



## 不同粒度构造煤的视电阻率特征

刘世奇 高德燚 桑树勋 王鹤

### 引用本文：

刘世奇, 高德燚, 桑树勋, 等. 不同粒度构造煤的视电阻率特征[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 162–169.  
LIU Shiqi, GAO Deyi, SANG Shuxun. Characteristics of apparent resistivity of coals with different particle sizes[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 162–169.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0340>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 破碎煤体点载荷强度测试及单轴抗压强度预测分析

Point load strength test of fragile coal samples and predictive analysis of uniaxial compressive strength  
煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/22d036c8-55d7-4069-8acf-e948db9cbcc9>

##### 煤体单轴抗压强度统计与分级研究

Study on statistics and classification of uniaxial compressive strength of coal  
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 64–70 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.007>

##### 水力压裂煤体复电阻率频散特征试验研究

Experimental study on dispersion characteristics of complex resistivity of hydraulic fracturing coal  
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 198–202 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c86f8baa-c422-4484-9f10-270fea2ef474>

##### 煤岩抗压强度和弹性模量对不同煤阶区煤层气开发的影响

Variation law of compressive strength and Young's modulus of coal rock with coal rank and their significance for CBM development  
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 245–253 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0ea11173-4a91-4689-bbeb-50f043fa997a>

##### 不同类型煤颗粒侧限压缩变形破碎特性试验研究

Experimental study on confined compression deformation and breakage characteristics for different types of coal particles  
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 163–170 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/749fd2e4-3095-4726-b0b2-a89c044f6413>

##### 不同加载条件下含瓦斯煤岩强度极限邻域范围研究

Study on strength limit neighborhood range of gas-bearing coal rock under different loading conditions  
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 114–125 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1034>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 地球科学与测绘



移动扫码阅读

刘世奇,高德燚,桑树勋,等.不同粒度构造煤的视电阻率特征[J].煤炭科学技术,2022,50(12):162-169.  
LIU Shiqi, GAO Deyi, SANG Shuxun, et al. Characteristics of apparent resistivity of coals with different particle sizes[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 162-169.

# 不同粒度构造煤的视电阻率特征

刘世奇<sup>1,2</sup>,高德燚<sup>3,4</sup>,桑树勋<sup>1,2</sup>,王鹤<sup>3,4</sup>

(1.中国矿业大学 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室,江苏徐州 221008;2.中国矿业大学 碳中和研究院,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 221116;4.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏徐州 221116)

**摘要:**应力释放煤层气开发理论技术是构造煤煤层气开发的新技术方向,构造煤视电阻率的研究可以为应力释放煤层气开发提供构造煤识别的技术支撑。开展了单轴加载条件下,不同粒度构造煤的视电阻率与应力-应变监测试验,探讨了应力-应变过程中构造煤视电阻率变化规律与响应机制。结果表明,轴向载荷大于单轴抗压强度后,随载荷增大构造煤视电阻率呈负指数降低,至轴向载荷 $\geq 10$  MPa时,视电阻率对载荷的敏感性降低;随粒度减小,构造煤视电阻率呈降低趋势,相同载荷下,粒度越小构造煤视电阻率对载荷的响应越敏感。受煤颗粒堆积方式和胶结类型影响,5~200目(4.000~0.075 mm)的构造煤具特殊性,其视电阻率整体较小、对载荷相对敏感。构造煤视电阻率随载荷的变化过程可划分为4个阶段。压密阶段,构造煤的视电阻率降幅取决于煤颗粒堆积方式和胶结类型;弹性阶段,粒度决定了构造煤视电阻率降幅,粒度越大,构造煤原有大孔和微裂隙保留越好,可压缩性越强,视电阻率降幅越高;扩容阶段,径向变形和微破裂导致构造煤视电阻率上升,构造煤力学强度则决定了视电阻率变化特征,随粒度减小,构造煤胶结强度和单轴抗压强度增大,视电阻率增幅降低;持续弹性阶段,破碎、压实作用使构造煤粒度分布更均匀、堆积更紧密,增强了电子导电性能,视电阻率降低。

**关键词:**构造煤;轴向载荷;胶结类型;单轴抗压强度;弹性极限;糜棱煤;视电阻率

**中图分类号:**TE37      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2022)12-0162-08

## Characteristics of apparent resistivity of coals with different particle sizes

LIU Shiqi<sup>1,2</sup>, GAO Deyi<sup>3,4</sup>, SANG Shuxun<sup>1,2</sup>, WANG He<sup>3,4</sup>

(1.Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;  
2.Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3.Key Laboratory of CBM Resources and Reservoir Strata Process State Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4.School of Mineral Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The theory and technology of stress released CBM development is a new theory and technology for CBM development of tectonically deformed coals. The research on the apparent resistivity of tectonically deformed coal can provide technical support for the identification of tectonically deformed coal for the stress release applied extraction of CBM. In this paper, the apparent resistivity and stress-strain monitoring experiments of tectonically deformed coals with different particle sizes were carried out under uniaxial loading, and the change law and response mechanism of the apparent resistivity in the stress-strain process were discussed. The results show that when the axial load is greater than the uniaxial compressive strength, the apparent resistivity of tectonically deformed coal decreases negatively exponentially with the increase of the axial load. When the axial load  $\geq 10$  MPa, the sensitivity of the apparent resistivity to the load decreases. With the particle size decreasing, the apparent resistivity of tectonically deformed coal decreases. Under the same axial load, the smaller the particle size is, the more sensitive the apparent resistivity of tectonically deformed coal is to the axial load. Affected by the ac-

cumulation mode and cementation type of coal particles, the structural coal of 5~200 mesh(4.000~0.075 mm) is special, with small apparent resistivity and relatively sensitive to load. The changes of apparent resistivity of tectonically deformed coal with axial load can be divided into four stages. In the compaction stage, the apparent resistivity decline of tectonically deformed coal depends on the accumulation mode and cementation type of coal particles. In elastic stage, particle size determines the apparent resistivity decline of tectonically deformed coal. The larger the grain size is, the better the original macropores and microcracks of structural coal remain, the stronger the compressibility is, and the higher the apparent resistivity reduction is. In the dilatation stage, radial deformation and micro-fracturing lead to the increase of apparent resistivity of tectonically deformed coal, while the mechanical strength of tectonically deformed coal determines the change characteristics of apparent resistivity. With the decrease of particle size, the cementation strength and uniaxial compressive strength of tectonically deformed coal increase, while the increase of apparent resistivity decreases. In the continuous elastic stage, crushing and compaction make the particle size distribution of tectonically deformed coal more uniform, and the stacking more compact, which enhances the electronic conductivity and decreases the apparent resistivity.

**Key words:** deformed coals; axial load; cementation type; uniaxial compressive strength; elastic limit; mylonitized coal; apparent resistivity

## 0 引言

我国构造煤煤层气资源丰富<sup>[1]</sup>。构造煤具有高应力、低渗透、松软易突出的特性,成井困难、井孔稳定性差、难以有效造缝和支撑,造成构造煤煤层气勘探开发成为当前原位煤层气生产的禁区<sup>[2-5]</sup>。国内外学者在构造煤煤层气开发理论与技术领域开展了大量探索,例如美国提出的直井洞穴完井工程理论技术<sup>[6]</sup>,我国研发的碎软煤层跨层压裂技术<sup>[7]</sup>、顶板岩层水平井分段压裂技术<sup>[8]</sup>等,取得了一定效果,尚无法满足构造煤煤层气高效规模化生产的需求。目前煤层气开发过程中,往往避开构造煤发育地区,遇构造煤分层时一般采取特殊技术手段或防护措施,避免构造煤对煤层气开发的影响。桑树勋等<sup>[2]</sup>充分利用典型构造煤松软低渗高应力和应力释放体积急剧膨胀特性,发展了水平井造洞穴应力释放解吸采气理论,并创研基于该理论基础的构造煤原位煤层气高效勘探开发技术。不同于疏水降压煤层气开发,应力释放煤层气开发适应于构造变形相对强烈的碎粒煤、片状煤、糜棱煤等不适用于采用水力压裂技术进行改造的典型构造煤。应力释放煤层气开发首先要求对构造煤储层或构造煤分层进行有效识别,获得井位部署、水平井造穴、应力释放等关键工艺实施所需的煤层变形程度及煤体结构等地质条件。

与原生结构煤相比,构造煤内部结构发生了巨大变化,造成原生结构煤和构造煤在视电阻率响应上存在较大的差异,为从导电性方面识别不同的煤体结构提供了可能性<sup>[9-10]</sup>。国内外学者开展了大量构造煤电性参数的研究,认为构造煤以电子导电为主。受煤岩物性特征、储层条件、测试条件等影响,构造煤视电阻率测试数值变化范围较大<sup>[9-11]</sup>。煤岩

物性特征方面,同一变质程度、同一煤体结构的煤视电阻率比较接近<sup>[11-13]</sup>;随煤变质程度增高,视电阻率减小;同一变质程度的煤视电阻率随破坏程度的增高而降低;除无烟煤外,煤中灰分含量越高,离子导电作用越强,视电阻率越低,而无烟煤视电阻率则随灰分含量增加而增大<sup>[14]</sup>。储层条件方面,煤的视电阻率与所受应力、吸附甲烷压力、甲烷含量呈指数或线性关系<sup>[15]</sup>;随温度与湿度的上升视电阻率呈下降趋势<sup>[16]</sup>。另外,测试频率<sup>[11,17]</sup>、测试方向<sup>[9,18]</sup>和电场强度<sup>[19-20]</sup>等测试条件对视电阻率同样具有影响。煤的视电阻率与测试频率成负相关<sup>[11,17]</sup>;垂直于层面方向煤的视电阻率较大,而平行于层面方向较小<sup>[9,18]</sup>。以上对于构造煤电性参数的研究,较系统阐述了构造煤与原生结构煤之间视电阻率的差异及其影响机制,然而对于不同破碎程度构造煤受载条件下的电性参数研究较少涉及。

以淮南矿区构造煤为例,开展受载条件下,不同破碎程度构造煤视电阻率变化规律的研究,对不同破坏程度构造煤识别提供试验支撑。

## 1 视电阻率监测试验

### 1.1 试验样品

研究选取淮南矿业(集团)有限责任公司构造煤样品开展研究。样品采自张集煤矿11-2煤层。根据矿井地质报告和回采地质说明书,张集煤矿为煤与瓦斯突出矿井,11-2煤层厚度0~4.79 m,平均2.64 m,构造复杂,断层发育,受到断层及层间滑动构造影响,煤层较松软、顶板较破碎,煤体呈块状、碎块状、鳞片状,局部呈粉末状,为典型的构造煤发育煤层,具有代表性。所采集样品为气煤,呈粉末状~块状,为糜棱煤,以亮煤为主,宏观煤岩类型属半亮煤。所采集样品的煤岩煤质特征见表1。

表1 构造煤样品煤岩煤质参数  
Table 1 Properties of tectonically deformed coal sample

工业分析/%			煤岩显微组分体积分数/%		
$M_{ad}$	$A_d$	$V_{daf}$	镜质组	惰性组	壳质组
1.68	24.72	38.93	54.77	24.51	10.50
10.22					

注:下标“ad”为空气干燥基;下标“d”为干燥基;下标“daf”为干燥无灰基。

## 1.2 型煤制备

为测试不同粒度构造煤的视电阻率特征,本次研究选择5~200目(4.000~0.075 mm)构造煤样品开展研究。由于5~10目(4.0~1.7 mm)、10~18目(1.7~0.88 mm)、18~35目(0.88~0.425 mm)的煤颗粒在设计成型压力下难以压制成型,本次研究按照所采集样品的粒度分布特征,分别配比5~200目(4.000~0.075 mm)、10~200目(1.7~0.075 mm)、18~200目(0.88~0.075 mm)、35~200目(0.425~0.075 mm)、45~200目(0.325~0.075 mm)、60~200目(0.25~0.075 mm)、80~200目(0.18~0.075 mm)、100~200目(0.15~0.075 mm)的混合粒度样品制备试验所需型煤。

首先,挑选出样品中夹矸和大煤块,采用逐级筛分法、按照多次粒度测量取平均值获得构造煤粒度分布特征(质量占比)(图1)。结果显示,不同粒度构造煤的质量占比(5~10目、10~18目、18~35目、35~45目、45~60目、60~80目、80~100目、100~200目和>200目)分别为35.47%、27.57%、18.61%、3.65%、7.21%、2.51%、1.95%、1.83%、1.20%(图1)。

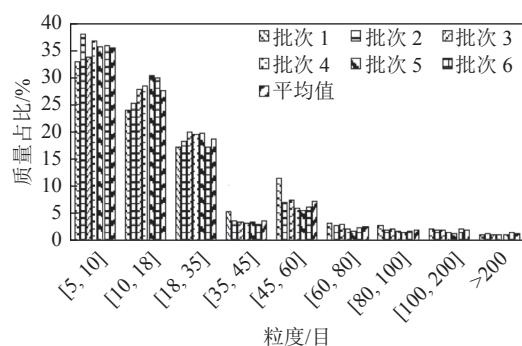


图1 构造煤样品的粒度分布特征

Fig.1 Particle size distribution of tectonically deformed coal sample

其次,将配比的混合粒度构造煤样品充分混合后放入型煤模具中,考虑采样地点的平均最大主应力约为14.5 MPa,利用液压伺服仪以15 MPa的成型压力压制模具中样品,成型时间2 h。压制完成后卸掉载荷,缓慢打开模具,取出型煤样品并放入真空干燥箱中,50 °C 真空干燥,每隔6 h称重一次,待前后

两次质量变化小于2%停止干燥。则所制备的样品均为直径50 mm、长度约100 mm的干燥基标准型煤煤柱,煤柱两端面采用细砂纸磨平,以确保受力均匀。

## 1.3 构造煤视电阻率监测试验

所制备的型煤样品按照对角线设置4条测线,每条测线安装8道电极,每道电极间隔12.5 mm(图2)。试验过程中,将安装好电极的试样放入专用模具中,由岩石压入硬度试验机以0.5 mm/min的恒定位移速度对试样进行加载,加载试验力0~40 kN(0~20 MPa),此时试样径向变形受限,只存在轴向加载方向的压缩变形。加载的同时采用32道的NPEI-DHZI-1网络并行电法仪对试样视电阻率进行连续监测。试验中,单轴加载试验主要用于模拟钻井造洞穴诱导的构造煤有效地应力与煤体变形的关系。应力释放煤层气开发中,采用e-p曲线(孔隙比-有效地应力)表征构造煤应力释放与煤体膨胀的关系<sup>[2]</sup>。e-p曲线与构造煤岩石力学特征有关,与试验力加载或卸载方式无关,常采用单轴加载试验获得<sup>[2]</sup>。

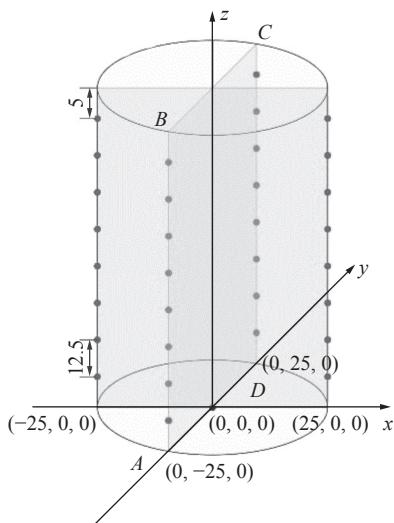


图2 型煤样品电极布置方式

Fig.2 Electrode arrangement of shaped coal samples

## 2 单轴加载条件下构造煤视电阻率特征

### 2.1 不同粒度构造煤样品的视电阻率

试验结果显示,型煤样品视电阻率主要分布在2 000~15 000 Ω·m,与其他学者获得的煤岩体视电阻

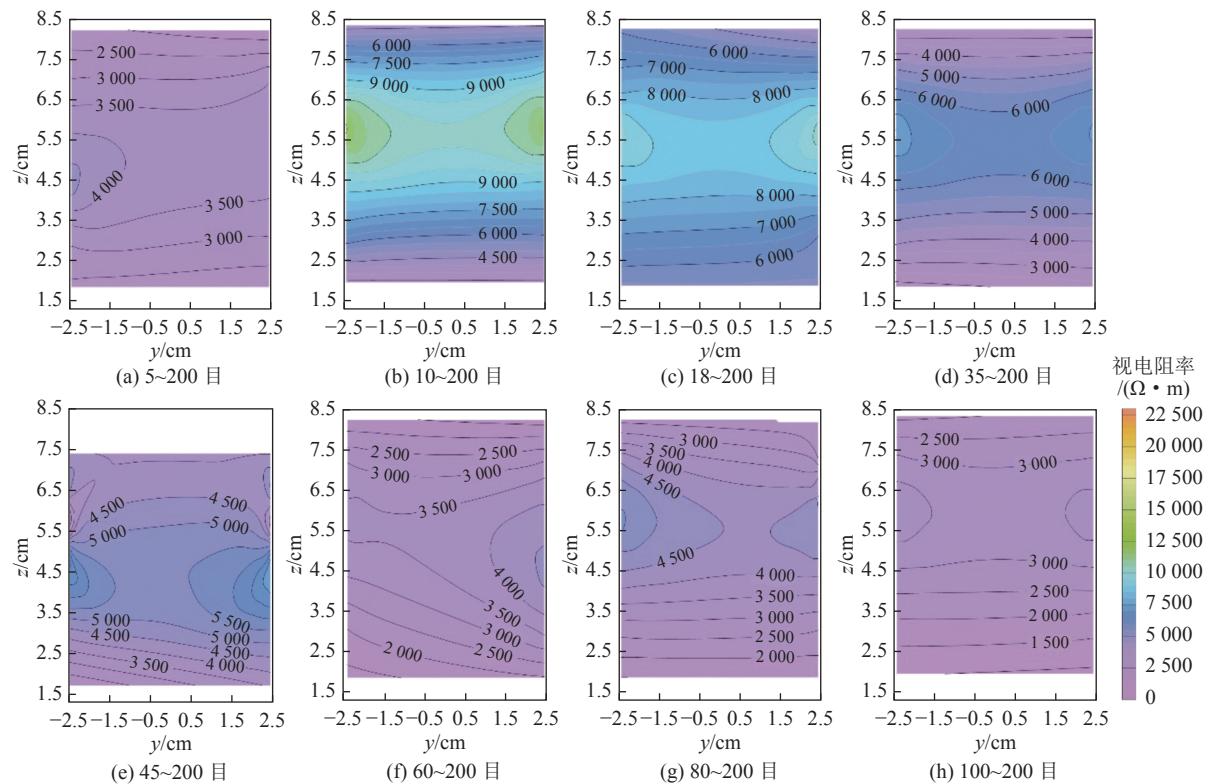


图3 未加载条件下型煤样品视电阻率

Fig.3 Apparent resistivity of shaped coal samples under unloaded condition

率基本一致<sup>[19, 21]</sup>。未加载条件下, 随粒度减小, 10~200 目型煤样品至 100~200 目型煤样品视电阻率呈降低趋势(图 3), 且视电阻率与视密度呈显著的正相关关系(图 4)。型煤样品轴向上视电阻率分布不均匀, 轴向中心区域为视电阻率的高值区, 靠近样品两端面的区域视电阻率相对较低(图 3)。型煤样品压制过程中, 轴向载荷传递时有一定损耗, 造成样品轴向不同位置压实程度不同, 即靠近样品两端面的区域压实程度较高, 靠近轴向中心区域压实程度低。反映在视电阻率中即压实程度越高, 煤颗粒堆积越致密, 视电阻率越小, 反之则视电阻率越高。但随粒度减小, 型煤样品均一性逐渐增强, 视电阻率高值区逐渐淡化(图 3)。经过重复试验, 排除样品制备和试

验过程的影响后发现, 5~200 目型煤样品具有特殊性, 即未加载情况下, 视电阻率整体小于 10~200 目型煤样品至 100~200 目型煤样品, 且均一性较好(图 3)。

## 2.2 构造煤视电阻率随轴向载荷的变化

由于电极和导线具有一定的厚度, 安装电极后, 型煤样品侧面与模具内壁没有完全贴合, 当轴向载荷达到其弹性极限(0.15~1.77 MPa)时, 型煤样品出现小幅径向变形和微破裂, 直至样品侧面与模具内壁完全贴合。因此, 轴向载荷大于弹性极限后, 随载荷增大, 型煤样品的视电阻率略有上升, 表现为轴向中心区域, 特别是靠近样品侧面处视电阻率升高; 同时, 随粒度减小, 视电阻率增幅越低(图 5)。轴向载荷>2.5 MPa 之后, 随载荷增大, 型煤样品的视电阻率均呈降低趋势, 二者呈负指数关系(图 6), 且视电阻率的均一性均大幅提高(图 5)。相同载荷下, 10~200 目型煤样品至 100~200 目型煤样品, 粒度越小则均一性越高(图 5), 视电阻率相对变化值(式 1<sup>[21]</sup>)也越小(负数), 表明视电阻率对轴向载荷的响应越敏感(图 6)。试验结果显示, 轴向载荷>2.5 MPa 之后, 型煤样品的视电阻率相对变化值主要介于-30%~0, 同样与其他学者获得的结果一致<sup>[21]</sup>。且以粒度 45 目、轴向载荷 10 MPa 为分界线, 煤颗粒粒度小

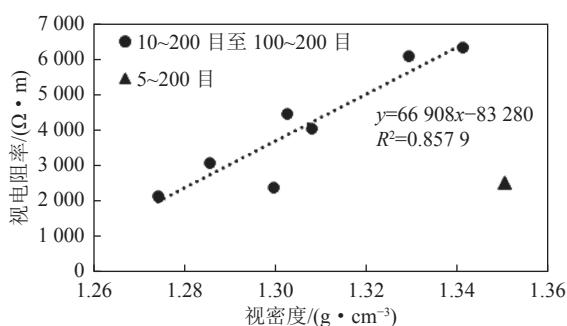


图4 型煤样品视电阻率与视密度的关系

Fig.4 Relationship between apparent resistivity and apparent density of shaped coal samples

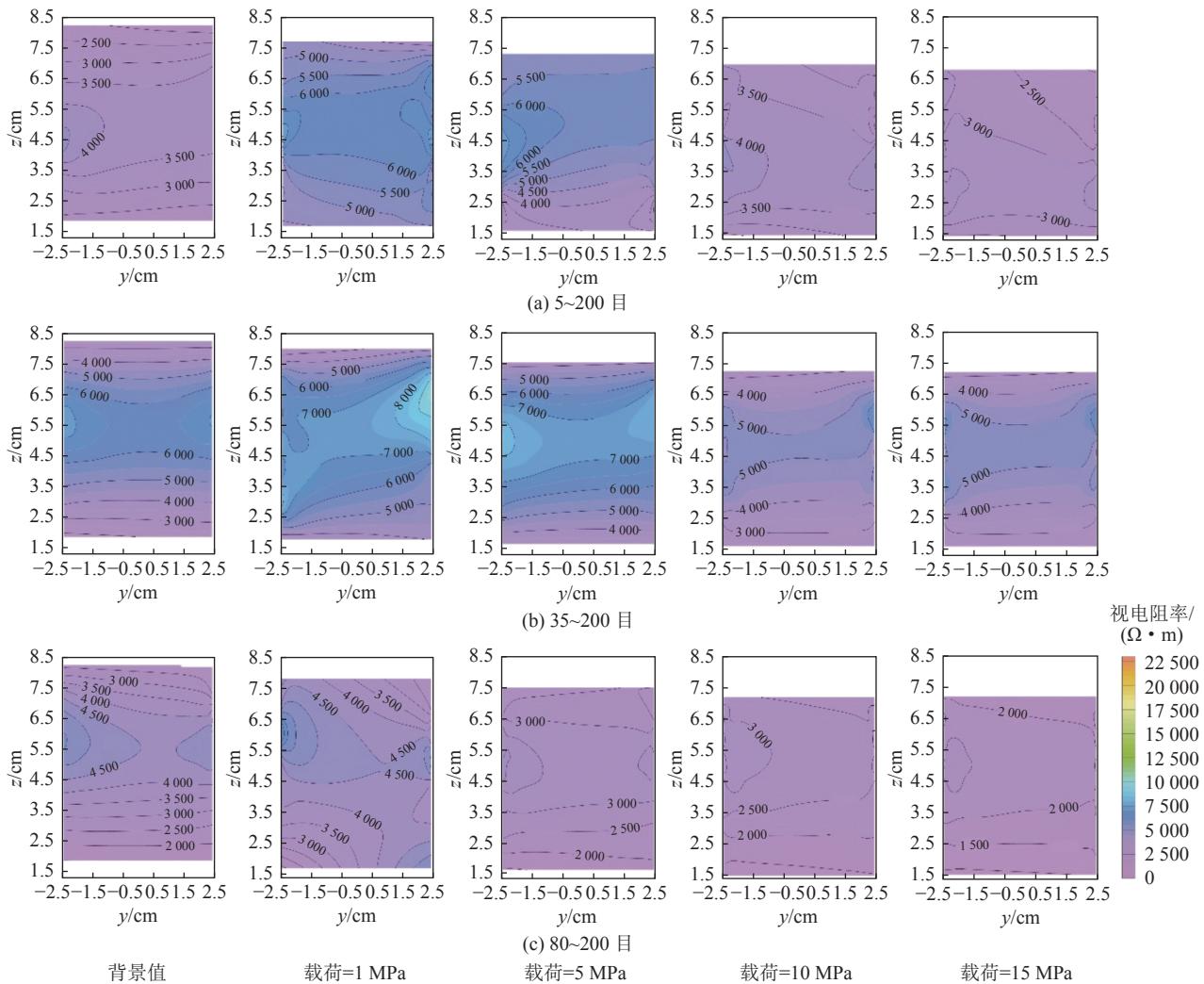


图5 不同载荷下型煤样品视电阻率

Fig.5 Apparent resistivity of shaped coal samples under different loads

45目(45~200目型煤样品至100~200目型煤样品)的型煤样品视电阻率的相对变化值明显小于粒度大于45目(5~200目型煤样品至35~200目型煤样品)的型煤样品;轴向载荷<10 MPa时,视电阻率相对变化值降幅明显,至轴向载荷 $\geq 10$  MPa后,降幅减缓(图6)。

同样经过重复试验发现,相同载荷下,5~200目的型煤样品视电阻率相对变化值与45~200目样品相当,说明其视电阻率对载荷相对敏感。

$$\Delta\rho_{RP} = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\Delta\rho_{RP}$  为视电阻率相对变化值;  $\rho_i$  为载荷为  $i$  时的视电阻率值;  $\rho_0$  为未加载时的视电阻率值。

### 3 不同粒度构造煤视电阻率响应机制

根据构造煤视电阻率变化特征和应力-应变特征,可将径向变形受限条件下构造煤视电阻率随载荷的

变化过程划分为压密阶段A、弹性阶段B、扩容阶段C和持续弹性阶段D四个阶段(图7)。由于本次研究中型煤样品径向变形受限,因此未出现煤岩体全应力-应变过程中的破坏阶段<sup>[22]</sup>。

#### 3.1 压密阶段

压密阶段(A),随轴向载荷增加,型煤样品煤颗粒之间的“空隙”被压缩,煤颗粒之间接触更紧密,形成更有利的导电通道,视电阻率降低。由于样品制备过程中经过15 MPa成型压力的压制,加之试验过程中样品并非完全的径向变形受限,压密阶段持续较短,轴向载荷0.05~0.36 MPa时结束(表2)。随样品粒度减小,压密阶段结束时的轴向载荷显著增大,并在10~200目和60~200目型煤样品出现小幅跃迁(图7、表2),说明随粒度减小型煤样品的可压缩性增强。压密阶段,不同粒度构造煤样品的可压缩性和视电阻率降幅与煤颗粒的堆积方式和胶结类型有关。

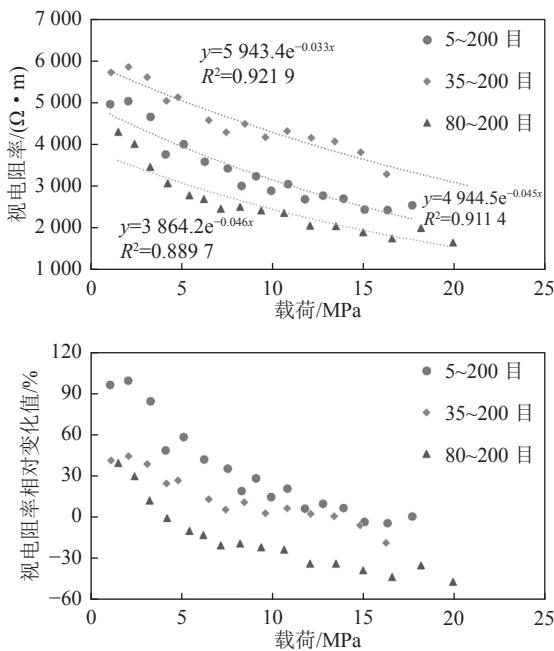


图 6 型煤样品平均视电阻率、视电阻率相对变化值与视密度的关系

Fig.6 Relationships between average apparent resistivity, relative changes of apparent resistivity of shaped coal samples, and axial loads

5~200 目的型煤样品中 5~18 目的煤颗粒质量占比达 63.04% (图 1), 可看作大粒度煤颗粒的孔隙胶结。其中, 5~18 目的煤颗粒为胶结颗粒, 颗粒之间接触相对紧密, 18~200 目的煤颗粒以胶结物的形式充填于 5~18 目的煤颗粒之间的“空隙” (图 8)。由于胶结颗粒之间的“空隙”被细煤粉充分充填, 未加载情况下, 5~200 目的型煤样品具有相对较低的视电阻率和较好的均一性。同时, 煤颗粒之间接触紧密, 可压缩性相对较低, 轴向载荷 0.05 MPa 左右即进入第二阶段 (表 2)。

10~200 目型煤样品至 45~200 目的型煤样品中, 煤颗粒之间粒度差异明显, 而含量差距不显著, 为不等粒结构。粒度较小的煤颗粒以胶结物的形式分布在较大煤颗粒周围, 形成基质胶结 (图 8)。由于煤颗粒堆积不均匀, 型煤样品整体胶结强度不高, 未加载

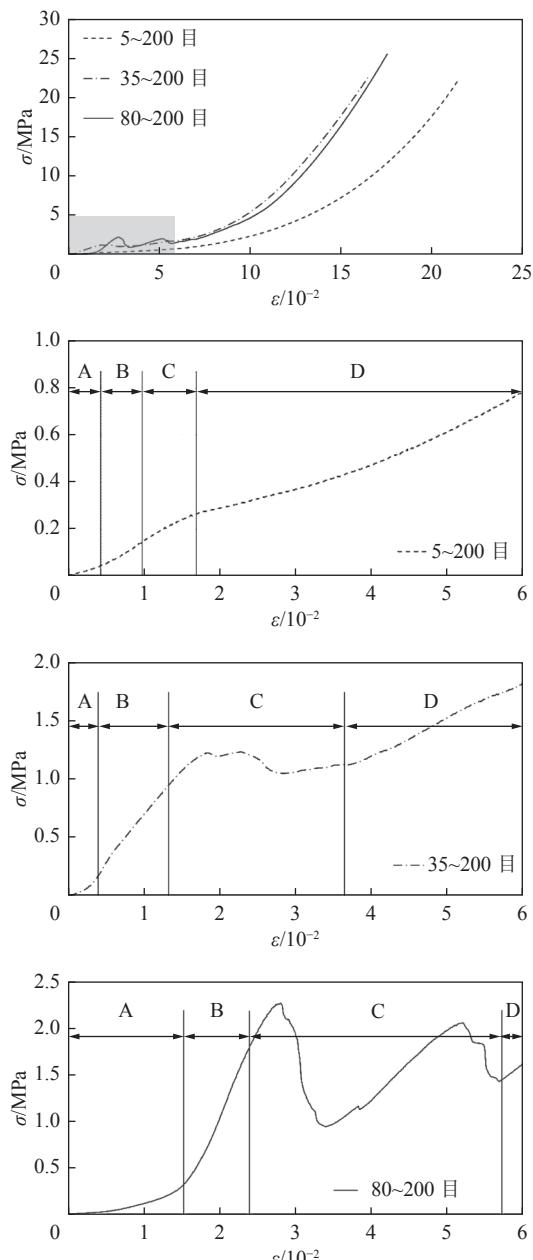


图 7 视电阻率检测试验中型煤样品的应力-应变 ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) 曲线

Fig.7 Stress-strain ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) curves of shaped coal samples from apparent resistivity monitoring experiment

情况下, 10~200 目至 45~200 目的型煤样品具有相对较高的视电阻率, 均一性相对较差。由于煤颗粒堆

表 2 型煤样品主要物理和力学参数

Table 2 The key physical and mechanical parameters of shaped coal samples

粒度/目	视密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%	弹性模量/MPa	压密阶段结束载荷/MPa	弹性极限/MPa	单轴抗压强度/MPa
5~200	1.3501	16.14	311.50	0.05	0.15	0.27
10~200	1.3410	16.71	438.70	0.13	0.29	0.59
18~200	1.3293	17.44	551.18	0.16	0.73	0.93
35~200	1.3079	18.77	762.59	0.18	0.94	1.22
45~200	1.3026	19.09	857.75	0.23	1.02	1.53
60~200	1.2997	19.27	598.11	0.31	1.03	1.56
80~200	1.2856	20.15	958.67	0.33	1.77	2.25
100~200	1.2742	20.85	1298.44	0.36	1.59	2.08

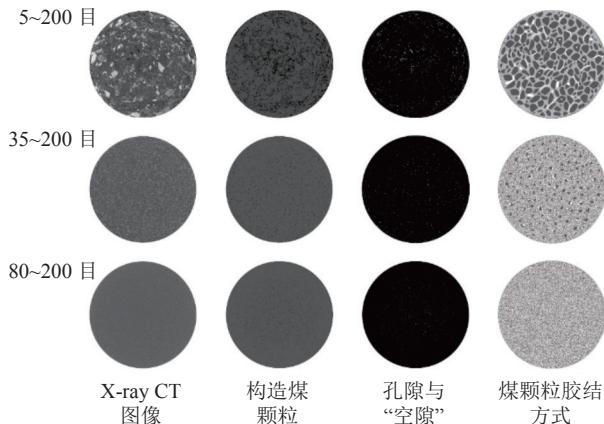


图 8 型煤样品 X-ray CT 扫描图像与胶结类型  
Fig.8 X-ray CT images and cementation types of shaped coal samples

积不均匀,未形成紧密充填,型煤样品相对松散,可压缩性相对较高,0.13~0.23 MPa 进入第二阶段(表 2)。

60~200 目至 100~200 目型煤样品中,煤颗粒之间粒度和含量差异进一步缩小,可看作等粒结构。这种等粒结构堆积相对整齐,形成了类似于微粒砂岩的结构,煤颗粒之间相互接触并相互胶结(图 8)。由于煤颗粒堆积整齐且接触紧密,未加载情况下,60~200 目至 100~200 目的型煤样品视电阻率较低降低,均一性也较高。煤颗粒相对整齐的堆积方式产生了较多煤颗粒之间的“空隙”,且“空隙”未被充分充填和胶结,型煤样品可压缩性较高,0.31~0.36 MPa 进入第二阶段(表 2)。

### 3.2 弹性阶段

随轴向载荷进一步增加,煤颗粒之间的“空隙”完全闭合,型煤样品进入弹性阶段(B)。该阶段,轴向载荷作用下,型煤样品发生弹性变形,煤颗粒中原有孔隙与微裂隙被压缩甚至闭合,直至轴向载荷达到其弹性极限(图 7)。同压实阶段,型煤样品进一步被压实,造成煤颗粒变形以及煤颗粒内部接触更紧密,形成更有利的导电通道,视电阻率随之降低。该阶段,构造煤样品的可压缩性和视电阻率降幅与粒度相关。随粒度减小,型煤样品的弹性模量(300~1 300 MPa)和弹性极限增大(0.12~1.04 MPa)(表 2),可压缩性则呈降低趋势(表 2)。粒度越大,煤颗粒中原有大孔和微裂隙保留越好,煤颗粒的可压缩性越强,视电阻率降幅越高;相反,粒度较小的煤颗粒,大孔和微裂隙被大量破坏,可压缩性大幅降低,弹性模量较大。由于型煤样品并非完全径向变形受限,且自身力学强度较低,其弹性极限相对较低。

### 3.3 扩容阶段

由于型煤样品侧面与模具内壁没有完全贴合,

当轴向载荷达到其弹性极限时,即进入扩容阶段(C),出现小幅径向变形和微破裂,直至样品侧面与模具内壁完全贴合,扩容阶段结束。径向变形和微破裂的出现,使煤颗粒之间接触程度降低,视电阻率显著上升。该阶段,不同粒度型煤样品的径向变形和微破裂程度,以及视电阻率增幅,与煤颗粒堆积方式和胶结类型所影响的力学强度有关。总体来看,随粒度的减小,型煤样品单轴抗压强度呈增大趋势(表 2)。

型煤样品的胶结强度取决于胶结物的胶结能力、煤颗粒的粒度和堆积方式。细煤粉的胶结能力相对较低,其含量决定了胶结强度,含量越高、粒度越小、堆积越致密则胶结强度越高。5~200 目的型煤样品,胶结物含量相对较低,胶结强度较弱,加之大颗粒堆积造成局部力学性质不均匀,其单轴抗压强度较低(表 2);10~200 目至 45~200 目的型煤样品,胶结强度介于 5~200 目型煤样品和 60~200 目至 100~200 目型煤样品,单轴抗压强度相对于 5~200 目型煤样品更高,具有高压缩性、大塑性变形的特点(表 2);而 60~200 目至 100~200 目的型煤样品为小粒度煤颗粒紧密堆积和相互胶结而成,胶结强度最高,表现出坚硬致密的特点,单轴抗压强度最大(表 2)。

### 3.4 持续弹性阶段

扩容阶段结束后,随轴向载荷的进一步增加,型煤样品发生径向完全受限条件下的轴向变形,即持续弹性阶段(D)。该阶段,随轴向载荷的增加,一方面,粒度较大的煤颗粒被进一步破碎、压实,成为粒度更小的煤颗粒,煤颗粒分布更均匀、堆积更紧密,导致型煤样品导电性能增强,视电阻率下降且分布更均匀;另一方面,根据固体导电理论,压实过程中煤分子间的电子云发生重叠,电子在分子间的迁移率增加,电子导电率上升,视电阻率降低<sup>[22]</sup>。

## 4 结 论

1)构造煤应力-应变过程中,轴向载荷大于单轴抗压强度后,随载荷增大视电阻率呈负指数降低,且均一性大幅提高;至轴向载荷  $\geq 10 \text{ MPa}$  时,视电阻率对载荷的敏感性降低。随粒度减小,构造煤视电阻率呈降低趋势,相同载荷下,粒度越小,构造煤视电阻率对载荷的响应越敏感。但 5~200 目的构造煤具特殊性,其视电阻率整体较小、对载荷相对敏感。

2)应力-应变过程中,不同粒度构造煤的视电阻率演化机制不同。压密阶段,构造煤的视电阻率降幅取决于煤颗粒堆积方式和胶结类型;弹性阶段,粒度决定了构造煤视电阻率降幅,粒度越大,煤中原有大孔和微裂隙保留越好,可压缩性越强,视电阻率降

幅越高; 扩容阶段, 径向变形和微破裂导致煤颗粒之间接触程度降低, 构造煤视电阻率上升, 构造煤力学强度则决定了视电阻率变化特征, 随粒度的减小, 构造煤胶结强度和单轴抗压强度增大, 视电阻率增幅降低; 持续弹性阶段, 破碎、压实作用使构造煤粒度分布更均匀、堆积更紧密, 增强了电子导电性能, 视电阻率降低。

#### 参考文献(References):

- [1] 侯泉林, 李会军, 范俊佳, 等. 构造煤结构与煤层气赋存研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(10): 1487–1495.  
HOU Quanlin, LI Huijun, FAN Junjia, et al. Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals[J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(10): 1487–1495.
- [2] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 应力释放构造煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2531–2543.  
SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, LIU Shiqi, et al. Research advances in theory and technology of the stress release applied extraction of coalbed methane from tectonically deformed coals[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2531–2543.
- [3] JU Yiwen, LI Xiaoshi. New research progress on the ultrastructure of tectonically deformed coals[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(11): 1455–1466.
- [4] 赵文峰, 熊建龙, 张军, 等. 构造煤分布规律及对煤与瓦斯突出的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(2): 52–55.  
ZHAO Wenfeng, XIONG Jianlong, ZHANG Jun, et al. Structure coal distribution law and affected to coal and gas outburst in Sichuan coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(2): 52–55.
- [5] 胡广青, 姜波, 陈飞, 等. 不同类型构造煤特性及其对瓦斯突出的控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 111–115.  
HU Guangqing, JIANG Bo, CHEN Fei, et al. Study on different type structure coal features and gas outburst control[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 111–115.
- [6] 徐云龙, 李亚男, 夏文安, 等. 煤层气洞穴完井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(5): 27–30.  
XU Yunlong, LI Yanan, XIA Wen'an, et al. CBM cave completion technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(5): 27–30.
- [7] 周加佳. 碎软低渗煤层气直井间接压裂技术及应用实践[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 6–11.  
ZHOU Jiajia. Technology and application of indirect fracturing in CBM vertical well of broken and soft coal seam with low permeability[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 6–11.
- [8] 李彬刚. 芦岭煤矿碎软低渗煤层高效抽采技术[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 81–84.  
LI Bingang. Technology of CBM extraction in the crushed and soft coal seam in Luling coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 81–84.
- [9] 童继强, 杨德义, 李志军, 等. 构造煤物性参数测试的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1650–1658.  
TONG Jiqiang, YANG Deyi, LI Zhijun, et al. Advances of physical property parameters test research in tectonic coal[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1650–1658.
- [10] 孟磊. 煤电性参数的实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.  
MENG Lei. Experimental study on the electrical parameters of coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [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): 90–92, 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): 90–92, 101.
- [12] 郭晓洁, 雷东记, 张玉贵. 构造煤复电性实验及其特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(4): 102–105.  
GUO Xiaojie, LEI Dongji, ZHANG Yugui. Electrical experiment and its characteristics of tectonic coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(4): 102–105.
- [13] 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实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 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, 2020, 35(12): 2028–2032.
- [14] 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.
- [15] 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.  
YANG Song. Experimental study on the electrical parameters of being loaded gas-filled coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [16] 徐宏武. 煤层电性参数的测试和研究[J]. 煤田地质与勘探, 1996, 24(2): 53–56.  
XU Hongwu. Research and test of coal seam electric parameters[J]. Coal Geology & Exploration, 1996, 24(2): 53–56.
- [17] 徐龙君, 刘成伦, 鲜学福. 频率对突出区煤导电性的影响[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(6): 25–26.  
XU Longjun, LIU Chenglun, XIAN Xuefu. Effect of frequency on electric conductivity of coal in outburst zone[J]. Mining safety & Environmental Protection, 2000, 27(6): 25–26.
- [18] 解滔, 卢军. 含裂隙介质中的视电阻率各向异性变化[J]. 地球物理学报, 2020, 63(4): 1675–1694.  
XIE Tao, LU Jun. Apparent resistivity anisotropic variations in cracked medium[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(4): 1675–1694.
- [19] 杨彩. 煤岩体电性时频特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
YANG Cai. Electrical time-frequency characteristics research of coal-rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [20] 杨海平. 基于双模式并行电法采集系统的激发极化法实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
YANG Haiping. Experimental study on induced polarization method based on dual mode parallel electrical acquisition system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [21] 唐宝琳. 单轴压缩下岩石视电阻率图像变化的实验研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2018.  
TANG Baolin. Experimental study on the changes of rock apparent resistivity image under uniaxial compression[D]. Beijing: The Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2018.
- [22] 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, 39(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, 39(11): 2220–2225.