中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

地质与测量

移动扫码阅读

韩德品,石学锋,石显新,等.煤矿老窑积水巷道直流电法超前探测异常特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(4):157-161.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.026

HAN Depin,SHI Xuefeng,SHI Xianxin,*et al*.Study on anomaly characteristics of in-advance DC electric detection of water-accumulated roadway in abandoned coal mines[J].Coal Science and Technology,2019,47(4):157-161.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.026

煤矿老窑积水巷道直流电法超前探测异常特征研究

韩德品[1],石学锋[1],石显新[1],李学潜[1,2],蒙 超[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)

摘 要:为了准确探查煤矿潜在的老窑积水巷道避免引发灾害性透水事故,根据直流电法超前探测原理和以往探测结果,采用统计的方法对已往验证的积水老窑直流电法超前探测的视电阻率异常特征进行了研究。结果表明:老窑积水巷道与电法探测方向不管正交或斜交,因电法的体积勘探效应无法区分;老窑积水巷道共同异常特征为 1 个单一下尖的低阻异常,宽度范围相对较小(3~5 m);当其异常幅值大于 1 倍的均方差时,一般对应老窑巷道积满水的情况(可作为预警条件);未积满水的老窑巷道,异常值相对较小,一般大于 1/2 的均方差;含导水裂隙破碎带常表现为大于 1 倍的均方差表现为低阻异常特征,但其异常范围常较宽,形态也不同。在实际应用中,使用该技术跟踪掘进工作面超前探测,已经成功预防了多次老窑透水事故。

关键词:直流电法;积水巷道;煤矿采空区;超前探测;异常特征

中图分类号:TD166;P631.8 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)04-0157-05

Study on anomaly characteristics of in-advance DC electric detection of water-accumulated roadway in abandoned coal mines

HAN Depin[1],SHI Xuefeng[1],SHI Xianxin[1],LI Xueqian[1,2],MENG Chao[1]

(1. *Xi'an Research Institute,China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an* 710077, *China*;2. *China Coal Research Institute, Beijing* 100013,*China*)

Abstract:In order to accurately detect water-accumulating roadway in abandoned of coal mines to avoid disastrous water accident, this paper is based on the principle and previous detection results of DC electric in-advance detection. The statistical method is used to study the anomalous characteristics of the apparent resistivity of the previously detection of goaf water.The results show that it is impossible to distinguish whether the water-accumulating roadway in abandoned of coal mines is orthogonal or oblique to the detection direction, due to the volumetric exploration effect of the electric method. The common anomaly feature is a single lower-point low-resistance anomaly with a relatively small width range (about 3~5 m). When the anomaly is greater than one-fold mean square error, it generally corresponds to the situation that the roadway is full of water (can be used as an early warning starting condition). In the roadway not fully filled with water,the outliers are relatively small, generally larger than half-fold mean square error. The water-conducting fractures often exhibit a low-resistance anomaly characterized by more than one-fold mean square error, but its anomaly range is often wider with different forms. In practice, this technology is used to track the heading face advanced detection of buried goaf water which has successfully prevented multiple accidents.

Key words:DC electric method; water-accumulatied roadway;gob of coal mines; advanced detection;apparent resistivity anomaly

0 引 言

潜在的老窑积水巷道(或积水采空区)是煤矿主要隐蔽致灾因素[1]之一。如 2005 年 8 月 7 日广东梅州兴宁市大兴煤矿发生老窑淹井重大透水事故,死亡 100 多人,矿井报废。2010 年 3 月 28 日山

收稿日期:2018-12-14;**责任编辑**:曾康生

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(41374150)

作者简介:韩德品(1962—),男,山东日照人,研究员。E-mail:handepin@cctegxian.com

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

西省王家岭煤矿遇老窑积水巷道[2],突发重大透水,造成特大伤亡事故。据统计,我国“十一五”期间,114 起较大水害事故中,掘透老窑积水 105 起、占 92.1%,其余占 7.9%。26 起重大以上水害事故中,其中老窑积水引起的 22 起,占 84.6%,其余占 13.4%。从水害事故原因看,大多数都是水文地质条件探查不清,无探放水措施,盲目掘进诱发老窑积水或直接揭露老窑积水巷道透水。由于老窑积水巷道相对较小,准确探查一直是探测难点。

自“十一五”以来,针对煤矿老窑积水区的探查展开了地面物探[1]、矿井物探[2]等一系列探查方法试验和研究,尤其对矿井独头巷道掘进超前探测技术研究取得了一系列成果[4]。地面物探基本能对较大范围的老窑积水采空区探查清楚,但地面物探对探查老窑积水巷道[4]、多层采空区[5]等误差大难度大,仍然会引发老窑透水事故。如地面直流电法在一些戈壁或者基岩裸露地区,电极接地电阻大很难应用;瞬变电磁法[6]异常范围较大,对某条巷道或者较小的采空区分辨率较低,不能精细化指导煤矿的安全生产,但这些方法各有自己的特点并取得了一定的成果。为了满足煤矿井下安全掘进要求,迫切需要更准确的探测方法,因此井下直流电法超前探测技术[7]应运而生,三维超前电法理论证明该方法可行[8-9],其相对于其他地面物探手段,更接近探测目标体,绝对误差相对较小,对低阻体反映敏感,是一种快速有效的跟踪掘进巷道超前探测方法[10-12]。另外,其他方法如 MSP 技术[13]、坑道音频电法[14]、高密度二极三维直流电法[15]等对老窑积水巷道难以分辨或处于研究阶段。即使直流超前探测法在实际应用中老窑积水巷道在电法中的异常特征规律性很难把握,往往造成误判,探查后仍然易造成老窑透水事故[2]。现对已经验证的超前探测的电性异常特征进一步归纳总结,以满足实际生产需要。该技术已先后推广应用于全国许多大型煤炭企业,效果良好。在实际应用中,煤矿井下情况复杂,应结合已知地质条件综合分析谨慎对待。对于掘进迎头前方出现的重点异常,必需要严格按照防治水规定,采取必要防治水措施,做到防患于未然。

为了解决电法异常特征的多种多样、不易判断和把握的难题, 解释标准是从实际若干验证结果中统计产生的,对实际生产有一定指导意义。

1　直流电法超前探测基本原理及施工技术

1.1　基本探测原理

对于均匀全空间,点电源的等位面是 1 个以点电源为球心的球壳,不管球壳的前面、后面、左面、右面其上的电位均相等,对于点电源来说,其球壳上的电位具有球对称性。在地下巷道内工作面供电点的后方就可以探测前方对称位置的电场情况,这是直流超前探测的基本理论依据[7]。

电源点 A 产生的电场分布特征的空间形态如图 1 所示,可用以下关系式表达,即

$$U_M = I\rho/(4\pi R_{AM}),\ U_N = I\rho/(4\pi R_{AN})$$

式中:U_M、U_N 分别为观测点 M、N 点之电位,V;I 为供电电流强度,A;ρ 为均匀空间介质电阻率,Ω · m;R_{AM}为观测点 M 到电源点 A 的距离,m。

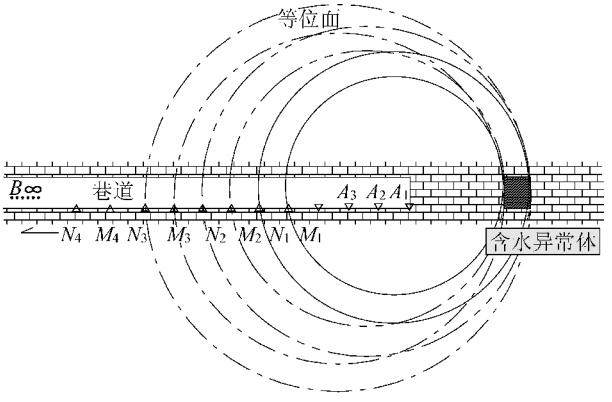


图 1　直流电法超前探测原理示意

Fig. 1　Principle sketch of advanced DC electric detection

岩石的视电阻率 $\rho_s = K\Delta U_{MN}/I$,其中 K 为装置系数,即有

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N$$

1.2　施工技术

在均匀空间中,该技术采用六电极系装置(或七电极系装置,4 个点供电电极),在巷道掘进工作面附近等间距布置 3 个点供电电极 A_1、A_2、A_3,分别往地下供入直流电建立人工电场,根据电流场分布原理,各供电电极分别供电时都是点电源,其电流线以 A_i点电极(i=1,2,3,以下同)为球心往外辐射,其等电位面是以 A_i为球心的球面,该球面的特点是在同 1 个球面上的任意一点的电位相同。由一定间隔的 MN 电极测得两个球壳之间的电位差[7]。施工布置如图 2 所示。

当掘进工作面前方无地质构造时,获得的电位差为正常值,掘进工作面前方存在地质构造时,等位面的分布将被改变,表现为包含地质构造的 2 个等位面之间的电位差发生变化,而该值可以通过测量掘进工作面后方的 MN 两电极获得。实际上 MN 间的电位差包括掘进工作面前方、后方、上方、下方、左方、右方全空间地层的地质信息。通过进一步处理解释就可得到前方电性异常的赋存状态[7]。

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

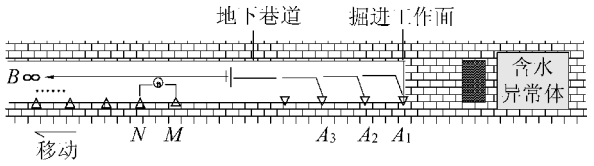


图 2　井下直流电法超前探测施工布置

Fig. 2　Underground layout of advanced DC electric detection method

1.3　解释标准

根据实测统计结果:当 $0.5|\delta|<E_{xp}\leqslant|\delta|$ 为一级异常,一般为对应前方含水导水性相对较差或无构造、或不含水的岩性变化;当 $|\delta|<E_{xp}\leqslant 2|\delta|$ 为二级异常,其中 E_{xp} 为超前探测电阻率异常值,δ 为均方差[7],一般对应岩石电性变化较大,如岩石相变、底鼓、含水断层、淋水裂隙及老窑等局部含水性较强的异常地质体;当 $E_{xp}>2|\delta|$ 为三极异常,一般对应突出的岩石电性变化,如大的导水断层(或导水裂隙发育带)、老窑积水巷道或潜在的导水或突水地质构造等强含水体的反应,一般为"灾害性"地质构造。

2　老窑积水巷道地球物理特征

在正常情况下,煤层未被采动时,沉积地层一般呈现成层性和完整性,地层电性在横向上是相对均一的,小区域内同一地层的电性变化不会太大。煤层被采空后,煤层上下岩层间形成一定的空间,破坏了岩石的完整性、连续性,故该处电阻率值明显与周边完整岩石的电阻率值不同,表现出局部电性异常特性。当采空区(或老窑巷道等)的空间被水完全充填,因矿化度较高,其电阻率常呈低阻反映;当采空区的空间不完全充填,其电阻率不一定呈低阻反映;当采空区的空间为空气充填,其电阻率常呈高阻反映。一般情况下,视电阻率值大小顺序依次为:采空区(空洞)>灰岩>煤层>砂岩>积水采空区或含导水裂隙破碎带。这种电性的变化与差异,在纵向、横向上都打破了原有地层电性的固有规律,使用物探仪器探测其赋存位置成为可能。

3　老窑积水巷道直流电法异常特征

3.1　掘进工作面前方为斜交老窑积水巷道

新疆库车某矿下$_5$煤工作面材料巷掘进工作面超前探测拟断面[16]如图 3 所示。此次超前探测距离为80 m范围内主要有 3 个低阻异常,分别位于 45—50 m(1 号异常),54—61 m(2 号异常),78—80 m(3 号异常)。验证结果:1 号异常和 2 号异常,巷道掘进后锚杆淋水、顶板裂隙淋水,属于裂隙水影响。3 号异常,掘进时揭露为斜交老窑巷道,部分积水。经分析得,本次均方差 $\delta=\pm 19$,本次低阻异常范围较小,1 号异常、2 号异常幅值均大于 1 倍均方差但小于 2 倍均方差(为二级异常),3 号异常幅值−12 在 0.5~1 倍均方差间(为一级异常)。调查结果,3 号异常为 1967 年建井的老窑巷道,直径 3 m 左右,水量较小。

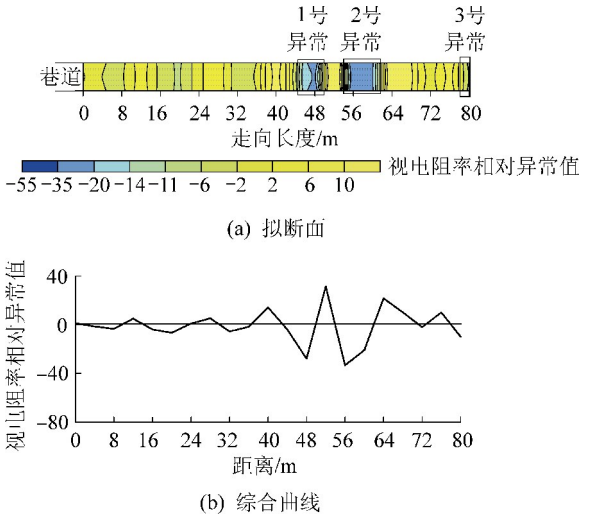


图 3　新疆库车某矿直流电法超前探测结果

Fig. 3　Detection result of advanced DC electric detection in a mine of Kuche, Xinjiang

3.2　掘进工作面前方为正交老窑积水巷道

王家岭碟子沟 20101 工作面回风巷电法超前探测拟断面[17]如图 4 所示。

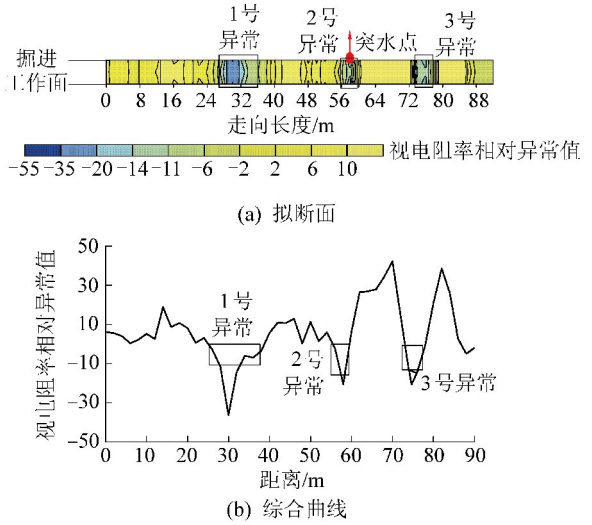


图 4　王家岭 20101 工作面回风巷直流电法超前探测结果

Fig. 4　Detection results of advanced DC electric detection in air return gateway of No.20101 working face of Wangjialing Mine

探测结果:此次超前探测距离 100 m 范围内主要有 3 处视电阻率低阻异常,分别位于掘进工作面前方 27—36 m(1 号异常,位于 20101 工作面回风巷口往西 770 m 附近),56—60 m 的 2 号异常(20101 工作面回风巷口往西 798 m 附近),73—78 m(3 号异常,20101 工作面回风巷口往西 833 m 附近)。

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

1)验证结果:因为各种原因未安排对物探异常点进行钻探验证。当掘进到 1 号异常时,无大的地质异常情况,是岩层裂隙发育带,安全通过;当掘进到 2 号异常(797.8 m)时发生了王家岭煤矿“3·28”特别重大透水责任事故,造成 153 人被困井下,经全力抢救,115 人获救(均受伤),38 人死亡,直接经济损失达 4 900 多万元。

2)结果分析:本次均方差 $\delta=\pm20$,其中 1 号异常幅值-36 相对较大,2 号异常-21,次之,3 号异常-20 最小,均在 $\delta\sim2\delta$ 间内,均属于二级异常。1 号异常范围较大,宽约 9 m,为局部裂隙发育带;2 号异常范围较小,宽约 4 m,积水巷道垂直于掘进方向,积满水的老窑巷道位于煤层的上分层(该处煤层厚约 7 m),高 2.4 m、宽 2.2 m,掘进巷道高 3.7 m、宽 5.6 m,距探测掘进工作面 56 m;3 号异常宽约 4 m,性质未知,其中,老窑透水平面如图 5 所示。

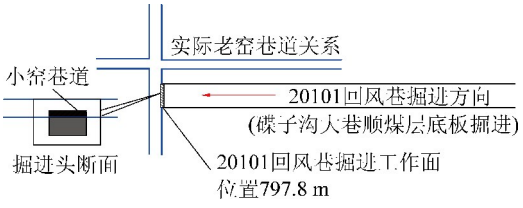
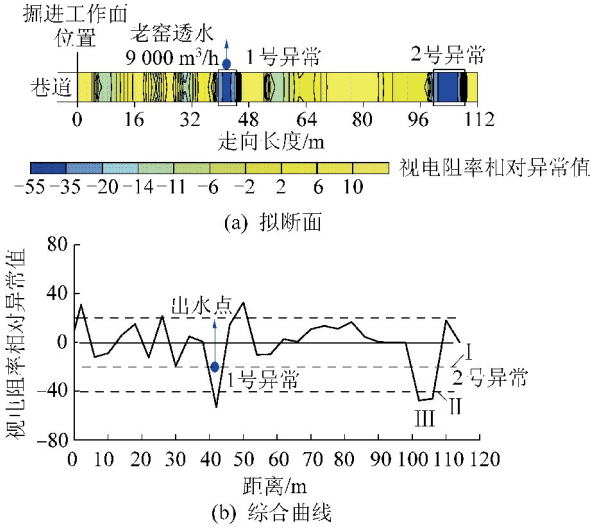


图 5　2 号异常老窑透水平面示意

Fig. 5　Schematic of permeable surface of No. 2 abnormal mine

3.3　掘进工作面前方 2 个老窑积水巷道

中煤能源股份有限公司平朔分公司某矿 9 号煤南翼主运大巷 6 号测量点前 24 m 的巷道掘进工作面位置直流电法顺煤层超前探测结果[17]如图 6 所示。



Ⅰ—1 级低阻异常临界值;Ⅱ—2 级低阻异常临界值;Ⅲ—3 级低阻异常带

图 6　平朔某矿直流电法超前探测结果

Fig. 6　Result of advanced DC electric detection in a mine of Pingshuo

探测结果得:此次超前探测距离 112 m 范围内主要存在 2 个较大低阻异常,分别位于 40—44 m(1 号异常),100—108 m(2 号异常)。

1)验证结果:当掘进至 1 号异常 43.3 m 处发生老窑透水,峰值突水量约 9 000 m^3/h,因决策正确无人员伤亡,短时间内工作面被淹。排干水后打钻验证 2 号异常仍为大量老窑积水巷道。

2)结果分析:本次均方差 $\delta=\pm20$。灾害性临界预报点为≤40。发现 2 个 3 级低阻异常(1 号异常-45、2 号异常-43)为灾害性异常。1 号异常低阻异常范围较小,幅值大于 2 倍均方差,对应 1 条老窑积水巷道直径约 3 m 充满水。2 号异常低阻异常范围较大宽 4 m 多,幅值大于 2 倍均方差,是 2 条交叉老窑积水巷道直径均 2~3 m,充满水且量大。探测方向与 2 个老窑巷道斜交。2 号异常虽远但异常仍属于 3 级较大低阻异常,说明距离远近基本不影响异常的大小。

4　结　　论

矿井直流电法超前探测技术在煤矿跟踪掘进工作面超前探测了数千次,每次探测距离约 100m,探测距离误差一般不大于 5%,已经成功探测出许多老窑积水巷道,尚无漏报,成功预防了多次老窑巷道透水事故。主要有以下电法异常特征:

1)老窑积水巷道与电法探测方向不管是正交或斜交,因电法的体积勘探效应无法区分。

2)老窑积水巷道的直流电法超前探测异常特征之一,共同表现为 1 个单一下尖的低阻异常,宽度范围相对较小(3~5 m)。老窑积水巷道异常特征之二,当其异常大于一倍均方差 δ(至少为 2 级异常)时,一般对应老窑巷道积满水的情况;当大于 2δ(3 级异常),一般对应水量较大可能是灾害性异常。(可作为预警条件)。窑积水巷道低阻异常特征三,当巷道内局部积水时,仍表现为低阻异常,异常相对较小,一般大于半倍均方差(1 级异常)。应根据防治水有关规定采取有效措施进行验证。

3)含导水裂隙破碎带常表现为幅值较大低阻异常特征,但其异常形态不是单一对称的下尖异常,其范围常表现较宽,与老窑积水巷道有区别,如顶板淋水等裂隙发育带会表现为局部下尖的 1 个较宽二级异常等。

4)直流电法超前探测使用的是相对电阻率异常值,距离对异常大小影响相对较小。值得注意的是,电法具有多解性目前还没有克服,建议尽量使用两种物探相互验证,或物探与钻探相互验证可以减

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

少多解性。

致谢:实测资料是由中煤科工集团西安研究院电法勘探研究所提供,在此表示感谢。

参考文献(References):

[1] 程建远,石显新.中国煤炭物探技术的现状与发展[J].地球物理学展,2013,28(4):2024-2032.
CHENG Jianyuan,SHI Xianxin.Current status and development of coal geophysical technology in China[J].Progress in Geophysics,2013,28(4):2024-2032.

[2] 王 益.王家岭碟子沟井下物探超前探测报告[R].西安:煤炭科学研究总院西安研究院,2010.

[3] 韩德品,赵 镨,李 丹.矿井物探技术应用现状与发展展望[J].地球物理学进展,2009,24(5):1839-1849.
HAN Depin, ZHAO Pu, LI Dan. Application status and development prospects of mine geophysical exploration technology [J].Progress in Geophysics,2009,24(5):1839-1849.

[4] 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.

[5] 许新刚,岳建华,夏书兵,等.多层采空积水区瞬变电磁响应研究[J].中国煤炭地质,2017,29(4):73-77.
XU Xingang, YUE Jianhua, XIA Shubing, *et al*. A study on multilevel gob ponding area transient electromagnetic response[J]. Coal Geology of China,2017,29(4):73-77.

[6] 刘 恋,姜志海,臧公瑾.积水采空区瞬变电磁响应微分解释方法[J].地球物理学进展,2017,32(4):1621-1627.
LIU Lian, JIANG Zhihai, ZANG gongjin. Integrated interpretation method of TEM by differential attenuation of response in mined-out area with water[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1621-1627.

[7] 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方法[J].煤炭学报,2010,35 (4): 635-639.
HAN Depin, LI Dan, 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.

[8] 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].煤田地质勘探,2013,41(1):78-81.
MA Bingzhen, LI Xiu. Roadway influences on advanced DC detection in underground mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2013,41(1):78-81.

[9] 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 and Exploration,2013,41(6):83-86.

[10] 赵永贵,刘 浩,孙 宇,等.隧道地质超前预报研究进展[J].地球物理学进展,2003,18(9):460-462.
ZHAO Yonggui, LIU Hao, SUN Yu, *et al*. Research progress in tunnel geological prediction [J].Progress in Geophysics,2003,18 (9):460-462.

[11] 刘 坦.煤矿采空区及其含水性综合物探技术[J].煤矿安全,2016,47(7):73-75.
LIU Tan. Geophysical prospecting technology for coal mine gobs and their aquosity[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(7): 73-75.

[12] 范 涛,鲁晶津,王冰纯,等.瞬变电磁虚拟波场反演法在井下超前探测中的应用[J].煤炭科学技术,2017,45(10):8-15,47.
FAN Tao,LU Jingjin,WANG Bingchun,*et al*.Inversion method of transient electromagnetic virtual wave-field applied to advance detection in underground mine[J].Coal Science and Technology, 2017,45(10):8-15,47.

[13] 刘盛东,郭立全.MSP 技术及其煤矿巷道小构造探测中的应用[J].安徽理工大学学报:自然科学版,2007,27 (S1): 22-25.
LIU Shengdong, GUO Liquan. MSP Technology and the application of detecting small geological structure in coal mine lane way [J].Journal of Anhui University of Science and Technology:Natural Science Edition,2007,27(S1):22-25.

[14] 骆 彬,张平松,胡雄武.矿井坑道音频电法超前探测模拟及其应用[J].中国煤炭,2018,44(5):27-31.
LUO Bin,ZHANG Pingsong,HU Xiongwu.Simulation and application of audio electric advanced detection method in mine tunnel [J].China Coal,2018,44(5):27-31.

[15] 殷国强,翟培合,秦鹏一,等.高密度二极三维直流电法超前探测研究[J].煤炭技术,2017,36(10):190-192.
YIN Guoqiang,ZHAI Peihe,QIN Pengyi,*et al*.Study on advanced detection of high density DC diode[J].Coal Technology,2017,36 (10):190-192.

[16] 石学锋.新疆库车某矿矿井直流电法超前探测报告[R].西安:煤炭科学研究总院西安研究院,2010.

[17] 解海军,蒋齐平,王 鹏.中国中煤能源股份有限公司平朔分公司矿井直流电法超前探测报告[R].西安:煤炭科学研究总院西安研究院,2010.