

复杂地层用反循环钻头双排内喷孔结构优化与试验

甘 心, 殷 琨, 殷其雷, 李 鹏

(吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 采用正交试验和计算流体动力学相结合的方法,对矿山多层空区钻探用 150 mm 反循环钻头双排内喷孔的 4 个结构参数进行优化分析,分析结构参数变化对钻头抽吸量 Q 的影响规律,并最终得出这 4 个结构参数的主次排序依次为:倾角(θ_s)、水平偏角(θ_d)、垂直间距(L)、水平间距(S)。最优参数组合为: $\theta_s = 30^\circ$, $\theta_d = 10^\circ$, $L = -15$ mm 和 $S = 10$ mm。与此同时,将最优参数组合下的 150 mm 反循环钻头进行多层空区探测孔钻进试验。从钻进试验效果看,穿过第一层空区继续实现反循环钻进,钻头依然能够形成良好的反循环抽吸效果,并且连续不断排出大颗粒岩块,解决矿山多层空区钻探及测量难题。

关 键 词: 反循环钻头;双排内喷孔;正交试验;CFD 分析;多层采空区钻孔

中图分类号: P 634.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)03-0392-06

Structural Optimization and Test of Double Row Suction Nozzles for Reverse Circulation Drill Bits Used in Complex Formations

GAN Xin, YIN Kun, YIN Qi-lei, LI Peng

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China. Corresponding author: YIN Kun, E-mail: yinkun@jlu.edu.cn)

Abstract: The 4 main structural parameters of double row suction nozzles for 150 mm reverse circulation drill bits used in multilayer goaf drilling were optimized by orthogonal design method and CFD (computational fluid dynamics) analysis. The analysis results indicated the primary and secondary orders as follows: the inclination angle (θ_s), the horizontal deflection angle (θ_d), the vertical space (L) and the horizontal space (S), with the most optimal parameter combination being $\theta_s = 30^\circ$, $\theta_d = 10^\circ$, $L = -15$ mm and $S = 10$ mm. At the same time, the 150 mm reverse circulation drill bit which adopts the most optimal parameter combination was carried on the multilayer goaf drilling test. The test results showed that the reverse circulation drilling can still be achieved through the first layer goaf, and the rock sample with large particles can be continuously discharged from the borehole bottom to the earth surface. The problem on multilayer goaf drilling and measurement in mines can thus be resolved.

Key words: reverse circulation drill bit; double row suction nozzle; orthogonal design; CFD analysis; multilayer goaf drilling

贯通式潜孔锤反循环钻探工艺既具有钻进效率高、成孔质量好的特点^[1-3],又具有排渣不受孔径大小限制^[4]、地层适应能力强、环境污染小的特点^[5-6]。如今,在贯通式潜孔锤反循环钻探施工中普遍使用的都是双排内喷孔反循环钻头,它具有喷射速度高、导流效果好、对孔底岩屑抽吸效果显著等优点^[7]。

本文对 150 mm 反循环钻头双排内喷孔的结构参数进行正交试验设计,找出参数的主次排序,并运用计算流体动力学(CFD)分析软件^[8]对钻头孔底流场进行模拟分析,最后将优化后的双排内喷孔式反循环钻头进行野外试验。

收稿日期: 2015-02-05

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113096900)。

作者简介: 甘 心(1987-),男,广西南宁人,吉林大学博士研究生;殷 琨(1952-),男,吉林长春人,吉林大学教授,博士生导师。

1 双排内喷孔反循环钻头模型建立

本文主要针对 150 mm 反循环钻头中双排内喷孔的 4 个主要结构参数进行模拟分析并优化 (见图 1),这 4 个结构参数分别为垂直间距 L 、水平间距 S 、水平偏角 θ_d 以及倾角 θ_s 。

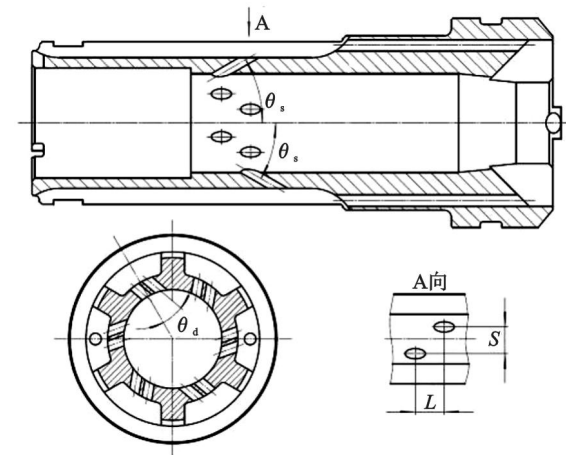


图 1 双排内喷孔结构参数示意图

Fig. 1 Structural parameters of double row suction nozzle

1.1 几何模型及网格划分

采用 Solidworks 软件建立钻头在孔底的流场几何模型,然后再利用 Hypermesh 软件对模型进行四面体非结构化网格划分.划分好的钻头网格模型的单元总数为 44 万~46 万个,单元最大尺寸为 3 mm,可以满足计算精度需要。

表 1 双排内喷孔结构参数因素水平表

Table 1 Orthogonal factor level table for structural parameters of double row suction nozzles

水平	因素			
	垂直方向间距/mm	水平方向间距/mm	水平偏角/(°)	倾角/(°)
1	-30	0	5	30
2	-10	4	10	40
3	10	8	15	50
4	30	12	20	60
水平间隔	20	4	5	10
平均水平	0	6	12.5	45

注:垂直方向间距负号表示左孔高于右孔,正号表示右孔高于左孔。

此外,引入“外环间隙抽吸气体质量流量 Q ”作为试验指标. $Q < 0$ 表示压缩气体经底喷孔喷出后从外环间隙出口泄露从而出现正循环; $Q = 0$ 表示外环间隙吸入气体质量流量与泄露的气体质量流量相互抵消; $Q > 0$ 表示钻头能够将外环间隙中的流体介质抽吸入钻头中心孔内形成稳定反循环,且 Q 值越大,表示从钻头与孔壁之间的环状

1.2 边界条件及求解控制

进口采用质量入口,输入的压缩空气质量流量为 0.49 kg/s,湍流强度为 3.42% 和水力直径为 0.03 m;出口采用压力出口边界条件,出口压力设为大气压,湍流强度为 2.781%,水力直径为 0.038 m;钻头与孔壁间隙出口采用压力出口,湍流强度为 4.135%,水力直径为 0.01 m。

在前处理中,采用基于密度的隐式求解器,湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$,可以更好地分析处理高应变率和弯曲程度较高的湍流运动问题^[9].采用 SIMPLEC 算法中的二阶迎风格式离散黏性项和对流项,中心差分格式离散扩散项.采用监测残差曲线及中心贯通孔出口与外环间隙出口的质量流量变化曲线相结合的方式对整个求解过程进行收敛性的判定.当残差曲线低于预设值 10^{-6} 并且中心贯通孔出口和外环间隙出口的质量流量变化曲线平稳时,可认定整个迭代求解过程收敛。

2 正交试验设计

在双排内喷孔钻头的结构优化设计中,采用正交试验设计的方法来安排 CFD 模拟分析;不考虑双排内喷孔 4 个结构参数间的交互作用,进行 4 因素 4 水平 CFD 模拟分析 (见表 1),并选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表对模拟数据进行统计分析计算 (见表 2)。

在双排内喷孔钻头的结构优化设计中,采用正交试验设计的方法来安排 CFD 模拟分析;不考虑双排内喷孔 4 个结构参数间的交互作用,进行 4 因素 4 水平 CFD 模拟分析 (见表 1),并选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表对模拟数据进行统计分析计算 (见表 2)。

间隙吸入的流体越多,反循环形成效果越好。

2.1 极差分析

采用极差分析法 (也称直观分析法) 讨论因素的主次排序. 从表 2 的极差分析结果可知:双排内喷孔的 4 个结构参数中,倾角 θ_s 对钻头的反循环抽吸量 Q 影响最大;其次依次是水平偏角 θ_d 和垂直间距 L ;而水平间距 S 对钻头的抽吸量 Q 影

响最小. 主次因素排序依次为 $\theta_s > \theta_d > L > S$.

要结构参数对试验指标 Q 影响的显著性水平. 从表 3 的方差分析结果可知:

2.2 方差分析

采用方差分析法来讨论双排内喷孔的 4 个主

表 2 双排内喷孔结构参数 $L_{16}(4^5)$ 正交表
Table 2 $L_{16}(4^5)$ orthogonal table for structural parameters of double row suction nozzles

试验号	因素				误差列	指标 $Q/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
	L	S	θ_d	θ_s		
1	1	1	1	1	1	0.183 7
2	1	2	2	2	2	0.158 6
3	1	3	3	3	3	0.089 8
4	1	4	4	4	4	-0.027 9
5	2	1	2	3	4	0.122 1
6	2	2	1	4	3	0.025 6
7	2	3	4	1	2	0.175 8
8	2	4	3	2	1	0.157 1
9	3	1	3	4	2	0.003 6
10	3	2	4	3	1	0.065 8
11	3	3	1	2	4	0.166 1
12	3	4	2	1	3	0.185 9
13	4	1	4	2	3	0.125 6
14	4	2	3	1	4	0.176 1
15	4	3	2	4	1	0.036 1
16	4	4	1	3	2	0.108 5
K_1	0.404 2	0.435 0	0.483 9	0.721 5	0.442 7	
K_2	0.480 6	0.426 1	0.502 7	0.607 4	0.446 5	
K_3	0.421 4	0.467 8	0.426 6	0.386 2	0.426 9	
K_4	0.446 3	0.423 6	0.339 3	0.037 4	0.436 4	
k_1	0.101 1	0.108 8	0.121 0	0.180 4	0.110 7	
k_2	0.120 2	0.106 5	0.125 7	0.151 9	0.111 6	
k_3	0.105 4	0.117 0	0.106 7	0.096 6	0.106 7	
k_4	0.111 6	0.105 9	0.084 8	0.009 4	0.109 1	
极差 R	0.019 1	0.011 1	0.040 9	0.171 0	0.004 9	
优水平	2	3	2	1	2	
主次因素排序	3	4	2	1	5	

表 3 双排内喷孔结构参数方差分析结果
Table 3 Variance analysis for structural parameters of double row suction nozzles

差异源	偏差平方和 SS	自由度 df	均方 MS	$F_{\text{比}}$	显著性水平 α
L	0.000 825 40	3	0.000 275 13	15.00	显著*
S	0.000 311 49	3	0.000 103 83	5.66	不显著
θ_d	0.004 041 12	3	0.001 347 04	73.46	高度显著**
θ_s	0.068 058 04	3	0.022 686 01	1 237.15	高度显著**
误差 θ_m	0.000 058 04	3	0.000 018 34		
总和	0.073 291 06	15			

注:查 F 分布表得 $F_{0.1}(3,3)=5.46, F_{0.05}(3,3)=9.55, F_{0.01}(3,3)=29.46$.

- 1) 倾角 θ_s 对反循环抽吸量 Q 影响最为显著,其次依次为水平偏角 θ_d 和垂直间距 L ,而水
- 平间距 S 对钻头抽吸量 Q 影响不显著.
- 2) 倾角 θ_s 及水平偏角 θ_d 均属于高度显著因

素,对钻头抽吸量 Q 影响较大;垂直间距 L 属于显著因素,对钻头抽吸量 Q 有一定影响;水平间距 S 则属于不显著因素,对钻头抽吸量 Q 影响较小。

3 CFD 结果分析

3.1 L 和 θ_d 变化时, Q 随 θ_s 的变化规律

由图 2 可知:1)当 L 和 θ_d 不变时, Q 随着 θ_s 的增大而减小,且降幅不断增大;2)当 L 和 θ_s 不变时, $\theta_d = 10^\circ$ 的 Q 最大,其次是 $\theta_d = 5^\circ$ 和 $\theta_d = 15^\circ$,而 $\theta_d = 20^\circ$ 的 Q 最小。

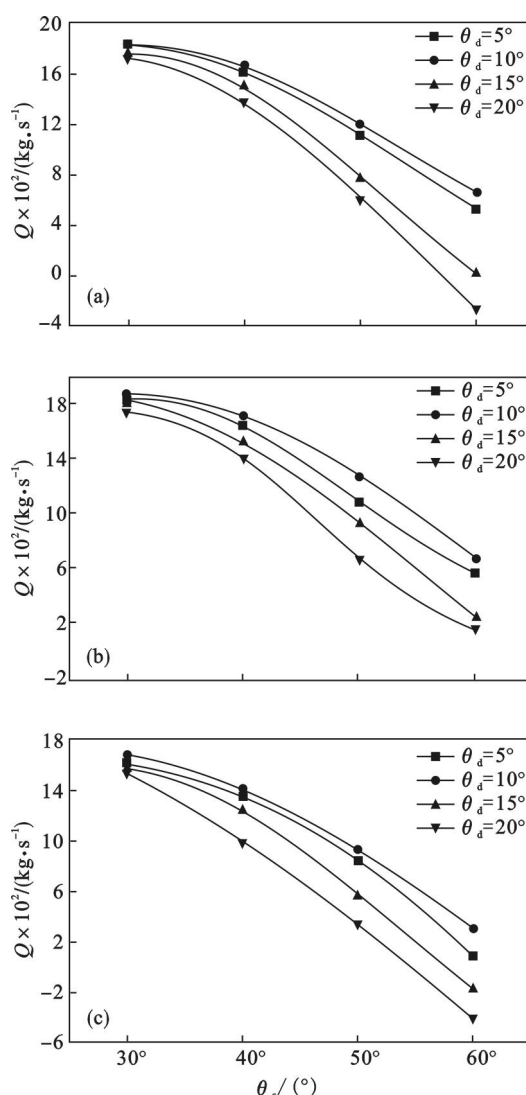


图 2 L 和 θ_d 变化时, Q 随 θ_s 的变化规律
Fig. 2 Variation of suction capability Q with θ_s while L and θ_d are changing

(a)— $L = -10$ mm; (b)— $L = -20$ mm;
(c)— $L = -30$ mm.

3.2 S 和 θ_s 变化时, Q 随 θ_d 的变化规律

由图 3 可知:1)当 S 和 θ_s 不变时, Q 随着 θ_d 的增大而先增大后减小,在 $\theta_d = 10^\circ$ 时达到最大;

2)当 S 和 θ_d 不变时, Q 随着 θ_s 的增大而减小,且幅度不断增大。

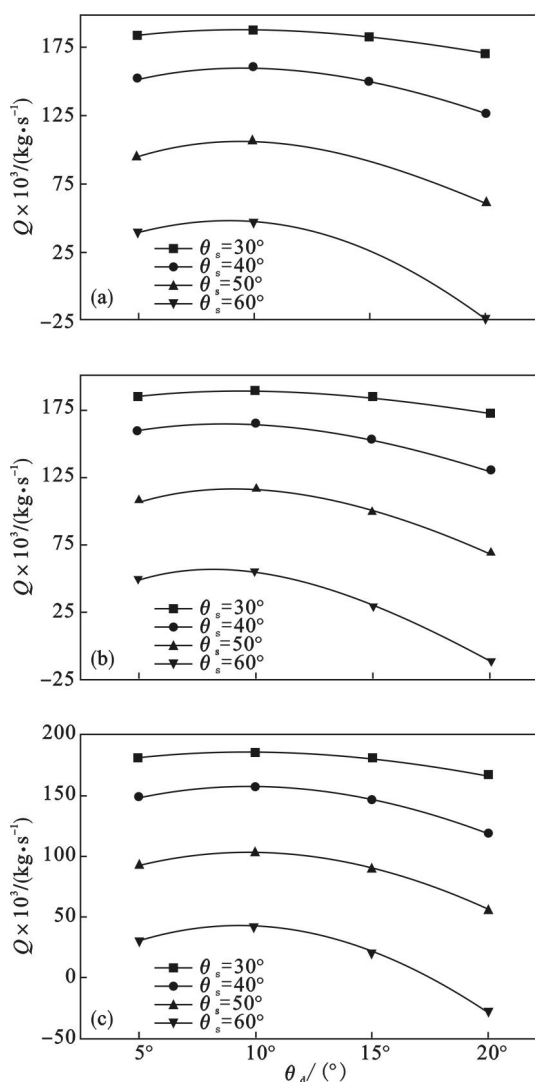


图 3 S 和 θ_s 变化时, Q 随 θ_d 的变化规律
Fig. 3 Variation of suction capability Q with θ_d while S and θ_s are changing

(a)— $S = 8$ mm; (b)— $S = 10$ mm;
(c)— $S = 12$ mm.

3.3 θ_d 和 S 变化时, Q 随 L 的变化规律

由图 4 可知:1)当 θ_d 和 S 不变时, Q 随着 L 的增大而先增大后减小,在 $L = -15$ mm 时达到最大;2)当 θ_d 和 L 不变时, $S = 10$ mm 时的 Q 最大,其次是 $S = 8$ mm 和 $S = 12$ mm,而 $S = 14$ mm 时的 Q 最小。

3.4 θ_s 和 L 变化时, Q 随 S 的变化规律

由图 5 可知:1)当 θ_s 和 L 不变时, Q 随着 S 的增大而先增大后减小,在 $S = 10$ mm 时达到最大;2)当 θ_s 和 S 不变时, $L = -15$ mm 时的 Q 最大,其次是 $L = -20$ mm 和 $L = -10$ mm,而 $L = -25$ mm 时的 Q 最小。

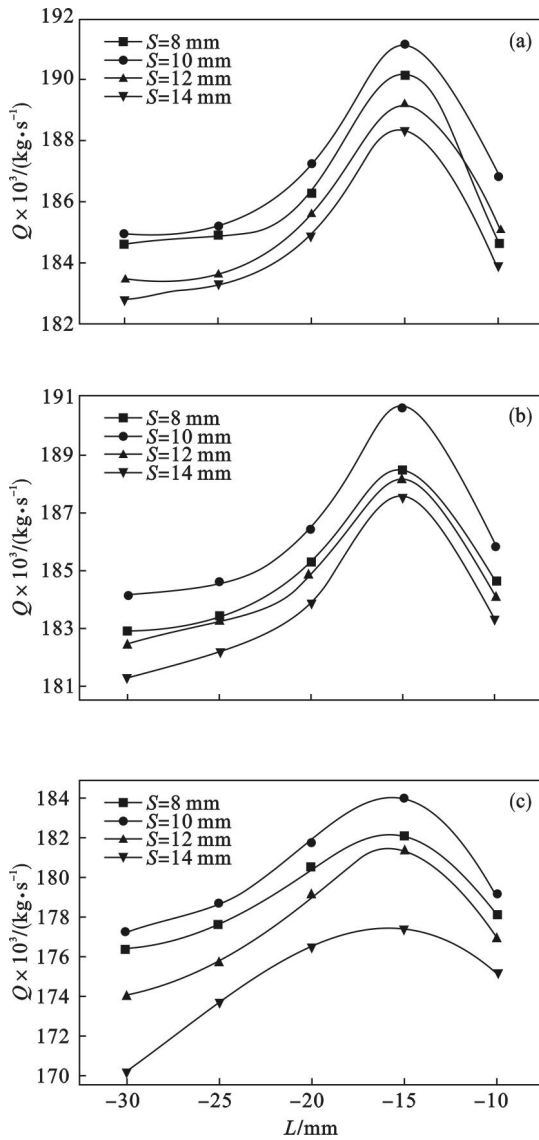


图 4 θ_d 和 S 变化时, Q 随 L 的变化规律
Fig. 4 Variation of suction capability Q with L while θ_d and S are changing
(a)— $\theta_d = 10^\circ$; (b)— $\theta_d = 15^\circ$; (c)— $\theta_d = 20^\circ$.

4 野外试验效果

从 CFD 结果分析得出双排内喷孔最优的参数组合为 $\theta_s = 30^\circ$, $\theta_d = 10^\circ$, $L = -15 \text{ mm}$ 和 $S = 10 \text{ mm}$. 将该参数组合的双排内喷孔式反循环钻头在太钢集团某露天矿区进行钻孔试验.

从钻进效果看, 穿过第一层空区空腔并在第一层空区底板继续钻进, 仍能形成稳定的全孔反循环, 且钻进效果良好, 连续排出大颗粒岩块, 最大直径达到 55 mm. 钻进过程中无卡钻、埋钻等现象出现.

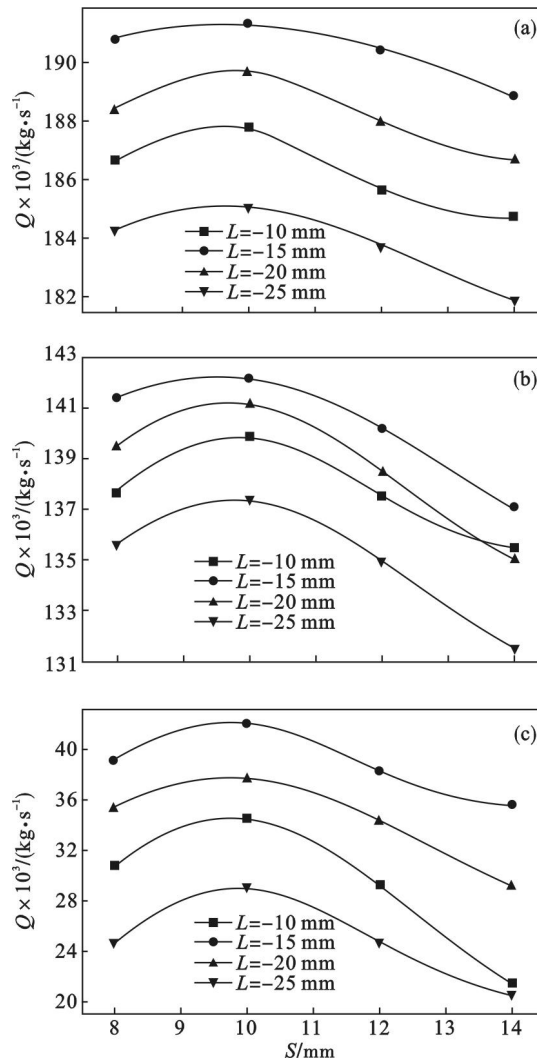


图 5 θ_s 和 L 变化时, Q 随 S 的变化规律
Fig. 5 Variation of suction capability Q with S while θ_s and L are changing
(a)— $\theta_s = 30^\circ$; (b)— $\theta_s = 45^\circ$; (c)— $\theta_s = 60^\circ$.

5 结 论

1) 倾角 θ_s 对钻头抽吸量 Q 的影响最大, 其次是水平偏角 θ_d , 二者对抽吸量 Q 影响均属于高度显著, 垂直间距 L 对抽吸量 Q 影响则属于显著, 而水平间距 S 对抽吸量 Q 的影响最小, 属于不显著. 且最优参数组合为: $\theta_s = 30^\circ$, $\theta_d = 10^\circ$, $L = -15 \text{ mm}$ 和 $S = 10 \text{ mm}$, 该组合下的抽吸量 $Q = 0.1911 \text{ kg/s}$.

2) 将最优参数组合的双排内喷孔式反循环钻头在太钢集团某露天矿区进行钻孔试验. 从钻进效果看, 钻头反循环抽吸力强, 穿过第一层空区继续实现反循环钻进, 钻头依然能够形成良好的反循环抽吸效果.

(下转第 402 页)