DOI：10.16285/j.rsm.2016.1140

分级加−卸载条件下原煤的渗透及能耗特征研究

段敏克[1,2]，蒋长宝[1,2]，俞 欢[1,2]，陆天宇[1,2]，钮彬炜[2]，孙东玲[3]

（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. 中煤科工集团重庆研究院有限公司，重庆 400037））

摘 要：利用自主研制的含瓦斯煤热−流−固耦合三轴伺服渗流试验装置，进行了含瓦斯原煤分级加−卸载试验，分析探讨了煤岩的变形、渗透特性及能耗特征，结合能耗特征建立了损伤变量方程。研究结果表明：随分级加−卸载进行，煤样的累积残余变形逐渐增加，相对残余变形先降低，后出现残余变形稳定区，临近煤样破坏又上升。随分级加−卸载进行，渗透率总体变化趋势呈螺旋状先降低，后上升，破坏瞬间急剧增大；定义渗透率绝对恢复率η_j和渗透率相对恢复率η_x定量分析了加−卸载渗透率的变化情况，发现η_j先减小，临近破坏又增大，η_x逐渐增大，其中弹性段η_x保持在 85%～95%，临近破坏超过 100%。随分级加−卸载进行，煤体累积耗散能呈指数函数增加，单级循环耗散能增加。随着轴向应力的增加，主应力差增加，损伤变量值增大，且煤样破坏时的损伤变量临界值 D_c≈0.9。

关 键 词：含瓦斯煤；分级加−卸载；残余变形；渗透率；耗散能

中图分类号：TD 313 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 04－1346－09

Experimental research on energy dissipation and seepage properties of coal under loading-unloading conditions at different stress levels

DUAN Min-ke[1,2], JIANG Chang-bao[1,2], YU Huan[1,2], LU Tian-yu[1,2], NIU Bin-wei[1,2], SUN Dong-ling[3]

（1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
3. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China）

Abstract: In this paper, loading-unloading experiments were carried out on gas-contained coal under different stress levels by using self-made thermal-hydro-mechanical (THM) coupling equipment. The characteristics of the deformation, seepage and energy dissipation of coal and rock were analysed, and the damage variable equation was also established by considering the energy dissipation. Research results show that the cumulative residual deformation increases gradually with the advancing of cyclic loading-unloading. The relative residual deformation decreases firstly, then maintains stable at a certain value, and finally rises again when the coal sample is nearly destroyed. With the advancing of cyclic loading-unloading, the overall trend of permeability decreases spirally, and then increases until the coal sample is fractured. Moreover, a sharp increase is observed at the moment of destruction. The absolute recovery rate of permeability and relative recovery rate of permeability are defined as η_j and η_x to quantitatively analyse the changes of permeability in loading and unloading processes, respectively. It is found that η_j decreases firstly, and then increases at the critical moment of destruction. However, η_x increases steadily during the process, where η_x maintains at 85%−95% in the elastic stage, and η_x is more than 100% at the critical moment of destruction. With the advancing of cyclic loading-unloading, the cumulative dissipated energy grows exponentially, and the single-stage cycle of dissipation energy increases. With the increase of the axial stress, the principal stress difference increases, and the value of damage variable also increases. In addition, damage variable of coal D_c is 0.9 when coal is fractured.

Keywords: coal containing gas; different level loading-unloading; residual deformation; seepage; energy dissipation

1 引 言

随着煤岩开采的不断进行，开挖空间周围的应力场出现应力升高－降低－再升高的循环往复过程。在煤炭开采的持续进行中，垂直应力随爆破震动、相邻煤层采动或巷道掘进，出现周期性增压和

收稿日期：2016-05-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 51674048)；重庆市科技计划资助项目(No. cstc2015jcyjA90009, No. cstc2015jcyjBX0076)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51674048) and the Fundamental and Advanced Research Projects of Chongqing (cstc2015jcyjA90009, cstc2015jcyjBX0076).
第一作者简介：段敏克，男，1990 年生，博士研究生，主要从事多场耦合下煤层气运移理论与工程应用方面的研究工作。E-mail: 1650145746@qq.com
通讯作者：蒋长宝，男，1982 年生，博士，副教授，博士生导师，主要从事采矿工程方面的研究工作。E-mail: jcb@cqu.edu.cn

卸压过程，煤岩体承受着分级加-卸载循环应力场的作用，对煤岩体强度、瓦斯涌出都将产生重要影响。而煤岩体在循环荷载作用下的变形、渗透特性及能量特征都与静态荷载作用下有所不同，为了更好地描述开挖环境下煤岩体的动态特性，有必要开展含瓦斯煤岩在动态循环载荷下的变形、渗透特性及能量特征研究，从而进一步揭示冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害的前兆信息特征，对煤岩动力灾害的防治有着重要意义。

目前，国内外学者对煤岩体在固定循环荷载方面进行了大量研究。葛修润等[1−2]对周期荷载作用下岩石的不可逆变形和疲劳门槛值等进行了大量试验研究，得到岩石不可逆变形的发展可分为初始、稳定及加速 3 个阶段，疲劳门槛值接近屈服值；郭印同等[3]进行了盐岩单轴循环荷载试验，分析了循环荷载作用下盐岩的疲劳强度、变形及损伤特性；许江等[4]做了不同温度下型煤的循环加-卸载试验，研究了不同温度下循环载荷作用对煤变形、渗透及能量特征的影响；杨永杰等[5]研究得到，煤岩在循环荷载作用下，随循环次数的疲劳破坏过程可反映从压密、应变硬化到软化的发展过程，也可反映其损伤演化过程；刘杰等[6]进行不同应力水平和加载速率条件下不同种类岩石材料的循环荷载试验，发现应力水平越高，加载频率越大，岩性越强，则滞回圈的面积、加载过程中做的功、卸载过程中释放的弹性能越大，岩石越软，能量消耗率越高；Liu 等[7]研究了循环荷载频率对砂岩的变形、强度特性及损伤特征的影响；苏承东等[8]对三轴循环加-卸载条件下煤样的变形及强度特征进行了分析；Araei 等[9]进行了单轴循环荷载下初始应力状态、加载速率对岩石应力−应变曲线的影响；Fuenkajorn 等[10]研究了周期荷载对盐岩单轴抗压强度、弹性模量及不可逆变形的影响；何明明等[11]对砂岩进行不同应力振幅条件下循环加载试验，研究了循环加载过程变形 3 阶段的变形特性、循环软化与循环硬化及能耗特征，并且建立了耗散能随循环次数变化的演化方程。

而对于分级加-卸载方面的研究相对较少，何俊[12]、Shkuratnik[13]等从声发射特征方面研究了原煤分级加-卸载过程，得到了原煤在循环加-卸载过程中声发射具有记忆效果。Liu 等[14]研究了不同应力水平下循环荷载作用过程盐岩的损伤演化特征，并建立了损伤演化方程。彭瑞东等[15]通过煤岩三轴循环加-卸载试验，分析了不同围压作用下煤岩的损伤演化过程的能量转化机制。左建平等[16]研究得到了分级加-卸载过程中煤岩组合体的变形、弹性模量、能量耗散等变化规律，但都未考虑瓦斯因素的影响。而煤岩体由于赋存大量的瓦斯气体，在地下开采过程中存在着应力场与瓦斯压力场的相互耦合，会形成复杂的能耗特征和破坏损伤规律。

因此，本文开展分级加-卸载含瓦斯原煤的渗透试验研究，考虑恒定围压和瓦斯压力，逐级加-卸载轴压的条件下，测定原煤的变形量和渗透率，分析探讨煤岩体在分级加-卸载作用下的变形、渗透特性及能量耗散规律。

2　试验设备及试验方案

2.1　试验仪器

本试验采用重庆大学自行研制的含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流试验装置[17]，该试验装置可以模拟研究煤岩在不同的应力场（围、轴压）、气体压力和地温场作用下的气体渗流试验，如图 1 所示。



图 1　含瓦斯煤热−流−固耦合三轴伺服渗流试验装置
Fig.1　Triaxial stress thermal-hydro-mechanical permeameter for gas-contained coal

2.2　试验煤样

试验所用煤样取自南川宏能煤业矿井西翼 K_1 煤层，K_1 煤层是以亮煤为主的半亮型煤，属于中灰、高硫、高热质贫煤间夹无烟煤，煤层富含瓦斯气体，存在煤尘爆炸性。煤样的基本参数如表 1 所示。将现场采取的大煤块沿垂直层理方向钻取，然后再切割打磨制成尺寸为 Φ50 mm×(100±0.25 mm)的标准试样，煤样实物如图 2 所示。

表 1　煤样基本参数
Table 1　Coal properties

水分 /%	灰分 /%	挥发份 /%	固定碳 /%	埋深 /m	波速 /(cm/s)
0.75	12.31	13.01	73.93	450	1 659



图 2 试验原煤试样

Fig.2 Prepared coal samples for testing

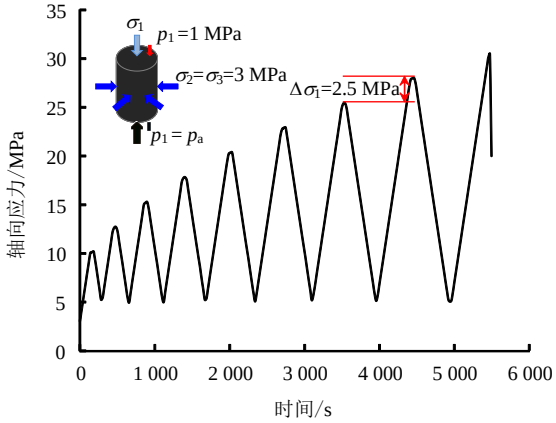


图 3 分级加-卸载曲线

Fig.3 Hierarchical loading-unloading curve

2.3 试验方案

本试验轴压和围压先同时以 0.05 MPa/s 的速度加载至静水压力（3 MPa），然后通 1 MPa 瓦斯，待吸附平衡后，保持围压和瓦斯压力不变，轴压以 0.05 MPa/s 速度继续进行加载，加载至目标值后卸载，卸载至 10 kN 后再进行下一次加载，以此循环。循环过程最小载荷不变，最大载荷每次增加 5 kN，以保证能够实现 5 次以上的循环加-卸载。分级加-卸载具体路径为 10→20→10→25→10→30…10 kN→峰值强度→破坏→立即停止试验，如图 3 所示。图中，σ_1 为轴向应力；σ_3 为围压。

3 试验结果与分析

本试验对编号为 NC-M-1、NC-M-2 两个煤样进行了相同条件下的分级加-卸载试验研究，从煤岩变形、渗透特性及能量耗散特征 3 个方面分析分级循环荷载对原煤的影响。煤样的基本试验数据如表 2 所示（注：表中括号内数值为煤样 NC-M-2 试验结果）。

表 2 煤样基本试验数据

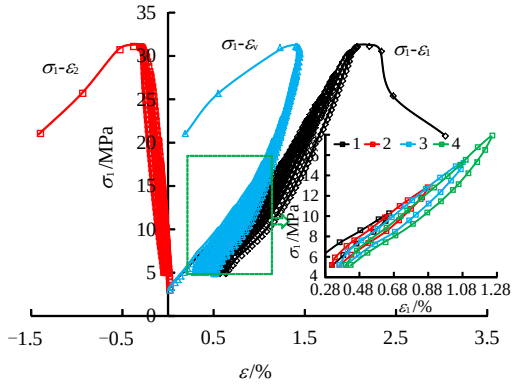
Table 2 The basic experimental results of three coal samples

循环次数	煤样 NC-M-1(NC-M-2)					
	累计残余变形/%	相对残余变形/%	渗透率绝对恢复率/%	渗透率相对恢复率/%	总耗散能/(10^{-2} MJ/m^3)	单级循环耗散能/(10^{-2} MJ/m^3)
1	0.144(0.149)	0.144(0.149)	56.8(54.1)	56.8(54.1)	3.68(3.68)	2.38(2.44)
2	0.193(0.191)	0.049(0.042)	49.2(45.6)	86.7(84.4)	5.35(5.63)	1.67(1.95)
3	0.221(0.225)	0.028(0.034)	44.3(41.5)	90.1(90.9)	7.64(8.14)	2.30(2.52)
4	0.254(0.262)	0.033(0.037)	40.4(33.1)	91.1(80.0)	10.40(11.50)	2.73(3.39)
5	0.286(0.284)	0.031(0.022)	37.5(28.9)	93.0(87.3)	13.60(15.20)	3.20(3.70)
6	0.316(0.327)	0.030(0.043)	35.9(24.8)	96.8(85.7)	17.30(20.40)	3.69(5.21)
7	0.348(0.386)	0.032(0.059)	34.7(37.5)	96.8(151.0)	21.70(27.10)	4.47(6.69)
8	0.387(0.473)	0.039(0.087)	35.5(101.0)	102.0(270.0)	27.20(36.40)	5.44(9.26)
9	0.450(–)	0.063(–)	40.3(–)	113.0(–)	35.20(–)	7.96(–)

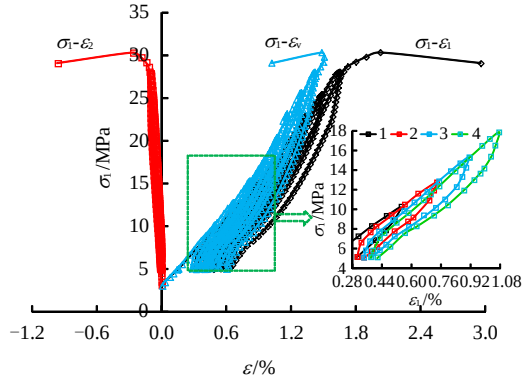
3.1 分级加-卸载煤岩变形特性分析

如图 4 所示，轴向应力的逐级循环加-卸载对煤岩的轴向应变 ε_1 影响最大，体积应变 ε_v 次之，径向应变 ε_3 最小。在同一级循环中，加载曲线与卸载曲线不形成闭合环路，卸载曲线与下一级循环的加-载曲线在最大载荷处形成闭合环路。每次卸载后再加载，在载荷超过上次循环的最大载荷后，变形曲线沿着上次加载曲线上升的趋势继续上升，说明原煤具有变形记忆特性，见图 4 中 σ_1-ε_1 曲线的局部放大处理。随着分级加-卸载的进行，原煤应力-应变曲线呈螺旋式向前推进，且历经疏-密-疏的过程。煤岩体富含大量可压缩的孔隙裂隙，在加-卸载循环进行中孔隙裂隙不断被压密，形成永久变形，屈服后煤体内大量产生次生裂隙，使变形急剧加大，故加-卸载曲线不重合但表现出螺旋式向前推进的特征，并且出现循环初期和破坏前循环加-卸载曲线稀疏，中间循环加-卸载曲线密集的现象。

采用累积残余变形和相对残余变形来精确分析分级加-卸载各级循环的变形特征，累积残余变形为每次循环卸载后的变形量与首次循环加载时变形量之差，如图 5(a)所示。可以看出，随着分级加-卸载循环的进行，累积残余变形逐渐增加。单级循环产生的永久变形称为相对残余变形，如图 5(b)所示，可见随着循环载荷的进行，相对残余变形在循环初始阶段逐渐降低，后趋于稳定，最后又逐渐上升，且初始循环阶段的相对残余变形较大。这主要是煤



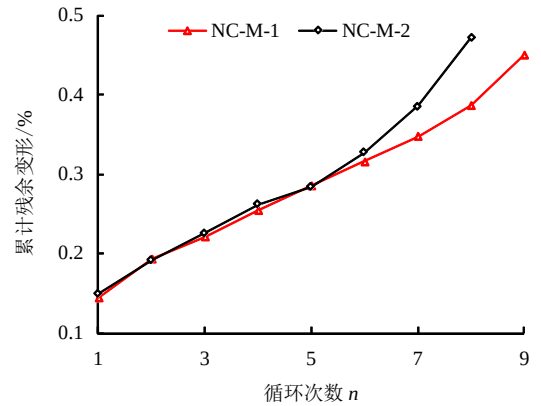
(a) NC-M-1 应力-应变曲线



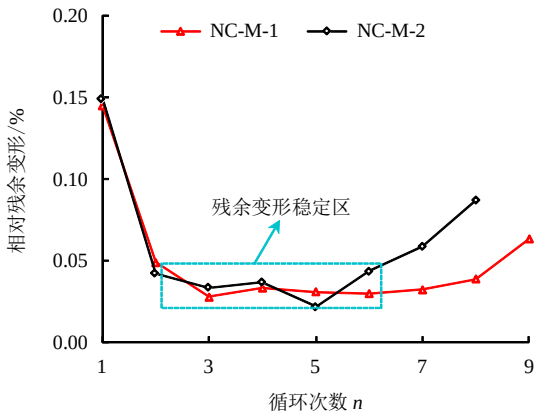
(b) NC-M-2 应力-应变曲线

图 4　分级加-卸载条件下原煤应力-应变曲线

Fig.4　Stress-strain curves of coal under cyclic loading-unloading at different levels



(a) 累积残余变形



(b) 相对残余变形

图 5　不同循环阶段残余变形

Fig.5　Residual deformation at different stages

体内部大量的原生孔隙裂隙造成的，随着加-卸载进行，初始循环阶段孔裂隙逐渐被压密，卸载后被压密的孔裂隙不能完全恢复，产生了较多的不可恢复变形；在煤体弹性阶段时，煤体的变形基本可恢复，出现相对残余变形稳定区；进入屈服阶段后，煤体次生孔裂隙大量产生并不断扩展，煤体变形增大且不可恢复，煤岩加速损伤劣化直至破坏。因此，相对残余变形急剧增加是煤样失稳破坏的前兆信息，监测煤岩体的变形规律对煤岩体破坏预测具有重要意义。

3.2　分级加-卸载煤岩渗透特性分析

假设试验中瓦斯在煤岩中的渗透过程为等温过程，瓦斯渗流符合达西定律，则可得渗透率 K 的计算公式为

$$K=\frac{2Qup_aL}{A\left(p_1^2-p_2^2\right)} \tag{1}$$

式中：K 为煤样的渗透率（mD，1 mD=10^{-16} m^2）；Q 为甲烷渗流流量（cm^3/s）；p_a 为标准大气压力；u 为瓦斯绝对黏度，取 1.12×10^{-5} Pa • s；L 为煤样长度（cm）；p_1、p_2 为煤样进出口瓦斯压力（Pa）；A 为煤样渗透的有效面积（cm^2）。

试验中两个煤样的渗透率变化规律存在相似性，故只对 NC-M-1 煤样的渗透率变化曲线进行分析。将煤样的渗透率变化过程与分级加-卸载煤样轴向应力-应变演化过程进行对比，如图 6 所示，可以看出，分级加-卸载过程中煤样渗透率变化与煤样应力-应变曲线存在密切对应关系。渗透率变化总体趋势表现为：随着轴向应力的逐级循环加-卸载，初始压密阶段，渗透率呈现大幅度的螺旋式减小；弹性阶段，渗透率呈现平缓的螺旋式减小；屈服阶段，渗透率呈现缓慢的螺旋式上升，破坏瞬间渗透率则急剧增大。

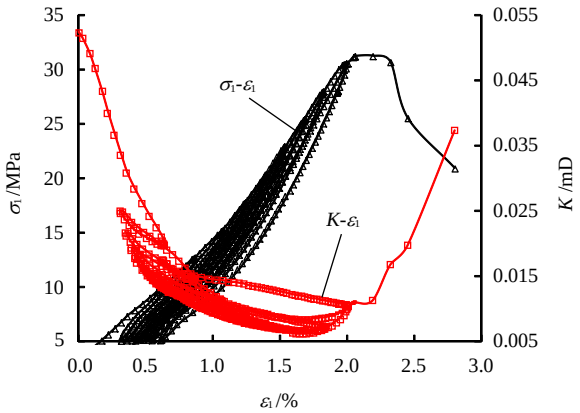


图 6　NC-M-1 煤样轴向应力-应变曲线及渗透率-应变曲线

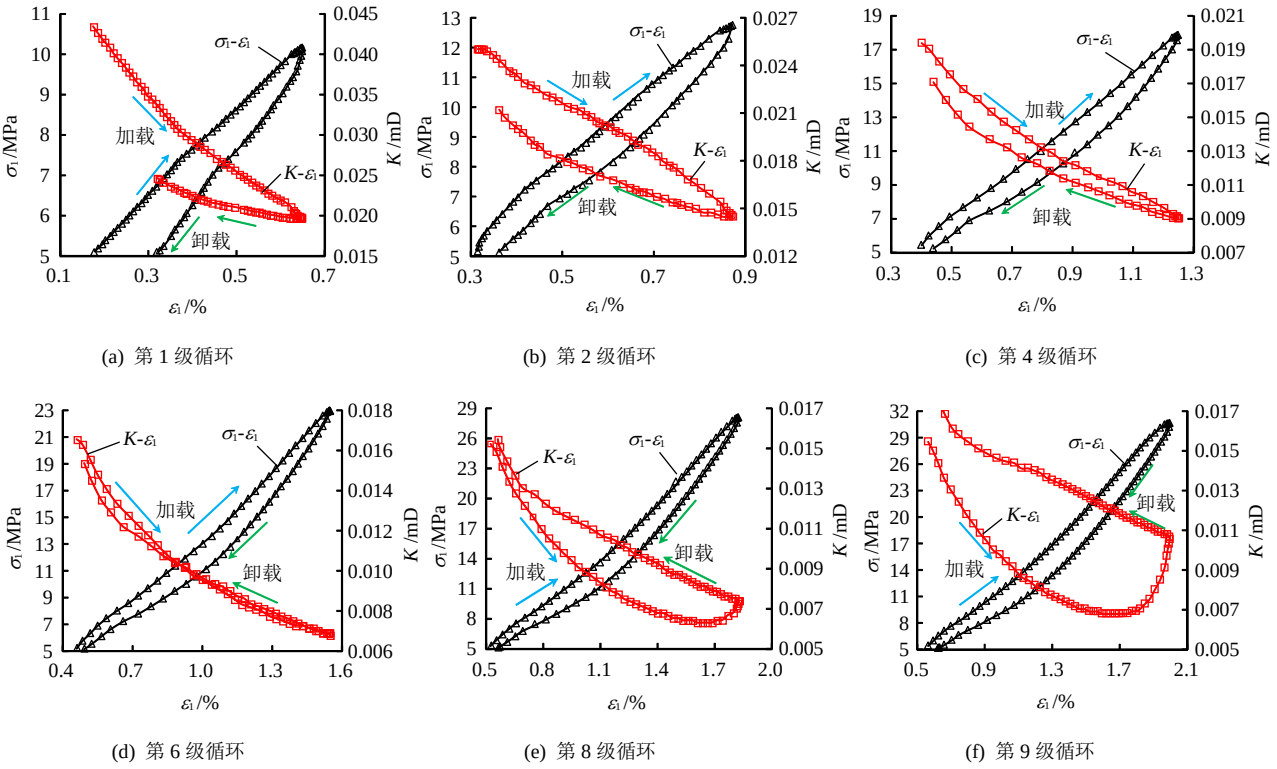
Fig.6　Stress-strain and permeability-strain curves of NC-M-1 under cyclic loading-unloading at different levels

不同循环阶段放大处理如图 7 所示。从第 1 个循环可以明显地看出加载与卸载曲线偏离较远，不能形成封闭环，加-卸载曲线形成了犄角状的曲线；而渗透率随轴向应力的加载急剧减小，卸载后渗透率不完全恢复。随着第 2 循环的进行，残余变形相比第 1 循环明显降低，渗透率随轴向加载减小，卸载后渗透率能恢复 2/3 以上。随着循环加-卸载的继续进行，加载和卸载曲线逐渐靠近，在循环阶段的最大载荷与最小载荷处呈尖状，加-卸载曲线渐变为细长的条带状曲线，而由于残余变形存在，曲线始终不能形成闭合环路。

随着循环加-卸载的进行，渗透率曲线始终与加卸载曲线呈 X 型交叉出现。第 6 循环前加载段渗透率曲线处于卸载段渗透率曲线上方并逐渐逼近，到第 6 个循环阶段，加载段渗透率曲线与卸载段渗透率曲线第 1 次产生交叉现象，卸载段渗透率首次出现部分大于加载段渗透率，说明在前 6 个循环加-卸载过程中煤样以孔裂隙压密为主，加-卸载过程中大量孔裂隙被逐渐压密，孔裂隙通道减小，渗透率逐渐降低，而自第 6 个循环后，加-卸载过程中以裂隙扩展为主，加载时产生大量次生裂隙且卸载后孔裂隙在瓦斯压力作用下能恢复张开，渗透通道增加，故出现第 8、9 循环加载段渗透率曲线和卸载段渗透率曲线又逐渐远离，且出现加载段渗透率曲线处在卸载段渗透率曲线下方的现象。

第 9 循环为 NC-M-1 煤样破坏前的最后一级循环，渗透率曲线在最大载荷处形成鼓胀状，渗透率随应力的增加表现出急剧增大的趋势，破坏前渗透率随应力的加载反而升高，说明应力压裂孔裂隙的程度远远大于压密孔裂隙的程度。

综上可得，渗透率曲线随分级加-卸载进行的变化规律为循环初期加载段渗透率曲线居上并逐渐逼近卸载段渗透率曲线，后两曲线交叉，最后卸载段渗透率曲线居上。



(a) 第 1 级循环　(b) 第 2 级循环　(c) 第 4 级循环

(d) 第 6 级循环　(e) 第 8 级循环　(f) 第 9 级循环

图 7　NC-M-1 不同循环阶段的应力-应变曲线及渗透率-应变曲线

Fig.7　Stress-strain and permeability-strain curves of NC-M-1 at different cyclic stages

定义渗透率绝对恢复率为每次循环卸载后的渗透率与首次加载时的渗透率的百分比，即

$$\eta_{\mathrm{j}} = K_i / K_1 \times 100\% \qquad (2)$$

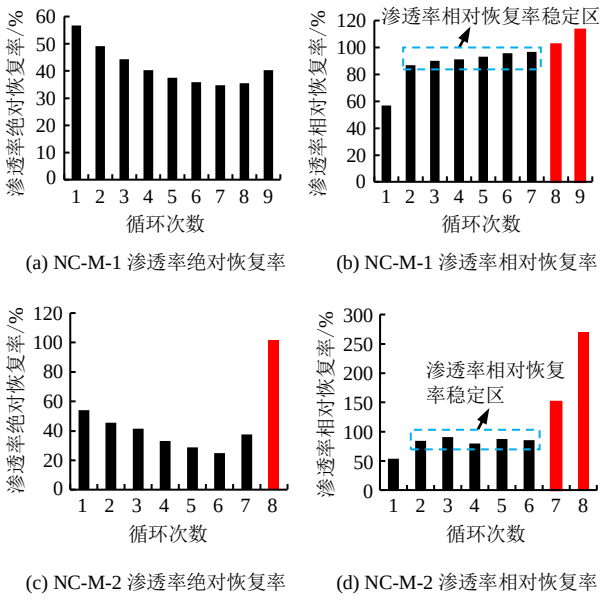
式中：η_{j} 为渗透率绝对恢复率；K_i 为循环加-卸载 i 次后轴向应力卸载至 10 kN 时的渗透率（mD）；K_1 为循环加-卸载首次轴向应力从 10 kN 加载时的渗透率（mD）。

定义渗透率相对恢复率为每级循环卸载后的渗透率与本级循环加载时渗透率的百分比，即

$$\eta_{\mathrm{x}} = K_{i+1} / K_i \times 100\% \qquad (3)$$

式中：η_x 为渗透率相对恢复率；K_{i+1} 为循环加-卸载 i+1 次后轴向应力卸载至 10 kN 时的渗透率（mD）；K_i 为循环加卸载 i 次后轴向应力卸载至 10 kN 时的渗透率（mD）。

用新定义的渗透率绝对恢复率和渗透率相对恢复率来定量分析加-卸载渗透率的变化情况，从图 8(a)、8(c)可以看出，随分级加-卸载的进行，渗透率绝对恢复率先逐渐减小，后又逐渐增大。主要是因为分级荷载应力水平不断提高，煤岩首先以孔裂隙压密为主，渗流通道减少；当达到屈服应力以后，煤岩产生大量裂隙，此时以裂隙扩展为主，渗流通道不断增加。如图 8(b)、8(d)所示，随循环荷载的进行，渗透率相对恢复率逐渐增大，弹性阶段渗透率相对恢复率保持在 85%～95%，表明弹性阶段，渗透率能大部分恢复。破坏前 2 个循环渗透率相对恢复率超过 100%，卸载后的渗透率比加载时的渗透率大，表明在此应力作用下裂隙生成程度大于裂隙压密程度，大量次生孔裂隙产生，煤样裂化加剧，孔裂隙不断扩张贯穿形成宏观裂纹，渗流通道增加，渗透率相对恢复率急剧增大，煤样临近破坏。因此，煤岩渗透率相对恢复率也可作为煤样破坏失稳的重要前兆指标，当煤岩渗透率相对恢复率超过 100%，表明煤岩临近破坏阶段。



(a) NC-M-1 渗透率绝对恢复率　(b) NC-M-1 渗透率相对恢复率

(c) NC-M-2 渗透率绝对恢复率　(d) NC-M-2 渗透率相对恢复率

（注：红色代表超过 100%）

图 8　不同循环阶段渗透率恢复率

Fig.8　Permeability recovery rate at different stages

3.3　分级加-卸载煤岩能耗特征分析

煤岩在外力作用下产生变形、破坏的过程实质是能量释放与耗散的过程，而能量耗散是岩石破坏的本质属性，是分析力学系统失稳破坏的常用方法[18–20]。煤岩体在力学试验中，外载所做的总功 W，其中大部分以弹性势能 E_e 蓄积在煤岩体内，而少部分 E_d 以各种形式损伤耗散掉，其弹性势能将在卸载时释放出来，近似等于卸载时外力做的负功 E_r。则有[15]

$$W = E_e + E_d = E_r + E_d \tag{4}$$

在含瓦斯煤的分级加-卸载试验条件下，计算单位体积煤岩体各部分能量需考虑瓦斯压力对轴压和围压的影响，实际作用在煤岩体对其做功的为轴向有效应力和有效围压，其中轴向有效应力和有效围压的计算公式为

$$\sigma_1 = \sigma_1^e + p_1 \tag{5}$$

$$\sigma_3 = \sigma_3^e + \frac{1}{2}(p_1 + p_2) \tag{6}$$

式中：σ_1^e 为轴向有效应力；σ_3^e 为有效围压。

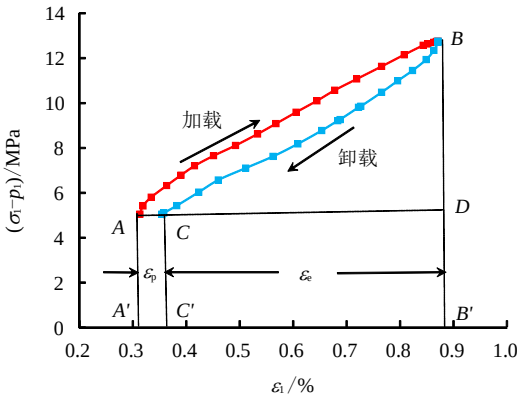


图 9　循环加-卸载下煤岩能量的计算面积

Fig.9　Calculation area of coal energy under cyclical loading-unloading conditions

煤岩体的总耗散能可分成轴向耗散能和环向耗散能两部分，以 NC-M-1 煤样第 2 次循环加-卸载过程中的轴向耗散能量计算为例，如图 9 所示，ε_p 为一次循环产生的塑性变形，ε_e 为弹性变形，$A'ABB'$ 所围面积为轴向有效应力加载过程做的总功 W_1，$C'CBB'$ 所围面积为轴向有效应力卸载过程释放的弹性能 E_{e1}，$A'ABCC'$ 所围面积为一次循环过程中轴向耗散的能量 E_{d1}。故滞回环面积即为一个循环过程中煤体内能量的轴向耗散量。计算轴向有效应力-应变曲线所围面积可结合微积分定义，得到轴向有效应力加载过程做的总功 W_1 和卸载过程释放的弹性能 E_{e1} 计算公式如下：

$$W_1=\int\sigma_1^{\mathrm{e}}\mathrm{d}\varepsilon_1=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}(\sigma_{1i}+\sigma_{1i-1}-2p_1)(\varepsilon_{1i}-\varepsilon_{1i-1}) \quad (7)$$

$$E_{\mathrm{e}1}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}(\sigma'_{1i}+\sigma'_{1i-1}-2p_1)(\varepsilon'_{1i}-\varepsilon'_{1i-1}) \quad (8)$$

式中：σ_{1i}、ε_{1i}为加载阶段轴向应力-应变曲线上每一点的应力、应变值；σ'_{1i}、ε'_{1i}为卸载阶段轴向应力-应变曲线上每一个点的应力、应变值；p_1为煤样进口瓦斯压力（MPa），此试验中p_1为恒定常量。

同理可求有效围压在轴向应力加载过程中做的总功W_3及卸载过程释放的弹性能$E_{\mathrm{e}3}$。

$$W_3=2\int\sigma_3^{\mathrm{e}}\mathrm{d}\varepsilon_3=\sum_{i=1}^{n}(\sigma_{3i}+\sigma_{3i-1}-p_1-p_2)(\varepsilon_{3i}-\varepsilon_{3i-1}) \quad (9)$$

$$E_{\mathrm{e}3}=\sum_{i=1}^{n}(\sigma'_{3i}+\sigma'_{3i-1}-p_1-p_2)(\varepsilon'_{3i}-\varepsilon'_{3i-1}) \quad (10)$$

式中：σ_{3i}、ε_{3i}为加载阶段径向应力-应变曲线上每一点的应力、应变值；σ'_{3i}、ε'_{3i}为卸载阶段径向应力-应变曲线上每一个点的应力、应变值；

每级循环过程中的轴向耗散能和环向耗散能可由上述公式计算得到，而煤岩的总耗散能为每级循环过程中的轴向耗散能和环向耗散能之和，将每级循环的轴向和环向滞回环面积累加即可得到累积耗散能，如图 10(a)所示。可看出，随煤体的主应力差增加，煤体的累积耗散能呈指数函数增加，这是由于分级加卸载中轴向应力不断提高，而围压保持不变，煤岩体的主应力差不断增加，对煤体损伤破坏程度越来越大，耗散在煤体内部因摩擦、次生裂纹产生以及塑性变形的能量增多。累积耗散能与主应力差的拟合可用指数函数表示为

$$E_{\mathrm{d}}=\alpha\exp[\beta(\sigma_1-\sigma_3)] \quad (11)$$

式中：E_{d}为总耗散能（MJ/m^3），与应力单位 MPa 实际相同[20]；α和β为拟合系数；$(\sigma_1-\sigma_3)$为主应力差（MPa）。

单级循环的耗散能即单级循环的滞回环面积，如图 10(b)所示，可见单级循环耗散能除第 1 循环外，随分级加-卸载的进行逐渐增加且增加的越来越快。第 1 循环耗散能比较大的主要原因是煤岩存在大量孔裂隙，初期孔裂隙被压缩，能量消耗较大。

为了表征煤岩体分级加-卸载条件下的损伤演化特征，彭瑞东等[15]结合煤岩损伤耗散能得到各应力点下的损伤变量计算表达公式为

$$D=\frac{2}{\pi}\arctan\frac{\Delta E_{\mathrm{d}}}{\Delta\sigma} \quad (12)$$

式中：ΔE_{d}为对应的损伤耗散能增量；$\Delta\sigma$为应力增量；当$\Delta E_{\mathrm{d}}=0$时，$D=0$，表示耗散能为 0 时，煤岩体无损伤。当$\Delta E_{\mathrm{d}}\to\infty$时，$D=1$，表示耗散能无穷大时，损伤极为严重。而实际煤岩体的耗散能不可能无穷大，当其达到某临界值时，煤岩体就会破坏失稳。与此临界值对应，存在一个临界损伤变量值D_{c}，当$D\geqslant D_{\mathrm{c}}$时煤岩体就会发生破坏。

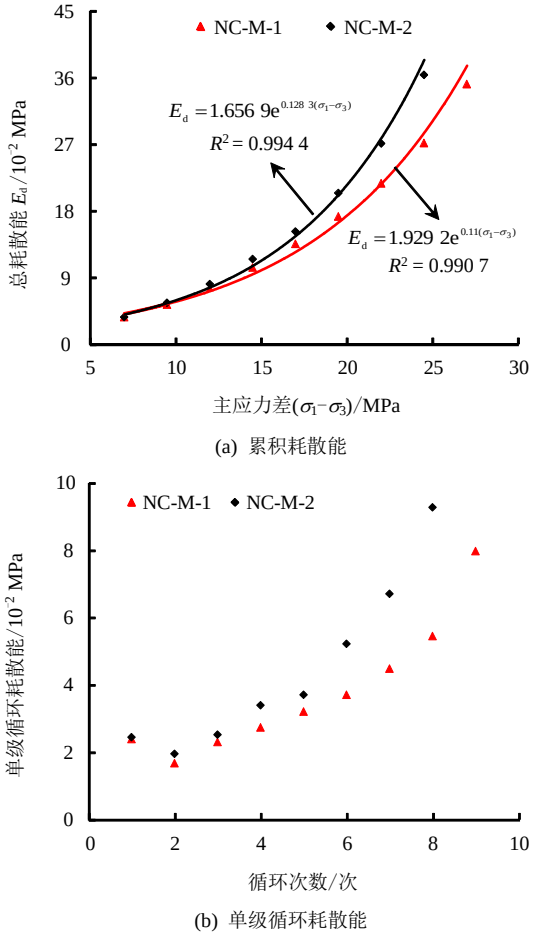


图 10 不同循环次数煤体的耗散能

Fig.10 Dissipation energy of coal at different cycles

将式（11）求导代入式（12）可得连续应力下的损伤变量计算公式：

$$D=\frac{2}{\pi}\arctan\left\{\alpha\beta\exp\left[\beta\left(\sigma_1-\sigma_3\right)\right]\right\} \quad (13)$$

式中：D为损伤变量值。

根据损伤变量函数式（13）可得到不同主应力差下煤样的损伤变量值，如图 11 所示。从图中可以看出，随循环的进行，峰值轴向应力不断增大，主应力差也不断增大，煤样的损伤变量值增大，损伤越来越剧烈。同时，从图中可以看出，两个煤样破坏点所对应的损伤变量值非常接近且大致在 0.9 左右，说明此试验煤样破坏的损伤变量临界值$D_{\mathrm{c}}\approx 0.9$，当煤样损伤变量值超过伤变量临界值 0.9 时，

煤样临近破坏。所以，煤样的损伤变量也可作为判定煤样破坏的指标之一。

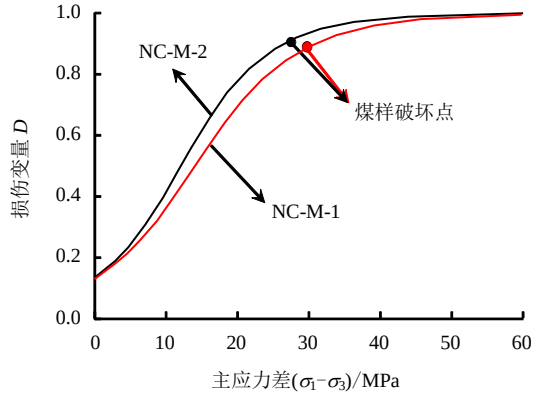


图 11　煤岩的损伤演化曲线

Fig11　Damage evolution curves of coal

4　结　论

（1）随分级加-卸载进行，煤样的累积残余变形逐渐增加，相对残余变形先降低、后出现残余变形稳定区、临近煤样破坏时又上升。且首次循环相对残余变形最大。

（2）随分级加-卸载的进行，渗透率总体趋势为先螺旋降低，后螺旋上升，破坏瞬间急剧增大。定义渗透率绝对恢复率 η_j 和渗透率相对恢复率 η_x 定量分析了加-卸载渗透率的变化情况，发现 η_j 先减小，临近破坏又增大，η_x 逐渐增大，其中弹性段 η 保持在 85%～95%，临近煤样破坏时超过 100%。

（3）随循环荷载的进行，煤体的累积耗散能成指数函数增加，单级循环的耗散能也逐渐增加，结合耗散能建立损伤变量方程。随着轴向应力的增加，主应力差增加，损伤变量值增大，且煤样破坏时的损伤变量临界值 $D_c \approx 0.9$。

参 考 文 献

[1] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581－1585.
GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1581－1585.

[2] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 473－478.
ZHANG Qing-xu, GE Xiu-run, HUANG Ming, et al. Testing study on fatigue deformation law of red-sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 473－478.

[3] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353－1359.
GUO Yin-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1353－1359.

[4] 许江, 李波波, 周婷, 等. 循环荷载作用下煤变形及渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 225－234.
XU Jiang, LI Bo-bo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of deformation and seepage characteristics of coal under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(2): 225－234.

[5] 杨永杰, 宋扬, 楚俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201－205.
YANG Yong-jie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study of characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 201－205.

[6] 刘杰, 李建林, 张玉灯, 等. 循环荷载下岩体能量特征及变形参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3505－3513.
LIU Jie, LI Jian-lin, ZHANG Yu-deng, et al. Analysis of energy characteristic and deformation parameters of rock mass under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3505－3513.

[7] LIU E L, HUANG R Q, HE S M. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45: 89－102.

[8] 苏承东, 熊祖强, 翟新献, 等. 三轴循环加卸载作用下煤样变形及强度特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 456－467.

SU Cheng-dong, XIONG Zu-qiang, ZHAI Xin-xian, et al. Analysis of deformation and strength characteristics of coal samples under the triaxial cyclic loading and unloading stress path[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2014, 31(3): 456－467.

[9] ARAEI A AGHAEI, RAZEGHI H R, GHALANDARZADEH A. Effects of loading rate and initial stress state on stress-strain behavior of rock fill materials under monotonic and cyclical loading conditions[J]. **Scientia Iranica**, 2012, 9(15): 1220－1235.

[10] FUENKAJORN K, PHUEAKPHUM D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt[J]. **Engineering Geology**, 2010, 112(1): 43－52.

[11] 何明明, 陈蕴生, 李宁, 等. 单轴循环荷载作用下砂岩变形特性与能量特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1805－1812.

HE Ming-ming, CHEN Yun-sheng, LI Ning, et al. Deformation and energy characteristics of sandstone subjected to uniaxial cyclic loading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(8): 1805－1812.

[12] 何俊, 潘结南, 王安虎. 三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 84－90.

HE Jun, PAN Jie-nan, WANG An-hu. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(1): 84－90.

[13] SHKURATNIK V L, FILIMONOV YU L, KUCHURIN S V. Acoustic emission memory effect in coal samples under uniaxial cyclic loading[J]. **Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**, 2006, 47(2): 236－240.

[14] LIU J F, XIE H P, HOU Z M, et al. Damage evolution of rock salt under cyclic loading in unixial tests[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(11): 153－160.

[15] 彭瑞东, 鞠杨, 高峰, 等. 三轴循环加卸载下煤岩损伤的能量机制分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 245－252.

PNEG Rui-dong, JU Yang, GAO Feng, et al. Energy analysis on damage of coal under cyclical triaxial loading and unloading conditions[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(2): 245－252.

[16] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1287－1296.

ZUO Jian-ping, XIE He-ping, MENG Bing-bing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1287－1296.

[17] YIN G Z, JIANG C B, WANG J G, et al. Combined effect of stress, pore pressure and temperature on methane permeability in anthracite coal: An experimental study[J]. **Transport in Porous Media**, 2013, 100(1): 1－16.

[18] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565－3570.

XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3565－3570.

[19] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2526－2531.

PENG Rui-dong, XIE He-ping, JU Yang. Analysis of energy dissipation and damage evolution of sandstone during tensile process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2526－2531.

[20] 康向涛, 黄滚, 宋真龙, 等. 三轴压缩下含瓦斯煤的能耗与渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 762－768.

KANG Xiang-tao, HUANG Gun, SONG Zhen-long, et al. Research on characteristics of energy dissipation and seepage of coal containing gas under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 762－768.