

基于CFD模拟的文丘里打捞篮喷嘴结构参数优化

赵善卿, 肖 锋, 王宗航, 叶恒东

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2026年9月12日; 录用日期: 2026年10月5日; 发布日期: 2026年10月12日

摘 要

针对油气开采过程中井筒内碎屑沉积导致清理困难及施工效率降低等问题, 基于文丘里原理设计了一种井下碎屑打捞篮装置。利用计算流体力学(CFD)方法, 对打捞篮内部流场进行了数值模拟分析, 研究了喷嘴角度、喷嘴入口段长度及喷嘴出口段长度对负压区域形成及碎屑循环吸附效果的影响规律。结果表明, 喷嘴结构参数对回收篮内部速度分布及负压区域形成有显著影响。当喷嘴角度为 40° 时, 装置对井筒内壁冲刷作用较强冲刷范围最广, 同时可在井筒内形成稳定且范围较大的负压区。当喷嘴入口段长度为11 mm时, 射流发展充分, 流场结构稳定, 有利于增强碎屑卷吸能力。当喷嘴出口段长度为11 mm时, 喷嘴出口处压力差最大, 负压分布均匀, 吸附效果最佳。综合分析可知, 在喷嘴角度 40° 、入口段长度11 mm及出口段长度11 mm的参数组合下, 文丘里打捞篮能够实现射流冲刷与负压吸附的强化, 其碎屑清理与回收性能最优。

关键词

打捞工具, 井筒清洗, 数值模拟, 文丘里原理, 喷嘴

Optimization of Nozzle Structural Parameters of a Venturi-Based Fishing Basket Based on CFD Simulation

Shanqing Zhao, Feng Xiao, Zonghang Wang, Hengdong Ye

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: September 12, 2026; accepted: October 5, 2026; published: October 12, 2026

Abstract

During oil and gas production, debris deposition in the wellbore often leads to cleaning difficulties

文章引用: 赵善卿, 肖锋, 王宗航, 叶恒东. 基于 CFD 模拟的文丘里打捞篮喷嘴结构参数优化[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(5): 518-530. DOI: 10.12677/met.2026.155049

and reduced operational efficiency. To address this issue, a downhole debris recovery basket based on the Venturi principle was designed. Computational fluid dynamics (CFD) was employed to numerically simulate and analyze the internal flow field of the recovery basket, with particular focus on the effects of nozzle angle, nozzle inlet length, and nozzle outlet length on the formation of negative-pressure regions and the circulation and entrainment of debris. The results show that the nozzle structural parameters have a significant influence on the velocity distribution inside the recovery basket and the formation of negative-pressure zones. When the nozzle angle is 40° , the device exhibits stronger scouring action on the wellbore wall and the widest scouring range, while also generating a stable and relatively large negative-pressure region within the wellbore. When the nozzle inlet length is 11 mm, the jet develops more fully and the flow field remains more stable, which is beneficial for enhancing debris entrainment. When the nozzle outlet length is 11 mm, the pressure difference at the nozzle outlet reaches its maximum, the negative-pressure distribution becomes more uniform, and the suction effect is optimal. Comprehensive analysis indicates that, under the combined parameters of a nozzle angle of 40° , an inlet length of 11 mm, and an outlet length of 11 mm, the Venturi recovery basket achieves enhanced jet scouring and negative-pressure suction, resulting in optimal debris cleaning and recovery performance.

Keywords

Fishing Tools, Wellbore Cleaning, Numerical Simulation, Venturi Principle, Nozzle

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着全球油气资源的不断开发,分段压裂技术已成为目前应用最为广泛的压裂技术。分段压裂主要利用桥塞进行,压裂完成后需利用螺杆钻具对桥塞进行钻除,在钻除桥塞后,会产生大量桥塞碎片及金属屑等杂质,可能对后续下井设备造成损坏,因此需要对井底碎屑进行清理与打捞。目前井下作业主要采用正循环、反循环以及局部反循环三种方式对落物碎屑进行打捞[1]-[6]。当采用正循环方式进行打捞作业时,碎屑依靠大排量的流体携带,经环空返至地面。与正循环打捞方式不同,采用反循环方式作业时,流体经环空注入井底,从油管通道流出,碎屑依靠大排量的流体携带,经油管返至地面[7]。正循环和反循环方式对于常规油气井可满足施工要求,而对于井筒漏失及大斜度井、水平井段的小件落物的打捞施工则存在很大的难度及风险[8]。为了解决上述问题,研究人员提出了局部反循环打捞技术。局部反循环打捞技术的特点在于能够在井下改变洗井介质的循环方式,直接在井底构成局部循环,将碎屑收集至打捞工具内[9]。而局部反循环打捞工具是实现局部反循环打捞作业的核心装置,其性能好坏直接决定了打捞作业的效率。

王春生等[10]设计了一种局部反循环打捞装置,可以在井底进行反循环冲砂打捞,解决了对井底碎屑冲洗能力不足的问题。王方祥等[11]基于局部反循环方式,设计了一种涡轮负压式局部反循环打捞工具,现场应用将施工周期缩短2倍以上。Li J等[12]基于同心连续管真空清砂技术,设计了一种冲砂工具,利用地面泵送的液体从喷嘴中射出,然后从井筒与工具环空处冲向井底,将井下碎屑携带至工具内部以完成清洗工作。刘念等[13]基于负压原理设计了一种页岩气井筒清洗打捞装置,研究了负压的发生原理以及影响负压大小的关键因素,实现了在井深3500米,井筒套管直径120 mm工况下实现清洗打捞功能。曾云等[14]设计了一种电动清洗打捞装置,利用工具内电泵对井底碎屑进行冲洗,利用单向打捞篮对碎屑进

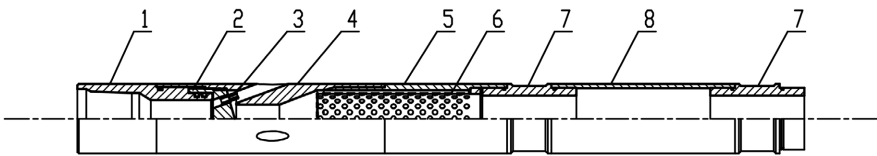
行收集，为井下电动打捞工具提供了参考。Qing F 等[15]基于伯努利原理设计了一种负压反循环井筒清洗装置，该装置利用高压水流在井底构建局部反循环系统并打捞井底碎屑。并利用 Fluent 对装置进行数值分析得出最佳打捞效果的工具参数，并通过实验验证了数值模拟的准确性。张华礼等[16]利用计算流体力学对打捞工具的流场进行了模拟研究，并对不同工具参数对工具性能的影响进行了研究。

尽管现有打捞工具能够实现井下碎屑的清洗与打捞功能，但仍存在诸多不足。局部反循环工具虽然在一定程度上改善了碎屑收集问题，但在实际应用中存在无效循环的问题。基于负压原理的清洗打捞工具通过射流产生负压，提高了碎屑吸附能力，但普遍存在结构复杂、吸附效果不稳定等问题。

针对以上问题，本文提出一种利用文丘里效应形成局部负压的打捞篮结构，并通过数值仿真对其关键结构参数进行优化分析，以提高井底碎屑的清洗打捞效率。

2. 工具结构设计

文丘里打捞篮是一种基于文丘里效应实现井底碎屑清洗与回收的工具，其整体结构如图 1 所示。装置由上接头、喷嘴承留体、喷嘴、中心管、中间套、回收篮、间断接头以及连接接头组成。上接头与上部管柱连接，用于引入流体。喷嘴承留体与喷嘴构成关键的节流单元。中心管和中间套主要起导流与支撑作用。回收篮则为碎屑的聚集与滞留区域，其结构设计直接影响打捞效果。



注：1、上接头；2、喷嘴承留体；3、喷嘴；4、中心管；5、中间套；6、回收篮；7、间断接头；8、连接接头。

Figure 1. Diagram of the retrieval basket structure
图 1. 打捞篮结构示意图

流体从上接头进入工具内部后，在喷嘴处流道截面积迅速减小，流体在收缩段内明显加速，并在喷嘴出口形成一股高速射流。与此同时，由于局部流速的提高，喷嘴出口附近的静压显著降低，从而在该区域形成稳定的低压区。

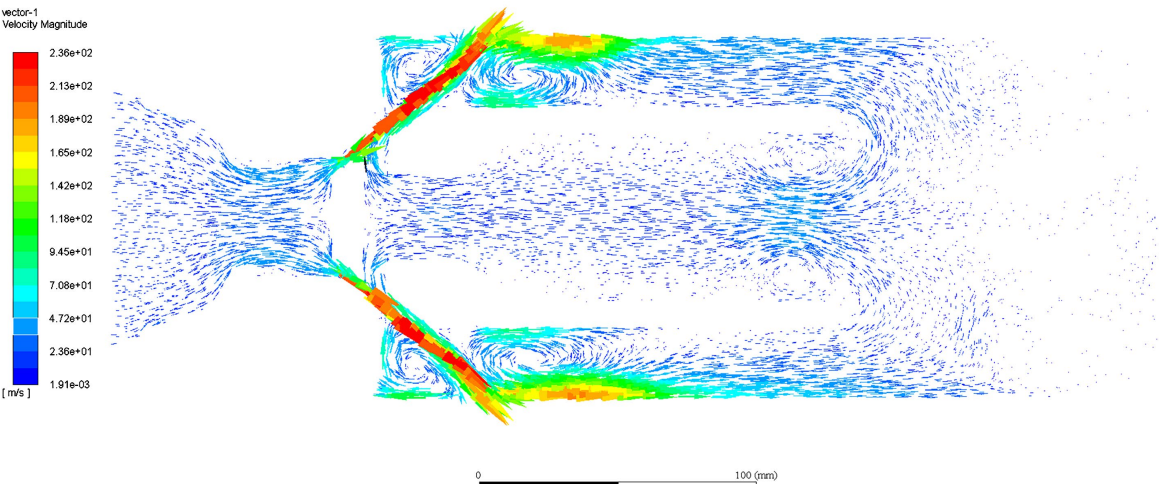


Figure 2. Velocity vector diagram of venturi fishing basket
图 2. 文丘里打捞篮速度矢量图

低压区域是实现碎屑卷吸的关键。当井底周围流体进入该区域时,会在压力梯度作用下向射流中心汇聚,从而携带碎屑颗粒进入工具内部。结合图2和图3可以看出,高速射流在进入井筒后对井筒内壁进行冲刷,在喷嘴出口及回收篮内部形成明显的涡旋结构。这些局部流动特征增强了流体混合,使颗粒更容易被卷入回收篮内。以上的流动特征主要受喷嘴结构及回收篮流场分布的影响。因此,合理优化喷嘴参数,能够提高负压强度及打捞效率。

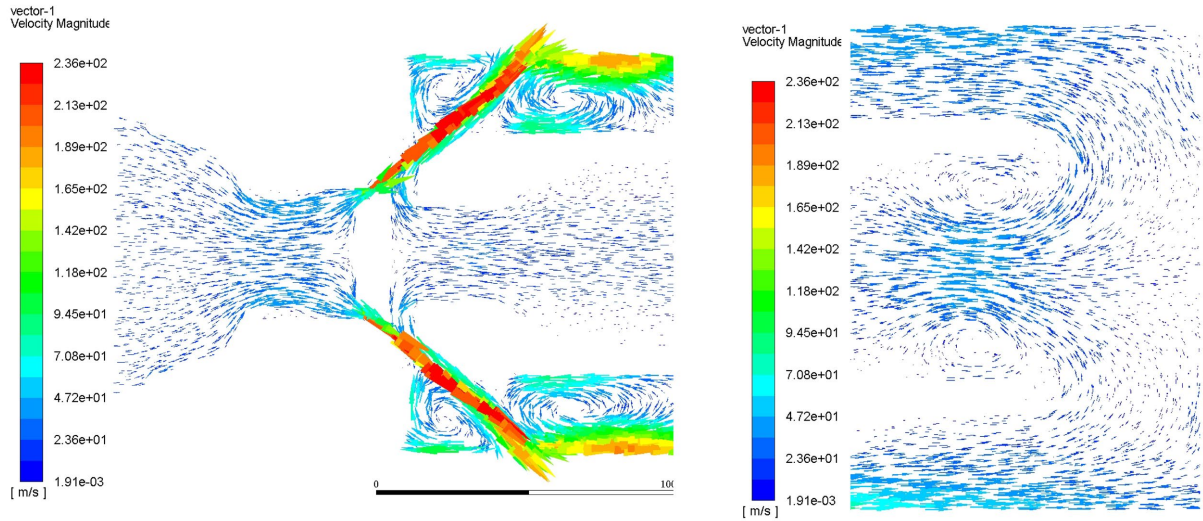


Figure 3. Partial enlarged velocity vector diagram of Venturi salvage basket
图3. 文丘里打捞篮局部放大速度矢量图

3. 数值模拟模型

根据上述文丘里打捞篮结构设计,为研究其内部流动特性及碎屑吸附机理,基于实际结构建立数值计算模型。为提高计算效率,在不影响主要流场特征的前提下,对工具结构进行适当简化,并构建相应的流体计算区域。在此基础上对模型进行网格划分,并设置边界条件和求解方法,从而开展后续流场数值模拟分析。

3.1. 数学模型

利用 CFD 技术研究流体工具内的流动问题需满足的守恒方程包括:质量守恒方程(连续性方程),动量守恒方程。

质量守恒方程(连续性方程)表达式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; t 代表时间; $\vec{u}$ 代表速度矢量; u 、 v 、 w 代表速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的速度分量;

动量守恒方程表达式为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\mu \rho \vec{u}) = \text{div}(\mu g \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\mu \rho \vec{v}) = \text{div}(\mu g \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\mu \rho \bar{u}) = \text{div}(\mu g \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

式中： μ 为动力粘度； p 为代表作用在流体微元体上的压强。

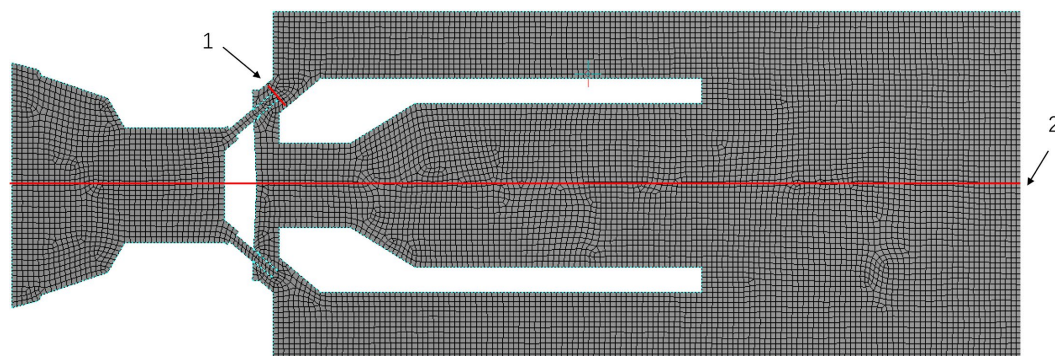
3.2. 边界条件与求解设置

本文采用稳态数值模拟方法对文丘里打捞篮内部流场进行分析。工作介质为液态水，并假设其为不可压缩牛顿流体，密度取 998.2 kg/m^3 ，动力黏度取 $1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。入口采用速度入口边界条件，入口速度设为 15 m/s 。出口采用压力出口边界条件，表压设为 0 Pa 。其余边界均设为无滑移固定壁面。

为模拟湍流流动特征，选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，入口湍流强度设为 5% ，湍流长度尺度按入口特征尺寸确定。求解器采用压力基稳态求解器，压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。动量方程、湍动能方程和湍流耗散率方程均采用二阶迎风格式离散。计算开始前采用标准初始化方法，并由入口边界初始化整个计算域。迭代过程中以各控制方程残差降至 1×10^{-5} 以下作为收敛判据，同时监测文丘里喉部速度及装置进出口压差，当其变化趋于稳定时，认为计算达到收敛。

3.3. 模型构建与网格无关性验证

结合实际井下作业工况，以井深不超过 3000 m 、井径为 121 mm 的水平井为研究对象，打捞工具外径为 79 mm 。本文主要研究文丘里打捞篮的吸附性能，在保持喷嘴角度、喷嘴入口段长度和喷嘴出口段长度等关键结构参数不变的条件下，对打捞篮结构进行适当简化，并在模型外部设置外流场区域。考虑到模型结构具有轴对称特征，且流体流动主要沿轴向发展，在不影响内部流场特征分析的前提下，将三维模型简化为二维计算模型。



注：1、出口截面线；2、中轴线。

Figure 4. Model mesh division

图 4. 模型网格划分

如图 4 所示，将文丘里打捞篮简化后的模型导入 ICEM 中进行网格划分。在进行数值模拟之前，为验证数值计算结果的网格无关性，以回收篮入口处最大速度作为评价指标，对不同网格数量条件下的计算结果进行对比分析，结果如图 5 所示。随着网格数量的增加，回收篮入口处最大速度整体呈逐渐增大的趋势。当网格数量较少时，计算得到的最大速度变化幅度较大，说明此时计算结果对网格尺度较为敏感。随着网格进一步加密，最大速度的变化逐渐减小，计算结果逐渐趋于稳定。当网格数量增加至约 60 万以上时，此时网格尺寸为 0.4 mm ，回收篮入口处最大速度基本保持稳定，曲线趋于平缓，表明此时数值计算结果已基本不再受网格数量变化的影响。由此，为提高计算精度，本文采用网格尺寸为 0.2 mm 即 94 万网格进行数值模拟计算符合网格无关性要求。

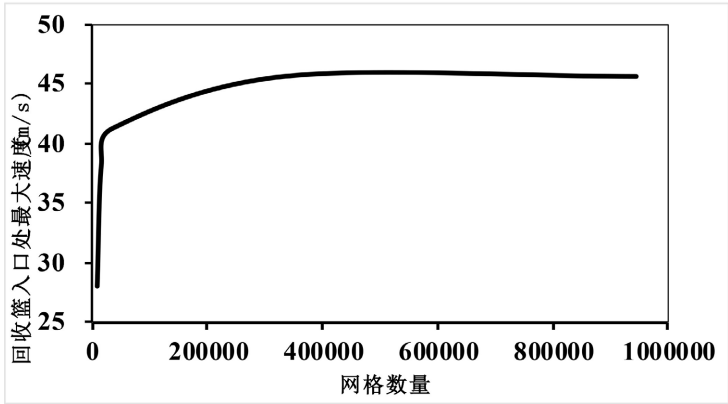


Figure 5. Grid independence analysis
图 5. 网格无关性分析

4. 喷嘴结构参数优化

在验证文丘里打捞篮具备井筒冲刷及碎屑吸附能力的基础上,为进一步优化工具结构参数,现采用控制变量法分别研究喷嘴角度、喷嘴入口段长度及喷嘴出口段长度对打捞篮内部流场特性及碎屑打捞性能的影响。对于喷嘴角度,射流喷嘴收敛角的常用工程范围为 15° 至 60° 。角度过小时水流对于井筒内壁的冲刷效果差,达不到对于井筒的清洗效果要求。角度过大时水流冲击井筒内壁易产生反溅,损伤工具。结合同类局部反循环打捞工具的喷嘴结构参数的选取原则,选取 20° 、 30° 、 40° 、 50° 四个角度进行对比分析。对于喷嘴入口段与出口段长度,以原喷嘴出入口段长度设计基准值 11 mm 为中心,在 $\pm 20\%$ 范围内以 2 mm 为步长,选取 9 mm 、 11 mm 、 13 mm 三种长度进行对比分析。若最优参数出现在所取区间的边界上,将适当扩展取值范围后补充仿真,以确保最优解的完备性。

4.1. 喷嘴角度对内部流场特性的影响

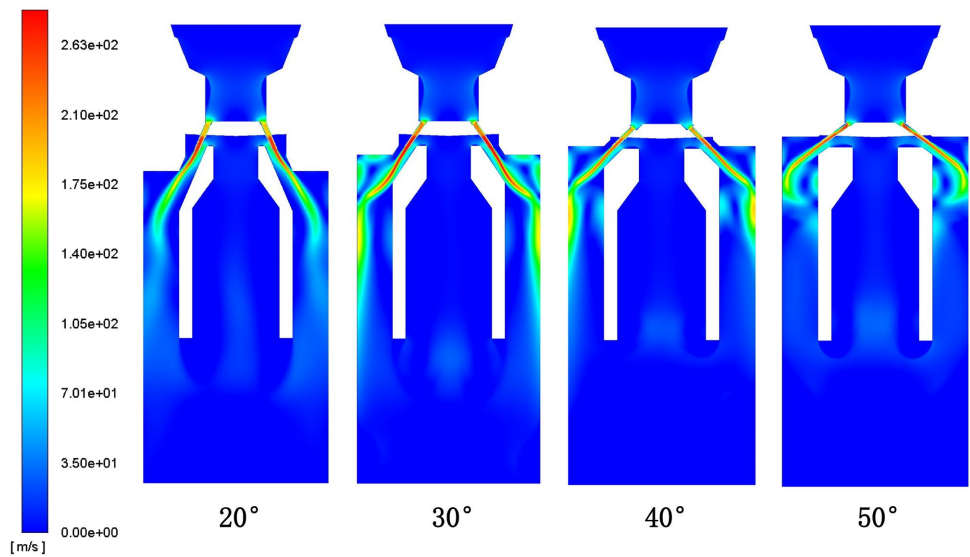


Figure 6. Cloud map of fishing basket speed at different nozzle installation angles
图 6. 不同喷嘴角度打捞篮速度云图

在数值模拟中选取喷嘴角度分别为 20° 、 30° 、 40° 、 50° ,其余结构参数保持一致,入口流速统一设置

为 15 m/s, 对不同喷嘴角度条件下打捞篮内部流场进行仿真分析。提取打捞篮内部速度云图与压力云图, 对喷嘴角度为 20°、30°、40°和 50°的仿真结果进行对比分析。为能直观地对比回收篮的吸附效果, 沿打捞篮中轴线提取速度分布。为进一步分析喷嘴附近的负压特性, 沿喷嘴出口的截面线提取总压分布。

由图 6 可知, 不同喷嘴角度(20°、30°、40°和 50°)对射流流场结构具有明显影响。随着喷嘴角度的增大, 喷嘴出口附近的高速区域逐渐扩大, 射流核心区长度增加。当喷嘴角度为 20°时, 井筒壁面处无高速速度分布, 证明此时喷嘴射流对井筒壁面的冲刷作用较弱。当喷嘴角度大于 20°时, 在井筒壁面处出现明显的速度分布区域, 证明此时经喷嘴进行加速得到的高速水流能够对井筒进行清洗。当喷嘴角度为 50°时, 由速度云图可知, 流体经喷嘴加速后冲击到井壁会形成反溅, 可能对打捞装置造成损伤。

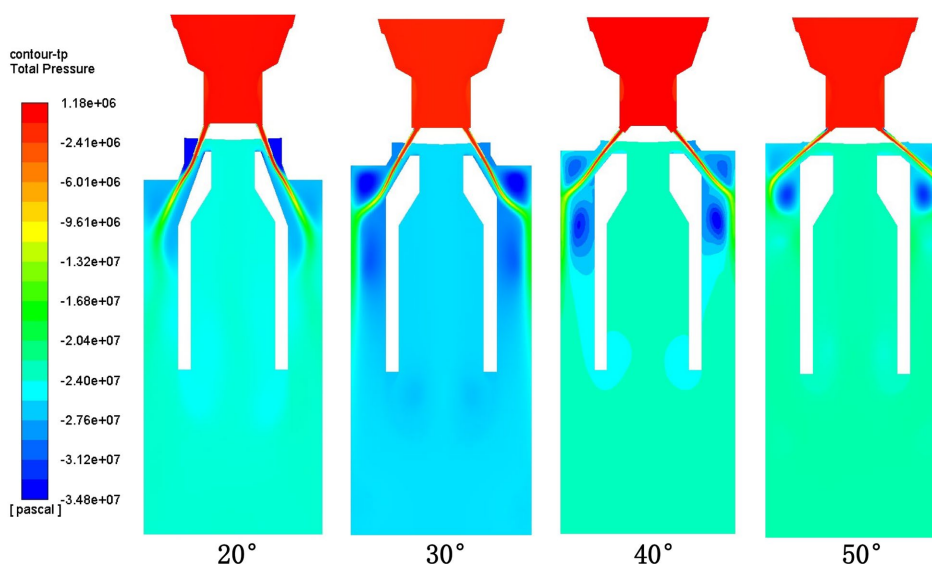


Figure 7. Cloud map of fishing basket pressure at the same nozzle installation angle

图 7. 不同喷嘴角度打捞篮压力云图

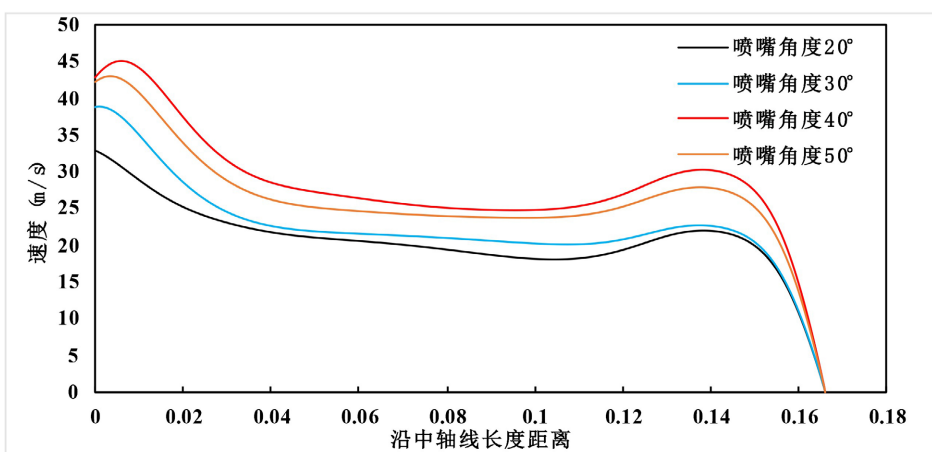


Figure 8. The axial velocity distribution of the retrieval basket at different nozzle angles

图 8. 不同喷嘴角度的打捞篮沿中轴线速度分布

由图 7 可知, 喷嘴角度对负压区的形成及分布具有显著影响。当喷嘴角度为 20°和 30°时, 负压区域主要集中于喷嘴出口附近, 范围较小, 难以在回收篮入口处形成有效吸附区。当角度增大至 40°时, 回收篮两侧出现明显且范围较大的低压区, 且分布较为均匀, 有利于增强对井底碎屑的吸附与卷吸能力。当

角度进一步增大至 50°时, 虽然仍能形成负压区, 但其分布趋于分散, 局部波动较大, 流场稳定性下降。总体来看, 当喷嘴角度为 30°~40°较优, 更有利于打捞过程的稳定进行。但仅通过云图对比仍难以完全确定最佳喷嘴角度。因此, 提取打捞篮中轴线处的速度分布曲线以及喷嘴出口截面线的压力分布曲线, 由中轴线速度分布及喷嘴出口截面线上的压力分布曲线可以进一步揭示喷嘴角度对流场特性的影响规律。

如图 8 与图 9 所示, 分析对比打捞篮沿中轴线速度分布曲线图可以看到, 当喷嘴角度为 20°~40°时, 打捞篮沿中轴线速度逐渐增加。当喷嘴角度为 40°~50°时, 打捞篮沿中轴线速度逐渐下降, 在喷嘴角度为 40°时, 回收篮内部的速度最大, 分析对比喷嘴出口截面线上的压力分布曲线图可知, 当喷嘴角度为 40°时, 负压区范围明显扩大, 且负压变化较为平稳, 能够在较大区域内维持有效压差, 有利于增强碎屑的卷吸能力。当喷嘴角度为 50°时, 虽可形成较深负压, 但曲线波动较大, 局部变化剧烈, 表明流场稳定性较差。综上分析, 可以得出喷嘴角度为 40°时打捞篮的打捞性能最佳。

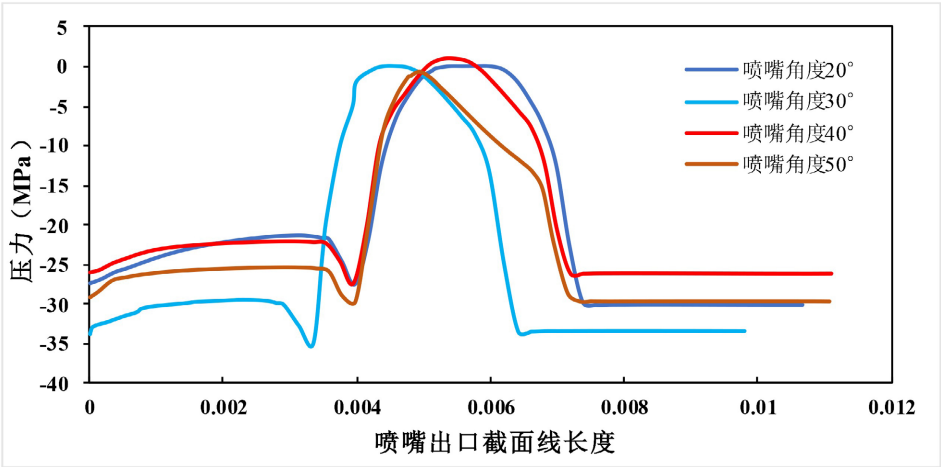


Figure 9. Pressure distribution along the nozzle outlet at different nozzle installation angles
图 9. 不同喷嘴角度沿喷嘴出口处压力分布

4.2. 喷嘴入口段长度对内部流场特性的影响

在确定喷嘴最佳角度后, 接下来对喷嘴的结构进行结构优化, 如图 10 所示, 喷嘴主要由入口段和出口段两部分组成, 首先对喷嘴入口段长度进行优化分析, 选取喷嘴入口段长度分别为 9 mm、11 mm 和 13 mm, 入口流体速度设置为 15 m/s, 对不同入口段长度条件下打捞篮内部流场进行仿真分析。提取速度云图与压力云图, 并沿中轴线提取速度分布曲线, 沿喷嘴出口截面线提取总压分布曲线, 以分析不同工况下的流动特性。

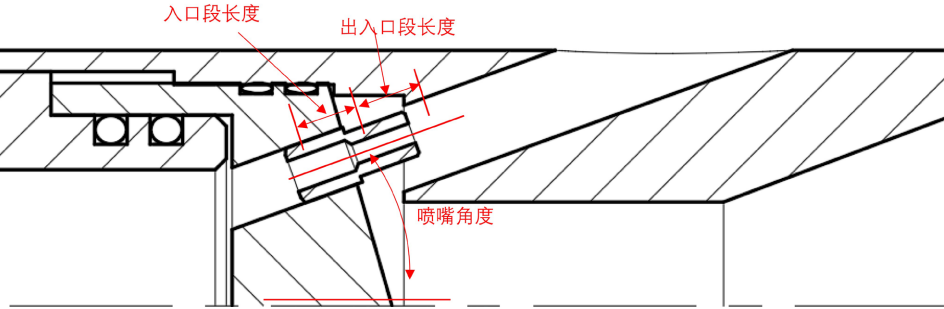


Figure 10. Schematic diagram of the nozzle inlet section length and nozzle outlet section length
图 10. 喷嘴入口段长度与喷嘴出口段长度示意图

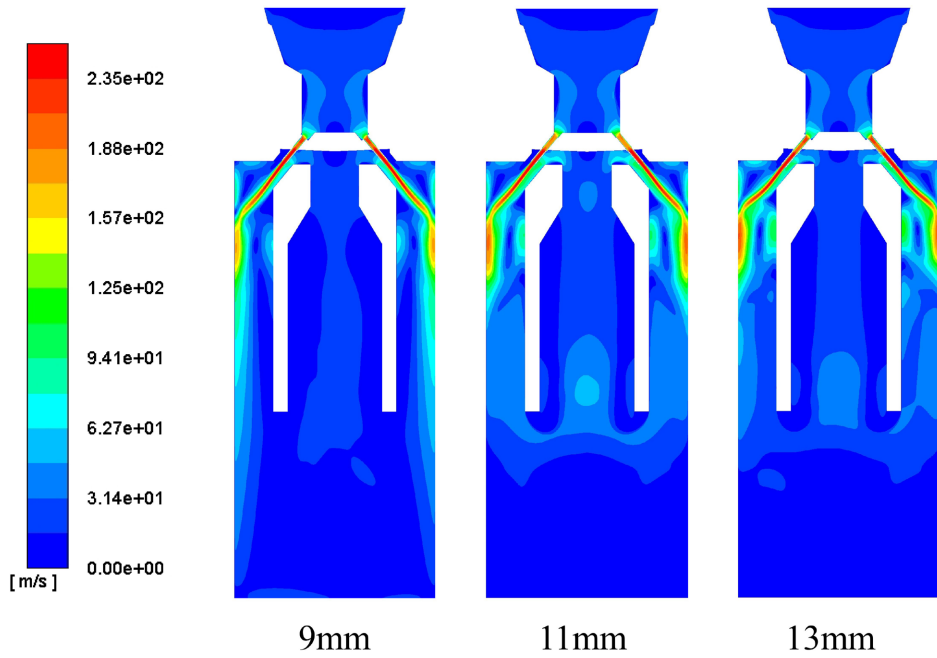


Figure 11. Cloud map of fishing basket speed for different nozzle inlet lengths
图 11. 不同喷嘴入口段长度打捞篮速度云图

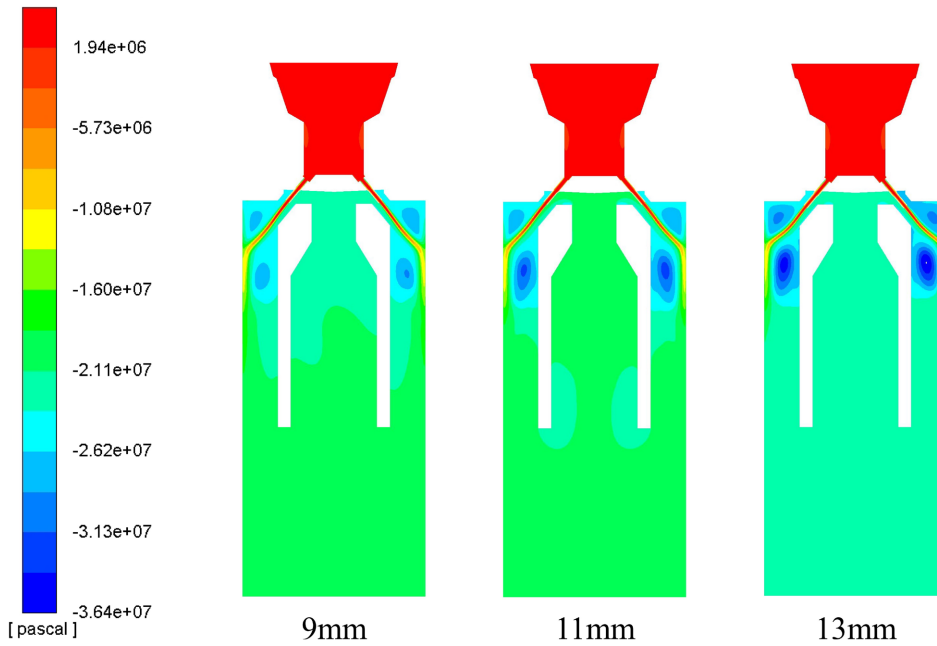


Figure 12. Cloud map of fishing basket pressure for different nozzle inlet lengths
图 12. 不同喷嘴入口段长度打捞篮压力云图

由图 11 可知,此时文丘里打捞篮射流已经能够对井筒内壁产生明显冲刷作用,当入口段长度为 9 mm 时,喷嘴出口处高速区范围较小,射流发展不充分,没有形成有效卷吸区域,对回收篮区域的卷吸能力有限。当入口段长度增大至 11 mm 时,喷嘴出口处形成较为集中且强度较高的高速射流,高速区沿轴向发展更加明显,有利于增强流体对周围介质的诱导作用。当入口段长度进一步增大至 13 mm 时,虽仍能形成高速射流,但其分布趋于分散,回收篮入口轴心速度有所衰减,卷吸能力降低。

由图 12 可知, 当入口段长度为 9 mm 时, 负压区域主要集中在喷嘴出口附近, 范围较小。当入口段长度为 11 mm 时, 回收篮两侧形成明显且范围较大的低压区, 且分布较为均匀, 有利于增强碎屑的吸附与卷吸能力。当入口段长度为 13 mm 时, 负压区虽有所扩大, 但局部低压区域出现波动, 整体稳定性有所下降。

由图 13 与图 14 可知, 入口段长度为 11 mm 时速度峰值最大, 且在回收篮区域内整体速度水平较高, 表明其射流动量及诱导能力最强。同时, 该工况负压区范围较广且变化较为平稳, 能够在较大空间范围内维持有效压差, 从而增强碎屑的卷吸与输运能力。相比之下, 9 mm 工况射流强度不足, 而 13 mm 工况虽局部负压较强, 但存在明显波动, 不利于稳定打捞过程。综合分析表明, 喷嘴入口段长度为 11 mm 时在速度分布与负压特性方面均表现最优。

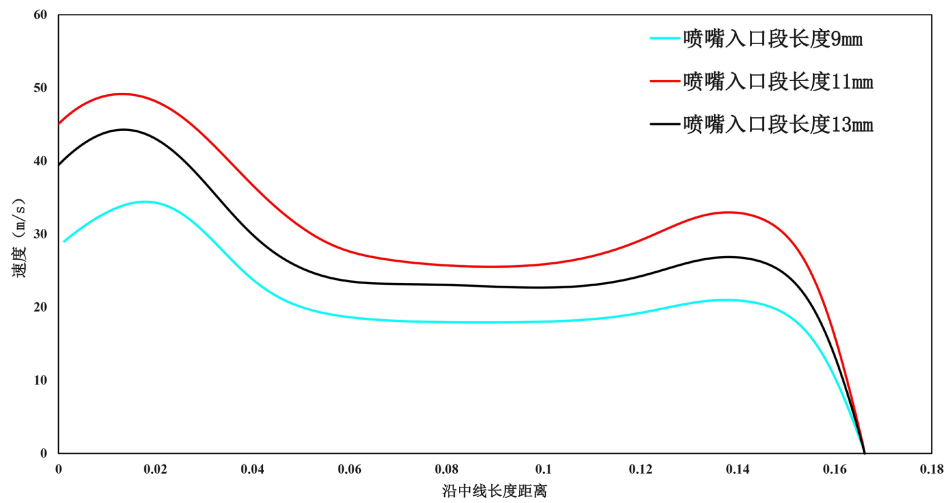


Figure 13. Velocity distribution along the axis of the retrieval basket at different nozzle inlet lengths
图 13. 不同喷嘴入口段长度下打捞篮中轴线处速度分布

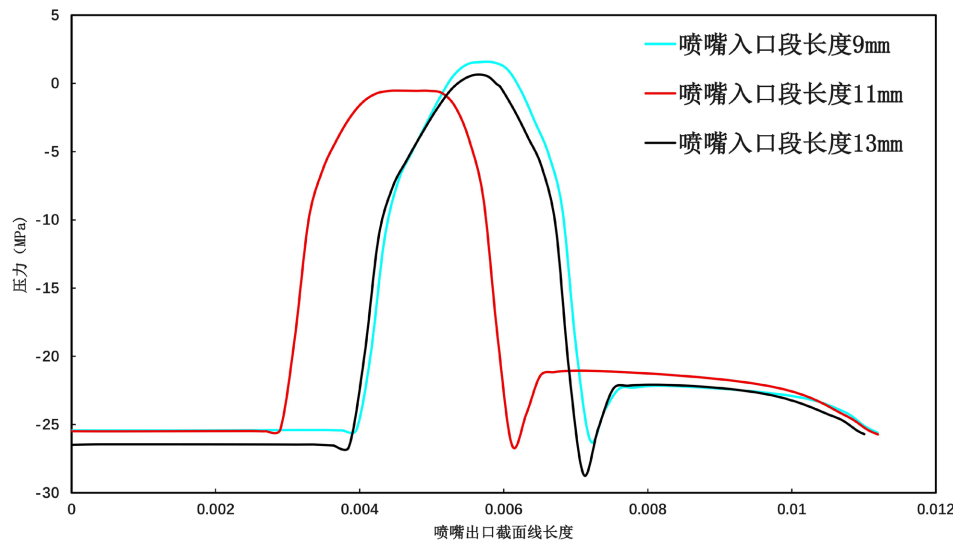


Figure 14. Pressure distribution along the nozzle outlet at different nozzle inlet lengths
图 14. 不同喷嘴入口段长度沿喷嘴出口处压力分布

4.3. 喷嘴出口段长度对内部流场特性的影响

在确定喷嘴最佳角度及喷嘴入口段最优长度后, 进一步对喷嘴出口段长度进行优化分析。选取喷嘴

出口段长度为 9 mm、11 mm 和 13 mm 三种结构参数进行对比分析，入口流速统一设定为 15 m/s，对比不同喷嘴出口段长度条件下打捞篮的流场特性及打捞性能，同样提取回收篮中轴线处的速度分布以及喷嘴出口截面线处的压力分布，比较并优选出喷嘴最佳出口段长度参数。

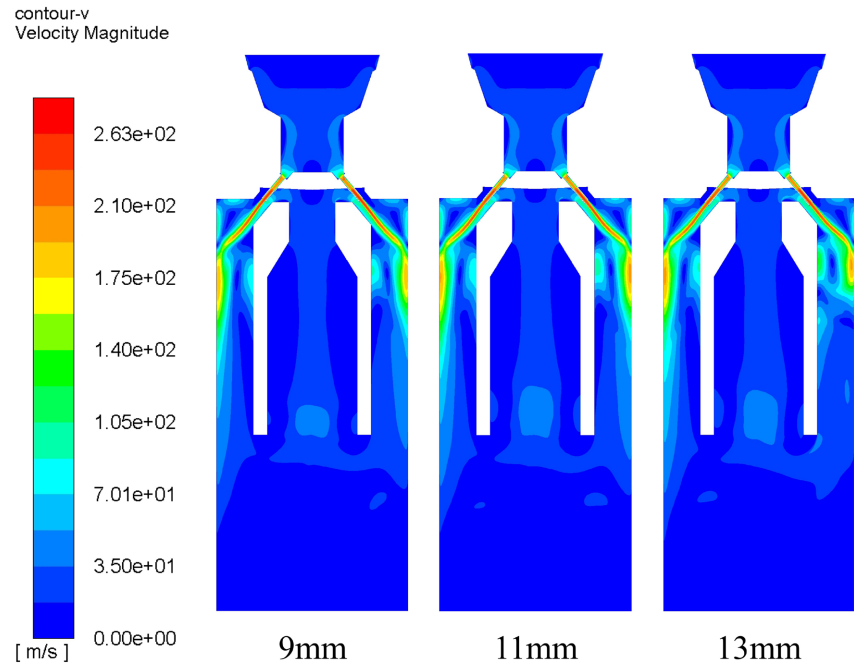


Figure 15. Optimal velocity cloud map for nozzle outlet section length selection
图 15. 喷嘴出口段长度优选速度云图

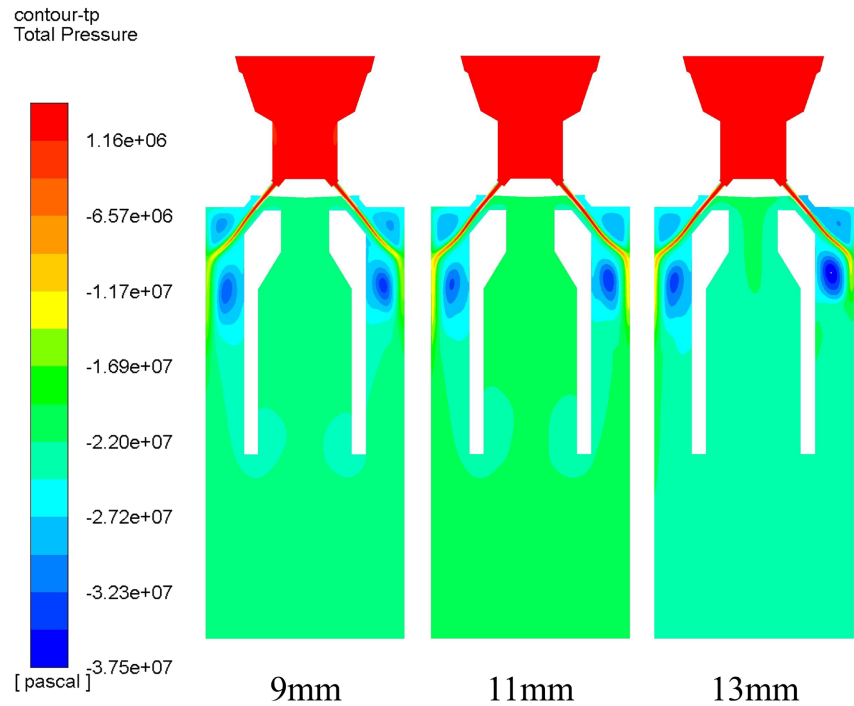


Figure 16. Cloud map of salvage basket pressure for different nozzle outlet lengths
图 16. 不同喷嘴出口段长度打捞篮压力云图

由上述分析结果可知，当下文丘里打捞篮的喷嘴角度为 40° ，喷嘴入口段长度为 11 mm。此时文丘里打捞篮已能够对井筒内壁产生明显冲刷作用，同时在回收篮处也能对碎屑形成吸附作用。由图 15 可知，当出口段长度为 9 mm 时，喷嘴出口处高速区范围较小。当出口段长度为 11 mm 时，高速射流区域明显增强，射流沿轴向发展更加充分，有利于提高流体冲刷能力。当出口段长度进一步增大至 13 mm 时，高速区范围有所扩大，但局部速度分布趋于分散，射流结构稳定性略有下降。由图 17 可知，当喷嘴出口段长度为 9 mm 时，回收篮入口处速度峰值约为 49 m/s。当喷嘴出口段长度为 11 mm 时，回收篮入口处速度峰值约为 53 m/s，当喷嘴出口段长度为 13 mm 时，回收篮入口处速度峰值约为 55 m/s。同时由图 18 可知，当喷嘴出口段长度为 11 mm 与 13 mm 时，打捞篮内部速度分布差异较小，因此需要根据压力云图进行进一步对比分析。

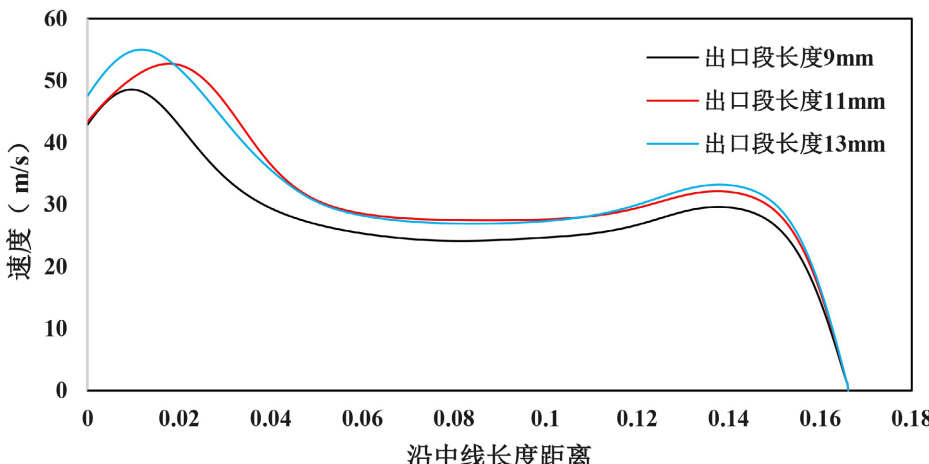


Figure 17. Velocity distribution at the central axis of the retrieval basket under different nozzle outlet segment lengths
图 17. 不同喷嘴出口段长度下打捞篮中轴线处速度分布

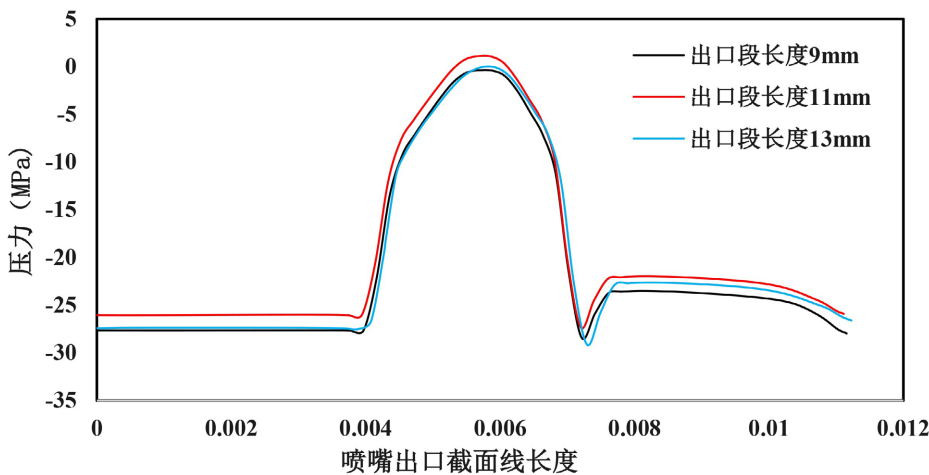


Figure 18. Pressure distribution along the nozzle outlet at different nozzle outlet lengths
图 18. 不同喷嘴出口段长度沿喷嘴出口处压力分布

结合图 16 与图 18 可知，当出口段长度为 9 mm 时，负压区主要集中于喷嘴出口附近，范围较小。此时，喷嘴出口处与回收篮入口处的压力差约为 9.07 MPa，当喷嘴出口段长度为 11 mm 时，回收篮两侧形成较为明显且范围较大的低压区，且分布相对均匀，有利于增强碎屑的吸附与卷吸能力。此时，喷嘴出

口处与回收篮入口处的压力差约为 10.18 MPa, 当喷嘴出口段长度为 13 mm 时, 负压区范围虽有所扩大, 但局部低压分布不均匀, 存在一定波动, 不利于形成稳定吸附流场。此时, 压力差约为 9.99 MPa。喷嘴出口处与回收篮入口处的压力差越大, 表明回收篮入口处的负压吸附能力越强。因此综合分析可知, 喷嘴出口段最优长度为 11 mm。

5. 结论

为减少油气开采过程中井筒内碎屑对后续施工的影响, 本文基于文丘里原理设计了一种井下碎屑打捞装置。通过数值模拟方法对喷嘴角度、喷嘴入口段长度及喷嘴出口段长度等结构参数进行了优化分析, 得到以下结论:

(1) 喷嘴角度对井筒冲刷与碎屑吸附效果有较大影响, 随着喷嘴角度由 20°增大至 40°, 轴向速度整体水平及峰值明显提高。当喷嘴角度进一步增大至 50°时, 轴向速度反而下降。因此, 喷嘴角度为 40°左右时, 回收篮的碎屑卷吸与输运能力均达到最优。

(2) 喷嘴入口段长度对碎屑吸附效果影响显著。当入口段长度由 9 mm 增至 11 mm 时, 回收篮内轴向速度整体提升, 流体卷吸作用增强。当入口段长度继续增至 13 mm 时, 轴向速度有所降低, 且局部压力波动增强。因此, 喷嘴入口段长度取 11 mm 左右时, 井底碎屑的卷吸与输运效果最佳。

(3) 喷嘴出口段长度对负压区域形成有显著的影响。随着出口段长度由 9 mm 增大至 13 mm, 打捞篮内轴向速度整体提升。但由 11 mm 增加至 13 mm 时, 喷嘴出口径向压力峰值有所下降。因此, 喷嘴出口段长度为 11 mm 时, 回收篮的卷吸与输运能力最强。

(4) 在当喷嘴安装角度为 40°、喷嘴入口段长度为 11 mm、喷嘴出口段长度为 11 mm 时, 文丘里打捞篮能够在井筒内形成较强的射流冲刷作用及稳定的负压吸附区域, 其碎屑清理与回收性能达到最优。

参考文献

- [1] 俞鹏. 石油开采井下作业打捞技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(12): 154-156.
- [2] 李伟, 杨保健. 油田井下落物打捞作业技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(18): 154-156.
- [3] 张秘. 井下打捞作业及其工具改进[J]. 化学工程与装备, 2023(8): 116-117+120.
- [4] 刘朕, 张勇, 孙小虎, 等. 大尺寸井眼一体化打捞工具的研制与应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(3): 159-164.
- [5] 伍涛. 煤矿井下可退式卡瓦打捞筒的研制及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 165-170.
- [6] 李志学, 李宗亮, 杨柏龙. 井下作业小修特殊井打捞工具的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(14): 111-113.
- [7] 单茂青, 王玉忠, 胡永雄, 等. 一种多功能局部反循环工作筒[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 47-49+77.
- [8] 陈宗涛, 李涛, 范怡静, 等. 泵吸式局部反循环取心钻具关键部件研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 119-125.
- [9] 赵崇镇. 基于射流泵原理的修井液正反循环换向钻具[J]. 石油机械, 2016, 44(4): 97-100.
- [10] Wang, C.S. and Zhang, L. (2019) Fluid Simulation in a Cyclone Reverse Circulation Well Washing Device Based on Computational Fluid Dynamics. *Energy Science & Engineering*, 7, 1306-1314. <https://doi.org/10.1002/ese3.349>
- [11] 王方祥, 赵增权, 李龙, 等. 涡轮负压式局部反循环打捞工具的设计[J]. 中外能源, 2020, 25(7): 49-53.
- [12] Li, J., Misselbrook, J. and Sach, M. (2010) Sand Cleanouts with Coiled Tubing: Choice of Process, Tools and Fluids. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49, 69-82. <https://doi.org/10.2118/113267-pa>
- [13] 刘念. 基于负压原理的页岩气水平井筒清洗打捞工具的仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [14] 曾云, 周宗赣, 吴文秀, 等. 井下电动清洗工具清洗性能数值模拟研究[J]. 石油机械, 2022, 50(12): 110-116.
- [15] Qin, F., Dong, L., Tang, S., et al. (2014) Analysis and Application of Cleaning Tool Structure in Negative Pressure Reverse Circulating Wellbore. *Advances in Mechanical Engineering*, 12, 1-15. <https://doi.org/10.1177/1687814020938596>
- [16] 张华礼, 杨盛, 李擎, 等. 基于计算流体动力学 CFD 技术的局部反循环打捞工具数值模拟及结构优化[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(4): 1-10.