◀油气田开发工程▶

非淹没条件下旋转磨料水射流破碎砂岩参数影响规律研究*

王 宇[1,2] 冯彦军[2] 赵凯凯[2] 李敬彬[3] 李 欢[3] 程 康[3] 李文彬[3]
（1. 中国矿业大学（北京）能源与矿业学院 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室
3. 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室）

王宇，冯彦军，赵凯凯，等. 非淹没条件下旋转磨料水射流破碎砂岩参数影响规律研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：72-82.

Wang Yu，Feng Yanjun，Zhao Kaikai，et al. Influences of parameters during sandstone breaking by swirling abrasive water jet under non-submerged conditions［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：72-82.

摘要：旋转磨料水射流技术可以在水平钻孔周围建立多分支流体通道，预先形成弱化结构，在低垂向应力条件下更易实现裂缝定向扩展，配合压裂实现顶板破断控制，解决悬顶问题。然而，在射流破岩过程中，施工环境由淹没条件转变为非淹没条件，非淹没条件下旋转磨料水射流破碎砂岩的效果和成孔形态尚不明确。基于煤矿井下钻孔内部非淹没工况，开展非淹没条件下旋转磨料水射流破岩室内试验，对比了淹没/非淹没条件下的差异，揭示了关键参数对破岩效果的影响规律，确定了非淹没条件下的最优参数组合。研究结果表明：淹没/非淹没条件下旋转磨料射流破岩的成孔形态均为内含中部倒锥体的规则圆孔；对比于淹没条件，非淹没条件下的成孔深度和成孔体积分别增加了76.89%和116.61%；各成孔参数均随泵压和喷射时间的增加而增大；随着喷射距离的增加，成孔直径增大，而成孔深度和成孔体积先增加后减小；对比于清水，添加磨料颗粒明显增大射流破岩的成孔参数，成孔直径和成孔深度分别增大了46.42%和295.61%；该试验条件下的最优作业参数组合为泵压25 MPa、喷射距离30 mm、喷射介质为质量分数10%石英砂、喷射时间600 s。在曹家滩煤矿122103工作面进行工业性试验，井下原位测定非淹没条件下旋转磨料水射流破岩的成孔直径为50 mm，成孔深度为40 mm。研究结果可为非淹没条件下旋转磨料水射流定点冲蚀破岩成孔提供理论依据和试验数据。

关键词：非淹没条件；旋转磨料射流；定点冲蚀破岩；导控压裂；厚硬顶板致裂
中图分类号：TE357 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202512043

Influences of Parameters During Sandstone Breaking by Swirling Abrasive Water Jet Under Non-submerged Conditions

Wang Yu[1,2] Feng Yanjun[2] Zhao Kaikai[2] Li Jingbin[3] Li Huan[3] Cheng Kang[3] Li Wenbin[3]
（1. *School of Energy and Mining Engineering*，*China University of Mining and Technology-Beijing*；2. *State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control*；3. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*，*China University of Petroleum*（*Beijing*））

Abstract：The swirling abrasive water jet technology can create multi-branch fluid channels around horizontal boreholes and form pre-weakened structures，which facilitates directional fracture propagation under low vertical stress conditions. Combined with hydraulic fracturing，this technology can achieve controlled roof fracturing

* 基金项目：国家重点研发计划资助项目“超大开采空间强矿压区域压裂卸压技术与装备”（2023YFC2907502）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

and solve the problem of roof suspension. However, during jet rock-breaking, the operating environment changes from submerged to non-submerged conditions. The sandstone breaking efficiency and drilling hole morphology by swirling abrasive water jet under non-submerged conditions remain unclear. Based on the non-submerged conditions in coal mine underground boreholes, laboratory tests on rock breaking by swirling abrasive water jet under non-submerged conditions were conducted. The rock-breaking performances under submerged and non-submerged conditions were compared, the influences of key parameters on rock-breaking performance were identified, and the optimal parameter combination of swirling abrasive water jet under non-submerged conditions was determined. The results show that the holes formed during rock breaking by swirling abrasive water jet under both submerged and non-submerged conditions are regular circular holes with inverted cones in the middle. Compared with the submerged conditions, the hole depth and volume under non-submerged conditions increase by 76.89% and 116.61%, respectively. All hole parameters increase with the increase of jet pressure and jet duration. With the increase of standoff distance, the hole diameter increases, while the hole depth and volume increase and then decrease. Compared with clean water, abrasive particles significantly improve the hole parameters of jet rock-breaking, with the hole diameter and depth increased by 46.42% and 295.61%, respectively. Under the test conditions, the optimal parameter combination is determined as: jet pressure of 25 MPa, standoff distance of 30 mm, jet medium of quartz (10 mass %), and jet duration of 600 s. An industrial test was performed in the 122103 working face at Caojiatan Coal Mine. Underground in-situ measurement shows that the hole diameter and depth during rock breaking by swirling abrasive water jet under non-submerged conditions are 50 mm and 40 mm, respectively. The research provides theoretical basis and test data for fixed-point erosion rock breaking and hole formation by swirling abrasive water jets under non-submerged conditions.

Keywords: non-submerged condition; swirling abrasive water jet; fixed-point erosion rock breaking; directed and controlled fracturing; thick-hard roof fracturing

0　引　言

国家统计局报告指出，2023年我国原煤产量、原油产量和天然气产量分别达到47.1亿t、20 902.6万t和2 324.3亿m^3，煤炭消费量占能源消费总量的比例为55.3%，煤炭仍是我国的主体能源。随着开发强度和开采深度的增加，煤矿安全高效开采面临的顶板控制难题日益突显。煤矿工作面上方存在厚硬岩层（厚硬顶板），在工作面回采过程中厚硬顶板无法有效破断，易形成大面积悬顶，积累大量的弹性能。当厚硬顶板破断垮落时释放大量能量，并作用于周围岩体，容易造成冲击地压、巷道变形、底鼓等问题[1-3]。为减小厚硬顶板破断释放的能量，需利用泄压技术进行岩层控制[4]。而水力压裂泄压技术有着安全、清洁、高效的特点。其中，射孔导控水力压裂可通过缝网扩展破坏顶板的完整性、弱化顶板强度，降低厚硬顶板大面积悬顶产生的静载荷和破断冲击时的动载荷[5-10]。

在煤岩层中有效形成射孔是射孔导控水力压裂技术的关键。旋转磨料水射流具有破岩能力强、效率高等优点，已成为煤矿井下区域性射孔的有效手段[11-13]。杨永印等[14]结合磨料射流和旋转水射流的优点，提出了旋转磨料水射流技术，兼具强冲击力和高扩散性，易破碎岩石形成大直径孔眼。大直径射孔具有过流截面积大的特点，射孔孔眼内流速降低，摩阻显著减小，压裂液也能更均匀地分配到各孔眼，更易形成多分支裂缝[15-19]。魏建平等[20-23]通过数值模拟发现，高压流体经旋转喷嘴形成旋转射流，与直射流不同，旋转射流的最大速度出现在环形区域而非射流轴线位置，冲击能量也集中在环形区域内。周蒙蒙等[24]开展了旋转磨料射流破碎碳酸盐岩成孔试验，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。马国锐等[25]对旋流式叶轮喷嘴在硬岩破碎方面的性能进行了试验研究，并指出，当喷射距离为50 mm时能够在碳酸盐岩上高效地钻出直径为70 mm的孔眼。Li等[26-29]研究发现，随着泵压、喷射时间、磨料粒度和磨料质量分数的增加，旋转磨料射流破岩性能有所提高，破岩能量来自高速高频的磨粒撞击。Zhang等[30]通过数值模拟的方法发现，磨料颗粒和水在剪切应力与拉应力的作用下可以获得较大的切向和径向速度，

并且随着旋转角度的增大，流体的轴向速度减小，切向速度逐渐增大。Li 等[31-32]通过 SPH-FEM 方法模拟磨料颗粒在喷嘴中的运动，发现颗粒会在喷嘴内旋转，且径向/切向自旋速度均大于锥形喷嘴中的对应速度。

上述学者主要针对淹没条件下旋转磨料水射流的破岩机理、方法和影响参数进行了深入研究。然而，在煤矿顶板区域射孔导控水力压裂技术应用中，射孔喷枪放置于裸眼钻孔内，工况为非淹没条件，非淹没条件下旋转磨料水射流破岩规律尚不明确。基于此，笔者以曹家滩煤矿 122103 工作面为工程背景，通过室内试验对比了淹没/非淹没条件下旋转磨料水射流破岩的差异性，明确了非淹没条件下喷射介质、压力、距离等参数对旋转磨料水射流破岩的影响规律并开展现场试验，测定了实际成孔参数。研究结果可为煤矿井下厚硬顶板内部非淹没条件下旋转磨料水射流破岩提供数据基础。

1　工程概况

曹家滩煤矿 122103 工作面采用综采放顶煤开采，以全部垮落法管理采空区顶板，埋深 290~372 m，走向长度 3 000 m，倾向长度 350 m。工作面平均煤厚 11.95 m，设计采高 5 m，放煤高度 6.95 m，倾角小于 1°，煤层硬度系数为 2~3，工作面概况如图 1 所示。其中基本顶和直接顶以砂岩为主，基本顶厚 1.40~30.82 m，直接顶厚 1.80~17.25 m；直接底主要以粉砂岩为主，厚 3.0~15.4 m；基本底为细粒砂岩，厚 3.2~15.7 m。

由于矿井厚硬顶板的赋存特性，工作面开采期间易形成大面积悬顶。曹家滩煤矿工作面历次来压监测表明，巷道侧向顶板活跃，生产过程中在工作面区块形成强矿压，导致工作面支架长期处于较高的工作阻力状态，煤壁管控难度增大，威胁生产安全。为此，122103 工作面实施了井下水平定向长钻孔区域射孔导控压裂项目工程，提前预裂煤层上方厚硬顶板，切断巷道侧向顶板联系。

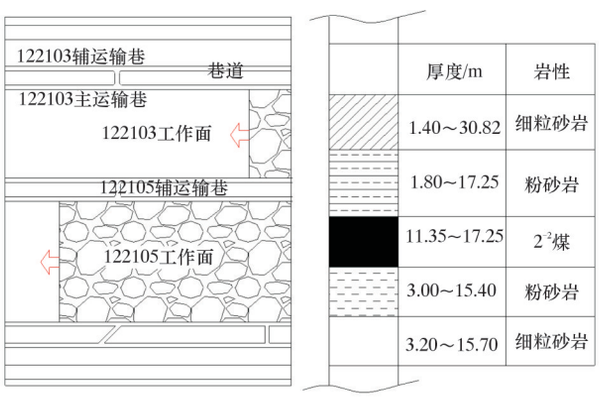


图 1　122103 工作面概况

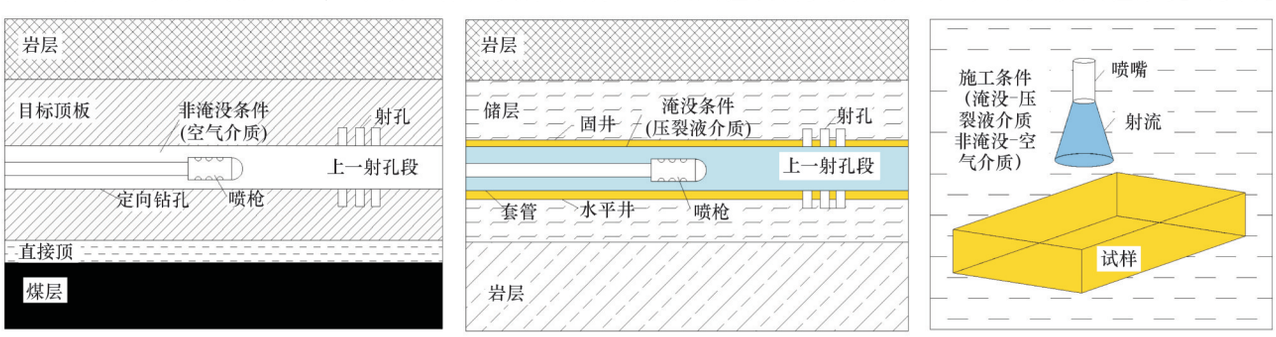
Fig. 1　The 122103 working face

由于煤矿井下旋转磨料水射流破岩的施工条件为非淹没条件，与石油领域的淹没条件有着较大差异。具体而言，煤矿井下钻孔内部喷枪与钻孔壁间为空气介质，管道内高压磨料流体经过旋转喷嘴形成旋转磨料水射流，进入空气介质后作用于钻孔壁；而淹没条件下喷枪与钻孔间存在压裂液，旋转磨料水射流先进入压裂液后作用于钻孔壁，如图 2 所示。为此，有必要明确非淹没条件下旋转磨料水射流破岩的成孔形态、成孔直径、成孔深度及成孔体积。

2　试验设备及方案

2.1　试验设备

利用高压磨料射流试验系统，开展非淹没条件下旋转磨料水射流定点冲蚀破岩的室内试验。该试验设备实物图如图 3 所示。该试验系统可实现



a. 煤矿井下非淹没条件　　b. 石油井筒淹没条件　　c. 射流喷射试样

图 2　淹没/非淹没条件下射流破岩

Fig. 2　Jet rock-breaking under submerged/non-submerged conditions

泵压 0~70 MPa，喷射距离 0~1 000 mm，磨料粒径 0.12~2.03 mm，磨料质量分数 0~30%，试样尺寸 0~400 mm，淹没/非淹没条件下的磨料射流试验研究。

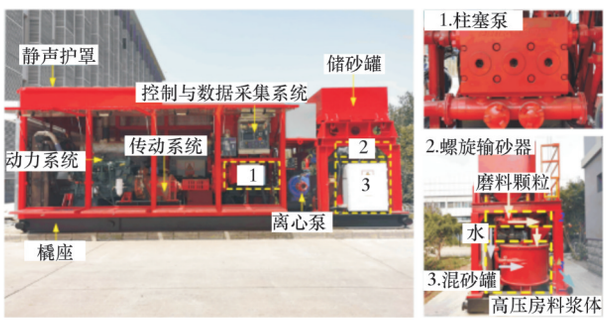


图 3　高压磨料射流试验系统图

Fig. 3　High-pressure abrasive jet testing system

2.2　试验材料

石英砂破岩能力强、作业成本低，已经成为煤矿井下磨料射流技术的常用磨料颗粒，因此该试验采用 46#石英砂和石榴石作为磨料。石英砂的密度 2.65 g/cm^3，莫氏硬度 7.0，形状因子 0.821，中值直径 355.0 μm，均匀系数 1.7，曲率系数 1。石榴石的密度 3.80 g/cm^3，莫氏硬度 7.8，形状因子 0.760，中值直径 336.3 μm，均匀系数 1.6，曲率系数 1。旋转形喷嘴主要由旋转叶轮与喷嘴外壳组成（见图 4），其中喷嘴外壳内部分为旋转叶轮安装空间及流体收缩舱，材质均由硬质合金制成。旋转叶轮为 3 叶片式，旋转角度为每 50 mm 旋转 360°；叶片厚度为 3 mm，叶片长度为 50 mm；喷嘴外壳为圆筒状，入口直径为 18 mm，出口直径为 5 mm；收缩舱整体为圆筒状，内部为漏斗状。其基本原理是管道内部高压磨料流体通过旋转叶轮产生周向速度，经收缩舱将高压流体转变为高速射流，最终形成“中空-外旋”形磨料射流。岩石试样选用陕西曹家滩煤矿的顶板砂岩，其密度 2.43 g/cm^3，抗压强度 95.43 MPa，抗拉强度 6.63 MPa，弹性模量 16.22 GPa，泊松比 0.248，断裂韧性 34 440.42 Pa·m$^{0.5}$。

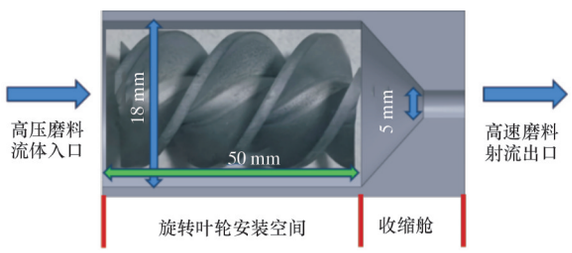


图 4　旋转喷嘴

Fig. 4　Swivel nozzle

2.3　试验方案

依据曹家滩煤矿井下现场的应用场景及相关文献资料，该试验的对照组参数设置为泵压 25 MPa，磨料质量分数 10%，喷射距离 20 mm，喷射时间 60 s，具体试验方案见表 1。采用成孔直径、成孔深度及成孔体积作为非淹没条件下不同试验参数旋转磨料射流定点冲蚀破岩效果的评价指标，其中成孔直径及成孔深度由游标卡尺测量，成孔体积采用填砂法测量。

表 1　旋转磨料射流破岩试验方案

Table 1　Test scheme for rock breaking by swirling abrasive water jet

试验组别	环境条件	泵压/MPa	喷射介质	喷射距离/mm	喷射时间/s	试样尺寸/mm
1	淹没	25	质量分数 10% 石英砂	20	60	150×150×150
2~4	非淹没	15/20/25	质量分数 10% 石英砂	20	60	
5~6	非淹没	25	清水/质量分数 10% 石榴石	20	60	
7~10	非淹没	25	质量分数 10% 石英砂	10/30/40/50	60	
11	非淹没	25	质量分数 10% 石英砂	10	60~600	150×150×300

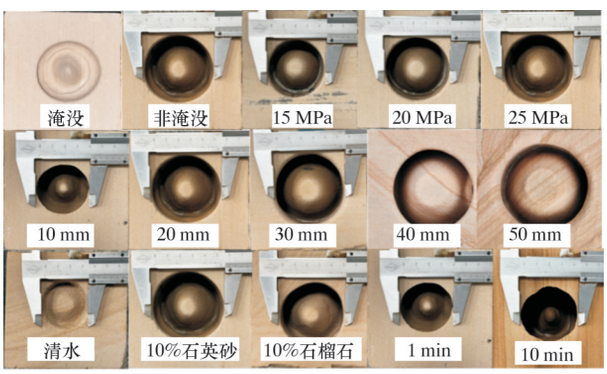
3　试验结果及分析

3.1　宏观破岩成孔特征

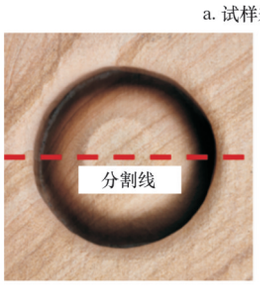
旋转磨料射流破岩特征如图 5 所示。由图 5a 可知，旋转磨料射流成孔形态与工况、泵压、喷射距离等施工参数无关，均为内含中部倒锥体的规则圆孔。旋转磨料水射流从喷嘴出来后，无论进入淹没还是非淹没环境，射流形态均为“中空-外旋”形，旋转射流在岩石表面产生剪切作用和拉伸作用，使得成孔形态为中部倒锥体的规则圆孔。而泵压、喷射距离等参数只会影响射流的动能，不会改变射流的形态，因此射流破岩的成孔形态一致。

沿着孔眼径向切开形成孔眼剖面结构，如图 5b 和图 5c 所示。旋转磨料水射流破岩的剖面形态为 W 形，说明“中空-外旋”形射流能量集中在外部圆环。由图 5d 可知，泵压、喷射距离、喷射介质及喷射时间不会改变剖面 W 形破岩形态，然而随着喷射时间的延长，孔眼内部倒锥体逐渐磨蚀，

体积减小。说明旋转磨料水射流先通过外旋的圆环切割破岩形成外部规则圆孔，随着圆环切割带的不断加深，孔眼内部磨料运移磨蚀圆环切割带中心岩石，在磨料反复磨蚀下形成内含中部倒锥体的规则圆孔。



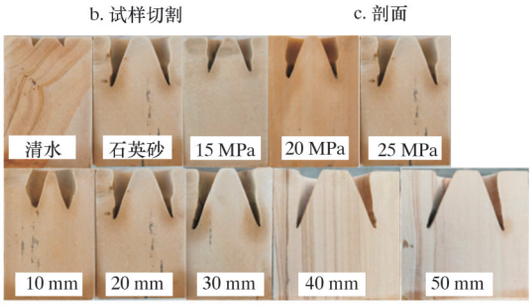
a. 试样表面



b. 试样切割



c. 剖面



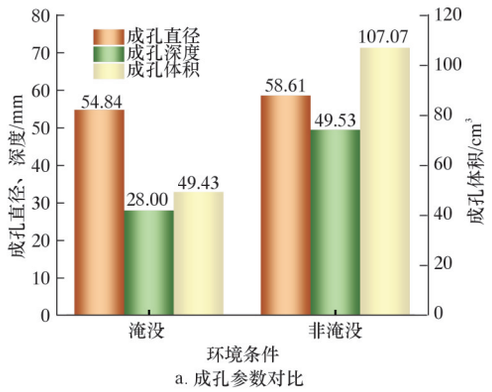
d. 不同因素下孔眼剖面

图 5　旋转磨料水射流破岩特征

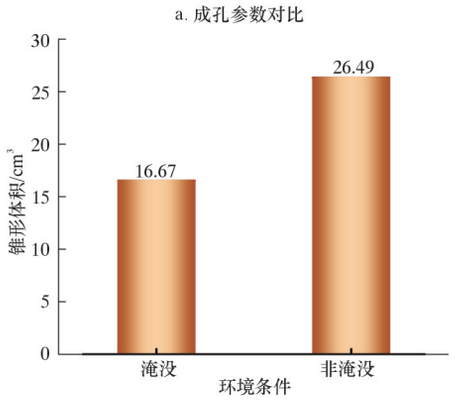
Fig. 5　Sandstone samples broken by swirling abrasive water jet

3.2　淹没/非淹没条件下磨料射流破岩特征

利用游标卡尺测量淹没/非淹没条件下成孔直径、成孔深度，通过填砂法测定成孔体积，如图 6 所示。由图 6 可知：对比淹没条件下的成孔参数，非淹没条件下的成孔直径增加了 6.87%，成孔深度增加了 76.89%，成孔体积增加了 116.61%；淹没/非淹没条件主要影响成孔深度及成孔体积。这是因为淹没条件的流体密度大于非淹没条件的流体密度，旋转射流通过喷嘴进入淹没条件会与流体介质进行动量交换，能量损耗大于非淹没条件下的损耗，使得淹没条件下的成孔参数均小于非淹没条件。另外，非淹没条件流体密度小使得旋转水射流扩散性大于淹没条件，但喷嘴与岩石的距离为 20 mm，限制了射流扩散范围，使得淹没与非淹没条件下的成孔直径差异较小。



a. 成孔参数对比



b. 中间锥形体积对比

图 6　不同施工条件下成孔特征

Fig. 6　Hole characteristics under different operational conditions

由于形成的孔洞形态为规则圆孔[33]，中间锥形体积可用圆孔体积减去成孔体积。由图 6 可知，对比淹没条件，非淹没条件下中间锥形体积增加了 58.91%，其中淹没条件下成孔体积为中间锥形体积的 2.97 倍，非淹没条件下成孔体积为中间锥形体积的 4.04 倍，非淹没条件下旋转射流破岩效率高于淹没条件。

3.3　不同泵压下磨料射流破岩规律

图 7 为不同泵压下的成孔特征。由图 7a 可知：泵压由 15 MPa 增至 20 MPa、再增至 25 MPa 时，成孔直径依次增加 8.66% 和 7.88%，成孔深度依次增加 17.28% 和 4.87%，成孔体积依次增加 45.29% 和 38.32%；泵压由 15 MPa 增至 25 MPa（提高约 67%）时，三者的总增幅分别为 17.22%、22.99% 和 100.96%。可见，成孔直径两级增幅相近，近似线性增长但增幅有限；成孔深度先快速增长，泵压超过 20 MPa 后增速明显放缓，这与淹没条件下泵压对成孔深度的影响规律一致[34]；成孔体积对泵压最为敏感，增幅远大于成孔直径与成孔深度。这说明泵压升高使旋转射流速度和动能增大，从而使成孔深度与成孔体积增大。

由图 7b 可知，泵压从 15 MPa 增加到 20 MPa

时，锥形体积增加了24.39%，其中泵压15 MPa时成孔体积是锥形体积的2.07倍，泵压增加到20 MPa时成孔体积是锥形体积的2.41倍，当泵压从20 MPa增加到25 MPa时圆锥体积减小了17.30%，而成孔体积是锥形体积的4.04倍。这是因为随着泵压的增加，非淹没条件下旋转磨料水射流磨蚀中部锥形体的效率急剧增大，射流能量消耗增加，使得成孔深度增长速率变缓。

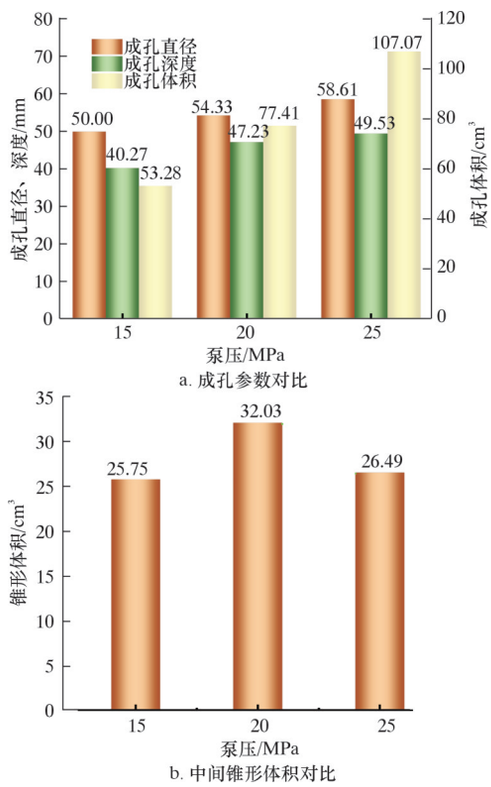


图7　不同泵压下成孔特征

Fig. 7　Hole characteristics under different jet pressures

3.4　不同喷射介质下磨料射流破岩规律

图8为不同喷射介质下的成孔特征。由图8a可知：与清水相比，在流体中添加质量分数10%石英砂和10%石榴石磨料后，成孔直径分别增加了46.42%和35.32%，成孔深度分别增加了295.61%和375.96%，成孔体积分别增加了1 152.28%和1 193.45%。这是因为纯水射流依靠高压冲击和剪切剥蚀使岩石表层松软或破碎岩屑；而当磨料加入后高速颗粒撞击岩石表面，产生局部高压，直接击碎岩石，并且磨料沿射流方向滑动，对岩石表面进行“铣削式”切割，增加了旋转水射流的破岩能力，成孔参数均有大幅度提升。另外，对比2种磨料的成孔参数发现，两者的成孔直径差值百分比7.58%，成孔深度差值百分比为20.31%，成孔体积差值百分比为3.29%。这是因为石榴石的莫氏硬度（7.5~8.5）与密度（3.5~4.3 g/cm³）均大于石英砂，在射流中不易因流速变化而偏离射流核心，使得成孔直径小于石英砂介质的成孔直径，成孔深度大于石英砂磨料介质条件。

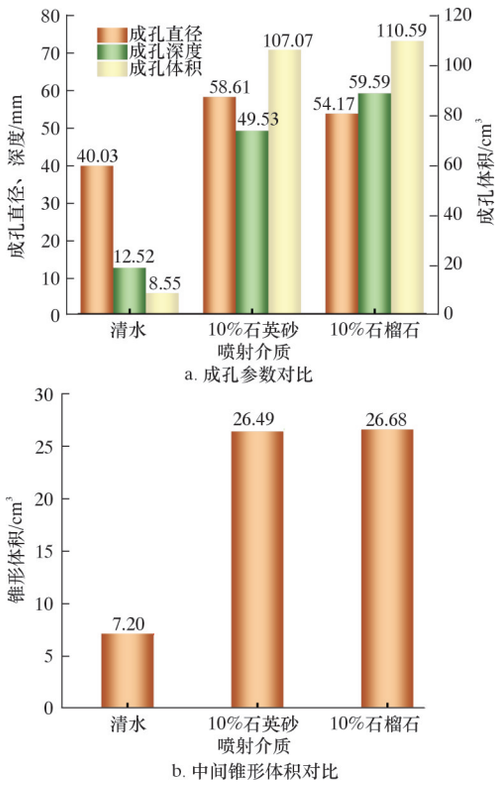


图8　不同喷射介质下成孔特征

Fig. 8　Hole characteristics under different jet media

由图8b可知：在清水中添加质量分数10%石英砂后锥形体积增加了268%，而当喷射介质为质量分数10%石英砂和10%石榴石时两者的锥形体积差值百分比仅为0.71%；在喷射介质为清水时成孔体积是锥形体积的1.19倍，喷射介质为质量分数10%的石英砂和石榴石时，成孔体积是分别是锥形体积的4.04倍和4.15倍。这是因为在清水中加入磨料后不仅增大了旋转磨料水射流的破岩能力，而且加快了射流磨蚀中间锥形体的速率。

为了进一步评估不同喷射介质的能效，引入了破岩成本效率E来量化经济性能，定义其为单位体积被清除的岩石的磨料成本[26]：

$$E = \frac{Y}{V_{\text{hole}}} \tag{1}$$

式中：E为破岩成本效率，元/cm³；Y为磨料的总成本，元；V_{hole}为被侵蚀的孔的体积，cm³。

较高的E表示单位体积的成本较高，因此经济效率较低。石英砂和石榴石的单价相同，破岩成本效率分别为0.374和0.904元/cm³。因此，石英砂实现了较低的单位体积成本和较高的能源效率。总而言之，石英砂在破岩效果和经济效益方面都

优于石榴石，使其成为更适合非淹没条件下旋转磨料水射流应用的磨料材料。

3.5　不同喷射距离下磨料射流破岩规律

图 9 为不同喷射距离下的成孔参数对比图。由图 9a 可知：随着喷射距离的增加，成孔直径依次增加了 39.32%、12.44%、11.68% 和 15.49%。成孔直径持续增长，核心原因在于射流旋转扩散角度的变化：非淹没条件下，旋转磨料射流进入空气介质后，由于空气密度低、能量损耗小，射流会沿旋转方向持续扩散，喷射距离越长，射流旋转扩散角度越大（经测量，10 mm 喷距时扩散角为 15°，50 mm 喷距时扩散角增至 28°），射流作用于岩石表面的覆盖范围扩大，进而导致成孔直径线性增加。同时，射流旋转扩散角度的增大会导致射流能量在径向分布趋于均匀，导致中心区域能量密度降低，这也是成孔深度呈现“先增加后减小”的重要原因。当喷距≤30 mm 时，射流扩散角度适中，能量集中于环形区域，破岩能力随喷距增加而提升；当喷距>30 mm 时，扩散角度过大，能量分散，中心区域动能不足，成孔深度开始减小。此外，图 9b 中不同喷距下孔眼剖面的“外八字”形态，正是射流旋转扩散角度的直接体现：喷距越大，扩散角度越大，孔眼剖面的“外八字”形态越明显，与射流扩散规律高度契合。

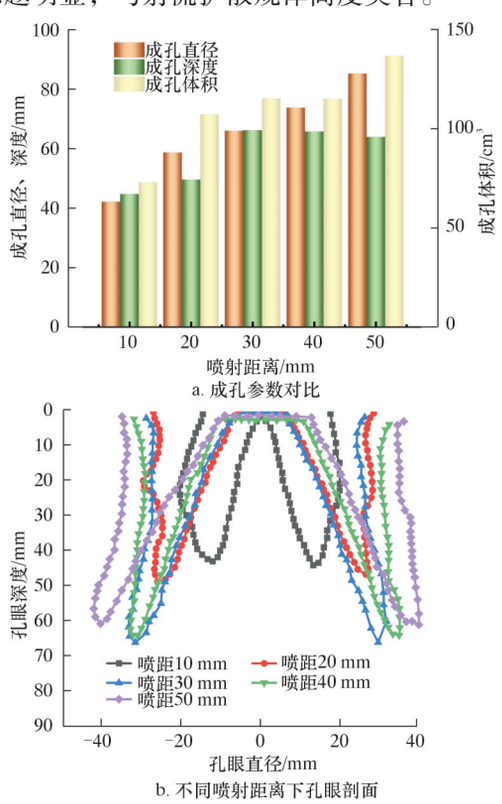


图 9　不同喷射距离下成孔参数对比

Fig. 9　Hole parameters under different jet distances

3.6　不同喷射时间下磨料射流破岩规律

图 10 为不同喷射时间下的成孔参数。由图 10 可知：随着喷射时间的延长，成孔直径呈现“增长-趋于稳定”的趋势，而成孔深度呈现持续增长的趋势。总体而言，喷射时间越长，旋转磨料水射流破碎岩石的效果就越好。成孔直径在 44.02~47.28 mm 之间，受喷射时间的影响较小。当喷射时间从 60 s 延长到 300 s 时，成孔直径增加了 6.72%。然而，当喷射时间从 300 s 延长到 600 s 时成孔直径仅增加了 0.64%。这是因为成孔直径由旋转磨料水射流的扩散性决定，射流扩散性与喷射时间无关，与喷射距离和喷射介质有关。另外，成孔深度会随着喷射时间的延长而增加，喷射时间从 60 s 延长到 600 s，成孔深度增加了 70.69%。这是因为在旋转磨料水射流破岩过程中磨料颗粒与岩石的碰撞次数随着喷射时间的延长而增加，旋转磨料水射流的有效动能与其喷射时间成正比，旋转磨料水射流的有效动能越大，其破岩性能越好。

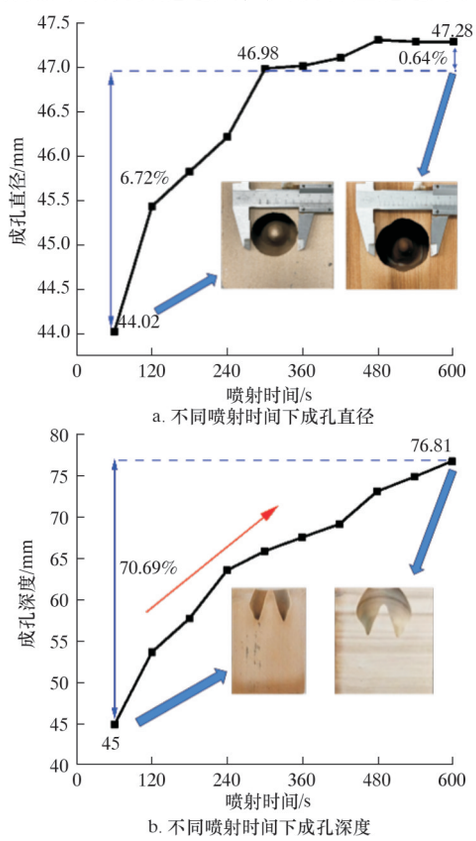


图 10　不同喷射时间下成孔参数对比

Fig. 10　Hole parameters under different jet times

结合成孔直径和成孔深度的变化，随着喷射时间的延长，孔眼变化可分为 3 个阶段。①快速增大阶段（60~300 s）。射流能量充足，孔顶未形成明显滞止区，磨料颗粒碰撞次数随时间延长，成孔深度快速提升。②缓慢增长阶段（300~480 s）。

随着孔深增加，射流在孔内运动距离延长，能量衰减加剧，同时孔顶形成滞止区，压力升高，阻碍射流向下渗透，成孔深度增长速率放缓。③ 趋于稳定阶段（480~600 s）。射流能量衰减至临界值，滞止区压力趋于稳定，磨料颗粒无法有效侵蚀岩石深层，成孔深度基本不变。上述结果符合磨料射流破岩的一般规律，即射流能量衰减和孔顶滞止区压力会限制成孔深度的持续增加。

3.7　非淹没条件下旋转磨料水射流破岩性能评价

成孔深度和成孔体积是表征旋转磨料水射流破岩效率的关键参数。为比较各因素的影响程度，将各因素在其试验范围内引起的成孔深度、成孔体积相对增幅分别定义为深度增量和体积增量，各因素的增量对比结果如图 11 所示。由图 11a 可知：成孔深度增量依次为喷射介质 295.61%、泵压 82.43%、喷射时间 70.69% 和喷射距离 47.88%；由图 11b 可知，成孔体积增量依次为 1 152.28%、100.96%、97.11% 和 57.92%，排序与图 11a 一致。2 项指标下喷射介质的增量均远高于其余 3 种因素，为控制性因素。因此，各因素对破岩效率的敏感性排序为喷射介质>泵压>喷射时间>喷射距离。

据此，优选的非淹没条件下旋转磨料水射流参数为：喷射介质为质量分数 10% 石英砂，泵压 25 MPa，喷射距离 30 mm，喷射时间 600 s。

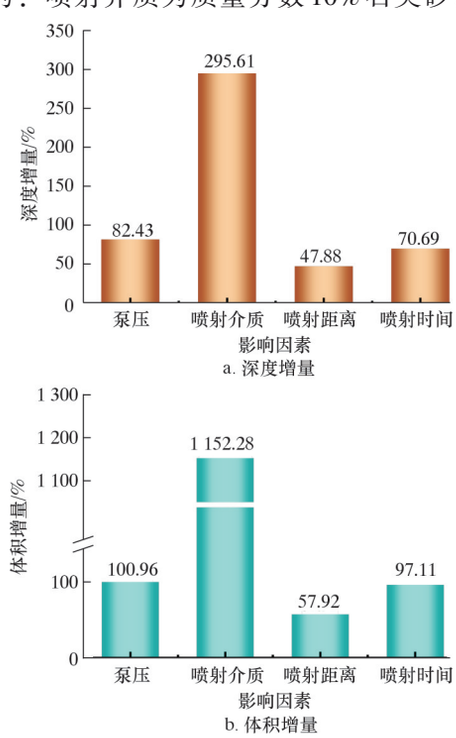


图 11　不同参数下破岩各增量柱状对比图

Fig. 11　Bar chart comparison of rack-breaking increment values under different parameters

4　工业性试验

4.1　方案设计

采用自主研制的排列形喷枪及旋转形喷嘴，在曹家滩煤矿 122103 工作面辅助运输巷道 1 800 m 处的钻场进行工业性试验。根据现场情况和施工要求，为方便成孔参数测量，将试验段设置在孔口向里 300 mm 处。钻孔直径为 120 mm，孔深为 780 m，水平段为 628 m；采用 2 台泵串联，射孔排量 1 m^3/min，泵压 25 MPa，射孔时间 10 min，射孔方向为垂直应力方向。喷枪直径约 100 mm，对称布置 2 排喷口，每排 3 个，喷口间距为 75 mm，喷口直径为 5 mm。喷嘴由旋转叶轮、固定筒、喷嘴外壳组成，安装在喷口内构成排列形喷枪，如图 12 所示。



a. 喷枪设备

b. 井下射孔试验

图 12　旋转喷嘴设备及试验

Fig. 12　Swivel nozzle equipment and test

4.2　试验结果

用卷尺现场测量非淹没条件下旋转磨料水射流破岩的成孔参数，得到成孔直径 50 mm、成孔深度 40 mm、孔间距 25 mm 的 3 个相邻规则圆孔，且孔内无倒锥体，如图 13 所示。现场试验证明，非淹没条件下旋转磨料水射流能够形成 50 mm 大直径射孔，并且在 10 min 持续喷射下，圆孔中部倒锥体被磨料磨蚀直至消失。但成孔深度（40 mm）小于实验室相同喷射时间下的成孔深度（76.81 mm）。其机理在于：磨料射流破岩的过程中，岩石表面主要受压应力和剪应力的共同作用而破坏，岩石内部则在拉应力的作用下逐渐受损并出现裂缝；在地应力的作用下，垂直方向分布的裂缝扩展大多受到抑制，且随着地应力的增大，岩石的

损伤深度逐渐减小，损伤宽度呈现出先减小后增大的趋势[32, 35-36]。因此，现场地应力环境是成孔深度小于实验室结果的主要原因。

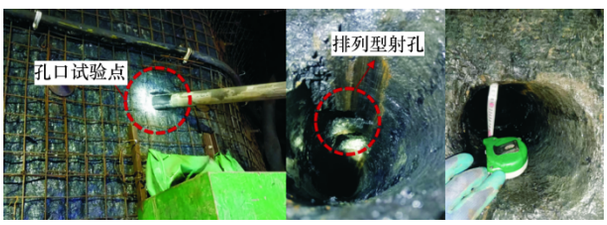


图 13　现场成孔参数测定

Fig. 13　Field measurement of hore parameters

5　结　论

（1）淹没/非淹没条件不会显著影响成孔形态（均为内含中部倒锥体的规则圆孔）。非淹没条件下成孔深度、体积分别较淹没条件增加 76.89%、116.61%，破岩效率更高。

（2）非淹没条件下，破岩效率与喷射介质、泵压、喷射时间正相关，随喷射距离的增大呈“先增后减”趋势；各敏感性排序为：喷射介质>泵压>喷射时间>喷射距离，该规律可为现场参数调控提供依据。

（3）结合实验室试验与现场工况，确定最优破岩参数为：泵压 25 MPa，喷射距离 30 mm，喷射介质为质量分数 10% 的石英砂，喷射时间 600 s。现场试验验证了该参数可形成直径 50 mm、深度 40 mm 的大直径射孔，符合工程要求。

参　考　文　献

[1] 康红普，徐刚，王彪谋，等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望 [J]. 采矿与岩层控制工程学报，2019，1（2）：7-39.
Kang Hongpu, Xu Gang, Wang Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1 (2): 7-39.

[2] 蒋金泉，张培鹏，聂礼生，等. 高位硬厚岩层破断规律及其动力响应分析 [J]. 岩石力学与工程学报，2014，33（7）：1366-1374.
Jiang Jinquan, Zhang Peipeng, Nie Lisheng, et al. Fracturing and dynamic response of high and thick stratas of hard rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (7): 1366-1374.

[3] 潘俊锋，康红普，闫耀东，等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用 [J]. 煤炭学报，2023，48（2）：636-648.
Pan Junfeng, Kang Hongpu, Yan Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48 (2): 636-648.

[4] 康红普，姜鹏飞，冯彦军，等. 煤矿巷道围岩卸压技术及应用 [J]. 煤炭科学技术，2022，50（6）：1-15.
Kang Hongpu, Jiang Pengfei, Feng Yanjun, et al. Destressing technology for rock around coal mine roadways and its applications [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50 (6): 1-15.

[5] 康红普，姜鹏飞，黄炳香，等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术 [J]. 煤炭学报，2020，45（3）：845-864.
Kang Hongpu, Jiang Pengfei, Huang Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1000 m deep coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (3): 845-864.

[6] 杨胜江，李正杰，娄金福. 深孔爆破构造裂隙卸压技术研究 [J]. 煤炭科学技术，2015，43（7）：55-59.
Yang Shengjiang, Li Zhengjie, Lou Jinfu. Study on pressure releasing technology with structural cracking made with deep borehole blasting [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43 (7): 55-59.

[7] 杨增强，窦林名，刘畅，等. 深井巷帮煤体冲击机理及水射流卸压技术应用 [J]. 采矿与安全工程学报，2017，34（4）：670-677.
Yang Zengqiang, Dou Linming, Liu Chang, et al. Mechanism of rock burst in roadway side wall and the application of water jet pressure relief technology in deep mine [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34 (4): 670-677.

[8] 王振锋，王宇，张涛. 掘进工作面水环保压聚能定向爆注卸压技术与装置 [J]. 煤炭学报，2023，48（11）：4036-4048.
Wang Zhenfeng, Wang Yu, Zhang Tao. Energy-accumulation blasting and water injecting under local water storage and pressure retention in heading face [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48 (11): 4036-4048.

[9] He Jianming, Lin Chong, Li Xiao, et al. Initiation, propagation, closure and morphology of hydraulic fractures in sandstone cores [J]. Fuel, 2017, 208: 65-70.

[10] Ha S J, Yun T S, Kim K Y, et al. Experimental study of pumping rate effect on hydraulic fracturing of cement paste and mortar [J]. Rock Mechanics and

Rock Engineering，2017，50（11）：3115-3119.

［11］ 康红普，雷亚军，赵福堂，等. 特厚煤层 10 m超大采高综采关键技术及装备［J］. 煤炭学报，2025，50（4）：1849-1875.
Kang Hongpu，Lei Yajun，Zhao Futang，et al. Key technology and equipment for fully mechanized mining with extra-large shearing height of 10m in extra-thick coal seam［J］. Journal of China Coal Society，2025，50（4）：1849-1875.

［12］ 雷亚军，冯彦军，康红普，等. 超大采高工作面厚硬顶板压裂卸压技术研究及应用［J］. 煤炭学报，2025，50（4）：1907-1934.
Lei Yajun，Feng Yanjun，Kang Hongpu，et al. Research and application of pressure relief technology for fracturing thick hard roof in super-high mining face［J］. Journal of China Coal Society，2025，50（4）：1907-1934.

［13］ 王锐，徐刚，康红普，等. 曹家滩煤矿 10 m超大采高工作面采场围岩控制技术［J］. 煤炭学报，2025，50（4）：1935-1950.
Wang Rui，Xu Gang，Kang Hongpu，et al. Surrounding rock control technology of 10 m super large mining height working face in Caojiatan coal mine［J］. Journal of China Coal Society，2025，50（4）：1935-1950.

［14］ 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，1999，27（4）：4-6.
Yang Yongyin，Shen Zhonghou，Wang Ruihe，et al. Experimental study on rotary abrasive jet drilling［J］. Petroleum Drilling Techniques，1999，27（4）：4-6.

［15］ Han Feng，Wang Lixiang，Wen Minjie，et al. Insights into the influence of 3D spiral perforation parameters on initiation pressure and fracture morphology：a comprehensive numerical study based on CDEM［J］. Engineering Fracture Mechanics，2025，323：111164.

［16］ 毕刚，吴捷敏，杨尚谕，等. 不同储层射孔参数适用性评价技术研究［J］. 煤田地质与勘探，2023，51（7）：80-91.
Bi Gang，Wu Jiemin，Yang Shangyu，et al. Applicability evaluation technology of perforating parameters in different reservoirs［J］. Coal Geology & Exploration，2023，51（7）：80-91.

［17］ 张儒鑫，侯冰，单清林，等. 致密砂岩储层水平井螺旋射孔参数优化研究［J］. 岩土工程学报，2018，40（11）：2143-2147.
Zhang Ruxin，Hou Bing，Shan Qinglin，et al. Parameter optimization of spiral perforations in horizontal well with tight sandstone reservoir［J］. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2018，40（11）：2143-2147.

［18］ Zhao Xi，Ju Yang，Yang Yong，et al. Impact of hydraulic perforation on fracture initiation and propagation in shale rocks［J］. Science China Technological Sciences，2016，59（5）：756-762.

［19］ Li Jing，Wang Lixiang，Feng Chun，et al. Study on the influence of perforation parameters on hydraulic fracture initiation and propagation based on CDEM［J］. Computers and Geotechnics，2024，167：106061.

［20］ 魏建平，校朋伟，张慧栋，等. 磨料水射流旋转切割煤岩最优参数匹配模形研究［J］. 煤炭科学技术，2025，53（1）：192-202.
Wei Jianping，Jiao Pengwei，Zhang Huidong，et al. Study on the optimal parameter matching model of rotary cutting coal-rock for abrasive water jet［J］. Coal Science and Technology，2025，53（1）：192-202.

［21］ 杨睿月，黄中伟，李根生，等. 煤层气水平井水力喷射分段造穴技术探索［J］. 煤炭学报，2022，47（9）：3284-3297.
Yang Ruiyue，Huang Zhongwei，Li Gensheng，et al. Investigation of hydraulic jet multistage cavity completion in coalbed methane horizontal wells［J］. Journal of China Coal Society，2022，47（9）：3284-3297.

［22］ Li Huan，Li Jingbin，Guo Chenrui，et al. Sandstone breaking performances and mechanisms of swirling abrasive water jet during radial het drilling process［J］. Petroleum Science，2024，21（6）：4298-4310.

［23］ 毕刚，李根生，屈展，等. 自进式旋转射流钻头破岩效果［J］. 石油学报，2016，37（5）：680-687.
Bi Gang，Li Gensheng，Qu Zhan，et al. Rock breaking efficiency of the self-propelled swirling jet bit［J］. Acta Petrolei Sinica，2016，37（5）：680-687.

［24］ 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（1）：1-7.
Zhou Mengmeng，Li Huan，Li Gensheng，et al. Study on applicability of swirling abrasive water jet drilling in reservoirs［J］. Fluid Machinery，2023，51（1）：1-7.

［25］ 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）：12-17，53.
Ma Guorui，Li Jingbin，Li Huan，et al. Study on pore forming characteristics of carbonate rock broken by

swirling abrasive water jet [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(11): 12-17, 53.

[26] Li Huan, Huang Zhongwei, Li Jingbin, et al. Performances of different abrasive materials during swirling impeller abrasive water jet drilling of granite [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(6): 4343-4361.

[27] Li Lei, Wang Fangxiang, Li Tianyang, et al. The effects of inclined particle water jet on rock failure mechanism: experimental and numerical study [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 185: 106639.

[28] Liao Hualin, Jia Xia, Niu Jilei, et al. Flow structure and rock-breaking feature of the self-rotating nozzle for radial jet drilling [J]. Petroleum Science, 2020, 17: 211-221.

[29] 李欢，黄中伟，李敬彬，等. 旋转磨料射流破碎碳酸盐岩参数影响规律及机理研究 [J]. 石油科学通报，2024，9(6)：991-1004.
Li Huan, Huang Zhongwei, Li Jingbin, et al. Investigation on the effect of process parameters and rock breaking mechanisms on swirling impeller abrasive water jet breaking carbonate rock [J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(6): 991-1004.

[30] Zhang Dongqing, Li Jingbin, Hu Xiao, et al. Flow field simulation of swirling abrasive jet nozzle for hard rock breaking [J]. Geofluids, 2022, 2022(1): 4681189.

[31] Li Huan, Li Jingbin, Guo Chenrui, et al. Numerical investigation into the abrasive particle movement characteristics inside the swirling impeller nozzle based on the coupled SPH-FEM method [J]. Powder Technology, 2024, 436: 119458.

[32] Li Huan, Li Jingbin, Huang Zhongwei, et al. Numerical investigation of abrasive water jet rock damage characteristics that considers the shape, the interaction and the fragmentation of abrasive particles [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(2): 2105-2131.

[33] Li Huan, Huang Zhongwei, Li Jingbin, 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.

[34] Li Huan, Li Jingbin, Huang Zhongwei, et al. Experimental investigation into the effect of process parameters on the drilling performance for swirling impeller abrasive water jet [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(12): 8833-8850.

[35] Wang Zizhen, Lei Xianbo, Zhou Weidong, et al. Numerical simulation of the damage process of rock containing cracks by impacts of steel-particle water jet [J]. Powder Technology, 2023, 422: 118465.

[36] Zhao Huihe, Jiang Hongxiang, Li Hongsheng, et al. Numerical research on rock cutting by abrasive jet under confining pressure based on SPH-FEM method [J]. Powder Technology, 2024, 433: 119196.

第一作者简介：王　宇，生于1998年，现为在读博士研究生，研究方向为磨料射流破岩导控水力压裂。地址：(100083) 北京市海淀区。email：wangyu980424@163.com。

修改回稿日期：2026-03-10

（本文编辑　刘海森）