

文章编号: 1001-1986(2017)06-0149-05

# 基于瞬变电磁法探究中高阶煤层瓦斯含量与视电阻率关系的试验

王恩营<sup>1,2</sup>, 刘山清<sup>1</sup>, 高荣斌<sup>3</sup>, 刘占军<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 义马煤业集团股份有限公司新安煤矿, 河南 新安 471842)

**摘要:** 为掌握煤层瓦斯分布规律, 揭示煤层瓦斯含量与视电阻率的关系, 结合实验室关于煤样电阻率的研究, 使用瞬变电磁法研究煤层视电阻率与瓦斯含量的相关性, 在豫西新安煤矿进行18次探测试验, 获取有效数据21组。研究表明: 煤层视电阻率与瓦斯含量呈较好的负相关, 瓦斯含量每升高1 m<sup>3</sup>/t, 视电阻率对数值降低6.6%~20%, 判定系数为0.621 9~0.753 1, 说明煤层视电阻率对瓦斯含量具有明显的响应特征, 利用瞬变电磁可以在相似地质条件下探测煤层瓦斯含量高低及其分布规律。

**关键词:** 瓦斯含量; 视电阻率; 瞬变电磁; 探测; 相关性

**中图分类号:** TD713 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.024

## Transient electromagnetic exploration-based experiment on the relationship between the level of gas content and apparent resistivity in high rank coal seam

WANG Enying<sup>1,2</sup>, LIU Shanqing<sup>1</sup>, GAO Rongbin<sup>3</sup>, LIU Zhanjun<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo 454003, China; 3. Xin'an Mine of Yima Coal Group Co. Ltd., Xin'an 471842, China)

**Abstract:** In order to master the distribution law of the coal seam gas and reveal the relationship between gas content and apparent resistivity, the experiment combined the laboratory research on coal sample and resistivity and used transient electromagnetic method to study the correlation between apparent resistivity and gas content of coal seam, it has been detected for 18 times and 21 sets of the effective data were obtained. The research shows that there is a negative correlation between apparent resistivity and gas content of coal seam, when the gas content increased by 1 m<sup>3</sup>/t, the apparent resistivity decreased by 6.6% to 20%, the determination coefficient was between 0.621 9 and 0.753 1 at the same time, it shows that the apparent resistivity of coal seams has a high degree of explanation to the coal seam gas content, the method can be used to detect the content and the distribution of coal seam gas with the similar geological condition.

**Keywords:** gas content; apparent resistivity; transient electromagnetic; detection; relevance

国内外突出煤层的开采实践表明, 煤与瓦斯突出区也是构造煤发育区和瓦斯富集区的叠加区, 随着煤层开采深度的增加, 瓦斯含量一般也随之增加, 复杂的地质条件更加剧了煤层中瓦斯分布的不均匀性和突出危险性。目前, 煤层瓦斯含量数据的获取

多采用现场解吸和实验室测试相结合的方法, 煤层瓦斯区域分布则采用瓦斯地质分析的方法, 这些方法工作量大, 耗时长, 成本高, 且在生产中仍存在发生煤与瓦斯突出的隐患。当前缺乏一种方便快捷的方法能够探测煤层中瓦斯含量及其分布规律。

收稿日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372161); 河南省产学研项目(132107000030); 河南理工大学博士基金项目(B2011-063)

**Foundation item:** The Natural Science Foundation of China(41372161); Henan Province Research Projects(132107000030); Project Supported by the Doctoral Foundation of Henan Polytechnic(B2011-063)

第一作者简介: 王恩营(1963—), 男, 河南新乡人, 博士, 教授, 从事煤矿瓦斯地质教学与研究工作。E-mail: wangenyi@163.com

引用格式: 王恩营, 刘山清, 高荣斌, 等. 基于瞬变电磁法探究中高阶煤层瓦斯含量与视电阻率关系的试验[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 149-153.

WANG Enying, LIU Shanqing, GAO Rongbin, et al. Transient electromagnetic exploration-based experiment on the relationship between the level of gas content and apparent resistivity in high rank coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 149-153.

目前,已有学者通过实验室试验对煤样电阻率与瓦斯含量的关系进行了研究,表明两者之间存在较好的相关性,解释了相关性原理,并对其影响因素进行了分析。井下瞬变电磁探测是依据含水煤岩层视电阻率差异,查明煤层顶底板含水层富水性的较有效物探手段之一,因为其采用的基本原理是煤岩层中视电阻率差异<sup>[1]</sup>,因此,采用同样的方法,针对含瓦斯煤岩层物性的差别也可以对煤层中瓦斯的富集进行解释。故本文作者提出使用瞬变电磁法研究煤层视电阻率与瓦斯含量的关系。

国内外学者关于煤及含瓦斯煤的电阻率研究主要处在实验室阶段,现场实验研究较少。实验室研究表明:**a.** 同一煤种,突出煤体和非突出煤体的导电性存在着较大的差异,不同变质程度煤的电阻率也具有明显的差异<sup>[1-2]</sup>;**b.** 瓦斯在常温常压条件下导电性较弱,电阻率较高,但随着瓦斯压力增大,气体中离子导电性增强,电阻率降低<sup>[3]</sup>;**c.** 煤样电阻率随瓦斯含量的增大呈增大或减小的趋势,其中以离子导电为主的煤样随瓦斯含量增大电阻率增大,以电子导电为主的煤样随瓦斯含量增大电阻率减小<sup>[4-7]</sup>;**d.** 电阻率可以作为瓦斯突出区域预测指标,且有望成为一个新的瓦斯探测方法<sup>[8-10]</sup>;**e.** 影响煤层视电阻率的因素较多。水分的增加可使煤层中自由离子含量升高,视电阻率降低;灰分有时比煤层中有机质的电阻率更低,如褐煤和烟煤的电阻率会随灰分的升高而降低,无烟煤则相反;瞬变电磁探测是一个体积效应,围岩中砂岩/泥岩比例的变化会影响煤层视电阻率;温度升高会使煤层中电子和离子活动增强,突出煤体一般随着温度的增加电阻率降低,但非突出煤体相反。此外,煤的变质程度、视密度等因素也不同程度地影响煤层视电阻率的测试结果<sup>[11-16]</sup>。

尽管影响煤层视电阻率的因素较多,但理论上煤层的视电阻率和瓦斯含量还是存在一定关系,结合煤层中瓦斯赋存规律以及国内外学者对于煤及含瓦斯煤电阻率的研究等,在煤层水分、围岩、煤层煤质等相似条件下,研究煤层瓦斯含量与视电阻率的关系,可以为煤层瓦斯分布规律的物理探测奠定基础。

## 1 实验条件及方法

### 1.1 实验地点地质概况

实验地点选在豫西新安煤田新安矿。新安矿总体构造形态为一平缓的单斜构造,井田内无规模较大的褶皱和断层,构造条件简单;矿井主采煤层为二叠系山西组二<sub>1</sub>煤,煤种牌号属贫瘦煤;矿井煤厚

变化较大,属不稳定煤层;煤层顶底板围岩具有区域性变化;煤层瓦斯含量与水分、灰分、围岩相关性较小,主要受埋深控制<sup>[17]</sup>等特点。实验工作面的选择主要考虑煤厚变化较小和瓦斯含量变化较大的区段,最大限度地体现瓦斯含量对视电阻率的影响。

实验主要在 3 个工作面进行,煤样点煤层周围均不含水,有效煤样的参数及试验点条件见表 1。从表中可以看出,除瓦斯含量变化外,其他因素均得到控制,满足试验的基本要求。

表 1 煤样点瓦斯地质条件  
Table 1 Gas geological condition of coal samples

工作面名称	水分 $M_{ad}/\%$	灰分 $A_{ad}/\%$	挥发分 $V_{daf}/\%$	围岩含砂率/%	煤厚/ m	瓦斯含量/ $(m^3 \cdot t^{-1})$
11204	2.89	21.49	15.46	33.9	3.5	2.26~5.78/3.87
16010	2.6	23.68	16.56	33.2	5.0	2.8~6.02/3.90
15110	3.2	25.51	15.48	33.8	3.3	1.32~4.27/3.26

注: 2.26~5.78/3.87 为最小值~最大值/平均值。

### 1.2 试验仪器及方法

试验仪器采用加拿大 GEONICS 公司生产的 TEM-47(增强型)瞬变电磁仪,该仪器具有断电时间短、信息量大、分辨率及信噪比高等优点。井下瞬变电磁探测受巷道空间限制,为了尽可能减少其影响,并对较近地质体探测盲区进行有效探测,试验采用多匝小线圈,使用偶极装置进行发射和接收(图 1)。

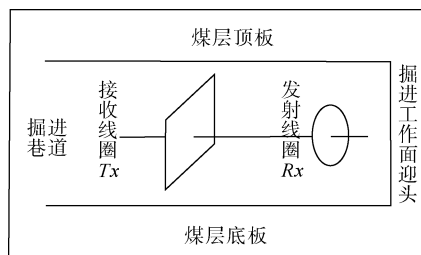


图 1 偶极探测装置

Fig.1 Dipole detecting device

探测时,发射线圈紧贴迎头煤壁放置,接收线圈置于距发射线圈 10 m 的位置,两者所在平面相互平行,且接收线圈  $T_x$  与发射线圈  $R_x$  轴线保持与巷道平行并指向目标体。发射线圈发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间利用接收线圈观测前方介质引起的二次感应磁场,记录三分量感应磁场的衰减比( $nV/m^2$ ),通过软件的计算处理,从而探测前方目标体的视电阻率及其对数值。

### 1.3 瞬变电磁资料处理

依据现场的瞬变电磁仪探测,瞬变电磁原始数据的解译主要通过 BETEM 软件进行,该软件是为瞬变电磁法的数据处理和解释开发的专用软件。软

件采用了近年来的最新技术和方法,具有精度和分辨率高,使用简单等特点。该软件包采用模块式结构,每个模块可以独立执行不同的功能。

瞬变电磁勘探的观测数据是归一化的瞬变感应电压,各测线的原始数据由接收机导入计算机,经整理完善后,在 BETEM 中按顺序通过多种校正、转换和正反演计算,求出地层的视电阻率值及其对数值并把时间转换为距离,从而得到全空间视电阻率。

2 试验结果及分析

试验工作面瓦斯含量依据国家标准 GB/T 23250—2009《煤层瓦斯含量井下直接测定方法》测试,共获得有效数据 21 个,且均是原始煤体瓦斯含量;煤层视电阻率通过井下瞬变电磁超前探测的方法测定,共探测 18 次,通过 BETEM 软件处理,将原始数据成图,图 2—图 4 中等值线上数据为视电阻率对数值( $\lg\rho$ )。

在探测范围内,通过瓦斯含量的测定,可以获取瓦斯含量与视电阻率对数值数据组(图 5a 上部分),按此

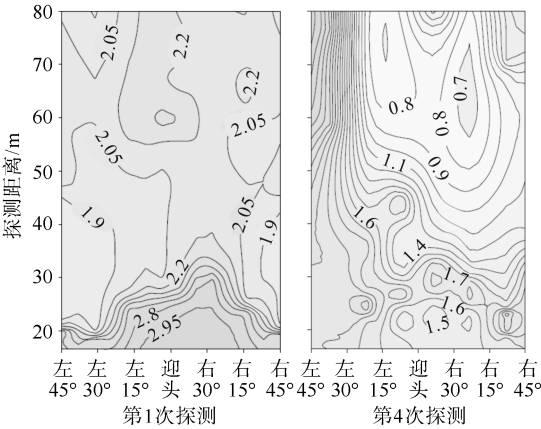


图 2 11204 工作面部分含瓦斯煤层瞬变电磁成果  
Fig.2 Transient electromagnetic results of a part of gas-bearing seam in working face 11204

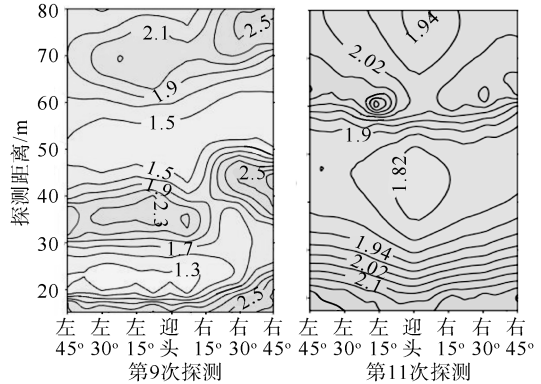


图 3 15110 工作面部分含瓦斯煤层瞬变电磁成果  
Fig.3 Transient electromagnetic results of a part of gas-bearing seam in working face 15110

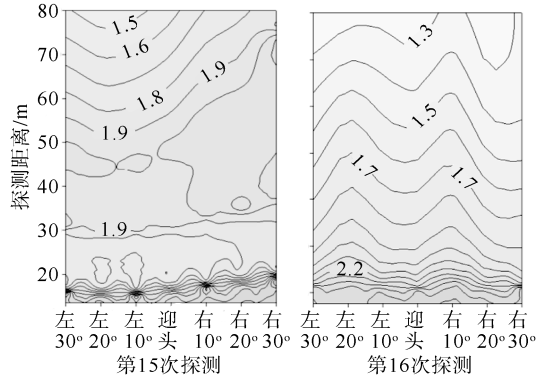


图 4 16010 工作面部分含瓦斯煤层瞬变电磁成果  
Fig.4 Transient electromagnetic results of of a part of gas-bearing seam in working face 16010

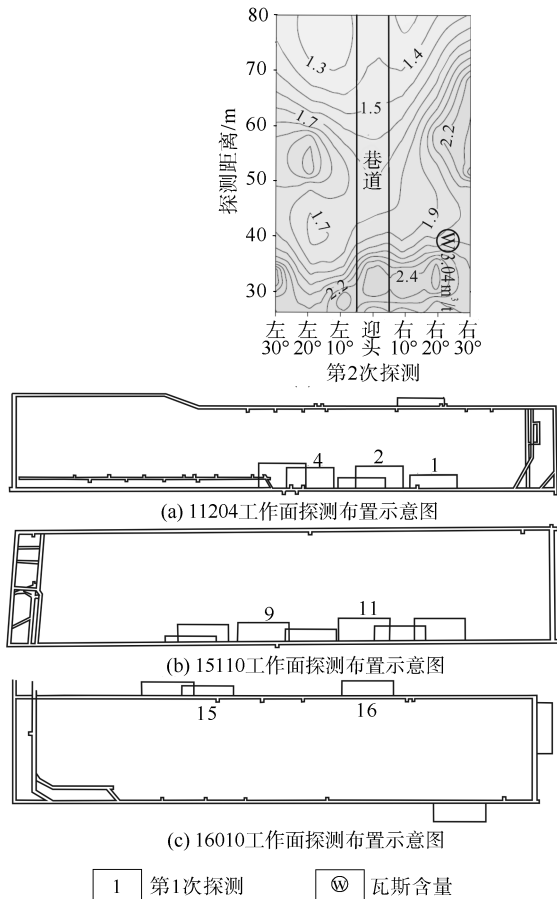


图 5 煤巷瞬变电磁探测范围与瓦斯含量  
测试位置对应图

Fig.5 Range of the transient electromagnetic detection and position of gas content test in coal roadway

方法进行其他数据点测试。采用回归分析的方法,对 3 个工作面瓦斯含量与视电阻率对数值的数据进行回归分析(表 2)。

研究表明:

a. 3 个工作面信度  $P$  值均小于 0.05,说明信度较高,即煤层瓦斯含量与视电阻率对数值线性相关成立,相似地质条件下,煤层的视电阻率在一定程度

表 2 工作面瓦斯含量与视电阻率对数回归分析  
Table 2 Regression analysis of gas content and logarithm of apparent resistivity of working face

工作面	项目	自由度 $df$	样本数据平方和 $SS$	样本数据平均平方和 $MS$	检验值 $F$	信度 $P$
11204	回归分析	1	2.430 4	2.430 4	9.869 4	0.020 0
	残差	6	1.477 5	0.246 2		
	总计	7	3.908 0			
15110	回归分析	1	0.378 1	0.378 1	15.252 8	0.011 3
	残差	5	0.123 9	0.024 7		
	总计	6	0.502 1			
16010	回归分析	1	0.256 5	0.256 5	7.858 5	0.048 6
	残差	4	0.130 5	0.032 6		
	总计	5	0.387 0			

度上可反映瓦斯含量的大小，利用井下瞬变电磁勘探可实现煤层瓦斯含量及其分布规律的探测。

b. 煤层瓦斯含量与视电阻率对数值具有较好的线性负相关性，判定系数达到 0.621 9~0.753 1(图 6)。

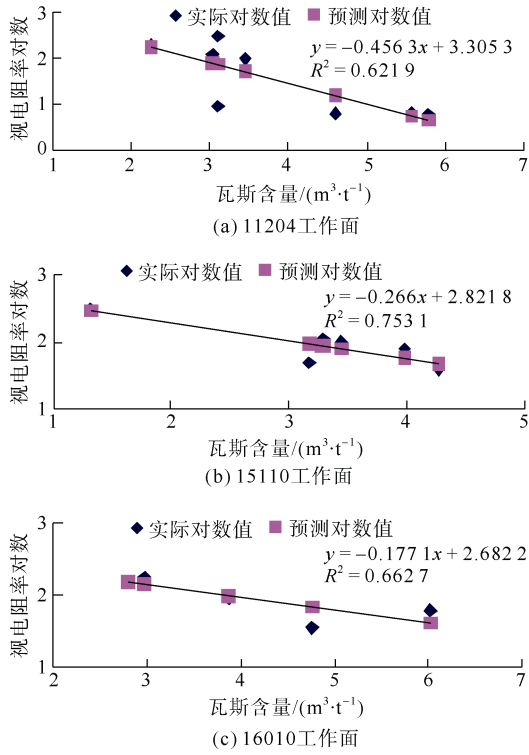


图 6 不同工作面线性拟合图

Fig.6 Linear fitting of different working faces

c. 不同工作面视电阻率对数值随瓦斯含量的变化速率存在差异，瓦斯含量升高  $1 \text{ m}^3/\text{t}$ ，11204、15110、16010 工作面煤层视电阻率对数值降低依次为 20%、10%、6.6%。

d. 3 个工作面瓦斯含量与视电阻率具有一致的变化趋势，说明相似地质条件下，新安矿不同工作面的含瓦斯煤层对瞬变电磁具有相似的响应规律。

现场试验过程中，也进行了实验室测试。将煤

样加工成型煤，在电阻率测试系统中充入瓦斯气体，随着时间的推移，在煤样吸附瓦斯量逐渐增加的过程中，煤样电阻率呈现出先快速、大幅降低，而后呈逐渐减小、趋于稳定的变化趋势(图 7)。

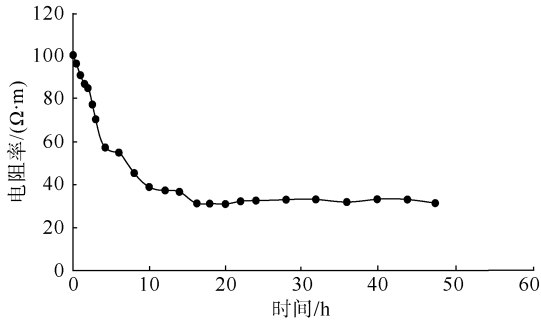


图 7 煤样电阻率随吸附时间的变化趋势

Fig.7 The change trend of coal resistivity with adsorption time

### 3 含瓦斯煤层瞬变电磁响应机理分析

根据分析，相似地质条件下，新安矿煤层视电阻率随瓦斯含量升高而降低，煤以电子导电为主，煤分子中的原子核对电子有较强的吸引作用，电子仅能在原子核周围有限范围内进行运动，所以煤体的导电能力很差。但煤在瓦斯吸附过程中煤体的电阻率会发生变化，煤分子和气体分子间的引力越大，其吸附量就越大，电阻率变化就越大。这是由于煤对瓦斯吸附是一个放热的物理吸附过程，瓦斯吸附使得煤体表面能量下降<sup>[18-19]</sup>，煤体对表面的杂离子和原子核周围电子的束缚作用减弱，杂离子和电子在孔隙表面更容易迁移<sup>[2,4,20]</sup>。随着瓦斯在煤层微孔隙间吸附量的增加，煤层的骨架会产生膨胀，瓦斯压力越高，膨胀效应越大，分子间的相互作用减弱，使得导电能力提升，电阻率下降(图 8)。

发射线圈供电时，煤层中会产生稳定的一次磁场，当发射线圈突然断电，根据电磁感应定律，煤层中会产生感应电流以阻止磁场的减弱，感应电流

会产生二次磁场以被接收线圈所接收, 进而达到对低阻异常区的探测。此次试验中3个工作面的煤层煤质、围岩、测试环境等条件具有相似性, 整体变化不大, 只有瓦斯含量一个变量, 因此, 可以判断瓦斯含量对煤层瞬变电磁的影响是显著的, 测试“背景”的干扰不足以影响瓦斯含量的作用效果。

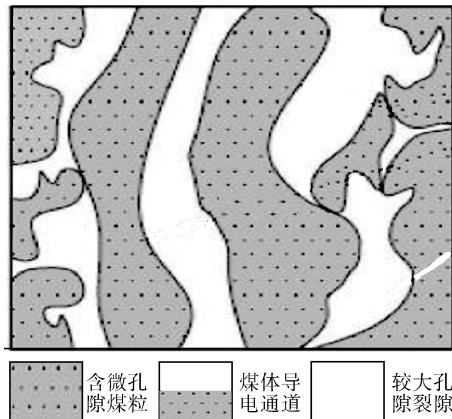


图8 煤层导电示意图(据陈鹏<sup>[4]</sup>, 2013)

Fig.8 Schematic diagram of coal seam conductivity

#### 4 结论

a. 相似地质条件下, 煤层视电阻率对数值和瓦斯含量之间存在较好的线性负相关关系, 判定系数为0.621 9~0.753 1。

b. 中高阶煤层以电子导电为主, 煤层视电阻率随着瓦斯含量的增加而降低, 豫西新安煤矿瓦斯含量每升高1 m<sup>3</sup>/t, 视电阻率对数值降低6.6%~20%。

c. 利用瞬变电磁法, 可以在相似地质条件下实现对煤层瓦斯含量高低及其分布规律的探测。

#### 参考文献

- [1] 韩德品, 郭林生, 赵利利, 等. 瞬变电磁法快速探查煤矿突水构造关键技术及应用效果[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 97-100.  
HAN Depin, GUO Linsheng, ZHAO Lili, et al. The key technology and application effects of transient electromagnetic method for rapid detecting water inrush structure in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 97-100.
- [2] 吕绍林, 何继善. 瓦斯突出煤体的导电性质研究[J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(6): 510-514.  
LYU Shaolin, HE Jishan. Study on electrical conductivity of gas outburst coal[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science), 1998, 29(6): 510-514.
- [3] 黄学满, 康建宁. 瓦斯气体电性参数的初步研究[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(5): 1-3.  
HUANG Xueman, KANG Jianning. Preliminary study of electric parameters of gas[J]. Mining Safety & Environmental Protec-

tion, 2005, 32(5): 1-3.

- [4] 陈鹏. 煤与瓦斯突出区域危险性的直流电法响应及应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [5] 康建宁, 黄学满. 煤的电性参数与瓦斯突出危险性之间关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(1): 56-59.  
KANG Jianning, HUANG Xueman. Study on relationship between coal electric parameter and gas outburst danger[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(1): 56-59.
- [6] 王云刚, 杨耸, 魏建平. 焦作矿区含瓦斯煤体电阻率变化规律研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 31(4): 373-376.  
WANG Yungang, YANG Song, WEI Jianping. Study on the variation rules of electrical resistivity on being loaded gas field coal[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2014, 31(4): 373-376.
- [7] 杨耸. 受载含瓦斯煤体电性参数的实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- [8] 徐胜平, 王轩, 云晓鸣, 等. 利用煤田测井参数解释煤层储气特征[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(5): 100-102.  
XU Shengping, WANG Xuan, YUN Xiaoming, et al. Exquisite interpretation on gas storage characteristic of coal and rock stratum by logging parameters of coal field[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(5): 100-102.
- [9] B.B 霍多特. 煤和瓦斯突出[M]. 宋世钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [10] TATIANA S, IGOR G, ALEXEY B. Control of combustion area using electrical resistivity method for underground coalgasification[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 351-355.
- [11] 王云刚, 魏建平, 刘明举. 构造软煤电性参数影响因素的分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(8): 77-80.  
WANG Yungang, WEI Jianping, LIU Mingju. Analysis on factors affected to electromagnetic parameters of tectonic soft seam[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(8): 77-80.
- [12] 吕绍林, 何继善, 李舟波. 瓦斯突出地球物理场的响应特征[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(1): 71-75.  
LYU Shaolin, HE Jishan, LI Zhoubo. Responses of geophysical field caused by coal and gas outbursts[J]. Journal of Chang chun University of Science and Technology, 2000, 30(1): 71-75.
- [13] MARLAND S, MERCHANT A, ROWSON N. Dielectric properties of coal[J]. Fuel, 2001, 80: 1839-1849.
- [14] WANG Yungang, WEI Jianping, YANG Song. Experimental research on electrical parameters variation of loaded coal[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 890-897.
- [15] HASAN D, BAI Xiaohong, WILLIAM B K. Thermal and electrical property measurements for coal[J]. Fuel, 1989, 68(2): 185-192.
- [16] TIWARY S N, MUKHDEO. Measurement of electrical resistivity of coal samples[J]. Fuel, 1993, 72(8): 1099-1102.
- [17] 乔磊. 基于煤储层特征的新安煤矿二<sub>1</sub>煤深部瓦斯涌出量预测模型构建[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.

c. 地面观测到的瞬变电磁法响应曲线特征与回线源布设的形态有明显的相关性。因此, 随地形起伏的回线源是造成感应二次场发生畸变的重要因素之一。

## 参考文献

- [1] 肖怀宇. 带地形的瞬变电磁法三维数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [2] 解海军. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
- [3] 唐新功, 胡文宝, 严良俊. 瞬变电磁法对存在山谷地形时的多个异常体的探测能力研究[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 316-323.  
TANG Xingong, HU Wenbao, YAN Liangjun. The detectability of transient electromagnetic method to multiple 3D bodies with valley topography[J]. Seismology and Geology, 2005, 27(2): 316-323.
- [4] 陈健. 复杂条件下瞬变电磁法探测采空区技术应用[J]. 陕西煤炭, 2015, 34(2): 96-98.  
CHEN Jian. Research on mine goaf detecting by TEM in complex terrain conditions[J]. Shaanxi Coal, 2015, 34(2): 96-98.
- [5] 王巍, 韩吉民, 陈剑杰. 起伏地形下隐伏异常体瞬变电磁法探测的模拟实验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 584-589.  
WANG Wei, HAN Jimin, CHEN Jianjie. Research on model experiment searchon of transient electromagnetic method to detect deep underground cavities in complex terrain[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 584-589.
- [6] 李建慧, 刘树才, 李富. 大定源瞬变电磁法矩形发射回线激发的电磁场[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(2): 154-157.  
LI Jianhui, LIU Shucui, LI Fu. Electromagnetic field induced by the transient electromagnetic method of large source transient electromagnetic method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 30(2): 154-157.
- [7] 翁爱华, 李舟波, 王雪秋. 地表大回线源在任意层状介质中产生磁场的计算[J]. 物探化探计算技术, 2000, 22(3): 245-249.  
WENG Aihua, LI Zhoubo, WANG Xueqiu. The magnetic field computation for large loop source[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 22(3): 245-249.
- [8] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [9] 薛国强. 大回线源瞬变电磁场响应特性[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 586-590.  
XUE Guoqiang. Response characteristics of large loop source transient electromagnetic field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(5): 586-590.
- [10] 付林兴, 邓志武. 毕奥—萨伐尔定律的推导[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2006, 28(1): 28-29.  
FU Linxing, DENG Zhiwu. Derivation of Biot Savart law[J]. Journal of Xiangtan Normal University(Natural Science Edition), 2006, 28(1): 28-29.
- [11] 李巍, 王信文. 瞬变电磁法探测复杂地形不积水采空区的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(3): 455-462.  
LI Wei, WANG Xinwen. Application of TEM on detecting goaf of coal mine without water in complex terrains[J]. CT Theory and Applications, 2013, 22(3): 455-462.
- [12] 蒋勤涛. 复杂地形地质条件下老空水瞬变电磁探测技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(2): 57-60.  
JIANG Qintao. Study on the transient electromagnetic detection technology for Gob water under complex terrain and geological conditions[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2014, 41(2): 57-60.
- [13] 张振勇. TEM 技术在岩层富水性探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 109-113.  
ZHANG Zhenyong. Application of TEM technique in detecting the water enrichment of strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6): 109-113.
- [14] 程建远, 聂爱兰, 张鹏. 煤炭物探技术的主要进展及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 136-141.  
CHENG Jianyuan, NIE Ailan, ZHANG Peng. Outstanding progress and development trend of coal geophysics[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 136-141.
- [15] 薛国强, 闫述, 陈卫营. 电磁测深数据地形影响的快速校正[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4408-4413.  
XUE Guoqiang, YAN Shu, CHEN Weiying. A fast topographic correction method for electromagnetic data[J]. Earth Physics Journal, 2016, 59(12): 4408-4413.

(责任编辑 聂爱兰)

## (上接第 153 页)

- [18] 简阔, 张玉贵, 赫少攀, 等. 构造煤甲烷吸附表面能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 31-34.  
JIAN Kuo, ZHANG Yugui, HE Shaopan, et al. The surface energy of methane adsorption of tectonic coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 31-34.
- [19] 王向浩, 王延忠, 刘坤, 等. 煤层气吸附量动态变化模型研究[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(5): 39-43.  
WANG Xianghao, WANG Yanzhong, LIU Kun, et al. Adsorption dynamic model of coalbed methane[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(5): 39-43.
- [20] 刘永杰, 李忠辉, 宋大钊, 等. 煤体吸附瓦斯过程表面电位特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1977-1981.  
LIU Yongjie, LI Zhonghui, SONG Dazhao, et al. Experimental research on surface potential induced by gas sorption process in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1977-1981.

(责任编辑 聂爱兰)