

# 新型探地雷达设备在采空区覆盖层厚度探测中的应用

张耀平<sup>1,2</sup>, 董陇军<sup>2</sup>, 袁海平<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学应用科学学院, 江西 赣州 341000;

2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 地下采矿形成的采空区, 严重影响着矿区居民的生命财产安全。探测空区的厚度, 对有效治理采空区及预防控制采空区灾害具有重要的意义。本文采用意大利产的 Detector 新型探地雷达设备, 对采空区覆盖层厚度进行探测, 该设备天线为 IDS TR 40MHz 屏蔽天线, 最大探测深度可以达到 50m。对监测方法及流程进行了概述, 并将其应用到龙桥铁矿的采空区覆盖层探测中, 发现该矿山的覆盖成厚度大于 25 m, 满足安全生产的需要, 为矿山的安全生产提供了理论依据。

**关键词:** 探地雷达; 采空区; 数据处理; 覆盖层厚度

**中图分类号:** TU459 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051 (2011) 04-0114-05

## Study of the detecting of harzard mined goaf using ground penetrating radar technology

ZHANG Yao-ping<sup>1,2</sup>, CAO Ping<sup>2</sup>, YUAN Hai-ping<sup>1</sup>

(1. School of Application and Scienc, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The mined goaf near the shallow surface of the mine has been a hidden trouble of the mine disaster. To prevent and control the disasters of goaf, it is important to detect overlying rock thickness of goaf. In this paper, a new Italian production Detector Ground Penetrating Radar devices is applied to detect the overlying rock thickness of goaf. The antenna of The device is the IDS TR40 MHz, and the maximum detection depth up to 50 m. Monitoring methods and procedures were reviewed, and it applied to detect overlying rock thickness of goaf in the Longqiao mined iron ore exploration. The results show that the overlying rock thickness is greater than 25 m, which meets the safety requirements for the mine's safety, and it provides a theoretical basis.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); mined goaf; strong electromagnetic interference; data processing; verlying rock thickness of goaf

采空区是矿山开采引起的最为主要的灾害形式之一, 主要的灾害形式有空区塌陷及地表沉降等。近年来, 有很多学者进行了诸如空区塌陷预测、地表塌陷、空区探测等方面卓有成效的研究<sup>[1-6]</sup>。合理有效的探测空区覆盖成厚度及空区位置, 可以减缓其灾害的发生。

目前, 矿山地下采空区探查, 主要采用钻探和地球物理探测技术。钻探方法比较直观, 因小

矿井开采的无规律性, 单一采用钻探很难准确探查采空区的范围, 且工作量大、效率低、经济投入大。地球物理方法以其面积测量的优势得到广泛应用, 取得了明显的地质效果。目前, 地球物理探测技术, 主要采用高密度电阻率法、探地雷达、电磁法、地震方法、瑞雷波法、氦气测量以及综合物探方法等<sup>[2,7-11]</sup>。不同的地球物理方法各有优势和不足, 电法探测精度偏低, 但对采空区是否含水的探测效果较好; 地震方法适用于探测深度较深的目标体; 探地雷达适用于探测深度较浅的目标体, 但探测分辨率高。要根据探测区的具体物理条件进行探测方法选择和优化, 特别是在工矿区及强电磁干扰区, 选择合理的技术方法

收稿日期: 2010-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50774093)

作者简介: 张耀平 (1974-), 男, 1998 年毕业于江西理工大学采矿工程专业, 现为副教授, 中南大学博士研究生, 主要从事岩石力学和采矿工程方面的研究。

进行探测尤其重要。对矿山地下采空区地球物理探测的研究,国外研究较少。近几年来,因安全生产及矿业开发监督管理的需要,国内许多科研机构做了大量研究工作。因不同地区地质条件和采矿条件的不同,各种地球物理技术方法探测效果差异较大。因此,通过不同地球物理技术方法的探测试验,可以筛选出先进、有效、经济、适用的采空区探测技术方法,实现不同技术方法的优化组合,以达到对地下采空区进行准确监测和探测。在利用探地雷达探测采空区研究方面,黄仁东<sup>[5]</sup>、程久龙等<sup>[6]</sup>利用探地雷达探测地下采空区,可得到较理想的探测结果,但探测深度较浅,探测效果受电磁干扰影响严重。为达到更理想的探测结果,需解决矿区强电磁干扰对探测资料影响问题。在有条件的地方,探地雷达技术与其他探测方法进行综合探测,可以取得较好的地质效果。

本文主要探讨利用探地雷达技术进行采空区覆盖层厚度探测的原理和方法,并将其应用到龙桥铁矿的采空区覆盖层探测中。

## 1 监测设备及方法

### 1.1 仪器设备

本次采空区覆盖层厚度探测,采用了意大利产的 Detector 新型探地雷达设备,天线为 IDS TR40MHz 屏蔽天线,最大探测深度可以达到 50m。该天线主要用于路基缺陷检测、粗大管线探测、深层溶洞探测、岩性分析等,以及不明岩土介质分层探测和条件恶劣场地的应用。

主要采集参数如下:

脉冲重复频率:400 kHz(高速的脉冲重复频率使数据收集更快);时窗:800 nsec;叠加数:1~32768。

分辨率:5psec; A/D 转换:16 bit;扫描采样数:512;信噪比:160 db;动态范围:≥160db。

### 1.2 探测方法原理和方法

由于龙桥铁矿为磁铁矿,探地雷达电磁波在这种高磁导率物质传播时,电磁波波速及衰减速度会受到较大的影响,将使得探地雷达的探测范围降低。由于介质差异,在不同介质表面形成强烈的发射波和折射波,同时也不可避免产生一些杂乱回波,掩盖了从覆盖层表面反射的有效波组。为了尽可能避免这些杂波干扰,课题组自行设计了一轻质竹架,使雷达天线尽量贴近巷道顶板,探测方法见图 1。

探地雷达作为工程物探检测的一项新技术,

具有连续、无损、高效和高精度等优点。探地雷达由一体化主机、天线及配套软件等部分组成。根据电磁波在有耗介质中的传播特性,探地雷达以宽频带短脉冲的形式向介质内发射高频电磁波(几 MHz 至几 GHz)。当其遇到不均匀体(界面)时,会反射部分电磁波,其反射系数由介质的相对介电常数决定。通过对雷达主机所接收的反射信号进行处理和图像解译,达到识别隐蔽目标物的目的(图 2)。



图 1 探地雷达探测方法图

电磁波在特定介质中的传播速度  $V$  是不变的,因此,根据探地雷达记录上的地面反射波与反射波的时间差  $\Delta T$ ,即可据式(1)算出异常的埋藏深度  $H$ :

$$H = \frac{V \cdot \Delta T}{2} \quad (1)$$

式中,  $H$  为目标层厚度。

$V$  是电磁波在地下介质中的传播速度,其大小由式(2)表示:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

式中,  $C$  是电磁波在大气中的传播速度,约为  $3 \times 10^8$  m/s;  $\epsilon$  为相对介电常数,取决于地下各层构成物质的介电常数。

雷达波反射信号的振幅与反射系数成正比,在以位移电流为主的低损耗介质中,反射系数  $r$  可表示为:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3)$$

式中,  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  为界面上、下介质的相对介电常数。

反射信号的强度,主要取决于上、下层介质的电性差异,电性差异越大,反射信号越强。

雷达波的穿透深度,主要取决于地下介质的电性和中心频率。导电率越高,穿透深度越小;

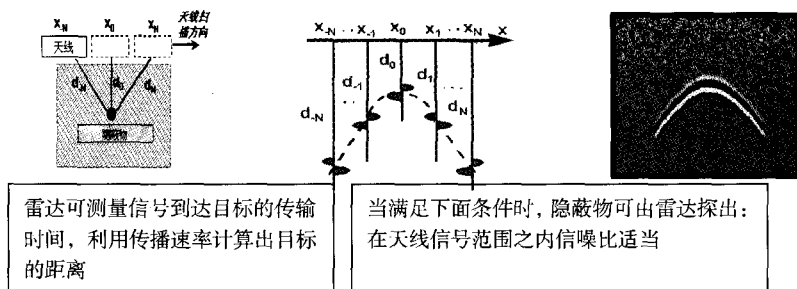


图2 探地雷达工作原理示意图

中心频率越高, 穿透深度越小, 反之亦然。

雷达的分辨率, 主要取决于天线的中心频率和目标物的深度。对于通常情况来说, 雷达的分辨率可由式(4)算得:

$$R = H/12 \quad (4)$$

式中,  $R$  表示雷达的分辨率;  $H$  表示目标物的深度。如目标物的深度为 12m, 则目标物的尺寸应大于 1m, 才能为雷达系统所识别。

### 1.3 数据处理

探地雷达数据处理包括预处理(标记和桩号校正、添加标题、标识等)和处理分析, 其处理流程如图3所示。其目的在于压制规则和随机干扰, 以尽可能高的分辨率在探地雷达图像剖面上显示反射波, 突出有用的异常信息(包括电磁波速度, 振幅和波形等)来帮助解释。

探地雷达所接收的是来自地下不同电性界面的反射波, 其正确解释取决于检测参数选择合理、数据处理得当、模拟实验类比和读图经验等因素。

## 2 在龙桥铁矿中的应用

### 2.1 平面测线布网图

0~1线、1~3线、W~13进路均在-355分层探测, 1线(爆破施工探测数据少)和3线在-342.5分层探测。测网平面布置示意图见图4。

### 2.2 W-13进路测线分析

通过时域垂直带通滤波和频域垂直带通滤波、去除直达波、背景消除等操作, 对原始具有代表性的雷达图 W-13 进路剖面进行处理, 结果如下图所示。由图4可以看出, 从巷道顶板至 21m 或 22m 之间, 有明显的雷达波记录, 此范围内存在明显的强幅度反射同相轴, 推测此同相轴是由矿岩界面与松散垫层底部界面反射形成的。反射波幅度基本相同, 高低变化在 1m 左右, 未见异常大的波动变化, 说明分层较明显, 说明了棱形矿岩处于这一高度。此外, 直到 35m 以上均未见强烈的反射波, 且松散垫层介质相对较均匀, 说明从

棱形矿岩以上直到 35m 以上均为松散的矿岩垫层, 垫层厚度满足设计生产要求。W-13 进路剖面图见图5。

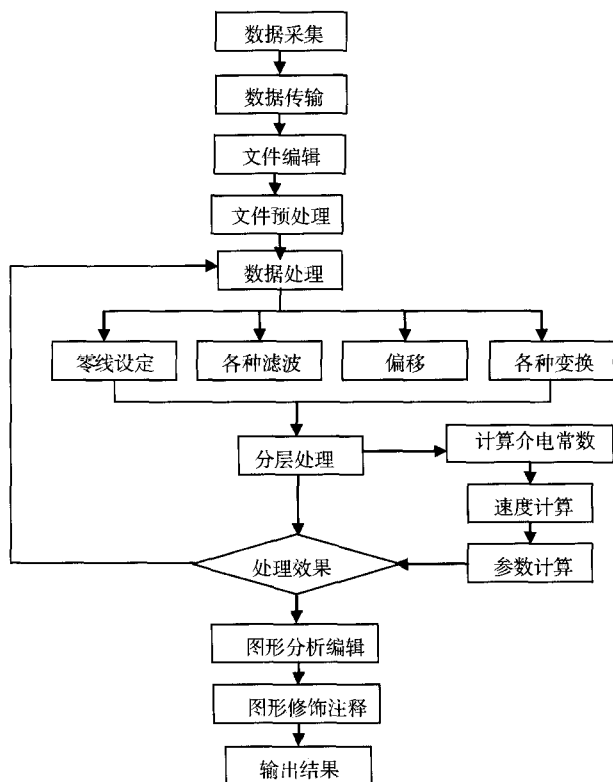


图3 探地雷达数据处理流程图

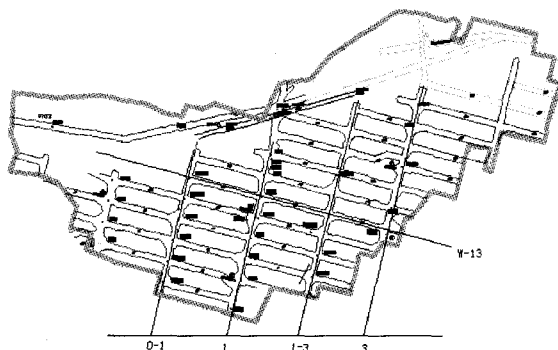


图4 测网平面布置示意图

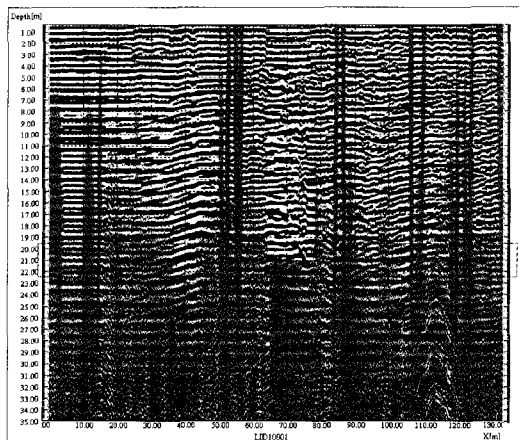


图5 W-13进路剖面

### 2.3 3测线

通过时域垂直带通滤波和频域垂直带通滤波、去除直达波、背景消除等操作,对原始具有代表性的雷达3线穿脉剖面图进行处理,结果如图6所示。从巷道顶板向上至20m左右,有一强烈的反射波,高度在1m上下波动,波组较明显,如下图的蓝色标记所示,说明此处存在疏密程度不同的介质,垫层和空气层分界可能就在这一分层。由于此处剖面是从-342.5分层探测的,去除11m左右的矿岩顶板,说明3线穿脉剩下9m左右松散矿岩垫层,高低变化在1m左右。由于此线崩落的岩层厚度在15m左右,去除9m垫层,只有6m高左右的空气层。到目前为止,此线穿脉放矿满足了生产安全要求。

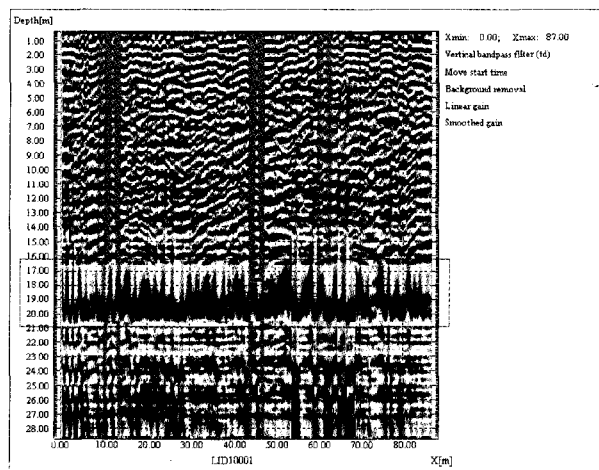


图6 3线穿脉剖面图

### 2.4 0~1测线

通过时域垂直带通滤波和频域垂直带通滤波、去除直达波、背景消除等操作,对原始具有代表性的雷达图0~1线剖面进行处理,结果如图7所示。由图7可以看出,从巷道顶板至9m左右,有很明显的雷达波,在此范围存在强幅度反射同相轴,推测此处存在不同的介质,而且也证实了由于0~1线上分层穿脉巷道与下分层穿脉重合,且上分层穿脉巷道可能存在间断的空气层。直到12m左右,反射波又有明显的变化,且有好几处存在间断的反射波,说明此处可能就是棱形矿岩与松散垫层分界面。从12m左右直到36m以上,均未见强烈的反射波,且介质相对较均匀,说明从棱形矿岩以上直到36m以上,均可能为松散的矿岩垫层,垫层厚度有25m以上,满足设计生产要求。

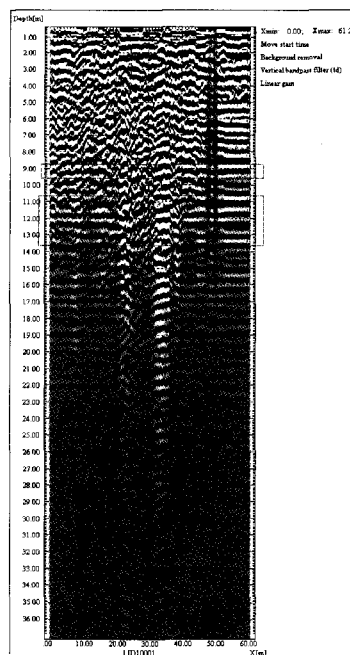


图7 0~1线剖面

### 2.5 1~3测线

通过时域垂直带通滤波和频域垂直带通滤波、去除直达波、背景消除等操作,对原始具有代表性的雷达图1~3线剖面进行处理,结果如图8所示。由图8可以看出,由于雷达扫描时存在晃动,有些扫描数据丢失,出现下图间断的雷达数据,但整理连接起来不影响看图效果。从巷道顶板至9m左右,有部分接近10m有很明显的雷达波记录,推测此处存在不同的介质,而且也证明了是由于1~3线上分层穿脉巷道与下分层穿脉重合,且上分层穿脉巷道可能存在间断的空气层。直到12m左右,有的位置在接近13m,反射波又有明显的变化,说明此处可能就是棱形矿岩与松散垫层分界面。从12m左右直到36m以上,均未见强烈的反射波,且介质相对较均匀,说明从棱形矿

岩以上直到 36m 以上, 均可能为松散的矿岩垫层, 垫层厚度有 25m 以上, 满足设计生产要求。

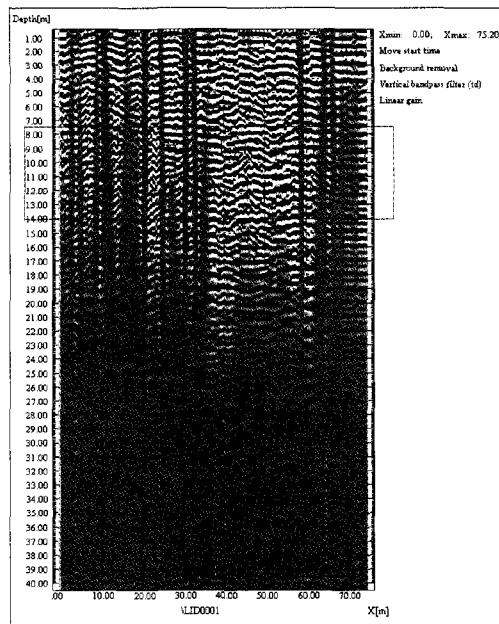


图8 1~3线剖面图

### 3 结论

本文将意大利产的 Detector 新型探地雷达设备应用到龙桥铁矿采空区覆盖层厚度探测中, 并论述了探测原理及具体方法。该设备天线为 IDS TR 40MHz 屏蔽天线, 最大探测深度可以达到 50m。对 0~1 线、1~3 线、W~13 进路均在一 355 分层探测, 1 线 (爆破施工探测数据少) 和 3 线在一 342.5 分层进行探测。探测结果表明, 该矿采空区垫层厚度大于 25 m, 满足国家安全生产规

程规定的无底柱自然崩落法空区垫层厚度必须超过 2 个分段高度的要求。

#### 参考文献

- [1] Dong Longjun, Peng Gangjian, FU Yuhua, BAI Yunfei, LIU Youfang. Unascertained measurement classifying model of goaf collapse prediction [J]. Journal of coal science & engineering (English edition), 2008, 12 (2): 221-224
- [2] 程久龙, 于师建, 王渭明, 等. 岩体测试与探测 [M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [3] 董晓军, 李夕兵, 宫凤强. 开采地面沉陷预测的未确知聚类预测模型 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19 (2): 95-99.
- [4] 程建远, 孙洪星, 赵庆彪, 等. 老窑采空区的探测技术与实例研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (3): 251-25.
- [5] 黄仁东, 刘教文, 徐国元, 等. 探地雷达在厂坝铅锌矿采空区探测中的试验与应用 [J]. 有色矿山, 2003, 32 (6): 1-3.
- [6] 程久龙, 胡克峰, 王玉和, 等. 探地雷达探测地下采空区的研究 [J]. 岩土力学, 2004 (25): 79-82.
- [7] 王东才. 探地雷达与工程地质勘探 [J]. 物探装备, 2001, 11 (3): 188-194.
- [8] Davis J L, Annan A P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy [J]. Geophysical Prospecting, 1989 (37): 531-551.
- [9] Benson A K. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards; examples of groundwater contamination, faults, cavities [J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33 (1-3): 177-193.
- [10] 李大心. 探地雷达方法与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [11] Sharma, P. Vallabh. Environment and engineering geophysics [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1997: 310-325.

\*\*\*\*\*

(上接第 113 页)

### 4 结论与认识

(1) 裂缝识别是解释的基础, 也是解释的关键。运用声波曲线, 采用分性分析的方法进行裂缝识别是比较准确的, 但这种裂缝一般为高角度缝。

(2) 深、浅侧向测井差异性, 主要是由裂缝的产状决定的, 可以通过这种方式进行裂缝识别, 但在深、浅侧向测井差异小的位置, 裂缝解释容易漏缺。

(3) 裂缝的物性解释采用经验公式的方式, 与实际有一定的差异, 方法有待于进一步改进。

#### 参考文献

- [1] 罗利, 任兴国. 测井识别碳酸盐岩储集类型 [J]. 测井技术, 1999, 23 (5): 355-360.

- [2] 赵良孝, 补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [3] 柏松章. 碳酸盐岩潜山油田开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [4] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释 [M]. 北京: 石油大学出版社, 1996.
- [5] 王晓畅, 等. 基于双侧向测井资料的裂缝孔隙度计算及其标定 [J]. 物探化探计算技术, 2008 (9).
- [6] 冉志兵, 等. 复杂油气藏裂缝型储层参数定量评价方法 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009 (12).
- [7] 吴琼, 等. 新立油田低渗透油层裂缝测井识别方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007 (4).
- [8] 张博, 等. 大北气田储层裂缝定量描述 [J]. 天然气地球科学, 2010 (2).
- [9] 李善军, 等. 碳酸盐岩地层中裂缝孔隙度的定量解释 [J]. 测井技术, 1997 (06).