



移动扫码阅读

王 鹏,鲁晶津,王信文.再论巷道直流电法超前探测技术的有效性[J].煤炭科学技术,2020,48(12):257-263. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.033
WANG Peng, LU Jingjin, WANG Xinwen. Restudy on effectivity of direct current advance detection method in roadway [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 257-263. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.033

再论巷道直流电法超前探测技术的有效性

王 鹏^{1,2,3}, 鲁晶津¹, 王信文¹

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.煤炭科学研究总院,北京 100013;
3.长安大学 地质资源与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘 要:煤矿井下直流电法超前探测技术是掘进工作面前方富水异常体探测的主要方法之一,在我国煤矿有着近 30 年的发展历史。有些专家学者通过研究分析,对该技术的有效性提出了质疑,为此,笔者以均匀全空间中无限延伸板状体、球体或立方体模型为基础,通过计算点电源在全空间的电位分布和异常特征参数提取方法,拟合了异常距离与异常特征参数极小值之间的关系式,分析了底板异常的响应特征,计算了理论探测距离。结果表明:掘进工作面前方异常体能在巷道后方产生明显的异常响应,即后方信号包含前方低阻体的信息,证明该技术的基本原理是正确的;前方低阻体与后方视电阻率异常位置并非镜像关系,选取正确的异常特征参数可获得前方异常位置;巷道前方低阻体与底板低阻体均能产生电位异常,根据异常响应特征的不同可以对其加以甄别;直流电法超前探测的最大距离可以达到 80 m 左右。煤矿井下掘进工作面直流超前探测方法是有效的,可以继续推广应用并不断完善。

关键词:直流电法;超前探测;板状体;球体;异常提取

中图分类号:P631.3;TD167 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0257-07

Restudy on effectivity of direct current advance detection method in roadway

WANG Peng^{1,2,3}, LU Jinjing¹, WANG Xinwen¹

(1.Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2.China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3.College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The direct current (DC) advance detection method in coal mines is one of the main methods for detecting water-rich anomalies in front of excavation face. It has a history of nearly 30 years in coal mines of China. Some experts and scholars have questioned the effectiveness of this technology through research and analysis. Based on the infinitely extending plate, sphere or cube model in a uniform whole space, the relationship between the abnormal distance and the minimum value of the abnormal characteristic parameter was fitted by calculating the potential distribution and the full space of the point power supply, and the extraction method of abnormal characteristic parameters, the response characteristic of the abnormal under floor were analyzed, and the theoretical detection distance was calculated. The results show that: the abnormal physical energy in front of the tunneling work produces obvious abnormal response behind the roadway, that is, the rear signal contains information of low-resistivity body in the front, which proves that the basic principle of this technique is correct. The front low-resistivity body is not a mirror image of the rear apparent resistivity abnormal position. The front abnormal position can be obtained by selecting the correct abnormal characteristic parameters. Both the low-resistivity bodies in front of the roadway and the low-resistance body of the floor can generate potential anomalies, which can be identified according to different characteristics of abnormal response. The maximum distance of DC advanced detection method can reach about 80 m. The DC advanced detection method in the excavation face of the coal mine is effective and can be popularized and improved continuously.

Key words: direct current method; advanced detection; plate-like body; sphere; anomaly extraction

收稿日期:2020-02-21;责任编辑:曾康生

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2019M653523);国家自然科学基金资助项目(41974162);陕西省自然科学基金资助项目(2020JQ-995,2020JQ-994);天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2020-TD-QN012)

作者简介:王 鹏(1982—),男,湖北监利人,研究员,博士。E-mail:wp717wangpeng@163.com

0 引 言

我国煤矿水文地质条件复杂,矿井水灾事故时有发生。掘进工作面是发生水害事故的主要地点^[1],而煤矿井下直流电法是掘进工作面前方含水体超前探测的主要方法之一^[2-3],迄今已在全国大水矿区得到30多年的应用,并被作为《煤矿安全规程》《煤矿防治水细则》等推荐的成熟技术。

随着煤矿井下直流电法超前探测技术研究的不断深入,一些专家学者对该方法的正确性、有效性等提出了不同的意见。黄俊革等^[4]以无限大板状体为例进行计算,结果显示仅利用视电阻率极值解释前方异常位置难度较大,据此认为该方法在理论上有待进一步研究和探讨;李飞等^[5]采用三维有限差分法对前方异常体的视电阻率响应进行计算,结果表明利用视电阻率最大异常幅度判定前方异常体的方法不可靠;张平松等^[6]认为依据点电源电场球壳理论的超前探测在实际应用中仍存在诸多问题;强建科等^[7]通过解析解和三维数值模拟,发现后方视电阻率曲线单调下降,无法判断异常体位置;罗国平^[8]通过球体解析解计算、地面相似性试验和实例分析,认为该方法解释结果与实际相差较远。以上学者发表的文章从球壳理论出发,对该方法的基本原理、数据处理、解释方法和探测效果等进行了探讨并提出了质疑,其主要论点可以概括为:①当点电源一侧存在异常体时,在点电源另一侧不会产生突变的异常,直流电法超前探测的球壳理论存在问题;②视电阻率异常范围远大于异常体的实际大小,且视电阻率异常位置与实际位置偏差较大;③直流电法超前探测主要是巷道底板而不是巷道前方地质情况的反映。

为了便于对比讨论,笔者针对上述的3个主要学术观点,从球壳理论概念的渊源、直流电法超前探测的原理、视电阻率异常特征提取方法等方面,开展技术探讨以利于煤矿井下直流电法超前探测技术的更深一步成熟发展。

1 球壳理论的渊源

笔者在“中国知网”中以“煤矿井下”+“直流电法”+“超前探测”组合主题词约束下对球壳理论进行检索,没有文献析出。与球壳理论相似的描述最早出现在《高分辨地电阻率法探测地下洞体》一书中^[9],该书利用多条单极-偶极测线确定地下洞体位置,根据等位壳层反映异常的原则,提出了以电流电极为圆心,以发生电位异常的电位电极到电流电

极的距离为半径画弧的办法,认为圆弧在地下的交汇影像就是所探测的洞体,其主要针对在地面探测地下洞体而提出的。在煤矿井下直流电法超前探测方面的200多篇文献检索中,韩德品等^[10]、张平松等^[6]为了便于形象阐述直流电法超前探测的技术原理,提到了球壳理论,并对其均质条件、激励电场影响范围、真假异常识别方法、低电阻率异常的距离定位和性质判定等展开了探讨(图1,N、M电极点),作者们一致认为根据巷道后方供电点电源所形成的电场分布,测试不同位置电位异常并依据等位面特征,可将后方测试的异常对应到前方地质条件的超前解释中^[6]。

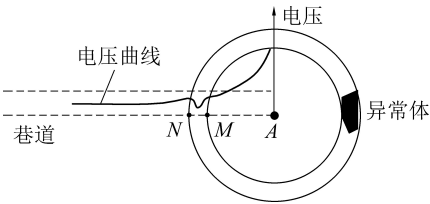


图1 球壳解释方法示意
Fig.1 Schematic of spherical shell interpretation method

实际上,直流电法超前探测数据的处理解释还需要进行巷道空腔和后方局部不均匀体影响校正^[11-13],再利用3条曲线进行空间交汇^[10],以排除非前方异常体的影响;在异常响应较弱的情况下,还需要进一步利用技术手段进行异常提取,并通过建立异常位置和真实位置之间的经验公式来对异常位置加以校正^[4,14-16],并非直接将后方异常镜像解释为前方地质条件那么简单。

因此,球壳理论并非学术界的主流认识,假设球壳理论成立来讨论直流电法超前探测技术的可行性,所获结论并不具有代表性,可能存在以偏概全的问题。

由于煤矿井下直流超前探测技术的数据采集、处理与解释方法,都建立在其探测原理基础之上。因此,下面首先从理论分析的角度,通过数值模拟手段对煤矿井下直流电法的探测原理进行论证。

2 直流电法超前探测的基本原理

煤矿井下直流电法超前探测技术以含水目标体与围岩的电阻率差异为物理基础,通过在掘进工作面附近布置点电源形成全空间电流场,在后方采集电位差数据,提取前方异常体信息,进而实现超前探测。

2.1 点电源在全空间的电场分布

为了便于对比分析,拟采用模型参数进行正演

模拟:在全空间中布设电流强度 1 A 的点电源,以点电源位置为坐标原点,假设在其前方 15~35 m 处存在一边长 20 m、电阻率 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 的低阻立方体异常,围岩电阻率 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 。对该模型采用有限差分法进行三维直流电法超前探测数值模拟^[13],模拟所得的电场分布如图 2a 所示,图中用黑色虚线方框标示了异常体的位置,实线为受异常体影响的电位等值线,虚线为均匀全空间的电位等值线。对比可见:异常体所在位置电位发生明显畸变,并且在点电源后方受异常体影响的电位等值线与均匀全空间的电位等值线存在明显的偏离,表明在点电源后方异常体的影响依旧存在;进一步计算受异常体影响的电场和均匀全空间电场的差值(图 2b)可见:前方低阻异常体的电位变化剧烈,在点电源后方的异常场相对偏弱,但其影响范围超过 80 m。

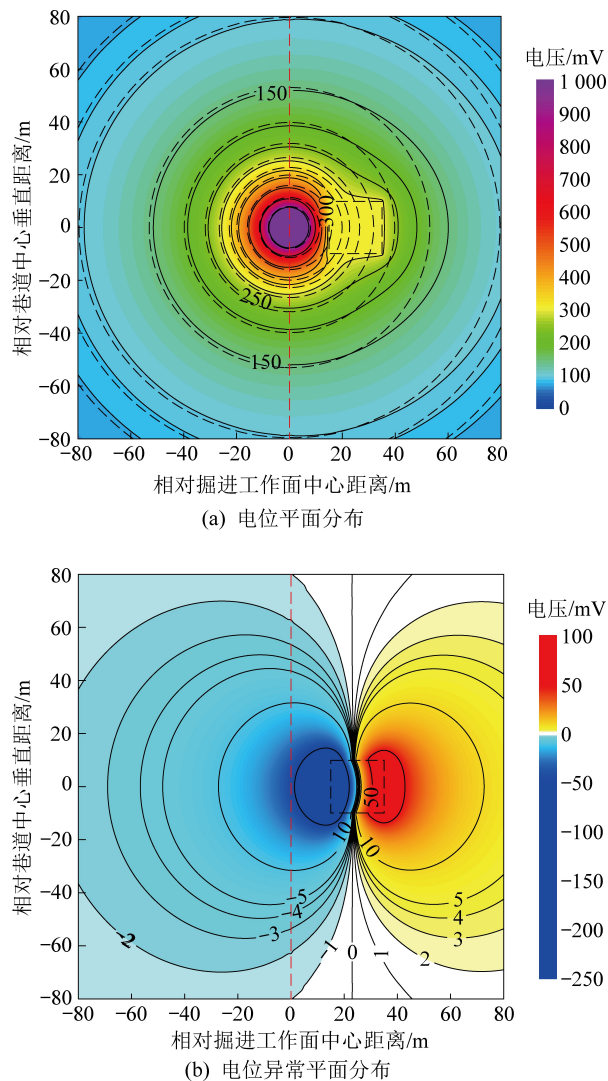


图 2 含低阻异常体的电位和电位异常平面分布
Fig.2 Plane distribution of potential and potential anomalies with low resistivity anomalies

考虑到煤矿井下掘进巷道前方超前探测的工况

环境,直流电法需要探测的目标体是巷道前方的低阻异常体,在掘进工作面附近点电源供电后全空间的静电场分布中,巷道前方低阻异常体附近的电力线最为聚集、电位差最为明显。但是,目前尚无法进入巷道前方的实体煤中直接观测其变化;反过来,前面的正演模拟结果表明,由于前方低阻异常体的存在导致后方的电场分布发生变化,尽管这一变化相对于巷道前方来说异常幅度较小,但这毕竟是现实可观测到的客观异常存在。另一方面,相对于巷道前方的强异常场而言,尽管巷道后方的异常场整体处于“弱异常”,但是巷道前方低阻异常体在后方的“弱异常”相对于背景场而言则是“较强异常”,如果通过设置合理的观测参数、提高仪器灵敏度和动态范围、改善异常提取方法等综合手段,完全可以在巷道后方实现其前方低阻异常的有效观测,这就是“遇强则弱,遇弱则强”辩证思维的具体体现。

上述结果表明:在点电源后方布置测线对前方异常体进行超前探测,从理论上来说是可行的,但后方异常响应比前方异常响应要弱是不争的事实,必须采取针对性的采集和处理方法,以记录弱异常、增强弱异常。

2.2 井下超前探测的工作方式

煤矿井下直流电法超前探测方法早期只采集一条由单个点源供电时的电位差曲线^[17](定点源梯度法或单极-偶极法);后来发展为采集 3 个或 4 个点源分别供电时的电位差曲线^[10,18](三点-三极法,七电极系);另有在底板或侧帮布置多条测线的三维超前探测方法^[19-20]以及在掘进工作面布置观测电极的聚焦法^[21-22]等。当前,煤矿井下主流工作方式如图 3 所示的三点-三极法。在掘进工作面附近按 4 m 间距布置 3 根电极作为供电电极(A_1 、 A_2 、 A_3),在后方按 4 m 间距布置若干电极作为接收电极(M 、 N),在供电电极分别供电时,采集后方接收电极之间的电位差,获得 3 条电位差曲线(图 3)。

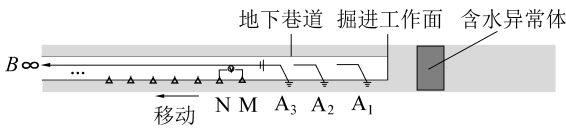


图 3 直流电法超前探测工作方式示意
Fig.3 Schematic of working mode of direct current advance detection method

煤矿井下直流电法工作方式从单点-三极、三点-三极法到多点-多极观测方法的演变,其目的是通过在空间数据采集上增加信息量,以便于为后续

弱信号处理和异常提取创造条件。

3 视电阻率异常特征的提取

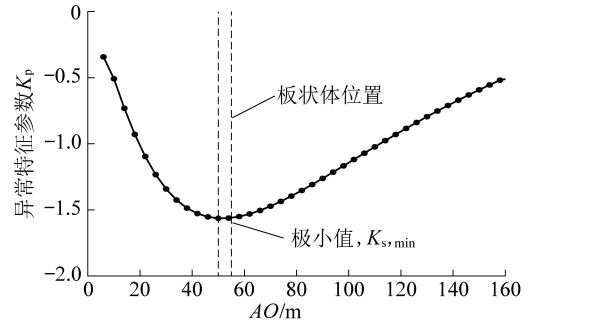
针对均匀全空间中低阻板状体和低阻球体这2类目标体,根据其响应特征确定异常特征参数,阐述弱异常的提取和定位方法。在上述2类模型条件下,点电源的电位分布解析解公式已由文献[4,11]推导给出。据此可计算各接收电极处的绝对电位和相邻电极的电位差,继而按全空间装置系数可计算视电阻率值。

3.1 板状体异常特征参数

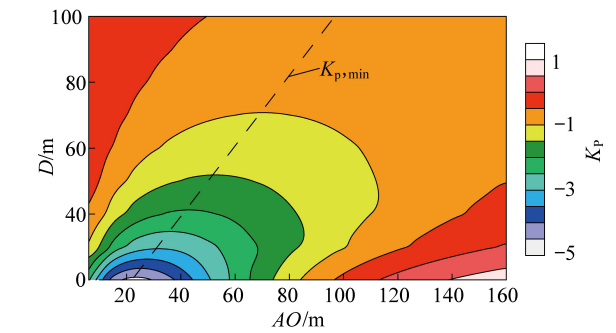
定义低阻板状体的异常特征参数 K_p 为

$$K_p = \sqrt{AO\rho'_s} \tag{1}$$

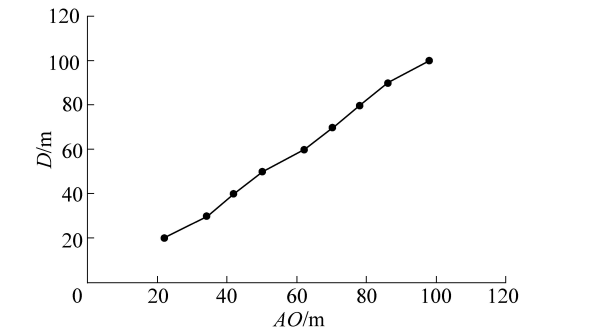
式中: AO 为极距; ρ'_s 为视电阻率导数。



(a) 板状体的异常特征参数曲线



(b) 板状体位于不同距离D时的异常特征参数



(c) 异常特征参数极小值时的异常距离与对应极距

图4 板状体异常特征参数与极距的关系
Fig.4 Relationships between abnormal characteristic parameters of plate and polar distance

板状体模型异常特征参数随极距变化的曲线如图4a所示。可见,异常特征参数出现极小值的位置,对应极距接近于异常到巷道掘进工作面的距离。

改变板状体距离,分别计算异常特征参数,绘制如图4b所示的异常特征参数等值线图,其横轴为极距、纵轴为异常体与点电源的距离。可见,对不同距离时的异常特征参数,随着极距增加均出现极小值。提取极小值对应极距,可以获得板状体距离与异常特征参数极小值处极距的变化关系(图4c)。显然,两者之间为线性关系,拟合关系式为

$$D = 1.084 \text{ } AO|_{K_{p,\min}} - 5.289 \tag{2}$$

式中: D 为点电源与板状体的最小距离; $AO|_{K_{p,\min}}$ 为异常特征参数取最小值 $K_{p,\min}$ 时对应的极距。

式(2)表明:依据后方采集数据计算的异常特征参数,能够获得前方板状体的距离,二者之间存在一定的线性关系。

按上述关系式计算结果、按极距1:1结果分别与板状体模型距离之间的对比情况见表1。

表1 板状体关系式计算结果对比
Table 1 Comparison of results calculated according to formula of plate

实际距离/m	极小值对应极距/m	关系式距离/m	关系式偏差/m	极距1:1偏差/m
20	22	18.6	1.4	-2.0
30	34	31.6	-1.6	-4.0
40	42	40.2	-0.2	-2.0
50	50	48.9	1.1	0
60	62	61.9	-1.9	-2.0
70	70	70.6	-0.6	0.0
80	78	79.3	0.7	2.0
90	86	87.9	2.1	4.0
100	98	101.0	-1.0	2.0

按关系式计算结果偏差约±2 m以内,按极距1:1结果偏差约±4 m以内,属于实际工作中可接受范围。

3.2 球体异常的特征参数

定义低阻球体的异常特征参数 K_s 为

$$K_s = AO^2 \rho'_s \tag{3}$$

同样,绘制球体模型异常特征参数随极距变化的曲线如图5a所示,图5a中异常特征参数出现极小值,对应的极距接近异常距离。

改变球体与巷道的距离,分别计算异常特征参数,异常特征参数等值线如图5b所示。图中横轴为极距、纵轴为球心与点电源的距离。可见,球心与巷道掘进工作面不同距离时的异常特征参数,随着极

距增加均出现极小值;通过提取极小值对应的极距,可以获得球心距离与异常特征参数极小值处极距的变化关系如图 5c 所示。同样,显见两者之间为线性关系,拟合关系式为

$$D = 0.940\ 1AO|_{K_{s,\min}} - 7.690\ 6 \tag{4}$$

式中: D 为点电源与球体的最小距离。 $AO|_{K_{s,\min}}$ 为异常特征参数取最小值对应的极距。

式(4)表明:依据后方采集数据计算的异常特征参数,同样能够预测前方球体的距离。

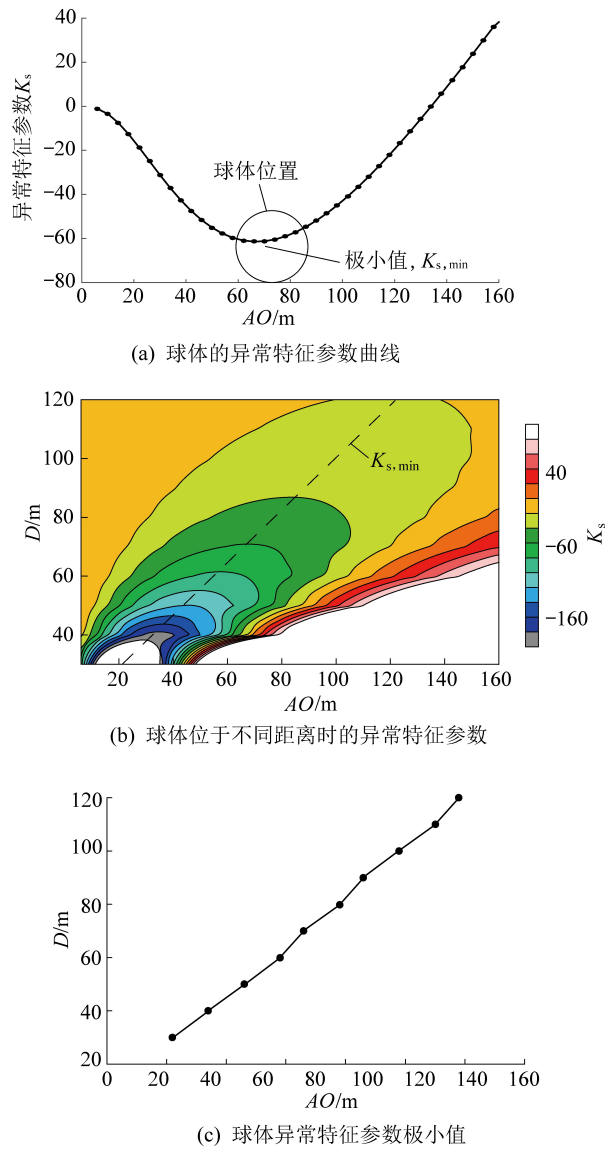


图 5 球体异常特征参数与极距的关系

Fig.5 Relationships between abnormal characteristic parameters of sphere and polar distance

按上述关系式计算结果、按极距 1 : 1 结果分别与球体模型距离之间的对比情况见表 2。

可以看出:低阻球体与巷道掘进工作面的距离,按关系式计算结果偏差基本在±2 m 以内;按极距 1 : 1 结果偏差在 8 m 以内,呈现整体偏近,近处异常

误差相对大的特点。

表 2 球体关系式计算结果对比

Table 2 Comparison of calculated results according to formula of sphere

实际距离/m	极小值对应极距/m	关系式距离/m	关系式偏差/m	极距 1 : 1 偏差/m
30	22	28.4	1.6	8.0
40	34	39.7	0.3	6.0
50	46	50.9	-0.9	4.0
60	58	62.2	-2.2	2.0
70	66	69.7	0.3	4.0
80	78	81.0	-1	2.0
90	86	88.5	1.5	4.0
100	98	99.8	0.2	2.0
110	110	111.1	-1.1	0.0
120	118	118.6	1.4	2.0

由上述板状体、球体异常的解析计算结果和异常提取分析结论来看:通过关系式可获得前方异常距离,且探测结果与实际距离相差较小;直接使用镜像 1 : 1 进行解释时,除近距离球体模型外,其他情况所得结果与实际距离的误差均相对较小。

3.3 巷道底板异常的响应特征

建立如图 6 所示存在底板异常的超前探测模型,假设巷道前方距离掘进面 10 m 处存在厚度 5 m、电阻率 $\rho_1=20\ \Omega\cdot\text{m}$ 的板状异常体,巷道底板下方距离掘进面后方 $d=50\ \text{m}$ 处存在边长 4 m、埋深 $h=2\ \text{m}$ 、电阻率 $\rho_2=50\ \Omega\cdot\text{m}$ 的立方体异常,围岩电阻率 $\rho_0=500\ \Omega\cdot\text{m}$ 。采用三点-三极法进行超前探测模拟,分别布设点电源 A1、A2、A3,其中 A1 位于巷道掘进面,点电源间距 4 m,接收电极间距 4 m,测线长度 200 m,模拟所得的探测曲线如图 7 所示。

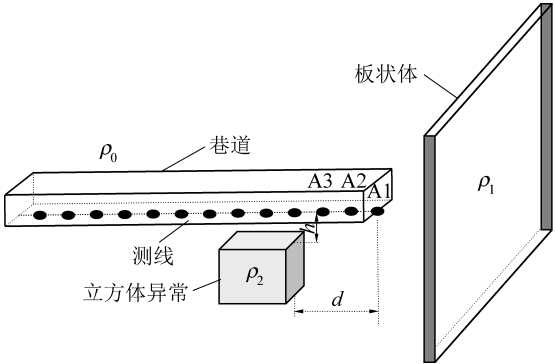


图 6 存在底板异常的超前探测模型

Fig.6 Advanced detection model with floor anomaly

图 7 中标示了板状体的镜像位置和立方体的实际位置,图中的虚线是不存在底板异常时的视电阻率曲线,图中带标记的实线是存在底板异常时的视

电阻率曲线。对比可见,不存在底板异常时,视电阻率曲线呈光滑渐变趋势;存在底板异常时,视电阻率曲线在底板异常正对的位置出现显著的畸变。随着点电源逐渐往后移动,板状体异常幅度逐渐减小,曲线的极小值位置逐渐向后推移;在此过程中,底板立方体异常的响应幅度则相对不变,视电阻率曲线发生畸变的位置也未发生移动。从上述分析可见,底板立方体异常响应特征明显,易于识别,但并没有掩盖前方板状体的异常响应。因此,在实际探测中,可以先通过比值法^[13]或拟合法等数据预处理方法对底板异常的影响加以校正,进一步通过前文提出的异常特征参数来提取前方异常。

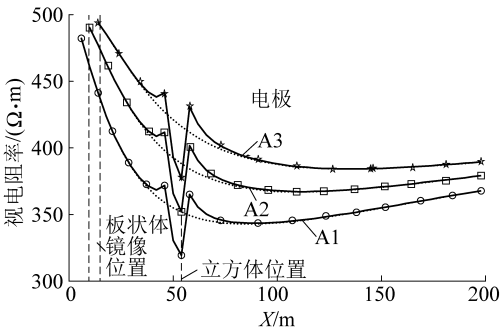


图7 存在底板异常时的超前探测模拟结果
Fig.7 Simulation results of advanced detection with floor anomaly

3.4 最大超前探测距离

煤矿井下掘进工作面直流电法超前探测数据采集时,煤矿井下允许的最大供电电流为 65 mA,数据采集仪器最小可分辨信号为 10 μV。设定最大供电电流为 60 mA,最小可分辨信号为仪器极限的 3 倍 (30 μV),以前述模型正演结果分析最大超前探测距离。

前方异常体在后方产生的纯异常电位差如图 8 所示。当电位差超过 30 μV 时,异常信号能被采集到。图 8 中,球体的极限极距为 72 m,板状体的极限极距为 87 m。根据式(2)、式(4)进行计算,球体最大探测距离为 75.4 m,板状体最大探测距离为 89.0 m。

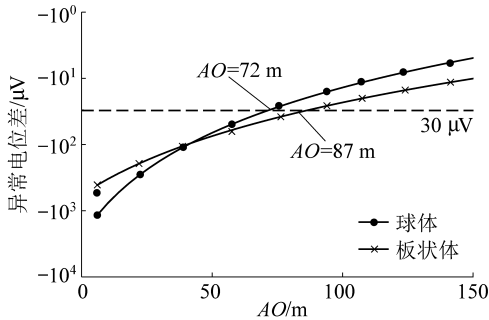


图8 异常电位差曲线与最小信号
Fig.8 Abnormal potential difference curves and minimum signal

4 结 论

1)煤矿井下掘进工作面前方的低阻异常体,在巷道后方具有弱异常的响应特征,采用高精度的观测仪器、采集方法和异常提取技术等可以捕捉、定位该异常,表明煤矿井下掘进工作面直流超前探测技术的原理是正确的。

2)巷道前方异常在后方原始电位上未发生“突变”,只有通过异常特征参数提取才能产生类似的“突变”特征,因此井下直流超前探测的数据处理技术值得深入研究。

3)巷道前方异常体到点电源的距离,与巷道后方异常特征参数出现的距离,二者之间存在一定的线性关系,这是该方法数据处理的基础支撑。

4)存在底板异常时,视电阻率曲线在底板异常正对的位置出现显著的畸变,但其并未掩盖巷道前方的异常响应,其影响可通过数据预处理方法加以校正。

5)按照电法仪器最大供电电流 60 mA、最小检测信号 30 μV 计算,采用本论文的数据处理方法时,煤矿井下直流电法超前探测的最大距离约 80 m。

上述是以均匀全空间中点电源对板状体和球体的电场分布为基础开展的理论分析,采用的模型相对实际条件进行了简化,给出的定量计算公式存在一定的条件限定。文中未涉及巷道空腔、层状介质、异常体大小、电阻率差异变化等影响,建议后续进一步开展针对性研究。

参考文献 (References) :

[1] 国家煤矿安全监察局.中国煤矿水害防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.

[2] 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, PEN 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.

[3] 岳建华,薛国强.中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾[J].地球物理学进展,2016,31(4):1716-1724.
YUE Jianhua, XUE Guoqiang. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1716-1724.

[4] 黄俊革,王家林,阮百尧.坑道直流电阻率法超前探测研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1529-1538.
HUANG Junge, WANG Jialin, RUAN Baiyao. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1529-1538.

- [5] 李 飞,程久龙,谭 强,等.巷道掘进中电阻率法超前探测研究[J].煤矿安全,2012,43(7):30-34.
LI Fei, CHENG Jiulong, TAN Qiang, *et al.* Study on Advanced Detection by Resistivity Method in Roadway Excavation [J]. safety in coal mines, 2012, 43(7):30-34.
- [6] 张平松,李永盛,胡雄武.巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J].地下空间与工程学报,2013,9(1):135-140.
ZHANG Pingsong, LI Yongsheng, HU Xiongwu. Application and discussion of the advanced detection technology with DC resistivity method in tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1):135-140.
- [7] 强建科,阮百尧,周俊杰,等.煤矿巷道直流三极法超前探测的可行性[J].地球物理学进展,2011,26(1):320-326.
QIANG Jianke, RUAN Baiyao, ZHOU Junjie, *et al.* The feasibility of advanced detection using DC three-electrode method in coal-mine tunnel[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(1):320-326.
- [8] 罗国平.直流电阻率三极超前探测的有效性[J].中国煤炭地质,2017,29(3):72-75.
LUO Guoping. Effectiveness of DC resistivity tri-electrode advanced prospecting[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(3):72-75.
- [9] 阎 述,陈明生.高分辨地电阻率法探测地下洞体[M].北京:地质出版社,1995:90-91.
- [10] 韩德品,李 丹,程久龙,等.超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J].煤炭学报,2010,35(4):635-639.
HAN Depin, LIDan, CHENG Jiulong, *et al.* DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):635-639.
- [11] 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.
LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, *et al.* Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10):3093-3101.
- [12] 刘 斌,李术才,李树忱,等.隧道含水构造电阻率法超前探测正演模拟与应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(1):246-253.
LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, *et al.* Forward modeling and application of electrical resistivity method for detecting water-bearing structure in tunnel [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1):246-253.
- [13] 鲁晶津,吴小平.巷道直流电阻率法超前探测三维数值模拟[J].煤田地质与勘探,2013,41(6):83-86.
LU Jingjin, WU Xiaoping. 3D numerical modeling of tunnel DC resistivity for in-advance detection[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(6):83-86.
- [14] 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,2000,28(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, 28(4):60-62.
- [15] 鲁晶津.地球电磁三维数值模拟的多重网格方法及其应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
LU Jingjin. Studies of multi-grid Algorithm for 3D geo-electromagnetic modeling and its applications[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [16] 刘 洋,吴小平.巷道超前探测的并行 Monte Carlo 方法及电阻率各向异性影响[J].地球物理学报,2016,59(11):4297-4309.
LIU Yang, WU Xiaoping. Parallel Monte Carlo method for advanced detection in tunnel incorporating anisotropic resistivity effect[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11):4297-4309.
- [17] 李学军.煤矿井下定点源梯度法超前探测试验研究[J].煤田地质与勘探,1992,20(4):59-63.
LI Xuejun. Study and experiment on heading detecting by fixed electric source gradient method in underground [J]. Coal Geology & Exploration, 1992, 20(4):59-63.
- [18] 刘青雯.井下电法超前探测方法及其应用[J].煤田地质与勘探,2001,29(5):60-62.
LIU Qingwen. Underground electrical lead survey method and its application [J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5):60-62.
- [19] 刘 路.矿井直流电阻率法三维超前探测技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
LIU Lu. Study on DC resistivity method 3D advanced prediction technology in mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [20] 胡雄武.坑道立体电阻率法超前探测技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2010.
HU Xiongwu. Study on stereo resistivity method advance detection technology in tunnel [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2010.
- [21] 阮百尧,邓小康,刘海飞,等.坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法研究[J].地球物理学报,2009,52(1):289-296.
RUAN Baiyao, DENG Xiaokang, LIU Haifei, *et al.* Research on new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1):289-296.
- [22] 张 力,阮百尧,吕玉增,等.坑道全空间直流聚焦超前探测模拟研究[J].地球物理学报,2011,54(4):1130-1132,1134-1139.
ZHANG Li, RUAN Baiyao, LYU Yuzeng, *et al.* Study of full-space numerical modeling of advanced exploration in tunnel with DC focus resistivity method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4):1130-1132, 1134-1139.