

文章编号: 1001-1986(2017)04-0149-08

# 煤巷多点电流源双频激电法超前扫描探测技术

刘志民<sup>1</sup>, 韩雷<sup>1</sup>, 张伟杰<sup>2</sup>, 吴淼<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 华北科技学院机电工程学院, 北京 101601; 3. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 在掘进工作面上设计多点电流源双频激电法探测电极布置方式, 根据稳定电流场性质, 建立多点电流源电场线微分方程, 基于变步长四阶五级 Runge-Kutta-Felhberg 算法, 对微分方程组进行求解。定义探测电场空间立体角和电场线边界角概念, 分析探测电场平均电流密度随主屏流比系数及距掘进断面距离变化规律, 确定聚焦效应探测时主屏流比系的取值范围。同时改变约束屏流比系数和主屏流比系数, 分析探测电场偏转角的变化规律及对其影响的主要因素, 确定偏转效应探测时约束屏流比系数的取值范围。工业性试验表明: 利用该方法进行超前扫描探测, 根据视幅频率和视电阻率异常激电效应参量变化规律, 能够有效识别工作面前方围岩地质构造特征及低阻含水异常体的方向, 但含水异常体距工作面的准确距离和含水量的大小尚需进一步研究。

**关 键 词:** 多点电流源双频激电法; 超前扫描探测技术; 聚焦与偏转效应; 电场线

中图分类号: TD82 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.027

## Study on advanced scanning detection technology of dual-frequency induced polarization method with multi-point current sources in coal mine roadway

LIU Zhimin<sup>1</sup>, HAN Lei<sup>1</sup>, ZHANG Weijie<sup>2</sup>, WU Miao<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Mechanical-Electrical Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 3. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The detection electrode arrangements of dual-frequency induced polarization method with multi-point current sources are designed in the heading face. According to the properties of stable current field, the differential equations of electric field lines with multi-point current sources are established and solved based on the fourth fifth-order variable step Runge-Kutta-Felhberg algorithm. Through defining the concept of detection field spatial angle and electric field lines boundary angle, this paper analyzes the average current density of the detection field variation with the main shielding current ratio coefficient and the distance from heading face to determine the range of the main shielding current ratio coefficient at focusing effect detection. When the constraint shielding current ratio coefficient and the main shielding current ratio coefficient are changed simultaneously, this paper analyzes the detection field deflection angle variation and its influence factors to determine the range of the constraint shielding current ratio coefficient at deflection effect detection. The industrial tests show that according to abnormal induced polarization effect parameters variation of the apparent frequency and the apparent resistivity, using this method for advanced scanning detection can effectively identify the geological structure characteristics of the surrounding rock and the direction of the low resistivity water-bearing anomaly in front of the heading face, but the accurate distance and the water content of the water-bearing anomaly are still need to be further studied.

**Keywords:** dual-frequency induced polarization method with multi-point current sources; advanced scanning detection technology; focusing and deflection effect; electric field lines

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA06A405); 河北省自然科学基金项目(D2017402158)

Foundation item :National Hi-Tech Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA06A405); Natural Science Foundation of Hebei Province , China(D2017402158)

第一作者简介: 刘志民(1975—), 男, 河北承德人, 博士, 从事电法超前探测理论与应用研究工作. E-mail: liuzhiminh@126.com

引用格式: 刘志民, 韩雷, 张伟杰, 等. 煤巷多点电流源双频激电法超前扫描探测技术[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 149–156.

LIU Zhimin, HAN Lei, ZHANG Weijie, et al. Study on advanced scanning detection technology of dual-frequency induced polarization method with multi-point current sources in coal mine roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 149–156.

煤巷掘进过程中如何有效、准确探查前方隐伏的地质构造(含水、断层和陷落柱等地质构造)，特别是含水地质构造已成为煤炭生产中亟待解决的技术难题。这些地质构造在地质勘查的宏观探查过程中很难发现和准确定位。目前，现有的煤巷超前探测物探方法主要有瞬变电磁法、矿井地质雷达法、地震波勘探法以及矿井直流电法等<sup>[1-2]</sup>。瞬变电磁法 TEM (Time Domain Electromagnetic Method)<sup>[3]</sup> 对低阻体反应敏感，用于野外探测时效果较好，受煤矿井下巷道空间的限制，其工作装置的尺寸不可能太大，限制了装置的发射功率，使其探测深度达不到实际工作需求，且探测结果受巷道内的机电设备、金属支架、锚杆锚网等金属导体的影响较大。矿井地质雷达法对含水、断层和陷落柱等地质构造具有较高的分辨率，在煤巷多孔隙煤岩介质探测时，其雷达波有效探测距离约为数米或更小，这是由于集肤效应影响，当电磁波遇到良导体时(如遇含水黏土)，穿透能力下降，甚至失去探测能力<sup>[4]</sup>。地震波勘探法探测距离较远，但其探测方向不能有效控制，不适合独头巷道掘进探测，且对含水异常体的敏感程度低，探测工序繁琐，分辨率低<sup>[5]</sup>。矿井直流电法对含水地质构造较为敏感，探测距离大，其发射电极沿巷道竖直向下布置，电流场以发射电极为中心呈辐射状向四周传播，电流分布具有分散性，探测电场方向不能有效控制，常受坑道后方及旁侧浮尘、轨道、机电设备、电磁场、浅部低阻疏松层屏蔽效应等干扰因素影响，且跑极工作量大，对巷道施工长度有特殊要求<sup>[6]</sup>。总之，利用现有物探方法进行煤矿井下超前探测，存在探测准确率低、实时性差、方向性差、抗干扰能力差等问题，要实现准确地预报掘进前方隐伏的异常地质构造难度较大，为掘进工作埋下了很大安全隐患<sup>[7]</sup>。

为克服矿井直流电法缺点，减小电场全空间效应及干扰因素影响，有效增加地质构造勘探深度，国内外许多学者提出了多种同性多点电源聚焦探测技术方法。C Panissod 等<sup>[8]</sup>在考古学领域利用直流聚焦电阻率法进行模型仿真与试验研究。其他学者<sup>[9-11]</sup>针对直流聚焦电阻率法探测机理开展大量研究。德国 GET(Geo Exploration Technologies)公司于 2004 年首次研制出 BEAM(Bore Tunnelling Electrical Ahead Monitoring)法隧道超前预报技术，该技术通过检测岩体的激发极化特性变化来预报掘进前方隐伏的有害地质构造<sup>[12]</sup>，具有较好的应用效果<sup>[13-14]</sup>。同性多点电流源聚焦探测技术主要用于地面和隧道勘探，其探测理论仍需完善，受煤矿地质条件限制，在综掘工作面探测方面尚未有针对性的研究和应用

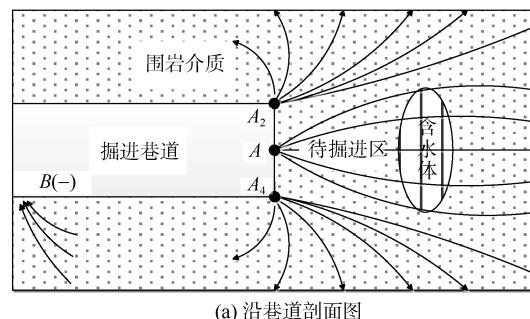
实例。

鉴于上述问题，在现有聚焦电法研究理论和探测方法的基础上<sup>[15-17]</sup>，提出一种适合煤巷超前探测的新方法——多点电流源双频激电法超前扫描探测技术，并针对探测仪器研制及物理模型试验探测模拟开展研究。目前，所研究的探测方法和技术机理仍需完善，缺少合理的工业性验证试验。因此，本研究通过分析多点电流源双频激电法空间电场聚焦与偏转效应扫描探测机理，完成煤矿井下水平向前探测工业性试验及数据处理解释。此研究对推动物探理论的发展、提高煤矿综掘效率、保障人身安全等方面具有重要意义。

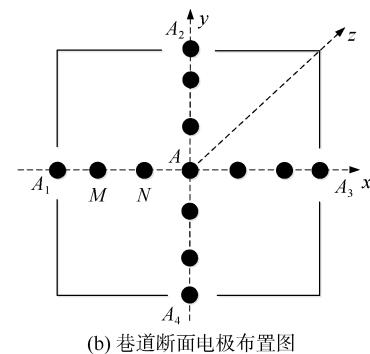
## 1 超前扫描探测技术机理

### 1.1 多点电流源断面布极方式

多点电流源双频激电法超前扫描探测技术是以双频激电法<sup>[18]</sup>和聚焦电法为理论基础，充分利用双频激电法仪器装置轻便、快速、精度高、性能稳定、操作灵活、抗干扰能力强等优点<sup>[19]</sup>，并结合聚焦电法具有较强的穿越低阻屏蔽层能力而形成的一种探测方法，该方法探测原理如图 1 所示。发射电极分 5 路进行布置，其中主电极 A 布置在断面中心位置，发射幅值强度可调，高低频率( $f_h$  和  $f_l$ )组合的超低频段调制方波电流为激励，其余 4 路约束电极  $A_n$  ( $n=1,2,3,4$ )对称布置在主电极边缘四周，并插入煤(岩)一定深度，发射与主电极高低频率相同、幅



(a) 沿巷道剖面图



(b) 巷道断面电极布置图

图 1 多点电流源双频激电法煤巷超前探测原理

Fig.1 Advanced detection principle of dual-frequency induced polarization method with multi-point current sources

值强度不同的调制方波电流为约束。根据同性电荷相排斥的性质，在约束电极发射电流形成的约束电场作用下，使主电极发射电流在掘进断面前方围岩介质中形成稳定的半空间探测电场。接地电极B布置在巷道后方数百米处，测量电极MN对称布置在主电极两侧。

通过改变各约束电极与主电极的电流和电流变化次序，有效控制探测电场的传播方向和传播距离，使掘进断面前方围岩介质及异常地质构造发生不同程度的激发极化效应，通过测量电极MN检测高低频电位差激电信息，计算表征煤巷围岩介质及异常地质构造激电异常程度的视电阻率 $\rho_s$ 和视幅频率 $F_s$ 值为

$$F_s(\text{PFE}) = \frac{\Delta U(f_L) - \Delta U(f_H)}{\Delta U(f_L)} \times 100\% , \quad \rho_s = \beta \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

式中  $\Delta U(f_H)$  和  $\Delta U(f_L)$  分别为高低频电位差，mV； $\beta$  为组合电极装置系数； $\Delta U$  为等效电位差，mV； $I$  为等效电流，mA； $\Delta U$  和  $I$  由组合电极装置系数决定。

## 1.2 聚焦与偏转效应扫描探测分析

通过改变约束电极与主电极发射电流，控制主电极探测电场进行聚焦与偏转扫描探测，聚焦与偏转效应程度可用空间多点电流源的电场线变化来进行描述。电场线是指在电极周围介质空间中画出的一些假想曲线，借助电场线可以形象地描绘电场的分布特征。

设在电阻率为 $\rho$ 的均匀煤巷围岩介质中，在仅考虑断面中心处主电极A形成的发射电场时，设其发射电流为 $I_0$ ，因电极尺寸相对断面空间而言非常小，可视为点电荷电场，则距A点半径为 $r$ 的任意节点H处的电位为

$$\varphi(r) = \frac{\rho I_0}{4\pi r} \quad (2)$$

当四周有约束电极 $A_n(n=1,2,3,4)$ 时，以断面中心O为原点(主电极A)，建立如图1b所示坐标系，设四周约束电极空间位置坐标为 $A_1(-a,0)$ 、 $A_2(0,b)$ 、 $A_3(a,0)$ 、 $A_4(0,-b)$ ， $a$ 和**b**长度分别等于巷道断面宽度和高度的一半，其发射电流分别为 $I_n(n=1,2,3,4)$ 。在约束电场作用下，主电极形成的探测电场可以认为沿断面正前方呈半空间分布，根据空间电位叠加理论<sup>[20]</sup>，其任意节点H( $x,y,z$ )处的电位为

$$\varphi(r) = \frac{\rho I_0}{2\pi r_0} + \frac{\rho I_0}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \frac{k_n}{r_n} \quad (3)$$

式中  $r_0$ 、 $r_n(n=1,2,3,4)$  分别为主电极和四周约束电极到空间任一点H处的距离， $r_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ， $r_1 = \sqrt{(x+a)^2 + y^2 + z^2}$ ， $r_2 = \sqrt{x^2 + (y-b)^2 + z^2}$ ，

$r_3 = \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}$ ， $r_4 = \sqrt{x^2 + (y+b)^2 + z^2}$ ； $k_n$  ( $n=1,2,3,4$ ) 为各约束电极与主电极之间电流之比，定义为主屏流比系数。

因双频调制方波电流幅值不随时间而改变，形成的空间电场分布是稳定的，根据稳定电流场性质，电场强度 $\vec{E}$ 与电位 $\varphi$ 有如下关系：

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k}\right) \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)，得到空间任一点的电场强度分量 $\vec{E}_x$ 、 $\vec{E}_y$ 和 $\vec{E}_z$ 为

$$\begin{cases} \vec{E}_x = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{2x}{r_0^3} + \frac{k_1(x+a)}{r_1^3} + \frac{k_2x}{r_2^3} + \frac{k_3x}{r_3^3} + \frac{k_4(x-a)}{r_4^3} \right\} \vec{i} \\ \vec{E}_y = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{2y}{r_0^3} + \frac{k_1y}{r_1^3} + \frac{k_2(y-b)}{r_2^3} + \frac{k_3(y+b)}{r_3^3} + \frac{k_4y}{r_4^3} \right\} \vec{j} \\ \vec{E}_z = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{2z}{r_0^3} + \frac{k_1z}{r_1^3} + \frac{k_2z}{r_2^3} + \frac{k_3z}{r_3^3} + \frac{k_4z}{r_4^3} \right\} \vec{k} \end{cases} \quad (5)$$

在电场中，任一点的电场线的切线方向与该点的电场强度 $\vec{E}$ 方向一致，引入参量 $t$ ，则电场线方程为

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

将式(5)代入式(6)，得到空间多点电流源电场线微分方程为

$$\begin{cases} \vec{E}_x = \frac{d\vec{x}}{dt} = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{2x}{r_0^3} + \frac{k_1(x+a)}{r_1^3} + \frac{k_2x}{r_2^3} + \frac{k_3x}{r_3^3} + \frac{k_4(x-a)}{r_4^3} \right\} \vec{i} \\ \vec{E}_y = \frac{d\vec{y}}{dt} = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{2y}{r_0^3} + \frac{k_1y}{r_1^3} + \frac{k_2(y-b)}{r_2^3} + \frac{k_3(y+b)}{r_3^3} + \frac{k_4y}{r_4^3} \right\} \vec{j} \\ \vec{E}_z = \frac{d\vec{z}}{dt} = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{2z}{r_0^3} + \frac{k_1z}{r_1^3} + \frac{k_2z}{r_2^3} + \frac{k_3z}{r_3^3} + \frac{k_4z}{r_4^3} \right\} \vec{k} \end{cases} \quad (7)$$

构造向量 $\Delta = [x \ y \ z]$ ，令其初值为 $\Delta(t_0)$ ，则式(7)变为

$$\begin{cases} \Delta'(t) = E(\Delta, t) \\ \Delta(t_0) = [x(t_0) \ y(t_0) \ z(t_0)] \end{cases} \quad (8)$$

利用Matlab软件ode45函数对上述微分方程组进行求解，基于向量范数 $\|E\|_\infty$ 估计局部截断误差，使截断误差小于给定的误差限。ode45求解器采用变步长四阶五级Runge-Kutta-Felhberg算法，能够自动调节步长，具有较高的计算效率和精度<sup>[21]</sup>。

自主研制的超前探测仪由发送机、接收机、电极和电缆组成(图2)，可同时发送5路(1路主电极和4路约束电极)幅值在10~60 mA连续可调的双频(频率可选择8 Hz及8/13 Hz、4 Hz及4/13 Hz、2 Hz及2/13 Hz、1 Hz及1/13 Hz中的任意一组)调制方波电流。为使主电极探测电场形成聚焦效应，各约

束电极与主电极电流之比必须保持相等。煤矿井下巷道高度通常为 3.5~6 m，宽度为 4~8.2 m，设在均质的围岩介质中，掘进断面面积为 5 m×5 m，各约束电极空间坐标  $a=b=2.5$  m，主电极发射电流  $I_0=30$  mA，主屏流比系数  $k_1=k_2=k_3=k_4=2$ ，即各约束电极电流  $I_n=60$  mA( $n=1,2,3,4$ )，计算电场线微分方程组的数值解，得到掘进断面前方聚焦效应电场线三维空间和二维平面(yoz 面)分布情况如图 3a 和图 3b 所示。从电场线分布可以看出，电场线越密的地方，

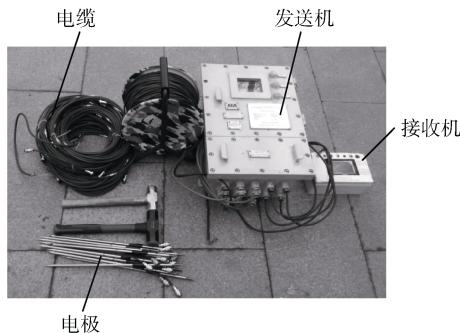


图 2 超前探测仪组成

Fig.2 Composition of the advanced detector

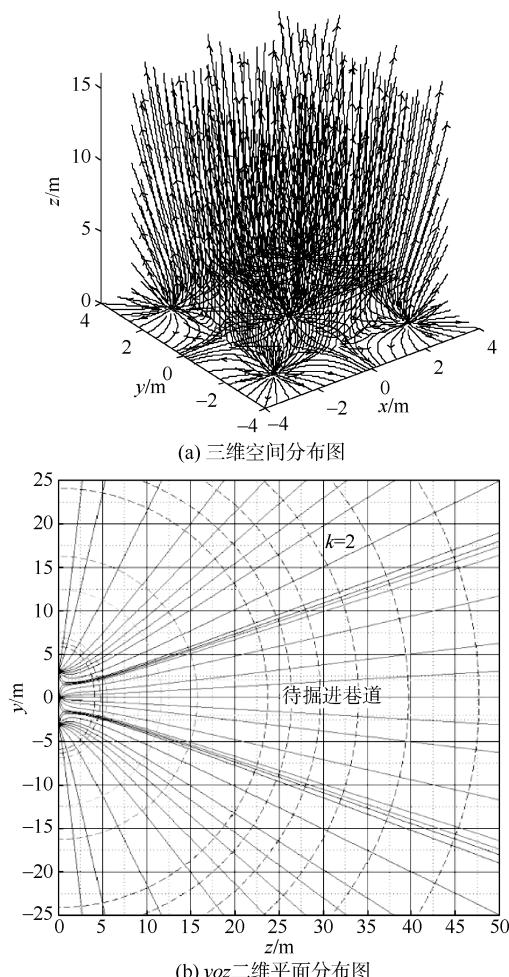


图 3 聚焦效应电场线分布情况

Fig.3 Distribution of electric field lines at focusing effect

其电场强度越强，反之电场强度越弱；在约束电极作用下，探测电场沿断面前方集中传播，具有较好的聚焦效应。

改变约束电极与主电极之间的主屏流比系数，可控制有效探测电场发生不同程度的聚焦，其聚焦效应程度可用探测电场空间立体角  $\beta$  的大小进行度量，探测电场空间立体角  $\beta$  定义为距掘进断面中心  $A$  某一空间距离处电流场覆盖区域面积  $S$  对其断面中心所张的立体角。

$$\beta = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_i} \sin \theta d\theta = 2\pi(1 - \cos \theta_i) \quad (9)$$

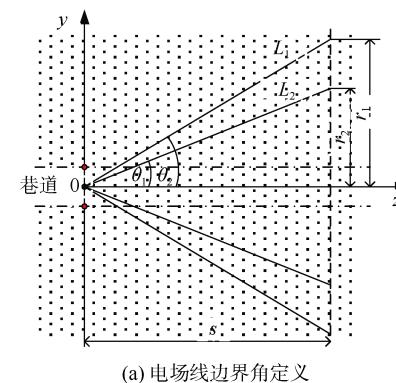
式中  $\theta_i$  为电场线边界线  $L_i$  与巷道中心线夹角(见图 4a)，定义为有效探测电场的电场线边界角。

令式(5)电场强度  $E=0$ ，计算中性点坐标，通过中性点坐标得出电场线边界线方程，结合煤巷探测实际，设探测距离  $s=50$  m，此时有

$$\theta_i = \arctan \frac{r_i}{s} \quad (10)$$

式中  $r_i$  为主屏流比系数取某一值时，在  $s=50$  m 处电场线边界线的纵坐标值。

改变主屏流比系数  $k_i$  值，有效探测电场的电场线边界角  $\theta_i$  随主屏流比系数  $k_i$  变化曲线，如图 4b 所示，随主屏流比系数  $k_i$  的增加，电场线边界角  $\theta_i$  逐渐减小，当  $k_i > 3$  时， $\theta_i$  减小程度趋于平缓，即此时聚焦效应程度变化不明显。



(a) 电场线边界角定义

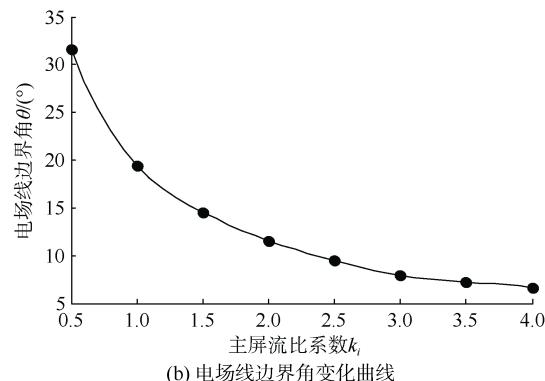


图 4 电场线边界角及变化曲线

Fig.4 Boundary angle and variation curve of electric field lines

掘进断面前方空间电流密度是表征电流强弱和流动方向的物理量, 有效电流密度越大, 其勘探深度越深。设在均质的煤巷围岩介质中, 主电极发射电流为  $I_0$ , 此时距离断面中心  $A$  点半径为  $r$  的某一处的空间平均电流密度  $j$  为

$$j = \frac{I_0}{S} = \frac{I_0}{\beta r^2} = \frac{I_0}{2\pi(1 - \cos \theta_i)r^2} \quad (11)$$

可见, 空间平均电流密度与探测电场的电场线边界角和距离的平方成反比, 与主电极发射电流成正比, 平均电流密度随主屏流比系数及距掘进断面距离变化曲线如图 5 所示。当主屏流比系数  $k_i=0.5$  时, 电流密度较小, 随主屏流比系数  $k_i$  的增加, 在距断面距离  $r$  较近位置处, 电流密度急剧增加, 且随  $r$  的增加而迅速递减; 当  $r>25$  m 时, 随主屏流比系数  $k_i$  的增加, 电流密度略有增加, 当  $r>30$  m 时, 电流密度增加不明显, 即距掘进断面较远处, 过度增加主屏流比系数, 尚不能有效增加探测电场的勘探深度。综合上述分析, 实际探测时, 主屏流比系数  $k_i$  设定值不宜太大, 同时受探测仪发射电流上限取值范围( 60 mA)限制, 主屏流比系数通常设定为  $1 < k_i < 2$ , 此时探测电场具有较好的聚焦效果。

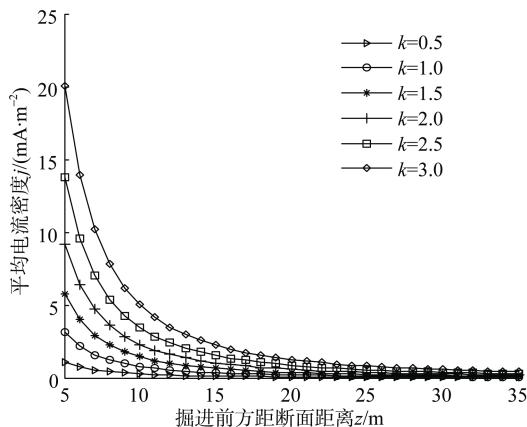


图 5 探测电场平均电流密度变化曲线

Fig.5 Average current density curve of the detection field

改变各约束电极之间的发射电流的比值(定义为约束屏流比系数  $k$ ), 可控制探测电场发生不同程度的偏转。当约束屏流比系数  $k$  取不同值时, 各约束电场对主电极探测电场的作用和影响不均衡, 探测电场中心线的传播方向相对巷道中心线发生偏离(定义为偏转角  $\alpha$ ), 即形成偏转效应。取电极  $A_1-A_3$  约束屏流比  $k=1$ , 改变  $A_2-A_4$  约束屏流比  $k$ , 使探测电场沿掘进面方向上下偏转; 同理, 取电极  $A_2-A_4$  约束屏流比  $k=1$ , 改变  $A_1-A_3$  约束屏流比  $k$ , 使探测电场沿掘进面方向左右偏转。偏转后与偏转前的电场传播方向发生了较大的变化, 其偏转程度

用偏转角  $\alpha$  度量。设在均质的围岩介质中, 主电极发射电流  $I_0=30$  mA, 各约束电极电流  $I_1=I_3=I_4=30$  mA、 $I_2=60$  mA, 即使约束屏流比系数  $k=2$ , 利用式(8)计算电场线微分方程组的数值解, 得到掘进断面前方偏转效应电场线三维空间和二维平面( $yoz$  面)分布情况, 如图 6a 和图 6b 所示。从电场线分布可以看出, 探测电场沿掘进断面下方集中传播, 其偏转程度取决于屏流比系数。当改变约束屏流比系数  $k$  和主屏流比系数  $k_i$  时, 分析偏转角  $\alpha$  沿断面向左偏转变化规律, 令主电极发射电流为  $I_0$ , 约束电极  $A_2$  和  $A_4$  电流  $I_2=I_4=I_0$ , 约束电极  $A_1$  的电流  $I_1=k_1 I_0$ , 约束电极  $A_3$  的电流  $I_3=k_3 I_0=k k_1 I_0$ 。 $k$  和  $k_1$  取不同值时, 计算探测电场偏转角  $\alpha$  沿掘进面向左偏转变化规律如图 7 所示。随着约束屏流比系数  $k$  的增加, 电场偏转角  $\alpha$  逐渐增大; 当约束屏流比系数  $k$  取某一固定值时, 随着主屏流比系数  $k_1$  的增加, 电场偏转角  $\alpha$  增加不明显, 说明电场偏转角  $\alpha$  的偏转程度主要取决于约束屏流比系数  $k$ 。受探测仪发射电流上限取值范围限制, 实际探测时约束屏流比系数通常设

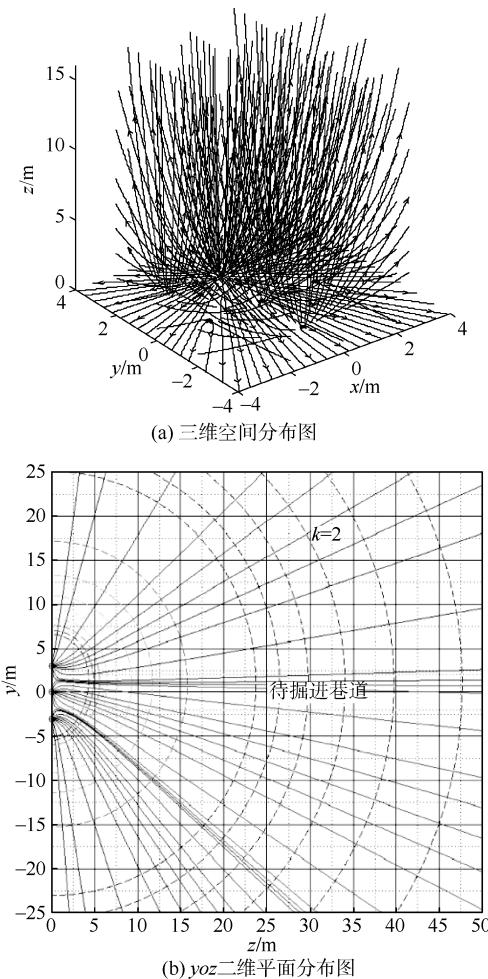


图 6 偏转效应电场线分布情况

Fig.6 Distribution of electric field lines at detection effect

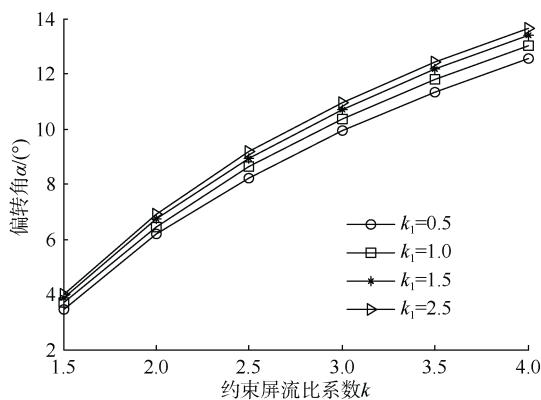


图 7 探测电场偏转角随屏流比系数变化规律

Fig.7 Detection field deflection angle changes with shielding ratio coefficient

定为  $2 \leq k \leq 3$ ，此时探测电场具有较好的偏转效果。

## 2 应用实例及资料解释

### 2.1 勘探区域地质概况

冀中能源峰峰集团梧桐庄矿属太行山东麓煤田南部的一部分，其水文地质条件异常复杂，曾发生过几起较大的突涌水事故。本次工业性试验选择在该矿的三采集中回风巷工作面，该工作面走向长度为 1 483 m，巷道标高为 -482.6~ -327.2 m，煤层以镜煤和亮煤为主，为光亮型煤，煤层厚 3.1~3.5 m，平均厚度为 3.3 m，煤层结构产状与围岩基本一致。勘探掘进工作面区域及周围地质条件如图 8 所示。测试工作面先后穿过煤柱、封堵巷道及煤层，西北方向为 182106 采空区，西南方向为 182105 采空区，东北方向为倾斜煤巷，东南方向为半煤岩巷道。

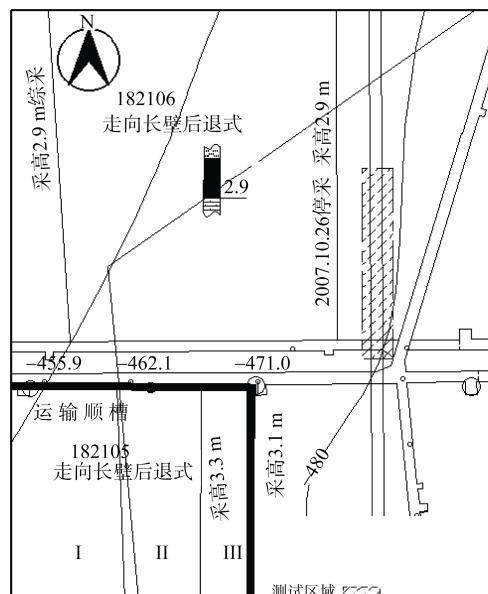


图 8 勘探区采掘工程平面示意图

Fig.8 Plan sketch of the exploration area

### 2.2 数据采集与资料解释

为探明巷道掘进正前方、前方顶底板处及前方左右帮侧岩层是否发育隐伏导水构造，试验利用多点电流源双频激电法对掘进断面前方 45 m 范围内岩层富水性进行超前扫描探测。按图 1b 所示布置测量电极，各约束电极空间坐标  $a = 2 \text{ m}$ ,  $b = 1.5 \text{ m}$ ，测量电极  $MN$  间距为 1 m，通过接收机进行参数设置，选择测线号、测点号和测量频点(1 Hz 和 1/13 Hz)。根据实际接地电阻，设置主电极发射电流取值范围，试验按照聚焦、上偏、下偏、左偏、右偏顺序依次向断面前方进行扫描探测。聚焦效应探测时，设置主电极发生电流  $I_0 = 45 \text{ mA}$ ，主屏流比系数  $k_1 = 1$ ；偏转效应探测时，若向下偏转，设置主电极发生电流  $I_0 = 45 \text{ mA}$ 、 $I_1 = I_2 = I_3 = 45 \text{ mA}$ 、 $I_4 = 15 \text{ mA}$ ，即使上下约束电极间的约束屏流比系数  $k = 3$ ；同理，向其他方向偏转，以此类推。点击运行开始测量，通过接收机依次检测测量电极  $MN$  两端的高低频电位差，由系统自动计算视幅频率和视电阻率值，待测量数据稳定后进行存储，完成一个扫描周期后结束本次测量。

随着掘进工作面不断向前推进，每掘进 5 m 按上述方法重新探查一次，连续测量 10 次，导出试验数据，以工作面掘进距离为横轴，利用 MATLAB 软件绘制不同方位视幅频率和视电阻率变化二维等值线图(图 9)。从二维等值线图可以看出，聚焦和上偏扫描探测时，围岩介质激电效应参量异常幅度变化不明显，视幅频率为 1.81%~3.02%，视电阻率为 201.6~388.6  $\Omega \cdot \text{m}$ ，即说明探测区域正前方和顶板处无明显低阻异常，不存在含(导)水通道；左偏扫描探测时，探测区域左帮测均显示高阻异常，围岩介质视幅频率为 0.86%~1.51%，视电阻率为 433.8~659.8  $\Omega \cdot \text{m}$ ，这是西北方向 182106 工作面为采空区的正常特征反应；右偏扫描探测时，探测区域右帮测均显示低阻异常，视幅频率为 4.38%~6.65%，视电阻率为 40.4~192.1  $\Omega \cdot \text{m}$ ，经分析，该测试段东北方向为经过封堵过的突水巷道；下偏扫描探测时，激电效应参量异常幅度变化较大，视幅频率为 1.94%~6.41%，视电阻率为 39.6~299.7  $\Omega \cdot \text{m}$ ，且距起始测点 20 m 处，随工作面不断向前推进，视幅频率逐渐增加，而视电阻率逐渐减小，说明测点 20 m 前方底板处某一位置存在低阻含水异常体，其含水量的大小需通过探测地质资料数据积累和资料反演进行估计，根据周边工作面施工钻孔情况，底板主要含水层是下伏的野青灰岩含水层，钻孔揭露该含水层涌水量为 0.005~0.1  $\text{m}^3/\text{min}$ ，水温为 25.4~35.8 °C，

水位为-427~ -208 m ,该含水层出水一般对工作面安

全生产影响较小。

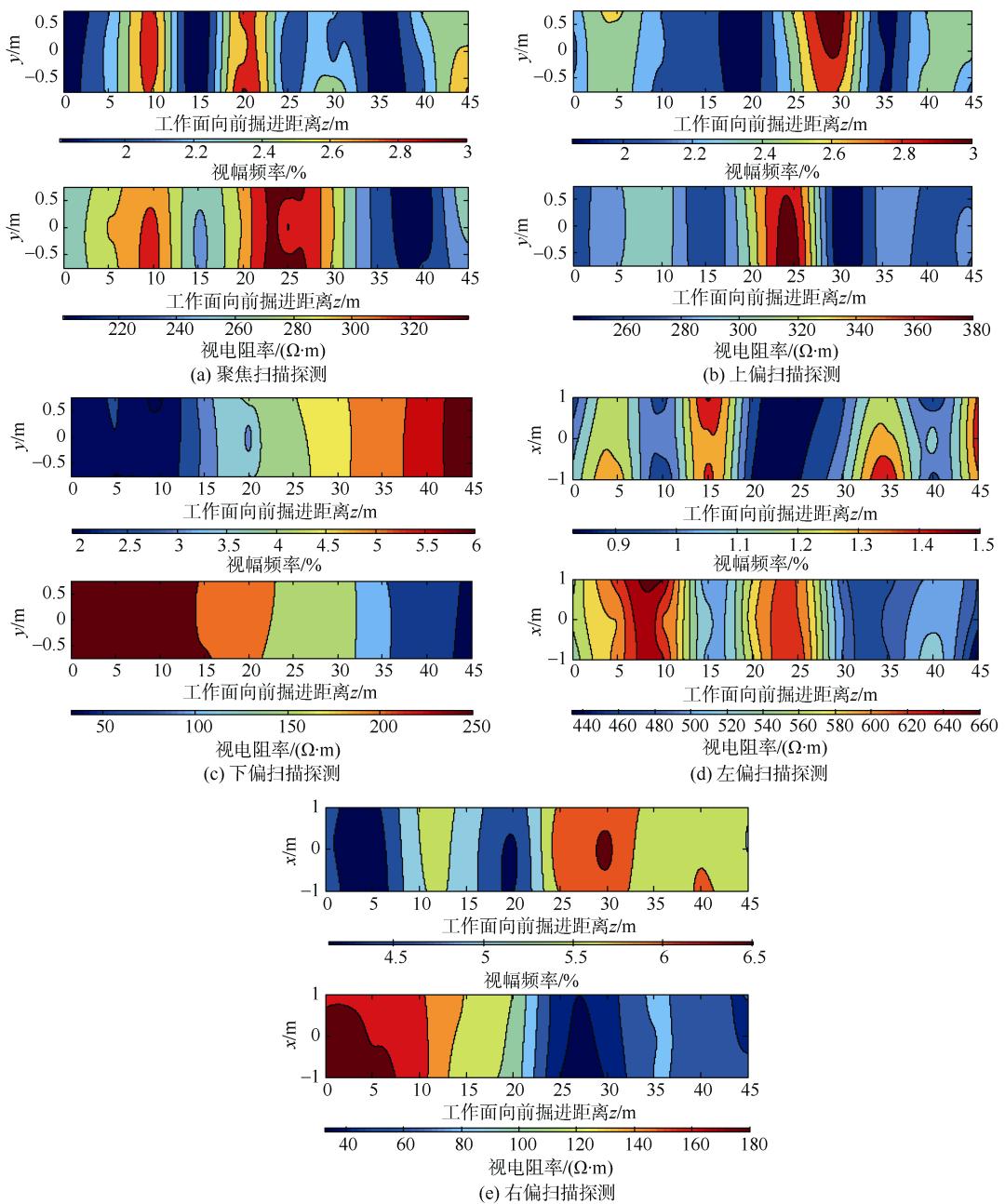


图9 视幅频率和视电阻率变化二维等值线图

Fig.9 Two-dimensional contour map of apparent frequency and apparent resistivity variation

### 3 结论

a. 聚焦效应扫描探测时,探测电场空间电流密度与电场线边界角 $\theta_i$ 和距离的平方成反比,随主屏流比系数 $k_i$ 的增加,电场线边界角 $\theta_i$ 逐渐减小,当 $k_i > 3$ 时, $\theta_i$ 减小程度趋于平缓,当 $r < 30$  m时,随主屏流比系数 $k_i$ 的增加,电流密度增加不明显。同时受探测仪发射电流强度上限取值范围限制,实际探测时主屏流比系数设定为 $1 \leq k_i \leq 2$ 。

b. 偏转效应扫描探测时,随着约束屏流比系数

$k$ 的增加,电场偏转角 $\alpha$ 逐渐增大,当 $k$ 取某一固定值时,随着主屏流比系数 $k_i$ 的增加,电场偏转角 $\alpha$ 增加不明显,说明电场偏转角 $\alpha$ 的偏转程度主要取决于约束屏流比系数 $k$ 。同时受探测仪发射电流强度上限取值范围限制,实际探测时约束屏流比系数设定为 $2 \leq k \leq 3$ 。

c. 工业性试验表明:煤巷多点电流源双频激电法超前扫描探测技术能有效识别工作面前方围岩地质构造特征及低阻含水异常体的方向,但含水异常体距工作面的准确距离和含水量的大小尚

需进一步研究，可根据实际异常地质构造资料库的不断积累和激电效应参量数据通过反演方法进行综合解释。

## 参考文献

- [1] 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 Julong, 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.
- [2] 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.
- [3] 刘树才, 刘志新, 姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 414–417.  
LIU Shucui, LIU Zhixin, JIANG Zhihai. Application of TEM in hydrogeological prospecting of mining district[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(4): 414–417.
- [4] 王威, 代兵权. 地质雷达在奔溪口隧道超前地质预报中的应用[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(12): 46–49.  
WANG Wei, DAI Bingquan. Application of ground penetrating radar in Benxikou tunnel geological prediction[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(12): 46–49.
- [5] 郭立全, 刘盛东. 巷道构造震波超前探测技术及其应用[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(11): 99–101.  
GUO Liqian, LIU Shengdong. Mine seismic prediction technology and application to mine roadway tectonic[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(11): 99–101.
- [6] 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.
- [7] 张伟杰, 郝明锐, 杜毅博, 等. 基于双频激电法的煤矿巷道超前探测新技术初探[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 73–75.  
ZHANG Weijie, HAO Mingrui, DU Yibo, et al. Discussion on new pilot detection technology of mine roadway based on double frequency induced method[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 73–75.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] DENG Xiaokang, LIU Jianxin, LIU Haifei, et al. 3D finite element numerical simulation of advanced detection in roadway for DC focus method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 2187–2193.
- [12] Geohydraulik data. Beam presentation[Z/OL]. Kirchvers : Geohydraulik Data Corp., 2004. <http://www.geo-exploration-technologies.de/>
- [13] 杨卫国, 王立华, 王力民. BEAM 法地质预报系统在中国 TBM 施工中应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(增刊 2): 161–162.  
YANG Weiguo, WANG Lihua, WANG Limin. Application of geological system based on Beam method TBM construction[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(S2): 161–162.
- [14] 朱劲, 李天斌, 李永林. Beam 超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 258–262.  
ZHU Jin, LI Tianbin, LI Yonglin, et al. Application of an electrical method "Beam" for advanced geological exploration to tunneling in Tongluo mountains for Dian-Lin highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 258–262.
- [15] 刘志民, 刘希高, 张金涛, 等. 煤巷超前探测双频交流激电接收机系统设计[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(8): 968–973.  
LIU Zhimin, LIU Xigao, ZHANG Jintao, et al. Design of dual-frequency alternating current IP receiver system for advanced detection in coal roadway[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2015, 34(8): 968–973.
- [16] 张金涛, 吕一鸣, 刘志民, 等. 聚焦双频激电法超前探水激励信号发送系统设计[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 107–111.  
ZHANG Jintao, LYU Yiming, LIU Zhimin, et al. Design of advanced water detection excitation signal transmission system of focusing double frequency induced polarization method[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 107–111.
- [17] 刘志民, 刘希高, 张金涛, 等. 交流聚焦激电法煤巷超前探测阻容试验模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2144–2151.  
LIU Zhimin, LIU Xigao, ZHANG Jintao, et al. Experimental simulation of resistance-capacitance model for advanced detection in coal roadway based on alternating current focusing induced polarization method[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2144–2151.

际应用中，混合器的下入深度要适当，才能提高空压机的效率。

c. 气举反循环钻进中，地层允许的条件下，可选用地下水直接作为钻井液，既节约了成本，又提高了钻井效率。

d. 本次对气举反循环钻进的启动风压模型进行了初探，为确定合理的工作风压和注气量奠定了基础，对进行气举反循环钻进系统的合理配置有重要指导意义，接下来应该结合工程实践开展进一步注气参数的研究工作。

## 参考文献

- [1] 许刘万，刘智荣，赵明杰，等. 多工艺空气钻进技术及其新发展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程)，2009，36(10)：8—14.  
XU Liuwan , LIU Zhirong , ZHAO Mingjie , et al. Alternative process air-drilling technology and its new development[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling) , 2009 , 36(10) : 8—14.
- [2] ZHANG Yong , ZHANG Jiangliang. Technical improvements and application of air-lift reverse circulation drilling technology to ultra-deep geothermal well[J]. Procedia Engineering , 2014 , 73 : 243—251.
- [3] 张小连，熊亮，熊菊秋，等. 大直径工程井气举反循环钻进施工常见问题与改进对策[J]. 中国煤炭地质，2015，27(10)：49—52.  
ZHANG Xiaolian , XIONG Liang , XIONG Juiqiu , et al. Common problems and improving measures in large diameter engineering well air-lift reverse circulation drilling[J]. Coal Geology of China , 2015 , 27(10) : 49—52.
- [4] 马黎明. 气举反循环工艺在大直径工程井中的应用探讨[J]. 中国煤炭地质，2015，27(10)：46—48.  
MA Liming. Discussion on application of air-lift reverse circulation technology in large diameter engineering well drilling[J]. Coal Geology of China , 2015 , 27(10) : 46—48.
- [5] SATIO T , KAJISHIMA T , TSUCHIYA K. Pumping characteristics of a large-scale gas-lift system[J]. Experimental Thermal and Fluid Science , 2004 , 28(5) : 479—488.
- [6] MA Xumin , CHEN Yue , QI Luheng. Research and application of gas-lift reverse circulation drilling technology to geothermal well construction in Dalian Jiaoliu island[J]. Precedia Engineering , 2014 , 73 : 252—257.
- [7] 熊亮，张小连，熊菊秋，等. 大口径工程井气举反循环钻进效

(上接第 156 页)

- [18] HE Jishan , LI Daqing , TANG J T. Equivalent circuit of nonlinear effect of spectral IP[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China , 1996 , 26(3) : 1—7.
- [19] 汤井田，戴前伟，柳建新，等. 何继善教授从事地球物理工作 60 周年学术成就回顾[J]. 中国有色金属学报，2013，23(9)：2323—2339.  
TANG Jingtian , DAI Qianwei , LIU Jianxin , et al. Academic achievements of Professor HE Jishan dedicated to geophysics for six decades[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals , 2013 , 23(9) : 2323—2339.

率影响因素初探[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程) , 2014 , 41(5) : 42—45.

XIONG Liang , ZHANG Xiaolian , XIONG Juqiu , et al. Preliminary analysis on influence factors of air-lift reverse circulation drilling efficiency to large diameter engineering well[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling) , 2014 , 41(5) : 42—45.

- [8] 王晓明. 非均匀颗粒气力提升的实验研究[D]. 株洲：湖南工业大学，2015.
- [9] 黄勇，殷琨，朱丽红. 潜孔锤反循环钻进中心通道内岩屑运移数学模型[J]. 煤田地质与勘探，2012，40(5)：89—92.  
HUANG Yong , YIN Kun , ZHU Lihong. Mathematical model for cuttings migration in center channel of DTH hammer of reverse circulation drilling[J]. Coal Geology & Exploration , 2012 , 40(5) : 89—92.
- [10] ZHU L H , HUNG Y , WANG R H , et al. A mathematical model of the motion of cutting particles in reverse circulation air drilling[J]. Applied Mathematics and Computation , 2015 , 256 : 192—202.
- [11] 张越南. 基于岩石吸水特性的气体钻井最小注气量研究[D]. 大庆：东北石油大学，2013.
- [12] COMTE M P , BASTOUL D , HEBRARD G , et al. Hydrodynamics of a three-phase fluidized bed—The inverse turbulent bed[J]. Chemical Engineering Science , 1997 , 52(21) 3971—3977.
- [13] YOSHINAGA T , SATO Y. Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles[J]. International Journal of Multiphase Flow , 1996 , 22(2) : 223—238.
- [14] 李元灵. 油气井气举反循环携岩效果理论和设备配套方案研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2015.
- [15] 耿令强. 气举反循环钻进深度的理论计算与加深试验[J]. 中国煤田地质，2001，13(2)：86—87.  
GENG Lingqiang. Depth theory calculation and deepen testing of air reverse circulation drilling[J]. Coal Geology of China , 2001 , 13(2) : 86—87.
- [16] 张文庆. 气举反循环钻进工艺选用原则及建议[J]. 西部探矿工程，2014，26(2)：46—48.  
ZHANG Wenqing. The choose principle and suggestion of air-lift reverse circulation drilling[J]. West China Exploration Engineering , 2014 , 26(2) : 46—48.
- [17] 刘广志. 特种钻探工艺学[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1992.

(责任编辑 聂爱兰)

- [20] 陈伟，易志俊，丁益民. 利用 Matlab 模拟点电荷系的电场线和等势面[J]. 大学物理实验，2014，27(3)：94—96.  
CHEN Wei , YI Zhijun , DING Yimin. Simulation of electric field and equipotential surface of point charge system with matlab[J]. Physical Experiment of College , 2014 , 27(3) : 94—96.
- [21] FEHLBERG E. Low-order classical Runge-Kutta formulas with stepsize control and their application to some heat transfer problems[R]. Washington DC : NASA TR R-315 , 1969.

(责任编辑 聂爱兰)