

文章编号:0253-9993(2013)04-0548-06

受载煤体电阻率变化规律的实验研究

陈鹏^{1,2},王恩元^{1,2},朱亚飞^{1,2}

(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)

摘要:通过建立受载煤体电阻率变化实时测试系统,分别测试了不同煤体在不同加载方式下不同方向的电阻率变化特征,并对电阻率变化机制进行了探讨。研究表明:在加载初期不同煤样电阻率随压力的变化趋势有所不同,但在煤体发生破裂后电阻率均呈现上升趋势;对于同一煤样而言,电阻率随压力的变化趋势是一致的,在不同加载方式下电阻率与应力保持良好的对应性;煤体电阻率呈现明显的各向异性特征,在受载过程中不同方向的电阻率中呈现不同的变化规律;煤体的导电特性和孔隙结构的演化共同决定了电阻率的变化特征。

关键词:电阻率;加载方式;应变;导电特性;孔隙结构

中图分类号:TD713;P631.3

文献标志码:A

Experimental study on resistivity variation regularities of loading coal

CHEN Peng^{1,2}, WANG En-yuan^{1,2}, ZHU Ya-fei^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The real-time testing system of resistivity variation regularities of loading coal was established where resistivity variation characteristics of different kinds of coal in different orientations under different loading methods were tested. Besides, resistivity variation mechanism was expounded. The research results indicate that there lies difference in resistivity changing tendency of different coal samples along with pressure's change in the initial stage of loading. Yet, resistivity shows rising trend without exception after coal fracturing occurs. In view of the same coal sample, the changing tendency of resistivity is in consistent with that of pressure. Under different loading methods, resistivity is in fine parallelism with stress. Furthermore, coal resistivity presents apparent anisotropic characteristics. In the loading process, resistivity in different orientations shows different variation regularities. Meanwhile, the conduction characteristics of coal and evolution of pore structure codetermine the variation characteristics of resistivity.

Key words: resistivity; loading method; strain; conduction characteristic; pore structure

我国煤矿近年来开采深度和开采强度日益增大,煤岩体所处应力场更加复杂,煤与瓦斯突出和冲击地压等煤岩动力灾害日趋严重^[1-2]。在灾害孕育和发展过程中,存在多种物理力学响应^[1],电阻率是其中的一个重要参数,其差异性也是煤矿井下开展电法勘探的物性前提^[3-4],因此,对煤体受载破坏过程中的电阻率进行研究,有助于深入认识煤岩动力灾害的演化过程,对电法勘探技术在煤矿中的应用及其在煤岩

动力灾害预测预报中的应用具有重要的理论和现实意义。

煤体电阻率的影响因素众多,国内外学者进行了大量的测试研究^[5-10],多集中于温度、湿度、工业成分、热解等因素对电阻率的影响。在矿井电法勘探领域,煤体电阻率的研究多集中于煤层内构造的影响以及顶底板岩层在受力、破坏、渗水过程中的电阻率变化规律^[3,11],测试仪器多使用电法勘探领域常用的直

流电法设备,如高密度电法仪和网络并行电法仪等。

在采掘过程中,煤体处于地应力场和采动应力场的耦合作用下^[12],时-空演化规律十分复杂,因此,一些学者对受载煤体的电阻率进行了研究。吕绍林等^[10,13]进行了模拟储层条件瓦斯突出煤体的电性参数测试实验,利用数字式双频激电仪对不同围压条件煤样电阻率进行了测试;文光才^[14]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,并进一步利用无线电波技术透视煤层突出危险性;李忠辉^[15]利用Resitest-4000电阻率测试仪对大尺度煤体进行了加载过程中电阻率测试实验;刘贞堂等^[16]利用MT 4080 LCR表对干燥和湿润两种煤样单轴压缩过程中的电阻率进行了测试;王云刚等^[17-18]利用4263B LCR表研究了构造软煤(型煤)单轴压缩条件下的电阻率特征,与原生结构煤进行了对比分析,并利用Resitest-4000电阻率测试仪对大尺度有冲击倾向性煤体进行了单轴压缩实验^[19];杨聿^[20]建立了含瓦斯煤体低频电性参数测试实验系统,利用4263B LCR表测试了受载状态下含瓦斯与不含瓦斯煤体电阻率的特征和变化规律。

前人的研究多集中于静态条件下内因(水分、灰分、孔隙率等)和外因(温度、测试频率等)对煤体电阻率的影响,一些学者对受载煤体电阻率的研究多局限于单轴压缩实验条件,对电阻率的实时变化规律及变化机制未能进行系统的分析。煤岩动力灾害的孕育和发生是一个力学过程^[21],存在多种受力方式,如二次应力场、周期来压和蠕变等^[22],应力集中和应变能的积累等都会引起煤体电性的改变^[19],因此,有必要对不同实验条件下煤体电阻率的实时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测试系统,对电阻率的实时变化规律进行系统测试,进一步揭示受载煤体电阻率的变化机制,促进电法勘探技术的应用和发展。

1 实 验

1.1 实验系统

实验系统由载荷控制系统、应变采集系统和电阻率测试系统组成,整个实验系统置于GP6高效电磁屏蔽室内(图1)。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PowerTestV3.3控制程序组成;应变采集系统主要为LB-IV型多通道数字应变仪,由中心处理器、显示器和前置放大器组成。将电阻应变片(横向与轴向各一个)与前置放大器用导线连接,可在应变仪上

记录微应变($\mu\epsilon$)数据;电阻率测试系统使用美国Agilent U1733C LCR测试仪,与PC连接后可利用自带软件连续采集数据。

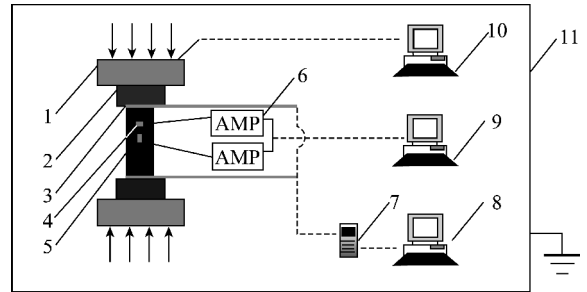


图1 受载煤体电阻率测试系统

Fig. 1 Schematic diagram of loading coal resistivity test system

- 1—试验机;2—绝缘垫块;3—铜片电极;4—电阻应变片;
5—试样;6—前置放大器;7—LCR测试仪;8—电阻率采集系统;
9—应变采集系统;10—载荷控制系统;11—电磁屏蔽室

该实验系统将压力、应变和电阻率测试系统组合在一起,与传统的单轴压缩压力(应力)-电阻率测量模式相比,增加了应变测试系统,并能模拟井下煤体各种复杂的受力方式。各参数均能够实现实时性、连续性采集,其中压力、应变数据采集频率为20 Hz,电阻率数据频率为1 Hz,大大满足了数据分析的要求。

1.2 实验方案

实验中所需煤样分别来自新庄矿、城郊矿、寺家庄矿,把取来的大块煤体用岩芯管沿层理方向取样,加工成 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体,将两端磨平,试样轴向方向即为煤体的层理方向,横向方向为垂直层理方向。分别考察加载方式、测试方向对煤体电阻率的影响:

(1)分别对新庄矿和城郊矿的煤样进行单轴压缩、循环加载和分级加载实验,单轴压缩加载速率为 0.1 mm/min ,达到煤样应力水平的30%和60%时进行突然卸载(循环加载)和恒载(分级加载),实验过程中采集压力、应变和电阻率数据;

(2)分别测试新庄矿、城郊矿和寺家庄矿的煤样平行层理方向和垂直层理方向的电阻率大小,并使用寺家庄矿煤样进行单轴压缩实验,将铜片电极置于煤体两端(两侧),测试煤体受载过程中平行(垂直)层理方向电阻率变化规律。

2 结果与讨论

2.1 实验结果分析

为了便于实验结果分析,对煤样基本参数进行了测定,测定结果见表1。

表 1 实验煤样基本参数
Table 1 Basic parameters of coal samples

取样地点	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	电阻率范围/ $(\Omega \cdot m)$	抗压强度/MPa
新庄矿	0.65	7.62	8.59	224.12 ~ 633.26	8.20
城郊矿	0.61	10.11	12.68	1 166.12 ~ 1 591.20	5.81
寺家庄矿	1.01	8.75	6.04	579.13 ~ 740.33	21.20

新庄矿和城郊矿煤样的实验结果如图 2,3 所示。图中 p 代表压力曲线, ε_1 代表轴向应变, ε_2 代表横向应变。用 λ 表示电阻率的变化:

$$\lambda = \rho/\rho_0 \tag{1}$$

其中, ρ 为测试电阻率; ρ_0 为初始电阻率。当 $\lambda > 1$ 时, λ 越大电阻率变化幅度越大; 当 $\lambda < 1$ 时, λ 越小电阻率变化幅度越大。应变曲线向下凹表示煤体受拉伸作用, 向上凸表示煤体受压缩作用^[15]。从总体上看, 压力和应变之间呈现良好的对应关系。随着压力的增大, 煤体沿横向发生拉伸变形, 沿轴向发生压缩变形, 变形和载荷大体上是对应的, 但并不是完全同步, 王恩元^[23]利用长距离高倍望远镜动态观测了单

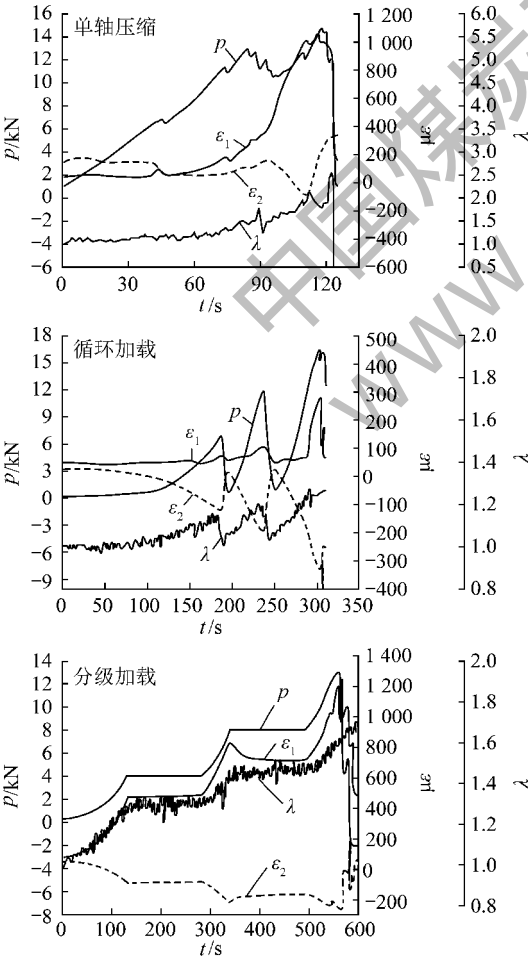


图 2 新庄矿煤样实验结果
Fig. 2 Experimental results of coal samples in Xinzhuan Coal Mine

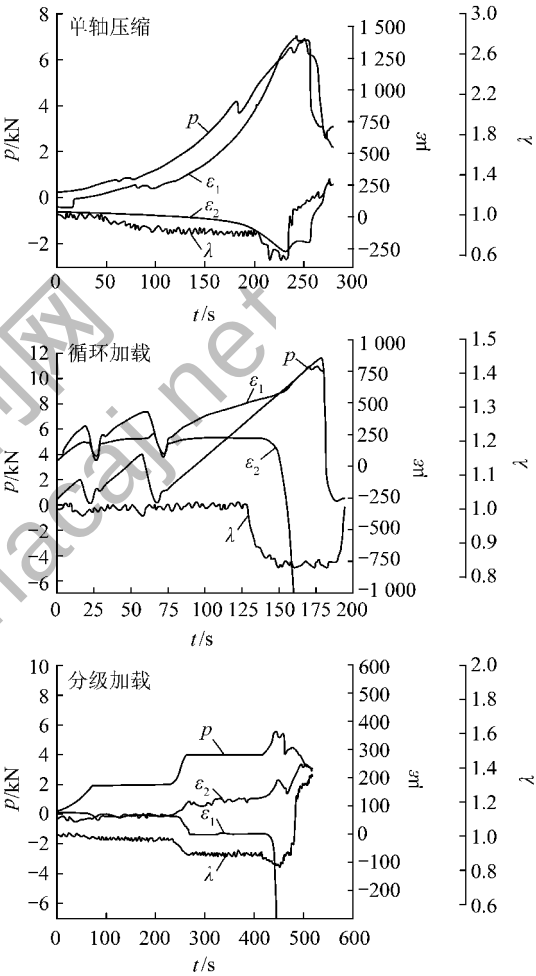


图 3 城郊矿煤样实验结果
Fig. 3 Experimental results of coal samples in Chengjiao Coal Mine

轴压缩下煤的变形破裂过程,发现煤体的变形破裂是不连续的、非均匀的,有时局部会产生膨胀或收缩,这与实验得到的结果是一致的。在加载后期,随着煤体的变形破裂加剧,应变曲线均发生了剧烈变化。

对于不同煤矿的煤样,受载煤电阻率变化趋势会有很大差别:新庄矿煤样单轴压缩初期电阻率持续上升,发生微破裂后电阻率上升速率增大,发生主破裂后电阻率升高到初始值的 3.45 倍,循环加载过程中突然卸载时电阻率会出现突降,分级加载时在 4 kN 和 8 kN 恒载阶段电阻率虽有波动,但总体趋势和压力曲线是一致的;城郊矿煤样的实验规律与新庄

矿煤样正好相反,单轴压缩初期电阻率随着载荷的增加而减小,但是减小幅度不大,到后期电阻率减小幅度增大,循环加载前期电阻率随压力波动幅度较小,到70% $\sigma_{\max}$ 水平左右电阻率下降速度加快,分级加载过程中电阻率曲线与压力曲线保持良好的对应关系。虽然两个矿煤样电阻率随压力的变化趋势不同,但是在加载后期随着裂隙的持续增多和贯通,两个矿煤样的电阻率均升高。

层理构造是煤层的典型特征,导致煤层的电阻率具有明显的方向性^[3],即平行层理方向的电阻率(ρ_1)和垂直层理方向的电阻率(ρ_n)不同,称为煤体电阻率的各向异性,可用各向异性系数 λ' 表示:

$$\lambda' = \sqrt{\rho_n / \rho_1} \quad (2)$$

对于煤岩体来讲,垂直层理方向的电阻率大于平行层理方向的电阻率^[3,11],所以 λ' 总大于1,经对各矿煤样进行电阻率测试可知,新庄矿、城郊矿和寺家庄矿煤样各向异性系数 λ' 分别为1.48,1.42,1.35(表2中 $\bar{\rho}$ 为电阻率平均值)。选取寺家庄矿1~4号煤样进行单轴压缩实验(图4),可以看出,寺家庄矿煤样与城郊矿煤样电阻率变化趋势一致,单轴压缩初期煤体电阻率呈下降趋势,由于平行层理方向受压强烈,故电阻率变化幅度大于平行层理电阻率;所有的煤体发生破裂后电阻率均迅速上升,由于垂直层理方向裂隙较发育^[24],最终电阻率上升幅度较大。

表2 煤体电阻率各向异性参数
Table 2 Anisotropy parameters of coal sample resistivity

$\Omega \cdot m$

煤样编号	新庄矿煤样		城郊矿煤样		寺家庄矿煤样	
	ρ_1	ρ_n	ρ_1	ρ_n	ρ_1	ρ_n
1	383.47	965.04	1 348.24	2 818.62	579.13	1 073.06
2	381.82	866.10	1 266.21	2 204.79	657.75	1 141.43
3	224.12	789.97	1 440.87	3 085.99	671.49	1 339.92
4	633.26	941.26	1 591.20	3 770.24	740.33	1 265.93
5	401.25	889.47	1 166.12	1 880.27	—	—
$\bar{\rho}$	404.79	890.37	1 362.52	2 751.98	662.18	1 205.08
λ'	1.48		1.42		1.35	

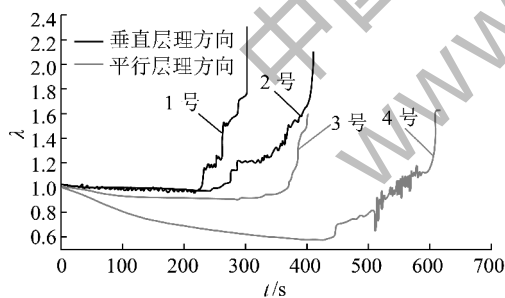


图4 寺家庄矿煤样单轴压缩不同方向电阻率变化

Fig. 4 Resistivity of Sijiazhuang coal sample under uniaxial compression in different directions

2.2 受载煤体电阻率变化机制探讨

固体介质的导电,按照载流子的不同类型,大致可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^[25]。煤作为一种高阻体,主要以电子导电为主^[14],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,如城郊矿和寺家庄矿煤样实验所示(图3,4);但是新庄矿的煤样在加载初期电阻率呈上升趋势(图2),原因可能是煤体存在离子导电性,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。文献[14]认为,煤的离子导电主要是由水分和矿物质引起的,新庄矿煤样水分含量较少,仅为0.65%(表1),不足以形成离子溶液,因此其离子导电性应主要由矿物质引起的。

在常温下,由于煤体所含晶体杂质较多,并且不可避免的存在晶格错位与宏观缺陷等因素,这两种作用共同构成了固体的弱束缚离子导电^[25]。煤及其矿物成分在形成和演化过程中不可避免的会出现晶体错位和宏观缺陷,晶体矿物成分越复杂杂质离子越多,与晶体点阵联系较弱的离子活化而形成的载流子越多,在受外力作用时,晶格错位与宏观缺陷等作用越剧烈,离子电导越明显。利用扫描电子显微镜的能谱分析功能对各矿煤样所含元素进行分析(表3),新庄矿煤样所含元素较多,分别为Mg, Al, Si, Ca, Fe。进一步对新庄矿煤样进行X射线衍射分析(图5),新庄矿煤样所含伴随矿物种类较多,除常见的高岭石外,还有4种其它矿物。由此可以判断,新庄矿煤样受外力作用时,其弱束缚离子导电作用会很明显甚至大于电子导电,以至于离子导电性可能占主导地位。

表 3 能谱分析数据

Table 3 Energy spectrum analysis data %

煤样	元素	质量百分比	原子百分比
新庄矿	Mg	1.264 4	1.669 8
	Al	19.748 0	23.500 5
	Si	49.561 2	56.659 2
	Ca	5.536 3	4.435 2
	Fe	23.890 1	13.735 3
城郊矿	Al	31.886 9	33.556 1
	Si	60.126 5	60.785 9
	Ca	7.986 6	5.658 0
寺家庄矿	Al	35.378 3	36.214 0
	Si	64.621 7	63.786 0

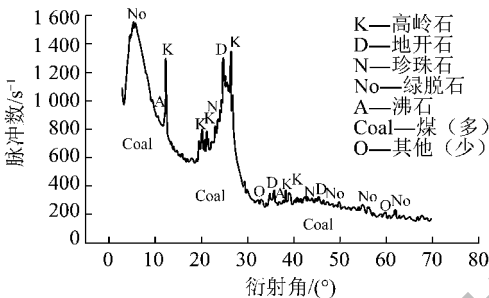


图 5 新庄矿煤样 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of Xinzhuan coal sample

煤的破坏是一个发生变形和破裂的过程。煤体中的孔隙、裂隙、新产生的裂纹对煤的电阻率有很大的影响^[20]。煤体受压过程中,随着轴向应力的增大,孔隙率呈现先减小后增大的趋势^[26]。3 个矿的煤样均属于无烟煤,通过压汞实验数据(表 4)可以看出,无烟煤其内部孔隙是以微孔、小孔为主且均匀分布,破坏后的煤样其微孔、小孔和中孔比例减小,而大孔和可见孔比例增大,说明在加载初期,以相对均匀的微小孔隙、裂隙为主的缺陷较匀速地不断的被压缩闭合,煤体结构趋于致密,孔隙率减小,根据煤体导电特性的不同,电阻率会随压力的升高而降低(电子导电)或升高(离子导电),随着新生裂隙的产生和扩展加剧,大孔和可见孔增多,孔隙率总体上是增大的,煤体导电通道受到切割或阻碍,所以无论是何种导电特性的煤体,电阻率均迅速上升。对于循环加载和分级加载而言,电阻率的变化取决于压力是否引起了煤体结构的变化。

3 结 论

(1)不同煤体电阻率随压力的变化趋势会有所不同,在加载初期,新庄矿煤样电阻率随压力的升高而升高,城郊矿和寺家庄矿煤样电阻率随压力的升高

表 4 压汞实验参数

Table 4 Mercury injection experiment parameters %

取样地点	样品编号	孔隙体积分数					孔隙率
		微孔	小孔	中孔	大孔	可见孔	
新庄矿	1	58.823 5	28.483 0	4.644 0	6.192 0	1.857 6	4.011 9
	1'	57.585 1	27.554 2	3.405 6	8.668 7	2.786 4	4.299 1
城郊矿	2	58.204 3	28.483 0	3.715 2	6.811 2	2.786 4	3.963 4
	2'	53.681 0	26.380 4	3.067 5	15.030 7	1.840 5	4.115 9
寺家庄矿	3	55.555 6	26.426 4	4.504 5	10.810 8	2.702 7	4.316 8
	3'	53.387 5	21.951 2	2.439 0	15.718 2	6.504 1	4.752 3

注:1~3 号表示原始煤体,1'~3'号表示单轴压缩破坏后的煤体。

而降低,在煤体发生破裂后电阻率均呈现上升趋势;对于同一煤矿的煤样而言,电阻率随压力的变化趋势是一致,在不同的加载方式下电阻率与压力保持良好的对应关系。

(2)煤体电阻率具有各向异性特征,垂直层理方向电阻率大于平行层理方向电阻率,在单轴压缩初期,平行层理方向电阻率下降幅度较大,煤体破裂后垂直层理方向电阻率上升幅度较大。

(3)受载煤体电阻率的变化特征受煤体导电特性和孔隙结构演化的共同影响;煤中晶体矿物成分的复杂性可引起弱束缚离子导电,从而可能引起离子导

电作用强于电子导电作用;加载初期煤体结构趋于致密,不同导电特性的煤体电阻率会发生不同的变化,随着新生裂隙的发展,煤体导电通道受到切割或阻碍,电阻率均呈现上升趋势。

需要指出的是,本文研究成果仅是初步结论,在今后的研究中还需通过大量的实验验证,并利用电介质物理学、电化学等方面的理论进一步揭示受载煤体电阻率变化的机理。

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.
- [2] Wu Aixiang, Sun Yezhi, Gour Sen, et al. Characteristics of rockburst and its mining technology in mines [J]. Journal of Central South University of Technology, 2002, 9(4): 255-259.
- [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.
- [4] Wu Yanqing. Application of radio wave penetration coal mine disaster [A]. Coalmine Safety and Health. Proceedings of the International Mining Tech. '98 Symposium [C]. Chongqing, 1998: 14-16.
- [5] 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.
- [6] Shreeman Narayan, Tiwary, Mukhdeo. Measurement of electrical resistivity of coal samples [J]. Fuel, 1993, 72(8): 1099-1102.
- [7] Verma R K, Bhui N C. Use of electrical resistivity methods for study of coal seams in parts of the Jharia Coalfield [J]. India Geoprospection, 1979, 17(2): 163-176.
- [8] Hasan D, Bai Xiaohong, William B Krantz. Thermal and electrical property measurements for coal [J]. Fuel, 1989, 68(2): 185-192.
- [9] Zubkova V, Prezhdov V. Change in electric and dielectric properties of some Australian coals during the processes of pyrolysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006, 75(2): 140-149.
- [10] 吕绍林, 何继善. 瓦斯突出煤体的导电性质研究 [J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(6): 511-514.
- Lü Shaolin, He Jishan. Electrical property measurements for the outburst coal mass [J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(6): 511-514.
- [11] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [12] 康红普. 煤矿井下应力场类型及相互作用分析 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1329-1335.
- Kang Hongpu. Analysis on types and interaction of stress fields in underground coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1329-1335.
- [13] 吕绍林. 瓦斯突出地球物理场研究 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1998.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘贞堂, 贾迎梅, 王恩元, 等. 受载煤体电阻率变化规律研究 [J]. 中国煤炭, 2008, 34(11): 47-49.
- Liu Zhen-tang, Jia Ying-mei, Wang En-yuan, et al. Study on the change law of the resistivity of coal in the process of compression [J]. China Coal, 2008, 34(11): 47-49.
- [17] Wang Yungang, Wei Jianping, Yang Song. Experimental research on electrical parameters variation of loaded coal [C]. Procedia Engineering, 2011, 26: 890-897.
- [18] 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, 2010, 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, 2010, 35(12): 2028-2032.
- [19] 王云刚. 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, 2010, 24(2): 15-18, 23.
- Wang Yungang. The experimental study on the apparent resistivity of large-scale coal samples with burst tendency [J]. Journal of University of South China, 2010, 24(2): 15-18, 23.
- [20] 杨 尊. 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.
- [21] Jin Hongwei, Hu Qianting, Liu Yanbao. Failure mechanism of coal and gas outburst initiation [J]. Procedia Engineering, 2011, 26(7): 1352-1360.
- [22] 李 楠, 王恩元, 赵恩来, 等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1099-1103.
- Li Nan, Wang En-yuan, Zhao En-lai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multistage loading [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1099-1103.
- [23] 王恩元. 含瓦斯煤破裂的电磁辐射和声发射效应及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 1997.
- [24] 刘延保, 曹树刚, 李 勇, 等. 煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2484-2491.
- Liu Yanbao, Cao Shugang, Li Yong, et al. Experimental study of swelling deformation effect of coal induced by gas adsorption [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2484-2491.
- [25] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [26] 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.
- Qin Yueping, Wang Li, Li Beibei, et al. Change law study on porosity of the coal and rock in compression test [J]. Mineral Engineering Research, 2010, 25(1): 1-3.