内喷孔式反循环钻头结构优化设计及 CFD 模拟分析

于 航,殷 琨,罗永江,甘 心

(吉林大学建设工程学院,吉林长春130026)

摘 要:为解决贯通式潜孔锤反循环连续取心(样)技术在钻进"硬、脆、碎"等复杂地层时反循环排不出渣或者排 渣不彻底的现象,在现有贯通式潜孔锤反循环连续取心钻头结构的基础上,优化设计一种新型内喷孔式反循环钻 头,能在孔底形成强有力的多股引射抽吸流场,并模拟分析了内喷孔轴线水平偏角和内喷孔轴线与钻头中心的偏 距2个结构参数对新型反循环钻头结构抽吸能力的影响。通过模拟分析的验证,此种反循环钻头的结构更加简 单,反循环效果比较优良。

关键词:反循环;内喷孔;反循环取心钻头;CFD 模拟分析

中图分类号:P634.4⁺1 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2013)01-0049-04

Optimal Design of Internal Jet Orifice Reverse Circulation Bit and CFD Simulation Analysis/YU Hang, YIN Kun, LUO Yong-jiang, GAN Xin (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China) **Abstract:** With hollow-through DTH hammer reverse circulation continuous coring (sample) technology, slagging or half-way slagging while drilling in the "hard, brittle, broken" complex formations are often encountered; to solve these problems, a new type of internal jet orifice reverse circulation bit was optimally designed on the basis of the existing hollow-through DTH hammer RC bit, which can form the powerful multilevel injection-suction fluid field. The article also imitates and analyzes the influence of 2 structural parameters of internal jet orifice level angle and the offset distance between internal jet orifice axis & the bit midpoint to the suction capacity of new RC bit structure. The simulation analysis has verified that the structure of such a RC bit is simpler with good reverse circulation effect.

Key words: reverse circulation; internal jet orifice; reverse circulation coring bit; CFD simulation analysis

0 前言

贯通式潜孔锤反循环连续取心钻进技术是一种 集成化的高新钻探技术,它集潜孔锤高效碎岩、流体 介质全孔反循环、钻进中连续取心3种先进钻探技 术于一体,效率可达到常规钻探方法的6~10倍^[1]。 该技术依靠其高效率、岩矿心质量好、低成本、不用 提钻实时取样、取样率高而准等优势,现已经成为矿 产资源勘探行业使用最广泛的方法,并广泛应用于 地质勘探领域^[2]。

在应用贯通式潜孔锤反循环连续取心技术进行 正常钻进时(尤其是破碎、漏失地层),需要解决的 一项问题是由于环空漏失而导致的岩样丢失和长期 积累造成的钻孔缩径引起的卡钻、钻具折断等孔内 事故。因此,反循环形成的是否彻底是这项技术能 否广泛应用的关键性问题^[3]。反循环钻头既是进 行孔底碎岩的工具,又能够促使孔底流体形成反循 环,因此研制专用的反循环钻头是实现潜孔锤反循 环钻进的关键。为了提高反循环形成的效果,对反 循环钻头进行结构优化设计,并对反循环钻头结构 参数进行深入研究以完善反循环取心工艺是十分有 价值的^[4,5]。

1 反循环钻头结构的改进设计

目前,较为先进和广泛应用的反循环钻头是引 入气体引射器的反循环钻头(图1)。此种钻头较以 往钻头设置了可以促进反循环形成的内喷孔。这样 反循环钻头体上的主要流体通道为底喷孔、内喷孔 和中心通道^[5]。其中底喷孔与内喷孔组合形成了 气体进入中心孔的通道,在从地表高压注入的压缩 气体驱动潜孔锤活塞做功后,一部分气体经由底喷 孔进入井底冷却钻头,并携带大量岩屑进入中心孔 通道,而另一部分气体则从内喷孔以射流形式直接 进入中心孔通道,形成了良好的反循环效果^[6,7]。 增加的内喷孔既可以利用高速气体射流的卷吸作用 对井底进行强有力的抽吸,使井底形成了局部负压 区,大大提高了反循环的排渣能力,另外还通过内喷

收稿日期:2012-11-02

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DK0003042)

作者简介:于航(1989-),女(汉族),吉林磐石人,吉林大学硕士在读,地质工程专业,研究方向为多工艺潜孔锤钻进技术,吉林省长春市西 民主大街 938 号吉林大学朝阳校区建设工程学院 2011 级硕,153571812@qq.com。

孔进行分流,相应减少经底喷孔进入井底的大流量 气体,使反循环效果得到提高。因此内喷孔的创新 设计尤为重要^[8]。



改进的钻头结构是在现有的反循环钻头的基础 上进行设计的。为了进一步提高反循环的效果,将 现有的反循环钻头的底喷孔和喷嘴等结构去掉,仅 留下内喷孔,驱动完潜孔锤做功的高压气体不经孔 底,直接从内喷孔流入中心孔通道,并利用多股抽吸 射流的原理,在井底形成局部负压区,对孔底形成强 力的卷吸作用,从而携带岩屑、岩渣进入中心通道, 实现反循环。若用反循环钻头对环空间隙气体的抽 吸强度来评价反循环能力,则通过使用反循环实验 器进行的验证,内喷孔式反循环钻头对环空有着强 力的抽吸作用,反循环排渣效果极好[3].因此,对这 种钻头结构进行详细的数值模拟研究是十分必要 的。本文主要讨论了内喷孔轴线水平偏角 θ 和内喷 孔轴线与钻头中心的偏距 d 对新型反循环钻头结构 抽吸能力的影响开展了一系列的数值模拟分析工作 (见图2)。



图 2 新型的内喷孔式反循环钻头

2 内喷孔式反循环钻头数值模拟分析

随着计算机技术和数值计算方法的快速发展, 计算流体动力学(CFD)技术越来越多地应用于流场 分析。由于压缩空气经钻头内喷孔以高速射流的形 式进入钻头的中心孔,这将导致反循环钻头局部流 场的流动形态复杂化。为了进行详细分析,本文采 用 CFD 技术对反循环钻头局部流场进行仿真分析。

2.1 数学模型

运用 CFD 技术研究压缩空气在钻头内的流动 问题需要的物理守恒方程包括:质量守恒方程(连续性方程)、动量守恒方程和能量守恒方程这3个 基本方程^[12]。

(1) 质量守恒万程(连续性万程):

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

(2) 动量守恒方程:
 $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\mu\rho u) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{ggrad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u$
 $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\mu\rho u) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{ggrad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v$
 $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\mu\rho u) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{ggrad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w$
(3) 能量守恒方程:
 $\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \operatorname{div}(T\rho u) = \operatorname{div}(\frac{k}{c_v} \operatorname{grad} gT) + S_T$

式中: ρ —流体密度;t——时间;u——速度矢量; u,v,w——速度矢量在x,y,z方向上的速度分量; μ ——动力粘度;p——作用在流体微元体上的压强; k——流体传热系数; S_r ——粘性耗散项; c_p ——比 热容; S_u,S_v,S_w ——动量守恒方程的广义源项。

2.2 几何模型及网格划分

通过对以往试验结果进行研究后决定在钻头的 花键槽上均匀布置4个内喷孔。为了进行内喷孔式 反循环钻头 CFD 数值模拟分析则要建立反循环钻 头局部流场几何模型。为了研究新型内喷孔式反循 环钻头的反循环形成效果,本文将分别求解内喷孔 轴线水平偏角θ为30°、45°、60°和内喷孔轴线与钻 头中心的偏距为0、3、6、9、10.33 mm的不同参数组 合下的情况。

本文采用 Solidworks 对钻头底部流体域进行三 维建模,其简化后主要分为5部分流体区域,如图3 所示。然后再将三维模型导入 GAMBIT 软件里进行 网格加密划分,并在内壁面生成了附面层网格,对网



格进行自适应计算,最后生成总数约为50万的四面体网格。

2.3 边界条件与求解控制

把钻头体花键空间入口采用质量入口边界条件,输入质量流量(0.1225 kg/s^[9])、温度、静压力、 流动方向、湍流系数等。中心孔通道上端面和外环 间隙上端面均采用压力出口边界条件,允许有回流, 输入静压力和回流条件等参数。其他表面采用壁面 边界条件,采用标准壁面函数法^[10]。

本文采用耦合隐式计算方式,它对于高速可压

缩流动的计算结果更好,采用 K – epsilon 湍流模型 计算,采用二阶精度迎风格式离散控制方程中的粘 性项、中心差分格式离散扩散项、二阶格式离散对流 项^[11]。

2.4 计算结果处理

2.4.1 中心轴线上的静压力分布

为了揭示不同模型内部流场的特征,分析各模型内部的压力分布情况,在各模型的中心孔轴线上 建立了一条路径,该路径上的静压力分布曲线如图 4 所示。



由图4可知:

(1)在内喷孔水平偏角θ相同的条件下,不同 偏距产生的静压力有较为明显的差别,随着偏距的 增大,中心孔轴线上的静压力值就越小,且为负压, 这样更有利于孔底的岩心(样)上返。

(2)在内喷孔水平偏角 θ为45°,偏距为10.33 mm时,中心孔轴线上的负压值最大;而且总体来 看,内喷孔水平偏角为45°时,中心孔轴线上的负压 值要比水平偏角为30°和60°时的负压值要大,岩心 (样)上返更容易。

2.4.2 中心孔纵向剖面上的速度分布

为了进一步分析研究不同组合参数下内喷孔形 成的多股射流在中心孔内的流动形态,取过中心孔 轴线的纵向剖面为研究对象,则不同内喷孔轴线水 平偏角θ与内喷孔轴线与钻头中心偏距参数组合模 型的纵向剖面上的速度分布云图如图5所示。

由速度分布云图可知:

(1) 在反循环钻头中心孔内,多股射流因卷吸 周围流体发生动量交换和质量传递并沿着上升方向 不断扩散,而气体流速逐渐降低。

(2)在内喷孔水平偏角 θ 相同时,随着内喷孔 偏距的增大,中心孔内上升流速整体变大;而在内喷 孔偏距相同时,随着内喷孔水平偏角 θ 的增大,中心 孔内上升流速也增大。当内喷孔水平偏角 θ 为 60°,偏距为 10.33 mm 时,中心孔内气体上升流速 最快、最均匀。



(3)在偏距为0 mm 时,无论水平偏角 θ 多大, 模型中多股射流的扩散区域朝着截面中心运动并相 交于一起,彼此因相互碰撞而产生径向辐射扩散;偏 距为 10.33 mm(内喷孔与中心孔相切)时,中心孔 内的多股射流贴附着中心孔壁向上运动,上升过程 中逐渐向中心扩散,钻头中心孔的中心区始终处于 低速区,中心孔壁面附近始终处于高速区。

2.4.3 新型内喷孔钻头的抽吸能力

为了确定不同内喷孔轴线水平偏角 θ 与内喷孔 轴线与钻头中心偏距参数组合对抽吸特性的影响规 律,一般来说,可以定义流体模型外环间隙出口处质 量流量与花键空间入口处质量流量的比值为抽吸系 数,但鉴于不同模型下的花键空间入口处的质量流 量是一致的,则可以把外环间隙出口的质量流量作 为评价抽吸能力的指标。

分析中采用流体指向孔底方向作为正向,背离孔 底方向为负向。将不同内喷孔轴线水平偏角 θ 与内 喷孔轴线与钻头中心偏距参数组合下的分析数据总 结得出表1,质量流量变化规律曲线如图6 所示。

表1 不同水平偏角 θ、偏距组合下的环空间隙质量流量

偏角	偏距	外环间隙出口处质	偏角	偏距	外环间隙出口处质
/(°)	/mm	量流量/(kg• s ⁻¹)	/(°)	/mm	量流量/(kg• s ⁻¹)
30	0	- 0. 008559670	45	9	0.010020621
30	3	0.008690332	45	10.33	0.007036173
30	6	0.011665429	60	0	0.018784011
30	9	0.004913767	60	3	0.018493259
30	10.33	0.012044781	60	6	0.017843774
45	0	0.014240368	60	9	0.016121885
45	3	0.014562553	60	10.33	0. 021543719
45	6	0 014274991			



图 6 不同水平偏角 θ 和偏距下外环间隙出口处质量流量变化曲线

数值模拟结果表明:

(1)内喷孔的抽吸能力与内喷孔的水平偏角 θ 密切相关,随着水平偏角的增大,抽吸能力越强(质量流量变大),反循环形成越好。而当内喷孔水平 偏角 θ 为 30°、偏距为0时的结构参数组合的外环空 质量流速为负值,即压缩空气向上流出的质量流量 大于向下流入的质量流量,该参数组合下的模型起 不到抽吸效果,反循环效果不好,出现正循环。当内 喷孔轴线水平偏角为 60°时,抽吸能力最强(外环间 隙质量流量最大),反循环效果最好。

(2)由图 6 可见,在不同水平偏角 θ 条件下,外 环间隙出口处的质量流量随着偏距增大而产生的变 化曲线是不同的,进而表明抽吸能力的变化曲线也 不同的。当水平偏角为 30°时,随着偏距的增大,质 量流量先增大后减小再增大,最大值出现在 10.33 mm 处;当水平偏角为 45°时,质量流量开始处于平 稳状态而后不断减小,最大值出现在 3 mm 处;当水 平偏角为 60°时,质量流量先处于稳定状态,然后减 小后增大,最大值出现在 10.33 mm 处。

3 结论

本文对贯通式反循环钻头进行了一些结构改进 与优化。新钻头取消了现有反循环钻头的底喷孔与 喷嘴结构,仅留下了内喷孔。本文分析了内喷式反 循环钻头内喷孔轴线水平偏角θ和内喷孔轴线近中 心端点与钻头中心的偏距这2个参数对新型反循环 钻头结构抽吸能力的影响,并对该钻头内部流体的 局部流场进行了 CFD 数值模拟分析。模拟结果表 明,该钻头体结构具有一定的改善孔底流场的作用, 根据多股引射原理,可以在孔底形成一定的负压区, 抽吸岩心(样)上返进入钻头中心孔道,提高反循环 形成能力,实现了钻头结构优化的效果,并通过综合 分析钻头局部流场区域的静压力值、速度值和抽吸 能力(质量流量值)得出:当内喷孔轴线水平偏角θ 为60°,内喷孔轴线近中心端点与钻头中心的偏距 为10.33 mm 时,钻头的反循环效果最好。

本文就新型钻头的2个重要参数进行了模拟研究,有一定进展,但仍需要对钻头结构进行更进一步的分析研究,并在工程实例应用中得到验证,从而能够解决贯通式潜孔锤反循环连续取心(样)技术在钻进"硬、脆、碎"等复杂地层时反循环排不出渣或者排渣不彻底的现象。

参考文献:

- [1] 任红.贯通式潜孔锤反循环连续取心钻进取心机理研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2008.
- [2] 殷琨.深化反循环工艺研究,促进钻探科技快速发展[J].探矿 工程(岩土钻掘工程),2006,33(3).
- [3] 范黎明.贯通式潜孔锤钻头反循环机理研究及结构优化[D]. 吉林长春:吉林大学,2011.
- [4] 博坤.贯通式潜孔锤反循环钻进技术试验及钻头流场分析 [D].吉林长春:吉林大学,2005.
- [5] 刘建林.气体钻井用贯通式潜孔锤关键技术研究[D].吉林长春:吉林大学,2009.
- [6] 黄勇,殷琨,博坤.空气潜孔锤反循环钻头试验研究[J].凿岩 机械气动工具,2009,(1).
- [7] 郝树青,殷琨,王清岩,等.基于 fluent 的钻头体内部流场数值 模拟与实验研究[J].钻采工艺,2007,(1).
- [8] 范黎明,殷琨,张永光.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,(1).
- [9] 郝树青,殷琨,王清岩,等.引射孔倾角与孔径对钻头体反循环 形成影响的仿真分析与实验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工 程),2006,33(5).
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [11] 刘建林.专用反循环钻头内喷孔结构设计研究[J].石油机 械,2012,(6).
- [12] 范黎明,殷琨,张晓光,等.潜孔锤钻进空口密封器流场数值模 拟及优化设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,(3).
- [13] 黄勇,殷琨,朱丽红.大直径潜孔锤气力反循环流体速度与压 力模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,(9).