

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.005

冲击荷载作用下弱胶结煤岩体的断裂韧度及 裂纹扩展特性试验研究*

汤俊¹,汪海波¹,朱建²,王梦想¹,高胡林³,吕闹¹

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院,淮南 232001;2. 鄂尔多斯市成达矿业有限公司 陶忽图煤矿,鄂尔多斯 017300;
3. 陕西亿华矿业开发有限公司 海则滩煤矿,榆林 718500)

摘要: 温度和含水状态是影响煤岩强度的关键因素,而动态荷载的扰动又使其破坏过程进一步复杂化。采用红砂岩和型煤制作出预制中心直裂纹的煤岩组合体,设置不同温度条件(25℃、0℃、-5℃)和不同含水状态(干燥、饱水)对试样进行预处理,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统开展动态试验,并采用高速相机记录其破坏形态,分析了不同冲击气压下,温度和含水状态的变化对煤岩组合体断裂韧度和裂纹扩展的影响。研究表明:煤/岩试件及煤岩组合体试件动态断裂韧度存在明显的应变率效应,冲击气压的增大使试件应力强度因子峰值增大,达到峰值所需的时间减少,而温度和含水状态只影响试件应力强度因子峰值的大小,不改其变达到峰值所需的时间;对于煤岩组合体试件,当两个试件均为两种相同材料组成时,由于其受冲击端材料体积大于预制裂缝端材料,动态断裂韧度取决于受冲击端材料,动态断裂韧度较大的材料作为受冲击端时,试件整体动态断裂韧度更大;随着含水状态的变化,饱水试件的动态断裂韧度小于干燥试件,而裂纹扩展速度快于干燥试件,随着冲击气压的增大,试件的动态断裂韧度和裂纹扩展速度亦增大,随着温度的降低,试件的动态断裂韧度先增大后减小。本研究旨在深入探讨西部弱胶结煤岩体的断裂韧度特性及其裂纹扩展规律,这对于理解煤岩体在复杂地质环境下的力学行为和预防工程地质灾害的发生具有至关重要的意义。

关键词: 煤岩组合体; 温度; 含水状态; 冲击荷载; 断裂韧度; 裂纹扩展

中图分类号: TD313;TD315 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0040-11

Experimental Study on Fracture Toughness and Crack Propagation Characteristics of Weak Cementation Coal Rock under Impact Load

TANG Jun¹, WANG Hai-bo¹, ZHU Jian², WANG Meng-xiang¹, GAO Hu-lin³, LV Nao¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Taohutu Coal Mine, Ordos Chengda Mining Co., Ltd., Ordos 017300, China; 3. Haizetan Coal Mine, Shaanxi Yihua Mining Development Co., Ltd., Yulin 718500, China)

Abstract: Temperature and moisture content critically govern coal rock strength, while dynamic load disturb-

收稿日期(Date of reception): 2025-04-04

网络首发日期(Published online): 2025-05-15

作者简介: 汤俊(2001-), 男, 安徽当涂, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学方面研究, (E-mail) 1638443435@qq.com。

通信作者: 汪海波(1983-), 男, 安徽舒城, 博士、教授, 主要从事爆破理论与技术、冲击动力学方面的研究, (E-mail) wanghb_aust@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274071)

About the author: TANG Jun(2001-), male, born in Dangtu city, Anhui province, master-graduate student, mainly engaged in the study of impact dynamics, (E-mail) 1638443435@qq.com.

Corresponding author: WANG Hai-bo(1983-), male, born in Shucheng city, Anhui province, Ph. D, professor, mainly engaged in blasting theory and technology, impact dynamics research, (E-mail) wanghb_aust@163.com.

Fund Programs: General Program of National Natural Science Foundation of China(52274071)

ances significantly compound the complexity of its failure mechanisms. Red sandstone and compacted coal were combined to fabricate coal-rock composite specimens featuring preformed central fractures, subsequently conditioned under controlled thermal (25°C, 0°C, -5°C) and hydration (dry/saturated) regimes. The dynamic characteristics were evaluated using a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system, with high-speed imaging capturing the failure mechanisms. The study investigates the impact of temperature and moisture conditions on the fracture toughness and crack growth behavior of coal-rock combinations under varying impact pressures. The results demonstrate that both coal/rock specimens and coal-rock composites exhibit a pronounced strain rate effect in dynamic fracture toughness. Increasing impact pressure elevates the peak stress intensity factor while shortening its time-to-peak. Notably, temperature and moisture content solely influence the peak stress intensity factor without altering its temporal evolution. For coal-rock composite specimens composed of identical materials, the dynamic fracture toughness is predominantly governed by the impact-end material due to its larger volume compared to the prefabricated crack-end region. When the impact-end material possesses higher dynamic fracture toughness, the specimen exhibits greater overall fracture resistance. Saturated specimens show lower dynamic fracture toughness but faster crack propagation speeds compared to dry specimens. The dynamic fracture toughness and crack propagation speed of specimens increase with rising impact pressure. In contrast, as temperature decreases, the dynamic fracture toughness initially increases before declining. This study aims to thoroughly investigate the fracture toughness characteristics and crack propagation mechanisms of weakly cemented coal and rock masses in western China. The findings will contribute significantly to understanding the mechanical behavior of these materials in complex geological environments and help prevent engineering geological disasters.

Key words: coal-rock combination body; temperature; moisture condition; impact load; fracture toughness; crack propagation

随着西部煤矿资源的不断开发,在西部煤矿井筒冻结基岩段的施工中,由于煤岩组合体复杂的力学特性,冻结井筒壁可能会发生严重变形,甚至破裂,筒壁破裂将导致大量涌水,井筒被淹,对作业人员的生命安全以及矿山的整体生产构成严重威胁,同时造成巨大经济损失,需引起高度重视。影响煤岩组合体力学行为的因素众多,如温度、含水状态、荷载等。因此,开展不同冲击气压下,温度和含水状态的变化对煤岩组合体断裂韧度和裂纹扩展的研究,在实际工程领域具有重要意义。

近年来,众多学者从环境因素、测试技术及数值模拟等多个角度对煤岩组合体的断裂韧度和裂纹扩展问题开展了大量研究,并取得了大量研究成果。谢凯迪等采用伺服压力机和霍普金森压杆对低温/饱水耦合作用下的红砂岩进行了静、动态短芯压剪试验^[1],研究并揭示了低温和水饱和状态对红砂岩 II 型断裂力学特性的影响及其相互作用机制。苗磊刚等采用分离式霍普金森压杆并结合高速摄影仪对煤-岩-煤组合体进行动态冲击试验^[2],分析并得到了煤-岩-煤组合体在冲击荷载作用下的力学特性和破坏模式。宋勇军等采用 CT 扫描和单轴压缩试验^[3],利用三维可视化软件和分形理论,分析并揭示了冻融环境下不同饱和度砂岩的损伤演化规律。孙长斌等开展不同含水率条件下煤岩组合体的单轴压缩试验^[4],研究并得到了水岩作用对煤岩组合体

抗压强度和弹性模量有明显的劣化效应,使组合体破裂形式发生明显改变。余雷雷等采用了 3D 打印及三点弯曲试验的方法^[5],研究探讨了低温条件下含预制中心直裂纹半圆盘弯曲 (NSCB) 试件的 I 型断裂特性,结果表明:含预制中心直裂纹 NSCB 试件的断裂韧度小于标准 NSCB 试件,且其裂纹拓展路径出现“偏折”现象。张建国等采用分离式霍普金森压杆系统^[6],对含预制中心直裂纹半圆盘弯曲 (NSCB) 试件的动态断裂韧度及裂纹扩展速度进行了研究,结果表明:随着预制裂纹长度的增加动态断裂韧度先增加后减小。杨阳等采用了动态冲击试验的方法^[7],结合损伤理论和能量理论,对高应变率下红砂岩动态力学特性的温度效应进行了研究,得到了红砂岩在较低负温下动态力学强度出现劣化的原因。Li 等对含预制界面斜裂纹的煤岩组合体进行单轴压缩试验^[8],对煤岩组合体界面裂纹扩展进行研究,结果表明,煤岩组合体破坏过程中裂纹的产生与扩展可以用应力场的演化反应。Liu 等采用了核磁共振试验的方法^[9],对西部地区富水砂岩进行了研究,分析并揭示了不同含水率冻结砂岩的强度特性及其强度强化机制。Cheng 等采用了毛细理论^[10],推导出孔隙水冻结温度方程,分析并验证了多孔岩石冻融水分迁移损伤机制。虽然目前对于低温冻结砂岩的研究已有一定基础,且对动载作用下的岩石力学行为也有所探讨,然而,对于在冲击荷载

作用下,弱胶结煤岩组合体所展现的动态断裂韧度、裂纹扩展的具体规律以及微观劣化机理的探讨还尚显不足。

含预制中心直裂纹半圆盘弯曲(NSCB)测试与分离式霍普金森压杆(SHPB)系统相结合,可以提供断裂韧度、裂纹扩展速度等有关动态断裂特性的详细数据。鉴于此,研究依托内蒙古自治区鄂尔多斯市陶忽图煤矿井筒冻结基岩段施工项目,以煤岩组合体为研究对象,基于含预制中心直裂纹半圆盘弯曲(NSCB)试验方法,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统进行冲击试验,结合超高速摄像技术对试件动态变形破坏过程进行捕捉记录,从而探究西部冻结煤岩体的断裂韧度和裂纹扩展规律并揭示其宏观力学性能劣化的微观机制。为西部煤矿井筒冻结基岩段施工中的灾害预防和风险控制提供参考,有利于降低实际工程中岩体灾害的风险,对西

部岩石工程的安全建设具有一定参考价值。

1 试验方案与原理

1.1 试验设备及试验方案

试验所用的 SHPB 系统主要由冲击子弹、入射杆、透射杆、缓冲装置和数据采集系统组成,试验装置如图 1 所示。所有压杆均为杨氏模量为 210 GPa 弹性波速为 5190 m/s 的钢材,撞击杆、入射杆、透射杆的直径均为 50 mm。入射杆上粘贴型号为 BFH120-5AA-D150 的电阻应变片,电阻值为 $(120 \pm 0.1) \Omega$,灵敏度系数为 $2\% \pm 1\%$;透射杆选用型号为 HU-101B-120 的半导体应变片,电阻值为 $(120\% \pm 5\%) \Omega$,灵敏度系数为 $110\% \pm 5\%$ 。低温系统主要包括控制器、制冷器、电热丝传感器及保温室等。在进行冲击加载试验时,结合同步控制系统,使用高速相机对试样加载过程进行拍摄。

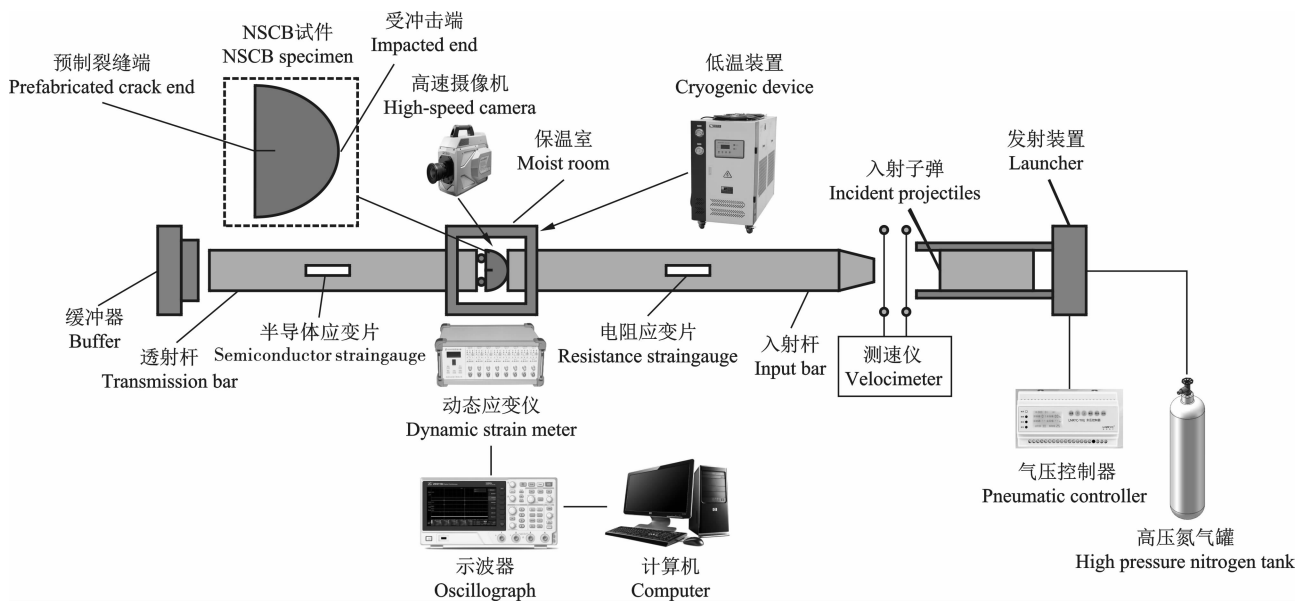


图 1 试验装置图

Fig. 1 Test device diagram

试验共设计了四种试件,分别为红砂岩 NSCB 试件、煤 NSCB 试件、受冲击端为红砂岩的 NSCB 组合体试件和受冲击端为煤的 NSCB 组合体试件(后续分别用代号:H 试件、M 试件、HM 试件、MH 试件表示),如图 2 所示。对于干燥、饱水的完整试件以及组合体试件进行 25℃、0℃、-5℃ 处理后,分别以 0.2、0.3、0.4 MPa 的冲击荷载作为加载条件,开展 SHPB 动态力学试验。

1.2 试样制备

制作试样的原材料取自内蒙古自治区鄂尔多斯市陶忽图煤矿,物理力学性质见表 1。又以该煤矿

中的煤为参考,通过静态力学试验测得其相应力学参数,按一定比例的水泥、水和煤粉配制出物理力学性质与其相似的煤^[11],如表 2 所示。

完整岩石和煤岩组合体试件如图 2 所示,试件均被加工成直径 50 mm,厚度 25 mm,预制切缝垂直于半圆盘底面且位于中心线处^[12],切缝长度为 3 mm 且宽度小于 0.5 mm。

其中,以 HM 试件制作过程为例,首先将制作好的 H 试件沿预设位置完全切割,切割后的试件分为左、右两块(左块为预制裂缝块、右块为受冲击块),将右块红砂岩置于模具中,按照上文所述水泥、水和

煤粉的配合比混合搅拌均匀后,于模具中分层压密,与右块红砂岩拼接成完整的 HM 试件。

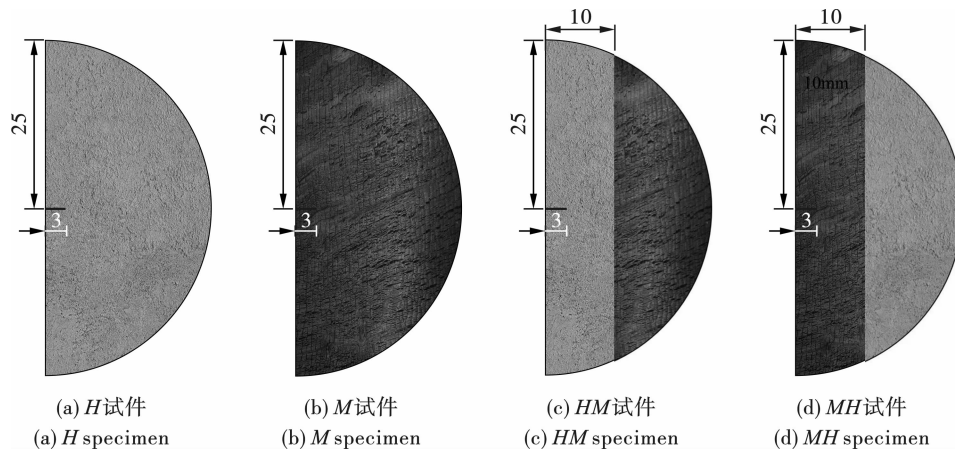


图 2 完整岩石和煤岩组合体试件示意图(单位:mm)

Fig. 2 The schematic diagram of complete rock and coal-rock combination specimen(unit:mm)

表 1 红砂岩和煤的基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of red sandstone and coal

岩石类型 Rock type	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength/MPa	单轴抗拉强度 Uniaxial tensile strength/MPa	干密度 Dry density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	饱和密度 Saturation density/ ($g \cdot cm^{-3}$)
红砂岩 Red sandstone	6.30	0.28	1.97	2.10
煤 Coal	11.80	1.19	1.32	1.45

表 2 水泥、水和煤粉配合比及力学参数

Table 2 Mix proportion and mechanical parameters of cement, water and pulverized coal

岩石类型 Rock type	水泥:水:煤 Cement:Water:Coal	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength/MPa	单轴抗拉强度 Uniaxial tensile strength/MPa	干密度 Dry density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	饱和密度 Saturation density/ ($g \cdot cm^{-3}$)
煤 Coal	1.5:0.8:1	13.40	0.96	1.69	1.91

将所制成的试件分为两组,一组置于 $55^{\circ}C$ 的干燥箱中烘至水分完全蒸发,期间每隔两小时对试件进行一次称重,直至试件重量不再发生变化,以确保试件达到完全干燥状态;另一组置于真空抽气饱水装置内进行饱水,在气压达到 $0.1 MPa$ 后继续抽气饱水至无气泡溢出,以确保试件达到完全饱水状态。对干燥和饱水两组试件分别按照 $25^{\circ}C$ 、 $0^{\circ}C$ 、 $-5^{\circ}C$ 进行处理,其中饱水试件在取出后应及时密封,防止水分蒸发,随后按预设温度将两组试件放入冷柜中冷处理 24 h。

2 试件的动态断裂韧度分析

2.1 动态应力平衡验证

在开展动态力学试验的过程中,确保试件两端的动态应力达到平衡状态是实现有效动态 NSCB 试

验的基本前提。依据国际岩石力学学会 (ISRM) 所推荐的测试方法^[13],为降低摩擦力对试验结果的潜在影响,建议在试件与入射杆及透射杆接触的两端涂覆适量的凡士林。在试验正式开始前,应将波形整形器固定于入射杆的撞击端,以减少波形振荡和弥散效应的影响。图 3 展示了典型试验的动态平衡曲线,从中可以观察到,在动态加载过程中,试件两端的动态应力几乎保持一致,这消除了动态加载过程中可能出现的惯性效应,确保了试验过程中试件两端的动态应力平衡。

2.2 动态断裂韧度的计算方法及加载率的确定

断裂韧度 $K_I(c)$ 是表征材料抵抗裂纹扩展的性能指标,断裂韧度越大,试件抵抗开裂的能力越强。NSCB 试件受到杆件施加平衡力使试件中心的预制裂纹产生 I 型破坏,当冲击荷载达到最大时,试

件中裂纹尖端的应力强度因子即为试件的动态断裂韧度,可采用动态时的应力强度因子 $K_I(t)$ 计算方法进行求解^[14]。计算公式如下

$$K_I(c) = \frac{P(t)}{2RB} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (1)$$

$$Y_I = -1.297 + 9.516\beta - (0.47 + 16.457\beta)\alpha + (1.071 + 34.401\beta)\alpha_0^2 \quad (2)$$

$$K_I(c) = \frac{P(t)_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} Y_I \quad (3)$$

式中: B 为试样的厚度; R 为试样的半径; a 为预制裂纹长度; $P(t)$ 为加载过程中试样两端所受到的荷载; $\beta = S/2R$, $\alpha = a/R$; S 为两支撑点之间距离; Y_I 为量纲参量,其值由试样几何形状及支撑座支点间距离决定。

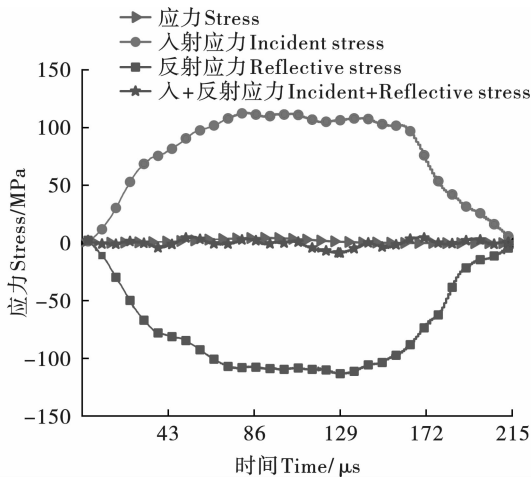


图 3 典型的动态平衡曲线

Fig. 3 Typical dynamic equilibrium curve

加载率(K)作为动力学分析的核心参数之一,其值可通过分析试件应力强度因子随时间变化的曲线获得。图 4 为典型 NSCB 试件应力强度因子随时间变化的曲线^[15],其中曲线峰值对应于动态断裂韧度 $K_I(c)$;曲线中近似线性上升段的斜率即代表了加载率(K)。

2.3 动态断裂韧度的试验结果与分析

通过上述试验方法,获得了不同试验工况试件的应力强度因子时程曲线,以 -5°C 条件下 HM 试件为例,如图 5 所示。提取获得的应力强度因子时程曲线峰值,建立如图 6 所示的动态断裂韧度变化趋势。

从图中可以看出,在此试验工况下,当冲击气压为 0.2、0.3、0.4 MPa 时,试件的应力强度因子分别在 45 ~ 60 μs 、30 ~ 45 μs 、15 ~ 30 μs 达到峰值,并且峰值亦会随之提升。由此可以看出,试件的动态断

裂韧度存在明显的应变率效应,冲击气压的增大不仅会使试件的应力强度因子提高,也会使其更快达到峰值。在初始阶段,由于试件内部存在的原生裂隙被压缩,应力强度因子增长缓慢,随后应力强度因子迅速增大并达到峰值,由于试件本身的脆性,在达到应力强度因子峰值后,其内部结构开始破坏,承载能力迅速降低^[16]。

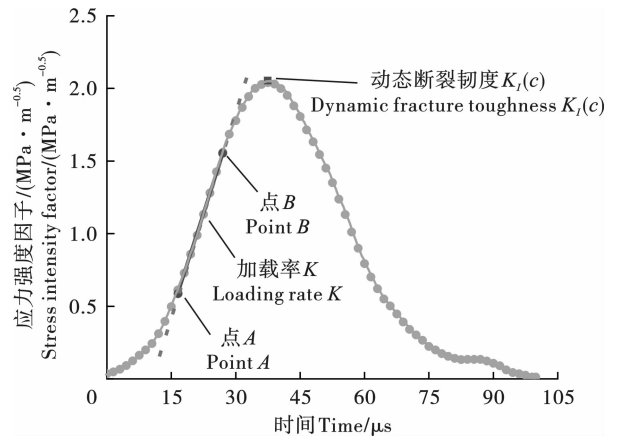


图 4 动态断裂韧度及加载率的确定方法

Fig. 4 Determination method of dynamic fracture toughness and loading rate

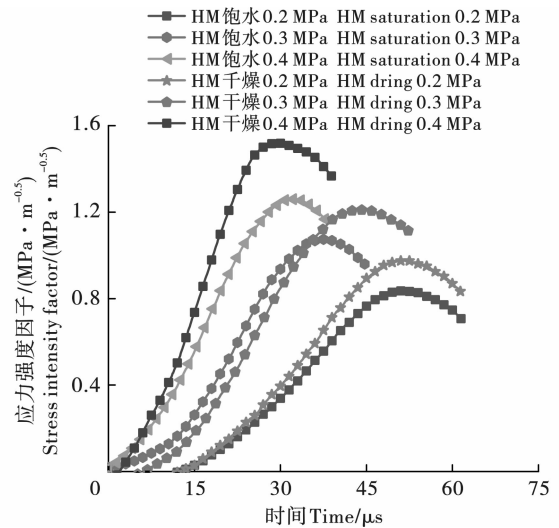


图 5 -5°C HM 试件应力强度因子时程曲线

Fig. 5 Time history curve of stress intensity factor of HM specimen at -5°C

相同冲击气压下, HM 干燥、饱水试件的应力强度因子时程曲线峰值在同一时间区域内达到峰值, HM 饱和试件的应力强度因子时程曲线峰值小于 HM 干燥试件。这是因为含水状态的变化影响了试件本身颗粒间的黏结力和内摩擦因数,从而影响力强度因子的大小,但是并不能改变应力强度因子达到峰值的时间。同理,温度的变化也是通过影响

试件本身的物理力学参数,进一步影响应力强度因

子的大小,不改变应力强度因子达到峰值的时间。

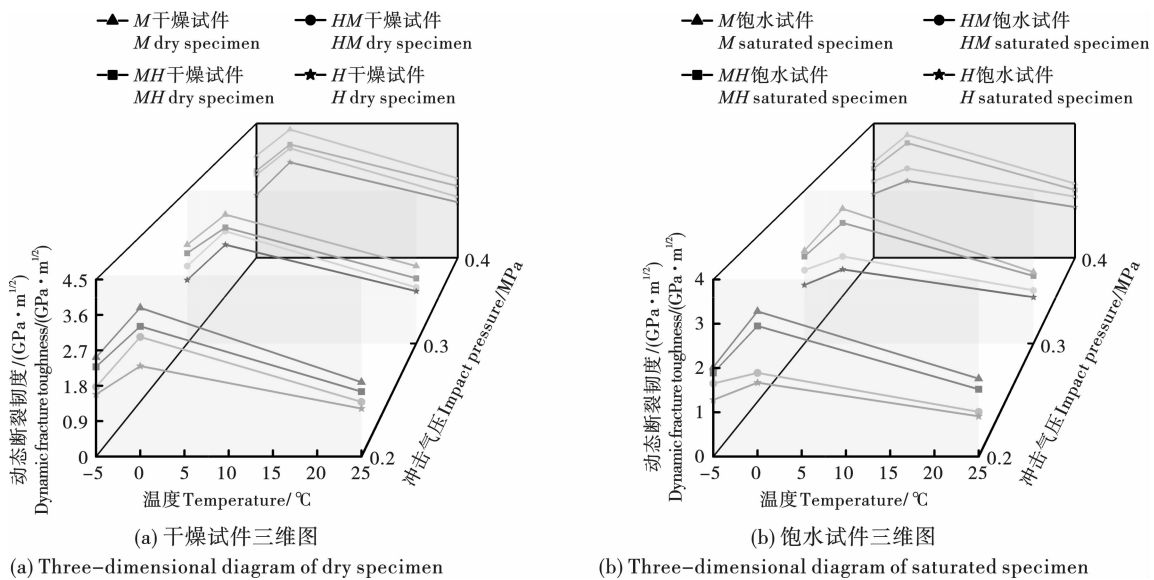


图 6 动态断裂韧度变化趋势

Fig. 6 Trend of dynamic fracture toughness

由图 6(a)、(b)可知:以 *MH* 试件为例,在温度相同的条件下,随着冲击气压的增大,*MH* 试件的动态断裂韧度呈现上升趋势,且 *MH* 干燥试件的动态断裂韧度整体上大于其饱和试件,*M* 试件、*H* 试件、*HM* 试件均符合此规律;在冲击气压相同的条件下,随着温度的降低,*MH* 试件的动态断裂韧度呈现先上升后下降的趋势,且在 0°C 时上升至最大值,在 -5°C 时下降至最小值,*M* 试件、*H* 试件、*HM* 试件均符合此规律。

在冲击气压为 0.2、0.3、0.4 MPa,温度为 25、0、 -5°C 的条件下,*MH* 干燥试件的动态断裂韧度分别是 *HM* 干燥试件的 1.29、1.09、1.19、1.17、1.03、1.16、1.05、1.04、1.18 倍。*MH* 试件与 *HM* 试件相比,两者均为相同材料组成,*MH* 试件动态断裂韧度却大于 *HM* 试件,这是因为煤岩组合体试件受冲击端材料体积大于预制裂缝端材料,试件整体以受冲击端材料为主,*MH* 试件的受冲击端材料为煤,*HM* 试件的受冲击端材料为红砂岩,煤的动态断裂韧度比红砂岩更大。同理,*MH* 饱水试件的动态断裂韧度亦大于 *HM* 饱水试件。

在冲击气压为 0.2、0.3、0.4 MPa,温度为 25、0、 -5°C 的条件下,*HM* 干燥试件的动态断裂韧度分别是 *H* 干燥试件的 1.12、1.32、1.14、1.22、1.14、1.07、1.32、1.15、1.10 倍。其中 *HM* 试件是受冲击端材料为红砂岩,预制裂缝端材料为煤的 NSCB 组合体试件,*H* 试件是完整的红砂岩 NSCB 试件,虽然 *H* 试件具有完整性,但是 *HM* 试件预制裂缝端材料

煤的动态断裂韧度远大于红砂岩,所以 *HM* 干燥试件的动态断裂韧度大于 *H* 干燥试件。而 *MH* 干燥试件的动态断裂韧度却小于 *M* 干燥试件,这是因为 *MH* 干燥试件不仅不具备完整性,而且还拥有动态断裂韧度较小的红砂岩组成部分。由此可以得到,在同为干燥或饱水的前提下,动态断裂韧度 *M* 试件 > *MH* 试件 > *HM* 试件 > *H* 试件。

3 试件的裂纹扩展特征分析

3.1 试件的动态破坏过程

图 7 为典型试件的应力时程曲线,并将曲线划分为 5 个阶段,以冲击气压为 0.3 MPa,温度为 -5°C 的干燥 *HM* 试件试验情况进行说明。图 8 为冲击气压 0.3 MPa、温度 -5°C 条件下,*H*、*M*、*HM*、*MH* 干燥试件的动态破坏过程。为研究在冲击荷载作用下试件中裂纹的演化过程,图 8 干燥 *HM* 试件给出了与图 7 对应的 5 个阶段典型的裂纹扩展过程。

第 I 阶段对应于试件的损伤压密过程 ($0 \sim 12.5 \mu\text{s}$):在此阶段,试件尚未形成裂纹。应力波在试件内部的传播导致试件顶端承受显著的压应力,同时切缝尖端则承受显著的拉应力,进而诱发了局部压缩损伤区与拉伸损伤区的形成。

第 II 阶段对应于裂纹的起始扩展过程 ($12.5 \sim 25 \mu\text{s}$):在此阶段,试件的切缝尖端开始形成初始裂纹。这一现象归因于应力波的传播效应,导致切缝尖端的拉应力逐渐增强,损伤程度逐步加剧。因此,裂纹首先在切缝尖端显现,并迅速沿着试件的中心

区域扩展,同时伴随着次生裂纹的形成。

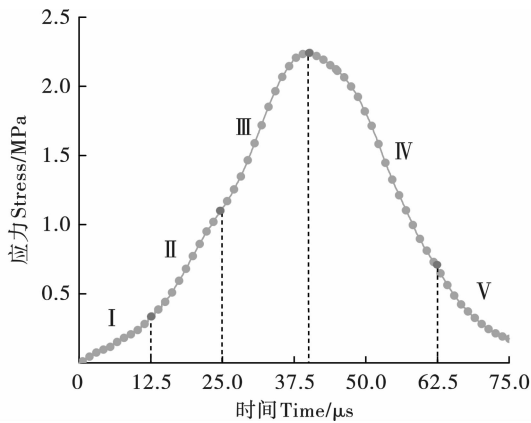


图 7 典型试件的应力时程曲线

Fig. 7 Stress time history curves of typical specimens

第Ⅲ阶段对应于裂纹的成形过程(25 ~ 50 μs):在此阶段,试件所承受的荷载达到峰值,裂纹继续发展但依然没有贯穿试件。

第Ⅳ阶段对应于裂纹的贯穿过程(50 ~ 62.5 μs):在此阶段,主裂纹持续扩展直至贯穿整个试件,尽管如此,试件在该过程中仍保持一定的承载能力。

第Ⅴ阶段为试件断裂阶段(62.5 ~ 75 μs):在此阶段,主裂纹已贯穿整个试件,损伤程度达到峰值,试件的承载能力几乎完全丧失。

同时,对不同冲击气压、不同温度以及不同含水状态的四种试件的试验结果进行统计分析后,发现试件的动态破坏过程几乎一致,说明试件受载后裂纹发育及演化机理基本可以用该 5 个阶段进行统一描述。

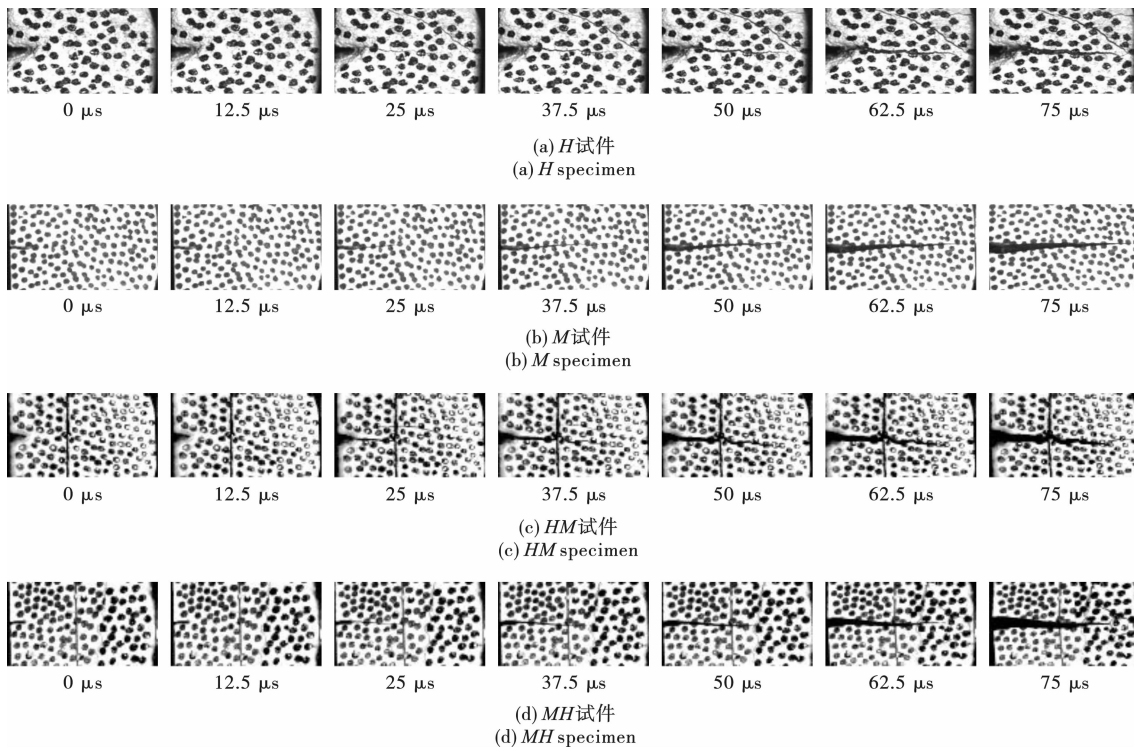


图 8 干燥试件的典型裂纹扩展过程

Fig. 8 Typical crack propagation process of dry specimens

3.2 裂纹扩展速度分析

计算得到试件在不同时刻的裂纹扩展速度,将裂纹扩展速度变化趋势类似的试件进行分类归纳处理。图 9 为冲击气压 0.3 MPa、温度 -5°C 条件下, H、M、HM、MH 干燥、饱水试件的裂纹扩展速度统计结果。

由图 9 可以看出,主裂纹的扩展过程集中在 0 ~ 75 μs ,试件的裂纹扩展速度主要分布在 200 ~ 800 m/s 范围内,且试件裂纹扩展速度随时间增加呈波动性减小的趋势。首先由于组合体试件和完

整试件皆为非均质性材料,裂纹在扩展过程中易受到材料中粗颗粒的影响,其中,组合体试件由两种材料所构成,其影响尤为显著。其次,试件内部受到应力波透反射作用的影响,其不同部位的裂纹扩展存在差异性,可能表现为促进或抑制作用^[17]。最后,在裂纹张开的初期,外界输入的能量大部分用于裂纹的生成与扩展,当裂纹扩展至某一程度后,在应力波的作用下,外界输入的能量大部分用于裂纹的张开,致使裂纹扩展速度迅速下降^[18]。

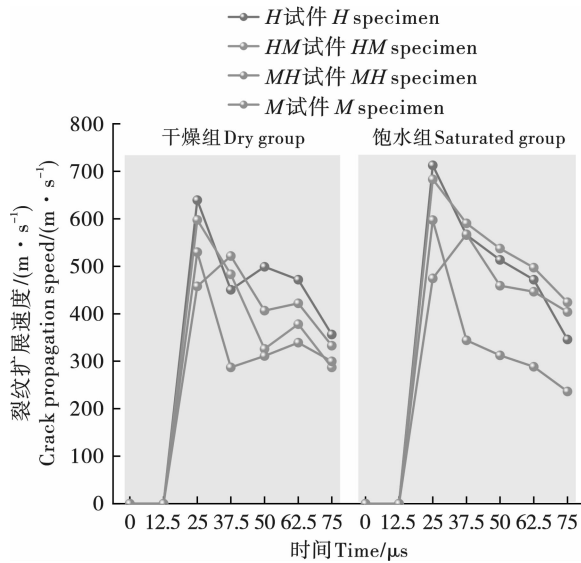


图 9 裂纹扩展速度图

Fig. 9 Crack propagation velocity diagram

在冲击气压为 0.3 MPa, 温度为 -5°C 的条件下, H 干燥、饱水试件裂纹扩展的峰值速度分别为 639.3、712.6 m/s, M 干燥、饱水试件裂纹扩展的峰值速度分别为 521.3、567.2 m/s, H 干燥、饱水试件裂纹扩展的峰值速度是 M 干燥、饱水试件的 1.23、1.26 倍。在冲击气压、温度相同的条件下, 裂纹扩展的峰值速度随着试件强度的增大而减小; 饱水试件裂纹扩展的初始速度和峰值速度均大于干燥试件, 这是饱水作用和低温冻胀劣化作用共同导致的结果。

在冲击气压为 0.3 MPa, 温度为 -5°C 的条件下, HM 干燥、饱水试件裂纹扩展的峰值速度分别为 597.7、683.3 m/s, MH 干燥、饱水试件裂纹扩展的峰值速度为 529.6、597.1 m/s, HM 干燥、饱水试件裂纹扩展的峰值速度分别是 MH 干燥、饱水试件的 1.13、1.14 倍。在达到裂纹扩展峰值速度后, HM 试件的裂纹扩展速度急剧下降趋于稳定, 这是由于 HM 试件的预制裂缝端材料为煤, 受冲击端材料为红砂岩, 其中红砂岩的动态断裂韧度远低于煤, 在 $12.5 \sim 25 \mu\text{s}$, HM 试件受到冲击后, 受冲击端材料红砂岩已经产生大量裂缝, 同时在预制切缝尖端, 裂纹迅速扩展达到峰值速度并将 HM 试件近乎贯穿, 在 $25 \sim 75 \mu\text{s}$, 由于试件被近乎贯穿, 导致裂纹扩展速度急剧下降; MH 试件的裂纹扩展速度迅速上升后缓慢下降趋于稳定, 这是由于 MH 试件的预制裂缝端材料为红砂岩, 受冲击端材料为煤, 其中煤的动态断裂韧度远高于红砂岩, 在 $12.5 \sim 25 \mu\text{s}$, 裂纹在预制切缝尖端迅速扩展, 贯穿预制裂缝端材料红砂岩, 在 $25 \mu\text{s}$ 后开始贯穿受冲击端材料煤, 但是由于煤

的动态断裂韧度远高于红砂岩, 则导致裂纹扩展速度下降, 并在应力波作用下波动式趋于稳定, 最终贯穿 MH 试件。

对于组合体试件和完整试件, 其裂纹扩展速度均有类似的阶段性变化特征。在 $0 \sim 12.5 \mu\text{s}$ 属于损伤压密阶段, 该阶段尚未产生裂纹; 在 $12.5 \sim 25 \mu\text{s}$ 属于初始快速扩展阶段, 裂纹迅速产生并开始扩展; 在 $25 \sim 37.5 \mu\text{s}$ 属于减速阶段, 该阶段裂纹扩展速度开始下降; 在 $37.5 \sim 75 \mu\text{s}$ 属于稳定扩展阶段, 该阶段裂纹扩展速度波动式趋于稳定。

4 温度及含水状态影响机制探讨

4.1 含水状态对试件强度的影响

相比于干燥状态的试件, 饱水状态的试件由于受到饱水作用的影响(图 10(a)、(c)), 会对其造成侵蚀, 水溶液在水压力的作用下, 顺着试件中的原生裂纹进入试件内部, 腐蚀、溶解其内部的胶结材料, 削弱矿物颗粒之间的黏结作用, 并且试件内部部分物质与水发生反应, 导致孔隙开裂和膨胀, 从而进一步降低试件强度^[19,20]。

4.2 冻结过程对干燥、饱水试件强度的影响

对于干燥的试件(图 10(a)、(b)), 空气占据了其内部孔隙的大部分空间, 在冻结过程中由于矿物颗粒的热力收缩作用, 使其颗粒间的接触增加, 内部更为密实, 有效降低了其内部孔隙的体积, 等同于减小了试件内部的初始损伤, 从而使其强度提高; 当温度继续下降, 由于颗粒间的过度挤压将导致新的裂纹出现, 增加新的损伤, 进而使其强度降低^[21]。

对于饱水的试件(图 10(c)、(d)), 水分子占据了其内部孔隙的大部分空间, 在冻结过程中, 主干孔中的水先结冰, 并将尚未结冰的过冷状态的水驱赶至与之相连的旁枝孔隙中, 此时, 旁枝孔隙若为封闭孔, 则其内部将产生较大的孔隙水压力, 旁枝孔隙若为连通孔, 则过冷状态的水进一步被驱赶至试件内部, 在这一阶段中, 试件内部冰含量的增加, 冰的强度也在增加, 所以试件强度得到提高; 当温度进一步下降, 旁枝孔隙中的水开始结冰, 由于主干孔中冰的化学势较低, 部分旁枝孔隙中的过冷水向主干孔中迁移并结冰, 导致主干孔中孔隙冰产生的冻胀压力增加, 当孔隙应力大于临界应力时, 孔隙将发生开裂、扩张, 此时试件强度降低^[22,23]。

由此可见, 温度和含水状态在试件破碎过程中产生了较为复杂的影响, 相同因素在不同条件下, 对试件的强度既可能起强化作用, 也可能起劣化作用, 在多种机制综合作用下, 导致其孔隙结构发生变化。

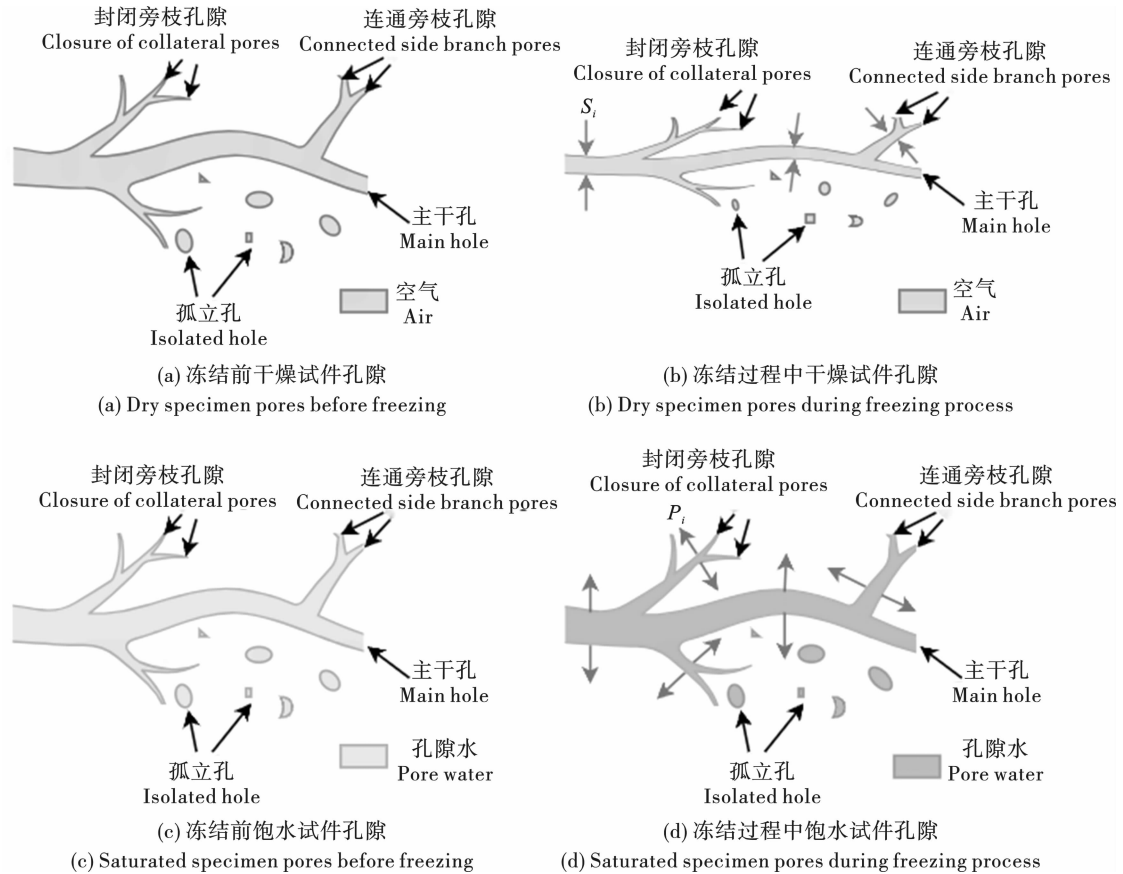


图 10 干燥、饱水试件冻结前后的孔隙结构

Fig. 10 Pore structure of Dry and saturated specimens before and after freezing

5 结论

1) 煤/岩试件及煤岩组合体试件动态断裂韧度存在明显的应变率效应,且冲击气压越大,试件应力强度因子达到峰值的时间越短,应力强度因子的峰值越大;而含水状态和温度的变化改变了试件本身的物理力学性质,从而影响力学强度因子的大小,但不改变其达到峰值的时间。

2) 对于煤岩组合体试件,当两个试件均为两种相同材料组成时,由于其受冲击端材料体积大于预制裂缝端材料,动态断裂韧度取决于受冲击端材料,动态断裂韧度较大的材料作为受冲击端时,其整体动态断裂韧度更大。组合体试件和完整试件的主裂纹扩展速度波动较大,但均呈现为先迅速上升后波动性下降至稳定。

3) 随着含水状态的变化,饱水试件的动态断裂韧度小于干燥试件,而裂纹扩展速度快于干燥试件;随着冲击气压的增大,试件的动态断裂韧度和裂纹扩展速度亦增大;随着温度的降低,试件的动态断裂韧度先增加后减小。

4) 试件微观结构受到温度和含水状态的影响,

在饱水状态下,试件被水溶液侵蚀,内部胶结材料被腐蚀、溶解,部分物质与水发生反应,从而降低试件强度;在低温状态下,试件内部同时发生矿物颗粒收缩、水冰相变、冰强度增强以及水/冰与试件相互作用,从而使试件强度先增强后减弱。

参考文献 (References)

- [1] 谢凯迪,邱艳宇,邢灏喆. 低温/饱水耦合作用下红砂岩静动态 II 型断裂特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(16): 236-242.
- [1] XIE Kai-di, QIU Yan-yu, XING Hao-zhe. Coupled effects of water and low temperature on quasistatic and dynamic mode-II fracture properties of red sandstone[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(16): 236-242. (in Chinese)
- [2] 苗磊刚,牛园园,石必明. 煤-岩-煤组合体冲击荷载作用下力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1217-1224.
- [2] MIAO Le-igang, NIU Yuan-yuan, SHI Bi-ming. Study on mechanical properties of coal-rock-coal composites under impact loading[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(6): 1217-1224. (in Chinese)

- [3] 宋勇军,杨慧敏,谭皓,等. 冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8):1513-1524.
- [3] SONG Yong-jun, YANG Hui-min, TAN Hao, et al. Study on damage evolution characteristics of sandstone with different saturations in freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8):1513-1524. (in Chinese)
- [4] 孙长斌,吴斌斌,杨逾. 不同含水率下煤岩组合体力学特性损伤规律研究[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(1):30-35.
- [4] SUN Chang-bin, WU Bin-bin, YANG Yu. Study on the damage law of mechanical properties of coal-rock combinations under different moisture contents[J]. Coal Geology of China, 2024, 36(1):30-35. (in Chinese)
- [5] 余雷雷,徐颖,葛进进,等. 基于3D打印试件的裂隙岩体断裂特性及裂纹扩展特征研究[J]. 爆破, 2024, 41(4):25-34.
- [5] YU Lei-lei, XU Ying, GE Jin-jin, et al. Study on fracture characteristics and crack propagation features of fissured rock mass based on 3d printed samples[J]. Blasting, 2024, 41(4):25-34. (in Chinese)
- [6] 张建国,杨文,汪海波,等. 动载作用板岩断裂韧度与裂纹扩展特征试验研究[J]. 爆破, 2025, 42(1):37-43, 55.
- [6] ZHANG Jian-guo, YANG Wen, WANG Hai-bo, et al. Experimental study on fracture toughness and crack propagation characteristics of slate under dynamic loading[J]. Blasting, 2025, 42(1):37-43, 55. (in Chinese)
- [7] 杨阳,杨仁树. 高应变率下红砂岩“冻伤效应”[J]. 工程科学学报, 2019, 41(10):1249-1257.
- [7] YANG Yang, YANG Ren-shu. “Frostbite effect” of red sandstone under high strain rates[J]. Chin J Eng, 2019, 41(10):1249-1257. (in Chinese)
- [8] LI Xiao-peng, LI Xiang-shang, YUAN Hong-hui, et al. The failure behavior of coal-rock combined body under compression-shear loading[J]. Science progress, 2024, 107(1):368504231225860-368504231225860.
- [9] LIU Bo, SUN Yan-ding, YUAN Yi-feng, et al. Strength characteristics of frozen sandstone with different water content and its strengthening mechanism[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6):1085-1093.
- [10] CHENG Hua, CHEN Han-qing, CAO Guang-yong, et al. Damage mechanism of porous rock caused by moisture migration during freeze thaw process and experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9):1739-1749.
- [11] 戴林超. 突出型煤配比及力学特性实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(6):8-12.
- [11] DAI Lin-chao. Experimental research on the proportion and mechanical properties of outburst briquette[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(6):8-12. (in Chinese)
- [12] 李杨,王雁冰,付代睿,等. 动载下层状复合岩石能量耗散及断裂特征研究[J]. 工程科学学报, 2023, 45(11):1833-1846.
- [12] LI Yang, WANG Yan-bing, FU Dai-rui, et al. Energy dissipation and fracture characteristics of composite layered rock under dynamic load[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11):1833-1846. (in Chinese)
- [12] LI Yang, WANG Yan-bing, FU Dai-rui, et al. Energy dissipation and fracture characteristics of composite layered rock under dynamic load[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11):1833-1846. (in Chinese)
- [13] CHEN R, XIA Kai-wen, DAI Feng, et al. Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(9):1268-1276.
- [14] 吴攸,尹士兵,刘希灵,等. 利用中心直裂纹半圆盘试样测定岩石在高温条件下的动态I型断裂韧度(英文)[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2022, 32(9):3036-3050.
- [14] WU You, YIN Tu-bing, LIU Xi-ling, et al. Determination of dynamic mode I fracture toughness of rock at ambient high temperatures using notched semi-circular bend method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(9):3036-3050. (in Chinese)
- [15] 马冬冬,汪鑫鹏,张文璞,等. 冲击荷载作用下冻土劈裂拉伸破坏特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7):1533-1539.
- [15] MA Dong-dong, WANG Xin-peng, ZHANG Wen-pu, et al. Experimental study on splitting tensile failure characteristics of frozen soils under impact loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7):1533-1539. (in Chinese)
- [16] 王浩,宗琦,汪海波,等. 不同应变率下干燥及饱水凝灰岩拉伸力学性能及裂纹扩展试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(2):420-429.
- [16] WANG Hao, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Experimental study on tensile properties and crack propagation of dry and saturated tuff under different strain rates[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(2):420-429. (in Chinese)
- [17] 赵毅鑫,孙荏,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.
- [17] ZHAO Yi-xin, SUN Peng, SONG Hong-hua, et al. Experimental and numerical simulation study on mode I dynamic fracture crack propagation law of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12):3961-3972. (in

- Chinese)
- [18] 王 浩,宗 琦,汪海波,等. 冲击荷载下饱水凝灰岩断裂韧性及裂纹扩展分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(7):1709-1719.
- [18] WANG Hao, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Fractal characteristics of fracture toughness and crack propagation of saturated tuff under impact loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7):1709-1719. (in Chinese)
- [19] 郑广辉,许金余,王 鹏,等. 不同饱水度红砂岩静态本构关系及动态力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2018,37(16):31-37.
- [19] ZHENG Guang-hui, XU Jin-yu, WANG Peng, et al. Static constitutive relation and dynamic mechanical properties of red sandstone with different water saturation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16):31-37. (in Chinese)
- [20] 张 村,王 磊,王潇杰,等. 含水率影响下煤体巴西劈裂特性与弱化机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2024,41(2):362-371.
- [20] ZHANG Cun, WANG Lei, WANG Xiao-jie, et al. Brazilian splitting characteristics and weakening mechanism of coal under the influence of water content[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(2):362-371. (in Chinese)
- [21] 方士正,杨仁树,李炜煜,等. 基于 NSCB 方法的冻结红砂岩动态断裂特性试验[J]. 工程科学学报,2023,45(10):1704-1715.
- [21] FANG Shi-zheng, YANG Ren-shu, LI Wei-yu, et al. Investigation of dynamic fracture characteristics of frozen red sandstone using notched semi-circular bend method [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(10):1704-1715. (in Chinese)
- [22] 冯梅梅,袁抗生. 孔隙水实时作用下冻结饱水砂岩的三轴压缩试验[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(4):836-844.
- [22] FENG Mei-mei, YUAN Kang-sheng. Triaxial compression test of frozen saturated sandstone under real-time action of pore water[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4):836-844. (in Chinese)
- [23] 许军策,浦 海,沙子恒. 低温下不同饱和度冻结砂岩动态力学行为试验研究[J]. 煤炭科学技术,2023,51(9):88-99.
- [23] XU Jun-ce, PU Hai, SHA Zi-heng. Experimental study on the dynamic mechanical behavior of frozen sandstone with differed saturations[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9):88-99. (in Chinese)

(上接第 32 页)

- [10] 姚梦圆,董春亮,郝建平,等. 初始损伤砂岩的蠕变模型研究[J]. 重庆大学学报,2025,3(2):1-17.
- [10] YAO Meng-yuan, DONG Chun-liang, HAO Jian-ping, et al. Research on creep model of sandstone with initial damage [J]. Journal of Chongqing University, 2025, 3(2):1-17. (in Chinese)
- [11] 李杨杨,张搏明,张士川,等. 循环荷载下初始损伤煤岩宏-细观破坏特征及劣化机制研究[J]. 采矿与安全工程学报,2025,42(1):60-72.
- [11] LI Yang-yang, ZHANG Bo-ming, ZHANG Shi-chuan, et al. Study on macro-mesoscopic failure characteristics and deterioration mechanism of initial damaged coal rock under cyclic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(1):60-72. (in Chinese)
- [12] 王春萍,刘建锋,陈 亮,等. 裂隙花岗岩非线性蠕变本构模型及参数分析[J]. 工程科学与技术,2024,56(4):141-149.
- [12] WANG Chun-ping, LIU Jian-feng, CHEN Liang, et al. Nonlinear creep constitutive model of fractured granite and its parameters analysis [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(4):141-149. (in Chinese)
- [13] 范 浩,王 磊,罗 勇,等. 卸荷损伤砂岩的分级加载三轴蠕变力学特性试验研究[J]. 岩土力学,2024,45(S1):277-288.
- [13] FAN Hao, WANG Lei, LUO Yong, et al. Experimental study on triaxial creep characteristics of unloading-damaged sandstone under step loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(S1):277-288. (in Chinese)
- [14] 秦 哲,刘永德,逢文龙,等. 不同峰前卸荷与循环侵入水作用后的黄砂岩再承载蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(2):358-370.
- [14] QIN Zhe, LIU Yong-de, PANG Wen-long, et al. Reloading experimental research on the creep properties of yellow sandstone samples considering pre-peak unloading and cyclic water intrusion damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2):358-370. (in Chinese)