



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

刘志民,李冰,潘越,等.坑道直流聚焦多点电源探测聚焦与偏转效应研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):174-179. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.023

LIU Zhimin,LI Bing,PAN Yue,*et al.* Research on focusing and deflection effect of detection with DC focusing multipoint current sources in tunnel[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 174-179. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.023

坑道直流聚焦多点电源探测聚焦与偏转效应研究

刘志民¹,李冰¹,潘越¹,吴淼²

(1.河北工程大学机械与装备工程学院,河北邯郸 056038;2.中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要:为增加直流电法水平勘探深度,准确查明掘进前方异常体的具体方位,减少机电设备、轨道、地形起伏、电磁干扰等因素对探测结果的影响,开展了直流聚焦多点电源探测聚焦与偏转效应正演模拟。据聚焦电法探测机理,采用有限单元法对空间多点电源场各节点电位进行求解,并推导空间场的电场线微分方程。利用 COMSOL 软件建立三维地电几何模型,通过改变屏蔽电极与主电极发射电流强度,对不同异常地质情况下的空间电流场聚焦分布特征及电位变化百分比曲线变化规律进行有限元数值模拟。结果表明:聚焦效应探测可增加掘进工作面正前方空间电场线的分布密度,使异常体探测会更加敏感;当掘进工作面正前方存有异常体时,聚焦效应相比无聚焦效应探测效果较好,至少可增大 50% 的探测距离,且随着屏蔽电流增大,探测效果越好,但对至掘进工作面 18 m 外的异常体探测效果变化不大;当异常体为低阻体时,电位变化百分比的值为负,反之为正;当异常体偏离坑道中心轴线时,探测效果随着偏离距的增大逐渐变差,此时通过改变屏蔽电流大小使探测电场进行偏转扫描探测,依据主电极四周各方位测量电极的电位变化百分比的变化规律确定出异常体的具体方位。

关键词:直流聚焦多点电源;聚焦与偏转效应;电流场;视电阻率

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)11-0174-06

Research on focusing and deflection effect of detection with DC focusing multipoint current sources in tunnel

LIU Zhimin¹, LI Bing¹, PAN Yue¹, WU Miao²

(1. College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to increase the horizontal exploration depth of direct current method, find out accurately the specific direction of the abnormal body in front of the tunnel face, and reduce the influence of electromechanical equipment, track, terrain fluctuation, electromagnetic interference and other factors on the detection, forward modeling of focusing and deflection effect of detection with DC focusing multipoint current sources were carried out. According to the detection mechanism of the focusing electric method, the potential values of multi-point power sources in tunnel is solved by using the finite element method, and the differential equation of the electric field line of the space field is derived. We can build a three-dimensional geoelectric geometric model with COMSOL, then change the emission current intensity of the shield electrode and the main electrode to simulate the focusing distribution characteristics of the space current field and the change rule of the potential change percentage curve in different abnormal geological conditions by finite element method. The simulation results show that focusing effect detection can increase the distribution density of electric field lines in front of the tunnel face and make the detection of abnormal bodies more sensitive; when there is an abnormal body in front of the tunnel face, the effect of focusing effect detection is better than without focusing effect detection, and the detection distance can be increased by at least 50%, and as the shielding current increases, the detection effect is better, but the detection effect of the abnormal body 18 m away from the tunnel face has little change. When the abnormal body is a low-resistance body, the percentage of potential change is negative, otherwise it is positive. When the abnormal body deviates

收稿日期:2020-10-25; **责任编辑:**曾康生

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(D2017402158);河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD2019046);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA06A405)

作者简介:刘志民(1975—),男,河北承德人,副教授,博士。E-mail:liuzhiminhd@126.com

from the central axis of the tunnel, the detection effect deteriorates gradually with the increase of the deviation distance. At this time, by changing the size of shielding current to detect electric field used for deflection scanning detection, the specific direction of the abnormal body can be determined according to the changing rule of percentage of potential change of the measuring electrode in all directions around the main electrode. This research is of great significance for interpreting accurately the data of the specific direction of the abnormal body and creating the exploration technology of focusing electric method.

Key words: DC focusing multipoint current sources; focusing and deflection effect; current field; apparent resistivity

0 引言

电法勘探在矿产开采、隧道掘进等地下工程施工领域中广泛应用,施工过程中通过查明坑道前方的地质情况,可有效避免水灾、动力地质灾害和瓦斯等灾害的发生,对保证财产及生命安全具有重要意义。直流电法是电法勘探中最常用的探测方法之一,与地质雷达法^[1]、地震勘探法^[2]、瞬变电磁法^[3]等探测技术相比,具有探测距离远、操作简单、适应能力强等优点,然而直流电法勘探技术多采用点电源供电和常规的电阻率剖面装置进行测量,其探测结果通常会受到坑道后方及旁侧的机电设备、轨道、地形起伏、电磁干扰等因素影响,有时会造成掘进前方异常体的资料解译与实际工况产生较大偏差^[4-5]。因此,为增加水平勘探深度,减小上述干扰因素影响,提高超前探测结果的准确性,国内外众多学者提出聚焦电法探测技术,并针对聚焦电法探测技术开展大量研究。

DOLL^[6]在休斯敦试验中设计了七电极侧向测井技术,PANISSOD等^[7]提出多电极在地面聚焦排列方式,并在侧向测井领域进行了可行性验证。阮百尧等^[8-9]提出一种在掘进工作面上设立环状电极组,使探测电流场具有聚焦功能的新型探测装置与方法。文献[10-12]对直流聚焦电阻率法的超前探测距离及其影响探测距离的主要因素进行有限元数值模拟,并对多种电极组合进行对比分析,通过数值模拟得出了探测效果较为理想的电极组合装置,并从理论上验证了直流聚焦电阻率法探测技术对掘进正前方异常体探测具有较强的敏感性。目前,聚焦电法探测技术理论尚未成熟,有关掘进前方异常体具体方位的确定方法有待进一步的研究与探讨。基于此,笔者通过构建直流聚焦多点电源地电几何模型,改变屏蔽电极与主电极发射电流,对其空间电流场分布及聚焦与偏转效应探测特性进行正演模拟,此研究对异常体具体方位的资料准确解译及创成聚焦电法探测技术具有重要意义。

1 构建聚焦多点电源探测地电几何模型

坑道直流聚焦多点电源探测是利用同性电流相

互排斥的性质,使屏蔽电极形成的约束电场挤压主电极形成的探测电场,从而使主电极的电流场沿着某一方向聚焦传播,进而增大水平向前探测距离。依据坑道实际地质工况,运用 COMSOL 软件构建三维地电几何模型如图 1 所示。设地电模型的尺寸为 80 m×50 m×50 m(长×宽×高),掘进工作面有效断面面积为 6 m×6 m,至掘进工作面正前方一定距离处存在一异常体。

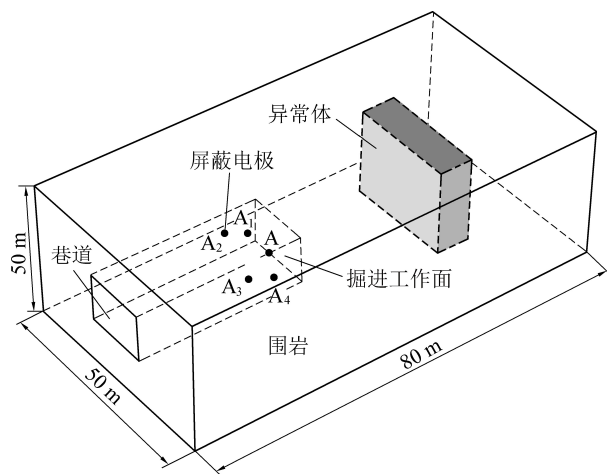


图 1 三维地电几何模型

Fig.1 3D geoelectric geometric model

使主电极 A 布置在掘进工作面的中心位置,4 个屏蔽电极 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 围绕主电极 A 对称布置在距掘进工作面后方 3 m 处的坑道壁上,测量电极 N (N') 采用二极装置,分别对称布置在掘进工作面四周,距主电极 A 为 1.5 m,如图 2 所示,所有电极均设置为铜材料。由于坑道空腔对探测结果具有较大影响^[13-14],在几何模型中可将巷道空腔视为一个高阻异常体^[15],所以其电阻率设置为 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot m$ 。

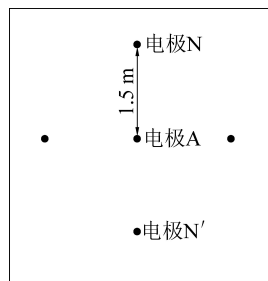


图 2 掘进工作面的电极布置点

Fig.2 Electrode arrangement ponits of tunnel face

2 空间场有限元数值模拟及电流场分布特征

2.1 空间场有限元数值模拟

在空间场有限元数值求解过程中,任意一点总电位 V 包含正常电位 u_0 和异常电位 u , 即

$$V = u_0 + u \quad (1)$$

空间场异常电位 u 满足如下边值条件^[16-19], 即

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla u) = -\nabla \cdot (\sigma' \nabla u_0) \in \Omega \\ \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \in \Gamma_s \\ \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\cos \theta}{R} u = 0 \in \Gamma_\infty \\ u_1 = u_2 \in \Gamma \\ \sigma_1 \frac{\partial u_1}{\partial n_1} + \sigma_2 \frac{\partial u_2}{\partial n_2} = -\left(\sigma_1 \frac{\partial u_0}{\partial n_1} + \sigma_2 \frac{\partial u_0}{\partial n_2}\right) \in \Gamma \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\frac{\cos \theta}{R} = \frac{1}{R'_1 + R'_2 + \dots + R'_N} \times \left(\frac{R'_1}{R'_1} \cos \theta_1 + \frac{R'_2}{R'_2} \cos \theta_2 + \dots + \frac{R'_N}{R'_N} \cos \theta_N \right)$, $R'_1 = R_2 R_3 \dots R_N$, $R'_2 = R_1 R_3 \dots R_N$, $R'_N = R_1 R_2 \dots R_{N-1}$, $(N=5)$ 。

式中: σ 为均匀介质的电导率; σ' 为异常体的电导率; Ω 为空间任意闭合面 Γ 所围成的空间区域; Γ_s 为地面边界; n 为边界法线方向; Γ_∞ 为无穷远边界; R_N 为点源到边界的距离; θ_N 为某点边界外法线的单位矢量 n 和 R_N 的夹角。 u_1 和 u_2 分别为电导率 σ_1 和 σ_2 所在区域电位; n_1 和 n_2 为分界面区域外法线方向。

与式(2)等价的变分问题为

$$\begin{cases} F(u) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 + \sigma' \nabla u_0 \cdot \nabla u \right] d\Omega + \\ \int_{\Gamma_\infty} \left(\frac{\cos \theta}{R} \right) \left(\frac{1}{2} \sigma u^2 + \sigma' u_0 u \right) d\Gamma \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

使用正四面体网格局部自适应算法进行剖分, 此方法可在电位变化较大的区域使网格自动加密, 在电位变化较小的区域使网格自动变疏, 既保持了空间场异常电位的求解精度, 又提高计算效率^[20]。求解过程中先将研究区域和边界进行单元积分计算, 再将单元系数矩阵合成并变分处理, 最终得到线性方程组 $Ku = K' u_0$, 其中 K 与 K' 分别为异常电位向量和正常电位向量的总体系数矩阵, 求解线性方程组即可得到聚焦电场各节点的异常电位的解。对

于正常电位的求解, 可根据聚焦多点电源电极组合方式来计算, 由于所研究的问题为坑道条件下全空间分布, 因此空间场中 A 点正常电位 u_0 为主电极正常电位 u_A 和屏蔽电极正常电位 $u_{A,i}$ 之和。

$$u_0 = u_A + \sum_{i=1}^4 u_{A,i} = \frac{I_0 \rho_0}{4\pi R_A} + \frac{I_s \rho_0}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \frac{1}{R_{A,i}} \quad (4)$$

式中: I_0 为主电极的电流强度; I_s 为屏蔽电极的电流强度; ρ_0 为点源处电阻率; R_A 、 $R_{A,i}$ 分别为主电极及屏蔽电极到空间任意一点的距离。

将各参数代入方程中即可得出各节点正常电位 u_0 , 最后将所得到的异常电位与正常电位相加即可求出各节点总电位 V 。为增加水平勘探深度, 应增大电流密度, 即使较多的电流沿掘进工作面正前方流过。电流密度的分布规律与电场强度完全相同, 可用电场线的疏密程度进行度量。根据稳定电流场性质, 空间场任意一点电场强度 E 与电位 V 满足如下方程:

$$E = -\text{grad}V = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} i + \frac{\partial V}{\partial y} j + \frac{\partial V}{\partial z} k \right) \quad (5)$$

而电场线上任意一点的切线方向与该点的电场强度方向相一致, 引入参量 t , 得到空间多点电流源电场线微分方程为

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z} = dt \quad (6)$$

其中: E_x 、 E_y 、 E_z 分别为沿 x 、 y 、 z 轴的电场强度分量。

2.2 均匀介质空间电流场分布特征

设均匀围岩介质的电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 在掘进工作面正前方不存在异常体时, 使主电极与屏蔽电极的电流强度均为 $0.1 A$, 空间电流场分布规律如图 3 所示。

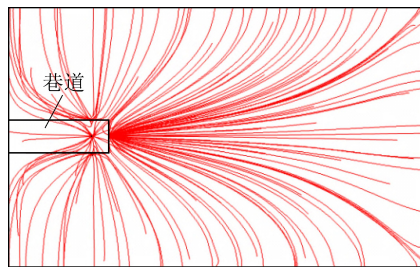


图 3 均匀介质空间电流场分布规律

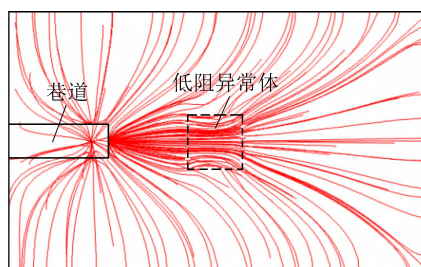
Fig.3 Distribution law of current field in uniform medium space

从图 3 可以看出电场线从电极出发向四周扩散, 在巷道正前方电场线分布较为密集, 但随着距掘进工作面正前方距离的增加, 电场线的密集程度逐渐减小; 在偏离坑道中轴线的区域, 电场线分布较稀疏, 偏离中轴线的距离越大, 电场线分布越稀疏。电场线的密集程度表示电流密度的大小, 即电场线越

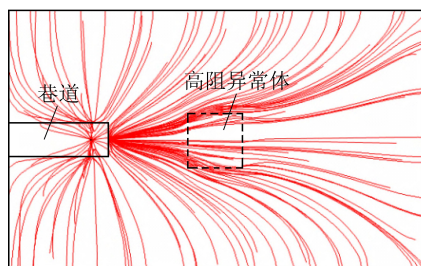
密,电流密度越大,反之越小,这就证明了添加屏蔽电极后掘进工作面前方的电流密度会增大,此时对掘进工作面前方较远处介质探测会更加敏感。

2.3 含异常地质构造空间电流场分布特征

设在坑道正前方 15 m 处存在某一低阻异常体(电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$),使主电极与屏蔽电极的电流强度仍为 0.1 A,此时空间电流场分布情况如图 4a 所示。当为高阻异常体时(电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{m}$),空间电流场分布情况如图 4b 所示。从图 4 可以看出,与图 3 一样,在巷道正前方电场线分布较为密集,随着距掘进工作面距离的增加电场线密集程度逐渐减小。对比图 4a 和图 3,当坑道正前方存在低阻异常体时,异常体周围的电场线向其靠拢,异常体所在区域电场线变密,这是由于低阻体对电流具有吸引作用,导致电流密度增大。对比图 4b 和图 3,当坑道正前方存在高阻异常体时,异常体周围的电场线沿其散开,异常体所在区域电场线变疏,这是由于高阻体对电流具有排斥作用,导致电流密度减小。



(a) 低阻异常体



(b) 高阻异常体

图4 存在异常体时的电场分布

Fig.4 Electric field distribution in presence of abnormal body

3 异常地质构造探测聚焦与偏转效应

3.1 聚焦效应探测

设坑道正前方存在电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 、长 8 m、宽 8 m、高 8 m 的低阻异常体,使主电极电流强度 I 为 0.1 A,屏蔽电流强度 I_s 分别为 0、0.1、0.3、0.5 A 时,通过测量电极 N 检测电位值,用电位变化百分比 α 来研究坑道前方异常体的变化特征,定义 α 为

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \times 100\% \quad (7)$$

其中: $\rho_s = kV'/I$ 为存在异常体时的视电阻率; $\rho = kV''/I$ 为无异常体时的视电阻率; k 为装置系数; V' 、 V'' 为测量电位;此时有

$$\alpha = \frac{kV'/I - kV''/I}{kV''/I} \times 100\% = \frac{V' - V''}{V''} \times 100\% \quad (8)$$

当异常体位于掘进工作面前方不同距离时,得到电位变化百分比 α 随异常体距掘进工作面距离 d 改变的变化曲线如图 5 所示。当其他测量条件保持不变,设巷道正前方某一电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 、长 8 m、宽 8 m、高 8 m 的高阻异常体时,得到电位变化百分比 α 随异常体距掘进工作面距离 d 改变的变化曲线如图 6 所示。

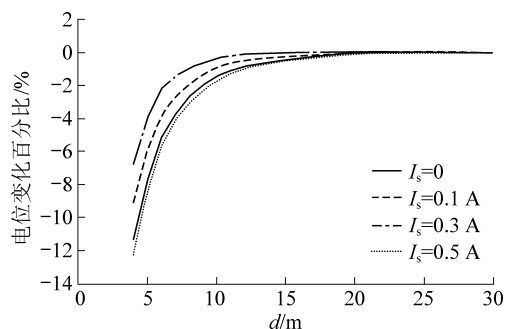


图5 低阻异常体聚焦效应探测 α 变化曲线

Fig.5 α changes curve of low resistance abnormal body during focusing effect detection

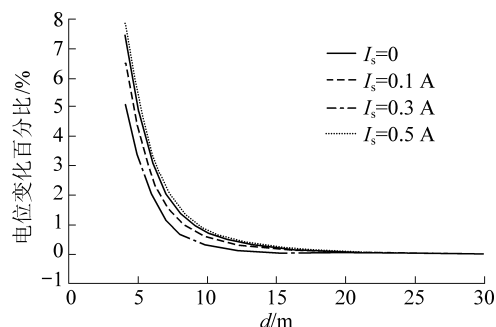


图6 高阻异常体聚焦效应探测时 α 变化曲线

Fig.6 α changes curve of high resistance abnormal body during focusing effect detection

从图 5 和图 6 中可以看出,当屏蔽电流强度 I_s 为 0 时(无聚焦效应),异常体距离掘进工作面越近, α 曲线梯度变化越大,异常体距掘进工作面大于 12 m 时, α 曲线变化趋于平缓;当屏蔽电流强度 I_s 为 0.1、0.3、0.5 A 时(有聚焦效应), α 曲线梯度的变化随屏蔽电流强度的增大而增大,且在异常体距掘进工作面大于 18 m 时, α 曲线梯度变化趋于平缓,即探测过程中有聚焦效应时探测效果较好,且至少可增大 50% 的探测距离。当异常体距离掌子较远时,随着屏蔽电流的逐渐增大, α 曲线变化梯度

逐渐减弱,且在探测过程中增大电流强度对探测仪器有较高要求,故探测时所选取的屏蔽电流强度不宜过大。从图5和图6还可以看出,当掘进工作面前方存在低阻异常体时, α 为负值,即测量电极电位值较无异常体时变小;当存在高阻异常体时, α 为正值,即测量电极电位值较无异常体时增大。

设在掘进工作面前方向上偏离坑道中轴线距离 h 分别为0、6、8、10 m处存在电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 、大小为长8 m、宽8 m、高8 m的低阻异常体,使主电极与屏蔽电极的电流强度均为0.1 A,得到电位变化百分比 α 随异常体距掘进工作面距离 d 改变的变化曲线如图7所示。从图中可以看出, α 变化梯度随异常体偏离坑道中轴线距离 h 的增加而减小,当 h 超过10 m时, α 变化梯度不超过0.25%,即采用聚焦效应探测时对偏离坑道中轴线的异常体识别能力减弱,且偏离距离越大,探测效果越弱,这表明聚焦效应探测不适用于偏离坑道中轴线的异常体。

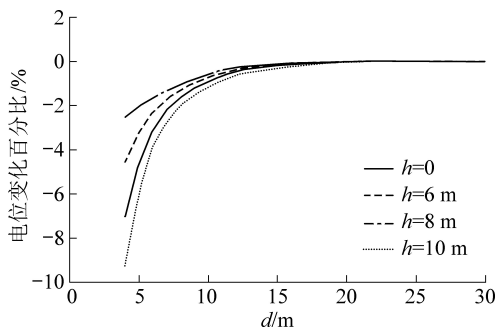


图7 异常体偏离掘进工作面中轴线时 α 变化曲线

Fig.7 α change curves when abnormal body deviates from axis of tunnel face

3.2 偏转效应探测

在掘进工作面前方向上偏离坑道中轴线距离 h 为8 m处存在电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 、大小为长8 m、宽8 m、高8 m的低阻异常体,使主电极和屏蔽电极 A_1 、 A_2 、 A_4 电流强度保持0.1 A不变,改变屏蔽电极 A_3 电流强度与主电极A电流强度之比 λ ,使探测电场由向前无偏聚焦变为向上偏状态,分别用主电极上下两侧的测量电极N和N'检测其电位,得到电位变化百分比 α 随异常体距掘进工作面距离 d 改变的变化曲线如图8所示。从图8中可以看出,随着 λ 的增大,与异常体同侧的测量电极N得到的 α 曲线梯度变化逐渐增大,而与异常体异侧的测量点N'得到的 α 曲线梯度变化不明显,即当异常体位于掘进工作面前方偏离中心轴线向上时,改变屏蔽电流大小使探测电场向上偏转,通过对比上下两侧测量电极N和N'的 α 曲线变化情况可以确定异常体的具体方向。同理,当异常体位于掘进工作面前方偏离

中心轴线不同方向时,改变屏蔽电流大小使探测电场向上或向下、向左或向右进行偏转扫描探测,分别对比主电极两侧测量电极得到的 α 曲线梯度变化规律,便可确定出异常体的具体方向,即靠近异常体一侧的测量电极得到的 α 曲线梯度变化较为明显,表明改变屏蔽电流大小可实现偏转扫描探测,对偏离坑道中轴线的异常体具有较好的探测效果。

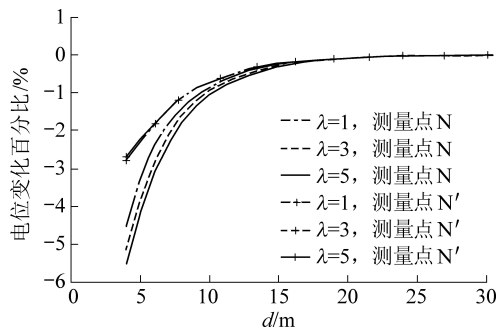


图8 偏转效应时 α 变化曲线

Fig.8 α change curves of deflection effect

4 结 论

1) 无论坑道前方是否存在异常体,采用聚焦多点电源探测进行水平超前探测,掘进工作面前方空间场电场线分布变密,其电流密度变大,对异常体探测会更加敏感。

2) 当掘进工作面前方存在异常体时,聚焦效应探测效果较好,且异常体为低阻体时,电位变化百分比 α 为负,反之为正。电位变化百分比 α 曲线梯度的变化随屏蔽电流强度的增大而增大,然而当异常体距掘进工作面大于18 m时,此时随屏蔽电流的增大, α 曲线梯度变化趋于平缓,故探测过程中屏蔽电流的选取不宜过大。当掘进工作面前方偏离中心轴线处存在异常体时,聚焦效应探测效果随着偏离距离的增大逐渐变差,故聚焦效应探测不适用于查明偏离中轴线的异常体。

3) 当掘进工作面前方偏离坑道中轴线某一距离处存在异常体时,改变屏蔽电流大小使探测电场进行偏转扫描探测,通过比较主电极四周各方位测量电极的电位变化百分比 α 曲线,若某一侧测量电极所得的 α 曲线梯度变化较大,则异常体位于该侧。

参考文献(References):

- [1] 李冬,杜文凤,许献磊. 矿井地质雷达超前探测方法及应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 223-228.
LI Dong, DU Wenfeng, XU Xianlei. Study on advanced detection method and application of mine geological radar[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 223-228.
- [2] 赵帝,杜文凤,勾精为,等. 煤田三分量地震勘探观测系统设计

- 计方法研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):182-187.
- ZHAO Di, DU Wenfeng, GOU Jingwei, *et al.* Study on design method of three-component seismic exploration & observation system in coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):182-187.
- [3] 薛国强,于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展,2017,32(1):319-326.
- XUE Guoqiang, YU Jingcun. New development of TEM research and application in coal mine exploration[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1):319-326.
- [4] 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.
- [5] 刘志民,韩 雷,张伟杰,等. 坑道聚焦双频激电法探测技术[J]. 煤炭学报,2016,41(12):3086-3094.
- LIU Zhimin, HAN Lei, ZHANG Weijie, *et al.* Research on the detection technology of focusing dual-frequency induced polarization method in tunnel [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12):3086-3094.
- [6] DOLL H G. The laterolog: a new resistivity logging method with electrodes using an automatic focusing system[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1951, 192:305-316.
- [7] PANISSOD C, LAJARTHE M, TABBAGH A. Potential focusing: a new multi-electrode array concept, simulation study, and field tests in archaeological prospecting[J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38(1):1-23.
- [8] 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 a new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1):289-296.
- [9] 阮百尧,邓小康,刘海飞,等. 坑道直流电阻率超前聚焦探测的影响因素及最佳观测方式[J]. 地球物理学进展,2010,25(4):1380-1386.
- RUAN Baiyao, DENG Xiaokang, LIU Haifei, *et al.* Influential factors and optimum survey method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnels[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(4):1380-1386.
- [10] 柳建新,邓小康,郭荣文,等. 坑道直流聚焦超前探测电阻率法有限元数值模拟[J]. 中国有色金属学报,2012,22(3):970-975.
- LIU Jianxin, DENG Xiaokang, GUO Rongwen, *et al.* Numerical simulation of advanced detection with DC focus resistivity in tunnel by finite element method[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2012, 22(3):970-975.
- [11] 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):1130-1139.
- 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):1130-1139.
- [12] 胡雄武,张平松,吴荣新,等. 矿井多极供电电阻率法超前探测技术研究[J]. 地球物理学进展,2010,25(5):1709-1715.
- HU Xiongwu, ZHANG Pingsong, WU Rongxin, *et al.* Study on the advanced detection technique by multi-electrode direct current resistivity in mines [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5):1709-1715.
- [13] 岳建华,李志聃. 矿井直流电法勘探中的巷道影响[J]. 煤炭学报,1999,24(S1):9-12.
- YUE Jianhua, LI Zhidan. Roadway influence on electrical prospecting in underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(S1):9-12.
- [14] 马炳镇,李 貅. 矿井直流电法超前探中巷道影响的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探,2013,41(1):78-81.
- MA Bingzhen, LI Xiu. Roadway influences on advanced DC detection in underground mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(1):78-81.
- [15] 强健科,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.
- [16] 徐世浙,刘 斌,阮百尧. 电阻率法中求解异常电位的有限单元法[J]. 地球物理学报,1994,37(S2):511-515.
- XU Shizhe, LIU Bin, RUAN Baiyao. The finite element method for solving anomalous potential for resistivity surveys [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(S2):511-515.
- [17] 强健科,罗延坤. 三维地形直流电阻率有限元法模拟[J]. 地球物理学报,2007,50(5):1606-1613.
- QIANG Jianke, LUO Yanzhong. The resistivity FEM numerical modeling on 3-D undulating topography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5):1606-1613.
- [18] 杨振威,李晓斌,刘仰光,等. 基于多重网格有限元法的大地电磁二维正演计算研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(3):1132-1138.
- YANG Zhenwei, LI Xiaobin, LIU Yangguang, *et al.* Study of 2D magnetotelluric forward based on multigrid finite element method [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3):1132-1138.
- [19] 解海军,李志强,栗 升. 线源直流电法有限元二维正演模拟[J]. 煤田地质与勘探,2019,47(1):194-199.
- XIE Haijun, LI Zhiqiang, LI Sheng. Finite element 2D forward modeling of DC method with line source[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1):194-199.
- [20] 蔡显新,王文凯,蒋燕英,等. 一种有效的网格自适应方法[J]. 计算力学学报,2007,24(2):241-245.
- CAI Xianxin, WANG Wenkai, JIANG Yanying, *et al.* An efficient moving grid method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2):241-245.