

doi: 10.3788/gzxb20154410.1006001

塑料光纤在裂缝监测中的性能

包腾飞^{1,2}, 赵津磊^{1,2}, 戚丹^{1,2}

(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)

摘 要: 针对普通石英光纤质地较脆, 应用在结构裂缝监测中易发生断裂的现象, 本文运用塑料光纤代替普通石英光纤进行结构裂缝监测, 并且考虑复合材料裂缝开裂方向的不确定性, 对塑料光纤及其裂缝监测能力进行了研究. 设计了一套塑料光纤传感装置, 并通过裂缝模拟装置来研究塑料光纤分别与裂缝呈 30°、45°、60° 夹角时, 光损耗与裂缝开度的关系. 实验结果表明, 随着裂缝的开展, 光损耗逐渐增加; 纤芯直径为 0.5 mm 时最大光损耗幅值为 78.76 μW , 而纤芯直径为 0.25 mm 时, 最大光损耗幅值只有 24.28 μW , 纤芯直径较大的光纤在微弯时易发生较大的光损耗. 塑料光纤传感装置在结构裂缝监测中应用是可行性的, 而且塑料光纤裂缝传感器的灵敏性随着方位角的增加而降低.

关键词: 塑料光纤; 裂缝监测; 变形; 结构健康监测; 光纤传感器

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)10-1006001-6

Properties of Plastic Optical Fibers in Crack Monitoring

BAO Teng-fei^{1,2}, ZHAO Jin-lei^{1,2}, QI Dan^{1,2}

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

(2 College of Water-conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ordinary silica fibers are easy to break in real applications due to their characteristics of brittleness. Plastic optical fibers were proposed to replace silica fibers in crack monitoring. Moreover, considering the uncertainty of crack propagation direction in composite materials, the influence of the angles between plastic optical fibers and cracks was studied. A set of plastic optical fiber sensing device was designed and the relationship between optical loss and crack width under different fiber/crack angles was measured through the device. The results show that the optical loss in plastic optical fibers increased gradually with crack propagation. Therefore, applying plastic optical fibers in crack monitoring is feasible and the sensitivity of plastic optical fiber crack sensors decreases with the increasing of fiber/crack angles. Moreover, from the experimental results, the maximum optical loss of 0.5mm plastic optical fibers is 78.76 μW , while the maximum optical loss of 0.25 mm plastic optical fibers is only 24.28 μW . Therefore, the fibers with bigger diameter have more bend loss when they are bent.

Key words: Plastic optical fiber; Crack monitoring; Deformation; Structural health monitoring; Fiber sensor

OCIS Codes: 060.2300; 060.2370; 060.3510; 140.3510

0 引言

开裂是结构老化和发生病变的先兆, 对结构的危

害很大, 例如, 混凝土裂缝会破坏结构的整体性和抗渗性, 降低其抵御氯盐和硫酸盐侵蚀的能力, 加速结构的老化. 因此, 必须对结构裂缝进行监测. 目前, 裂缝监测

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 51379068, 51139001)、江苏省杰出青年基金项目 (No. BK20140039) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20120094110005) 资助

第一作者: 包腾飞 (1974-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为水工结构及岩土工程的安全监控、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: 2015-05-04; **录用日期:** 2015-06-17

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

的方法包括超声波法^[1]、声发射法^[2]、冲击回波法^[3]、红外热成像法^[4]、探地雷达法^[5]等。这些方法具有较强功能,但是它们仅能给出裂缝位置,却不能连续地监测裂缝的开度变化。

近年来,将光纤传感器应用于大型工程结构的健康监测受到越来越多的关注。与电测传感器相比,光纤传感器不仅具有对裂缝分布式、连续式监测的潜力,而且还具有重量轻、抗电磁干扰、防雷击、抗腐蚀等优越特性。因此,许多研究人员尝试开发光纤裂缝传感器,例如,Rossi^[6]在混凝土梁中埋入了一系列的裸光纤探测裂缝,利用光纤与裂缝相交断裂使传输光消失来探测裂缝的存在;Ansari^[7]开发了一种强度调制型环形光纤传感器,利用裂缝张开时光纤进一步弯曲导致光损耗增大来监测裂缝的开度;Li等^[8]利用 Michelson 白光干涉制作了一个光纤裂缝传感器,将其布置在裂缝的尖端以监测裂缝的开度;Shi等^[9]在纵横两个方向将 Brillouin 传感光纤布置在混凝土结构表面测量应变的分布,据此监测开裂区域;Bao等^[10]探讨了混凝土裂缝分布式光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)监测能力,研究表明,FBG 可以实现对裂缝的准分布式监测;Leung等^[11]基于光时域反射技术(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)开发了一种具有分布式传感能力的传感器,利用单根光纤就能够探测到多个裂缝,并且事先在不知到裂缝的位置情况下可以监测裂缝的开度。上述工作对将光纤传感技术用于裂缝的监测研究进行了有益的探索,并取得了一些有益的成果,预示着光纤传感技术在该领域具有较强的发展潜力。但上述研究全部采用的是石英光纤,而石英光纤纤巧、细弱,其最大伸长率仅为 1%左右^[12],很容易折断,因此仅能监测细小裂缝。另外,大型土木、水利工程施工粗放、施工工序交叉、复杂,对于这种恶劣的工程施工环境,石英光纤难以在工程实际中有效存活,这也给上述研究成果的实际应用造成很大的障碍。

为克服现有石英光纤裂缝传感技术存在的不足,一些工程人员开始采用塑料光纤(Polymer Optical Fiber, POF)替代石英光纤。POF 采用的是高性能聚合物作为纤芯材料,其最大伸长率可达 80%^[13],除了具备石英光纤的许多优越性能外,还具备良好韧性、不易折断、价格便宜、容易切割和连接、易于施工、存活率高等特性。除广泛应用到局域网、豪华汽车通讯等外,越来越受到工程界的重视,例如,Babchenko等^[14]开发了一个塑料光纤传感器测量结构的位移;Takeda等^[15]将塑料光纤埋入 FRP 材料中探测横向开裂;Wong等^[16]将塑料光纤埋入碳纤维复合材料中进行应变测量;Husdi 和 Nakamura等^[13, 17]利用 OTDR 和多模塑料光纤研究结构的变形;Kreber等^[18]将塑料光纤植入土工织物中,采用 OTDR 技术监测波兰 Solimi 大坝、德

国的一个河堤和高速公路路基;Kuang等^[19, 20]将一段预定长度的塑料光纤去掉部分横截面作为传感段,将传感器粘贴在混凝土表面,以此监测裂缝的发展过程;Liehr等^[21-22]利用 OTDR 技术、采用混凝土四点弯曲实验研究了裂缝开度从 0mm 开展到 20mm 过程中塑料光纤的后向反射特性。

总体说来,应用塑料光纤进行结构裂缝的监测研究成果较少,该项研究尚处于起步阶段,除了 Kuang等^[19-20]和 Liehr等^[21-22]的零星探索外,国内外鲜有报道,而且国外学者的研究多局限于带有结构损伤的塑料光纤,光纤上的结构损伤可以提高对变形监测的敏感性,但是监测的范围也会局限于结构损伤处尺寸的大小,而且如果结构损伤的尺寸过大,又必然影响到光信号传输距离的大小,因此进一步开展无结构损伤的塑料光纤在裂缝监测中的应用研究十分必要。为此,本文探讨塑料光纤裂缝传感原理及裂缝存在下塑料光纤中光的传输机制,设计一套塑料光纤裂缝传感装置,利用实验验证无结构损伤的塑料光纤裸纤在裂缝监测中的可行性以及塑料光纤对不同开展方向的裂缝的监测能力。

1 塑料光纤的结构及裂缝传感原理

1.1 塑料光纤结构

塑料光纤是一类以光学塑料为材料的光纤,外部保护层为聚氨酯,内部结构由纤芯和包层组成,纤芯和包层材料主要是聚甲基丙烯酸甲酯、聚丙烯、聚碳酸酯、或新型的环状透明光学聚合物等,纤芯的折射率略高于包层,其结构见图 1。与普通石英光纤不同,塑料光纤纤芯直径较大,可达 1 mm,而石英光纤直径仅为 5~50 μm 。因此,塑料光纤数值孔径大,光的耦合效率高,光纤断面处理容易,连接简便。同时,塑料光纤韧性好,抗击外力能力较强,易于制成小巧的传感器,这些传感器在大型土木、水利工程施工中易于存活。

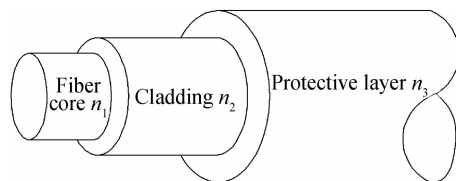


图 1 塑料光纤结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polymer optical fiber structure

1.2 塑料光纤的裂缝传感原理

塑料光纤的裂缝传感原理如图 2,将塑料光纤埋入结构内部或粘贴在结构表面,当裂缝产生或发生扩展时,与裂缝斜交的塑料光纤为保持连续性,会在裂缝的缝面两侧各产生一个弯曲,形成夹角 θ_1 和 θ_2 ,光纤的弯曲导致纤芯中的光向包层辐射,从而产生光损耗,这种损耗称为光纤的弯曲损耗。光纤的弯曲损耗受其

具体的结构、折射率的分布等多种因素影响,而且对于多模光纤由于模式间的耦合使得问题更为复杂,所以说很难从理论上给出准确的分析,但是可以肯定的是,光纤的弯曲损耗必然与其弯曲半径有关,弯曲程度越大,光损耗值就越多^[23-24]。光纤的弯曲损耗可以利用探测设备测量光强的变化得到,从而可以感知裂缝的存在或扩展,根据光强变化的大小可以确定裂缝的开展宽度,实现对裂缝的监测。

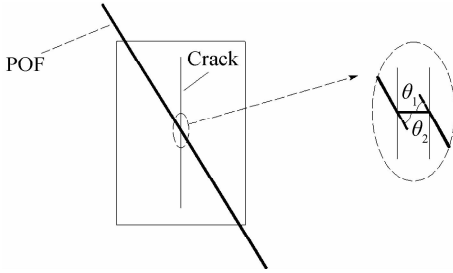


图2 塑料光纤的裂缝传感原理

Fig. 2 Crack sensing principle of polymer optical fibers

2 塑料光纤裂缝监测可行性及裂缝开展方向对其监测能力影响研究试验

在实际应用中,裂缝引起的光纤微弯变形是难以测量的,但光纤微弯变形与裂缝的开展宽度直接相关,为此,在室内实验研究裂缝的开展宽度与塑料光纤中的光强变化关系,以此验证塑料光纤的裂缝传感原理。此外,实际裂缝的开展方向是不确定的(如混凝土裂缝),裂缝与预先埋设的光纤可能存在不同的交角,为了考察塑料光纤与裂缝在不同交角情况下对裂缝的监测能力,实验中预设了多组不同的光纤/裂缝交角。

2.1 实验装置

实验装置如图3,塑料光纤裂缝传感装置由光源、光功率计和塑料光纤组成。光源为红光光源笔,功率为10 mW,发射光的波长为650 nm。由于发射出的光为可见红光,不会对人体造成危害,从而保证实验的安全性。该光源笔小巧轻便,功率大,输出稳定,输出可见的红色光源穿透力较强。非接触式连接不会损害光纤及发射器的端面,输出功率不受电压波动影响。该光源笔接口为通用适配头,2.5 mm通用头可连接FC、SC、ST型接头,无需更换适配头,使用方便。实验中采用的光功率计型号为JW3233,是塑料光纤专用光功率计,与本实验中的红光光源笔配套使用。功率计可校准波长有635、650、780、850、980 nm;可测量光功率范围为0~4mW,不确定度为±5%;显示分辨率为0.1%(线性显示);工作温度及储存温度分别为-10℃~60℃和-25℃~70℃;接头类型包括SI、FC等。实验所用的塑料光纤为三菱塑料光纤,包括塑料光纤尾纤和塑料光纤裸纤(分别简称为尾纤和裸纤)。裸纤包括纤芯直径为0.25 mm和0.5 mm的裸纤两种,其型号分别为

SK10、SK20。裸纤芯体折射率为1.49,数值孔径为0.5,耐热温度范围为-55℃~70℃,裸纤是传感装置的关键部分,裂缝的产生及其扩展都通过裸纤弯折处光的损耗来感知;尾纤包括纤芯直径为0.25 mm和0.5 mm的两种,尾纤芯体折射率为1.49,纤芯直径为0.25 mm的尾纤和0.5 mm的尾纤被覆材料分别为聚乙烯和交联聚乙烯,两种尾纤的数值孔径分别为0.5、0.58,耐热温度分别为-55℃~70℃、-55℃~105℃。

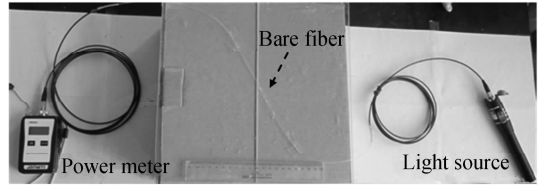


图3 塑料光纤裂缝传感装置图

Fig. 3 Schematic diagram of POF crack sensing setup

2.2 实验方法与步骤

2.2.1 裂缝的模拟

如图4,用有机玻璃板模拟水工混凝土裂缝的发生和扩展,其中一块玻璃板固定不动,向右移动另一块玻璃板。塑料光纤裸纤被粘贴在两块玻璃板上,可以使裸纤随着裂缝的扩展发生微小变形。粘贴在右侧的裸纤通过尾纤与光源连接,粘贴在左侧的裸纤通过另一根尾纤与光功率计连接。用红光光源发射输入光波,使用光功率计记录输出光的强度变化。

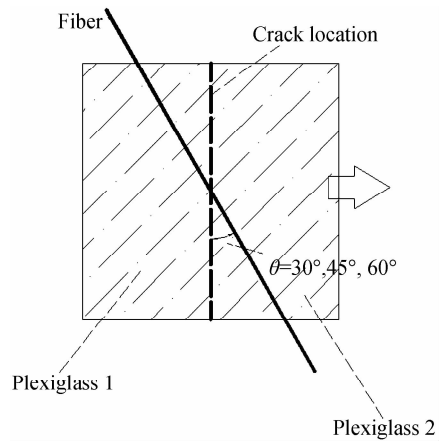


图4 塑料光纤与裂缝布置夹角实验图

Fig. 4 Schematic diagram of the intersection angle between POF and crack

2.2.2 光纤布置

本实验将塑料光纤与裂缝的交角分别按30°、45°、60°布置。为保证光纤位置精准不发生偏斜,在涂胶水之前用胶带将塑料光纤两端固定在玻璃板上。两块玻璃板必须平整放置并严格处于同一平面上,这样可以保证塑料光纤紧贴玻璃板,便于光纤的粘合。用胶带将塑料光纤固定好后,使用AB胶枪将环氧触变胶涂在塑料光纤裸纤上,保证靠近裂缝的那部分裸纤紧贴于玻璃板上。两块玻璃板上所涂胶水带长度各3 cm,这样

既不浪费胶水也可以保证光纤与玻璃板紧密粘合。

2.2.3 塑料光纤的连接

塑料裸纤通过尾纤分别与光源和光功率计相连,光源和光功率计通过 FC 接口分别与尾纤连接. 在连接之前使用脱脂棉签蘸取适量医用酒精对光源接口、光功率计接口及光纤尾纤端部进行去污处理,实现接口的洁净,以此保证尽可能地减少光损耗. 塑料裸纤与两端尾纤的连接通过塑料套管以冷连接的方式实现,连接前需要使用粗细研磨纱布将塑料光纤裸纤及尾纤裸露端面进行打磨处理,保证端面的光滑平整,以减少光损耗. 打磨处理完成后,擦拭酒精进行去污处理. 待酒精挥发干后用塑料套管将裸纤及尾纤连接. 为了保证连接的稳定性,可以使用胶带对连接部位进一步固定.

2.2.4 实验过程

待环氧触变胶完全凝固后(大约 10 min 可完成,为保证塑料光纤和玻璃板粘合效果,凝固时间可增加至 0.5~1 h),开始实验. 上述各项准备工作完成后,开启光源使其处于连续发光状态,开启光功率计,选取波长为 650 nm. 记录裂缝开展前的光功率大小,即裂缝宽度为 0 mm 时的光功率值. 本实验模拟裂缝将从 0 mm 缝宽扩展到 6 mm 缝宽,以 0.5 mm 作为缝宽变化步长,依次不断增加插入两块玻璃板中的刀片数量,以实现裂缝的不断扩展每次裂缝宽度变化至所测值时,等待大约 5 min 光功率计数据稳定后再读取并记录,每个缝宽读数三次,图 5 为实验中裂缝扩展前后光纤变形图.

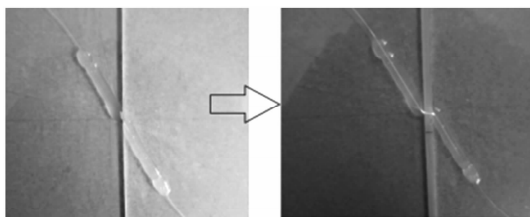


图 5 裂缝引起的塑料光纤变形

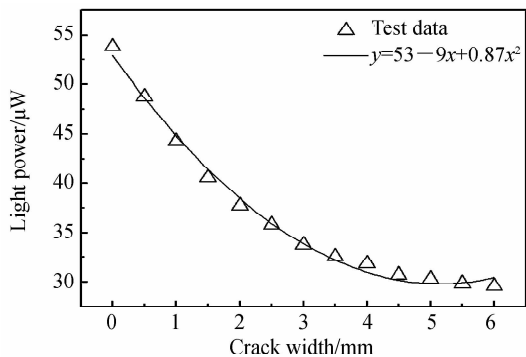
Fig. 5 Deformation diagram of POF caused by crack propagation

2.3 实验结果分析

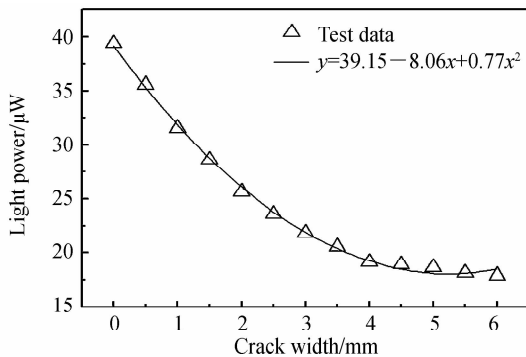
根据实验数据,绘制纤芯直径为 0.25 mm 的 SK10 和直径为 0.5 mm 的 SK20 两种塑料光纤在不同方位下的光强-裂缝宽度关系图,如图 6,每组实验均重复进行了 3 次,即图中实验数据为 3 次实验的平均值.

由图 6 可以看出,虽然采用的光纤直径和裂缝/光纤交角不同,但光强随缝宽的变化规律一致,即裂缝开展初期,光纤中光强衰减程度较大,随着裂缝的继续开展,光强衰减程度逐渐变小,裂缝开度接近 6 mm 时,光强-缝宽关系曲线趋于水平.

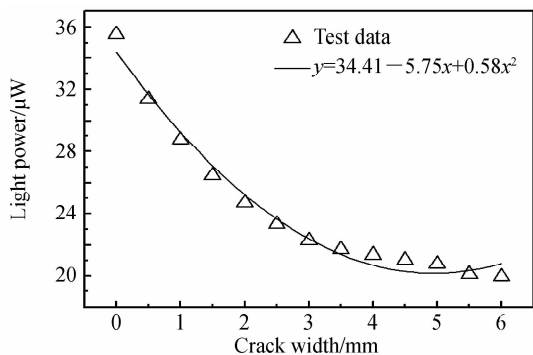
纤芯直径为 0.5 mm 的 SK20 塑料光纤与纤芯直径为 0.25 mm 的 SK10 塑料光纤相比,光强随裂缝扩展变化更加明显,例如 45°方位情况下裂缝从 0 扩展至 6 mm 过程中,SK20 塑料光纤光强平均由 103.17 μW 衰减至 40.47 μW,平均衰减幅度为 62.70 μW;SK10 塑料光纤对应的光强平均由 39.42 μW 衰减至 17.73 μW,平均衰减幅度为 21.69 μW. 这是由于纤芯直径为 0.5 mm 的 SK20 塑料光纤断面较大,当发生弯折时微弯损耗也较大.



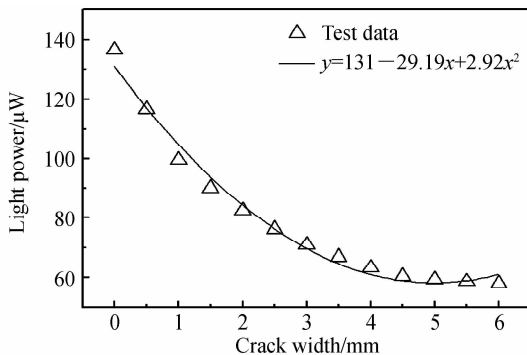
(a) SK10 with intersection angle of 30°



(b) SK10 with intersection angle of 45°



(c) SK10 with intersection angle of 60°



(d) SK20 with intersection angle of 30°

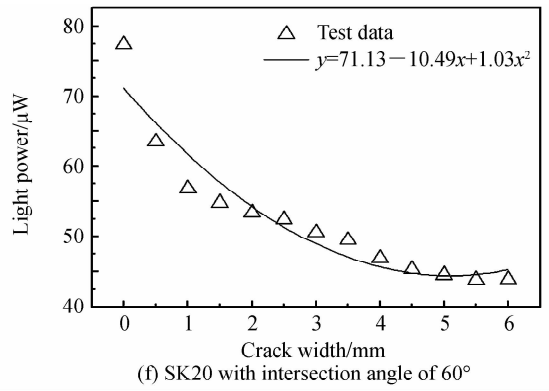
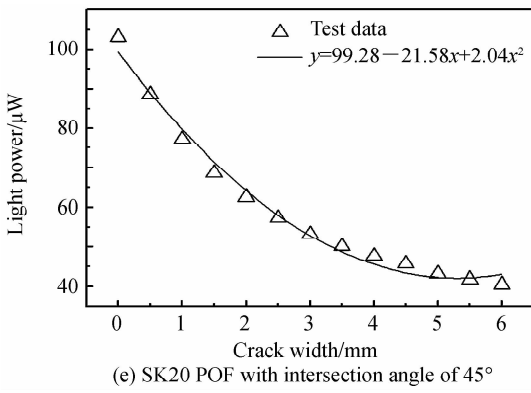


图6 POF在不同方位下的光强-缝宽关系

Fig. 6 Relationship between the light power and crack width

为了进一步了解不同方位下光损耗与裂缝扩展宽度的关系,对光强平均值作进一步处理,即用缝宽为0 mm时对应的光强减去不同缝宽时对应的光强,得到

不同裂缝宽度下的光损耗值.按照纤芯直径不同,绘制光纤在各种方位下的光损耗与裂缝扩展宽度之间的关系图,如图7.

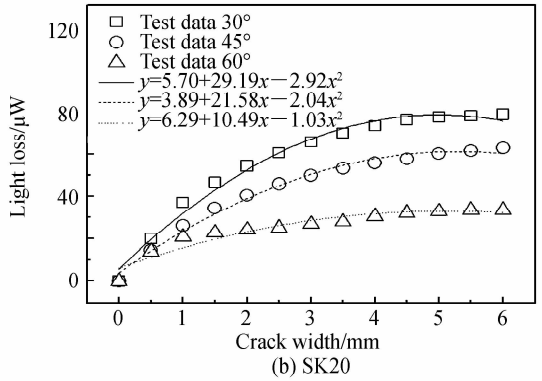
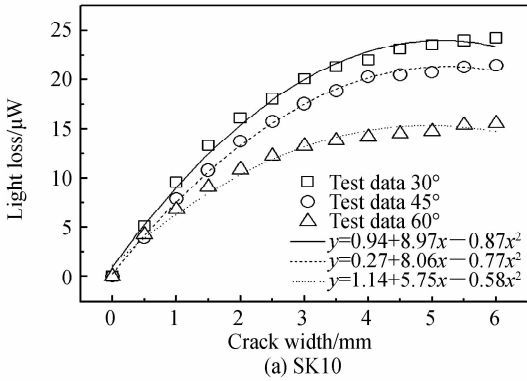


图7 POF光损耗与缝宽关系

Fig. 7 Relationship between the optical loss and crack width

由图7可以看出,裂缝扩展到6 mm时,SK10塑料光纤对应的光损耗值整体小于 $30\mu\text{W}$,最大光损耗为 $24.28\mu\text{W}$ (方位角为 30°),最小光损耗为 $15.59\mu\text{W}$ (方位角为 60°);SK20塑料光纤最大光损耗为 $78.76\mu\text{W}$ (方位角为 30°),最小光损耗为 $33.52\mu\text{W}$ (方位角为 60°).较大纤芯直径的塑料光纤由于具有较大断面,在塑料光纤发生弯折时,微弯损耗较多,从而引起光的衰减也较多.

四组方位角中,位角为 30° 时光损耗随着裂缝宽度的增加变化最明显.夹角为 60° 时,光损耗随着裂缝宽度的增加变化最小,塑料光纤裂缝传感器灵敏性随着方位角的增加而降低.

3 结论

本文利用塑料光纤传感装置研究光纤与裂缝在不同夹角下塑料光纤的裂缝监测能力.实验中设计的光纤与裂缝交角分别为 30° 、 45° 、 60° ,利用实验研究了纤芯直径为0.25 mm SK10塑料光纤和纤芯直径为0.5 mm SK20塑料光纤在不同交角条件下光损耗与裂

缝扩展宽度之间的关系.结果表明:

1)在不同光纤直径和裂缝/光纤交角的情况下,光强随缝宽的变化规律一致,即裂缝开展初期,光纤中光强衰减较高,随着裂缝的开展衰减程度逐渐变小,本实验中裂缝开度大致在4 mm以内时裸纤内的光强衰减趋势较明显,随后其衰减趋势减弱.

2)纤芯直径为0.5 mm的塑料光纤相对于纤芯直径为0.25 mm的塑料光纤光损耗明显,纤芯直径为0.5 mm时最大光损耗幅值可达 $78.76\mu\text{W}$,而纤芯直径为0.25 mm最大光损耗幅值只有 $24.28\mu\text{W}$,这主要是因为纤芯直径为0.5 mm塑料光纤断面较大,当发生弯折时微弯损耗较大.

3)裂缝/光纤交角越小,塑料光纤对裂缝的监测能力越强,塑料光纤裂缝传感器的灵敏性随着夹角的增加而降低.

参考文献

- [1] SHAH A A, RIBAKOV Y, HIROSE S. Nondestructive evaluation of damaged concrete using nonlinear ultrasonics[J]. *Materials & Design*, 2009, **30**(3): 775-782.
- [2] DEGALA S, RIZZO P, RAMANATHAN K, et al. Acoustic

- emission monitoring of CFRP reinforced concrete slabs[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, **23**(5): 2016-2026.
- [3] MORI K, SPAGNOLI A, MURAKAMI Y, *et al.* A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete[J]. *NDT & E International*, 2002, **35**(6): 399-406.
- [4] CHENG C C, CHENG T M, CHIANG C H. Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves[J]. *Automation in Construction*, 2008, **18**(1): 87-92.
- [5] HUSTON D, HU J Q, MASER K, *et al.* GIMA ground penetrating radar system for monitoring concrete bridge decks[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, **43**(2): 139-146.
- [6] ROSSI P, LE MAOU F. New method for detecting cracks in concrete using fibre optics[J]. *Materials and Structures*, 1989, **22**(6): 437-442.
- [7] ANSARI F, NAVALURKAR R K. Kinematics of crack formation in cementitious composites by fiber optics[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, **119**(5): 1048-1061.
- [8] LI Q, LI G, WANG G, *et al.* CTOD measurement for cracks in concrete by fiber optic sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **42**(4): 377-388.
- [9] ZHANG W, SHI B, ZHANG Y F, *et al.* The strain field method for structural damage identification using Brillouin optical fiber sensing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, **16**(3): 843-850.
- [10] BAO T. Distributed fiber bragg grating sensors for monitoring cracks in concrete structures[C]. Proceedings of the 13th International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments-Earth and Space, 2012; 1390-1399.
- [11] LEUNG C K Y, ELVIN N, OLSON N, *et al.* A novel distributed optical crack sensor for concrete structures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, **65**(2): 133-148.
- [12] LARGE M C J, MORAN J, YE L. The role of viscoelastic properties in strain testing using microstructured polymer optical fibres[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(3): 1-6.
- [13] HUSDI I R, NAKAMURA K, UEHA S. Sensing characteristics of plastic optical fibres measured by optical time-domain reflectometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(8): 1553-1559.
- [14] BABCHENKO A, WEINBERGER Z, ITZKOVICH N, *et al.* Plastic optical fibre with structural imperfections as a displacement sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(5): 1157-1161.
- [15] TAKEDA N, KOSAKA T, ICHIYAMA T. Detection of transverse cracks by embedded plastic optical fiber in FRP laminates[C]//1999 Symposium on Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics, 1999; 248-255.
- [16] WONG Y M, SCULLY P J, BARTLETT R J, *et al.* Plastic optical fibre sensors for environmental monitoring: biofouling and strain applications[J]. *Strain*, 2003, **39**(3): 115-119.
- [17] NAKAMURA K, HUSDI I R, UEHA S. Memory effect of POF distributed strain sensor [C]//Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2004; 144-147.
- [18] KREBBER K, LENKE P, LIEHR S, *et al.* Smart technical textiles with integrated POF sensors [C]//The 15th International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2008; 69330V-69330V-15.
- [19] KUANG K S C, CANTWELL W 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.
- [20] KUANG K S C. Development of a wireless, self-sustaining damage detection sensor system based on chemiluminescence for structural health monitoring[C]//SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2014; 906208-906208-8.
- [21] LIEHR S, LENKE P, WENDT M, *et al.* Polymer optical fiber sensors for distributed strain measurement and application in structural health monitoring [J]. *Sensors Journal*, 2009, **9**(11): 1330-1338.
- [22] LIEHR S, BURGMEIER J, KREBBER K, *et al.* Fiber optic bend and temperature sensing in femtosecond laser-structured POF[C]//OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensor. International Society for Optics and Photonics, 2012; 84213I-84213I-4.
- [23] 廖延彪. 光纤光学—原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [24] OLSON N, LEUNG C K Y, MENG A. Crack sensing with a multimode fiber: experimental and theoretical studies[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **118**(2): 268-277.