

地应力场中煤岩卸围压过程力学特性试验研究及 瓦斯渗透特性分析

黄启翔^{1, 2}, 尹光志^{1, 2}, 姜永东^{1, 2}

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 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, 重庆 400044)

摘要: 应用 MTS815 力学试验机, 对典型煤与瓦斯突出矿井松藻矿务局打通一矿突出煤层原煤制备的型煤试件进行卸围压试验研究。研究表明: (1) 位移控制方式卸围压将导致试件的扩容损伤, 力控制方式卸围压将导致试件的破坏。(2) 用位移控制卸围压时, 在某一初始围压下, 试件的轴向应力随围压的降低而减小, 轴压减小的速率越来越大, 屈服阶段卸围压曲线比弹性阶段卸围压曲线更加非线性; 随初始围压的加大, 屈服阶段卸围压曲线的非线性特征更加明显。(3) 用力控制方式卸围压时, 在某一初始围压下, 试件的轴向应变随围压的降低而增大, 轴向应变增大的速率越来越大, 屈服阶段卸围压时轴向应变的增大比弹性阶段卸围压时更为迅速; 随初始围压的增大, 屈服阶段卸围压时试件加速破坏的趋势更加明显; 通过轴向应变可计算分析卸围压过程中试验机对试件作的功。根据试验结果, 结合全应力-应变过程煤岩瓦斯渗透特性的试验结果, 推导出卸围压过程瓦斯渗透特性曲线。根据以上结果, 应用损伤理论和 Mohr-Coulomb 强度理论推导含瓦斯煤岩卸围压过程中试件的损伤和强度的计算公式。研究结果对预测预报瓦斯涌出和预测卸围压过程中煤岩的破坏具有现实指导意义。

关键词: 采矿工程; 地应力场; 型煤试件; 卸围压; 力学特性; 瓦斯渗流

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)08-1639-10

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COAL SPECIMEN IN PROCESS OF UNLOADING CONFINING PRESSURE IN GEOSTRESS FIELD AND ANALYSIS OF GAS SEEPAGE CHARACTERISTICS

HUANG Qixiang^{1, 2}, YIN Guangzhi^{1, 2}, JIANG Yongdong^{1, 2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the briquette specimens of the outburst coal seam of typical coal and gas outburst mine of Datong in Songzao, the experimental study of unloading confining pressure of briquette specimen is performed by means of mechanical testing machine MTS815. The results are shown as follows: (1) unloading confining pressure with displacement control leads to the dilatancy and damage of briquette specimens, unloading confining pressure with load control leads to the failure of briquette specimens; (2) if the confining pressure is unloaded by means of displacement control, within a certain range of initial confining pressure, the axial stress of briquette specimens drops with decreasing confining pressure, and the velocity of axial stress drop rises, the nonlinearity of curve of unloading confining pressure is more significant when unloading confining pressure in yield phase than that in

收稿日期: 2010-03-13; **修回日期:** 2010-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874124); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221502); 国家科技重大专项项目(2008ZX05034-002); 重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC, 2008BA6028)

作者简介: 黄启翔(1978-), 男, 2002年毕业于重庆大学资源及环境科学学院采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与采矿安全等方面的研究工作。E-mail: hqx@cqu.edu.cn

elastic phase; the nonlinearity is more and more obvious with the increase in initial confining pressure; (3) if the confining pressure is unloaded by means of load control, within a certain range of initial confining pressure, the axial strain of briquette specimens rises with decreasing confining pressure, the velocity of axial strain rise increases, the increase in axial strain is more significant when unloading confining pressure in yield phase than that in elastic phase. The increasing failure is more and more obvious in yield phase with the increase in initial confining pressure; the work of testing machine done in the process of unloading confining pressure can be calculated and analyzed according to axial strain. Based on the test results, combining with the test results of permeability of briquette specimens in the complete stress-strain process, the permeability curve of briquette specimens in the process of unloading confining pressure is deduced. Based on these results, using damage theory and Mohr-Coulomb theory, the formula for calculating the damage of briquette specimens containing gas in the process of unloading confining pressure is derived. The study results have a reference value for predicting gas emission and failure in the process of unloading confining pressure.

Key words: mining engineering; geostress filed; briquette specimen; unloading confining pressure; mechanical characteristics; gas seepage

1 引言

在地下开采煤炭资源的过程中,对煤岩的开挖作业实际上是一个将处于三向原岩应力状态的煤岩卸除围压的过程。伴随着围压的解除,煤岩体将发生变形和破坏。对于高瓦斯矿井,这是由于采动作用影响工作面瓦斯涌出和引发煤与瓦斯突出等煤矿动力现象的重要原因。

煤岩体卸除围压是一个煤岩体由三向应力状态向二向或单向应力状态转换的过程。有学者对岩石或煤体卸围压进行过研究。徐松林等^[1]研究了大理岩峰前和峰后卸围压过程;李小琴等^[2]进行了砂岩峰后卸除围压过程的渗透性试验研究;张黎明等^[3]进行了岩石卸围压破坏的试验研究;王在泉等^[4-7]对不同种类岩石进行了固定轴向位移的卸围压试验研究,并利用轴压随围压的变化曲线来确定岩石材料的泊松比;高春玉等^[8]对大理岩进行加卸载三轴试验,并分析不同应力路径下的变形模量和强度参数特征;苏承东等^[9, 10]用原煤煤样进行了卸围压试验;陈卫忠等^[11, 12]从强度特性和能量原理方面研究了岩石的卸围压特性。黄润秋和高达^[13]重点从破裂特征方面研究了岩石的卸围压特性。T. F. Wong等^[14]研究了应力路径对岩石破坏的影响。前人的研究加深了人们对煤岩力学性质的认识,但对位移控制和力控制卸围压过程中型煤试件的轴向力学参数随围压的变化规律的研究还鲜见报道。由于在采矿工业现场中,开采卸围压过程是人为实施的连续过程,煤岩体的轴向力学参数相对容易观测,所以有必要加强在这方面的研究。

为此,本文应用 MTS815 电液伺服力学试验机

模拟地应力场中煤岩的三向应力状态,通过位移控制和力控制卸除围压试验,观察型煤试件在卸除围压过程中轴向力学参数随围压的变化过程,研究在围压的变化过程中试件轴向力学参数的变化规律。同时,针对高瓦斯矿井,结合卸围压过程中试件所受应力及其应变情况推导其瓦斯渗透特性随围压的变化规律。研究结果为预测卸围压过程中煤岩的破坏提供了参考,并为预测预报煤岩瓦斯涌出提供了新的思路。

2 试验设计和试验方法

2.1 试验原理

在煤矿的实际开采过程中,对煤岩体的开挖活动实质上是给被开挖体后方未开挖的煤岩体卸去围压的过程,随着该过程的进行,未开挖煤岩体将发生变形和破坏,现场表现为顶板的下移和支承压力向更后方的煤岩体的转移,此变化过程是一个复杂的过程,在此过程中煤岩体的力学状态由多个因素控制。为了更好地模拟地应力场中煤岩卸围压过程中的力学特性,结合现场实际,试将该过程分解为2个单因素控制的过程,第一是位移控制过程,即保持轴向应变不变,随着围压的减小,煤岩轴向应力逐渐减小的过程;第二是力控制过程,即保持轴向应力不变,随着围压的减小,煤岩轴向应变不断增大的过程。在采掘现场,这2个过程通过不同的围岩支护条件来综合考虑,还原实际情况下的卸围压。同时,由于埋藏深度和地质构造等因素的不同,煤岩体所处的原岩应力状态也不同,导致煤岩在开采卸围压前处于不同的应力-应变状态,有的处于弹性状态,有的处于屈服状态。

2.2 试验设计

通过对试验原理的分析, 基于其中的思想, 将试验设计为: 用电液伺服材料试验机模拟地应力状态, 将卸围压试验分为位移控制和力控制 2 种方式实施, 每种方式又分成弹性阶段卸围压和屈服阶段卸围压 2 种不同的卸围压起始条件进行。

在具体的操作上, 先由压力试验机将型煤试件加载到一定的三向应力 - 应变状态, 再匀速卸掉围压。

位移控制卸围压是指保持试验机加载压头轴向位移不变, 匀速卸去围压的过程。力控制卸围压是指保持试验机加载压头轴向载荷不变, 匀速卸去围压的过程。

根据常规三轴压缩试验的结果, 弹性阶段是指轴向应力加载到该初始围压下型煤试件峰值强度的 30%, 屈服阶段是指轴向应力加载到该初始围压下型煤试件峰值强度的 70%。

2.3 试验方法

本试验使用 MTS815 电液伺服材料试验机模拟煤岩所处的三向地应力状态。该试验机轴向载荷由液压缸驱动加载压头电液伺服加载, 可实现位移控制和力控制 2 种加载方式; 围压由液压油直接电液伺服加载, 可实现高精度匀速加卸载围压。

3 试验过程

3.1 试件的制作

本试验所用的煤样取自重庆松藻矿务局打通一矿, 将取回的原煤在粉碎机上进行粉碎后, 筛选其中的 40~80 目的颗粒、制成试验用的粉煤。在粉煤中加入适量的水, 搅拌均匀。之后, 在成型模具上用 200 kN 的成型压力加压, 压制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体型煤试件 12 个。将制成的试件在 60 °C 烘箱中烘干 12 h, 试件准备完毕。煤样的基本物理力学参数见表 1。

表 1 煤试件的基本物理力学参数

$M_{ad} / \%$	$A_d / \%$	$V_{daf} / \%$	密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	抗压强度/MPa			
				单轴	围压 2 MPa	围压 4 MPa	围压 6 MPa
1.63	20.62	8.56	1.22	0.43	14.35	21.95	25.58

3.2 试验步骤

3.2.1 试件的装配

给试件上下端面装上带密封圈的加载垫块, 将长度为 180 mm 左右的热收缩套套在试件的侧面, 给热收缩套加热, 使其收缩, 在热收缩套的密封圈位置装上密封箍环。将试件垫块连同热收缩套整体装在 MTS 力学试验机的试件底座上, 安装轴向应变计, 放下三轴压力室顶盖, 拧紧顶盖紧固螺栓。试件装配完毕。

3.2.2 试验步骤

(1) 测出型煤试件在 2 MPa 围压下的常规三轴抗压强度。

(2) 更换试件, 施加围压至 2 MPa。

(3) 施加轴向载荷至试件在 2 MPa 围压下的常规三轴试验的弹性阶段, 即施加轴向载荷至试件在围压 2 MPa 下峰值强度的 30%。

(4) 保持试验机加载压头位移不变, 匀速卸去围压, 卸围压速率为 0.005 MPa/s。

(5) 重复步骤(2)。

(6) 施加轴向载荷至试件在 2 MPa 围压下的常规三轴试验的屈服阶段, 即施加轴向载荷至试件在围压 2 MPa 下峰值强度的 70%。

(7) 重复步骤(4)。

(8) 重复步骤(2), (3)。

(9) 保持试验机加载压头载荷不变, 匀速卸去围压, 直到试件破坏, 卸围压速率为 0.005 MPa/s。

(10) 重复步骤(5), (6)。

(11) 重复步骤(9)。

(12) 将围压变为 4 和 6 MPa, 分别重复上述试验。

具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Testing schemes

控制方式	试件编号	试件尺寸 $/(mm \times mm)$	初始围压/MPa	卸载点轴压 /MPa
位移 控制	A1	50.1 × 100.6	2	4.35
	A2	50.7 × 98.8	2	10.13
	A3	50.7 × 100.5	4	6.59
	A4	50.8 × 100.9	4	15.37
	A5	50.7 × 95.0	6	7.68
	A6	50.9 × 98.6	6	17.91
力 控制	B1	50.0 × 100.1	2	4.35
	B2	51.0 × 99.3	2	10.13

B3	50.8×100.5	4	6.59
B4	50.9×102.3	4	15.37
B5	50.9×101.3	6	7.68
B6	51.1×101.7	6	17.91

4 试验结果分析

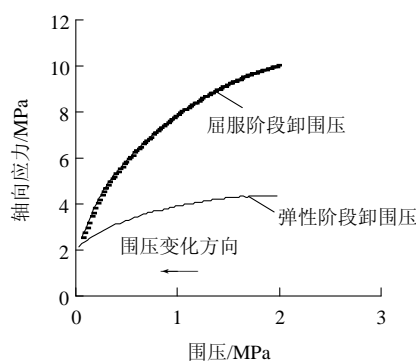
4.1 位移控制方式卸围压

位移控制方式下卸围压时，随着围压的基本卸除，轴向应力随之下降，将试件拆卸后测量观察发现，试件只是出现侧向膨胀，没有出现明显的破坏，位移控制方式卸围压后煤样的形状如图 1 所示。位移控制方式卸围压时煤试件轴向应力 - 围压曲线如图 2 所示。

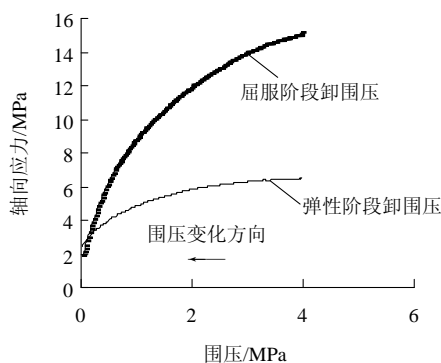


图 1 位移控制方式卸围压后煤试件的形状

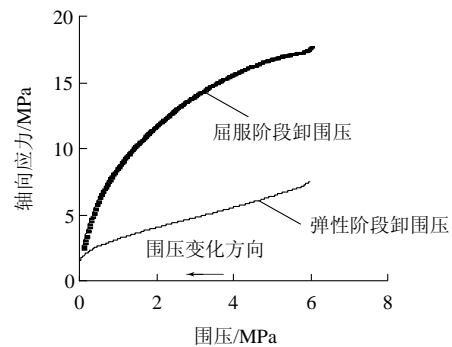
Fig.1 Shape of coal specimen after unloading confining pressure by means of displacement control



(a) 2 MPa 位移控制卸围压



(b) 4 MPa 位移控制卸围压



(c) 6 MPa 位移控制卸围压

图 2 位移控制方式卸围压时煤试件轴向应力 - 围压曲线
Fig.2 Axial stress-confining pressure curves of coal specimens when unloading confining pressure by means of displacement control

从图 2 可以看出，在某一初始围压下，对于弹性阶段卸围压，随着围压的降低轴向应力降低，其曲线约微向上弯曲，轴向力降低的速率越来越快。对于屈服阶段卸围压，随着围压的降低，轴向应力也降低，其曲线也向上弯曲，其弯曲程度较弹性段卸围压时明显，相同围压下曲线各点的梯度大于弹性段卸围压时的情况。综合对比，屈服段卸围压与弹性段卸围压相比，其轴向应力 - 围压曲线表现出更为明显的非线性特征，由于其横纵坐标的单位都是 MPa，所以可引入坡度的概念，以坡度为 100% 的直线为参考，弹性段卸围压时的轴向应力 - 围压曲线的切线的坡度都小于 100%，而屈服段卸围压时该曲线分为 2 个阶段，第一阶段为轴向应力低速减小阶段，其曲线各点的切线的坡度小于 100%，第二阶段为轴向应力快速减小阶段，其曲线各点的切线的坡度大于 100%。在围压基本卸除时弹性阶段和屈服阶段卸围压的轴向应力都保持在 2 MPa 左右。

在位移控制方式下，卸围压前所施加围压不同，无论是弹性阶段还是屈服阶段卸围压，随着围压的基本卸除，其轴向应力都保持在 2 MPa 左右。轴向应力 - 围压曲线则有所不同，随着施加初始围压的增大，对于弹性阶段卸围压，其轴向应力 - 围压曲线的始末点连线的斜率基本保持不变，对于屈服阶段卸围压，其轴向应力 - 围压曲线的始末点连线的斜率表现出减小的趋势。其原因是在位移控制卸围

压的过程中, 试件的损伤是依靠储存在其中的应变能在卸围压过程中释放而引起的, 对于弹性阶段卸围压的情况, 先由外力加载至弹性阶段, 由于试件内部没有明显的损伤出现, 外力做功全部转化为应变能存储在试件内部; 在卸围压时, 储存在其中的应变能完全释放, 因此, 当初始围压不同时, 其轴向应力 - 围压曲线的始末点连线的斜率基本保持不变。对于屈服阶段卸围压的情况, 先由外力加载至屈服阶段, 此时, 试件内部已出现损伤, 外力做功的一部分已从试件内部释放出去。随着初始围压的增大, 试件的塑性和延性也增大^[15], 储存应变能的能力降低, 相对低初始围压, 在高初始围压下试件达到屈服阶段时, 其中储存的应变能占外力做功的比例较低, 所以其轴向应力 - 围压曲线的始末点连线的斜率较小。

对位移控制方式卸围压的轴向应力 - 围压曲线进行拟合可得

$$\sigma_{zx} = \frac{ab\sigma_w}{a\sigma_w + c} \quad (1)$$

式中: σ_{zx} 为轴向应力(MPa); σ_w 为围压(MPa); a, b, c 均为拟合系数。

4.2 力控制方式卸围压

力控制方式下卸围压时, 随着围压的减小, 轴向应变随之增大, 将试件拆卸后测量观察发现, 试件要发生侧向膨胀, 并最终发生破坏, 力控制方式卸围压后煤试件的形状如图 3 所示。力控制方式下卸围压时煤样轴向应变 - 围压曲线如图 4 所示。



图 3 力控制方式卸围压后煤试件的形状

Fig.3 Shape of coal specimen after unloading confining pressure by means of load control

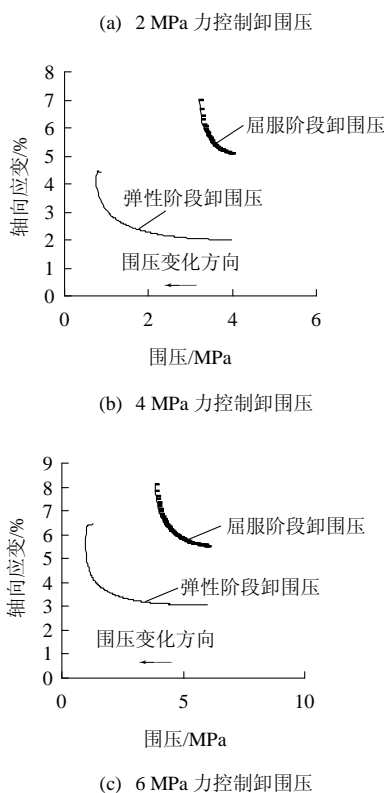
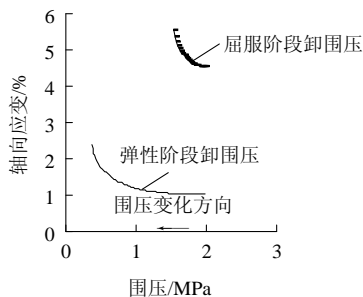


图 4 力控制方式卸围压时煤样轴向应变 - 围压曲线
Fig.4 Axial strain-confining pressure curves of coal specimens when unloading confining pressure by means of load control

从图 4 可以看出, 对于弹性阶段卸围压, 随着围压的降低, 轴向应变增大, 其曲线向下弯曲, 轴向应变增大的速率越来越快。卸围压初始阶段轴向应变随围压的减小而缓慢增加, 当卸围压使主应力差达到屈服强度时, 轴向应变的增加速度突然增大。对于屈服阶段卸围压, 随着围压的降低, 轴向应变也增大, 其曲线也向下弯曲, 卸围压初始阶段轴向应变随围压的减小而缓慢增加, 当卸围压使主应力差接近破坏强度时, 轴向应变的增加速度突然增大。该曲线的始末点连线的斜率大于弹性阶段卸围压的情况。综合对比, 弹性阶段卸围压终点对应的围压和轴向应变均小于屈服阶段卸围压的情况。

在力控制方式下, 卸围压前所施加围压不同, 无论是弹性阶段还是屈服阶段卸围压, 其轴向应变 - 围压曲线的卸围压起点的切线都与横坐标轴平行, 卸围压破坏点的切线都近似与纵坐标轴平行; 不同

的是，对于弹性阶段卸围压，随着初始围压的增大，其卸围压曲线的轴向应变低速增长阶段所卸围压占卸除总围压的比例增大；对于屈服阶段卸围压，随着初始围压的增大，其卸围压曲线的轴向应变高速增长阶段所卸围压占卸除总围压的比例增大。

力控制卸围压最终导致试件的破坏，该破坏是由卸围压过程中试件自身储能的释放和外力的持续作用而引发的。由于卸围压过程中加载压头是缓慢加载的，因此可以通过计算得出卸围压过程中加载压头对试件所做功。计算结果如表 3 所示。

表 3 卸围压过程中压头对煤试件做功
Table 3 Work of testing machine in the process of unloading confining pressure

初始围压/MPa	卸压阶段	轴向压力/kN	轴向位移/mm	压头做功/J
2	弹性	8.7	1.32	11.48
2	屈服	20.3	0.96	19.49
4	弹性	13.2	3.91	51.61
4	屈服	33.7	1.65	55.61
6	弹性	15.5	5.00	77.50
6	屈服	35.9	2.22	79.70

通过表 3 可以看出，在相同的初始围压下卸围压，由屈服阶段卸围压至试件破坏，压头对试件做功大于弹性阶段卸围压。其原因是，对于弹性阶段卸围压的情况，先由外力加载至弹性阶段，由于试件内部没有明显的损伤出现，外力做功全部转化为应变能存储在试件内部，在卸围压时，储存在其中的应变能又完全释放，即卸围压前压力试验机对试件做功完全释放用于试件的破坏。而对于屈服阶段卸围压的情况，先由外力加载至屈服阶段，此时，试件内部已出现损伤，外力做功的一部分已从试件内部释放出去，在卸围压时，储存在其中的应变能虽然也能完全释放，但总体来看，卸围压前压力试验机对试件做功只有部分用于试件的破坏。所以，要使试件最终产生破坏，在屈服阶段卸围压后加载压头对试件作的功要大于弹性阶段卸围压的情况。

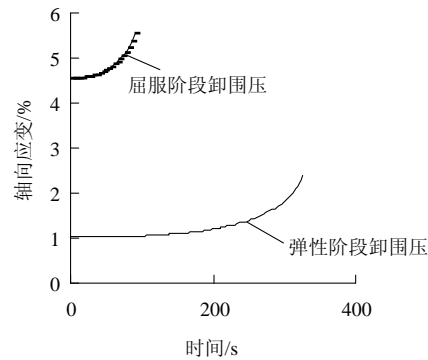
对力控制方式卸围压的轴向应变 - 围压曲线进行拟合可得，

$$\varepsilon_{zx} = le^{-m\sigma_w} \quad (2)$$

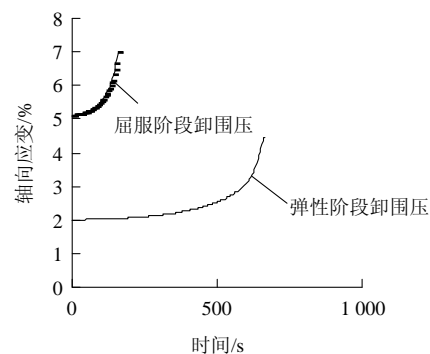
式中： ε_{zx} 为轴向应变(%)； l, m, n 均为拟合系数。

由此可见，用力控制方式卸围压时，轴向应变与围压满足负指数函数拟合关系。

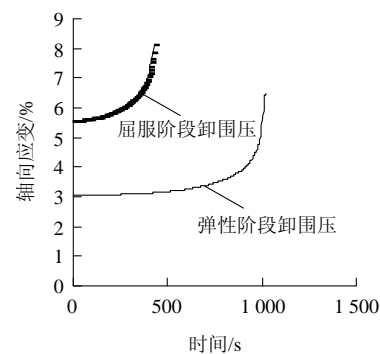
通常情况下，在煤矿现场获取应变即煤体的变形要比获取应力要方便得多。因此有必要建立匀速卸围压过程中试件轴向应变与时间的关系，以便在现场预测煤岩的破坏。力控制方式卸围压时煤试件轴向应变 - 时间曲线如图 5 所示。



(a) 2 MPa 力控制卸围压



(b) 4 MPa 力控制卸围压



(c) 6 MPa 力控制卸围压

图 5 力控制方式卸围压时煤试件轴向应变 - 时间曲线
Fig.5 Axial strain-time curves of coal specimens when unloading confining pressure by means of load control

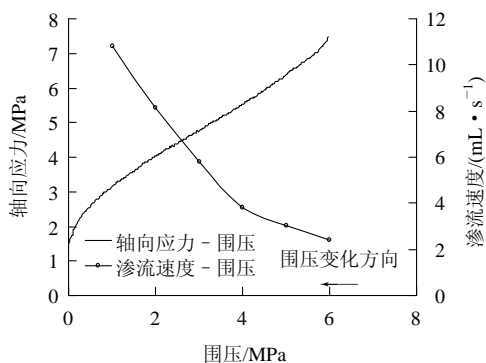
由图 5 可见，轴向应变 - 时间关系可作为力控制方式卸围压时煤岩发生破坏的判据。

5 煤岩卸围压过程瓦斯渗透特性的讨论

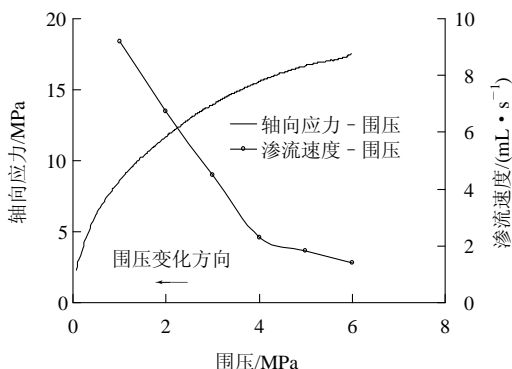
本试验研究了卸围压过程中煤试件的轴向力学参数随围压的变化规律。

在高瓦斯矿井中, 由采动卸围压作用所引起的煤岩破坏将改变煤岩的瓦斯渗透特性, 进而影响工作面瓦斯涌出和引起煤与瓦斯突出等煤矿瓦斯动力现象。因此, 有必要对煤试件卸围压过程中瓦斯渗透特性随围压的变化规律进行研究, 为现场预测瓦斯涌出量和预防煤与瓦斯突出提供参考。

由于本 MTS 试验机不能用于开展气体渗流的研究工作, 所以根据尹光志等^[16]进行过的模拟地应力场中型煤试件变形破坏过程的瓦斯渗流特性的试验研究及相关的辅助试验的结果。对照该研究得出的全应力 - 应变过程煤岩瓦斯渗流速度 - 轴向应力曲线和本研究的轴向应力 - 围压曲线(力控制方式卸围压时轴向应力保持不变), 通过查找不同围压下前者中对应轴向应力的渗流速度点, 并将其描在渗流速度 - 围压坐标系中, 可得出在相应的初始应力状态下, 卸除围压的过程中的渗流速度 - 围压曲线。在绘制该曲线时, 所参照的渗流速度 - 轴向应力曲线应选取所加瓦斯压力最小的情况; 轴向应力 - 围压曲线应选取初始围压最大的情况, 以尽量减小通入瓦斯对试件力学性质的影响。按照上述原则所选取的参照曲线, 前者施加的瓦斯压力(0.4 MPa)比后者的初始围压(6 MPa)小得多, 这时, 可基本忽略瓦斯压力对试件力学性质的影响。试验结果见图 6, 7。



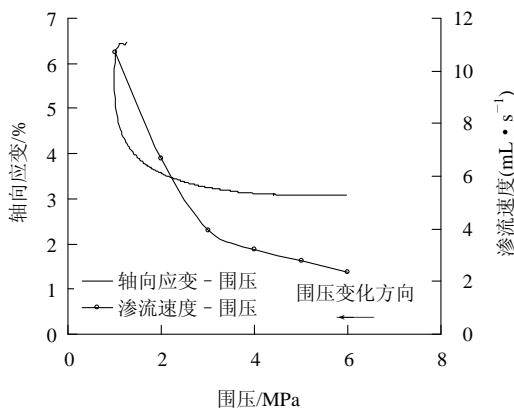
(a) 6 MPa 位移控制弹性阶段卸围压



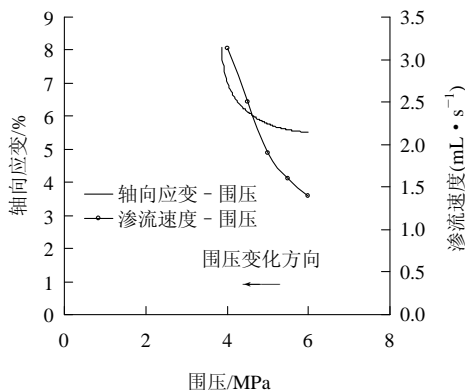
(b) 6 MPa 力控制弹性阶段卸围压

(b) 6 MPa 位移控制屈服阶段卸围压
图 6 位移控制方式卸围压时煤试件轴向应力 - 围压曲线、渗流速度 - 围压曲线

Fig.6 Axial stress-confining pressure and seepage velocity-confining pressure curves of coal specimens when unloading confining pressure by means of displacement control



(a) 6 MPa 力控制弹性阶段卸围压



(b) 6 MPa 力控制屈服阶段卸围压

图 7 力控制方式卸围压时煤试件轴向应变 - 围压、渗流速度 - 围压曲线

Fig.7 Axial strain-confining pressure and seepage velocity-confining pressure curves of coal specimens when unloading confining pressure by means of load control

从图 6, 7 可以看出卸围压过程中渗流速度随围压的变化规律。卸围压渗流速度 - 围压曲线所反映的瓦斯流动与全应力 - 应变过程中试件破坏前的瓦斯流动规律基本一致。随着围压的卸除, 试件瓦斯渗流速度增大, 且增大率越来越大。

值得注意的是, 如图 7 所示, 对于力控制方式卸围压的情况, 在弹性阶段卸围压时瓦斯渗流速度 - 围压曲线有一明显的瓦斯渗流速度增大率增大突变

点,而在屈服阶段卸围压时该突变点却不明显。其原因可能是在力控制方式的持续压力作用下,弹性阶段卸围压一定程度后试件发生屈服,使瓦斯渗流速度增大率突然增大;而屈服阶段卸围压时,试件本身已处于屈服状态,瓦斯渗流速度增大率本来就很大,所以不会发生突变的情况。

渗流速度-围压曲线可应用于采掘卸围压现场煤岩瓦斯涌出的预测预报,该曲线的推导也为下一步应用本文所述的方式进行含瓦斯煤岩的位移控制和力控制卸围压试验打下了基础。

6 卸围压过程中含瓦斯煤岩破坏前的损伤现象分析

位移控制卸围压试验中试件的破坏是依靠煤岩试件自身储存的能量的释放而实现的。在此,以能量损伤模型推导位移控制卸围压时煤岩的损伤模型。

在常规三轴试验中,煤岩的损伤过程是伴随煤岩的变形特别是体积应变和扩容现象而发生发展的^[17]。煤岩体内部微观的损伤可通过其外部宏观尺寸的变化来体现。在密实阶段强化作用占优势,表现出煤岩试件裂隙闭合;在弹性变形阶段,强化作用和弱化作用相互抵偿,表现出煤岩试件的应力-应变为线弹性关系;在屈服阶段,弱化作用开始占优势,表现出内部宏观裂纹的产生并发展到一定的程度,试件开始扩容,试件内部出现损伤;在破坏阶段,弱化作用占支配地位,表现为试件内部出现贯穿试件的宏观裂纹带,试件发生破坏。在卸围压的过程中,煤岩的损伤也伴随煤岩的变形而发生发展。本文为了探讨试件在破坏前的损伤而进行了位移控制方式的卸围压试验。在位移控制方式下,在弹性变形阶段卸围压时,在卸围压前,试件已处于弹性变形阶段,强化作用与弱化作用保持均势;卸除围压后,对拆卸后的试件进行测量观察可知试件发生侧向膨胀,结合卸围压前的轴向压缩,通过计算其体积应变,发现其发生扩容,这就相当于常规三轴试验中屈服阶段出现的扩容现象,弱化作用将强于强化作用,试件内部会出现损伤。在屈服阶段卸围压时,在卸围压前,试件已处于屈服状态,弱化作用已开始强于强化作用,试件开始扩容,卸除围压后,通过对拆卸后的试件进行测量观察可知试

件发生侧向膨胀,其扩容现象更加明显,相当于常规三轴试验中破坏前的扩容增大的现象,弱化作用更加强于强化作用,试件内部会出现更大的损伤,其变形情况如图1所示。

能量损伤模型研究结果^[18]表明,在考虑煤岩的损伤的情况下,定义煤岩的损伤为 D ,煤岩的本构关系为

$$\sigma_{zx} = E_0 \phi \varepsilon_{zx} \quad (3)$$

式中: E_0 为无损伤状态煤岩的弹性模量; ϕ 为连续性因子, $\phi = 1 - D$ 。

将式(1)代入式(3),有

$$\frac{ab\sigma_w}{a\sigma_w + c} = E_0 \phi \varepsilon_{zx} \quad (4)$$

由式(4)有

$$\phi = \frac{ab\sigma_w}{E_0 \varepsilon_{zx} (a\sigma_w + c)} \quad (5)$$

通常情况下,在现场测量煤体的应力和外部宏观变形比煤体的内部损伤要容易,由式(5)可得出煤体损伤随围压的变化规律。在现场,可通过式(5)由煤岩体的外部宏观力学参数得出其微观损伤。

考虑通瓦斯的情况,如图6所示,在位移控制卸围压过程中,型煤试件的瓦斯渗流速度是由其所受的应力状态决定的,即某一瓦斯渗流速度对应的轴向应力和围压是一定的。在煤矿开采的现场,工作面和井巷的瓦斯涌出量可以反映煤层中的瓦斯渗流速度;同时,获取工作面和井巷围岩的应变相对获取其应力容易。因此,可先实际测得瓦斯涌出量,从而得出煤层瓦斯渗流速度,将瓦斯渗流速度与图6结合,得到煤层的应力状态;再实际测得煤层的应变,结合式(5)可计算煤岩体的损伤。该损伤说明:在卸围压过程中,可通过瓦斯渗流速度的变化反映煤岩弹性应变能释放对其内部微孔隙和微裂纹的影响。

7 卸围压过程中瓦斯渗透对煤岩强度的影响分析

用力控制方式卸围压,将导致型煤试件的破坏,其破坏情况如图3所示。

Mohr-Coulomb 强度理论^[19]中指出,材料在复杂应力状态下发生的破坏是由于材料在外载荷作用

下沿某一斜面上的剪应力达到某一极限值造成的。同时, 破坏也与剪切面上的正应力有关。斜截面上的抗剪强度应该是该面上正应力的函数。即: $S_s = f(\sigma)$ 只有当 $\tau \geq S_s$ 时, 材料才会沿此斜截面破坏。

作为应力场边界条件, 试件上施加有轴向压力和围压, 在等围压三向应力状态下, 用最大主应力和最小主应力来表达 Mohr-Coulomb 强度理论的方程为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

式中: σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

式(6)揭示了岩体处于极限平衡状态时 σ_1 , σ_3 的关系, 当 σ_1 , σ_3 满足式(6)时, σ_1 , σ_3 所确定的应力圆与莫尔包络线相切。此关系也可运用于型煤试件的卸围压过程。

力控制方式卸围压的试验中, 在围压被卸除的过程中, 试件的破坏既依靠自身储存的能量的释放, 又依靠轴向压力的持续加载。以下分 2 种情况讨论:

(1) 对于依靠自身的储能释放, 相当于位移控制下卸围压。此时式(6)变为

$$\sigma_{zx} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_w + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

当卸围压前加载至弹性阶段和屈服阶段时, 应力圆与莫尔包络线还未相切。由轴向应力 - 围压曲线可知随着围压的卸除, σ_{zx} , σ_w 同时减小, 圆心向原点移动, 应力圆向包络线靠近。对于弹性阶段卸围压, 其围压减小的速度要大于轴向应力减小的速度, 其应力圆半径是减小的, 对于屈服阶段卸围压, 前一阶段其围压减小的速度要大于轴向应力减小的速度, 其应力圆半径是减小的, 减小程度不及弹性阶段卸围压, 后一阶段其围压减小的速度要小于轴向应力减小的速度, 其应力圆半径是增大的。

将式(1)代入式(7), 有

$$\frac{ab\sigma_w}{a\sigma_w + c} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_w + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (8)$$

由式(8)可得, 在卸围压储能释放过程中极限应力圆随围压的卸除而发生的变化。

(2) 对于轴向力的持续加载, 当卸围压前加载至弹性阶段和屈服阶段时, 应力圆与莫尔包络线还未相切。在围压 σ_3 的卸除过程中, 轴向力 σ_1 保持不变, 圆心向原点移动, 应力圆向包络线靠近, 其半

径同时增大。

当围压以速度 s 减小时, 应力圆圆心以 $q = 0.5s$ 的速度沿 σ 坐标轴向左移动, 应力圆的半径以 $k = 0.5s$ 的速度增加, 应力圆圆心与包络线的距离以 $u = s \sin \varphi$ 的速度减小, 最终应力圆与包络线相切, 导致试件破坏。力控制方式卸围压时煤样破坏应力圆如图 8 所示。

考虑瓦斯渗透的情况, 瓦斯通过型煤试件后, 由于瓦斯压力对煤骨架的力学作用和煤吸附瓦斯的效应, 煤岩的强度会发生变化, 强度变化的实质是煤岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 发生了改变。设试件通入瓦斯后的黏聚力为 c_d , 内摩擦角为 φ_d , 式(6)变为

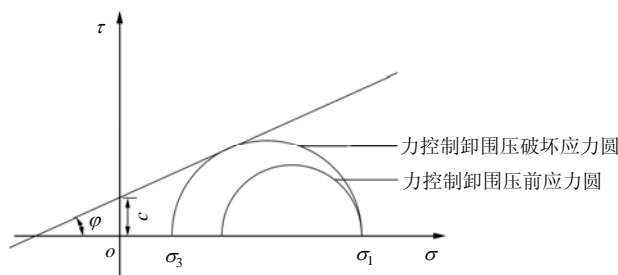


图 8 力控制方式卸围压时煤样破坏应力圆

Fig.8 Failure stress circle of coal specimens when unloading confining pressure by means of load control

$$\sigma_{zx} = \frac{1 + \sin \varphi_d}{1 - \sin \varphi_d} \sigma_w + \frac{2c_d \cos \varphi_d}{1 - \sin \varphi_d} \quad (9)$$

当围压减小时, 煤岩的破坏情况也符合前述规律, 应力圆圆心与包络线的距离的减小速度变为 $u = s \sin \varphi_d$, 试件的破坏点也发生相应的变化。

图 7 描述了力控制卸围压过程中瓦斯渗流速度 - 围压关系, 结合式(9), 并结合图 7 所示瓦斯渗流速度增大率突变点, 可以用煤岩瓦斯渗透特性来判定煤岩的破坏, 即用峰值瓦斯渗流速度来反映煤岩的强度。为现场预测煤岩的破坏提供了一种新的方法。

8 结 论

本文采用 MTS815 力学试验机, 研究了型煤试件在卸围压过程中的力学特性, 并推导了该过程中试件瓦斯渗透特性的变化规律, 可以总结出以下结论:

(1) 位移控制方式卸围压将导致型煤试件的扩容损伤, 随着围压的降低, 轴向应力减小, 屈服阶段卸围压时其轴向应力随围压变化曲线的非线性比

弹性阶段时明显,随着初始围压的升高,屈服阶段曲线的非线性更加明显。由此可得出位移控制卸围压时轴向应力-围压方程。

(2) 力控制方式卸围压将导致型煤试件的破坏,随着围压的降低,轴向应变增大,屈服阶段卸围压时其轴向应变随围压变化的速率的增加比弹性阶段时明显,随着初始围压的升高,屈服阶段卸围压时轴向应变的加速趋势更加明显。由此可得出位移控制卸围压时轴向应变-围压方程。该方式下卸围压时的轴向应变-时间曲线可作为现场预测卸围压时煤岩破坏的参考指标。

(3) 位移控制方式卸围压时,试件的损伤依靠试件内部储存的应变能的释放;力控制卸围压时,试件的破坏即依靠试件内部储存的应变能的释放,又依靠试验机对试件做功。前述屈服阶段与弹性阶段卸围压的区别可用上述能量原理进行分析。

(4) 根据本试验结果,结合全应力-应变过程煤岩瓦斯渗透特性的试验结果,推导出卸围压过程瓦斯渗流速度-围压曲线,该曲线为现场煤岩瓦斯涌出的预测预报提供了一种新的方法。

(5) 根据本试验结果,应用损伤理论可以推导出卸围压过程中试件的损伤计算公式,该公式与相应的卸围压瓦斯渗透特性曲线相结合,可实现通过瓦斯涌出量预计煤岩的损伤。

(6) 根据本试验结果,应用 Mohr-Coulomb 强度理论可以推导出卸围压过程中试件的强度计算公式,该公式与相应的卸围压瓦斯渗透特性曲线相结合,可实现通过瓦斯涌出量预测煤岩的破坏。

参考文献(References):

- [1] 徐松林, 吴文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 763 - 767.(XU Songlin, WU Wen, WANG Guangyin, et al. Study of complete procedures of marble under triaxial compression I: testing study of complete procedure of triaxial compression and the processes of unloading confining pressure at the pre-peak and post-peak[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 763 - 767.(in Chinese))
- [2] 李小琴, 李文平, 李洪亮, 等. 砂岩峰后卸除围压过程的渗透性试验研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 481 - 484.(LI Xiaoqin, LI Wenping, LI Hongliang, et al. Experimental study of permeability of sandstone during post-peak unloading of the confining pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 481 - 484.(in Chinese))
- [3] 张黎明, 王在泉, 王建新, 等. 岩石卸荷破坏的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(3): 34 - 37.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan, WANG Jianxin, et al. Experimental study of the rock behavior under unloading condition[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2006, 38(3), 34 - 37.(in Chinese))
- [4] 王在泉, 华安增, 王谦源. 加、卸荷条件下岩石变形及三轴强度研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(12): 10 - 12.(WANG Zaiquan, HUA Anzeng, WANG Qianyuan. Rock deformation and triaxial strength under loading and unloading conditions[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(12): 10 - 12.(in Chinese))
- [5] 尤明庆, 华安增. 应力路径对岩样强度和变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 101 - 104.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Effect of stress path on strength and deformation of specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 101 - 104.(in Chinese))
- [6] 尤明庆, 华安增. 卸围压法测量岩石材料的泊松比[J]. 实验力学, 1997, 12(2): 274 - 278.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Determination of Poisson's ration for rock material by experiment of confining pressure reduction[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(2): 274 - 278.(in Chinese))
- [7] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24 - 29.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Triaxial unloading confining pressure test of rock sample[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 24 - 29.(in Chinese))
- [8] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456 - 460.(GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study of mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456 - 460.(in Chinese))
- [9] 苏承东, 翟新献, 李永明, 等. 煤样三轴压缩下变形和强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2963 - 2968.(SU Chengdong, ZHAI Xinxian, LI Yongming, et al. Study of deformation and strength of coal samples in triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup.1): 2963 - 2968.(in Chinese))
- [10] 李永明, 郝临山, 魏胜利, 等. 煤岩加卸载不同应力途径变形破坏力学参数的研究[J]. 煤炭技术, 2006, 25(12): 129 - 131.(LI Yongming, HAO Linshan, WEI Shengli, et al. Research on coal deformation and failure mechanical parameters in different stress paths of loading and unloading test[J]. Coal Technology, 2006, 25(12): 129 - 131.(in Chinese))
- [11] 陈卫忠, 刘豆豆, 杨建平, 等. 大理岩卸围压幂函数型 Mohr 强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2214 - 2220.(CHEN Weizhong, LIU Doudou, YANG Jianping, et al. Power function based Mohr strength criterion for marble with unloading confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2214 - 2220.(in Chinese))
- [12] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530 - 1540.(CHEN Weizhong, LU Senpeng, GUO Xiaohong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1530 - 1540.(in Chinese))
- [13] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2205 - 2213.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2205 - 2213.(in Chinese))
- [14] WONG T F, SZETO H, ZHANG J X. Effect of loading path and porosity on the failure mode of porous rock[J]. Applied Mechanics Reviews, 1992, 45(8): 281 - 289.

- [15] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [16] 尹光志, 黄启翔, 张东明, 等. 地应力场中含瓦斯煤岩变形破坏过程中瓦斯渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 336 - 343.(YIN Guangzhi, HUANG Qixiang, ZHANG Dongming, et al. Test study of gas seepage characteristics of coal specimen contain gas in process of deformation and failure in geostress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 336 - 343.(in Chinese))
- [17] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.(ZHAO Yangsheng. Rock fluid mechanics in mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [18] 谭云亮, 刘传孝, 赵同彬. 岩石非线性动力学初论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.(TAN Yunliang, LIU Chuanxiao, ZHAO Tongbin. Elementary theory for rock nonlinear dynamics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008.(in Chinese))
- [19] 李通林, 谭学术, 刘传伟. 矿山岩石力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.(LI Tonglin, TAN Xueshu, LIU Chuanwei. Rock mechanics in mine[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.(in Chinese))