# 采煤面隐伏陷落柱三维并行电法探测模拟与 应用

#### 万之杰

上海市建筑科学研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2022年12月9日; 录用日期: 2023年1月10日; 发布日期: 2023年1月18日

# 摘要

针对含水陷落柱与周围煤岩体之间存在明显的视电阻率差异,可以通过三维并行电法进行探查。文章以 柱状模型代替陷落柱目标体,建立数学模型,通过构建不同地质参数的陷落柱模型进行数值模拟,并分 析各模型的地电响应特征。结果表明含水陷落柱正演数据,在通过反演后,低阻异常区域迅速收敛,能 够清晰地反映模型中含水陷落柱的分布范围,异常体与周围岩层有明显的电阻率差异,低阻区位置与模 型预设的位置相对应。在正演结果中,单极 - 单极排列与单极 - 偶极排列方式相比,前者对于低阻区的 定位及范围分布响应效果较好;在反演结果中,后者对于低阻区的收敛效果优于前者。在对某矿II6115 面风联巷陷落柱探测中,利用三维并行电法技术探测陷落柱的赋存范围及其富水性,取得良好的效果。

### 关键词

含水陷落柱,数值模拟,三维并行电法,视电阻率

# Detection Simulation and Application of Three Dimensional Parallel Electric Method for Concealed Collapse Column in Coal Face

#### **Zhijie Wan**

Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai

Received: Dec. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 10<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 18<sup>th</sup>, 2023

### Abstract

In view of the apparent resistivity difference between the water-bearing collapse column and the

**文章引用:**万之杰.采煤面隐伏陷落柱三维并行电法探测模拟与应用[J].矿山工程,2023,11(1):52-58. DOI:10.12677/me.2023.111007 surrounding coal and rock mass, the three-dimensional parallel electrical method can be used for exploration. In this paper, the cylindrical model is used to replace the target body of the collapse column, and the mathematical model is established. The numerical simulation is carried out by constructing the collapse column model with different geological parameters, and the geoelectric response characteristics of each model are analyzed. The results show that the forward modeling data of water-bearing collapse column converges rapidly after inversion, and can clearly reflect the distribution range of water-bearing collapse column in the model. There is an obvious resistivity difference between the abnormal body and surrounding rock strata, and the location of low-resistance area corresponds to the preset location of the model. In the forward results, the pole-pole arrangement has a better response to the localization and range distribution of the low resistance region compared with the pole-dipole arrangement; in the inverse results, the latter has a better convergence effect on the low resistance region than the former. In the process of detecting the collapse column in the air lane of II6115 face of a mine, the 3D parallel electrical method was used to detect the occurrence range and water abundance of the collapse column, and good results were obtained.

#### Keywords

Water-Bearing Collapse Column, Numerical Simulation, Three-Dimensional Parallel Electrical Method, Apparent Resistivity

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

# 1. 引言

陷落柱是煤矿开采生产过程中常见的地质问题之一,普遍分布于我国华北地区石炭—二叠纪煤田中。 陷落柱的存在破坏了煤层的连续性,且极易导通承压含水层诱发矿井水害,对煤矿安全生产带来巨大冲 击与威胁从而降低了煤矿的经济效益[1]。因此查明陷落柱的空间位置、赋存范围、富水性等地质特征, 对于保障煤矿安全开采具有重要意义。对陷落柱的探查技术方法多种多样,目前地球物理探测是采煤工 作面地质保障技术的一种重要手段,其中主要的物探方法有并行电法技术、地震波 CT 技术、无线电波 透视技术和地质雷达技术等[2] [3] [4]。

三维并行电法技术对低阻异常体具有较高的灵敏度且分辨能力强,因此在探测含水陷落柱时,由于 含水陷落柱与周围岩体存在明显的电性差异,在电性反演参数上具有较为明显的特征而容易被识别出来, 所以在一定条件下,理论上通过对含水陷落柱进行三维并行电法数值模拟,对煤矿安全生产实践具有一 定的指导意义[5] [6] [7]。

# 2. 三维并行电法

并行电法系统由安徽理工大学率先提出,该系统由 PC 机、测量主机、电极阵列和电缆系统组成[8] [9]。 并行电法为直流电阻率法的一种,是在高密度电法勘探基础之上发展起来的一种新技术。它既具有集电 测深和电剖面法于一体的多装置、多极距的高密度组合功能,同时,还具有多次覆盖叠加的优势,能够 探测到钻孔外围一定范围,最大侧向探测距离为电极控制段的长度。由于采用并行技术,在数据采集时 具有同时性和瞬时性,可得到供电时的测线上的全部电位曲线,使得电法图像更加真实合理,大大提高 了视电阻率的时间分辨率[10]。 并行电法数据采集是在传统电法仪的基础上加上了单片机电极转换控制系统,通过多芯电缆与电极 的连接来构成,实行每一电极都配备 A/D 转换形成智能电极,智能电极通过网络协议与主机保持实时联 系,在接受供电状态命令时电极采样部分断开,让电极处于 AB 供电状态,否则一直工作在电压采样状 态,并通过通讯线实时地将测量数据送回主机。通供电与测量的时序关系对自然场、一次场、二次场电 压数据及电流数据自动采样,采样过程中没有空闲电极出现。根据观测装置的不同,并行电法数据采集 方式分为两种: AM 法和 ABM 法[11] [12] [13]。

#### 3. 数值模拟

#### 3.1. 含水陷落柱模型

数值模拟基于 RES3D 软件平台, RES3DMOD 是一个基于 Windows 系统下的三维电阻率建模程序, 在计算矩形电极网格中的视电阻率值时,基本上需要指定电极网格覆盖区域内子块的电阻率。以华北煤 田含水陷落柱为原型建立地质-地球物理模型,模型概化为2层地层和1个含水陷落柱,第一层是位于 煤层底板的以砂岩和泥岩为主的煤系地层,深度为0~45 m;第二层是煤系地层的基底——奥陶系石灰岩, 深度 45~150 m。陷落柱位于模型 X-Y 平面的中心,向上发育至底板以下 10 m,向下发育至奥陶系石灰 岩顶部界面以下 10 m,深度为 10~55 m,柱状陷落柱顶面边长均为 40 m。综合考虑华北型煤田地层的电 性特征,以砂岩和泥岩为主的其他煤系地层电阻率设置为 100 Ω·m,奥陶系石灰岩地层具有一定富水性, 电阻率设置为 200 Ω·m,模型中以柱状体代替含水陷落柱,电阻率设置为 10 Ω·m。含水陷落柱地质-地 球物理模型参数设置见图 1。



**Figure 1.** Schematic diagram of water-bearing collapse column model 图 1. 含水陷落柱模型示意图

#### 3.2. 观测系统

针对图 1 所构建的采煤工作面底板柱状陷落柱模型进行理论计算与分析。令工作面左上角为统一坐标系原点,沿工作面巷道走向为 x 轴正方向,沿工作面倾向和底板分别为 y 和 z 正方向。设工作面巷道走向长度为 L = 200 m,宽度 W = 120 m,沿着 x、y 正方向分别布置 41 和 25 个电极,将所有电极均匀 网格化,最小电极间隔为 5 m。分别选择单极 - 单极排列和单极 - 偶极排列方式,利用有限差分法进行 正演计算得到的含水陷落柱模型的电性分布特征,在此基础上进行反演成像,并对模型电阻率正反演结 果进行综合分析。由于正反演得到的数据量庞大,难以直观辨别相对低阻区,因此下文均从模型正反演 数据中分别提取过含水陷落柱中心的 2 个相互正交切面进行空间位置的判定。

#### 3.3. 正演结果

基于上述观测系统,采用有限差分法对图 1 含水陷落柱模型进行矿井三维并行电法正演计算。图 2

为含水陷落柱模型的视电阻率正演结果,X-Y 切面图和X-Z 切面图的左图分别为单极 - 单极排列下的平面切片(即X-Y 切面)和垂向切片(即X-Z 切面),右图分别为单极 - 偶极排列下的平面切片和垂向切片。 正反演图均采用统一色标,由暖色调到冷色调依次表示视电阻率变小,靠近模型的区域作为低阻区。从 X-Y 切面图中可知,左图中低阻区呈椭圆形分布,收敛较好,与柱状含水陷落柱模型的分布比较接近, 而右图中低阻区域偏向模型分布的左侧,右侧呈明显的高阻,与所构建的含水陷落柱模型分布范围分布 有所出入。X-Z 切面图中左图中低阻区域呈拱形,在横向上比含水陷落柱模型的分布范围大一些,在垂 向上主要集中在陷落柱分布范围的上半部位,而右图低阻区在垂向上向左侧倾斜,左右两幅图均与含水 陷落柱模型的分布范围有一定的重合度。由此结合X-Y 切面图和X-Z 切面图,说明单极 - 单极排列和单 极 - 偶极排列方式下的正演结果均能在一定程度上反映出含水陷落柱的空间位置及分布范围,但其收敛 性以及空间位置的精确度还有待提高。



**Figure 2.** Forward modeling results of apparent resistivity data of the model under different arrangement modes 图 2. 不同排列方式下模型的视电阻率数据正演结果

# 3.4. 反演结果

图 3 为含水陷落柱模型的视电阻率反演结果,X-Y 切面图和X-Z 切面图的左图分别为单极 - 单极排列下的平面切片和垂向切片,右图分别为单极 - 偶极排列下的平面切片和垂向切片。从X-Y 切面图中可知,左图中的低阻区位于模型 x-y 平面中央,同样呈椭圆形分布,更加贴合含水陷落柱模型的分布范围; 右图中低阻区呈近似矩形状分布,相比较单极 - 单极排列下的反演结果,后者对含水陷落柱低阻区的定 位更加精确,收敛效果更好。同时对比两种排列下的反演 X-Z 切面图,两者均能反映低阻区在垂向上的 分布,其中在 x 方向上,单极 - 偶极排列下的反演收敛效果优于单极 - 单极排列,在视电阻率分布范围 上较为符合模型构建的预设值。



**Figure 3.** Apparent resistivity data inversion results of models with different arrangement modes 图 3. 不同排列方式下模型的视电阻率数据反演结果

#### 3.5. 正反演结果对比

单独对比单极 - 单极排列下的正反演结果,在平面切片图中,两者对低阻区的定位都比较准确,相 比较正演结果,反演结果对于低阻区的收敛性较好,与含水陷落柱模型的分布更为接近;在垂向切片图 中,正演结果中低阻区顶部定位偏上,且分布范围较小,深部低阻响应较差,而反演结果中对于低阻区 顶部定位较为准确,深部低阻响应优于正演结果。再对比单极 - 偶极排列下的正反演结果,反演结果较 之正演结果,前者对于含水陷落柱的定位及分布范围响应效果明显优于后者。两种排列方式下的反演结 果中对于低阻区的定位更加准确,收敛效果更好,在电阻率范围分布上更加符合各地层及含水陷落柱预 设的电阻率值。再对比两种排列方式下的正反演结果,在正演结果中,单极 - 单极排列在低阻区分布范 围响应上优于单极 - 偶极排列;在反演结果中,后者对于低阻区的边界收敛效果更佳。

# 4. 工程实例

某矿 II6115 工作面风联巷在揭露陷落柱时无显著涌水现象。根据该矿的综合开采情况可知,该矿为

陷落柱发育区,且受底板灰岩水影响,由于富水区通常为低电阻率值区,特别是在灰岩中,不含水区为 明显的高电阻率值区,而富水区电阻率值显著下降,由于其显著的电性差异,所以适合直流电法勘探。 现场采用高分辨电法和三维并行电法进行探测。

高分辨地电阻率法探测在风巷共布置 64 个电极,电极间距 5.5 米,控制测线长 352 米; 三维并行电 法探测共布置 64 个电极,1-44#电极布置在风巷,间距 5.5 米,44-64#电极布置在联巷,电极间距 2 米, 共控制测线长 300 米。三维电法反演时同时利用测线 1 和测线 2 电法数据。

对测线 1、测线 2 所采 AM 法数据,将两站电极坐标统一进行坐标编辑,利用三维电法软件进行三 维电法反演,所得立体结果如图 4 所示。垂向方向以二水平南翼总回风巷底板为零点。图中风联巷前方 所见电阻率值较低部分,为所见陷落柱范围中心,向深度方向电阻率值渐低,范围越来越大,符合陷落





柱特征。由于陷落柱范围深度 45 米以下,电阻率值由浅部 30~40 Ω·m 降至 10~25 Ω·m 左右,表明陷落柱 在较深部含导水性强。南翼总回巷附近低电阻率值范围在巷道底板浅部电阻率值最低,向深部电阻率值 逐渐升高,显然该范围主要为 II617 面风巷及改造巷积水所致。

# 5. 结论与讨论

### 5.1. 结论

 含水陷落柱正演数据,在通过反演后,低阻异常区域迅速收敛,能够清晰地反映模型中含水陷落柱的分布范围,异常体与周围岩层有明显的电阻率差异,低阻区位置与模型模拟的位置相对应。单极-单极排列与单极-偶极排列方式相比,在正演结果中,前者对于低阻区的定位及范围分布响应效果较好; 在反演结果中,后者对于低阻区的收敛效果优于前者。

2) 通过三维并行电法含水陷落柱探测数值模拟的结果表明,认为三维并行电法对于采煤工作面底板 含水陷落柱的探测是一种有效的方法,结合其他地质资料辅助判断其他的地质构造,对生产实践具有一 定的指导意义。

# 5.2. 讨论

1) 本文通过理论模型模拟试验验证了三维并行电法对含水陷落柱探测的有效性,实际应用中陷落柱 的规模、形态以及电性等特征比理论模型更为复杂,需要结合现场地质条件等其他已知资料综合验证。

2) 由于工作面巷道空间的限制,对于观测系统的布极存在一定影响,采集的数据量有所降低,需要 在现场试验方法上以及后期数据处理上做出进步,提高数据采集质量以及反演算法的效率和精度。

# 参考文献

- [1] 王家臣,杨胜利. 采动影响对陷落柱活化导水机理数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 140-144.
- [2] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 120-123.
- [3] 李振华, 徐高明, 李见波. 我国陷落柱突水问题的研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2009, 18(4): 107-109.
- [4] 刘盛东. 分布式智能电极电位差信号采集方法[P]. 中国专利, zl2004100140200. 2006-07-26.
- [5] 刘盛东,吴荣新,胡水根,郭立全. 网络分布式并行电法勘探系统[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第 22 届年会论文集. 成都:四川科学技术出版社, 2006: 251.
- [6] 江晓益,胡雄武.利用三维并行电法探测陷落柱异常区[C]//中国煤炭学会矿井地质专业委员会.矿山地质灾害 成灾机理与防治技术研究与应用.中国煤炭学会矿井地质专业委员会,2009:257-260.
- [7] 吴荣新,方良成,周继生.采用网络并行电法仪探测采煤工作面无煤区[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 6-9+32.
- [8] 胡雄武, 张平松. 坑道隐伏陷落柱直流电阻率法超前探测分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1176-1183.
- [9] 周文龙, 吴荣新, 肖玉林. 充水溶洞特征的高密度电阻率法反演分析研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 699-705.
- [10] 吴荣利. 煤矿含水陷落柱二维高密度电阻率正演数值模拟[J]. 建井技术, 2016, 37(4): 32-35.
- [11] 王家臣,李见波,徐高明.导水陷落柱突水模拟试验台研制及应用[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3): 305-309.
- [12] 吴荣新, 刘盛东, 张平松. 双巷并行三维电法探测煤层工作面底板富水区[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 454-457.
- [13] 方良成, 吴荣新, 张爱华. 煤层工作面内陷落柱综合物探探查[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(11): 51-54.