

赵裕齐,金永平,刘德顺,等. 基于有限元的岩芯扰动定量分析和钻进参数优化[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(4):20-28. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.04.003

ZHAO Y Q, JING Y P, LIU D S, et al. Quantitative analysis of core disturbance based on finite element and optimization of drilling parameters [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(4):20-28. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.04.003

基于有限元的岩芯扰动定量分析和 钻进参数优化

赵裕齐,金永平*,刘德顺,万步炎

(湖南科技大学 海洋矿产资源开采装备与安全技术国家地方联合工程实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:针对海底天然气水合物赋存的复杂地层,建立沉积物-硬岩-天然气水合物的地层模型,使用搭载于海牛钻机上的钻头,利用 ABAQUS 对钻头钻进取芯的过程进行仿真并对在不同地层钻进的情况进行分析;然后,利用 Python 对其进行二次开发,以此为依据对扰动进行定量分析并计算各地层的扰动率,三层扰动率之和为总扰动率,以总扰动率之和取最小值作为目标,利用遗传算法对钻进工艺参数进行优化,并且在一定的范围内计算出最优的钻进工艺参数,此结果对于实际海底工况下的钻进工艺参数的设定有一定的参考价值。

关键词:天然气水合物;复杂地层;钻探取芯;岩芯扰动;遗传算法;参数优化

中图分类号:TE58

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)04-0020-09

Quantitative Analysis of Core Disturbance Based on Finite Element and Optimization of Drilling Parameters

ZHAO Yuqi, JIN Yongping, LIU Deshun, WAN Buyan

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In view of the complex strata of submarine gas hydrates, the stratigraphic model of sediment-hard rock-gas hydrate is established, the drill bit mounted on the manatee drilling rig is used to simulate the process of drilling the drill bit into the core by using ABAQUS, and the drilling rate in different formations is analyzed. Then the secondary development is carried out by Python, and the stress state of the core is analyzed by the simulation to generate ODB files for post-processing, and the disturbance rate of each stratum is quantitatively analyzed and calculated based on the drill bit mounted on the manatee drilling rig. The sum of the three layers of disturbance rate is the total disturbance rate, and the minimum value of the sum of the total disturbance rate is taken as the goal, and the genetic algorithm is used to optimize the drilling process parameters. The optimal drilling process parameters are calculated within a certain range, which also has certain references for the setting

收稿日期:2024-10-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC2805901);湖南省科技创新计划资助项目(2023ZJ1020)

*通信作者, E-mail: jinyongping@hnust.edu.cn

of drilling process parameters under actual subsea conditions.

Keywords: gas hydrate; complex stratigraphy; drilling coring; core disturbance; genetic algorithms; parameter optimization

海洋中含有丰富的资源,随着世界范围内能源需求的急速扩大,对于海洋资源的探索与开采已经迫在眉睫,海底有一种有笼状构造的似冰状结晶矿物,主要是由甲烷和水分子结核而成,即天然气水合物,也被称作“可燃冰”。天然气水合物的资源总量已超过了传统资源含碳量的2倍,因此被公认为是未来重要的后续能源^[1]。海底天然气水合物具有能量高、分布广、规模大、埋藏浅等特点,然而海域天然气水合物储层比传统油气储层具有更复杂的力学特性,直接采用传统油气开采技术开采水合物,容易引起海底滑坡、钻井井壁失稳、海上钻井平台基础不均匀沉陷等安全问题^[2]。钻头在下钻过程中还会对地层造成破坏进而产生扰动,发生扰动的部分会作为所取岩芯中的无效部分而降低取芯率。因此研究水合物取芯过程中复杂地层的力学特性,建立预测其在复杂载荷条件下的力学行为的本构模型,进而通过适当调整钻进工艺参数以降低在下钻过程中对于相关地层造成的扰动,对于比较准确地反映出下钻过程中的真实情况以及提高取芯率就显得尤为重要。

针对海底地层本构模型方面,YU等^[3-4]提出了修正 Duncan-Chang 本构模型,描述了水合物沉积物在不同温度、围压及加载率情况下的力学特性;SONG等^[5]基于 Mohr-Coulomb 和 Duncan-Chang 准则建立考虑水合物分解的力学本构模型,描述了水合物分解对水合物沉积物力学特性的影响;刘乐乐等^[6]提出水合物沉积物等效弹性模量计算公式,改进了水合物沉积物的力学本构模型,描述了内聚力和摩擦角与围压和水合物饱和度间的关系。对于硬岩地层,周辉等^[7-8]针对大理岩、ZHANG等^[9]针对砂岩、李震等^[10]针对绿片岩建立了塑性强化-软化变形破坏过程中,强度参数及剪胀角的演化模型。关于扰动方面,王国欣等^[11]提出了基于扰动的结构性黏土本构模型;于小军等^[12]提出了基于扰动状态概念的结构性软黏土本构模型。本文通过对复杂地层的建模,使用 ABAQUS 对钻头在复杂地层中的钻进过程进行仿真模拟,通过 Python 编写子程序对钻进过程中地层的扰动,进行定量分析,并且依据算出的扰动率使用遗传算法对钻进工艺参数进行优化处理,进而得出在一定范围内的最佳钻进工艺参数。

1 扰动的定量分析

1.1 钻进取芯有限元建模及相关参数的设定

首先,基于便于仿真分析的目的作如下简化:

- 1) 只考虑钻头部分钻进过程中对地层的影响;
- 2) 将整个钻头当作一个刚体,因此不考虑钻头部分的磨损;
- 3) 钻头设定为竖直方向上下钻,不考虑钻头左右跳动的情况;
- 4) 失效后的单元直接用单元删除消去,钻头部分的流道在建模时不考虑,同时也不考虑冲洗液的影响;
- 5) 不考虑钻头部分接触的水合物受热分解的情况。

在下钻过程中,钻头与地层的接触是一个高度非线性的过程,用有限元法可以将接触问题转化成为(1)中的数学模型。

$$\int_{\alpha} \sigma d\alpha - \int_{\alpha} B d\alpha - \int_{\varepsilon_f} r w_e dS - \int_{\varepsilon_e} r_e w_u dS + \int_{\alpha} D A w_u d\alpha = 0. \quad (1)$$

式中: α 为有限元系统在 t 时刻接触的空间域; B, σ 为系统的体力、柯西内应力; r, r_e 均为边界力; ε_e 为接触系统的边界; ε_f 为边界力的范围边界; w_e 为虚应变; w_u 为虚位移; D 为密度; A 为加速度。

使用有限元方法对空间域 α 离散,再引入虚位移,可得

$$m \ddot{a} = s(t) + c(x, \lambda) - f(x, \theta). \quad (2)$$

式中: $\mathbf{m}$ 为有限元系统的质量矩阵; $\ddot{\mathbf{a}}$ 为加速度矢量; $\mathbf{s}$ 为外力矢量; $\mathbf{c}$ 为摩擦与接触矢量; $\mathbf{f}$ 为系统内应力矢量; $\mathbf{x}$ 为位移; λ 为与接触面相关的变量; θ 为与材料相关的变量.

1.1.1 钻头模型及相关参数

钻头部分直接选用搭载于海牛海底钻机的表镶金刚石钻头,具体的钻头模型和相关的材料参数可参考文献[13],钻头实物和构建的模型如图 1 所示,钻头胎体和金刚石颗粒的相关材料参数如表 1 所示.



图 1 金刚石钻头有限元模型与实物

表 1 金刚石钻头材料参数

钻头模型	密度/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	硬度	抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa
钻头胎体	11 400	550	0.22	35~40 HRC	—	1 270
金刚石颗粒	3 520	1 050	0.20	压痕硬度 70 000 MPa	8 857	—

1.1.2 复杂地层模型及相关参数

海底水合物所储藏的环境是很复杂的,本文假设一种沉积物-硬岩-天然气水合物的复合地层模型,整个模型中地层的厚度分别为 30,40,50 mm.由相关资料可知:海底岩层大多为玄武岩,所以将硬岩地层按玄武岩设置.下面介绍一下德鲁克-普拉格准则,德鲁克和普拉格于 1952 年提出了考虑静水压力影响的广义 Mises 屈服与破坏准则,常被称为德鲁克-普拉格准则,简称 D-P 准则,即

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0. \quad (3)$$

式中: $I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ 为应力的第一不变量; $J_2 = \frac{1}{2}S_i S_i = \frac{1}{6}[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ 为应力偏量第二不变量; α, K 为与岩石内摩擦角和黏结力有关的实验常数.

D-P 准则计入了中间主应力的影响,又考虑了静水压力的作用,克服了 M-C 准则的主要弱点,依据其建立的本构模型,是在 M-C 本构模型上的进一步优化,并且已在国内岩土力学与工程的数值计算分析中获得广泛的应用.

参考刘锐鸿等^[14],周博等^[15],孔洋等^[16],刘文化等^[17]的研究成果对三层 D-P 模型中所需要的弹性模

量,剪胀角,泊松比,内摩擦角,黏聚力以及塑性参数分别进行赋值,其中3种地层弹性相关的参数如表2所示.

表2 各地层弹性材料参数

	密度/(t·mm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
沉积物	2.00E-9	10~500	0.46~0.47	5~15	9E-4~2.8E-3
玄武岩	2.70E-9	30 000~70 000	0.10~0.35	45~55	20~60
水合物	2.00E-9	2 500~5 000	0.15~0.35	23~33	0.1~0.2

从表2中可以看出:在同一地层弹性模量的变化很大,所以在子程序中按照网格划分对每一个纵轴方向上每一个网格所在地层的弹性模量在上述范围中进行蒙特卡洛随机抽样,以求尽可能真实地模拟复杂地层的相关情况.

1.1.3 其余参数的设定及网格划分

因为假定在下钻过程中钻头不发生磨损,所以可以将钻头整体当作一个刚体,因此在其上部中心设置一个参考点,将接触设置为面与面接触,框选整个岩层,将切向行为摩擦系数设置为0.1,法向行为设置为硬接触.地层模型的下表面设定为完全约束,定义分析步为显示动力学分析步,将钻头与地层接触的部分划定为钻进区,对其中的网格进行进一步细化,将网格类型设置为C3D8R,设置单元删除.具体效果图如图2所示.

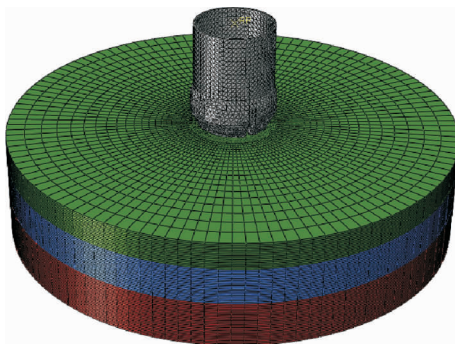


图2 金刚石钻头与各地层网格划分效果

1.2 岩芯扰动的判据与定量分析

扰动状态是由美国教授 Desai 提出的一种理论概念,认为岩石内部存在连接材料的相对完整状态(Relative Intact State)和完全调整状态(Fully Adjusted State),处于完全调整状态的部分也同样具有承受外载的能力,通过控制扰动函数可以更精确地刻画损伤及描述材料的强化,因此扰动函数比“损伤因子”的概念更广泛,在揭示岩石时效破坏机理时较传统损伤力学理论更具优势.扰动状态因子 $D^{[18]}$ 的表达式如式(4)所示.

$$D=D(\xi^p)=D_u[1-e^{(-M\xi^p)^N}]. \quad (4)$$

式中: M, N 为扰动因子的参数; D_u 为扰动极限值,通常取1; ξ^p 为塑性应变累计值,可以看出当塑性应变为0时, D 为0,即可以认为没有发生扰动.以此为依据可以考虑采用塑性应变来对扰动进行定量分析.

可以通过子程序先提取下钻过程当中的实时塑性应变,先创建单元集合 N ,定义时间总数 T ,单元节点数 M ,定义评估值 a ,定义节点坐标 x, y, z ,在下钻过程中遍历所有单元的塑性应变情况随时间的变化,定义当单元上存在节点的有效塑性应变值大于0即认为该单元发生扰动,因此评估值 a 取0,由于下钻过程中每一个单元的情况也会随着时间不停地发生变化,因此定义时间总数 T 为完整下钻一次所用的时间.利用条件循环语句在下钻时间内不断重复这一判断依据来遍历所有单元上的节点并且即时对不符合条件的单元进行筛选来确定扰动区域,岩芯的总体积为 V ,通过筛选剔除扰动部分后剩余体积为 V_r ,岩芯的扰动率为发生扰动的体积与岩芯的总体积之比,所以扰动率 P 按式(5)计算.

$$P = 1 - V_r/V. \quad (5)$$

根据式(5),可以分别计算出沉积物层,硬岩层,水合物层的扰动率,并分别用 P_1 , P_2 和 P_3 来表示,为后续钻进工艺参数的优化提供相应数据.具体的判定和计算的流程框图如图 3 所示.

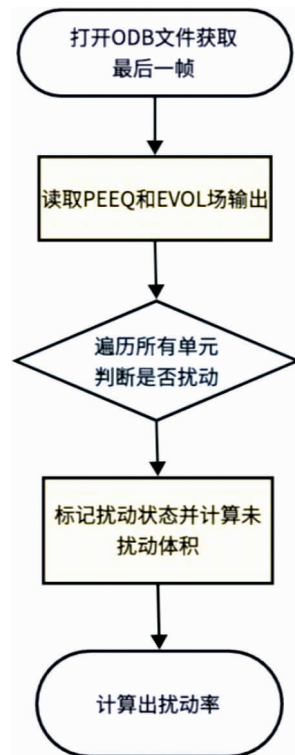


图 3 扰动定量分析的判定和计算流程

经过单元删除以后的地层情况如图 4 所示.

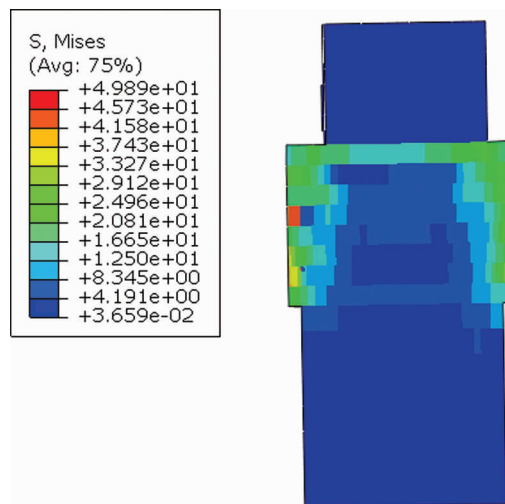


图 4 单元删除后的效果

2 基于岩石扰动的钻进工艺参数优化

2.1 优化的数学模型及相关设定

根据李洋辉等^[19]的研究表明:随着围压的增大,地层的强度也逐渐增大,并出现一个最大值;随后随着围压继续增大,强度则逐渐降低.高围压下晶体凝聚力增大,质点彼此接近,其晶格不易破坏,即不易发生断裂,只能滑移,故表现为塑性变形.根据岩土力学教材围压 $p_z = 10^{-6} \rho g z$,对应单位为 MPa,其中 ρ 为覆

盖层平均密度, g 为重力加速度, z 为深度, 在本文仿真的条件下, 即使是最底层受到的有效围压仍然非常小可以忽略不计, 属于超低围压环境下的仿真, 所以不考虑围压对不同地层的影响。

基于 1.2 节对于扰动率的定量计算, 考虑对钻进工艺参数进行优化, 本文采用单目标优化, 单目标优化问题的通用数学表达式如式(6)所示。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad f_0(\mathbf{x}) ; \\ & \text{subject to} \quad f_i(\mathbf{x}) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ 为优化变量, 是一个向量, 有 2 个变量需要优化, 其中 x_1 为下压力, x_2 为转速; $f_0(\mathbf{x})$ 为目标函数, 设定为 3 层地层扰动率之和, 即 1.2 节中提到的 P_1, P_2 和 P_3 之和; $f_i(\mathbf{x})$ 为一组不等式约束, 约束有 5 个, 沉积物地层扰动率小于 30% [$f_1(\mathbf{x}) < 30\%$] 为约束 1, 硬岩层扰动率小于 30% [$f_2(\mathbf{x}) < 30\%$] 为约束 2, 水合物地层扰动率小于 25% [$f_3(\mathbf{x}) < 25\%$] 为约束 3, 参考刘文化等^[17]文章以及 ODP 航次报告^[20], 将钻进参数下压力取值范围设定为 15 000 ~ 25 000 N ($15\,000 \leq x_1 \leq 25\,000$) 为约束 4, 转速取值范围设定为 90 ~ 150 r/min ($90 \leq x_2 \leq 150$) 为约束 5。

2.2 遗传算法及相关设定

为了缩短整个计算时间, 并且在全局范围内找到最优参数, 本文采用遗传算法进行优化, 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 最早是由美国的 John Holland 于 20 世纪 70 年代根据大自然中生物体进化规律而设计提出的, 是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型, 是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。针对具体问题的遗传算法的逻辑框图如图 5 所示。

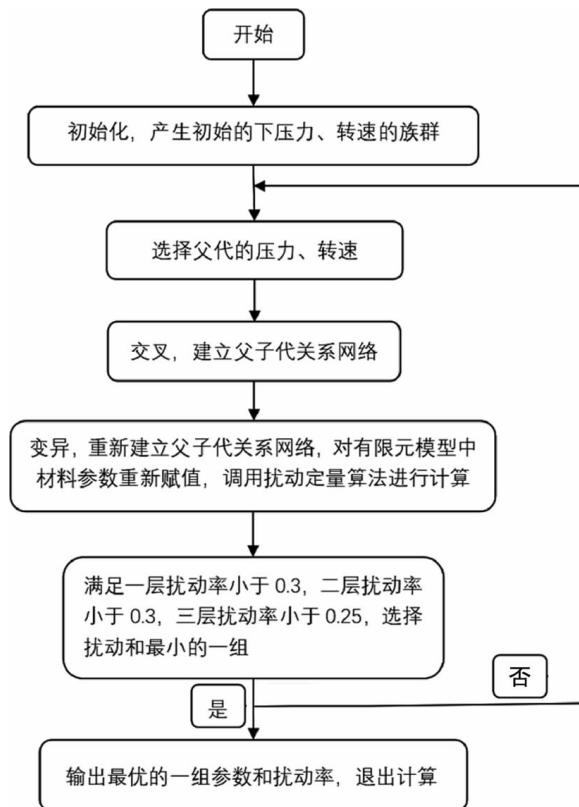


图 5 遗传算法逻辑

图 6 为遗传算法中交互次数对适应度函数的影响曲线。由图 6 可知: 交互次数越多数据越趋于稳定, 并且越接近真实值, 但是考虑到完整运行 1 次子程序的时间非常长, 所以设定交互次数为 10。遗传算法中交叉因子设定为 0.1, 变异因子设定为 0.1, 种群数量设定为 36, 目标函数取 3 层扰动率之和 (即总扰动率的最小值), 停止条件则采用针对各层扰动率的约束条件。在子程序中设定最终算出的最优钻进工艺参数以及对应的总扰动率一并输出到一个 Excel 表格中。

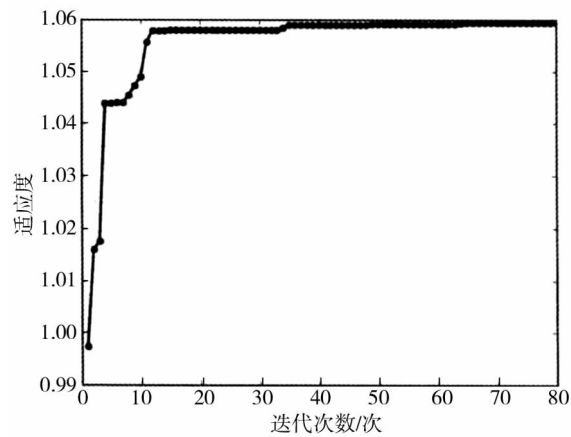


图 6 交互次数对适应度函数的影响

3 仿真及优化结果

3.1 钻速分析

以钻头底部中心点为基准提取下钻过程中的实时坐标,进而得到在下钻过程中位移和时间的拟合曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出:在下钻过程中,刚开始由于沉积物地层由于整体偏软所以下钻较快,进入硬岩地层下钻速度持续变慢,进入水合物地层下钻速度又加快,由于同一地层材料参数的随机变化,钻速在同一层也有一定的波动。

3.2 钻进过程

在下钻过程中截取钻头与沉积物地层刚接触,下钻到沉积物地层和硬岩地层交界,下钻到硬岩层与水合物地层交界,以及下钻到底的截图如图 8 所示。

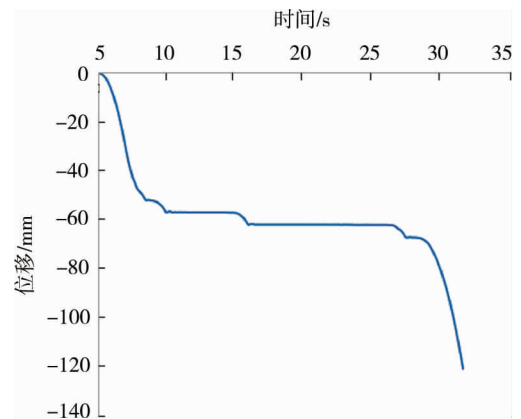


图 7 钻头下钻过程中的位移和时间拟合曲线

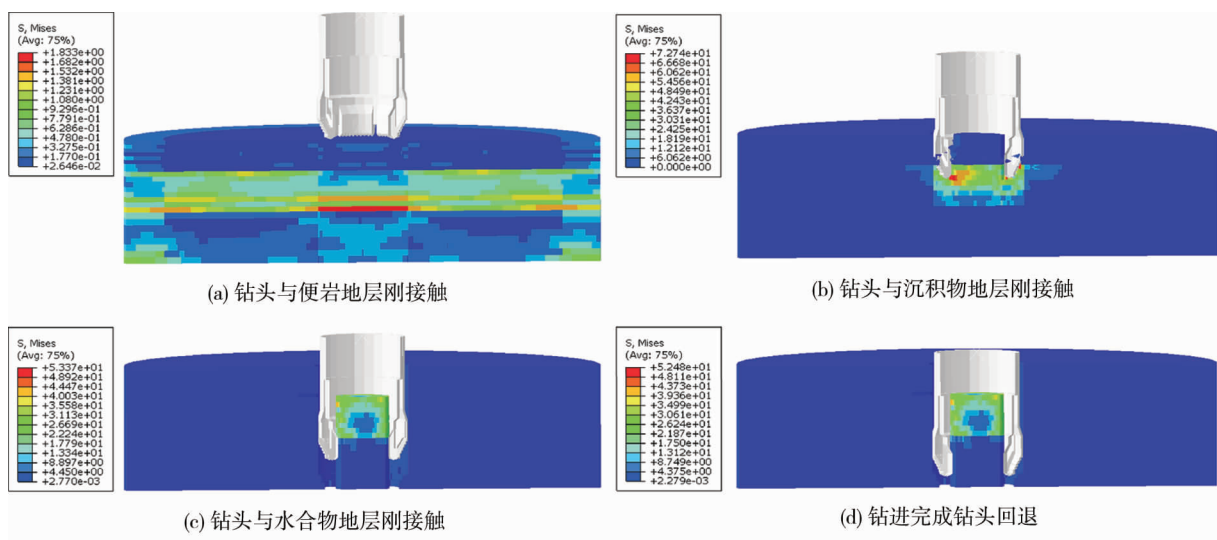


图 8 钻进过程

3.3 优化结果

将子程序完整运行 2 次,最终运行结果与提取自 Pythondata 中运算过的所有钻进工艺参数放在同一个坐标系中, x, y 轴分别对应下压力和转速,得到的结题如图 9 和图 10 所示。

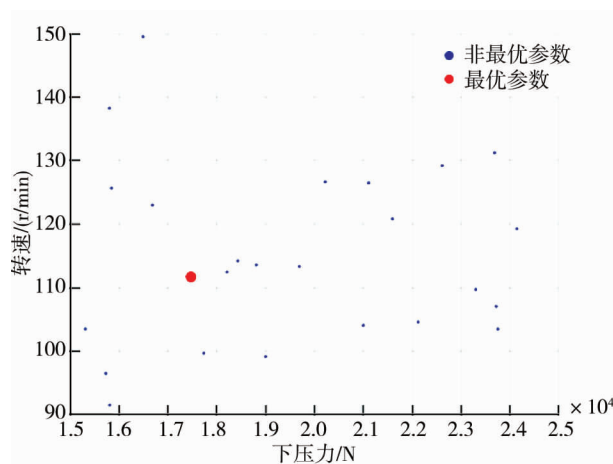


图9 第一次运行参数分布

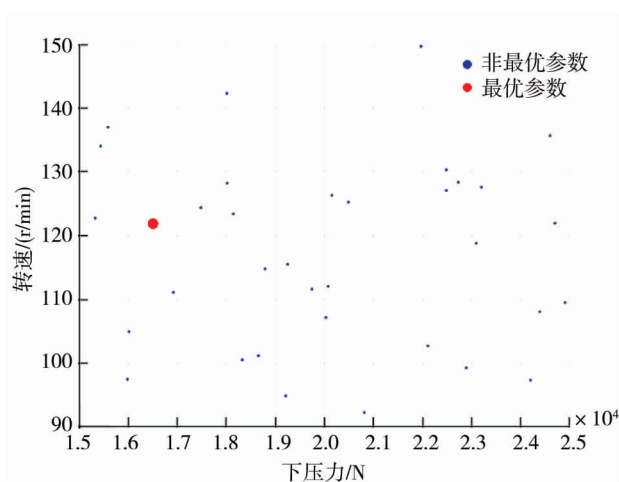


图10 第二次运行参数分布

第一次计算出的下压力为 17 471.85 N, 转速为 111.69 r/min, 对应的各层扰动率分别为沉积物层 25.34%, 硬岩层 0.04%, 水合物层 21.77%, 总扰动率 46.96%; 第二次计算出的下压力为 16 505.85 N, 转速为 121.89 r/min, 对应的各层扰动率分别为沉积物层 24.78%, 硬岩层 0.03%, 水合物层 22.13%, 总扰动率 47.03%。考虑到过程中材料参数的随机变化等因素, 2 次结果相当接近也一定程度上证明了计算结果的可靠性, 在上述设定的要求下的最佳钻进工艺参数大约为下压力 17 000 N, 转速 115 r/min。

4 结论

1) 钻头在不同地层中的下钻情况不同, 通过对钻头底部中心点实时位置的提取, 可以得知钻头在沉积物层下钻很快并且速度呈逐渐加快的趋势, 进入硬岩地层后下钻速度骤减并且速度呈逐渐减慢的趋势, 进入水合物地层后钻头速度再次加快, 并且速度呈逐渐加快的趋势。

2) 通过提取有效塑性应变并且认为发生塑性应变的单元即产生扰动的判定条件对扰动进行定量分析, 并且以 3 层扰动率之和为目标函数, 沉积物层扰动率小于 30%, 硬岩层扰动率小于 30%, 水合物层扰动率小于 25% 作为约束, 取下压力为 15 000~25 000 N, 转速为 90~150 r/min, 通过遗传算法得到优化后的钻进工艺参数大约为下压力 17 000 N, 转速 115 r/min。

参考文献:

- [1] 新华社. 直击我国海域天然气水合物(可燃冰)成功试采[J]. 国土资源, 2017(6): 6-13.

- [2] SULTAN N, COCHONAT P, FOUCHER J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1/2/3/4): 379–401.
- [3] YU F, SONG Y C, LIU W G, et al. Analyses of stress strain behavior and constitutive model of artificial methane hydrate[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 77(2): 183–188.
- [4] YU F, SONG Y C, LI Y H, et al. Analysis of stress-strain behavior and constitutive relation of methane Hydrate-Bearing sediments with various Porosity[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2011, 21(4): 316–322.
- [5] SONG Y C, ZHU Y M, LIU W G, et al. Experimental research on the mechanical properties of methane Hydrate-Bearing sediments during hydrate dissociation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 70–78.
- [6] 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭, 等. 含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析[J]. *力学学报*, 2016, 48(3): 720–729.
- [7] 周辉, 张凯, 冯夏庭, 等. 脆性大理岩弹塑性耦合力学模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(12): 2398–2409.
- [8] 周辉, 杨凡杰, 张传庆, 等. 考虑围压效应的大理岩弹塑性耦合力学模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2389–2399.
- [9] ZHANG K, ZHOU H, SHAO J F. An experimental investigation and an elastoplastic constitutive model for a porous rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1499–1511.
- [10] 李震, 周辉, 宋雨泽, 等. 考虑硬化软化和剪胀特性的绿泥石片岩力学模型[J]. *岩土力学*, 2013, 34(2): 404–410.
- [11] 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟, 等. 基于扰动状态概念的结构性粘土本构模型研究[J]. *固体力学学报*, 2004, 25(2): 191–197.
- [12] 于小军, 齐志宏. 基于扰动状态概念的结构性软黏土本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1882–1887.
- [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.
- [14] 刘锐鸿, 刘金锋. 海南北部玄武岩实时温度单轴拉-压强度试验研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2024, 63(4): 19–28.
- [15] 周博, 王宏乾, 王辉, 等. 水合物沉积物的力学本构模型及参数离散元计算[J]. *应用数学和力学*, 2019, 40(4): 375–385.
- [16] 孔洋, 阮怀宁, 汪璋淳. 玄武岩脆性类岩石相似模型材料比选与力学特性测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(11): 2308–2318.
- [17] 刘文化, 杨庆, 孔纲强, 等. 海洋沉积物力学特性及其弹塑性本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(10): 1837–1845.
- [18] Desai C S. A consistent finite element technique for work-softening behavior[C]//Proc., Int. Conf. on Computational Methods in Nonlinear Mechanics. University of Texas, Austin, 1974.
- [19] 李洋辉, 宋永臣, 于锋, 等. 围压对含水合物沉积物力学特性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 637–640.
- [20] Party S S. Leg 204 summary[C]//Proc. ODP, Init. Repts. Ocean Drilling Program, 2003, 204: 1–75.