

多因素条件下浸水焦煤电阻率变化规律实验

李石林¹, 牛会永^{2*}, 李轶群¹, 陈世强¹, 李芳¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 煤矿采空区自燃区域因位置隐蔽及影响因素多导致定位难度大, 可考虑利用煤的电性参数变化规律探测隐蔽煤火位置。为研究浸水焦煤电性参数随环境因素的变化特征, 选取山西某矿煤样, 利用自制煤电性参数测试装置, 在不同的温度、浸水时长及测试频率条件下, 测试浸水煤样的电阻率, 探索多因素作用对焦煤电阻率变化特征的影响机制。研究结果表明: 随浸水时间增加, 焦煤电阻率呈下降趋势, 且12 h后电阻率的整体下降速度趋缓; 焦煤电阻率随温度升高而降低; 相同环境因素条件下, 随测试频率增高, 焦煤的电阻率变小; 浸水焦煤电阻率随测试频率增大、温度增高而更易达到稳定状态。

关键词: 浸水煤; 电性参数; 电阻率; 测试频率; 焦煤

中图分类号: X936 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2021)02-0065-04

Experimental Study on Resistivity Variation Law of Soaked Coking Coal Under Multi-factor Conditions

LI Shilin¹, NIU Huiyong², LI Yiqun¹, CHEN Shiqiang¹, LI Fang¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The location of spontaneous combustion area in coal mine goaf is difficult due to hidden location and many influencing factors. The position of hidden coal fire can be detected by using the law of electrical parameters of coal. In order to study the variation characteristics of electrical parameters of soaked coking coal with environmental factors, coal samples from a mine in Shanxi are selected for experiments. The self-made coal electrical parameters test device is used in the experiments. The resistivity of water-immersed coal samples are tested at different temperatures, soaking time and test frequency. The influence mechanism of multiple factors on resistivity variation characteristics of coking coal is explored. Results show that the resistivity of coking coal decreases with the increase of soaking time. After 12 hours, the overall decline rate of coal resistivity slows down. The resistivity of coking coal decreases with the increase of temperature. Under the same environmental factors, the resistivity of coking coal decreases with the increase of test frequency. The resistivity of soaked coking coal is more likely to reach a stable state with the increase of test frequency and temperature.

Keywords: soaked coal; electrical parameters; resistivity; test frequency; coking coal

煤矿采空区自燃火灾是煤矿重大灾害之一, 其氧化燃烧阶段判断、火源位置定位是亟待解决的难题^[1]。水分在煤的自燃过程中起着重要的作用。煤矿采空区遗煤(特别是急倾斜煤层)往往经过水的浸泡, 其氧化特性及电性参数会发生一定变化。利用煤岩电性参数变化是探测地下隐蔽煤火位置的方法之一^[2]。因此, 研究煤的电性参数在不同环境因素影响条件下的变化规律有一定的应用价值。

收稿日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874131; 51474106); 湖南省教育厅优秀青年资助项目(18B213)

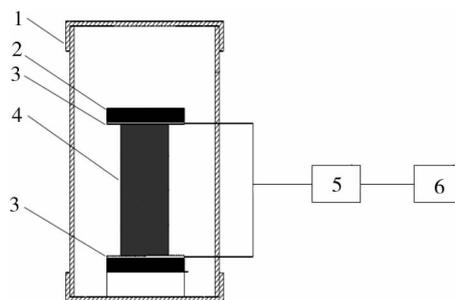
*通信作者, E-mail: niuhuiyong@163.com

煤电性参数包括电阻率(导电率)与介电常数.国内外学者对煤电性参数变化特征的理论分析、实验测试、现场应用开展了研究.SELIVANOVA等^[3]发现煤样加热过程中的电阻率取决于加热温度;徐宏武^[4]通过研究煤岩层电性参数多个影响因素及各向异性问题,指出与电磁法勘探最密切的电性参数是煤岩层电阻率、相对介电常数和煤层对电磁波吸收系数;牛会永等^[2]对浸水加温条件下褐煤电性参数特征进行了试验研究;孟磊、任育华等^[5,6]发现原生结构煤的电阻率与构造软煤的电性参数存在差异;杨彩等^[7]研究了煤岩体时间域和频率域煤岩体电性参数响应规律,并将其应用于现场工程试验;柳苏等^[8]采集了几种不同变质程度的原生结构煤样品,测量了在常温常压下不同含水煤体在不同频率下的同相电阻率及异相电阻率;王云刚等^[9,10]利用 Eview 软件的数理统计功能,采用均方差回归分析方法对构造软煤电性参数的影响因素进行了定量研究,研究含瓦斯煤体在变形破裂过程中电性参数与渗透率之间的变化规律;郑学召等^[11]研究了煤的介电常数随变质程度与测试频率之间的关系;宋吾军、邵振鲁等^[12-14]通过建立煤火的地电模型,对高密度电法探测煤火进行了正演模拟研究.上述研究多集中在温度、变质程度、含瓦斯煤体等因素对电性参数的影响,对浸水煤在多因素影响下的变化规律缺乏深入研究.

本文以山西某煤矿焦煤为实验煤样,通过实验测试与分析,研究温度、浸水时间及测试频率多因素条件下的煤电阻变化规律,为煤矿浸水焦煤的自然防治提供一定的理论指导.

1 实验系统及准备

煤电性参数实验系统主要由绝热保温装置、绝缘板、导电电极板、LCR 表和计算机组成,如图 1 所示.



1.二氧化硅气凝胶绝热保温材料;2.聚四氟乙烯绝缘板;3.铜片导电电极板;4.型煤试样;5.LCR 表;6.PC.

图 1 电性参数实验装置

1.1 主要实验仪器及设备

选用 U1733C LCR 表作为煤样电性参数测试仪器,可在频率为 100,120,10³,10⁴和 10⁵ Hz 下进行参数测量.LCR 表可用于测量电阻、阻抗模值、电感、电容、相位角等参数,也可用于测量直流电阻、等效串联电阻和品质因数等辅助参数.LCR 表通过 U5481A IR-USB 与计算机连接,通过 Keysight GUI Data Logger 软件对数据进行采集.选用温度可控范围为 5~95 ℃的 CS501-SP 型超级数显恒温器(恒温水浴),误差能够控制在±0.05 ℃,显示精度为±0.10 ℃.选用 DHG-9030A 型电热鼓风干燥箱,温度可在 10~250 ℃之间选择,温度分辨率为 0.10 ℃,恒温波动度为±1 ℃.选用 SYE-2000 型压力试验机制作试件,最大试验力为2 000 kN.

1.2 煤样制备

煤样选取山西万丰煤矿的焦煤.将原煤样破碎后,筛选颗粒直径在 0.074 mm 以下的煤粉.将煤粉置入 Φ50 mm×50 mm 的型煤模具,用压力试验机压制成型,成型压力由 0 逐渐调至 135 MPa,并保持 135 MPa 压力 30 min.使用液压脱模机将型煤模具中 Φ50 mm×50 mm 的圆柱体煤样脱出.成型煤样是在专用模具内压制而成的,其表面规范整齐,达到实验外形精度要求.

1.3 实验方案

1.3.1 实验内容

测量干燥煤样电阻率在不同温度、不同测试频率条件下随水浸泡时间的变化关系.

1.3.2 实验步骤

将型煤煤样放入 100 °C 的恒温鼓风干燥箱中干燥 24 h,制成干燥型煤煤样.将干燥型煤煤样分为 5 组,分别放置于 25,40,55,70,85 °C 的 5 个恒温水浴中浸泡 60 h,每 12 h 将煤样取出,在频率为 100,120,10³,10⁴,10⁵ Hz 的 5 个测试条件下,测量阻抗模值和相位角.

2 实验结果及分析

煤的电阻率是表征煤的抗阻特性的物理量,计算公式为

$$\rho = |Z| \cos \theta \frac{S}{L}. \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻率; $|Z|$ 为阻抗模值; S 为煤样横截面积,cm²; L 为煤样长度,cm; θ 为相位角^[2].

运用式(1)对 5 个不同的测试频率、温度及浸水时间条件下的阻抗模值和相位角进行计算,得出焦煤电阻率值变化规律,如图 2 所示.

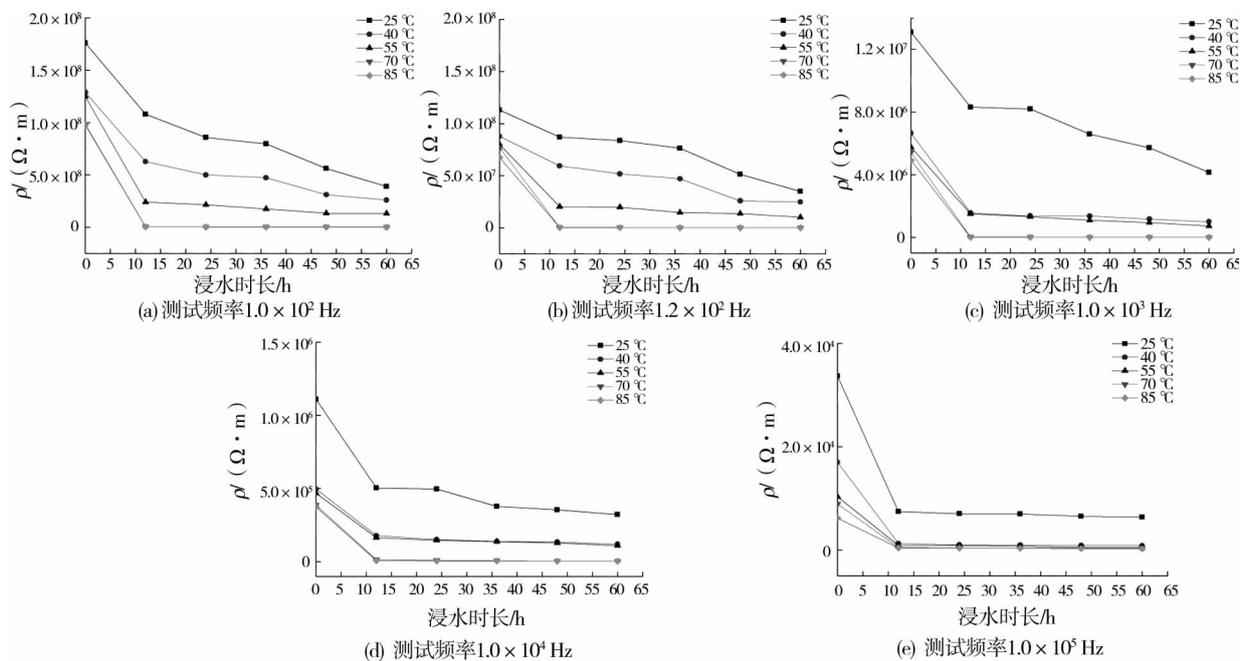


图2 焦煤浸水电阻率变化曲线

由图 2 可知,随测试条件和参数的改变,浸水焦煤电阻率发生明显变化,规律如下:

1) 随浸水时间增加,焦煤电阻率呈下降趋势.焦煤在浸水 12 h 内,电阻率下降速度较快.12 h 后电阻率的整体下降速度趋缓.这是因为煤样在前 12 h 的浸水时间里,含水量大幅度增加,极性水溶液迅速增多,使得煤电阻率大幅度降低.12 h 后煤样吸水速率减慢,电阻率的整体下降速率放缓.

2) 相同测试频率和浸水时间条件下,不同煤样电阻率随温度升高而降低.因为浸水焦煤的导电方式主要是离子导电和电子导电,在相同测试频率和浸水时间条件下,各煤样离子导电参与差异度较小,但随着温度增加,煤中被激发的自由电子增多,导致导电率增加,电阻率降低.

3) 相同测试频率和浸水时间条件下,煤样电阻率随温度升高而更快趋于稳定;不同测试频率条件下,85 °C 煤样电阻率在浸水 12 h 后基本达到稳定状态.在浸水 12 h 内,各煤样吸水量大,离子大量增加,各煤样电阻率均大幅下降.浸水 12 h 后,煤样吸水增加量有限,离子导电参与变化幅度较小.温度越高,煤样中自由电子越活跃,需激发的时间越短,85 °C 煤样中自由电子在 12 h 内基本已被激发.因而,浸水 12 h 后,温度越高,煤样电阻率越快表现出稳定状态.

4) 相同浸水时间和温度条件下,随测试频率增高,煤样电阻率变小,且浸水 12 h 后,电阻率变化幅度趋缓.这是由于浸水 12 h 后,煤样电阻率受煤中含水量的影响变小,随测试频率升高,能更多激发煤中被

俘获电子成为自由电子,电子导电占主导,煤电阻率降低。

5) 浸水焦煤的电阻率随测试频率增高而更快趋于稳定。不同测试频率条件下,浸水 12 h 内,各煤样电阻率下降速度均较快。浸水 12 h 后,随着测试频率逐渐增高,各煤样电阻率下降速度出现明显分化:当测试频率为 120 Hz 及以下时,各煤样电阻率均表现出持续缓慢下降趋势;当测试频率达到 10^3 Hz 及以上时,除 25 °C 煤样电阻率持续缓慢下降外,其余各煤样电阻率基本保持稳定;当测试频率达到 10^5 Hz 时,各煤样电阻率均基本达到稳定状态。这是因为测试频率越高,煤样中被俘获电子转变为自由电子的时间越短,煤样电阻率越快趋于稳定。

3 结论

1) 浸水焦煤电阻率随温度升高呈下降趋势,且温度越高,电阻率更快趋于稳定。可利用电阻率及其变化规律推算采空区遗煤温度及自燃危险区域。

2) 浸水焦煤电阻率随测试频率增高而降低,且降幅与煤体温度相关。可通过改变测试频率获得的电阻率及其变化规律,辅助确定采空区遗煤温度分布。

3) 应用电法探测采空区或其他隐蔽区域煤温及火源位置,操作简便、成本低、精度高、抗干扰能力强,能为判定自燃火灾危险区域、确定煤层自燃防治方案和措施提供支持,便于矿井防灭火工作,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 邓军,李贝,王凯,等.我国煤火灾防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2016,44(10):1-7.
- [2] 牛会永,刘轶康,聂琦苗,等.浸水加温条件下煤电性参数特征试验研究[J].中国安全科学学报,2020,30(9):37-42.
- [3] Selivanova T, Grebenyuk L, Belov A. Control of combustion area using electrical resistivity method for underground coal gasification[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3):351-355.
- [4] 徐宏武.煤层电性参数测试及其与煤岩特性关系的研究[J].煤炭科学技术,2005,33(3):41-46.
- [5] 孟磊.煤电性参数的实验研究[D].焦作:河南理工大学,2010.
- [6] 任华育,曹志勇,童继强,等.原生煤和碎裂煤电阻率对比分析[J].煤炭技术,2018,37(9):139-142.
- [7] 杨彩.煤岩体电性时频特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [8] 柳苏.含水煤体复电性频散特征实验研究[D].焦作:河南理工大学,2017.
- [9] 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.
- [10] 王云刚,张莉,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].河南理工大学学报(自然科学版),2013,32(4):380-384.
- [11] 郑学召,赵炬,张铎,等.不同变质程度煤介电常数特性[J].西安科技大学学报,2019,39(3):469-474.
- [12] Song W J, Wang Y M, Shao Z L. Categorical modeling on electrical anomaly of room and pillar coal mine fires and application for field electrical resistivity tomography[J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 136:474-483.
- [13] 宋吾军,王雁鸣,邵振鲁.高密度电法与磁法探测煤田火区的数值模拟[J].煤炭学报,2016,41(4):899-908.
- [14] 邵振鲁,王雁鸣,王德明.高密度电法探测煤火的正演模拟研究[J].科学技术与工程,2012,12(21):5249-5252.