

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.002

## 力-热耦合作用下煤岩动力学特性和 破碎机理研究\*

李鹏龙<sup>1a,1b</sup>, 罗宁<sup>1a,1b,2</sup>, 索云琛<sup>1a,1b</sup>, 柴亚博<sup>1a,1b</sup>, 孙锐<sup>1a,1b</sup>

(1. 中国矿业大学 a. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室; b. 力学与土木工程学院, 徐州 221116;  
2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了安全高效地进军深部煤炭资源开采, 开展深地“三高一扰动”环境下煤岩的动态力学特性和破碎机理研究, 采用自主改进的 $\phi 50$  mm 高温同步分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统, 对25~200°C 温度下煤岩进行动态冲击试验研究, 并改进ZWT粘弹性本构模型建立考虑温度效应的煤岩动态本构方程, 基于有限差分-离散元数值模拟研究高温效应对煤岩裂纹发育规律及其动态强度的影响。研究表明: 高温冲击作用下煤岩的动态应力应变曲线可划分为四个阶段: 压密阶段、弹性阶段、裂纹增长阶段和软化失效阶段; 随着温度的增加, 煤岩的动态抗压强度和动态弹性模量劣化明显, 失效应变呈现增加趋势, 吸收能则呈现W型波动趋势; 破碎粒径减小, 分形维数则呈现明显的线性增加, 抗压强度越低, 破碎程度越高, 破碎模式更为复杂; 基于ZWT改进后的动态本构模型良好地表达高温冲击后的应力应变关系, 但对压密阶段的表达不甚理想; 模拟和试验结果显示煤岩在150°C高温后水成分和吸附气体活跃析出, 煤基质受热膨胀破裂, 出现明显细观裂纹, 并逐渐发育为贯通裂纹, 其中以剪切裂纹为主。煤岩在100°C下动态压缩的裂纹发育从受撞击面发育贯通, 高温劣化煤岩强度。研究结论为“三高一扰动”深部复杂地况下煤炭资源安全高效开采提供基础理论支持。

**关键词:** 深部煤岩; 力-热耦合; 分离式霍普金森压杆; 动态本构模型; 有限差分-离散元

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)04-0008-10

## Study on Dynamic Characteristics and Fracture Mechanism of Coal Rock under Action of Mechanical-thermal Coupling

LI Peng-long<sup>1a,1b</sup>, LUO Ning<sup>1a,1b,2</sup>, SUO Yun-chen<sup>1a,1b</sup>, CHAI Ya-bo<sup>1a,1b</sup>, SUN Rui<sup>1a,1b</sup>

(1. a. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering;  
b. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology,  
Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To carry out deep coal mining safely and efficiently, the dynamic mechanical characteristics and frac-

收稿日期(Date of reception): 2023-12-21

网络首发日期(Published online): 2024-03-04

作者简介: 李鹏龙(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石冲击动力学方向的学习研究, (E-mail) 2337807483@qq.com。

通讯作者: 罗宁(1980-), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事爆炸与冲击动力学(高性能计算与冲击防护理论)、深地岩石动力学(资源能源开发及关键力学问题)等相关科学技术的研究, (E-mail) nluo@cumt.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0711800); 国家自然科学基金项目(12072363)

**About the author:** LI Peng-long(1999-), male, master's degree candidate, mainly engaged in the study and research of rock impact dynamics, (E-mail) 2337807483@qq.com.

**Corresponding author:** LUO Ning(1980-), male, Ph. D, professor and doctoral supervisor, mainly engaged in the research of explosion and impact dynamics(high-performance computing and impact protection theory), deep rock dynamics(resource and energy development and key mechanical problems) and other related science and technology, (E-mail) nluo@cumt.edu.cn.

**Fund Programs:** National Key R&D Program(2020YFA0711800); National Natural Science Foundation of China(12072363)

ture mechanism of coal rock in deep earth were investigated under the ‘three high and one disturbance’ environment. A dynamic impact test of coal rock was carried out using the self-improved  $\phi 50$  mm high temperature synchronous split Hopkinson pressure bar (SHPB) test equipment at temperatures between 25 ~ 200°C. A ZWT viscoelastic constitutive model was also improved to establish a dynamic constitutive equation considering the temperature effect. The influence of high temperature on crack development law and the dynamic strength of coal rock was investigated based on the coupling of the finite difference and discrete element methods. The results show four stages to the dynamic stress-strain curve of coal rock under high-temperature impact: compaction, elastic, crack propagation, and softening failure. The dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of coal rock significantly decrease as temperature increases. In contrast, the failure strain increases, and the absorbed energy varies in a W-shaped pattern. The fractal dimension increases linearly as the particle size decreases. The degree and complexity of the fragmentation mechanism increase as the compressive strength decreases. Although the improved dynamic constitutive model based on ZWT could adequately express the stress-strain relationship following a high-temperature impact, it does not apply to the compaction stage. According to the simulation and test results, water and adsorbed gas actively escape in the coal rock at 150°C. The coal matrix is also heated and expanded, which induces cracks. There are apparent mesoscopic cracks initially and gradually developed through cracks, mainly shear ones. The crack development of coal rock under dynamic compression at 100°C develops through the impact surface, and the high temperature deteriorates the strength of coal rock.

**Key words:** deep coal rock; mechanical-thermal coupling; split Hopkinson pressure bar; dynamic constitutive model; finite difference-discrete element method

随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭,煤矿开采深度已然向深部进军步入千米,开采过程中所遇到的困难甚至隐藏动力灾害也在随之剧增,如图(1)所示,千米深地下煤炭资源的安全高效开采面临着“三高一扰动”(高地应力、高地温、高渗透压以及强开采扰动)的复杂储层条件<sup>[1-3]</sup>。煤岩是对温度、构造应力、水饱和等因素都十分敏感的有机岩石,在高温作用下会发生复杂的物理和化学变化,导致其力学特性与常温下的有本质上的差异<sup>[4,5]</sup>。研究常规温度下煤岩的动态力学特性并不能完全地揭露千米深井下煤炭爆破开采工艺中所涉及的力学机理,揭示煤岩在原位环境下的非线性行为,因此研究力-热耦合作用下煤岩的动态力学特性和破碎机理研究对于深部矿井高效安全作业具有重要的理论指导作用。

迄今为止,国内关于高温、高压下煤岩的力学特性和破碎机理的研究仍然较少。早于 1997 年,姜波开展研究了高温、高压下煤岩的变形研究<sup>[6]</sup>,指出煤对于温度的敏感度远大于压力,随着温度的上升,抗压强度随之降低。此后,齐消寒研究了热冲击对煤岩细观损伤的作用<sup>[7]</sup>,发现热冲击促使煤岩内部产生大量的微裂纹,温度升高,强度随之降低。马占国通过 MTS810 伺服试验系统研究高温作用下煤岩的力学特性<sup>[8]</sup>,发现煤在温度范围内呈现增减的波动趋势,而非单一减少。李波波研究了力-热耦合下煤岩的损伤变化<sup>[9]</sup>,发现随着温度的升高,抗压强度降低,并建立了力-热耦合下煤岩损伤本构模型。此外,许金余也建立了岩石的高温动态统计损伤本

构<sup>[10]</sup>。在其他岩石方面,李明研究了常温与 800°C 高温冲击后砂岩的动态力学行为<sup>[11]</sup>,发现加热后的峰值应力要大于常温下峰值应力。张志镇研究了高温冲击下花岗岩的力学特性<sup>[12]</sup>。但是截至目前,上述学者均只单一研究静态高温岩石的力学行为和破碎机理,研究高温冲击下煤岩的动态力学特性仍十分缺少。煤岩的内部孔隙结构十分复杂,对高温敏感,煤岩基质受热膨胀,吸附气体易析出,导致其变化趋势十分不稳定,瞬态冲击下的力学特性更是难以分析。为了解决相关科学问题,采用自主改进高温同步 SHPB 试验系统开展了力-热耦合作用下煤岩的动态力学特性和破碎机理研究。

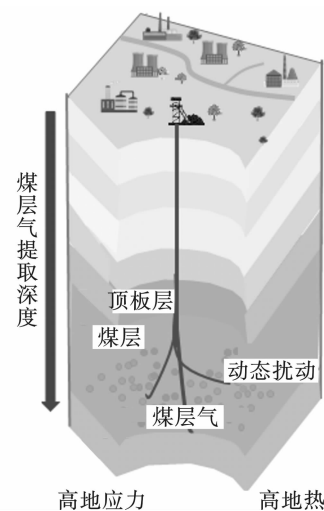


图 1 煤炭资源开采示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coal resources exploitation

## 1 动态冲击实验

### 1.1 试样加工过程

本次力-热耦合冲击试验所需用的煤样均采自陕西省府谷县张明沟煤矿,根据《中国爆破行业协会团体标准》(T/CSEB 0004—2018)要求,煤岩试样如图 2,加工为直径 50 mm、高 25 mm 的标准岩石冲击试样,其长径比为 0.5 满足冲击试验要求,为了防止冲击试验由于端面粗糙导致的应力弥散,采用端面磨石机对试样端面打磨光滑,使其加载面光洁度和平整度小于 0.02 mm,最大程度地降低试样差异所引发的试验误差。

### 1.2 高温 SHPB 试验系统及理论基础

如图 3 所示,高温 SHPB 试验系统基于传统单轴 SHPB 改进而成,试验装置包括冲击短杆、入射杆、透射杆、吸收杆、缓冲阻尼、激光测速仪和动态试

验分析,在此之上所增加的高温加载装置,温度控制装置和高温同步装置可以保证煤岩在目标温度范围内(25~200℃)实现实时同步冲击。为了保证煤样内部受热均匀,在温度上升至目标温度后,在高温加载炉中维持 3 h,杆件夹紧维持固定,加载 0.2 MPa 冲击气压实现高温状态下煤样的实时同步冲击<sup>[13]</sup>,具体 SHPB 杆件材料参数如表 1 所示。

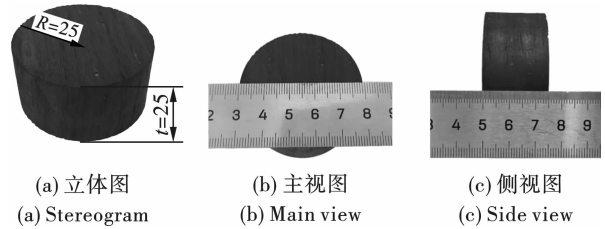


图 2 煤岩试样示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of coal sample(unit:mm)

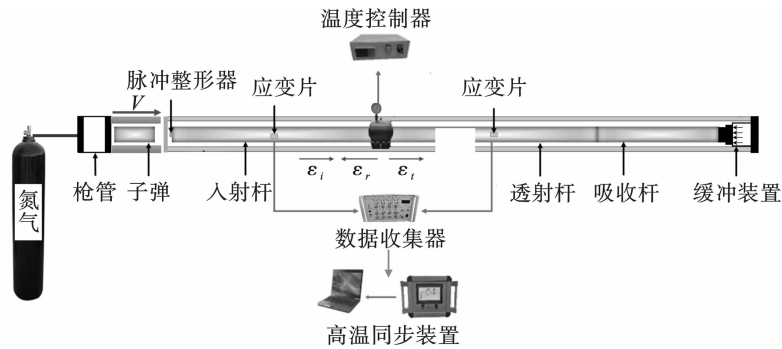


图 3 高温 SHPB 测试系统

Fig. 3 High temperature SHPB test system

表 1 具体 SHPB 杆件参数

Table 1 Specific SHPB bar parameters

材料	冲击杆	入射杆	透射杆	吸收杆	泊松比
锰硅弹簧钢	500 mm	3000 mm	3000 mm	1200 mm	0.29
弹性模量	密度	纵波速度	抗拉强度	屈服强度	断面收缩率
210 GPa	7800 kg/m <sup>3</sup>	5188 m/s	$\sigma_b \geq 1274$ MPa	$\sigma_s \geq 1176$ MPa	$\psi \geq 25\%$

力-热耦合冲击试验过程中对于试样应力应变的计算需要满足一维应力波和应力均衡性假设,由此可得式(1),如图 4 所示,加载过程中实现煤岩各处的应力应变均衡化<sup>[13-15]</sup>,因此可将式(1)简化至式(2)。

$$\begin{cases} \sigma_S = \frac{A_B}{2A_S} E_B (\varepsilon_1 + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \\ \dot{\varepsilon}_S(t) = \frac{C_0}{L_S} (\varepsilon_1 - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \\ \varepsilon_S = \int_0^t \dot{\varepsilon}_S(\tau) d\tau \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_S = \frac{A_B}{A_S} E_B \varepsilon_T \\ \dot{\varepsilon}_S(t) = -2 \frac{C_0}{L_S} \varepsilon_R \\ \varepsilon_S = -2 \frac{C_0}{L_S} \int_0^t \varepsilon_R d\tau \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_R$ 和 $\varepsilon_T$ 分别是入射、反射和透射应变脉冲; $A_B$ 和 $A_S$ 是杆件和煤岩的横截面积; $E_B$ 为杆件弹性模量; $\sigma_S$ 、 $\dot{\varepsilon}_S(t)$ 和 $\varepsilon_S$ 分别是试样的应力、应变率和应变; $C_0$ 为杆的弹性纵波速度; $L_S$ 是煤岩的初始长度。

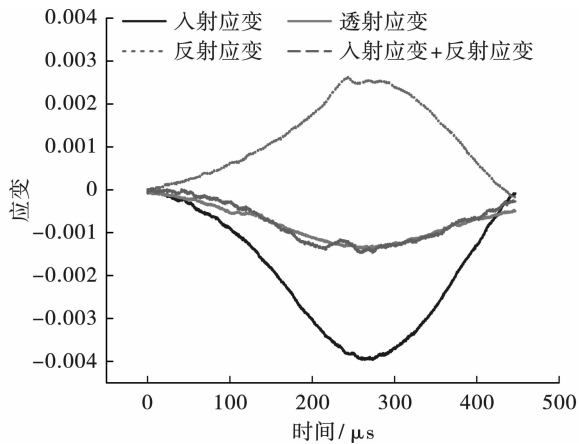


图4 煤岩应力均匀性验证

Fig. 4 Verification of coal rock stress uniformity

## 2 力-热耦合作用下煤岩应力-应变的变化特征

如图5所示,力-热耦合作用下的应力应变曲线可以划分为4部分:Ⅰ(压密阶段)、Ⅱ(弹性阶段)、Ⅲ(裂纹增长阶段)和Ⅳ(失效阶段)。Ⅰ阶段的历时十分短暂,煤岩内部的原生裂纹以及高温产生的次生微裂纹在高速冲击下只能短暂闭合或未经闭合即进入Ⅱ阶段,因此曲线的压密效果并不明显,应力应变并未有较大起伏。在Ⅱ阶段,内部的大量孔隙和微裂纹吸收能量,提高煤岩弹性变形的能力,而在吸收能量相互贯通之后则进入Ⅲ阶段,微小裂纹发育贯通形成更多的宏观主裂纹,其应力集中导致其主裂纹快速发育,应力达到峰值。在Ⅳ阶段,应力应变曲线的失效阶段的历时明显高于峰值前,最终完全破碎失效<sup>[16]</sup>。

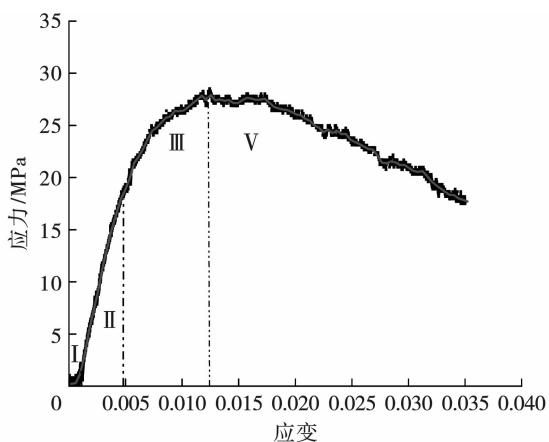


图5 力-热耦合作用下动态应力-应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves under force-thermal coupling

## 3 力-热耦合作用下煤岩的动态力学特性

### 3.1 动态抗压强度的变化特征

如图6所示,随着温度的增加,动态抗压强度逐渐减小,温度对煤岩动力学强度具有显著劣化效果,且在100℃之前下降迅速,之后缓慢下降。煤岩内部具有大量原生裂纹、吸附气体和游离水,温度升高,煤岩内部水成分开始蒸发逸出,吸附气体活跃析出,煤基质受热膨胀破裂,导致裂缝网络开始发育贯通,导致煤岩透气性增强,整体力学性能劣化。在100℃之前,游离水逸出效果占据主导,煤基质处于弹性变形阶段,受热膨胀体积增大明显,动态抗压强度劣化明显,之后,游离水蒸气析出结束,煤吸附气体(CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>)活跃析出,煤基质断裂破坏,动态抗压强度持续下降。

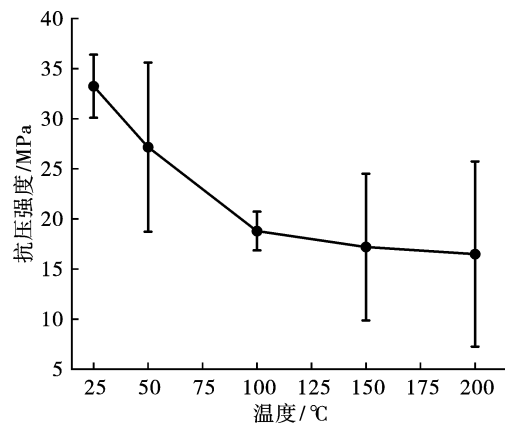


图6 抗压强度随温度的变化规律

Fig. 6 Variation of compressive strength with temperature

### 3.2 动态失效应变和动态弹性模量的变化特征

本文采用式(3)所示0.4倍和0.6倍峰值应力与其应变差之比计算煤岩的动态弹性模量。

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_1$ 和 $\sigma_1$ 为0.4倍峰值应力时的应变和应力; $\varepsilon_2$ 和 $\sigma_2$ 为0.6倍峰值应力时的应变和应力。

如图7所示,随着温度的增加,失效应变增加,弹性模量减少,说明失效应变与抗压强度呈现负相关,与弹性模量呈现正相关。随着温度的增加,煤岩内部产生更多的微裂纹,裂纹尖端产生的应力集中导致煤结构荷载传递能力的减弱,因此抵抗变形的能力较小,最终导致失效应变增加。

### 3.3 能量吸收的变化特征

为了研究破碎煤岩的难易程度,采用能量法分析吸收能与温度的关系,如式(4)。

$$\begin{cases} W_x = \frac{A_e C_e}{E_e} \int_0^t \sigma_x^2(t) dt = A_e C_e E_e \int_0^t \varepsilon_x^2(t) dt \\ W_A = W_I - (W_R + W_T) \\ \lambda_A = \frac{W_A}{W_I} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x = I, R, T$ ;  $W_I, W_R, W_T$  分别是入射、反射、透射应力波能量;  $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\sigma_T$  分别是入射、反射和

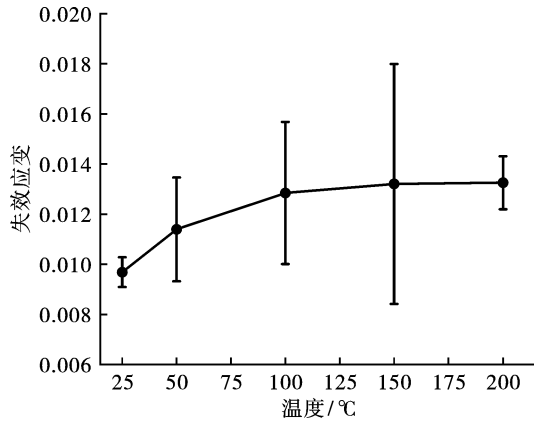


图 7 失效应变和弹性模量随温度的变化规律

Fig. 7 Variation of failure strain and elastic modulus with temperature

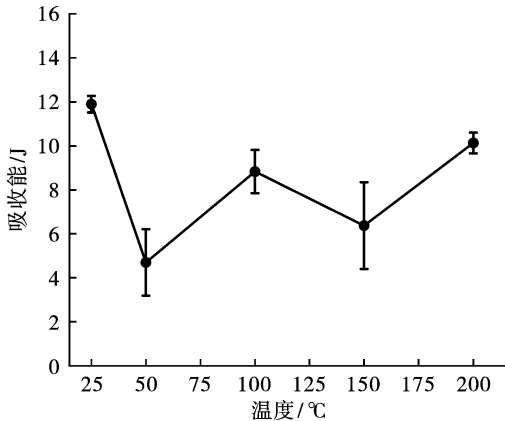
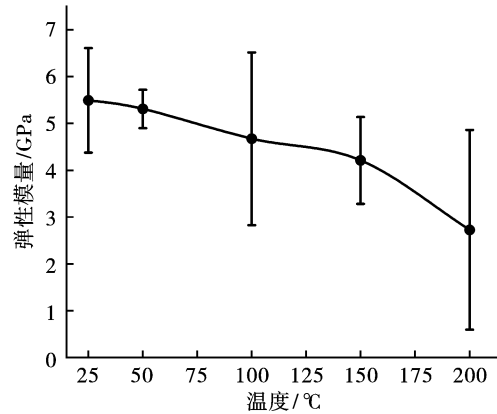


图 7 失效应变和弹性模量随温度的变化规律

Fig. 7 Variation of failure strain and elastic modulus with temperature

图 8 吸收能随温度的变化规律

Fig. 8 Variation of absorption energy with temperature

#### 4 力-热耦合作用下煤岩表观破坏形态及分形特征

图 9 为煤样在高温加热后和高温实时冲击后的表观图。在 100°C 之前,煤岩表观并未出现明显宏观裂纹,游离水蒸气的析出主要导致微观孔隙的发育,煤体基质并未断裂,主裂纹并未形成,之后随着温度的增加,表观垂直和水平方向上均出现宏观贯通裂纹,在 200°C 时出现剥落现象,温度越高,裂缝网络越复杂,主裂纹宽度越大。在高温实时冲击后的破碎形态主要呈现块状劈裂-块状碎裂-粉碎破坏的演变过程,100°C 之前破碎粒径复杂,呈梯度状,之

透射应力波应力时程;  $W_A$  为吸收应力波能量。

如图 8 所示,随着温度的增加,吸收能并未呈现单一的增减趋势,而是 W 型波动趋势,这一结果与 Fan 相同<sup>[13]</sup>。在加热冲击后的吸收能均小于常温 25°C,说明温度对能量的吸收有抑制作用,但并不显著。

后粒径分布均匀,粒径减小。

为了研究力-热耦合作用下煤岩冲击破碎程度,采用标准筛(0.5、1、10、20、30 mm)对冲击后的碎块筛选,计算公式如式(5)。

$$d_m = \frac{\sum r_i d_i}{\sum r_i} \quad (5)$$

式中:  $d_i$  为不同等级标准筛中碎块的平均尺寸, mm;  $r_i$  为对应的碎块质量分数。

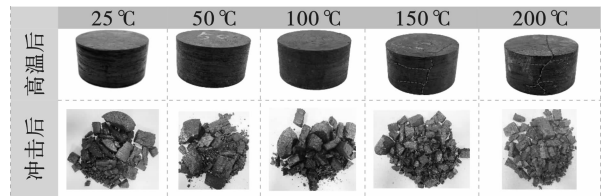


图 9 力-热耦合作用下煤岩的破坏模式

Fig. 9 Failure modes of coal under mechanical-thermo coupling action

如图 10 所示,随着温度的升高,平均粒径逐渐减小,细小颗粒占比增加,破碎程度加剧。平均粒径与动态抗压强度呈现明显的正比关系,动态抗压强度越高,平均粒径越大,煤岩更难以碎裂。

基于上述筛分数据,采用分形维数定量分析力-热耦合作用下煤岩破坏程度的自相似性<sup>[17]</sup>。采用式(6)。

$$\lg(M_g/M) = (3 - D) \lg R \quad (6)$$

式中:  $D$  为碎块的分形维数;  $M_g$  为直径小于  $R$  的碎块的累计质量;  $M$  为试样总质量。

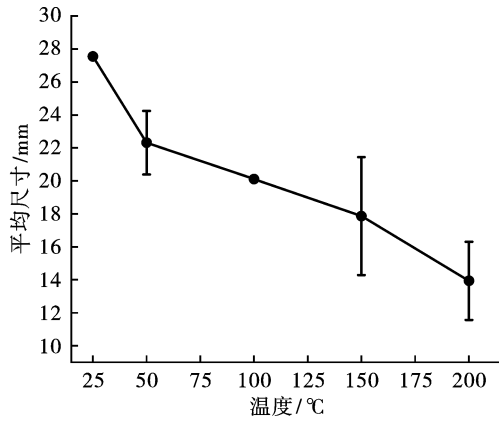


图 10 平均粒径随温度的变化规律

Fig. 10 Variation of average particle size with temperature

如图 11 所示, 随着温度的增加, 分形维数呈现线性增加的趋势, 分形维数越高, 破碎程度越为严重, 破坏模式越为复杂。在 100°C 之前, 分形维数为 1.65 ~ 1.89, 在 150 ~ 200°C, 分形维数为 2.04 ~ 2.11。分形维数有明显的增加, 说明气体析出和基质断裂使煤岩内部裂缝网络发育更为复杂, 破坏程度更加严重。此外, 分形维数与动态抗压强度呈现负相关趋势, 即抗压强度越高, 分形维数越小, 破坏模式趋于单一。

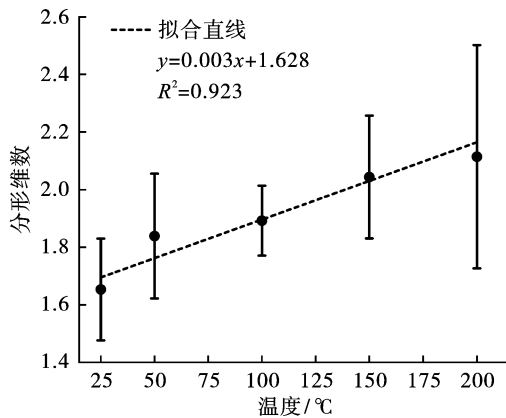


图 11 分形维数随温度的变化规律

Fig. 11 Fractal dimension changes with temperature

## 5 力-热耦合作用下煤岩动态本构模型

煤岩是典型的非均质各向异性岩石材料, 基于微元强度不均匀分布的考虑, 假设煤岩的损伤演化遵循 Weibull 分布的概率密度函数<sup>[18]</sup>, 如式(7)。

$$P(\delta) = \frac{m}{F} \left(\frac{\delta}{F}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\delta}{F}\right)^m\right] \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为岩石材料的应变变量,  $m$  和  $F$  均为 Weibull 分布参数;  $P(\delta)$  为 Weibull 概率密度函数。

采用损伤变量  $D_c$  定义某一冲击载荷下的破坏程度, 其值为已破坏的微元体数  $N_c$  与总微元  $N$  的比值, 如式(8)。

$$D_c = \frac{N_c}{N} \quad (8)$$

式中,  $N_c$  如式(9)。

$$N_c = \int_0^F NP(x) dx = N \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{\alpha}\right)^m\right] \right\} \quad (9)$$

因此, 得式(10)和式(11)。

$$D_c = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{\alpha}\right)^m\right] \quad (10)$$

$$\sigma_a = (1 - D_c) \sigma_r \quad (11)$$

许金余指出<sup>[10]</sup>,  $m$  可以反映出材料缺陷分布的不规则度, 其大小反映了损伤的程度, 作用与分形维数相当, 因此推导假设  $m$  与分形维数呈线性关系, 而上述结果显示分形维数与温度呈现良好的线性关系, 因此推导而得式(12)。

$$m = aT + b \quad (12)$$

因此, 如式(13)。

$$D_c = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{\alpha}\right)^{aT+b}\right] \quad (13)$$

此外, 基于 ZWT 本构模型进行变形修正, 传统的 ZWT 模型由描述材料初始非线性行为的弹簧和瞬态响应的两个 Maxwell 体组成<sup>[19,20]</sup>, 如式(14)。

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_2}\right) d\tau \quad (14)$$

式中: 多项式项  $E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3$  为平衡状态下的应力;  $E_0, \alpha, \beta$  为非线性弹簧的弹性系数; 积分项  $E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_1}\right) d\tau$  和  $E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_2}\right) d\tau$  分别来描述不同松弛时间低频和高频的黏弹性响应, 2 个积分项代表 Maxwell 相关参数

基于现有数据考虑, 将非线性多项式简化为线性表达<sup>[21]</sup>, 并忽略表征弛豫时间为 10 ~ 10<sup>2</sup> s 的低频 Maxwell 单元  $\varphi_1$ , 简化得式(15)。

$$\sigma = E_0 \varepsilon + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_2}\right) d\tau \quad (15)$$

因此最终考虑温度效应下的煤岩动态本构模型为式(16)。

$$\sigma = \exp\left[-\left(-\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{aT+b}\right] \cdot \left\{ E_0 \varepsilon + E_2 \dot{\varepsilon} \varphi_2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon \varphi_2}\right) \right] \right\} \quad (16)$$

如图 12 所示,选取两条代表性应力应变曲线进行拟合对比,结果显示拟合曲线和试样曲线有良好的一致性, $R^2$  为 0.98 和 0.99,但仍有不足,主要体现在两方面:在第一种情况中,由于简化本构模型,将峰值前曲线由非线性简化为线性,导致瞬时间的密实阶段不能得到很好地表达,之后曲线平滑且具

有极高的一致性;第二种情况为因瞬时的冲击作用,煤岩在达到应力峰值后破坏显著,软化失效阶段波动震荡,导致拟合曲线和试验曲线的峰值处不能良好的对应,但其应力应变差异不大,整体仍保持高度一致,具体仍需后续修正改进。

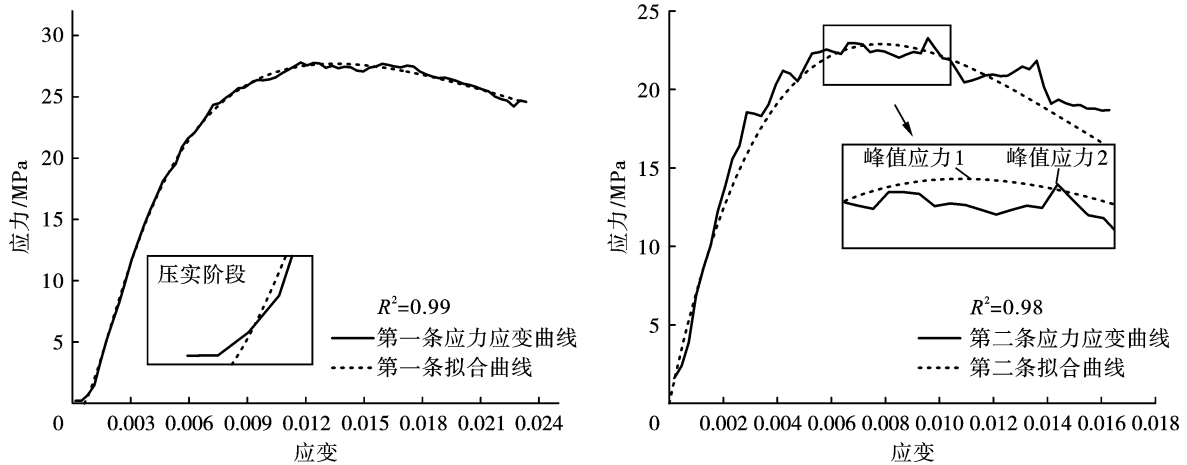


图 12 考虑温度效应的煤岩动态本构模型

Fig. 12 Dynamic constitutive model of coal rock considering temperature effect

## 6 力-热耦合作用下煤岩离散元数值模拟

### 6.1 静态压缩数值模拟

颗粒离散元具有良好的模拟颗粒接触导热方式,同时基于力学计算模拟温度传递而产生的力和位移的变化,从而判定颗粒接触键是否断裂。PFC 的力-热耦合模块通过热管模型实现,即将颗粒假设为热储存介质,颗粒间的接触假设为热管,温度以能量的方式在热管中流动<sup>[22,23]</sup>。为了还原试验环境,

将墙的温度设为目标温度,颗粒初始温度设置为 25℃,实现边界传热,分析固体对热力场的影响。为使模拟材料特性满足分析要求,采用 50 mm × 100 mm 的煤岩进行 25℃ 室温下的单轴压缩试验,并建立同高径比的颗粒模型,通过宏观力学参数标定颗粒的 Pb 模型参数,如表 2 所示。结果如图 13 所示,材料标定后的数值模拟结果与试验结果有较高的相似度。

表 2 颗粒 Pb 模型参数

Table 2 Pb model parameters of particles

颗粒接触模量	刚度比	平行黏结模量	平行黏结刚度比	法向黏结强度	切向黏结强度
8e8	1.5	8e8	1.5	8e6	1.89e7

力-热耦合加载后的破裂结果如图 14 所示,25 ~ 100℃ 温度加载后煤岩表面并无明显裂纹,当 150℃ 高温施加后,由边界处开始出现大量细观裂纹,高温加载过程中,边界最早接触温度并持续增热,裂纹最早出现,当 200℃ 的高温施加后,整体出现贯穿裂缝,这一实验结果与图 9 的试验结果相同。

在高温施加后,对煤岩进行静态单轴压缩,25℃ 和 50℃ 的破坏模式相同,说明较少的升温对煤的破坏形式影响有限,100℃ 和 150℃ 则由边界处细观裂纹发育扩展,形成狭长的贯穿剪切裂纹,当 200℃ 施

加后,裂纹则由边界处向高温产生的中心贯穿裂纹处发育,裂纹发育模式中心对称。

如图 15 所示,选取 200℃ 力-热耦合作用下的裂纹发育情况进行分析,200℃ 高温加载后的煤岩拉伸裂纹数和剪切裂纹数分别为 62 和 320,在单轴加载后则增长为 370 和 1163,结果显示,高温和单轴压缩下,煤岩均以发展剪切裂纹为主,且分别增加 5.97 和 3.63 倍。

为了研究温度效应对静、动态抗压强度增量的影响,将动态抗压强度与静态抗压强度之比定为动

态增强因子(Dynamic increase factor, DIF)。由图 16 所示,力-热耦合作用下 25 ~ 150℃ 的单轴抗压强度并没有明显的下降趋势,而是呈现范围波动,颗粒受热膨胀并不明显,无裂纹出现。而随着温度持续增加,煤岩内部产生明显贯通裂纹,细小裂纹发育充分,强度劣化迅速。而动态增强因子则呈现明显的下降趋势,在 25 ~ 100℃ 迅速降低,并逐渐趋于平稳,高温效应对煤岩的动态抗压性能影响明显。

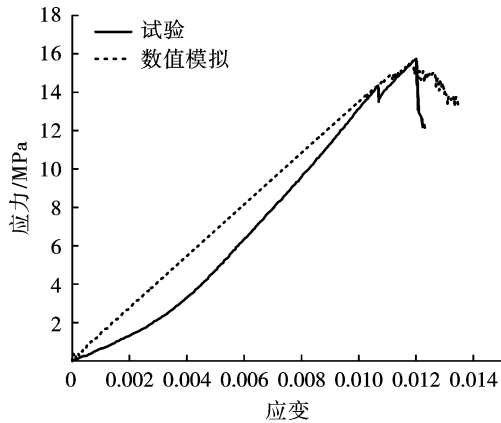


图 13 试验结果与模拟结果的应力应变曲线对照  
Fig. 13 Comparison of stress-strain curves between experimental result and simulated result

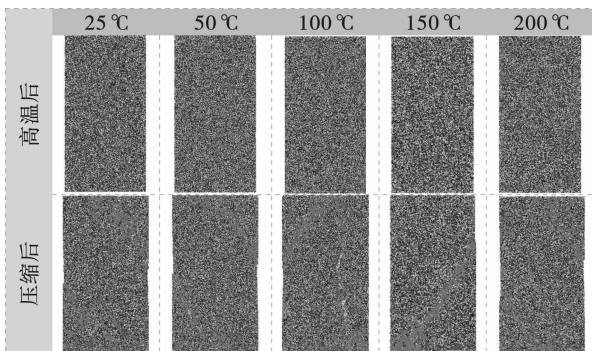


图 14 煤岩的静态压缩模拟破坏模式  
Fig. 14 Static compression simulation failure mode of coal rock

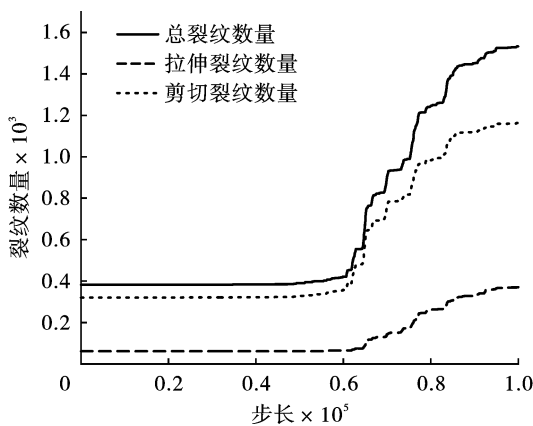


图 15 200℃ 下裂纹发育随温度的变化规律  
Fig. 15 Variation of crack development with temperature at 200℃

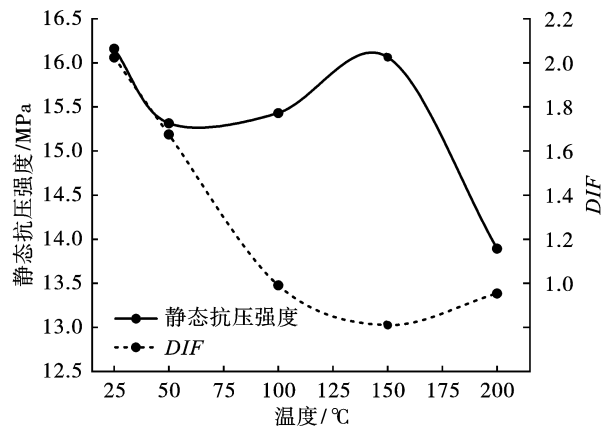


图 16 200℃ 下裂纹发育随温度的变化规律  
Fig. 16 Variation of crack development with temperature at 200℃

### 6.2 动态压缩数值模拟

PFC 6.0 嵌套 FLAC 模块,可以加载大变形模式实现动载模拟, SHPB 试验涉及金属材料 and 岩石材料,杆件金属用颗粒离散元的表达结果不甚理想,因此采用连续-离散元建模,有效简化计算流程,保证冲击应力波的成功传导。煤岩静态和动力学性能有着明显差异,为研究应力波在力-热耦合煤岩间的传播规律,基于上述煤岩 Pb 参数适当调整,再次进行动态参数标定<sup>[24,25]</sup>。通过连续-离散耦合建立实验室 1:1 数值模型,煤岩颗粒最小半径为 1.0 mm,最大半径为 1.6 mm,总颗粒数为 15 986,通过 wall-zone 耦合实现 zone 与 ball 的力学联系,保证实现应力波的加载,数值建模如图 17 所示。数值模拟应力波通过 Origin 进行数据光滑处理,调整应力波振荡时间,将试验和模拟应力波形进行对比验证,如图 18 所示,试验和模拟的应力波峰值达到高度一致,可用此参数进行冲击试验。

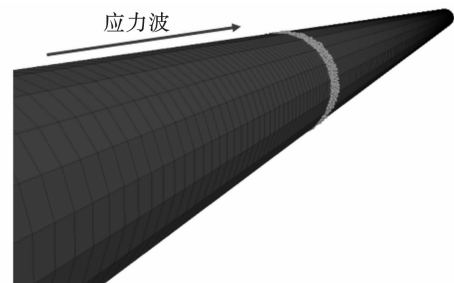


图 17 基于有限差分-离散元法建立的数值模型  
Fig. 17 Numerical model based on finite difference-discrete element method

高温对煤岩有明显劣化致裂效果,数值模拟颗粒受热膨胀飞散失效明显,而 25 ~ 100℃ 范围内高温对煤岩的动力学特性更为复杂。因此选取 100℃

研究力-热耦合作用下煤岩的裂纹扩展模式。如图 19 所示,裂纹首先出现在受撞击面,随后贯通,在与透射杆交界面出现明显裂纹面,经过应力波在试件内震荡反、透射,从加载面方向开始产生大量细观裂纹,且受撞击面颗粒分散四射。且 100℃ 的透射应力波明显小于 25℃,表示能量透射比降低,温度劣化试件抗压强度,模拟结果与试验结果相同。

## 7 结论

采用  $\phi 50$  mm 高温同步 SHPB 测试系统开展 25 ~ 200℃ 煤岩的动态力学特性和破碎机理研究,并基于试验数据构建合理的粘弹性本构模型,最终通过有限差分-离散元法模拟分析高温效应对煤岩损伤机制的影响,主要结论如下:

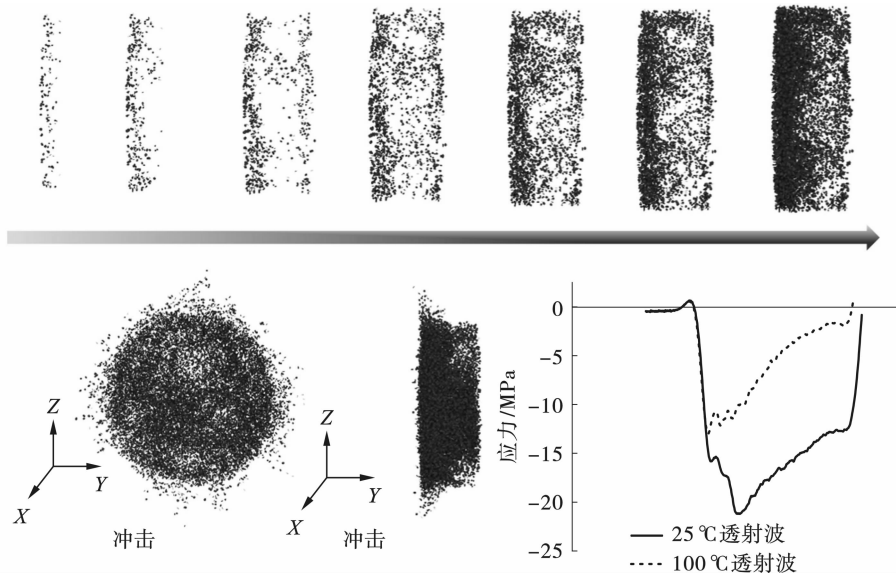


图 19 100℃ 下冲击煤岩裂纹扩展规律

Fig. 19 Law of crack propagation in coal impingement at 100℃

(1) 高温促使煤岩内水、吸附气体活跃析出,基质受热膨胀破裂,劣化煤岩的动态力学性能。随着温度的增加,动态抗压强度和动态弹性模量降低,失效应变增加,吸收能呈现范围内 W 型波动趋势。煤岩的破碎平均粒径减小,破碎分形维数呈现线性增加。

(2) 基于 ZWT 改进考虑温度效应的粘弹性本构模型良好的表征力-热耦合作用下煤岩的动态应力应变关系,但对压密阶段的表达不甚理想,后续仍需改进。

(3) 基于离散元数值计算显示,煤岩受 25 ~ 100℃ 温度加载的影响有限,在 150℃ 表现开始出现细观裂纹,并逐渐演变为宏观贯通裂纹。动态增强因子在 25 ~ 100℃ 迅速降低,煤岩静态压缩的裂纹

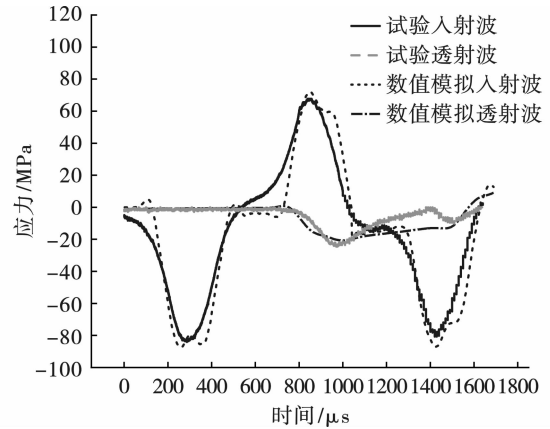


图 18 试验与数值模拟应力波形验证

Fig. 18 Experimental and numerical simulation stress waveform verification

发育以剪切裂纹为主。煤岩在 100℃ 动态压缩的裂纹发育从受撞击面发育贯通,高温劣化煤岩强度。

## 参考文献 (References)

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [1] XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305. (in Chinese)
- [2] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, XUE Dong-jie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical

- mining depth [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4):535-542. (in Chinese)
- [3] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3):726-746.
- [3] HE Man-chao. Research progress of deep shaft construction mechanics [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3):726-746. (in Chinese)
- [4] 姜波, 金法礼, 秦勇. 煤变形的高温高压实验研究 [J]. 煤炭学报, 1997, 22(1):82-86.
- [4] JIANG Bo, JIN Fa-li, QIN Yong. Coal deformation test under high temperature and confining pressure [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(1):82-86. (in Chinese)
- [5] 金法礼, 秦勇. 高温高压下煤变形的实验分析 [J]. 煤田地质与勘探, 1999(1):14-17.
- [5] JIN Fa-li, QIN Yong. Coal deformation test under high temperature and confining pressure [J]. Coal Geology and Exploration. 1999(1):14-17. (in Chinese)
- [6] 姜波, 秦勇, 金法礼. 高温高压下煤超微构造的变形特征 [J]. 地质科学, 1998, 33(1):18-25.
- [6] JIANG Bo, QIN Yong, JIN Fa-li. Deformation characteristics of super-microstructures of coal under the condition of high temperature and confining pressure [J]. Scientia Geologica Sinica. 1998, 33(1):18-25. (in Chinese)
- [7] 齐消寒, 马恒, 王晓琪, 等. 热冲击对煤岩细观损伤及力学特性影响研究 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12):85-92.
- [7] QI Xiao-han, MA Heng, WANG Xiao-qi, et al. Impacts of thermal shocks on meso-damage and mechanical properties of coal [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12):85-92. (in Chinese)
- [8] 马占国, 茅献彪, 李玉寿, 等. 温度对煤力学特性影响的实验研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(3):46-48.
- [8] MA Zhan-guo, MAO Xian-biao, LI Yu-tao, et al. Experimental study on effect of temperature on mechanical properties of coal [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2005(3):46-48. (in Chinese)
- [9] 李波波, 任崇鸿, 杨康, 等. 力热耦合作用下煤岩损伤演化规律及渗透率模型研究 [J]. 安全与环境学报, 2020, 20(5):1727-1735.
- [9] LI Bo-bo, REN Chong-hong, YANG Kang, et al. Exploration into the damage evolutionary regularity and the permeability model of the coal strata under the coupling effect of stress and temperature [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(5):1727-1735. (in Chinese)
- [10] 许金余, 刘石. 岩石的高温动态统计损伤本构模型研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5):1109-1113.
- [10] XU Jin-yu, LIU Shi. Study on constitutive model of rock with high-temperature dynamic statistic damage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5):1109-1113. (in Chinese)
- [11] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高温后砂岩动力特性应变率效应的试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(12):3479-3488.
- [11] LI Ming, MAO Xian-biao, CAO Li-li, et al. Experimental study of mechanical properties on strain rate effect of sandstones after high temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12):3479-3488. (in Chinese)
- [12] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温影响下花岗岩孔径分布的分形结构及模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12):2426-2438.
- [12] ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng, GAO Ya-nan, et al. Fractal structure and model of pore size distribution of granite under high temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12):2426-2438. (in Chinese)
- [13] FAN Xue-ru, LUO Ning, LIANG Han-liang. Dynamic breakage characteristics of shale with different bedding angles under the different ambient temperatures [J]. Rock Mech Rock Eng, 2021, 54(6):3245-3261.
- [14] LUO Ning, SUO Yun-chen, FAN Xue-ru, et al. Research on confining pressure effect of pore structure of coal-rich in coalbed methane under cyclic impact [J]. Energy Reports, 2022, 8:7336-7348.
- [15] YANG Zhen-hua, FAN Chao-jun, LAN Tian-wei, et al. Dynamic mechanical and microstructural properties of outburst-prone coal based on compressive SHPB tests [J]. Energies, 2019, 12(22):4236.
- [16] 李明, 茅献彪, 曹丽丽, 等. 高应变率下煤力学特性试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2):317-324.
- [16] LI Ming, MAO Xian-biao, CAO Li-li, et al. Experimental study on mechanical properties of coal under high strain rate [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2):317-324. (in Chinese)
- [17] 张文清, 石必明, 穆朝民. 冲击载荷作用下煤岩破碎与耗能规律实验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2):375-380.
- [17] ZHANG Wen-qing, SHI Bi-qing, MU Chao-min. Experimental research on failure and energy dissipation law of coal under impact load [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2):375-380. (in Chinese)