

文章编号: 1000-582X(2012)03-103-05

循环载荷作用下突出煤力学性质演化分析

赵洪宝^{1, 2a, 2b}, 尹光志¹

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国矿业大学(北京) a. 资源与安全工程学院; b. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以具有突出倾向煤制备的型煤试件为研究对象, 对其在循环载荷作用下的力学性质及不同载荷水平时的滞回曲线演化规律进行了分析。结果表明: 型煤试件在循环载荷作用下的加、卸载曲线将形成滞回环, 且从第 2 个循环后, 开始出现次级滞回环; 随着循环次数的增加, 滞回曲线围成面积逐渐减小; 循环载荷水平的选取与煤样的变形响应程度密切相关; 滞回曲线的加卸载段分别可以用二次曲线进行表征, 随着加卸载次数的增加, 各拟合参数变化规律性明显, 但与载荷水平变化规律性不强; 加卸载阶段各对应拟合参数的符号均相反。

关键词: 循环载荷; 载荷水平; 滞回曲线; 次级滞回环

中图分类号: TU 452

文献标志码: A

Analysis on mechanical properties evolution of outburst coal under cyclic loading

ZHAO Hong-bao^{1, 2a, 2b}, YIN Guang-zhi¹

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2a. School of Resources and Safety Engineering; 2b. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: Briquette specimens made of outburst coal are taken as research objects, and both mechanical properties evolution under cyclic loading and law of hysteretic curve evolution under different loading level are studied. The results show that hysteretic loop is composed of load-unload curve when briquette specimens are studied under cyclic loading, and secondary hysteretic loop is produced from the second cycle. The area composed by hysteretic curve becomes smaller with the addition of cycle numbers. The relation between deformation response and loading level is very close. Load-unload curve of hysteretic curve is expressed by conic, and the change law of fitting parameters of conic is very regular with the addition of cycle numbers, but the regularity of the law with loading level isn't very obvious; the minus sign of fitting parameters of conic is opposite.

Key words: cyclic loading; loading level; hysteretic curve; secondary hysteretic loop

收稿日期: 2011-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004110); 国家自然科学基金项目(50834005); 煤炭资源与安全开采国家重点实验
开放课题(SKLCRSM09KFB09); 中央高校基本科研业务费资助项目(2009QZ03)

作者简介: 赵洪宝(1965-), 男, 中国矿业大学(北京)讲师, 主要从事岩石力学与安全技术工程的研究,
(E-mail) hongbaozhao@126.com。

具有突出倾向的煤岩是在特殊条件下经过复杂过程形成的多孔不均匀介质体,其内包含有大量的孔隙、裂隙结构,且多为结构破碎或软弱煤体,其非线性、各向异性明显高于岩石类材料,如聂百胜等^[1-2]研究认为煤体中的微结构可分为 5 种;张力等得到了煤体内的割理分布及分类异常复杂的特点^[3]。具有突出倾向的煤岩在各种不同受载情况下将表现出不同的动力学特性。在井下采煤过程中,煤岩体处于复杂的应力状态环境中,其中单轴压缩、三轴压缩是最为常见的井下受力状态。但是,随着采煤工作面的推移,矿山压力将从初次来压演变为周期来压,采煤过程中留设的对采煤空间起保护作用的各种煤柱将处于周期载荷作用之下,其力学性质也将发生较大变化,这将更可能导致煤体失稳破坏;工作面煤壁由于支撑应力导致的应力集中和迁移,也将加剧采煤工作面煤壁内部结构的调整,如在较大瓦斯压力作用下也将可能导致煤与瓦斯灾害的发生,这已经成为诱发矿井安全事故的主要因素之一;目前对煤与瓦斯共采技术的理论基础与实现方法正在逐步深入,利用采动影响实现煤与瓦斯共采的过程也受到循环加卸载过程中煤体的力学性质演化的影响与作用。因此,研究循环载荷下突出煤的力学性质演化对于维护矿井采掘空间安全稳定、煤与瓦斯共采机理的研究与技术方法的实现均将具有重要的理论指导意义。

国内外对于循环载荷作用下材料的力学性质研究多集中于大理岩、砂岩、土体材料等相对均质岩石类材料,如许江等^[4]对循环载荷下砂岩滞回曲线特点进行的研究;国外学者则在复合黏土材料在循环载荷下的黏性变形特点^[5]、脆性层结构在循环载荷作用下的断裂模型^[6]等方面进行了深入的研究;而在国内,张晖辉等^[7]进行了循环载荷作用下大理岩试件的声发射特性研究,均认为岩石类材料在循环载荷作用下力学特性演化均符合经典理论,如加、卸载曲线不闭合而形成滞回曲线^[8-9]、加卸载第 1 个循环的塑性变形量不大^[10-12]、残余位移一般开始出现在第 2 个循环以后^[13-14]、不同的循环载荷水平对岩石类材料的力学性质影响有所不同^[15],等等。尽管如此,对于各向异性明显高于岩石的非线性材料——突出煤在循环载荷下的力学性质及其滞回曲线特性系统的研究报道不多,且笔者通过试验发现在循环载荷作用下突出煤的力学性质及滞回曲线具有明显不同于岩石类材料经典理论的特点。因此,笔者以具有突出倾向煤制备的型煤试件为研究对象,对不同载荷水平的循环载荷作用下突出煤的力

学特性及滞回曲线演化特性进行了研究。

1 实验方案

以具有突出倾向煤经实验室粉碎、筛选、加压成型制备成标准型煤试件,尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱试件,为模拟真实原煤的力学性质,型煤试件制备时不添加任何粘结剂。前人的研究成果表明,型煤试件可以代替原煤试件进行相关力学性质的研究^[8]。其基本力学参数如表 1 所示。

表 1 型煤试件基本力学参数

弹性模量/MPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
9.0	0.35	0.45	1.2	0.91	29

实验在重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室进行。载荷由 AG-250 kN 型精密电子万能试验机提供,采用载荷控制,加载速度为 0.01 kN/s,载荷水平分别为 0.2、0.3、0.4、0.6 kN,分别为单轴抗压强度的 25%、37.5%、50%、75%。实验方法为:

- 1) 进行煤样单轴压缩实验,得到煤样单轴压缩强度。根据单轴压缩曲线特征点,依次选取压密段结束点、线弹性阶段中间点、屈服点强度作为循环载荷试验的循环载荷水平。
- 2) 按载荷控制方式,加载速率 0.01 kN/s 加载至选定载荷水平;再以相同的卸载速率卸载至 0。
- 3) 再将载荷以相同的加载速率上升到选定的载荷水平;以相同的卸载速率卸载至 0。
- 4) 不断重复上述过程,直至设定的 15 个循环结束。
- 5) 更换试件,进行下一个实验。

2 循环载荷作用下突出煤力学特性

2.1 循环载荷作用下突出煤力学性质

为了得到循环载荷作用下突出煤的力学特性,选取载荷水平 0.4 kN 进行循环载荷作用下突出煤的力学性质研究,得到了典型的循环载荷作用下应力应变曲线,如图 1 所示。

分析曲线可知:

- 1) 在第 1 次加载过程中,煤样的变形特点完全符合单轴压缩时的变形特点,且线性较好。这是因为在循环载荷作用下的第 2 次加载过程完全等同于单轴压缩,且选取的载荷水平又没有达到屈服载荷所致。

2)由于煤样本身内部存在孔隙、裂隙等弱面结构,导致煤样具有非线性特性,因此在循环载荷作用下的卸载曲线与加载曲线不重合,形成一条封闭的滞回曲线,这符合前人研究得出的循环载荷作用下典型岩石类材料的变形特点。

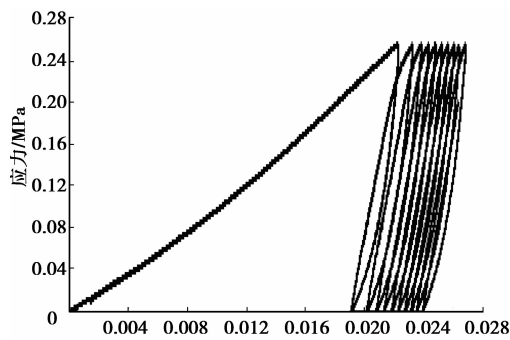
3)前几个循环滞回曲线变化不大且滞回曲线的加卸载曲线间距较大,说明煤样塑性较大,在卸载后产生的塑性变形仍很大。

4)第4个循环后,随加卸载次数的增加,滞回曲线围成面积越来越小,加卸载曲线彼此越来越接近,近乎平行,说明煤样在循环次数达到一定数量后,煤样将不会产生较大塑性变形。

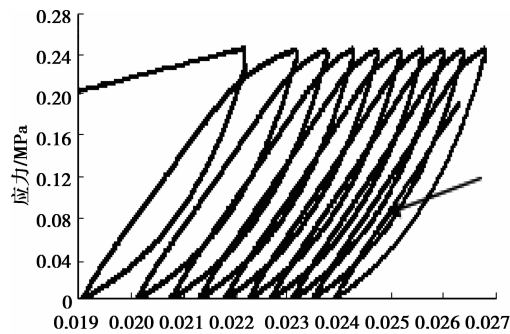
5)每个循环均有应变量产生,且随着循环次数的增加,应变量增量呈减小趋势直至试件破坏。

6)从第2个循环开始,第*i*个循环的卸载曲线与第*i*+2个循环的加载曲线间也围成小的环状面积,且随着加载次数的增加,两曲线间的面积逐渐增大,形成了次级滞回环。

7)随着加卸载次数的增加,加载段曲线逐渐出现明显的屈服点,而似线弹性特点越来越显著,此阶段的变形模量逐渐降低;卸载段曲线越来越弯曲,且倾斜程度越来越大,此阶段的变形模量逐渐减小。



(a)

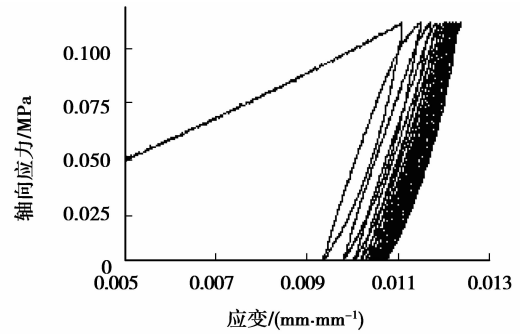


(b)

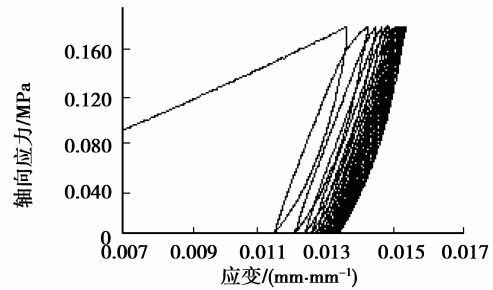
图1 循环载荷作用下典型应力应变曲线(0.4 kN)

2.2 循环载荷水平对突出煤力学性质影响

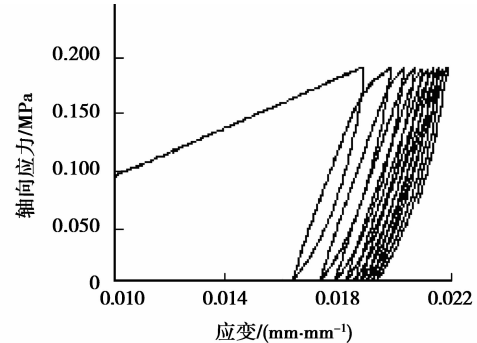
根据设计的试验方案,分别进行试验,每种载荷水平进行4个试件的研究,得到了各循环载荷水平下突出煤轴向载荷与应变关系典型曲线,如图2所示。



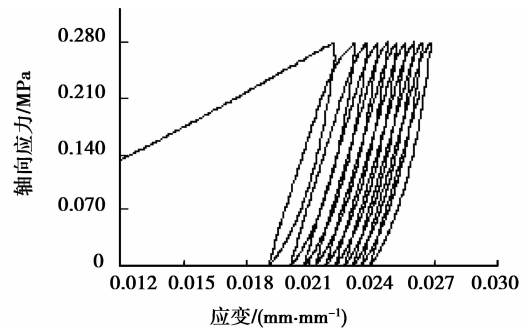
(a) 0.2 kN



(b) 0.3 kN



(c) 0.4 kN



(d) 0.6 kN

图2 不同载荷水平应力-应变曲线

对比分析不同载荷水平下典型试验曲线可知:

1)循环载荷大小的选取对遭受循环载荷时煤样试件的变形破坏具有重要影响,一般小于屈服强度

的循环载荷作用于煤样试件后,在循环次数较少时一般不会发生破坏变形。

2) 载荷水平对煤样纵向应力-应变曲线本身影响不大,但随着载荷水平的提高,每次循环加、卸载完成后残余变形量呈增大趋势。

3) 循环载荷水平对循环载荷作用下煤样的变形影响程度不同。一般的,载荷水平越高,变形量越大。

4) 循环载荷水平对滞回曲线疏密程度也有影响。当载荷水平较低时,滞回曲线间距较小;随着载荷水平的提高,在前几个循环时即表现出滞回曲线间距变大的趋势。

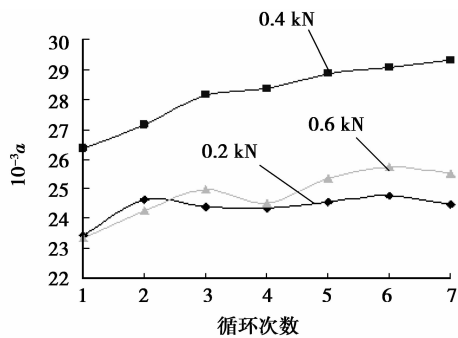
3 滞回曲线演化特性分析

为了进一步分析循环载荷水平不同情况下,型煤试件的滞回曲线演化规律,将各载荷水平的滞回曲线分解为加载阶段和卸载阶段进行分别研究,并根据加载、卸载阶段曲线的变化基本趋势,进行数学耦合处理。根据前人研究的成果^[4,7],可以用二次曲线表征加载、卸载阶段各滞回曲线的拟合参数特点。

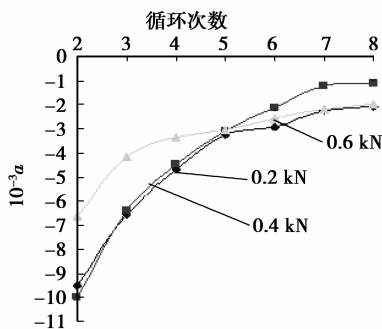
$$\sigma = a \cdot \varepsilon^2 + b \cdot \varepsilon + c, \quad (1)$$

式中: σ 为纵向载荷,MPa; ε 为纵向位移,mm/mm; a, b, c 为拟合参数。

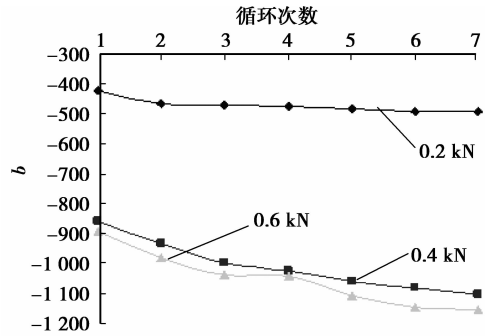
以载荷水平分别为 0.2、0.4、0.6 kN 为研究对象,按上述步骤进行研究,得到各载荷水平滞回曲线加载卸载阶段各拟合参数的典型规律,如图 3 所示。



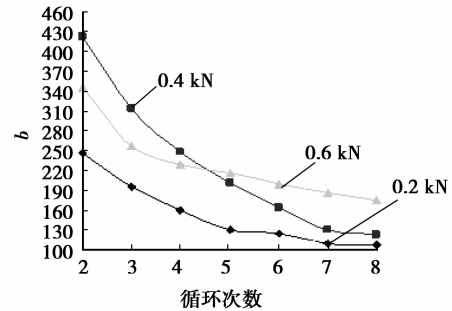
(a) 卸载阶段 a 值



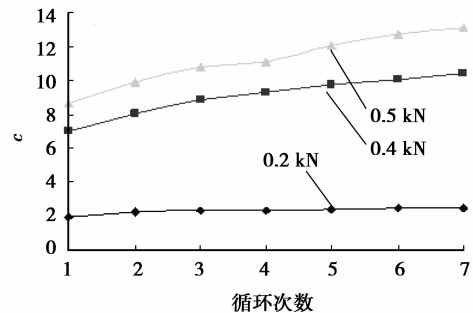
(b) 加载阶段 a 值



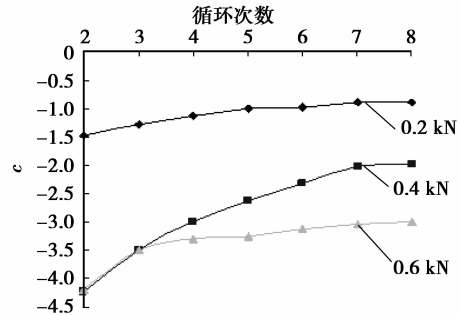
(c) 卸载阶段 b 值



(d) 加载阶段 b 值



(e) 卸载阶段 c 值



(f) 加载阶段 c 值

图 3 不同载荷水平参数比较

分析图 3 曲线发现:

1) 不论加载还是卸载阶段,各拟合参数从第 1 个循环到第 2 个循环均会产生较大变化,但此后的循环中各拟合参数的增减趋势逐渐减缓,且逐渐稳定于一个定值,这可能是由于第 1 个循环对试件内部结构影响较大所致。

2) 不同载荷水平的各参数变化趋势基本一致,不同的仅是变化幅度和参数本身的大小。这可能是

由于煤样试件为型煤试件,个体差异性较小,加之设计载荷水平均未达到试件屈服值,各试件变形均处于似弹性阶段所致。

3)加载阶段的各拟合参数比较敏感,在各个循环之间的变化较大;而卸载阶段各拟合参数则变化不大。

4)各拟合参数值的大小规律性不强,并非载荷水平越大,拟合数值越大。这也表明循环载荷水平对突出煤样力学性质影响较复杂。

4 结 语

通过对循环载荷作用下煤样的力学性质及滞回曲线演化研究,可得以下主要结论:

1)循环载荷作用下,煤岩变形将形成明显的滞回环,且随着循环次数的增加,滞回曲线加载段与卸载段围成的面积逐渐减小。

2)循环载荷作用下,从第2个循环开始,第*i*个循环的卸载曲线与第*i*+2个循环的加载曲线间也围成小的环状面积,形成次级滞回环。

3)循环载荷作用下,当载荷水平较低时滞回曲线围成面积较小;随着载荷水平的提高,在前几个循环时即表现出滞回曲线围成面积较大的趋势。

4)循环载荷作用下,滞回曲线加、卸载段*a*值均呈增大趋势,加、卸载段*b*值均呈减小趋势,加、卸载段*c*值均呈增大趋势,但均与载荷水平的大小关系变化较复杂。

5)循环载荷作用下,滞回曲线加、卸载段*a*、*b*、*c*值符号均相反。

参考文献:

- [1] 聂百胜,何学秋,王恩元. 瓦斯气体在煤孔隙中的扩散模式[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(5): 14-18.
NIE BAI-SHENG, HE XUE-QIU, WANG EN-YUAN. Diffusion mode of methane gas in coal pores[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000, 27(5): 14-18.
- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [3] 张力,何学秋,王恩元,等. 煤吸附特性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(5): 449-451.
ZHANG LI, HE XUE-QIU, WANG EN-YUAN, et al. Study of absorptive characteristics of coal[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(5): 449-451.
- [4] 许江,杨秀贵,王鸿,等. 周期性载荷作用下岩石滞回曲线的演化规律[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 754-758.
XU JIANG, YANG XIU-GUI, WANG HONG, et al. Evolution law of hysteresis curve of rock under cyclic loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(6): 754-758.
- [5] KONGKITKUL W, HIRAKAWA D, TATSUOKA F,

- et al. Viscous deformation of geosynthetic reinforcement under cyclic loading conditions and its model simulation[J]. Geosynthetics International, 2004, 11(2): 73-99.
- [6] LAM S, HALLIDAY K, QASIM T. The effects of cyclic loading on fracture modes in brittle layer structures: relevance to failure of dental crowns[J]. Advanced Materials Research, 2008, 41/42: 21-26.
- [7] 张晖辉,颜玉定,于怀忠,等. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射实验: 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-scaled rock failure under cycling load: fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3621-3628.
- [8] RAO S N, KUMAR N D. Earth pressure on caissons in marine clay under cyclic loading [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2007, 25(1): 15-35.
- [9] PRASAD Y V S N, RAO S N. Experimental studies on foundations of compliant structures-II under cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 1994, 21(1): 15-27.
- [10] KUSUMI H, MINE Y, NISHIDA K. Effect of structural anisotropy on deformation properties of granite under cyclic loading[J]. Zairyo, 1997, 46(9): 1029-1034.
- [11] BAI Z Z, AU F T K, KWAN A K H. Complete nonlinear response of reinforced concrete beams under cyclic loading[J]. The Structural Design of Tall Special Buildings, 2007, 16(7): 107-130.
- [12] 殷有泉,黄木藩,王康平. 房山大理岩本构性质的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 240-248.
YIN YOU-QUAN, HUANG MU-FAN, WANG KANG-PING. Experimental study of the constitutive behaviors of Fangshan marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(3): 240-248.
- [13] KAGGWA W S, BOOKER J R, CARTER J P. Residual strains in calcareous sand due to irregular cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(2): 201-218.
- [14] PECKLEYD C, UCHIMURA T. The P2S effect on the accumulation of residual strains in soft rocks due to irregular cyclic loading [J]. Soils and Foundations, 2009, 49(1): 63-74.
- [15] 许江,王维忠,杨秀贵,等. 细粒砂岩在循环加、卸载条件下变形实验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2004, 27(12): 60-62.
XU JIANG, WANG WEI-ZHONG, YANG XIU-GUI, et al. Experimental study on the deformation characteristics of fine-sandstone under the loading and unloading conditions[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(12): 60-62.

(编辑 郑洁)