

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2020.267

# 煤体复电阻率实验室测试方法研究

雷东记<sup>1a,2</sup>, 周 猛<sup>1a</sup>, 孟 慧<sup>1a,1b</sup>, 赵晨光<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 a. 河南省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;  
b. 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000; 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,  
河南 焦作 454000; 3. 中国矿业大学(北京), 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:**实验室煤体复电阻率测试旨在提供可靠的复电阻率数据,为进一步现场应用基础研究。影响煤体复电阻率测量精度的因素众多,其中电极板为最重要的因素之一,极板的厚度和大小都会对煤体复电阻率测量产生影响,因此电极板的变化对测量参数的准确性有重要意义。通过选用导电性较好的紫铜材料作为极板,对 3 种不同厚度的极板材料进行了复电阻率测量,分析极板厚度对激发极化效应的影响,测试了直径为 1,2,3,4,5 cm 5 种大小极板对煤体复电阻率测量的影响,并使用 Cole-Cole 模型进行数据拟合。得出结论如下:1)极板本身的极化效应和极板与煤样端面贴合程度是影响煤样复电阻率测量误差的主要因素,3 种不同厚度的极板材料中导电铜纸误差最小;2)对同一个煤样而言极板面积变化仅对复电阻率幅值有较大影响,对煤样激发极化的影响可以忽略。

**关键词:**复电阻率;极板材料;Cole-Cole 模型

**中图分类号:**TD12

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2022)02-103-11

## Experimental study on complex resistivity test of coal

LEI Dongji<sup>1a,2</sup>, ZHOU Meng<sup>1a</sup>, MENG Hui<sup>1a,1b</sup>, ZHAO Chenguang<sup>3</sup>

(1a. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control; 1b. College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;  
2. Collaborative Innovation Center of Central Plains Economic Region for Coalbed/Shale Gas, Jiaozuo, Henan 454000, P. R. China; 3. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** The purpose of complex resistivity measurement of coal in laboratory is to provide reliable data of complex resistivity for further field application. The measurement accuracy of coal complex resistivity is affected by many factors, and electrode plate is one of the most important factors. The thickness and the

**收稿日期:**2020-05-25 **网络出版日期:**2020-09-07

**基金项目:**国家自然科学基金(51704101);河南省重点科技攻关项目(182102310780,192102310199);中国博士后科学基金第 65 批面上项目(2019M652535);河南省高等学校重点科研项目计划(19A520024);河南省高校基本科研业务费专项资金资助(NSFRF200307)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51704101), Key Programs for Science and Technology Development of Henan Province (182102310780, 192102310199), China Postdoctoral Science Foundation (2019M652535), Science and Technology Research Projects of Henan Educational Committee (19A520024) and the Fundamental Research Funds for the Universities of Henan Province (NSFRF200307).

**作者简介:**雷东记(1983—),男,副教授,博士,主要从事瓦斯地质和瓦斯防治方面的研究。

**通讯作者:**孟慧(1981—),女,讲师,博士,主要研究方向为计算机建模和算法,(E-mail)huimeng069@126.com。

size of electrode plate will affect the result of coal complex resistivity measurement, so the change of electrode plate is of great significance to the accuracy of measurement parameters. In this paper, the complex resistivity of the electrode material with three different thicknesses is measured by using the copper material with better conductivity as the electrode plate. The influence of the thickness of electrode plate on the induced polarization effect is analyzed. The influence of different sizes of electrode plates (diameter of 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm and 5 cm) on the measurement of the complex resistivity of coal is tested, and the Cole-Cole model is used for data fitting. The results show that 1) the polarization effect of the electrode plate itself and the bonding degree between the electrode plate and the end face of the coal sample are the main factors affecting the measurement error of the complex resistivity of the coal sample, and the error of the conductive copper paper is the smallest among the three electrode materials. 2) For the same coal sample, the change of the area of the electrode plate only has a great influence on the amplitude of the complex resistivity, and the influence of the area on the induced polarization of the coal sample can be ignored.

**Keywords:** complex resistivity; electrode material; Cole-Cole model

复电阻率法(CR, complex resistivity)作为一种新兴的电法勘探技术,其原理为利用岩石在外电场激励下产生电压响应滞后的激发极化效应来达到地球物理勘探的目的<sup>[1]</sup>。复电阻率法最早应用于金属矿产资源勘探<sup>[2]</sup>和地下水资源探测<sup>[3]</sup>,并取得了较好的效果。1978年, Pelton等<sup>[4]</sup>将 Cole-Cole模型应用到激发极化理论中,极大推动了复电阻率法的发展。80年代以来,中国开展了复电阻率法在油气勘探中的理论研究与应用<sup>[5-7]</sup>,其测井技术在区分含油层、评价岩石湿润性和渗透性等方面进行了大量研究<sup>[8-9]</sup>,何继善<sup>[10]</sup>开发了双频激电法,将装备笨重的时间域激电仪改为便携性高的频率域激电仪,并获得更好的测量效果。如今,复电阻率法应用广泛,其“非侵入性”的特点对于地下特征研究具有重要价值,例如土壤污染物监测<sup>[11]</sup>,地下水修复监测<sup>[12]</sup>,以及细菌活性监测<sup>[13]</sup>等,展现了复电阻率法广阔的应用前景。

煤体复电阻率实验是研究煤体激发极化现象与理论的基础,也是复电阻率法测井技术应用的前提,但目前仅有少量的相关研究见于报道<sup>[14-15]</sup>。贾将等<sup>[16]</sup>设计了一套复电阻率测量装置,提高了测量信号信噪比,可实现时域和频域测量,推动了煤岩复电阻率实验的发展。魏光华等<sup>[17]</sup>将电极测量结构改为四电极,相较于传统的二电极中极化电压的影响,大大提高了测量精度,但却忽略了电极板本身的极化影响;杨迪等<sup>[18]</sup>为避免电极板的极化效应,在样品和测量电极之间使用浸泡过饱和硫酸铜溶液的海绵隔开, Khajehnouri等<sup>[19]</sup>通过复电阻率法测量混凝土样件的内部损伤,利用导电凝胶将铜极板与样品结合,达到了较高的测量精度。关于极板本身的极化和极板大小对实验测量结果的影响不可忽略,但目前还鲜有报道。

笔者选用导电性较好的紫铜极板,分别测量3种厚度极板的复电性参数,研究极板本身极化的影响;通过测量不同接触面积的煤样复电阻率实验,研究接触面积对复电阻率测量的影响,相关研究对煤体复电阻率实验和测井技术发展具有重要意义。

## 1 实验系统与样品

### 1.1 实验测量系统

实验采用四极法(图1所示)测量煤岩复电阻率,克服了二级法中电极本身对煤岩样品复电阻参数的误差影响,四极法是将测量电极和供电电极分开,其中AB两个电极为供电电极, MN两个电极为测量电极,两个电极互不影响。选用的测量仪为IM3533-01LCR四端子阻抗测试仪,如图2所示,其中HCUR端子为电流发生端子, HPOT端子为高侧电压检测端子, LCUR端子为电流检测端子, LPOT端子为低侧电压检测端子,四端子结构可提高测量精度。该阻抗测试仪具有速度快、范围广、精度高等优点。实验选取的测量参数为复电阻实部R和虚部X,测量频段为0.01~100 kHz。因在0.01~0.1 kHz频率,由于频率过低,容易受到外界干扰造成测量结果波动较大。当频率大于0.1 Hz,测量结果趋于稳定,在10~100 kHz有明显频散特

征<sup>[20]</sup>。由于电感作用极板开始出现明显的频散现象,为了保证测量精度的要求,在每次测量前需对仪器进行 30 min 以上的预热,并且减少外界噪声的干扰。

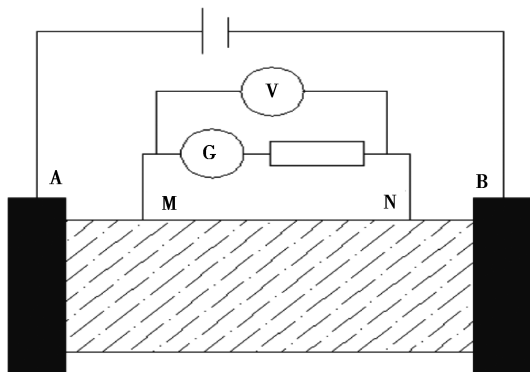


图 1 四级法阻抗测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impedance measurement by four-stage method

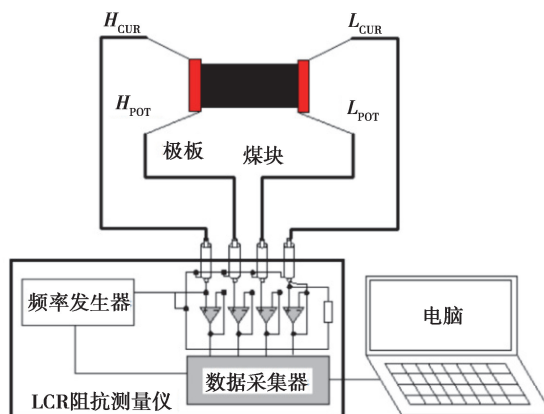


图 2 煤样复电阻率测量系统

Fig. 2 Schematic diagram of complex resistance measurement in laboratory

### 1.2 测试流程

首先将仪器放置在干净隔音的房屋中,开机预热 1 h 以上,连接电脑,选择测量参数为  $R_s$  和  $X$ ,测量频率范围为 0.1~100 kHz,选择测量速度为 SLOW,测量速度越慢,测量准确度越高,选择平均值为 3,即每个点的测量次数为 3 次,取平均值。设置完参数之后要进行测量补偿,分别进行线路补偿、开路补偿和短路补偿,其中外界噪声对补偿效果影响很大,要在静音环境下进行。补偿成功后,将煤柱放置在极板中间,使极板与煤柱接触良好,开始测量,连续测量 3 次,测量结束后保存实验数据并关机。

### 1.3 样品制备

本实验选取了来自焦作矿区的无烟煤和平顶山矿区的肥煤进行分析,煤样的煤质特征如表 1 所示。根据标准试件尺寸要求,将煤加工成 50 mm×100 mm 煤柱,为减少端面效应,上下两端面打磨光滑,要求平整度不大于 0.02%,加工好的样品如图 3 所示。

表 1 两种煤样品的煤质特征

Table 1 Coal characters of two kinds of coal samples

编号	煤种	矿区名称	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$R_{0,max}/\%$
a	肥煤	平顶山八矿	0.84	7.99	32.84	0.94
b	无烟煤	焦作古汉山	3.09	10.95	8.12	3.86

注: $M_{ad}$ 为水分的质量分数,%; $A_d$ 为空气干燥基灰分的质量分数,%;  
 $V_{daf}$ 为干燥无灰基挥发分的质量分数,%; $R_{0,max}$ 为最大镜质组反射率,%。

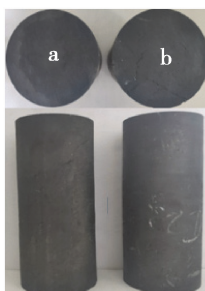


图 3 加工好的煤样图

Fig. 3 Processed coal sample

## 2 实验测量与结果

### 2.1 极板厚度复电阻测量实验

极板选取为导电较好的紫铜,其中极板厚度为 2.00,6.00,0.06 mm,其中 0.06 mm 为铜箔纸。将极板材料分别加工成 60 mm×60 mm 正方形,以至于完全覆盖煤样截面。导电极板实物图如图 4 所示。

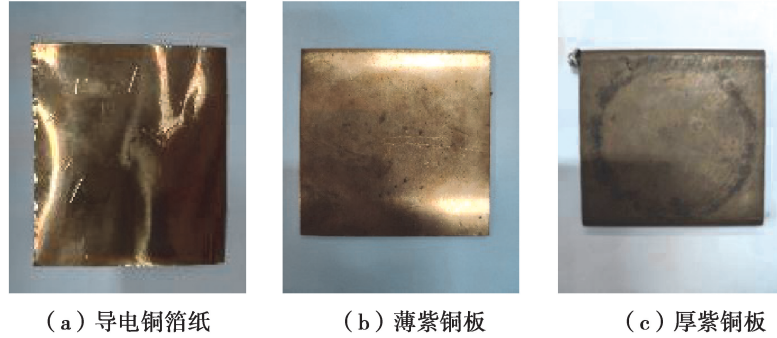


图 4 极板材料实物图

Fig. 4 Plate materials

实验对 3 种厚度的铜极板进行复电阻率实部和虚部测量,测量结果如图 5 所示。在 0.1~10 kHz 以内,3 种材料实部结果相似,皆在  $0 \Omega \cdot \text{m}$  附近,而在 10 kHz 以后,厚极板实部和虚部数值发生明显的频散现象,造成此现象的原因是厚极板随着频率的增高,即电流发生迅速变化时,就会产生电磁辐射现象,导致明显的电磁干扰现象,对实验造成很大的误差,而导电铜纸和薄铜极板的数值以及走势规律相似。为进一步选择,选取实验煤样分别用导电铜纸和薄极板进行复电阻测量。测量结果如图 6 所示,无烟煤测量结果中薄极板的实部和虚部较导电铜纸结果规律性较差,尤其是虚部在频率较低时,出现逐渐下降阶段,与激发极化理论不相符,这是薄极板自身的极化效应以及极板与煤样间无法紧密贴合,留有空隙造成的端面效应共同导致的,属于实验测量误差,而导电铜纸可以与煤样端面进行良好的贴合;肥煤测量结果中导电纸所测的实部和虚部具有明显的频散特征,虚部曲线极值点,而薄电极板测量的虚部没有拐点,不利于进一步的分析。所以综合考虑,选择导电铜纸作为极板材料。

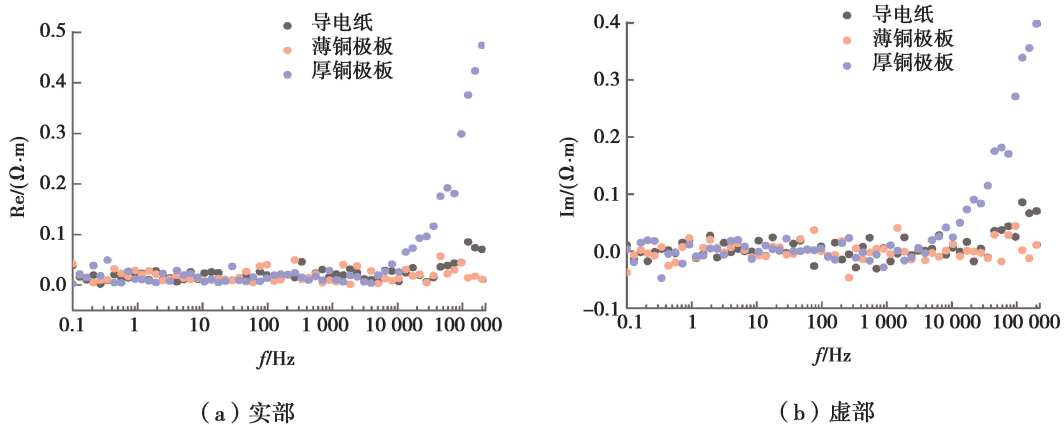


图 5 不同厚度电极板复电阻率频散曲线

Fig. 5 Dispersion curves of complex resistivity of the electrode materials with different thicknesses

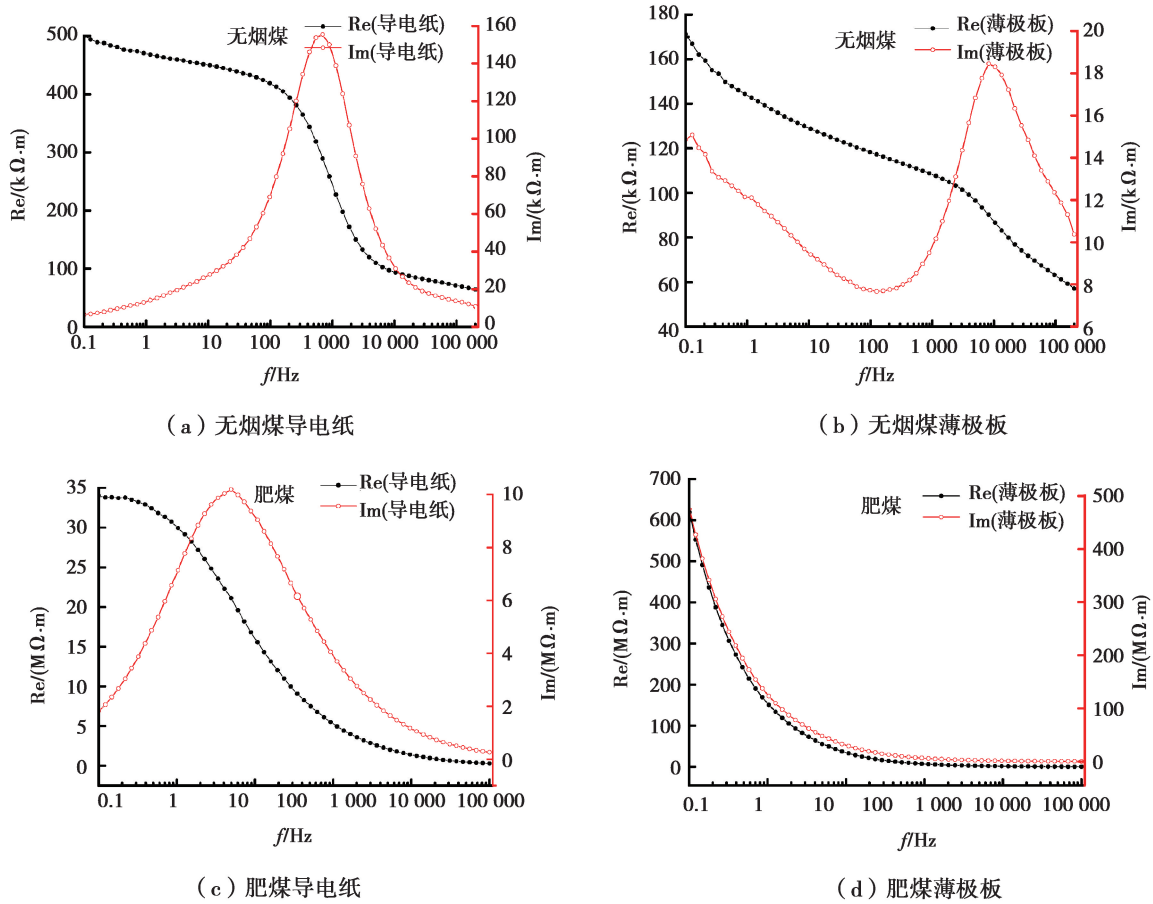


图 6 不同厚度电极板煤样复电阻率频散曲线

Fig. 6 Dispersion curves of complex resistivity with different electrode materials on anthracite coal sample and fat coal sample

### 2.2 极板面积复电阻测量实验

在实验室测量时,通常将极板完全覆盖煤样端面,而现场测量是不可能实现的,所以为了更贴近实际应用情况,研究不同面积的导电纸对复电阻率测量数据的影响,实验采用 5 种 1,2,3,4,5 cm 不同直径的导电铜纸作为电极材料,如图 7 所示,并对无烟煤进行复电阻率测量,进行对比分析。

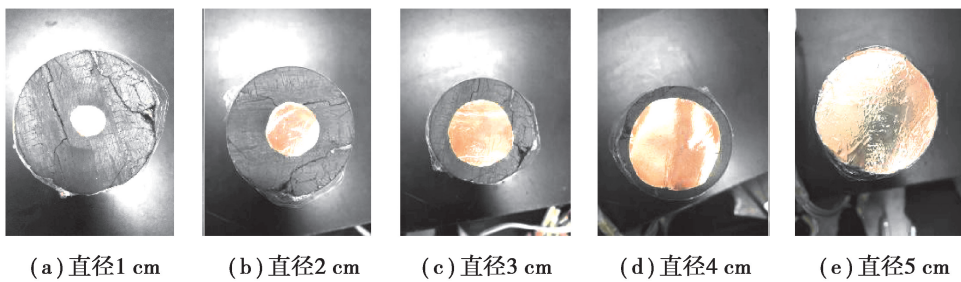


图 7 不同面积的导电纸

Fig. 7 Conductive paper of different areas

测量结果如图 8 所示,随着测量面积的增加,煤样的复电阻率实部和虚部都呈现逐渐减少的趋势,且不同直径的实部拐点和虚部的极值点大致在 1 000 Hz 频率段中。



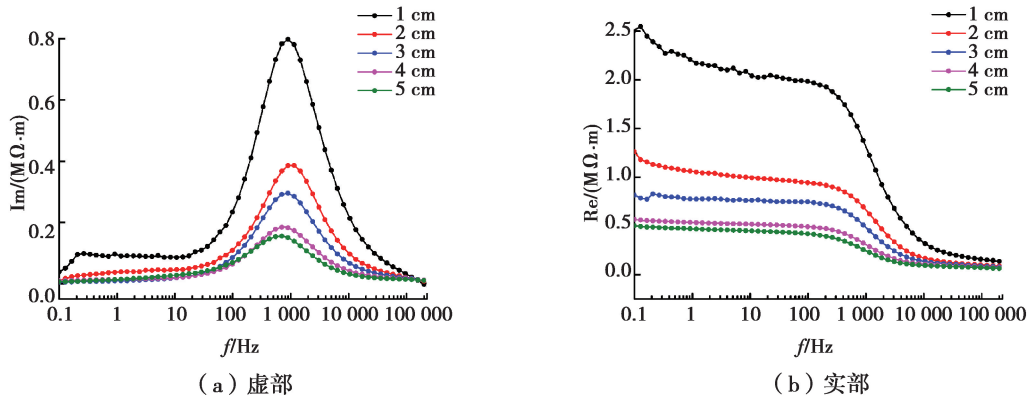


图 8 不同面积导电电极板煤样复电阻率测量

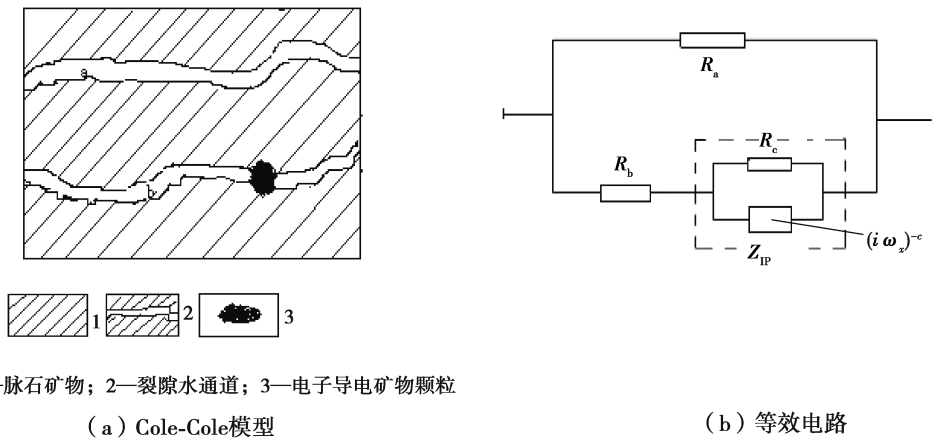
Fig. 8 Measurement of complex resistivity of coal samples with conductive plates of different areas

### 3 分析与讨论

#### 3.1 复电阻率频散机理

由基本电磁理论可知,交变电磁场中存在 2 种电流,一是传导电流,二是位移电流。传导电流是由自由电子或者其他带电粒子的定向运动所产生;而位移电流为极化分子定向排列(介电极化)所致,两者间相位相差  $\pi/2$ 。煤体复电阻率频散特性的微观机理是煤岩孔隙中大量带正电荷的离子游离于溶液中,煤体介质中存在大量带负电荷的成分,且因正负电荷间存在引力,故形成导体-溶液双电层平衡结构,交变电流场引起煤体介质中电荷的分化和转移,在外电流的激励下,正负电荷发生电化学反应开始重新分布,致使孔隙中离子双电层形状发生改变重新达到新的动态平衡,形成激发极化效应。

学者们为描述岩石复电阻率频散特征,依据等效电路法建立了各种模型,如 CPA 模型<sup>[21]</sup>等。目前描述激发极化的模型中应用最广的是 Cole-Cole 模型,该图 9 中(a)是岩(矿)石激发极化单元的 Cole-Cole 模型,图 9(b)是它的等效电路。



1—脉石矿物; 2—裂隙水通道; 3—电子导电矿物颗粒

(a) Cole-Cole模型

(b) 等效电路

图 9 岩(矿)石激发极化单元模型及其 Cole-Cole 模型等效电路

Fig. 9 The element model of rock induced polarization and equivalent circuit of Cole-Cole model

式(1)为 Cole-Cole 模型表达式,

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}, \tag{1}$$

式中: $\rho_0$  为零频电阻率; $m$  为极化率; $\tau$  为时间常数; $c$  为频率相关系数。

在 Cole-Cole 模型表达式(1)中,

$$(i\omega\tau)^c = (\omega\tau)^c e^{i(4n+1)\frac{\pi}{2}c} = (i\omega\tau)^c \left[ \cos(4n+1)\frac{\pi}{2}c + i\sin(4n+1)\frac{\pi}{2}c \right] = R - 1 + iI, \quad (2)$$

式中,

$$R = 1 + (\omega\tau)^c \cos(4n+1)\frac{\pi}{2}c, I = (\omega\tau)^c \sin(4n+1)\frac{\pi}{2}c, \quad (3)$$

或者取主值( $n=0$ )

$$R = 1 + (\omega\tau)^c \cos \frac{\pi c}{2},$$

$$I = (\omega\tau)^c \sin \frac{\pi c}{2},$$

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{R + iI} \right) \right] = \rho_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{R - iI}{R^2 + I^2} \right) \right] = \rho_0 \left[ 1 - m + \frac{mR}{R^2 + I^2} - i \frac{mI}{R^2 + I^2} \right]. \quad (4)$$

由此可写出复电阻率各分量的表达式,实分量:

$$\text{Re}\rho(i\omega) = \rho_0 \left( 1 - m + \frac{mR}{R^2 + I^2} \right) = \rho_0 \frac{1 + (2-m)(\omega\tau)^c \sin \frac{\pi c}{2} + (1-m)(\omega\tau)^{2c}}{1 + 2(\omega\tau)^c \cos \frac{\pi c}{2} + (\omega\tau)^{2c}}; \quad (5)$$

虚分量:

$$\text{Im}\rho(i\omega) = -\rho_0 m \frac{I}{R^2 + I^2} = -\rho_0 m \frac{(\omega\tau)^c \sin \frac{\pi c}{2}}{1 + 2(\omega\tau)^c \cos \frac{\pi c}{2} + (\omega\tau)^{2c}}; \quad (6)$$

幅值:

$$A(\omega) = \{[\text{Re}\rho(i\omega)]^2 + [\text{Im}\rho(i\omega)]^2\}^{\frac{1}{2}} = \rho_0 \left[ \left( 1 - m + \frac{mR}{R^2 + I^2} \right)^2 + \left( \frac{mI}{R^2 + I^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$\rho_0 \left[ \frac{1 + 2(1-m)(\omega\tau)^c \cos \frac{\pi c}{2} + (1-m)^2 (\omega\tau)^{2c}}{1 + 2(\omega\tau)^c \cos \frac{\pi c}{2} + (\omega\tau)^{2c}} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (7)$$

相位:

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}\rho(i\omega)}{\text{Re}\rho(i\omega)} = \arctan \frac{-mI}{(1-m)(R^2 + I^2) + mR} =$$

$$\arctan \frac{-m(\omega\tau)^c \sin \frac{\pi c}{2}}{1 + (2-m)(\omega\tau)^c \cos \frac{\pi c}{2} + (1-m)(\omega\tau)^{2c}}; \quad (8)$$

式中: $\rho_0$ 和 $m$ 是表征导电性和激电效应强弱的参数(强度参数), $\rho_0$ 表示频率为0时的电阻率, $m$ 表示极化率; $c$ 和 $\tau$ 则分别是表征激电谱(频谱和时间谱)陡缓和(沿频率轴或时间轴)位置的参数(谱形态参数和时间参数)。

### 3.2 Cole-Cole 模型拟合和数据分析

无烟煤使用导电铜纸测量时虚部为单极值曲线,使用薄极板测量时虚部为双极值曲线,在之前的研究中<sup>[20]</sup>笔者发现 Cole-Cole 模型对双极值曲线拟合效果较差,这里不再研究无烟煤。运用上述 Cole-Cole 模型推导出各分量公式对肥煤数据(实部电阻率和虚部电阻率)进行拟合。如图 10 所示,拟合得到模型参数如表 2 所示。

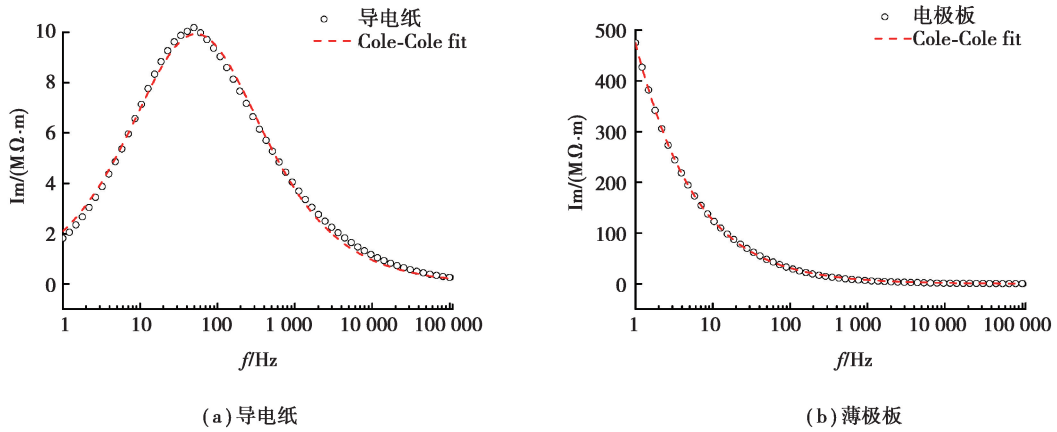


图 10 肥煤煤样复电阻率虚部绝对值 Cole-Cole 模型拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of Cole-Cole model for imaginary absolute value of complex resistivity of fat coal sample

表 2 肥煤煤样复电阻率虚部 Cole-Cole 模型参数

Table 2 Parameters obtained by fitting imaginary data of complex resistivity of fat coal sample with Cole-Cole model

电极材料	$\rho_0 / (\Omega \cdot m)$	$m$	$c$	$\tau$	$R^2$
导电纸	$3.5 \times 10^7$	1.00	0.65	$3.02 \times 10^{-3}$	0.99
电极板	$6.3 \times 10^8$	10.28	0.61	6.68	0.99

从图 9 和表 2 可以看出 Cole-Cole 模型对导电铜纸和薄极板测量的肥煤虚部数值拟合效果都很好,其  $R^2$  达到 0.99。但从拟合参数的数值来看,除  $c$  值变化不大,其余参数都有较大的变化,其中薄极板所测的  $m$  值为 10.28,与  $m$  值的取值范围  $0 \sim 1$  有较大偏差,而导电纸所测的  $m$  值为 1,在  $m$  值取值范围内。所以,通过模型拟合参数也可证明导电纸测量的数据具有较好的效果和可信度,与前文实验结果相印证。

为研究不同接触面积对煤样复电阻率结果的影响,采用 Cole-Cole 模型对实验测量的复电阻率虚部进行拟合,拟合曲线如图 11 所示。

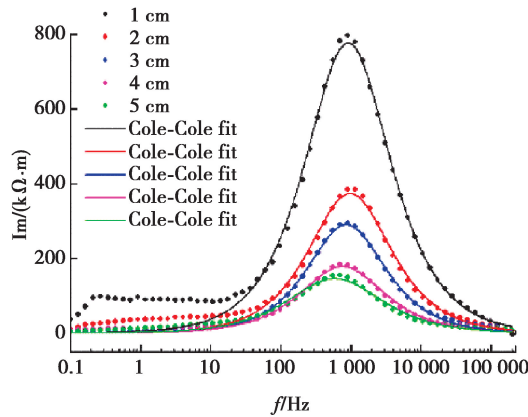


图 11 不同接触面积煤样 Cole-Cole 模型拟合

Fig. 11 Fitting diagram of Cole-Cole model for complex resistivity data of coal samples with different contact areas

Cole-Cole 拟合得到参数如表 3 所示,为了便于分析,将  $\rho_0$ 、 $m$ 、 $c$ 、 $\tau$  随极板直径变化绘制见图 12。从图 11 和表 3 可以看出,Cole-Cole 模型拟合效果较好,随着接触面积的增加,参数  $\rho_0$  呈现逐渐减少的趋势,由公式  $R = \rho L / S$  可知,当煤样长度一定时,电阻率与面积成反比,即与直径的平方成反比。由于煤样的有效导电面积增加,故参数  $\rho_0$  随着接触面积的增加而减小。对于参数  $m$  和  $c$  而言,由图 12 可以看出,变化范围较



小,结合表 3 数据,参数  $m$  在  $0.92 \pm 0.02$  范围内变化,参数  $c$  在  $0.85 \pm 0.05$  范围内变化。对于参数  $\tau$ ,其值随极板直径增加呈现小幅度增加,这是由于  $\tau$  为煤样激发极化的时间常数,是虚部曲线极值点倒数的函数,由图 11 可以看出当极板直径增加时,虚部极值点对应的频点有轻微向左偏移的趋势,即频点降低,对应的参数  $\tau$  值表现为较小幅度增加,在实际测量中可忽略。由于每次测量时所用柱体为同一煤柱(同一条件下),所以不论电极面积如何变化,其仅仅改变参数  $\rho_0$  的值,对于其他 3 个参数变化较小,可以忽略。

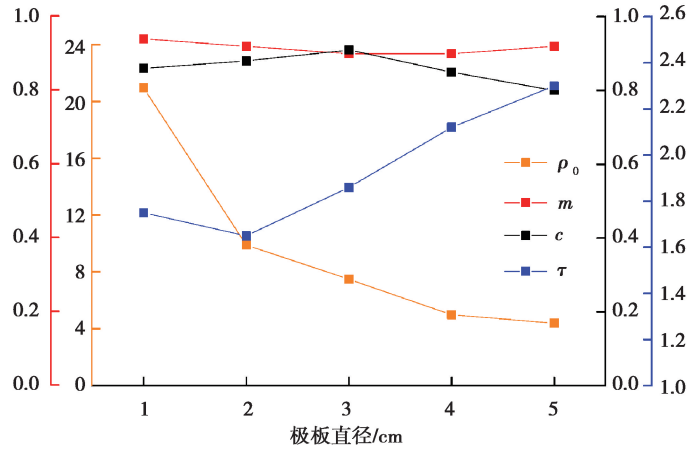


图 12 模型参数随极板直径变化图

Fig. 12 Change of model parameters with varying plate diameters

表 3 不用接触面积无烟煤煤样复电阻率虚部 Cole-Cole 模型参数

Table 3 Parameters of Cole-Cole model of complex resistivity imaginary part of anthracite samples with different contact areas

极板直径/cm	接触面积/cm <sup>2</sup>	$\rho_0 / (\Omega \cdot m)$	$m$	$c$	$\tau$	$R^2$
1	3.14	$2.1 \times 10^6$	0.94	0.86	$1.75 \times 10^{-4}$	0.96
2	12.56	$9.9 \times 10^5$	0.92	0.88	$1.65 \times 10^{-4}$	0.97
3	28.26	$7.5 \times 10^5$	0.90	0.91	$1.86 \times 10^{-4}$	0.99
4	50.24	$5.0 \times 10^5$	0.90	0.85	$2.12 \times 10^{-4}$	0.98
5	78.50	$4.4 \times 10^5$	0.92	0.80	$2.30 \times 10^{-4}$	0.95

## 4 结 论

通过测量 3 种极板的复电性参数,研究极板本身极化的影响,并开展了不同接触面积的煤样复电阻率实验研究,得出结论如下:

1) 极板本身的极化效应和极板与煤样端面贴合程度是影响煤样复电阻测量误差的主要因素,3 种不同厚度的极板中测量结果:厚极板的频散曲线干扰严重,而薄极板谱和导电纸谱彼此接近,更为稳定。对于同一样品,在不同厚度电极板的条件下采集的复电阻率频谱完全不同,厚极板为电极板进行测量会产生误差,不能用于数据解释;薄极板无法与煤样端面紧密贴合,且自身存在极化效应;以导电纸为电极板的测量结果与激发极化现象更为吻合,且经模型参数验证其误差也是最小,即以导电纸为电极板进行煤体复电阻率测量可提供更为可靠的复电阻率频谱。

2) 同一个煤样,极板面积变化仅对复电阻率幅值有较大影响:即随着测量面积的增加,煤样的复电阻率

实部和虚部绝对值都呈现逐渐减少的趋势,且不同直径的实部拐点和虚部的极值点大致在 1 000 Hz 频率段中。依据复电阻率频散机理和模型参数对比可知,参数  $\rho_0$  随着煤样的有效导电面积增加而减小,极板面积变化对参数  $m$ 、 $c$ 、 $\tau$  的影响较小,即对煤样激发极化的影响较小,在实际测量中可忽略。

相关研究为提高实验室复电阻率测量精度提供依据,为进一步复电阻率法的现场应用打下了基础。

#### 参考文献:

- [1] Vinegar H J, Waxman M H, Best M H, et al. Induced polarization logging: borehole modeling, tool design and field tests [C]// SPWLA 26th Annual Logging Symposium, 17-20 June, Dallas, Texas. Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, 1985: 62.
- [2] 何继善, 鲍光淑. 频率域激发极化法的观测系统[J]. 中南矿冶学院学报, 1986, 17(4): 1-9.  
He J S, Bao G S. On induced polarization surveying system[J]. Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy, 1986, 17(4): 1-9. (in Chinese)
- [3] Chongo M, Christiansen A V, Fiandaca G, et al. Mapping localised freshwater anomalies in the brackish paleo-lake sediments of the Machile-Zambezi Basin with transient electromagnetic sounding, geoelectrical imaging and induced polarisation[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 123: 81-92.
- [4] Pelton W H, Ward S H, Hallof P G, et al. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP[J]. Geophysics, 1978, 43(3): 588-609.
- [5] 罗延钟, 吴之训. 谱激电法中频率相关系数的应用[J]. 地球物理学报, 1992, 35(4): 490-500.  
Luo Y Z, Wu Z X. The application of frequency dependent factor in spectral induced polarization method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1992, 35(4): 490-500. (in Chinese)
- [6] 柯式镇, 冯启宁, 何亿成, 等. 电极法复电阻率测井研究[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 89-92.  
Ke S Z, Feng Q N, He Y C, et al. Study on complex resistivity well logging with electrode antenna[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 89-92. (in Chinese)
- [7] 柯式镇. 井壁电成像测井全三维数值模拟与裂缝评价模型[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(S1): 150-153.  
Ke S Z. 3D numerical simulation and fracture evaluation model of borehole electrical Imaging logging[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(S1): 150-153. (in Chinese)
- [8] 肖占山, 曾志国, 朱世和, 等. 基于岩石电性参数频散特性评价润湿性的实验方法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1326-1332.  
Xiao Z S, Zeng Z G, Zhu S H, et al. An experimental study of wettability evaluation based on frequency dispersion property of rock electric parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1326-1332. (in Chinese)
- [9] Tong M S, Tao H G. Permeability estimating from complex resistivity measurement of shaly sand reservoir [J]. Geophysical Journal International, 2008, 173(2): 733-739.
- [10] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
He J S. Dual frequency IP method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [11] Deng Y P, Shi X Q, Revil A, et al. Complex conductivity of oil-contaminated clayey soils[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 930-942.
- [12] Orozco A F, Velimirovic M, Tosco T, et al. Monitoring the injection of microscale zerovalent iron particles for groundwater remediation by means of complex electrical conductivity imaging[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(9): 5593-5600.
- [13] Mellage A, Smeaton C M, Furman A, et al. Linking spectral induced polarization (SIP) and subsurface microbial processes: results from sand column incubation experiments[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 2081-2090.
- [14] Volkmann J, Klitzsch N. Wideband impedance spectroscopy from 1 mHz to 10 MHz by combination of four- and two-

- electrode methods[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 114:191-201.
- [15] Abdulsamad F, Florsch N, Schmutz M, et al. Assessing the high frequency behavior of non-polarizable electrodes for spectral induced polarization measurements[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 135: 449-455.
- [16] 贾将, 柯式镇, 张冰, 等. 岩心激发极化实验系统研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 908-914.  
Jia J, Ke S Z, Zhang B, et al. Research on core induced polarization experimental system[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2019, 50(4): 908-914. (in Chinese)
- [17] 魏光华, 赵学亮, 李康, 等. 基于双极性电压激励信号的四电极电导率测量仪的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(5): 34-37, 49.  
Wei G H, Zhao X L, Li K, et al. Design of four-electrode conductivity instrument based on bipolar voltage excitation[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(5): 34-37, 49. (in Chinese)
- [18] 杨迪. 天然岩矿石复电阻率测量及频谱曲线特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.  
Yang D. Research on complex resistivity measurement and frequency spectrum curve of nature rock[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese)
- [19] Khajehnouri Y, Chouteau M, Rivard P, et al. Measuring electrical properties of mortar and concrete samples using the spectral induced polarization method: laboratory set-up[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210: 1-12.
- [20] Lei D J, Zhao C G, Zhang Y G, et al. Experimental study on characteristics of water containing coal complex resistivity dispersion[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 56: 328-333.
- [21] 杨振威, 许江涛, 赵秋芳, 等. 复电阻率法(CR)发展现状与评述[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(2): 899-904.  
Yang Z W, Xu J T, Zhao Q F, et al. Current situation and review of Complex Resistivity[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(2): 899-904. (in Chinese)

(编辑 郑洁)