

分布式光纤裂缝传感工程应用研究进展

吴永红, 朱莎*, 许蔚, 张海明

昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500

摘要 随着光纤传感技术的发展,近年来分布式光纤传感技术被用于结构裂缝的监测,其中主要包括准分布式光纤传感技术——光纤布拉格光栅技术,分布式光纤裂缝传感技术——基于瑞利散射的光时域反射技术、布里渊光时域反射技术、布里渊光时域分析技术、布里渊光相关域分析技术以及最新的具有高空间分辨率的脉冲预抽运布里渊光时域分析技术和差分脉冲对布里渊光时域分析技术。基于这些技术在结构裂缝监测中的应用,综述各自的优缺点及国内外分布式光纤裂缝传感工程应用的情况。同时对分布式光纤裂缝监测中的力学、畸变光信号及实验研究等问题进行分析,提出关于这些重点问题的研究见解。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 分布式; 裂缝; 力学解析解; 畸变光信号

中图分类号 TU197

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090002

Progress in Distributed Optical Fiber Crack Sensing Engineering

Wu Yonghong, Zhu Sha*, Xu Wei, Zhang Haiming

*Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, Yunnan 650500, China*

Abstract With development of the optical fiber sensing technology, the distributed optical fiber sensing technology has been used in the structure crack monitoring in recent years, mainly including the quasi-distributed optical fiber sensing technology of fiber Bragg grating, and distributed fiber optic crack sensing technologies such as optical time domain reflectometry, Brillouin optical time domain reflectometry, Brillouin optical time domain analysis, Brillouin optical correlation domain analysis, and the latest high spatial-resolution pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis and differential pulse-width pair Brillouin optical time domain analysis. Based on the applications of these techniques in structural crack monitoring, their respective advantages and disadvantages and applications of distributed fiber optic crack sensing all through the world are summarized. Additionally, mechanics, distorted light signal and experimental researches are analyzed in the distributed optical fiber crack monitoring, and some opinions on the issues are proposed.

Key words fiber optics; fiber optic sensors; distributed type; cracks; mechanics analytic solution; distorted light signal

OCIS codes 060.2370; 200.4880

1 引言

对于钢筋混凝土工程,工程结构的安全评估及处理,通常是以结构裂缝的出现情况作为首要判断^[1]。结构安全或健康监测系统若能持续探测结构裂缝的信息,就可有效满足混凝土工程安全监测的需要^[2]。因此,对混凝土工程裂缝实施实时监测,及早、及时捕捉裂缝的形成和发展趋势,判断裂缝是否

会发生失稳扩展,是大型混凝土结构安全的重要保证^[3],对结构的安全、维护和耐久性都有重要意义。结构健康监测系统的主要目的是监测工程结构的累积损伤。世界上许多新建的大跨桥都安装有监测系统,但这些健康监测系统都不具备损伤识别能力,包括对结构内部极端损伤即裂缝的识别和监测能力^[4]。

光纤传感按其检测范围可分为三类:1) 点式传

收稿日期: 2018-02-27; 修回日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(51669009, 50878152)

* E-mail: 619689003@qq.com

感器;2) 准分布式光纤传感,如光纤布拉格光栅(FBG)型;3) 分布式光纤传感。

分布式光纤传感是光纤传感中的高端技术,该技术中光纤既是传输介质也是传感元件,可获得沿光纤传感方向的所有被测物理量,通过合理布设光纤网络可对被测结构实现整体健康监测,可进行空间上的连续测量。分布式光纤传感技术除具有精巧、灵敏、精度高、抗电磁干扰、几乎无零漂、耐腐蚀、可靠耐久、传感-传输一体化、降价潜力较大等一般光纤传感的优点外,其独特优势在于可获取光纤沿线全程的被测量随时间、空间的连续分布,这对大型结构获取全局和整体变形状态信息极为有利。虽然与点式和准分布式光纤传感技术相比,分布式光纤传感技术存在空间分辨率低、测量时间长、信号微弱、系统复杂等不足,但由于其无可比拟的优越性,依然成为最具前途的一类光纤传感技术^[5]。裂缝是由材料拉应变增大引起的,利用光纤对应变进行监测可以实现对裂缝的监测。分布式光纤传感技术可用于工程结构内部损伤识别和空间随机裂缝的连续监测。

20世纪80年代初首次出现了分布式光纤温度传感系统^[6],随后国内外研究人员对各类分布式光纤传感器技术作了大量研究,其中基于光纤中瑞利散射、拉曼散射、布里渊散射等效应的传感技术是分布式光纤传感技术的主要代表。瑞利散射与入射光频率相同,但能量最大。拉曼散射和布里渊散射的散射光较入射光发生一定频移,其中拉曼散射光只与光纤温度变化有关,而布里渊频移与光纤应变和温度变化相关^[7]。

要对工程结构裂缝形成和发展的全过程进行动态监测,光纤作为一种接触式感应技术,要求既能识别结构早期出现的微裂缝,又能在裂缝扩展过程中保持传感光路的连通以及必要的敏感性。对于各种类型的分布式光纤传感技术,这些目标还存在相互制约甚至冲突的关系。要完全达到这些目标,满足工程安全监测和评估的需要,对目前各种原理的光纤技术都是相当大的挑战。总之,光纤作为精细通信技术中的一种信息传输载体,将之应用于规模巨大、施工环境粗放的大型混凝土工程的安全监测,要真正实现其技术功能的重大跨越,必然存在不少重要复杂的基础问题有待研究突破。

2 用于混凝土裂缝监测的光纤传感技术

用于混凝土裂缝监测的光纤传感技术有基于准

分布式光纤传感的FBG技术^[8-11]和基于分布式光纤传感技术的瑞利散射光时域反射(OTDR)技术^[12-17]、布里渊光时域反射(BOTDR)技术^[18-23]、布里渊光时域分析(BOTDA)技术^[24-36][其中包括脉冲预抽运布里渊光时域分析(DPP-BOTDA)技术^[35]和差分脉冲对布里渊光时域分析(PPP-BOTDA)技术]^[26,28,33-34]和布里渊光相关域分析(BOCDA)技术^[37-38]。近年来,日本^[8,18,20,25,38-39]、美国^[40]、加拿大^[33,41-42]、瑞士^[6]、阿联酋^[1]的很多专家以及我国哈尔滨工业大学^[29,30,43]、四川大学^[44]、浙江大学^[32,45]、南京大学^[22,46]、河海大学^[3,7,34,47-48]、东南大学^[24,49-50]、大连理工大学^[21,51-53]等众多高校都致力于采用光纤传感技术对混凝土裂缝进行监测。

2.1 FBG 技术

FBG传感器是一种准分布式光纤传感器,通过布拉格光栅中心波长的变化 $\Delta\lambda$ 来测定应变和温度的变化,光纤光栅应变和温度传感的基本表达式为^[54]

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{1-P}, \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\alpha + \zeta}, \quad (2)$$

式中: λ 为中心波长; ϵ 为应变; T 为温度; P 为有效光弹系数; α 为热膨胀系数; ζ 为热光系数。通过(1)式测量中心波长的变化量 $\Delta\lambda$ 即可确定FBG埋设点的应变值。孙曼等^[55]利用FBG裂缝传感器,应用于钢-砼组合桥面板模型实验中,在试件处于弹性阶段时测得埋设点的应变值,当裂缝产生即损伤发生后,测得损伤值即缝宽。

包腾飞等^[10]、田石柱等^[11]用FBG对混凝土结构进行裂缝监测,通过实验分析得出FBG可以感知裂缝的出现并对其进行定位。包腾飞等^[10]将多只FBG传感器串联在一根光纤上进行分布式监测,在不知裂缝具体位置和走向的情况下能监测混凝土结构裂缝的发生和发展。FBG传感技术较传统的点式检测具有一定的优越性,且测试精度和空间分辨率较高,但是FBG不能实现完全的分布式监测,而且光纤光栅是裸光纤,目前的研究主要集中在将裸光纤粘贴于结构表面,埋入结构内部需要进行复杂的封装,测试成本高。

2.2 OTDR 技术

OTDR技术是分布式光纤传感技术的进一步发展,利用光纤损耗原理进行裂缝监测。该技术应用于光纤裂缝传感的主要依据是工程结构出现裂缝

时,埋入其中的光纤会在裂缝上、下两面分别产生两个微弯,如图 1 所示。该微弯会使光信号出现局部微弯损耗,形成裂缝-光损耗的单值对应关系,通过 OTDR 探测后向瑞利散射光损耗的位置和大小,可推知相应位置处是否有裂缝存在^[56]。

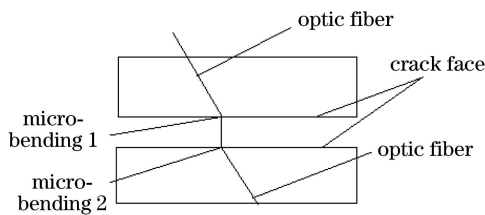


图 1 基于 OTDR 的裂缝检测原理示意图

Fig. 1 Schematic of OTDR crack detection mechanism

但该技术有较大局限,因而从其裂缝传感思想提出 20 年来,未见在国外实际工程中得到应用。其主要局限在于^[7]:即使对于延伸方位可预知的裂缝,也要构成复杂的所谓斜交式组合传感网络,在粗放的工程环境中实施困难;其灵敏度与复用能力即分布式检测能力相互制约;易受环境因素的干扰,检测距离有限;空间分辨率不高(一般为 1 m),非严格意义上的分布式技术,难以满足结构损伤识别和安全监测的需要^[26]。该技术也有显著优点,即信号分析简单,可对同一空间分辨区间内的单个裂缝进行单值检测。刘晓濂^[51]用 OTDR 对裂缝进行监测,空间分辨率达到 0.25 m,实现了模拟埋入式(用环氧树脂模拟混凝土)单处独立确定裂缝宽度、走向和定位的功能。

2.3 BOTDR 和 BOTDA 技术

BOTDR 和 BOTDA 两者的光信号都是布里渊散射光。布里渊散射光与其他散射光相比,频移变化量与温度的相关性比其与应变的相关性小得多(0.002%/°C),因此,当测量与应变相关的布里渊频移时,如果温度差小于 5 °C,可以忽略温度对布里渊频移的影响。这两种测量技术中,布里渊散射光的频移变化量与光纤所受的轴向应变之间呈线性关系,如图 2 所示,通过频移量可以得到光纤的轴向应变,从而判断结构裂缝的宽度^[19]。

BOTDR 和 BOTDA 信号发生的方式不同,特性也有差别。前者是基于自发布里渊散射(spBS)原理的分布式光纤传感技术,后者是基于受激布里渊散射(SBS)原理的分布式光纤传感技术。BOTDR 技术的特点在于仅需从光纤一端输入脉冲光,且光路发生中断时不影响中断点之前各点的测量,但是信号相对较弱;BOTDA 技术则需从光纤的

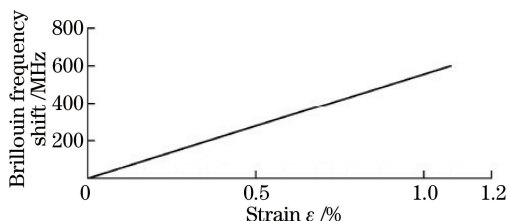


图 2 布里渊散射光频率漂移与应变量的关系

Fig. 2 Relationship between strain and Brillouin frequency shift

两端分别注入探测光与抽运光,测量精度大大提高,但光路一旦中断测量便无法进行。因此,与 BOTDR 技术相比,BOTDA 技术对光纤传感器的耐久性性与布设质量有更高的要求^[49]。

施斌等^[19]、Wu 等^[20]、卢毅等^[22]都利用 BOTDR 光纤传感器对裂缝及裂缝宽度进行了有效监测,但都存在一些问题。他们都是将光纤粘贴于结构表面,施斌等^[19]的监测时间较短,Wu 等^[20]和卢毅等^[22]的监测主要采取定点粘贴,难以实现全面粘贴,因此实践应用中还存在很多问题。

钱振东等^[24]将 BOTDA 埋设于沥青混凝土路面铺装层中,采用紧套光纤对 4 mm 的有效裂缝宽度进行裂缝监测感知。何勇等^[27]、毛江鸿等^[31]对采用 BOTDA 技术结合斜交光纤组监测结构裂缝开展过程的分布式裂缝光纤应变监测方法进行了理论分析和实验研究,通过理论分析建立了光纤应变和裂缝宽度及走向的数值关系,并提出斜交光纤组监测结构裂缝开展的理论公式;通过标定实验对分布式光纤裂缝传感器的标距和预拉力进行了优化和比选,并标定了 300 mm 标距的光纤裂缝传感器实测应变和裂缝宽度及夹角的定量关系;通过裂缝模拟实验对裂缝开展进行了跟踪监测,结果表明斜交光纤组能有效得到光纤与裂缝之间夹角值并实时监测裂缝宽度变化。但他们对裂缝的监测还是局限于结构表面。

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术是感应光信号受光纤应变调制的传感技术,通过测试光纤的局部应变分布,推知光纤附近结构出现的裂缝。该技术也存在一定的缺陷,该技术测试的是光纤某点的应变,是该点附近感应光信号解调仪在其空间分辨率范围内的平均应变。因此,解调仪器可达到的空间分辨率,会对光纤裂缝检测的灵敏度有影响^[21],甚至导致不能感知裂缝的存在。除此之外,裂缝附近显得更为集中的光纤局部应变分布,不仅不能反映在光纤的平均应变中,还会加剧感应光信

脉宽为 t_1 和 t_3 的两抽运脉冲光相继入射到长度为 L 的光纤中, 间隔时间为 t_2 , 与连续波(CW)相互作用后由探测器接收, 对采集到与两脉冲对应的布里渊增益谱, 曲线拟合得到光纤各点处的布里渊频移, 根据频移量解调出光纤中各点的温度和应变。该技术的优点是布里渊信号强, 信噪比高; 增益谱展宽小; 可以提供长距离、高空间分辨率与高精度传感。

由于传统的分布式光纤传感技术在混凝土裂缝监测方面都有局限性, 近年来逐渐有研究人员采用分辨率更高的 PPP-BOTDA 和 DPP-BOTDA 技术进行混凝土裂缝监测。郭彤等^[26]将 PPP-BOTDA 技术应用于钢筋混凝土结构的应变测试及开裂监控中, 由于该技术将空间定位精度大大提高, 使得局部应变和混凝土开裂的自动化监控成为可能。王宏宪等^[68]用 PPP-BOTDA 技术对膨胀土裂隙发育特征进行分析研究。Meng 等^[69]用 PPP-BOTDA 检

测了结构表面的细微裂缝, 确定了裂缝宽度的变化情况。Bao 等^[33]等采用 PPP-BOTDA 对地面多个裂缝进行监测, 并给出了测试峰值与裂缝宽度的关系。贾强强等^[34]利用 PPP-BOTDA 技术开展了混凝土结构开裂辨识和发展状况监测的可行性研究, 并建立了混凝土结构开裂监测的经验模型, 实现裂缝的实时、连续、分布式监测, 通过实验得出该技术可以灵敏地检测到裂缝的产生与扩展, 光纤布里渊频移曲线峰值与混凝土开裂位置具有很好的对应性, 峰值大小可以表征裂缝的宽度变化。陶思聪等^[35]采用 DPP-BOTDA 技术对混凝土表面密集裂缝区应变情况进行监测及实验研究。

2.6 分布式光纤裂缝传感技术对比

针对混凝土裂缝监测中常用的分布式光纤传感技术, 对其优缺点进行了对比^[70], 详见表 1。

根据表 1 中的对比, 在裂缝监测的工程实际中常选用光纤复用性好、空间分辨率较高的 BOTDA

表 1 分布式光纤裂缝传感技术对比

Table 1 Comparison of distributed fiber optic crack sensing technologies

Distributed optical fiber crack sensing technology	Advantages	Disadvantages
FBG (quasi-distributed)	Good dynamic and static test performance; series FBG can realize distributed measurement; its test accuracy is much higher than that of BOTDA.	Quasi-distributed; poor distribution; distributed measurement is costly; there is no FBG packaging process suitable for large-scale and long-term durability.
OTDR	The measurement of attenuation along the optical fiber can be achieved at the single end of the fiber.	Poor reusability; the number of cracks is limited; sensing distance is limited.
BOTDR	The technology can be used to transmit and collect optical signals at one end of the optical fiber; high frequency scanning accuracy; longer sensing distance.	It is very difficult for naked optical fiber to survive in civil engineering environment; the fiber needs to be moderately pre-tensioned; accuracy and spatial resolution need to be improved.
BOTDA	Good reusability; the signal strength is large, the strain and temperature measurements are more accurate, and the measurement range is larger; the minimum spatial resolution can reach 0.1 m at present; the effect of Rayleigh scattering is small; cracks monitoring quantity and sensing length are not affected by damage.	Double light paths; it is very difficult for naked optical fiber to survive in civil engineering environment; the fiber needs to be moderately pre-tensioned; accuracy and spatial resolution need to be improved.
BOCDA	There are fewer applications and no special advantages.	
PPP-BOTDA	High spatial resolution and test precision.	Complicated structure.
DPP-BOTDA	Higher frequency resolution and spatial resolution.	Complicated structure.

技术,近年来随着监测技术的进步,空间分辨率更大的 PPP-BOTDA 技术也越来越多地应用于结构裂缝监测。当然,分辨率高有利于对裂缝的识别,但监测距离又受到限制,这也限制了高空间分辨率的分布式光纤传感技术在大型工程裂缝监测中的应用。

3 分布式光纤裂缝传感技术难题

3.1 分布式光纤裂缝监测参量的力学解析分析

文献[48]首次提出光纤光栅应变传感光-力转换关系这一概念。光纤光栅传感的光-力转换或光-力本构关系(丁睿^[44]通过实验提出基于 OTDR 的力-光耦合本构关系,并首次提出了光纤-混凝土复合体分析的细观力学双界面理论模型),即光信号感应参量与环境检测参量之间的关系,是各类光纤传感技术应用研究中的基本问题。这一转换关系是感应信号分析和传感器设计的理论依据。之前光纤传感器应变传递关系解析方程的建立普遍建立在 Ansari 等^[71]提出的光纤应变传递模型的基础上,该模型假定基材应变不变的同时忽略了基材和光纤之间的应力耦合作用,导致建立的应变传递关系不能反映传感器封装结构的力学参数和几何参数对光-力转换效应的影响,最终建立的光-力转换方程均不能成为传感器优化设计和性能分析的实用化工具。在此,根据实际情况和研究目标,具体表达为传感系统裂缝光信号感应特征参量与裂缝宽度、位置和方位等裂缝特征参数之间的变化关系。对于基于 SBS 原理及 spBS 原理的分布式光纤裂缝传感,裂缝信息通过传感光纤的局部应变分布转换而推知。因此,要建立这两种裂缝传感技术的光-力本构关系,需建立光纤局部应变分布与裂缝宽度之间的关系。文献[38]对混凝土表面粘贴式传感光纤局部应变分布与裂缝宽度之间的关系进行了二维有限元模拟分析。该分析只针对裂缝形成时的情况,没有考虑光纤与混凝土之间的滑移和脱黏。

实际上,当结构裂缝进一步扩展时,缝间光纤位移主要是由光纤与混凝土界面出现滑移和脱黏产生的。光纤发生滑移和脱黏时的局部应变分布特点,相比于与混凝土表面粘接固定的情况,定有很大不同。如果裂缝增大时,仍不考虑滑移和脱黏,则分析误差会明显增大。另外,要求解光信号解调系统在光纤各点的应变检测灵敏度,需求得光纤应变一定规律的空间分布。这样,所得的系统应变检测灵敏的分布即为裂缝引起的光纤应变分布与某一分布函数乘积的全空间积分函数。如果光纤应变分布是通

过数值分析^[44-45,52-53,72]获得的一系列离散值而非解析函数,会为光纤结构特征参数、裂缝特征参量及目标检测灵敏度的反演分析带来很大的不便,即对传感器的设计分析极其不便。故而目前国际上对这一问题的实用化和深入研究趋势,指向解析关系的建立和求解。文献[21]给出了粘贴在工字型钢梁表面光纤的局部应变分布与裂缝宽度之间的关系,并与基于 spBS 原理的光纤技术的测试结果进行了对比,但这一关系的建立并没有考虑光纤-粘接材料-基体界面之间的相对滑移情况。准分布式的光纤光栅传感技术对光纤应变与混凝土裂缝之间的解析关系的研究较为成熟,同时也考虑了光纤-粘接材料-基体界面之间的相对滑移情况^[43,73-75]。

结构界面接触-滑移-脱黏全过程动态分析,是细观力学中的难题。建立反映裂缝扩展过程中界面滑移与脱黏及光纤断裂全过程的光纤局部应变分布与缝宽之间的解析关系,不仅为分布式光纤裂缝的工程应用提供必要的分析理论基础,还将丰富和深化工程结构中广泛存在的结构界面细观力学问题分析的内容和方法。

对于分布式光纤应变与混凝土裂缝宽度之间的解析函数关系,毛江鸿^[58]给出了分布式光纤的应变测试理论,该理论中构建了基于 BOTDA/BOTDR 监测原理的埋入式光纤应变测试模型,给出了分布式传感器应变传递方程,通过表面测试的分布式光纤开裂监测模型推出了光纤应变与裂缝宽度的函数关系式,同时得到了光纤应变与裂缝宽度和开展方向的双参数关系式。Meng 等^[69]结合前人研究提出了应变与裂缝宽度的解析式,并与三维有限元模拟和实验结果进行了对比。张宝祥^[76]根据剪滞理论推导了基于 BOTDA 的分布式光纤裂缝传感器的应变传递系数计算公式,并以此为基础建立了分布式光纤传感器在各种应变条件下的应变传递计算模型。贾强强等^[34]通过实验分析得到基于 PPP-BOTDA 监测原理的布里渊频移与温度、应变、裂缝宽度的关系式,同时给出了光纤与裂缝夹角的关系式,但测试中使用的模型并非真正的混凝土,而是采用两块玻璃板之间的缝隙模拟混凝土结构的裂缝,因此得到的关系式的准确性有待考证。

在考虑光纤-粘接材料-基体界面接触-滑移-脱黏过程中分布式光纤混凝土裂缝测试参量的力学解析分析问题,可以借鉴分析钢筋混凝土结构时用到的一些理论和方法。文献[77]基于预应力锚索锚固体从岩土体中拔出计算模式,通过锚固体与灌浆

材料的界面层变形-破坏过程分析,将锚固段分为弹性区、塑性滑移区和脱黏区,建立锚固体-岩土体界面力学模型,采用与 Coulomb 条件关联的流动法则,导出界面应力分布的理论解。陆飞^[50]通过应变分析得出光纤在裂缝位置的应变分布取决于光纤的粘接滑移,在光纤滑移量一定时光纤的应变峰值与裂缝宽度成正比。葛小琿^[78]对钢筋混凝土的裂缝理论-粘接滑移理论和无滑移理论进行了总结。在光纤的力学分析方面,Ansari 等^[71]引入剪滞理论和界面力学理论分析了测试中传感光纤的应变情况。Ansari^[79]在其著作中提到应用光纤进行裂缝监测的相关力学理论。Wan 等^[80]通过剪滞理论讨论了基于 FBG 传感监测的应变变化,并与三维有限元数值模拟和实验结果进行了对比。Imai 等^[81]研究了一种基于受激布里渊散射的混凝土裂缝末端的应力传递模型。Feng 等^[20]根据位移场的相容性,根据剪滞模型计算纤维芯的诱导应变,并对光纤的保护涂层材料进行弹性和弹塑性建模。

3.2 对畸变光信号的处理

国际上目前对基于布里渊散射原理的分布式光纤传感技术的应用研究,除在改善其空间分辨率和精度的方向上不断寻求突破外,在基于 SBS 原理的光纤裂缝传感感应光信号扭曲现象和影响的研究上,也进行了众多的探索。这些探索主要集中在采用纤维光学手段对畸变光信号进行分析处理和解读。主要的分析处理方法有形状系数法 (FF)^[82]、单峰拟合法 (Spf)^[83]、长度-强度图表法 (LSd)^[84]、瑞利等效标准法 (REC)^[85] 及多峰拟合法 (Mpf)^[1]。

这些方法各有优势,也各有局限:当布里渊散射光谱的次峰高度低于主峰高度的一半时,FF 和 Spf 就都不适用;FF 只是对实际测试结果的局部应变分布情况进行定性分析,因此既不适合检测结果的定量分析,也不能用于传感器的设计分析;Spf 度量的是局部(空间分辨率范围内的)平均应变,测出的应变一般大大小于实际应变;LSd 不适合对检测结果的分析,且当标准化布里渊频移 Ω_{Bs} 靠近其阈值 Ω_{th} 时,特别是在观测资料受到噪声扰动的情況下,就更难区分布里渊光谱的单峰和双峰形态;REC 也存在适用范围的问题,当标准布里渊损失高于等效瑞利标准时,该方法就失去了效用;出现多峰只是布里渊散射谱畸变的一种表现,所以 Mpf 只适合特定的情况;即使在布里渊散射谱存在多峰的情况下,如果双峰的频率差小于一定的范围,则用 Mpf 拟合得到的参考布里渊频移与真正的布里渊频移之间的界限就

会变得模糊。由于上述方法存在适用范围和精度上的局限且较为复杂,不易为一般检测人员掌握,因此在实际的裂缝检测分析中,几乎没有得到应用。

文献[1]在采用基于 SBS 原理的光纤技术进行分布式裂缝检测实验时,发现检测得到的裂缝位置与实际有偏差,并将这种差异解释为光信号解调系统的读数空间分辨率过大所致,文中对采用多峰拟合和单峰拟合获得的数据进行对比,得出多峰拟合结果更为精确的结论。文献[86]虽然利用多峰拟合法对光谱信号进行了处理,但该技术测得的裂缝附近传感光纤的应变值与实际值在某些测点仍有较大差异,并将这种差异解释为相同的原因所致。实际上,光纤应变观测值的这种偏差,是由裂缝位置相对于光信号解调仪的检测空间分辨区间和读数空间分辨区间的随机性引起的。简而言之,是由裂缝空间分布的随机性引起的。这种随机性不仅会造成裂缝检测灵敏度的变化,还会造成裂缝检测结果的不确定性,即会出现对结构不同位置同一宽度裂缝检测缝宽的多值性,以及裂缝检测位置的偏差。这种不确定性,是各类利用应变转换检测结构内部裂缝的方法都存在的普遍问题,主要是由于缝宽的单值转换和测定。因此需要对现有光纤混凝土裂缝测量中出现的光信号畸变进行相应的控制。文献[73]采用高弹性模量的光纤涂覆层来提高灵敏度并改善应变局部集中导致的测量结构的多值性。

3.3 实验研究及实际应用中存在的问题

空间分辨率的提高会降低光信号畸变及裂缝位置随机性对检测结果的影响。但受光的传播速度等因素的限制,任何分布式传感技术的空间分辨率都存在一定的极限。同时,几个主要传感参数之间,如空间和应变分辨率、检测精度和距离之间,还存在相互约束的关系。实际工程应用中,需对各个参数的取值予以综合考虑。所以,分布式光纤传感技术的空间分辨率不可能无限提高或任意取值。或者说,灵敏度和定宽方面的问题总会以不同程度存在。因此,需关注并解决该技术工程应用中的这些问题,以满足工程安全监测的实际需要。

或许由于以上两方面的制约因素,迄今为止,基于 SBS 及 spBS 原理的光纤裂缝传感工程应用研究,大多为原理性或方法性模型的实验研究,缺乏量化观测实例^[87],并且一般是对钢筋混凝土的裂缝进行光纤表面粘贴实验^[88,31]。对于土木工程空间尺度不大的梁、柱结构,监测结构某处的表面裂缝,可基本满足结构健康监测的要求。但对于大体积水工

混凝土结构,如混凝土大坝,只有探测到裂缝的位置、宽度、深度、方位等裂缝全部空间特征参量与变化趋势,才能对结构的安全性态作出合理的分析和判断。这对大型水工结构的裂缝监测提出了更高的要求。

采用光纤传感器对混凝土裂缝进行监测,光纤的布设方式通常有三种。1) 粘贴在结构表面。将光纤粘贴于混凝土表面,通过选择不同的粘接材料和粘接方法,可以改变并控制混凝土开裂时光纤与裂缝的协同变形情况。2) 混凝土表面开槽^[76]。3) 埋入混凝土内部。将光纤埋入混凝土内部,光纤表面直接与混凝土接触,混凝土裂缝形成时,光纤局部应变分布特征以及对感应布里渊散射光谱形态的影响,会有不同的规律和特点。具体使用的埋入方法包括:毛江鸿^[58]采用气吹-灌浆技术进行混凝土内部光纤布设;李东升等^[74]采用智能夹层结构;丁睿^[44]采用泵送混凝土的光纤安装保护仿真实验。在实际应用中丁睿用其方法在巫峡长江大桥上安装布设了传感光纤,不计入人为损坏时,传感光纤总存活率为75.3%。刘德华^[89]对埋入式光纤传感器的力学性能进行了研究。毛江鸿^[58]只提出埋入方法,未进行埋入式的混凝土裂缝监测。其他研究采用的是模拟裂缝,因此,埋入式混凝土裂缝监测迄今尚缺乏深入研究。

在实验过程中,裂缝的模拟也是一个问题。国内外学者采用的制作开裂混凝土试件的主要方法有预制裂缝法^[90]、劈拉开裂法^[91]和弯拉开裂法^[92]。在实验中也有采用模拟混凝土裂缝的方法:贾强强等^[34]采用两块玻璃板之间的缝隙模拟混凝土结构的裂缝;张宝祥^[76]采用两块分离金属板模拟裂缝。近年来也提出了一些产生真实裂缝的实验方法:付传清等^[93]采用两次加载法,使混凝土产生自然裂缝。

此外,对光纤的标定^[76]以及对裂缝定宽、开展情况进行研究^[34]也是对混凝土裂缝进行实验研究的重点。

对混凝土裂缝的光纤传感监测技术多拘泥于实验研究,且裂缝的设置多采用预制裂缝,与真实裂缝存在差异。文献[39-40,87]对瑞典、美国和日本的三座桥梁进行结构完整性监测,在实际结构进行了裂缝监测。其中文献[39]连续进行了七年多的监测跟踪,并利用得到的监测数据对桥梁健康状况进行分析评价。丁睿等^[94]用光纤传感技术对巫峡长江大桥进行了裂缝监测。孙曼等^[95]对冶勒大坝心

墙基座裂缝进行分布式光纤传感监测。这些实际应用对设计实验作进一步研究有很大的参考价值,但采用分布式光纤传感技术对工程结构进行实际监测的技术仍有待提高。

4 结束语

近年来分布式光纤裂缝传感工程应用越来越多,出现了像PPP-BOTDA这样较新较好的监测技术,但实际工程中应用较少,也缺乏理论支撑,这也是分布式光纤裂缝传感工程未来研究的重点。

围绕分布式光纤裂缝传感的研究进展,未来该工程技术研究重点应放在以下方面:1) 确定适合某工程实际的分布式光纤裂缝传感技术;2) 结合实验数据验证分布式光纤裂缝监测参量的力学解析解;3) 采用合理的方法控制光纤混凝土裂缝测量中出现的光信号畸变情况;4) 将实验研究与工程实际相结合,将分布式光纤裂缝传感技术应用于工程实践。

参 考 文 献

- [1] Deif A, Martín-Pérez B, Cousin B, *et al.* Detection of cracks in a reinforced concrete beam using distributed Brillouin fibre sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(5): 055014.
- [2] Afzal M H B, Kabir S, Sidek O. Fiber optic sensor-based concrete structural health monitoring [C] // *Saudi International Electronics Communications and Photonics Conference*, 2011: 12063502.
- [3] Zhao J L, Bao T F, Qi D. Prediction of crack width based on plastic optical fiber crack sensor [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(2): 131-134.
赵津磊, 包腾飞, 戚丹. 基于塑料光纤裂缝传感器的裂缝开度预测 [J]. *水电能源科学*, 2015, 33(2): 131-134.
- [4] Qin Q. Health monitoring of long-span bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2000, 13(2): 37-42.
秦权. 桥梁结构的健康监测 [J]. *中国公路学报*, 2000, 13(2): 37-42.
- [5] Liu D R. Research on long distance distributed Brillouin scattering fiber sensing technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 2-3.
刘迪仁. 长距离分布式布里渊散射光纤传感技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 2-3.
- [6] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997,

- 15(10): 1842-1851.
- [7] Wu Y H, Xu H Z, Gao P W, *et al.* Optimization of optical fiber monitoring network structure for crack detection of high concrete arch dams[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(6): 37-39.
吴永红, 徐洪钟, 高培伟, 等. 混凝土高拱坝裂缝光纤监测网络构型的优化[J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(6): 37-39.
- [8] Li S Z, Wu Z S. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. *Structural Health Monitoring*, 2007, 6(2): 133-143.
- [9] Liang D Z, Sun L, Wang S L, *et al.* Monitoring the cracks in concrete structures using FBG sensors[C]// *International Forum on Advances in Structural Engineering*, 2008: 810-815.
梁德志, 孙丽, 王世磊, 等. 应用FBG传感器对混凝土结构裂缝的监测[C]// *结构工程新进展国际论坛*, 2008: 810-815.
- [10] Bao T F, Qian F. Study on crack monitoring capability of distributed fiber Bragg grating sensors in concrete structures [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(4): 540-543.
包腾飞, 钱飞. 混凝土裂缝分布式光纤光栅监测能力研究[J]. *压电与声光*, 2011, 33(4): 540-543.
- [11] Tian S Z, Qiu W C, Wen K, *et al.* Application research on FBG sensor in the monitoring of fracture and damage[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(1): 129-132.
田石柱, 邱伟宸, 温科, 等. FBG传感器关于裂缝及损伤的监测应用研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(1): 129-132.
- [12] Kim N. Crack detection of structures using optical time domain reflectometry (OTDR) method [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3988: 276-283.
- [13] Li J Z, Sun B C, Du Y L, *et al.* Crack monitoring of concrete [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(4): 1129-1132.
李剑芝, 孙宝臣, 杜彦良, 等. 混凝土裂缝的监测[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(4): 1129-1132.
- [14] Ou J P, Hou S, Zhou Z, *et al.* The multi-line distributed fiber optic crack detection system and its application [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2007, 29(2): 144-147.
欧进萍, 侯爽, 周智, 等. 多段分布式光纤裂缝监测系统及其应用[J]. *压电与声光*, 2007, 29(2): 144-147.
- [15] Yang L. Application of Brillouin OTDR in concrete crack detection[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
杨莉. Brillouin OTDR 在混凝土裂缝检测中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [16] Huang D W, Zhang Y, Zhao J W. Measurement of concrete cracks based on OTDR[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2011(3): 31-33.
黄定卫, 张莹, 赵建伟. 基于 OTDR 的混凝土裂缝测量技术[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2011(3): 31-33.
- [17] Jia Q Q, Su H Z, Jin S J. Optimization of network structure of optical fiber monitoring cracks in concrete panel [J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(9): 58-60.
贾强强, 苏怀智, 金盛杰. 混凝土面板裂缝光纤监测网络构型的优化[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(9): 58-60.
- [18] Wu Z S, Takahashi T, Sudo K. An experimental investigation on continuous strain and crack monitoring with fiber optic sensors [J]. *Concrete Research and Technology*, 2002, 13(2): 139-148.
- [19] Shi B, Xu H Z, Zhang D, *et al.* Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 493-499.
施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 493-499.
- [20] Wu Z S, Xu B, Takahashi T, *et al.* Performance of a BOTDR optical fibre sensing technique for crack detection in concrete structures [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2008, 4(4): 311-323.
- [21] Feng X, Zhou J, Sun C S, *et al.* Theoretical and experimental investigations into crack detection with BOTDR-distributed fiber optic sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139(12): 1797-1807.
- [22] Lu Y, Shi B, Xi J, *et al.* Field study of BOTDR-based distributed monitoring technology for ground fissures[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(1): 8-13.
卢毅, 施斌, 席均, 等. 基于 BOTDR 的地裂缝分布式光纤监测技术研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(1): 8-13.
- [23] Su J W, Jiang Y H, Shi B, *et al.* Research on the application of BOTDR distributed optical fiber

- monitoring technology in ground crack monitoring[C] // Compilation of Abstract of the Paper of 2015 Academic Annual Conference of China Geological Society (Volume II), 2015: 33-38.
- 苏晶文, 姜月华, 施斌, 等. BOTDR 分布式光纤监测技术在地裂缝监测中的应用研究[C] // 中国地质学会 2015 学术年会论文摘要汇编(下册), 2015: 33-38.
- [24] Qian Z D, Huang W, Guan Y S, *et al.* Application of BOTDA on cracking monitoring for asphalt concrete pavement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(5): 799-803.
- 钱振东, 黄卫, 关永胜, 等. BOTDA 在沥青混凝土铺装层裂缝监测中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 799-803.
- [25] Iwashita K, Wu Z, Hashimoto A, *et al.* Monitoring of concrete crack width with optic fiber sensors[C] // The Japan Society of Mechanical Engineers, 2009: 114-118.
- [26] Guo T, Li A Q, Song Y S, *et al.* Experimental study on strain and deformation monitoring of reinforced concrete structures using PPP-BOTDA [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 2859-2868.
- [27] He Y, Jiang S, Mao J H, *et al.* Cracking monitoring method and experiment with distributed fiber sensor [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1): 1-6.
- 何勇, 姜帅, 毛江鸿, 等. 结构裂缝的分布式光纤监测方法及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1): 1-6.
- [28] Zhang H. Study on PPP-BOTDA technology for concrete crack monitoring[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 333/334/335: 1582-1585.
- [29] Xie C C. Research on structural health monitoring based on BOTDA distributed fiber-optic sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- 谢超超. 基于 BOTDA 分布式光纤传感器的结构健康监测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [30] Kang S B. Crack monitoring of composite beam bridge deck using BOTDA [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- 康师表. 基于 BOTDA 的组合梁桥面板裂缝监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [31] Mao J H, Cui L, Jin W L, *et al.* Experimental research on concrete crack recognizing and monitoring based on distributed fiber sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(9): 1298-1304.
- 毛江鸿, 崔磊, 金伟良, 等. 基于分布式光纤传感的混凝土裂缝识别与监测试验研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(9): 1298-1304.
- [32] Jiang S. Study on the whole process monitoring and prediction model of reinforced concrete rust crack based on BOTDA [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- 姜帅. 基于 BOTDA 的钢筋混凝土锈裂全过程监测及预测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [33] Bao Y, Tang F, Chen Y, *et al.* Concrete pavement monitoring with PPP-BOTDA distributed strain and crack sensors [J]. Smart Structures & Systems, 2016, 18(3): 405-423.
- [34] Jia Q Q, Su H Z, Feng L L, *et al.* Experimental research on concrete structure crack monitoring based on PPP-BOTDA technology [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(8): 832-837.
- 贾强强, 苏怀智, 冯龙龙, 等. 混凝土结构开裂监测的 PPP-BOTDA 分布式光纤技术试验研究[J]. 光子 • 激光, 2016, 27(8): 832-837.
- [35] Tao S C, Lai B W, Lei Y, *et al.* Experimental study of multi-crack propagation monitoring on the surface of reinforced concrete beam[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2016, 55(4): 596-600.
- 陶思聪, 赖博文, 雷鹰, 等. 钢筋混凝土梁表面多裂缝扩展的试验研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(4): 596-600.
- [36] Xu Z, Feng X, Zhong S, *et al.* Surface crack detection in prestressed concrete cylinder pipes using BOTDA strain sensors [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-12.
- [37] Ong S S L, Kumagai H, Iwaki H, *et al.* Crack detection in concrete using a BOCDA based fiber optic distributed strain sensor [C] // Proceedings of the IEICE General Conference: The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2003: 178-182.
- [38] Imai M, Nakano R, Kono T, *et al.* Crack detection application for fiber reinforced concrete using BOCDA-based optical fiber strain sensor[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(8): 1001-1008.
- [39] Sigurdardottir D H, Glisic B. On-site validation of fiber-optic methods for structural health monitoring: Streicker Bridge [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(4): 529-549.
- [40] Imai M. Seven-year-long crack detection monitoring

- by Brillouin-based fiber optic strain sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9435: 94351Y.
- [41] Bao X, Chen L. Recent progress in optical fiber sensors based on Brillouin scattering at University of Ottawa[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(2): 102-117.
- [42] Li W, Bao X, Li Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21616-21625.
- [43] Zhou Z, Li J L, Ou J P. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(1): 49-55.
周智, 李冀龙, 欧进萍. 埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(1): 49-55.
- [44] Ding R. Research on distributed fiber sensing technology and its application to civil structural health monitoring[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
丁睿. 工程健康监测的分布式光纤传感技术及应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [45] Chen Q. Numerical simulation on bond-slip relationship of reinforced concrete and crack in reinforced concrete beam [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
陈强. 钢筋混凝土粘结性能和梁裂缝的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [46] Cui H L, Zhang D, Shi B. Spatial resolution and its calibration method for Brillouin scattering based distributed sensors [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(7): 1232-1237.
崔何亮, 张丹, 施斌. 布里渊分布式传感的空间分辨率及标定方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(7): 1232-1237.
- [47] Yang M, Su H Z, Guo Z Y, *et al.* Feasibility study of hydraulic structures health monitoring on PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing technology [J]. China Sciencepaper, 2014, 9(5): 499-501.
杨孟, 苏怀智, 郭芝韵, 等. PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术在水工结构物健康监测中的可行性探讨[J]. 中国科技论文, 2014, 9(5): 499-501.
- [48] Wu Y H, Qu W J, Shao C J, *et al.* Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2067-2070.
吴永红, 屈文俊, 邵长江, 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2067-2070.
- [49] Zhao L H. Study on crack monitoring of box girder bridges with distributed optical fiber sensing technique[D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
赵丽华. 基于分布式光纤传感技术的大跨箱梁桥裂缝监测研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [50] Lu F. Application of distributed optical fiber sensing technology in civil engineering structure monitoring [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
陆飞. 分布式光纤传感技术在土木工程结构监测中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [51] Liu X J. Experiment study on distributed optical fiber sensor based on OTDR for crack detection [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
刘晓澌. 基于 OTDR 的分布式光纤裂缝传感器特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [52] Deng T. Numerical simulation for crack propagation process in concrete gravity dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
邓涛. 混凝土重力坝裂缝扩展过程的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [53] Wu Y. Research on structural damage location based on distributed strain monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
武扬. 基于分布式应变监测的结构损伤定位研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [54] Zhou Z, Ou J P. Study on smart FBG sensors and their applications in civil engineering [J]. Journal of Functional Materials, 2004, 35(z1): 152-156.
周智, 欧进萍. FBG 智能传感器及其在土木工程中的应用研究[J]. 功能材料, 2004, 35(z1): 152-156.
- [55] Sun M, Zhi Y, Ye F, *et al.* Full-process test of cracking damages in top of concrete of steel and concrete composite deck slab model [J]. World Bridges, 2006, 34(4): 60-63.
孙曼, 植涌, 叶丰, 等. 钢-混凝土组合桥面板模型混凝土顶裂缝损伤全过程检测[J]. 世界桥梁, 2006, 34(4): 60-63.
- [56] Wu Y H, Cai H W, Liu H W, *et al.* Study on engineering applicability of optic fiber crack sensing [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(12): 1438-1441.
吴永红, 蔡海文, 刘浩吾, 等. 裂缝光纤传感的工程应用[J]. 光电子·激光, 2007, 18(12): 1438-1441.
- [57] Mao J H, Chen J Y, Cui L, *et al.* Monitoring the corrosion process of reinforced concrete using BOTDA and FBG sensors [J]. Sensors, 2015, 15(4): 8866-8883.
- [58] Mao J H. Research on application of distributed

- optical fiber sensor in structural strain and cracking monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- 毛江鸿. 分布式光纤传感技术在结构应变及开裂监测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [59] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, *et al.* Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0700002.
- 张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0700002.
- [60] Kishida K, Li C H, Lin S, *et al.* Pulsed pre-pump method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique [R]. Technical Report of IEICE OFT, 2004, 104: 15-20.
- [61] Kishida K, Li C H, Nishiguchi K. Pulse pre-pump method for cm-order spatial resolution of BOTDA [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5855: 559-562.
- [62] Tsuda T. PPP-BOTDA method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique [R]. Technical Report of IEICE OFT, 2005, 108: 55-60.
- [63] Kishida K, Li C H. Pulse pre-pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system[C] // 1st International Symposium on Photoelectric Sensor Monitoring of Geological Engineering, China Geological Society & International Environmental Geotechnical Engineering Association, 2005: 471-477.
- [64] Koyamada Y, Sakairi Y, Takeuchi N, *et al.* Novel technique to improve spatial resolution in Brillouin optical time-domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(23): 1910-1912.
- [65] Luo Y, Yan L S, Shao L Y, *et al.* Gokay-differential pulse hybrid coding technology based on Brillouin optical time domain analysis sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806002.
- 罗源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806002.
- [66] Peng Y C, Qian H, Lu H, *et al.* New research progress on distributed optical fiber sensor technique based on BOTDA [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100005.
- 彭映成, 钱海, 鲁辉, 等. 基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100005.
- [67] Li H. Research on the key technology of pulse pre-pump BOTDA system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- 李欢. 脉冲预泵浦 BOTDA 系统关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [68] Wang H X, Zhang D, Li C S, *et al.* PPP-BOTDA based experiments on characterization and description methods for cracking of expansive soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(2): 210-217.
- 王宏宪, 张丹, 李长圣, 等. 基于 PPP-BOTDA 的膨胀土裂隙发育特征的分析与表征方法研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(2): 210-217.
- [69] Meng D, Ansari F, Feng X. Detection and monitoring of surface micro-cracks by PPP-BOTDA [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 4972-4978.
- [70] Zhou Z C, Wang X L, Su R T, *et al.* Application of distributed fiber sensing in fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080006.
- 周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080006.
- [71] Ansari F, Yuan L. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- [72] Gu J F, Ren Q W. Study on hydraulic concrete cracking criterion in smeared crack numerical model [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(6): 84-91.
- 顾嘉丰, 任青文. 水工混凝土弥散型裂缝数值模型中开裂判据的研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(6): 84-91.
- [73] Wu Y H. Opto-mechanical transformation-relationship for fiber optic grating sensing and durability encapsulation and protection [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- 吴永红. 光纤光栅应变传感光力转换关系及耐久性封装与保护[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [74] Li D S, Li H N. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(4): 435-441.
- 李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. *力学学报*, 2005, 37(4): 435-441.
- [75] Wu Y H, Shao C J, Qu W J, *et al.* Basic theoretical model and its experimental investigation for standard embedded sensing fiber Bragg grating packaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1290-1293.
- 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 传感光纤光栅标准化

- 埋入式封装的理论与实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1290-1293.
- [76] Zhang B X. Strain transmission and cracks determination of structures under various loading conditions by distributed optical fiber sensors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
张宝祥. 多种受力状态下结构分布式光纤传感应变传递及裂纹监测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [77] You C A, Zhan Y B, Liu Q Y, *et al.* Shear lag-debonding model for anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 800-806.
尤春安, 战玉宝, 刘秋媛, 等. 预应力锚索锚固段的剪滞-脱黏模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 800-806.
- [78] Ge X H. Experimental study on fracture spacing of reinforced concrete beams [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
葛小琿. 钢筋混凝土梁裂缝间距的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [79] Ansari F. Sensing issues in civil structural health monitoring[M]. Amsterdam: Springer, 2005.
- [80] Wan K T, Leung C K Y, Olson N G. Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors [J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(3): 035037.
- [81] Imai M, Feng M. Sensing optical fiber installation study for crack identification using a stimulated Brillouin-based strain sensor [J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(5): 501-509.
- [82] Ravet F, Bao X, Ozbakkaloglu T, *et al.* Signature of structure failure using asymmetric and broadening factors of Brillouin spectrum [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(2): 394-396.
- [83] Zhang H, Wu Z. Performance evaluation of BOTDR-based distributed fiber optic sensors for crack monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(2): 143-156.
- [84] Ravet F, Briffod F, Glisic B, *et al.* Submillimeter crack detection with Brillouin-based fiber-optic sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1391-1396.
- [85] Ravet F. Distributed Brillouin sensor application to structural failure detection [M] // New developments in sensing technology for structural health monitoring. Heidelberg: Springer, 2011: 93-136.
- [86] Martín-Pérez B, Deif A, Cousin B, *et al.* Strain monitoring in a reinforced concrete slab sustaining service loads by distributed Brillouin fibre optic sensors [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 37(10): 1341-1349.
- [87] Glisic B, Inaudi D. Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 11(2): 161-171.
- [88] Mao J H, Cui L, He Y, *et al.* Experimental research on monitoring concrete expansion and cracking induced by corrosion based on distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(8): 1147-1153.
毛江鸿, 崔磊, 何勇, 等. 基于分布式光纤的钢筋混凝土锈胀开裂监测试验研究 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(8): 1147-1153.
- [89] Liu D H. Study on super-long distance distributed optical fiber sensing technology and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
刘德华. 超长距离分布式光纤传感技术及其工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [90] Marsavina L, Audenaert K, de Schutter G, *et al.* Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 264-274.
- [91] Wang K, Jansen D C, Shah S P, *et al.* Permeability study of cracked concrete [J]. Cement & Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.
- [92] Jaffer S J, Hansson C M. The influence of cracks on chloride-induced corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes subjected to different loading conditions [J]. Corrosion Science, 2008, 50(12): 3343-3355.
- [93] Fu C Q, Jin N G, Jin X Y, *et al.* Development of natural cracks generating device used in concrete specimens and its application [J]. Experimental Technology and Management, 2014, 31(5): 75-79.
付传清, 金南国, 金贤玉, 等. 混凝土试件自然裂缝产生装置研制及应用 [J]. 实验技术与管理, 2014, 31(5): 75-79.
- [94] Ding R, Liu H W, Luo F L, *et al.* Technical application of fiber sensing in Wu Gorge Bridge [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, 36(6): 24-27.
丁睿, 刘浩吾, 罗凤林, 等. 光纤传感技术在巫峡长江大桥中的应用 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 24-27.

[95] Sun M, Chen J C, Chen X G, *et al.* Distributed fiber sensing and crack monitoring of basement of core of Yele dam [C] // 3rd International Forum on Opto-Electronic Sensor-Based Monitoring in Geo-

Engineering, 2010: 75-78.

孙曼, 陈建春, 陈绪高, 等. 冶勒大坝心墙基座裂缝的分布式光纤传感监测 [C] // 第三届地质(岩土)工程光电传感监测国际论坛, 2010: 75-78.