



移动扫码阅读

闫国才,鲜鹏辉,仇念广.深井低阻体电性源短偏移距瞬变电磁探测技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(6):171-176.doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.06.022  
 YAN Guocai, XIAN Penghui, QIU Nianguang. Study on short offset transient electromagnetic detection technology for low-resistance electrical sources in deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (6): 171 - 176. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.06.022

# 深井低阻体电性源短偏移距瞬变电磁探测技术研究

闫国才,鲜鹏辉,仇念广

(中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037)

**摘要:**煤矿深部开采是一种趋势,但是相随的复杂水害问题给安全造成了巨大威胁,煤层顶板以上巨厚砾岩层中的含水层表现为浅薄深厚、发育不规则的特性,常规地面瞬变电磁探测深度不够,深部探测体积效应大,低阻屏蔽效应明显。为保障深部煤层安全回采,高精度、高分辨率的探测煤层顶板以上巨厚砾岩层的富水性及富水范围,基于电性源短偏移距瞬变电磁法的相关理论,分析了电性源短偏移距瞬变电磁探测技术的垂直磁场强度、视电阻率值及探测深度计算表达式,研究总结了现场类地震的一发多收探测方法,探讨了基于改进阻尼因子的最小二乘法反演方法,在华北某矿区深部巨厚砾岩层富水性探测中应用。研究结果表明:电性源短偏移距瞬变电磁探测技术增大了探测深度,实现了深度超过1000 m的低阻含水异常体有效探测,缩小了深部探测的体积效应,有效压制了低阻屏蔽影响,反演计算明显提高了深部巨厚砾岩层的富水性及富水范围的探测精度,经过38次迭代后H型理论模型的反演误差为 $7 \times 10^{-7}$ ,经过50次迭代后实际资料的反演误差为0.05%,针对低阻异常区进行钻探验证,出水情况与强含水异常区及中等含水异常区相吻合,探测精度和分辨率明显提升。该方法探测研究为深部煤层安全回采提供了有效的地质技术资料,具有较高的推广应用价值。

**关键词:**电性源短偏移距;瞬变电磁法;深部低阻异常体探测;改进阻尼因子;巨厚煤层

**中图分类号:**P631.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2020)06-0171-06

## Study on short offset transient electromagnetic detection technology for low-resistance electrical sources in deep mine

YAN Guocai, XIAN Penghui, QIU Nianguang

(Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** Deep mining in coal mines is a trend, but the accompanying complex water hazards pose a huge threat to safety. The aquifer in the super-thick conglomerate above the coal seam roof is characterized by shallow, deep and irregular development. The conventional ground transient electromagnetic detection depth is insufficient, and the volume effect of deep detection is large, and the low resistance shielding effect is obvious. In order to ensure safe mining of deep coal seams, the water content and water-rich range of the super-thick conglomerate above the coal seam roof were detected with high precision and high resolution. Based on the short offset transient electromagnetic method of electrical sources, the electrical properties were analyzed and the calculation expressions of the vertical magnetic field strength, apparent resistivity value and detection depth of the short-distance transient electromagnetic detection technology of the source were summarized. The research summarized the detection method of on-site multiple earthquakes and discussed the least squares based on the improved damping factor. It has been applied to the water-rich exploration of the thick conglomerate deep in a mining area in north China. The research results show that the short offset transient electromagnetic detection technology of electrical source increases the detection depth, realizes the effective detection of low-resistance water bearing anomalies with a depth of more than 1000 m, reduces the volume effect of deep detection, and effectively suppress the influence of conductive shielding, and it obviously improves the detection accuracy of the deep thick conglomerate layer and the rich water range. After 38 iterations, the inversion error of the H-type theoretical model is  $7 \times 10^{-7}$ , and after 50 iterations, the inversion error of the actual data is 0.05%. The drilling verification shows that the water-bearing situation of the strong water-bearing anomaly zone and the medium water-bearing anomaly zone is consistent with the research results, which significantly improves the detection accuracy and resolution. This method provides effective geological technical data for safe mining of deep coal seams, and has high application promotion value.

收稿日期:2019-10-25;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002-003)

作者简介:闫国才(1987—),男,山西朔州人,工程师,硕士。E-mail:ygclq@126.com

$10^{-7}$ , and the inversion error of the actual data is 0.05% after 50 iterations. According to the drilling verification of the low-resistivity anomaly area, the water output is consistent with the strong and medium water-bearing anomaly area, and the detection accuracy and resolution are significantly improved. This method provides effective geological technical data for safe mining of deep coal seam and has a high value of popularization and application.

**Key words:** short offset of electrical source; transient electromagnetic method; deep low-resistance anomaly detection; improved damping factor; huge thickness coal seam

## 0 引言

随着国家经济的不断发展,煤炭资源的重要地位仍无法撼动,而煤矿开采深度在逐渐加大,这就使得深部煤岩层中的水害问题备受关注,对煤层的安全回采造成了巨大的威胁,有时甚至会酿成水害事故,造成不可估量的生命财产损失。随着开采深度的增大,煤层顶板含水层更加复杂,常规瞬变电磁法达不到探测深度和分辨率的要求,体积效应和低阻屏蔽效应影响明显,探测精度难以保证,给实际问题的解决带来困难。当前地面瞬变电磁探测方法已经发展到短偏移距近区电性源探测,对提高探测深度及分辨率有明显的效果。

古近系砾岩层在某些井田深部发育巨厚,造成煤层埋藏深度往往都超过1 000 m,这就使得常规针对煤系地层使用的瞬变电磁方法难以达到所需的探测深度,如果一味想办法增大探测深度,又难以保证探测分辨率。在这种情况下,李功强等<sup>[1]</sup>详细分析该方法的原理、工作方法及探测效果;闫述等<sup>[2]</sup>用解析分析、时域有限差分、时-频分析的方法讨论了瞬变电磁法探测深度的问题;薛国强等<sup>[3]</sup>在2013年提出了一种基于近区探测的电性源短偏移距瞬变电磁方法,并在某盐矿溶腔进行探测得到良好效果;薛国强等<sup>[4]</sup>还分析了去噪方法,采用了曲线精细拟合技术提高定量反演精度;KAUFMAN A A<sup>[5]</sup>于1983年最先提出该方法,对探测方法和探测深度问题进行了详细的研究,一改之前仅停留在远区探测达不到探测深度要求的弊端;陈卫营<sup>[6]</sup>在前人研究的基础上对基本理论、施工技术、数据处理做了细致深入的研究,并通过实例验证了探测效果。该方法在时间域中一次场和二次场是完全分离的,这就可以彻底避开一次场的干扰,达到纯二次场探测深部信息的效果,干扰项得到有效遏制,分辨率得到明显改善,提高了探测精度<sup>[7-8]</sup>。

针对矿井煤层上覆砾岩层中含水赋存情况在地层中表现出来的特殊电性特征,笔者采用超敏感电性源短偏移距瞬变电磁法对深部复杂砾岩层富水性及富水区域进行精确探测,施工简便、野外工作高

效、探测效果明显,并在数据处理过程中加入最小二乘法反演计算,可提高探测精度,在各行业都具有很好的推广应用前景,且具有十分重要的安全生产指导意义。

## 1 电性源短偏移距瞬变电磁理论基础

电性源本身对低阻体有超敏感特性,短偏移有“近区”大深度探测的优点。电性源短偏移距瞬变电磁法,是一种利用通电的接地电极向探测区域地下供电以形成阶跃脉冲式一次电磁场,使用磁棒在时间域探测感生二次场的分布规律<sup>[2-4,6]</sup>。基于感应涡流场形成的“烟圈”效应,KAUFMAN等<sup>[5]</sup>于1983年推导出了均匀半空间时磁场强度的垂直分量 $H_z$ 计算表达式<sup>[7]</sup>为

$$H_z = -\frac{Idsy}{2\pi k^2 r^5} [3 - (3 + 3ikr - k^2 r^2) e^{-ikr}] \quad (1)$$

式中: $I$ 为发射电流强度; $ds$ 为偶极子长度; $r$ 为收发距; $k$ 为波数; $y$ 为在 $y$ 轴方向上的距离。

将式(1)通过逆拉普拉斯变换处理,再经过一些代数变换,得到便于数据处理的感应电压 $\partial B_z / \partial t$ 表达式<sup>[8]</sup>为

$$\frac{\partial B_z(t)}{\partial t} = \frac{3IL\rho \sin \varphi}{2\pi r^4} \left[ \Phi(\mu) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \mu \left( 1 + \frac{\mu^2}{3} \right) e^{-\mu^2/2} \right] \quad (2)$$

式中: $\Phi(\mu)$ 为概率函数,且有 $\mu = r / \sqrt{2\rho t / \mu_0}$ , $\rho$ 为地层电阻率, $\mu_0$ 为真空磁导率; $t$ 为时间; $L$ 电性源长度; $\varphi$ 为接收点与发射源的夹角。

由于探测深度较大,因此近区场的响应满足 $\mu = r / \sqrt{2\rho t / \mu_0} \ll 1$ 。此时可得到感应电压表达式为

$$\frac{\partial B_z(t)}{\partial t} = \frac{3IL\rho\mu_0^{5/2}}{60\pi^{3/2} t^{5/2} \rho^{3/2}}$$

因此,相比于“远区”,“近区”的感应电压与 $\rho^{-3/2}$ 成正比,这正是电性源“近区”探测对低阻体超敏感的原因所在<sup>[2,4,9-10]</sup>。

探测时,根据实测磁场反演可得到时间域视电阻率计算公式<sup>[11-13]</sup>为

$$\rho_s = \frac{t}{\pi} \left\{ \frac{\partial g(t)}{\partial t} [1 - \exp(-w)/2 + w \exp(-w)/4] / 500 \right\}^2 \quad (3)$$

式中:  $w = [100\pi\rho t / (\mu_0 R^2)]^{1/4}$ ;  $g(t)$  为深度函数。

野外实际探测都是在非均匀半空间进行的,理论上采用视电阻率直接计算探测深度在实际中是不可行的,需要用到深度函数  $g(t)$  的时间导数及拟合得到的式(3)来计算与视电阻率值对应的探测深度,其表达式<sup>[1,4,7-9]</sup>为

$$d = 0.48 \left( \frac{ILy\rho}{2\gamma} \right)^{1/5} \quad (4)$$

式中: $d$  为探测深度;  $\gamma$  为设备最小分辨电压,这就将短偏移距离变电磁探测深度与视电阻率值相对应起来。

## 2 探测方法

电性源短偏移距离变电磁法探测示意。图中 AB 代表电性源,在电性源两侧一定距离布置的两个蓝色虚线框区域表示接收区域,由接收线和接收点组成,区域大小据探测深度和范围决定,接收线平行于电性源,接收线距和接收点距视探测精度要求而定,电性源两侧与之最近的测线间距称为偏移距(收发距),直接决定着探测的最大深度<sup>[14-16]</sup>。

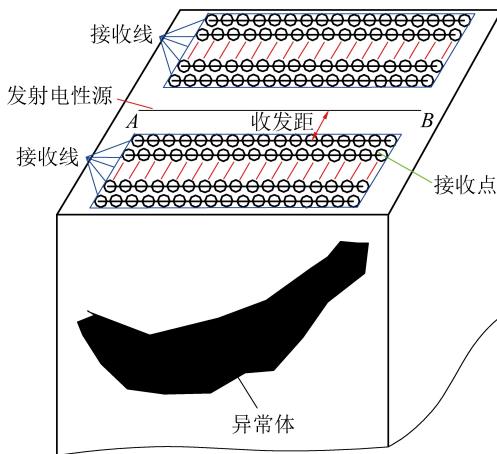


图 1 电性源短偏移距离变电磁法探测示意

Fig.1 Schematic of short-distance transient electromagnetic method for electrical source detection

该探测方法电性源可以相对固定,布置好发射电性源 AB 后,在其两侧采用小于等于探测目标层深度的短偏移距,布设一定面积的探测区域,探测点用磁棒进行接收,探测时采用多测线多测点同时进行,以便有效提高工作效率,而且对探测区域实现了多次覆盖,达到深部高精度探测的目标。

## 3 最小二乘法反演计算

本着提高探测精度的目标,对电性源短偏移距离变电磁探测进行线性反演计算。选取磁场强度水平分量的相对误差作为目标函数,以使不同探测点上的响应曲线拟合程度提高。经过雅可比变换,根据边界条件写出收敛性较强的阻尼因子法方程<sup>[17-19]</sup>为

$$(\mathbf{P}^T \mathbf{P} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \mathbf{X} = \mathbf{P}^T \mathbf{Q} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{P}$  为雅可比矩阵; $\mathbf{Q}$  为目标函数中的误差计算项; $\mathbf{I}$  为单位矩阵; $\lambda$  为阻尼因子。

### 3.1 H型理论模型反演

H型理论模型的参数及反演结果见表 1,从表中可以看出视电阻率反演值接近于理论值,第 1 层深度的反演值略小于理论值,第 2 层深度的反演值大于理论值,总体反演效果较为理想。

表 1 H型理论模型参数及反演结果

模型参数	理论值	取值范围	反演值
$\rho_1 / (\Omega \cdot m)$	500	[400, 600]	513.72
$\rho_2 / (\Omega \cdot m)$	50	[10, 100]	48.36
$\rho_3 / (\Omega \cdot m)$	1 000	[900, 1 100]	952.84
$h_1 / m$	1 000	[900, 1 100]	973.16
$h_2 / m$	100	[50, 150]	115.30

模型瞬变电磁响应反演拟合曲线如图 2 所示,从图 2 可以看出,曲线衰减规律跟模型参数相适应,高阻衰减快,低阻衰减慢,且理论响应值与反演响应值基本吻合,反演效果好。

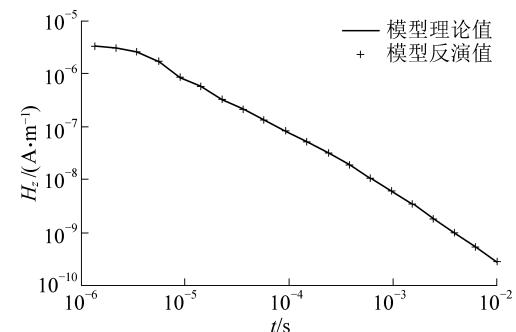


图 2 模型瞬变电磁响应反演拟合曲线

Fig.2 TEM response fit curve of model

模型反演拟合误差曲线如图 3 所示,从图 3 中可以看出,随着迭代次数增加拟合误差表现为迅速降低到变化较小再到平缓降低的趋势,当迭代 38 次时拟合误差约为  $7 \times 10^{-7}$ ,反演精度高。

### 3.2 实际资料反演效果

通过调整  $\lambda$  值可以改变计算效率,提高反演精度。按照反演的过程对现场采集的资料进行反演计算,取迭代次数为 50,得到相对误差曲线如图 4 所

示,图4中误差曲线走势相对较为平滑,误差范围随着迭代次数不同分布较大,按照选取的迭代次数可得拟合误差小于0.05%,反演精度较高。

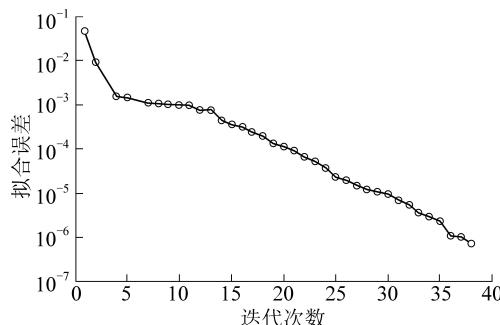


图3 模型反演拟合误差曲线

Fig.3 Inversion fitting error curve of H-type model

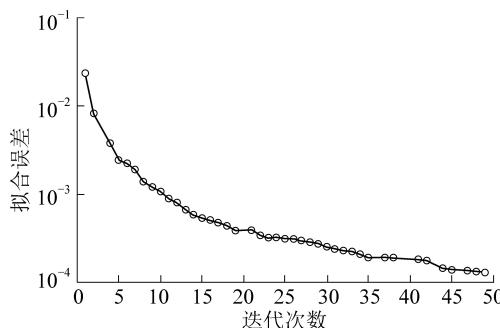


图4 反演拟合误差曲线

Fig.4 Inversion fitting error curve

## 4 探测应用

### 4.1 地质概况

某矿地层断面如图5所示,从图5中可以看出,4煤和6煤均为单斜构造发育,煤层沿走向倾角较大,埋深都超过600 m,最深可能延伸到1 400 m以上,煤层上覆岩层为巨厚砾岩层,砾岩层中的含水层具有浅薄深厚的特点,且含水层发育不规则<sup>[20]</sup>,为保障深部煤层安全高效开采,需要对煤层延伸到的深部进行高分辨率探测,因此采用电性源短偏移距

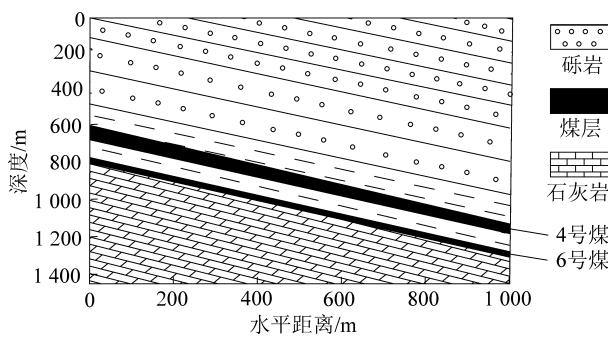


图5 某矿地层断面

Fig.5 Stratigraphic section of a mine

瞬变电磁法对探测区域深部巨厚砾岩层进行富水性探测研究。

### 4.2 探测参数

现场探测系统布置好以后,要进行试验线测试,以确定该探测区域的电性源发射电流强度、发射频率大小、每个接收点探测时间等参数。经过2条试验线探测,最终选定该探测区域现场探测工作参数为:发射电流强度为20 A、发射频率为2.5 Hz、单点探测时间为7 min,探测效率相对较高。

探测区域面积不到2 km<sup>2</sup>,先在勘探区外布置电性源发射线长度为1 000 m,收发距为1 000 m,然后按照50 m及100 m间距在同侧布置探测线31条,覆盖整个探测区域,测线布置如图6所示,图6中红黑蓝3种颜色的实点表示测点,测点间距10 m,测线间距有50、100和400 m三种。

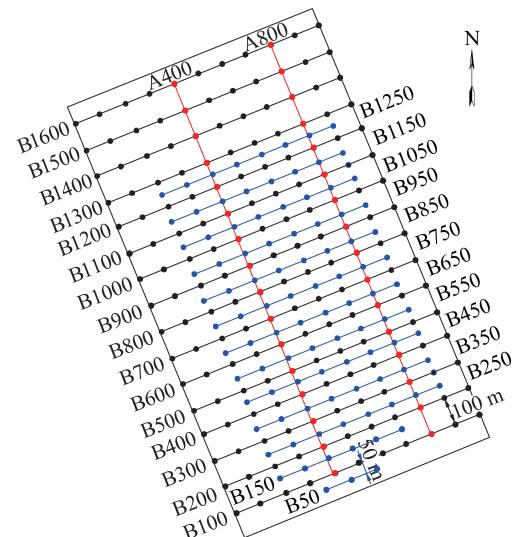


图6 测线布置

Fig.6 Line layout

### 4.3 探测结果地质解释

该矿B1300测线视电阻率断面如图7所示。原始数据经过处理和反演计算得到随深度变化的视电阻率断面图,可以明显反映该测线不同深度的视电阻率,图7中探测深度在0~100 m范围内整个探测长度视电阻率为40~70 Ω·m,反映的是古近系上组的弱含水地层;探测深度在100~350 m范围内整个探测长度视电阻率为60~150 Ω·m,反映的是古近系中组弱含水或不含水地层;探测深度在350~1 500 m范围视电阻率变化范围在20~500 Ω·m,反映的是古近系下组复杂的地质情况。在图中实线圈闭区域A(探测长度200~1 000 m、探测深度450~500 m范围)内视电阻率明显较低,判断为4煤顶板以上的相对强含水层;图中虚线圈闭B(探测长度0~1 000 m、探测深度350~800 m范围)内视电阻率相对较低,判断为4煤顶板以上的相对中等含水层;其余探测范围富水性相对较弱或不具有富水性。

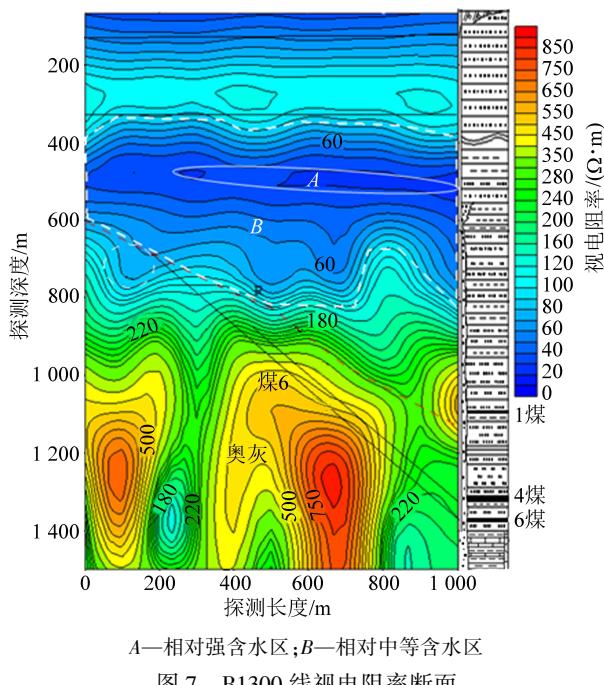


Fig.7 Apparent resistivity section of Line B1300

为了更好地反映深部煤层顶板以上富水区域的分布范围,综合所有测线的探测结果,采用顺层切片的模式进行分析。4 煤顶板以上 30 m 顺层切片如图 8 所示。

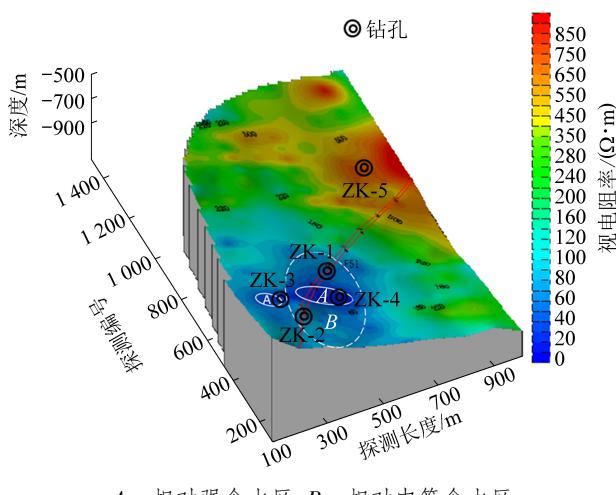


图 8 4 煤顶板以上 30 m 顺层切片

Fig.8 Layering slice diagram of No.4 coal seam roof above 30 m

从图 8 可以看出,小号测线段视电阻率值相对较低而大号测线段视电阻率较高,且含水区域基本上集中到 F51 断层附近,判定断层具有连通作用。具体地,图 8 中实线圈闭 A 区(测线 B150~B400 段、测线长度 650~700 m 范围及测线 B500~B600 段、测线长度 550~650 m 范围)内视电阻率明显较低,判断为受断层导通而形成的强含水区域;图中虚线圈闭 B 区(测线 B450~B650 段、测线长度 400~800

m 范围)内视电阻率值相对较低,判断为相对中等含水区域;其余探测范围视电阻率值均相对较高,判断为富水性较弱或不具有富水性。

#### 4.4 钻探验证

结合探测结果及煤矿井下现有巷道条件,在 4 煤顶板设计 5 个钻孔进行现场验证,其中 2 个钻孔针对导水裂隙(图 8 中 ZK-1 和 ZK-2)、2 个钻孔针对强含水区域(图 8 中 ZK-3 和 ZK-4)、1 个钻孔针对不含水区域(图 8 中 ZK-5)。钻探验证情况为:探测结果中的相对中等含水区域及强含水区域均表现为含水,水量为 560 m<sup>3</sup>/d,放水 12 d 后水量减少,40 d 后钻孔水量很小,含水区域放水基本完毕;探测结果中弱含水区域表现为钻孔小股流水现象;探测结果中不含水区域表现为钻孔淋滴水或干燥。验证结果表明,电性源短偏移距离变电磁对深部低阻体探测效果较好,探测结果与实际验证情况基本吻合,反演后精度明显提高。

### 5 结 论

1) 对电性源短偏移距离变电磁探测技术的相关理论进行了分析,研究了现场实际探测布置方法和最小二乘法反演计算在数据处理过程中的应用效果,对理论模型和实际资料进行了反演计算,得出该探测技术对深部低阻异常区及其范围探测具有很好的效果。

2) 探测理论采用电性源短偏移距激发增大了纵向探测深度,探测方法采用类地震施工法,实现了“一发多收”,数据处理过程加入了反演计算,H型理论模型经过 38 次迭代后的反演误差仅为  $7 \times 10^{-7}$ ,说明了改进阻尼因子的最小二乘法反演方法适用性强,实际资料经过 50 次迭代后的反演误差为 0.05%,说明反演精度高,效果明显,提高了煤矿深部富水性探测的分辨率和精度。

3) 结合某矿巨厚砾岩层深部富水性探测结果,针对低阻异常区进行钻探验证,钻孔出水情况与强含水低阻异常区及中等含水低阻异常区相吻合,说明该方法对深部低阻异常体具有超敏感特性,体积效应小,为煤矿深部煤层安全回采的富水性探测提供有效的技术资料,具有良好的推广使用价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 李功强,程久龙,高峰,等.煤矿深部采区岩层富水性短偏移距离变电磁法探测[J].中国矿业,2013,22(10):131-133,140.
- LI Gongqiang, CHENG Jiulong, GAO Feng, et al. Detection of water-rich short-offset transient electromagnetic method in deep

- mining area of coal mine [J]. China Mining Magazine, 2013, 22 (10): 131–133, 140.
- [2] 闫述,石显新,陈明生.瞬变电磁法的探测深度问题[J].地球物理学报,2009,52(6):1583–1591.  
YAN Shu, SHI Xianxin, CHEN Mingsheng. Detection depth of transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1583–1591.
- [3] 薛国强,陈卫营,周楠楠,等.接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术[J].地球物理学报,2013,56(1):255–261.  
XUE Guoqiang, CHEN Weiying, ZHOU Nannan, et al. Deep detection technology of ground – source transient electromagnetic short – displacement [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (1): 255–261.
- [4] 薛国强,闫述,陈卫营,等.SOTEM深部探测关键问题分析[J].地球物理学进展,2015,30(1):121–125.  
XUE Guoqiang, YAN Shu, CHEN Weiying, et al. Analysis of key problems in SOTEM deep detection [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 121–125.
- [5] KAUFMAN A A, KELLER G V. Frequency and transient soundings [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983.
- [6] 陈卫营.短偏移距电性源瞬变电磁法研究[D].桂林:桂林理工大学,2010.
- [7] 崔江伟.电性源短偏移距离变电磁法全程视电阻率计算研究[D].抚州:东华理工大学,2015.
- [8] 卢云飞,薛国强,邱卫忠,等.SOTEM研究及其在煤田采空区中的应用[J].物探与化探,2017,41(2):354–359.  
LU Yunfei, XUE Guoqiang, QIU Weizhong, et al. SOTEM research and its application in coal mining goaf [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 354–359.
- [9] 陈卫营,薛国强.瞬变电磁法多装置探测技术在煤矿采空区调查中的应用[J].地球物理学进展,2013,28(5):2709–2717.  
CHEN Weiying, XUE Guoqiang. Application of multi-device detection technology of transient electromagnetic method in investigation of coal mined area [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28 (5): 2709–2717.
- [10] 薛国强,闫述,陈卫营.电性源瞬变电磁短偏移探测方法[J].中国有色金属学报,2013,3(9):2365–2370.  
XUE Guoqiang, YAN Shu, CHEN Weiying. Detection method of transient short-electromagnetic offset of electrical source [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 3(9): 2365–2370.
- [11] 陈卫营,薛国强,李海,等.电性源瞬变电磁近场区响应特征[C]//长沙:中国地球物理学会第二十七届年会论文集,2011: 770.
- [12] 于师建.三软煤层上覆含水层富水性瞬变电磁法探测技术[J].煤炭科学技术,2015,43(1):104–107.  
YU Shijian. Detection technology of water-rich transient electromagnetic method for overlying aquifer in three soft coal seams [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 104–107.
- [13] 薛俊杰,陈卫营,王贺元.电性源短偏移距离变电磁探测深度分析与应用[J].物探与化探,2017,41(2):381–384.  
XUE Junjie, CHEN Weiying, WANG Heyuan. Analysis and application of short-distance transient electromagnetic detection depth of electrical source [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 381–384.
- [14] 程久龙,姜国庆,王玉和,等.矿井深部采掘隐患水体综合地球物理精细探测研究[C].北京:第七次全国煤炭科学技术大会文集,2010.
- [15] 牟义,董健,张振勇,等.CSAMT探测在煤矿深部采空区中的应用[J].煤炭科学技术,2013,41(S2):336–339.  
MOU Yi, DONG Jian, ZHANG Zhenyong, et al. Application of CSAMT detection in deep goaf of coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41 (S2): 336–339.
- [16] 蒋宗霖,于景春,孙伟涛.矿井瞬变电磁法低阻体的全空间响应影响研究[J].煤炭科学技术,2012,40(8):107–110.  
JIANG Zonglin, YU Jingcun, SUN Weitao. Study on the effect of full-space response of low-resistance body in mine transient electromagnetic method [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40 (8): 107–110.
- [17] 闫国翔.电性源瞬变电磁激电效应的正反演方法技术研究[D].西安:长安大学,2015.
- [18] 郭伟立.电性源瞬变电磁全场域探测研究[D].成都:成都理工大学,2013.
- [19] 陈卫营,薛国强.SOTEM一维等效源反演方法[J].物探与化探,2016,40(2):411–416.  
CHEN Weiying, XUE Guoqiang. One-dimensional equivalent source inversion method for SOTEM [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 411–416.
- [20] 张金涛.华丰煤矿第三系砾岩水与开采四层煤关系[J].煤田地质与勘探,2002,30(5): 35–38.  
ZHANG Jintao. Relationship between the Tertiary conglomerate water and the four-layer coal in Huafeng Coal Mine [J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(5): 35–38.