

文章编号: 1001-1749(2023)02-0235-07

# 定向钻孔中直流电法探测技术在宽工作面中的应用

李 果, 庞贵良, 吕情绪

(国能神东煤炭集团有限责任公司, 神木 719315)

**摘要:** 厚煤层在开采时,为了提高采掘效率,通常布置较宽工作面(宽度 240 m 以上)。常规井下电透视法由于仪器功率限制无法在对巷中采集到有效信号。为解决宽大工作面内部隐伏构造探查问题,提出一种利用煤层气抽采定向钻孔进行钻孔旁侧异常探查的方法。该方法在内平钻杆内部采用水力驱动方式将高密度线缆推送到孔中,完成孔中电极布置,向定向孔中注水改善电极接地条件。采用与地面垂直钻孔中类似的方法进行孔内径向探查,实现了对钻孔旁侧 30 m 范围内异常进行探查的目标。定向孔中的探测试验证明,将电极布置在高阻煤层中,并对电极采取合理的接地改善措施,也能得到良好的探测效果。

**关键词:** 宽工作面; 隐伏构造; 定向钻孔; 内平钻杆; 孔中电极

**中图分类号:** P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.02.12

## 0 引言

采用直流电法进行工作面顶/底板含水性探查是煤矿井下物探工作的常规手段,但随着采煤机械化程度的提高,工作面宽度增加,原有的常规勘探手段已经逐渐无法满足现有工况条件的需求,常规直流电法透视施工方式适用工作面宽度 180 m 以下,而对于部分陕北、内蒙等厚煤层工作面(如国能集团神东保德煤矿),工作面宽度已普遍大于 200 m,中煤能源纳林河二号矿井个别工作面宽度已达到 300 m 以上,应对宽度不断增加的工作面,井下物探工作也需要发展出新的探查施工方式。

岳建华<sup>[1-4]</sup>早在上世纪 90 年代就开始了井下直流电法的应用和推广,比较系统地介绍了井下直流电法探测的工作原理;黄俊革等<sup>[5-7]</sup>就井下直流电法超前探测问题进行了十分细致的数值模拟研究,研究了井下直流电法观测信号的一般规律并总

结了超前探测方法面临的理论难题。面对越来越高的精准化要求,传统巷道施工方式已经无法满足现实需求,需要新的施工技术/手段完成对任意目标区域的探查,孔中/钻孔一巷道联合方式为解决这一难题提供了有效途径<sup>[8]</sup>。

直流电法探查在地面垂直钻孔中运用更加成熟(如地铁掘进过程中超前透视探查和风化层中的花岗岩孤石、溶洞探查<sup>[9-10]</sup>,地面垂直短钻孔进行孔间透视开展地铁开挖线路超前探测等<sup>[11-12]</sup>)。在井下水平/倾斜钻孔中,利用孔中直流电法进行‘三带’监测的工程实例,是近年来出现的新的工程运用场景<sup>[13]</sup>,更进一步地利用电阻率法,进行回采工作面采动影响下的突水预警技术也不断有相关研究成果<sup>[14-15]</sup>。无论是地面还是井下,实际利用的钻孔深度均较小,采用重力或人工推送方式将孔内电极安装到预定位置,地面大深度垂直钻孔/井下水平定向孔中的运用较为少见<sup>[16]</sup>。在工作面宽度不断增加的背景下,采用水平定向钻孔进行孔内探查可成为

收稿日期: 2021-11-29

基金项目: 国能神东煤炭集团有限责任公司科技创新项目(202016000001)

第一作者: 李果(1986—),男,硕士,工程师,主要从事地质及水文地质方面研究,E-mail: 10030737@chnenergy.com.cn.

工作面内部构造/赋水性探查的良好技术补充。

## 1 水平孔中的直流电法探测理论

水平钻孔中的直流电法探测原理与地面直流电法探测原理相同,电位空间分布满足拉普拉斯方程,地面勘探中,电位满足的方程形式为式(1)。

$$\nabla^2 u = -2I \delta(A) \quad \in \Omega \quad (1)$$

在井下全空间,电位满足的方程形式为:

$$\nabla^2 u = -I \delta(A) \quad \in \Omega \quad (2)$$

从描述场的方程形式可以看出,全空间与半空间方程差异主要在方程右端项关于电流源的描述上,影响电流场分布的主要因素为全空间与半空间的边界条件差异。

视电阻率值是用来描述所探测区域介质电阻率值相对高低的比较直观的参数,无论对于半空间还是全空间,视电阻率计算公式为式(3)。

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

按照解析公式,将实测电位差值带入即可计算不同模型在特定位置的视电阻率值,为说明水平钻孔中测量数据与地面测量数据特征,设计 2 个不同模型进行对比,在模型中心处布置一条长度为 80 m 的测线,测线包含 21 个电位测量点,电极间距为 4 m,采用有限元数值模拟方法计算各点电位并计算视电阻率。

### 1.1 地面半空间模型

半空间模型主体为两层介质,第一层厚度为 6 m,电阻率为  $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ ,第二层电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ ,异常体为二度体,截面尺寸  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ,电阻率为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,异常体中心横向位置位于 50 m 处(图 1)。

采用三极 AMN 装置测量,供电电极 A 于  $x=0 \text{ m}$  处,接收电极 MN 间隔一个道间距逐渐远离供电电极 A,测量电位差数据根据视电阻率计算公式转换后曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,收一发距小于 20 m 时,视电阻率值呈下降趋势,随着收一发距的增加,第二层低阻介质影响逐渐显现,在收一发距离为 50 m 时出现视电阻率值的极小值,与异常体中心对应。

### 1.2 全空间模型

全空间模型为三层介质,煤层顶、底板均为砂岩,电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ ,顶、底板岩层厚度均为 200 m,煤层电阻率为  $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ ,厚度为 6 m 采用三

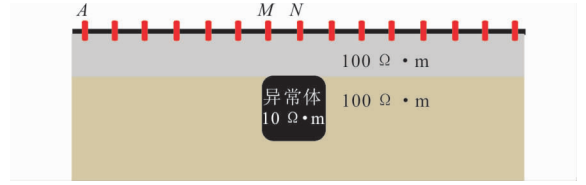


图 1 半空间介质模型视电阻率曲线

Fig. 1 Schematic diagram of half-space medium model

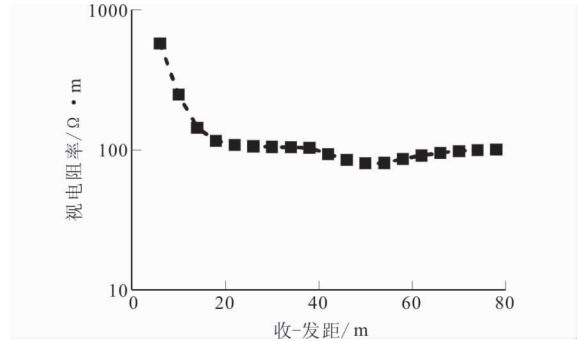


图 2 半空间介质模型示意图

Fig. 2 Apparent resistivity curve of the half-space medium model

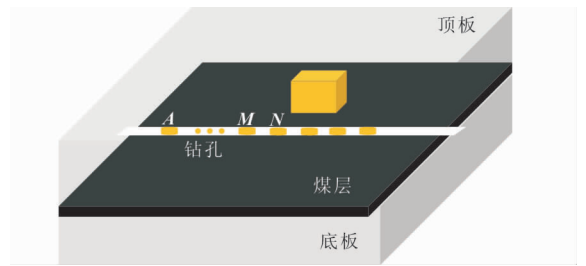


图 3 全空间层状模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of full-space layered model

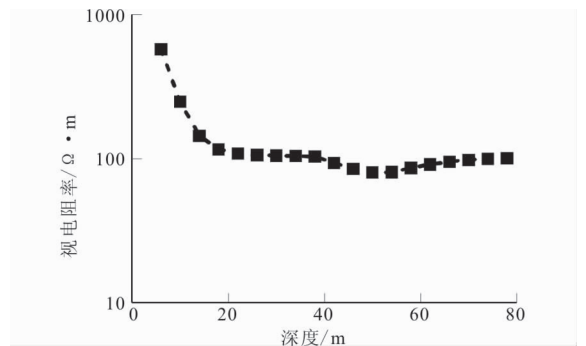


图 4 全空间介质模型视电阻率曲线

Fig. 4 Apparent resistivity curve of the full-space medium model

极 AMN 装置观测,供电电极 A 位于  $x=0 \text{ m}$  处,异常体规模  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,电阻率为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,

异常体中心偏离钻孔 10 m(图 3)。

供电电极 A 位置不变,接收电极 MN 以间隔一个道间距逐渐远离供电电极,测量电位差曲线转换为视电阻率曲线如图 4 所示。

从图 2 和图 4 可以看出,异常体位于测线的下方或旁侧对于观测数据的影响大致等效。当探测环境总体为层状时,单个异常体的影响将‘叠加’在层状介质背景曲线之上。

## 2 垂直与水平孔中直流电法探测异同

地面垂直钻孔与煤矿井下水平定向钻孔主要存在两方面差异。首先,地面垂直钻孔深度较浅,多数钻孔深度小于 100 m,在该深度范围内,探测环境一般为地表覆盖层,背景介质电性较为均一;含煤地层井下定向钻孔深度一般大于 400 m,即便钻孔所在层位稳定,岩性变化小,但下伏岩层和上覆岩层与钻孔所在岩层依旧存在较大的电性差异,探测环境差异将导致不同场景下的异常形态有较大区别。

当待探查目标体总体位于均匀介质中时,观测线水平布置与垂直布置对观测结果影响不大,当探测环境为层状介质时,垂直钻孔与水平钻孔内进行径向探测,结果将有较大差距。分别以全空间均匀介质下的异常体在水平钻孔、垂直钻孔和全空间层状介质下的水平、垂直钻孔为例说明二者差异。

### 2.1 均匀介质模型

均匀介质背景电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ ,异常体电阻率为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,异常体规模  $15 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ ,钻孔深度为 80 m,以第一个供电电极 A 作为坐标轴起点,钻孔方向为  $x$  轴,异常体中心位于  $x=40 \text{ m}$  处,偏离钻孔径向 10 m,均匀介质孔内探查模型(图 5)。

采取 AMN 三极测量方式,供电电极 A 固定,移动测量电极 MN,根据模拟电位差数据计算得到水平、垂直钻孔两种观测方式下的视电阻率曲线(图 6)。从图 6 可以看出,全空间背景下,垂直/水平钻孔接收视电阻率曲线基本一致,全空间背景下异常幅值比较显著,在  $x=40 \text{ m}$  处存在电阻率的极小值。

### 2.2 层状介质模型

将均匀模型中间一定厚度电阻率设置更高或更低即形成了最简单的三层模型,中间夹层厚度为 6 m,电阻率为  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ ,异常体电阻率为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,异常体规模  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,钻孔深度为 80 m,以第一个供电电极 A 作为坐标轴起点,钻孔方向

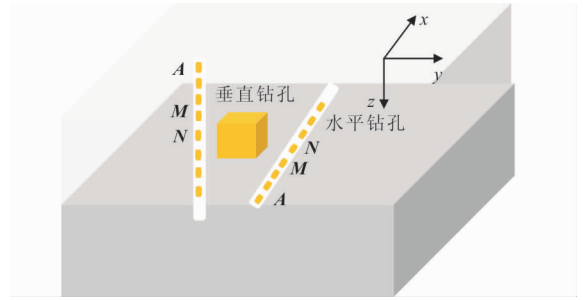


图 5 均匀介质孔中探查模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of probing model in homogeneous medium hole

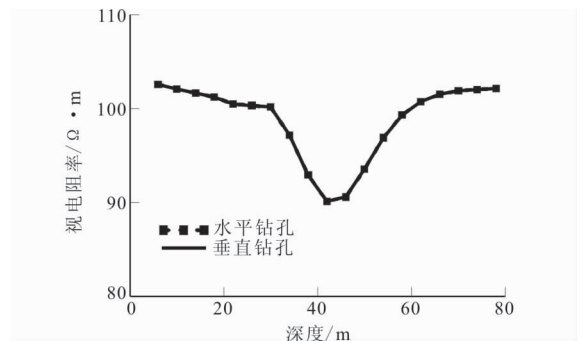


图 6 垂直、水平钻孔模型视电阻率曲线对比

Fig. 6 Comparison of apparent resistivity curves between vertical and horizontal borehole models

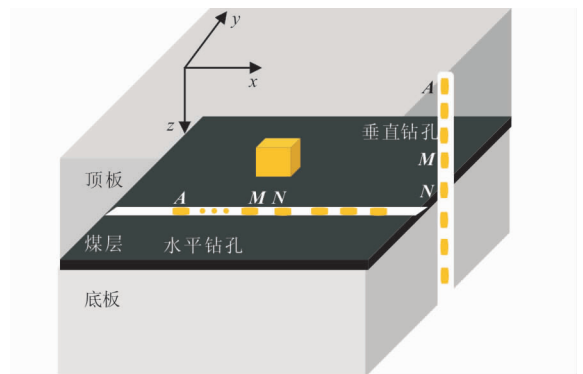


图 7 层状介质孔中探查模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of probe model in hole of layered medium

为  $x$  轴,异常体中心位于  $x=50 \text{ m}$  处,偏离钻孔径向为 15 m,层状介质孔内探查模型如图 7 所示。

采取 AMN 三极测量方式,供电电极 A 固定,移动测量电极 MN,根据模拟电位差数据计算得到的水平、垂直钻孔两种观测方式下的视电阻率曲线(图 8)。从图 8 可以看出,层状介质条件下,垂直钻孔与水平钻孔观测视电阻率曲线有较大差异,水平

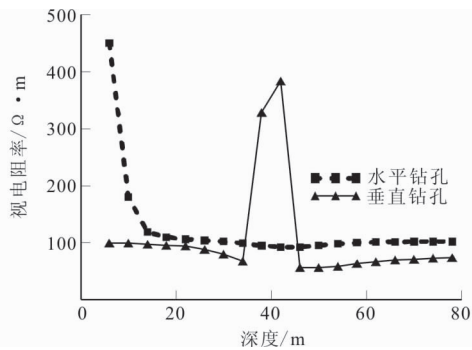


图8 层状介质垂直、水平孔模型视电阻率曲线对比  
Fig. 8 Comparison of apparent resistivity curves between vertical and horizontal borehole models in layered media

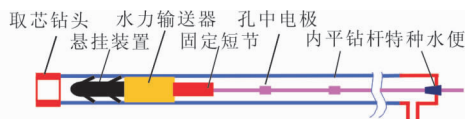


图9 深长钻孔电缆推送装置示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of long-bore cable push device

钻孔中,视电阻率曲线随着收一发距的增加逐渐趋于平稳,最终反映顶、底板电阻率的值,低阻异常叠加在平稳段;在垂直钻孔中,视电阻率背景曲线与收一发距离无关,反映背景电阻率,高阻地层与低阻体异常叠加在同一横向距离,无法将低阻异常从高阻地层本身影响中分辨出来。因此在探查煤层中的异常时,在水平钻孔中进行观测更容易取得理想的效果。

### 3 定向钻孔中孔中电缆布置技术

对比地面垂直钻孔施工,水平长钻孔中高密度电缆安装难度有较大提升,需要特定辅助安装设备。具体辅助装置示意图9。从图9可以看出,装置主体为73 mm内平钻杆,取芯钻头防止孔径变化对输送过程造成不利影响,悬挂装置保证高密度电缆单向移动,水力输送器推动悬挂装置在钻杆内向前移动并最终固定于钻孔底部,固定短节用于连接水力输送器和孔中电缆,特种水便采取侧方打压方式为线缆向前移动提供动能,保证线缆平铺于定向钻孔中。

定向钻孔施工完毕后,退出用于钻探施工的通缆钻杆,将内径32 mm的内平钻杆送入钻孔中,悬挂装置、水力输送器依次送入内径为32 mm内平钻

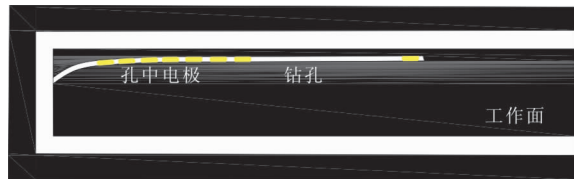


图10 定向钻孔布置示意图  
Fig. 10 Schematic diagram of directional drilling layout

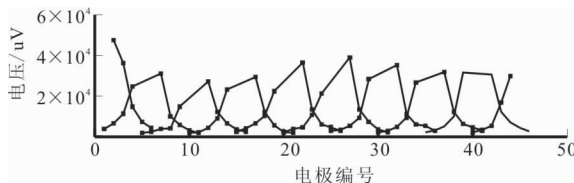


图11 定向孔中实测数据示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of measured data in directional holes

杆,固定短节连接电缆和水力输送器,钻杆尾端水力打压,特种水便尾部采用可变直径橡胶圈作为电缆输送口。水力输送器在水压推动下逐渐向钻孔底部移动带动孔中电缆逐渐平铺于钻杆中,当悬挂装置到达孔底,退出内平钻杆。悬挂装置的单向运动结构,使孔中电缆不随钻杆退出。钻杆完全退出后,开展孔中直流电法测深和透视探测。

## 4 探测实例

### 4.1 工作面地质概况

国能集团神东保德煤矿81304工作面开采煤层为二叠系煤层,煤层总体近南北走向,为向西倾斜的单斜构造,煤层平均厚度为7 m,平均倾角为4°。煤层局部受到冲刷变薄,并含有1层至3层夹矸,顶板岩性为砂质泥岩到泥质砂岩,且裂隙较为发育。81304工作面走向长度为1 500 m,宽度为240 m,常规音频电透视方法在巷道中施工时面临测量信号幅度减小,信噪比急剧降低问题,为解决工作面内部构造探查/疑似异常区验证的问题,以81304工作面内部的煤层气定向抽采钻孔为场景,对定向钻孔旁侧30 m范围内可能出现的电性异常区进行探测,探究直接在煤层中进行供电和测量解决工作面内部隐伏构造探查问题的效果,为后续其他工作面的物探工作提供借鉴。

### 4.2 孔内径向探测施工

81304工作面切眼贯通后,为保证回采过程中不出现瓦斯浓度超标问题,在回采工作面布置10处

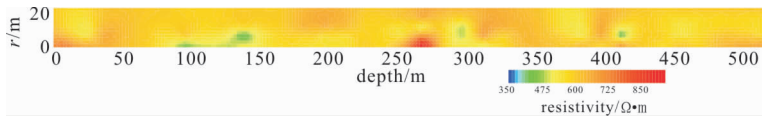


图 12 水平定向钻孔中实测数据反演结果

Fig. 12 Inversion results of measured data in horizontal directional drilling hole

顺煤层的瓦斯抽采钻孔,定向钻孔长度 550 m 至 700 m 不等,在选定的钻孔布置孔中电缆,电缆上布置电极 46 个,电极间距为 12 m,采用三极工作装置,供电电极在接收电极 MN 前后 5 个道间距移动,钻孔布置示意图如图 10 所示。

接收电极 MN 以间隔一个道间距逐渐由孔口向孔底移动,固定 MN 时改变供电位置 5 次~10 次,完成全孔测量。

#### 4.3 探测结果及宽大工作面物探工作的思考

从 1# 电极开始间隔 5 个电极提取接收曲线,实测数据如图 11 所示。从图 11 可以看出,测量电位差曲线规律基本一致,未出现明显跳变。通过对钻孔进行打水操作,改善了电极的供电、接收条件,保障了数据质量。对实测数据采用二维商业软件 Resinv2D 反演,得到视电阻率剖面结果(图 12)。从图 12 可以看出,在煤层定向孔中进行孔内径向探测,采集数据反演结果电阻率值较高,分布范围约  $450 \Omega \cdot m \sim 900 \Omega \cdot m$ ,深度 100 m~150 m 靠近钻孔附近,存在较小范围低阻区域,推断为煤层局部破碎导致的局部裂隙积水,其他区域未见明显低阻异常,在旁侧 10 m 施工的平行定向钻孔钻进过程中也未揭露其他构造异常。

在工作面宽度较大,超出常规物探技术的施工控制范围时,采用在钻孔中施工可以一定程度上解决勘探盲区的问题,在水平钻孔中采用单孔测深模式时,无法根据反演结果判断异常的空间位置,即使结合含煤地层的水平方向上大体稳定的特征,也无法确定异常体与钻孔的相对方位(钻孔左侧与右侧),还需要采取透视或多孔联合方式才能对异常进行准确定位,但单孔测深具有客观的实际意义,若定向钻孔探测结果无异常,则说明在钻孔深度范围内,钻孔径向 20 m~30 m 范围内,存在采掘威胁的安全隐患概率较低,也可对探明异常进行提前针对性治理,变相实现了远距离的超前探测,为保障煤矿安全开采提供了新的技术手段。

## 5 结论

为解决宽大工作面内部隐伏构造探查,提出了一种在工作面内部定向钻孔内开展径向探查的施工方式,从模拟数据和实测数据总结以下结论:

1) 在层状介质条件下,水平钻孔中进行探查,异常叠加在层状介质电阻率背景之上,异常幅度有所减小,但相比于垂直钻孔探测情况,异常与地层影响混叠,孔旁低阻异常将更难识别。

2) 保德煤矿探查实例可以证明,借助内平钻杆采取水力推送方式将孔中电极推送 500 m 以上在技术上是可行的,解决了长钻孔中电极布置这一重大工程难题,相关技术措施为孔内物探技术施工提供了解决方向,对于宽大工作面内物探工作的开展开辟了一条道路。

3) 对于孔内接地不佳问题,采取向孔内注水方式可改善供电、接收效果。

4) 采用定向钻孔中的直流电法单孔测深工作方式提供了潜在异常体的深度和径向距离,探测结果对于后续掘进具有指导意义,为后续的采掘/治理提供了明确靶区,预留更多时间制定更为有利的针对措施。

#### 参考文献:

- [1] 岳建华,李志聃. 煤矿井下直流层测深方法与原理[J]. 煤炭学报,1994,19(4):422-429.  
YUE J H, LI Z D. DC Layer sounding in coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(4):422-429. (In Chinese)
- [2] 岳建华,李志聃. 矿井多极距偶极剖面法及其应用[J]. 煤田地质与勘探,1994,22(3):47-50.  
YUE J H, LI Z D. Technique and application of multiple array-spacing dipole-dipole electrical profiling in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 1994, 22(3):47-50. (In Chinese)
- [3] 岳建华,李志聃,刘世蕾. 巷道层测深理论曲线数值模

- 拟及资料解释方法[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(1): 52—56.
- YUE J H, LI Z D, LIU S L. Numerical simulation and date interpretation method of theoretical curves in coal seam sounding[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(1): 52—56. (In Chinese)
- [4] 岳建华, 李志聃. 矿井直流电法及在煤层底板突水探测中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(1): 94—98.
- YUE J H, LI Z D. Mine DC electrical methods and application to coal floor water invasion detecting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(1): 94—98. (In Chinese)
- [5] 阮百尧, 熊彬. 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元模拟[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 131—138.
- RUAN B Y, XIONG B. A Finite element modeling of three-dimensional resistivity sounding with continuous conductivity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(1): 131—138. (In Chinese)
- [6] 黄俊革, 鲍光淑, 阮百尧. 坑道直流电阻率测深异常研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 222—228.
- HUANG J G, BAO G S, RUAN B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 222—228. (In Chinese)
- [7] 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 J G, WANG J L, RUAN B Y. A study on anomalous bodies of DC resistivity sounding in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 222—228. (In Chinese)
- [8] 刘磊, 范涛, 李博凡. 煤矿井下孔中直流电法超前探测数值模拟研究[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(2): 239—243.
- LIU L, FAN T, LI B F. Numerical simulation of advanced detection by direct current method in borehole of coal mine[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 42(2): 239—243. (In Chinese)
- [9] 曹权, 项伟, 贾海梁. 跨孔超高密度电法在球状风化花岗岩体探测中的应用[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 730—735.
- CAO Q, XIANG W, JIA H L. Application of cross-hole ultra-density resistivity method to detection of spherically weathered granite[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 730—735. (In Chinese)
- [10] 张文俊, 李术才, 苏茂鑫, 等. 基于井间电阻率成像的城市地铁溶洞探测方法[J]. 山东大学学报, 2014, 44(3): 75—81.
- ZHANG W J, LI S C, SU M X, et al. Detection method of karst caves in city subway based on the cross-hole resistivity tomography[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2014, 44(3): 75—81. (In Chinese)
- [11] 李术才, 苏茂鑫, 薛翊国. 城市地铁跨孔电阻率 CT 超前地质预报方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 913—920.
- LI S C, SU M X, XUE Y G. Study on computed tomography of cross-hole resistivity in urban subway geological prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 913—920. (In Chinese)
- [12] 刘征宇, 李术才, 刘斌, 等. 用于地铁盾构区间孤石探测的三维电阻率跨孔 CT 方法研究及物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2520—2530.
- LIU Z Y, LI S C, LIU B, et al. Boulder detection method based on 3d resistivity cross-hole tomography in metro shield zones and its physical model experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2520—2530. (In Chinese)
- [13] 张平松, 刘盛东, 吴荣新, 等. 采煤面覆岩变形与破坏立体电法动态测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1870—1875.
- ZHANG P S, LIU S D, WU R X, et al. Dynamic detection of overburden deformation and failure in mining workface by 3D resistivity method[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1870—1875. (In Chinese)
- [14] 鲁晶津, 李德山, 王冰纯. 超大采高工作面顶板电阻率监测可行性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 186—194.
- LU J J, LI D S, WANG B C. Feasibility test of roof resistivity monitoring for super-high mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 186—194. (In Chinese)
- [15] 鲁晶津, 王冰纯, 颜羽. 矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 18—26.
- LU J J, WANG B C, YAN Y. Advances of mine elec-

trical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 18–26. (In Chinese)

[16] LUI L, FAN T, LI Y, et al. Resistivity detection tech-

nology and its application in directional borehole in coal mine[C]. Proceedings of 8th Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development, 2020: 169–176.

## Application of direct current detection technology in directional drilling in wide working face

LI Guo, PANG Guigen, LV Qingxu

(Shandong Coal Group Corporation Limited, China Energy, Shennu 719315, China)

**Abstract:** To improve the mining efficiency in the thick coal seam, a broad working face (width of more than 240m) is usually arranged. The conventional downhole electrical fluoroscopy method can not collect effective signals in the opposite alley due to the power limitation of the instrument. In order to solve the problem of detecting concealed structures in the broad working face, a method of detecting the abnormal side of the borehole by directional drilling with CBM extraction is put forward. In this method, the high-density cable is pushed to the hole by a hydraulic drive inside the inner flat drill pipe to complete the electrode layout in the hole. Water is injected into the directional hole to improve the electrode grounding condition. The radial exploration in the hole is carried out using a method similar to that in the vertical ground drilling, and the target of abnormal exploration within 30 m range beside the borehole is realized. The detection test in directional drilling proves that good detection results can be obtained by placing electrodes in high-resistance coal seams and adopting reasonable grounding improvement measures.

**Keywords:** wide working face; concealed structure; directional drilling; inner flat drill pipe; electrode in a hole