

doi: 10.11720/wtyht.2022.1202

王强,田野,刘欢,等.综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用[J].物探与化探,2022,46(2):531-536. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1202>

Wang Q, Tian Y, Liu H, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting in investigation of coal mine goaves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 531-536. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1202>

综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用

王强,田野,刘欢,朱春光,白超琨,郝森

(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,河北廊坊 065000)

摘要: 辽阳灯塔市铍子镇—西大窑一带存在较多煤矿小窑采空区,分布于村镇及周边,对地面房屋建筑和居民生活形成极大威胁,矿区周围一定范围内植被稀疏,大量采煤粉碴随意堆存,给生态环境带来严重破坏。但单一方法调查采空区具有局限性,难以彻底消除干扰和观测误差,本文从物探方法抗干扰性和有效性方面进行了选择和探索,运用的方法包括重力测量、高密度电法和浅层地震,经过钻孔验证,取得的效果较好。

关键词: 采空区探测;重力测量;高密度电法;浅层地震

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)02-0531-06

0 引言

煤矿经过地下开采工作后,会留下大面积空洞,形成采空区,其上覆岩层主要靠矿柱等支护设施维持应力平衡^[1],当某些矿柱实际强度低于设计承载能力或因长期处于地下水浸泡,在泥化、软化或受复采爆破震动等因素影响下,就会遭到破坏,进而改变采空区顶板的稳定平衡状态,此时会引起采空区上覆岩层发生形变,使形变区向周围蔓延,最终导致地面出现裂缝、沉降、塌陷等。

辽阳市下辖灯塔市铍子镇—西大窑一带就处于这种地质现状下^[2]。20世纪后期该矿区煤炭资源就已濒于枯竭,主要是私营矿企在残采区复采,以巷道采掘为主,向两边无规律开挖支巷道,多呈网格状,上下多层重叠交错,采宽范围较窄,高、宽一般为2~3 m,甚至更小,大多不支撑或临时支撑。由于开采深度较浅,地表变形剧烈,大多形成塌陷坑和地裂缝,给居民生命财产安全和生态环境造成极大的破坏^[3]。因此,准确地查明矿区内采空区的位置和深度,有助于为地质灾害的预防和治理提供可靠的依据。

目前,国内探测和评价采空区的主要物探方法

一般包括电磁法、高密度电法、浅层地震法等,近年来也有部分同行探索了重力、微重力法在采空区调查的效果^[4-7]。但是小窑一般的开采方式为以掘代采,采空区面积较小,尤其在人文活动、电磁干扰、地形地质条件复杂的地区,很难准确勘查^[8]。本次研究区位于村庄及周围,存在诸多不利因素,综合考虑选择了重力法、高密度电法、浅层地震法等物探手段,并通过布设钻探进行了验证。

1 工作区地质特征

工作区茨山村北距铍子镇约3 km,南距西大窑镇约2 km,交通方便。区内地势东高西低,地貌类型东部为铍子岭剥蚀构造低丘,走向南北为单斜山,最高点海拔136 m,西部为剥蚀堆积山前倾斜平原,地势平坦,微向西倾斜,海拔标高约60~80 m,由坡洪积粉质黏土和亚黏土组成。区内出露的地层主要为古生界石炭系太原组,二叠系山西组、下石盒子组和新生界第四系。

岩性由老到新分别为:石炭系太原组(C_3t)岩性主要为砂岩、页岩、炭质页岩夹层。岩层产状为走向NE20°,倾角NW约275°。含煤9层,地层总厚87

收稿日期:2021-04-12;修回日期:2021-09-28

基金项目:辽阳市多要素城市地质调查项目(DD20191025)

第一作者:王强(1990-),男,助理工程师,主要从事地球物理勘探工作。Email:35599@163.com

m。二叠系山西组(P_{1s})呈整合覆于石炭系太原组之上,岩性为石英砂岩、细粒石英砂岩,岩层总厚104 m,上部为含煤段,主要为灰黑色石英砂岩、黑色炭质页岩。据原灯塔市煤矿勘探资料,在区内该组岩层中含煤5~6层。下石盒子组(P_{1x})整合覆于山西组地层之上,主要岩性为砂岩与页岩、粉砂岩互层,风化强烈破碎,区内厚度25 m左右。第四系大面积分布于勘查区的西部、东部山前平原。主要岩

性为坡洪积粉质黏土和黏质砂土,粉质含量较高,含零星小砾石、碎石。据前人钻探揭露,东部山前厚6~11 m,西部厚20 m左右。

构造方面,工作区处于辽东山地与平原的结合部,区域构造体系属辽阳莲花状构造的次一级构造铍子沟向斜的西翼。岩层向西缓倾,地表因被松散层覆盖断裂构造不清。

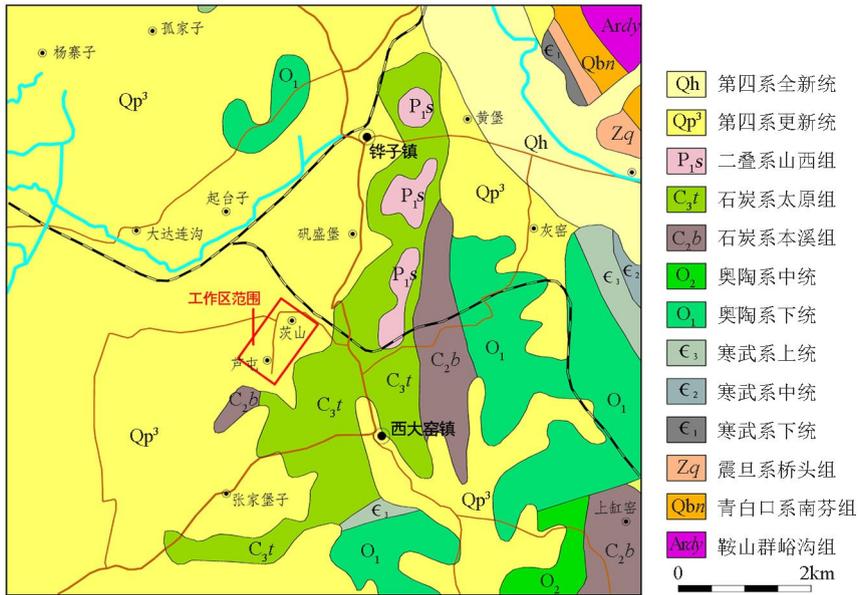


图1 工作区地质简图

Fig.1 Geological sketch of working area

2 煤层采空区的地球物理特征

煤层被开采后会形成“三带”,即冒落带、裂隙扩展带、弯曲变形带^[8]。当应力平衡被打破后,上覆岩层会向下发生错动形变,形成裂隙发育区域的裂隙扩展带。采空区的冒落带和裂隙带根据富水程度、垮塌程度等会形成多种不同的地球物理特征。

2.1 密度特征

采空区上覆岩层发生变形破坏,裂隙带会有地下水沿裂隙、空洞渗漏汇集,冒落带会有松散物质填充,致使采空区岩土体密实程度、含水程度产生差异,形成不同的地球物理特性:基底为完整稳定基岩,岩体密实;采空区为松散堆积物,导水性强。原始地层物性发生改变,与围岩相比形成质量亏损^[6-7],满足重力勘探所需的密度差异。

2.2 电性特征

煤层开采后形成的“三带”破坏了原始地层在横向上电阻率均匀分布的特性^[8],当裂隙带上的大

量空洞和裂隙区域不充水时,相对围岩一般表现为高电阻率的特征,若地下水沿裂隙汇集并赋存,则采空区及其上覆松散裂隙带在地电断面上会呈现低阻特征。根据这种较大的电性差异进行电阻率法工作,符合存在明显电性差异的地球物理勘探前提。

2.3 波阻抗特征

含煤地层在开采前,煤层顶板的波速和密度与围岩之间具有较大的差异,能够形成一个良好的波阻抗界面,产生较为明显的反射波,可用于追踪识别煤层反射面,为地震勘探提供了良好的前提条件。当煤层开采后的采空区发生塌陷,原有的波阻抗界面会发生明显的畸变和破坏^[1],地震时间剖面表现为反射波同相轴的弯曲、中断或缺失。因此反射波组的紊乱或畸变,可以作为识别采空区的主要依据。

3 方法应用与成果解释

本次采空区工作部署思路为:由大比例尺重力测量确定采空区的边界范围,由高密度电阻率法及

浅层地震反射波法对异常的深度、规模进行更细致的划分,由钻探对发现的异常进行验证。

3.1 重力测量

在研究区内首次选用高精度重力测量法进行采空区探测,从茨山村、芦屯到东南侧山腰布置重力测线 21 条,线距 50 m,点距 10 m,走向 NW。重力测量仪器采用加拿大 Scintrex 公司制造的 CG-5 全自动陆地重力仪,该重力仪测量过程中对读数自动进行漂移改正、倾斜改正、地震滤波、温度补偿等,仪器分辨率为 $1 \mu\text{Gal}$ 。根据收集资料显示,工作区 3 煤厚度为 0.10~2.34 m,顶板埋深 100 m 左右,密度差约 $0.3 \sim 2 \text{ g/cm}^3$,据此建立长方体模型,经正演计算得

出其引起的重力异常在仪器测量的精度范围内。实际测量完成后由布格、地形、正常场改正值经过总精度公式^[6]计算后,得到本次工作布格重力异常总精度为 $0.008 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

由布格重力异常(图 2)可见,区内重力区域背景场形态总体表现为重力梯级带反映,布格重力异常特征表现为北西高南东低的分布特征,布格重力异常值范围为 $(-51 \sim -48) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。根据地质情况分析整体地层的产状向东倾。引起正值异常的原因可能为重力异常反映深部综合的信息,而浅部采空区引起的异常并未在整体异常图中产生明显的指示。

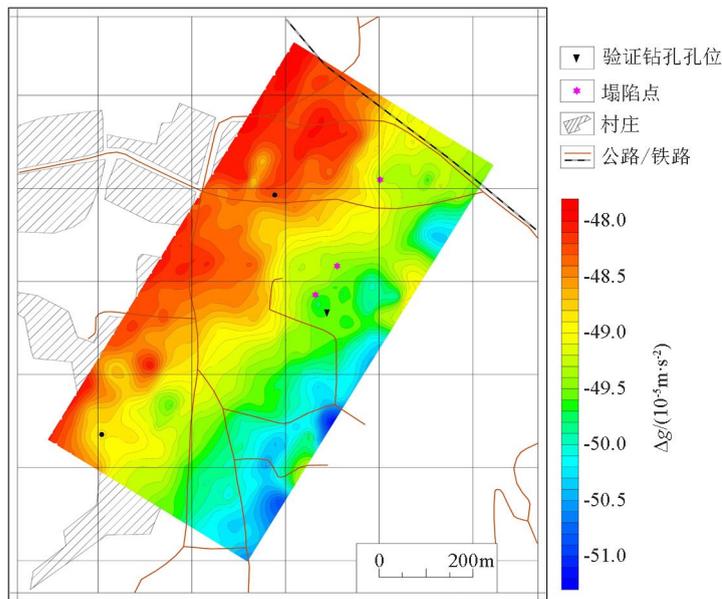


图 2 工作区实测布格重力异常

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly map measured in working area

为能够从布格重力异常中凸显地下采空区所产生的异常,对布格重力异常进行了场分离处理来求取剩余重力异常。国内外学者已经提出趋势分析法、滤波法、窗口法、高次导数法、解析延拓法等诸多场分离方法,不同的方法处理效果略有差异,在实际应用中,需对比选取最适合的方法进行处理。经初步处理对比后,本文最终选择窗口滑动平均法进行处理,采用的小窗半径为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,大窗半径为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$,求取的剩余重力异常结果如图 3 所示。经过处理后的剩余重力等值线图,异常形态发生改变,推断的低密度异常区位置与已发现的地表沉陷区相符,沉陷区皆出现在负异常带中,说明处理方法获得的结果是可信的。

3.2 高密度电法

根据工况条件,从村庄到山腰共布置了高密度

电法剖面 11 条,点距 12 m,其中 NW 向剖面 8 条,NE 向剖面 3 条。仪器采用美国 AGI 公司制造的 SuperSting R8 高密度电法仪,80 道分布式电缆和不锈钢电极。

图 4 为高密度电法 L3 线视电阻率反演断面,地表下 13 m 以内皆为低阻,视电阻率 $< 20 \Omega \cdot \text{m}$,推断为地表粉土、粉质黏土层。根据反演断面图显示,L3 线存在 3 处低阻异常,在剩余重力异常图上为低密度体反映,符合采空区异常特征,推测为采空区引起。I 号异常区位于测线 435~540 m、深度 37~74 m 之间,视电阻率值约为 $39 \sim 69 \Omega \cdot \text{m}$ 左右;II 号异常位于测线 645~765 m、深度 32~97 m 之间,视电阻率值约为 $32 \sim 105 \Omega \cdot \text{m}$ 左右;III 号异常位于测线 1000~1070 m、深度 26~60 m 之间,视电阻率值约为 $10 \sim 42 \Omega \cdot \text{m}$ 左右,该异常未封闭,还有向下延伸的

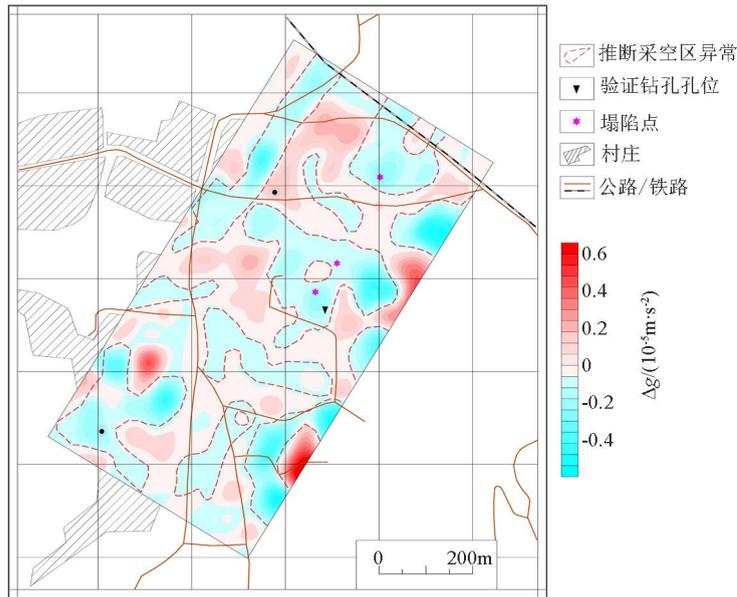


图 3 工作区剩余重力异常

Fig. 3 Residual gravity anomaly map of working area

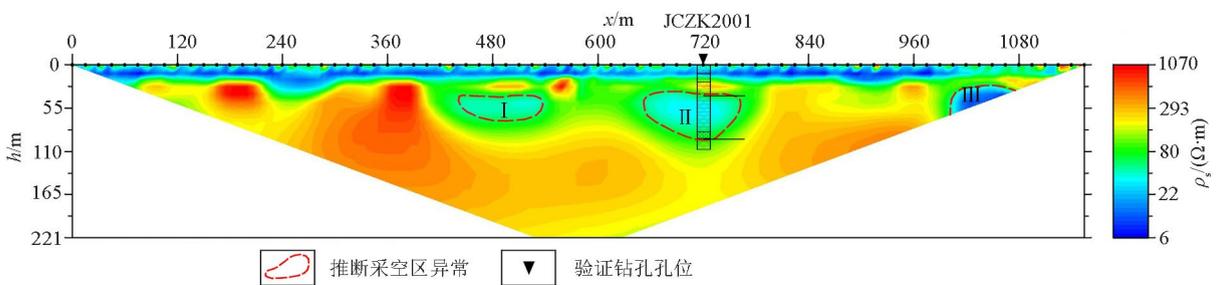


图 4 高密度电法 L3 线视电阻率反演断面

Fig. 4 High density resistivity inversion section of line 3

趋势。I 号异常区和 II 号异常区上方都有较薄的高阻层覆盖,结合工作区的地层、物性及钻孔情况分析,推测为原岩性为泥岩、细砂岩及粉砂岩由于下部煤层采空,部分地层发生沉降,导致的电性反映不均匀。

为验证异常在 L3 线 720 m 处布置钻孔,钻孔施工中发生两次掉钻,约为 2 m,进一步证实了采空区的存在。但高密度电法剖面图显示的低阻异常区深度范围比采空区要大,推测是由于采空区上方冒落带和裂隙带充水,因矿化度较高,其电阻率整体呈低阻反映。因此采空区深度应根据钻孔进一步校正。

3.3 浅层地震反射波法

在茨山村中部及东侧农田布设浅层地震剖面 3 条,其中 NE 向 2 条, NW 向 1 条,测线主体部分基本与重力测量和高密度电法工区重合。浅层地震仪器采用美国 GEOMETRICS 公司制造的 Strata Visor

NZXP 专业型高精度地震仪。使用落锤式震源,落锤自重 50 kg,离地高度 1 m,采用单边激发单边接收的 6 次覆盖观测系统,48 道接收,偏移距 0 m,道间距 3 m,采样间隔 500 μs,记录长度 1 000 ms。

地震剖面中,同一反射界面的反射波组应具有强振幅特性和同相轴的连续性,而采空区内的反射波组会出现同相轴断裂、缺失或振幅明显减弱等异常特征^[9]。图 5 为 NE 向的 DZ03 线水平叠加时间剖面,对剖面反射波组进行追踪可得到 60~100 ms 和 110~150 ms 范围内的两组振幅较强且连续的反射波(T1、T2 波组),再往下一定范围仍有几组反射波,但同相轴连续性较差。T1 波组在测线 215~290 m 和 380~470 m 之间,T2 波组在 70~100 m、160~190 m、215~290 m 和 380~470 m 之间分别出现同相轴错断、缺失或振幅减弱等情况,符合采空区异常特征,推断这几段空白区域为采空区引起异常(图 5)。

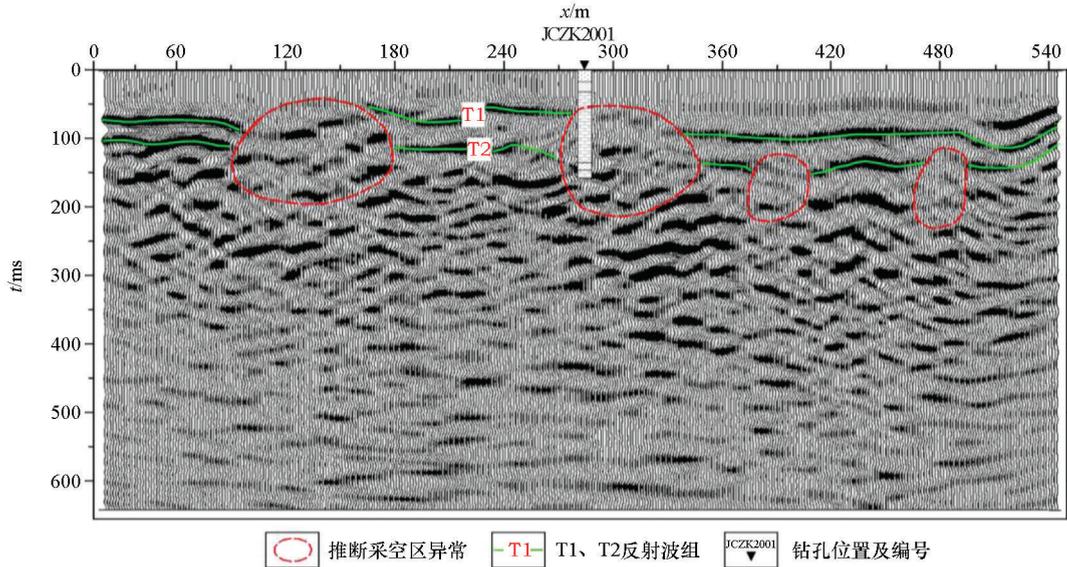


图5 浅层地震 DZ03 线水平叠加时间剖面

Fig.5 Shallow seismic time profile of line DZ03

钻孔 JCZK2001 揭露围岩岩性为粉砂岩、泥岩,煤层波速约为 1 300~1 600 m/s,参照钻孔处的采空区两侧的 T1、T2 波组双程旅行时,估算采空区 T1、T2 埋深约为 42 m 和 104 m。

4 钻探验证

为进一步验证以上推断的准确性,在分析收集煤矿资料和物探工作成果后,于重力测量 1150 线、高密度电法 L3 线和浅层地震 DZ03 线交叉位置,布置 JCZK2001 监测钻孔。在钻探施工过程中,钻进至 39.0~40.6 m 处突然严重漏水,孔口水位突然消失(浅层煤采空区),掉钻 1.60 m;钻进至 103.1~105.1 m 深度突然严重漏水,孔口水位突然消失(深部煤采空区),掉钻 2.00 m。围岩可见部分泥岩煤状光泽,其中 47.50 m 处和 61.20 m 处发现完整木块。钻孔验证结果与物探推断结果基本吻合。

5 结论

1) 煤矿采空区具有多种地球物理异常特征,针对不同的地球物理特征,建议选择多种物探方法对采空区进行综合探测,来减少单一方法局限性带来的影响,提高异常解释的准确度。

2) 初步探索了煤矿采空区探测的地球物理方法组合。可首先利用大比例尺重力测量对采空区分布范围进行识别,利用高密度电法对采空区充水情

况和大致深度范围进行判断,利用浅层地震对采空区位置、深度规模进行估算。

3) 物探方法解释出的采空区范围和深度,建议通过在异常位置布置钻孔进行验证。

参考文献 (References):

- [1] 李莲英,薛俊杰,赵焯焯,等.应用综合物探方法探查煤层采空区[J].物探与化探,2017,41(2):377-380.
Li L Y, Xue J J, Zhao X X, et al. The exploration of mined-out areas by integrated geophysical method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 377-380.
- [2] 尤建功,靳胜凯,田野,等.辽阳市城市地质工作思考[J].城市地质,2020,15(3):246-249.
You J G, Jin S K, Tian Y, et al. Reflection and suggestion on urban geological work of Liaoyang City [J]. Urban Geology, 2020, 15(3): 246-249.
- [3] 郝森,霍润斌,王末,等.辽阳城市地质灾害问题及防治[J].城市地质,2020,15(3):267-275.
Hao S, Huo R B, Wang M, et al. Problems and prevention measures of geological Hazards in Liaoyang City [J]. Urban Geology, 2020, 15(3): 267-275.
- [4] 郇恒飞,高铁,赵海卿,等.高精度重力测量在抚顺煤矿采空区探测中的应用[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):194-200.
Huan H F, Gao T, Zhao H Q, et al. Application of high precision gravity survey in detecting mined-out areas of Fushun coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 194-200.
- [5] 王延涛,潘瑞林.微重力法在采空区勘查中的应用[J].物探与化探,2012,36(S1):61-64.
Wang Y T, Pan R L. Application of micro-gravity method in survey of goaf [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(S1): 61-64.
- [6] 明圆圆,王春辉,牛雪,等.重力勘探在阳泉煤炭采空区中的应用

- 用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 136 - 139.
- Ming Y Y, Wang C H, Niu X, et al. Application of gravity exploration in detection of coal goafs in Yangquan [J]. Coal Technology, 2018, 37(9): 136 - 139.
- [7] 孟庆旺. 综合物探方法在嘉祥县青山省级地质公园溶洞勘察中的应用效果[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1464 - 1469.
- Meng Q W. The application effect of comprehensive geophysical method in karst cave investigation of Qingshan Provincial Geopark in Jiaxiang County [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1464 - 1469.
- [8] 薛永军, 武秀芳, 仲丛明, 等. 煤矿小窑采空区及塌陷区的地球物理勘查[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 111 - 113.
- Xue Y J, Wu X F, Zhong C M, et al. Geological exploration in goaf and collapse areas in small coal pits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(S1): 111 - 113.
- [9] 彭超. 浅层地震反射波法和高密度电法在石膏矿采空区勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 481 - 485.
- Peng C. The application of shallow seismic reflection method and high-density electrical method to survey of gypsum mine goaf [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(4): 481 - 485.

Application of comprehensive geophysical prospecting in investigation of coal mine goaves

WANG Qiang, Tian Ye, LIU Huan, ZHU Chun-Guang, BAI Chao-Kun, HAO Sen

(Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: There are many small coal mine goaves in Huazi Town-Xidayao Town in Dengta City, Liaoyang City, Liaoning Province. They are distributed in villages and towns and their surrounding areas, posing great threats to the ground buildings and resident life. Furthermore, the vegetation around the mining area is sparse, and a large amount of coal slag has been piled up at will, which causes serious damage to the ecological environment. However, owing to the limitations of a single geophysical method, it is difficult to completely eliminate interference and observation errors through the goaf investigation using a single geophysical method. Based on the selection and exploration of geophysical methods from the aspects of anti-interference and effectiveness, this study conducted the coal mine goaves in the study area by applying the geophysical prospecting methods including gravity survey, high-density resistivity method, and shallow seismic reflection method. As verified through drilling, ideal results were achieved.

Key words: detection of mine goaves; gravity survey; high-density resistivity method; shallow seismic reflection method

(本文编辑: 王萌)