

文章编号:1671-251X(2015)08-0072-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.08.018

许昭勇,宋大钊,王恩元,等.含水量对煤岩电阻率特征的影响[J].工矿自动化,2015,41(8):72-76.

# 含水量对煤岩电阻率特征的影响

许昭勇<sup>1</sup>, 宋大钊<sup>1,3</sup>, 王恩元<sup>1,2</sup>, 邱黎明<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;

2.煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;

3.永城煤电集团有限责任公司 技术与信息中心,河南 永城 476600)

**摘要:**通过建立的受载煤体电阻率实时监测系统,测试研究了自然原煤试样及不同含水量原煤试样在单轴压缩破坏过程中电阻率实时变化特征规律,并分析了该过程孔隙率对电阻率的影响。测试结果表明,自然原煤试样在破裂破坏产生大尺度裂纹时电阻率急剧增加,含水原煤试样在破裂破坏时电阻率虽然也有增加,但相比于自然原煤试样更平缓;含水原煤试样的孔隙率对破坏过程中电阻率的变化有显著影响,在含水原煤试样剧烈破坏前电阻率变化与孔隙率变化基本呈负相关关系。

**关键词:**煤岩动力灾害;电阻率;煤体含水量;孔隙率;单轴压缩破坏

中图分类号:TD315

文献标志码:A

网络出版时间:2015-07-31 15:36

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150731.1536.018.html>

## Effect of moisture content on resistivity of coal or rock

XU Zhaoyong<sup>1</sup>, SONG Dazhao<sup>1,3</sup>, WANG Enyuan<sup>1,2</sup>, QIU Liming<sup>1</sup>

(1.School of Safety Engineering,China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2.Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Ministry of Education, Xuzhou 221116,

China; 3.Technology and Information Center, Yongcheng Coal and Electricity

Holding Group Co., Ltd., Yongcheng 476600, China)

**Abstract:** By establishing real-time monitoring system of resistivity variation regularities of loaded coal, real-time resistivity variation law of natural raw coal samples and raw coal samples with different moisture content in uniaxial compressive failure process was tested and studied, and the effect of porosity of the process on the resistivity was analyzed. The testing results show that resistivity of natural raw coal samples increases dramatically when a large-scale destruction of rupture crack, although resistivity of raw coal samples with different moisture content also increases during burst damage, but compares to the natural raw coal samples is more gentle; porosity of raw coal samples with moisture content has a significant impact on resistivity change in damage process, resistivity and porosity change of raw coal samples with moisture content is negative linear correlation before severe damage.

**Key words:** coal and rock dynamic catastrophes; resistivity; coal moisture content; porosity; uniaxial compressive failure

收稿日期:2015-03-20;修回日期:2015-06-05;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304205);教育部科学技术研究项目(113031A);中国博士后科学基金项目(2013M541982, 2014T70678)。

作者简介:许昭勇(1990—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为矿山煤岩动力灾害监测,E-mail:heroxuzhaoyong@163.com。

## 0 引言

我国煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害严重,在这些灾害孕育和发展过程中,存在多种地球物理力学响应<sup>[1]</sup>,其中,电阻率是一个重要参数。电阻率的差异性是利用电法勘探技术进行异常体探测的物性基础,也是电法勘探的主要参数<sup>[2-3]</sup>。受采掘活动的影响,煤岩体处于动态变化状态。因此,对勘探对象破坏过程电阻率变化规律的研究尤为重要。

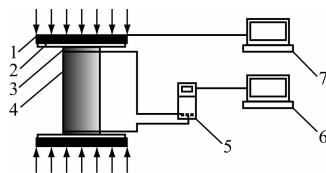
长期以来,国内外学者对受载煤岩体电阻率的变化规律进行了大量的研究。葛宝堂等<sup>[4]</sup>研究了岩体电阻率与岩体应力、应变关系,利用岩体电阻率观测技术预报顶板失稳动力现象;刘光才<sup>[5]</sup>对构造煤和非构造煤的电性参数进行了对比试验,发现非构造煤的电阻率远高于构造煤电阻率,并利用  $Q$  表对不同的煤样在不同应力条件下的电阻率进行了测试;陈鹏等<sup>[6]</sup>对不同煤体在不同加载方式下的不同方向的电阻率进行了实验和理论分析,并对电阻率变化机制进行了探讨;李忠辉<sup>[7]</sup>对大尺度煤体进行了加载过程电阻率测试实验;王云刚等<sup>[8-9]</sup>研究了构造软型煤单轴压缩条件下的电阻率特征,并与原生构造煤进行了对比分析;陈健杰等<sup>[10]</sup>测试了中低频下原生结构煤和构造煤的视电阻率,并发现在各测试频率下,构造煤的电阻率均小于原生构造煤的电阻率。

目前已经开展的实验研究多集中在不同加载方式或不同煤样类型对电阻率的影响,有关含水量对煤岩电阻率影响的研究还不够全面。但在实际生产过程中由于实施防突措施,打钻、割煤过程中用水量较大,使得煤体内含水量增大,因为水的导电性大于煤体且相差较大,煤岩破裂过程中电阻率势必会发生一些变化,弄清其变化规律,更有利于在实际工程中使用电法勘探技术来探测煤体。因此,有必要对单轴压缩破坏过程中不同含水量的煤体电阻率的变化规律及变化机制进行研究。本文通过建立受载煤体电阻率实时监测系统,对煤体破坏过程中电阻率的实时变化规律进行了系统测试,进一步揭示受载煤体电阻率的变化机制,促进电法勘探技术在实际工程中的应用和发展。

## 1 受载煤体电阻率实时监测系统

受载煤体电阻率实时监测系统由载荷控制系统和电阻率测试系统组成,整个系统置于 GP6 高效电磁屏蔽室内,如图 1 所示。载荷控制系统采用

YAW 型电液伺服压力试验机系统,该系统由压力机、加载自动控制系统 PowerTest V3.3 控制程序组成;电阻率测试系统使用 Agilent U1733C LCR 测试仪,与 PC 连接后可利用自带的 Data Logger 软件连续采集数据。该系统将压力和电阻率测试系统组合在一起,各参数均能实现实时、连续采集,其中压力数据采集频率为 30 Hz,电阻率数据采集频率为 1 Hz,大大满足了数据分析的要求。



1—YAW 型试验机;2—绝缘垫片;3—铜片电极;4—煤岩试样;  
5—LCR 测试仪;6—电阻率测试系统;7—载荷控制系统

图 1 受载煤体电阻率实时监测系统组成

## 2 实验测试

### 2.1 煤样的制备

#### 2.1.1 自然原煤试样

实验所需煤样取自山东某煤矿,将取来的大块煤样用岩芯管沿层理方向取样,切割两端制成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱体,并将两端断面磨平,以利于实验时受力均匀。

#### 2.1.2 含水原煤试样

(1) 潮湿状态原煤试样:在大气压力和室温下,将自然原煤试样放于水槽中,试样之间留有空隙,然后向水槽中注水使原煤试样逐步浸水,先浸没至原煤试样高度的  $1/4$  处,以后每隔 2 h 注水一次,使水位分别抬升至原煤试样高度的  $1/2$  和  $3/4$  处,6 h 后全部浸没原煤试样且使水面高出原煤试样 1~2 cm,原煤试样在水中自由吸水 48 h。

(2) 饱和状态原煤试样:本实验采用强制饱和法,即将原煤试样置于水槽内且试样之间留有空隙,然后加水至完全浸没原煤试样并将水煮沸,煮沸时间不少于 6 h。

为便于分析含水量对煤岩电阻率的影响,对原煤试样进行称重并记录原始质量。擦拭潮湿和饱和原煤试样表面的水滴,待试样无滴水后又分别进行称重记录,以此来计算其含水量(这里的含水量不考虑其固有含水量,经测定其固有含水量为 0.65%),测定结果见表 1。

### 2.2 实验方案

实验中将事前制备好的自然原煤试样、潮湿原煤试样和饱和原煤试样放于加载系统中,进行单轴

表 1 实验煤样含水量

| 编号 | 试样   | 煤质量/g  |        | 含水量/% |
|----|------|--------|--------|-------|
|    |      | 处理前    | 处理后    |       |
| 1  | 自然原煤 | 283.67 | 283.67 | 0     |
| 2  |      | 297.78 | 297.78 | 0     |
| 3  |      | 279.77 | 279.77 | 0     |
| 4  |      | 302.97 | 305.45 | 0.82  |
| 5  | 潮湿原煤 | 281.66 | 284.22 | 0.91  |
| 6  |      | 284.59 | 287.12 | 0.89  |
| 7  | 饱和原煤 | 278.67 | 283.52 | 1.74  |
| 8  |      | 289.23 | 295.10 | 2.03  |
| 9  |      | 284.57 | 290.20 | 1.98  |

压缩加载,单轴压缩加载采用力控控制,加载速率为 10 N/s,并将铜片电极置于煤样两端,测试煤样受载破坏过程中电阻率的变化规律。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果分析

自然原煤试样、潮湿原煤试样和饱和原煤试样在变形破坏时的应力、电阻率曲线如图 2—图 4 所示。从图 2 可看出,自然原煤试样的抗压强度为 3.9 MPa。从图 3、图 4 可看出,潮湿原煤和饱和原煤试样的抗压强度分别为 0.67 MPa 和 0.55 MPa,水的浸润作用使得煤岩试样的强度降低<sup>[11]</sup>。

在未施加载荷时,自然原煤的原始电阻率约为 10 kΩ·m,由于自然原煤试样中含有大量的微孔和小孔,当比煤体导电性能更好的水渗入到大量孔隙中时,煤体电阻率降低,所以,潮湿和饱和原煤试样的原始电阻率分别为 7 kΩ·m 和 5 kΩ·m。加载初期,自然原煤试样的电阻率出现减小趋势(图 2),而潮湿和饱和原煤试样的电阻率在 50 s 内出现增大趋势(图 3,图 4),之所以会产生这种不同,是因为水可以改变煤岩体的导电类型。固体介质的导电类型按载流子的不同,大致分为离子导电和电子导电,前者取决于离子的移动,后者取决于电子的移动<sup>[12]</sup>。煤作为一种高阻体,主要以电子导电为主<sup>[5]</sup>,当有外界压力作用时,分子间的电子云重叠,电子在分子间的迁移率增加,电阻率下降<sup>[6]</sup>,但当煤体内含有水分或大量矿物质时,可能表现为离子导电<sup>[5]</sup>,这是由于加载过程中分子之间的间距缩小,离子迁移率降低,导致电阻率上升。因此,不含水的原煤试样在开始施加载荷时,电阻率会出现下降趋势,而含水原煤试样(潮湿和饱和)在开始施加载荷时,

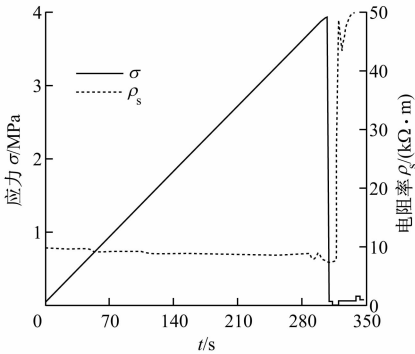


图 2 自然原煤试样在变形破坏时的应力和电阻率曲线

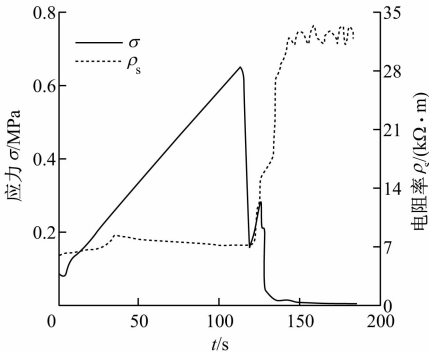


图 3 潮湿原煤试样在变形破坏时的应力和电阻率曲线

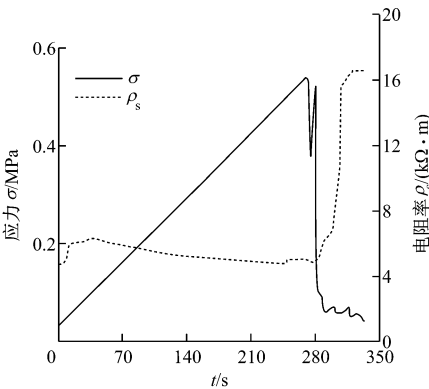


图 4 饱和原煤试样在变形破坏时的应力和电阻率曲线

电阻率会出现上升趋势,与实验结果一致。

实验时仿真煤的破坏是发生变形和破裂,煤体中各种原始孔隙、裂隙以及新孔隙、裂隙的产生对煤岩电阻率的变化有较大影响。为了分析煤体破坏过程中水和孔隙率对电阻率的影响,对实验自然原煤试样进行了压汞实验(数据见表 2)。通过压汞实验可知,自然原煤试样内部以微孔、小孔为主,而煤体受压过程中,孔隙率随着轴向应力的增大呈现先减小后增大的趋势<sup>[12]</sup>。对比自然原煤试样和潮湿、饱和原煤试样的实验结果可知,未施加载荷时,由于煤体孔隙中水的存在,使得潮湿和饱和原煤试样的原始电阻率明显比自然原煤试样的原始电阻率低。孔隙中足够多的水改变了潮湿和饱和原煤试样的导电

类型,致使开始施加载荷时,潮湿和饱和原煤试样的电阻率呈现出上升趋势而自然原煤试样的电阻率出现下降趋势。随着载荷的不断施加,当试样出现宏观断裂面时,3 种类型的煤样均出现电阻率突然增大的现象,这是由于随着新生裂隙的产生和扩展加剧,大孔和可见孔增多,孔隙率迅速增大造成的。但具体表现却不尽相同,自然原煤试样的电阻率增长更迅速且最终数值更大,相比于自然原煤试样,潮湿和饱和原煤试样的电阻率增长稍显缓和且数值较小,这主要是因为虽然 3 种试样均失去承载能力,产生大的断裂面,致使煤体导电通道被切割或阻断,但是由于潮湿和饱和原煤试样内部孔隙中含有较多水分且水的导电性相比于煤体更好所致。

表 2 压汞实验参数

| 样品<br>编号 | 孔隙体积分数/% |          |         |         |         | 孔隙<br>率/% |
|----------|----------|----------|---------|---------|---------|-----------|
|          | 微孔       | 小孔       | 中孔      | 大孔      | 可见孔     |           |
| 1        | 58.237 8 | 26.293 8 | 3.918 1 | 7.193 1 | 1.341 2 | 4.019 2   |
| 2        | 57.312 3 | 26.019 1 | 3.0193  | 6.109 3 | 1.429 1 | 4.108 1   |
| 3        | 59.231 1 | 27.932 4 | 4.948 2 | 6.194 0 | 1.348 2 | 4.098 1   |
| 4        | 59.311 8 | 26.394 8 | 4.209 3 | 6.930 1 | 2.093 8 | 4.819 1   |
| 5        | 58.232 1 | 25.882 1 | 4.991 1 | 5.912 3 | 1.242 4 | 4.019 2   |
| 6        | 58.239 7 | 25.932 8 | 4.021 8 | 5.131 1 | 1.232 4 | 3.891 2   |
| 7        | 58.234 1 | 26.239 3 | 3.019 4 | 7.143 2 | 1.874 9 | 4.109 1   |
| 8        | 57.192 8 | 26.029 1 | 3.591 1 | 6.472 8 | 1.792 9 | 3.981 2   |
| 9        | 58.213 3 | 25.092 8 | 5.940 1 | 6.818 1 | 1.344 9 | 4.019 0   |

3.2 水对煤岩体破坏过程中电阻率影响的分析

煤岩体中存在大量孔隙、裂隙,而实际生产过程中由于实施防突措施以及打钻、割煤过程中使用水,致使煤岩孔隙部分含水,为了更深入了解水对煤岩体破坏过程中电阻率的影响,有必要研究煤岩试样破坏过程中孔隙率的变化情况,进而推导出水对该过程中电阻率的影响。

煤岩试样的孔隙率在受载过程中会发生变化,通过假设初始孔隙率  $\eta_0$  为常数,结合体积模量  $K$  以及静水压力  $\sigma_0$  等之间的关系,可推导出煤岩压缩过程中孔隙率的变化方程为<sup>[12-14]</sup>

$$\eta = \frac{\eta_0 - \epsilon_v + \frac{\sigma_0}{K}}{1 - \epsilon_v}$$

(1)

式中: $\epsilon_v$  为试样的体积应变。

由式(1)分析可知,对于煤岩试样,在单轴压缩实验过程中,孔隙率会随着轴向应力的增大而出现一个先减小后增大的过程。

若在煤岩孔隙中只有部分含水,则空气的绝缘

作用将导致电阻率升高,因此,根据 Archie<sup>[15-17]</sup> 公式可推导出部分含水煤岩的电阻率为

$$\rho_t = b\rho_0 S_w^{-n} = bF\rho_w S_w^{-n}$$

(2)

式中: $b$  为与岩性有关的常数; $\rho_0$  为煤岩 100% 饱和含地层水的原始电阻率; $S_w$  为地层含水饱和度, $n$  为饱和度指数; $F$  为地层因子, $F = \rho_0 / \rho_w = a / \eta^m$ ;  $\rho_w$  为地层水电阻率; $a$  为与煤岩有关的比例系数; $m$  为煤岩的胶结指数。

将  $F = \rho_0 / \rho_w = a / \eta^m$  代入式(2),整理得出电阻率与孔隙率之间的关系式为

$$\rho_t = \frac{ab\rho_w}{\eta^m} S_w^{-n}$$

(3)

联立式(1)和式(3)可得含水煤岩试样压缩破坏过程中电阻率与孔隙率之间的关系:

$$\rho_t = \frac{ab\rho_w}{(\eta_0 - \epsilon_v + \sigma_0 / K) / (1 - \epsilon_v)} S_w^{-n}$$

(4)

结合式(4)和图 3—图 4 可以看出,当含水原煤试样开始进行单轴压缩试验时,随着孔隙率的减小,含水煤岩电阻率呈现增大趋势,随着加载过程的继续,孔隙率由减小变成增大,含水煤岩电阻率呈现出下降趋势。当含水原煤试样加载到破坏时,出现大的宏观横断面,阻断煤岩孔隙中水的运移,最终导致煤岩电阻率急剧增大,无论是潮湿原煤试样还是饱和原煤试样,电阻率都迅速增大到原电阻率的 3~4 倍。实验结果和理论分析基本吻合。

4 结语

通过建立的受载煤体电阻率实时监测系统,测试研究了自然原煤试样及不同含水量原煤试样在单轴压缩破坏过程中电阻率的实时变化特征规律,得出了如下的结论:

(1) 施加载荷后,自然原煤试样的电阻率在试样失去承载力、产生宏观断裂面前一直处于下降趋势,而含水原煤试样在开始施加载荷的 50 s 内,电阻率逐渐增加,继续施加载荷,电阻率开始下降,当试样破裂破坏时,所有试样的电阻率都迅速增加,但自然原煤试样的电阻率增长速度相比于含水原煤试样更迅速。

(2) 水对煤岩破坏过程中电阻率的影响主要有 2 个方面:一是水能对煤岩体导电类型产生影响,使原本以电子导电为主的煤岩转变为以离子导电为主,在单轴压缩破坏初期表现为电阻率由先降低转变为先升高;二是水的浸润使原煤试样的强度和弹性模量降低,塑性增大,当潮湿和饱和煤岩破裂时,

电阻率的增长相较于自然原煤试样趋于缓慢。

(3) 将 Archie 公式与破裂过程中煤岩孔隙率的动态变化方程结合,初步推导出含水煤岩试样在单轴压缩破坏过程中电阻率随孔隙率变化的规律,在含水原煤试样剧烈破坏前电阻率与孔隙率基本呈负相关关系。

参考文献:

[1] 王恩元,何学秋,李忠辉,等.煤岩电磁辐射技术及其应用[M].北京:科学出版社,2009:1-2

[2] 程志平.电法勘探教程[M].北京:冶金工业出版社,2007:3-4.

[3] 岳建华,刘树才.矿井直流电法勘探[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000:2-3.

[4] 葛宝堂,李德春.岩体电阻率观测技术预报顶板失稳的前景[J].中国矿业大学学报,1993,22(2):48-52.

[5] 文光才.无线电波透视煤层突出危险性机理的研究[D].徐州:中国矿业大学,2003.

[6] 陈鹏,王恩元,朱亚飞.受载煤体电阻率变化规律的实验研究[J].煤炭学报,2013,38(4):548-553.

[7] 李忠辉.受载煤体变形破裂表面电位效应及其机理的研究[D].徐州:中国矿业大学,2007:3-4.

[8] WANG Yungang, WEI Jianping, YANG Song.

Experimental research on electrical parameters variation of loaded coal [J]. Procedia Engineering, 2011,26:890-897.

[9] 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,2011,35(12):2028-2032.

[10] 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.

[11] 李忠辉,王恩元,何学秋,等.含水量对煤岩电磁辐射特征的影响[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):362-366.

[12] 秦跃平,王丽,李贝贝,等.压缩实验煤岩孔隙率变化规律研究[J].矿业工程研究,2010,25(1):1-3.

[13] 章梦涛,潘一山,梁冰,等.煤岩流体力学[M].北京:科学出版社,1995:134-137.

[14] 赵阳升.矿山岩石流体力学[M].北京:煤炭工业出版社,1996:201-203.

[15] 孙建国.岩石物理学基础[M].北京:地质出版社,2006:157-159.

[16] 罗娜.阿尔奇公式数值分析及其意义[J].石油学报,2007,28(1):111-114.

[17] 王俊璇.受载条件下岩石电阻率特性的理论与试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2012:45-48.