

基于 ALE-FEM 耦合算法的磨料水射流破岩数值模拟及其机理分析

徐鹏, 盛茂*, 田守增, 王天宇

中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, shengmao@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-05-04

国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号: 52122401)资助

摘要 磨料水射流在钻井提速、深穿透射孔和压裂增产等方面应用效果显著, 深入认识磨料水射流破岩机理是提升其应用效果的关键之一。本文基于任意拉格朗日-欧拉耦合有限单元算法, 提出了独立封装有限元网格描述磨料的方法, 将水射流单元设定网格随物质的运动而变化以实现流体流动特性, 速度设置给物质; 将磨料单元设定网格不随物质的运动而变化以实现固体颗粒特性, 速度设置给网格。综合考虑岩石的动态冲击损伤作用以及水射流和磨料的协作, 建立了可表征水射流流动和岩石损伤破坏的多相多物理场耦合过程的磨料水射流破岩模型, 模型聚焦磨料颗粒和水射流对岩石微秒级的冲击破坏。采用 2 套网格捕捉磨料和水射流的协同破岩作用, 得到了岩石破碎体积、岩石损伤场、水射流压力场、水射流和磨料对岩石破碎的能量贡献率等关键参数的时空演化特征。结果表明, 磨料水射流破岩过程磨料起主导作用, 水射流起辅助作用。分析得到磨料水射流中磨料-水射流协同破岩机理认识, 磨料撞击岩石使岩石局部产生的高程度损伤降低了水射流破岩的难度, 此外磨料冲击破碎岩石使得水射流和岩石之间产生新界面, 促使水射流的冲击压力升高, 提高了水射流的破岩能力, 因此磨料水射流中的水相比于纯水射流具有更高的射流打击力和能量利用率, 磨料冲击预损伤岩石叠加水射流聚集增压的磨料-水射流协同作用破岩是磨料水射流破岩效率和能量利用率高于纯水射流数倍的重要机理之一。研究结果对优化磨料水射流破岩参数提供了理论模型和设计依据。

关键词 磨料水射流; 数值模拟; ALE-FEM; 破岩机理

中图分类号: TE248; TD231

Numerical simulation and mechanism analysis of abrasive water jet rock breaking based on ALE-FEM coupling algorithm

XU Peng, SHENG Mao, TIAN Shouceng, WANG Tianyu

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Received: 2023-03-09; Revised: 2023-05-04

Abstract The abrasive water jet has remarkable effect in the application of accelerating drilling speed, deep penetration

引用格式: 徐鹏, 盛茂, 田守增, 王天宇. 基于 ALE-FEM 耦合算法的磨料水射流破岩数值模拟及其机理分析. 石油科学通报, 2024, 04: 627-636
XU Peng, SHENG Mao, TIAN Shouceng, WANG Tianyu. Numerical simulation and mechanism analysis of abrasive water jet rock breaking based on ALE-FEM coupling algorithm. Petroleum Science Bulletin, 2024, 04: 627-636. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.047

perforation and fracturing stimulation. In-depth understanding of the mechanism of abrasive water jet rock breaking is one of the keys to improve its application effect. Based on the arbitrary Lagrange-Euler finite element coupling algorithm, an independent packaged finite element mesh method for describing abrasives is presented in this paper. The grid of the water jet unit is set to change with the movement of the material to realize the fluid flow characteristics, and the speed is set to the material. The abrasive unit is set to the grid does not change with the movement of the material to achieve the solid particle characteristics, and the speed is set to the grid. Considering the dynamic impact damage of rock and the cooperation between water jet and abrasive, an abrasive water jet rock breaking model was established to characterize the multi-phase and multi-physical coupling process of water jet flow, rock damage and failure. The model focused on the impact damage of abrasive particles and water jet on rock in microseconds. Two sets of meshes were used to capture the collaborative rock breaking action of abrasives and water jets, and the temporal and spatial evolution characteristics of key parameters such as rock breaking volume, rock damage field, pressure field of water jet and energy contribution rate of water jet and abrasive to rock breaking were obtained. The results show that abrasive plays the main role and water jet plays the auxiliary role in the process of rock breaking. The mechanism of abrasive and water jet cooperative rock breaking is analyzed. The abrasive impingement of rock causes high degree of local damage of rock, which reduces the difficulty of water jet breaking rock. In addition, the impact of abrasive water jet on rock breakage creates a new interface between water jet and rock, which increases the impact pressure water jet and improves the rock breaking ability of water jet. Therefore, water in abrasive water jet has higher impact force and energy utilization rate than that of pure water jet. The predamage of abrasive impact on rock combined with the higher pressure of water jet stagnation is one of the important mechanisms that abrasive water jet has several times higher efficiency and energy utilization than pure water jet. The results can provide a theoretical model and design basis for optimizing the rock breaking parameters of abrasive water jet.

Keywords abrasive water jet; numerical modeling; ALE-FEM; rock mechanics

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.047

磨料水射流是由磨料颗粒和高速水流混合而成的固液两相射流, 高速水流与磨料颗粒流固耦合、协同冲击破岩, 已被广泛用于深井钻井提速^[1-2]、深穿透射孔^[3-4]和水力喷射分段压裂^[5-6]等油气钻采工程领域。其中, 磨料水射流破岩机理一直是该技术应用的研究热点和难点。实验研究方面, 采用CT扫描、超声波检测、扫描电子显微镜等先进微观检测手段, 可视化获得了射流冲击下岩石损伤特征, 实现了静态最终损伤评价^[7-9]; 部分学者采用应变高频测量和声发射技术实现了射流破岩信息的动态过程监测, 但仍难以捕捉磨料颗粒和水射流协同作用破岩的细节^[10-11]。随着岩石动力学和多场耦合数值模拟技术的发展, 逐步形成了高压水射流破岩动力学数值模拟系列方法, 主要有光滑粒子耦合有限单元(SPH-FEM)^[12]和任意拉格朗日-欧拉耦合有限单元(ALE-FEM)^[13-14]两类方法, 其中, SPH-FEM算法能够实现水射流的大变形模拟, 同时通过随机修改光滑粒子材料属性表征磨料颗粒^[15-16], 但难以实现水射流冲击瞬态力学特征以及持续冲击流态模拟。ALE-FEM算法能够更好地表征水射流的连续性和可压缩性, 采用体积分法^[17]或随机修改网格单元材料属性^[18]实现磨料颗粒的定量表征, 但缺乏对磨料固体撞击属性的表征, 难以体现磨料和水射流对岩石的协同冲击作用。

为此, 本文基于任意拉格朗日-欧拉耦合有限单

元算法, 提出了有限元网格独立封装描述磨料的方法, 建立了可精细表征磨料形状和速度、水射流流动和岩石损伤破坏等多相多物理场耦合过程的磨料水射流破岩模型, 得到了岩石破碎体积、岩石损伤场、水射流和磨料对岩石破碎的能量贡献率等关键参数时空变化特征, 揭示了磨料-水射流协同破岩机理。

1 基于 ALE-FEM 耦合算法的磨料水射流破岩模型

1.1 磨料-水射流-岩石属性表征与流固耦合建模

建立磨料水射流破岩模型(图1), 为提高模拟效率和便于结果观察, 将无限大地层磨料水射流三维动态破岩问题简化为二维平面问题。假设岩石为各向同性均质材料, 对其下边界施加位移固定约束, 受力处于平面应变状态; 考虑水射流以轴向速度, 忽略其径向速度; 磨料硬度远大于靶件硬度, 视其为刚体, 考虑实际磨料浓度较低, 忽略磨料间相互碰撞。

基于 ALE-FEM 耦合方法, ALE 算法兼具拉格朗日法能够跟踪物质边界的运动而调整网格边界和欧拉法能使网格单元独立于物质实体的长处, 在保证网格单元完整性的同时提升了计算精度、节省了求解时间, 能够有效处理大变形问题^[19]。本文分别针对水射流和磨料建立相互独立的 2 套有限元单元, 通过相互独立

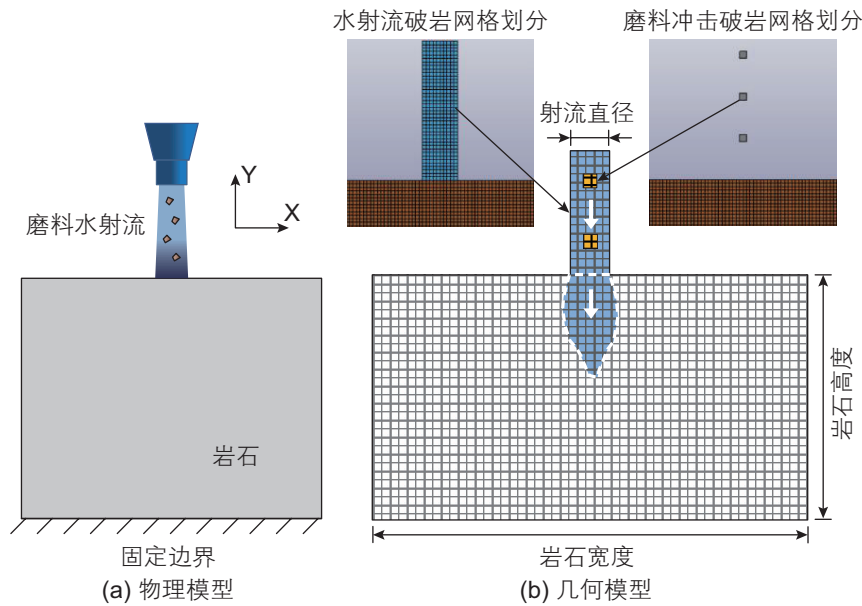


图 1 磨料水射流破岩模型
Fig. 1 Abrasive water jet rock breaking model

的网格单元可得磨料和水射流的速率以及能量变化特征，便于分析磨料和水射流的破岩贡献以及协同破岩作用机理。其中，水射流单元设定网格随物质的运动而变化以实现流体流动特性，将速度赋予物质；磨料单元设定网格不随物质的运动而变化以实现固体颗粒特性，将速度赋予网格。岩石采用有限元单元划分网格，可表征岩石弹性参数、应变、损伤与破坏。由于 ALE-FEM 耦合算法需采用体单元，本文选用单层六面体网格，限定 Z 轴方向位移，模拟二维平面应变状态。

兼顾物质点速度和网格运动速度，磨料水射流采用 ALE 法建立满足流体力学原理，控制方程如下：

$$\text{连续性方程：} -\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \omega_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\text{动量方程：} \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{i,j} + \rho b_i - \rho \omega_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\text{能量方程：} \rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{i,j} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho \omega_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中： ρ —密度， t —时间， v_i —速度， ω_i —相对速度， E —内能， $\sigma_{i,j}$ —应力张量， $\sigma_{i,j} = -P\delta_{i,j} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i})$ ， μ 为动力黏性系数， $\delta_{i,j}$ 为 Kronecker 函数。

岩石采用 Lagrange 法建立，控制方程如下：

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad (4)$$

式中： f_i —体积力， $\sigma_{i,j}$ —应力张量， $\sigma_{i,j} = \frac{E}{1+\nu} \times$

$\left(\frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{i,j} \varepsilon_v + \varepsilon_{i,j} \right)$ ， $\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ ， E —弹性模量， ν —泊松比。

除上述控制方程外，磨料水射流还需状态方程构成封闭控制方程组。为同时满足表征应力—应变、体积变形和压力之间的关系，水射流和磨料的液固两相采用自定义材料。考虑材料碰撞过程压缩作用为主，忽略拉伸作用，优选 Gruneisen 材料状态方程^[20]：

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left\{ 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right\} \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (5)$$

式中： E —单位体积内能， J ； C —冲击波速度—粒子速度曲线截距， m/s ； S_1 、 S_2 、 S_3 —冲击波速度—粒子速度曲线斜率； γ_0 —Gruneisen 系数； α —关于 Gruneisen 系数与体积系数的修正系数，采用高硬度高密度的石榴石作为磨料，方程参数参考文献^[21]，详见表 1。

采用罚函数法解决磨料水射流流动与岩石变形破坏过程的流固耦合问题^[22]，原理如图 2 所示，在岩石积分耦合点找到相应的流体物质点，并跟踪其相对位移 d ；根据相对位移大小分别针对岩石和流体施加节点力。

1.2 岩石动态损伤本构方程

为表征射流高速冲击作用下岩石损伤渐进破坏过

表1 水射流和磨料材料参数

Table 1 Material parameters for water jet and abrasive

名称	$P_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0
水射流	1.0	1480	2.56	-1.986	0.229	0.50
磨料	4.0	4569	1.49	0	0	2.17

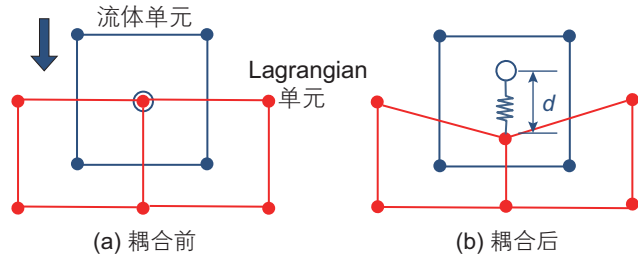


图2 罚函数法的流固耦合问题求解示意图

Fig. 2 Fluid-structure coupling of penalty function method

程, 选用Johnson-Holmquist-Concrete(JHC)岩石动态损伤本构方程^[23]。该本构方程可有效表征材料大变形、高应变率、高静水压力和损伤等综合影响。岩石的等效屈服强度是流体压力、岩石应变率和损伤的函数, 而流体压力是体积应变的函数; 损伤积累是塑性体积应变、等效塑性应变和流体压力的函数。强度以归一化等效应力描述^[24]:

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}] [1 - C \ln \varepsilon^*] \quad (6)$$

式中: $\sigma^* = \sigma/f_c$, 代表归一化等效应力, 且 $\sigma^* \leq S_{\max}$, MPa; S_{\max} —归一化等效应力所能达到的最大值, MPa; σ —实际屈服强度, MPa; f_c —准静态单轴抗压强度, MPa; $P^* = P/f_c$, P^* —归一化等效静水压力, N; P —静水压力, N; $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$, ε^* —归一化应变率, ε —实际应变率, ε_0 —参考应变率, 取值 1.0 s^{-1} ; A —归一化黏附强度; B —归一化压缩系数; C —应变率系数; N —压缩强化指数, D —损伤因子 ($0 < D < 1$), 通过等效塑性应变和塑性体积应变累积得到的损伤因子表示如下:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (7)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ —等效塑性应变增量; $\Delta \mu_p$ —等效体积应变增量; $f(P) = \varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}$, 为常压 P 下材料

表2 岩石材料参数

Table 2 Material parameters for rock

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	f_c/MPa	G/GPa	T/MPa	A	B	C	N	K_1/GPa	K_2/GPa
2.080	48.00	14.86	4.00	0.790	1.60	0.00700	0.61	85.0	-171.00
K_3/GPa	$\varepsilon_0(\text{S}^{-1})$	S_{\max}/GPa	$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	$P_{\text{lock}}/\text{MPa}$	μ_{crush}	μ_{lock}	D_1	D_2	
208.0	1	7.0	16.00	800	0.001 00	0.100	0.040	1	

断裂塑性应变; P^* —归一化压力; T^* —材料所能承受的归一化最大拉伸静水压力; D_1 和 D_2 —损伤常数。岩石动态损伤本构方程参数取值参考文献^[25], 详见表2。

1.3 模型验证与数值模拟方案

本文研究微妙级磨料水射流破岩过程, 设置3个磨料颗粒均匀分布于水射流中便于捕捉磨料和水射流的协同破岩作用(图3), 有磨料参与破岩的阶段磨料质量浓度为9.6%符合实际, 磨料设置为方形符合石榴石多棱角的特点, 模型基本参数取值如表3。为满足计算精度, 选取四边形网格, 单元尺寸 $100 \mu\text{m}$, 网格

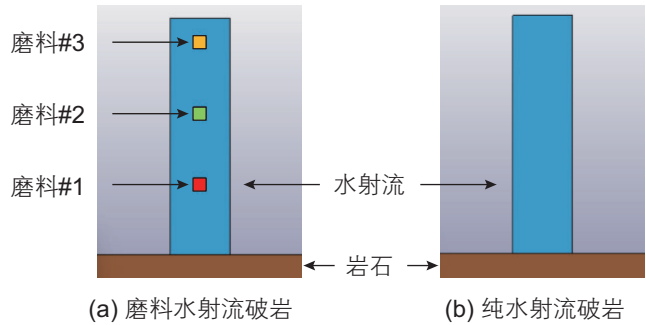


图3 射流破岩模型

Fig. 3 Jet rock breaking model

表3 模型参数与算例取值

Table 3 Material parameters and their calculation values

模型参数	算例取值
射流直径/mm	1.0
磨料形状	方形, 边长 0.2 mm
磨料数量/个	3
岩石长度/mm	50
岩石高度/mm	25
射流速度/(m/s)	250
喷射时间/ μs	50

数 250 412 个。

对比纯水射流水锤压力解析式^[26], 验证上述模型计算精度。水锤压力属于流体压力, 对应该模型计算得到的水压力极大值, 采用二者的归一化后的数据作对比。如图 4 所示, 不同射流速度下, 归一化水锤压力和所对应的水压力极大值的相关系数达 0.99, 模型计算结果与解析解吻合较好。

最终得到不同时刻的破岩体积、岩石损伤场、射流冲击压力场、射流能量和破岩耗能。其中, 射流能量是通过累加射流单位时间流过喷嘴的流体动能得到; 破岩耗能是通过某一时刻射流能量减去当前时刻射流剩余动能得到。射流破岩耗能和射流最终输入总能量

的比值为能量利用率。

$$k = \frac{w_{rb}}{w_{ei}} \quad (8)$$

式中: k —能量利用率, %; w_{rb} —破岩耗能量; w_{ei} —最终输入总能量。

2 磨料水射流冲击破岩特性

2.1 磨料水射流和纯水射流破岩过程对比

图 5(a)对比了磨料水射流与纯水射流的累计破岩体积以及射流速率变化特征。结果表明, 本文计算条件下, 磨料水射流的最终破岩体积是纯水射流的 3 倍,

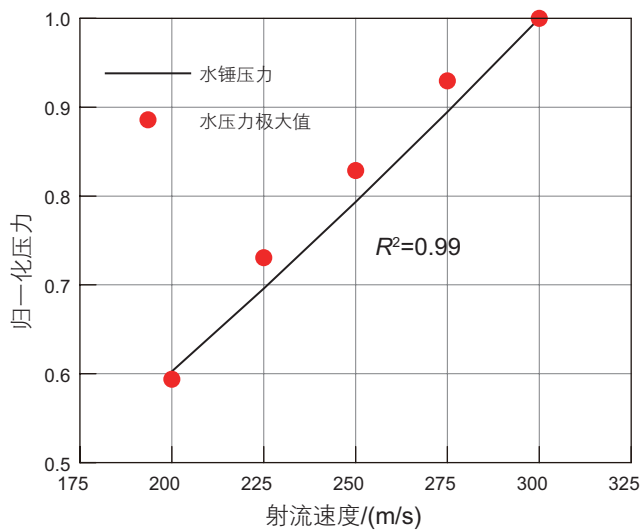


图 4 模型验证
Fig. 4 Model validation

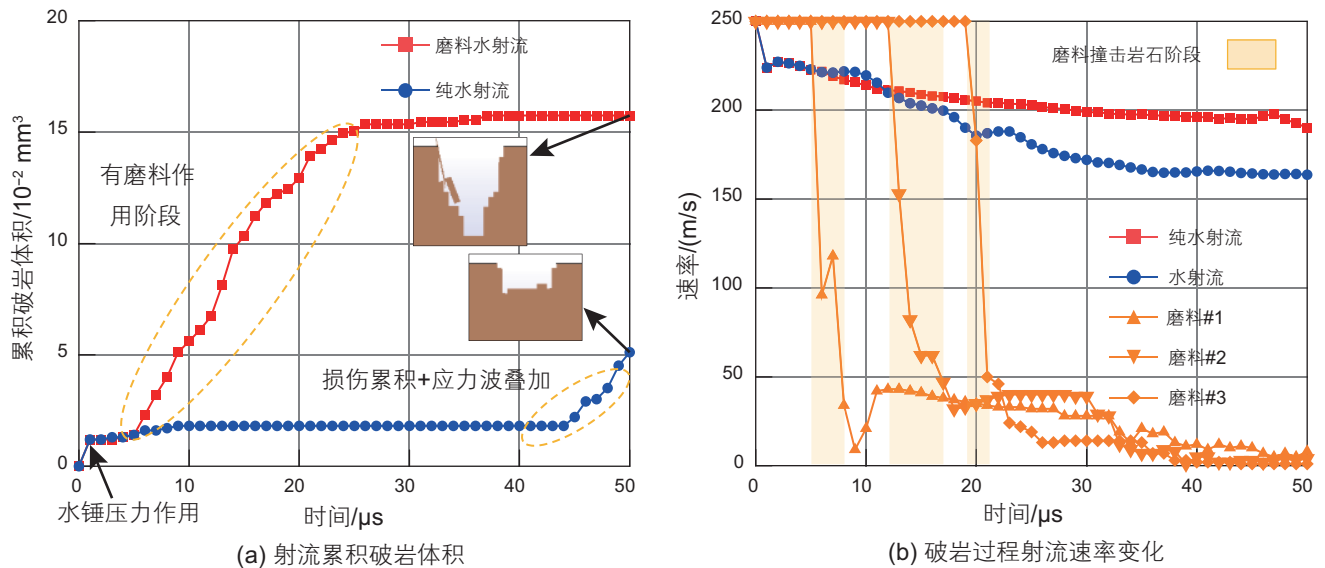
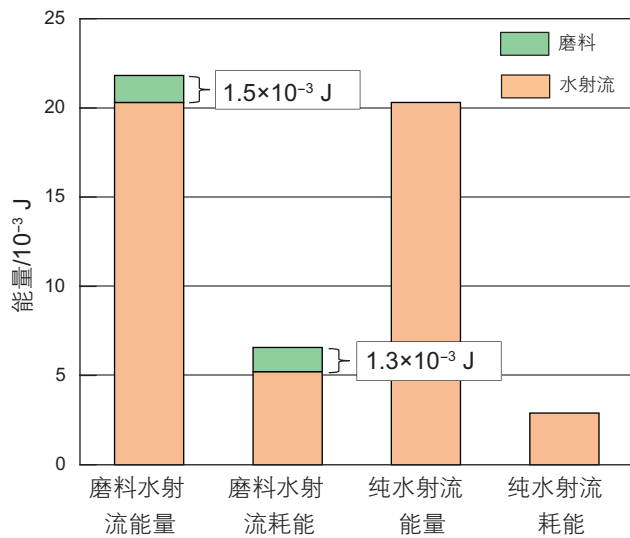
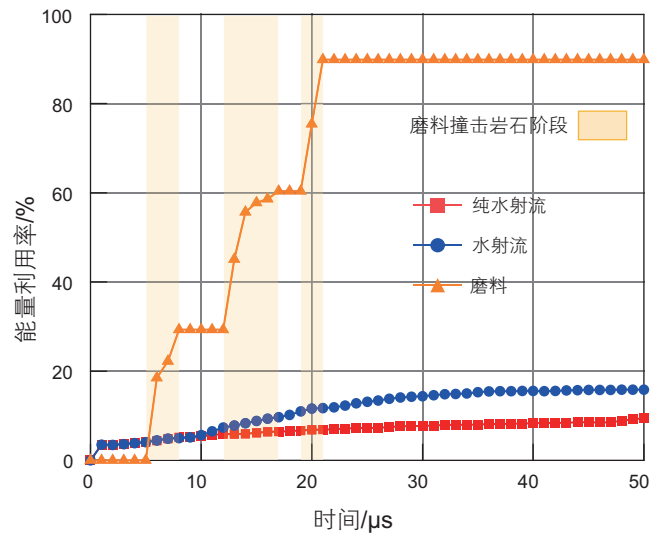


图 5 磨料水射流破岩过程
Fig. 5 Abrasive water jet rock breaking process



(a) 有磨料作用阶段射流能量与破岩耗能



(b) 射流破岩耗能变化规律

图6 磨料水射流破岩耗能

Fig. 6 Energy consumption of abrasive water jet rock breaking

磨料水射流具有更强的深穿能力。磨料水射流高效破岩与磨料的冲击作用以及磨料和水射流的协同作用有关,通过图 5(b)可以看出磨料与岩石的接触时间不到 $5 \mu\text{s}$ 其速率就降至 50 m/s ,体现磨料颗粒较强的固体冲击特性, $0\sim 25 \mu\text{s}$ 有磨料间断冲击岩石,在水射流的配合下,岩石持续破碎,直到磨料耗尽,破岩体积不再明显增加;而纯水射流仅依靠水射流冲击作用破岩,水射流速率逐渐降低,体现流体的柔性冲蚀特性,初期主要依靠射流水锤压力致使岩石表面发生体积破碎,而后岩石损伤不断累积,达到损伤破裂门限,外加应力波叠加,岩石才能再次破碎,因而破岩效率较磨料水射流大幅降低。

2.2 磨料水射流和纯水射流破岩耗能对比

图 6(a)对比了 $0\sim 25 \mu\text{s}$ 磨料水射流和纯水射流破岩耗能情况。磨料水射流破岩能量利用率远大于纯水射流,本文计算条件下,二者能量仅差磨料的 $1.5 \times 10^{-3} \text{ J}$,而磨料水射流破岩耗能是纯水射流的 2.3 倍。6(b)展示了不同时刻磨料水射流中的磨料和水射流以及纯水射流能量利用率。磨料水射流破岩的高能量利用率与磨料高效破岩以及磨料和水射流的协同作用有关。磨料冲击作用下,磨料能量利用率阶梯式增长,磨料最终 89.9% 的能量用于破岩。有磨料参与阶段,磨料和水射流协同破岩,水射流的能量利用率持续增长,水射流最终 15.9% 的能量用于破岩,而纯水射流能量利用率最终仅有 9.4%。

3 磨料—水射流协同破岩机理分析

3.1 岩石损伤时空演化特征

图 7 展示了磨料水射流作用下岩石破损规律,分析得到磨料冲击破岩的同时岩石产生局部高强度损伤,降低了水射流进一步破岩的难度。如图 7(a),损伤因子增加表明岩石单元强度降低,损伤因子骤降至 0 表明岩石单元破碎。观察射流轴向岩石单元破损特征发现,磨料水射流冲击作用使接触射流的岩石破碎,远离射流的岩石损伤,损伤程度随着距离增加递减。随着射流冲击时间增加,在磨料和水射流协同作用下,岩石单元损伤呈阶梯式累积直至破碎。如图 7(b),初期在水锤压力作用下岩石产生的损伤区直径约为射流直径的 1.5 倍,损伤因子 0.2~0.6,水射流难以进一步破岩,在磨料的冲击作用下岩石产生的损伤区直径约为磨料粒径的 1.5 倍,损伤因子 0.6~1.0,使得水射流更容易破岩。

3.2 水射流冲击压力变化特征

如图 8 所示,对比磨料水射流和纯水射流破岩过程中水射流冲击压力变化。结果表明,纯水射流的冲击压力稳定在 $30\sim 40 \text{ MPa}$,磨料水射流有磨料参与破岩阶段的水射流冲击压力波动剧烈,且冲击压力可达到同等条件下纯水射流的 1.75~2.0 倍,观察发现磨料冲击破碎岩石使得水射流和岩石之间产生新界面,与水锤压力的产生原理相同,促使水射流的冲击压力波

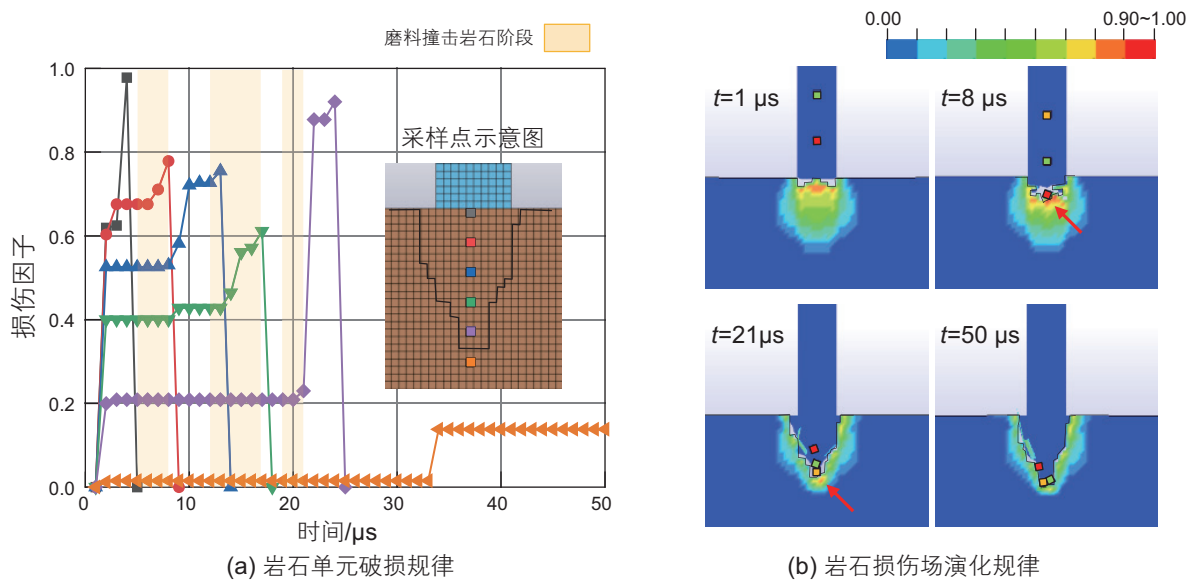


图 7 岩石单元破损时空演化特征

Fig. 7 Temporal and spatial evolution of rock unit failure

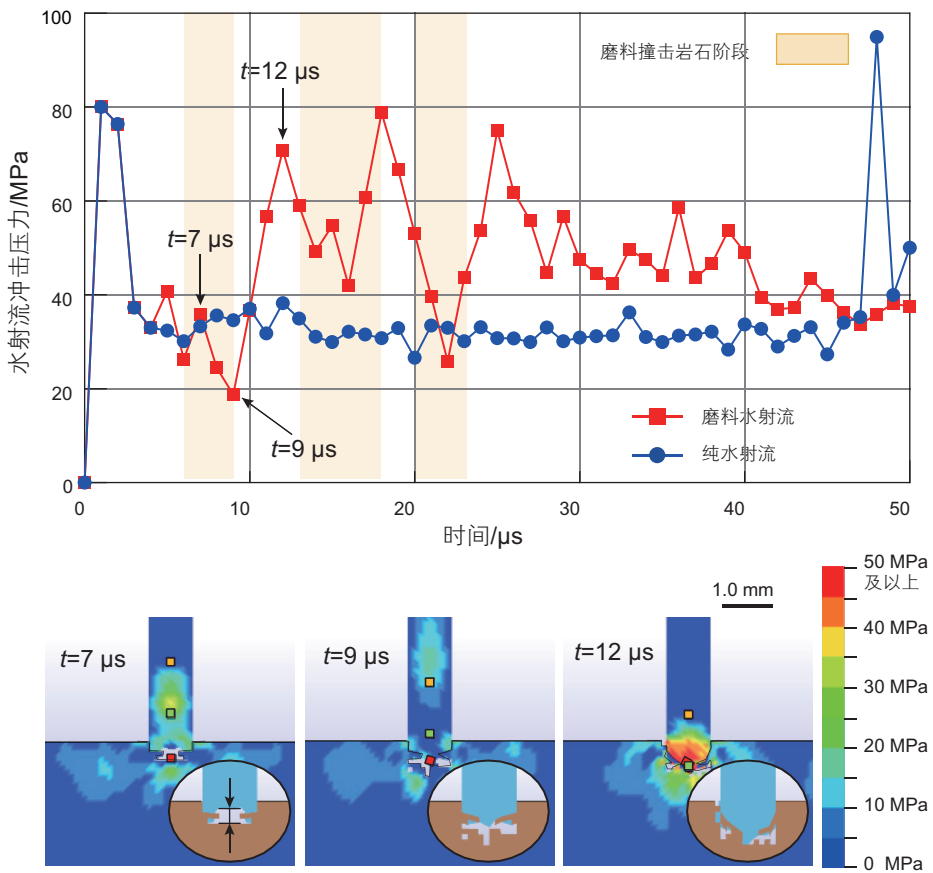


图 8 磨料水射流破岩过程水射流冲击压力极值变化特征

Fig. 8 Extreme value of water jet impact pressure during abrasive water jet rock breaking

动升高，提高了水射流的破岩能力。

前人通过对冲蚀后的岩样进行CT扫描证实了磨料水射流能够损伤岩石^[27]，但未区分损伤产生原因以及

说明损伤对破岩的进一步影响。通过图 7 发现，岩石损伤主要源于磨料沿射流轴线方向的冲击作用和水射流回流径向扩张导致的岩石拉剪破坏。磨料冲击引起

的岩石损伤程度高且主要作用于孔尖；水射流扩张引发的损伤程度低且主要作用于孔壁。因此，磨料预损伤岩石是岩石能够在磨料水射流作用下持续破碎和深穿射孔的根本原因。

以往研究认为纯水射流破岩能力弱，所以磨料水射流中的水射流破岩能力也弱，破岩主要依靠磨料的冲击作用^[28]，这种认识源于纯水射流破岩数值模拟思路对磨料水射流破岩的影响，认为射流破岩过程中的水和岩石是时刻紧密接触的，因此射流仅刚接触岩石时会产生较高的水锤压力而后压力稳定在较低水平。本文采用善于表征连续流体的ALE算法并通过两套网格建模突出了磨料的固体属性，捕捉到了磨料水射流

中的水射流不同于纯水射流的动载特征，通过图8得到磨料冲击破岩会使水和岩石之间产生新界面，水射流瞬间聚集使冲击压力波动升高从而扩大破岩效果。

通过对磨料水射流破岩过程岩石破损以及水射流冲击压力变化的分析得到磨料—水射流协同破岩机理认识。如图9(a)，磨料冲击破岩的瞬间使岩石产生微结构损伤，降低了水射流破岩的阻力，如图9(b)，水射流填入磨料破岩产生的空隙，致使水射流冲击压力波动升高，增加了水射流破岩的动力，一方面水射流的破岩阻力降低，另一方面水射流的破岩动力增加，最终促使水射流进一步破岩(图9(c))，提高了破岩效率和射流能量利用率。

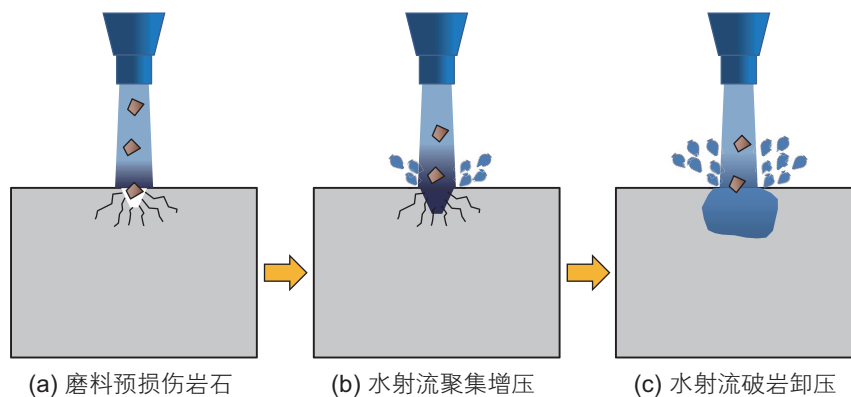


图9 磨料—水射流协同破岩作用机理图

Fig. 9 Mechanism diagram of abrasive-water cooperative rock breaking

4 结论

综合考虑岩石的动态冲击损伤作用以及水射流和磨料的协作破岩作用，聚焦磨料颗粒和水射流对岩石微秒级的冲击破坏，建立了磨料水射流破岩数值模型。磨料水射流破岩过程中磨料起主导作用，水射流起辅助作用。磨料水射流中的水相比于纯水射流具有更高

的射流打击力和能量利用率。分析得到磨料水射流中磨料—水射流协同破岩机理认识，磨料撞击岩石使岩石局部产生的高程度损伤降低了水射流破岩的难度；磨料撞击瞬间破岩促使水压力波动升高增加了水射流破岩的动力，磨料冲击预损伤岩石叠加水射流聚集增压的磨料—水射流协同作用破岩是磨料水射流破岩效率和能量利用率高于纯水射流数倍的重要机理之一。

参考文献

- [1] 李根生, 沈忠厚. 高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 96–99. [LI G S, SHEN Z H. Advances in researches and applications of water jet theory in petroleum engineering [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 96–99.]
- [2] 盛茂, 田守崧, 李根生, 等. 高压水射流冲刷作用下页岩破坏模式与力学机制 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(11): 99–106. [SHENG M, TIAN S C, LI G S, et al. Shale rock fragmentation behaviors and their mechanics by high pressure waterjet impinging [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(11): 99–106.]
- [3] 黄中伟, 李根生, 唐志军, 等. 水力喷射侧钻定向微小井眼技术 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 37–41. [HUANG Z W, LI G S, TANG Z J, et al. Technology of hydra-jet sidetracking of horizontal micro-radial laterals [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,

- 41(4): 37–41.]
- [4] 李根生, 牛继磊, 刘泽凯, 等. 水力喷砂射孔机理实验研究 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(2): 31–34. [LI G S, NIU J L, LIU Z K, et al. Experimental study on mechanisms of hydraulic sand blasting perforation for improvement of oil production [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2002, 26(2): 31–34.]
- [5] 黄中伟, 李根生. 水力射孔参数对起裂压力影响的实验研究 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 48–50. [HUANG Z W, LI G S. Experimental study on effects of hydraulic perforation parameters on initial fracturing pressure [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007, 31(6): 48–50.]
- [6] 田守增, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂机理与技术研究进展 [J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(1): 58–62. [TIAN S C, LI G S, HUANG Z W, et al. Research on hydraulic fracturing in mechanisms and technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(1): 58–62.]
- [7] HUANG F, ZHAO Z, LI D, et al. Investigation of the breaking manifestations of bedded shale impacted by a high-pressure abrasive water jet [J]. Powder Technology, 2022, 397: 117021.
- [8] LI Y, PENG J, BO K, et al. Analysis on the mechanical properties of granite rock near the wellbore after percussive drilling and AWJ perforation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106489.
- [9] XUE Y, SI H, XU D, et al. Experiments on the microscopic damage of coal induced by pure water jets and abrasive water jets [J]. Powder Technology, 2018, 332: 139–149.
- [10] CAI C, WANG X, YUAN X, et al. Experimental investigation on perforation of shale with ultra-high pressure abrasive water jet: shape, mechanism and sensitivity [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 67: 196–213.
- [11] LIU J, DU S, XUE Y. Study on the breaking process and damage characteristics of abrasive water jet impacting concrete based on acoustic emission [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120085.
- [12] 李坤元, 刘佳亮. 磨料水射流多维参数对混凝土致裂性能影响特征 [J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 110–116. [LI K Y, LIU J L. Effects of multi-dimensional parameters of abrasive water jet on cracking concrete [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 110–116.]
- [13] 司鹄, 谢延明, 杨春和. 磨料水射流作用下岩石损伤场的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2011, 32(03): 935–940. [SI H, XIE Y M, YANG C H. Numerical simulation of rock damage field under abrasive water jet [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(03): 935–940.]
- [14] 覃兆勇, 李宇, 贾元钊. 淹没状态下磨料射流破煤岩数值模拟仿真研究 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2015, 17(01): 70–73+84. [QIN Z Y, LI Y, JIA Y Z. Numerical simulation study of coal-rock erosion with submerged abrasive water jet [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2015, 17(01): 70–73+84.]
- [15] WANG J M, GAO N, GONG W J. Abrasive waterjet machining simulation by SPH method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1): 227–234.
- [16] 林晓东, 卢义玉, 汤积仁, 等. 基于 SPH-FEM 耦合算法的磨料水射流破岩数值模拟 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(18): 170–176. [LIN X D, LU Y Y, TANG J R, et al. Numerical simulation of abrasive water jet breaking rock with SPH-FEM coupling algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(18): 170–176.]
- [17] GONG W J, WANG J M, GAO N. Numerical simulation for abrasive water jet machining based on ALE algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(1): 247–253.
- [18] XUE Y, SI H, CHEN G. The fragmentation mechanism of coal impacted by water jets and abrasive jets [J]. Powder Technology, 2020, 361: 849–859.
- [19] HALLQUIST J O. LS-DYNA theory manual [J]. Livermore Software Technology Corporation, 2006, 3: 25–31.
- [20] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, 2007. 970: p. 299–800.
- [21] LIU S, LIU X, CHEN J, et al. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 607–617.
- [22] CERRONI D, MANSERVISI S. A penalty-projection algorithm for a monolithic fluid-structure interaction solver [J]. Journal of Computational Physics, 2016, 313: 13–30.
- [23] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures [J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5).
- [24] 闻磊, 李夕兵, 吴秋红, 等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究 [J]. 计算力学学报, 2016, 33(5): 725–731. [WEN L, LI X B, WU Q H, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook model for granite porphyry [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(5): 725–731.]
- [25] LIU S, CUI Y, CHEN Y, et al. Numerical research on rock breaking by abrasive water jet-pick under confining pressure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 120: 41–49.
- [26] 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 F, LU Y Y, LI S Q, 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.]
- [27] 汤积仁, 卢义玉, 孙惠娟, 等. 基于CT方法的磨料射流冲蚀损伤岩石特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 6. [TANG J R, LU Y Y, SUN H J, et al. Study of erosion and damage characteristics of rock by abrasive water jet using CT [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 6.]
- [28] 穆朝民, 戎立帆. 磨料射流冲击岩石损伤机制的数值分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 7. [MU C M, RONG L F. Numerical simulation of damage mechanism of abrasive water jet impactation on rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 7.]

(编辑 马桂霞)