doi: 10.11720/wtyht.2026.2417
石荔,明攀,耿晓明,等. 小回路线圈瞬变电磁法在露天矿边坡中的探测应用[J]. 物探与化探,2026,50(1):180-187. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2417
Shi L, Ming P, Geng X M, et al. Application of the small-loop transient electromagnetic method in detecting open-pit slopes[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 180-187. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2417

小回路线圈瞬变电磁法在露天矿边坡中的探测应用

石荔[1],明攀[2],耿晓明[3],陆俊[2],张盛行[2],董茂干[2]
(1. 中冶武勘工程技术有限公司,湖北 武汉 430000;2. 南京水利科学研究院材料与结构研究所,江苏 南京 210094;3. 南京市秦淮河河道管理处,江苏 南京 210012)

摘 要: 为全面了解因开采作业和降雨等外部因素诱发露天矿区边坡形成潜在的隐伏地质特征,本文采用小回路线圈瞬变电磁系统对露天矿边坡开展现场探测试验。通过现场试验表明,小回路线圈瞬变电磁系统具有优异的纵横分辨率,能够较好地反映边坡隐伏构造的电性特征和岩石圈的物质分层界面,对露天矿边坡探测是快捷可行的。通过联合层状约束反演技术、地表岩石圈调查和地层地质约束,可定性定量解释地下隐伏构造的空间位置及基本形态特征,推测深部岩石圈的物质组成和结构性质,提前认知隐伏构造的存在,减轻露天矿边坡的破坏风险。

关键词: 露天矿边坡;隐伏构造;小回路瞬变电磁;空间约束层状反演;岩石圈电性
中图分类号: P631;P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0180-08

0 引言

边坡破坏是露天矿在全球范围内发生的常见灾害,对人员、设备、基础设施的安全造成严重威胁和破坏,对经济效益和生产调度造成严重不利后果[1-2]。在采矿作业中,由于爆破开挖、地震等多种因素导致岩体应力释放,使围岩松弛膨胀形成不连续面,岩体强度下降[3]。在降雨作用下,孔隙水压力(PWP)上升,导致岩体间抗剪强度下降[4],容易诱发滑坡、边坡失稳、坍塌等地质灾害。因此,露天矿边坡的检测变得十分重要。然而,由于场地或经济限制,对露天矿边坡进行检测调查的工作具有挑战性[5]。另外,露天矿边坡的破坏涉及到局部或全局范围内岩石或土壤物质的物理剥离和随之而来的崩塌,亟须高分辨率的技术方法提前对潜在的不良地质体进行深层次的揭露。地球物理方法对边坡的探测,尤其是在地质复杂情况下的作用更为突出[6-7]。然而,对于特定的工况环境,方法的选择往往受限较多。

小回路瞬变电磁法[8-9]通过增大发射电流,增加线圈匝数来减少线圈面积,在复杂的地形工作场地情况下,相比直流式电阻测量系统,能更简便、快捷,同时小回路瞬变电磁系统能够快速密集地采集数据,在保持高水平近地表分辨率的同时,也可以获得横向的高分辨率。牟义等[10]通过试验和模拟验证了在复杂地形条件下,小回路瞬变电磁法对踩空区探测的可靠性。Tang 等[11]设计了小回路瞬变电磁系统,采用扇区探测方案成功探明了煤矿巷道周围的富水区域。杜库实等[12]提出立体的小回路瞬变电磁法探测方案,快速有效地获得掘进巷道前方复杂断层带的富水程度、位置和范围。徐栓祥等[13]联合小回路瞬变电磁法(等值反磁通)和红外测温方法,实现了掘进巷道前方准确的预测预报。胡雄武等[14]通过物理模型实验和实例应用,推导了全空间线性关断条件下全程视电阻率算法,表明采用小

收稿日期: 2024-10-21; **修回日期:** 2025-02-23
基金项目: 国家重点研发课题(2024YFF1700705);国家自然科学基金项目(52409165);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y423001)
第一作者: 石荔(1988-),女,山西阳泉人,工程师,研究方向为岩土、地质与资源工程、机器学习等。Email:15921702972@163.com
通讯作者: 明攀(1993-),男,博士,工程师,研究方向为涉水工程无损诊断与修补加固。Email:1053238613@qq.com

回线瞬变电磁对坑道掘进前方浅部含水体的空间划分更好。Auken 等[15]通过全地形车搭载小回路瞬变电磁系统在密西西比三角洲地区系统绘制了复杂的地下地质详图,并建立了水文地质模型。可以看出,小回线瞬变电磁系统在对采空区、含水体的探测中表现出了优异的高分辨率探测效果。但是,针对露天矿边坡的地层特性和岩体的裂隙、破碎和断层等不良地质体构造的探测效果尚未可知。

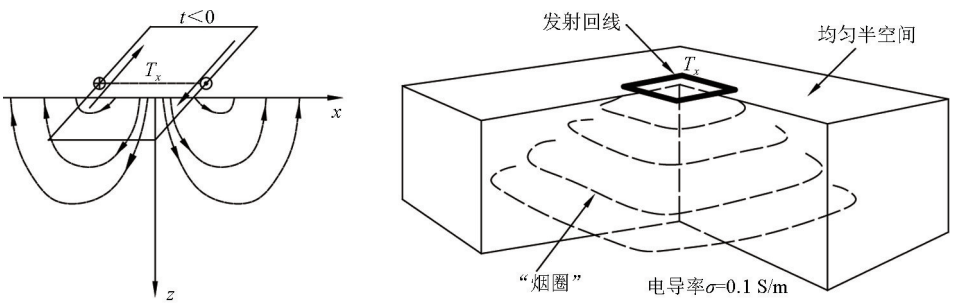
本文采用小回线瞬变电磁方法,对多个露天矿边坡开展现场探测试验研究,通过层状约束反演技术,结合现场的地质调查结果,分析露天矿边坡浅部岩石圈的地质组成,揭露边坡潜在的各种隐伏地质情况,为矿山安全高效的开采提供有力支撑。

1　方法技术

1.1　小回路线圈瞬变电磁

瞬变电磁法(简称 TEM)[16]是利用不接地回线或电极向地下发送脉冲式一次电磁场,用线圈或接地电极观测由该脉冲电磁场感应的地下涡流产生的二次电磁场的空间和时间分布,来解决有关地质问题的时间域电磁法。与直流电法相比,采用不接地回线装置,适宜于各种地理环境下的野外工作;可通过调节发送功率、仪器采样时间,方便地控制探测范围;高阻围岩地区不会产生地形起伏的假低阻,在低阻围岩区,由于是多道观测,早期场的地形影响也较易分辨。

瞬变电磁法在电流断开之前,发射电流在回线周围的大地和空间中建立起一个稳定的磁场,如图 1a 所示。当一次电流断开时,一次磁场的剧烈变化首先传播到发射回线周围地表各点,在紧靠发射回线一次磁场最强的地表处感应电流最强。随着时间的推移,地下的感应电流便逐渐向下、向外扩散,其强度逐渐减弱,分布趋于均匀,并逐渐变形为圆电流环。如图 1b 所示,等效电流环很像从发射回线中"吹"出来的一系列"烟圈",因此,人们将地下涡旋电流向下、向外扩散的过程形象地称为"烟圈效应"。从"烟圈效应"的观点看,早期瞬变电磁场是由近地表的感应电流产生,反映浅部电性分布;晚期瞬变电磁场主要是由深部的感应电流产生,反映深部的电性分布。因此,观测和研究瞬变电磁场随时间的变化规律,可以探测地层电性的垂向变化,通过地层电性的变化反演地质体的电阻率分布,判别地质异常体,这是瞬变电磁测深的原理。



(a) 发射稳定的电磁场　　(b) 二次感应的电磁场

图 1　瞬变电磁探测的原理

Fig. 1　Principles of transient electromagnetic detection

本次工作采用小回路线圈瞬变电磁系统 FCTEM,该系统在高速线性关断、消互感、观测模式和信号处理等方面取得多项创新性成果。如图 2 所示,系统由瞬变电磁主机、拖拽式发送接收线圈、数据处理与成像软件组成,采用了"恒压钳位"高速线性关断技术和"跨环消耦"发送接收线圈消互感技术,结合高密度采集,具有极强的浅层和横向高分辨探测能力。通过加大发射电流和线圈匝数,加大发射功率和多次叠加,可大幅度地提高信噪比,加大勘探深度,同时使得线圈面积变小,地形适应能力增强,便于提携且工作效率提高,表 1 给出了此次瞬变电磁设备的参数设置情况。

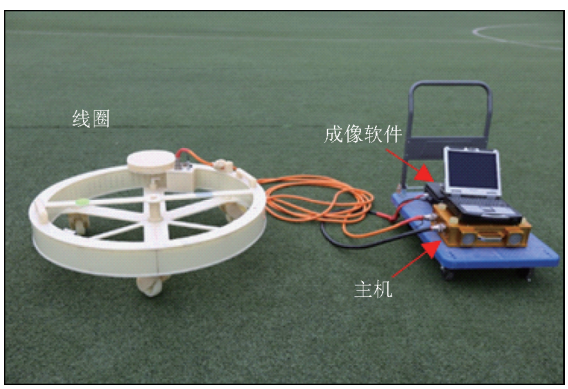


图 2　小回路线圈瞬变电磁系统 FCTEM

Fig. 2　Small loop coil transient electromagnetic system FCTEM

表 1 瞬变电磁设备参数设置

Table 1 Parameter settings for transient electromagnetic equipment

线圈类型	发射频率/Hz	采集频率/MHz	发射电流/A	发射面积/m^2	接收面积/m^2	加窗步进宽度	点距	总加窗数	叠加次数
CL700-16	16	1.25	50.0	10.77	4.02	21	5.0	120	200

1.2 空间约束层状反演

瞬变电磁数据的反演是找到一个与观测数据、先验地质认识相一致的地质模型的“逆问题”。它的前提是有解决问题的反演方法。空间约束反演(spatially constrained inversion,SCI)方法[17]通过在反演目标函数中加入相邻测点之间电阻率、层厚度和界面深度约束项,提高反演的分辨率。这个目标函数由数据拟合和正则化组成,并用一个权衡参数来控制它们的相对贡献[18]:

$$\varphi(m)=\frac{1}{2}\| \boldsymbol{W}_d(F[m]-d^{\mathrm{obs}})\|_2^2+\frac{\beta}{2}\cdot[\| \boldsymbol{W}_c m\|_2^2+\alpha_s\| \boldsymbol{W}_s(m-m^{\mathrm{ref}})\|_2^2], \quad (1)$$

式中:方程中第一项为实测数据与正演模型响应的拟合差; d^{obs} 为含噪观测数据; $\boldsymbol{W}_d$ 为数据加权对角阵, $F[m]$ 为正演模拟数据;第二项为约束项包含了空间约束和模型约束,其中空间约束项中 $\boldsymbol{W}_c=[\alpha_r W_r,\alpha_z W_z]$, α_r 为横向约束, α_z 为深度方向约束, $\boldsymbol{W}_r$ 为模型横向光滑度矩阵; $\boldsymbol{W}_z$ 是模型深度方向光滑度矩阵; 模型约束项中 β 为模型约束项用正则化参数; $\boldsymbol{W}_s$ 为相似度矩阵; m^{ref} 为包含先验信息的参考模型; α_s 为模型相似度的加权系数。

在解决反问题时,我们对模型(向量 $\boldsymbol{m}$)进行反求,与物理属性模型解耦。这种解耦需要能够将 $\boldsymbol{m}$ 转换为模拟网格上物理属性的映射的定义[19]。本文采用层状模型描述,通过指数映射来将模型转换为电导率,然后定义在正演网格子集上,注入到完整的模拟域中。其中正向模拟域的“引擎”采用麦克斯韦方程组控制,通过本构关系将场与介质电导率及磁导率联系起来:

$$\vec{J}=\sigma\vec{E},\qquad \vec{B}=\mu\vec{H}, \quad (2)$$

式中: σ 为电导率; μ 为磁导率,其中 $\vec{E}$、$\vec{H}$ 分别为电场和磁场, $\vec{B}$ 为磁通量密度; $\vec{J}$ 为电流密度,正演过程我们选择有限体积法[20]。

迭代反演过程,对于目标函数(1),采用高斯牛顿法进行优化,第 k+1 次迭代方程为:

$$[\boldsymbol{J}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\boldsymbol{J}_k+\beta\boldsymbol{W}_c^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_c+\beta\alpha_s\boldsymbol{W}_s^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_s]\Delta m^k=\boldsymbol{J}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{W}_d\Delta d_k-\beta\boldsymbol{W}_c^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_c m^k+\beta\alpha_s\boldsymbol{W}_s^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(m^{\mathrm{ref}}-m^k)_s, \quad (3)$$

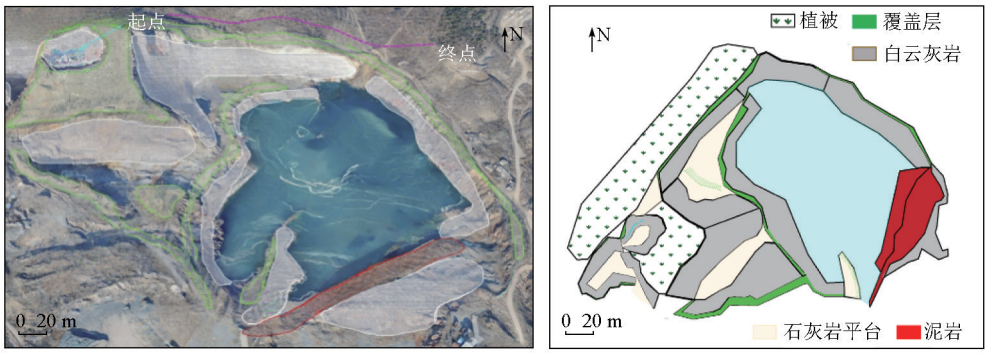
其中: $\boldsymbol{J}$ 为灵敏度矩阵,采用“冷却法”进行更新。 m^k 和 Δm^k 分别为第 k 次迭代的模型参数和相应的参数增量; Δd^k 为第 k 次正演模型与实测数据的拟合差 $\{F[m^k]-d^{\mathrm{obs}}\}$。整个反演过程,建立初始层状模型和约束,通过指数映射来将模型转换为电导率,定义在正演网格子集上开展正演模拟,然后采用高斯牛顿法进行采集数据的约束反演,通过更新目标函数梯度,最后获得模型电阻率反演结果。

2 边坡地质现场勘探

矿区 1 位于燕山山脉的东部,濒临渤海,总体地势北高南低,西高东低。主要岩性为灰岩和泥岩,节理裂隙发育,覆盖层较薄,植被茂盛。矿区内由于多年开采形成了大量崩塌危岩,地形地貌被强烈改变,破坏了原有自然地貌,形成多处平台、高陡边坡;采矿平台压占损毁大量植被及山地资源,对地形地貌景观破坏程度极为严重。基岩主要由花岗岩和部分沉积岩组成。沟谷多呈树枝状展布,形态多呈“V”形谷,山麓多以重力崩塌物和碎石堆积为主。区域分布着第四系松散岩类孔隙水,碳酸盐岩类岩溶裂隙水和基岩裂隙水。松散岩类孔隙水含水层厚度 5~15 m,碳酸盐岩类岩溶裂隙水含水层水位埋深一般为 10~60 m,岩基裂隙水水位埋深一般为 5~20 m。

图 3a 为矿区 1 边坡的现场测线布置,测线主要位于矿区北边的高边坡区域。现场探测从西向东开展,测深采样间隔点为 5 m,采集过程中共记录了 72 个观测数据点在对数时间窗范围内的磁场衰减,将原始数据叠加 200 次。

基于矿区 1 现场的地质调查结果,设置初始的层状模型,其中浅层岩土层 0~20 m,电阻率设定为 200~400 Ω · m;中间岩体层 20~60 m,电阻率设定为 400~700 Ω · m;最深岩体层 60~100 m,电阻率设定为 700~1 000 Ω · m,然后每个地质层更细的层间初始电阻率随着深度增加而线性增大。设置好初始模型后,基于式(1)的目标函数,采用高斯牛顿法进行反演,得到最后的视电阻率反演结果。图 4 给出了矿区 1 边坡测线的视电阻率探测结果,其中探测深度由式(4)计算得到。可以看出,小回路线圈瞬变电磁横向上电阻率连续性较好,对异常体的突



(a) 测线布置　　(b) 地质分布示意

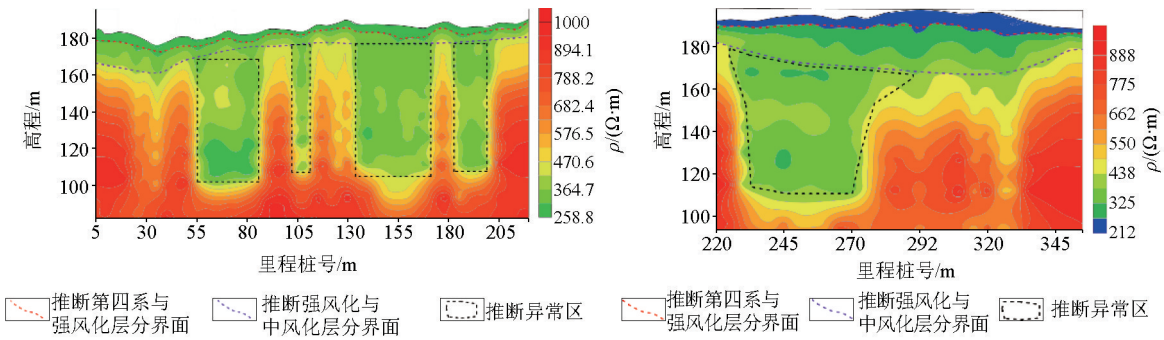
图 3　矿区 1 的地质分布与现场探测

Fig. 3　Geological distribution and site exploration of mining one

出能力相对明显。在深度方向上,表层碎石土覆盖层电阻率较低,与基岩电阻率差异明显、界限分明,基岩表现为电阻率持续增大的高阻层。由地质资料可知,在深度 10~60 m 区域内存在碳酸盐岩类岩溶裂隙水和基岩裂隙水,如图 4 所示,在视电阻率结果中表现出了不同宽度和深度的低电阻异常区,可以看出在矿区北侧边坡存在 5 处岩溶或溶蚀裂隙发育区域,岩体的完整性、连续性遭到了破坏。

$$h = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\sqrt{t/\sigma\mu_0}\ , \tag{4}$$

式中:t 为传播时间;σ 为介质电导率;μ_0 为真空中的磁导率。



(a) 桩号(0+005)~(0+220) m电阻率剖面　　(b) 桩号(0+220)~(0+355) m电阻率剖面

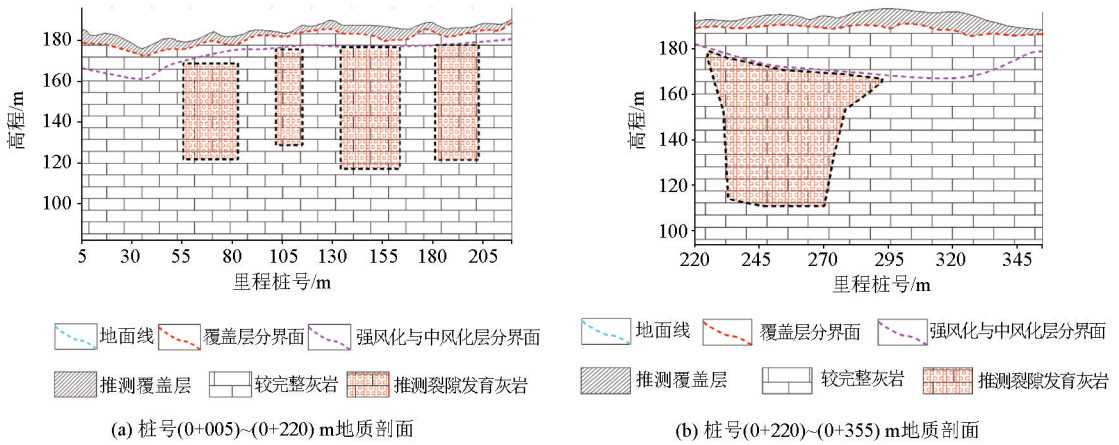
图 4　矿区 1 FCTEM 反演剖面结果

Fig. 4　FCTEM inversion profile results of mining 1

根据地调资料,如图 3b 所示,矿区 1 主要出露古生界寒武系和新生界第四系地层。古生界寒武系下统上部紫红色页岩夹灰岩,上部为 5 m 绿灰色灰岩;下部鲜紫红色页岩夹泥质灰岩 5 m,底部有 0.5 m 含角砾砂泥灰岩。新生界第四系全新统以人工搬运形成的粉质黏土、碎石土和矿渣为主;通过以岩石圈物质组成架构作为约束,可以进一步成像地下深部物质的信息。图 5 给出了矿区 1 测线范围内地下深度的物质构造推断结果。如图 5 所示,根据岩石圈的物质组成,可以确定表层的覆盖层的厚度大约为 0.5 m,其中靠西侧段桩号(0+005)~(0+220) m 段中风化层相对东侧桩号(0+220)~(0+355) m 段厚度较薄,岩体的完整性更好,但是岩体裂隙发育的部位更多,由于低阻区域的面积较大,也有可能为发育的岩溶。

矿区 2 同样位于燕山山脉的东部,总体地势北高南低,西高东低。主要岩性为泥岩、灰岩、页岩和石英砂岩,断层、节理裂隙发育,覆盖层较薄,植被茂盛。区内由于多年开采形成了陡崖地形,地形地貌被强烈改变,形成多处平台、高陡边坡;基岩主要由花岗岩和部分沉积岩组成,矿山区域内流水剧烈切割沟谷,谷坡较陡,普遍有松散堆积物,形成冲洪积扇、坡洪积裾、坡洪积锥等地形。区域分布着第四系松散岩类孔隙水,含水层的特点是孔隙大、结构松散。碳酸盐岩类裂隙岩溶发育,地下水主要赋存于溶洞、溶孔、溶蚀裂隙中,岩溶发育深度一般在 40~100 m,水位埋深一般为 5~20 m。

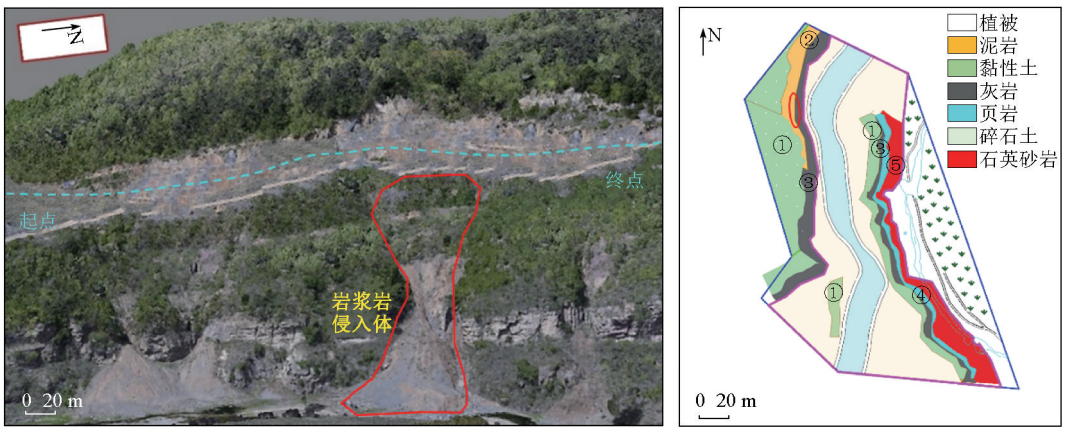
图 6a 给出了矿区 2 边坡的现场测线布置,测线主要位于矿区西边的高边坡区域。现场探测从南向北开展,测深采样间隔点为 5 m,采集过程中共记



(a) 桩号(0+005)~(0+220) m地质剖面　　(b) 桩号(0+220)~(0+355) m地质剖面

图 5　矿区 1 的地质推断剖面

Fig. 5　Geologically inferred profile of mining one



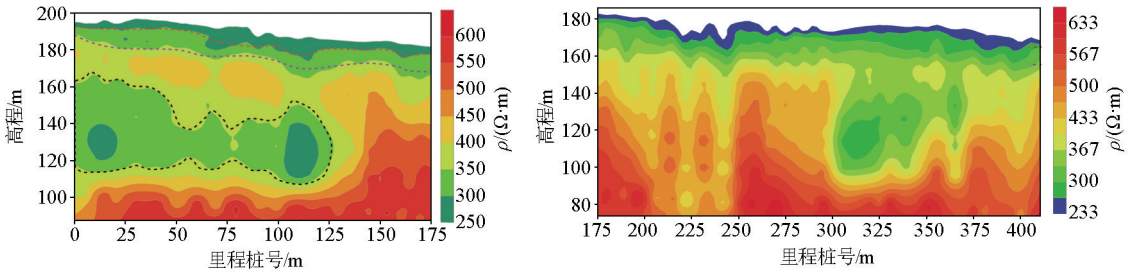
(a) 测线布置　　(b) 地质分布示意

图 6　矿区 2 的地质分布与现场探测

Fig. 6　Geological distribution of mine two and site exploration

录了 83 个观测数据点在对数时间窗范围内的磁场衰减,将原始数据叠加 200 次。

基于矿区 2 现场的地质调查结果,虽然矿区 2 同样位于燕山山脉的东部,但是岩溶发育,地下水丰富。因此,初始层状模型其中浅层岩土层 0~20 m,电阻率设定为 100~250 Ω · m;中间岩体层 20~40 m,电阻率设定为 250~450 Ω · m;最深岩体层 40~100 m,电阻率设定为 450~600 Ω · m,然后每个地质层更细的层间初始电阻率随着深度增加而线性增大。设置好初始模型后,基于式(1)的目标函数,采用高斯牛顿法进行反演,得到最后的视电阻率反演结果。图 7 给出了矿区 2 边坡测线的视电阻率探测结果,其中探测深度由式(4)计算得到。可以看出,小回路线圈瞬变电磁系统在横向上电阻率连续性较好,凡有较高的分辨率,在南北两侧电阻率差异明显。图 7a 给出了南侧段的视电阻率结果,可以看出视电阻率呈现明显的分层,在中高阻区域出现了明显的中低阻区域。根据地质资料(图 6b)推断该区域岩溶发育,在地表以下 40~100 m 呈现低阻特征,与地下水主要赋存深度一致。图 7b 显示了北侧段的视电阻率结果,可以看出小回路线圈瞬变电磁系统对异常体的突出能力相对明显,在高阻区域出现了条带状的中高阻区域,通过现场勘查,如图 6a 所示,在灰岩处存在岩浆岩侵入体,由于混合岩体的不连续结构面,在高地下水位下呈现了相对较低的视电阻率结果。在桩号(0+300)~(0+400) m 位置呈现了倒梯形的中低阻区域,与图 6b 位置的高程位置相似。则该处低阻异常区域可能岩溶发育,并赋存岩体裂隙水。在纵向上,小回路线圈瞬变电磁系统同样具有较好的分辨率,对比图 6a 和图 6b 中的浅层电阻率,可以发现南侧的表层电阻率大于北侧的表层电阻率,与地表岩石圈的圈定结果一致。客观地反映了风化灰岩的电阻率比泥岩的电阻率大。

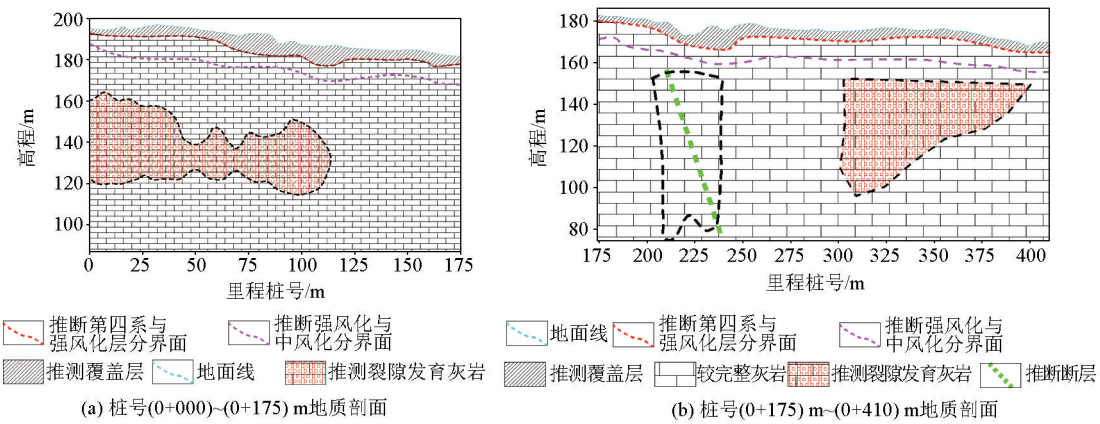


(a) 桩号(0+000)~(0+175) m电阻率剖面　　(b) 桩号(0+175)~(0+410) m电阻率剖面

图 7　FCTEM 反演剖面结果

Fig. 7　FCTEM inversion profile results of mine 2

根据现场的地调和岩体物理新质判定,如图 6b 所示,矿区 2 主要以灰岩、泥岩为主,基岩破碎范围大,基底岩石形成大小不等,纵横交错的裂隙,构成地下水畅流通道,地下水系发育。通过以岩石圈物质组成架构作为约束,可以进一步成像地下深部物质的信息。图 8 给出了矿区 2 测线范围内地下深度的物质构造推断结果。如图 8 所示,根据岩石圈的物质组成,可以确定表层的覆盖层的厚度为 2.5 ~ 5 m,靠南侧段的中风化层厚度相对北侧段较薄,岩体的完整性更好,但是在地表深度 40 ~ 100 m 范围岩体裂隙发育,地下水系畅通,呈现大面积的低阻区域。北侧电阻率的第一个局部差异是由于地层中存在构造导致,构造倾角较陡,根据现有的地质资料,与断层吻合,表现为中低阻体。第二个局部差异与南侧结果一致,岩体裂隙发育,地下水系畅通,呈现大面积的低阻区域。



(a) 桩号(0+000)~(0+175) m地质剖面　　(b) 桩号(0+175) m~(0+410) m地质剖面

图 8　矿区 2 的地质推断剖面

Fig. 8　Geologically inferred profile of mining 2

3　结论

本文采用自行设计的小回路线圈瞬变电磁系统,对矿区边坡开展现场探测试验,通过现场试验,表明小回路线圈瞬变电磁系统具有较高的纵、横向分辨率,采用空间约束层状技术,获得了边坡地下结构的电阻率分布。通过电阻率的连续性,由局部的异常电阻率可以有效地分辨地下的异常结构体。在高地下水位下,裂隙发育的岩体会呈现相对低阻特征,岩浆岩类的侵入体或断层构造会在高阻区域呈现竖条状的相对低阻区域。

通过空间约束层状反演技术,可以提高小回路线圈瞬变电磁浅层的分辨率。对不同岩体的分界面进行有效的识别,在深度方向上能有效反映不同岩体的电性特征。结合对地表岩石圈物理调查和矿区地质资料的分析,可以进一步帮助定性定量地确定隐伏地质的埋深和范围。对于具体的地下构造填图,仍需研究物性参数与异常表征参数之间的定量关系。

参考文献(References):

[1] Lu Y, Jin C Y, Wang Q, et al. Combining InSAR and infrared thermography with numerical simulation to identify the unstable slope of open-pit: Qidashan case study, China[J]. Landslides, 2023, 20(9): 1961-1974.

[2] Bar N, Dixon R. Unveiling unknowns: Practical application of In-

SAR for slope performance monitoring and risk management across multiple surface mines [J]. Engineering Geology, 2021, 293: 106326.

[3] Zhou Z H, Du S J. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1227-1232.

[4] Pan Y, Wu G, Zhao Z M, et al. Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering the water-induced weakening of rock[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 128: 103806.

[5] Lu Y, Jin C Y, Wang Q, et al. Deformation and failure characteristic of open-pit slope subjected to combined effects of mining blasting and rainfall infiltration[J]. Engineering Geology, 2024, 331: 107437.

[6] 任喜荣,李欣,周志杰. 等值反磁通瞬变电磁法在金矿采空区探测中的应用[J]. 物探与化探,2023,47(2):540-546.
Ren X R, Li X, Zhou Z J. Application of the opposing coils transient electromagnetic method in investigation of mined-out areas of a gold deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 540-546.

[7] 刘伟,甘伏平,张伟,等. 红层区岩溶塌陷调查地球物理勘探技术应用研究[J]. 地球物理学进展,2015,30(6):2923-2930.
Liu W, Gan F P, Zhang W, et al. Application of geophysical prospecting to Karst collapse in red bed area[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2923-2930.

[8] Harris B D, Wilkes P G, Kepic A. Acquisition of very early time transient electromagnetic data for shallow geotechnical, environmental and hydrogelogical applications [C]//Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2006, Environment and Engineering Geophysical Society, 2006.

[9] 罗术,陈争玉,蓝宇骋,等. 等值反磁通瞬变电磁法探测滑坡堆积体的应用[J]. 物探与化探,2023,47(2):523-529.
Luo S, Chen Z Y, Lan Y C, et al. Application of opposing-coils transient electromagnetics in the detection of landslide deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 523-529.

[10] 牟义,张永超,邱浩,等. 复杂地形小回线瞬变电磁法探测采空区试验研究[J]. 煤矿安全,2023,54(9):156-165.
Mu Y, Zhang Y C, Qiu H, et al. Experimental study on goaf detection by small loop transient electromagnetic method in complex terrain[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(9): 156-165.

[11] Tang H Z, Yang H Y, Lu G Y, et al. Small multi-turn coils based on transient electromagnetic method for coal mine detection[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 169: 165-173.

[12] 杜库实,程久龙,王和固,等. 复杂断层带富水性矿井瞬变电磁法探测研究[J]. 中国矿业,2013,22(11):119-121.
Du K S, Cheng J L, Wang H G, et al. Detection of water enrichment in complex faults by mine transient electromagnetic method [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(11): 119-121.

[13] 徐栓祥,程久龙,董毅,等. 矿井瞬变电磁与红外测温联合超前探测方法与应用[J]. 中国矿业,2019,28(5):136-139,145.
Xu S X, Cheng J L, Dong Y, et al. The ahead detection combined method of the mine transient electromagnetic and infrared surveying and its application[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(5): 136-139, 145.

[14] 胡雄武,张平松,严家平,等. 坑道掘进瞬变电磁超前探水解释方法的改进研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(4):654-661.
Hu X W, Zhang P S, Yan J P, et al. Improvement of means for interpretation of advanced water detection of tunnels by transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 654-661.

[15] Auken E, Foged N, Larsen J J, et al. tTEM—A towed transient electromagnetic system for detailed 3D imaging of the top 70 m of the subsurface[J]. Geophysics, 2019, 84(1): E13-E22.

[16] 薛国强,李貅,底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1195-1200.
Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1195-1200.

[17] 张文波,张莹,李建慧. 地面回线源瞬变电磁法一维反演系统及其应用[J]. 物探与化探,2022,46(5):1258-1266.
Zhang W B, Zhang Y, Li J H. A 1D inversion system of the ground-based loop-source transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1258-1266.

[18] Haber E, Ascher U M, Oldenburg D W. Inversion of 3D electromagnetic data in frequency and time domain using an inexact all-at-once approach[J]. Geophysics, 2004, 69(5): 1216-1228.

[19] Heagy L J, Cockett R, Kang S, et al. A framework for simulation and inversion in electromagnetics[J]. Computers & Geosciences, 2017, 107: 1-19.

[20] 崔焕玉,沈金松,冉尚,等. 基于有限体积法的煤矿巷道瞬变电磁响应二维反演与富水区探测应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2022,52(4):1314-1327.
Cui H Y, Shen J S, Ran S, et al. Application of 2D inversion of transient electromagnetic response and water bearing area detection in coal mine tunnel based on finite volume method[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52 (4): 1314-1327.

Application of the small-loop transient electromagnetic method in detecting open-pit slopes

SHI Li[1], MING Pan[2], GENG Xiao-Ming[3], LU Jun[2], ZHANG Sheng-Xing[2], DONG Mao-Gan[2]

(1. *WSGRI Engineering & Surveying Incorporation Limited.*, *Wuhan* 430000, *China*; 2. *Materials & Structural Engineering Department*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210094, *China*; 3. *Nanjing Qinhuai River Management Office*, *Nanjing* 210012, *China*)

Abstract: To thoroughly understand the geological characteristics of potential concealed structures in open-pit slopes induced by external factors such as mining activities and rainfall, this study conducted field detection tests on open-pit slopes using a small-loop transi-

ent electromagnetic (TEM) system. Field tests demonstrate that the small-loop TEM system exhibited excellent vertical and horizontal resolution, effectively reflecting the electrical characteristics of concealed structures within slopes and the stratification interfaces of lithospheric materials. Accordingly, the small-loop TEM system proved fast and feasible in detecting open-pit slopes. Combined with layered spatially constrained inversion (SCI) technology, surface lithosphere investigations, and geological constraints of strata, the small-loop TEM system can qualitatively and quantitatively interpret the spatial locations and general morphological characteristics of subsurface concealed structures. These interpretations allow for the inference of the material composition and structural properties of the deep lithosphere and the identification of concealed structures in advance, thereby reducing the risk of open-pit slope failure.

Key words: open pit slope; concealed structure; small-loop transient electromagnetic (TEM) method; layered spatially constrained inversion (SCI); lithospheric electrical properties

(本文编辑:王萌)