



移动扫码阅读

DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2023.02.030

高卫富,吴鹏正,王立栋,等.直流电法四极装置超前探测正演模拟研究及应用[J].煤矿安全,2023,54(2):206-211.

GAO Weifu, WU Pengzheng, WANG Lidong, et al. Research and application of forward modeling of direct current quadrupole device in advance detection[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(2): 206-211

直流电法四极装置超前探测正演模拟研究及应用

高卫富¹,吴鹏正¹,王立栋¹,尹俊凯²,贾李博³

(1.山东科技大学 资源学院,山东 泰安 271019;2.山东煤田地质局第三勘探队,山东 泰安 271000;
3.山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:为研究矿井直流电法四极装置在掘进巷道超前探中的可行性,建立了巷道超前探三维地电模型,利用 ANSYS 模拟四极装置进行数据采集;对采集数据采用比值法剔除巷道、装置等干扰因素影响,并与无巷道影响下的采集数据进行对比研究;建立3个全空间地电模型,研究四极装置对不同异常体位置的响应,得出四极装置对低阻异常体的响应特征;通过工程实例说明该方法的实用性。研究结果表明:比值法能够消除巷道对异常体的影响,实现四极装置巷道超前探测,巷道超前探中采用四极装置进行数据采集是可行的。

关键词:掘进巷道;超前探测;直流电法四极装置;异常体;正演模拟;数据修正

中图分类号:TD163

文献标志码:B

文章编号:1003-496X(2023)02-0206-06

Research and application of forward modeling of direct current quadrupole device in advance detection

GAO Weifu¹, WU Pengzheng¹, WANG Lidong¹, YIN Junkai², JIA Libo³

(1.College of Natural Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China; 2.The Third Exploration Team of Shandong Coalfield Geologic Bureau, Tai'an 271000, China; 3.College of Earth Sciences & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to study the feasibility of mine DC quadrupole device in advance detection of tunneling roadway, a 3D geoelectric model of roadway advance detection is established, and ANSYS is used to simulate quadrupole device for data acquisition; the ratio method is used to eliminate the influence of interference factors such as roadway and device, and the collected data without the influence of roadway is compared with the collected data; three full space geoelectric models are established to study the response of quadrupole device to different abnormal body positions, and the response characteristics of quadrupole device to low resistance abnormal body are obtained; the practicability of this method is illustrated by an engineering example. The research results show that the ratio method can eliminate the influence of the roadway on the abnormal body, and realize the advance detection of the roadway with the quadrupole device. It is feasible to use the quadrupole device to collect data in the advance detection of the roadway.

Key words: tunneling roadway; advance detection; DC quadrupole device; anomaly; forward modelling; data correction

煤炭作为我国的基础能源与重要材料,常在能源生产及材料消耗占主要地位,虽在双碳目标的背

景下,我国能源结构不断优化。但占接下来一段时间内,煤炭仍将在一次能源中占据主导地位^[1],因此

收稿日期:2022-05-20 责任编辑:李力欣

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807283);山东省自然科学基金重点资助项目(ZR2020KF023)

作者简介:高卫富(1983—),男,山东临淄人,副教授,硕士研究生导师,博士,从事地球物理勘探与矿井水防治方面的教学与研究工作。E-mail: gaoweifu-2006@163.com

煤炭安全问题仍然是不可忽视的。

煤矿主要面临 5 大地质灾害:瓦斯、水害、煤尘、火灾、冲击地压^[2]。矿井水害不仅影响煤田的正常开采,而且对井下人员的生命安全造成威胁。因此,在掘进过程中必须坚持有疑必探的原则,探明前方可能存在不良地质体的位置及大小^[3]。巷道前方岩石电阻率存在较大的差异,而直流电法正是以岩矿石导电性的差异作为理论依据的一种探测方法,该方法在矿井超前探中已得到广泛进行运用^[4-6]。

常用的装置有二极装置(A-M),三极装置(A-MN)等^[7],由于二极装置、三极装置均需要布置无穷远电极,在有限的空间内布置无穷远电极影响了现场施工效率。直流电法四极装置(α 装置)不需要布置无穷远电极,但目前缺少该方面的研究和应用。为此,通过 ansys 模拟四极装置正演计算,并通过工程说明装置实用性。

1 直流电法巷道超前探原理

三极装置球体理论示图如图 1。

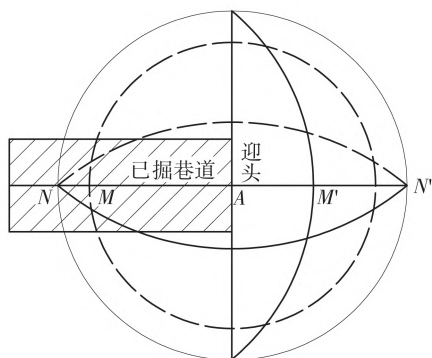


图 1 三极装置球体理论示图

Fig.1 Schematic diagram of pole-dipole device sphere theory

以二极装置勘探为例,A 点供电时形成 1 个以 A 为圆心的电场,在均一介质中以 A 为圆心,距离相等的圆面上电位均相等,M 点测量的视电阻率与未开挖巷道 M',具有类似的变化^[8]趋势,则可以通过某点测深的视电阻率来反映出未开挖巷道位于对应位置某点的视电阻率变化趋势,从而实现超前探的目的^[9]。

三极装置勘探与二极装置勘探类似,仅布置 1 个无穷远供电电极 A,三极探测结果反映 2 个测量点之间的电阻率变化情况,因此,通过巷道测量 M、N 电阻率的变化规律,分析未开挖巷道中以 A 为圆点下位于等势面下 M、N 变化趋势^[10]。

对于四极装置而言,该装置分别采用 2 个供电电极和测量电极,测量结果是单一供电电极的叠加,其测量结果更准确。为了提高勘探精度,考虑 2 个供电电极对其产生的影响^[11],通过类比二极、三极超前探理论,建立四极装置超前探异常体地电模型,分析四极装置对异常体的响应特征。

2 基于 ansys 正演模拟的思路方法

目前,没有专门的软件研究巷道超前探,为了实现研究的目的,借助 ansys 软件平台进行正演模拟来实现巷道超前探测。根据现场情况,设定的巷道、围岩以及存在于未开挖围岩中异常体的大小及位置,同时赋予各个地质体不同的电阻率参数情况。在参数确定后,对模型进行网格剖分,采用有限元法模拟获得实际测量过程中的数据^[12]。

首先建立 4 000 m×2 400 m×1 000 m 的全空间模型,巷道大小为 1 200 m×5 m×5 m,异常体位于巷道迎头前方,异常体大小为 50 m×50 m×50 m,三维模型图如图 2。

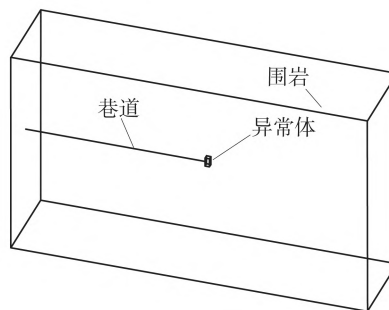


图 2 三维模型图

Fig.2 3D model diagram

模型建立后,设定模型参数,具体如下:异常体电阻率 10 $\Omega \cdot m$,围岩电阻率 500 $\Omega \cdot m$,巷道电阻率 5 000 $\Omega \cdot m$;采用 20 个电极进行测量,电极间距为 5 m,第 1 个电极置于迎头处,其余电极依次向后排列进行测量。

以 α 装置为模拟装置,分别采用该装置分析巷道、异常体对测量结果影响,并分析四极置实际应用的可行性。

3 Ansys 正演模拟分析

3.1 测线及巷道对数据影响

为了研究四极装置测量精度,建立了 1 个全空间下围岩的模型 I:大小为 4 000 m×2 400 m×1 000 m,无异常体,无巷道,围岩电阻率为 500 $\Omega \cdot m$ 。采用

四级装置进行数据采集,并分析其测量误差^[13]。通过模型 I 模拟获得 63 个数据,按相对误差大小列出部分数据,装置影响下相对误差如表 1。

表 1 装置影响下相对误差

Table 1 Relative errors under the influence of devices					
A 点 位置/m	M 点 位置/m	N 点 位置/m	B 点 位置/m	电阻率/ (Ω·m)	相对误差
-5	-10	-15	-20	470.712	0.058 57
-85	-90	-95	-100	471.483	0.057 03
-80	-85	-90	-95	471.485	0.057 03
-75	-80	-85	-90	471.489	0.057 02
-70	-75	-80	-85	471.490	0.057 02
-65	-70	-75	-80	471.493	0.057 01
-60	-65	-70	-75	471.494	0.057 01
-55	-60	-65	-70	471.499	0.057 00
-50	-55	-60	-65	471.500	0.057 00
-35	-40	-45	-50	471.503	0.056 99
-40	-45	-50	-55	471.503	0.056 99
-45	-50	-55	-60	471.503	0.056 99
-25	-30	-35	-40	471.504	0.056 99
-30	-35	-40	-45	471.504	0.056 99
-20	-25	-30	-35	471.505	0.056 99
-15	-20	-25	-30	471.507	0.056 98
-10	-15	-20	-25	471.533	0.056 93
0	-5	-10	-15	493.819	0.012 36

通过表 1 可知,误差最大约为 5.7%,可知该模拟数据相对误差较小,且误差较大点均出现在表层,该假异常可以通过数据修正,避免误判异常区,因此,模拟数据满足计算速度和精度要求。

在实际工程中进行超前探时,巷道对采集数据的影响是不可忽略的。在测量过程中,由于巷道开挖的区域被气体所覆盖,相对围岩其电阻率极大,已挖巷道不能作为均匀围岩处理,因此,建立模型 II:以模型 I 为基础增加大小为 2 400 m×5 m×5 m 的巷道,围岩电阻率为 500 Ω·m,巷道电阻率为 5 000 Ω·m。通过模型 II 研究巷道对数据采集的影响,巷道影响下相对误差见表 2。

对比表 1 和表 2 可知:巷道对数据采集影响较大,特别是采集表层数据时,测得数据受巷道影响较大。分析其原因为地表距离巷道较近,受巷道影响后电阻率迅速增大。

3.2 巷道对数据影响的修正

为了消除测线及巷道对测量的影响,需要对已采集数据进行修正。拟采用比值法^[14]来剔除巷道对探测结果影响,即通过对比无异常体下有无巷道影

表 2 巷道影响下相对误差

Table 2 Relative errors under the influence of roadway					
A 点 位置/m	M 点 位置/m	N 点 位置/m	B 点 位置/m	电阻率/ (Ω·m)	相对误差
-75	-80	-85	-90	795.309	0.590 618
-65	-70	-75	-80	795.302	0.590 604
-80	-85	-90	-95	795.302	0.590 604
-70	-75	-80	-85	795.301	0.590 602
-85	-90	-95	-100	795.301	0.590 602
-60	-65	-70	-75	795.289	0.590 578
-55	-60	-65	-70	795.283	0.590 566
-50	-55	-60	-65	795.254	0.590 508
-45	-50	-55	-60	795.219	0.590 438
-40	-45	-50	-55	795.151	0.590 302
-35	-40	-45	-50	795.045	0.590 090
-30	-35	-40	-45	794.869	0.589 738
-25	-30	-35	-40	794.560	0.589 120
-20	-25	-30	-35	793.976	0.587 952
-15	-20	-25	-30	792.762	0.585 524
-10	-15	-20	-25	789.859	0.579 718
-5	-10	-15	-20	778.528	0.557 056
-70	-80	-90	-100	761.590	0.523 180

响下视电阻率的变化情况^[15](模型 I、模型 II),得出每一个测点下对应的修正系数,再对每个数据进行修正得到仅受异常体影响下电阻率变化规律,修正后的电阻率公式为:

$$\rho_1=\frac{\rho_w}{\rho_x}\rho_{x+y}$$
 (1)

式中: ρ_1 为校正后仅受异常体影响下电阻率,Ω·m; ρ_w 为纯围岩情况下测量电阻率,Ω·m; ρ_x 为纯围岩加巷道下测量电阻率,Ω·m; ρ_{x+y} 为受巷道、异常体影响下测量视电阻率,Ω·m。

为了确定该方法的准确性,建立模型 III:以模型 I 为基础增加大小为 50 m×50 m×50 m 的异常体于迎头后 20 m 处,异常体电阻率为 10 Ω·m;建立模型 IV:以模型 II 为基础增加大小为 50 m×50 m×50 m 的异常体于迎头后 20 m 处,异常体电阻率为 10 Ω·m。

通过以上公式对模型 IV 数据进行修正后,对比模型 III 对应数据及成图发现其误差在 1% 以内,说明该方法确实已消除了巷道对数据的影响。同理,在消除巷道影响后用相同方法消除测线及装置对数据影响,具体方法与上文类似,其公式为:

$$\rho_2=\frac{\rho_L}{\rho_w}\rho_1$$
 (2)

式中: ρ_2 为理论修正、巷道修正后受异常体影响

下电阻率, $\Omega \cdot m$; ρ_L 为纯围岩情况下理论电阻率值, $500 \Omega \cdot m$; ρ_w 为纯围岩情况下测量电阻率, $\Omega \cdot m$; ρ_1 为校正后仅受异常体影响下电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

通过公式修正, 最终得到的计算结果仅受到异常体影响, 修正对比图如图 3。由图 3 可以明显观测到修正后 20 m 处低阻异常出现(图 3(d)), 与模型吻合度较高, 说明采用四极装置进行巷道超前探测是可行的。

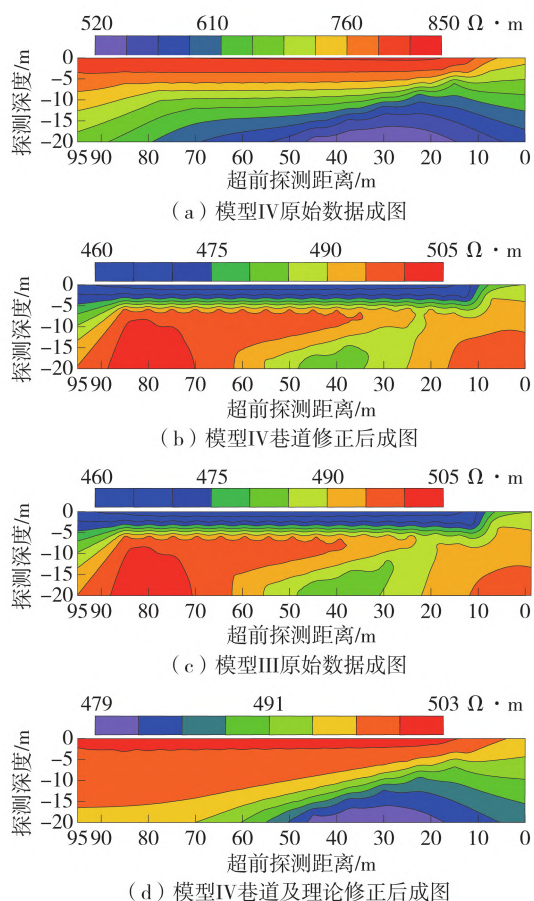


图 3 修正对比图
Fig.3 Modified contrast diagram

3.3 不同异常体位置下四极装置正演模拟

为研究四极装置对前方低阻异常体的探测范围与准确性, 建立模型 V~模型 VII 进行模拟。模型 V 以模型 IV 为基础将异常体移至迎头前 10 m, 模型 VI 以模型 IV 为基础将异常体移至迎头前 30 m, 模型 VII 以模型 IV 为基础将异常体移至迎头前 50 m。对数据进行修正后成图, 不同异常体位置如图 4。

由图 4 可知: 低阻异常普遍存在于底部, 且整体电阻率随着异常体位置的向后偏移而不断增大, 至 50 m, 如图 4(c) 低阻异常体最小为 $495 \Omega \cdot m$, 与围岩电阻率相差不大; 图 4(a) 低阻异常水平方向位于

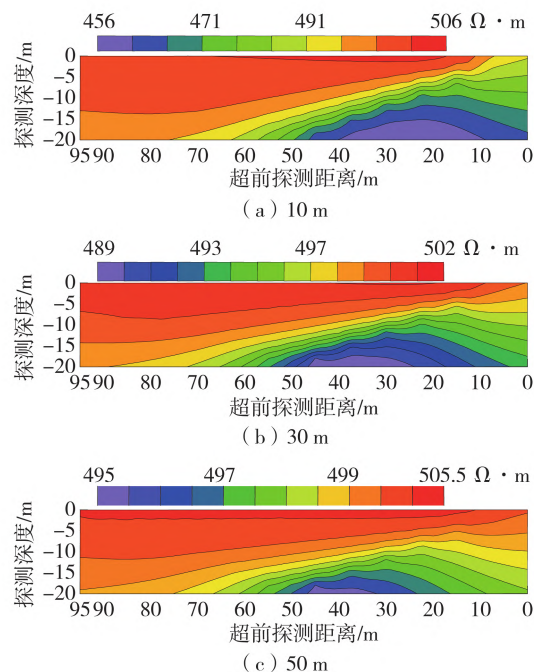


图 4 不同异常体位置

Fig.4 Positions of different abnormal bodies

10~40 m 处能较好地反映异常体出现的位置, 大致判断异常体范围; 图 4(b) 低阻异常体水平方向位于 25~45 m 处, 能较好地反映出异常体出现的位置而实际大小难以确定; 图 4(c) 中异常体范围为 33~45 m, 实际电阻率已与围岩差别不大, 较难判断异常体具体出现位置及大小。

通过以上研究可知, 四极装置对于前方浅部异常体较为敏感, 而随着距离增加对异常体探测较为困难。

4 工程实例

付村煤矿 3 上 1202 工作面切眼掘进过程中, 受前方尹家洼断层的影响, 岩层层位有起伏, 造成断层附近岩层的富水性, 影响巷道正常掘进。为保障巷道安全掘进, 需对巷道前方岩层含水性做进一步的探查工作。具体方案为布置 U 型装置, 共布置 30 个电极, 其中 1#~15# 电极布置于巷道左帮, 16#~30# 电极布置于巷道右帮。采用四极装置中的 α 装置进行数据采集, 形成三维数据体模型。三维数据体成果图如图 5, 图 5 中: 电阻率用以 10 为底的对数形式表示, x 方向为超前探测距离, y 方向为超前探测宽度, z 方向为超前探测深度。

由图 5 可以看出在表层区域存在部分低阻异常, 这可能是由于装置及测线本身存在的系统误差

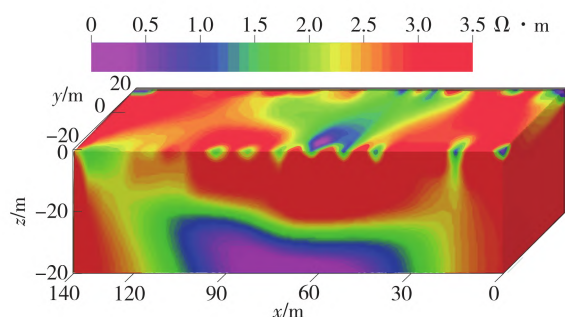


图5 三维数据体成果图

Fig.5 Result diagram of 3D data volume

而导致表层出现部分假异常,同时,表层电阻率明显较大是受巷道影响较大而导致,使得表层低电阻率难以判断。通过分析测量结果及地质资料确定低阻异常范围后确定低阻异常阈值^[16],推断低阻异常区主要位于 x 方向30~90 m、 z 方向20~40 m范围内。可推测巷道前方30~90 m、深度20~40 m范围内含水性好,钻孔验证该部分为砂岩透水引起的异常,与前方尹家洼断层无关,施工可以正常进行。

5 结 语

采用ansys进行正演模拟,对比测量结果与理论结果,并通过实际工程中的应用证明巷道超前探中采用四极装置进行数据采集是可行的;通过对正演数据进行理论修正和巷道修正,剔除干扰因素影响后可以提高数据结果的可靠性;四极装置可探测浅部(10~30 m)异常,但对深部(50 m后)异常灵敏度低。

参考文献(References):

- [1] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [2] 杨丽.煤炭地下开采引发的地质灾害及其防治措施研究[J].山东煤炭科技,2016(9):189-191.
YANG Li. Geological hazards caused by underground coal mining and its prevention and control measures[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016 (9): 189-191.
- [3] 程久龙,李飞,彭苏萍,等.矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J].煤炭学报,2014,39(8):

1742-1750.

- CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (8): 1742-1750.
- [4] 底青云,王若,王妙月,等.电法精细探测在雄安新区的应用展望[J].工程地质学报,2018,26(1):137-144.
DI Qingyun, WANG Ruo, WANG Miaoyue, et al. Application and prospect of fine detection in Xiong-An new area by electrical method[J]. Journal of Engineering Geology, 2018(1): 137-144.
- [5] 郭恒.矿井三维直流电透视技术研究[J].煤炭技术,2020,39(1):76-79.
GUO Heng. Research and application of 3D DC resistivity forward in coal mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(1): 76-79.
- [6] 刘盛东,刘静,岳建华.中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J].煤炭学报,2014,39(1):19-25.
LIU Shengdong, LIU Jing, YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (1): 19-25.
- [7] 吴海之.高密度直流电测法超前地质预报技术[J].铁道工程学报,2007(S1):5-8.
WU Haizhi. Technology of geological forecast in advance with high-density direct current test method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(S1): 5-8.
- [8] 韩光,庄德玉,田劫,等.矿井直流电法超前预报球体构造的初步理论及沙槽实验研究[J].煤炭工程,2009(3):69-72.
HAN Guang, ZHUANG Deyu, TIAN Jie, et al. Primary theory on the mine direct current method to pilot predict sphere structure and study on sand trough simulation experiment[J]. Coal Engineering, 2009(3): 69-72.
- [9] 王欣宇.基于直流电法的掘进工作面前方应力异常探测研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [10] 程久龙,王玉和,于师建,等.巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J].煤田地质与勘探,2000(4):60-62.
CHENG Jiulong, WANG Yuhe, YU Shijian, et al. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2000(4): 60-62.
- [11] 董耀,肖娟,刘岩,等.高密度电法在隧洞工程勘察中的应用[J].岩土工程技术,2022,36(1):70-73.

- DONG Yao, XIAO Juan, LIU Yan, et al. Application of high density electric method in exploration of tunnel engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2022, 36(1): 70–73.
- [12] 高卫富, 韩进, 刘玉, 等. 基于 ANSYS 全空间直流电法异常体正演模拟[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2089–2094.
- GAO Weifu, HAN Jin, LIU Yu, et al. Research on the forward model DC method of abnormal body in full space based on ANSYS[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2089–2094.
- [13] 王敏, 刘玉, 牟义, 等. 多装置矿井直流电法巷道超前探测研究及应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 396–405.
- WANG Min, LIU Yu, MU Yi, et al. Research and application of multi-array mine DC electrical method for roadway advanced detection[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 396–405.
- [14] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测三维反演成像[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1866–1876.
- LIU Bin, LI Shucui, NIE Lichao, et al. Advanced detection of water-bearing geological structures in tunnels using 3D DC resistivity inversion tomography method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1866–1876.
- [15] 翟培合, 任科科, 张钊, 等. 基于比较法消除巷道影响的三维电法超前探测技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 67–71.
- ZHAI Peihe, REN Keke, ZHANG Zhao, et al. Three-dimensional electrical method advanced detection technology based on comparative method to eliminate the influence of roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(7): 67–71.
- [16] 李宏泽, 赵磊, 周官群, 等. 口孜东矿 5 煤物性特征和直流电法超前探测低阻阈值的确定[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(10): 155–161.
- LI Hongze, ZHAO Lei, ZHOU Guanqun, et al. Coal No.5 physical property features and low-resistivity threshold value determination through direct current prospecting advanced detection in Kouzidong Coalmin [J]. Coal Geology of China, 2021, 33(10): 155–161.