

# 同轴双向回转钻进破岩效率研究

曹彦伟, 李 谦\*

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610051)

**摘要:**国内外相关研究均显示同轴双向回转可有效降低钻具振动和提高破岩效率,但双向回转相对传统单向回转的钻进效率的提升水平研究较少。据此,本文建立双向回转钻头以及单向回转钻头与岩石相互作用的有限元模型,以破岩比功作为评价指标量化比较分析了2种钻头的破岩效率。通过定义双向钻头内外壁尺寸差、内外钻头的间隙、内钻头壁厚与双向钻头内外壁尺寸差之比、内外钻头转速比和内外钻头底部高度差5种核心参数,并设计正交试验完成了仿真分析。结果显示,内外钻头高度差与内外钻头间隙对于破岩比功影响比较小,内外钻头尺寸差、内外钻头转速比和内钻头壁厚与双向钻头内外尺寸差之比对破岩比功影响显著。

**关键词:**双向回转钻进;钻进仿真;正交试验设计;破岩比功

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0070-09

## Research on rock-breaking efficiency of coaxial contra-rotary drilling

CAO Yanwei, LI Qian\*

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610051, China)

**Abstract:** Related research at home and abroad have shown coaxial contra-rotary drilling can effectively reduce drilling tool vibration and improve the rock breaking efficiency. There are few researches on the improvement level of drilling efficiency of coaxial contra-rotary drilling compared with traditional drilling. In view of the above, the finite element model of interaction between coaxial contra-rotary bit and rock is established and the finite element model of interaction between conventional bit and rock is established. The rock breaking efficiency of the two kinds of drill bits is compared quantitatively with rock breaking specific work as evaluation index. The orthogonal experiment is designed by defining five core parameters, the size difference between the inner and outer wall of the coaxial contra-rotary bit, the gap between the inner and outer wall of the coaxial contra-rotary bit, the ratio of the inner and outer wall thickness to the size difference between the inner and outer wall of the coaxial contra-rotary bit, the rotating ratio of the inner bit and outer bit and the bottom height difference of the inner and outer bit. The simulation analysis is completed according to the orthogonal experiment. The result show that the height difference between the internal and external bit and the internal and external bit clearance have little influence on the rock breaking specific work, while the size difference between the inner and outer bit, the rotating ratio of the inner and outer bit and the ratio of the wall thickness of the inner bit to the size difference between the inner and outer wall of the coaxial contra-rotary bit have significant influence on the rock breaking specific work.

**Key words:** contra-rotary drilling; drilling simulation; orthogonal experimental design; mechanical specific energy of rock breaking

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.011

基金项目:自然资源部深部地质钻探技术重点实验室开放课题“深部钻探双向回转结构及机理研究”(编号:KF201809);岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放课题“钻头同轴双旋结构对钻柱的振动影响分析”(编号:201904)

作者简介:曹彦伟,男,汉族,1996年生,土木工程专业,硕士研究生,从事双向回转结构机理研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,1666288258@qq.com。

通信作者:李谦,男,汉族,1987年生,讲师,地质资源与地质工程专业,博士,从事钻井智能化分析与应用研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,liqian2014@cdut.edu.cn。

引用格式:曹彦伟.同轴双向回转钻进破岩效率研究[J].钻探工程,2021,48(S1):70-78.

CAO Yanwei. Research on rock-breaking efficiency of coaxial contra-rotary drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):70-78.

## 0 引言

大量的钻探试验及现场分析已经表明,钻柱振动是影响机械钻速和切削效率最为显著的因素之一。随着钻杆柱的长度加长,在巨大的反扭力作用下钻柱会变成螺旋状同时在回转中钻柱与井壁碰撞摩擦和交变荷载作用极易产生振动使钻杆柱提前损坏,导致井内事故的发生。除此之外,振动也会引起能量的浪费,使驱动能量不能直接作用在切削岩石上,间接地增加了能量的消耗。若能降低甚至抵消钻头与地层摩擦产生的反扭力,使钻进过程中钻柱的扭矩趋于稳定,便可降低振动并将更多的回转和给进能量传递到钻头用以提高破岩效率。在航空、潜水领域的共轴双旋翼直升机和对转螺旋桨推进器都采用了扭矩平衡的原理<sup>[1-3]</sup>。澳大利亚南极局科学部门制造了一种冰层浅孔取心用的双管机械钻具,钻具通过电机驱动内外管旋转方向相反,在钻进时上部钻具回转力矩几乎为零<sup>[4]</sup>。陈鹏等介绍了一种可抵消钻柱所受扭矩的井下钻具,该钻具利用电机驱动两个圆锥齿轮沿相反转动,电机所承受的扭矩大小相等方向相反,减小钻杆所受扭矩<sup>[5]</sup>;日本相关团队制造出一种用于岩土工程勘察的小型挖掘机器人,该机器人使用两个钻头,两个钻头向相反的方向旋转,可以抵消来自土壤的反作用力,扭矩保持恒定<sup>[6]</sup>;Southard 钻井公司研发的行星钻头驱动器采用了两个同心反向旋转的钻头,能够有效地消除钻进产生的反扭矩<sup>[7-9]</sup>。高红通通过有限元软件对单、双钻头回转碎岩进行动态受力分析得到双钻头钻进可增加更多的岩石自由面且钻进效率大于单钻头,并使用自平衡钻具进行人造地层室内试验得到双钻头能够减少对岩石的扰动<sup>[10]</sup>。

相关理论与试验已经证明双向回转效率优于单向回转,但目前还没有针对双向回转钻头钻进效率的量化影响分析以及影响钻进效率的关键影响因素。因此,本文使用正交试验方法用有限元分析软件分别对单向回转钻头和双向回转钻头回转钻进破碎岩石的过程进行一系列数值模拟,通过仿真数据确定了内外钻头尺寸参数对双向回转钻进效率的影响。

## 1 钻头-岩石有限元模型的建立

### 1.1 岩石本构模型的建立与验证

为保证数值仿真的正确性,需要在模拟前对岩

石材料进行准确定义。岩石受力先后经过弹性阶段、塑性硬化,达到强度极限后,刚度逐渐降低,岩石进入渐进损伤阶段,当岩石塑性应变达到完全失效时的等效塑性应变时,岩石单元从岩石体中剥落。因考虑了中间主应力的影响,选择 Drucker-Prager 模型来定义岩石的塑性本构关系。采用线性渐进损伤描述岩石材料的损伤过程,判据<sup>[11]</sup>如式(1)所示,当损伤变量  $d = 0$  时认为岩石硬化阶段结束,岩石开始进入刚度降低阶段,当  $d = 1$  时岩石失效,岩石单元从有限元模型中移除,采用完全失效时的有效塑性位移作为直接的材料失效参数。据此,模型材料的参数如表 1 所示。

$$\begin{cases} \epsilon^p \leq \epsilon_f^{pl} \\ d = \frac{L\epsilon^p}{u_f^{pl}} = \frac{u^p}{u_f^{pl}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d$ ——材料损伤变量,无量纲, $0 \leq d \leq 1$ ;  $L$ ——有限元网格特征长度,mm; $\epsilon^p$ ——岩石的等效塑性应变; $\epsilon_f^{pl}$ ——岩石完全失效时的等效塑性应变; $u_f^{pl}$ ——丧失刚度时的有效塑性位移,mm; $u^p$ ——有效塑性位移,mm。

表 1 材料物理参数

模型 材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	内摩擦 角/( $^\circ$ )	剪胀角/ ( $^\circ$ )
泥岩	2515	24.78	0.19435	49.3	49.3
钻头	3485	860.07	0.0768		

根据单轴试验所用高径比为 2 的标准泥岩岩心进行了几何建模,并应用以上的弹塑性损伤本构模型和显式动力学算法,建立与室内单轴试验同尺度的有限元模型如图 1 所示。划分单元总数为 57800,单元类型为六面体八结点减缩积分单元( $C_3D_8R$ ),设定试样底部完全固定,轴向位移由刚体钢板施加,钢板位移给定 2 mm,仿真时间为 0.2 s。模拟应变曲线和与试验获得的应变曲线对比如图 2 所示,可知本文基于 Drucker-Prager 模型建立的本构模型能够较为准确地反映无围压条件下的力学特征。

## 1.2 有限元模型的建立

### 1.2.1 模型阐述

双向钻头内外钻头的尺寸参数包括内/外钻头壁厚、内/外钻头底部高度差和双向钻头内外壁尺寸之差;钻进参数设置包括钻速和内/外钻头转速。为

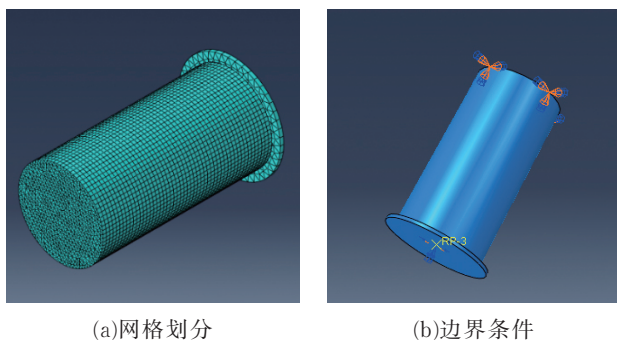


图1 单轴压缩试验有限元模型网格划分与边界条件设置

准确分析钻头结构对钻进效率的影响,本文选择双向回转钻头的内外尺寸差 $A$ ,内钻头与外钻头的间隙 $B$ ,内钻头壁厚与双向钻头内外尺寸差之比 $C$ ,内外钻头的转速比 $D$ ,内外钻头底部高度差 $E$ ,作为正交试验设计的因素。模拟模型如图3所示。在保证一定模拟效率、精度和不影响岩石受力的前提下,对模型进行一定程度简化<sup>[12]</sup>:

(1)模拟过程中将两种钻头模型视为刚体,忽略

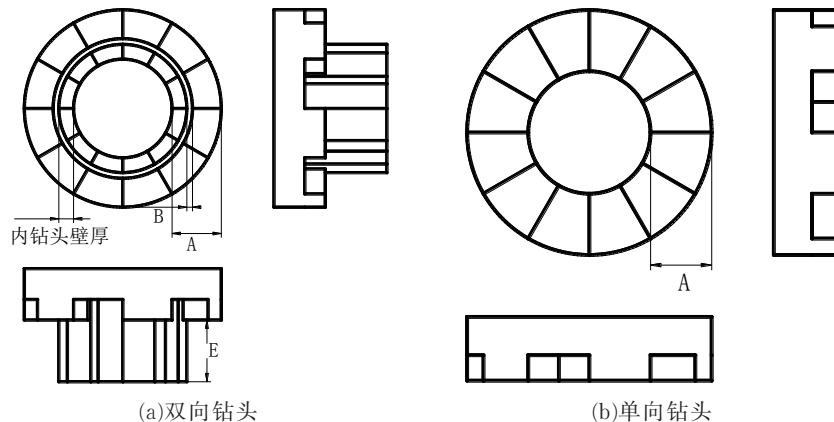


图3 钻头基本三视图

### 1.2.2 网格划分

网格划分如图4所示。钻头模型采用六结点母性三棱柱单元( $C_3D_6$ )扫掠划分网格,网格尺寸大小为2 mm。对岩体模型采用六面体八结点减缩积分单元( $C_3D_8R$ )按进阶算法扫掠划分网格,为使仿真结果尽可能准确并降低计算量节约仿真时间,使岩体模型与钻头接触部分网格密集,非接触部分网格松散,网格密集处尺寸大小为1.9 mm,网格松散处尺寸大小为5 mm。

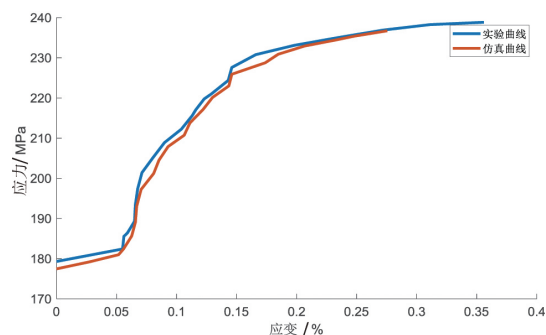


图2 单轴试验以及有限元仿真得到的塑性应变曲线

钻头在钻进过程中的变形;

(2)不考虑围压的作用;

(3)将岩体视为连续、均匀、各向同性的介质,不考虑温度对岩石的影响;

(4)当岩石单元失效后即从岩石体中删除,忽略其失效后对后续破岩的影响;

(5)为了提高研究效率,钻头仿真模型只包括下端的钻头体以及胎体部分。

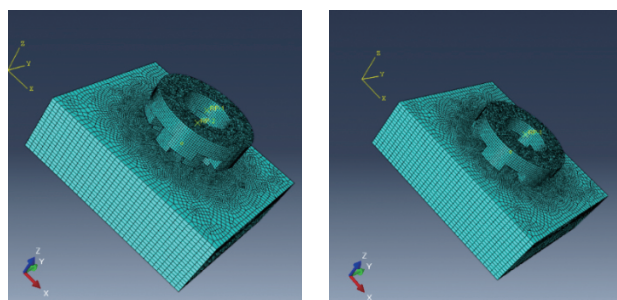


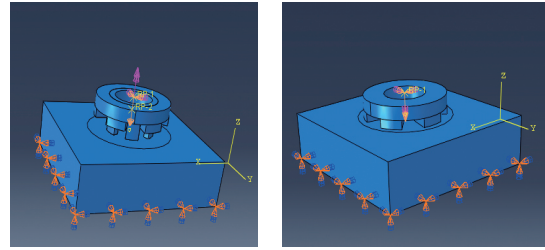
图4 钻头-岩石网格划分模型

1.2.3 边界条件

边界条件的设置如图5所示,对岩石模型的底面施加完全固定,将两种钻头均设为刚体并分别固定在参考点上。基于各自的参考点,定义双向钻头与单向钻头各自在钻头轴线( $z$ 轴)上的钻速以及转速。由于转速设置过大会致使模拟结果中岩石的破碎坑直径变大,而出现双向钻头外钻头与岩石无法接触的问题,故设置的钻头转速比正常岩心钻探规定的转速稍低,设单向回转钻头与双向回转钻头的外钻头均以 150 r/min 的转速绕钻头的轴线转动,同时双向回转内钻头的转速设定为外钻头的倍数。结合实钻参数,使两种钻头都以 28.8 m/h 的速度垂直向下破岩。设定钻头与岩石间的接触类型为通用接触,通用接触可以判别岩石网格不断变化而重新生成的接触表面,钻头与岩石的摩擦系数设置为 0.3<sup>[13]</sup>。仿真时间设置为 2.24 s。

1.3 正交试验方案

为准确分析设定的 5 个因素对钻进效率的影响,设计正交试验进行仿真模拟。考虑因素数量、水平数量与试验次数的协调,每个因素设置两个水平,双向钻头内外壁尺寸差  $A$  参数范围设定为 48~152 mm,取 48 mm 和 74 mm 两个水平,其中,内外钻头间隙  $B$  参数范围设定为 1~10 mm,取 1 mm 和 5.5



(a)双向钻头 (b)单向钻头

图5 钻头边界条件设置

mm 两个水平;内钻头壁厚与双向钻头内外尺寸差之比参数范围设定为 20%~80%,取 30% 和 45% 两个水平;内外钻头高度差参数范围设定为 0~30 mm,取 15 mm 和 30 mm 两个水平。各参数列表如表 2 所示。在不确定交互作用的条件下,试验设计中需要加入 5 个因素可能存在的 10 个交互作用  $A \times B$ 、 $A \times C$ 、 $A \times D$ 、 $A \times E$ 、 $B \times C$ 、 $B \times D$ 、 $B \times E$ 、 $C \times D$ 、 $C \times E$ 、 $D \times E$ ,故自由度总和为 15,选用  $L_{16}(2^{15})$  正交试验分析表<sup>[14]</sup>,试验设计方案如表 3 所示。

表2 设计正交试验因素-水平

水平	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 E
1	48	1	0.3	1.2	15
2	74	5.5	0.45	1.8	30

表3 试验设计方案

试验	A	B	A×B	C	A×C	B×C	D×E	D	A×D	B×D	C×E	C×D	B×E	A×E	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

## 2 试验结果与分析

基于设定的边界条件与试验参数,对16组试验均进行了时长2.24 s的2种钻头的破岩过程显式动

力学仿真,得到了岩石破碎仿真模拟数据,以第一组试验结果为例进行展示如图6所示。

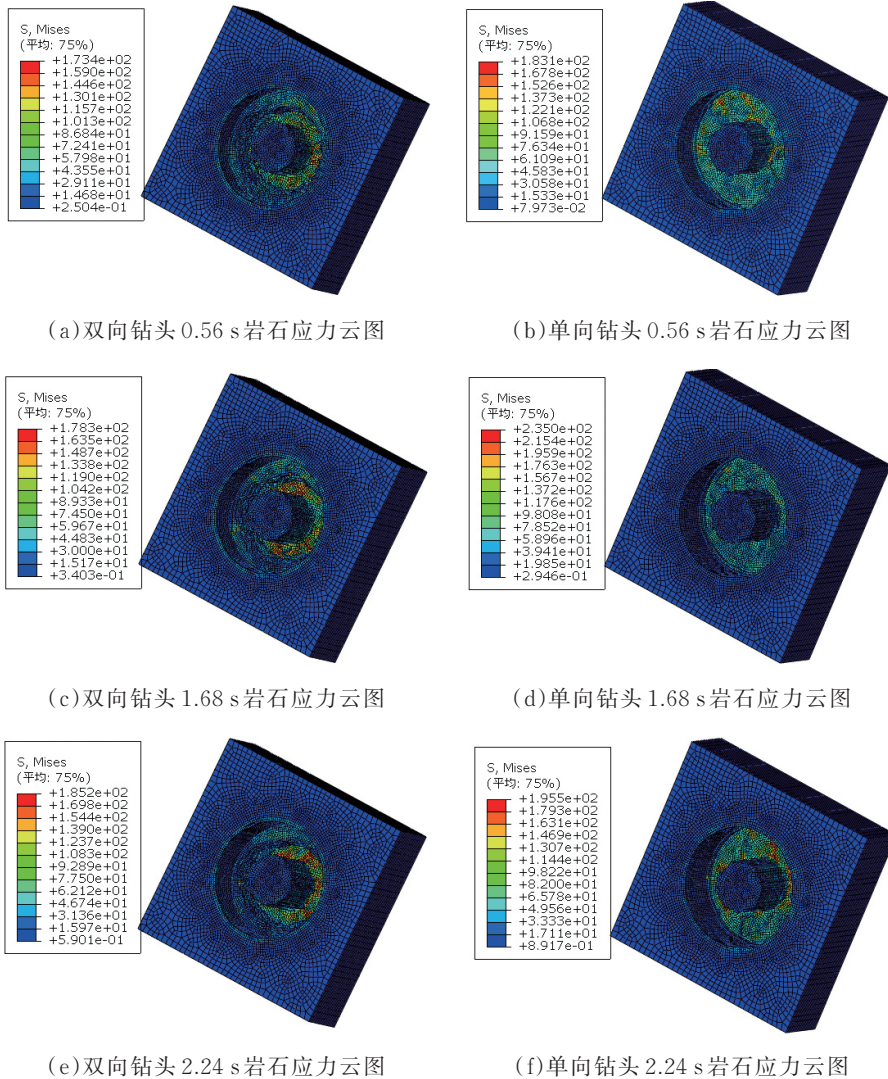


图6 各个时刻岩石应力云图(单位:MPa)

### 2.1 钻压与扭矩

以第一组试验为例展示2种钻头钻进过程中轴向荷载及扭矩随时间的变化趋势如图7所示。从图中可以看出,随着岩石发生体积破碎,钻头载荷是循环跳跃变化的。当2种钻头与岩石接触时,由于双向回转钻头的内外钻头具有一定高度差,单向回转钻头与岩石的接触面积大于双向回转内钻头,故破碎岩石时所需要的最大轴向载荷和最大切向载荷也同样大于双向回转钻头,故单向回转钻头波动幅度明显较剧烈。

计算各组试验中两种钻头钻进过程中的平均钻压与平均扭矩如图8所示。由于单向回转钻头只需取心直径、钻头外径两个参数与双向回转钻头保持一致,而前8组试验双向钻头内外钻头尺寸差都为48 mm,后8组试验内外钻头尺寸差都为74 mm,故单向回转钻头只有两组不同的试验结果。单向钻头各组平均钻压范围为112~181.7 kN;双向回转内钻头各组平均钻压范围为34.5~76.8 kN,双向回转外钻头各组平均钻压范围为0.13~53.5 kN。单向钻头各组平均扭矩范围为1301.9~2574.9 N·m;双向

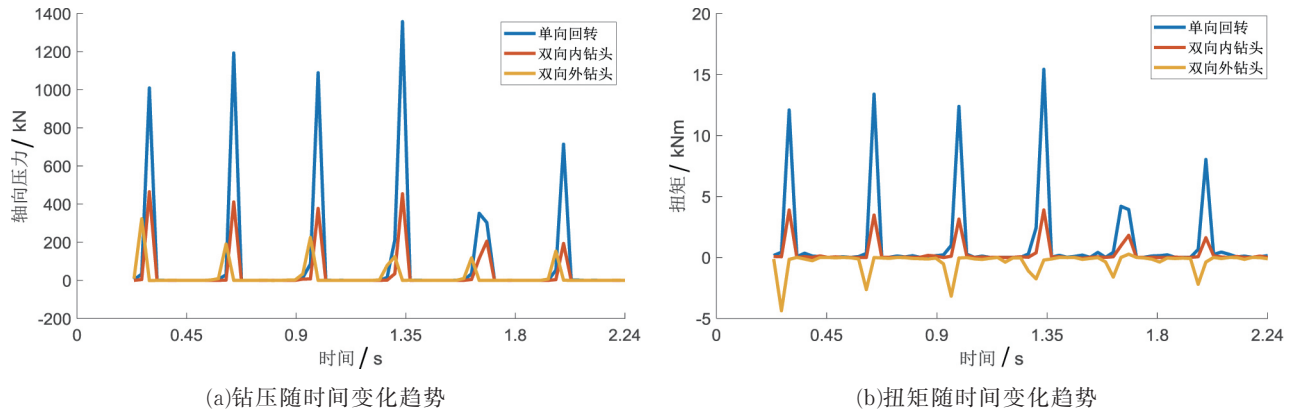


图 7 两种钻头钻进时钻压与扭矩随时间变化趋势

回转内钻头各组平均扭矩范围为 326.6~822.3 N·m;双向回转外钻头各组平均扭矩范围为 22.6~1004.9 N·m。双向内钻头钻压值比单向钻头降低 57.7%~69.2%;双向外钻头钻压值比单向钻头降低 70.6%~99.9%;双向内钻头扭矩值比单向钻头降低 68.1%~74.9%;双向外钻头扭矩值比单向钻头降低

61%~98.3%;整体上看出各组试验钻进过程中单向回转钻头钻进岩石所需的钻压与扭矩要明显大于双向回转钻头。同时可见部分双向回转外钻头的钻压值很小,是因为内钻头先接触岩石,岩石体积破碎形成自由面使外钻头与岩石接触不上,降低了切削反力。这在一定程度上也证明双向回转效率更高。

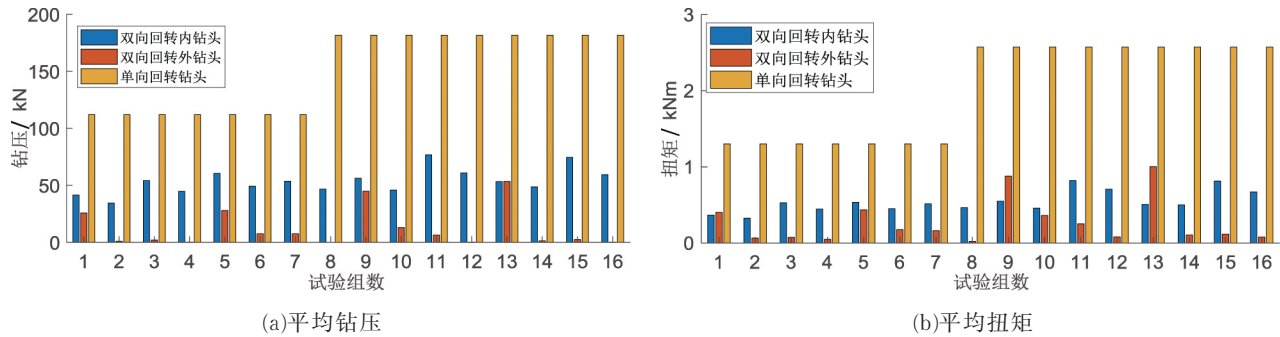


图 8 各组试验两种钻头钻进过程中的平均钻压与平均扭矩

### 2.2 破岩比功计算与分析

从能量消耗的角度,岩石破碎比功可用以评价钻头破岩效果的优劣。在同等条件下,破岩比功越小说明钻头破岩效率越高。单位破岩比功被定义为表示破碎单位体积岩石所需做的功,钻进过程中破碎做功主要包括回转扭矩做功和给进力做功<sup>[15]</sup>。其中,回转扭矩做功等于扭矩乘以钻进所用时间内钻头转动的角度,给进力做功等于钻压乘以钻进进尺,二者相加除以破碎岩石的体积即可求得破碎比功,如式(2)<sup>[16]</sup>所示。经计算,各试验对应的破岩比功仿真结果如表 4 所示。

$$MSE = \frac{W}{V} = \frac{f_h v_h t + f_n v_n t}{V} = \frac{f_h \omega_h r t + f_n v_n t}{V} = \frac{T_h \omega_h t + f_n v_n t}{V} \quad (2)$$

式中: $MSE$ ——破碎比功, $J/m^3$ ;  $W$ 为功, $J$ ;  $V$ ——破碎岩石的体积, $m^3$ ;  $f_h$ ——切向力, $N$ ;  $v_h$ ——钻头切向速度; $f_n$ ——钻压, $N$ ;  $v_n$ ——机械钻速, $m/s$ ;  $\omega_h$ ——角速度, $rad/s$ ;  $r$ ——钻头半径, $m$ ;  $T_h$ ——扭矩, $Nm$ ;  $\theta$ ——钻头在钻进的时间内转的角度, $rad$ ;  $t$ ——钻进总用时, $s$ 。

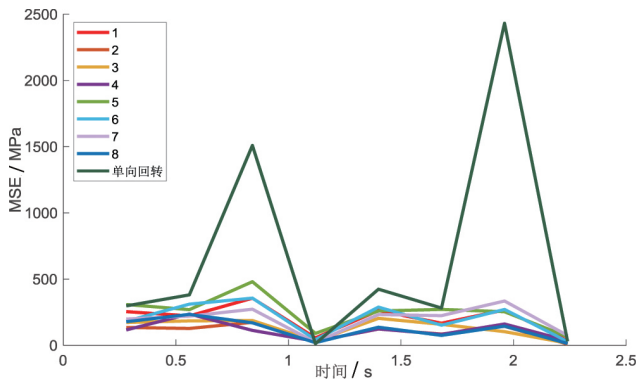
2种钻头的破岩比功随时间的变化及各组试验平均破岩比功的比较如图 9 所示。从图 9(a)、(b)两图中可以看出各组试验破岩比功随时间的变化趋势

表4 仿真试验获得的破碎比功对比(MPa)

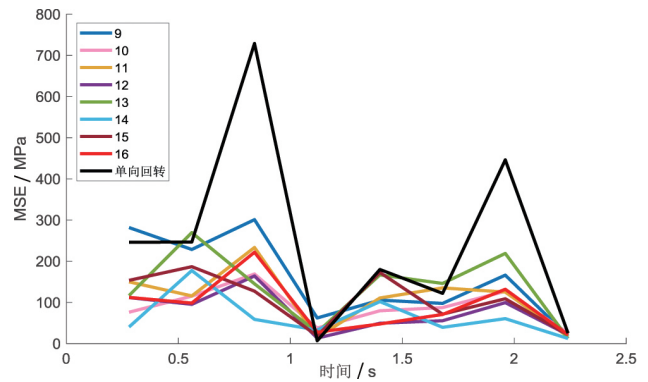
试验号	1	2	3	4	5	6	7	8
MSE双向	202.7	103.7	132.5	112.7	249.9	204.4	197.7	121.9
MSE单向	671.3	671.3	671.3	671.3	671.3	671.3	671.3	671.3
试验号	9	10	11	12	13	14	15	16
MSE双向	157.8	89.9	112.9	76.4	138.1	65.7	107.8	91.6
MSE单向	250.4	250.4	250.4	250.4	250.4	250.4	250.4	250.4

大致相同,且不同时段破岩比功上下波动较大,单向回转钻头的破岩比功的波动明显大于双向回转钻头。图9(c)为各组试验的破岩比功的平均值,双向钻头前八组MSE范围为103.7~249.9 MPa,单向钻头为671.3 MPa,相对于前八组单向钻头MSE降低62.8%~84.6%;后八组MSE范围为65.7~157.8

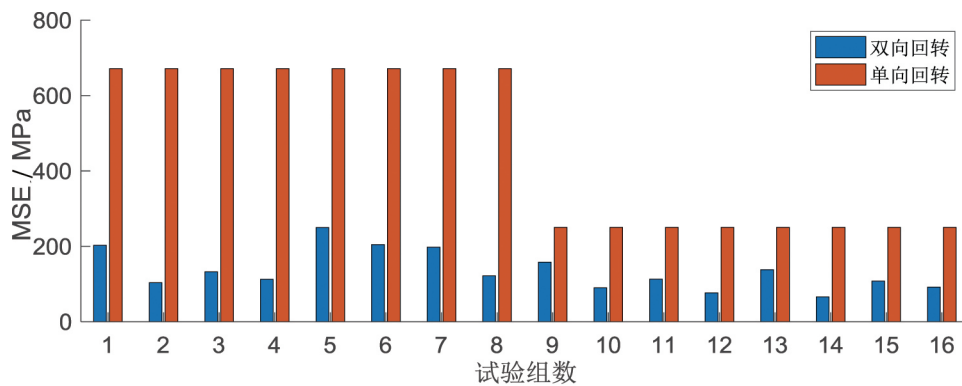
MPa,单向钻头为250.4 MPa,相对于后八组单向钻头MSE降低37%~73.8%,可以看出16组试验条件下双向钻头的MSE均低于单向钻头,在钻头内外尺寸差为48 mm时的双向钻头对单向钻头MSE下降百分比大于钻头内外尺寸差为74 mm的双向钻头对单向钻头MSE下降百分比。



(a) 1~8组两种钻头 MSE 随时间的变化



(b) 9~16组单向回转及双向回转钻头 MSE 随时间的变化



(c) 各组试验破岩比功的平均值

图9 两种钻头的破岩比功随时间的变化及各组试验平均破岩比功的比较

### 2.3 参数间交互作用

为了比较各因素对破岩比功的影响大小并选取最佳水平,用极差分析法分析试验得到的破岩比功数据见表5、图10。

从表5和图10中可以看出,各因子极差大小顺序为  $A > D > C > A \times B > B > C \times D > E > A \times C > D \times E > A \times E > A \times D > B \times E > B \times C > C \times E > B \times D$ 。可见,双向钻头内外壁尺寸差A、内外钻头

表 5 极差分析

因素	$K_1$	$K_2$	$k_1$	$k_2$	$R$
A	1325.5	840.2	165.7	105	60.7
B	988.6	1177.1	123.6	147.1	23.6
A×B	954.8	1210.9	119.4	151.4	32
C	1212.2	953.5	151.5	119.2	32.3
A×C	1149.4	1016.3	143.7	127	16.6
B×C	1073.1	1092.6	134.1	136.6	2.4
D×E	1019.1	1146.6	127.4	143.3	15.9
D	1299.4	866.3	162.4	108.3	54.1
A×D	1106.4	1059.3	138.3	132.4	5.9
B×D	1089.5	1076.2	136.2	134.5	1.7
C×E	1073.7	1092	134.2	136.5	2.3
C×D	1151.1	1014.6	143.9	126.8	17.1
B×E	1063.5	1102.2	132.9	137.8	4.8
A×E	1125.2	1040.5	140.7	130.1	10.65
E	1150	1015.7	143.75	127	16.8

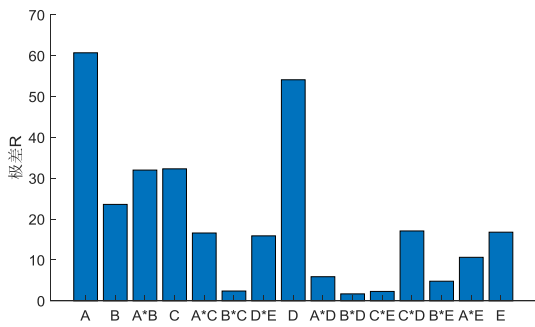


图 10 各因素极差对比

转速比  $D$ 、内钻头壁厚与双向钻头内外壁尺寸差之比  $C$  都比较重要,  $A$ 、 $D$ 、 $C$  都取二水平为好, 即双向钻头内外壁尺寸差应选 74 mm、内钻头壁厚与双向钻头内外壁尺寸差之比应选 0.45、内外钻头的转速比应选 1.8。从图 10 中可以看出比较明显的交互作用有  $A \times B$ 、 $D \times E$ 、 $A \times C$ 、 $C \times D$ , 交互作用的因素水平不能随便选取, 需要画出二元图来分析(见图 11)。

从  $A$  和  $B$  交互作用二元图中看应选  $A_2$  水平, 从图中可以看出交互作用的影响要明显小于  $A$  因素的影响; 从  $A$  和  $C$  交互作用二元图中看应选  $A_2$ 、 $C_2$  水平; 从  $D$  和  $E$  交互作用二元图中看应选  $D_2$ 、 $E_2$  水平; 从  $C$  和  $D$  交互作用二元图中看应选  $C_2$ 、 $D_2$  水平。整体来看, 双向钻头内外尺寸差  $A$  应选  $A_2$  水平, 根据  $B$  因素极差值及  $A$  和  $B$  交互作用二元图得出内外

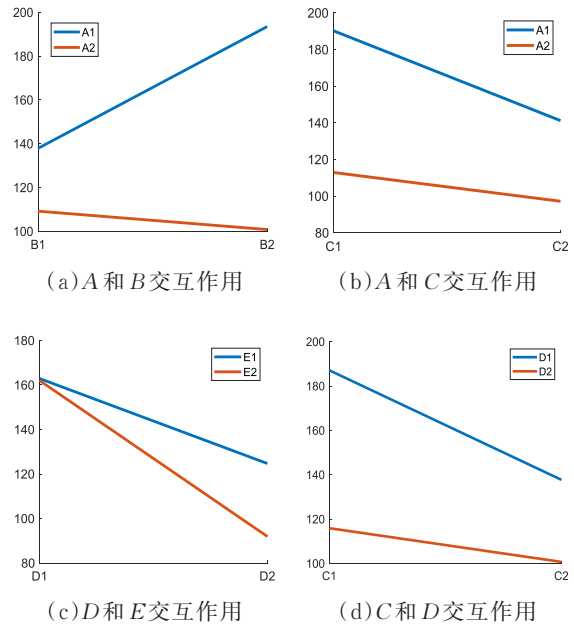


图 11 不同因素交互作用二元图

钻头间隙应选  $B_1$  水平, 内钻头壁厚与双向钻头内外尺寸差之比应选  $C_2$  水平; 内外钻头转速比应选  $D_2$  水平; 内外钻头高度差应选  $E_2$  水平, 即  $A_2 B_1 C_2 D_2 E_2$ , 双向钻头内外壁尺寸差取 74 mm, 内外钻头间隙取 1 mm, 内钻头壁厚与双向钻头内外壁尺寸差之比取 0.45, 内外钻头转速比取 1.8, 内外钻头高度差取 30 mm。

### 3 结论

本文用数值模拟对双向回转钻头钻进效率进行了量化影响分析研究, 获得了如下结论:

(1) 建立双向钻头、单向钻头与岩石相互作用的有限元模型, 仿真结果显示在相同的边界条件下双向回转内钻头钻进时的钻压比单向钻头降低 57.7%~69.2%, 外钻头钻进时的钻压比单向钻头降低 70.6%~99.9%; 内钻头钻进时的扭矩比单向钻头降低了 68.1%~74.9%, 外钻头钻进时的扭矩比单向钻头降低了 61%~98.3%; 钻头破岩比功比单向钻头降低了 62.8%~73.8%, 可以看出双向回转钻头钻进时的扭矩和破岩比功均明显小于常规单向回转钻。

(2) 以破岩比功为钻头破碎岩石效率的评价指标, 通过正交试验获知五个设计参数中双向回转钻头内外钻头底部高度差与内外钻头间隙对于破岩比



功影响比较小,内外钻头尺寸差、内外钻头转速比和内钻头壁厚与双向钻头内外壁尺寸差之比对破岩比功影响很显著。同时由试验结果得到了破岩比功最小的双向回转钻头设计参数组合,即双向钻头内外壁尺寸差为74 mm,内外钻头间隙为1 mm,内钻头壁厚与双向钻头内外壁尺寸差之比为0.45;内外钻头转速比为1.8;内外钻头高度差为30 mm。

#### 参考文献:

- [1] 吕增岁. 共轴双旋翼直升机旋翼/机体耦合动稳定性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [2] 蔡昊鹏. 水下机器人扭矩平衡式推进器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [3] 汤庆儒. 同轴对转行星齿轮传动优化与有限寿命评价[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [4] E. Wehrle. A shallow core-collecting mechanical ice drill [J]. Australian Glaciological Research, 1982-1983:196-201.
- [5] 陈鹏,银进,康博,等. 新型无扭矩井下电动钻具设计[J]. 科技创新与应用,2014(5):44.
- [6] Abe R, Kawamura Y, Kamijima K, et al. Performance evaluation of contra-rotating drill for DIGBOT [C]// Proceedings of SICE Annual Conference, 2010.
- [7] Southard R C. New assembly drills without reactive torque [C]// SPE/IADC Drilling Conference, 2007.
- [8] 陈勇,陈若铭,张兴国,等. PDC钻头反扭矩分析及控制技术[J]. 石油矿场机械,2010,39(5):59-61.
- [9] 戴金岭,温林荣,何育光,等. 无反扭矩钻井装置和扭矩平衡分析[J]. 石油钻探技术,2008,36(1):53-56.
- [10] 高红通. 双向回转条件下钻头碎岩过程分析与试验[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [11] 李海. 扭转冲击作用下PDC切削齿破岩数值模拟研究[D]. 成都:西南石油大学,2014.
- [12] 张强,刘峻铭,顾颖颖,等. 不同卸荷工况下岩石钻孔破碎特性研究[J]. 应用力学学报,2019,36(3):727-733.
- [13] 马亚超. 基于切削齿动态磨损的PDC钻头侧向力平衡分析与布齿优化设计[D]. 成都:西南石油大学,2017.
- [14] 何为,唐斌,薛卫东. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [15] 吴海东. 高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [16] 祝效华,李海. PDC切削齿破岩效率数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(1):182-191.