

# 旋转磨料射流破碎碳酸盐岩参数影响规律及机理研究

李欢, 黄中伟\*, 李敬彬, 程康, 李文彬, 胡静茹

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, huangzw@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-10-09

国家自然科学基金重大科研仪器研制项目“水力喷射径向水平井综合实验系统”(51827804)资助

**摘要** 旋转磨料射流喷射钻进径向水平井是经济高效开发碳酸盐岩油藏的潜在有效手段。基于旋转磨料射流破碎灰岩室内实验, 证实了其碳酸盐岩储层喷射钻进可行性、揭示了关键参数对破岩效果的影响规律、优选了最优作业参数组合, 并探析了岩石破碎机理。研究表明: 旋转磨料射流冲击灰岩形成一个规则光滑、底部存在凸起的圆形孔眼, 孔眼剖面为“W”型, 孔眼直径大于入井管串的最大外径, 且凸起可被后续射流剥蚀而不影响管线连续送进, 证实了其碳酸盐岩储层喷射钻进可行性; 成孔直径随喷射压力、喷射距离、喷射时间的增加而增加, 随磨料质量浓度的增加先增加后减小; 成孔深度和体积随喷射压力、喷射时间的增加而增加, 随喷射距离的增加而减小, 随磨料质量浓度的增加先增加后减小; 本文实验条件下的最优作业参数组合为射流压力 30 MPa、喷射距离 0、磨料质量浓度 9.0%~10.0%、喷射时间 60 s; 在旋转磨料射流破碎碳酸盐岩过程中, 其不单以磨料颗粒大角度冲击下产生的拉伸作用破岩, 同时还伴以磨料颗粒小角度冲击下产生的剪切作用破岩, 由于岩石抗拉、抗剪强度远低于其抗压强度, 从而使得旋转磨料射流具有较高的破岩能力和破岩效率。研究结果可望为旋转磨料射流喷射钻进径向水平井开发碳酸盐岩油藏提供理论依据和实验基础。

**关键词** 旋转射流; 磨料射流; 岩石破碎; 径向水平井; 碳酸盐岩油藏

**中图分类号**: TE242; TD353

## Investigation on the effect of process parameters and rock breaking mechanisms on swirling impeller abrasive water jet breaking carbonate rock

LI Huan, HUANG Zhongwei, LI Jingbin, CHENG Kang, LI Wenbin, HU Jingru

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

Received: 2023-05-30; Revised: 2023-10-09

**Abstract** Radial swirling impeller abrasive water jet drilling technology is a potential cost-effective way to develop carbonate reservoirs. Swirling impeller abrasive water jet carbonate rock breaking experiments are utilized to study the feasibility of drilling radial branches in carbonate reservoirs. Besides, the influence law of process parameters and optimal process parameter combination on the swirling impeller abrasive water jet carbonate rock breaking performances are studied and illustrated. Finally,

引用格式: 李欢, 黄中伟, 李敬彬, 程康, 李文彬, 胡静茹. 旋转磨料射流破碎碳酸盐岩参数影响规律及机理研究. 石油科学通报, 2024, 09(06): 991-1004

LI Huan, HUANG Zhongwei, LI Jingbin, CHENG Kang, LI Wenbin, HU Jingru. Investigation on the effect of process parameters and rock breaking mechanisms on swirling impeller abrasive water jet breaking carbonate rock. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(06): 991-1004. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.076

the carbonate rock breaking mechanisms of swirling impeller abrasive water jet are discussed and revealed. The results of this study showed that the swirling impeller abrasive water jet could create a regular smooth circular hole with a conical bulge at the hole bottom. The cross-section of the swirling impeller abrasive water jet drilled hole presented a “W”-shape. The jet drilled hole diameter was greater than the maximum outside diameter of the jetting pipe string and the conical bulge at the hole bottom could be eroded by the subsequent jet, which proofed that it was feasible for the swirling impeller abrasive water jet to drill radial branches in carbonate reservoirs. The jet drilled hole diameter increased with the increase in the jetting pressure, the standoff distance and the exposure time. And, it increased firstly and then decreased with the increase in the abrasive mass concentration. The jet drilled hole depth and hole volume increased with the increase in the jetting pressure and the exposure time, and with a decrease in the standoff distance. And, they increased firstly and then decreased with the increase in the abrasive mass concentration. The optimal process parameter combination under our experimental conditions was the jetting pressure, standoff distance, abrasive mass concentration and exposure time were the 30 MPa, 0, 9.0%~10% and 60 s respectively. In the process of swirling impeller abrasive water jet carbonate rock breaking, the swirling impeller abrasive water jet not only through the tension force that was created by the high angle abrasive particle impact, but also through the shear force that was created by the low angle abrasive particle impact to break the carbonate rock. Since the tensile strength and shear strength of carbonate rock material was far small than the compressive strength, the swirling impeller abrasive water jet possessed a high rock breaking ability and efficiency on carbonate rock. The research results were expected to provide a theoretical basis and experimental foundation for utilizing the swirling impeller abrasive water jet to drilling radial branches in carbonate reservoirs.

### Keywords

**Keywords** swirling jet; abrasive jet; rock breaking; radial jet drilling; carbonate reservoir

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.076

## 0 引言

中国碳酸盐岩油藏分布面积广, 储量丰富, 实现其经济高效开发具有重要的现实意义<sup>[1-3]</sup>。然而碳酸盐岩油藏具有典型的双重或三重孔隙结构, 储层非均质性强, 油气赋存条件复杂, 给钻采工程工艺带来诸多挑战<sup>[4-7]</sup>。水力喷射径向水平井技术(Radial Jet Drilling Technology, 简称RJD)采用水力能量破岩, 可沿垂直主井筒方向钻出一条或多条呈辐射状分布的径向孔眼(直径30~50 mm), 可形成“一井多层、同层多支”的三维立体井网结构, 具有施工工艺简单、操作成本低、不受地应力控制、可穿透近井污染带、储集体钻遇率高等优点, 并可与酸化压裂等油井增产手段相结合, 被证明是碳酸盐岩油藏经济高效开发的有效手段<sup>[8-12]</sup>。然而, 碳酸盐岩储层岩性多为灰岩、白云岩和白垩岩, 其力学强度高, 使得纯水力能量难以高效破碎。为进一步实现利用水力喷射径向水平井技术经济高效开发碳酸盐岩油藏, 亟需高效的射流破碎硬质碳酸盐岩新方法。

磨料直射流冲击力强, 但扩散性弱; 旋转水射流扩散性强, 但冲击力小。结合磨料直射流和旋转水射流各自优点, 沈忠厚等提出旋转磨料射流破岩技术<sup>[13]</sup>。旋转磨料射流由高压磨料浆体流经叶轮式旋转喷嘴产生, 兼具冲击力强和扩散性高的特点, 破解了现有射流类型破岩能力和破岩孔径之间的矛盾, 可高

效破碎硬质岩石形成大直径孔眼, 是实现水力喷射径向水平井技术高效开发碳酸盐岩油藏的重要保证<sup>[14-15]</sup>。周蒙蒙等<sup>[12, 16]</sup>开展了旋转磨料射流破碎碳酸盐岩成孔特性实验研究, 其采用的喷嘴入口直径为18 mm, 出口直径为5 mm。结果表明, 在喷射压力25 MPa、磨料质量浓度10%、无因次喷距2、喷射时间60 s的实验场景下, 可在抗压强度170.7 MPa的硬质灰岩上形成直径62 mm的规则圆形孔眼, 完全满足水力喷射径向水平井技术需求。然而, 旋转磨料射流破岩场景复杂且涉及参数多, 参数影响规律和岩石破碎机理尚不明确, 相关研究少见文献报道。明晰旋转磨料射流破岩参数影响规律, 优化作业参数组合、并揭示破岩机理, 对旋转磨料射流应用于水力喷射径向水平井技术开采碳酸盐岩油藏具有重要理论价值和指导意义。

为解决上述问题, 本文以灰岩为实验岩样, 采用室内实验的方法开展了不同参数组合下旋转磨料射流破岩研究, 以破岩孔径、深度、体积为评价指标揭示了关键参数(喷射压力、磨料质量浓度、喷射距离、喷射时间等)影响规律, 并优选了最优作业参数组合; 结合扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)等微观检测手段, 分析了孔眼壁面的断口形貌, 并从微观角度阐述了旋转磨料射流岩石破碎机理。本文研究结果可望为旋转磨料射流应用于水力喷射径向水平井技术开采碳酸盐岩油藏提供作业参数选取依据。

# 1 实验方法

## 1.1 实验设备

旋转磨料射流破碎灰岩实验在高压磨料射流综合实验系统上进行。该实验系统包含混砂系统、动力系统、作业池系统、数据采集与控制系统等4个子系统，设备实物图见图1。通常可用于喷嘴性能评价、喷嘴结构优化、射流作业参数优选、射流破岩机理等实验研究。具体而言，该实验系统可实现射流压力0~70 MPa,喷射距离0~1000 mm,磨料质量浓度0~30%，磨料目数46目，岩样尺寸50×50×50 mm~500×500×500 mm的磨料射流或纯水射流破岩实验。实验系统运行原理图见图2：其中，磨料存储于储砂罐，由螺旋蛟龙输送至混砂罐；磨料和水于混砂罐中在搅拌器的高速转动下实现均匀混合，形成设定浓度的磨料浆体；离心泵输送磨料浆体至三缸柱塞泵，低压磨料浆体在柱塞泵的加压作用下形成高压磨料浆体；高压磨料浆体流经叶轮式旋转射流喷嘴产生旋转磨料射流，最终实现破岩实验。值得注意的是，该实验系统具备完善的沉淀分离功能，可实现磨料和清水的循环使用。与此同时，该实验系统采用直接加压磨料浆体的方式产生磨料射流，因此磨料颗粒对柱塞泵的磨蚀不可避免。长期使用经验表明，柱塞泵的凡尔胶圈和凡尔体极易磨损失效，其有效寿命与实验工况密切相关，在本实验条件下，其使用寿命通常不超过500 h。

## 1.2 实验材料

石榴石又称水刀砂，常用于磨料射流加工，拥有优异的破岩效率和较低的作业成本<sup>[14, 17]</sup>。因此，本次实验采用46#石榴石作为磨料，其基本属性(真密度、莫氏硬度、形状因子等)见表1。射流喷嘴采用叶轮式旋转射流喷嘴，其入口直径为18 mm，出口直径为5 mm，其示意图见图3。该喷嘴主要部件为加旋叶轮和喷嘴外壳，为增强喷嘴耐磨性，延长使用寿命，加旋叶轮和喷嘴外壳均由硬质合金材料制成。加旋叶轮为三叶片式，旋转角度为360°/50 mm,叶片厚度为3 mm，叶片长度为50 mm，其实物图见图4。喷嘴外壳依据功能不同可分为5个部分，如图3所示，由左到右依次为入口段、加旋段、加速段、稳流段和扩散段。值得注意的是，扩散段的存在使得射流未流出喷嘴就已经开始扩散，因此这一段也被称为喷嘴的自带喷距段。设计扩散段的初衷是为了避免喷嘴在接触到岩石时(喷射距离为0)由于流道被堵而产生憋压危险。岩石选用产自陕西延安的灰岩露头，岩样尺寸为150×150×150 mm，其密度为2.7 g/cm<sup>3</sup>，单轴抗压强度180.3 MPa，单轴抗拉强度9.2 MPa，按国际岩石力学学会分类标准<sup>[18]</sup>属于R5级(单轴抗压强度位于100~250 MPa)，具体基本力学参数见表2。值得注意的是，本文采用形状因子( $R = 4\pi A/P^2$ )描述石榴石颗粒的形状特点。其中A为石榴石颗粒投影面积，P为石榴石颗粒投影周长，A和P利用颗粒的SEM照片，结合ImageJ图像处理软件测得<sup>[19]</sup>。



图1 实验设备实物图

Fig. 1 Physical map of the experiment equipment

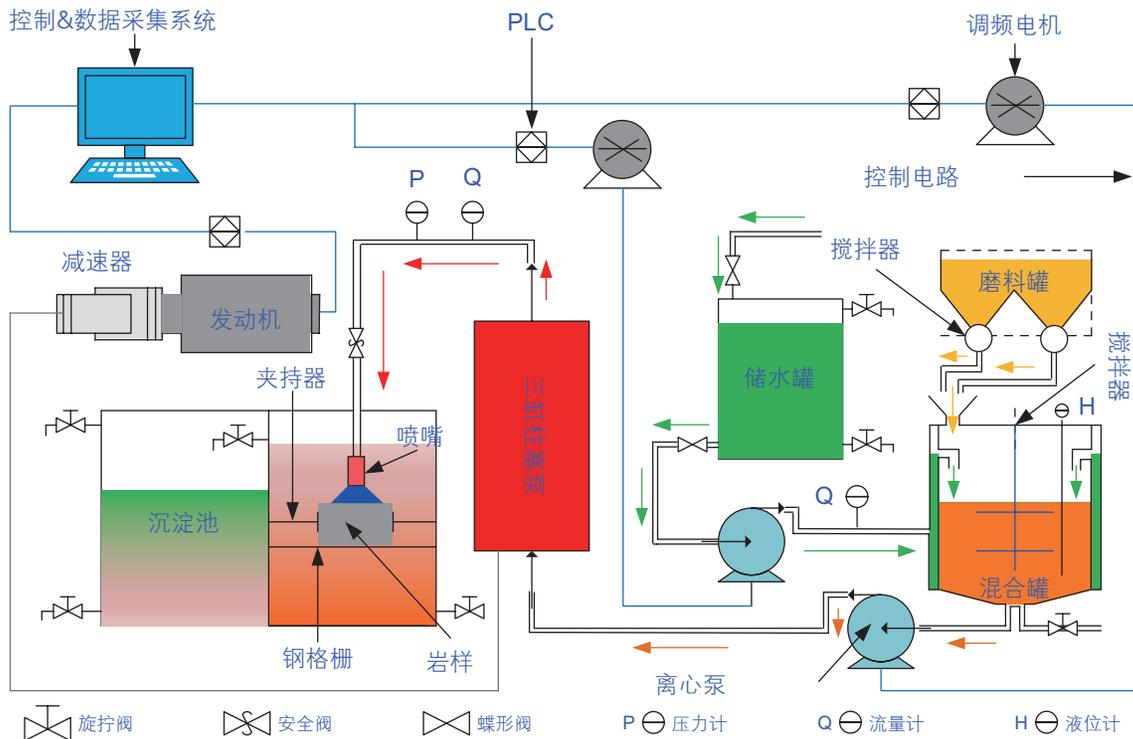


图 2 实验设备原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of the experiment equipment

表 1 46# 石榴石基本属性

Table 1 Basic properties of 46# garnet abrasive material

属性	真密度	莫氏硬度	形状因子	中值直径	均匀系数	曲率系数	单价
单位	g/cm <sup>3</sup>	—	—	μm	—	—	元/kg
数值	3.80	8.0	0.764	416.0	2.32	1.11	2.5

注：中值直径、均匀系数和曲率系数分别指磨料颗粒粒度分布曲线上的中值直径、均匀系数和曲率系数。

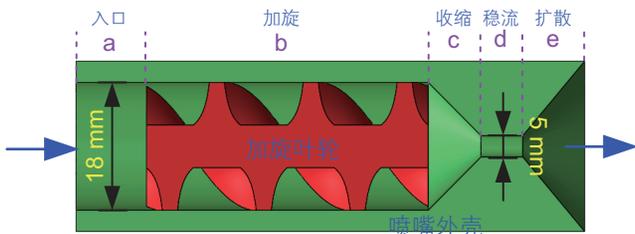


图 3 叶轮式旋转射流喷嘴示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of swirling impeller nozzle



图 4 加旋叶轮实物图  
Fig. 4 Physical map of the impeller

表 2 灰岩基本力学属性

Table 2 The Geo-mechanical properties of limestone specimen

属性	密度	抗拉强度	抗压强度	弹性模量	泊松比
单位	g/cm <sup>3</sup>	MPa	MPa	GPa	—
数值	2.7	8.5	170.7	59.2	0.23

### 1.3 实验方案

依据前期旋转磨料射流破碎灰岩预实验结果，结

合相关文献资料<sup>[15-16, 20]</sup>，并考虑现场应用，本次基准组实验设置为喷射压力 20 MPa，磨料质量浓度 10%，喷射距离 10 mm，喷射时间 60 s。具体实验方案见表

3, 为减小实验误差, 增加实验可信度, 每组实验重复开展 3 次, 共计开展实验 60 组。采用孔眼直径、孔眼深度和孔眼体积作为不同实验参数下旋转磨料射流破碎灰岩效果的评价指标, 并取三次重复实验的平均值作为最终结果, 其中孔眼直径和孔眼深度由游标卡尺测得, 孔眼体积由填砂法<sup>[21]</sup>测得。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 宏观破岩成孔特性

旋转磨料射流破碎灰岩宏观成孔特性见图 5。由图 5 可知, 旋转磨料射流冲击灰岩形成一个规则光滑、底部存在锥形凸起的圆形孔眼, 且灰岩内部大量发育的裂纹并未显著影响孔眼形貌。旋转磨料射流由于加旋叶轮的约束而产生剧烈的旋流效应, 其扩散性好、冲击面积大, 且磨料的加入使其拥有较强的破坏力, 因此可在短喷距内喷射形成大直径孔眼。进一步的, 由于剧烈的旋流效应, 磨料浆体在离心力的作用下被迫远离喷嘴轴线, 其运动轨迹为螺旋线, 从而使得喷嘴轴线附近的流体较少, 且冲击能量集中在距喷

嘴轴线一定距离的圆环上, 最终导致孔眼底部存在锥形凸起。除此之外, 其破岩能量主要源自于高频高速磨料颗粒, 破岩方式主要为磨料颗粒的磨削、犁削所导致的颗粒磨蚀作用, 因此对旋转磨料射流而言, 目标岩石内部的缺陷和非均质性并不能显著影响其破岩孔眼形貌, 且孔眼壁面由于磨料颗粒的抛光作用而较为光滑。上述旋转磨料射流流场特性, 可解释其宏观破岩成孔特性。

水力喷射径向水平井技术对射流的基本要求为可以在目标岩层中喷射形成一个孔眼直径大于最大入井管串外径的有效孔眼, 通常情况下最大入井管串外径为 30 mm<sup>[15, 22]</sup>。本文实验结果表明, 旋转磨料射流成孔直径(本文实验条件下, 最小孔眼直径为 43.1 mm, 实验参数为射流压力 10 MPa, 喷射距离 10 mm, 磨料质量浓度 10%, 喷射时间 60 s)完全满足水力喷射径向水平井技术对射流成孔直径的要求。进一步的, 为验证旋转磨料射流破碎灰岩成孔有效性, 即孔眼底部锥形凸起是否可被冲蚀, 形成可供入井管线进入的通孔, 本文开展了补充验证实验。补充实验的目标岩石同样选用硬质灰岩, 实验条件为射流压力 25 MPa, 喷射距

表 3 旋转磨料射流破碎灰岩实验方案

Table 3 Experimental scenarios

实验组别	喷射压力/MPa	喷射距离/mm	磨料质量浓度/%	喷射时间/s
1-5	10/15/20/25/30	10	10	60
6-10	20	0/10/20/30/40	10	60
11-15	20	10	4/6/8/10/12	60
16-20	20	10	10	60/120/180/240/300

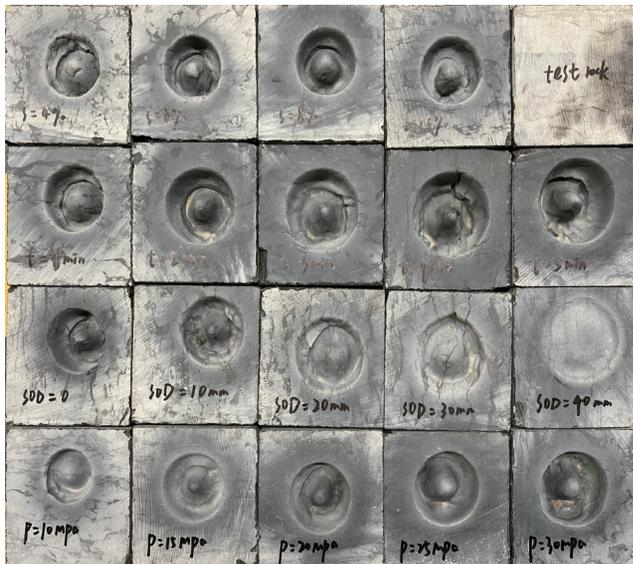


图 5 旋转磨料射流破碎灰岩宏观成孔特性  
Fig. 5 Macroscopic morphology of the jet-drilled holes

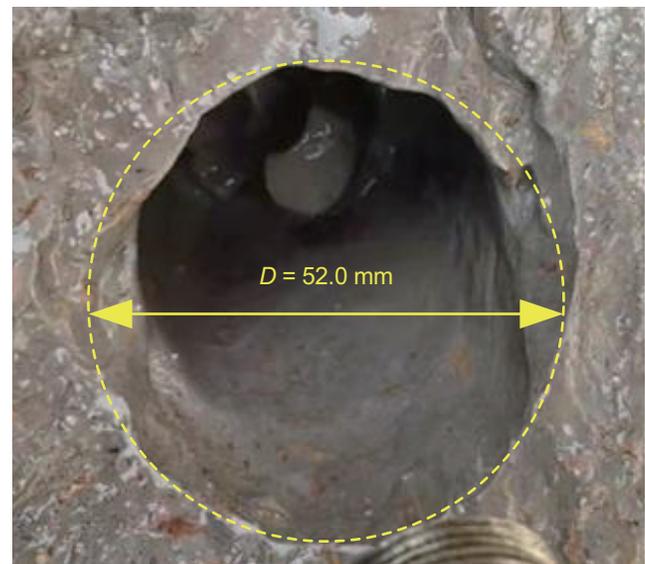


图 6 旋转磨料射流灰岩成孔有效性验证  
Fig. 6 Feasibility for drilling laterals in limestone

离 10 mm, 磨料质量浓度 10%, 喷射时间 25 min, 实验结果见图 6。由图 6 可知, 旋转磨料射流喷射灰岩形成的锥形凸起可随喷射时间的延长被冲蚀并不断向下延伸, 并不影响喷嘴连续送进, 证实了孔眼的有效性。

## 2.2 喷射压力影响规律

不同喷射压力(10、15、20、25、30 MPa)下旋转磨料射流破碎灰岩成孔直径、成孔深度和成孔体积分别见图 7、图 8 和图 9。由图可知, 成孔直径、深度和体积随着喷射压力的增加而增加, 其线性拟合相关系数分别为  $R^2=0.9417$ 、 $R^2=0.9869$ 、 $R^2=0.9844$ , 呈现出

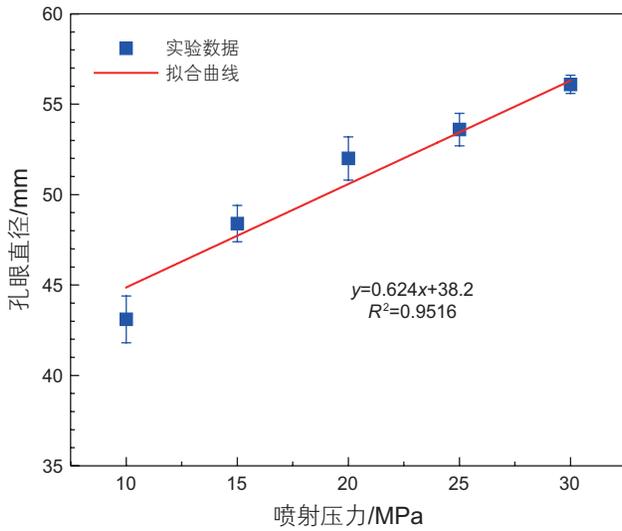


图 7 不同喷射压力下射流成孔直径

Fig. 7 Hole diameter vs jetting pressure

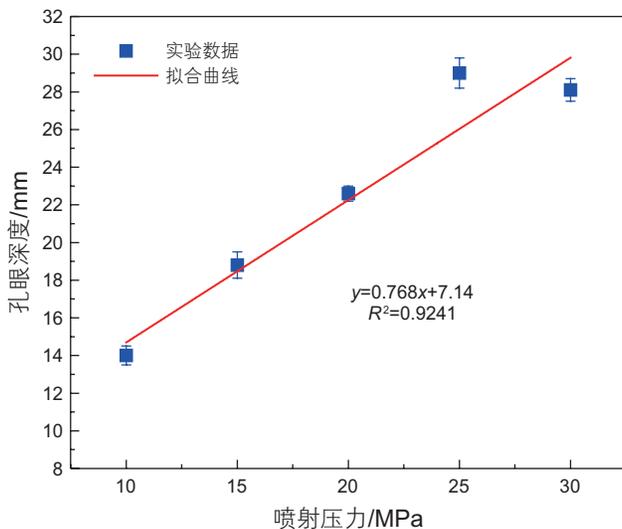


图 8 不同喷射压力下射流成孔深度

Fig. 8 Hole depth vs jetting pressure

较好的线性关系。喷射压力由 10 MPa 增加到 30 MPa, 成孔直径、深度和体积分别增加 30.2%、100.7% 和 330.0%。在本文实验条件下, 最优喷射压力为 30 MPa。依靠射流喷射方式实现破岩成孔的主要能量来源为射流动能, 而作用在岩石自由面的射流动能取决于磨料浆体质量流量、射流喷射速度和喷射时间<sup>[22-23]</sup>(见公式 1)。进一步的, 磨料浆体质量流量取决于射流喷射速度、喷嘴当量直径和磨料浆体密度(见公式 2)。结合公式 1 和公式 2, 可得公式 3。代入射流喷嘴喷射速度-喷射压力计算公式<sup>[9]</sup>(见公式 4)至公式 3, 可得公式 5。由公式 5 可知, 对于本实验而言(即喷嘴当量直径为 5 mm, 喷嘴流量系数保持不变, 磨料浆体密度不变, 磨料质量浓度为 10%, 喷射时间为 60 s), 射流动能只取决于喷射压力。综上所述, 随喷射压力的增加, 射流动能增加, 而射流动能的增加, 导致射流作用在岩石表面的能量增多, 最终使得射流破岩效果变好, 具体表现为孔眼直径、深度和体积随喷射压力的增加而增加。

$$E = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 t \quad (1)$$

$$\dot{m} = \frac{1}{4} \pi d_{ne}^2 v \rho \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{8} \pi d_{ne}^2 v^3 \rho t \quad (3)$$

$$v = \sqrt{\frac{16C^2}{0.081\pi^2 \rho}} \sqrt{P} \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{8} \pi d_{ne}^2 \left( \frac{16C^2}{0.081\pi^2 \rho} \right)^{\frac{3}{2}} \rho t P^{\frac{3}{2}} = k_1 P^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

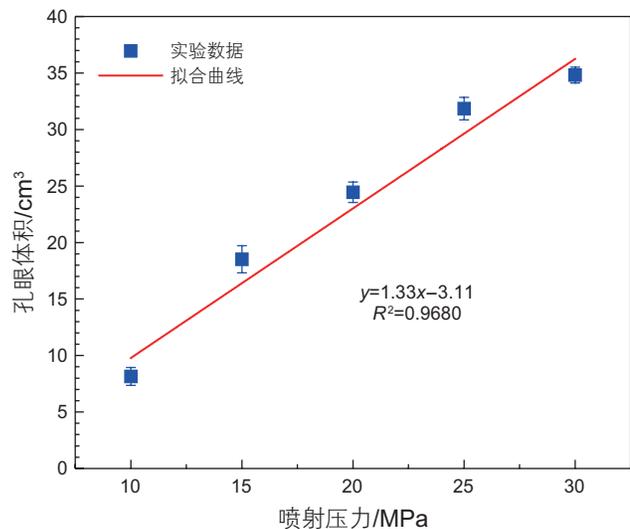


图 9 不同喷射压力下射流成孔体积

Fig. 9 Hole volume vs jetting pressure

式(1)~式(5)中,  $E$ 为射流动能, 单位J;  $m$ 为磨料浆体质量流量, 单位kg/s;  $v$ 为射流喷射速度, 单位m/s;  $t$ 为喷射时间, 单位s;  $d_{ne}$ 为喷嘴当量直径, 单位m;  $\rho$ 为磨料浆体密度, 单位kg/m<sup>3</sup>;  $C$ 为喷嘴流量系数, 无量纲;  $P$ 为喷射压力, 单位Pa。

### 2.3 喷射距离影响规律

不同喷射距离(0、10、20、30、40 mm)下旋转磨料射流破碎灰岩成孔直径、成孔深度和成孔体积分别见图 10、图 11 和图 12。由图可知, 成孔直径随喷射距离的增加而增加、成孔深度和体积随喷射距离的增加而减小, 其线性拟合相关系数分别为 $R^2=0.9504$ 、

$R^2=0.9718$  和  $R^2=0.9689$ , 均呈现出较好的线性关系。喷射距离由 0 增加到 40 mm, 成孔直径增加 28.2%、成孔深度和体积分别减小 77.2% 和 89.1%。实验结果表明, 当喷射距离为 40 mm 时, 旋转磨料射流无法破碎灰岩形成有效孔眼(图 13), 因此在本文实验条件下(即喷射压力为 20 MPa, 磨料质量浓度为 10%, 喷射时间为 60 s)旋转磨料射流有效作用距离为 30 mm。因为在喷射距离为 0(即喷嘴紧贴岩石表面)的场景下, 旋转磨料射流破碎灰岩成孔直径为 47.6 mm, 其完全满足水力喷射径向水平井技术对射流成孔直径的要求, 且在该场景下孔眼深度和体积均为最大值, 因此本文实验条件下, 最优喷射距离为 0, 即喷嘴紧贴岩石表面。旋转

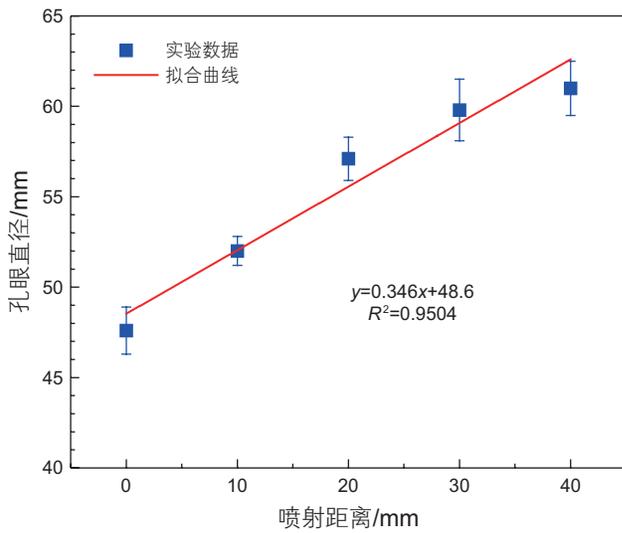


图 10 不同喷射距离下射流成孔直径  
Fig. 10 Hole diameter vs standoff distance

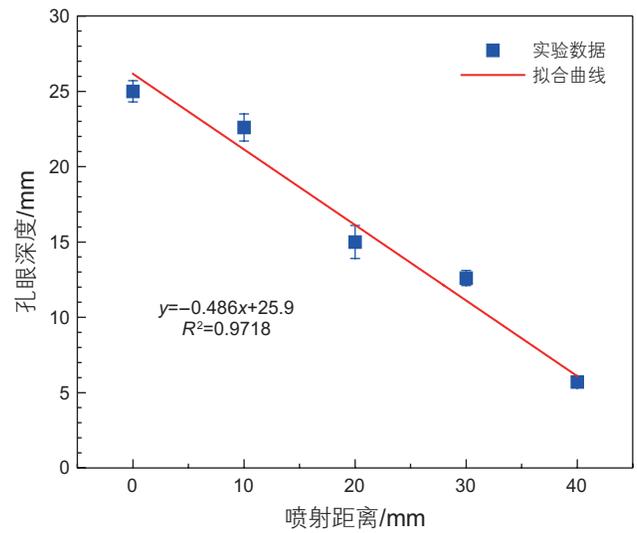


图 11 不同喷射距离下射流成孔深度  
Fig. 11 Hole depth vs standoff distance

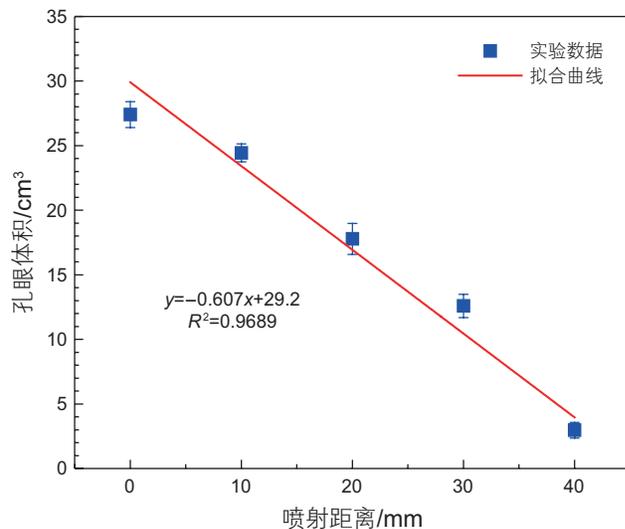


图 12 不同喷射距离下射流成孔体积  
Fig. 12 Hole volume vs standoff distance

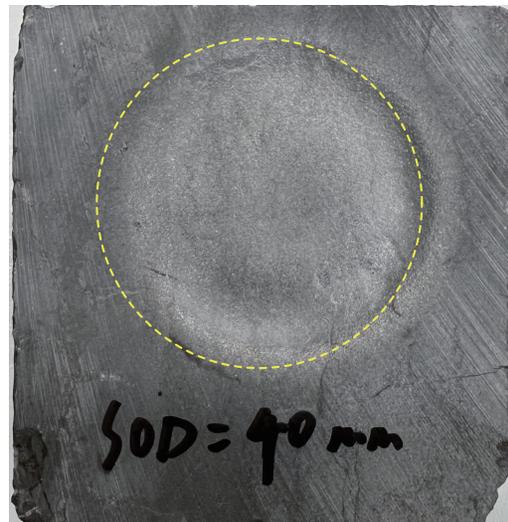


图 13 40 mm 喷射距离下射流成孔形态  
Fig. 13 Hole morphology when 40 mm

磨料射流由于旋流效应，使得射流流体和环境流体发生剧烈的掺混和动量交换，这虽增加了射流冲击面积，但也导致了射流强度的快速衰减<sup>[23]</sup>。这在一定程度上可解释成孔直径随喷射距离增加而增加，而成孔深度和体积随喷射距离增加而减小这一实验现象。

### 2.4 磨料质量浓度影响规律

不同磨料质量浓度(4%、6%、8%、10%和12%)下旋转磨料射流破碎灰岩成孔直径、成孔深度和成孔体积分别见图14，图15和图16。由图可知，孔眼直径、深度和体积随磨料质量浓度的增加先增加后减小，其二次多项式拟合相关系数分别为 $R^2=0.9971$ 、

$R^2=0.9391$ 和 $R^2=0.9888$ ，呈现出较好的二次函数关系。由拟合曲线可知，本文实验条件下(即喷射压力为20 MPa，喷射距离为10 mm，喷射时间为60 s)，旋转磨料射流喷射灰岩形成的最大孔径、最大孔深和最大孔体积分别为52.3 mm、22.7 mm和24.6 cm<sup>3</sup>，分别在磨料质量浓度为9.6%、9.5%和9.4%的情景下取得。因此，在本文实验条件下，最优磨料质量浓度位于9.0%~10.0%之间，与该范围相对应的破岩成孔直径、深度和体积见图14、图15和图16中的粉色区域部分。低磨料质量浓度下(本实验条件下其小于9%)，随着磨料质量浓度的增加，磨料浆体密度随之增加，因此在相同情况下射流作用到岩石自由面的动能增加，

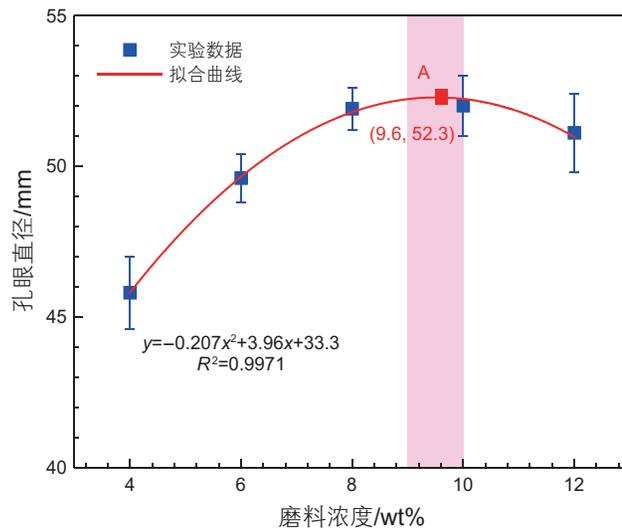


图 14 不同磨料质量浓度下射流成孔直径  
Fig. 14 Hole diameter vs abrasive mass concentration

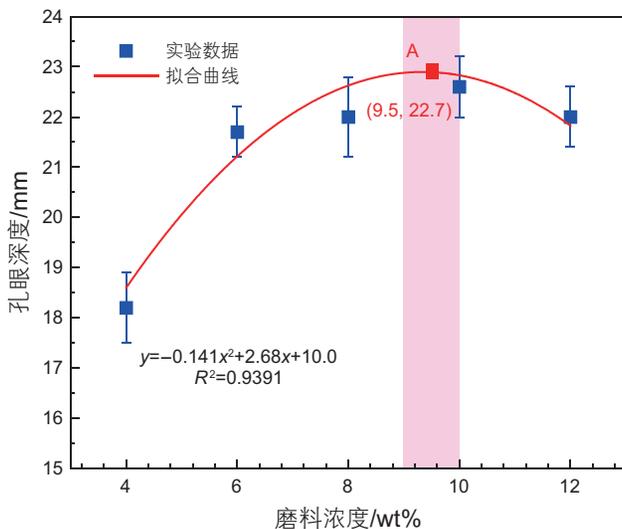


图 15 不同磨料质量浓度下射流成孔深度  
Fig. 15 Hole depth vs abrasive mass concentration

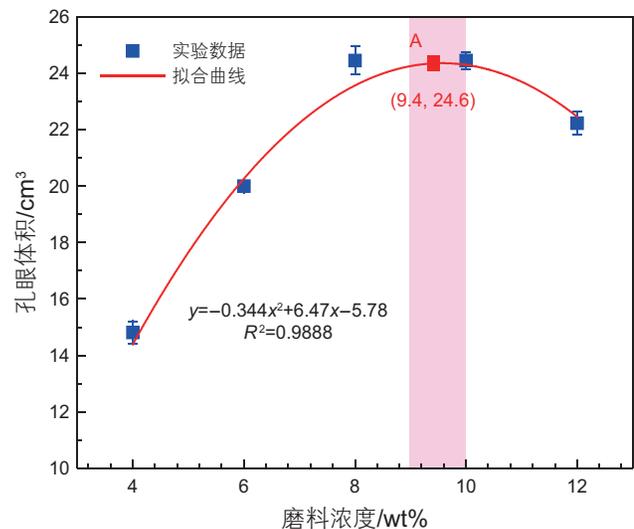


图 16 不同磨料质量浓度下射流成孔体积  
Fig. 16 Hole volume vs abrasive mass concentration

射流破岩效果(孔径、孔深和体积)变好;高磨料质量浓度下(本实验条件下其大于10%),随着磨料质量浓度的进一步增加,单位磨料浆体体积内的磨料颗粒数量随之增加,导致磨料颗粒和磨料颗粒、磨料颗粒和喷嘴壁面之间碰撞频率和次数增加,从而增加了射流的能量损耗<sup>[23, 26]</sup>,使得射流破岩效果(孔径、孔深和体积)变差。

### 2.5 喷射时间影响规律

不同喷射时间(60、120、180、240和300 s)下旋转磨料射流破碎灰岩成孔直径、成孔深度和成孔体积分别见图17、图18和图19。由图可知,成孔直径、深度和体积随喷射时间的增加而增加,其线性拟合相

关系数分别为 $R^2=0.9417$ 、 $R^2=0.9869$ 和 $R^2=0.9844$ ,呈现出较好的线性关系。喷射时间由60 s增加到300 s,成孔直径、深度和体积分别增加20.4%、59.7%和154.9%。射流破岩成孔速度(单位时间内的射流钻孔深度, mm/min)和破岩效率(单位时间内的射流钻孔体积,  $\text{cm}^3/\text{min}$ )是衡量其破岩效果的关键指标。本文实验场景下(喷射压力为20 MPa、磨料质量浓度为10%、喷射距离为10 mm),不同喷射时间下旋转磨料射流破碎灰岩成孔速度和破岩效率见图20。由图20可知,成孔速度和破岩效率随喷射时间的增加而减小,其二次多项式拟合相关系数分别为 $R^2=0.9866$ 和 $R^2=0.9955$ ,呈现出较好的二次函数关系。喷射时间由60 s增加到300 s,成孔速度和破岩效率分别下降68.1%和49.2%。

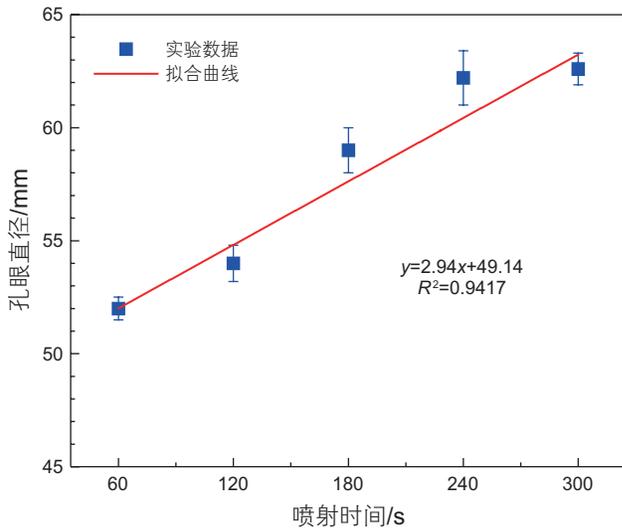


图 17 不同喷射时间下射流成孔直径  
Fig. 17 Hole diameter vs exposure time

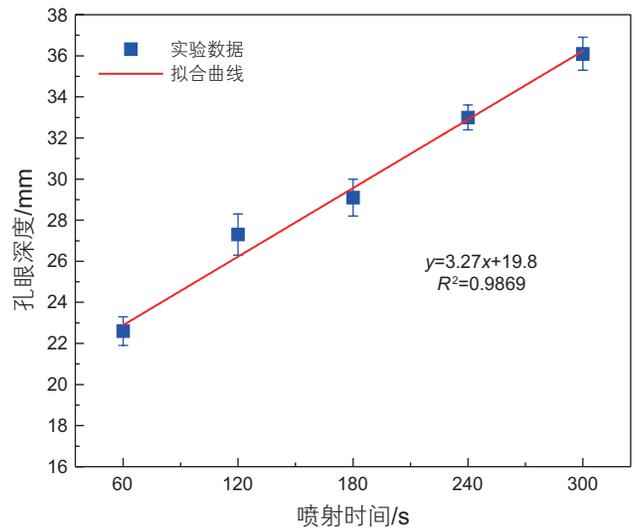


图 18 不同喷射时间下射流成孔深度  
Fig. 18 Hole depth vs exposure time

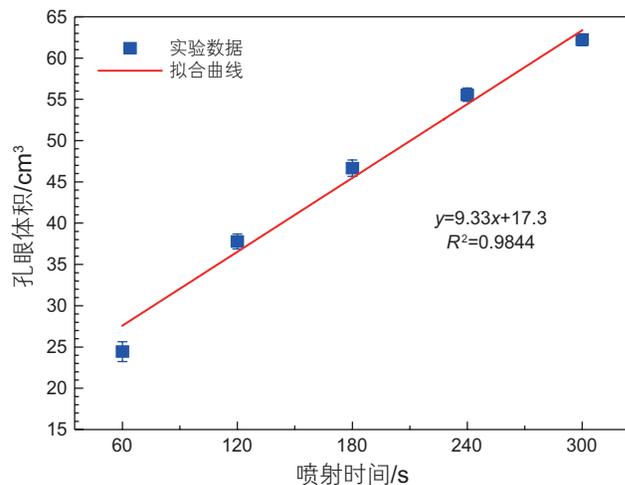


图 19 不同喷射时间下射流成孔体积  
Fig. 19 Volume depth vs exposure time

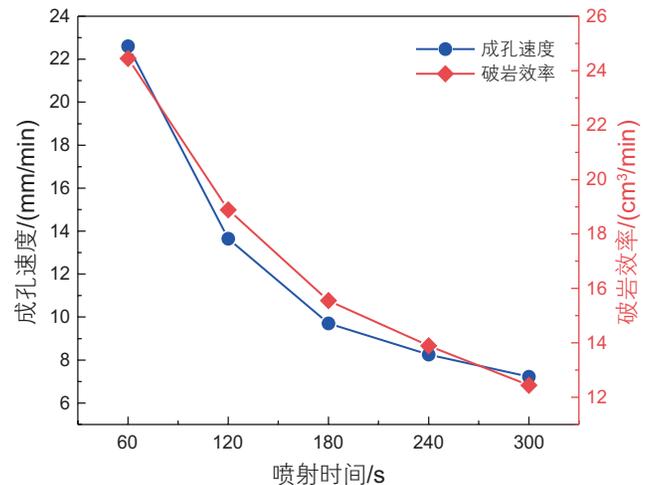


图 20 射流成孔速度与破岩效率  
Fig. 20 Drilling speed and efficiency

除此之外，对于磨料射流而言，其作业成本的一大部  
分来自于磨料的花费，显然随着喷射时间的增加，所  
消耗的磨料量增加，因此磨料射流作业成本增加。旋  
转磨料射流作为磨料射流的一种，亦有上述作业成本  
随喷射时间增加而增加的特性。综合成孔速度、破岩  
效率和作业成本分析可知，本文实验条件下，最优喷

射时间为 60 s。射流破岩的能量源自于射流动能(见公  
式 5)，由公式 5 可知，喷射时间越长，作用到岩石自  
由面的射流动能越大，射流破岩成孔直径、深度和体  
积越大。但与此同时，随着喷射时间的增加，返流对  
射流来流的扰动进一步加剧，使得射流动能的损耗增  
大，这导致了射流的成孔速度和破岩效率的降低。

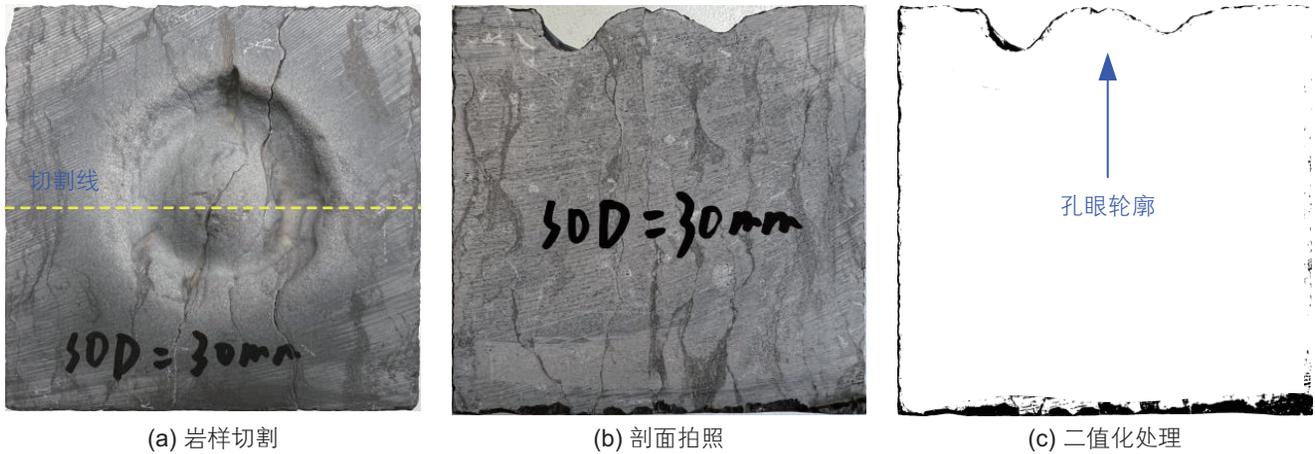


图 21 孔眼轮廓提取

Fig. 21 Reconstructed the SAWJ-drilled hole profiles

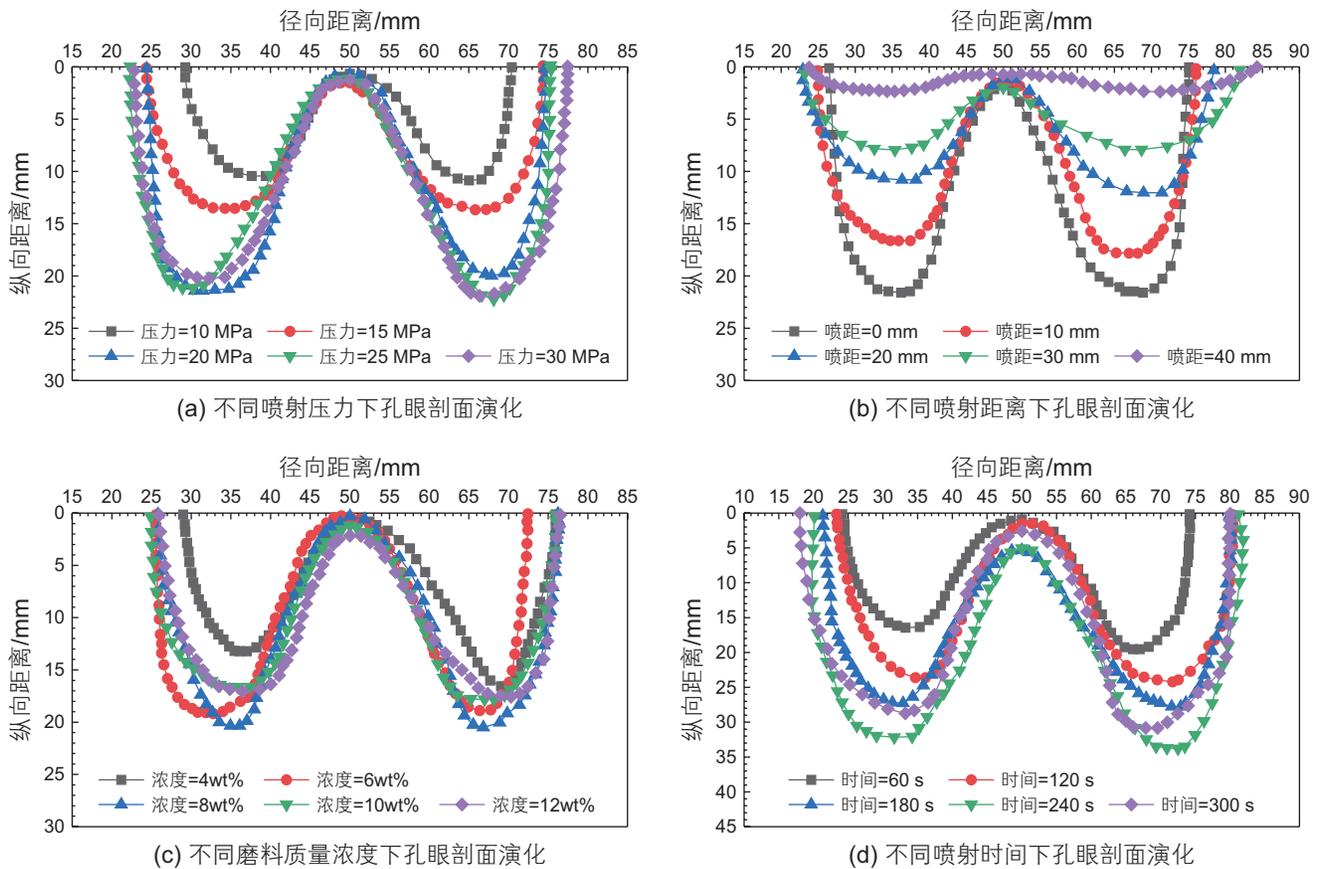


图 22 孔眼剖面演化

Fig. 22 Evolution of the hole profile

### 3 讨论

#### 3.1 孔眼剖面演化

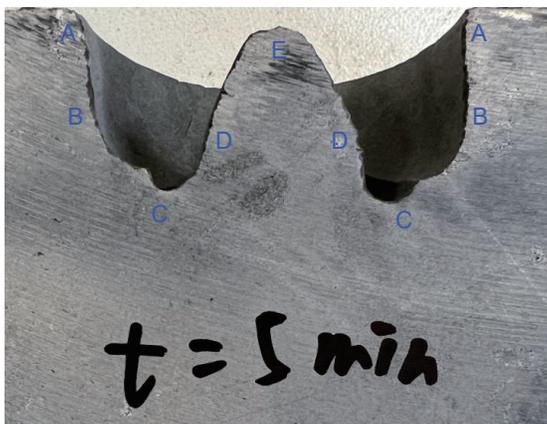
岩石材料具有非透明的属性，利用孔眼剖面可直观的展示出旋转磨料射流破碎灰岩形成孔眼的内部形态，并可在一定程度上反映孔眼形成过程和岩石破碎机理。本文采用岩石切割—孔眼剖面拍照—MATLAB图像处理的方式，重构了旋转磨料射流破碎灰岩形成孔眼的剖面，处理过程描述如下：(1)将旋转磨料射流喷射后的岩样沿中心线切开(如图 21a所示)，并对切割后的孔眼剖面进行拍照(如图 21b所示)；(2)编写 MATLAB 程序对图 21b 进行图像二值化处理，处理结果见图 21c；(3)以锥形凸起顶点为坐标原点建立二维坐标系，编写 MATLAB 程序提取孔眼轮廓点阵数据并输出数据文档；(4)利用 Origin 软件对孔眼形貌数据绘图，且将孔眼锥形凸起顶点坐标调整为(0, 50 mm)；(5)对所有剖面进行上述处理，并绘图，可得图 22。

由图 22 可知，整体上，旋转磨料射流破岩孔眼剖面呈“W”型，证实了其冲击能量集中在距喷嘴轴线一定距离的圆环上这一旋转磨料射流流场特性。定义孔眼剖面锥形凸起距岩石表面的距离为喷嘴许用送进距离，由图 22 可知，喷射压力、磨料质量浓度和喷射距离对喷嘴许用送进距离影响较小，而喷射时间对其产生了显著的影响。喷射时间由 60 s 增加到 300 s，喷嘴许用送进距离由 0.6 mm 增加至 5.0 mm，这说明旋转磨料射流破碎灰岩形成的锥形凸起可被后续射流剥蚀，表明锥形凸起并不影响喷嘴送进。进一步的，由图 22 可推断出，旋转磨料射流破岩过程大致分为两个

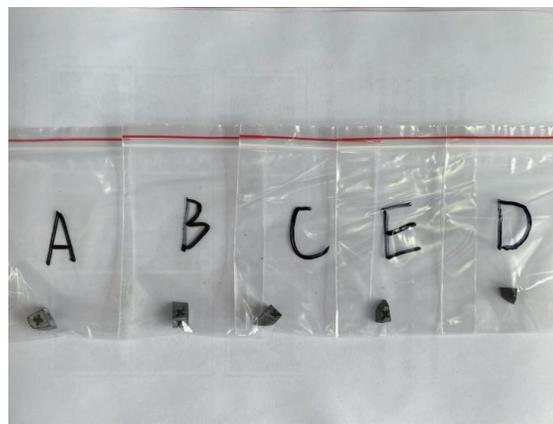
阶段：首先，岩石在旋转磨料射流冲击下出现一个环形的冲蚀带；之后，在后续射流的持续冲击下，环形侵蚀带不断向下延伸，最终形成一个规则光滑、底部存在锥形凸起的圆形孔眼。

#### 3.2 射流破岩机理

射流破碎坑的微观断口形貌可反映射流破岩机理<sup>[27-29]</sup>。为揭示旋转磨料射流破碎灰岩机理，采用扫描电镜(SEM)观测的方法，观察了孔眼边缘、孔眼侧壁、孔眼底部、凸起侧壁和凸起顶部等孔眼剖面上的 5 个典型区域(见图 23)的微观断口特征。分析 5 个典型区域的微观断口形貌，可知孔眼不同区域的微观断口特征基本一致，表明孔眼不同区域的岩石破碎机理相同。灰岩在旋转磨料射流冲击下产生的典型微观断口形貌见图 24。整体上，旋转磨料射流冲击灰岩产生的孔眼表面非常光滑(见图 24a，放大 100 倍)，由三维表面形貌仪测得其粗糙度为 0.035 mm。进一步放大可知，孔眼表面的微观断口特征可分为两类：一类是灰岩矿物颗粒在磨料颗粒大角度冲击下发生破裂，并产生沿晶裂纹和穿晶裂纹(见图 24b，放大 5000 倍)，其主要破坏方式为拉伸破坏；另一类是灰岩自由面在磨料颗粒小角度冲击产生的犁削和磨削作用下出现明显的划痕(见图 24c，放大 5000 倍)，其主要破坏方式为剪切破坏。由上述射流破碎坑表面微观断口形貌分析可知，旋转磨料射流具有独特的破岩方式，它不单以磨料颗粒大角度冲击下产生的拉伸作用破坏岩石，同时还伴以磨料颗粒小角度冲击下产生的剪切作用破坏岩石。由于岩石材料的抗剪、抗拉强度远低于其抗压强度，故其在剪应力和拉应力作用下很容易破碎，



(a) 孔眼剖面及五个典型区域



(b) 典型区域SEM扫描样品

图 23 孔眼剖面上的 5 个典型区域：(A) 孔眼边缘；(B) 孔眼侧壁；(C) 孔眼底部；(D) 凸起侧壁；(E) 凸起顶部

Fig. 23 Five typical regions of the hole profile: (A) edge region, (B) hole side-wall region, (C) hole bottom region, (D) bulge wall region, (E) bulge top region.

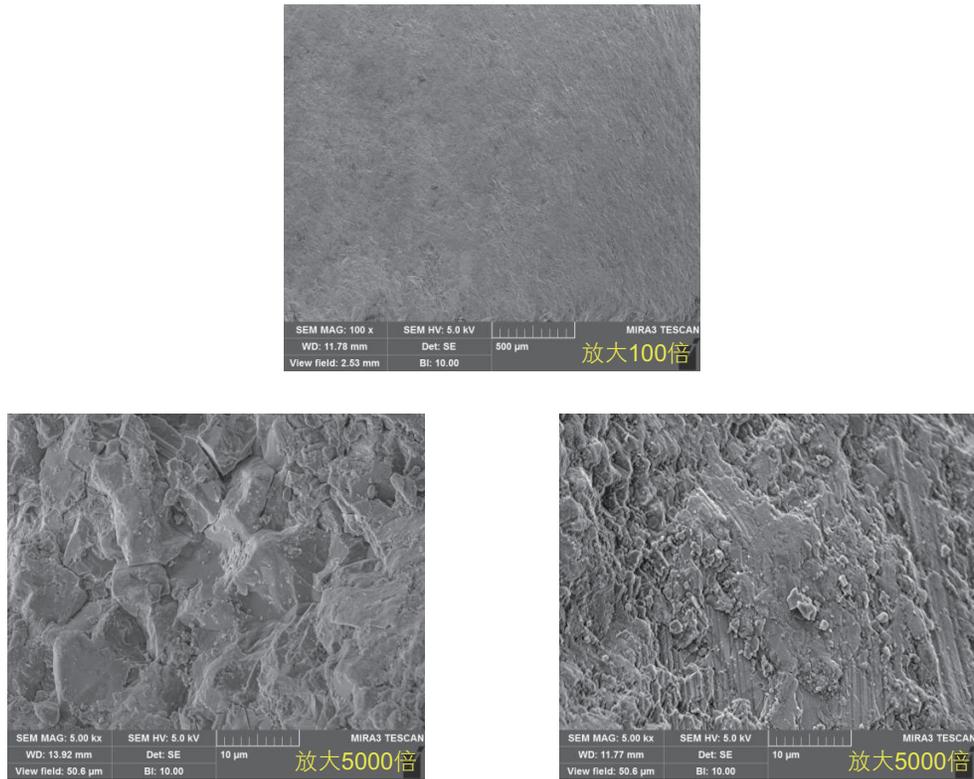


图 24 孔眼表面微观断面口形貌

Fig. 24 Microscopic morphology of the jet-drilled hole

因此旋转磨料射流具有较高的破岩能力和破岩效率。

#### 4 结论

本文开展了旋转磨料射流破碎灰岩实验,揭示了喷射压力、喷射距离、磨料质量浓度和喷射时间等关键参数对射流成孔直径、深度和体积的影响规律,并采用孔眼剖面重构的方法探析了孔眼形貌演化。此外,还采用岩石断面形貌分析的手段,探索了旋转磨料射流破碎灰岩机理。主要得出以下结论:

(1) 旋转磨料射流冲击灰岩形成一个规则光滑、底部存在锥形凸起的圆形孔眼,其孔眼剖面为“W”型。孔眼直径大于入井管线最大外径,且锥形凸起可被后续射流剥蚀而不影响管线连续送进,故旋转磨料射流适用于水力喷射径向水平井技术开采碳酸盐岩油藏;

(2) 射流成孔直径、深度和体积随喷射压力的增加而增加,呈现出较好的线性关系。喷射压力由 10 MPa 增加到 30 MPa,成孔直径、深度和体积分别增加了 30.2%、100.7% 和 330.0%。在本文实验条件下,最优喷射压力为 30 MPa。

(3) 射流成孔直径随喷射距离的增加而增加、成孔

深度和体积随喷射距离的增加而减小,均呈现出较好的线性关系。喷射距离由 0 增加到 40 mm,成孔直径增加了 28.2%、成孔深度和体积分别减小了 77.2% 和 89.1%。在本文实验条件下,最优喷射距离为 0。

(4) 射流成孔直径、深度和体积随磨料质量浓度的增加先增加后减小,均呈现出较好的二次函数关系。最大孔径、孔深和孔体积分别为 52.3 mm、22.7 mm 和 24.6 cm<sup>3</sup>,分别在磨料质量浓度为 9.6%、9.5% 和 9.4% 的情景下取得。在本文实验条件下,最优磨料质量浓度位于 9.0%~10.0% 之间。

(5) 射流成孔直径、深度和体积随喷射时间的增加而增加,均呈现出较好的线性关系。成孔速度和破岩效率随喷射时间的增加而减小,均呈现出较好的二次函数关系。在本文实验条件下,最优喷射时间为 60 s。

(6) 旋转磨料射流具有独特的破岩方式,它不单以磨料颗粒大角度冲击下产生的拉伸作用破坏岩石,同时还伴以磨料颗粒小角度冲击下产生的剪切作用破坏岩石。由于岩石材料的抗剪、抗拉强度远低于其抗压强度,故旋转磨料射流具有较高的破岩能力和破岩效率。

## 参考文献

- [1] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报. 2012, 33(02): 173–187. [ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. *Acta Petrolei Sinica*. 2012, 33(02): 173–187.]
- [2] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘. 2005(03): 15–22. [JIN Z J. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins [J]. *Earth Science Frontiers*. 2005(03): 5–22.]
- [3] 罗平, 张静, 刘伟, 等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘. 2008(01): 36–50. [LUO P, ZAHNG J, LIU W, et al. Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China [J]. *Earth Science Frontiers*. 2008(01): 36–50.]
- [4] XU Z X, LI S Y, LI B F, et al. A review of development methods and EOR technologies for carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Science*. 2020, 17(4): 990–1013.
- [5] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报. 2013, 34(01): 115–121. [LI Y. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*. 2013, 34(01): 115–121.]
- [6] 张希明. 新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J]. 石油勘探与开发. 2001(05): 17–22. [ZHANG X M. The characteristics of lower ordovician fissure-vug carbonate oil and gas pools in Tahe oil field, Xinjiang [J]. *Petroleum Exploration and Development*. 2001(05): 17–22.]
- [7] JIANG T W, SUN H D, DENG X L. Dynamic description technology of fractured vuggy carbonate gas reservoirs [M]. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2019.
- [8] 陈丽帆. 深层小井眼碳酸盐岩水平井分段酸压分析[J]. 石化技术. 2021, 28(09): 172–173. [CHEN L F. Analysis of segmented acid fracturing in deep slim hole carbonate horizontal wells [J]. *Petrochemical Industry Technology*. 2021, 28(09): 172–173.]
- [9] 李根生, 黄中伟, 李敬彬. 水力喷射径向水平井钻井关键技术研究[J]. 石油钻探技术. 2017, 45(02): 1–9. [LI G S, HUANG Z W, LI J B. Study of the key techniques in radial jet drilling [J]. *Petroleum Drilling Techniques*. 2017, 45(02): 1–9.]
- [10] 晏军, 崔明月, 蒋卫东, 等. 水力喷射径向钻井研究及其在碳酸盐岩储层中的应用[J]. 油气井测试. 2017, 26(06): 69–72. [YAN J, CUI M Y, JIANG W D, et al. Research of hydraulic Jet radial drilling and Its application in carbonate reservoir [J]. *Well Testing*. 2017, 26(06): 69–72.]
- [11] 陈东波, 龙武, 张杰, 等. 塔河油田深井径向多分支水力钻孔技术探讨[J]. 新疆石油天然气. 2018, 14(04): 27–32. [CHEN D B, LONG W, ZHANG J. Discussion on radial multi-branch technology of hard limestone in deep well of TaHe Oilfield [J], *Xinjiang Oil & Gas*. 2018, 14(04): 27–32.]
- [12] 马国锐, 李敬彬, 李欢, 等. 旋转磨料射流破碎碳酸盐岩成孔特性研究[J]. 流体机械. 2021, 49(11): 12–17. [MA G R, LI J B, LI H, et al. Study on pore forming characteristics of carbonate rock broken by swirling abrasive water jet [J]. *Fluid Machinery*. 2021, 49(11): 12–17.]
- [13] 杨永印, 沈忠厚, 王瑞和, 等. 旋转磨料射流破岩钻孔试验研究[J]. 石油钻探技术. 1999(04): 4–7. [YANG Y Y, SHEN Z H, WANG R H, et al. Experimental study on rotary abrasive jet drilling [J]. *Petroleum Drilling Techniques*. 1999(04): 4–7.]
- [14] LI H, HUANG Z W, LI J B, et al. Performances of different abrasive materials during swirling impeller abrasive water jet drilling of granite [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023.
- [15] LI H, HUANG Z W, LI J B, et al. Rock breaking characteristics by swirling impeller abrasive water jet (SAWJ) on granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022, 159: 105230.
- [16] 周蒙蒙, 李欢, 李根生, 等. 旋转磨料射流钻孔储层适应性研究[J]. 流体机械. 2023, 51(01): 1–7. [ZHOU M M, LI H, LI G S, et al. Study on applicability of swirling abrasive water jet drilling in reservoirs [J]. *Fluid Machinery*. 2023]
- [17] ENGIN I C. A correlation for predicting the abrasive water jet cutting depth for natural stones [J]. *South African Journal of Science*. 2012, 108(9/10).
- [18] BARTON N. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International society for rock mechanics [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. 1978, 15: 319–368.
- [19] SABARINATHAN P, ANNAMALAI V E, RAJKUMAR K S. Application of grinding wheel waste as abrasive for abrasive water jet machining process. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 261: 121225.
- [20] 牛继磊, 李根生, 宋剑, 等. 水力喷砂射流参数实验研究[J]. 石油钻探技术. 2003(02): 14–16. [NIU J L, LI G S, SONG J, et al. An experimental study on abrasive water jet perforation parameters [J], *Petroleum Drilling Tehcnology*. 2003(02): 14–16]
- [21] HONG C Y, YANG R Y, HUANG Z W, et al. Experimental investigation on coal-breakage performances by abrasive nitrogen-gas jet with a conical nozzle [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, 142: 104781.

- [22] HUANG Z, HUANG Z W. Review of radial jet drilling and the key issues to be applied in new geo-energy exploitation [C]. Energy Procedia. 2019, 158: 5969–5974.
- [23] OH T, CHO G. Characterization of effective parameters in abrasive waterjet rock cutting [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014, 47(2): 745–756.
- [24] OH T, CHO G. Rock cutting depth model based on kinetic energy of abrasive waterjet [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016, 49(3): 1059–1072.
- [25] 陈健翔, 杨睿月, 黄中伟, 等. 基于分离涡模拟的旋转射流流场结构特征分析 [J]. 石油勘探与开发. 2022, 49(04): 806–817. [CHEN J X, YANG R Y, HUANG Z W, et al. Detached eddy simulation on the structure of swirling jet flow field [J]. Petroleum Exploration and Development. 2022, 49(04): 806–817.]
- [26] OH T, JOO G, CHO G. Effect of abrasive feed rate on rock cutting performance of abrasive waterjet [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, 52(9): 3431–3442.
- [27] KARAKURT I, AYDIN G, AYDINER K. An experimental study on the depth of cut of granite in abrasive waterjet cutting [J]. Materials and manufacturing processes. 2012, 27(5): 538–544.
- [28] TIAN S C, SHENG M, LIU Q L, et al. Experiment and SEM analysis on rock breaking mechanism by swirling-round SC-CO<sub>2</sub> jet [C]. American Rock Mechanics Association. 2017.
- [29] HE Z G, LI G S, TIAN S C, et al. SEM analysis on rock failure mechanism by supercritical CO<sub>2</sub> jet impingement [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2016, 146: 111–120.

(编辑 马桂霞)

**第一作者:** 李欢(1996 年—), 博士研究生, 主要从事高压射流破岩及水力喷射径向水平井方面的研究, huanli\_cup@163.com。

**通信作者:** 黄中伟(1972 年—), 博士, 教授, 主要从事油气井流体力学与完井增产技术研究, huangzw@cup.edu.cn。