维普资讯 http://www.cqvip.com

第22卷 第3期
2008年6月

矿 产 与 地 质
MINERAL RESOURCES AND GEOLOGY

Vol. 22, No. 3
Jun., 2008

紫金山金-铜矿露天采矿场地下不明空区的地质雷达探测①

邓世坤，梅 宝，胡朝彬
（中国地质大学地球物理与空间信息学院，武汉 430074）

摘 要：采用先进的地球物理技术探明露天采矿场地下不明空区的分布情况，准确确定其平面分布范围、顶面埋深及空间高度，对保障露天采矿作业的安全进行、预防突发性事故的发生具有十分重要的意义。运用地质雷达对福建紫金山金铜矿露天采矿场地下不明空区进行探测，在两个不同探测区块共完成18条探测剖面，剖面线总长近4km；经处理后的实测地质雷达剖面具有高清晰度、高分辨率，能准确反映地下各种不同规模的不明采空区的属性、平面位置、顶板埋藏深度、空区大致高度；地质雷达探测共查明较大空区异常55个。采用50MHz天线的地质雷达系统在该露采场的有效探测深度可以达40m以上。在露天采矿场，地质雷达探测受矿区地形条件及环境影响很小，可直接在岩（矿）石表面进行，不受第四系覆盖层对雷达波衰减吸收的影响。因此，地质雷达非常适应露天采矿场地下采空区的探测及定位。

关键词：地质雷达；露天采矿场；地下采空区；高分辨率探测；紫金山金铜矿
中图分类号：P631.325 **文献标识码**：A **文章编号**：1001－5663(2008)03－0255－06

0 前言

在我国有些露天采矿场由于多方面的原因导致其地下存留不明空区，这些空区的存在对露天采矿作业过程中人员与设备的安全构成隐患。采用先进的地球物理技术探明露天采矿场地下不明空区的分布情况，准确确定其平面分布范围、顶面埋深及空间高度，对保障露天采矿作业的安全进行、预防突发性事故的发生具有十分重要的意义。从理论上讲，传统的地球物理方法，如重力、电阻率法、地震等勘探技术都具有探测地下空区的可能性，但由于受露天采矿场复杂的地质与地球物理条件（如地形起伏较大、场地不开阔、地表为基岩直接出露、及机械噪声与工业游散电流干扰严重等）的影响，采用这些传统的地球物理技术探测露天采矿场的地下空区时通常难以取得理想的效果。

地质雷达技术是20世纪80年代末开始在工程与环境勘探领域得到广泛采用的一种现代地球物理探测技术[1~2]。地质雷达技术目前被广泛应用于各类工程基础勘察，在探测地下一定深度范围内的隐伏洞穴、断裂破碎带以及确定第四系覆盖层厚度等方面取得了良好的地质效果[3~6]；作为一种高分辨率的探测技术，地质雷达还被广泛用于各类工程施工质量的检测与监测[7~8]；地质雷达同时也是铁路、公路、水电等各类隧道施工过程中被用来进行超前探测的主要手段之一[9]；地质雷达是目前分辨率最高的地球物理探测手段之一。

福建紫金山金-铜矿早期是以硐采方式进行开采，随着选矿技术的提高，该矿藏上部原来无利用价值的低品位矿石已成为具有开采价值的矿石。因而采矿方式也由硐采转为露采。多年硐采所存留的地下空区由于其缺乏准确的位置和深度资料而成为露天开采作业最大的安全隐患。多年来，紫金矿业有关部门一直在致力于寻找一种有效的探测技术以对该露天采矿场地下不明空区进行探测定位。

2006年6月，中国地质大学地球物理与空间信息学院地质雷达组受紫金矿业集团邀请采用地质雷达在该露天采矿场进行地下空区探测试验，其试验结果得到该集团有关部门认可。在此基础上，我们于2007年1月在该露天采矿场两块地面岩移、塌陷较多的区

① 收稿日期：2007－09－10 作者简介：邓世坤（1963－），湖南益阳人，教授，长期从事工程与环境地球物理教学与科研工作；曾特邀参加我国第19次南极科学考察。

维普资讯 http://www.cqvip.com

域开展了地质雷达探测。本文以地质雷达在该采矿场地下空区探测的实际应用为例探讨地质雷达技术在露天采矿场地下不明空区探测中的实际应用效果。

1 地质雷达探测原理[1~2]

地质雷达是采用高频电磁波探测地下地质结构与特征的地球物理探测技术。地质雷达探测采用一对天线进行。如图1－1所示，由发射天线向地下介质中发射一定中心频率的电磁脉冲波，电磁脉冲波在地下介质中传播时，遇到介质中的电磁性(即岩土介质的导电性、介电性及磁性)差异分界面会发生反射和透射；被反射的电磁波传回地表，由接收天线接收；电脑与仪器控制台相连接，通过电脑进行操作和控制；接收天线所接收的地下反射回波信号经由光纤传输到仪器控制台，并经过离散采样转换成时间序列信号；由这种时序数字化信号构成每一测点上的地质雷达波形记录道，它包含在该测点处所接收到的来自地下空间的雷达回波的幅度、相位及旅行时间等信息。由电脑收集并存储每一测点上雷达波形序列，即可形成一个由若干记录道构成的地质雷达剖面(见图1－2)。通过对地质雷达剖面进行适当的处理与解译，便可获得剖面下方的有关地质信息(或地下目标体的内部结构特征)。

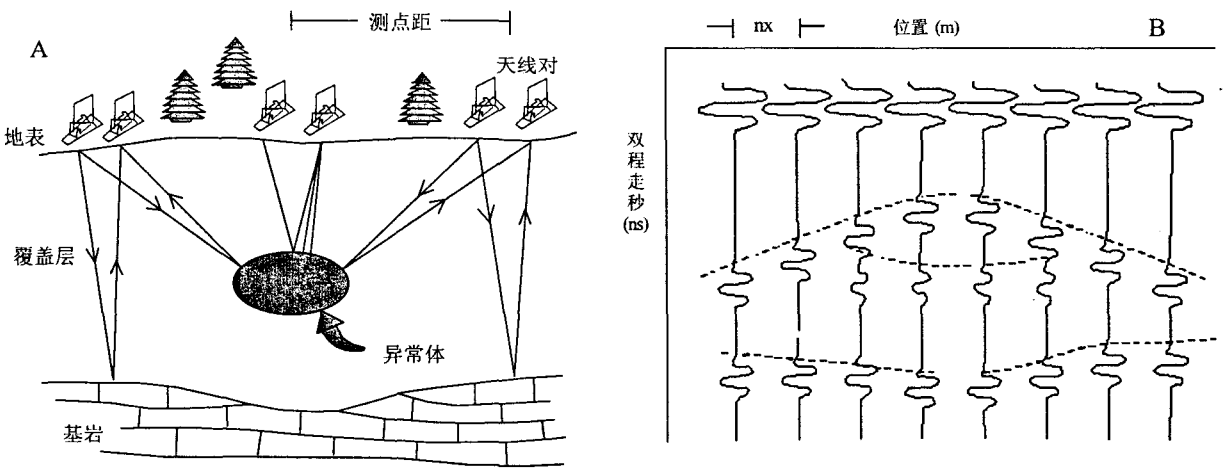


图1 地质雷达探测原理图

A：地质雷达现场探测示意图； B：地质雷达剖面示意图

Fig. 1 Principle map of GPR detection A: Sketch map of field detection by GPR; B: Profile sketch of GPR

2 工区地质及地球物理特征概述

紫金山金铜矿床是80年代在我国东部陆相火成岩区勘探的一个大型金铜矿床，位于福建上杭县城北15km处。该矿床位于闽西南晚古生代凹陷之西南、云霄－上杭NW向深断裂带与宣和NE向复式背斜交汇处，上杭NW向的白垩纪火山－沉积盆地的ME缘，矿体赋存为上金下铜。矿区地层主要分布于外围地区，矿区范围内仅有白垩纪火山－沉积岩零星分布。燕山期岩浆岩占据矿区中部，区内断裂构造发育。

经过数年的露采作业，工区目前的地表地貌呈现为一大型露采坑(称为'锅底')，'锅底'标高为700m，'锅底'地势平坦，其面积约为200×300m^2。以'锅底'为中心，盘旋而上的采矿平台的平均宽度约为10m，相邻采矿平台之间的高程差为12m，本次地质雷达探测所要求达到的最高平台的高程为856m。各采矿平台沿走向方向相对较平坦。

工区地表为露采所揭露的岩(矿)石，具有角砾块状结构，局部岩(矿)石呈粉质结构。整体而言，探测工区地下岩(矿)石结构不均匀，裂隙较发育。岩(矿)石结构的这种不均匀性对地质雷达探测所采用的高频电磁波具有较强的随机散射作用，这种散射作用会在一定程度上影响雷达波的穿透深度，同时会在地质雷达剖面上产生无规则的杂乱回波，地质雷达剖面上的这种杂乱回波会在一定程度上掩盖来自地下空区的有效反射，对地质雷达探测形成干扰。

3 工作方法与技术

3.1 现场探测工作布置与测线定位

地质雷达现场探测工作在该露天采矿场内两块

维普资讯 http://www.cqvip.com

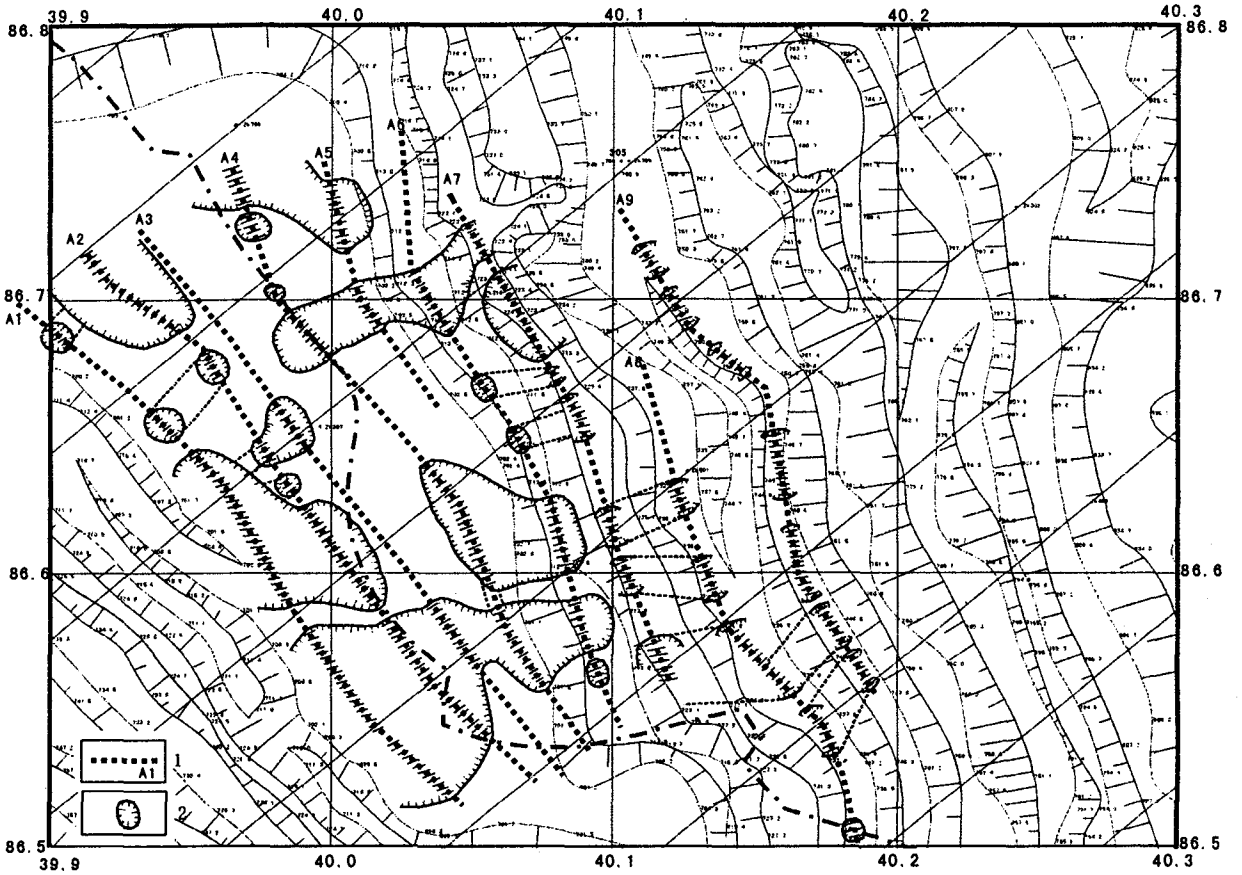


图2 A测区地质雷达测线布置及空区异常分布平面图

Fig. 2 Plane map showing the disposal of GPR surveying lines and distribution of cavities' anomalies in A surveying area

A1～A9为测线编号及起点位置 1—地质雷达测线 2—空区及其边界

地面岩移、塌陷较明显的区域内进行，两块待勘探区域的地面条件基本相同。根据矿方要求，地质雷达测线间平均距离设计为25m，根据探测区域内实际地形来布置地质雷达探测剖面，采用测绳、罗盘和水准测量仪相结合对探测线进行定位。本次空区探测在该露采场的A、B两个区域共布置地质雷达测线18条。A测区位于该露采场的中部'锅低'及其东北边的几个平台上；B测区位于该露采场的东南部的各采矿平台上。A、B两探测区相距约300m。在A探测区共布置9条探测剖面，其中5个剖面位于'锅底'，4个剖面沿'锅底'东北面的采矿平台布置。在B探测区共布置9条探测剖面，这9个剖面均沿平台走向布置在各平台上。各测线均沿平台布置，因而沿每条测线方向地面高程接近相同，可以避免地形起伏对地质雷达探测结果的影响。图2给出了A测区地质雷达探测工作布置图，B测区地质雷达测线布置见图4。

3.2 地质雷达探测与数据处理技术

现场探测采用加拿大Sensor & Software公司生产的EKKO IV型低频探地雷达系统，采用主频为50MHZ的天线进行探测，发射与接收天线距2m，测点距为0.5m，保持天线对与测线垂直，采用反射剖面法进行工作，设计采样时间窗为900ns。

对实测地质雷达资料主要采用了数字滤波处理以消除或压制地质雷达剖面上来自地下岩(矿)石裂隙的散射杂波干扰，提高地质雷达剖面的信噪比，突出地下空区的反射回波异常；对原始数据进行指数扩散增益补偿(SEC)以消除雷达波在地下传播过程中的扩散与吸收衰减影响，突出深部空区目标的反射异常；由于受构造控制作用，测区内岩矿石发生变质作用的程度不同，在测区内有些部位岩矿石的导电率会明显高于其它部位岩矿石的导电率，这会导致同一地质雷达剖面上不同段雷达波幅度的吸收衰减程度会有所不同。因此，在对雷达剖面数据进行振幅恢复时，必须分段采用不同的吸收衰减补偿系数。

在对地质雷达剖面进行时—深转换时必须给出雷达波在岩石介质中传播的平均速度。在早期的试验

维普资讯 http://www.cqvip.com

阶段，根据该区的岩性特征确定平均雷达波速度为0.11m/ns；根据该速度值所标定的地下空区的顶面埋深与采矿场给出的深度吻合得很好。因此，结合测区岩性特征及先前试验资料进一步确定了该区岩石介质雷达波的平均波速。

4 地质雷达剖面特征分析、解释

图3为在A测区A1测线（其位置见图2）所探测的地质雷达剖面及其推断解释地质断面，该测线走向为由WN向EN。图3（上图）地质雷达剖面横坐标表示测点位置，左边纵坐标为雷达反射波双程走时，单位为ns（10～9s）；右边纵坐标为转换深度，即根据所测定的反射波双程走时，结合介质中平均雷达波速度并考虑接收与发射天线偏移距离换算出的深度。从图中可以看出该雷达剖面所显示的有效探测深度接近40m；雷达剖面对地下采空区反映十分清晰，分辨率很高。根据地质雷达剖面上反射波同相轴特征以及反射回波波组特征，可以确定出该剖面下方共有7个采空区存在。采空区可分两类：一类为已回填（或部分回填）采空区，一类为未回填采空区，7个采空区的编号分别为A1－1～A1－7（见图3）。

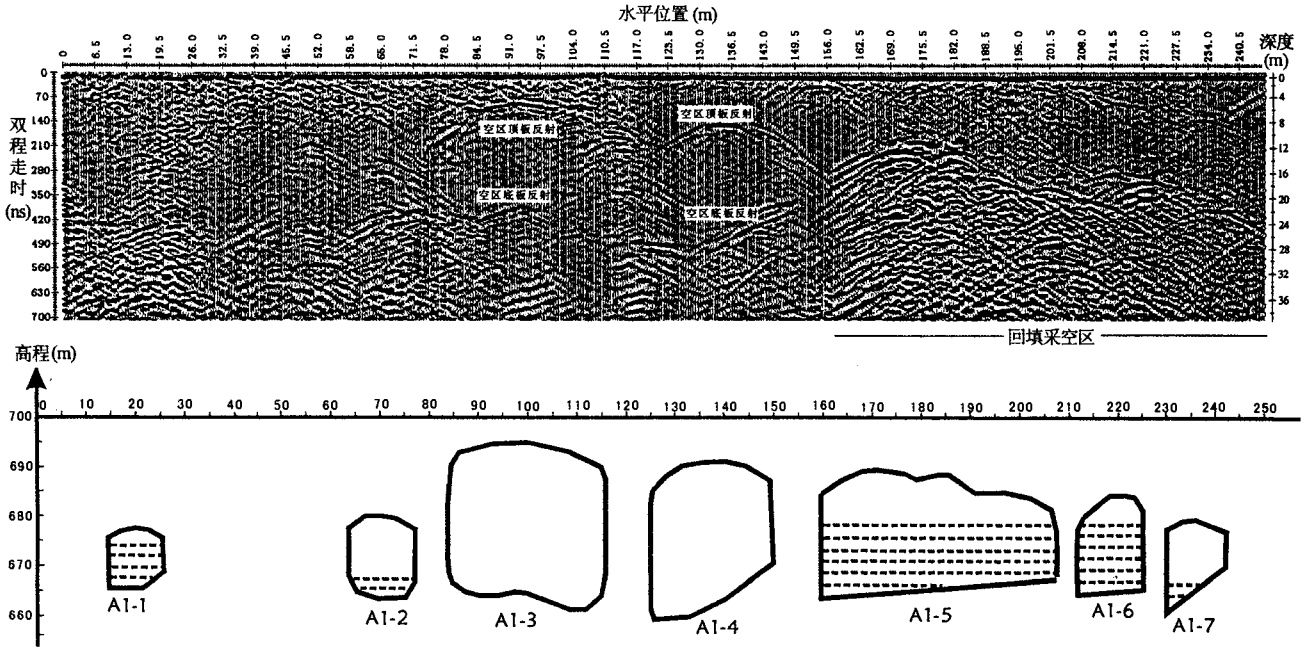


图3 A测区A1测线地质雷达剖面（上）及推断解释的地质断面（下）雷达平均波速为0.11m/ns

Fig. 3 GPR profile of A1 surveying line in A surveying area (Upper figure) and its inferring illustrating geological section (Lower figure) with the average radar wave velocity being 0.11m/nanaosecond

该剖面中部78～152m范围有两个规模较大的未回填的采空区存在，其编号为A1－3、A1－4。其中A1－3空区顶板埋深约为4m，A1－4空区顶板埋深约为8m；二者顶、底板在雷达剖面上均有反映。其中A1－4空区顶、底板反射同相轴清晰且连续性好，其顶板同相轴呈弧形且连续，是采空区拱顶形态的反映，其底板反射同相轴也十分清晰、连续性好，且明显向测线起点方向倾斜，即向西北方向倾斜，且产状较陡。而A1－3空区的顶板同相轴虽然清楚且呈弧形，但存在明显错断迹象，其底板反射波同相轴的清晰度相对较差，连续性也差些。这些特征反映了A1－3空区的顶板结构不连续，存在错断，即在测线上A1－3空区对应的地面位置（78～115m）已发生岩移，A1－3空区的顶板岩石已发生破裂，导致顶板岩石结构不连续；而顶板岩石破裂导致其雷达反射波同相轴错断，同时也使来自底板反射波的幅度降低（顶板岩石破裂，会使来自底板的雷达反射回波在穿过顶板时产生更强的散射，因而会使在地面上接受到的来自底板的雷达反射波能量减弱）。A1－3和A1－4两个采空区的顶、底板之间的空间距离的计算应考虑雷达波在岩（矿）石介质中传播和在空气中传播的速度差异，应根据雷达波在空气介质中的传播速度（0.3m/ns来计算采空区的空间高度。

该剖面右端（自157m起至剖面终点）下方有强

维普资讯 http://www.cqvip.com

反射回波存在，反映该段地下有采空区存在。这一段地质雷达剖面的特点是来自采空区顶面的反射波同相轴呈多个弧形出现，且这些弧形同相轴的顶点的水平位置和深度有所不同，弧形同相轴组下方是杂乱的强反射波组，这种杂乱强反射回波一直延续到剖面底部。据此可以推断：这一段地下采空区为已回填的采空区。地质雷达剖面上的杂乱回波是由采空区内回填碎石体对雷达波的散射所产生。根据该段采空区顶面反射的弧形同相轴的特点可以推断该剖面上地下采空区并不是连成一个整体，这些采空区之间有岩柱(即安全柱)分隔。

在该测线的左段(0～80m 范围)，地质雷达剖面上有局部反射存在，推断为小规模采矿坑道所形成的反射。

图 3 中下图为根据地质雷达剖面推断解释的地下采空区分布的地质断面。

对测区内每条地质雷达剖面进行分析解译，可以得到每一剖面下方地下采空区的分布情况。综合测区内各探测线所反映的地下采空区的顶板高程及其在地面的水平投影分布，可以勾画出各测区地下采空区的平面分布范围，图 2 为 A 探测区地下采空区平面分布范围图。从图中可以看出，A1、A2、A3、A4、A5、A6 六条探测线所反映的地下采空区顶板具有相近的高程，根据相邻测线的探测结果可将地下同一采空区的边界大致圈定出来。而 A7、A8、A9 三条测线分别位于高程为724m、736m 及748m 的平台上，且各自所反映的地下采空区的顶板高程相差很大，故不能将这些探测线所反映的地下采空区的边界圈定出来。B 测区的 9 条探测线的资料与 A 测区的基本特征相同，不同之处是 B 测区的 9 个剖面分别位于不同高程的平台上，各平台之间的高程差为 12m。根据各测线地质雷达剖面资料的推断结果，可以获得 B 探测区地下采空区平面分布情况(见图 4)。

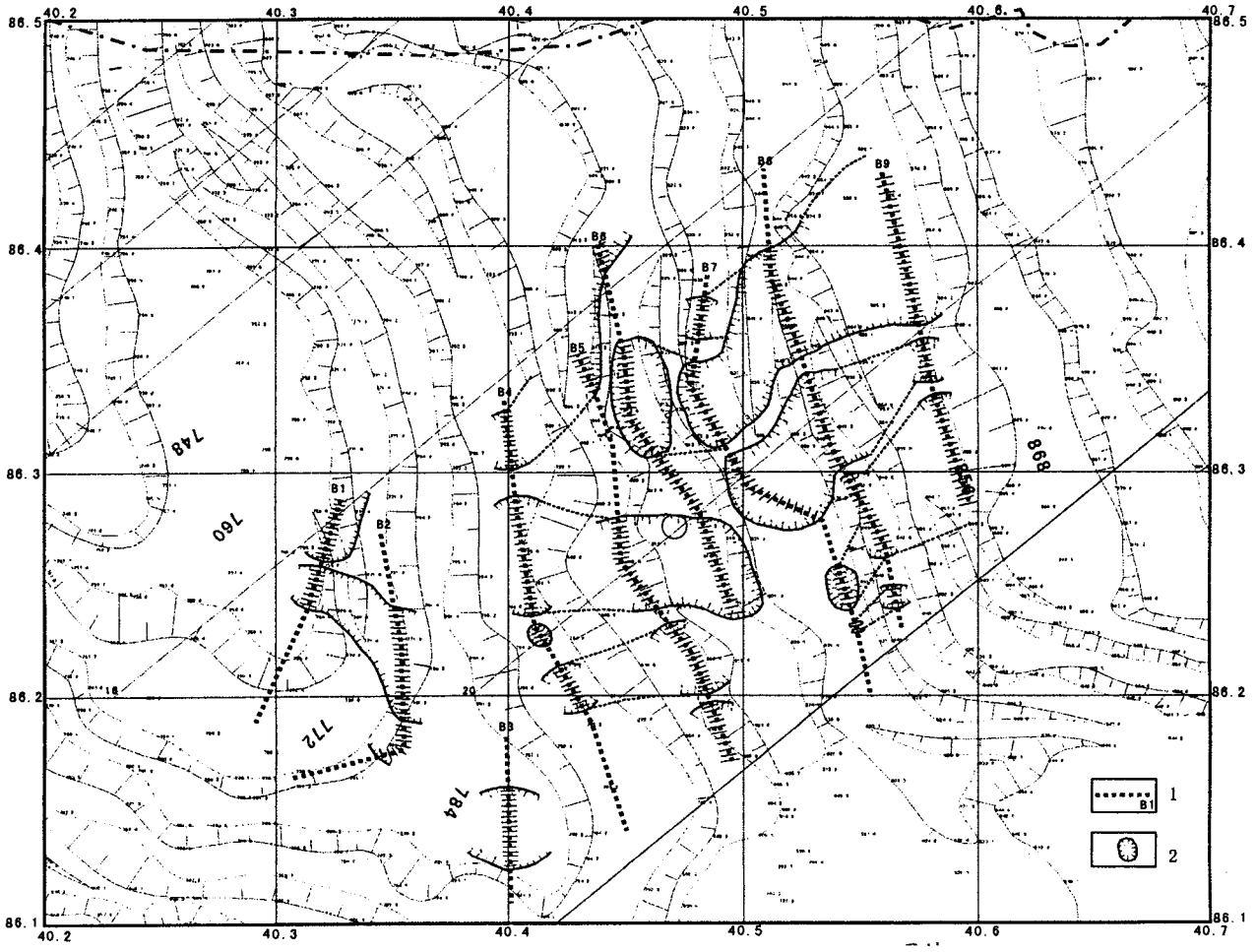


图 4　B 测区地质雷达测线布置及空区异常分布平面图

Fig. 4　Plane map showing the disposal of GPR surveying lines and distribution of cavities' anomalies in B surveying area

B1～B9 为测线编号及起点位置　1—地质雷达测线　2—空区及其边界

维普资讯 http://www.cqvip.com

5 结束语

地质雷达技术与传统的地球物理方法有很大的不同，地质雷达的应用受场地地形条件影响小，不受机械振动噪声与工业游散电流场干扰影响，地质雷达的探头(发射与接收天线)可直接贴在岩石的表面进行探测，无需考虑场地接地条件的影响，且对探测场地及环境无破坏作用。因此，地质雷达非常适应于露天采矿场探测地下采空区。地质雷达剖面能高清晰、高分辨、准确地反映地下各种不同规模的不明采空区的类型及回填情况、平面位置、顶板埋藏深度、空区大致高度。在紫金山金铜矿露天采矿场的两个探测区域内地质雷达探测共查明较大规模空区异常55个。本次探测成果的准确性一方面得到了早期采矿场所设计的现场试验过程的验证；另一方面，后期在A、B两探测区的探测结果的可靠性也为采矿场方面所掌握的部分已知空区的存在情况所证实。由于露天采矿场岩石直接出露地表，采用地质雷达探测不受第四系覆盖层对雷达波的衰减吸收的影响，采用加拿大EKKO IV型探地雷达中心频率为50MHz的天线系统在紫金山金铜矿露天采矿场能达到40m以上的有效探测深度。

地质雷达具有探测效率高、探测周期短、探测成果资料精度高等优点，地质雷达图像能全面反映出探测深度范围内各种不同规模、不同类型的空区异常的存在。

因此，地质雷达探测技术是一种可靠的、高效的探测及圈定露天采矿场地下由于各种原因存留下的不明空区的有效的地球物理探测手段。

致谢：该探测项目得到了紫金矿业集团股份有限公司资助。在该项目的早期现场试验及实施期间得到了紫金山金铜矿采矿厂的及紫金矿业集团的大力支持与协助，在此一并致以衷心的感谢！

参考文献：

[1] Davis JL, Annan A P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 1989,37: 531-551.

[2] Daniels D J et al., Introduction to subsurface radar. IEE Proceedings, 1988,135(4): 278-320.

[3] Deng S K, Zuo Z R, Wang H L., The application of ground penetrating radar to detection of shallow faults and caves. GPR'94 Proceedings, 1994, Kitchener, Ontario, Canada, Vol. 3 of 3: 1115-1120.

[4] Deng S K, et al., Ground penetrating radar imaging of railroad subgrade and subsoil strata. Proceedings of the 2nd International conference on Environmental and Engineering Geophysics, Wuhan, China, 2006, Vol. 1 of 2:550-554.

[5] 朱德斌，邓世坤，覃建波. 探地雷达探测潜在喀斯特地面塌陷区的可行性研究[J]. 工程勘察，2005(5)：65-68.

[6] 赵远由，林贵生. 探地雷达在隐伏岩溶勘察中的应用[J]. 矿产与地质，2006,20(3)：279-282.

[7] 邓世坤. 探地雷达在水利设施现状及隐患探测中的应用[J]. 物探与化探，2000,24(4)：296-301.

[8] 邓世坤. 探地雷达用于深圳湾软基处理工程中的质量检测[J]. 岩土工程学报，2000,22(1)：133-135.

[9] 钟世航，孔宏志，王荣，等. 隧道掌子面前方地质预报的现状及发展之路[J]. 工程地球物理学报，2007,4(3)：180-185.

Ground penetrating radar detection of underground unknown mining cavities in the open-pit at the Zijinshan Au—Cu deposit

DENG Shi-kun, MEI Bao, HU Chao-bin

(*Institute of Geophysics & Geomatrics, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: It is very significant for keeping safe mining in open pit and preventing sudden accident by accurately defining distributing area of ore field, roof depth and space heights through applying advanced geophysical technology to detect the underground unknown mining cavities in open pit. Using ground pentrating radar (GPR) to detect the underground unknown mining cavities in open pit in the Zijinshan Au—Cu deposit of Fujian Province, 18 detecting profiles with their total length of 4km in two different detecting blocks have been finished. The processed GPR profiles with high clarity and resolution can reflect exactly the attributes, plane location, roof depths and approximate heights of the cavities. 55 larger scale unknown cavities have been revealed by GPR. GPR system with 50MHz antennas can detect effectively the depth of more than 40m in this open pit. GPR would be little affected by landform condition and environment in open pit, and it can be used on rock surface directly without any absorbing attenuation of radar waves from Quaternary overburden. Inhence, GPR is very suitable for the detection and location of the under ground unknown mining cavities in open pit.

Key Words: ground penetrating radar, open pit, underground mining cavities, high resolution detection, Zijinshan Au—Cu deposit