

泵吸式局部反循环取心钻具关键部件研究

陈宗涛^{1,2}, 李 涛¹, 范怡静¹, 贺秋冬¹, 丁 涛¹, 熊 巍¹

(1. 湖北工程学院 机械工程学院, 湖北 孝感 432000; 2. 中国地质大学(武汉)

工程学院, 湖北 武汉 430074)



扫码移动阅读

摘 要:针对现有取心钻具在钻遇松散破碎等复杂地层时岩心采取率不足等问题,研究了泵吸式局部反循环取心钻具的局部反循环效果;运用计算流体动力学(CFD)分析技术对影响局部反循环效果的关键部件——负压部件中右角增大的圆弧半径 R_y 、两齿轮中心距 D 、齿轮转速 N , 3 个关键参数进行数值模拟,采用试验方法检验局部反循环效果。研究表明:体现负压效果的压差 P 受负压部件参数 R_y 、 D 和 N 影响明显;对于 P91 型孔底局部反循环钻具而言,取结构参数 $R_y = 18$ mm, $D = 27.3$ mm, 运动参数 $N = 300$ r/min 是比较理想的参数组合;按优选后的结构参数加工出负压部件,并进行反循环效果试验,试验结果表明,在相同泵量的条件下,泵吸式孔底局部反循环钻具比某射流式孔底局部反循环钻具反循环效果提高了约 30%。

关键词:局部反循环;取心钻具;岩心采取率;负压效果

中图分类号:TD41;P634.4

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)11-0119-07

Research on key components of pump-suction coring drill with local reverse circulation

CHEN Zongtao^{1,2}, LI Tao¹, FAN Yijing¹, HE Qiudong¹, DING Tao¹, XIONG Wei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China;

2. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: To solve the problem of low core recovery percentage when drilling in loose broken stratum using the existing coring drills, the locally reversely cycling performance of pump-suction coring drill with local reverse circulation is investigated. By means of CFD analyses, the effects of three key parameters of the vital component, negative suction part, which are enlarged radius (R_y), center distance (D), and rotational speed (N) on the locally reversely cycling performance were simulated numerically. These simulated effects were examined by experiments. The results show that the pressure difference P which manifests the effect of negative suction is affected significantly by the above three parameters. For the P91 coring drill with local reverse circulation at the hole bottom, the combination of parameters $R_y = 18$ mm, $D = 27.3$ mm, and $N = 300$ r/min leads to an ideal effect. According to the optimized structural parameters, the negative suction parts were manufactured and tested in terms of locally reversely cycling performance. The tests show that with the same pump volume, the local reverse circulation efficiency of the present coring drill is 30% higher than that of fluidic drilling tool with local reverse circulation at the borehole bottom.

Key words: local reverse circulation; coring drill; core recovery percentage; negative-suction effect

0 引 言

当今世界矿产资源紧缺,亟待进一步勘探和开

发。为了清楚地了解深部矿产资源的具体情况,深部取心(样)钻进技术是最直接和最有效的手段,但是随着地质钻探、石油钻井等各种钻探范围的越来

收稿日期:2018-05-22;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.11.019

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划资助项目(Q20172701)

作者简介:陈宗涛(1984—),男,湖北广水人,讲师,博士。通讯作者:熊巍, E-mail:174181461@qq.com

引用格式: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.

CHEN Zongtao, LI Tao, FAN Yijing, et al. Research on key components of pump-suction coring drill with local reverse circulation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11):119-125.

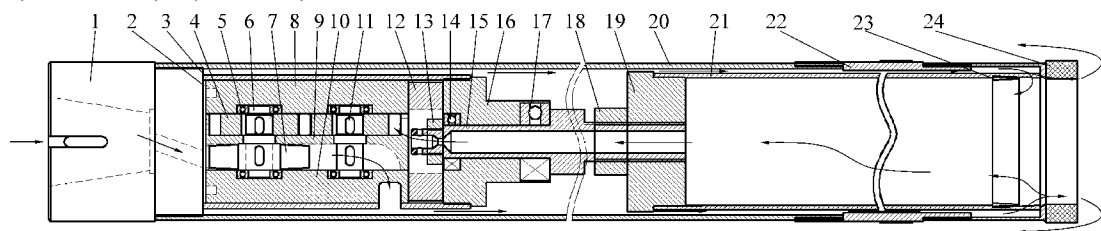
越广,钻遇松散、破碎等复杂地层的情况也越来越多。由于松散破碎等复杂地层的特性,导致普通取心(样)钻进方法难以高质高效采取所需岩心(样)。目前解决松散破碎等复杂地层钻进取心问题的方法之一是采用全孔反循环钻具和孔底局部反循环钻具钻进取心^[1]。现有的全孔反循环取心钻具在钻进取心时破坏岩心原状,难以直接获得岩层真实属性;现有射流式孔底局部反循环钻具因其需要大泵压产生高射流速度来形成负压,且负压效果不明显,特别是在深部钻探压力损失和漏失较大时,严重影响岩心采取质量^[2]。

针对目前反循环取心技术和相关成型产品存在上述缺陷的问题,有必要对松散破碎地层取心钻探进行更深入的研究。为进一步提高孔底反循环取心(样)效果,减小岩心(样)被冲蚀,促进孔底局部反

循环取心(样)这一先进钻进技术的进一步完善和推广应用,笔者所在研究组将机械工业常用的齿轮泵结构应用到局部反循环钻具中,设计了基于泵吸原理的、具有负压效应的孔底局部反循环钻具,并利用齿轮泵的工作原理,在计算流体动力学(CFD)数值模拟的基础上,探讨泵吸原理在提高局部反循环钻具反循环能力上的可行性,研究负压部件结构参数和运动参数对负压效应的影响规律,并通过试验研究实际检验并验证该钻具的适用性,为进一步优化钻具结构提供理论依据,同时也对局部反循环钻具结构形式进行了补充。

1 泵吸式局部反循环钻具结构

泵吸式局部反循环取心钻具结构如图 1 所示。



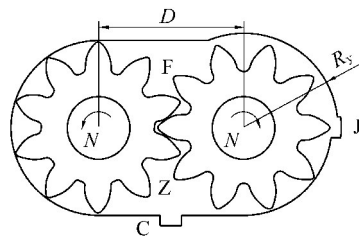
1—接头上端;2—支架盖板;3—接头下端;4—齿轮;5—深沟球轴承;6—轴;7—叶轮;8—支架齿轮侧;9—支架;10—支架叶轮侧;11—键;12—支撑环;13—螺母(小);14—止推轴承(小);15—过渡联通元件;16—过渡元件;17—止推轴承(大);18—螺母(大);19—岩心管接头;20—外管;21—内管(岩心管);22—扩孔器;23—卡簧;24—取心钻头

图 1 泵吸式局部反循环取心钻具结构及钻井液流向

Fig. 1 Schematic of the pump-suction local reverse circulation core drilling tool fluid and drilling fluid flow direction

泵吸式局部反循环取心钻具结合了齿轮泵和双管单动反循环钻具工作原理^[1-3],在普通孔底局部反循环钻具中设计添加负压部件(由支架、支架齿轮侧、支架叶轮侧、齿轮、叶轮、轴、深沟球轴承、键等组成)。该负压部件安装在接头下端的空腔内,负压部件上端连接接头上腰孔,下端接过渡元件、过渡联通元件,经岩心管接头连接内管(岩心管);钻机通过钻杆带动接头、外管、扩孔器和钻头同步旋转钻进,钻具中安装的大小 2 个推力轴承实现双管单动效果。钻井液从钻杆流经接头腰孔,被引导进入负压部件的支架叶轮侧,冲击叶轮叶片使叶轮旋转后,从侧孔排出进入内外管环空,并沿着内外管环空到达钻头处;旋转的叶轮通过轴键配合带动另一面的一对啮合齿轮转动。这对啮合齿轮的转动,以齿轮泵的工作原理在内管中产生负压,形成负压效应,把钻头处的部分钻井液吸入内管,从而造成钻井液的孔底局部反循环,来提高岩心采取质量,钻井液局部反循环流向如图 1 所示。

支架和支架齿轮侧配合形成一个封闭空间,一对啮合的齿轮通过轴安装在该空间内,支架上开设有液体出入口,基于钻具负压部件的结构和钻具实际工作情况,入口设置位置相对齿轮泵有所改变,具体位置如图 2 所示。



D—中心距; R_s —圆弧半径;N—转速;

J—进口;C—出口;F—负压区;Z—正压区

图 2 泵吸式局部反循环取心钻具负压部件结构示意图

Fig. 2 Schematic of negative-pressure suction parts of the pump-suction local reverse circulation core drilling tool

入口连接内管,出口连接内外管环空。叶轮驱动啮合齿轮旋转,实现液体从内管经负压部件入口吸入,

然后经出口排出至内外管环空,实现钻井液由内管向内外管环空的流动,形成钻井液孔底局部反循环。

结合负压部件在局部反循环取心钻具中的实际作用,笔者引入压差参数用来评价泵吸式局部反循环取心钻具的反循环效果,即出口压力 P_e 与入口压力 P_i 的压差 $P(P=P_e-P_i)$ 。 $P=0$ 表示无负压效果产生, $P>0$ 表示有负压效果产生, P 越大表示负压效果越强,则反循环效果越好。

由于改变了齿轮泵入口位置,且齿轮泵内部流场的复杂性以及工作条件的不同,改变后的齿轮泵内部流场特性与改变前亦有所不同,还容易在如图 3 所示的负压区 F 处产生较大负压,而此处的负压会影响齿轮泵的工作效率和压差,为此设置参数 R_y ,即齿轮泵右角增大的圆弧半径,考查改变参数 R_y 对进出口压差 P 的影响;中心距 D 影响着齿轮泵的结构紧凑性、出口流速和压差,也是影响负压效果的关键因素;转速 N 与压差直接相关,也是影响负压效果的关键因素。综上所述,制约泵吸式局部反循环钻具负压部件压差的关键参数有:右角增大的圆弧半径 R_y 、两齿轮中心距 D 和齿轮转速 N 。

2 齿轮泵进出口模型建立

齿轮泵的进出口设计多对称,其内部流场复

$$\rho \frac{du_x}{dt} = \rho f_x + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{du_y}{dt} = \rho f_y + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right] \quad (3)$$

$$\rho \frac{du_z}{dt} = \rho f_z + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right] \quad (4)$$

2.2 几何模型建立及网格划分

根据负压部件的结构特点,采用平面绘图软件绘制 2 个啮合直齿圆柱齿轮平面图形,然后绘制包括进出口在内的泵体轮廓;将该平面图形通过面域、布尔计算得出流体计算区域,计算区域采用三角形网格进行划分^[9-10],模型单元数为 36 000~40 000,网格模型如图 3 所示。

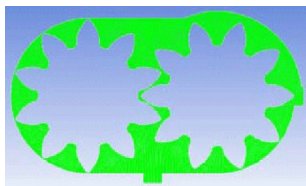


图 3 网格模型

Fig. 3 Meshing model

杂,工作条件多样,改变其进口位置后对其进行数值模拟的文献还不多见。在此,笔者采用 CFD 方法,对泵吸式局部反循环取心钻具负压部件中与反循环效果密切相关的 3 个关键参数 (R_y 、 D 、 N) 进行数值研究,重点关注上述 3 个参数在一定范围内变化时对压差 P 的影响,并对其影响规律进行研究,以探讨将泵吸原理用于局部反循环取心钻具负压部件的可行性,并为优化设计提供最优结构参数。

2.1 数学模型建立

单位时间内流出控制体的流体质量之和等于同一时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量。流体连续性方程的微分形式为^[4-8]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量, m/s ; t 为时间, s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

动量组方程见式(2)、式(3)、式(4)。式中: p 为流体微元上的压强, Pa ; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的单位质量力, m/s^2 ; μ 为动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

2.3 边界及求解

左齿轮逆时针旋转,右齿轮顺时针旋转,右边为进口,下边为出口。设置进口边线段为压力入口边界,设置出口边线段为压力出口边界,设置齿轮轮廓为 wall(墙)边界^[11-13];由于计算流域会随齿轮的转动而变化,所以采用动网格技术^[14-19]。为实现 2 个齿轮的转动,在 VC 中编译好 UDF 文件,并导入 Fluent 中使用^[20-22];钻井液多为水基型,计算流体设置为水,其密度和黏性系数选择默认值^[4]。通过计算,内部压力云图如图 4 所示。

由于参数不多,故采用固定其中 2 个参数,研究另一个参数的变化对压差 P 的影响。改变参数设置将得到不同参数条件下的内部压力云图,然后查看进出口压力,分析该参数变化对 P 的影响。

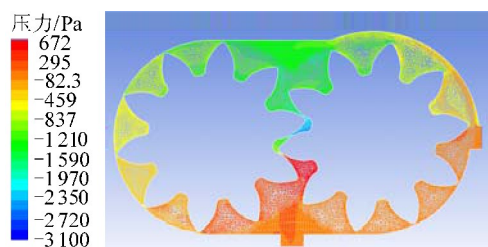


图 4 进出口压力云图

Fig. 4 Import and export pressure nephogram

3 模拟结果分析

3.1 圆弧半径 R_y 变化对压差 P 的影响

中心距是齿轮泵的重要参数。中心距过大则齿轮重合度减小,影响齿轮泵工作效率和运转平稳性;中心距过小,齿轮传动过程中可能造成干涉或阻力过大,根据设计模型取中心距为标准值,即 $D=27.5$ mm;齿轮转速与负压效果密切相关,根据所设计钻具型号和试验时测得的齿轮转速范围,取转速 $N=300$ r/min^[14],现分别讨论 R_y 为 16.5、17.0、17.5、18.0 和 18.5 mm 时,压差 P 与圆弧半径 R_y 之间的关系如图 5 所示。

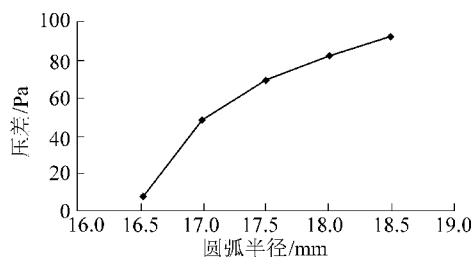


图 5 压差随圆弧半径的变化规律

Fig. 5 Variation trend of pressure difference with respect to arc radius

由图 5 可知:①整个曲线基本单调递增, R_y 由 16.5 mm 增至 18.5 mm 时,压差 P 也随之以 7.01 Pa 增大至 92.64 Pa,增大了 85.63 Pa。需要说明的是,Fluent 软件计算出的压力为相对压力,但是并不影响考查目标——即进出口压差 P 的大小。由于改变了进口位置,在不增大进口与负压区(图 2)之间圆弧半径 R_y 的条件下,齿轮泵工作效率大受影响,导致压差较小;在其他条件相同的情况下, R_y 增大可以提高齿轮泵的工作效率,因而压差 P 也随之增大。②整个曲线虽单调递增,但斜率不同。说明虽然增大 R_y 的值,可以提高压差 P ,但是压差 P 的增大并不和 R_y 成正比,特别是当 R_y 增大到 18 mm 时,其斜率变得更小,表示当 R_y 增大到一定值时,其继

续增大对压差的影响变小。

为了进一步研究 R_y 的变化对压力的影响,笔者还通过云图研究了 R_y 的变化与最大压力 P_{\max} 之间的关系,如图 6 所示。

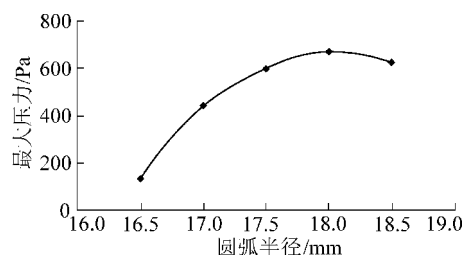


图 6 最大压力随圆弧半径的变化规律

Fig. 6 Variation trend of the maximum pressure with respect to arc radius

由图 6 可知, P_{\max} 先随着 R_y 的增加而增加,到 R_y 为 18 mm 时达到最大,然后 P_{\max} 又随着 R_y 的增大而减小。说明 R_y 的增加对提高进出口压差是有帮助的,但有其合理值,根据所建模型和计算结果推荐取 $R_y=18$ mm。

3.2 D 变化对 P 的影响

根据上述 R_y 对 P 的影响研究可知,在其他条件相同的情况下, $R_y=18$ mm 时 P 达到最大值,故取 $R_y=18$ mm;同理取 $N=300$ r/min,分别讨论 D 为 27.3、27.5、27.7 和 27.9 mm 时,压差 P 与中心距 D 的关系,如图 7 所示。

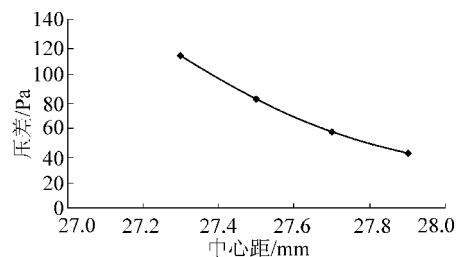


图 7 压差随中心距的变化规律

Fig. 7 Variation trend of pressure difference with respect to center distance

由图 7 可知:整个曲线单调递减, D 由 27.3 mm 增加至 27.9 mm,压差 P 反而由 114.79 Pa 减小至 41.72 Pa。齿轮泵计算中心距为 27.5 mm,当安装时减小为 27.3 mm 时,压差 P 为 114.8 Pa,说明中心距的减小能够导致进口腔与出口腔压差增大,有利于齿轮泵负压效果的提高,但是中心距过小其最大压力也会随之增大,可能加剧“困油”和产生干涉。当安装中心距大于标准值 27.5 mm 时,压差会随之减小,说明齿轮泵中心距安装过大,引起泄漏现象,影

响齿轮泵的工作效果,根据模型和计算结果推荐取 $D=27.3$ mm。

3.3 N 变化对 P 的影响

根据上述 R_y 和 D 对 P 的影响研究结果,取 $R_y=18$ mm, $D=27.5$ mm, 分别讨论转速 N 为 100、150、200、250 和 300 r/min 时,压差 P 与 N 之间的关系,如图 8 所示。

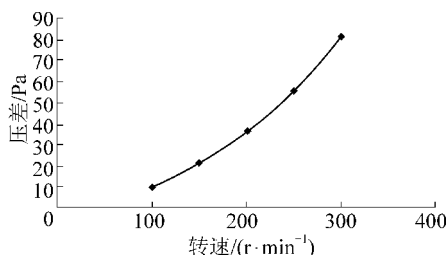


图 8 压差随转速的变化规律

Fig. 8 Variation trend of pressure different with respect to rotation rate

由图 8 可知,整个曲线单调递增, N 由 100 r/min 增大至 300 r/min,压差 P 也随之由 10.56 Pa 增大至 81.85 Pa,增大了 71.29 Pa。说明转速的变化能够引起进出口压差的正向变化,要增大泵的负压效应,可以考虑使用提高转速的方法;由图 8 还可知,相邻 2 点之间连线的斜率不同,转速越大的 2 点间连线其斜率也越大,这说明转速对齿轮泵的压差影响明显,且转速越大,影响越明显。为了进一步研究转速对压力的影响,笔者还研究了转速 N 与泵内最大负压(即最小压力) P_{\min} 之间的关系,如图 9 所示。

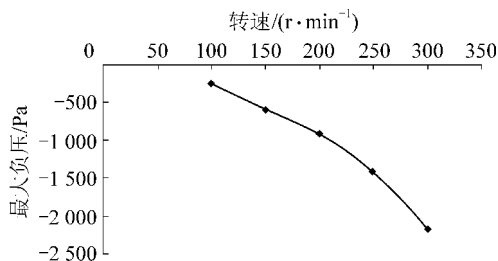


图 9 最大负压随转速的变化规律

Fig. 9 Variation trend of the maximum negative pressure with respect to rotation

由图 9 可知,整个曲线呈单调变化,随着转速 N 由 100 r/min 增大至 300 r/min,其最大负压 P_{\min} 也由 -252 Pa 变化至 -2 160 Pa,且曲线陡峭程度增加;说明转速 N 对负压的影响明显,且转速越大,影响越明显;负压过大容易引起泵内的气蚀现象,从而影响齿轮泵的工作效率和负压效果。综合图 8 和图 9 分析结果可知,提高转速 N 有利于提高压差 P ,但是

转速的提高有其合理范围,根据模型和计算结果推荐取 $N=300$ r/min,试验表明泵量为 145 L/min 时基本达到该转速。

3.4 R_y 、 D 和 N 变化对 P 影响显著性分析

由上述分析结果可知,体现负压效果的压差 P 受负压部件参数 R_y 、 D 和 N 影响明显。为了进一步研究 3 个参数对压差 P 影响的显著性,对 R_y 、 D 、 N 在变化范围内进行归一化处理,所得结果如图 10 所示。

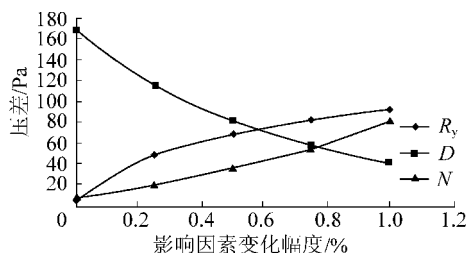


图 10 不同因素影响的显著性

Fig. 10 Significance of the different factors effects

由图 10 可知,在影响因素变化幅度的前 50% 范围内, D 的曲线变化较为陡峭, R_y 的曲线变化次之, N 的曲线变化较平缓;在影响因素变化幅度的后 50% 范围内, N 的曲线变化较为陡峭, R_y 的曲线变化次之, D 的曲线变化较平缓。这说明在各参数取值范围内前 50% 的变化范围中, D 对 P 的影响较为显著, R_y 对 P 的影响次之, N 对 P 的影响较小;在各参数取值范围内后 50% 变化范围中, N 对 P 的影响较为显著, R_y 对 P 的影响次之, D 对 P 的影响较小。

4 钻具试验结果与分析

根据优化结果,加工出负压部件实物,在中国地质大学(武汉)工程学院钻探大厅进行试验,验证负压效应的产生,同时将本文设计、优化的钻具其反循环性能和现有某射流式钻具(2 个钻具内、外管的内外径相近)反循环性能进行对比分析。钻具工作时产生的负压能力是钻具反循环效果的直接体现,为了测试钻具的反循环效果,特设计一负压效果测试装置,试验原理如图 11a 所示。

将钻具内管浸没于水中,在钻具内管中放置 1 个玻璃管,玻璃管管口高于内管中液面,并通过橡胶软管连接外面的玻璃管一端,外玻璃管另一端置于一盛水容器中,且外玻璃管管端浸入水中,这样就形成了相对密封的连通装置,钻具中负压部件运行后,由于泵吸作用使钻具内管中压强小于外界大气压,从而迫使外玻璃管中的液柱上升,通过液柱上升高度即

刻测试出内管中负压值。试验过程如图 11b 所示。

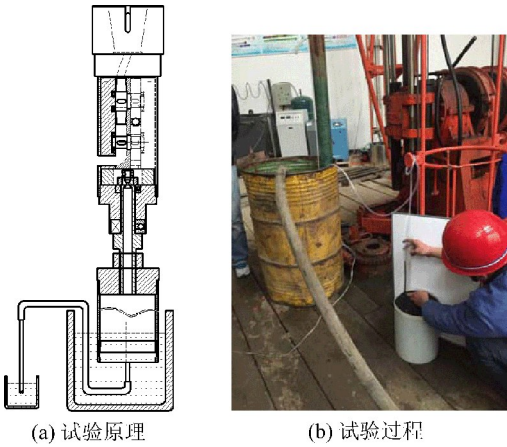


图 11 钻具测试装置及现场

Fig. 11 Experimental equipment and site of drilling tool

为了验证笔者设计的泵吸式钻具的性能,采用对比研究的方法,在同样的试验条件下,测试了泵吸式钻具和现有某射流式钻具反循环效果,并进行对比分析。射流式钻具在泵量为 90 L/min 时,负压效果最好,液柱高度最高为 12 cm^[14],现比较 2 种钻具在泵量为 90 L/min 时的负压效果,试验记录数据见表 1。

表 1 2 种钻具室内试验记录数据

Table 1 Date form of two kinds of drilling tool laboratory test

项目	某射流式钻具	泵吸式钻具
泵量/(L·min ⁻¹)	90	90
液柱高度/cm	10~12	15~16

由表 1 可知,泵吸式钻具的负压液柱高度要高于某射流式钻具的液柱负压高度。根据测试原理可知,液柱高度代表了反循环效果的强弱,说明在相同泵量下泵吸式钻具反循环效果要优于某射流式钻具反循环效果,反循环效果提高了约 30%。

5 结 论

1) 结合齿轮泵和普通单动双管局部反循环取心钻具工作原理,设计了一套基于泵吸原理的孔底局部反循环取心钻具,并对其关键部件——负压部件进行了结构参数分析和优化,引入压差的概念来考查该负压部件的局部反循环效果。分析计算表明,该钻具能够实现钻井液的孔底局部反循环效果,且用进出口压差的方式来考查反循环效果的好坏是可行的。

2) CFD 软件分析结果表明压差 P 受 R_y 、 D 、 N

影响较为明显,但作用效果不同。随着 R_y 的增大, P 也增大,整个曲线单调递增,但是曲线斜率逐渐减小,说明 R_y 刚开始增大时,对 P 影响较明显,往后则影响慢慢变小;随着 D 的增大, P 反而减小,整个曲线单调递减,说明安装时选取较小的中心距对提高压差 P 是有益的; N 对 P 的影响较为明显,随着 N 的增大, P 也增大,整个曲线单调递增,且曲线斜率逐渐增大,说明 N 越大,对 P 的影响越大。

3) CFD 软件分析结果表明压差 P 受 R_y 、 D 和 N 综合影响,所以在设计钻具的负压部件时,须将所有因素综合考虑。对于本文分析的取心钻具来说,选用 $R_y = 18$ mm, $D = 27.3$ mm 是比较理想的结构参数组合。

4) 试验发现泵吸式反循环钻具反循环试验效果比现有某射流式钻具反循环效果提高了约 30%。

参考文献 (References):

[1] 刘成才.喷射式局部反循环绳索取心钻具[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2008(9):35-36.
LIU Chengcai.Wire-line coring drilling tool with local rejecting reverse circulation [J]. Exploration Engineering: Rock and Soil Drilling Engineering,2008(9):35-36.

[2] 胡正毅.空气孔底局部反循环电动机机械冰层取心钻具研究[D].长春:吉林大学,2015:3-5.

[3] 马 征.绳索取心反循环钻具的结构设计及孔底喷反数值流场分析[D].长春:吉林大学,2014:14-25.

[4] 江 帆,黄 鹏.Fluent 高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008:263-269.

[5] 张 勇,王和顺,朱维兵,等.外啮合齿轮泵内部流场的数值分析[J].矿山机械,2012,40(1):95-99.
ZHANG Yong, WANG Heshun, ZHU Weibing, et al. Numerical analysis on flow field inside externally-meshed gear pump[J]. Mining Machinery,2012;40(1):95-99.

[6] 范黎明,殷 琨,张永光,等.基于引射原理的侧吸式反循环钻头结构参数数值研究[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(1):220-226.
FAN Liming, YIN Kun, ZHANG Yongguang, et al. Numerical investigation of geometry parameters on side-ejector DTH hammer RC bit [J]. Journal of central South University: natural Science Edition,2011;42(1):220-226.

[7] 吕亚国,刘振侠,黄 健.外啮合齿轮泵内部两相流动的数值模拟[J].润滑与密封,2012,37(1):17-21.
LYU Yaguo, LIU Zhengxia, HUANG Jian. Numerical Simulation of two-phase flow in external gear pump[J]. Lubrication Engineering, 2012;37(1):17-21.

[8] 孔繁余,何玉洋,郑 德,等.外啮合齿轮泵流量特性影响因素分析[J].排灌机械工程学报,2014,32(2):108-111.
KONG Fanyu, HE Yuyang, ZHENG De, et al. Analysis of influence

- factors on flow rate characteristics in gear pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(2):108-111.
- [9] 吕程辉,杜睿龙,谢安桓,等.内啮合齿轮泵流场的数值模拟[J].*液压与气动*,2015(7):107-110.
LYU Chenghui, DU Ruilong, XIE Anhuan, *et al.* Numerical simulation of internal gear pump flow field [J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2015(7):107-110.
- [10] HOUZEAUX G, CODINA R. A finite element for solution of rotary pumps [J]. *Computers & Fluid*, 2007, 36(4):667-679.
- [11] ZHU Yin Hai, CAI Wenjian, WEN Changyun, *et al.* Numerical investigation of geometry parameter for design of high performance ejectors [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5):898-905.
- [12] BARTOSIEWICZ Y, AIDOUN Z, ETC P D. Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2005(26):56-70.
- [13] CHUNG M. Cartesian cut cell approach for simulating incompressible flows with rigid bodies of arbitrary shape [J]. *Computers & Fluids*, 2006, 35(6):607-623.
- [14] 黄帆,梁俭,高元宏,等.喷射式局部反循环钻具结构参数数值模拟[J].*地质科技情报*,2016,35(4):213-218.
HUANG Fan, LIANG Jian, GAO Yuanhong, *et al.* Numerical simulation of structural parameters of jet reverse partial circulation drilling tool [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(4):213-218.
- [15] MANSOURI A, ARABNEJAD H, SHIRAZI S A, *et al.* A combined CFD/experimental methodology for erosion prediction [J]. *Wear*, 2015, 332/333:1090-1097.
- [16] PARSI M, NAJMI K, NAJAFIFARD F, *et al.* A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21:850-873.
- [17] SHEKARI Y, HAJIDAVALLOO E, BEHBAHANI-Nejad M. Reduced order modeling of transient two-phase flows and its application to upward two-phase flows in the under-balanced drilling [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2013, 224:775-790.
- [18] NGUYEN Q B, NGUYEN V B, LIM C Y H, *et al.* Effect of impact angle and testing time on erosion of stainless steel at higher velocities [J]. *Wear*, 2014, 321:87-93.
- [19] SHEKARI Y, HAJIDAVALLOO E. Application of Osher and PRICE-C schemes to solve compressible isothermal two-fluid models of two-phase flow [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 86:363-379.
- [20] HAN S, HWANG Y, WOO N, *et al.* Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 70(3/4):308-319.
- [21] NGUYEN V B, NGUYEN Q B, LIU Z G, *et al.* A combined numerical-experimental study on the effect of surface evolution on the water-sand multiphase flow characteristics and the material erosion behavior [J]. *Wear*, 2014, 319(1/2):96-109.
- [22] 余志宏. 基于 Fluent 的喷射器数值模拟与结构优化研究 [D]. 无锡:江南大学,2011:3-10.