

深海海底钻机海底沉积物取芯过程 扰动水压分析

刘亮,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:深海海底沉积物取样是开展海洋地质科学研究、海底矿产资源勘探、海洋工程建设勘察等工作的前提。针对海底沉积物取芯过程中取芯管中海水压力升高造成样品扰动问题,本文以深海海底钻机沉积物取芯钻具为研究对象,建立了沉积物取芯过程扰动水压模型;结合海牛号深海海底取样钻机设计,分析了钻具压入速度、取样管尺寸和过流小孔直径对扰动水压的影响。研究结果有利于钻具结构、取芯工艺优化,对发展深海海底钻机低扰动勘探取样技术具有重要意义。

关键词:海底钻机;海底沉积物;取样;水压;扰动

中图分类号:P742 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0001-07

Analysis of Disturbed Water Pressure in Seabed Sediment Coring Process of Seafloor Drill

LIU Liang, 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: Sampling of deep-sea seabed sediments is a prerequisite for the development of marine geological scientific research, seabed mineral resource exploration, and marine engineering construction surveys. Aiming at the problem of sample disturbance caused by the increase of seawater pressure in the core tube during the coring process of submarine sediments, this paper takes the sediment core drilling tool of the seafloor drill as the research object, and establishes the disturbance water pressure model of the sediment core process. Combined with the design of the "Hainiu" seafloor drill, the influence of drilling tool intrusion speed, sampling tube size and waterway hole diameter on the disturbance water pressure is analyzed. The research results are conducive to the optimization of drilling tool structure and coring technology, and are of significance to the development of low-disturbance exploration and sampling technology for seafloor drill.

Keywords: seafloor drill; seabed sediments; sampling; water pressure; disturbance

深海海底沉积物取样是海洋地质科学研究、海底矿产资源勘探、海洋工程建设等事业的基础性工作,深海海底钻机(如图 1 所示)是实施海底沉积物取样的先进技术之一^[1-4]。在深海海底钻机海底沉积物取样过程中,随着钻具取样管压入沉积物,处于管内的水体压力将增加,这个压力作用在沉积物表面,将对沉积物样芯造成扰动,从而影响样品物理力学性能的准确分析^[5-9]。因此开展深海海底钻机沉积物压入取芯过程芯管水压力分析、实现低扰动取样具有重要意义。

收稿日期:2021-08-30

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);湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2020GK1021;2019SK2271;2019GK1010)

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

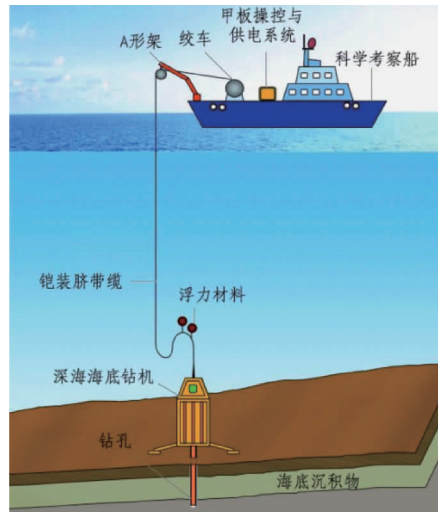


图1 海底钻机取样原理

在一些取样管装置获取样品过程中,通常采用负压吸入原理来提高取样速度和取芯率.吴小建等^[10]采用抽吸泵抽吸使取样管内海水压力减小,保证了样品顺利进入取样管,并对抽吸泵的抽吸压力进行计算,但未对非抽吸取样时管内水压变化情况进行分析研究;李小洋等^[11]研制了一种天然气水合物取样钻具,水合物进入取样管后,挤压管内海水经取样器上部的小孔排出,海上取样时岩芯获取率为72.14%.静水压力驱动取样器^[12-13]通过密封取样管,避免了因海水排出造成的管内压力变化,将沉积物样品吸入取样管,样品获取率可以达到90%以上.而且,因为深海海底钻机配备了强大的推进动力,采用压入式取样时,具有远大于其他取样装置的压入力,从而可以获得更高的取样速度和取样率,深海海底钻机成为实施海底沉积物取样发展方向^[14-16].所以,开展深海海底钻机沉积物压入取芯过程芯管水压力分析研究,有利于促进深海海底钻机低扰动勘探取样技术发展.

本文以深海海底沉积物取芯钻具为研究对象,建立海底钻机取芯过程岩芯管内扰动水压模型,分析影响芯管扰动水压的主要因素,以为深海海底钻机沉积物取样钻具结构设计、取芯工艺选择提供理论依据.

1 深海海底钻机沉积物取样过程芯管内水压力模型

1.1 深海海底钻机钻具结构与原理

深海海底钻机沉积物取样钻具主要由内管总成和外管总成构成,其结构如图2所示.取样作业前,海底钻机利用连接于捞矛头的打捞绳索将内管总成下放至外管总成内,钻具下方内管伸出外管,且与钻具外管密封.作业时采用纯压入的方式,将钻具压入海底沉积物获取土样.随着沉积物样品进入芯管,将挤压芯管内部的海水通过钻具顶部的球形逆止阀,再经内管两侧对称分布的排水口排放至内外管间隙,最后通过钻机顶部的排水孔排放至海洋.钻具全部压入沉积物,海底钻机通过打捞绳索、捞矛头取出芯管,更换取芯、加接钻杆管后,继续取样作业.

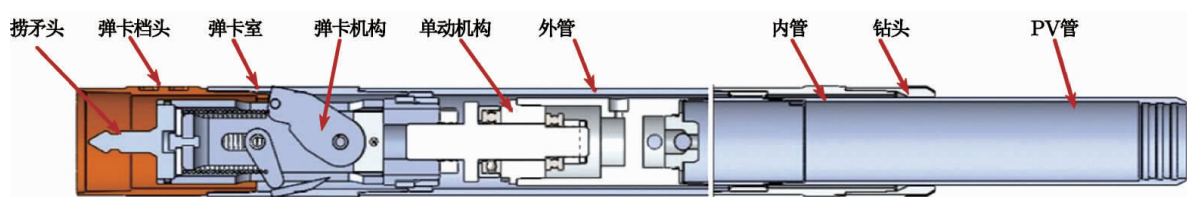


图2 海底取样钻具结构

为了方便分析芯管内海水运动,将深海海底取芯钻具简化为如图3所示的钻具排水结构简图.其中,取样钻具内管由直径为 d_s 的打捞绳连接,穿过顶部内径为 d_r 的圆孔.用于储存岩芯的内管总长度为 $(H+$

H_1) (岩心管与内管排水系统组成长度为 H , 伸出外端段长度为 H_1), 内径为 d_1 ; 内管总成侧壁排水口至内管总成顶部的长度为 H_2 , 内管顶部距排水口的高度为 H_3 ; 外管的内径为 d_6 . 钻具外海水压力为 P_0 . 在取样过程中, 长度为 L 的沉积物样品以速度 V 进入取样管, 挤压管内海水自钻具上方排出, 引起岩芯表面压力 P 增大. 芯管内的海水经入口内径为 d_2 、球仓内径为 d_3 的逆止阀, 进入内径为 d_4 的过渡圆管, 经对称布置在其侧壁的两个内径为 d_5 的排水口排至内管与外管组成的环形间隙, 最后通过钻具外管顶部由打捞绳和端盖组成的环形排水孔 (内径为 d_7) 排至海洋, 以实现取样过程中海水的排放.

1.2 沉积物取芯过程芯管水压建模

假设, 沉积物样品进入取芯管速度 V 等于海底钻机压入取芯管速度; 沉积物表面的压力为 P , 钻具外部海水压力也就是作业水深的水体压力 P_0 . 取芯管内沉积物样品表面和钻具顶部环形排水口的外侧面, 列伯努利方程:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} = z_7 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{\alpha_7 v_7'^2}{2g} + \sum h_{lm} + \sum h_{jn} \quad (1)$$

式中: z 为芯管内沉积物表面的高程; ρ 为海水的密度, 取 $1\,025\text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; α, α_7 为海水的动能修正系数, 与海水的流态有关, 层流状态下动能修正系数为 2, 紊流状态下其值接近 1^[17]; z_7 为环形排水口处的高程; v_7' 为环形排水口外侧海水的流速, 0 m/s ; $\sum h_{lm}$ 为海水流动过程中总沿程损失; $\sum h_{jn}$ 为海水流动过程中总局部损失.

海水流动的沿程损失 h_l 可以表示为^[18-19]

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中: λ 为流体沿程阻力系数; l 为管道的长度; d 为管道的内径; v 为管道内流体的流速. 由于沿程阻力系数 λ 的取值与取样管内海水的流态有关, 湍流相比层流具有较大的复杂性, 使得阻力系数 λ 的取值不能通过简单的推导求得, 采用尼古拉兹试验曲线 (如图 4 所示) 数学表达式来确定 λ 的取值^[20], 所以有

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re}, & Re < 2\,000; \\ 0.0025 \sqrt[3]{Re}, & 2\,000 \leq Re \leq 4\,000; \\ \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}, & 4\,000 > Re. \end{cases} \quad (3)$$

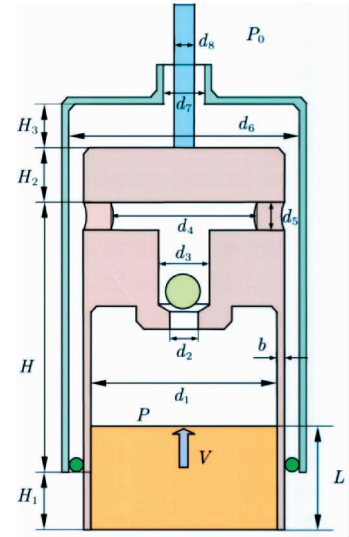


图3 海底取样钻具排水结构

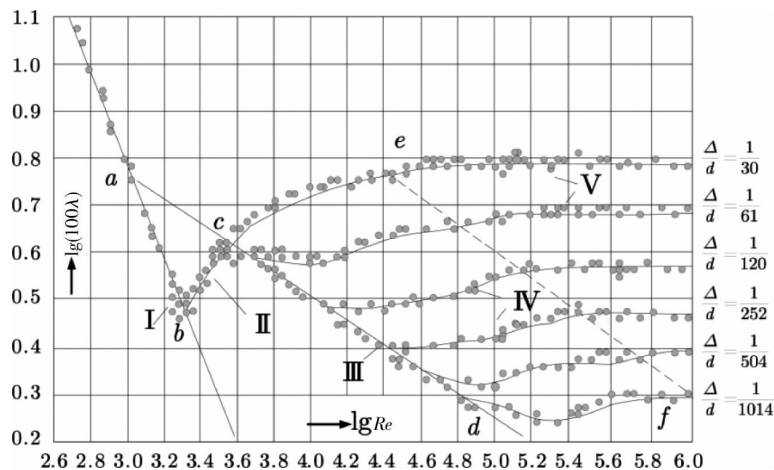


图4 尼古拉兹试验曲线^[20]

式中: Re 为流体的雷诺数 ($Re = vd/\eta$, η 为海水的运动粘度, $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时海水的运动粘度约为 $1.565 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). 假设海水为不可压缩流体, 流速 v 可以根据流体连续方程求得

$$v = \left(\frac{d_1}{d}\right)^2 V. \quad (4)$$

根据沿程损失计算方法, 就可以依次求得海水流动过程中各个流段的沿程损失.

1) 芯管内 (即自取样管底端起高度为 $(H+H_1)$) 海水流动沿程损失:

$$h_{11} = \lambda_1 \frac{H + H_1 - L}{d_1} \frac{V^2}{2g}. \quad (5)$$

式中: 阻力系数 λ_1 可采用式 (3) 确定.

2) 内、外管间隙 (即等径排水口至内管总成顶部, 高度为 H_2): 由于该圆环形管道长度较大, 沿程阻力不可忽略, 该过程沿程损失可以表示为

$$h_{12} = \lambda_2 \frac{H_2}{d_6 - d_1 - 2b} \frac{v_g^2}{2g} = \lambda_2 H_2 \frac{d_1^4 V^2}{2g (d_6 - d_1 - 2b)^5}. \quad (6)$$

式中: v_g 为内、外管间隙海水流速.

3) 内管顶部圆环形管道 (即内管总成顶部至外管内径顶部, 高度为 H_3): 随着取样深度的增加, 该段管道的长度 H_3 不断增加, 逐渐成为流体沿程损失发生的主要管段:

$$h_{13} = \lambda_3 \frac{H_3}{d_6 - d_8} \frac{v_6^2}{2g} = \lambda_3 H_3 \frac{d_1^4 V^2}{2g (d_6 - d_8)^5}. \quad (7)$$

式中: v_6 为内径为 d_6 的外管的段海水流速.

考虑海水流过小孔管段时引起的局部损失 h_j 表示:

$$h_j = \xi \frac{v^2}{2g}. \quad (8)$$

式中: ξ 为局部阻力系数, 可通过查阅相关资料直接使用^[21]; v 为流经小孔的速度, 可以采用管道流速计算方法式 (4), 将管道直径换成小孔直径即可求得.

海水流经各段的局部损失可以表示为

1) 芯管内海水向上运动, 由取样管流入逆止阀下端入口, 该过程的局部阻力 h_{j1} 可以表示为

$$h_{j1} = \xi_1 \frac{v_2^2}{2g}. \quad (9)$$

式中: v_2 为海水在逆止阀下端入口处的流速, 该结构是一个内插管道进口, 局部损失系数 $\xi_1 = 1$.

2) 海水流入球形逆止阀. 球形逆止阀结构局部损失系数为 $2 \sim 9$, 本文取均值 $\xi_2 = 5.5$, 因此该段的局部损失可以用 h_{j2} 表示:

$$h_{j2} = \xi_2 \frac{v_2^2}{2g} = \xi_2 \frac{\left(\frac{d_1^2}{d_2^2} V\right)^2}{2g} = 5.5 \frac{V^2 d_1^4}{2g d_2^4}. \quad (10)$$

3) 流体由逆止阀球仓流入过渡圆管, 将其等效为突扩截面的管道结构, 其局部损失系数可以表示为

$$\xi_3 = \left(1 - \frac{d_3^2}{d_4^2}\right)^2, \text{ 因此:}$$

$$h_{j3} = \xi_3 \frac{v_3^2}{2g} = \xi_3 \frac{\left(\frac{d_1^2}{d_3^2} V\right)^2}{2g} = \left(1 - \frac{d_3^2}{d_4^2}\right)^2 \frac{V^2 d_1^4}{2g d_3^4}. \quad (11)$$

4) 流体由过渡圆管流入内管的等径排水口, 将该排水孔近似简化为稍加修圆的管道进口, 局部损失系数取 $\xi_4 = 0.25$, 因此:

$$h_{j4} = 2\xi_4 \frac{v_5^2}{2g} = 2\xi_4 \frac{\left(\frac{d_1^2}{2d_5^2}V\right)^2}{2g} = \frac{V^2 d_1^4}{16g d_5^4}. \quad (12)$$

5)海水自内管等径排水孔流出进入内径为 (d_1+2b) 、外径为 d_6 的圆环形间隙,其局部阻力系数 ξ_5 可以表示为

$$\xi_5 = \left[1 - \left(\frac{d_5}{H+H_2}\right)^2\right]^2.$$

内、外管下方完全密封,管内海水无法从下方排出,由于管道长度 $(H+H_2)$ 远远大于 d_5 ,因此该过程局部损失可以表示为

$$h_{j5} = 2\xi_5 \frac{v_5^2}{2g} = 2\xi_5 \frac{\left(\frac{d_1^2}{2d_5^2}V\right)^2}{2g} = \frac{V^2 d_1^4}{4g d_5^4}. \quad (13)$$

6)流体自内外管环形缝,经内外管顶部的夹层,最后由外径为 d_7 、内径为 d_8 的圆环形孔口排出.该三段管道均为圆环形管道,其当量水力直径分别为 (d_6-d_1-2b) 、 (d_6-d_8) 、 (d_7-d_8) ,且有 $(d_6-d_1-2b) < (d_6-d_8)$ 、 $(d_7-d_8) < (d_6-d_8)$,海水先后流经断面突然扩大管、断面突然缩小管.因此,该过程局部损失分别表示为

$$h_{j6} = \xi_6 \frac{v_6^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{d_6-d_1-2b}{d_6-d_8}\right)^2\right]^2 \frac{V^2 d_1^4}{2g(d_6-d_1-2b)^4}; \quad (14)$$

$$h_{j7} = \xi_7 \frac{v_6^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{d_7-d_8}{d_6-d_8}\right)^2\right]^2 \frac{V^2 d_1^4}{4g(d_7-d_8)^4}. \quad (15)$$

7)最后,取芯管内的海水通过内径为 d_8 、外径为 d_7 的圆环形管道厚壁孔口排至海洋,存在一定的孔口出流($\xi_8=1$)损失:

$$h_{j8} = \xi_8 \frac{V_7^2}{2g} = \frac{V^2 d_1^4}{2g(d_7-d_8)^4}. \quad (16)$$

综上分析,可得芯管内水压的变化量可以表示为

$$\Delta P = \rho g(H-L + \sum_{i=1}^3 H_i + \sum_{m=1}^3 H_{im} + \sum_{n=1}^8 h_{jn}) - \frac{\alpha \rho V^2}{2}. \quad (17)$$

由以上分析可知,深海海底钻机取样钻具扰动水压主要受压入速度 V 、取样深度 $\sum H$ 、取芯钻具管道尺寸 d_1 和 d_6 、水路中结构小孔尺寸 $d_2 \sim d_5$ 及 d_7 等因素的影响.

1.3 沉积物取芯过程芯管内水压力的计算与分析

为进一步分析不同取芯工艺参数、取芯钻具内管内径 d_1 和外管内径 d_6 以及水路各个小孔直径 $d_2 \sim d_5$ 、 d_7 等参数对扰动水压的影响规律,利用以上推导的扰动水压模型,并结合海牛深海海底钻机沉积物取样钻具设计参数进行量化分析.钻具内管总长度 $(H+H_1)$ 为2.7 m,其中伸出外管长度 H_1 为0.3 m,壁厚 b 为4 mm,内管上部总成的长度 H_2 为0.5 m.取芯速度 V 变化范围为10~50 mm/s;取样管内管内径 d_1 为20~80 mm,取样管外管内径 d_6 为70~90 mm;逆止阀入口内径 d_2 为1~32 mm,内管排水孔直径 d_5 为1~20 mm,取样器顶部排水孔内径 d_7 为5~30 mm.代入上述参数至模型中进行计算,得到如图5、图6所示的结果.

1)从图5a~图5b、图6a~图6b图可见,取芯管内管直径 d_1 对钻具扰动水压 ΔP 影响明显, ΔP 随着内管直径 d_1 的增大而增大,且趋势逐渐加快,同时由于速度造成的差异也逐渐放大; ΔP 随着外管内径 d_6 的增加而迅速减小,并趋于稳定.这是因为内管直径越大,排出海水体积就越大,导致水流速度越高、扰动水压越大;而外管内径越大,经过的水流速度越低、扰动水压越小.在取样钻具设计中,内管直径取决于样品分析需要,而外管内径是由内管直径、钻头直径共同决定的.因此,要根据取样钻具内管直径、样品直径要求,合理选择钻具取样管压入速度,以便控制取样过程中扰动水压,确保获得的沉积物样品质量.

2)从图5c~图5e、图6c~图6e可见,取样钻具中过流小孔尺寸影响其扰动水压 ΔP ,这是因为小孔越小、流速越快,产生的压力损失、扰动水压就越大.值得注意的是,当小孔直径增加到一定值时,扰动水压迅

速减小、并趋于稳定,这里称之为临界直径.所以,在取样钻具设计时,在结构尺寸允许条件下,尽可能使小孔直径增加到相应的临界直径,这样就可以尽量减小小孔产生的扰动水压.

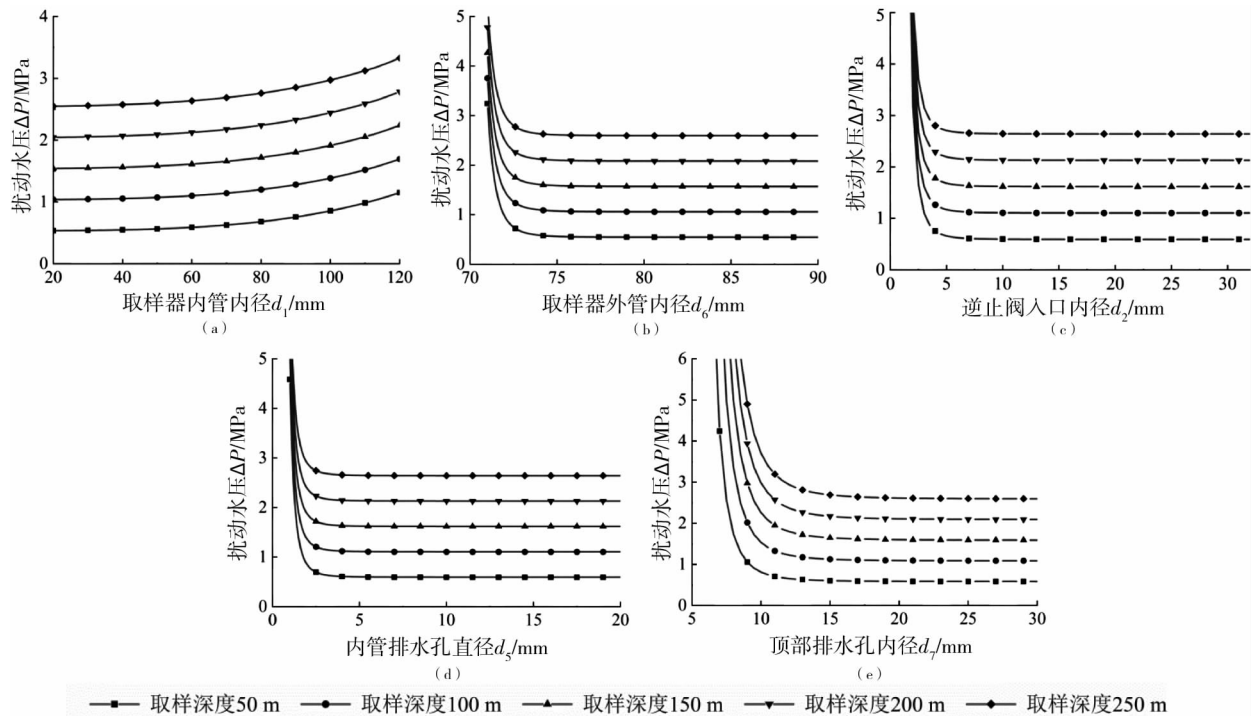


图5 不同取芯阶段,管内扰动水压随各钻具设计参数的变化规律

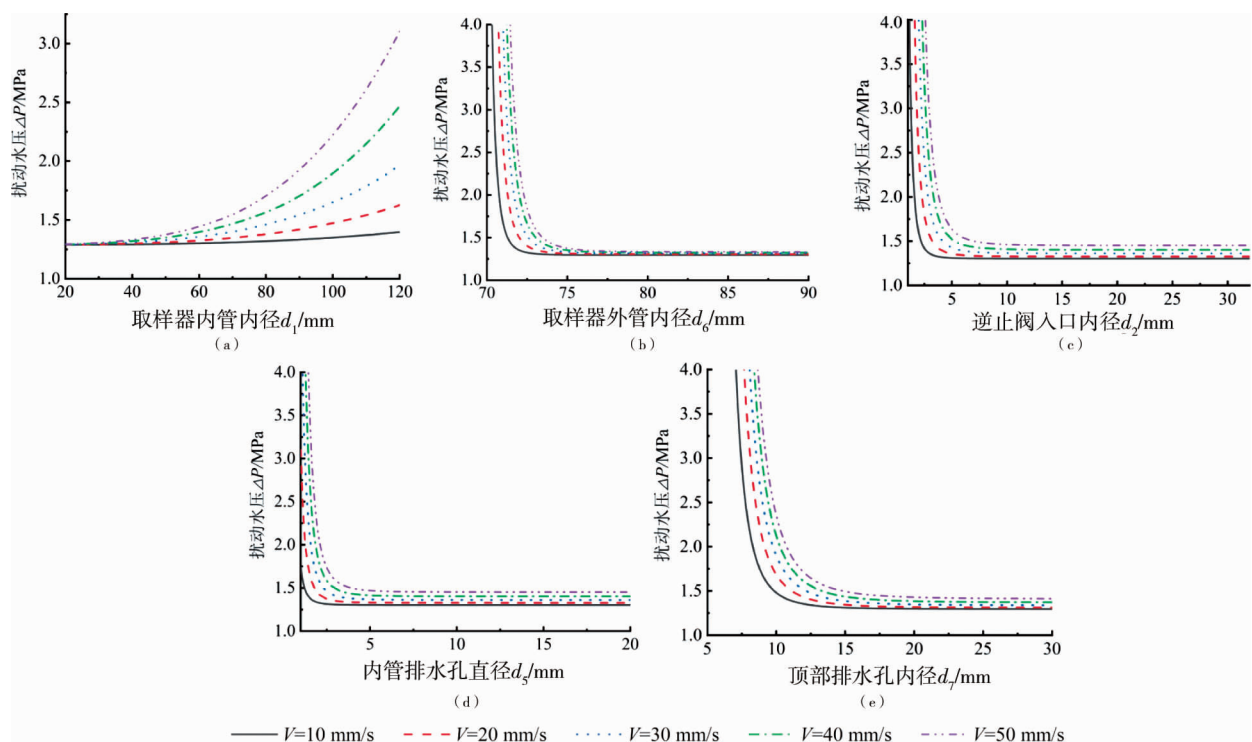


图6 匀速取样时,管内扰动水压随各钻具设计参数的变化规律

3)由图5可以看出,取芯深度50 m增加至250 m, ΔP 增加了2~3 MPa.通过分析图5发现,扰动水压 ΔP 的增加量随着 d_1 的增大而增大,随着其他各参数的增大而减小.取样深度增大过程中,扰动水压增大主要由于静水压力的增加和压力损失的产生,受取样实际环境限制,芯管内海水只能通过钻具上部排出,所以,应尽可能减小压力损失的产生,可通过减小取芯管的内径和增大外管的当量水力直径实现.

4)由图6可以看出,取样钻具压入速度 V 对扰动水压 ΔP 的影响明显,因为海水在钻具水道中流动速

度取决于压入速度 V , 钻具扰动水压 ΔP 与压入速度 V 平方成正比。比如, 钻具压入速度由 0.05 m/s 减小至 0.01 m/s , 扰动水压 ΔP 可降低 1 MPa 以上。必须指出: 对样品扰动程度既取决于扰动水压、又取决于取样作业水深初始压力 P_0 , 也就是说, 1 MPa 扰动水压对于 $10\,000 \text{ m}$ 作业水深、相当于 100 MPa 初始压力, 只有 1% 的扰动; 而对于 $1\,000 \text{ m}$ 作业水深, 就有 10% 的扰动, 这在实际中必须尽量避免。同时, 钻具压入速度高低就意味着作业时间短长, 也就决定了取样作业效率的高低。所以, 选择控制钻具取样压入速度时, 要综合考虑样品低扰动要求和取样作业水深及取样作业效率, 从而保证样品质量和可接受的取样效率。

2 结论

1) 在取样钻具设计时, 在结构尺寸允许条件下, 尽可能使小孔直径增加到相应的临界直径, 这样就可以尽量减小小孔产生的扰动水压。

2) 要综合考虑取样低扰动要求、样品直径要求、取样作业水深和取样作业效率, 合理选择、控制钻具取样压入速度, 从而保证样品重量和可接受的取样效率。

参考文献:

- [1] 马公正, 卢海龙, 陆敬安, 等. 海底沉积物多边形断层及其对天然气水合物赋存的控制[J]. 中国地质, 2020, 47(1): 1-13.
- [2] 刘煜, 李清, 林小云, 等. 海底沉积物生物气演化特征及气源影响因素分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(6): 169-177.
- [3] 金永平, 万步炎, 刘德顺. 深海海底钻机收放装置关键零部件可靠性分析与试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 183-191.
- [4] 谢焜, 金永平, 李兰香, 等. 深海海底钻机用铠装脐带缆有限元分析[J]. 矿业工程研究, 2020, 35(3): 34-40.
- [5] RIBEIRO M C, FERREIRA R, PEREIRA E, et al. Scientific, technical and legal challenges of deep sea mining. A vision for Portugal-Conference report[J]. Marine Policy, 2020, 114: 103338.
- [6] 李志杰, 宋晶, 杨守颖, 等. 取土器几何尺寸对饱和软黏土样结构的扰动研究[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 17-24.
- [7] LI W L, GAO S Y, HAN C H, et al. A Brief Analysis on Data Mining for Deep-Sea Mineral Resources Based on Big Data[J]. Procedia Computer Science, 2019, 154: 699-705.
- [8] HONG G D, YUE D W, JIAN L, et al. An analytical investigation of soil disturbance due to sampling penetration[J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 9(6): 743-755.
- [9] 李峰. 深海沉积物无扰动保压取样技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 吴小建, 荣耀, 殷琨. 海底液动冲击取样器的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(10): 1418-1422.
- [11] 李小洋, 李宽, 张永勤, 等. 海洋天然气水合物保温保压取样钻具研制[J]. 钻采工艺, 2021, 44(3): 72-75.
- [12] KULLENBERG B, PETTERSSON H. A Vacuum Core-Sampler for Deep-Sea Sediments[J]. Nature (London), 1940, 145(3669): 306.
- [13] 秦华伟, 陈建桥, 王建军, 等. 静水压力驱动取样器的设计与实验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 942-945.
- [14] 高艳波, 李慧青, 柴玉萍, 等. 深海高技术发展现状及趋势[J]. 海洋技术, 2010, 29(3): 119-124.
- [15] 冯景春, 梁健臻, 张偲, 等. 深海环境生态保护装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 56-66.
- [16] 刘德顺, 金永平, 万步炎, 等. 深海矿产资源岩芯探测取样技术与装备发展历程与趋势[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3255-3265.
- [17] 李斌怀. 伯式中动能修正系数 α_k 理论值与实验验证分析[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(5): 35-39.
- [18] 潘家宝. 润滑脂热流变特性及管路减阻研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [19] 齐红媛. 液体管道内壁润湿性及流动特性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [20] 陆彬, 陈晓波, 周杰. 某试验台海水冷却管网水力分析[J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 78-80.
- [21] 何川. 流体力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2018: 228.