

深海重力活塞取样器冲击取样的有限元数值模拟分析

刘湛^{1,2}, 文泽军^{1*}, 金永平^{1,2}, 田续玲², 黄良沛^{1,2}

(1.湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室,湖南 湘潭 411201;
2.湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备技术湖南省工程实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:以深海重力活塞取样器取样管为研究对象,建立取样器冲击取样三维有限元模型,运用LS-DYNA软件对取样管下落接触海底沉积物表面的冲击取样进行动力学仿真分析.通过数值仿真,分析海底沉积物的坡度、取样管壁厚、取样器自由下落高度、取样器配重以及海底沉积物类型对深海重力活塞取样器取样管冲击应力的影响,为深海重力活塞取样器取样管的稳定性分析、评估与设计提供理论依据与指导.

关键词:深海重力活塞取样器;海底沉积物;冲击取样;LS-DYNA

中图分类号:P756 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)02-0001-06

Finite Element Simulation and Analysis of the Impact Sampling for Deep-sea Gravity Piston Sampler

Liu Zhan^{1,2}, Wen Zejun¹, Jin Yongping^{1,2}, Tian Xuling², Huang Liangpei^{1,2}

(1.Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2.Hunan Provincial Engineering Laboratory of Equipment and Technology for Marine Mineral Resources Exploration,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the influence of impact sampling to the sampler, the three-dimensional simulation model of the deep-sea gravity piston sampler were built. The finite element analysis and LS-DYNA were used to analysis the influence of sediment's angle, core pipe thickness, free fall height, sampler weight stand, sediment types. Theoretically, the results are proven to be fundamental method of stability analysis, evaluation and design for the deep-sea gravity piston sampler.

Keywords: deep-sea gravity piston sampler; sediment; impact sampling; LS-DYNA

深海重力活塞取样器是采取海底松散沉积物柱状长芯样品常用的采样工具之一,其基本原理是通过重锤触发平衡杆,利用取样器本身的重力,在距海底表层一定高度自由下落,将中空的取样管直接贯入海底沉积物中进行取样,如图1所示为深海重力活塞取样器工作原理图.深海重力活塞取样器在下放取样的过程中,常因取样管在冲击取样的过程中阻力太大而发生失稳现象,使取样管在冲击取样时发生弯曲变形甚至折断现象,无法完成正常取样工作.因此,深入研究深海重力活塞取样器取样管冲击取样力学特性,提高取样效率保证取样质量具有重要的理论意义.

收稿日期:2015-01-04

基金项目:湖南省产学研结合技术创新工程计划资助项目(2010XK6066);湖南省科技厅资助项目(2012TP4023-7)

*通信作者, E-mail: zjwen732@163.com

近年来,国内外学者围绕重力活塞取样器力学特性问题展开如下研究:李民刚^[1-2]通过将取样管作为细长杆件,对重力活塞取样器进行了取样管的压杆稳定分析;刘国营^[3]分析了不同抛落速度、攻角采样地质状态下采样器的粘性流场和阻力性能;张庆力等^[4]对取样器取样过程进行了动态分析,得出了取样器撞击海底沉积物的速度模型;Yu等^[5]分析了膨胀土的圆柱形和球形孔大变形扩张,提出岩土模型采用线性理想弹塑性体;周文等^[6]选取 Drucker-Prager 弹塑性模型作为海底沉积物的本构模型,进行了取样管与沉积物接触的有限元分析;卢博等^[7]分析了南海南部海域海底沉积物的弹性性质,求解了海底沉积物的弹性参数;秦蕴珊等^[8]调查研究了渤海岩芯沉积物的力学性指标;Skinner等^[9]基于土力学进行了重力活塞取样器贯入取样的分析与建模;秦华伟等^[10-11]采用球形孔扩张理论来模拟取样器贯入沉积物的过程,建立了取样器贯入模型;Xu等^[12]基于 ABAQUS 对重力活塞取样器的贯入过程及贯入过程中的影响因素进行了研究.综上所述,对于重力活塞取样器进行海底取样的研究主要集中在取样管贯入沉积物过程中的非线性分析及自由下落过程中取样器的动态特性分析等方面,且通常认为取样管为刚体,认为取样管不存在变形甚至失效;或者将海底沉积物视为软粘土,忽略沉积物对取样管冲击取样的作用,而对于海底各类沉积物性质及沉积物状态对取样管冲击取样的影响的研究分析尚少.在实际取样工作中,取样器的工作环境都不尽相同,因此,对于可能出现引起取样管弯曲及失效的现象,在进行动力学分析时,必须考虑取样器自身结构及工作环境等因素对取样管冲击取样的影响.

本文采用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA,对 N80 钢制取样管在自由下放情况下的跌落冲击取样过程进行数值模拟,分析海底沉积物的坡度、取样管壁厚、取样器自由下落高度、取样器配重以及海底沉积物类型对深海重力活塞取样器取样管冲击应力的影响,为深海重力活塞取样器取样管的稳定性分析、评估与设计提供理论依据与指导.

1 深海重力活塞取样器冲击取样有限元建模

1.1 问题描述

深海重力活塞取样器利用触发装置触发取样器在距海底一定距离处自由下落,通过自由下落方式获得一定速度进行冲击取样,重力活塞取样器冲击取样模型如图 2 所示.其中, D, L_1 分别为取样器铅块的直径和高度, L 为取样管长度, d 为取样管外径, b 为管壁厚, h 为取样器自由下落高度.在取样器工作取样过程中,取样器以自由落体形式下放冲击海底沉积物表面.一般地,取样管发生弯曲变形出现在取样管与沉积物表面接触冲击的瞬间,这也正是对深海重力活塞取样器冲击取样进行冲击动力学数值模拟分析的原因之一.

取样器下落冲击取样发生时,取样管上的应力大小与分布会发生急剧变化,取样器的自身结构以及工作环境都将影响取样管上的应力大小及分布.本文将主要关注在不同取样器配重、取样器下放高度、取样管壁厚、沉积物坡度以及不同沉积物类型的情况下,取样管冲击取样时的应力应变.

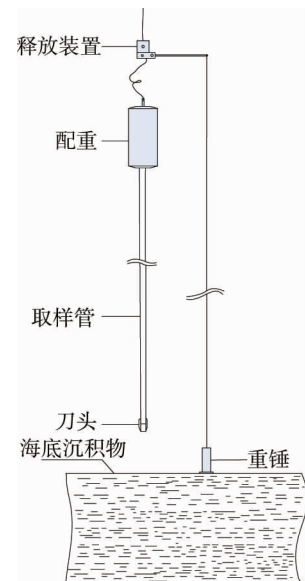


图 1 深海重力活塞取样器工作原理

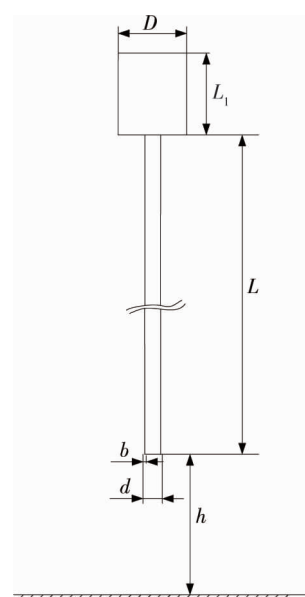


图 2 重力活塞取样器冲击取样模型

1.2 确定变量

深海重力活塞取样器是依靠其自身的重力,在下落过程中,由重力势能转变为动能完成冲击取样的,所以取样器的配重影响着取样管的贯入深度,同时配重的大小也影响着取样管在冲击取样时的应力大小。配重一般选取密度比较大的铅块,因此通过保持配重的直径 D 不变,改变配重高度 L_1 来控制配重大小。

取样器自由下落高度 h 影响着取样器下落末速度 v ,也即冲击取样初速度 v 。当模拟下落高度为 h 时,冲击取样初速度为

$$v = \sqrt{2\left(\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh - \frac{1}{2}\rho u_\infty^2 A^2 C_D h - f_{\text{浮}} h\right)} / m. \quad (1)$$

式中: m 为取样器质量; v_0 为下放初速度; h 为下方高度; ρ 为海水密度; u_∞ 为势流速度; A 为取样器最大截面积; C_D 为取样器阻力系数; $f_{\text{浮}}$ 为取样器所受浮力。

在冲击取样模拟中,为了缩短计算时间,假设取样器以冲击取样初速度 v 在距离沉积物表面 1 mm 处开始下落进行计算。

海底沉积物的性质同样影响取样管冲击取样时取样管上应力的分布。本文根据渤海西部海底沉积物与南海南部海域海底沉积物的性质模拟取样管冲击海底沉积物,分别选取淤泥、粘土、亚粘土、亚砂土、沙土进行分析。

本文还考虑了取样管壁厚以及海底沉积物的坡度对取样管应力大小及分布的影响规律。

1.3 冲击取样有限元模型

根据深海重力活塞取样器的结构参数建立取样器冲击取样的有限元模型,取样管长 $L=30$ m,壁厚 $b=7$ mm,外径 $d=127$ mm,取样器配重 $G=18\ 000$ N,直径 $D=700$ mm,沉积物坡度 $\theta=0^\circ$ 。沉积物本构模型选用 DP 弹塑性模型,沉积物宽度 1.5 m,高 1 m。海底沉积物上表面为自由边界,底部施加全约束,其余 4 个方向施加水平约束。通过 hypermesh 划分网格,利用 LS-DYNA 进行计算求解。图 3 所示为冲击取样的有限元模型,土体网格数 25 000,节点数 26 010,取样管网格数 39 600,节点数 79 200。

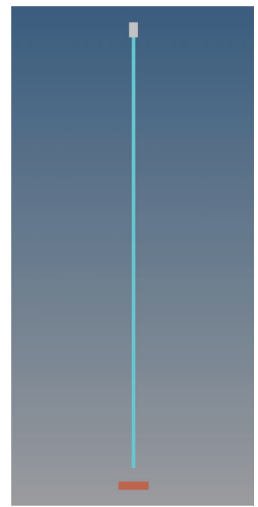


图3 冲击取样有限元模型

2 取样器冲击取样数值模拟分析

2.1 沉积物坡度对取样管应力的影响

取样器在一定高度垂直自由下落,通过冲击海底沉积物进行取样作业,本文利用沉积物坡度表示海底工况,沉积物坡度是指取样器冲击取样时与取样管接触部分沉积物的坡度。选取沉积物表面与水平方向平行开始,每旋转 10° 进行一次试验,直到沉积物表面与水平方向成 40° 角,由于取样器结构具有对称性,因此朝一个方向旋转即可,从 0° 旋转至 40° ,进行 5 次试验,观察其接触瞬时最大等效应力分布情况。图 4~图 8 分别为沉积物坡度为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时取样管接触海底沉积物表面瞬时取样管接触部分的等效应力云图,图中 Fringe Levels 表示应力色阶。图 9 为海底沉积物坡度与受下落冲击取样最大等效应力关系,2 条曲线分别表示取样管刀头处有锥度与无锥度时的情形。可以看出:沉积物坡度不同,下落时冲击沉积物表面的接触点也不同;虽然其等效应力均是出现在取样管与沉积物表面的接触点上,但不同沉积物坡度,取样管受到的等效应力差异较大。

由图 9 可知:刀头处无锥度或圆角时,随着海底沉积物坡度的增加,取样管的最大等效应力明显上升。当坡度为 0° 时,取样管的最大等效应力为 10.3 MPa;当坡度为 20° 时,最大等效应力为 32.4 MPa;而坡度为 40° 时,最大等效应力达到 75 MPa,是坡度为 0° 时的 7 倍。由此可知:

1) 在取样管设计中,必须充分考虑海底沉积物坡度的多样性和不确定性,不能仅仅考虑垂向冲击取样时的稳定性,否则在冲击取样时取样管就有可能失效;

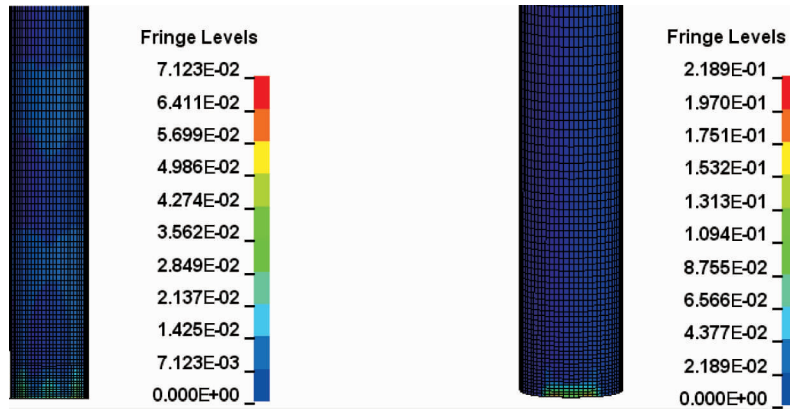


图 4 坡角 $\theta=0^\circ$ 时冲击取样的等效应力

图 5 坡角 $\theta=10^\circ$ 时冲击取样的等效应力

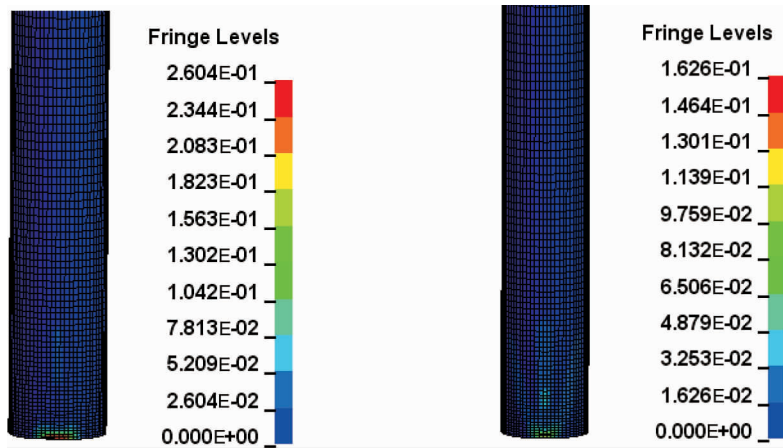


图 6 坡角 $\theta=20^\circ$ 时冲击取样的等效应力

图 7 坡角 $\theta=30^\circ$ 时冲击取样的等效应力

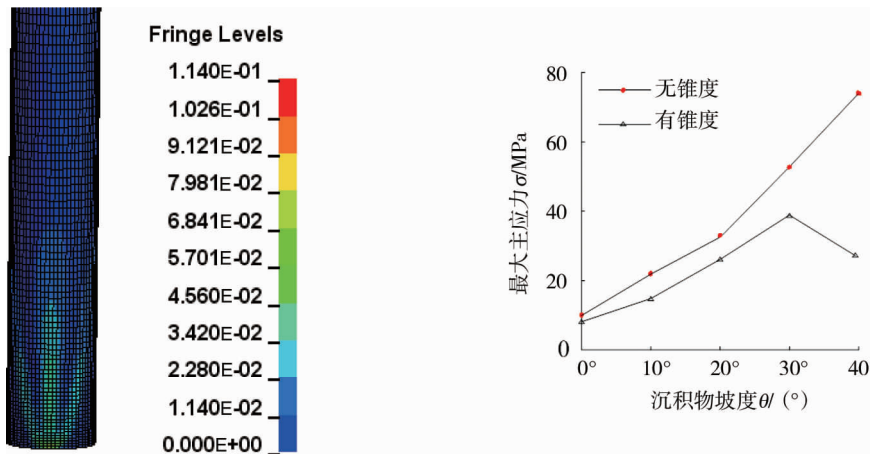


图 8 坡角 $\theta=40^\circ$ 时冲击取样的等效应力

图 9 沉积物坡度与取样管最大等效应力关系曲线

2) 取样管下端是冲击取样时与沉积物的接触点, 容易引起应力集中, 在结构设计时应采取过度圆角或设计一定的锥度等措施来增加取样器在冲击取样时的稳定性。

如图 9 所示, 在取样管刀头处设计一定锥度时, 取样器进行冲击取样作业时, 取样管中最大等效应力显著较小, 当坡度为 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时, 其最大等效应力依次为 8.69, 14.70, 27.10, 39.70, 27.50 MPa。刀头锥度使得冲击取样时刀头与沉积物接触面积明显增大, 因此有效减小了应力集中, 取样管中最大等效应力也显著降低, 尤其当坡度为 40° 时最为明显。故在结构设计时应采取过度圆角或设计一定的锥度等措施来增加取样器在冲击取样时的稳定性是可行的, 同

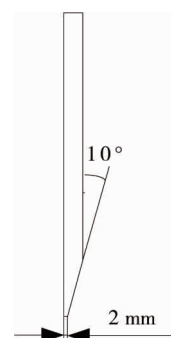


图 10 有锥度取样管截面

时可降低对海底沉积物的扰动.图 10 所示为设计有锥度的取样管截面图.

2.2 下落高度对取样管应力的影响

以取样管壁厚 $b=7\text{ mm}$,配重为 $18\ 000\text{ N}$,沉积物为粘土且坡度为 0° 时,改变取样器下放高度为 $0.5\sim 2.5\text{ m}$,将下落高度换算成冲击速度.观察取样管接触沉积物时等效应力的大小及分布,得到如图 11 所示的下落高度与取样管冲击取样时的最大等效应力关系曲线.

从图 11 可以看出:随着下落高度的增大,取样管冲击沉积物表面时速度增大,取样管受到的最大等效应力增大.在下落高度 $h=0.5\text{ m}$ 时,取样管最大等效应力为 2.62 MPa ,而当 $h=2.5\text{ m}$ 时,其最大等效应力为 20.60 MPa ,增加将近 8 倍.这表明在取样管的结构设计中必须考虑取样器在实际使用过程中下落高度等因素对取样管冲击失效的影响.

2.3 取样管壁厚对取样管应力的影响

以下落高度 $h=1\text{ m}$,配重为 $18\ 000\text{ N}$,沉积物为粘土且坡度为 0° ,改变取样管壁厚从 5 mm 增加至 9 mm 进行仿真分析,观察取样管接触沉积物表面时最大等效应力的变化,得到取样管壁厚与取样管冲击沉积物表面时的最大等效应力关系曲线如图 12 所示.

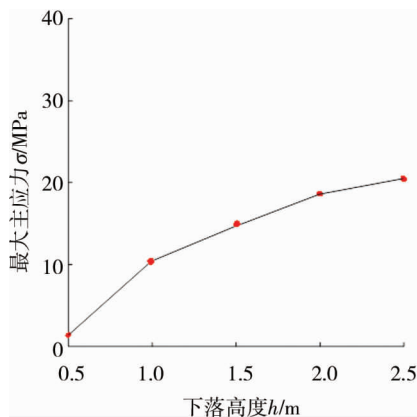


图 11 下落高度与取样管最大等效应力关系曲线

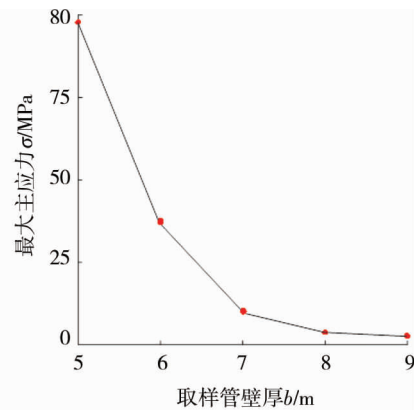


图 12 取样管壁厚与取样管最大等效应力关系曲线

从图 12 可以看出:随着取样管壁厚的增大,取样管冲击沉积物的等效应力随之减小.取样管壁厚从 5 mm 增至 7 mm 时,其相应等效应力下降明显;而当壁厚从 7 mm 增至 9 mm 时,相应等效应力变化很小.因此在取样管的设计上不能盲目增大壁厚;同时壁厚的增大也会引起取样器贯入阻力的增大.

2.4 取样器配重对取样管应力的影响

重力活塞取样器依靠自身重力驱动完成冲击贯入取样,因此通过增加配重来增大取样器贯入取样的能量.以下落高度 $h=1\text{ m}$,壁厚 $b=7\text{ mm}$,沉积物为粘土且坡度为 0° ,改变配重重量,配重从 $12\ 000\text{ N}$ 增大到 $20\ 000\text{ N}$ 进行仿真分析,得出取样管最大等效应力的变化.图 13 所示为不同配重下,取样管接触沉积物表面时的最大等效应力变化规律.

从图 13 可以看出:取样器配重的增大,对于取样管的最大等效应力影响很小,当配重从 $12\ 000\text{ N}$ 增加至 $20\ 000\text{ N}$ 时,取样管最大等效应力只增大了约 3% ,由此可以看出配重重量对于取样管的稳定性影响不明显,由于重力活塞取样器依靠自身重力驱动,故可适当增大配重重量.

2.5 海底沉积物性质对取样器应力的影响

重力活塞取样器主要用于采取软质海底沉积物,但由于海底环境的不确定性,沉积物类型可能是粘土,也可能是砂土,甚至硬岩.因此以取样器下放高度 $h=1\text{ m}$,壁厚 $b=7\text{ mm}$,配重为 $18\ 000\text{ N}$ 且沉积物坡度为 0° 时,分别用淤泥、粘土、亚粘土、亚砂土以及砂土模拟海底沉积物进行仿真分析,得出取样管冲击取样不同性质沉积物时最大等效应力的变化.图 14 为取样管冲击接触不同类型沉积物表面时最大等效应力变化曲线.

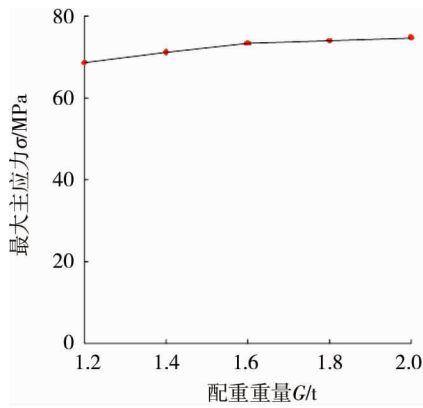


图 13 取样器配重与取样管最大等效应力关系曲线

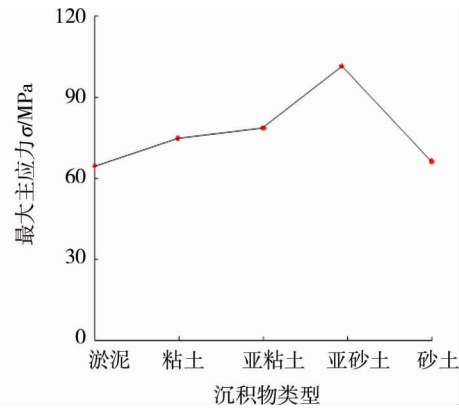


图 14 沉积物类型与取样管最大等效应力关系曲线

从图 14 可以看出:不同沉积物类型由于其力学性质的不同,对于取样管冲击取样时的最大等效应力将产生影响.当沉积物为淤泥、粘土、亚粘土时,取样管最大等效应力依次有所增大;当沉积物为亚砂土时,取样管应力增大明显,约增大 35%.所以,在取样管结构设计中还必须要考虑取样器所采取沉积物的类型,以保证取样管在冲击取样时的稳定性.

3 结论

1) 沉积物坡度对于取样管冲击取样最大等效应力影响显著,随着沉积物坡度的增大,取样管最大等效应力成倍增大,因此在取样管设计时需考虑沉积物状态的多样性,可通过改变取样管底部形状增强取样管冲击稳定性,同时应该考虑不同沉积物类型对取样管的冲击稳定性的影响.

2) 取样管的最大等效应力随取样器下落高度的增大而增大,因为取样高度的增加,冲击速度增大,因此取样管最大等效应力明显增大.为保证取样管冲击取样稳定性,必须根据所需下落高度进行取样管强度设计.

3) 在取样器自身结构上,取样管壁厚对于取样管冲击取样时最大等效应力也有显著影响,取样管冲击取样最大等效应力随壁厚的增大而明显减小,但在 7 mm 以后变化趋于平稳.在取样器结构设计中,应综合考虑各个因素,以保证取样管冲击取样的稳定性.

参考文献:

- [1] 李民刚.40 米重力活塞取样器设计及仿真[D].青岛:青岛理工大学,2012.
- [2] 李民刚,王廷和,程振波.深海重力活塞取样器贯入深度影响因素分析[J].中国海洋大学学报,2013,43(7):94-98.
- [3] 刘国营.基于 ANSYS 和 FLUENT 的海底沉积物原位保真采样系统性能分析[D].青岛:中国海洋大学,2009.
- [4] 张庆力,刘贵杰.新型海底沉积物采样器结构设计及采样过程动态分析[J].海洋技术,2009,28(4):20-23.
- [5] Yu H S, Housby G T. Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis[J]. Geotechnique, 1991, 41(2): 173-183.
- [6] 周文,秦华伟,陈鹰.海底沉积物取样扰动的有限元研究[J].海洋科学,2009,1(33):89-95.
- [7] 卢博,李赶先,张福生,等.南海南部海域海底沉积物弹性形制及其分布[J].热带海洋学报,2005,24(3):47-54.
- [8] 秦蕴珊,徐善民,李凡,等.渤海西部海底沉积物土力学性质的研究[J].海洋与湖沼,1983,14(4):305-314.
- [9] Skinner L C, McCave I N. Analysis and modelling of gravity-and piston coring based on soil mechanics[J]. Marine Geology, 2003, 199(1):181-204.
- [10] 秦华伟,陈鹰,顾临怡.海底沉积物保真采样技术研究进展[J].热带海洋学报,2009,28(4):42-48.
- [11] 秦华伟,朱敬如,王建军.静水压力取样器冲击头冲击速度的理论与试验研究[J].海洋工程,2013,31(2):68-73.
- [12] Xu Jian, Meng Guangyao. Analysis and research on the gravity piston corer theory based on Abaqus[J]. Hydromechanics Engineering, 2013, 41(24):87-92.