

文章编号: 1671-251X(2025)07-0122-14

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025030099

水射流联合刀齿冲击非均质受载岩石的 破损特征及能量演化规律

马宏宇^{1,2}, 王文¹, 王龙³, 陈勇⁴, 杨宇轩², 邓舜春², 周永²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南省瓦斯治理和利用工程研究中心有限公司, 湖南 长沙 410221; 3. 湘潭大学 环境与资源学院, 湖南 湘潭 411105; 4. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要: 为研究深部复杂地层高应力环境下水射流联合刀齿破碎非均质岩石的效率及机理, 基于光滑粒子流体动力学-有限元方法, 以含石英、长石、方解石 3 种组分的砂岩为研究对象建立数值计算模型, 研究了单齿单独破碎均质岩石、单齿单独破碎非均质岩石、水射流联合单齿异轨迹破碎非均质岩石、水射流联合单齿同轨迹破碎非均质岩石 4 种破碎方式下, 非均质岩石的损伤破坏特征及时效特性, 分析了受载岩石的破损能量演化规律, 揭示了水射流联合刀齿冲击非均质岩石的损伤破坏机理。研究结果表明: 水射流联合单齿破碎非均质岩石时, 低强度组分与组分界面处将形成损伤脆弱区, 且在应力集中作用下易导致主裂缝萌生及扩展, 形成大范围重度损伤区; 水射流联合单齿异轨迹和同轨迹破碎方式分别在破岩宽度和深度方面具有优势, 从岩石破碎面积整体效果出发, 水射流联合单齿异轨迹破碎方式较好; 在水射流联合刀齿冲击作用下, 非均质受载岩石破损能量变化以内能为主, 其最大值出现时刻早于动能最大值出现时刻, 高强度组分对其内能累积具有促进作用; 非均质受载岩石的初始损伤主要由压剪应力导致, 随后在压剪应力为主、拉应力为辅及应力集中效应的综合作用下发生瞬时断裂破坏。

关键词: 煤炭开采; 巷道掘进; 刀齿破岩; 高压水射流; 非均质岩石; 破坏特征; 能量演化

中图分类号: TD823

文献标志码: A

Damage characteristics and energy evolution of heterogeneous loaded rocks under the combined action of water jet and cutter tooth impact

MA Hongyu^{1,2}, WAN Wen¹, WANG Long³, CHEN Yong⁴, YANG Yuxuan², DENG Shunchun², ZHOU Yong²

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology,

Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Gas Control and Utilization Engineering Research Center Co., Ltd.,

Changsha 410221, China; 3. College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

4. CCTEG Chongqing Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400037, China)

Abstract: To investigate the efficiency and mechanism of breaking heterogeneous rocks using a combined water jet and cutter tooth under high-stress conditions in deep complex formations, a numerical model was established based on the smoothed particle hydrodynamics-finite element method, taking sandstone composed of quartz, feldspar, and calcite as the research object. Four rock-breaking modes were studied: single-tooth breaking of homogeneous rock, single-tooth breaking of heterogeneous rock, water jet combined with single-tooth breaking of heterogeneous rock along different trajectories, and along identical trajectories. The damage and time-

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-07-10; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52274194, 52274118); 长沙市雨花区科技计划项目 (YHKJ-2023-YG-15)。

作者简介: 马宏宇 (1987—), 男, 河北唐山人, 副研究员, 硕士, 主要从事煤矿巷道掘进、瓦斯灾害防治等方面的研究工作, E-mail: 923129690@qq.com。

引用格式: 马宏宇, 王文, 王龙, 等. 水射流联合刀齿冲击非均质受载岩石的破损特征及能量演化规律[J]. 工矿自动化, 2025, 51(7): 122-134, 148.

MA Hongyu, WAN Wen, WANG Long, et al. Damage characteristics and energy evolution of heterogeneous loaded rocks under the combined action of water jet and cutter tooth impact[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(7): 122-134, 148.



扫码移动阅读

dependent characteristics of heterogeneous rocks were analyzed, and the evolution pattern of damage energy in loaded rock was examined to reveal the damage mechanism of heterogeneous rocks under the combined impact of water jet and cutter tooth. The results showed that when heterogeneous rocks were broken by the combined action of water jet and single cutter, damage-prone zones formed in low-strength components and at component interfaces, which tended to induce the initiation and propagation of main cracks under stress concentration, resulting in large-scale severe damage zones. The rock-breaking modes along different and identical trajectories showed respective advantages in rock-breaking width and depth. From the perspective of overall rock-breaking area, the different trajectory mode was superior. Under the combined action of water jet and cutter tooth, the damage energy variation of the heterogeneous loaded rock was mainly in the form of internal energy, whose peak occurred earlier than that of kinetic energy. High-strength components facilitated internal energy accumulation. The initial damage of heterogeneous loaded rock was mainly caused by compressive-shear stress, followed by instantaneous damage under the combined effects of dominant compressive-shear stress, auxiliary tensile stress, and stress concentration.

Key words: coal mining; roadway excavation; rock breaking by cutter teeth; high-pressure water jet; heterogeneous rock; damage characteristics; energy evolution

0 引言

随着煤炭开采逐渐向深部和复杂地层发展,煤炭资源安全高效开采面临新的挑战。由于深部地应力增大,煤炭开采和巷道掘进对象的硬度和抗破坏强度增加^[1-2]。煤岩单轴抗压强度通常超过 100 MPa,传统机械破岩方式在破碎该种硬岩时存在刀具磨损严重、掘进效率低等问题。为减少刀具磨损、提高破岩效率,国内外学者在刀具布局、参数选取等方面开展研究,取得了一系列成果,如: Xue Yadong 等^[3]采用 MatDEM 软件研究了节理倾角、方向、间距等岩石结构参数对切削力和岩石切削规律的影响;谭青等^[4]基于 PFC2D 探究了双滚刀条件下岩体的力学行为,得到了最优滚刀间距与破岩动态行为规律,为实际工程案例提供了参考;程永亮^[5]基于 Drucker-Prager 非线性本构模型建立了三维有限元模型,确定了滚刀最优贯入度;冀国栋等^[6]研发了滚刀破岩试验机,开展了花岗岩在不同边界条件下的滚刀切割试验和光滑粒子流体动力学-有限元方法(Smoothed Particle Hydrodynamics-Finite Element Method, SPH-FEM)耦合破岩数值模拟,发现最佳贯入度为 2~4 mm。

研究表明,仅通过改变刀具布置参数、刀头选取参数等难以有效提高刀具的破岩效率与使用寿命,故学者们针对其他辅助刀具联合破岩技术进行探究,最典型的是水射流辅助刀具破岩^[7-10]。韩伟锋^[11]开展了不同水射流和刀具掘进参数条件下的破岩试验,验证了水射流可以有效辅助刀具破岩。Lu Yiyu 等^[12]引入磨料水射流方法,自主研发了硬岩破碎钻头和磨料水射流辅助硬岩钻探设备系统,开展了岩石钻进试验,结果表明在磨料水射流的辅助下,

钻孔深度提高了 63%,推力和转矩分别降低了 15% 和 20%,钻头磨损显著降低。F. D. Wang 等^[13]对比了水射流辅助刀具破岩与传统纯刀具破岩方式,发现前者的掘进效率比后者高 40%~48%,且施工成本降低。Zhang Jinliang 等^[14]开展了高压水射流辅助掘进机圆盘刀盘破岩试验,研究了不同切口深度对圆盘刀盘破岩过程、载荷和效率的影响。朱团辉等^[15]基于正交试验方法探究了喷嘴移动速度、喷嘴直径和水射流压力等因素对破碎岩体沟槽深度的影响规律,丰富了水射流破岩机理。黄飞等^[16]通过高压水射流冲击砂岩试验和有限元数值模拟试验,分析得出不同水射流速度下岩体的破坏主要为劈裂剪切模式。Liu Songyong 等^[17]基于 SPH 和拉格朗日算法建立了水射流锥形刀破岩损伤模型,分析了不同位置、不同压力的水射流辅助破岩效果,结果表明倾角为 5°的水射流破岩效果最好。Liu Songyong 等^[18]采用磨料水射流辅助锥形镐破岩,分析了切割深度和水压对破岩性能的影响。Jiang Hongxiang 等^[19]基于 SPH-FEM 耦合算法建立数值模型,通过岩石应力和岩石破碎特征来评价高压水射流的辅助效果。Li Biao 等^[20]研究证实在水射流切缝辅助下岩石更易出现张拉破坏,但现有实验获得的切缝参数差异大,需系统研究不同布局下射流-滚刀联合破岩效率,以优化破碎方案。王大勇等^[21]开展了水射流辅助锥形聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact, PDC)齿破碎花岗岩试验,发现在高压水射流辅助下锥形 PDC 齿和常规 PDC 齿的破岩比能分别降低了 17.36% 和 19.63%。张金良等^[22]进行了高压水射流切割辅助滚刀破岩试验,分析了不同切缝布置下滚刀破碎岩石的裂纹扩展形态。李烈等^[23]开展了水射

流前置式、后置式及中心式 3 种布置方式下的水射流辅助刀齿破岩试验,分析了不同水压下刀齿的受力特征及载荷分布规律,发现水射流前置式与中心式布置时刀齿破岩效果更好,刀齿载荷振动得到改善。江红祥等^[24]研究了水射流入射角、喷嘴位置及靶距等参数对水射流联合刀齿破岩效果的影响规律,发现喷嘴在刀齿前方时联合破岩效果更佳。

目前在水射流辅助刀齿联合破岩效率、参数优化、破岩机理等方面取得了大量研究成果,包括不同滚刀间距、水射流压力、冲击时间等因素影响下岩石的破坏特征,但研究对象鲜有考虑岩石的应力赋存环境及其非均质结构特征,尤其是深部复杂地层。本文采用 SPH-FEM 耦合算法,对水射流辅助刀齿联合破碎方式下非均质受载岩石的损伤破坏特征、能量分布规律及应力损伤演化机理展开研究,以期为高压水射流联合刀齿高效破碎非均质岩石工艺参数选取及破碎范围评价等提供理论指导。

1 SPH-FEM 耦合算法

采用 SPH-FEM 耦合算法分析水射流联合刀齿破碎岩石,如图 1 所示。其中水射流通过 SPH 方法建模,利用 FEM 方法描述岩石的力学性能,不仅可以获得相对准确的损伤特征,而且解决了数值模型计算效率低的问题^[25]。SPH-FEM 耦合算法的分析过程如图 1 所示。采用“节点对面”的算法定义水射流与岩石之间的相互作用关系,其中水射流作为从属部分,岩石作为主要部分^[26]。在接触界面处水射流和岩石需满足速度相同的滑动条件。

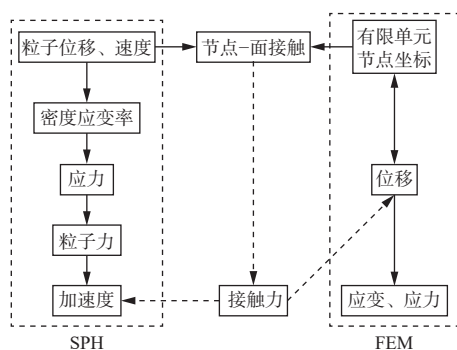


图 1 SPH-FEM 耦合算法分析过程

Fig. 1 Analysis process of SPH-FEM coupling algorithm

2 模型建立

2.1 数值计算模型

现有高压水射流联合刀齿冲击破岩数值模拟研究中通常将岩石设置为单一介质的均质材料^[27-28]。然而,真实岩石内部存在石英、长石、方解石等组分,其强度和密度各不相同。在高压水射流冲击与

刀齿压裂破碎过程中,各组分对作用力的响应特征也不同,导致数值模拟误差较大,不能较好地反映岩石的力学特性和能量演化规律。

针对上述问题,将岩石设置为非均质材料,模拟岩石类型为砂岩,其组分包括石英、长石、方解石、云母、黏土矿物等。考虑砂岩中云母、黏土矿物等含量极少,因此将砂岩组分简化为石英、长石、方解石 3 种。基于 SPH-FEM 耦合算法,建立应力加载条件下高压水射流联合刀齿冲击岩石的数值计算模型,如图 2 所示。岩石内部各组分性质和刀齿均通过 FEM 方法定义(其中刀齿为刚性属性),水射流通过 SPH 方法定义。该模型采用零厚度 cohesive 单元设置砂岩各矿物组分之间的界面黏结性能。根据文献^[29-30]可知,通常将界面过渡区强度设置为砂岩整体强度的 20%~40%,以平衡计算效率与破坏模式的准确性。本文选取砂岩整体强度的 30% 作为砂岩各矿物组分界面过渡区强度。模型中岩石尺寸为 60 mm×80 mm(高×宽),刀齿尺寸为 20 mm×3 mm(长×宽),水射流直径为 1.05 mm^[31-33]。设置 4 种破碎方式:① 单齿单独破碎均质受载岩石;② 单齿单独破碎非均质受载岩石;③ 水射流联合单齿异轨迹破碎非均质受载岩石,即水射流和刀齿的作用线相互平行但不重合,其间距为 6.00 mm^[34];④ 水射流联合单齿同轨迹破碎非均质受载岩石,即水射流和刀齿的作用线相互重合。在模拟水射流联合单齿破碎岩石时,为保证水射流和单齿冲击能量相同,先使用水射流冲击岩石 100 μs,之后结束水射流冲击,启动单齿破岩。

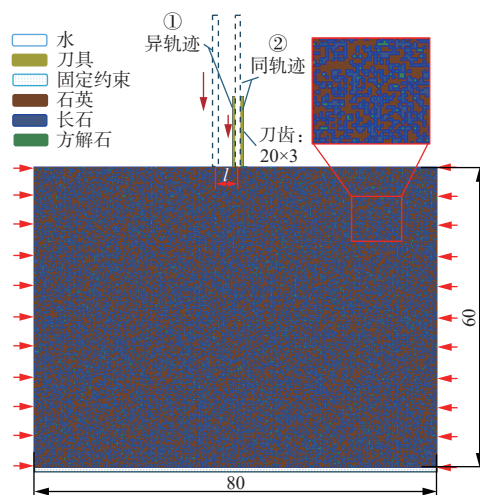


图 2 水射流联合刀齿冲击岩石的数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model of water jet combined with single-tooth breaking rock

根据文献^[35-38]可知,目前三牙轮钻头、PDC 钻头和冲旋钻头的冲击速度为 0~10 m/s,并不属于

静态载荷。从冲击动力学角度来看,当速度大于 20 m/s 时属于高速侵彻^[39],因此将刀齿冲击速度设置为 10 m/s。本文研究的砂岩试样产自四川省自贡市^[40],取样深度为 200~300 m,地应力为 8.4~11.1 MPa。根据文献^[41]中的地应力计算公式,得出本文模拟的砂岩地应力赋存环境为埋深约 300 m,地应力载荷为 10 MPa。

2.2 水射流本构模型

采用 NULL 材料模型描述水射流,并赋予其 Gruneisen 状态方程,表达式为

$$P = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu E) E \quad (1)$$

式中: P 为水射流压力; ρ_0 为水射流密度; c 为冲击波速度(V_S)-粒子速度(V_P)关系曲线的截距; μ 为黏性系数; γ_0 为 Gruneisen 常数; α 为关于 Gruneisen 常数与体积关系的修正系数; s_1, s_2, s_3 为 V_S-V_P 曲线的斜率,其中 s_1 为核心参数,决定材料在冲击作用下的行为, s_2 和 s_3 为高压修正项,多数情况下可忽略; E 为单位体积内能。

根据文献^[26]设置水射流本构模型参数,见表 1。

表 1 水射流本构模型参数

Table 1 Constitutive model parameters for water jet

参数	取值	参数	取值
$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.05	s_3	0.228 6
$c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1 480	α	1.397
s_1	2.56	γ_0	0.49
s_2	-1.986	E/J	0

2.3 刀齿与岩石本构模型

2.3.1 刀齿本构模型

本文聚焦水射流-刀齿联合作用下岩石破损特征及能量演化规律,刀齿作为外部载荷施加工具,其材料特性并非研究重点。为简化计算并突出岩石破坏机制,模型中通过关键字“*MAT_RIGID_(TITLE)”将刀齿设定为刚性体,模拟对象为合金钨钢,其密度为 14.6 g/cm³,弹性模量为 600 GPa,泊松比为 0.22^[17],其力学行为通过位移边界条件传递至岩石。

2.3.2 岩石本构模型

模拟中岩石内部各组分均采用 RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma)本构模型进行描述。RHT 模型是 T. Borrvall 等^[42]提出的一种拉压损伤模型,与其他损伤模型相比,它考虑了围压、应变速率、应变硬化和损伤软化对岩石材料在动态冲击载荷下破坏强度的

影响,适用于描述深部岩石体对冲击荷载的动态力学响应^[43]。

对砂岩试样进行物理力学参数测试,得到砂岩的天然密度为 2.30 g/cm³,自然含水率为 0.57%,饱和含水率为 0.65%。采用 GAW-2000 型电液伺服试验机(轴向最大试验力为 4 000 kN,最大位移量为 150 mm)开展岩样单轴压缩试验及巴西劈裂试验,试验过程中均采用轴向位移控制方式,加载速率均为 0.1 mm/s。测得砂岩抗压强度为 37.9 MPa,抗拉强度为 3.25 MPa,弹性模量为 5.80 GPa。同时,基于所测砂岩的物理力学参数,利用有限元软件开展单轴压缩和巴西劈裂的数值模拟,并与试验结果进行对比分析,如图 3 所示。可看出数值模拟和试验结果误差较小,验证了模型所选参数的正确性。

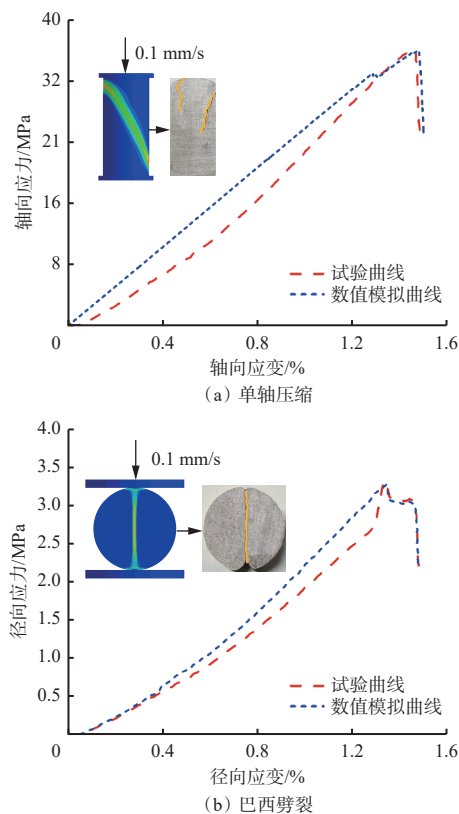


图 3 试验和数值模拟中砂岩的应力-应变曲线与破坏模式对比
Fig. 3 Comparisons of stress-strain curve and failure mode of sandstone between experiments and simulations

考虑数值模型中需对岩石不同矿物组分分别赋值,为反映砂岩的整体强度,基于文献^[40]研究结果,将砂岩中石英、长石、方解石的体积分数比设置为 6:3:1,各矿物组分的主要参数见表 2。

3 数值模拟结果与分析

3.1 数值模拟结果验证

为验证本文所建立数值模型及其计算结果的可靠性,选用文献^[44]中水射流联合单齿破碎均质砂

表 2 砂岩内部各矿物组分的主要参数
Table 2 Key parameters of various mineral components
inside sandstone

参数	值		
	石英	长石	方解石
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.65	2.50	2.35
单轴抗压强度/MPa	150	80	40
抗拉强度/MPa	15	8	5
破坏面参数 A	1.8	1.7	1.6
破坏面参数 N	0.65	0.70	0.75
洛德角依赖因子	0.80	0.75	0.70
相对抗拉强度	0.06	0.08	0.10
相对抗剪强度	0.15	0.20	0.25

岩的试验结果与本文数值模拟结果进行对比,二者均为水射流联合单齿异轨迹破碎均质岩石,对比结果如图 4 所示。可看出试验和数值模拟形成的破碎坑形态较类似,均呈现上宽下窄的“碗状”形态,其横截面轮廓形态凹凸不平,呈现畸形。此外,水射流破岩处的深度稍浅,而刀具作用处的破岩深度较大,主要原因是水射流对岩石进行冲击破碎,对破碎坑周围岩石造成了损伤,降低了岩石抗冲击破坏能力,当刀具进一步冲击磨损岩石时效果更好。从试验结果可看出,岩石在刀具作用一侧会出现局部的块状剥落,形成较大的破碎范围和块状岩屑。从数值模拟结果同样发现在刀具冲击侧的表面出现了块状剥落,表明数值模拟与试验结果具有一致性。造成上述现象的主要原因是刀具对周围岩石的挤压胀裂作用,尤其是对浅部岩石作用显著。在水射流和刀具冲击破岩作用部位尤其是底部位置,由于强冲击剪压作用,岩石形成粉碎性破碎,多形成细小的岩屑。此外,数值模拟结果较好地呈现出真实岩石材料在压缩状态下出现的深部弹性变形区域及破碎坑内壁重度损伤塑性变形区域(呈红橙色)。上述在破碎坑形貌特征、不同尺寸岩屑形成位置等方面的对比分析,在一定程度上可验证本文数值模拟结果的正确性。

3.2 水射流联合刀具冲击受载岩石的损伤破坏特征

4 种破碎方式(单齿单独破碎均质岩石、单齿单独破碎非均质岩石、水射流联合单齿同轨迹破碎非均质岩石、水射流联合单齿异轨迹破碎非均质岩石)下,不同时刻受载岩石破坏坑形貌及裂纹特征的损伤破坏云图如图 5 所示。从图 5(a)、图 5(b)可看出,单齿单独破碎受载岩石时,在破坏初期($t=10\ \mu\text{s}$, t 为时间),岩石损伤主要发生在刀具底边两侧,且两侧损伤区相互贯通并出现相互交叉,但非均质受载

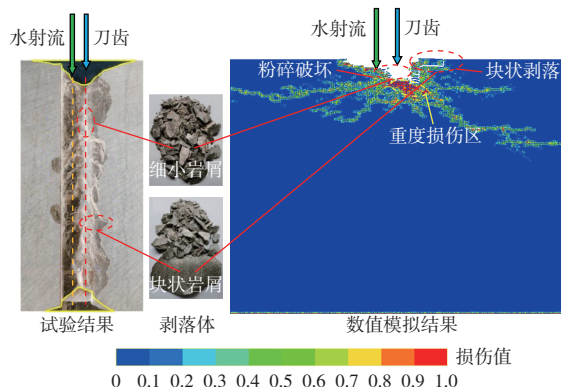


图 4 水射流联合单齿异轨迹破碎非均质岩石的试验结果和数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparisons of experimental results and numerical simulation results for heterogeneous rock breaking by water jet combined with cutter tooth along different impact trajectory

岩石的损伤程度弱于均质岩石。随着刀具持续作用($t=50\ \mu\text{s}$),由于刀具的嵌入形成了范围较小的破碎坑,破碎坑底部为重度损伤区,且在距破碎坑外围一定距离处形成了锥形主裂缝。随着刀具进一步贯入,破碎坑和重度损伤区范围逐渐增大, $t=90\ \mu\text{s}$ 时锥形主裂缝即将扩展到岩石表面。在刀具的持续作用下,破碎坑宽度和深度进一步增加,两侧的锥形主裂缝逐渐完全贯通,表层岩石块剥落,且在试件中下位置形成了弧形损伤带。随着刀具持续作用, $t=130, 170\ \mu\text{s}$ 时弧形损伤带范围进一步扩大。主要原因是刀具的冲击作用在岩石内部传递到底部边界时发生反射,与后续的作用力相互叠加形成拉伸作用,导致岩石内部出现弧形损伤带,且随着冲击作用持续,刀具贯入度的增大导致岩石内部损伤范围增大,促使内部损伤带发展。从图 5(c)、图 5(d)可看出,水射流联合单齿破碎受载岩石时,岩石初始破坏时间早于单齿单独破碎时, $t=10\ \mu\text{s}$ 时已形成破碎坑,且破碎坑周围开始形成径向裂缝。随着冲击时间增加,破碎坑范围尤其是破岩深度逐渐增大,裂缝长度和数量逐渐增加。与单齿单独破碎方式相比,水射流联合单齿破碎方式能产生更多更长的径向裂缝,其中水射流联合单齿同轨迹破碎时左右两侧的裂缝几乎呈近水平对称分布,而异轨迹破岩时刀具侧裂缝呈倾斜分布。

为揭示裂缝传播规律及其传播路径,提取 $t=50\ \mu\text{s}$ 时岩石内部裂缝分布和应力等值线,如图 6 所示。可看出在上述 4 种破碎方式下,岩石的宏观破坏特征存在显著差异。对比图 6(a)、图 6(b)可知,采用单齿单独破碎方式时,均质岩石的损伤破坏区域几乎呈对称分布,而非均质岩石的损伤破坏区域左右两侧出现差异,且底部的重度损伤区分布范

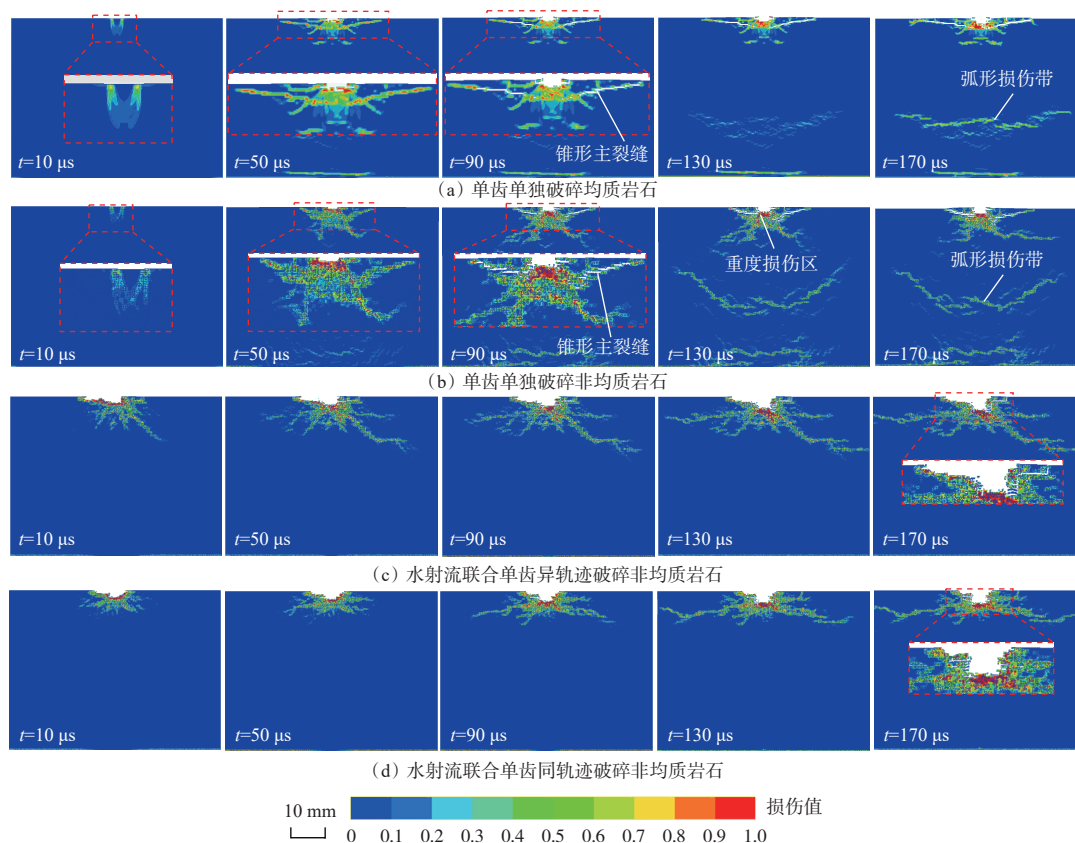


图 5 不同破碎方式下受载岩石不同时刻的损伤破坏云图

Fig. 5 Damage and failure cloud diagrams of loaded rock under different breaking methods

围更大。主要原因是刀齿作用下非均质岩石内部出现应力集中现象,进而形成局部损伤,且主裂缝更容易沿应力集中处扩展,裂缝发展呈现更大的随机性。从图 6(c)、图 6(d)可看出,经水射流预处理后,岩石在刀齿冲击作用下的宏观破坏特征更加明显,具体表现为岩石破碎坑表面宽度和深度较单齿单独破碎时更大。采用水射流联合单齿破碎方式时,非均质岩石受到冲击时产生的主裂缝直指岩石内部,主要原因是非均质岩石在外力冲击作用下,应力波以撞击点为中心向岩石内部传播,但非均质岩石内部各组分的密度、强度等不同,受到应力波作用时的响应也不同,具体表现为强度较低的方解石及各组分交界面脆弱区损伤急剧上升,同时该区域也是应力集中现象发生区域,导致裂缝萌生与传播,使裂缝沿着应力集中方向扩展。整体上,水射流联合单齿破碎受载岩石时损伤破坏范围更大,其中异轨迹破碎时岩石破碎坑表面宽度更大,而同轨迹破碎时破碎坑深度更大。

为进一步定量表征 4 种破碎方式对受载岩石破碎效率的影响,对 4 种破碎方式下受载岩石破碎坑深度、表面宽度、面积与时间进行线性 and 非线性拟合,结果如图 7 所示。可看出各拟合函数的相关系数 R^2 均在 94% 以上,拟合效果较好。

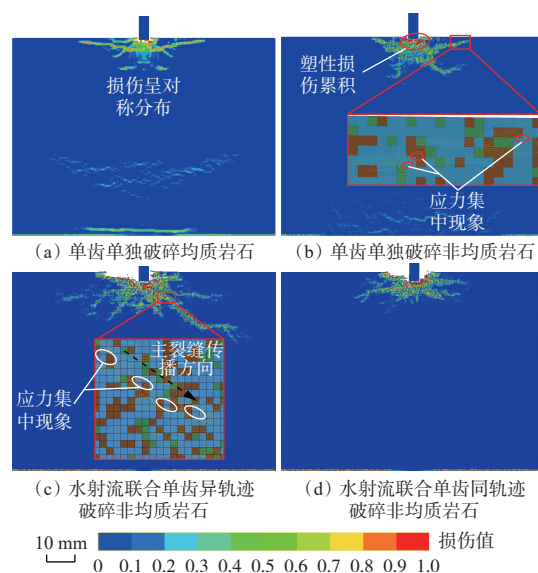


图 6 不同破碎方式下受载岩石内部应力集中现象及裂缝扩展

Fig. 6 Internal stress concentration and crack propagation in loaded rock under different breaking methods

从图 7(a)可看出,水射流联合单齿异轨迹破碎非均质岩石时破碎坑深度随冲击时间呈线性增大变化,而其他 3 种破碎方式下受载岩石的破碎坑深度均随时间呈指数型增大,但增幅逐渐减小。单齿单独破碎时岩石破碎坑深度明显小于水射流联合单齿破碎时,如 $t=170 \mu\text{s}$ 时,单齿单独破碎均质岩石和非

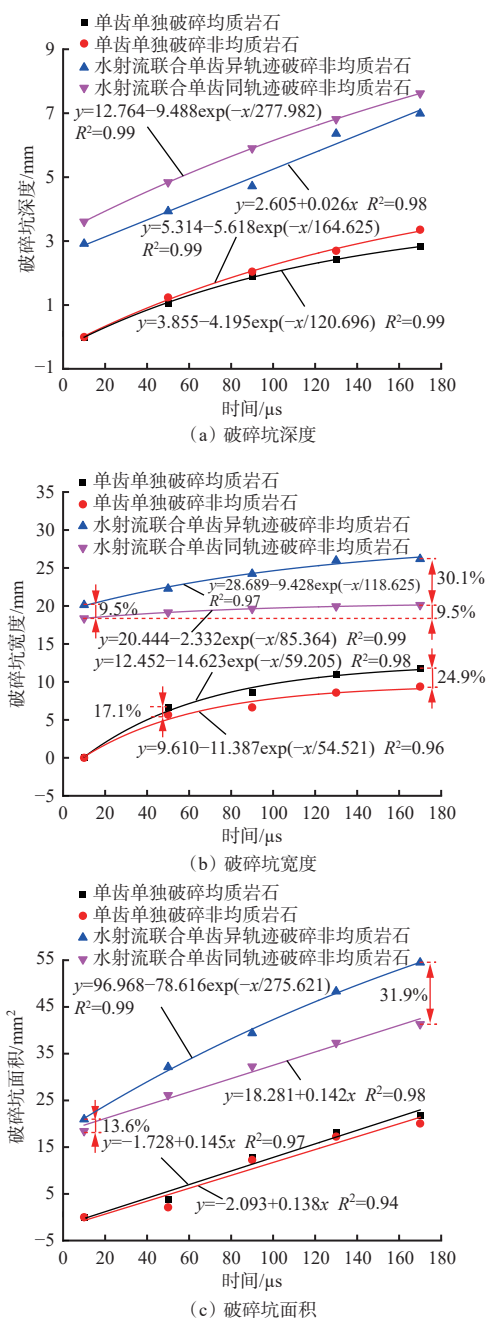


图 7 不同破碎方式下受载岩石破碎坑深度、宽度、面积随时间的变化曲线

Fig. 7 Curves of depth, width and area of broken pits of loaded rock under different breaking methods with versus time

均质岩石的破碎坑深度分别为 2.8, 3.4 mm, 明显小于水射流联合单齿异轨迹和同轨迹破碎时的 7.1, 7.6 mm。在破岩初期, 刀齿作用于均质岩石和非均质岩石的破碎坑深度差异不明显, 在 $t=10 \mu\text{s}$ 时均未形成破碎坑。但随着刀齿持续作用, 非均质岩石的破碎坑深度逐渐大于均质岩石, 主要原因是单齿单独破碎非均质岩石时, 刀齿底部岩石由于应力集中会形成更大范围的重度损伤区, 便于刀齿进一步贯入破碎。水射流联合单齿同轨迹破碎岩石时破碎坑深度大于异轨迹破碎方式, 但二者差异随时间增加

而逐渐减小, 主要原因是异轨迹破碎方式中刀齿在水射流侧面破岩, 就破碎深度而言, 效果不及水射流和刀齿同轨迹破岩。

从图 7(b) 可看出, 4 种破碎方式下岩石破碎坑宽度均随冲击时间的增加呈指数型增大, 且增速逐渐减小。特别地, 水射流联合单齿破碎岩石时其破碎坑宽度较单齿单独破碎时大, 这主要是因为水射流联合单齿破碎时, 二者有效破碎范围叠加, 导致破碎坑在宽度上发展。总体上, 4 种破碎方式下破碎坑宽度变化范围不大, 原因是破碎坑宽度主要由初期的冲击作用所形成, 后期是水射流破岩的返流或刀齿扰动使破碎坑宽度进一步增大, 但增幅有限。水射流联合单齿异轨迹破碎时岩石破碎坑宽度明显大于同轨迹破碎时, 二者差异随时间增加而逐步增大, 从 $t=10 \mu\text{s}$ 时的 9.5% 增大到 $t=170 \mu\text{s}$ 时的 30.1%。单齿单独破碎时, 均质岩石的破碎坑宽度大于非均质岩石, 且随着刀齿持续贯入, 二者差异逐渐增大, 从 $t=50 \mu\text{s}$ 时的 17.1% 增大到 $t=170 \mu\text{s}$ 时的 24.9%。主要原因是非均质岩石由于强度差异导致破碎时间不同且块度较小, 而均质岩石表面易出现块状剥落, 导致碎屑块度大于非均质岩石。

从图 7(c) 可看出, 单齿单独破碎均质岩石和非均质岩石时, 破碎坑面积差异较小, 且破碎坑面积均随时间增加呈线性增大变化, $t=10 \mu\text{s}$ 时无破碎坑形成, $t=170 \mu\text{s}$ 时破碎坑面积分别为 20.8, 20.1 mm^2 。水射流联合单齿异轨迹和同轨迹破碎非均质岩石时, 破碎坑面积随时间增加分别呈指数型增大和线性增大, 其中异轨迹破碎效果好于同轨迹破碎方式, 且二者差异随着时间增加而逐渐增大, 从 $t=10 \mu\text{s}$ 时的 13.6% 增大到 $t=170 \mu\text{s}$ 时的 31.9%。导致受载岩石破碎坑面积随时间变化的主要原因是破碎坑深度和宽度综合变化。

3.3 水射流联合刀齿冲击受载岩石的能量分布规律

水射流联合刀齿冲击受载岩石的损伤破坏特征具有以下典型特点: 作用初期岩石破碎坑近似呈“碗状”分布且逐渐向外部扩展, 其周围依次为密实破碎区域(简称密实区)、裂纹扩展损伤区域(简称开裂区)、完整无损区域(简称弹性区)^[40]。其中, 破碎坑等宏观破坏特征可通过其深度、面积等形态尺寸表征, 主裂缝可通过其数量、扩展角度及长度等描述, 但不同时间阶段受载岩石内部的损伤情况未知, 尤其开裂区和弹性区是刀齿后续作用的潜在破碎区, 虽然该区域没有明显的破碎或裂缝发育, 但接近开裂区的岩石已受到不同程度的损伤, 是后续刀齿冲击作用易发生破碎的潜在区域。就能量转换而言,

岩石的损伤断裂过程是水射流和刀齿冲击能量转换为岩石变形和破坏的内能和动能的过程,内能主要包括岩石因挤压而产生的变形能,在一定程度上可反映岩石的损伤程度,动能主要指岩石单元发生破坏、运动及删除的能量,以及因裂缝扩展而剥落块状岩屑的能量。为进一步探明岩石在水射流及刀齿冲击作用下的损伤程度,有必要对受冲击后岩石内部的动能和内能等能量演化分布规律进行分析。

3.3.1 破碎方式对岩石损伤破坏能量的影响分析

4种破碎方式下受载岩石损伤破坏过程中动能和内能随时间的变化规律如图8所示。

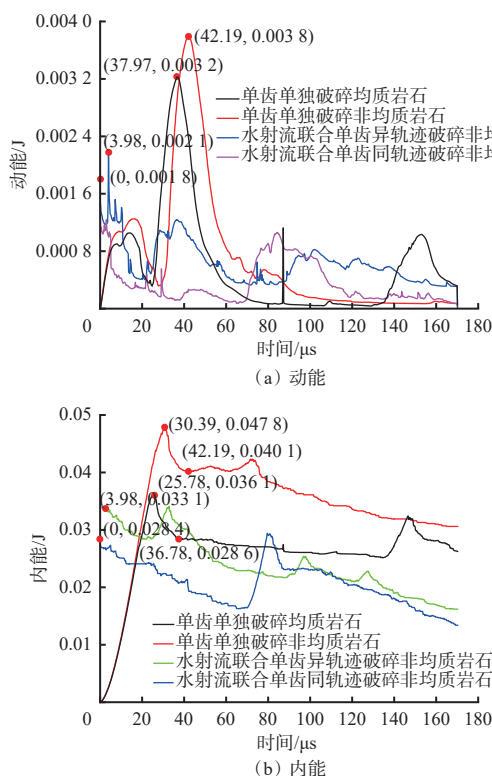


图8 不同破碎方式下受载岩石动能和内能随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of kinetic energy and internal energy of loaded rock samples under different breaking methods

从图8可看出,岩石损伤破坏过程中,整体上动能变化较内能小,动能和内能最大值出现在冲击初期。其中单齿单独破碎均质岩石和非均质岩石时动能最大值分别出现在 $t=37.97, 42.19 \mu\text{s}$ 时,比内能最大值出现的时间晚约11.0, 11.8 μs ,动能最大值分别为0.0032, 0.0038 J,仅为同时刻内能的11.19%和9.48%,是内能最大值的8.89%和7.92%。水射流联合单齿异轨迹和同轨迹破碎时动能最大值出现在 $t=3.98, 0 \mu\text{s}$ 时,分别为0.0021, 0.0018 J,均为相应破碎方式下内能最大值的6.4%。导致上述现象的主要原因是水射流或刀齿作用下岩石内部部分单元发生破坏运动,而大部分单元处于挤压变形阶段,为后续进一步被破坏积累能量,因此岩石破损过程中以内

能为主。另一方面,在破碎初期,岩石相对完整,具有更好的吸能能力,且此时岩石单位时间内破碎程度更高,因此动能和内能最大值均出现在冲击初期,且内能最大值早于动能最大值出现。

为阐明不同破碎方式下岩石微观能量变化和宏观物理现象之间的联系,选取单齿单独破碎非均质岩石及水射流联合单齿同轨迹破碎非均质岩石2种方式,对不同内能演化阶段的破碎坑深度、宽度及裂缝发展进行分析,如图9、图10所示。

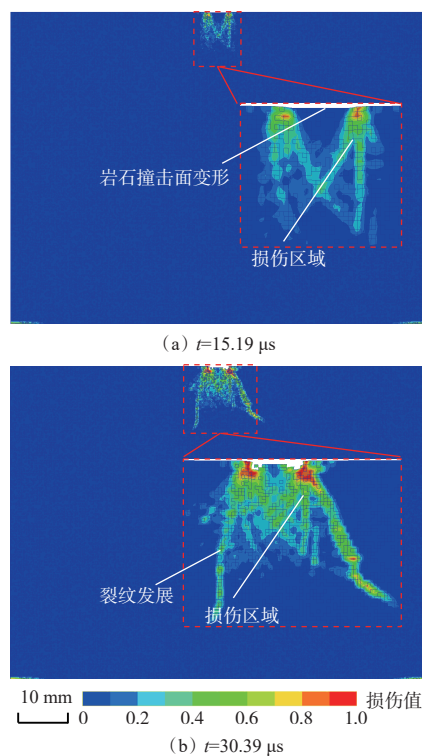


图9 单齿单独破碎非均质岩石的破坏特征

Fig. 9 Damage characteristics of heterogeneous rock broken by a single tooth alone

单齿单独破碎非均质岩石时, $t=0 \sim 30.39 \mu\text{s}$ 岩石内能呈持续上升趋势, $t=15.19 \mu\text{s}$ 时达到0.0213 J,此时岩石内部出现深6.75 mm的损伤区域,如图9(a)所示。这主要是因为刀齿对岩石撞击,撞击处岩石单元受到挤压和摩擦,外力对岩石做功,能量不断传递给岩石,导致岩石内能持续增大;而非均质岩石内部矿物分布不均匀、结构存在差异,在应力集中区域,矿物之间的结合力受到破坏,从而出现一定深度的损伤区域。 $t=30.39 \mu\text{s}$ 时岩石在刀齿撞击下出现破碎,破碎坑深度达0.5 mm,且损伤累积导致裂纹开始发展,损伤深度和面积较 $t=15.19 \mu\text{s}$ 时大,如图9(b)所示。这主要是因为岩石内部损伤累积到一定程度,超过了岩石的承受极限,岩石开始破碎,形成破碎坑。同时,损伤区域扩展和连通导致裂纹开始发展,更多岩石内部结构受到破坏,损伤深度和面积进

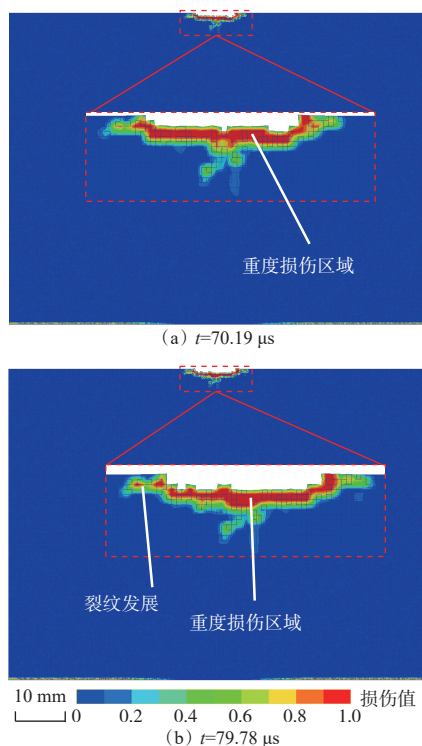


图 10 水射流联合单齿同轨迹破碎非均质岩石的破坏特征

Fig. 10 Damage characteristics of water jet combined with single-tooth breaking of heterogeneous rock along identical trajectories

一步增大,也使岩石整体内能达到峰值(0.047 8 J)。在水射流联合单齿同轨迹破碎非均质岩石时, $t=70.19\sim 79.78\ \mu\text{s}$ 岩石的内能呈持续上升趋势, $t=79.78\ \mu\text{s}$ 时内能为 0.029 2 J。这主要是因为高速水射流使岩石表面单元受到强烈的冲击和剪切作用,能量传递给岩石使其内能上升。同时其宏观破坏特征出现一定变化,具体表现: $t=70.19\ \mu\text{s}$ 时岩石在水射流联合刀齿作用下出现破坏,其破碎坑深度和宽度分别为 0.75, 7.50 mm,如图 10(a)所示; $t=79.78\ \mu\text{s}$ 时破碎坑深度和宽度分别为 1.00, 8.00 mm,在作用点周围因损伤累积传递导致裂纹发展,如图 10(b)所示。

可见,在单齿单独破碎和水射流联合单齿同轨迹破碎方式下,非均质岩石破坏内能的增大都与岩石破坏过程密切相关,内能增大反映了外力对岩石做功的积累,当内能达到一定值时,岩石的宏观物理现象(如破碎坑形成、裂纹发展等)会出现明显变化。

3.3.2 非均质岩石破损过程中的内能分布规律分析

由 3.3.1 节可知,在水射流联合刀齿冲击作用下,岩石损伤破坏过程中以内能变化为主,动能变化相对不显著,因此本文主要分析非均质受载岩石内部不同组分的内能变化。非均质岩石在单齿单独破碎、水射流联合单齿异轨迹破碎及同轨迹破碎方式下,其内部石英、长石、方解石等组分内能随时间变化曲线如图 11 所示。

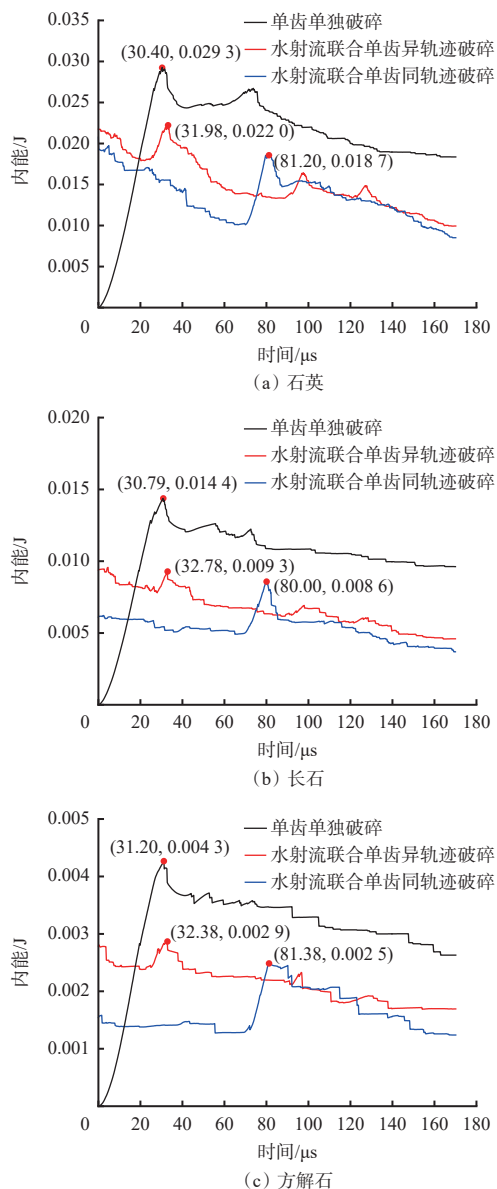


图 11 不同破碎方式下非均质受载岩石内部各组分内能随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of internal energy of each component of heterogeneous loaded rock under different breaking methods versus time

从图 11 可看出,单齿单独破碎方式下,石英、长石和方解石逐渐开始内能积累,分别在 $t=30.40, 30.79, 31.20\ \mu\text{s}$ 时达到峰值 0.029 3, 0.014 4, 0.004 3 J, 随后波动下降。水射流联合单齿异轨迹破碎和同轨迹破碎方式下,石英和长石的内能分布规律类似,整体呈现随冲击时间增加而减小的变化趋势,但中途出现几次突增现象,并超过初期内能值,其中石英分别在 $t=31.98, 81.20\ \mu\text{s}$ 时达到峰值 0.022 0, 0.018 7 J, 长石分别在 $t=32.78, 80.00\ \mu\text{s}$ 时达到峰值 0.009 3, 0.008 6 J; 方解石的内能变化在初期整体上较稳定,呈波动变化,然后出现明显增大现象,2 种破碎方式下分别在 $t=32.38, 81.38\ \mu\text{s}$ 时达到峰值 0.002 9, 0.002 5 J,

随后呈波动降低。由上述分析可知,非均质岩石中,石英的内部贡献量最大,其次为长石和方解石,3种破碎方式下3种组分的内能比分别为6.7:3.3:1,7.6:3.1:1,7.6:3.2:1,几乎与各组分的含量比例相同,近似为6:3:1。主要原因是石英、长石、方解石等组分在岩石内部随机均匀分布,受到水射流和刀齿作用时产生变形、损伤及破坏的单元数量与各组分占比一致,但各组分随机分布会导致微弱偏差。此外,各组分强度排序为石英>长石>方解石,在水射流和刀齿冲击作用下,强度较高的组分对其内能的累积起到一定的积极作用,而强度较低的组分会更大程度地出现应力集中破坏区,导致岩石出现局部破坏,不利于内能累积。因此,相比各组分的含量比例,强度最高的石英破碎时内能占比显著增大,强度次之的长石破碎时内能占比也有一定程度的增大。

3.4 水射流联合刀齿冲击受载岩石的损伤破坏机理分析

为揭示非均质受载岩石破碎时内部各组分的损伤破坏机制,针对单齿单独破碎和水射流联合单齿同轨迹破碎方式,选取刀齿正下方3.75 mm处的石英、长石与方解石特征单元进行分析,如图12所示。2种破碎方式下各成分特征单元的应力及损伤随时间变化曲线如图13—图15所示。

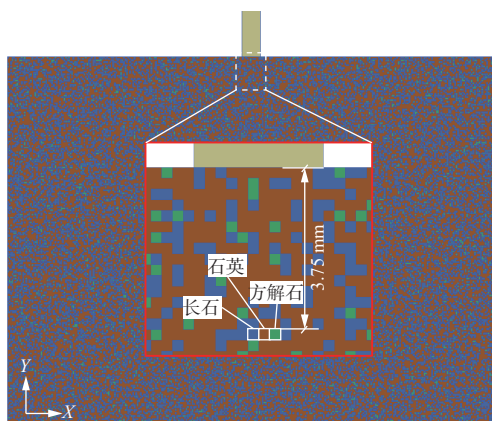


图12 非均质岩石应力损伤分析单元分布

Fig. 12 Element distribution for stress damage analysis in heterogeneous rock

从图13(a)可看出,单齿单独破碎方式下, $t=2.79\ \mu\text{s}$ 时石英单元开始出现损伤累积,此时单元受到的有效应力、最大剪应力、最小主应力及最大主应力分别为63.19, 36.11, -73.17, -0.95 MPa,有效应力已超过石英单元最大损伤阈值,最大剪应力和最小主应力分别超过其最大抗剪强度和最大抗压强度。因此,在单齿单独破碎方式下,石英单元的初始损伤累积主要由压应力和剪应力共同作用所致。经过32.4 μs 损伤累积, $t=35.19\ \mu\text{s}$ 时石英单元的损伤值

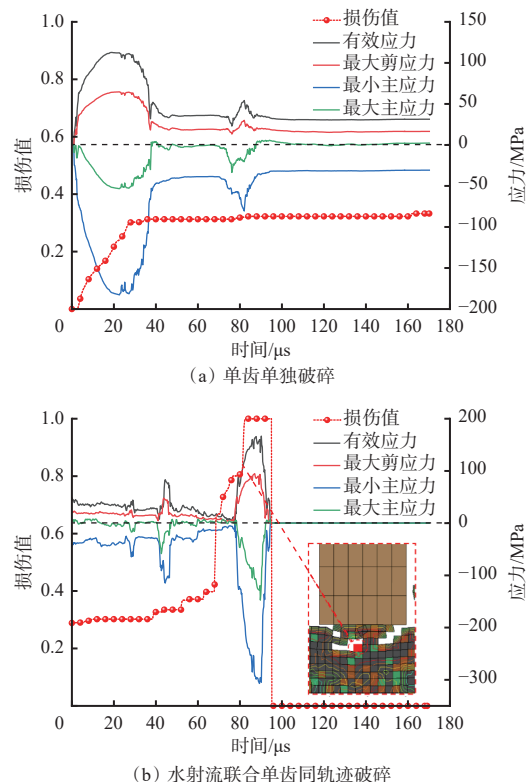


图13 石英应力及损伤随冲击时间变化曲线

Fig. 13 Curves of stress and damage of quartz versus impact time

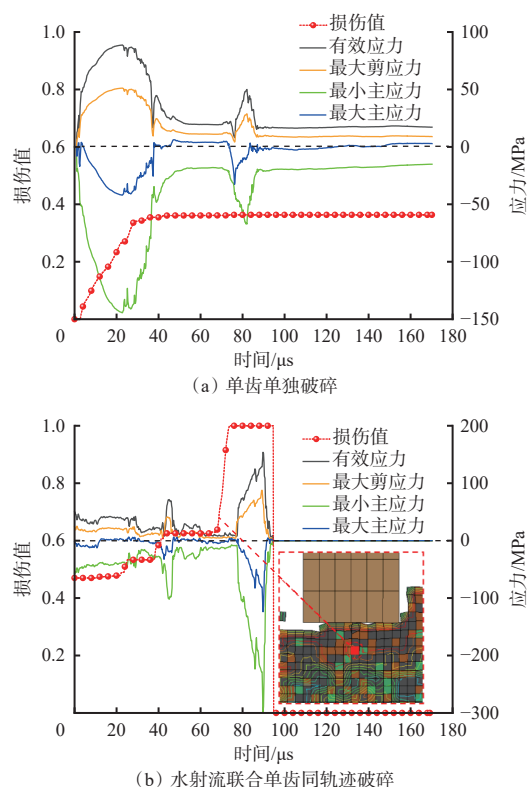


图14 长石应力及损伤随冲击时间变化曲线

Fig. 14 Curves of stress and damage of feldspar versus impact time

达0.32,随后趋于稳定。虽然在 $t=2.79\sim 35.19\ \mu\text{s}$ 时间段内有应力峰值出现,并超过单元的损伤破坏阈值,但并未出现明显的损伤累积甚至破坏,这主要是

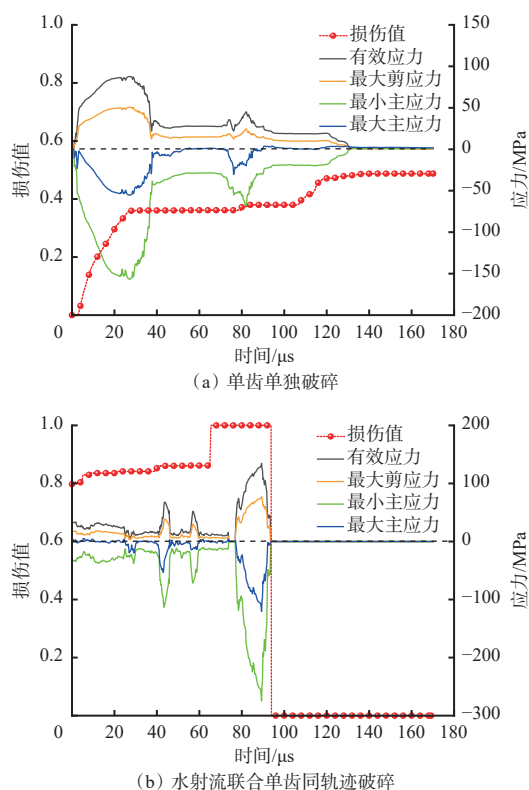


图 15 方解石应力及损伤随冲击时间变化曲线

Fig. 15 Curves of stress and damage of calcite versus impact time

因为岩石内部单元的相互挤压作用会极大提高石英单元的抗破坏能力。从图 13(b)可看出,水射流联合单齿同轨迹破碎方式下,石英单元会产生初始损伤,损伤值为 0.289,此后在单齿单独作用下, $t=67.79 \mu\text{s}$ 时,损伤值上升至 0.398,有效应力、最大剪应力、最小主应力和最大主应力分别为 83.22, 47.96, -114.81, -8.02 MPa,在拉压应力等综合作用下,该单元进一步产生新的损伤累积,但损伤值仅上升 0.109。此外, $t=81.37 \mu\text{s}$ 时石英单元的有效应力、最大剪应力、最小主应力和最大主应力分别为 101.07, 66.37, -148.87, -27.59 MPa。由此可知,上述综合作用力并不能使岩石内部石英单元发生瞬时损伤累积,从此时的损伤破坏放大云图发现刀具已临近特征单元,该特征单元周围应力集中现象明显。因此,该石英特征单元在上述综合作用力和应力集中共同作用下发生脆性破坏,在极短时间(2.95 μs)内其损伤值由 0.81 上升至 1.0。

从图 14(a)、图 15(a)可看出,单齿单独破碎方式下,长石单元和方解石单元均在 $t=2.79 \mu\text{s}$ 时开始出现损伤累积,表明岩石内部不同强度和密度组分间的初始损伤累积时间差异不明显。为研究组分强度及密度对岩石损伤破坏机制的影响,选取方解石作为主要研究对象,发现在 $t=2.79 \mu\text{s}$ 时方解石单元的有效应力、最大剪应力、最小主应力及最大主应

力分别为 48.50, 27.57, -57.05, -1.90 MPa,表明仅在刀具作用下,方解石单元的初始损伤累积主要由压剪应力所致,与强度更大的石英单元初始损伤机理一致。以破碎岩石最终时刻为例,在单齿单独破碎方式下,岩石单元的损伤值与其强度和密度呈反比,在 $t=170 \mu\text{s}$ 时石英、长石与方解石的损伤值分别为 0.332, 0.363, 0.488,主要是因为单元强度越大则越难以破碎,刀具越难对其造成损伤累积。从图 14(b)和图 15(b)可看出,水射流联合单齿同轨迹破碎方式下,在水射流冲击岩石 100 μs 后,岩石内部石英、长石和方解石的损伤值分别累积至 0.289, 0.470, 0.797,说明水射流的冲击作用致使使岩石内部各组分出现损伤,且损伤程度与其强度呈反比。此外,发现长石单元在 $t=67.98 \mu\text{s}$ 时损伤值出现突增现象,此时长石单元的有效应力、最大剪应力、最小主应力及最大主应力分别为 7.40, 21.74, -8.46, -0.30 MPa,不足以引起该单元损伤值突增,同时发现方解石单元在此时的损伤值也出现突增,主要原因是应力集中现象导致方解石单元受力失衡。值得注意的是,与石英单元相比,长石和方解石单元由应力集中主导的瞬时脆性破坏更早出现,时间分别为 67.98, 64.79 μs ,这与组分强度有直接关系:组分强度越低,该部位越容易发生瞬时脆性破坏。

4 结论

1) 单齿单独破碎方式下,均质岩石损伤呈对称分布,非均质岩石因应力集中形成非对称损伤;水射流联合单齿破碎效果显著优于单齿单独破碎,水射流联合单齿异轨迹破碎方式下破岩面积随时间呈指数型增长,而同轨迹破碎方式下为线性增长,其中异轨迹破碎方式在破岩宽度上占优,较同轨迹破碎方式增大 30.1%,但同轨迹破碎方式在破岩深度上较异轨迹破碎方式增大 24.9%。

2) 不同破碎方式下岩石动能和内能最大值出现在破损初期,以内能变化为主,且内能最大值出现时间早于动能最大值。非均质岩石内部各组分内能占比与其含量占比呈正相关,石英、长石、方解石依次递减,且强度较高的组分对其内能的累积起到一定的积极作用。

3) 岩石各组分的初始损伤累积由压剪应力共同导致,单齿单独破碎方式下岩石仅形成一定的损伤,且损伤值与组分强度和密度呈反比。水射流联合单齿同轨迹破碎方式下,岩石受到以压剪应力为主、拉应力为辅的作用,其损伤进一步累积,加之应力集中导致岩石发生瞬时断裂破坏,且组分强度越低,瞬时

破坏时间越早。

参考文献(References):

- [1] 李洪盛. 自激振荡脉冲射流破岩性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LI Hongsheng. Rock breaking performance of self-excited oscillating pulsed waterjet[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [2] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(1): 91-99.
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 91-99.
- [3] XUE Yadong, ZHOU Jie, LIU Chun, et al. Rock fragmentation induced by a TBM disc-cutter considering the effects of joints: a numerical simulation by DEM[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 136. DOI: [10.1016/J.COMPGEO.2021.104230](https://doi.org/10.1016/J.COMPGEO.2021.104230).
- [4] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. TBM 滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2453-2464.
TAN Qing, YI Nian'en, XIA Yimin, et al. Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2453-2464.
- [5] 程永亮. TBM 盘形滚刀破岩最优贯入度的数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(4): 936-943.
CHENG Yongliang. Numerical simulation on optimal penetration of TBM disc cutter's rock fragmentation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(4): 936-943.
- [6] 冀国栋, 付柏毅, 章慧健, 等. TBM 滚刀贯入度对破岩效能的影响规律研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(12): 4755-4768.
JI Guodong, FU Boyi, ZHANG Huijian, et al. Study on the influence law of TBM disc cutter penetration on the rock-breaking efficiency[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(12): 4755-4768.
- [7] JIANG Hongxiang, LIU Zenghui, GAO Kuidong. Numerical simulation on rock fragmentation by discontinuous water-jet using coupled SPH/FEA method[J]. *Powder Technology*, 2017, 312: 248-259.
- [8] 江红祥, 赵慧贺, 刘送永, 等. 磨料射流冲击割缝岩石性能影响因素分析[J]. *振动. 测试与诊断*, 2022, 42(3): 564-571, 621-622.
JIANG Hongxiang, ZHAO Huihe, LIU Songyong, et al. Influencing factors analysis of rock slotting performance by abrasive waterjet impact[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(3): 564-571, 621-622.
- [9] FOLDYNA J, SITEK L, ŠČUČKA J, et al. Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(20): 6174-6180.
- [10] 李子丰. 空化射流形成的判据和冲蚀机理[J]. *工程力学*, 2007, 24(3): 185-188.
LI Zifeng. Criterion and erosion mechanism of cavitating jet[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(3): 185-188.
- [11] 韩伟锋. 水射流辅助机械滚刀破岩试验研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(8): 1414-1419.
HAN Weifeng. Experimental study on rock-breaking using a water jet assisted mechanical disc cutter[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(8): 1414-1419.
- [12] LU Yiyu, TANG Jiren, GE Zhaolong, et al. Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60: 47-56.
- [13] WANG F D, MILLER R. High pressure water jet assisted tunneling[C]. *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Las Vegas, 1976: 649-676.
- [14] ZHANG Jinliang, LI Yongchang, ZHANG Yuansheng, et al. Using a high-pressure water jet-assisted tunnel boring machine to break rock[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(10). DOI: [10.1177/1687814020962290](https://doi.org/10.1177/1687814020962290).
- [15] 朱团辉, 李光, 周小磊, 等. 硬岩掘进机高压水耦合破岩影响因素实验研究[J]. *液压与气动*, 2021, 45(5): 157-163.
ZHU Tuanhui, LI Guang, ZHOU Xiaolei, et al. Experimental investigation on influencing factors of TBM high pressure water coupling rock breaking[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021, 45(5): 157-163.
- [16] 黄飞, 卢义玉, 李树清, 等. 高压水射流冲击速度对砂岩破坏模式的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(11): 2259-2265.
HUANG Fei, LU Yiyu, LI Shuqing, et al. Influence of velocity of high-pressure water jet on failure patterns of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11): 2259-2265.
- [17] LIU Songyong, LIU Zenghui, CUI Xinxia, et al. Rock breaking of conical cutter with assistance of front and rear water jet[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42: 78-86.
- [18] LIU Songyong, ZHOU Fangyue, LI Hongsheng, et al. Experimental investigation of hard rock breaking using a conical pick assisted by abrasive water jet[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(9): 4221-4230.
- [19] JIANG Hongxiang, ZHAO Huihe, GAO Kuidong, et al. Numerical investigation of hard rock breakage by high-pressure water jet assisted indenter impact using the coupled SPH/FEM method[J]. *Powder Technology*,

- 2020, 376: 176-186.
- [20] LI Biao, ZHANG Bo, HU Mengmeng, et al. Full-scale linear cutting tests to study the influence of pre-groove depth on rock-cutting performance by TBM disc cutter[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122. DOI: [10.1016/J.TUST.2022.104366](https://doi.org/10.1016/J.TUST.2022.104366).
- [21] 王大勇, 马红滨, 李欣龙, 等. 高压水射流辅助锥形 PDC 齿破碎花岗岩试验研究[J]. *石油机械*, 2024, 52(7): 36-44.
- WANG Dayong, MA Hongbin, LI Xinlong, et al. Experimental study on high-pressure water jet assisted conical PDC cutter breaking of granite[J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(7): 36-44.
- [22] 张金良, 许弘毅, 龚秋明, 等. TBM 滚刀与高压水射流布局对滚刀破岩效率影响的室内试验[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(7): 204-217.
- ZHANG Jinliang, XU Hongyi, GONG Qiuming, et al. Experimental study on effect of layouts of TBM cutter and high-pressure water jet on cutting efficiency[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(7): 204-217.
- [23] 李烈, 江红祥. 高压水射流辅助掘进机截齿截割实验研究[J]. *机械设计与制造*, 2021(4): 78-81.
- LI Lie, JIANG Hongxiang. Experimental study on cutting performance of roadheader pick assisted with high pressure water jet[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021(4): 78-81.
- [24] 江红祥, 杜长龙, 刘送永, 等. 水射流-机械刀具联合破岩的影响因素试验研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(8): 1013-1017.
- JIANG Hongxiang, DU Changlong, LIU Songyong, et al. Experimental research of influence factors on combined breaking rock with water jet and mechanical tool[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(8): 1013-1017.
- [25] 米建宇, 黄飞, 李树清, 等. 基于 SPH-FEM 耦合算法的后混合磨料水射流冲击破岩数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(16): 132-139.
- MI Jianyu, HUANG Fei, LI Shuqing, et al. Numerical simulation of rock breaking by rear-mixed abrasive water jet based on an SPH-FEM coupling algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 132-139.
- [26] XIAO Songqiang, XIAO Juchong, REN Qingyang, et al. Damage evolution and fracture characteristics of heterogeneous concrete with coarse aggregate impacted by high-velocity water jet[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416. DOI: [10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135128](https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135128).
- [27] JIANG Hongxiang, ZHAO Huihe, GAO Kuidong, et al. Numerical investigation of hard rock breakage by high-pressure water jet assisted indenter impact using the coupled SPH/FEM method[J]. *Powder Technology*, 2020, 376: 176-186.
- [28] LIU Jialiang, ZHU Bin, LIU Renjie, et al. Study on parameter analysis and damage mechanism of water jet combined with mechanical cutter head breaking concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 61. DOI: [10.1016/J.JOBE.2022.105314](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105314).
- [29] 李文帅. 浆-岩界面宏微观力学行为及加固机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- LI Wenshuai. Study on macro-micro mechanical behavior and reinforcement mechanism of slurry-rock interface[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [30] 陆翔, 杨雨清, 才庆祥, 等. 不同种类添加剂对地聚合物-岩石界面过渡区的影响研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(4): 790-800.
- LU Xiang, YANG Yuqing, CAI Qingxiang, et al. Effect of different types of additives on the interface transition zone of geopolymer rock interface[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(4): 790-800.
- [31] LIU Songyong, LIU Zenghui, CUI Xinxia, et al. Rock breaking of conical cutter with assistance of front and rear water jet[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42: 78-86.
- [32] JIANG Hongxiang, ZHAO Huihe, GAO Kuidong, et al. Numerical investigation of hard rock breakage by high-pressure water jet assisted indenter impact using the coupled SPH/FEM method[J]. *Powder Technology*, 2020, 376: 176-186.
- [33] LIU Fuwei, WANG Yansen, HUANG Xin. Cutting efficiency of extremely hard granite by high-pressure water jet and prediction model of cutting depth based on energy method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(4). DOI: [10.1007/S10064-024-03586-0](https://doi.org/10.1007/S10064-024-03586-0).
- [34] WANG Xuebin. Adiabatic shear localization evolution for steel based on the Johnson-Cook model and gradient-dependent plasticity[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 2006, 13(4): 313-318.
- [35] 杨迎新, 张文卫, 李斌, 等. 牙齿破岩效率的评价及牙齿优选探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 110-113.
- YANG Yingxin, ZHANG Wenwei, LI Bin, et al. Effect evaluation on insert penetration to rock and optimization of insert shape[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 110-113.
- [36] 马德坤. 牙轮钻头工作力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- MA Dekun. Working mechanics of roller drill bit[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.

- [8] 梁利利, 高楠. 基于小波理论的铜矿浮选泡沫图像特征提取研究[J]. 中国锰业, 2018, 36(1): 118-121.
LIANG Lili, GAO Nan. A study on image feature extraction of copper flotation foam on wavelet theory[J]. China's Manganese Industry, 2018, 36(1): 118-121.
- [9] 刘晓青, 程全, 李晋, 等. 浮选过程控制方法研究[J]. 矿产综合利用, 2016, 37(5): 14-18.
LIU Xiaoqing, CHENG Quan, LI Jin, et al. Research on methods of controlling flotation process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016, 37(5): 14-18.
- [10] 刘晓青, 程全, 李晋, 等. 浮选生产过程综合自动化系统[J]. 控制工程, 2016, 23(11): 1702-1706.
LIU Xiaoqing, CHENG Quan, LI Jin, et al. Integrated automation system for flotation processes[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(11): 1702-1706.
- [11] 刘晓青, 郭荣艳, 杨静, 等. 浮选过程自动控制系统设计[J]. 矿产综合利用, 2016, 37(6): 72-75, 79.
LIU Xiaoqing, GUO Rongyan, YANG Jing, et al. Design of automatic control system for floatation process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016, 37(6): 72-75, 79.
- [12] 王琳岩, 李健, 贾瑶, 等. 混合选别浓密过程双速率智能切换控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(2): 330-343.
WANG Linyan, LI Jian, JIA Yao, et al. Dual-rate intelligent switching control for mixed separation thickening process[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(2): 330-343.
- [13] 苏超, 王旭. 浮选流程智能控制系统开发与应用[J]. 铜业工程, 2019(4): 4-9.
SU Chao, WANG Xu. Development and application of intelligent control system for flotation processes[J]. Copper Engineering, 2019(4): 4-9.
- [14] 谭利平, 张泽琳, 赵伟, 等. 基于机器视觉的矿物浮选泡沫监控研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(11): 123-130.
TAN Liping, ZHANG Zelin, ZHAO Wei, et al. Research status of mineral flotation foam monitoring based on machine vision[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11): 123-130.
- [15] SUPOMO A, YAP E, ZHENG X, et al. PT Freeport Indonesia's mass-pull control strategy for rougher flotation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(12/13/14): 808-816.
- [16] 徐宁, 周俊武, 王清. 关于选矿过程智能化控制技术的探讨[J]. 铜业工程, 2011(1): 54-60.
XU Ning, ZHOU Junwu, WANG Qing. Discussion on intelligent controlling of mineral processing[J]. Copper Engineering, 2011(1): 54-60.
- [17] 范富博, 王然风, 付翔. 基于多源异构信息融合的浮选精煤灰分在线检测技术研究与应用[J]. 煤炭技术, 2023, 42(2): 233-238.
FAN Fubo, WANG Ranfeng, FU Xiang. Research and application of on-line detection technology of flotation cleaned coal ash based on multi-source heterogeneous information fusion[J]. Coal Technology, 2023, 42(2): 233-238.
- [18] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [19] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278-2324.
- [20] NAIR V, HINTON G E. Rectified linear units improve restricted boltzmann machines[C]. 27th International Conference on Machine Learning, Haifa, 2010: 807-814.
- (上接第 134 页)
- [37] 罗衡. 空气锤动静载耦合冲击破岩[D]. 成都: 西南石油大学, 2013.
LUO Heng. Air hammer dynamic static coupling impact rock breaking[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [38] 蔡灿, 伍开松, 廉栋, 等. 单齿冲击作用下破岩机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1659-1666, 1675.
CAI Can, WU Kaisong, LIAN Dong, et al. Study of rock-breaking mechanism under single-tooth impact[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1659-1666, 1675.
- [39] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
NING Jianguo, WANG Cheng, MA Tianbao. Explosion and shock dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [40] 朱英豪. 水盐干湿循环作用下砂岩的损伤特性和机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- ZHU Yinghao. Study on damage characteristics and mechanism of sandstone under water-salt dry-wet cycle[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [41] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
LI Siguang. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1973.
- [42] BORRVAL T, RIEDEL W. The RHT concrete model in LS-DYNA[C]. 8th European LS-DYNA Conference, Strasbourg, 2011: 23-24.
- [43] ZHANG Shuangxia, LIU Zhixiang, YANG Xiacong, et al. Analysis of damage characteristics and optimization of fan-holes blasting design under high in situ stresses[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(6): 1887-1899.
- [44] 周方跃. 硬岩巷道掘进机水射流-刀盘破岩系统关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHOU Fangyue. Research on key technology of water jet-cutterhead rock breaking system for hard rock roadway roadheader[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.