◀油气田开发工程▶

旋转磨料射流冲蚀煤岩成孔及孔周造缝特性研究

李文彬[1] 黄中伟[1] 李敬彬[1] 田开庆[2] 李 锐[1] 李 欢[1] 席 冰[1]
（1. 中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室 2. 长庆工程设计有限公司）

李文彬，黄中伟，李敬彬，等. 旋转磨料射流冲蚀煤岩成孔及孔周造缝特性研究[J]. 石油机械，2026，54（9）：117-125.

Li Wenbin，Huang Zhongwei，Li Jingbin，et al. Hole-forming and fracturing characteristics around holes in coal rock eroded by swirling abrasive jet[J]. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：117-125.

摘要：为优化煤层气水平井水力喷射分段造穴技术，聚焦于旋转磨料射流破碎煤岩的成孔造缝特性，以期解决煤层“三低一高”特征带来的增产难题。采用正交试验法，以水泥包裹煤岩靶件模拟井下围压约束条件，在喷射压力 8~14 MPa、射流喷距 15~30 mm、射流时间 30~120 s 范围内设计 16 组试验，深入探究旋转磨料射流破碎煤岩的成孔造缝特征及水力参数影响规律。研究了旋转磨料射流在定点喷射与连续送进条件下破碎煤岩的成孔演化机制，分析了旋转叶轮结构与孔眼底部形态的对应关系。研究结果表明：旋转磨料射流可高效破碎煤岩，形成壁面光滑且底部具有凸起的大尺寸圆形孔眼，最大孔径达 45.54 mm，最大孔深达 92.33 mm，并在孔周形成 1~3 条次生裂缝；旋转磨料射流通过激活煤岩内部弱面，在水楔作用下实现煤岩大块剥离与体积破碎，剥离煤岩沿弱面发生层裂或崩裂并被射流持续破碎带出孔眼；射流压力对孔深和孔径的影响最为显著，增大射流压力可提升射流破煤岩成孔能力，喷距超过 25 mm 时孔深明显减小，射流喷距建议控制在 20~25 mm，射流时间不短于 60 s。相关成果可为煤层气水平井水力喷射分段造穴技术的应用提供理论参考和参数优化依据，有望推动煤层气高效开发技术的创新与发展。

关键词：煤层气；水力喷射；旋转磨料射流；水平井造穴；正交试验法
中图分类号：TE37 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202505022

Hole-Forming and Fracturing Characteristics around Holes in Coal Rock Eroded by Swirling Abrasive Jet

Li Wenbin[1] Huang Zhongwei[1] Li Jingbin[1] Tian Kaiqing[2] Li Rui[1] Li Huan[1] Xi Bing[1]
（1. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting*, *China University of Petroleum* (*Beijing*); 2. *Changqing Engineering Design Co., Ltd.*, *PetroChina Changqing Oilfield Company*）

Abstract: In China, coal seams are generally characterized by low gas saturation, low permeability, low reservoir pressure, and high coal rank, which bring challenges to achieving additional coalbed methane (CBM) production. It is necessary to optimize the hydraulic jetting staged cavitation technology for CBM horizontal wells, and to especially understand the hole-forming and fracturing characteristics during coal rock breaking by swirling abrasive jet. Using the orthogonal test method, coal rock targets were cement-encapsulated to simulate downhole confining pressure constraints, and 16 groups of tests were designed with the jet pressure of 8-14 MPa, standoff distance of 15-30 mm, and jet time of 30-120 s, to thoroughly investigate the hole-forming and fracturing characteristics during coal rock breaking by swirling abrasive jet, as well as the influences of hydraulic parameters. The hole-forming evolution mechanisms during coal rock breaking by swirling abrasive jet under fixed-point jetting and continuous feeding conditions were analyzed, and the correlation between the structure of the swirling impeller and the

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

bottom morphology of the hole was clarified. The results show that the swirling abrasive jet can efficiently break coal rock, forming large-diameter circular holes with smooth walls and raised bottoms, with the maximum hole diameter of 45.54 mm and maximum hole depth of 92.33 mm, and creating 1-3 secondary fractures around the holes. The swirling abrasive jet activates the internal weak planes of the coal rock to trigger large-block spalling and volumetric breaking under the water wedge effect. The spalls undergo exfoliation or flaking along the weak planes, and are continuously broken and taken out of the hole by the jet. The jet pressure has the most significant influence on the hole depth and diameter, and increasing the jet pressure can improve the hole-forming ability of the jet in coal rock breaking. When the standoff distance exceeds 25 mm, the hole depth decreases significantly. The standoff distance is recommended to be controlled at 20-25 mm and the jet time to be no less than 60 s. The research findings provide theoretical reference and parameter optimization basis for the application of hydraulic jetting staged cavitation technology in CBM horizontal wells, hopefully promoting the innovation and development of efficient CBM exploitation technology.

Keywords: CBM; hydraulic jetting; swirling abrasive jet; cavitation in horizontal well; orthogonal test method

0 引 言

提高煤层气单井产量是我国开发煤层气的重要课题[1-2]。我国煤层普遍具有“三低一高”特征，即饱和度低、渗透性低、储层压力低和变质程度高[3]。学者们围绕煤层储层改造开展了大量研究，形成了一系列煤层卸压增透技术和方法，并取得了良好的现场应用效果[4-7]。卸压增透技术通过降低煤层中的地应力或瓦斯压力和提高煤层的渗透性达到煤层气增产的目的[8-9]，被认为是激活我国煤层气资源潜力的重要手段。其中以水力割缝[10]、水力冲孔[11]、水力压裂[12-13]为代表的水力化措施已成为煤层卸压增透、强化瓦斯抽采的主要技术方法。因而，推动水射流卸压增透煤层方法的技术和理论创新，是未来煤层卸压增透技术的重点发展趋势[14]。

工程实践表明，煤矿采空及直井裸眼洞穴完井后形成的煤层应力释放区能够有效提高煤层气单井产量[15]。在此基础上，诱导煤层塌孔造穴工艺的提出，能够进一步改善煤层局部应力释放效果，扩大能量传递范围，被认为是实现煤层气增产的储备型技术[16]。张波等[17]提出气体波动压力诱导水平井段煤层塌孔造穴，并现场应用于华北油田沁水盆地樊庄区块某井，显著改善了该井的煤层气产量。桑树勋等[18]提出水力-机械联合诱导扩孔造穴工艺，在应力释放构造煤煤层气开发理论研究中取得重要进展。卢义玉等[19]提出将定向井与水力割缝技术结合，实现对深部煤层的卸压增产目的。杨睿月等[20-21]总结了磨料射流破碎煤岩的造穴优势，提出了水平井水力喷射分段造穴技术，并进一步开展了淹没条件下磨料直射流和旋转磨料射流喷射煤岩的室内试验，研究结果证实了磨料射流尤其是旋转磨料射流能够有效应对煤系夹层、薄互层等储层压裂改造不充分的问题。然而，现有研究并未深入探索旋转磨料射流破碎煤炭的成孔特征及水力参数对旋转磨料射流破碎煤岩成孔影响。

为此，笔者团队采用水泥包裹煤岩的方式设计并开展旋转磨料射流破碎煤岩的正交试验，分析水力参数对旋转磨料射流破碎煤岩成孔的影响规律。通过3D扫描仪对孔眼几何进行数据处理，获得旋转磨料射流在垂直于煤岩层理喷射时破碎煤岩的孔眼形态，并讨论煤岩射流孔眼的演化特征，揭示旋转磨料射流在煤岩孔周形成次生裂缝的独特性质。研究结果可为旋转磨料射流造穴应用提供理论借鉴，促进水平井水力喷射分段造穴储层改造技术在煤层气开发领域的应用。

1 旋转磨料射流破碎煤岩试验

1.1 试验装置与步骤

试验采用中国石油大学（北京）自主研发的高压磨料射流破岩综合试验系统（见图1）。该试验系统由混砂单元、动力单元、作业池单元、岩样夹持单元、数据采集与控制单元、液体循环单元组成[20]。工作原理是高压柱塞泵将与磨料均匀混合的流体增压，通过旋转射流喷嘴形成高速磨料射流，冲蚀煤岩靶件。高压磨料射流破岩综合试验系统具备以下参数调节能力：喷射压力可调范围0~70 MPa，喷射距离0~1 000 mm，岩样最大尺寸400 mm，淹没度0~500 mm，砂质量分数0~



图 1　试验与测量装置

Fig. 1　Testing and measurement equipment

30%，磨料粒度 12~120 mm。

试验保持淹没度 300 mm 不变，砂质量分数均控制在 8%~10%。磨料射流压力选取范围 8~14 MPa，射流喷距选取范围 15~30 mm，射流时间 30~120 s。依据正交试验准则，共设计旋转磨料射流破碎煤岩试验 16 组。试验参数如表 1 所示。

表 1　旋转磨料射流破碎煤岩正交试验表($L_{16}(4^3)$)

Table 1　Orthogonal tests for coal rock breaking by swirling abrasive jet ($L_{16}(4^3)$)

参数类型	喷射压力/MPa	射流喷距/mm	射流时间/s
参数范围	8、10、12、14	15、20、25、30	30、60、90、120

试验步骤：①夹持煤岩，将其浸没于水中，调节煤岩表面水平度，保持水平；②调节喷嘴出口至煤岩距离，以厚度为 5 mm 钢片为标尺，钢片恰能置于喷嘴出口与煤岩之间缝隙，说明已达到设定的射流喷距；③开泵连续喷射一定时间，停泵；④更换煤岩靶件，重复步骤②和步骤③直到完成所有 16 组试验；⑤收集岩屑，评价破岩效果。

1.2　试验材料

试验所用煤岩取自陕西省神木市境内的鄂尔多斯盆地侏罗系延安组，煤岩平均密度为 1.25 g/cm^3。该煤岩天然裂缝发育、非均质性强，且煤岩力学性质随取芯方向的不同有较大差异，水平取芯时煤岩弹性模量为 2.545 GPa，抗拉强度为 0.960 MPa。垂直取芯时弹性模量为 3.283 GPa，抗拉强度为 1.815 MPa。试验煤岩物理力学参数详见表 2。

表 2　煤岩物理力学性质参数

Table 2　Physical and mechanical properties of coal rock

取芯方向	密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
水平	1.26	2.55	0.395	2.64	0.96
垂直	1.25	3.28	0.425	3.28	1.81

煤岩靶件制备：钻取并切割出长宽高均为 100 mm 的立方体煤岩岩心，岩心表面齐整，且外表无肉眼可见裂缝。将煤岩层理方向与水平方向平行放置，并在四周和岩心底部分别包裹厚度为 50 和 20 mm 的水泥，如图 2 所示。水泥成型后养护 30 d 以确保水泥强度。

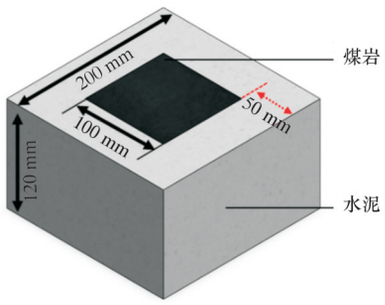


图 2　水泥包裹煤岩靶件示意图

Fig. 2　Cement-encapsulated coal rock targets

试验用旋转射流喷嘴[22]包含喷嘴外壳、旋转叶轮，结构如图 3 所示。喷嘴长度 100 mm，入口内径 18 mm，出口直径 5 mm。试验磨料选用分选性好、粒度均匀的石英砂（砂直径 0.25 mm），其真密度 2.65 g/cm^3，堆积密度 1.5 g/cm^3，莫氏硬度 7。

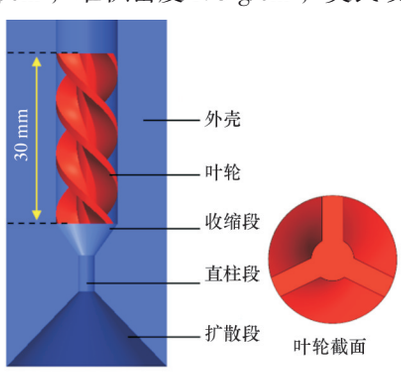


图 3　旋转磨料射流喷嘴结构示意图

Fig. 3　Structure of the swirling abrasive jet nozzle

1.3　评价方法

利用手持扫描仪对射流冲蚀煤岩孔眼进行扫描，准确获取煤岩孔眼的几何信息，包含孔眼形状、孔径、孔深、凸起高度和孔眼体积。文中的孔径皆为孔眼的等效直径，孔深为孔眼深度的平均值。通过专业数据处理软件对手持扫描仪生成的 STL 面网格文件进行处理，随后对煤岩孔眼进行体积提取和重建模，还原煤岩破碎产生的孔眼及裂缝面形貌。

2　试验结果分析

2.1　宏观成孔特征

旋转磨料射流破碎煤岩成孔形貌如图 4 所示。由图 4 可知：旋转磨料射流垂直于层理面冲击煤岩靶件，形成具有一定孔径和深度的圆形孔眼，孔眼壁面光滑；部分煤岩的冲蚀孔眼上部出现煤岩

剥蚀区，孔眼周边存在裂缝扩张区，孔眼内部具有三角形凸起，孔眼底部逐渐分化为3个小型射流冲蚀孔，呈三角形分布。

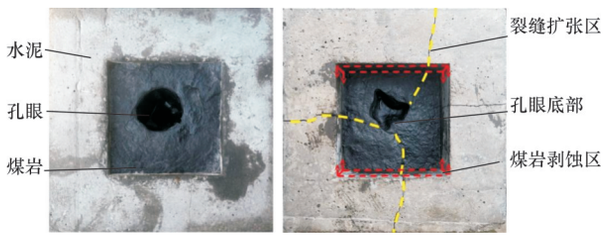


图4　旋转磨料射流破碎煤岩成孔特征

Fig. 4　Hole-forming characteristics of coal rock breaking by swirling abrasive jet

利用手持扫描仪对冲蚀孔眼内部特征进行扫描，提取后的孔眼形状如图5所示。旋转磨料射流冲蚀煤岩形成的孔眼根据形状的变化可在纵向上分为4个区域。孔眼顶部为较规则的圆柱体，等效直径可达39 mm，随着孔眼深度加深，孔眼直径小幅度减小，最小可至37 mm。孔眼上部仍保留了一定程度的圆柱体特征，截面形状开始由圆形向三角形转变，冲蚀孔道逐渐向外拓宽，但孔眼面积开始减小，孔眼周长逐渐增大。孔眼中部区域的截面形状出现明显的三角形特征，说明在该深度下，旋转磨料射流有效冲蚀区域分化明显且射流冲蚀能力逐渐减弱。在孔眼底部，由于旋转磨料射流冲蚀区域的进一步分化，孔眼形状持续向内部收缩，直到在冲蚀煤岩孔眼中心留下凸起。

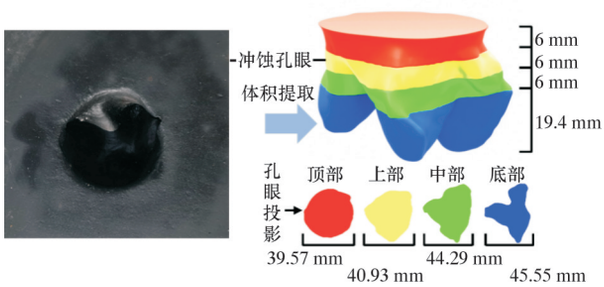
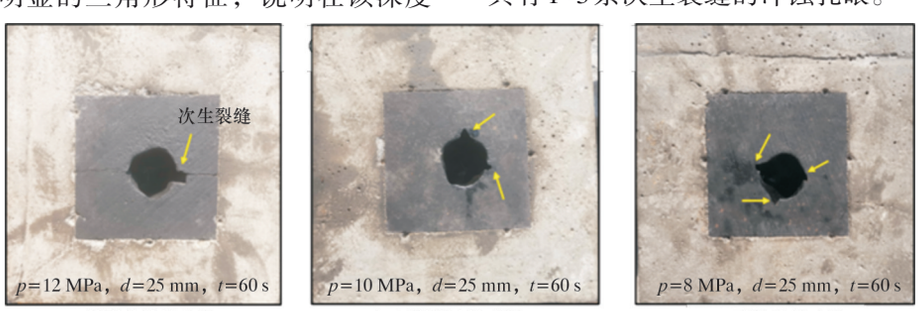


图5　煤岩破碎孔眼形态特征

Fig. 5　Morphology of hole formed in coal rock

2.2　孔周造缝特征

旋转磨料射流破碎煤岩在孔周处能够生成纵向分布的次生裂缝，如图6所示。次生裂缝的形成与旋转磨料射流的叶轮结构有关，流体和磨料颗粒经过叶轮加旋槽获得三维速度，由于流体和磨料颗粒的动能在叶轮加旋槽出口位置达到最大，射流沿孔周位置对煤岩造成局部脆性破坏，形成具有1~3条次生裂缝的冲蚀孔眼。



a. 单裂缝冲蚀孔眼　　b. 双裂缝冲蚀孔眼　　c. 三裂缝冲蚀孔眼

图6　煤岩冲蚀孔眼次生裂缝形态特征

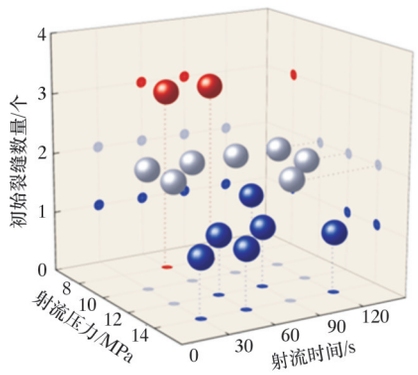
Fig. 6　Morphology of secondary fractures around eroded holes in coal rock

另外，在次生裂缝的尖端位置会形成高应力区域，由于应力集中作用，次生裂缝能够控制裂缝扩展的方向。在持续射流过程中，受到水楔作用影响，裂缝从次生裂缝的尖端处向外延伸，直到裂缝与自由表面贯穿后，对水泥包裹的煤岩靶件形成劈裂破坏。试验结果表明，旋转磨料射流冲击煤岩形成次生裂缝的数量与射流压力、喷距和射流时间有关（见图7）。由图7可知：当射流压力达到12 MPa以上时，更倾向形成单一的裂缝，且裂缝延伸距离更远，更易劈裂靶件；当较小的射流压力冲击煤岩时，更倾向于间隔一定角度的多条裂缝，裂缝不延伸或延伸距离较短。

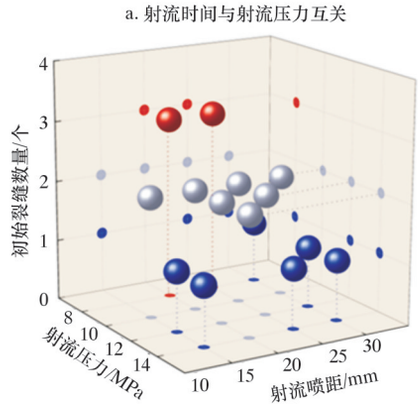
2.3　岩屑剥离特性

旋转磨料射流冲击煤岩靶件不仅会形成孔眼，还会产生大块煤岩被剥离的情况[23]。旋转磨料射流垂直于煤岩层理面喷射时，大块煤岩被剥离主要存在2种形式：①当煤岩内部弱面平行于层理分布时，大块煤岩沿着弱面发生层裂（见图8a）；②当煤岩内部弱面垂直于层理分布时，弱面间的煤岩发生崩裂（见图8b）。这是因为当射流孔眼达到一定深度时，在水楔作用[24]的影响下，煤岩中存在的弱面如割理、天然裂缝[25]被激活，流体迅速进入缝隙，对煤岩造成张拉破坏，使得局部煤岩离开主体，形成体积破碎。并且当射流方向与煤岩层理方向垂直时，由于此方向上煤岩抗拉强度相对更低（见表2），层裂现象更易发生。

由于煤岩内部弱面分布的非均质性，剥离出的煤岩厚度、碎屑尺寸和形态有较大差异。图9展



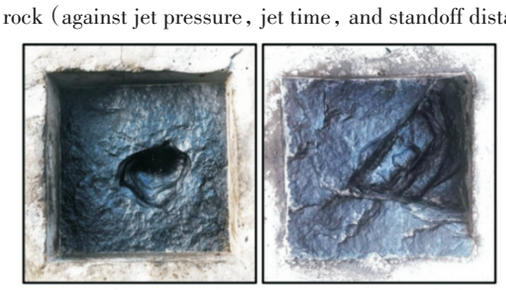
a. 射流时间与射流压力互关



b. 射流喷距与射流压力互关

图 7　煤岩次生裂缝数分布特征(射流压力、时间、喷距)

Fig. 7　Distribution characteristics of secondary fractures in coal rock (against jet pressure, jet time, and standoff distance)



a. 平行于层理层裂　　b. 垂直于层理崩裂

图 8　旋转磨料射流剥离煤岩形式

Fig. 8　Forms of coal rock spalling by swirling abrasive jet

示了煤岩受到旋转磨料射流冲击后产生的各种碎屑。值得注意的是，煤岩中存在的惰质组分，由于其密度更大、强度更高，在射流冲击中更难破碎，因而更易形成大块的碎屑。

2.4　参数影响规律

由于旋转磨料射流破碎煤岩时存在大块煤岩层裂和崩裂的现象，冲蚀煤岩后的体积难以有效表征射流参数对破碎煤岩的影响效果，故本节仅从破碎煤岩成孔的孔深与孔径 2 个角度进行分析。旋转磨料射流破碎煤岩正交试验极差及方差分析结果如表 3 所示。由表 3 可知：破碎煤岩的最大孔径为 45. 54 mm，最大孔深为 92. 33 mm；射流压力对孔径和孔深的变化存在正相关性，其中对孔深变化的影响具有显著性，增大射流压力能够有效提高旋转磨料射流破碎煤岩的能力；增大射流喷距可以一定程度地扩大孔径和孔深，当射流喷距超过 25 mm 时，孔眼的深度大幅减少；射流时间对孔眼深度的变化具有显著性，延长射流时间能够获得更大的孔深，当射流时间超过 60 s 孔眼成型后，射流时间的变化对孔径的影响较小。



图 9　旋转磨料射流破碎煤岩碎屑特征

Fig. 9　Characteristics of coal rock debris broken by swirling abrasive jet

根据表 3 中不同指标下各因素极差值 R 及离均差平方和 S_s，得出影响孔深和孔径变化因素的主次顺序由大到小依次为射流压力、射流时间和射流喷距，结果与方差分析中各因素的显著性排序具有一致性。结合设定的水力参数选取范围及极差分析结果，得出孔深最优的射流参数组合为：射流压力 14 MPa，射流喷距 25 mm，射流时间 120 s。孔径最优的射流参数组合为：射流压力 14 MPa，射流喷距 30 mm，射流时间 90 s。综合考虑孔深、孔径 2 个破坏指标及实际工况中设备的能力，推荐射流参数组合为：射流压力≥14 MPa，射流喷距 20~25 mm，射流时间≥60 s。

3　旋转磨料射流破碎煤岩成孔演化特征

旋转磨料射流破碎煤岩成孔演化特征如图 10 所示。定点喷射状态下（见图 10a~图 10d），旋转磨料射流破碎煤岩过程可以分为 3 个阶段。①初始阶段：旋转磨料射流接触煤岩形成冲击环，冲击应力在冲击环上的分布与叶轮结构设计有关[26]，主要集中在叶轮加旋槽位置处。冲击环附近煤岩受到拉剪作用发生局部脆性破坏[27]，与叶轮的 3 个流体加旋槽对应，旋转磨料射流在煤岩接触面上优先冲蚀出 3 个初始孔眼（见图 10b）。②扩展阶段：旋转磨料射流持续冲击，形成切应力破碎区。

表 3　旋转磨料射流破碎煤岩正交试验结果

Table 3　Range and variance of orthogonal tests for coal rock breaking by swirling abrasive jet

编号		压力/MPa	喷距/mm	射流时间/s	孔径/mm	孔深/mm
1		8	15	30	26.35	20.20
2		8	20	60	37.15	55.59
3		8	25	90	39.73	53.26
4		8	30	120	35.20	30.23
5		10	15	60	30.19	42.54
6		10	20	30	26.96	45.26
7		10	25	120	30.60	70.11
8		10	30	90	35.57	37.13
9		12	15	90	34.16	54.31
10		12	20	120	33.18	47.34
11		12	25	30	34.50	51.99
12		12	30	60	43.64	61.47
13		14	15	120	38.04	92.33
14		14	20	90	45.54	78.45
15		14	25	60	43.15	53.87
16		14	30	30	39.58	37.38
孔径	R	10.75	6.31	6.90	敏感性：射流压力>射流时间>射流喷距	
	S_S	1 377.83	636.60	1 027.77		
	显著性*	0.001	0.016	0.005		
孔深	R	25.69	15.76	21.3	敏感性：射流压力>射流时间>射流喷距	
	S_S	239.27	87.09	136.68		
	显著性*	0.300	0.582	0.406		

冲击环区域两侧靠近破碎坑壁面的区域形成拉应力区。拉应力区中将出现拉伸裂纹，流体浸入裂纹形成拉伸破坏，并使裂纹沿扩展能量最小方向延伸[28]，当裂纹与射流冲击面接触时，大的岩体被剥离，由于冲击应力在冲击环上的分布主要集中在叶轮加旋槽位置处[22]，旋转磨料射流破碎煤岩的扩展阶段表现为形成近似三角形的环状煤岩破碎坑（图 10c）。③衰退阶段：该阶段与扩展阶段类似，然而随着射流出口到冲击区域的距离增加，射流冲击作用力相对减小[29]，旋转磨料射流在破碎坑壁面上产生强烈的剪切作用力[30-31]。当射流与新的破坏面作用时会产生回流，回流与来流相互作用会削弱旋转磨料射流对煤岩的作用[31-33]。射流喷距增加和回流的影响，使旋转磨料射流对煤岩的冲击作用降低，随着旋转磨料射流持续冲击，破碎坑不断向外拓宽，孔眼逐渐变圆，并在底部形成凸起。同时，由于射流能量在径向上的衰减并不均匀，煤岩破碎孔眼极易在孔周处形成与叶轮加旋槽位置对应的 1~3 个次生裂缝，此时孔眼成形，孔眼直径和孔眼深度不再随射流时间延长而变化（见图 10d）。

连续送进状态下，旋转磨料射流破碎煤岩孔眼的过程不断重复扩展阶段和衰退阶段（见图 10e~图 10g）。在该状态下，初始空隙随着喷嘴送进在纵向上延伸，孔眼也不断加深，直至煤岩两侧被射流贯穿（见图 10h）。

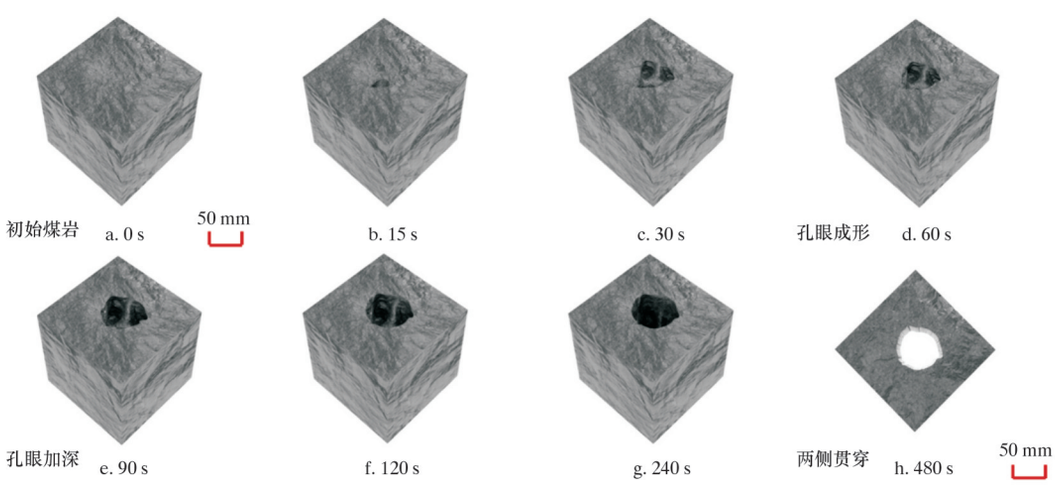


图 10　旋转磨料射流破碎煤岩成孔演化特征

Fig. 10　Hole-forming evolution characteristics during coal rock breaking by swirling abrasive jet

4　结　论

（1）旋转磨料射流能够高效破碎煤岩，形成壁面光滑、具有凸起的大直径圆形孔眼。最大孔径达 45. 54 mm，最大孔深达 92. 33 mm。

（2）旋转磨料射流可激活煤岩内部弱面，大块剥离煤岩，形成体积破碎。剥离后的煤岩被射流持续破碎，并最终被带出孔眼。

（3）旋转磨料射流破碎煤岩可形成具有 1~3 条

次生裂缝的冲蚀孔眼。射流压力越大时，更易形成延伸距离长的单裂缝孔眼。射流压力较小时，则形成延伸距离短的多裂缝孔眼。

（4）极差分析和方差分析结果表明，旋转磨料射流参数对孔深和孔径影响的主次顺序为射流压力>射流时间>射流喷距。推荐射流参数组合为：射流压力≥14 MPa，射流喷距 20~25 mm，射流时间≥60 s。

（5）旋转磨料射流破碎煤岩成孔演化特征可分为初始阶段、扩展阶段和衰退阶段。连续送进状态下，破碎煤岩孔眼的过程不断重复扩展阶段和衰退阶段，直至贯穿煤岩。

参 考 文 献

[1] 秦勇，申建，史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. 煤炭学报，2022，47（1）：371-387.
Qin Yong，Shen Jian，Shi Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society，2022，47（1）：371-387.

[2] 杨雪，田冲，杨雨然，等. 四川盆地长宁地区深层煤层气成藏特征与勘探潜力[J]. 油气藏评价与开发，2025，15(2)：194-204.
Yang Xue，Tian Chong，Yang Yuran，et al. Accumulation characteristics and exploration potential of deep coalbed methane in Changning area of Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，2025，15(2)：194-204.

[3] 刘勇，张汶定，陈长江，等. 松软煤层无水化增透理论及技术发展趋势[J]. 煤炭学报，2024，50（4）：2123-2146.
Liu Yong，Zhang Wending，Chen Changjiang，et al. Prospects for the development of the theory and technology of non-hydration penetration enhancement in soft coal seams[J]. Journal of China Coal Society，2024，50（4）：2123-2146.

[4] 翟成，李贤忠，李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报，2011，36（12）：1996-2001.
Zhai Cheng，Li Xianzhong，Li Quangui. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society，2011，36（12）：1996-2001.

[5] 林柏泉，孟凡伟，张海宾. 基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J]. 煤炭学报，2011，36（1）：75-79.
Lin Baiquan，Meng Fanwei，Zhang Haibin. Regional gas control based on drilling-slotting-extracting integration technology[J]. Journal of China Coal Society，2011，36（1）：75-79.

[6] 王维，韩金良，王玉斌，等. 大宁-吉县区块深层煤岩气水平井钻井技术[J]. 石油机械，2023，51（11）：70-78.
Wang Wei，Han Jinliang，Wang Yubin，et al. Drilling technology for deep coal rock gas horizontal wells in Da'ning-Jixian block[J]. China Petroleum Machinery，2023，51（11）：70-78.

[7] 陈掌星，梁浩，李颖，等. CO_2注入提高深部煤层气采收率多因机制试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2025，49(5)：82-92.
Chen Zhangxing，Liang Hao，Li Ying，et al. Experiment on multifactorial mechanisms of CO_2 injection for enhancing deep coalbed methane recovery[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2025，49(5)：82-92.

[8] 蔺海晓，苏现波，刘晓，等. 煤储层造缝及卸压增透实验研究[J]. 煤炭学报，2014，39（增刊 2）：432-435.
Lin Haixiao，Su Xianbo，Liu Xiao，et al. Experimental study of permeability enhancement in coal layers by fracture making or unloading[J]. Journal of China Coal Society，2014，39（S2）：432-435.

[9] 高亚楠，程红梅，李玺茹，等. 单一煤层钻孔割缝卸压增透的非连续变形分析（DDA）模拟[J]. 煤炭学报，2011，36（12）：2068-2073.
Gao Ya'nan，Cheng Hongmei，Li Xiru，et al. The numerical modelling of slotted drilling in single coal seam based on DDA[J]. Journal of China Coal Society，2011，36（12）：2068-2073.

[10] 周雷，彭雨，卢义玉，等. 基于物质点法的深部煤层气水力割缝卸压解吸增透规律数值模拟研究[J]. 煤炭学报，2022，47（9）：3298-3309.
Zhou Lei，Peng Yu，Lu Yiyu，et al. Numerical simulation of deep CBM hydraulic slotting pressure relief and desorption and permeability enhancement based on the MPM[J]. Journal of China Coal Society，2022，47（9）：3298-3309.

[11] 刘勇，何岸，魏建平，等. 水射流卸压增透堵孔诱因及解堵新方法[J]. 煤炭学报，2016，41（8）：1963-1967.
Liu Yong，He An，Wei Jianping，et al. Plugging factor and new plugging method to hydraulic relieving stress[J]. Journal of China Coal Society，2016，41（8）：1963-1967.

[12] 李雪彬，金力新，陈超峰，等. 深层煤岩气水平井压裂关键技术：以准噶尔盆地白家海地区侏罗系为例

[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 629-637.
Li Xuebin, Jin Lixin, Chen Chaofeng, et al. Key technologies of horizontal well fracturing for deep coal-rock gas: a case study of Jurassic in Baijiahai area, Junggar Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 629-637.

[13] 孔祥伟,谢昕,王存武. 基于综合可压指数的煤层气水平井压裂分段参数优化[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(6): 925-932.
Kong Xiangwei, Xie Xin, Wang Cunwu. Optimization of segmented fracturing parameters for coalbed methane horizontal wells based on comprehensive fracability index[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(6): 925-932.

[14] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189-3211.
Lu Yiyu, Huang Sha, Ge Zhaolong, et al. Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189-3211.

[15] 刘亮亮, 李国庆, 李国富, 等. 寺河井田采空区下伏煤层应力特征及其对煤层气开发的影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1608-1619.
Liu Liangliang, Li Guoqing, Li Guofu, et al. Stress characteristics of coal seam underlying the goaf in the Sihe coalfield and its effect on the development of coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1608-1619.

[16] 黄中伟, 李国富, 杨睿月, 等. 我国煤层气开发技术现状与发展趋势[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3212-3238.
Huang Zhongwei, Li Guofu, Yang Ruiyue, et al. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3212-3238.

[17] 张波, 倪元勇, 张丹琪, 等. 煤层气水平井造穴及解堵造缝技术探索与实践[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 188-190.
Zhang Bo, Ni Yuanyong, Zhang Danqi, et al. Exploration and practice on cave and seam-building technology of CBM horizontal wells[J]. Coal Technology, 2018, 37(9): 188-190.

[18] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2531-2543.
Sang Shuxun, Zhou Xiaozhi, Liu Shiqi, et al. Research advances in theory and technology of the stress release applied extraction of coalbed methane from tectonically deformed coals[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2531-2543.

[19] 卢义玉, 李瑞, 鲜学福, 等. 地面定向井+水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 876-884.
Lu Yiyu, Li Rui, Xian Xuefu, et al. Discussion on the efficient exploitation method of deep coalbed methane with pressure relief by ground directional well+hydraulic slotting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 876-884.

[20] 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.

[21] 王斌, 黄中伟, 杨睿月, 等. 煤矿巷道磨料射流泄压增透新方法初探[J]. 石油机械, 2023, 51(1): 40-46, 77.
Wang Bin, Huang Zhongwei, Yang Ruiyue, et al. New tehniques of pressure relief and permeability enhancement by abrasive jet in coal mine roadways[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(1): 40-46, 77.

[22] 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(4): 806-817.
Chen Jianxiang, Yang Ruiyue, Huang Zhongwei, et al. Detached eddy simulation on the structure of swirling jet flow field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 806-817.

[23] 黄中伟, 张世昆, 李根生, 等. 液氮磨料射流破碎高温花岗岩机理[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 604-614.
Huang Zhongwei, Zhang Shikun, Li Gensheng, et al. Breakage mechanism of high-temperature granite by abrasive liquid nitrogen jet[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 604-614.

[24] 夏开文, 王峥, 吴帮标, 等. 流固耦合作用下深部岩石动态力学响应研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 454-478.
Xia Kaiwen, Wang Zheng, Wu Bangbiao, et al. Research progress on dynamic response of deep rocks under coupled hydraulic-mechanical loading[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 454-478.

[25] 东振，鲍清英，张继东，等. 低煤阶厚煤层水平井方位及选层：以吉尔嘎朗图地区为例[J]. 煤炭学报，2017，42（增刊2）：417-427.
Dong Zhen，Bao Qingying，Zhang Jidong，et al. Optimization method of horizontal well orientation and layer selection in low-rank thick coal seam：a case study of Jiergalangtu area[J]. Journal of China Coal Society，2017，42（S2）：417-427.

[26] 徐昊，张思，吴墨染，等. 天然气水合物直旋混合射流破碎规律研究[J]. 石油机械，2025，53（2）：89-97.
Xu Hao，Zhang Si，Wu Moran，et al. Crushing of natural gas hydrate by straight-swirling mixed jet[J]. China Petroleum Machinery，2025，53（2）：89-97.

[27] 盛茂，田守嶒，李根生，等. 高压水射流冲蚀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）：95-102.
Sheng Mao，Tian Shouceng，Li Gensheng，et al. Shale rock fragmentation behaviors and their mechanics by high pressure waterjet impinging[J]. Scientia Sinica（Physica，Mechanica & Astronomica），2017，47（11）：95-102.

[28] 高亚斌，向鑫，郭晓亚，等. 钻孔水射流冲击破煤岩特性及机制研究[J]. 振动与冲击，2022，41（23）：51-59.
Gao Yabin，Xiang Xin，Guo Xiaoya，et al. Characteristics and mechanism of coal and rock breaking with water jet impact in drill hole[J]. Journal of Vibration and Shock，2022，41（23）：51-59.

[29] 穆总结，赵恺，李根生，等. 自进式旋转射流喷嘴结构设计与流场特性研究[J/OL]. 石油机械，2026，54（1）：20-29. www. syjxzz. com. cn.
Mu Zongjie，Zhao Kai，Li Gensheng，et al. Structural design and flow field characteristics of self-propelled rotating jet nozzle[J/OL]. China Petroleum Machinery，2026，54（1）：20-29. www. syjxzz. com. cn.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 李根生，廖华林，黄中伟，等. 超高压水射流作用下岩石损伤破碎机理[J]. 机械工程学报，2009，45（10）：284-293.
Li Gensheng，Liao Hualin，Huang Zhongwei，et al. Rock damage mechanisms under ultra-high pressure water jet impact[J]. Journal of Mechanical Engineering，2009，45（10）：284-293.

[33] 易松林，汪志明，孙怡红，等. 径向钻井高压水射流喷嘴内外流场分析[J]. 石油机械，2013，41（3）：15-20.
Yi Songlin，Wang Zhiming，Sun Yihong，et al. Analysis of the internal and external flow fields of high pressure water jet nozzle in radial drilling[J]. China Petroleum Machinery，2013，41（3）：15-20.

第一作者简介：李文彬，生于1999年，现为在读博士研究生，研究方向为高压水射流钻井技术。地址：（102249）北京市昌平区。email：734150617@qq. com。

修改回稿日期：2026-03-13
（本文编辑　南丽华）