

综合技术

瞬变电磁法在探测磷矿采空区中的应用研究

Application Research of Transient Electromagnetic Method in Detecting Goaf of Phosphate Mine

姚毅^{1,2,3}, 王浩^{1,2,3}, 刘军省^{4,5}, 石亮^{1,2,3}, 何良^{1,2,3}, 李晓龙^{6,7},
徐磊^{8,9}, 陈元喜^{1,2,3}, 贺天全¹⁰, 朱红金¹¹

(1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川 德阳 618299; 2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川 德阳 618202; 3. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司研发中心, 四川 德阳 618202; 4. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101; 5. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083; 6. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 7. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077; 8. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012; 9. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012; 10. 四川省化工地质勘察院, 四川 成都 611930; 11. 四川煤矿安全监察局安全技术中心, 四川 成都 610046)

摘要: 本文基于瞬变电磁法技术, 探测已有采空区的位置、形态以及与富水破碎区等情况, 并结合现有地质资料对采空区和岩溶富水区的范围、积水状况等进行综合分析, 为全面隐蔽致灾因素普查工作提供科学参考依据。研究表明, 瞬变电磁法技术希望能够为磷矿采空区的地质特征和隐患评估提供新的技术手段和理论支撑, 为相关工程项目的安全运行提供科学依据。

关键词: 瞬变电磁法; 深部磷矿开采; 低阻地质体

中图分类号: TD166 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)04-0049-07

Abstract: This article is based on the transient electromagnetic method technology to detect the location, shape, and water rich fractured areas of existing goaf areas. Combined with existing geological data, a comprehensive analysis is conducted on the scope and water accumulation conditions of goaf areas and karst water rich areas, providing scientific reference for the comprehensive investigation of hidden disaster causing factors. The research results indicate that the transient electromagnetic method technology hopes to provide new technical means and theoretical support for the geological characteristics and hazard assessment of phosphate mining goaf, and provide scientific basis for the safe operation of related engineering projects.

Key words: transient electromagnetic method; deep phosphate mining; low resistance geological body

1 前言

在当前百年未有之大变局的深刻变革与复杂调整的国际背景下, 磷矿资源开发已上升到国家战略层面, 成为新一轮全球资源战略的焦点, 相应的磷化工产品已成为关乎国家粮食安全、生命健康、新能源

及新能源汽车等重要产业供应链安全稳定的关键因素。我国浅部磷矿资源已趋于枯竭, 磷矿资源开发逐渐向深部进军, 深部矿产资源开采是国内外采矿业发展的必然趋势^[1-2]。随着深部磷矿资源的开采, 深部原岩应力的平衡状态不断被打破, 在深部高地应力、高地温、高渗透压、强采动、强流变及多场耦

[作者简介] 姚毅(1990—), 男, 岩土工程高级工程师, 主要从事岩土工程、矿床水文地质及矿井水害防治、矿山压力与岩层控制、深部地球物理探测、环境与工程地球物理等方面工作, 作为项目骨干参与国家重点研发项目、国家攻关课题子课题、国家自然科学基金、省科技厅重大专项等国家级、省部级项目 20 余项科研课题, 作为项目负责人主持完成 370 余项企业委托横向项目。

[基金项目] 全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室“四川省绵阳市清平磷矿接替资源勘查”(项目编号: 200751070)、德阳昊华清平磷矿有限公司深部延伸接替项目“德阳昊华清平磷矿有限公司 100 万吨/年磷矿延伸接替工程”联合资助。

[引用格式] 姚毅, 王浩, 刘军省, 等. 瞬变电磁法在探测磷矿采空区中的应用研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(4): 49-55.

合的复杂地质力学环境下,深部磷矿采场的应力场特征、磷矿岩体破碎性质、岩层移动及能量的积聚释放规律等均发生了显著变化。地下采空区的面积不断扩大,同时由于磷块岩属软弱岩石,其膨胀、低强度、流变等特性,使得采空区内矿柱顶板在荷载、水、地应力等作用下出现风化和蠕变并逐步失稳破坏^[3-4]。尤其在深部高地应力及高承压水作用下,深部岩体结构的有效应力升高,强烈的开采扰动造成高应力岩体卸荷并驱动岩体裂隙变形破裂,使得岩体渗透性增加,并导致深部开采突水概率增大,突水灾害频发,从而威胁矿井安全生产。

瞬变电磁法作为一种非破坏性地球物理探测技术,具有探测深度大、分辨率高、对地下水敏感等优点,能够有效地识别和评估采空区的分布及其稳定性,为预防和控制深部开采中的突水灾害提供科学依据。本研究旨以某区域为工程背景,采用瞬变电磁法探测磷矿采空区,以为深部磷矿资源的安全高效开发提供技术支持。

2 邓家火地矿段地质概况

该区域大地构造位置处于扬子准地台(I)龙门山-大巴山台缘拗陷(II)龙门山陷褶断束(III)漩口凹褶束(IV)北东段次级构造-大水闸复式背斜南东翼^[5-6]。龙门山构造带具有强烈的挤缩特征,表现为大水闸推覆体主要为脆性(兼韧性)推覆体,北西界与高川推覆体接触,南东界为陈家坪-白云山断裂,逆冲推覆在金花推覆体之上,而又伏于太平推覆体之下。其内分布有前震旦世、早震旦世花岗岩和震旦系上统-三叠系下统碳酸盐岩和碎屑岩。

研究区内除缺失志留系和奥陶系地层外,自上元古界至新生界地层均有出露。基底为前震旦系黄水河群(P₁hn)变质杂岩及澄江期花岗岩,研究区内矿产主要为磷矿、硫磷铝锶矿,煤次之,还有硫铁矿、耐火黏土、石灰岩、白云岩等。研究区内的磷矿层皆为层状、似层状沉积矿床,其中“什邡式”磷矿平行不整合于震旦系地层上。直接进水底板为震旦系灯影组(Z^{bd}n)的硅质白云岩、白云质硅质岩溶蚀裂隙岩溶含水层,顶板为泥盆系上统沙窝子组下段黏土岩及磷块岩隔水层。

3 瞬变电磁法基本原理

瞬变电磁法(Transient electromagnetic method, TEM),也称时间域电磁法,是利用不接地回线或接地线源向地下发射双极性脉冲磁场,在一次脉冲磁

场间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次感应场随时间变化的衰减特性,从而探测介质电阻率的一种方法^[7-10]。TEM利用接地导线或不接地回线向地下发送一次脉冲电磁场,在一次场断电后,通过观测及研究二次涡流场随时间的变化规律来探测介质的电性,具体原理如图1所示。M. N. Nabighian(1979)采用“烟圈理论”,形象化地描述了瞬变电磁测深的原理:瞬变响应可近似地用向地下扩散的电流环等效,这些电流环好像是发射回线吹出的“烟圈”,其形状与发射回线相同,随着延时的增加而向外、向下扩散。根据这个原理,可把地表测得的随时间变化的瞬变响应转化为电阻率随深度变化的函数曲线,从而实现瞬变电磁测深。

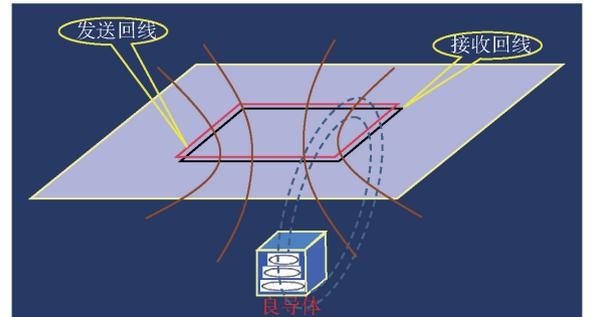


图1 瞬变电磁法工作原理示意图

对于均匀半空间条件下,可得到中心回线瞬变响应的解析表达式为

$$H_z = \frac{1}{2a} \left[\left(1 - \frac{3}{u^2}\right) \phi(u) + 3 \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} / u \right] \quad (1)$$

$$H_z = \frac{3I\rho}{\mu_0 a^3} \left[\varphi\varphi(u - \sqrt{\frac{2}{\pi}} ue^{-u^2/2} \left(1 + \frac{1}{3}u^2\right)) \right] \quad (2)$$

式中, H_z 为Hz的时间导数; $\tau = 2\pi \sqrt{2\rho t / \mu_0}$; $\phi(u)$ 为误差函数。

二次衰减曲线反映了大地电阻率随时间变化的特征,由于二次场随时间的推移向地下深部扩散,衰减曲线也即相应地反映了大地电阻率随深度变化的特征,通过反演解释即可得到大地电阻率随深度的变化曲线^[11-14]。TEM为人工源时间域电磁测深,具有穿透高阻层能力强,及人工源方法受干扰影响小等优点外,它具有以下特点:

- (1)断电后观测纯二次场,可以进行近区观测,电性分辨能力较强。
- (2)可用大功率发射方法增强二次场,提高信噪比,从而增加勘探深度。
- (3)通过多次脉冲激发,场的重复叠加和空间

域拟地震的多次覆盖技术应用,提高信噪比和观测精度。

(4)可通过选择不同的时间窗口进行观测,有效地压制地质噪声,可获得不同勘探深度等一系列优点。

4 瞬变电磁法应用

4.1 邓家火地 900 m 中段

该剖面全长 340 m,剖面反演电阻率断面如图 2 所示,巷道平面图如图 3 所示。反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,局部电阻率不均匀,低阻层位于剖面以下 20 ~ 70 m,以 160 m 位置为界

限,两侧低阻发育情况明显不同。0 ~ 160 m 段低阻异常呈小规模团块状发育,整体呈串珠状;160 ~ 340 m 段低阻异常则规模大、电阻率值更低,且在水平方向有一定延伸。采空区位于剖面 160 ~ 310 m 位置下方,深度约 30 ~ 50 m,表现为低阻特征,沿水平方向延伸较大。在剖面 200 ~ 260 m 段采空区电阻率值明显变低,低阻异常规模也变大,推断认为该处原矿体受 F_6 断裂切割,致采空区在 F_6 位置下方也出现错动,同时该位置附近还存在断裂 F_7 ,受断裂 F_6 、 F_7 及采空区共同影响,推断认为该处岩体破碎、充水,为疑似松散或积水区,规模约 60 m × 40 m。

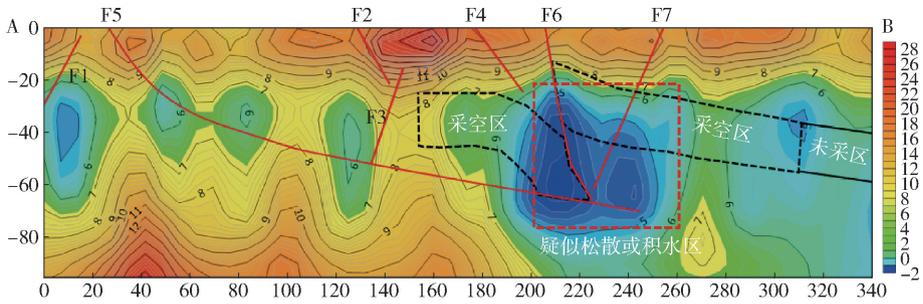


图 2 邓家火地 900 m 中段瞬变电磁反演电阻率断面图

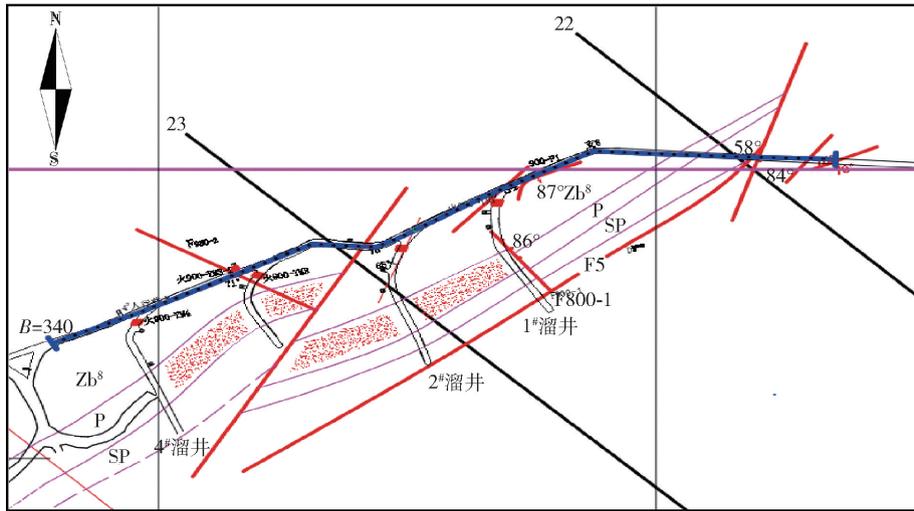


图 3 邓家火地 900 m 中段巷道平面图

4.2 邓家火地 950 m 中段

该剖面全长 460 m,剖面反演电阻率断面如图 4 所示,巷道平面图如图 5 所示,反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,局部电阻率不均匀,低阻层位于剖面以下 60 ~ 90 m,整体呈水平展布,在约 120 m 位置下方有明显错动。

矿体受 F_{950-1} 、 F_{950-7} 断裂切割,导致采空区出现明显错动;150 ~ 460 m 段矿体受 F_{950-6} 、 F_{950-4} 、 F_{950-2} 切割,采空区也有错动但不明显。该剖面电阻率等值线较均匀,未出现明显低于采空区电阻率的富水易塌陷风险异常。

4.3 邓家火地 1 000 m 中段

1) 1 000 中段 0 ~ 480 m 段

采空区在整条剖面均有明显反映,深度约 60 ~ 90 m,表现为水平低阻条带,在约 120 m 位置下方原

0 ~ 480 m 段反演电阻率断面如图 6 所示,巷道

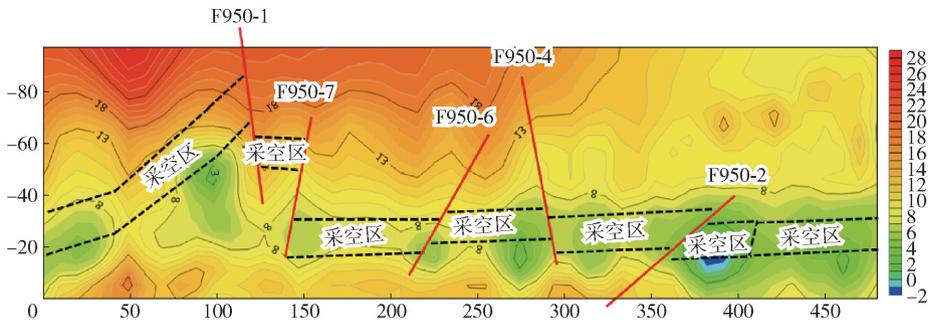


图4 邓家火地 950 m 中段瞬变电磁反演电阻率断面图

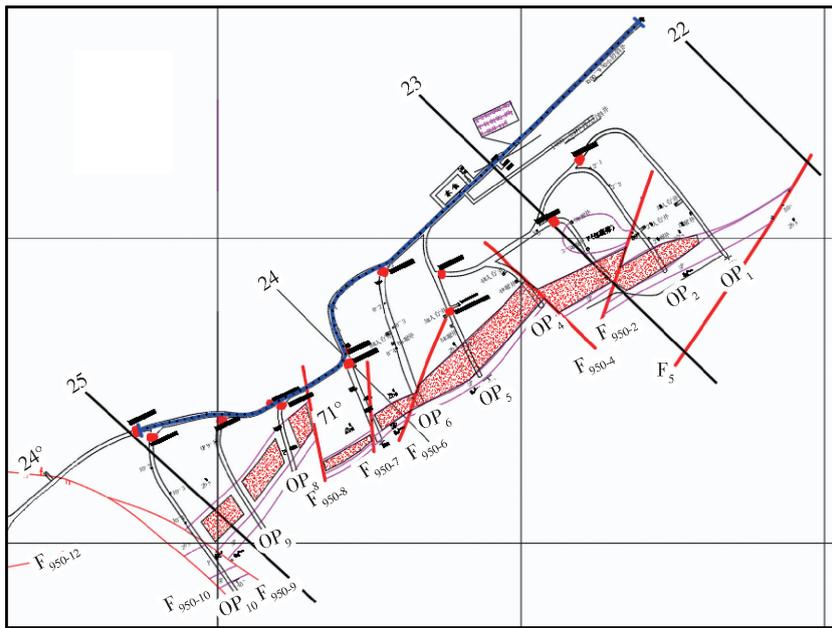


图5 邓家火地 950 m 中段巷道平面图

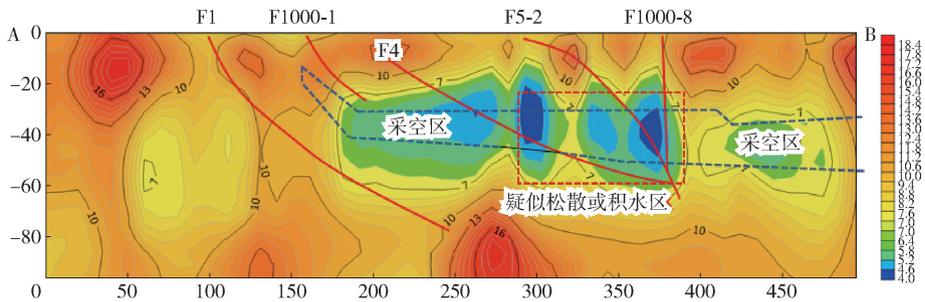


图6 邓家火地 1000 m 中段 0-480 m 瞬变电磁反演电阻率断面图

平面图如图7所示,反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,局部电阻率不均匀,中间低阻层在180~480 m较为明显,发育深度30~50 m。

采空区位于180~480 m下部明显的低阻异常位置,发育深度30~50 m。剖面约290~390 m位置下方F₄、F₅₋₂、F₁₀₀₀₋₈断裂与采空区交汇部位电阻率明显降低,伴随异常形态发生改变,可能存在岩体破

碎、充水,为疑似松散或富水区,规模约100 m × 30 m。

2) 1000 m 中段 480~640 m 段

480~640 m 段反演电阻率断面如图8所示,反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,局部电阻率不均匀,低阻层深度与前段基本一致,由480 m至640 m总体有逐渐变浅的趋势。采空区位于该

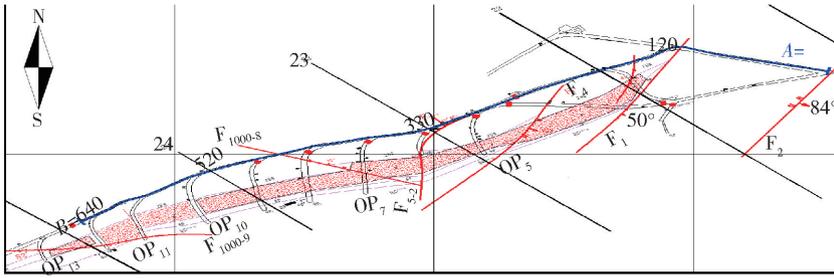


图7 邓家火地1000 m中段巷道平面图

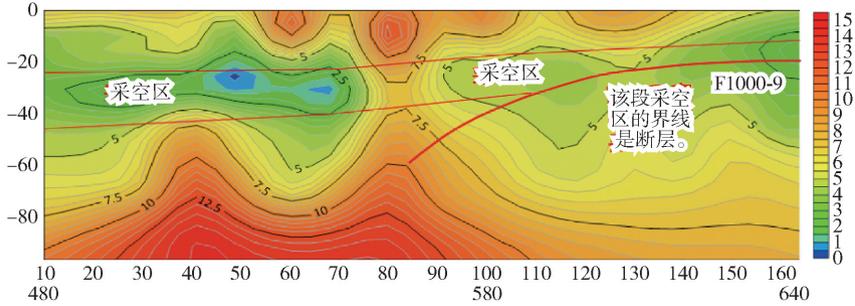


图8 邓家火地1000 m中段480~640 m瞬变电磁反演电阻率断面图

段剖面低阻位置,整体深度约20~50 m,由480 m至640 m深度逐渐变浅。该剖面电阻率等值线较均匀,未出现明显低于采空区电阻率的富水易塌陷风险异常。

4.4 邓家火地1050 m中段

1) 1050 m中段160~250 m段

160~250 m段反演电阻率断面图如图9所示,巷道平面图如图10所示,反演视电阻率从浅至深依次

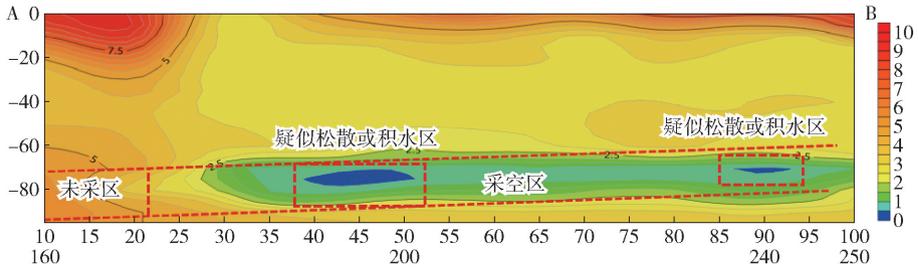


图9 邓家火地1050 m中段160~250 m瞬变电磁反演电阻率断面图

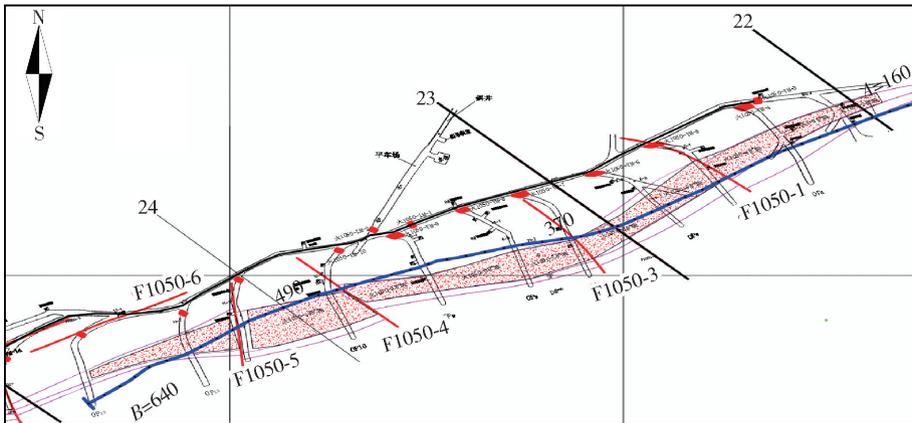


图10 邓家火地1050 m中段巷道平面位置图

为高-低-高的特征,180 m~250 m 位置、深度60 m~80 m 发育一条低阻条带,低阻条带由180 m 至250 m 有逐渐浅的趋势。

结合地质资料综合分析,该剖面异常识别情况如下:该段剖面未发现明显断裂带。

采空区位于该段180~250 m 位置、深度60~80 m 处,由180 m 至250 m 深度逐渐变浅。该剖面

电阻率等值线均匀连续,未出现明显富水易塌陷风险异常。

2)1 050 m 中段 250~360 m 段

250~360 m 段反演电阻率断面如图 11 所示,反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,与前段剖面基本一致,剖面深度60 m~80 m 发育一条低阻条带,低阻条带呈水平展布。

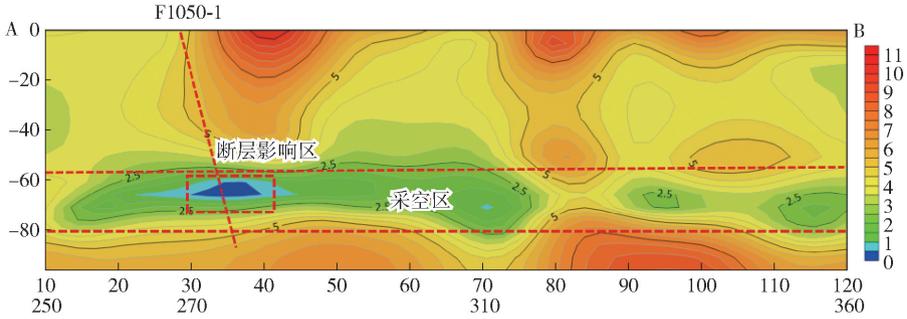


图 11 邓家火地 1 050 m 中段 250~360 m 瞬变电磁反演电阻率断面图

采空区位于该段剖面深度60~80 m 处,与 F₁₀₅₀₋₁ 断裂交汇部位电阻率略有降低,异常形态不变,可能存在岩体破碎情况。该剖面电阻率等值线均匀连续,未出现明显富水易塌陷风险异常。

前段剖面基本一致,剖面深度60~80 m 发育一条低阻条带,低阻条带呈水平展布。

采空区位于该段剖面深度60~80 m 处,与 F₁₀₅₀₋₄ 断裂交汇部位电阻率略有降低,异常形态变化不大,可能存在岩体破碎情况。该剖面电阻率等值线均匀连续,未出现明显富水易塌陷风险异常。

3)1 050 m 中段 360~500 m 段

360~500 m 段反演电阻率断面如图 12 所示,反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,与

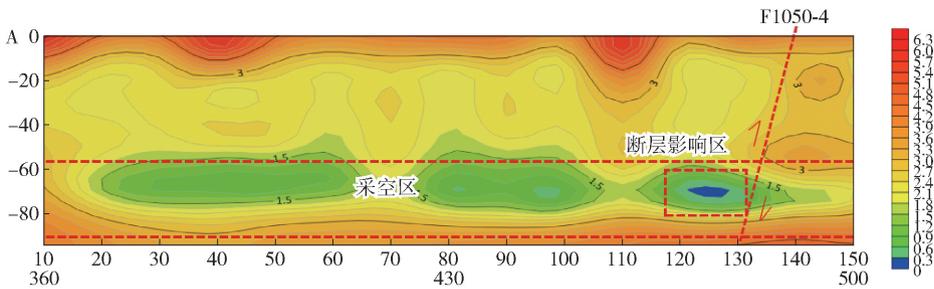


图 12 邓家火地 1 050 m 中段 360~500 m 瞬变电磁反演电阻率断面图

4)1 050 m 中段 500~580 m 段

500~580 m 段反演电阻率断面如图 13 所示,

反演视电阻率从浅至深依次为高-低-高的特征,与前段剖面基本一致,剖面深度60~85 m 发育一条低

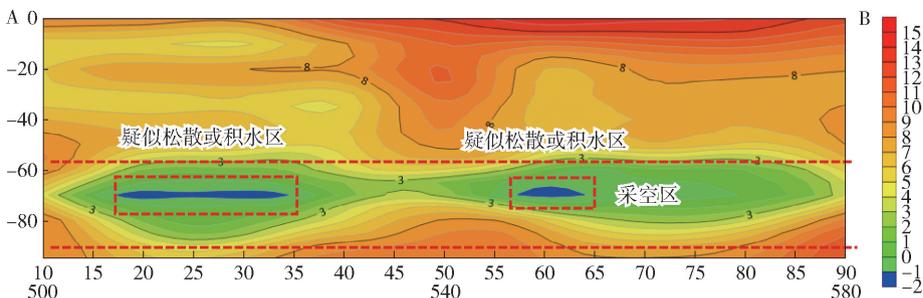


图 13 邓家火地 1 050 m 中段 500~580 m 瞬变电磁反演电阻率断面图

阻条带,低阻条带呈水平展布。

5 结论

(1)本研究成功应用瞬变电磁法对清平磷矿矿区的采空区与岩溶富水区进行了精细探测,实现了对这些关键区域的精确定位和形态描述。结合矿山地质资料的综合分析,本研究的探测成果与已知的地质结构如断裂、采空区等吻合度较高,有效揭示了采空区与富水破碎区之间的内在联系。研究结果为评估磷矿采空区的隐蔽致灾因素提供了重要的科学依据,为地质特征评估和隐患识别提供了新的视角和方法。这项工作不仅对保障矿山工程的安全运行具有重要的实际意义,也为矿山地质安全管理领域贡献了新的理论和实践成果。

(2)瞬变电磁法作为一种高精度的地球物理勘探技术,在清平磷矿矿区的采空区与岩溶富水区探测中发挥了至关重要的作用。本研究的深入分析为理解采空区的地电特性及其与岩溶富水区的相互作用提供了新的见解。研究成果不仅丰富了瞬变电磁法在矿区勘探中的应用,也为矿区灾害预防和地质安全评估提供了有力的技术支持。此外,本研究强调了在地质勘探中综合多种方法和资料进行分析的重要性,以提高探测的准确性和可靠性。

(3)物探电法工作虽然能够通过地层岩性的电性差异来划分异常,但方法相对单一。未来的探测工作需要结合其他地质、地球物理资料进行综合研判,以获得更全面的地质信息。对于已有采空区,由于围岩应力得到释放,围岩相对稳定,致灾可能性较低,可以采取适当的监控措施而非立即处理。本研究利用瞬变电磁法对清平磷矿矿区的采空区进行了系统性探测,揭示了其与岩溶富水区的复杂关系。研究成果不仅为磷矿采空区的隐蔽致灾因素提供了科学的评估工具,而且为矿山工程的长期稳定性和安全性提供了重要的参考。这项工作强调了地质勘探技术在矿山安全管理中的核心作用,并为未来的地质安全研究和实践奠定了坚实的基础。

[参考文献]

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(16):2803-2813.
- [2] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
- [3] 邓喀中,张冬至,张周权. 深部开采条件下地表沉陷预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报,2000(1):52-55.
- [4] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2020,2(3):5-13.
- [5] 刘树才,刘志新,姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报,2005(4):414-417.
- [6] 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[J]. 工程地球物理学报,2007(4):341-344.
- [7] 范亮,钱荣毅. 瞬变电磁法在煤矿采空区的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2011,8(1):29-33.
- [8] 刘焱,刘树才,闫赛,等. 大定源瞬变电磁法在探测煤矿采空区富水性中的研究[J]. 工程地球物理学报,2011,8(1):10-15.
- [9] 郭有刚,刘峰,王斌武,等. 瞬变电磁法在煤矿采空区勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报,2010,7(2):151-154.
- [10] 张帆,冯国瑞,戚庭野,等. 瞬变电磁法勘探煤矿不同层间距双层积水采空区的可行性研究[J]. 物探与化探,2023,47(5):1215-1225.
- [11] 杨华奎. 基于瞬变电磁法的陇东煤矿采空区水文地质勘探技术研究[J]. 地质与勘探,2023,59(4):883-890.
- [12] 覃庆炎. 瞬变电磁法在积水采空区探测中的应用[J]. 煤炭科学技术,2014,42(8):109-112.
- [13] 解海军,孟小红,王信文,等. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测的附加效应[J]. 煤田地质与勘探,2009,37(2):71-74.
- [14] 周国平,周强太,刘金刚,等. 银山矿区生产探矿与地质勘探控制矿体特征对比分析[J]. 中国矿山工程,2022,51(5):82-86.