

文章编号: 1001-1986(2012)03-0082-04

大直径反循环钻头底面形状设计

刘建林¹, 殷 琨²

(1. 中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安 710077;

2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 针对大直径反循环钻头底面形状对反循环形成效果的影响, 分析了反循环钻头孔底循环介质流动的特点; 基于反循环钻头孔底流动模拟实验器对凸面型、凹面型和凸凹组合型 3 种典型的钻头底面形状进行了对比测试; 运用 CFD 技术对不同底面形状反循环钻头孔底局部流场进行了数值模拟, 揭示了其各自的流动特征及影响反循环形成效果的机理。实验结果表明, 凹面型钻头底面形状更有利于反循环的形成。反循环钻头底面形状设计研究对改善和提高大直径反循环钻头的性能具有重要的意义。

关键词: 反循环钻头; 底面形状; 实验测试; 数值模拟

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.03.020

Design of undersurface figure for large-diameter reverse circulation drill bit

LIU Jianlin¹, YIN Kun²

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China;

2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Aiming at the reasonable structure design of large-diameter reverse circulation drill bit used in gas drilling, research on the relationship between undersurface figure of reverse circulation drill bit and forming effect of reverse circulation was carried out in this paper. Firstly, the flow characteristics of compressed air under reverse circulation drill bit were analyzed. Then the experimental tests were done with experimental apparatus for hole-bottom flow field simulation of special reverse circulation drill bit, three types of undersurface figure: convexity, concave and combination of convexity and concave were designed for reverse circulation drill bit and tested with regard to forming effect of reverse circulation, the results show that concave undersurface figure is beneficial to formation of reverse circulation. Finally, with CFD technology, the numerical simulation of bottom flow field formed by reverse circulation drill bit with different undersurface figure was done, which exposes the flow characteristics of compressed air under the drill bit and the mechanism of reverse circulation forming affected by undersurface figure. The research on the undersurface figure design is helpful to improve the performance of large-diameter reverse circulation drill bit.

Key words: reverse circulation drill bit; undersurface figure; experimental test; numerical simulation

常规空气锤钻井技术的成功应用为气动潜孔凿岩工具的发展和使用提供了更加广阔的空间^[1-2]。贯通式潜孔锤作为一类具有特殊结构形式的潜孔凿岩工具, 在油气勘探开发气体钻井领域具有广阔的应用前景。贯通式潜孔锤全孔反循环钻进工艺应用于油气勘探开发气体钻井领域, 面对深孔、大孔径的客观使用条件, 需研制开发性能良好的大直径贯通式潜孔锤、专用反循环钻头、双壁钻具及配套钻进工艺。

专用反循环钻头是实施贯通式潜孔锤全孔反循环钻进工艺的关键部件。在大直径井(孔)施工中, 反循环钻头的作用则更为重要。因为在大直径条件

下, 孔内钻具系统与孔壁之间环状通道的流动阻力相对较小, 流体介质正循环流动趋势增强; 同时, 孔壁附近大量岩屑向钻头中心反循环通道运移路程增长, 反循环排渣的难度增大, 致使反循环钻头的性能随其直径增大而逐渐变差。研制大直径专用反循环钻头的核心问题是如何形成良好稳定的反循环, 而这一问题的解决将有赖于反循环形成机理的进一步深入研究和反循环钻头结构的创新设计。

本文通过室内实验测试和数值模拟计算两种方式, 研究了反循环钻头底面形状对反循环形成效果的影响。

1 反循环钻头与射流冲击流动

专用反循环钻头是基于多喷嘴引射器原理设计而成的。经过不断深入的理论研究、室内实验、数值模拟及大量生产实践,对反循环钻头进行改进和完善,目前已研制成功多种规格、不同结构类型的专用反循环钻头^[3-4]。

目前,与GQ系列贯通式潜孔锤配套使用的反循环钻头底面形状均为平面型,即钻头本体底面法线与钻头体中心轴线平行。贯通式潜孔锤用于地质勘探钻进领域时,依施工小口径钻孔的客观要求,反循环钻头体直径都比较小($\Phi 85\text{ mm} \sim \Phi 132\text{ mm}$),加之底面上设有大断面的反循环排渣通道,受几何尺寸限制难以进行其他形式的底面形状设计。贯通式潜孔锤用于油气勘探开发气体钻井领域时,反循环钻头体直径较大($\Phi 444.5\text{ mm}$),使得设计其他类型的底面形状成为可能。

国外常规空气锤钻进用合金柱齿钻头的底面形状有凹面、平面、凸面3种基本类型,并有由此衍生的组合类型。应用实践表明,不同底面形状的空气锤合金柱齿钻头在对不同硬度地层的适应性、防斜效果、机械钻速、孔底清洁及其自身使用寿命等方面存在很大差异^[5-6]。对于气体钻井用大直径反循环钻头底面形状设计而言,不仅要考虑它的地层适应性、防斜效果,更重要的是研究不同类型钻头底面形状对反循环形成效果以及反循环排渣的影响,通过创新设计钻头底面形状来改善、提高其反循环性能。

反循环钻头在孔底工作时,驱动活塞做功后的一部分气体经钻头体上的底喷孔以高速气体射流形式排出,并撞击到孔底岩石表面上,形成冲击射流。图1所示为平面气体自由射流与光滑平面正交冲击时的情形。整个射流的流动结构可分为自由射流区、滞止区(冲击区)和贴壁射流区,其中贴壁射流区的漫流流动特征与壁面形状相关。反循环钻头底面形状决定了钻进时所形成孔底的形状,进而影响着孔底漫流流动形态,与反循环形成效果之间存在必然联系。

2 室内实验研究

反循环钻头底面是一个回转曲面(含平面),整体上是由与钻头中心轴线相交的曲线(包括直线)回转形成的。其中直线回转形成的底面形状是最简单也是最具代表性的一类。室内实验研究即以直线和折线回转形成的钻头底面形状为对象。

实验平台为反循环钻头孔底流动模拟实验器,其结构原理如图2a所示。不同类型底面形状被设计在钻头底面模型(12)上,它通过固定螺钉(11)与钻头基体(18)连接组成钻头模型。这种分体式结构

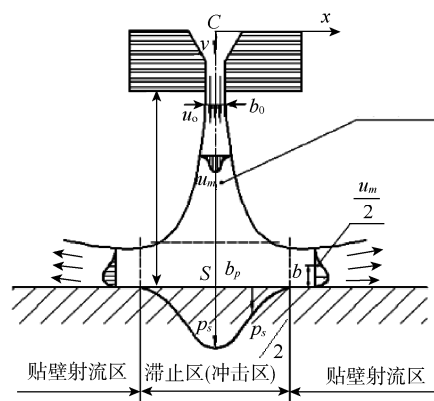


图1 冲击射流的流动结构

Fig. 1 Flow field structure of impinging jet

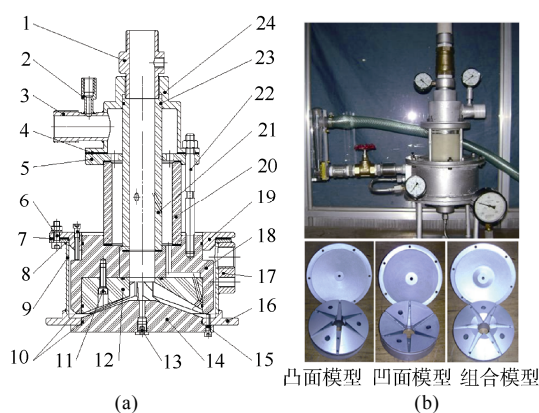


图2 反循环钻头孔底流动模拟试验器及底面模型

Fig. 2 Experimental apparatus for hole-bottom flow field simulation of reverse circulation drill bit and undersurface figure moles

a—孔底流动模拟实验器原理图；b—实验器实物与钻头底面模型；
1—压紧接头；2—压力表接头；3—进气管接头；4—密封垫；
5—导流板；6—紧定螺钉；7—密封垫；8—定位螺钉；9—钢筒；
10—密封圈；11—固定螺钉；12—钻头底面模型；13—封堵螺钉；
14—孔底模板；15—支撑螺钉；16—底板；17—侧板；
18—钻头基体；19—导正盖板；20—外管；21—内管；
22—中间立柱；23—密封圈；24—进气管

设计增强了实验的灵活性和可操作性。孔底模板(14)用以模拟不同钻头底面形状对应的孔底表面,它与钻头底面模型(12)之间的距离代表钻头合金柱齿的镶装高度,可通过定位螺钉(8)和支撑螺钉(15)进行调节。

实验器实物、3个钻头底面模型及对应的孔底模板如图2b所示。3个钻头底面模型分别为凸面型、凹面型和凸凹组合型,是由直线和折线旋转而成的,其中凹面模型和凸面模型的底面轮廓母线与水平线之间的夹角为 20° 。组合模型同时具备凸面和凹面轮廓,且两部分轮廓母线与水平线之间夹角均为 20° 。每个模型上设计了6个底喷孔,分两组交错均布在两个同心圆上,且3个模型上的底喷孔分布圈径相同。

实验时将内管(21)上的流道封闭,使进入实验器的气体(理论流量为 $6 \text{ m}^3/\text{min}$)全部经底喷孔流动。通过测量钻头模型外环空气体体积流量及环空压力来评价反循环形成效果。实验数据见表 1。环空压力与环空体积流量随中心孔压力变化曲线如图 3 所示。

表 1 不同中心孔压力下各模型外环空压力和外环空体积流量实验数据

Table 1 Test data of outer-annulus pressure and volume flow rate

参 数 中心孔压力 P_c/kPa	环空压力 P_a/kPa			环空体积流量 $Q_{v.a}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		
	凸面模型	凹面模型	组合模型	凸面模型	凹面模型	组合模型
0	10.00	5.49	9.51	39	25	40
5	13.52	8.53	12.94	49	35	49
10	16.76	12.05	16.17	56	46	55
15	21.17	16.07	20.97	64	55	63
20	25.19	21.07	25.09	69	62	70
25	29.99	25.19	29.20	77	70	75

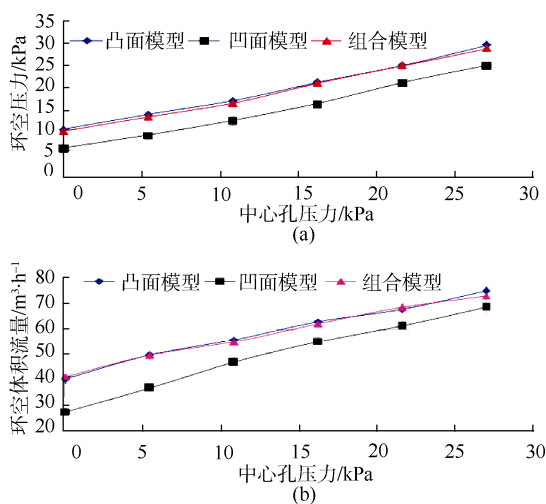


图 3 环空体积流量(a)及环空压力(b)随中心孔压力变化图

Fig. 3 Curve of outer-annulus pressure and volume flow rate changed with center-hole pressure

由环空体积流量($Q_{v.a}$)和环空压力(P_a)测量数据可知:在底喷孔数量、总过流断面和分布圈径完全相同的前提下,对应于相同的中心孔局部压力(P_c),凹面钻头模型的 $Q_{v.a}$ 和 P_a 值最小,而凸面钻头模型与组合钻头模型的 $Q_{v.a}$ 和 P_a 值较大,且二者较接近。其中环空体积流量相对凹面钻头模型分别高出 10%~56%和 7.14%~60%,环空压力相对凹面钻头模型分别高出 19.15%~82.15%和 15.20%~73.22%。实验结果表明:钻头底面形状对反循环形成效果存在较大影响。在冲击角相同的情况下,凹面型钻头底面形状更有利于反循环的形成,而凸面型与组合型钻头底面形状对应的反循环形成效果相对较差。

3 孔底流场数值模拟分析

在实验测试的基础上,借助 CFD 技术对凸面型和凹面型两种底面形状的反循环钻头孔底局部流场进行了数值模拟,旨在揭示各自对应流场的流动特征,分析不同类型钻头底面形状影响反循环形成效果的机理。

3.1 流场几何模型

大直径反循环钻头的底部流道设计相对复杂,这包括底喷孔、扩散槽和中心孔,其中 6 个梯形扩散槽与中心孔相连通,呈辐射状分布。底喷孔的出口位于扩散槽内,构成了循环介质在钻头体上的流动空间。而钻头体底面与孔底、钻头体外圆柱面与孔壁之间的间隙构成了循环介质的另一部分流动空间。根据反循环钻头实际结构特点,通过提取各部分流道而建立的几何模型如图 4 所示。建立几何模型时所作的基本简化和假设包括:

- 忽略合金柱齿对井底流场的影响;
- 忽略井底表面和孔壁凹凸不平的影响,并以理想的空间曲面和圆柱面代替;
- 不考虑钻头转动效应对井底流场的影响。

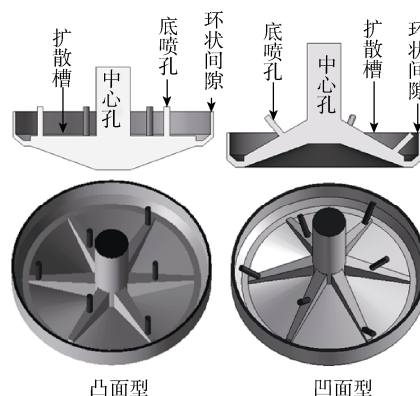


图 4 反循环钻头孔底流场几何模型

Fig. 4 Geometric models of hole bottom flow field formed by reverse circulation drill bit

3.2 网格划分与求解控制

划分网格时,根据几何模型的对称性,采用对称边界条件来缩小计算域规模,并对几何模型进行分块。满足几何拓扑结构的部分采用六面体单元进行网格划分,其他部分采用四面体单元进行网格划分^[7]。底喷孔入口采用质量进口边界条件(Mass-flow-inlet);中心孔和外环空出口采用压力出口边界条件(Pressure-outlet);其他表面采用壁面边界条件(Wall)。选择耦合求解器进行计算,并用二阶格式计算连续方程、动量和能量等主控方程;粘性项采用二阶格式;扩散项采用中心差分格式离散;对流项采用二阶迎风格式计算。采用 AMG(Algebraic Multi-Grid)代数多重网格法加速计算收敛,此时设

定网格层数为 3 层。计算时, 借助残差曲线和中心出口质量流量变化曲线进行收敛性判断^[8-9]。

3.3 计算结果分析与处理

求解完成后统计模型进出口边界上的质量流量, 并定义环空出口边界(A-outlet)上的质量流量 M_{A-O} 与进口总质量流量 $\sum M_{in}$ 之比的百分数为反循环效果指数(χ), 即:

$$\chi = \frac{M_{A-O}}{\sum M_{in}} \times 100\%$$

χ 值的大小代表经外环空边界流出的气体质量流量的相对多少, 在模型总进口质量流量相同的情况下, χ 数值大小表征了反循环形成的效果。经计算凸面钻头模型的 χ 值为 18.15%, 凹面钻头模型的 χ 值为 15.39%, 说明在底喷孔布置形式相同的情况下, 凹面模型的反循环效果更好, 这与实验所得结论是一致的。

图 5 所示为反循环钻头孔底流场底面上的速度矢量分布图, 它揭示了反循环钻头孔底冲击射流的流动特征。经底喷孔形成的高速射流冲击到底面后形成孔底漫流。单股射流形成的漫流区以冲击点为中心向外辐射分布, 但冲击区沿着径向呈现非对称性, 向着中心方向汇聚流动的速度大于向外发散的速度。这种非对称性流动是由冲击角度和扩散槽结构决定的。6 个底喷孔分两组在不同圈径上交错均布条件下, 内圈底喷孔射流冲击形成的汇聚漫流区彼此交汇并占据底面中心区, 一定程度上阻碍、干扰了外圈底喷孔射流形成的汇聚漫流向中心的流动。

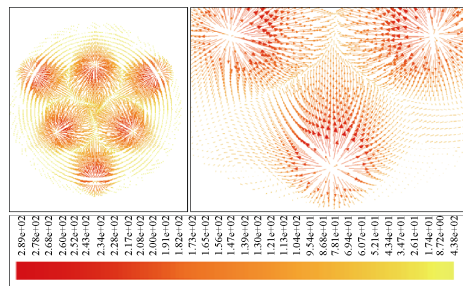


图 5 流场底面速度矢量分布图

Fig. 5 Distribution of velocity vector on hole-bottom surface

图 6 所示为凸面型和凹面型底面形状钻头孔底流场数值模型过底喷孔轴线的速度分布剖面图。该图显示: 底喷孔射流冲击到底面后运动方向发生了改变, 形成贴壁漫流, 且在剖面内射流分为两部分, 一部分向中心汇集流动, 另一部向外环空辐射流动。在扩散槽内, 由于射流的卷吸效应而形成涡旋, 迫使贴壁漫流产生上升流动趋势。

在凸面模型中, 汇聚流沿着向下倾斜面向中心汇聚, 辐射流体沿着向上倾斜的面流动。在凹面模型中, 汇聚流沿着向上倾斜面向中心汇聚, 辐射流

体沿着向下倾斜的面流动。在扩散槽内, 汇聚流体沿向上倾斜的面流动与其上升流动趋势一致, 流动阻力小, 反之则流动阻力大。辐射流体沿着向下倾斜面流动与其上升流动趋势相反, 流动阻力大, 反之则流动阻力小。在凹面钻头内, 向上倾斜的底面引导汇聚流体向中心反循环流动的同时有效阻止了辐射流体的正循环流动, 因此反循环效果良好, 而凸面钻头恰好相反。这正是凹面钻头底面轮廓能够提高反循环钻头性能的原因所在。

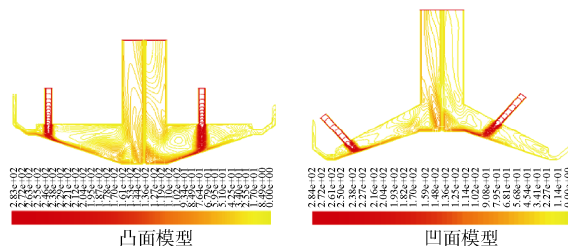


图 6 速度等值线分布剖面图

Fig. 6 Distribution of velocity contour line on section of models

4 结论

室内实验测试结果证明, 大直径反循环钻头底面形状对反循环形成效果存在较大影响, 在底喷孔数量、总过流断面积和分布圈径完全相同的前提下, 凹面型的钻头底面形状更有利于反循环的形成; 凸面型与凸凹组合型底面形状对应的反循环形成效果相对较差。

反循环钻头孔底局部流场数值模拟分析结果揭示了孔底冲击射流的流动特征及钻头底面形状影响反循环形成效果的机理。此外, 数值模拟结果表明多个底喷孔在不同圈径上交错均布对反循环形成存在不利影响, 应加强底喷孔合理布置方面的研究。

参考文献

- [1] 孟庆昆, 王向东, 于兴胜. KQC 系列空气锤在油田气体钻井中的应用[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(11): 54-57.
- [2] 罗整, 徐忠祥. 空气锤钻井技术在气体钻井中的应用[J]. 钻采工艺, 2007, 30(6): 9-10, 15.
- [3] 张祖培, 殷琨. 岩土钻掘工程新技术[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [4] 王茂森. 全孔反循环潜孔锤参数优化及其钻进工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006: 72-74.
- [5] WILLIAM C L. Air and gas drilling manual(second edition)[M]. New York(USA): McGraw-Hill Companies, 2001.
- [6] 晁文学, 林勇. 国外空气钻井钻头的应用[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(1): 39-40.
- [7] 周天孝, 白文. CFD 多块网格生成新进展[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 344-365.
- [8] 徐惊雷, 徐忠, 肖敏, 等. 冲击射流的研究概述[J]. 力学与实践, 1999, 21(6): 8-16.
- [9] 王瑞金. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.