

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0769-06

浅埋特厚煤层小窑采空区 瞬变电磁探测技术研究及应用

姜志海^{1,2}, 杨光³

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049)

摘要 根据海拉尔露天矿区实际地质情况建立相应的地球物理模型, 对理论地电模型和高阻采空区模型进行三维数值模拟, 探讨高阻目标体的瞬变电磁响应特征和分布规律, 并确定适合该地区的时深换算系数。结果表明: 瞬变电磁法能够比较清晰地反映出地下浅埋高阻目标体, 视电阻率等值线横向变化剧烈, 受其影响, 视电阻率等值线上拱或下凹, 形成明显的高阻异常区, 与物理模拟实验结论相似, 时深换算系数取 1.1~1.2 时计算得到的视深度与实际地层厚度的误差较小。工程实践表明: 对于埋深不大于 100 m 的小窑采空区而言, 只要选择合理的参数, 瞬变电磁法能够探测出直径大于 5 m 的未塌陷小窑采空区, 并可查明其空间分布范围和埋深。

关键词 小窑采空区; 瞬变电磁法; 数值计算; 时深转换

中图分类号 P 631

文献标志码 A

Research and application of TEM detection technology for small mine gob area in shallowly-buried and extremely thick seam

JIANG Zhihai^{1,2}, YANG Guang³

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract Three-dimensional numerical simulation has been carried out to test the theoretical models and high-resistance gob area models in coal mine based on the geophysical model established according to the actual geological conditions of the opencast mine in Hailaer. The response characteristic and distribution law of transient electromagnetic field have been discussed and the parameter of time-depth conversion has been determined. The numerical results show that Transient electromagnetic method can clearly reflect the shallowly-buried and extremely thick high-resistance objective underground. The level curve of the apparent resistivity has a drastic lateral variation, with a camber and concave line, which indicates that it is the high resistivity anomaly area. And numerical method has similar conclusions with physical experiment for the geologic model. For a given geoelectric model when choosing time-depth conversion parameter $\gamma=1.1$ or 1.2, the error is small. The applied result shows that: for the

收稿日期: 2013-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227900); 国家自然科学基金青年基金项目(41304113)

作者简介: 姜志海(1978—), 男, 山东省德州市人, 博士, 副教授, 从事矿山地球物理勘探理论与应用技术方面的研究。

E-mail: jzh3885434@126.com

Tel: 13645203339

inter-mining coal pit, with the buried depth less than 100 meters, as long as a reasonable parameter is chosen, TEM can find out the small mine gob area with over 5 meters in diameter and its distribution range and depth.

Key words small mine gob area; transient electromagnetic method; numerical simulation; time-depth conversion

随着煤炭资源的大规模开发和利用,带来巨大的经济和社会效益的同时,也给矿山周围生态环境带来严重的伤害和破坏^[1]。煤炭开采在地下形成的采空区由于原岩应力平衡遭到破坏易导致岩石变形、破坏和移动,以及上覆山体边坡发生蠕滑而变形,甚至产生采空区塌陷等地质灾害^[2]。塌陷采空区不仅会造成地下水枯竭、耕地破坏、生态环境恶化,还会使当地房屋受损、道路等开裂变形,未塌陷的采空区更是会带来极大安全隐患^[3-6]。陈旗煤田宝日希勒露天矿区东部分布大量历史遗留未塌陷采空区,生产过程中,随着台阶开采的不断剥离,露天开采境内各台阶与地下空区群的隔离层厚度越来越薄^[3],随时有可能发生采空区顶板坍塌事故。

近年国内外地球物理工作者在采空区探查方面做了大量工作^[7-13]。肖石英介绍了微重力仪在石灰岩溶洞区探测中的应用;高密度电阻率法在浙中萤石产区开展采空区调查、北京地区的地下采空勘查探测均取得了理想的探测效果;程久龙探讨了利用探地雷达技术查明地表浅部采空区的效果;单涛等通过阿勒泰地区的勘查实例同样说明了 CSAMT 法在积水采空区探测方面的有效性。王俊茹介绍了应用浅层地震方法探测采空区岩层塌陷所采用的

野外工作、资料处理及解释方法技术,讨论了高分辨率浅层地震方法的地质解释依据和勘查效果;陈灯研究了瑞雷波探测空区的理论基础、具体操作技术和方法。刘菁华等探讨了采空区、塌陷区和非采空区(残留煤柱)上氢浓度异常差异,分析了采空区、地面塌陷区和残留煤柱所对应的异常曲线特征。在以往的工程实践中上述各探测手段均已取得了一定的效果,但在海拉尔露天矿区的应用效果并不理想,基于此,拟采用瞬变电磁法进行小窑采空探测。

1 正演模拟

1.1 数值模拟

结合研究地区的地层特性和电性特征,并根据小窑开采的特点设计一个简化了的小窑采空区三维模型。参数为:第四系覆盖层 $\rho_1=50 \Omega \cdot \text{m}$, $h_1=10 \text{ m}$;煤层上覆地层 $\rho_2=100 \Omega \cdot \text{m}$, $h_2=50 \text{ m}$;煤层 $\rho_3=500 \Omega \cdot \text{m}$, $h_3=20 \text{ m}$;煤层底板岩层 $\rho_4=100 \Omega \cdot \text{m}$, 厚度无穷大;在第 3 层煤层间设计一个水平不充水的高阻采空区,大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,电阻率为 $5000 \Omega \cdot \text{m}$,发射线圈等效面积 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 16 \text{ m}$,采用中心回线装置接收,接收线圈等效面积为 1 m^2 。

图 1 是上述高阻采空区模型瞬变电磁响应曲线。

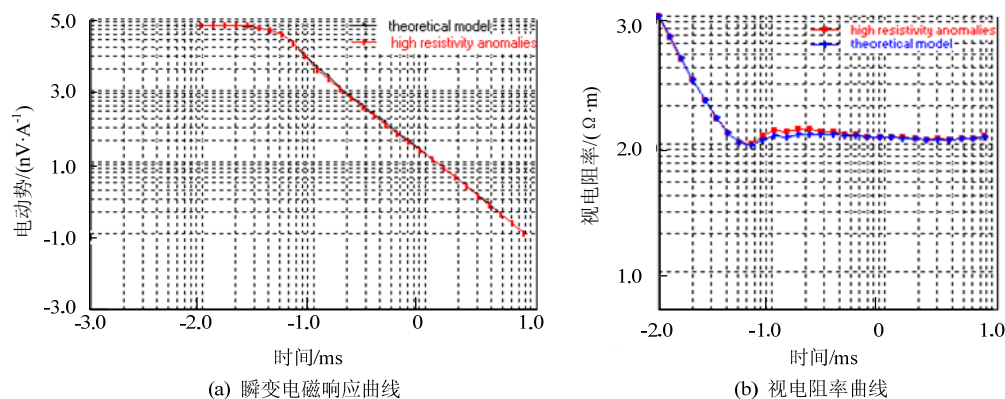


图 1 瞬变电磁响应曲线、视电阻率曲线对比

Fig.1 Plots of different model's vertical component of EMF

从图 1 可看出,瞬变电磁响应随着采空区异常体电阻率的存在而相对变弱,并且只在中间时间段与正常地层瞬变响应曲线稍有差别,曲线首支和尾

支差别不明显,这主要是因为较早时刻电磁场尚未扩散到异常区域,而曲线尾支差别较小的原因是“烟圈”已扩散到深处,高阻异常体对其影响减弱。

从视电阻率曲线图可看出: 视电阻率值整体呈现高低变化, 从 0.08 ms 开始是电阻率值开始升高, 在 0.2 ms 趋于极值后又逐渐降低并无限接近 100 $\Omega \cdot m$ 。由于给定的采空区电阻率值较煤层电阻率值更大, 所以视电阻率值完全压制住了煤层的响应, 这说明瞬变电磁法对高阻采空区的反映效果良好。

图 2 是上述模型数值计算的结果计算得到的视电阻率-深度断面图。

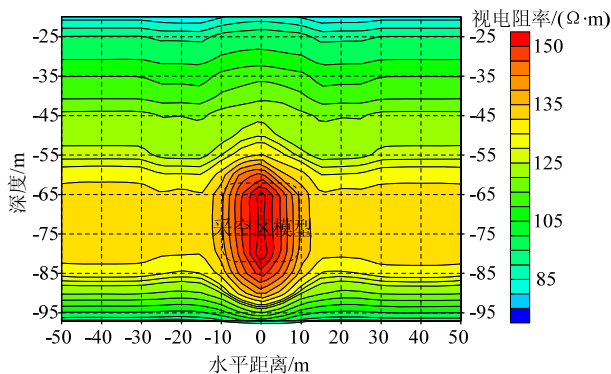


图 2 视电阻率断面图

Fig.2 Section diagrams for apparent resistivity

从图 2 可看出由浅至深视电阻率等值线整体呈现高低变化, 这种变化趋势较好地反映了实际地层的电性变化。由于高阻采空区的存在, 在横向 -10~10 m 区段, 深度上 -60 m 开始其电阻率值明显比周围岩层电阻高很多, 视电阻率断面图上呈现高阻异常反应, 这说明在此类地电条件下, 瞬变电磁法可以探测到煤层中的高阻采空区, 这为以电性差异为应用前提的瞬变电磁法提供了良好的地球物理基础。

1.2 物理模拟

在研究采空区模型时使用沙子充当围岩介质, 使用玻璃槽充当采空区, 建立物理模型, 对采空区异常体的瞬变电磁响应特征进行了物理模拟。图 3 为小回线源瞬变电磁法探测采空区物理模型示意图, 其中玻璃槽异常体到地表的距离为 20 cm, 测点点距为 5 cm, 共计 13 个测点。采用 TERRATEM 瞬变电磁仪, 发射电流 6 A, 关断时间约 0.25 ms, 1 m×1 m 的单匝发射回线, 10 cm×10 cm×40 匝接收回线。

图 4 为上述物理模型计算得到的视电阻率断面图, 电阻率整体趋势呈现由高至低的变化趋势, 这与实际模型符合。正常情况下, 同一地层电阻率相差不大, 视电阻率等值线断面图上横向变化平缓, 但从图中可看出, 由于充满空气的玻璃槽的存在,

使得在 9#(横坐标 40 cm 为中心)测点附近正下方视电阻率值横向变化剧烈, 出现高阻异常扰动, 且对应的视电阻率值相对较大, 形成近似“漏斗状”的高阻异常区, 与地电模型中玻璃槽异常位置吻合, 认为此处扰动为玻璃槽异常体的响应。

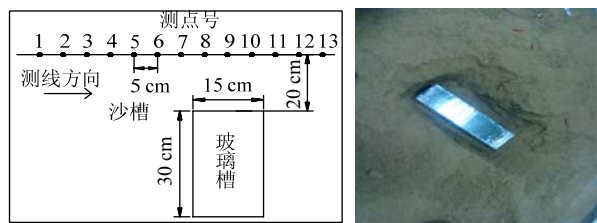


图 3 采空区模型示意图

Fig.3 Profile diagram of goaf model

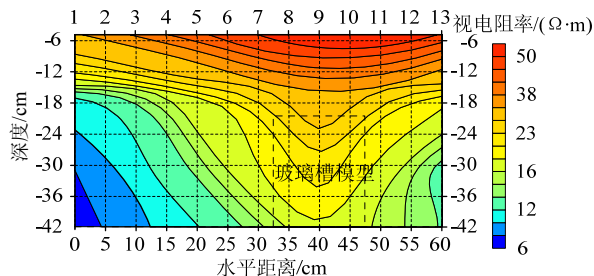


图 4 视电阻率断面图

Fig.4 Section diagrams for apparent resistivity

2 时深换算技术

当地下半空间为不均匀分布的导电介质或任意导电介质分布情况下, 电磁波在地下的传播规律和均匀介质一样, 也必须满足麦克斯韦方程组。即在某一时刻, 电磁场在地下任意介质中扩散速度的速度与均匀介质情况扩散速度满足一定的比例关系, 即有:

$$V_s = \beta \rho_i \sqrt{\alpha} / \mu a \quad (1)$$

$$\left\{ C_1 + (C_1^2 + 2)^{1/2} + \left[1 + C_1 (C_1^2 + 2)^{-1/2} \right] \alpha C_2 \right\} \quad (2)$$

$$D = \gamma V_s \times t_i \quad (3)$$

$$C_1(\alpha) = \frac{3}{4} \sqrt{\pi} \left[1 - \frac{\alpha}{4} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(2k-3)!!}{k!(k+1)!} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^k \right] \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{3}{4} \sqrt{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k-1)!!}{k!(k+1)!} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^k \quad (5)$$

式中: V_s 为“烟圈”的扩散速度; D 为扩散深度; a 为发射回线半径; ρ 为均匀半空间电阻率; $\alpha = 1/4\tau$, $\tau = t\rho/\mu_0 a^2$; ρ_i 为 t_i 时刻对应的视电阻率值; β 为比例系数; γ 为换算系数。由式(1), (2)可看出电磁波在不同介质中传播速度不同, 采用同等参数在不同地电条件下的探测深度差别较大, 故

选取合理的换算系数对瞬变电磁勘探深度的求取显得尤为重要。

图 5 为理论模型采用不同时深换算系数进行时深转换后的视电阻率随深度变化曲线,横坐标代表

深度(m);纵坐标为视电阻率值($\Omega \cdot m$)。从图可看出,换算系数为 1.2 时误差最小,计算的视深度与实际深度比较接近。

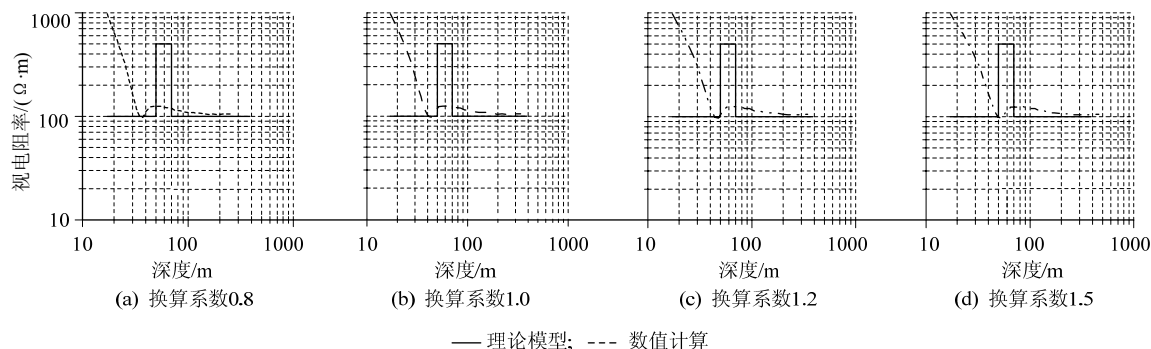


图 5 不同换算系数下视电阻率深度变化曲线

Fig.5 Depth of the apparent resistivity curve of different correction coefficient

3 应用实例

神华宝日希勒露天矿区煤层顶板以粉砂岩、泥岩、中粗砂岩为主。根据已知地质资料,小窑采空区埋藏深度在 60~100 m 之间,煤层顶、底板岩层之间电性差异较小,数值上不易区分。但层状沉积煤层在横向上视电阻率值变化较为平缓,横向电性差异比较小。而空洞采空区能引起电性在横向上的剧烈变化,呈高阻异常反映,与完整煤层、围岩形成明显电性差异。

3.1 采场坡道探测成果

图 6 分别为采场坡道不同测点的实测电位衰减曲线和视电阻率-深度曲线。

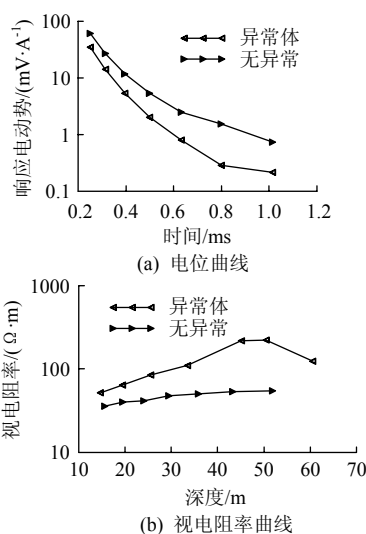


图 6 实测电位衰减曲线、视电阻率曲线对比

Fig.6 Comparison of vertical component of EMF and apparent resistivity curve

从图 6a 中可看出,当地下存在采空异常时其实测感应电位值明显要低于正常地层,且曲线首支差别较尾支要小。图 6b 中正常地层的视电阻率曲线整体呈现升高的趋势,这主要反映了煤层及上覆岩层的地电信息;而当地下存在采空区时,视电阻率曲线呈现先升高后降低,与“K”型曲线形态类似,中间高阻响应即为采空区的反映,与数值模拟结果吻合。

图 7 为采场 0810-8 线视电阻率等值线图,采用 PROTEM47 瞬变电磁仪,5 m×5 m×3 匝,分离回线装置形式。

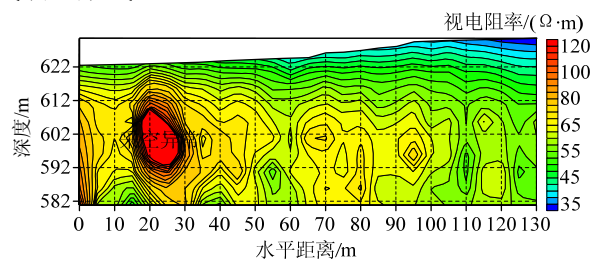


图 7 采场 0810-8 线视电阻率等值线图(5 m×5 m 分离回线)

Fig.7 Line 0810-8 apparent resistivity isoline map

该测线位于采场平台,由于土方剥离厚度不均,致使地势由小号点向大号点逐渐增高,地面标高最低 630 m、最高 640 mm,高程差约为 10 m,即小号点低阻土层较薄,大号点低阻土层较厚,地表距煤层顶板约 30~40 m。0810-8 线视电阻率断面图很好地反映了这一变化趋势,从横向距离 60 m 处,小于 40 $\Omega \cdot m$ 电性区域逐渐变厚。水平方向 15~30 m、纵向从 610 m 开始出现高阻异常反映,视电阻率值高于 100 $\Omega \cdot m$,远高于其他区域,疑为

小窑采空区, 直径为 10 m 左右, 埋深在 30 m 左右, 现场钻探爆破结果证实了解释的正确性。

3.2 排土场平台探测成果

图 8 分别为采场坡道不同测点的实测电位衰减曲线和视电阻率-深度曲线, 从图中不难看出由于排土场新近高阻土层堆积和目的层埋深的增大使得瞬变电磁响应幅度差异明显变小。右图中正常地层的视电阻率曲线整体呈现高低高的变化趋势, 较好地反映煤层及煤层以上地层的地电信息。当地下存在采空区时, 其视电阻值明显高于围岩介质。

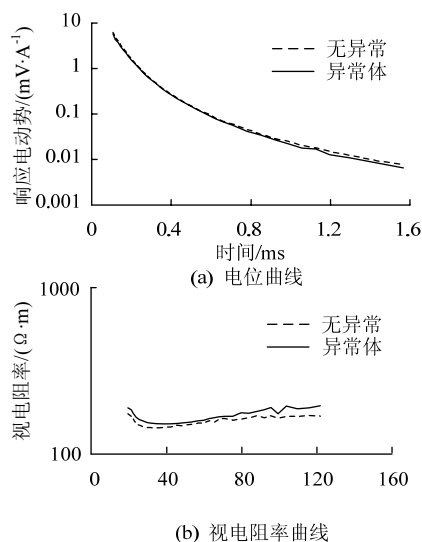


图 8 实测电位衰减曲线、视电阻曲线对比
Fig.8 Comparison of vertical component of EMF and apparent resistivity curve

图 9 为排土场 15[#]线深度-视电阻率等值线图。

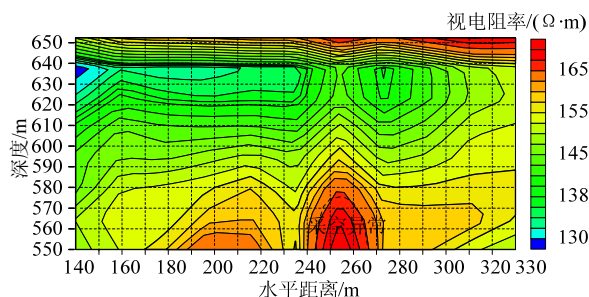


图 9 排土场 15 线视电阻率等值线图(20 m×20 m 中心回线)
Fig.9 Line 15 apparent resistivity isoline map

采用 Tsikl-7 瞬变电磁仪, 发射线圈 20 m×20 m, 排土场平台新近土层堆积厚约为 30 m, 地面标高约为 671.028 m。在视电阻率等值线断面图浅层应表现为高阻, 下伏原生第四系覆盖层低阻, 再向下煤系地层高阻, 纵向上电性层呈高低高趋势。由于新近土层堆积松散, 电阻率较高, 瞬变场扩散较快,

在时间剖面上主要分布在 0.2 ms 以上, 探测距离对应为 640 m 左右以上范围。第四系地层电阻较低, 电磁场扩散较慢, 该层位对应时间剖面 0.2~0.5 ms, 即探测距离上 610~640 m 范围内, 视电阻率-深度断面图很好地反映了这一电性变化。横向 245~265 m 区段呈高阻反映, 视电阻率值高于 150 Ω·m, 且远高于横向其他区域, 推断为小窑采空区, 钻探爆破结果证实了解释的可靠性。

3.3 未开挖草地探测成果

图 10 分别为未开挖草地不同测点的实测电位衰减曲线和视电阻率-深度曲线, 正常地层的视电阻率曲线整体呈现低-中高-高的变化趋势, 较好地反映实际地层的电性变化。但当地下存在采空区时, 使得视电阻率值整体升高, 尤其在 70~90 m 深度范围内视电阻值明显高于围岩介质。

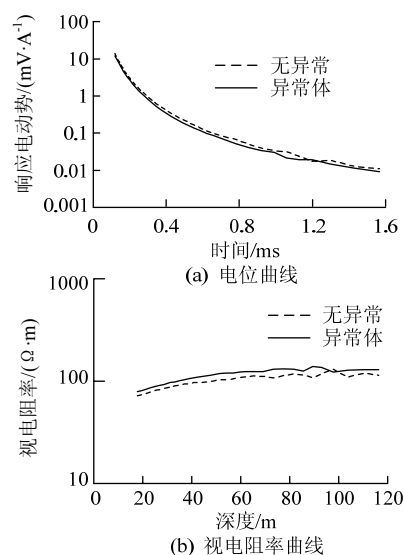


图 10 实测电位衰减曲线、视电阻曲线对比
Fig.10 Comparison of vertical component of EMF and apparent resistivity curve

图 11 为草地 X12 线视电阻率等值线深度断面图, 该探测区域位于矿区南部宝雁矿东侧, 地势平坦, 为原生草原, 地面标高约为 679.774 m, 地表未见有小窑塌陷, 未探测前均认为存在小窑可能性不大。图 11 断面图对该区的地电断面反映非常好, 即浅表低阻, 为第四系覆盖层反映, 随即电阻率逐渐升高, 为煤系地层反映。横向 98~118 m, 155~175 m 区段, 视电阻率值高于 140 Ω·m, 且高于其他区域, 推断 2 处均为采空异常。后经打钻验证, 结果钻探过程中 98~118 m 处异常区段掉钻 6 m, 爆破后证实为小窑采空区。

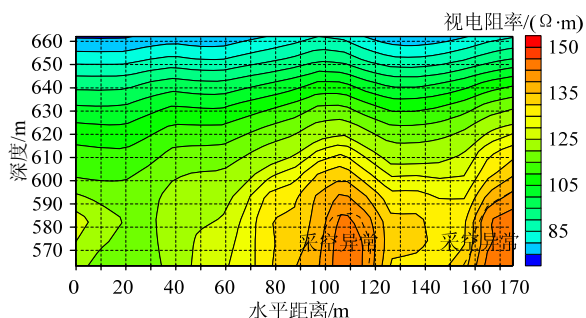


图 11 草地 X12 线视电阻率等值线图(20 m×20m 中心回线)

Fig.11 Line X12 apparent resistivity isoline map

4 结 论

1) 结合研究地区的实际地电特性重新修正时深换算系数,理论模型计算表明:在上述地电条件下时深换算系数取 1.1~1.2 时计算得到的视深度与实际地层厚度的误差较小,并在海拉尔实际探测工程中得以验证。

2) 宝日希勒露天矿区小窑采空区一般为不充水的空洞,在电性上呈高阻异常响应特征。结合数值模拟和现场反复试验的结果,采用 5 m×5 m×3 m 分离回线装置形式,最大采样时间 1 ms 有效探测深度可达 60 m 以上,5 m×10 m 网度能够探测直径 5 m 以上的未塌陷小窑采空区;在排土场、原生草地采用边长 20 m 的中心回线装置形式,最大采样时间 1.5 ms 有效探测深度可达 100 m,亦能探测到直径 5 m 以上未塌陷小窑采空区。在海拉尔露天矿区的探测结果表明,一期采空异常爆破 82 个,其中 64 个为小窑采空,准确率 78%;二期采空异常爆破 116 个,其中 105 个为小窑采空,准确率达 90.5%。

3) 每一种物探方法都有它的应用条件和使用范围,在特定环境下都能解决一定的地质问题,但由于地下介质的地质、地球物理特征及自然地理条件经常因地而异,故影响方法的有效性,即某种地球物理方法在解决地质问题时存在局限性。

参考文献:

- [1] 杜坤,李夕兵,刘科伟,等.采空区危险性评价的综合方法及工程应用[J].中南大学学报,2011,42(9): 2803-2811.
DU Kun, LI Xibing, LIU Kewei, et al. Comprehensive evaluation of underground goaf risk and engineering application [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(9): 2803-2811.
- [2] 张耀平,曹平,袁海平,等.复杂采空区稳定性数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(6): 233-238.
ZHANG Yaoping, CAO Ping, YUAN Haiping, et al. Numerical simulation on stability of complicated goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(6): 233-238.
- [3] 汪吉林,丁陈建,张云,等.老采空区地基变形对地面建筑影响的数值分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4): 477-480.
WANG Jilin, DING Chenjian, ZHANG Yun, et al. Numerical analysis of effect of abandoned goaf foundation deformation on ground buildings[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 477-480.
- [4] 刘科伟.露天开采隐患空区激光三维探测、可视化研究及其稳定性分析[D].长沙:中南大学,2012.
- [5] 李夕兵,李地元,赵国彦,等.金属矿地下采空区探测、处理与安全评判[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1): 24-29.
LI Xibing, LI Diyu, ZHAO Guoyan, et al. Detecting, disposal and safety evaluation of the underground goaf in metal mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 24-29.
- [6] 周保精,徐金海,吴锐,等.特厚煤层小窑采空区充填复采技术研究与应[J].采矿与安全工程学报,2012,29(3): 317-321.
ZHOU Baojing, XU Jinhai, WU Rui, et al. Research on filling repeated mining technology in small pit goaf in extremely thick coal seam and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 317-321.
- [7] 童立元,刘松玉,邱钰,等.高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J].岩石力学与工程学报,2004,23(7): 1198-1202.
TONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, et al. Current research state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1198-1202.
- [8] 邵振鲁,王德明,王雁鸣.高密度电法探测煤火的模拟及应用研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5): 468-474.
SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming. Simulation of high-density electrical method in detecting coal fires and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 468-474.
- [9] 王树威.小煤窑采空区综合探测技术的应用研究[D].西安:西安科技大学,2012.
- [10] 刘菁华,王祝文,朱士,等.煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J].煤炭学报,2005,30(6): 715-719.
LIU Jinghua, WANG Zhuwen, ZHU Shi, et al. The geophysical exploration about exhausted area and sinking area in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 715-719.
- [11] 薛国强,宋建平,闫述,等.瞬变电磁探测地下洞体的可行性分析[J].石油大学学报,2004,28(5): 135-138.
XUE Guoqiang, SONG Jianping, YAN Shu, et al. Feasibility analysis of transient electromagnetic method for detecting underground cave[J]. Journal of the University of Petroleum, 2004, 28(5): 135-138.
- [12] 梁建刚.瞬变电磁勘察煤田采空区的可行性分析[D].长沙:中南大学,2009.