

钻孔地质雷达工作原理及应用

宋雷 黄家会 杨维好

(中国矿业大学建筑工程学院,徐州 221008)

摘 要 阐述了钻孔雷达的工作原理,介绍了单孔反射和跨孔层析成像 2 种工作方式,并将其用于深部岩层岩性评价和地质异常体探测,效果显著。

关键词 钻孔雷达;单孔反射;层析成像;岩层岩性评价;地质异常体探测

地质雷达以其高分辨率和高效率在工程领域得到了广泛应用。依据不同的工作方式,地质雷达分为地面地质雷达和钻孔地质雷达。地面地质雷达受探测深度限制,不适于进行深部探测。钻孔地质雷达可通过钻孔直接进入地下深部,又具有地质雷达分辨率高的优势,在对深部问题要求高分辨率的情况下是唯一可行和有效的探测手段。国外已有最大探测达 2 000 m 的钻孔地质雷达,主要用于裂隙探测、洞穴探测、矿产勘探、地质构造填图和地下水调查等。1998 年 12 月,我们首次利用钻孔地质雷达,对地下深部灰岩进行钻孔雷达探测研究,效果显著,填补了国内有关钻孔地质雷达理论和应用研究的空白。

钻孔地质雷达基本的工作方式有单孔反射测量和跨孔透射测量 2 种。

1 单孔反射雷达工作原理

单孔反射雷达工作原理见图 1。发射天线和接受天线同在一个钻孔中并固定间距沿钻孔上下移动,以固定间距触发,一般采用间隔为 0.5~1 m。钻孔地质雷达介质中的反射波形成雷达剖面,通过异常体反射波的走时、振幅和相位特征来识别目标体,判明其位置、岩性及几何形态。从几何形态来看,地下异常体可概括为点状体和面状体 2 类,前者如洞穴、巷道等,后者如裂隙、层面、矿脉等,它们在雷达图像上有各自特征(图 1),其中点状体反射呈现双曲线,面状体反射呈现“V”字型。异常体的位置可通过反射波的走时确定,岩性则可通过反射波振幅来判断。

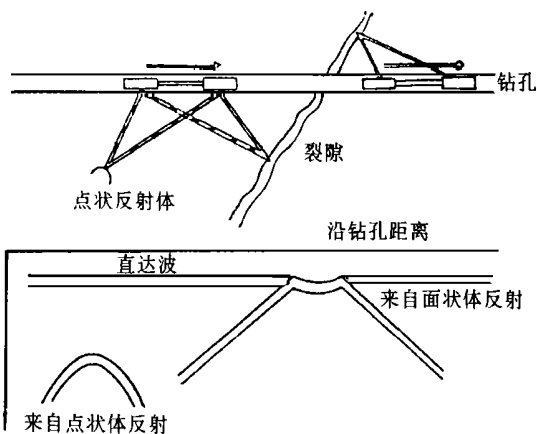


图 1 单孔反射测量原理

2 跨孔雷达层析成像工作原理

跨孔雷达层析成像与地震层析成像原理类似,见图 2。它的基本思想是:通过对边界处电磁波信号的测量,获取钻孔间介质物性参数的分布信息。具体工作方法是在两相邻钻孔间分

别布置接收天线和发射天线,固定发射天线,接收天线沿钻孔移动,每隔相应距离接收一次,可得到一系列的射线,记为一次扫描;移动发射天线,进行另次扫描,直至射线覆盖整个研究区,并达到一定的密度。每条射线记录了电磁波振幅和走时等有用信息,反映的是沿射线方向岩层的平均物性参数。当研究区内某点附近有数条射线通过时,即可通过公式求得该点的物性参数。当利用射线走时信息作层析成像时,得到的是电磁波在研究区内介质中传播的速(慢)度特征,称为速度层析;当利用振幅信息时,得到的是电磁波在研究区内介质中的衰减特征,即衰减层析。

运用跨孔雷达层析成像技术可以研究地下深部岩层的裂隙发育程度或破碎程度,并可研究深部地下水的径流情况。

3 应用实例

本次工作旨在通过利用钻孔雷达的 2 种测量方式探明地下深部灰岩中裂隙和溶洞的发育情况。为此,我们利用瑞典 RAMAC 钻孔地质雷达,对开滦矿物局范各庄煤矿露头区彭 3 孔奥陶系灰岩进行了单孔雷达反射研究,对彭 2 孔和彭 6 孔奥陶系灰岩进行了跨孔雷达层析成像研究。3 个测试孔均位于岩溶和陷落柱发育区,各钻孔详细资料见表 1。

表 1 钻孔资料

项目	彭 2 孔	彭 3 孔	彭 6 孔
钻孔深度(m)	400	400	400
孔口标高(m)	31.745	32.96	32.013
孔中水位标高(m)	±0	±0	±0
第四系深度范围(m)	0~61.95	0~56.04	0~53.04
灰岩深度范围(m)	61.95~400	56.04~400	53.04~400
孔径(mm)	168	219	219
套管范围(m)	0~79.39	0~58.50	0~53.54
套管直径(m)	168	219	219

3.1 所用钻孔雷达主要技术参数

动态范围 150 dB,采样精度 1 ns,最大承压 150×10^5 Pa,采样频率 30~4 000 MHz,采样点数 256~4 096,叠加次数 1~32 767,时窗大小 0~11 μ s,可接收的最小信号 1 μ V。

本次测试所用天线为 60 MHz 全方位天线,采样频率 491.62 MHz。

3.2 野外数据采集

彭 3 孔的单孔雷达反射研究:测量范围 63.2~390 m,采样间距 0.5 m,接收和发射天线间距 4.9 m。

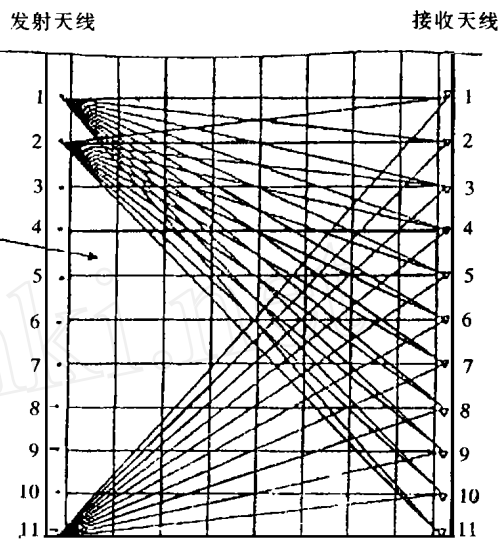


图 2 跨孔雷达层析成像原理图

彭 2 孔和彭 6 孔的跨孔雷达层析成像研究:两孔间距 89.19 m,发射天线置于彭 2 孔,接收天线置于彭 6 孔,测量深度 302 ~ 398 m,采样间隔 4 m(边界处加密),总计扫描 24 次,采集射线 584 条。

3.3 数据处理和资料解释

对雷达资料进行地质解释首先需要数据处理,然后进行图像判释。数据处理主要包括增强有效信息,抑制随机噪声,压制非目的体的杂乱回波,提高图像的信噪比和分辨率等。图像判释主要依据地质雷达图像(包括单孔反射剖面图和雷达层析图像)的正演结果和已知的地质、钻探资料,对获得的雷达资料进行合理的地质解释。

3.3.1 单孔雷达反射图像解释及结果

本次野外采集的数据质量较高,经过基本数据处理后得到的结果可用于雷达图像解释,单孔反射数据通常用变灰度图和波形曲线组合显示。

经已知点校正,得灰岩中电磁波传播速度 120 m/ns,辅以至时信息可推出本次径向上最大探测距离达 45 m。在 63.2 ~ 390 m 单孔反射雷达图像上共解释出 6 个点状反射体和 8 个面状反射体。这些反射体雷达图像特征清晰、典型,其代表性图像见图 3、图 4。其中点状反射体距钻孔最近距离和面状反射体与钻孔夹角是通过一个专门程序计算出来的。根据对该区地质资料分析,可以推测这些点状反射体是溶洞,面状反射体是岩溶裂隙^{[2] ①}。

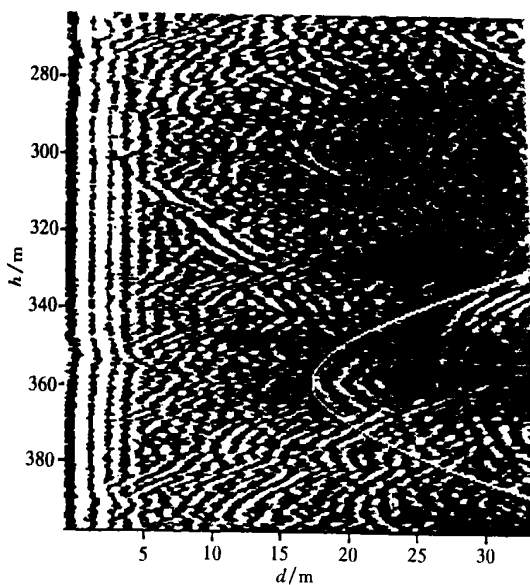


图 3 典型点状体反射雷达图像

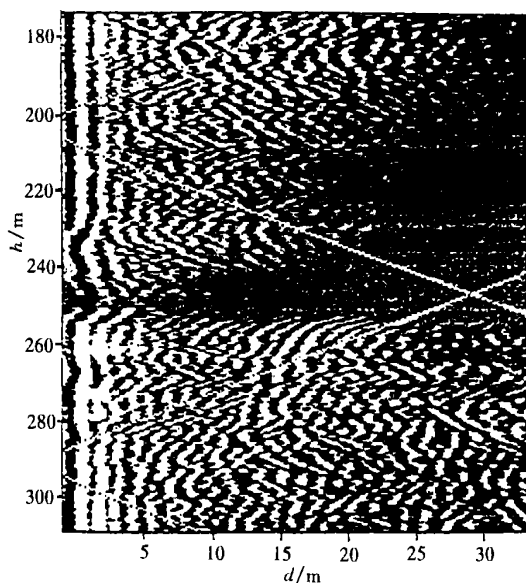


图 4 典型面状体反射雷达图像

3.3.2 跨孔雷达层析成像及解释

跨孔雷达层析成像数据处理过程如下:(1)对原始数据做滤波处理,去除随机噪声;(2)将扫描序列和钻孔资料录入微机,建立钻孔、射线以及振幅(走时)间的内在联系;(3)对射线进行计算机自动处理,求得射线走时和振幅,并以人机对话方式进行错误射线校正;(4)选定层析成像参数,采用共轭梯度法迭代求解各像元的衰减系数或慢度;(5)为避免像元边界处所得物性参数突变,还须采用样条插值法对各像元参数做圆滑处理;(6)生成雷达层析图像;(7)将慢度

① Du Bois J-C. GPR analysis in limestone. Presented at 54th meeting of the EAEG

层析图像转化为速度层析图像。

对野外数据进行以上处理,得雷达层析图像(图 5)。通过层析分析,得到研究区电磁波平均速度为 115 m/ns ,衰减系数平均为 0.32 dB 。

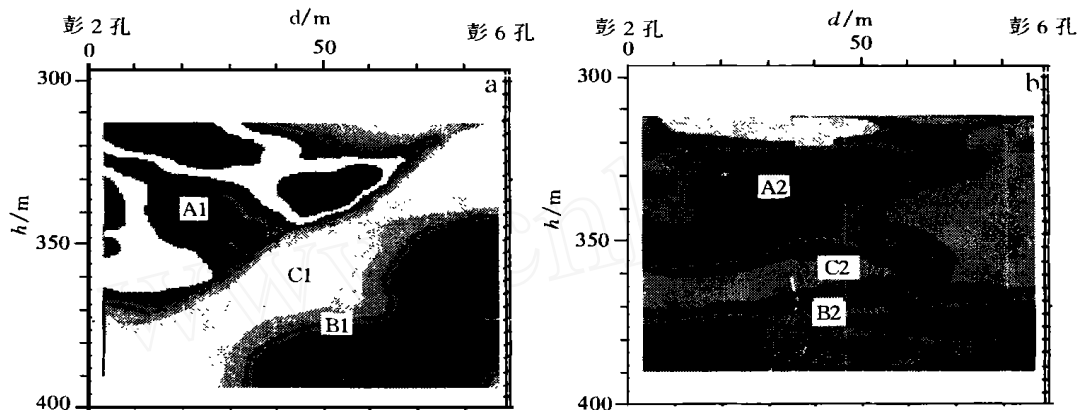


图 5 彭 2 孔—彭 6 孔间雷达层析图像

a—雷达速度层析图像,黑色表示低速带;b—雷达衰减层析图像,黑色表示高衰减区

可以看出,在 2 种方式的雷达层析图像中高衰减区与低速区整体规律基本一致。在图 5a,b 正中,分别有低速带 A1 和高衰减区 A2;下方分别有低速带 B1 和高衰减区 B2 贯通于两孔之间。根据区域地质资料推测,孤立的 A1,A2 区是裂隙和小溶洞发育区;B1,B2 带裂隙发育且贯通,是地下水运移的良好通道。从工程地质角度看,上述地带是不良工程地质体(带)。图中 C1,C2 分别为高速带和低衰减区,表明该区岩层完整性良好。

4 结论

1. 钻孔雷达径向探测距离大,可以发挥钻孔的最大效益,适用于地下深部的高分辨率探测,在许多情况下是深部工程唯一可行和有效的探测手段。

2. 在钻孔地质雷达单孔反射雷达图像上,溶洞和岩溶裂隙反应清晰,说明单孔雷达反射法用于研究灰岩的岩石特性效果显著。但在全方位天线的单孔反射雷达图像上,点状反射体和面状反射体的空间方位不能确定。要确定这些反射体空间方位可通过 3 个以上钻孔的单孔反射测量联合求得,也可通过单孔方向性天线测量求得。

3. 雷达层析成像技术可以探明地下深部的岩层破碎程度、裂隙和岩溶发育程度,适用于地下深部的岩层特性研究。由于彭 2 孔和彭 6 孔岩芯钻孔柱不能提供测试段灰岩裂隙和溶洞发育程度的定量、半定量评价,故本次跨孔雷达层析成像探测的结果无法用钻孔柱状资料来验证。

4. 跨孔雷达层析成像接收的是单程透射波信号,单孔反射法接收的是双程反射波信号,故径向上前者的测试距离大,为后者的 2 倍以上。

本次工作得到中国矿业大学建筑工程学院陈先德实验师、王衍森硕士的大力帮助,开滦矿务局总工程师殷作如、矿务局地测处和范各庄煤矿有关人员提供了便利,在野外测试中瑞典 MALA GeoScience 公司 Borje. Niva 先生和 Lars. Lundmark 先生给予了指导,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 Sandberg E ,Olsson O ,Falk L. Combined interpretation of fracture zones in crystalline rock using singlehole , crosshole ,tomography and directional borehole radar data. 3rd MGLS symposium in Las Vegas ,1989
- 2 Stevens K M ,Lodha G S ,Holloway A L ,et al. The application of ground penetrating radar for mapping fractures in plutonic rocks within the Whiteshell research area ,Pinawa ,Manitoba ,Canada. Journal of applied geophysics 1995 (33) :125 ~ 141

THE PRINCIPLE AND APPLICATION OF GEOLOGICAL DRILL HOLE RADAR

Song Lei ,Huang Jiahui ,Yang Weihao

(Institute of Architectural Engineering , China Mining University , Xuzhou 221008)

Abstract This paper describes the working principle of drillhole radar and recommends two working patterns : single-drillhole reflection and crosshole tomographic imaging. The technique was used to make lithologic evaluation of deep strata and detect geological anomalous bodies with obvious effects obtained.

Key words drillhole radar ;single drillhole reflection ;tomographic imaging ;lithologic evaluation of strata ;detection of geological anomalous body

第一作者简介 宋雷 ,男 ,助教 ,1998年毕业于长春科技大学 ,硕士学位。目前主要从事地质工程和岩土工程的研究工作。发表论文数篇。