

张传玖, 李果, 任建慧, 等. 循环应力损伤对煤体I型动态断裂特性的影响[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023031.
ZHANG Chuanjiu, LI Guo, REN Jianhui, et al. Effect of cyclic stress damage on the mode I dynamic fracture characteristics of coal[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 023031.

循环应力损伤对煤体I型动态断裂特性的影响

张传玖¹, 李果², 任建慧¹, 姚士茂¹, 李宣良¹

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司 布尔台煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017209; 2. 国能神东煤炭集团有限责任公司 神东煤炭技术研究院, 陕西 榆林 719315)

摘要: 为探明循环应力损伤作用对煤体动态断裂特性的影响, 对原始及循环应力损伤后的煤体I型单边缺口梁试件进行了静态与动态断裂试验研究。通过试验得到: 煤体平均动态I型断裂韧度(K_{IC})为 $0.344 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 平均I型断裂能(G_C)为 66.99 N/m , 较静态煤断裂参数分别提高了1.38倍与1.26倍; 经循环应力损伤后煤试件的平均静态 K_{IC} 值为 $0.219 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 平均静态 G_C 为 44.26 N/m , 较原始煤试件分别降低了12.05%与16.74%; 平均动态 K_{IC} 为 $0.279 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 平均动态 G_C 为 52.72 N/m , 与原始煤试件冲击断裂试验结果相比, 分别降低了20.90%与21.30%。试验结果表明, 循环应力对煤体的动静态断裂力学参数均具有劣化影响, 且煤试件动态断裂力学参数的劣化程度更高, 证明煤体动态断裂行为对循环应力损伤作用更加敏感。同时, 原始及循环应力损伤后煤试件动态断裂破坏的分形维数分别为1.32与1.21, 即原始煤试件在冲击载荷作用下断裂破碎的更加复杂, 冲击动力学显现的更加充分。此外, 基于黏聚裂纹模型的煤体I型动态断裂数值计算结果与试验结果相符, 表明黏聚裂纹模型能够对煤体动态断裂过程进行有效表征。研究成果可为具有相似特性的煤体提供参考。

关键词: 冲击载荷; 断裂韧度; 分形维数; 黏聚裂纹模型

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)02-3031-11

Effect of cyclic stress damage on the mode I dynamic fracture characteristics of coal

ZHANG Chuanjiu¹, LI Guo², REN Jianhui¹, YAO Shimao¹, LI Xuanliang¹

(1. Buertai Coal Mine, China Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China; 2. Shendong Coal Technology Research Institute, China Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, China)

Abstract: To investigate the impact of cyclic stress damage on the dynamic fracture characteristics of coal masses, static and dynamic fracture tests were conducted on type I single-sided notched beam specimens of coal both prior to and following cyclic stress damage. The test results revealed that the average dynamic mode I fracture toughness (K_{IC}) of the coal mass stands at $0.344 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, with an average mode I fracture energy (G_C) of 66.99 N/m . These figures are respectively 1.38 and 1.26 times higher than those measured for the static fracture parameters of the coal specimens. After exposure to cyclic stress damage, the average static K_{IC} value of the coal specimen was reduced to $0.219 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, and the average static G_C to 44.26 N/m , marking decreases of 12.05% and 16.74% relative to the original specimens. Additionally, the average dynamic K_{IC} and G_C values decreased to

收稿日期: 2023-04-02

修回日期: 2023-11-08

责任编辑: 夏英杰

作者简介: 张传玖(1983—), 男, 四川达州人, 博士, 主要从事矿山压力与岩层控制以及煤矿冲击地压防治等方面的研究工作。E-mail: 408269210@qq.com

be $0.279 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ and 52.72 N/m , respectively, representing reductions of 20.90% and 21.30% compared with the impact fracture test results of the untreated coal specimens. These findings suggest that cyclic stress detrimentally affects both the dynamic and static fracture mechanical parameters of coal masses, with dynamic fracture parameters exhibiting a greater degree of degradation. This highlights the enhanced sensitivity of coal mass dynamic fracture behavior to cyclic stress damage. Furthermore, fractal analysis of the dynamic fracture damage yielded dimensions of 1.32 for untreated specimens and 1.21 for those subjected to cyclic stress damage, indicating a more complex fracture and fragmentation process under impact loading for the former. Numerical calculations based on the cohesive crack model for type I dynamic fracture of coal masses align well with experimental results, underscoring the model's effectiveness in capturing the dynamic fracture process of coal masses. These insights provide a reference for coal masses with similar characteristics.

Key words: impulse load; fracture toughness; fractal dimension; cohesive crack model

现阶段,我国对于煤炭资源的需求量仍处于高位。随着采煤工艺、技术装备、智能化水平的稳步提升,矿井地下采掘的速度及强度持续增加^[1]。同时,随着煤炭开采逐步向深部迈进,将会诱发更为复杂且强烈的围岩灾害,其中冲击地压灾害备受关注。冲击地压在煤炭地下开采过程中表现形式通常为煤岩体抛出、煤壁两帮大变形、巷道底臃等,伴随巨大的声响、气浪、冲击波等^[2],其对井下设备的正常运行,施工人员的安全造成巨大威胁。研究表明,煤体多种形式的破坏均起始于其内部微裂纹;由于外部应力的施加,微裂纹发生扩展逐步演化为宏观裂纹;在矿井高强度开采扰动条件下,煤体中裂纹发育至某一阶段,其内部积累的弹性应变能突然释放,形成冲击地压^[3]。因此,研究冲击载荷作用下煤体的动态断裂特性对于探明冲击地压形成机理具有重要意义。研究表明煤岩体材料在外界应力条件下更易发生张拉型(I型)断裂^[4]。刘瑞峰^[5]等试验测得了爆炸载荷下岩体I型断裂韧度及动态裂纹扩展规律;李杨杨^[6]等对复合缺陷类岩石裂纹扩展规律及力学特性试验进行了研究;张财贵^[7]等通过边裂纹圆环试件测定了岩石I型动态断裂韧度值;刘江伟^[8]等研究了人工裂缝形态对煤的抗拉性能及能量积聚的弱化规律;赵毅鑫^[9]等对煤体开展了I型动态断裂行为特征的调查;龚爽^[10]等研究了层理对煤岩动态断裂的影响;WANG^[11]等通过单边缺口梁试件探讨了冲击速度、层理介质弹性模量、层理间距、层理角度等条件对煤体I型动态断裂韧度的影响;GONG^[12]等研究了含水率对于煤体I型动态断裂参数的影响。煤炭开采过程中,受煤岩体多重开挖、顶板垮落等因

素的影响,巷道及工作面附近煤岩体会面临多次循环应力加卸载扰动的影响。在循环加载扰动作用下,煤(岩)体力学特性发生变化,应力损伤逐步累积,将诱发煤(岩)系统失稳破坏,同时伴随着能量的耗散和释放^[13]。张晓悟^[14]等研究了循环加卸载条件下岩石力学特性的温度-围压效应;王天佐^[15]等研究了不同循环加卸载路径下红砂岩声发射及应变场演化规律;张祥^[16]等基于侧限压缩试验对黏土动态力学性能进行了研究;朱凌^[17]等初步探明了含缺陷岩石循环加卸载后的损伤程度及强度变化规律;张晓悟^[18]等研究了水化学侵蚀条件下砂岩力学特性及能量损伤特征演化规律;DING^[19]等研究了循环加卸载下煤体的力学特性及能量损伤演化特征。故掌握循环应力损伤作用下煤体的动态断裂力学特性是探明冲击地压致灾机理的关键,李欣^[20]等开展了卸荷条件下岩石I型动态断裂行为规律研究;杨丽荣^[21]等发现岩样破裂前的能量会在新的频段内重新分布与聚集;王波^[22]等对含瓦斯煤岩流变规律进行了研究;付安琪^[23]等探究了循环冲击损伤后大理岩的静态断裂力学特性;潘海源^[24]等研究了循环冲击作用下砂岩动力学特性及能量耗散特征;孔凯^[25]等对岩-煤组合体试样变形场与能量演化特征试验进行了研究。而关于循环应力损伤对煤体I型动态断裂特性影响研究鲜有相关报道。

因此,笔者对煤体进行了I型单边缺口梁三点弯曲静态断裂试验,以及循环应力损伤条件下的I型静态断裂试验研究。同时通过霍普金森杆(SHPB)试验系统对煤体I型单边缺口梁试件进行动态断裂试验,以及循环应力损伤条件下的I型动态断裂试验研究。旨在探明循环应力损伤对煤体动

态断裂特性的影响。

1 试验概况

1.1 煤体试样制备

煤试件取自内蒙古自治区鄂尔多斯市布尔台煤矿埋深430 m处。原始煤试件自井下获取后,即刻通过石蜡将其密封,以防止风化作用影响后续相关试验结果。经工业性分析得到该煤试件的平均含水率为0.83%、灰分为8.89%、挥发分为30.37%及镜质组反射率为0.87%。在实验室内,将煤试件制备成长度 L 为100 mm、高度 H 为40 mm、厚度 B 为40 mm的I型单边缺口梁试件用以开展相关I型断裂韧度测定试验研究。试件加工尺寸精度不小于0.2 mm; 其中在煤I型单边缺口梁试件底边边界中心位置沿着对称轴线预置1条人工裂缝,裂缝长度与梁试件高度之比 a/H 设定为0.35,即预置裂缝长度 a 为14 mm,底部两支撑辊轮分别距离试件边界20 mm处,即梁试件三点弯曲跨度 S 与长度 L 的比值为0.6(图1)。

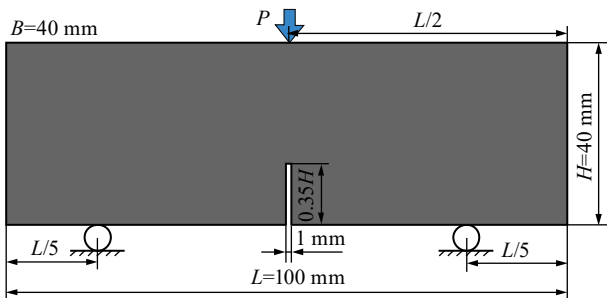


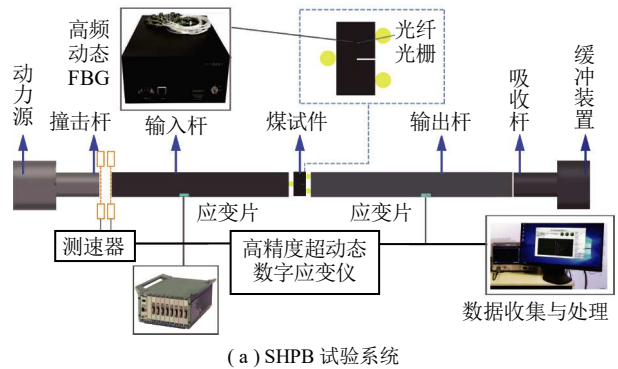
图1 I型单边缺口梁试件

Fig. 1 Mode I single notch beam specimen

1.2 试验设备

通过WAW-100型多功能力学电子试验平台与三点弯曲加载框架,对煤试件开展静态I型断裂参数测定试验,以及循环应力断裂损伤试验。该试验设备可实现施加最大载荷100 kN,包含位移控制和载荷控制两种加载模式,加载速率可调控为 $5 \times 10^{-5} \sim 0.3$ mm/s和 $0.05 \sim 50$ N/s。此外,笔者还通过ALT1000型分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统配合改造后的三点弯曲冲击压头对煤体试件实施动态断裂试验。如图2所示,SHPB试验装置中入射杆、透射杆、吸收杆、压力冲头均采用高强度铬合金钢制成,通过高压气体驱动合金冲击头实现冲击载荷的施加。试验过程中,通过SG型动态应变

片和SYD2019A超动态应变仪监测入射杆和透射杆中传播时产生应变信号、通过DL900E型示波器进行应力波形采集;同时采用光纤光栅与SSI855型高频动态FBG对煤体I型单边缺口梁试件的裂纹尖端张开位移变化进行实时监测。



(a) SHPB 试验系统



(b) SHPB 试验实物

图2 SHPB试验系统及煤体I型单边缺口梁试件

Fig. 2 SHPB test system and the type I single notch beam coal specimen

1.3 试验步骤

笔者对煤体I型单边缺口梁试件进行4种类型的试验研究,包括:a. 煤体I型静态断裂试验;b. 循环应力损伤后煤体I型静态断裂试验;c. 煤体I型动态断裂试验;d. 循环应力损伤后煤体I型动态断裂试验。同时还测定了该煤体抗压强度、抗拉强度及弹性模量等基本岩石力学参数。

(1)静态煤体I型断裂参数测定试验步骤为:首先将三类煤体I型单边缺口梁试件置于三点弯曲加载框架中,将底部两个支撑辊轮分别调整至距煤试件边界20 mm处,同时在煤试件预置裂纹尖端处粘贴光纤光栅,用于记录试验过程中裂纹尖端张开位移(CTOD)变化;随即将三点弯曲加载框架整体置于电子多功能力学试验机加载平台上,启用位移加载控制模式,加载速率设定为0.002 mm/s,沿着煤体I型单边缺口梁试件对称中轴线施加压缩载荷,使得煤试件沿预置裂纹处发生I型裂纹扩展。试验至少进行两组。

(2)循环应力损伤后煤体I型静态断裂试验具体步骤为: 首先将煤体I型单边缺口梁试件按照上述设定参数安置于三点弯曲加载框架中, 并将其置于试验机加载平台上, 启用载荷加载控制模式, 加载速率设定为2 N/s, 对煤试件开展循环加卸载试验, 其中循环加载上限设定为静载荷作用下煤试件峰值载荷的50%, 循环卸荷下限设定为0, 该模式下循环加卸载被执行50次, 最终持续施加载荷直至煤试件破断。试验至少进行两组。

(3)煤体I型动态断裂试验具体步骤为: 首先, 将煤体I型单边缺口梁试件置于SHPB试验系统内经过改进的三点弯曲入射杆与输出杆的冲击压头之间, 并使得三者端面中心线保持一致; 再将动态应变片粘贴在入射杆和输出杆中间部位, 用以监测试验过程中产生的应变信号及应力波; 同时将3条光纤光栅粘贴在煤试件预置裂纹尖端前位置, 用以监测冲击载荷下煤试件预置裂纹尖端处动态张开位移(CTOD)变化过程。试验最终选用0.6 MPa冲击气

压进行动力学试验。试验至少进行两组。

(4)循环应力损伤后煤体I型动态断裂试验具体步骤为: 首先对煤体I型单边缺口梁试件进行循环应力损伤后煤体I型静态断裂试验, 完成50次加卸载循环后, 将损伤后的煤试件置于SHPB试验系统内加载位置, 再次依照煤体I型动态断裂试验具体步骤完成冲击载荷下动态断裂试验。试验至少进行两组。

1.4 试验结果

通过试验得到: 煤试件平均单轴抗压强度为10.46 MPa, 平均弹性模量为1.07 GPa; 煤体平均I型断裂韧度值 K_{IC} 为0.249 MPa·m^{1/2}, I型平均断裂能 G_C 为53.17 N/m; 经过循环应力损伤后的煤体平均 K_{IC} 值为0.219 MPa·m^{1/2}, I型平均断裂能 G_C 为44.26 N/m; 煤体动态平均 K_{IC} 值为0.344 MPa·m^{1/2}, 平均 G_C 值为66.99 N/m; 经循环应力损伤后的煤体动态平均 K_{IC} 值为0.279 MPa·m^{1/2}, 平均 G_C 值为52.72 N/m。具体试验结果见表1。

表1 不同试验条件下煤体I型断裂参数
Table 1 Mode I fracture parameters of coals under various test conditions

煤试件编号	载荷类型	是否经历循环应力损伤	峰值载荷/N	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2})$		$G_C/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	
				试验值	平均值	试验值	平均值
C-1	静态	否	810.5	0.264	0.249	57.21	53.17
C-2			720.7	0.234		49.13	
C-3	静态	是	706.3	0.230	0.219	47.83	44.26
C-4			637.1	0.208		40.69	
C-5	动态	否	1 125.8	0.367	0.344	70.74	66.99
C-6			985.6	0.321		63.24	
C-7	动态	是	899.5	0.293	0.279	56.85	52.72
C-8			813.5	0.265		48.59	

2 试验结果分析

2.1 煤体I型静态断裂特性

图3给出了该煤体I型单边缺口梁试件典型应力 P 与裂纹尖端张开位移CTOD的三点弯曲试验全过程变化曲线。试验初期在较低载荷作用下, 煤试件试验曲线呈下凹形态, 表明煤试件内部分布着一定量的原生微缺陷, 在三点弯曲轴向压缩载荷作用下, 煤体内部微缺陷被逐步压密, 该阶段为被压密过程。随着载荷增加煤试件进入线性变形阶段; 当载荷接近峰值时, P -CTOD试验曲线斜率逐渐降低, 表明煤试件进入塑性变形阶段。达到峰值载荷时,

煤试件中沿着预置裂纹尖端发生新的宏观断裂。通过该I型单边缺口梁试件可获得煤体I型断裂韧度 K_{IC} 值, 具体计算公式^[26]为

$$K_{IC} = \frac{3P_{\max}S\sqrt{a}}{2H^2B}F_i\left(\frac{a}{H}\right) \quad (1)$$

$$F_i\left(\frac{a}{H}\right) = \frac{1.99 - \frac{a}{H}\left(1 - \frac{a}{H}\right)\left[2.15 - 3.93\frac{a}{H} + 2.7\left(\frac{a}{H}\right)^2\right]}{\left(1 + 2\frac{a}{H}\right)\left(1 - \frac{a}{H}\right)^{3/2}} \quad (2)$$

式中, K_{IC} 为煤体I型断裂韧度; $P_{\max}$ 为I型单边缺口梁试件三点弯曲试验峰值载荷; a 为I型单边缺口梁试

件的预置裂纹长度; H 为试件高度; B 为试件厚度; S 为试件的跨度。

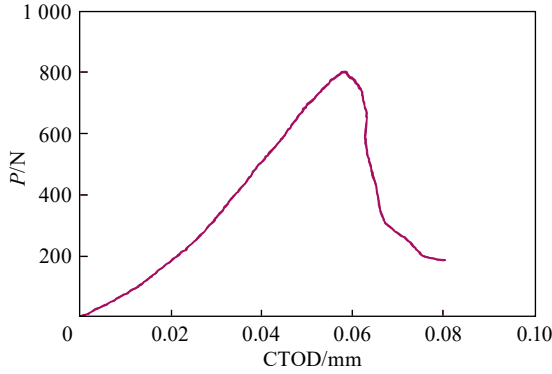


图3 煤试件 P -CTOD 试验曲线

Fig. 3 P -CTOD curves of the coal specimen

表1中的原始煤试件的 K_{IC} 计算结果显示, 试验平均值达到 $0.249 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。达到峰值载荷后持续对煤试件施加应力, 出现一定程度的应力软化现象, 表明该煤试件存在韧性断裂行为。

三点弯曲试验测得的煤体I型单边缺口梁试件载荷 P 与法向位移(挠度) δ 的关系曲线, 如图4所示。

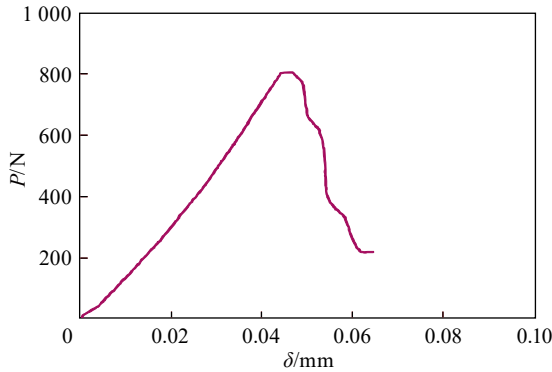


图4 煤试件 P - δ 试验曲线

Fig. 4 P - δ curves of the coal specimen

该煤试件 P - δ 曲线变化规律与 P -CTOD试验曲线变化规律相类似, 加载初期试验曲线存在较为明显的压实阶段, 随着载荷不断增加, 试验曲线逐渐经历线性阶段及塑性变形阶段; 达到峰值载荷时, 煤试件沿着预置裂纹方向发生宏观断裂。通过I型单边缺口梁三点弯曲试验, 可确定了煤体的I型断裂能 G_C , 其具体计算公式^[27]为

$$G_C = \frac{W_A + mg\delta_{\max}/2}{A_0} \quad (3)$$

式中, W_A 为 P - δ 试验曲线以下的面积; mg 为煤试件在下部辊轮间的自重, 其中 g 取 9.81 m/s^2 ; $\delta_{\max}$ 为梁

试件断裂时的挠度; A_0 为潜在断裂区的面积, 即沿轴线方向非预置裂纹的面积, $A_0=B\times(H-a)$ 。计算结果见表1, 原始煤试件的平均断裂能达到 53.17 N/m 。

2.2 循环应力损伤后煤体I型静态断裂特性

图5描述了该类煤试件的循环加载作用下典型的 P -CTOD变化曲线, 煤试件处于较低应力加载阶段时, 试验曲线同样呈现下凹形式, 煤试件正处于压密过程, 这是由于较低的循环应力作用使煤试件内部原生微裂隙及微孔隙发生反复压缩闭合。该过程中, 每一加卸载循环完成后, 应变并不能完全恢复至该循环起始加载时的应变水平, 煤试件均存在较为明显的不可恢复应变, 这是由于煤试件中存在较多的微孔隙、微裂隙, 在循环加卸载的作用下, 将发生微裂隙不断闭合、裂纹面之间相互摩擦、微孔隙体积收缩等一系列非线性不可逆变形^[28-29], 尤其对于预置裂纹尖端附近区域, 应力集中作用将进一步加剧上述不可逆变形行为, 这些行为将消耗掉一部分输入能量。随着循环加卸载次数的增加, 滞回环曲线现象逐渐明显, 这说明循环加卸载作用使得煤体内产生新的微裂纹, 能量耗散进一步增加, 导致煤试件发生疲劳损伤。50次应力循环结束后, 对煤体I型单边缺口梁试件持续施加载荷直至完全断裂, 其峰后阶段存在较明显应力软化现象, 表明经过循环应力作用后煤体I型单边缺口梁试件发生韧性断裂。该煤试件经循环加卸载作用后的平均峰值载荷为 671.7 N , 平均I型断裂韧度值为 $0.219 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 较原始煤试件的断裂参数降低了约12.05%; 平均断裂能为 44.26 N/m , 较原始试件降低了16.74%。以上试验结果表明循环应力条件对煤体I型断裂力学参数存在损伤劣化作用。

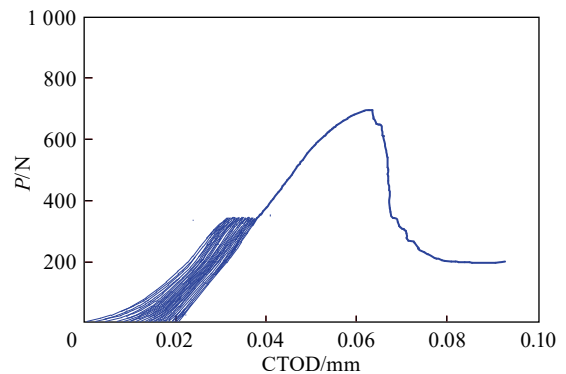


图5 煤试件循环加卸载 P -CTOD 试验曲线

Fig. 5 Cyclic loading and unloading test P -CTOD curves of the coal specimen

2.3 煤体I型动态断裂行为特性

通过改造后的SHPB试验系统, 对该类煤试件进行I型动态断裂力学试验, 冲击动力源气压设定为0.6 MPa, 图6描述了冲击载荷作用下该煤体I型单边缺口梁试件的典型 P -CTOD试验曲线。对比, 图3, 6可知, 煤试件的动态I型断裂试验结果与静态试验结果存在明显差异, 该类煤体I型单边缺口梁试件在冲击载荷作用初始阶段, P -CTOD曲线斜率陡增, 三点弯曲载荷增加速度明显, 与静载荷加载相比, 不存在显著的煤体压实阶段。在冲击载荷持续作用下, 煤试件迅速进入线性变形阶段; 随着冲击载荷的进一步增加, 当 P 值约达到峰值载荷的80%时, 应力增长速率减缓, 煤试件进入塑性变形阶段, 直至煤试件发生宏观断裂。该煤试件在冲击载荷作用下平均极限载荷为1 055.7 N, 平均I型动态断裂韧度为 $0.344 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 较之静载荷作用下三类煤体I型断裂韧度值提高了约1.38倍; 平均I型动态断裂能为 66.99 N/m , 较静载荷作用下三类煤体I型断裂能提高了约1.26倍。此外, 临近冲击破坏时, 该煤体I型单边缺口梁试件主体断裂的同时伴随有碎块从煤试件主体中崩离, 表现出较为明显的动力学破坏特征。

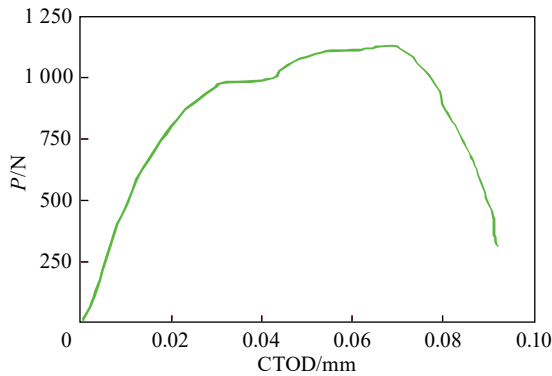


图6 冲击载荷下煤试件的 P -CTOD曲线

Fig. 6 P -CTOD curves of the coal sample under impact load

2.4 循环应力损伤煤体I型动态断裂行为特性

受到50次循环加卸载损伤后的煤试件, 通过改造后的SHPB试验系统进行I型动态断裂力学试验, 冲击试验参数设置与2.3节的一致。试验结果表明, 循环应力损伤后的煤试件在冲击载荷作用下的平均极限载荷为856.5 N, 平均I型动态断裂韧度为 $0.279 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 较同一条件循环加卸载损伤作用后煤体静力学I型断裂韧度值提高了约1.27倍, 平均I型动态断裂能为 52.72 N/m , 较静载荷作用下循环

应力损伤后煤体I型断裂能提高了约1.19倍, 表明相对于静载荷作用, 冲击载荷作用下煤试件断裂力学参量得到显著提高。同时, 与原始煤试件冲击断裂试验结果相比, 循环应力损伤后煤试件的I型断裂韧度值降低了约20.90%, I型动态断裂能降低了约21.30%, 证明循环应力作用对煤体动态断裂参数具有劣化影响。而且, 与前述静态载荷所得到的试验结果相比, 冲击载荷作用下循环载荷损伤后的煤试件动态断裂力学参数劣化程度更高, 这表明煤体动态断裂行为对循环应力损伤作用更加敏感。此外, 冲击破坏时, 该循环应力损伤后煤体I型单边缺口梁试件整体发生断裂破坏, 伴随有少量煤体碎屑崩落, 与未受到损伤的原始煤试件相比, 动力学破坏特征并不显著。

3 讨论

3.1 煤体冲击断裂分形特征分析

煤体在冲击载荷作用下, 将从其预置宏观裂纹尖端应力集中处发生微裂纹扩展, 在持续动载荷的作用下形成微裂隙网络, 进而宏观裂纹逐渐形成, 直至煤体发生崩裂。分形理论可有效地描述煤体动态断裂的自相似性特征, 采用分形维数表征煤体动态断裂的复杂程度, 煤体断裂越复杂表示其破碎越剧烈。煤体断裂破碎后的块体分形分析一般模型^[30]为

$$k = M(r)/M_T = (r/r_m)^\alpha \quad (4)$$

式中, k 为等效直径小于 r 煤体碎块的质量分数; $M(r)$ 为等效直径小于 r 的煤体碎块累积质量; M_T 为煤体碎块的总质量; r_m 为最大尺寸煤体碎块的等效半径; α 为分布指数。

$$N = Cr^{-D} \quad (5)$$

式中, N 为等效半径不小于 r 的煤体碎块数目; C 为比例常数; D 为分形维数。

煤试件碎块数量与碎块质量的增量关系为

$$dM = r^3 dN \quad (6)$$

将式(4)与式(5)分别求导与式(6)联立得到分形维数计算公式为

$$D = 3 - \alpha \quad (7)$$

其中, α 通过式(4)计算得到, 即

$$\alpha = \ln k / \ln r \quad (8)$$

笔者收集冲击载荷试验后原始煤试件及循环应力损伤作用后煤试件动态断裂破坏的碎块, 采用

2, 4, 6, 9, 12, 18 mm标准筛孔将煤试件碎块分为0~2, 2~4, 4~6, 6~9, 9~12, 12~18 mm等6个等级, 图7为循环应力作用后煤试件经过冲击载荷破碎后的煤体碎块筛分结果。两种循环应力损伤条件下煤体I型单边缺口梁试件经冲击三点弯曲载荷断裂破碎后的块度分析结果见表2, 并求得了煤试件动力学破碎块度的分形维数。由计算结果可知, 原始煤试件动态断裂破坏后的分形维数为1.32, 经循环应力作用的煤试件受到冲击载荷破碎后分形维数为1.21, 明显小于原始煤试件, 说明原始煤试件在冲击载荷作用下断裂破碎的更加复杂, 冲击动力学显现更加充分; 同时能够证明, 循环加卸载作用会对煤体造成损伤, 进而弱化煤体的动态断裂力学行为特征显现。

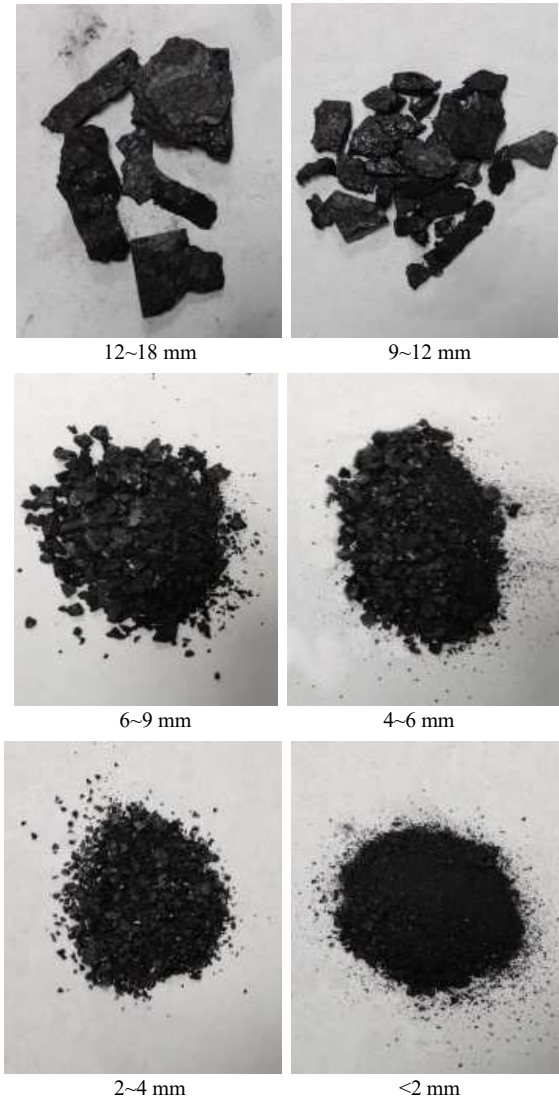


图7 冲击载荷作用后循环应力损伤煤试件的碎块分级
Fig. 7 Fragmentation classification of coal specimen damaged by cyclic stress after impact load

表2 循环应力损伤后煤试件动力学破碎块度分析
Fig. 2 Dynamic fragmentation analysis of coal samples after cyclic stress damage

煤试件类型	r/mm	煤碎块筛分分析		筛分曲线		D
		煤块质量/g	$k/\%$	$\ln r$	$\ln k$	
原试件	<2	4.37	5.22	0.81	0.96	1.32
	2~4	6.28	8.01	0.92	1.21	
	4~6	11.74	16.18	1.61	1.39	
	6~9	16.32	19.27	1.82	1.48	
	9~12	20.32	27.21	2.11	1.77	
	12~18	18.01	24.11	2.03	1.89	
循环应力作用	<2	5.17	5.71	0.83	0.97	1.21
	2~4	6.12	7.92	0.91	1.19	
	4~6	11.81	17.57	1.67	1.43	
	6~9	15.72	12.51	1.76	1.47	
	9~12	19.78	27.32	2.35	1.82	
	12~18	20.81	28.97	2.51	1.97	

3.2 基于黏聚裂纹模型的煤体动态断裂模拟

岩石断裂行为的模拟一般采用线弹性断裂理论(LEFM), 然而, LEFM主要应用于脆性材料, 其中脆性材料的断裂过程区(FPZ)^[31], 即裂纹尖端前发生微裂纹萌生或聚合的区域尺寸较小。对于韧性材料, FPZ尺寸相对较大, 这会对材料的断裂行为造成较大影响。根据笔者的试验结果, 煤试件经过动静载荷作用, 其峰后存在较为明显的应力软化过程, 尤其对于循环应力损伤后的煤试件, 表现出韧性断裂特征, 因此LEFM理论不再适用于煤体动态断裂的模拟。黏聚裂纹模型(CZM)^[32]自提出后被成功地应用于韧性材料的断裂模拟分析中, 同时被证明该理论模型适用于对静载荷作用下煤体裂纹扩展的分析^[33]。因此笔者利用ABAQUS®有限元软件, 采用零厚度黏聚单元法对原始及循环应力损伤后煤体I型单边缺口梁试件的动态断裂行为进行数值模拟。数值模型中, 原始及循环应力损伤后煤体弹性模量分别为1.07 GPa与0.85 GPa, 泊松比分别为0.29与0.28, 抗拉强度分别为0.52 MPa与0.45 MPa, 动态I型断裂能分别为66.99 N/m与52.72 N/m。模拟过程中, 利用用户自定义材料子程序(VUMAT)将多项式黏聚本构关系引入到黏聚单元中^[34]。图8描述了煤体I型单边缺口梁试件数值模型网格划分情况, 在该模型中三角形固体单元共7 650个, 固体单元之间处插入零厚度黏聚型单元共17 362个, 外部冲击压头模型设定为刚性材料,

通过显式计算方法模拟冲击载荷下原始及循环应力损伤后煤体I型动态裂纹扩展。图9给出了循环应力损伤后煤体I型单边缺口梁试件经冲击载荷作用下的多裂纹扩展及黏聚型单元损伤模拟结果, 采用SDEG表征黏聚型单元损伤程度。当SDEG=0时, 表示黏聚型单元未发生损伤; SDEG=1时, 表示黏聚型单元完全破坏, 即产生新的裂纹。模拟结果表明, 通过零厚度单元法可实现对煤体I型单边缺口梁试件动态多裂纹扩展的数值模拟。图10描绘了原始煤试件及循环加卸载损伤后煤体I型单边缺口梁经过冲击荷载的数值结果 P -CTOD曲线。其中动载荷作用下煤试件峰值载荷数值模拟结果分别为1 251.5 N与1 076.1 N, 与实验室试验结果相似; 同时, 数值计算 P -CTOD曲线的变化趋势与前述试验结果基本相符合, 表明黏聚裂纹模型能够对煤体动

态断裂过程进行有效的表征。

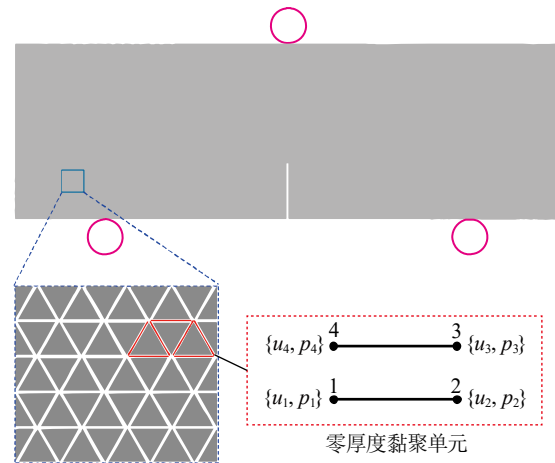


图 8 冲击载荷作用下煤体 I 型单边缺口梁试件数值模型

Fig. 8 Numerical model of type I single notch beam coal specimen under impact load

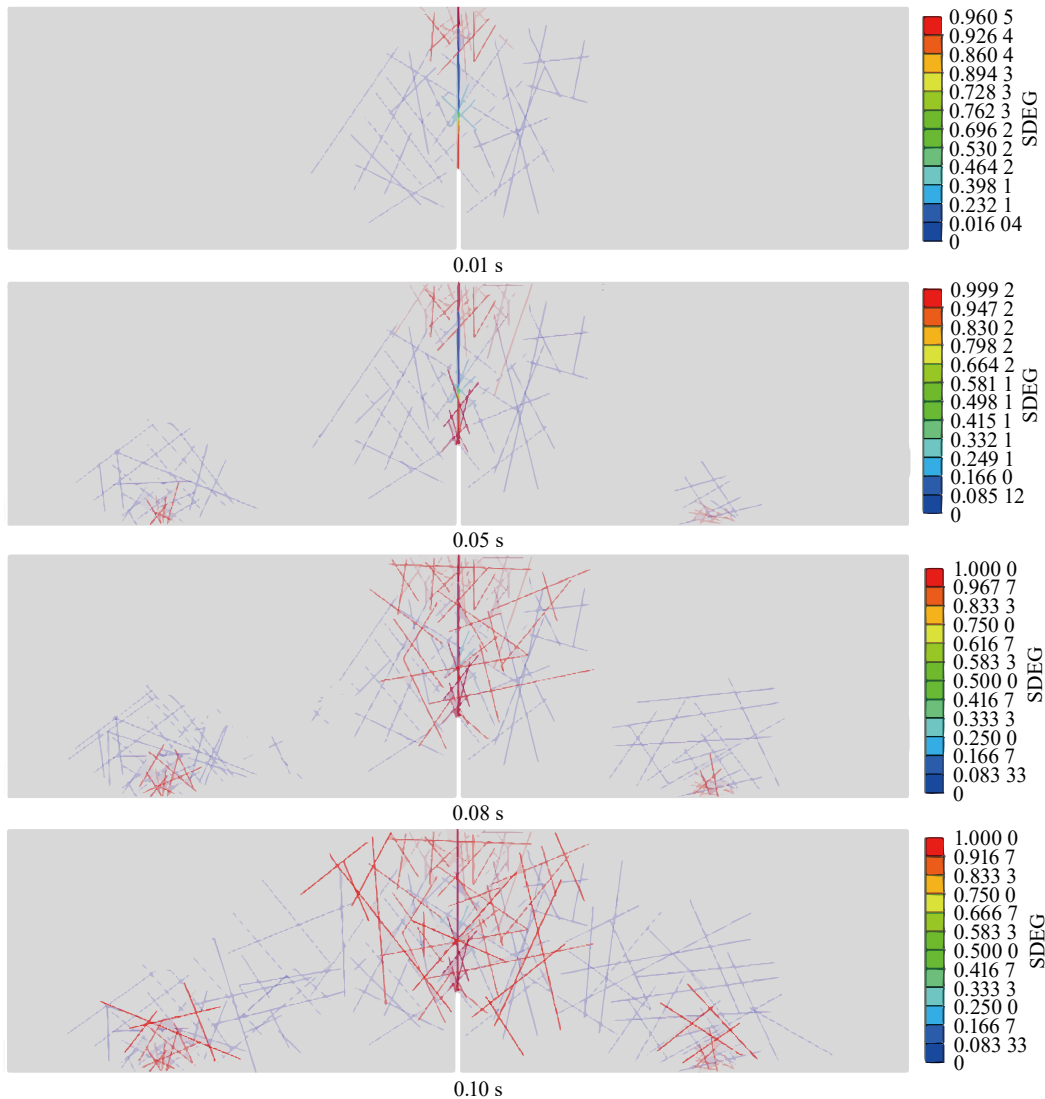
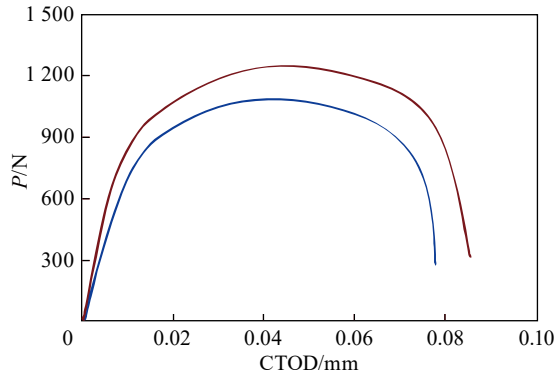


图 9 煤体 I 型单边缺口梁试件动态断裂数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of dynamic fracture of mode I single notch beam coal specimen

图 10 煤体 I 型单边缺口梁试件 P -CTOD 曲线Fig. 10 P -CTOD curves of mode I single notch beam coal specimen

4 结 论

(1) 经过循环应力作用后的煤体静态 I 型断裂韧度值 K_{IC} 与 I 型断裂能 G_C , 较原始煤试件的静态断裂参数分别降低了 12.05% 与 16.74%, 表明循环应力条件对煤体 I 型静态断裂力学参数存在劣化作用。同时, 经过循环应力作用后的煤试件表现出韧性断裂特征。

(2) 原始煤体平均动态 K_{IC} 及 G_C , 较静载荷作用下煤体断裂参数分别提高了 1.38 倍及 1.26 倍; 循环应力损伤作用后煤体平均动态 K_{IC} 及 G_C , 较静载荷作用下损伤煤体断裂参数分别提高了 1.27 倍及 1.19 倍, 说明冲击载荷条件对煤体断裂参数具有加强作用。与原始煤试件冲击断裂试验结果相比, 经过循环应力作用后的煤体平均动态 K_{IC} 及 G_C , 较原始煤试件的动态断裂参数分别降低了 20.90% 与 21.30%, 冲击载荷作用下循环载荷损伤后的煤试件动态断裂力学参数劣化程度更高, 这表明煤体动态断裂力学参量对循环应力损伤作用更加敏感。

(3) 原始煤试件动态断裂破坏后的分形维数更高, 说明原始煤试件在冲击载荷作用下断裂破碎的更加复杂, 冲击动力学显现的更加充分; 证明循环加卸载作用会对煤体造成损伤, 进而弱化煤体动态断裂力学行为特征的显现。

(4) 基于黏聚裂纹模型的煤体 I 型单边缺口梁动态断裂数值计算结果与试验结果相符, 这表明零厚度黏聚裂纹模型单元法能够对煤体动态断裂过程进行有效表征。

参考文献(References):

[1] 康红普, 姜鹏飞, 刘畅. 煤巷智能快速掘进技术与装

备的发展方向[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 023535.

KANG Hongpu, JIANG Pengfei, LIU Chang. Development of intelligent rapid excavation technology and equipment for coal mine roadways[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 023535.

[2] 潘一山, 耿琳, 李忠华. 煤层冲击倾向性与危险性评价指标研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1975-1978.

PAN Yishan, GENG Lin, LI Zhonghua. Research on evaluation indices for impact tendency and danger of coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1975-1978.

[3] 杨增强, 金珠鹏, 刘国栋, 等. 高应力动压巷道围岩冲击破坏机理与防治技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 33-37, 42.

YANG Zengqiang, JIN Zhupeng, LIU Guodong, et al. Study on the rock burst failure mechanism and prevention technology of surrounding rock in dynamic pressurized roadway under high stress[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(4): 33-37, 42.

[4] 杨健锋, 梁卫国, 陈跃都, 等. 不同水损伤程度下泥岩断裂力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2431-2440.

YANG Jianfeng, LIANG Weiguo, CHEN Yuedu, et al. Experiment research on the fracturing characteristics of mudstone with different degrees of water damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2431-2440.

[5] 刘瑞峰, 朱哲明, 李盟, 等. 爆炸载荷下 I 型裂纹的起裂及扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 392-402.

LIU Ruifeng, ZHU Zheming, LI Meng, et al. Initiation and propagation of mode I crack under blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 392-402.

[6] 李杨杨, 颜浩东, 张士川, 等. 复合缺陷类岩石裂纹扩展规律及力学特性试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 42-50.

LI Yangyang, YAN Haodong, ZHANG Shichuan, et al. Experimental study on the expansion law and mechanical characteristics of crack propagation in rock with composite defect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(2): 42-50.

[7] 张财贵, 周妍, 杨井瑞, 等. 用边裂纹平台圆环试样测试岩石的 I 型动态断裂韧度[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 691-700.

ZHANG Caigui, ZHOU Yan, YANG Jingrui, et al. Determination of model-I dynamic fracture toughness of rock using edge cracked flattened ring (ECFR) specimen[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 691-700.

- 691–700.
- [8] 刘江伟, 周广磊, 武娜. 人工裂缝形态对煤的抗拉性能及能量积聚的弱化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5): 053011.
LIU Jiangwei, ZHOU Guanglei, WU Na. Weakening effect of artificial fracture morphology on the tensile strength and energy accumulation of coal[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(5): 053011.
- [9] 赵毅鑫, 孙庄, 宋红华, 等. 煤I型动态断裂裂纹扩展规律试验与数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 3961–3972.
ZHAO Yixin, SUN Zhuang, SONG Honghua, et al. Crack propagation law of mode I dynamic fracture of coal: Experiment and numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 3961–3972.
- [10] 龚爽, 赵毅鑫. 层理对煤岩动态断裂及能量耗散规律影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3723–3731.
GONG Shuang, ZHAO Yixin. Effects of bedding on fracture characteristics and energy dissipation of coal under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3723–3731.
- [11] WANG Y, YANG R. Study of the dynamic fracture characteristics of coal with a bedding structure based on the NSCB impact test[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 184: 319–338.
- [12] GONG S, ZHOU L, WANG W, et al. Investigation of dynamic fracture behavior and energy dissipation of water-bearing coal under impact load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 275: 108793.
- [13] 甘德清, 田晓曦, 刘志义, 等. 循环冲击状态下砂岩力学及损伤特性研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(3): 203–211.
GAN Deqing, TIAN Xiaoxi, LIU Zhiyi, et al. Study on mechanics and damage characteristics[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 203–211.
- [14] 张晓悟, 徐金海, 孙垒, 等. 三轴循环加卸载条件下热损伤石灰岩力学特性演化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 043011.
ZHANG Xiaowu, XU Jinhai, SUN Lei, et al. Mechanical properties evolution of thermally damaged limestone under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 043011.
- [15] 王天佐, 王春力, 薛飞, 等. 不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2881–2891.
WANG Tianzuo, WANG Chunli, XUE Fei, et al. Study on acoustic emission and strain field evolution of red sandstone under different loading and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2881–2891.
- [16] 张祥, 陈骏, 李进, 等. 基于侧限压缩试验的黏土动态力学性能研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 1–8.
ZHANG Xiang, CHEN Jun, LI Jin, et al. Study on dynamic mechanical properties of clay based on confined compression test[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 1–8.
- [17] 朱凌, 裴向军, 崔圣华, 等. 含脉状缺陷结构岩石循环加卸载损伤及强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 900–911.
ZHU Ling, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Experimental study on cycle loading and unloading damage and strength characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 900–911.
- [18] 张晓悟, 徐金海, 黄宁, 等. 水化学侵蚀条件下砂岩力学特性及能量损伤特征演化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 063036.
ZHANG Xiaowu, XU Jinhai, HUANG Ning, et al. Mechanical properties and energy damage characteristics of sandstone subjected to hydrochemical erosion[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 063036.
- [19] DING Ziwei, JIA Jindui, TANG Qianbao, et al. Mechanical properties and energy damage evolution characteristics of coal under cyclic loading and unloading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 4765–4781.
- [20] 李欣, 张振南. 卸荷条件下岩石I型动态应力强度因子变化规律[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 422–430.
LI Xin, ZHANG Zhennan. Variation law of mode-I dynamic stress intensity factor of rock under unloading condition[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2021, 38(4): 422–430.
- [21] 杨丽荣, 黎嘉骏, 江川, 等. 岩样破裂过程声发射参数特征与时频特性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 5(1): 013015.
YANG Lirong, LI Jiajun, JIANG Chuan, et al. Analysis of acoustic emission parameters and time-frequency characteristics in the process of rock sample fracture[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 5(1): 013015.
- [22] 王波, 黄子康, 胡仕宇, 等. 含瓦斯煤岩流变规律及三维本构模型研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 60–67.
WANG Bo, HUANG Zikang, HU Shiyu, et al. Rheological law and 3D constitutive model of coal rock containing gas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Sciences), 2022, 41(5): 60–67.
- [23] 付安琪, 蔚立元, 苏海健, 等. 循环冲击损伤后大理岩

- 静态断裂力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2021–2030.
- FU Anqi, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Experimental study on static fracturing mechanical characteristics of marble after cyclic impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2021–2030.
- [24] 潘海源, 马芹永. 循环冲击作用下砂岩动力学特性及能量耗散特征研究[J]. 建井技术, 2022, 43(3): 39–46.
- PAN Haiyuan, MA Qinyong. Study on dynamic characteristics and energy dissipation characteristics of sandstone under cyclic impact[J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(3): 39–46.
- [25] 孔凯, 尹大伟, 张虎, 等. 岩-煤组合体试样变形场与能量演化特征试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 30–39.
- KONG Kai, YIN Dawei, ZHANG Hu, et al. Experimental study on deformation field and energy evolution characteristics of rock-coal composite samples[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Sciences), 2022, 41(5): 30–39.
- [26] SHAH S P. Determination of fracture parameters (K_{Ic} and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend tests[J]. Materials and Structures, 1990, 23(6): 457–460.
- [27] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773–781.
- [28] YANG Jianfeng, LIAN Haojie, LI Li. Fracturing in coals with different fluids: An experimental comparison between water, liquid CO_2 , and supercritical CO_2 [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18681.
- [29] YANG Jianfeng, LIAN Haojie, LI Li. Investigating the effect of confining pressure on fracture toughness of CO_2 -saturated coals[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 242: 107496.
- [30] 周强, 潘永泰, 郭庆, 等. 不同冲击比能下煤岩颗粒破碎的分形演化[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 143–148.
- ZHOU Qiang, PAN Yongtai, GUO Qing, et al. Fractal evolution of particle fragmentation of ore and rock under different impact energy[J]. Coal Engineering, 2020, 52(4): 143–148.
- [31] BAŽANT Z P, KAZEMI M T. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete[J]. Int J Fract, 1990, 44(2): 111–131.
- [32] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773–781.
- [33] 杨健锋, 柴敬, 张丁丁, 等. 基于黏聚裂纹模型的煤岩体韧性断裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3014–3023.
- YANG Jianfeng, CHAI Jing, ZHANG Dingding, et al. Study on ductile fracture mechanism of coal and rock mass based on cohesive crack model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3014–3023.
- [34] 杨健锋. 煤体黏聚裂纹本构方程研究及其在压裂工程中的应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- YANG Jianfeng. Study on the constitutive equation of the cohesive crack in coals and its application in hydraulic fracturing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.