

循环加卸载作用下不同高度煤样渗透性试验研究

王辰霖¹, 张小东^{1, 2}, 李贵中³, 杜志刚¹, 张 硕¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中原经济区煤层气(页岩气)协同创新中心, 河南 焦作 454000;
3. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 为获取循环荷载作用下不同高度煤样渗透率的变化规律, 应用煤岩三轴加载渗流试验装置, 对直径相同高度不同的煤样进行循环加卸载轴压渗透性试验。研究表明: 加载阶段, 渗透率随轴压增加而降低; 卸载阶段, 渗透率随轴压降低而增加; 渗透率与轴压呈负指数函数关系, 渗透率应力敏感性随循环次数增加而降低; 加载阶段与卸载阶段渗透率产生明显差值, 其差值随循环次数增加而降低, 渗透率损失量主要发生在初期加卸载阶段。不同高度煤样应力敏感性存在显著差异, 应力敏感性随煤样高径比增加而降低; 在加载与卸载阶段, 无因次渗透率损失量随高径比增加而增大; 经历循环加卸载作用后, 渗透率损失率随高径比增加而增大, 渗透率恢复率随高径比增加而降低。

关键词: 岩石力学; 循环加卸载; 轴压; 高度; 渗透率; 应力敏感性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)10 - 2299 - 10

Experimental study on the permeability of coal samples with different heights under cyclic loading and unloading

WANG Chenlin¹, ZHANG Xiaodong^{1, 2}, LI Guizhong³, DU Zhigang¹, ZHANG Shuo¹

(1. *School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China*; 2. *Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane(Shale Gas) in Central Plains Economics Zone, Jiaozuo, Henan 454000, China*;
3. *Langfang Branch, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Langfang, Hebei 065007, China*)

Abstract: In order to obtain the permeability variations of coal samples with different heights under cyclic loading, triaxial loading seepage experiment device was used to carry out the cyclic axial loading and unloading compression tests on coal samples with the same diameter and different heights. The results show that the permeability decreases with the increasing of the axial compression in the loading stage. The permeability increases with the decreasing of the axial compression in the unloading stage. The relationship between the permeability and the axial compression is a negative exponential function and the stress sensitivity of permeability decreases with the increasing of cycle numbers. The permeability has a significant difference during the loading and unloading stage and the permeability difference decreases with the increasing of cycle numbers. The permeability reduction mainly occurs in the initial stage of loading and unloading. There are significant differences in stress sensitivity for coal samples with different heights. The stress sensitivity decreases with the increasing of the height to diameter ratios of coal samples. During the loading and unloading

收稿日期: 2018 - 06 - 11; **修回日期:** 2018 - 07 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372162); 河南省高校科技创新团队支持计划(14IRTSTHN002)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41372162) and Science and Technology Innovation Team Support Plan of Henan Province(Grant No. 14IRTSTHN002)

作者简介: 王辰霖(1988 -), 男, 2012 年毕业于河南理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事矿山岩体力学方面的研究工作。E-mail: wag_cheli@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0687

stage, the reduction of dimensionless permeability increases with the increasing of the height to diameter ratio. After cyclic loading and unloading, the reduction rate of permeability increases with the increasing of height to diameter ratio. The recovery rate of permeability decreases with the increasing of height to diameter ratio.

Key words: rock mechanics; cyclic loading and unloading; axial compression; height; permeability; stress sensitivity

1 引言

地下煤炭开采过程中,采煤工作面前方煤体受到前方支承压力的影响,开采后煤体发生卸载,残留于采空区内的煤体由于顶板周期来压的影响,使得应力场多次重新分布进而引起采空区内煤体处于增压区或卸压区的动态变化过程中,采空区内煤体始终要经历周期性循环加卸载的应力作用,而循环加卸载作用下必然导致采空区内煤体渗透性发生动态变化,这是影响采空区瓦斯抽采的重要因素,对提高采空区内瓦斯抽采效益至关重要。

加卸载作用下煤样渗透性试验研究,国内外主要开展了以下相关研究:彭永伟等^[1]研究了不同尺寸煤样在加卸载围压条件下渗透率的变化规律,分析认为不同尺寸煤样渗透率对围压敏感性存在明显差异。李东印等^[2]研究了大尺寸煤样在重复加卸载条件下渗透性的变化特征。李晓泉等^[3]研究了原煤在循环荷载条件下渗透率的变化特征,分析认为煤样渗透率随循环次数增加呈现降低趋势。王登科等^[4]研究了型煤在循环加卸载围压条件下渗透率的变化特征,分析认为围压加卸载阶段,渗透率会受到一定程度伤害。许江等^[5]研究了原煤在加轴压卸围压条件下煤岩渗透率变化特征。此外,许江等^[6]还研究了不同温度下型煤在循环荷载作用下煤样渗透率的变化特征。尹光志等^[7]研究了原煤在加卸载条件下渗透率变化特征。魏建平^[8]研究了不同含水率型煤在加卸载围压条件下煤样渗透率的变化规律,分析认为在加卸载阶段,含水率越高的煤样渗透率与围压的变化曲线越平缓。潘荣锸等^[9]研究了含层理原煤在不同加卸载条件下渗透性的变化特征。孙光中等^[10]研究了构造煤在轴向应力循环加卸载作用下渗透率的变化特征。J. P. Zou等^[11]研究了平行层理与垂直层理煤样在循环加卸载轴压作用下渗透率的变化特征。C. Zhang等^[12]研究了不同颗粒煤样在循环加卸载作用下渗透率的变化特征。C. B. Jiang等^[13]研究了原煤在分级循环加卸载作用下渗透率变化特征。J. J. Guo等^[14]研究了不同破坏类型煤样

在加卸载条件下渗透率变化特征。X. M. Zhang等^[15]研究了原煤在峰值强度后加卸载条件下渗透率的变化特征。刘超等^[16]研究了原煤在轴压、围压分别循环加卸载条件下渗透性特征。

上述试验研究中对不同类型煤样在加卸载作用下渗透率变化特征已做了大量的研究,但循环加卸载轴压作用下不同高度煤样渗透率变化特征的研究还相对较少,且尺寸效应与循环荷载作用下煤样渗透率应力敏感性及渗透率损失量的关系还需进一步分析。因此,本文开展了循环加卸载作用下不同高度煤样渗流特征试验,分析了循环加卸载轴压过程中不同高度煤样的渗透性特征。

2 试验装置与方案

2.1 试验装置

本试验采用三轴加载煤岩渗流装置,装置主要由供气系统、样品夹持系统、应力加载系统、排水系统4个部分组成。试验用气体为氦气,气压上限可达10 MPa;样品夹持器内可放置直径为50 mm,长度为50~100 mm的煤样;温度控制范围为0℃~60℃;围压控制范围为0~35 MPa,轴压控制范围为0~70 MPa;排水系统中量筒的量程为0~1 000 mL,精度为±10 mL。试验系统组成如图1所示。

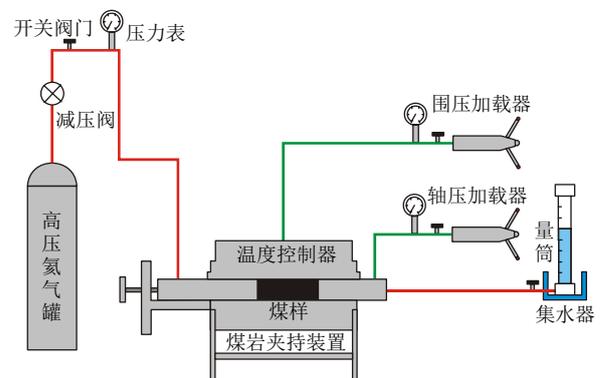


图1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental device

2.2 试验煤样

试验煤样采自鹤煤集团五矿3305工作面二1煤层的完整大块煤,沿煤层的垂直层理方向密集布

孔钻取，经过切割与打磨后加工成直径为 50 mm，长度分别为 50, 60, 70, 80, 90, 100 mm 的圆柱形煤样，煤样编号分别为 C1, C2, C3, C4, C5, C6。煤样两端的不平行度小于 0.05 mm，加工精度满足规程^[17]的要求，煤样如图 2 所示。原煤单轴抗压强度为 14.33 MPa，围压为 2 MPa 时的三轴压缩强度为 22.28 MPa，普氏系数为 1.433，孔隙率为 1.25%。



图 2 试验煤样

Fig.2 Coal specimens

2.3 试验方案

将试验煤样装入煤样夹持装置中，加载围压至 2 MPa，保持围压恒定，加载轴压至 4 MPa，调节温控装置，整个试验过程在 25 °C 的恒温条件下进行，调节进气口压力为 0.3 MPa，向样品夹持装置中通入氦气，当量筒内水流量稳定后，记录量筒读数，通过秒表计时器开始记录排水时间，待稳定排水 20 min 后再次读取量筒读数，通过 2 次读数差值计算气体渗流量；保持围压恒定，每间隔 2 MPa 加载轴压，直至轴压加载至 12 MPa，每次加载轴压后均记录量筒内水位读数变化以计算煤样气体渗流量。保持围压恒定，每间隔 2 MPa 卸载轴压，直至轴压卸载至 4 MPa，每次卸载轴压后均记录量筒内水位读数变化以计算气体渗流量，完成第一阶段循

环加卸载。此后，采用上述相同的方法进行第二阶段与第三阶段循环加卸载渗透率测试，当第三阶段卸载至 4 MPa 时，试验结束。试验加卸载路径如图 3 所示。

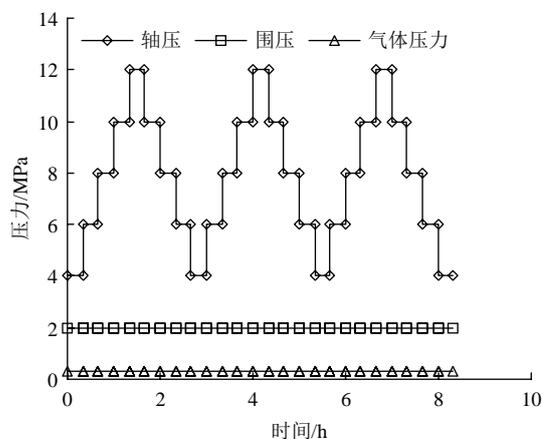


图 3 加卸载轴压路径

Fig.3 The path of axial loading and unloading compression

3 试验结果及分析

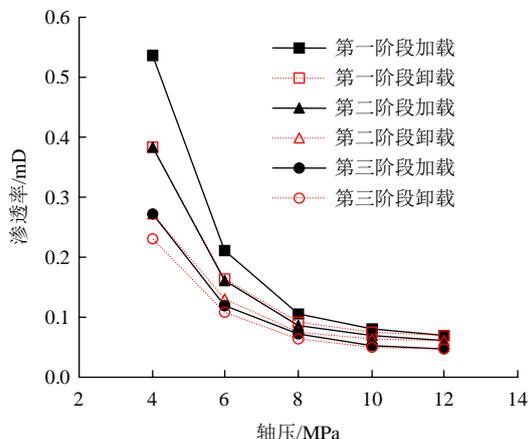
试验过程中，假设煤样内的气体流动符合达西定律，根据试验测试的煤样气体流量与煤样两端的气压等参数可计算煤样的渗透率，其计算公式为

$$k = \frac{2qp\mu L}{(p^2 - p_0^2)S} \tag{1}$$

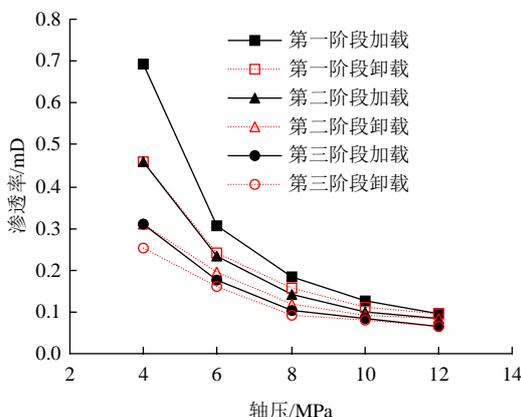
式中： k 为渗透率(mD)， q 为气体渗流流量(cm^3/s)， μ 为氦气动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)， L 为试件长度(cm)， S 为煤样横截面面积(cm^2)， p 为氦气进口端气压(Pa)， p_0 为大气压(Pa)。

3.1 循环加卸载轴压过程中渗透率变化特征

图 4 为 6 个煤样循环加卸载轴压后，渗透率随轴压的变化曲线图，从图 4 中可以看出，在加载阶段，渗透率随轴压增加而降低，其主要原因为煤样



(a) C1 煤样



(b) C2 煤样

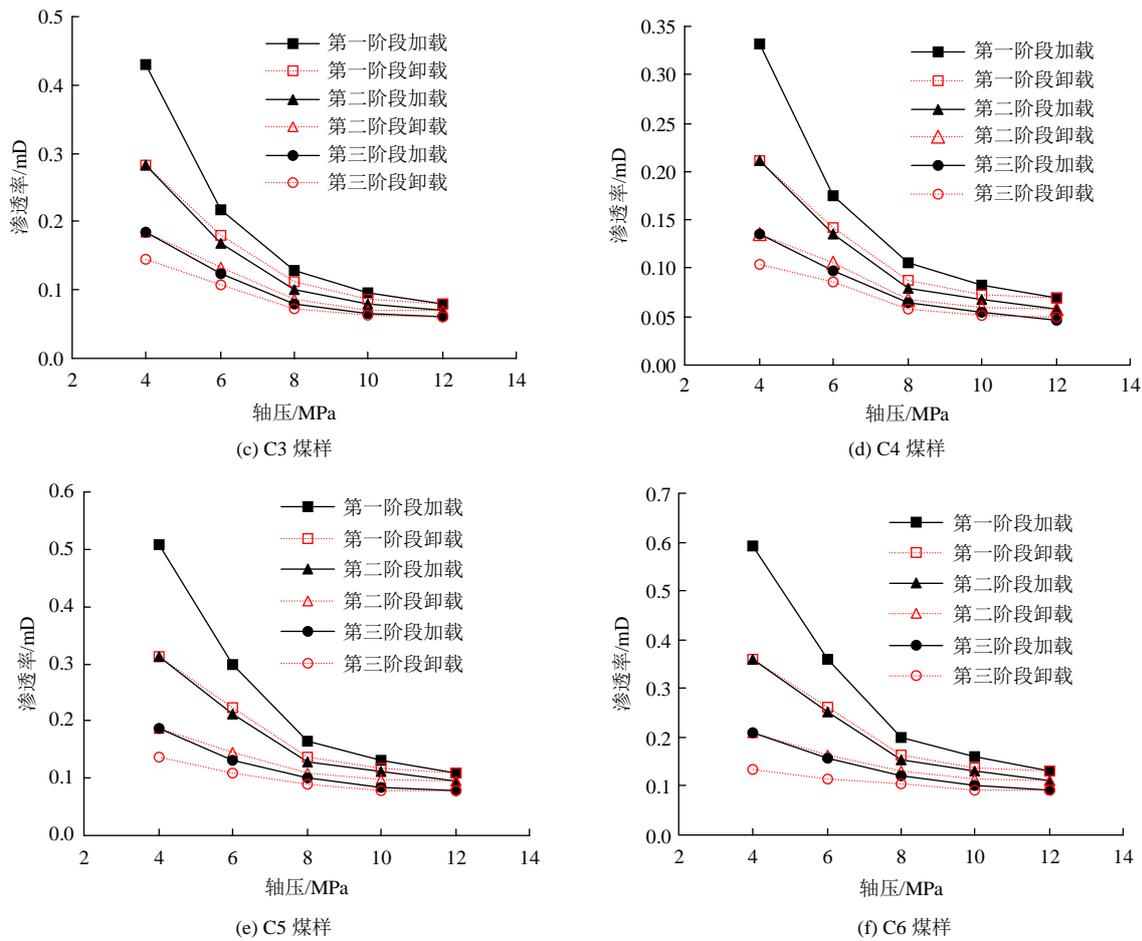


图4 渗透率与轴压的关系

Fig.4 Relations between permeability and axial compression

内部孔隙与原生裂隙在轴压作用下发生压密，减少了煤样内部渗流通道，使气体在煤样内部流动阻力增大。在卸载阶段，渗透率随轴压降低而增大，煤样内部孔隙与裂隙随轴压降低而逐渐张开，增加了煤样内部渗流通道，使气体在煤样内部流动阻力降低，但其并未完全恢复到加载阶段渗透率值，产生了不可逆的渗透率损伤，说明在煤样中被压密的孔隙与裂隙仅部分重新张开，煤样产生明显的塑性变形。在第二阶段加卸载期间与第三阶段加卸载期间，煤样渗透率随循环加卸载次数增加而降低，但渗透率随轴压的变化规律与第一阶段加卸载期间相同。

对加载阶段与卸载阶段煤样渗透率与轴压的关系曲线拟合分析，发现渗透率与轴压呈负指数函数关系，拟合公式为

$$k = ae^{-b\sigma} + c \quad (2)$$

式中： σ 为轴压(MPa)； a, b, c 为拟合参数。不同加卸载阶段拟合参数及相关系数如表1~3所示。

系数 a 与初始应力点渗透率 k_0 相关，即在不同加卸载阶段与轴压为 4 MPa 的渗透率相关，如图 5(a) 所示，系数 a 随初始渗透率增加而增大。系数 b 可

表1 第一阶段加卸载拟合参数及相关系数

Table 1 Fitting parameters and correlation coefficients in the first stage loading and unloading

煤样编号	第一次加载阶段				第一次卸载阶段			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
C1	5.027	0.592	0.065	0.999	3.303	0.586	0.065	0.999
C2	4.355	0.496	0.091	0.999	2.005	0.418	0.083	0.999
C3	2.133	0.445	0.069	0.999	0.878	0.343	0.061	0.997
C4	1.576	0.440	0.061	0.999	0.691	0.339	0.054	0.992
C5	1.886	0.371	0.083	0.996	0.783	0.302	0.082	0.985
C6	1.991	0.345	0.095	0.995	0.875	0.297	0.098	0.985

表2 第二阶段加卸载拟合参数及相关系数

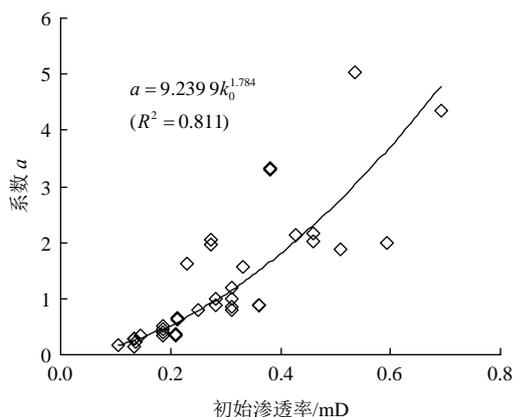
Table 2 Fitting parameters and correlation coefficients in the second stage loading and unloading

煤样编号	第二次加载阶段				第二次卸载阶段			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
C1	3.339	0.583	0.058	0.999	1.965	0.552	0.056	0.999
C2	2.172	0.430	0.071	0.999	0.984	0.345	0.064	0.996
C3	1.006	0.371	0.055	0.998	0.451	0.303	0.053	0.987
C4	0.661	0.342	0.045	0.994	0.278	0.275	0.044	0.973
C5	0.851	0.315	0.073	0.992	0.344	0.297	0.082	0.991
C6	0.889	0.282	0.077	0.991	0.355	0.281	0.096	0.995

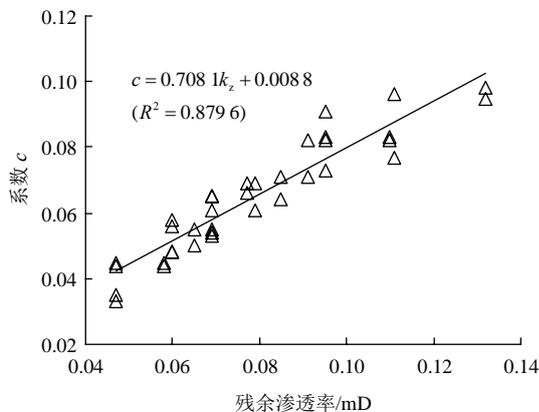
表 3 第三阶段加卸载拟合参数及相关系数

Table 3 Fitting parameters and correlation coefficients in the third stage loading and unloading

煤样编号	第三次加载阶段				第三次卸载阶段			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
C1	2.055	0.550	0.045	0.999	1.628	0.542	0.044	0.999
C2	1.194	0.386	0.055	0.999	0.790	0.341	0.050	0.994
C3	0.523	0.334	0.048	0.996	0.334	0.302	0.048	0.985
C4	0.293	0.261	0.033	0.993	0.177	0.228	0.035	0.965
C5	0.406	0.305	0.066	0.999	0.220	0.291	0.069	0.996
C6	0.382	0.251	0.071	0.999	0.136	0.234	0.082	0.995



(a) 系数 *a* 与初始渗透率关系



(b) 系数 *c* 与残余渗透率关系

图 5 系数 *a* 和 *c* 与渗透率的关系

Fig.5 Relations between *a*, *c* and permeability

反映煤样渗透率对应力的敏感程度，加载阶段反映煤样孔隙与裂隙闭合程度对应力的敏感效应，随加载次数增加，系数 *b* 逐渐降低(见表 1~3)；卸载阶段反映煤样孔隙与裂隙张开程度对应力的敏感效应，随卸载次数的增加，系数 *b* 逐渐降低(见表 1~3)，加载阶段与卸载阶段煤样对应力的敏感性是 2 个不同的表征，随加卸载次数增加，煤样孔裂隙闭合与张开程度对应力敏感性逐渐降低。系数 *c* 与加卸载阶段轴压为 12 MPa 的渗透率 *k*₂ 相关，将最大

轴压处渗透率称为残余渗透率，如图 5(b)所示，系数 *c* 随残余渗透率增加而增大。

3.2 阶段渗透率差值变化特征

为了分析加载阶段渗透率差值与卸载阶段渗透率差值的变化规律，分别计算了加载阶段的渗透率差值 *k*_j 与卸载阶段渗透率差值 *k*_x，计算式分别为

$$k_j = k_0 - k_z \tag{3}$$

$$k_x = k_s - k_z \tag{4}$$

式中：*k*₀ 为初始渗透率，即加载阶段最小轴压处渗透率(mD)；*k*_s 为卸载阶段最小轴压处的渗透率(mD)。

加载阶段渗透率差值 *k*_j 可反映煤样孔隙与裂隙闭合程度，卸载阶段渗透率差值 *k*_x 可反映煤样孔隙与裂隙恢复变形程度。由于 C1~C6 煤样 *k*_j 与 *k*_x 均呈现相同的变化规律，因此，以 C1 煤样为例，说明其阶段渗透率差值变化规律。由图 6 可知，循环加卸载期间，*k*_j 随加载次数增加而降低，*k*_x 随卸载次数增加而降低，说明在第一阶段加载期间，煤样可闭合的孔隙与裂隙数量最多，其渗透率变化量最大；在第一阶段卸载期间，煤样部分孔隙与裂隙重新恢复变形量最大，使其渗透率恢复量最大。随加卸载次数增加，煤样可闭合与可重新张开的孔隙与裂隙数量逐渐减少。

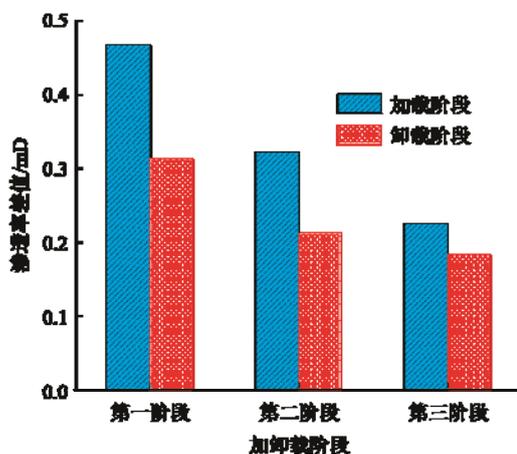


图 6 循环加卸载阶段渗透率差值的变化规律

Fig.6 Variation of the permeability differences during the cyclic loading and unloading

3.3 渗透率损失量变化特征

同一阶段加卸载期间相同轴压处渗透率存在明显差值，其值的大小可表征煤样在加卸载阶段每个轴压处产生的不可恢复的孔裂与裂隙变化量，即不可逆的渗透率损失称为渗透率损失量，计算公式为

$$k_{\sigma_i} = k_{j_i} - k_{x_i} \quad (5)$$

式中： k_{σ_i} 为在同一加卸载阶段第*i*个轴压处渗透率损失量(mD)， k_{j_i} 为加载阶段在第*i*个轴压处渗透率(mD)， k_{x_i} 为卸载阶段在第*i*个轴压处渗透率(mD)。

由于 C1~C6 煤样渗透率损失量与轴压均呈现相同的变化规律，因此，以 C1 煤样为例，说明渗透率损失量随轴压的变化规律。如图 7 所示，3 次加卸载期间，应力渗透率损失量均随轴压增加而降低，其主要原因是与煤样荷载作用时间相关，在加载期间轴压为 4 MPa 加载至 12 MPa，卸载期间轴压从 12 MPa 卸载至 4 MPa，从加载阶段的轴压 4 MPa 至卸载阶段轴压的 4 MPa，煤样经历荷载的作用时间最长，煤样产生的塑性变形量较大，渗透率损失量也最大，其次是 6 与 8 MPa，轴压为 10 MPa 时经历的荷载作用时间较短，煤样产生的塑性变形量较小，所以渗透率损失量较小。

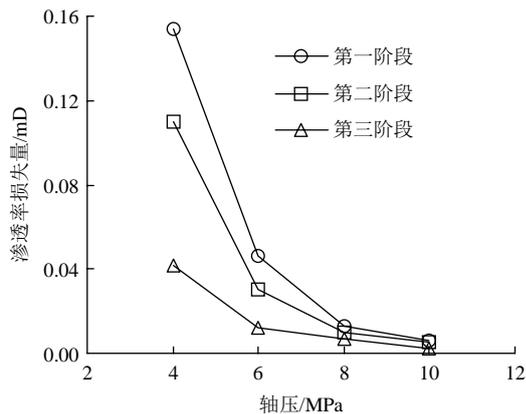


图 7 渗透率损失量随轴压的变化曲线

Fig.7 Curves of permeability reduction varies with axial compression

煤样经历 3 个阶段循环加卸载后，在每一阶段加卸载完成后均会产生不可恢复的塑性变形，以 C1 煤样为例，如图 8 所示，第一阶段渗透率损失量(加卸载期间轴压为 4 MPa 时的渗透率损失量)最大占渗透率总损失量的 50%，其次是第二阶段渗透率损失量占渗透率总损失量的 36%，第三阶段渗透率损失量最小仅为渗透率总损失量的 14%，由此可知，初期加卸载阶段煤样产生的塑性变形量要明显高于后期加卸载阶段煤样产生的塑性变形量，初期加卸载阶段是煤样产生渗透率损失量的主要阶段。

渗透率总损失量的计算公式为

$$k_D = k_0 - k_m \quad (6)$$

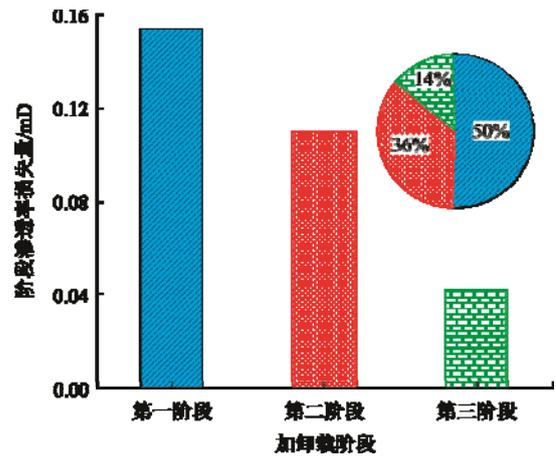


图 8 渗透率损失量随循环次数的变化规律

Fig.8 Variation of permeability reduction with the cycle numbers

式中： k_m 为最后一个循环阶段卸载期间最小轴压处的渗透率(mD)， k_D 为循环加卸载完成后渗透率总损失量(mD)。

图 9 中绘制了加载阶段渗透率差值 k_j 、卸载阶段渗透率差值 k_x 、渗透率损失量 k_{σ_i} 、渗透率总损失量 k_D 。

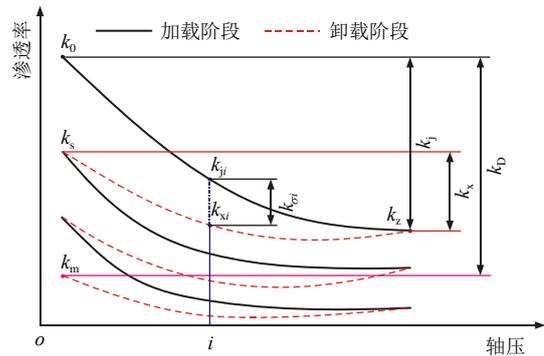


图 9 渗透率差值与损失量示意图

Fig.9 Sketch of the difference and reduction of permeability

4 煤样高度对渗透率的影响

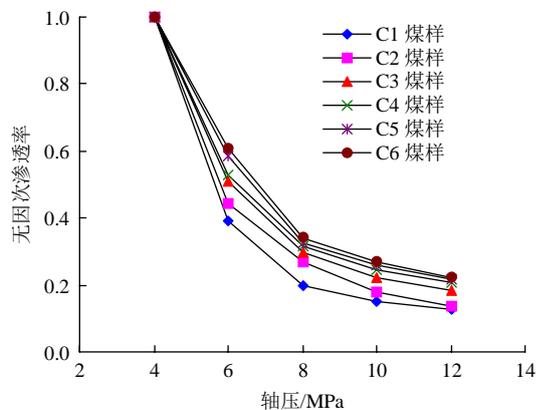
4.1 无因次渗透率随轴压的变化特征

不同高度煤样之间存在显著的各向异性，其渗透率会产生明显差异，为了对比分析不同高度煤样在循环加卸载期间渗透率之间的差异，对不同高度煤样渗透率进行了归一化无因次渗透率计算，计算公式为

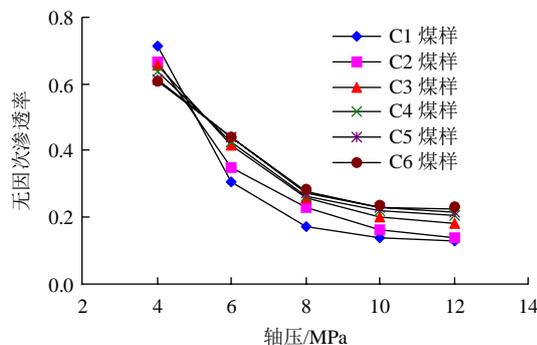
$$K_i = \frac{k_i}{k_0} \quad (7)$$

式中： K_i 为第*i*个轴压处的无因次渗透率， k_i 为第*i*个轴压处的渗透率(mD)。

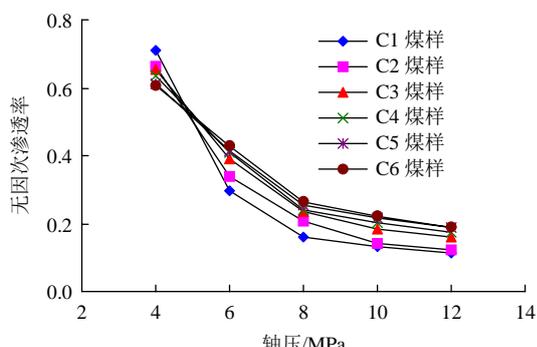
图 10 反映了 6 个不同高度煤样无因次渗透率随轴压的变化规律。由图 10 可知，第一加载阶段，C1 煤样无因次渗透率最小，C6 煤样无因次渗透率最大；在后期加卸载阶段，在 4 MPa 轴压作用下小尺寸煤样无因次渗透率较大，当轴压大于 4 MPa，



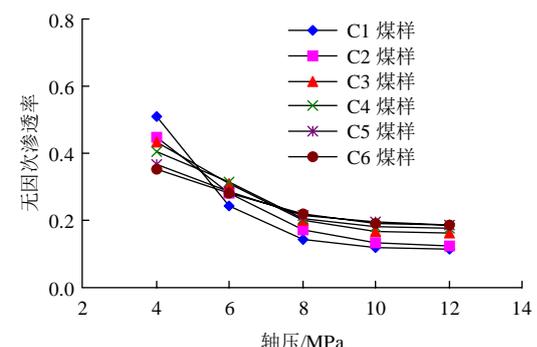
(a) 第一阶段加载



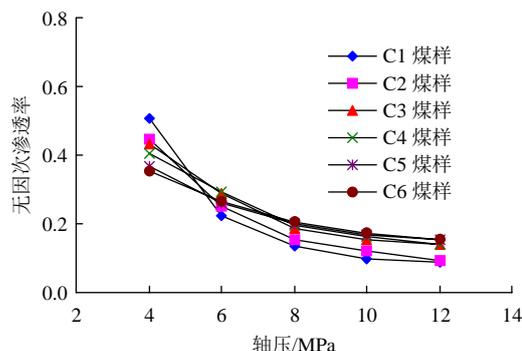
(b) 第一阶段卸载



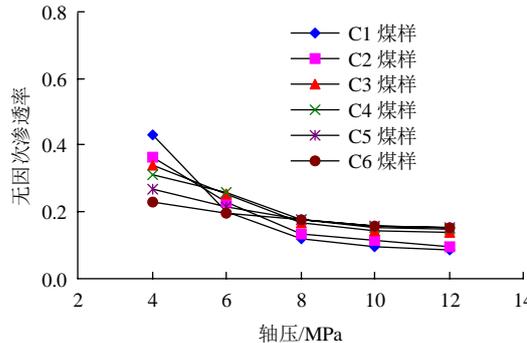
(c) 第二阶段加载



(d) 第二阶段卸载



(e) 第三阶段加载



(f) 第三阶段卸载

图 10 无因次渗透率与轴压的关系

Fig.10 Relations between dimensionless permeability and axial compression

大尺寸煤样无因次渗透率大于小尺寸煤样，无因次渗透率随煤样高度增加而增大。随加卸载次数增加，无因次渗透率与轴压的关系曲线逐渐变缓，说明随加卸载次数增加，煤样渗透率应力敏感性逐渐降低。在轴压为 4 MPa 处，C1 煤样与 C6 煤样无因次渗透率差值随加卸载次数逐渐增大，说明循环加卸载过程中，小尺寸煤样应力敏感性变化量小于大尺寸煤样应力敏感性变化量。

图 11 反映了加载阶段与卸载阶段应力敏感系数 b 值随煤样高径比的变化规律。由图 11 可知，在加卸载阶段与卸载阶段，系数 b 值均随高径比增加而降低，说明小尺寸煤样应力敏感性大于大尺寸煤样，主要由于小尺寸煤样总孔隙度与裂隙数量小于大尺寸煤样，在应力作用下，小尺寸煤样中大部分半径较大的孔隙与裂隙被压缩，被压缩的孔隙与裂隙对渗透率的贡献较大，使小尺寸煤样渗透率发生急剧变化，所以小尺寸煤样对应力敏感性较强；随尺寸增加，大尺寸煤样孔隙与裂隙数量高于小尺寸煤样，加卸载期间，发生闭合的大孔隙与裂隙数量占总孔隙与裂隙数量的比例与小尺寸煤样相比相对减小，对渗透性的影响相对降低，所以随高径比增加应力敏感性相对降低。

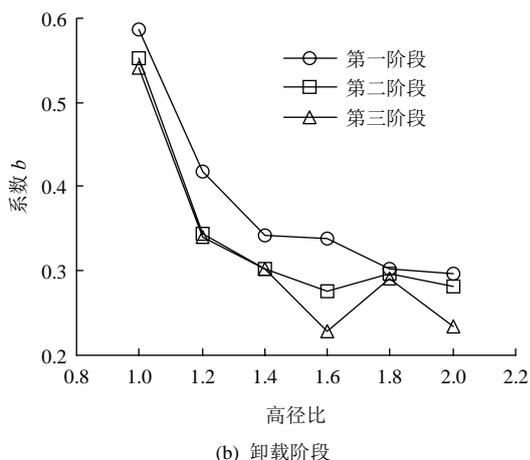
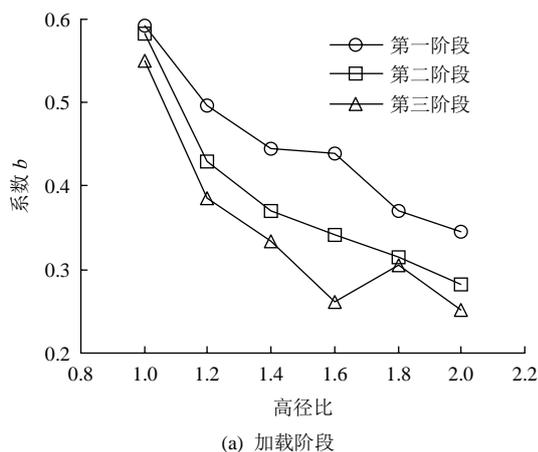


图 11 系数 b 随高径比的变化曲线

Fig.11 Curves of b varies with height-diameter ratio

在第三阶段加卸载期间，当高径比为 1.8 时，在加载阶段与卸载阶段系数 b 突然增加，可能由于煤样在荷载作用下发生破坏，内部产生裂隙使其渗透率的突变，导致其应力敏感性增加。

4.2 无因次渗透率差值与高径比的关系

为了分析不同高度煤样加载阶段渗透率差值与卸载阶段渗透率差值，分别计算了加载阶段与卸载阶段无因次渗透率差值，计算公式为

$$K_j = \frac{k_j}{k_0} \tag{8}$$

$$K_x = \frac{k_x}{k_0} \tag{9}$$

式中： K_j 为加载阶段无因次渗透率差值， K_x 为卸载阶段无因次渗透率差值。

无因次渗透率差值随高径比的变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知，煤样在循环加卸载阶段，无因次渗透率差值随高径比增加而降低，说明小尺寸煤样在加载与卸载阶段无因次渗透率变化量要高于大尺寸煤样，主要是由于其应力敏感性高于大尺寸煤样使加卸载期间煤样渗透率变化显著，随高径比增

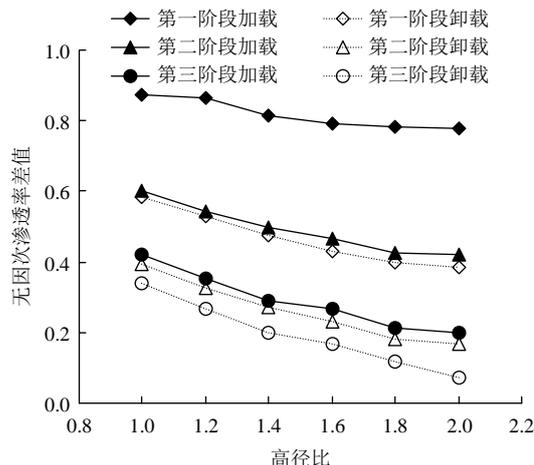


图 12 无因次渗透率差值随高径比的变化曲线

Fig.12 Curves of dimensionless permeability difference varies with height-diameter ratio

加煤样渗透率应力敏感性逐渐降低，加载阶段渗透率差值与卸载阶段渗透率差值变化量均减小，所以无因次渗透率差值降低。

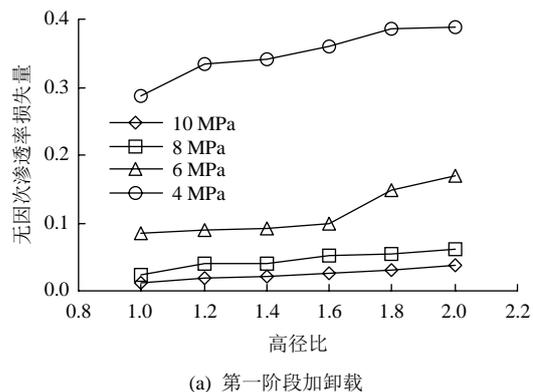
4.3 无因次渗透率损失量与高径比的关系

无因次渗透率损失量为渗透率损失量与初始渗透率比值，可计算循环加卸载阶段不同轴压处的无因次渗透率损失量，计算公式为

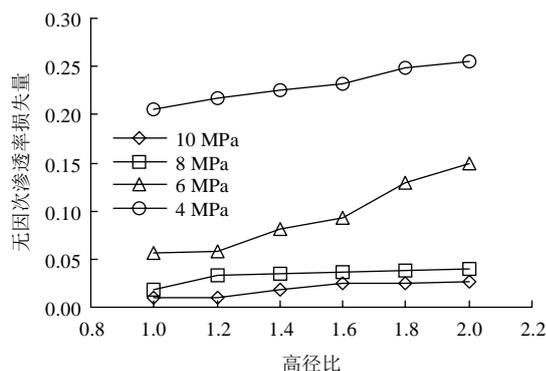
$$K_{\sigma_i} = \frac{k_{\sigma_i}}{k_0} \tag{10}$$

式中： K_{σ_i} 为无因次渗透率损失量。

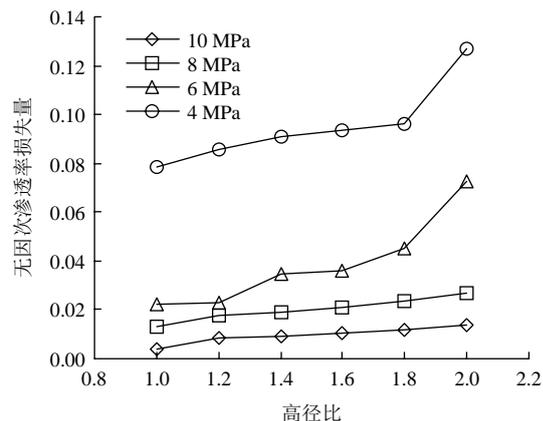
无因次渗透率损失量随高径比的变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知，在循环加卸载期间，无因次渗透率损失量随高径比增加而增大，说明应力敏感性越弱的大尺寸煤样，在卸载过程中，煤样孔隙与裂隙重新张开的程度较小，渗透率损失量较大，发生塑性变形量加大，而应力敏感性较强的小尺寸煤样，在卸载过程中，煤样孔隙与裂隙重新张开的程度较大，渗透率损失量相对较小，发生塑性变形量较小，所以无因次渗透率损失量较小。



(a) 第一阶段加卸载



(b) 第二阶段加卸载



(c) 第三阶段加卸载

图 13 无因次渗透率损失量随高径比的变化曲线

Fig.13 Curves of reduction of dimensionless permeability varies with height-diameter ratio

4.4 渗透率恢复率与损失率与高径比的关系

渗透率恢复率为循环加卸载期间，最后一个循环阶段卸载期间最小轴压处的渗透率与初始渗透率比值的百分比，其可反映煤样渗透率的恢复程度。渗透率损失率为循环加卸载期间，煤样产生的塑性变形引起的渗透率减少部分占初始渗透率比值的百分比。

分别计算了不同高度煤样渗透率恢复率与渗透率损失率，计算公式为

$$K_H = \frac{k_m}{k_0} \times 100\% \quad (11)$$

$$K_S = \left(1 - \frac{k_m}{k_0}\right) \times 100\% \quad (12)$$

式中： K_H 为渗透率恢复率， K_S 为渗透率损失率。

图 14 反映了煤样渗透率恢复率与损失率随煤样高径比的变化规律，由图 14 可知，渗透率恢复率随煤样高径比的增加而降低，渗透率损失率随煤样高径比增加而增大，即不同高度煤样经历循环加卸作用后大尺寸煤样渗透率损失率较大，而渗透率恢复能力较小，小尺寸煤样反之。

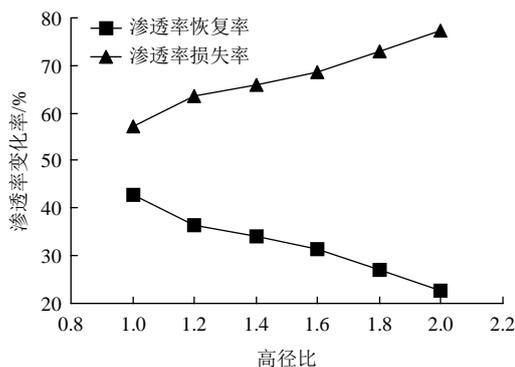


图 14 渗透率损失率与恢复率随高径比的变化曲线

Fig.14 Curves of reduction rate and recovery rate of permeability vary with height-diameter ratio

5 结论

(1) 循环加卸载轴压作用下，煤样渗透率与轴压呈负指数函数关系；加载阶段，渗透率随轴压增加而降低，表现为煤样孔隙与裂隙闭合程度对应力的敏感效应；卸载阶段，渗透率随轴压降低而增大，表现为孔隙与裂隙张开程度对应力的敏感效应。加载阶段与卸载阶段煤样渗透率对应力的敏感性是 2 个不同的表征，应力敏感性均随循环加卸载次数增加而降低。

(2) 渗透率差值与渗透率损失量随循环加卸载次数增加而降低，渗透率的变化量与损失量主要发生在初期加卸载阶段。

(3) 渗透率应力敏感性随高径比增加而降低；无因次渗透率差值随高径比增加而降低，无因次渗透率损失量随高径比增加而增大。渗透率恢复率随高径比增加而降低，渗透率损失率随高径比增加而增大。

参考文献(References):

[1] 彭永伟, 齐庆新, 邓志刚, 等. 考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5): 509 - 513.(PENG Yongwei, QI Qingxin, DENG Zhigang, et al. Experimental research on sensibility of permeability of coal samples under confining pressure status based on scale effect[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 509 - 513.(in Chinese))

[2] 李东印, 王文, 李化敏, 等. 重复加 - 卸载条件下大尺寸煤样的渗透性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 121 - 125.(LI Dongyin, WANG Wen, LI Huamin, et al. Research on permeability of large-sized coal sample in loading and unloading test[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(1): 121 - 125.(in Chinese))

- [3] 李晓泉, 尹光志, 蔡波. 循环荷载下突出煤样的变形和渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3 498 - 3 504. (LI Xiaoquan, YIN Guangzhi, CAI Bo. Experimental study on deformation and seepage properties of outburst coal samples under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.2): 3 498 - 3 504.(in Chinese))
- [4] 王登科, 魏建平, 尹光志. 复杂应力路径下含瓦斯煤渗透性变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 303 - 310.(WANG Dengke, WEI Jianping, YIN Guangzhi. Investigation on change of permeability of coal containing gas under complex stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 303 - 310.(in Chinese))
- [5] 许江, 李波波, 周婷, 等. 加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1 493 - 1 498.(XU Jinag, LI Bobo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of coal deformation and permeability characteristics under loading-unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1 493 - 1 498.(in Chinese))
- [6] 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 Bobo, 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.(in Chinese))
- [7] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1 497 - 1 503.(YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Permeability properties and effective stress of raw coal under loading-unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1 497 - 1 503.(in Chinese))
- [8] 魏建平, 秦恒洁, 王登科. 基于水分影响的加-卸载围压条件下含瓦斯煤渗流特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 987 - 994.(WEI Jianping, QIN Hengjie, WANG Dengke. Seepage characteristics of coal mass containing gas considering moisture effect in loading-unloading confining pressure test[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(6): 987 - 994.(in Chinese))
- [9] 潘荣锬, 程远平, 董骏, 等. 不同加卸载下层理裂隙煤体的渗透特性研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 473 - 477.(PAN Rongkun, CHENG Yuanping, DONG Jun, et al. Research on permeability characteristics of layered natural coal under different loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 473 - 477.(in Chinese))
- [10] 孙光中, 荆永滨, 张瑞林, 等. 轴向应力循环加卸载作用下含瓦斯煤渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 928 - 938.(SUN Guangzhong, JING Yongbin, ZHANG Ruilin, et al. Permeability of coal samples containing methane under cyclic loading-unloading of axial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 928 - 938.(in Chinese))
- [11] ZOU J P, CHEN W Z, YANG D S, et al. The impact of effective stress and gas slippage on coal permeability under cyclic loading[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 236 - 248.
- [12] ZHANG C, TU S H, ZHANG L. Analysis of broken coal permeability evolution under cyclic loading and unloading conditions by the model based on the hertz contact deformation principal[J]. Transport in Porous Media, 2017, 119: 739 - 754.
- [13] JIANG C B, DUAN M K, YIN G Z, et al. Experimental study on seepage properties, AE characteristics and energy dissipation of coal under tiered cyclic loading[J]. Engineering Geology, 2017, 221: 114 - 123.
- [14] GUO J J, QIN Q R, ZHANG R L. Evaluation of the damages of permeability and effective porosity of tectonically deformed coals[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(16): 357.
- [15] ZHANG X M, ZHANG D M, LEO C J, et al. Damage evolution and post-peak gas permeability of raw coal under loading and unloading conditions[J]. Transport in Porous Media, 2017, 117: 465 - 480.
- [16] 刘超, 黄滚, 赵宏刚, 等. 复杂应力路径下原煤力学与渗透特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 191 - 198.(LIU Chao, HUANG Gun, ZHAO Honggang, et al. Tests on mechanical and permeability characteristics of raw coal under complex stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 191 - 198.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准. GB/T23561.7—2009 煤与岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.(The National Standard Compilation Group of People's Republic of China. GB/T23561.7—2009 Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.(in Chinese))