

# 露天矿台阶对高密度电法勘探的影响研究

宋文江 张云松 赵化君

内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院 内蒙古包头 014010

**摘要:** 露天矿边坡稳定性评估是预防边坡事故发生的基本手段,物探数据被其视为重要依据。然而在台阶地形进行高密度电法勘探时会导致反演成果出现畸变,对露天矿的边坡稳定性评估造成影响。传统的地球物理勘探理论和反演方法主要基于水平大地的假设。在测线垂直方向上,上述校正方法将地形视为测线方向地形的延伸。露天金属矿台阶上布置测线时,虽然测线是水平的,但其垂直方向的地形却呈台阶状。由于地形的影响,垂直于测线方向的断面内的电流线不再是均匀分布的射线,而是朝着某些方向发生弯曲,这种弯曲现象最终导致测量结果的畸变。本文将通过水槽实验具体探究台阶地形对高密度电法勘探的影响。

**关键词:** 高密度电法勘探; 相似材料模拟实验; 台阶地形

## Study on the impact of open pit benching on high density electrical exploration

Wenjiang Song Yunsong Zhang Huajun Zhao

College of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia

**Abstract:** The stability assessment of open-pit mine slopes is a fundamental means of preventing slope accidents, and geophysical data is considered an important basis for such assessments. However, conducting high-density electrical resistivity surveys in stepped terrains can lead to distorted inversion results, affecting the slope stability assessment of open-pit mines. Traditional theories and inversion methods for geophysical exploration are primarily based on the assumption of a horizontal ground surface. In the vertical direction along the survey lines, the aforementioned correction methods consider the terrain as an extension of the line direction. When survey lines are laid out on stepped terrains in open-metal mines, although the lines are horizontal, the vertical terrain exhibits a stepped shape. Due to the influence of the terrain, the current lines within the cross-section perpendicular to the survey lines are no longer uniformly distributed rays but curve in certain directions. This bending phenomenon ultimately distorts the measurement results. This paper will explore the specific impact of stepped terrains on high-density electrical resistivity surveys through a tank experiment.

**Keywords:** High-density electrical exploration; Simulation experiment of similar materials; Step relief

### 引言

随着露天采矿工程不断深入开发,边坡高度逐年上升,而边坡稳定性问题也日益凸显。如今边坡已经成为了影响矿山安全生产的关键问题之一。因此,对露天矿边坡的稳定性进行深入研究显得至关重要。

近年来,各领域学者在高密度电法勘探的物理模拟与数值模拟方面做了大量研究:日本 Takeshi 究分析了地形起伏中圆柱形包裹体的电响应,发现凸起区的电场完全非线性,且受凸起宽高及电阻率和充电性差异影响。校正地形效应后,测量结果与等效平坦半空间相似<sup>[1]</sup>。我国徐世浙等优秀学者曾采用导电纸 2-D 模拟、水槽 2-D 模拟等物理模拟方法地形对电法勘探的影响。任光明等对顺层滑坡进行了物理模拟,对其成因进行了分析探讨<sup>[2]</sup>。吴小平等针对起伏地形下的有限差分电阻率/激发极化 3-D 正演技术与反演技术的研究<sup>[3]</sup>。杨海斌等研究起伏地形对航空电磁响应影响,采用二维 (DFD) 计算电磁场分布,使用双共轭梯度法求解复线性

方程。设计山脊和山谷地形,比较坡度对响应影响。提出线性校正方法,简单快速,准确指示地下异常<sup>[4]</sup>。冯郁对稳定电流场进行了系统的论述,即稳定电流场是由稳定的电流在空间中形成的电场分布<sup>[5]</sup>。

本文以针对露天矿台阶地形对高密度电法勘探的截面电流密度以及其对反演结果的影响等关键问题,采用水槽实验室的方法,开展露天矿台阶地形对高密度电法勘探的影响研究。

### 一、台阶地形水槽模拟实验及方案

#### 1. 水槽模型建立

相对于其他模拟方法,水槽模拟有以下几个优势:成本低廉、易于控制实验条件、提高实验精度、增强可视化效果等。水槽模拟所需要的材料和设备比较简单,可以在实验室中进行,不需要太大的场地和设备。设在野外实际条件下,地下有  $n$  个形状、大小和导电性不同的地质体,其电阻率分别为  $\rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots \rho_n$ , 这时地面任意两点 M, N 间的电位差  $\Delta$

U, 可表示为:

$$\Delta U = \Delta U_0 [1 + F(\mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n, G)]$$

式中  $\Delta U$  为地表水平、地下均匀、各向同性介质情况下的电位差;  $\mu$  为与各地质体几何, 形状、大小、埋深、电极位置及地形起伏等因素有关的几何参数;  $\mu$  为相对电阻率参数:

$$\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \mu_3 = \frac{\rho_3}{\rho_1}, \dots, \mu_n = \frac{\rho_n}{\rho_1}$$

其中  $\rho_2, \rho_3 \dots \rho_n$  表示地电体的电阻率,  $\rho_1$  表示其周围介质的电阻率。当各电性不均匀体的电阻率比值参数  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3 \dots \mu_n$  与各长度因素的相对比值或几何参数  $G$  保持不变时,  $\frac{\Delta U}{\Delta U_0}$  保持恒定, 这意味着, 通过在实验室中建造一个缩小比例尺的物理模型, 并在其中进行观测, 可以获得与野外实际情况相同的电场变化特征。通过稳定电流场物理模拟, 可以在实验室环境中研究地下地质体对电阻率测量的影响, 从而优化高密度电法勘探的参数设置和解释结果。这种方法在地质勘探、地下水资源管理、土壤污染评估等领域具有广泛的应用价值。本试实验所用仪器为 (DUK-2B), 如图 1 所示。



图 1 高密度电法仪器 DUK-2B

水槽实验模型根据露天矿台阶地形进行 1: 200 比例缩放。如图 2 所示。该在其中设置板状高阻异常体模拟实际勘探中的板状空洞或破碎带。



图 2 水槽模拟装置

## 2. 实验方案与结果

为了研究地形对高密度电法勘探反演结果的影响规律, 本文分别设置高阻异常体在台阶地形下的实验, 并将反演结果进行对比分析。台阶地形含高阻或低阻地层实验模型参数设置:

按照 1: 200 的比例制作 50cm×64cm×150cm 的水槽, 考虑水槽壁厚, 上下两平台高差为 32cm, 水槽断面图如图。准备万用表、直流稳压电源 HY3005B、DUK-2B 高密度电法仪等。在水槽模型的清扫平台上布置了 30 根电极, 每根电极之间的间隔为 5cm。这些电极的设置有助于在水槽模型中模拟实际地下勘探场景。接着在水槽中注入自来水, 以模拟地下岩石和矿产资源的背景电场。

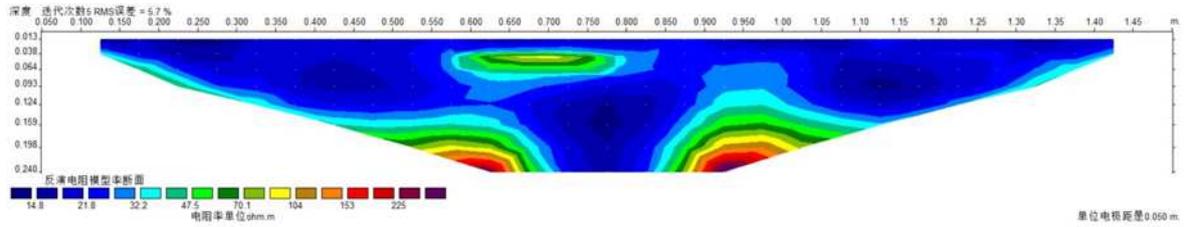
高阻异常体或者低阻异常体在实际勘探中通常代表着地层中的裂隙、空洞、含水层等, 这些异常体的存在时刻威胁着露天矿边坡的安全, 为了进一步探究台阶地形下异常体的反演规律, 本次实验设置了含有高阻异常体实验进行观察并总结分析反演规律。

表 1 高阻体位置角度影响实验参数

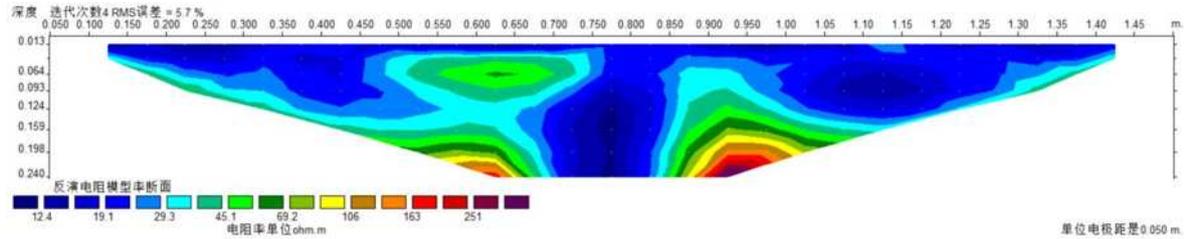
电阻异常体/编号	测线正下方距离/角度
高阻体 (G-2)	2cm
高阻体 (G-5)	5cm
高阻体 (G-8)	8cm

表 2 高阻体位置角度影响实验参数

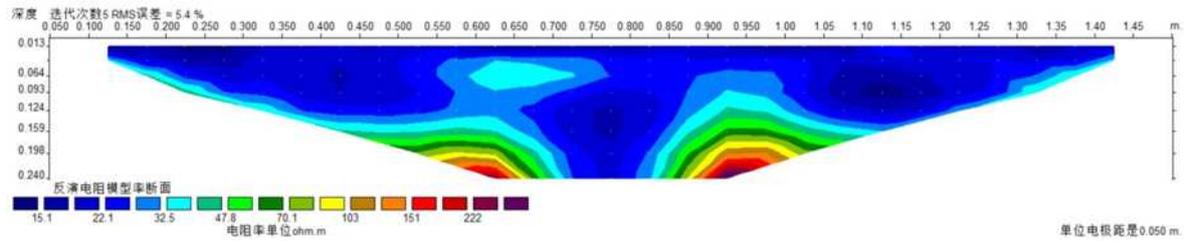
电阻异常体/编号	测线正下方距离/角度
高阻体 (G-5-10)	5cm/10°
高阻体 (G-5-20)	5cm/20°
高阻体 (G-5-30)	5cm/30°



(a) 埋深 2cm

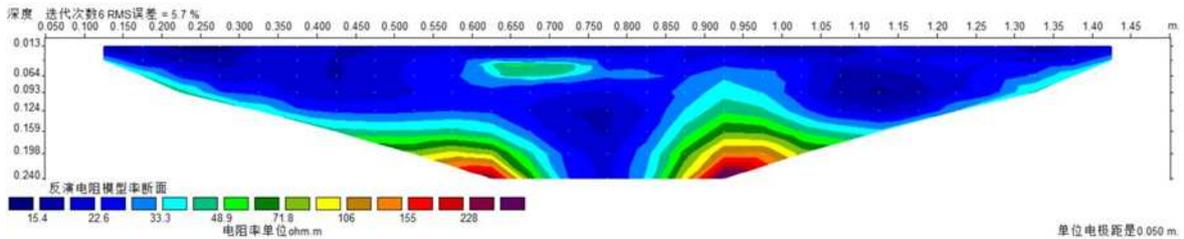


(b) 埋深 5cm

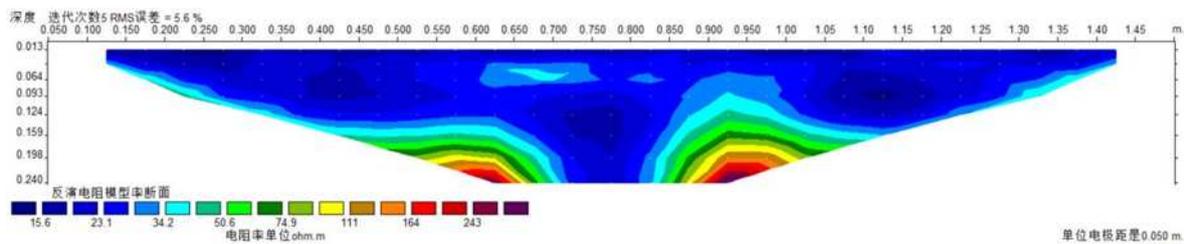


(c) 埋深 8cm

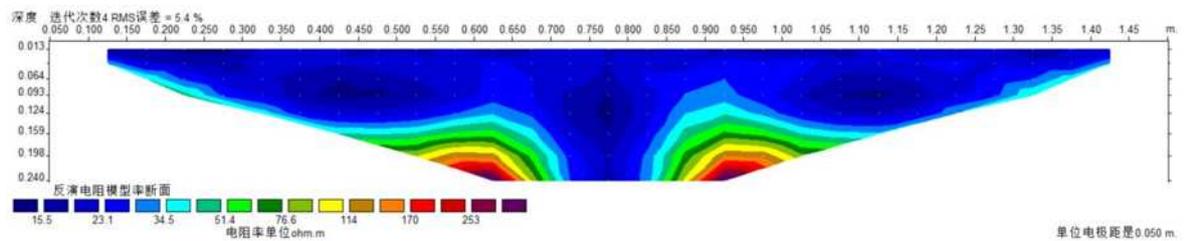
图 3 高阻体埋深反演图



(a) 偏移 10°



(b) 偏移 20°



(c) 偏移 30°

图 4 高阻体角度偏移反演图

## 二、实验结果分析

图(3)中高阻体距离测线较近时,测量到的电场异常较为明显,表现为异常曲线的幅度较大。反演结果中,高阻体的位置和形状较为准确,可靠性高。

随着高阻体逐渐远离测线,测量到的电场异常逐渐减弱。异常区域的横坐标由 0.45m-0.75m 逐步缩小为 0.55m-0.75m,异常曲线的幅度减小,但仍可辨识。此时,反演结果中,高阻体的位置和形状略有偏差,但整体趋势仍可辨认。当高阻体距离测线较远时,电场异常被背景电场掩盖,导致异常曲线的幅度接近零。此时,反演结果中高阻体的位置和形状辨识难度加大,可靠性降低。

图(4)中当异常体(无论高阻或低阻)位于测线正下方时,反演图上的异常区域会明显地出现在测线中心位置。随着异常体向坡面内侧方向偏移,反演图上的异常区域也会相应地偏离测线中心位置。由于电法勘探具有较低的横向分辨率,随着异常体(无论高阻或低阻)向坡面内侧方向偏移,反演图上的异常区域形状会出现扭曲或变形。这种情况在异常体较远离测线时更为明显。

## 三、结论

(1)无论是平面地形还是台阶地形的实验,随着高阻异常体或低阻异常体远离测线,高密度电法勘探的准确性与可靠性就会变差。可以实验反演图清晰的看到这一现象,由

于台阶地形的电流路径更复杂,特别是靠近台阶转折部分。从而导致电阻率异常的扩散和失真。而在平面地形中,电流路径相对简单,可以更容易获得清晰的电阻率分布。

(2)在同一距离测线距离下,电性异常体向测线坡面内侧方向偏移的角度越小,探测结果越好。本次实验设置了 10°~50° 的分组实验,从实验反演图来看,偏移的角度越小对电流线的扰乱越大,反演结果也越明显。在台阶地形的 30° 后的反演图就难以识别电性异常体的存在。

## 参考文献:

- [1]Takeahi K. The topographic effect on resistivity curves[J]. Geophysical Exploration (Butsuri-Tansa), 1952, 5, 178-182.
- [2]徐世浙,汪晓东. 起伏地形下二维电阻率异常的反演[J]. 地质与勘探, 1987(7):63.
- [3]吴小平. 起伏地形条件下电阻率/激发激化三维正反演[D]. 中国科技大学项目设计, 2001.
- [4]杨海斌,梁潇,常凯,等. 频域航空电磁法地形影响及校正研究[J]. 世界地质, 2013, 32 (2):379-383.
- [5]冯郁. 论稳定电流场[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 1984(02):39-43.

作者简介:宋文江(1997-),男,内蒙古科技大学安全工程专业在读硕士研究生,主要研究方向为露天矿边坡灾害源探测等。