自激振荡脉冲射流喷嘴振荡腔结构优化研究*

王奥[1,2],冯小静[1,2],段东[1,2],陆卫东[3,4],甘元平[3,4],苗鲁振[3,4]

(1.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024;
2.太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024;
3.新疆工程学院 安全科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023;
4.新疆工程学院 新疆煤矿灾害智能防控与应急重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要:自激振荡脉冲射流喷嘴可将连续射流转化为脉冲射流形式,脉冲射流通过对岩石造成周期性的"水锤"破坏,可有效提高破岩效率。喷嘴振荡腔作为射流形态调控的核心部件,且现有直线型结构存在能量耗散问题,制约射流性能,开展了腔径比(振荡腔长度L/上喷嘴直径d_1)对喷嘴外流场脉冲射流性能的影响研究,优选出最佳腔径比范围。基于流场结构角度,分析腔室内低速区与射流性能的动态变换关系,利用贝塞尔曲线优化振荡腔壁面形状。开展振荡腔壁面形状优化前后喷嘴的自激振荡脉冲射流破岩冲孔试验研究,对比验证喷嘴振荡腔形状优化效果。结果表明,腔径比在5~6范围内时,振荡腔内部低速区域最小,外部流场射流性能最佳;优化后喷嘴外部流场平均速度增大了16.99%、峰值速度增大了16.74%,脉冲射流冲击岩石造成的冲孔直径较原喷嘴增大了25.45%、深度增大了24.27%、体积增大了18.32%,自激振荡脉冲射流喷嘴性能得到有效提升。

关键词:射流破岩;自激振荡脉冲射流喷嘴;振荡腔结构优化;腔径比

中图分类号:TD231.62 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0221-10

Structural Optimization of the Oscillation Cavity in a Self-Oscillating Pulsed Jet Nozzle

WANG Ao[1,2], *FENG Xiaojing*[1,2], *DUAN Dong*[1,2], *LU Weidong*[3,4], *GAN Yuanping*[3,4], *MIAO Luzhen*[3,4]

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2.Key Laboratory of In-situ Modified Mining of Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
3.School of Safety Science and Engineering, Xinjiang University of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China;
4.Xinjiang Key Laboratory of Coal Mine Disaster Intelligent Prevention and
Emergency Response, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China)

Abstract: A self-oscillating pulsed jet nozzle can convert a continuous jet into a pulsed jet, which effectively enhances rock-breaking efficiency by inflicting periodic "water hammer" damage on the rock. As the core component for regulating jet morphology, the conventional linear structure of the nozzle oscillation cavity suffers from energy dissipation, thereby constraining jet performance. To address this, a study was conducted to investigate the influence of the cavity diameter ratio (the ratio of the oscillation cavity length L to the upper nozzle diameter d_1) on the pulsed jet performance within the external field, thereby identifying the optimal range for this ratio. From the perspective of flow field structure, the dynamic relationship between the internal low-velocity zone of the cavity and jet performance was analyzed, and Bezier curves were employed to optimize the wall profile of the oscillation cavity. Rock breaking and punching experiments using the self-oscillating pulsed jet nozzle were performed before and after the shape optimization of the oscillation cavity wall to comparatively verify the optimization effect of the oscillation cavity shape of the nozzle. The results indicate that when the cavity diameter ratio is between 5 and 6, the internal low-velocity zone of the oscillation cavity is minimized, yielding optimal jet performance in the external field. For the optimized nozzle, the average velocity and peak velocity of the external field exhibit increases of 16.99%

* **收稿日期**:2025-04-14
基金项目:国家自然科学基金项目(52274134,52474139);山西省基础研究计划项目(202403011242005)
作者简介:王奥(2001—),男,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为高压水射流破岩。E-mail:17200620244@163.com
通信作者:冯小静(1981—),女,辽宁铁岭人,副教授,主要研究方向为矿山压力与岩层控制。E-mail:fengxiaojing0507@126.com

and 16.74%, respectively. Furthermore, compared with the original nozzle, the diameter, depth, and volume of the punching holes generated by the pulsed jet impact on the rock are enlarged by 25.45%, 24.27%, and 18.32%, respectively. These findings demonstrate that the overall performance of the self-oscillating pulsed jet nozzle is effectively upgraded.

Key words: Jet rock breaking, Self-oscillating pulsed jet nozzle, Structural optimization of the oscillation cavity, Cavity diameter ratio

0 引言

水射流破岩技术在煤层顶板切缝、煤层气增透等领域已获学术界广泛研究[1-2],自激振荡脉冲射流通过瞬态水锤效应产生的动态应力波,可有效诱导岩石内部裂纹扩展[3-4],其峰值压力比连续射流高2.5倍[5],其中自激振荡喷嘴因结构紧凑、无外置激励源,具备显著工程应用潜力[6]。

近年来,关于自激振荡脉冲射流喷嘴的研究取得许多成果:WU 等[7]发现流体在振荡室内通过信号产生—反馈—放大形成自激振荡脉冲射流;YUAN 等[8]认为振荡腔是产生扰动并形成自激振荡脉冲射流的关键部分;汪朝晖等[9]证明大涡模拟对瞬时涡量扰动变化有明显预测效果;LI 等[10]为优化脉冲参数提供理论依据;唐川林等[11]对振荡腔内脉冲射流频率进行了研究;高传昌等[12]通过试验研究分析了自吸气式脉冲射流的影响参数;ZHANG 等[13]得到了喷嘴的合理尺寸设计范围;王循明等[14]通过数值模拟分析了自激振荡发生机理;李晓红等[15]提供了自激振荡上、下游喷嘴的设计原则;KOLSEK 等[16]通过数值模拟发现腔室直径比例是调整喷嘴扰动的关键参数;方珍龙等[17-18]采用大涡模拟证明腔径比对喷嘴的自激振荡性能影响较大;LIU 等[19]提出不同腔径比下自由流中最大脉冲压力短暂增加的位置不同;王晖等[20]通过自振脉冲磨料水射流切割试验,揭示了工作压力、横向速率及靶距对切割性能的作用规律,论证了自激振荡磨料水射流在井下作业的安全性。

当前研究更多聚焦于自激振荡脉冲射流喷嘴内部涡环的演变,而喷嘴射流性能的优劣最终体现在对靶件的冲击效果上,所以结合喷嘴外部流场射流性能及实际破岩效果,评价喷嘴结构的性能优劣更为合理。此外,目前研究普遍采用的直线型振荡腔结构难以匹配流体实际运动路径,流体在振荡腔内流动过程中直线相交区域存在低速区,不利于喷嘴射流性能的提升。因此,本文基于腔径比参数开展喷嘴外流场速度演变规律研究,从振荡腔内部速度分布特征角度分析了低速区与射流能量的变化关系,通过贝塞尔曲线拟合方法优化振荡腔壁面形状。分别使用优化前后喷嘴进行破岩冲孔试验,对比分析了振荡腔优化效果。研究结果提高了自激振荡脉冲射流喷嘴射流性能,为其在实际工程中的应用提供了理论基础。

1 自激振荡脉冲射流喷嘴结构与原理

1.1 喷嘴几何结构

本文中的自激振荡脉冲水射流喷嘴通过亥姆霍兹共振腔实现,结构简单、性能可靠,在实际工程中有着广泛应用。喷嘴的结构主体可分为上喷嘴、自激振荡腔室和下喷嘴三部分,如图1所示。喷嘴主要的结构参数包括:上喷嘴直径 d_1、振荡腔直径 D、振荡腔长度 L、腔室碰撞壁夹角 α 以及下喷嘴直径 d_2。

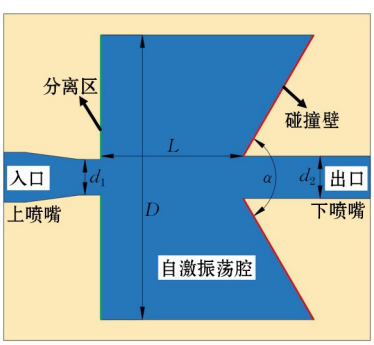


图1 自激振荡喷嘴结构

Fig.1 Self-oscillating nozzle structure

1.2 自激振荡脉冲射流发生原理

脉冲射流的本质特征在于其动态不连续性,该现象的形成涉及流体弹性振动、压力波反射叠加及能量共振转换等多学科耦合机制,当流体流经特定几何结构的振荡腔室时,流体动能与弹性势能通过反馈机制实现周期性转换,形成具有显著压力波动的非稳态射流。相较于它激式振荡射流,该技术通过流体自组织过程实现能量循环,具有系统构型简化与能量传递效率优化的显著特点。自激式脉冲射流在目标表面产生的动态冲击载荷不仅峰值冲击力超越连续射流,其空间分布特性更有利于扩展损伤

域面积,从而显著提升加工效率。

自激振荡脉冲射流形成原理如图 2 所示,喷嘴内部流场动态演变如图 3 所示。连续射流经入口流道进入振荡腔后,与腔内介质发生动能交换,二者边界层相互扰动形成剪切层结构,射流剪切层对初始扰动波起放大作用,形成小涡环结构,如图 3(a)所示;小涡环随着射流剪切层流动直至与碰撞壁相互作用,射流剪切层转而形成向上游反馈的压力扰动波,如图 3(b)所示;当扰动频率匹配时,反馈扰动波会进一步增强初始扰动波,随着射流继续流动,腔室内将形成如图 3(c)所示的大尺度涡环结构,伴随涡环作用下射流循环流动过程,流体状态由稳态转变为动态振动,最终使出口射流呈现周期性脉动特性,脉冲射流形成。

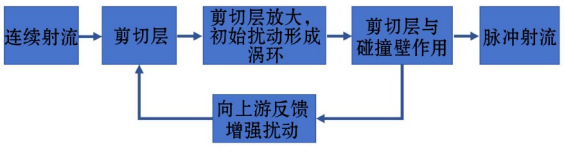


图 2 自激振荡脉冲射流形成原理

Fig.2 Formation principle of self-oscillating pulsed jet

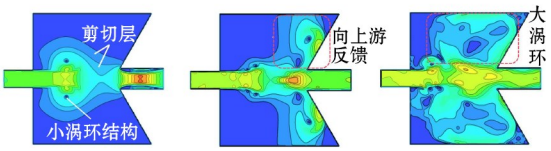


图 3 自激振荡脉冲射流喷嘴内部流场演变

Fig.3 Evolution of internal field in a self-oscillating pulsed jet nozzle

2 振荡腔结构优化

在射流冲击岩石实际工况中,外部流场轴线上的速度衰减规律及峰值分布位置对破岩效率具有关键影响,而国内外学者的研究已证明振荡腔长度是影响自激振荡脉冲射流性能的核心参数,因此,本文首先开展无量纲常数腔径比(振荡腔长度 L/上喷嘴直径 d_1)对喷嘴外部流场中脉冲射流变化的影响规律研究。

2.1 振荡腔参数优化

2.1.1 数值模型网格划分及边界条件

基于喷嘴形状建立数值模型,采用 ICEM CFD 软件对喷嘴的内部流场域进行网格划分,网格划分最小尺寸为 0.000 1 m,平均质量大于 0.98,质量较高,划分完成的网格模型及边界条件设置如图 4 所示,建立入口(in)、出口(out)、壁面(wall)、对称轴(axis)和靶面(impact_wall)五部分。靶面设置在距喷嘴出口 50 mm 处,目的是拉长射流在外流场流动距离,以便更直观地分析腔径比的改变对射流性能的影响,喷嘴入口设置为压力入口,压力 100 MPa,出口设置为压力出口。多相流模型选取 VOF 模型中的隐式方程,使用瞬态、压力基求解器,将水设置为主相,空气设置为第二相,设置喷嘴出口处的第二相空气回流体积分数为 0.5,计算方法采用 COUPLED 压力速度耦合方式,湍动能方程采用 Bounded Central Differencing,压力松弛因子为 0.75,动量松弛因子为 0.75,其他松弛系数使用默认设置。

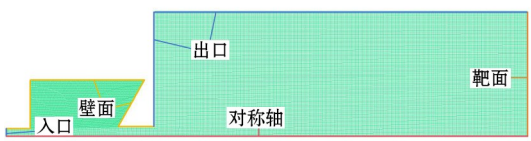


图 4 喷嘴外流场数值模拟模型

Fig.4 Numerical simulation model of external field of the nozzle

2.1.2 模拟方案

喷嘴基础参数设置为:上喷嘴直径 $d_1=1.2$ mm、下喷嘴直径 $d_2=1.32$ mm、振荡腔直径 $D=9$ mm、腔室碰撞壁夹角 $\alpha=120°$,开展腔径比在 2~8 范围内变化的外部流场数值模拟研究,分析射流轴线上的速度峰值分布规律,数值模拟研究方案及外流场速度监测轴线具体位置分别见表 1 和图 5。

表 1 腔径比研究方案

Table 1 Research schemes of cavity diameter ratio

方案	上喷嘴直径 d_1/mm	腔径比	振荡腔长度 L/mm
方案 1	1.2	2	2.4
方案 2	1.2	3	3.6
方案 3	1.2	4	4.8
方案 4	1.2	5	6.0
方案 5	1.2	6	7.2
方案 6	1.2	7	8.4
方案 7	1.2	8	9.6

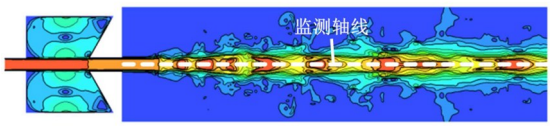


图 5 外流场速度监测轴线位置

Fig.5 Position of external field velocity monitoring axis

2.1.3 结果分析

不同腔径比条件下喷嘴外部流场射流速度与矢量如图 6 所示,提取不同腔径比下轴线速度变化曲线,结果如图 7 所示。当腔径比为 2 时,受限的腔室空间抑制射流剪切层发展,涡环未能有效成型,射流无脉冲效果,射流性能近似连续射流。当腔径比增至 3 时,随着腔室空间的逐步增大,射流剪切层扰动逐渐增强,促使大尺寸涡环初步形成,射流速度曲线出现少量波动,但中心涡环能量积累效率仍不足,未能形成脉冲射流。当腔径比为 4 时,腔长达到最低要求,基本满足中心涡环的发展需要,形成明显的大尺度涡环结构,外流场射流初显脉冲特性。当腔径比为 5 时,射流剪切层与腔室结构匹配,中心主涡环稳定演化,低速区对大尺寸涡环结构的影响大大降低,脉冲射流振幅与频率显著提升。当腔径比为 6 时,外流场射流平均速度与峰值速度均达到最高,但射流脉冲特性略有衰减。当腔径比为 7 时,腔室空间冗余导致中心涡环能量离散化,次生大涡环结构对主涡环消耗作用骤增,射流速度降低且脉冲特性衰减,脉冲射流性能劣化。当腔径比为 8 时,腔室空间过大导致振荡腔内出现大量小涡环结构,主涡环能量被大量无序次级涡环消耗,射流速度锐减,脉冲特性几乎消失。

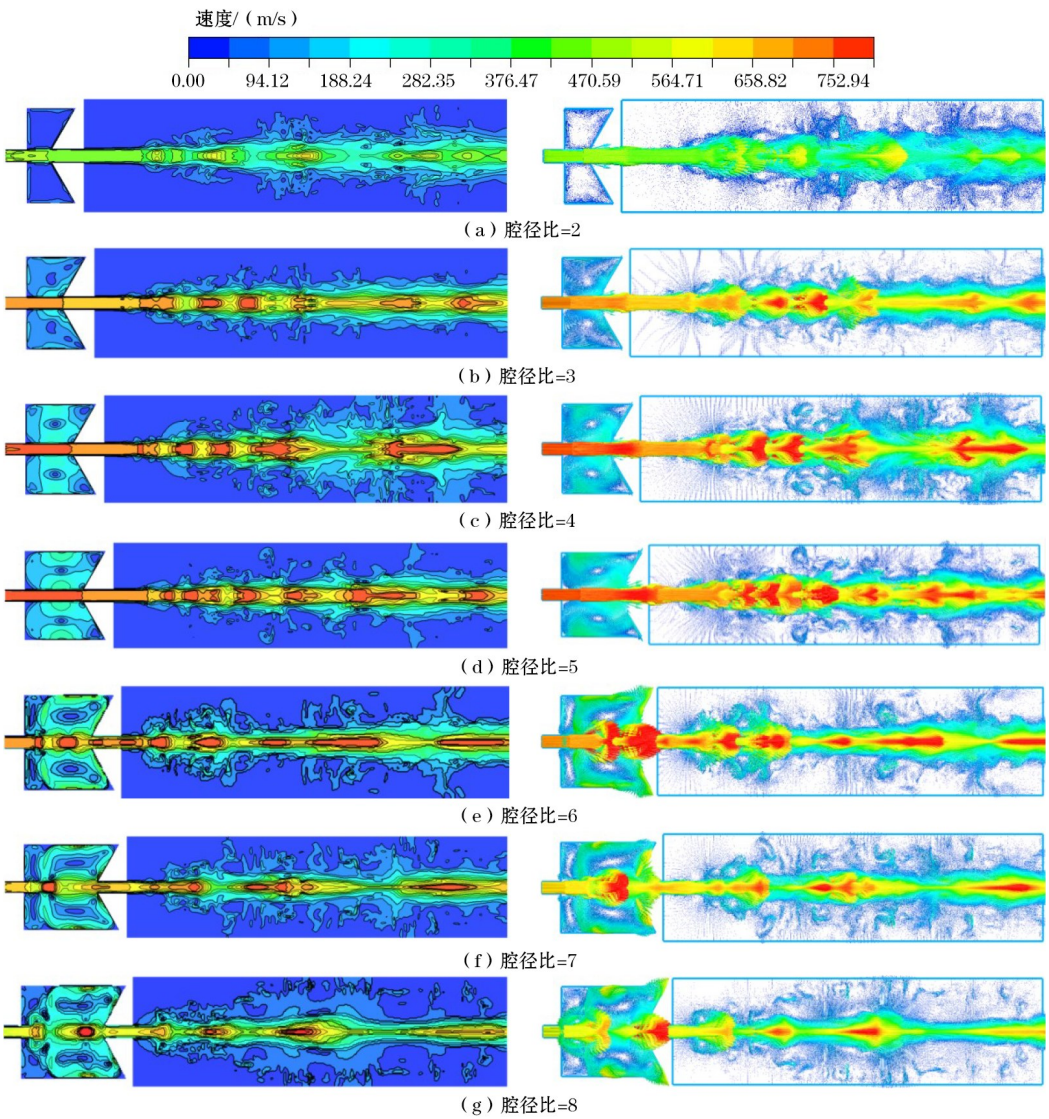


图 6 喷嘴外部流场速度分布云图与矢量图

Fig.6 Velocity distribution cloud maps and vector diagrams of external field of the nozzle

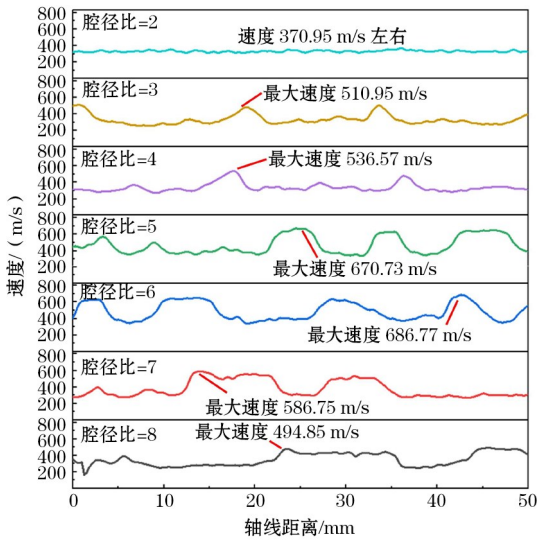


图 7 不同腔径比条件下射流轴线速度分布情况

Fig.7 Velocity distribution of jet axis under different cavity diameter ratios

根据模拟结果可以看出,随着腔径比的增加,喷嘴外部流场射流性能经历了先优化后衰减的变化过程。在整个变化过程中,振荡腔中低速区域大小以同样的规律变化,如图 8 中红色框区域所示(颜色标识见电子版)。

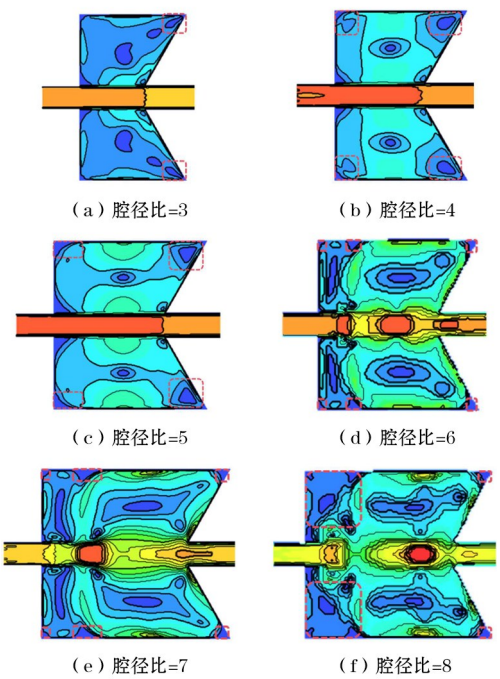


图 8 不同腔径比下振荡腔内部流场低速区域分布

Fig.8 Low velocity zones distribution of internal field of oscillating cavity under different cavity diameter ratios

腔径比较小时,较小的腔室面积使射流进入振荡腔后快速充满腔室,腔室内未能形成有效反馈条件,整体速度低,低速区域未有效显现,在腔径比增大至 5 的过程中,低速区域逐渐增大,当腔径比为 6 时,振荡腔内流体流动状态改变,出现成型的二级涡环结构,此时直线相交处低速区域迅速减小,但大、小主涡环之间出现新的低速区域,此低速区域随着腔径比的增大逐渐变大。当腔径比为 5～6 时,腔室内低速区域较小,而此时外部流场脉冲射流性能最佳。因此,可以认为腔室内低速区域范围与喷嘴外部流场射流性能成反比,低速区域的存在导致射流出现能量损耗。

2.2 振荡腔形状优化

组成振荡腔结构的直线相交角会诱发流体出现流动分离效应,当射流流经该区域时速度下降,形成低速区,即产生低速区的主要原因是喷嘴振荡腔壁面形状与流体流动轨迹不符,将振荡腔壁面形状优化为更符合流体流动轨迹的曲线形式有利于减小低速区域。常见的线性表达式方程有 B 样条曲线、非均匀样条曲线和贝塞尔曲线,B 样条曲线方程和非均匀样条曲线参数化所需的参数比贝塞尔曲线多,需要更多的迭代次数。贝塞尔曲线通过调整控制点,灵活优化曲线形状,其具有的连续性可避免曲率突变,实现几何过渡的自然平滑,具有很强的适用性。为了确保壁面的高阶平滑度,采用由给定点确定的贝塞尔曲线作为腔室壁面形状,重构壁面曲率。

2.2.1 贝塞尔曲线原理

贝塞尔曲线作为一种参数化数学曲线,其几何形态完全由给定的控制顶点所决定。该曲线的数学本质在于利用插值算法构造一条光滑过渡的路径,确保曲线精确穿过首末节点,同时通过控制顶点来调节路径的弯曲特性。在实际应用中,二阶贝塞尔曲线(含 3 个控制顶点)可精确描述抛物线轨迹,而三阶贝塞尔曲线(含 4 个控制顶点)则能生成具有更高复杂度的光滑路径。这类曲线具有控制参数精简、操作便捷等优势,展现出良好的工程适用性,贝塞尔曲线数学表达式为:

$$B(t)=\sum_{i=0}^{n}\binom{n}{i}(1-t)^{n-i}t^{i}P_{i} \tag{1}$$

式中:P_i 为控制点;$\binom{n}{i}$ 为二项式系数;t 为参数,$t\in[0,1]$。

该曲线具备的微分连续性特征能够有效防止曲率不连续现象,实现几何形貌的渐进式平滑过渡。

通过调控顶点位置,可实现对曲线几何特征的柔性调节。

2.2.2 振荡腔形状优化方法

在针对轴对称喷嘴腔室的结构优化研究中,基于振荡腔室的几何对称性特征,仅需对其上半部分进行几何重构即可改善整体流动规律,由于半侧腔室轮廓包含 4 个点,采用三次贝塞尔曲线方程进行参数化建模能够有效兼顾数学表达的简洁性与几何形变的灵活度。通过 Python 编程算法参数化生成曲线,该方法以二维平面内预设的锚点坐标为几何约束基础,结合路径序列规划与数值插值算法,自动构建符合流体运动特性的连续光滑曲线,实现振荡腔壁面与流场的有效响应与反馈,有效降低壁面形状对流体流动的影响,减小低速区域,实现腔室轮廓修正,规避人工绘图过程中因界面操作偏差导致的几何失真问题,优化后的腔室壁面形状如图 9 所示。

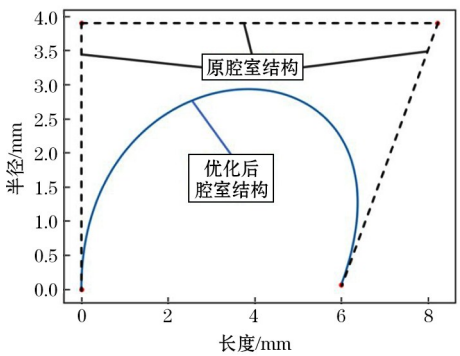


图 9 优化后振荡腔壁面形状

Fig.9 Optimized wall shape of oscillating cavity

2.2.3 振荡腔形状优化后外部流场数值模拟

以腔径比为 5 的喷嘴结构参数为基础,建立振荡腔壁面优化后的喷嘴数值模拟模型,模型边界条件设置及计算方法与 2.1.1 节相同,得到优化后振荡腔内部流场分布,如图 10 所示,喷嘴外流场速度与矢量分布结果如图 11 所示,优化前后喷嘴外部流场射流轴线速度曲线对比如图 12 所示。振荡腔壁面形状优化后喷嘴外部流场中速度较原腔室喷嘴整体增加,振荡腔内部低速区域显著减小,射流脉冲振幅增大,原腔室喷嘴外部流场平均速度为 469.68 m/s、峰值速度为 670.73 m/s,而优化后喷嘴外部流场平均速度为 549.46 m/s、峰值速度为 783.02 m/s,改变振荡腔壁面形状后,喷嘴外部流场平均速度增大了 16.99%、峰值速度增大了 16.74%。结果表明,使用贝塞尔曲线优化振荡腔后的喷嘴可以有效减小振荡腔内低速区域,进而提高喷嘴脉冲射流性能。

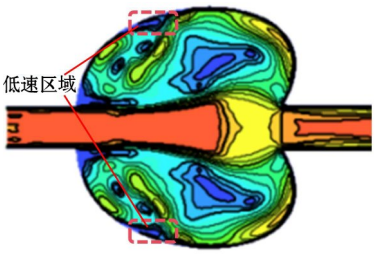


图 10 优化后振荡腔内部流场

Fig.10 The internal field of the optimized oscillating cavity

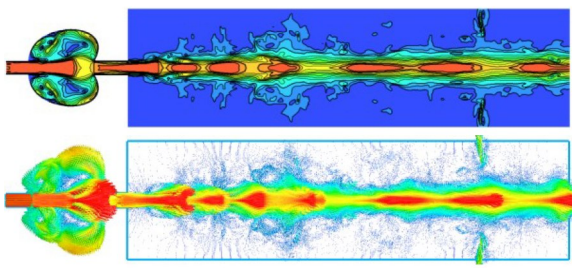


图 11 振荡腔形状优化后喷嘴外流场速度分布云图与矢量图

Fig.11 Velocity distribution cloud map and vector diagram of external field of the nozzle after optimizing the shape of oscillating cavity

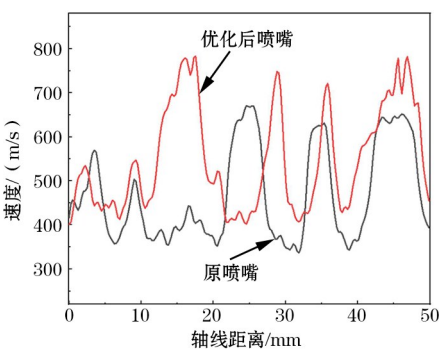


图 12 振荡腔优化前后喷嘴外部流场轴线速度对比

Fig.12 Comparison of axial velocity in the external field of the nozzle before and after optimizing the oscillating cavity

3 自激振荡脉冲射流破岩冲孔试验

3.1 试验系统

本次试验基于永达 YD-3020 型 AC 五轴水刀设备完成,整体试验系统如图 13 所示。该系统主要包括供水罐、高压水泵、龙门架、试验台、控制主机、喷嘴。系统工作时,供水罐中的水经由过滤器抽出,通过高压泵加压送入喷嘴,高压泵额定工作压力 450 MPa,从喷嘴出口射出形成脉冲射流。试验台尺寸为 3 100 mm×2 100 mm,可以实现 x、y、z 三个方向的运动。其中,x 轴方向的模组行程为 3 000 mm,y 轴方向的模组行程为 2 000 mm,z 轴方向的模组行程为 120 mm。快速定位速度为 15 000 mm/min,重

复定位精度为±0.05 mm,可通过使用交流伺服系统的 CNC 控制器精确定位喷嘴相对于岩样的位置。

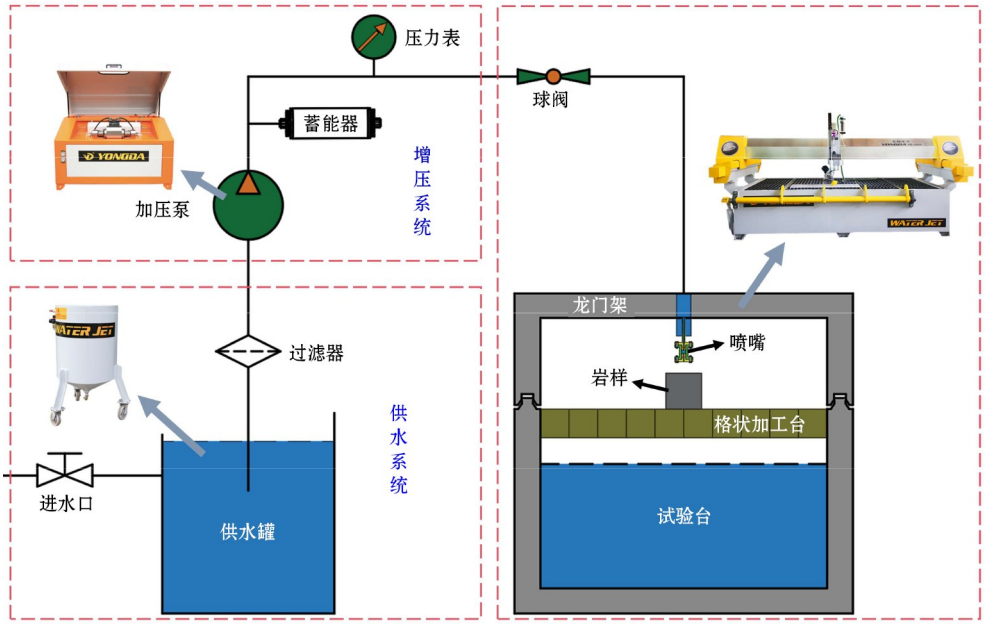


图 13 试验系统

Fig.13 Test system

3.2 试验方案

试验试样选用强度适中且较易获取的石灰岩,加工为长宽高为 100 mm×80 mm×80 mm 的标准试样,试验前首先采用 YAW 3000 型岩石力学试验系统,对岩样进行单轴压缩、巴西劈裂及抗剪力学性能试验研究,测得的岩样物理力学特性参数见表 2。由于喷嘴尺寸较小,直接加工难度大、对设备精细要求高,将喷嘴分为上喷嘴、振荡腔、下喷嘴三部分加工,更换振荡腔即可实现对不同形状振荡腔性能的测试,试验时通过 4 个六角螺栓连接固定。为避免喷嘴两部分之间的接触面由于加工误差而漏水,采用 O 型密封圈保证装置的密封效果,避免缝隙漏水对试验结果产生不利影响。上喷嘴整体设计为锥形流道,便于从高压软管处的大直径平缓过渡到自激振荡脉冲射流喷嘴上游喷嘴的小直径,根据优化后的喷嘴结构,加工了实物喷嘴,如图 14 所示。试验设置喷嘴入口压力 100 MPa、冲击靶距 10 mm,分别使用原喷嘴与振荡腔形状优化后喷嘴冲击岩石试样,观察脉冲射流冲击下岩石破坏随冲击时间的变化情况。

表 2 试样物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the sample

密度/(g/cm³)	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2.48	121.96	10.29	32.06	0.26

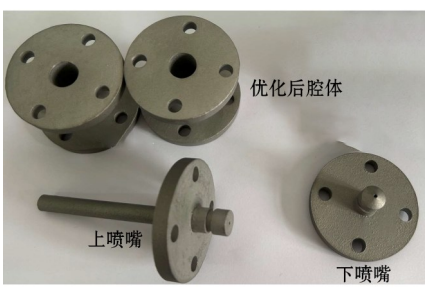
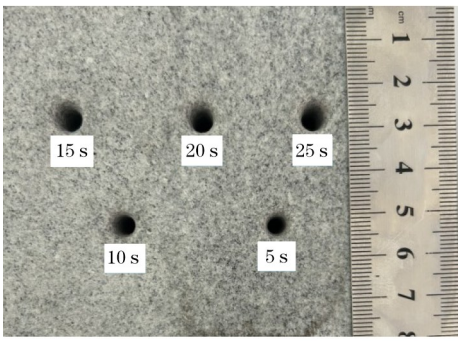


图 14 喷嘴实物图

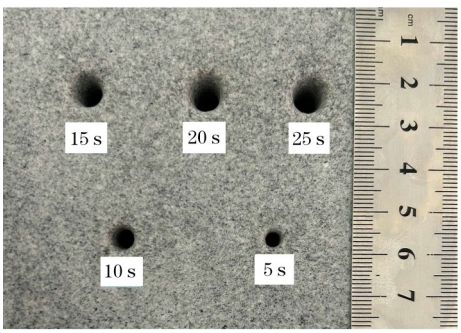
Fig.14 Physical picture of the nozzle

3.3 试验结果与分析

分别使用优化前后的喷嘴结构进行破岩冲孔物理试验,冲击 5～25 s 时间内的岩石冲孔变化结果对比如图 15 所示。振荡腔优化前后喷嘴脉冲射流作用下的岩石冲孔直径变化规律基本一致,在射流冲击岩石前期孔径均随着冲击时间的增长逐渐增大,当冲击时间到达 15 s 时,孔径增长趋缓。不同的是,振荡腔优化后脉冲射流作用下产生的冲孔直径明显大于优化前:原喷嘴作用下冲孔直径约为 5.5 mm,优化后喷嘴作用下冲孔直径约为 6.9 mm,孔径增大了 25.45%,这是因为腔室优化后喷嘴所产生的脉冲射流速度远高于原喷嘴,更高的射流速度使射流作用于岩石初期所产生的初始粉碎区面积更大,且更长的射流核心段使破坏效果得以保持。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 15 振荡腔优化前后脉冲射流破岩冲孔效果对比

Fig.15 Comparison of rock breaking and punching effect of pulsed jet before and after optimizing the oscillating cavity

为更直观地对比喷嘴振荡腔优化前后产生的脉冲射流性能,测试岩石冲孔深度及体积数据,结果如图 16、图 17 所示。随着脉冲射流冲击时间的增加,岩石冲孔深度与体积均呈逐渐增加的变化趋势,振荡腔优化前,岩石冲孔最大深度为 35.11 mm,最大体积为 1 150.39 mm^3,优化后岩石冲孔最大深度为 43.63 mm,最大体积为 1 361.09 mm^3,岩石冲孔深度增大了 24.27%,体积增大了 18.32%,振荡腔优化后喷嘴作用下的岩石冲孔深度与体积均高于原喷嘴。

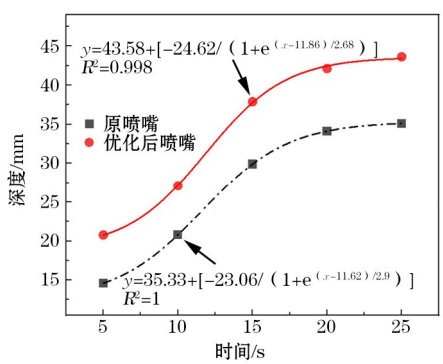


图 16 振荡腔优化前后岩石冲孔深度对比

Fig.16 Comparison of rock punching depth before and after optimizing the oscillating cavity

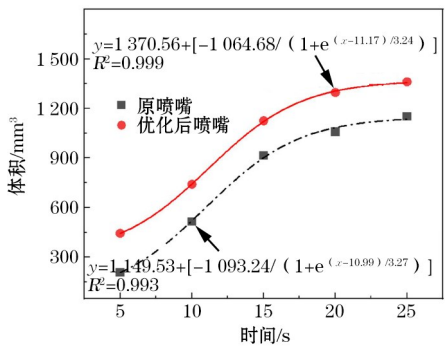


图 17 振荡腔优化前后岩石冲孔体积对比

Fig.17 Comparison of rock punching volume before and after optimizing the oscillating cavity

4 结论

(1) 腔径比的改变能够影响喷嘴外流场脉冲射流性能与速度分布特征,在腔径比由小到大变化的过程中,喷嘴外流场射流性能呈先逐渐优化后逐渐衰减的变化趋势,喷嘴振荡腔直线相交区域导致射流在流动过程中产生低速区,低速区域大小与射流性能存在非线性负相关特征,呈现此消彼长的动态平衡关系,腔径比在 5～6 范围内时,低速区域最小,外部流场射流性能最佳。

(2) 贝塞尔曲线可实现振荡腔壁面形状的自然平滑过渡,避免曲率突变。原喷嘴外部流场平均速度为 469.68 m/s、峰值速度为 670.73 m/s,而使用优化振荡腔壁面形状后喷嘴外部流场平均速度为 549.46 m/s、峰值速度为 783.02 m/s,喷嘴外部流场平均速度增大了 16.99%、峰值速度增大了 16.74%,有效提升了喷嘴射流性能。

(3) 随着自激振荡脉冲射流冲击时间的增加,岩石试样表面孔直径逐渐增大,在 0～15 s 范围内,增加速率较快,冲击时间超过 15 s 后,孔径增长逐渐变缓,冲孔深度与体积随冲击时间增加的变化规律与孔径基本相同,均呈现为先快速增加后缓慢增加的持续增长趋势。分别开展原腔室喷嘴与优化振荡腔形状后喷嘴破岩冲孔试验,优化后喷嘴脉冲射流冲击岩石造成的冲孔直径较原喷嘴增大了 25.45%、深度增大了 24.27%、体积增大了 18.32%,喷嘴脉冲射流破岩性能显著得升。

参考文献(References):

[1] 袁瑞甫,秦博,邓俊豪,等.磨料水射流切割能力与岩石参数相关关系研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):118-124.

YUAN Ruifu, QIN Bo, DENG Junhao, et al. Study on the correlation between cutting ability of abrasive water jet and rock mechanics parameters[J]. Mining Research and Development,2024,44(1):118-124.

[2] 李定启,张浩海.五阳煤矿松软煤层定向水射流卸压增透技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(9):116-122.
LI Dingqi, ZHANG Haohai. Research on directional water jet pressure relief and permeability enhancement technology in soft coal seam of Wuyang Coal Mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):116-122.

[3] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2014,39(10):1945-1955.
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.

[4] 李晓红,赵瑜,卢义玉,等.自激振荡射流改善松软煤层渗透率的机理[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(增刊1):202-205.
LI Xiaohong, ZHAO Yu, LU Yiyu, et al. Improving the penetrability of soft coal seam with self-excited oscillation water jet[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2009,28(Suppl.1):202-205.

[5] ZHOU Zhe, GE Zhaolong, LU Yiyu, et al. Experimental study on characteristics of self-excited oscillation pulsed water jet[J]. Journal of Vibro Engineering, 2017, 19(2): 1345-1357.

[6] 刘勇,崔家玮,魏建平,等.自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流发生机制[J].煤炭学报,2022,47(7):2643-2655.
LIU Yong, CUI Jiawei, WEI Jianping, et al. Generating mechanism of self-excited oscillation pulsed super-critical carbon dioxide jet[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7):2643-2655.

[7] WU Qiang, JI Guodong, ZHAO Jian, et al. Validation of numerical simulations and experiments on impulse characteristics induced by self-excited oscillation[J]. Scientific Reports,2024,14(1):5505.

[8] YUAN Miao, LI Deng, KANG Yong, et al. Characteristics of oscillation in cavity of helmholtz nozzle generating self-excited pulsed waterjet[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2022,35(3):278-288.

[9] 汪朝晖,饶长健,高全杰,等.基于瞬时涡量助推效应的自激振荡腔室脉动研究[J].机械工程学报,2018,54(14):207-214.
WANG Zhaohui, RAO Changjian, GAO Quanjie, et al. Study on the pulsation of self-excited oscillation chamber based on instantaneous vortex boosting effect[J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(14):207-214.

[10] LI Hongsheng, LIU Songyong, JIA Jiguang, et al. Numerical simulation of rock-breaking under the impact load of self-excited oscillating pulsed waterjet[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,96:103179.

[11] 唐川林,胡东,裴江红.自激振荡脉冲射流喷嘴频率特性实验研究[J].石油学报,2007,28(4):122-125.
TANG Chuanlin, HU Dong, PEI Jianghong. Experimental study on the frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed nozzle[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4):122-125.

[12] 高传昌,黄晓亮,赵礼,等.不同围压下自激吸气式脉冲射流装置性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(6):971-977.
GAO Chuanchang, HUANG Xiaoliang, ZHAO Li, et al. Experimental research on performance of self-excited inspiratory pulsed jet device under different ambient pressures[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011,19(6):971-977.

[13] ZHANG Xiaojun, LI Xiaqing, NIE Songlin, et al. Study on velocity and pressure characteristics of self-excited oscillating nozzle[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2021,43(1):1-14.

[14] 王循明,焦磊,王乐勤.自激脉冲发生机理数值模拟及参数影响分析[J].浙江大学学报(工学版),2005(9):176-180.
WANG Xunming, JIAO Lei, WANG Leqin. Numerical simulation of self-exicited oscillation pulsed jet and analysis of parameters' influence[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2005(9):176-180.

[15] 李晓红,杨林,王建生,等.自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J].煤炭学报,2000,25(6):641-644.
LI Xiaohong, YANG Lin, WANG Jiansheng, et al. The natural frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed water jet device[J]. Journal of China Coal Society, 2000,25(6):641-644.

[16] KOLSEK T, JELIC N, DUHOVNIK J. Numerical study of flow asymmetry and self-sustained jet oscillations in geometrically symmetric cavities[J]. Applied Mathematical Modelling,2007,31(10):2355-2373.

[17] 方珍龙,康勇,王晓川,等.腔径比对亥姆赫兹自振射流性能影响[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(11):2100-2106.
FANG Zhenlong, KANG Yong, WANG Xiaochuan, et al. Numerical investigation of cavity diameter ratio influence on Helmholtz oscillation waterjet[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2016,50(11):2100-2106.

[18] 方珍龙.亥姆赫兹式自激振荡射流空化特性研究[D].武汉:武汉大学,2016.
FANG Zhenlong. Research on cavitation characteristics of Helmholtz self-excited oscillation pulsed jet[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.

[19] LIU Yong, DENG Yujie, ZHANG Huidong, et al. Study on the evolution law of the vortical structure inside of oscillation chamber of self-excited oscillation pulsed supercritical carbon dioxide jet (SEOP SC-CO_2 jet) and its influence on pulsed characteristics [J]. Energy, 2025, 314:134252.

[20] 王晖,何学秋,聂百胜,等.自振脉冲磨料水射流切割性能影响因素及矿用安全性分析[J].矿业研究与开发,2012,32(3):69-73.
WANG Hui, HE Xueqiu, NIE Baisheng, et al. Analysis on influence factors of cutting performance of self-vibration pulse abrasive water-jet and its application safety in mine [J]. Mining Research and Development,2012,32(3):69-73.