



杨镜明, 魏周政, 高晓伟. 2014. 高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用. 地球物理学进展, 29(1): 0362-0369, doi: 10.6038/pg20140151.

YANG Jing-ming, WEI Zhou-zheng, GAO Xiao-wei. 2014. The application of the methods of high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting effect. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(1): 0362-0369, doi: 10.6038/pg20140151.

高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用

The application of the methods of high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting effect

杨镜明, 魏周政, 高晓伟

YANG Jing-ming, WEI Zhou-zheng, GAO Xiao-wei

核工业二一六大队, 乌鲁木齐 830011

Geology Party No. 216, CNNC, Urumqi 830011, China

摘要 从煤矿采空区诱发的地质灾害对国民经济建设的危害和采空区探测与治理的现实意义出发, 总结了煤矿采空区探测中的地球物理方法技术现状, 分析了开展煤矿采空区地球物理探测的物性差异前提。在简要介绍高密度电阻率法和瞬变电磁法基本原理的基础上, 结合我国新疆某地区的探测实例, 研究总结了高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用效果。结果表明, 由于煤矿地下采空区和未采区之间存在有明显导电性(电阻率)差异, 使用高密度电法和瞬变电磁法综合勘察煤田采空区效果较好, 工作区 120 m 以上浅部采空区采用高密度电法探测, 其定量解释结果精度较高, 而 100~350 m 深度范围内采用瞬变电磁法探测作定量推断解释效果较好。文章还结合应用实例探讨了利用高密度电阻率法评价煤矿采空区注浆治理效果的可行性。

关键词 高密度电阻率法; 瞬变电磁法; 煤田采空区; 注浆

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg20140151

Abstract Starting from the dangers of geological calamities induced by coal mining goaf and the practical significance of coal mining goaf detection and controlling, this paper summarizes the application status of geophysical methods in coal mining goaf detecting and analyses the resistivity difference along coal mining goaf. Based on brief introduces the principle of high density resistivity method and TEM, combined with a case study in Xinjiang Province, the application effects of high density resistivity method and TEM in coal mining goaf detection are analyzed. The results shows that there are distinct resistivity difference between coal mining goaf and host rocks, high density resistivity method can get good effect to detect coal mining goaf no deeper than 120m, while TEM is useful to the goaf buried in 100m to 350m deep. The feasibility of high density resistivity method to inspect grouting effect of coal mining goaf is discussed via an example.

Keywords high density resistivity method; transient electromagnetic method; coal mining goaf; grouting

0 引言

所谓煤田采空区是指地下煤矿体采出后所留下的空间区域, 当煤矿从地下被采出后, 上覆岩层失去支撑而导致平衡状态被破坏, 应力重新分布, 以期达到新的平衡。在此过程中, 采空区上覆岩层变形和移动向上波及地表, 而地层内部岩石强度和内聚力也大大降低, 并在地表或地下(陷落柱)呈

现出塌陷、裂缝和台阶等多种形式的地质灾害。煤田采空区及其影响区岩层完整性被破坏, 从而改变了其电阻率、密度、弹性等物性特征, 为使用综合物探方法探测采空区和检测采空区注浆质量提供了物性前提。

采空区引起的地面塌陷、山体滑塌、地面不均匀沉降、地下水疏干、破坏性矿震等地质灾害已经对铁路与公路建设、水利与电力工程设施、工业与民用建筑、生态与水文环境及

收稿日期 2012-07-09; 修回日期 2013-10-10.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

作者简介 杨镜明, 男, 1972 年生, 云南大理人, 硕士, 地球物理高级工程师, 从事地球物理和地球化学勘探工作。

(E-mail: 21yjmm@163.com)

人民生命财产带来了直接危害。况且在我国大部分煤矿采空区没有经过处理, 有的为不规范开采煤矿形成的采空区, 有的为煤矿古空区, 其位置和范围很难确定, 存在很大隐患, 这些地质灾害大都发生在采空影响区内, 严重影响区域内经济可持续发展和社会稳定(胡祥云等, 2006; 于景村等, 2007; 张凌云等, 2011; 黄俊革等, 2006)。

近年来, 为了满足新疆经济大发展的要求, 乌鲁木齐市城市建设不断扩大, 城市交通网和工业园区建设已扩展到六道湾、米东区、西山等煤矿采空区, 应用物探方法准确探测采空影响区的范围, 是解决乌鲁木齐市市政建设的关键性工作, 具有重要的现实意义。

国内外有关资料表明, 探测采空区以物探为主, 钻探验证的方法。目前, 主要方法有高密度电法、瞬变电磁法、EH4 连续电导率剖面法、地震勘探法、地质雷达探测法、双频激电法、放射性测量法等, 虽然探测采空区的物探方法有多种, 但各有优缺点。近年来高密度电阻率法在探测采空区和地面塌陷区方面广泛应用, 其显著特点是施工快捷、数据量大、分辨率高、可靠性好、图像直观, 同时高密度电法探测精度虽然较高但探测深度较浅, 对地形条件要求较高(吕惠进等, 2005; 祁民等, 2006; 雷旭友等, 2009; 王平等, 2011; 王飞等, 2012; 杨镜明, 2012)。瞬变电磁法探测成本较低, 工作效率高、受地形影响小、能穿透高阻覆盖层等优势(薛国强等, 2013; 孟庆鑫等, 2012; 李貅等, 2012; 薛国强等, 2011a; 薛国强等, 2011b), 但对异常的定量解释精度不高, 且存在浅部探测盲区(李貅等, 2010; 石显新等, 2009; 闫述等, 2009; 丁艳飞等, 2012; 周楠楠等, 2011; 薛国强等, 2007; 张开元等, 2007; 包乃利等, 2013; 戴前伟等, 2013)。EH4 连续电导率剖面在采空区勘探中也取得了一定效果, 具数据采集量大、设备轻便、工作效率高等优点, 但采空区现场各种自然和人为干扰较复杂, 致使 EH4 处理和反演结果分辨率低、不能有效地抑制噪声干扰等缺点, 不能够满足资料解释的要求(柳建新等, 2012; 严家斌等, 2011; 胡国泽等, 2013)。地震勘探法分辨率较高(陈昌彦等, 2010; 陈相府等, 2005; 戴前伟等, 2010; 张劲松等, 2010), 但一般采空区现场环境较复杂, 低能量震源其勘探深度有限, 高能量震源成本过高, 同时存在引起采空塌陷等潜在的危险。地质雷达探测工作效率和解释结果精度较高, 但目前其探测深度有限, 不能解决开采深度大于 40~70 m 以上的采空区(余传涛等, 2008; 刘泰峰等, 2004)。双频激电法中间梯度装置探测曲线能反映地下异常体的大概平面位置, 但不能反映异常体的埋深, 特别是在垂直剖面上有多个异常体叠加时不易区分地下的异常究竟是由哪一个引起(杨华等, 2002)。采空区聚积着大量的氡气, 通过氡气测量法能圈定采空区的位置和范围, 但不能给出其埋深, 同时, 该方法受季节、降雨等自然因素影响较大(于景村等, 1998; 吴圣林等, 2005)。目前, 高密度电阻率法检测地基注浆治理效果较明显(陈仲候等, 1993; 董浩斌等, 2001)。

由于新疆乌鲁木齐市米东区煤矿采空区深度约 80~350 m, 有些物探方法应用受到限制, 例如, 地质雷达探测深度较浅; 地震勘探方法受场地、安全等因素限制; 双频激电法在采空区勘察中目前仅只作为一种尝试; 放射性氡气测量只能探测出采空区的位置与范围以及影响区域, 而不能定量给

出煤矿地下采空区的埋藏深度。实践表明, 高密度电法和瞬变电磁法是目前煤矿采空区探测中最常用的方法, 探测效果也较显著。

本文通过实例, 阐明应用高密度电阻率法和瞬变电磁法(TEM), 探测新疆乌鲁木齐市齐米东区煤矿采空区范围和检测六道湾采空区注浆治理工作质量。野外工作中 120 m 深度范围内采空区采用高密度电法探测, 100~350 m 深度范围内采空区采用 TEM 探测, 结果取得了明显的地质效果, 为综合治理采空区提供了第一手资料和科学决策的依据。

1 高密度电阻率和瞬变电磁法采空区勘探原理

高密度电阻率法的基本原理与传统的电阻率法完全相同, 它仍以岩土体的导电性差异为物质基础, 在人工电流场作用下, 通过观测和研究视电阻率的变化规律, 进而解决地质、环境、工程问题的一种电法勘探方法。所不同的是高密度电阻率法在观测中设置了较高密度的测点, 电极布设一次完成, 具有剖面测量和测深两种性质, 与传统的电阻率法相比, 高密度电阻率法成本低、效率高, 信息丰富, 解释方便, 因而勘探能力显著提高(程业勋等, 2005; 吴成平等, 2007)。

瞬变电磁法以岩(矿)石的导电性、导磁性差异为物质基础, 根据电磁感应原理, 利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场, 在一次脉冲磁场的间隙期间, 利用线圈或接地电极观测二次涡流场, 并研究该场的空间与时间分布规律, 来寻找地下矿产资源或解决其它工程地质问题的一种电法勘探方法(戴前伟等, 2010)。

煤层采空塌陷区可分为 3 个带:

- 1) 垮落带: 煤层采空上部岩层出现坍塌;
- 2) 断裂带: 冒落带上方岩体因弯曲变形过大, 在采空区上方产生较大的拉应力, 两侧受到较大剪应力, 因而岩体出现大量裂隙, 岩石的整体性受到破坏;
- 3) 弯曲带: 裂隙带以上直到地面, 在自重应力作用下产生弯曲变形而未破裂(黄俊革等, 2006; 张劲松等, 2010)。

通常情况下, 电阻率值以采空区(空洞)为最高, 其次顺序为第四系覆盖、煤层、砂岩、泥岩及含水裂隙岩层为最低。地层中煤层被采空后, 破坏了岩石的完整性和连续性, 故该处电阻率值明显高于周边完整岩石处的电阻率, 表现出明显的局部特高阻, 当采空区被水充填, 其电阻率呈低阻反映, 若采空区发生塌陷, 其充填物比围岩松散、潮湿而呈中阻或相对低阻的特征。以上特性是高密度电阻率法和瞬变电磁法探测地下采空区的地球物理勘探前提。在高密度电阻率法二维反演断面图和瞬变电磁法电阻率断面图上, 未采空正常地层电阻率分布为明显完整、连续水平层状特征; 浅部采空或巷道电阻率曲线呈圆状或横向椭圆状特高阻(空区完整未充水)、中低阻(空区垮落)、低阻(空区垮落充水或空区充水), 如果浅部空区体积较大, 空区上部因变形裂隙发育, 其电体效应扩散到地表, 在电阻率断面图上形成从地表向深部延伸的高阻或中低阻半圆或半椭圆异常体。深部采空在高密度电阻率法二维反演断面图上形成从最底部向上延伸的高阻或中低阻半圆或半椭圆异常体, 在瞬变电磁法电阻率断面图上形成封闭的圆形或椭圆形高阻或中低阻异常体。

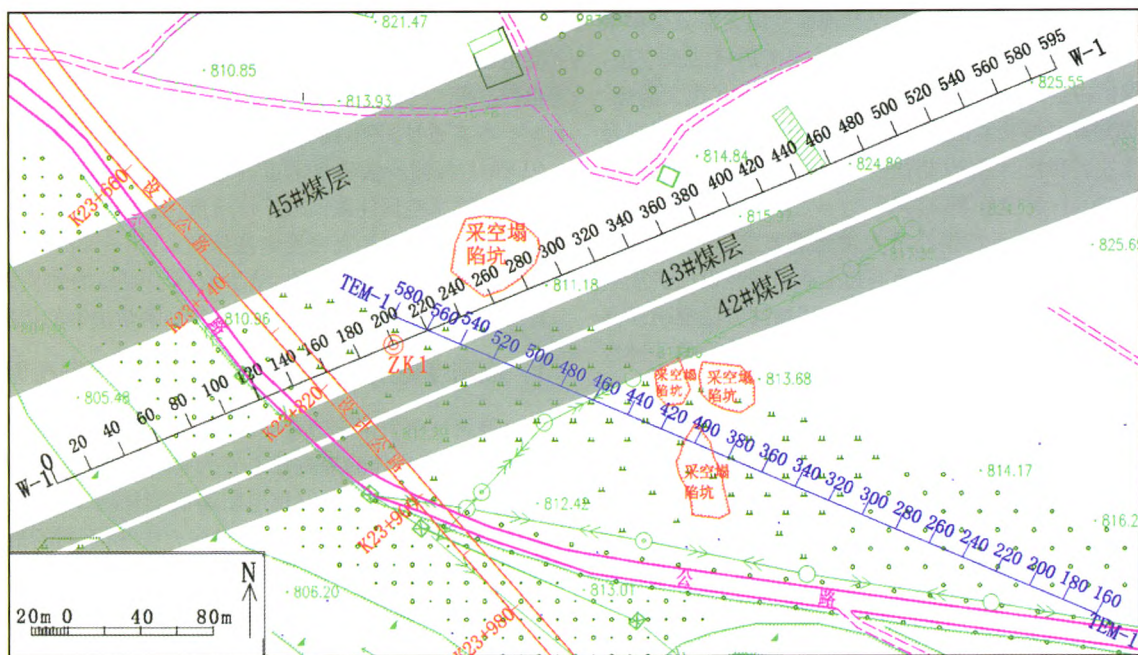


图 1 综合物探测线示意图

Fig. 1 Survey map of integrated geophysical exploration

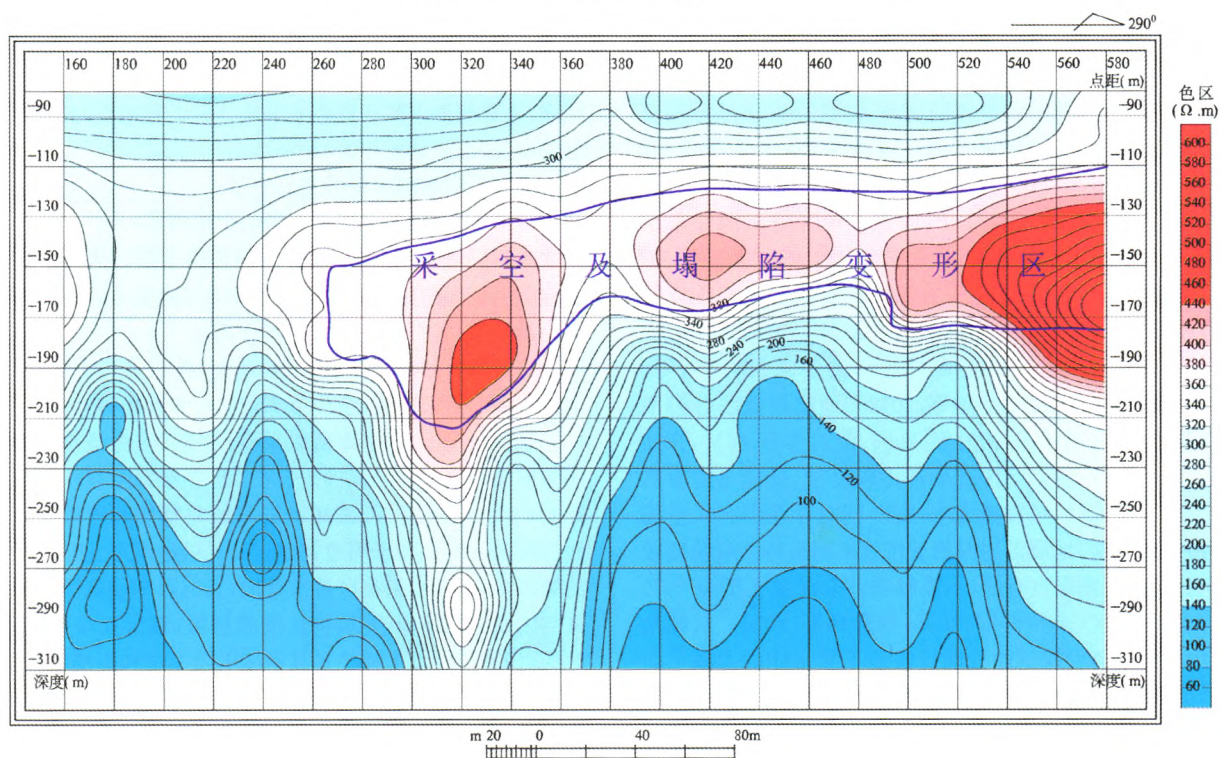


图 3 TEM1 剖面视电阻率断面等值线图

Fig. 3 Cross-section of apparent resistivity for measure line TEM1

2 采空区勘查实例

2.1 工作区地质及电性特征概况

测区分布有四个主要地质单元:第四系覆盖层、煤层、煤田采空区及破坏区、基岩。第四系覆盖厚度 35~55 m,其上部为 2-12 m 黄土,下伏为砾石层,第四系覆盖的电阻率整体

为高阻反映,其中黄土为中低阻,砾石层因含泥和水不均匀,电性表现为中高阻;含煤地层岩层为陡倾,其走向 80°,倾角 45°~50°,煤为相对中高阻,其他岩性(泥岩,粉砂、细砂岩)为低阻特征;采空及其塌陷区根据其积水程度,为中高阻或中低阻电性特征,同时,因塌陷引起周围大面积岩层稳定性被破坏,而在电阻率断面上会形成较大面积的中高阻异常区,

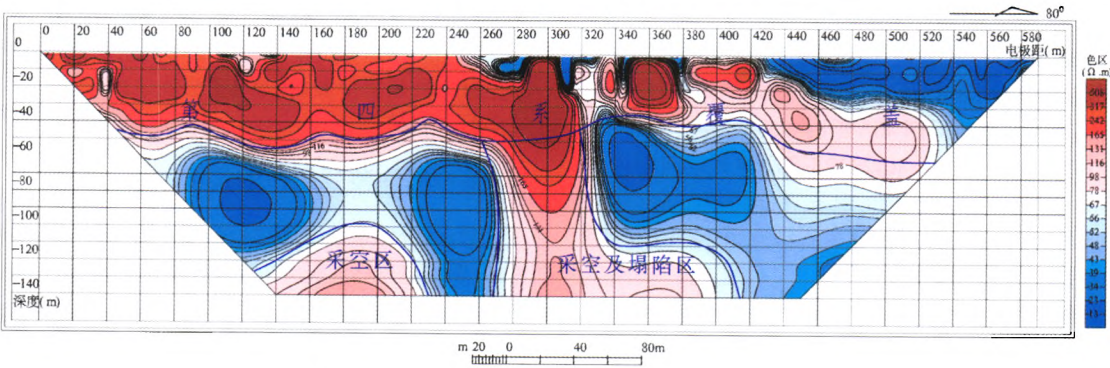


图 2 W1 剖面高密度电阻率法电阻率反演断面图
Fig. 2 Inversion section of apparent resistivity for measure line W1

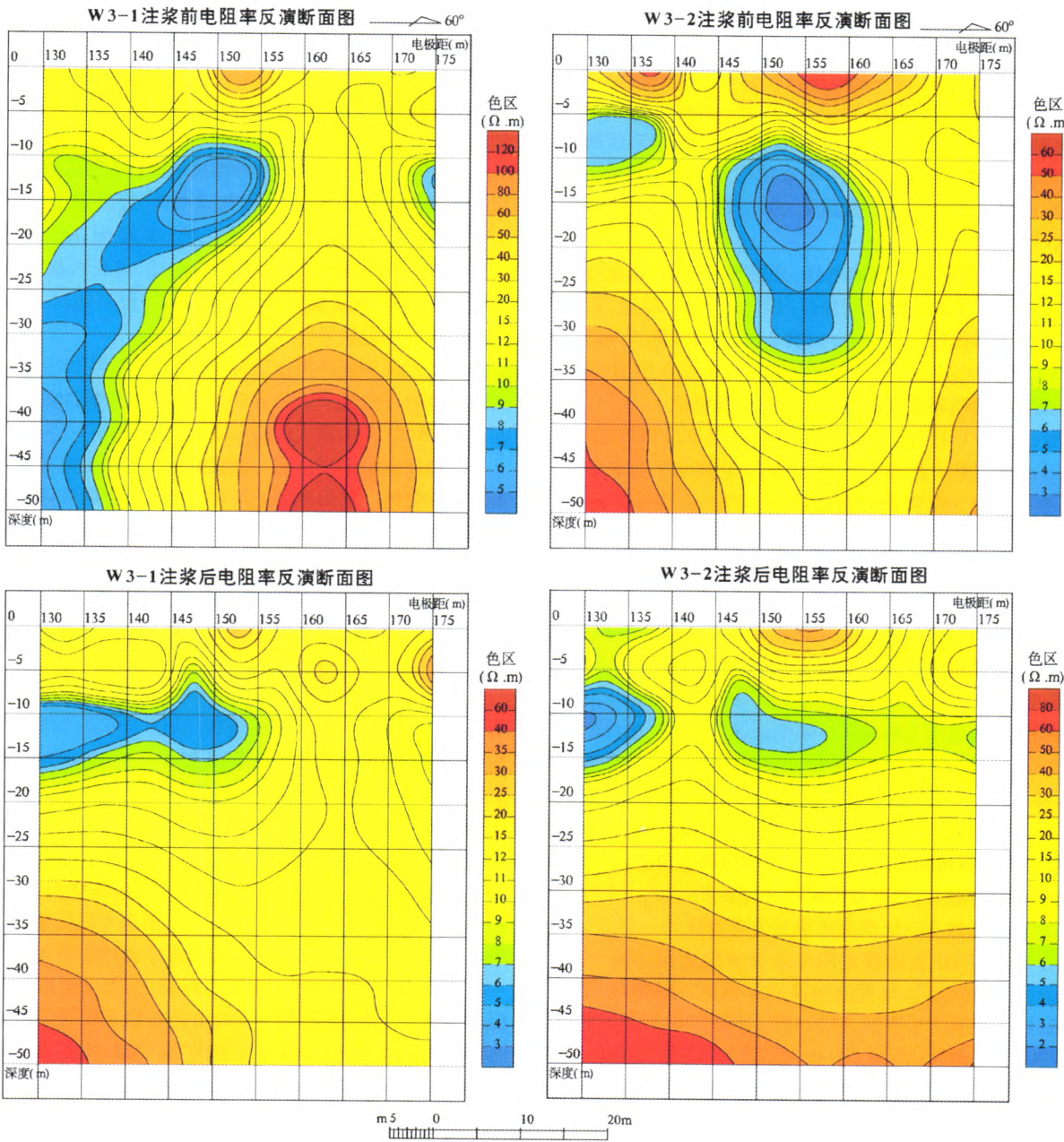


图 4 W3-1、W3-2 剖面高密度电阻率法注浆前后电阻率反演断面图
Fig. 4 Inversion section of apparent resistivity before and after grouting

或因积水形成“碗状”低阻异常区。

根据煤矿地质资料(图1),测区存在三层煤:42#、43#、45#。煤层走向80°,向东南倾,倾角43°~48°。42#煤层总厚12.06~21.38 m,与其下部43#煤层间距1.99~6.19 m;43#煤层总厚10.61~16.45 m,与其下部45#煤层间距约20~60 m;45#煤层总厚42.75~49.84 m。TEM1剖面360~440 m测点附近和560 m测点以东25 m有直径为10~30 m、深度8~18 m的漏斗状采空塌陷坑。

W1剖面290~310号测点以北3 m处有一直径约25 m、深约9 m的漏斗状煤田采空塌陷坑,从坑壁可见第四系上部为黄土厚2 m左右,黄土以下为直径约0.05~0.15 m砾石夹粉土层。

2.2 野外工作及目的

根据煤田采空区的位置和地形场地条件,在试验区布置高密度电阻率法W1和瞬变电磁法TEM1,以局部验证矿山资料,确定采空区边界,为拟建公路设计及后续采空区勘察物探方法选择提供依据。图1可见W1测量剖面方向与45#煤层走向一致,位于45#煤层隐伏露头顶板地表投影线以南55 m。高密度电阻率法测量采用温纳装置,电极个数120个、点距5 m、最大间隔系数为36,最终数据反演采用快速最小二乘法。

TEM1剖面因受高压输电线、公路等场地影响,剖面斜交于煤层走向,从南向北分别穿过42#、43#、45#煤层。TEM工作参数:发射线圈20 m×20 m共2匝,接收线圈20 m×20 m共2匝,发射电流5.5 A,供电电压24 V,测量点距10 m。

2.3 高密度电阻率法W1剖面电阻率异常特征

图2为W1剖面高密度电阻率法电阻率反演断面图。0~420 m号测点下方,0~55 m深度段呈现水平分布的高阻层,推断解释为第四系砾石层,420~590 m号测点下方,0~30 m深度低阻层为黄土层,其向东变厚。黄土层下伏拉长的椭圆状中高阻异常为砾石层的反映,其厚度约20 m;在260~400 m号测点下方,大于110 m深度的高阻异常区,推断为采空区,此推断与煤矿山资料采空上界面深度为120 m相吻合,根据矿山调查资料,260 m号测点为采空区边界,以西无采空,但120~240 m号测点下方100 m深度以下有明显中阻异常体,推断为前人煤矿采空区,解释深度为110 m。经在200 m号测点位置钻孔ZK1验证:0~48 m为第四系砾石层,48~108 m为泥岩夹薄层细砂岩,112~116 m为煤层,116 m见采空,与高密度电阻率法解释一致。W1剖面高密度电阻率法解释资料较精确地反映出地下采空区具体位置,方法有效性达到了预期的工程地质勘察目的与要求。

2.4 瞬变电磁法TEM1剖面电阻率异常特征

图3为TEM1剖面视电阻率断面等值线图,300~580 m测点下方110~270 m深度为高阻异常区,其具有三个高阻异常中心,推断为采空区。560 m测点以东25 m为采空塌陷坑,以西20 m(W1剖面200 m号测点)ZK1钻孔验证116 m为采空,因此推断500~570 m测点下伏高阻异常为45#煤层采空区,其采空顶面深度110~140 m,向南最大采深210~240 m;360~440 m测点附近采空塌陷坑(图1)表明该段深部为采空,300~460 m测点间下伏高阻推断为42#和43#煤层采空区,采空顶面深度110~140 m,向南最大采深

240~280 m。

TEM1剖面电阻率断面等值线图高阻异常反映了地下采空区空间位置特征,瞬变电磁法能达到有效勘察煤田深部采空区的目的。

3 采空区注浆效果检测实例

目前,公路采空区(空洞)治理方法主要有注浆法和非注浆法。根据采空区特征,六道湾煤矿采空区治理采用了注浆法。注浆法指用人工的方法向地基土颗粒的空隙、土层界面或岩层的空隙(溶洞、溶隙、裂隙、空隙)或采空区的垮落带里注入具有充填、胶结性能的浆液材料,以便硬化后增加其强度或降低渗透性的注浆工程。由于采空区治理工程的隐蔽性和复杂性,要求必须对治理工程质量的最终结果进行检测。注浆工程质量检测方法有高密度电阻率法、孔内波速测井法、瑞雷波(面波)法、瞬变电磁法等综合物探方法(严家斌等,2011;胡国泽等,2013);还有钻探、压水试验和变形观测等方法。测试结果表明,以综合物探方法、变形观测为主,结合少量钻孔监控的模式是有效的。

物探检测作为一种无损检测技术,目前是采空区治理工程质量检测的重要方法,其具有成本低、速度快、效率高、施工简单的优点,根据采空区治理区域内同范围、同点、同深度岩层的物理性质在注浆前后的变化对比,直观判断工程质量的优劣,但因物探反演解释的多解性,一般只能对工程质量进行定性或半定量评价。

本次六道湾公路采空区注浆治理深度为10~60 m,检测采用高密度电阻率法的温纳装置。工作参数:电极个数为60个,点距为5 m,最大间隔系数为16。

高密度电阻率法注浆工程质量检测的施工流程为:注浆治理前在公路采空治理区进行高密电阻率法勘查,以获取治理区范围内电性特征;注浆治理工程结束一周后,再在同线同点布置高密度电阻率法测量,然后,对注浆前、后高密度电阻率法测量结果进行对比,综合分析电阻率异常变化特征,利用治理前后岩层的电阻率变化特征对治理工程质量进行评价。

图4(a)、(b)分别是W3-1、W3-2剖面高密度电阻率法注浆前后电阻率反演断面等值线图。从图4可见,试验区注浆前后电阻率等值线形态发生明显变化。注浆前,由浅到深电阻率等值线在垂向上扭曲明显,变化剧烈且凌乱,说明勘查区受地下采空影响,裂缝和裂隙及空洞发育,使电阻率变化较大。注浆前W3-1剖面160~165 m号测点下方约36 m深度有一高阻空洞,注浆钻孔在39 m处揭露该空洞;W3-2剖面145~165 m号测点下方约10~34 m深度段低阻区,推断为采空塌陷积水区。注浆后,裂隙和采空破碎岩体固结,形成一整体,电阻率变化稳定,高阻空洞消失,其电阻率降低,低阻区电阻率升高,电阻率等值线由扭曲趋于稳定平直。与注浆前相比,在注浆后电阻率等值线“块”特征明显,说明注浆后岩体的稳定性、完整性和导电性的均一程度均有提高。

4 结论

4.1 煤田地下采空区引起的地质灾害对铁路与公路建设、水利与电力工程设施、工业与民用建筑、生态与水文环境及

人民生命财产将带来重大影响. 因此,开展煤矿采空区探测对地质灾害预测与防治具有重要意义. 本文根据我国新疆地区的探测实例,研究总结了高密度电阻率法和瞬变电磁法探测煤矿采空区和采空区注浆处理效果,结果表明,高密度电法和瞬变电磁法是有用的煤田采空区地球物理探测手段. 由于方法技术的特点,工作区 120 m 以上浅部采空区采用高密度电法探测,其定量解释结果精度较高,同时,根据采空区上部岩体弯曲变形、裂隙发育在电阻率断面上形成较大面积的中高阻异常区,或因积水形成“碗状”低阻异常区,可定性推断深部存在采空,而 100~350 m 深度范围内采用瞬变电磁法探测作定量推断解释效果较好.

4.2 采空区治理效果探测实例的结果表明,煤矿地下采空区注浆治理前后,岩层的电阻率参数会发生明显变化,为利用电阻率类方法评价采空区治理注浆工程质量的有效性提供了物性前提,探测实例中,注浆前后断面电阻率变化明显,表明该方法是采空区注浆治理效果评价的有效手段之一.

4.3 虽然高密度电阻率法和瞬变电磁法结合用于地下煤矿采空区探测可以取得较好的效果,但该技术也存在探测深度与分辨率矛盾的问题,以及人文噪声干扰问题,建议今后加大数据采集量及相关正反演方法技术研究,提高探测效果.

致 谢 本文编写期间,得到李振宇和邓居智教授的亲切指导,在此表示感谢!

References

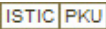
- BAO Nai-li, Liu Hong-fu, YU Chuan-tao, *et al.* 2013. The detection of mined-out area of shallow iron ore by nanometer transient electromagnetic method. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 28 (2):0952-0957.
- CHEN Chang-Yan, BAI Chao-Xu, SONG Lian-Liang, XIE Chao-Hui. 2010. Application of the multi-channel transient rayleigh wave method to highway goaf detection [J]. *Progress in Geophysics*, 25(2): 701-708.
- Chen X F, An X F, Wang G W. 2005. Application of high resolution seismic detecting for under mined shallow strata[J]. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 20(2):437-439.
- CHEN Zhonghou, WANG Xintai. 1993. *Course of engineering and environment geophysical exploration* [M]. Beijing: geological Press, 121-124.
- Cheng Yexun, Yang Jin. 2005. *An Introduction to Environmental Geophysics*[M]. Beijing, Geology Press, 139-141,110-111.
- DING Yan-Fei, BAI Deng-Hai, XU Cheng. 2012. A rapid algorithm for calculating time domain transient electromagnetic responses of a large fixed rectangular loop on the half space. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), (6): 2087-2096, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 06. 030.
- DAI Qian-wei, HOU Zhi-chao, CHAI Xin-chao. 2013. Application of transient electromagnetic method and EH4 to investigation of mined-out areas of molybdenum deposits. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 28(3):1541-41546.
- DAI Qian-wei, YU Kai, FENG De-shan, ZHANG Bin. 2010. Application of ground penetrating radar and EH4 to goaf exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 25(5): 1763-1768.
- DONG Haobin, WANG Chuanlei, XU Ganglin. 2001. Distributed intelligent high-density electrical instrument[J]. *Earth Science-China University of Geosciences*, 26(s):17-22.
- Hu X Y, Yang D K, Liu S H, *et al.* 2006. The developing trends of environmental and engineering geophysics [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(2): 598-604.
- HU Guo-ze, TENG Ji-wen, PI Jiao-long, WANG Wei, QIAO Yong-hu. 2013. In-seam seismic exploration techniques—a geophysical method predicting coal-Mine disaster[J]. *Progress in Geophysics*, (1): 439-451.
- HUANG Jun-Ge, WANG Jia-Lin, RUAN Bai-Yao. 2006. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49 (4): 1206-1214.
- Lu H J, Liu S H, Liu B G. 2005. Application of resistivity tomography survey method in detecting ground subsidence[J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 20(2): 381-386.
- Lei X Y, Li Zh W, Zhe J P. 2009. Applications and research of the high resolution resistivity method in exploitation of caves, mined regions and Karst region[J]. *Progress in Geophysics.* (in chinese), 24(1): 340-347.
- LI Xiu, XUE Guo-Qiang, LIU Yin-Ai, QIAN Jian-Bing. 2012. A research on TEM imaging method based on synthetic-aperture technology. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(1): 333-340, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 01. 034.
- LI Xiu, QI Zhi-Peng, XUE Guo-Qiang, FAN Tao, ZHU Hong-Wei. 2010. Three dimensional curved surface continuation image based on TEM pseudo wave-field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(12): 3005-3011, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 12. 025.
- LIU Jian-xin, LUO Xi, TONG Xiao-zhong, *et al.* 2012. Joint analysis of EH4 data in time-frequency domain and application in gob areas of coal mine. *progress in Geophys.* (in Chinese), 27(5): 2160-2167.
- Liu T F, AN H Zh, Kang J J, Zhou R. 2004. the space characteristics and the results of numerical computing of the radon field around a collapse column[J]. *Chinese Journal Of Geophysics*, 47 (1):171-177.
- MENG Qing-Xin, PAN He-Ping. 2012. Numerical simulation analysis of surface-hole TEM responses. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55 (3): 1046-1053, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 035.
- Qi M, Zhang B L, Liang G H, *et al.* 2006. High-resolution prediction of space distribution characteristics of complicated underground cavities—preliminary application of high-density electrical technique in an area of Yangquan, Shanxi [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(1):256-262.
- SHI Xian-Xin, YAN Shu, FU Jun-Mei, CHEN Ming-Sheng. 2009. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52 (7): 1931-1936, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 07. 029.
- Wang P, Wu Q X, Liu S F, *et al.* 2011. Using D-InSAR and resistivity imaging profile to study ground subsidence above the old goaf of Wangfeng coal mine in Jiaozuo city. *progress in Geophys.* (in Chinese), 26(6): 2196-2203.
- WANG Fei, GUO Xin-jun, YaANG Zhen-hua. 2012. Detection of shallow bauxite mined area and induced ground subsidence prediction. *progress in Geophys.* (in Chinese), 27(4): 1769-1774.
- Wu Sh L, Ding Ch J. 2005. Application of comprehensive measurement method to check grouting effect in mined-out region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 4(1):5271-5274.
- WU Cheng-ping, HU Xiang-yun. 2007. Geophysical methods on survey of mined-out area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 22(1):19-23.
- XUE Guo-Qiang, CHEN Wei-Ying, ZHOU Nan-Nan, LI Hai. 2013. Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding. *Chinese Journal Geophysics*, 56(1): 255-261, doi: 10. 6038/cjg20130126.
- XUE Guo-Qiang, YAN Shu, ZHOU Nan-Nan. 2011. Theoretical study on the errors caused by dipole hypothesis of large-loop TEM response. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(9): 2389-2396, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 09. 022.
- XUE Guo-Qiang, LI Xiu, QI Zhi-Peng, FAN Tao, ZHOU Nan-

- Nan. 2011. Study of sharpen the wave-form of TEM pseudo-seismic. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54(5): 1384-1390, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 05. 028.
- XUE Guo Qiang, LI Xiu, DI Qing Yun. 2007. The progress of TEM in theory and application. progress in Geophys. (in Chinese), 22(4): 1195-1200.
- Yu J C, Liu Z X, Yue J H, Liu S C. 2007. Development and prospect of geophysical technology in deep mining [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 22(2): 586-592.
- YANG Jing-ming. 2012. The application of high density method to the exploration of coalfield goaf [J]. Geophysical and geochemical exploration, 36: 12-15.
- YAN Shu, SHI Xian-Xin, CHEN Ming-Sheng. 2009. The probing depth of transient electromagnetic field method. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 52(6): 1583-1591, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 06. 020.
- YAN Jia-bin, LI Wei, DAI Qian-wei, FENG De-shan, WANG Yan-long. 2011. Application of the high-frequency magnetotelluric sounding to investigation of worked out areas of molybdenum deposits[J]. Progress in Geophysics, 26(1): 306-310.
- Yu Ch T, Liu H F, Gao J P. 2008. the Experimental study on the Dual frequency induced polarization method detecting coal mine gob[J]. Progress in Geophys. (in Chinese), 23(5): 1603-1609.
- Yang H, Liu H F. 2002. The Application of Radon Measurement in the Mined-out Area[J]. Shanxi Coal, 23(2): 38-42.
- Yu J C, Li Zh D. 1998. the high density resistivity method used for detecting foundation grouting[J]. Geology and Prospecting, 34(5): 48-51.
- ZHANG Ling-Yun, LIU Hong-Fu. 2011. The application of ABP method in high-density resistivity method inversion. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54(1): 227-233, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 01. 024.
- Zhou N N, Xue G Q, Chen W J, et al. 2011. Geophysical prospecting to underground iron ore dugged-cave. progress in Geophys. (in Chinese), 26(2): 669-674.
- Zhang K Y, Han Z H, Zhou T. 2007. Application of Transient Electromagnetic Method in Coal Mine Gob[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 4(4): 341-344.
- Zhang J S, Zhao Y G, Wang M R. 2010. Deep survey analysis of low-frequency ground penetrating radar[J]. Progress in Geophys. (in Chinese), 25(5): 1848-1855.
- [J]. 地球科学, 26(增刊): 17-22.
- 胡祥云, 杨迪坤, 刘少华, 等. 2006. 环境与工程地球物理的发展趋势[J]. 地球物理学进展, 21(2): 598-604.
- 胡国泽, 滕吉文, 皮娇龙, 王伟, 乔勇虎. 2013. 井下槽波地震勘探——预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. 地球物理学进展, (1): 439-451.
- 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 2006. 三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元模拟异常特征研究. 地球物理学报, 49(4): 1206-1214.
- 吕惠进, 刘少华, 刘伯根. 2005. 高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用[J]. 地球物理学进展, 20(2): 381-386.
- 雷旭友, 李正文, 折京平. 2009. 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 24(1): 340-347.
- 李貅, 薛国强, 刘银爱, 钱建兵. 2012. 瞬变电磁合成孔径成像方法研究. 地球物理学报, 55(1): 333-340, doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 01. 034.
- 李貅, 戚志鹏, 薛国强, 范涛, 朱宏伟. 2010. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像. 地球物理学报, 53(12): 3005-3011, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 12. 025.
- 柳建新, 罗曦, 童孝忠, 曹创华, 周志军. 2012. EH4 时频数据联合处理及其在煤矿采空区的应用[J]. 地球物理学进展, 27(5): 2160-2167.
- 刘泰峰, 安海忠, 亢俊健, 周瑞. 2004. 煤田陷落柱氦气场的数值计算及空间形态分布特征[J]. 地球物理学报, 47(1): 171-177.
- 孟庆鑫, 潘和平. 2012. 地-井瞬变电磁响应特征数值模拟分析. 地球物理学报, 55(3): 1046-1053, doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 035.
- 祁民, 张宝林, 梁光河, 等. 2006. 高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征——高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究[J]. 地球物理学进展, 21(1): 256-262.
- 石显新, 闫述, 傅君眉, 陈明生. 2009. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进. 地球物理学报, 52(7): 1931-1936, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 07. 029.
- 王平, 吴清星, 刘少峰, 王涛. 2011. 利用 D-InSAR 测量和高密度率剖面揭示焦作市王封煤矿老采空区地面沉降机制[J]. 地球物理学进展, 26(6): 2196-2203.
- 王飞, 郭秀军, 杨振华. 2012. 浅层铝土矿采空区探测及引发的地面沉降预测[J]. 地球物理学进展, 27(4): 1769-1774.
- 吴圣林, 丁陈建. 2005. 综合检测法在采空区注浆效果检测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 24(1): 5271-5274.
- 吴成平, 胡祥云. 2007. 采空区的物探勘查方法[J]. 地质找矿论丛, 22(1): 19-23. 薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 李海. 2013. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术. 地球物理学报, 56(1): 255-261, doi: 10.6038/cjg20130126.
- 薛国强, 闫述, 周楠楠. 2011. 偶极子假设引起的大回线源瞬变电磁响应偏差分析. 地球物理学报, 54(9): 2389-2396, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 09. 022.
- 薛国强, 李貅, 戚志鹏, 范涛, 周楠楠. 2011. 瞬变电磁拟地震子波宽度压缩研究. 地球物理学报, 54(5): 1384-1390, doi: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 05. 028.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1195-1200.
- 于景村, 刘志新, 岳建华, 刘树才. 2007. 煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望[J]. 地球物理学进展, 22(2): 586-592.
- 杨镜明. 2012. 高密度电阻率法煤田采空区勘察效果[J]. 物探与化

附中文参考文献

- 包乃利, 刘鸿福, 余传涛, 李月雷. 2013. 纳米瞬变电磁法在探测浅层铁矿采空区的实验研究[J]. 地球物理学进展, 28(2): 0952-0957.
- 陈昌彦, 白朝旭, 宋连亮, 谢朝晖. 2010. 多道瞬态瑞雷波技术在公路采空塌陷区探测中应用[J]. 地球物理学进展, 25(2): 701-708.
- 陈相府, 安西峰, 王高伟. 2005. 浅层高分辨地震勘探在采空区勘测中的应用[J]. 地球物理学进展, 20(2): 437-439.
- 陈仲候, 王兴泰, 杜世汉编. 1993. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 121-124.
- 程业勋, 杨进主编. 2005. 环境地球物理学概论 [M]北京: 地质出版社, 139-141, 110-111.
- 丁艳飞, 白登海, 许诚. 2012. 均匀半空间表面大定源瞬变电磁响应的快速算法. 地球物理学报, (6): 2087-2096, doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 06. 030.
- 戴前伟, 侯智超, 柴新朝. 2013. 瞬变电磁法及 EH4 在铝矿采空区探测中的应用. 地球物理学进展, 28(3): 1541-1546.
- 戴前伟, 余凯, 冯德山, 张彬. 2010. 探地雷达及 EH4 对铝矿采空区的综合探测[J]. 地球物理学进展, 25(5): 1763-1768.
- 董浩斌, 王传雷, 许刚林. 2001. 分布式智能化高密度电法仪的研制

- 探, 36: 12-15.
- 闫述, 石显新, 陈明生. 2009. 瞬变电磁法的探测深度问题. 地球物理学报, 52(6): 1583-1591, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 06. 020.
- 严家斌, 李伟, 戴前伟, 冯德山, 王燕龙. 2011. 高频电磁测深法在铅矿采空区探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 26(1): 306-310.
- 余传涛, 刘鸿福, 高建平. 2008. 双频激电法在探测煤矿采空区的尝试[J]. 地球物理学进展, 23(5): 1603-1609.
- 杨华, 刘鸿福. 2002. 测氧在煤矿采空区的应用[J]. 山西煤炭, 23(2): 38-42.
- 于景村, 李志鹏. 1998. 高密度电阻率法检测地基注浆效[J]. 地质与勘探, 34(5): 48-51.
- 张凌云, 刘鸿福. 2011. ABP 法在高密度电阻率法反演中的应用. 地球物理学报, 54(1): 227-233, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 01. 024.
- 周楠楠, 薛国强, 陈卫营, 闫述, 赵长胜, 张松. 2011. 铁矿采空区的地球物理探测[J]. 地球物理学进展, 26(2): 669-674.
- 张开元, 韩自豪, 周韬. 2007. 瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用[J]. 工程地球物理学报, 4(4): 341-344.
- 张劲松, 赵育刚, 王梦茹. 2010. 低频地质雷达深层探测分析[J]. 地球物理学进展, 25(5): 1848-1855.

作者: 杨镜明, 魏周政, 高晓伟, [YANG Jing-ming](#), [WEI Zhou-zheng](#), [GAO Xiao-wei](#)
作者单位: 核工业二一六大队, 乌鲁木齐, 830011
刊名: [地球物理学进展](#) 
英文刊名: [Progress in Geophysics](#)
年, 卷(期): 2014, 29(1)

参考文献(80条)

1. [BAO Nai-li;Liu Hong-fu;YU Chuan-tao](#) The detection of mined-out area of shallow iron ore by nanometer transient electromagnetic method 2013(02)
2. [CHEN Chang-Yan;BAI Chao-Xu;SONG Lian-Liang;XIE ChaoHui](#) Application of the multi-channel transient rayleigh wave method to highway goaf detection[期刊论文]-[Progress in Geophysics](#) 2010(02)
3. [Chen X F;An X F;Wang G W](#) Application of high resolution seismic detecting for under mined shallow strata 2005(02)
4. [CHEN Zhonghou;WANG Xintai](#) Course of engineering and environment geophysical exploration 1993
5. [Cheng Yexun;Yang Jin An](#) Introduction to Environmental Geophysics 2005
6. [DING Yan-Fei;BAI Deng-Hai;XU Cheng](#) A rapid algorithm for calculating time domain transient electromagnetic responses of a large fixed rectangular loop on the half space[期刊论文]-[Chinese Journal of Geophysics](#) 2012(06)
7. [DAI Qian-wei;HOU Zhi-chao;CHAI Xin-chao](#) Application of transient electromagnetic method and EH4 to investigation of mined-out areas of molybdenum deposits 2013(03)
8. [DAI Qian-wei;YU Kai;FENG De-shan;ZHANG Bin](#) Application of ground penetrating radar and EH4 to goaf exploration[期刊论文]-[Progress in Geophysics](#) 2010(05)
9. [DONG Haobin;WANG Chuanlei;XU Ganglin](#) Distributed intelligent high-density electrical instrument 2001(s)
10. [Hu X Y;Yang D K;Liu S H](#) The developing trends of environmental and engineering geophysics[期刊论文]-[Progress in Geophysics](#) 2006(02)
11. [HU Guo-ze;TENG Ji-wen;PI Jiao-long;WANG Wei QIAO Yong-hu](#) In-seam seismic exploration techniques--a geophysical method predicting coal-Mine disaster 2013(01)
12. [HUANG Jun-Ge;WANG Jia-Lin;RUAN Bai-Yao](#) A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey[期刊论文]-[Chinese Journal of Geophysics](#) 2006(04)
13. [Lu H J;Liu S H;Liu B G](#) Application of resistivity tomography survey method in detecting ground subsidence[期刊论文]-[Progress in Geophysics](#) 2005(02)
14. [Lei X Y;Li Zh W;Zhe J P](#) Applications and research of the high resolution resistivity method in exploitation of caves,mined regions and Karst region 2009(01)
15. [LI Xiu;XUE Guo-Qiang;LIU Yin-Ai;QIAN Jian-Bing](#) A research on TEM imaging method based on synthetic-aperture technology[期刊论文]-[Chinese Journal of Geophysics](#) 2012(01)
16. [LI Xiu;QI Zhi-Peng;XUE Guo-Qiang;FAN Tao,ZHU HongWei](#) Three dimensional curved surface continuation image based on TEM pseudo wave-field[期刊论文]-[Chinese Journal of Geophysics](#) 2010(12)
17. [LIU Jian-xin;LUO Xi;TONG Xiao-zhong](#) Joint analysis of EH4 data in time-frequency domain and application in gob areas of coal mine 2012(05)
18. [Liu T F;AN H Zh;Kang J J;Zhou R](#) the space characteristics and the results of numerical computing of the radon field around a collapse column 2004(01)
19. [MENG Qing-Xin;PAN He-Ping](#) Numerical simulation analysis of surface-hole TEM responses[期刊论文]-[Chinese Journal of Geophysics](#) 2012(03)
20. [Qi M;Zhang B L;Liang G H](#) High-resolution prediction of space distribution characteristics of complicated underground cavities-preliminary application of high-density electrical technique in an area of Yangquan, Shanxi 2006(01)

21. [SHI Xian-Xin;YAN Shu;FU Jun-Mei;CHEN Ming-Sheng Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method\[期刊论文\]-Chinese Journal of Geophysics 2009\(07\)](#)
22. [Wang P;Wu Q X;Liu S F Using D-InSAR and resistivity imaging profile to study ground subsidence above the old goaf of Wangfeng coal mine in Jiaozuo city\[期刊论文\]-Progress In Geophysics 2011\(06\)](#)
23. [WANG Fei;GUO Xin-jun;YaANG Zhen-hua Detection of shallow bauxite mined area and induced ground subsidence prediction\[期刊论文\]-Progress In Geophysics 2012\(04\)](#)
24. [Wu Sh L;Ding Ch J Application of comprehensive measurement method to check grouting effect in mined-out region 2005\(01\)](#)
25. [WU Cheng-ping;HU Xiang-yun Geophysical methods on survey of mined-out area\[期刊论文\]-Contributions to Geology and Mineral Resources Research 2007\(01\)](#)
26. [XUE Guo-Qiang;CHEN Wei-Ying;ZHOU Nan-Nan;LI Hai Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding\[期刊论文\]-Chinese Journal of Geophysics 2013\(01\)](#)
27. [XUE Guo-Qiang;YAN Shu;ZHOU Nan-Nan Theoretical study on the errors caused by dipole hypothesis of large-loop TEM response\[期刊论文\]-Chinese Journal of Geophysics 2011\(09\)](#)
28. [XUE Guo-Qiang;LI Xiu;QI Zhi-Peng;FAN Tao, ZHOU NanNan Study of sharpen the wave-form of TEM pseudoseismic 2011\(05\)](#)
29. [XUE Guo Qiang;LI Xiu;DI Qing Yun The progress of TEM in theory and application\[期刊论文\]-Progress In Geophysics 2007\(04\)](#)
30. [Yu J C;Liu Z X;Yue J H;Liu S C Development and prospect of geophysical technology in deep mining 2007\(02\)](#)
31. [YANG Jing-ming The application of high density method to the exploration of coalfield goaf 2012](#)
32. [YAN Shu;SHI Xian-Xin;CHEN Ming-Sheng The probing depth of transient electromagnetic field method\[期刊论文\]-Chinese Journal of Geophysics 2009\(06\)](#)
33. [YAN Jia-bin;LI Wei;DAI Qian-wei;FENG De-shan WANG Yanlong Application of the high-frequency magnetotelluric sounding to investigation of worked out areas of molybdenum deposits\[期刊论文\]-Progress in Geophysics 2011\(01\)](#)
34. [Yu Ch T;Liu H F;Gao J P the Experimental study on the Dual frequency induced polarization method detecting coal mine gob\[期刊论文\]-Progress In Geophysics 2008\(05\)](#)
35. [Yang H;Liu H F The Application of Radon Measurement in the Mined-out Area 2002\(02\)](#)
36. [Yu J C;Li Zh D the high density resistivity method used for detecting foundation grouting 1998\(05\)](#)
37. [ZHANG Ling-Yun;LIU Hong-Fu The application of ABP method in high-density resistivity method inversion\[期刊论文\]-Chinese Journal of Geophysics 2011\(01\)](#)
38. [Zhou N N;Xue G Q;Chen W J Geophysical prospecting to underground iron ore dugged-cave 2011\(02\)](#)
39. [Zhang K Y;Han Z H;Zhou T Application of Transient Electromagnetic Method in Coal Mine Gob\[期刊论文\]-Chinese Journal of Engineering Geophysics 2007\(04\)](#)
40. [Zhang J S;Zhao Y G;Wang M R Deep survey analysis of lowfrequency ground penetrating radar 2010\(05\)](#)
41. [包乃利;刘鸿福;余传涛;李月雷 纳米瞬变电磁法在探测浅层铁矿采空区的实验研究\[期刊论文\]-地球物理学进展 2013\(02\)](#)
42. [陈昌彦;白朝旭;宋连亮;谢朝晖 多道瞬态瑞雷波技术在公路采空塌陷区探测中应用\[期刊论文\]-地球物理学进展 2010\(02\)](#)
43. [陈相府;安西峰;王高伟 浅层高分辨地震勘探在采空区勘测中的应用\[期刊论文\]-地球物理学进展 2005\(02\)](#)
44. [陈仲候;王兴泰;杜世汉 工程与环境物探教程 1993](#)
45. [程业勋;杨进 环境地球物理学概论 2005](#)
46. [丁艳飞;白登海;许诚 均匀半空间表面大定源瞬变电磁响应的快速算法\[期刊论文\]-地球物理学报 2012\(06\)](#)
47. [戴前伟;侯智超;柴新朝 瞬变电磁法及EH4在钨矿采空区探测中的应用 2013\(03\)](#)
48. [戴前伟;余凯;冯德山;张彬 探地雷达及EH4对钨矿采空区的综合探测\[期刊论文\]-地球物理学进展 2010\(05\)](#)
49. [董浩斌;王传雷;许刚林 分布式智能化高密度电法仪的研制 2001\(增刊\)](#)
50. [胡祥云;杨迪坤;刘少华 环境与工程地球物理的发展趋势\[期刊论文\]-地球物理学进展 2006\(02\)](#)

51. 胡国泽;滕吉文;皮娇龙;王伟 乔勇虎 [井下槽波地震勘探—预防煤矿灾害的一种地球物理方法](#) 2013(01)
52. 黄俊革;王家林;阮百尧 [三维高密度电阻率E-SCAN法有限元模拟异常特征研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2006(04)
53. 吕惠进;刘少华;刘伯根 [高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2005(02)
54. 雷旭友;李正文;折京平 [超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2009(01)
55. 李貅;薛国强;刘银爱;钱建兵 [瞬变电磁合成孔径成像方法研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2012(01)
56. 李貅;戚志鹏;薛国强;范涛 朱宏伟 [瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2010(12)
57. 柳建新;罗曦;童孝忠;曹创华 周志军 [EH4时频数据联合处理及其在煤矿采空区的应用](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2012(05)
58. 刘泰峰;安海忠;亢俊健;周瑞 [煤田陷落柱气气场的数值计算及空间形态分布特征](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2004(01)
59. 孟庆鑫;潘和平 [地-井瞬变电磁响应特征数值模拟分析](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2012(03)
60. 祁民;张宝林;梁光河 [高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征——高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究](#) 2006(01)
61. 石显新;闫述;傅君眉;陈明生 [瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2009(07)
62. 王平;吴清星;刘少峰;王涛 [利用D-InSAR测量和高密度率剖面揭示焦作市王封煤矿老采空区地面沉降机制](#) 2011(06)
63. 王飞;郭秀军;杨振华 [浅层铝土矿采空区探测及引发的地面沉降预测](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2012(04)
64. 吴圣林;丁陈建 [综合检测法在采空区注浆效果检测中的应用](#) 2005(01)
65. 吴成平;胡祥云 [采空区的物探勘查方法](#)[期刊论文]-[地质找矿论丛](#) 2007(01)
66. 薛国强;陈卫营;周楠楠;李海 [接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2013(01)
67. 薛国强;闫述;周楠楠 [偶极子假设引起的大回线源瞬变电磁响应偏差分析](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2011(09)
68. 薛国强;李貅;戚志鹏;范涛 周楠楠 [瞬变电磁拟地震子波宽度压缩研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2011(05)
69. 薛国强;李貅;底青云 [瞬变电磁法理论与应用研究进展](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2007(04)
70. 于景村;刘志新;岳建华;刘树才 [煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2007(02)
71. 杨镜明 [高密度电阻率法煤田采空区勘察效果](#) 2012
72. 闫述;石显新;陈明生 [瞬变电磁法的探测深度问题](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2009(06)
73. 严家斌;李伟;戴前伟;冯德山 王燕龙 [高频电磁测深法在钼矿采空区探测中的应用](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2011(01)
74. 余传涛;刘鸿福;高建平 [双频激电法在探测煤矿采空区的尝试](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2008(05)
75. 杨华;刘鸿福 [测氧在煤矿采空区的应用](#) 2002(02)
76. 于景村;李志聘 [高密度电阻率法检测地基注浆效](#) 1998(05)
77. 张凌云;刘鸿福 [ABP法在高密度电阻率法反演中的应用](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2011(01)
78. 周楠楠;薛国强;陈卫营;闫述 赵长胜 张松 [铁矿采空区的地球物理探测](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2011(02)
79. 张开元;韩自豪;周韬 [瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用](#)[期刊论文]-[工程地球物理学报](#) 2007(04)
80. 张劲松;赵育刚;王梦茹 [低频地质雷达深层探测分析](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2010(05)

引用本文格式: 杨镜明, 魏周政, 高晓伟, YANG Jing-ming, WEI Zhou-zheng, GAO Xiao-wei [高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2014(1)