



柴斌, 许小凯, 张川, 等. 2021. 六种不同变质程度煤的电阻率研究. 地球物理学进展, 36(3): 1046-1051, doi: 10.6038/pg2021EE0298.

CHAI Bin, XU XiaoKai, ZHANG Chuan, et al. 2021. Characteristics of resistivity and its anisotropy of six kinds of metamorphic coals. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(3): 1046-1051, doi: 10.6038/pg2021EE0298.

# 六种不同变质程度煤的电阻率研究

## Characteristics of resistivity and its anisotropy of six kinds of metamorphic coals

柴斌<sup>1</sup>, 许小凯<sup>2\*</sup>, 张川<sup>3</sup>, 于光明<sup>4</sup>

CHAI Bin<sup>1</sup>, XU XiaoKai<sup>2\*</sup>, ZHANG Chuan<sup>3</sup>, YU GuangMing<sup>4</sup>

1. 辽宁省东煤地质物探测量队有限责任公司, 沈阳 110101
2. 河南理工大学能源科学与工程学院, 焦作 454003
3. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081
4. 北京多分量地震技术研究院, 北京 100029

1. Liaoning Dongmei Geological Survey Team Limited, Shenyang 110101, China
2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China
3. Institute of Geochemistry, CAS, National Key Lab of Oral Geochemistry, Guiyang 550081, China
4. Institute of Multi-Component Seismic Techniques, Beijing 100029, China

**摘要** 煤岩电阻率是衡量煤岩电性特征最重要的参数之一, 是进行煤田电法勘探的物性前提. 研究煤岩电阻率, 尤其是其各向异性特征具有重要的理论和实践意义. 本文通过对8块6种不同变质程度的煤岩电阻率及其各向异性测量发现: 煤岩三方向的电阻率均随频率增加下降, 且两者呈极好的负指数关系, 平均相关系数达0.95以上; 煤岩电阻率呈现明显的各向异性, 走向与垂向、倾向与垂向之间的电阻率差异显著大于走向与倾向之间的电阻率差异; 从褐煤到瘦煤, 随着变质程度加深, 煤岩电阻率呈上升趋势, 但到无烟煤阶段, 电阻率急剧下降; 煤岩电阻率受湿度影响强烈, 饱和水与非饱和水情况下电阻率存在较大差异.

**关键词** 煤; 变质程度; 电阻率; 各向异性; 频率; 湿度

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2021EE0298

**Abstract** Electrical resistivity is an important parameter to describe the electrical characteristic of coal. It's also the physical premise of surface geophysical survey in coal field. It is of great theoretical and practical significance to study coal's resistivity and especially its anisotropy. The resistivity and its anisotropy of six different metamorphic kinds of coals were discussed through laboratorial resistivity measurement in its strike, dip and vertical directions. After analyzing the test data, some results and conclusions could be deduced: Coal resistivities in strike, dip and vertical directions show obvious anisotropy; the resistivity difference between strike and vertical or dip and vertical is much greater than that between strike and dip; the resistivities in three directions all reduce when testing frequency increases, and there is a good negative relation of exponential function with the correlation coefficient up to 0.95; with the rise of coal metamorphism, coal resistivity increases slowly as a whole from lignite to lean coal, but anthracite coal resistivity drops sharply, which is of high metamorphic grade; coal resistivity is strongly influenced by humidity, there is a big difference of resistivity, when moisture content of coal changes.

**Keywords** Coal; Metamorphic grade; Resistivity; Anisotropy; Frequency; Humidity

## 0 引言

电阻率是表征物体导电性的主要参数, 也是煤田电法勘探所用的基本参数. 近年来, 随着煤矿开采强度的日益增大, 煤矿灾害面临严峻形势. 在灾害孕育和发生过程中, 存在多种地球物理场响应, 电磁波发射就是其中一种重要的物理现象(孟磊, 2010). 此外, 煤矿井下、井中、地面电法勘探的

物性前提是煤岩与周围岩石的电阻率差异(岳建华和刘树才, 2000). 因此, 电阻率的研究, 对电法勘探技术在煤矿中应用及其在煤矿灾害预报方面有着重要的理论和实践意义.

煤岩电阻率的影响因素很多, 为了更广泛的了解煤岩的电学性质, 国内外不少学者对煤岩的电性特征进行了研究. 陈健杰等(2011)对不同煤体结构类型煤的导电性进行了研究; 徐宏武(2005)分析了煤层电性参数与煤岩特性的关系;

收稿日期 2020-09-30; 修回日期 2021-03-04. 投稿网址 http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金(41425017, 41904118)和“构造与油气资源”教育部重点实验室开放基金(TPR-2019-05)联合资助.

第一作者简介 柴斌, 男, 1971年生, 高级工程师, 研究方向为煤田地球物理勘探. E-mail: 13940522056@139.com

\* 通讯作者 许小凯, 男, 1987年生, 博士(后), 讲师, 研究方向为储层岩石物理. E-mail: xuxiaokai110110@163.com

何继善和吕绍林(1999)、Branch(1994)、万琼芝(1982)、徐龙君等(2001)等在大量测试的基础上,研究了温度对电性参数的影响;Balanis等(1981)研究了极化方向对电阻率的影响;杜云贵等(1993)对煤电导率进行了定量研究.此外,陆海龙和贾迎梅(2009)、陈鹏等(2013)、孟磊(2010)、王云刚(2008,2010)等对受载煤体电阻率的变化规律做了有益尝试.陈健杰等(2011)、徐宏武(2005)、孟磊(2010)等做过煤岩电阻率各向异性的实验研究工作,但只做了平行层理面和垂直层里面电阻率的对比,未能深入各向异性讨论.

传统的电法勘探中,一般用电性均质体模型来模拟煤层,这与煤岩电阻率的各向异性发育特征存在较大误差(王赞等,2017).对于煤岩电性特征的认识,受限于大多数实验研究的煤样变质程度单一或矿区单一(柳苏等,2017;郭跃辉等,2020),不同变质程度煤岩电阻率的特征认识还缺乏系统性,电阻率各向异性的研究尤其鲜见(张川等,2015;郭晓洁等,2017).本文针对采自全国不同煤矿区、不同变质程度的煤岩电阻率进行了从0.1 Hz~100 kHz的系统测量,尝试总结出不同变质程度煤岩电阻率各向异性特征,煤岩电阻率与频率、变质程度、湿度之间的关系,揭示不同变质程度煤岩电阻率的一般特征,促进电法勘探技术在煤矿地质保障方面的应用和发展.

### 1 煤岩电阻率测试原理与方法

#### 1.1 待测样品信息

为研究我国主要变质类型煤的电阻率特征,在国内不同煤矿区采集了六种具有不同变质程度的原生结构煤.煤具有典型的层理结构,所以煤岩电阻率的各向异性必然会集中体现在以煤层层理、煤层产状为主的方向特征上.鉴于此,对煤矿井下采煤工作面实际采集的块状煤样,按煤层的走向、倾向及垂直层理三个正交方向进行现场标记.在实验室将采自于井下的煤块样品进一步切割加工成规则的、边长约6 cm的立方体,并将端面打磨平整.选择其中相对完整的8块成样品进行常温(25℃)、常压(1个大气压)条件下的电阻率测量,样品信息见表1和图1(张川等,2015).

表1 样品信息

Table 1 Sample information

煤样编号	采样地点	煤样变质程度
A	义马煤矿	褐煤
B	平顶山八矿戊组	肥煤
C1	平顶山八矿己组	焦煤
C2	平顶山八矿己组	焦煤
D	新疆	气煤
E	鹤壁六矿2143工作面	贫瘦煤
F1	焦作方庄矿	无烟煤
F2	焦作九里山矿	无烟煤

#### 1.2 测试原理

测量原理如图2所示,测试设备选用 ZM2371 型 LCR 测



图1 待测煤样

Fig.1 Coal samples

试仪.为保证煤样与电极接触良好,在电极与打磨平整的煤样端面之间夹CuSO<sub>4</sub>溶液的海绵垫片,按照走向(X)、倾向(Y)、垂向(Z)依次测量(见图3).电阻率测量步骤如下:

- (1) 将 LCR 测试仪接通电源,开机预热 30 min 以上;
- (2) 对 LCR 参数测试仪进行开路校正和短路校正;
- (3) 测量煤岩的电阻值  $R$ ;
- (4) 计算出电阻率值  $\rho(\rho = RS/L. R$  为煤样电阻值,  $S$  为电极与煤样的有效接触面积,  $L$  为煤样的厚度).

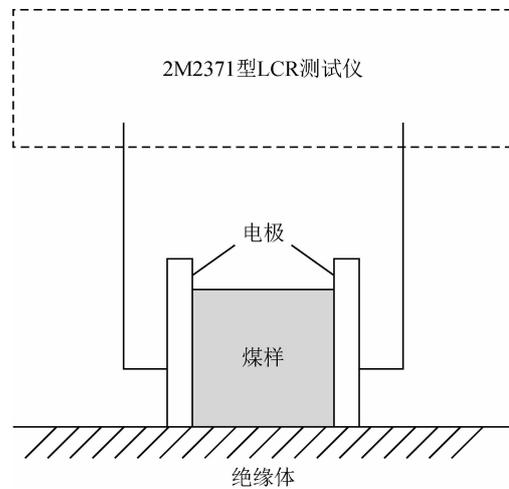


图2 电阻率测量原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of resistivity measurement principle

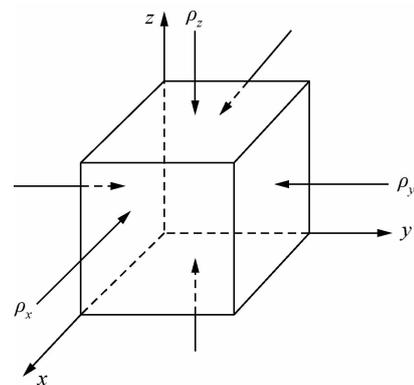


图3 煤样三方向电阻率示意图

Fig.3 Schematic diagram of three-direction resistivity for coal sample

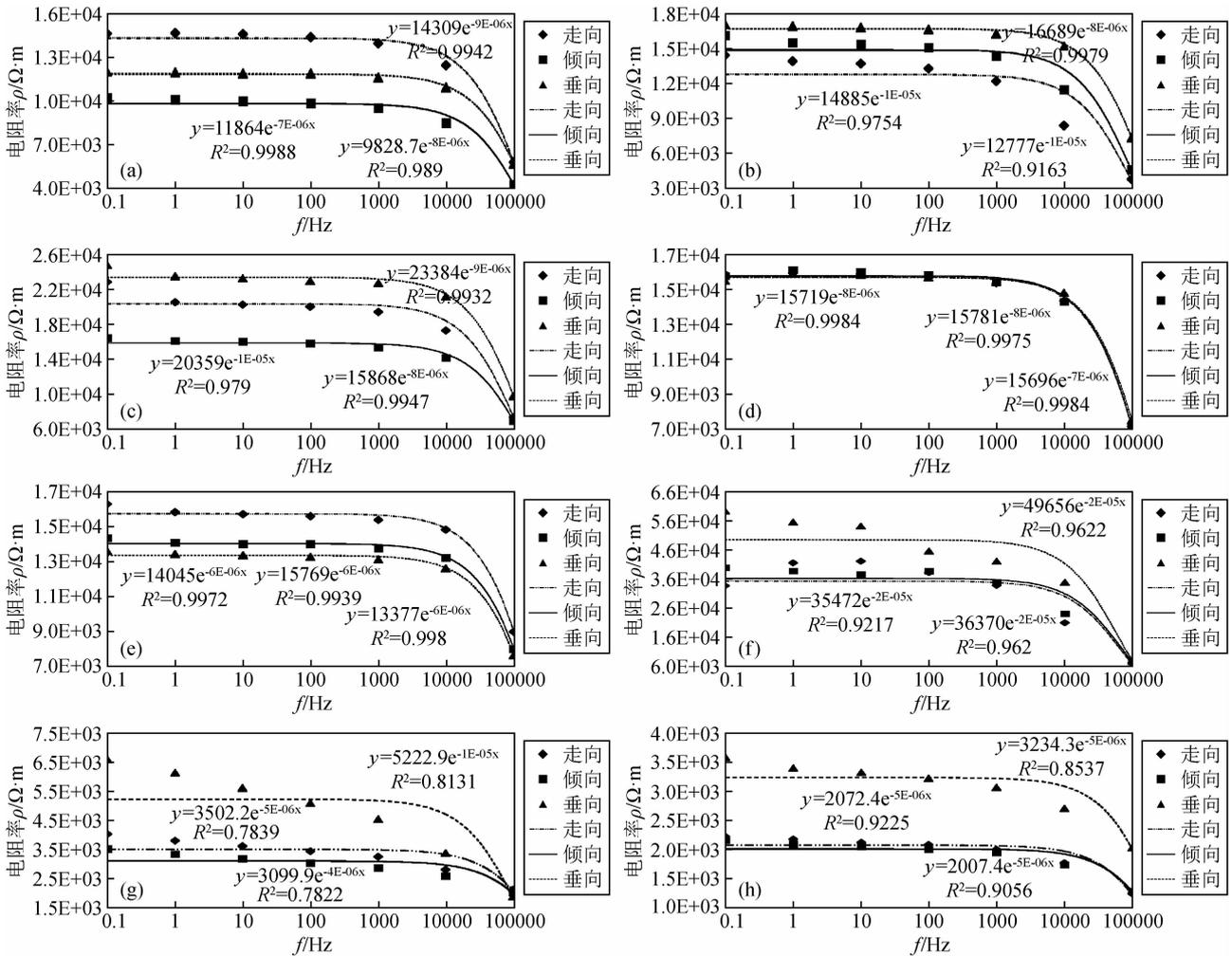


图4 不同变质程度煤岩电阻率与频率关系

(a) 煤样 A; (b) 煤样 B; (c) 煤样 C1; (d) 煤样 C2; (e) 煤样 D; (f) 煤样 E; (g) 煤样 F1; (h) 煤样 F2.

Fig. 4 The relations between resistivity and frequency for coals of different metamorphism degrees

(a) Coal A; (b) Coal B; (c) Coal C1; (d) Coal C2; (e) Coal D; (f) Coal E; (g) Coal F1; (h) Coal F2.

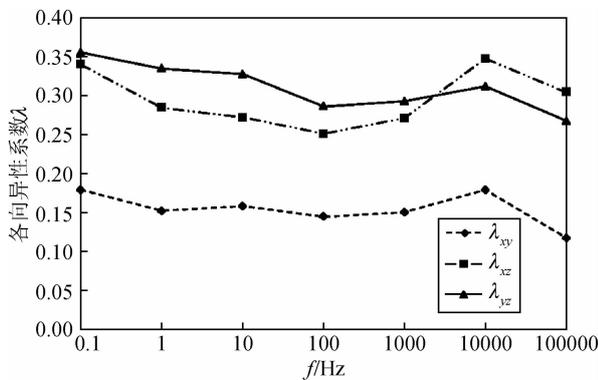


图5 不同频率下的各向异性系数

Fig. 5 Anisotropy coefficients at different frequencies

## 2 测试数据分析

### 2.1 煤岩电阻率跟频率关系

前人(徐宏武, 2005; 孟磊等, 2010; 陈健杰等, 2011)对

电阻率与频率的关系已有研究,但分析频点较少,且多为中高频(1000 Hz 以上),低频研究缺乏,另外未见针对电阻率各向异性与频率的关系分析.因此,为了系统的研究电阻率与频率的关系,笔者连续测量了 0.1 Hz、1 Hz、10 Hz、100 Hz、1000 Hz、10000 Hz、100 kHz 的三方向的干燥煤岩电阻率.限于篇幅,表 2 仅列出了频率为 0.1 Hz、100 Hz、100 kHz 煤岩三方向的电阻率值.为了更直观的了解煤岩电阻率与频率的关系,笔者对 8 块 6 种不同变质程度煤岩的三方向电阻率与频率的关系进行了成图,如图 4 所示.从图 4 可以看出随频率增加,煤岩三方向的电阻率随频率增加呈下降趋势,且电阻率与频率之间呈极好的负指数关系,平均相关系数在 0.95 以上.可见从低到高的不同变质程度的六种煤均符合煤岩的一般激发极化特征(郭晓洁等, 2017).煤岩复电性具有明显的频散特征,且其电阻率( $\rho$ )随频率( $f$ )变化的突出特点表现为:大致以 1000 Hz 为界可分为两个频率阶段,低频段  $\rho$  随  $f$  变化不显著,高频段  $\rho$  随  $f$  的升高而急剧降低.

表2 不同频率下煤岩电阻率值  
Table 2 Coal resistivity values at different frequencies

煤样 编号	电阻率( $f=0.1$ Hz) / $\Omega \cdot m$			电阻率( $f=100$ Hz) / $\Omega \cdot m$			电阻率( $f=100$ kHz) / $\Omega \cdot m$		
	$\rho_x$	$\rho_y$	$\rho_z$	$\rho_x$	$\rho_y$	$\rho_z$	$\rho_x$	$\rho_y$	$\rho_z$
A	14603	10211	12025	9828	11859	13908	5809	4272	5685
B	14385	16070	17043	15034	16588	12159	3783	4605	7345
C1	22806	16398	24761	15828	22922	19366	73601	6940	9763
C2	15839	15756	15459	15833	15661	15317	7183	7170	7513
D	16299	14353	13607	14006	13274	15383	8982	7998	7626
E	33663	39895	59419	38694	45620	33851	6949	7565	8088
F1	4015	3509	6582	3024	5075	3241	2122	2013	1881
F2	2212	2151	3577	1995	3220	1993	1235	1281	2021

2.2 三方向电阻率各向异性

煤岩的电阻率各向异性特征,前人已有涉及(徐宏武, 2005; 陈健杰等, 2011),但都只分析了平行层理方向及垂直层理方向的电阻率差异,这种分析的前提是平行层里面两个方向电阻率不存在差异,然而事实上,我们的前期实验结果表明在平行层理的两个方向也是存在电阻率差异的,且已经在—篇论文中给予了初步介绍(张川等, 2015).为了进一步对煤岩走向、倾向、垂向三个正交方向上电阻率的差异性进行系统分析,参照前人(李金铭, 2005; 程志平, 2007)对电性各向异性的表征方法以及地震领域对各向异性系数的定义,我们在此定义煤岩三个正交方向之间电阻率的各向异性系数分别为:

$$\begin{cases} \lambda_{xy} = \frac{\max(\rho_x, \rho_y) - \min(\rho_x, \rho_y)}{\min(\rho_x, \rho_y)} \\ \lambda_{xz} = \frac{\max(\rho_x, \rho_z) - \min(\rho_x, \rho_z)}{\min(\rho_x, \rho_z)} \\ \lambda_{yz} = \frac{\max(\rho_y, \rho_z) - \min(\rho_y, \rho_z)}{\min(\rho_y, \rho_z)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 即为各向异性系数, $x/y/z$ 分别表示煤样在笛卡尔坐标系中的三个正交方向(即走向、倾向、垂向).

由式(1)可计算出所测煤样三个正交方向( $x/y/z$ )相互之间的 $\lambda$ 值,限于篇幅表3仅列出了频率为0.1 Hz及1 Hz时的结果.继而获得不同测试主频下的 $\lambda$ 均值(见表4).

表3 煤样在0.1 Hz和1 Hz时电阻率各向异性系数  
Table 3 Coal resistivity anisotropy coefficient at 0.1 Hz and 1 Hz

煤样 编号	电阻率各向异性系数 $\lambda$					
	0.1 Hz			1 Hz		
	$\lambda_{xy}$	$\lambda_{xz}$	$\lambda_{yz}$	$\lambda_{xy}$	$\lambda_{xz}$	$\lambda_{yz}$
A	0.430	0.214	0.178	0.453	0.225	0.186
B	0.117	0.185	0.061	0.114	0.216	0.092
C1	0.391	0.086	0.510	0.272	0.145	0.457
C2	0.005	0.025	0.019	0.011	0.004	0.014
D	0.136	0.198	0.055	0.124	0.178	0.048
E	0.185	0.765	0.489	0.071	0.337	0.433
F1	0.144	0.639	0.876	0.138	0.611	0.833
F2	0.029	0.617	0.663	0.037	0.566	0.624

表4 煤样在0.1 Hz~100 kHz时的 $\lambda$ 均值

Table 4 Coal  $\lambda$  mean with frequency ranging from 0.1 Hz ~ 100 kHz

频率/Hz	各向异性系数 $\lambda$		
	$\lambda_{xy}$	$\lambda_{xz}$	$\lambda_{yz}$
0.1	0.180	0.341	0.356
1	0.153	0.285	0.336
10	0.158	0.273	0.328
100	0.145	0.252	0.287
1000	0.151	0.272	0.294
10000	0.179	0.348	0.313
100000	0.118	0.305	0.268

为了更加直观地描述 $\lambda$ 与频率( $f$ )之间的关系,将表4数据绘制成图(图5).由图5可见,在所测频率范围内, $\lambda_{xy}$ 明显小于 $\lambda_{xz}$ 和 $\lambda_{yz}$ ,约为后两者的一半;而 $\lambda_{xz}$ 与 $\lambda_{yz}$ 相近.表明具有典型层理结构的煤岩在垂直层理面方向上的电阻率与平行层理面方向上的电阻率有显著差异,而在平行层理面方向上的各向异性特征则相对明显偏弱.在所测频段范围内随着 $f$ 从低到高,煤岩电阻率的各向异性系数 $\lambda$ 总体上呈现出下降的趋势,这表明煤岩电阻率的各向异性特征也是随着频率的变化而发生变化的,即具有一定的频散效应.结合我们前期的研究(张川等, 2015)基本上可以确定煤岩电阻率的各向异性与频率之间确实存在着负相关关系.煤岩所表现出来的电阻率频散特征可归因于煤岩典型的物性结构对其激发极化效应的响应机理.

2.3 煤岩电阻率与变质程度的关系

煤的变质程度是在温度压力等因素作用下,煤的物理、化学性质变化的程度.煤在变质过程中,其电阻率值必然存在变化.为了研究煤岩电阻率与变质程度的关系,笔者通过对8块6种不同变质程度煤样的三方向电阻率测量(相同变质程度煤,取平均值作为该变质程度煤的电阻率),绘制出了煤变质程度与电阻率的关系图.图6a、b分别为频率为0.1 Hz和100 Hz时,煤岩三方向电阻率与煤变质程度的关系图.从图6可以看出,从褐煤到瘦煤,随着变质程度的加强,三方向的电阻率均呈现上升趋势,但到无烟煤阶段,电阻率急剧

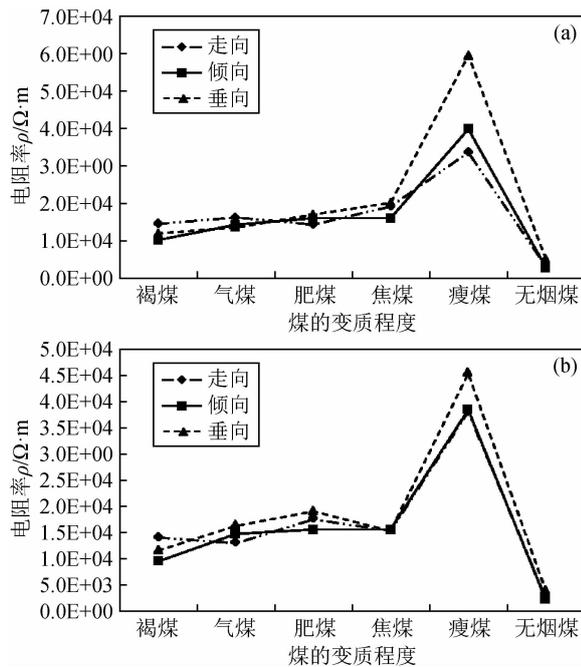


图6 煤变质程度与电阻率关系

(a) 频率 0.1 Hz; (b) 频率 100 Hz.

Fig. 6 Relationship between coal metamorphism and resistivity

(a)  $f=0.1$  Hz; (b)  $f=100$  Hz.

下降.这是因为不同煤阶的煤岩所具有的导电模式不是一成不变的,受控于各自的矿物组成及微观多孔介质结构.到了无烟煤阶段,电阻率显著降低的原因普遍认为是高变质程度的煤芳香稠环达到了很高的缩合程度,即进入了石墨矿化阶段,电子导电机制明显占主导作用(张广洋等, 1994).

#### 2.4 煤岩电阻率跟湿度关系

因地下水和天然水电阻率通常低于  $100 \Omega \cdot m$  (李金铭, 2005), 显著低于干燥煤岩电阻率.因此,水分含量的多少对煤岩电阻率影响巨大.为了研究湿度对煤岩电阻率的影响规律,采用浸水时间作为衡量煤岩湿度的尺度进行分析.图7a、b、c分别为A、B、F2煤岩三方向电阻率与浸泡时间关系图.从图可以看出,在最初的18 h内,随着浸泡时间增加,煤岩电阻率显著下降,24 h之后,煤岩电阻率逐渐趋于稳定.另外,需要注意的是,无烟煤F2由于本身电阻率就较低,其电阻率受水分影响,相对于其他煤岩稍低.在地下多孔介质煤岩中水分含量的多少决定了其内部离子导电的程度,所以在煤电法勘探中,煤的水分含量的确定是先决条件或首要探测因素,必须先搞清楚水分对探测煤体电性的影响程度,这一点是至关重要的,有待更深入的研究.

### 3 结论和认识

通过对8块6种不同变质程度煤岩走向、倾向、垂直层理三个正交方向的电阻率测量分析,可以得到以下结论:

(1) 煤岩三方向电阻率随频率增加呈下降趋势,且两者呈极好的负指数关系.

(2) 煤岩在垂直层理面方向上的电阻率与平行层理面

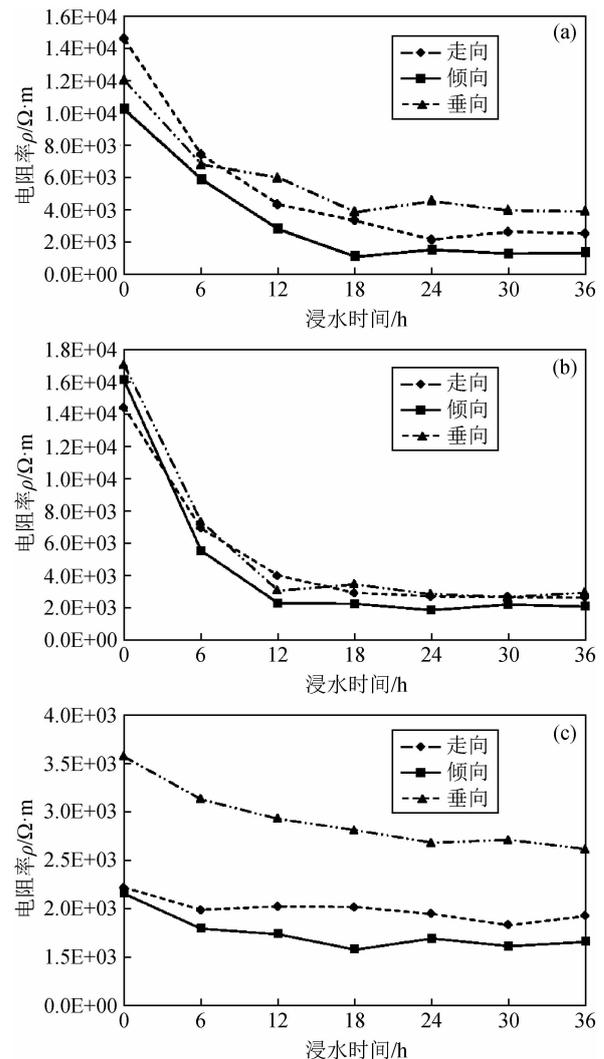


图7 煤岩电阻率与浸水时间关系

(a) 煤样 A; (b) 煤样 B; (c) 煤样 F2;

Fig. 7 The relationship between resistivity and immersion time

(a) Coal A; (b) Coal B; (c) Coal F2;

方向上的电阻率有显著差异,而在平行层理面方向上的各向异性特征则相对明显偏弱.在所测频段范围内煤岩电阻率的各向异性具有一定的频散效应,与频率之间总体上呈现负相关关系.

(3) 从褐煤到瘦煤,随着煤岩变质程度加深,煤岩电阻率呈上升趋势,但到无烟煤阶段,电阻率急剧下降.

(4) 煤岩电阻率受湿度影响强烈.在饱水过程中,电阻率随浸泡时间增加,电阻率显著下降,而当浸水达到一定时间后,电阻率趋于稳定.

同时笔者也认识到:①由于煤样的易碎性,本次实验采样和制样数量有限,未能就某一变质程度煤样进行大量采样测试,从而总结出来的规律,可能与我国煤类型的多样性和复杂性不完全匹配;②岩石电阻率的影响因素还有很多,比如温度、压力,但本文的研究仅限于常温压条件,更进一步的研究有待于今后进行.

**致谢** 本实验研究是在王赞教授的设计、指导下进行的,并在实验成果的整理和文章撰写过程中得到了王赞教授的多次指点;电性实验是在中国科学院地质与地球物理研究所进行的,期间得到了王光杰副研究员的具体指导。

## References

- Balanis C A, Cooper B R, Petrake L. 1981. Chemistry and Physics of Coal Utilization [M]. New York: American Institute of Physics.
- Brach I, Giuntini J C, Zanchetta J V. 1994. Real part of the permittivity of coals and their rank [J]. Fuel, 73(5): 738-741.
- Chen Jianjie, Jiang Linhua, Zhang Yugui, et al. 2011. Study on Coal Conductive Properties of different Coal Structure [J]. Coal Science and Technology (in Chinese), 39(07): 90-92, 101.
- Chen Peng, Wang Enyuan, Zhu Yafei. 2013. Experimental study on resistivity variation regularities of loading coal [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 38(4): 548-553.
- Cheng Zhiping. 2007. Course of electrical exploration [M]. Guilin: Metallurgical Industry Press (in Chinese).
- Du Yungui, Xian Xuefu, Tan Xueshu, et al. 1993. Research on the Electrical Conductivity of Nantong Coal [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science) (in Chinese), (03): 145-148.
- GuoXiaojie, Huan Xuan, Gong Weidong, et al. 2017. Study on coal complex resistivity anisotropy and characteristics of frequency response [J]. Coal Science and Technology (in Chinese), 45(04): 167-170.
- GuoYuehui, Zhang Yugui, Li Jian, et al. 2020. Frequency dispersion mechanism of complex resistivity of coal [J]. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 48(01): 221-226.
- He Jishan, Lü Shaolin. 1999. Geophysical study on gas outburst [M]. Beijing: Coal Industry Press (in Chinese).
- Li Jinming. 2005. Geoelectric field and electrical prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Liu Su, Zhang Yugui, Xu Xiaokai, et al. 2017. Research on coal electrical experiment stimulated by frequency signal and its characteristics [J]. Safety in Coal Mines (in Chinese), 48(11): 65-67.
- Lu Hailong, JiaYingmei. 2009. Experimental study on change law of resistivity of coal under compressive load [J]. Mining Research and Development (in Chinese), 29(04): 36-37, 44.
- Meng Lei. 2010. Experimental study on the electrical parameters of coal [Master's thesis]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University (in Chinese).
- Meng Lei, Liu Mingju, Wang Yungang. 2010. Study on the rules of electrical resistivity variation of tectonic coal in uniaxial compression experiment [J]. Journal of China Coal Society (in Chinese), 35(12): 2028-2032.
- Wan Qiongzhi. 1982. Resistivity and relative permittivity of coal [J]. Coal Mine Safety Technology (in Chinese), 1982(01): 17-24.
- Wang Yun, Yang Dinghui, Yin ChangChun, et al. 2017. Anisotropic geophysics and vector field [J]. Scientific Bulletin (in Chinese), 62(23): 2595-2605.
- Wang Yungang. 2008. Basic Study on microwave radiation rules and its mechanism of loading coal in deformation and fracture process [Ph. D. thesis]. Xuzhou: China University of Mining and Technology (in Chinese).
- Wang Yungang. 2010. The Experimental study on the apparent resistivity of large-scale coal samples with burst tendency [J]. Journal of University of South (Natural Science) (in Chinese), 24(02): 15-18, 23.
- Xu Hongwu. 2005. Measurement and test of seam electric parameter and study on relationship between seam electric parameter and coal petrology characteristics [J]. Coal Science and Technology (in Chinese), 33(3): 41-46.
- Xu Longjun, Liu Chenglun, Xian Xuefu. 2001. Fractal characteristics of alternating current conductivity of coal [J]. Coal Conversion (in Chinese), (01): 50-52.
- Yue Jianhua, Liu Shucai. 2000. Underground mine electrical prospecting [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press (in Chinese).
- Zhang Chuan, Wang Yun, Liu Yun. 2015. Analysis of anisotropic characteristics of coal resistivity [J]. Acta Mineralogica Sinica (in Chinese), 35(S1): 259-260.
- Zhang Guangyang, Tan Xueshu, Xian Xuefu, et al. 1994. Study of relation between electrical conductivity and coal macromolecular structure [J]. Coal Conversion (in Chinese), 17(02): 10-13.

## 附中文参考文献

- 陈健杰, 江林华, 张玉贵, 等. 2011. 不同煤体结构类型煤的导电性质研究 [J]. 煤炭科学技术, 39(07): 90-92, 101.
- 陈鹏, 王恩元, 朱亚飞. 2013. 受载煤体电阻率变化规律的实验研究 [J]. 煤炭学报, 38(04): 548-553.
- 程志平. 2007. 电法勘探教程 [M]. 桂林: 冶金工业出版社.
- 杜云贵, 鲜学福, 谭学术, 等. 1993. 南桐煤的导电性质研究 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), (03): 145-148.
- 郭晓洁, 郁璇, 宫伟东, 等. 2017. 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, 45(04): 167-170.
- 郭跃辉, 张玉贵, 李健, 等. 2020. 煤复电阻率频散机理研究 [J]. 煤田地质与勘探, 48(01): 221-226.
- 何继善, 吕绍林. 1999. 瓦斯突出地球物理研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社.
- 李金铭. 2005. 地电场与电法勘探 [M]. 北京: 地质出版社.
- 柳苏, 张玉贵, 许小凯, 等. 2017. 频率信号激励下煤电性试验及其特征研究 [J]. 煤矿安全, 48(11): 65-67.
- 陆海龙, 贾迎梅. 2009. 煤体电阻率受压变化规律实验研究 [J]. 矿业研究与开发, 29(04): 36-37, 44.
- 孟磊. 2010. 煤电性参数的实验研究 [硕士论文]. 焦作: 河南理工大学.
- 孟磊, 刘明举, 王云刚. 2010. 构造煤单轴压缩条件下电阻率变化规律的实验研究 [J]. 煤炭学报, 35(12): 2028-2032.
- 万琼芝. 1982. 煤的电阻率和相对介电常数 [J]. 煤矿安全技术, (01): 17-24.
- 王赞, 杨顶辉, 殷长春, 等. 2017. 各向异性地球物理与矢量场 [J]. 科学通报, 62(23): 2595-2605.
- 王云刚. 2008. 受载煤体变形破裂微波辐射规律及其机理的基础研究 [博士论文]. 徐州: 中国矿业大学.
- 王云刚. 2010. 大尺度冲击性煤体电阻率变化规律的实验研究 [J]. 南华大学学报(自然科学版), 24(02): 15-18, 23.
- 徐宏武. 2005. 煤层电性参数测试及其与煤岩特征关系的研究 [J]. 煤炭科学技术, 33(3): 42-46.
- 徐龙君, 刘成伦, 鲜学福. 2001. 煤导电性质的分形特征 [J]. 煤炭转化, 24(01): 50-52.
- 岳建华, 刘树才. 2000. 矿井直流电法勘探 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 张川, 王赞, 刘云. 2015. 煤岩电阻率各向异性特征浅析 [J]. 矿业学报, 35(S1): 259-260.
- 张广洋, 谭学术, 鲜学福, 等. 1994. 煤的导电性与煤大分子结构关系的实验研究 [J]. 煤炭转化, 17(02): 10-13.