

基于自然电场与电阻率法的尾矿库渗漏探测数值模拟研究

杜兴忠¹, 谢静², 官俊峰², 崔益安²

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 尾矿库堆存是处置矿山尾矿的常规方案,但尾矿库渗漏严重威胁生态环境。及时查明地下渗漏情况,有助于采取有效的补救方案。笔者基于有限元—无限元耦合法开展数值模拟研究,探究基于直流电阻率法及自然电场法的综合物探技术在尾矿库渗漏探测中的应用效果。研究表明,直流电阻率法和自然电场法能相互结合、验证、补充,能够揭露地下电阻率结构异常,同时能提供渗漏点的位置及深度信息。这些研究可为尾矿库及其它渗漏问题提供数值参考和技术方案指导。

关键词: 尾矿库渗漏; 综合物探; 直流电阻率法; 自然电场法

中图分类号: P631.3 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.08

0 引言

作为一个矿业大国,我国金属和非金属矿山开采发展迅猛,产生的尾矿数量日益增多,存在巨大隐患。截至2013年底,我国尾矿累积贮存量高达146亿吨;截至2015年底,尾矿库数量共计8869座^[1]。目前,较为成熟的尾矿综合利用途径主要包括回采有价成分、充填回填、生产建筑材料等。但有效利用率较低,2018年的调查表明综合利用率为27.1%,而大部分尾矿主要通过建库贮存的方式集中处置^[1]。尾矿通常含有大量污染源,如放射性物质、重金属、化学药剂等。若处理不当,这些污染源可能随雨水或尾矿浆向地下环境渗漏,造成严重的地下水及土壤污染^[2-3]。

尾矿库作为堆积尾矿的处置库,需要采取专门的水平环保防渗措施。但由于施工、养护等各种原因,经常存在防渗土工膜渗漏的情况,导致尾矿库中

的有毒污染物渗入到土壤中,严重威胁当地生态环境和自然资源^[4-5]。实时探测地下潜在的渗漏情况,有助于及时采取有效的补救措施。目前,尾矿库渗漏监测的方案有生物测试法^[6]、同位素示踪法^[7]等。但这些方法实施繁琐,难以开展长期的实时监测。地球物理勘探技术是一种无损探测技术,对地下物性差异有着独特的响应,已成功应用于各种渗漏检测中。如直流电阻率法广泛应用于堤坝隐患探测^[8]、蓄水池渗漏探查^[9]、垃圾填埋场渗漏检测^[10]以及输水管道渗漏探测^[11]等;自然电场法广泛应用于石油储备库场地地下水勘查^[12]以及大坝渗漏路径探测^[13-14]等。考虑到单一物探手段的信息有限,综合物探技术具有显著优势。如姚纪华等^[15]联合流场法、自然电场法以及直流电阻率法探测水库渗漏问题;王旭明等^[16]综合采用充电法、高密度电阻率法和瞬态面波勘探法对垃圾填埋场垃圾挡坝渗漏进行研究;Guo等^[17]通过直流电阻率法和自然电场法成功重构了大坝渗漏通道。以上研究表明,综合

收稿日期: 2022-11-05

基金项目: 中国电建贵阳勘测设计研究院有限公司重大科技项目(YJZD2020-02)

第一作者: 杜兴忠(1973-),男,博士,高级工程师,主要从事工程物探技术研究和应用,E-mail: duxinzhon_gyy@powerchina.cn。

通信作者: 官俊峰(1997-),男,硕士,主要从事环境与工程地球物理相关研究,E-mail: 2941374811@qq.com。

物探技术在各类渗漏检测中的应用效果明显,其中直流电阻率法和自然电场法更是表现出独特优势。

笔者通过数值模拟技术,探究基于主动源直流电阻率法和被动源自然电场法的综合物探技术在尾矿库渗漏检测中的可行性。研究结果表明,本文所提方案有效,能实现尾矿库渗漏的实时精准监测,为及时采取补救措施提供地球物理指导和建议。

1 综合物探技术

地球物理勘探技术通过测量由地下介质间的物性差异引起的地球物理场的分布和变化特征,结合已知地质资料,推断、解释地下物性分布特征^[8-14]。作为一种间接探测技术,单一物探手段的勘探效果较为有限。多种物探方法联合的综合物探技术同时测量多种地球物理场数据,不同方法相互结合、验证、补充,有助于数据解释更精准有效^[15-17]。

1.1 自然电场法

自然电场法作为一种被动源地球物理探测技术,通过在地表、井中或(海)水中测量由电化学、电动和热电机理引发的自然电位异常进而开展相关勘探工作^[18]。自然电位信号与地下水流和电化学梯度有着直接的关联,在各种渗漏问题中表现出独特优势。而污染废液中含有多种离子,在渗漏时将产生流动电位和扩散电动势;且基于负离子、电子的滞后性,通常在渗漏点下游积累正电荷,上游积累负电荷,这是开展自然电场法探测渗漏问题的基础。同时,自然电场法具有测点布设灵活、仪器设备简便、测量方法简单、数据处理方便、能快速有效提取自然电位异常信息的特点,在工程与环境地球物理领域广泛应用^[18]。

在自然电场法中,通常假定地下电阻率结构已知,进而主要研究自然电场源的地表异常响应特征。地下电阻率信息通常由直流电阻率法或电磁法确定,尤其以直流电阻率法为主^[17]。

1.2 直流电阻率法

直流电阻率法作为一种主动源地球物理探测技术,通过接地电极向地下供电,建立稳定的地下人工电场,然后在地表通过电测深法或剖面法观测地下电阻率变化,获得地下电阻率结构分布特征^[19]。开展直流电阻率法的目的是在低阻地层中探测高阻异常体或是在高阻地层中探查低阻结构,尾矿处置库渗漏形成的低阻异常区^[20]是开展直流电阻率法的勘探基础。

在直流电阻率法中,在强供电电流的影响下,可忽略地下原本存在的自然电流源分布,此时研究对象为地下电阻率结构。不同于自然电场法,直流电阻率法需要多次移动供电电源,以通过特定的排列方式计算地下各点的视电阻率分布。

1.3 稳定电流场基本方程

在麦克斯韦准静态极限条件下,自然电场和直流电场均满足稳定电流场基本方程。在笛卡尔坐标系 (x, y, z) 中,假定三维电导率模型 $\sigma(x, y, z)$,自然电场源或人工电源 \mathbf{I} 位于点 (x_I, y_I, z_I) 处,则空间中任意点的电位 $u(x, y, z)$ 满足的偏微分方程可表示为^[21]:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla u(x, y, z)] = -\mathbf{I} \delta_I \quad (1)$$

其中 δ 为狄拉克函数,在场源点处为1,其余地方为0。在地表边界处,电流受限于地表流动,故电位满足 Neumann 边界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (2)$$

在截断边界处,常采用混合边界条件以提高计算精度:

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} + \frac{\cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{|\mathbf{r}|} u = 0 \quad (3)$$

其中 \mathbf{n} 是外边界法向量, \mathbf{r} 是由电源点指向外边界的径向向量。

方程(1)、(2)、(3)所描述的场值分布即为稳定电流场满足的边值问题。求解该边值问题的常规方案是将其转换为等价的变分问题,然后采用数值模拟算法求解。与上述边值问题等价的变分问题可表示为^[19]:

$$\begin{cases} V(u) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 - \mathbf{I} \delta_I u \right] d\Omega \\ \quad + \int_{\Gamma_{\infty}} \frac{1}{2} \sigma \frac{\cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{|\mathbf{r}|} u^2 d\Gamma \\ \delta V(u) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 有限元—无限元耦合法

为避免因电源移动而引起总刚度矩阵多次更新,本文采用有限元—无限元耦合法^[22]提高计算精度及效率,其中无限单元充当边界单元以处理截断边界问题。有限元—无限元耦合法广泛应用于岩土工程力学等领域,近年来在地球物理领域尤其是在自然电场法^[22]、直流电阻率法^[23]以及电磁法^[24]数值模拟研究中得到特别关注。

有限元—放射状单向映射无限元的空间耦合如

图 1 所示,其中模型中部核心区域采用常规六面体有限单元剖分模型,四周及底部采用放射状单向映射无限单元作为边界条件。

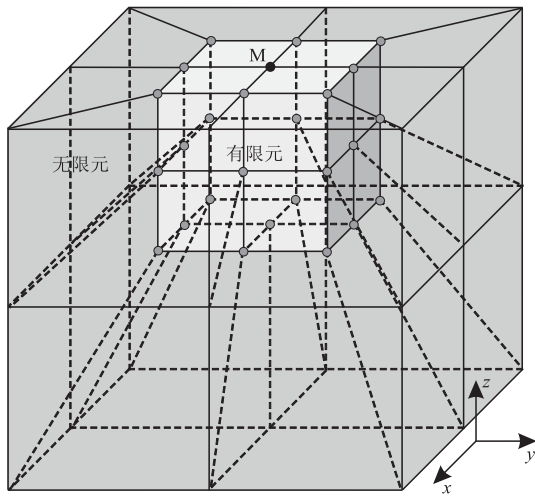


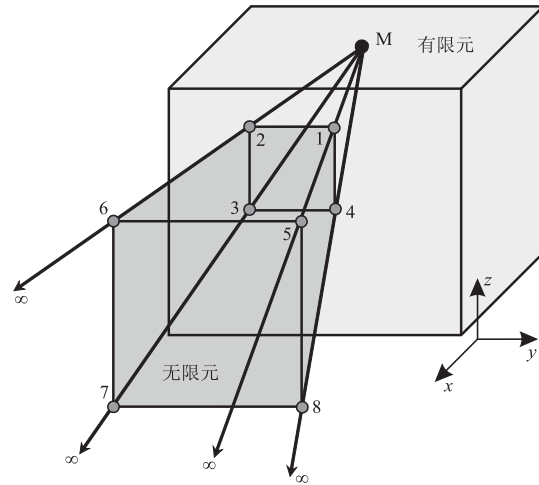
图 1 三维有限元—放射状单向映射六面体无限元耦合空间示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coupled structure of 3D finite elements and radial-unidirectional-mapping infinite elements

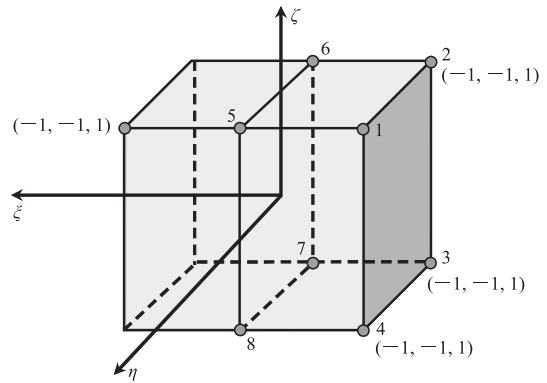
该型无限元的坐标映射过程如图 2 所示:从映射原点 M 出发,穿过有限元区域的截断边界 1234 的四个节点 1、2、3、4,再分别经过无限元中间节点 5、6、7、8 进而延伸至无穷远(图 2(a));坐标映射过程通过映射函数将空间呈放射状单向无限延伸的四棱柱映射为局部空间边长为 2 的规则六面体(如图 2(b));其中有限元区域边界面 1234 也是无限单元的映射起始面,面 5678 为无限单元的中间节点面,可通过点 M 到面 5678 的垂向距离来控制电位在无限单元中的衰减程度;无穷远的四个节点电位值为零,无需考虑。

映射无限元采用的映射技术类似于有限单元中的等参变换,通过映射函数将形状不规则的无限元转换成规则的、利于积分的、有限的单元,进而可以将其直接融入到有限元程序中。设定局部坐标 ξ 的正向指向无穷远,则母单元中任意点的空间坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^8 M_i(\xi, \eta, \zeta) x_i = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \dots + M_8 x_8 \\ y = \sum_{i=1}^8 M_i(\xi, \eta, \zeta) y_i = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_8 y_8 \\ z = \sum_{i=1}^8 M_i(\xi, \eta, \zeta) z_i = M_1 z_1 + M_2 z_2 + \dots + M_8 z_8 \end{cases} \quad (5)$$



(a)子单元



(b)母单元

图 2 放射状单向映射无限元映射过程

Fig. 2 The mapping process of radial-unidirectional-mapping infinite elements

其中 $x_1, x_2, \dots, x_8, y_1, y_2, \dots, y_8, z_1, z_2, \dots, z_8$ 为子单元各节点的空间坐标, M_i 为映射函数,表达式为:

$$\begin{cases} M_1 = -\frac{\xi(1+\eta)(1+\zeta)}{2(1-\xi)} \\ M_2 = -\frac{\xi(1-\eta)(1+\zeta)}{2(1-\xi)} \\ M_3 = -\frac{\xi(1-\eta)(1-\zeta)}{2(1-\xi)} \\ M_4 = -\frac{\xi(1+\eta)(1-\zeta)}{2(1-\xi)} \\ M_5 = \frac{(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta)}{4(1-\xi)} \\ M_6 = \frac{(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)}{4(1-\xi)} \\ M_7 = \frac{(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)}{4(1-\xi)} \\ M_8 = \frac{(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)}{4(1-\xi)} \end{cases} \quad (6)$$

母单元中任意点的电位插值满足:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) u_i \quad (7)$$

其中 N_i 为放射状单向映射无限元形函数,表达式为:

$$\begin{cases} N_1 = -\frac{\xi(1-\xi)^2(1+\eta)(1+\zeta)}{16} \\ N_2 = -\frac{\xi(1-\xi)^2(1-\eta)(1+\zeta)}{16} \\ N_3 = -\frac{\xi(1-\xi)^2(1-\eta)(1-\zeta)}{16} \\ N_4 = -\frac{\xi(1-\xi)^2(1+\eta)(1-\zeta)}{16} \\ N_5 = \frac{(1-\xi^2)(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)}{8} \\ N_6 = \frac{(1-\xi^2)(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)}{8} \\ N_7 = \frac{(1-\xi^2)(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)}{8} \\ N_8 = \frac{(1-\xi^2)(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)}{8} \end{cases} \quad (8)$$

无限单元体积系数矩阵的求解过程与有限单元类似,区别在于求解雅可比坐标变换矩阵时,有限单元中采用的是形函数,而无限单元中采用映射函数。无限单元中雅可比矩阵表达式为:

$$\begin{aligned} [J] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^8 \begin{bmatrix} \frac{\partial M_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial M_i}{\partial \eta} y_i & \frac{\partial M_i}{\partial \zeta} z_i \\ \frac{\partial M_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial M_i}{\partial \eta} y_i & \frac{\partial M_i}{\partial \zeta} z_i \\ \frac{\partial M_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial M_i}{\partial \eta} y_i & \frac{\partial M_i}{\partial \zeta} z_i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial M_1}{\partial \xi} & \frac{\partial M_2}{\partial \xi} & \dots & \frac{\partial M_8}{\partial \xi} \\ \frac{\partial M_1}{\partial \eta} & \frac{\partial M_2}{\partial \eta} & \dots & \frac{\partial M_8}{\partial \eta} \\ \frac{\partial M_1}{\partial \zeta} & \frac{\partial M_2}{\partial \zeta} & \dots & \frac{\partial M_8}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_8 & y_8 & z_8 \end{bmatrix} \quad (9) \end{aligned}$$

将变分方程(4)中的积分分解到各剖分子单元中,通过单元分析计算得到各积分网格对应的子刚度矩阵,然后将所有子刚度矩阵按节点编号扩展累加形成总刚度矩阵,最后基于变分为零的条件获得线性方程组:

$$Ku = I \quad (10)$$

其中 K 为总刚度矩阵, u 为待求电位向量, I 为源向量。由于 K 是稀疏、对称、正定的,这里采用基于不完全 LU 分解的稳定双共轭梯度法求解方程组(10)。所有计算基于个人笔记本电脑 i7-10710U CPU@1.10 GHz~1.61 GHz, Matlab 2021b。

3 数值算例

3.1 算法验证

通过层状电阻率解析解模型验证有限元—无限元耦合法计算精度及效率。如图 3 所示,以 K 型三层水平电阻率模型为例,设定模型尺度为 150 m × 60 m × 50 m,其中第一层厚度为 5 m,电阻率为 50 Ω · m;第二层厚度为 5 m,电阻率为 100 Ω · m;第三层电阻率为 10 Ω · m。采用对称四极测深装置进行观测,其中测点 M 和 N 位于地表中心,极距为 1 m。逐点移动供电电极 A 和 B 并保持 AM = BN。耦合法(CM)和有限单元法(FEM)的数值模拟结果及其相对于数值滤波解析解(NFS)^[23]的误差分布(RE)如表 1 所示。计算结果表明:①有限元—无限元耦合法具有较高的计算精度,且在电源靠近模型边界时仍能保持高精度;②引入无限单元后,总刚度矩阵与场源分布不再相关,在需要多次计算的剖面测量或测深研究中计算效率更高。在本模型中,基于矩阵矢量化计算方案只需 30 s 即可获得总刚度矩阵。

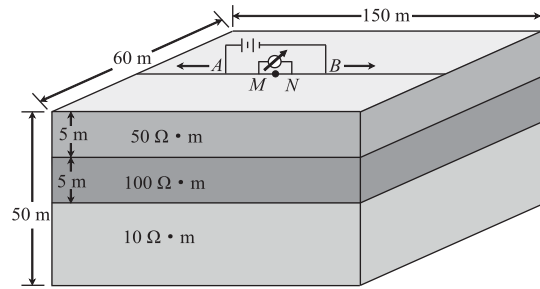


图 3 层状电阻率模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layered resistivity model

表 1 数值模拟结果精度对比

Tab. 1 Accuracy comparison of different numerical simulations

AB/2 /m	NFS /Ω · m	CM /Ω · m	RE /%	FEM /Ω · m	RE /%
1	50.02	49.24	-1.56	49.24	-1.56
2	50.18	48.90	-2.55	48.90	-2.55
3	50.54	49.95	-1.17	49.95	-1.17
5	51.89	51.85	-0.08	51.87	-0.04
7	53.52	53.55	0.06	53.59	0.13
9	54.63	54.67	0.07	54.76	0.24
11	54.75	54.80	0.09	54.94	0.35
15	51.96	51.98	0.04	52.34	0.73
20	44.95	44.97	0.04	45.77	1.82
25	37.10	37.12	0.05	38.58	3.99
33	26.64	26.71	0.26	29.65	11.30
45	17.50	17.74	1.37	23.75	35.71
65	12.20	12.61	3.36	25.56	109.51

3.2 尾矿库渗漏模型

尾矿库通常在山谷口、河道或洼地附近筑坝,电阻率模型示意图如图 4 所示。数值模型尺度设为 $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 50\text{ m}$;四周及底部为围岩或浇筑体,电阻率设定为 $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$;中部为填埋区,从上往下依次为:A 区域—已堆尾矿,设厚度为 15 m ,电阻率为 $400\ \Omega \cdot \text{m}$;B 区域—水平防渗层,视为高阻体,电阻率设为 $10\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$,影响厚度为 1 m ;C 区域—填充层,设厚度为 25 m ,电阻率为 $400\ \Omega \cdot \text{m}$ 。潜在的渗漏点位于 B 层,呈低阻特性,电阻率设为 $1\ \Omega \cdot \text{m}$,且设定一个渗漏基本点造成的低阻影响范围为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 。

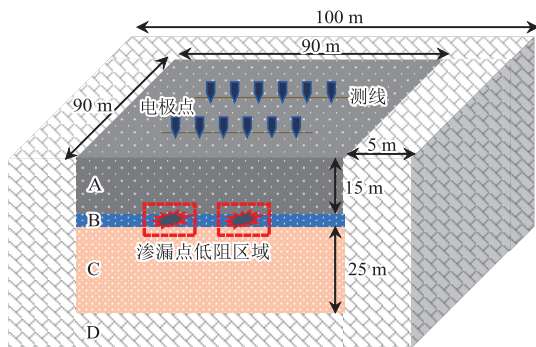


图 4 尾矿库电阻率模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tailings pond resistivity model

设渗漏模型中部有两个渗漏基本点,沿长轴方向分布,相距 20 m 。直流电阻率法沿长轴布设主测线,测线长度为 80 m ;采用偶极—偶极排列计算视电阻率断面图,电极距为 1 m 。自然电场法在不同填埋深度采用均匀分布的电极网络开展测量,以电流强度为 10 mA 的偶极子模型近似模拟渗漏点的电荷分布特征;采用电位法观测自然电位分布情况。数值模拟结果分别如图 5、6 所示。

基于视电阻率剖面数值模拟结果,无渗漏模型在填埋深部表现出高阻特性,即高阻土工膜阻碍电流向深部流动;而当防渗膜存在渗漏点时,所形成的低阻区域重构了地下导电结构,吸引电流向渗漏区域流动;直流电阻率法视电阻率剖面成像能较为清晰地识别低阻异常区域的分布范围。

基于自然电位切片数值模拟结果,渗漏模型在渗漏点上方区域产生自然电位负异常。靠近地表时,不同渗漏点产生的电位异常相互叠加,呈现一个模糊轮廓;随着靠近渗漏点,负异常强度明显增加,不同渗漏点的叠加效果变弱,单异常贡献趋于清晰。

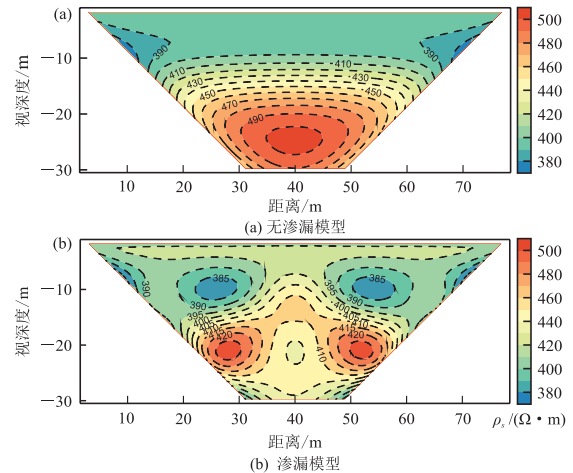


图 5 主测线视电阻率剖面

Fig. 5 Apparent resistivity profile on the main survey line $\rho_s (\Omega \cdot \text{m})$

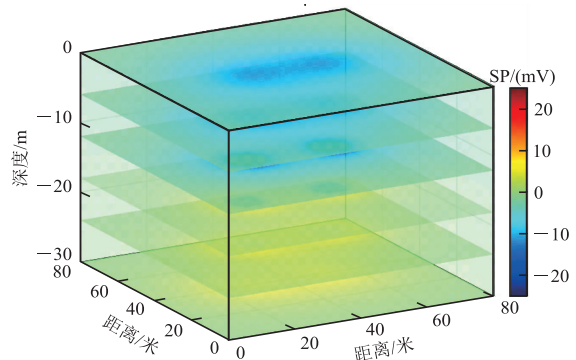


图 6 不同深度的自然电位分布切片

Fig. 6 Slices of self-potential (SP) distribution at different depths

4 结论

笔者基于直流电阻率法和自然电场法,采用数值模拟手段探究综合物探技术在尾矿库渗漏检测中的应用效果。数值结果表明,地表自然电场法能定性判断地下渗漏的存在性,但无法获得有效的深度信息,且对不同渗漏点的精准定位效果较差;而深部的自然电位数据能清晰识别渗漏点的分布特征,表现出平面精准定位特点。直流电阻率法能有效反映地下电阻率异常结构,对渗漏区域的低阻特性有着较为明显的揭示,同时能提供异常点的深度信息。

直流电阻率法实施效率较低,而自然电场法具备较强的现场测量优势。联合直流电阻率法和自然电场法的综合物探技术在尾矿库渗漏调查中是有效的。其中自然电场法可用于开展前期的大面积初

勘,对潜在的目标区域进行快速定位,并辅助验证、补充、解释;同时,为及时获得地下渗漏情况并避免地表测量的低分辨率,可于填埋初期在防渗膜附近预铺设非极化电极网络,用于实时监测地下渗漏情况,有效识别潜在渗漏点的分布特征。直流电阻率法能直观反映电阻率异常的空间分布特征,可在基于自然电场法圈定的潜在异常区域进行更具针对性的探测工作,提高有效性。综上所述,自然电场法与直流电阻率法相结合的综合物探技术是开展尾矿库渗漏探测的有效技术方案。

参考文献:

- [1] 王硕,田祎,叶旌,等. 国内外尾矿管理制度比较研究和展望[J]. 中国环境监测, 2020, 36(6): 29-35.
WANG S, TIAN Y, YE J, et al. Comparative research and prospect of domestic and foreign tailing management system[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(6): 29-35. (In Chinese)
- [2] 杨久流. 尾矿中有价矿产资源的综合回收与利用[J]. 有色金属, 2002(3): 86-89.
YANG J L. Comprehensive recovery of useful minerals from tailings[J]. Nonferrous Metals, 2002(3): 86-89. (In Chinese)
- [3] 沈楼燕,张书滨. 论矿山尾矿库垂直防渗系统的适用性及经济性[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(5): 73-75.
SHEN L Y, ZHANG S B. Applicability & economical efficiency of vertical anti-seepage system for mine tailings pond[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2009, 61(5): 73-75. (In Chinese)
- [4] GUEDRON S, COSSA D, GRIMALDI M, et al. Methylmercury in tailings ponds of Amazonian gold mines (French Guiana): Field observations and an experimental flocculation method for *in situ* remediation [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(2): 222-229.
- [5] 初娜,赵元艺,张光弟,等. 江西省德兴铜矿矿区重金属元素的环境效应[J]. 地质学报, 2008, (4): 562-576.
CHU N, ZHAO Y Y, ZHANG G D, et al. Environmental effect of heavy metal elements in Dexing copper mine, Jiangxi Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, (4): 562-576. (In Chinese)
- [6] SHIN K H, KIM J Y, KIM K W. Earthworm toxicity test for the monitoring arsenic and heavy metal-containing mine tailings[J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24(9): 1257-1265.
- [7] GHOMSHEI MM, ALLEN D M. Hydrochemical and stable isotope assessment of tailings pond leakage, Nickel Plate Mine, British Columbia[J]. Environmental Geology, 2000, 39(8): 937-944.
- [8] 孙礼钊,郑琳,包伟力. 高密度电阻率法在某水库南堤渗漏探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(5): 574-579.
SUN L Z, ZHENG L, BAO W L. The application of high-density resistivity method to leakage detection in Nan Dam of one reservoir[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(5): 574-579. (In Chinese)
- [9] 张赓,庾先国,汪楷洋,等. 高密度电阻率法在蓄水池渗漏原因调查中的应用[J]. 工程勘察, 2013, 41(8): 92-95.
ZHANG G, TUO X G, WANG K Y, et al. Application of high density resistivity method in the cause investigation of reservoir leakage[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(8): 92-95. (In Chinese)
- [10] 刘国辉,徐晶,王猛,等. 高密度电阻率法在垃圾填埋场渗漏检测中的应用[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 680-683.
LIU G H, XU J, WANG M, et al. The application of high-density resistivity method to landfill leakage detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 680-683. (In Chinese)
- [11] 张巍,周瑜琨,刘立岩,等. 高密度电阻率法在南水北调输水管道渗漏探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(3): 322-329.
ZHANG W, ZHOU Y K, LIU L Y, et al. Application of high density resistivity method in leakage detection of water pipeline of south-to-north water diversion project[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(3): 322-329. (In Chinese)
- [12] 刘加文,王治军,杜志伟. 自然电场法在场地地下水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(5): 612-615.
LIU J W, WANG Z J, DU Z W. Application of natural electric field in site groundwater exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(5): 612-615. (In Chinese)
- [13] GUIRELI NETTO L, MALAGUTTI FILHO W, GANDOLFO O C B. Detection of seepage paths in small earth dams using the self-potential method (SP) [J]. REM - International Engineering Journal, 2020, 73(3): 303-310.
- [14] SOUEID AHMED A, REVIL A, BOLEVE A, et al. Determination of the permeability of seepage flow

- paths in dams from self-potential measurements[J]. *Engineering Geology*, 2020, 268: 105514.
- [15] 姚纪华, 罗仕军, 宋文杰, 等. 综合物探在水库渗漏探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2020, 44(2): 456-462.
- YAO J H, LUO S J, SONG W J, et al. The application of comprehensive geophysical exploration method to leakage detection of a reservoir[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(2): 456-462. (In Chinese)
- [16] 王旭明, 马若龙, 刘现锋, 等. 综合物探技术在垃圾填埋场渗漏探测中的应用研究[J]. *工程地球物理学报*, 2021, 18(6): 903-910.
- WANG X M, MA R L, LIU X F, et al. Application of integrated geophysical prospecting technology in the landfill leakage detection[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2021, 18(6): 903-910. (In Chinese)
- [17] GUO Y J, CUI Y A, XIE J, et al. Seepage detection in earth-filled dam from self-potential and electrical resistivity tomography[J]. *Engineering Geology*, 2022, 306: 106750.
- [18] XIE J, CUI Y A, LIU J X, et al. A review on theory, modeling, inversion, and application of self-potential in marine mineral exploration[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33: 1214-1232.
- [19] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- XU S Z. *Finite Element Method for Geophysics*[M]. Beijing: Science Press, 1994. (In Chinese)
- [20] 肖筱瑜, 张静, 李薏, 等. 某尾矿库渗漏原因调查及污染防治措施分析[J]. *矿产与地质*, 2014, 28(2): 246-248.
- XIAO X Y, ZHANG J, LI H, et al. Investigation of causes of leakage of a certain trailing pond and analysis on pollution control measures[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2014, 28(2): 246-248. (In Chinese)
- [21] LI Y G, SPITZER K. Three-dimensional DC resistivity forward modelling using finite elements in comparison with finite-difference solutions[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 151(3): 924-934.
- [22] XIE J, CUI Y A, FANIDI M, et al. Numerical modeling of marine self-potential from a seafloor hydrothermal ore deposit[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 178(5): 1731-1744.
- [23] 汤井田, 公劲喆. 三维直流电阻率有限元—无限元耦合数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(3): 717-728.
- TANG J T, GONG J Z. 3D DC resistivity forward modeling by finite-infinite element coupling method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(3): 717-728. (In Chinese)
- [24] 张林成, 汤井田, 任政勇, 等. 基于二次场的可控源电磁法三维有限元—无限元数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(9): 3655-3666.
- ZHANG L C, TANG J T, REN Z Y, et al. Forward modeling of 3D CSEM with the coupled finite-infinite element method based on the second field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(9): 3655-3666. (In Chinese)

Numerical study on leakage detection of tailings pond by self-potential and DC resistivity methods

DU Xingzhong¹, XIE Jing², GUAN Junfeng², CUI Yian²

(1. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Tailings storage is a conventional way of disposal, but tailings leakage seriously threatens the ecological environment. Timely detection of underground leakage is essential for designing efficient remediation strategies. In this paper, we conducted a numerical simulation study by the finite-infinite element coupling method, which aimed to explore the feasibility of the integrated geophysical prospecting technology based on DC resistivity and self-potential methods in tailings pond leakage detection. The results show that the two electrical exploration techniques can be combined, verified, and complementary. This combination reveals structural anomalies in resistivity and provides information on the location and depth of potential leaks. Our work provides numerical reference and technical scheme guidance for tailings ponds and other leakage problems.

Keywords: tailings pond leakage; integrated geophysical prospecting; DC resistivity; self-potential