

## 地质勘探

# 基于瞬变电磁和地震反射波法的竖井超前探查研究及应用

## Research and Application of Shaft Advance Detection Using Transient Electromagnetic and Seismic Reflection Methods

孙智杰<sup>1</sup>, 高志友<sup>2</sup>, 贾瀚文<sup>3</sup>, 曾国志<sup>2</sup>, 王元魁<sup>1</sup>, 李晓旭<sup>2</sup>, 李冬<sup>1</sup>, 杜琳琳<sup>2</sup>

(1. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 烟台 261400; 2. 山东省地矿工程集团有限公司, 山东 济南 250100;

3. 山东黄金矿业股份有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要:**井下突水是井筒施工过程中重点防范的灾害之一。为了防止突水事故的发生,在超深竖井掘进过程中,应当加强竖井超前探查。以三山岛超深竖井1464.5 m处超前探测为例,采用瞬变电磁法及地震反射波法探查掘进工作面含水裂隙带分布。根据工作面条件设置了瞬变电磁法和地震反射波法的观测系统,现场采集数据并经过数据处理绘制了成果图,结合现场地质及水文资料,在1492.5~1507.5 m和1517.5~1529.5 m出现明显的低阻异常区及波阻抗界面,圈定上述异常区,推断该异常区为含水裂隙带。现场工程揭露与探测结果相吻合,说明瞬变电磁法与地震反射波联合探测法可以实现超深竖井的超前探查。

**关键词:**超深竖井; 富水性区域; 瞬变电磁法; 地震反射波法

**中图分类号:** TD163

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-609X(2025)06-0076-07

**Abstract:** Water inrush in shafts is one of the key disasters to be prevented during shaft construction. To avert water inrush accidents, advance detection in shafts must be enhanced during the excavation of ultra-deep shafts. Taking the advance detection at the 1464.5 m depth of the Sanshandao ultra-deep shaft as an example, the Transient Electromagnetic (TEM) method and the seismic reflection method were employed to detect the distribution of water-bearing fracture zones in the excavation face. Survey systems for both TEM and seismic reflection were set up according to the face conditions. Field data were acquired, processed, and visualized into result maps. Integrated with on-site geological and hydrogeological data, distinct low-resistivity anomalies and wave impedance interfaces were identified within the depth ranges of 1492.5 m to 1507.5 m and 1517.5 m to 1529.5 m. These anomalous zones were delineated and interpreted as water-bearing fracture zones. Field excavation results confirmed the accuracy of the detection, demonstrating that the combined TEM and seismic reflection method can effectively achieve advance detection in ultra-deep shafts.

**Key words:** ultra-deep shaft; water abundance zone; transient electromagnetic method (TEM); seismic reflection method

## 1 前言

随着我国矿产资源的开发和矿山建设的发展,深竖井方式因具有安全性高、易机械化施工、可开采深层矿产资源等优点,在矿山建设中普遍运用。竖井施工因工程规模大常深入地下几百米到上千米,且诸如岩性、裂隙发育程度、地下水位等地质环境随掘进深度而发生变化,具有动态性强的特点<sup>[1-2]</sup>。为了确保竖井掘进工作的有序进行,预防井下突水灾害,需加强掘进时的超前探查工作。常规矿井物

探方法中,瞬变电磁法对低阻异常体十分敏感,还具有操作便捷,工作量小,受场地影响小等优点<sup>[3-4]</sup>。魏新等人使用瞬变电磁法对矿区岩溶富水性分布进行研究,将矿区岩溶区域的富水性由弱到强进行了划分,为矿区防治水工作提供有力的参考<sup>[5]</sup>。李菊红基于瞬变电磁对水敏感的特点,成功探查到断层导储水位置<sup>[6]</sup>。邓海朋在长榆河煤矿进行瞬变电磁法对采空区水探查研究,证实了瞬变电磁法的应用效果<sup>[7]</sup>。上述学者通过瞬变电磁法能够有效的完成富水区探查,但由于方法的单一性,而瞬变电磁

[作者简介] 孙智杰(1992—),男,工程师,主要从事金属矿山水文地质研究。

[基金项目] 泰山产业领军人才工程专项经费资助

[引用格式] 孙智杰,高志友,贾瀚文,等.基于瞬变电磁和地震反射波法的竖井超前探查研究及应用[J].中国矿山工程,2025,54(6):76-82.

法也存在易受环境影响等缺点,可能出现假异常情况,从而影响解释成果的准确性<sup>[8]</sup>。为了提高解释成果的可靠性,需要结合其他物探手段综合解释<sup>[9]</sup>。探地雷达法和地震反射波法均以岩性差异产生的反射界面对反射波的影响为依据来判断地下异常体的赋存情况<sup>[10]</sup>。其中地震反射波法通过裂隙水区域与围岩产生的波阻抗界面反射的信号来确定富水区位置,且具有分辨率高,探测深度大等优点,适用于大深度的矿井超前探测研究<sup>[11]</sup>。潘纪顺等在某隧道探查异常体研究中,根据波速分析等参数证实了地震反射波法对异常地质体探查的可行性<sup>[12]</sup>。王学习在广西板城河北岸使用地震反射波法探查溶洞取得了良好的成果<sup>[13]</sup>。以上地震波案例均在半空间内探测取得了良好的成果,在矿井全空间内地震反射波法存在较多干扰影响<sup>[14]</sup>。因此需要结合两种及以上探测手段进行综合解释,从而准确查明富水性区域的位置。

通过在三山岛金矿超深竖井掘进中 1 464.5 m 深度的超前探测应用,在分析工作面围岩与富水裂隙带之间的物性差异的基础上,依据现场工作面条件分别设计了瞬变电磁和地震反射波法的观测系统,进行了数据采集和数据处理,并绘制了探查成果图,结合地质情况进行综合的解释,准确圈定了竖井工作面下方的异常区。

## 2 工区概况与地球物理特征

三山岛矿区超深竖井井深为 1 915 m,断面净直径 10.5 m,井筒掘进断面直径 11.5 m。位于三山岛断裂带的西北约 125 m 处,属于三山岛断裂带的下盘,三山岛断裂带是区域控矿断裂构造,由主干断裂及上下盘伴生的羽支断裂和下盘派生平行断裂组成。以主裂面为界,上盘构造岩依次为花岗质碎裂岩、碎裂状花岗岩;下盘依次为糜棱岩、碎裂岩、花岗质碎裂岩、碎裂状花岗岩。下盘中生代玲珑序区内分布的为崔召单元。岩性为弱片麻状中粒二长花岗岩。岩性为浅肉红色,中粒花岗结构,交代结构,块状构造。矿物由斜长石(40%)、钾长石(23%)、石英(28%)、黑云母(5%)及少量绿帘石、绿泥石、磁铁矿、磷灰石、榍石、绢云母和白云母组成。矿物粒度 2~4 mm。

位于三山岛断裂带下盘的主裂面附近,存在由黄铁绢英岩质碎裂岩、绢英岩化花岗质碎裂岩、绢英岩化花岗岩等组成的含水层,富水性主要受三山岛断裂带的控制,在断裂的拐弯以及其走向与区域应力交角较小的部位(北北东走向附近),富水性相对

较强。

当前工作面所揭露岩石为二长花岗岩,岩石节理裂隙较发育,工作面已浇筑水泥,局部有少量积水,井壁模板位于工作面上方约 4 m。勘探围岩以花岗岩为主,电阻率略大于沉积岩。花岗岩体中若存在裂隙水则会产生相对于花岗岩高阻背景下的低阻异常,是使用瞬变电磁法勘探的物性基础。在花岗岩体中出现的含水裂隙与围岩之间会存在波阻抗差异,即存在波阻抗界面,当地震波从高波阻抗的花岗岩围岩入射到低波阻抗的含水裂隙带时,反射系数为负值,导致反射波波形(相位)相对于入射波发生反转,即“极性反转”。通过识别这种现象,可以推断含水裂隙带的存在<sup>[15]</sup>。

## 3 探测原理及观测系统

### 3.1 瞬变电磁原理

瞬变电磁法是基于电磁感应定律以及涡流扩散理论,探测地下异常体位置的电磁类地球物理方法。如图 1 所示,该方法首先利用发射线圈通入稳定电流建立一次磁场,随后瞬时间切断电流通入,依据法拉第定律可知,在地下导电介质中会激发出涡流电场,法拉第电磁感应定律为

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $E$  为电场强度,  $V \cdot m^{-1}$ ;  $B$  为磁感应强度, T;  $t$  为衰减时间, s。

安培定律表示为

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

式中: $H$  为磁场强度,  $A \cdot m^{-1}$ ;  $J$  为电流密度,  $A \cdot m^{-2}$

$$B = \mu H \quad (3)$$

$$J = \sigma E \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

式中: $\mu$  为磁导率,  $H \cdot m^{-1}$ ;  $\sigma$  为电导率,  $S \cdot m^{-1}$ 。

将上述方程联立,推导得到扩散方程:

$$\nabla^2 H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

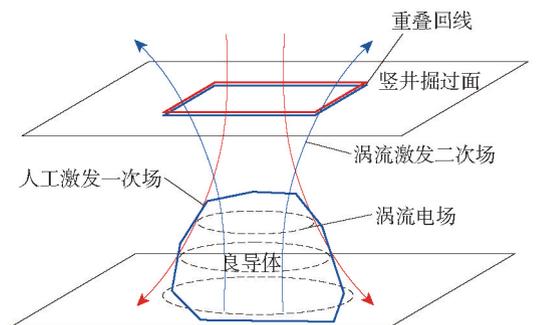


图 1 瞬变电磁原理示意图

该涡流以“烟圈”的扩散形式向岩层内部传播,其强度与扩散速率受介质的 $\mu\sigma$ (磁导率和电导率)控制:相较于围岩介质,低阻体会产生能量更强的感应涡流,涡流衰减也会变得缓慢;反之高阻体产生的感应涡流,其衰减迅速。

因此,瞬变电磁对低阻异常体十分敏感,最后通过分析接收线圈采集感应涡流产生的二次磁场随时间衰减的响应。如二次场的衰减曲线的特征:强度、速率、形态等,可以直接反映不同深度介质之间的电阻率差异。通过调整发射线圈的磁矩方向,即法线方向,可定向激发特定轴线的涡流环,实现对不同方位地质体的探测。

### 3.2 瞬变电磁法观测系统

根据工作面条件,采集工作面内部数据设置观测方式分别为测线1从正西至正东,经过工作面中心点,共布设20个测点;侧线2从正南至正北,经过工作面中心点,共布设20个测点。采集工作面四周数据确定观测方式设置测线3从正西出发,顺时针贴工作面最外圈成圆环状测线,环绕一周回到正西方向,共布设60个测点。采集工作面外围数据布置侧线4从正西出发,顺时针贴工作面最外圈成圆环状测线,环绕一周回到正西方向,施工角度为外围 $20^\circ$ ,共布设60个测点。点距为1m,共计160个测点,具体如图2所示。该观测系统测量了竖井的内部和外围区域,测量范围基本覆盖全部工作面,使得采集的数据全面,可靠性高。

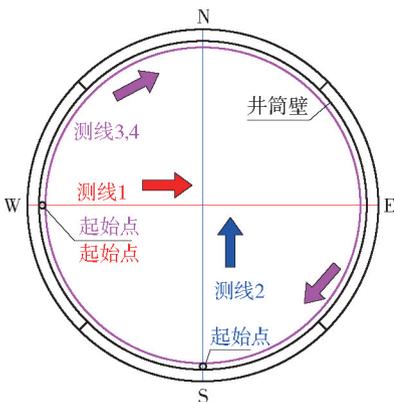


图2 瞬变电磁法观测系统平面图

### 3.3 地震反射波法原理

地震反射波法是基于弹性波传播理论与波阻抗差异原理的地震类地球物理勘探方法。如图3所示,利用人工震源激发地震波向地下传播,经过不同物性的传播介质之间的分界面,即波阻抗界面。

反射系数公式表示为

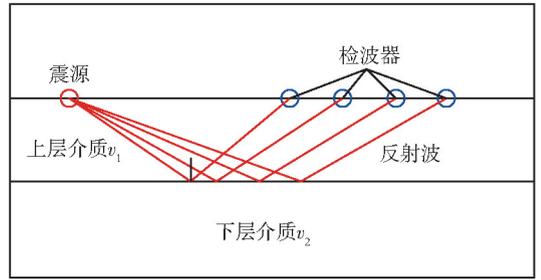


图3 地震反射波法原理示意图

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (7)$$

式中: $R$ 为反射系数,取值范围在 $[-1, 1]$ ;  $Z_1$ 和 $Z_2$ 分别为上层和下层介质的波阻抗, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 分别为上层和下层介质的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $v_1$ 和 $v_2$ 分别为上层和下层介质的传播速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

其中反射系数 $R$ 的绝对值越大,表示波阻抗差异越明显,反射信号的能量随之增强。地震波将遵循斯奈尔定律发生反射返回。满足以下关系:

$$t(x) = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2}}{v} \quad (8)$$

式中: $t(x)$ 为震源至检波器距离为 $x$ 的双程旅行时; $s$ ;  $x$ 为震源至检波器的距离, $\text{m}$ ;  $h$ 为反射界面的深度, $\text{m}$ ;  $v$ 为上层介质的平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

通过布设检波器阵列接收反射波信号,记录地震波的双程旅行时、振幅、相位等特征。分析反射波双程旅行时与界面深度的关系,进而推断地下介质的波阻抗差异及界面形态。由于裂隙中存在空气或流体改变了介质密度,从而使地震波速显著降低,与围岩之间形成能够反射地震波的波阻抗界面,因此地震反射波法通过识别波阻抗界面,实现对含水构造的解释和空间定位。

### 3.4 地震反射波法观测系统

根据工作面工作条件,本次地震反射波法沿工作面布设6个震源点( $S1 \sim S6$ ),震源点点距为2m,线距为2m,每个震源点锤击次数6次,共接收数据36道。布设12个X-Y-Z三分量检波器( $A1 \sim A6$ ,  $B1 \sim B6$ )多道接收,检波器点距为2m,线距为2m,在12个位置上同时接收地震波,共采集432道地震波数据。该观测系统将检波器均匀分布在测区内,有助于提高数据的采集质量,保证数据的完整性和可靠性,具体如图4所示。

## 4 数据处理与成果分析

### 4.1 数据处理

瞬变电磁法数据处理如图5所示,首先对4条

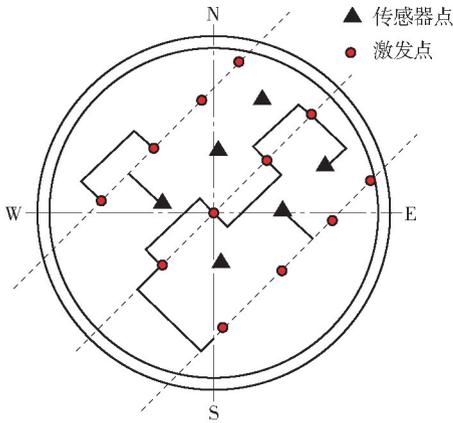


图4 地震反射波法观测系统平面图

测线的原始数据进行预处理,将数据进行分测线分离,测线分离后对数据进行检查,对于瞬变电磁二次场感应电位曲线明显不一致的数据点进行剔除处理,剔除完成后对单支感应电位曲线进行圆滑处理。曲线处理过程中采用圆滑滤波以及不同测线之间进行滤波,确保曲线的圆滑,从而压制干扰噪声。数据预处理完成后,利用电位与电阻率的关系进行视电阻率计算,视电阻率计算完成后,采用圆滑最小二乘法进行反演。

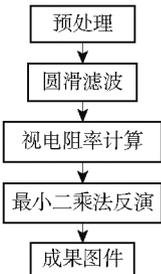


图5 瞬变电磁处理路线图

本次研究中瞬变电磁采用重叠回线装置,发射和接收回线边长为 1.5 m,发射回线匝数为 3 匝,接收回线匝数为 20 匝,得到单点反演数据体。将西东及南北测线、环形测线反演数据成图,绘制瞬变电磁成果图。

地震反射波法数据处理如图 6 所示,先对原始数据进行数据转换和解编,再进行定义观测系统,准确输入震源点以及检波点的空间坐标信息。再检查数据的质量,对受强干扰的波形信号采取剔除或叠加处理,对数据进行振幅校正、频率滤波以及反褶积手段以压制干扰噪声,再抽取道集进行速度分析和动校正,最后水平叠加处理和偏移归位,叠后处理得到成像结果,本次研究中地震反射波法采用 125 μs,采样频率为 8 000 Hz,并展示立体成像图和侧视图。

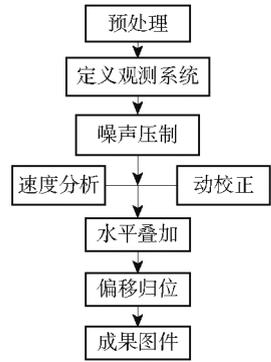


图6 瞬变电磁处理路线图

两种方法的数据质量均采用公式(9)进行评估:

$$M_j = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{v_j(t_i) - v'_j(t_i)}{v_j(t_i) + \frac{v'_j(t_i)}{2}} \right)^2} \quad (9)$$

式中: $v_j(t_i)$  为第  $j$  点第  $i$  测道原始观测数据; $v'_j(t_i)$  为第  $j$  点第  $i$  测道系统检查观测数据; $n$  为参加统计的测道数。

表1 测量观测精度统计表

工作方法	总数据点/ 个	检查点/ 个	检查率/%	$M_j$ /%
瞬变电磁	160	6	3.75	5.23
地震反射波法	432	15	3.47	6.44

本次研究中  $M_j \leq 10\%$ ,说明观测系统精度满足规范要求。

### 4.2 瞬变电磁法探测成果

图 7 所示为岩性视电阻率横向-纵向变化的情况。其中阻值从低到高变化趋势由冷色调到暖色调的变化表示。

结合该竖井井深 1 464.5 m 水文地质资料、现场岩层情况及本次物探成果,分析认为蓝色区域为低阻富水区域,西到东和南到北测线探测结果剖面(图 7)可知:

(1)在深度 0 ~ 20 m 和深度 35 ~ 45 m 范围内,两条剖面均未出现低阻异常,推断区域内岩层较完整,裂隙发育少,地下水状态和目前工作面揭露情况基本一致,整体富水性弱。

(2)在深度 20 ~ 35 m 范围内,两条剖面均出现了相对低阻响应,推断区域内裂隙较发育,存在局部裂隙水。其中正西岩壁位置深度 26 ~ 34 m 范围内发现有低阻异常区域,正南岩壁位置至工作面中心区域深度 23 ~ 29 m 范围内发现有低阻异常区域,工

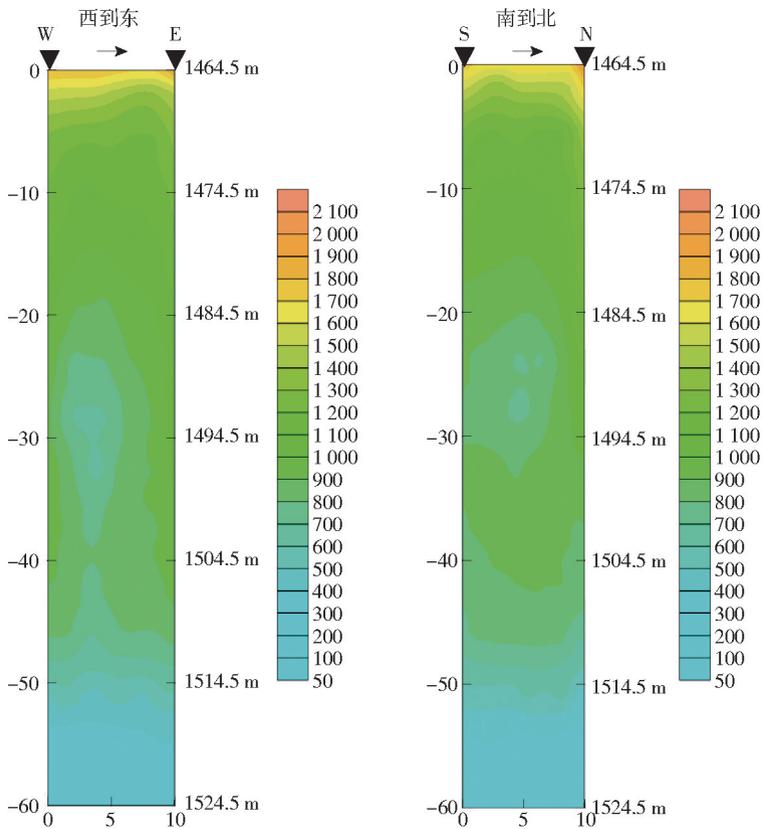


图7 西到东和南到北探测剖面图

作面中心区域深度 23 ~ 35 m 范围内发现有低阻异常区域。

(3) 在深度 50 ~ 60 m 范围内, 两条剖面中视电阻率整体相对深度 0 ~ 50 m 范围内的视电阻率值降低, 推断该区域岩层裂隙较发育, 存在含水构造, 富水性较强。因探测深度加大, 数据质量下降, 探测精度会相应降低。

由竖井外围垂直向下和外偏 20° 测线探测结果剖面(图 8)可知:

(1) 在深度 0 ~ 20 m 和深度 35 ~ 45 m 范围内, 两条剖面均未出现低阻异常, 推断区域内岩层较完整, 裂隙发育较少, 整体富水性弱。

(2) 在深度 20 ~ 30 m, 两条剖面中在井壁东南方向, 出现相对低阻区, 推断为岩层裂隙较发育, 局部存在裂隙水, 电导性增强, 呈现相对低阻异常。倾斜 20° 测线低阻异常区对应的深度值变小。推断裂隙带发育呈倾斜状态。

(3) 深度 50 ~ 60 m, 两条剖面中视电阻率值急剧下降, 推断该区域裂隙较发育, 存在岩石裂隙含水层, 裂隙中富水性较强, 呈现低阻异常响应。

结合上述 4 条视电阻率等值线剖面图可得: 工

作面下方 20 ~ 35 m、井壁东南方向, 有较弱低阻区分布, 推测该区段可能存在裂隙水岩层。50 ~ 60 m 视电阻率值下降明显, 推断该区段岩石裂隙较发育, 存在裂隙水岩层。

#### 4.3 地震反射波法探测成果

处理得到本次地震波成像图、侧视图分别如图 9、图 10 所示, 结合水文地质资料、现场岩层情况以及探测区域的地震反射波成像图分析, 推断解释如下:

(1) 在井深 1 465.5 ~ 1 475.5 m、1 485.5 ~ 1 488.5 m 段内, 局部存在多处不连续反射界面。推断该段岩体发育小尺度裂隙, 岩层整体性较好, 存在潜在岩体稳定性问题。

(2) 在井深 1 492.5 ~ 1 507.5 m、1 517.5 ~ 1 529.5 m 段内, 存在多处连续反射界面。推断该段岩体质量总体较上段差, 岩体完整性差。裂隙发育程度加剧, 可能为发育节理裂隙密集带, 岩体稳定性较差。

(3) 在井深 1 559.5 ~ 1 568.5 m 附近, 存在多处反射界面。推断该段岩体质量总体较上段好, 岩体较完整, 局部完整性差。裂隙较发育, 裂隙发育程度

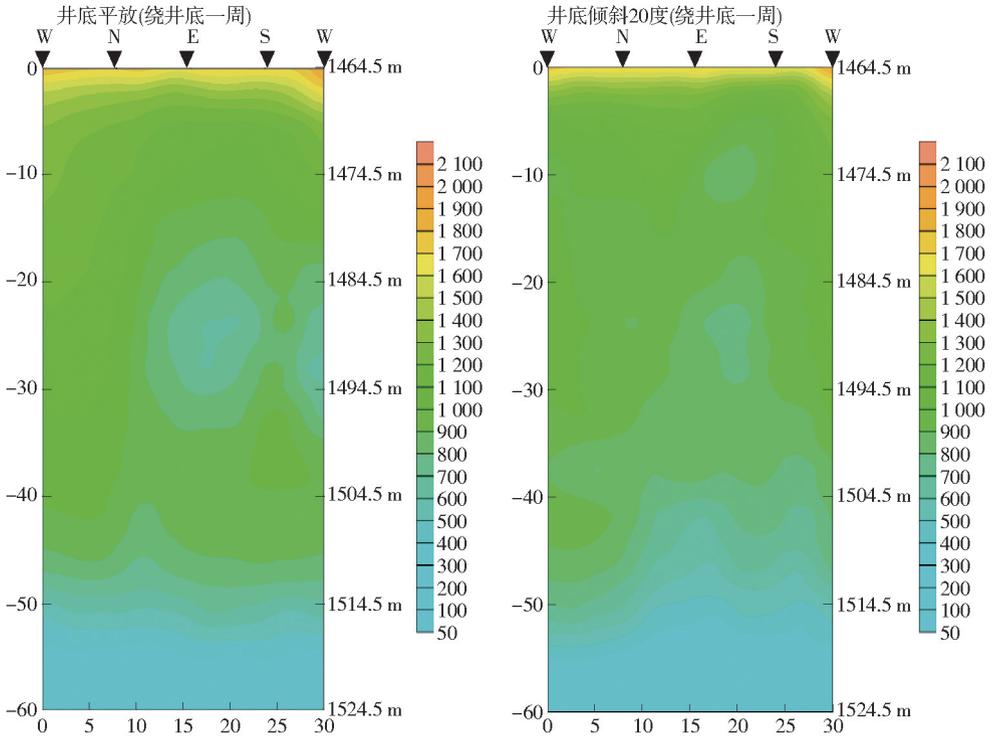


图8 外围垂直向下探测和外偏20°探测剖面图

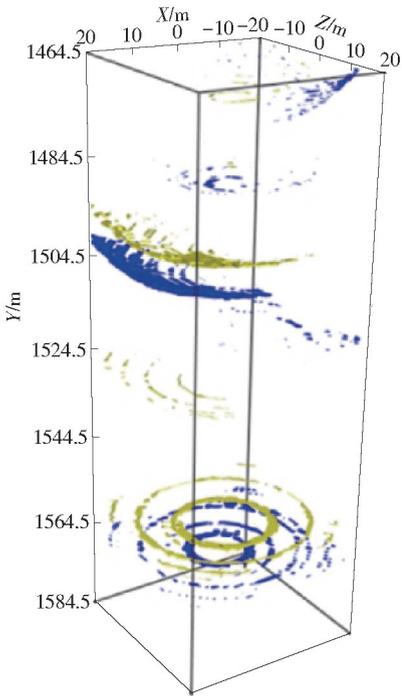


图9 竖井地震波成像图

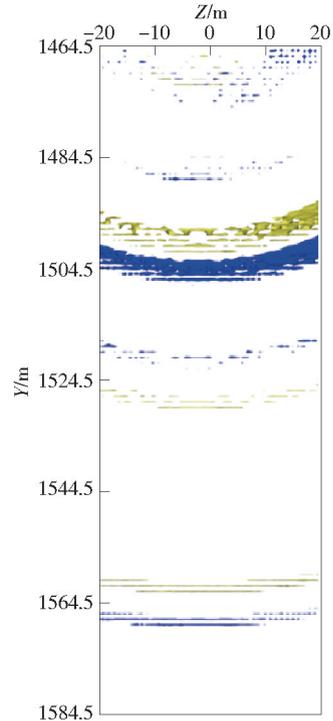


图10 竖井地震波成像侧视图

加剧,岩体稳定性较差。

#### 4.4 综合解释

如图11所示,综合以上两种探测结果,并结合

已知地质条件,分析可知:

- (1)井底以下1492.5~1507.5 m和1517.5~1529.5 m区间存在两处明显地震波的反射界面,

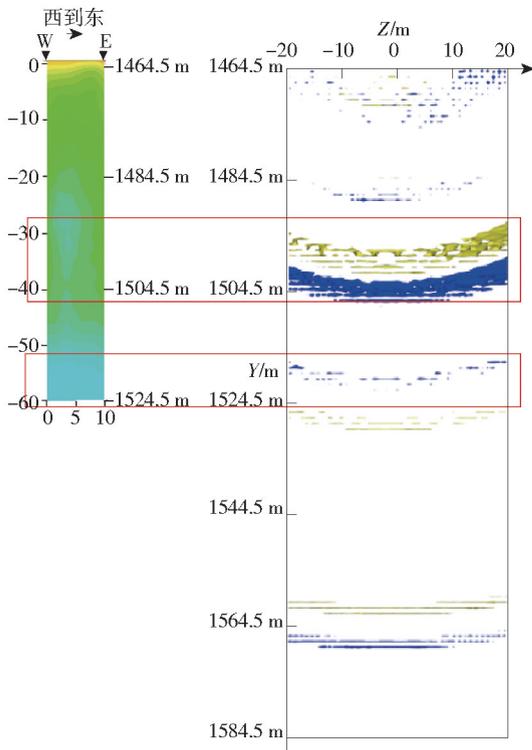


图 11 西到东测线瞬变电磁法与对地震波法对比图

推断为岩性变化导致,可能存在岩层破碎带或裂隙发育较好;根据瞬变电磁探测结果可知该两处区域同样出现相对低电阻率异常,明显低于上、下段围岩视电阻率值,推断该区域可能存在裂隙水,使得区段内电阻率降低,呈现相对低阻响应。两种方法的异常响应在空间位置上具有高度吻合,因此圈定该两处区域为富水性强的裂隙发育带。

(2) 在 1 465.5 ~ 1 475.5 m 和 1 485.5 ~ 1 488.5 m 处浅部区域,地震反射波法探测结果存在弱反射界面,瞬变电磁法同样未出现低阻异常区,推断该位置处岩层局部裂隙发育但未被地下水补给,富水性较弱。在 1 559.5 ~ 1 568.5 m 处深部区域中,地震反射波法探测存在较强反射界面,推断该区域裂隙发育较好,此区域处已超出瞬变电磁法的探测极限,无法判定该区域反射界面富水性,需要其他方法或后续掘进验证。

(3) 经后续掘进施工至约 1 501 m 深度时,岩体出现明显的节理构造,发育有裂隙,持续涌水量约为 4.3 m<sup>3</sup>/d,该实际揭露情况与综合解释的含水裂隙带位置高度吻合,有力的证明了本次瞬变电磁与地震反射波联合超前探测方法的有效性和准确性。

## 5 结论

通过以上研究得到结论:

(1) 异常区与围岩电阻率及波阻抗差异为开展瞬变电磁和地震反射波法探测提供物性基础。

(2) 利用瞬变电磁法对水体敏感和地震反射法对裂隙构造敏感的优点,可以准确圈定竖井掘进面前方的裂隙含水区。

(3) 现场工程表明瞬变电磁及地震反射波法综合探测可以为相关类型工程施工提供借鉴。

### [参考文献]

- [1] 陈富健. 矿山竖井工程施工质量控制研究[J]. 世界有色金属, 2024(12): 226 - 228.
- [2] 张庆, 徐晓冬, 关凯, 等. 红布矿区竖井稳定性现场监测与风险预测[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(3): 638 - 647.
- [3] 银晓鹏, 李颖, 张彪. 瞬变电磁法在煤矿采空区勘测中的实践[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(13): 184 - 186.
- [4] 张文静. 基于瞬变电磁法对张家峁煤矿的含水层研究[J]. 价值工程, 2025, 44(14): 139 - 141.
- [5] 魏新, 鹿存金, 侯小宇, 等. 基于瞬变电磁的岩溶发育及富水分区特征研究[J]. 能源与环保, 2024, 46(9): 102 - 109.
- [6] 李菊红, 孙彦良, 姜佰信. 瞬变电磁法在新疆哈密花岗岩地区寻找地下水资源中的应用[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(3): 540 - 549.
- [7] 邓海朋. 瞬变电磁探测技术在长榆河煤矿的应用与研究[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(4): 192 - 195.
- [8] 李彦兵. 煤矿防治水技术中物探方法的应用分析[J]. 价值工程, 2024, 43(32): 54 - 56.
- [9] 史翠英, 蔡承刚, 汤志刚. 综合物探在徐州某煤矿采空区勘察中的应用[J]. 勘察科学技术, 2025(3): 71 - 76.
- [10] 崔凡, 王然, 陈存强, 等. 滇东复杂地质条件探地雷达与井下地震综合超前预测小构造[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 222 - 230.
- [11] 张金锋, 张龙宝, 徐晓燕. 煤矿掘进巷道地震反射波超前探测技术解析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(17): 118 - 120.
- [12] 潘纪顺, 张允涛, 朱叶, 等. 地震反射波法在隧道超前预报中的应用[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(15): 167 - 170.
- [13] 王学习. 地震反射法在岩溶勘探中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(7): 122 - 124.
- [14] 李飞. 基于地震与瞬变电磁联合反演的导水陷落柱精细探测研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019: 107 - 113.
- [15] 黄元元. 深埋隧道中地震波场特征的数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 23 - 35.

# NSR 在多金属矿床露天境界优化中的应用

Application of NSR in Open-pit Optimization of Polymetallic Deposits

邢介雷, 王恒涛, 唐坤林(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 10038)

**摘要:**本研究旨在探讨 NSR(Net Smelter Return)在多金属矿床露天境界优化中的应用,为矿床的经济评价和管理决策提供更好的依据。针对多金属矿床矿体形态复杂、品位变化大等特点,研究建立了基于 NSR 的地质模型,对露天矿山的开采境界进行优化分析。研究表明:(1) NSR 方法通过计算矿块净收益来确定最优的露天开采最终境界,综合考虑了矿石的地质特征与经济因素,使得境界圈定更加科学合理。(2) NSR 可用于确定不同矿体的开采优先级,为投资决策提供依据,有助于矿山企业在复杂多变的市场环境中做出科学决策,提高整体经济效益。(3) 相较于当量品位境界优化方法,NSR 境界优化采出的矿石量更低、品位更高、收入更大,从而优化资源利用,减少低品位矿石的开采。该特别适用于处理复杂矿体或低品位矿床,能够显著提高资源利用率。同时,NSR 方法在多金属矿床境界优化中具有较好适应性和灵活性,为露天矿的优化规划提供了新的方法,具有重要的理论价值和实际应用前景。

**关键词:**NSR; 多金属矿床; 露天矿; 境界优化

**中图分类号:** TD216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0083-06

**Abstract:** This study aims to explore the application of the NSR (Net Smelter Return) method in open-pit optimizing of polymetallic orebodies to improve resource utilization efficiency and economic benefits. Given the characteristics of polymetallic orebodies, such as complex orebody morphology and significant grade variations, this research establishes a geological model based on the NSR method and optimize the open-pit mining boundaries. Research shows that: (1) The NSR method optimizes open-pit by calculating the net revenue of ore blocks, taking into account the geological characteristics and economic factors of the ore comprehensively, making the boundary delineation more scientific and reasonable. (2) NSR can be used to determine the mining priority of different ore bodies, providing a basis for investment decisions. This helps mine to make scientific decisions in a complex market environment, thereby improving overall economic efficiency. (3) Compared to the equivalent grade pit optimization method, the NSR boundary optimization method extracts less ore, with higher grade and greater revenue, thereby optimizing resource utilization and reducing the mining of low-grade ore. This is particularly suitable for dealing with complex ore bodies or low-grade ore deposits and can significantly improve resource utilization. Additionally, the NSR method exhibits good adaptability and flexibility in optimizing open-pit boundaries for polymetallic orebodies, providing a new approach for open-pit mine optimization planning. This study has important theoretical and practical implications, offering valuable insights for the optimization of open-pit mining in polymetallic orebodies.

**Key words:** NSR; polymetallic orebody; open-pit mine; open-pit optimization

## 1 前言

露天开采境界优化是露天矿山设计与生产管理的核心问题,直接关系到资源利用率、开采经济效益和矿山服务年限,因此科学合理地确定露天开采境界,实现资源综合价值最大化,一直是采矿工程领域的研究热点与难点。其中,胥孝川等对于境界优化过程中的主要影响因素开展了研究,包括地表构筑物、生态成本、社会效益、边坡角<sup>[1-3]</sup>等,指出在不同矿产资源开发情况下需综合考虑地表建设费用及社

会效益。顾晓薇等<sup>[4]</sup>通过盈亏平衡品位和指定境界品位开展境界优化,认为盈亏平衡最终境界更优。上述境界优化采用的是椎体排除法,工程设计中应用偏少,多为 L-G 图论法替代。朱学胜<sup>[5]</sup>采用 NPV 开展境界优化,使露天境界比原有境界外扩 20 ~ 80 m,增加了矿石量并延长了矿山服务年限。赵彬等<sup>[6]</sup>基于 NPV 开展境界优化确定了某露天矿开采方案,提升了露天开采工作效率和经济效益。张延凯等<sup>[7]</sup>研究境界优化过程中 LG 算法初始有向图,

[作者简介] 邢介雷(1983—),男,高级工程师,主要从事露天开采工艺。

[引用格式] 邢介雷,王恒涛,唐坤林. NSR 在多金属矿床露天境界优化中的应用[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):83-88+94.