DOI：10.11883/bzycj-2025-0304

冲击作用下红砂岩动态破坏的围压效应

王 磊[1]，徐敬皓[1]，张慧梅[2]，陈世官[1]，王远鹏[1]

（1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院，西安 710054；

2. 西安科技大学 理学院，西安 710054；

摘 要：为研究隧道、煤矿围岩在掘进过程中爆破引起的扰动作用，亟需掌握围压条件下红砂岩在动态荷载下的力学响应、破坏模式及能量耗散特性。本研究采用自主研发主动围压控制装置的霍普金森压杆（SHPB）试验系统，对红砂岩试件进行不同围压等级下的动态压缩试验。以探讨红砂岩在冲击荷载作用下的动态力学响应、破坏模式和能量耗散机制。试验结果表明：无围压状态下应力-应变曲线呈现“两阶段”特征，而随着围压增加应力-应变曲线由“两阶段”向“三阶段”变化。围压显著增强了红砂岩的动态抗压强度与峰值应变，二者均表现出显著的应变率效应与围压效应。破坏模式和能量耗散方面，无围压时，岩石试件在较高应变率作用下发生粉碎性破坏；而在围压条件下，试样的破坏程度显著减轻，最终表现为压剪破坏。在相同围压条件下，反射能、反射率随应变率的提高而增长，透射能随着应变率提高而增大，透射率随着应变率提高而减小；相同应变率条件下，随着围压增大，岩石反射能、反射率减小，透射能增加和透射率增加；试件动态破坏时，耗散能受应变率与围压协同调控，当围压恒定时，耗散能及耗散率随应变率增大而增加；当应变率恒定时，二者随围压增大而减小。

关键词：红砂岩；围压；SHPB；破坏模式；能量耗散

中图分类号：TU452 **文件标识码**：A

Confinement effect of dynamic failure of red sandstone under impact

WANG Lei[1]，XU Jinghao[1]，ZHANG Huimei[2]，CHEN Shiguan[1]，WANG Yuanpeng[1]

(1. *School of Architecture and Civil Engineering，Xi'an University of Science and Technology，Xi'an 710054；*

2. *School of Science，Xi'an University of Science and Technology，Xi'an 710054，China*)

Abstract: To investigate study the disturbance caused by blasting in the excavation process of tunnel and coal mine surrounding rock, it is urgent to master the mechanical response, failure mode and energy dissipation characteristics of red sandstone under dynamic load under confining pressure. In this study, the Hopkinson pressure bar (SHPB) test system with self-developed active confining pressure control device was used to carry out dynamic compression tests on red sandstone specimens under different confining pressure levels. In order to explore the dynamic mechanical response, failure mode and energy dissipation mechanism of red sandstone under impact load. The test results show that the stress-strain curve presents the characteristics of ' two stages ' under the condition of no confining pressure, and the stress-strain curve changes from ' two stages ' to ' three stages ' with the increase of confining pressure. The confining pressure significantly enhances the dynamic compressive strength and peak strain of red sandstone, both of which show significant strain rate effect and confining pressure effect. In terms of failure mode and energy dissipation, when there is no confining pressure, the rock specimen is crushed under the action of higher strain rate. Under the condition of confining pressure, the damage degree of the sample is significantly reduced, and finally it is manifested as compression-shear failure. Under the same confining pressure, the reflection energy and reflectivity increase with the increase of strain rate, the transmission energy increases with the increase of strain rate, and the transmittance decreases

收稿日期：2025-09-15；**修回日期**：2025-12-09

基金项目：国家自然科学基金项目（12172280）

作者简介：王磊（1982－），男，博士，副教授，E-mail:wl2013@xust.edu.cn。

通讯作者：徐敬皓（1996－），男，硕士生，E-mail:19272994150@163.com

with the increase of strain rate. Under the condition of the same strain rate, with the increase of confining pressure, the rock reflection energy and reflectivity decrease, the transmission energy and transmittance increase ; when the specimen is dynamically damaged, the dissipation energy is regulated by strain rate and confining pressure. When the confining pressure is constant, the dissipation energy and dissipation rate increase with the increase of strain rate. When the strain rate is constant, both decrease with the increase of confining pressure.

Key words: red sandstone; confining pressure; SHPB; destruction mode; Energy dissipation

近年来，随着我国地下工程开发与建设不断向西部推进，而西部地层多为红砂岩[1-4]，在矿山开采、隧道建设等常受到岩体赋存地质条件的影响，工程所处地质环境日趋复杂[5-8]。在地下工程掘进过程中，围岩承受爆破、地震等动载。致使红砂岩地层稳定性遭到破坏，在不同应力状态下，爆破开挖的冲击作用使岩石裂隙不断发展，影响围岩动态强度，降低其自稳能力，严重威胁地下工程安全[9-10]。因此，本文重点研究不同围压条件下冲击荷载对红砂岩动态力学行为及能量耗散机制的影响规律。

近些年，不少学者利用霍普金森压杆[11]（SHPB）开展一维动静组合加载试验，模拟红砂岩地质条件下，地下工程开挖爆破扰动引起的围岩响应。研究发现，红砂岩的力学性质和破坏模式与其尺寸[12-14]、粗糙度[15-16]、含水率[17]、裂隙[18-19]等参数有着密切的关联。红砂岩的动态力学特性与破坏模式已通过理论分析、室内试验和数值模拟等方法进行广泛研究。理论分析方面于洋[20]基于朱-王-唐本构模型，引入了损伤体构建的黏弹塑性动态本构方程，反映了红砂岩在受荷变形过程中所表现出的损伤软化、黏弹性和黏塑性等，并且也反映出冻融损伤对红砂岩动态力学特性的影响。Li[21]并提出了考虑应变率和温度的动态损伤本构模型。樊赖宇[22]引入长期强度与扰动能量的相关性，动态扰动单元和扰动-损伤黏性元件，建立了黏塑性扰动损伤蠕变模型，该模型可以描述砂岩在静态恒载和动态扰动组合作用下的瞬态变形和蠕变行为。在数值模拟方面，颗粒离散元法和连续-离散耦合法已应用于模拟岩体的 SHPB（split Hopkinson pressure bar）试验中[23-25]。室内试验方面采用霍普金森压杆（SHPB），汤俊[26]通过预制红砂岩和型煤的煤岩组合体，煤岩组合体试件动态断裂韧度存在明显的应变率效应，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。金解放[27]研究动荷载和含水率对岩体破坏和能耗特性的影响发现同一冲击速度下，能量透射率和含水率具有指数函数关系且呈负相关，能量耗散率随含水率先增大后减小且具有二次函数关系，同一含水率下，能量透射率和冲击速度呈负相关，能量耗散率和冲击速度呈正相关；张慧梅等[28]通过研究红砂岩在受到不同加载速率、不同次数扰动冲击的能量耗散与分形特征。发现在不同速率扰动冲击作用下，低速率扰动冲击下试样的能量利用率更高，贾蓬[29]发现冻结红砂岩的峰值强度、耗散能、能量利用率随饱和度的增加均呈先减小后增大再减小的三段式分布规律，且具有明显的应变率效应。上述研究成果为浅地表岩体工程的安全、高效的爆破开挖提供了重要理论支撑与实践指导。

随着深部工程的开发，围岩体处于三维地应力环境，围压决定其初始孔隙结构与静态损伤程度，又直接影响波阻抗特性及动态力学响应行为。诸多学者开始研究试件在围压条件下的动、静态力学性质，开展了多种试验，包括三轴剪切试验、带围压装置的动态冲击试验。在三轴剪切方面，Kun[30-31]等通过声发射特性分析，砂岩常规三轴压缩破坏以剪切裂纹为主导，围压越小越促进剪切破坏、越大则抑制；同时明确了常规三轴压缩与变角剪切试验中，计算内聚力和内摩擦角的适宜数据集选取范围。吴琳[32-33]等总结砂土高应变率冲击试验与数值模拟现状及问题，通过板壳理论简化 SHPB 被动围压试验套筒并分析其力学规律，同时指出岩石动态破坏能量特征对深部岩体研究的重要性。马冬冬[34-36]等通过主动加压 SHPB 试验，揭示了不同围压下冻结黏土与砂土的破坏及变形特征差异，并据此改进朱-王-唐模型，建立了考虑围压效应的冻结砂土动态损伤本构模型，同时明确了模型参数与损伤规律。方士正[37-38]发现轴压和围压均对岩石动态强度产生显著影响，以 8MPa 时为临界点，岩石动态强度随着轴压提升呈先增加后减小的趋势，但岩石动态强度随着围压的增加持续增大；岩石耗散能随着轴压的增加逐渐减小，在轴压较低时，耗散能随着围压的增加而减小，在轴压较高时，耗散能随围压提升表现出先增加后减小的特征；上述研究主要分析了不同地应力状态下岩石的动态力学行为及能量耗散机制，其研究成果完善了岩石动力学理论体系。

由于围岩爆破开挖时，爆破应力波的衰减作用，围岩体随着爆源位置变化，承受冲击载荷也随之变化。而对于不同冲击荷载作用下围岩体产生的动态力学行为及能量耗散机制的变化仍缺乏系统性研究。因此本研究基于带围压装置的霍普金森压杆（SHPB）试验系统，对红砂岩试样开展围压条件下的动态力学试验，重点分析围压与冲击荷载的协同作用对材料强

度特性、破坏机理及能量传播规律的影响。研究成果可为深部巷道爆破开挖中的动力灾害防控与优化设计提供理论依据。

1 试验设计方案

1.1 试件制备

本文试验岩石试样取自甘肃西北地区某矿红砂岩，依据国际岩石力学学会标准，对试样进行实验室加工处理选取完整性和均匀性较好的红砂岩（图1），加工成 50×50mm 的圆柱体试件，试样两端横截面不平行度和不垂直度均小于 0.02mm，制作完成后放入烘干箱内烘干，将离散性较大的试样剔除，经筛选符合试验要求的试件，其基本物理力学参数测定结果见表 1。

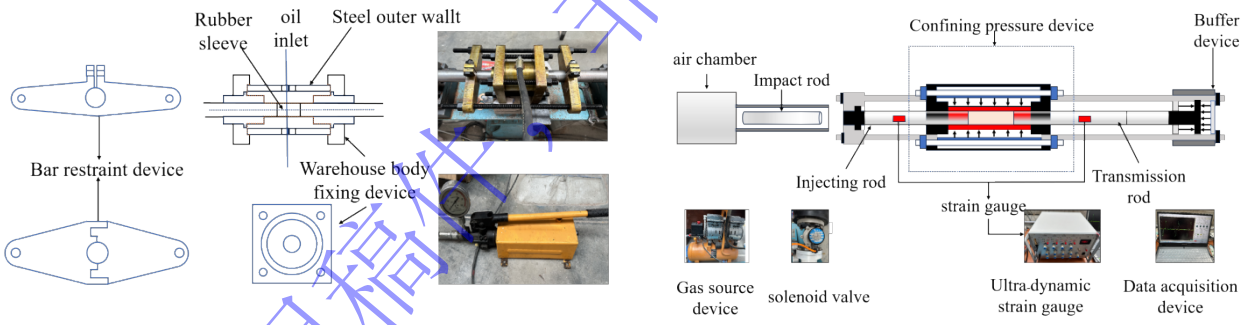
图 1 标准试样图
Fig.1 Standard specimen diagram

表 1 红砂岩基本物理力学参数
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of red sandstone

孔隙度/%	密度/kg·m^{-3}	单轴抗压强度/MPa	纵波波速/m·s^{-1}	静态弹性模量/GPa
14.30	2238	27.78	3012	9.24

1.2 试验设备

动态冲击压缩试验在直径为 50 mm 的分离式霍普金森压杆（SHPB）试验系统中进行。该系统由加载装置、杆系组件及数据采集系统三部分组成。通过在入射杆与透射杆上粘贴的应变片，分别采集入射波、反射波及透射波信号。围压采用主动加载方式，通过液压装置控制围压大小，围压仓及 SHPB 系统如图 2 所示。



(a) Schematic diagram of the enclosure andcompression chamber

(b) SHPB test system

图 2 SHPB 系统
Fig.2 SHPB system

1.3 试验方案

由于本试验所用试件取自地下约 100 米深度范围，且在立井钻爆法施工过程中承受冲击荷载作用。因此将围压条件下 SHPB 冲击压缩试验的围压等级[35]设置为 0 MPa、0.5 MPa、1 MPa 和 1.5 MPa，其中 0 MPa 作为对照组试验进行分析。具体试验方案如图 3 所示。

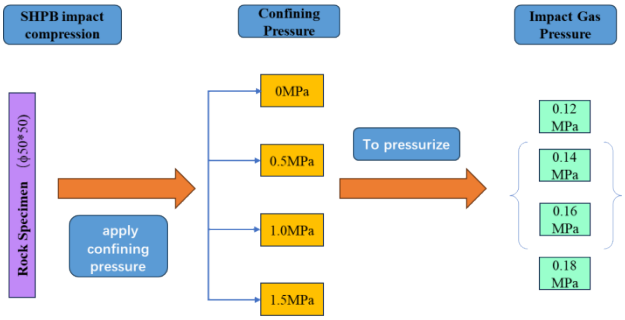


图 3 围压条件下的 SHPB 冲击压缩试验方案
Fig.3 SHPB impact compression test scheme under confining

pressure

2 实验分析

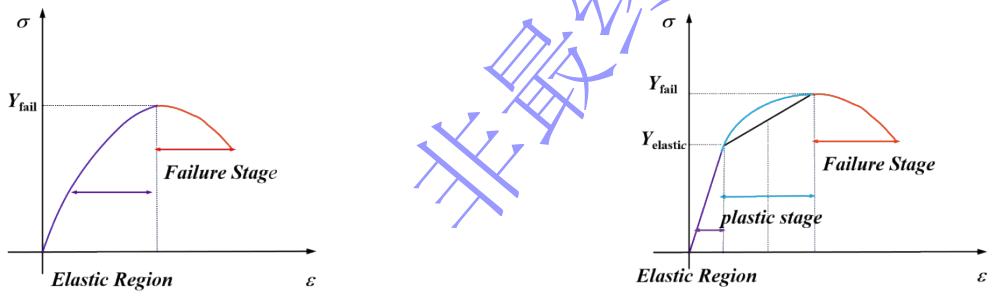
2.1 应力-应变曲线

为探究围压和应变率对红砂岩试样动态力学特性的影响，通过对原始波形数据的处理得到试样动态力学参数如表 2 所示，其“两段式”、“三段式”示意图如图 4 所示，具体应力应变曲线如图 5 所示。

比较图 5 可知，红砂岩试件应力-应变曲线的起始段近似呈直线状态，直线斜率随应变率、围压等级的提高而增大，材料的动态弹性模量表现出显著的应变率效应。从整体曲线特征来看，无围压状态下应力-应变曲线呈现“两阶段”特征，而随着围压增加应力-应变曲线由“两阶段”向“三阶段”变化，表明围压对岩样在冲击荷载作用下的力学响应具有重要影响。不同围压条件下岩样的应力-应变特征可总结如下：

（1）围压为 0 MPa 时，应力-应变曲线演化过程可划分为两个典型阶段：线弹性变形阶段与峰后应力跌落阶段，分别表征材料的储能特性与脆性破坏特征。随着应变率增大，弹性变形阶段应力-应变曲线初始斜率明显上升，反映出材料动态弹性模量具有显著的率相关性，呈现典型的应变率增强特性。

（2）围压为 0.5 MPa~1.5 MPa 时，在围压条件下，应力-应变曲线由“两阶段”逐渐演化至“三阶段”，表现出明显的应变率强化效应与围压增强效应。当应力-应变发展至一定水平后，曲线斜率明显降低，该阶段应力随应变增长趋缓，岩样内部裂隙逐步发育、扩展并贯通，导致损伤持续累积。应力达到峰值后，岩样发生宏观破坏并逐渐丧失承载能力，进入峰后软化阶段。



(a) Bilinear Stress-Strain Curve　　(b) Three-Stage Stress-Strain Curve

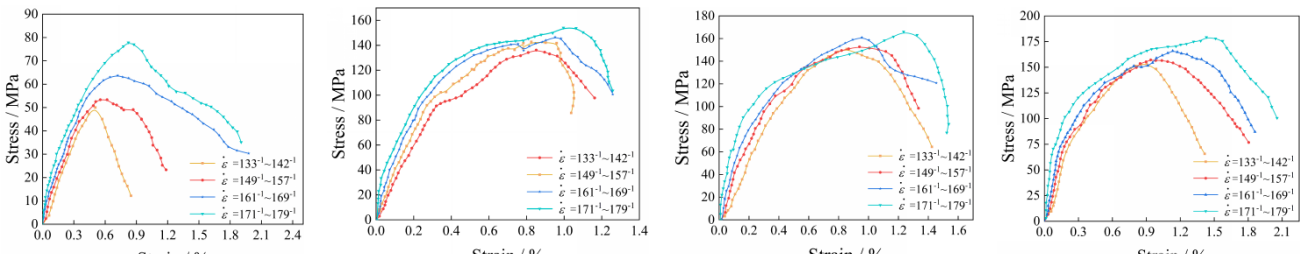
图 4 应力-应变曲线示意图

Fig.4 Stress-Strain Curve Diagram

表 2 红砂岩试件动态力学参数

Table 2 Dynamic mechanical parameters of red sandstone specimens

围压 σ_3/ MPa	应变率 $\dot{\varepsilon}$/ s^{-1}	峰值应变/ %	峰值应力/ MPa
0	133.4	0.49	48.9
	149.6	0.60	54.2
	161.3	0.76	63.6
	172.2	0.81	77.3
0.5	136.8	0.83	135.3
	155.2	0.88	139.4
	167.3	0.95	146.6
	175.8	1.12	156.5
1.0	141.2	0.84	144.2
	152.3	0.92	151.9
	169.2	0.98	158.0
	179.6	1.23	166.5
1.5	142.3	0.93	150.7
	157.8	1.07	157.9
	163.5	1.15	166.2
	177.0	1.43	178.4



(a) Confining Pressure	(b) Confining Pressure	(c) Confining Pressure	(d) Confining Pressure
$\sigma_3=0$ MPa	$\sigma_3=0.5$ MPa	$\sigma_3=1.0$ MPa	$\sigma_3=1.5$ MPa

图 5 红砂岩试件动态应力-应变曲线

Fig.5 Dynamic stress-strain curve of red sandstone specimens

2.2 应变率、围压对动态抗压强度的影响

动态抗压强度是衡量岩石在冲击荷载下极限承载能力的关键指标，红砂岩试样的动态抗压强度随应变率及围压变化的演变规律如图 6 和图 7 所示。

根据图 6 的分析结果可知，在相同围压条件下，红砂岩的动态抗压强度 σ_d 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 之间呈现出明显的线性正相关，其具体对应关系可用式 1~式 4 表示。

围压 $\sigma_3=0$ MPa

$$\sigma_d=0.69\dot{\varepsilon}-45.59,\ R^2=0.901 \tag{1}$$

围压 $\sigma_3=0.5$ MPa

$$\sigma_d=0.52\dot{\varepsilon}+62.56,\ R^2=0.881 \tag{2}$$

围压 $\sigma_3=1.0$ MPa

$$\sigma_d=0.54\dot{\varepsilon}+67.66,\ R^2=0.977 \tag{3}$$

围压 $\sigma_3=1.5$ MPa

$$\sigma_d=0.81\dot{\varepsilon}+33.55,\ R^2=0.958 \tag{4}$$

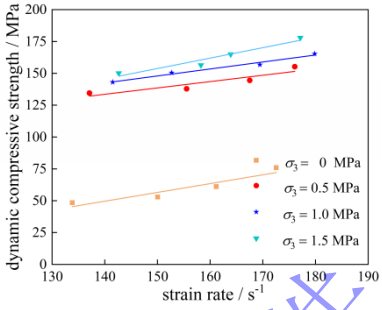


图 6 动态抗压强度随应变率变化

Fig.6 Dynamic compressive strength with strain rate variation

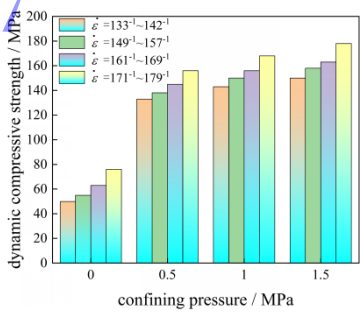


图 7 动态抗压强度随围压变化

Fig.7 Dynamic compressive strength with variation of confining pressure

分析图 7 可知，将围压值由 0 MPa 逐步提高到 1.5 MPa，当（$\dot{\varepsilon}=133\ \mathrm{s^{-1}}\sim142\ \mathrm{s^{-1}}$ 时，红砂岩试样动态抗压强度分别提升 271.1%、288.9%和 302.0%；当（$\dot{\varepsilon}=149\ \mathrm{s^{-1}}\sim157\ \mathrm{s^{-1}}$ 时，红砂岩试样动态抗压强度分别提升 257.2%、280.2%和 291.3%；当（$\dot{\varepsilon}=161\ \mathrm{s^{-1}}\sim169\ \mathrm{s^{-1}}$ 时，红砂岩试样动态抗压强度分别提升 230.5%、248.4%和 261.3%；当（$\dot{\varepsilon}=171\ \mathrm{s^{-1}}\sim179\ \mathrm{s^{-1}}$ 时，红砂岩试样动态抗压强度分别提升 202.4%、215.4%和 230.8%。由此可见，围压对岩石的动态抗压特性具有显著影响。围压作用不仅提高了岩石的破坏强度，同时增强了其整体承载能力。

2.3 应变率、围压对峰值应变的影响

岩石峰值应变表征了冲击荷载作用下岩石发生起裂时临界变形程度。为探究冲击压缩过程中红砂岩峰值应变与应变率和围压的关系，绘制不同应变率和不同围压下，红砂岩峰值应变变化曲线，具体如图 8 和图 9 所示。根据图 8 结果显示，红砂岩的动态峰值应变随应变率提高呈增长趋势，表现出显著的应变率效应。在围压 0.5 MPa~1.5 MPa 条件下，高应变率时（$\dot{\varepsilon}>160\ \mathrm{s^{-1}}$ 红砂岩试样峰值应变的应变率效应更为显著，相同围压条件下峰值应变分别增大了 17.9%、25.9%和 24.3%。根据图 9 所示，在相同应变率条件下，红砂岩的动态峰值应变随围压增大而增大。特别地，当围压从 0 MPa 增加至 0.5 MPa 时，相同应变率下试样的峰值应变增长率最大。

综上所述，红砂岩的动态峰值应变表现出显著的应变率效应与围压效应，其值随应变率及围压的提高而明显增大。这一现象表明，围压的施加使岩石材料的破坏应变增大，韧性增强，从而显著提升抗冲击能力。

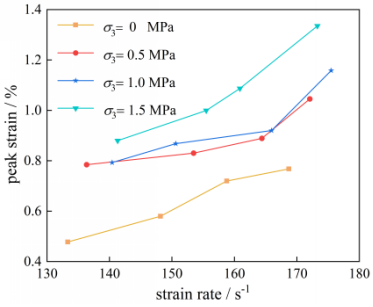


图 8 峰值应变随应变率变化曲线

Fig.8 Peak strain versus strain rate curve

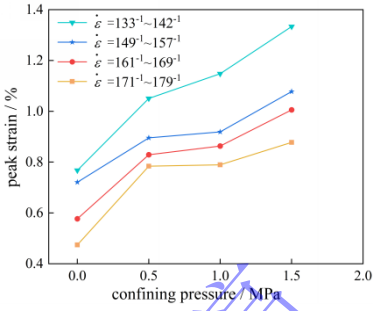


图 9 峰值应变随围压变化曲线

Fig.9 Curve of peak strain with confining pressure

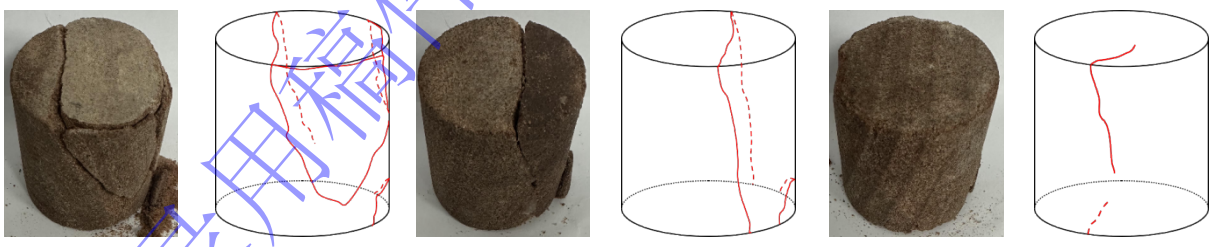
2.4 破坏模式

在冲击荷载作用下，岩体发生不可逆破坏。在轴向压缩与径向围压共同作用下，影响岩体中裂纹的萌生、扩展及最终破坏模式，围压有效抑制裂纹发展并改善其抗冲击性能。剪切裂纹通常表现为断面粗糙，伴随岩石碎屑的产生，而拉伸裂纹则因未经历压缩破碎阶段，断口表面一般比较平直，试样最终破坏模式照片如图 10 和图 11 所示。

(a)（$\dot{\varepsilon}$ = 133.4 s^{-1} (b)（$\dot{\varepsilon}$ = 149.6 s^{-1} (c)（$\dot{\varepsilon}$ = 161.3 s^{-1} (d)（$\dot{\varepsilon}$ = 171.2 s^{-1}

图 10 0 MPa 围压试件破坏模式

Fig.10 Failure mode of the 0 MPa encircling specimen



(a) 0.5 MPa confining pressure (b) 1.0 MPa confining pressure (c) 1.5 MPa confining pressure

图 11（$\dot{\varepsilon}$ = 161 s^{-1} ~ 169 s^{-1} 试件破坏模式

Fig.11 Failure mode of specimens with（$\dot{\varepsilon}$ = 161 s^{-1} ~ 169 s^{-1}

图 10 可知，无围压时，红砂岩试件在较高应变率下发生粉碎性破坏，随着应变率的提高，试件破坏后产生的碎块平均尺寸显著减小，碎块数量明显增多；当 $\dot{\varepsilon}$ = 172.2 s^{-1} 时，试件发生破碎产生大量碎屑。从图 11 可以看出，主动围压条件下与无围压条件下试样的破坏形态存在显著差异。在相同应变率下，无围压条件下，在高应变率条件下以动态张拉破坏为主导的、伴随剪切作用的粉碎性脆性断裂。而施加主动围压后，破坏模式逐渐转向延性破坏，表现为破坏程度明显减轻，宏观裂纹数量减少，整体完整性提高。这表明围压有效抑制了裂纹的扩展，增强了岩石的抗冲击破坏能力。具体而言，当围压处于 0.5 MPa～1.0 MPa 范围内时，试件发生压剪破坏，其剪切面与最大主应力方向呈约 45°夹角，最终形成较大块状结构；当围压进一步提高至 1.5 MPa 时，试件表面出现微小裂缝，从侧面破坏形态发现裂缝与轴线方向仍呈一定

夹角，表明其破坏机制仍属于压剪破坏类型，但整体结构完整性保持更好。

综上所述，未施加围压的试件在冲击荷载作用下，动态荷载迅速达到其破坏阈值，导致发生粉碎性破坏；而在施加主动围压后，试件受到较强的径向约束作用，表现出显著的增强与增韧效果，其在冲击作用下呈现由脆性向延性的转变，破坏模式由张拉破坏转为压剪破坏，减轻了冲击载荷作用下的试件破坏程度。

2.5 能量分析

岩石在动态响应中的核心物理行为表现为能量演化，其破坏本质可归结为能量主导的失稳现象。岩石变形与破坏实为能量吸收、传递与耗散的动态过程。因此，系统研究 SHPB 冲击过程中能量动态演化行为与岩石破坏的关联机制，有助于揭示冲击荷载导致岩石强度退化与结构失效的内在机理。岩石在冲击作用下从变形至破坏的整个过程，实际上是能量在系统中经历输入、储存、耗散与释放的完整响应过程。

表 3 围岩条件下红砂岩冲击能量统计表

Table 3 Statistical table of impact energy of red sandstone under surrounding rock conditions

围压/MPa	应变率/s^{-1}	入射能 W_I/J	反射能 W_R/J	透射能 W_T/J	耗散能 W_L/J
0	133.4	190.4	135.1	23.3	32.0
	149.6	206.3	138.1	34.0	34.2
	161.3	225.9	143.2	40.1	42.6
	172.2	251.3	150.1	54.2	47.0
0.5	136.8	195.4	125.3	39.0	31.1
	155.2	210.3	129.5	46.7	34.1
	167.3	230.9	133.6	55.5	41.8
	175.8	255.3	139.9	69.9	45.5
1.0	141.2	196.5	120.2	46.0	30.3
	152.3	207.3	123.4	49.7	34.2
	169.2	235.9	129.3	67.7	39.0
	179.6	262.3	132.5	85.7	44.1
1.5	142.3	197.4	114.0	59.1	24 3
	157.8	211.3	116.1	68.3	26.9
	163.5	229.9	122.7	75.6	31.6
	177.0	259.3	126.3	96.2	36.8

SHPB 实验中通过气压控制使撞击杆获得初速度并撞击入射杆，从而对试件实施冲击加载。从能量方向分析，入射波、反射波和透射波分别对应入射能 W_I、反射能 W_R 和透射能 W_T。基于一维应力波理论，可对这三种能量成分进行定量计算。分别按式（5）、式（6）及式（7）进行计算。

$$W_I = (A_0 C_0 / E_0)\int_0^t \sigma_I^2 dt \tag{5}$$

$$W_T = (A_0 C_0 / E_0)\int_0^t \sigma_T^2 dt \tag{6}$$

$$W_R = (A_0 C_0 / E_0)\int_0^t \sigma_R^2 dt \tag{7}$$

式中，A_0 为入射杆的横截面积；C_0 为应力波波速；E_0 为入射杆弹性模量；σ_I、σ_R 和 σ_T 分别为入射波、反射波和透射波的应力时程。

同时，根据能量守恒定律，忽略杆件摩擦等耗能损失，可以得到耗散的能量 W_L，即等于入射能减去反射能和透射能，如式（8）。具体试件入射能、反射能、透射能和耗散能大小如表 3。

$$W_L = W_I - (W_R + W_T) \tag{8}$$

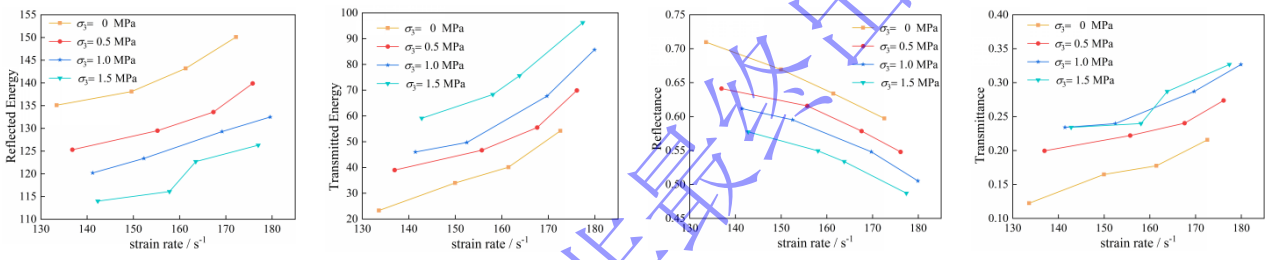
$$w_{\mathrm{R}}=\frac{W_{\mathrm{R}}}{W_{\mathrm{I}}} \tag{9}$$

$$w_{\mathrm{T}}=\frac{W_{\mathrm{T}}}{W_{\mathrm{I}}} \tag{10}$$

$$w_{\mathrm{L}}=\frac{W_{\mathrm{L}}}{W_{\mathrm{I}}} \tag{11}$$

式中: w_{R} 、 w_{T} 、 w_{L} 分别为反射能系数、透射能系数和耗散能系数，W_{I}、W_{R}、W_{T}、W_{L} 分别为岩石试件的入射能、反射能、透射能和耗散能。

红砂岩试样反射和透射随应变率的变化如图 12 所示，由图 12 可知当围压不变时，随着应变率的增加，红砂岩的反射能和透射能都显著增加。岩石反射能与透射能增加的机制可归结为两点[27,39]：其一，应变率的提升伴随入射能量的同步增长，作为入射能衍生的反射能与透射能因此呈现递增趋势；其二，应变率增大导致岩石内部裂隙的萌生、扩展乃至贯通，导致岩石波阻抗降低，更多能量反射回入射杆，并抑制了透射能的增加，因此反射系数增大而透射系数减小。在相同冲击荷载作用下，红砂岩的反射能和反射率随围压增加而降低，而透射能和透射率随之增加，这表明围压增大会使岩石内部的微小裂缝和孔隙闭合，导致反射能减弱，透射能增强。



The relationship between reflected energy and strain rate

The relationship between transmitted energy and strain rate

Relationship between reflectance and strain rate

Relationship between transmittance and strain rate

图 12 应变率和围压对反射和透射的影响

Fig.12 Effects of strain rate and confining pressure on reflection and transmission

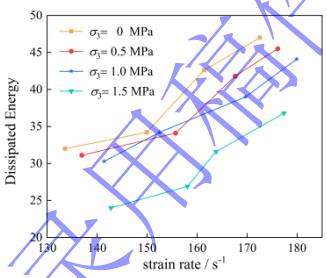


图 13 耗散能与应变率的关系

Fig.13 The relationship between dissipated energy and strain rate

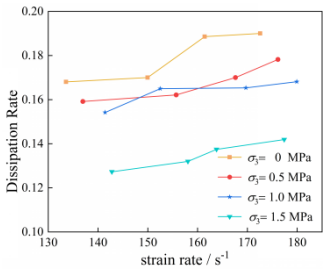


图 14 耗散率与应变率的关系

Fig.14 The relationship between dissipation rate and strain rate

在岩石动态力学研究中，反射能与透射能仅用于表征岩体的能量传递效能，而耗散能可直接量化岩石动态损伤过程中的能量消耗，因此探究耗散能的演化规律是揭示岩石内部损伤发展及强度劣化机制的核心手段。由图 13、14 所示的耗散能及耗散率与应变率的关系可知，冲击荷载作用下，围压恒定条件下，砂岩耗散能及耗散率随应变率提升呈递增趋势。岩石的破坏程度越高，则需要吸收越多的能量。冲击速度恒定条件下，红砂岩耗散能及耗散率随围压增加呈下降趋势，核心原因是调控试件内部结构、变形模式及能量传播特性：一是约束裂隙发育减少损伤耗能，二提升弹性变形占比，降低塑性耗散占比，三是波阻抗增大减少应力波传播损耗。

结果表明：（1）在相同围压条件下，反射能、反射率随应变率的提高而增长，透射能随着应变率提高而增大，透射率随着应变率提高而减小。（2）相同应变率条件下，随着围压增大，岩石反射能、反射率减小，透射能增加和透射率增加。（3）试件动态破坏时，耗散能受应变率与围压协同调控，当围压恒定时，耗散能及耗散率随应变率增大而增加；当应变率恒定时，二者随围压增大而减小。

3 结论

基于配备围压装置的 SHPB 试验系统，对红砂岩试样开展了不同围压等级与应变率条件下的动态压缩试验，系统分析了其动态力学响应、破坏模式及能量演化规律，主要研究结论如下：

（1）通过对不同应变率与围压条件下试样的动态应力-应变曲线进行分析，无围压状态下应力-应变曲线呈现“两阶段”特征，而随着围压增加应力-应变曲线由“两阶段”向“三阶段”变化。系统研究了应变率与围压对试件动态抗压强度及峰值应变的影响，结果表明：试样的动态力学参数具有显著的应变率与围压效应；围压的施加显著提高了试样的承载能力与抗冲击性能。

（2）系统分析了无围压状态和有围压状态下试样在单轴动态冲击作用下的破坏模式。无围压条件下，试件在较高应变率下发生粉碎性破坏，且随着应变率的增加，试件碎块尺寸减少且碎块数量明显增加。而在主动围压作用下，试样由粉碎性脆性破坏变为延性破坏，破坏模式由张拉破坏转为压剪破坏，减轻了试件的整体破坏程度。

（3）在相同围压条件下，反射能、反射率随应变率的提高而增长，透射能随着应变率提高而增大，透射率随着应变率提高而减小；相同应变率条件下，随着围压增大，岩石反射能、反射率减小，透射能增加和透射率增加；试件动态破坏时，耗散能受应变率与围压协同调控，当围压恒定时，耗散能及耗散率随应变率增大而增加；当应变率恒定时，二者随围压增大而减小。

参考文献：

[1] 李宇杰, 冯忠居, 朱彦鹏. 红砂岩区某深基坑支护体系力学特性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(05): 1550-1559. **DOI:** 10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2025. 05. 028.
LI Y J, FENG Z J, ZHU Y P, et al. Mechanical behavior analysis of a deep foundation pit support system in red s andstone area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2025, 33(05): 1550-1559. **DOI:** 10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2025. 05. 028.

[2] 王志杰, 李振, 徐海岩, 等. 倾角对土砂互层地层围岩稳定性的影响探究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(09): 54-59+84. **DOI:** CNKI: SUN: TDGC. 0. 2019-09-010.
WANG Z J, LI Z, XU H Y, et al. Influence of dip angle on surrounding rock stability in soil-sand interbedded strata [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(9): 54-59+84. **DOI:** CNKI: SUN: TDGC. 0. 2019-09-010.

[3] 王志杰, 徐君祥, 徐海岩, 等. 第四系富水红砂岩地层隧道围岩变形特征研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(09): 54-60+109. **DOI:** CNKI: SUN: TDGC. 0. 2018-09-011.
WANG Z J, XU J X, XU H Y, et al. Deformation characteristics of tunnel surrounding rock in quaternary water-rich red sandstone stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(9): 54-60+109. **DOI:** CNKI:SUN:TDGC. 0. 2018-09-011.

[4] 李宇杰, 冯忠居, 朱彦鹏. 兰州特殊红砂岩地层深基坑支护监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 236-240. **DOI:** CNKI: SUN: YTGC. 0. 2022-S1-042.
LI Y J, FENG Z J, ZHU Y P. Monitoring and numerical simulation analysis of deep foundation pit support in special red sandstone stratum of Lanzhou [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 236-240. **DOI:** CNKI: SUN: YTGC. 0. 2022-S1-042.

[5] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
QIAN Q H. Challenges and countermeasures for safety in underground engineering construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.

[6] 王祥秋, 周岳峰, 周治国. 爆破冲击荷载下隧道振动特性与安全性评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 134-138. **DOI:** 10. 16265/j. cnki. issn1003-3033. 2010. 11. 001.
WANG X Q, ZHOU Y F, ZHOU Z G. Vibration characteristics and safety assessment of tunnel under blasting impact loading

[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(11): 134-138. **DOI:** 10. 16265/j. cnki. issn1003-3033. 2010. 11. 001.

[7] 康永水, 耿志, 刘滨, 等. 煤矿深部巷道软弱围岩密集钻孔卸压技术与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3187-3194. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2023. 1036.

KANG Y S, GENG Z, LIU B, et al. Technology and application of intensive drilling pressure relief in soft surrounding rock of deep coal mine roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3187-3194. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2023. 1036.

[8] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(05): 1283-1305.**DOI:** 10. 13225/j. cnki. jccs. 2019. 6038.

XIE H P. Research progress of deep rock mass mechanics and mining theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(05): 1283-1305. **DOI:** 10. 13225/j. cnki. jccs. 2019. 6038.

[9] Mahdi A, Ali S, Alain R, et al. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods [J]. Underground Space, 2022, 7(4): 577-607.

[10] 张蓉蓉, 沈永辉, 马冬冬, 等. 循环冲击作用下冻融红砂岩动力学特性与损伤机理[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(08): 133-148.

ZHANG R R, SHEN Y H, MA D D, et al. Dynamic characteristics and damage mechanism of freeze-thaw red sandstone under cyclic impact loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(8): 133-148.

[11] 余浩然, 陈骏, 朱锐, 等. 一维爆炸应力波传播规律的试验方法及装置[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(02): 448-457. **DOI:** 10. 13247/j. cnki. jcumt. 20240203.

YU H R, CHEN J, ZHU R, et al. Experimental method and device for one-dimensional explosion stress wave propagation law [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(02): 448-457. **DOI:** 10. 13247/j. cnki. jcumt. 20240203.

[12] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(02): 233-243. **DOI:** 10. 13247/j. cnki. jcumt. 000477.

MENG Q B, HAN L J, PU H, et al. Experimental study on effects of size effect and strain rate on mechanical properties of rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(02): 233-243. **DOI:** 10. 13247/j. cnki. jcumt. 000477.

[13] 樊宝杰, 赵伏军, 刘永宏, 等. 大尺寸岩石在低频周期扰动载荷下的力学特性试验研究[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(03): 128-137+159. **DOI:** 10. 13578/j. cnki. issn. 1671-1556. 20221055.

FAN B J, ZHAO F J, LIU Y H, et al. Experimental study on mechanical properties of large-size rock under low-frequency periodic disturbance load [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(03): 128-137+159. **DOI:** 10. 13578/j. cnki. issn. 1671-1556. 20221055.

[14] 翟友成. 红砂岩抗压强度概率分布尺寸效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1):2649-2657. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2021. 0588.

ZHAI Y C. Experimental study on size effect of probability distribution of compressive strength of red sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S1): 2649-2657. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2021. 0588.

[15] 胡宇璇, 叶祖洋, 李硕. 实时温度下红砂岩粗糙节理剪切力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S1): 63-73. **DOI:** 10. 13225/j. cnki. jccs. 2024. 0950.

HU Y X, YE Z Y, LI S. Shear mechanical properties of rough joints in red sandstone under real-time temperature [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-12[2025-10-07]. https: //doi. org/10. 13225/j. cnki. jccs. 2024. 0950.

[16] 刘红岩, 薛雷, 张光雄, 等. 考虑裂隙粗糙度的岩体单轴压缩动态损伤模型[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(06): 45-55.

LIU H Y, XUE L, ZHANG G X, et al. Dynamic damage model of rock mass under uniaxial compression considering fracture roughness [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(06): 45-55.

[17] 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. **DOI:** 10. 13465/j. cnki. jvs. 2023. 16. 029.

XIE K D, QIU Y Y, XING H Z. Experimental study on static and dynamic mode-Ⅱ fracture characteristics of red sandstone under low-temperature/water-saturated coupling effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(16): 236-242. **DOI:** 10. 13465/j. cnki. jvs. 2023. 16. 029.

[18] 闻磊，冯文杰，李明烨，等. 应变率对含裂隙红砂岩裂纹扩展模式及破碎特征的影响[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11): 88-107. **DOI:** CNKI: SUN: BZCJ. 0. 2023-11-008.
WEN L, FENG W J, LI M Y, et al. Effect of strain rate on crack propagation mode and fragmentation characteristics of fractured red sandstone [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(11): 88-107. **DOI:** CNKI: SUN: BZCJ. 0. 2023-11-008.

[19] 余伟健，周明娟. 不同次裂隙数目条件下岩石力学特性及破坏模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(02): 394-403. **DOI:** 10. 13545/j. cnki. jmse. 2023. 0342.
YU W J, ZHOU M J. Mechanical properties and failure modes of rock under different numbers of secondary fractures [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(02): 394-403. **DOI:** 10. 13545/j. cnki. jmse. 2023. 0342.

[20] 于洋，江亲财，王泽华，等. 冲击荷载作用下冻融红砂岩动力特性及损伤模型[J]. 煤炭学报, 2025, 50(05): 2437-2452. **DOI:** 10. 13225/j. cnki. jccs. 2024. 0641.
YU Y, JIANG Q C, WANG Z H, et al. Dynamic characteristics and damage model of freeze-thaw red sandstone under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(05): 2437-2452. **DOI:** 10. 13225/j. cnki. jccs. 2024. 0641.

[21] Li, Y, Yang, S Q, Liu, Zl. et al. Dynamic mechanical properties and constitutive model of red sandstone under different loading rates and high temperatures. J. Cent. South Univ. 32,1922–1937 (2025). https: //doi. org/10. 1007/s11771-025-5967-6

[22] 樊赖宇，吴志军，储昭飞，等. 动态冲击下红砂岩蠕变特性及损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2024, 45(06): 1608-1622. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2023. 1067.
FAN L Y, WU Z J, CHU Z F, et al. Creep characteristics and damage constitutive model of red sandstone under dynamic impact [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(06): 1608-1622. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2023. 1067.

[23] 周磊，朱哲明，董玉清，等. 砂岩在不同应变率条件下的劈裂破坏特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(02): 555-567. **DOI:** CNKI: SUN: ZNGD. 0. 2021-02-024.
ZHOU L, ZHU Z M, DONG Y Q, et al. Splitting failure characteristics of sandstone under different strain rate conditions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(02): 555-567. **DOI:** CNKI: SUN: ZNGD. 0. 2021-02-024.

[24] 王蒙，朱哲明，谢军. 岩石Ⅰ-Ⅱ复合型裂纹动态扩展 SHPB 实验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2474-2485. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2015. 0010.
WANG M, ZHU Z M, XIE J. SHPB experiment and numerical simulation of dynamic propagation of rock type-I-II mixed mode cracks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2474-2485. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2015. 0010.

[25] Liu, Yi, Dai, et al. Experimental and numerical investigation on the tensile fatigue properties of rocks using the cyclic flattened Brazilian disc method [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2018, 105(Feb.): 68-82.

[26] 汤俊，汪海波，朱建，等. 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[J/OL]. 爆破, 1-16[2025-10-07]. https: //doi. org/10. 3963/j. issn. 1001-487X. 2025. 01. 001.
TANG J, WANG H B, ZHU J, et al. Experimental study on fracture toughness and crack propagation characteristics of weakly cemented coal rock under impact loading [J/OL]. Blasting, 1-16[2025-10-07]. https: //doi. org/10. 3963/j. issn. 1001-487X. 2025. 01. 001.

[27] 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. Influence of dynamic load and moisture content on failure and energy consumption characteristics of red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3231-3240. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2021. 2128.

[28] 张慧梅，陈世官，王磊，等. 扰动冲击下弱胶结红砂岩的能量耗散与分形特征[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(04): 622-631.
ZHANG H M, CHEN S G, WANG L, et al. Energy dissipation and fractal characteristics of weakly cemented red sandstone under disturbance impact [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(04): 622-631.

[29] 贾蓬，卢佳亮，毛松泽，等. 不同饱和度冻融砂岩动态冲击压缩特性及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,

42(12): 2908-2918. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2023. 0242.

JIA P, LU J L, MAO S Z, et al. Dynamic impact compression characteristics and damage mechanism of freeze-thaw sandstone with different saturation degrees [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 2908-2918. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2023. 0242.

[30] Kun, D. U., et al. Mechanical performance of hard red sandstone in acoustic emission integrated conventional triaxial compression tests. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 35. 6 (2025): 2021-2035.

[31] Li, Xf., Du, K., Wang, Lc. et al. Compression-shear micro- and macro-failure characteristics of red sandstone. J. Cent. South Univ. 32, 437–448 (2025).

[32] 吴琳, 吕亚茹, 张申, 等. 砂土 SHPB 冲击试验与数值模拟研究进展及问题探讨[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3461-3480. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2024. 0014.

WU L, LYU Y R, ZHANG S, et al. Research progress and issues discussion on SHPB impact tests and numerical simulation of sandy soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3461-3480. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2024. 0014.

[33] 陈昊祥, 李杰, 邓树新, 等. 散体介质 SHPB 被动围压试验体应力计算的理论修正方法[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(06): 115-121.

CHEN H X, LI J, DENG S X, et al. Theoretical correction method for bulk stress calculation in SHPB passive confining pressure test of granular media [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(06): 115-121.

[34] 马冬冬, 马芹永, 袁璞, 等. 主动围压状态人工冻结砂土 SHPB 试验与分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2957-2961+2972. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2017. 10. 024.

MA D D, MA Q Y, YUAN P, et al. SHPB test and analysis of artificially frozen sand under active confining pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2957-2961+2972. **DOI:** 10. 16285/j. rsm. 2017. 10. 024.

[35] 马冬冬, 马芹永, 袁璞, 等. 冻结黏土单轴与主动围压状态 SHPB 试验对比分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(19): 255-260. **DOI:** 10. 13465/j. cnki. jvs. 2017. 19. 039.

MA D D, MA Q Y, YUAN P, et al. Comparative analysis of SHPB tests on frozen clay under uniaxial and active confining pressure states[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(19): 255-260. **DOI:** 10. 13465/j. cnki. jvs. 2017. 19. 039.

[36] 马冬冬, 汪鑫鹏, 马芹永, 等. 考虑围压效应的冻结砂土动态本构模型研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(04): 33-41.

MA D D, WANG X P, MA Q Y, et al. Dynamic constitutive model of frozen sand considering confining pressure effect [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(04): 33-41.

[37] 方士正, 杨仁树, 李炜煜, 等. 非静水压条件下深部岩石能量耗散规律及破坏特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 83-96. **DOI:** 10. 13199/j. cnki. cst. 2022-1504.

FANG S Z, YANG R S, LI W Y, et al. Experimental study on energy dissipation law and failure characteristics of deep rock under non-hydrostatic pressure [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 83-96. **DOI:** 10. 13199/j. cnki. cst. 2022-1504.

[38] 刘晓辉, 薛洋, 郑钰, 等. 冲击荷载下煤岩破碎过程能量释放研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3201-3211. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2021. 0214

LIU X H, XUE Y, ZHENG Y, et al. Energy release during coal-rock fragmentation process under impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3201-3211. **DOI:** 10. 13722/j. cnki. jrme. 2021. 0214.

[39] 金志豪, 李远, 栾亚伟, 等. 动静荷载下煤岩体应力波传播与衰减特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(09): 3469-3479.

JIN Z H, LI Y, LUAN Y W, et al. Stress wave propagation and attenuation characteristics of coal rock under static-dynamic loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(09): 3469-3479.