

# 清平磷矿采空区与岩溶富水区的瞬变电磁法精细探测

姚毅<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 刘军省<sup>2,3</sup>, 石亮<sup>1</sup>, 何良<sup>1</sup>,  
陈元喜<sup>1</sup>, 李晓龙<sup>7,8</sup>, 徐磊<sup>4,5,6</sup>, 朱红金<sup>9,10</sup>, 贺天全<sup>11</sup>

(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. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101; 3. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;

4. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012; 5. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;

6. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;

7. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;

8. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077;

9. 四川煤矿安全监察局安全技术中心, 四川 成都 610046; 10. 四川铸创安全科技有限公司, 四川 成都 610046;

11. 四川省化工地质勘察院, 四川 成都 611930)

**摘要:**瞬变电磁法作为一种高效的地球物理勘探技术,在岩土工程勘察中得到了广泛应用。针对深部磷矿开采过程中形成的采空区,其独特的地电特性为瞬变电磁法的应用提供了理想的条件。采用瞬变电磁法技术对清平磷矿采空区的位置、形态进行精确定位,并评估其与富水破碎区的关联性。结合地质资料,对采空区及岩溶富水区的分布范围、积水情况等进行了深入的综合分析。为磷矿采空区的隐蔽致灾因素普查提供科学的参考依据,同时为磷矿采空区的地质特征评估和隐患识别提供新的技术手段和理论支持,进而为相关工程的安全运行提供科学基础。

**关键词:**深部磷矿;瞬变电磁法;低阻地质体;采空区探测;隐蔽致灾

**中图分类号:**P631.3 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2024)S1-0415-07

## High-precision transient electromagnetic method detection of mining voids and karst aquifers in the Qingping phosphate mine area

YAO Yi<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, LIU Junsheng<sup>2,3</sup>, SHI Liang<sup>1</sup>, HE Liang<sup>1</sup>,

CHEN Yuanxi<sup>1</sup>, LI Xiaolong<sup>7,8</sup>, XU Lei<sup>4,5,6</sup>, ZHU Hongjin<sup>9,10</sup>, HE Tianquan<sup>11</sup>

(1. Deyang Haohua Qingping Linkuang Co., Ltd., Deyang Sichuan 618299, China;

2. Geological Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China;

3. Technology Innovation Center for Ecological Restoration Engineering in Mining Areas of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;

4. State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha Hunan 410012, China;

5. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha Hunan 410012, China;

6. Hunan Mining Geological Disaster Prevention and Environmental Reconstruction Engineering Technology

收稿日期:2024-06-16; 修回日期:2024-07-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.067

**基金项目:**全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室“四川省绵竹市清平磷矿接替资源勘查”(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”

**第一作者:**姚毅,男,苗族,1990年生,高级工程师,岩土工程专业,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,四川省绵竹市苏绵大道中段25号,yaoyi211313@163.com。

**引用格式:**姚毅,王浩,刘军省,等.清平磷矿采空区与岩溶富水区的瞬变电磁法精细探测[J].钻探工程,2024,51(S1):415-421.

YAO Yi, WANG Hao, LIU Junsheng, et al. High-precision transient electromagnetic method detection of mining voids and karst aquifers in the Qingping phosphate mine area[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):415-421.

Research Center, Changsha Hunan 410012, China;

7. Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an Shaanxi 710077, China;

8. Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Prevention and Control Technology in Shaanxi Province,  
Xi'an Shaanxi 710077, China;

9. Sichuan Coal Mine Safety Supervision Bureau Safety Technology Center, Chengdu Sichuan 610046, China;

10. Sichuan Zhuchuang Safety Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610046, China;

11. Sichuan Institute of Chemical Geological Exploration, Chengdu Sichuan 611930, China)

**Abstract:** The Transient Electromagnetic Method (TEM), as an efficient geophysical exploration technique, has been widely applied in geotechnical surveys. For the voids formed during the deep mining of phosphorus ores, their unique geoelectrical properties provide ideal conditions for the application of TEM. The TEM technology is used to precisely locate the position and shape of the voids and to assess their association with water-rich fractured zones. Integrated with geological data, an in-depth comprehensive analysis has been conducted on the distribution range, water accumulation, and other conditions of the voids and karst water-rich areas. This provides a scientific reference for the survey of concealed disaster factors in phosphorus ore voids, and offers new technical means and theoretical support for the geological feature assessment and hazard identification of phosphorus ore voids, thereby providing a scientific foundation for the safe operation of related engineering projects.

**Key words:** deep phosphorus ore mining; transient electromagnetic method (TEM); low-resistance geological body; void detection; concealed disaster factors

## 0 引言

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。磷矿资源是我国重要的战略性非金属矿资源,富磷矿更是中国战略稀缺资源。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。当前浅部磷矿资源已趋于枯竭,逐渐向地球深部进军。随着深部磷矿地下开采规模的不断扩大和深入,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的变化<sup>[1-4]</sup>。地下采空区的面积也不断扩大,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。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及井下工作人员的生命财产安全,对开采工作安全和效率构成了严峻挑战<sup>[4]</sup>。如何减少或解决深部磷矿

开采过程中采空区隐蔽地质灾害的隐患,成为亟待解决的研究课题。因此,研究深部磷矿地下开采出现的采空区隐蔽致灾问题已迫在眉睫、刻不容缓,这些问题已成为制约深部磷矿开采工程部署和实现深部探矿、采矿突破的焦点和难点。

采空区地层有其独特的地电特征,可以利用瞬变电磁法进行探测,本研究旨在探讨瞬变电磁法在四川清平磷矿矿区井下采空区和岩溶发育情况的应用。通过瞬变电磁法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,并提出科学合理的防控对策,为全面隐蔽致灾因素普查工作提供科学的参考依据,以期提高矿山开采效率和保障生产安全,为矿山生产管理部门提供可行的应对方案,为相关工程项目的安全运行提供科学依据,同时为相关学科领域的研究提供参考和启示。

## 1 研究区地质概况

研究区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<sup>[5-6]</sup>。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一三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,自元古界至新生界地层均有出露。基底为前震旦系黄水河群(P<sub>1</sub>hn)变质杂岩及澄江期花岗岩,盖层从老到新有<sup>[5-6]</sup>:震旦系上统观音崖组(Z<sub>6</sub>g)、灯影组(Z<sub>6</sub>dn);寒武系筇竹寺组(Є<sub>1</sub>q);泥盆系观雾山组(D<sub>2</sub>g)、沙窝子组(D<sub>3</sub>s);石炭系岩关组(C<sub>1</sub>y)、大塘组(D<sub>2</sub>d);二叠系梁山组(P<sub>1</sub>l)、栖霞组(P<sub>1</sub>q)、茅口组(P<sub>1</sub>m)、吴家坪组(P<sub>2</sub>w)、长兴组(P<sub>2</sub>c);三叠系飞仙关组(T<sub>1</sub>f)、嘉陵江组(T<sub>1</sub>j)、雷口坡组(T<sub>2</sub>l)、天井山组(T<sub>2</sub>t)、须家河组(T<sub>3</sub>xj)及第四系(Q)。区内矿产主要为磷矿、硫磷铝锶矿,煤次之,还有硫铁矿、耐火粘土、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<sub>6</sub>dn)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粘土岩及磷块岩隔水层。

## 2 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<sup>[7-10]</sup>。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(见图1)。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来等效,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。

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<sup>[7]</sup>:

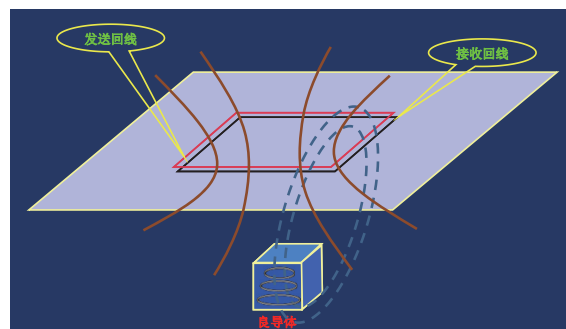


图1 瞬变电磁法工作原理示意

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

$$\dot{H}_z = \frac{3I\rho}{\mu_0 a^3} \left[ \varphi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u e^{-u^2/2} \left( 1 + \frac{1}{3} u^2 \right) \right]$$

式中: $\dot{H}_z$ ——表示 $H_z$ 的时间导数; $\varphi(u)$ ——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<sup>[7,11-13]</sup>,TEM为人工源时间域电磁测深,具有穿透高阻层能力强,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。

## 3 已知剖面标定试验

本次研究工作正式开展之前,在燕子岩矿区选择一条40 m长剖面进行了瞬变电磁法标定试验,该试验剖面已知异常体2处,分别为松散体1处、断裂1处;实测反演电阻率剖面如图2所示,巷道平面位置如图3所示,剖面10 m位置下方识别一处团块状低阻异常,位于剖面10 m位置下方,电阻率值在0.2~2.0 Ω·m之间,与已知松散体位置吻合;剖面20~20 m位置下方识别一处串珠状低阻异常,电阻率值在1.4~2.0 Ω·m之间,异常倾向B端,与已知的东南倾断裂吻合,紧邻断裂东侧一处低阻其深度与已知断裂,电阻率值亦与已知断裂相当,可能与已知断裂引起局部岩体破碎有关,本试验剖面中不再对该处异常另行推断。

通过试验剖面综合分析如下:

(1)瞬变电磁法反演视电阻率剖面对异常的识别效果明显,可以有效识别勘探深度之内的松散



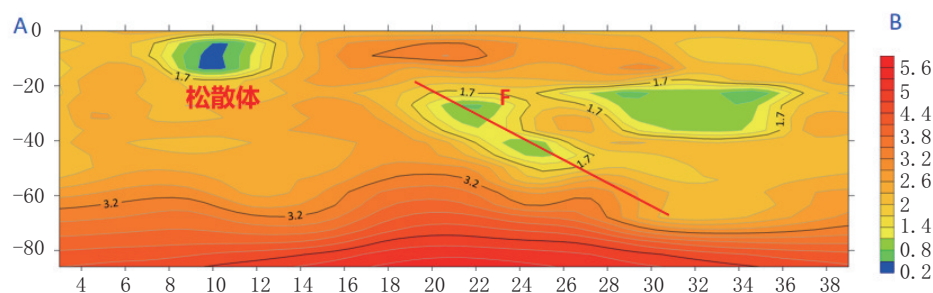


图2 瞬变电磁试验剖面反演电阻率断面图

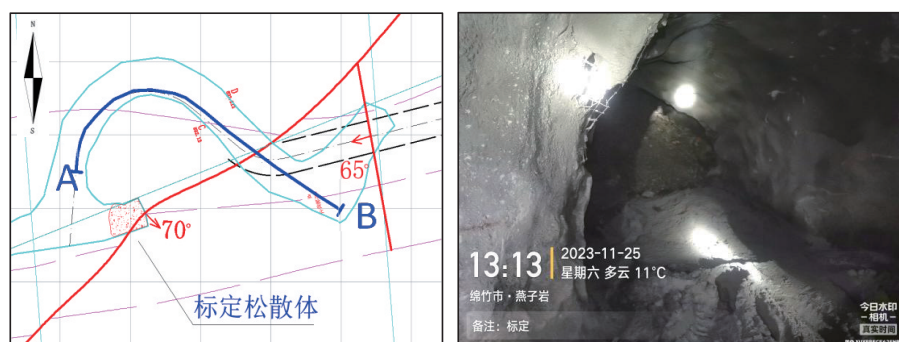


图3 标定点位置示意图及现场照片

区、断裂。

(2)工作区内松散区以及断裂破碎带在电阻率剖面上均表现为明显的低阻特征,松散区电阻率低于断裂带,与松散程度及富水性关系密切。

(3)从异常形态来看,松散区异常呈团块状,异常规模不大,没有明显的倾向,而断裂异常呈串珠状,能够明显识别出倾向。

(4)该试验剖面对已知松散区、断裂均有明显的反应,实际工作中这两种异常体引起的电阻率异常特征除与本试验剖面中特征相似外还有可能还有其他异常形态存在,如断裂带除本试验剖面中串珠状异常外还存在等值线同向弯曲、低阻、电阻率变化梯度带、高低阻界限等形态,在后续成果解释中亦予以推断解释。

#### 4 典型瞬变电磁法剖面解释

##### 4.1 邓家火地900中段

该剖面全长340 m,剖面反演电阻率断面如图4所示,巷道平面如图5所示。总体来看,反演视电阻率从浅至深依次为高一低一高的特征,局部电阻率不均匀,低阻层位于剖面以下20~70 m之间;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。识别断裂7条,分别编号F1~F7,其中F1~F4规模较小,均表现为电阻率变化梯度带特征,F6、F7规模略大,表现为电阻率等值线的同向弯曲及低阻特征,F5规模最大,表现为串珠状异常。

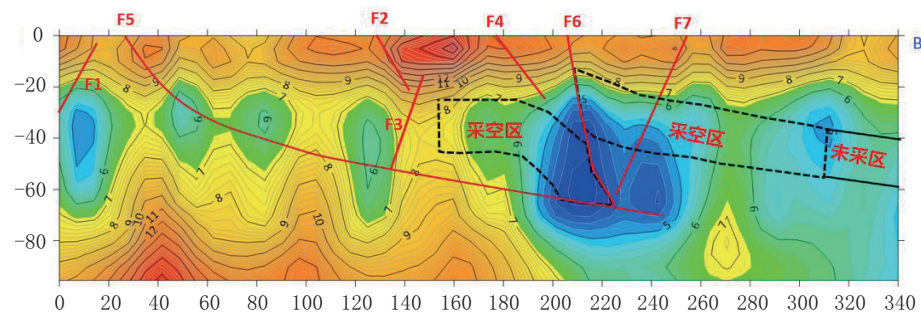


图4 邓家火地900中段瞬变电磁反演电阻率断面

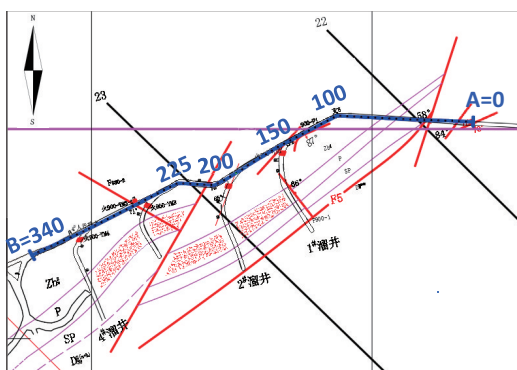


图5 邓家火地900中段巷道平面

采空区位于剖面160~310 m位置下方,深度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,为疑似松散或富水区,规模约 $60\text{ m} \times 40\text{ m}$ 。

#### 4.2 邓家火地950中段

该剖面全长460 m,剖面反演电阻率断面如图6所示,巷道平面见图7。总体来看,反演视电阻率从浅至深依次为高一低一高的特征,局部电阻率不均匀,低阻层位于剖面以下60~90 m之间,整体呈水平展布,在约120 m位置下方有明显错动。识别断裂5条,分别编号 $F_{950-1}$ 、 $F_{950-2}$ 、 $F_{950-4}$ 、 $F_{950-6}$ 、 $F_{950-7}$ ,如图所示,其中 $F_{950-1}$ 表现为电阻率变化梯度带, $F_{950-7}$ 、 $F_{950-6}$ 、 $F_{950-4}$ 均表现为电阻率等值线同向弯曲, $F_{950-2}$ 则表现为高低阻变化界限。

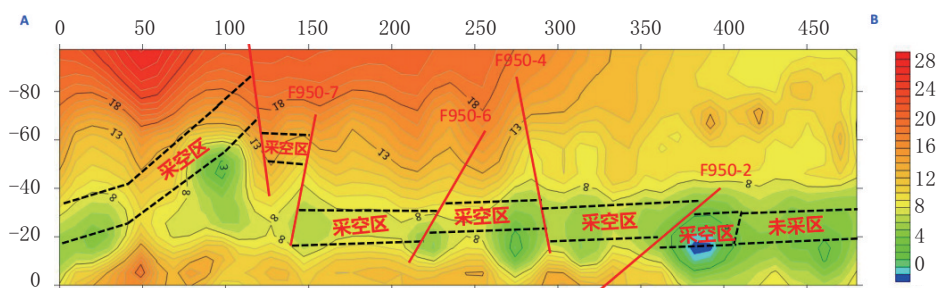


图6 邓家火地950中段瞬变电磁反演电阻率断面

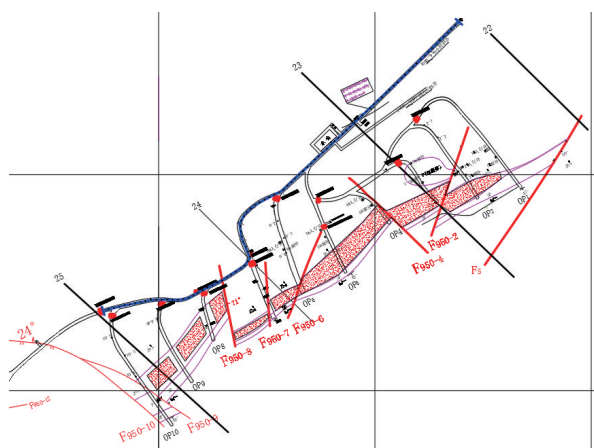


图7 邓家火地950中段巷道平面

采空区在整条剖面均有明显反映,深度60~90 m,表现为水平低阻条带,在约120 m位置下方原矿体受 $F_{950-1}$ 、 $F_{950-7}$ 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,采空区亦有错动但不明显。整体来

看,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1000中段

该剖面全长640 m,根据测线的探测环境,将该剖面分为2段,第一段长度为480 m,第二段长度为160 m。

##### 4.3.1 1000中段0~480 m段

0~480 m段反演电阻率断面如图8所示,巷道平面见图9。反演视电阻率从浅至深依次为高一低一高的特征,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。

该剖面异常解译识别断裂5条,分别编号 $F_1$ 、 $F_{1000-1}$ 、 $F_4$ 、 $F_5-2$ 、 $F_{1000-8}$ ,如图所示,其中 $F_1$ 表现为电阻率变化梯度带, $F_{1000-1}$ 表现为电阻率等值线同向弯曲, $F_4$ 、 $F_5-2$ 表现为串珠状异常及高低阻界限, $F_{1000-8}$ 表现为电阻率等值线同向弯曲及高低阻界限。

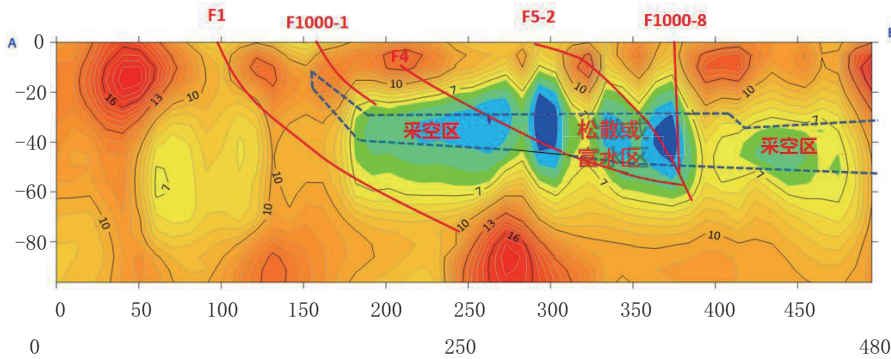


图8 邓家火地1000中段0~480 m瞬变电磁反演电阻率断面

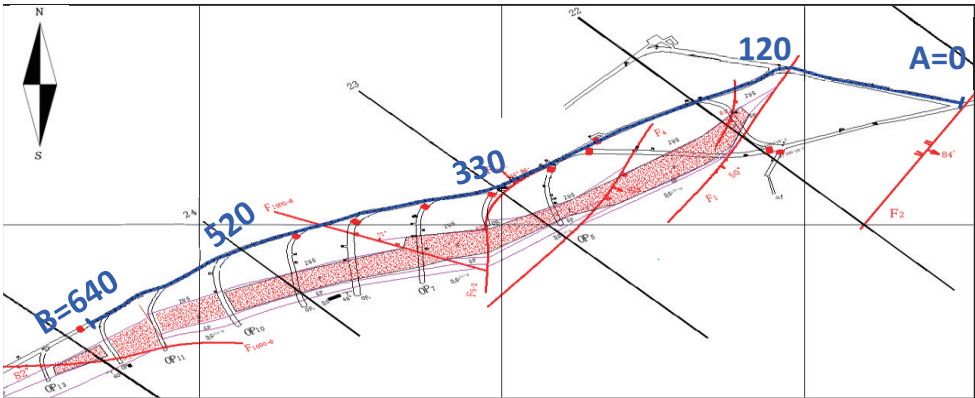


图9 邓家火地1000中段巷道平面

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。

4.3.2 1000中段480~640 m段

480~640 m段反演电阻率断面如图10所示,巷道平面参见图9。总体来看,反演视电阻率从浅至深依次为高一低一高的特征,局部电阻率不均匀,低阻层深度与前段基本一致,由480~640 m总体有逐渐变浅的趋势。结合地质资料综合分析,该剖面异常解译如下:

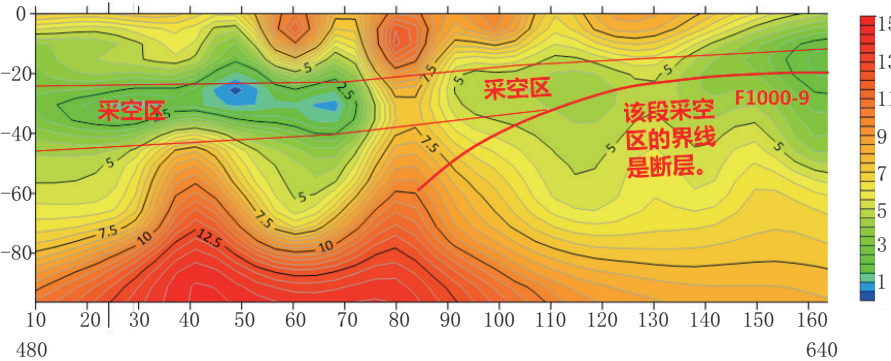


图10 邓家火地1000中段480~640 m瞬变电磁反演电阻率断面



该段异常剖面解译未发现明显断裂带,根据地质资料在560~640 m采空区底板界限为F1000-9断层,在电阻率断面图上表现为低阻串珠状异常。采空区位于该段剖面低阻位置,整体深度20~50 m,由480~640 m深度逐渐变浅。整体来看,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。

## 5 结语

(1)本研究通过应用瞬变电磁法对清平磷矿采空区与岩溶富水区进行了精细探测,成功实现了对这些区域的精确定位和形态描述。研究结果不仅揭示了采空区与富水破碎区之间的密切联系,而且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。对保障矿山工程的安全运行具有重要的实际意义。

(2)瞬变电磁法作为一种高精度的地球物理勘探技术,在清平磷矿采空区与岩溶富水区探测中发挥了关键作用。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。

(3)通过对清平磷矿矿区采空区与岩溶富水区的瞬变电磁法探测,展示了该技术在精细探测和地质结构分析中的巨大潜力。研究结果强调了对采空区进行综合评估的重要性,并为矿山工程的稳定性和安全性提供了新的理论基础和实践指导,为矿山安全监测和管理提供了科学依据。

(4)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降预测及控制探讨[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] 乔喜旦,曹新群,邓志勇,等.四川省绵竹市清平磷矿燕子岩矿段延伸勘查及资源储量核实报告[R].成都:四川省化工地质勘查院,2012.
- [6] 褚登安,武敏建,李德俊,胡勇,等.四川省绵竹市清平磷矿接替资源勘查(普查)及资源储量核实报告[R].成都:四川省化工地质勘查院,2011.
- [7] 牛之琰.脉冲瞬变电磁法及应用[M].长沙:中南工业大学出版社,1987.
- [8] 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.
- [9] 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(04):341-344.
- [10] 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.
- [11] 刘燧,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.
- [12] 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.
- [13] 施羽,廖军桥,赵勇,等.煤矿采空富水区瞬变电磁法探测及三维可视化应用[J].四川地质学报,2023,43(S1):108-112.

(编辑 荐华)