

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.04.001

基于计算流体力学 CFD 技术的局部反循环打捞工具 数值模拟及结构优化

张华礼¹, 杨 盛¹, 李 擎², 李玉飞¹, 罗 伟¹, 汤积仁²

(1. 中国石油西南油气田公司 工程技术研究院, 成都 610017;

2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对现有局部反循环打捞工具存在打捞对象单一、反循环能量不足、碎屑采集率低等问题,提出了一种集收集和打捞于一体的新型局部反循环打捞工具,采用计算流体力学(CFD)对该型工具作业时的流场进行模拟,揭示该型工具形成反循环的机理。在此基础上,开展该型工具结构优化数值模拟研究。结果表明:该型局部反循环打捞工具利用喷嘴形成的高压水射流的卷吸作用形成反循环系统,适当增加喷嘴数量能够提升该型工具的性能;局部反循环打捞工具性能随着喷嘴直径增加呈现先增大后减小的趋势,继续增大喷嘴直径将导致无法形成有效反循环系统;改变喷嘴的几何形状会影响局部反循环打捞工具性能,采用圆锥形喷嘴的局部反循环打捞工具性能最强,但是所需排量较大。研究结果可为局部反循环打捞工具的优化设计提供参考,为局部反循环打捞工具现场作业提供理论指导。

关键词:局部反循环;打捞工具;数值模拟;喷嘴;水射流

中图分类号:TE358

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)04-001-10

Numerical simulation and structure optimization of a local reverse-circulation fishing tool based on computational fluid dynamics technology

ZHANG Huali¹, YANG Sheng¹, LI Qing², LI Yufei¹, LUO Wei¹, TANG Jiren²

(1. Engineering and Technology Research Institute, Petro China Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610017, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To solve the problems of single fishing object, insufficient reverse-circulation energy and low debris recovery rate of existing local reverse-circulation fishing tools, a new local reverse-circulation fishing tool, which integrates collection and fishing, is proposed. The flow field of the tool is simulated by

收稿日期:2019-11-01

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT17R112);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-0612);中国石油西南油气田公司科研项目(20180302-11)。

Supported by the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT17R112), the Major Science and Technology Project of Petrochina Company Limited (2016E-0612), and the Scientific Research Project of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company (20180302-11).

作者简介:张华礼(1975—),男,高级工程师,主要从事采气工程及机械设计方面的研究工作,(E-mail) zhanghuali@petrochina.com.cn。

通讯作者:汤积仁,男,重庆大学副教授,博士生导师,主要研究方向为页岩气、煤层气等非常规天然气开发,高压水射流理论及技术,(E-mail)jrtang2010@163.com。

computational fluid dynamics (CFD), and the mechanism of reverse-circulation formation of the tool is revealed, on the basis of which the numerical simulation of the tool structure optimization is carried out. The results show that the reverse-circulation system is formed by the entrainment of the high pressure water jet formed by the nozzle, and the performance of the tool can be improved by increasing the number of nozzles appropriately. The performance of the local reverse-circulation fishing tool increases first and then decreases with the increase of the nozzle diameter, and further increasing the nozzle diameter results in the failure to form an effective reverse-circulation system. The change of nozzle geometry affects the performance of the local reverse-circulation fishing tool, which is the best with a conical nozzle, but the required displacement is relatively large. The research results can provide reference for the optimization design of local reverse-circulation fishing tools and theoretical guidance for the on-site operation of local reverse-circulation fishing tools.

Keywords: local area reverse circulation; fishing tool; numerical simulation; nozzle; water jet

随着油气田开发的深入,部分油气井由于井内管柱断落、井筒堵塞等原因造成修井作业逐年增多,修井难度逐渐增大,严重时甚至造成油气井报废^[1]。而处于开发中后期的油气田区块由于地层压力不足,在洗井过程中易发生洗井循环液和清水漏失,部分漏失严重井甚至无法建立洗井循环,为落物鱼顶碎屑的收集打捞带来了很大困难。针对部分漏失严重井,如何有效地建立良好的洗井循环通道以正常循环回收井内的碎屑是解决上述问题的关键^[1]。

目前修井作业可采用正循环、反循环以及局部反循环方式对落物鱼顶碎屑进行收集打捞。采用正循环方式作业时,碎屑依靠大排量的液流携带,经油、套环空返至地面;与正循环打捞方式不同,采用反循环方式作业时,液流经油、套环空注入井底,从油管通道流出,碎屑依靠大排量的液流携带,经油管返至地面;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^[2]。为了解决上述问题,人们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。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。

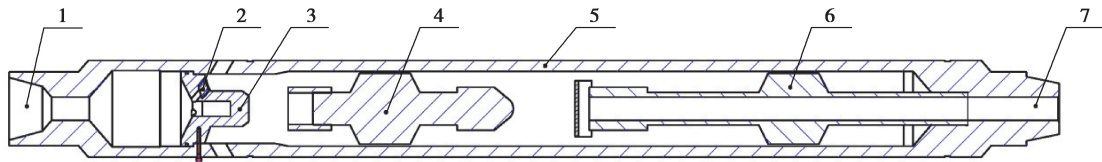
已有不少学者对局部反循环打捞工具开展了研究。顾长增等^[3]根据多年技术经验研制了小井眼局部反循环工具,并结合现场施工效果对该工具进行了完善和改进。杨义兴^[4]根据落物特点、性质以及井筒情况,研制了一种加长隔腔式反循环打捞篮,并成功应用于元 54-8 井打捞作业,该工具能有效解决小件落物打捞技术难题。单茂青等^[5]研制了一种由外筒、内衬管、中心管、中心管接头、中心管底座及滤砂器组成的多功能局部反循环工作筒,并分析了该多功能局部反循环工作筒的工作原理。王春生等^[6]利用数值模拟方法对常规反循环打捞装置在洗井作业时孔底流场流体分布特征进行了研究,分析了常规局部反循环洗井装置在井下形成反循环的原理,并总结了导致常规反循环洗井装置洗井效果不理想的原因。艾白布·阿不力米提等^[7]基于负压抽吸原理研制了一套专门针对球类落物的连续油管负压打捞管柱,并用数值模拟和试验分析进行了优化,该工具为球类落物打捞难题提供了有效的解决方案。

尽管目前已有众多学者对不同局部反循环打捞工具进行了研究,但是在实际应用中发现,这些装置存在打捞对象单一、反循环能量不足、碎屑采集率低等问题。为了解决上述问题,笔者研发了一种新型局部反循环打捞工具,该新型局部反循环打捞工具具有结构复杂、打捞范围大等特点,实验研究难以直接观测到其内部的流场情况。计算流体力学(CFD)方法具有成本低和能模拟较复杂或较理想的流动过程等优点^[8-14],能对复杂的结构进行模拟,并求得流场不同位置的基本物理量(如速度和压力等)的分布。因此,笔者利用 CFD 方法模拟该型局部反循环打捞工具的工作过程并进行结构优化;利用 SolidWorks 软件建立该工具在井筒作业时的三维物理模型,运用 FLUENT 前处理器 ICEM 软件对物理模型进行网格划分,利用 FLUENT3D 单精度求解器对网格模型进行求解,获得该工具在井筒作业时的内部压力场、速度场分布,分析该工具的工作原理,在此基础上,开展该型打捞工具结构优化数值模拟研究。

1 数值模拟

1.1 物理模型及网格划分

图1所示为研发的新型局部反循环打捞工具结构示意图,该工具主要由工具套筒、过滤本体、喷嘴安装座、喷嘴本体以及吸入扶正杆5部分组成。

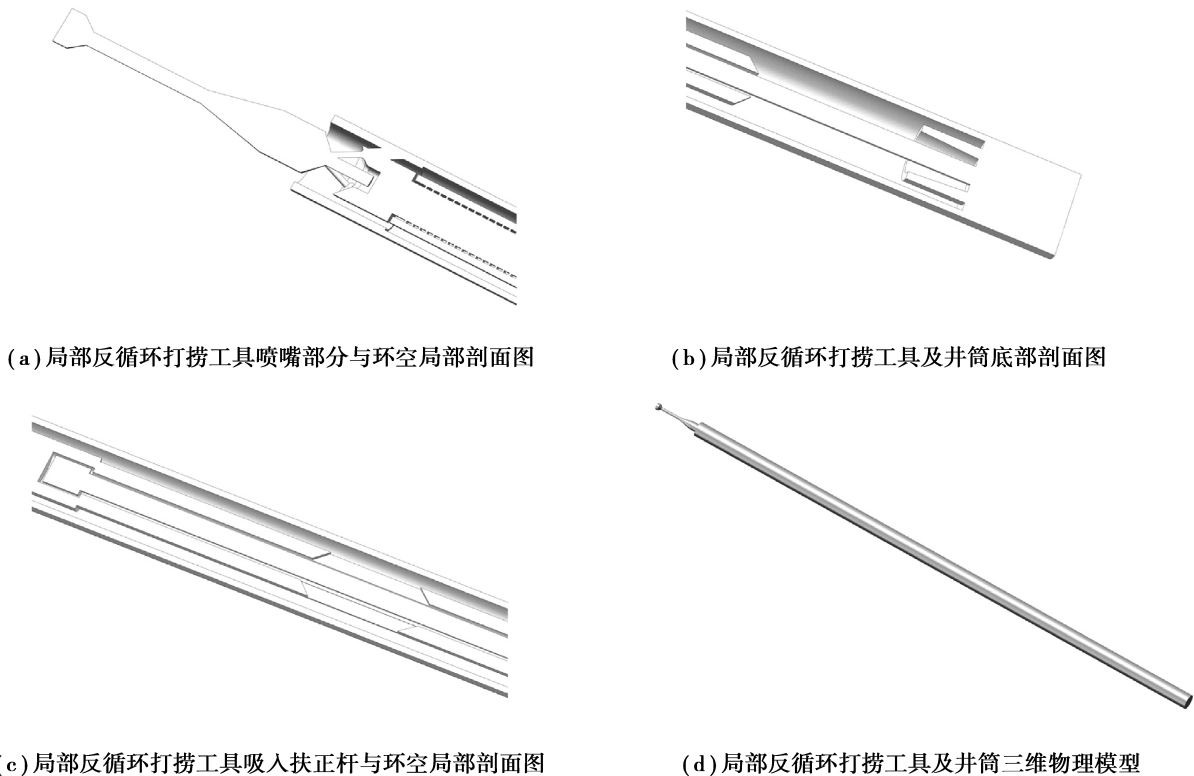


1.入口;2.喷嘴本体;3.喷嘴安装座;4.过滤本体;5.工具套筒;6.吸入扶正杆;7.反循环打捞口

图1 局部反循环打捞工具结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of local reverse circulation fishing tool

根据工具实际尺寸以及井筒尺寸,利用 SolidWorks 软件建立井下作业时的局部反循环打捞工具计算域模型(长约 4 638.82 mm、直径为 114.30 mm)。所建物理模型如图2所示。



(a)局部反循环打捞工具喷嘴部分与环空局部剖面图

(b)局部反循环打捞工具及井筒底部剖面图

(c)局部反循环打捞工具吸入扶正杆与环空局部剖面图

(d)局部反循环打捞工具及井筒三维物理模型

图2 局部反循环打捞工具三维物理模型

Fig. 2 Three-dimensional physical model of local reverse circulation fishing tool

将局部反循环打捞工具模型导入 FLUENT 软件前处理器 ICEM 中对模型进行网格划分。由于结构复杂,全局均采用四面体非结构化网格,对喷嘴、筛管、工具壁面开口处等主要细小计算区域进行局部网格加密处理,以提高计算过程的稳定性及精度。划分后的网格单元数为 2 332 399 个,节点数为 405 342 个,所得网格模型见图3。

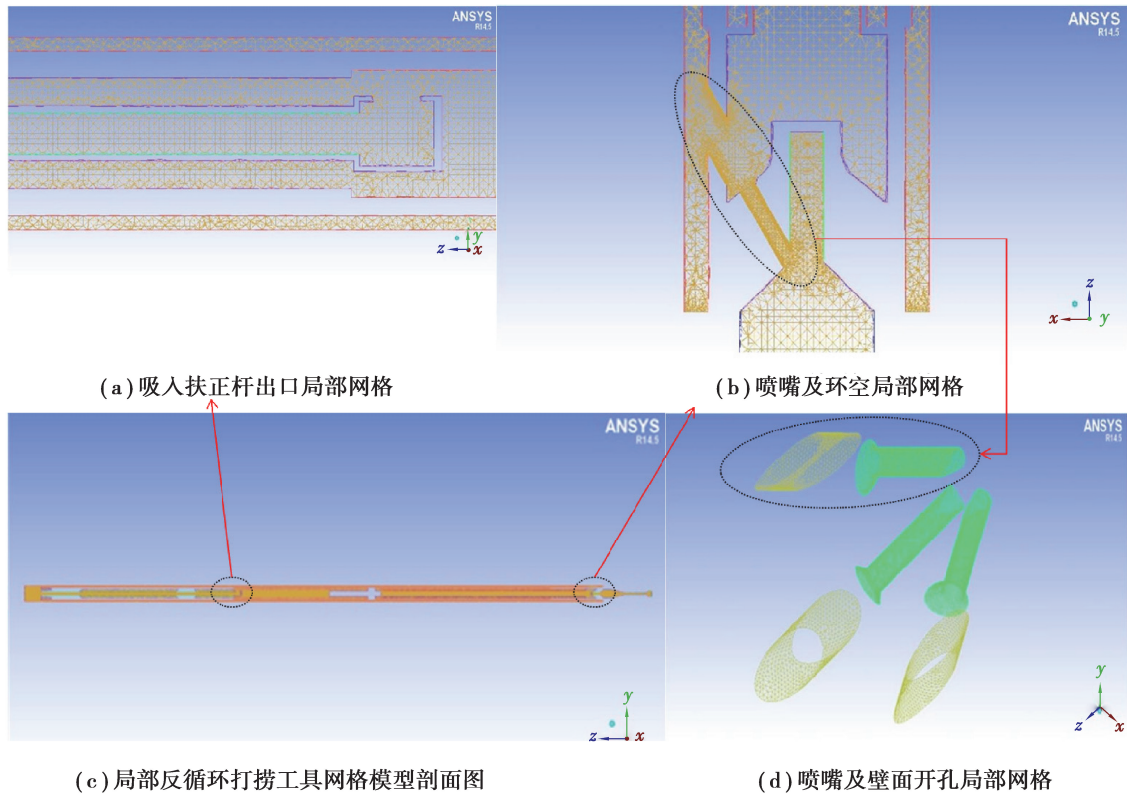


图 3 局部反循环打捞工具流道网格模型

Fig. 3 Mesh model of local reverse circulation fishing tool

1.2 边界条件与模拟参数

流体入口边界采用压力入口边界,混合流体出口边界采用压力出口边界。固体壁面采用无滑移壁面边界。基本方程采用有限体积法离散化三维 N-S 方程,湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,采用非耦合隐式方案进行求解,采用二阶迎风式离散对流项,用工作流体入口压力初始化流场,以残差 10^{-5} 作为收敛依据。

根据现场施工工艺参数,地层压力为 10 MPa,工具入口压力为 20 MPa,因此,设置入口初始压力为 20 MPa,出口初始压力为 10 MPa。

2 计算结果与分析

2.1 局部反循环打捞工具模拟结果

将上述模拟参数带入 FLUENT 求解器中进行计算,得到图 4 和图 5 中的结果。

从图 4 中可以看出,在工具壁面开孔以下位置,局部反循环工具内部的静压小于环空区的静压,而由于喷嘴的作用主要是将高压水转换成高速流动的水射流,所以喷嘴内部的静压比较低,从喷嘴喷出的高速流动的水射流将卷吸喷嘴出口附近的流体,并通过动量交换的形式将部分动能传递给被卷吸的流体,本身流速降低,所以此区域内的静压比喷嘴内部的大。

从图 5 中可以看出,流体在吸入扶正杆内的流动较快,在过滤本体内的流动较慢,由于喷嘴能将高压水转变成高速流动的水射流,所以在喷嘴内以及喷嘴出口处流体速度非常大,高速水射流经过工具壁面开孔之后撞击到环空壁面,流体速度出现转向并随之减小,流体向井筒底部流动。

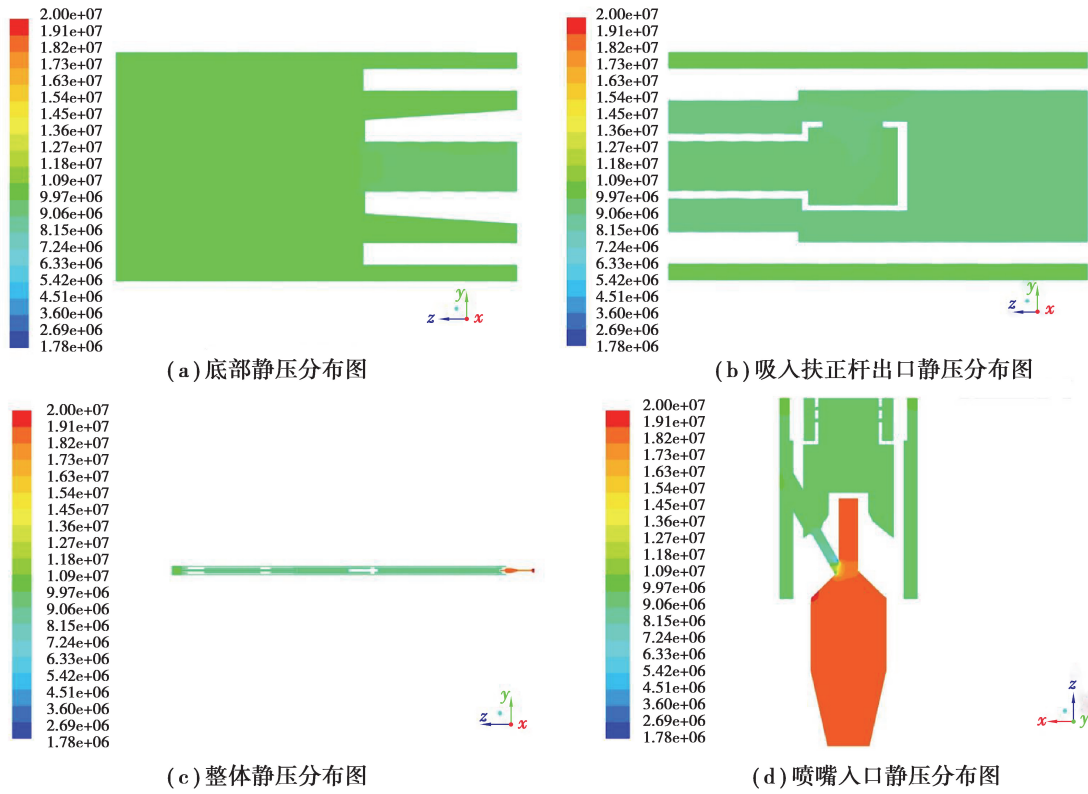


图 4 局部反循环打捞工具静压云图

Fig. 4 Static pressure nephogram of local reverse circulation fishing tool

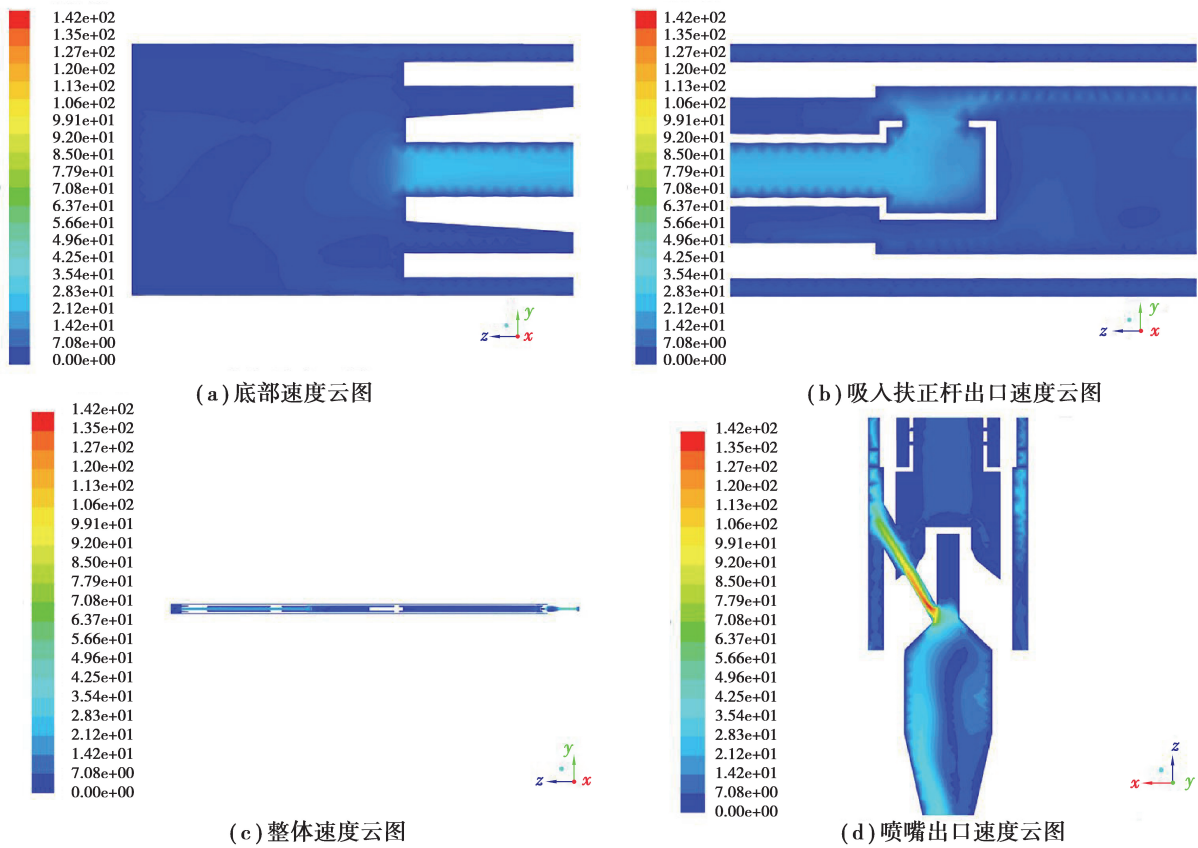


图 5 局部反循环打捞工具速度云图

Fig. 5 Velocity nephogram of local reverse circulation fishing tool

对图 5 中局部反循环打捞工具速度云图进行处理,得到井下作业时的局部反循环打捞工具底部、喷嘴出口附近以及过滤筛管处的速度矢量图,分别见图 6、图 7 和图 8。

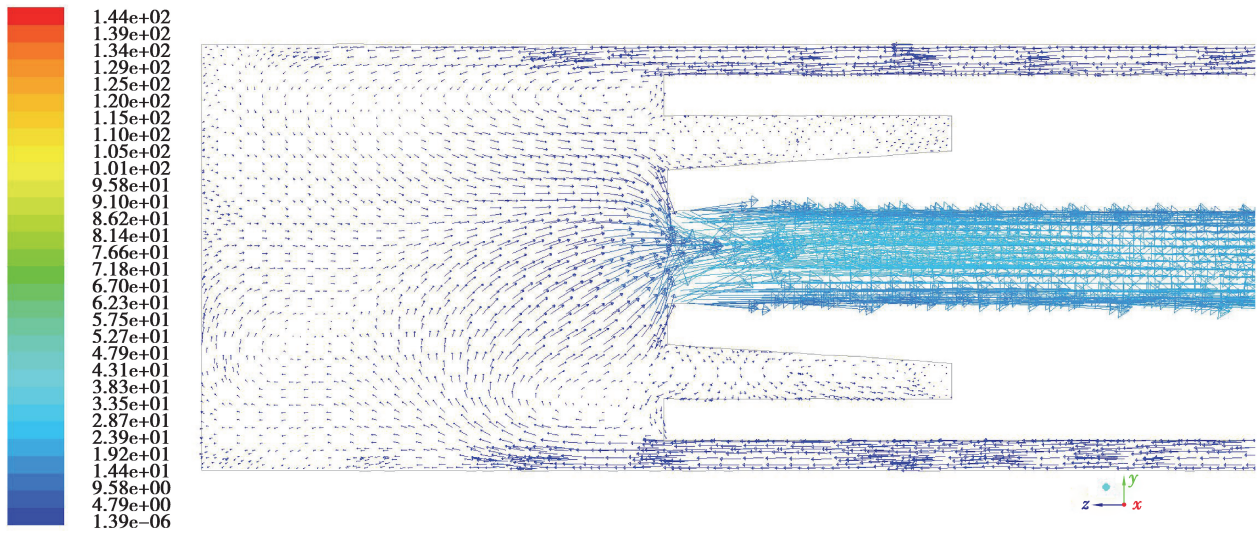


图 6 局部反循环打捞工具底部速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector map of bottom of local reverse circulation fishing tool

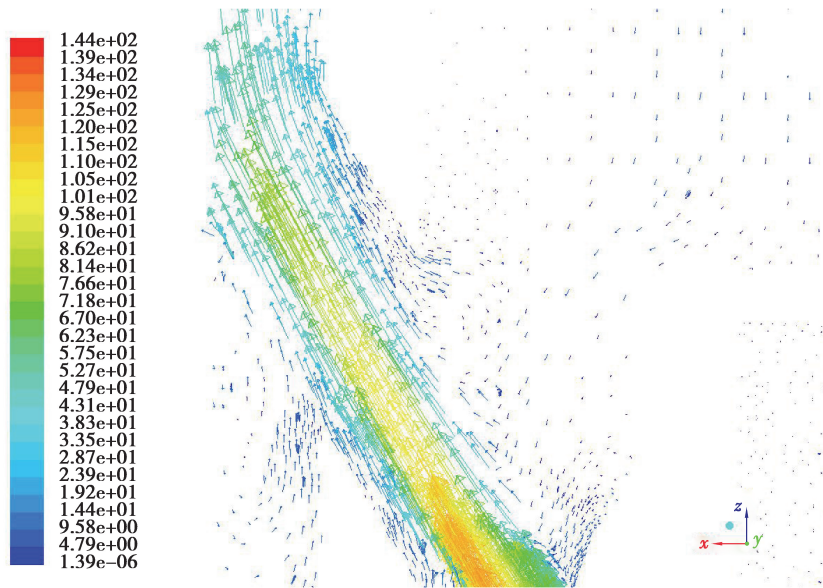


图 7 局部反循环打捞工具喷嘴出口附近速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector map near nozzle outlet of local reverse circulation fishing tool

分析图 6~8 中的速度矢量,可以得出局部反循环打捞工具的工作原理,即高压水从局部反循环打捞工具中的喷嘴喷出形成高速水射流,此时喷嘴形成的射流流体与其周围流体之间存在切向间断面,该切向间断面一旦受到扰动将失去稳定并产生漩涡,卷吸周围流体进入射流流体。由于动量的横向传递,卷入的流体与射流混合,随着高速水射流一起经过套管壁面开孔进入环空区,最后撞击到井筒壁,流体速度发生转向,向工具底部流动并对工具底部产生扰动作用。而在工具内部,喷嘴出口附近被卷吸走的流体被下部流体替代,工具内的下部流体被更下部流体替代,依次循环,最终在工具内部和环空区之间构成反循环系统。

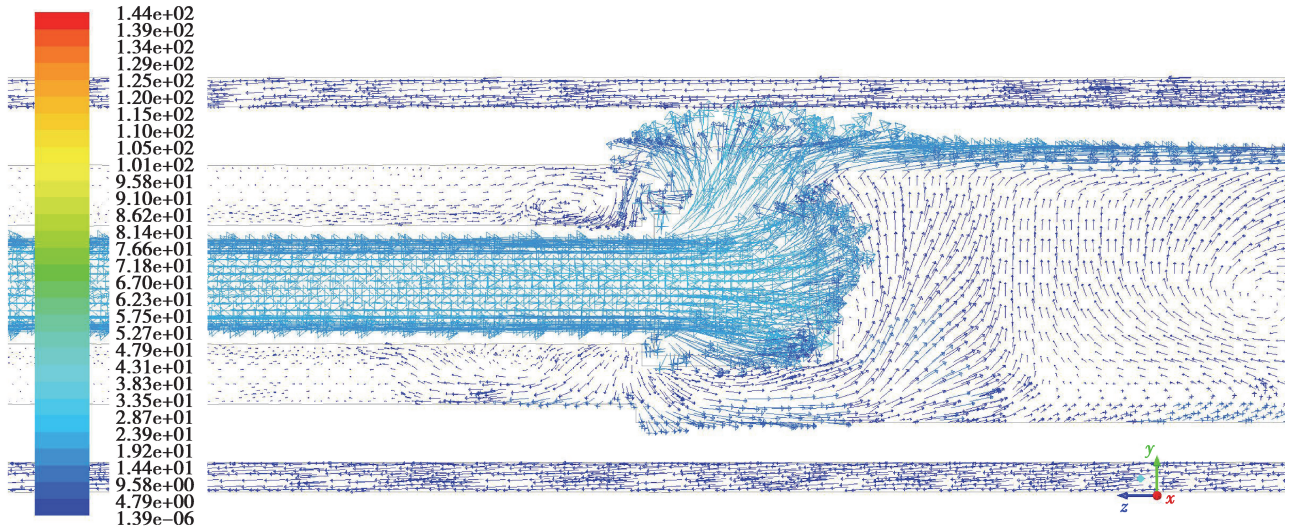


图 8 局部反循环打捞工具吸入扶正杆上部出口附近速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector map near the entrance of filtration screen tube of local reverse circulation fishing tool

由于局部反循环打捞工具的原理主要是利用喷嘴形成的高压水射流的卷吸作用来构成反循环,若能增大射流的卷吸能力,则喷嘴出口附近被卷吸的流体越多,清洁工具形成的反循环系统运行越顺畅,清洁工具的打捞能力越强。

2.2 局部反循环打捞工具结构优化研究

已有多种方法可用于增大射流的卷吸能力,比如增加喷嘴数量,改变喷嘴直径,改变喷嘴形状等^[15-20]。

2.2.1 喷嘴数量对局部反循环打捞工具性能影响

采用 8.0 mm 直径圆形喷嘴的局部反循环打捞工具,改变喷嘴数量,其他结构不变,考查对工具性能的影响。由于增加喷嘴数量时工具壁面开孔也要增加,为了保证工具本身的强度,只考虑了 3 个、4 个以及 6 个喷嘴的情况。设置流体出口边界条件为 10 MPa,入口压力为 20 MPa。将上述参数代入 FLUENT 中,计算结果见表 1。

表 1 喷嘴数量对局部反循环打捞工具性能的影响

Table 1 Effect of nozzle number on performance of the local reverse circulation fishing tool

喷嘴数量	工具内外压差/ MPa	底部入口平均速度/ (m · s ⁻¹)	吸入扶正杆出口平均速度/ (m · s ⁻¹)	排量/ (L · min ⁻¹)
3	-0.73	17.70	23.37	960
4	-0.82	18.86	24.45	1 245
6	-0.91	19.64	26.41	1 708

从表 1 中可以看出,增加喷嘴数量能够增加工具内外部压差,提高工具内部的流体运动速度,意味着增加喷嘴数量能增加射流卷吸能量,但是随着喷嘴数量增加,需要提供的排量也增加。

2.2.2 喷嘴直径对局部反循环打捞工具性能的影响

采用圆形喷嘴,喷嘴数量为 3,改变喷嘴直径,其他结构不变。将喷嘴直径分别设置为 5.7,7.0,8.0,10.0,12.0,16.0 mm,工具壁面开孔直径为 16.0 mm,设置流体出口边界条件为 10 MPa,入口压力为 20 MPa。将上述参数代入 FLUENT 中,计算结果见表 2。

表 2 喷嘴直径对局部反循环打捞工具性能的影响

Table 2 Effect of nozzle diameter on the performance of the local reverse circulation fishing tool

喷嘴直径/ mm	工具内外压差/ MPa	底部入口平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	吸入扶正杆出口平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	排量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
5.7	-0.19	12.79	15.80	467
7.0	-0.45	13.73	15.34	781
8.0	-0.73	17.70	23.37	960
10.0	-0.40	13.15	17.30	1 403
12.0	0.00	3.46	4.85	1 884
16.0	0.15	12.88	14.40	2 540

局部反循环打捞工具的性能随着喷嘴直径增大先增加后减小,当喷嘴直径达到 12 mm 时,工具与环空区之间内外压力几乎相同,但是此时局部反循环打捞工具与环空仍能形成反循环系统,随着喷嘴直径进一步增加,工具与环空区之间内外压差由负值变成正值,说明工具内部静压大于环空区静压,意味着部分水流是从工具内部经工具底部流入环空区的,此时无法构成反循环系统。

当喷嘴直径为 8.0 mm 即为壁面开孔直径的 1/2 时,工具内部的流体流动速度最大,工具内部与环空区之间的压差最大,说明此时局部反循环打捞工具的能力最强。

2.2.3 喷嘴几何形状对局部反循环打捞工具性能的影响

改变喷嘴形状,会改变射流的卷吸能力,进而影响局部反循环打捞工具的性能。在保证喷嘴出口最小截面积相同的前提下,分析了拉瓦尔喷嘴、圆锥形喷嘴、圆形喷嘴、三角形喷嘴、圆锥收敛型喷嘴以及文丘里喷嘴对局部反循环打捞工具性能的影响。具体喷嘴形状见图 9。

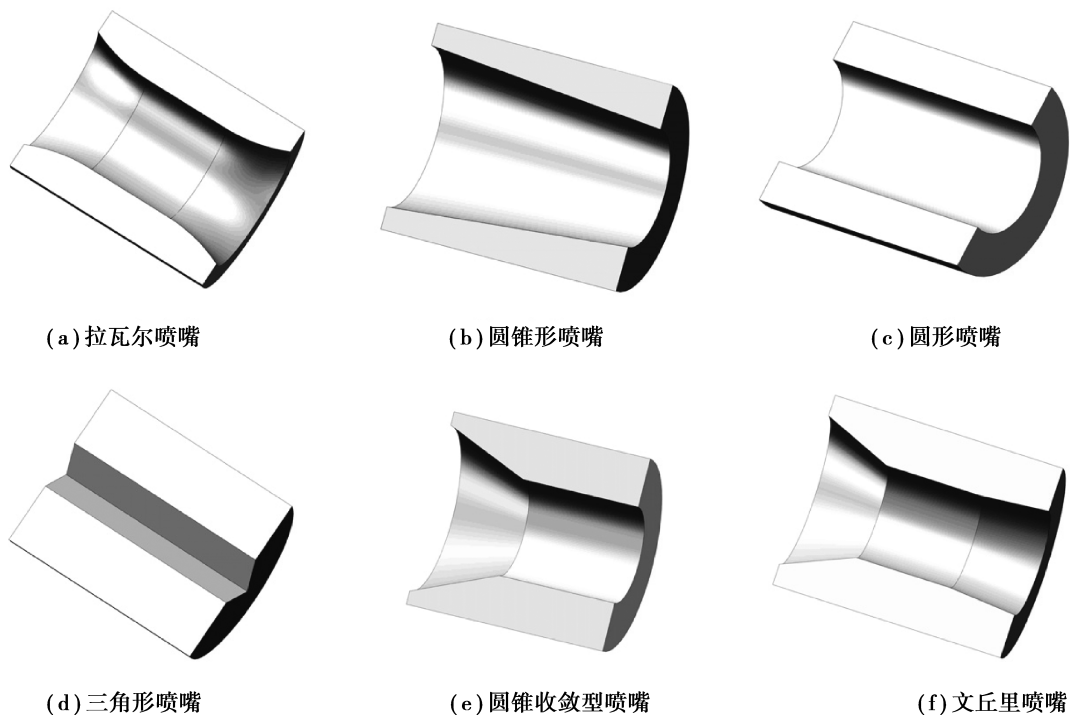


图 9 不同几何形状喷嘴示意图

Fig. 9 Schematic diagram of nozzles with different geometrical shapes

喷嘴的直径为 8.0 mm,数量为 3,依次采用图 9 中不同的几何形状,设定流体出口边界条件为 10 MPa,入口压力为 20 MPa。将上述参数代入 FLUENT 中,计算得到结果列于表 3。

表 3 喷嘴几何形状对局部反循环打捞工具性能的影响

Table 3 Effect of nozzle geometry on performance of the local reverse circulation fishing tool

喷嘴形状	工具内外压差/ MPa	底部入口平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	筛管内部平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	排量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
拉瓦尔喷嘴	0.00	2.92	4.86	1 521
圆锥形喷嘴	-1.02	23.48	27.51	1 425
圆形喷嘴	-0.73	17.70	23.37	960
三角形喷嘴	-0.49	15.82	21.32	664
圆锥收敛型喷嘴	-0.88	20.70	26.76	1 165
文丘里喷嘴	-0.86	19.85	24.64	1 381

从表 3 中可知,不同几何形状喷嘴的局部反循环打捞工具的性能差异较大。将喷嘴换成拉瓦尔喷嘴时,工具内部与环空区之间的压力几乎相等,且在工具内部的流体运动速度较小;安装了圆锥形喷嘴的局部反循环打捞工具的性能最好,此时,工具内部与环空区之间的压差最大,工具内部流体运动速度最大;其次是圆锥收敛型喷嘴,再次是文丘里喷嘴,最差的是拉瓦尔喷嘴。

在相同条件下,不同形状的喷嘴需要的排量不同。与圆形喷嘴比较,在入口压力和出口压力相同的条件下,采用圆锥形喷嘴、圆锥收敛型喷嘴、文丘里喷嘴的局部反循环打捞工具形成的内外压差分别是圆形喷嘴局部反循环打捞工具的 1.40, 1.21 和 1.18 倍,底部入口速度分别是圆形喷嘴局部反循环打捞工具的 1.33, 1.17 和 1.12 倍,筛管内部平均速度分别是圆形喷嘴局部反循环打捞工具的 1.18, 1.15 和 1.05 倍,需要的排量分别是圆形喷嘴局部反循环打捞工具的 1.48, 1.05 和 1.44 倍。

3 结 论

利用计算流体动力学方法模拟了井下作业时局部反循环打捞工具的流场,通过分析局部反循环打捞工具与环空区之间的速度矢量图,揭示了局部反循环打捞工具井下作业的工作原理:利用喷嘴形成的高压水射流的卷吸作用来构成反循环系统。

为提高局部反循环打捞工具性能,基于局部反循环打捞工具工作原理,开展了局部反循环打捞工具结构优化设计数值模拟研究,结果表明:

- 1) 增加喷嘴数量能提高局部反循环打捞工具性能,但是所需排量随之增大。
- 2) 随着喷嘴直径增大,局部反循环打捞工具性能呈现先增加后降低的趋势,当喷嘴直径增加到一定值时,局部反循环打捞工具甚至无法形成反循环系统。
- 3) 改变喷嘴形状会影响局部反循环打捞工具的性能,采用圆锥形喷嘴的局部反循环打捞工具性能最佳,其次为圆锥收敛型喷嘴,最差为拉瓦尔喷嘴;但是采用圆锥形喷嘴的局部反循环打捞工具所需排量较大。

参考文献:

- [1] 徐玉建. 大修磨铣井反循环洗井装置的设计与结构优化[D]. 黑龙江大庆:东北石油大学, 2017.
XU Yujian. The design and structure optimization of reverse circulation flushing device working in the bottom hole of workover well [D]. Daqing, Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2017. (in Chinese)
- [2] 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.
ZHAO Chongzhen. Jet pump principle-based workover fluid direct-reversed circulation reversing drilling tool[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(4): 97-100. (in Chinese)

- [3] 顾长增, 王耀东, 许建国, 等. 小井眼局部反循环及工具的研制应用[J]. 中国西部科技, 2011, 10(35): 27-28,18.
GU Changzeng, WANG Yaodong, XU Jianguo, et al. Development and application of slim hole local reverse circulation and tools [J]. Science and Technology of West China, 2011, 10(35): 27-28,18. (in Chinese)
- [4] 杨义兴. 隔腔式局部反循环打捞篮在元 54-8 井实践与认识[J]. 化工管理, 2016(27): 90.
YANG Yixing. Practice and understanding of partial reverse circulation salvage basket with separated cavity in Well Yuan54-8 [J]. Chemical Enterprise Management, 2016(27): 90. (in Chinese)
- [5] 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.
SHAN Maoqing, WANG Yuzhong, HU Yongxiong, et al. A kind of multi-functional parted reverse circulation working barrel[J]. Well Testing, 2017, 26(2): 47-49,77. (in Chinese)
- [6] 王春生, 何振楠, 徐玉建, 等. 局部反循环打捞装置数值模拟[J]. 河北工业科技, 2018, 35(2): 98-103.
WANG Chunsheng, HE Zhennan, XU Yujian, et al. Numerical simulation of local reverse circulation salvage device[J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2018, 35(2): 98-103. (in Chinese)
- [7] 艾白布·阿不力米提, 庞德新, 郭新维, 等. 连续油管负压打捞管柱研制[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(6): 47-51.
AIBAIBU Abulimiti, PANG Dexin, GUO Xinwei, et al. Development of a coiled tubing negative pressure fishing device[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(6): 47-51. (in Chinese)
- [8] Rezakazemi M. CFD simulation of seawater purification using direct contact membrane desalination (DCMD) system[J]. Desalination, 2018, 443: 323-332.
- [9] Montazeri H, Montazeri F. CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: impact of outlet openings[J]. Renewable Energy, 2018, 118: 502-520.
- [10] Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: guidelines for minimum domain size and azimuthal increment[J]. Renewable Energy, 2017, 107: 373-385.
- [11] Gao Y X, Hong D, Cheng Y W, et al. CFD simulation for up flow jet-loop reactors by use of bi-dispersed bubble model[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 141: 66-83.
- [12] He Z G, Li G S, Wang H Z, et al. Numerical simulation of the abrasive supercritical carbon dioxide jet: the flow field and the influencing factors[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(2): 238-246.
- [13] 廖华林, 李根生, 李敬彬, 等. 径向水平钻孔直旋混合射流喷嘴流场特性分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1895-1900.
LIAO Hualin, LI Gensheng, LI Jingbin, et al. Flow field study on integrating straight and swirling jets for radial horizontal drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1895-1900. (in Chinese)
- [14] Wang H Z, Li G S, Tian S C, et al. Flow field simulation of supercritical carbon dioxide jet: comparison and sensitivity analysis[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(2): 210-215.
- [15] Zhao Q J, Chen X, Ma Y Y, et al. Investigations of synthetic jet control effects on helicopter rotor in forward flight based on the CFD method[J]. The Aeronautical Journal, 2018, 122(1253): 1102-1122.
- [16] 梁兰健, 袁鹏, 李仁军. 增强自由紊动射流卷吸、掺混性能的研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(05): 127-134.
LIANG Lanjian, YUAN Peng, LI Renjun. Research on free turbulent jet's enhancement of entrainment and mixing performance [J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(05): 127-134. (in Chinese)
- [17] 禹言芳, 李春晓, 孟辉波, 等. 不同形状喷嘴的射流流动与卷吸特性[J]. 过程工程学报, 2014, 14(4): 549-555.
YU Yanfang, LI Chunxiao, MENG Huibo, et al. Flow and entrainment characteristics of jet from different shape nozzles[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(4): 549-555. (in Chinese)
- [18] Miller R S, Madnia C K, Givi P. Numerical simulation of non-circular jets[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(1): 1-25.
- [19] Rao S M V, Jagadeesh G. Novel supersonic nozzles for mixing enhancement in supersonic ejectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 62-71.
- [20] Yang X, Long X, Yao X. Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 56: 95-106.