

傅雪海,李升,于景邨,等.煤层气井排采过程中煤储层水系统的动态监测[J].煤炭学报,2014,39(1):26-31. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0919

Fu Xuehai, Li Sheng, Yu Jingcun, et al. Dynamic monitor on coal reservoir water system during drainage process of coalbed methane well [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 26-31. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0919

煤层气井排采过程中煤储层水系统的动态监测

傅雪海^{1,2,3}, 李升^{1,2,3}, 于景邨^{2,3}, 吴有信⁴

(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 3. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 4. 安徽省煤田地质局物探测量队, 安徽 宿州 234000)

摘要:为了研究煤层气井排采过程中煤储层水系统的动态传播特征,基于煤系不同岩层不同含水状态的导电性差异,在沁南地区选择一口煤层气排采井,分别在该井排采前、排采半年后进行了煤储层水系统瞬变电磁动态探测。在该井排采范围内设置400 m×300 m的矩形测网,垂直地层走向布置16条测线,每条测线上布置400个测点,在测网内部形成20 m×10 m的观测坐标网格,通过数据采集、资料处理与定量解释,获得排采前、排采半年后各测线、测点煤系视电阻率对比图、视电阻率拟断面对比图、视电阻率顺层切片图,分析结果表明排采前煤储层水系统分布相对较均一,排采半年后煤储层水系统非均质性十分明显。在连通性差的区域,排采半年后煤储层水系统中静水储量部分被排出,煤层及其顶板砂岩视电阻率有不同程度地升高;在连通性较好区域,由于地下水动态补给,煤层及其顶板砂岩视电阻率降低。

关键词:煤层气;煤储层水系统;地下水动态传播;瞬变电磁技术;视电阻率;沁南地区

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2014)01-0026-06

Dynamic monitor on coal reservoir water system during drainage process of coalbed methane well

FU Xue-hai^{1,2,3}, LI Sheng^{1,2,3}, YU Jing-cun^{2,3}, WU You-xin⁴

(1. College of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Ürümqi 830047, China; 2. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Key Laboratory of CBM Resources and Dynamic Accumulation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. Anhui Coalfield Geology Bureau Geophysical Prospecting Entity, Suzhou 234000, China)

Abstract: In order to study dynamic propagation characteristics of coal reservoir water system during drainage process of coalbed methane well, based on different electrical conductivity of different lithology and water content of coal strata, a CBM production well in Qinnan area was chosen to conduct transient electromagnetic dynamic detections of coal reservoir water system before drainage and after half a year respectively. A rectangular survey grid of 400 m×300 m was set up with 16 survey lines perpendicular to the strata strike and 400 survey points distributed in each line, resulting in an observation coordinate network of 20 m×10 m within the survey grid. By means of data acquisition, data processing and quantitative interpretation, apparent resistivity bedding slice chart, comparison diagram of coal apparent resistivity and apparent resistivity section of each survey line and point were available before drainage and after half a year. The analysis results show that, distribution of coal reservoir water system is relatively uniform before drainage, while its anisotropy becomes very obvious after half a year. In the poor connectivity regions, apparent resistivity of coal

收稿日期:2013-07-02 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2009CB219605);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034);新疆维吾尔自治区引进高层次人才和“天山学者”启动基金资助项目(11100213)

作者简介:傅雪海(1965—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,博士。E-mail: fuxuehai@163.com

seam and roof sandstone increases in different degrees because static water reserves of coal reservoir water system are partly dewatered, to the contrary, that of coal seam and roof sandstone in the preferable connectivity regions decreases in a certain range because of hydraulic dynamic supply.

Key words: coalbed methane; coal reservoir water system; dynamic propagation of groundwater; transient electromagnetic method; apparent resistivity; Qinlan area

煤储层通过储层压力对煤层气吸附富集起控制作用。在煤层气井排采的过程中,煤储层压力逐渐降低,导致煤层气解吸、扩散、渗流,并运移至井筒产出,因而研究地下水动态变化规律是煤层气井开发及排采控制的基础^[1-3]。前期排采中的地下水动态变化研究多基于井口数据采集,进而从地球化学、数值模拟角度展开,间接推测煤储层水系统内的含水性变化^[4-5]。如果在排采范围内加密布设水文钻孔直接观测,则成本昂贵而耗时,信息也不够全面。由于含煤地层含水状态不同,导电能力不同,富水导电性好,电阻率低;贫水导电性差,电阻率高。因而能够利用电磁感应类探测方法进行无损探测。近年来发展的瞬变电磁技术(Transient Electromagnetic Method, TEM)基于对含水体敏感、受地形影响较小、分辨率高、信息丰富等优点已被广泛应用于地下水勘查及隐伏含(导)水构造探测等方面^[6-8]。笔者基于煤层气井排采过程中煤储层水系统动态变化观测的直观性、无损性,利用瞬变电磁法探测成果反演煤层气井排采过程中煤系电阻率变化,监测煤层气井排采过程中煤储层水系统动态变化特征,研究煤层气井排采地下水流动规律,为煤层气井排采优化提供有用的信息。

1 煤储层水系统的地电性

煤储层水系统系指煤层气井排采时直接或间接供给煤层气井地下水的煤岩层组合。由煤储层、直接给水含水层和间接给水含水层组成。直接给水含水层在煤层气井排采时直接流入煤储层或排采井;间接给水含水层系指与直接给水含水层有水力联系的其他含水层。

煤储层水系统的含水性变化特征可通过不同深度、不同时间段的地电特征来体现。煤储层水系统在含水性稳定情况下视电阻率值分布稳定,等值线分布均匀、平缓;若煤储层水系统含有相对富水区和含水、导水构造时,则呈现低阻异常,视电阻率值产生明显的畸变,等值线扭曲、变形为圈闭或呈密集条带状等。

2 排采水动态传播瞬变电磁监测方法

2.1 瞬变电磁法基本原理

瞬变电磁法的探测原理可用“烟圈”效应形象地

加以阐明。地表接收的二次电磁场是由于导电介质在阶跃变化的电磁场激发下而产生地下感应涡流而产生的,其涡流以等效电流环向下并向外扩散,形如“烟圈”(图 1)。随着时间的推移,“烟圈”的传播与分布将受到地下介质的影响,这样从“烟圈效应”的观点看,可知早期瞬变电磁场是近地表感应电流产生的,反映浅部电性分布;晚期瞬变电磁场主要是由深部的感应电流产生的,反映深部的电性分布。因此,观测和研究大地瞬变电磁场强弱、空间分布特性和时间特性,可以探测地下介质电性的垂向变化^[9-10]。

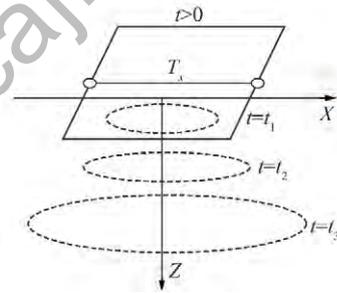


图 1 地下感应电流环分布

Fig. 1 Distribution of underground inductive current circle
瞬变电磁法全空间视电阻率 ρ_1 的计算公式^[11]为

$$\rho_1 = \frac{[MS_R]^{2/3} \left(\frac{1}{t}\right)^{5/3}}{[\varepsilon(t)]} \times 6.3219e^{-3}$$

式中, M 为发送回线的磁矩; S_R 为接收线圈的有效面积; $\varepsilon(t)$ 为感应电动势; t 为延迟时间。

2.2 测网布设

本次对沁南潘庄区块煤层气开发井 PE-055 井(位于晋城潘庄区块中部,单排采 3 号煤层)排采范围进行了瞬变电磁法动态探测(图 2)。3 号煤层位于山西组下部,上距 K8 砂岩 32.2 m,下距 K7 砂岩 7.85 m;煤层平均厚度为 5.95 m,埋深 525.2 m,底板标高为 293.36 m。地层走向北西,倾向南西,倾角小于 5° ,较平缓。

排采煤储层水系统动态探测的瞬变电磁法监测仪器为澳大利亚产的 Terra TEM 型瞬变电磁仪。该瞬变电磁仪具有抗干扰、轻便、自动化程度高等特点。数据采集由微机控制,自动记录和存储,与微机连接

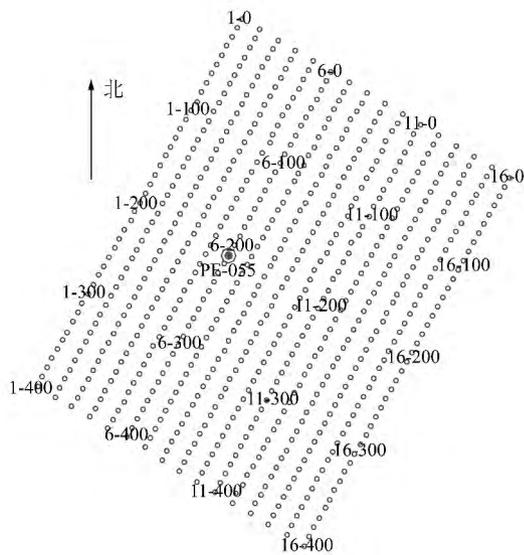


图 2 瞬变电磁法探测点布置

Fig. 2 Distribution of detection points of TEM

可实现数据回放^[12]。

目前,工程探测实践中常用的回线装置形式有同点装置、偶极装置和框-回装置,几类装置适用条件及效果各不相同^[11-12]。笔者采用框-回装置,又称大回线定源装置进行探测。一般框-回装置发射回线采用边长数百米甚至千余米的矩形线圈,采用小型线圈或探头,回线内部中心 1/3 面积范围内布线逐点测量。由于发射回线固定,可采用大功率发射设备供以大电流,加之发射回线面积大,能够提供很强的发射磁矩,磁场均匀,特别适于地层水探测。此外,由于采用轻便的接收线圈,使得装置移动灵活,不仅可以测量磁感应强度的 Z 分量,而且也可以测量 X, Y 分量(图 1)^[13-14]。

此次大地源瞬变电磁法发射线框为 200 m × 200 m 的正方形回线,接收回线采用边长为 5 m 的多匝数小回线,在发射回线中心 1/3 范围内进行煤储层排采水动态探测。以 PE-055 开发井为中心,考虑到现场的地形和地物,布置成 400 m × 320 m 的矩形测网,在测网内部形成 20 m × 10 m 的观测坐标网格,局部地段加密为 10 m × 10 m,测线尽量垂直地层走向,空间采样间隔、最大频点间距满足勘探精度要求。勘探面积为 0.12 km²。按上述测网密度,在测区范围内设计北东向测线 16 条,依次编号为 1 ~ 16 线,线距为 20 m。每条测线上测点数相同,点距为 10 m,测点编号为 0 ~ 400,测线总长达 6 400 km。其中 PE-055 井位于 6 线 200 点位置(图 2)。

2.3 动态监测

煤层气井排采前瞬变电磁探测总工作量为 646 个坐标点,检查点 25 个;排采半年后为 647 个坐标

点,检查点 22 个。通过排水采气前测试的视电阻率与排采半年后的数据对比,反演煤储层水系统视电阻率的动态变化,分析煤层气排采井煤储层水系统含水性的动态变化特征。

3 监测结果分析与讨论

3.1 数据后处理方法

采用中国矿业大学地球物理研究所自行开发和研制的“瞬变电磁法数据处理与解释系统”软件进行资料处理和解释。后处理时,先将各测线的原始数据由接收机传入计算机,通过多种校正、转换和正、反演计算求出地层视电阻率值,并把视电阻率时间函数转换为深度函数,进而得到不同深度下的煤岩层视电阻率。根据得到的视电阻率值生成视电阻率拟断面图和顺层切片图。其中视电阻率拟断面图是根据同一剖面上不同测深点和不同深度的视电阻率值勾绘的等值线断面图,用于分析剖面上不同深度地电断面的特征和规律。依据两类图中地层相对高、低阻电性分布情况,得到探测区内煤岩层电阻率立体分布信息,从而判断煤储层水系统的含水性变化特征。

3.2 煤储层水系统电性拟断面成果分析

由 5 线排采前、排采半年后视电阻率拟断面对比(图 3,曲线为视电阻率等值线,曲线上数字为视电阻率值,低电阻率值用蓝色表示,高电阻率值用红色表示)可以看出在电性意义上,浅地表地层变化不大,视电阻率出现变化的是在进入煤系后,排采半年后探测视电阻率数值相对排采前有所增加(图 3),说明部分煤储层水被排出,视电阻率增大。

总体来看,地层电性层位表现比较明显。浅地表以风化层为主,视电阻率值在 100 Ω · m 左右。山西组 3 号煤层顶板上 40 m 的 K8 砂岩层视电阻率值 ρ_1 介于 21.6 ~ 59.2 Ω · m,平均视电阻率值 $\bar{\rho}_1$ 为 40.2 Ω · m,标准偏差 ρ_m 为 3.46 Ω · m,根据异常划分的标准 $\rho_1 < \bar{\rho}_1 - \rho_m / 3$, $\rho_1 < 39.0$ Ω · m 的区域为相对低阻异常区;3 号煤层顶板砂岩层段的视电阻率值 ρ_1 介于 20.3 ~ 60.2 Ω · m, $\bar{\rho}_1$ 为 40.4 Ω · m,标准偏差为 3.38 Ω · m,则 $\rho_1 < 39.3$ Ω · m 区域为相对低阻异常区。埋深继续增大至太原组含煤地层,视电阻率值略高,最下的奥陶系灰岩视电阻率值又高于太原组含煤地层(图 3)。

以 2 线 280 点、6 线 200 点、16 线 200 点为例,进行深度反演计算,获取不同深度的视电阻率值。对比分析结果表明:2 线 280 点排采前、排采半年后探测的视电阻率比对应深度的排采前探测结果略高(图 4),表明此点地下水被排出;6 线 200 点排采前、排采

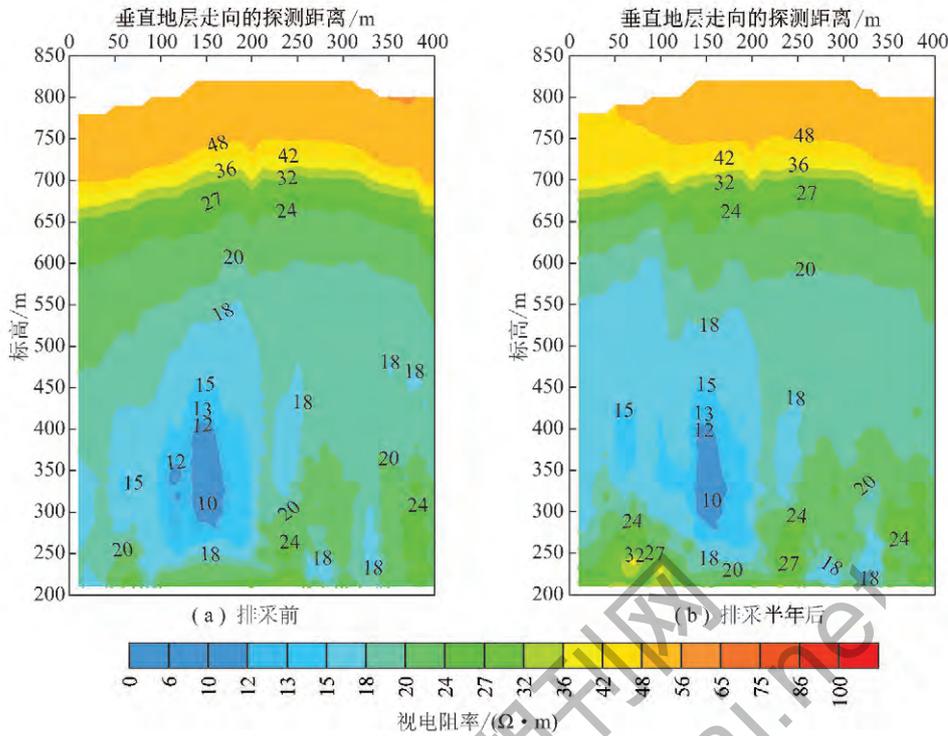


图 3 5 线排采前、排采半年后视电阻率拟断面的对比

Fig. 3 Comparison of line 5 apparent resistivity section before drainage and after half a year

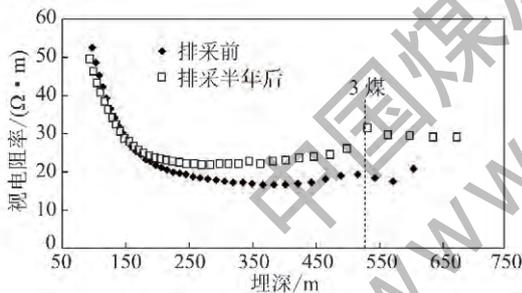


图 4 2 线 280 号测点排采前、排采半年后视电阻率的对比

Fig. 4 Comparison of apparent resistivity of the 280th point on line 2 before drainage and after half a year

半年后采集数据反映结果差异性较小,深度及视电阻率对比基本无明显变化,表明此点地下水排出与补给相平衡;16 线 200 点排采半年后比排采前对应相似深度的结果低,表明此点地下水补给量大于排出量。

3.3 煤储层水系统顺层切片成果分析

排采前探测 3 煤层顺层切片视电阻率基本均一,无明显强弱异常区域,反映地下介质维持相对平衡的电性均一状态;排采半年后探测 3 煤层顺层切片视电阻率数值出现强弱异常变化(图 5),图 5 中红色线区域标注为视电阻率升高区域,蓝色线标注区域为视电阻率降低区域。煤层气井排水使煤储层水系统的储存和水力联系产生动态变化,排水使煤储层水系统的

水力关系活化,造成煤储层水系统出现不同状态的补给关系变化,由于煤储层水系统不同区域水力连通状态不同,在连通性差的区域,地下水抽排后出现电性参数升高异常,即视电阻率有不同程度的升高;在连通性较好区域,水力动态补给,电性参数出现降低异常,即视电阻率有一定范围的降低。

排采前与排采半年后探测 3 号煤层顶板砂岩含水层视电阻率切片图出现微弱变化,排采前探测 3 号煤层顶板砂岩视电阻率基本均一,阻值变化幅值较小,无明显强弱异常区域(图 6);排采半年后探测 3 号煤层顶板砂岩视电阻率数值出现趋势变化,图 6 中红色线区域标注为视电阻率升高区域,蓝色线标注区域为视电阻率降低区域(图 6)。对比 3 号煤层顶板砂岩含水层排采前探测与排采半年后探测视电阻率切片成果图可以发现,抽排水引起水力活化,连通性较好的区域产生水力联系、相互补给,3 号煤层与其顶板砂岩含水层有一定的导通(岩石裂隙),当产生水力补给后,地下水的补给造成排水后视电阻率降低,如区域 2。区域 1 无水力联系,消耗煤储层水系统内地下水的静储量,排水后视电阻率升高。

4 结 论

(1)瞬变电磁法是快速、直观探测煤层气井排采

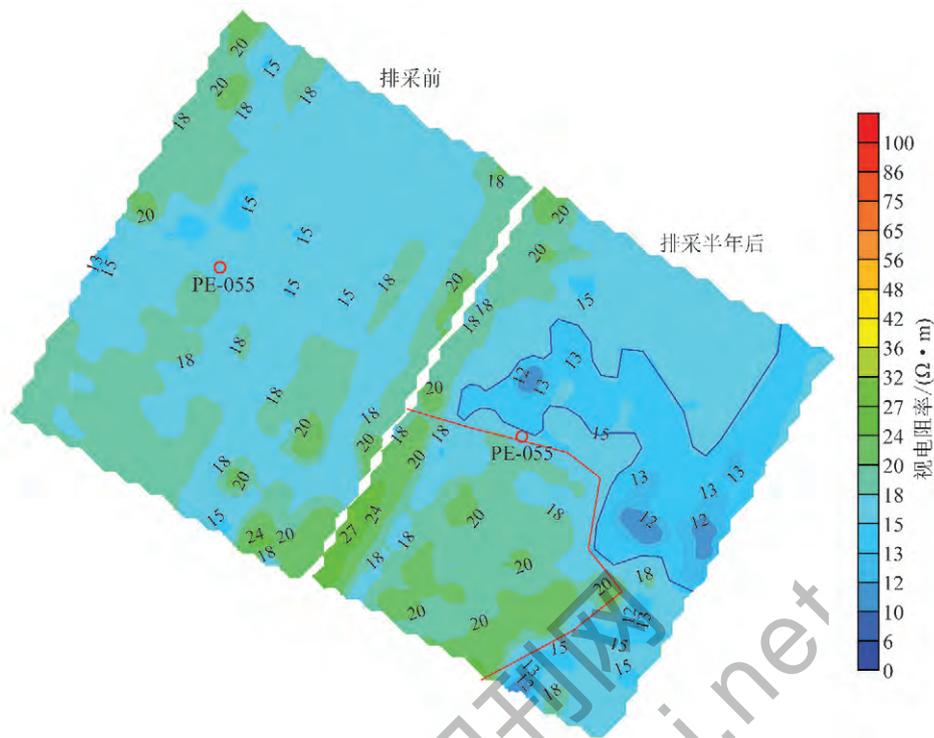


图5 3号煤层视电阻率顺层切片

Fig. 5 Apparent resistivity bedding slice chart of No. 3 coal seam

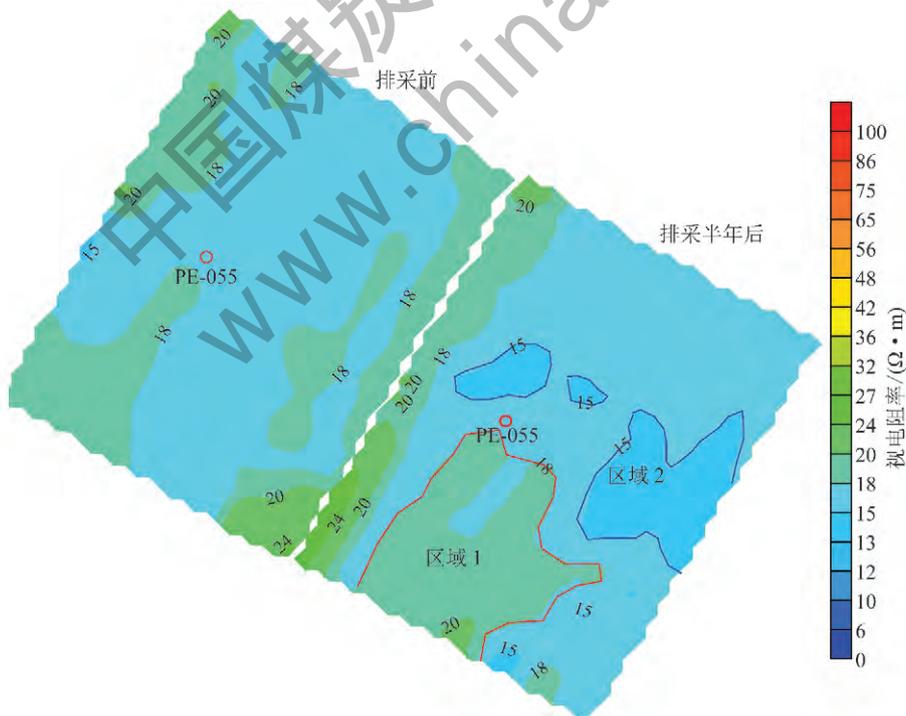


图6 3号煤层顶板砂岩含水层视电阻率顺层切片

Fig. 6 Apparent resistivity bedding slice chart of aquifer of No. 3 coal seam roof sandstones

过程中煤储层水系统动态变化的有效手段。通过在地面对煤层气井排采区域合理布设测网、测点、测线,选择有效的回线装置,排采前、排采过程中通过多次探测可以监测煤储层水系统的动态传播特征。

(2)煤层气井排采前煤储层水系统含水性分布

较均一,排采后由于煤系岩层水力连通性的差异导致排采范围内煤层与其顶板砂岩视电阻率升高/降低程度不等。

(3)煤层气井排采还将引起水力活化导致煤层与其顶板砂岩含水层导通,产生水力补给,煤储层视

电阻率降低。

参考文献:

- [1] 许浩,汤达祯,秦勇,等. 黔西地区煤储层压力发育特征及成因[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(4):556-560.
Xu Hao, Tang Dazhen, Qin Yong, et al. Characteristics and origin of coal reservoir pressure in the west Guizhou area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(4):556-560.
- [2] 叶建平,武强,王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. 煤炭学报,2001,26(5):459-462.
Ye Jianping, Wu Qiang, Wang Zihe. Controlled characteristics of hydrogeological conditions on the coalbed methane migration and accumulation[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5):459-462.
- [3] 王兴隆,赵益忠,吴桐. 沁南高煤阶煤层气井排采机理与生产特征[J]. 煤田地质与勘探,2009,37(5):19-22.
Wang Xinglong, Zhao Yizhong, Wu Tong. Analysis of typical production mechanism and characteristics of coalbed methane wells for high rank coal in south Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(5):19-22.
- [4] 朱卫平,唐书恒,王晓峰,等. 煤层气井产出水中氯离子变化规律回归分析模型[J]. 煤田地质与勘探,2012,40(5):34-36.
Zhu Weiping, Tang Shuheng, Wang Xiaofeng, et al. Prediction model for the ion concentration change of co-produced water from coalbed methane wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(5):34-36.
- [5] 刘会虎. 沁南地区煤层气排采井间干扰的地球化学约束机理[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.
- [6] 罗平平,范波,李松营. 井下瞬变电磁法在底板富水异常区探测中的应用[J]. 河南理工大学学报,2011,30(1):27-33.
Luo Pingping, Fan Bo, Li Songying. Application of mine transient electromagnetic method in detecting water anomaly area of floor[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2011, 30(1):27-33.
- [7] 于景邨,刘振庆,廖俊杰. 全空间瞬变电磁法在煤矿防治水中的应用[J]. 煤炭科学技术,2011,39(9):110-113.
Yu Jingcun, Liu Zhenqing, Liao Junjie. Application of full space transient electromagnetic method to mine water prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(9):110-113.
- [8] 纵跃进,鲁金海,程建忠. 瞬变电磁法探测陷落柱技术在袁庄煤矿的应用[J]. 煤炭科学技术,2008,36(6):100-102.
Zong Yuejin, Lu Jinhai, Cheng Jianzhong. Application of transient electromagnetic method to probe sink hole in Yuanzhuang Mine[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6):100-102.
- [9] 程志平. 电法勘探教程[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [10] 刘树才,岳建华,刘志新. 煤矿水文物探技术与应用[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2005.
- [11] 高波,王传雷,刘金涛,等. 瞬变电磁方法在河南某煤矿深部含水构造探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2006,3(4):283-287.
Gao Bo, Wang Chuanlei, Liu Jintao, et al. Application of TEM to deep coal mining in Henan for prospecting water-bearing structures[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(4):283-287.
- [12] 于景邨,刘志新,汤金云. 用瞬变电磁法探查综放工作面顶板水体的研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(4):542-546.
Yu Jingcun, Liu Zhixin, Tang Jinyun. Transient electromagnetic detecting technique for water hazard to the roof of fully mechanized sub-level caving face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4):542-546.
- [13] 李金铭,罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [14] 方文藻,李予国. 大环线法瞬变电磁测深正演计算[J]. 煤田地质与勘探,1991,19(2):49-53.
Fang Wenzao, Li Yugu. Large loop transient electromagnetic sounding forward method[J]. Coal Geology & Exploration, 1991, 19(2):49-53.