

北京地区浅层采空区高密度电法探测应用分析

肖敏, 陈昌彦, 白朝旭, 贾辉, 苏兆锋, 吴言军

(北京市勘察设计院有限公司, 北京 100038)

摘要: 高密度电法已广泛应用于煤层采空区探测之中, 采空区充填性质的不同造成其在高密度电法数据剖面中的表现特征也不相同。本文主要介绍运用高密度电法进行浅层小煤窑采空区探测的一些经验和案例。采用高密度电法中的温纳装置对门头沟地区未充填、部分充填的小煤窑巷道和石景山区富水充填的小煤窑采空区的探测, 取得了很好的效果。探测结果显示, 未充填和部分充填的小煤窑巷道表现为高视电阻率异常, 位置与测线周边发现的小煤窑窑口位置相对应。而富水充填的小煤窑采空区表现为低视电阻率异常, 经钻探验证, 采空区内充填有富含水的粉末状的煤灰, 含坑木。需注意在山区进行高密度电法测试时, 台阶状的地形对高密度电法测试的干扰影响较大, 以温纳装置为例, 测试数据在台阶地形处表现为高低阻相邻的八字形干扰, 且电极距越小, 干扰越明显。

关键词: 小煤窑采空区; 浅层采空区; 高密度电法; 地形干扰; 温纳装置

中图分类号: P631

文献标识码: A

收稿日期: 2013—08—28

Analysis and Applications of Shallow Underground Goaf Detection Using High-density Electrical Method in Beijing

Xiao Min, Chen Changyan, Bai Chaoxu, Jia Hui, Su Zhaofeng, Wu Yanjun

(BGI Engineering Consultant Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The high density resistivity method has been widely used in coal mine goaf detection. As we know, the different filling materials of the goaf results in the different characteristics in the 2D apparent resistivity image. Several experiences and cases of using high-density electrical method to detect shallow goaf of small coal mine were mainly introduced in this paper. This company successfully used the high density resistivity method in small coal mine roadway detection of no filling/partly filling in Mentougou district and small coal mine goaf detection of Shijingshan district with the Wenner equipment. The anomalies of roadway of no filling or partly filling appeared as a closed circle with high impedance in the 2D apparent resistivity image. And the positions of anomalies correspond to the small coal mine caves. The anomaly of the small coal mine goaf filled with high moisture materials ap-

基金项目: 北京市科技计划课题(编号: Z121100000812006)资助。

作者简介: 肖敏(1985—), 男, 江西萍乡人, 工程师, 从事工程检测与工程物探工作。E-mail: bgi_xiaomin@163.com

陈昌彦(1968—), 男, 教授级高级工程师, 从事地质灾害评估与治理设计、岩土体工程地质及岩土工程综合测试、检测和监测、计算机在岩土工程中应用等方面研究和技术管理工作。E-mail: chenchangy@sina.com

peared as a circle with low impedance. And the drilling result showed the goaf was filled with powdered coal ash and mine timber with high moisture. When using the high density resistivity method on the mountainous area, we found that the step-form terrain would produce a great disturbance to the detection. The dates of the step-form terrain would appear as a “^”- shape of interference with adjacent high and low resistance in the 2D apparent resistivity image, and the smaller the electrode spacing is, the more serious the interference is.

Key words: small coal mine goaf; shallow goaf; high density resistivity method; terrain interference; Wenner equipment

1 引言

地球物理探测方法在采空区探测的运用已经非常成功及广泛^[1],目前探测采空区的地球物理手段主要包括高密度电法、瑞雷面波法、微重力法、探地雷达法、放射性法(测氡法)、瞬变电磁感应技术、三维地震勘探技术和井中物探技术(测井)等,不同的地球物理方法各有优势和不足。

地下采空区的地球物理性质明确,与周边岩体(土体)存在着明显的物性差异(电阻率、速度差异等),其大致可将采空区分为充填和未充填两种情形,采空区充填状态和充填物性质的不同,其物性差异也不同。高密度电法利用采空区与围岩的电性差异,能够探测出采空区的位置、大致规模、埋深以及充填属性^[2,3]。其探测效果也得到了国内外物探工作者的一致肯定,在国内外文献中记载的成功的探测案例颇多^[4~6]。

笔者运用高密度电法在北京周边山区对浅层小煤窑巷道和浅层小煤窑采空区进行探测,取得了较好的效果。

2 浅层小煤窑采空区工程特性与电阻率特征

2.1 浅层小煤窑采空区工程特性

小煤窑大多位于煤田的浅部边缘地带,开采系统简单,不正规,无完整的地质及采矿资料,具有较大的随意性。小煤窑一般是手工作业,开采范围小,开采深度浅,多在 50m 深度以内,少数也可以达到 200~300m,平面延伸 100~200m,对小煤窑而言,采掘技术落后,一般以巷道采掘为主,向两边开挖支巷道。一般分布无规律或呈网格状,有单层或 2~3 层重叠交错。巷道的高、宽一

般为 2~3m,大多不支撑或临时支撑。采挖过程中为了确保安全生产留有大量煤柱,对较厚的煤层只采挖一部分,有的沿顶板采挖上半部分;有的沿底板采挖下半部分;大多不放顶任其自然坍塌,回采率相当低^[7,8]。

通常可将采空区的变形破坏在垂直方向分为“三带”^[9](图 1)。煤层采空区上部岩层出现塌落形成的冒落带;冒落带上方岩层因弯曲变形作用,产生较大的拉应力,两侧受到较大的剪应力,岩层整体性受到破坏产生大量裂隙,从而形成裂隙带;裂隙带以上直到地面,在自重应力作用下产生弯曲变形,形成弯曲带。

小煤窑在开采工程中,虽然留下了许多残留煤柱或临时支护系统来支持覆岩,但残留煤柱尺寸小、强度差,难以保持长期的稳定性。开采后形成的采空区大多不采取任何处理措施而任其自由垮落。由于残留煤柱大小不一,采空区范围小且无规则,导致上覆岩层破坏规律性差,开采空洞常常欠充填或垮落岩块压密程度差。由于采深较小,由各种原因导致的残留煤柱破坏和残留空洞垮塌,通常会造成地表的突然塌陷,而且塌陷的发生时间和持续时间难以估测,因此对地面安全影响极大。

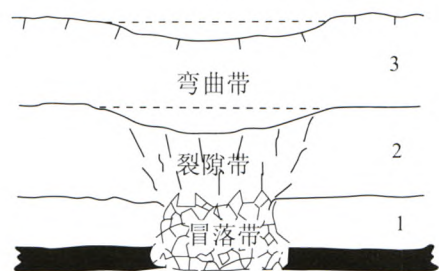


图 1 煤层采空区变形破坏垂直“三带”示意
Fig. 1 The vertical three-zone of deformation of coal mine goaf

2.2 浅层小煤窑采空区电阻率特征

煤层被采空后,在煤层上下岩层形成一定的空隙,破坏了岩石的完整性、连续性,各岩层电阻率将会发生相应的变化。若采空区为完整型采空区,其在电性特征上,一般表现为高阻异常。若为破坏型采空区,其在电性特征上,一般分为两种情况,采空区部分填充,表现为相对高阻异常;采空区全部填充或充水,表现为低阻异常。若为小型煤窑采空区,其电性特征包含在上述两种类型之中,但若采空区范围过小,周围裂隙发育充水,就会产生低阻屏蔽,形成低阻异常区。这些特性成为了高密度电法探测地下采空区良好的地球物理前提。

3 高密度电法方法原理

3.1 基本原理

高密度电阻率探测方法是近十几年来开发研制出的一种新型的直流电法探测系统,是基于垂向直流电测深与电测剖面法两个基本原理的基础上,通过高密度电法测量系统中的软件,控制着在同一条多芯电缆上布置连结的多个电极,使其自动组成多个垂向测深点或多个不同深度的探测剖面,根据控制系统中选择的探测装置类型,对电极进行相应的排列组合,按照测深点位置的排列顺序或探测剖面的深度顺序,逐点或逐层探测,实现供电和测量电极的自动布点、自动跑极、自动供电、自动观测、自动记录、自动计算、自动存储。通过数据传输软件把探测系统中存储的探测数据调入计算机中,经软件对数据处理后,可自动生成各测深点曲线及各剖面层或整体剖面的图像。

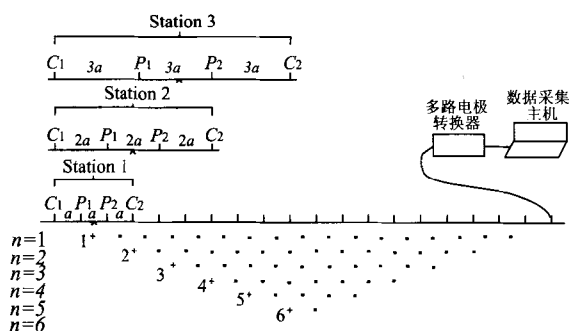


图 2 高密度电阻率法勘探系统示意(温纳装置)

Fig. 2 The detection system of high density resistivity method (Wenner equipment)

图 2 为高密度电法中温纳装置的装置示意图, C_1 、 C_2 为供电电极, P_1 、 P_2 为接收电极, $C_1 P_1 = P_1 P_2 = P_2 C_2$,数据采集过程中通过多路电极转换器转换数据采集层数,改变供电电极和接收电极之间的距离,完成由浅到深的电阻率测试,从而完成最终的剖面数据采集。

3.2 探测影响因素分析

野外数据采集质量是室内数据处理的基础,对于高密度电法来说,数据采集时排列装置选择的合适与否,直接关系到是否能测试出探测目的所反映出的电性差异,从而影响目标体的判断、解释与表达。通常来说,测试装置的选择取决于场地范围、地形状况、探测技术要求及精度、仪器设备、地下地质条件等诸多因素,必须结合现场实际条件进行综合考虑,做到合理有效地利用各种探测要素^[10]。

1)测试场地条件的影响。高密度电阻率法的勘探深度最大可达测线长度的 1/3。通常场地条件允许,一般常使用四极装置,因为该方法能获得最大的测量电位,可以减少供电电压,并有利于压制干扰,增强有效信号。如果场地较小,可采用三极装置。

2)地形条件的影响。地形的高低起伏对高密度电法勘探带来一定的影响,因此现场测试应尽力避免地形的起伏,同时考虑不同装置对地形的影响程度。

地形干扰的案例,如某山区进行的高密度电法测试,由于现场测试条件限制,测线处的地形起伏较大,在水平位置 21、32、42、53m 处均为台阶状地形,采用温纳装置以不同电极距进行测试,测试结果如图 3 和图 4 所示,其中图 3 为 1.0m 电极距测试的结果,图 4 为 2.0m 电极距测试的结果。

如图 3 所示,在水平位置 21、32、42、53m 的台阶状地形处,在剖面上整体表现为高低阻相邻的八字形干扰。图 4 所示 2.0m 电极距的测试结果中显示,台阶状地形的干扰已经明显减弱。试验表明小电极距对地形干扰的反应更加灵敏,对数据造成干扰更大。

3)探测技术要求及精度的影响。探测目标体的大小、深度及分辨能力会对探测技术提出具体的要求,由于不同装置具有不同的灵敏度,这也会成为测试装置选择的一个重要因素^[11]。实际工作中,通常选择 α 和 β 两种装置进行数据采集,目的是通过不同方法进行综合判别与解释,提高探

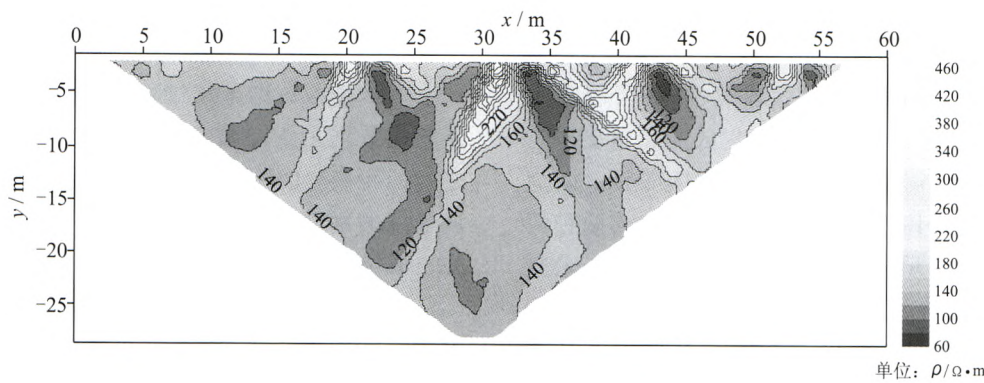


图 3 电极距 1.0m 时的测试结果
Fig. 3 Detection result with electrode distance of 1.0m

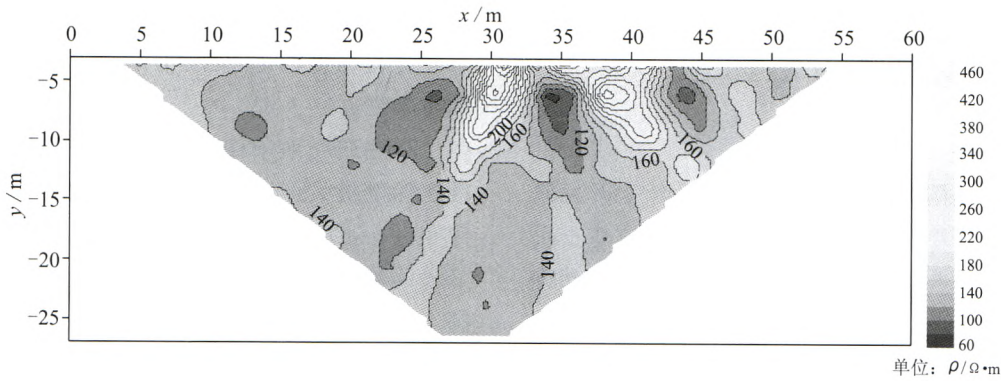


图 4 电极距 2.0m 时的测试结果
Fig. 4 Detection result with electrode distance of 2.0m

测精度。

在实际探测进行测试装置选择时,必须充分考虑地下地质体的垂向和横向变化、探测深度、数据覆盖程度以及信号可靠性等。根据历史数据和经验资料,温纳装置对垂向分辨率比水平方向变化的反映灵敏度高,抗干扰能力强且耗时较少,但其数据量有限。通常该装置解决垂向变化(如水平层状结构)问题比较有利,而对水平变化较大(如狭窄垂向结构)相对较差。温纳—施伦贝尔装置是常用的一种方法,它对地质体垂向及横向有着适当的灵敏度,且数据覆盖程度好。

4 北京地区浅层小煤窑采空区探测

4.1 小煤窑巷道探测

北京市门头沟地区采煤历史悠久,煤窑众多,这当中有老窑、新窑,有国矿、私企、私人盗采的小窑,大量的煤层被部分或全部开采,在地下不同层位留下了大量的巷道和采空区,特别是其中私挖盗采的小煤窑,巷道及采空区深度浅、范围小且无规则,大多不支护或临时支护,通常会造成地表的突然塌陷,而且塌陷的发生时间和持续时间难以估计和预测,对地面安全影响极大。据不完全统计,门头沟区小煤窑矿口数量达数千个,虽基本上都被水泥封死,但仍常伴有地面开裂、塌陷等情况发生。

在门头沟某地区的私采小煤窑窑口往山体内部延伸区域,垂直巷道走向的布置高密度电法测线,测线点位如图 5 所示。测线附近有 3 个已知的小煤窑入口 M1~M3,现场地调结果显示:M1 洞口宽 3.6m,高 1.7m,上有砧盖板,两壁砖墙,出口有运煤轨道,窑口有堆土,向里变窄,已封堵;M2 洞口坡高约 8.0m,洞口已坍塌封堵,从坍塌痕迹观察,原洞口约宽 4.0m,高 3.0m,洞口处斜坡表层有较厚崩塌积碎石土层,植被较发育,洞身延伸方向斜坡地表有变形迹象;M3 洞口已坍塌,宽约 4.0m。

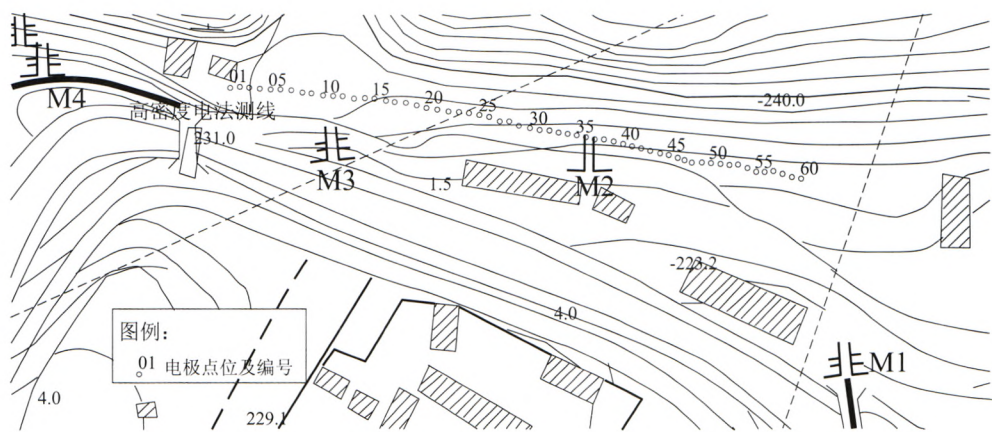


图 5 高密度电法测线点位

Fig. 5 Survey line's electrodes position of high density resistivity method

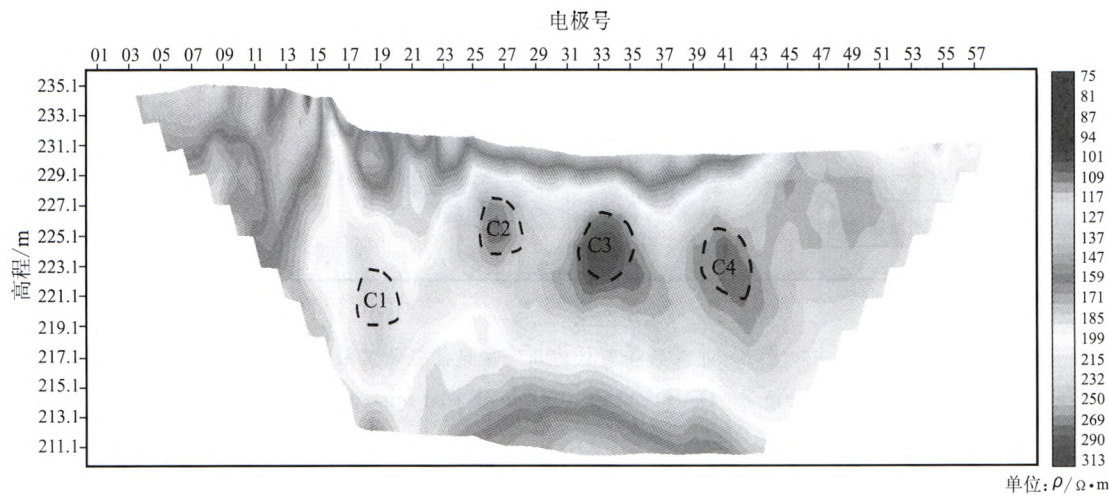


图 6 小煤窑巷道的高密度电法探测结果

Fig. 6 Detection result of small coal mine roadway

探测结果剖面如图 6 所示,剖面中明显发育有 4 个高阻圈闭异常,水平第 18 个电极处发育的 C1 异常对应已知小煤窑入口 M3,揭示的深度相对于其他异常略深,中心埋深为 15.0m,视电阻率为 $250\Omega\cdot\text{m}$ 左右,推测其为部分充填的巷道。第 26 个电极处的 C2 异常、第 33 个电极处的 C3 异常和第 41 个电极处的 C4 异常平行相邻,异常中心埋深为 8.0m,视电阻率为 $250\sim 320\Omega\cdot\text{m}$,推测其为未充填的小煤窑巷道,最接近小煤窑入口 M2 的为 C3 和 C4 异常。

水平位置第 16 个电极处为台阶状地形,剖面中显示有高低阻相邻的“八”字形干扰。

4.2 小煤窑采空区探测

探测区域位于北京市石景山区,区域地质资

料表明,探测区域内存在一地层界线,界线以北为侏罗系窑坡组砂岩、泥岩,界线以南为侏罗系南大岭组玄武岩。在窑坡组砂岩地层中,赋存着一定厚度的煤层,结合调查情况可知,早在 20 世纪 50 年代,此处存在煤窑开采的情况,有多处出煤洞口,山体内存在一定的采空区域。图 7 所示为钻孔揭示的未开采煤层,岩芯较完整,局部呈短柱状。

在煤层上方布置高密度电法测线,测试结果如图 8 所示。资料表明,泥岩的电阻率约为 $10\sim 100\Omega\cdot\text{m}$ 、砂岩的电阻率约为 $10\sim 1000\Omega\cdot\text{m}$,而玄武岩的电阻率较高,约为 $5\times(10^2\sim 10^5)\Omega\cdot\text{m}$,这两组地层的电阻率差异非常明显。

探测结果剖面中窑坡组砂岩、泥岩地层与南



图 7 钻孔揭示的未开采煤层
Fig. 7 The unmined coal seam revealed by drilling hole

大岭组玄武岩地层的地层界线非常明显,视电阻率存在明显高低阻差异,界线上部位于水平位置第 55 电极处。在水平位置第 26~40 电极之间,发育一低阻异常,视电阻率值小于 $50\ \Omega\cdot\text{m}$,推测其为小煤层采空区,且富含水。在该异常上方布置验证钻孔,钻探结果显示(图 9),钻孔底部 49.0~53.0m 揭示为已开采过的煤层,岩芯为粉末状煤灰,含坑木,含水率高,且钻孔在钻至 53m 时出现卡钻现象,这些迹象都表明此处为小煤窑采空区。钻探结果与高密度电法探测结果相吻合。

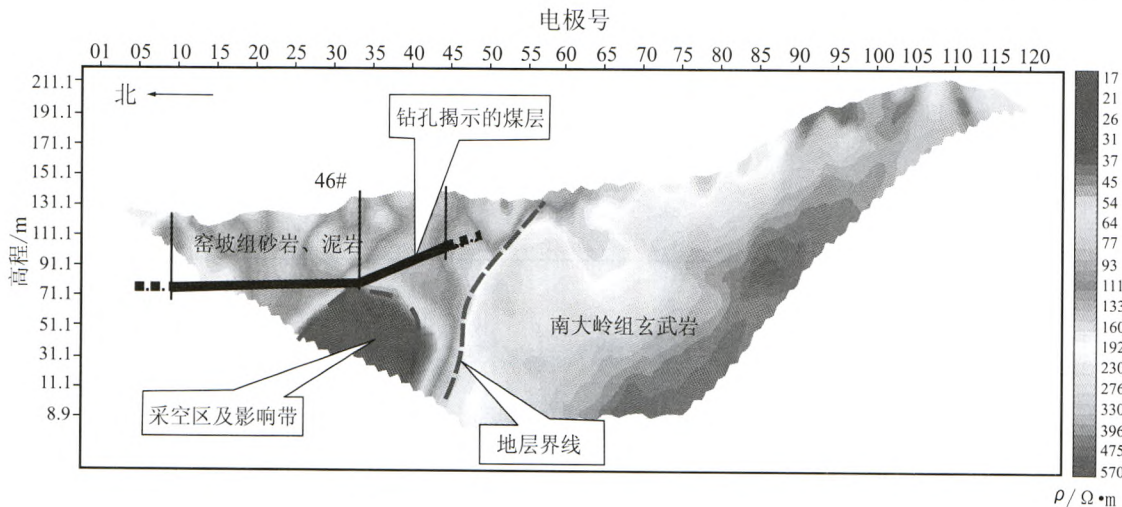


图 8 小煤窑采空区的高密度电法探测结果
Fig. 8 Detection result of small coal mine goaf

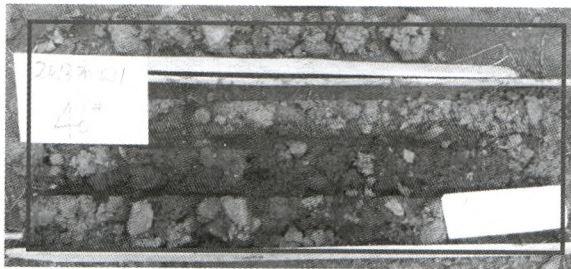


图 9 钻孔揭示的已开采煤层
Fig. 9 The mined coal seam

填,物探结果明显,可以进一步为钻探确定准确的位置。

2)石景山区的小煤窑采空区位置及内部情况亦未知,通过高密度电法测试,探测出一个孤立的明显低阻异常,推测其为富水充填状态,在异常上方布置钻孔,验证其为煤层采空区,堆积富含水的煤灰和坑木,钻探结果与物探结果相吻合。且该场区的地层界线在电阻率剖面上表现明显。

3)在山区采用高密度电法对采空区进行探测时,应当避免地形变化较大的区域,尽量选择在地形平坦处布置测线;若必须在地形起伏的地段进行高密度电法测试时,建议在满足探测精度的条件下,选用较大的电极距。

高密度电法是浅层采空区探测的有效探测方法,已被广泛运用。但其仍旧存在一些局限,例如表层低阻异常的屏蔽作用、难以准确判定异常的规模和形态等。在探测条件复杂的区域,建议采用多种物探的方式进行综合探测和解释,提高探

5 结 语

1)门头沟探测区域的小煤窑巷道洞口已封堵,其巷道具体走向、内部充填及是否坍塌等情况均未知,通过高密度电法探测,能够清楚地查明巷道的分布位置与大致深度。剖面中揭示的巷道均显示为高阻异常,表明这些巷道未充填或部分充

测的准确性。

参考文献：

- [1] 刘海涛,杨娜,董哲,等.综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用[J].工程地球物理学报,2011,8(3):362~365.
- [2] 刘爱华,郑鹏.影响采空区精确探测关键因素的分析研究[J].采空与安全工程学报,2008,25(2):132~138.
- [3] 郭秀军,王兴泰.用高密度电阻率法进行空洞探测的几个问题[J].物探与化探,2001,25(4):306~315.
- [4] 冯彦东.高密度电阻率法在煤田采空区勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(5):624~626.
- [5] 张亮国,徐义贤,王云安.高密度电法在沪蓉高速公路勘察中的应用[J].岩土工程技术,2004,18(4):187~190.
- [6] 杨建军,吴汉宁,冯兵,等.煤矿采空区探测效果研究[J].煤田地质与勘探,2006,34(1):67~70.
- [7] 肖川,张义平,刘超,等.高密度电法在探测煤矿采空区富水情况的应用研究[J].科学技术与工程,2012,12(30):201~205.
- [8] 李建华,黄立勇,田军.高密度电法在岩溶、采空区探测中的应用[J].土工基础,2007,21(3):37~39.
- [9] 赵忠海.地球物理探测技术在北京门头沟小窑采空区勘查中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):60~64.
- [10] 吕玉增,阮百尧.高密度电法工作中的几个问题研究[J].工程地球物理学报,2005,2(4):264~269.
- [11] 向阳,李玉冰,易利,等.排列方式及电极距对高密度电法异常响应的影响分析[J].工程地球物理学报,2011,8(4):426~432.

欢迎订阅《工程地球物理学报》

《工程地球物理学报》是由中国地质大学(武汉)和长江大学联合主办的面向国内外公开发行的工程、环境地球物理类学术期刊。本刊是工程、环境、资源地球物理勘探理论、方法、技术学术研究成果的重要交流和展示窗口及前沿学术问题的讨论平台。

国际标准刊号:ISSN 1672-7940,国内统一刊号:CN42-1694/TV。

本刊主要面向国内外地球物理及相关学科的教学、研究和生产人员。刊期为双月刊,128页,A4开本,每册定价15.00元,全年共6期,全年定价90.00元。

欢迎订阅,邮发代号:38—424。

汇款方式：

1. 请从银行汇款：

账户名称：中国地质大学(武汉)

账 号：569 057 528 302

开户银行：中国银行武汉市地大支行

行号(市内)：846 006

(市外)：104 521 003 359

注意：①务必在注释栏写上：付《工程地球物理学报》款；

②将汇款底联扫描后发到编辑部邮箱。

编辑部收到款后将用挂号信寄出正式发票。

2. 如从银行汇款确实不方便,可来电话协商其他交款方式。

编辑部地址：武汉市洪山区鲁磨路388号中国地质大学

电 话：027—67883682

传 真：027—67883681

E-mail: cjeg@cug.edu.cn

网 址：http://unit.cug.edu.cn/gcdqwl/