

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0346

## 循环冲击作用下砂岩裂缝扩展及渗透率响应特征\*

王伟<sup>1,2</sup>, 刘泽<sup>1,2</sup>, 牛庆合<sup>1,2</sup>, 常江芳<sup>1,2</sup>, 袁维<sup>1,2</sup>, 郑永香<sup>1,2</sup>, 商松华<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 为了研究循环冲击作用下砂岩型铀矿的裂缝及渗透率特征, 通过霍普金森杆实验系统对砂岩试样进行了循环冲击, 分别在试样冲击3次、6次和9次后, 测得砂岩试样的动态力学特性。随后, 对冲击后的砂岩试样进行CT扫描, 并对扫描得到的裂隙进行了三维重构, 从而测得孔隙裂隙参数的变化, 并对冲击后试样内部结构及损伤影响进行分析。进一步, 利用微观渗流模拟对试样进行渗透性分析, 获得试样的模拟渗透率变化特征。最后, 进行了冲击后试样的渗透率室内试验, 测得实际渗透率的变化情况。结果显示: 循环冲击使得试样产生累积损伤, 降低了其动态力学性能, 随着冲击次数的增加, 试样内能量循环蓄积-释放, 导致裂缝“扩展-压实-再扩展-再压实”; 循环冲击过程中, 试样内部小而孤立的裂缝逐步形成大且相互贯通的裂缝, 而中裂缝同时存在错断、连通的双重效应, 呈现非线性变化特征; 循环冲击作用使得试样内产生更多复杂裂缝, 导致流体渗流通道更多、渗流规模更大; 循环冲击3次时, 试样形成单一裂缝, 渗透率提升340.91%~380.00%; 循环冲击6次时, 裂缝初步连通, 渗透率提升1468.18%~2893.33%; 循环冲击9次时, 形成连通裂缝网络, 渗透率提升4718.18%~9380.00%。研究表明, 循环冲击作用能够显著提高砂岩的渗透率, 裂缝扩展和连通是渗透率提升的关键驱动因素。

**关键词:** 砂岩型铀矿; 循环冲击; SHPB; CT扫描; 渗流模拟

中图分类号: O389; TD853

国标学科代码: 13015; 13035

文献标志码: A

## Characteristics of fracture propagation and permeability response of sandstone under cyclic impact effect

WANG Wei<sup>1,2</sup>, LIU Ze<sup>1,2</sup>, NIU Qinghe<sup>1,2</sup>, CHANG Jiangfang<sup>1,2</sup>, YUAN Wei<sup>1,2</sup>,

ZHENG Yongxiang<sup>1,2</sup>, SHANG Songhua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of Roads and Railway Engineering Safety Control,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China;

2. Hebei Metal Mine Safety and Efficient Mining Technology Center, Shijiazhuang 050043, Hebei, China)

**Abstract:** To investigate the fracture and permeability characteristics of sandstone-type uranium ore under cyclic impact, a Hopkinson bar experimental system was used to load sandstone samples by cyclic impacts. The dynamic mechanical properties of the sandstone samples were measured after 3, 6 and 9 impacts. Subsequently, the impacted sandstone samples were subjected to CT scanning, and the crack images obtained from the scans were reconstructed in three-dimensions to measure the changes in pore and fracture parameters. The internal structures and damages in the impacted samples were then analyzed. Furthermore, a microscopic seepage simulation was performed to analyze the permeability of the samples, revealing the changes in the simulated permeability. Finally, permeability tests were conducted on the impacted samples to measure the variations in the actual permeability. Results show that cyclic impacts cause cumulative damage in the specimens, reducing their dynamic mechanical properties. As the number of impacts increases, energy in the specimens accumulates and releases

\* 收稿日期: 2024-09-15; 修回日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(12372375); 河北省自然科学基金(E2021210128, A2024210057)

第一作者: 王伟(1978—), 男, 博士, 教授, wangweiuu@163.com

通信作者: 牛庆合(1990—), 男, 博士, 副教授, qinghniu@163.com

cyclically. This cyclic accumulation and release of energy lead to a process of crack "expansion, compaction, re-expansion, re-compaction". During the cyclic impact process, small and isolated cracks inside the specimen gradually develop into larger, interconnected fractures. Simultaneously, medium-sized cracks exhibit dual effects of faulting and connectivity, presenting nonlinear characteristics. Cyclic impacts induce more complex fractures in the specimens, leading to an increased number of fluid seepage pathways and a larger scale of seepage. When subjected to three cycles of impact, the sample forms a single crack, resulting in a permeability increase of 340.91%–380.00%. After six cycles of impact, the cracks begin to connect, leading to a permeability increase of 1 468.18%–2 893.33%. With nine cycles of impact, a connected network of cracks forms, resulting in a permeability increase of 4 718.18%–9 380.00%. The cyclic impact significantly enhances the permeability of sandstone, with crack propagation and connectivity being the key driving factors for the increase in permeability.

**Keywords:** sandstone-type uranium mines; cyclic shock; SHPB; CT scan; seepage simulation

天然铀是重要战略资源和能源矿产, 加快铀资源开发力度对保障我国资源能源安全重大战略至关重要<sup>[1]</sup>。原地浸出(简称地浸)是目前我国铀矿的主流开采方式<sup>[2]</sup>, 截至 2020 年底, 我国地浸产能已占到天然铀产能的 90% 以上<sup>[3]</sup>。地浸采铀技术要求矿床具有良好的渗透性, 然而我国 70% 以上砂岩型铀矿呈现低渗透特征<sup>[4]</sup>; 同时, 地浸中产生的矿物沉淀堵塞孔隙也造成矿床地浸效率降低<sup>[5]</sup>。由此可见, 解决矿床低渗透造成的开采难题, 是当前及未来地浸采铀领域迫切需要突破的关键技术瓶颈。

储层改造是提升低渗透储层渗透性的关键技术, 以水力压裂为代表的物理改造方法已在石油、页岩气、煤层气、干热岩开采等领域得到了应用。但铀矿矿层薄、数量多、分布散, 以静态荷载进行储层改造易形成长大裂缝, 造成溶浸液渗流短路, 对地浸效果的提升反而不利<sup>[6]</sup>。于此, 王伟等<sup>[7]</sup>提出了低渗透砂岩型铀矿爆破改造方法, 采用动荷载使矿层产生密集复杂缝网, 符合地浸开采需求, 有望成为铀矿储层改造增渗的有效技术。

爆破增渗的实质是岩石动态致裂, 针对该内容, 前人已开展了大量的研究工作。在研究动态冲击作用下岩石力学性能变化方面, 李晓锋等<sup>[8]</sup>分析了岩石动强度因子、耗散能密度及其破碎尺寸与应变率的变化关系, 建立了相应的关系模型。考虑到地应力的作用, 吕晓聪等<sup>[9]</sup>开展了围压约束下砂岩的动态力学性能实验, 认为在围压作用下砂岩具有明显的脆性-延性转化特征, 且围压具有阻止试样剪切失稳的作用; 刘少赫等<sup>[10]</sup>研究了围压对岩石冲击损伤的影响, 发现低围压状态下岩石的累积损伤程度明显更高。地下工程中常存在循环冲击作用, 王志亮等<sup>[11]</sup>基于等幅循环冲击实验, 发现随冲击次数增加, 岩石峰值应力呈现出整体减小的趋势, 而峰值应变、平均应变率及累积比能量吸收值则表现出相反的变化趋势; 许金余等<sup>[12]</sup>和于洋等<sup>[13]</sup>分析了应力-应变曲线随冲击荷载循环次数的变化特征, 揭示了循环冲击作用下动态弹性模量、损伤因子等物理量的变化关系。考虑到岩层含水及冻融的条件, 陈海亮等<sup>[14]</sup>和张蓉蓉等<sup>[15]</sup>研究了含水、冻融条件下循环冲击后砂岩动态力学性能及损伤演化规律。循环冲击作用下岩石冲击破坏形态各异, Zhou 等<sup>[16]</sup>、张明涛等<sup>[17]</sup>、金解放等<sup>[18]</sup>和褚夫蛟等<sup>[19]</sup>开展了循环冲击荷载作用下的力学性质、断裂行为和破坏形态, 发现随着冲击次数的增加, 岩石的破坏形态随之变化, 静载作用下砂岩破坏后呈现锥形破坏形式。

为了进一步刻画冲击后试样的细观损伤特性, Kawakata 等<sup>[20]</sup>和 Huang 等<sup>[21]</sup>通过 CT 扫描技术分析了在围压和动态作用下岩石孔隙和裂缝的演变规律, 实现了对岩石细观损伤的量化。李学帅等<sup>[22]</sup>研究发现循环荷载下类砂岩材料损伤变量随循环次数的增加呈线性增长趋势, 表明其在疲劳循环过程中损伤逐渐积累。为了研究动态损伤后岩体的渗流行为, 安然等<sup>[23]</sup>结合 CT 扫描结果进行渗流模拟, 从定性和定量角度探究了岩体孔隙体积分布与渗透系数的演化规律; Ju 等<sup>[24]</sup>通过 CT 成像技术和格子玻尔兹曼法(LBM)定量且直观地表征砂岩的微观结构、流速、渗透率的空间分布, 分析了砂岩体积变形对流速、有效孔隙度和渗透率的影响。王晓雨等<sup>[25]</sup>和孔茜等<sup>[26]</sup>测试了冲击致裂后岩石的渗透率, 发现冲击后岩石渗透率显著提升, 但其提升效果又同时受到围岩的限制作用。

综上所述, 前人在考虑矿层原位条件的基础上, 针对岩石动态致裂机理及规律开展了大量的探索,

但考虑到铀矿爆破增渗这一背景, 多次冲击作用下矿层增渗效果如何仍缺乏深入研究。为此, 本文首先开展围压作用条件下试样动态冲击试验, 分析循环冲击作用下试样的动态力学特征; 在此基础上, 对冲击后试样进行 CT 扫描和三维重构, 探究循环冲击作用下试样的裂缝扩展分布规律; 最后, 对冲击后试样进行渗透率测试和数值模拟, 探索循环冲击致裂试样的微观渗流过程及机理, 以为低渗透砂岩型铀矿循环爆破增渗效果预测及技术优化提供理论支撑。

## 1 实验及数值模拟方法

### 1.1 试样制备

采用岩石动力特性试验规程(T/CSRME 001—2019), 选取颗粒均匀、致密性良好的砂岩, 加工成高度 30 mm、直径 50 mm 的 9 个圆柱形试样, 并对其两端面进行精细打磨, 以确保实验的一致性和准确性。试样基本参数见表 1。

表 1 试样基本参数

Table 1 Basic parameters of samples

密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	纵波波速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
2.362	2395	54.19	7.50	0.23

### 1.2 SHPB 实验

SHPB(split Hopkinson pressure bar) 实验系统常用来研究岩石在冲击荷载作用下的动态力学性能, 主要由气枪、子弹、入射杆、透射杆、轴压/围压控制系统、监测系统组成(图 1)。子弹为纺锤形, 长度为 300 mm。入射杆和透射杆长度分别为 3 000 和 2 000 mm, 直径为 50 mm, 密度为  $7\,821\text{ kg/m}^3$ , 纵波波速为  $5\,452\text{ m/s}$ 。轴压和围压的通过油缸控制, 压力范围为  $0\sim 20\text{ MPa}$ 、测量精度可达  $\pm 1\%$ 。

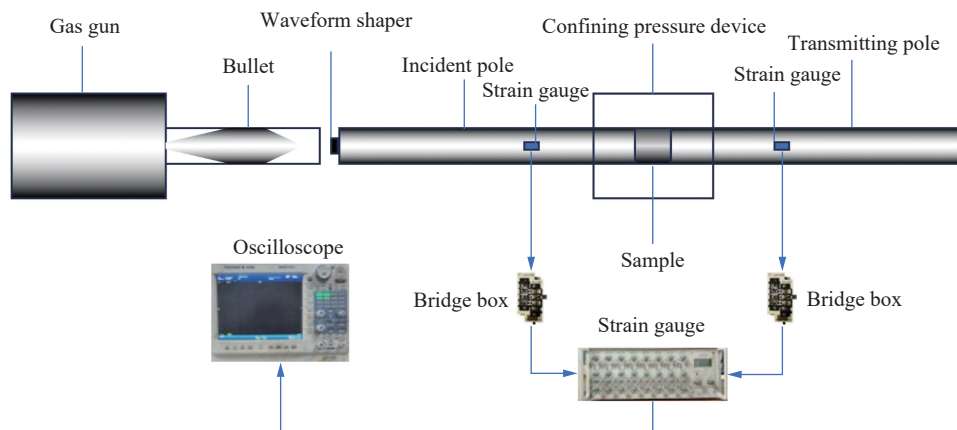


图 1 SHPB 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHPB test system

基于一维应力波理论, 将应变采集系统记录的原始数据转换得到应力  $\sigma$ 、应变  $\varepsilon$  和应变率  $\dot{\varepsilon}$ <sup>[27]</sup>:

$$\sigma = \frac{AE}{A_0} \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_r \quad (3)$$

式中:  $A$  为杆的横截面积;  $E$  为杆的弹性模量;  $A_0$  为试样横截面积;  $l_0$  为长度;  $c_0$  为压杆中的弹性波速;  $\varepsilon_t$  为透射波所对应的杆中应变;  $\varepsilon_r$  为反射波所对应的杆中应变。

具体实验步骤如下: (1) 在试样两端均匀涂抹凡士林, 确保样品在实验过程中保持稳定, 将其固定在入射杆和透射杆之间; (2) 调整围压控制系统, 给试样施加围压; (3) 调节气枪压力, 通过子弹为试样施加

冲击荷载,完成冲击作用下试样动态力学性质测试;(4)采集实验数据、观测描述冲击后试样宏观形态;(5)重复步骤(1)~(4),实现对试样的循环冲击致裂。为模拟围压作用下循环冲击过程中试样裂缝渐进式演化过程,考虑轴矿实际地质条件及爆破增渗工艺条件,通过预实验确定围压为 1 MPa,加载气压为 0.55 MPa,冲击次数分别为 3 次、6 次和 9 次。

### 1.3 CT 扫描及三维重构

CT 扫描试验仪主要参数为:双射线管、扫描电压 120 kV、扫描电流 120  $\mu$ A,分辨率 25  $\mu$ m。对循环冲击过程中试样进行 CT 扫描,获得 1600 张扫描切片,三维重构步骤如下:(1)采用高斯滤波降噪方法去除噪声,并增强图像对比度;(2)调整灰度阈值将切片二值化,获得试样基质、裂缝图像;(3)基于建立的切片孔裂缝图像,通过体积编辑等图像处理方法,建立试样的孔裂缝三维重构模型,并计算、提取孔裂缝结构的量化参数。三维重构流程见图 2。

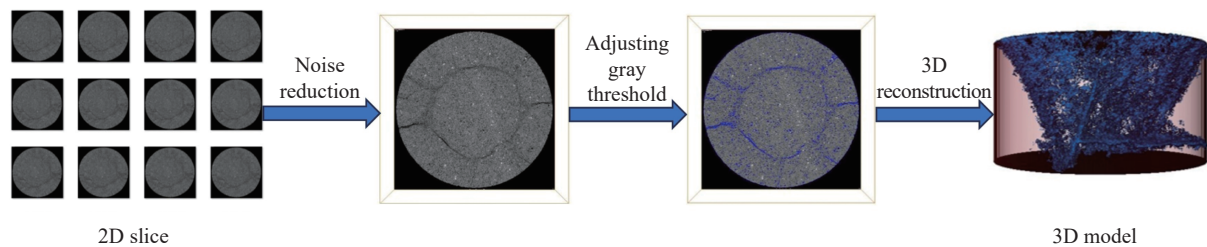


图 2 孔裂缝三维重构流程

Fig. 2 3D reconstruction process of pores and cracks

### 1.4 渗透率测试

砂岩试样的渗透率测试在岩石三轴多场耦合试验系统上进行,渗透率测试流程见图 3。实验中设定围压为 5 MPa、孔压为 3 MPa。采用稳态法测量循环冲击后的砂岩试样高渗透率测量。稳态法测砂岩渗透率遵循达西定律,通过测量水流单位时间内通过岩体的体积进行计算。计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$K_i = \frac{\mu L \Delta V}{A_0 \Delta p \Delta t_i} \quad (4)$$

式中:  $K_i$  为砂岩在  $\Delta t_i$  时间内的平均渗透率,  $\mu$  为流体黏系数,  $L$  为试样高度,  $\Delta V$  为  $\Delta t_i$  时间内通过砂岩试样的水流量,  $\Delta p$  为试样上下游渗透压差,  $\Delta t_i$  为测试时间间隔。

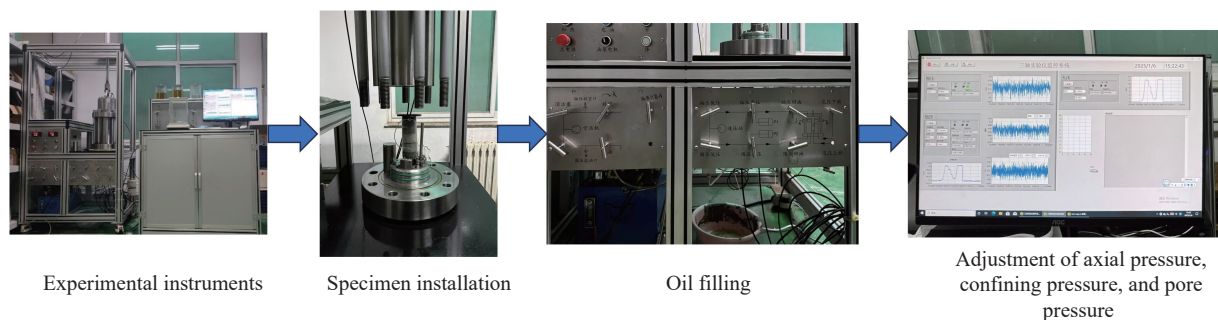


图 3 渗透率测试流程

Fig. 3 Permeability testing procedure

### 1.5 微观渗流模拟方法

采用 1.3 节的裂缝三维重构方法获得冲击后试样三维裂缝模型,提取代表性体积单元,进行微观尺度渗流模拟(图 4)。参考渗流实验条件,设置入口压力为 3 MPa、出口压力为 0.1 MPa。侧面边界设置为自由滑移壁面,其余流体壁面则设置为无滑移壁面。

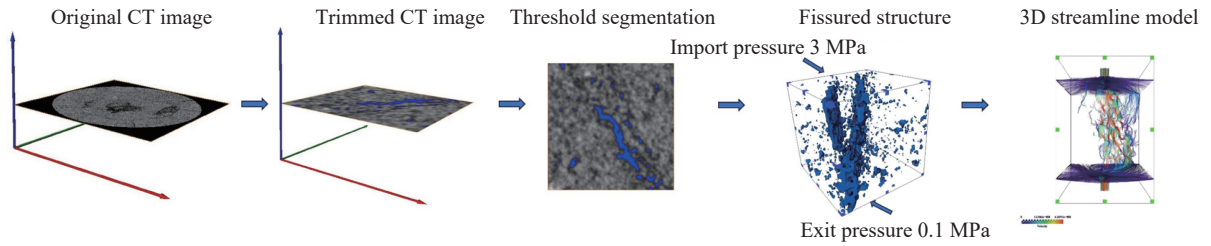


图 4 渗流模拟流程图

Fig. 4 Flow chart of seepage simulation

连通孔裂缝模型入口处的边界条件设定方程为:

$$\begin{cases} p = p_{in} \\ \mathbf{n} \cdot \mu \nabla^2 \mathbf{v} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

出口处的边界条件方程为:

$$\begin{cases} p = p_{out} \\ \mathbf{n} \cdot \mu \nabla^2 \mathbf{v} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

无光滑壁面(孔裂缝)的压力边界加载方程为:

$$\mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

自由滑移壁面的加载方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \mathbf{t} \cdot \mu (-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}) \mathbf{n} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

渗流模拟基于非定常纳维-斯托克斯方程, 简称 N-S 方程, 其表达式<sup>[29-30]</sup> 为

$$\rho \left[ \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (9)$$

式中:  $\rho [d\mathbf{v}/dt + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}]$  为惯性力;  $\nabla$  为 Nabla 算子;  $p$  为流体压力,  $p_{in}$  和  $p_{out}$  分别为入口和出口压力;  $\rho$  为水流动的密度;  $\mathbf{v}$  为流体流速;  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{t}$  分别为法向和切向的单位矢量;  $\mathbf{f}$  为体积力;  $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$  为黏性力。

通过达西定律进行渗透率计算, 其表达式为:

$$K = \frac{Q\mu L}{A_0 \Delta p} \quad (10)$$

式中:  $Q$  为体积流量;  $K$  为绝对渗透率;  $L$  为模型在流动方向的长度。

通过形状因子  $\eta$  来量化裂缝形状<sup>[5]</sup>, 即:

$$\eta = \frac{1}{\gamma\psi} = \frac{3S_0}{S_1(d_{min}/d_{max} + d_{mid}/d_{max} + d_{min}/d_{mid})} \quad (11)$$

式中:  $\gamma$  为异常指数;  $\psi$  为真球度;  $S_1$  为裂缝实际面积;  $S_0$  为与裂缝体积相同的球体的表面积;  $d_{min}$  为最小 Feret 直径;  $d_{max}$  为最大 Feret 直径;  $d_{mid}$  为位于最大 Feret 直径正交平面中的 Feret 直径。

## 2 循环冲击作用下砂岩动态力学特征及裂缝分布

### 2.1 砂岩动态力学特征

以 1 MPa 围压条件下冲击 1 次的 SHPB 试验为例, 获得了试验中试样的原始波形图(图 5)和应力平衡图(图 6)。可见, 冲击过程中电压信号波形清晰、噪声干扰少、基线稳定, 入射波、反射波和透射波的形态和时间关系合理, 符合应力波传播的物理规律。入射波与反射波的应力时程曲线叠加后几乎与透射波时程曲线重合, 证实试样在 SHPB 试验中满足动态平衡的条件, 可确保试验结果的准确性。

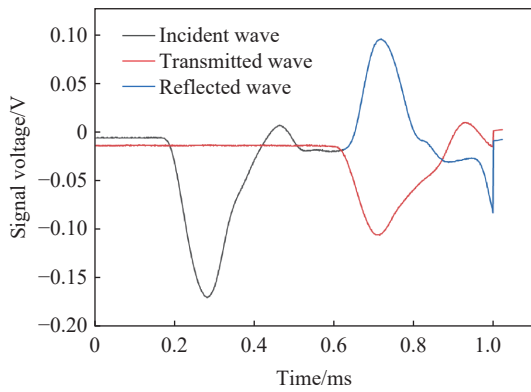


图 5 SHPB 原始波形

Fig. 5 SHPB original waveform

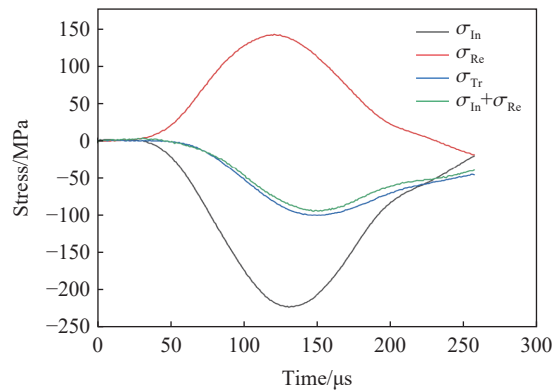


图 6 应力平衡图

Fig. 6 Stress balance diagram

试样在 9 次冲击过程中的动态应力-应变曲线见图 7。动态应力-应变曲线呈现明显的阶段性变化特征, 起初近似为直线(处于弹性变形阶段), 之后曲线趋缓进入塑性变形阶段, 接下来发生破坏进入峰后卸载阶段, 应变呈现逐渐减小的趋势, 出现明显的“回弹”现象。但是, 随着冲击次数的增加, 动态应力-应变曲线在弹性变形阶段之前出现压密阶段, 表现为在应力随应变增加缓慢(冲击 3~7 次)或基本维持不变(冲击 8~9 次)。这是因为原始试样较致密、无明显孔裂缝发育, 近似于弹性体, 卸载未被压缩。在冲击 3~7 次后, 试样内产生少量冲击裂缝, 动荷载加载后裂缝首先压缩闭合; 在冲击 8~9 次后, 试样内部冲击裂缝大量发育, 导致动荷载主要消耗于将压密裂缝, 压密阶段最明显。

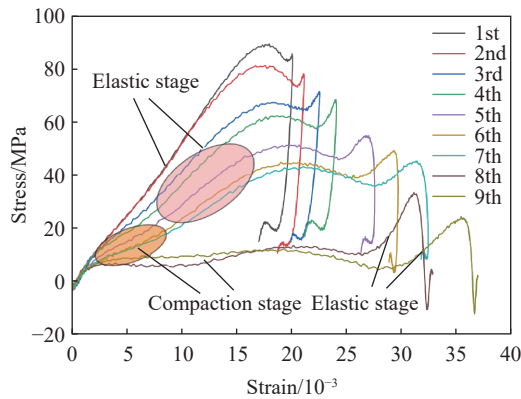


图 7 砂岩试样应力-应变曲线

Fig. 7 Stress strain curves of samples

冲击次数与应变率、峰值强度、弹性模量和峰值应变的关系见图 8。可见, 冲击次数对试样的力学参数呈现规律性的控制作用。前两次冲击平均应变率明显提升, 之后趋于稳定, 随着冲击次数从 4 次增加到 7 次, 平均应变率再次迅速升高, 之后基本维持不变。这反映了循环冲击作用下试样内部裂缝“扩展-压实-再扩展-再压实”的过程, 即: 随着冲击次数的增加, 试样内损伤裂缝扩展, 当裂缝发育到一定规模时, 试样波阻抗显著增大, 导致冲击波快速衰减, 能量更多损耗在压缩损伤裂缝上。

如图 8 所示, 冲击次数与峰值强度和弹性模量呈线性负相关关系, 与峰值应变呈现线性正相关关系, 拟合所得  $R^2$  均大于 0.97。这表明循环冲击过程中试样显示出明显的动态疲劳特性, 即: 随着冲击次数的增多, 试样内部损伤一直在累积, 使得试样表现出更显著的破坏特征, 其峰值强度和弹性模量逐渐降低。而峰值应变正好相反, 试样累积损伤的增大降低了其动态承载能力, 使得即使每次以相同的加载压力冲击试样变形也愈发明显。可见, 循环冲击作用降低了试样的力学性能, 有利于诱发产生更多损伤裂缝。

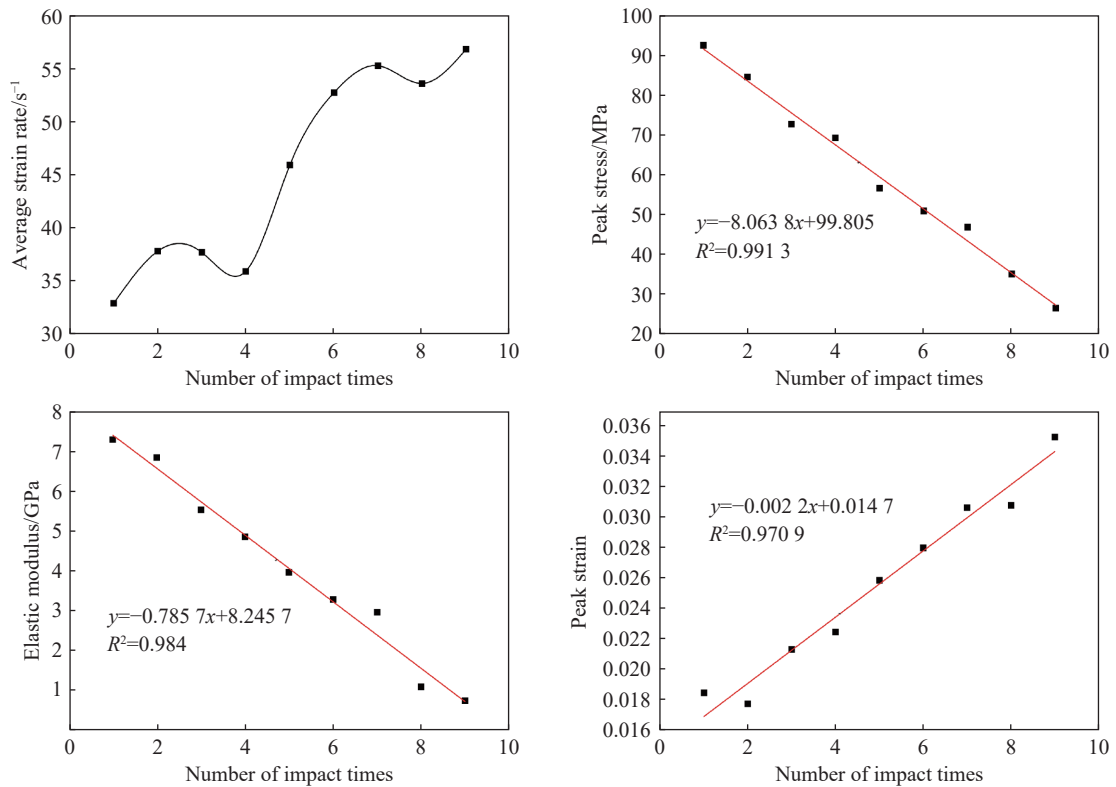


图 8 冲击次数与应变率、峰值强度、弹性模量和峰值应变的关系

Fig. 8 Relationship of strain rate, peak strength, elastic modulus and peak strain with impact times

## 2.2 冲击次数对内部结构及损伤的影响

### 2.2.1 试样的结构参数演变

基于 CT 扫描获得试样裂缝参数, 以裂缝长度为例, 将裂缝分为小裂缝(长度不足 2 mm)、中裂缝(2~5 mm)和大裂缝(超过 5 mm)。循环冲击作用下试样裂缝长度占比见图 9。随着冲击次数从 3 次、6 次增加至 9 次, 小裂缝长度占比从 41.54%、23.79% 降低至 20.57%, 中裂缝长度占比从 53.72% 先增加至 68.62% 再降低至 59.43%, 大裂缝长度占比从 4.74%、7.92% 增加至 20.00%, 这展现了循环冲击过程中裂缝的不断萌生和发育过程。随着冲击次数的增加, 小裂缝占比降低而大裂缝占比升高, 这证实了裂缝在不断的扩展和连通, 由小而孤立的裂缝形成大且相互贯通的裂缝。中裂缝占比并未呈现单调变化关系, 这反映了循环冲击作用下裂缝形态的动态演变过程, 在 6 次冲击时, 主要以小裂缝扩展形成中裂缝为主, 而在 9 次冲击时, 中裂缝转变为大裂缝占主导作用。

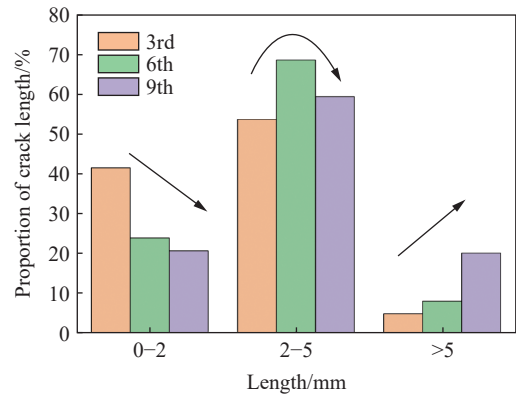


图 9 冲击后试样裂缝长度占比

Fig. 9 Proportion of crack length of samples after impact

### 2.2.2 试样的损伤演变

参考文献 [17], 以裂缝密度(即孔隙和裂缝的体积与试样体积之比)表示试样的损伤:

$$D = V/V_0 \tag{12}$$

式中:  $D$  为损伤变量,  $V_0$  为试样总体积,  $V$  为冲击后试样孔隙和裂缝的总体积。

裂缝密度和冲击次数的关系见图 10。随着冲击次数从 3 次、6 次增加至 9 次, 裂缝密度从 6.5%、8.1% 增加至 14.4%, 说明冲击次数越多裂缝密度增加越明显。这是因为试样内部预先存在的裂缝造成了多次冲击过程中应力波的反射、折射等现象, 加剧了试样内部的损伤, 导致裂缝密度显著提升。可见循环冲击作用下损伤裂缝逐步积累, 该现象与脆性材料的疲劳破坏机制一致。

### 2.3 试样形貌特征演变

依据循环冲击过程中应变率呈现阶段性变化的特征, 选取了冲击 3 次、6 次和 9 次条件下典型试样进行拍照和 CT 扫描, 结果见图 11 和

图 12。CT 扫描灰度图中亮度高的区域代表密度大, 亮度低的区域(深灰或黑色)表示密度小, 代表孔隙或裂缝。第 3 次冲击时, 试样表面未产生肉眼可见的破坏, 但 CT 扫描结果显示试样边缘存在弧形裂缝, 由于试样损伤主要在内部、且裂缝细小, 肉眼难以辨识。第 6 次冲击时, 试样端部呈现肉眼可见的裂缝, 并有岩屑掉落, CT 扫描显示裂缝逐渐延展形成环状裂缝; 第 9 次冲击时, 试样表面肉眼可见环形裂缝, CT 扫描证实试样内除了形成环状裂缝外, 也伴随大量分支裂缝, 导致试样破碎程度最大。

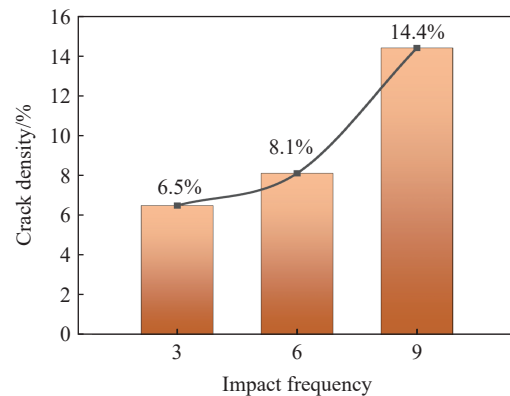


图 10 裂缝密度和冲击次数的关系

Fig. 10 The relationship between crack density and impact frequency

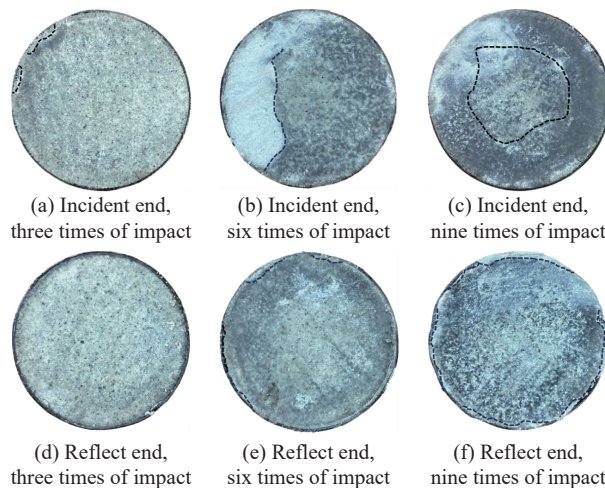


图 11 循环冲击后试样宏观照片

Fig. 11 Macroscopic photos of specimens after cyclic impact

循环冲击作用下试样三维重构模型见图 13。冲击 3 次时, 试样入射端和反射端均出现大量的损伤孔隙和裂缝, 入射端产生裂缝是冲击波荷载大于起裂强度造成的, 反射端产生裂缝是反射拉伸波沿层间传播造成的<sup>[30]</sup>。冲击 6 次时, 当预先存在于裂缝尖端的应力大于“弱化”强度时<sup>[31]</sup>, 裂缝将继续扩展, 使得孔裂缝分布范围扩大, 同时又有少量裂缝延伸距离较长并贯通整个试样; 冲击 9 次时, 产生的损伤孔裂缝继续向反射端扩展, 最终形成“锥形”环状裂缝。该裂缝分布特征的形成与实验过程中荷载施加条件有关。如图 14 所示, 冲击过程中试样承受围压( $F_w$ )作用, 一方面限制了试样侧向变形, 另一方面增加了断面摩擦力( $f$ ), 这既降抑制了径向裂缝的形成, 又增强了轴向的剪切作用, 导致试样在冲击动荷载( $F_d$ )作用下形成明显的斜主裂缝面。在循环冲击和围压共同作用下, 试样内部的损伤在冲击动荷载和围压限制的共同作用下逐步扩展: 初期, 裂缝主要集中于入射端和反射端, 受冲击波和拉伸波的作用产生裂缝; 随着冲击次数增加, 裂缝尖端的应力超过“弱化”强度, 裂缝进一步扩展并贯通试样; 最终在多次冲击后, 裂缝呈现出锥形环状和分支裂缝分布特征, 破坏形式主要表现为压剪破坏。

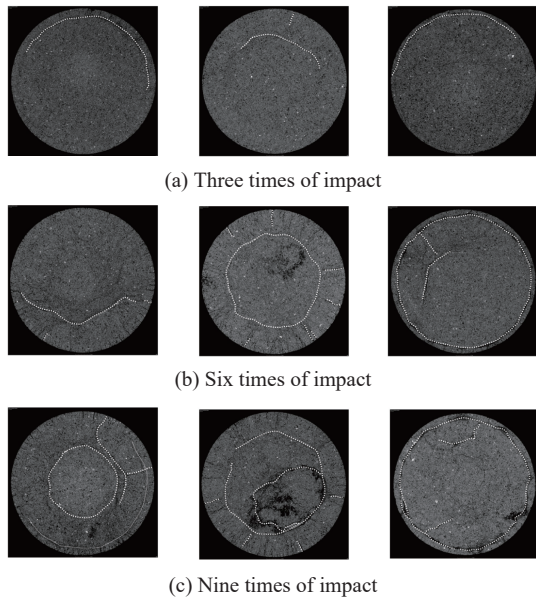


图 12 围压 1 MPa 砂岩试样 CT 扫描切片图  
Fig. 12 CT scan slice image of samples with confining pressure of 1 MPa

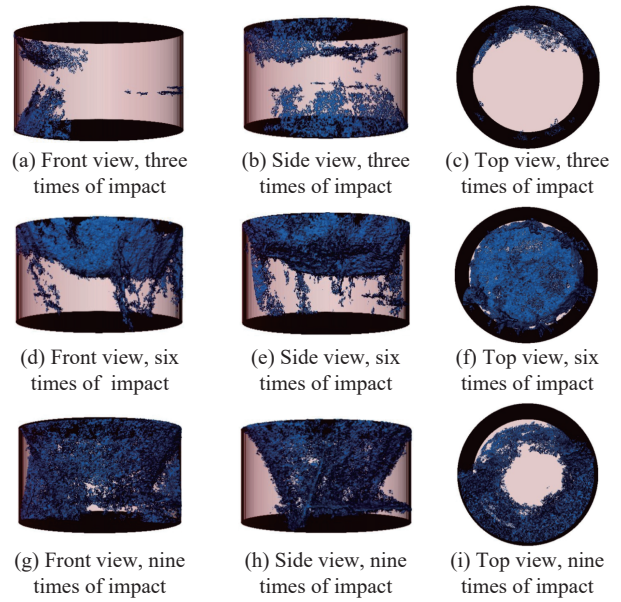


图 13 冲击后试样裂缝三维重构图  
Fig. 13 3D reconstruction of samples after impact

### 3 循环冲击作用下砂岩微观渗流响应

#### 3.1 裂缝模型提取与构建

为深入分析冲击次数对试样微观渗透特征的影响, 在冲击 3、6 和 9 次后的岩心试样中选取  $4950\ \mu\text{m} \times 4950\ \mu\text{m} \times 4950\ \mu\text{m}$  大小的含主裂缝代表性体积单元, 如图 15 所示。孤立孔隙、裂缝和主裂缝不连通, 在流体运移过程中不起作用, 在计算前将孤立孔隙和裂缝删除。冲击 3、6 和 9 次后主裂缝长度分别为  $6274.29$ 、 $7239.55$ 、 $8015.79\ \mu\text{m}$ , 开度分别为  $1800.31$ 、 $2248.79$ 、 $4015.15\ \mu\text{m}$ , 形状因子分别为  $395.76$ 、 $430.79$ 、 $552.87$ 。长度和开度的增长表明循环冲击作用提升了裂缝的尺寸, 而形状因子  $\eta$  的增长证实循环冲击作用促使裂缝扁平化、复杂化, 即主裂缝粗糙不平且存在弯曲分支裂缝。

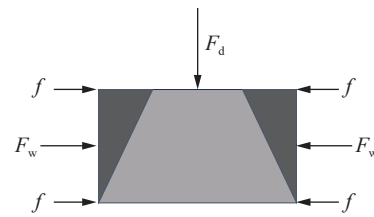


图 14 试样冲击破坏示意图

Fig. 14 Schematic diagram of sample after impact failure

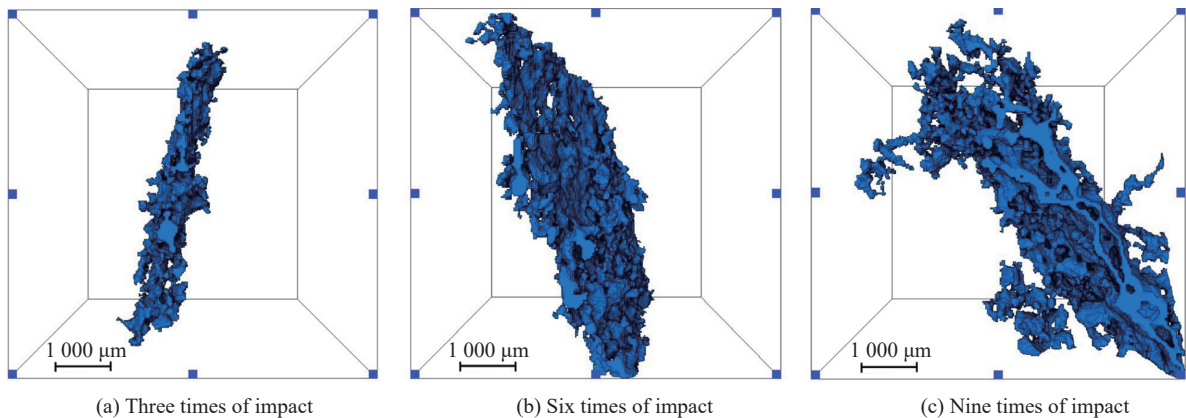


图 15 含主裂缝的代表性体积单元  
Fig. 15 Representative volume elements containing main cracks

### 3.2 裂缝微观渗流过程

为分析冲击后主裂缝的微观渗流过程, 基于 1.5 节提出的模拟方法, 获得了主裂缝流体渗流的压力分布, 如图 16 所示。冲击 3 次后, 试样内裂缝中红色区域明显, 说明裂缝内流体压力较大, 这是由于裂缝细小且存在较多喉道, 导致流体运移产生较大的阻力; 冲击 6 次后, 试样主裂缝压力降低, 且从入口向出口逐步衰减, 这是因为裂缝开度和贯穿程度的增大提升了流体输运能力, 但局部分支裂缝另一端不连通, 导致分支裂缝内流体压力较大; 冲击 9 次后, 试样主裂缝内压力分布更均匀, 除了少部分分支裂缝外, 裂缝内部压力较低, 证实试样裂缝内流体稳定渗流。

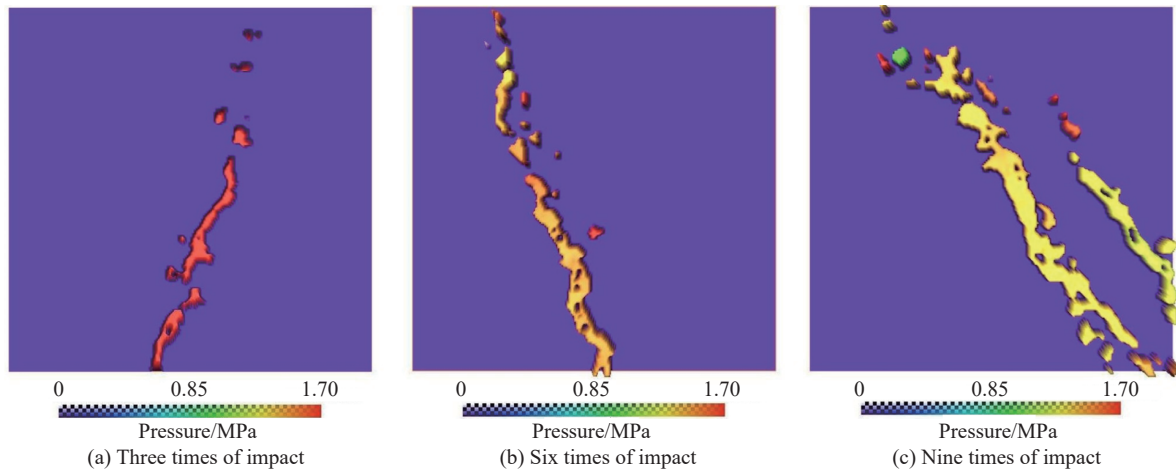


图 16 代表性体积单元的流体压力分布

Fig. 16 Fluid pressure distribution of representative volume element containing main crack

流体渗流过程中流线反映了渗流速度和局部渗透率, 循环冲击后试样主裂缝的流线分布见图 17。裂缝中流体的渗流特征与裂缝开度密切相关, 当渗流通道变窄时, 流线聚集、流速增大, 呈现红色区域; 相反, 当渗流通道较宽时, 流线稀疏、流速降低, 呈现蓝色区域。

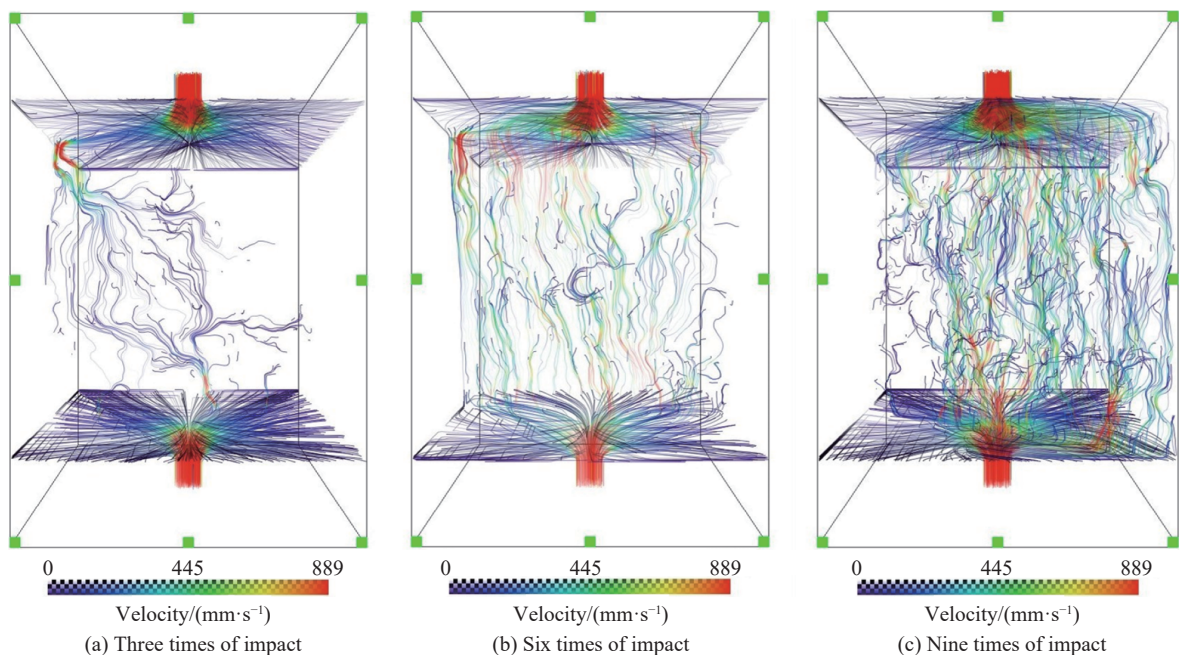


图 17 循环冲击后试样主裂缝的流线分布

Fig. 17 Streamline distribution of main cracks in samples after cyclic impact

3次冲击后,裂缝渗流通道单一,在出口端聚集,导致试样渗透率较低;3次冲击后,贯通性的裂缝数量明显增多,增加了从入口到出口的渗流通道,试样渗透率得到提升;9次冲击后,裂缝高度发育且连通性较好,渗流路径更为复杂、渗流规模更大,试样渗透率显著提升。试样主裂缝内流体流线清晰反映了流体微观运移特征,流体的渗流行为受控于裂缝尺寸和裂缝形态。可见,提升冲击次数可增加裂缝的复杂程度,提升了试样渗透性能,但同时裂缝壁面的粗糙性和较多的喉道也对流体渗流起到一定的抑制作用。

### 3.3 冲击次数对渗透率的影响

基于1.4节渗透率测试方法,获得了循环冲击下试样实测和数值模拟渗透率,见表2。随着冲击次数增加至3、6、9次,实测渗透率增加到0.72、4.49、14.22 mD,相比于无冲击情况下提升了380.00%、2893.33%和9380.00%;数值模拟渗透率增加到3.88、13.80、42.40 mD,相比于无冲击情况下提升了340.91%、1468.18%和4718.18%。

随着冲击次数的增加,试样的动态力学强度逐渐降低,表现出较明显的疲劳效应,这一过程伴随着裂缝的扩展和贯通。冲击次数较低时,裂缝主要集中于局部区域,渗透率变化不显著;随着冲击次数的增加,裂缝逐渐扩展并连通,试样内部形成贯通性渗流通道,渗透率显著提升,证实了循环冲击作用对提升试样渗透率的积极作用。但实测渗透率均低于模拟渗透率,其原因可能是:(1)试样在冲击后裂缝内部存在微小矿物颗粒或粉末,在实测渗透率过程中堵塞渗流通道;(2)数值模拟中仅考虑了裂缝对微观流体渗流的影响,未考虑围压的作用,实测渗透率中试样承载有围压,其裂缝开度要低于数值模拟的模型;(3)CT扫描及三维重构过程中存在误差,CT扫描的分辨率无法完全捕捉到试样中微小裂缝,导致三维重构裂缝模型比实际更为理想化。以上原因导致实测渗透率要低于数值模拟渗透率,尽管如此,本文采用的冲击后裂缝微观渗流模拟方法,可以较好地模拟流体微观渗流行为,可用于揭示爆破后砂岩型铀矿裂缝非均匀渗流特性。

## 4 结论

基于SHPB实验、CT扫描及三维重构、渗透率测试及数值模拟等技术,首先分析了循环冲击作用下试样的动态力学性能及宏细观破坏特征,其次量化了冲击后试样孔裂缝的三维结构参数,获得了冲击次数对孔裂缝参数的影响规律,最后,揭示了主裂缝中流体微观渗流过程,阐明了循环冲击作用对试样的增渗效果,主要结论如下:

(1)循环冲击过程中试样动态应力-应变曲线呈现明显的压密阶段,累积损伤使得试样承载能力降低;循环冲击作用下试样平均应变率呈现非线性变化,反映了试样内部裂缝“扩展-压实-再扩展-再压实”的过程,证实了其能量循环蓄积-释放的特点;冲击次数与峰值强度和弹性模量呈线性负相关关系,与峰值应变呈线性正相关关系,循环冲击作用使得试样内部疲劳损伤,降低了其动态力学性能,有利于诱导更多损伤裂缝;

(2)循环冲击后试样内部裂缝不断扩展、最终形成“锥形”环状裂缝,属于压剪破坏模式;随着冲击次数的增加,试样中小裂缝占比降低而大裂缝占比升高,反映出小而孤立的裂缝逐步形成大且相互贯通的裂缝,中裂缝同时存在错断、连通的双重效应,其变化呈现非线性特征;

(3)试样主裂缝流体压力随着冲击次数增大而减小,分支裂缝和孤立裂缝压力较大,对流体渗流作用不大;渗流过程中流线清晰反映了裂缝尺寸和裂缝形态对微观渗流的控制作用,随着冲击次数增大,流体渗流通道更多、渗流规模更大,但裂缝壁面的粗糙性和较多的喉道也对流体渗流起到一定的抑制作用;

(4)循环冲击3次时,试样形成单一裂缝,渗透率提升340.91%~380.00%;循环冲击6次时,裂缝初

表2 循环冲击下试样实测和数值模拟渗透率

Table 2 Actual measurement and numerical simulation of permeability of specimens under cyclic impact

方法	渗透率/mD			
	无冲击	冲击3次	冲击6次	冲击9次
实测值	0.15	0.72	4.49	14.22
数值模拟值	0.88	3.88	13.80	42.40

步连通,渗透率提升1468.18%~2893.33%;循环冲击九次时,形成连通裂缝网络,渗透率提升4718.18%~9380.00%;循环冲击作用能够显著提高砂岩的渗透率,裂缝扩展和连通是渗透率提升的关键驱动因素。

## 参考文献:

- [1] 王伟豪,刘金辉,阳奕汉,等.地浸采铀过程中含矿层渗透性演化的示踪试验[J].*有色金属(冶炼部分)*,2024(2):72–82. DOI:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.02.011.  
WANG W H, LIU J H, YANG Y H, et al. Tracer test of permeability evolution of ore-bearing layer during in-situ leaching of uranium [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(2): 72–82. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2024.02.011.
- [2] 牛庆合,何佳彬,王伟,等.基于渗流-化学-应力多场耦合的砂岩型铀矿 $\text{CO}_2+\text{O}_2$ 地浸开采的数值模拟[J].*有色金属(冶炼部分)*,2023(6):144–152. DOI:10.3969/j.issn.1007-7574.2023.06.016.  
NIU Q H, HE J B, WANG W, et al. Numerical simulation of  $\text{CO}_2+\text{O}_2$  in-situ leaching of sandstone type uranium deposit based on multifield coupling of seepage-chemistry-stress [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023(6): 144–152. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7574.2023.06.016.
- [3] 陶峰,张传飞,冯国平,等.某砂岩型铀矿 $\text{CO}_2+\text{O}_2$ 地浸采铀试验[J].*有色金属(冶炼部分)*,2022(6):56–61. DOI:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.06.010.  
TAO F, ZHANG C F, FENG G P, et al.  $\text{CO}_2+\text{O}_2$  in-situ leaching of uranium from a sandstone type uranium deposit [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2022(6): 56–61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2022.06.010.
- [4] 苏学斌.第三代铀采冶技术有望成为“走出去”的新生力量[J].*中国核工业*,2015(11):28–29.
- [5] 王刚,陈昊,陈雪畅,等.基于CT三维重构煤体变开度裂隙渗流特性研究[J].*中国矿业大学学报*,2024,53(1):59–67. DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.20230128.  
WANG G, CHEN H, CHEN X C, et al. Study on seepage characteristics of coal fissures with variable apertures based on CT 3D reconstruction [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(1): 59–67. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20230128.
- [6] ZHOU X Y, WANG W, NIU Q H, et al. Geochemical reactions altering the mineralogical and multiscale pore characteristics of uranium-bearing reservoirs during  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in situ leaching [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1094880. DOI: 10.3389/feart.2022.1094880.
- [7] 王伟,李小春.低渗透砂岩型铀矿床增渗方法及其可行性研究[J].*岩土力学*,2009,30(8):2309–2314. DOI:10.16285/j.rsm.2009.08.002.  
WANG W, LI X C. Study of enhanced permeability methods and their feasibility in low-permeability sandstone-type uranium deposit [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2309–2314. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.08.002.
- [8] 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 rocks 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.
- [9] 吕晓聪,许金余,葛洪海,等.围压对砂岩动态冲击力学性能的影响[J].*岩石力学与工程学报*,2010,29(1):193–201.  
LV X C, XU J Y, GE H H, et al. Effects of confining pressure on mechanical behaviors of sandstone under dynamic impact loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 193–201.
- [10] 刘少赫,许金余,王鹏,等.围压条件下砂岩循环冲击损伤的力学与超声分析[J].*振动与冲击*,2015,34(1):190–194. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2015.01.033.  
LIU S H, XU J Y, WANG P, et al. Mechanical and ultrasonic analysis on damage of sandstone under cyclical impact loading with confining pressure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(1): 190–194. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.01.033.
- [11] 王志亮,汪大为,汪书敏,等.循环冲击下大理岩的损伤力学行为及能量耗散特性[J].*爆炸与冲击*,2024,44(4):043104. DOI:10.11883/bzycj-2023-0243.  
WANG Z L, WANG D W, WANG S M, et al. Dynamic behaviors and energy dissipation characteristics of marble under cyclic impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(4): 043104. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0243.
- [12] 许金余,吕晓聪,张军,等.循环冲击作用下围压对斜长角闪岩动态特性的影响研究[J].*振动与冲击*,2010,29(8):60–63,72. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2010.08.005.

- XU J Y, LV X C, ZHANG J, et al. Research on dynamic mechanical performance of amphibolite under cyclical impact loadings at different confining pressures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(8): 60–63, 72. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.08.005.
- [13] 于洋, 徐倩, 刁心宏, 等. 循环冲击对围压作用下砂岩特征的影响 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(6): 127–132. DOI: 10.13245/j.hust.190623.
- YU Y, XU Q, DIAO X H, et al. Effect of cyclic impact on sandstone characteristics under confining pressures [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(6): 127–132. DOI: 10.13245/j.hust.190623.
- [14] 陈海亮. 含水砂岩循环冲击载荷下力学特性与损伤演化规律研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023. DOI: [10.27623/d.cnki.gzkyu.2023.001708](https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2023.001708).
- CHEN H L. Study on mechanical characteristics and damage evolution of water-bearing sandstone under cyclic impact loading [D]. Xuzhou, Jiangsu, China: China University of Mining and Technology, 2023. DOI: [10.27623/d.cnki.gzkyu.2023.001708](https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2023.001708).
- [15] 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(8): 081443. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0449.
- ZHANG R R, SHEN Y H, MA D D, et al. Dynamic characteristics and damage mechanism of freeze-thaw treated red sandstone under cyclic impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(8): 081443. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0449.
- [16] ZHOU T, HAN Z Y, LI D Y, et al. Experimental study of the mechanical and fracture behavior of flawed sandstone subjected to coupled static-repetitive impact loading [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 117: 103161. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103161.
- [17] 张明涛. 基于 SHPB 试验的灰砂岩动态破坏过程及应变-损伤演化规律研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020. DOI: [10.27334/d.cnki.gstdy.2020.000427](https://doi.org/10.27334/d.cnki.gstdy.2020.000427).
- ZHANG M T. Study on dynamic failure process and strain-damage law of gray sandstone based on SHPB test [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. DOI: [10.27334/d.cnki.gstdy.2020.000427](https://doi.org/10.27334/d.cnki.gstdy.2020.000427).
- [18] 金解放, 李夕兵, 王观石, 等. 循环冲击载荷作用下砂岩破坏模式及其机理 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2012, 43(4): 1453–1461.
- JIN J F, LI X B, WANG G S, et al. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(4): 1453–1461.
- [19] 褚夫蛟, 刘敦文, 陶明, 等. 基于 SHPB 的不同含水状态砂岩动态响应 [J]. *工程科学学报*, 2017, 39(12): 1783–1790. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.12.002.
- CHU F J, LIU D W, TAO M, et al. Dynamic response of sandstones with different water contents based on SHPB [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(12): 1783–1790. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.12.002.
- [20] KAWAKATA H, CHO A, KIYAMA T, et al. Three-dimensional observations of faulting process in Westerly granite under uniaxial and triaxial conditions by X-ray CT scan [J]. *Tectonophysics*, 1999, 313(3): 293–305. DOI: 10.1016/s0040-1951(99)00205-x.
- [21] HUANG S, XIA K, ZHENG H. Observation of microscopic damage accumulation in brittle solids subjected to dynamic compressive loading [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9): 093903. DOI: 10.1063/1.4821497.
- [22] 李学帅. 循环荷载作用下类砂岩损伤演化特征与本构模型研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022. DOI: [10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000317](https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000317).
- LI X S. Study on damage evolution characteristics and constitutive model of sandstone-like under cyclic loading [D]. Huainan, Anhui, China: Anhui University of Science and Technology, 2022. DOI: [10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000317](https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000317).
- [23] 安然, 陈昶, 牛玉璋. 考虑干湿循环影响的残积土  $\mu$ -CT 扫描与渗流模拟 [J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(2): 228–235. DOI: 10.15961/j.jsuese.202200626.
- AN R, CHEN C, NIU Y Z.  $\mu$ -CT tests and seepage simulations of residual soil under the influence of wetting-drying cycles [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(2): 228–235. DOI: 10.15961/j.jsuese.202200626.
- [24] JU Y, WANG J B, GAO F, et al. Lattice-Boltzmann simulation of microscale  $\text{CH}_4$  flow in porous rock subject to force-induced deformation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(26): 3292–3303. DOI: 10.1007/s11434-014-0465-5.
- [25] 王晓雨. 冲击荷载下砂岩动态损伤与渗透率演化规律研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022. DOI: [10.27334/d.cnki](https://doi.org/10.27334/d.cnki).

- [gstdy.2022.000019](#).
- WANG X Y. Study on dynamic damage and permeability evolution of sandstone under impact load [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022. DOI: [10.27334/d.cnki.gstdy.2022.000019](#).
- [26] 孔茜,王环玲,徐卫亚.循环静卸载作用下砂岩孔隙度与渗透率演化规律试验研究[J].*岩土工程学报*,2015,37(10):1893–1900. DOI: [10.11779/CJGE201510018](#).
- KONG Q, WANG H L, XU W Y. Experimental study on permeability and porosity evolution of sandstone under cyclic loading and unloading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1893–1900. DOI: [10.11779/CJGE201510018](#).
- [27] 王伟,梁渲钰,张明涛,等.动静组合加载下砂岩破坏机制及裂纹密度试验研究[J].*岩土力学*,2021,42(10):2647–2658. DOI: [10.16285/j.rsm.2021.0095](#).
- WANG W, LIANG X Y, ZHANG M T, et al. Experimental study on failure mechanism and crack density of sandstone under combined dynamic and static loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2647–2658. DOI: [10.16285/j.rsm.2021.0095](#).
- [28] 张培森,侯季群,赵成业,等.不同应力状态下底板岩体渗流特性分析研究[J].*煤炭科学技术*,2022,50(1):127–133. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2336.2022.1.mtkxjs202201011](#).
- ZHANG P S, HOU J Q, ZHAO C Y, et al. Analysis and study on seepage characteristics of floor rock mass under different stress states [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 127–133. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2336.2022.1.mtkxjs202201011](#).
- [29] 高振.煤体微细观孔裂隙演化及瓦斯渗流规律实验研究[D].西安:西安科技大学,2022. DOI: [10.27397/d.cnki.gxaku.2022.000103](#).
- GAO Z. Experimental study on fracture evolution and gas seepage law of coal micro-pore [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022. DOI: [10.27397/d.cnki.gxaku.2022.000103](#).
- [30] 郎颖娴,梁正召,钱希坤,等.岩体结构面对应力波传播及动态破坏影响研究[J].*地下空间与工程学报*,2023,19(6):1896–1906.
- LANG Y X, LIANG Z Z, QIAN X K, et al. A study on the effect of rock discontinuities on stress wave propagation and dynamic fracture [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(6): 1896–1906.
- [31] 杨科,刘文杰,马衍坤,等.煤岩组合体冲击动力学特征试验研究[J].*煤炭学报*,2022,47(7):2569–2581. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2021.1279](#).
- YANG K, LIU W J, MA Y K, et al. Experimental research on dynamic characteristics of coal-rock combined specimen [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2569–2581. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2021.1279](#).

(责任编辑 王小飞)