多履齿连续扰动下深海沉积物流动特性研究①

陈梓辉，欧雨佳，胡琼
（中南大学 机电工程学院，湖南 长沙 410083）

摘 要：为研究深海采矿时集矿车履带扰动沉积物的流动特性，基于欧拉多相流模型开展多履齿连续扰动沉积物仿真模拟，针对沉积物扰动质量和扩散速度进行分析，同时探明原位扰动、沉陷深度及底流流速对沉积物流动特性的影响。结果表明，集矿车以0.6 m/s的速度行走 1.5 m 的过程中，水土交界处沉积物扰动质量为 70.8 kg，2.5 s 时羽状流横向扩散速度达 0.37 m/s，纵向扩散速度达 0.269 m/s，沉陷度的增加会加大扩散的剧烈程度。原位扰动对土层破坏更严重，海洋底流速度虽小，但对沉积物扩散浓度及范围均有影响。

关键词：深海集矿车；扰动羽流；深海采矿；海洋环境；欧拉固液两相流；数值模拟；多履齿；沉积物；羽状流；流动特性；扩散规律
中图分类号：TD857；TD807　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.013
文章编号：0253-6099(2026)04-0097-08

Flow Characteristics of Seabed Sediments Under Continuous Disturbance by Multiple Grousers

CHEN Zihui, OU Yujia, HU Qiong
(*School of Mechanical Electrical Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: To investigate the flow characteristics of sediments disturbed by the track of a collector vehicle during deep-sea mining, numerical simulations of continuous sediment disturbance by multiple grousers were conducted based on the Eulerian multiphase flow model. The mass and the dispersion velocity of disturbed sediments were analyzed, and the effects of in-situ disturbance, subsidence depth, and bottom-current velocity on the flow characteristics of sediments. The results indicate that when a collector vehicle travels 1.5 meters at a speed of 0.6 m/s, the mass of disturbed sediments at the water-sediment interface reaches 70.8 kg. After 2.5 seconds, the horizontal dispersion velocity of the plume reaches 0.37 m/s and the vertical dispersion velocity is 0.269 m/s. Subsidence depth increases, the dispersion intensity aggregates. In-situ disturbance causes more severe damage to the soil layer. Seabed bottom-current velocity, although being lower, can also bring influence to both the concentration and dispersion range of sediments.

Key words: deep-sea collector vehicle; disturbance plume; deep-sea mining; marine environment; Eulerian solid-liquid two-phase flow; numerical simulation; multiple grousers; sediment; plume; flow characteristics; dispersion law

全球矿产资源需求持续增长，为缓解陆地矿产资源短缺问题，深海采矿正加速推进。但深海采矿带来的海洋生态环境问题是商业开采面临的核心挑战之一[1]。深海集矿车在海底行进时，其履带会对底质产生巨大的剪切和翻搅作用，过大的扰动会产生大量、长时间悬浮的沉积物羽状流，其影响范围可达数十公里[2]。沉积物羽状流会影响海洋水环境、深海底质、生物群落等[3-6]，是造成深海环境问题的主要原因。

目前，研究者针对羽状流以及集矿车扰动沉积物开展了大量工作。文献[7]在东太平洋进行的现场监测结果表明羽状流中粗颗粒会快速沉降，细小颗粒受水深等因素影响会扩散数百公里，初步探索了不同粒径颗粒的沉降规律。文献[8]以 HYCOM 环流模型等作为边界条件，建立了大型尺度水动力模型，通过有限元方法求解了中层羽流扩散过程，为后续采用数值模拟方法探索羽状流扩散提供了参考。文献[9]利用

① **收稿日期**：2026-05-20
基金项目：国家重点研发计划(2021YFC2801701-02)
作者简介：陈梓辉(1999—)，男，湖南株洲人，硕士研究生，主要研究方向为深海矿产资源开发。E-mail：550627568@qq.com
通信作者：胡琼(1981—)，女，湖北孝感人，博士，副教授，主要研究方向为深海矿产资源开发。E-mail：huqiong@csu.edu.cn

EMP 模型进行了深海采矿尾水排放羽状流模拟研究，分析了尾水入射源速度和初始质量浓度对羽状流扩散特性的影响。文献[10]基于欧拉多相流方法，采用双流体模型对深海采矿细颗粒羽状流开展数值模拟研究，探究了羽状流初始排放质量浓度、排放速度对羽状流扩散过程的影响。文献[11]进行了集矿车行进扰动特性研究及低扰动履齿的设计研究，对一字形履齿的主要参数进行了优化设计。

以上研究为集矿车产生羽状流尤其是履带扰动下的沉积物流动特性研究提供了借鉴。在前人研究的基础上，本文基于计算流体力学(CFD)方法，采用欧拉固液两相流模型对多履齿连续扰动深海沉积物进行数值模拟，并同步设计水池实验，开展多履齿连续扰动下深海沉积物流动特性研究。

1 仿真模型建立

1.1 数值模拟理论基础

1.1.1 湍流模型

湍流是由各种尺度的涡混叠成的三维流动状态。预测羽状流的行为，需要对湍流流动进行模拟。采用 Realizable k-ε 两层模型模拟仿真扰动产生沉积物羽状流过程，通过区域化建模策略，在近壁面采用物理上更真实的低雷诺数模型，在主流区保留高效的高雷诺数模型，从而在精度与计算成本之间取得最优平衡[12]。

在 Realizable k-ε 两层模型中，湍动黏度 μ_t 计算式为：

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1}$$

式中：C_μ 为经验系数；ρ 为液体密度；k 为湍流动能；ε 为湍流耗散率。

湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程为：

$$\frac{\partial x}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho k \bar{u}) = \nabla\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla(\rho\varepsilon \bar{u}) = \nabla\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right] + \frac{1}{T_\varepsilon}C_{\varepsilon 1}P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2}f_2\rho\left(\frac{\varepsilon}{T_\varepsilon} - \frac{\varepsilon_0}{T_0}\right) + S_\varepsilon \tag{3}$$

式中：$\bar{u}$ 为速度均值；σ_k、σ_ε、$C_{\varepsilon 1}$、$C_{\varepsilon 2}$均为模型系数；P_k 为湍流动能产生项；P_ε 为湍流耗散率产生项；f_2 为阻尼函数；S_k 和 S_ε 均为自定义源项；ε_0 为抵消湍流衰减的环境湍流值；T_0 为 ε_0 导致的单位时间尺度。

1.1.2 固液两相流模型

欧拉多相流模型将各相均视为相互贯穿的连续介质，并采用体积分数描述各相的空间分布。虽然深海沉积物由离散颗粒组成，但对于深海表层细粒沉积物而言，在研究尺度远大于颗粒尺度的条件下，可采用连续介质假设进行处理。此外，深海沉积物具有较高含水率，在履带扰动作用下会发生剪切变形、再悬浮及输运过程，其宏观力学行为表现出明显的流变特性，可近似视为连续相。该模型对等处理固液两相，适用于各浓度两相流计算，目前在射流和沉积物尾矿排放等场景的数值模拟结果与试验数据吻合较好[13]，故本文采用该模型。

假设 s 为沉积物固相，f 为海水液相，两相计算公式相似，以固相为例。

以体积分数定义模型中固相比例，固相体积 V_s 可表示为：

$$V_s = \int \alpha_s \mathrm{d}V \tag{4}$$

式中 α_s 为固相体积分数，固相与液相体积分数之和为 1。

固相连续方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \alpha_s\rho_s \mathrm{d}V + \oint_A \alpha_s\rho_s u_s \cdot \mathrm{d}\alpha = \int_V (m_{sf} - m_{fs})\mathrm{d}V + \int_V S_s^\alpha \mathrm{d}V \tag{5}$$

式中：ρ_s 为固相密度；u_s 为固相速度；m_{sf}为液相到固相的质量传输率；m_{fs}为固相到液相的质量传输效率；S_s^α 为自定义固相质量源项[14]。

固相动量方程表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \alpha_s\rho_s u_s \mathrm{d}V + \oint_A \alpha_s\rho_s u_s \otimes u_s \cdot \mathrm{d}a = -\int_V \alpha_s \nabla p \mathrm{d}V + \int_V \alpha_s\rho_s g \mathrm{d}V + \int_V S_s^\alpha \mathrm{d}V + \oint_A [\alpha_s(T_s + T_s^t)] \cdot \mathrm{d}a + \int_V M_s \mathrm{d}V + \int_V (F_{int})_s \mathrm{d}V + \int_V (m_{sf}u_f - m_{fs}u_s)\mathrm{d}V \tag{6}$$

式中：g 为重力加速度；T_s 和 T_s^t分别为分子应力和湍流应力；M_s 为单位体积的相间动量传输；$(F_{int})_s$ 为颗粒间固体压力；u_f 为液相速度。

在该模型中，两相被视为相互渗透的连续介质，非独立运动，通过动量方程中的相间作用力源项实现耦合，固相与液相之间的相互作用，相间的动量传输主要包括曳力 F_d、虚拟质量力 F_v 和升力 F_l 三种[15]，相互作用力 F 可表示为：

$$F = F_d + F_l + F_v \tag{7}$$

曳力 F_d 的计算公式为：

$$F_d = K\left[(u_f - u_s) - \frac{v_{tf}}{\sigma_c}\nabla\alpha_s\right] \tag{8}$$

式中：K 为广义曳力系数；σ_c 为施密特数；v_{tf}为液相湍流黏性系数。

当流场为非均匀或旋转场时,颗粒会受到垂直于相对速度的升力 F_l,其表达式为:

$$F_l = C_l\rho_f\alpha_s(u_f - u_s) \times (\nabla \times u_f) \tag{9}$$

式中:C_l 为升力系数;ρ_f 为液相密度。

流体中颗粒的加速度会受到周围流体惯性影响,而虚拟质量力 F_v 表征颗粒带动周围流体加速所附加的作用力,表达式为:

$$F_v = C_v\rho_f\alpha_s\frac{D(u_f - u_s)}{Dt} \tag{10}$$

式中 C_v 为虚拟质量力系数。

1.2　模型构建与网格划分

仿真模型所用履齿为 T 字齿,其截面示意如图 1 所示。板长 L 为 160 mm,履带板厚度 d_1 为 20 mm,台阶高度 d_2 为 20 mm,台阶宽度 b_3 为 20 mm,履刺长 H 为 100 mm,厚度 b_1 为 20 mm,履刺尖端宽度 b_2 为 0.5 mm,倾角 α_1 为 70°。

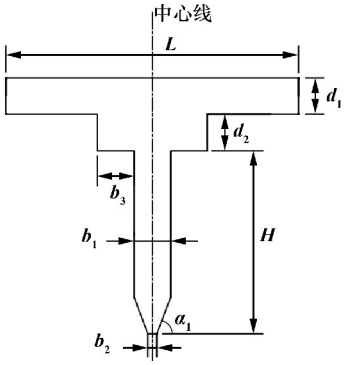


图 1　履齿截面示意图

Fig. 1　Cross-sectional view of grouser

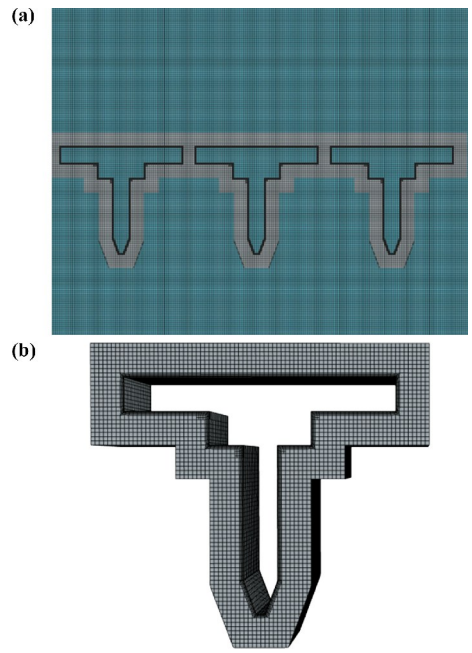
本文研究对象为规则几何体,其计算域采用六面体网格进行划分,网格数量较少,计算速度较快,节约计算成本。

重叠网格区域与背景网格区域的网格基础划分尺寸均为 10 mm,由于黏性流体具有边界层效应,在壁面处具有较大的速度梯度,通过添加棱柱层进行近壁面边界层流动信息捕捉,履齿表面设置 5 层棱柱层,网格划分如图 2 所示。

1.3　运动分析与参数设定

深海集矿车履带行走机构主要由张紧轮、拖轮、台车架、履带、驱动轮和支重轮组成,如图 3 所示。

简化的履带行走机构如图 4 所示。履带上区段长度 L_1 为 5 784 mm,前区段长度 L_2 为 551 mm,接地段长度 L_3 为5 000 mm,驱动段长度 L_4 为 677 mm,右下支重轮半径 r_1、左下支重轮半径 r_4 均为 175 mm,驱动轮半径 r_2、张紧轮半径 r_3 均为 240 mm,α、β 分别为 38.3°、51.2°。



(a) 流体域网格;(b) 单履齿网格

图 2　网格划分示意图

Fig. 2　Schematic diagram of mesh generation

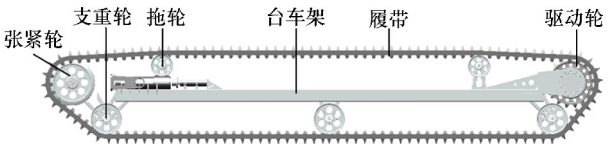


图 3　履带行走机构

Fig. 3　Clawer travel mechanism

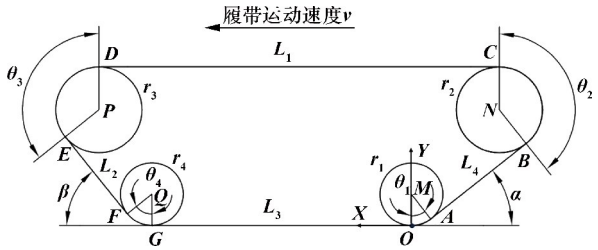


图 4　简化的履带行走机构

Fig. 4　Simplified crawler travel mechanism

不考虑多边形效应的情况下,各履齿以相同运动状态带动履带以 v=0.6 m/s 沿如图 5 所示方向运动,首个履齿以 o 点为起点、以逆时针方向沿履带轮廓运动,仿真计算模型如图 5 所示,为方便描述履齿对沉积物土壤的扰动过程,将 10 个履齿从右往左依次排序,分别为 1~10 齿。

沉积物参数初始化设定基于 A-5 矿区底质,其类型以硅质与钙质黏土和粉砂为主,湿密度为 1.5 g/cm^3,动力黏度为 2.2 Pa·s,颗粒粒径平均为 20 μm。海水密度为 1.02 g/cm^3,动力黏度为 0.001 7 Pa·s[16],基准工

况为集矿车以 0.6 m/s 的速度行走 1.5 m。

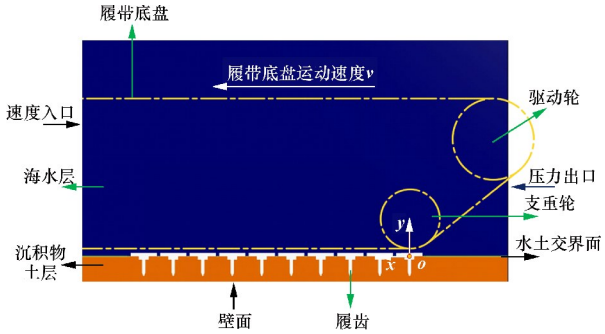


图 5 仿真计算模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation model

1.4 网格无关性验证

网格无关性分析以基准工况下水土交界面的沉积物扰动质量为分析指标,结果如表 1 所示。粗网格与精网格间的沉积物扰动质量差距可达 1.02 kg。当网格数量提升到 400 万以上时,网格数量对计算精度的提升有限,最终选择 426 万网格数量,同时保证计算精度和速度。

表 1 网格无关性分析

Table 1 Mesh independence analysis

仿真条件	网格数量	划分质量	沉积物扰动质量/kg
基准工况	2 250 882	粗糙	69.80
	2 952 264	粗糙	70.22
	3 572 586	中等	70.45
	4 261 276	良好	70.81
	5 180 636	精细	70.82

2 沉积物流动特性仿真结果分析

2.1 沉积物扰动质量分析

以水平面 $y=0$ 的初始水土交界面作为观测截面,量化分析履带行走机构的沉积物扰动程度。由该截面可获取沉积物扰动质量 m_{st} 以及质量流率 q_s。对数据进行后处理分析,获得的 m_{st} 和 q_s 曲线如图 6 所示。

q_s 总体呈现波动上升趋势,履齿连续扰动造成质量流率变化曲线的波峰与波谷交替出现。履齿从起动到脱离土层阶段,q_s 快速上升,该履齿脱离土层后到下一履齿起动前的阶段 q_s 逐渐下降。根据行走速度 0.6 m/s、履齿板长 160 mm 可知,大约每隔 0.27 s 下一个履齿开始向上扰动,1.2~1.5 s 时,即第 5 个履齿参与搅动后,q_s 达到峰值 50.4 kg/s。

集矿车以速度 0.6 m/s 行走 1.5 m 的过程中,通过 $y=0$ 水平面的沉积物扰动质量 m_{st} 为 70.8 kg,仅单齿参与沉积物扰动时,受扰动沉积物较少,在重力作用下沉积物出现回流,反向穿越观测截面,m_{st} 与 q_s 几乎无变化。在 0.75 s 左右时,即齿 3 向上扰动时,扰动质量开始大幅上升,当至少三齿参与扰动时,总体呈现单调上升的趋势。

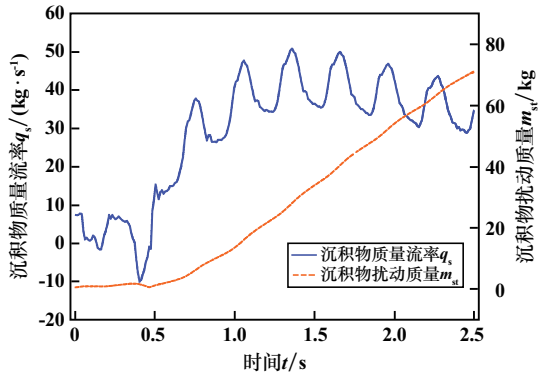


图 6 沉积物扰动质量及质量流率曲线

Fig. 6 Disturbed sediment mass and mass flow rate curves

以上数据是衡量集矿车对沉积物干扰强度的关键量化指标,反映了履带的干扰能力和对海底环境的影响程度,其中多履齿扰动大大增加了沉积物的扰动和运输量,突破了单履齿扰动的研究局限,为行走机构的低扰动设计提供了参考。

2.2 沉积物扩散速度分析

为克服单颗粒速度分析的局限,平均化处理沉积物速度,采用被搅动到 $y=0$ 平面上方沉积物颗粒的横向扩散速度 $\bar{v}_x$ 与纵向扩散速度 $\bar{v}_y$ 进行羽状流运动状态分析。

沉积物扩散速度如图 7 所示。其中,$\bar{v}_x$ 主要受履齿运动水平速度分量影响,在首个履齿扰动阶段,扰动产生的反向水流使之出现短暂负向速度,后续由于集矿车运动的主导作用,总体水平扩散方向回归正向。分析 $\bar{v}_x$ 曲线可知,每个履齿开始参与扰动时曲线产生波动,并随履齿连续加入扰动,曲线呈阶梯式波动,反映了履齿连续扰动对羽状流运动的动态影响。2.5 s 时羽状流的横向扩散速度 $\bar{v}_x$ 达 0.37 m/s,该速度值对评估海底沉积物再分布的范围和模式具有一定的参考价值。

分析 $\bar{v}_y$ 曲线可知,齿 1 开始扰动时,黏附在齿上的沉积物及齿周围漂浮的沉积物团受齿 1 巨大的抬升作用与水流冲刷作用的共同影响,短时间内 $\bar{v}_y$ 急增。后续又因重力、水流和其余履齿的扰动作用,颗粒在垂向上逐渐接近平衡,$\bar{v}_y$ 出现较长时间的平缓阶段,2.5 s 时沉积物羽状流的 $\bar{v}_y$ 达到 0.269 m/s,该数值可用于分析被扰动沉积物的沉降时间和进一步评估扰动对海洋底层生态系统的影响。

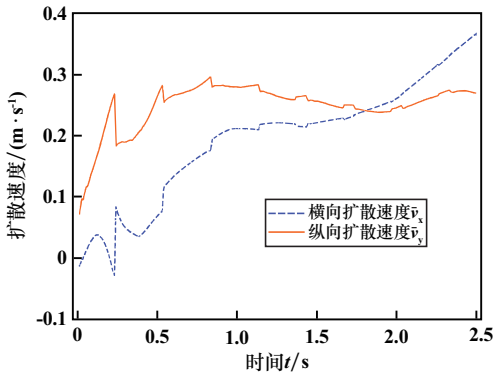


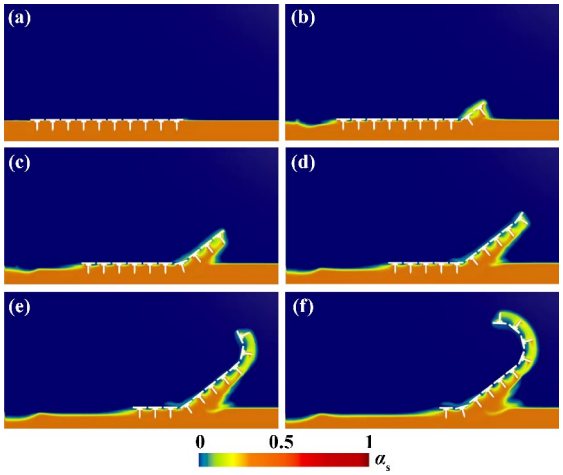
图 7　沉积物扩散速度

Fig. 7　Sediment dispersion velocity

2.3　履带原位扰动分析

为研究集矿车在稀软底质上打滑而造成履带空转的扰动情况,观测集矿车履带原位扰动的沉积物流动特性,使集矿车运动速度为 0,履带底盘视为两相不可穿透壁面。

图 8 展现了履带底盘静止而 10 块履齿绕其轮廓转动的原位扰动仿真效果。履齿从开始运动到即将离开土层时带动大量沉积物,且表现出典型的“黏带效应”,沉积物黏附于履齿,在脱离土层时形成黏带尾流。土壤被夹带至驱动轮时,在离心力作用下从齿间脱落,随涡流扩散形成悬浮羽状流。在没有海洋底流影响下,沉积物无明显扩散,其仍处于履齿周围。



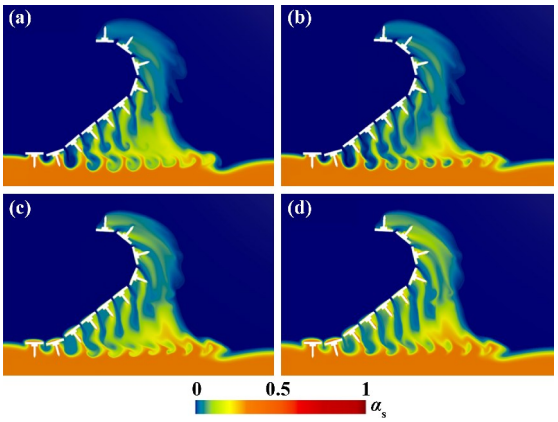
(a) 静止阶段;(b) 双齿扰动;(c) 四齿扰动;(d) 五齿扰动;(e) 七齿扰动;(f) 九齿扰动

图 8　集矿车原位扰动仿真效果

Fig. 8　Simulation results of in-situ disturbance by collector vehicle

2.4　沉陷深度影响扰动分析

沉陷深度 c 的变化影响履齿与沉积物接触面积及剪切应力分布。不同沉陷量下的沉积物扰动如图 9 所示。沉陷越深,履齿与土壤接触面积越大,剪切力作用下的扰动剧烈程度加大,导致扰动质量变大。沉陷深度 c 也对相间动量传输有影响,c 过小时,水土交界层会在受扰动时产生较剧烈的波动,而底层的水土混合较为充分;c 较大时,交界处波动较为平缓。沉积物的扩散速度随 c 增加产生变化,集矿车运动 1.5 m,沉陷深度 $c=0$ 时,羽状流水平方向扩散速度 $\bar{v}_x$ 为 0.37 m/s,垂直方向扩散速度 $\bar{v}_y$ 为 0.27 m/s;$c=4$ cm 时,$\bar{v}_x$ 为 0.41 m/s,$\bar{v}_y$ 为 0.30 m/s,沉陷量增加会增强羽状流横向和纵向的扩散程度。



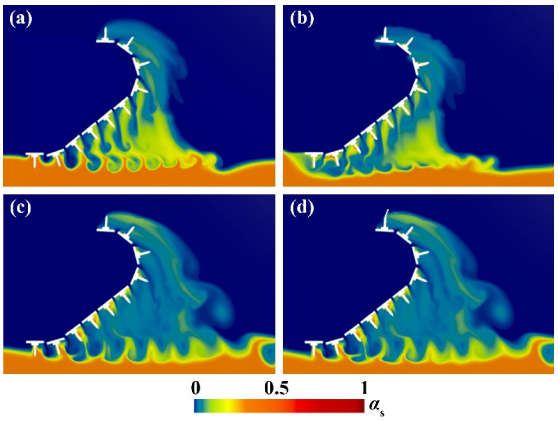
(a) $c=0$;(b) $c=2$ cm;(c) $c=4$ cm;(d) $c=6$ cm

图 9　不同沉陷量下的沉积物扰动

Fig. 9　Sediment disturbance at different subsidence depths

2.5　海底底流影响扰动分析

海底底流对沉积物尾流扩散速度和范围产生影响,设置不同底流流速 v_b,底流仅为水平方向流动,以集矿车 $v=0.6$ m/s 行走 1.5 m 的过程,观察羽状流形态,如图 10 所示。



(a) $v_b=0$;(b) $v_b=10$ cm/s;(c) $v_b=-5$ cm/s;(d) $v_b=-10$ cm/s

图 10　不同海底底流下羽状流形态

Fig. 10　Plum morphology under different bottom currents

逆向海流作用下,齿背流线分离区形成低压涡旋,使沉积物在齿槽内聚集,已脱离的颗粒随海流逆向传播,导致尾流扩散增大,当 $v_b=-10$ cm/s 时,羽状流 $\bar{v}_x$

为0.29 m/s。正向海流作用下,颗粒随海流加速脱离履齿,尾流面积向履带方向缩小而浓度增大,当 v_b = 10 cm/s时,羽状流 $\bar{v}_x$ 为 0.48 m/s。海洋底流的存在会带动颗粒飘动,增大羽状流扩散,现实中还存在沉积物因底流传播而影响行进视野的情况。

3 水池实验

3.1 多履齿扰动实验设计

水池内搭建多履齿沉积物扰动实验装置,示意图如图 11 所示。履齿固定于支架上,与水池边缘距离 D_e 为 30 cm,由驱动轮转动带动履齿卷绕实现扰动,浊度计 1 与水池左端面距离 d_{e1}为 20 cm,两浊度计间隔 d_{e2}为 30 cm,安装高度 h_e 为 15 cm,水深 h_f 为 45 cm,模拟沉积物土层深度 h_e 为 6 cm,实验履齿模型尺寸为原尺寸的 1/2,宽度为 14 cm。

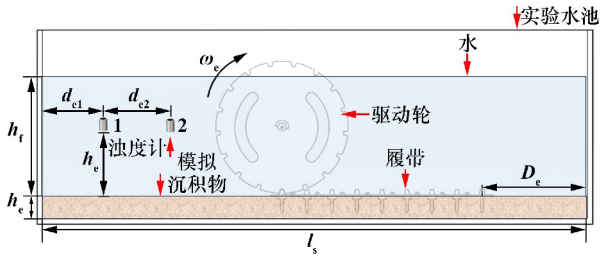


图 11 多履齿沉积物扰动实验装置示意图

Fig. 11 Experimental setup for sediment disturbance by multiple grousers

实验装置整体框架如图 12 所示,采用 4040 铝型材构成,一面为玻璃可观察扰动情况,履齿卷绕和啮合细节如图 13 所示。

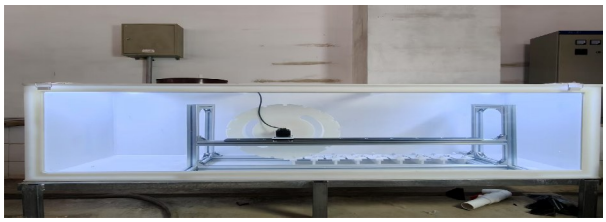


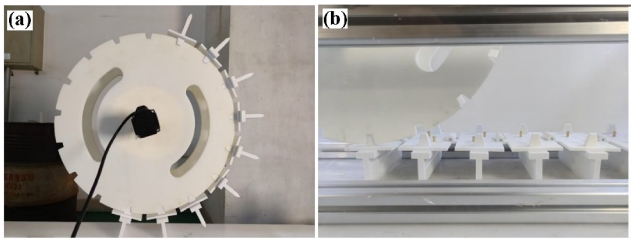
图 12 实验装置框架

Fig. 12 Experimental setup framework

模拟沉积物采用钙基、钠基膨润土、高岭土按质量比 2∶2∶1与水配制,设置 3 组实验组,以驱动轮转速 ω 为变量进行探究,如表 2 所示;仿真过程同样设置驱动轮转速来实现履带前进,仿真所用驱动轮半径 r 为 240 mm,对应履带行进速度($v=\omega \cdot r$)如表 3 所示。

3.2 多履齿扰动实验结果

图 14 为封闭箱体空间内,在实验组 1 驱动轮转速条件下,履齿后方沉积物形成羽状流的画面。



(a) 履齿卷绕;(b) 履齿啮合

图 13 履齿卷绕和啮合细节

Fig. 13 Grouser winding and meshing details

表 2 实验组驱动轮转速

Table 2 Rotating speed of drive wheel in experiments

实验组	驱动轮转速 ω/(rad · s^{-1})
1	0.6
2	1.2
3	2.0

表 3 仿真组履带行进速度

Table 3 Simulated clawer travel speed

仿真组	履带行进速度 v/(m · s^{-1})
1	0.144
2	0.288
3	0.480

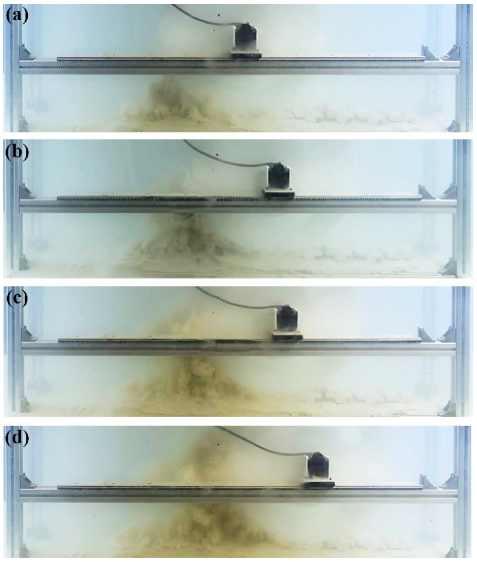


图 14 履齿后方羽状流形态

Fig. 14 Plume morphology behind grousers

启动电机,首个履齿开始转动,剩余履齿平动,土壤在扰动下开始剥离底层。随驱动轮转动,更多颗粒向上运输,而粘夹在履齿上的土壤受水流冲刷从履齿脱落,羽状流范围扩张,“羽状”形态愈发清晰。

扰动停止后,细颗粒在重力作用下碰撞土层,其流动向远离撞击点的方向传播,形成异重流,其典型速度

剖面图如图 15 所示。

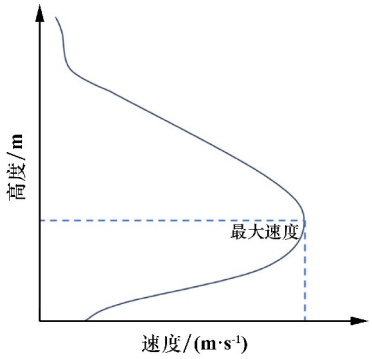
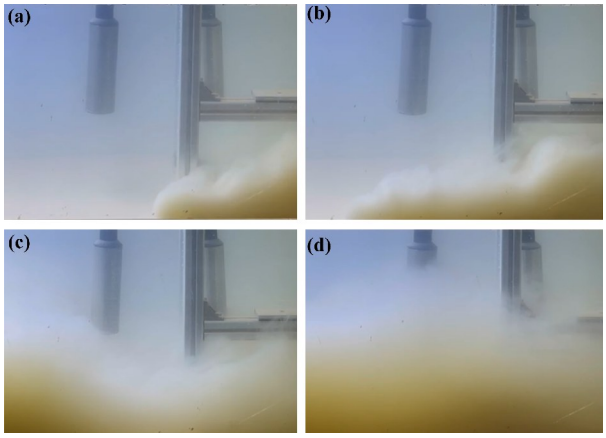


图 15　异重流典型流速剖面

Fig. 15　Typical velocity profile of density current

强烈湍流在高剪切力下产生于异重流头部,卷吸周围低密度流体并将头部密度稀释,后方高密度流体维持着异重流推进。主体流速相对稳定,尾部因黏性耗散和颗粒沉降逐渐停滞,形成扩散型尾部结构[17]。

图 16 为沉积物异重流锋面的形成与变化过程。撞击底层的羽状流比其他部分更快远离扰动源,靠近玻璃窗的羽状流部分与窗面相撞,其余部分朝两侧扩散撞击壁面后回卷,与主流相互作用生成二次流。



(a) 初期;(b) 中期;(c) 后期;(d) 终期

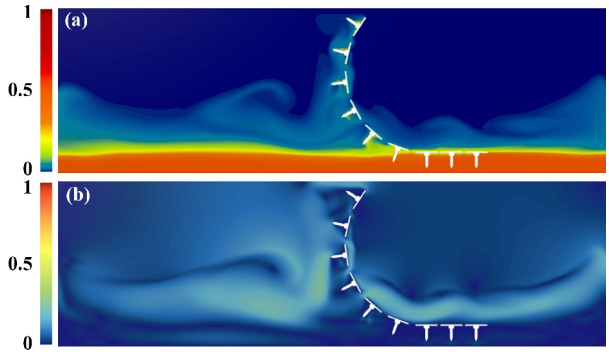
图 16　沉积物异重流锋面

Fig. 16　Sediment density current front

图 17 为仿真组 1 的仿真情况。通过模型的中心剖面图,可以清晰观测到履齿输运到上方水域的沉积物撞击土层并向两侧扩散的过程,沉积物速度云图中,土层上方的底层流流动速度较高。

实验现象与仿真模拟揭示了沉积物羽状流从扰动源能量输入到羽状流在密度差异驱动下自发推进和扩散的动态转换过程。

表 4 记录了 2 个浊度计监测的环境浊度峰值及达到峰值的时间。近池壁的浊度计2率先产生显著变



(a) 体积分数;(b) 速度

图 17　仿真组 1 的仿真情况

Fig. 17　Simulation result of simulation case 1

化,浊度值持续上升到 40 s 时达到峰值。浊度计 1 的数值变化相对滞后,在浊度计 2 的数值显著上升后的数秒内,浊度计 1 的浊度值上升趋势更为迅速,主要是因为沉积物羽状流撞击水池尾部壁面后回弹产生回流、涡旋,使沉积物在浊度计 1 附近悬浮,最终浊度计 1 达到峰值浊度 236.9 mg/L。

表 4　仿真组与实验组浊度结果对照

Table 4　Comparison of turbidity results between simulation and experimental cases

浊度计编号	组别	初始值/(mg·L⁻¹)	实验组		仿真组	
			峰值/(mg·L⁻¹)	峰值时间/s	峰值/(mg·L⁻¹)	峰值时间/s
1	1	35.2	236.9	34	208.5	39
	2	38.1	370.5	23	304.8	27
	3	42.1	452.4	18	378.1	23
2	1	42.2	230.2	40	204.1	47
	2	45.7	364.4	29	297.5	33
	3	40.8	439.2	24	369.1	28

实验组 1~3,展现了履齿运动速度提升造成的沉积物扰动效果加剧。水槽实验受限于实验条件和流域限制,与现实环境中集矿车履带扰动沉积物有较大差异,但仍能为沉积物流动特性研究提供参考依据。

4　结论

1) 沉积物质量流率曲线随时间呈波动上升趋势,曲线振荡发生在前一履齿离开土层、后一履齿开始切削时;以水土交界面为界,履带以速度 0.6 m/s 行走 1.5 m 时,沉积物扰动质量达 70.8 kg。

2) 沉积物横向扩散速度 $\bar{v}_x$ 起始阶段因逆向水流出现短暂负值,随更多履齿加入扰动后,呈阶梯状正向上升,2.5 s 时达 0.37 m/s;沉积物纵向扩散速度 $\bar{v}_y$ 起始因履齿抬升作用剧烈上升,但又因重力和水流作用

后趋于平稳,2.5 s时达0.269 m/s,沉陷量增加会造成羽状流横向和纵向的扩散程度增强。

3) 原位扰动时土层破坏严重且沉降恢复较难,仿真未考虑矿车重力,现实中随扰动过程的进行,矿车重力与重心变化将导致履带下陷程度和接地比改变,造成更严重的扰动和土层破坏,而海洋底流虽流速较低,但对扩散浓度和范围均有影响。

4) 水池实验与仿真模拟进行对照,沉降物流动变化趋势呈现一致性。

参考文献(References):

[1] Miller K A, Thompson K F, Johnston P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 4:418.

[2] 金小栋,陈旭光,刘金忠,等. 深海采矿中不同成分底质对羽流触发的影响[J]. 海洋工程, 2024,42(4):150-163.
Jin Xiaodong, Chen Xuguang, Liu Jinzhong, et al. The impact of different substrates compositions in deep-sea mining on triggering plume[J]. The Ocean Engineering, 2024,42(4):150-163.

[3] Weaver P P E, Billett D S M, Van Dover C L. Environmental risks of deep-sea mining[M]//Handbook on Marine Environment Protection: Science, Impacts and Sustainable Management. Cham: Springer International Publishing, 2018:215-245.

[4] 刘泽霖,陈时平,郑皓,等. 深海采矿沉积物羽流静水扩散特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):63-68.
Liu Zelin, Chen Shiping, Zheng Hao, et al. Experimental study on diffusion characteristics of sediment plumes in still water during deep-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):63-68.

[5] Sharma R. Deep-sea mining: economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development[J]. Marine Technology Society Journal, 2011,45(5):28-41.

[6] Dijkstra J A, Mello K, Sowers D, et al. Fine-scale mapping of deep-sea habitat-forming species densities reveals taxonomic specific environmental drivers[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(6):1286-1298.

[7] Baeye M, Purkiani K, de Stigter H, et al. Tidally driven dispersion of a deep-sea sediment plume originating from seafloor disturbance in the DISCOL area (SE-Pacific ocean)[J]. Geosciences, 2022,12(1):8.

[8] 曾兴井,于通顺,陈旭光,等. 深海采矿中层羽流被动输运阶段扩散及沉降特征数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2026,47(1):44-53.
Zeng Xingjing, Yu Tongshun, Chen Xuguang, et al. Numerical simulation of diffusion and settlement characteristics during the passive transport phase of midwater plumes in deep-sea mining[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2026,47(1):44-53.

[9] 李东泽,于宗冰,邹丽,等. 深海采矿尾水排放羽状流模拟研究[J]. 中国造船, 2025,66(1):208-217.
Li Dongze, Yu Zongbing, Zou Li, et al. Numerical simulation of tailwater discharge plume in deep-sea mining[J]. Shipbuilding of China, 2025,66(1):208-217.

[10] 刘港慧,刘磊. 深海采矿细颗粒羽状流数值模拟研究[J].海洋工程, 2023,41(5):150-160.
Liu Ganghui, Liu Lei. Numerical simulation of fine particle plume flow in deep-sea mining[J]. The Ocean Engineering, 2023,41(5):150-160.

[11] 王洋洋. 深海采矿车行进扰动特性研究及低扰动履齿设计[D]. 长沙:中南大学, 2024:68-77.
Wang Yangyang. Research on the disturbance characteristics of deep-sea mining vehicle movement and design of low-disturbance track shoes[D]. Changsha: Central South University, 2024:68-77.

[12] 何凤. 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, 2023.
He Feng. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023.

[13] 张悦,宋锦春,野琦勉,等. 射流式采沙系统中液固两相流的数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2016(5):20-23.
Zhang Yue, Song Jinchun, Nozaki Tsutomu, et al. Numerical simulation of liquid-solid two phase flow on the spraying jet type sand collector[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(5):20-23.

[14] Drew D A, Passman S L. Theory of multicomponent fluids[M]. NY: Springer New York, 1999.

[15] Auton T R, Hunt J C R, Prud'Homme M. The force exerted on a body in inviscid unsteady non-uniform rotational flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988,197:241-257.

[16] Li X K. Multiphase flow and fluidization, continuum and kinetic theory descriptions[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1994,55(2):207-208.

[17] Cuthbertson A J S, Laanearu J, Wåhlin A K, et al. Experimental and analytical investigation of dense gravity currents in a rotating, up-sloping and converging channel[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2011,52(3):386-409.

引用本文:陈梓辉,欧雨佳,胡琼. 多履齿连续扰动下深海沉积物流动特性研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):97-104.
Chen Zihui, Ou Yujia, Hu Qiong. Flow characteristics of seabed sediments under continuous disturbance by multiple grousers[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):97-104.