

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2024.03.002

海底天然气水合物储层复杂地层 钻进取芯数值模拟

卫成效, 金永平*, 刘德顺, 万步炎, 何木东

(湖南科技大学 海洋矿产资源探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:海底天然气水合物由于其特殊的成藏机理,其分布大多与海底构造地层相关,而天然气水合物的赋存状态同样影响着海底沉积物的性质,因此其储层往往是可预见性差、可钻性差及稳定性差的复杂地层.针对天然气水合物储层的软硬互层,利用有限元软件 Abaqus/CAE,建立搭载在海底钻机上的金刚石钻头对天然气水合物储层钻进取芯的有限元仿真模型,对钻进过程进行模拟分析.通过在钻头上施加不同的钻进参数,获得金刚石钻头随钻进参数变化的运动规律,以及不同钻进参数下水合物储层不同位置的应力状态;通过对应力状态进行分析,得到岩芯受扰动的变化规律.结果表明:金刚石钻头在穿过不同地层时运动状态可分为 3 个阶段,钻头的平均钻速随着钻压与转速的增加而增加;不同地层的岩芯失效率大不相同,水合物层岩芯的失效率为 10%~15%,其上覆土层岩芯的失效率为 25%~45%,而且失效率受钻压的影响较为明显.

关键词:海底天然气水合物;复杂地层;有限元模型;钻速;应力状态

中图分类号:TE52

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)03-0011-09

Numerical Simulation on Drilling of Submarine Gas Hydrate in Complicated Formation

WEI Chengxiao, JIN Yongping, LIU Deshun, WAN Buyan, HE Shudong

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The distribution of submarine gas hydrates is mostly related to the submarine structural strata due to its special accumulation mechanism. The occurrence state of natural gas hydrate also affects the properties of seabed sediments, so its reservoirs are often complex formations with poor predictability, poor drill ability, and poor stability. This paper, using the finite element software Abaqus/CAE, targeting at the soft and hard interbeds of natural gas hydrate reservoirs, a finite element model of the diamond drill bit mounted on the deep-sea drilling-rig drill a complex marine gas hydrate reservoir is built to simulate and analyze the drilling process. During the drilling, by applying different drilling parameters to the bit, it obtains the variation of diamond bit motion with drilling parameters, and stress states at different positions of hydrate reservoirs under different drilling parameters. Through the analysis of stress state, the variation law of core disturbance is obtained. The results show that the motion of a diamond bit through different formations can be divided into three stages, the average bit rate increases with the increase of bit weight and rotational speed. The core failure rate varies greatly from formation to formation, the failure rate of hydrate core is about 10% to 15%, while the failure rate of the overlying rock core is about 25% to 45%. Failure rate is obviously affected by weight on bit.

Keywords: submarine gas hydrate; complicated formation; numerical simulation; drilling velocity; stress state

收稿日期:2022-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779092);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0300502);湖南省研究生科研创新资助项目(CX20210985);湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2020GK1021;2019SK2271;2019GK1010;2019GK1012)

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

天然气水合物又称“可燃冰”,其资源总量相当于已探明的石油、天然气和煤的总碳量的两倍^[1-2].天然气水合物分布于深海或陆域永冻土中,而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,具有很高的开采价值.国际组织围绕海底天然气水合物开展了多个航次勘探开发研究,发现诸多无法忽视的问题,如天然气水合物储层环境复杂,因其特殊的成藏条件使得水合物多赋存于断裂褶皱、底辟以及海底滑塌等构造地层之中^[3],且水合物的赋存形态会导致海底岩层的力学性能发生巨大的变化^[4],从而形成软硬互层的复杂地层,这些因素会导致下钻困难,钻进效率低下,以及钻孔崩落、井壁坍塌、卡钻、设备损坏、井壁扩大等安全问题^[5-9].同时,钻井过程对海底地层的破坏,造成钻井地层应力的释放,使岩芯颗粒间的联系减弱,降低了地层颗粒间胶结的有效应力,最终导致岩芯样品的强度降低^[10-11].因此为了保持高效开采并减少钻进事故的发生,需要综合考虑各种配套技术,如稳定的钻进平台、合理的钻进工艺参数等^[12].

本文以搭载在某型海牛深海海底钻机上的绳索取芯用金刚石钻头为对象,以在海底天然气水合物储层复杂地层下获取合理钻进工艺参数为目标展开研究,同时对钻进过程中岩芯所受的等效应力状态进行探究,从而对钻探取得的岩芯性能做出有效评估.由于钻进系统结构庞大且复杂,通过常规物理实验难以研究,而采用数值模拟的方法进行钻井过程中钻头的破岩仿真分析较常规实验方法容易实现.借助于有限元分析软件,SHI等^[13]通过建立钻柱-钻头-岩石非线性动力学模型,分析钻井过程中破坏和扰动发生时岩石结构的增量变化;XU等^[14]利用Abaqus软件对日本东南海槽的两个钻井项目的井壁稳定性进行模拟研究;SASAKI等^[15]为研究在不同钻井过程中未固结的水合物地层的稳定性,借助Abaqus软件建立二维轴对称有限元模型进行分析,研究结果为海底天然气水合物的钻探取芯研究提供了理论指导.目前,针对天然气水合物储层复杂地层钻进的数值模拟研究较少.因此,本文通过对钻进系统的非线性动力学建模,针对在天然气水合物储层的复杂地层钻进取芯中存在的问题,包括在频繁换层的海底岩层中不合理的钻进工艺参数导致的钻进效率低下,以及钻进获取的岩芯不能达到取芯标准等,在合理假设的基础上利用有限元软件Abaqus对钻进系统进行建模,利用其强大的非线性处理能力对钻进系统进行仿真分析,得到不同钻进参数下金刚石钻头在复杂地层中钻进的运动状态规律,并对岩芯所受应力状态,即钻进过程对岩芯的影响进行评估分析,为高效低扰动天然气水合物海底钻探取芯技术的发展提供指导与理论依据.

1 海底钻进模型建立

1.1 钻进动力学模型

钻进破岩过程是一个十分复杂的钻头与岩石相互作用的动力学过程.在旋切钻进过程中,钻头对岩石进行挤压、切削和摩擦,使岩石由弹性变形进入较大的塑性变形,进而实现切削破碎.钻进破碎岩石是一个高度非线性过程,其非线性主要表现为:(1)短时间内因结构的大位移与大转动所引起的几何非线性;(2)岩石单元因发生大应变直至破坏失效所表现的材料非线性;(3)由钻头转动与岩石单元变形、失效和移除产生的接触动态变化所引起的接触非线性.采用有限元法,设接触系统在时刻 t 占据空间域 Ω ,作用在接触系统内的体积力为 b 、边界力的切向力 q 和法向力 q_c ,以及柯西内应力 σ ,则接触问题可归结为^[16]

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

式中: Γ 为给定边界力的边界; Γ_c 为接触边界; δu 为虚位移; δe 为虚应变; ρ 为密度; a 为加速度.

将域 Ω 用有限单元离散化并引入虚位移场,得到:

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

式中: m 为质量矩阵; \ddot{u} 为加速度矢量; t 为时间; p 为外力矢量; c 为接触力与摩擦力合力矢量; f 为内应力矢量; u 为物体位移; α 为与接触表面特性相关的变量; β 为与材料本构关系相关的变量.

1.2 金刚石钻头模型

搭载于某型海牛海底钻机的金刚石钻头,遵循设计与选型原则,选用如图1所示的针对海底天然气水

合物储层复杂地层的表镶金刚石钻头.本文所建立的金刚石钻头模型依照该金刚石钻头结构,对其进行部分简化:将镶嵌在钻头胎体表面的金刚石颗粒视为球体,在保留金刚石颗粒在胎体上排列规律的基础上减少胎体表面金刚石颗粒的数量,同时增大金刚石颗粒的出刃值,该值原则上不超过金刚石颗粒的30%,同时本模型仅考虑钻头唇面及表镶金刚石颗粒与地层的相互作用关系,故将钻头钢体连接处与侧面保径块隐去,如图2所示.



图1 金刚石钻头

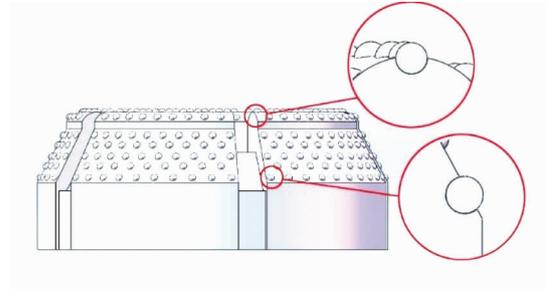


图2 金刚石钻头几何模型

钻头胎体为《金刚石钻探手册》^[17]中63#胎体,为碳化钨级合金钢,硬度大小为HRC35~HRC40,为弹塑性材料,抗弯强度为1 270 MPa,弹性模量为550 GPa,泊松比为0.22,线膨胀系数为 $9.9 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$,密度为11 400 kg/m³.金刚石颗粒为密度3 520 kg/m³,弹性模量1 050 GPa,泊松比0.20,抗压强度8 857 MPa,压痕硬度70 000 MPa的天然颗粒.胎体对金刚石的包镶力有2种类型,分别为机械力包镶和化学力包镶.63#胎体配方采用覆以金属薄膜的化学力包镶方法,使其包镶能力提高了48%,金属薄膜厚度为0.1~3.0 μm,覆以金属薄膜金刚石的结合强度 σ 可达 17×10^7 N/m².金刚石钻头几何参数如表1所示.

表1 金刚石钻头的几何参数

| 内径/mm | 外径/mm | 高度/mm | 唇面倾斜角/(°) | 水口宽度/mm | 水口深度/mm | 金刚石出刃高度/mm |
|-------|-------|-------|-----------|---------|---------|------------|
| 62 | 95 | 37.5 | 65 | 5 | 11 | 0.6 |

1.3 天然气水合物储层模型

建立海底天然气水合物储层软硬互层模型,通过对几何模型分层并赋予不同材料实现.各个地层本构模型选取线性Drucker-Prager(D-P)弹塑性模型来实现,天然气水合物储层软硬层模型参数如表2所示.其中天然气水合物上覆沉积物层材料为中国海洋石油公司提供的中国南海神狐海域天然气水合物储层上覆土层^[18],该数据具有一定的可靠性.天然气水合物模型分别为实验所得的沙冰主体样品型天然气水合物GH-1、水冰主样品型天然气水合物GH-2^[19]及以具有一定成岩性的粉砂地层为骨架的强胶结型天然气水合物GH-3^[20].

表2 复杂地层物理力学性能参数

| 地层编号 | 地层种类 | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 内摩擦角/(°) | 孔隙度/% | 饱和度/% |
|------|------|----------|-------|----------|-------|--------|
| 1 | GH-1 | 200 | 0.163 | 32.00 | 37.70 | 25 |
| 2 | GH-2 | 1 100 | 0.170 | 28.00 | 42.40 | 55 |
| 3 | GH-3 | 3 850 | 0.190 | 23.67 | 31.37 | 80 |
| 4 | S-1 | 25.10 | 0.490 | 25.02 | 40.00 | 完全水饱和 |
| 5 | S-2 | 21.59 | 0.470 | 22.13 | 60.00 | 完全水饱和 |
| 6 | S-3 | 91.04 | 0.470 | 42.98 | 60.00 | 40%水饱和 |

由于钻进取芯的目标地层——天然气水合物储层的周围环境岩层岩性复杂,且在实际的海洋环境中,每种岩层的分布范围都很大,同种岩性的岩层厚度可达几十米甚至几百米,在某种地层进行钻进时,该钻进过程对其他岩层造成的扰动状态是极其微小甚至可以忽略不计的,因此可以选取2种岩性相差较大的岩层进行钻进仿真分析.本文选取硬度较大的水合物上覆沉积物层S-3与GH-3水合物模型进行钻进仿

真,该仿真结果对较软质沉积物层与水合物层也具有一定的适用性.

建立如图3所示的有限元模型,其中上层为力学性能表现较软性质的沉积物地层,厚度取0.02 m,下层为强胶结型水合物地层,厚度为0.05 m. F 与 ω 分别为施加在钻头上的压力与转速.将沉积物与水合物模型区域划分为岩芯区、钻进区以及非钻进区,对钻进区网格进行加密处理,网格类型采用C3D8R,金刚石胎体部分与金刚石颗粒部分网格类型分别为C3D4和C3D8R.

1.4 边界条件与加载方式

1.4.1 基本假设

钻头在天然气水合物储层复杂地层的钻进过程的仿真计算十分复杂,本模型重点考虑钻进破岩的动态过程、地层应力-应变状态、钻进参数以及岩体特征等因素对钻头进尺情况的影响.为了提高计算效率和便于分析,忽略次要影响因素,对该模型做出如下假设:

- 1)表镶金刚石钻头主要通过镶嵌在钻头唇面上的金刚石颗粒对地层进行切削,其硬度和强度远高于地层岩体,为了简化计算,可设置金刚石钻头为刚体.
- 2)钻头的进尺方向垂直于地表,钻头在钻进过程中不会改变方向,即钻头的轴线与井眼轴线始终重合.
- 3)海底岩体单元在受到破坏失效后自动剔除,不考虑钻井液对岩屑的影响.
- 4)海底岩体性质为连续、均质、各向同性的弹塑性介质,且不考虑温度的影响,水合物层不会受热分解.
- 5)井底岩石处于井眼远场部分,对岩石施加压力边界及约束来模拟围压对海底岩体力学特性的影响.

1.4.2 边界条件与加载

添加金刚石钻头与沉积物地层之间的接触为点-面接触,钻头与地层的接触作用主要有两个部分,一是两者间的法向作用,二是两者间的切向作用.地层模型上表面为自由界面,下底面采用完全约束.在本模型中钻头通过破坏地层单元来实现钻进过程,且地层所处环境为1 000 m海深的沉积地层,故不考虑两地层间的相互滑移作用,因此两不同地层间的接触类型为紧连接.增加应力场,使地层获得有效围压大小为5 MPa,限制边缘位置各个方向上的位移获得一个平衡状态下的海底地层.根据ODP航次报告给出的钻进参数^[21]及某型海牛钻机的钻进参数,选定3个不同的钻压(1.5,2.0,2.5 t)以及3个不同的转速(90,120,150 r/min).钻压施加于整个钻头模型,方向为沿钻进方向 z 轴向下,施加类型为恒定载荷;初始转速同样施加于整个钻头模型,方向为顺时针方向,类型为匀速转动.

2 仿真计算结果与扰动分析

金刚石钻头的钻进破岩过程为钻头在钻压与转速的作用下,先与上部地层接触,完全钻穿沉积物地层层后再与水合物层接触,钻头与沉积物和水合物单元的接触关系表现为与岩层表面发生接触,在破坏相接触的表层岩层单元后,下一层岩层单元裸露出来将作为新的岩层表面,钻头的钻进过程即为与岩层单元进行接触-破坏-接触的反反复复循环过程.取地层模型在0.25,0.50,0.75,1.00 s时刻的有效应力图,当钻压为2.0 t,转速为90 r/min时金刚石钻头钻进形成井眼的过程,如图4所示,最终获得半径约为0.03 m的沉积物与水合物岩芯.

2.1 钻头运动状态

金刚石在不同地层的钻进过程可分为3个阶段,阶段Ⅰ:钻进沉积物层;阶段Ⅱ:钻进沉积物与水合物交错层,该阶段为金刚石钻头唇面从接触水合物层开始至钻头唇面完全进入水合物层;阶段Ⅲ:钻进天然气水合物层.钻进过程如图5所示.

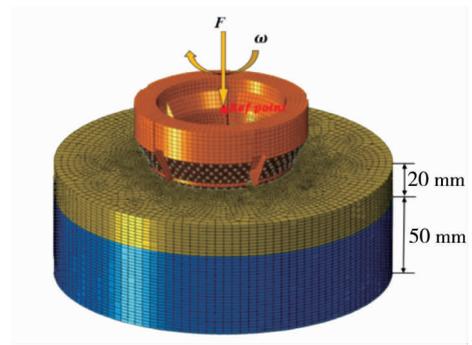


图3 金刚石钻头钻进有限元模型

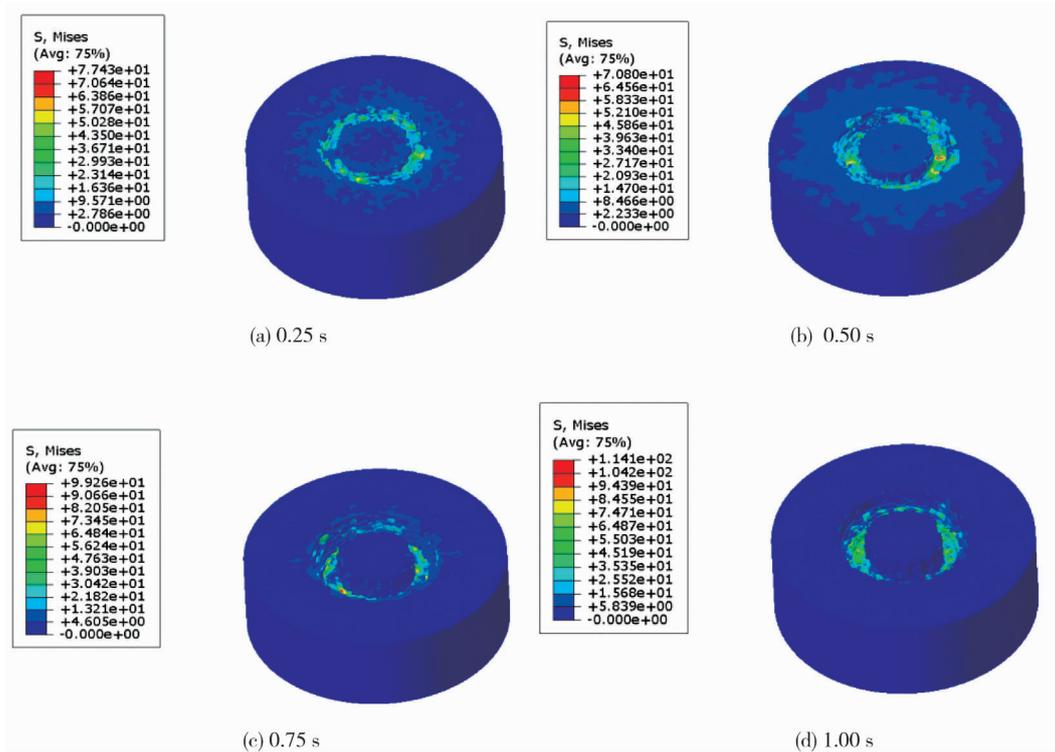


图 4 金刚石钻头作用下井眼形成过程

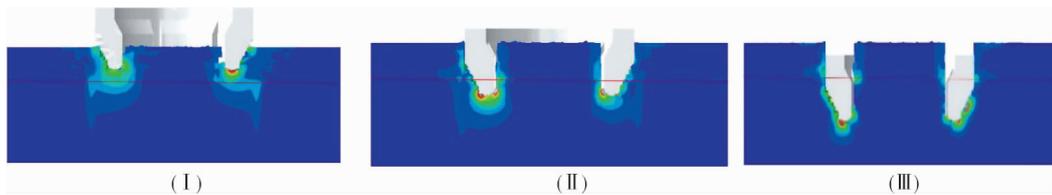


图 5 钻进过程中钻头的钻进阶段

取图 3 所示的钻头参考点的运动状态作钻头加速度变化曲线,如图 6 所示.在钻进过程中,钻头与地层岩石处于黏滞-滑脱-黏滞的循环阶段,当钻头稳定钻进时加速度表现为在某一范围内来回震荡.参考点的位移与时间变化曲线如图 7 所示,设金刚石钻头在 t_0 时开始钻进作业,在钻进作业时间 t_n 时参考点的位移为 u_n ,则金刚石钻头的进尺速度为

$$v_n = \frac{u_n - u_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \tag{3}$$

式中: n 为金刚石钻头钻进不同阶段,取 $n = 1, 2, 3$, 分别对应钻进阶段 I, II, III.其中 $u_0 = 0, t_0 = 0$.

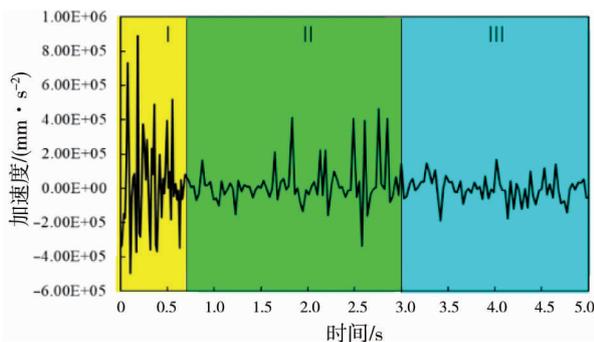


图 6 钻进过程中钻头参考点的运动状态曲线

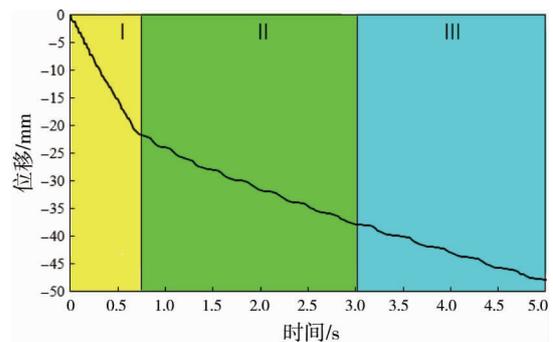


图 7 钻进过程中钻头参考点的位移曲线

当在金刚石钻头上施加 2.0 t 钻压及 90 r/min 转速时,金刚石钻头在第 I 阶段的钻速约为 31 mm/s,

由于沉积物地层的硬度及抗压强度较低,金刚石钻头在此阶段的破岩速度较快;当金刚石钻头完全钻穿上层的沉积物层开始与较硬的天然气水合物层接触时,即钻进过程进入阶段 II,此时钻头的钻进速度发生较大的变化,进尺速度大幅减小,且其变化趋势仍在缓慢减小,金刚石钻头在这一阶段的钻速约为 6.94 mm/s;当钻进过程进入阶段 III 时,金刚石钻头唇面完全进入水合物层,进尺速度进入新的稳定阶段,此阶段的钻速约为 5.16 mm/s.

2.2 地层应力分布状态

在钻井过程中,井底钻头在承受一定钻压和扭矩的条件下切削破碎区以下一定范围内的天然气水合物地层.在一定的外力作用下,天然气水合物地层经历骨架颗粒的挤密和弯曲、骨架颗粒间连接形状的扭曲和骨架颗粒间的错动过程,发生塑性变形,导致储层的孔隙度、饱和度、渗透率等重要参数发生变化,将使测井波速等用于评估天然气水合物储层性质的数据有效性降低.因此,研究钻井过程中岩芯处应力分布状态对获取低扰动天然气水合物岩芯以及提高钻井效率具有重要意义.

控制钻压为 2.0 t,转速为 90 r/min 进行钻进,当钻进深度为 0.045 m 时,对岩芯的扰动状态进行分析.

选取沉积物模型节点,通过获取其上应力分布状态来描述钻进过程中钻头对岩芯的影响.选取岩芯层深度为 10 mm 的表层节点,如图 8 所示,以岩芯中轴线上的点为起点,沿径向方向向外选取网格节点作为参考点,得到这些参考点上的最大等效应力分布状态,其最大等效应力分布曲线如图 9 所示.由图 9 可知,岩芯中轴线处的最大等效应力最小,其扰动程度最小;离钻进区域越近的点,其周围的等效应力越大,在最靠近钻进区域的节点处,分布的最大等效应力急剧增大.其中沉积物层岩芯处最大等效应力为 4.34 MPa,而水合物层岩芯处的最大等效应力仅为 1.78 MPa.与沉积物层所受扰动相比,钻进过程中水合物层所受扰动程度及扰动范围相对较小,这与地层的性质有关.

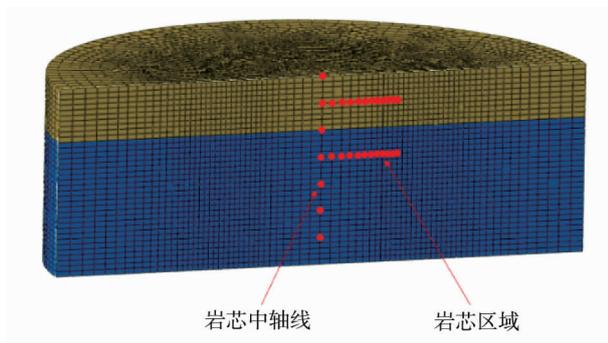


图 8 目标地层扰动参考点分布

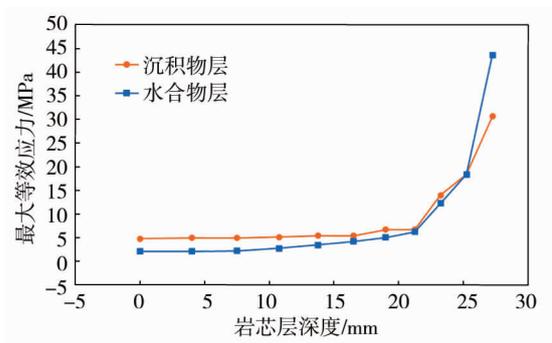


图 9 岩芯径向方向应力分布曲线

软质沉积物层与水合物层的抗压峰值强度分别为 10.26 MPa 和 49.51 MPa,取地层抗压峰值强度的 60%作为地层失效的等效应力参考值,即当钻进目标地层所受最大等效应力超过该值时,视为地层受到钻进过程导致的严重扰动,失去其力学性质与结构状态.由图 9 可知,在深度 0.01 m 处的上层沉积物层钻进所获岩芯在半径约为 18.15 mm 外的区域失效,而在深度 0.03 m 处的水合物层钻进所获岩芯未失效的区域半径约为 25.25 mm.

为了得到钻进过程对岩芯整体的影响,取岩芯在不同深度处的岩芯未失效区域半径,计算钻进所获岩芯未失效区域半径的平均值,所获岩芯的失效率 p 可以表示为

$$p = \frac{r_0 - r}{r_0} \times 100\%. \quad (4)$$

式中: r_0 为钻进所获岩芯半径; r 为岩芯未失效区域半径的平均值.

当钻压为 2.0 t,转速为 90 r/min 时,钻井过程在沉积物层所获岩芯未失效区域半径平均值约为 20.52 mm,岩芯的失效率约为 31.60%;而在水合物层所获岩芯未失效区域半径平均值约为 26.71 mm,岩芯的失效率约为 10.98%.

选取天然气水合物模型岩芯中轴线上位于不同深度的节点为参考点,获取其最大等效应力分布,如图 10 所示.由图 10 可知,随着钻进过程的进行,钻头不断切削岩土深入破岩,当钻头钻进 0.045 m 时,金刚石钻头的钻进行为对岩芯中心处造成的扰动随着岩芯层深度的增加而逐渐减小,且水合物层的扰动变化缓慢,即水合物层岩芯处所受扰动小于沉积物层.

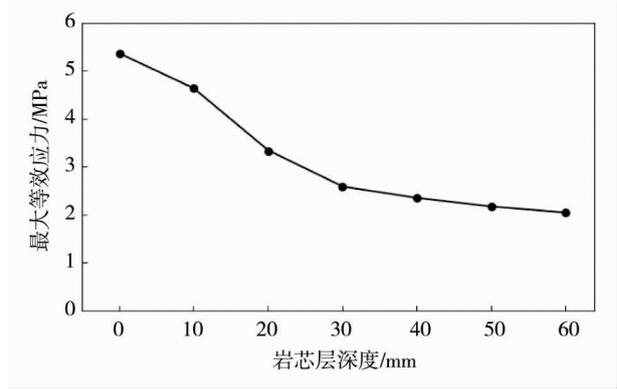


图 10 岩芯中心处在不同深度的最大等效应力分布曲线

当钻进深度为 0.045 m 时,取岩芯中心处深 0.01 m (沉积物层)和 0.03 m (水合物层)处节点为参考点,该节点所受等效应力随时间变化曲线如图 11 所示.由图 11 可知,钻进过程中,在钻头与地层接触的初始阶段均会产生一个较大的扰动状态,随着钻进的进行,扰动程度会趋于平缓.各地层岩芯所受最大扰动均发生在金刚石钻头进尺至该地层位置时,此时地层岩芯所受等效应力均有一个明显的增大过程,当钻头穿过该深度后,岩芯所受等效应力则在一定范围内上下波动.以钻头穿过该位置深度为节点将钻进过程分为前后两段,后阶段岩芯所受平均等效应力高于前阶段.

由图 11 可知,钻进过程中,在钻头与地层接触的初始阶段均会产生一个较大的扰动状态,随着钻进的进行,扰动程度会趋于平缓.各地层岩芯所受最大扰动均发生在金刚石钻头进尺至该地层位置时,此时地层岩芯所受等效应力均有一个明显的增大过程,当钻头穿过该深度后,岩芯所受等效应力则在一定范围内上下波动.以钻头穿过该位置深度为节点将钻进过程分为前后两段,后阶段岩芯所受平均等效应力高于前阶段.

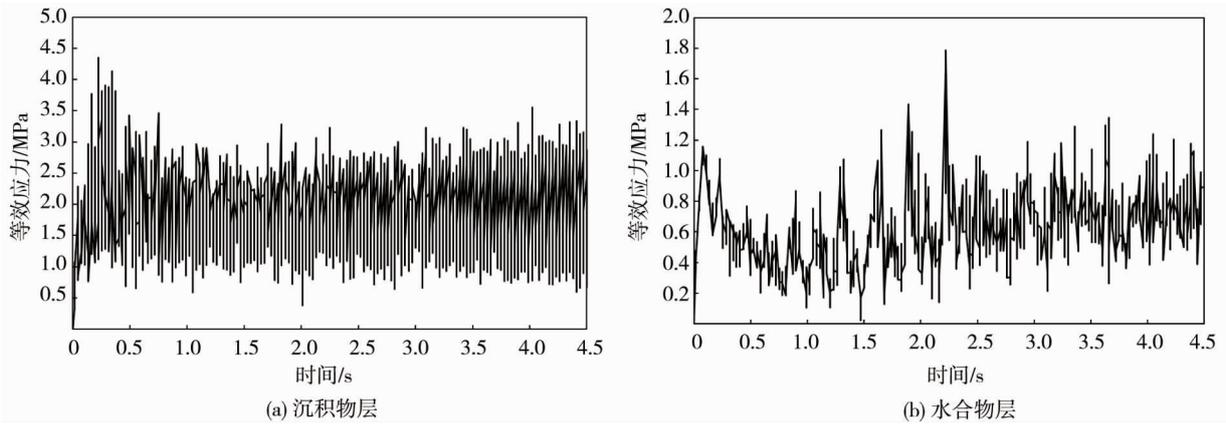


图 11 岩芯中心处节点在不同深度处所受等效应力变化曲线

3 钻进工艺参数的影响仿真分析

3.1 钻压的影响

对转速为 120 r/min,钻压为 1.5,2.0,2.5 t 时的钻进过程进行模拟,得到当钻进深度为 0.045 m 时钻头的进尺情况及各个阶段的进尺速度,如图 12 和图 13 所示.

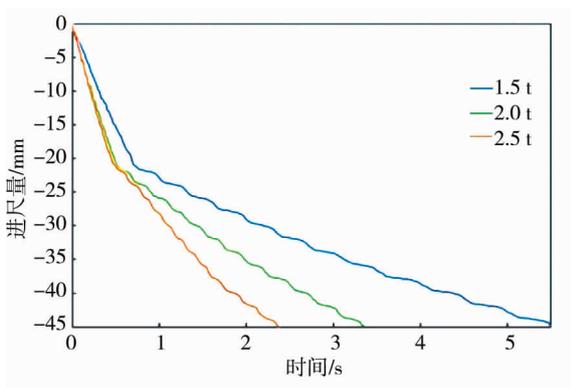


图 12 不同钻压下的钻头进尺情况

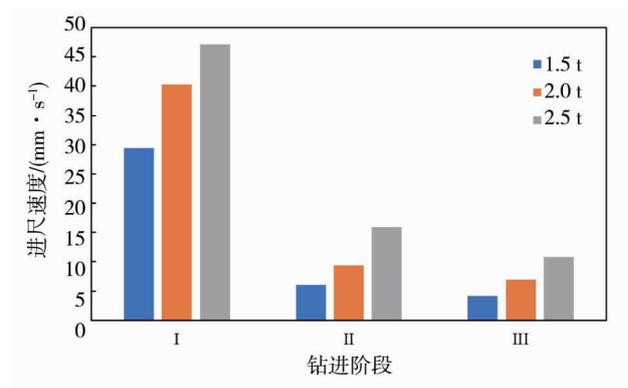


图 13 不同钻压下钻头在各阶段的进尺速度

由图 13 可知,当转速一定时,增大钻压对钻进软质沉积物层进尺速度的影响较大.当转速为 120 r/min 时,1.5 t 的钻压下金刚石钻头在沉积物层的进尺速度约为 29 mm/s,当钻压增加到 2.5 t 时,钻头在沉积物层的进尺速度约增加 18 mm/s;对水合物层而言,当钻压分别为 1.5,2.0,2.5 t 时,钻头的稳定进尺速度仅约为 4.16,6.94,10.87 mm/s.金刚石钻头在不同地层的钻进速度增量变化不同,在沉积层钻速增量随钻压的增加而减少,在水合物层钻速增量随钻压的增加而增加.

以各个地层的失效强度为参考值,探究不同钻压下在沉积物层及水合物层所获岩芯的失效率,如图 14 所示.由图 14 可知,钻压的变化对沉积物层的岩芯失效率影响较大,当转速固定为 120 r/min,钻压为 1.5 t 时沉积物层的岩芯失效率约为 25.8%,当钻压增加至 2.5 t 时,沉积物层的岩芯失效率达 45%.水合物层的岩芯失效半径随钻压的变化较小,钻压为 1.5,2.0 和 2.5 t 时水合物岩芯的失效率分别为 11.2%,12.5%和 15.0%.

3.2 转速的影响

对钻压为 2.0 t,转速为 90,120,150 r/min 时的钻进过程进行模拟,得到当钻进深度为 0.045 m 时钻头的进尺情况及各个阶段的进尺速度,如图 15 和图 16 所示.

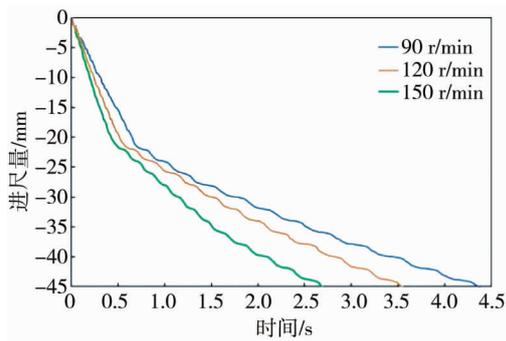


图 15 不同转速下的钻头进尺情况

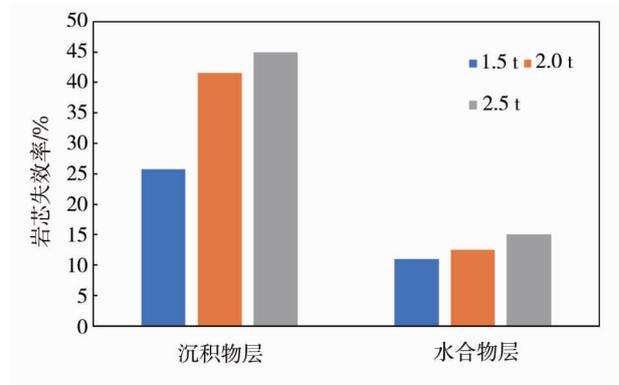


图 14 不同钻压下岩芯的失效率

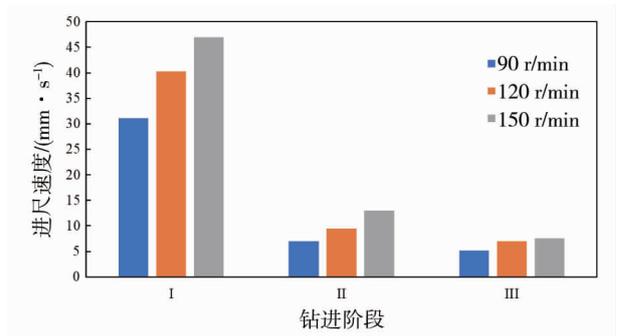


图 16 不同转速下钻头在各阶段的进尺速度

由图 16 可知,当钻压一定时,金刚石钻头的进尺速度随着转速的增大而增大.当钻压为 2.0 t 时,90 r/min 的转速下金刚石钻头在沉积物层的进尺速度约为 31 mm/s,当转速增大到 150 r/min 时,钻头在沉积物层的进尺速度约增加 16 mm/s.在水合物层,当转速为 90,120,150 r/min 时,钻头的稳定进尺速度仅约为 5.16,6.94,8.03 mm/s,且随着转速的增加进尺速度变化较小.金刚石钻头的钻速增量在一定范围内表现为随转速的增加而减少.

当钻压为 2.0 t,不同转速下金刚石钻头进尺 0.045 m 时,在沉积物层和水合物层所获岩芯的失效率如图 17 所示.由图 17 可知,当钻压一定时,转速的变化对岩芯的影响较小.当钻压为 2.0 t,转速为 90,120,150 r/min 时,沉积物层对应的岩芯的失效率分别为 31.59%,34.6%,37.3%,水合物层岩芯失效率分别为 10.9%,12.5%,13.3%.

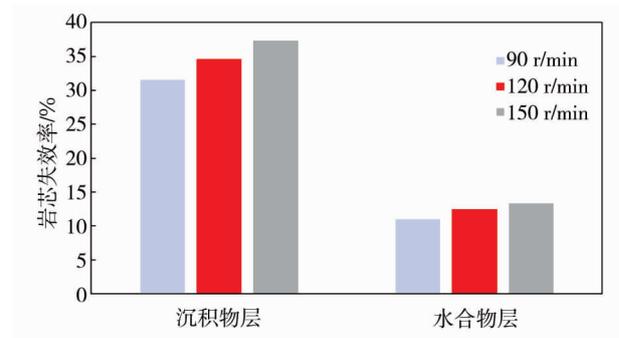


图 17 不同转速下岩芯的失效率

4 结论

1) 搭载于某型海牛深海海底钻机上的金刚石钻头在一定转速与钻压的工艺参数下能够对软硬互层的海底天然气水合物储层复杂地层进行有效钻进.当金刚石钻头钻进不同地层时,其钻速呈现3个阶段的变化,当岩层岩性差异较大时,钻速也呈现出明显的差异.当钻头所钻区域岩层性质由软至硬发生变化时,金刚石钻头的钻速受硬质地层的影响而急剧减小.在水合物层时,金刚石钻头的钻速增量随钻压的增加而增加,随转速的增加而减小.

2) 金刚石钻头在目标地层钻进时,不同的钻进工艺参数下钻井过程对所获岩芯的扰动程度不同.岩芯所受扰动程度与施加在钻头上的钻压与转速呈正相关,且岩芯失效率受钻压的影响较为明显.沉积物层所获岩芯受到的扰动明显大于水合物层,在实际钻进过程中应综合考虑各种因素的影响.当在沉积层钻进时,可适当地减小钻压与转速以获得高质量的岩芯;在水合物层钻进时,在一定的进尺速度的条件下,增加转速比增大钻压对提高钻进效率更加有效.

参考文献:

- [1] 肖钢,白玉湖.天然气水合物勘探开发关键技术研究[M].武汉:武汉大学出版社,2015.
- [2] 王力峰,付少英,梁金强,等.全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J].中国地质,2017,44(3):439-448.
- [3] 米雪源,孙亚丹,马贵阳,等.海底天然气水合物生成影响因素研究进展[J].应用化工,2019,48(3):694-697.
- [4] 颜荣涛,梁维云,韦昌富,等.考虑赋存模式影响的含水合物沉积物的本构模型研究[J].岩土力学,2017,38(1):10-18.
- [5] 吴能友,陈弘,蔡秋蓉,等.科学大洋钻探与天然气水合物[J].地球科学进展,2003,18(5):753-758.
- [6] RIEDEL M, COLLETT T S, MALONE M J, et al. Expedition 311 summary[R]. Washington: Integrate Ocean Drilling Program Management International, 2006.
- [7] DEEPAK M, KUMAR P, SINGH K, et al. Techno-economic forecasting of a hypothetical gas hydrate field in the offshore of India[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 108:741-746.
- [8] 张金华,樊波,刘瑞江.天然气水合物钻探现状与钻井技术[J].科学技术与工程,2020,20(35):14343-14351.
- [9] 张炜,邵明娟,姜重昕,等.世界天然气水合物钻探历程与试采进展[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(5):1-13.
- [10] WINTERS W J, PECHER I A, WAITE W F, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate[J]. American Mineralogist, 2004, 89(8/9):1221-1227.
- [11] 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.
- [12] 马庆涛.天然气水合物储层剪切强度及井壁稳定性研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.
- [13] SHI J, WANG J W, LIU X L. The nonlinear dynamics simulation of drill string-drill bit-rock based on ABAQUS[C]// International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences, 2015.
- [14] XU E, SOGA K, ZHOU M L, et al. Numerical analysis of wellbore behaviour during methane gas recovery from hydrate bearing sediments[C]// Offshore Technology Conference, 2014.
- [15] SASAKI T, SOGA K, ELSHAFIE MZ E B. Simulation of wellbore construction in offshore unconsolidated methane hydrate-bearing formation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 60: 312-326.
- [16] ZHONG Z H. Finite Element Procedure for Contact-Impact Problems[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [17] 刘广志.金刚石钻探手册[M].北京:地质出版社,2009.
- [18] 李佳杰.天然气水合物储层上覆土层力学特性研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [19] MASUI A, HANEDA H, OGATA Y, et al. Effects of methane hydrate formation on shear strength of synthetic methane hydrate sediments[J]. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005: 364-369.
- [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.
- [21] Shipboard Scientific Party. Leg 204 summary[M]// TREHU A M, BOHRMANN G, RACK F R, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Results, 204. College Station, Texas: Texas A & M University (Ocean Drilling Program), 2003:1-75.