

# 煤复电阻率各向异性及其频率响应特征研究

郭晓洁<sup>1,2</sup>, 郝璇<sup>3</sup>, 宫伟东<sup>1</sup>, 张玉贵<sup>2,4</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 河南理工大学瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000; 3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 为了实现煤岩物质组成和结构的高效电法勘探, 基于岩石频率域激电效应, 采用复电阻率法测试对四种不同变质程度的原生结构煤在不同方向上的复电阻率模值频率响应特征进行了研究。研究表明: 随着频率不断增加, 不同变质程度煤复电阻率模值在走向、倾向、垂向上均依次呈递减趋势; 低频阶段复电阻率模值呈现明显各向异性; 高频阶段复电阻率模在水平向和垂向呈各向异性, 走向和倾向呈各向同性, 造成这样的原因与煤中可极化电介质极化的时间长短有关。

**关键词:** 复电阻率; 各向异性; 时间常数; 测井

中图分类号: P319.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)04-0167-04

## Study on coal complex resistivity anisotropy and characteristics of frequency response

Guo Xiaojie<sup>1,2</sup>, Huan Xuan<sup>3</sup>, Gong Weidong<sup>1</sup>, Zhang Yugui<sup>2,4</sup>

(1. College of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

4. Collaborative Innovation Center of Central Plains Economic Region for Coalbed/Shale Gas, Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to realize the high-efficient electrical exploring for the material composition and structure of coal and rock, based on IP effects in frequency domain of rock, by using the method of complex resistivity frequency response characteristics of complex resistivity for four coal samples with different metamorphic degree were studied in different directions. The experimental results show that complex resistivity of all coal show monotone decrease in vertical direction, trend direction and inclination direction with the increase of frequency. The complex resistivity values are obviously different in low frequency. The coal seam complex resistivity values between trend and inclination performs isotropy and performs anisotropy between horizontal and vertical directions in high frequency. The reason for all this is related to the polarization time for polarizable dielectric in coal.

**Key words:** complex resistivity; anisotropy; time constant; well logging

## 0 引 言

研究煤体电性响应特征是获取煤体结构和成分的重要手段。汤友谊等<sup>[1-2]</sup>依据硬煤与构造软煤分层的视电阻率值差异, 将煤体结构划分为2大类; 孟磊等<sup>[3]</sup>分析了在单轴压缩条件下电阻率变化规律;

文献[4-5]通过试验研究了受载煤体电阻率的变化规律, 同时也研究了受载煤体全应力-应变过程中电阻率的响应规律, 结果表明电阻率呈不规则“V”字型变化; 王云刚等<sup>[6]</sup>研究了含瓦斯煤体电性参数与渗透率的关系; H. Dindi<sup>[7]</sup>测定了煤的导热性和导电性; S. Marland等<sup>[8]</sup>在试验室内模拟储层条件测量

收稿日期: 2016-10-10; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.04.029

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-005); 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(14IRTSTHN002); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(20134116110006)

作者简介: 郭晓洁(1988—), 女, 河南孟州人, 博士研究生。Tel: 13051865633, E-mail: guoxiaojie@163.com

引用格式: 郭晓洁, 郝璇, 宫伟东, 等. 煤复电阻率各向异性及其频率响应特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 167-170.

Guo Xiaojie, Huan Xuan, Gong Weidong, et al. Study on coal complex resistivity anisotropy and frequency response characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 167-170.

岩石的电阻率;伯明翰大学 SMarland 等<sup>[8]</sup>在微波频段对煤的介电常数进行了测定和研究。然而以往学者多是采用常规电阻率法来研究煤的电性特征,而常规方法只利用了测量信号的实部(电阻),忽略了虚部信号(电抗)对煤体所造成的影响。除此之外,很多学者也注意到了煤层电阻率存在着明显的各向异性。杜云贵等<sup>[9]</sup>通过研究煤的大分子结构,表明垂直于煤层方向的势垒与平行于煤层方向的势垒存在明显差异;吕绍林等<sup>[10]</sup>从电解质极化方向研究煤导电性质(主要影响的是非突出煤体,瓦斯突出煤体由于构造受到严重破坏而导致结构趋同,表现出似均质特性),发现同一样品垂直极化方向的电阻率是平行极化方向的 1.3 倍,极化率为 1.4 倍;陈健杰等通过对不同煤体结构类型煤的导电性质研究得出煤体电阻率各向异性与频率有关;许小凯等<sup>[12]</sup>分别给不同煤体在不同方向上加载不同频率,测量煤层不同方向上的电阻率,得出电阻率在煤体走向与倾向之间表现为各向同性,水平方向和垂向上表现为各向异性,且与频率呈负相关。通过以上研究可知,煤的电阻率存在明显的各向异性,并且其变化与频率有关。

复电阻率测井在岩石中已得到广泛应用,其同时考虑待测样本的实部和虚部(电阻和电抗)。何继善等<sup>[13-14]</sup>对岩石复电阻率频散特性的机理、导电模型等方面做了深入研究;文献[15-16]利用复电阻率测井克服了岩性和地层水矿化度的影响,有效识别了油、水层,表明该方法明显优于常规电阻率法。煤属于一种较岩石复杂的有机沉积岩,岩石中存在的导电模型、极化、电化学反应等现象,煤中也必然存在。故笔者通过借鉴岩石电性测量方法,利用复电阻率法代替常规电阻率法测量煤体电性,给待测煤体加载连续频率,分别测定煤体走向、倾向和垂向的复电阻值  $Z$  ( $Z = R + X_j$ , 其中  $R$  为电阻,  $X$  为电抗),意在全面考虑煤体不同方向上的电特性。从而为利用地球物理方法测定物质组成和结构提供理论和试验基础,对减轻和防止煤矿自然灾害具有重要意义。

## 1 煤样采集与加工

### 1.1 煤样采集

为了从总体上把握不同变质程度煤的电性响应特征,煤样采集自淮南矿区、平顶山矿区与焦作矿区。采集时定向标定(标记走向、倾向和垂向)样

品。采样地点与煤样煤质特征见表 1。

表 1 煤样煤质特征

Table 1 Coal sample quality properties

采样点	煤种	工业分析/%			$R_{o, max}/\%$
		$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	
淮南潘一矿	气煤	1.15	7.87	41.83	0.75
平煤八矿戊 <sub>9-10</sub> 煤层	肥煤	0.84	7.99	32.84	0.94
平煤八矿己 <sub>15</sub> 煤层	焦煤	0.78	5.94	25.14	1.01
焦作古汉山二 <sub>1</sub> 煤层	无烟煤	3.09	10.95	8.12	3.86

### 1.2 煤样加工

在保证煤岩属性的基础上,煤样按其在煤层中标定的走向、倾向和垂直层理方向被切割加工成 6 cm×6 cm×6 cm 的块状,并将 6 个端面打磨光滑以使煤样与测试电极耦合良好。成品煤样如图 1 所示,4 种不同变质程度成品煤样各加工成 1 块。

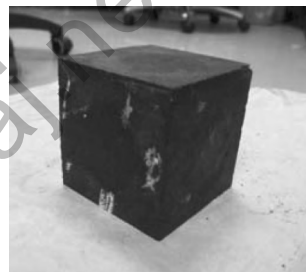


图 1 加工的标准煤样照片

Fig. 1 Standard processed coal sample photo

## 2 试验方法与测量

本试验在中国科学院地质与地球物理研究所工程地质与水资源研究室完成。试验主要采用二极法,试验仪器选用日置 LCR 3522-50 测试仪。试验参数设定:供给电流幅值范围 0.02~0.50 mA 和阻抗 200 kΩ,测试频率  $f$  范围为 0.1~100.0 kHz(试验在室温、一个大气压下进行)。具体试验方法和试验条件见文献[17]。

## 3 测试结果与分析

不同变质程度煤样幅频各向异性特征曲线如图 2 所示,从图 2 可知,不同煤样在不同方向上  $Z$  值均呈单一递减趋势,符合一般岩石激发极化特征<sup>[18]</sup>。4 类煤样幅频特征曲线大致可以分为 2 个阶段。第 1 阶段随着频率增加,  $Z$  的下降斜率较小, A 类煤幅频曲线均近于水平直线;第 2 阶段  $f$  在 100 Hz 左右,下降斜率明显增大,曲线迅速下降。各变质程度煤

样出现拐点的频率区间均为  $10 \sim 100$  Hz; 由双频激发法可知, 中频阶段, 正好是不同矿物激发极化差别最具代表性的阶段, 由于激发极化造成的波形畸变, 从而使  $Z$  值在此阶段变化最为明显。由图 2 还可知, 低频阶段, 气煤和无烟煤在倾向和走向上  $Z$  值差值均小于焦煤和肥煤在这 2 个方向的差值, 随着频率的逐渐增加, 气煤和无烟煤在倾向和走向上  $Z$  值逐

渐趋于重合, 且在时间上晚于肥煤和焦煤; 在低频阶段走向、倾向、垂向呈各向异性; 高频阶段, 走向和倾向呈各向同性, 除气煤外, 其余样品水平向和垂向呈各向异性; 由文献 [12] 可知, 垂向的各层类似串联电路, 水平方向类似于并联电路, 由串联电阻大于并联电阻可知垂向的  $Z$  值大于水平向。低频阶段呈现各向异性的原因有以下 2 点。

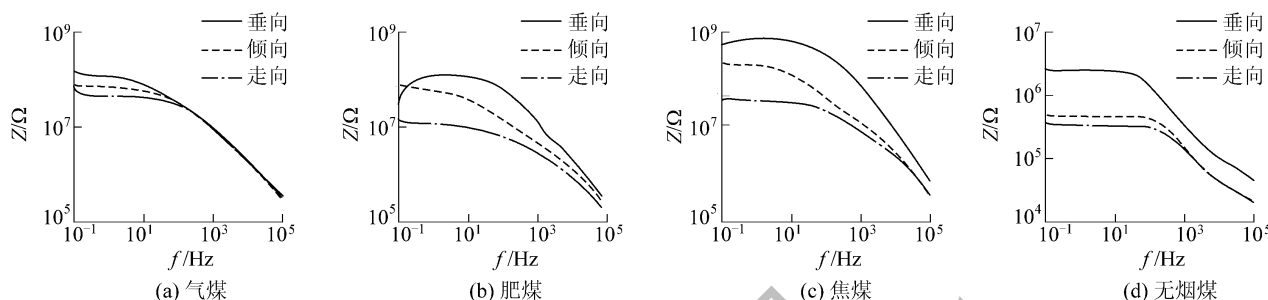


图 2 4 种不同变质程度煤样幅频各向异性特征曲线

Fig. 2 Amplitude and frequency characteristic curves in coal with different metamorphic grade

1) 由物理学可知, 在交变电磁场中存在 2 种电流, 即传导电流和位移电流<sup>[19]</sup>。传导电流主要是由带电粒子(电子、离子)定向移动引起, 位移电流主要是极化分子定向排列所致。在低频阶段由于极化分子经历的时间较长, 极化几乎已完成, 故在低频阶段主要考虑由传导电流(即带电离子、电子)所引起复电阻率的变化。根据文献 [19] 可知, 在低频阶段幅频特性出现差异主要是由激发极化所引起的, 而此时主要考虑的是带电粒子的激发极化效应; 由激发极化理论可知时间常数  $\tau$  代表极化过程的缓慢性, 结合图 2, 除焦煤外, 其他煤块的时间常数  $\tau$  大小均呈走向>倾向>垂向, 故对于煤层中存在的可极化介质来说, 煤层在垂向上可极化介质发生极化的时间最短, 即在较短的时间内其各类极化几乎都已完成, 从总体上来说, 各个分层平均分子极化不剧烈, 根据电介质固体能带理论<sup>[20]</sup>, 价带中的部分电子跃迁到导带上成为导电载流子的数量相对较少, 故  $Z$  值较大。这也就验证了煤层垂向上  $Z$  值较走向和倾向上大的原因。低频阶段走向和倾向呈各向异性的主要原因在于时间常数  $\tau$  呈走向>倾向,  $\tau$  值越大, 连通性越好, 故煤层在走向上的连通性较倾向上好, 而连通性越好, 煤体中可通过的粒子也就越多, 煤体导电性越强, 因此走向上的  $Z$  值小于倾向。

2) 从构造地质学的角度来说, 在低频阶段当  $f \rightarrow 0$  ( $T \rightarrow \infty$ ) 时相当于直流, 地下介质已经得到充分的极化, 此时由地下介质引起煤  $Z$  值变化的情况

可忽略不计, 只考虑煤体本身所造成的影响, 对于煤体本身而言, 首先要考虑的是裂隙所带来的影响, 而裂隙主要是由构造引起, 构造和煤层倾向有关, 煤层走向和成煤环境关系密切; 故在考虑低频阶段  $Z$  值的变化时, 应考虑煤体本身构造的影响; 而在低频阶段, 构造对煤体电性的影响有待进一步研究。

## 4 结 论

1) 煤层各个方向上  $Z$  值均呈单一递减趋势, 符合一般岩石激发极化特征; 且  $Z$  值拐点均出现在  $10 \sim 100$  Hz。

2) 同一煤样, 低频阶段煤层出现明显的各向异性; 高频阶段, 走向和倾向逐渐趋于各向同性, 水平向和垂直向出现各向异性。

3) 在低频阶段出现各向异性的原因: ①由时间常数  $\tau$  大小走向>倾向>垂向, 在 3 个方向上, 垂向发生极化的时间最短, 倾向次之, 走向最长; 即在垂向上在较短的时间内其各类极化几乎都已完成, 从总体上来说, 各个分层平均分子极化不剧烈, 据电介质固体能带理论, 价带中的部分电子跃迁到导带上成为导电载流子的数量相对较少, 故  $Z$  值较大; ②低频阶段当  $f \rightarrow 0$  ( $T \rightarrow \infty$ ) 相当于直流, 地下介质已经得到充分的极化, 此时由地下介质引起煤  $Z$  值变化的情况可忽略不计, 只考虑煤体本身所造成的影响, 对于煤体本身而言, 首先要考虑的是裂隙所带来的影响, 而裂隙主要是由构造引起, 构造和煤层倾

向有关煤层走向和成煤环境关系密切。故在考虑低频阶段 $Z$ 值的变化时,应考虑煤体本身构造的影响;而低频阶段构造对煤体电性的影响有待进一步研究。

4) 在低频阶段走向和倾向呈各向异性的原因:由走向 $\tau$ 大于倾向 $\tau$ 可知, $\tau$ 值越大,连通性越好,故煤层在走向上的连通性较倾向上好,而连通性越好,煤体中可通过的粒子也就越多,煤体导电性越强,因此走向上的 $Z$ 值小于倾向。

#### 参考文献(References):

- [1] 汤友谊,孙四清,郭纯等.不同煤体结构类型煤分层视电阻率值的测试[J].煤炭科学技术,2005,33(3):70-72.  
Tang Youyi, Sun Siqing, Guo Chun *et al.* Measurement of apparent resistivity value for coal slices of different seam structures[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(3): 70-72.
- [2] 汤友谊,孙四清,高彩玲.测井曲线计算机识别构造软煤的研究[J].煤炭学报,2005,28(6):23-26.  
Tang Youyi, Sun Siqing, Gao Cailing. Study of computer identifying on tectonic soft coal with well log [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 28(6): 23-26.
- [3] 孟磊,刘明举,王云刚.构造煤单轴压缩条件下电阻率变化规律的试验研究[J].煤炭学报,2010,35(12):2028-2032.  
Meng Lei, Liu Mingju, Wang Yungang. Study on the rules of electrical resistivity variation of tectonic coal in uniaxial compression experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2028-2032.
- [4] 王恩元,陈鹏,李忠辉等.受载煤体全应力-应变过程电阻率响应规律[J].煤炭学报,2014,33(11):2220-2225.  
Wang Enyuan, Chen Peng, Li Zhonghui *et al.* Resistivity response in complete stress-strain process of loaded coal [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 33(11): 2220-2225.
- [5] 陈鹏,王恩元,朱亚飞.受载煤体电阻率变化规律的试验研究[J].煤炭学报,2013,38(4):548-553.  
Chen Peng, Wang Enyuan, Zhu Yafei. Experiment study on resistivity variation regularities of loading coal [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 548-553.
- [6] 王云刚,李莉,李盟等.受载含瓦斯煤体电性参数与渗透率关系的试验研究[J].河南理工大学:自然科学版,2013,32(4):380-384.  
Wang Yungang, Li Li, Li Meng *et al.* Relations between electrical parameters and permeability on being loaded gas-filled coal [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2013, 32(4): 380-384.
- [7] Dindi H. Thermal and electrical property measurements for coal [J]. Fuel, 1987, 68(3): 185-192.
- [8] Marland S, Merchant A, Rowson N. Dielectric properties of coal [J]. Fuel, 2001, 80(2): 1839-1849.
- [9] 杜云贵,任震,鲜学福等.煤的各向电异性与其大分子结构间的关系[J].煤炭转化,1995,18(4):63-67.  
Du Yungui, Ren Zhen, Xian Xuefu *et al.* Relationships between the electrical anisotropy of and coal macromolecular structure [J]. Coal Conversion, 1995, 18(4): 63-67.
- [10] 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):511-514.  
Lv Shaolin, He Jishan. Study on conductive properties of different coal [J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(6): 511-514.
- [11] 陈健杰,江林华,张玉贵等.不同煤体结构类型煤的导电性质研究[J].煤炭科学技术,2011,39(7):90-101.  
Chen Jianjie, Jiang Linhua, Zhang Yugui *et al.* Study on coal conductive properties of different coal structure [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(7): 90-101.
- [12] 许小凯,张玉贵,侯锦绣.煤电阻率各向异性及其频率响应特征[C]//第四届国际矿山安全学术研讨会论文集.北京:煤炭工业出版社,2012,402-406.
- [13] 何继善,李大庆.双频道频率激电的非线性效应[J].地球物理学报,1995,38(5):662-669.  
He Jishan, Li Daqing. Nonlinear effect of dual-frequency IP spectrum [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(5): 662-669.
- [14] 陈儒军,何继善,白宜诚等.多频激电相对相位谱研究[J].中南大学学报:自然科学版,2004,35(1):106-111.  
Chen Rujun, He Jishan, Bai Yicheng *et al.* The study of relative phase spectrum in multi-frequency induced polarization [J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2004, 35(1): 106-111.
- [15] 陈序三,赵文杰,朱留方.复电阻率测井方法及其应用[J].测井技术,2001,25(5):327-331.  
Chen Xusan, Zhao Wenjie, Zhu Liufang. Complex resistivity logging and its applications [J]. Well Logging Technology, 2001, 25(5): 327-331.
- [16] 郑和华,冯启宁,尚作源.岩石复电阻的频率特征及其应用前景[J].石油大学学报,1993,17(S1):23-28.  
Zheng Hehua, Feng Qining, Shang Zuoyuan. Frequency property and its potential application of the complex resistance of reservoir rocks [J]. Journal of University of Petroleum, 1993, 17(S1): 23-28.
- [17] 郭晓洁,雷东记,张玉贵.构造煤复电性试验及其特征研究[J].煤田地质与勘探,2015,43(5):102-105.  
Guo Xiaojie, Lei Dongji, Zhang Yugui. Electrical experiment and its characteristics of tectonic coal [J]. Coal Geology and Exploration, 2015, 43(5): 102-105.
- [18] 何继善.双频激电法[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [19] 肖占山,徐世浙,罗延钟等.岩石复电阻率频散特性的机理研究[J].浙江大学学报:理学版,2006,33(6):796-800.  
Xiao Zhanshan, Xu Shihe, Luo Yanzhong *et al.* Study on mechanisms of complex resistivity frequency dispersion property of rocks [J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2006, 33(6): 796-800.
- [20] 方俊鑫,殷之文.电介质物理学[M].北京:科学出版社,2000.