

贯通式环喷潜孔锤钻头反循环结构参数研究

胡德玥¹, 博 坤¹, 范黎明^{2*}

(1. 吉林大学, 吉林 长春 130061; 2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 四川 成都 610083)

摘要:反循环钻进技术作为一种先进钻探方法,其在提高钻探效率和减少环境污染方面具有显著优势。进一步优化反循环钻头的结构设计以提升其反循环效果是当前研究的重点。本文聚焦于贯通式环喷潜孔锤钻头反循环结构,通过系统的数值模拟与试验研究,深入探讨其结构参数对反循环效果的影响规律。研究基于EFD技术,采用 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验设计,对11项关键结构参数进行数值模拟分析,明确了各参数对反循环效果的影响权重。结果表明,喷嘴直径、喷嘴与底喷孔接收段入口距离和入口风量是影响反循环效果最为显著的因素。在此基础上,构建了一套高效的环喷式反循环试验器,并通过 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 正交试验方案对数值模拟结果进行验证。试验结果表明,当喷嘴直径较小时,内喷孔层数增加可显著提升反循环效果,且入口风量在4~4.5 m³/min区间时,反循环效果最佳。此外,环喷式反循环结构的开放式喷射设计可有效抑制钻头泥包现象,尤其适用于黏土层等易泥包地层的钻进作业。本文的研究不仅为环喷式反循环钻头的设计提供了理论依据和技术支持,同时也为进一步优化钻探工艺参数、提高钻探效率奠定了基础。

关键词:贯通式环喷潜孔锤;反循环钻头;喷嘴直径;EFD;正交设计;参数优化;反循环效果

中图分类号:P634.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0135-09

Study on reverse circulation structural parameters of through-type ring jet DTH bit

HU Deyue¹, BO Kun¹, FAN Liming^{2*}

(1. Jilin University, Changchun Jilin 130061, China; 2. CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu Sichuan 610083, China)

Abstract: Reverse circulation drilling technology, as an advanced drilling method, has attracted significant attention due to its remarkable advantages in improving drilling efficiency and reducing environmental pollution. Further optimizing the structural design of reverse circulation drill bits to enhance their performance remains a key research focus. This study focuses on the reverse circulation structure of the through-type ring jet DTH (Down-the-Hole) bit. Through systematic numerical simulation and experimental research, the influence laws of structural parameters on reverse circulation performance are explored in depth. Based on EFD (Engineering Fluid Dynamics) technology and using an $L_{27}(3^{13})$ orthogonal experimental design, numerical simulations were conducted to analyze the impact of 11 key structural parameters on reverse circulation performance. The results indicate that nozzle diameter, the distance between the nozzle and the inlet of the bottom jet hole, and the inlet air volume are the most significant factors affecting reverse circulation performance. The experimental findings show that a smaller nozzle diameter, an increased number of inner jet layers, and an inlet air volume within the range of 4~4.5 m³/min can significantly enhance reverse

收稿日期:2025-05-31; 修回日期:2025-07-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.021

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备(编号:2024ZD1003100);吉林省科技厅重点研发项目“矿山灾害生命保障孔快速钻探关键技术与装备研发”(编号:20240304124SF)

第一作者:胡德玥,男,汉族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为钻进液、潜孔锤、碎岩等,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号,2923381102@qq.com。

通信作者:范黎明,男,汉,1983年生,高级工程师,地质资源与地质工程专业,博士,从事钻井新工艺新技术研究工作,四川省成都市成华区华泰路龙远科技大厦川庆钻采院科技研发中心, fanln_zcy@cnpc.com.cn。

引用格式:胡德玥,博坤,范黎明.贯通式环喷潜孔锤钻头反循环结构参数研究[J].钻探工程,2025,52(S1):135-143.

HU Deyue, BO Kun, FAN Liming. Study on reverse circulation structural parameters of through-type ring jet DTH bit[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1):135-143.

circulation performance. Moreover, the open-jet design of the ring-jet reverse circulation structure can effectively suppress bit balling, especially in clay layers and other strata prone to bit balling. This study not only provides theoretical and technical support for the design of ring-jet reverse circulation drill bits but also lays the foundation for optimizing drilling process parameters and improving drilling efficiency.

Key words: through-type ring jet DTH; reverse circulation bit; nozzle diameter; EFD; orthogonal design; parameter optimization; reverse circulation performance

0 引言

反循环钻进技术作为一种先进的钻探方法,在提高钻探效率和减少环境污染方面具有显著优势。特别是在面对高要求的作业环境时,传统钻探方法往往暴露出效率低下、成本高昂以及适应性差的问题。进一步优化其结构设计以提升反循环效果是当前研究的重点。

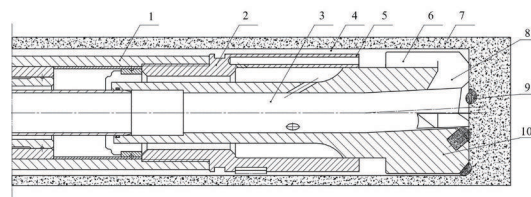
近年来,基于引射原理的环喷式潜孔锤钻头引起了广泛关注^[1-5]。刘军等^[6]探讨了潜孔锤反循环钻进技术在采空区勘探中的应用,展示了其卓越的应用前景。吴冬宇等^[7]进一步分析了2种贯通潜孔锤反循环钻头的应用效果及理论基础,揭示了不同设计参数对钻探性能的影响规律。与此同时对于反循环技术所用设备的最佳参数也有大量研究。Zhao等^[8]通过数值模拟与正交实验设计,提出了大型直径DTH锤钻头的最优结构参数组合方案,并验证了该设计方案的有效性和稳定性。Fan等^[9]则通过数值研究详细分析了几何参数对侧吸式反循环钻头结构的影响,为优化设计提供了重要参考。Bo等^[10]利用CFD软件求解三维稳态流动的Navier-Stokes方程,计算钻头周围流场以评估反循环效率,并通过正交实验设计及对 $L_{18}(3^7)$ 正交表的CFD模拟实验,分析了喷嘴直径、喷嘴长度、喷嘴数量等六个关键几何参数对反循环性能的影响,得出了反循环效率的数学模型。Sun等^[11]通过实验和CFD模拟研究了空气反循环钻井中多相流动行为,进一步验证了数值模拟方法的准确性和可靠性。Cao等^[12]针对大直径气动潜孔锤结构对其性能的影响展开研究,运用计算流体力学模拟结合动态网格技术,分析了活塞质量、活塞上端直径等多项结构参数的作用,设计出GQ-400潜孔锤并开展了现场钻进测试。同时他也开展了新型可伸缩钻头在空气反循环跟管钻进中携岩性能的研究,采用正交实验设计方法分析钻头结构参数对携岩能力和反循环性能的影响,确定最优结构参数,设计600mm直

径钻头并进行现场测试^[13]。

本文聚焦于贯通式环喷潜孔锤钻头反循环结构的研究,旨在通过该结构参数进行系统的数值模拟与物理试验分析,揭示各关键因素对反循环效果的影响规律。此外,本研究还构建了一套高效的试验台架,用以验证数值模拟结果,未来的研究将继续探索更广泛的工况条件,并开展现场应用验证。如He等^[14]研究了反循环空气锤在隧道钻探中的抽吸能力和除尘性能,强调了实际应用中的重要性。

1 环喷式反循环钻头结构原理

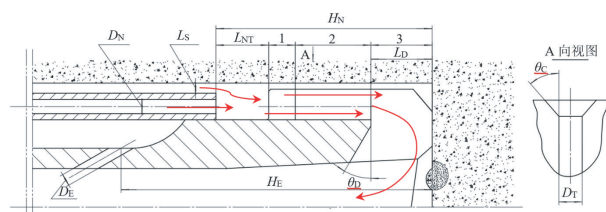
多孔环隙式(环喷式)反循环钻头是一种专为地质勘探和钻井工程设计的高效能工具,其核心原理在于利用高速流体的引射效应来优化钻探过程中的反循环效果。该钻头结构原理与引射式反循环钻头原理相似(图1),实现了在钻头底部形成高速射流,卷吸周围岩屑和流体,形成有效的向下流动,从而将岩屑从钻孔中排出。该钻头主要由潜孔锤外缸、花键套、中心通道、外环间隙(环空)、喷嘴、开放式底喷孔、扩压槽、球齿和钻头本体等关键部件构成。在工作过程中,压缩空气或流体从钻头顶部的中心通道进入,流经喷嘴时形成高速射流。这一高速射流通过引射效应卷吸周围的岩屑和流体,形成向下的流动,将岩屑从钻孔中有效排出,形成稳定的反循环。



1—潜孔锤外缸;2—花键套;3—中心通道;4—外环间隙(环空);5—喷嘴;6—开放式底喷孔;7—扩压槽;8—球齿;9—钻头;10—钻头

图1 引射式反循环钻头原理

图2进一步展示了喷嘴处的局部放大图,详细说明了喷嘴的设计和流体的流动路径。流体首先进入底喷孔接受段,然后在底喷孔混合段与岩屑混合,形成高速射流。流体通过扩压槽时,速度降低而压力增加,这有助于岩屑的排出。这种设计使得环喷式反循环钻头能够有效地提高反循环效果,减少岩屑与孔壁的接触,提高岩屑的纯度和钻进效率,特别适用于复杂地层的钻进。影响环喷式反循环钻头反循环效果的结构参数包括喷嘴直径、内喷孔层数、内喷孔直径、入口风量、喷嘴距离、环空间隙和底喷孔直径等。这些参数的合理配置对提升钻头性能至关重要。例如,喷嘴直径的大小直接影响流体的射流速度和卷吸能力;内喷孔层数和直径则关系到流体的分布和岩屑的去除效率;入口风量和喷嘴距离则影响流体的动能和射流的覆盖范围;环空间隙和底喷孔直径则关系到流体流动的通畅性和岩屑的排出效率。



1—底喷孔接受段;2—底喷孔混合段;3—扩压槽

图2 环喷式反循环钻头喷嘴处局部放大图

通过这种设计,环喷式反循环钻头在地质勘探和钻井作业中展现出了显著的优势,尤其是在处理复杂地层时,其高效能的反循环能力为钻进作业提供了强有力的支持。未来的研究可进一步探索这些结构参数的优化配置,以实现更高效、更经济的地质勘探和钻井作业。

2 基于EFD技术的多结构参数数值模拟

边界条件因素:入口空气体积流量 Q_V (标准状态下,即温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力为 101325 Pa 条件下的体积流量)、贯通孔(中心通道)背压 P_{cen} ;引射器的结构参数包括:(1)引射器部分(喷嘴直径 D_N 、喷嘴与底喷孔接收段入口距离 L_{NT} 、底喷孔混合段直径 D_T 、底喷孔接收段收缩角 θ_C 、环空间隙 L_S);(2)内管部分(扩压槽深度 L_D 、扩压槽仰角 θ_D 、内喷孔直径 D_E 、内喷孔高度 H_E 、内喷孔层数 m);再加上入口空气体

积流量 Q_V 。根据以上11个因数及3个水平数,设计数学实验设计正交实验,如果全面实验将会进行 3^{11} 次。所以需要进行正交实验设计。因数个数 $c=11$,水平数 $N=3$,采用 $L_{27}(3^{13})$ 标准正交表设计数学试验。该正交实验需要进行27次可得到实验结果。模拟方案与结果见表1。

对得到的实验结果进行极差分析可以得到各因数对引射器的反循环效果影响排行如下:喷嘴直径 D_N >喷嘴与底喷孔接收段入口距离 L_{NT} >入口风量 Q_V >底喷孔混合段直径 D_T >内喷孔高度 H_E >内喷孔层数 m >内喷孔直径 D_E >扩压槽深度 L_D >环空间隙 L_S >扩压槽仰角 θ_D >接受段收缩角度 θ_C 。影响最高的3个因素是喷嘴直径、喷嘴与底喷孔接收段入口距离 L_{NT} 以及入口风量 Q_V 。根据结果得出最优结果不在这27个实验中。下一步便是进行回归系数计算方案、方差分析与统计检验。根据他们对指标的贡献率 β 可知, Q_V 对指标的贡献比 L_{NT} 略大,且 L_D 的贡献率亦比 D_E 大。因此因素的主次顺序应当按照贡献率大小重新排列。根据方差分析结果,可以将因素主次、最优水平及其对应数值、因素贡献率总结如表2。

反循环效果仍用环空质量流量 $M_{\text{环}}$ 表示,根据因素重要关系,对一些能使反循环效果变化明显的因素进行规律探究。分析时,入口风量 Q_V 取最优值 $5\text{ m}^3/\text{min}$,对环喷式反循环结构的最优结构组合进行分析。分析出了主要因素对反循环效果的影响规律,以及个别因素相互作用时对效果的影响。

2.1 内喷孔层数 m 、内喷孔直径 D_E 与高度 H_E 对 $M_{\text{环}}$ 影响规律

在回归方程有效范围内,内喷孔层数 m 、内喷孔直径 D_E 与高度 H_E 对 $M_{\text{环}}$ 影响规律见图3和图4。图3中内喷孔的层数 m 越多, $M_{\text{环}}$ 越大,反循环效果越好。而且环喷式反循环结构的内喷孔层数从 $m=1$ 层增加到 $m=3$,反循环效果变化梯度非常均匀, $M_{\text{环}}$ 值增量基本相同。内喷孔高度 H_E 与 $M_{\text{环}}$ 呈单调递减关系,内喷口离孔底太远不利于反循环,因而环喷式结构的内喷孔最佳高度为 10 mm 。而内喷孔直径 D_E 与 $M_{\text{环}}$ 近似满足二次抛物线关系。对于内喷孔直径 D_E 而言,出现 $M_{\text{环}}$ 极大值的 D_E 大小大约为 5.25 mm 左右,同样,内喷孔直径不能太大,也不能太小,需要结合边界条件、喷嘴直径 D_N 、内喷孔数等

表1 环喷式反循环结构数值模拟方案与结果

试验序号(<i>i</i>)	因素(<i>j</i>)											指标
	$Q_v(z_1)$	$D_N(z_2)$	$L_{NT}(z_3)$	$D_T(z_4)$	$\theta_c(z_5)$	$L_D(z_6)$	$L_S(z_7)$	$D_E(z_8)$	$H_E(z_9)$	$m(z_{10})$	$\theta_D(z_{11})$	$M_{\text{环}}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})(y_i)$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0031585
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	0.00993
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	0.006262
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	0.0034010
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	0.0015968
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	-0.000825
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	0.001069
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	0.00169
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	0.00058
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	0.0322534
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	0.0317461
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	0.0342031
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	0.0024503
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	0.0138882
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	0.00918
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	-0.00607
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	-0.007657
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	-0.02695
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	0.0142998
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	0.0290413
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	0.0213292
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	0.0044982
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	-0.020620
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	-0.01505
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	-0.03666
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	-0.042646
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	-0.017069

表2 环喷式反循环结构参数主次关系及最优水平(CFD)

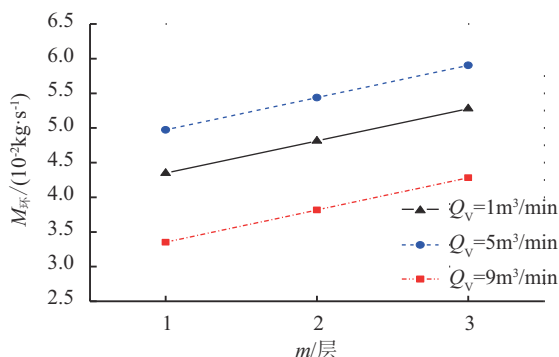
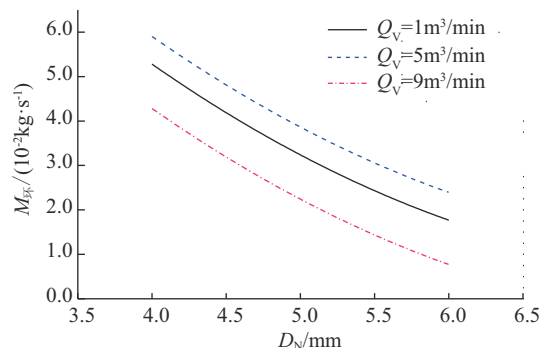
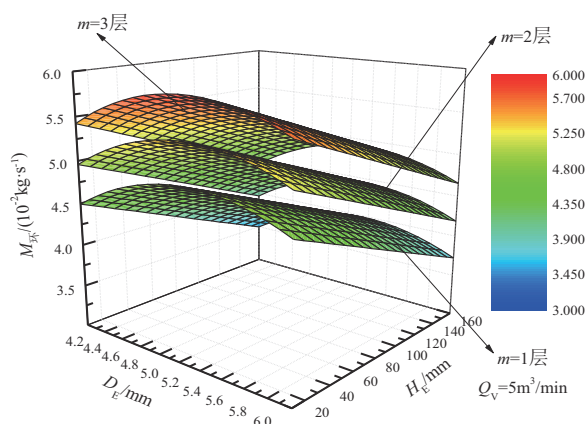
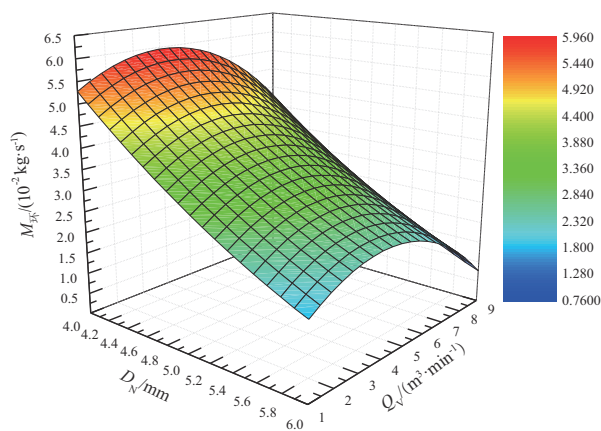
因素	D_N/mm (z_2)	$Q_v/(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$ (z_1)	L_{NT}/mm (z_3)	D_T/mm (z_4)	H_E/mm (z_9)	$m/\text{层}$ (z_{10})	L_D/mm (z_6)	D_E/mm (z_8)	L_S/mm (z_7)	$\theta_D/^\circ\text{C}$ (z_{11})	$\theta_c/^\circ\text{C}$ (z_5)
最优水平	1	2	3	3	1	3	2	2	1	3	1
最优值	4	5	20	12	10	3	10	5	2	30	0
$\beta/\%$	55.66	11.92	11.89	8.41	4.423	3.858	1.052	0.965	0.62	0.282	剔除

综合确定最优值。

2.2 环喷部分结构参数对 $M_{\text{环}}$ 的影响规律

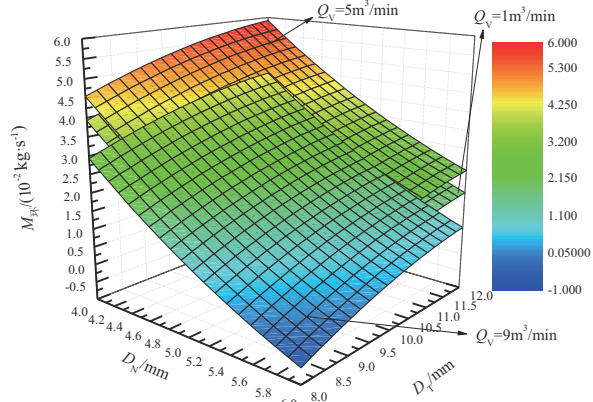
关键结构参数包括以下参数:混合段直径 D_T 、喷嘴与底喷孔接受段入口距离 L_{NT} 、环空间隙 L_S 、环空大小 L_S 以及喷嘴直径 D_N 。由于接受段收缩角度 θ_c 是不显著因素,忽略其对环空质量流量 $M_{\text{环}}$ 没有影响。环喷部分的作用,对底喷孔混合段采取了开放式设计,是对环空气体进行“重吸收”。喷嘴喷出的高速流体会对周围气体产生卷吸,减少环空漏失。从理论上讲,选择合适的引射器结构参数组合,完全能有效降低环空漏失,甚至能使环空质量流量 $M_{\text{环}} > 0$ 。

喷嘴直径 D_N 对 $M_{\text{环}}$ 的影响见图5。当喷嘴直径 D_N 在回归方程有效取值范围(4~6 mm)内时,反循

图3 内喷孔层数 m 与入口风量对 $M_{\text{环}}$ 的影响规律图5 不同 Q_v 下 $M_{\text{环}}$ 随 D_N 的变化规律图4 $Q_v=5 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, $M_{\text{环}}$ 随 D_N 及 D_T 的变化规律图6 $M_{\text{环}}$ 随 D_N 及 Q_v 的变化规律

环效果随着直径的增加而迅速变差。这是因为,当入口空气体积流量一定时,喷嘴直径增加,加大流道过流断面,流束变粗且喷射速度减小,引射能力下降,对环空气体的卷吸与抽吸作用被削弱。因此较小的喷嘴直径是比较理想的结构参数。不同喷嘴直径 D_N 下入口风量 Q_v 对 $M_{\text{环}}$ 的影响见图6。环喷式反循环结构的风量 Q_v 在回归范围1~9 m^3/min 内呈抛物线变化。最佳风量约在4~4.5 m^3/min 左右。不同喷嘴直径 D_N 下底喷孔混合段直径 D_T 对 $M_{\text{环}}$ 的影响见图7。在回归方程的有效范围内,底喷孔混合段直径 D_T 是越大越好。

针对环喷部分其他结构参数对 $M_{\text{环}}$ 的影响而言。环空间隙 L_s 是越小越好。 L_s 越小,环空漏失的阻力越大。而喷嘴与接受段距离 L_{NT} 不能太小,对于目前 L_{NT} 的有效取值范围, L_{NT} 选取20 mm是比较理想的。较大的 L_{NT} 会增加喷嘴射流的引射区域,因此 L_{NT} 取较大值会取得更好的反循环效果。底喷孔接受段收缩角 θ_c 也是引射器部分的结构参数,而在反循环钻头这种特殊的工况和结构下, θ_c 并非显

图7 $M_{\text{环}}$ 随 D_N 及 D_T 的变化规律

著因素, θ_c 对环空质量流量 $M_{\text{环}}$ 的影响非常小,可以忽略。

2.3 扩压槽结构参数对 $M_{\text{环}}$ 的影响规律

对与环喷结构来说,扩压槽深度 L_D 、扩压槽仰角 θ_D 对 $M_{\text{环}}$ 的影响规律见图8与图9。 L_D 、 θ_D 与 $M_{\text{环}}$ 均成二次抛物线关系。从前面的极差分析可知,因素 L_D 为10 mm是其最优水平,但根据回归分析得

出,最优 L_D 值应该在12 mm左右,且此 L_D 的极值点位置与扩压槽仰角基本没有太大关系。 θ_D 在极差分析中的最优值为 30° ,根据回归分析可以预测,仰角的最优值应该在 $23^\circ \sim 25^\circ$ 左右。 θ_D 太小,流动时局部损失较大; θ_D 太大,流线突然转折,必然会产生涡流(如图8),消耗主流能量,造成流动受阻。

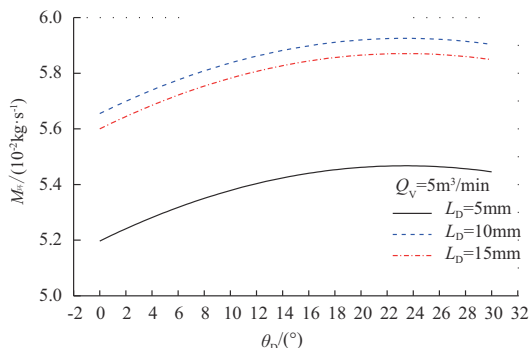


图8 不同 θ_D 时 $M_{\text{环}}$ 随 L_D 的变化规律

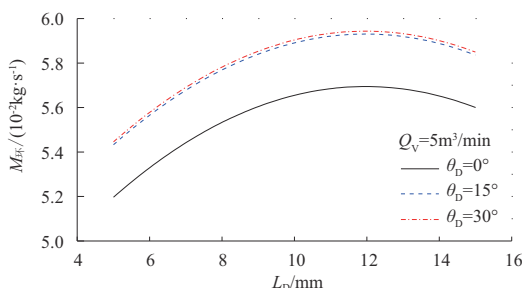


图9 不同 L_D 时 $M_{\text{环}}$ 随 θ_D 的变化规律

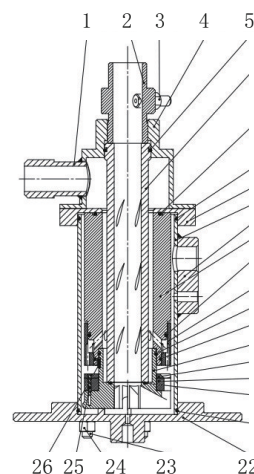
3 环喷式反循环结构反循环试验研究

在前期数值模拟工作中,针对环喷式反循环结构的各项结构参数展开研究。其核心目的在于,从理论分析角度定性甄别钻头各结构参数中对反循环效果影响显著的因素,剖析这些因素的作用规律,明确各结构参数对反循环产生显著影响的取值区间,为试验台架的设计与试验提供设计依据和试验范围参考。

3.1 试验目的与内容

本部分围绕环喷式反循环结构开展系统性试验研究,环喷式(Ⅱ型)反循环结构试验器示意图见图10。

实验目的包括:(1)结合前期数值模拟成果开展试验验证,基于实测数据对物理数学模型进行参数校正,建立高精度的数值仿真方法体系;(2)构建



1—进气接头;2—排气接头;3—测压接头;4—进气座;5—密封圈1;6—内管;7—密封圈2;8—密封圈3;9—导流板;10—刚筒;11—外环空出口;12—Ⅱ型中间套;13—密封圈4;14—Ⅱ型喷嘴;15—密封圈5;16—密封圈6;17—Ⅱ型钻头基体;18—Ⅱ型 θ_c 调整垫片;19—Ⅱ型 L_{NT} 调整垫片;20—密封圈7;21—密封圈8;22—底板;23—拉紧螺柱;24—六角螺母;25—开槽沉头螺钉;26—键

图10 环喷式(Ⅱ型)反循环结构试验器示意

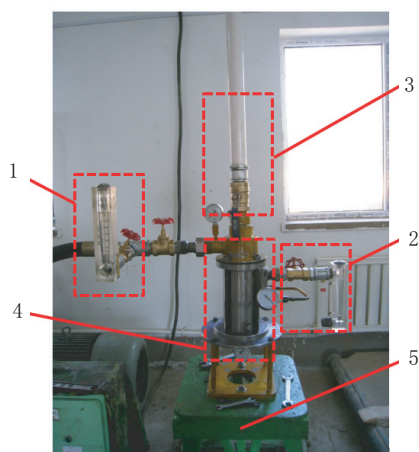
入口风量、中心孔背压与反循环效率的定量关系模型,通过多工况对比试验优选最佳工艺参数组合;(3)系统评价不同结构形式对岩屑运移效率的影响规律,通过结构构型优化揭示最有利于形成稳定反循环的几何特征,为新型反循环钻头研发提供创新设计基准。研究成果预期形成反循环钻具设计的理论方法体系,对提升复杂地层钻进效率具有重要工程价值。

试验内容:(1)测试多孔环隙喷射式反循环结构各关键结构参数在不同组合条件下(D_N 、 L_{NT} 、 θ_c 、 D_T 、 D_E 、 H_E 、 m 、 L_S)对反循环效果的影响情况,观察对反循环影响大小;分析每个因素的最优水平和最优搭配,进而得到最优的参数组合;(2)通过调控反循环结构构型参数,系统研究入口风量调控阈值与中心孔出口背压响应特性之间的耦合关系,重点揭示边界条件约束下不同结构钻头的流场演化特征与岩屑运移效率的作用机理,为钻进工艺参数优化提供理论指导与工程判据。(3)将试验结果与数值模拟结果进行对比,分析二者差异及吻合程度。

3.2 反循环试验台架的研制

反循环实验台实体见图11,零件包括内管、外套

组件(刚筒、外环出口),进气组件、排气组件、喷嘴、钻头基体、调整垫片等。内部流场流动形式见图12、装配体见图13。气体从内环空进入,流经内喷孔和喷嘴,内喷口处的流体在中心通道里卷吸向上,喷嘴出的流体向下到孔底,在孔底形成,周围高压,中心低压的压力环境。外环空的流体也随之向下流动,后流入中心孔道。测试搭建试验台后测试反循环效果,反循环结构确能对环空气体实现强力抽吸,将原本存在于环空的气体抽吸至钻头中心孔中。



1—入口流量控制组件;2—环空出口流量监测组件;
3—中心孔出口组件;4—试验器主体;5—底座

图11 反循环试验台实体

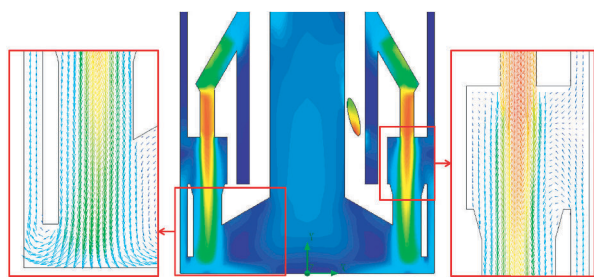


图12 试验器内部流场流速云图及局部放大速度矢量图



图13 环喷式反循环结构装配体

环喷式反循环结构的喷嘴均靠外侧分布(即尽量靠近环空间隙,目的是保证射流对环空气体的引射能力),且喷嘴外侧壁薄。为了方便变化喷嘴直径,提高零部件更换的灵活性,在设计时仍采用分体式设计。喷嘴流道由Ⅱ型中间套和Ⅱ型喷嘴共同组成,只需更换Ⅱ型喷嘴,便可实现直径的变换。Ⅱ型喷嘴共3个规格,分别为 $D_N=4, 5, 6$ mm。

环喷式反循环结构的调整垫片具有三重功能:一是调节接受段收缩角 θ_c ,二是调整喷嘴与接受段入口端面的距离 L_{NT} ,三是改变混合段底喷孔直径 D_T 。根据数学试验结果, L_{NT} 和 D_T 对环空气体质量流量 $M_{环}$ 的贡献率分别为11.89%和8.41%,而 θ_c 为非显著因素。因此,试验重点优化 L_{NT} 和 D_T 参数。综合轴向与径向尺寸约束及前期数学试验结果,设计3种厚度(5、10、20 mm)的 L_{NT} 调整垫片,每种厚度对应3种底喷孔直径($D_T=8, 10, 12$ mm)。通过组合不同厚度的 L_{NT} 调整垫片,可实现 L_{NT} 的多样化调节。对于非显著因素 θ_c ,设计 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 3种角度,仅进行简单试验验证。环喷式钻头基体的底喷孔部分采用开放式结构。根据环喷式反循环结构数值分析结果可知,扩压槽深度 L_D 与扩压槽仰角 θ_D 的贡献率比较低,仍然属于次要因素,加之加工繁琐,故可不对 L_D 和 θ_D 进行详细的试验。

3.3 环喷式反循环结构试验方案与结果

环喷式反循环结构反循环试验考查的因素主要有:(1)边界条件因素:入口空气体积流量 Q_V (现场实际流量)、中心孔背压 P_{CEN} ;(2)结构参数因素:喷嘴直径 D_N 、混合段底喷孔直径 D_T 、喷嘴距离 L_{NT} 、内喷孔直径 D_E 、内喷孔高度 H_E 、内喷孔层数 m 、环空大小 L_s 、接受段收缩角 θ_c ;还有些结构参数,比如扩压槽深度 L_D 、扩压槽仰角,由于它们对反循环的影响不太大,加上制造加工比较麻烦,且成本高,因此不对这2个参数进行试验。反循环效果用实测气体体积流量 $Q_{V环}$ 来衡量,如果环空间隙漏风,则 $Q_{V环}<0$;如果反循环效果很好,环空间隙出现气体被抽吸的现象,则 $Q_{V环}>0$ 。试验的因素水平设置见表3。

为了减少试验次数,同时提高试验的科学性,本次试验仍然采用正交试验法编排试验方案。根据因素水平表,可选则混合正交表安排试验。由于本次试验并不需要考查交互作用,选择 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 来安排试验方案。 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 由非标准表 $L_{18}(3^7)$ 变换而来,其中空列用于估计试验误差。试验结果如

表3 环喷式反循环结构反循环试验因素水平

因素水平	L_S / mm	m / 层	D_E / mm	D_N / mm	D_T / mm	L_{NT} / mm	$Q_V/(m^3 \cdot min^{-1})$
1	2	1	4	4	8	0	2
2	4	2	5	5	10	10	4
3		3	6	6	12	20	6

表4所示,在这18组试验中确实可以找到 $Q_{V环}>0$ ($Q_{V环}<0$ 表示环空气体泄漏)的组合,且这种组合占了整个试验数目的一多半。

表4 环喷式反循环结构反循环试验
方案编排与试验结果

序号 (i)	因素(j)							指标 y_i
	L_S / mm	m / 层	D_E / mm	D_N / mm	D_T / mm	L_{NT} / mm	$Q_V/(m^3 \cdot min^{-1})$	
1	1	1	1	1	1	1	1	2.5
2	1	1	2	2	2	2	2	1
3	1	1	3	3	3	3	3	-3
4	1	2	1	1	2	2	3	4
5	1	2	2	2	3	3	1	2
6	1	2	3	3	1	1	2	-1.4
7	1	3	1	2	1	3	2	3.5
8	1	3	2	3	2	1	3	-2.2
9	1	3	3	1	3	2	1	10
10	2	1	1	3	3	2	2	-4.5
11	2	1	2	1	1	3	3	6
12	2	1	3	2	2	1	1	0.8
13	2	2	1	2	3	1	3	-0.8
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

注:中心孔背压 $P_{CEN}=0$ kPa;收缩角 $\theta_c=0^\circ$;内喷孔高度 $H_E=10$ mm。

从试验总体效果上来看,环喷式反循环结构试验结果与前面数值模拟所得结论一样。通过试验数据处理与CFD结果对比见表5, M 、 D_E 、 D_N 、 D_T 、 L_{NT} 的单因素实验结果见图14,得出以下结论:

(1)结果一致性:CFD与试验结果吻合度较高,

表5 最优水平及因素主次CFD和试验结果对比

比较对象	因素					
	L_S	m	D_E	D_N	D_T	L_{NT}
最优水平	试验	2	3	3	1	3
	CFD	1	3	2	1	3
因素主次	试验	D_N 、 m 、 D_E 、 L_S 、 L_{NT} 、 D_T				
	CFD	D_N 、 L_{NT} 、 D_T 、 m 、 D_E 、 L_S				

注:不对比 Q_V ,CFD和试验中所取 Q_V 的水平值不相同,没有对比意义。

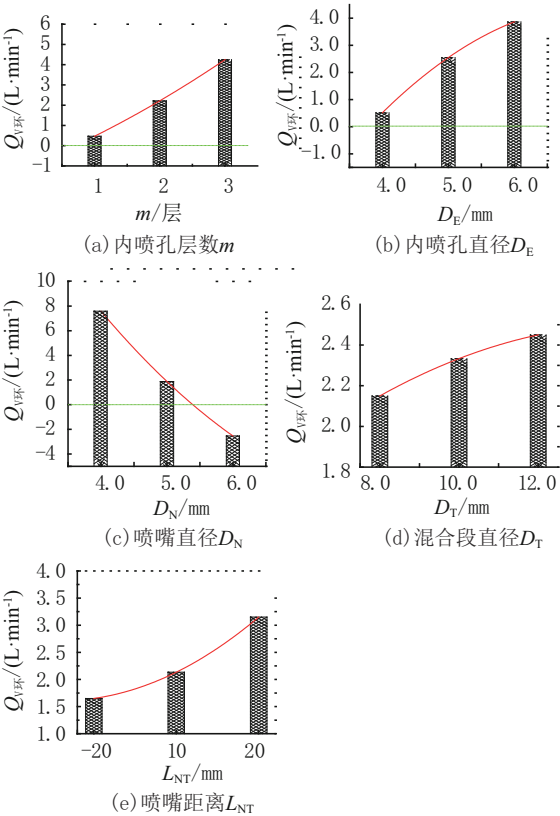


图14 M 、 D_E 、 D_N 、 D_T 、 L_{NT} 的单因素实验结果

除环空间隙 L_S 和内喷孔直径 D_E 外,各结构参数最优水平一致。试验误差主要源于:浮子流量计精度有限及空压机气体脉动导致的读数误差;入口空气体积流量和温度波动引起的边界条件偏差;试验器加工与装配精度不足引发的流道差异。上述误差不可避免,导致试验结果与CFD存在一定偏差。(2)因素影响:喷嘴直径 D_N 为环喷式反循环结构的最主要影响因素。试验误差可能导致次要因素主次关系重排,但不影响环喷式反循环结构的整体效果。(3)内喷层数效应:内喷层数 m 增加可显著提升反循环效果,环形体积流量 Q_V 环与 m 呈单调递增关系,与

CFD模拟规律一致。(4)内喷孔直径关系:CFD模拟显示内喷孔直径 D_E 与反循环效果呈近似抛物线关系,最佳值在5~6 mm。试验结果受误差影响,未呈现明显抛物线关系,但发展趋势与CFD近似吻合。(5)喷嘴直径 D_N 、混合段直径 D_T 和喷嘴位置 L_{NT} 的试验结果可以看出, D_N 仍然是越小越好, D_T 、 L_{NT} 二者与反循环效果之间均是单调递增的关系,试验结果与CFD计算所得规律依然完全一致

4 结论

(1)结构改进与反循环性能优势。环喷式反循环结构的核心特征是底喷孔混合段采用了开放式结构,通过环隙喷嘴群的高速射流引射作用,增强对环空流体的抽吸能力。数值模拟与物理试验结果表明,该结构反循环效果优于传统引射器式结构。且开放式喷射设计可有效抑制钻头泥包现象,尤其适用于黏土层等易泥包地层的钻进作业。

(2)关键结构参数影响规律通过 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验设计与极差分析,明确11项结构参数对反循环效果的影响权重依次为:喷嘴直径(D_N)>喷嘴与底喷孔接收段入口距离(L_{NT})>入口风量(Q_V)>底喷孔混合段直径(D_T)>内喷孔高度(H_E)>内喷孔层数(m)>扩压槽深度(L_D)等。

(3)结构参数中,喷嘴直径 D_N 是最关键因素, D_N 减小可使射流速度提升,引射能力增强,但需匹配合理的入口风量($Q_V=5\text{ m}^3/\text{min}$ 为最优值)。内喷孔层数 m 与反循环效果呈单调递增关系,3层时环空质量流量较1层时提升约80%。内喷孔高度 $H_E=10\text{ mm}$ 为最佳取值,过高的喷孔位置会削弱对孔底岩屑的抽吸效率。底喷孔混合段直径 D_T 与喷嘴距离 L_{NT} 均与反循环效果呈正相关, D_T 增大可降低射流扩散阻力, $L_{NT}=20\text{ mm}$ 时引射区域最大化。环空间隙 L_s 越小越有利于抑制漏风,间隙为2 mm时环空漏失量比间隙为6 mm时减少65%。扩压槽结构参数(L_D 、 θ_D)对反循环效果影响较弱, $L_D=12\text{ mm}$ 、 $\theta_D=23^\circ\sim 25^\circ$ 为优化区间,可兼顾流动阻力与能量损耗的平衡。

(4)数值模拟与试验验证的吻合性。基于EFD技术的数值模拟结果与 $L_{18}(2\times 3^7)$ 正交试验数据吻合度达82%以上。尽管存在浮子流量计精度、空压机脉动及加工误差等干扰因素,但关键参数的影响

趋势(如 D_N 与 Q_V 环的负相关、 D_T 与 Q_V 环的正相关)与模拟结果完全一致,证实了数值模拟方法的可靠性,可为钻头结构设计提供科学依据。

参考文献:

- [1] 冉恒谦,张金昌,谢文卫,等.地质钻探技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1806-1822.
- [2] 李鹏,殷琨,彭视明,等.基于LS-DYNA的贯通式潜孔锤反循环钻头强度的优化分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(3):44-47.
- [3] 董硕,贺文博,曹金娥,等.冰层空气反循环快速钻进方法及冰屑运移研究[J].钻探工程,2021,48(1):49-56.
- [4] 黄勇,殷琨,博坤,等.空气潜孔锤反循环钻头试验研究[J].凿岩机械气动工具,2009,35(1):23-27.
- [5] 宋小军,李文彬,王扶志,等.贯通式空气反循环潜孔锤连续取心锤头改进与试验效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):52-57.
- [6] 刘军,博坤,李巧莲.潜孔锤反循环钻进技术在采空区勘探中的应用[J].采矿技术,2011,11(1):49-51,86.
- [7] 吴冬宇,殷琨,甘心,等.两种贯通潜孔锤反循环钻头应用效果及理论分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(1):197-202.
- [8] Zhao Z Q, Li L J, Bo K, et al. Numerical investigation based on orthogonal design of structural parameters on large-diameter DTH hammer bit[J]. Advanced Materials Research, 2013(774-776):1442-1445.
- [9] Fan L M, Yin K, Zhang Y G, et al. Numerical investigation of geometry parameters on side-ejector DTH hammer RC bit[J]. Journal of Central South University (Ence and Technology), 2011,42(1):220-226.
- [10] Bo K, Ji F, Zhao Z, et al. Optimum design of large-diameter reverse circulation drill bit for drilling rescue wells using orthogonal experimental method and CFD simulation[J]. Energies, 2023,16(9):3913.
- [11] Sun S, Bo K, Jia R, et al. Experimental investigation and CFD simulation of multiphase flow behavior in air reverse circulation drilling[J]. Advanced Powder Technology: The international Journal of the Society of Powder Technology, Japan, 2023(10):34.
- [12] Cao P L, Cao H Y, Cao S S. Performance of large-diameter pneumatic down-the-hole (DTH) hammers: A focus on influences of the hammer structure[J]. Petroleum Science, 2023,20(4):2399-2412.
- [13] Cao P, Cui G, Qi B. Investigation on the cuttings carrying capacity of a novel retractable drill bit used in casing while drilling with air reverse circulation[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2022. DOI:10.1016/j.petrol.2022.111079.
- [14] He J F, Sun B X, Liang Y P, et al. Research on suction capacity and dust suppression performance of a reverse circulation air hammer in tunnel drilling[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018,71:391-402.

(编辑 王文)