

卸压速度对构造煤突出过程中瓦斯膨胀能的控制作用

蒋静宇^{1,2,3,4,5}, 史孝宁^{1,2,3}, 王成浩⁴, 程远平^{1,2,3}, 黄一鸣^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 煤矿灾害防控全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 人工智能研究院, 江苏 徐州 221116;
5. 中国矿业大学 贵州研究院, 贵州 贵阳 550001)

摘要:煤与瓦斯突出(简称“突出”)多发生在构造煤层。瓦斯膨胀能是参与突出的重要能量之一。构造煤体在突出连续发展阶段中将经历连续复杂的卸压过程,为了明确卸压速度在突出连续发展过程中对瓦斯膨胀能的控制作用机理,选取地质构造复杂、突出灾害治理难度较大的平煤十三矿突出煤层煤样为研究对象,开展了不同卸压速度条件下的构造煤型煤三轴加载试验、筛分试验和煤粒瓦斯解吸扩散动力学试验。基于试验结果揭示了不同卸压速度条件下构造煤体的粉化特征和瓦斯解吸规律,反算了不同卸压速度条件下破碎煤体的瓦斯解吸量和瓦斯膨胀能,提出了一种突出连续发展过程中的正反馈模型。结果表明:卸压对煤样强度和抵抗变形的能力具有一定的弱化作用,卸压速度越大,弱化作用越强,越容易发生破坏。随着卸压速度的提高,煤样破碎后的粉化程度增强,瓦斯解吸量亦随之增高,导致瓦斯膨胀能增大。卸压速度从0.01 MPa/s增大至0.1 MPa/s时,破碎煤样的瓦斯膨胀能增加了21.05%~40.00%。卸压速度的增大,使得构造煤样的破碎程度、气体流动通道和煤体内能增加,初始瓦斯解吸量也随之增加,最终导致瓦斯膨胀能的增加。研究表明卸压速度对诱导突出连续发展有着关键作用,其控制瓦斯膨胀能的正反馈过程不断循环是影响构造煤层突出连续发展的重要因素。

关键词:煤与瓦斯突出;卸压速度;粉化作用;瓦斯膨胀能;正反馈循环

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)11-4473-13

Control effect of pressure-unloaded speed on gas expansion energy released by tectonic coal during coal and gas outburst

JIANG Jingyu^{1,2,3,4,5}, SHI Xiaoning^{1,2,3}, WANG Chenghao⁴, CHENG Yuanping^{1,2,3}, HUANG Yiming^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Xuzhou 221116, China; 2. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116; 3. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Artificial Intelligence Research Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Guizhou Research Institute, China University of Mining and Technology, Guiyang 550001, China)

Abstract: The majority of coal and gas outbursts (referred to as outbursts for brevity) occurred in tectonic coal seams. Gas expansion energy stands out as a critical factor contributing to these outbursts. The development stages involve the rapid release of confining pressure within the coal. To elucidate the mechanism of how pressure-unloaded speed controls gas ex-

收稿日期: 2024-03-25 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0312

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174217); 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目(苏教师函[2019]31号)

作者简介: 蒋静宇(1983—),男,河南永城人,教授,博士生导师。Email: jiangjingyu@cumt.edu.cn

引用格式: 蒋静宇,史孝宁,王成浩,等.卸压速度对构造煤突出过程中瓦斯膨胀能的控制作用[J].煤炭学报,2024,49(11):4473-4485.

JIANG Jingyu, SHI Xiaoning, WANG Chenghao, et al. Control effect of pressure-unloaded speed on gas expansion energy released by tectonic coal during coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4473-4485.



移动阅读

pansion energy during the continuous development of outbursts, we conducted triaxial loading tests, sieving experiments, and gas desorption measurements on the outburst coal samples from the No.13 Mine of the Pingdingshan coalfield, a site with complex geological structures and significant challenges in managing outburst hazards, at different pressure-unloaded speed. Based on the experimental results, we revealed the pulverization characteristics and gas desorption behavior of tectonic coal under different pressure-unloaded rates. Gas desorption volume and gas expansion energy of crushed coal at different pressure-unloaded speeds were back-calculated, proposing a positive feedback model for the continuous development of outbursts. The results indicate that unloading confining pressure weakens the strength and deformation resistance of coal, with this effect intensifying as pressure-unloaded speed increases. As pressure-unloaded speed increases, the degree of pulverization and gas desorption volume increase, resulting in a corresponding rise in gas expansion energy. When pressure-unloaded speed increases from 0.01 MPa/s to 0.1 MPa/s, gas expansion energy increases by 21.05% to 40%. As the unloading rate increases, the degree of fragmentation in the tectonic coal samples, the gas flow pathways, and the internal energy of the coal also increase. This leads to a higher initial gas desorption volume, ultimately increasing gas expansion energy. The positive feedback cycle involving pressure-unloaded speed emerges as a crucial factor influencing the continuous development of outbursts. It is shown that the positive feedback cycle process of pressure-unloaded speed controlling gas expansion energy is an important factor influencing the continuous development of tectonic coal seam outbursts.

Key words: coal and gas outburst; pressure-unloaded speed; pulverization; gas expansion energy; positive feedback cycle

0 引 言

煤与瓦斯突出(简称突出)严重威胁煤矿井下的安全生产。尽管我国采取了世界上极为严格的两级“四位一体”综合防突措施,但突出事故仍时有发生^[1-4]。近年来我国典型突出事故案例表明突出多发生在构造煤层,严重威胁煤矿安全生产^[5]。突出是煤层中储存的应力能和瓦斯能的失稳释放,表现为煤层中聚集的瓦斯和煤岩在极短时间内释放和抛出,其过程包括孕育、激发、发展和终止4个阶段^[6-9]。突出通常是地应力、瓦斯压力和煤岩力学特性的耦合作用的结果^[10-12]。在井下作业过程中,受采掘扰动影响,煤体常经历卸压过程(水平应力减小,垂直应力增大)^[13],可能会导致突出事故的发生。同时,在突出发生后,突出孔洞附近被抛出的煤体及其后方一定距离范围内煤体都将处于卸压区。

三轴压缩实验可以很好的模拟煤体所经历的卸压过程,许多学者已经实验研究了卸压对煤体力学性质的影响。徐佑林等^[14]开展卸围压条件下含瓦斯煤的三轴试验,表明卸围压速率对煤体的弹性模量影响较大,煤体弹性模量随着卸围压速率的增加而减小。YIN等^[15]研究表明,与恒定围压相比,三轴抗压强度和延性应变或承载力随围压卸荷而显著降低,较高的围压卸荷速率对应于较低的抗压强度和较低的延性应变。笔者等^[16]开展了构造煤不同卸围压速度条件下的应力释放规律研究,表明急速卸压条件下构造煤更易失稳破坏,应力释放控制瓦斯膨胀能的非稳态释

放,从而导致构造煤突出的连续发展。由此认为,较高的卸压速度增大了煤体破碎程度,急速卸压对煤矿井下煤层突出的连续发展有显著影响。此外,一些学者还对卸压条件下瓦斯在煤体中的渗流特性开展了研究。CHEN等^[17]通过卸荷条件下的渗透率实验发现,在卸荷点之前的加载阶段,渗透率与轴向应变呈负指数关系;在卸荷点后的卸荷阶段,渗透率与轴向应变呈正指数关系。刘永茜等^[18]开展了不同卸载速率条件下受载煤体的三轴瓦斯渗流试验,表明卸载速率的提高可以增加煤体渗透率和裂隙扩展程度。

煤矿中许多高能灾害的发生都可以看作是能量驱动的结果,因此有必要从能量的角度来考虑煤矿灾害机理^[19]。苏联学者BB Hodot^[20]提出的能量假说揭示了突出的能量和应力条件。瓦斯膨胀能是突出的主要能量来源之一^[21],在突出的孕育阶段,瓦斯膨胀能不断积累,当其达到突出阈值后,突出激发^[22-23]。在突出的发展阶段,瓦斯膨胀能为煤岩体的持续抛出提供动力。王刚等^[24]发现,构造煤比原煤贡献更多的瓦斯膨胀能,导致构造地区易发生高频和大型突出。

虽然已有学者围绕瓦斯膨胀能在突出中的作用做了较充分的研究,但不同卸压速度条件下构造煤体瓦斯膨胀能的释放机制研究仍存在不足。据统计,大多数突出均与构造煤有关,有学者提出构造煤是突出发生的必要条件^[25-27]。构造煤体解除应力后易粉化成散体颗粒,而煤体粉化是突出连续发展的必要条件之一^[28-30]。因此,开展不同卸压速度条件下构造煤体粉化与瓦斯膨胀能积聚过程研究,对丰富突出机理和

煤矿构造煤突出防治有重要意义。

1 样品和方法

1.1 型煤制备

采用刻槽法获取了平煤十三矿己 15-17 煤层 13050 工作面的构造煤样品。该样品为粉末状糜棱煤和少部分碎粒状煤, 颜色较为暗淡, 强度较低, 部分手捻即碎, 破坏类型属于 V 类。采用 5E-MAG6600 全自动工业分析仪对煤样进行工业分析, 利用 FMJ-1 型坚固性系数测定装置测定了煤体硬度, 采用 WT-1 型瓦斯扩散速度测定仪进行了 Δp 的测定。工业分析、煤体坚固性系数和瓦斯放散初速度 Δp 测试结果见表 1。

采用双向压制法^[31]将构造煤粉压制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准型煤, 共压制 8 个型煤。取 245 g 粒径小于 0.25 mm 煤粉, 加入适量蒸馏水 (煤粉质量分数 10%~20%), 在 200 kN 的压制压力条件下稳压 45 min,

表 1 构造煤煤样基础性参数

Table 1 Basic physical parameters of tectonic coal samples

工业分析				坚固性	瓦斯放散初
$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$FC_d/\%$	系数 f	速度 $\Delta p/\text{kPa}$
1.86	10.18	18.08	73.58	0.23	1.919

双向压制法原理如图 1 所示。

1.2 试验方案

1.2.1 构造型煤力学特性试验

破碎试验方案主要包括常规三轴加载试验和峰前卸围压试验两部分, 其中 2 个型煤试样用于常规三轴加载试验, 围压设定为 10 MPa 和 20 MPa, 其余 6 个型煤试样用于峰前卸围压试验, 初始围压设定为 10 MPa 和 20 MPa, 卸荷点设置为常规三轴加载试验测得峰值应力的 80%^[32], 峰前卸围压速度分别设为 0.01、0.05 和 0.10 MPa/s。试验力学路径如图 2 所示 (图中, $\sigma_1-\sigma_3$ 为偏应力)。

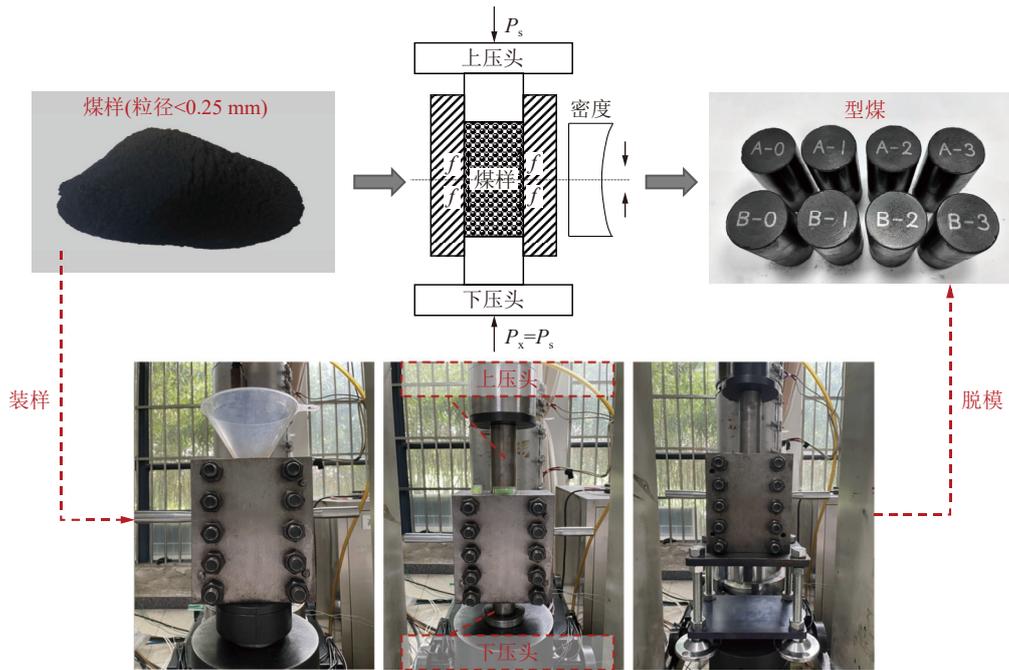


图 1 双向压制法与型煤压制过程

Fig.1 Briquettes pressing process using the bi-directional pressing method

1.2.2 破碎煤样筛分试验

峰前卸围压破碎试验完成后, 使用小型电磁振动筛 (ASONE) 对每个型煤的破碎煤样进行筛分, 筛网尺寸分别为 3、1、0.5、0.25、0.2、0.074 mm。将每种粒径的煤样进行称重, 进而获得不同卸压速度条件下破碎煤样的粒径分布占比。

笔者采用 Kolomogrov 容量维即盒维数来表征破碎样品的粉化程度。WANG 等^[33-34]研究指出可以通过煤颗粒分形维数表示样品的粉化程度, 分形维数越

大, 煤的破坏越严重。分形模型表达式为

$$D = 3 - \frac{d[\ln(\omega_{<d})]}{d(\ln d)} \quad (1)$$

式中: D 为煤颗粒分形维数; d 为煤粒径, mm; $\omega_{<d}$ 为粒径 $< d$ 的煤颗粒质量分数, %。

当 D 较小时, $\ln(\omega_{<d})$ 和 $\ln d$ 在直角坐标系中成正比例关系; 当 D 较大时, $\ln(\omega_{<d})$ 和 $\ln d$ 在直角坐标系中成线性关系, 即 $\omega_{<d}$ 和 d 在双对数坐标系中成线性关系^[34]。

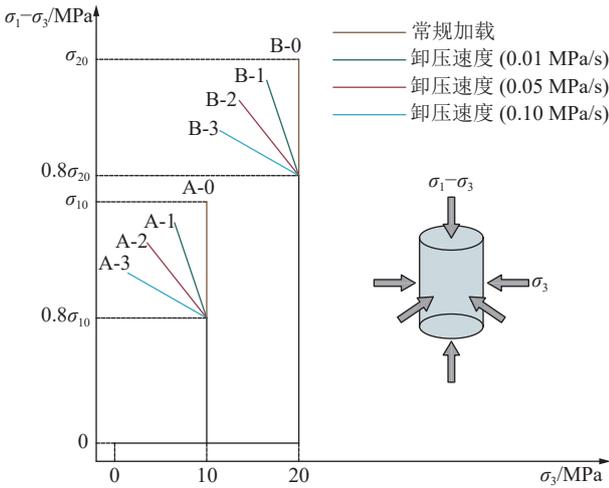


图 2 不同卸压速度条件下构造煤试验力学路径

Fig.2 Loading path of tectonic coal for different pressure-unloaded speed

1.2.3 煤粒瓦斯解吸扩散能力测定试验

将制备型煤剩余的煤样筛分为不同粒径的煤粒 (< 0.074、0.074~0.2、0.2~0.25、0.25~0.5、0.5~1、1~3 和 > 3 mm), 并各取 50 g 进行瓦斯解吸实验。首先将样品抽真空 8 h 以上, 然后在不同的瓦斯平衡压力下 (0.74、1.00、2.00、3.00 和 4.00 MPa) 吸附甲

烷气体, 然后用气体流量计测定 120 min 内甲烷解吸量的变化。设置不同的瓦斯平衡压力可以对应不同突出压力条件下的煤与瓦斯突出过程。为了排除温度对试验结果的影响, 实验过程在 30 °C 恒温水浴中进行。

上述试验结束后, 可获得破碎煤样不同粒径占比和不同粒径煤样的瓦斯解吸曲线。根据式 (2) 反算得到不同卸压速度条件下的破碎样品的解吸曲线。

$$\begin{cases} Q_c = \sum_{i \in I} Q_i \omega_i \\ I = \left\{ \begin{array}{l} < 0.074 \text{ mm}, 0.074 \sim 0.2 \text{ mm}, 0.2 \sim 0.25 \text{ mm}, \\ 0.25 \sim 0.5 \text{ mm}, 0.5 \sim 1 \text{ mm}, 1 \sim 3 \text{ mm}, > 3 \text{ mm} \end{array} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_c 为破碎煤样的反算瓦斯解吸量, cm^3/g ; Q_i 为 i 粒径范围内破碎煤样的瓦斯解吸量, cm^3/g ; ω_i 为 i 粒径范围内煤样的质量分数, %。

2 结果与分析

2.1 构造型煤应力-应变特征

初始围压 10 MPa 常规三轴试验和峰前卸围压试验型煤试样的应力-应变曲线如图 3 所示。

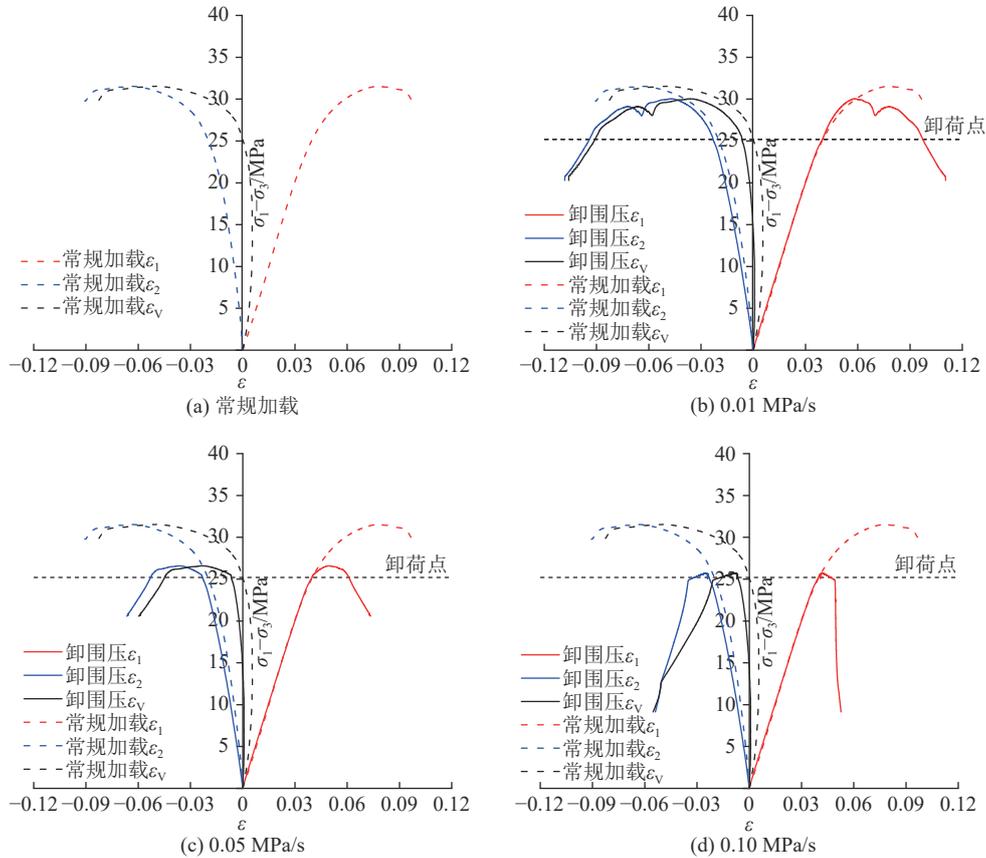


图 3 围压 10 MPa 常规三轴试验和峰前卸围压试验应力-应变曲线^[16]

Fig.3 Stress-strain curves for conventional triaxial tests and pre-peak unloading confining pressure tests at an initial confining pressure of 10 MPa^[16]

由于试验应力-应变路径相同, 图 3 所示的应力-应变曲线在达到卸荷点之前每个型煤的应力-应变曲线表现出了很强的相似性, 可见实验结果具有一定的可靠性。卸荷点后, 峰前卸围压试验和常规三轴试验的煤样的应力-应变曲线开始显现差异性。煤样在峰前卸围压试验中的峰值应力低于常规三轴试验中型煤的峰值应力。卸压速度越大, 煤样的峰值应力越小。峰前卸围压试验中煤样破碎时的轴向应变、径向应变和体积应变均小于常规加载试验, 且随着卸压速度的增大而减小。这表明在卸压作用下, 煤样的强度和延性应变较低, 导致其更容易失效。初始围压 20 MPa 条件下峰前卸围压试验与常规三轴试验的应力-应变曲线的变化规律与初始围压为 10 MPa 相似。表 2 列出了所有不同力学路径下煤样的峰值应力测试结果。

初始围压 10 MPa 和 20 MPa 常规三轴试验的煤样峰值应力测试结果分别为 31.51 MPa 和 62.55 MPa, 峰前卸围压试验的卸荷点分别为 25.21 MPa 和 50.04 MPa。初始围压为 10 MPa 时, 卸压速度为 0.01、0.05 和 0.10 MPa/s 时煤样的峰值应力分别为 30.03、26.59 和 25.69 MPa, 分别比常规三轴试验降低了 4.70%、15.61% 和 18.47%。初始围压为 20 MPa 时, 卸压速度为 0.01、0.05 和 0.10 MPa/s 时煤样的峰值应力分别为 58.31、53.11 和 51.41 MPa, 分别比常规三轴试验降低 6.78%、15.09% 和 17.81%。这表明, 卸围压对构造煤强度具有一定的弱化作用。卸压速度越大, 弱化作用越强, 煤样越容易发生破坏。

2.2 破碎煤样筛分结果

煤颗粒分形维数可以直观定量的反映不同卸压速度条件下破碎煤样的粉化程度, 分形维数越大, 煤的粉化程度越高^[33]。将破碎试验得到的样品进行筛分, 得到不同粒径范围煤粒的质量分数。根据式 (1) 可以拟合得到不同卸压速度条件下破碎样品的煤颗粒分形维数, 用以衡量样品的粉化程度。筛分结果和煤颗粒分形维数如图 4 所示。

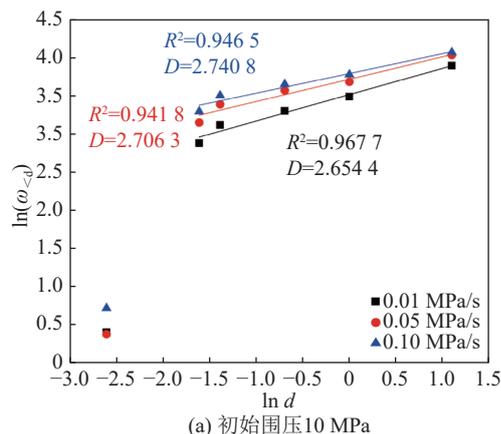
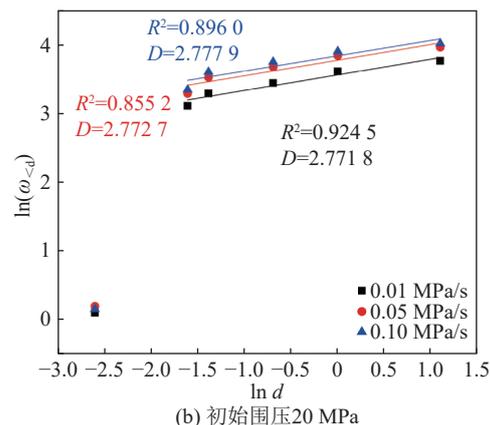


表 2 破碎试验峰值应力测试结果
Table 2 Peak stress results of crushing tests

型煤编号	初始围压/ MPa	卸荷点/ MPa	卸压速度/ (MPa · s ⁻¹)	峰值应力/ MPa
A-0	10	—	—	31.51
A-1	10	25.21	0.01	30.03
A-2	10	25.21	0.05	26.59
A-3	10	25.21	0.10	25.69
B-0	20	—	—	62.55
B-1	20	50.04	0.01	58.31
B-2	20	50.04	0.05	53.11
B-3	20	50.04	0.10	51.41

如图 4a、图 4b 所示, 使用式 (1) 进行拟合时, 粒径 < 0.074 mm 的破碎样品的质量分数表现出较大的差异性, 这是因为破碎样品会呈现分段分形特征^[34-36], 因此在拟合时不考虑粒径 < 0.074 mm 的数据。d 分别取 0.2、0.25、0.5、1 和 3 mm, $\omega_{<d}$ 则为图 4c、图 4d 中粒径小于 d 的破碎煤样质量分数总和。如图 4 所示, 卸压速度越大, 煤颗粒分形维数越大, 煤的粉化程度越高。在卸压速度相同的情况下, 初始围压 20 MPa 条件下破碎煤样的煤颗粒分形维数大于初始围压 10 MPa 条件下破碎煤样的煤颗粒分形维数。相同初始围压条件下, 随着卸压速度的增大, 粒径较小的颗粒 (尤其是粒径范围在 0.074~0.2 mm 的颗粒) 质量分数逐渐增大, 而粒径 > 3 mm 的颗粒质量分数逐渐减小。初始围压为 10 MPa 时, 卸压速度从 0.01 MPa/s 增大至 0.10 MPa/s, 粒径范围在 0.074~0.2 mm 的颗粒质量分数从 16.37% 增大至 24.94%, 粒径 > 3 mm 的颗粒质量分数从 50.58% 降低至 41.42%。初始围压为 20 MPa 时, 卸压速度从 0.01 MPa/s 增大至 0.10 MPa/s, 粒径范围在 0.074~0.2 mm 的颗粒质量分数从 21.44% 增大至 27.34%, 粒径 > 3 mm 的颗粒质量分数从 56.51% 降低至 44.18%。这表明随着卸压速度的增大, 越来越多的大颗粒被破碎为小颗粒, 煤样的粉化



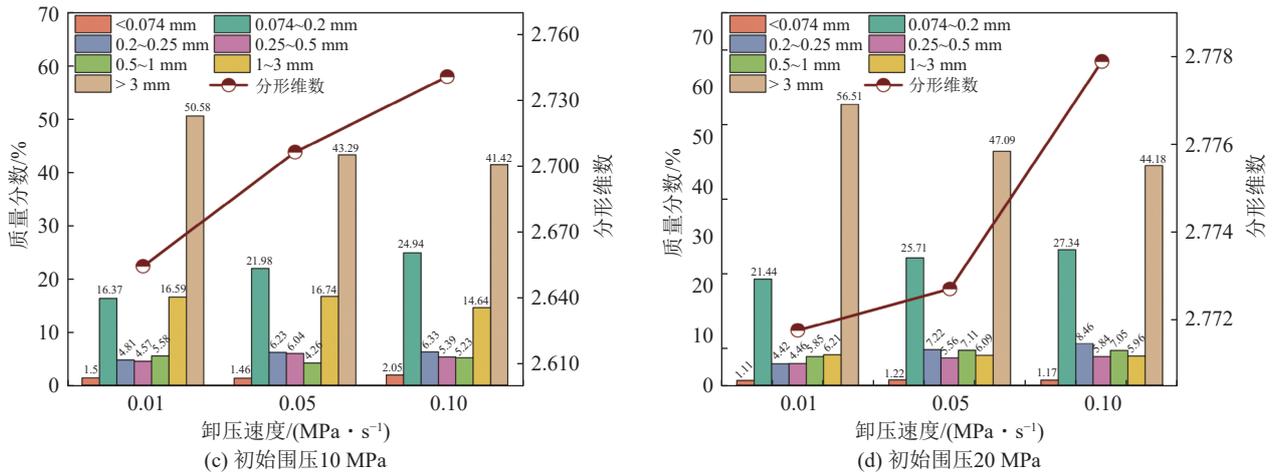


图 4 不同卸压速度下破碎煤样的筛分结果与分形维数

Fig.4 Sieving results and fractal dimensions of the crushed coal samples at different pressure-unloaded speed

程度越来越高。这是由于卸压速度的增大导致煤样损伤速度增大, 围压在短时间内迅速下降, 煤体环向变形来不及发展, 煤样破碎失稳释放出大量的能量, 加剧了煤体的粉化程度。卸压速度对煤样的粉化程度具有至关重要的控制作用。

2.3 破碎煤样瓦斯解吸特性

2.3.1 不同粒径煤样的瓦斯解吸扩散动力学特性

对于设定的不同平衡压力, 采集并汇总 7 种粒径煤样的 120 min 瓦斯解吸扩散动力学试验结果, 根据解吸数据绘制得到瓦斯解吸曲线, 如图 5 所示。

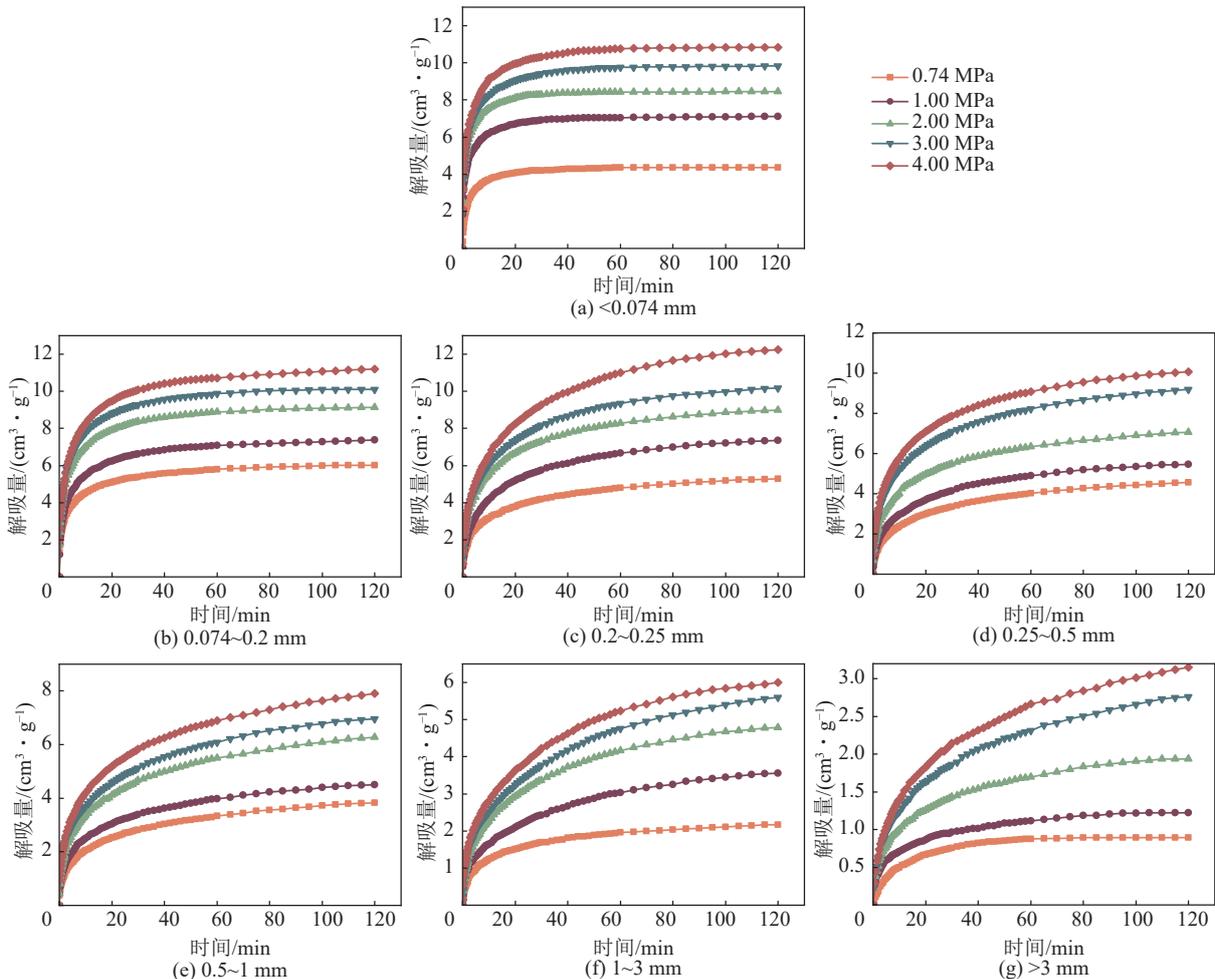


图 5 不同粒径构造煤样瓦斯解吸曲线

Fig.5 Gas desorption curves for tectonic coal of different particle size range

由图 5 可知, 不同粒径煤样均在初始阶段解吸出大量瓦斯, 解吸曲线急剧上升, 后期解吸曲线趋于平缓, 整个解吸过程符合 Langmuir 特征。解吸曲线的斜率越大, 说明解吸速率越快。因此在解吸的初期, 煤样具有最大的瓦斯解吸速率, 但随着时间的推移, 瓦斯解吸速率会逐渐减慢。这种现象是由于瓦斯解吸受到浓度梯度和扩散系数的复杂影响。在初始阶段, 煤体内部的瓦斯浓度最高, 有利于解吸。随着解吸的进行, 煤体内部瓦斯含量逐渐减少, 瓦斯浓度差越来越小, 进而导致瓦斯解吸速率变慢。另外, 瓦斯压力也会增强煤样的解吸能力。以粒径为 0.2~0.25 mm 煤样为例, 当平衡压力由 0.74 MPa 增大至 4.00 MPa, 其 120 min 累计瓦斯解吸量由 5.28 cm³/g 增大至 12.24 cm³/g, 增大了 1.32 倍, 作用效果显著。

除平衡压力之外, 粒径对煤体瓦斯解吸能力大小

至关重要。一般来说, 粒径越小, 煤样瓦斯解吸量越大^[37-38], 本试验结果中粒径与瓦斯解吸量的关系整体符合这一特征。比如在 1.00 MPa 的平衡压力下, 7 种粒径煤样的 120 min 累计瓦斯解吸量由 1.20 cm³/g 增大至 7.37 cm³/g。结果表明煤样粒径越小, 煤样瓦斯解吸能力越强。

2.3.2 不同卸压速度下破碎煤样的解吸特性

2.2 节得到了不同卸压条件下破碎煤样的粒径分布, 2.3.1 节得到了不同粒径煤样的 120 min 瓦斯解吸曲线。通过式 (2) 对 2 组结果进行加权计算, 可反算得到不同卸压速度条件下破碎煤样的解吸特性, 破碎煤样的反算瓦斯解吸曲线和反算结果如图 6 所示。

由于初始围压 20 MPa 和初始围压 10 MPa 不同卸压速度条件下破碎煤样的解吸规律相似, 图 6 仅列出初始围压 20 MPa 不同卸压速度条件下破碎煤样的

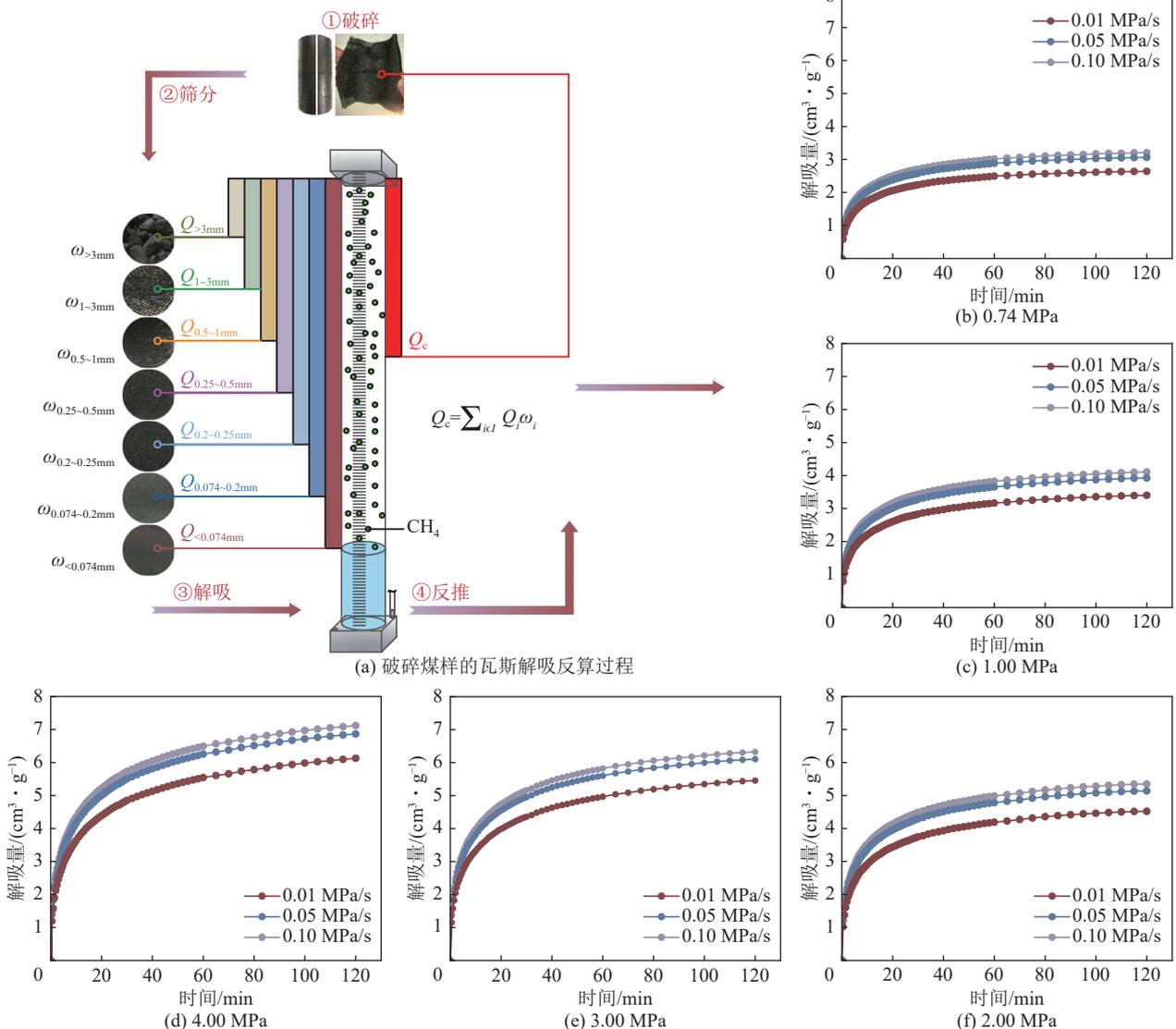


图 6 破碎煤样的反算瓦斯解吸曲线与反算结果

Fig.6 The gas desorption curves and results of back-calculation under different pressure-unloaded speed

反算瓦斯解吸曲线。表3列出了试验所有卸压条件下破碎煤样在平衡压力为1 MPa时的30 s、3 min和120 min反算瓦斯累计解吸量(Q_{30s} 、 Q_{3min} 、 Q_{120min})。

表3 破碎煤样在平衡压力1 MPa下的反算瓦斯累计解吸量
Table 3 Back-calculated gas desorption volume at equilibrium pressure of 1 MPa for crushed coal samples

初始围压/ MPa	卸压速度/ (MPa·s ⁻¹)	瓦斯解吸量反算结果/(cm ³ ·g ⁻¹)		
		Q_{30s}	Q_{3min}	Q_{120min}
10	0.01	0.73	0.98	3.37
	0.05	0.85	1.14	3.83
	0.10	0.92	1.23	4.00
20	0.01	0.79	1.05	3.40
	0.05	0.92	1.21	3.93
	0.10	0.96	1.27	4.11

由图6可知,破碎煤样的反算瓦斯解吸量受平衡压力和卸压速度的影响。平衡压力越大,破碎煤样的反算瓦斯解吸量越大。在同一平衡压力下,破碎煤样的反算瓦斯解吸量和解吸能力随着卸压速度的增大而增大。由表3可知,在相同的卸压速度条件下,初始围压20 MPa破碎煤样的反算瓦斯解吸量大于初始围压10 MPa破碎煤样的反算瓦斯解吸量。卸压速度由0.01 MPa/s增大至0.10 MPa/s,初始围压10 MPa的破碎煤样的120 min瓦斯解吸量由3.37 cm³/g增大至4.00 cm³/g,增大了18.69%;初始围压20 MPa的破碎煤样的120 min瓦斯解吸量由3.40 cm³/g增大至4.11 cm³/g,增大了20.88%。与破碎煤样的粉化程度相同,破碎煤样的瓦斯解吸能力与卸压速度呈正相关的关系。

3 讨 论

煤与瓦斯突出激发之后,煤变形能主要作用于煤体的破碎,而瓦斯膨胀能则为煤体的抛出和搬运提供主要能量。煤在瓦斯膨胀能作用下的抛掷和运输是突出的直接表现。本节主要讨论卸压速度对瓦斯膨胀能的控制作用及其在突出连续发展中重要地位。

已经有诸多学者从突出能量的计算方法、突出的能量判据等不同的角度对瓦斯膨胀能进行了研究,并提出了各种瓦斯膨胀能的计算模型。有学者^[39-40]从突出调查报告中获得整个突出过程中释放的瓦斯体积,然后计算出瓦斯膨胀能。这样计算会导致瓦斯膨胀能被过分高估,因为不是所有的突出瓦斯都参与了突出的抛出和搬运。由于只有一部分释放的瓦斯参与突出过程中做功,所以不同瓦斯膨胀能计算模型中变量的不同取值方法会导致计算结果存在数量

级的差异。

主要讨论卸压速度对瓦斯膨胀能的控制作用,故不对计算模型进行更深层次的讨论。研究采用李成武等^[40]提出的瓦斯膨胀能做功的计算模型,计算模型见式(3)。为了使得计算模型更具合理性,本文采用了不同的变量取值方法,具体参见3.1节。

$$W = \frac{P_0 V_0}{n-1} \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: P_0 突出巷道环境瓦斯压力,MPa; V_0 为单位煤体参与突出的瓦斯体积,m³/t; P_1 为突出发生时候的瓦斯压力,MPa; n 为绝热指数,其值为1.31。

3.1 不同卸压速度条件下构造煤瓦斯膨胀能

初始解吸阶段的瓦斯气体在突出过程中起着关键作用,JIN等^[29]进行粉煤-瓦斯两相流研究后,发现突出的总能量中,粉煤瓦斯的快速解吸提供了73.3%~89.95%的能量。煤体内部大部分气体是以吸附态存在的,本文假设不同卸压速度条件下破碎煤体的解吸量作为提供瓦斯膨胀能的主要来源。突出发生的时间非常短,一般在几十秒内便完成突出。在如此短的时间内,实际作用于突出过程的瓦斯体积非常有限,因此根据图6破碎煤样的反算瓦斯曲线,将破碎煤体的前30 s的反算瓦斯解吸量设为单位煤体参与突出做功的瓦斯量即 V_0 。将各个瓦斯平衡压力视为突出压力 P_1 ,大气压力视为环境压力 P_0 ,根据式(3)计算解吸瓦斯膨胀能 W ,计算结果见表4。根据计算结果绘制各突出压力下解吸瓦斯膨胀能与卸压速度的关系如图7所示。

结合表4和图7可知,当瓦斯压力一定时,瓦斯膨胀能随着卸压速度的增大而增大。以平衡压力为1.00 MPa,初始围压为20 MPa下的卸压试验为例,当卸压速度由0.01 MPa/s增大至0.10 MPa/s时,参与突出做功的瓦斯量由0.79 m³/t增大至0.96 m³/t,增大了21.52%,单位质量煤体的瓦斯膨胀能由0.19 m³/t增大至0.23 m³/t,增大了21.05%。在同一卸压速度下随着瓦斯压力的升高,瓦斯膨胀能呈现逐渐增大的趋势。瓦斯膨胀能的数量级在0.1~1 J/g,这与WANG等^[41]的研究结果一致。由此可见,卸压速度越大,瓦斯压力越高,突出时参与做功的瓦斯量就越多,瓦斯膨胀能也就越大,增加了瓦斯突出危险性。

3.2 卸压速度对瓦斯膨胀能的控制作用

卸压速度越大,煤体破碎后释放的瓦斯膨胀能越大。本节对卸压速度如何控制瓦斯膨胀能进行讨论。LEI等^[42]统计了1977—2020年的117次突出事故的瓦斯释放量和突出强度。突出事故的突出强度与瓦

表 4 不同卸压速度条件下瓦斯膨胀能计算结果

Table 4 Calculation results of gas expansion energy under different pressure-unloaded speed

初始围压/MPa	卸压速度/ (MPa · s ⁻¹)	P ₁ /MPa	V ₀ /(m ³ · t ⁻¹)	瓦斯膨胀能/ (J · g ⁻¹)	初始围压/MPa	卸压速度/ (MPa · s ⁻¹)	P ₁ /MPa	V ₀ /(m ³ · t ⁻¹)	瓦斯膨胀能/ (J · g ⁻¹)
10	0.01	0.74	0.52	0.10	20	0.01	0.74	0.58	0.11
		1.00	0.73	0.17			1.00	0.79	0.19
		2.00	0.93	0.31			2.00	1.02	0.34
		3.00	1.05	0.42			3.00	1.15	0.46
		4.00	1.08	0.49			4.00	1.15	0.52
	0.05	0.74	0.64	0.13	0.05	0.74	0.71	0.14	
		1.00	0.85	0.20		1.00	0.92	0.22	
		2.00	1.11	0.37		2.00	1.20	0.40	
		3.00	1.24	0.50		3.00	1.36	0.54	
		4.00	1.27	0.57		4.00	1.36	0.62	
	0.10	0.74	0.70	0.14	0.10	0.74	0.75	0.15	
		1.00	0.92	0.22		1.00	0.96	0.23	
		2.00	1.20	0.40		2.00	1.26	0.42	
		3.00	1.35	0.54		3.00	1.43	0.57	
		4.00	1.37	0.62		4.00	1.43	0.65	

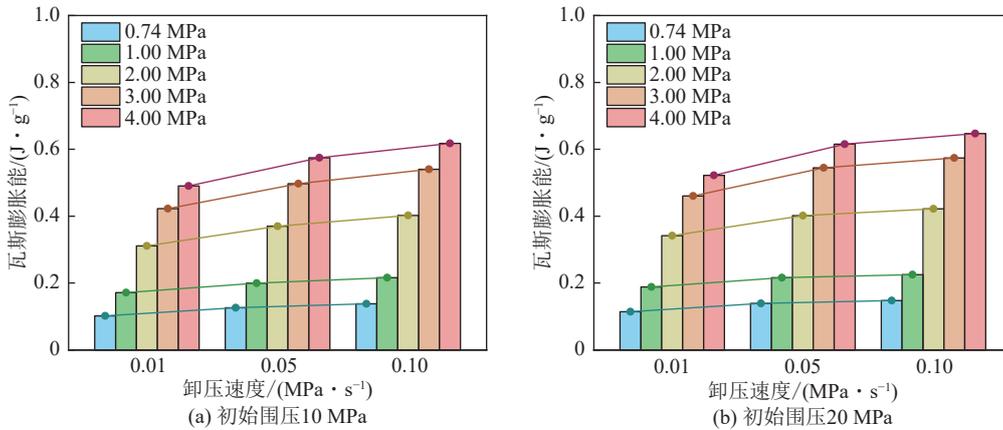


图 7 不同卸压速度条件下的瓦斯膨胀能

Fig.7 Gas expansion energy under different pressure-unloaded speed

斯释放量统计如图 8 所示。

图 8 说明了瓦斯释放量和突出强度的关系是恒定的, 强调了瓦斯解吸在促进突出发展方面的关键作用。JIN 等^[29]和聂百胜等^[43]的研究都表明常规粒径煤样的瓦斯解吸量并不能满足突出发生所需要的能量。粉煤是突出发生和发展的必要条件, 并且突出过程中存在一个临界粒径值, 只有煤体破碎至临界粒径甚至是更小粒径时, 才能提供搬运煤体所需要的能量。破碎煤样的筛分结果表示, 煤体的粉化程度会随着卸压速度的增大而增大。将能够表示煤体粉化程度的分形维数与相对应的瓦斯膨胀能数据绘制成曲线如图 9 所示。

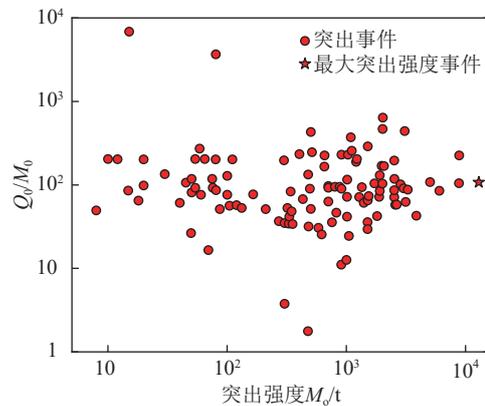


图 8 突出事故的突出强度与瓦斯释放量统计^[42]

Fig.8 Outburst intensity and gas release statistics for outbursts^[42]

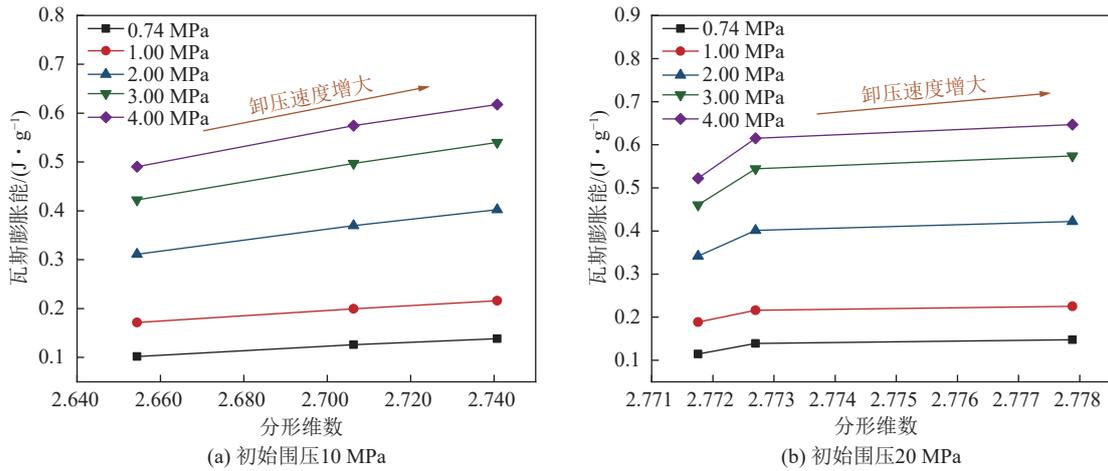


图 9 瓦斯膨胀能与分形维数的关系

Fig.9 Relationship between gas expansion energy and fractal dimension

由于构造煤特殊的摩擦结构,在煤体破碎前就会一直产生耗散能,这些能量会造成煤体的破碎程度、气体流动通道和煤体内能的增加^[9,44]。由图 9 可以看出,卸压速度越大,分形维数越大,瓦斯膨胀能越大。这可能是因为卸压速度的提高使得煤体产生了更多的耗散能,从而增加了破碎煤体的粉化程度和气体流动通道。同时产生的耗散能也会提高煤体的内能,产生的热量也会促进瓦斯的解吸,这也解释了破碎煤体的反算解吸量会随卸压速度的增大而增大。因此,增大卸压速度会增加煤体的破碎程度、气体流动通道和

煤体内能,从而造成瓦斯解吸量增加,最终导致瓦斯膨胀能的增加。

3.3 卸压速度在突出连续发展中的重要作用

突出的发展阶段是煤体内部损伤不断扩展,破碎煤不断被抛出并搬运的连续过程。卸压速度在突出的连续发展中扮演了重要的角色。构造煤突出的连续发展过程中煤体的卸压状态和卸压速度控制瓦斯膨胀能的正反馈循环如图 10 所示。

突出发展阶段实际上是应力破坏煤体,变形能释放,煤体被粉化,释放的瓦斯将煤体抛出,推动应力峰

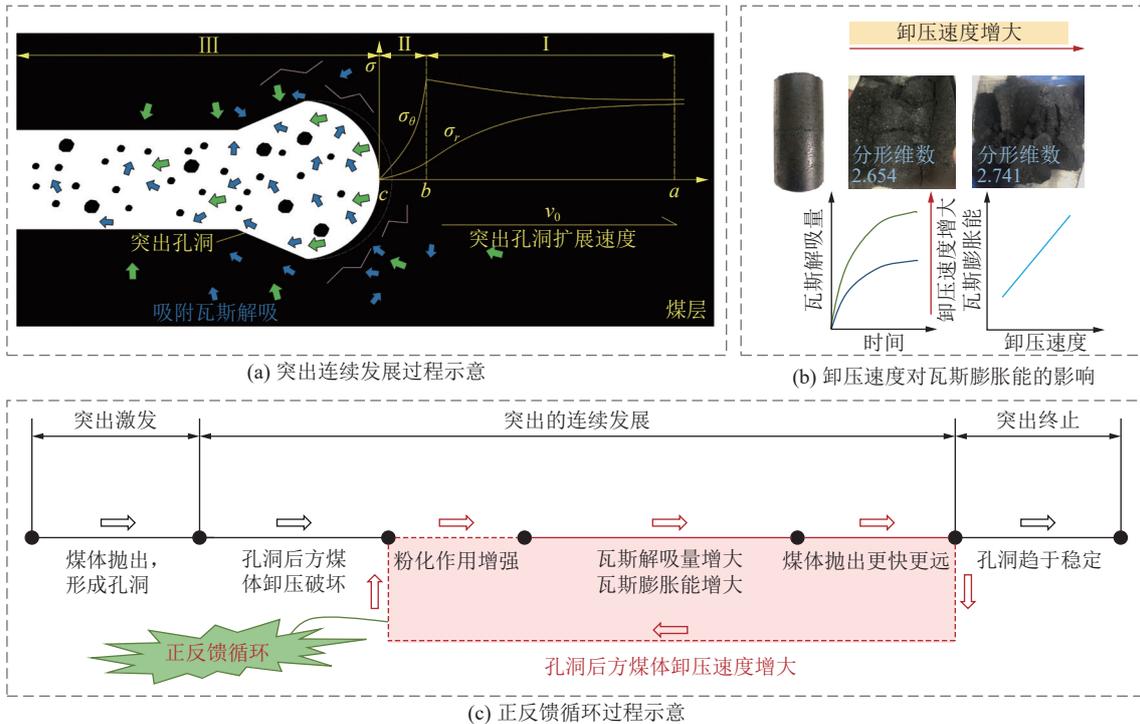


图 10 构造煤突出连续发展过程中卸压速度控制瓦斯膨胀能的正反馈循环

Fig.10 Positive feedback cycle process for controlling gas expansion energy by pressure-unloaded speed in the continuous development of tectonic coal outburst

值向煤体内部转移,继续破坏煤体的连续过程。当突出孔洞在煤体中扩大时,所经过的任一煤体质点都将经历 3 个不同的阶段,如图 10a 所示。

I 应力集中阶段:图 10a 中的 a 点对应着初始应力状态,此时煤体质点上的切向应力等于径向应力。随着突出孔洞的逐渐扩大,质点逐渐从 a 点过渡到 b 点。切向应力不断增大,径向应力不断减小。

II 煤体破碎粉化阶段:当切向应力增大至煤体的峰值应力即质点处于 b 点时,煤体破碎,变形能释放,煤体被粉化,质点瓦斯快速解吸。

III 煤体抛出搬运阶段:当煤体质点过渡到突出孔洞边缘 c 点时,解吸的大量瓦斯将被粉化的煤体快速抛出。

在应力集中阶段径向应力不断减小是受煤体抛出速度影响的,煤体抛出速度越快,突出孔洞的扩大速度越快,径向应力的卸压速度越大。由图 10b 所示,卸压速度越大,瓦斯膨胀能越大,煤体的抛出速度和突出孔洞扩展速度也就越大。突出孔洞扩展速度的增大又导致卸压速度增大。如图 10c 所示,卸压速度控制瓦斯膨胀能的正反馈过程不断循环,促成了突出的连续发展。

3.4 对于突出事故控制的启示

突出一旦激发,突出孔洞后方煤体的卸压速度不断增大,瓦斯膨胀能也不断增大,导致了突出的连续发展。已有的防突措施多关注于突出的预防和监测,鲜有针对突出发展过程中的灾害控制措施。虽然煤矿已经进行了大量的预防和监测监控工作,但是突出事故仍然时有发生。卸压速度在突出连续发展过程中的重要作用为我们提供了一种新的控制突出事故的思路。可以预先采取一些措施在突出发展阶段的最初期降低煤体的抛出速度,从而降低突出孔洞后方煤体的卸压速度。

事实上,在煤矿的一些措施中如孔口防喷装置已经体现了这种思路^[45]。喷孔是指打孔或者扩孔过程中煤和瓦斯混合物突然持续喷出的现象,大多数情况下可以看作小型突出。防喷孔装置可以利用液压系统有效阻挡并收集喷出的煤粉和瓦斯,增加突出煤粉的抛运阻力,降低突出孔洞后方煤体的卸压速度,有效防止喷孔现象的连续发展。将思路应用到其他措施中或许能够有更佳的效果,以石门揭煤为例,除了采取预抽瓦斯和排放钻孔措施降低瓦斯含量,降低煤体的瓦斯膨胀潜能,还可以采取一些辅助措施如金属骨架和煤体固化。一方面可以加强煤体强度,另一方面如果发生突出,这些措施可以弱化煤体的粉化作用和抛出速度,从而减缓甚至打断正反馈过程的循环,

达到控制突出事故的目的。针对突出连续发展过程控制突出事故的更多措施和技术需要进行进一步的研究。

4 结 论

1) 卸压对构造煤强度具有一定的弱化作用。卸压速度从 0.01 MPa/s 增大至 0.10 MPa/s 时,初始围压 10 MPa 和 20 MPa 条件下构造煤样的峰值应力分别从 30.03 MPa 和 58.31 MPa 降低至 25.69 MPa 和 51.41 MPa。卸压速度越大,弱化作用越强,构造煤强度和抵抗变形的能力越弱,越容易发生破坏。

2) 随着卸压速度的增大,构造煤破碎后的粉化程度增大,破碎煤样的瓦斯解吸量亦随之增高。卸压速度从 0.01 MPa/s 增大至 0.10 MPa/s 时,破碎煤样 120 min 瓦斯解吸量的增大了 18.69% ~ 20.88%。

3) 随着卸压速度的增大,构造煤样的破碎程度、气体流动通道和煤体内能增加,初始瓦斯解吸量也随之增加,最终导致瓦斯膨胀能的增加。卸压速度从 0.01 MPa/s 增大至 0.10 MPa/s 时,瓦斯膨胀能增大了 21.05% ~ 40.00%。

4) 卸压速度是促成构造煤突出连续发展重要角色之一。在突出连续发展过程中,煤体卸压速度越大,粉化作用越强,瓦斯膨胀能越大,煤体的抛出速度也就越大,导致煤体卸压速度增大。这个正反馈过程的不断循环,导致了突出的连续发展。

参考文献(References):

- [1] 袁亮,吴劲松,杨科.煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):861-868.
YUAN Liang, WU Jinsong, YANG Ke. Key technology and its application of coal safety intelligent precision mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 861-868.
- [2] 翟成,丛钰洲,陈爱坤,等.中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干思考及展望[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1146-1161.
ZHAI Cheng, CONG Yuzhou, CHEN Aikun, et al. Reflection and prospect on the prevention of gas outburst disasters in China's coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1146-1161.
- [3] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [4] KĘDZIOR S, DREGER M. Methane occurrence, emissions and hazards in the upper Silesian coal basin, Poland[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 211: 103226.
- [5] 郭德勇,揣筱升,张建国,等.构造应力场对煤与瓦斯突出的控制作

- 用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3076–3090.
- GUO Deyong, CHUAI Xiaosheng, ZHANG Jianguo, et al. Controlling effect of tectonic stress field on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3076–3090.
- [6] 程远平, 雷杨. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 180–198.
- CHENG Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 180–198.
- [7] 唐巨鹏, 任凌冉, 潘一山, 等. 高地应力条件煤与瓦斯突出冲击力演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 116–128.
- TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, et al. Study on the impact force evolution law of coal and gas outburst under high ground stress[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 116–128.
- [8] 高魁, 乔国栋, 刘泽功, 等. 煤与瓦斯突出机理分类研究构想及其应用探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 1043–1051.
- GAO Kui, QIAO Guodong, LIU Zegong, et al. On classification conception of coal and gas outburst mechanism and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 1043–1051.
- [9] 程远平, 王成浩. 构造煤变形能在煤与瓦斯突出中的作用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 645–663.
- Cheng Yuanping, Wang Chenghao. Deformation energy of tectonic coal and its role in coal and gas outbursts [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 645–663.
- [10] 罗明坤, 范超军, 李胜, 等. 煤与瓦斯突出的地质动力系统失稳判据研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 137–144.
- LUO Mingkun, FAN Chaojun, LI Sheng, et al. Failure criteria of the geological dynamic system of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 137–144.
- [11] 王亮, 郑思文, 陆壮, 等. 强突煤层群非连续开采应力叠加特征与瓦斯分区精准防治[J/OL]. 煤炭学报: 1–14[2024–06–03]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0027>.
- Wang Liang, Zheng Siwen, Lu Zhuang, et al. Precise zoning control of coal seam gas in discontinuous mining face of strong outburst coal seams group [J/OL]. Journal of China Coal Society: 1–14[2024–06–03]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0027>.
- [12] 李成武, 乔朕. 煤与瓦斯突出局部防突措施失效判定方法[J/OL]. 煤炭学报: 1–10[2024–06–02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1687>.
- Li Chengwu, Qiao Zhen. Failure determination method regarding local outburst prevention measures for coal and gas outburst[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2024, 1–10[2024–06–02]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1687>.
- [13] XUE Y, RANJITH P G, GAO F, et al. Mechanical behaviour and permeability evolution of gas-containing coal from unloading confining pressure tests[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 40: 336–346.
- [14] 徐佑林, 康红普, 张辉, 等. 卸荷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, 2014, 33(S2): 3476–3488.
- XU Youlin, KANG Hongpu, ZHANG Hui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing gas under unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3476–3488.
- [15] YIN G Z, LI W P, JIANG C B, et al. Mechanical property and permeability of raw coal containing methane under unloading confining pressure[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(6): 789–793.
- [16] 蒋静宇, 史孝宁, 程远平, 等. 急速卸压条件下构造煤体应力释放规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 634–644.
- JIANG Jingyu, SHI Xiaoning, CHENG Yuanping, et al. Study on stress release law of tectonic coal under rapid unloading confining pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 634–644.
- [17] CHEN H D, CHENG Y P, REN T X, et al. Permeability distribution characteristics of protected coal seams during unloading of the coal body[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 105–116.
- [18] 刘永茜, 韩国锋, 王维华, 等. 不同卸载速率下受载煤体裂隙结构演化机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3806–3816.
- LIU Yongqian, HAN Guofeng, WANG Weihua, et al. Evolution mechanism of fracture structure of loaded coal under different unloading rates[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3806–3816.
- [19] 许江, 周斌, 彭守建, 等. 基于热-流-固体体系参数演变的煤与瓦斯突出能量演化[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 213–222.
- XU Jiang, ZHOU Bin, PENG Shoujian, et al. Evolution of outburst energy based on development of heat-flow-solids parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 213–222.
- [20] B B 霍多特. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [21] 王刚, 武猛猛, 王海洋, 等. 基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 238–248.
- WANG Gang, WU Mengmeng, WANG Haiyang, et al. Sensitivity analysis of factors affecting coal and gas outburst based on a energy equilibrium model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 238–248.
- [22] 赵鹏翔, 卓日升, 李树刚, 等. 采动覆岩卸压瓦斯运储通道属性参数拓扑关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 135–149.
- ZHAO Pengxiang, ZHUO Risheng, LI Shugang, et al. Research on the evolution mechanism of the topological relationship of the property parameters of the mining overburden rock pressure relief gas migration channel[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 135–149.
- [23] 聂百胜, 赵丹, 王孟霞, 等. 含瓦斯煤体受载微破坏模型及失稳判识准则[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 707–719.
- NIE Baisheng, ZHAO Dan, WANG Mengxia, et al. Micro-damage model of gas-bearing coal under load and instability identification criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 707–719.
- [24] 王刚, 程卫民, 谢军, 等. 煤与瓦斯突出过程中煤体瓦斯的作用研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 116–120.
- WANG Gang, CHENG Weimin, XIE Jun, et al. Study on the effect of gas in the coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(9): 116–120.
- [25] CHENG Y P, PAN Z J. Reservoir properties of Chinese tectonic coal: a review[J]. Fuel, 2020, 260: 116350.

- [26] 闫江伟, 张小兵, 张子敏. 煤与瓦斯突出地质控制机理探讨[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1174–1178.
YAN Jiangwei, ZHANG Xiaobing, ZHANG Zimin. Research on geological control mechanism of coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1174–1178.
- [27] 张玉贵, 张子敏, 曹运兴. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 281–284.
ZHANG Yugui, ZHANG Zimin, CAO Yunxing. Deformed-coal structure and control to coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 281–284.
- [28] 张超林, 许江, 王恩元, 等. 突出煤体破碎抛出及粒度分布规律试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 784–792.
ZHANG Chaolin, XU Jiang, WANG Enyuan, et al. Experimental study of breaking characteristics and particle size distribution of ejected coal after outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 784–792.
- [29] JIN K, CHENG Y P, REN T, et al. Experimental investigation on the formation and transport mechanism of outburst coal-gas flow: implications for the role of gas desorption in the development stage of outburst[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 194: 45–58.
- [30] JIANG J Y, HUANG Y M, CHENG Y P, et al. Study on the evolution of pore structure and desorption characteristics of crushed tectonic coals under the different conditions of unloading confining pressure[J]. Powder Technology, 2023, 426: 118681.
- [31] 张遵国, 陈毅, 赵丹, 等. 原煤与型煤 CO₂ 吸附/解吸及变形特征对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 793–803.
ZHANG Zunguo, CHEN Yi, ZHAO Dan, et al. Comparative study of adsorption/desorption and deformation characteristics of raw and briquette coals under CO₂[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 793–803.
- [32] 王延宁, 张强, 李子仪, 等. 考虑弹塑性耦合效应的应变软化模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4037–4051.
WANG Yanning, ZHANG Qiang, LI Ziyi, et al. Strain softening model considering elastic-plastic coupling effect[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4037–4051.
- [33] WANG C H, CHENG Y P, JIANG J Y, et al. Effect of gas adsorption on breakage energy of tectonic coal particles[J]. Powder Technology, 2022, 406: 117575.
- [34] WANG C H, CHENG Y P, JIANG J Y, et al. Influences of double-sided molding method and initial particle size on fragmentation characteristics of reconstituted coal briquette[J]. Fuel, 2023, 349: 128732.
- [35] KEULEN N, HEILBRONNER R, STÜNITZ H, et al. Grain size distributions of fault rocks: a comparison between experimentally and naturally deformed granitoids[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(8): 1282–1300.
- [36] HUANG J Y, HU S S, XU S L, et al. Fractal crushing of granular materials under confined compression at different strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 106: 259–265.
- [37] 李博, 游波, 张慧杰, 等. 不同粒径煤的瓦斯放散初期规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(4): 64–70.
LI Bo, YOU Bo, ZHANG Huijie, et al. Experimental study on law of gas emission of coal with different particle sizes at initial stage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(4): 64–70.
- [38] 刘彦伟, 刘明举. 粒度对软硬煤粒瓦斯解吸扩散差异性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 579–587.
LIU Yanwei, LIU Mingju. Effect of particle size on difference of gas desorption and diffusion between soft coal and hard coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 579–587.
- [39] ZHENG Z. The mechanism of coal and gas outburst from the view of quantity and dimensional analysis[J]. Collect Work ZHENG Zhemin, 2004: 382–392.
- [40] 李成武, 解北京, 曹家琳, 等. 煤与瓦斯突出强度能量评价模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1547–1552.
LI Chengwu, XIE Beijing, CAO Jialin, et al. The energy evaluation model of coal and gas outburst intensity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1547–1552.
- [41] WANG C H, CHENG Y P. Role of coal deformation energy in coal and gas outburst: a review[J]. Fuel, 2023, 332: 126019.
- [42] LEI Y, CHENG Y P, WANG L, et al. Identical acoustic waveforms found between different-sized outbursts: implications for the propagation mechanism of coal and gas outbursts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(11): 6887–6903.
- [43] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 207–220.
NIE Baisheng, MA Yankun, HE Xueqiu, et al. Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: a preliminary study[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(2): 207–220.
- [44] MENG H, YANG Y Z, GUO H J, et al. Experimental study on the determinant factors and energy criterion of coal and gas outbursts[J]. ACS Omega, 2023, 8(40): 37248–37263.
- [45] 黄春明, 代志旭, 郭明功. 高压水射流割缝增强瓦斯抽采及防喷孔技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(4): 63–66, 109.
HUANG Chunming, DAI Zhixu, GUO Minggong. Study on enhanced gas drainage and borehole outburst prevention technology with high pressurized water jet slotting[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(4): 63–66, 109.