

受载煤岩电阻率变化的实验研究¹

王云刚, 王恩元, 李忠辉, 刘贞堂, 刘晓斐

中国矿业大学能源与安全工程学院, 江苏徐州 (221008)

摘要: 阐述了国内外学者对岩石在单轴压缩条件下电阻率的实验研究及其规律。采用具有冲击性倾向的煤样, 在压力实验机上进行了单轴压缩实验, 测试了煤样破坏过程的电阻率变化随压力增加的规律。实验结果表明: 实验曲线整体上大致成“凹”型曲线; 煤样电阻率随压力增加逐渐减少, 当达到破裂应力值的一半左右时, 电阻率达到最小值; 继续加载, 电阻率将升高, 直到出现第一次主破裂; 煤样出现主破裂后在继续加载的情况下, 电阻率会继续升高, 甚至会超出电阻率测试仪的量程, 直到完全失稳。这充分说明, 受载煤岩的电阻率变化与其破裂过程中的裂隙形成、发育和扩展密不可分, 对于冲击型的煤岩动力灾害预报有着较大的理论意义和应用前景。

关键词: 冲击倾向性煤岩; 电阻率; 单轴压缩; 裂隙

0. 引言

电阻率是岩石一个重要的电性参数, 有关岩石电阻率受载破裂过程中的电阻率变化的实验研究及在应用岩石电阻率变化预报地震和瓦斯突出方面, 国内外学者作了大量的工作。

Brace and Orange 应用电阻率二极法测量水饱和火成岩和沉积结晶岩被压裂到破裂时电阻率的变化, 得出其减少量达一个数量级, 大部分变化发生于超过破裂应力一半时, 于是 Brace 和 Orange 提出测量岩石电阻率可以揭示岩石破裂过程的细节, 并在较大程度上发出临震警告^[1]。帕尔霍敏柯和邦达连柯观测到辉绿岩、玄武岩和橄榄岩在单轴压缩应力下电阻率减少 5%—30%, 其应力远在破裂应力的一半以下。Dokoupil 等 1967 年报告了单轴应力对电阻率影响的某些测量结果 (1MHz)。这些岩石是干燥的, 对约 1kbar 的压力, 花岗岩减少 80%, 辉绿岩减少 40%^[2]。山崎良雄实验证明了特殊凝灰岩的应变有异常的电灵敏度, 也观测到岩石电阻率随应力产生变化^[3]。陈大元、陈峰、安金珍^[4-9]等做了单轴压缩、低围压三轴压缩、剪切和二维约束的单轴压缩下岩石电阻率变化的实验研究, 得出了有补给水实验和无补给水实验电阻率变化整体形态相似, 且电阻率变化出现明显的方向性; 以及岩石视电阻率变化最大的各向异性主轴方向与岩石的主破裂方向基本一致的结果。郝锦琦^{[10][11]}等在岩石单轴压缩过程中应用层析成像法重建其内部真电阻率分布的图象, 探讨了岩石电阻率明显变化的机理。重庆大学杜云贵^[12]等研究了南桐煤的导电性质, 重庆煤科院^[13]对分布于全国 8 种不同变质程度的煤进行了电阻率和介电常数的测定, 中南大学何继善^[14]等建立了瓦斯突出煤体电性参数观测系统, 研究了突出煤体的导电性质。

煤岩作为一种特殊的岩石, 电阻率也是它的一种重要电性参数。目前, 在受载情况下其电性参数变化的实验研究较少。基于此, 本文对有冲击倾向性的煤岩进行了单轴压力实验, 且研究其电阻率的变化规律, 这对利用电磁辐射技术和电阻率变化预测预报冲击矿压、顶板来压等煤岩动力灾害有着重要的意义。

1. 受载煤岩电阻率测试实验

1.1 样品

¹本课题得到国家自然科学基金 (项目编号: 50204010)、国家自然科学基金仪器专项 (项目编号: 50427401)、国家“十五”科技攻关计划 (项目编号: 2005BA813B-3-09)、国家 973 计划 (项目编号: 2005CB221505) 的资助。

实验用的4个煤样均采自甘肃砚北煤矿二水平2502采区250205^上工作面,煤样的平均单向抗压强度为10.58MPa,煤样平均动态破坏时间为243ms,平均弹性指数为8.06,平均冲击能指数为5.41,对比《中华人民共和国行业标准》MT/T174-2000,该工作面煤样具有强冲击倾向性。实验煤样为圆柱状,其长度分别为16.8cm、18.4cm、16cm、15.4cm,直径均为5.0cm,所作煤样上、下表面平行、光滑,以利于和压力压头接触,受力均匀。

1.2 实验方法

实验主要采用压力机、Resitest-4000电阻率测试仪和计算机。电阻率测试仪包括主机、Wenner探头、硫酸铜电极(传感器)和标准块,它在同一点测试时准确度在1%以内。Wenner探头的长度为15cm,其上有一排4个电极,每个电极的间距是50mm,故所取煤样必须大于15cm。通过外面2个电极产生电流,通过里面2个电极测试所产生的电压;标准块的作用是检验仪器是否工作正常。Resitest-4000仪器上显示的结果为电阻率($\Omega \cdot m$)。在计算电阻率时所用公式为: $R = V / I, \rho = 2\pi aR$;其中, R ——电极电阻; V ——电极电压; I ——电极电流; ρ ——电阻率; a ——电极间距。

建立了有冲击性倾向煤样加载的电阻率测量实验系统,如图1所示。分别把4个煤样放在压力机压头上,煤样上下垫上绝缘板,使其充分接触,启动压机,使压头和绝缘板接触。由于条件限制,在进行加压过程中对煤样的电阻率测试线如图2所示,当压力达到0.1kN、1kN、2kN、3kN、4kN、5kN、6kN、7kN、8kN、9kN时,停止并保持压力值不变,立刻进行电阻率的测试,读取测试值进行记录,然后再增加压力值,直到煤样破坏。测试结果取三条线的电阻率平均值为该煤样的电阻率值,如图3—6所示。

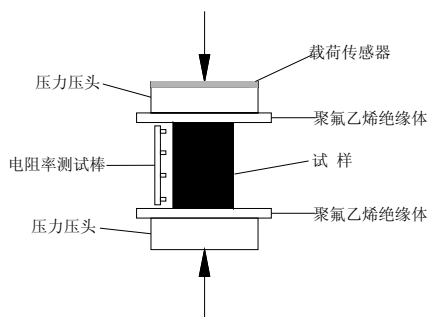


图1 实验系统
Fig.1 Experiment system

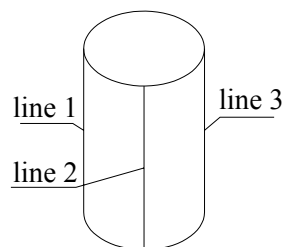


图2 测试线
Fig.2 test line

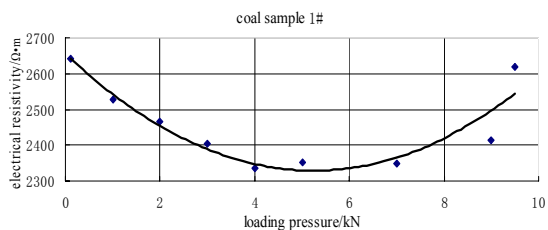


图3 1#煤样电阻率值
Fig.3 the electrical resistivity of 1# coal sample

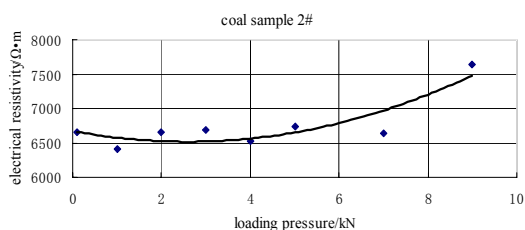


图4 2#煤样电阻率值
Fig.4 the electrical resistivity of 2# coal sample

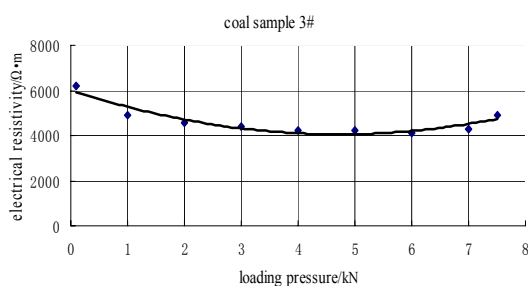


图 5 3# 煤样电阻率值

Fig.5 the electrical resistivity of 3# coalsample

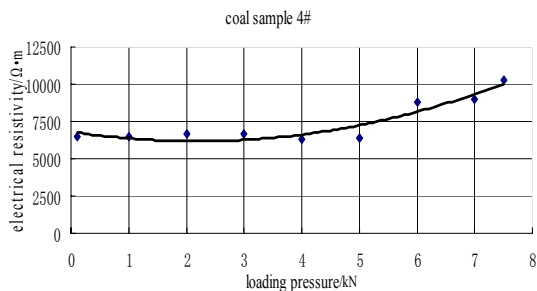


图 6 4# 煤样电阻率值

Fig.6 the electrical resistivity of 4# coalsample

2. 实验结果分析

由图 4—6 可得, 所作实验曲线整体上大致成“凹”型曲线。随着压力的增加, 煤样电阻率逐渐减小; 达到破裂应力值的一半左右时, 电阻率达到最小值; 继续加载, 电阻率将升高, 直到第一次出现主破裂。在单轴压缩条件下, 煤样电阻率变化最大的地方是破坏应力值的一半左右, 电阻率的变化率分别是 11.5%、16.1%、32%、38.7%。这与 Brace 等学者作的实验结果相同, 但是 Brace 等采用的是二极法, 测试结果反映了岩石平均真电阻率的变化, 而本实验采用的是对称四极法, 测试结果为视电阻率, 由于在煤岩动力灾害等地电阻率预报中研究的是大地电阻率的变化, 因此, 视电阻率变化的实验更具有现实意义。

煤样出现主裂纹后在继续加载的情况下, 电阻率也存在相同的变化, 5# 煤样在达到 6 kN 时表面有小块形成劈裂, 到达 7.3 kN 时发生破裂, 抛出部分煤块, 在 7.5 kN 时测试, 电阻率继续升高, 甚至超出电阻率测试仪器的量程, 直到最后出现失稳状态。1#、2#、3#、4# 存在类似的现象。

煤岩在单轴压缩作用下相继进入非线性压密和线弹性阶段, 在这两个阶段, 存在于煤样内部的后生裂隙和天然缺陷(微裂纹、微孔隙等)在外载作用下逐渐压密闭合, 导致其内部结构发生了变化——颗粒之间接触更加紧密, 孔隙体积缩小, 水所占比例相对增长, 局部形成饱和状态, 电阻率减小, 达到峰值压应力的一半左右时, 电阻率达到极小值。在微裂纹稳定扩展阶段中, 随压应力增加, 沿煤样内的原生和次生裂隙的端部或内部缺陷, 间夹杂质等引起局部应力集中或裂隙的剪切运动而引起新的微裂纹逐渐增多, 单个裂纹缓慢增长, 形成了新的空隙。如果导电液能进入新裂隙就构成新的导电通路, 使电阻率减少; 反之, 电阻率就会增加。随着载荷的增加, 煤样内斜交或平行加载方向的裂隙扩展迅速, 裂隙进入不稳定发展阶段, 裂纹在试件某些部位密集、贯通, 形成某些宏观裂缝, 从而进入裂纹加速扩展直至破裂阶段, 此时电阻率也就升高, 如果宏观裂缝很大, 甚至会导致电阻率非常大。

3. 结论

通过对受载煤岩电阻率实验研究, 得出了以下结论:

- (1) 建立了有冲击倾向性煤样在单轴压缩条件下测试其电阻率变化的实验系统;
- (2) 实验曲线整体上大致成“凹”型曲线;
- (3) 煤样电阻率随压力增加逐渐减少, 当达到破裂应力值的一半左右时, 电阻率达到最小值; 继续加载, 电阻率将升高, 直到出现第一次主破裂; 煤样出现主破裂后在继续加载的情况下, 电阻率会继续升高, 甚至会超出电阻率测试仪器的量程, 直到到完全失稳。
- (4) 受载煤岩的电阻率变化与其破裂过程中的裂隙形成、发育和扩展密不可分, 对于

冲击型的煤岩动力灾害预报有着较大的理论意义和应用前景。

参考文献

- [1] Brace W F. and Orange A S. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73 :1433~1445
- [2] 钱家栋,陈有发,金安忠.地电阻率法在地震预报中的应用[M].北京:地震出版社,1985
- [3] 山崎良雄. 变形岩石的电阻率(二) 沉积岩的进一步研究[J]. *Bullet in of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1966, 44 (3) : 44~49
- [4] 陈大元, 陈峰, 王丽华. 1983. 单轴压力下岩石电阻率的研究——电阻率的各向异性[J]. *地球物理学报*, 1983, 26 (增刊): 783~792
- [5] 陈大元,修济刚,安金珍等.岩石不同变形阶段电阻率变化各向异性特征研究. 见:中国地球物理学会年刊.北京:中国建材工业出版社,1996.207
- [6] 安金珍,修济刚,陈峰等. 单轴压力下有补给水岩石电阻率变化各向异性研究. *中国地震*,1996,12(3):300~306
- [7] 陈峰,修济刚,安金珍等. 用动态岩石电阻率变化各向异性探测岩石破裂前兆和确定主破裂扩展方向. *地震学报*,2000,22(2):210~213
- [8] 陈峰,修济刚,安金珍等. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究. *地震学报*,2000,22(3):310~318
- [9] 陈峰,安金珍,廖椿庭等.电阻率下降异常与岩石破裂前兆. *中国地震学会第七次摘要集*,1998.265
- [10] 郝锦绮,冯锐,周建国,等.岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J].*地球物理学报*,2002,45(3):426-434
- [11] 郝锦绮,冯锐,李晓芹等.对样品含水结构的电阻率CT研究[J].*地震学报*,2000,22(3):305~309
- [12] 杜云贵, 鲜学福等. 南桐煤的导电性质研究[J], *重庆大学学报*, 1993, 16(3): 145~148
- [13] 蒋成站等. 煤层电性参数测试技术完善的研究[研究报告]. 重庆: 煤炭科学研究总院重庆分院, 1994
- [14] 何继善, 吕绍林著. 瓦斯突出地球物理研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999

The experimental study on the electric resistivity of loaded coal samples

Wang Yungang, Wang Enyuan, Li Zhonghui, Liu Zhentang, Liu Xiaofei
School of Mining and Safety Engineering, CUMT, Xuzhou, Jiangsu (221008)

Abstract

The experimental studies on electrical resistivity of rock samples at home and abroad under uniaxial compression are stated in the paper. According to the method, the electrical resistivity method of coal samples with the outburst liability is brought forward. Experiments results are as follows: (1) The experimental curves are basically like concave type. (2)The electrical resistivity changes of coal samples in the uniaxial compression show that coal samples' electrical resistivity decreases with increasing uniaxial compression press, and begins to increase while reaching half of rupture press, and the electrical resistivity increase continuously if keeping on loading until rupture.(3)This shows clearly that there must have a close relationship between the electrical resistivity changes of loaded coal samples and their fissures induced by the pressure.The research has the certain significance in the abstract and foreground in the application for the disaster prediction of the dynamical catastrophes of coal or rock.

Keywords: coal samples with the outburst liability; electrical resistivity; uniaxial compression; fissures

作者简介: 王云刚(1978—), 男, 山西晋城人, 中国矿业大学(徐州)在读博士生, 主要从事煤矿动力灾害防治方面的研究。