

文章编号:0253-9993(2012)09-1499-06

瓦斯压力对卸围压原煤力学及渗透特性的影响

尹光志^{1,2,3},李铭辉^{1,2},李文璞^{1,2},蒋长宝^{1,2,3},曹 偈^{1,2},张千贵^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030;2. 重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400030;3. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室,重庆 400030)

摘要:运用自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流试验装置,以原煤煤样作为研究对象,在不同瓦斯压力条件下对含瓦斯煤进行了固定轴向应力的卸围压瓦斯渗流试验,研究卸围压过程中瓦斯压力对煤体的力学及渗透特性的影响。研究表明:开始卸围压后,煤体出现明显的扩容现象,径向发生明显膨胀应变,煤体中的渗流通道张开,煤体中瓦斯的渗流速率随之加快;随着瓦斯压力的升高,解除单位围压后煤样产生的变形变大,渗流速率升高的速率也随之增大;瓦斯压力越高,煤样从开始卸围压起至破坏的时间越短,即煤体强度越低;在卸围压初始阶段,煤样变形模量变化不大,在进入屈服阶段和失稳破坏阶段后,煤样的变形模量减小的速率开始明显加快。从煤样开始卸围压至破坏之前,煤样的变形模量下降了3.71%~7.45%;煤样的泊松比逐渐增大,围压与泊松比的对应具有较为明显的幂函数关系。

关键词:瓦斯压力;卸围压;原煤;力学特性;渗透特性

中图分类号:TD712.6 **文献标志码:**A

Influence of gas pressure on mechanical and seepage characteristics of coal under unloading condition

YIN Guang-zhi^{1,2,3}, LI Ming-hui^{1,2}, LI Wen-pu^{1,2}, JIANG Chang-bao^{1,2,3}, CAO Jie^{1,2}, ZHANG Qian-gui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing 400030, China)

Abstract: Based on domestic-developed triaxial servo-controlled seepage equipment for thermal-hydrological-mechanical coupling of coal containing methane, the experimental study of unloading confining pressure of coal was performed on coal samples under different gas pressure. The results show that the characteristic of distinct dilatancy is displayed in the process of unloading confining pressure, therefore seepage channels in coal body are extended and seepage velocity increases. The deformation of coal containing methane per unit decreased confining pressure and seepage velocity increases with the increase in gas pressure in the same stress paths. The compressive strength decreases gradually with the increase of gas pressure. In the initial stage of unloading confining pressure, deformation modulus of coal containing methane changes little. After the yielding occurs, it decreases obviously. The deformation modulus decreases 3.71%~7.45% in the process of unloading confining pressure. Meanwhile, the Poisson's ratio turns to increase and a function can be used to describe the relationship between confining pressure and Poisson's ratio.

Key words: gas pressure; unloading confining pressure; coal; mechanical characteristics; seepage characteristic

当今学者对于加载岩石力学进行了大量的研究, 而岩石类材料在卸载条件下的力学特性与其在加载

收稿日期:2012-05-06 责任编辑:毕永华

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201203);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-004);国家自然科学基金资助项目(51174241)

作者简介:尹光志(1962—),男,四川西昌人,教授,博士生导师。E-mail:gzyin@cqu.edu.cn

条件下的情况是有区别的^[1]。在地下采煤开挖过程中,如石门揭煤等情况下煤层常处于卸荷工况。矿山中的开挖行为是对一个处于三向原岩应力状态的煤岩体卸除围压,而随着围压的解除,煤岩体易发生失稳破坏^[2],造成瓦斯涌出及煤与瓦斯突出^[3-4]等煤矿动力灾害。因此,开展煤岩在卸荷条件下的试验研究具有重大的理论意义和实践指导作用。

国内外学者已经进行了一些岩石类材料卸荷条件下力学特性的研究工作。黄润秋和黄达^[5]重点从破裂特征方面研究了卸荷条件下花岗岩的力学特性;陈卫忠等^[6]研究了脆性岩石卸围压特性与岩爆机制;苏承东等^[7-8]进行了不含瓦斯原煤煤样的卸围压试验并对其声发射特性进行了研究;尹光志等^[2]探讨了不同卸围压速度对含瓦斯煤力学特性和渗流特性的影响;蒋长宝等^[9-10]利用含瓦斯型煤煤样分别进行了一级和多级卸围压试验;黄启翔等^[11]研究了卸围压过程中型煤试件的轴向力学参数变化规律。赵洪宝等^[12]对含瓦斯煤在卸围压条件下的轴向应力、径向应变演化特性进行了研究。前人的研究加深了人们对卸荷岩石力学的认识,但对于卸围压条件下含瓦斯原煤煤样力学及渗流特性的研究还鲜见报道。

本文利用自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置,以原煤试件为研究对象,以瓦斯压力作为研究变量,进行含瓦斯煤体的卸围压力学试验,同时研究其过程中的瓦斯渗流特性。

1 试验方法

1.1 试验装置

本试验采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研发的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置^[13],如图 1 所示。该设备主要由伺服加载系统、三轴压力室、水浴恒温系统、孔压控制系统、数据测试系统和辅助系统 6 个部分组成,其最大轴压为 100 MPa,最大围压为 10 MPa,力控制精度为示值的 $\pm 0.5\%$,力测试精度为示值的 $\pm 1\%$,变形测试精度为示值的 $\pm 1\%$,装置总体刚度大于 10 GN/m,采用美国 Epsilon 环向引伸计、北京七星华创质量流量控制器等高精度传感器,可用于研究含瓦斯煤的力学及渗透特性。

1.2 煤样采集与加工

试验煤样取自贵州省松河煤矿。煤样取回后,在实验室将煤样加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体标准原煤试件,将制作好的试件置于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干 12 h,然后置于干燥皿内备用。

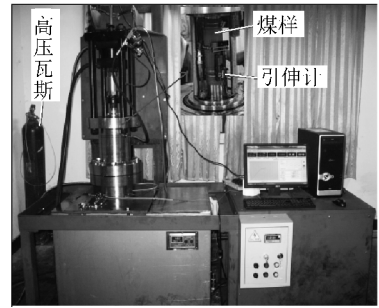


图 1 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置
Fig. 1 Triaxial servo-controlled seepage equipment for thermal-hydrological-mechanical coupling of coal containing methane

1.3 试验方案

为了确定含瓦斯煤卸围压力学及瓦斯渗流特性试验中开始卸围压时的轴向应力值(比例极限点 σ_1^s , 为三轴抗压强度的 80%),需先了解含瓦斯煤在常规三轴试验中的力学及瓦斯渗流特性。因此,本试验有两种加卸载方案。试验应力路径如图 2 所示。

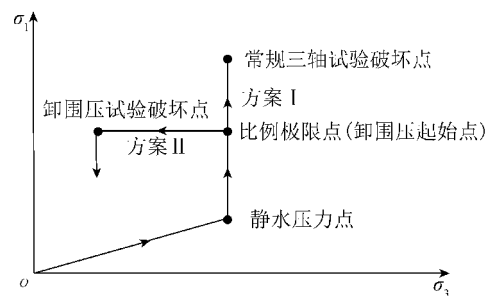


图 2 应力路径示意

Fig. 2 Sketch map of stress path

(1) 方案 I。进行常规三轴压缩试验,首先按静水压力条件逐步施加 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定值 6 MPa,然后通入瓦斯(瓦斯压力 p_1 分别为 0.5, 1.0, 1.5 MPa),待瓦斯充分吸附 12 h 后,以位移控制(0.1 mm/min)的方式连续施加轴向应力至煤岩破坏,以此得到不同瓦斯压力下含瓦斯煤的常规三轴抗压强度及瓦斯流动情况。

(2) 方案 II。进行三轴卸围压试验,首先按静水压力条件逐步施加 $\sigma_1 = \sigma_3$ 至预定值 6 MPa,然后通入瓦斯(瓦斯压力 p_1 分别为 0.5, 1.0, 1.5 MPa),待瓦斯充分吸附 12 h 后,稳定围压,以应力控制的方式连续施加轴向应力至 σ_1^s ,保持轴向应力不变,并以预定速率(0.02 MPa/s)降低围压。煤岩失稳破坏后无法承受比 σ_1^s 更大的载荷,因此将加载方式变为位移控制方式(0.1 mm/min),直至围压降低到预定值停止。同时测量整个过程中的瓦斯流动情况。试验数据记录频率为 1 次/s。

2 试验结果及分析

2.1 含瓦斯煤力学特性分析

图3给出了不同瓦斯压力下的卸围压试验中各煤样破坏时的摩尔应力圆。图中 $\sigma'_1, \sigma''_1, \sigma'''_1$ 分别对应瓦斯压力为0.5, 1.0, 1.5 MPa时的轴向应力, $\sigma'_3, \sigma''_3, \sigma'''_3$ 则分别对应相应的围压。从图3可以看出,在卸围压试验中,随着瓦斯压力的增大,相应的摩尔应力圆圆心横坐标值增大,其所对应的摩尔应力圆变小,包络的正应力-剪应力组合减少,也就是说随着瓦斯压力的增大,煤体的承载能力减小。

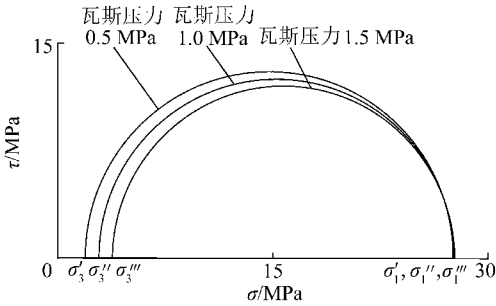


图3 不同瓦斯压力下摩尔应力圆

Fig. 3 Mohr's stress circle under different gas pressure

该结果与其他学者的研究成果^[14]相似:导致该现象的原因有两个,一是随着瓦斯压力的增大,煤样吸附的瓦斯量增多,煤样发生的膨胀变形也越大,在煤样受到外部压力限制的情况下,煤体产生的膨胀应力越大,煤样的强度也就越低;二是随着孔隙压力的增大,作用于煤样的有效应力降低,而孔隙压力的增长对于围压减小程度大大高于其对于轴向应力的减小程度,其承载能力便相应降低。

图4给出了不同瓦斯压力下煤样在卸围压过程中的轴向应变-围压特性曲线。从图4可以得出:在卸围压过程中,煤样的轴向应变在轴向应力不变的情况下继续变大,即煤样在长轴线方向继续被压缩。随着瓦斯压力的增大,煤样的轴向应变也增大,而其轴向应变增长幅度是随着瓦斯压力的增大而逐渐减小的。

图5给出了卸围压过程中径向应变的变化特征。从图5可以看出,煤样的径向变形随着围压的减小逐渐增大,并且随着围压的进一步减小,其变形速率还在加快。在卸围压过程中煤样的径向变形量随着瓦斯压力的增加而增大,这是因为随着瓦斯压力的升高使得煤样的瓦斯吸附量也在增加,那么相应煤样所受到的强度降低作用也更明显。因此,较高瓦斯压力作用下煤样的径向变形更大,而径向变形随瓦斯压力增大其增长速率逐渐减小。

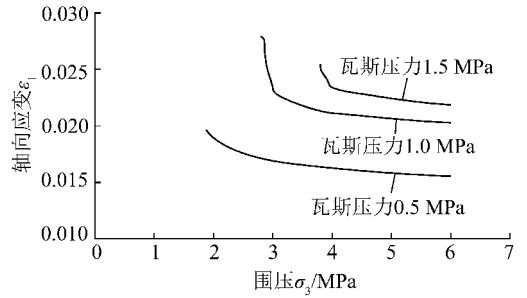


图4 卸围压过程中轴向应变变化特征

Fig. 4 Changing characteristics of axial strain in the process of unloading confining pressure

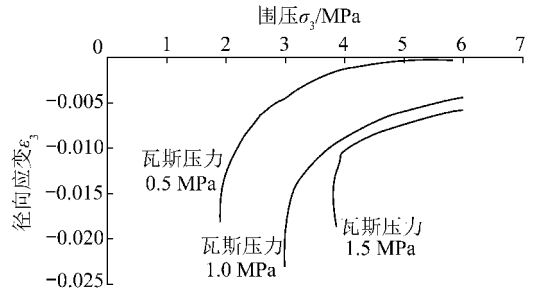


图5 卸围压过程中径向应变变化特征

Fig. 5 Changing characteristics of radial strain in the process of unloading confining pressure

图6给出了卸围压过程中体积应变的变化特征。从图6可知开始卸围压后,煤样体积应变的发展趋势立即发生改变,开始逐渐朝着变小的方向发展,这是逐渐解除围压导致煤样扩容的表现。在 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的情况下,体积应变的计算公式为

$$\epsilon_V = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (1)$$

其中, ϵ_V 为体积应变; ϵ_1 为轴向应变; ϵ_3 为径向应变。开始卸围压后,围压的解除对于 ϵ_3 影响最大,使其朝变小的方向发展;同时围压的解除也使 ϵ_1 变大,但其影响程度较 ϵ_3 小。由式(1)可知,开始卸围压后, ϵ_3 对 ϵ_V 的影响要大于 ϵ_1 对 ϵ_V 的影响。因此,虽然在卸围压过程中 ϵ_1 朝着变大的方向发展,但 ϵ_V 的总体变化趋势还是变小。

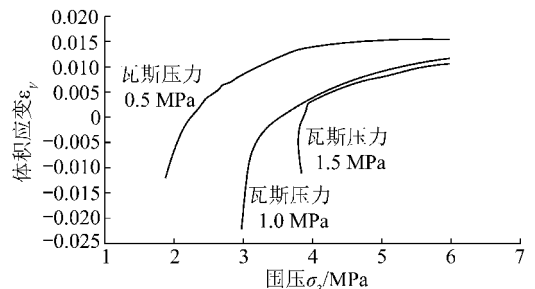


图6 卸围压过程中体积应变变化特征

Fig. 6 Changing characteristics of volumetric strain in the process of unloading confining pressure

在岩石力学研究中,变形模量、泊松比等参数一般是通过单轴压缩试验得到的,即 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 。而对于常规三轴压缩试验,可将计算公式中的 σ_1 替换为主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 进行相关计算即可。而卸围压试验中围压是在不断变化的,所以如果仍然采用常规三轴压缩试验的计算方法,就会产生误差,与实际情况不相符合。卸围压试验过程中的煤岩变形参数求解应该考虑径向变形 ε_3 和围压 σ_3 ,因此本文采用高春玉等^[15]的计算变形模量和泊松比的公式:

$$\begin{cases} B = -\varepsilon_3/\varepsilon_1 \\ \mu = (B\sigma_1 - \sigma_3)/[\sigma_3(2B - 1) - \sigma_1] \\ E = (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)/\varepsilon_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, B 为横纵向应变之比; E 为变形模量,GPa; μ 为泊松比。

图 7 给出了不同瓦斯压力下的煤样卸围压过程中围压-变形模量曲线。从图中可以看出,在卸围压初始阶段,煤样变形模量变化不大,在进入屈服阶段和失稳破坏阶段后,煤样的变形模量减小的速率开始明显加快。从煤样开始卸围压至破坏之前,煤样的变形模量下降了 3.71% ~ 7.45%。从图中还可以看出,随着瓦斯压力的增大,煤样的变形模量逐渐变小,这是由于煤体中吸附瓦斯量越大对煤体的强度降低作用越明显。

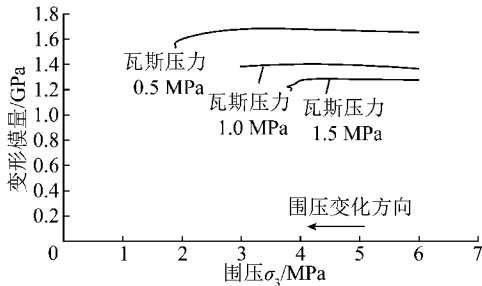


图 7 卸围压过程中变形模量变化特征

Fig. 7 Changing characteristics of deformation modulus in the process of unloading confining pressure

图 8 给出了不同瓦斯压力下的煤样卸围压过程中围压-泊松比曲线。从图中可以看出,卸围压开始后,煤样的泊松比呈现出不断增大的趋势。并且其增长速率不断升高。在进入屈服阶段后,煤样的泊松比增长突然增加,这是因为卸围压过程中的煤体径向变形不仅由弹性回弹变形造成的,还有一部分变形是由张拉裂隙导致的,而这部分裂隙多与最大主应力方向平行,所以导致煤样的径向变形明显增大,从而导致泊松比迅速增大,此时的泊松比已经不是材料本身属性意义上的泊松比了,还包含了张拉裂隙的发展。

针对不同瓦斯压力下煤样卸围压过程中的围压

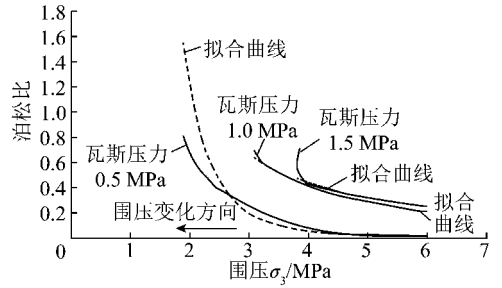


图 8 卸围压过程中泊松比变化特征

Fig. 8 Changing characteristics of Poisson ratio in the process of unloading confining pressure

σ_3 和泊松比 μ ,可建立一个关系式,按幂函数关系进行拟合可得其拟合曲线(图 8):

$$\mu = a\sigma_3^{-b} \quad (3)$$

其中, μ 为泊松比; σ_3 为围压,MPa; a, b 分别为拟合常数,随瓦斯压力的变化而变化。对于不同瓦斯压力下的情况,其 a, b 值及相应的拟合系数见表 1。

表 1 围压-泊松比曲线拟合参数

Table 1 Parameters of fitting curves of confining pressure-Poisson ratio

瓦斯压力/MPa	a	b	R^2
0.5	25.812 0	4.459	0.949 7
1.0	4.115 6	1.664	0.997 8
1.5	2.985 3	1.382	0.948 2

2.2 含瓦斯煤瓦斯渗流特性分析

图 9 给出了不同瓦斯压力下含瓦斯煤卸围压试验中的煤样轴向应变-渗流速率曲线。

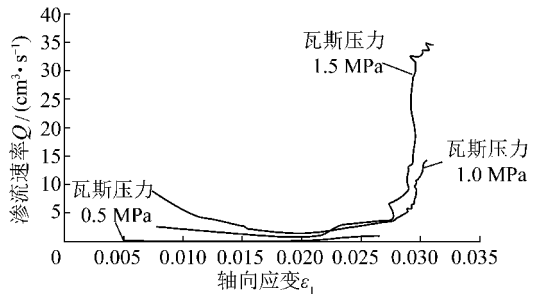


图 9 卸围压试验中轴向应变-渗流速率曲线

Fig. 9 Axial strain-seepage velocity curves in unloading confining pressure test

结合图 4 可以知道,在卸围压之前,煤样的渗流速率随着体积应力的增加呈下降趋势,而由于瓦斯压力越大,煤样吸附瓦斯量也越大,导致其受到的强度降低作用也越明显,那么在相同的受力情况下煤骨架所受到的压缩变形也就越大,渗流通道被缩小。因此,随着瓦斯压力的增大,煤样的渗流速率下降的速率也越大。开始卸围压后,随着围压的解除,煤体所

受体积应力下降,渗流速率从下降的趋势转化为开始上升的趋势。至煤样达到屈服阶段和失稳破坏阶段时,煤样的渗流速率开始急剧上升。

图 10 给出了不同体积应力下瓦斯压力与渗流速率的关系曲线。从图中可以看到,不同体积应力下煤样中瓦斯的渗流速率均随瓦斯压力的增加而加快,且其渗流速率的增长速率逐渐变大。当煤样所受体积应力为最小的 6 MPa(三向等压状态)时,渗流速率随瓦斯压力的增加而升高的幅度最大,其渗流速率的增长速率也最快。当煤样所受体积应力为 12 MPa(三向等压状态)时,相比体积应力为 6 MPa 时的情况其曲线斜率变小,即其渗流速率升高的幅度和增长速率均有所降低。而当煤样受到体积应力为 18 MPa(三向等压状态)时,相应的渗流速率升高幅度和增长速率又较体积应力为 12 MPa 时有所下降。至卸压前,此时的体积应力约为 45 MPa,煤样中瓦斯的渗流速率几乎不随瓦斯压力增加而升高。这是因为,瓦斯流经煤样渗流通道时会对煤骨架产生作用力,对渗流通道起到一个扩张的作用,抵消了部分外部载荷的作用,即降低了煤样所受到的有效应力。在煤样所受体积应力较小时,该作用力对煤样整体渗流速率会起到很重要的作用,而随着体积应力的不断上升,瓦斯压力对于外部载荷的抵消作用在不断变小,此时由于瓦斯压力变大导致的煤样吸附瓦斯量增加而使煤体强度降低的作用开始较为明显地显现出来。

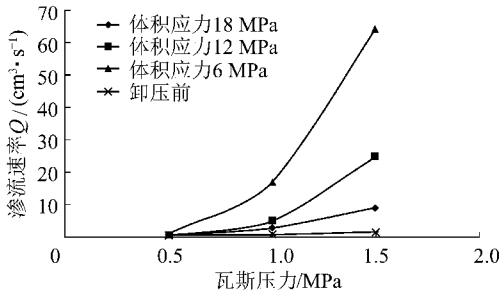


图 10 不同体积应力下瓦斯压力-渗流速率曲线
Fig. 10 Curves of gas pressure-seepage velocity in different volumetric stress

图 11 给出了卸围压过程中的围压减小量 $\Delta\sigma_3$ -渗流速率增加量 ΔQ 的关系曲线。

结合图 11 与图 6 可以得到,随着围压减小量的不断增加,煤样开始明显的出现扩容现象,伴随着煤样的扩容,煤体中瓦斯的渗流速率开始逐渐上升,即渗流速率的增加与煤样的扩容体现出良好的对应关系。图 11 中不同瓦斯压力下随着围压减小量的增加,煤样的渗流速率的增长速率也有所不同,这是由于不同的瓦斯压力导致煤样在卸围压过程中展现出

不同的变性损伤特性,进而影响与其密切相关的渗流特性。

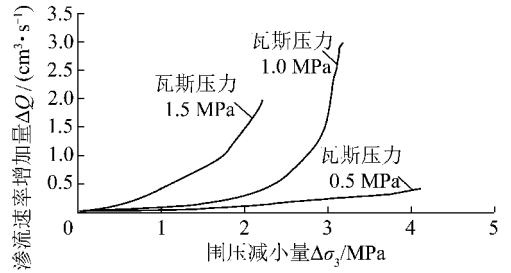


图 11 围压减小量-渗流速率增加量曲线
Fig. 11 Curves of variable quantity of confining pressure-seepage velocity

综上所述,在含瓦斯煤的卸围压试验过程中,煤体中瓦斯的渗流特性与煤体的变性损伤过程有着十分密切的关系。

3 结 论

(1) 在含瓦斯原煤样的卸围压试验过程中,在开始卸围压后,煤体出现明显的扩容现象,径向发生明显膨胀应变,因此煤体中的渗流通道张开,煤体中瓦斯的渗流速率随之加快。

(2) 随着瓦斯压力的升高,解除单位围压后煤样产生的变形变大,渗流速率的增长速率也随之升高。瓦斯压力越高,煤样从开始卸围压起至破坏的时间越短,即煤体强度越低。

(3) 在卸围压初始阶段,煤样变形模量变化不大,在进入屈服阶段和失稳破坏阶段后,煤样的变形模量减小的速率开始明显加快。从煤样开始卸围压至破坏之前,煤样的变形模量下降了 3.71% ~ 7.45%;煤样的泊松比向变大的方向发展,可用幂函数 $\mu = a\sigma_3^{-b}$ 的形式对泊松比和围压之间的关系进行表达。

在实际工程中,不同的瓦斯压力会对现场的卸荷工况造成不同的影响。瓦斯压力越大,煤体中的瓦斯渗流速率越快,在石门揭煤等情况下越容易在揭开之前积蓄更大的能量,在形成煤矿动力灾害时会造成更大的破坏作用。因此,建议在煤矿现场的卸荷工况下密切监测瓦斯压力参数以防止灾害的发生。

本文的研究工作得到了中央高校基本科研业务费项目的资助(CDJZR12240054),在此一并表示感谢!

参考文献:

[1] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报,

- 1998,20(1):114.
- Ha Qiuling. Loading and unloading rock masses mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1998,20(1):114.
- [2] 尹光志,蒋长宝,王维忠,等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(1):68-77.
- Yin Guangzhi, Jiang Changbao, Wang Weizhong, et al. Experimental study of influence of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing-gas coal rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(1):68-77.
- [3] Alexeev A D, Revva V N, Alyshev N A. True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst predication[J]. International Journal of Coal Geology,2004,58:245-250.
- [4] Wold M B, Connell L D, Choi S K. The role of special variability in coal seam parameters on gas outburst behavior during coal mining [J]. International Journal of Coal Geology,2008,75:1-14.
- [5] 黄润秋,黄 达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(11):2205-2213.
- Huang Runqiu, Huang Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(11):2205-2213.
- [6] 陈卫忠,吕森鹏,郭小红,等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(6):963-969.
- Chen Weizhong, Lü Senpeng, Guo Xiaohong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(6):963-969.
- [7] 苏承东,翟新献,李永明,等. 煤样三轴压缩下变形和强度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2963-2968.
- Su Chengdong, Zhai Xinxian, Li Yongming, et al. Study on deformation and strength of coal samples in triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(S1):2963-2968.
- [8] 苏承东,高保彬,南 华,等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(4):757-766.
- Su Chengdong, Gao Baobin, Nan Hua, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics during deformation and failure processes of coal samples under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(4):757-766.
- [9] 蒋长宝,尹光志,黄启翔,等. 含瓦斯煤岩卸围压变性特征及瓦斯渗流试验[J]. 煤炭学报,2011,36(5):802-807.
- Jiang Changbao, Yin Guangzhi, Huang Qixiang, et al. Experiment of deformation property and gas permeation of containing-gas coal under confining pressure unloading process[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(5):802-807.
- [10] 蒋长宝,黄 滚,黄启翔. 含瓦斯煤多级卸围压变形破坏及渗透率演化规律实验[J]. 煤炭学报,2011,36(12):2039-2042.
- Jiang Changbao, Huang Gun, Huang Qixiang. Experiment on deformation failure and permeability evolution law of gas-containing coal under multi-stage unloading confining pressure[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(12):2039-2042.
- [11] 黄启翔,尹光志,姜永东. 地应力场中煤岩卸围压过程力学特性试验研究及瓦斯渗透特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1639-1848.
- Huang Qixiang, Yin Guangzhi, Jiang Yongdong. Experimental study of mechanical characteristics of coal specimen in process of unloading confining pressure in geostress field and analysis of gas seepage characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(8):1639-1848.
- [12] 赵洪宝,王家臣. 卸围压时含瓦斯煤力学性质演化规律试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(S1):270-274.
- Zhao Hongbao, Wang Jiachen. Experimental study of evolution law of mechanical properties of coal containing gas under unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(S1):270-274.
- [13] 许 江,彭守建,尹光志,等. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):907-914.
- Xu Jiang, Peng Shoujian, Yin Guangzhi, et al. Development and application of triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of coal containing methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):907-914.
- [14] 李祥春,聂百胜,何学秋,等. 瓦斯吸附对煤体的影响分析[J]. 煤炭学报,2011,36(12):2035-2038.
- Li Xiangchun, Nie Baisheng, He Xueqiu, et al. Influence of gas adsorption on coal body[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(12):2035-2038.
- [15] 高春玉,徐 进,何 鹏,等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):456-460.
- Gao Chunyu, Xu Jin, He Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(3):456-460.