



文章编号:1671-251X(2015)09-0026-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.09.008

刘永杰,陈鹏,张立强,等.含瓦斯煤循环加载破坏表面电位实验研究[J].工矿自动化,2015,41(9):26-30.

含瓦斯煤循环加载破坏表面电位实验研究

刘永杰, 陈鹏, 张立强, 李思瑶

(华北科技学院 安全培训部, 河北 燕郊 065201)

摘要:为了研究循环加载条件下瓦斯对煤体破坏表面电位的影响,搭建了含瓦斯煤受载破坏表面电位实验系统,测试并分析了不同瓦斯压力条件下,煤体循环加载破坏产生表面电位信号的特征规律,探讨了有瓦斯参与情况下煤体受载破坏的机理。实验结果表明,煤体在有瓦斯的条件下受载破坏能够产生表面电位信号,且电位信号与应力和瓦斯的变化趋势具有一定的关联性;对于同一类型煤样,随着充入瓦斯压力的增加,电位信号最大时的应力水平逐渐减小;在循环加载过程中,当应力超过前一次加载应力最大值时,电位信号明显增大。

关键词:煤与瓦斯突出;含瓦斯煤;受载破坏;表面电位

中图分类号:TD713.1

文献标志码:A

网络出版时间:2015-08-29 15:41

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150829.1541.008.html>

Experimental research of surface potential of coal containing gas under cyclic loading

LIU Yongjie, CHEN Peng, ZHANG Liqiang, LI Siyao

(Security Training Department, North China Institute of Science and Technology,
Yanjiao 065201, China)

Abstract:In order to research influence of gas on surface potential of coal containing gas under cyclic loading, an experimental system about surface potential of coal containing gas under cyclic loading was built. Characteristic laws of surface potential signals were tested and analyzed in coal destruction process by cyclic loading under different gas pressure, and mechanism of loaded destruction of coal containing gas was discussed. The experimental results show that coal containing gas can produce surface potential signal in loaded destruction process, and the surface potential signal has some relevance with stress and gas change. For the same type of coal samples, stress level under the maximum surface potential decreases as gas pressure increases. The surface potential signals obviously increases when stress is larger than the last maximum during cyclic loading.

Key words:coal and gas outburst; coal containing gas; loaded destruction; surface potential

0 引言

煤与瓦斯突出是煤矿井下含瓦斯煤岩体以粉碎状从煤岩层向采掘空间急剧运动并伴随大量瓦斯喷出的动力现象,原始煤岩体中的能量大多以电磁能、

声能、弹性能等形式释放出来^[1-5]。矿井生产过程中,原始煤体处在应力和瓦斯压力共同作用下,其破坏过程受地应力和瓦斯压力的综合作用,因此研究瓦斯对煤体破坏表面电位影响的特征规律,对于深入理解煤与瓦斯突出演化过程具有重要的理论

收稿日期:2015-05-11;修回日期:2015-07-19;责任编辑:李明。

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(3142015051,3142015001)。

作者简介:刘永杰(1987—),男,河南永城人,讲师,硕士,现主要从事煤化工方面的教学工作,E-mail:liuyongjie@ncist.edu.cn。

价值。

国内外学者围绕煤岩破坏带电现象开展了大量的研究工作。P. III. 基利凯耶夫等^[6]研究了力荷载作用下岩石的极化现象,认为其与压电效应及动电现象无关,岩石中应力场不均匀就会出现极化;A. Takeuchi 等^[7]在短时间内对辉长岩和花岗岩进行加载实验,得到瞬间电流和电位信号;潘一山等^[8-10]对不同加载速率下煤岩受载破坏产生电荷信号的情况进行了实验研究,并在现场用电荷仪进行了测试,得出了岩体电荷可用于预测煤矿动力现象的结论;李忠辉等^[11-14]研究了煤岩破坏表面电位特征规律;宋良等^[15]研究了不同孔隙瓦斯压力条件下含瓦斯煤单轴压缩的破坏特征,发现随着瓦斯压力的增加,含瓦斯煤的抗压强度、弹性模量逐渐减小。

本文通过对不同瓦斯压力下煤体循环加载破坏表面电位信号进行实验研究,探讨了瓦斯对煤体受载破坏表面电位的影响,对煤矿预测煤岩动力灾害具有重要的理论意义。

1 实验系统及实验方案

1.1 实验系统

含瓦斯煤循环加载破坏表面电位实验系统由密封缸体、表面电位数据采集系统、高压瓦斯气源、加载系统、管路系统、阀门、压力表等组成,如图 1 所示。表面电位数据采集系统为 LB-IV 型多通道电位数据采集系统。加载系统采用 YAW 微机控制电液伺服压力试验机。密封缸体采用刚性结构,缸体上部开口连接气体管路,缸体中部连接电极线路。实验采用体积分数为 99.9% 的瓦斯。

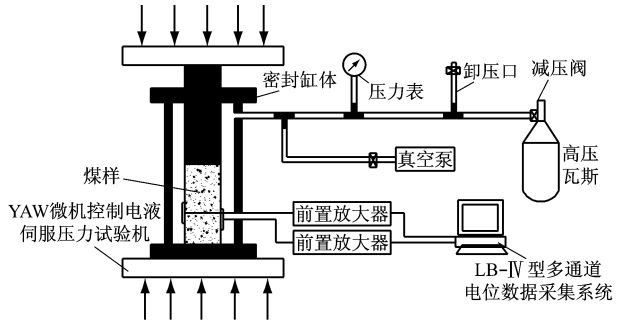


图 1 实验系统组成

1.2 实验煤样及其制备

实验煤样取自某矿采煤工作面,由原煤加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体,用砂纸将两端磨平。

1.3 实验方案

为了分析在不同瓦斯压力下煤体受载破坏产生表面电位信号的特征规律,选用压力分别为 0.2,

0.4,0.6,0.8 MPa 的瓦斯进行实验。加载方式为轴向位移控制,加载速度为 0.1 mm/min。实验过程:首先对煤样加载 1.5 MPa,然后卸载至 0.25 MPa;随后加载到 3 MPa,之后卸载至 0.25 MPa;再次加载到 4.5 MPa,之后卸载至 0.25 MPa;最后直接加载至煤样破坏。

2 实验结果与分析

2.1 不含瓦斯煤实验

图 2 为不含瓦斯煤循环加载破坏表面电位实验结果。可看出电位信号与应力的变化对应较好。在每一个加载段,电位信号逐渐增大;卸载时,电位信号减小,但不会完全消失;在第 2 次加载过程中,电位信号增大,卸载过程中电位信号减小,但比第 1 次卸载时的电位信号大;第 3 次、第 4 次加卸载与第 2 次现象相似。另外,在 4 次加载过程中,电位信号的表现不完全相同。第 2 次加载时,当应力超过第 1 次加载应力的最大值时,电位信号才明显增大,第 3 次、第 4 次加载时情况类似,体现了电位信号在循环加载过程中的记忆效应。

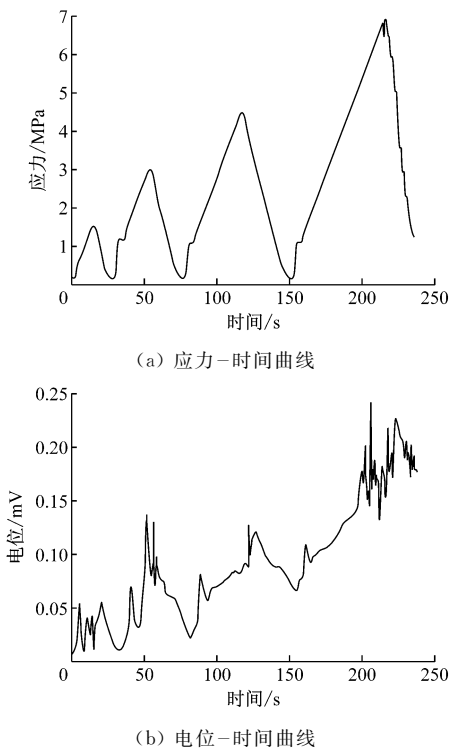


图 2 不含瓦斯煤循环加载破坏表面电位实验结果

分析认为在煤体失稳破坏前(应力水平小于最大破坏应力水平的 70%~80%)进行循环加载时,若施加的应力低于先期施加的最大应力,因煤体结构损伤扩展具有不可逆性,煤体内部结构基本不发生新的损伤和扩展,在裂隙壁面产生的电荷的能级

较弱,只有少部分电荷挣脱束缚成为自由电荷,所以得到的电位信号较少或基本没有电位信号;在应力超过先前最大应力后,煤体内部结构形成新的损伤和扩展,电荷数量和能级突然增大,大量电荷逃逸成为自由电荷,导致电位信号突然增大。

2.2 含瓦斯煤实验

图 3 为瓦斯压力为 0.2 MPa 时,煤样循环加载破坏表面电位实验结果。可看出表面电位信号和应力变化趋势一致,在每一个加载段,随着应力的增加,电位信号逐渐增大;达到应力阶段最大值后,电位信号随应力的减小而减小。在第 2 次加载过程中,当应力最大值超过第 1 次加载时,电位信号明显增大。第 3 次、第 4 次加载过程情况类似。煤样主破裂时电位信号最大值约为 0.7 mV,比不含瓦斯时大,对应的应力值比不含瓦斯时小。

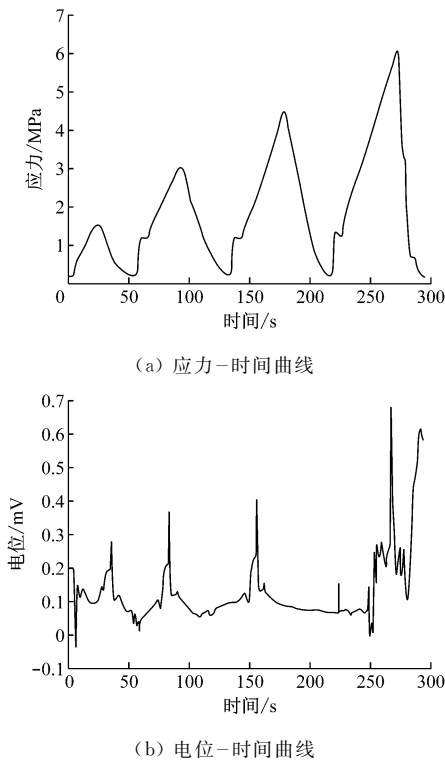


图 3 瓦斯压力为 0.2 MPa 时煤样循环加载破坏表面电位实验结果

分析认为对于含瓦斯煤,其内部孔隙和裂隙中的瓦斯常以游离和吸附状态存在,瓦斯压力和煤体骨架对其吸附能力直接影响煤体的力学行为。当煤体受载时,其内部形成微裂纹和裂隙,而范德华力在微裂纹和裂隙表面处不平衡,产生相互吸引的黏聚作用,不利于裂纹扩展。而煤体含瓦斯气体时,煤体表面对瓦斯气体分子的吸附减弱了范德华力不平衡现象,使黏聚力降低,有利于裂纹扩展。另外,煤体吸附瓦斯后,使煤体的应力状态、力学性质及变形等

发生变化,孔隙内的瓦斯压力作用于煤体,使煤体易发生膨胀变形,分布在煤体内部的瓦斯会对煤体的微裂纹、裂隙造成破坏,使煤体内部形成新的裂隙。应力使煤体内部瓦斯压力不平衡,使得产生的表面电位较大。

图 4 为瓦斯压力为 0.4 MPa 时,煤样循环加载破坏表面电位实验结果。可看出此时电位信号比瓦斯压力为 0.2 MPa 时大,加载时电位信号随应力增大而增大,卸载时电位信号相应减小,且在 4 次循环加载过程中,电位信号峰值随应力峰值的增大而增大。由于再次加载时瓦斯和应力共同楔开煤体新的裂纹,且煤体受载时瓦斯气体分子在煤体内部流动产生流动电位,出现电位变化,所以增强了循环加载电位信号的记忆效应。

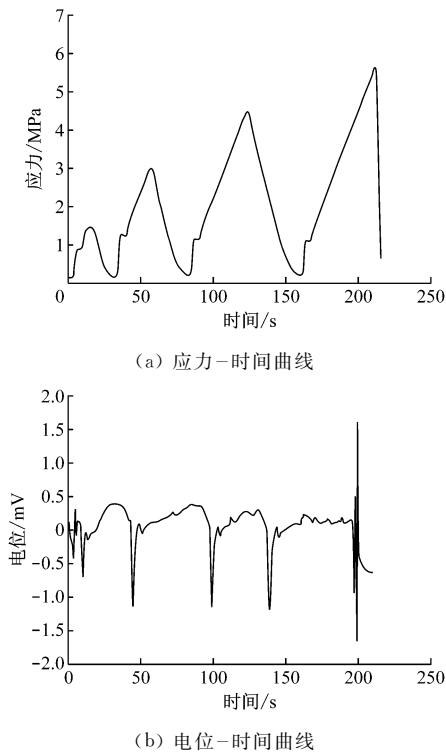


图 4 瓦斯压力为 0.4 MPa 时煤样循环加载破坏表面电位实验结果

图 5、图 6 分别为瓦斯压力为 0.6, 0.8 MPa 时,煤样循环加载破坏表面电位实验结果。可看出瓦斯压力为 0.6 MPa 时,煤体主破裂产生的表面电位信号最大值约为 2.5 mV,约为瓦斯压力为 0.2 MPa 时的 3.6 倍,主破裂时应力为 5.5 MPa;瓦斯压力为 0.8 MPa 时,煤体主破裂产生的表面电位信号最大值约为 6.5 mV,约为瓦斯压力为 0.2 MPa 时的 9.5 倍,主破裂时应力为 5 MPa。

表 1 为实验结果。可看出含瓦斯煤表面电位信号最大时的应力比不含瓦斯煤小,且煤体破裂产生

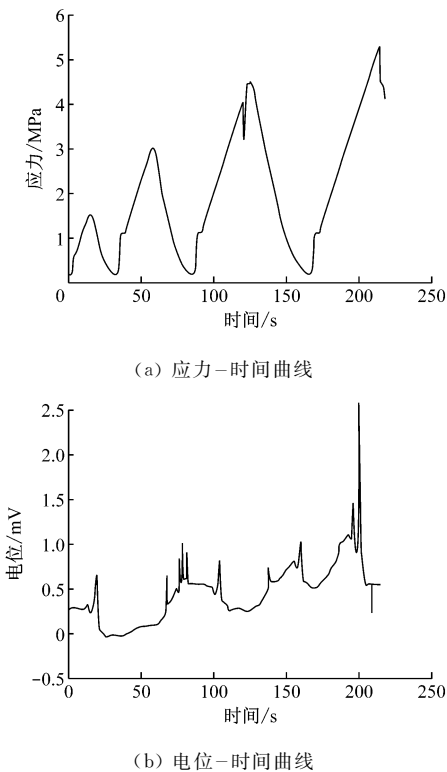


图5 瓦斯压力为0.6 MPa时煤样循环加载破坏表面电位实验结果

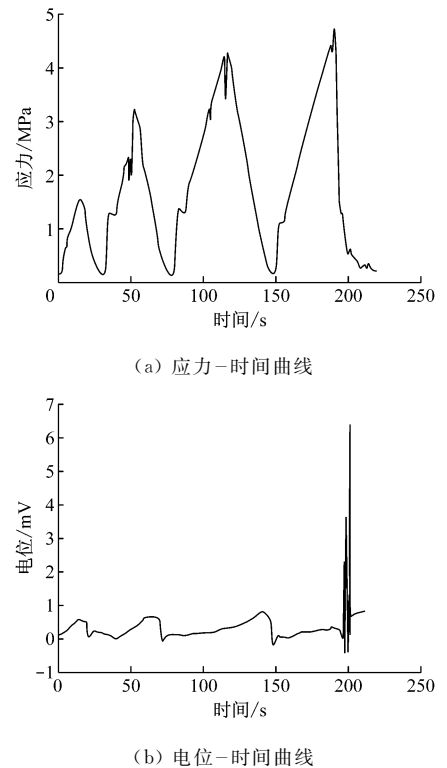


图6 瓦斯压力为0.8 MPa时煤样循环加载破坏表面电位实验结果

最大电位信号时的应力水平随瓦斯压力的增加而减小。瓦斯压力为0.2 MPa时,电位信号最大时的应力水平约为88%,瓦斯压力为0.8 MPa时,电位信

号最大时的应力水平约为73%。这是因为当含瓦斯煤受载破坏时,分布在煤体内部的瓦斯对煤体的微裂纹、裂隙产生破坏作用,使煤体内部形成新的裂隙,造成已有的和新的裂隙失稳扩展,同时应力使得煤体内部瓦斯压力不平衡,压力梯度促使瓦斯渗流,当瓦斯在煤的孔隙内产生渗流时,瓦斯气体与壁面形成的气固界面上因双电层效应而产生一定的流动电势,瓦斯压力越大,产生的裂隙和流动电势越大,使表面电位信号最大值越大,对应的应力水平减小。

表1 实验结果

煤样类型	电位信号 最大值/mV	应力水 平/%
不含瓦斯	0.25	93
瓦斯压力为0.2 MPa	0.7	88
瓦斯压力为0.4 MPa	1.5	83
瓦斯压力为0.6 MPa	2.0	81
瓦斯压力为0.8 MPa	4.0	73

3 瓦斯对煤体破坏表面电位的影响机理

含瓦斯煤内部存在大量孔洞、裂隙,其变形破坏时内部微小孔洞和裂隙受到拉伸作用而扩展,最后汇合贯通。含瓦斯煤的受载破坏是外应力与瓦斯共同作用的结果。含瓦斯煤中的瓦斯包括自由瓦斯和吸附瓦斯,自由瓦斯对煤体的破坏程度与煤体内裂纹所处的状态有关,当裂纹为张开裂纹时,根据Griffith理论,瓦斯阻碍了裂纹闭合,且随着瓦斯压力的增大,裂纹闭合越来越困难,降低了煤体的抗压强度。从表1可看出,随着瓦斯压力的增大,表面电位最大时的应力水平逐渐减小。当裂纹为闭合裂纹时,随着瓦斯压力的升高,闭合裂纹减少,张开裂纹不断增加,由于张开裂纹更易受破坏而扩展,所以煤体强度进一步降低。

吸附瓦斯压力与煤体表面能成反比,根据Gibbs方程^[9]可知

$$\Delta\gamma = \frac{RT}{MS} \int_0^p X d\ln(p/\text{MPa}) \tag{1}$$

式中: $\Delta\gamma$ 为煤体表面能变化; R 为气体常数; T 为Kelvin绝对温度; M 为吸附瓦斯的摩尔质量; S 为煤体的比表面积; X 为吸附瓦斯的量; p 为吸附瓦斯压力。

吸附瓦斯降低了煤体的表面能,改变了煤体内局部应力场的分布,导致煤体膨胀变形,而煤体的膨胀变形是裂纹产生、扩展与变形伸长的结果,该过程

降低了煤体的实际强度。

在煤体受载初期,微裂纹、裂隙没有扩展,瓦斯对煤体骨架起到支撑作用;当裂隙被破坏时,瓦斯向新生微裂纹、裂隙表面扩散,有效促进裂纹扩展,从而产生较大的表面电位,且瓦斯压力越大,裂纹扩展越多,表面电位呈增大趋势。煤体在破坏过程中,其断裂面上电荷分离是产生表面电位的主要机制,裂纹尖端的裂纹壁面间距较小,壁面上异号电荷的引力更大,这种引力会阻止裂纹开张扩展,宏观表现是煤体强度增加,但当有瓦斯存在时,煤体裂纹壁间引力减小,有利于裂纹的扩展,宏观表现是煤体强度降低。

4 结论

(1) 含瓦斯煤在循环加载破坏时能够产生表面电位,且产生的电位信号与应力变化趋势具有较好的一致性。随着应力的增加,电位信号不断增大,达到最大值后随应力的减小而减小。对于同一类型煤体,含瓦斯煤受载破坏产生的电位信号比不含瓦斯煤的电位信号大。

(2) 对于不同瓦斯压力,含瓦斯煤受载破坏产生的表面电位信号不同。煤体含有的瓦斯压力越大,其受载破坏产生的电位信号最大值越大,且随着瓦斯压力增加,电位信号最大时的应力水平减小。在循环加载过程中,当应力超过前一次加载应力最大值时,电位信号明显增大,即电位信号在循环加载过程中表现出记忆效应。

(3) 通过含瓦斯煤循环加载破坏表面电位实验研究,可看出含瓦斯煤的失稳破坏是外应力和瓦斯共同作用的结果,孔隙瓦斯压力对煤体受载破坏过程中产生的表面电位信号有重要作用。

参考文献:

- [1] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1999.
- [2] 梁冰,章梦涛.煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论

[J].煤炭学报,1995,20(5):492-496.

- [3] HUANG W, CHEN Z, YUE J, *et al.* Failure modes of coal containing gas and mechanism of gas outbursts [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(4): 504-509.
- [4] 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.
- [5] 何学秋,刘明举.含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [6] 基利凯耶夫 P III,米罗什尼钦科 M И.力荷载下的岩石电场[M]//萨多夫斯基 M A.苏联地震预报研究文集.张肇诚,何世海,张炜,等,译.北京:地震出版社,1993.
- [7] TAKEUCHI A, LAU B W S, FREUND F T. Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31(4-9): 240-247.
- [8] 赵扬锋,潘一山,刘玉春,等.单轴压缩条件下煤样电荷感应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011, 30(2):306-312.
- [9] 唐治,潘一山,李忠华,等.煤岩体电荷检测在动力灾害预测中的应用[J].中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3):109-112.
- [10] 赵扬锋,潘一山,李国臻,等.岩石变形破裂过程中电荷感应信号的检测[J].防灾减灾工程学报, 2010, 30(3):252-256.
- [11] 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,2009.
- [12] 王恩元,李忠辉,刘贞堂,等.受载煤体表面电位效应的实验研究[J].地球物理学报, 2009, 52(5): 1318-1325.
- [13] 刘杰,王恩元,李忠辉,等.预制裂纹煤样单轴压缩表面电位实验研究[J].煤炭学报, 2011, 36(7): 1135-1138.
- [14] 李忠辉,王恩元,刘贞堂,等.煤岩破坏表面电位特征规律研究[J].中国矿业大学学报, 2009, 38(2): 187-192.
- [15] 宋良,刘卫群,靳翠军,等.含瓦斯煤单轴压缩的尺度效应实验研究[J].实验力学, 2009, 24(2):127-132.