冲击荷载与围压耦合作用下裂隙岩体损伤演化研究*

孙卓明，张拥军，张家辉

（青岛理工大学 土木工程学院， 山东 青岛市 266520）

摘要：为定量分析冲击荷载与围压耦合作用下预制裂隙岩体的动态响应特征，基于一维应力波理论与HJC动态损伤本构模型，采用ANSYS/LS-DYNA建立SHPB数值模型，对不同预制裂隙倾角及不同初始围压条件下的棱柱状大理岩试样开展动态冲击模拟。结果表明：在给定应变率条件下，各工况应力-应变曲线峰前段基本重合，宏观起裂主要发生于峰值应力附近的短历时阶段；围压对动强度提升作用显著，峰值应力随围压增大而提高，且随裂隙倾角变化的增幅在高围压下更为显著，围压为0，5，10 MPa时，峰值应力随倾角变化的增幅分别约为14%、20%、30%，岩体峰值应变由约0.004提高至约0.006 1；裂纹形态总体以“X”形剪切破坏为主导，依据裂纹扩展轨迹与起裂力学机制，可归纳出5类典型裂纹类型及1类碎裂特征；围压增大时，岩体内部裂纹网络更趋复杂、试样碎裂程度显著加剧。能量演化分析表明，各工况入射能量保持一致时，围压由0增至10 MPa时，试样平均能量吸收率由6.13%提升至9.35%，能量反射率由93.54%降至89.99%，能力透射率由0.33%升至0.66%；耗散能随围压增大整体上升，并随裂隙倾角增大，在45°附近出现局部低值后快速递增。研究结果可为浅埋边坡、深埋巷道等场景中，裂隙岩体在爆破振动扰动与地应力耦合作用下的损伤评估与稳定性控制提供参考。

关键词：冲击载荷；裂隙岩体；裂纹扩展；耗散能；数值模拟

中图分类号：TD315　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)04-0162-08

Damage Evolution of Fractured Rock Mass Under Coupled Impact Load and Confining Pressure

SUN Zhuoming, *ZHANG Yongjun*, *ZHANG Jiahui*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: To quantitatively analyze the dynamic response characteristics of prefabricated fractured rock mass under the coupled action of impact load and confining pressure, a SHPB numerical model was established using ANSYS/LS-DYNA based on one-dimensional stress wave theory and the HJC dynamic damage constitutive model. Dynamic impact simulations were carried out on prismatic marble specimens with different prefabricated fracture inclination angles and different initial confining pressures. The results show that under a given strain rate, the pre-peak segments of the stress-strain curves for various working conditions are basically coincident, and macroscopic cracking mainly occurs in the short duration near the peak stress. Confining pressure has a significant enhancement effect on the dynamic strength. The peak stress increases with the increase of confining pressure, and its increase with the variation of fracture inclination angle is more significant under high confining pressure. When the confining pressure is 0, 5 and 10 MPa, the increase of peak stress with the variation of fracture inclination angle is approximately 14%, 20% and 30%, respectively. The peak strain of the rock mass increases from about 0.004 to about 0.006 1. The crack morphology is generally dominated by “X”-type shear failure. Based on the crack propagation trajectory and the crack initiation mechanism, five typical crack types and one fragmentation characteristic can be summarized. As the confining pressure increases, the crack network inside the rock mass becomes more complex and the fragmentation degree of the specimen intensifies significantly. Energy evolution analysis shows that when the incident energy is kept consistent across all working conditions, as the confining pressure increases from 0 to 10 MPa, the average energy absorption rate of the specimen increases from 6.13% to 9.35%, the energy reflection rate decreases from 93.54% to 89.99%, and the energy transmission rate increases from 0.33% to 0.66%. The dissipated energy generally increases with the increase of confining pressure. As the fracture inclination angle increases, the dissipated energy shows a local low value near 45° and then increases rapidly. The

* **收稿日期**：2025-12-31

基金项目：贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑〔2025〕一般071)

作者简介：孙卓明(2000—)，男，山东潍坊人，硕士研究生，主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail:1157683248@qq.com

通信作者：张拥军(1974—)，男，河南焦作人，博士，教授，主要从事岩石力学与工程灾害防控方面的研究。E-mail:zyjun@qut.edu.cn

research results can provide a reference for damage assessment and stability control of fractured rock mass under the coupled action of blasting vibration disturbance and in-situ stress in scenarios such as shallow slopes and deep roadways.

Key words: Impact load, Fractured rock mass, Crack propagation, Dissipated energy, Numerical simulation

0 引言

岩体在成岩演化过程中受构造运动、风化侵蚀等地质作用影响，内部普遍发育节理、孔隙、裂隙及软弱夹层等不连续结构面。在矿山边坡、巷道等工程环境中，岩体同时叠加爆破振动与施工扰动，以及围岩压力等外部载荷作用，使含裂隙岩体的力学响应与裂纹扩展呈现显著复杂性[1]。尤其在深部地下工程中，高地应力条件下岩体的应力重分布与损伤累积更为突出，围岩常处于强静水压力与开挖扰动的耦合状态，其变形破坏具有强非线性与突发性，亟需在“地应力-结构面-扰动”耦合框架下开展相关机理研究[2-3]。

在静载/准静载条件下，既有研究已证实裂隙几何参数(如长度、夹角与倾角等)会显著影响岩体强度特性、起裂阈值与破坏模式，并可通过 CT 扫描等手段识别裂隙压密、翼裂纹扩展与贯通等阶段性演化特征[4-8]。然而现有关于裂隙几何参数作用规律的研究结论主要基于静载/准静载条件建立，尚难充分阐释冲击载荷下应力波-裂隙耦合作用机制及能量传递通道重构规律。

相较于静载，动载条件下裂隙岩体的破裂过程更受应力波传播、速率效应与能量通道重构控制，其破坏模式可由张拉破坏向张-剪复合破坏乃至压碎破坏转化，并可借助能量吸收率等指标实现定量表征[9]。霍普金森压杆(SHPB)试验结果表明，试样尺寸会影响应力平衡的建立与裂纹孕育时间，进而改变裂纹扩展历程与岩体动态响应稳定性[10]；岩体动态断裂韧度的相关研究表明，断裂过程区的空间-时间域特征与尺寸效应密切相关[11]。与此同时，围压作为深部岩体典型的应力约束条件，会显著改变节理岩体变形模量与失稳模式，并可能诱导岩体破坏由节理滑移向穿透性剪切破裂转化[12]；在冲击载荷作用下，围压与冲击速度对岩体动态强度、变形与耗能特性具有显著的调控作用，体现出三向应力状态下动力响应的工程相关性[13]，不同加载路径(如卸围压)亦会进一步影响岩体损伤演化与破坏模式[14]。此外，针对含双缺陷试样的研究表明，缺陷角度与数量对试样动态强度与能量耗散的影响往往强于韧带角度[15-19]。总体而言，现有研究多聚焦于单因素或两因素效应，对于“冲击载荷-围压-裂隙倾角”三者在统一应变率约束下的耦合作用规律，尤其是应力-应变响应、裂纹扩展模式与能量分配之间的内在对应关系，尚未开展系统研究。

为弥补上述研究的不足，本文基于一维应力波理论，采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立数值模型，针对不同围压-倾角组合下大理岩试样的动力响应开展研究，从岩体力学特征、裂纹演化规律与能量耗散特性角度进行综合分析，为复杂应力环境中裂隙岩体的动力稳定性评价提供依据。

1 数值模拟方法

1.1 材料参数设置

本研究在 ANSYS/LS-DYNA 中选用 HJC 本构模型对岩石材料进行本构表征。HJC 模型适用于研究岩石等材料在高应变率与高约束压力条件下的动力学行为，可同时反映压力硬化、速率效应及损伤软化，并可在拉格朗日或欧拉求解框架下使用，适用于冲击载荷与强动载问题的数值计算。

HJC 模型由强度准则(屈服面)、状态方程(EOS)与损伤演化三部分组成。损伤演化通常以等效塑性应变与塑性体积应变为控制变量，用于描述岩体压密、剪切与拉裂过程中损伤累积及承载能力退化特征。HCJ 模型共 21 项参数，按关键字手册可归并为：强度参数、压力参数、损伤参数与物性参数，本文建立和校准了霍普金森压杆的数值模型，通过试错法获得的大理石 HJC 模型的模拟参数见表 1。

表 1 HJC 本构模型参数

Table 1 HJC constitutive model parameters

R_0/(kg/m^3)	G/GPa	A	B	C	N	f_c/MPa
2 704.6	16.8	0.25	1.8	0.001 84	0.83	100
T/MPa	$EPSO$	EF_{min}	SF_{max}	p_c/MPa	μ_c	PL/GPa
7	1	0.01	7	33.3	0.001 1	1.2
UL	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	F_S
0.17	0.04	1	0.12	0.25	0.43	0.01

1.2 数值模型的建立

本文数值模型参照以前学者[17]试验方案构建，岩样尺寸设为 60 mm×60 mm×15 mm(长×宽×高)。在岩样几何中心布置预制裂隙，裂隙不设充填介质，裂隙尺寸设为 10 mm×2 mm×15 mm，试样形态如图 1 所示。试样材料参数见表 2。

本文共设计 21 种计算工况，考虑 2 组研究变量，其中，预制裂隙倾角 θ 取 7 个水平(0°～90°，步长 15°)；围压取 3 个水平(0，5，10 MPa)。围压采用等值三向约束方式，在试样六面施加等值边界压力。

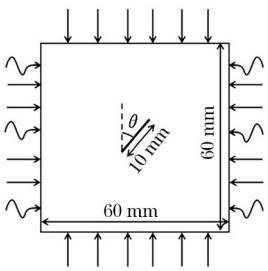


图 1 试样示意

Fig.1 Schematic of the specimen

表 2 试样材料相关力学参数

Table 2 Relevant mechanical parameters of speciment material

弹性模量 E_a/GPa	泊松比 ν	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	密度 γ/(kg/m³)	纵波波速 V_p/(m/s)	孔隙度/%
44.7	0.33	99.6	7.0	2 704.6	3 536.7	0.24

为模拟冲击载荷作用下的应力波传播与试样破坏过程，本文采用 ANSYS/LS-DYNA 建立三维分离式霍普金森压杆模型，轴向依次布置撞击器、入射杆、岩石试样与透射杆，均采用 Solid-164 实体单元进行离散。撞击器长 54 cm，入射杆与透射杆长 200 cm，杆径均为 7.5 cm。入射杆与透射杆采用 * MAT_ELASTIC(纵波波速 5 400 m/s，弹性模量 240 GPa，密度 7 810 kg/m³)；大理石试样采用 * MAT_HJC 模型，并叠加 * MAT_ADD_EROSION 指令以实现单元的失效与删除，从而表征裂纹扩展与碎裂。为实现近似恒应变率加载，撞击器采用纺锤形结构，撞击器与入射杆之间采用自动面—面接触，杆件与试样之间采用侵蚀面—面接触。计算总时长设为 1 ms，结果输出时间步取 5 μs，以获取清晰的破坏时序。模型整体效果见图 2。

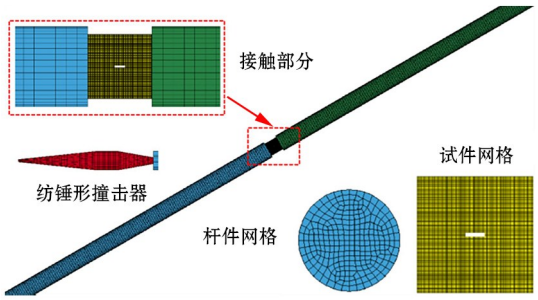


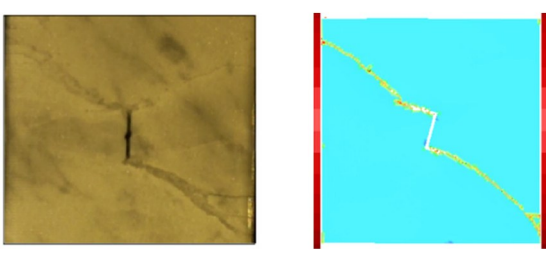
图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

1.3 参数可靠性验证

为验证所建霍普金森压杆数值模型及 HJC 参数取值的可靠性，本文以文献[17]的室内冲击试验为基准开展模型可靠性的对比验证分析。模型中杆件与试样的几何尺寸完全与室内试验保持一致；试样采用 HJC 动态本构，参数见表 1。为与文献标准算例严格一致，验证工况不施加围压，预制裂隙倾角取 0°，并将应变率控制在 60～120 s^{-1} 范围内。

图 3 对比显示了文献试验结果与本文数值模拟结果的岩体裂纹形貌。二者试样在裂纹起裂位置、主裂纹扩展方向及最终破坏模式上呈现高度一致：裂纹首先在预制裂隙端部起裂并沿对角向发展，随后在端部产生次生裂纹与边界裂纹，最终多条裂纹连通形成贯穿破坏面，岩体整体表现为典型的“X”形剪切破坏。上述一致性表明，本文所采用的霍普金森压杆数值模型与 HJC 参数能够可靠地复现试验观测到的动态破裂过程，可用于后续不同围压与节理倾角工况的扩展模拟分析。



(a) 物理试验 (b) 数值模型

图 3 预制裂隙角度为 0°时的试样裂纹

Fig.3 Cracking pattern of the specimen with a prefabricated fracture angle of 0°

2 裂纹演化规律与力学响应分析

2.1 裂纹扩展过程分析

无围压条件下，0°预制裂隙岩石试样的裂纹演化及等效应力云图见图 4。依据应力场演化与裂纹

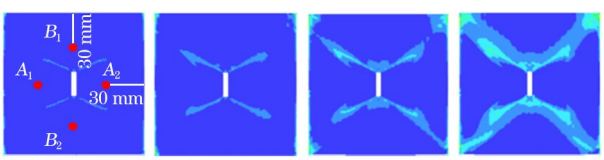
形貌，岩体动态破坏过程可分为 3 个阶段：应力场建立与扩展阶段、裂纹起裂与扩展阶段、裂纹贯通后的整体破坏阶段。

(1) 应力场建立与扩展阶段(见图 4(a))，入射波自左向右传入试样，裂隙尖端首先出现强应力集中，并沿对角向形成初始高应力带；随后在应力波的反射与叠加作用下，应力集中效应向四角逐步增强并最终形成“X”形高应力区，表明该阶段应力局部化趋势已基本确立，为后续裂纹扩展提供主控路径。

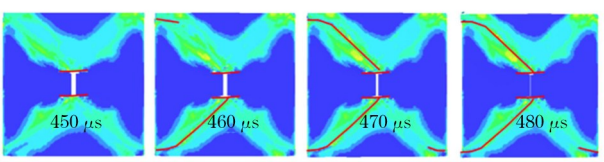
(2) 裂纹起裂与扩展阶段(见图 4(b))，裂纹先在预制裂隙两端起裂并沿加载方向伸展，扩展至约 10 mm 后出现明显约束；随后试样角部边缘产生新裂纹，并与端部诱发的“X”形裂纹快速连通，裂隙网络形成，试样由局部损伤向宏观破坏转变。

(3) 裂纹贯通后的整体破坏阶段。贯穿裂纹将试样分割为多个块体；块体间的挤压与错动促使裂隙邻域进一步压碎压密，表现为裂隙开度逐渐减小直至趋于闭合，试样最终发生整体破坏失稳。

为表征岩石试样的变形响应特征，在试样中部(距试样边缘 30 mm 处)设置 4 个位移监测点：A_1、A_2用于记录加载方向位移；B_1、B_2 用于记录垂直加载方向位移。监测点布置位置如图 4(a)所示。



(a) 应力云图



(b) 裂纹扩展

图 4　试样破坏过程

Fig.4　Failure process of the specimens

2.2　破坏模式分析

在相同应变率条件下，裂隙倾角与围压共同决定缺陷试样的起裂部位、扩展路径与最终破坏形貌。尽管岩体内部裂纹网络细节特征随工况变化而改变，但宏观上均以对角向剪切带为骨架呈现典型“X”形剪切破坏。依据裂纹萌生-扩展的时序特征及其力学机制，可归纳为 5 类典型裂纹与 1 类碎裂特征，动载加载方向统一设定为自左向右(见图 5)。按起裂机制划分，Ⅲ、Ⅳ型为拉伸主导，Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ型为剪切主导。

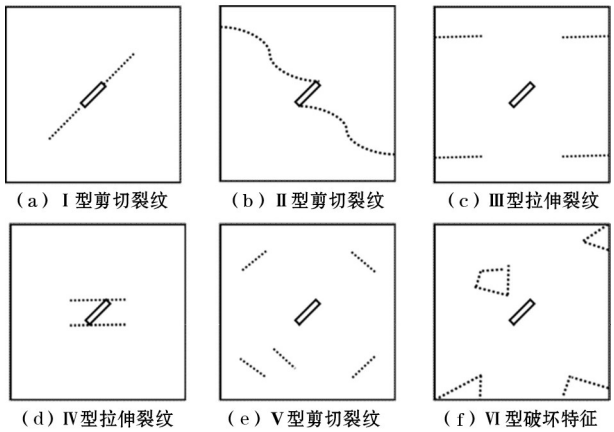


图 5　裂纹类型与破坏特征

Fig.5　Crack types and failure characteristics

(1) Ⅰ型(共面剪切裂纹)。多见于 45°～90°试样预制裂隙端部，该类型裂纹较早起裂并沿裂隙走向共面延伸。无围压时延伸有限(约 10 mm)；围压增大后裂纹扩展尺度显著增加，由端部两条发展为多条，且多与裂隙近平行，表明围压促进了裂隙邻域剪切滑移与裂纹共面扩展。

(2) Ⅱ型(翼形裂纹)。除 0°与 90°预制裂隙试样外普遍出现该类型裂纹，其起裂于裂隙端部，并以一定夹角向对角向扩展，最终与对侧裂纹体系连通，主导“X”形破坏形成。其几何形态与文献[19]中的静载翼形裂纹相似，但起裂和扩展机理不同：静载翼形裂纹以端部拉应力为主，常在靠近自由边界端起裂并向轴向应力方向演化；动载翼形裂纹受瞬态剪切与波动应力场控制，更倾向于由远离边界端起裂并沿对角向快速扩展。

(3) Ⅲ型(边界拉伸裂纹)。该类型裂纹起裂较晚，主要出现在试样边缘，各倾角工况下均可观测到这种裂纹。裂纹总体沿加载方向发展，后期多与Ⅱ型裂纹并合，主要参与贯通与试样分割而非单独主导岩体的宏观破坏，特征与文献[17]所述Ⅳ型裂纹相近。

(4) Ⅳ型(轴向拉伸裂纹)。主要分布于 0°预制裂隙两端，入射应力波传入后，该类型裂纹在端部快速起裂并沿加载方向扩展；围压增大时其延伸长度与偏转角度发生调整，反映围压对端部张拉开裂及扩展路径的稳定性具有约束作用。

(5) Ⅴ型(远场剪切裂纹)。该类型裂纹多出现于有围压工况，位于试样边角位置；围压达 10 MPa 时，试样可形成更清晰的局部剪切带。该类裂纹通常晚于Ⅰ～Ⅳ型裂纹出现，扩展尺度较小，表明高围压下远场应力重分布诱发的边角剪切局部化。

(6) 此外，试样还呈现Ⅵ类碎裂特征，试样角部

易形成三角形或四边形碎块,主要由“X”形剪切裂纹与边界拉伸裂纹交汇连通所致。随着围压升高,试样角部碎块数量增加;同时裂纹交叉增多使试样内部四边形破碎块体增多,表明围压推动裂纹网络由少数主控裂纹向多裂纹交织的碎裂形态演化。

2.3 裂隙倾角对应力-应变曲线的影响

不同围压与裂隙倾角组合下岩石试样的应力-应变曲线如图 6 所示。在应变率一致的条件下,各倾角工况下的应力-应变曲线峰前段基本重合,表明宏观裂纹的显著起裂与快速扩展主要集中于接近峰值应力的短历时区间,峰前响应仍以整体承载与弹塑性变形累积为主。

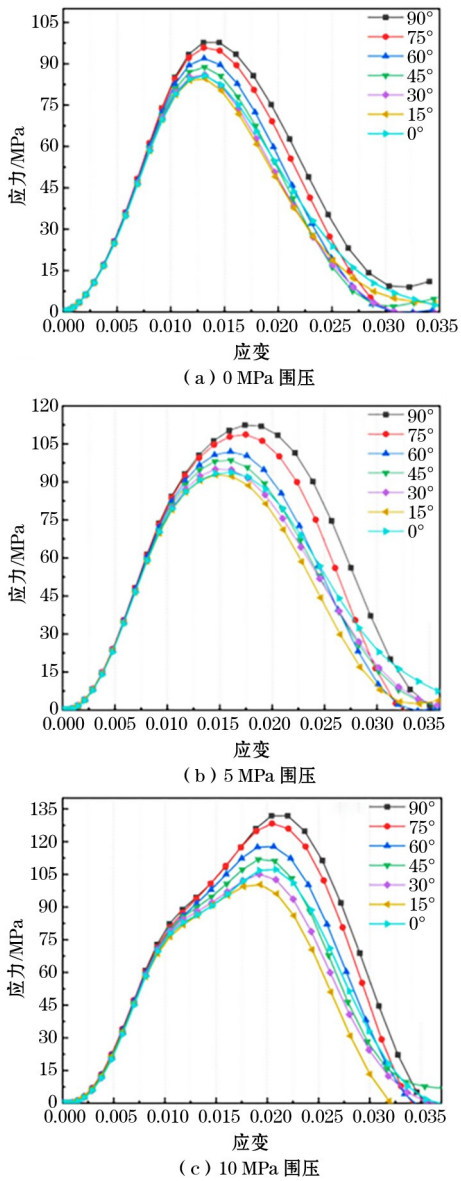


图 6 不同围压与裂隙倾角条件下应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves under different confining pressures and fracture angles

围压、裂隙角度与峰值应力、峰值应变的关系如图 7 所示。从图中可知,峰值强度对围压与裂隙倾角更为敏感。各围压水平下,峰值应力随裂隙倾角呈弱非单调变化,即在裂隙倾角为 15°的工况时略有降低,而后随倾角增大呈稳步上升趋势;围压增大则整体抬升峰值应力水平。倾角增大引起的峰值应力增幅在围压为 0、5、10 MPa 时分别约为 14%、20%、30%,说明围压不仅提高了岩体的动态承载能力,还放大了裂隙倾角对峰值应力的效应(见图 7(a))。

峰值应变随围压增大而提高,对倾角的依赖则相对较弱(见图 7(b))。峰值应变在无围压时约为 0.004;在围压 5 MPa 时约在 0.005 附近波动并呈先降后升(75°峰值应变约为 0.005 4)的趋势;围压 10 MPa 时峰值应变升至约 0.006 1,且在 20°~45°区间略低于均值。总体上,围压对峰值应变的提升作用显著强于裂隙倾角,体现了围压约束对岩体变形能力的主导控制影响。

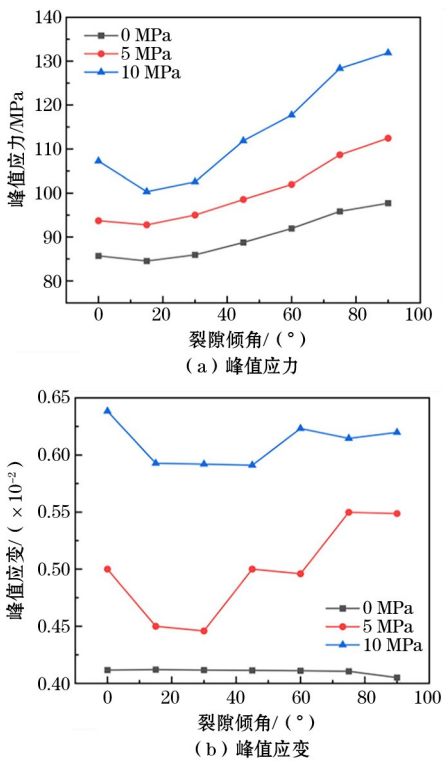


图 7 围压、裂隙倾角与峰值应力、峰值应变关系

Fig.7 Relationship between confining pressure, fracture angle, peak stress and strain

3 能量演化分析

3.1 能量计算方法与评价指标

不同裂隙倾角与围压条件下,岩石试样对入射

能量的分配方式(反射、透射与耗散)存在显著差异，而裂纹萌生—扩展—贯通及最终碎裂的过程本质上对应能量在试样内部的吸收与耗散过程。因此，从能量演化角度刻画冲击过程，有助于揭示裂隙岩体的动态破坏机制。本节采用能量指标对模拟结果进行对比分析。近似认为 SHPB 试验体系满足一维应力波理论，则入射能 E_I、反射能 E_R、透射能 E_T、吸收能 E 可由入射 σ_I、反射 σ_R 与透射 σ_T 的应力历程通过积分形式计算[20]：

$$E_I=\frac{A_e C_e}{E_e}\int_0^t \sigma_I^2(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$E_R=\frac{A_e C_e}{E_e}\int_0^t \sigma_R^2(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$E_T=\frac{A_e C_e}{E_e}\int_0^t \sigma_T^2(t)\mathrm{d}t \tag{3}$$

$$E=E_I-E_R-E_T \tag{4}$$

式中：A_e 为弹性杆横截面积，m^2；C_e 为弹性杆纵波波速，m/s；E_e 为弹性杆材料弹性模量，Pa。

已有研究表明，试样碎裂后的抛射动能在吸收能中的占比通常小于 10%[21]，据此可将 E 近似视为破碎耗散能(即损耗能)。在本研究中，为保证应变率一致，各工况入射能量恒定设为 39 J/cm^3。

为降低入射波形波动对对比结果的干扰，采用归一化的比值指标进行评价[22]：

$$R_E=\frac{E_R}{E_I} \tag{5}$$

$$T_E=\frac{E_T}{E_I} \tag{6}$$

$$R=\frac{E}{E_I} \tag{7}$$

式中：R_E 为能量反射率；T_E 为能量透射率；R 为能量吸收率。

3.2　损耗能时程特征与围压-倾角耦合效应

表 3 给出了不同裂隙倾角与围压组合下的 R_E、T_E 与 R；其中 R 可表征试样在动载作用下的有效能量耗散能力。总体上，围压增大使试样能量吸收率与透射率上升，反射率降低。其原因在于：围压约束下碎裂后的岩石块体仍保持较强贴合与接触状态，界面传力路径更连续、等效接触面积增大，从而削弱反射效应，并促进入射能量向试样内部传递与耗散；相较于无围压工况，透射与耗散分量随围压增强而上升。另一方面，随裂隙倾角增大，试样能量吸收率和透射率上升，反射率降低，说明预制裂隙取向改变了应力波与岩体缺陷的相互作用方式及破坏耗能路径。

表 3　试样能量分布

Table 3　Energy distribution of the specimens

试样围压/MPa	裂隙倾角/(°)	能量吸收率/%		能量反射率/%		能量透射率/%	
		模拟值	平均值	模拟值	平均值	模拟值	平均值
0	0	5.64	6.13	94.05	93.54	0.30	0.33
	15	5.81		93.90		0.28	
	30	5.64		94.06		0.29	
	45	5.86		93.85		0.31	
	60	6.21		93.45		0.34	
	75	6.54		93.08		0.39	
	90	7.20		92.38		0.42	
5	0	7.58	8.08	91.97	91.43	0.46	0.51
	15	7.47		92.15		0.41	
	30	7.75		91.84		0.45	
	45	7.68		91.88		0.47	
	60	7.81		91.71		0.51	
	75	8.45		90.98		0.60	
	90	9.84		89.51		0.68	
10	0	8.61	9.35	90.82	89.99	0.58	0.66
	15	8.37		91.14		0.50	
	30	8.68		90.78		0.55	
	45	8.98		90.40		0.61	
	60	9.30		89.98		0.69	
	75	10.23		88.97		0.82	
	90	11.28		87.85		0.89	

试样不同预制裂隙倾角在围压为 5 MPa 时的损耗能时程曲线如图 8 所示。结果显示，在 80～140 μs 区间损耗能迅速增长，对应应力波传入试样并推动材料达到屈服、损伤快速累积阶段。随后在约 160 μs 附近，试样损耗能出现短时回落现象。该损耗能的“瞬态下降”可理解为裂纹在起裂阶段对能量的瞬时需求与在后续稳定扩展阶段的耗能机制存在差异。裂纹起裂瞬间的能量分配发生快速重构，导致损耗能曲线出现短暂波动，而后随裂纹网络发展损耗能再次增长。

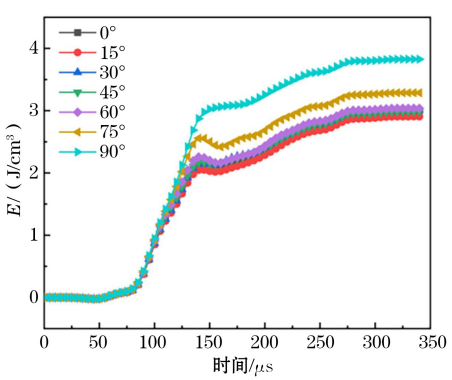


图 8　围压为 5 MPa 损耗能时程曲线

Fig.8　Time-history curves of dissipated energy at a confining pressure of 5 MPa

图 9 进一步揭示了围压与裂隙倾角对耗散能量的耦合影响,无围压时损耗能随裂隙倾角呈弱而非单调变化,倾角为 30°时损耗能最小;围压为 5 MPa 与 10 MPa 时损耗能最小值均转移至 15°倾角工况,且在约 45°倾角附近出现轻微回落后随倾角快速上升。总体上,围压越大,损耗能均值越高,且增长幅度随围压增强而提高。在裂隙倾角 0°～45°区间内,损耗能变化较小,而在 45°～90°区间上升更显著,表明大倾角条件下岩体裂纹交织与块体化更充分、能量耗散更显著。结合岩体剪切破坏为主导且剪切面与加载轴向夹角多集中于 45°～60°裂隙倾角的特征,可对裂隙倾角出现局部"低耗散"的现象作出力学解释。围压为 0 MPa 和 5 MPa 时,裂隙倾角为 30°(节理与加载方向夹角为 60°)与 45°工况下出现了损耗能下降的情况,岩体内部更易形成贯通路径;围压升高后损耗能最小值由 30°迁移至 15°,表明围压改变了剪切局部化的优势。工程上,浅埋环境应重点关注含 45°～60°裂隙岩体的冲击失稳风险;深埋环境下需结合围压水平识别不利倾角并提前加固。

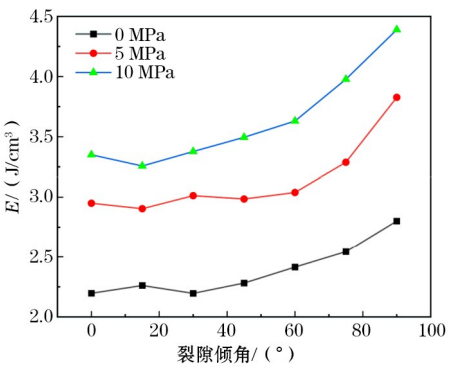


图 9 围压、裂隙倾角与耗散能量关系

Fig.9 Relationship between confining pressure, fracture angle, and dissipated energy

4 结论

本研究基于一维应力波理论与 HJC 本构框架,借助 ANSYS/LS-DYNA 开展了数值模拟,研究了预制裂隙岩石试样在不同围压与裂隙倾角下的动力响应、裂纹演化、能量耗散特性,得到如下主要结论。

(1) 在动载作用下,试样峰值强度受围压与裂隙倾角的共同控制。峰值应力随围压水平提高和裂隙倾角增大均整体呈上升趋势;此外,围压越高,峰值应力随倾角变化的增幅与增速越明显,围压为 0,5,10 MPa 时峰值应力随倾角变化的增幅分别约为 14%、20%、30%;峰值应变由无围压时的约 0.004 提高至围压 10 MPa 时的约 0.006 1,表征围压约束增强了试样在峰前阶段的变形承载能力,使岩体在破坏前的非弹性变形累积更加充分。

(2) 试样宏观破坏以"X"形剪切贯通破坏为主导模式,裂纹多起裂于预制裂隙端部并向对角向扩展,随后与边界裂纹、次生裂纹连通形成贯穿破裂面;围压增大使裂纹网络发育更为复杂,碎裂程度加深,体现出围压约束条件对裂纹连通路径与块体化过程的强化效应。

(3) 围压与裂隙倾角显著影响入射能量在反射、透射与耗散之间的分配。随着围压增大,岩体能量反射率降低,而透射率与吸收率相应升高;在各工况应变率保持一致的条件下,吸收能可近似视为破碎耗散能,表明围压约束增强了能量向试样内部的传递效率并促进其参与损伤耗散过程。耗散能随裂隙倾角增加在 45°附近出现局部低值,随后转为快速上升,说明预制裂隙取向对剪切局部化路径及裂纹网络演化具有显著调控作用。工程上,浅埋环境应重点关注 45°～60°裂隙岩体的冲击失稳;深埋环境需结合围压识别不利倾角并超前加固,以降低爆破振动扰动下的岩体损伤累积与贯通破坏概率。

参考文献(References):

[1] XIA K W, YAO W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system: a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(1): 27-59.

[2] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.

[3] 朱永建,李鹏,王平,等.深部高应力煤巷围岩径向梯度损伤特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(11):2643-2654.
ZHU Yongjian, LI Peng, WANG Ping, et al. Experimental study on radial gradient damage characteristics of surrounding rock in deep high stress coal roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2643-2654.

[4] 马平,谢天铖,刘红岩.含 X 型交叉裂隙的岩体力学特性数值分析[J].矿业研究与开发,2019,39(2):60-65.
MA Ping, XIE Tiancheng, LIU Hongyan, et al. Numerical analysis of the mechanical behavior of the rock mass with X type cross cracks[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(2): 60-65.

[5] 徐贞社,卞壮,刘毅,等.组合裂隙及其倾角对岩石力学特性及破坏特征的影响[J].矿业研究与开发,2022,42(11):140-145.

XU Zhenshe, BIAN Zhuang, LIU Yi, et al. The influence of combined fissures and its dip angles on the mechanical properties and failure characteristics of rock[J]. Mining Research and Development,2022,42(11):140-145.

[6] 司洁萌,郝家旺.基于VIC-3D的含充填裂隙岩石破坏实验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(1):68-71.
SI Jiemeng, HAO Jiawang. Experimental study on failure of fracture-filled rock based on VIC-3D[J]. Mining Research and Development,2019,39(1):68-71.

[7] 靳瑾,曹平,蒲成志.预制裂隙几何参数对类岩材料破坏模式及强度的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(2):529-535.
JIN Jin, CAO Ping, PU Chengzhi. Influence of flaw parameters on damage mode and strength of rock-like materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2014,45(2):529-535.

[8] 李术才,李廷春,王刚,等.单轴压缩作用下内置裂隙扩展的CT扫描试验[J].岩石力学与工程学报,2007(3):484-492.
LI Shucai, LI Tingchun, WANG Gang, et al. CT real-time scanning tests on rock specimens with artificial initial crack under uniaxial conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007(3):484-492.

[9] 赵国彦,李振阳,吴浩,等.含非贯通裂隙砂岩的动力破坏特性研究[J].岩土力学,2019,40(增刊1):73-81.
ZHAO Guoyan, LI Zhenyang, WU Hao, et al. Dynamic failure characteristics of sandstone with non-penetrating cracks[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(Suppl.1):73-81.

[10] 张盛,喻炳鑫,王峰,等.不同尺寸含裂缝岩样动态破坏特征的实验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(5):1045-1054.
ZHANG Sheng, YU Bingxin, WANG Feng, et al. Experimental study on dynamic fracture characteristics of different sizes of rock specimens with a crack[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(5):1045-1054.

[11] 张盛,安定超,张旭龙,等.考虑空间-时间域影响的岩石动态断裂韧度尺寸效应研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(10):1981-1992.
ZHANG Sheng, AN Dingchao, ZHANG Xulong, et al. Research on the size effect of rock dynamic fracture toughness considering the influence of space-time domain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(10):1981-1992.

[12] 詹懿德,汪发祥,佘恬钰,等.考虑围压效应的块状节理岩体变形破坏数值模拟[J].水利水运工程学报,2022(4):70-76.
ZHAN Yide, WANG Faxiang, SHE Tianyu, et al. Numerical simulation on deformation and failure of blocky jointed rock mass considering the effect of confining pressure [J]. Hydro-Science and Engineering,2022(4):70-76.

[13] 杨大方,陈舒凯,李佳赛,等.不同围压和冲击速度下锚注加固单裂隙红砂岩动态力学特性研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(5):2180-2190.
YANG Dafang, CHEN Shukai, LI Jiasai, et al. Dynamic mechanical properties of anchor-injection reinforced single-fracture red sandstone under different confining pressures and impact velocities[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2025,22(5):2180-2190.

[14] 张旭龙.不同加载方式下裂隙岩石力学特性及损伤演化规律研究[D].焦作:河南理工大学,2024.
ZHANG Xulong. Study on the mechanical properties and damage evolution law of fissured rock under different loading modes[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2024.

[15] ZHANG J, HUANG L Q, LIU Z X, et al. Peridynamic simulation of rock failure with surface flaw under dynamic loading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2024,34(7):2313-2327.

[16] LI D Y, HAN Z Y, SUN X L, et al. Dynamic mechanical properties and fracturing behavior of marble specimens containing single and double flaws in SHPB tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2019,52(6):1623-1643.

[17] LI X B, ZHOU T, LI D Y. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-Hopkinson pressure bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2017,50(1):29-44.

[18] FAN W B, ZHANG J W, NIU W M, et al. Study on dynamic loading characteristics and energy evolution of sandstone with double cracks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2023,125:103893.

[19] YANG S Q, JING H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. International Journal of Fracture,2011,168(2):227-250.

[20] FENG P, XU Y, DAI F. Effects of dynamic strain rate on the energy dissipation and fragment characteristics of cross-fissured rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,138:104600.

[21] YAN Z L, DAI F, LIU Y, et al. Experimental investigation of pre-flawed rocks under combined static-dynamic loading: Mechanical responses and fracturing characteristics[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 211:106755.

[22] FAN X R, LUO N, LIANG H L, et al. Dynamic breakage characteristics of shale with different bedding angles under the different ambient temperatures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2021,54(6):3245-3261.