

探地雷达在煤巷掘进中超前探测试验研究

梁庆华¹ 吴燕清¹ 宋 劲¹ 黄 晖² 朱昌淮² 孙兴平²

(1. 中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039; 2. 淮南矿业集团有限责任公司, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了准确分析煤矿掘进巷道探地雷达探测地质异常问题, 采用井下探测试验跟踪方法, 在淮南矿业集团顾北煤矿和顾桥煤矿对探地雷达在井下煤巷超前探测的效果进行了跟踪试验 52 次, 预测预报距离 2 390 m, 并经过掘进验证, 研究了探地雷达在煤矿井下的探测深度、回波异常特征以及探测异常的准确率。研究结果表明: 探地雷达在煤层掘进巷道的探测距离达到 50 m, 探测异常回波特征主要采用波形明显的回波异常法, 得到了探测异常准确率为 87.5%, 较好地指导了煤矿安全生产。

关键词: 煤巷掘进工作面; 探地雷达; 超前探测

中图分类号: P631.325

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)05-0091-04

Experimental Study on Advanced Detection in Coal Seam Driving Roadway by Ground Penetrating Radar

LIANG Qing-hua¹, WU Yan-qing¹, SONG Jin¹, HUANG Hui², ZHU Chang-huai², SUN Xing-ping²

(1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039, China;

2. Huainan Coal Mining Group Ltd., Huainan 232001, China)

Abstract: In order to accurately analyze geological anomaly detection question in coal roadway by Ground Penetrating Radar (GPR) using mine detection test tracking method, the authors conducted out 52 times tracking test for the effect of advanced detection of the ground penetrating radar in Gubei Mine and Guqiao Mine of Huainan Coal Mining Group. Prediction distance was 2 390 m. This was validated by excavation. The authors studied the exploration depth, echo anomalies and anomaly detection accuracy of GPR in the coal mine. The results showed that GPR in the detection of roadway distance was to reach 50 m and the anomaly method was mainly applied to detect echo anomaly characteristics. The accuracy of abnormality detection was 87.5%. This method was better to guide the safety production of coal mine.

Key words: driving face of coal seam roadway; ground penetrating radar; advanced detection

0 引言

探地雷达技术是集地质、高频电子、计算机、电磁场理论、信息处理等学科为一体的新技术, 具有理论成熟、操作简单、分辨率高、解释成果直观、无需辅助工程等特点和优点^[1]。近年来, 随着高频微电子技术、计算机数据处理水平和探地雷达工作方法的不断提高, 探地雷达技术得到了长足的发展^[2]。但是该技术在煤矿井下探测各种异常构造方面还处于试验阶段^[3-9], 主要是井下探地雷达回波分析困难、探测距离较短以及探测异常的准确率不确定等问

题。目前, 探地雷达对于隧道和公路监测方面的应用研究较多, 关于煤矿井下探地雷达的研究较少。文献[2]研究了探地雷达在煤矿井下探测瓦斯地质小构造问题; 文献[3-10]研究了探地雷达探测南方煤矿探测岩溶突水通道中以及老窑问题; 文献[11]研究了探地雷达探测矿井工作面前方 40 m 范围内精细地质构造的解释方法谱剖面分析技术; 文献[12]研究了应用探地雷达探测煤矿断层、空洞以及围岩松动圈等实际案例及分析; 此外, 文献[13-15]也进行了井下探地雷达的研究。以上研究均未系统地研究探地雷达的异常特征以及准确问题, 因

收稿日期: 2013-12-05; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.05.025

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05041-003-005); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B01)

作者简介: 梁庆华(1980—), 男, 山东日照人, 博士。Tel: 023-68683157, E-mail: linqing1110@sina.com

引用格式: 梁庆华, 吴燕清, 宋 劲, 等. 探地雷达在煤巷掘进中超前探测试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(5): 91-94.

LIANG Qing-hua, WU Yan-qing, SONG Jin, et al. Experimental Study on Advanced Detection in Coal Seam Driving Roadway by Ground Penetrating Radar[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(5): 91-94.

此,研究探地雷达在煤矿井下的探测深度、回波异常特征以及探测异常的准确率具有一定的实际意义和应用价值。

1 探地雷达基本原理

探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称 GPR)方法是利用一种频率介于 1~1 000 MHz 的无线电波来确定地下介质分布的一种无损探测方法^[9]。如图 1 所示,通过发射天线 T 向地下发射高频电磁波,接收天线 R 接收反射回地面的电磁波,电磁波在地下介质中传播时遇到存在电性差异的分界面时发生反射,根据接收到的电磁波的波形、振幅强度和时间的变化等特征推断地下介质的空间位置、结构、形态和埋深^[16]。

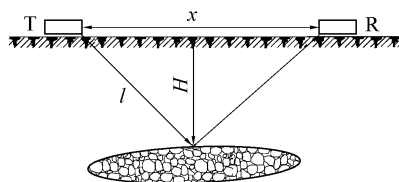


图 1 探地雷达原理示意

探地雷达探测目标体的距离 l 定位可通过式

(1) 计算^[16]:

$$l = vt/2 \quad (1)$$

式中: v 为雷达波在介质中的速度; t 为雷达波在介质中的双程走时。

反射界面深度 H 计算公式近似为^[16]:

$$H = \sqrt{v^2 t^2 - x^2}/2 \quad (2)$$

式中 x 为发射天线和接收天线的间距。

对于介质为煤层而言,雷达波在煤层中的速度 v 可以根据下式求出:

$$v = c/\sqrt{\varepsilon'} \quad (3)$$

其中: c 为光在真空中的传播速度,取 3×10^8 m/s; ε' 为雷达波在煤层中传播的相对介电常数。煤的相对介电常数变化不大,从褐煤到无烟煤为 2.3~3.6^[17],利用式(3)可以推导出 v 为 0.15~0.19 m/ns。通常情况下,一般取 v 为 0.18 m/ns,也可通过其他方法进行测定^[18],淮南矿区实测波速 v 为 0.15 m/ns。根据电磁场理论,无界均匀有耗介质中的电磁波的电场 $E(r)$ 表达式为^[16]:

$$E(r) = E_0 e^{-\alpha r} e^{-j\beta r} \quad (4)$$

式中 r 为电磁波的传播距离, m; E_0 为电场初始信号 V/m; α 为衰减系数 Np/m; j 为向量; β 为相移系数 rad/m。雷达采集信号即雷达接收反射回来的电

场信号 $E(r)$, V/m,煤和非煤异常体之间存在的介电常数差异为雷达探测煤层异常体提供了可靠的地球物理依据。在超前探测中一般在煤中探测和识别异常体,在不同介质分界面上将产生回波信号,这是雷达识别异常体的基本波形依据。理想情况下,出现异常体的雷达回波走时图如图 2 所示。

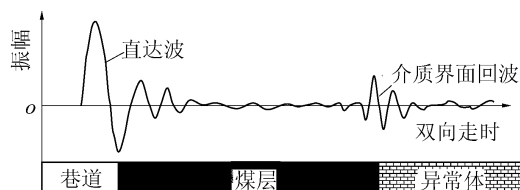


图 2 理想情况下雷达超前探测异常体单波示意

在双向走时图像上,首先有一个直达波,其幅度最大,然后出现指数衰减。在异常体与煤层的分界面上产生一个幅度较大的异常体回波,反映出异常体的位置和距离。工程探测实例图为电场信号色谱图,表征的是电场信号传播路径上的大小,为多个雷达反射回波形成的图谱。

2 淮南矿区井下试验

自 2009 年 11 月 16 日始到 2010 年 9 月 10 日止,在淮南矿业集团顾北煤矿和顾桥煤矿南区共进行探地雷达超前探 52 次,预测预报距离 2 390 m。其中仅有 1 次井下探测试验因现场条件复杂,信号失真,未进行预报,其余 51 次全部经过验证。

探测试验主要是在掘进巷道前方进行构造超前探测并预报,主要研究巷道掘进工作面前方 30~50 m 的破碎带等异常区以及对雷达波的反映,并分析探测异常准确率。

2.1 探地雷达的探测距离

雷达探测距离(也称雷达的探测深度)是在确定的观测环境和一定的发现概率和虚警概率的条件下,雷达能检测到目标的最大距离^[19-20]。衡量雷达系统效率一个重要的参数就是系统的品质因子 Q ,品质因子定义为接收天线能够接收到的最小回波信号功率与由发射源送入发射天线的功率的比值^[20]。

$$Q = 10 \lg [\xi_{TX} \xi_{RX} G_{TX} G_{RX} v^2 g^{\sigma} e^{-4\alpha l} / (64 \pi^3 f^2 l^4)]$$

其中: ξ_{TX} 为发射天线效率; ξ_{RX} 为接收天线效率; G_{TX} 为发射天线方向增益; G_{RX} 为接收天线方向增益; g 表示目标体的反向散射增益; σ 表示目标体的散射截面积; f 为天线中心频率。因此,雷达最大探测距离主要与雷达的接收机灵敏度、发射机峰值功率、发射天线增益和接收天线的有效面积以及目标

的雷达截面积有关。

由于煤矿巷道环境的不同, 天线不能太长, 采用 $1\,000\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的天线和 $2\,000\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的 2 种天线。一般而言, 频率越高, 探测深度越浅。在掘进工作面平整度较好的情况下, 采用 50 MHz 频率, 探地雷达的探测距离一般能达到 50 m, 如图 3 所示。试验在顾桥煤矿南区 1414(1) 工作面运输巷 K24 + 21.3 m 处掘进面, 可以看出雷达探测距离能达到 50 m。

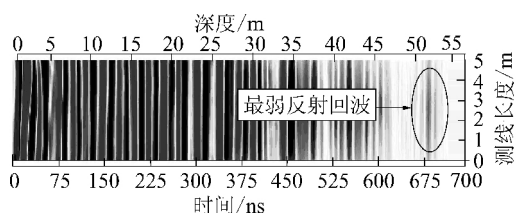


图 3 顾桥煤矿南区 1414(1) 工作面运输巷超前探测结果

2.2 探地雷达的回波异常特征

雷达波形的分析主要有波形明显的回波异常法和明显的波形分界线法^[13]。在淮南矿区试验中, 雷达回波特征主要采用波形明显的回波异常分析法。岩体物性的差异造成波形明显的异常回波是雷达波分析的基础, 几乎大部分的探测异常都是通过回波异常法分析得出的。这种方法在矿井雷达数据分析中也经常采用。

典型探测实例如图 4 所示。试验地点在顾北煤矿南翼 11-2 采区揭煤通风联络巷掘进工作面测点 T6 + 23.5 m 处掘进工作面。在探测前方 3 m 附近位置回波反射信号突然变得较弱, 之后回波反射信号增强, 存在一处明显的回波异常区域。后经掘进验证, 探测点前方 2.5 m 处见一断距 $H = 0.6\text{ m}$ 的断层。这种实例在淮南试验矿井中比较常见, 波形明显的回波异常分析法在矿井中也常被用到。

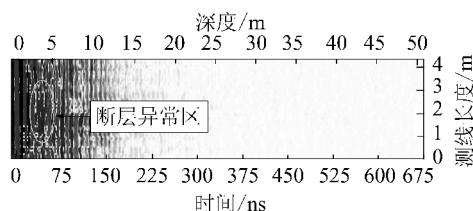


图 4 顾北煤矿南翼 11-2 采区通风巷探测结果

由于深部信号比较微弱, 若是遇到小的构造, 必然造成信号衰减的异常, 形成的探测图形就是有明显的衰减界线, 分界线以上浅部雷达回波完整, 波形比较正常; 分界线以下深部雷达回波基本看不到, 形成一片无回波区域。对这样的界面就需注意异常存

在的可能性。一般正常的雷达回波在煤层中穿透距离为 20 ~ 30 m, 而界面为 20 m, 则可以推断存在一定的构造异常或者破碎带。如图 5 所示的试验地点为在顾桥煤矿南区 1414(1) 工作面轨道巷 K10 点前 37 m 处的掘进工作面探测的结果, 在 30 m 附近位置存在一明显的分界线, 后经掘进验证探测点前方 31 m 处见 F27 断层, 断距 $H = 3.0\text{ m}$ 。这种实例在淮南试验矿井中不多见。

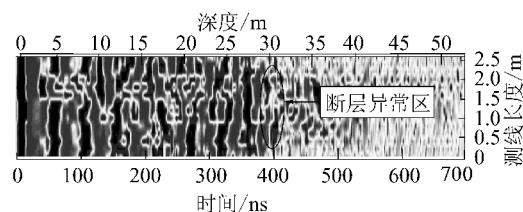


图 5 顾桥煤矿南区 1414(1) 工作面轨道巷探测结果

2.3 探地雷达的准确率分析

探地雷达在淮南矿区共进行了 52 次试验, 预报次数 51 次。从整体上来看, 经过统计: 有 2 次前方未有异常而预测异常, 有 1 次漏报现象, 有 2 次预报不太准确, 其余预报前方未有大异常全部正确。漏报、多报以及不太准确等现象 5 次, 探测试验预报次数 51 次, 因此探测整体准确率为 90.20%。

从探测异常情况来看, 探测到异常区域 16 次: 14 次预报准确, 2 次预报由于断层落差小于 $2/3$ 煤厚而导致探测不太准确, 探测落差在 $2/3$ 煤厚以上断层的成功率为 100%, 把落差小于 $2/3$ 煤厚断层的探测效果也统计进来, 则探测异常成功率 87.5%。

探测按月份准确率的计算以异常探测的误差率为基础, 如果此月没有异常, 而且预报显示前方无大异常, 则可视误差为零, 准确率为 100%; 如果此月有异常, 则以此月探测异常的准确率计算。雷达探测准确率 77% ~ 100%, 平均 93%。其中 2009 年 11 月准确率最低, 为 77%, 其余 2010 年 5—6 月较低。这是因为 2009 年 11 月刚进行试验工作, 对地质情况、井下实际探测情况均需要了解, 探测准确率较低; 对于中期探测准确下降, 是由于探测设备刚搬到顾桥煤矿南区, 南区的情况比较复杂等原因造成的。后经过增加采集次数, 提高现场掘进面平整度, 采用多种方法进行探测等方式, 准确率逐渐上升, 充分体现了雷达探测试验的时间效应, 即雷达探测试验的准确率是随着时间、经验的积累, 准确率慢慢上升的; 也体现了雷达在井下复杂环境的适应性和现场探测的严格性。

3 结 语

在淮南矿区煤巷条件下,煤层探测有效距离可以达到 50 m。落差在 2/3 煤厚以上的断层等异常体,探测试验成功率达到 100%;对于落差小于 2/3 煤厚的断层探测,成功率也达到了 87.5%。经过现场试验研究证明淮南矿区的探地雷达分析方法适用于波形明显的回波异常分析法。

探地雷达技术在淮南矿区的探测试验表明,推广应用该技术将提高矿井近距离超前预测预报的精度和矿井物探的应用水平,为保障煤矿安全生产有重要意义。但是该技术还存在探测距离较短、波形分析不够清晰可辨等问题。随着探测实践和井下工作方法研究的不断深入和完善,探地雷达技术作为一种新型的近距离矿井物探技术,有望成为煤层掘进巷道中的最有效的物探手段。

参考文献:

- [1] 宋 劲,吴燕清,胡运兵,等.探地雷达在煤巷超前探测中的应用[J].矿业安全与环保,2007,34(1):37-41.
- [2] 宋 劲.探地雷达煤矿井下探测技术的研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2006.
- [3] 邓春为,李大洪.地质雷达资料解释方法综述[J].矿业安全与环保,2004,31(6):23-24.
- [4] 王连成.地质雷达在工程地质和煤矿生产中的应用[J].山东矿业学院学报:自然科学版,1999,18(1):17-20.
- [5] 高克德,王连成.地质雷达探测隧道掘进前方充水和瓦斯构造[J].公路,1994(9):44-46.

- [6] 王连成.地质雷达的探测实践[J].西安矿业学院学报,1999,19(4):318-321.
- [7] 王连成,高克德,李大洪,等.地质雷达探测掘进工作面前方瓦斯突出构造[J].煤炭科学技术,1997,25(11):13-16.
- [8] 李大洪.地质雷达目标识别方法述评[J].煤炭科学技术,2000,28(5):49-51.
- [9] 李大洪.地质雷达的应用现状及发展前景[J].煤田地质与勘探,1997,25(5):60-64.
- [10] 邵 雁.矿井综合物探技术在南方煤矿探测岩溶水通道中的应用[J].中国煤炭地质,2009,21(7):62-65.
- [11] Peng Suping, Yang Feng. Fine Geological Radar Processing and Interpretation [J]. Journal of Chinese Geophysical Society Applied Geophysics, 2004, 1(2): 89-94.
- [12] 刘传孝,杨永杰,蒋金泉.探地雷达技术在采矿工程中的应用[J].岩土工程学报,1998,20(6):99-101.
- [13] 梁庆华.矿井探地雷达井下快速超前探测与数据分析[J].物探化探计算技术,2011,33(5):531-535.
- [14] 杜磊,曹赵飞.探地雷达在煤矿井下掘进工作面构造探测的应用[J].中小企业管理与科技,2011(5):224.
- [15] 王东才.探地雷达与工程地质勘探[J].物探装备,2001,11(3):188-194.
- [16] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [17] 蒋成站,吴燕清,朱适流,等.煤层电性参数测试技术完善的研究[R].重庆:煤炭科学研究总院重庆分院,1994.
- [18] 邵 雁.用速度谱获取雷达波速度[J].矿业安全与环保,2001,28(3):19-20.
- [19] 何继善,柳建新.隧道超前探测方法技术与应用研究[J].工程地球物理学报,2004,1(4):293-298.
- [20] 赵永辉,吴健生,万明浩.不同地下介质条件下探地雷达的探测深度问题分析[J].电波科学学报,2003,18(2):220-224.

(上接第 90 页)

3) 建立了动态移动角值(超前影响角、最大下沉速度滞后角)与地质采矿条件之间的综合关系式;超前影响角与基岩厚度成正比,与采厚、工作面推进速度成反比;最大下沉速度滞后角与松散层所占覆岩比例、工作面推进速度成正比,与采厚成反比。

参考文献:

- [1] 滕永海,张荣亮.徐州矿区地表移动规律研究[J].矿山测量,2003(3):34-35.
- [2] 谭志祥,邓喀中.建筑物下采煤理论与实践[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.
- [3] 温继满.厚冲积层下开采地表岩层移动规律实测分析[J].煤炭科学技术,2010,38(6):104-107.
- [4] 陈俊杰,陈 勇,郭文兵,等.厚松散层开采条件下地表移动规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(11):95-97,102.

- [5] 刘义新,戴华阳,姜耀东,等.厚松散层大采深下采煤地表移动规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(5):117-120,124.
- [6] 谭志祥,邓喀中.综放面地表变形预计参数综合分析及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1041-1047.
- [7] 邹友峰,邓喀中,马伟民.矿山开采沉陷工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [8] 何国清,杨 伦,凌虞娣,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [9] 国家煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [10] 煤炭科学研究院北京开采所.煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1981.
- [11] B. A. 布克林斯基[苏].矿山岩层与地表移动[M].王金庄,洪渡译.北京:煤炭工业出版社,1989.
- [12] Syd S Peng. Surface Subsidence Engineering[M]. The Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, 1992.
- [13] 马金铃,高井祥,张书毕.数据分析与测量数据处理[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994.