

# 矿井三维电法对封闭不良钻孔的探测

高卫富<sup>1</sup>,施龙青<sup>1</sup>,于小鸽<sup>2</sup>,翟培合<sup>1</sup>,马曾虎<sup>3</sup>

(1.山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590;2.山东科技大学 资源与土木工程学院,山东 泰安 271000;  
3.西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

**摘要:**封闭不良钻孔是影响矿区安全生产的重要隐患之一,不良钻孔具有导通工作面顶板上含水层,增强顶板砂岩的富水性.针对这一问题,将直流电法电极顶入工作面顶板上,采用分站式进行数据采集工作.数据采集完成后,经过数据预处理和无穷远校正及巷道校正、剔除旁侧干扰等处理,将二维电阻率格式转换成三维电阻率格式,使用圆滑最小二乘法对数据进行反演,将反演完成后的数据导入三维可视化成图,圈定钻孔附近岩层富水区,为矿井水防治工作者提供决策.经工程验证后,说明该方法具有很强实用价值及推广价值.

**关键词:**三维电法;封闭不良钻孔;顶板砂岩水;数据处理

**中图分类号:**P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)03-0006-04

## Study on detection of sealed bad drilling using mine 3D DC method

Gao Weifu<sup>1</sup>, Shi Longqing<sup>1</sup>, Yu Xiaoge<sup>2</sup>, Zhai Peihe<sup>1</sup>, Ma Zenghu<sup>3</sup>

(1.College of Earth Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;  
2.Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China;  
3.Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Sealed bad drilling is an important risk adverse impact mine production safety, the bad drilling has turned bad on roof drilling on the aquifer, enhanced roof sandstone rich water. To solve this problem, the electrode was putted into the top of the face roof, using of sub-station data collection. After the data collection was completed, after data preprocessing and infinity corrected and roadway correction, removed the side interference handling, the least squares method was used to smooth mapping of data retrieval, the data retrieval was imported into 3D visualization Mapping, drilling rock near the water-rich area was described, providing decision-making for mine water treatment workers.

**Keywords:** 3D DC;sealed bad drilling;roof sandstone;data processing

当前,对矿井岩层富水性探查主要有瞬变电磁法和直流电法<sup>[1]</sup>.瞬变电磁法对低阻敏感,探查效果准确等特点,但容易受井下低阻异常体干扰.直流电法受周围工作环境影响小,探查结果准确等优点,深受矿井工作者的青睐.当前,王为申等<sup>[2]</sup>提出了矿井瞬变电磁对不良钻孔的探查,并加一实例说明了该方法的实用性.矿井三维直流电法是在地面三维直流电法<sup>[3]</sup>的基础上发展起来的,它采集数据大,数据体信息丰富,能够探查工作面内顶、底板岩层富水情况,同时可运用切片技术进行高精度的数据解释,这是矿井二维电法所不能比拟的.三维电法的由于巷道空间的影响,制约其发展,本文通过改变传统的布线方式,采用全空间二极直流电法数据采集方式,改进数据处理方法,将二维电阻率格式转换成三维格式,根据矿井工作

收稿日期:2015-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41572244);山东省自然科学基金资助项目(ZR2015DM013);泰山学者建设工程专项经费资助项目

通信作者:于小鸽(1981-),女,讲师,主要从事井水害防治的研究.E-mail:yuxiaoge2010@163.com

面的实际情况,建立三维数据模型,采用圆滑最小二乘反演方法算法进行反演计算,以实现三维勘探.

## 1 全空间均匀各向同性介质的稳定电流场

由直流电场论可知,向均匀各向同性介质的全空间内部  $A$  点供电时,  $M$  点的电位值  $U_M$ 、电场强度  $E_M$  及电流密度  $j_M$  为

$$U_M = \frac{I\rho}{4\pi r}; \quad (1)$$

$$E_M = \frac{I\rho}{4\pi r^2}; \quad (2)$$

$$j_M = \frac{I}{4\pi r^2}. \quad (3)$$

式中:  $r$  为  $A, M$  两点间的距离;  $\rho$  为介质的电阻率;  $I$  为供电电流强度.

图1为三维空间点电源场.电流场的等电位面是以  $A$  点为中心的同心球面,且电流线是垂直于等电位面的,从图1中可以看出,这些电流线是从供电点发出的一簇辐射线.

当介质内存在双异性点电源  $A(+I)$  和  $B(-I)$  同时供电时,测量电极  $M, N$  间的电位差  $\Delta U_{MN}$  为

$$\Delta U_{MN} = \frac{I\rho}{4\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]. \quad (4)$$

式中:  $AM, AN, BM, BN$  为相应电极间的距离.

当采用二极法进行测量时,  $B, N$  接无穷远时,  $AN, BM, BN$  趋于无穷大,相应式(4)变为

$$\rho = 4\pi AM \frac{\Delta U_M}{I}. \quad (5)$$

式(5)即为全空间直流二极法电阻率计算公式,利用该公式只要计算出  $AM$  的距离,即可求出实际电阻率.

### 1.1 数据采集

数据采集时候,对顶板探测时,将电极钉入工作面顶板中;对底板探测时,将电极钉入底板中.将电极及电缆连接好,铺设电缆围绕工作面一周,采用分站式对数据进行采集.图2是井下  $400 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  工作面数据测量图,仪器采集分3站完成,数据采集电缆共2根,每根长  $300 \text{ m}$ ,共  $600 \text{ m}$ ,电极间距  $10 \text{ m}$ ,共61个电极.第1站数据采集将第1根电缆和30个电极铺设到  $0 \sim 300 \text{ m}$  处,第2根电缆及电极铺设到  $300 \sim 600 \text{ m}$  处,将仪器、电缆和电极连接好后,进行第1站的数据采集.

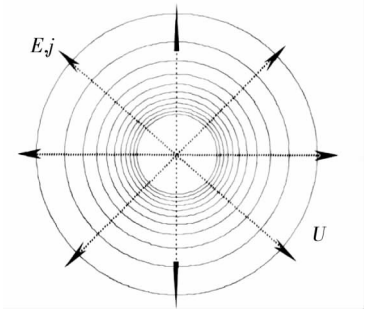


图1 三维空间中的点电源场

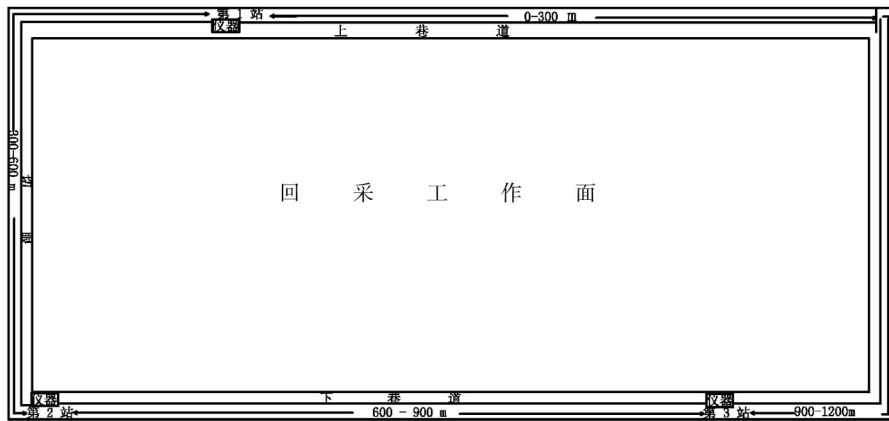


图2  $400 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  工作面数据采集

第1站数据采集完成后,将第1根电缆铺设到第  $600 \sim 900 \text{ m}$  处,第2根电缆不需要移动,将数据采集

仪器移到第2站位置,进行2站数据的采集;第2站数据采集完成后,将第2根电缆移动到900~1200 m处,第1根电缆不需要移动,数据采集仪器移到第3站位置,进行第3站数据采集,按照这样的规律,铺设电缆围绕工作面一周,直到数据采集完成为止。

数据采集时,仪器采用二极装置,即供电电极 $B$ 和测量电极 $N$ 放置到无穷远处(由于巷道空间的限制,尽可能把无穷远电极放到远处),通过增加供电电极 $A$ 和测量电极 $M$ 的距离,实现电阻率测深一种装置。二极装置具有采集数据量多,测量深度大等优点,满足三维电法勘探要求。

## 1.2 数据处理

数据采集完成后,将数据进行数据预处理,主要对数据进行滤波处理,剔除由电极及周围环境引起的干扰。数据预处理完成后,需要将二维数据的格式改变成三维格式,采用比值法对数据进行巷道校正<sup>[4]</sup>和旁侧干扰校正<sup>[5]</sup>。由于井下空间的限制,井下无穷远校正并不是真正意义的无穷远,需对数据进行无穷远校正<sup>[6]</sup>。上述处理在文献[4-6]中做了详细说明,本文不再具体的论述。最后,将二维数据格式转换成三维数据格式:  $(x, y, \rho) \rightarrow [(x_i, y_j)(x_m, y_n)\rho]$  其中 $x, y$ 为二维电阻率的记录点,  $(x_i, y_j)(x_m, y_n)$  分别是供电点和测量点电极标号的坐标位置,  $\rho$  为供电电极与测量电极测量电阻率。

转换过程中应注意:二维电阻率图的记作为一条直线,而三维电阻测量是对目标区的立体勘探,因此,在目标区建立三维坐标系,对实际测量电极进行编号,并计算出 $AM$ 的实际距离及电阻率值。数据转换完成后将数据导入res3d三维电阻率反演软件<sup>[7-10]</sup>,进行反演处理。本软件反演是在三维有限差分正演基础上进行反演的,三维有限差分模型的网格节点数为 $N_x \times N_y \times N_z = m$ ,其中 $N_x, N_y, N_z$ 分别是 $X, Y, Z$ 方向上的节点数。设模型地层电阻率参数为 $\mathbf{m} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)^T$ ,视电阻率观测数值为 $\mathbf{d}_{\text{obs}} = (\rho_{s1}, \rho_{s2}, \dots, \rho_{sn})^T$ ,  $n$ 为观测数,三维反演问题本身就是非线性问题,将三维非线性问题经过最小二乘法转化为线性问题,将其线性并正则化得到最小二乘法算法公式:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \Delta \mathbf{m} = \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{d}. \quad (6)$$

式中: $\mathbf{J}$ 为雅克比矩阵; $\Delta \mathbf{m}$ 为模型参数修改矢量; $\Delta \mathbf{d}$ 为观测数据 $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ 与正演理论数据 $\mathbf{d}_m$ 残差向量; $\mathbf{d}_m$ 为给定模型参数正演理论观测数据。

三维反演问题往往表现为混定问题,导致方程为病态方程,为了解决此问题,将光滑约束引入反演方程。光滑约束就是相邻节点的电阻率光滑过渡,使相邻网格电阻率差异极小。对式(6)施加光滑约束后得到圆滑三维电阻率反演方程:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{d}; \quad (7)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_x \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \mathbf{f}_z^T. \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 为拉格朗日常数,决定光滑约束的权重; $\mathbf{f}_x$ 为水平圆滑滤波系数矩阵; $\mathbf{f}_z$ 为垂直圆滑滤波系数矩阵。

圆滑最小二乘反演方法流程见图3。数据反演完成后,将数据保存成 slicer-dicer 软件相对应的格式,利用 slicer-dicer 三维可视化系统,结合探查工作面情况,建立三维工作面数据体。根据不同的需求将电性体制成 $x$ 方向, $y$ 方向或者不同角度的切片,结合水文地质及钻孔资料,依据 $x$ 切片分析同一岩层横向电阻率变化图,确定低阻变化范围;依据 $y$ 或 $z$ 切片分析不同岩层电阻率变化图,分析煤层底板不同含水层之间的水力联系,圈定岩层富水靶区,对异常区做出合理的解释,指导矿井防治水工作者做出决策。

## 2 工程实例

本文通过某矿1301工作面138普查封闭不良钻孔的探测,查明了钻孔附近工作面顶板砂岩水的赋存状态,在钻孔附近富水区进行超前探放水,确保工作面安全回采。

数据采集时,工作面推进位置到138号钻孔约120~

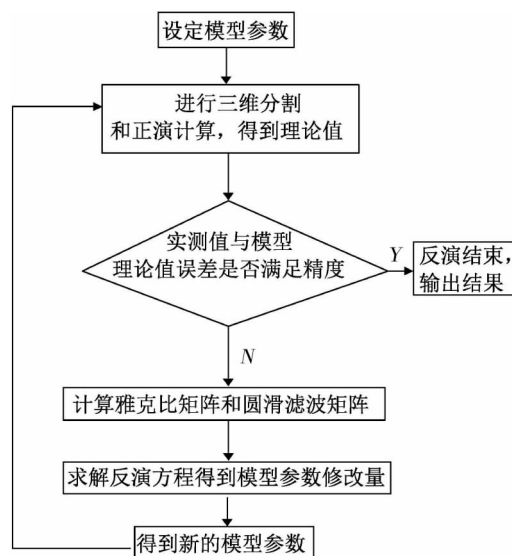


图3 反演流程图

130 m位置.数据采集过程中,电极间距是 10 m,共布设电极 90 个,测线长度 890 m,每个电极采集数据 30 个,共采集有效数据 2 700 个,采集时停止了工作面内的所有电源,保证了数据采集质量.

数据经处理后得到 1304 工作面开采位置的顶板地层电阻率三维数据体(图 4)和低阻异常体(图 5),三维数据体长 340 m,宽 210 m,高 170 m,低阻异常体主要分布在巷道两侧及钻孔周围附近区域(120~130 m 为中心区域).资料解释使用 Slicer Dicer 三维可视化系统,采用切片技术精确圈定低阻异常范围,结合有关地质资料解释出顶板砂岩地层的富水性.综合分析三维数据体及水平切片(由于篇幅未附切片图),发现低阻异常的幅度和范围均加大(与相邻工作面对比),说明未封闭钻孔位置顶板砂岩富水性相对较强.低阻异常区与岔孔(592.72~911.48 m 共 318.71 m 未封闭,592.72 m 标高距 3 煤顶板距离为 68.68 m)未封闭吻合,138 号钻孔岔孔未封闭段导通了上下各含水层,使钻孔附近地层含水性增强.

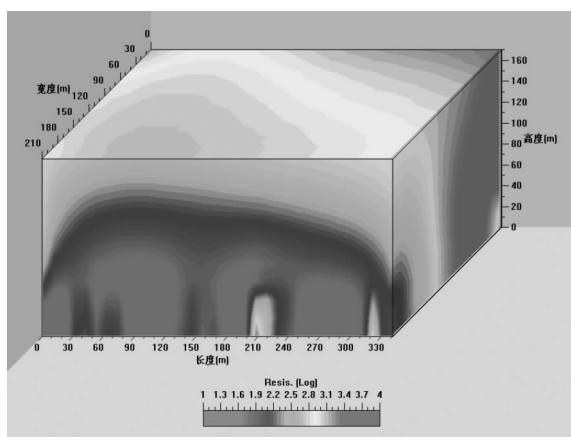


图4 1304 工作面三维数据体

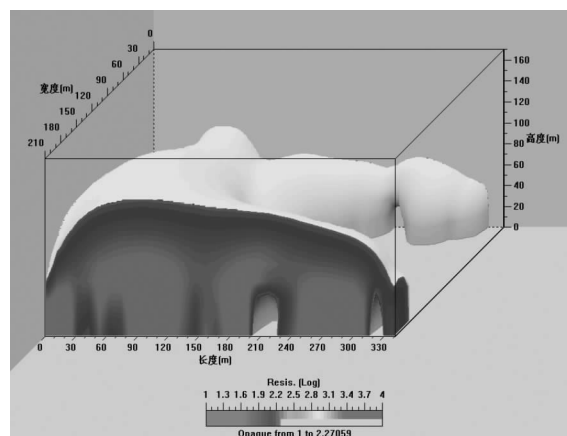


图5 1304 工作面低阻异常体

### 3 结论

1) 利用井下三维电法技术,成功探测出封闭不良钻孔附近岩层富水性,探查成果显示封闭不良钻孔使附近岩层富水性增强.

2) 井下三维电法不仅可以将巷道内岩层富水性展现出来,而且可以探测出工作面内顶底板岩层富水性,具有形象直观的特点.

3) 井下三维电法施工简单、受井下复杂环境干扰影响小,具有很强的实用价值和推广价值.

### 参考文献:

- [1] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
- [2] 王为申,贾庆孟,齐长春.瞬变电磁法在封堵不良钻孔探测中的应用[J].山东煤炭科技,2015(2):15-157.
- [3] 高卫富,翟培合,施龙青.三维高密度电法在煤矿斑裂区探测中的应用[J].工程地球物理学报,2011(1):34-37.
- [4] 岳建华,李志聘.巷道空间对矿井对电测深曲线影响的模型实验研究[J].煤田地质与勘探,1993,21(2):56-59.
- [5] 刘斌,李术才,李树忱,等.隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J].岩土力学,2009,30(10):3093-3101.
- [6] 牛超.直流电法勘探中无穷远极影响及校正技术研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
- [7] Loke M H. 2D and 3D electrical imaging surveys.Tutorial,2010.<http://www.geotomosoft.com/>.
- [8] Loke M H, Barker R D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections[J]. Geophysics,1995,60(6):1682-1690.
- [9] Yutaka S. 3D resistivity inversion using the finite-element method[J].Geophysics, 1994, 59(12):1839-1848.
- [10] Tripp A C, Hohmann G W, Swift Jr C M. Two dimensional resistivity inversion[J]. Geophysics, 1984, 49(10):1708-1717.