

基于 OTDR 的矿井渗水监测技术

朱宗玖, 李仁浩

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 煤矿开采过程中的水灾害往往带来各种巨大损失, 而对矿井渗水的监测一直比较困难。基于光纤微弯损耗原理和光时域反射(OTDR)技术, 提出了一种针对矿井渗水的检测定位方法。结合膨胀土防水毯(GCL)遇水膨胀的特性, 井壁渗水区的 GCL 膨胀并传导形变至与之紧贴的光纤, 通过光纤微弯损耗原理获取对渗水情况的检测结果, 同时结合 OTDR 原理, 可对出现弯曲损耗的形变点即渗水点进行定位。实验证明渗水位置与测量结果基本吻合, 该方法具有较好的定位效果。

关键词: 矿井渗水; 渗水定位; 微弯损耗; 光时域反射

中图分类号: TN818 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)01-0020-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Monitoring technology of mine seepage based on OTDR

ZHU Zongjiu, LI Renhao

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Water disasters in coal mining often bring a variety of huge losses, but it is difficult to monitor water seepage in coal mines. Based on the principle of optical fiber microbending loss and the optical time domain reflection (OTDR) technology, this paper presents a method of detecting and locating mine water seepage. Combined with the water expansion characteristics of expansive soil waterproof mat (GCL), GCL in the water seepage zone expands and conducts deformation to the fiber tightly attached to the outer diameter. The detection results of water seepage can be obtained through the principle of optical fiber micro-bending loss. At the same time, combining with the principle of OTDR, the deformation point of bending loss, namely the water seepage point, can be positioned. The experimental shows that the seepage location is basically consistent with the measured results and the method has a good location effect.

Key words: mine seepage; seepage location; microbending loss; optical time domain reflection

0 引言

近年来, 煤矿中的水灾害已经上升为当前煤矿事故多发的一大因素。突水、透水等水灾害造成巨大生命财产损失的案例日益增多^[1,2]。如何在水灾害发生的初期通过高精度的检测手段在前期轻度渗水时进行及时有效的监测, 具有重要意义。

分布式光纤传感器作为一种具有抗电磁干扰、绝缘、防腐蚀、响应快、灵敏度高和可实现分布式检测等

收稿日期: 2019-07-07。

基金项目: 安徽省政府国家标准奖励基金光纤器件(1C067)资助。

作者简介: 朱宗玖(1963-), 男, 安徽淮南人, 博士, 安徽理工大学电气与信息工程学院教授, 通信工程系主任, 硕士生导师。主要研究方向为光纤通信、光纤传感器、光纤激光器和电磁场理论。主持参与多项国家自然科学基金项目, 入选中国科学院“百人计划”基金项目。



优点的检测装置, 其发展受到普遍关注^[3-5]。膨胀土防水毯(GCL)是一种防渗漏的土木合成材料, 由于其遇水高膨胀性, 常用于各种防渗工程^[6,7]。本文基于光时域反射(OTDR)技术, 将 GCL 的这一特性与光纤微弯损耗检测相结合, 提出一种检测矿井渗水与否并有效定位泄露位置的方法。

1 检测原理

本文设计的煤矿矿井渗水监测剖面图实验结构如图 1 所示, 在 GCL 层之间放置检测光纤。当井壁渗水时, GCL 与水反应体积膨胀。检测光纤受到 GCL 形变压迫, 其中的能量就会因为微弯损耗而产生光能损耗。即可通过检测光能衰减来判断铺设区域是否有渗水以及渗水区域的大小。根据 OTDR 原理, 只要直接监测整根光纤的能量损耗, 就可以清楚地得到产生后

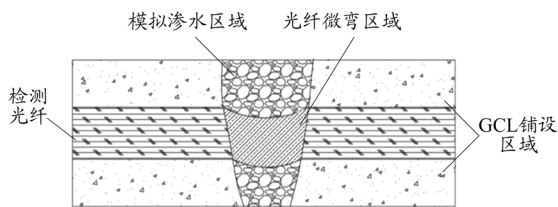


图1 模拟矿井渗水监测剖面图

向瑞利散射的各点^[8-10],并根据时间差计算出各点的位置。结合光纤的微弯损耗、OTDR与GCL遇水膨胀的特性,即可实现对监测区域的渗水检测,以及对渗水点建立一维坐标并进行定位。

2 渗漏模型的建立

2.1 检测测量系统

OTDR 设计系统结构图如图2所示。系统设计中,首先运用GCL的材料特性使渗漏点产生微小形变,然后通过OTDR探测技术来检测铺设在GCL外层的光纤产生微弯损耗的位置。工作时,激光器向光纤发射激光,待确认GCL浸水膨胀后,传感器收集各个形变点导致的后向瑞利散射光,进入检测电路,通过放大器放大整形、模/数(A/D)转换以及采样,就能够得到检测的结果曲线。

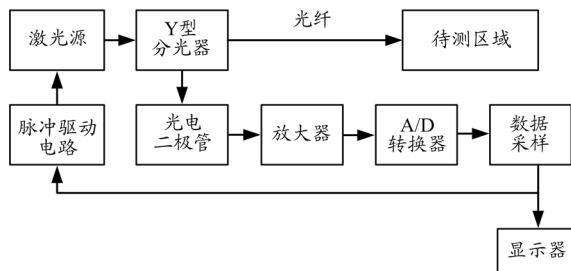


图2 OTDR 设计系统结构图

OTDR 测量的光纤微弯损耗分布图除去前端盲区和噪声电平,中段稳定下降部分为系统主要检测的衰减范围。通过OTDR检测所获得的检测曲线中,当仪器监测到能量衰减,即GCL膨胀后导致传感光纤形变产生的事件点,则在平稳曲线中显示“凸起”,该点即为渗漏点^[11]。如果是多处渗漏,则会有多处这种“凸起部分”;如果是大面积渗水,则这种突出部的宽度增加,甚至覆盖全程,且衰减大幅度增加。

2.2 确定合适的检测参数

对于OTDR来说,影响其测试结果的主要有3个方面的因素:脉冲宽度、测试波长和采样时间。分析这3个因素,确定最适合检测的参数范围。

◆脉冲宽度的影响。脉冲宽度决定测试长度。减小脉冲宽度的作用在于可以把相近的时间点区分开来^[12,13]。但是,随着脉冲宽度的减小,其动态范围不断降低,噪声的影响逐渐变大,影响光纤的最大可测量长度。本实验中所需要的检测范围不是很大,所以采用窄脉宽(80 ns的脉宽进行测试)来使定位更加精准。

◆测试波长。波长和功率呈反比,波长越长,光纤的损耗功率也就越小,相对应的敏感度就越高^[14]。然而波长过长,瑞利散射的能量会增大。而当瑞利散射的能量增大到峰值以后会下降,产生红外线的衰减现象,对整个实验产生影响。为了更好地检测光纤的弯曲损耗,本文采用1310 nm与1550 nm同时进行实验检测,既能保证有着较好的瑞利散射能量值,又能通过2次检测值作对照,去除误测点,确保了实验的准确性。

◆采样时间。对实验数据进行合理的采集能够在一定程度上降低一些随机事件产生的影响^[15]。本实验选择的平均采样时间为1 min。

2.3 实验方法

由于光纤本身比较纤细,且矿井渗水环境难以实现。因此,本文对实验环境进行了相应的模拟。

首先,由于普通通信用的商用单模光纤的结构为涂覆层、包层和纤芯3层结构。涂覆层在水中容易老化,因此本实验采用紧包结构的光纤,即在上述结构光纤外再紧包一层耐腐蚀的塑料,这样能更好地传递侧面遇水膨胀土产生的形变压力。

其次,检测光纤应比测试需要的光纤略长,以防止光纤前端的盲区效应影响实验结果。这里光纤总长度取 $L=1$ km。为了防止矿井壁最外层的因素导致光纤弯曲而影响实验结果,实验在矿井壁最外层铺设平整的水泥面。在水泥层的内侧依次加上细沙、高密度聚乙烯渗透膜(防止水泄露到外面)、GCL、检测光纤、GCL、高密度聚乙烯渗透膜、细沙和水泥层。在靠近检测光纤的内层高密度聚乙烯渗透膜和同位置的上层水泥上面随机制造6个洞,模拟渗漏的情况。

最后,整体装置铺设完毕后,在最内层的水泥上浇水。由于大面积渗水情况比较复杂,且本实验主要针对局部渗水的防范与监测,故这里仅使用正常水进行小面积的点渗漏状态进行模拟。等待水通过内层水泥和内层的高密度聚乙烯膜并且充分浸染GCL后,使其发生膨胀形变,之后再利用OTDR进行数据的监测和收集。

3 实验结果与理论分析

OTDR 测试系统的光纤状态情况如图 3 所示。可以看出,一共有 6 处出现了光能变化的记录点,此时的 6 个记录点的位置 X_n 和实验前记录的模拟渗漏的位置 Y_n 出入不大,能够断定出现变化的记录点就是由于 GCL 遇水膨胀导致光纤发生弯曲的位置。具体数据如表 1 所示。

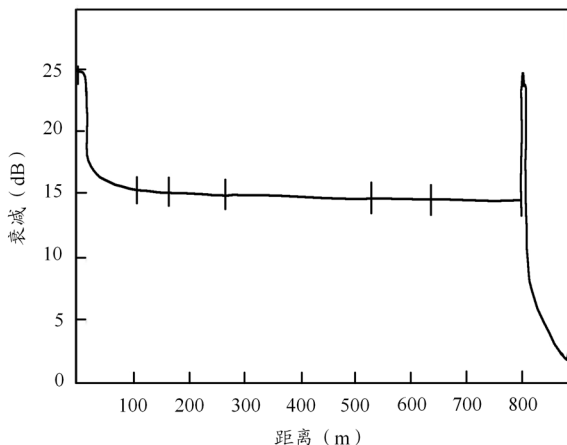


图 3 OTDR 测试光纤状态情况

表 1 OTDR 测试结果

编号	$X_n(\text{m})$	$Y_n(\text{m})$	$Z_n(\text{m})$	$T_n(\%)$
1	103.4	104	0.6	0.06
2	163.7	164.4	0.7	0.07
3	271.7	272.5	0.8	0.08
4	523.6	524	0.4	0.04
5	619.8	620.4	0.6	0.06
6	793.8	794.5	0.7	0.07

由表 1 可得所测结果与实际渗漏点大致相同,检测装置能较好地检测到由于渗漏导致的形变位置。由于光纤铺设过程中存在部分弯曲产生的损耗,同时噪音也会对实验结果产生影响,导致数据不能完全吻合。

对数据归总后进行误差计算,实际绝对误差 Z_n 为:

$$Z_n = |X_n - Y_n| \quad (1)$$

整套系统定位渗水点的引用误差 T_n 为:

$$T_n = \frac{Z_n}{L} \times 100\% \quad (2)$$

实验模拟产生的 6 个洞中,最大的定位误差是

0.8 m,最小的定位误差是 0.4 m。由式(2)能够计算出系统定位的最大误差为 0.08%。

4 结束语

本文利用 GCL 能够在煤矿井壁渗水时与水结合发生膨胀并且压迫光纤的现象,建立了基于光纤弯曲损耗的渗漏检测模型。根据光纤功率的损耗情况即可判断光纤是否发生微弯形变,进而利用 OTDR 技术实现激光束功率损耗点的一维空间定位。本研究具有测量距离较长、范围较大、铺设成本低和光纤耐腐蚀抗干扰能力强等优点,可以较好地对矿井环境进行监测和数据收集。同时,本系统的最大误差为 0.08%,定位精度较高,且整套系统实时性好,对煤矿矿井水灾事故的防范与监测工作有较好的预警作用,能有效减少矿井水灾害带来的人员生命财产损失。

参考文献:

- [1] 张金辉. 煤矿防治水工作中勘探方法的途径研究[J]. 中国设备工程, 2018, 18:212-213.
- [2] 孙丙山,张跃,朱洪利,等. 站街煤矿立井井筒施工综合防治水技术[J]. 煤炭技术, 2014, 33(7):248-250.
- [3] 许海燕. 分布式光纤振动传感器及其定位技术研究[D]. 上海:复旦大学, 2011.
- [4] 徐灿. 分布式光纤测温技术在煤矿中的应用 [D]. 山东:山东大学, 2016.
- [5] 罗勇,李春峰,邢皓枫. 基于分布式光纤测试技术的大直径嵌岩桩承载性能研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5):1406-1412.
- [6] 王宝,董兴玲. 利用膨润土的膨胀和稠度特性对 GCL 渗透系数进行预测的试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5):66-71.
- [7] 谢世平,何顺辉,张健. GCL 常见问题分析 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(2):8-12.
- [8] 陈亚宇,能昌信,董路,等. 基于边界定位法的填埋场渗漏检测[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3):346-351.
- [9] 韩永温,杨丽萍,张青,等. 光纤测温技术在渗漏监测中的试验研究[J]. 勘察科学技术, 2012(3):13-16.
- [10] 邓文华. 光纤微弯压力传感器的检测系统设计[D]. 南昌:南昌大学, 2011.
- [11] 刘长华,徐亚军. 基于 OTDR 法的分布式光纤应力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2005(6):3-5.
- [12] 徐亚军,刘长华. 基于光纤微弯的分布式光纤应力传感器[J]. 光电技术应用, 2003, 24(6):436-438.
- [13] KERSEY A D, DAVIS M A. Fiber grating- sensors [J]. Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1442-1462.
- [14] 张旭革,张凯,王顺. 布里渊 OTDR 计中电光调制器调制特性与控制[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1):15-23.
- [15] 游善红,郝素君,殷宗敏,等. 单模光纤中弯曲损耗的测试与分析[J]. 光子学报, 2003, 32(4):409-411.