作为裂缝错动位移的监测指标,其中,光损耗水平变化幅度更大,对裂缝的感知更敏感.通过扭转试验研究了试件扭转周数与对应时刻 OTDR 测得的背向散射光及光损耗量规律.试验结果显示,扭转变形对 POF 内部光传输的影响较小.因此当结构出现撕开型裂缝时,由于其对 POF 产生的扭转变形十分有限,所以其对 POF 内部光学特性的影响与滑开型裂缝类似.

## 参考文献

- [1] ZHENG Dong-jian, HUO Zhong-yan, LI Bo. Arch-dam crack deformation monitoring hybrid model based on XFEM[J]. *Science China*, 2011, **54**: 2611 - 2617.
- [2] QIAN Fei, TONG Jian-jie. Study on multiplex capacity of distributed optical fiber monitoring for cracks of concrete dam [J]. *Water Resources and Power*, 2010, **28**(1): 70-72+109.  
钱飞, 佟剑杰. 混凝土坝裂缝分布式光纤监测复用能力研究[J]. *水电能源科学*, 2010, **28**(1): 70-72+109.
- [3] ZHAO Jin-lei, BAO Teng-fei, KUNDU T. Wide range fiber displacement sensor based on bending loss[J]. *Journal of Sensors*, 2016, **2016**: 4201870.
- [4] BAO Teng-fei, ZHAO Jin-lei, ZHANG Wan-zhu, *et al.* Bend type fiber Bragg grating crack sensor with big measurement range[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, **10**(44): 1013-1019.  
包腾飞, 赵津磊, 张万祝, 等. 新型可测量大变形的弯曲型光纤光栅裂缝传感器[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, **10**(44): 1013-1019.
- [5] LAFLAMME S, KOLLOSCH M, CONNOR J, *et al.* Soft capacitive sensor for structural health monitoring of large-scale systems[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, **19**(1): 70-81.
- [6] ZHAO Jin-lei, BAO Teng-fei, CHEN Rui. Crack monitoring capability of plastic optical fibers for concrete structures[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, (24): 70-76.
- [7] BAO Teng-fei, ZHAO Jin-lei, QI Dan. Properties of plastic optical fibers in crack monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1006001.  
包腾飞, 赵津磊, 戚丹. 塑料光纤在裂缝监测中的性能[J]. *光子学报*, 2015, **44**(10): 1006001.
- [8] ZHAO Jin-lei, BAO Teng-fei, QI Dan. Feasibility study on application of plastic optical fiber in crack monitoring[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(10): 1943-1948.

- 赵津磊, 包腾飞, 戚丹. 塑料光纤在裂缝监测中应用的可行性研究[J]. 光电子·激光, 2014, **25**(10): 1943-1948.
- [9] TAKEDA N, KOSAKA T, ICHIYAMA T. Detection of transverse cracks by embedded plastic optical fiber in FRP laminates[A]. Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials[C]. Newport Beach: 1999.
- [10] KUANG C, CANTWELL J, THOMAS C. Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, **14**(2): 205-216.
- [11] KUANG C, QUEK T, MAALEJ M. Assessment of an extrinsic polymer-based optical fibre sensor for structural health monitoring[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(10): 2133-2141.
- [12] LIEHR S, LENKE P, KREBBER K, *et al.* Distributed strain measurement with polymer optical fibers integrated into multifunctional geotextiles[C]. Optical Sensors 2008, Strasbourg: 2008.
- [13] LIEHR S, LENKE P, WENDT M, *et al.* Distributed polymer optical fiber sensors in geotextiles for monitoring of earthwork structures[C]. 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-4), Zurich: 2009.
- [14] LIEHR S, LENKE P, WENDT M, *et al.* Polymer optical fiber sensors for distributed strain measurement and application in structural health monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*. 2009, **9**(11): 1330-1338.
- [15] LIEHR S, WENDT M, KREBBER K. Distributed perfluorinated POF strain sensor using OTDR and OFDR techniques [C]. 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, Edinburgh: 2009.
- [16] ZUBIA J, ARRUE J, MENDIORIZO A. Theoretical analysis of the torsion-induced optical effect in a plastic optical fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 1997, **3**(2): 162-167.