

动态瞬变电磁技术在甲玛铜多金属矿 隐蔽水害探查的研究与应用

米玛顿珠¹,刘百祥²,李亚军¹,殷建康¹,李 栋¹,姚志忠¹,李甫龙¹

(1. 西藏华泰龙矿业开发有限公司; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司)

摘要:甲玛铜多金属矿作为国内海拔最高、规模最大的斑岩型铜矿之一,随着开采深度突破4 300 m,深部采掘工程面临隐伏导水构造与岩溶裂隙水的双重威胁。对动态瞬变电磁探测技术在甲玛铜多金属矿的应用进行优化,系统开展了隐蔽水害精准探测方法研究。通过分析隐蔽水害特点,建立典型含水体系正演模型并进行三维数值模拟,分析感应电场传播规律与响应特征;改进动态瞬变电磁成像算法,实现井下瞬变电磁信号的高精度实时解译。通过开展不同线圈、发射电流、叠加次数及发射频率的参数试验,优选出适配甲玛铜多金属矿的最佳探测参数。现场试验表明,该技术实现了高阻围岩背景下低阻异常体(视电阻率 $<6 \Omega \cdot m$)的精准提取,快速锁定隐蔽水害位置,为甲玛铜多金属矿安全开采筑牢地质保障,并为水害防治开拓新思路。

关键词:隐蔽水害;瞬变电磁法;典型含水体系;三维正演;参数试验;动态成像

中图分类号:TD15 P618.43

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)09-0121-06

doi:10.11792/hj20250915

引 言

在矿山开采过程中,地下导水通道及富水构造的精准识别始终是保障安全生产的技术难题。方运海等^[1]通过综合物探方法在金属矿山成功识别出多条导水通道,验证了瞬变电磁(TEM)法对低阻异常体的敏感特性;高学丰等^[2]基于数值模拟技术建立了含水陷落柱的TEM响应模型,揭示了不同充水条件下的电磁响应规律;孙文斌等^[3]通过TEM反演技术实现了煤矿隐蔽水害的空间定位;周楠楠等^[4]则进一步从横磁场模式角度解析了TEM对薄层水体的探测能力;施羽等^[5]采用TEM及三维可视化技术实现了采空区积水的立体表征;景旭等^[6]提出的树网格离散优化三维瞬变电磁有限体积正演法显著提高了复杂地质模型的正演效率;李昊锦等^[7]开展了瞬变电磁三维各向异性响应特征研究;吕可艺^[8]对瞬变电磁三维正演进行了边界优化;朱榕等^[9]通过TEM正演模拟揭示了矿井顶板水害的电磁响应特征,并成功应用于实际工程验证;刘大金等^[10]基于矿井瞬变电磁技术开展金属矿山超前探测研究,建立了含水体系位置与规模的量化评估方法;王智聪等^[11]针对磷矿富水性探测需求,优化了瞬变电磁法的观测参数组合与解释流程;陈旭日等^[12]通过瞬变电磁法成功定位金属矿山突水通道,提

出了多参数联合判别的致灾水源识别技术;杨生文等^[13]将高密度电法与瞬变电磁法联合应用于矿山开采区域,实现了水文地质异常体的精细刻画;孙玉学等^[14]基于TEM探测结果构建了铁矿灰岩富水区的三维水文地质模型,制订了探放水综合治理方案;戚伟等^[15]通过瞬变电磁法揭示了金属矿山深部岩体储水的空间分布规律,发现其具有显著的各向异性特征;章达宾^[16]通过现场试验验证了瞬变电磁法在金属矿山突水探测中的有效性,提出了干扰压制与信号增强技术;王瑞权等^[17]系统总结了物探技术在金属矿山地地质勘探中的应用现状,强调综合方法对提高勘探精度的重要性;尹纪超等^[18]开展了瞬变电磁法在矿山巷道超前预报系统构建中的应用研究;王玉等^[19]采用综合物探方法融合构建了三维地质模型并确定了深部找矿靶区;殷保全^[20]利用瞬变电磁响应曲线圈定矽卡岩型铜多金属矿。

然而,现有研究多聚焦于煤矿领域,而金属矿山具有高电阻率围岩、复杂构造形态及多期次开采扰动等特征,其深部岩体储水特征的TEM响应机制尚未完全明晰。西藏华泰龙矿业开发有限公司甲玛铜多金属矿(下称“甲玛铜多金属矿”)地处青藏高原南部,当前开采深度已突破4 300 m。随着开采深度的增加,巷道频繁揭露构造破碎带、溶洞及老窿积水,致使矿坑涌水量急剧增大,严重威胁矿山安全生产。传统

收稿日期:2025-03-27; 修回日期:2025-05-25

基金项目:重庆市科技计划项目(CSTB2024NSCQ-MSX0783)

作者简介:米玛顿珠(1998—),男,助理工程师,研究方向为地质工程;E-mail:mmdz1123@163.com

钻探方法在应对此类问题时,暴露出效率低、成本高的弊端。瞬变电磁法凭借对低阻体敏感、探测深度大等显著优势,成为水害探测的优选技术。然而,金属矿山井下环境极为复杂,强电磁干扰、探测参数适应性差等问题突出,迫切需要对现有技术进行优化升级。本文围绕瞬变电磁法的动态成像技术和工艺参数开展深入研究,通过大量参数试验,优化各项参数,成功构建适用于甲玛铜多金属矿的隐蔽水害探测技术体系,为水害防治领域提供了创新性的解决方案。

1 研究区地质特征

1.1 矿区概况

甲玛铜多金属矿矿区出露地层主要为侏罗系多底沟组灰岩和白垩系林布宗组板岩。该区域构造活动剧烈,发育有红塔背斜、牛马塘背斜及滑覆断裂带(F_1 、 F_7)等。岩溶裂隙、断层破碎带及未封填钻孔共同构成了主要充水通道,雨季时涌水量可达 $4\ 560\text{ m}^3/\text{d}$,给矿山开采带来极大挑战。

1.2 隐蔽水害类型

矿山工程目前最低开拓标高为 $4\ 300\text{ m}$,位于灰岩岩溶地下水位以上。矿坑地下水主要来自上部垂向补给,矿床充水的主要来源为大气降水、沟谷地表水及老窿积水和采空区积水的渗漏补给。矿床充水通道主要为岩溶裂隙、断层破碎带、斑岩带和未封填钻孔。总结分析隐蔽水害主要类型为:①构造裂隙导水,如 $4\ 450\text{ m}$ 南平硐S18出水点,裂隙宽度达 15 cm ,连通地表水渗漏;②溶洞储水,如 $4\ 400\text{ m}$ 巷道4盘区斑岩带,溶洞地下水通过构造裂隙补给巷道;③老窿积水,一期工程遗留未回填采空区,雨季降水补给形成突水隐患。

2 动态瞬变电磁技术原理

瞬变电磁法通过发射线圈产生一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场传播过程中,当遇到导电介质时,其内部会激发产生感应电流,也称作二次电流或涡流。由于存在感应电流的热损耗,二次电流不断减小,进而在其周围产生新的磁场,称为二次磁场。二次磁场随着时间的延长呈指数衰减,也被称为瞬变磁场。利用接收线圈对二次磁场进行观测,由于二次磁场包含与地下导电介质有关的电磁信息,通过对观测数据进行分析和处理,可以推断出地下地质体的电性分布、埋深等信息。动态瞬变电磁技术探测原理如图1所示。井下数据采集时,探测区域地层地质情况可实时成像;同时,根据现场动态成像信息,初步判断探测区域煤岩层赋水性情况。针对可疑区域展开多次重复扫

描,提高探测精度,保证探测效果。

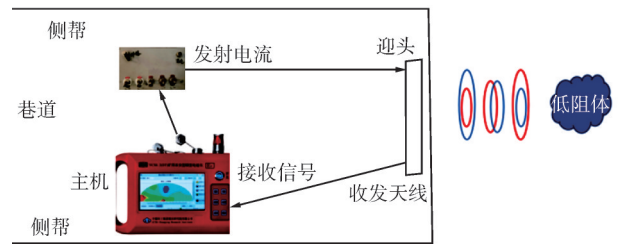


图1 动态瞬变电磁技术探测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the detection principle of dynamic transient electromagnetic technology

3 参数试验与优选

针对甲玛铜多金属矿特殊的探测环境,专门设计了可自由伸缩调节的天线支架,伸缩长度 1 m 、 1.5 m 、 2 m 。开展了 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 、 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 等3种不同规格的线圈探测试验,发射线圈采用 4 mm^2 铜芯线缆,接收线圈采用 1.5 mm^2 铜芯线缆。同时,开展了 1.7 A 、 2.2 A 、 3.2 A 、 5.0 A 、 6.5 A 等5组不同电流探测试验,以及不同频率和叠加次数的探测试验。通过一系列参数试验,优选出甲玛铜多金属矿隐蔽水害动态探测的最佳参数。

3.1 线圈

不同线圈瞬变电磁探测衰减曲线如图2所示。由图2可知:3种不同规格线圈的衰减曲线各具特色。 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 线圈早期信号较强,但衰减速度快,易受浅部干扰,中晚期信号表现较差; $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 线圈早期信号稍弱,衰减速度适中,中晚期能够有效反映中深层信息,曲线波动较小; $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 线圈早期信号较弱,衰减速度最慢,中晚期对深部探测能力强,曲线较为平滑。结合试验结果,依据现场实际情况,灵活选择 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 或 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 线圈规格。

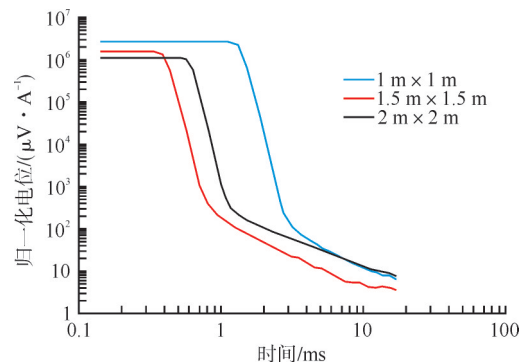


图2 不同线圈瞬变电磁探测衰减曲线

Fig. 2 Decay curves of transient electromagnetic detection with different coils

3.2 发射电流

不同发射电流瞬变电磁探测衰减曲线如图3所

示。由图3可知:随着发射电流从1.7 A逐步增加到6.5 A,在初始阶段,曲线起始幅度不断上升,感应电动势的变化也从较为平缓逐渐变得极为剧烈。其中,发射电流为1.7 A时,信号强度相对较弱,感应电动势变化较为温和;而发射电流为6.5 A时,信号强度极强,感应电动势变化强烈;表明地下介质对高电流的响应更为灵敏,感应电动势可达 $5 \mu\text{V}$,分辨力达到最大,探测深度更深。综合考虑探测分辨率与深层穿透能力,发射电流选择6.5 A。

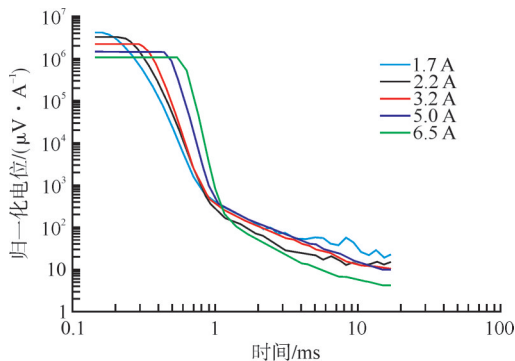


图3 不同发射电流瞬变电磁探测衰减曲线

Fig. 3 Decay curves of transient electromagnetic detection with different transmitting currents

3.3 发射频率

不同发射频率瞬变电磁探测衰减曲线如图4所示。由图4可知:当发射频率为62.5 Hz时,衰减曲线下落速度较快,对浅层地质响应敏感,初始信号强度迅速衰减,整体衰减幅度较大,深层探测能力相对较弱。随着发射频率降至25 Hz,衰减曲线下落速度有所减缓,初始信号衰减幅度略小,能兼顾浅层和中层地质探测,持续时间相对较长。当发射频率为12.5 Hz时,衰减曲线下落更为平缓,初始信号衰减幅度进一步减小,且持续时间明显增加,对深层地质探测能力增强。当发射频率降低到6.25 Hz时,衰减曲线下落极为缓慢,初始信号衰减幅度很小,且长时间保持相对稳定强度,对极深层地质探测更深入。当发射频率为2.5 Hz时,衰减曲线几乎呈缓慢下降趋势,初始信号衰减幅度极小,且在很长时间内保持低而稳定的强度,对最深层地质结构的探测能力最强。频率越小,衰减曲线尾部延伸越长,探测的理论深度越大。综合考虑,发射频率选择12.5 Hz。

3.4 叠加次数

不同叠加次数瞬变电磁探测衰减曲线如图5所示。由图5可知:随着叠加次数从4次逐步增加到1024次,衰减曲线呈现出一系列变化特征。叠加次数为4次时,信号较弱且信噪比较低,曲线波动大、光滑度差;随着叠加次数增加,信号强度逐渐增强,信噪

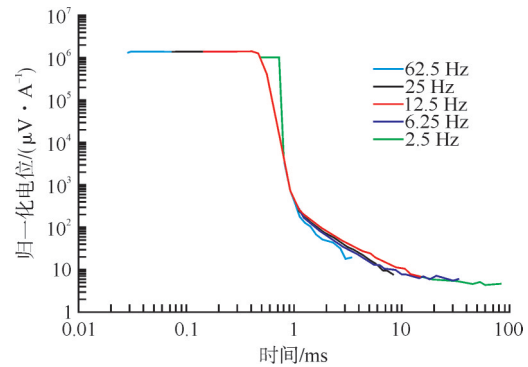


图4 不同发射频率瞬变电磁探测衰减曲线

Fig. 4 Decay curves of transient electromagnetic detection with different transmitting frequencies

比不断提高,衰减曲线越来越平滑稳定,早期对浅层电性结构的刻画愈发准确,中期能更好地分辨不同电性层之间的过渡,晚期对深部地质体的电性信息反映也更加有效;叠加次数为64~1024次时,衰减曲线的平滑度和稳定性都很好,形态基本一致,能够很好地抑制噪声干扰。但是,叠加次数越高,探测时间越长。综合考虑,叠加次数选择64次或128次比较合适。

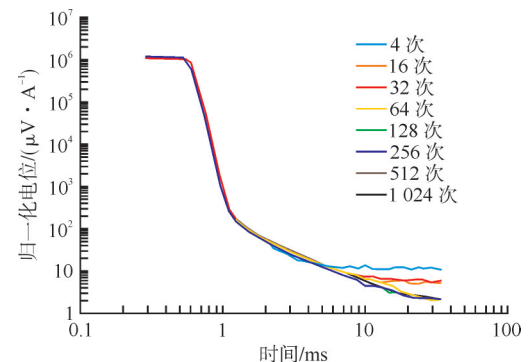


图5 不同叠加次数瞬变电磁探测衰减曲线

Fig. 5 Decay curves of transient electromagnetic detection with different stacking times

4 典型含水异常体模型三维正演模拟

根据甲玛铜多金属矿矿井地质和水文地质资料,建立甲玛铜多金属矿典型导水断层破碎带地电模型,进行井下全空间瞬变电磁三维正演模拟。研究瞬变电磁场的传播规律和响应特征,提高瞬变电磁法探测资料处理与解释的精度。

4.1 导水断层模型

模型上覆地层视电阻率 $500 \Omega \cdot \text{m}$;第二层为基岩裂隙水层,视电阻率 $1 \Omega \cdot \text{m}$,厚度40 m;第三层为灰岩地层,视电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$,厚度100 m;第四层视电阻率 $50 \Omega \cdot \text{m}$,厚度40 m;下覆高阻基地层,视电阻率 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。激发源置于第三层中,位于模型几何中心,平行层理激发,断层面距激发源30 m,左盘下降,右盘上升,断距20 m。

4.2 典型含水体模型响应特征

承压断层不同时刻 y 方向感应电场等值线分布如图6所示。由图6可知:瞬变电场感应的最初时刻,感应电场主要分布于激发源附近,外边缘刚扩散至断层面,感应电流密度中心位于激发源所在平面上并垂直于层理面。随着时间的推移,感应电场越过断层面,由断层切割错动带来的层理方向上电性变化开始对感应电场的扩散产生影响,上下2个密度中心的扩

散速度差别较大,下密度中心迅速向四周扩散,且在断层上下2盘的低阻强含水层形成2个次生感应环,而上密度中心受低阻含水层的影响,扩散速度较慢。随着时间的进一步推移,低阻对感应电场强烈的吸收作用,使得感应电场在低阻强含水层中逐渐形成3个密度中心,并长时间滞留在低阻强含水层。随着时间的推移,感应电场扩散至更大的外部空间并逐渐消失。

断层瞬变磁场响应曲线如图7所示。由图7可

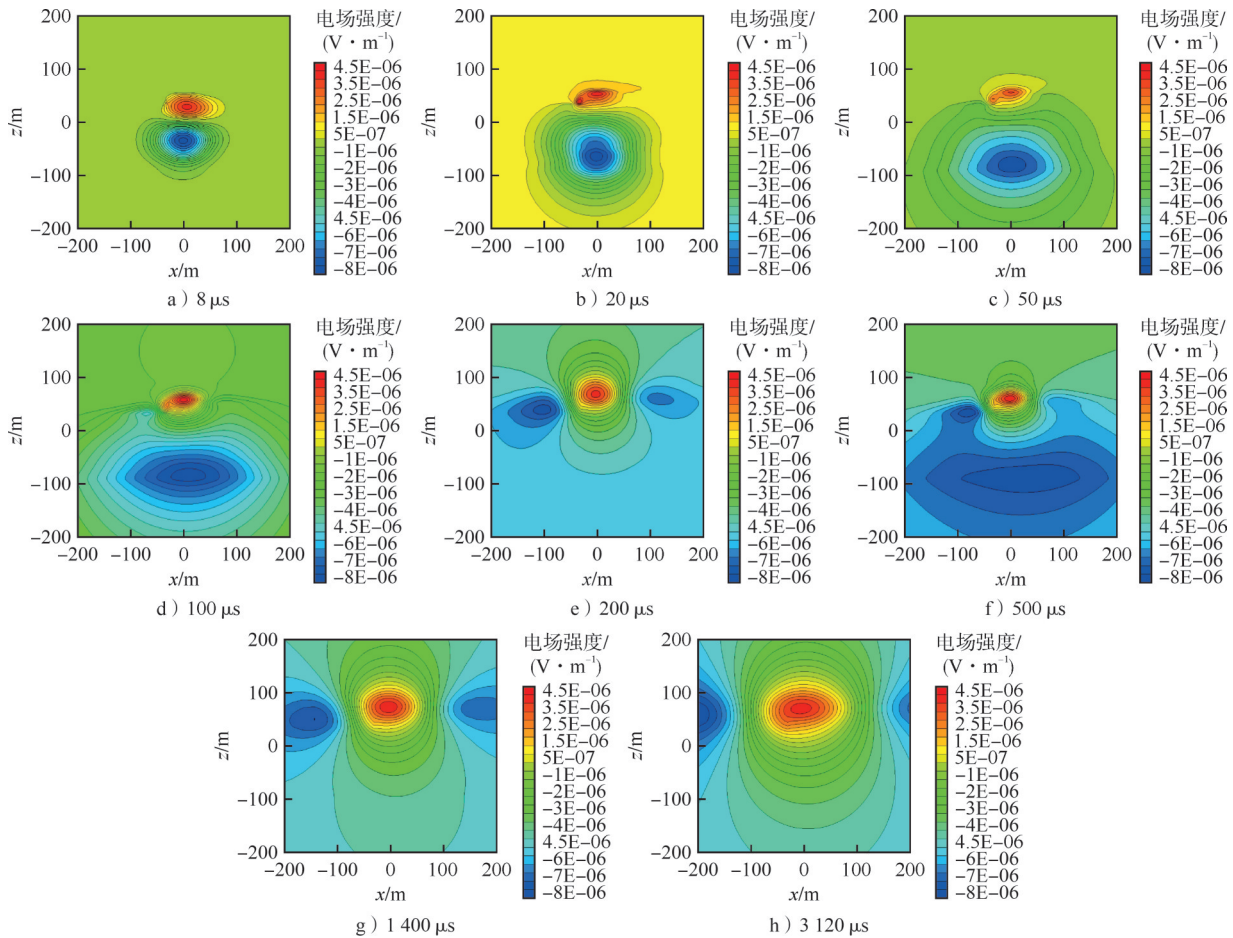


图6 承压断层不同时刻 y 方向感应电场等值线分布

Fig. 6 Contour distribution of y -direction induced electric field of a confined fault at different times

知:断距(断层错动)越大,断层导水的可能性也越大,激发源点瞬变磁场响应越大。断距为40 m时,含水层与灰岩地层对接,此时响应幅值最强。

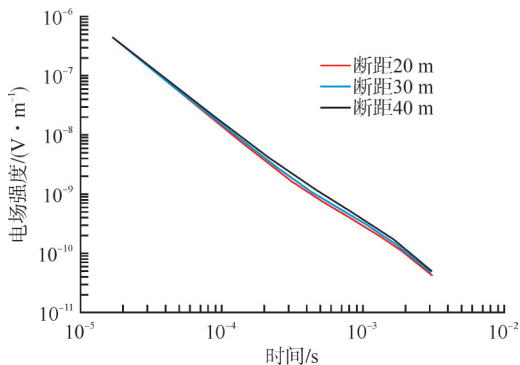


图7 断层瞬变磁场响应曲线

Fig. 7 Transient magnetic field response curves of the fault

5 现场应用与效果分析

在甲玛铜多金属矿开展了掘进巷道超前探测,在巷道底板及侧帮进行探测。根据现场多次探测试验结果,当视电阻率 $>30 \Omega \cdot m$ 时,表示无低阻异常;当视电阻率 $<6 \Omega \cdot m$ 且呈“圈闭”时,则表示岩层富水性较强。动态瞬变电磁探测技术能够实现100 m范围内隐蔽水害的实时成像。

1) 4 320 m 中段 3# 探矿巷道掌子面探测。在4 320 m 中段 3# 探矿巷道掌子面,根据探测地质需求,设计偏顶板 40° 、偏顶板 20° 、沿巷道掘进方向、偏底板 20° 、偏底板 40° 等5个探测方向;每个方向按照半圆形探测方式布置,均布置13个测点,从左 270° 到右

90°方向,间隔15°移动,探测180°范围。动态瞬变电磁探测成果三维可视化(如图8所示)显示,视电阻率 $>30\ \Omega\cdot\text{m}$,无低阻异常,掘进验证岩层富水性弱。

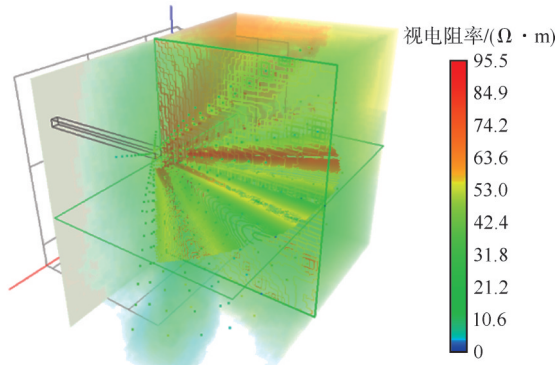


图8 4320 m中段3#探矿巷道掌子面动态瞬变电磁探测成果三维可视化图

Fig. 8 3D visualization of dynamic transient electromagnetic detection results at the heading face of 3# exploration roadway at the 4320 m level

2) 4420 m中段5#探矿巷道侧帮探测。在4420 m中段5#探矿巷道侧帮,根据实际巷道地质及水文地质情况设计探测方向,在巷道侧帮布置测线,测点间距3 m,测线长度30 m,结果如图9所示。由图9可知:4420 m中段5#探矿巷道侧帮视电阻率为 $5\sim 70\ \Omega\cdot\text{m}$ 。在测线长度0~22 m、探测深度28~92 m范围内,存在相对低阻异常区,视电阻率 $<6\ \Omega\cdot\text{m}$,且呈“圈闭”,推测该探测范围内岩层富水性较强。

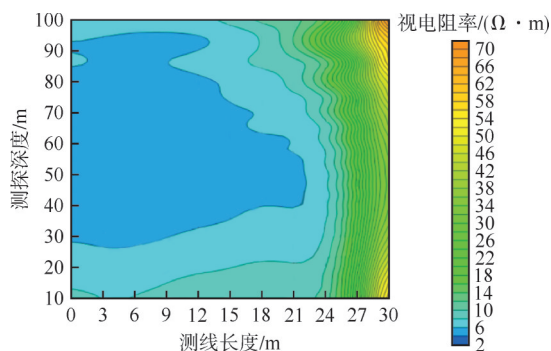


图9 4420 m中段5#探矿巷道侧帮瞬变电磁探测视电阻率等值线

Fig. 9 Apparent resistivity contour of transient electromagnetic detection on the sidewall of 5# exploration roadway at the 4420 m level

6 结论

1)通过系统的现场参数试验,成功优选出甲玛铜多金属矿动态瞬变电磁探测的最佳参数,即线圈 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 或 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 、发射电流6.5 A、发射频率12.5 Hz、叠加64次或128次,保障了探测效果。

2)在甲玛铜多金属矿,当视电阻率 $>30\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,

表示无低阻异常;当视电阻率 $<6\ \Omega\cdot\text{m}$ 且呈“圈闭”时,表明岩层富水性较强,为现场水害判断提供了清晰依据。

3)动态瞬变电磁技术可实现井下100 m范围内隐蔽水害实时成像,大幅提升探测精度,满足了甲玛铜多金属矿水害探测需求。

4)将动态瞬变电磁技术推广至甲玛铜多金属矿尚未探测的区域,尤其是深部开采规划区域,提前排查水害隐患,为深部安全开采提供有力支撑。

5)建议联合地质雷达、高密度电法等地球物理探测方法,构建综合探测体系。充分发挥不同方法的优势,弥补单一方法的局限性,进一步提升隐蔽水害探测的准确性与可靠性。

[参考文献]

- [1] 方运海,钱家忠,马雷,等.基于综合物探的金属矿地下导水通道识别[J].高校地质学报,2025,31(1):58-66.
- [2] 高学丰,张晓东,马丁.基于含水陷落柱数值模拟瞬变电磁超前探测技术研究与应用[J].内蒙古煤炭经济,2024(4):148-150.
- [3] 孙文斌,李长江,王宇,等.基于瞬变电磁法的煤矿隐蔽致灾水害分析研究[J].煤炭技术,2023,42(10):167-169.
- [4] 周楠楠,魏新昊,张顺.瞬变电磁横磁场响应特征与探测能力分析[J].地球物理学报,2023,66(9):3914-3927.
- [5] 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(增刊1):108-112.
- [6] 景旭,曹华科,周建美,等.树网格离散优化三维瞬变电磁有限体积正演算法[J].地球物理学报,2023,66(8):3524-3539.
- [7] 李昊锦,毛玉蓉,王新宇,等.地-井瞬变电磁三维各向异性响应特征研究[J].石油地球物理勘探,2024,59(5):1184-1196.
- [8] 吕可艺.基于边界优化的瞬变电磁三维正演研究[D].西安:长安大学,2022.
- [9] 朱榕,王耀,许洋铖,等.矿井顶板水害瞬变电磁正演模拟及应用[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2023,48(3):62-71.
- [10] 刘大金,胡体才,温来福,等.基于矿井瞬变电磁的金属矿山超前探测研究[J].工程地球物理学报,2022,19(6):829-834.
- [11] 王智聪,张军.瞬变电磁法在磷矿富水性中的探测方法研究[J].工程地球物理学报,2022,19(6):769-775.
- [12] 陈旭日,张海东,夏丽.瞬变电磁法在金属矿山突水探测中的应用[J].中国金属通报,2021(12):95-97.
- [13] 杨生文,徐林,张风荣,等.高密度电法及瞬变电磁法在矿山开采区域中的应用[J].世界有色金属,2021(10):48-49.
- [14] 孙玉学,张庆松,王凤刚,等.基于TEM的铁矿灰岩富水区探放水综合治理研究[J].金属矿山,2021(5):197-204.
- [15] 戚伟,李威.基于瞬变电磁法的金属矿山深部岩体储水分布探测[J].黄金,2019,40(8):41-45.
- [16] 章达宾.瞬变电磁法在金属矿山突水探测中的应用研究[J].山西能源学院学报,2019,32(1):96-98.
- [17] 王瑞权,张立剑,赵向奎.物探技术在金属矿山地区地质勘探中的应用[J].世界有色金属,2017(3):89,91.
- [18] 尹纪超,王慎利.瞬变电磁法在矿山巷道超前预报系统构建中的应用研究[J].黄金,2024,45(6):27-30.

[19] 王玉,尹召凯,王君伟.胶西北焦家—仓上地区深部地球物理探测综合应用[J].黄金,2023,44(7):55-60.

[20] 殷保全.瞬变电磁响应曲线圈定矽卡岩型铜多金属矿的应用效果[J].世界有色金属,2019(11):89-90.

Research and application of dynamic transient electromagnetic technology in detecting concealed water hazards at Jiama copper polymetallic mine

Mima Dunzhu¹, Liu Baixiang², Li Yajun¹, Yin Jiankang¹, Li Dong¹, Yao Zhizhong¹, Li Fulong¹

(1. Xizang Huatailong Mining Development Co., Ltd.; 2. CCTEG Chongqing Research Institute)

Abstract: The Jiama copper polymetallic mine, one of China's highest-altitude and largest porphyry copper mines, faces dual threats of concealed water-conducting structures and karst fissure water as mining depths exceed 4 300 m. This study optimizes the application of dynamic transient electromagnetic (TEM) detection technology for the mine and systematically develops precise detection methods for concealed water hazards. By analyzing the characteristics of concealed water hazards, forward models of typical aquifers were established, and 3D numerical simulations were conducted to investigate induced electric field propagation and response characteristics. The dynamic TEM imaging algorithm was improved to achieve high-precision, real-time interpretation of underground TEM signals. Parameter tests involving different coil configurations, transmitting currents, stacking numbers, and detection frequencies were carried out to determine the optimal detection parameters for the Jiama copper polymetallic mine. Field tests demonstrated that the technology enabled accurate extraction of low-resistivity anomalies (apparent resistivity $<6 \Omega \cdot \text{m}$) within high-resistivity surrounding rock backgrounds, rapidly locating concealed water hazards. The results provide a robust geological safeguard for safe mining operations at Jiama copper polymetallic mine and open new avenues for water hazard prevention and control.

Keywords: concealed water hazard; transient electromagnetic method; typical water-bearing bodies; 3D forward modeling; parameter experiments; dynamic imaging

(上接第46页)

Geological characteristics and prospecting directions of newly discovered gold (polymetallic) mineralization in the Dongshan area of the Xinxingxia region, Eastern Tianshan

He Xinyu^{1,2}, Fu Yu^{1,2}, Du Haichao³, Ding Xiaolei², Bo Hetian⁴, Wang Hongwei^{1,2}, Zhang Chi^{1,5}, Li Qiang^{1,6}, Li Si², Fang Tonghui⁷, Hou Dehua⁶, Cui Kunlei⁵, Guo Dongbao¹

(1. Key Laboratory of Strategic Mineral Resources of the Upper Yellow River, Ministry of Natural Resources;

2. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey; 3. China Gold Group Geology Co., Ltd.;

4. Henan Fifth Geological Brigade Limited Company; 5. Henan Academy of Geology;

6. Regional Geological Survey Institute of Hebei Province;

7. Sino-Zijin Resources (Beijing) Co., Ltd.)

Abstract: As one of the world's largest gold producer and consumer, China faces a high dependence on imported gold resources, making intensified exploration and development efforts essential. The Eastern Tianshan region, where the Dongshan area of Xinxingxia is located, serves as a key mineral resource base in Xinjiang and exhibits significant potential for gold and polymetallic mineralization. Based on a mineral geological survey, this study focuses on the Dongshan area and integrates field investigation, trenching, and geochemical analysis. New discoveries include the Hongxingshan gold occurrence, the Dongqianluzi Lead Deposit, and 4 copper mineralized sites (Zhuanjing, Zhuanjing East, Dongshan, and Dongshan East). The findings suggest that the gold mineralization in the Dongshan area may be part of a porphyry-related system, likely representing an epithermal low-temperature hydrothermal type. The copper mineralization is inferred to be of a magmatic-hydrothermal vein type, while the newly identified lead mineralization may represent a distal expression of a molybdenum system. Overall, the Dongshan area of Xinxingxia shows significant exploration potential for gold, molybdenum, tungsten, tin, and copper, and may also host porphyry-type W-Sn and Mo deposits.

Keywords: gold polymetallic deposit; mineral exploration; geochemistry; Dongshan area of Xinxingxia region; Eastern Tianshan; porphyry type; prospecting direction