

# 多金属结核采矿对海底沉积物扰动的数值分析

齐瀚琛,王英

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

**摘要:**通过分析多金属结核采矿系统和结核海底赋存特征,发现多金属结核采矿对海洋环境造成的所有扰动中,采集头和集矿机产生的扰动最直接、影响最大。针对海底沉积物被扰动、沉积物颗粒迁移和扩散过程进行了数值分析。利用 Fluent 软件 SIMPLE 算法仿真沉积物颗粒受扰动后的运动,应用 DPM 模型追踪扰动导致的颗粒运动,计算了沉积物颗粒扩散浓度的变化。仿真结果表明:伴随着多金属结核采矿,沉积物被扰动到海洋底层水中,先在扰动源后方形成云团,之后在扰动源前方形成云团,随着云团的扩散、融合,云团个数减少,云团内的颗粒浓度降低,30 min 后浓度变化趋于稳定。由此可以了解沉积物被扰动后对海底环境的影响,为后续扰动监测提供监测参数选取和传感器时间、空间布设依据。

**关键词:**多金属结核采矿;采矿扰动;数值模拟;海底环境监测

**中图分类号:** TH766

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2017) 04-0533-05

## 0 引言

随着深海多金属结核勘查和开发的日益频繁,深海采矿引起的环境问题也引起了国际社会的广泛关注,何宗玉等<sup>[1-2]</sup>跟踪了国际上关于深海采矿与环境保护规章制度的进展和各先驱国家的主张,认为按照《联合国海洋法公约》,先驱投资者有义务和责任对深海采矿活动可能造成的环境影响进行调查和研究,在投入开采前,需要先行试验和评估采矿对海底环境造成的影响。

王春生等<sup>[3]</sup>综合分析了 2003 年以前先进国家的深海采矿对环境影响的研究程度,发现自 20 世纪 70 年代起,美国财团开始开展海底采矿环境影响试验,此后主要由美国、德国为主的发达国家开展了多项扰动测试试验。自 1991 年起,多个国家和国际组织采用扰动器陆续进行了底层影响试验(BIE 实验),研究了人工扰动海底表层沉积物对海底环境的影响。Thiel 等<sup>[4]</sup>在 1988—1993 年开展了大尺度深海环境影响研究,Schriever 等<sup>[5]</sup>在 1995—1998 年,

通过监测大尺度广阔海底区扰动后底栖生物的重建,评估采矿对环境的影响。Amos 等<sup>[6]</sup>的研究主要集中在沉积物与周围海水混合后离海底 5 m 处的排放效应,来评估对环境造成的影响。

综上所述,海底沉积物和海水环境的改变作为采矿扰动的直接响应,其研究主要集中在基于时间和空间小尺度范围内物理、化学环境的监测,以及大尺度范围内观测底栖生物的重建及环境评估,而对于采矿扰动这一直接影响源,较少有全面的理论分析及研究。德国学者 Oebius 等<sup>[7]</sup>根据 20 世纪 90 年代在秘鲁海盆的航次调查,总结了多种采矿试验及环境响应,通过实验室模拟采矿系统的动作,估算了采矿造成的海底沉积物迁移和扩散,得到不同粒径、不同浓度的颗粒在海底的沉降速度,以此评估扰动对海底环境影响的空间和时间尺度。韩国学者 Choi 等<sup>[8]</sup>通过其在太平洋开辟区的调查活动,分析了采矿过程,估算了扰动造成的海底沉积物的再分布。

我国已经成为联合国国际海底筹委会登记的第

收稿日期:2017-01-24 网络出版日期:2017-05-24

基金项目:中国大洋协会课题(DY125-14-T-03)

作者简介:齐瀚琛(1990-),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要从事数值模拟及检测设备研究。

通信作者:王英,E-mail:wangying@zstu.edu.cn

五个“先驱投资者”，伴随着深海采矿系统的研究，应及时开展深海采矿造成的潜在环境影响研究。本文将采矿扰动因素参数化，利用 Fluent 软件模拟了海底沉积物的迁移、扩散、再沉积的过程。

## 1 海底多金属结核采矿对环境的扰动分析

多金属结核采矿系统由集矿机、中间仓和采矿船组成，集矿机按预定回采路径在海底矿区行走，采集到的结核通过输送管线送到中间仓，中间仓采集容量达到预设后提升至水面采矿船，采矿船拖曳中间仓和输送管线系统随集矿机行进。

采矿系统对海底环境的影响主要源于集矿机采集头采集结核、集矿机行走、采集后输送到中间仓等动作对近海底环境的影响，这些影响包括沉积物迁移、水化学环境的改变和生物环境遭到破坏等。其中采集头的工作处在整个采矿系统的最前端，造成的环境影响最为直接，也最为明显。其工作方式为：利用喷射流将多金属结核与沉积物分离，将结核和其所带的再悬浮物一并提升到采集室，由输送系统负责将水、沉积物、结核混合物从采集室输送到中间仓。中国开辟区结核赋存通常上部是半流体状态，由水、沉积物、多金属结核组成；下部是固态，由结核、沉积物组成。<sup>[9]</sup>采集头的工作方式是水力采集方式，工作时喷射流切割、穿过半流体层到达固态结核层，将结核和半流体物质冲入采集系统。由于结核和半流体物质密度的差异，采集头的喷射流会使半流体层被从结核上冲掉后成为悬浮物，在采矿机附近扩散，从而导致海底环境的变化。采矿机的移动会造成海底流场的改变，采矿机附近的沉积物颗粒将受到这个弱流场的改变，使悬浮状态发生改变。

本文将集矿机的行进和采集头的工作作为海底环境扰动源，仿真采矿扰动导致的海底沉积物的分布和扩散，对扰动导致的环境响应在时间和空间上进行数值仿真，探讨采矿扰动导致的海底环境变化。

## 2 采矿扰动沉积物悬浮扩散数值模型及求解

对采矿扰动及其导致的沉积物悬浮和扩散过程进行分析，选择影响最为明显的采矿头对环境的扰动进行仿真，根据工作过程和扰动响应建立仿真模型，根据集矿机的外形尺寸如集矿机的长度、采矿头的有效采集宽度、集矿机和中间仓的构建高度、采矿系统工作方式和集矿机的行进速度等参数，建立仿

真空间，设置模型参数，利用 Fluent 软件实现数值仿真。

### 2.1 仿真模型的建立

因为海底沉积物被扰动后扩散到海水中，液相为海水，固相为沉积物颗粒。液相为连续相不可压缩液态水，本文用 Navier-Stokes 方程和动量方程求解扰动后的流场<sup>[10-11]</sup>。

固相为离散相，描述沉积物颗粒的悬浮和扩散，其运动轨迹用颗粒运动方程求解，本文模拟了单机、单方向行进时的采矿情况，考虑颗粒在固液场中受采矿行进方向的扰动力、绕流阻力和重力的影响，运动方程为：

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{D(u-u_p)} + F_x + m_p g \quad (1)$$

其中： $m_p$  为颗粒质量， $u_p$  为颗粒速度， $F_{D(u-u_p)}$  为颗粒的单位质量所受到的曳力， $u$  为流体相速度， $F_x$  为  $x$  方向上的扰动力。

由于沉积物颗粒从结核分离、悬浮、扩散到海水中之后浓度很低，所以可以忽略颗粒之间的相互作用和颗粒的体积分数对连续相的影响<sup>[12]</sup>，采用 DPM 模型来模拟沉积物颗粒受扰动后的颗粒扩散，选取了 SIMPLE 算法进行仿真计算。

颗粒运动轨迹能直观地反映采矿扰动导致的沉积物颗粒扩散，本文采用计算颗粒浓度衡量其扩散程度。取颗粒运动轨迹的最大边界作为整个颗粒扩散空间，求其体积积分，获得颗粒扩散范围，因为单次扰动沉积物颗粒数已经设定，由此可以仿真沉积物扩散空间内的颗粒浓度，用颗粒浓度的变化来反应海水环境的改变。颗粒浓度求解公式为：

$$\phi = \frac{\int \phi \rho |\vec{n} \cdot dA|}{\int \rho |\vec{n} \cdot dA|} \quad (2)$$

其中： $\phi$  为颗粒浓度， $\rho$  为颗粒密度， $A$  为单位网格面积， $n$  为颗粒踪迹所至最大表面所对应的网格面数。

### 2.2 模拟参数的选择

采矿造成的沉积物扰动仿真包括时间和空间上的模拟，以计算域来模拟沉积物扩散的空间范围。把海底集矿机和采集头作为仿真计算的海底扰动源，根据前述采矿机的尺寸，扰动源高度等效为 50 m，宽度等效为 20 m，扰动源按长度方向行进，计算域的参数选择为：长为 600 m，宽为 20 m，高为 400 m，设置扰动源距离边界左侧为 250 m，距离边界右侧为 350 m，运行速度选择为 3 m/s。

考虑到中国多金属结核开辟区水深达 5000 多

米,海底地形较为平缓,沉积物多为极细的硅泥,被扰动之后的运动过程可以描述为扬起—分散—再聚集。因为沉积物颗粒并非规则的圆形,所以本文选择等效粒径描述沉积物颗粒,根据中国结核区沉积物主要特性,取其等效粒径为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m}$ <sup>[13]</sup>,颗粒的最小粒径设置为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,最大粒径设置为 $1 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,平均粒径设置为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,密度设置为 $2500 \text{ kg/m}^3$ 。粒子的分布为随机分布,受重力影响,方向为竖直向下。

粒子被扰动时一次性释放的粒子为7800颗,释放区域为距离左侧200 m,距离右侧200 m的表面,并且不会持续释放粒子,只在第一个时间步释放,仿真计算这些粒子随时间扩散的历程。

本文计算域边界条件设定为:因为采矿系统工作于海底,所以计算域底面设为固壁,上面、左面和右面设为对称边界;将计算域左端设为入流边界,计算域右端为出口边界;依据海底水流速度,设计计算域入口水流速度设为 $3 \text{ cm/s}$ ,颗粒初速度为0,整个仿真过程颗粒均处于计算域中,设边界出口颗粒速度为0;颗粒被扰动后运动方式设为完全弹性碰撞,仿真沉积物颗粒与海底的相互作用。

### 2.3 计算域的网格参数

本文采取有限体积法,采用Gambit划分软件实现计算域的网格划分,采用六面体网格对三维流场进行网格划分。取计算域左下角为坐标原点,扰动源沿 $x$ 方向运动,扰动源的初始位置如图1所示,近扰动源部分网格进行加密处理。

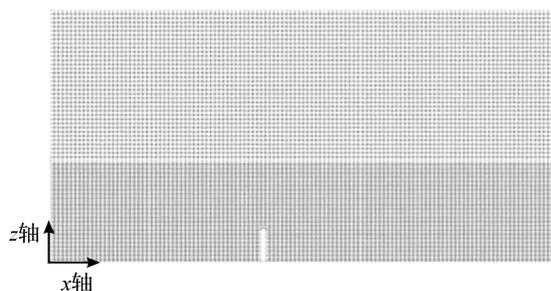


图1 计算域网格划分

以扰动导致的沉积物颗粒浓度变化进行网格无关性验证,考察停止扰动60 s后沉积物颗粒浓度的变化,发现网格数为 $1.6 \times 10^6$ 个时,如果继续增加网格数,计算结果变化很小,网格无关性验证结果如图2所示,考虑到仿真效果,模型网格数取为 $1.9 \times 10^6$ 。根据计算域网格尺度和海底水流速度,时间步长参数选择为 $0.1 \text{ s}$ 。

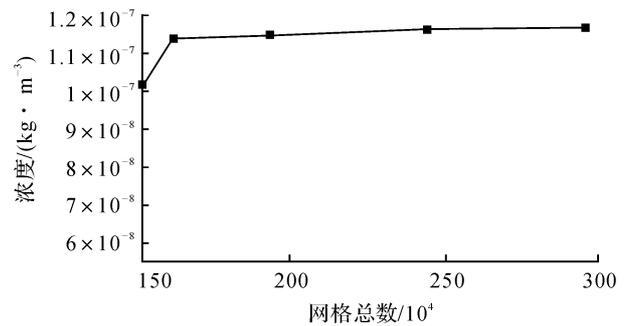


图2 网格无关性验证

### 3 数值模拟结果及分析

通过追踪扰动发生后沉积物颗粒的运动踪迹,进行采矿扰动沉积物迁移扩散的模拟。采矿扰动停止60 s后颗粒在计算域中的分布情况如图3所示,从图中可以看出,随着扰动源的运动,沉积物颗粒悬浮、扩散,在扰动源运动方向的后方聚集成3个体积大小不一的云团。云团内颗粒分布较为均匀,据计算云团内沉积物颗粒浓度为 $1.13 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$ 。



图3 采矿扰动60 s后颗粒在计算域中的分布图

图4为扰动源停止扰动300 s后颗粒在计算域中的分布图,此时扰动源运行方向的前方也出现了颗粒云团,后方形成的云团继续扩散,可以看出随着扰动源停止扰动的的时间越久,粒子在计算域中的分布范围越广,沉积物云团内颗粒的浓度越低,据计算云团内平均颗粒物浓度为 $7.47 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。



图4 扰动源停止扰动后300 s后粒子在计算域中的分布图

图5为扰动源停止扰动740 s后颗粒在计算域中的分布图,颗粒云团向上扩散,向与扰动源运动方向相反的方向扩散,后方的两个云团渐渐融合成一个,此时颗粒运动速度更低,云团内颗粒浓度继续降低,根据计算当前沉积物云团颗粒平均浓度为 $5.9 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。

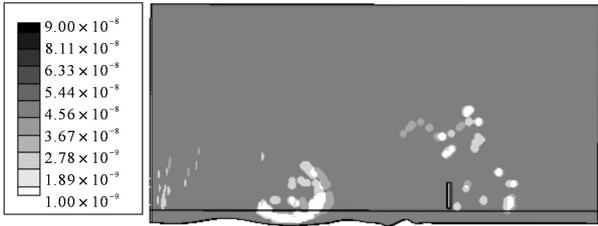


图5 扰动源停止扰动后 740 s 后粒子在计算域中的分布图

继续对颗粒的扩散进行追踪,扰动源停止扰动 1800、3220 s 后颗粒在计算域中的分布如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出,随着沉积物颗粒扩散,云团越来越大,速度越来越小,图 6 中两个大的云团沉积物颗粒的浓度为  $1.63 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ ;从图 7 中可以看出,扰动源停止扰动后 3220 s 后,沉积物扩散到整个仿真空间,形成一个大的沉积物云团,浓度为  $1.04 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3$ 。

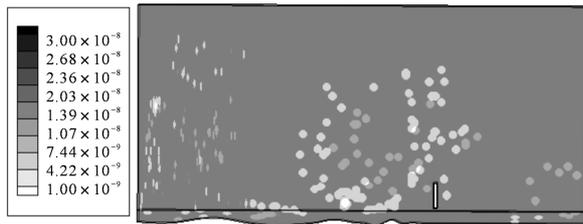


图6 扰动源停止扰动后 1800 s 后粒子在计算域中的分布图

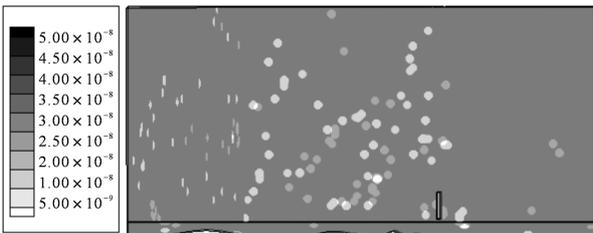


图7 扰动源停止扰动后 3220 s 后粒子在计算域中的分布图

根据沉积物随时间扩散后云团内颗粒浓度的变化,将采矿扰动发生后沉积物云团内的粒子浓度作为变量,以单次扰动停止后的时间为自变量,得出图 8 所示的沉积物颗粒扩散浓度随扩散时间变化曲线。

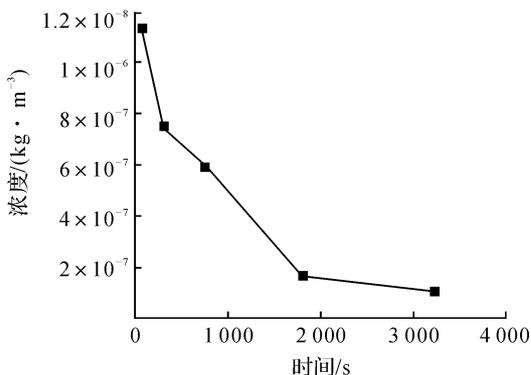


图8 沉积物云团颗粒浓度随扩散时间变化曲线

图 8 显示在采矿扰动停止 30 min 之内,颗粒浓度由大变小,变化较为快速,在扰动停止 30 min 以后,颗粒浓度变化比较缓慢,说明扩散趋于稳定,搅起的沉积物颗粒扩散到整个仿真计算空间。

根据上述计算,可以推测海底沉积物的迁移扩散对底层海水环境的影响,在实际的采矿活动中可以根据仿真计算的结果选择监测参数、配置监测传感器。沉积物的迁移、扩散直接导致海水浑浊度的变化,海水浊度变化的增量与沉积物扩散到海水中的浓度变化应该是一致的,其监测可选择海水浊度测量设备、电导率和 pH 值监测设备。根据沉积物云团扩散的时间特点,选择设备的量程和精度;根据颗粒扩散的空间变化布设传感器的位置,传感器的布设应以扰动源为中心差异化布设。

以上计算假设集矿机对海底环境的扰动是单次、单方向的,实际上集矿机的运行是区域折返的,也可以是多台集矿机同时工作,采集头以一定的周期连续采集多金属结核,实际的沉积物扩散、悬浮应该是连续扰动叠加的结果,这必然会导致海水浑浊度大幅度增加。更符合实际的数值模拟有待后续研究,但是本文获得的结果可用于海底采矿试验阶段海底环境监测设备布设的参考。

采矿机对海底的扰动除了直接造成沉积物迁移,还会造成水化学环境和生物生存环境的改变,有些环境的改变需要进行长期的监测。因此多金属结核采矿导致的沉积物被扰动伴随的海底环境的变化,可以通过实时和长期监测海水浊度、pH 值、电导率等参数获得,当被扰动的海底水浑浊度不是非常大的时候,也可以用视觉传感器观测集矿机扰动导致的沉积物悬浮云团的生成、消亡来评估扰动对环境的影响。

### 4 结论

本文分析了我国多金属结核开辟区域内结核赋存特点和底质特征,分析了采矿系统的机械构成和工作方式,仿真了多金属结核采矿对海底沉积物和海底环境造成的影响,包括扰动源仿真、计算域的选取、扰动频率和扰动方向的设计,获得了长 600 m、宽 20 m、高 400 m 范围内单次单方向扰动不同时间内的沉积物迁移和扩散规律,其规律如下:

a) 海底沉积物因采矿扰动导致颗粒释放至底层水中,在扰动源后方先形成云团,之后在扰动源前方形成云团,随着时间的推移,这些云团在海水中继续扩散,最后融合成一个大的沉积物颗粒云团。

b) 根据仿真结果可以看出,扰动发生后颗粒扩散时间越长,粒子的扩散范围越大,颗粒云团内的沉积物浓度越低,扰动停止 30 min 后颗粒浓度趋于稳定。

c) 根据数值仿真结果,考虑实际采矿扰动情况,可以通过实时和长期监测海水浊度、pH 值、电导率等参数获得采矿扰动导致的环境变化情况,传感器的布设应以扰动源为中心差异化布设。

#### 参考文献:

- [1] 何宗玉. 深海采矿的环境影响[J]. 海洋开发与管理, 2003,20(1):61-65.
- [2] 何宗玉,林景高,杨保华,等. 国际海底区域采矿规章制度的进展和主张[J]. 太平洋学报,2016,24(10):9-17.
- [3] 王春生,周怀阳,倪建宇. 深海采矿环境影响研究:进展、问题与展望[J]. 东海海洋,2003,21(1):55-64.
- [4] THIEL H, SCHRIEVER G, BOROWSKI C, et al. Cruise report DISCOL 1, Sonne-cruise 61[R]. Hamburg Institut fuer Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft der Universitaet Hamburg,1989:110-119.
- [5] SCHRIEVER G, KOSCHINSKY A, BLUHM H, et al. Cruise report ATESEPP-Auswirkungen technischer eingriffe in das kosystem der tiefsee im sued-ost-Pazifik vor Peru[R]. Hamburg Institut fuer Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft der Universitaet Hamburg,1996:45-49.
- [6] AMOS A F, GARSIDE C, HAINES K C, et al. Effects of surface discharged deep-sea mining effluent [J]. Marine Technology Society Journal,1972,6(4):40-45.
- [7] OEBIUS H U, BECKER H J, ROLINSKI S. Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea Manganese nodule mining[J]. Deep-Sea Research Part II,2001,48(17):3453-3467.
- [8] CHOI J S, HONG S, CHI S B, et al. Probability distribution for the shear strength of seafloor sediment in the KR5 area for the development of manganese nodule miner [J]. Ocean Engineering, 2011, 38 (17): 2033-2041.
- [9] 梁东红,何高文,朱克超. 中国多金属结核西示范区的结核小尺度分布特征[J]. 海洋学报,2014,36(4):33-39.
- [10] 刘保余,綦耀光,晏海武,等. 基于 Fluent 分析的环空油管颗粒沉降规律研究[J]. 石油机械,2010,38(5):32-35.
- [11] 夏密,李昶,李凤琴. 固液两相流离心泵内颗粒运动规律的数值研究[J]. 机电工程,2015,32(12):1555-1558.
- [12] 计时鸣,钟佳奇. 稀疏软性磨粒流的磨粒群分布及其动力学特性研究[J]. 轻工机械,2012,30(4):29-36.
- [13] 滕云业. 中太平洋多金属结核和沉积物的地质特征及样品采集[J]. 岩矿测试,1996,16(2):104-107.

## Numerical Simulation on the Disturbance of Polymetallic Nodule Mining to Marine Sediments

QI Hanchen, WANG Ying

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The geotechnical features of polymetallic nodules and marine sediments in China contract mining area has been analyzed. Also the working characteristics of deep-sea polymetallic nodule mining system have been analyzed. Among all disturbances, collecting head and collecting machine have been found make the biggest impact on the marine environment, whose actions make the seabed sediment disturbed, migrated and diffused. According to the technical parameters of the mining machine and its working methods, sediment disturbance model has been established. Fluent software has been used to simulate the disturbance on sediment, DPM model has been used to track particle motion, and the particle concentration has been calculated. The numerical simulation shows: Along with the polymetallic nodule mining, marine sediments are disturbed into submarine water, form particle clouds behind the disturbance source, then form particle clouds in front of the disturbance source. With the clouds diffuse, the number of clouds lessenes, the sediment concentration in clouds abates, the change of concentration becomes even after 30 min when disturbance source stopped. Which can provide the monitoring parameters for the follow-up seabed mining, and the basis of the monitoring sensors layout.

**Key words:** polymetallic nodules mining; disturbance of mining; numerical simulation; submarine environmental monitoring

(责任编辑:康 锋)