

气动潜孔锤反循环钻头结构改进与优化设计

郝树青¹, 殷琨², 黄宏伟¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:运用理论分析、数值模拟与实验研究相结合的科学研究手段,对影响气动贯通式潜孔锤反循环形成的钻头新增引射孔各参数、底喷孔各参数以及其它相关参数进行优化设计,得到一系列适合不同规格钻头的相关参数值及其回归方程。运用 Visual Basic 语言,将研究结论与专家的经验总结汇合,编写了钻头参数优选系统软件。研究结论应用于生产试验中取得令人满意的结论,岩矿心采取率达到 98% 以上,反循环形成顺利,岩矿心完整度好。参数优选系统的建立为该项硬岩钻进技术的完善提供了参考性依据。

关键词:硬岩钻进技术;潜孔锤反循环;参数优选

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2008)10-0018-05

Improvement and Optimized Design on the Structure of Pneumatic Down-the-hole Hammer Reverse Circulation Drilling Bit/ HAO Shu-qing¹, YIN Kun², HUANG Hong-wei¹ (1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: By the theoretical analysis, numerical simulation and experiment study, a serial parameters affected reverse circulation of pneumatic hollow down-the-hole drilling were optimized, and the relative parameters and regression equations were achieved, and software of parameters optimization on drilling bit was made with Visual Basic language. According to the research conclusion, construction test was made with more than 98% coring rate. The parameter optimization system provides the reference gist for the hard rock drilling technology.

Key words: hard rock drilling technology; DTH reverse circulation; parameters optimization

气动贯通式潜孔锤钻进技术是专门针对硬岩钻进的一门新技术,20 世纪 90 年代以来以其独特的优势被广泛应用。然而在复杂地层钻进中,由于反循环钻头结构不够合理,反循环往往难以形成,使该技术的应用受到限制。究其原因,主要是孔底气体容易从裂隙中漏失,在孔底形成的负压不够大,不足以将岩心(样)上举到上返通道内,或者至上返通道内又没有获得足够的加速度,从而使其顺利返出地表。为解决这些问题,笔者对之展开了研究。

1 气动贯通式潜孔锤反循环钻进技术工作原理及在硬岩钻进中的应用现状

气动贯通式潜孔锤反循环钻进技术应用气体推动活塞做功产生能量往复冲击岩石,使岩石产生破碎,获得理想岩心(样),通过中心通道上返至地表。

气动贯通式潜孔锤钻进技术突出的特点是:集潜孔锤快速碎岩、流体介质反循环和钻探连续取心 3 种钻探技术于一体,具有钻进效率高、岩矿心质量好和岩心无污染等技术优势^[1]。

反循环技术的应用,在生产与施工中带来了重大的革命^[2]。然而反循环钻头作为该技术的关键性部件在起到较好作用效果的同时,依然存在着许多问题。在试验地层裂隙发育,岩层内的溶洞较多时,从钻头排气孔排出后的相当部分气体漏失到地层中,使进入钻头中心孔的气体减少,影响了反循环形成,钻取的岩心(渣、样、屑)不能被及时排出,钻头堵塞现象严重,经常发生诸如反循环形成不彻底、岩心卡堵^[3]、钻头断裂、空压机参数不匹配^[4]等问题,影响了生产和该技术的推广应用。

2 引射原理在钻头结构上的应用现状

目前的反循环钻头,根据引射器基本结构,将钻头排风孔设计成引射器的喷嘴,合理设计钻头底部结构,使其较好地构成混合室与扩压室,由于排风孔数量一般为多个,故形成多喷嘴引射结构,经过潜孔锤后的压气进入喷嘴产生高速射流,对周围流体产生卷吸作用,对外环间隙构成抽吸,多个喷嘴随钻头不断旋转,在孔底形成环状负压区,气体被导流到贯

收稿日期:2008-03-18

基金项目:吉林省科技厅科技发展引导项目(编号:200405033)

作者简介:郝树青(1975-),女(汉族),山西平遥人,同济大学土木工程博士后,隧道及地下工程专业,地质工程博士,主要研究方向为地下空间灾害发生下的疏散技术和多工艺潜孔锤钻进技术优化设计等,上海市杨浦区同济新村 498 号 1 室,jdhsq@163.com。

通孔内再行压力恢复,这样将有助于反循环的形成。孔底射流携带岩屑沿钻杆中心通道返回地表。

对于目前该技术存在的这些问题,笔者提出了改进办法——新增引射结构装置,称“二级引射设置”,实际是一些引射孔,这些加工在钻头侧壁上的引射孔高速喷入钻头中心通道的气流,可以对中心通道内流体产生卷吸作用,再次形成负压区,在一段路程上形成压力差,进入中心孔内的岩心(样)在上下压力差的作用下,得到加速,更顺利地排出孔外,从而改善反循环形成效果,较好地避免孔底堵塞现象。

本文通过建立影响反循环钻头工作及反循环形成质量好坏的重要的引射孔参数及底喷孔参数进行优化设计,建立参数优选专家系统,为钻探工作者优化钻头结构提供参考性依据。

3 本文对该问题的深刻剖析与解决

3.1 影响反循环形成效果的主要结构参数的确定

运用流体力学^[5]及空气动力学知识对反循环形成机理进行分析,确定影响反循环形成质量的 2 个重要变量为气体上返速度及岩心在上返过程中所受到的气体上举压力。

分析反循环钻头结构对流场特性的影响规律,主要采用的方法是数值模拟与实验研究相结合的手段。

3.2 影响反循环钻进新增引射孔参数的优化设计

3.2.1 数值模拟

建立引射孔内部流场的几何模型,运用 CFD 技术^[6]进行计算,得到不同引射孔倾角、直径、数目及分布方式下的流场分布特点,通过比较有以下规律。

(1)在固定值中心通道内,当引射孔倾角 θ_1 、直径 d_1 、分布数量 z_1 与分布方式不同时,在中心通道内形成的负压值是不同的,也即对环空气流的抽吸力不同,反循环形成效果不同。表 1 为不同引射孔倾角下的负压值情况。

(2)在供风量一定的情况下,引射装置引射孔倾角 θ_1 取 15° (即,当引射孔倾角越小,在钻头体中心通道内产生的负压越大,上返风速也越大,越有利于反循环的形成)、引射孔直径 d_1 取一个最优值时,设计 6 个引射孔均匀分布在引射管侧壁,能在中心通道内产生最强的卷吸作用,从而携带岩心(屑)顺利返向地表形成反循环。图 1 为引射装置引射孔倾角 15° 时的压力分布云图。

表 1 不同引射孔倾角下的负压值情况表

长度 /m	倾角 $\theta_1/(^\circ)$					
	15	30	45	60	75	90
4	0	0	-0.00020	正压	正压	正压
5	0	0	-0.00049	正压	正压	正压
6	0	0	-0.00032	正压	正压	正压
7	0	0	-0.00415	正压	正压	正压
8	0	-0.00480	-0.00647	-0.00083	正压	正压
9	-0.00489	-0.00512	-0.00862	-0.00144	-0.00098	正压
10	-0.00511	-0.00651	-0.00991	-0.00244	-0.00101	正压
11	-0.00687	-0.00731	-0.01022	-0.00247	-0.00144	正压
12	-0.00755	-0.00822	-0.01116	-0.01044	-0.00654	正压
13	-0.09621	-0.01284	-0.09431	-0.01090	-0.00985	正压
14	-0.01022	-0.01384	-0.09455	-0.02000	-0.01654	正压
15	-0.01988	-0.02393	-0.10431	-0.02020	-0.01874	正压
16	-0.02013	-0.02837	-0.10531	-0.02089	-0.01998	正压
17	-0.02974	-0.03520	-0.11441	-0.02193	-0.02001	正压
18	-0.03478	-0.04657	-0.12451	-0.04221	-0.02546	正压
19	-0.09987	-0.10686	-0.13412	-0.05959	-0.04589	正压
20	-0.10324	-0.11755	-0.14422	-0.06000	-0.05622	正压
21	-0.10652	-0.11916	-0.15647	-0.05050	-0.04980	正压
22	-0.08740	-0.09774	-0.11993	-0.04988	-0.04322	正压
23	-0.07854	-0.08176	-0.11141	-0.04588	-0.04550	正压
24	-0.00065	-0.00971	-0.10745	-0.04364	-0.03965	正压

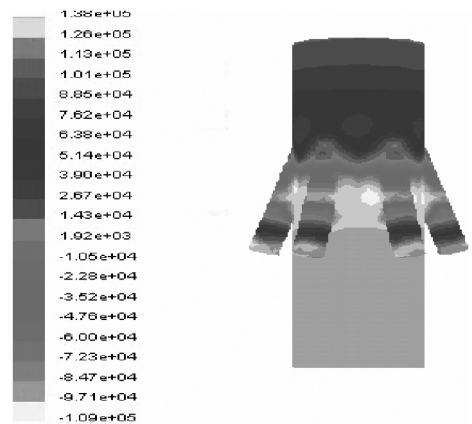


图 1 引射装置引射孔倾角 15° 时的压力分布图^[6]

(3)通过计算多组不同钻头直径、不同钻头中心通道直径的情形,得出结论:钻头直径不同时,引射孔结构参数对于钻头中心通道内形成的负压影响不明显,而钻头中心通道直径变化时,只有引射孔直径大小对于钻头中心通道内形成的负压影响是较大的。

3.2.2 实验研究

对于中心通道直径为 32 mm 的钻头加工有机玻璃质模型,在室内进行试验,发现与仿真分析结果相吻合。

从试验结果可以看出,引射孔倾角越小时,在钻头中心通道内所形成的负压值越大,负压区最大,压力区均匀,越有利于反循环的形成。

用同样的方法,可以得到速度也有一样的规律。从而说明,仿真分析的结论是可靠的。

3.3 反循环钻头底喷孔各参数的优化设计

用同样的数值方法,分析了反循环钻头底喷孔各参数的最优参数。研究中,涉及到不同的钻头直径、不同的钻头中心通道直径、及底喷孔各参数对钻头内部负压值及中心通道最优上返风速的影响规律。通过比较,得到不同情况下的底喷孔各参数的最优取值,见表2。并在实验室做了类似于引射孔参数确定的实验,加工有机玻璃质钻头进行测试。得到的规律与仿真分析结果相吻合。

表2 不同直径、不同中心通道直径的钻头,其底喷孔直径 d_2 与倾角 θ_2 最优值

钻头直径/cm	24 mm		30 mm		44 mm		60 mm		72 mm	
	d_2	θ_2	d_2	θ_2	d_2	θ_2	d_2	θ_2	d_2	θ_2
89	8	4	7	5	10	5.2	10.5	5.5	7	5
95	8.5	4.5	7.5	5.5	10.5	5.8	11	6	7.5	5.5
127	9	5.5	8	5.8	11	6	11.5	6.5	8	5.8
160	9.5	5.5	8.5	6	12	6.5	12	7	8.5	6
200	9.5	5.5	9	6.5	12.5	6.8	12.5	7.5	9	6.5
250	10	6	9.5	6.8	13	7	13	8	9.5	6.8
320	10	6.5	13	7	13	7.5	13.5	8.5	11	7
377	11	7	13.5	7.5	13	7.8	14	9	13	7.5

3.4 影响反循环形成的其它相关参数的优化设计

3.4.1 引射孔与底喷孔之间距离 h 对流场的影响

对于引射孔与底喷孔之间的距离影响,做了相关的仿真分析,研究了 $h = 65、80、95、110、120、150、160$ mm的情况,结果发现,钻头侧壁引射孔到底喷孔之间的距离实际上对反循环流场的影响相差不多,由仿真分析过程中所选取的模型的几何尺寸可以粗略地得出结论,认为 h 取110 mm左右的值都是可以的,或者在设计时,可以忽略 h 值的影响,而单纯考虑钻头结构上加工的便利。图2为 $h = 110$ mm时流场压力分布云图。

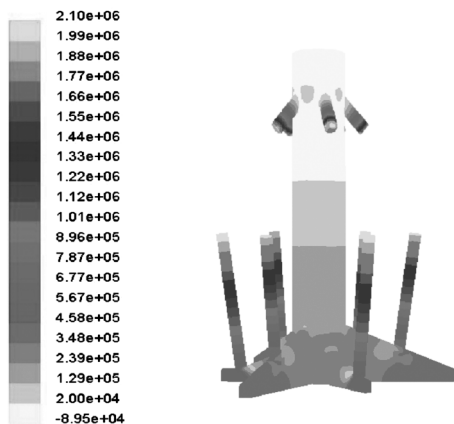


图2 $h = 110$ mm时流场压力分布云图^[6]

3.4.2 底喷孔中性轴线与钻头中心通道轴线之间距离 α 对流场的影响

建立底喷孔中性轴线与钻头中心通道轴线之间距离 α 分别取不同值时的流场几何简化模型。通过大量的计算,得到 α 的最优取值应当是72 mm,因为在这种情况下,底喷孔高速喷出的气体不仅能产生涡流卷吸流体,而且在高速气流碰到孔底时存在一个最优角度反射进入中心通道,同时,一小部分气体在井底发生漫流时能扫过钻头边齿,使其良好地冷却。

为了找到钻头直径对 α 的影响规律,又分析了钻头直径 $D_1 = 89、95、127、160、200、250$ mm等几种情形,也得到 α 的最优取值,见表3。

表3 α 与钻头直径关系表^[6]

钻头直径/mm	α /mm	钻头直径/mm	α /mm
89	46	200	60
95	50	250	68
127	52	320	72
160	54		

3.5 基于SAS的参数回归分析

由数值计算与本章的实验研究,得出大量影响钻进过程中反循环形成效果好坏的钻头结构参数最优取值,这些值是千变万化的,但又有规律可循,为提高计算结果的利用率,本文借助于数学手段找到参数之间的相互关系。

采用回归分析方法,借助SAS(Statistical Analysis System,统计分析系统)数据分析软件系统,进行数据处理和统计分析。SAS具有完备的数据访问、数据管理、数据分析和数据呈现功能。它运用统计分析、时间序列分析、运筹决策等科学方法进行质量管理、财务管理、生产优化、风险管理、市场调查和预测等业务,并可将各种数据以灵活多样的各种报表、图形和三维透视的形式直观地表现出来,程序流程见图3。

首先进行皮尔逊相关分析,表明,中心通道直径 D_3 与底喷孔直径 d_2 之间无显著相关性;中心通道直径 D_3 与底喷孔倾角 θ_2 之间也无显著相关性。故在分析影响底喷孔直径 d_2 与倾角 θ_2 的因素时,可以不考虑中心通道直径 D_3 带来的影响。

将 $d_2 \sim D_1$ 和 $\theta_2 \sim D_1$ 关系的分析确定为直线回归分析,直线回归分析是基于最小二乘法原理产生古典统计假设下的最优无偏估计。它是研究一个自变量与一个因变量之间是否存在某种线性关系的统计学方法。此处自变量是钻头直径 D_1 ,最优底喷孔

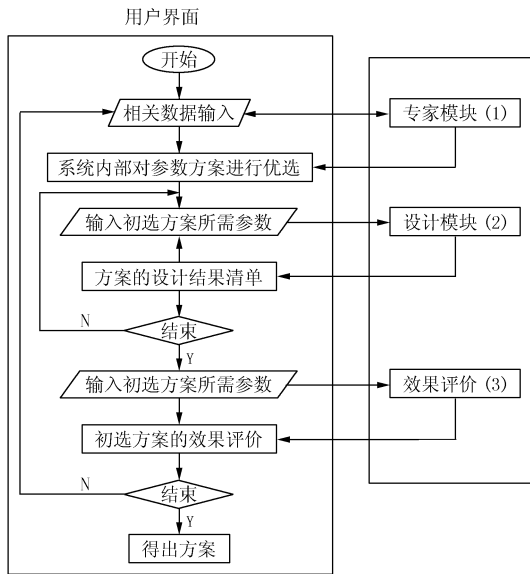


图 3 系统的程序流程

直径 d_2 。

通过分析得到以下结论：

(1) 钻头直径直接影响着底部排风孔的参数，通过相关性分析，底部排风孔直径 d_2 、倾角 θ_2 与钻头直径 D_1 之间具有如下关系：

$$(D_1 \sim d_2): d_2 = 7.88830 + 0.01199D_1 \quad P < 0.01$$

$$(D_1 \sim \theta_2): \theta_2 = 4.63271 + 0.00865D_1 \quad P < 0.01$$

(2) 底部排风孔与钻头中心通道轴线之间最佳距离 α 与钻头直径 D_1 之间关系：

$$(D_1 \sim \alpha): \alpha = 37.65381 + 0.11154D_1 \quad P < 0.01$$

式中： D_1 ——钻头直径； d_2 ——底部排风孔直径； θ_2 ——底部排风孔中性线与贯通孔中性轴线夹角； α ——底部排风孔与钻头中心通道轴线之间距离。

由以上回归方程，编写内置程序来确定底部排风孔直径与倾角，一般情况下底部排风孔数目为 3 个。

(3) 引射孔参数确定。通过分析得到结论，中心通道直径 D_3 与钻头引射孔的直径 d_1 具有较大相关性，而与引射孔倾角 θ_1 、引射孔数目 z_1 相关性不大，故当中心通道直径发生变化时，主要考虑引射孔直径的变化即可。

在本文中分析了多种中心通道直径所造成的引射孔参数的变化，再次运用回归分析方法得出之间的关系。

$$(D_3 \sim d_1): d_1 = 3.98987 + 0.09523D_3 \quad P < 0.01$$

式中： D_3 ——钻头中心通道直径； d_1 ——引射孔直径。

另外，由前面的分析可知，孔数确定为 6 孔均布是较好的，倾角为 15° 。

(4) h 的确定。从大量的仿真与实验结论可以看出， h 值在一定范围内变化对于反循环形成效果的影响不大，基本不受钻头直径和中心通道直径的影响。因此在编写系统时直接给出值 110 mm。

3.6 编写参数优选系统

运用 Visual basic 6.0 语言编写反循环钻头体引射孔及底喷孔结构参数优选系统，编写过程中，仿照专家系统的设计思想，指导反循环钻头引射孔与底喷孔等参数的优选。欢迎界面见图 4。



图 4 系统的欢迎界面

本论文研制系统使用了部分辅助程序来辅助进行不同直径、不同贯通孔直径条件下，钻头体引射孔与底喷孔参数及钻头其它相关参数优选。

3.6.1 系统研究内容范围的确定

研究范围界定在钻头引射孔与底喷孔参数优选上。

3.6.2 程序结构

包括 3 个模块：模块 1 为专家模块，它包括一个知识库。知识库是由人类专家经验、理论知识以及常用的经验构成的；模块 2 包括本系统所考虑的各种情形下反循环钻头引射孔与底喷孔设计方案的定性和定量描述；模块 3 是效果评价，它是通过已经完成的现场试验所得效果进行评价的。

3.6.3 专家模块的开发

本系统的开发是遵循专家的思维进行的，然后通过编程来模拟他们解决问题的方法。

基于上述观点开发了反循环钻头引射孔及底喷孔参数优选系统，系统模块 1 用来模仿上述①和②所述的专家行为，模块 2(设计模块)和模块 3(效果模块)则力求尽可能地减小人为的主观倾向性。

3.6.4 系统开发

数据的获取：一部分来源于本文的分析结论；另一部分通过查阅相关资料，与钻探专家探讨，获得经验知识。另一部分则通过前面的分析与计算，编写程序进行计算获得。

通过定量和定性的分析,该系统可以帮助我们解决问题。

4 工程应用及所得效果

将所建立的参数优选系统应用于河南栾川钼矿勘探生产中,矿区内地层断裂结构发育,岩层间夹有松散的破碎带和风化层。待勘探矿区上部已爆破松动,下部为采空区,勘探地层破碎,且岩石坚硬。由于爆破开采,使岩石裂隙进一步发育,为典型的硬、脆、碎复杂地层。

采用优化设计后的 $\varnothing 95$ 、113 mm反循环钻头,配合贯通式潜孔锤反循环取心钻进配套设备,有效解决了钻探技术难题,累计完成钻探工作量5000多米,岩矿心样采取率98%以上,探明钼矿储量超亿吨,钼矿石价值100多亿元。反循环形成稳定,平均时效4.05 m,最高时效为36 m;平均台班进尺14.02 m,最高台班进尺35 m。

钻具配套组合: $\varnothing 89$ mm双壁钻杆+ $\varnothing 108$ mm/38 mm贯通式潜孔锤+ $\varnothing 113$ mm反循环钻头; $\varnothing 89$ mm双壁钻杆+ $\varnothing 89$ mm/33 mm贯通式潜孔锤+ $\varnothing 95$ mm反循环钻头。图5为反循环钻进取出的岩矿心。

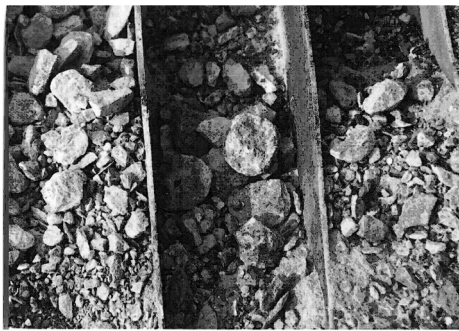


图5 反循环钻进取出的岩矿心

5 结论与展望

5.1 本文得到的结论

本论文对钻头引射孔与底喷孔结构进行较为全面的分析,对钻进中孔底流场进行大量数值模拟和实验研究,得到了一些定性定量的结论,使贯通式潜孔锤取心(样)钻进技术的反循环形成机理研究更进一步,所取得的结论为钻头体结构参数优化设计提供了选择依据。完善后的一部分钻头在现场试验中证明,完成反循环顺利,钻进效率大幅提高,岩矿心采取率大于98%,钻头结构更合理,功能更可靠。

5.2 后期工作展望

本论文针对反循环形成过程中钻头结构上存在的问题、影响反循环形成的引射孔参数和底喷孔参数进行了深入细致的分析与研究,取得了一些进展,但笔者认为仍需做以下一些研究与探讨:

(1)从理论上找到反循环钻头各参数精确的计算表达式,使该技术更完善;

(2)进一步深化对反循环形成机理的研究。

参考文献:

- [1] 张祖培,殷琨,等. 岩土钻掘工程新技术[M]. 北京:地质出版社,2003. 17-57.
- [2] 国外探矿工程情报(空气钻进专辑)[R]. 1988,(2-3):69-80.
- [3] 王茂森,殷琨,陈宝义,等. 复杂地层钻进中贯通式潜孔锤的应用及反循环钻头的改进[J]. 煤田地质与勘探,2005,33(5):79-80.
- [4] E·约翰芬纳莫尔,约瑟夫B·弗朗兹尼. 流体力学及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006:177-192,438-466.
- [5] 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,2004:1-6,13-17,119-125.
- [6] 郝树青,殷琨,王清岩,等. 反循环钻头引射孔倾角的仿真分析[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(4):77-79.