

水平定向钻进破岩数值仿真及力学特性分析

韩添阳¹, 王义红², 常喜顺², 王朝阳², 赵 权¹, 贺 鑫^{1,3*}

(1. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 陕西太合智能钻探有限公司, 陕西 西安 710086;
3. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要:水平定向钻进技术在城市地下空间开发、资源勘探等领域具有广阔的应用前景,但其破岩过程复杂,研究水平定向钻进过程的动态特性及参数响应规律十分重要。本文以PDC钻头和牙轮钻头为研究对象,基于ABAQUS建立了水平定向钻进地层的三维有限元仿真模型,模拟了钻头在钻进过程中岩体的变形、破坏和钻头的受力情况,得到了钻头的反力和扭矩的响应曲线,并分析两种钻头破岩动态特性的差异。通过参数化仿真,研究了不同钻进参数和岩石力学参数对钻头破岩动力学特性的影响规律。基于响应面分析法建立了钻头反力和扭矩的多元参数回归预测模型,从而得出两种钻头的钻速预测方程,并验证了该方程具有较高的精确性,为优化钻进参数、提高钻进效率提供了理论依据。

关键词:水平定向钻进;破岩过程;钻速方程;PDC钻头;牙轮钻头

中图分类号:P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0037-10

Numerical simulation and mechanical property analysis of rock breaking for horizontal directional drilling

HAN Tianyang¹, WANG Yihong², CHANG Xishun², WANG Chaoyang², ZHAO Quan¹, HE Xin^{1,3*}

(1. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China; 2. Shaanxi Taihe Intelligent Drilling Company, Xi'an Shaanxi 710086, China; 3. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Horizontal directional drilling technology has broad application prospects in urban underground space development, resource exploration, and other fields. However, it has complex rock breaking process, making the study of the dynamic characteristics and parameter response patterns of horizontal directional drilling processes crucial. This paper takes the PDC bit and roller bit as research objects, a three-dimensional finite element simulation model of horizontal directional drilling formations based on ABAQUS is established, in which the deformation, failure of rock mass and the forces acting on the bit during drilling are simulated, the response curves of bit reaction forces and torques are obtained, and the dynamic differences in rock breaking characteristics between the two types of bits are analysed. Through parametric simulation, the influence of different drilling parameters and rock mechanics parameters on the dynamics properties of bit's rock breaking is investigated. A multivariate parameter regression prediction model for bit reaction forces and torques is developed based on response surface analysis, and the drilling speed prediction equations for both types of bit are derived, and the accuracy of these equations is verified. These researches provide a theoretical basis for optimizing drilling parameters and improving drilling efficiency.

Key words: horizontal directional drilling; the process of rock breaking; drilling speed equation; PDC bits; roller bit

收稿日期:2024-09-21; 修回日期:2025-01-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.005

基金项目:国家重点研发计划“高效钻孔救援技术及装备”(编号:2022YFC3005904-2)

第一作者:韩添阳,男,汉族,2000年生,硕士研究生,机械工程专业,主要从事机械设计与仿真分析等方面的研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388路,2878627750@qq.com。

通信作者:贺鑫,男,汉族,1989年生,讲师,机械工程专业,博士,主要从事机械设计与仿真分析等方面的研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388路,hexin@cug.edu.cn。

引用格式:韩添阳,王义红,常喜顺,等.水平定向钻进破岩数值仿真及力学特性分析[J].钻探工程,2025,52(3):37-46.

HAN Tianyang, WANG Yihong, CHANG Xishun, et al. Numerical simulation and mechanical property analysis of rock breaking for horizontal directional drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 37-46.

0 引言

相比传统钻进方法,水平定向钻进技术对环境破坏小、交通影响小、施工快速可靠、综合成本低,在工程勘察领域应用广泛^[1]。在钻进过程中钻头破岩的动态过程复杂,钻头动态受力特性与钻进参数及岩石力学参数之间密切关联,研究钻头破岩动态受力对于预测钻速,优化钻进参数具有重要意义。

对此,国内外学者对钻进破岩过程的力学特性进行了广泛研究。早期针对钻进破岩研究多集中于试验研究和简化的理论模型。王国荣等^[2]对盘式单牙轮钻头进行砂岩钻进过程的台架试验,得出了其破岩过程和动态曲线,结果表明这类钻头与井底接触有较长的滑移过程,振动较小,有利于提高钻头寿命和破岩效率,但不适用于硬脆和研磨性强的地层中。邹德永等^[3]通过对PDC钻头钻进岩样试验研究了切削齿尺寸、后倾角和布齿密度对其破岩效率的影响。

理论模型大多对岩石的力学性质进行了简化,难以准确地描述岩石的非线性变形和破坏行为。而试验研究受到成本、时间和技术条件的限制,难以全面地模拟现场的复杂工况。与传统的试验研究和简化的理论分析相比,数值模拟能够更全面、直观地模拟复杂的地层条件和钻进过程,通过数值模拟,可以获得大量的量化数据,为优化钻进参数、预测钻速提供可靠指导。对此,许多学者对钻进过程的数值模拟进行了研究。况雨春等^[4-5]建立了三牙轮钻头钻进仿真模型,分析了三牙轮钻头结构、钻压和岩石性质对轮体速比的影响;采用了Mohr-Coulomb准则和Drucker-Prager准则分别进行了PDC单齿破岩仿真,对比分析计算结果,评判了不同本构模型的精度和效率。Woldemichael等^[6]采用Ansys Autodyn-2D的有限元方法对PDC单刀具和岩石的正交切割过程进行仿真,研究了PDC钻头切削深度对钻进过程的影响,发现切削深度的增加会使钻速提高,但也导致了切削力的增加。刘忠等^[7]开展了PDC钻头混合布齿参数对破岩效率影响规律试验和数值模拟,对PDC钻头切削结构和布齿优化设计进行研究。Wang等^[8]建立了基于黏聚单元的数值模型,研究了复合冲击作用下的岩石动态破碎过程及机理,并通过砂岩进行动态冲击试验,验证了该方法的有效性。吴泽兵等^[9]基于Drucker-Prager准则和弹塑性力构建了钻齿与岩石

的有限元模型,对锯齿形和常规PDC钻头的破岩性能和温度场进行对比研究。文国军等^[10]基于ABAQUS研究了PDC钻头在软硬交错地层钻进过程中的动力学特性,通过响应面分析,得到多参数下钻头受力的解析模型。Guo等^[11]基于实验和数值分析方法,分析了两种不同形状复合锥形单牙轮钻头的破岩机理,并得出结论:牙轮钻头依靠冲击和剪切联合破碎岩石,且钻头的破岩方法主要由锥体结构决定,与岩石性质无显著关系。吴金发^[12]建立了金刚石绳索取心钻进在水平勘察孔的几何模型,通过数值模拟得出了转速与进给压力对钻柱摩阻的影响规律。郭正伟等^[13]针对复合锥单牙轮钻头现场试验中,牙齿磨损不均匀这一问题,通过有限元分析的方法,模拟了各齿圈牙齿载荷分布和切削时间,研究结果表明钻头钻进过程中向井壁一侧发生倾斜是导致偏磨现象的主要原因。Yang等^[14]建立了平面、斧形和三棱型PDC钻头在旋转冲击载荷作用下的三维破岩数值模型,定量分析了不同冲击幅度和频率下的刀具破岩规律,评价了3种类型刀具在不同地质条件下的破岩效果差异。吴泽兵等^[15]对PDC-牙轮混合钻头进行破岩仿真,得出混合钻头钻进时钻速及岩石应力场变化规律,并设计出一种适用于一趟钻的智能混合钻头。汤凤林等^[16]研究了PDC钻头在岩石钻进中的破碎机制,指出体积破碎是最有效的方式,并通过试验分析钻头轴载和转速等参数的关系,提出优化钻进规程以提高效率和经济性的建议。荣准等^[17]研究了斧形曲面PDC齿在五宝场沙溪庙硬塑性地层的破岩性能,发现与常规PDC钻头相比,该齿通过剪切、挤压和犁切的综合作用,表现出更强的破岩性能和稳定性。冯云春等^[18]设计了一种适用于火山岩地层的异形齿PDC钻头,与普通PDC钻头对比,显著提高了平均钻速和钻头进尺,降低了钻井成本。

综上可知,学者们在破岩数值仿真方面取得了丰硕的成果,然而现有研究大多针对垂直钻进破岩,对水平钻进破岩的数值模拟较少。此外,针对单齿破岩仿真较多,对全钻头的破岩仿真较少;单因素分析较多,对多因素耦合作用的研究相对较少。且现有对于钻速方程的研究通常基于理论推导的经验模型,很少基于数值模拟获得。对此,本文选取了水平定向钻进中的2类典型钻头:PDC钻头和三牙轮钻头为研究对象,通过数值仿真模拟了

两种钻头的动态破岩过程,分析了其受到地层反力和扭矩的动态特性。并针对不同的地层参数和钻进参数开展参数化研究,探讨地层参数、钻进参数与钻头反力、扭矩之间的响应规律,基于参数化数值仿真得到钻速预测方程。

1 水平定向钻进过程仿真

1.1 模型建立

本文仿真选取的钻头为水平定向钻进常用的聚晶金刚石复合片钻头和三牙轮钻头,如图 1 所示。两类钻头选择接近的尺寸,钻头公称直径为 98 mm,高度 160 mm。地层模型尺寸大小为 400 mm×400 mm×400 mm。为了便于求解,对钻头模型部分结构进行简化,保留破岩相关的主要特征。

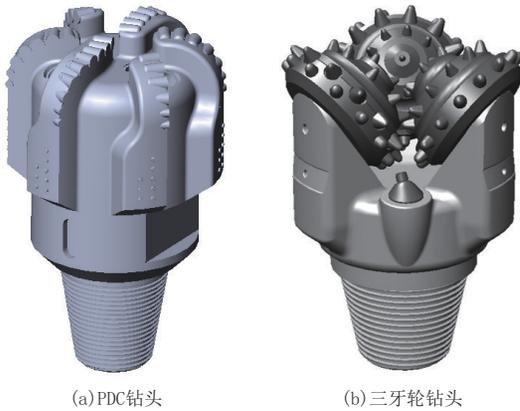


图 1 钻头三维模型
Fig.1 3D model of the bits

1.2 网格划分

网格划分质量是影响仿真结果精确性和仿真效率的关键。地层整体采用网格单元选用 C3D8R 六面体单元类型,中心轴画法,同时考虑到钻头与地层的圆柱形接触区域仅为地层的一小部分,因此对地层与钻头的圆柱形接触区域进行局部加密。钻头网格较为复杂,选择 C3D10 四面体单元类型划分。将网格划分好的钻头和地层模型进行装配,钻头初始位置与地层间距 2 mm,装配图如图 2 所示。

1.3 岩石本构模型和破坏准则

岩石是一种复杂的各向异性材料,岩石在塑性阶段应力-应变关系表现为非线性,因此选择岩石的本构模型是钻进仿真的关键。Mohr-Coulomb 准则和 Drucker-Prager 准则在描述本构关系时较为常用^[19]。Drucker-Prager 准则是考虑静水压力影响的

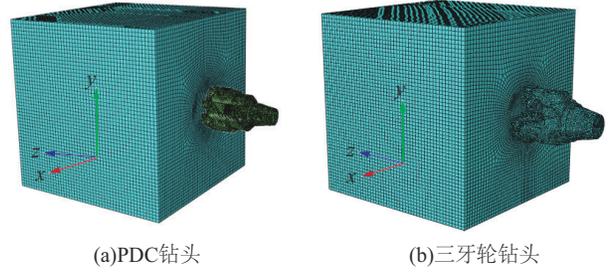


图 2 钻头与地层仿真模型示意
Fig.2 Simulation model of the drill bit and the formation

广义 Mises 屈服与破坏准则^[20],其一般形式为:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (1)$$

式中: α 、 K ——由岩石黏聚力 c 与内摩擦角 φ 相关的常量。

表达式如下:

$$\alpha = 2 \sin \varphi / [\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)] \quad (2)$$

$$K = 6c \cos \varphi / [\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)] \quad (3)$$

应力第一不变量:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4)$$

应力第二不变量:

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——第一、第二、第三主应力。

随着钻进的进行,钻头与岩石发生接触,当岩石单元节点的等效塑性应变值达到材料的等效塑性应变值时,材料开始破坏。岩石破碎塑性应变判定准则表达式:

$$\epsilon^p \leq \epsilon_f^{pl} \quad (6)$$

式中: ϵ^p ——岩石破碎前等效塑性应变; ϵ_f^{pl} ——岩石破碎后的等效塑性应变。

Drucker-Prager 准则改进了在 Mohr-Coulomb 准则未考虑中间主应力的缺陷,在岩石力学分析和工程数值计算中被广泛应用,因此本文中选取 Drucker-Prager 准则作为岩石破坏准则。

1.4 仿真假设

考虑到钻进过程的复杂性,为了便于简化模型和提高计算效率,对仿真做出以下假设:

- (1) 钻头视为刚体,忽略钻头磨损;
- (2) 忽略钻进过程温度、振动等因素影响;
- (3) 忽略钻进过程产生岩屑的影响,岩石单元在被破坏后自动删除。

1.5 仿真参数设定

对于PDC钻头,由于不含活动部件,将钻头整体设置为刚体。对于三牙轮钻头,将3个牙轮锥体和钻头体分别设置为刚体,在每个锥体中心轴线上建立2个参考点并进行铰连接,限制牙轮除轴向转动外的自由度,以模拟牙轮自转。对两种钻头均限制 x 轴和 y 轴方向平动和转动自由度,保留 z 轴方向平动和转动自由度,钻速设置为75 mm/s,转速为40 r/min。将地层底面视为远端地层,不受钻进影响,设置为完全固定。地层表面施加10 MPa正压力模拟地层围压。水平钻进与垂直钻进相比,由于钻进方向和重力方向垂直,钻头前端与孔壁地层发生接触,因此需重点考虑其摩擦阻力,对钻头施加重力作用,钻头与地层间接触方式采用面-面接触,接触属性的法向行为设定为硬接触,法向行为设定为罚摩擦,摩擦系数取0.2。整个仿真过程采用显式动力学模块求解,分析步时间长度设置为2 s,钻头能旋转一周。钻头和地层材料参数设置见表1,仿真软件中的岩土力学基本参数设置见表2。

表1 材料物理参数

模型	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/MPa	泊松比
钻头	7850	210000	0.29
地层	2600	30000	0.25

表2 ABAQUS中岩土力学参数

模型	内摩擦角/($^{\circ}$)	流应力比	膨胀角/($^{\circ}$)	单轴抗压强度/MPa
地层	40	1.0	10	40~80

2 仿真结果分析

求解完成后,以抗压强度为60 MPa的地层为例,可以得到2种类型钻头钻进过程地层的应力云图,见图3、图4。从图中可以直观地观察到不同钻头的岩石破碎和应力分布情况。当钻头切削齿钻进至与地层接触时,岩石单元受到切削和挤压作用,此时岩石材料在与钻头的相互作用下受到应力作用,发生弹塑性形变并传递应力至周围相邻的单元区域。

钻头破坏地层过程会受到地层反力(F_x, F_y, F_z)和反扭矩(M_x, M_y, M_z)作用。图5、图6所示为2种

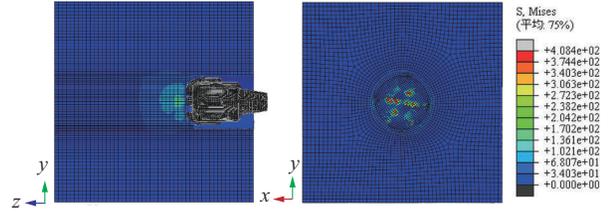


图3 PDC钻头钻进地层应力

Fig.3 Formation stress using PDC bit

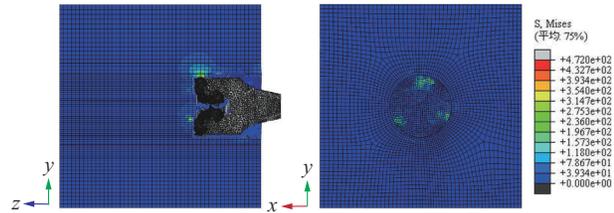


图4 三牙轮钻头钻进地层应力

Fig.4 Formation stress using tricone bit

类型钻头钻进地层时所受反力和扭矩随时间变化曲线。PDC钻头在 x 轴和 y 轴方向反力在0值附近振荡,在 z 轴方向反力随着钻进的进行,从0开始以来回波动的形式逐渐增加,到达峰值后,整体趋势又以波动的形式逐渐减小,同时整个钻进过程出现明显周期性。牙轮钻头 x 轴和 y 轴方向反力在0值附近波动,与PDC钻头相比波动幅度更大,而在 z 轴方向的反力随着钻进过程的进行,逐渐增加,并在钻进到一定深度后,最终稳定在一定范围区间内来回振荡,且无明显周期性。两类钻头扭矩变化趋势接近,三牙轮钻头曲线相对波动幅度更大,PDC钻头曲线波动频率更快。

两类钻头反力和扭矩随时间的响应曲线差异反映了两者在钻头结构上的不同:PDC钻头主要部分由钻头体、PDC切削齿等组成,切削齿分布更加规则,整个钻头可视为一个整体。而三牙轮钻头由钻头体、3个呈 120° 分布的牙轮、牙爪等组成,结构更加复杂,同时钻进过程会由于钻头的自转和公转产生振动,所以波动幅度更大。

3 多元回归模型预测

3.1 响应面分析

为了研究不同参数对钻头所受反力和扭矩的影响,本文通过响应面分析法建立多元回归模型,进行相关性分析。根据中心复合设计方法,设置三因素五水平试验,其中3个因素为:钻速(A)、转速

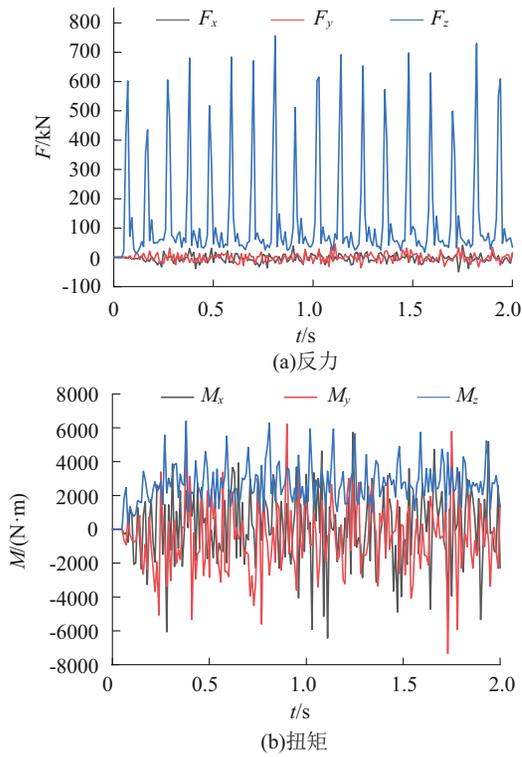


图 5 PDC 钻头钻进反力和扭矩随时间变化曲线
Fig.5 Curves of resistance and torque vs. time using PDC bit

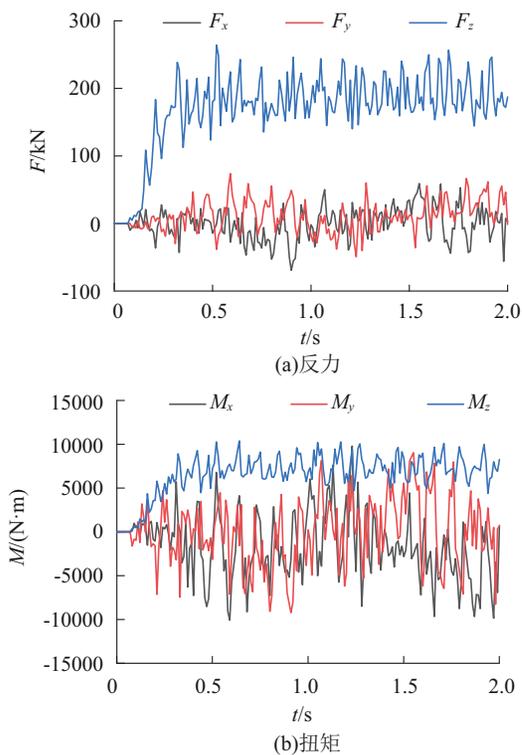


图 6 三牙轮钻头钻进反力和扭矩随时间变化曲线
Fig.6 Curves of resistance and torque vs. time using tricone bit

(B)、地层强度(C)。响应面试验设计参数如表 3 所示。

表 3 响应面试验设计参数
Table 3 Parameters designed for response surface experiment

试验因素	水平				
钻速(A)	10	20	30	40	50
转速(B)	10	20	30	40	50
地层强度(C)	40	50	60	70	80

3.1.1 PDC 钻头仿真试验

对 PDC 钻头进行相应的仿真试验,将整个钻进过程的钻进方向 z 轴反力(F_z)和扭矩(M_z)取平均值作为输出量,响应面试验结果见表 4。数值计算的波动性可能导致表中重复试验仿真结果略有差异。

对回归模型进行方差及可靠性分析,分析结果如表 5、表 6 所示。 F 值和 P 值反映了检验特征与变量之间的相关性。 F 值越大, P 值越小,代表该模型

表 4 PDC 钻头响应面试验结果

Table 4 Experimental results of PDC bit response surface

编号	钻速/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	地层强 度/MPa	反力/ kN	扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)
1	20	20	50	106.1	1494
2	40	20	50	144.9	2553
3	20	40	50	84.0	952
4	40	40	50	119.6	1643
5	20	20	70	143.3	2072
6	40	20	70	199.1	3602
7	20	40	70	110.3	1341
8	40	40	70	161.6	2290
9	10	30	60	74.5	732
10	50	30	60	173.1	2842
11	30	10	60	174.2	3520
12	30	50	60	108.3	1346
13	30	30	40	88.6	1272
14	30	30	80	160.8	2458
15	30	30	60	124.5	1863
16	30	30	60	127.5	1956
17	30	30	60	121.2	1689
18	30	30	60	120.3	1624
19	30	30	60	128.8	1985
20	30	30	60	122.4	1813

相关性越显著。表5中A、B、C的P值<0.0001,表明与响应值间存在极显著相关性;B²、AC的P值<0.05,表明与响应值间存在较为显著关系。表6中A、B、C的P值<0.0001,表明与响应值间存在极显著相关性;B²、AB的P值<0.05,表明与响应值间存在较为显著关系。

表5 PDC钻头反力模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	F值	P值
模型	19428.15	9	99.29	< 0.0001**
A	8963.36	1	412.26	< 0.0001**
B	3896.88	1	179.23	< 0.0001**
C	5779.8	1	265.84	< 0.0001**
A ²	3.8	1	0.1747	0.6848
B ²	567.56	1	26.1	0.0005*
C ²	9.47	1	0.4355	0.5242
AB	7.41	1	0.3409	0.5723
AC	133.66	1	6.15	0.0326*
BC	66.7	1	3.07	0.1104
残差	217.42	10		
失拟项	157.87	5	2.65	0.1542
纯误差	59.55	5		
合计	19645.57	19		

注:“**”(P<0.0001)为此项交互影响极显著,“*”(P<0.05)为显著。

因此对该回归模型进行优化,保留相关性显著项,通过回归分析得到PDC钻头反力均值F₁及扭矩均值M₁的二次多项式回归模型:

$$F_1 = 102.5 - 0.086A - 4.31B + 0.67C + 0.04B^2 + 0.046AC \quad (7)$$

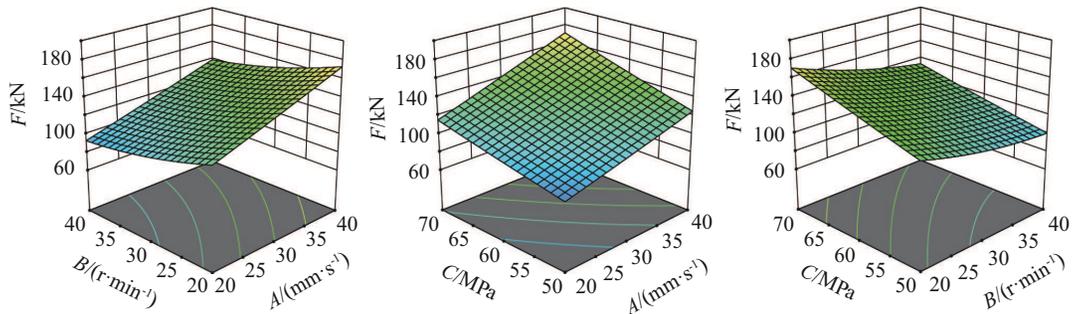


图7 PDC钻头反力均值交互效应响应曲面

Fig.7 PDC bit resistance mean interaction effect response surface

表6 PDC钻头扭矩模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	F值	P值
模型	1.08×10 ⁷	9	68.86	< 0.0001**
A	4.46×10 ⁶	1	257.19	< 0.0001**
B	3.85×10 ⁶	1	221.62	< 0.0001**
C	1.58×10 ⁶	1	91.34	< 0.0001**
A ²	1.94×10 ³	1	0.1118	0.745
B ²	5.86×10 ⁵	1	33.8	0.0002*
C ²	2.89×10 ³	1	0.1664	0.6919
AB	1.13×10 ⁵	1	6.49	0.029*
AC	6.64×10 ⁴	1	3.83	0.0788
BC	4.37×10 ⁴	1	2.52	0.1437
残差	1.74×10 ⁵	10		
失拟项	5.75×10 ⁴	5	0.4952	0.7705
纯误差	1.16×10 ⁵	5		
合计	1.09×10 ⁷	19		

注:“**”(P<0.0001)为此项交互影响极显著,“*”(P<0.05)为显著。

$$M_1 = 134.3 + 88.39A - 104.86B + 31.47C + 1.52B^2 - 1.19AB \quad (8)$$

式中:F₁——PDC钻头轴向力均值;M₁——PDC钻头轴向扭矩均值。

根据模型结果,绘制各因素交互效应与PDC钻头反力均值的3D响应曲面图,如图7所示。由图可见,地层强度越大,转速越小,钻速越大,钻进过程中PDC钻头所受反力均值越大。等高线与坐标轴交点越密集,表明该因素对响应值影响越大,图中可以看出,3个因素对于地层反力影响强弱依次为:A>C>B。

绘制各因素交互效应与钻头扭矩均值的3D响应曲面图,见图8。地层强度越大,转速越小,钻速越大,钻进过程中PDC钻头所受扭矩均值越大。等

高线与坐标轴交点越密集,表明该因素对响应值影响越大,图中可以看出,3个因素对于地层反力影响强弱依次为: $A > B > C$ 。

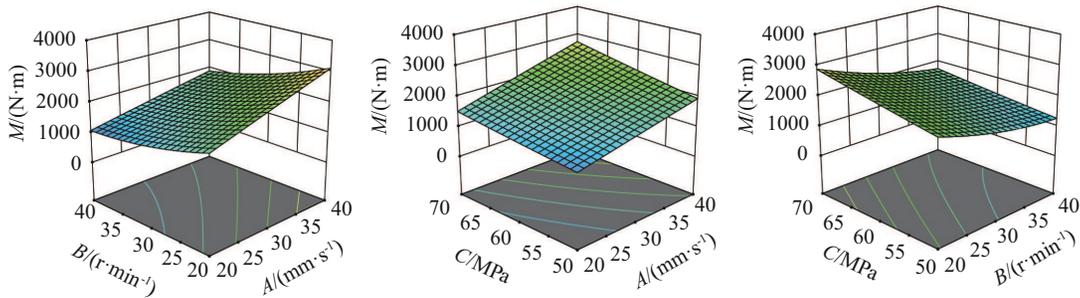


图8 PDC钻头扭矩均值交互效应响应曲面

Fig.8 PDC bit torque mean interaction effect response surface

3.1.2 三牙轮钻头仿真试验

与PDC钻头类似,对三牙轮钻头钻进过程进行相应的仿真试验,试验结果如表7所示。

对回归模型进行方差及可靠性分析,分析结果

表7 三牙轮钻头响应面试验结果
Table 7 Experimental results of response surface for tricone bit

编号	钻速/ (mm·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	地层强 度/MPa	反力/ kN	扭矩/ (N·m)
1	20	20	50	63.6	2806
2	40	20	50	134.1	5217
3	20	40	50	32.6	1522
4	40	40	50	76.5	3317
5	20	20	70	85.5	3766
6	40	20	70	178.6	6991
7	20	40	70	44.2	2070
8	40	40	70	102.7	4437
9	10	30	60	17.7	982
10	50	30	60	148.8	6002
11	30	10	60	187.9	6336
12	30	50	60	53.8	2542
13	30	30	40	60.3	2628
14	30	30	80	111.1	4868
15	30	30	60	83.3	3624
16	30	30	60	82.4	3586
17	30	30	60	81.8	3289
18	30	30	60	86.4	3766
19	30	30	60	89.5	3965
20	30	30	60	90.1	3898

如表8、表9所示。表8中A、B、C、B²的P值<0.0001,表明与响应值间存在极显著相关性;AC的P值<0.05,表明与响应值间存在较为显著关系。表9中A、B、C的P值<0.0001,表明与响应值间存在极显著相关性;AB、AC的P值<0.05,表明与响应值间存在较为显著关系。

表8 三牙轮钻头反力模型方差分析

Table 8 Variance analysis of resistance model for tricone bit

方差来源	平方和	自由度	F值	P值
模型	35914.17	9	140.64	<0.0001**
A	17437.2	1	614.56	<0.0001**
B	13340.25	1	470.17	<0.0001**
C	2647.1	1	93.29	<0.0001**
A ²	19.91	1	0.7016	0.4218
B ²	1514.13	1	53.36	<0.0001**
C ²	1.93	1	0.0681	0.7994
AB	468.18	1	16.50	0.0023*
AC	172.98	1	6.10	0.0332*
BC	102.24	1	3.60	0.0869
残差	283.74	10	—	—
失拟项	217.67	5	3.29	0.1083
纯误差	66.07	5	—	—
合计	36197.91	19	—	—

注:“**”(P<0.0001)为此项交互影响极显著,“*”(P<0.05)为显著。

因此对该回归模型进行优化,保留相关性显著项,通过回归分析得到牙轮钻头反力均值F₂及扭矩均值M₂的二次多项式回归模型:

表9 三牙轮钻头扭矩模型方差分析

Table 9 Variance analysis of torque model for tricone bit

方差来源	平方和	自由度	F值	P值
模型	4.54×10^7	9	5.04×10^6	$<0.0001^{**}$
A	2.46×10^7	1	2.46×10^7	$<0.0001^{**}$
B	1.41×10^7	1	1.41×10^7	$<0.0001^{**}$
C	4.93×10^6	1	4.93×10^6	$<0.0001^{**}$
A ²	7.86×10^4	1	7.86×10^4	0.1586
B ²	8.22×10^5	1	8.22×10^5	0.0006*
C ²	1.65×10^3	1	1.65×10^3	0.8300
AB	2.72×10^5	1	2.72×10^5	0.0178*
AC	2.40×10^5	1	2.40×10^5	0.0238*
BC	1.42×10^5	1	1.42×10^5	0.0677
残差	3.39×10^5	10	3.39×10^4	
失拟项	3.80×10^4	5	7.61×10^3	0.9797
纯误差	3.01×10^5	5		
合计	4.57×10^7	19		

注：“**”(P<0.0001)为此项交互影响极显著，“*”(P<0.05)为显著。

$$F_2 = 80.8 + 2.81A - 5.37B - 0.11C + 0.079B^2 - 0.077AB + 0.047AC \quad (9)$$

$$M_2 = 2559 + 75.3A - 152.18B + 3.54C + 1.89B^2 - 1.84AB + 1.73AC \quad (10)$$

式中： F_2 ——三牙轮钻头轴向力均值； M_2 ——三牙轮钻头轴向扭矩均值。

根据模型分析，绘制各因素交互效应与牙轮钻头反力均值的3D响应曲面图，见图9。地层强度越大，转速越小，钻速越大，钻进过程中三牙轮钻头所受反力均值越大。等高线与坐标轴交点越密集，表明该因素对响应值影响越大，图中可以看出，3个因素对于地层反力影响强弱依次为： $A > B > C$ 。

绘制各因素交互效应与三牙轮钻头扭矩均值的3D响应曲面图，见图10。地层强度越大，转速越小，钻速越大，钻进过程中三牙轮钻头所受扭矩均值越大。等高线与坐标轴交点越密集，表明该因素对响应值影响越大，图中可以看出，3个因素对于地层反力影响强弱依次为： $A > B > C$ 。

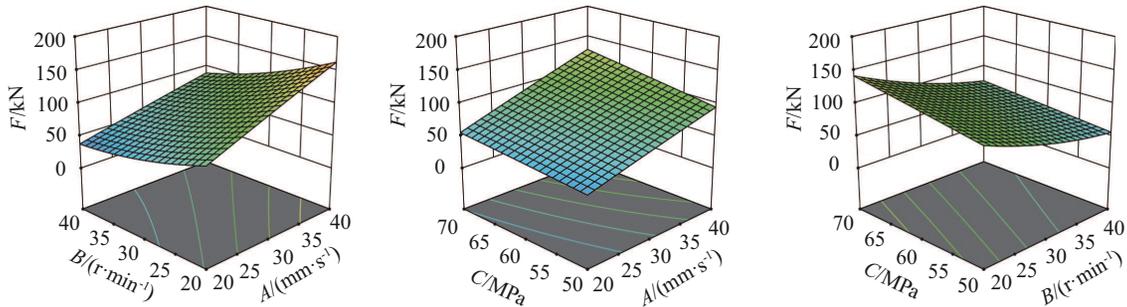


图9 三牙轮钻头反力均值交互效应响应曲面

Fig.9 Resistance mean interaction effect response surface of tricone bit

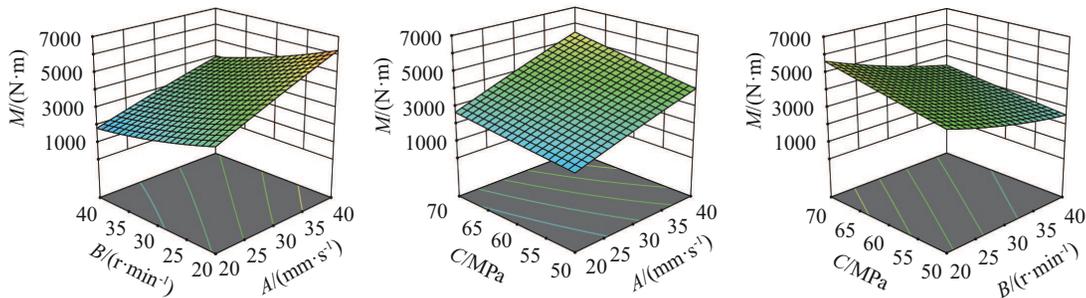


图10 三牙轮钻头扭矩均值交互效应响应曲面

Fig.10 Torque mean interaction effect response surface of tricone bit

不同参数对2类钻头反力和扭矩的影响显著性存在差异，该现象体现了2类钻头工作原理的区别：PDC钻头主要通过剪切作用破碎岩石。它的切削齿直接切入岩石表面，产生剪切应力，导致岩石被

切削剥离。钻速对钻头的反力和扭矩影响最为显著，钻速越高，切削作用越强，产生的反力也越大。地层强度影响了PDC钻头破碎岩石所需的剪切应力，地层强度越高，钻头需要施加更大的剪切力，因

此反力增加。对于转速, PDC 钻头转速只影响切削齿的覆盖范围(切削路径的分布密度), 转速的增加对单一切削刃的受力影响有限, 因此反力的变化较小。与 PDC 钻头不同, 三牙轮钻头主要通过滚压和挤压破碎岩石, 转速决定牙齿在单位时间内与岩石的接触次数(即每次滚动接触点的分布密度), 其转速越高, 牙轮的滚动和压碎动作越频繁, 增加了反力, 因而影响较大^[21]。

通过上述响应面分析, 可以得到地层参数及钻进参数对钻头反力和扭矩的影响规律, 得到反力和扭矩与不同参数之间的近似解析模型。

3.2 钻速预测方程建立及验证

在钻进过程中, 由于钻压和地层对钻头钻进方向反力是一对轴向的相互作用力, 因此两者数值大小相等, 方向相反。因此, 选取 PDC 钻头和三牙轮钻头反力的多元回归模型建立钻速预测方程:

$$v_1 = \frac{W - 102.5 + 4.31B - 0.67C - 0.04B^2}{0.046C - 0.086} \quad (11)$$

$$v_2 = \frac{W - 80.8 + 5.37B + 0.11C - 0.079B^2}{2.81 + 0.047C - 0.077B} \quad (12)$$

式中: v_1 ——PDC 钻头钻速; v_2 ——三牙轮钻头钻速; W ——钻压。

为验证回归模型和钻速预测方程的精确性, 选取未参与响应面试验的 5 组数据进行钻速预测方程的仿真验证试验, 试验设置和结果如表 10、表 11 所示, 钻头验证试验钻速预测结果见图 11、图 12。

表 10 PDC 钻头验证试验设计和结果
Table 10 Experimental design and results for PDC bit validation

组号	钻速/ (mm·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	地层强 度/MPa	反力/ kN	预测钻速/ (mm·s ⁻¹)	误差 率/%
1	10	20	45	81.2	9.5	5.0
2	15	25	50	87.3	15.4	2.7
3	25	30	60	115.9	24.9	0.4
4	35	40	65	140.2	35.3	0.9
5	40	45	70	155.2	37.9	5.3

验证试验显示, PDC 钻头的钻速方程预测的平均误差率为 2.9%, 三牙轮钻头的钻速方程预测的平均误差率为 2.4%, 这表明由数值仿真试验分析得出的该钻速方程较为精确。同时, 由于响应面试验采用的中心复合设计方法, 中心点被重复测量, 并且其他设计点分布对称, 因此可以观察到当几个因素

表 11 三牙轮钻头验证试验设计和结果
Table 11 Experimental design and results for tricone bit validation

组号	钻速/ (mm·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	地层强 度/MPa	反力/ kN	预测钻速/ (mm·s ⁻¹)	误差 率/%
1	15	25	50	37.8	14.6	2.7
2	20	30	60	50.3	19.9	0.5
3	30	40	70	75.8	30.2	0.7
4	40	35	45	77.2	41.5	3.8
5	45	45	55	83.5	46.9	4.2

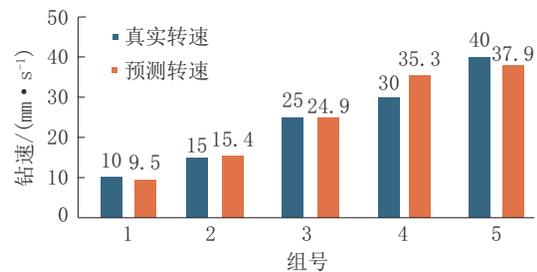


图 11 PDC 钻头验证试验钻速预测结果

Fig.11 ROP prediction results of PDC bit verification test

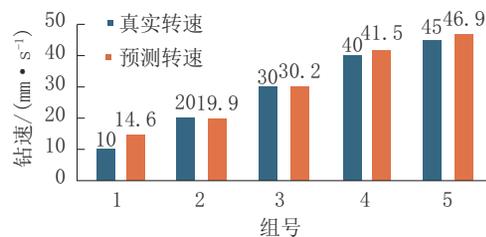


图 12 三牙轮钻头验证试验钻速预测结果

Fig.12 ROP prediction result of tricone bit verification test

的值靠近中心值时, 预测转速与真实转速接近, 预测的误差相对较小。

4 结论

(1) 基于 ABAQUS 对 PDC 钻头和三牙轮钻头建立了水平定向钻进的动理学仿真模型, 通过数值仿真得到了钻头在钻进时受到反力和扭矩的动态特性曲线, 结果表明该方法能有效地模拟钻头对地层的破岩过程, 从而分析水平定向钻进过程中应力场和破坏过程的变化。

(2) 采用中心复合设计方法以钻速、转速、地层强度为变量因素设计开展了一系列数值仿真试验, 通过响应面分析法建立了 2 类钻头反力和扭矩的多元回归模型, 得到地层强度参数、钻进参数与钻头反力、扭矩之间的响应规律, 地层强度越大, 转速越小,

钻速越大,则钻进过程中钻头所受反力、扭矩越大。

(3)根据多元回归模型建立了钻速预测方程,并通过仿真试验验证了方程具备较高的可靠性,为优化钻进参数、提高钻进效率提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] 曾聪,马保松.水平定向钻井理论与技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2015.
ZENG Cong, MA Baosong. Horizontal Directional Drilling Theory and Technology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2015.
- [2] 王国荣,刘清友,王健,等.盘式单牙轮钻头破岩机理试验研究[J].石油机械,2003,31(11):1-2.
WANG Guorong, LIU Qingyou, WANG Jian, et al. Experimental study of rock breaking mechanism of disc one cone bit [J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(11): 1-2.
- [3] 邹德永,蔡环.布齿参数对PDC钻头破岩效率影响的试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(5):76-79.
ZOU Deyong, CAI Huan. Experiment on effect of cutter parameters of PDC bit on rate of penetration[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(5): 76-79.
- [4] 况雨春,伍开松,杨高,等.三牙轮钻头轮体速比仿真模型研究[J].石油钻采工艺,2008,30(2):57-60.
KUANG Yuchun, WU Kaisong, YANG Gao, et al. Research on cone/bit speed ratio simulation model of tri-cone bits[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 57-60.
- [5] 况雨春,彭亚洲,张雨婷.PDC全钻头破岩数值模拟及试验研究[J].石油机械,2015,43(9):10-13.
KUANG Yuchun, PENG Yazhou, ZHANG Yuting. Numerical simulation and experiment on rock breaking of PDC bits[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(9): 10-13.
- [6] Woldemichael D E, Rani A M A, Lemma T A, et al. Numerical simulation of rock cutting using 2D AUTODYN [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 100(1): 012052.
- [7] 刘忠,胡伟,尹卓,等.PDC钻头混合布齿参数对破岩的影响研究[J].石油机械,2020,48(3):51-57.
LIU Zhong, HU Wei, YIN Zhuo, et al. The influence of mixed cutter arrangement parameters of PDC bit on rock breaking [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(3): 51-57.
- [8] Wang W, Liu G H, Li J, et al. Numerical simulation study on rock-breaking process and mechanism of compound impact drilling [J]. Energy Reports, 2021, 7: 3137-3148.
- [9] 吴泽兵,袁若飞,张文溪,等.锯齿形PDC刀具的破岩特性及温度场[J].科学技术与工程,2023,23(27):11615-11621.
WU Zebing, YUAN Ruofei, ZHANG Wenxi, et al. Rock breaking characteristics and temperature field of serrated PDC cutter [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11615-11621.
- [10] 文国军,张冯豆,贺鑫,等.基于Abaqus的软硬交错地层钻进过程仿真及动态特性分析[J].地质科技通报,2023,42(5):10-19.
WEN Guojun, ZHANG Fengdou, HE Xin, et al. Drilling process simulation and dynamic characteristic analysis of soft-hard-staggered strata based on Abaqus [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 10-19.
- [11] Guo Z W, Ye X T, Gou J H, et al. Research on rock breaking mechanism of composite cone single cone bit [J]. Geoenery Science and Engineering, 2023, 231 (Part A): 212302.
- [12] 吴金发.水平勘察孔金刚石绳索取心钻进钻柱摩擦阻研究[D].长春:吉林大学,2023.
WU Jinfa. Study on drill string drag of diamond wire-line coring drilling in horizontal exploration hole [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [13] 郭正伟,苟俊华,何伟,等.复合锥单牙轮钻头牙齿磨损研究[J].钻探工程,2023,50(4):118-126.
GUO Zhengwei, GOU Junhua, HE Wei, et al. Study on tooth wear of compound cone single cone bit [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 118-126.
- [14] Yang L, Li Y M, Xi Y, et al. Numerical investigation of rock-breaking mechanisms and influencing factors of different PDC cutters during rotary percussion drilling [J]. Geoenery Science and Engineering, 2024, 241: 213144.
- [15] 吴泽兵,胡诗尧,姜雯,等.一趟钻智能混合钻头齿面结构设计与分析[J].机电工程技术,2024,53(2):107-110.
WU Zebing, HU Shiyao, JIANG Wen, et al. Intelligent hybrid bit design and analysis for one trip drilling [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(2): 107-110.
- [16] 汤凤林,赵荣欣,Нескоромных В В,等.PDC钻头钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数关系的分析研究[J].钻探工程,2024,51(1):5-14.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, HESKOROMNYH V. V., et al. Analytical research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in PDC bit drilling [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 5-14.
- [17] 荣准,杨学军,张航,等.五宝场硬塑性地层斧形曲面PDC齿破岩性能研究[J].钻探工程,2024,51(2):85-93.
RONG Zhun, YANG Xuejun, ZHANG Hang, et al. Study on the rock breaking performance of axe-shape cambered PDC cutters in the hard plastic formation in Wubaochang [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 85-93.
- [18] 冯云春.龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J].钻探工程,2024,51(2):94-101.
FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 94-101.
- [19] 郑颖人,赵尚毅,邓楚键,等.有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J].中国工程科学,2006,8(12):39-61.
ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, DENG Chujian, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering [J]. Chinese Academy of Engineering, 2006, 8(12): 39-61.
- [20] 高红,郑颖人,冯夏庭.材料屈服与破坏的探索[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2515-2522.
GAO Hong, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Exploration on yield and failure of materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2515-2522.
- [21] 李勇,毛旭.牙轮钻头与PDC钻头的对比分析[J].中国井矿盐,2016,47(1):31-33.
LI Yong, MAO Xu. Contrastive analysis of the roller bit and PDC bit [J]. China Well and Rock Salt, 2016, 47(1): 31-33.

(编辑 王文)