

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. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.006

WEI C X, JIN Y P, LIU D S, 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. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.006

海底天然气水合物复杂地层 钻进取芯仿真岩芯扰动分析

卫成效,金永平*,刘德顺,万步炎

(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:针对海底天然气水合物赋存的复杂地层,利用有限元分析软件 ABAQUS/CAE,对搭载于深海海底钻机上的金刚石钻头钻进取芯海底天然气水合物过程进行了模拟仿真,并利用 Python 对仿真结果进一步处理.通过对钻进过程中岩芯所受应力状态的分析,得到岩芯扰动状态随钻进参数的变化规律,获得天然气水合物储层及其上覆土层沉积物低扰动岩芯范围,以及岩芯扰动率随钻进参数的变化趋势,对获取低扰动岩芯钻进参数及其优化具有一定的参考意义.结果表明:随着钻压和转速的增加,沉积物及水合物岩芯的扰动范围都相应的增大.岩芯的扰动率呈现出先迅速增大,之后再逐渐保持稳定的趋势.扰动率稳定值的大小受钻压的影响较大,与钻头的转速无关.当在沉积层钻进时,选择较大的钻压及转速以保证高的进尺效率,而当在水合物层钻进时,适当降低钻压可以获得质量较好的岩芯,而增大转速会使进尺速度得到有效的提升.

关键词:天然气水合物;有限元分析;应力状态;岩芯扰动

中图分类号:TE52 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2023)01-0043-07

Simulation Core Disturbance Analysis of Core Drilling in Complex Submarine Gas Hydrate Formation

WEI Chengxiao, 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: Aiming at the complex formation for gas hydrate occurrence in seabed, this paper uses the finite element analysis software ABAQUS/CAE to simulate the drilling process of diamond bit mounted on deep seabed drilling rig for coring seabed gas hydrate. With further processing of simulation results using Python, this paper also analyzes the stress state of rock core during drilling, and the variation law of rock core disturbance state with drilling parameters is obtained. It obtains the low-disturbance core range of natural gas hydrate reservoir and its overlying sediments, and the variation trend of core disturbance rate with drilling parameters. It has certain referential significance for optimizing core drilling parameters with low disturbance. The results show that the disturbance range of sediments and hydrate cores increases with the increase of drilling pressure and rotational speed. The disturbance rate of the core first increases rapidly, and then gradually remains stable. The stability

收稿日期:2022-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779092);国家重点研发计划项目资助(2016YFC0300502);湖南省研究生科研创新项目资助(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

value of the disturbance rate is greatly affected by the drilling pressure, and has nothing to do with the speed of the bit. When drilling in the sedimentary layer, larger drilling pressure and speed should be selected to ensure high footage efficiency. When drilling in hydrate layer, the core with good quality can be obtained by appropriately reducing the drilling pressure, and increasing the rotational speed can effectively improve the footage speed.

Keywords: gas hydrate; finite element analysis; state of stress; core disturbance

近年来,由地球物理勘探表明,中国南海深水区蕴藏着丰富的天然气水合物资源^[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,而其特殊的成藏条件则决定了海底天然气水合物储层的地质条件也极其复杂.以往的三轴试验结果表明:实钻所获得的天然气水合物岩芯强度较低,与天然软黏土和冻土的岩芯强度接近^[2].这是由于在钻井过程中钻具在钻进时会破坏地层,导致岩芯以及井周附近的地层应力释放,从而使岩芯颗粒间的联系减弱,降低地层颗粒间胶结的有效应力,最终导致水合物岩芯样品的强度降低^[3].经过钻头扰动的这部分地层物质,一部分进入岩芯管形成岩芯,一部分构成了井周力学扰动带,其余被钻井液带走.岩芯物质受到的扰动不仅导致了取芯效率的降低,也对获取的岩芯的物性结构产生了影响,对岩芯较大程度的破坏还会造成水合物的分解.

针对海底天然气水合物钻进取芯扰动的研究,邹远晶等^[4]基于扰动状态概念,建立含水合物土的应力-应变模型,该模型重点分析受荷情况下含水合物沉积物胶结结构的破坏,并描述了水合物沉积物胶结结构受载破坏的全过程;王维等^[5]利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟 PCS 取样器钻取水合物的过程,并给出井底及井周不同时刻的应力场,从而得出水合物地层的扰动程度和扰动范围与钻压和转速的关系;宁伏龙^[6]通过研究水合物地层钻探过程中出现的稳定性问题,指出在实际钻井过程中,储层中的孔压和应力分布情况是流体流动和固体变形共同作用的结果;程远方等^[7]基于有限元法,通过采用流固耦合模型研究开采过程中储层的应力状态及物性参数的动态变化规律;Xu 等^[8]利用 ABAQUS 软件对日本东南海槽的2个水合物钻井项目的井壁稳定性进行了模拟研究;SASAKI 等^[9]通过建立二维轴对称有限元模型,研究不同钻井过程对未固结水合物层的扰动影响;KIM 等^[10]则利用 FLAC 计算应力应变,模拟分析了水合物储层的变形及稳定性问题.本文则通过仿真模拟获得不同钻进下岩芯的应力状态,通过对岩芯部分应力分布范围的计算与分析,得到钻进过程中岩芯的扰动状态,从而得到扰动范围和扰动程度与钻进参数之间的关系,为天然气水合物低扰动钻进取芯工艺的优化提供一定的参考意义.

1 钻进取芯模型

1.1 钻进取芯动力学模型

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塑性变形,进而实现切削破碎.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、边界力 柯西内应力分别为 b, q, q_c, σ ,则接触问题可归结为^[11]

$$\int_{\Omega} \sigma \delta e d\Omega - \int_{\Omega} b \delta u d\Omega - \int_{\Gamma_f} q \delta e dS - \int_{\Gamma_c} q_c \delta u dS + \int_{\Omega} \rho a \delta u d\Omega = 0.$$

式中: Γ_f 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; S 为接触面积; 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:

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

式中: m 为质量矩阵; \ddot{u} 为加速度矢量; t 为时间变量; p 为外力矢量; c 为接触力与摩擦力矢量; 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 钻进取芯有限元模型

本模型重点考虑钻进破岩的动态过程、岩石的应力-应变状态以及不同钻进参数对岩体的影响.因此,

为了提高计算效率以及便于分析,在取芯动力学模型的基础上,做出如下假设,从而建立钻进取芯有限元模型:

- 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,同时深海钻探过程中无法更换钻头,因此为了简化计算,可设置金刚石钻头为刚体;
- 2) 钻头的进尺方向为垂直于地表,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,因此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) 通过对岩石施加压力边界以及约束来模拟围压对海底岩体力学特性的影响。

1.2.1 钻头模型建立

搭载于某型海牛海底钻机的金刚石钻头,采用针对海底天然气水合物储层复杂地层的表镶金刚石钻头。钻头胎体为《金刚石钻探手册》^[12]中 63# 胎体,材料为碳化钨级合金钢,硬度大小为 HRC35~HRC40,抗弯强度为 1 270 MPa,线膨胀系数为 $9.9 \times 10^{-6} \sim 12.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$,密度为 $11\ 400 \text{ kg/m}^3$ 。63# 配方的胎体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%,金属薄膜厚度有 $0.1 \sim 3 \text{ }\mu\text{m}$,覆以金属薄膜金刚石的结合强度可达 $17 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 。金刚石钻头材料参数如表 1 所示。

表 1 金刚石钻头材料参数

	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	硬度	抗压强度	抗弯强度
钻头胎体(63#)	11 400	550	0.22	HRC35 ~ HRC40	—	1 270
金刚石颗粒	3 520	1 050	0.2	压痕硬度 70 000 MPa	8 857	—

1.2.2 海底天然气水合物储层模型

建立天然气水合物储层模型,模型可分为上层沉积物模型与下层水合物模型,该模型可以模拟钻头在通过不同地层时的钻进状态。损伤模型采用 Drucker-Prager 准则^[13],该模型可以考虑静水压力影响下的岩土模型,可用于海底地层模型的模拟,沉积物与水合物分别为中国南海神狐海域天然气水合物储层上覆土层^[14]以及具有一定成岩性的粉砂地层骨架强胶结型天然气水合物^[15],该数据具有一定的可靠性,其力学性能参数如表 2 所示。

表 2 水合物储层材料参数

编号	种类	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^\circ$)	孔隙度/%	饱和度/%
1	沉积物	91.04	0.47	42.98	60.00	40(水饱和)
2	强胶结水合物	3 850	0.19	23.67	31.37	80

1.2.3 有限元模型

一个复杂的有限元分析包括一系列相互关联的事件,可以根据先后发生的顺序定义相应的分析步。定义分析步为显示动力学分析步,算法为中心差分法。设定金刚石钻头与海底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 2 个部分,一是两者间的法向作用,二是两者间的切向作用。模型选用海域天然气水合物分布于 800~1 000 m 左右的深海海底沉积层下,为了有效模拟海底岩层环境,对模型施加相应的边界条件,设置地层模型上表面自由,下底面采用完全约束,施加海底应力场,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环境。钻进参数根据 ODP 航次报告^[16]以及某型海牛钻机的钻进参数为参考,选定了 3 个不同钻压(1.5, 2.0, 2.5 t)和 3 个不同转速(90, 120, 150 r/min)。钻压施加于整个钻头模型,方向为沿 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。如图 1 所示。

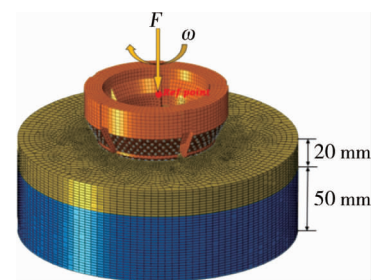


图 1 金刚石钻头钻进不同岩层的有限元模型

2 仿真计算结果与扰动分析

2.1 仿真计算结果

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,即与岩层单元进行接触-破坏-接触的反反复复过程.当钻压为 2.0 t,转速为 90 r/min 时,岩芯在 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 s 时的等效应力云图如图 2 所示,最终获得半径约为 0.03 m 的沉积物与水合物岩芯.

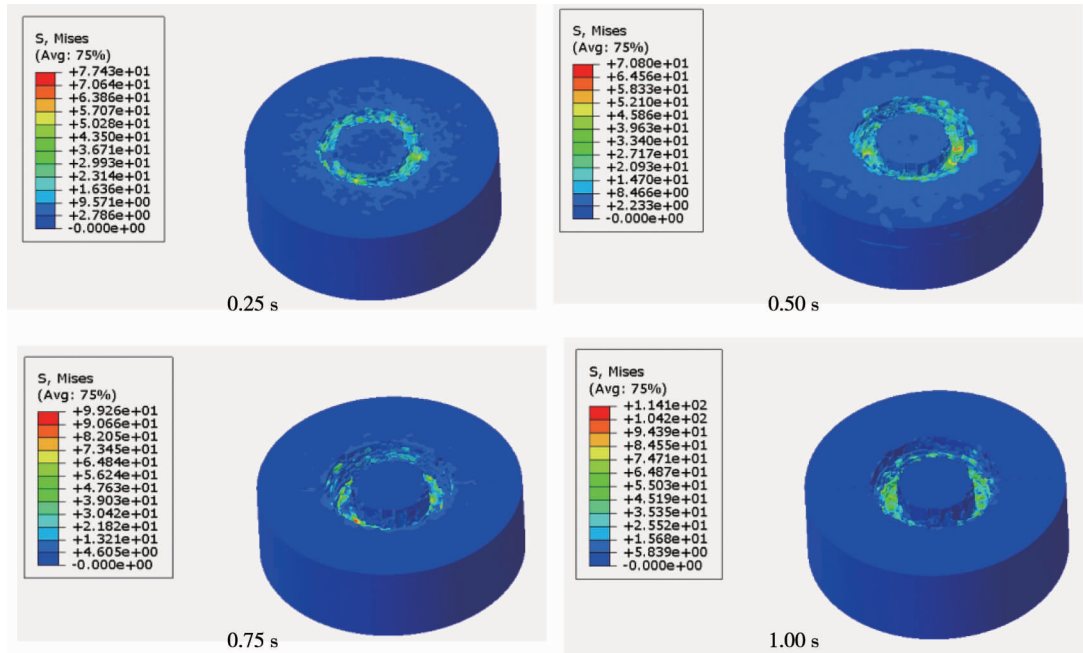


图 2 井眼形成过程

2.2 扰动分析

有限元软件 ABAQUS 可以获得钻进过程中天然气水合物岩芯所受应力的变化,为了进一步得到钻进对岩芯的影响,可以利用 Python 语言脚本控制 ABAQUS 内核实现后处理的计算分析^[17].

通过对 ABAQUS 仿真获得的岩芯应力,利用 Python 将岩芯在钻进过程中各单元应力的变化提取出来,可取天然气水合物峰值强度的 60%~70%作为岩芯受到扰动的评估值^[18],即当单元应力大小超过评估值时,即可视为该单元受到了扰动.对岩芯的扰动分析方法可分为以下 2 种:岩芯未受到扰动区域的最小半径;钻进过程中岩芯的扰动率.

2.2.1 岩芯未受扰动区域的最小半径

通过寻找自岩芯中轴线至岩芯扰动区域的边界距离最小的点,以此距离为所获岩芯受到扰动的最小半径.在钻进过程中,岩芯各处所受应力大小是不断变化的,则其扰动区曲线也是在不断变化的,如图 3 所示,以圆柱体代表钻进取得岩芯,阴影部分为某一时刻下岩芯部分应力超过评估值的区域,即扰动带.而在钻进过程中,岩芯内部存在一个规则的区域,该区域自钻进起始至取芯完成均未受到来自钻进过程的扰动.当钻进进行到某一时刻时,岩芯扰动曲线峰值距岩芯中轴线距离出现最小值,则视为以岩芯中心点为轴,以该最小值 r_{\min} 为半径的圆柱形岩芯区域内均未受到扰动,该值可以作为评估岩芯扰动的参考值.

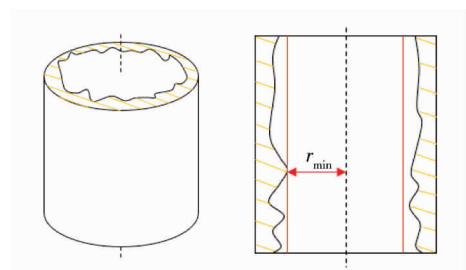


图 3 岩芯扰动分布

基于 Python 对 ABAQUS 后处理进行二次开发,利用执行 Python 脚本来寻找岩芯范围内非扰动区域

的最小半径.步骤如下:创建岩芯范围内节点与单元集合,定义节点在 x, y, z 这 3 个方向的坐标分量以及扰动评估值,通过遍历循环显示集合内各点应力状态随时间的变化,利用条件循环语句比较单元节点应力与扰动评估值大小,定义当节点应力大于扰动值时为失效节点.对于岩芯而言,节点位于网格单元的各个顶点,而扰动峰值点不一定会出现在节点上,因此需要寻找扰动峰值点所在网格单元,该单元满足同时存在失效节点和未失效节点.则通过遍历循环所有满足条件的网格单元,并计算其节点至中心线的距离,所获最小值节点所在单元即为扰动曲线峰值所在单元.通过标记峰值点为参考点即可利用 ABAQUS 工具模块获得峰值点到中线的距离,则以该距离为半径,以中心线为轴的圆柱体岩芯区域自钻进开始至终了均未受到扰动.

通过运用 Python 对 ABAQUS 后处理进行二次开发,分别取沉积物层和水合物层的失效强度为 7.18 和 34.65 MPa,计算获得不同钻进参数下岩芯未受扰动区域的最小半径如表 3 和表 4 所示.由表 3 和表 4 可知:随着钻压和转速的增加,未受扰动的岩芯范围都呈减小趋势.对于沉积物而言,未受扰动的最小岩芯半径约为 20 mm,且随钻压的变化有较为明显的差异.而对于水合物岩芯而言,未受扰动的最小半径约为 25 mm,且受钻进参数的影响较小.同时,获得最小半径出现时的位置以及该时刻的进尺量即钻头位置,由表 3 和表 4 可知:最小半径出现的深度多数位于井底上侧,钻头在钻井中与沉积物作用时对岩芯上部仍存在着较大影响.

表 3 转速为 120 r/min 时不同钻压下岩芯的扰动情况

钻压/t	岩芯类型	最小半径/mm	时刻/s	最小半径处深度/mm	进尺/mm
1.5	沉积物	21.88	0.297 5	8.6	9.8
2		20.99	0.412 5	15.3	16.9
2.5		19.18	0.280 0	12.7	13.8
1.5	水合物	25.36	2.012 5	26.4	28.9
2		25.00	2.037 5	31.5	34.9
2.5		24.70	1.340 0	35.1	34.9

表 4 钻压为 2.0 t 时不同转速下岩芯的扰动情况转速

转速/rpm	岩芯类型	最小半径/mm	时刻/s	最小半径处深度/mm	进尺/mm
90	沉积物	21.20	0.450 0	14.4	14.2
120		20.99	0.412 5	15.3	16.9
150		21.06	0.137 5	11.2	7.2
90	水合物	25.54	2.850 0	35.3	36.8
120		25.00	2.037 5	31.5	34.9
150		24.75	1.350 0	30.5	32.9

2.2.2 扰动率

随着金刚石钻头钻进取芯过程的进行,取得岩芯的体积会不断地增加,岩芯中受到扰动部分的体积也会随之增加,通过计算钻进过程中岩芯的扰动率可以直观地显示出钻进所获岩芯的质量及效率.设岩芯的扰动率为岩芯所受扰动区域的体积与岩芯总体积之比,即

$$p = \frac{V_r(t)}{V(t)} = 1 - \frac{V_w(t)}{V(t)}$$

式中: V_r 为岩芯受到扰动区域的体积; V_w 为岩芯未受到扰动区域的体积; V 为岩芯总体积.

基于 Python 的 ABAQUS 后处理二次开发,通过执行 Python 脚本来计算岩芯扰动率随时间的变化.步骤如下:创建岩芯范围内的单元与节点集合并定义扰动评估值,通过遍历循环显示各集合中所有时间帧数下的单元应力状态,而岩芯上各单元所受到的应力状态是不断变化的,当某一处的应力值大小超过评估值时,则该单元视为受到了扰动而失效,因此在下一时刻不再对该区域的应力大小进行判断.因此,利用条件判断语句不断删除岩芯集合中受到扰动的单元,计算每一次循环下该集合中剩余单元的体积和,即为未扰动区域的体积 V_w ,将未扰动区域体积与岩芯体积做差则获得岩芯扰动区域体积 V_r ,岩芯总体积可由钻头

进尺量与岩芯表面积乘积获得。

当转速固定为 120 r/min, 改变钻压时, 对海底天然气水合物储层模型进行钻进仿真模拟, 并通过 Python 实现 ABAQUS 后处理的二次开发, 计算获得在不用钻压下钻进过程对天然气水合物层及其上覆土层所产生的扰动影响。图 4 为在不同钻压下钻头分别在沉积物以及水合物层钻进各 20 mm 时所获得的扰动率随时间的变化曲线。由图 4 可知: 在钻进过程中, 岩芯所受到的扰动在初始阶段会迅速增大, 随着钻进过程的进行, 岩芯的扰动率逐渐趋于平稳并保持在一定范围之内。而当钻压不同时, 钻进过程对岩芯的扰动率的影响也不同, 当岩芯扰动率趋于平稳状态时该值随着钻压的增大而增加。不同的储层在相同的钻进参数下, 扰动率有较大的差异, 其中天然气水合物岩芯的扰动率稳定值在 0.20~0.25 之间, 而其上覆土层沉积物岩芯受钻进影响较大, 当转速保持 120 r/min, 钻压为 1.5 t 时, 沉积物岩芯的扰动率约为 0.33, 而当钻压增大至 2.5 t 时, 沉积物岩芯的扰动率高达 0.42。

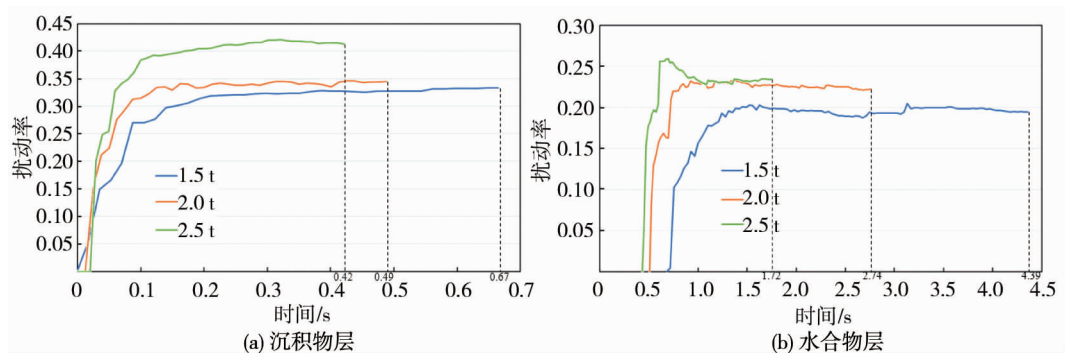


图 4 不同钻压下岩芯的扰动率

当钻压固定为 2 t 时, 改变金刚石钻头的转速, 计算获得钻头在沉积物及水合物层进尺各 20 mm 时岩芯的扰动率如图 5 所示。由图 5 可知: 当钻压一定时, 施加在金刚石钻头上转速的改变对岩芯的扰动率影响不大, 其中沉积物岩芯的扰动率稳定值约为 0.35, 而水合物岩芯的扰动率稳定值约为 0.21。

综上所述, 转速与钻压的改变不仅影响着岩芯的质量, 也对金刚石钻头的进尺速度有很大的影响。在实际钻进中, 为了高效率地钻取低扰动的岩芯, 应综合考虑各类因素的影响。当在沉积层钻进时, 选择较大的钻压及转速以保证高的进尺效率, 而当在水合物层钻进时, 适当降低钻压可以获得质量较好的岩芯, 而增大转速会使进尺速度得到有效的提升。

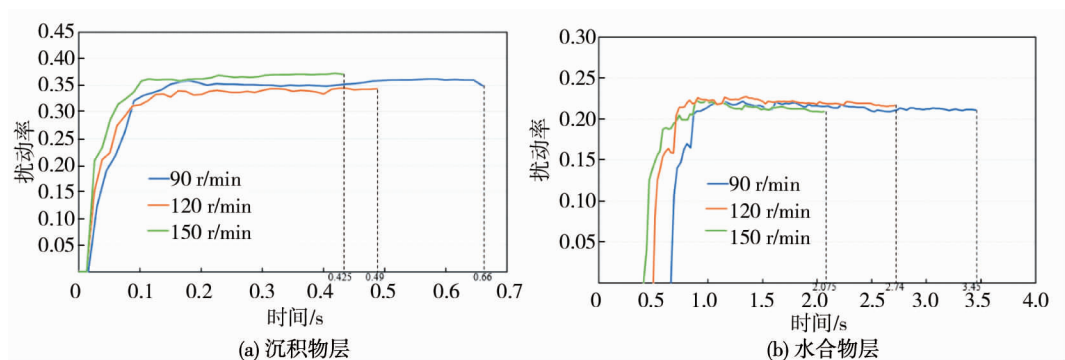


图 5 不同转速下岩芯的扰动率

3 结论

1) 在金刚石钻头钻进过程中, 受钻头的钻进作用的影响, 水合物岩芯及其上覆沉积物岩芯外侧都存在一定范围的扰动带, 在相同的钻进参数的作用下, 水合物岩芯及沉积物岩芯的扰动带范围存在较大的差异。当转速一定且钻压增大时, 水合物岩芯及其上覆土层沉积物岩芯最大扰动带范围呈增大趋势; 当钻压一定时, 改变转速对岩芯最大扰动带范围影响较小, 对水合物岩心而言, 以岩芯中心线为中轴线, 半径约

25 mm 的圆柱体范围内的岩芯均为受到扰动。

2) 随着金刚石钻头与海底地层发生作用,取得岩芯的扰动率在不断地发生变化,随着钻进的进行而逐渐增大,最终趋于一个稳定值。天然气水合物由于其物性结构比较稳定,岩芯受到钻进过程的扰动程度较低,其扰动率约为 0.20~0.25,其上覆沉积物层受到的扰动较大,在实际钻探中应适当减小钻头钻压,从而保证沉积物的取芯效率。水合物岩芯及其上覆沉积物岩芯的扰动率随钻头钻压变化的影响较为明显,呈正相关趋势。而当钻压一定时,钻头转速的变化不会影响岩芯的扰动率。

参考文献:

- [1] SU M, YANG R, WANG H, et al. Gas hydrate distribution in the Shenhu area, northern South China Sea: comparisons between the eight drilling sites with gas-hydrate petroleum system[J]. *Geologica Acta*, 2016, 14(2): 79-100.
- [2] 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 hydrate[J]. *American Mineralogist*, 2004, 89(8): 1221-1227.
- [3] 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):9.
- [4] 邹远晶,韦昌富,陈合龙,等.基于扰动状态概念的含水合物土弹塑性模型[J].*岩土力学*,2019,40(7):2653-2662.
- [5] 王维,彭视明,王红岩,等.天然气水合物地层 PCS 取样扰动有限元仿真分析[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(4):1183-1189.
- [6] 宁伏龙.天然气水合物地层井壁稳定性研究[D].武汉:中国地质大学,2005.
- [7] 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.
- [8] XU E, SOGA K, ZHOU M, et al. Numerical Analysis of Wellbore Behavior during Methane Gas Recovery from Hydrate Bearing Sediments[C]//USA: Offshore Technology Conference, 2014.
- [9] SASAKI T, SOGA K, ELSHAFIE M. Simulation of wellbore construction in offshore unconsolidated methane hydrate-bearing formation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 60: 312-326.
- [10] 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.
- [11] ZHONG Z H. Finite Element Procedure for Contact-Impact Problems[M]. USA: Oxford Science Publications, 1993.
- [12] 刘广志.金刚石钻探手册[M].北京:地质出版社,2009.
- [13] DRUCKER D C, PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2013, 10(2): 157-165.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] TREHU A M, BOHRMANN G, RACK F, et al. Shipboard Scientific party. Leg 204 summary[M]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Results, 204. College Station, Texas: Texas A & M University(Ocean Drilling Program), 2003, 204: 1-75.
- [17] 曹金凤,王旭春,孔亮. Python 语言在 Abaqus 中的应用[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [18] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].*岩石力学与工程学报*,2007(6):1081-1106.