

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1924

## 峰后围压卸载对原煤变形和渗透特性的影响

刘 超<sup>1,2,3</sup>, 张东明<sup>1,2,3</sup>, 尚德磊<sup>1,2,3</sup>, 赵宏刚<sup>1,2,3</sup>, 宋真龙<sup>1,2,3</sup>, 俞 欢<sup>1,2,3</sup>

(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:** 运用自主研发的煤岩热-流-固耦合试验系统, 以原煤为研究对象, 进行峰后轴压保持在不同应力水平下围压的卸载试验, 以分析围压卸载对原煤变形特性和渗透特性的影响。研究表明: 通过径向应变  $\varepsilon_r$ 、轴向应变  $\varepsilon_a$  和体应变  $\varepsilon_v$  的不可恢复变形量以及三者受力加载过程中的响应程度来定义损伤变量, 满足损伤变量的变化区间  $[0, 1]$ , 并以此计算煤样在卸载过程中的损伤量, 得到在峰后轴压  $\sigma_1$  保持不变, 对围压  $\sigma_3$  进行卸载时, 损伤量  $D$  随着  $\sigma_3$  的减小而增大, 煤样的损伤程度越来越大; 当轴压卸荷到不同应力时, 煤样的渗透率随围压卸载次数的增加而增大, 表明当  $\sigma_1$  减小时,  $\sigma_3$  对渗透率的影响越来越重要, 同时煤样内部的孔隙裂隙以发育、扩展、延伸为主。此外, 渗透率  $k$  在  $\sigma_3$  卸载初期, 几乎不增加; 当  $\sigma_3$  继续卸载时,  $k$  开始增大, 并且斜率越来越大, 表明煤样的损伤加剧。当保持  $\sigma_1$  不变, 对  $\sigma_3$  进行卸载时, 相当于摩尔应力圆半径增大, 煤样向破坏的趋势发展, 发生二次破坏的可能性增大。随着  $\sigma_3$  的卸载, 卸围压前  $\sigma_1$  越大, 摩尔应力圆半径越大, 煤样的承载能力就越弱, 更易发生煤样的二次破坏, 表现在煤样的轴向应变  $\varepsilon_a$  和径向应变  $\varepsilon_r$  发生突变。

**关 键 词:** 围压卸载; 损伤; 损伤变量表达式; 渗透率; 摩尔应力圆; 二次破坏

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2017-09

## Influence of confining pressure unloading at post-peak on deformation and permeability characteristics of raw coal

LIU Chao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Dong-ming<sup>1,2,3</sup>, SHANG De-lei<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Hong-gang<sup>1,2,3</sup>,  
SONG Zhen-long<sup>1,2,3</sup>, YU Huan<sup>1,2,3</sup>

(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:** In this study, experiments were conducted on raw coal specimens by using the self-developed triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-hydro-mechanical coupling of coal containing methane. Experiments were carried out when the axial pressure maintained at different stress levels but the confining pressure was unloaded. We studied the effects of unloading confining pressure on deformation properties and permeability characteristics of gas-filled coal at the post-peak. The results showed that the damage variable was defined by the unrecoverable deformations of radial strain  $\varepsilon_r$ , axial strain  $\varepsilon_a$  and volumetric strain  $\varepsilon_v$  and the response of these three parameters during the process of unloading. The interval  $[0, 1]$  of damage variable was satisfied to calculate the damage quantity of coal specimen in the process of unloading. When the axial pressure  $\sigma_1$  remained constant and the confining pressure  $\sigma_3$  was unloaded, the amount of damage quantity  $D$  increased with the decrease of  $\sigma_3$  and the damage degree of coal specimen increased greatly. When unloading the axial pressure to different stress levels, the permeability of coal specimen increased with the growing unloading times of confining pressure. It indicated that the influence of confining pressure  $\sigma_3$  on permeability was more and more important when  $\sigma_1$  decreased. At the same time, the pores and fractures in the coal specimen were developed, expanded and extended. In addition, the permeability  $k$  hardly increased at the beginning of unloading  $\sigma_3$ . As  $\sigma_3$  continued to unload,  $k$  began to increase and the slope became growing, indicating the severe damage of coal specimen. The radius of Mohr stress circle was equivalent to an increase under this stress path of loading and unloading, and coal specimens tended to destruction causing the

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51434003, No.51374256)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51434003, 51374256).

第一作者简介: 刘超, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事矿山岩石力学、煤矿灾害动力学与控制方面的研究。E-mail: 1712594246@qq.com

通讯简介: 张东明, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事煤矿安全与岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhangdm@cqu.edu.cn

increasing possibility of the occurrence of secondary failure. At the higher level of  $\sigma_1$ , with the unloading of  $\sigma_3$ , the radius of Mohr stress circle increased and the supportability of coal specimens became weaker. Hence, the secondary failure easily occurred, which manifested the abrupt change of axial strain  $\varepsilon_1$  and radial strain  $\varepsilon_3$ .

**Keywords:** confining pressure unloading; damage; damage variable expression; permeability; Mohr stress circle; secondary failure

## 1 引言

井下巷道在掘进过程中,煤岩所处的地应力场和瓦斯场平衡状态被打破,引起应力重分布,对周围煤岩体的强度、变形以及煤岩的渗透特性等产生重要影响,如开挖巷道周围的松动圈(相当于峰后岩石状态)、煤层中赋存的瓦斯因应力扰动使得瓦斯能量突然释放而导致的煤与瓦斯突出、综放采空区出现的高浓度高瓦斯等。因此,在力的作用下对围岩破裂带煤岩进行变形特性、损伤演化规律和渗透特性的研究是十分必要的。

不少学者对煤岩力学特性和变形损伤特性进行了相关研究。许江等<sup>[1]</sup>通过对原煤进行加轴压(加载速率保持不变)、卸围压(不同卸载速率)的加、卸载试验,得出煤岩渗透率的变化与其变形损伤演化过程密切相关。彭瑞东等<sup>[2]</sup>通过岩石三轴循环加、卸载试验,分析了不同围压作用下煤岩的损伤演化行为,并给出了基于能量分析的损伤变量定义,能够较好地描述设计应力路径下的煤岩损伤演化程度。赵闯等<sup>[3]</sup>开展了循环加、卸载试验,通过修正原有损伤变量,并结合能量,得出应力水平越高,损伤变量与塑性变形越大,滞回圈的面积也越大。赵星光等<sup>[4]</sup>对花岗岩进行了三轴循环加、卸载试验,以探究其损伤和扩容特性,采用塑性剪切应变 $\gamma_p$ 定义损伤变量,得出当岩样经历很小的 $\gamma_p$ 时,其裂隙损伤应力便显著衰减,最后趋于稳定。陆银龙等<sup>[5]</sup>以峰后岩石任意一点应力状态均满足 Mohr-Coulomb 极限破坏条件这一假设,建立了以广义黏聚力和广义内摩擦角两个状态参数表征软弱岩石后继屈服面的模型。朱建明等<sup>[6]</sup>通过对砂卡岩进行三轴循环加、卸载试验,得出破碎岩峰后应变软化实际上是破碎块体之间的一种摩擦滑动特性。胡振襄等<sup>[7]</sup>通过定义卸荷围压比 $V_c$ ,得出卸荷围压比低于90%,岩石损伤主要由孔隙数量的增多引起;卸荷围压比高于90%,损伤由孔隙数量和孔径均急剧增大引起。段敏克等<sup>[8]</sup>进行了含瓦斯原煤分级加、卸载试验,探讨了煤岩的渗透特性及能耗特征,得出随着分级加、卸载进行,煤体累积耗散能呈指数函数增加。

许多学者以煤岩在井下采掘过程中受到复杂的采动应力作用这一工程背景,设计了相应地应力路

径,研究煤岩在应力变化中的渗透特性。尹光志等<sup>[9]</sup>对原煤进行增轴压的同时卸围压这一应力路径下的力学特性试验研究,表明加、卸载煤样的承载强度随轴力加载速度的增加呈幂函数关系降低等力学特性。俞缙等<sup>[10]</sup>对砂岩进行了常规加载、峰前卸围压和峰后卸围压这3种应力路径下的气体渗透三轴试验,结果表明,峰后卸围压过程与常规加载过程中声发射规律相似。王广荣等<sup>[11]</sup>对煤样进行全应力-应变过程中的渗透测试及CT扫描试验,煤样渗透率表现出应变滞后性,表明瓦斯在煤岩中的流动特性与卸载过程中煤岩内部产生的损伤演化密切相关。魏建平<sup>[12]</sup>得出通过煤样在含水率、围压和瓦斯压力的不同组合情况下的渗流量,得出不同含水率条件下的含瓦斯煤,随着瓦斯压力的增大,含瓦斯煤渗透率先减小后增大,具有明显的 Klinkenberg 效应。潘一山等<sup>[13]</sup>认为,随着围压卸荷速率的提高,煤岩内部大量微观裂纹扩展,促进煤岩变形损伤,增大了煤岩内部裂纹间局部束缚电荷突变为自由电荷的概率,使得煤岩主破裂过程产生的感应电荷大幅增多。尹光志等<sup>[14-17]</sup>通过原煤在不同瓦斯压力条件下的固定轴向应力卸围压、不同初始围压和瓦斯压力组合条件下的不同卸围压速度等不同应力路径下的试验研究,对原煤的力学特性和渗透特性进行了研究。

可以看出,不少学者对煤岩在不同应力组合下的力学特性、损伤演化规律和渗透特性进行了许多有益的研究。考虑到煤岩在采掘过程中,尤其是在峰后会受到更加复杂变化下的应力作用,因此,很有必要研究峰后原煤的变形特性和渗透特性。由于煤岩在峰后阶段可能受相邻巷道掘进或相邻工作面回采、当前作业范围内的支护强度及采动应力作用、煤岩自身物理属性的影响,造成轴压和围压在峰后可能处于不同的应力水平,使得煤岩变形、瓦斯运移产生相应的动态响应。基于此,本文在含瓦斯煤应力加载破坏后,使轴压处于不同的应力水平,并在轴压每一应力目标值下对围压逐级卸载(具体试验方案、应力路径详见下文),并通过定义损伤变量来研究含瓦斯煤的力学与渗透特性,以期为煤岩在峰后变形特性、峰后围岩稳定性与巷道支护、瓦斯在围岩松动圈内的运移特性,防治煤与瓦斯突出等

工程问题提供参考。

## 2 试验装置与方案

### 2.1 试验装置

试验装置采用重庆大学自主研发的煤岩热-流-固耦合试验系统 (THM-2), 该装置由轴压加载系统、围压加载系统、水浴恒温系统、气压控制系统、数据测量采集系统及辅助系统等组成, 可实现应力场、温度场、瓦斯压力场三场耦合, 最大轴向力为 1 000 kN, 围压最大为 60 MPa, 试验温度范围为室温~100 °C, 设备如图 1 所示。



图 1 煤岩热-流-固耦合试验系统  
Fig. 1 Servo-controlled seepage equipment for thermo-hydro-mechanical coupling of coal

### 2.2 试验样品

试验所用煤样取自川煤集团白皎煤矿 2461 工作面 C1 煤层, 原煤经过钻取、切割、打磨成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 试件两端面不平行度误差不得超过 0.02 mm, 原煤试件如图 2 所示。



图 2 原煤煤样  
Fig. 2 Coal specimens

### 2.3 试验方案

具体试验步骤如下:

整个过程通 4 MPa 的瓦斯, 待流量稳定后记录

数据, 再进行应力加、卸载。①将  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  以 0.1 kN/s 的速率加载至静水压力 18 MPa, 待流量稳定; ②保持  $\sigma_2 = \sigma_3 = 18 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_1$  由力控制改为位移控制, 并以 0.01 mm/min 的速率进行加载, 直至煤样破坏后处于残余应力区; ③ $\sigma_1$  由位移控制改为力控制, 进行轴压卸荷和围压卸载试验; ④将  $\sigma_1$  卸荷至 37.5 MPa, 待流量稳定后, 以 0.05 MPa/s 的速率对  $\sigma_3$  进行逐级卸载, 卸载至最终目标值后将  $\sigma_3$  加载至 18 MPa, 其中  $\sigma_3$  的卸载路径为 18→17→16→15→14→13→12→11→10→9 MPa; ⑤将  $\sigma_1$  卸荷至 32.5、27.5、22.5 MPa, 围压的卸载路径按照步骤④所述; ⑥试验结束。

试验应力路径如图 3 所示。

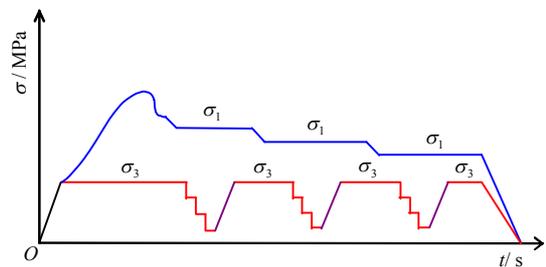


图 3 煤样加、卸载应力路径  
Fig. 3 Stress path of coal specimen loading and unloading

## 3 试验结果及分析

### 3.1 煤样变形与渗透特性分析

试验中, 瓦斯在峰后处于非高速流动状态, 结合文献[11], 渗流视为符合达西定律, 瓦斯渗透率计算公式<sup>[15]</sup>为

$$k = \frac{2q\mu LP_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

式中:  $k$  为渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $q$  为瓦斯的渗流速度 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\mu$  为瓦斯动力黏度系数, 取  $1.087 \times 10^{-11} \text{ MPa}\cdot\text{s}$ ;  $L$  为煤样长度 (m);  $A$  为试样渗透横截面积 ( $\text{m}^2$ );  $P_1$  为进口瓦斯压力 (MPa);  $P_2$  为出口瓦斯压力, 取 0.1 MPa。

图 4~7 分别为 4 次围压卸载时轴向应变  $\varepsilon_{1i}$ 、径向应变  $\varepsilon_{3i}$ 、体应变  $\varepsilon_{Vi}$  和渗透率  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ , 表示第  $i$  次围压卸载) 随围压  $\sigma_3$  卸载的变化情况。

进入峰后阶段后, 煤样的轴向应变  $\varepsilon_1$  和径向应变  $\varepsilon_3$  的变化主要包括剪切面的摩擦滑动和煤样孔隙裂隙的闭合、张开、发育、扩展。从图 4、5 可以看出: 在保持轴压  $\sigma_1$  不变, 对围压  $\sigma_3$  进行卸载时, 随着  $\sigma_3$  的减小,  $\varepsilon_1$  增大,  $\varepsilon_3$  减小 (煤岩热-流-固耦合试验系统中测量径向变形的引伸计为压正拉负, 即煤样受力压缩时, 数值增大, 膨胀时, 数值减小),

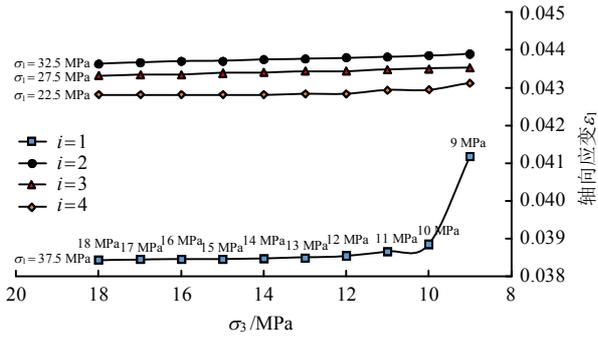


图4 围压卸载时轴向应变  $\epsilon_1$  随围压  $\sigma_3$  的变化情况  
Fig.4 Change of axial strain  $\epsilon_1$  with confining pressure  $\sigma_3$  when unloading the confining pressure

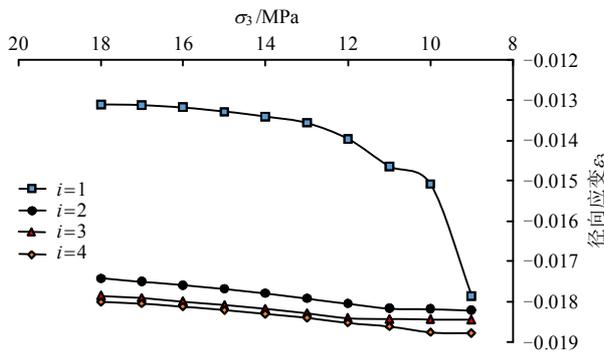


图5 围压卸载时径向应变  $\epsilon_3$  随围压  $\sigma_3$  的变化情况  
Fig.5 Change of radial strain  $\epsilon_3$  with confining pressure  $\sigma_3$  when unloading the confining pressure

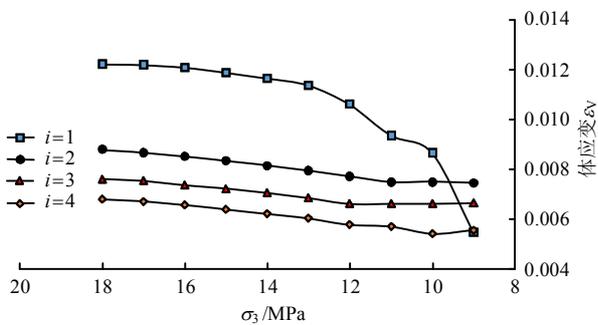


图6 围压卸载时体应变  $\epsilon_v$  随围压  $\sigma_3$  的变化情况  
Fig.6 Change of volumetric strain  $\epsilon_v$  with confining pressure  $\sigma_3$  when unloading the confining pressure

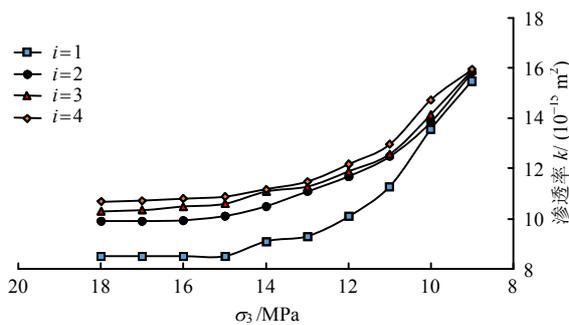


图7 围压卸载时渗透率  $k$  随围压  $\sigma_3$  的变化情况  
Fig.7 Change of permeability  $k$  with confining pressure  $\sigma_3$  when unloading the confining pressure

即煤样相应地压缩和膨胀。在同样的轴向压力下，煤样的承载力逐渐减弱，相对较高围压下的  $\epsilon_1$ ，低围压下煤样压缩的程度会越来越大，表现在  $\epsilon_1$  逐渐增大。在第1次围压卸载时，由于  $\sigma_1$  的值相对较大，当  $\sigma_3$  卸载到某一值时，煤样的承载力相较之前，会迅速减弱。如本次试验在保持  $\sigma_1 = 37.5$  MPa 不变，进行第1次围压卸载时， $\epsilon_3$  随  $\sigma_3$  的卸载而斜率变化越来越大，直至  $\sigma_3$  卸载至 9 MPa 时，煤样的轴向应变和径向应变的数值较之前，即  $\sigma_1 = 37.5$  MPa、 $\sigma_3 \geq 10$  MPa 有明显的变化，其损伤量也明显增大。此时煤样压缩的程度达到最大同时扩容现象也最为明显。因此，在围岩出现明显扩容前，应及时进行支护，以免围岩失稳，发生岩爆等动力灾害。随着轴压卸荷至较低的应力水平，当  $\sigma_3$  进行围压卸载时，由于  $\sigma_1$  对煤样的作用相对减弱，煤样不会再出现  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_3$  在  $\sigma_3$  卸载至某一点时的明显变化，表现在曲线较为平缓。同样从图6可以看出：体应变  $\epsilon_v$  随  $\sigma_3$  卸载，斜率减小，说明随着  $\sigma_1$  卸荷，轴压对煤样的变形控制相应减弱。

从图7可以看出：煤样的渗透率在  $\sigma_3$  卸载初期，渗透率  $k$  几乎不增加。 $\sigma_3$  继续卸载， $k$  开始增大，且  $k$ - $\sigma_3$  斜率越来越大。相较围压卸载引起的变形，煤样渗透率的变化幅度明显，因此，在井下更要及时预防煤与瓦斯突出。此外， $k_1 < k_2 < k_3 < k_4$ ，当  $\sigma_1$  减小时，围压对渗透率的控制越来越重要。同时也可以看出，在第4、3、2次进行围压卸载时，煤样的渗透率相较第1次增加程度不大，表明孔隙裂隙虽一直在发育、扩展，却不会出现突增，即煤样发生二次破坏的可能性越来越小。

### 3.2 煤样在围压卸载过程中的损伤分析

煤岩体在外力的作用下，会发生位错滑移<sup>[18]</sup>，孔隙裂隙发育、扩展、延伸等力学响应现象，使其力学性能劣化，造成损伤。煤岩在力的作用下，轴向应变  $\epsilon_1$  和径向应变  $\epsilon_3$ 、体应变  $\epsilon_v$  会相应地动态变化，三者为力学响应下，反映煤岩力学性能、渗透特性的最直接参量，煤岩的能量分析（如弹性能、耗散能的演化过程）、损伤劣化分析等都是由此结合相关理论推导而来。此外，煤岩在力加载过程中， $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_3$ 、 $\epsilon_v$  对作用力的响应程度不同，即表现出不同的敏感性。因此，本文基于  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_3$ 、 $\epsilon_v$  3个基本参量，引入权重系数定义损伤变量  $D$ ，以反映煤岩内部损伤的产生、积累这一不可逆过程。其表达式如下：

$$D = 1 - \frac{(1-\alpha)|\delta\epsilon_{1ij}| + (1-\beta)|\delta\epsilon_{3ij}| + (1-\gamma)|\delta\epsilon_{vij}|}{|\delta\epsilon_{1ij}| + |\delta\epsilon_{3ij}| + |\delta\epsilon_{vij}|} \quad (2)$$

式中： $i = 1、2、3、4$  时， $\sigma_1 = 37.5、32.5、27.5、22.5$  MPa； $j = 18 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 13 \rightarrow 12 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 9$  MPa，表示  $\sigma_3$  逐级卸载的目标值； $\varepsilon_{1ij}$ 、 $\varepsilon_{3ij}$  和  $\varepsilon_{vij}$  分别表示在第  $i$  次围压卸载、 $\sigma_3 = j$  MPa 时轴向应变、径向应变和体应变的数值； $\delta\varepsilon_{1ij}$ 、 $\delta\varepsilon_{3ij}$  和  $\delta\varepsilon_{vij}$  分别表示在第  $i$  次围压卸载、 $\sigma_3 = j$  MPa 时的累计轴向、径向应变和体应变的不可恢复变形量，表示煤样在围压卸载过程中塑性发展和变形程度，其定义式如下：

$$|\delta\varepsilon_{1ij}| = |\varepsilon_{1ij} - \varepsilon_{1118}| \quad (3)$$

$$|\delta\varepsilon_{3ij}| = |\varepsilon_{3ij} - \varepsilon_{3118}| \quad (4)$$

$$|\delta\varepsilon_{vij}| = |\varepsilon_{vij} - \varepsilon_{v118}| \quad (5)$$

式中： $\varepsilon_{1118}$ 、 $\varepsilon_{3118}$  和  $\varepsilon_{v118}$  为第 1 次围压卸载初始条件下，即  $\sigma_1 = 37.5$  MPa、 $\sigma_3 = 18$  MPa 时径向应变  $\varepsilon_1$ 、轴向应变  $\varepsilon_3$  和体应变  $\varepsilon_v$  的数值，规定该量为初始值，公式中变化量取值结果用绝对值表示，用以说明其变化程度。

$\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  为  $|\delta\varepsilon_{1ij}|$ 、 $|\delta\varepsilon_{3ij}|$  和  $|\delta\varepsilon_{vij}|$  占  $\sigma_3$  在卸载过程中引起的最大轴向应变、径向应变和体应变不可恢复量  $\max\{|\delta\varepsilon_{1ij}|\}$ 、 $\max\{|\delta\varepsilon_{3ij}|\}$ 、 $\max\{|\delta\varepsilon_{vij}|\}$  的百分比，即权重系数，表示  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$  和  $\varepsilon_v$  对损伤发展的影响程度。其表达式如下：

$$\alpha = |\delta\varepsilon_{1ij}| / \max\{|\delta\varepsilon_{1ij}|\} \quad (6)$$

$$\beta = |\delta\varepsilon_{3ij}| / \max\{|\delta\varepsilon_{3ij}|\} \quad (7)$$

$$\gamma = |\delta\varepsilon_{vij}| / \max\{|\delta\varepsilon_{vij}|\} \quad (8)$$

表 1、2 分别为第 1 次围压卸载过程中有关损伤表达式相关量的计算数值和 4 次围压卸载时损伤变量  $D$  计算数值。

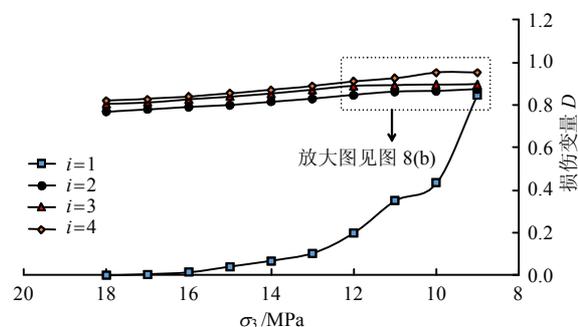
表 1 第 1 次围压卸载时有关的损伤参量  
Table 1 Damage parameters related to the first confining pressure unloading

$\sigma_3$ / MPa	$ \delta\varepsilon_{1ij}  / 10^{-4}$	$ \delta\varepsilon_{3ij}  / 10^{-4}$	$ \delta\varepsilon_{vij}  / 10^{-4}$
18	0.000	0.000	0.000
17	0.207	0.275	0.343
16	0.310	0.813	1.316
15	0.310	1.814	3.317
14	0.517	3.064	5.612
13	0.724	4.628	8.532
12	1.137	8.630	16.123
11	2.274	15.384	28.494
10	4.135	19.887	35.638
9	27.680	47.596	67.512

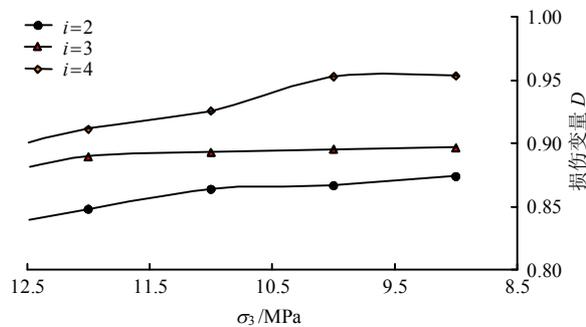
表 2 围压卸载时的损伤变量  $D$   
Table 2 Damage variable  $D$  when unloading the confining pressure

$i$	不同 $\sigma_3$ (MPa) 时的 $D$									
	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9
1	0.000	0.005	0.016	0.041	0.069	0.105	0.199	0.351	0.435	0.847
2	0.769	0.780	0.791	0.801	0.815	0.830	0.848	0.864	0.866	0.874
3	0.805	0.813	0.826	0.839	0.853	0.871	0.889	0.893	0.895	0.896
4	0.821	0.828	0.840	0.855	0.871	0.889	0.911	0.925	0.953	0.953

从损伤变量定义式和表 1、2 可以看出：保持  $\sigma_1$  不变，围压进行卸载时，损伤量增加； $\sigma_1$  越小，因  $\sigma_3$  卸载引起的损伤变化程度越小，这与实际情况相符，能够反映煤岩的损伤劣化过程。此外，式 (2) 将径向变形  $\varepsilon_3$ 、轴向变形  $\varepsilon_1$  和体应变  $\varepsilon_v$  这 3 个宏观变量以及在每次围压卸载时相应的塑性变形量、三者对损伤发展的响应程度考虑进去，直接利用其试验过程中的瞬时形变量，能够表现出试验过程中煤样的损伤变量  $D$  随着围压  $\sigma_3$  的变化情况。而且符合损伤变量的变化规律（区间） $[0,1]$ ，张明等<sup>[19]</sup>用概率分布函数定义统计损伤变量也是基于  $D \in [0,1]$ 。因此，所提出地损伤变量表达式是合理的。图 8 为 4 次围压卸载时损伤变量  $D$  随围压  $\sigma_3$  的



(a)  $D$  随  $\sigma_3$  变化曲线



(b) 局部放大图

图 8 围压卸载时损伤变量  $D$  随围压  $\sigma_3$  的变化情况  
Fig.8 Change of damage variable  $D$  with confining pressure  $\sigma_3$  when unloading the confining pressure

变化情况。

从图 8 可以看出：随着  $\sigma_3$  的卸载，煤样的损伤变量  $D$  越来越大。煤样剪切破坏后，当保持轴压  $\sigma_1$  不变，对围压  $\sigma_3$  进行卸载时，相当于摩尔应力圆半径增大，发生二次破坏的可能性也会增大，不论内摩擦角  $\varphi$  是否明显增大、减小还是不变，煤岩始终向破坏的趋势发展。而且卸围压前  $\sigma_1$  越大，随着  $\sigma_3$  的卸载，摩尔应力圆半径越大，煤样的承载能力就越弱，发生二次破坏的可能性也越大，如图 9 所示， $\varphi_2$  (内摩擦角增大)  $> \varphi_0$  (内摩擦角不变)  $> \varphi_1$  (内摩擦角减小)，随着  $\sigma_3$  的逐级卸载，相当于摩尔应力圆右端点固定，左端点向左动态运动，半径越来越大，接触曲线  $\tau = \sigma \tan \psi + c$  的概率增加，煤岩发生二次破坏的可能性相应增加。因此，煤样的损伤在  $\sigma_3$  卸载至某一值时，如本次试验，当  $\sigma_1$  保持不变， $\sigma_3$  卸载 9 MPa 时，煤样的损伤量出现了较大的增幅，损伤随随机裂纹的产生扩大到局部损伤。从图 5 也可以看出，煤样在第 2、3、4 次  $\sigma_3$  的卸载过程中损伤变量的增加程度未出现第 1 次  $\sigma_3$  由 10 MPa 卸载至 9 MPa 时的突增现象，这与图 4、5 是相符的。损伤的不断积累，煤样内部原有的孔隙裂隙始终以张开、发育、延伸、扩展占主导地位。另一方面，从能量角度看，孔隙裂隙在力的作用下的变化即是煤样不断产生新表面的过程，新表面产生的过程即是能量不断产生与耗散的过程。因此，损伤不断积累，损伤变量越来越大，从表 1、2 也可以看出。如图 10 所示，反映了试验过程中含瓦斯煤在峰后保轴压卸围压下的裂隙演化，煤样在剪切破坏后产生了主剪切面，但同时也可能伴有局部的张性破坏，产生新的孔隙裂隙。

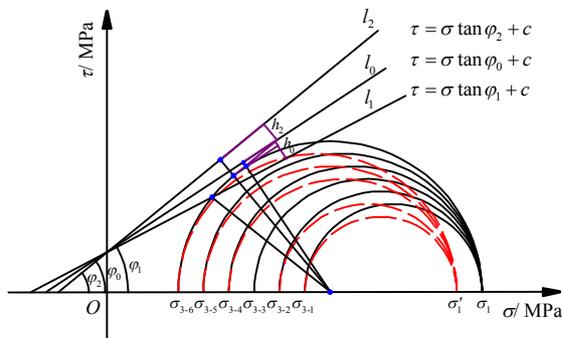


图 9 摩尔应力圆半径随应力加、卸载变化情况  
Fig.9 Change of Mohr's stress circle radius with the stress when loading and unloading the confining pressure

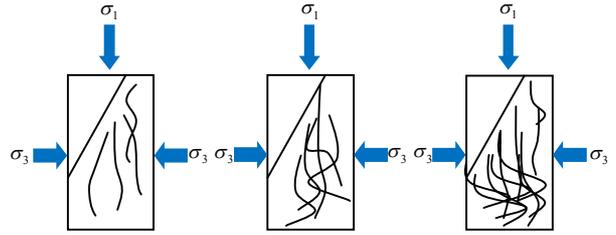


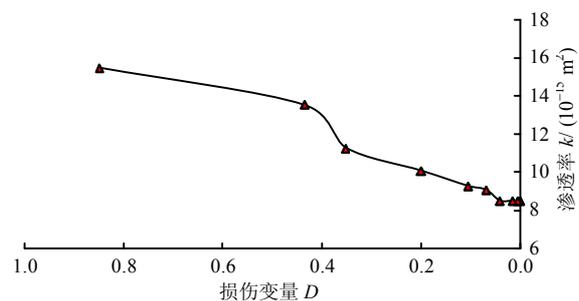
图 10 含瓦斯煤峰后在三轴压力下孔隙裂隙演化示意图  
Fig.10 Evolution sketch of pore-crack of coal containing gas at the post-peak under triaxial pressure

另一方面，围压的每次加、卸载，剪切面上的小煤块便会微滑移或有滑移倾向。尽管小煤块所受力的作用大小随  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的变化而始终在变，剪切面由起伏不平有趋于光滑的态势，这个过程中可能会有一定数量的煤颗粒由于摩擦作用出现在剪切面上以及落入煤中供瓦斯运移的通道，对煤的渗透特性起阻碍作用。

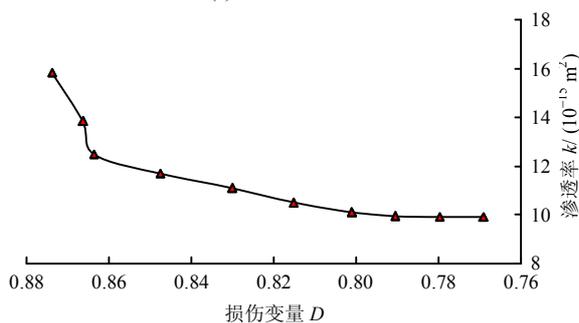
图 11 分别为 4 次围压卸载渗透率  $k$  随损伤变量  $D$  的变化情况，可以看出，随着损伤变量的增加，煤样的渗透率也随之增大。因此，煤样在轴压和围压共同作用下，其内部产生的损伤不断累积，同样宏观表现在煤样渗透率越来越大。

图 11 中第 1 次围压卸载的凸形曲线较之于其他加载路径下的凹形曲线有所不同，笔者认为，在第 1 次围压卸载过程中，因  $\sigma_1$  处于较高的应力水平，当  $\sigma_3$  由 11 MPa 时卸载至 10 MPa 时对煤样引起的力的作用效果相当于  $\sigma_1$  处于较低的应力水平时， $\sigma_3$  由 10 MPa 时卸载至 9 MPa 时所起到的作用效果，即渗透率  $k$  随着损伤变量  $D$  的增加而呈现较大幅度的增加。而在第 1 次围压卸载过程中，当  $\sigma_3$  卸载至 10 MPa 时，可能由于煤样的二次临界破坏条件已经具备，渗透率出现了大幅度增加，之后在卸载至 9 MPa 的过程中，虽然损伤变量一直在增加，煤样内部的孔隙裂隙以扩展、延伸为主，不会产生引起渗透率大幅度的特殊裂隙或是弱面。因此，此过程渗透率有所增加，但增加幅度不会较大。对于第 2、3、4 次围压卸载过程，按照设计应力目标值，都处于未超过第 1 次所设计的应力史，二次破坏的概率相应减小，且因  $\sigma_1$  的应力水平较低，整个过程只有一定数量的孔隙裂隙的增加，围压对煤样渗透特性的影响也越来越大，即围压对渗透率的控制作用加强。因此， $\sigma_3$  由 11 MPa 时卸载至 10 MPa 以及由 10 MPa 时卸载至 9 MPa 时，渗透率都以较大幅度增加，表现在第 2、3、4 次和第 1 次图示曲线出

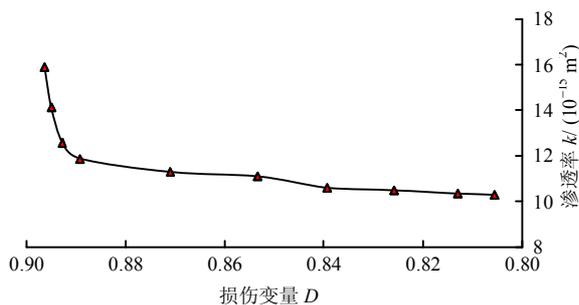
现不同。但图 11(a)~11(d)同时得出了渗透率  $k$  随煤样损伤的发展与累积而增加的这一重要规律。



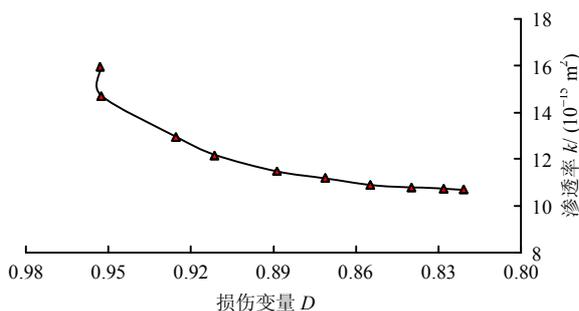
(a) 第 1 次围压卸载



(b) 第 2 次围压卸载



(c) 第 3 次围压卸载



(d) 第 4 次围压卸载

图 11 围压卸载时渗透率  $k$  随损伤变量  $D$  的变化情况  
Fig.11 Change of permeability  $k$  with damage variable  $D$  when unloading the confining pressure

## 4 结 论

本文通过对原煤进行峰后轴压在不同应力水平条件下的围压卸载试验, 得出以下结论:

(1) 通过轴向应变  $\varepsilon_1$ 、径向应变  $\varepsilon_3$  和体应变  $\varepsilon_V$

的不可恢复变形量以及三者有力加载过程中响应程度的不同, 引入权重系数, 定义损伤变量表达式, 计算煤样在卸载过程中的损伤量, 得出在峰后轴压  $\sigma_1$  保持不变, 对围压  $\sigma_3$  进行卸载时, 损伤量  $D$  随着  $\sigma_3$  的减小而越来越大, 煤样的损伤程度也越来越大, 宏观表现在煤样渗透率越来越大。

(2) 随着轴压的不断卸荷, 围压卸载时煤样的渗透率呈  $k_1 < k_2 < k_3 < k_4$ 。说明峰后轴压处于较低的应力水平时, 围压对渗透率的控制越来越重要。此外, 煤样的渗透率  $k$  在  $\sigma_3$  卸载初期, 渗透率  $k$  几乎不增加。当  $\sigma_3$  继续卸载时,  $k$  开始增大, 并且斜率越来越大, 表明煤样的损伤加剧, 孔隙裂隙以张开为主, 使渗透率突增。

(3) 煤样剪切破坏后, 当保持轴压  $\sigma_1$  不变, 对围压  $\sigma_3$  进行卸载时, 相当于摩尔应力圆半径增大, 接触曲线  $\tau = \sigma \tan \varphi + c$  的概率增加。因此, 发生二次破坏的可能性增大, 表现在煤样的轴向应变  $\varepsilon_1$  和径向应变  $\varepsilon_3$  发生突变。

## 参 考 文 献

- [1] 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): 1493—1498.  
XU Jiang, LI Bo-bo, 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): 1493—1498.
- [2] 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.  
PENG 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.
- [3] 赵闯, 武科, 李术才, 等. 循环荷载作用下岩石损伤变形与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 890—896.  
ZHAO Chuang, WU Ke, LI Shu-cai, et al. Energy characteristics and damage deformation of rock subjected to cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 890—896.
- [4] 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1740—1748.  
ZHAO Xing-guang, LI Peng-fei, MA Li-ke, et al.

- Damage and dilation characteristics of deep granite at Beishan under cyclic loading-unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1740—1748.
- [5] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 640—648.  
LU Yin-long, WANG Lian-guo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 640—648.
- [6] 朱建明, 徐秉业, 岑章志. 岩石类材料峰后滑移剪膨变形特征研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(5): 19—22.  
ZHU Jian-ming, XU Bing-ye, CEN Zhang-zhi. Study on the deformation mechanisms of sliding dilation of post-failure rocks[J]. **Mechanics in Engineering**, 2001, 23(5): 19—22.
- [7] 胡振襄, 周科平, 李杰林, 等. 卸荷岩体细观损伤演化的核磁共振测试[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(12): 1567—1574.  
HU Zhen-xiang, ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, et al. Meso-damage evolution of unloading rock mass based on nuclear magnetic resonance technology[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2014, 36(12): 1567—1574.
- [8] 段敏克, 蒋长宝, 俞欢, 等. 分级加-卸载条件下原煤的渗透及能耗特征研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1346—1354.  
DUAN Min-ke, JIANG Chang-bao, YU Huan, et al. Experimental research on energy dissipation and seepage properties of coal under loading-unloading conditions at different stress levels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1346—1354.
- [9] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 891—901.  
YIN Guang-zhi, LI Wen-pu, LI Ming-hui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(5): 891—901.
- [10] 俞缙, 李宏, 陈旭, 等. 砂岩卸围压变形过程中渗透特性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 69—79.  
YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study of permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(1): 69—79.
- [11] 王广荣, 薛东杰, 郗海莲, 等. 煤岩全应力-应变过程中渗透特性的研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 107—112.  
WANG Guang-rong, XUE Dong-jie, GAO Hai-lian, et al. Study on permeability characteristics of coal rock in complete stress-strain process[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(1): 107—112.
- [12] 魏建平, 位乐, 王登科. 含水率对含瓦斯煤的渗流特性影响试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 97—103.  
WEI Jian-ping, WEI Le, WANG Deng-ke. Experimental study of moisture content influences on permeability of coal containing gas[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(1): 97—103.
- [13] 潘一山, 罗浩, 李忠华, 等. 含瓦斯煤岩围压卸荷瓦斯渗流及电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 713—719.  
PAN Yi-shan, LUO Hao, LI Zhong-hua, et al. Experimental study on gas permeability and charge induction of gaseous coal rock under confining pressure unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(4): 713—719.
- [14] 尹光志, 李铭辉, 李文璞, 等. 瓦斯压力对卸荷原煤力学及渗透特性的影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1499—1504.  
YIN Guang-zhi, LI Ming-hui, LI Wen-pu, et al. Influence of gas pressure on mechanical and seepage characteristics of coal under unloading condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(9): 1499—1504.
- [15] 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瓦斯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 Guang-zhi, JIANG Chang-bao, WANG Wei-zhong, 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.