

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.3006

基于 ABAQUS 的深海复杂地层钻具 钻进数值模拟研究

邱显焱, 贾创创, 邓子强

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对深海复杂地层钻进难题, 基于 ABAQUS 软件平台, 建立了深海复杂地层-钻具系统的三维数值模型模拟钻具在不同地层中的钻进过程, 验证所搭载钻具在深海钻进中的适用性。并通过对钻具施加不同的钻速和钻压参数, 获取钻具在不同参数下的进尺速度和钻头所受压力。结果表明: 搭载钻具在钻进不同地层时, 进尺速度随钻速和钻压的增加而增大, 且进尺速度在硬地层中的变化显著。在硬地层中, 低钻速高钻压时的进尺速度增量较大, 而高钻速低钻压时的进尺速度增量较小; 钻头所受压力随着钻速的提升而降低, 且降低幅度逐渐增大, 在硬质地层中降低比例较为平稳, 压力降低比例仅提升了 0.6%。

关键词: 有限元分析; 深海钻具; 复杂地层; 数值模拟

中图分类号: TD421.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)03-0041-08

引文格式: 邱显焱, 贾创创, 邓子强. 基于 ABAQUS 的深海复杂地层钻具钻进数值模拟研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(3): 41-48.

ABAQUS-Based Numerical Simulation Study on Drilling Tools in Complex Deep-Sea Formations

QIU Xianyan, JIA Chuangchuang, DENG Ziqiang

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In response to the challenges of deep-sea complex deep-sea formation drilling, a three-dimensional numerical model of the deep-sea formation-drilling tool system has been established based on the ABAQUS software platform so as to simulate the drilling process of the drilling process in different formations, thus verifying the applicability of the equipped drilling tools for deep-sea operations. By applying different drilling speed and weight-on-bit (WOB) parameters to the drilling tool, the rate of penetration (ROP) and the pressure distribution on the drill bit under varying conditions can be successfully obtained. The increase in feed rate is greater at low drilling speeds and high drilling pressures in hard formations, while the increase in feed rate is smaller at high drilling speeds and low drilling pressures. The pressure on the drill bit decreases as the drilling speed increases, with the decrease gradually accelerated. In hard formations, the decrease in pressure remains relatively stable and consistent, with the pressure reduction ratio increasing by merely 0.6%.

Keywords: finite element analysis; deep-sea drilling tool; complex formation; numerical simulation

收稿日期: 2025-05-30

基金项目: 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设省级专项基金资助项目 (2023sfq52)

作者简介: 邱显焱, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为复杂机械系统振动机理及控制, 深海采矿装备设计,
E-mail: qiuxianyan@hut.edu.cn

1 研究背景

我国海域面积广阔,蕴藏着丰富的矿物油气资源。如何更准确地掌握海洋资源分布状况及资源量,是目前深海勘探工作的一道难题。目前最有效的办法就是通过对深海地层钻探获取样品,通过样品可以直观、可靠地反映岩层的详细地质特征^[1]。但在实际勘探开采过程中,海底油气矿产资源储层环境较为复杂^[2],此类复杂地层具有非均匀性、高围压、软硬互层等特点^[3-4],钻探钻机在此区域内会面临钻速骤降、钻具磨损、钻杆断裂等严峻挑战^[5-7]。由于钻具对深海地层不规则的剪切和挤压作用,会导致地层颗粒间的有效应力减弱,最终使得勘探的岩芯样品质量降低^[8]。为了保证勘探工作的正常进行,并减少作业故障的发生,在实际复杂地层作业中输入合理的钻进工艺参数尤其重要^[9]。

关于深海勘探的传统研究方法,主要依赖物理实验与现场经验总结,但是深海环境的高压(可达100 MPa)、低温(2~4℃)等极端条件在实验室难以真实复现,而现场试验成本高昂且风险不可控。通过数值模拟方法构建钻具-地层相互作用的高保真模型,可突破试验条件的限制,为钻进参数优化和钻具可靠性评估提供理论支撑。ABAQUS有限元软件,凭借其在非线性接触、多物理场耦合和大变形分析方面的独特优势,逐渐成为深海钻探领域仿真研究的核心工具^[10]。R. Freij-Ayoub等^[11]开发出针对多孔介质中水合物热力学及机械变形耦合模型,以模拟在含甲烷水合物的沉积岩层中钻探的井眼的稳定性。其发现开发的数值模型对于理解水合物沉积物的行为和预测水合物沉积物对井筒超平衡钻井相关过程的响应非常有用。程远方等^[12]通过建立等温流固耦合数学模型,分析了深海水合物储层的应力状态、物性参数分布及动态变化规律。卫成效等^[13]针对海底天然气水合物赋存的复杂地层,利用有限元法分析了钻进过程中岩芯所受应力状态,得出了随钻进工艺参数变化时岩芯扰动状态的变化规律。Kim H. M.等^[14]通过对模拟地层应力应变的计算,分析了模拟地层的变形及稳定性问题。Yu H. M.等^[15]为解决勘探过程与地上作业之间的相互影响和制约问题,开发了储层-井筒-管网一体化模拟优化技术,在各个步骤中得到了冲突最小、效益最优的方案。目前,针对钻具对深海复杂地层钻进的过程和运动状态研究较少,受上述文献启发,本文拟通过ABAQUS有限元分析软件平台,构建包含非均质地层和钻具系统的数值模型。通过引入修正的Drucker-Prager本构关系表征海底储

层的应变特性,重点分析钻压、转速等钻进参数对钻具进给情况的影响。以期对深海复杂地层钻具选型、钻进参数匹配和风险预警提供理论参考依据,对推动我国“深地工程”战略的实施有重要工程价值。

2 数值模型建立

2.1 钻进动力学模型

在深海钻探中,其钻进动力学模型来自钻具与海底复杂的地层之间所进行的相互作用。其大致过程如下:钻具对施加钻进范围内的地层进行挤压、摩擦、切削,使地层内的各类岩体由弹性变形转化为塑性变形,从而实现对深海地层钻进范围内的破碎及后续对海底岩芯的拾取。在整个碎岩过程中^[16],其地层岩石单元的变化是高度非线性的,该非线性变化包括岩石单元因其结构变形产生的几何非线性、岩石单元受到应变产生的材料非线性,以及钻头与岩石单元之间相互作用产生的接触非线性。

假设即将撞击或接触的两个物体为A和B,撞击或接触系统在t时刻占据的欧几里得空间的有限区域为 Ω ,受到作用的体积力为**b**,表面牵引力为**q**,密度为 ρ ,柯西内应力为 σ 。如果不存在任何阻尼力和摩擦力,通过使用散度定理,可得如下运动方程:

$$\int_{\Omega} \rho \ddot{u} \delta u d\Omega - \int_{\Omega} \rho b \delta u d\Omega + \int_{\Omega} \sigma \delta u d\Omega - \int_{\Gamma_q} \bar{q} \delta u d\Gamma - \int_{\Gamma_C^A} \bar{q}_C^A \delta u d\Gamma - \int_{\Gamma_C^B} \bar{q}_C^B \delta u d\Gamma = 0, \quad (1)$$

式中: Γ_q 为表面牵引力的边界; Γ_C^A 和 Γ_C^B 为两个物体的接触边界; \ddot{u} 为加速度; δu 为虚拟位移; \bar{q} 和 \bar{q}_C 分别为表面切向力和表面法向力。

方程(1)可通过替换有限元插值函数或形函数在空间上离散化,它们是跨越虚拟位移的有限维空间的一组基函数的成员,可描述成如下形式:

$$\delta u \left(\ddot{\mathbf{u}} \int_{\Omega} \rho N_{\alpha} N_{\beta} d\Omega + \int_{\Omega} N_{\alpha} N_{\beta} d\Omega - \int_{\Omega} N_{\alpha} \rho b d\Omega - \int_{\Gamma_q} N_{\alpha} \bar{q} d\Gamma - \int_{\Gamma_C^A} N_{\alpha} q_C^A d\Gamma - \int_{\Gamma_C^B} N_{\alpha} q_C^B d\Gamma \right) = 0, \quad (2)$$

式中: $\ddot{\mathbf{u}}$ 为加速度矢量; α 为接触边界相关变量; β 为材料本构相关变量; N_{α} 和 N_{β} 为形函数。

对于任意虚拟位移函数u,括号内的项应为0,因此可以得出如下矩阵形式的有限元方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{F}^1 = \mathbf{F}^2 + \mathbf{F}^3 + \mathbf{F}^4, \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{F}^1 为内力矢量; \mathbf{F}^2 为外力矢量; \mathbf{F}^3 为接触力矢量; \mathbf{F}^4 为体积力矢量。

2.2 金刚石钻头模型

对于施加于海底复杂地层钻具模型的建立,本

文按照钻头设计和选型的原则,采用如图1所示的金刚石钻头,相较于其他进行海底钻探的PDC (polycrystalline diamond compact) 钻头,该钻头具有以下优势:1) 其结构设计相较于地质钻探钻头和PDC钻头更加直观简洁,以此为模型基础进行有限元分析时可节省大量工作时间;2) 该钻具模型具有抗冲击性较好、工艺复杂度和制作成本较低、生产效率较高、集约生产整合度较强的特点,适用于钻具厂商的量产;3) 在实际深海钻探工作中,由于其深海地层的复杂度情况往往伴随着钻头在钻进过程中由于受力不均使钻头丢失的事故,因此使用该模型为基础的钻具在深海复杂地层领域作业时可以减少其试错成本,提高勘探过程的经济效益。



图1 海底钻探钻具

Fig. 1 Subsea drilling tool

该钻头材料参数依据《金刚石钻探手册》^[17]进行选取,金刚石胎体为WC基胎体,硬度为HRC45~HRC55,抗弯强度大于1 200 MPa,为弹塑性材料,密度为14.0 g/cm³,弹性模量为500 GPa,泊松比为0.20,线膨胀系数为4.5 × 10⁻⁶,压缩强度为4 000 MPa。金刚石颗粒为单晶人造金刚石,颗粒排数为4,单排粒度选择粗颗粒10目,颗粒半径为2 mm,用于软至中硬地层;选择细颗粒20目,颗粒半径为1 mm,用于硬岩层的破岩,破碎比功降低15%~20%。密度为3.30 g/cm³,弹性模量为1 050 GPa,泊松比为0.20,单粒抗压强度为30 kN,硬度为80 GPa,胎体对金刚石包裹类型为机械力包裹,金刚石颗粒与胎体的结合强度为15 × 10⁷ N/m²,钻头的几何参数见表1。

表1 钻头的参数与取值

Table 1 Drill bit parameters with assigned values

参数	取值	参数	取值
内径/mm	51	水口宽度/mm	2
外径/mm	75	水口深度/mm	5
高度/mm	26.5	出刃高度/mm	0.4
倾斜角/(°)	35		

2.3 深海复杂地层模型

在油气资源勘探与开发过程中,对储层及其周围

地层的地质结构的了解,是评估开采风险及优化开采策略的关键步骤。本文旨在建立一套海底油气资源储层的软硬互层模型,该模型通过几何分层与材料属性赋值实现,以模拟实际地层的复杂性。本研究中,所有地层均采用线性Drucker-Prager (D-P) 弹塑性模型进行构建。D-P模型能够较好地模拟土体和岩石的弹塑性行为。通过调整D-P模型的参数,包括屈服强度、剪切模量和体积模量等,可以准确地再现各种地层的力学性能。以此建立其典型案例的复杂地层力学参数^[18],表2给出了几种典型深海地层材料的力学性能参数。其中软质地层源自中国海洋石油公司^[19]提供的中国南海神狐区域水合物上覆土层参数,硬质地层源自某海域^[20]水合物储层参数,该数据具有一定的可靠性。

表2 典型深海地层材料的力学性能参数

Table 2 Mechanical performance parameters of typical deep-sea formations

地层种类	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	孔隙度/%	饱和度/%
S-1	25.10	0.490	25.02	40.00	100
S-2	21.59	0.470	22.13	60.00	100
S-3	91.04	0.470	42.98	60.00	40
GH-1	200.00	0.163	32.00	37.70	25
GH-2	1 100.00	0.170	28.00	42.40	55
GH-3	3 850.00	0.190	23.67	31.37	80

在实际的深海钻探工作中,其真实的海底地层环境大部分并非由以上几种典型地层互相叠加而成,各地层经过长时间的渗透和挤压作用,表现出以下复杂性:1) 横向不同区域地层内所表现的力学性能不同;2) 同一地层区域内纵向地层随不同深度所表现的力学性能不同。为使得钻进模拟过程场景更符合真实的海底复杂地层情况。根据不同地层材料参数之间并无关联的原理,利用相似模拟法通过不同地层比例构建出新的模拟地层^[21],选取S-1(60%)、S-2(30%)、S-3(10%)的3种地层作为相似比例,拟合出模拟地层1;选取GH-1(10%)、GH-2(20%)、GH-3(70%)的3种地层作为相似比例,拟合出模拟地层2。模拟地层的力学性能参数如表3所示。

表3 模拟地层的力学性能参数

Table 3 Mechanical performance parameters of simulated geological formations

地层编号	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	孔隙度/%	饱和度/%
模拟地层1	32.5	0.485	37.05	46.7	23
模拟地层2	2 800.0	0.175	29.00	38.0	51

通过构建的两种模拟地层作为钻进区域仿真模

拟地层,更符合真实海底地层的复杂情况,该数据具有一定的可靠性,且该仿真过程对于相互叠加的软质地层和硬质地层的复杂地层同样适用。

建立如图2所示的钻进系统模型,其中上层为软质模拟地层1,为便于观察其受力过程,尺寸设定如下:厚度为20 mm,区域面积为200 mm×200 mm;下层为硬质模拟地层2,设定其厚度为60 mm,区域面积为200 mm×200 mm。对模拟地层添加网格处理,其网格类型为C3D8R;对钻头添加网格处理,其网格类型为C3D4。设定钻头与地层之间的接触方式为面面接触,摩擦因数取0.2和0.4(根据地层调整),法向行为为“硬接触”。模拟地层1与模拟地层2之间的接触为面面接触,通过接触面将两种模拟地层设置为绑定体,并将模拟地层2的下表面设置为完全约束。选取参考点RP-1与钻头的相互作用为刚体,并在参考点处施加集中力和钻速,作为施加在钻头处的钻压与钻速。

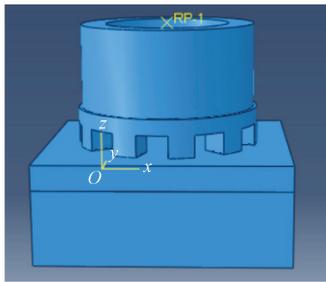


图2 钻进系统模型示意图

Fig. 2 Drilling system model schematic diagram

2.4 加载方式

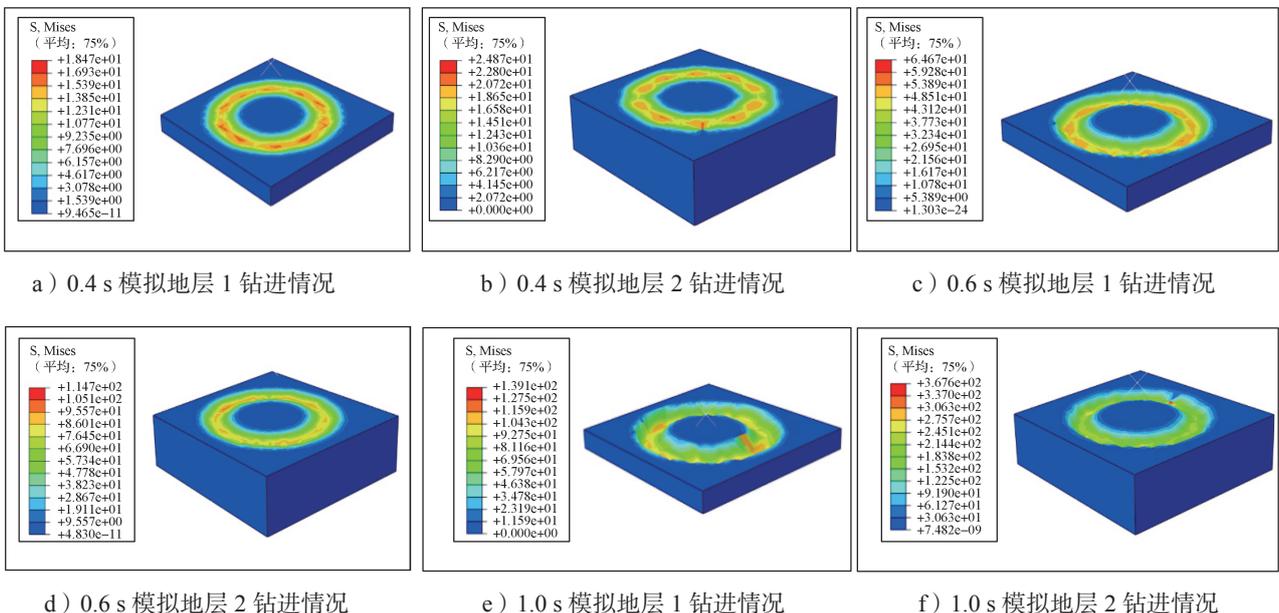
模拟深海环境的高静水压力,模拟环境为水深2 000 m左右的深海地层,并且施加20 MPa的均布

压力,通过ABAQUS的“压力”模块施加至地层与钻具模型外表面。钻头轴向载荷(钻压)以集中力的形式施加于所选取的参考点处,根据实际工作情况选取3个不同的钻压(1.2 t, 1.5 t, 1.8 t, 1 t=9.8 kN)作为恒定载荷施加于钻头上,方向为延z轴垂直向地层。通过施加旋转角速度于选定参考点处完成对钻头钻速的添加,使用“旋转角速度”定义钻具旋转,根据实际工作情况选取60, 90, 120 r/min共3个不同的钻速,方向为顺时针方向,类型为匀速转动。模拟地层单元在失效后自动剔除,不考虑岩屑的影响,在深海2 000 m处进行钻探时,由于其为低温环境,故不考虑热力学影响。钻头钻进参数的选取符合文献[22]中提供的深海高压环境下钻具的钻压与钻速范围,故其仿真结果较为准确。

3 仿真结果分析

3.1 钻具钻进过程

钻具钻进中钻头的破岩过程可以解构为如下3个相互作用的阶段:1)应力加载阶段。该阶段中,钻压通过切削齿-岩层接触面传递,导致软质地层和硬质地层单元产生弹塑性变形。2)裂纹扩展阶段。钻具钻进过程中,当局部有效应力超过岩体抗剪强度时,主裂纹沿最大主应力方向扩展,完成单次破岩循环。3)岩屑运移阶段。该阶段中,被剥离的岩屑随着钻井液排出,使得新的岩面被持续暴露。以钻压为1.5 t、转速为120 r/min为例,取模拟地层在0.4, 0.6, 1.0, 1.2 s时对应的模拟地层1与模拟地层2的应力云图,其钻进工作过程如图3所示,在该钻进过程中获取了半径约40 mm的模拟地层岩芯。



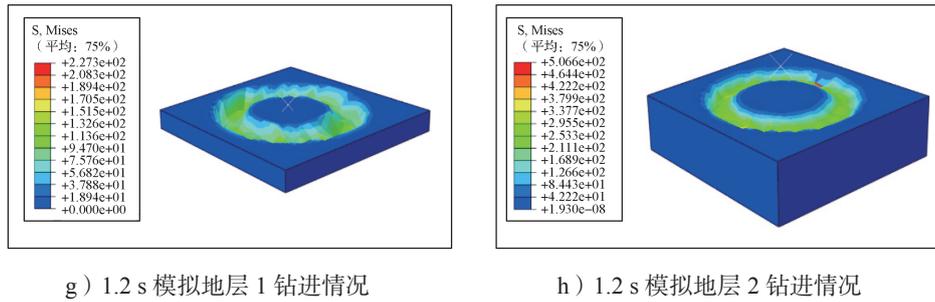


图3 钻进工作过程

Fig. 3 Drilling operation process

在钻头钻进工作过程中, 钻头先与模拟地层 1 接触并进行破岩过程, 模拟地层 1 受到钻头切削和挤压作用发生变形。在钻进 0.4 s 时两种地层的应力状态如图 4a 所示: 在钻进模拟地层 1 的过程中, 随着钻进深度的增加而改变模拟地层 1 的力学性能, 导致模拟地层 2 受到轻微挤压, 但此时模拟地层 2 并未发生弹塑性变形。将钻头钻进模拟地层 1 的过程定义为阶段 I, 在对模拟地层 1 的破岩工作完成时, 钻具进给量达到并超出 20 mm 后, 钻头与模拟地层 2 发生剪切与挤压行为, 此时模拟地层 2 发生明显的弹塑性变形, 如在钻进 1.2 s 时, 两种地层的应力状态如图 4b 所示。将钻头钻进模拟地层 2 的过程定义为阶段 II。

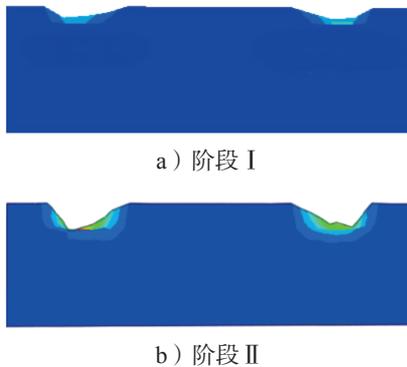


图4 不同破岩阶段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bit penetration at different stages

3.2 钻头运动状态

当在钻具上施加 1.5 t 钻压及 60 r/min 转速时, 选取参考点的运动状态作为金刚石钻头的位移与时间变化曲线, 结果如图 5 所示, 则钻具进尺速度为

$$v = \Delta u / \Delta t, \quad (4)$$

式中: u 为钻头钻进位移; t 为钻头钻进时间。

由金刚石钻头的位移曲线可知, 钻具在 I 阶段下的进尺速度约为 23 mm/s, 在钻进模拟地层 1 的过程中, 由于模拟地层 1 的硬度及剪切抗压强度较低, 在此过程下的钻具速度较快。当钻具进给量超过 20 mm 后, 钻头穿过模拟地层 1 并与模拟地层 2 接触, 由于模拟地层 2 的硬度及剪切抗压强度均较大, 钻具

的进尺速度明显降低, 钻具在 II 阶段下的进尺速度约为 3.85 mm/s。

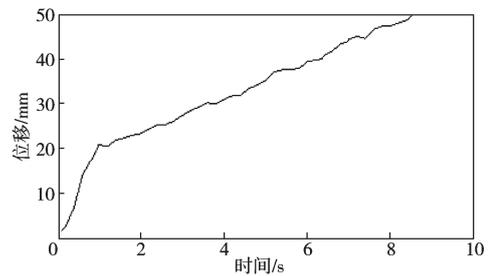


图5 金刚石钻头的位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of the diamond drill bit

3.3 钻头所受压力

吴丹等^[23]利用 Hertz 理论, 根据单颗粒金刚石受力情况, 建立了整个钻头所受压力与钻进参数的理论关系, 将其引入修正该钻进系统模型中, 得到钻头所受压力为

$$F = (F_n + \mu T_n) Nn, \quad (5)$$

式中: F_n 和 T_n 分别为钻头钻进时所受正压力和切削力; N 为钻头颗粒排数; n 为单排颗粒数目; μ 为摩擦因数。

文献 [24] 通过对岩石的研究, 认为内摩擦角 θ 与摩擦因数存在如下联系:

$$\mu = \tan \theta. \quad (6)$$

钻头所受正压力和切削力大小分别如下:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R h^3}, \quad (7)$$

$$T_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R L^3}. \quad (8)$$

式 (7) (8) 中: R 为金刚石颗粒半径; h 为钻头每转切削深度; L 为切入深度; E^* 为减缩弹性模量, 其表达式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B}, \quad (9)$$

其中, ν_A 和 ν_B 分别为两接触体的泊松比, E_A 和 E_B 分别为两接触体的弹性模量。

钻头切削深度和切入深度可视为相等,其等量关系为

$$h=L=60v/(Nw), \quad (10)$$

式中 w 为钻头转速。

将以上式子结合,得到钻头所受压力为

$$F=(4(1+\tan\theta)E^*n/3)\sqrt{(R/N)(60v/w)^3}。 \quad (11)$$

4 钻进参数影响分析

4.1 钻速对进尺速度的影响

当钻压为 1.5 t 时,分别对钻速为 60, 90, 120 r/min 的钻进过程进行模拟,得到钻头钻进深度为 50 mm 时的进给情况以及不同情况下的进尺速度,如图 6 和图 7 所示。

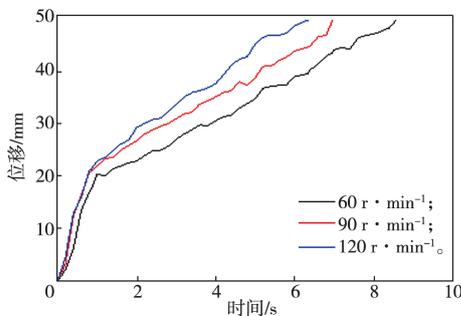


图 6 不同钻速下钻具的位移变化曲线

Fig. 6 Displacement variation curves of drilling tools at different drilling speeds

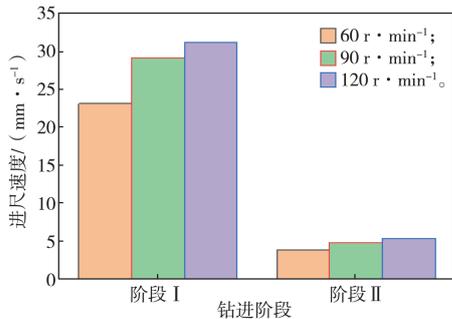


图 7 不同钻速下的钻具进尺速度

Fig. 7 Rate of penetration (ROP) at different drilling speeds

由图 6 所示位移变化曲线可知,当施加相同的钻压时,同一钻进时间下的位移量随着钻速的增大而增加,这表明钻具的进尺速度随着施加钻速的增加而增大。由图 7 可以得知,钻速越小,钻具在不同阶段下的进尺速度变化越明显,尤其是在阶段 II 的钻进过程中,钻具的进尺速度的变化尤为明显。当钻速为 60, 90, 120 r/min 时,钻具在阶段 I 钻进时的进尺速度分别约为 23, 29, 31 mm/s,进尺速度分别增加了 26.09%, 6.89%。钻具在阶段 II 钻进时的进尺速度分别约为 3.85, 4.79, 5.27 mm/s,进尺速度分别增加了

24.42%, 10.02%。可见,随着钻速增加,钻具在钻进软质地层时的进尺速度变化比钻进硬质地层时的进尺速度变化更大。

4.2 钻压对进尺速度的影响

当钻速为 90 r/min 时,分别对钻压为 1.2 t, 1.5 t, 1.8 t 的钻进过程进行模拟,得到钻头钻进深度为 50 mm 时的进给情况以及不同情况下的进尺速度,如图 8 和图 9 所示。

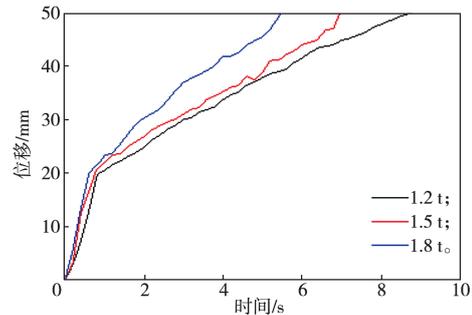


图 8 不同钻压下钻具的位移变化曲线

Fig. 8 Displacement variation curves of drilling tools under different drilling pressures

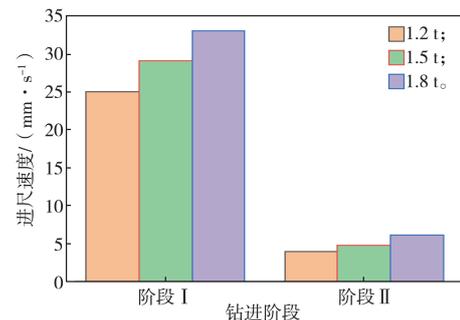


图 9 不同钻压下的钻具进尺速度

Fig. 9 Penetration rate of drilling tools under different drilling pressures

由图 8 可知,在施加相同的钻速时,同一钻进时间下的位移量随着钻压的增大而增加,表明钻具的进尺速度随着施加钻压的增加而增大。尤其是在不同钻压下钻具在阶段 II 的钻进过程中,其进尺速度的变化更加明显。由图 9 可知,钻压为 1.2 t, 1.5 t, 1.8 t 时,钻具在阶段 I 的进尺速度分别约为 25, 29, 33 mm/s,钻进速度分别增加了约 16.00%, 13.79%;钻具在阶段 II 钻进时的进尺速度分别约为 3.93, 4.79, 6.17 mm/s,钻进速度分别增加了约 21.88%, 28.81%。可见,随着钻压的增加,钻具在钻进硬质地层时的进尺速度变化比钻进软质地层时的进尺速度变化更大。

4.3 钻进参数对钻头所受压力的影响

由于钻头所受压力与钻具进尺速度和转速有关,当钻压为 1.5 t 时,钻头所受压力与钻进参数之间的关系如图 10 所示。

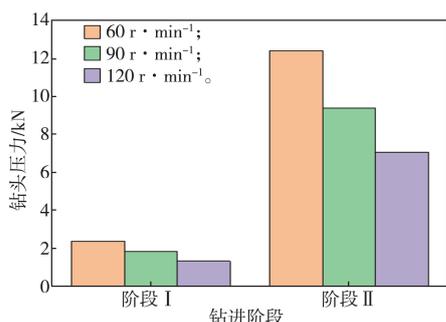


图 10 不同钻速下钻头所受压力

Fig. 10 Bit pressure profile under different drilling pressures

由图 10 可知,施加相同钻压下,钻头所受压力随钻速提升逐渐降低,当钻速为 60, 90, 120 r/min 时,钻具在阶段 I 钻进时,钻头所受压力分别为 2358, 1809, 1305 N, 钻头所受压力分别约降低了约 23.28%, 27.86%。由此可知,钻具在钻进软质地层时,钻头所受压力随着钻速的提升其降低幅度逐渐增大。钻具在阶段 II 钻进时,钻头所受压力分别为 12417, 9391, 7046 N, 钻头所受压力分别降低了约 24.37%, 24.97%。可见,钻具在钻进硬质地层时,虽然钻头所受压力随着钻速的提升而降低幅度增大,但降低比例较为平稳,压力降低比例仅提升了约 0.6%。

5 结论

1) 本文以所选取的金刚石钻头作为钻具,在施加不同的工作钻速和工作钻压下,可以实现对相互叠加的软质地层和硬质地层为基准的深海复杂地层的有效钻进,通过相似材料构建法拟合的模拟叠加地层更加符合深海钻探的真实工作环境,该钻具适用的范围更广,可以适应更加复杂的海底钻进场所。

2) 该钻具在钻进不同地层时,其进尺速度会发生明显变化,说明钻进力学性能差异较大的复合地层时,钻具进尺速度会因地层岩性的差异而呈现出明显变化。钻具进尺速度会因钻速和钻压的增加而增大,这种变化在钻具钻进软质地层时并不明显,但在钻进硬质地层时更显著,在低钻速和高钻压下对钻具钻进硬质地层时的进尺速度增量较大,在高钻速和低钻压下钻具钻进硬质地层时的进尺速度增量较小。

3) 通过引入 Hertz 理论建立了该钻进系统模型中钻头所受压力与钻进参数的理论关系。钻具在钻进复杂地层过程中,钻头所受压力与钻具进尺速度和转速有关,在保持钻压不变的情况下,钻头所受压力随着钻速的提升逐渐降低,且降低幅度逐渐增大,但在硬质地层中降低比例较为平稳,压力降低比例仅提升了约 0.6%。

参考文献:

- [1] 熊亮, 李星辰, 谢文卫, 等. 我国深海科学钻探技术研究成果及进展 [J]. 中国地质调查, 2025, 12(1): 29-39.
XIONG Liang, LI Xingchen, XIE Wenwei, et al. Achievements and Progress of Deep-Sea Scientific Drilling Technology Research in China [J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 29-39.
- [2] 李文龙, 毛雪莲, 刘平, 等. 琼东南盆地第四系乐东组沉积体系演化特征 [J]. 天然气勘探与开发, 2024, 47(6): 1-7.
LI Wenlong, MAO Xuelian, LIU Ping, et al. Evolution on Sedimentary System of the Quaternary Ledong Formation, Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(6): 1-7.
- [3] 王滢, 王妍妍, 高盟, 等. 深海能源土含气储层边坡稳定性研究 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 32-40.
WANG Ying, WANG Yanyan, GAO Meng, et al. Study on Slope Stability of Deep-Sea Energy Soil Gas Reservoir [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 43(1): 32-40.
- [4] 刘亚明, 王红军, 田作基, 等. 南美圭亚那盆地不同区带油气成藏差异性分析 [J]. 中国石油勘探, 2024, 29(6): 130-143.
LIU Yaming, WANG Hongjun, TIAN Zuoji, et al. Analysis of Differences in Hydrocarbon Accumulation in Various Zones of Guyana Basin, South America [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(6): 130-143.
- [5] 熊亮, 谢文卫, 于彦江, 等. 大洋钻探随钻扩孔下套管关键技术 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3): 74-80.
XIONG Liang, XIE Wenwei, YU Yanjiang, et al. Key Technology of Reaming While Drilling and Casing Running in Ocean Drilling [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(3): 74-80.
- [6] 万步炎, 彭奋飞, 金永平, 等. 深海海底钻机钻探技术现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(22): 385-402.
WAN Buyan, PENG Fenfei, JIN Yongping, et al. Drilling Technology Status and Development Trends of Deep-Sea Seafloor Drill [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(22): 385-402.
- [7] 汪品先. 未雨绸缪: 迎接大洋钻探学术新计划的制定 [J]. 地球科学进展, 2017, 32(12): 1229-1235.
WANG Pinxian. Towards the New Decade of Ocean Drilling: Preparing Its Science Plan [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(12): 1229-1235.
- [8] 黄天佳, 李小森, 张郁, 等. 海洋天然气水合物地

- 层钻井安全问题研究进展[J]. 新能源进展, 2019, 7(6): 513-521.
- HUANG Tianjia, LI Xiaosen, ZHANG Yu, et al. Research Progress of the Safety Issues of Marine Natural Gas Hydrate Reservoirs Drilling[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(6): 513-521.
- [9] 郑森. 基于深海运载器的小型取芯钻头设计及钻进工艺参数研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- ZHENG Sen. Design of Small Coring Bit Based on Deep-Sea Vehicle and Study on Drilling Process Parameters [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021.
- [10] 姚智晓. 提钻取芯式海底钻探采样机构设计与仿真分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- YAO Zhixiao. Design and Simulation Analysis of Seafloor Sediment Drilling and Sampling Mechanism Through Multi-Barrel Connection[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [11] FREIJ-AYOUB R, TAN C E, CLENNELL B, et al. A Wellbore Stability Model for Hydrate Bearing Sediments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 57(1/2): 209-220.
- [12] 程远方, 沈海超, 赵益忠, 等. 天然气水合物藏开采物性变化的流固耦合研究[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 607-611.
- CHENG Yuanfang, SHEN Haichao, ZHAO Yizhong, et al. Study on Fluid-Solid Coupling of Physical Variation of Gas Hydrate Reservoirs During Natural Gas Development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 607-611.
- [13] 卫成效, 金永平, 刘德顺, 等. 海底天然气水合物复杂地层钻进取芯仿真岩芯扰动分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 43-49.
- WEI Chengxiao, JIN Yongping, LIU Deshun, et al. Simulation Core Disturbance Analysis of Core Drilling in Complex Submarine Gas Hydrate Formation[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1): 43-49.
- [14] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, et al. Exploring the Concept of Compressed Air Energy Storage (CAES) in Lined Rock Caverns at Shallow Depth: A Modeling Study of Air Tightness and Energy Balance[J]. Applied Energy, 2012, 92: 653-667.
- [15] YU H M, WANG Y Q, CHENG C J, et al. Advances and Outlook of Integrated Reservoir-Wellbore-Pipe Network Simulation Technology[J]. Energy Geoscience, 2024, 5(4): 100315.
- [16] HAR J, FULTON R E. A Parallel Finite Element Procedure for Contact-Impact Problems[J]. Engineering with Computers, 2003, 19(2): 67-84.
- [17] 刘广智. 金刚石钻探手册[M]. 北京: 地质出版社, 2022: 274-277.
- LIU Guangzhi. Diamond Drilling Manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2022: 274-277.
- [18] 卫成效. 海底天然气水合物复杂地层钻探取芯建模与分析[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
- WEI Chengxiao. Modeling and Analysis of Core Drilling in Complex Formation of Submarine Gas Hydrate[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2022.
- [19] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 1-14.
- YANG Shengxiong, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. New Understandings on the Characteristics and Controlling Factors of Gas Hydrate Reservoirs in the Shenhu Area on the Northern Slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 1-14.
- [20] 孙晓杰, 程远方, 李令东, 等. 天然气水合物岩样三轴力学试验研究[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 52-57.
- SUN Xiaojie, CHENG Yuanfang, LI Lingdong, et al. Triaxial Compression Test on Synthetic Core Sample with Simulated Hydrate-Bearing Sediments[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 52-57.
- [21] 王慧敏. 大口径钻进软质岩层相似材料模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- WANG Huimin. The Research on Simulating of Soft Rock Layer to Aim at a Large Diameter Drilling with Similar Materials[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [22] 贺晓斌. 高压环境下海底钻机钻进试验台研制[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023.
- HE Xiaobin. Development on Experiment Table of Seafloor Drill Under High Pressure Environment[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2023.
- [23] 吴丹, 金永平, 刘德顺, 等. 深海海底钻机海底天然气水合物钻进取芯建模与分析[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4): 136-143.
- WU Dan, JIN Yongping, LIU Deshun, et al. Modeling and Analysis of Core Drilling of Marine Gas Hydrate by Seafloor Drill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4): 136-143.
- [24] 邹永吉. 关于土的黏聚力和内摩擦角值的领悟和理解[J]. 林业建设, 2014(4): 40-42.
- ZOU Yongji. Understanding About Cohesion and Internal Friction Angle[J]. Forestry Construction, 2014(4): 40-42.

(责任编辑: 廖友媛)