

海底沉积物静水压力驱动取样器的 内部流场数值模拟研究^{*}

魏双丰, 秦华伟^{*}, 王建军

(杭州电子科技大学 机械电子工程研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要:给出了海底沉积物静水压力驱动取样器驱动单元的基本结构。建立了取样器驱动单元内部流道的流动实体,并对其进行网格划分。利用 CFD 软件对驱动单元内部流场进行了数值模拟计算,得到了该内部流场的速度和压力分布。研究结果表明取样器驱动单元排水口的形状对取样器排水流量的影响较大,通过改变排水口形状,可以提高取样器取样效率。模拟计算结果对优化设计取样器驱动单元内部结构,提高取样器取样效率具有指导意义。

关键词:海底沉积物;取样器;静水压力;流场;数值模拟

中图分类号:TH122;TH123;P756.5

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)01-0029-04

Numerical simulation on flow field inside the drive unit of seafloor sediment hydrostatic corer

WEI Shuang-feng, QIN Hua-wei, WANG Jian-jun

(The Institute of Mechatronic Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The basic structure of a drive unit of seafloor sediment hydrostatic corer was given. A model of the flow entities inside the hydrostatic corer drive unit was proposed and a mesh was gained. Based on CFD software, the flow field inside the drive unit was numerically simulated and its velocity and pressure distribution were obtained. The results indicate that the shape of the drive unit outlet has significant effects on the drainage flow, change the drive unit shape can improve the sampling efficiency of samplers, and it can be a guide for internal structure optimum designing of a drive unit and improving the efficiency of the hydrostatic corer sampling.

Key words: marine sediment; corer; hydrostatic; flow field; numerical simulation

0 引 言

对于在海底一定深度作业的设备而言,海洋静水压力能是一个可供选择的能量来源。海底沉积物静水压力驱动取样器就是利用了海洋静水压力能,以重力驱动和静水压力驱动两种方式插入沉积物,不需要外界能量供给。与目前常用的重力取样器和振动取样器^[1-2]相比,静水压力驱动取样器^[3-6]可以采集比重力取样器更硬的海底沉积物,同时解决了振动取样器在

深海中能量供给麻烦的问题。目前,还未见国内其他研究机构对静水压力驱动取样器的研究报道。

静水压力驱动取样器的基本原理是利用海水和取样器低压腔之间的压差来驱动取样器内部驱动单元工作:进水口打开,排水口关闭,高压海水顶起取样器冲击单元,将海洋静水压力能转化为冲击单元的重力势能;排水口打开,进水口关闭,取样器冲击单元下落冲击取样管,冲击单元的重力势能转化为冲击单元动能,使得取样管插入沉积物一定深度;上述动作重复进行,直到取样器低压腔压力与外界海水压力平衡。

收稿日期:2010-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40806043)

作者简介:魏双丰(1985-),男,湖北随州人,主要从事海洋机电装备技术方面的研究。E-mail: weishuangfeng1985@163.com

通信联系人:秦华伟,男,副教授,硕士生导师。E-mail: qinhw@hdu.edu.cn

在取样器自重及冲击单元被抬升的高度一定的情况下,为了提高取样器取样效率,让取样管获得单次冲击的最大取样深度,冲击单元在依靠自重下落冲击取样管时,必须获取最大的冲击动能。根据动能公式 $E = \frac{1}{2}mv^2$,就需要使冲击单元获取最大的冲击末速度。因此,在密封圈阻力和海水对取样器浮力一定的前提下,必须使得冲击单元在下落过程中所受到的排水阻力最小,即必须使得驱动单元及活塞缸的排水流量最大。

本研究主要探讨海底沉积物静水压力驱动取样器的内部流场数值模拟问题。

1 数值模拟计算模型建立

1.1 静水压力驱动取样器驱动单元基本结构

静水压力驱动取样器驱动单元主要包括配流阀体、配流阀芯和活塞组件,如图 1 所示。图 1(a)为配水阀芯打开进水口/关闭排水口的状态,高压海水进入驱动单元将取样器冲击单元顶起;图 1(b)为配水阀芯打开排水口/关闭进水口的状态,取样器冲击单元开始下落冲击取样管。驱动单元工作机理如下:利用高压海水与取样器低压腔之间的压差驱动配流装置和活塞组件;配流装置与活塞组件之间既相互驱动,又相互制约;二者的位置关系决定了配流阀芯的位置并以此决定活塞腔的压力变化,活塞腔的压力变化又反过来改变二者的相互位置关系;从而使得取样器的冲击头在深海静水压力的激励下上下反复冲击取样管,进而获

取沉积物。因此,配流装置和活塞组件是保证静水压力驱动取样器高效取样的关键部件。

1.2 流动控制方程

本项目研究的取样器的驱动单元内部流动是三维单相流动,因为水的压缩量非常小,故可以将驱动单元内部的流动看作不可压缩流动;并且流体介质与取样器内部流道之间的热交换对流动的影响也可被忽略。基本的控制方程为质量守恒方程和动量守恒方程^[7-8]:

(1) 质量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w —3 个坐标方向的湍流时均速度。

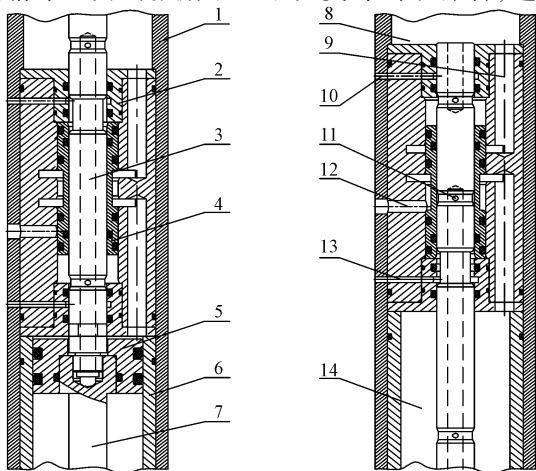
(2) 动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}w)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \\ \left[-\frac{\partial \rho u'v'}{\partial x} - \frac{\partial \rho v'v'}{\partial y} - \frac{\partial \rho w'w'}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ —流体密度, p —流体压力, μ —流体动力粘度, $\mathbf{u}$ —流体速度矢量,其速度分量分别为 u 、 v 、 w ,而 u' 、 v' 、 w' 为各脉动速度分量。

1.3 取样器驱动单元内部流动实体的几何模型

静水压力驱动取样器驱动单元的几何模型由 Pro/Engineer 软件完成,利用已完成的几何模型,建立流动实体。模型的基本尺寸为:进水口直径 10 mm,排水口直径 8 mm,配水阀芯凹槽深度 3 mm,取样器冲击单元质量 160 kg。该模型利用 Gridgen 软件生成结构性网格进行计算,为了获得更好的求解精度,在流动实体的壁面对网格进行了加密。如图 2 所示为驱动单元排水流道计算区域网格。



(a) 配水阀芯打开进水口/关闭排水口

(b) 配水阀芯打开排水口/关闭进水口

图 1 静水压力驱动取样器驱动单元基本结构示意图

1—耐压筒;2—配水阀端盖;3—上活塞杆;4—配水阀芯;5—活塞;6—支撑筒;7—下活塞杆;8—高压腔;9—高压海水通道;10,13—低压腔连通孔;11—通水孔;12—排水口;14—活塞腔

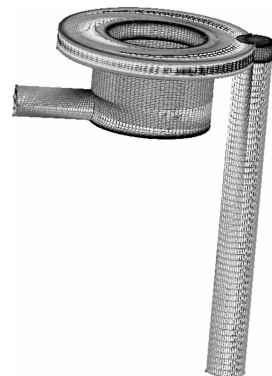


图 2 取样器驱动单元排水流道流体计算网格

在模拟计算过程当中,对模型做如下假定:

(1) 满足 1.2 所述的流动控制条件及基本的流动

控制方程。

(2) 以水作为流动介质,其密度为 998.2 kg/m^3 ,动力粘度为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。驱动单元排水孔流道出口截面处的流动过程已充分发展。

(3) 计算采用目前使用最为广泛的 $k-\varepsilon$ 湍流计算模型^[9],并在近壁区对网格进行加密。对于 k 及 ε 采用如下公式进行估算:

$$k = \frac{3}{2} (\overline{u_{\text{ref}}})^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{0.07L} \quad (4)$$

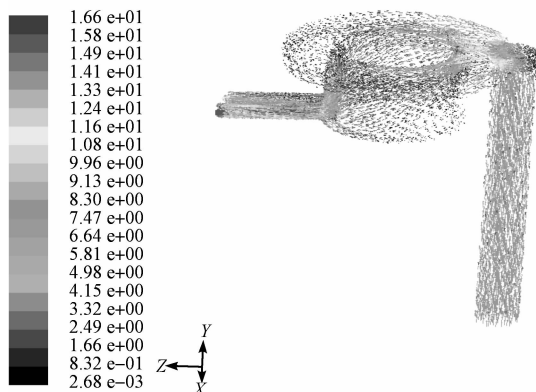
式中: $\overline{u_{\text{ref}}}$ —进口处的平均速度, L —进口管径特征长度, I —湍流强度,取 $C_{\mu}=0.09$ 。

(4) 边界条件组合采用压力进口和压力出口,进口压力值设为 0.3 MPa ,出口压力为 1 个大气压。数值计算方法采用有限元体积法中常用的 SMPLE^[10]算法求解离散方程组。

2 模拟结果及分析

2.1 取样器驱动单元内部流场流速分布

在上节假定的前提下,设定排水流道水流初始速度为 0 ,模拟计算了取样器在一个工作周期内,驱动单元内部排水流道速度,如图 3 所示。



(c) 排水流道速度矢量分布图

图 3 驱动单元内部排水流道速度图

由排水流道速度等值线图 3(a) 和图 3(b) 可以看出,取样器驱动单元内部排水流道的流速分布情况:①在排水流道的两处拐角处,流速均发生了变化;②排水口附近,流速变化更为明显,最大流速就出现在拐角处。由排水流道速度矢量图 3(c) 可以看出,排水流道排水速度的快慢和方向变化:①在速度变化明显的两处拐角,排水口附近出现了明显的回流现象,并且回流范围较大;②另外一处拐角回流并不明显。

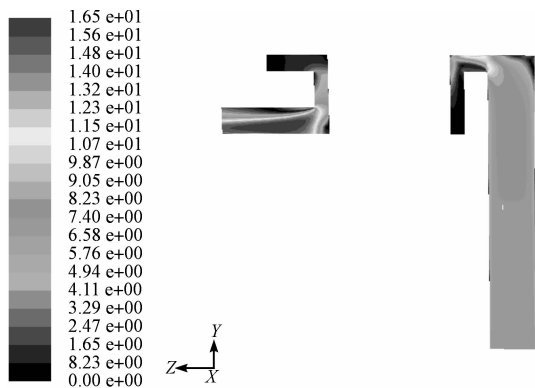
2.2 取样器驱动单元内部流场压力分布

在上节假定的前提下,将进口压力设为 0.3 MPa ,并模拟计算了取样器在一个工作周期内,驱动单元内部排水流道压力,如图 4 所示。

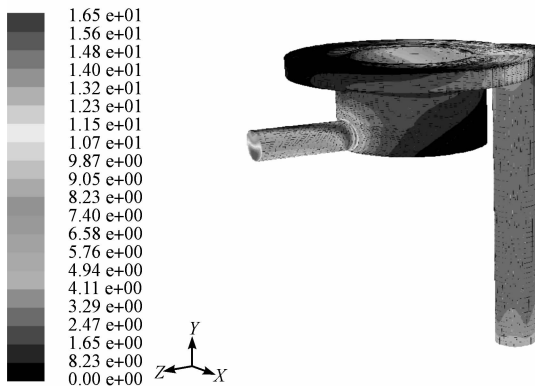
由排水流道压力等值线图 4(a) 和 4(b) 可以看出,取样器驱动单元在 0.3 MPa 的初始压力作用下,各个阶段的压力大小和压力损失最大的部位:①在排水流道的两处拐角处,压力均发生了明显变化;②排水口附近,压力变化更为明显和复杂,最低压力就出现在此处。

2.3 结果分析

通过图 3 和图 4 的对比分析可以看出:①在取样器驱动单元排水流道的两处拐角,压力和速度都出现了较大的变化,速度增大,压力减小;②两处拐角相比,在排水口附近的改变更为明显,压力和速度变化也更为复杂:最大流速和最小压力值都出现在这一部位,并有着明显的对应关系;③在排水口拐角出现最小压力值的区域,存在明显并且较大范围的回流现象,这将直接影响到驱动单元的排水流量。由此表明:①排水口对取样器驱动单元排水流量的影响效果明显;②在排水口直径一定的前提下,改变排水口的形状,有望获得更大的排水流量,提高取样器单次冲击获取沉积物的深度和取样器效率。



(a) 排水流道速度切面等值线图



(b) 排水流道速度等值线图

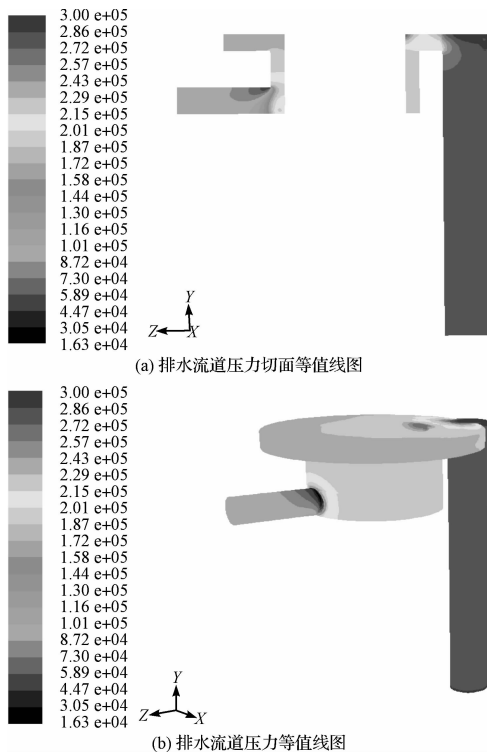


图 4 驱动单元内部排水流道压力图

2.4 取样器排水口形状对排水流量的影响

根据上节分析结果,通过改变排水口形状,有望提高取样器排水流量。

仅在取样器排水口拐角处倒角,并在数值模拟设置条件,边界条件都相同的情况下,通过仿真计算得到排水口改变形状后压力图如图 5 所示。

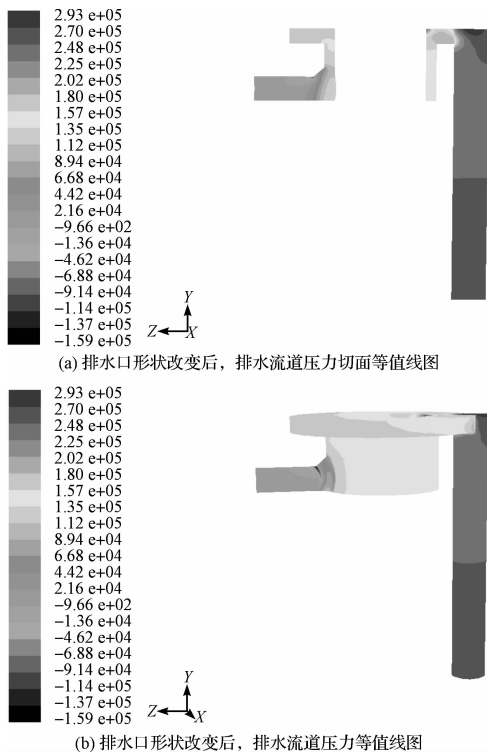


图 5 排水口形状改变后压力图

通过对比分析图 4 和图 5 可以看出:①改变排水口形状以后,压力分布的更为均衡,尤其是排水口拐角处的压力改变变小;②在图 4 中出现的较大面积的回流在图 5 中得到有效的改变,回流区域变得很小;③直接由质量流量报告得到排水流量的变化,图 4 中的质量流量值为 0.630 kg/s ,图 5 质量流量值为 0.734 kg/s ,排水流量提高 16.5% 。由此表明:改变排水口形状,可以有效提高排水流量,即能够有效地提高取样器取样效率。

3 结束语

本研究建立了取样器驱动单元内部流道的流动实体并进行网格划分;通过 CFD 软件对驱动单元内部流场进行了数值模拟计算,得到了该流场的速度和压力分布。结果表明:在取样器排水口直径一定的情况下,取样器驱动单元排水口的形状对取样器排水流量的影响显著;改变排水口的形状后,通过对比仿真分析获得更大的排水流量。该结论表明,改变排水口形状,可以提高取样器单次冲击获取沉积物的深度和取样器效率。

这些数值模拟计算结果对优化设计取样器驱动单元内部结构,提高取样器取样效率具有指导意义。

参考文献 (References):

- [1] LUNNE T, LONG M. Review of long seabed samplers and criteria for new sampler design [J]. *Marine Geology*, 2006, 226(1-2): 145-165.
- [2] WEAVER P P E, SCHULTHEISS P J. Current methods for obtaining, logging and splitting marine sediment cores [J]. *Marrine Geophysical Researches*, 1990, 12(1-2): 85-100.
- [3] KRISTOFFERSEN Y, LIEN E, FESTERVOLL K, et al. The hydrostatic corer selcore-a tool for sediment sampling and geophysical site characterization [J]. *Marine Geology*, 2006, 229(1-2): 101-112.
- [4] HANS P, BA-RJE K. A vacuum core-sampler for deep-sea sediments [J]. *Nature*, 1940, 145(2): 306-306.
- [5] SELWYN S, MCCOY F W. The hydrostatic motor: utilization of hydrostatic pressure differentials in the deep sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 1981, 1(3-4): 233-236.
- [6] BROOKE J, GILBERT R L G. The development of the bedford institute deep-sea drill [J]. *Deep-Sea Research*, 1968, 15(4): 483-490.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [8] 高广德, 操波. 水压锥阀三维流场的数值模拟 [J]. *机床与液压*, 2008, 36(5): 52-54.
- [9] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\varepsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用 [J]. *热能工程*, 2007, 36(4): 13-15.
- [10] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008.

[编辑:柴福莉]