

文章编号: 1000-582X(2012)01-110-07

阶段性循环载荷对突出煤样渗透特性的影响

李晓泉^{1,2}, 尹光志¹, 蒋长宝¹, 蔡波¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 广西大学 资源与冶金学院, 南宁 530004)

摘要: 利用自行研制的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流系统”, 进行固定瓦斯压力及不同围压和循环载荷情况下突出煤样变形渗透特性试验研究。结果表明: 加载路径对煤样的力学特性影响显著, 循环载荷试验和全应力-应变曲线总体趋势相同, 循环载荷作用下煤样的峰值应力比全应力-应变的低; 煤样在周期性循环载荷作用下的卸载应力-应变曲线与加载应力-应变曲线不重合, 形成封闭的滞回环。渗透率与煤样的损伤变形进程密切相关, 在循环载荷下, 渗透率在卸载过程中逐渐增大, 加载过程中逐渐减小; 卸载时渗透率-应变曲线和加载时渗透率-应变曲线会围成封闭环, 与煤样的轴向应力-应变封闭滞回环相对应, 其所围面积随着围压和应力水平增加而减小。

关键词: 岩石力学; 型煤; 循环载荷; 瓦斯渗流; 力学特性; 固气耦合三轴试验

中图分类号: O357.3

文献标志码: A

Effect of outburst coal's gas seepage properties under stage cyclic loading

LI Xiao-quan^{1,2}, YIN Guang-zhi¹, JIANG Chang-bao¹, CAI Bo¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. College of Resources and Environment of Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: Experiments of outburst coal's gas seepage and deformation under cyclic loading of the stationary gas pressure and different confining pressures are made by “fluid-solid-heat coupling with axis servo seepage system of coal”. The results show that loading route has a significant effect on mechanical properties of coal sample. Although the complete stress-strain curves and one cyclic loading curve present similarity in the overall trend, the stress peak value of coal sample under cyclic loading is lower. Under cyclic loading, the stress-strain curves during loading and unloading don't overlap. They connect to form a hysteretic loop. The permeability is in close relation with the damage deformation process of coal sample. Under cyclic loading, permeability is increasing during the unloading and decreasing during the loading. The permeability-strain curves during loading and unloading form a hysteretic loop, which is corresponding with the hysteretic loop of stress-strain curves of coal sample.

Key words: rock mechanics; coal sample; cyclic loading; gas seepage; mechanical properties; gassy coal THM coupling system

收稿日期: 2011-07-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201203); 国家自然科学基金资助项目(50874124); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11240004); 重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介: 李晓泉(1972-), 男, 重庆大学博士, 研究方向为矿山安全, (E-mail)lxq0927@sina.com。

尹光志(联系人), 男, 重庆大学教授、博士生导师, 主要从事矿业工程与岩石力学方面的研究, (E-mail)gzyin@cqu.edu.cn。

在煤矿井下开采过程中,煤层除了受地应力的静荷载作用外,还会受到各种采动作用的影响,如开采近距离煤层群,在开采其中某一层煤时,其他煤层必然会受到采动造成的循环荷载的作用。另外,采矿工程中还存在由低应力到高应力的多级循环荷载现象,如揭石门中工作面离煤层越来越近;地震活动^[1]及日、月潮汐力^[2]作用。关于岩石在循环荷载作用下的研究,国内外学者对岩石的强度、变形规律、加卸载响应比、阻尼特性、超声波速法、剪切性能、滞回曲线演化和声发射等方面做了一些相关的研究^[3-9]。岩石在循环荷载作用下的强度和变形规律与静态荷载作用下显著不同,强度方面表现出劣化性;变形表现为记忆性、滞后性^[9]。国内外学者对气体在煤岩中的渗流研究做了大量工作^[10-13],主要是研究在煤岩全应力-应变状态下的气体渗流。

目前研究煤岩在循环荷载作用下的变形及瓦斯渗透特性方面的工作较少。深入研究含瓦斯煤岩的力学性质及瓦斯在煤层中的流动机理对研究煤与瓦斯突出、瓦斯抽放和瓦斯排放具有重大意义。因此研究在三轴应力及循环荷载作用下煤岩的变形及瓦斯渗透特性有一定的现实意义。

笔者利用自行研制的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流系统”,进行固定瓦斯压力及不同围压和循环荷载情况下突出煤煤样变形渗透特性试验研究,为研究煤矿现场扰动对煤层内瓦斯渗流提供理论依据。

1 试验设备及方案

1.1 煤样制备及试验设备

煤样严格按照煤与岩石物理力学性质测定方法的要求制作,将所取突出煤原煤粉碎,选取粒径大小为 60~40 目的煤粉颗粒,加入少量纯净水混合均匀后置入成型模具中,在 200 t 刚性试验机上,以 100 MPa 的压力压制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准煤样,端面不平行度不超过 0.05 mm。最后将制作好的型煤煤样烘干后置于干燥箱内以备实验时用。

本试验以自行研制的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置”作为动力设备,试验设备是自主研制的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流系统”,该装置主要包括液压装置、瓦斯供给与采集装置、三轴渗透装置、应力-应变采集装置、恒温水浴加热装置等,此系统所有数据均由电脑自动采集。实验时,载荷检测采用安置在该装置上的压力传感器直接测定,煤样轴向位移的检测采用在装置轴向方

向上布置的轴向引伸计直接测定,径向位移的检测采用安设在试件上的径向引伸计直接测定,瓦斯压力大小采用高压瓦斯罐和减压阀组合控制,瓦斯流量采用流量计直接测定,所有数据都由计算机及控制程序自动采集记录。

1.2 试验方案

本次不同围压下循环荷载渗流试验采用气体为纯度为 99.99% 的甲烷气体,试验瓦斯压力为 1 MPa,围压分别为 2、4、6 MPa,首先分别在各围压和 1 MPa 气体压力情况下做煤样的全应力-应变试验,以便同循环荷载试验结果进行对比,试验前,煤样在瓦斯压力 1 MPa 情况下,充分吸附 24 h。具体步骤如下:

1) 将加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 规格的标准煤样侧壁均匀涂抹一层 704 型硅橡胶,防止气体从煤样侧壁泄露。

2) 待硅橡胶干燥后,将煤样安装在渗透试验设备上,套上热缩管,用吹风机将热缩管加热使其紧贴于试验煤样及上下压头上,装好径向引伸计,安装好三轴渗透装置。

3) 对煤样施加预定的围压和可以封闭瓦斯气体的轴压,检查装置气密性,抽真空至 50 Pa 以下,通入压力 1 MPa 的纯瓦斯气体,充分吸附 24 h。

4) 打开气体阀门释放瓦斯,待瓦斯流量稳定后,按照事先编好的循环荷载程序开始试验:循环荷载试验的每个循环阶段的加卸载幅度为 4 kN,循环荷载采用力控制方式,循环加卸载完成后采用位移控制方式以速度 0.1 mm/min 加载至煤样峰后破坏。

5) 同一实验条件下使用 3 个煤煤样,采用加权平均值得出相应数据,在不同三轴应力组合下重复以上试验步骤。

2 试验结果及分析

本试验是模拟突出煤在采掘作业时产生的循环荷载扰动下瓦斯渗流系数的变化,试验过程中变化的轴压和围压相当于地应力。通过电脑记录的瓦斯流速,根据式(1)计算出渗透率。本试验瓦斯在煤样中的渗流可以视为服从达西定律

$$K = \frac{2P_2QL\mu}{A(P_1^2 - P_2^2)}, \quad (1)$$

式中: K 为渗透率, mD; Q 为瓦斯流速, mL/s; μ 为瓦斯黏度, 室温 20 °C 时瓦斯黏度为 $1.087 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; L 为煤样长度, mm; A 为煤样横截面积, m^2 ; P_1 为煤样入口瓦斯压力, MPa; P_2 为煤样出口瓦斯压

力,MPa。

2.1 在时间上的对应

由图 1 可以看出渗透率和轴向应力在时间上有很好的对应性,轴向应力的变化引起渗透率的变化,在循环载荷情况下轴向应力增大时,渗透率则减小;反之亦然。循环加卸载后在屈服点前渗透率是减小的,屈服点后渗透率开始增加,但不会达到或超过初始值。

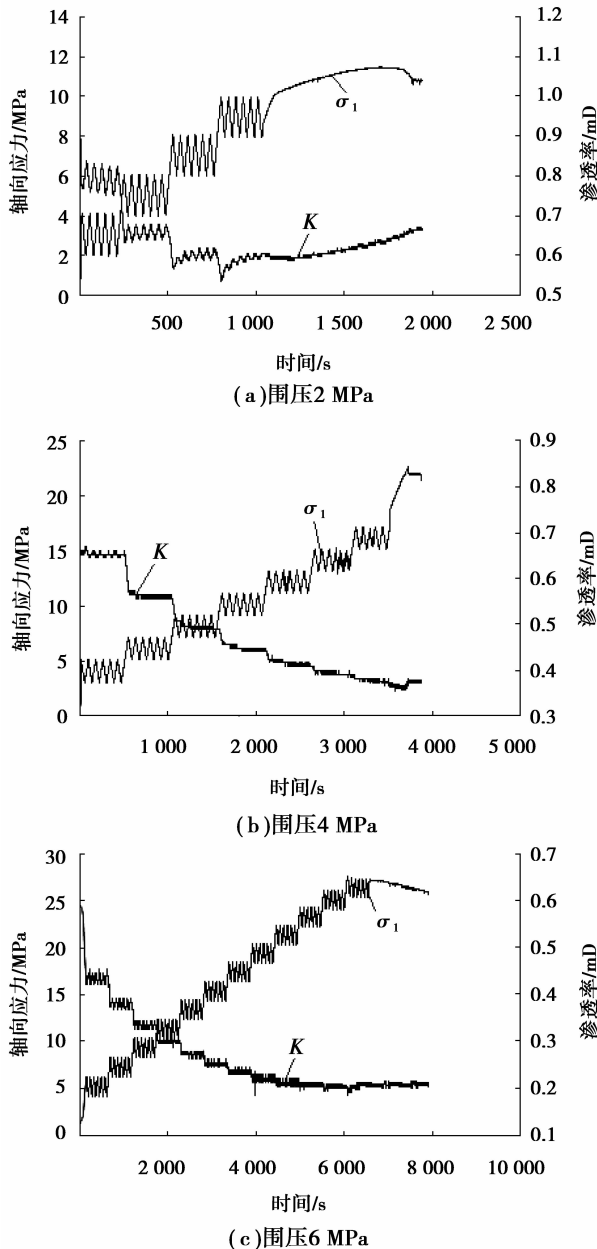


图 1 轴向应力和渗透率随时间的变化

2.2 轴向应力-应变

图 2 是不同围压下循环荷载和单项加载的轴向应力与应变关系曲线,可以看出循环荷载和全应

力-应变曲线总体趋势相同,也经历了初始压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和峰后阶段。在低围压时煤样的初始压密阶段很明显,但随着围压的增大,初始压密阶段越来越不明显,这可能是围压越大,对煤样的压密作用越大,经过保压瓦斯吸附那段时间后,高围压对煤样的压密效果更好^[14]。在峰后阶段,低围压时,煤样的应力迅速下降,而在高围压时,煤样表现出很好的塑性流动性,应力下降非常缓慢。这可能是围压越大,对煤样裂隙产生和扩展的限制作用越大造成的^[14]。

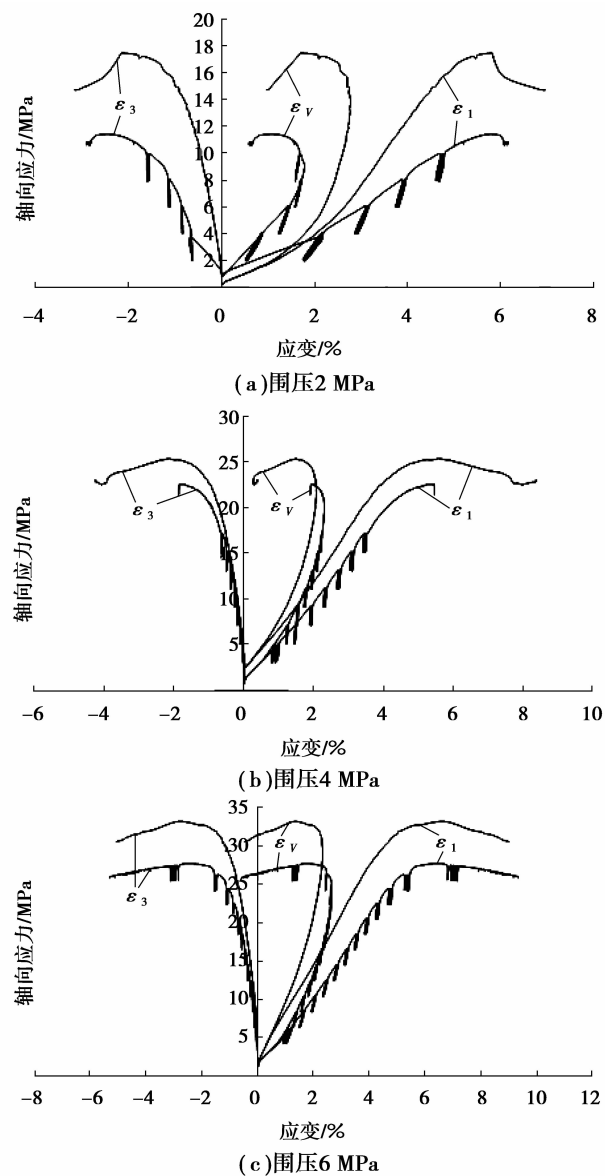


图 2 循环荷载全应力-应变

从图 2 还可以看出,煤样有很好的加载记忆性,在弹性极限前,完成一个阶段循环荷载进入下一个阶段的循环荷载时,轴向应力-应变曲线会回到全应

力-应变加载时的路径。同一围压下,循环荷载作用下煤样的峰值应力比单向加载的低,这可能是循环荷载作用引起的煤样疲劳损伤变形降低了煤样的强度^[11],其影响在屈服阶段及以后尤为明显,说明加载路径对煤样的力学特性影响显著。

从图 2 可以看出,由于煤岩本身的非线性,煤样在周期性循环荷载作用下的卸载应力-应变曲线与加载应力-应变曲线不相重合,将形成一封闭的滞回环。在同一围压同一应力水平区间循环荷载作用下,第 2 次循环较第 1 次循环的滞回环所围面积变化较大,从第 2 次循环开始,每次滞回环所围面积较前一次变化趋小。每次循环滞回环应力上限交点值有随循环次数的增加而略为增大的趋势。每次循环所形成的滞回环随循环次数的增加有逐渐向其相应应变绝对值增大的方向移动的趋势。每次循环完成后相应轴向应变、径向应变和体积应变的相对残余应变有随循环次数的增加呈减少的演化趋势。另外,在同一围压时,每次循环所形成的滞回环所围面积有随着应力水平的增大而减小的演化趋势,这是因为随着应力水平的增大,卸载时煤样产生的残余变形变大,从而使卸载曲线与加载曲线所围面积减小^[15]。在同一应力水平时,每次循环所形成的滞回环所围面积有随着围压的增加而减小的演化趋势,这是围压越大对煤样的压密作用越大所致。

2.3 渗透特性

图 3 是不同围压下应力-轴向应变和渗透率-轴向应变关系曲线,从图中可以看出渗透率-轴向应变曲线总体趋势与轴向应力-轴向应变曲线的相反,随着应力和轴向应变的增大,渗透率先减小后增大,呈现出明显的对应关系,表明渗透率的变化与煤样的变形损伤演化过程密切相关。

图 4 反映了渗透率-径向应变和轴向应力-径向应变之间的关系:径向应变受轴向应力的作用影响的,径向应变随着轴向应力同方向变化,并且受围压影响较大,在轴向应力减小时在围压作用下煤样恢复部分径向变形,这种效果随着围压增大而更加明显。渗透率和径向应变按照反向变化,即径向应变在轴压作用下增加时,渗透率呈减小趋势;轴向应力减小,在围压作用下恢复部分径向变形时,渗透率呈增大趋势。

图 5 是不同围压下轴向应力-体积应变和渗透率-体积应变关系曲线,可以看出渗透率-体积应变曲线总体趋势与轴向应力-体积应变曲线也有很明

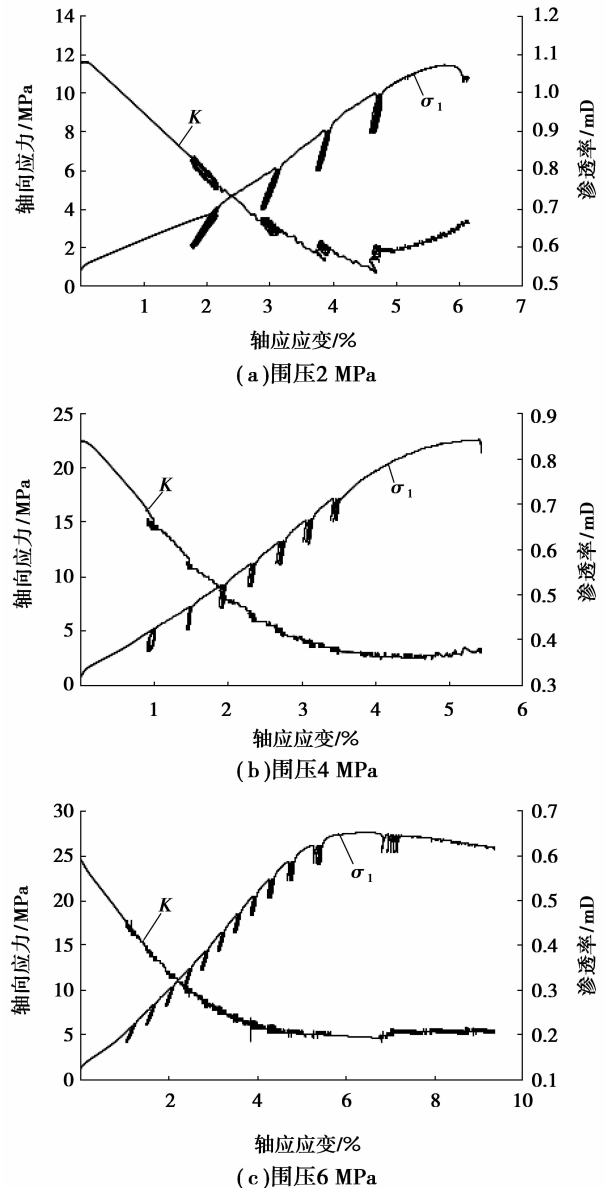


图 3 轴向应力-轴向应变和渗透率-轴向应变

显的对应关系,随着轴向应力和体积应变的增大,渗透率先减小,并在体积应变达到最大值时,即煤样体积最小时,渗透率降到最低值,该处具有明显的拐点,然后随着体积应变转为减小,即煤样进入扩容阶段,渗透率转为增大,但不能恢复到初始阶段的水平。另外,从图 5 还可以看出,同应力-应变滞回环一样,在同一围压同一应力水平区间的循环荷载作用下,第 2 次循环较第 1 次循环的渗透率-应变滞回环所围面积变化较大,从第 2 次循环开始,每次滞回环所围面积较前一次变化趋小。在同一围压时,每次循环所形成的渗透率-应变滞回环所围面积有随着应力水平的增大而减小的演化趋势。在同一应力水平时,每次循环所形成的渗透率-应变滞回环所围面积有随着围压的增加而减小的演化趋势。这是因

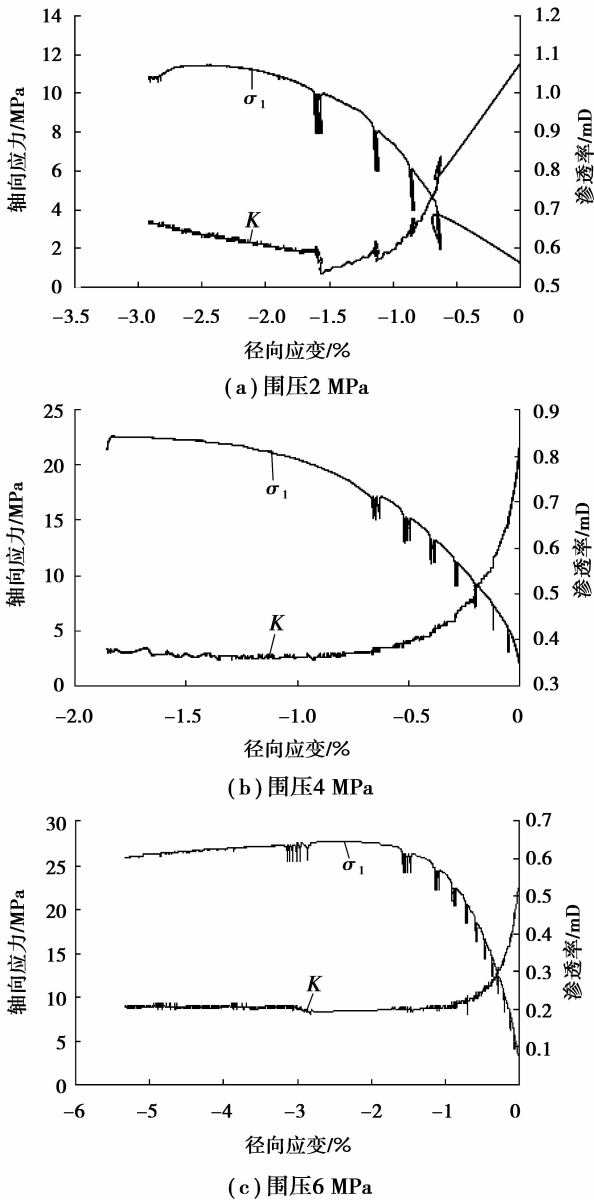


图 4 轴向应力-径向应变和渗透率-径向应变

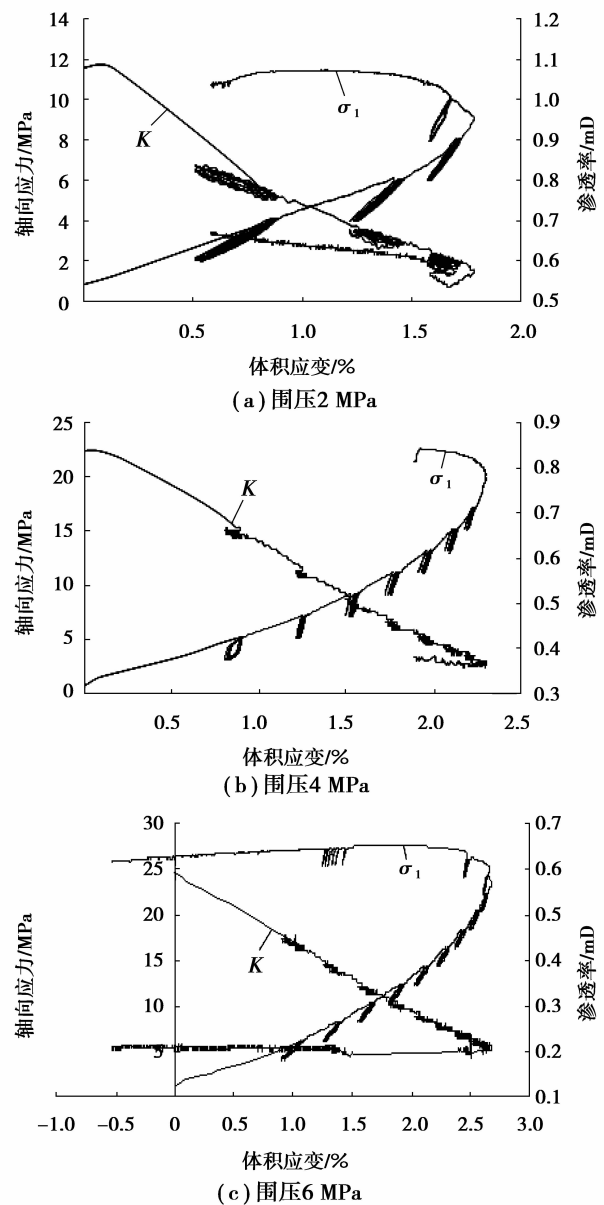


图 5 轴向应力-体积应变和渗透率-体积应变

为应力水平越大,围压越大,对煤样的压密作用越大,限制煤样裂隙孔隙扩展的作用越大,使是渗透率整体变小所致。

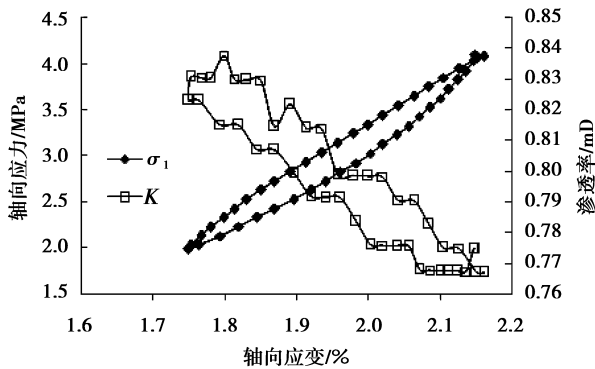
根据图 3-5 还可以看出,相同应变条件下,围压越大,渗透率越小,而且围压越大,渗透率随应变的变化幅度越小,渗透率-轴向应变曲线、渗透率-径向应变曲线、渗透率-体积应变曲线也都随着围压增大而越趋于平缓。其原因可能是围压对煤样内部的裂隙孔隙起到的压密闭合作用,限制了煤样内部裂隙孔隙的张开和扩展程度,围压越大,对煤样裂隙孔隙扩展的限制作用越大^[14]。

提取围压 2 MPa 时应力-应变和渗透率-应变的一个循环放大,如图 6 所示,说明循环荷载对煤样瓦斯渗流特性的影响。可以看出,在循环荷载作用

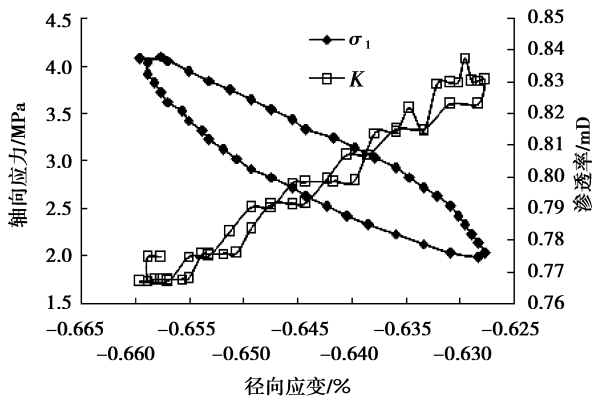
阶段,轴向应力-轴向应变曲线光滑,而渗透率-径向应变、渗透率-体积应变和轴向应力-体积应变曲线均呈现出阶跃性的变化。这是因为试验中主动加、卸载是轴向方向,轴向应变达到一定量时径向应变才会有变化,导致轴向应力-径向应变变化曲线并不像应力-轴向应变曲线那样光滑。体积应变是轴向应变和径向应变综合的结果,因此轴向应力-体积应变曲线也不光滑。体积应变是煤样体积变化的一个指标,煤样体积的变化必然使煤样内部裂隙孔隙发生变化,从而引起渗透率的变化,因此,渗透率变化曲线和体积应变变化曲线对应,也呈现出阶跃性的变化。

在周期性循环荷载作用下,卸载过程中渗透率逐渐增大,加载过程中渗透率逐渐减小,同时,卸载

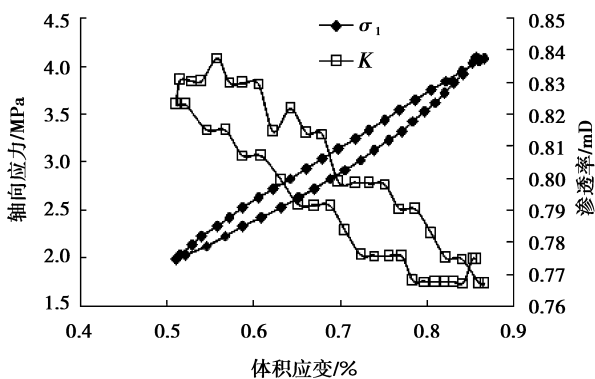
时渗透率-应变曲线和加载时的曲线也会围成一个封闭环,这和煤样在周期性循环载荷作用下轴向应力-应变曲线形成的封闭滞回环相对应,说明渗透率的变化与煤样的变形损伤密切相关。



(a) 轴向应力-轴向应变和渗透率-轴向应变



(b) 轴向应力-径向应变和渗透率-径向应变



(c) 轴向应力-体积应变和渗透率-体积应变

图 6 围压 2 MPa 时某一个循环的
轴向应力-应变和渗透率-应变

3 结 论

1) 循环载荷和单向加载作用下的突出煤型煤全程应力-应变曲线总体趋势相同,煤样有很好的加载记忆性,在弹性极限前,每完成一个阶段循环载荷,应力-应变曲线会回到单向加载时的路径;同一围压

下,循环载荷作用下煤样的峰值应力比单向加载的低,说明加载路径对煤样的力学特性影响显著。

2) 煤样在周期性循环载荷作用下的卸载应力-应变曲线与加载应力-应变曲线不相重合,形成一封闭的滞回环。应变的相对残余应变量和滞回环的特性(包括其位置、应力上限交点及所围面积)随着循环次数、围压和应力水平而变化。

3) 渗透率-轴向应变曲线总体趋势与应力-纵向应变曲线的相反,渗透率-体积应变曲线总体趋势与应力-体积应变曲线也有很明显的对应关系,说明渗透率与煤样的损伤变形的进程密切相关。

4) 煤样在周期性循环载荷作用下,渗透率-应变曲线呈阶跃性的变化,并且在卸载过程中逐渐增大,加载过程中逐渐减小。

5) 卸载时渗透率-应变曲线和加载时渗透率-应变曲线也会围成一个封闭环,该封闭环和型煤在周期性循环载荷作用下形成的封闭滞回环相对应。其所围面积随着围压和应力水平增加而减小,并且变化趋势逐渐减小,说明围压越大,应力水平越大,对煤样的压密作用越大,使得渗透率变小。

参 考 文 献:

- [1] 张晖辉,颜玉定,余怀忠,等. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射试验:岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3621-3628.
ZHANG HUI-HUI, YAN YU-DING, YU HUAI-ZHONG, et al. Acoustic emission experimental research on large-scale rock failure under cycling load-fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3621-3628.
- [2] YU H Z, YIN X C, XIA M F, et al. Experimental research on critical point hypothesis [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 17(S): 129-137.
- [3] BAGDE M N, PETROS B V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42(2): 237-250.
- [4] JAFARI M K, HOSSEINI K A, PELLET F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 619-630.
- [5] 苗胜军,樊少武,蔡美峰,等. 基于加卸载响应比的载荷岩石动力学特征试验研究[J]. 煤炭学报,2009,34(3): 329-333.
MIAO SHENG-JUN, FAN SHAO-WU, CAI MEI-FENG, et al. Dynamic characteristics experiment study of loading rock based on theory of load / unload

- response ratio[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 329-333.
- [6] BAGDE M N, PETROS V. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(1): 200-209.
- [7] YU H Z, SHEN Z K, WAN Y G, et al. Increasing critical sensitivity of the load/unload response ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern [J]. Tectonophysics, 2006, 428(1/4): 87-94.
- [8] YILDIRIM H, ERSAN H. Settlements under consecutive series of cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(6): 577-585.
- [9] 蒋宇,葛修润,任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11):1810-1814.
JIANG YU, GE XIU-RUN, REN JIAN-XI. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810-1814.
- [10] CONNELL L D, LU MENG, PAN ZHE-JUN. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(2): 103-114.
- [11] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress dependent permeability and porosity of coal [M]. America: Rocky Mountain Association of Geologist, 1998.
- [12] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等. 地应力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2557-2561.
- YIN GUANG-ZHI, LI XIAO-QUAN, ZHAO HONG-BAO, et al. Experimental study of outburst coal's gas seepage under ground stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2557-2561.
- [13] 尹光志,王登科,张东明,等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的实验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(2):410-417.
YIN GUANG-ZHI, WANG DENG-KE, ZHANG DONG-MING, et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strengths of two types of coal specimens containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 410-417.
- [14] 杨永杰,宋扬,陈绍杰. 煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007,28(2):381-385.
YANG YONG-JIE, SONG YANG, CHEN SHAO-JIE. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 381-385.
- [15] 许江,尹光志,王鸿,等. 不同应力水平时砂岩滞回曲线演化的实验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006,28(2): 40-42.
XU JIANG, YIN GUANG-ZHI, WANG HONG, et al. Experimental research on the evolution of hysteresis curve of rock in different axial stress level [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(2): 40-42.

(编辑 郑洁)

(上接第 109 页)

- [15] ECKHOFF R K. Understanding dust explosions: the role of powder science and technology[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1): 105-116.
- [16] AMYOTTE P R, PEG M J. Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation [J]. Process safety and Environment Protection, 2009, 87(1): 35-39.
- [17] 蔡周全,张引合. 干粉灭火剂粒度对抑爆性能的影响[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(4): 14-16.
CAI ZHOU-QUAN, ZHANG YIN-HE. Influence of particle size of dry fire-extinguishing powder on explosion suppression performance [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2001, 28(4): 14-16.
- [18] DUFAUD O, TRAORE M, OERRIN L, et al. Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(2): 226-236.

(编辑 郑洁)