

硬地层牙轮钻头破岩特性数值模拟研究

赵子栋¹, 宋永朋¹, 刘航铭^{1*}, 张所邦¹, 许志新²

(1. 湖北省地质局第七地质大队, 湖北 宜昌 443100; 2. 长江大学机械工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 针对硬地层钻进中牙轮钻头失效频发、寿命短等工程难题, 本研究基于现场钻井数据, 建立了钻头-岩石非线性接触动力学模型, 采用Drucker-Prager准则描述岩石弹塑性行为, 通过有限元软件ABAQUS模拟三牙轮钻头在钻压与转速耦合作用下的破岩过程。结果表明: 破岩以冲击和剪切为主, 其所诱发的拉应力是岩石破坏的主导因素; 钻头在破岩过程中存在显著的纵向与扭转振动, 其导致的瞬时冲击是加速轮齿磨损和轴承失效的根本原因, 该结论与现场失效案例基本一致。研究成果揭示了牙轮钻头在硬地层中的失效机理, 并提出优选抗磨损钻头、加装减震器及优化钻进参数等建议, 对提升深部硬地层钻进效率与降低工程成本具有重要的理论指导意义和实践应用价值。

关键词: 牙轮钻头; 硬地层; 岩石破碎; 数值模拟; 有限元法; 动态特性; 地热钻井

中图分类号: TE21; P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0059-07

Numerical simulation of rock-breaking characteristics of tri-cone bit in hard formations

ZHAO Zidong¹, SONG Yongpeng¹, LIU Hangming^{1*}, ZHANG Suobang¹, XU Zhixin²

(1. *The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang Hubei 443100, China*; 2. *School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434023, China*)

Abstract: To address the engineering challenges of frequent failure and short service life of roller cone bits in hard formation drilling, this study established a nonlinear contact dynamic model between the bit and rock based on field drilling data. The Drucker-Prager criterion was adopted to describe the elastoplastic behavior of the rock. The rock-breaking process of a tri-cone bit under the coupled effects of weight on bit (WOB) and rotary speed was simulated using the finite element software ABAQUS. The results indicate that rock breakage is primarily achieved through impact and shear, with the induced tensile stress being the dominant factor in rock failure. Pronounced longitudinal and torsional vibrations occur during the rock-breaking process, and the resulting transient impacts are the root cause of accelerated tooth wear and bearing failure. This conclusion is consistent with field failure cases. The research reveals the failure mechanism of roller cone bits in hard formations and proposes recommendations such as preferentially selecting wear-resistant bits, installing shock absorbers, and optimizing drilling parameters. These findings provide important theoretical guidance and practical value for enhancing drilling efficiency in deep hard formations and reducing engineering costs.

Key words: tri-cone bit; hard formation; rock fragmentation; numerical simulation; finite element method; dynamic characteristics; geothermal drilling

收稿日期: 2025-08-12; 修回日期: 2025-11-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.009

基金项目: 湖北省地质局项目“页岩气水平井旋转扶正防托压钻具组合物学模型与设计软件开发”(编号: 42000025622T000000169); 湖北省地质勘查基金项目“湖北利川一忠路地区二叠系页岩气远景区调查”(编号: [2024]1)

第一作者: 赵子栋, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 钻探工程专业, 主要从事地热、页岩气井钻完井技术研究与管理工作, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号, 854057772@qq.com。

通信作者: 刘航铭, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 石油与天然气工程专业, 博士, 从事非常规油气钻完井技术研究工作, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号, zjrslhm@163.com。

引用格式: 赵子栋, 宋永朋, 刘航铭, 等. 硬地层牙轮钻头破岩特性数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 59-65.

ZHAO Zidong, SONG Yongpeng, LIU Hangming, et al. Numerical simulation of rock-breaking characteristics of tri-cone bit in hard formations[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 59-65.

0 引言

我国地热资源潜力巨大且分布规律明显。综合评价显示,全国地热资源年可开采量约26亿t标准煤,其中浅层地热能年可采量达7亿t标准煤,水热型地热资源年可采量约19亿t标准煤。而干热岩远景资源量则高达856万亿t标准煤^[1]。在全球能源需求持续攀升的背景下,深层及超深层地热资源的开发利用是新能源行业发展的重点方向^[2-4]。近年来,我国不断加大对干热岩的勘探开发力度,其中青海共和盆地干热岩示范工程取得了系列进展,钻探现场初步形成了“转盘+旋冲钻具+强保径牙轮钻头”、“转盘+液动冲击器+强保径牙轮钻头”和“转盘+螺杆+强保径牙轮钻头”的深部高温地热钻进工艺,克服了花岗岩地层钻进效率低的难题^[5-7]。牙轮钻头因其地层适应性强,钻进效率高,在钻井作业中应用日益广泛^[8-10]。目前,我国地热资源开发正向深部迈进,井深更深,岩石可钻性更差,对钻头性能提出了更高的要求。牙轮钻头作为硬地层钻进的核心装备,其破岩性能直接决定钻井效率、井眼质量与工程成本^[11]。尽管钻头设计与制造水平在不断提高,但在复杂地质环境下,牙轮钻头失效仍频繁发生,严重制约了安全高效钻进^[12]。

由现场数据可知,牙轮钻头在钻进过程中因系统性振动会出现不同程度的失效,主要表现为轮齿磨损、轴承失效、牙轮掉块、裂纹扩展及整体结构破坏等。目前,国内外学者已对牙轮钻头失效机理进行了一系列研究,尝试从磨损理论、应力分布等角度分析钻头的受力特征与失效路径^[13-15],但大多基于理想井底环境假设,与实际情况差异显著。而在钻头试验研究过程中,由于难以复现井底真实环境、操作繁琐以及试验成本高等因素,很难科学地选择准确的钻井参数,导致研究钻头破岩特性较为困难^[16]。在湖北英山花岗岩地层的实际钻探过程中,多次出现牙轮钻头使用寿命短导致的频繁更换、作业周期延长等问题,亟需通过实际案例系统分析。而有限元数值仿真可通过多因素耦合模拟来弥补试验的环境局限,同时以较低的成本实现参数优化,有效反映硬地层中牙轮钻头的破岩机制与失效规律,对于优化钻井参数,进而提升机械钻速、延长钻头寿命并降低单位进尺成本,具有显著的理论与实践意义。

本研究以湖北英山地区花岗岩、片麻岩地层为

研究对象,结合现场钻井数据,系统分析牙轮钻头在硬地层中失效的原因。基于现场钻井参数与地层资料,构建三维有限元模型,通过模拟钻头在钻进过程中的运动规律及力学性能,从而分析出钻头破坏的原因。研究成果不仅有助于揭示钻头在硬地层中的失效机理,也为后续高效钻井技术的推广应用提供参考。

1 湖北英山地区地质特点及面临挑战

1.1 湖北英山地区地质特点

下部地层主要以花岗岩、片麻岩为主。通过归纳整理钻井资料并详细分析地层岩性特征,确定了目标区块岩石的抗剪强度、抗压强度与内摩擦角等力学性质。经综合评估,该区块地层岩石可钻性等级介于8~10级之间,综合表征为硬-坚硬地层。

1.2 DBSDR-1井施工难点

(1)花岗岩岩性致密、坚硬,组成矿物含石英、云母、长石,整个井段均较硬,不易破碎。

(2)花岗岩地层钻头选型困难,地层可钻性差、研磨性强,钻头磨损严重,消耗数量多、费用高。目前本井累计使用 $\varnothing 215.9$ mm钻头5只,见表1。

表1 钻头使用情况

Table 1 Drill bit usage

井段/m	钻头尺寸/mm	钻头型号	钻头数量 (PDC/牙轮)/只	转盘转速/ (r·min ⁻¹)
0~300	444.5	LS537G	0/2	30~60
300~1000	311.2	LS537G/ LS617 G/PDC	2/1	60~80
1000~2300	215.9	LS537G/ LS617 G/PDC	2/3	60~80

2 牙轮钻头-岩石系统动力学模型

2.1 钻头岩石接触模型

钻头破岩是一种复杂的非线性行为,表现为钻头运动的几何非线性,岩石材料在大应变下的物理非线性,以及因几何与物理非线性相互作用致使接触界面状态持续演变的接触非线性^[17]。基于有限单元法,在 t 时刻接触系统占据空间域 Ω ,承受体积力 b 、边界力 q 、接触力 q_c 等外力作用,并存在柯西应

力 σ , 则该接触问题的控制方程:

$$\int_{\Omega} \sigma \delta \epsilon d\Omega - \int_{\Omega} b \delta u d\Omega - \int_{\Gamma_f} q \delta \epsilon dS - \int_{\Gamma_c} q_c \delta u dS + \int_{\Omega} \rho a \delta u d\Omega = 0 \quad (1)$$

式中: $\delta \epsilon$ ——虚应变; δu ——虚位移; Γ_f ——边界力的边界; Γ_c ——接触边界; ρ ——密度; a ——加速度。

将域 Ω 有限元离散化, 并引入虚位移场, 可得:

$$m \ddot{u} = p(t) + c(u, \alpha) - f(u, \beta) \quad (2)$$

式中: m ——质量矩阵; \ddot{u} ——加速度矢量; p ——外力矢量; t ——时间变量; c ——接触力与摩擦力矢量; u ——物体位移; α ——与接触表面特征相关的变量; f ——内力矢量; β ——与材料本构关系相关的变量。

基于有限单元法和达朗贝尔原理, 建立钻头与岩石相互接触的动力学模型^[18]:

$$\begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_B \\ \ddot{U}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} z_B & 0 \\ 0 & z_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{U}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_B & 0 \\ 0 & k_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_B \\ U_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_B^i - f_B^i \\ F_R^i - f_R^i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: m, z, k ——整体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{U}, \dot{U}, U ——加速度、速度和位移矢量; F^i ——钻压矢量; f^i ——接触力矢量, 其中下标 B 表示钻头, R 表示岩石。

2.2 岩石动态本构模型

岩石材料的真实应力-应变关系高度复杂, 表现为各向异性和非线性, 在外载作用下还会发生脆性断裂和弹塑性变形。研究表明, D-P 准则是在 M-C 和 Mises 准则基础上扩展和推广而得, 适用于钻头破岩数值模拟^[19]:

$$f_1 = b I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (4)$$

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (5)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right] = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6} \quad (6)$$

$$b = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (7)$$

$$K = \frac{6n \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (8)$$

式中: f_1 ——关于岩石屈服的函数; b, K ——仅与内摩擦角 φ 和黏聚力 n 有关的试验常数; I_1 ——应力第一不变量; J_2 ——应力偏量第二不变量; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——第一、二、三主应力。

由式(4)可知, 岩石在钻压与转速作用下内部应力增大, 进而发生塑性变形。塑性变形不断累积, 至临界值时岩石发生失效剥离。岩石的等效塑性应变 ϵ^p 和临界等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_f^p$ 关系如下:

$$\epsilon^p \leq \bar{\epsilon}_f^p \quad (9)$$

岩石应力-应变曲线见图1, 可通过损伤因子 D 来表征其失效机制:

$$D = 1 - \frac{E'}{E} = \begin{cases} 0 & (\epsilon \leq \bar{\epsilon}_f^p) \\ 1 - \frac{\tau}{\bar{\tau}} & (\epsilon > \bar{\epsilon}_f^p) \end{cases} \quad (10)$$

式中: E' ——岩石破碎后的弹性模量; E ——岩石破碎前的弹性模量; ϵ ——应变; $\bar{\tau}$ ——峰值应力。

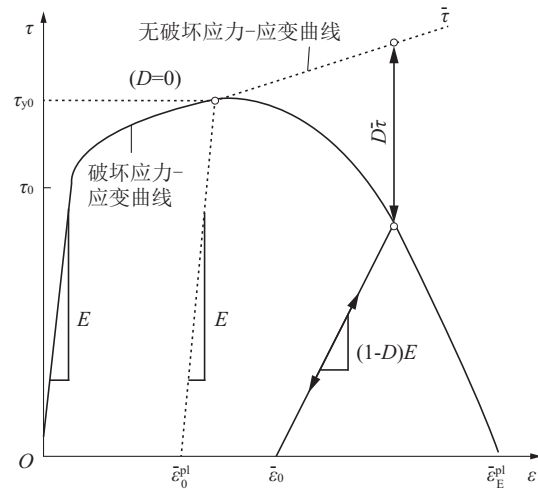


图1 岩石应力-应变曲线^[16]

Fig.1 Stress-strain curve of rock

图1中, τ_{y0} 为岩石破碎处屈服应力, 此时总损伤 $D=0$ 。当塑性应变达到 $\bar{\epsilon}_f^p$ 时, 总损伤 $D=1$, 岩石完全破碎。

3 牙轮钻头破岩过程的有限元数值模拟

3.1 模型的建立

应用 Solidworks 建立 $\varnothing 215.9$ mm 三牙轮钻头三维模型, 并另存为精度较高的 Step 格式, 然后导

入ABAQUS软件中进行前处理。为提升计算效率,需对模型进行合理简化。鉴于岩石破碎主要由牙轮实现,仿真模型仅保留三个关键牙轮部件,构建了如图2所示的牙轮-岩石接触分析模型。

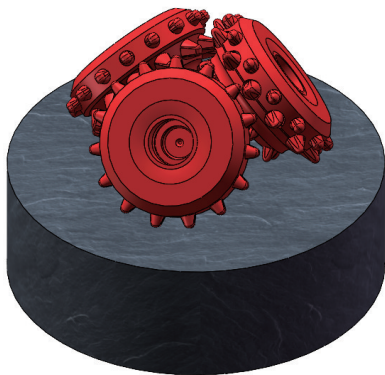


图2 钻头-岩石模型

Fig.2 Drill-rock simulation model

3.2 基本假设

在实际钻井过程受钻头结构、钻压、转速、地层岩性及泥浆排量等多因素影响,为聚焦关键机制并提升计算效率,需对模型进行必要简化,并作如下假设:

(1)忽略温度场、井底流场对岩石破碎过程的影响;

(2)将岩体视为连续、均匀、各向同性介质,忽略其原生裂隙及孔隙压力效应;

(3)破碎形成的岩屑及时排出井底,仿真中对失效岩体单元及时删除;

(4)钻头旋转中心固定,不考虑其径向位移。

3.3 材料属性及网格划分

3.3.1 材料属性

模型设定中,忽略温度与磨损对牙轮的影响,并将牙轮钻头模型设为刚体。钻头密度设置为等效密度,岩石为花岗岩。模型材料参数见表2。

3.3.2 网格划分

由于牙轮模型几何形状比较复杂,并且牙齿部

分需要将网格精细化处理,采用六面体单元划分网格比较困难。为了避免由于接触主从面网格差异导致计算不收敛,牙轮与岩石均采用四面体(C3D10M)进行网格划分。同时将四面体网格尺寸略微增大,以降低计算成本。牙轮-岩石模型网格划分如图3所示。

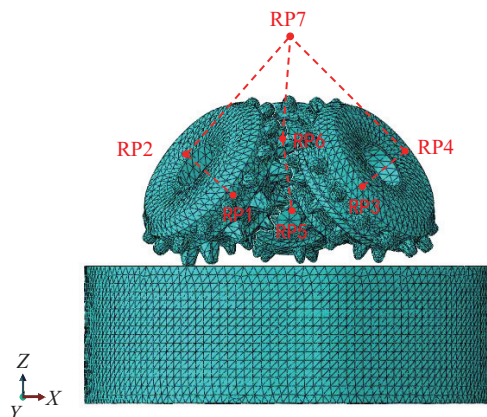


图3 破岩模型网格划分

Fig.3 Grid division of rock breaking model

3.4 岩石与钻头控制方法及分析步设置

岩石初始地应力设置为上覆压力10 MPa,侧压系数取1;约束条件为:岩石模型底面施加法向位移约束,外圆周面施加水平位移约束。在三条牙轮轴线上各设置两个参考点(RP1,RP2),其中RP1与对应牙轮建立耦合约束,RP2与钻头主体建立耦合约束。约束钻头X和Y方向的平移和转动,保留Z方向钻进与旋转的自由度。参考钻井实际工况,设置钻压为50 kN,转速为70 r/min,钻头与岩体间接触设置为面-面接触。

4 牙轮钻头破岩仿真分析

4.1 牙轮钻头破岩过程分析

牙轮钻头在井底的破岩机制主要包括冲击与剪切两种破碎形式。破岩初期,在钻压作用下,牙轮齿圈冲击井底岩石,诱发表面损伤。牙轮运动包含绕钻头轴线的公转和绕自身轴线的自转。自转运动导致齿圈与井底岩石的接触模式呈现单齿与双齿交替状态。当接触点的公转线速度大于其自转线速度时,齿尖对岩石产生相对滑动,形成剪切作用。钻头的这种复合运动使得表层岩石单元的应力迅速累积并超越其强度阈值,进而发生失效剥

表2 有限元模型材料参数

Table 2 Finite element model material parameters

模型材料	弹性模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)	内摩擦角/(°)	泊松比	膨胀角/(°)
花岗岩	28.7	2.65	53	0.3	53
牙轮钻头	218			0.3	

落。随后,新暴露的内层岩石单元在钻压作用下与钻头齿圈重新建立接触并承受载荷。钻头与岩石单元间反复经历“接触-应力累积-失效破碎-新表

面暴露-再接触”的周期性循环,最终在井底形成非均匀破碎坑形貌,如图 4 所示。

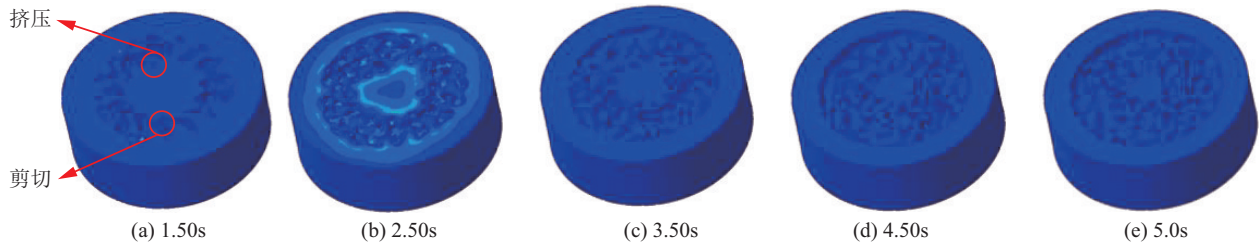


图 4 不同时刻岩石井底形貌

Fig.4 Bottom hole morphology of rock at different times

4.2 岩石应力-应变分析

井底岩石受牙轮钻头刮削作用,其 5 s 时刻的岩石等效塑性应变见图 5。由计算结果可知,在钻头钻进过程中,岩石单元内部产生明显的等效塑性应变,且塑性变形主要集中于井壁表面及井底附近区域,该区域岩石单元因应变达到临界值而发生失效;远离钻头作用的岩石区域应变值较小,处于弹性状态,应力低于屈服值,未发生塑性损伤。

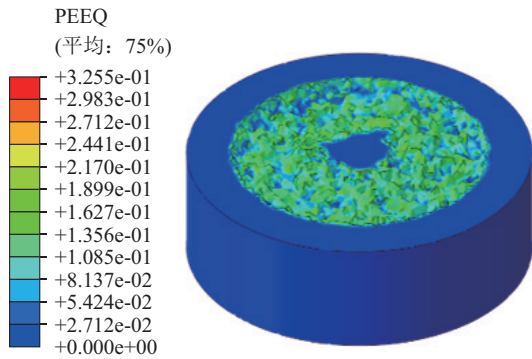


图 5 岩石等效塑性应变云图

Fig.5 The equivalent plastic strain cloud diagram of rock

常规条件下岩石抗拉强度显著低于其抗压强度,因此岩石更容易在拉应力作用下发生破坏。图 6 为三牙轮作用下岩石的最大主应力云图,其中拉应力为正、压应力为负,在钻头作用下,井底和井壁区域同时存在拉、压应力集中区,其中压应力相较于拉应力作用区域极少,可忽略不计。因此,在钻进过程中牙轮钻头主要通过诱发拉应力破碎岩石,从而实现高效破岩。

4.3 钻头运动情况分析

图 7 为牙轮钻头沿钻进方向的加速度响应曲

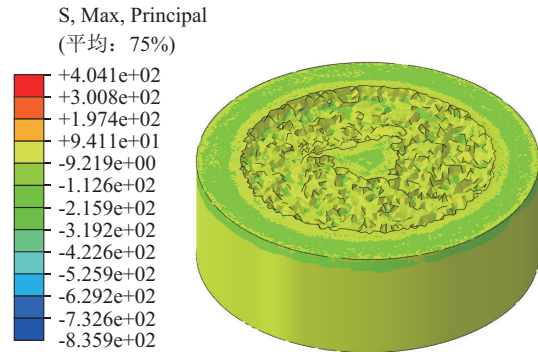


图 6 岩石最大主应力云图

Fig.6 The maximum principal stress cloud diagram of rock

线。可以看出,钻进过程中钻头存在纵向振动现象,加速度在 $-0.59 \sim 0.63 \text{ m/s}^2$ 范围内。钻头的转动会带动牙轮滚动,导致单、双齿与井底岩石交替接触,从而产生周期性运动。此外,钻头破碎岩石后,岩石单元因破坏从岩体脱落,会使钻头瞬间失去支撑,进而导致加速度急剧增大;当钻头接触到下层岩石并产生撞击时,加速度又会随之减小甚至反向。

图 8 为牙轮钻头沿钻进方向上的反扭矩响应曲线。钻进初期,因岩石表面平整,钻头受岩石阻力小,反扭矩数值较小;随着持续钻进,岩石破碎使其自然裂缝及井周整体岩石结构发生不确定改变,破碎坑表面变得凹凸不平,岩石对钻头阻力增大,可钻性快速下降。曲线中出现的几处扭矩瞬时增大现象,源于破岩扭矩难以破碎岩石时,钻头出现短暂卡阻,转盘持续扭转使钻头扭矩不断增大,达到岩石破碎临界值后又迅速回落,形成瞬时峰值;反扭矩的波动还会激发钻头的扭转振动,并在钻进过程中发生扭矩反转,与实际情况相符。

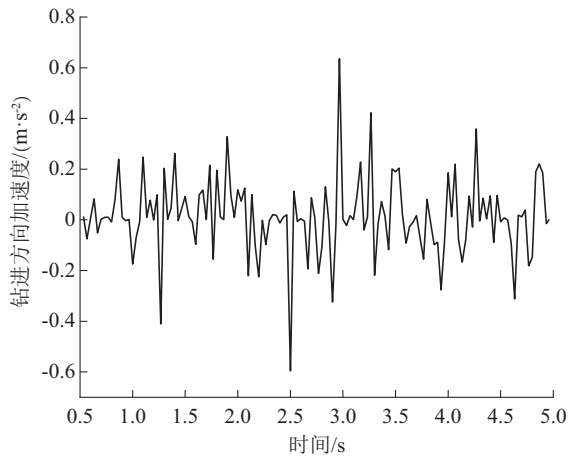


图7 钻进方向加速度响应曲线

Fig.7 Acceleration response curve of drilling direction

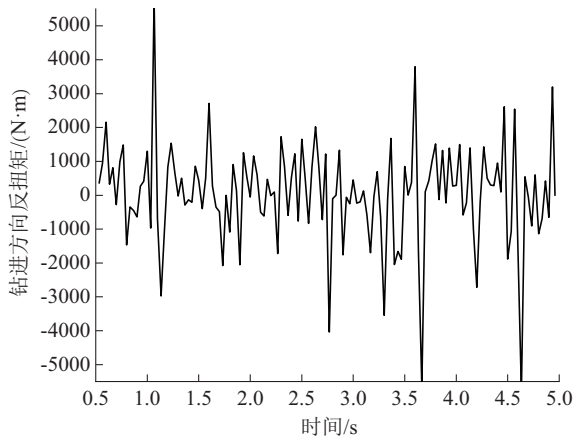


图8 钻进方向反扭矩响应曲线

Fig.8 Reverse torque response curve in drilling direction

综上所述,在牙轮钻头钻进过程中,钻头加速度和反扭矩的急剧变化,导致钻头受到很大的瞬间冲击力,该冲击虽可增强对岩石的破碎作用,提高钻进速度,但也会导致牙轮结构损伤,显著加快轮齿的磨损速率和轴承失效进程,大大降低牙轮钻头的使用寿命,与现场的实际情况基本一致,如图9所示。



轴承滑道损伤 牙轮轮体损伤 牙轮轮齿损伤

图9 钻进过程中钻头失效案例

Fig.9 Drill failure cases in drilling process

5 结论与建议

(1)考虑上覆压力、钻头与岩石动态随机接触,依据有限单元法构建了钻头与岩石间的非线性接触模型,基于岩石弹塑性本构关系,通过数值模拟手段,复现了牙轮钻头自转与公转相结合的复合运动状态,实现了岩石失效单元的动态剥离过程。

(2)牙轮钻头破碎岩石主要有冲击和剪切两种破岩形式,井底呈现凹凸不平的破碎坑形貌。钻头破岩时塑性变形主要集中在井壁与井底周边,远离钻头作用处岩石单元仍处于弹性阶段;且井底和井壁均存在拉、压应力,而拉应力占主导,这是岩石破坏的主要原因。

(3)牙轮钻头在破岩过程中受力复杂,存在一定的纵向振动及扭转振动,使牙轮受到较大的瞬间冲击力而出现损伤,极大地加快轮齿磨损和轴承失效,数值模拟结果与现场实际情况基本一致。

(4)在硬地层钻井作业时,优先选用抗磨损性强且保径效果好的牙轮钻头,并对轮齿表面进行硬化处理提升抗磨损能力。同时可在钻具组合中加入减震器,降低纵向与扭转振动传递至钻头的能量,减少对钻头的损伤。钻进过程中应实时监测钻头扭矩与加速度变化,及时调整钻井参数(如降低转速、调整钻压、增大排量等),尽量避免钻头卡阻与失效,延长钻头使用寿命。

参考文献(References):

- [1] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] 张政,袁健鹏,马鑫,等.地热井钻井过程中钻井液热物理性质对井筒温度压力的影响[J].科学技术与工程,2025,25(7):2767-2775.
ZHANG Zheng, YUAN Jianpeng, MA Li, et al. Influence of thermal physical properties of drilling fluid on wellbore temperature and pressure during geothermal well drilling [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 2767-2775.
- [3] 施山山,李宽,李小洋,等.干热岩资源高效钻采技术理论探讨[J].钻探工程,2023,50(S1):121-125.
SHI Shanshan, LI Kuan, LI Xiaoyang, et al. The theory discussion of high efficient drilling and development on the hot dry rock resource [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 121-125.
- [4] 叶辉兵,张所邦,胡胜华,等.中深层地热井开采对套管与水泥环性能影响的研究[J].钻探工程,2024,51(5):93-100.
YE Huibing, ZHANG Suobang, HU Shenghua, et al. Research on the influence of middle-deep geothermal well exploitation on

- the performance of casing and cement sheath[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(5):93-100.
- [5] 许天福,文冬光,袁益龙.干热岩地热能开发技术挑战与发展战略[J]. *地球科学*, 2024, 49(6):2131-2147.
XU Tianfu, WEN Dongguang, YUAN Yilong. Technical challenges and strategy of geothermal energy development from hot dry Rock[J]. *Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2024, 49(6):2131-2147.
- [6] 张德龙,郭强,杨鹏,等.地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与应用进展[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(5):1082-1090.
ZHANG Delong, GUO Qiang, YANG Peng, et al. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5):1082-1090.
- [7] 李宽,施山山,张恒春,等.共和盆地干热岩GH-05井钻井关键技术[J/OL]. *钻探工程*. (2025-06-04) [2025-08-12]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1730.TD.20250603.1634.004>.
LI Kuan, SHI Shanshan, ZHANG Hengchun, et al. Key technologies of Well GH-05 drilling for hot dry rock in Gonghe Basin [J/OL]. *Drilling Engineering*. (2025-06-04) [2025-08-12]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1730.TD.20250603.1634.004>.
- [8] 许奇,虎江云.深层高压地热孔的施工方法[J]. *西部探矿工程*, 2024, 36(5):48-50.
XU Qi, HU Jiangyun. Construction methods for deep High-Pressure geothermal wells [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2024, 36(5):48-50.
- [9] 王勇军,梁伟,杜志强,等.雄安新区D05井燧石白云岩地层钻头应用探索[J]. *钻探工程*, 2023, 50(4):142-148.
WANG Yongjun, LIANG Wei, DU Zhiqiang, et al. Exploration of drill bit applied in chert dolomite strata in Well D05 of Xiong'an New Area [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(4):142-148.
- [10] 谭现锋,战启帅,张强,等.扭力冲击器复合钻进工艺在干热岩钻井中的试验应用[J]. *钻探工程*, 2023, 50(1):94-101.
TAN Xianfeng, ZHAN Qishuai, ZHANG Qiang, et al. Test of compound drilling with the torsional impactor in hot dry rock geothermal wells [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1):94-101.
- [11] 王刚.基于ABAQUS三牙轮钻头传动比计算机仿真[D].西安:西安石油大学,2023.
WANG Gang. Computer simulation of rotary speed ratio of cone to bit of tricone bits based on ABAQUS[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2023.
- [12] 李琴,谢豆,黄志强,等.硬地层复合钻头破岩特性与提速机理研究[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(3):347-353.
LI Qin, XIE Dou, HUANG Zhiqiang, et al. Studying rock breaking properties and penetration rate improving mechanisms for hybrid drill bit in hard formation [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(3):347-353.
- [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] 赵向阳,张顺科,鲍洪志.基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(5):79-84.
ZHAO Xiangyang, ZHANG Shunke, BAO Hongzhi. Bit evaluation and optimization based on rock mechanics and mechanical specific energy theory [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(5):79-84.
- [15] Warren T M, Sinor A. Drag-bit performance modeling [J]. *SPE Drilling Engineering*, 1989, 4(2):119-127.
- [16] 吴泽兵,吕澜涛,张帅,等.混合钻头破岩特性研究[J]. *石油机械*, 2020, 48(2):35-41.
WU Zebing, LV Lantao, ZHANG Shuai, et al. Study on rock breaking characteristics of a hybrid bit [J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(2):35-41.
- [17] 邓思洪,但斌斌,容芷君,等.混合钻头对软硬交错地层破岩特性的仿真研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2022, 45(1):46-52.
DENG Sihong, DAN Binbin, RONG Zhijun, et al. Simulation study on rock-breaking characteristics of hybrid drill bit in soft and hard interbedded strata [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2022, 45(1):46-52.
- [18] 谢豆.深部硬地层PDC-牙轮复合钻头破岩机理研究[D].成都:西南石油大学,2016.
XIE Dou. Study on rock breaking mechanism of PDC-cone composite bit in deep hard formation [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [19] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
CAI Meifeng. *Rock Mechanics and Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002.

(编辑 王跃伟)