

应用光纤传感技术进行岩溶 塌陷监测预报的关键问题探讨

蒙彦,管振德

(中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林 541004)

摘 要:在总结上世纪80年代以来岩溶塌陷监测预报方法的基础上,从岩溶塌陷自身特点和光纤传感技术监测原理出发,对目前光纤传感技术应用于岩溶塌陷监测预报急需解决的关键技术问题进行了探讨分析,主要包括环境温度影响、光纤敷设和预报模型建立三个方面。光纤本身的光学特性决定环境温度变化会影响光纤的变形测量,其解决办法主要是进行温度补偿和监测数据修正处理;光纤敷设,主要是解决光纤与岩土体同步变形问题,其办法是通过室内实验确定适宜的胶结剂和最优配比;建立光纤应变与岩土体变形的关系模型是应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键,其解决办法为室内模拟实验。

关键词:岩溶塌陷;光纤传感;监测预报

中图分类号:P642.26 **文献标识码:**A

0 引 言

岩溶塌陷作为岩溶区的主要地质灾害,其发生具有极大的隐蔽性和突发性,这使得对它的监测预报难度很大。从上世纪80年代至今,人们从岩溶塌陷的形成特点出发,并结合先进的仪器设备,提出了许多行之有效的办法,较为成熟和常用的方法为地球物理探测和触发因素监测。

地球物理探测方法总体上可分为电法、重力、磁法、地震、测井五类,这五种方法在岩溶塌陷的监测预报中均有应用,其中电法中的高密度电法以其数据量大、操作简单、判别异常迅速、成本低等特点被广泛应用^[1-2];地质雷达(GPR)用于岩溶塌陷监测预报始于1987年^[3],之后随着雷达设备探测精度和深度的逐步提高,应用也越来越多,效果也越来越好^[4-5];其他方法如浅层地震^[6]、测井(CT)^[7]、微重力法^[8]也有应用,但相对较少。

触发因素监测法^[9]主要是对触发岩溶塌陷的关键因素(地下水动力条件)进行监测,其原理为分别对室内渗透实验和野外岩溶管道系统的地下水动力条

件进行监测,当野外监测的水力坡度大于试验的临界水力坡度时,即认为土体发生变形破坏,进而产生岩溶塌陷。

最近几年,随着科学技术的发展,光纤传感这一高新技术以其精度高、定位准确,可实现分布式监测等特点已被应用到滑坡等地质灾害的监测预报上来,并取得了突破性的进展^[10]。作为监测难度更大的岩溶塌陷是否也能应用这一技术,解决空间定位和时间预报问题呢?蒋小珍研究员通过大型物理模拟实验,研究了光纤传感技术在岩溶塌陷监测中的应用^[11]。结果显示光纤的应变峰值与土层的扰动、掏空对应,可判断为塌陷发生的位置;不同层位的光纤应变变化,可判断土层扰动带垂直方向的发展过程;光纤时间序列的变化趋势,可判断土层扰动带水平方向的发展方向。由此可见,光纤传感技术监测塌陷的发生是可行的,但是,由于光纤传感技术的本身原理和岩溶塌陷的复杂性,使得这项技术应用于岩溶塌陷监测预报还存在着许多关键技术问题需要完善和解决。本

基金项目:中国地质科学院岩溶地质研究所所长基金项目(2009017、2008012、2010009)

第一作者简介:蒙彦,(1978-),男,硕士,助理研究员,主要从事岩溶工程与地质灾害研究工作。E-mail:sinkhole@163.com。

收稿日期:2011-03-07

文结合室内实验,从光纤监测岩溶塌陷过程中的环境温度干扰、光纤与岩土体同步变形、预测模型三个方面对目前急需解决的问题进行了探讨,希望能提高光纤传感技术监测预报岩溶塌陷的准度和精度。

1 监测原理上存在的问题及解决办法

大量的理论和实验研究证明^[12-15],光纤中布里渊散射信号的频移和功率与光纤所处环境和所承受的应变在一定条件下呈线性变化关系:

$$(1) \text{ 频移与温度、应变 } \Delta V_B = C_{VT} \Delta T + C_{\epsilon} \Delta \epsilon$$

$$(2) \text{ 功率与温度、应变 } 100 \Delta P_B / P_B(T, \epsilon) = C_{PT} \Delta T + C_R \Delta \epsilon$$

式中: ΔV_B 为布里渊频移变化量; $\Delta \epsilon$ 为应变的变化量; ΔT 为温度变化量; C_{VT} 为布里渊频移温度系数; C_{ϵ} 为布里渊频移应变系数; ΔP_B 为布里渊功率变化量; C_{PT} 为布里渊功率温度系数; C_R 为布里渊功率应变系数。

通过式(1)、(2)式可以看出,在已知温度和应变系数的情况下,测定布里渊散射信号的频移和功率,就可以得到预先埋设于土体中光纤的温度和应变信息,进而实现对岩溶塌陷的监测预报。但是,对于岩溶塌陷监测预报而言,应变信息是至关重要的,而温度信息则是干扰因素,因此必须予以剔除。目前对于温度影响的处理方式主要有两种:一是进行温度补偿^[16],使得式(1)中的 $C_{VT} \Delta T$ 项和式(2)中的 $C_{PT} \Delta T$ 变为常数或与应变具有某种线性关系;目前,学者们对光纤的温度补偿问题进行了很多探索,以解决温度影响这一问题,例如使用布拉格光纤光栅对^[17];采用长周期光纤光栅与布拉格光纤光栅构成复合光纤光栅对^[18];光纤光栅与法一珀腔联用^[19],利用掺铒光纤光栅^[20];还有一种思路就是采用特殊设计的光纤测试系统^[21]使传感器对某个参量不敏感,而对另外的参量却又敏感。

另外一种消除温度影响的方式是通过其他辅助监测手段获取光纤监测的温度数据(ΔT),然后通过数学处理等方式将数据项中的温度信息剔除,得到实际的光纤应变信息。比较常用的方法为光纤光栅与独立的温度传感器联用^[22]。应用此种方法首先要对埋设的光纤进行温度实验标定,以获取光纤的布里渊频移温度系数 C_{VT} 。图 1 为通过室内实验获取的 GFRP 铠装光缆的应变与温度关系图,测试段光缆用混凝土封装,通过预留孔测试光缆温度,并同时应变测试,获取的布里渊频移温度系数 C_{VT} 近似为 $0.0238 \text{ } \epsilon / ^\circ\text{C}$ 。从图中可以看出,温度对光纤应变的

影响并非绝对的线性关系,而且在实际工程的埋设过程中环境介质温度更是千变万化,因此要想完全消除温度对光纤应变的影响必须进行大量的测试模拟试验,这将是一个复杂而漫长的过程。

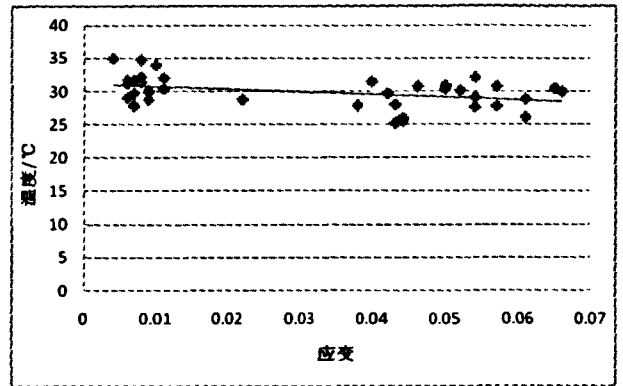


图 1 GFRP 砼胶结铠装光缆应变与温度关系图

Fig. 1 Graph showing the relationship between sheath fiber cable strain and temperature

2 现场敷设存在的问题及解决办法

光纤传感技术最显著的优点就是可以准确地测出光纤沿线任一点上的应力、温度、振动和损伤等信息,无须构成回路。如果将光纤纵横交错铺设成网状即可构成具备一定规模的监测网,实现对监测对象的全方位监测。因此,在实际监测过程中,敷设方式就显得尤为重要,首先要保证光纤与岩土体必须保持同步变形,如果光纤因土体变形破坏而发生滑动,则会影响到塌陷位置的判定。其次,光纤埋设的深度和方式也是影响岩溶塌陷预报精度的主要因素。

2.1 光纤与岩土体同步变形问题

光纤传感技术监测预报岩溶塌陷的核心是光纤对土体的变形响应,这就要求光纤必须与土体同步变形,否则就会出现误差或误判。因此,解决这个问题就需要特殊的敷设方式,使得光纤与岩土体同步变形,进而建立光纤应变与岩土体应变的对应关系。同时还需考虑现场施工条件。因此必须通过室内试验,选取适宜的粘合剂来解决这一问题。

根据目前光纤传感技术监测预报岩溶塌陷和其他地质灾害的经验,粘合剂可选为:砼、粘土和化学试剂三类。

选取砼胶结,关键是做好配比,硬度太大,则与土体相差太远,且损害光纤,硬度过低则无法实现同步变形的目的。砼的配比,可根据监测现场的地质条件,进行室内配比研究,确定适合当地监测的适宜配比。砼胶结具有施工条件方便、成本较低等特点,但

是也存在一定的缺点,如砼强度过高,则会形成梁,对塌陷有一定的减缓作用,往往会降低塌陷的预测精度,造成预测时间推后。通过室内实验进行了不同配比的水泥砂浆封装铠装光缆折断测试,其水、水泥、砂浆配比分别为1:2:4和1:2:6。监测光纤长70 m,水泥砂浆封装段位于光纤的60 m~61.3 m处,长

度1.3 m。实验显示,配比1:2:4的试件折断位置在60.2 m处,光纤断点在61.3 m处,光纤测试的断点位置与试件折断位置偏差为1.1 m(图2);配比1:2:6的试件折断位置在59.2 m处,光纤断点在58.6 m处,光纤测试的断点位置与试件折断位置偏差为0.6 m(图3)。

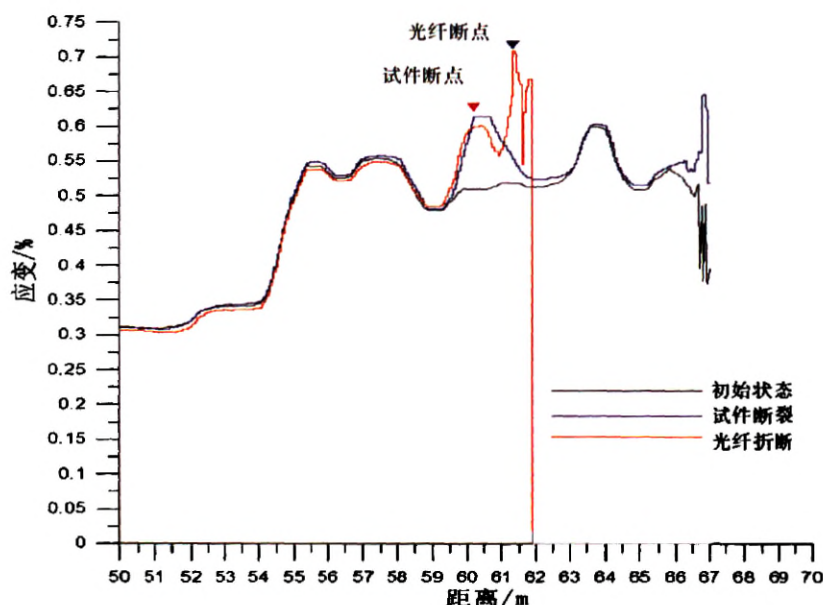


图2 砼胶结铠装光缆测试断点与实际断点位置对比图(配比1:2:4)

Fig. 2 Figure for comparison of the breakpoint position in fiber cable test and the breakpoint position in practice(1:2:4 in proportioning)

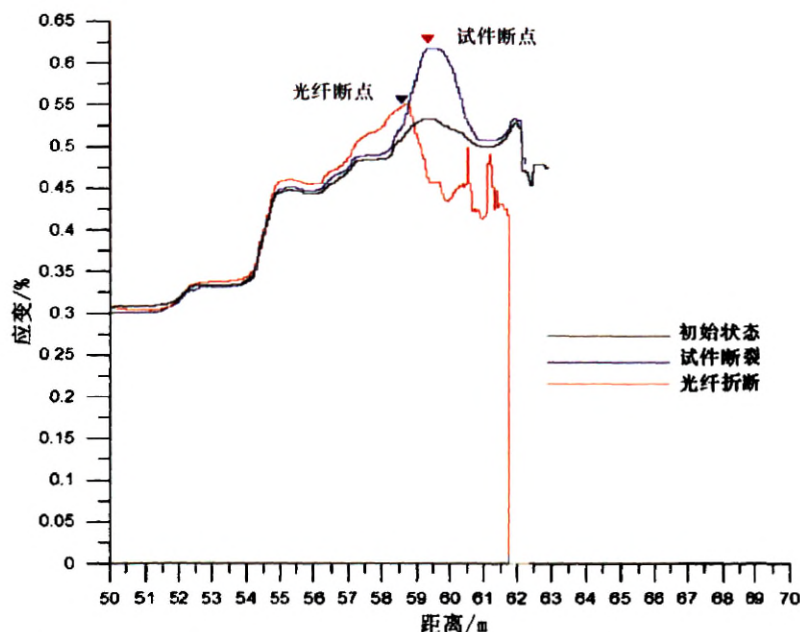


图3 砼胶结铠装光缆测试断点与实际断点位置对比图(配比1:2:6)

Fig. 3 Figure for comparison of the breakpoint position in fiber cable test and the breakpoint position in practice(1:2:6 in proportioning)

从实验结果可以看出,两次实验中光纤测试的断点位置与试件实际折断位置均存在偏差,这主要是由于光纤未能和砧保持同步变形,在砧折断的过程中光纤发生滑动造成的;其偏差大小受水泥砂浆配比控制。试验中 1:2:4 配比的偏差较大,光纤测试断点位置滞后于试件断点位置,说明光纤在试件中滑动较大;1:2:6 配比的偏差相对较小,光纤测试断点位置超前于试件断点位置,说明光纤在试件中滑动较小,其偏差可能是由于光纤测试仪器本身的系统误差造成的。由此可见,1:2:6 配比在保持同步变形方面要优于 1:2:4 配比。

选取粘土胶结,关键在于粘土的制作工艺,选用的粘土应进行一系列的室内试验研究。制作的粘土

应尽量接近原土。为了使光纤与粘土较好的融合,需将粘土按一定的含水率制成小球,待光纤铺好后,适当增加含水率,并进行夯实处理,使光纤与粘土较好的融合。粘土胶结具有取材方便、成本低廉、便于操作等优点,是光纤胶结的首选,但是在铺设过程中存在着铺设应变消除与残余应变等问题。图 4 是室内进行的粘土垫层对光纤变形响应的测试实验。实验时设置光纤长度 50 m,粘土层厚 0.5 m,在光纤的 30 m 位置对粘土层进行击实加载,并记录锤击数和粘土层沉降距离,实验完成后,测试光纤的最大断点位置为 30.3 m 处,与锤击加载位置偏差为 0.3 m,其结果明显优于砧胶结。

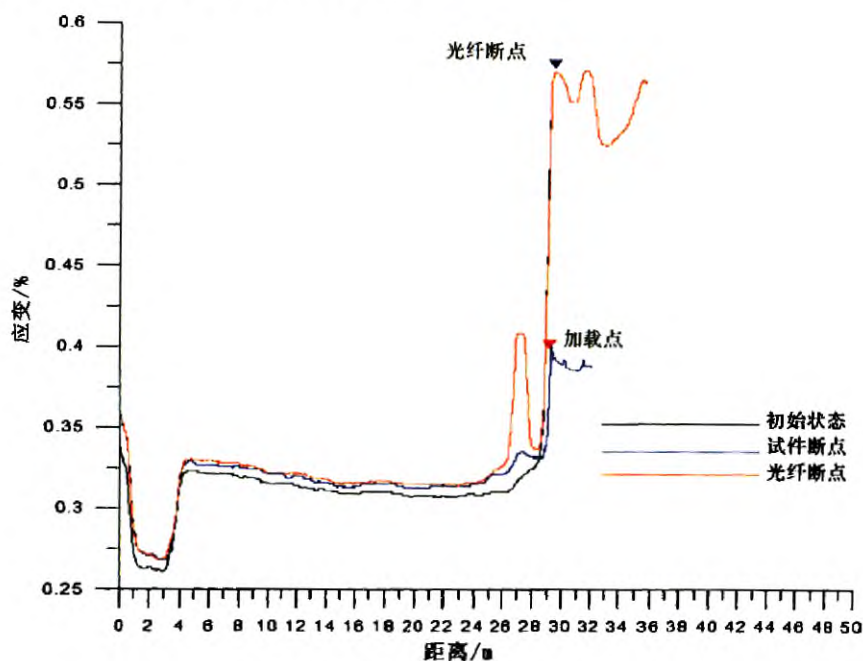


图 4 粘土垫层对光纤的应变影响曲线

Fig. 4 The strain curve of fiber cable in clay cushion

适用于光纤胶结的化学试剂主要为环氧树脂和泡沫充填剂,这种胶结方式成本较前两种稍高,且在施工要求上有一定的难度,如果监测场地较小或者是室内试验研究则可以考虑。

2.2 敷设方式和深度

光纤的敷设方式和深度主要取决于监测精度和监测场地的地质条件,首先需对监测场地的岩溶塌陷影响因素及已发生岩溶塌陷的特征进行调查,然后制定铺设方案。对于土层结构复杂或土层厚度较大的场地,一般采用多层铺设。根据监测精度,在同一层可选用栅格敷设方式,格网间距一般控制在 1 m 以内,各层之间的格网应当相互交叉。

3 建模存在的问题及解决办法

光纤应变与岩土体应变的关系模型是应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键,其核心是确定岩溶塌陷发生的光纤应变阈值。目前效果较好的方法是室内大型岩溶塌陷光纤模型试验。通过试验,可以确定在不同受力方式、受力大小情况下光纤的应变变化,进而建立光纤应变与岩土体变形大小的关系模型。但是由于光纤传感技术应用于岩溶塌陷监测刚刚起步,且岩溶塌陷的发生十分复杂和隐蔽,这使得监测模型的建立还存在着许多问题需要解决。除了解决光纤监测原理本身和敷设等影响建模的因素

外,光纤应变与岩土体变形的对应关系就显得尤为重要。图5为2006年蒋小珍研究员通过室内模型试验获得的抽水塌陷光纤应变变化曲线,图中101#曲线为抽水前光纤的应变曲线(初始状态),102#—108#曲线为抽水塌陷发育过程中光纤的应变曲线,113#曲线为塌陷发生时的光纤应变曲线。从图中可以看出,塌陷发生时113#光纤应变曲线在28.65 m和29.75 m两个位置出现峰值(应变为0.5和0.6),与模型实际塌陷位置(图6)对应较好。

从图5中的应变峰值曲线可以看出,塌陷发育的

不同时段均出现较好的应变峰值,如果能获得应变峰值对应的岩土体变形值,则可以建立相应的关系模型,进而对岩溶塌陷实行监测预报。但是这项工作是非常复杂和困难的,岩土体结构性质和地下水动力条件的不同,使得塌陷发生时的光纤应变值(阈值)并不相同,本次试验中两次塌陷发生时所对应的最大应变值(阈值)不同也证明了这一点。要想解决这一问题,必须进行大量的室内模拟实验来获取拟监测区域发生岩溶塌陷时的光纤应变阈值范围。

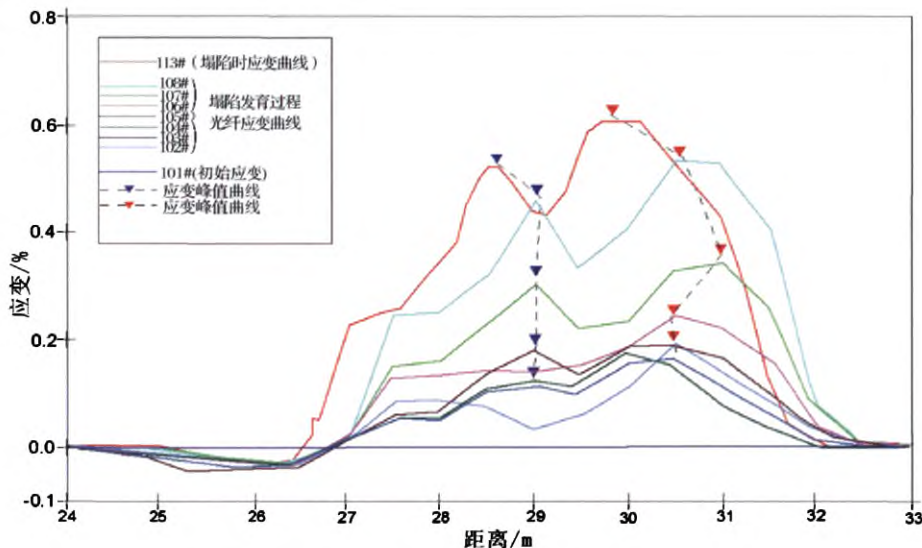


图5 岩溶塌陷过程光纤应变变化曲线(据蒋小珍,2006)

Fig.5 The strain curve of fiber cable in sinkhole



图6 光纤模型试验中形成的岩溶塌陷

Fig.6 Sinkhole formed in the fiber cable monitoring test

4 结 语

光纤传感技术是最近发展起来的一项高新技术,其分布性、高精度、定位准确等特点对于岩溶塌陷的

监测预报非常适用,但是因为其刚被引用到岩溶塌陷监测预报上来,再加上其本身监测原理和岩溶塌陷发生的隐蔽性、突发性等特点,使得这项技术在实际应用过程中还存在着许多急需解决的关键性问题,主要为温度影响、现场敷设和模型建立。作者根据相关资料和自己的研究经验,对这些急需解决的关键问题进行了分析讨论,并提出了一些解决办法,希望能对该技术在岩溶塌陷监测预报领域的研究和应用起到抛砖引玉作用。

参考文献

- [1] 王兴泰. 高密度电阻率法及其应用技术[J]. 长春地质学院学报, 1991, 21(3): 341—348.
- [2] 喻立平, 韦吉益, 卢呈杰. 岩溶区不同土洞探测方法的对比研究——以桂阳高速公路 K23+100~K23+190 路段为例[J]. 中国岩溶, 2008, 27(3): 278—282.
- [3] Benson R C. Assessment and long term monitoring of Localized subsidence using ground penetrating radar 1987[M]//Proceedings of The Second Multidisciplinary conference on sinkholes and

- the Environmental Impacts of Karst, Orlando, Florida, 1987.
- [4] Awni T. Batayneh, Abdelruhman A. Abueladas, Khaled A. Moumani. Use of ground-penetrating radar for assessment of potential sinkhole conditions; an example from Ghoral Haditha area, Jordan[J]. *Environmental Geology*, 2001, 41, (8): 977—983.
- [5] Rana A Al-Fares. The Utility of Synthetic Aperture Radar Interferometry in Monitoring Sinkhole Subsidence[C]//Geotechnical Special Publication No. 144. ASCE, 2005: 541—547.
- [6] 王俊茹, 陈烈南. 应用浅层地震探测岩溶塌陷的技术研究[J]. *物探与化探*, 1997, 21(04): 289—292.
- [7] 雷旭友, 程凯. 电磁波 CT 在重庆至怀化铁路岩溶塌陷病害抢险勘探中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2009, 6(5): 561—565.
- [8] 陈贻祥, 蔡国斌, 喻立平. 重力垂直梯度测量技术在隐伏岩溶探测中的应用[J]. *中国岩溶*, 1992, 11(04): 319—331.
- [9] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜, 等. 桂林柘木岩溶塌陷监测预报[C]//岩溶地区水、工、环及石漠化问题学术研讨会论文集[C]. 2003.
- [10] 王宝军, 李科, 施斌, 等. 边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(3): 325—332.
- [11] 蒋小珍, 雷明堂, 陈渊, 等. 岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, (6): 75—78.
- [12] Mendez A. Morse, T F. Mendez F. Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures[M]. 1989.
- [13] 马水山, 王志旺, 李端有. 光纤传感器及其在岩土工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(z1): 310—314.
- [14] 施斌, 丁勇, 徐洪钟, 等. 分布式光纤应变测量技术在滑坡早期预警中的应用[C]//第七届全国工程地质大会论文集. 2004.
- [15] 国兵, 隋青美. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的发展[J]. *信息技术与信息化*, 2009, (3): 56—58.
- [16] 黄永林, 李杰, 开桂云, 等. 光纤光栅的温度补偿[J]. *光学学报*, 2003, 23(6): 677—678.
- [17] Spirin V V, Shlyagin M G, Miridonov S V, et al. Temperature insensitive strain measurement using differential double Bragg grating technique [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33: 43—46.
- [18] 王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. *光学学报*, 2002, 22 (7): 867—869.
- [19] Liu T, Fernando G F, Zhang Z Y, et al. Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 80: 208—215.
- [20] 孙伟民, 姜福强, 刘志海, 等. 利用掺铒光纤光栅实现应变测试中的温度补偿[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(06): 719—722.
- [21] 孙安, 乔学光, 贾振安. 一种新颖的温度补偿光纤光栅应力传感测量技术[J]. *光学技术*, 2003, 29 (5): 534—536.
- [22] Nellen P M, Mauronp, Frank A, et al. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications [J]. *Sensors and Actuators*, 2003, 103(3): 364—376.
- [23] 唐瑞良, 祁兵, 陈常洪, 等. 一种基于小波变换的光纤故障诊断算法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(02): 101—105.

A discussion on the key technical problem in monitoring and predicting sinkhole with optical fiber sensing (BOTDR) technique

MENG Yan, GUAN Zhen-de

(Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The key technical problem in monitoring and predicting of the sinkhole with optical fiber sensing technology (BOTDR) are summarized and analyzed based on the features of the sinkhole and the principle of BOTDR. The study mainly includes temperature effect, optical fiber laying and model building. The optical fiber deformation by temperature effect can be eliminated by compensating and amendments of the additional temperature sensor. The deform in same pace of optical and soil can be solved by the laying way, and the jointing compound and the proportion are the key factors. The core of monitoring and predicting of the sinkhole by optical fiber sensing technique is to build a strain relation model between optical and soil, it can be achieved by the simulation experiment in the lab.

Key words: sinkhole; BOTDR; monitoring and predicting