



## 易弹射煤体力学特性及能量演化机制

许文涛 成云海

引用本文:

许文涛, 成云海. 易弹射煤体力学特性及能量演化机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 51–66.

XU Wentao, CHENG Yunhai. Mechanical properties and energy evolution mechanism of coal prone to ejection[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 51–66.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023–0834>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 基于能量原理不同含水率下煤岩体变形破坏能量损伤演化机制

Mechanical properties and damage constitutive model of coal with different water content based on energy principle

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 67–80 <https://doi.org/10.12438/cst.2023–1871>

##### 加卸荷应力路径下巷帮煤体力学特性与损伤破坏研究

Study on mechanical characteristics and damage failure of coal mass from roadway side wall under loading and unloading stress path

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/65218e6a-074a-49c2-9524-9582a022901e>

##### 单向卸载条件下组合煤岩力学特性及声发射演化规律

Mechanical properties and acoustic emission evolution of coal-rock combination under unidirectional unloading condition

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 71–83 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–2040>

##### 预制孔洞煤样冲击力学特性及能量耗散试验研究

Experimental study on impact mechanical properties and energy dissipation of predrilled hole coal samples under impact load

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 92–103 <https://doi.org/10.12438/cst.2023–1789>

##### 不同冲击倾向性煤单轴压缩下能量演化与损伤特征

Energy evolution and damage characteristics of coal with different bursting liability under uniaxial compression

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 111–118 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b1356989-ce5b-451c-a90b-d8c5f9180a2b>

##### 不同加卸载路径下岩石卸荷劣化特征及机制研究

Unloading deterioration and mechanism of rock under different loading and unloading stress paths

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 117–127 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.QN21–008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

许文涛, 成云海. 易弹射煤体力学特性及能量演化机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 51–66.

XU Wentao, CHENG Yunhai. Mechanical properties and energy evolution mechanism of coal prone to ejection[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 51–66.

## 易弹射煤体力学特性及能量演化机制

许文涛, 成云海

(安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**通过开展不同主应力条件下真三轴加卸载试验, 研究不同加卸载路径下易弹射煤体的力学特性、破坏特征及能量演化规律, 揭示开挖卸荷易弹射巷道围岩弹射机制。研究表明: 易弹射煤样在高应力单面卸荷比加载破坏更剧烈, 当轴压为峰值的 90% 时卸荷, 易弹射煤样表面出现一条大剪切裂缝, 轴向应变率高, 其自身破坏程度大, 弹射现象明显; 当轴压为峰值的 80%, 70% 时卸荷, 煤样未发生整体宏观破坏, 轴向应变率低, 自身的破坏程度小, 仅在临空面产生张拉裂纹, 弹射现象不明显; 随着第二主应力的增大, 在一定范围内对易弹射煤样有补强的作用, 易弹射煤样内部复合型裂纹先增加后减小, 破坏形态由剪切破坏转变为张拉–剪切复合破坏, 最后发展为劈裂破坏, 弹射剧烈程度呈现出先增加后减小的现象; 高应力卸荷破坏过程中, 弹性能转化为耗散能瞬间释放, 耗散能占比急剧增大, 抛离母体的碎块携带能量弹射出去, 临空面出现明显的交叉网格裂缝, 弹射现象明显; 高应力易弹射煤样卸荷后张拉–剪切裂纹迅速扩展贯通, 发生张拉–剪切复合破坏, 弹射现象显著; 卸荷后, 易弹射煤样出现张拉–剪切裂纹, RA 急剧值增高, AF 值持续降低, AE 呈现高能、高计、高幅、高频特征。研究结果可为类似地下工程开挖卸荷岩微冲击现象控制提供借鉴。

**关键词:** 煤体弹射; 主应力; 卸荷; 能量; 冲击地压

中图分类号: TD313

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)06-0051-16

## Mechanical properties and energy evolution mechanism of coal prone to ejection

XU Wentao, CHENG Yunhai

(School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In this paper, true triaxial loading and unloading tests under different principal stress conditions were conducted to study the mechanical properties, failure characteristics, and energy evolution laws of coal bodies that are prone to ejection under different loading and unloading paths, aiming to reveal the ejection mechanism of the surrounding rock of roadway that is prone to ejection after excavation and unloading. The results are as follows. Firstly, the damage of coal samples that are prone to ejection was more severe under high stress single-sided unloading than under loading; when the axial pressure is 90% of the peak value, a large shear crack appeared on the surface of the coal samples, the axial strain rate is high, its own damage degree is large, and the ejection phenomenon was obvious; when the axial pressure was 80% and 70% of the peak value, respectively, the coal samples did not undergo overall macroscopic damage, the axial strain rate is low, and the degree of damage is small, only generated tensile cracks on the free face, and the ejection phenomenon was not obvious. Secondly, the increase of the second principal stress had a reinforcing effect on coal samples that are prone to ejection within a certain range, the internal composite cracks of coal samples that are prone to ejection first increase and then decreased, and the failure mode changed from shear failure to tension-shear composite failure, and finally developed into splitting failure; the intensity of ejection first increased and then decreased. Thirdly, in the process of high stress unloading failure, elastic energy was converted into dissipated energy and released instantly, and the proportion of elastic energy increased sharply, causing the fragments being ejected from the mother body with energy; there were obvious cross mesh cracks in the free face, and the ejection phenomenon was obvious. Fourthly, for coal samples that are prone to ejection under high stress after unloading, the tension-shear cracks rapidly expanded and connected, resulting in tension-shear

收稿日期: 2023-06-30

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.12438/cst.2023-0834

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52004006)

作者简介: 许文涛(1996—), 男, 河南焦作人, 博士研究生。E-mail: 1666098283@qq.com

composite failure, and the ejection phenomenon was obvious; Fifth, tension-shear cracks appear in ejectable coal samples of after unloading, RA increased sharply and AF decreased continuously, AE showing the characteristics of high energy, high meter, high amplitude and high frequency. The study results can provide reference for the on trol of micro impact phenomena in unloading surrounding rock during excavation of similar underground engineering.

**Key words:** coal ejection; principal stresses; unloading; energy; rock burst

## 0 引 言

深部高应力巷道开挖致使围岩发生卸荷,其内部裂纹迅速扩展,产生能量耗散及弹性能释放<sup>[1-2]</sup>,高速率释放的能量使破碎煤岩体高速位移形成弹射<sup>[3-5]</sup>。经调研,鄂尔多斯矿区的伊旗煤矿、上海庙煤矿、乌审旗煤矿开采冲击倾向煤层时弹射现象频发,造成了巨大经济损失,人身安全受到严重的威胁。弹射在冲击地压分类中属于微冲击现象,具有突发性、随机性和剧烈性,发生机理极其复杂<sup>[6-8]</sup>,国内外众多学者从不同角度对弹射进行研究。宫凤强、朱建波<sup>[9-10]</sup>深入分析了煤矿矿震、岩爆与冲击地压的区别及联系;宫凤强等<sup>[11]</sup>归纳总结了煤的冲击倾向性指数,提出了煤的冲击倾向性直接指数和间接指数的概念和定义,并提出了冲击地压“人-煤-环”三要素机理;顾金才等<sup>[12]</sup>研制了新的抛掷型岩爆装置,阐明了抛掷型岩爆发生机理;何满潮等<sup>[13]</sup>进行了不同层理倾角砂岩单向双面卸荷岩爆弹射速度试验研究,指出了岩爆碎屑弹射现象的4个阶段:颗粒弹射或碎屑剥离、岩块折断、碎屑弹射和弹射后期。苏国韶等<sup>[14]</sup>进行了岩爆弹射破坏过程的试验研究,发现了岩爆弹射动能占岩样峰前集聚的可释放弹性应变能的比例小于1%;左宇军等<sup>[15]</sup>结合损伤力学理论与能量平衡原理,分析了单轴动-静组合荷载作用下岩石发生破坏时的能量转换过程,对单轴动静组合加载诱发岩爆的岩块弹射进行了研究。宫伟力等<sup>[16]</sup>通过开展真三轴卸载岩爆模拟试验,应用动态莫尔圆,建立了岩爆过程中岩块弹射的理论模型。近些年得益于高速摄像机的快速发展,一些学者开始利用高速摄像机对室内岩爆试验的岩爆碎屑弹射速进行研究。苏国韶等<sup>[17]</sup>利用数字影像运动分析软件 Image ProPlus 对高速摄像视频进行分析得到岩爆碎屑弹射速度,并计算了岩爆弹射动能。何满潮等<sup>[18]</sup>利用2台高速相机同步拍摄到碎屑弹射过程的数字图像,利用双目立体视觉技术对图像数据进行分析处理,得到碎屑的三维坐标和体积2个关键参数,进而求得碎屑的弹射速度。AKDAG等<sup>[19]</sup>通过开展不同高温处理后的花岗岩真三轴单面快速卸荷岩爆试验,利用高速摄像机得到碎屑弹射持续时间和弹射距离

计算了岩爆弹射速度,并对热损伤下的岩爆弹射速度进行了研究;赵恩来等<sup>[20]</sup>认为工作面老顶在破断过程中积聚的能量突然释放,导致煤发生弹射等现象;冯龙飞等<sup>[21]</sup>认为冲击倾向性煤样峰后冲击破坏剧烈,微破裂相互交汇造成整体冲击破坏。以上学者大多以硬岩为研究对象,分析了岩爆过程中弹射现象,针对煤的弹射(微冲击现象)研究较少。

华安增<sup>[22]</sup>对地下工程周围岩体的能量进行分析研究,指出释放的能量大且不能向深部转移,将造成冲击。谢和平等<sup>[23]</sup>基于能量耗散与释放原理研究了岩石的强度损失准则,并给出整体破坏准则,得到了能量释放是岩石突然破坏的内在原因。孙振武等<sup>[24]</sup>探讨了处于弹塑性变形状态下井巷和采场围岩体弹性比能的计算方法,揭示了冲击地压发生的机制。潘俊峰等<sup>[25]</sup>建立冲击地压启动能量判据,将冲击分为集中静荷载冲击和集中动荷载冲击,并认为两种典型的冲击地压启动与启动区所承受载荷直接相关。郭超<sup>[26]</sup>基于能量理论,对煤岩能量特征与冲击地压强度关系进行研究。徐捷<sup>[27]</sup>对砂岩卸荷过程中能量存储、消耗以及释放过程的影响规律进行研究,得到的结论可为探讨岩爆发生的能量判据提供依据。但是多数是以弱冲击或者强冲击现象为基础进行分析,对弹射(微冲击现象)发生的能量演化还需进一步研究。

徐鼎平等<sup>[28]</sup>研究了不同第2主应力的岩爆现象,得到了第2主应力是影响岩爆类型的关键因素之一。郭延华等<sup>[29]</sup>基于统一强度理论和塑性应变损伤模型,分析了高地应力下圆形巷道中间主应力和剪胀特性对临界冲击地压的影响。李文帅等<sup>[30]</sup>研究了不同中间主应力砂岩强度、变形特征和破裂等特征。向天兵等<sup>[31]</sup>进行了灰岩真三轴和声发射试验研究,得到了第二主应力呈区间变化,以劈裂破坏为主,支护力改善岩石力学性质,以张剪破坏为主。刘刚等<sup>[32]</sup>探讨了小尺度效应下岩石强度、变形、弹性常数(弹性模量、泊松比)、破坏形态及能量转化的规律,分析了声发射能量、计数和峰频与尺寸之间联系,得到了岩石即将发生破坏的判据。彭琦等<sup>[33]</sup>基于声发射率建立了岩爆突变预测模型,通过现场验证得到了该模型在岩爆预测中的可行性。但是针对不同第二主应



力加卸载对弹射的影响还需进一步研究,弹射发生的预判分析还需进一步提高。

因此,以鄂尔多斯矿区易弹射煤层为研究对象,开展不同卸荷条件下真三轴试验,研究不同卸荷条件下易弹射煤样的力学特性及破坏特征,分析易弹射煤样在弹射破坏过程中应力特征和裂纹扩展规律,揭示煤岩体弹射发生机理;基于能量守恒原理,研究易弹射煤样在不同卸荷条件下全过程能量演化规律,探讨能量演化与裂纹扩展和弹射之间的关系,揭示能量演化机制对弹射的影响机制;分析易弹射煤样声发射参数特征与裂纹开裂方式的相关性,为预防、控制高应力巷道开挖卸荷弹射发生具有一定指导意义。

## 1 不同加卸载煤岩体真三轴试验

### 1.1 试验设备

采用真三轴扰动卸荷岩石测试系统和声发射监测系统,进行不同加卸载路径及不同第二主应力力学试验。试验机能够实现  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴独立加、卸载,水平方向( $X$  轴)可以实现单面卸荷,模拟开挖岩体积聚能量向临空面方向释放而产生破坏的现象;垂直方向( $Z$ )加载油缸最大载荷为 5 000 kN,水平方向( $X, Y$ )加载油缸最大载荷为 3 000 kN,如图 1 所示。

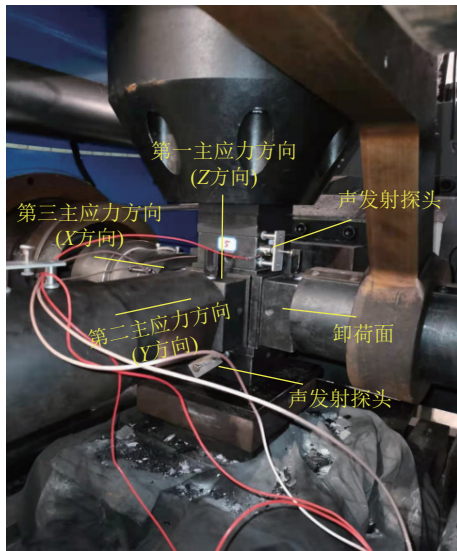


图 1 加卸载方式及声发射探头位置

Fig.1 Loading-unloading mode and acoustic emission probe position

### 1.2 试验方案

本试验主要模拟不同加卸载条件下煤岩体弹射现象,试样选自鄂尔多斯易弹射煤层,煤样尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,保证端面的平整度和垂

直度。

1)方案 1:单面卸载试验。为了模拟巷道掘进过程巷道附近围岩单面卸载应力集中的现象。首先加载初始地应力,试样编号 TSX-1,采用载荷控制加载,加卸载速率为 30 kN/min,加至初始应力,随后对最小主应力( $X$ )方向进行单面卸荷,最后加载最大主应力( $Z$ )方向至破坏,获得单面卸荷试样的峰值强度  $\sigma_F$ 。

2)方案 2:高应力卸载试验。为了模拟巷道掘进工作面高应力卸载过程。首先将第一、二、三主应力同时加载至预设值(第一主应力分别为峰值强度的 70%, 80%, 90%, 100%(表 1),第二主应力为 10 MPa,第三主应力为 5 MPa),试样编号 TXS-2, TXS-3, TXS-4, TXS-5;随后,保持  $Y$  和  $Z$  方向应力不变,进行  $X$  方向单面卸荷,应力路径如图 2a 所示。

表 1 初始应力值  
Table 1 Initial stress value MPa

编号	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
TSX-1	20	10	5
TSX-2	100% $\sigma_F$	10	5
TSX-3	90% $\sigma_F$	10	5
TSX-4	80% $\sigma_F$	10	5
TSX-5	70% $\sigma_F$	10	5
TSX-6	20	5	5
TSX-7	20	15	5
TSX-8	20	20	5

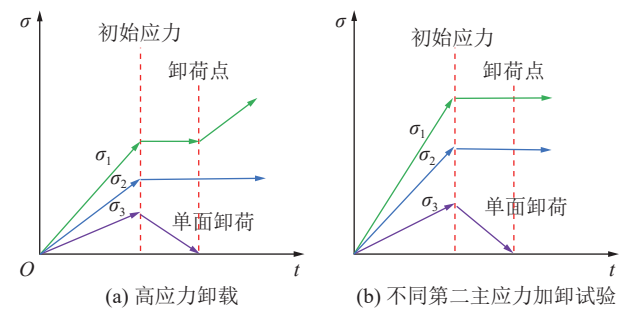


图 2 不同应力加卸载路径

Fig.2 Different stress loading and unloading paths

3)方案 3:不同第 2 主应力加载试验。为了模拟回采巷道超前支承压力影响下围岩应力逐渐升高过程。首先将 3 个方向应力加载至初始应力水平(表 1),试样编号 TXS-1, TXS-6, TXS-7, TXS-8,试验加载速率为 30 kN/min,随后  $Y, Z$  方向保持不变,最小主应力( $X$ )方向进行单面卸荷,最后加载最大主应力( $Z$ )方向至破坏,应力路径如图 2b 所示。

2 不同加卸载煤岩力学响应与破坏机制

不同加卸载条件下煤岩的力学特征呈现出差异性,为了更好地研究不同加卸载方式对煤样弹射的影响,进行高应力卸荷、不同第二主应力加载试验,对易弹射煤样力学特性及破坏特征对比分析。

2.1 高应力卸载力学特性及破坏形态

研究不同高应力卸荷易弹射煤样的力学特性及破坏特征,有助于探明高应力煤岩体弹射破坏的孕育、演化及发生机制,掌握高应力卸荷煤岩体与弹射破坏的力学响应。因此,针对易弹射煤样峰值强度的 100%, 90%, 80%, 70% 进行真三轴卸荷试验。

由图 3 高应力卸载轴向应力-应变曲线可以看出:在初期压密阶段,易弹射煤样原有微裂缝及孔隙闭合,曲线呈下凹型;随着载荷的增加,裂缝未发生明显扩展,应力-应变曲线进入线弹性阶段;达到预设峰值比例进行单面卸荷,易弹射煤样向临空面扩容,轴向应变快速增加,轴向应力越大轴向应变越大。当轴向压力为峰值的 100%, 90% 时,随着单面卸荷值的减小,易弹射煤样内部破裂面逐渐扩展贯通,从而发生宏观破坏,且出现明显的屈服平台,说明破坏前易弹射煤样临空面出现很多的微小裂纹,在表面形成大量小体积块体,由于这些块体的质量较小,在脱离母体时仅需很小的弹性能就会发生弹射现象。由此可以看出:轴向应力越大,屈服平缓段越长,微小裂纹形成的小块体越多,弹射现象越明显。

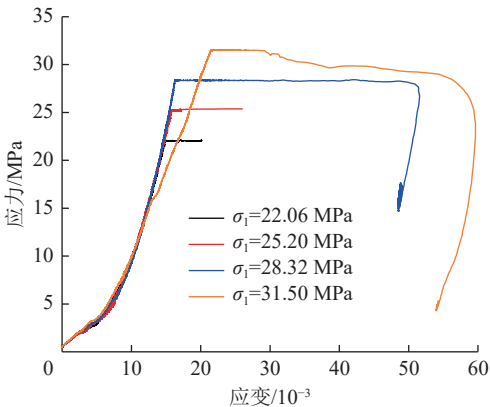


图 3 高应力卸载轴向应力-应变曲线  
Fig.3 High stress unloading stress-strain curve

煤岩体在单面卸荷过程中首先发生张拉破坏引起竖向裂纹,随着卸荷程度的增加,煤岩体出现斜向剪切裂纹,当斜向剪切裂纹与竖向张拉裂纹交汇贯通时,形成脱离母体的小块体,从而发生弹射现象。

由图 4 和表 2 可以看出,当轴压为峰值的 100% 时,轴向应变率为 0.052,易弹射煤样破碎程度较高,裂纹数量较多;当轴压为峰值的 90% 时,轴向应变率为 0.045,易弹射煤样表面出现一条大剪切裂缝,裂纹数量相对较少;当轴轴压为峰值的 80%, 70% 时,轴向应变率分别为 0.026, 0.020, 煤样未发生整体宏观破坏,仅在临空面产生张拉裂纹。由此可以看出:在单面卸荷过程中,易弹射煤样临空面微小裂纹迅速扩展贯通,产生较多小块体,随着轴向应力的增加,轴向应变增大,裂纹扩展速度越大,破碎更加充分,弹射现象越明显。

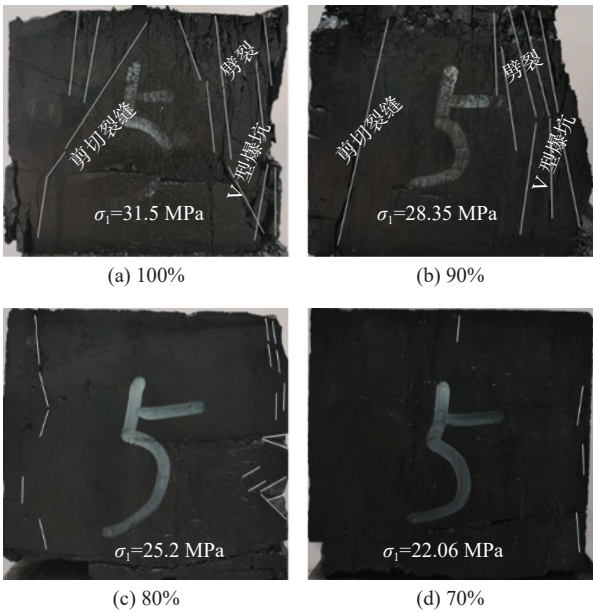


图 4 高应力卸荷宏观破坏  
Fig.4 Macroscopic failure diagram of high stress unloading

表 2 高应力卸载力学参数  
Table 2 High stress unloading mechanical parameters

试样编号	$\sigma_{\max}$ /MPa	弹性模量/GPa	应变率/s <sup>-1</sup>
TSX-2	31.5	1.30	0.052
TSX-3	28.35	2.32	0.045
TSX-4	25.2	2.56	0.026
TSX-5	22.06	2.56	0.020

2.2 不同第二主应力加载力学特性及破坏形态

已有研究表明<sup>[28-29, 34]</sup>,开挖卸荷后,切向应力明显增加,呈现出应力集中现象,随着埋深的增加,第二主应力逐渐增大,应力集中现象更加突出。因此有必要研究第二主应力对弹射破坏的影响。通过对易弹射煤样开展不同第二主应力加卸载试验,得到轴向应力-应变曲线如图 5 所示。

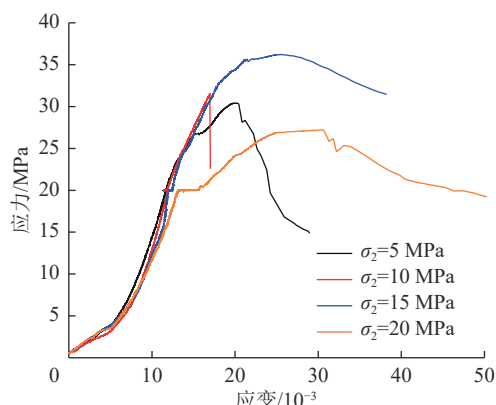


图 5 不同第 2 主应力加载轴向应力-应变曲线  
Fig.5 Stress-strain curves under different second principal stress loading conditions

由图 5 看出,在达到初始应力时,对第三主应力单面卸荷,轴向应变存在瞬时回弹现象,说明易弹射煤样由于三向受压,内部裂纹处于受压闭合状态,在最小主应力单面瞬时卸荷时,内部裂纹扩张,易弹射煤样发生瞬时扩容;当第二主应力增大到 15 MPa 时,易弹射煤样内部初始裂纹产生翼型裂纹,进行最小主应力单面卸荷时,轴向应变持续增大;当第二主应力增大到 20 MPa 时,易弹射煤样内部翼型裂纹扩展,损伤程度增大,进行最小主应力单面卸荷时,轴向应变增大。

由表 3 可知,随着第二主应力的增加,试样强度由 30.4 MPa 增至 38.1 MPa,弹性模量逐渐增加,当第二主应力增加至 20 MPa 时,强度和弹性模量出现下降,由此可以看出:随着第二主应力的增大易弹射煤样内部微裂纹压密闭合程度越大,其峰值强度越高;当第二主应力增大到一定程度后,易弹射煤样内部产生复合型裂纹,随着第二主应力的增加峰值强度降低,与文献 [28, 30] 总结的不同第二主应力试验规律一致。

表 3 不同第二主应力力学参数

Table 3 Mechanical parameters of different second principal stresses

试样编号	$\sigma_2/\text{MPa}$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	破坏程度
TSX-6	5	30.4	1.88	剧烈
TSX-1	10	31.5	2.00	剧烈
TSX-7	15	38.1	2.94	非常剧烈
TSX-8	20	27.1	2.03	非常剧烈

由图 6 可以看出,第二主应力对弹射煤样破坏有较大的影响。当  $\sigma_2$  为 5 MPa 时,弹射煤样有明显的剪切裂缝,主要呈现剪切破坏,临空面出现少量张

拉裂缝;随着第二主应力的增大,弹射煤样内部微裂纹由翼型裂纹转变为复合型裂纹,破坏形态由剪切破坏转变为张拉-剪切复合破坏,临空面张拉裂缝和斜向剪切裂缝逐渐增多,弹射显现剧烈;当  $\sigma_2$  为 20 MPa 时,由于第二主应力的限制,微裂纹面间摩擦力增大,减小了有效剪应力的作用,破坏形态主要呈现出张拉破坏。由此可以看出:随着第二主应力的增大,弹射煤样内部复合型裂纹先增加后减小,破坏形态由剪切破坏转变为张拉-剪切复合破坏,最后发展为劈裂破坏,弹射剧烈程度呈现出先增加后减小的现象。

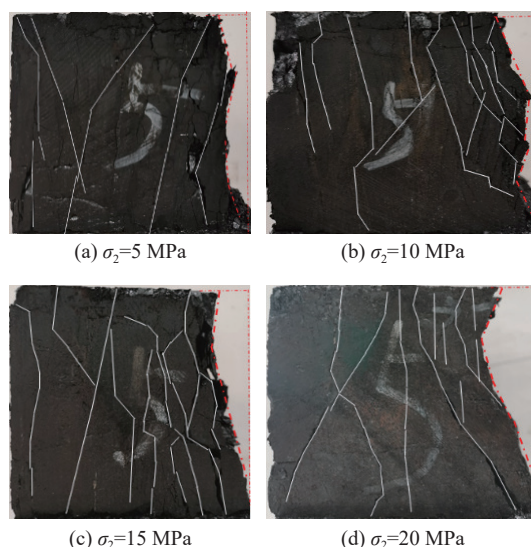


图 6 不同第二主应力宏观破坏图  
Fig.6 Macroscopic failure diagram of different second principal stress

### 3 不同加卸载煤岩能量演化规律

煤岩弹射(微冲击现象)过程是一个能量输入、积聚、耗散、释放和转化的过程。在不同加卸载试验中,试验机对煤样加载做功,煤样受到三轴方向的载荷作用,即由机械能转化为岩石的变形能,其中一部分能量转化为弹性能储存于煤样内,另一部分能量转化煤样内部破裂面的产生而耗散。当用于裂纹扩展的耗散能使临空面斜向剪切裂缝与竖向张拉裂缝交汇贯通,形成脱离母体的小块体,在释放能量驱使下发生弹射。根据试验所得应力-应变曲线,基于能量守恒定律,计算得到煤样在不同试验条件下的能量演化曲线,从能量角度剖析弹射(微冲击现象),对于揭示弹射发生机制具有重要意义。

#### 3.1 不同加卸载煤岩能量转化理论

假设单元体在外力作用下产生变形,与外界未



发生热交换,且处于封闭试验系统,根据热力学第一定律知<sup>[35-36]</sup>:

$$U = U^e + U^d \quad (1)$$

其中,  $U$  为总输入能量;  $U^e$  为单元可释放弹性应变能,  $U^d$  为单元耗散能。

根据图7 应力-应变曲线能量关系,面积  $U^d$  表示单元发生损伤和塑性变形时所消耗的能量,用于形成单元内部损伤和塑性变形,阴影面积  $U^e$  表示单元中储存的可释放应变能,该部分能量为煤岩体单元卸载后释放的弹性应变能。

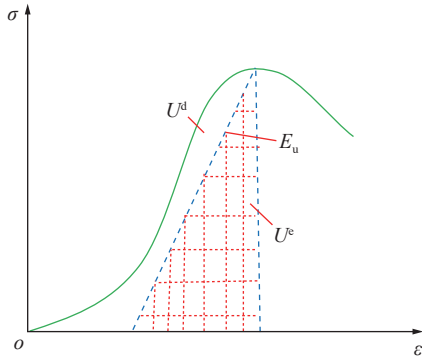


图7 单位体积中的能量耗散和可释放应变能的量值关系  
Fig.7 Quantitative relationship of energy release and energy dissipation

主应力空间中煤岩体单元各部分能量可表示为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (3)$$

$$\varepsilon_i^e = \frac{1}{E_u} [\sigma_i - \nu_u (\sigma_j + \sigma_k)] \quad (4)$$

$$U^e = \left[ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3) \right] / 2E_u \quad (5)$$

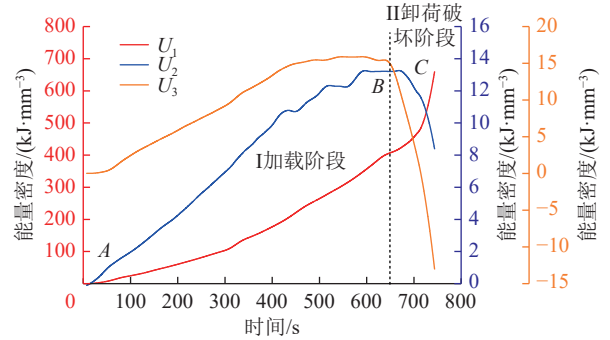
式中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  为第一、三主应力 ( $i, j, k=1, 2, 3$ );  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$  为第一、二、三主应变;  $\varepsilon_i^e$  为三个主应力方向上的弹性总应变;  $\nu$  为泊松比。

### 3.2 高应力卸载煤岩破坏能量演化规律

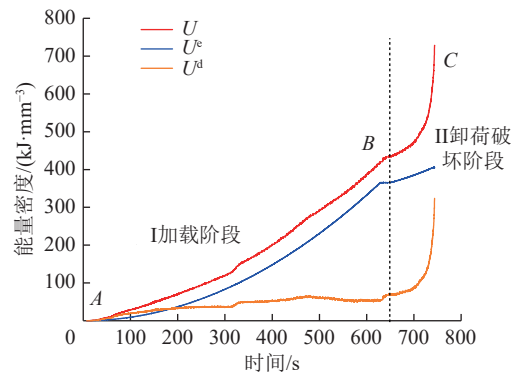
弹射过程中能量不仅表现出空间上的非均匀积聚,也表现在时间上的非稳定转化。根据能量守恒定律,煤岩体加卸载过程伴随着能量的动态转化,在高应力条件下的不同阶段能量演化特征有所不同。因此,研究高应力条件下易弹射煤样积聚能量释放与弹射的相关性具有重要意义。图8—图11 为高应力卸荷条件下易弹射煤样能量演化曲线。

由图8—图11 看出,  $U$ 、 $U^e$ 、 $U^d$  随着轴压的增高呈现非线性增长趋势,总体来讲,高应力卸荷条件

下能量的时间效应均具有明显的阶段性特征,主要分为2个阶段: I 加载阶段 ( $AB$  段),对应压密和线弹



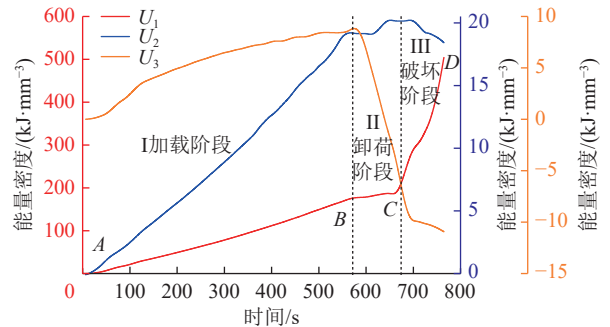
(a) 三向主应力能量演化曲线



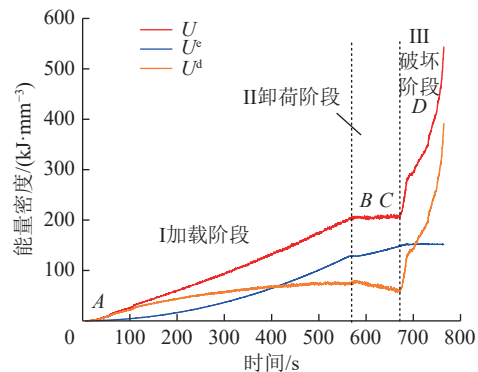
(b) 时间-能量演化曲线

图8 100%单面卸荷能量演化曲线

Fig.8 100% unilateral unloading energy evolution curve



(a) 三向主应力能量演化曲线



(b) 时间-能量演化曲线

图9 90%单面卸荷能量演化曲线

Fig.9 90% unilateral unloading energy evolution curve

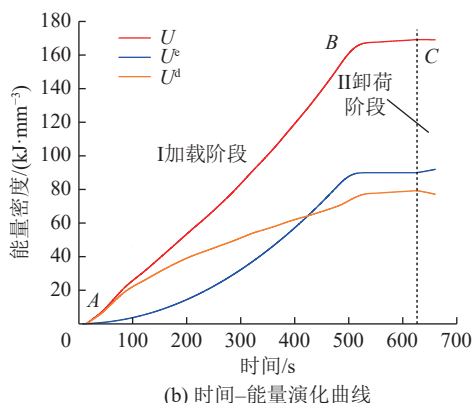
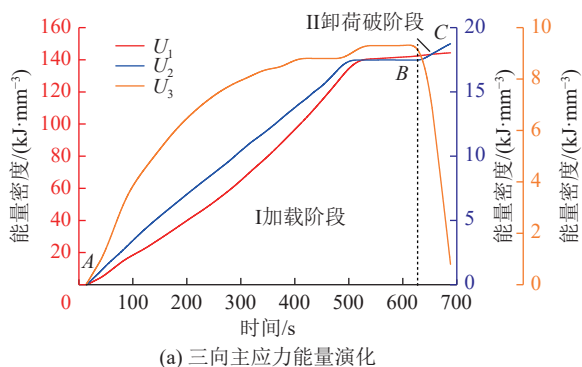


图 10 80% 单面卸荷能量演化曲线

Fig.10 80% unilateral unloading energy evolution curve

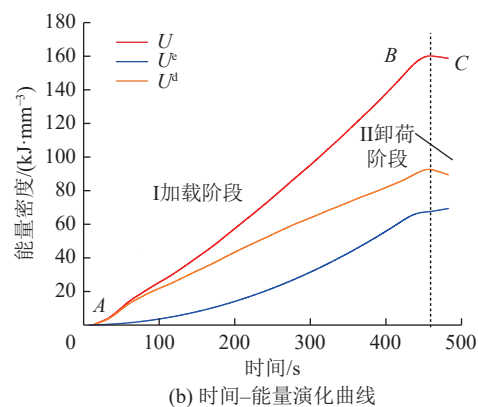
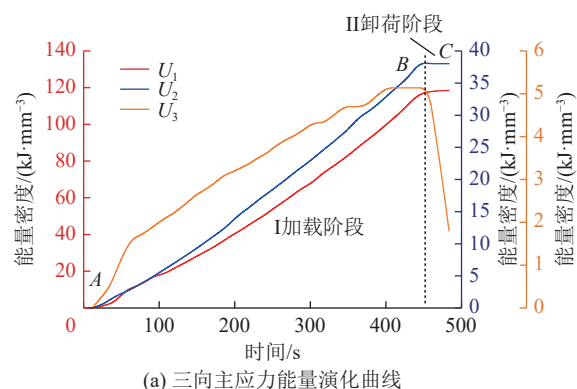


图 11 70% 单面卸荷能量曲线

Fig.11 70% unilateral unloading energy evolution curve

性阶段,在加载前期主要是易弹射煤样内部压密及局部微裂纹扩展,易弹射煤样吸收的能量主要以弹

性能的形式储存,  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 随着应力的增大逐渐增大;Ⅱ卸荷阶段(BC段),伴随着围压减小,易弹射煤样发生扩容,积聚的弹性能达到单元某种表面能时,大量弹性能快速释放;同时耗散能快速增长,裂纹之间汇合、贯通形成破裂面,破裂面之间的摩擦导致积聚的弹性能快速释放,伴随着动能形式加以辅助释放发生弹射。

结合高应力卸载能量曲线和表 4 知,当轴压为峰值应力的 100% 时,易弹射煤样在Ⅰ加载阶段内积聚能  $U^e$  达到 400 kJ/m<sup>3</sup>,不同主应力总能量均呈上升特征;Ⅱ卸载阶段为能量耗散和能量释放,卸荷后  $U_1$ 、 $U$  和  $U^d$  快速增长,  $U_2$ 、 $U_3$  迅速降低,内部裂纹加速扩展产生能量耗散,在能量耗散的同时,弹性能呈增长趋势;随着单面卸荷程度加深,导致内部裂纹迅速扩展贯通,  $U^e$  快速释放,  $U^d$  急剧上升,产生宏观破坏裂缝,发生弹射破坏。当轴压为峰值应力的 90% 时,将易弹射煤样划分为 3 个阶段,在Ⅰ阶段积聚能  $U^e$  为 150 kJ/m<sup>3</sup>,  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  呈增长趋势,以弹性能积聚为主;卸荷后进入Ⅱ卸荷阶段,能量近似水平发展,呈现出稳定特征,在此阶段  $U_1$  和  $U^e$  线性稳定增长,  $U_3$  呈下降趋势,说明卸荷后试样产生裂纹扩展,发生一定的能量耗散,相较于持续增加的  $U^e$ ,耗散的能量较少,呈现平静特征;当完全卸荷后进入Ⅲ破坏阶段,  $U^d$  出现突增现象,随后快速增加,说明卸荷完全后,试样内部发生较大的裂纹扩展,产生较大的能量耗散,随着试样内部裂纹的快速扩展、贯通,  $U^e$  能快速释放,  $U^d$  持续增加,发生弹射。当轴压为峰值应力的 80%、70% 时,在Ⅰ加载阶段  $U^e$  分别为 90 kJ/m<sup>3</sup>、70 kJ/m<sup>3</sup>,在Ⅱ卸荷阶段  $U^d$  略有增加,出现裂纹扩展,  $U_1$  和  $U_2$  呈增大趋势,  $U_3$  呈现下降特征,随着轴压的降低,由于积聚的弹性能未达到试样破坏的临界值,能量耗散少,未发生整体破坏,仅在临空面产生少量裂纹。对比知,在围压一定的条件下,随着轴压的增高,积聚的弹性能越高,卸荷后,耗散的能量越低,随着持续卸荷,内部裂纹扩展、贯通速度更快,释放的能量达到最大,耗散能急剧增加,易弹射煤样发生弹射破坏。

表 4 高应力卸载下煤样能量值

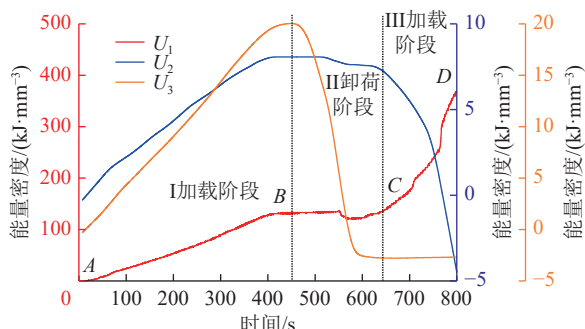
Table 4 Energy value of coal sample under high stress unloading

试样编号	$U^e$	$U^d$	$U$
TSX-2	404.236	323.922	728.752
TSX-3	151.399	391.750	543.149
TSX-4	92.924	72.222	165.146
TSX-5	69.843	88.283	158.126

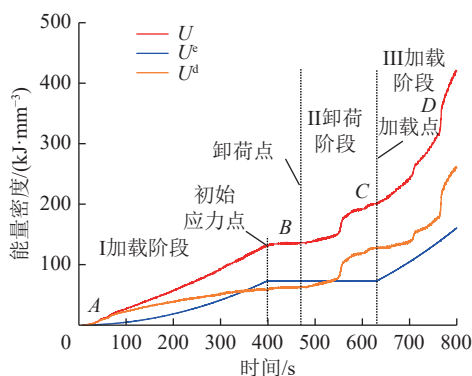


### 3.3 不同第二主应力加载煤岩破坏能量演化规律

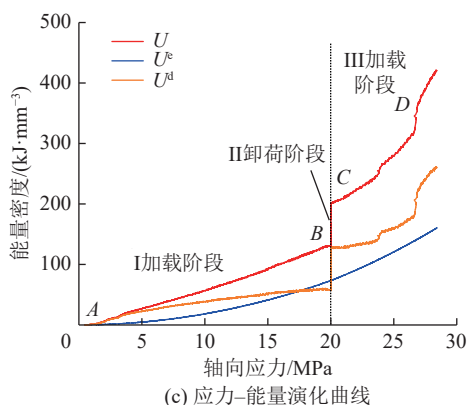
第二主应力对开挖卸荷所引起的弹射破坏有着不可忽视的作用,因此考虑不同第二主应力对能量演化的影响,图12—图15为不同第二主应力能量演化曲线。



(a) 三向主应力能量演化曲线



(b) 时间-能量演化曲线

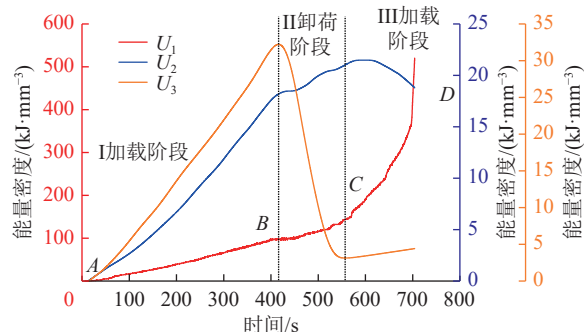


(c) 应力-能量演化曲线

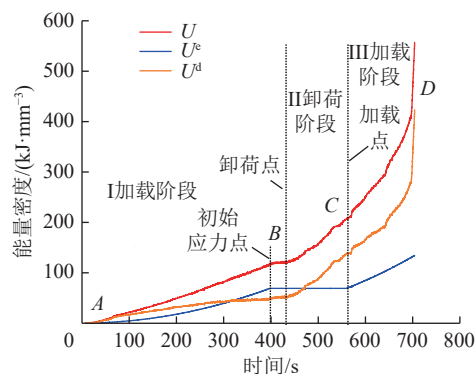
图12 第二主应力为5 MPa 能量曲线

Fig.12 Second principal stress is 5 MPa energy curve

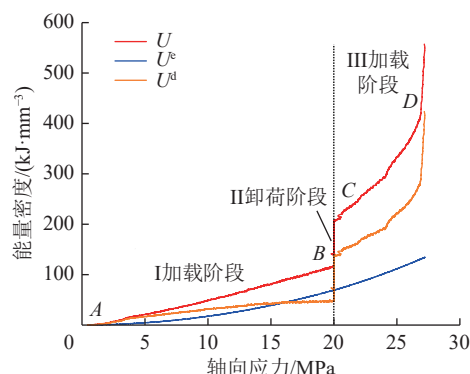
由图12—图15看出,不同第二主应力能量演化曲线有明显的阶段特性,不同阶段易弹射煤样能量耗散特征和能量转化规律各不相同, $U$ 和 $U^e$ 随着第2主应力的增大呈现先增高后降低趋势, $U^d$ 呈相反趋势;易弹射煤样的强度、弹性模量以及极限储能随着第二主应力的增加而增加,将不同第二主应力能量演化曲线分为3个阶段:Ⅰ加载阶段( $AB$ 段),对应压密阶段和线弹性阶段,易弹射煤样吸收的能量主



(a) 三向主应力能量演化曲线



(b) 时间-能量演化曲线



(c) 应力-能量演化曲线

图13 第二主应力为10 MPa 能量演化曲线

Fig.13 The second principal stress is 10 MPa energy curve

要以弹性能为主,耗散能相对较小, $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 持续增长, $U$ 、 $U^e$ 随轴向应力的增大逐渐增大;Ⅱ卸荷阶段( $BC$ 段),卸荷后存在一段时间的平静期, $U_1$ 、 $U$ 和 $U^d$ 呈现出缓慢增加, $U_2$ 呈现出下降趋势, $U_3$ 呈“跳楼式”下降, $U^e$ 在轴向应力到达稳定后几乎保持不变,说明卸荷导致易弹射煤样在卸荷面产生裂纹,使得 $U^d$ 增加,积聚的 $U^e$ 低于试样破坏所需的能量,因此需要一段时间继续积累能量, $U^e$ 保持稳定,表明 $U^d$ 的大小主要与应力状态有关,随着持续卸荷, $U^d$ 出现突增,说明卸荷导致易弹射煤样内部产生裂纹扩展、贯通,产生较大的能量耗散;Ⅲ加载阶段( $CD$ 段),随着轴向应力持续加载,易弹射煤样向临空面膨胀,内部裂纹快速扩展贯通, $U^e$ 增速减缓,而 $U^d$ 增长速率

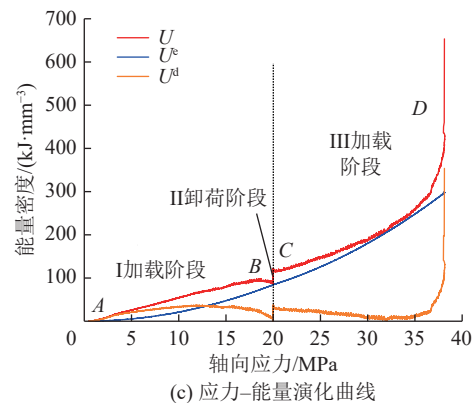
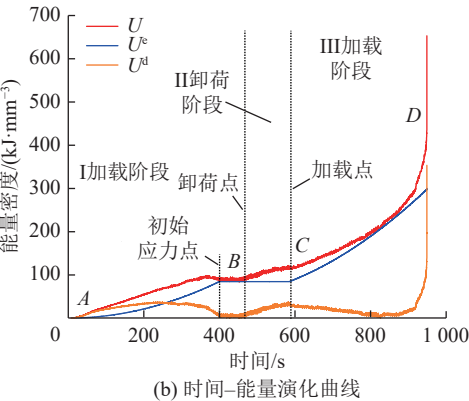
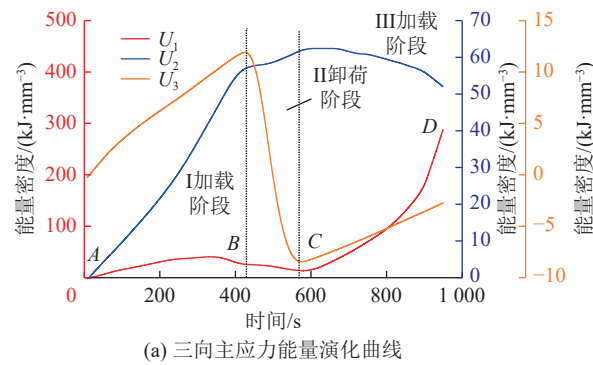


图14 第二主应力为15 MPa 能量演化曲线  
Fig.14 The second principal stress is 15 MPa energy curve

急剧增大,当应力达到峰值后, $U^e$ 突然释放, $U^d$ 急剧上升,出现宏观破坏裂缝,发生弹射, $U^d$ 的增加是微裂纹发育加速的结果。

由表5知,随着第二主应力的增大总能量逐渐增大,由420.573 kJ/m<sup>3</sup>增至653.739 kJ/m<sup>3</sup>,当第二主应力为15 MPa时,易弹射煤样峰值强度达到最大, $U$ 和 $U^e$ 达到最高,分别为300.161 kJ/m<sup>3</sup>和653.739 kJ/m<sup>3</sup>,破坏最为剧烈,弹射现象最为明显;当第二主应力为20 MPa时, $U$ 、 $U^e$ 和 $U^d$ 略有下降,说明第二主应力为15 MPa时为不同第二主应力加卸载条件下易弹射煤样的拐点。由此得到,随着第二主应力的增大,在一定范围内对易弹射煤样有一定的补强作用,提高煤岩体的储能能量;当第二主应力超过某

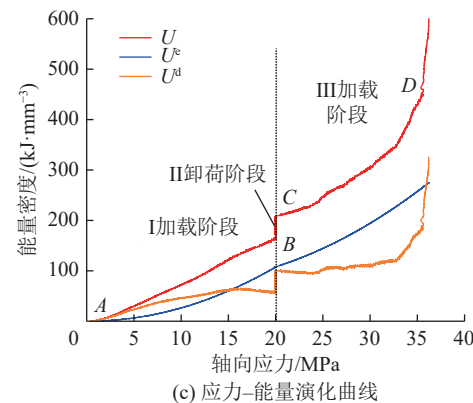
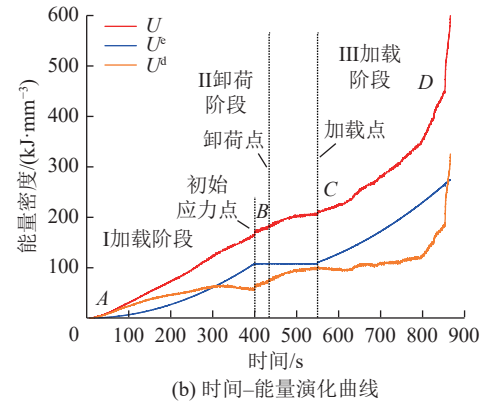
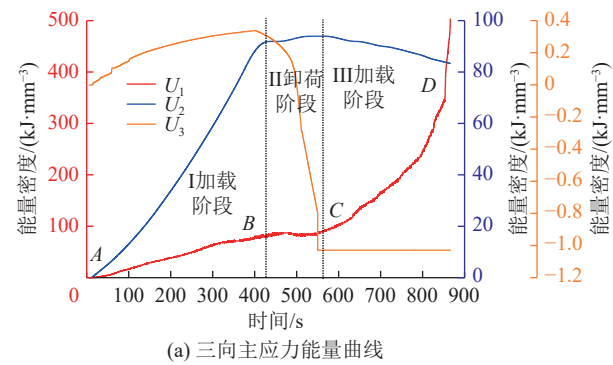


图15 第二主应力为20 MPa 能量演化曲线  
Fig.15 The second principal stress is 20 MPa energy curve

一临界值时,强度、弹性模量以及积聚的能量均有所降低。

表5 不同第2主应力加载能量值  
Table 5 Different second principal stress loading energy values

试样编号	$U^e$	$U^d$	$U$
TSX-5	160.511	260.062	420.573
TSX-1	133.863	423.475	557.338
TSX-7	300.161	353.578	653.739
TSX-8	274.588	325.642	600.230

3.4 不同加卸载弹性能-耗散能占比分析

能量动态转化、转移是煤岩变形破坏的本质,在

煤岩破坏过程中起根本性作用。卸荷是诱发弹性能释放的主要原因,在破坏过程中,应力急剧下降,释放大量弹性能。为进一步研究不同加卸载煤岩能量演化规律,对不同加卸载煤岩能量占比进行分析,得到不同加卸载条件下弹性能和耗散能随应力变化特征,如图16,图17所示。

由图16知,随着轴向应力的增高,弹性能占比呈现出先增大后减小规律,耗散能占比则相反,转折点与裂纹扩展相对应,在加载阶段内部能量转化以弹性能储存为主,耗散能占比逐渐上升,能量耗散减小,耗散能占比下降;卸荷后弹性能占比迅速下降,耗散能占比随轴向应力的增大而增大,此阶段易弹射煤样内积聚的弹性能伴随裂纹加速扩展而释放。对比高应力卸荷能量转化特征看出,在相同围压条件下,随着轴向应力的增高弹性能占比逐渐增高,卸荷后释放的弹性能更多,耗散能占比则相反。

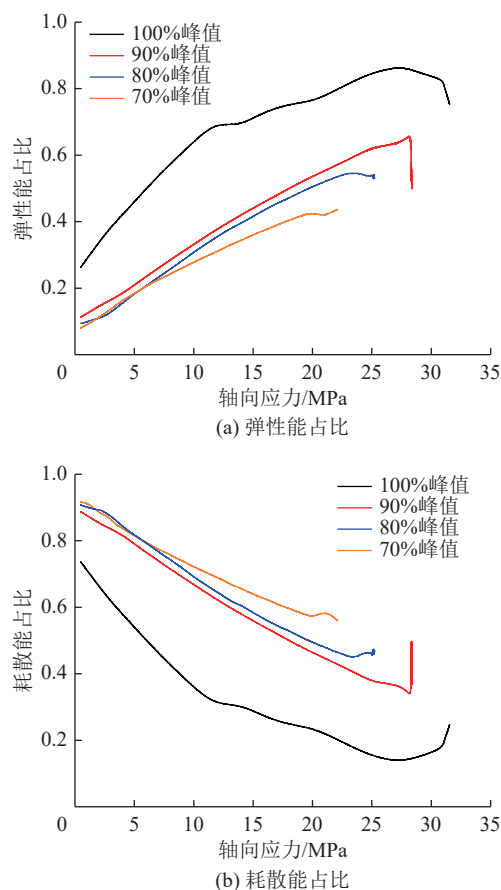


图16 高应力卸荷能量转化特征

Fig.16 Energy transformation characteristics of high stress unloading

由图17知,弹性能占比呈现增长-降低-增涨-降低特征,耗散能占比则相反。在卸荷点之前出现的转折点与裂纹扩展相对应,卸荷点之后的转折点与易弹射煤样峰值强度相对应。卸荷点前,随着总

能量的持续输入弹性能占比呈增长特征,卸荷后呈下降特征,耗散能占比迅速上升,说明卸荷导致易弹射煤样出现裂纹扩展,产生能量耗散;随着应力的增高,弹性能占比呈增长特征,说明随着轴压的增大,总能量持续输入以及易弹射煤样内部裂隙出现压密、闭合,相应的耗散能占比降低,当达到峰值应力时,弹性能快速释放,耗散能占比急剧增大,发生弹射。

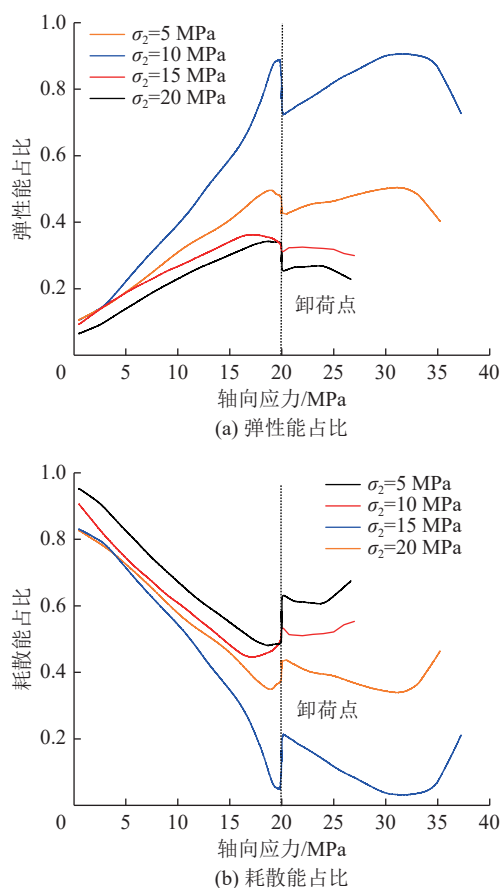


图17 不同第二主应力能量转化特征

Fig.17 Energy transformation characteristics of different second principal stresses

对比图16,图17可知,在高应力条件下更容易储存弹性能,随着轴向应力的增高,耗散能占比逐渐减小,弹性能持续增加,说明高应力限制了裂纹扩展,可储存更大弹性能,高应力状态对应高弹性储能,卸荷后,弹性能迅速释放,很快产生宏观破坏裂纹,破坏剧烈,弹射明显,因此,高应力卸荷条件下更容易发生弹射。

#### 4 不同加卸载煤岩声发射特性

在不同加卸载条件下煤岩内部产生损伤破裂,在损伤破裂过程中以裂纹扩展的形式向外释放弹性波,声发射传感器能够接收释放的弹性波。通过声发射表征参数分析,可以直观的反映煤岩体在荷载



作用下内部损伤、破坏情况。

#### 4.1 高应力卸载煤岩声发射参数分布特征

图 18 为高应力卸荷计数-能量图, 图中存在明显 3 个峰值, 将声发射全过程分为压密期-平静期-片帮、弹射期-剧烈弹射期。

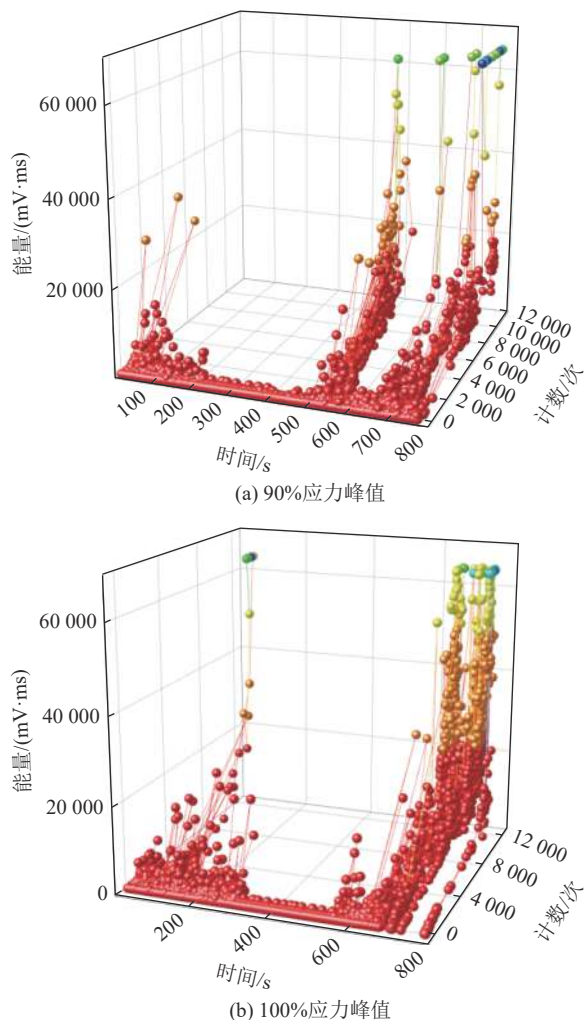


图 18 高应力卸荷计数-能量

Fig.18 High stress unloading count-Energy diagram

1) 压密期: 加载初期, 试样内部微裂隙、孔洞压密和颗粒间的摩擦滑移产生较高声发射信号, 出现较高峰值。

2) 平静期: 随着持续加载, 煤样进入弹性阶段, 其内部裂隙发育较少, 呈现近似稳定发展趋势。

3) 片帮、弹射期: 此阶段计数-能量突增, 出现峰值, 对应试样发生片帮、弹射。在高应力下, 出现局部高应力, 试样出现较大损伤, 新裂缝产生和老裂缝扩展、贯通, 导致发生局部片帮、弹射。

4) 剧烈弹射期: 卸荷完全后, 临空面完全暴露, 在高应力加持下, 试样发生剧烈弹射, 裂缝迅速扩展, 发生宏观破坏。峰值强度 100% 在卸荷后产生更高的峰值, 在高应力下, 计数-能量更大, 积聚能量的速

度更快, 试样从局部弹射到全面剧烈弹射时间缩短, 快速丧失承载能力, 导致能量瞬间释放, 造成剧烈破坏, 弹射明显。

图 19 为高应力卸荷峰频-幅值图, 试验后期存在明显高幅值、高峰频两峰值, 卸载后不同频段发生高幅值, 因此峰频及幅值的变化可以定性判定试件在外力作用下发生损伤, 高幅值声发射源与宏观的破坏相对应, 处于较高三向应力状态下的试件, 单面卸载后瞬间的应力重分布导致试件破坏, 因为有瞬间的能量释放过程及单面临空有利于局部产生破坏的条件。

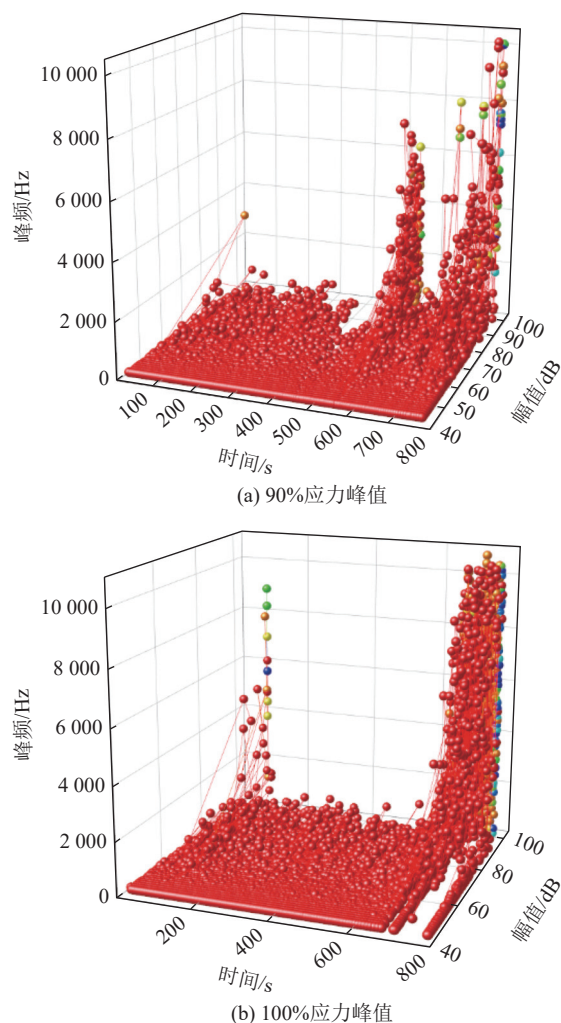


图 19 高应力卸荷峰频-幅值

Fig.19 Peak frequency-amplitude diagram of high stress unloading

#### 4.2 不同第二主应力加载煤岩声发射参数分布特征

不同第二主应力声发射特征呈现出类似特征, 由于篇幅有限, 选取较为突出的特征分析。图 20 为不同第二主应力声发射演化图, 具有压密期-平静期-片帮、弹射期-剧烈弹射期 4 个阶段。

由图 20 知, 初始围压能增加试样的储能性, 在

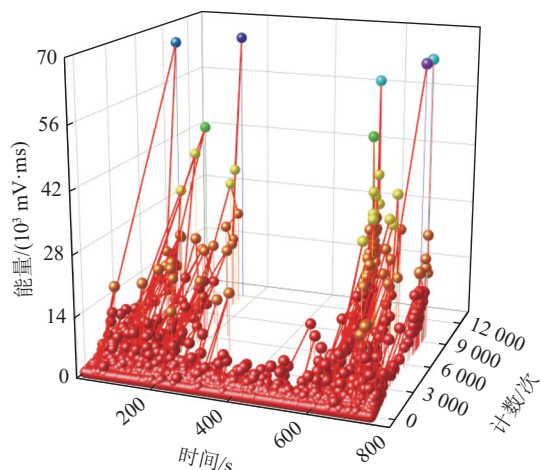


图20 不同第二主应力计数-能量

Fig.20 Acoustic emission evolution characteristics of different second principal stresses

初始围压的加持下,压密阶段积聚能大于耗散能,此阶段对应图中第1个峰值;卸荷后进入平静期,内部裂缝扩展,产生能量消耗,使得曲线呈近似水平发展;卸荷完全后,进入片帮、弹射期,此阶段最大主应力持续加压,临空面产生局部高应力,内部裂缝不断扩展,出现轻微颗粒弹射,随着压力增大,裂缝相互贯通,弹射加剧,临空面出现片帮、弹射,此阶段对应图中第2个峰值;当加载至试样极限峰值时,进入到剧烈弹射期,试样产生宏观裂缝,弹射剧烈,此阶段对应图中第3个峰值。图中片帮、弹射期和剧烈弹射期之间没有明显的界限,这是要由于在最大主应力持续加载下,从出现片帮、弹射开始至剧烈弹射破坏之间间隔较小,试件内部裂缝迅速扩展,积聚大量能量,当达到极限承载力时,弹性能快速释放,发生弹射。

由图21可知,试样峰频、幅值较大,在压密阶段积聚大量能量,因为单位体积试样所吸收的能量越高,变形破坏过程中能量耗散及能量释放相应也越大,从而导致更多的微裂纹形成,产生更多破裂面和碎块,在能量释放过程中,表现出抛掷碎块现象。幅值增大预示着破坏发生,从单面卸载后出现片帮、弹射到最后剧烈弹射前,不同频段内声发射幅值总体趋势降低,但峰频、幅值是突增的,突然的幅值、峰频增加更可能是弹射破坏的特征。试件在卸载后很快产生大量高幅值是发生弹射的反应,表现为局部开裂及小颗粒弹射,最后剧烈弹射破坏是在最大主应力有所增加后产生。

#### 4.3 不同加卸载煤岩裂纹破裂分析

声发射信号强度用来衡量断裂产生的强弱,根据声发射RA值(上升时间/幅值,单位ms/V)可判断

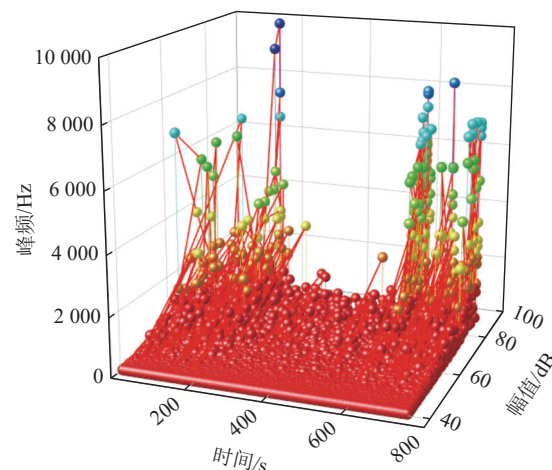


图21 不同第二主应力幅值-峰频

Fig.21 Acoustic emission evolution characteristics of different second principal stresses

裂纹开裂形式,认为低RA值对应张拉裂纹,高RA值对应剪切裂纹<sup>[37]</sup>,张拉破裂对应较小的RA值与较大的AF值;剪切破裂对应较大的RA值与较小的AF值<sup>[38]</sup>。因此,对比不同加卸载方式下RA值与应力的关系,RA-AF分布,分析易弹射煤样裂纹破裂方式,图22为不同加卸载方式下煤岩裂纹破裂去曲线图。

由于篇幅有限,仅列出弹射最为明显的TSX-2,TSX-3和TSX-7试样的RA值。对比图22可知在I加载阶段,对应压密和线弹性阶段,以微裂纹扩展为主,AF值占较大比例,说明在此阶段随着轴压的增高先经历旧裂隙压密及新裂纹的萌发;II卸荷阶段,卸荷后RA值出现波动,以张拉裂缝为主,随着持续卸荷,出现高RA值,低AF值,说明卸荷导致易弹射煤样裂纹快速扩展,出现大量的张拉和剪切裂缝,并扩展、贯通,将易弹射煤样切割成可剥离母体的小块体,在高应力条件下,易弹射煤样破坏前出现大量张拉裂缝,积聚的能量快速释放,将切割成的小块体迅速弹射出去;III加载阶段,此阶段为不同第二主应力加载路径下的特征,卸荷后,应力未达到易弹射煤样的峰值强度,仅出现少部分的张拉和剪切裂缝,随后持续加载,RA值增多,AF值减小,张拉和剪切裂缝更加明显,积聚的能量快速释放,将小块体抛离母体,发生弹射,在弹射发生时,RA值达到最大。

从整体来看,易弹射煤样在不同加卸载路径下产生的弹射破坏为张拉-剪切复合破坏,卸荷前后RA值产生波动,出现张拉-剪切裂纹,随后RA值增高,AF值降低,表明剪切裂纹形成、扩展,且与张拉裂纹相互贯通,形成可脱离母体的小块体,发生弹射,弹射发生时RA值急剧增加;在高应力条件下卸荷张

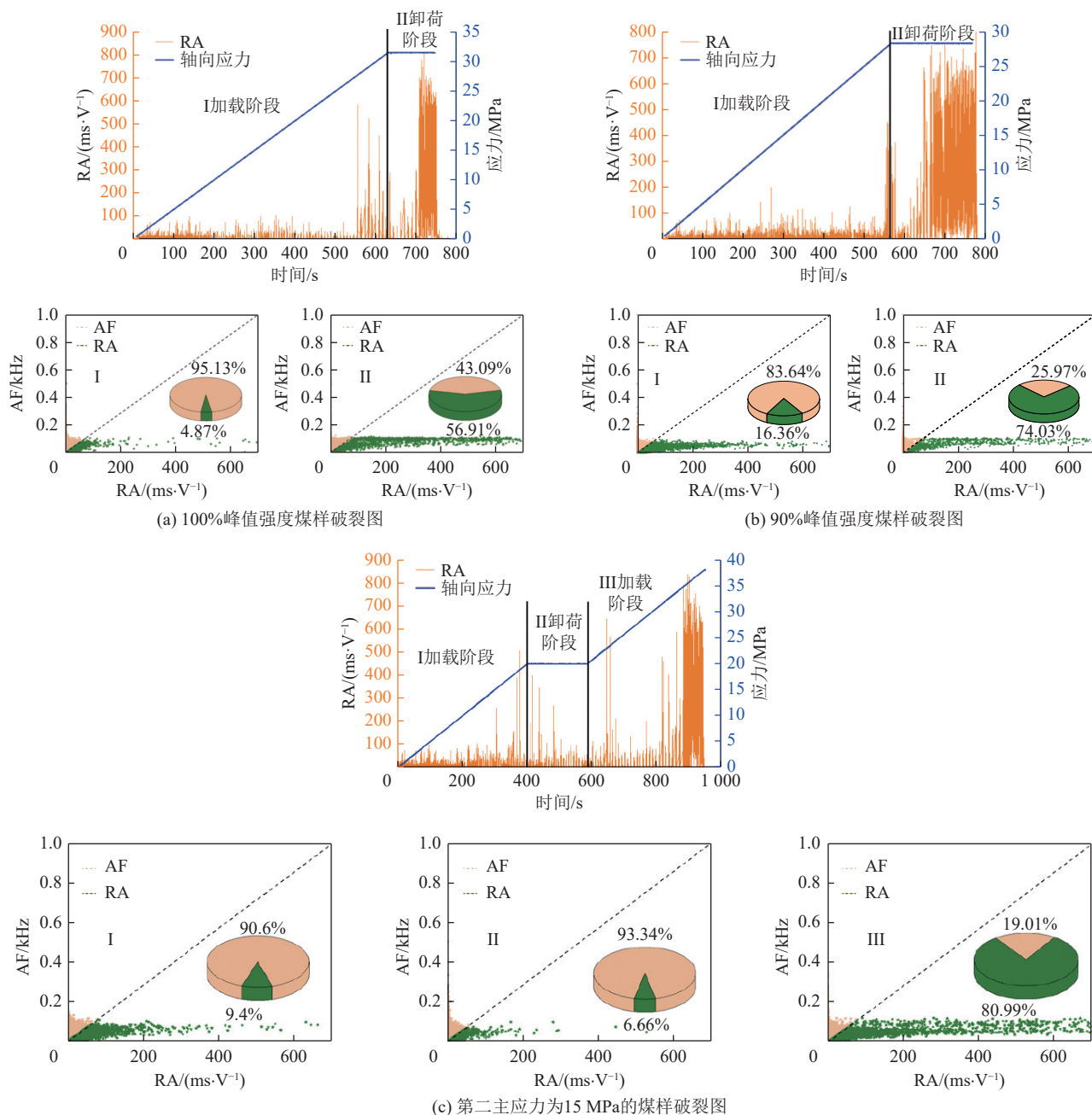


图 22 不同加卸载裂纹破裂曲线  
Fig.22 Crack rupture curves of different loading and unloading

拉和剪切裂纹发育速度更快,很快形成脱离母体的小块体,仅需要很小的能量将小块体抛离,为弹射提供更加有利的条件,破坏更为剧烈,发生弹射。

## 5 讨 论

冲击地压是煤矿井巷或工作面周围煤岩体由于弹性能的瞬时释放而产生的以突然、急剧、猛烈的破坏为特征的动力现象,常伴随煤岩体的瞬间位移与抛出、巨响及气浪,严重时会造成人员伤亡和井巷的毁坏,甚至引起地表塌陷而导致局部地震<sup>[39-40]</sup>。根据冲击地压的显现强度分类标准,可分为4类:弹射

(微冲击)、矿震、弱冲击、强冲击<sup>[6]</sup>。评估、预测煤矿冲击地压危险程度主要依据煤的冲击倾向性,衡量煤的冲击倾向性强弱程度指数为:弹性能指数、冲击能量指数、动态破坏时间、单轴抗压强度,但是这4个倾向性判别指数跟煤样的破坏状态没有直接联系,而且缺少根据煤样的实际破坏过程和状态进行验证的统一标准;由于冲击地压的发生离不开能量因素<sup>[11]</sup>,因此,从考虑煤样受力全过程中的能量储存、耗散和破坏耗能及释放动能的角度,考察煤的冲击倾向性的科学性和适用性非常必要。

不同加卸载方式对煤岩全过程力学特性有很大



影响。在不同加卸载方式下煤岩的损伤、破坏程度不同,导致自身极限储能、强度及峰后软化阶段也存在差异,卸载比加载破坏的更剧烈<sup>[41]</sup>,试验结果也表明:高应力卸载比加载更容易破坏,卸载破坏强度是加载破坏强度的90%,卸载作用会对煤岩体产生强度弱化效应。深部煤岩体在开挖卸荷前处于三维应力状态,开挖卸荷后产生临空面,约束临空面上的水平径向应力消失,煤岩内部产生损伤,裂纹扩展形成扩容现象,煤岩体强度产生弱化;当临空面斜向剪切裂纹与竖向张拉裂纹交汇贯通,形成脱离母体的小块体,在释放能量驱使下更易发生弹射现象。

能量研究大多数是从总能量、弹性能和耗散能3个参数进行分析,现实情况是煤岩系统所含能量较为复杂,大致分为热能和机械能<sup>[42]</sup>,包括:热能、应变能、弹性势能、塑性变形能、表面能等,其中表面能对应煤岩内部开裂产生。因此,接下来将研究煤岩体的总能量、弹性能、耗散能与表面能之间的联系和区别,为弹射(微冲击现象)研究提供依据。

## 6 结 论

1)弹射的发生是由于煤岩体在加卸载过程中,临空面斜向剪切裂纹与竖向张拉裂纹交汇贯通,形成脱离母体的小块体,在释放能量驱使下发生的微冲击现象。

2)高应力单面卸荷比单面卸荷加载易弹射煤样更加容易破坏,弹射现象更加明显。

3)高应力单面卸荷过程中,易弹射煤样临空面微小裂纹迅速扩展贯通,产生较多小块体,随着轴向应力的增加,轴向应变增大,裂纹扩展速度越大,破碎更加充分,弹射现象越明显。

4)随着第2主应力的增大易弹射煤样内部微裂纹压密闭合程度越大,其峰值强度越高;当第2主应力增大到一定程度后,易弹射煤样内部产生复合型裂纹,破坏形态由剪切破坏转变为张拉-剪切复合破坏,最后发展为劈裂破坏,弹射剧烈程度呈现出先增加后减小的现象。

5)在围压一定的条件下,随着轴压的增高,积聚的弹性能越高,卸荷后,耗散的能量越低,随着持续卸荷,内部裂纹扩展、贯通速度更快,释放的能量达到最大,耗散能急剧增加,易弹射煤样发生弹射破坏。

6)易弹射煤样在不同加卸载路径下发生张拉-剪切复合破坏,卸荷后,出现张拉-剪切裂纹,RA值增高,AF值降低,呈现高计、高能、高幅高频特征。

## 参考文献(References):

- [1] 康红普,姜鹏飞,冯彦军,等.煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J].煤炭科学技术,2022,50(6):1-15.  
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, *et al.* Destressing technology for rock around coal mine roadways and its applications[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 1-15.
- [2] 左建平,刘海雁,王军,等.深部巷道主被动全空间协同控制技术及工程应用[J].煤炭科学技术,2023,51(7):255-267.  
ZUO Jianping, LIU Haiyan, WANG Jun, *et al.* Active and passive full-space collaborative control technology and engineering application in deep roadways[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 255-267.
- [3] 尤明庆,华安增.岩石试样破坏过程的能量分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):778-781.  
YOU Mingqing, HUA Anzeng. Energy analysis of failure process of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 778-781.
- [4] 齐庆新,李海涛,郑伟钰,等.煤岩弹性变形能的表征物理模型及实测方法[J].煤炭科学技术,2022,50(1):70-77.  
QI Qingxin, LI Haitao, ZHENG Weiyu, *et al.* Physical model and measurement method for elastic deformation energy characterization of coal and rock[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 70-77.
- [5] 苏承东,张振华.大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):273-280.  
SU Chengdong, ZHANG Zhenhua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 273-280.
- [6] 钱七虎.岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J].岩土力学,2014,35(1):1-6.  
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6.
- [7] 司雪峰,宫凤强.深部高应力圆形隧洞内部卸荷条件下岩爆模拟试验和强度弱化效应研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):276-289.  
SI Xuefeng, GONG Fengqiang. Rockburst simulation tests and strength-weakening effect of circular tunnels under deep high stresses and internal unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 276-289.
- [8] SU G S, GAN W, ZHAI S. B, *et al.* Acoustic emission precursors of static and dynamic instability for coarse-grained hard rock[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2883-2898.
- [9] 宫凤强,潘俊锋,江权.岩爆和冲击地压的差异解析及深部工程地质灾害关键机理问题[J].工程地质学报,2021,29(4):933-961.  
GONG Fengqiang, PAN Junfeng, JIANG Quan. The difference analysis of rock burst and coal burst and key mechanisms of deep engineering geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 933-961.
- [10] 朱建波,马斌文,谢和平,等.煤矿矿震与冲击地压的区别与联

- 系及矿震扰动诱冲初探[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3396–3409.
- ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, *et al.* Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [11] 宫凤强, 赵英杰, 王云亮, 等. 煤的冲击倾向性研究进展及冲击地压“人-煤-环”三要素机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1974–2010.
- GONG Fengqiang, ZHAO Yingjie, WANG Yunliang, *et al.* Research progress of coal bursting liability indices and coal burst “Human-Coal-Environment” three elements mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1974–2010.
- [12] 顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1081–1089.
- GU Jincai, FAN Junqi, KONG Fuli, *et al.* Mechanism of ejective rockburst and model testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081–1089.
- [13] 何满潮, 李杰宇, 任富强, 等. 不同层理倾角砂岩单向双面卸荷岩爆弹射速度实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 433–447.
- HE Manchao, LI Jieyu, REN Fuqiang, *et al.* Experimental investigation on rockburst ejection velocity of unidirectional double-face unloading of sandstone with different bedding angles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 433–447.
- [14] 苏国韶, 蒋剑青, 冯夏庭, 等. 岩爆弹射破坏过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 1990–1999.
- SU Guoshao, JIANG Jianqing, FENG Xiating, *et al.* Experimental study of ejection process in rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 1990–1999.
- [15] 左宇军, 李夕兵, 张义平, 等. 动-静组合加载诱发岩爆时岩块弹射速度的计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 815–819.
- ZUO Yujun, LI Xibing, ZHANG Yiping, *et al.* Calculation of ejection velocity of rock in rockburst caused by static dynamic coupling loading[J]. Journal of Central South University( Science and Technology), 2006, 37(4): 815–819.
- [16] 宫伟力, 汪虎, 何满潮, 等. 深部开采中岩爆岩块弹射速度的理论与实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2269–2278.
- Gong Weili, Wang Hu, He Manchao, *et al.* Theoretical and experimental study on rock block ejection velocity for rock burst found in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2269–2278.
- [17] 苏国韶, 胡李华, 冯夏庭, 等. 低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1309–1322.
- SU Guoshao, HU Lihua, FENG Xiating, *et al.* True triaxial experimental study of rockburst process under low frequency cyclic disturbance load combined with static load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1309–1322.
- [18] 何满潮, 任富强, 宫伟力, 等. 基于双目立体视觉技术的岩爆碎屑弹射速度理论修正模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2341–2349.
- HE Manchao, REN Fuqiang, GONG Weili, *et al.* Modified model for ejection velocity of rock burst fragments based on binocular stereovision technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2341–2349.
- [19] AKDAG S, KARAKUS M, TAHERI A, *et al.* Effects of thermal damage on strain burst mechanism for brittle rocks under true-triaxial loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(6): 1657–1682.
- [20] 赵恩来. 动静载与温度耦合作用下煤岩动力学特征及损伤机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022: 126–127.
- ZHAO Enlai. Study on Dynamic Characteristics and Damage Mechanism of Coal and Rock under Coupling Action of Dynamic and Static Load and Temperature[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [21] 冯龙飞, 王皓, 王晓东, 等. 煤冲击破坏的微破裂演化特征及前兆识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(7): 1440–1452.
- FENG Longfei, WANG Hao, WANG Xiaodong, *et al.* Microfracture evolution characteristics and precursor identification of coal impact failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(7): 1440–1452.
- [22] 华安增. 地下工程周围岩体能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1054–1059.
- HUA Anzeng. Energy analysis of surrounding rocks in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1054–1059.
- [23] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003–3010.
- [24] 孙振武, 代进, 杨春苗, 等. 矿山井巷和采场冲击地压危险性的弹性能判据[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 794–798.
- SUN Zhenwu, DAI Jin, YANG Chunmiao, *et al.* Elastic energy criterion of rock burst in roadway and coalface of mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 794–798.
- [25] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 586–596.
- PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, *et al.* Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586–596.
- [26] 郭超. 煤岩能量特征与冲击地压强度关系研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017: 35–63.
- GUO Chao. Research on relationship between the energy characteristics of coal-rock mass and intensity of rockburst[D]. Fuxin Liaoning Technical University, 2017: 35–63.
- [27] 徐婕. 煤矿深部砂岩卸荷特性及岩爆预测方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016: 27–42.
- XU Jie. Study on characteristics of deep-buried sandstone in the coal mine under loading and unloading conditions and rockburst

- prediction methods[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016: 27–42.
- [28] 徐鼎平, 郭广涛, 夏跃林, 等. 高应力强卸荷下双江口花岗岩岩爆中间主应力效应宏观细观试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 1–12.
- XU Dingping, GUO Guangtao, XIA Yuelin, *et al.* Macro-meso experimental study on the intermediate principal stress effect on the rockburst of Shuangjiangkou granite under high stress and strong unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(9): 1–12.
- [29] 郭延华, 姜福兴, 张常光. 高地应力下圆形巷道临界冲击地压解析解[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 118–122.
- GUO Yanhua, JIANG Fuxing, ZHANG Changguang. Analytical solution for critical rockburst of a circular chamber subjected to high in-situ stress[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(2): 118–122.
- [30] 李文帅, 王连国, 陆银龙, 等. 真三轴条件下砂岩强度、变形及破坏特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 191–197.
- LI Wenshuai, WANG Lianguo, LU Yinlong, *et al.* Experimental investigation on the strength, deformation and failure characteristics of sandstone under true triaxial compression[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(1): 191–197.
- [31] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 开挖与支护应力路径下硬岩破坏过程的真三轴与声发射试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 500–506.
- XIANG Tianbing, FENG Xiating, CHEN Bingrui, *et al.* True triaxial and acoustic emission experimental study of failure process of hard rock under excavating and supporting stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(S1): 500–506.
- [32] 刘刚, 肖福坤, 秦涛. 小尺寸效应下岩石力学特性及声发射规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3905–3917.
- LIU Gang, XIAO Fukun, QIN Tao. Rock mechanics characteristics and acoustic emission rule under small-size effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 3905–3917.
- [33] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1436–1440.
- PENG Qi, ZHANG Ru, XIE Heping, *et al.* Prediction model for rockburst based on acoustic emission time series[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1436–1440.
- [34] LI X B, FENG F, LI D Y, *et al.* Failure characteristics of granite influenced by sample height-to-width ratios and intermediate principal stress under true-triaxial unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(5): 1321–1345.
- [35] MENG Q B, ZHANG M W, ZHANG Z Z, *et al.* Experimental research on rock energy evolution under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, 41(4): 717–729.
- [36] MENG Q B, ZHANG M W, HAN L J, *et al.* Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3873–3886.
- [37] 何满潮, 赵菲, 杜帅, 等. 不同卸载速率下岩破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2737–2747, 2793.
- HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, *et al.* Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2737–2747, 2793.
- [38] 吴顺川, 甘一雄, 任义, 等. 基于 RA 与 AF 值的声发射指标在隧道监测中的可行性[J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 723–730.
- WU Shunchuan, GAN Yixiong, REN Yi, *et al.* Feasibility research of AE monitoring index in tunnel based on RA and AF[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(6): 723–730.
- [39] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.
- JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 205–213.
- [40] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567–1584.
- QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, *et al.* Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [41] 许文松, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 大理岩真三轴单面卸荷条件下加卸载试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 526–534.
- XU Wensong, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui, *et al.* Test study on true-triaxial loading and unloading for marble with unloaded single face[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(3): 526–534.
- [42] 薛东杰, 周宏伟, 钟江城, 等. 采动岩体能量释放及灾变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3865–3872.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, ZHONG Jangcheng, *et al.* Mining-induced release of energy from rock and mechanism on catastrophic failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3865–3872.