

含孔洞非贯通节理岩体的 动态力学特性和断裂损伤

赵桂锋^{1,2}, 蒋海明¹, 戴兵², 李杰¹, 王明洋¹

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 为揭示含孔洞非贯通节理岩石的裂纹扩展机制和评估不同动荷载作用下的应力集中导致岩石的应变破坏, 通过室内实验和理论推导, 聚焦含孔洞非贯通节理岩石的动态力学特性、损伤演化和裂纹扩展进行研究。试验结果表明: 试样的动态强度和弹性模量随应变速率的增大整体呈上升趋势。试样的峰值应变和能量耗散率都表现出明显的应变率效应, 随着应变速率的增大, 试样的破坏程度不断增大。含复合裂隙岩石的损伤演化综合考虑了能量耗散以及动荷载效应, 在加载过程中损伤曲线呈 L 型增长。试样中的应力集中区和塑性区主要位于结构面两端和岩桥区域, 拉伸应变发生在剪切应变之后, 岩石的最终破坏模式由主要的剪切破坏向混合拉伸剪切破坏转变。结合最大环向应力准则, 研究了不同冲击荷载和孔洞形状对结构面端部裂纹萌生扩展的影响, 裂纹起裂位置不受孔洞形状变化的影响, 试样表面的微裂纹数量和扩展范围随动荷载的增大显著增加。研究结果有助于深入了解含结构面和孔洞岩体的动态破坏机理, 并且为实际工程提供理论支撑。

关键词: 孔洞非贯通节理; 动荷载; 力学特性; 损伤演化; 裂纹扩展

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Dynamic mechanical properties and fracture damage of non-persistent jointed rock mass with hole

ZHAO Guifeng^{1,2}, JIANG Haiming¹, DAI Bing², LI Jie¹, WANG Mingyang¹

(1. State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: Rock mass containing abundant irregularly distributed joints tend to accumulate high strain energy, which poses a potential risk of fracturing failure. In order to reveal the crack propagation mechanism of non-persistent jointed rock mass containing a hole and evaluate the strain failure of rock caused by stress concentration under different dynamic loads, the mechanical properties of non-persistent jointed rock mass containing a hole under different combined impacts were conducted by using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) and digital image correlation (DIC) system. A dynamic damage mechanics model for the tested specimens was established on the basis of fracture mechanics and energy dissipation theory, and the damage evolution and crack propagation mechanism were further analyzed. The experimental results indicate that the dynamic strength and elastic modulus of the specimens generally increase with increasing strain rate. Both the peak strain and energy dissipation rate exhibit a prominent strain rate effect, and the damage degree of specimens progressively intensifies as the strain rate increases. The damage evolution of rock with composite cracks accounts for both energy dissipation and dynamic loading effects, and the damage curve presents an L-shaped growth trend during the loading process. Stress concentration and plastic zones are primarily distributed at the two tips of the structural plane and within rock-bridge regions. Tensile strain develops subsequent to shear strain, and the final failure pattern transforms from the predominantly shear failure to mixed tensile-shear failure. With the aid of the maximum circumferential stress criterion, the effects of different impact loads and hole shapes on crack initiation and propagation at structural plane tips were investigated. The location of crack initiation is insensitive to hole shape, and the

*收稿日期: 2025-04-13; 修回日期: 2026-10-23;

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102331); 国家重点研发计划项目(2024YFF0508204);

第一作者: 赵桂锋(1995—), 男, 博士研究生, zgf_184@163.com

通信作者: 蒋海明(1989—), 男, 博士, 副教授, jhm2002@163.com

propagation range of surface micro-cracks increases significantly with increasing dynamic load. The findings will contribute to an in-depth understanding of the dynamic failure mechanism of rock with structural plane and hole and provide theoretical support for engineering practices.

Key words: non-persistent jointed containing a hole; dynamic load; mechanical properties; damage evolution; crack propagation

岩石结构的稳定性是地质、采矿和隧道建设等工程实践中的重要前提,这直接关系到地下工程的安全运行、资源开采效率和环境保护等。岩石结构具有复杂性特征,其中通常包含随机分布的孔洞和节理裂隙,这些裂隙极大地影响了其力学性质和稳定性^[1-2]。一方面,孔洞降低了岩石的整体强度和密度,提高了渗透性。另一方面,节理裂隙能显著改变应力分布,促进岩石损伤积累直至破裂^[3]。因此,孔洞和节理裂隙引起的岩石破裂机制已成为岩石力学的核心问题,这对预测地质灾害、优化开采方案和保障地下工程安全施工等具有重要意义^[4-5]。

许多研究普遍采用静态压缩试验方法来研究节理裂隙和孔洞的共同作用对岩石变形破坏的影响,其中数字图像技术(Digital Image Correlation, DIC)、声发射(Acoustic Emission, AE)、CT扫描和数值模拟等技术通常用来辅助研究岩石的应力重分布和裂纹扩展规律^[6-7]。Li等^[8]对含有孔洞-节理组合裂隙的岩石进行了单轴压缩试验,研究了裂隙长度和角度对岩石破坏的影响,DIC结果显示孔洞对接头尖端裂纹的扩展有抑制作用,裂隙长度的增加会削弱裂纹的传播。冯帆等^[9]采用数值模拟技术分析了不同结构面位置对深部巷道的裂纹扩展行为、能量演化规律和应力位移分布特征的影响,研究表明结构面的存在会显著影响巷道围岩稳定性。Wang等^[10]通过单轴压缩试验研究了含孔洞裂隙岩石在不同轴向应力和温度作用下的力学特性、破坏行为、能量耗散和损伤本构关系,试验过程中采用声发射和数字图像相关技术观察了岩石的破坏行为主要分为拉剪破坏。Li等^[11]对含孔洞和节理裂隙的花岗岩试样进行了单轴加载试验,研究了脆性节理岩石中孔洞周围的断裂演化和破坏行为,发现节理裂隙的存在是影响岩石结构变形和开裂的主要因素,峰值强度和弹性模量随着裂隙角度的增大先减小后增大。Chen等^[12]对含两侧裂隙和中间孔洞的花岗岩试样进行了单轴压缩试验,通过数值模拟研究了孔洞面积和裂隙倾角对岩石试样峰值应力、开裂过程和应力分布的影响。Shao等^[13]对含不同偏移距离的结构面和孔洞试样进行了侧向约束的单轴压缩试验,利用数字图像相关和声发射研究了结构面类型(完全相交、部分相交和平行)和偏移距离对试样峰值强度和稳定性的影响。

上述研究对揭示含节理孔洞岩石的破坏行为具有重要意义,但实际上,含节理裂隙和孔洞岩石很难自发破坏,许多案例表明,动力扰动是岩石产生失稳破坏的重要因素^[14-15]。冲击及爆炸荷载作用下岩石受力特征属于高应变速率和超高应变速率的范畴^[16]。一方面,一些学者利用分离式霍普金森压杆系统研究了含节理裂隙岩石的动态力学特性、裂纹扩展和破坏模式^[17-18]。戴兵等^[19]首先对含平行裂隙岩石进行了动态冲击试验,研究结果表明应变速率显著影响岩石的能量耗散和损伤演化。Yan等^[20]对板状多裂隙岩石进行了动静加载试验,研究结果表明动态强度随着裂隙角度的增大先减小后增大,岩石的破坏形式以拉伸剪切混合破坏为主。Fan等^[21]采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)开展了冲击试验,模拟了动荷载作用下含裂隙圆柱体砂岩的力学特性和能量演化,研究结果表明随着裂纹角度的增大,岩石的破坏模式由拉伸破坏转变为剪切和拉伸剪切混合破坏。另一方面,国内外研究人员也开展了许多关于含孔洞岩石的动态力学特性研究工作^[22-23]。王雁冰等^[24]对含孔洞砂岩进行了冲击试验,研究了孔洞尺寸对砂岩动态力学性能的影响,试样的峰值应力和应变随着孔洞直径的增加呈减小趋势,内部形成的贯通裂纹和破碎块数增多。戴兵等^[25]对含孔洞试样进行了不同冲击方式下的循环冲击试验,发现试样的损伤积累随着平均应变率的增大呈幂函数增加,破坏模式主要表现为横向拉伸破坏和横向拉伸-轴向劈裂组合破坏。周子龙等^[26]通过研究冲击荷载作用下含孔洞岩石的应变演化和破坏特征,得出了孔洞的数量和排列方式对试样冲击响应峰值和孔洞周围的平均应变演化均有显著影响。除此之外,许多案例表明结构面和动力扰动的共同作用是诱发含孔洞试样产生断裂损伤的重要因素。Qiu等^[27]对不同倾角结构面的大理岩孔洞试样进行了SHPB冲击试验,研究结果表明节理倾角对孔洞周围岩石的承载力和破坏特征影响显著。Li等^[28]对含孔洞和交叉节理裂隙岩石进行

了动态冲击试验,研究了孔洞和节理裂隙周围岩石的力学特性和裂纹的扩展行为,发现试样的动态强度和弹性模量随着冲击荷载的增大呈上升趋势,试样的裂纹扩展和最终破坏模式表现出明显的应变率效应。Dong 等^[29]对含双裂隙和圆形孔洞岩石进行了动态冲击试验,基于最大能量释放理论建立了包含孔洞和节理裂隙岩石的裂纹起始角准则,研究结果表明冲击荷载增强了节理裂隙对能量传播的阻碍作用,新裂纹的起始角随着原始节理裂隙角度的增大先增大后减小。综上所述,目前关于动荷载作用下含结构面和孔洞试样的研究主要集中在相同断面,而动力扰动和结构面对不同孔洞岩石的力学特性影响的研究尚处于起步阶段,尤其是裂纹扩展、最终破坏模式和损伤演化的研究更是很少。

本文分别对含圆形孔洞、矩形孔洞和马蹄形孔洞和结构面岩石试样进行了动态冲击试验,分析了不同应变速率条件下结构面和孔洞形状对岩石动态力学特性和破碎状态的影响,阐明了孔洞和结构面的相互作用机理。根据断裂力学理论和能量耗散原理推导出了含复合裂隙岩石的损伤演化规律,采用数字图像技术分析了试样中结构面和孔洞周围的应力分布情况,并且考虑最大环向应力准则,研究了冲击荷载和孔洞形状对结构面端部裂纹萌生扩展的影响。研究结果为实际地下工程中硐室的建设与施工提供了科学的依据和有价值的参考。

1 岩石材料和试验方法

1.1 样本制备

为了确保岩石的完整性和均匀性,采用大型砂岩块体取芯,且所有制备的试样都是从同一块岩石上切割下来的。根据国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)推荐的方法对该型砂岩的物理性质进行了测试,岩样的密度、单轴抗压强度、抗拉强度、杨氏模量和泊松比分别为 2328 kg/m^3 、58 MPa、6 MPa、7.1 GPa 和 0.31。考虑到小尺寸试样有利于 SHPB 试验中的动应力平衡,将试样切割成 $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的长方体,然后在试样中部利用高压水射流制作圆形、矩形和马蹄形孔洞,其中圆形孔的直径和矩形孔的边长均为 10 mm,马蹄形孔中半圆拱半径为 5 mm,直墙洞壁高为 5 mm,拱底长为 10 mm。在孔洞的右上方切割一条长宽分别为 10 mm 和 1 mm 的裂隙,裂隙位置与水平方向的夹角固定为 45° 。试样的端部经过抛光,其表面粗糙度小于 0.02 mm ,如图 1 所示。一方面,选用板状试样便于制作不同孔洞-结构面和观察表面裂纹的萌生扩展。试样端面需要尽量小于杆件的横截面积,这样可以保证实现试样端部全域加载,避免杆件边缘对试样形成挤压约束和局部加载导致的应力集中现象,厚度选择 20 mm 有利于实现应力均匀。另一方面,为了确保一维应力波和均匀性假设的满足条件,在试验过程中对试样端部进行打磨并涂抹润滑剂,降低杆件-试样接触面的摩擦效应。同时对每组试验开展应力平衡校验,采用波形整形技术降低应力波高频振荡和几何弥散引起的波形畸变。

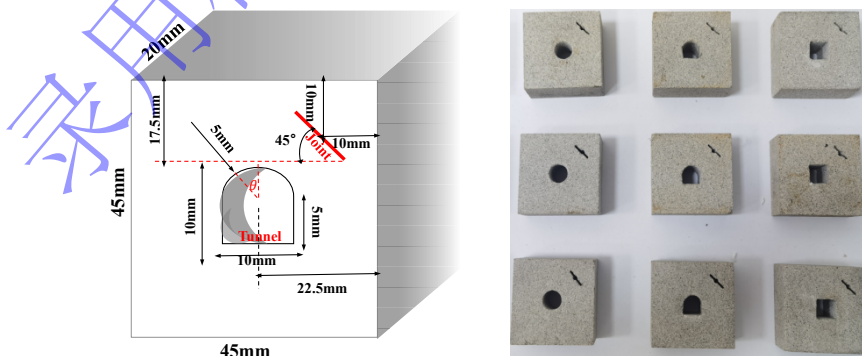


图 1 含不同孔洞和结构面的试样示意图

Fig.1 Schematic specimens with different hole and structural plane

1.2 试验装置和方案

试验利用了中南大学的 SHPB 系统,如图 2 所示,动态加载源由高压氮气瓶和气枪提供,通过气枪释放气体将锥形弹头从压力容器中发射出来实现半正弦波形加载,该方法突破了传统矩形波加载的

波形畸变, 消除了高频震荡, 使半正弦波形载荷沿着入射杆向试样传播。锥形弹头、入射杆和透射杆均采用高强度的 Cr40 合金材料。根据试样的尺寸, 入射杆和透射杆的横截面直径分别设置为 50 mm, 其长度、密度、弹性模量和纵波波速分别为 2000 mm、7817 kg/m³、208 GPa 和 5458 m/s。通过粘贴在杆件相应位置的电阻应变片, 可以捕捉入射和透射杆件上的应力波电压, 用动态应变仪和示波器记录应力波的大小, 并且在计算机上进行处理。利用高速摄像机拍摄了 SHPB 试验中结构面和孔洞周围裂纹的扩展过程, 帧数时间设置为 12.5 μ s, 即 80000 fps。

为了获得岩石试样在动荷载作用下的力学特性和破坏模式, 试验中将冲击气压分别设置为 0.55 MPa、0.60 MPa、0.65 MPa、0.70 MPa 和 0.75 MPa, 用 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 表示, SpecimenA、SpecimenB 和 SpecimenC 分别表示含圆形孔、矩形孔和马蹄孔试样, 例如 SpecimenA- S_1 表示冲击气压为 0.55 MPa 作用下的圆形孔洞试样。加载过程包含三个主要步骤, 首先将两端涂有润滑剂的试样放置于入射杆和透射杆之间, 确保试样与加载杆沿着同一轴线对齐。随后, 调整高速摄像机与试样的相对位置, 使试样处于摄像机的最佳视角内, 设置光源亮度, 检查数据采集系统的自动触发模式。最后将撞击器和冲击气压分别调整到目标位置和目标值, 对试样进行冲击加载, 每次试验后保存数据。应力平衡关系可以通过选取和转换应力波电压数据得到。图 2(c)显示了应变片采集的原始波的电压信号。在测试过程中, 为了冲击波能够在试样中产生回传, 采用脉冲整形技术维持的时间约为 250 μ s。在 SHPB 试验中, 试样两端的动态应力平衡是进行数据后处理的前提。图 2(d)显示的是试样两端的时变应力, 其中入射端的动应力为入射应力和透射应力之和; 透射端的动应力为透射应力。在峰值应力之前, 试样两端的应力基本一致, 这表明试样达到了动态应力平衡, 惯性效应被消除。

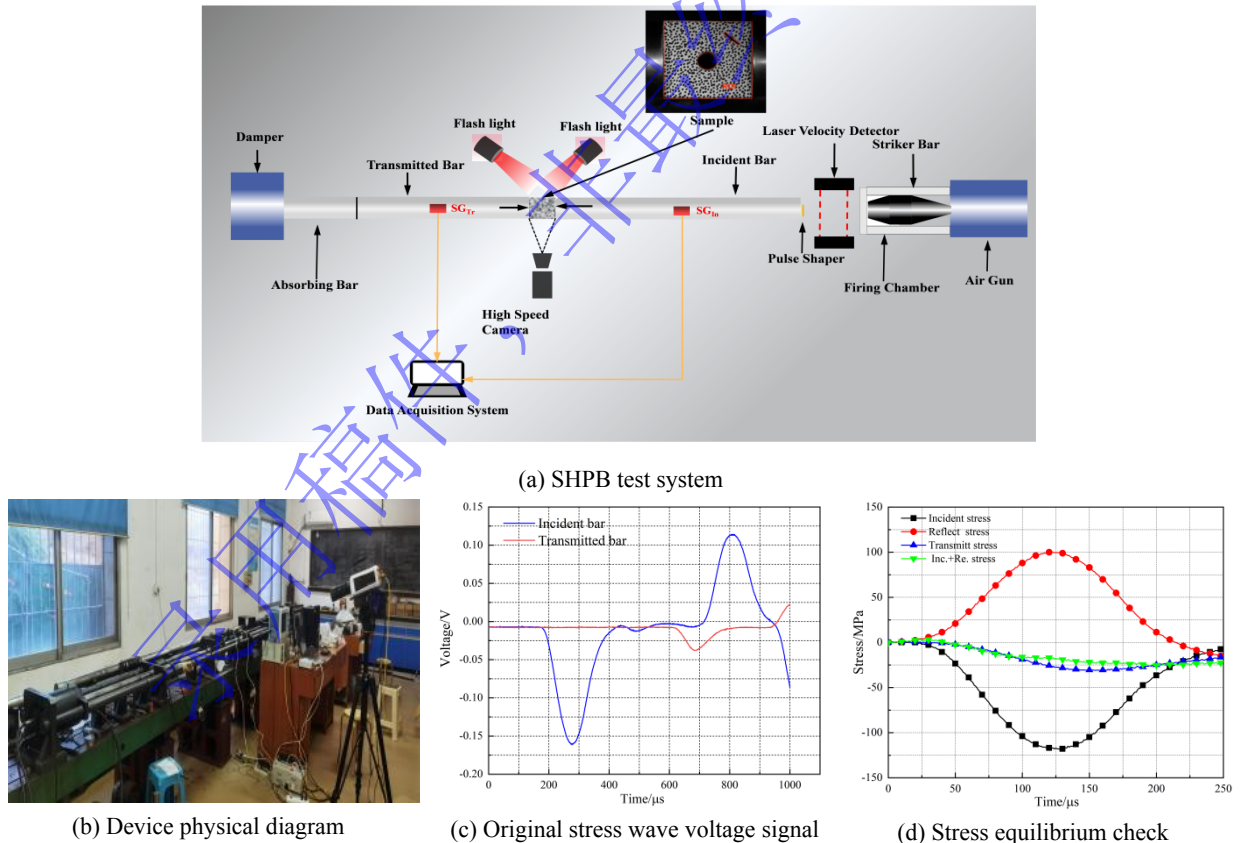


图 2 试验装置示意图和配置

Fig. 2 Schematic and configuration of experimental step

1.3 数据处理

1.3.1 应力应变和能量分析原理

根据一维应力波原理, 试样平均动态应力、应变和应变率可以表示为^[30]:

$$\sigma(t) = \frac{A_e}{2A_s}[\sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} \int_0^t [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{\rho_e C_e L_s} [\sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t)] \quad (3)$$

式中： A_e 、 C_e 、和 ρ_e 分别为杆件的横截面积、纵波波速和密度； A_s 和 L_s 分别为岩石试样的横截面积

和长度； $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 和 $\sigma_T(t)$ 分别为 t 时刻杆的入射应力、反射应力和透射应力。

根据上述表达式，可以获取动态试验中的应力应变曲线，如图 3(a)所示。为了表征含孔洞和结构面试样的动态变形，引入了弹性模量，即连接 50%动态峰值强度和坐标原点的直线的斜率^[31]。本文采用峰值应变速率之前的平均应变速率来描述动荷载作用下试样的应变速率，如图 3(b)所示。

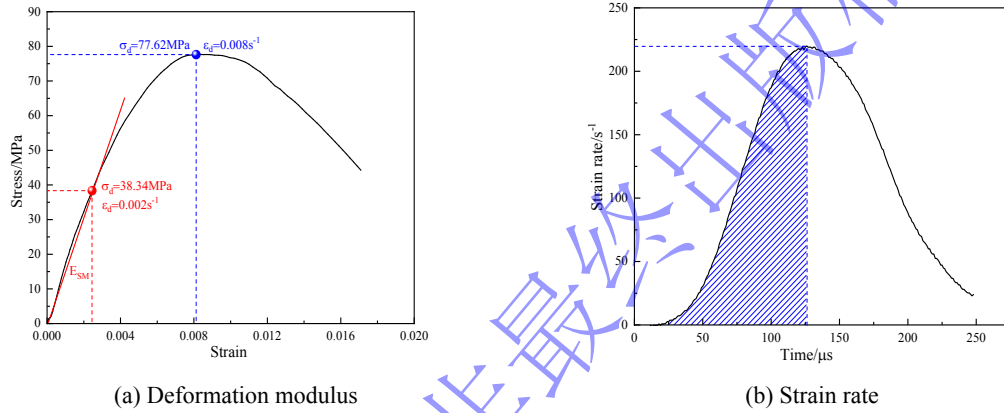


图 3 动荷载下含孔洞和结构面试样的弹性模量和应变速率的确定

Fig.3 Determination of elastic modulus and strain rate of specimen with hole and structural plane under dynamic loading

基于入射杆和透射杆中的应力波传播，各项能量大小可以表示为^[32]：

$$E_I = \frac{A_e}{C_e \rho_s} \int_0^t \sigma_I^2(t) dt \quad (4)$$

$$E_R = \frac{A_e}{C_e \rho_s} \int_0^t \sigma_R^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_T = \frac{A_e}{C_e \rho_s} \int_0^t \sigma_T^2(t) dt \quad (6)$$

$$E_A = E_I - E_R - E_T \quad (7)$$

式中： E_I 、 E_R 、 E_T 和 E_A 分别为加载过程中的入射能量、反射能量、透射能量和吸收能量； ρ_s 为试样的密度。

动态加载过程中试样的能量耗散密度可以表示为：

$$\eta_v = \frac{E_A}{V_s} \quad (8)$$

式中： V_s 为试样的体积。

1.3.2 数字图像技术

数字图像技术(DIC)是一种非接触式的光学测量，主要通过匹配加载前后物体表面的灰度来监测位移和应变。在动态加载过程中，利用高速摄像机拍摄试样的变形情况，并且利用 GOM Correlate 软件对图像进行处理，得到试样的表面应变，主要包括以下步骤：(i) 选择变形之前的图像作为用于计算

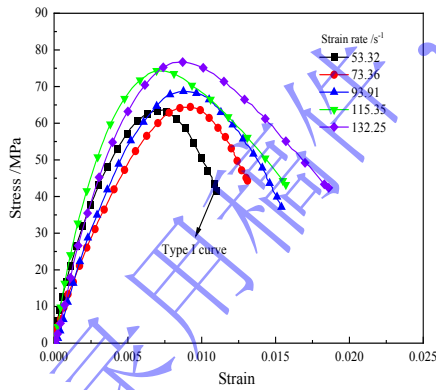
变形的参考状态；(ii) 在样本表面定义感兴趣的区域 (ROI) 并将其分割成多个子集；(iii) 计算参考图像中子集的初始位移，并且使用相关算法在目标图像中执行匹配搜索，基于两幅图像之间的子集位置差来确定位移场；(iv) 通过位移微分和后处理来获得应变场。

2 试验结果和分析

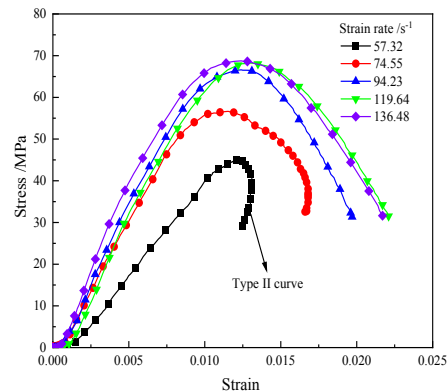
2.1 动态应力应变特征

试样的动态应力应变曲线如图 4 所示，试样在峰前加载过程中表现出相似的力学行为，但在峰后阶段却呈现出明显的差异。根据岩石的峰后变形曲线特征将岩石的应力应变曲线分为 I 型和 II 型。I 型曲线裂纹扩展过程是稳定的，在荷载达到峰值后，试样中应变能不足以维持裂纹继续扩展直到试样破坏，只有加载力不断对试样做功，岩石才能进一步破裂。对于 II 型曲线，其裂纹扩展是不稳定的，在荷载达到峰值后，主裂纹在节理裂隙和孔洞周围产生，岩石试样中所储存的应变能够维持裂纹扩展直到试样发生完全破坏，曲线进入缓慢下降阶段，表现出明显的软化现象。

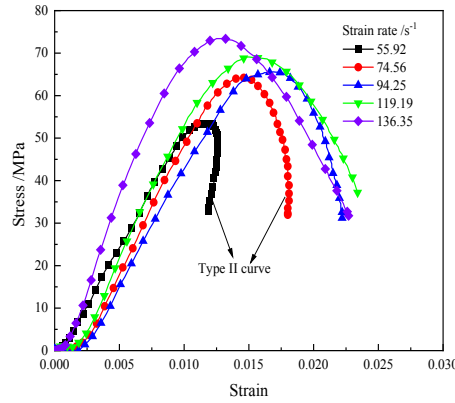
圆形孔洞的孔壁应力分布相对均匀，应力集中系数较小，加载过程中裂纹能够稳定扩展，吸收的能量通过裂纹的贯通和试样的整体破坏持续耗散，峰后阶段裂纹扩展始终保持稳定，因此应力应变曲线均为 I 型。对于矩形和马蹄形孔洞试样，在较小应变速率作用下，新产生的裂纹扩展驱动力不足，裂纹无法顺利贯通，孔洞尖角和结构面的端部位置产生微裂纹损伤，试样吸收的能量不足以驱动裂纹持续贯通扩展。当外部加载结束后，试样内部储存的弹性应变能无法通过宏观破裂完全释放，从而诱发应变回弹，应力应变曲线表现为 II 型特征。随着应变速率的增大，试样的吸收能量超过裂纹贯通所需要的临界阈值，孔洞和结构面的耦合损伤效应促使孔洞尖角和结构面尖端萌生的裂纹持续扩展，岩体内部积聚的弹性应变能完全释放，试样最终发生整体破坏，应力应变曲线由 II 型向 I 型转变。这说明在较小应变速率作用下，含矩形和马蹄形孔洞试样容易发生应变回弹现象，其内部能量在冲击加载后没有完全释放，试样容易产生二次变形。随着应变速率的增大，试样达到峰值应力的时间变短，峰后破坏阶段的持续时间延长。在峰前阶段主裂纹起裂速度较慢，节理裂隙和孔洞的耦合结构效应没有得到充分利用，然而在峰后破坏阶段，结构效应逐渐起到减缓曲线下降的作用。



(a) Specimens with circle hole



(b) Specimens with rectangular hole



(c) Specimens with horseshoe hole

图 4 试样的动态应力应变曲线

Fig.4 Dynamic stress-strain curve of specimens

2.2 动态强度和弹性模量变化

等人的研究发现孔洞形状和应变率对冲击荷载作用下试样的动态强度如图 5 所示，具体参数见表 1。试样中结构面和孔洞的存在导致其力学参数发生明显的改变，这与结构面和孔洞周围的应力重分布密切相关^[33]。随着应变速率从 50 s⁻¹ 增加至 130 s⁻¹，岩石动态强度从 52 MPa 增加到 82 MPa，表现出明显的应变率效应。Yan 等^[34]定义了应变率敏感因子 $M_{rel} = \lg \sigma / \lg \dot{\epsilon}$ ，用来定量表示试样动态强度的应变率效应。通过计算得到含圆形、矩形和马蹄形孔洞试样的应变率敏感因子分别为 0.367、0.274 和 0.201，逐渐呈下降趋势。随着应变速率的增大，微裂纹在短时间内难以扩展，岩石抵抗损伤的能力增强，动态强度进一步提高。在近似应变速率条件下，圆形孔试样的动态强度最大，方形和马蹄形孔洞试样的动态强度相差不大。

试样的弹性模量变化如图 6 所示。对于含孔洞-结构面的复合缺陷岩石，试样的动态弹性模量随应变速率的增大整体呈上升趋势。在较小应变速率作用下，岩石吸收的能量主要用于裂纹的扩展和贯通，孔洞尖角和结构面端部的应力集中共同促进新裂纹的萌生扩展，岩体内部结构损伤占据主导地位，整体刚度逐渐降低，宏观表现为动态弹性模量随着应变速率的增大小幅下降；随着应变速率增大至较高水平，应变率强化效应占据主导地位，虽然试样仍然存在微裂纹的扩展贯通，但是岩体的刚度提升和结构面的摩擦效应增强等应变率动态强化机制超过了损伤弱化机制，导致试样整体抗变形能力显著提高，动态弹性模量反而增大。

表 1 含不同孔洞和结构面岩石试样加载试验结果

Table 1 Loading test results of rock specimens with different hole shape and structural plane

试样编号	冲击气压/MPa	应变速率/s ⁻¹	动态强度/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变	能量耗散密度/(J·cm ⁻³)
SpecimenA-S ₁	0.55	53.32	67.42	7.84	1.26	0.21
SpecimenA-S ₂	0.60	73.36	71.85	7.23	1.67	0.37
SpecimenA-S ₃	0.65	93.91	74.45	12.72	1.86	0.39
SpecimenA-S ₄	0.70	115.35	78.97	14.13	2.51	0.76
SpecimenA-S ₅	0.75	132.25	82.83	18.05	2.77	1.19
SpecimenB-S ₁	0.55	57.32	54.96	4.88	1.14	0.26
SpecimenB-S ₂	0.60	74.55	57.84	4.42	1.68	0.39
SpecimenB-S ₃	0.65	94.23	65.66	4.11	2.33	0.52
SpecimenB-S ₄	0.70	119.64	69.68	4.92	2.68	0.85
SpecimenB-S ₅	0.75	136.48	74.29	7.33	2.75	1.28
SpecimenC-S ₁	0.55	55.92	52.47	4.82	1.26	0.37

SpecimenC-S ₂	0.60	74.56	57.08	4.41	1.81	0.49
SpecimenC-S ₃	0.65	94.25	66.94	6.03	2.27	0.62
SpecimenC-S ₄	0.70	119.19	70.17	6.61	2.67	0.92
SpecimenC-S ₅	0.75	136.35	73.52	10.62	3.14	1.35

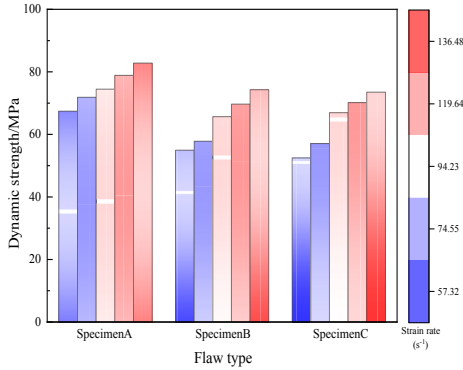


图 5 不同应变率作用下试样的动态强度

Fig.5 Dynamic strength of specimens under different strain rates

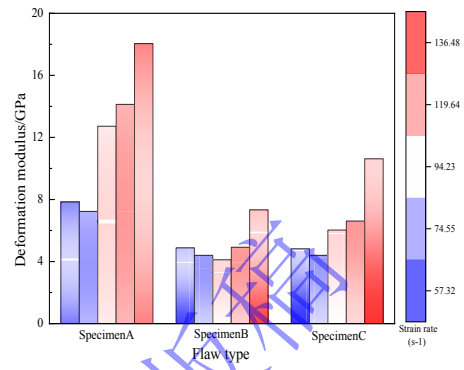


图 6 不同应变率作用下试样的动态弹性模量

Fig.6 Dynamic deformation modulus of specimens under different strain rates

2.3 试样的应变率效应和破坏模式

图 7 显示了应变速率对岩石峰值应变的影响, 随着应变速率从 53.32 s^{-1} 增加到 136.48 s^{-1} , 峰值应变从 1.14 增大到 3.14, 这是因为动荷载产生的应变逐渐减小, 岩石的剩余变形量增加, 所以动态峰值应变随着应变速率的增大而增大。然而, 在近似应变速率作用下, 孔洞形状对峰值应变的影响不显著。图 8 显示了应变速率对试样能量耗散密度的影响, 随着应变速率的增大, 岩石的能量耗散密度从 0.21 增加到 1.35, 这一现象可以用岩石断裂力学和能量守恒定律来解释。不同孔洞形状中, 马蹄形孔试样的能量耗散密度最大, 而圆形和方形孔试样的能量耗散密度相差不大。

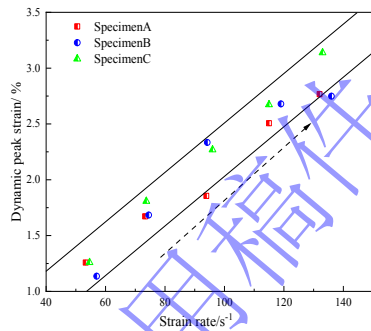


图 7 应变速率对试样峰值应变的影响

Fig.7 Effect of strain rate on specimen peak strain

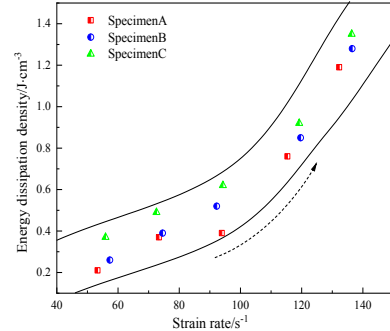


图 8 应变速率对试样能量耗散密度的影响

Fig.8 Effect of strain rate on specimen energy dissipation density

试样在破坏过程中结构面与新裂纹之间相互贯通, 大部分能量以摩擦和塑性变形的形式被消耗, 次生裂纹数量不断增多, 总的耗散能增大, 并且大部分耗散能转化为试样的断裂破坏能。根据碎块表面积和平均尺寸的几何关系, 增加的断裂能会导致碎块尺寸分布向小粒径偏移。一般来说, 低应变速率加载会导致试样产生微小的断裂面, 试样大多数被劈成多半, 尤其在静态加载试验中, 试样几乎被完整地分成两半而不产生新的碎块。但是随着应变速率的增大, 试样中断裂面的个数和面积逐渐增多, 其破碎程度也得到加强^[35-36]。从图 9 可以看出, 圆形和马蹄形孔试样在较小应变率作用下发生剪切破坏, 形成两个锥形碎块。随着应变速率的增大, 试样的破碎程度增加, 形成锥形和纺锤形小碎块, 试样由剪切破坏逐渐向拉伸剪切混合破坏转变。与之前的大碎块相比, 小碎块的边缘较薄, 摩擦面更明显, 这表明试样在断裂面形成过程中受到剪切应力的诱导, 从而改变了断裂面的发展方向。对于方形孔试样, 在低应变速率作用下, 微裂纹在裂隙尖端萌生扩展, 释放局部应力, 导致试样发生局部剪切破坏, 岩块沿结构面产生滑移断裂并且断口较平整。随着应变速率的增大, 裂纹进一步扩展和贯通,

形成锥形和纺锤形碎块，在碎块的边缘可以看到一些明显的划痕，试样的破坏主要是由结构面端部到孔洞端部再到试样端部形成贯通断裂面引起的。

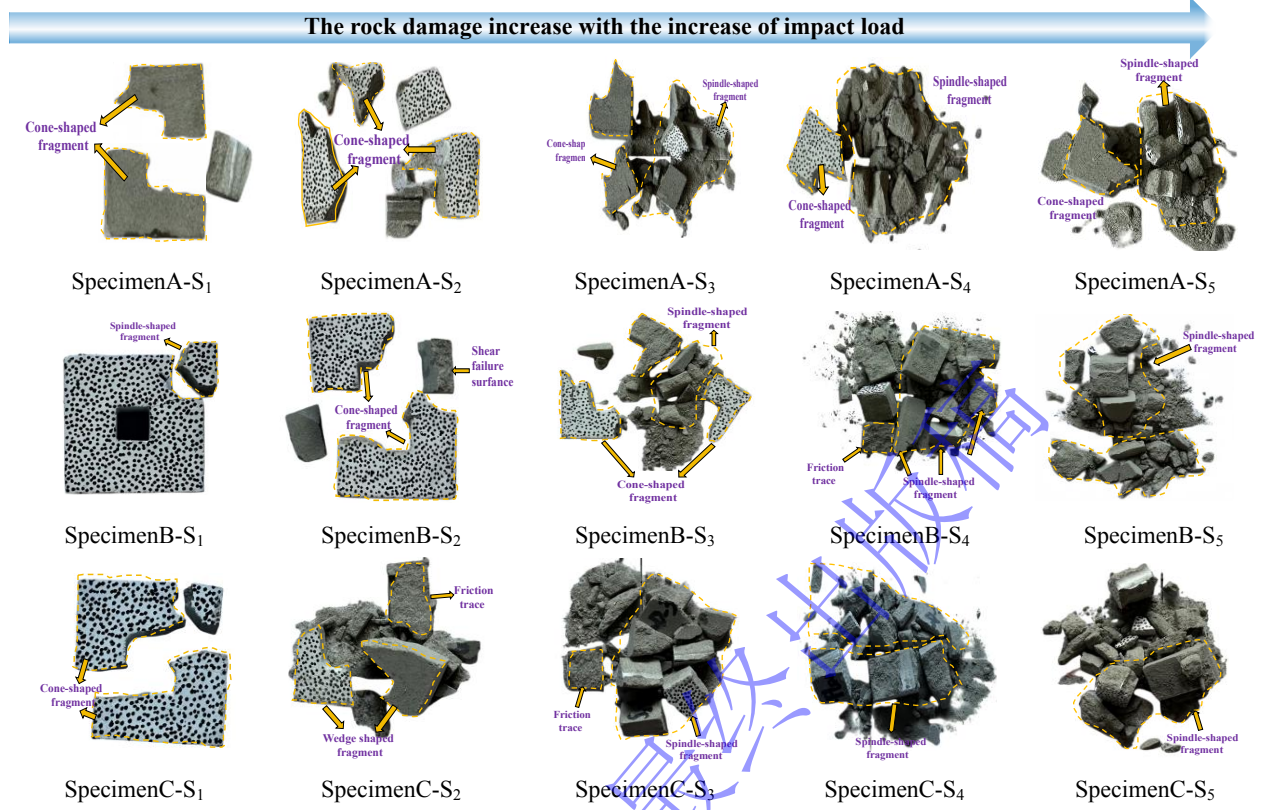


图9 含不同孔洞和结构面试样的破碎形态

Fig. 9 Failure modes of specimens containing different holes and structural planes

2.4 试样的损伤演化分析

试样的破坏特性不仅表现出明显的应变速率强化效应，还与损伤演化过程有关。含不同孔洞和结构面试样的损伤演化如图10所示，岩石损伤可以视为微裂纹的萌生、扩展和贯通的过程。根据断裂力学理论，试样的最终损伤变量可以定义为^[37]：

$$\begin{cases} D = D_c \frac{K_\varepsilon}{K_0} \\ D_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： K_ε 为应变为 ε 时的损伤因子； K_0 为岩石达到临界损伤状态时的损伤因子； D 为试样的最终损伤变量； D_c 为临界损伤阈值； σ_c 为残余应力； $\sigma_{\max}$ 为峰值应力。

由于耗散能是促进岩石内部裂纹扩展的主要能量，因此耗散能 U_d 在总应变能 U 中所占比例可以反映岩石的宏观损伤程度，损伤变量可以进一步表示为：

$$\begin{cases} D = \frac{U_d \beta}{U} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} \right) \\ \beta = \frac{K_\varepsilon}{K_0} = \int_0^\varepsilon \varphi(\varepsilon) d\varepsilon \\ \varphi(\varepsilon) = \frac{n}{b} \left(\frac{\varepsilon}{b} \right)^{n-1} \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{b} \right)^n \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中：定义 K_e 和 K_0 的比值为损伤系数 β ，用来表示不同试样的损伤特性； $\varphi(\varepsilon)$ 为加载过程中岩石单元体损伤的概率密度； n 、 b 与岩石的形状、尺寸和内部裂隙分布情况有关^[38]。

试样在加载过程中耗散能 U_d 与总应变能 U 的比值可以用弹性应变能的变化量 U_e 来表示，因此损伤变量可以进一步表示为：

$$D = \frac{\sigma_{\max} \varepsilon - U_e}{\sigma_{\max} \varepsilon} \beta \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} \right) \quad (11)$$

根据断裂力学中 Griffith 的能量理论，试样表面裂隙引起的弹性应变能的变化量 U_e 也可以用能量释放率和应力强度因子来表示：

$$U_e = \int_0^{A_i} G dA = \frac{1}{E'} \int_0^{A_i} (K_I^2 + K_{II}^2) dA \quad (12)$$

式中： A_i 为试样中裂隙的表面积； G 是能量释放率；对于平面应变问题， $E' = E / (1 - \nu^2)$ ， ν 和 E 分别为完整岩石的泊松比和杨氏弹性模量； K_I 和 K_{II} 分别为试样裂隙尖端的 I 型和 II 型的应力强度因子。

对于单裂隙岩石试样，I 型和 II 型 SIFs 可以表示为：

$$\begin{cases} K_I = -f(a, d, \alpha) \sigma \cos^2 \alpha \sqrt{\pi a} \\ K_{II} = f(a, d, \alpha) \sigma \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\pi a} \end{cases} \quad (13)$$

式中： σ 为压缩应力； a 为节理裂隙半长度； α 为裂隙角度，本文中节理裂隙的倾角均为 45° ； f 函数为孔洞和结构面对岩石 SIFs 影响的相互作用因子^[39]，它与岩石中结构面的长度 a 、倾角 α 和结构面尖端至孔洞边缘最大应力集中位置的距离 d 有关。由图 10 可知，本文中的 d 可以分别表示为结构面尖端至圆形孔洞顶端、矩形和马蹄形孔洞拐角的距离。对于含不同孔洞和结构面试样，需结合 DIC 分析得出的最大应力集中分布和数值反演进一步建立相互作用因子 f 的量化取值方案。

将等式(13)带入等式(12)，弹性应变能的变化量 U_e 可以表示为：

$$U_e = \frac{1 - \nu^2}{E} 2WNa(f(a, d, \alpha) \sigma_{\max}^2 \cos^2 \alpha \times \pi a) \quad (14)$$

式中： W 为试样厚度； N 为试样的节理裂隙数量，本文中 N 等于 1。

因此，将等式(14)带入等式(11)，即可得到岩石的最终损伤变量为：

$$D = \left[1 - \frac{1 - \nu^2}{E\varepsilon} 4WNa(f(a, d, \alpha)^2 \sigma_{\max}^2 \cos^2 \alpha \times \pi a) \right] \frac{\sigma_{\max} - \sigma_c}{\sigma_{\max}} \beta \quad (15)$$

损伤力学模型的建立通常需要考虑动态荷载参数，包括应变速率和应力波传播效应，岩体的固有物理参数包括弹性模量、泊松比、断裂韧度和结构面摩擦系数等，然而等式(15)的适用边界仅考虑了部分动荷载效应和能量耗散，用于揭示结构面和孔洞动态相互作用的损伤力学机制。随着试样的损伤速率逐渐增大，损伤变量迅速上升到临界值，岩体局部承载力迅速下降，损伤演化曲线呈 L 型增长。在损伤曲线中分别取 4 个特征点显示冲击过程中的应变云图。试样的应变演化表现出相同的变化规律，首先在较小冲击荷载作用下(0.55 MPa)，特征点 I 处的应变主要集中在裂隙尖端和孔洞附近。当加载到 II 点时，随着损伤的进一步增大，剪切应变首先从结构面尖端逐渐扩展，但试样内部未出现裂纹，孔洞周围的应变变化不明显。当加载到 III 和 IV 点时，孔洞上端的剪切应变逐渐增强，应变集中主要发生在岩桥区域。随着冲击荷载的增大(0.60 MPa)，试样的应变集中在损伤前期（I、II 特征点）无明显变化。但当加载到损伤后期（III 和 IV 特征点），裂隙尖端形成了“Z”型应变区并且与试样的入射端连接贯通，试样左下端形成的拉伸应变逐渐与孔洞下端连接。随着冲击荷载的进一步增大(0.70 MPa)，特征点 II 处的应变集中开始发生在试样的岩桥区，孔洞下端也同样形成剪应变集中区。随着加载的继续，特征点 III 处的应变集中逐渐加强，除了形成结构面尖端的“Z”型应变区，孔洞下端出现的剪切应变带向试样与杆件的接触端部扩展。当加载到特征点 IV，各处的应变集中继续加强，试样下端形成

了一条新的拉伸应变带并且逐渐沿加载方向扩展。对于矩形和马蹄形孔洞试样，其应变变化规律与圆形孔洞试样大致相同，但是在中等和较大冲击荷载作用下试样的应变集中明显增强。由此可以得出在较小冲击荷载作用下，应变集中首先在结构面尖端萌生，之后孔洞上端形成剪应变集中并且逐渐增强，最终形成局部剪切破坏。随着冲击荷载的增大，孔洞周围会产生新的剪应变，其他各处的应变集中都得到加强，远场拉应变主要发生在试样的端部，拉伸剪切裂纹逐渐增多，试样由局部剪切破坏转变为拉伸剪切混合破坏。

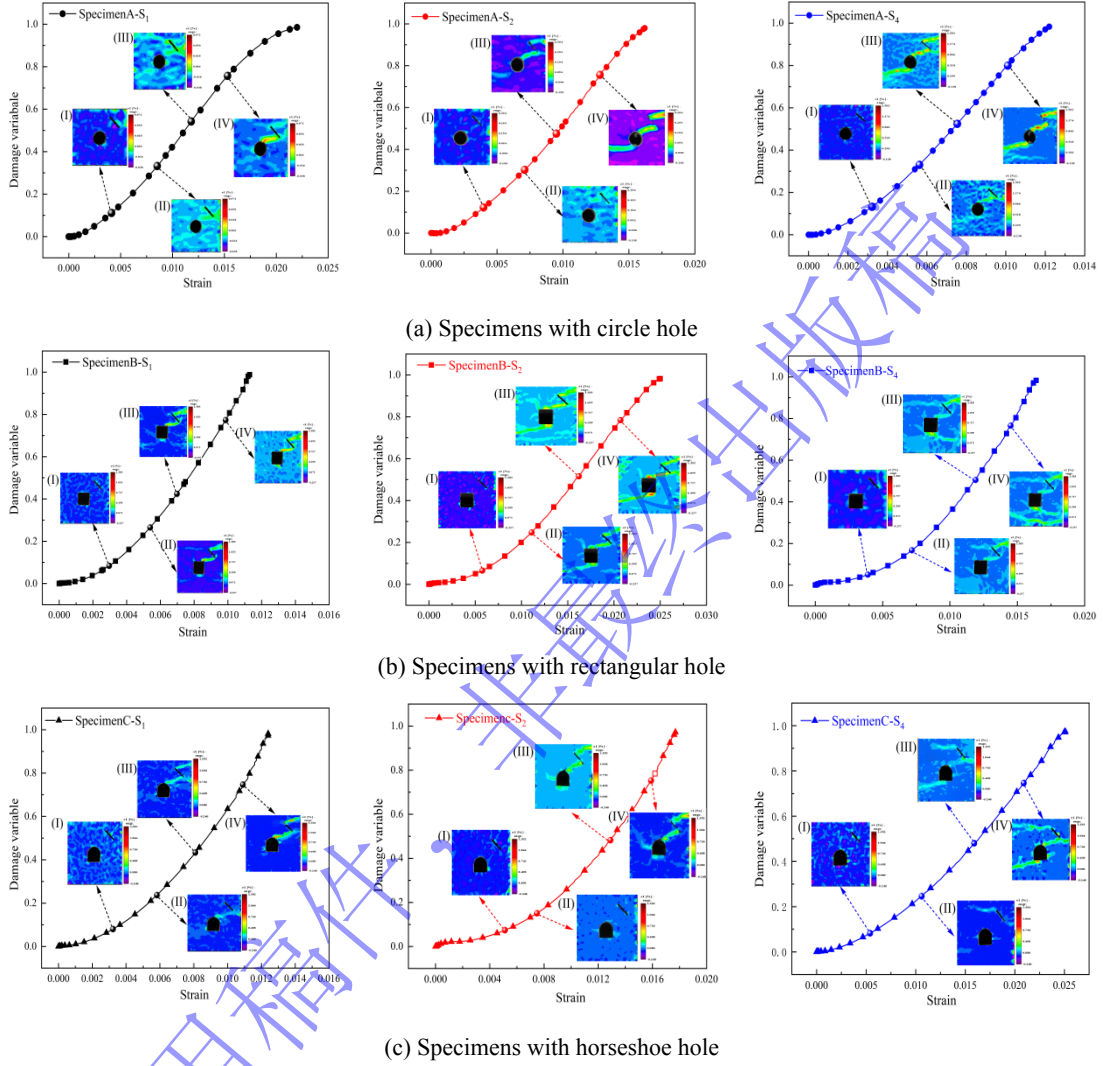


图 10 含结构面 and 不同孔洞试样的损伤演化

Fig. 11 Damage evolution of specimens with structural plane and different hole

2.5 孔洞与结构面周围裂纹的扩展机理

冲击荷载作用下含孔洞和结构面试样的应力变化可以通过等效考虑在没有外部荷载情况下承受表面力的断裂面来进行研究。该表面力与岩石断裂位置产生的应力大小相等，方向相反。因此在外部荷载作用下试样的应力变化可以等价表示为一个受到冲击荷载的带圆孔的无限板和一个受到结构面损伤应力的无限板的叠加，如图 11 所示。在孔洞中心建立极坐标，孔洞周围岩石的径向应力、切向应力和剪应力可以表示为^[40]：

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma_p(\lambda+1)\left(1-\left(\frac{R}{r}\right)^2\right) + \frac{1}{2}\sigma_p(\lambda-1)\left(1-4\left(\frac{R}{r}\right)^2 + 3\left(\frac{R}{r}\right)^4\right)\cos 2\theta \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma_p(\lambda+1)\left(1+\left(\frac{R}{r}\right)^2\right) - \frac{1}{2}\sigma_p(\lambda-1)\left(1+3\left(\frac{R}{r}\right)^4\right)\cos 2\theta \quad (17)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}\sigma_p(\lambda-1)\left(1+2\left(\frac{R}{r}\right)^2-3\left(\frac{R}{r}\right)^4\right)\sin 2\theta \quad (18)$$

式中：\$R\$ 为孔洞的半径；\$r\$ 为岩石单元体至孔洞中心的距离；\$\theta\$ 为岩石单元体与水平方向的夹角；\$\sigma_p\$ 为垂直应力；\$\lambda\$ 为侧向应力与垂直应力之比，本研究冲击加载过程中的侧向应力为 0，因此 \$\lambda\$ 为 0；\$\sigma_r\$、\$\sigma_\theta\$ 和 \$\tau_{r\theta}\$ 分别为孔洞周围岩石的径向应力、切向应力和剪应力。

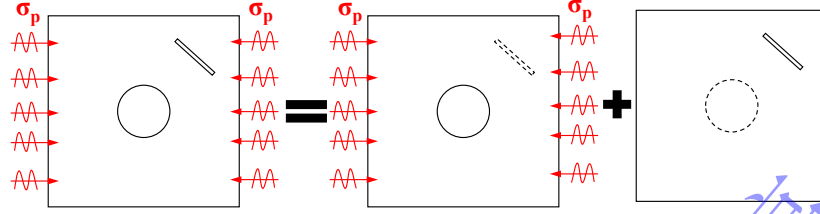


图 11 叠加原理

Fig.11 Superposition principle

由于需要在结构面处建立局部直角坐标系，因此将极坐标系转换为直角坐标系，如图 12 所示：

$$\sigma_x = -\frac{\sigma_p R^2}{2\rho^4} \left[(2\rho^2 - 3R^2)\cos(4\theta) + \rho^2\cos(2\theta) \right] \quad (19)$$

$$\sigma_y = -\frac{\sigma_p}{2\rho^4} \left[3R^4 - 2R^2\rho^2\cos(4\theta) + 3R^2\rho^2\cos(2\theta) + 2\rho^4 \right] \quad (20)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_p R^2}{2\rho^4} \left[(3R^2 - 2\rho^2)\sin(4\theta) + \rho^2\sin(2\theta) \right] \quad (21)$$

式中：\$\sigma_x\$、\$\sigma_y\$ 和 \$\tau_{xy}\$ 分别为直角坐标系中结构面位置的远场应力分量；\$\rho\$ 为直角坐标系中岩石单元体至孔洞中心的距离。

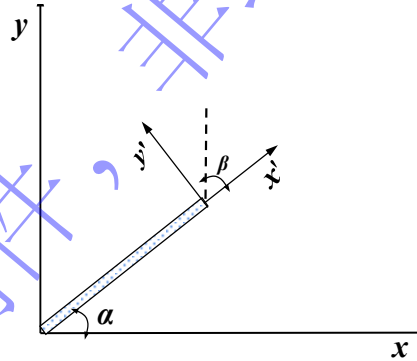


图 12 结构面端部新的坐标系

Fig. 12 New coordinate system at the structural plane tip

Ju 等^[41]为了研究结构面周围的裂纹扩展机制，在结构面末端引入了新的坐标系 \$x'-y'\$，并且通过坐标变换确定了新坐标系中的应力分量，具体如下：

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\alpha - \tau_{xy}\sin 2\alpha \quad (22)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\alpha + \tau_{xy}\sin 2\alpha \quad (23)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\alpha + \tau_{xy}\cos 2\alpha \quad (24)$$

在本研究中，\$\alpha=45^\circ\$，等式(22)-(24)可以简化为：

$$\begin{cases} \sigma_{x'}|_{\alpha=45^\circ} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \tau_{xy} \\ \sigma_{y'}|_{\alpha=45^\circ} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \tau_{xy} \\ \tau_{x'y'}|_{\alpha=45^\circ} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \end{cases} \quad (25)$$

根据弹性力学理论, 坐标系 $x'-y'$ 中环向应力可以表示为:

$$\sigma_{\beta'} = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{y'}}{2} + \frac{\sigma_{x'} - \sigma_{y'}}{2} \cos 2\beta - \tau_{x'y'} \sin 2\beta \quad (26)$$

将等式(25)代入等式(26)可以得到:

$$\sigma_{\beta'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \tau_{xy} \cos 2\beta - \tau_{x'y'} \sin 2\beta \quad (27)$$

根据最大环向应力准则, 裂纹沿最大环向应力方向开始萌生和扩展。因此, 对于等式(27), 一阶导数等于零, 二阶导数小于零:

$$\frac{\partial \sigma_{\beta'}}{\partial \beta'} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{\beta'}}{\partial \beta'^2} < 0 \quad (29)$$

等式(28)和(29)可以表示为:

$$\tau_{xy} \sin 2\beta - \tau_{x'y'} \cos 2\beta = 0 \quad (30)$$

$$\tau_{xy} \cos 2\beta + \tau_{x'y'} \sin 2\beta < 0 \quad (31)$$

试样的应力状态遵循平面应力条件, 根据莫尔圆理论, 主应力分量可以表示为:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (32)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (33)$$

根据等式(32)和(33), 主应力的平方差 $(\sigma_1 - \sigma_2)^2$ 可以简化为:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 \quad (34)$$

通过将等式(25)代入等式(34), 可以确定 $x'-y'$ 坐标系中的应力分量 $\tau_{x'y'}$ 为:

$$\tau_{x'y'} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 - \tau_{xy}^2} \quad (35)$$

根据计算出的主应力差和剪应力, $x'-y'$ 坐标系中的剪应力可以使用等式(35)有效量化。这里对不同孔洞试样的应力变化进行了分析, 用来评估 $\tau_{x'y'}$ 的分布特征。在近似垂直于结构面的方向上, $\tau_{x'y'}$ 的应力值接近于 0, 这表明当 $\beta \approx 90^\circ$, $\tau_{x'y'} = 0$ 。因此, 当 $\tau_{x'y'} = 0$ 且 $\tau_{xy} > 0$ 时, 满足等式(30)和(31), 最大环向应力发生在垂直于结构面的位置, 这些区域成为裂纹起始和扩展的潜在位置。图 13、14 和 15 分别显示了在 0.55 MPa、0.60 MPa 和 0.70 MPa 冲击气压下含不同孔洞和结构面试样的最终裂纹扩展模式。起始于结构面端部的裂纹沿垂直于结构面的方向传播, 传播方向几乎为 90° , 这与 Bobet^[42]等的研究内容一致。在较小冲击荷载作用下(0.55 MPa), 试样中 $\tau_{x'y'} = 0$ 且 $\tau_{xy} > 0$ 的位置位于结构面的上下端和孔洞的上端, 新裂纹在结构面处呈“Z”型分布。随着冲击荷载的增大(0.60 MPa), 试样中 $\tau_{x'y'} = 0$ 且 $\tau_{xy} > 0$ 的位

置与 0.55 MPa 冲击气压作用下观察到的位置保持一致, 裂纹沿近似垂直于结构面的方向扩展, 但孔洞下端产生了新的剪切裂纹并且扩展方向和结构面端部的裂纹扩展方向相互平行。在较大冲击荷载作用下(0.70 MPa), 试样中 $\tau_{xy}=0$ 且 $\tau_{xy}>0$ 的位置主要分布在结构面的两端, 加载过程中圆形和矩形孔试样的底部观察到一条沿加载方向扩展的拉伸裂纹, 马蹄形孔试样的上端形成了一条拉伸裂纹, 这说明在中等和较大冲击荷载作用下 $\tau_{xy}=0$ 且 $\tau_{xy}>0$ 的位置与孔洞形状无关, 动荷载的增大会显著影响试样的破坏类型, 试样由剪切破坏转变为拉伸剪切混合破坏。需要说明的是以上分析不能直接证明动态起裂的物理机制完全服从最大环向应力准则, 采用最大环向应力准则仅用于对比加载过程中孔洞和结构面的应力集中与试验现象中裂纹的起裂位置和方向, 结果显示二者表现出一致性, 但动态加载过程中裂纹的实际动态起裂还会受到惯性效应、应力波扰动和动态断裂韧度等因素的影响。

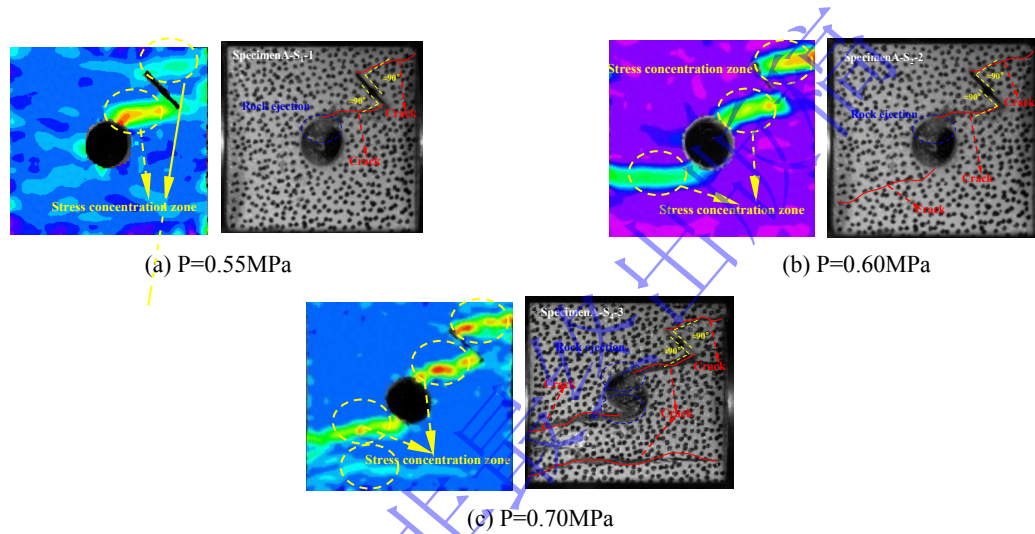


图 13 动荷载下含圆形孔洞和结构面试样裂纹的萌生位置和方向

Fig. 13 Crack initiation locations and orientations in specimens with circular holes and structural planes under dynamic loads

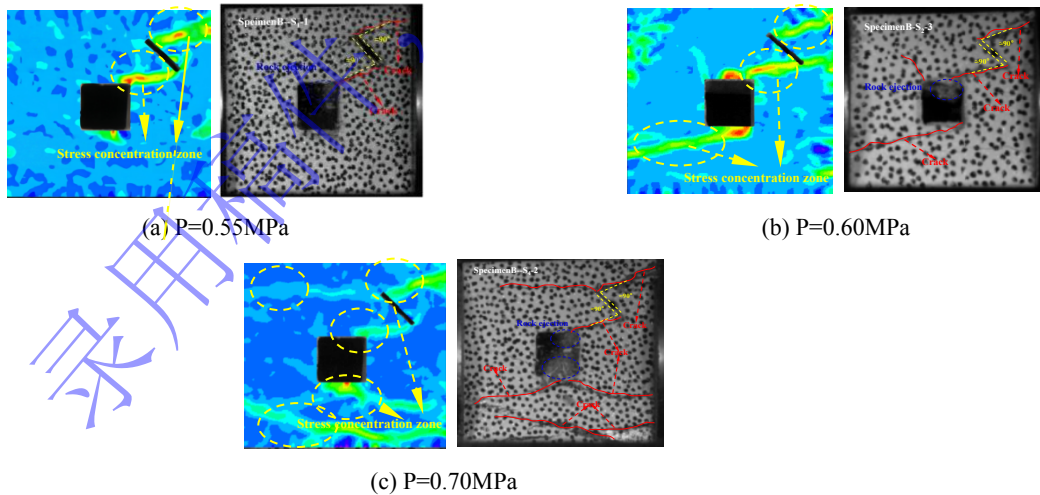
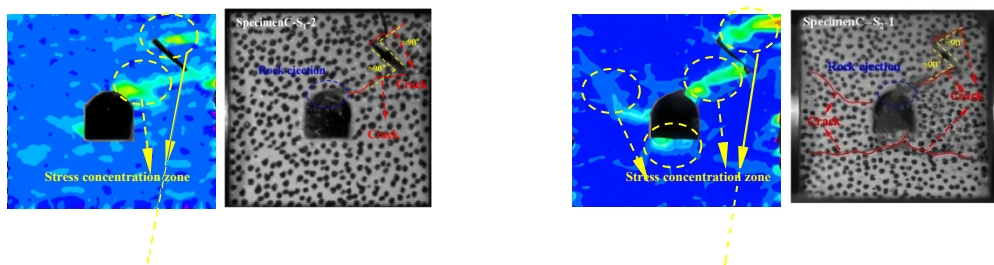


图 14 动荷载下含矩形孔洞和结构面试样裂纹的萌生位置和方向

Fig. 14 Crack initiation locations and orientations in specimens with rectangular hole and structural plane under dynamic loads



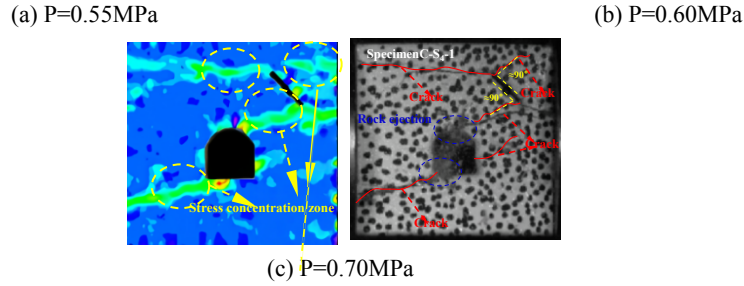


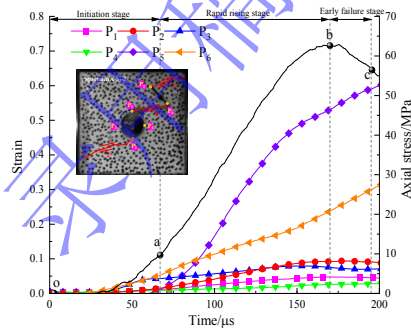
图 15 动荷载下含马蹄形孔洞和结构面试样裂纹的萌生位置和方向

Fig. 15 Crack initiation locations and orientations in specimens with horseshoe hole and structural plane under dynamic loads

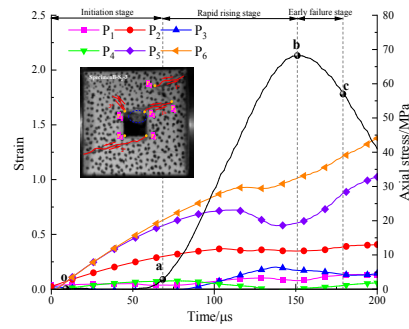
2.6 关键位置的应变定量分析

基于上述研究分析，确定了孔洞周围和结构面尖端为主要破坏位置。借助 DIC 技术，在孔洞周围和结构面尖端布置了测量点，用来记录这些位置在加载过程中的应变演化，如图 16 所示， P_1 - P_4 用来监测孔洞周围的应变变化， P_5 - P_6 用来监测结构面尖端的应变变化。试样表面发生宏观破坏时散斑点丢失，因此无法获得准确的应变，这里仅监测了 $200\ \mu\text{s}$ 之前的变形，主要包括峰前和峰后早期破坏阶段，其中峰后早期阶段保留的测点数据全部选取的是试样中未发生剥落和散斑特征完好区域监测点，该阶段散斑完整，子区匹配度高，数据可信度较好。由于篇幅限制，仅分析了岩石试样在冲击气压为 $0.70\ \text{MPa}$ 作用下各监测点的应变演化过程。

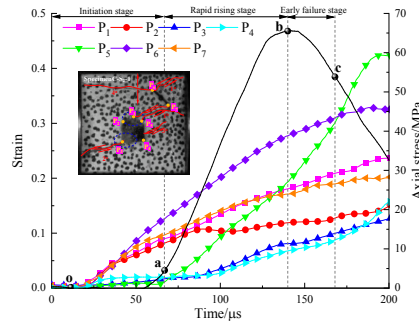
试样中结构面尖端的应变变化速率总是大于孔洞周围的应变变化速率。对于圆形孔洞试样，在加载初期，孔洞周围和结构面尖端的应变变化速率较小。随着加载的继续，结构面尖端的应变变化速率急剧增大，孔洞其他位置的应变变化较为平缓，在孔洞顶部监测点 P_1 观察到的应变明显高于其他位置，结构面尖端和孔洞顶端形成的剪切裂纹成为主要的破坏特征，最终控制试样的破坏模式。当加载到 $100\ \mu\text{s}$ 后，由于宏观贯通裂纹形成，试样经历了一个突变阶段，导致孔洞下端的剪切应变急剧上升。对于矩形和马蹄形孔试样，在加载初期，结构面和靠近结构面侧壁的监测点的应变变化速率明显大于其他监测点，这些位置经历了显著的剪切变形。随着加载的继续，矩形孔试样中远离结构面的侧壁监测点 P_1 和 P_3 的应变变化速率无明显变化，而马蹄形孔试样中拱顶 P_1 的应变快速上升，其他相同位置处的应变变化速率大于矩形孔和圆形孔试样。总的来说，试样的应变变化过程可以分为三个不同阶段：(1)应变萌生阶段(oa)：试样以靠近结构面的侧壁和结构面之间的剪切应变集中为主要特征。(2)应变快速上升阶段(ab)：试样中形成宏观贯通裂纹，应变突然快速增加。(3)峰后早期破坏阶段(bc)：裂纹进一步扩展贯通，应变集中增强导致试样发生最终的剪切破坏。



(a) Specimen with circle hole



(b) Specimen with rectangle hole



(c) Specimen with horseshoe hole

图 16 各监测点的应变演化过程

Fig. 16 Development of the strain evolution of monitoring points

3 讨论

3.1 结构面应力遮挡效应

之前的研究发现对于不含结构面的孔洞试样, 高应变集中区域主要沿孔洞端部分布^[43-44]。图 17 分别显示了含圆形、矩形和马蹄形孔试样在动荷载作用下的整体剪切破坏。裂纹一般从孔洞的端部以及马蹄形孔洞的拐角处开始萌生。随着裂纹的扩展, 破坏区逐渐形成, 应力强度因子得到增强, 孔洞的端部和拐角处是岩石结构最容易开裂的位置。然而对于含结构面-孔洞试样, 结构面的存在改变了动载应力波的传播路径, 如图 18(a)所示。初始应力波 σ_0 通过节理裂隙面时会衰减为低能量应力波 σ_1 , 由于应力波的衍射作用, 会形成斜上传播的应力波 σ_2 , 并且来自初始应力波 σ_0 的部分能量转移到 σ_1 当中。因为应力波 σ_1 和 σ_2 的大小和方向不同, 导致形成剪切应力分量, 进一步诱发剪切裂纹向孔洞顶端延伸扩展。冲击荷载作用下孔洞两侧破坏机制可以归因于几个方面: 首先, 结构面显著改变了孔洞周围的应力分布和裂纹扩展路径, 裂纹先从结构面两端萌生, 逐渐向孔洞端部扩展。另外, 结构面的存在对裂纹的扩展具有应力遮挡效应, 其核心机理是当结构面存在时, 相邻裂纹的应力场在空间上发生重叠, 改变了主裂纹尖端的局部应力分布, 裂纹尖端的应力强度因子由 K_{IC}^1 转变为 K_{IC}^2 。随着裂纹的扩展, 各种断裂因子也会发生变化, 裂纹间的相互作用导致系统内能量的重新分配, 显著改变了裂纹的扩展路径。随着动荷载的增大, 新裂纹沿破坏区方向逐渐扩展, 裂纹长度不断增加, 应力强度因子也随之增大, 试样由剪切裂纹主导的剪切破坏逐渐转变为拉伸剪切混合破坏, 这说明在不同动荷载作用下结构面和孔洞对破坏路径的协同控制改变了试样的整体破坏模式。

在地下工程中, 受结构面的影响, 岩石爆裂可能发生在硐室的不同位置, 如硐顶、侧壁和硐底, 如图 18(b)所示, 硐室往往遭受严重的局部失稳, 包括岩爆和大规模岩块剥离, 出现明显的 V 形损伤区, 这一结论已被以往关于结构面诱导失稳机制的研究广泛支持。例如, Xiao 等^[45]报告了由结构面硐室顶板变形导致的围岩弯曲变形, 岩爆在爆破后立即发生, 并且破坏区倾向于呈现 V 型缺口。当拱顶上部硬岩区域分布有少量的结构面时, 在开挖过程中这些区域通常会受到结构面的控制, 导致拱顶出现岩石碎块塌陷, 甚至出现明显的剪切滑移破坏。Huang 等^[46]强调了硐室基底隆起引起开裂风险。硐室开挖后的基底处于径向卸荷和应力释放的状态, 在动态扰动下易发生向上的回弹变形。结构面和动态扰动使岩体被切割成块体, 整体性降低, 相同条件下更容易发生塑性变形和回弹隆起。这些研究证实, 结构面和硐室的相互作用是决定其影响程度的关键因素, 围岩变形过程中的能量传递和应力重分布显著影响硐室的力学响应和破坏行为。在结构面的影响下, 硐室临近结构面的一侧通常会形成弱化区, 随着冲击荷载的增大, 影响会迅速扩张并且逐渐增强, 因此需要根据测试结果在易发生破坏位置进行支护设置, 且支护设计方案应该以增强周围岩石稳定性, 减少岩石爆裂发生为主要目的。

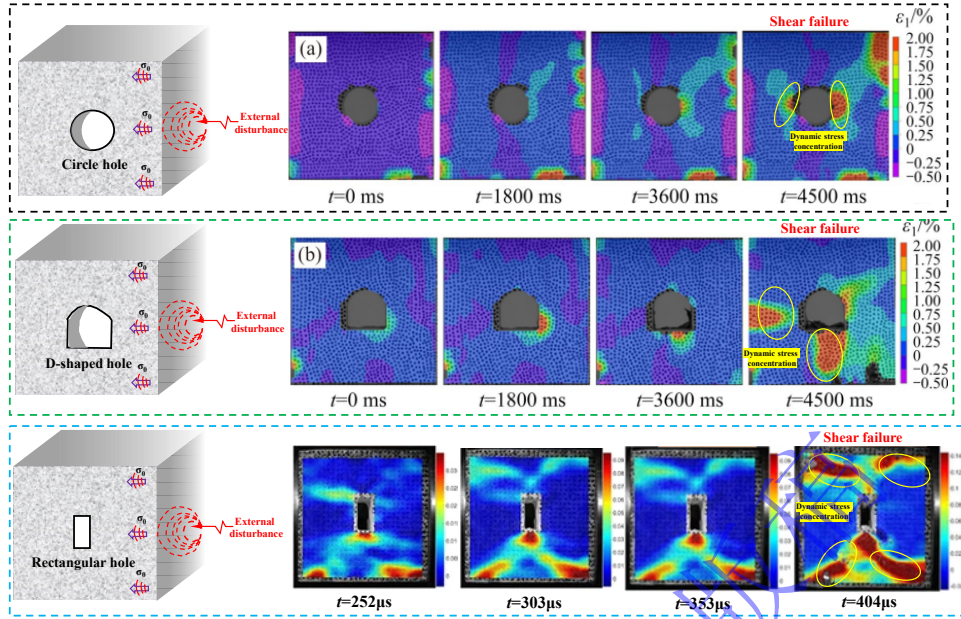


图 17 不含结构面的孔洞周边应变变化^[41-42]

Fig.17 Strain change around the hole without structural plane^[41-42]

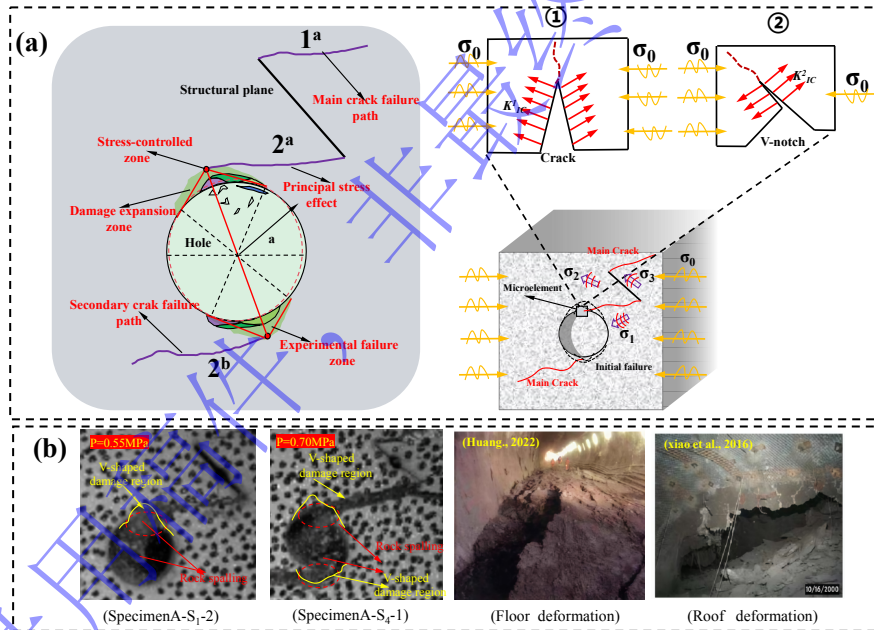


图 18 结构面应力遮挡效应及应力控制破坏路径示意图

Fig.18 Schematic diagram of the structure plane stress shielding effect and stress-controlled failure path

3.2 对地下工程建设的启示

基于本研究成果可以总结出地下硐室在爆破开挖作用下的易损伤区域，如图 19 所示。对于马蹄形硐室，无论爆破荷载条件如何，硐室拐角处的应力集中效应明显大于其他位置^[47]，拐角处是硐室结构最容易开裂的部位，由于该区域应力集中较强，这有利于裂纹的萌生扩展，导致硐室的早期破坏，因此在其支护和加固设计中应该特别注意。在硐室爆破施工中，建议将围岩的实际扰动荷载控制在临界损伤扰动荷载之下，从而降低硐室周围裂纹扩展贯通的风险。对于室内试验，临界损伤扰动荷载的识别方法可以采用 DIC 全场应变演化、应力应变曲线拐点和损伤变量突增点等联合判断，将试样内部首次出现稳定应变集中、损伤演化速率发生突变对应的荷载定义为该工况下的临界损伤扰动荷载。然而该临界指标受到试样尺寸、边界条件和应力波效应的控制，不能直接作为地下工程现场扰动控制阈值，仅可用于判断室内岩样在冲击扰动下的损伤起裂条件，后续需结合多尺度修正模型实现室内指标向工

程判据的转换。此外硐室与围岩结构面之间的相互作用导致结构面附近区域的能量升高, 裂纹向围岩内部扩展, 该区域为爆破扰动下的高风险区, 可以采取增加衬砌厚度和加长加密锚杆等措施控制岩石破裂。锚固结构的动力损伤本质上是动荷载附加裂隙扩展耦合作用的结果^[48]。根据损伤破坏机理, 对于变形强烈、破坏范围广的地下硐室, 应充分考虑动载应力波和裂纹扩展对锚固承载结构不同区域的影响。硐室不同位置的锚固支护参数需要合理调整, 并且结合断面形状和结构面位置测试不同应力波的能量耗散规律和锚固承载结构的抗冲击性能, 最大限度的降低动态应力波对硐室中锚固承载结构的破坏。

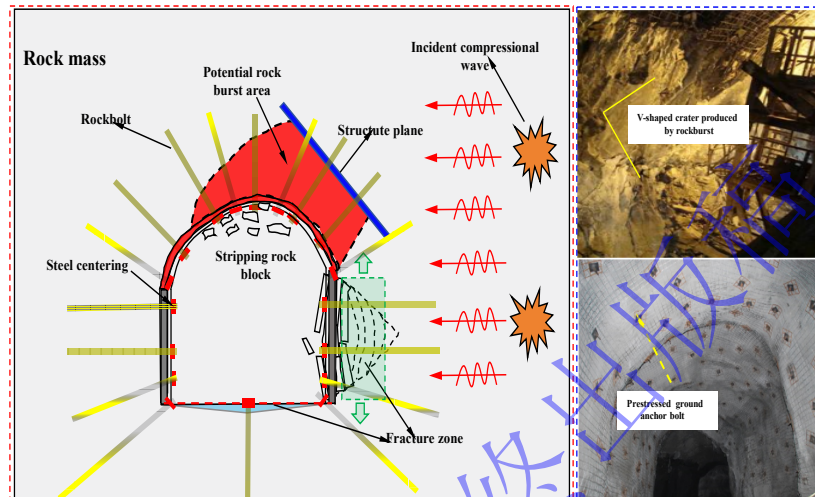


图 19 地下硐室围岩的典型破坏机制与调控策略

Fig.19 Typical failure mechanism and control strategy of underground caverns

3.3 不足之处

由于本文是基于小试样尺寸而非工程尺寸进行的, 因此试验中岩石的损伤破坏与实际工程存在一定的差异。研究发现孔洞形状和应变速率对试样的动态力学特性具有重要影响, 但分析中缺乏变量独立性验证, 导致结论的说服力不足。考虑到试验离散性和样本数量的限制, 采用相似应变速率条件下分组对比的方式开展分析, 但该方法仅能在一定程度上弱化多变量耦合带来的干扰。今后将运用回归或者无量纲分析对不同孔洞形状和多种冲击荷载组合加载下岩石的损伤破坏过程及机制进行研究。此外, 为了验证试验结果对地下爆破工程的指导建议, 未来有必要开展数值模拟试验, 其中需要特别注意二维模型在模拟真实三维爆破时的边界效应处理, 例如模型侧向断面边界设置无反射和透射边界, 使向外传播的应力波可以直接透过计算区域, 进一步消除断面边界造成的应力波虚假反射, 避免非物理的反射波干扰试样核心区域的裂纹扩展和应力演化; 杆件与试样之间的设置面接触引入库仑摩擦模型, 这样能够较好地复现 SHPB 试验中杆-试样端面摩擦约束效应; 孔洞内壁设置自由边界条件, 结构面采用接触面单元表征其力学行为。通过开展三维爆炸模型试验和建立岩石三维空间结构, 可以真实反映球面应力波传播、多自由面反射以及波场空间耦合的全过程, 进一步分析爆炸应力波作用下内部孔洞与结构面之间的相互作用和结构面对岩石爆破过程中裂纹空间分布的影响, 从而弥补二维平面模型的不足, 提升研究成果对地下爆破工程的参考价值。

4 结论

本研究采用室内试验方法和理论推导, 研究了试样动态力学性能、破碎状态、损伤演化和裂纹扩展规律。结合断裂力学和能量耗散理论推导出了损伤力学模型, 利用数字图像相关技术对试样的断裂过程进行了记录和分析, 总结了结构面和孔洞相互作用下试样裂纹的扩展过程和最终的破坏模式, 主要结论如下:

(1) 随着应变速率的增大, 试样的动态强度和弹性模量整体呈上升趋势。在较小应变速率作用下矩形和马蹄形孔试样的应力应变曲线表现出明显的回弹现象, 呈现出 II 型断裂特征, 但随应变速率的

增大表现出 I 型断裂特征。圆形孔试样的应力应变曲线始终表现出 I 型断裂特征。在近似应变速率作用下, 圆形孔洞试样的动态强度最大, 矩形和马蹄形孔洞试样相差不大。

(2) 岩石的损伤破坏是由孔洞和结构面共同决定的。在近似应变速率作用下, 马蹄孔试样的破碎程度较大, 而圆形和矩形孔试样的破碎程度相差不大。随着应变速率的增大, 不同孔洞试样的破坏程度增强, 试样由剪切破坏逐渐转变为拉伸剪切混合破坏。

(3) 在较小应变速率作用下, 结构面和孔洞产生的宏观裂纹的扩展方向与结构面大致呈 90° 。随着应变速率的增大, 新的应变集中主要发生在圆形和矩形孔试样的下端以及马蹄孔试样的左侧壁拐角位置。在较大应变速率作用下, 试样中出现了沿加载方向扩展的拉伸应变区。由于微裂纹在试样中逐渐积累, 产生了多个突出的应变集中区, 这些微裂纹最终演变成拉伸剪切裂纹。

(4) 孔洞和结构面应力场的相互作用改变了裂纹的扩展方向, 冲击荷载进一步调节能量释放, 主导损伤区不断扩展。随着冲击荷载的增大, 结构面的应力遮挡效应被削弱, 呈现出裂纹数量和范围的显著增加。裂纹的起裂位置不受动荷载和孔洞形状变化的影响, 起裂是一个临界状态, 动荷载只影响到达该状态的时间。

参考文献:

- [1] 闻磊, 冯文杰, 李明烨, 等. 不同加载条件下含裂隙岩石裂纹扩展特征及能量演化机制试验研究[J]. 实验力学, 2025, 40(01): 30-48. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2025.01.004.
WENG L, FENG W J, LI M Y, et al. Crack propagation and energy evolution mechanisms of rocks containing pre-existing cracks under different loading conditions[J]. Journal of experimental mechanics, 2025, 40(01): 30-48. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2025.01.004.
- [2] 戴兵, 单启伟, 罗鑫尧, 等. 含孔洞岩石在静应力下的循环冲击试验研究[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(04): 531-540. DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2020.04.193.
DAI B, SHAN Q W, LUO X Y, et al. Cyclic Impact Test of Hole-bearing Rock Under Static Stress[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(04): 531-540. DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2020.04.193.
- [3] 李晓锋, 李海波, 刘黎旺, 等. 冲击荷载作用下岩石动态拉伸破坏特征及细观机制[J]. 岩土力学, 2025, 46(08): 2387-2398. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1640.
LI X F, LI H B, LIU N W, et al. Tensile failure characteristics and mesoscopic mechanism of rocks under impact loading[J]. Rock Soil Mechanics, 2025, 46(08): 2387-2398. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1640.
- [4] DONG Z H, WANG P T, LI P, et al. Dynamic Crack Initiation in Holed and Jointed Rock Masses: A Maximum Energy Release Rate Criterion and Parametric Influences[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2025, 100261. DOI: 10.1016/j.rockmb.2025.100261.
- [5] DONG Z H, CAI M F, MA C, et al. Rock damage and fracture characteristics considering the interaction between holes and joints[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 133: 104628. DOI: 10.1016/j.tafmec.2024.104628.
- [6] WANG M, LU Z X, ZHAO Y L, et al. Peak strength, coalescence and failure processes of rock-like materials containing preexisting joints and circular holes under uniaxial compression: Experimental and numerical study[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 125: 103898. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103898.
- [7] ZHANG H D, ZHOU L, NIE F K, et al. Experimental and numerical research on crack extension behavior of multi-cracked rock based on discrete element method[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 138: 104944. DOI: 10.1016/j.tafmec.2025.104944.
- [8] LI S, LIN H, CAO R H, et al. Mechanical behavior of rock-like specimen containing hole-joint combined flaw under uniaxial loading: findings from DIC and AE monitoring[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 3426-3449. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.102.
- [9] 冯帆, 赵兴东, 陈绍杰, 等. 结构面位置对于深部高应力采动硬岩巷道破坏的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(08): 2588-2600. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.08.007.

- FENG F, ZHAO X D, CHEN S J, et al. Effect of structural plane position on hard tunnel failure during excavation unloading subjected to high stresses in deep level mines[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(08): 2588-2600. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.08.007.
- [10] WANG Z Y, LIN H, FENG X L, et al. Fracture characteristics and damage mechanisms of heat-treated sandstone with combined hole-joint flaws under uniaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 136: 104845. DOI: 10.1016/j.tafmec.2025.104845.
- [11] LI P, CAI M F, GAO Y B, et al. Fracture evolution and failure behavior around an opening in brittle jointed rocks subjected to uniaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122: 103651. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103651.
- [12] CHEN H, LAI H P, XIE T L, et al. Experimental and numerical study of granite blocks containing two side flaws and a tunnel-shaped opening[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 104: 102394. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102394.
- [13] SHAO Y L, LEEM J S, KIM J, et al. Experimental insights into tunnel stability affected by offset distance from fully non-persistent structural planes with inclination using 3D-printed physical models[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2026, 168: 107237. DOI: 10.1016/j.tust.2025.107237.
- [14] 蔡鑫, 陈立业, 周子龙, 等. 扰动诱发高应力岩石动力响应及岩爆灾变机制[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(07): 2463-2475. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2023-44678.
- CAI X, CHEN L Y, ZHOU Z L, et al. Dynamic response law of high-stressed rock triggered by dynamic loading and mechanism of rockburst occurrence[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(07): 2463-2475. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2023-44678.
- [15] 王智德, 钱梦凡, 李杰, 等. 高应变率冲击荷载下节理花岗岩损伤机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(07): 1917-1928. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1228.
- WANG Z D, QIAN M F, LI J, et al. Damage mechanism of jointed granite under high strain rate impact loading[J]. Rock Soil Mechanics, 2024, 45(07): 1917-1928. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1228.
- [16] 李晓锋, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2393-2405. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0539.
- LI X F, LI H B, LIU K, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rock subject to impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2393-2405. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0539.
- [17] FENG P, LIU B, TANG R, et al. Dynamic fracture behaviors and fragment characteristics of pre-compressed flawed sandstones[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 220: 107162. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107162.
- [18] 平琦, 胡薇, 孙施佳, 等. 弱酸液腐蚀下砂岩物理特性和冲击动力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(S1): 31-41. DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0392.
- PING Q, HU W, SUN S J, et al. Experimental study on physical properties and impact dynamics of sandstone under weak acid liquid corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(S1): 31-41. DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0392.
- [19] 戴兵, 赵桂锋, 张雷, 等. 不同加载速率作用下含平行裂隙岩石的试验研究: 能量耗散与损伤演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3397-3412. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0283.
- DAI B, ZHAO G F, ZHANG L, et al. Experimental study of rock with parallel cracks under different loading rates: energy dissipation and damage evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3397-3412. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0283.
- [20] 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. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106755.

- [21] 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. DOI:10.1016/j.tafmec.2023.103893.
- [22] 龚爽, 赵毅鑫, 周磊, 等. 冲击荷载作用下含双孔洞裂纹石灰岩动态断裂行为[J]. 煤炭学报, 2023, 48(08): 3030-3047. GONG S, ZHAO Y X, ZHOU L, et al. Dynamic fracture behavior of limestone specimens containing double holes and crack under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(08): 3030-3047. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1171.
- [23] 吴浩, 凡奥奇, 贾永胜, 等. 冲击动载下含孔洞岩石的力学特性及破裂机制[J]. 爆破, 2023, 40(04): 1-12. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.001. WU H, FAN A Q, JIA Y S, et al. Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Pre-holed Rock under Impact Load[J]. Blasting, 2023, 40(04): 1-12. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.001.
- [24] 王雁冰, 张瑶瑶, 聂俊文, 等. 冲击荷载下含孔洞砂岩的力学特性[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(01): 78-88. WANG Y B, ZHANG Y Y, NIE J W, et al. Mechanical properties of sandstone with holes under impact load[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(01): 78-88. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20221212.001.
- [25] 戴兵, 罗鑫尧, 单启伟, 等. 循环冲击荷载下含孔洞岩石损伤特性与能量耗散分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(07): 69-77. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.07.011. DAI B, LUO X Y, SHAN Q W, et al. Analysis on damage characteristics and energy dissipation of rock with a single hole under cyclic impact loads[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(07): 69-77. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.07.011.
- [26] 周子龙, 孙景楠, 王海泉, 等. 冲击荷载作用下孔洞花岗岩的应变演化及破坏特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(03): 681-692. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.03.008. ZHOU Z L, SUN J N, WANG H Q, et al. Strain evolution and failure characteristics of granite with cavities under impact load[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(03): 681-692. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.03.008.
- [27] QIU J D, XIE H P, ZHU J B, et al. Dynamic response and rockburst characteristics of underground cavern with unexposed joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105442. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105442.
- [28] LI P, CAI M F, GAO Y B, et al. Dynamic mechanical behavior and cracking mechanism of cross-jointed granite containing a hole[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 572-1594. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.12.034.
- [29] DONG Z H, WANG P T, LI P, et al. Dynamic Crack Initiation in Holed and Jointed Rock Masses: A Maximum Energy Release Rate Criterion and Parametric Influences[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2025, 100261. DOI: 10.1016/j.rockmb.2025.100261.
- [30] 赵华涛, 陶明, 李夕兵, 等. 一维动静组合加载下圆柱孔洞花岗岩的力学性能及破裂特征[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(09): 3077-3091. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43692. ZHAO H T, TAO M, LI X B, et al. Mechanical characteristics and fracture mechanism of cylindrical hole granite under one-dimensional coupled static-dynamic load[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(09): 3077-3091. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43692.
- [31] 李地元, 胡楚维, 朱泉企. 预制裂隙花岗岩动静组合加载力学特性和破坏规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(06): 1081-1093. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1089. LI D Y, HU C W, ZHU Q Q, et al. Experimental study on mechanical properties and failure laws of granite with an artificial flaw under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(06): 1081-1093. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.1089.
- [32] 金解放, 徐虹, 余雄, 等. 动荷载和含水率对红砂岩破坏及能耗特性的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3231-3240. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2128.

- JIN J F, XU H, YU X, et al. Effect of dynamic load and water content on failure and energy dissipation characteristics of red sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3231-3240. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2128.
- [33] 刘享华, 张科, 李娜, 等. 含孔双裂隙 3D 打印类岩石试件破裂行为定量识别[J]. *岩土力学*, 2021, 42(11): 3017-3028. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0521.
- LIU X H, ZHANG K, LI N, et al. Quantitative identification of the failure behavior of the 3D printed rock-like specimen with one hole and two flaws[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(11): 3017-3028. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0521.
- [34] YAN Z L, DAI F, LIU Y, et al. Experimental investigations of the dynamic mechanical properties and fracturing behavior of cracked rocks under dynamic loading[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79:5535-5552. DOI: 10.1007/s10064-020-01914-8.
- [35] TAO M, LUO H, ZHANG D Z, et al. Experimental and numerical study of the dynamic tensile response and failure mechanisms of rock tunnels with different cross-sections[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2026, 145(2):105663. DOI: 10.1016/j.tafmec.2026.105663.
- [36] 王磊, 徐敬皓, 张慧梅, 等. 冲击作用下红砂岩动态破坏的围压效应[J]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(7): 104-116. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0304.
- WANG L, XU J H, ZHANG H M, et al. Confinement effect of dynamic failure of red sandstone under impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2026, 46(7): 104-116. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0304.
- [37] HE Z L, WANG F, DENG J H, et al. Fracture and energy evolution of rock specimens with a circular hole under multilevel cyclic loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 127: 103996. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103996.
- [38] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, (19): 3226-3231. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.19.008.
- CAO W G, ZHAO M H, LIU X C. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, (19): 3226-3231. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.19.008.
- [39] Cherepanov GP. *Mechanics of Brittle Fracture*[M]. New York: McGrawHill; 1977.
- [40] TAO M, MA A, CAO W Z, et al. Dynamic response of pre-stressed rock with a circular cavity subject to transient loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 99: 1-8. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.09.003.
- [41] JU Y, XING Y D, WANG S Y, et al. Visualizing the full-field stress and plastic zones in arch tunnel surrounding rocks embedded with roadway-scale discontinuities using 3D printed transparent models and stress freezing techniques[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 163: 106772. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106772.
- [42] Bobet A. The initiation of secondary cracks in compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 66(2): 187-219. DOI: 10.1016/s0013-7944(00)00009-6.
- [43] NIE F K, Zhou L, WANG H H, et al. Mechanical properties and fracture evolution of tunnel surrounding rock under the coupling effect of static and dynamic loads[J]. *Journal of Central South University*, 2026, 33: 1307-1331. DOI: 10.1007/s11771-026-6217-2.
- [44] TAN L H, REN T., DOU L M, et al. Dynamic response and fracture evolution of marble specimens containing rectangular cavities subjected to dynamic loading[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 7701-7716. DOI: 10.1007/s10064-021-02425-w.
- [45] XIAO Y M, FENG X T, LI S J, et al. Rock mass failure mechanisms during the evolution process of rockbursts in tunnels[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 83: 174-181. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.01.008.
- [46] HUANG L Q, SI X F, LI X B, et al. Influence of maximum principal stress direction on the failure process and characteristics of D-shaped tunnels[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(5): 1125-1143. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.07.004.

- [47] 杨书浩, 王俊, 宁建国, 等. 动载扰动下深部大断面硐室围岩“帮-顶”联动失稳机理[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 23-33. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.10.004.
- YANG S H, WANG J, NING J G, et al. Mechanism of connected instability of “rib—roof” in deep large section chamber under dynamic disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 23-33. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.10.004.
- [48] Fan D, Liu X, Tan Y et al. Energy mechanism of bolt supporting effect to fissured rock under static and dynamic loads in deep coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 34(3): 371-384. DOI: 10.1016/j.ijmst.2024.03.001.

录用稿件，
非最终出版稿