

## 采空区充填物探地雷达识别技术研究及应用

刘敦文 古德生 徐国元 黄仁东

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

**摘要** 设计了一个由混凝土、矿粉和尾砂等材料制成的带空洞的实验模型.在模型的预留空洞中,分别充填水、砂、泥和空气进行了模拟实验,研究不同充填介质在探地雷达探测图像中表现出的特征及差异,进而辨别不同充填介质.论述了采空区探地雷达探测原理与方法,并通过在甘肃厂坝铅锌矿进行现场试验,分析、识别了采空区内充填物类型及状态.实践表明,应用探地雷达技术,可以高效、准确地探测采空区及其充填情况.

**关键词** 采空区;充填物;探地雷达;识别;探测

**分类号** TD 853.391

探地雷达作为一种高分辨探测技术,可以对深浅地质问题进行详细填图和对地下目标体进行无损探测等,目前已应用到各行各业中.在矿山工程中,探地雷达可用于探测采空区<sup>[1-3]</sup>、地下水防突层厚度<sup>[4]</sup>、渗水裂隙<sup>[5]</sup>、破碎带<sup>[6]</sup>、断层<sup>[6,7]</sup>、溶洞<sup>[8]</sup>、瓦斯突出<sup>[9]</sup>、巷道围岩松动圈<sup>[10]</sup>以及采场充填体缺陷<sup>[9]</sup>等等.有关其工程应用方面的报道很多,但报道其实验研究方面的文献却较少.Peden等人,构建了一个研究探地雷达在低耗介质中散射特性的实验模型,通过对多次测试结果分析,探讨了雷达波的散射特性<sup>[11]</sup>.Jiao等人通过三个实验证明,从理论上可推导出线形偶极子天线发射的电磁波在半无限空间非磁介质中传播方程<sup>[11]</sup>.Deng等人通过室内实验,研究了雷达波在分层有耗介质中传播规律,得出频率在1GHz之间的雷达波在有耗介质中的传导率最大不超过30mS/m<sup>[14]</sup>.Berabinin等人通过一个室外实验,研究了探地雷达天线特性与雷达波传播之间的关系<sup>[15]</sup>.Robert等人则通过在实验室内对混凝土模型空洞内充填水或空气进行实验,研究了不同充填介质在探地雷达图像中显现特征,并将实验结果应用于隧道质量检测与病害诊断之中<sup>[16]</sup>.

笔者通过设计一个由混凝土、矿粉和尾砂等材料制成的带空洞的实验模型,在空洞内分别充填水、砂、泥和空气进行模拟实验,研究了不同充

填介质在探地雷达探测图像中表现出的特征及差异,进而辨别不同充填介质.并将实验结果应用于地下金属矿采空区探测之中.

## 1 探地雷达测试原理<sup>[17,18]</sup>

电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化.探地雷达正是根据电磁波在介质中传播的这个特征来工作的.探地雷达可根据电磁波的变化差异,反映出被探测介质体的赋存形态、尺寸大小以及各介质体间的界面.另外,电磁波在不同介质中传播的速度存在差异,不同介质对电磁波的吸收和反射能力也有差异.针对不同介质在探地雷达中呈现不同图像这一特征,通过室内模拟实验研究,可以揭示模型空区内不同充填介质对其雷达图像影响规律.

数据处理后所得的探地雷达图像剖面中,根据反射波组的波形与强度特征,通过同相轴的追踪,确定反射波组的含义.当介质中有空区(洞)时,介质与空区(洞)的界面两侧电性差异较大,容易形成强烈的反射波,同时,在这一界面处常常产生绕射波,而绕射波在时间剖面上为双曲线反映.因此通过时间剖面上的特征图像就能确定空区(洞)的位置及深度.

探地雷达探测是一种高频电磁波勘探方法,雷达电磁波可近似为均匀平面电磁波.介质中传播时,它的电场分量瞬时波动方程为:

收稿日期:2004-02-16 修回日期:2004-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.502044012)

作者简介:刘敦文(1972—),男,副教授,博士

$$E_z(Z, t) = E_0 e^{-\alpha Z} \cos(\omega t - \beta Z) \quad (1)$$

式中,  $E_0$  为  $z=0, t=0$  时电磁场强度;  $\alpha$  为衰减系数;  $\beta$  为相移系数;  $Z$  为传播距离;  $\omega$  为电磁波的角频率.

从式(1)中可知, 当  $\cos(\omega t - \beta Z) = 1$  时, 电磁场强度最大, 可求得电磁波波速的表达式为:

$$v = \omega / \beta \quad (2)$$

$$\beta = \left( \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \right)^{1/2} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right]^{1/2} + 1 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为磁导率;  $\epsilon$  为介电常数;  $\sigma$  为电导率.

对于混凝土、铅锌矿石和岩石介质,  $\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \ll 1$ ,  $\mu = 1$ , 式(2)可简化为:

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

式中,  $C$  为光波速度,  $\epsilon_r$  为相对介电常数. 铅锌矿石的相对介电常数为 4~10; 花岗岩类岩石的相对介电常数为 5~7, 干混凝土的相对介电常数为 6.4, 各种介质的相对介电常数均可在有关的资料中查取, 其实际值与含水量有关.

## 2 模拟实验

### 2.1 实验模型

实验模型结构尺寸如图 1 所示. 该模型由水泥、尾砂和粉矿砂浆浇灌而成, 水泥、尾砂和粉矿配比(质量比)为 200 : 200 : 220(粉矿中 Pb 的品位为 80%, Zn 的品位为 40%~45%). 模型养护 15 a 进行测试.

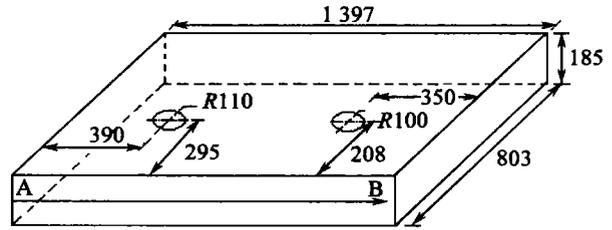


图 1 模型结构示意图(单位:mm)

Fig.1 Model structure sketch (in mm)

### 2.2 实验测试仪器

实验中, 采用 RAMAC/GPR 探地雷达系统进行实验测试. 该测试系统由主机、1 GHz 高频天线(发射接收天线集成在一起)、计算机、电源、数据电缆、光纤等几部分组成.

### 2.3 测试方法及其参数设置

测试过程中, 在模型的预留空区里分别充填水、空气、泥、砂等四种介质, 进行探地雷达探测实验. 对每一种充填介质, 分别沿测线(图 1 中带箭头直线标出)测试三次, 取效果最好的一次, 作为探测结果. 探地雷达参数: 天线频率为 1 GHz, 样点为 480 个, 采样频率为 39 239.69 MHz, 叠加次数为 512 次, 叠加时间为 2.45 s, 起点为  $-0.15 \mu\text{s}$ , 时窗为  $0.01 \mu\text{s}$ , 触发源为距离轮, 间距为 0.009 m.

### 2.4 实验结果及分析

实验中共获得了 12 条探测剖面, 其中 4 条效果好的雷达图像, 如图 2 所示.

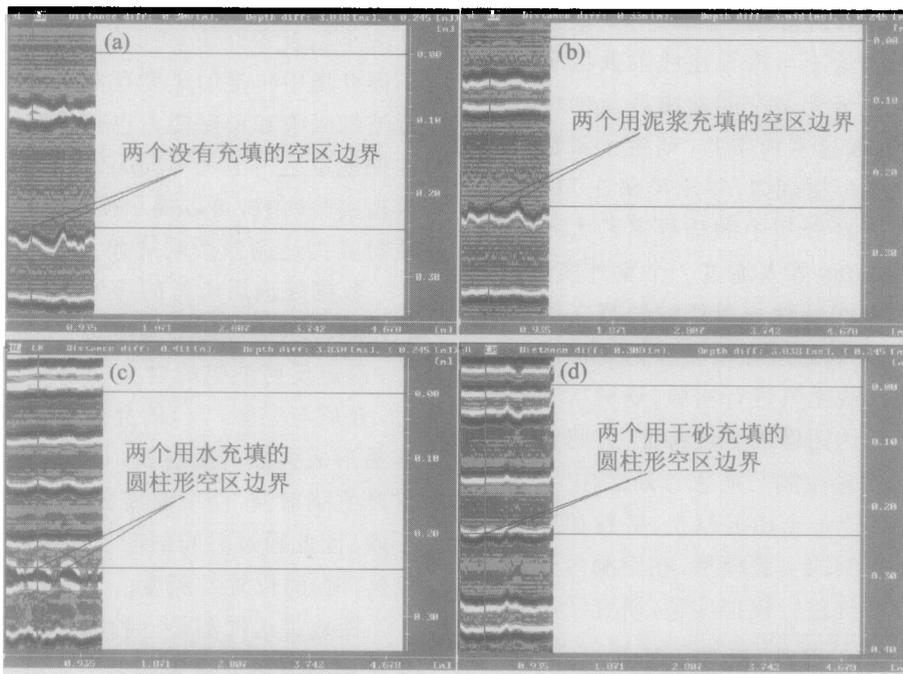


图 2 模型的空区在各种条件下 AB 测线的探地雷达探测图像.(a)没有充填;(b)充有泥浆;(c)有水;(d)有干砂

Fig.2 GRP images of profile AB under the condition of cavities with filling air (a), mud (b), water (c) and dry sand (d) in model

根据探地雷达探测理论,模型中空区在雷达图像中显现的图像特征为双曲线.如图2中所示,在雷达图像剖面中均已标出了模型中的两个空区的位置,其深度与距测线起点的水平距离,可通过移动软件中双光标标出,图中已标出了右侧的空区位置,即深度245 mm,距测线起点距离分别为308,336,308,411 mm.各个图中空区距测线起点有些差异,这是由于考虑到距测线起点位置对该实验结果没有影响,在测试过程中,每次在测线AB上放置雷达天线起始位置时,没有完全一致所致.

从探地雷达图像中可知,空区深度245 mm,对应的雷达波双程走时为3.838 ns.通过雷达软件反算,可求得雷达波的平均速率为115.3 m/ $\mu$ s.根据公式(4)可求出模型的相对介电常数.当然,这样计算得到的模型介质相对介电常数会有些误差,但足以满足后面相互比较的精度要求.

从不同充填介质的探地雷达图像可以看出,随充填介质与模型介质的相对介电常数变化,探

地雷达图像也有些变化.当模型空区中充填介质为空气时,空区在探地雷达图像中呈现的曲线很尖,这是由于模型介质的介电常数与空气的介电常数相差很大;当模型空区中充填介质为泥浆时,空区在探地雷达图像中呈现的曲线较尖,这是由于模型介质的介电常数与泥浆的介电常数相差较大;当模型空区中充填介质为干砂时,空区在探地雷达图像中呈现的曲线变得较小,这是由于模型介质的介电常数与干砂的介电常数相差很小;当模型空区中充填介质为水时,空区在探地雷达图像中呈现的曲线变得较大,但较宽,这是由于模型介质的介电常数与水的介电常数相差较大,以及空区中的水已将空区周围区域浸湿所致.

从表1可以看出,对于同一空区,其充填介质不同,其图像特征也不一样.对两种不同的充填介质而言,若其各自与模型本身介质的相对介电常数之差越接近,其各自之间的图像特征越相似;反之,其图像特征差异性越大.

表1 各探地雷达图像中空区图像特征对比表  
Table 1 Correlation table of GPR image feature for cavities

介质	相对介电常数	与模型介质的相对介电常数之差	探地雷达测试图	探地雷达图像中空区图像特征比较
空气	1	5.77	图2(a)	图2(a)与(b)的空区图像特征极相似,相似程度达80%以上
泥浆	12	5.23	图2(b)	
干砂	5	1.77	图2(c)	图2(c)与(d)的空区图像特征相差最大,相异程度达90%以上
水	81	74.23	图2(d)	

### 3 应用实例

白银公司厂坝铅锌矿的主矿体由于屡遭群采破坏,留下了数百个采空区.根据该矿矿体和围岩的实际情况,选用RAMAC雷达的100 MHz天线进行空区探测,并对其充填状况作出判断.图3为某一采空区的雷达探测成果图.

图3中,圆圈圈定处为采空区顶部出现位置.两处采空区顶部位置分别距起点4.5~6.5 m, 8.5~9.8 m;深度分别为5.0~5.5 m, 5.5~6.0 m.由于该两处采空区异常点十分接近,其实际为一个大的采空区的顶部两个至高点,故该两处异常点范围内可能均为采空区,且其顶部离测试巷道地面由深到浅.另外,图像表明,雷达波进入采空区后,被吸收衰减得非常快.因此,可以推断此空区内有一定深度的积水.该处探测结果后来被现场钻探结果验证.

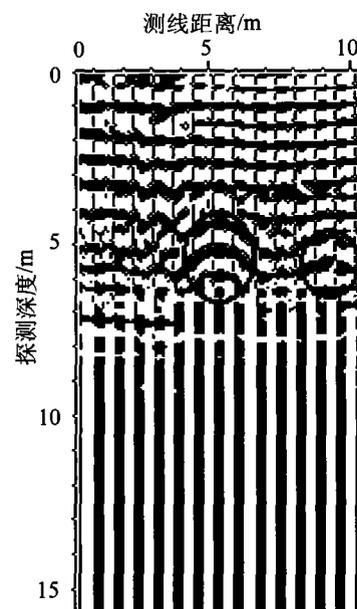


图3 采空区雷达探测图像  
Fig.3 GPR image of gob

## 4 结论

通过室内与现场试验研究,可以取得如下一些结论:

(1) 随充填介质与模型介质的相对介电常数之差增大,空区图像特征愈明显,探测效果愈好.

(2) 对两种不同的充填介质而言,若其各自与模型本身介质的相对介电常数之差越接近,其各自之间的图像特征越相似;反之,其图像特征差异性越大.

(3) 试验结果表明,空区充填介质与其在雷达图像的特征存在一定的相关性.通过大量的实验研究,完全可以获得不同充填介质在探地雷达图像中表现出的特征之间的规律,进而辨别不同充填介质.

(4) 实践表明,探地雷达可以高效、快捷地探测地下采空区,并对其充填状态作出判断,这为井下采空区及时处理和矿床安全开采提供科学依据.

### 参 考 文 献

- [1] Baker R L, Cull J P. Acquisition and signal processing of ground-penetrating radar for shallow exploration and open-pit mining. *Exploration Geophys*, 1992, 23(1-2): 17
- [2] Turner G, Yelf R J, Hatherly P J. Coal mining applications of ground radar. *Exploration Geophys*, 1990, 21(1-2): 165
- [3] 刘教文, 徐国元, 黄仁东, 等. 金属矿采空区探测新技术. *中国矿业*, 2000(4): 33
- [4] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水. 北京: 地质出版社, 1997
- [5] Siggins A F. A radar investigation of fracture in a granite outcrop. *Exploration Geophys*, 1990, 21(1-2): 105
- [6] 王连成. 地质雷达在工程地质和煤矿生产中的应用. *山东矿业学院学报*, 1999, 18(1): 17
- [7] 杨永杰, 刘传孝, 蒋金泉. 探地雷达方法及在井下工程探测中的实际应用. *山东矿业学院学报*, 1997, 16(4): 353
- [8] 申宝宏. 矿井地质雷达在煤矿中的应用现状. *矿业安全与环保*, 1999(1): 3
- [9] 王连成. 矿井地质雷达的方法及应用. *煤炭学报*, 2000, 25(1): 5
- [10] 刘传孝. 新汶华丰矿井巷松动圈探地雷达实测研究. *应用基础与工程科学学报*, 1999, 7(2): 171
- [11] Momayez M, Hassani F P, Hara A et al. Application of GPR in Canadian mines. *CIM Bull*, 1996, 89: 107
- [12] Peden I C, Brew J. A laboratory scale model for the study of sub-surface scattering in low-loss media with applications to ground penetrating radar. *J Appl Geophys*, 1995, 33(1-3): 109
- [13] Jiao Y R, McMehan G A, Pettinelli E. In situ 2-D and 3-D measurements of radiation patterns of half-wave dipole GPR antennas. *J Appl Geophys*, 2000, 43(1): 69
- [14] Deng R L, Liu C. FM-CW radar performance in a lossy layered medium. *J Appl Geophys*, 1999, 42(1): 23
- [15] Berabinin M, Pettinelli E, Pierdicca N, et al. Field experiments for characterization of GPR antenna and pulse propagation. *J Appl Geophys*, 1995, 33(1-3): 63
- [16] Robert A, Bosset C D. Application du géoradar à la localisation de cavités, de nids e gravier et de zones karstiques. *J Appl Geophys*, 1994, 31(1-3): 197
- [17] 李大心. 探地雷达方法及应用. 北京: 地质出版社, 1994
- [18] Daniels J J. *Fundamental of Ground Penetrating Radar*. London: Soft Earth Associates Inc., 1990

## Exploration study of gob filling by ground penetrating radar and its application

LIU Dunwen, GU Desheng, XU Guoyuan, HUANG Rendong

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

**ABSTRACT** An experimental model with two cavities was made of concrete, ore fines and tails in the laboratory. Simulation experiments were conducted to study the characters in Ground Penetrating Radar (GPR) images of every filling body by filling water, sand, mud and air in turn. Experimental results indicate the radar image changes with gob filling. Field investigations were carried out at Changba Lead-zinc Mine in China. The main detecting method for gob and its filling by GPR was expounded. The space distribution of gob was obtained. The filling can be well identified by analyzing the radar images. The results of field experiments show GPR technique is useful, high-efficiency and nondestructive for detecting gob and its filling.

**KEY WORDS** gob; filling; ground penetrating radar; identification; detection