深海沉积物剪切作用下羽流激发特性的数值研究*

李凯辉[1,2]，陈秉正[1,3]，马玉祥[2]，江敏[1,3]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.大连理工大学 建设工程学院， 辽宁 大连市 116000；
3.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：多金属结核在开采过程中产生的沉积物羽流对海底生态有极大影响。为探究集矿车剪切扰动下沉积物激发扩散现象，基于有限元分析的Eulerian模型进行了模拟研究。研究分析了在不同滚筒速度(0.1～0.9 m/s)和压陷深度(33 cm和18 cm)下的羽流扩散情况，并评估了护罩羽流的抑制效果。结果显示，当滚筒速度超过0.3 m/s时，羽流规模和高度显著增加羽流高度，最高可达1.4 m。在降低压陷深度的情况下，羽流扩散平均速度和羽流规模明显减小。另外，添加羽流护罩后，羽流规模减少约51%，羽流高度下降25%，扩散趋势降低至46%，表明护罩等羽流抑制装置对羽流起到了良好的抑制效果，为深海多金属结核采矿沉积物羽流控制提供了参考。

关键词：深海环境；深海采矿；多金属结核；沉积物羽流；Eulerian模型

中图分类号：TD857 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)01-0010-09

Numerical Study on Plume Resuspension Characteristics Under Shear Action of Deep-Sea Sediments

LI Kaihui[1,2], *CHEN Bingzheng*[1,3], *MA Yuxiang*[2], *JIANG Min*[1,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116000, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Sediment plumes generated during the mining of polymetallic nodules have a significant impact on the seabed ecosystem. To explore the sediment resuspension and dispersion phenomena under the shear disturbance of mining vehicles, a simulation study was conducted based on a finite element analysis of Eulerian model. The plume dispersion under different roller velocities (0.1-0.9 m/s) and indentation depths (33 cm and 18 cm) was analyzed, and the effectiveness of plume shields was evaluated. Results indicate that when the roller velocity exceeds 0.3 m/s, the plume size and height significantly increase, with the maximum plume height reaching 1.4 m. As reducing the indentation depth, the average plume diffusion velocity and plume size noticeably decreases. Additionally, with the addition of a plume shield, the plume size reduces by about 51%, plume height decreases by 25%, and diffusion tendency reduces to 46%, indicating that the plume suppression devices such as shields can effectively mitigate the plume. The study can provide a reference for controlling plumes in the mining of deep-sea polymetallic nodules.

Key words: Deep-sea environment, Deep-sea mining, Polymetallic nodules, Sediment plume, Eulerian model

0 引言

海洋覆盖了地球表面的70%，其中有75%的海域深度超过3 000 m，蕴藏着丰富的石油、天然气和矿产资源。深海矿产资源，如多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物等，包含镍、钴、铜、锰、金、银等元素。然而，深海采矿可能带来海底生物窒息、微生物栖息地破坏、生物多样性缺失等潜在风险[1]。海底采矿产生的沉积物羽流会导致海洋栖息地的破碎，掩埋生物，并可能释放有毒元素，影响海洋物种和微生物生态系统[2]。深海生态系统复杂、脆弱且恢复能力慢，生物习性尚未充分了解，深海采矿可能对生

* **收稿日期**：2024-11-14
基金项目：湖南省自然科学基金项目(2021JC0013-3)；国家重点研发计划项目(SH6700-02)
作者简介：李凯辉(2000—)，男，湖南娄底人，硕士，主要从事深海采矿方面的研究。E-mail：A374158493@163.com

态环境造成深远和多维度的破坏。比利时全球海洋矿产资源公司(GSR)和加拿大深海矿业公司(TMC)等机构正在进行深海采矿环境影响的调查和研究,结果表明,采矿车碾压、结核提取、底层水迁移和高浓度羽流等因素可能对深海生态造成直接危害[3-4]。

与富钴结壳或多金属硫化物采矿相比,多金属结核采矿过程中产生的悬浮颗粒羽流具有更广泛的水平扩散范围。这是由于结核矿区底质由稀软的黏土颗粒构成,采矿活动使这些颗粒易于悬浮,而结壳和硫化物资源的开采主要涉及坚硬岩石的破碎,所产生的羽流较小且颗粒较密集。多金属结核在深海盆地中缓慢形成,底层水体清澈,沉积物再悬浮的可能性低。适应这种环境的生物无法适应高浊度的环境。因此,尽管颗粒十分微小,结核采矿产生的羽流效应却更加显著,长期暴露可能会造成显著的慢性影响[5]。因此,预测羽流的生成和扩散是深海采矿环境影响评估的关键环节。

目前关于羽流的扩散模拟国内外已有研究学者进行了研究。如刘欣等[6]使用任意耦合滑移网格法(ACMI)实现对集矿车长距离位移的模拟,探讨了集矿车与水-沉积物两相流相互作用对周围流场结构的影响。胡琼等[7]使用 EMP 方法对不同履齿结构对深海沉积物扰动情况进行了分析,得出一字型履齿低扰动性能较好的结论。旷芳芳等[8]基于原始方程的区域海洋模型系统 ROMS(RE-gional Ocean Modeling System),构建了包含大洋协会合同区的北太平洋三维斜压水动力数值模型,对 CC 区深海采矿羽流的扩散在长时间尺度上进行了模拟并得出了羽流扩散规律。BERTEVAS 等[9]、TRAN-DUC 等[10]采用光滑粒子流体动力学(SPH)算法对平板运动引起的沉积物羽流进行了仿真,考虑了湍流、非牛顿流体行为、沉积物运动和流体-结构相互作用等因素,仿真结果与实验室测试结果一致。詹琳等[11]对不同粒径的羽流颗粒沉降进行了数值模拟,结果表明,粒径大于 32 μm 的颗粒将在 10 min 内完成沉降,而较小粒径颗粒沉降速度则在 0.06～3.33 mm/s 之间。LIU S H 等[12]采用拉格朗日-欧拉方法,将单个粒子的动力学与欧拉场相结合,精确计算羽流中粒子的运动轨迹,并揭示水流对羽流的卷吸作用。离散相的守恒方程以拉格朗日形式描述粒子运动,连续相的控制方程则通过欧拉形式修正以考虑离散相的影响。

然而,当前对于不同工况下采矿车对沉积物的水土交换过程仍不够全面。因此,本研究将对不同工况下,采矿车对沉积物扰动特性展开数值仿真,模拟沉积物的激发和扩散过程,研究羽流的激发和扩散机理,以期为采矿车采矿过程设计、深海采矿环境影响评估提供可靠依据。

1 沉积物羽流及模拟控制方程

1.1 沉积物羽流

深海采矿过程中的沉积物羽流演变可划分为 3 个关键阶段。初始阶段,采矿设备周边区域的羽流由采矿车与海底沉积物的机械扰动产生,在惯性力与湍流的耦合作用下呈现显著的扩散特征。在随后的浮力驱动阶段,悬浮沉积物产生的负浮力效应与持续性湍流相互作用,导致羽流与周围海洋环境之间发生复杂的动力学过程,包括密度分层、剪切不稳定性及湍流混合等现象。在最终的被动输送阶段,羽流主要受控于背景洋流的输送作用,同时在环境湍流的调控下产生水平和垂直扩散,伴随着沉积物的持续沉降与再沉积过程。这种多阶段演变特征体现了深海采矿羽流的动力学复杂性,对评估其环境影响具有重要意义。

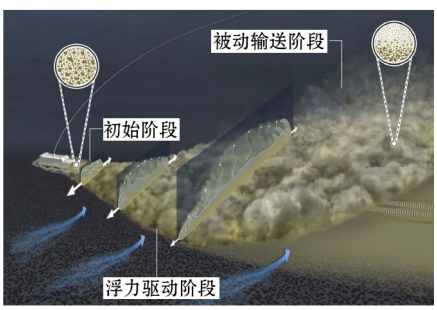


图 1 采矿车行驶过程产生的羽流[13]

Fig.1 Plume caused by mining vehicle[13]

如图 2 所示,采矿车产生的沉积物羽流主要源自履带齿与海底沉积物间的剪切相互作用,这些羽流主要集中分布于采矿车履带的后方区域。

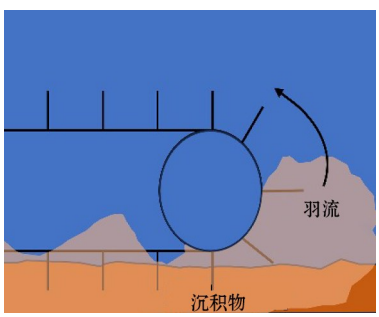
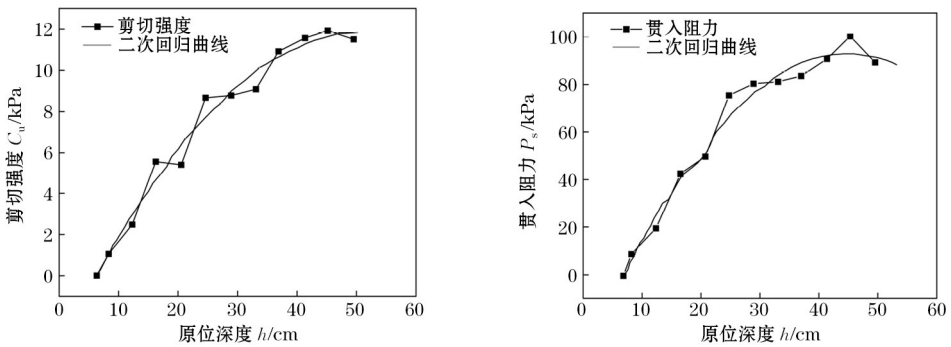


图 2 履带剪切沉积物

Fig.2 Cutting sediment of track

由于履带与沉积物之间的剪切作用机理涉及复杂的固-液两相流动、颗粒运动及湍流掺混等物理过程,为降低研究难度并突出关键物理机制,本研究采用滚轮系统替代履带结构,以模拟其对沉积物的剪切效应。这种简化模型保留了履带系统的基本剪切特性,同时提供了便于理论分析和数值模拟的研究框架。

东太平洋 CC 区多金属结核矿区沉积物大部分为含黏土的硅质软泥[14]。在东太平洋中国西矿区的 41 个测点中,对深海稀软底质的剪切强度(C_u)和贯入阻力(P_s)进行了测量。结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着沉积物原位深度的增加,剪切强度和贯入阻力都显著提高。在沉积物原位深度 $h=0\sim8$ cm 范围内,深海底质的抗剪切能力和承载能力极差,整体呈现流变特性,并且是产生羽流的主要区域。而在 $h=8\sim40$ cm 范围内,底质的剪切强度与贯入阻力显著增加。



(a) 剪切强度　　(b) 贯入阻力

图 3　深海稀软底质力学特性原位测试结果

Fig.3　In-situ test results of mechanical properties of deep-sea soft sediments

对于大部分深海沉积物而言,随着沉积物原位深度的增加,其含水量和孔隙比会逐渐减少,而湿密度则会相应地增加[15]。大洋多金属结核矿区沉积物土工性质见表 1。

表 1　稀软底质物理性质[16]

Table 1　Physical properties of soft sediments[16]

原位深度 h/cm	含水率 w/%	湿密度 ρ_w/(kN·m^{-2})	干密度 ρ_d/(kN·m^{-2})	孔隙比 e	液限 w_L/%	塑限 w_p/%
5	81.8	12.0	3.1	7.0	—	—
20	72.1	12.3	3.6	6.5	56.7	46.9
50	64.9	12.5	3.8	6.1	55.8	46.5
范围	70～82	12.0～12.5	3.1～3.8	6.1～7.9	55.5～57.0	44.0～47.0

黏土颗粒含水率与流动性的关系直接影响羽流形成,含水率越高,其塑性黏度越低,流动性越强。多金属结核矿区沉积物呈现流动状态,随着沉积物原位深度的增加,其物理性质呈现出流动状、流塑状和可塑状的渐变[17-19]。

1.2　数值模拟控制方程

欧拉模型对悬浮颗粒、流化床模拟的准确度较高,且相对简便高效,故运用欧拉模型模拟沉积物被剪切扩散的过程。在欧拉模型中,各相被视为互穿的连续介质,除了相间的质量、动量和能量传递,与此相伴的还有其他隐含的约束条件。为描述各相在控制体内的占用空间,使用体积分数来表示。

第 q 相占的体积定义为:

$$V_q=\int_V \alpha_q \mathrm{d}V \tag{1}$$

式中:V_q 为 q 相所占体积;V 为控制体的总体积;α_q 为 q 相体积分数,所有相体积分数总和为 1:

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q=1 \tag{2}$$

第 q 相在控制体内的有效密度表示为:

$$\hat{\rho}_q=\alpha_q\rho_q \tag{3}$$

式中:$\hat{\rho}_q$ 为体积内该相的有效密度;ρ_q 为 q 相液体的密度。

与单相质量守恒相比,控制体中某相的质量变化多了各相之间的质量传递相。

因此,第 q 相的连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla\cdot(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)=\sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp})+S_q \tag{4}$$

式中:t 为时间;∇为散度运算符;$\dot{m}_{pq}$ 为第 p 相向第 q

相的质量传递;$\dot{m}_{qp}$ 为第 q 相向第 p 相的质量传递。

在多金属结核开采过程中,初始时刻沉积物颗粒平铺在海床上,当采矿车驶过矿区,大量沉积物长时间悬浮,且相体积分数较高。因此选择了 Gidaspow 曳力模型。

在 Gidaspow 模型中,当$\alpha_s < 0.2$ 时,固液两相之间的交换系数K_{sl} 见式(5):

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \alpha_l^{-2.65} \tag{5}$$

式中:C_D 为曳力系数;α_s 为沉积物相体积分数;α_l 为海水相体积分数;d_s 为颗粒直径;$\vec{v}_s$ 为固相速度;$\vec{v}_l$ 为液相速度。

曳力系数C_D 计算公式为:

$$C_D = \frac{24}{a_l Re_s}[1 + 0.15 (a_l Re_s)^{0.687}] \tag{6}$$

当$\alpha_s > 0.2$ 时,交换系数K_{sl} 的表达式则为:

$$K_{sl} = 150 \frac{\alpha_s(1-\alpha_l)\mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_l \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \tag{7}$$

式中:Re_s 为雷诺数;u_l 为海水相动力黏度。

2 沉积物扰动数值模拟

2.1 模型及网格划分

在进行沉积物扰动模拟时,为简化复杂的履带建模过程且考虑到沉积物羽流的产生主要源于履带行驶后方履齿剪切沉积物的作用,将履带与沉积物的相互作用简化为滚筒齿轮与水土的相互作用进行模拟,简化模型结构如图 4 所示,简化参数见表 2。

表 2 滚筒结构参数

Table 2 Parameters of rotor structure

滚筒结构	参数
半径	400 mm
滚轮长度	1 600 mm
履齿结构	T 字型履齿
齿高	120 mm

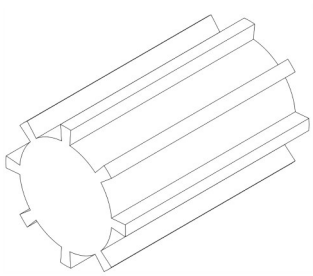


图 4 滚筒简化模型

Fig.4 Simplified model of rotor

网格可以根据其连接特征分为结构化和非结构化两类。结构化网格具有规则的连续性,通常由四边形和六面体单元构成;而非结构化网格则表现出不规则的连接模式。由于模拟涉及动网格模型的使用,因此本研究结合了结构化网格和非结构化网格,重点模拟沉积物被滚筒剪切扰动后激发扩散的初始特征,以通过滚筒附近流体的速度来体现。因此选择近海底固定高度截面上最大沉积物速度进行网格无关性验证,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着网格数不断增大,沉积物最大速度缓慢增大,单元数达到 80 万个后趋于稳定,在不影响计算精度同时兼顾计算成本和效率,本研究选择 80 万个网格进行计算,具体流体域网格划分如图 6 所示。

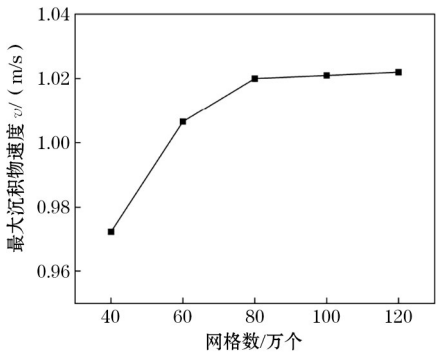


图 5 网格无关性验证

Fig.5 Independence verification of grid

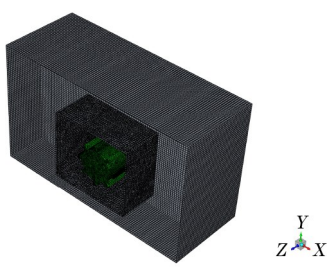


图 6 流体域网格划分

Fig.6 Grid division of fluid domain

2.2 边界条件设定

在该情景模拟中,本研究构建了一个长 5 m、宽 2 m、高 3 m 的长方体计算域。滚筒在通道内以预设转速绕 Z 轴旋转,如图 6 所示。为简化数值模拟,对沉积物扩散模型作以下假设:

(1) 深海矿区的洋流稳定且温度波动微小,因此忽略热量传递问题;

(2) 假设海水相为不可压缩、连续且性质均匀的流体,物理参数如温度、黏度和密度保持恒定,并假定固相颗粒为均匀球体;

(3) 设定周围边界为开放水域,允许混合物自

由流动；

(4) 由于结核矿区坡度一般小于 5°，假定海底为平面；

(5) 材料属性定义中，海水密度为 1 045 kg/m^3，对沉积物属性进行分层处理，0～8 cm 深度范围内沉积物密度设为 1 200 kg/m^3，8～25 cm 深度范围内沉积物密度设为 1 230 kg/m^3，超过 25 cm 深的沉积物密度设为 1 250 kg/m^3[16,20]。

(6) 定义多相流模型，将海水相设为主相，沉积物相为次相，填充极限使用默认值 0.63，并选择 Gidaspow 作为固液两相流曳力函数模型；

(7) 为多相流模型启动所需的湍流子模型选择 Realizable k-ε 湍流模型[21]。

2.3 试验方案设计

在相同海底底质条件下，静止状态时沉积物蠕变作用达到最大值，导致压陷量显著。随着采矿车行驶速度提升，蠕变效应逐渐减弱，压陷量呈下降趋势并最终趋于稳定状态[22]。表 3 详细记录了不同行驶速度条件下采矿车的压陷数据。研究表明，采矿车速度与压陷量之间存在非线性关系，这种关系受底质类型、孔隙水压力及载荷分布等多重因素影响。

表 3 不同行驶速度条件下采矿车的压陷数据[22]

Table 3 Subsidence data of a mining car under different travel speed conditions[22]

平行试验组	不同行驶速度下的稳定压陷量 h/cm				
	0 m/s	0.5 m/s	1.0 m/s	1.5 m/s	2.0 m/s
1	33.1	18.3	16.2	13.2	11.4
2	37.2	22.6	18.4	16.5	13.0
3	28.1	16.3	13.7	11.6	9.1
4	33.5	18.6	16.3	13.0	11.5
5	33.1	17.9	15.9	12.9	10.9

深海采矿车运行期间，采矿车压陷量范围主要分布在 12～33 cm 区间。研究聚焦于采矿车静止状态和稳定行驶过程中的压陷现象，忽略沉积物蠕变效应的影响。考虑到采矿车实际行驶速度区间为 0～1 m/s，且羽流的产生主要由履带后方剪切作用所致，本研究采用滚筒滚动线速度替代采矿车行驶速度开展模拟试验。分别设置 0.1，0.3，0.5，0.7 m/s 和 0.9 m/s 共 5 种滚筒最大线速度条件。研究选取两个典型工况：静止状态下的 33 cm 平均压陷量，以及 0.5 m/s 行驶速度下的 18 cm 稳定压陷量作为基准组。为评估护罩对羽流扩散的抑制效果，研究设计有无护罩的两组对比模拟方案。试验设计方案见表 4。

表 4 试验设计方案

Table 4 Test design plans

工况	滚筒最大线速度 v/(m/s)	压陷量 h/cm
1	0.1	18
2	0.3	18
3	0.5	18
4	0.7	18
5	0.9	18
6	0.1	33
7	0.3	33
8	0.5	33
9	0.7	33
10	0.9	33
11	0.5	18(添加护罩)
12	0.5	33(添加护罩)

2.4 结果分析

2.4.1 不同滚筒速度下的羽流扩散

沉积物在扰动后沿切线速度方向扩散，在 0～10 s 内，沉积物的扩散羽流分布如图 7 所示。在滚筒附近，后方羽流主要在后半履齿向上剪切过程中发生卷绕，形成高浓度聚集区，在涡流作用下逐渐扩散和稀释。而前方羽流主要在前半履齿向下剪切卷绕的过程中产生，此过程分别对应履带的前端和后端的运动特征。

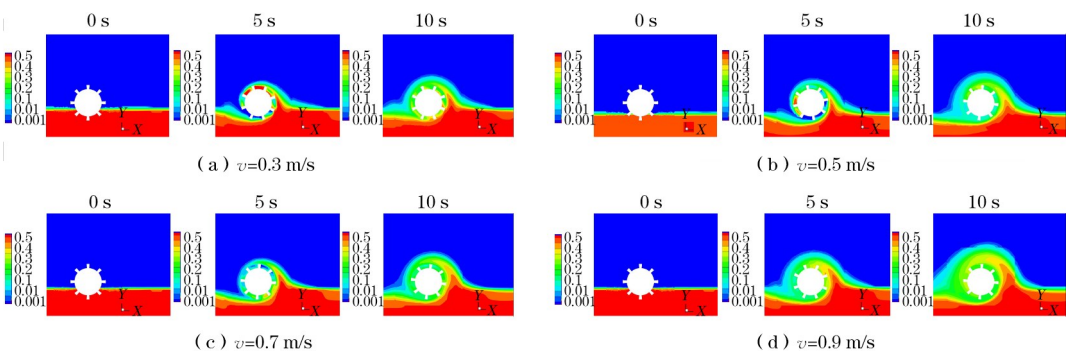


图 7 不同滚筒速度下沉积物羽流时间上的分布

Fig.7 Temporal distribution of sediment plumes at different roller velocities

图 8 为不同滚筒速度下沉积物羽流在空间上的分布。从图中可以看出,滚筒线速度与羽流扩散呈正相关性。当滚筒线速度从 0.3 m/s 提升至 0.5 m/s 时,羽流规模增加 18%;速度达到 0.9 m/s 时,羽流规模增加 30%。与滚筒线速度为 0.3 m/s 相比,0.9 m/s 工况下羽流最大高度由 1.0 m 增至 1.4 m。

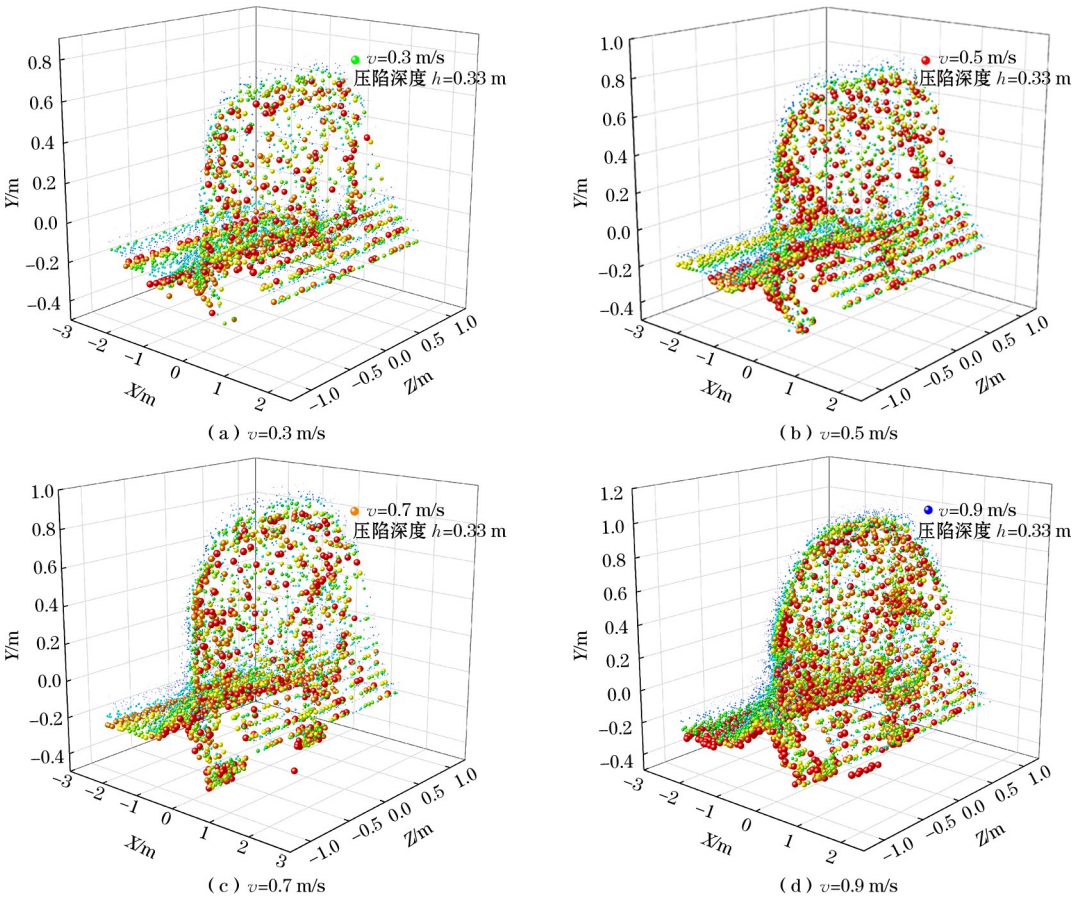


图 8 不同滚筒速度下沉积物羽流在空间上的分布

Fig.8 Spatial distribution of sediment plumes at different roller velocities

2.4.2 不同压陷深度下的羽流扩散

不同压陷深度下羽流扩散速度如图 9 所示。压陷深度降低对羽流扩散最大速度影响不明显,仅降低 3%左右,但对羽流扩散的平均速度产生显著影响,数据表明整体羽流扩散平均速度下降 16%。

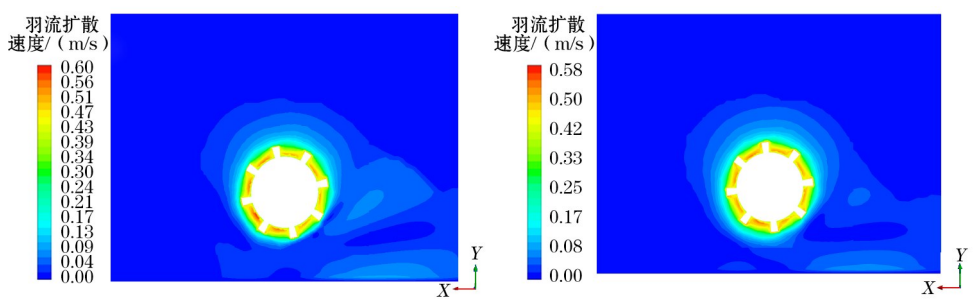
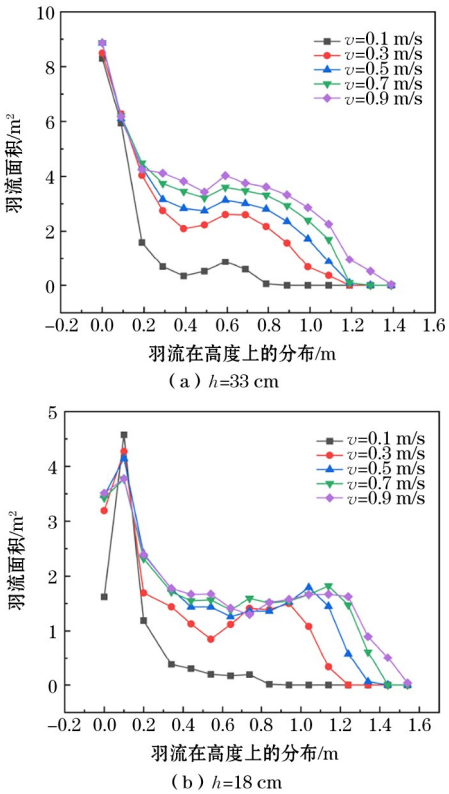


图 9 不同压陷深度下羽流扩散速度

Fig.9 Diffusion velocity of plume at different depression depths

羽流在高度上的分布如图 10 所示。图 10 表明,压陷深度对羽流高度影响不显著,但对羽流扩散面积影响显著。数据显示,当压陷深度从 33 cm 降至 18 cm 时,沉积物羽流扩散面积减少约 50%。水流卷绕效应是决定羽流高度的主导因素。压陷深度增加导致羽流规模扩大,这源于更深压陷环境下扰

动沉积物量的增加。



(a) h=33 cm

(b) h=18 cm

图 10 羽流在高度上的分布

Fig.10 Plume distribution at height

2.4.3 护罩对羽流扩散的影响

为研究护罩对降低羽流扩散程度的影响,进一步开展了模拟试验。在滚筒周围安装护罩板,护罩板与滚筒间距为 200 mm,覆盖区域包括滚筒两侧及底部,如图 11 所示。

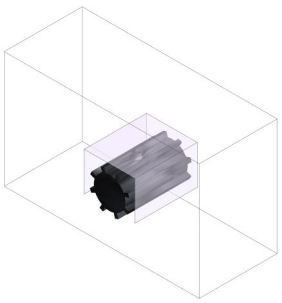
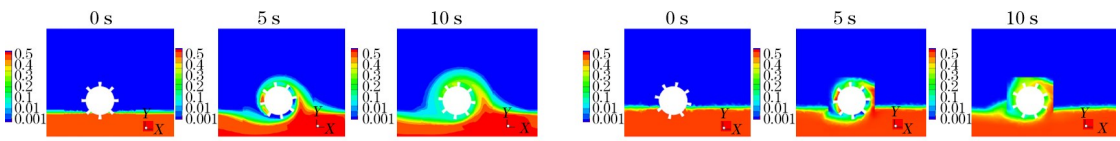


图 11 滚筒护罩设计示意

Fig.11 Design of the roller shield

在有无护罩的条件下,羽流在时间和空间上的分布情况如图 12 和图 13 所示。

从图 12 和图 13 可以明显对比得出,护罩对羽流产生显著抑制效果。羽流主体被限制于护罩内部,仅在滚筒前方出现少量扩散。数据显示羽流规模降至原值的 51%,羽流高度由 1.2 m 降低至 0.8 m。

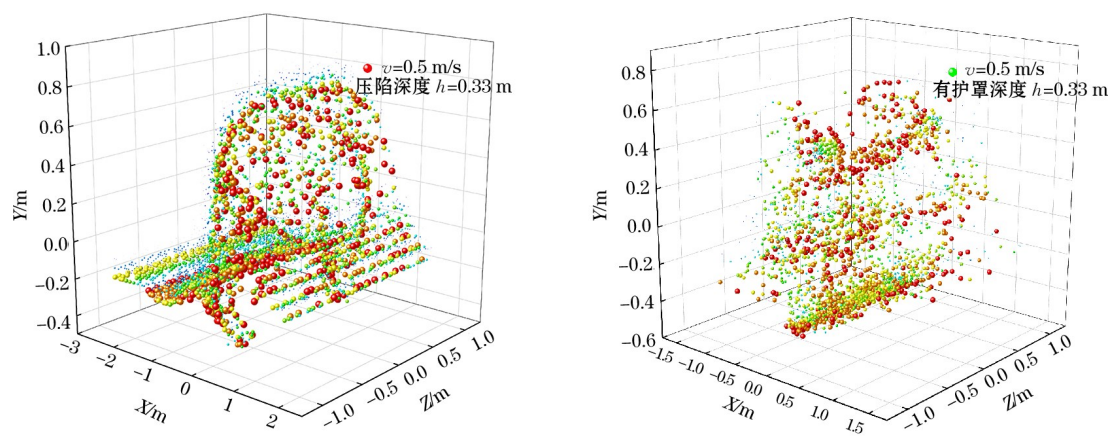


(a) v=0.5 m/s, 无护罩

(b) v=0.5 m/s, 有护罩

图 12 护罩对沉积物羽流在时间分布上的影响

Fig.12 The influence of the shield on the temporal distribution of sediment plumes



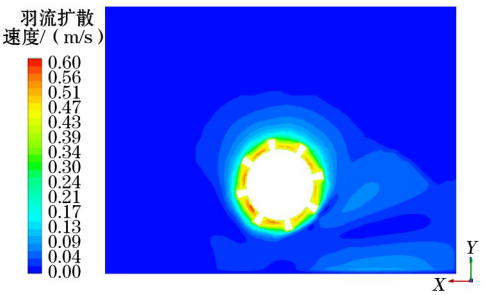
(a) v=0.5 m/s, 无护罩

(b) v=0.5 m/s, 有护罩

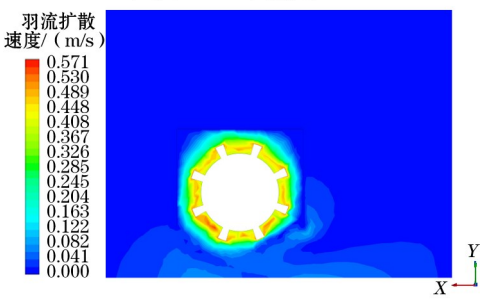
图 13 护罩对沉积物羽流在空间分布上的影响

Fig.13 The influence of the shield on the spatial distribution of sediment plumes

在有无护罩的条件下,沉积物羽流扩散速度的情况如图 14 所示。从图中可发现添加护罩后,沉积物羽流的扩散得到了极大的抑制,仅有前方和后方底部部分羽流有扩散趋势,扩散趋势降低至原本的 46%,平均扩散速度降低了 4%。



(a) v=0.5 m/s,无护罩



(b) v=0.5 m/s,有护罩

图 14 护罩对沉积物羽流扩散速度的影响

Fig.14 The influence of the shield on the diffusion rate of sediment plumes

3 结论

(1) 采用欧拉多相流模型对深海沉积物羽流的激发扩散进行了模拟,使用简化的滚筒模型代替复杂的履带模型探讨了不同转速、不同压陷深度以及有无羽流护罩条件下滚筒剪切、卷绕作用对沉积物羽流的影响。

(2) 当滚轮的最大线速度超过 0.3 m/s 时,羽流高度明显增加。在较高转速条件下,羽流主要汇集在原底质上方 0.4～1.0 m 范围内,而超过 1.0 m 后羽流规模减少。33 cm 的压陷深度下的平均羽流规模是 18 cm 的压陷深度下的 2 倍,反映出压陷深度对羽流生成有显著影响。随着压陷深度的增加,羽流高度并没有增加,表明羽流高度的主要影响因素为水流卷绕作用。降低整个采矿车的质量以达到更小的压陷深度,对控制羽流规模有较大的影响。

(3) 在安装羽流护罩后,羽流规模、羽流高度及羽流扩散趋势均有显著的下降,表明护罩等羽流抑制装置可对羽流的抑制起到十分关键的作用。

参考文献(References):

[1] 刘少军,刘畅,戴瑜.深海采矿装备研发的现状与进展[J].机械工程学报,2014,50(2):8-18.
LIU Shaojun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering,2014,50(2):8-18.

[2] HOWARD P, PARKER G, JENNER N, et al. An assessment of the risks and impacts of seabed mining on marine ecosystems [J]. Fauna and Flora International: Cambridge, United Kingdom,2020,336.

[3] KOSCHINSKY A, HEINRICH L, BOEHNKE K, et al. Deep-sea mining: interdisciplinary research on potential environmental, legal, economic, and societal implications [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2018, 14(6):672-691.

[4] VONNAHME T R, MOLARI M, JANSSEN F, et al. Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years [J]. Science Advances,2020,6(18):5922.

[5] WEAVER P P E, AGUZZI J, BOSCHEN-ROSE R E, et al. Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles[J]. Marine Policy,2022,139:105011.

[6] 刘欣,杨博,梁丙臣,等.基于 OpenFOAM 的悬沙与运动集矿车相互作用数值模拟研究[J].水道港口,2023,44(1):19-30.
LIU Xin, YANG Bo, LIANG Bingchen, et al. Numerical simulation of the interaction between suspended sediment and nodule colector/harvest based on OpenFOAM [J]. Journal of Waterway and Harbor,2023,44(1):19-30.

[7] 胡琼,王洋洋,欧雨佳,等.履齿结构对深海沉积物扰动分析[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(6):1127-1134.
HU Qiong, WANG Yangyang, OU Yujia, et al. Deep-sea sediment disturbance analysis using a tracked teeth structure [J]. Journal of Harbin Engineering University,2024,45(6):1127-1134.

[8] 旷芳芳,张俊鹏,靖春生,等.CC 区深海采矿羽流扩散的数值模拟研究[J].应用海洋学学报,2024,43(3):462-472.
KUANG Fangfang, ZHANG Junpeng, JING Chunsheng, et al. Modelling of sediment plumes generated by deep-sea mining in CC area[J]. Journal of Applied Oceanography, 2024,43(3):462-472.

[9] BERTEVAS E, TRAN-DUC T, LE-CAO K, et al. A smoothed particle hydrodynamics (SPH) formulation of a two-phase mixture model and its application to turbulent sediment transport[J]. Physics of Fluids,2019,31(10):5122671.

[10] TRAN-DUC T, PHAN-THIEN N, KHOO B C. A smoothed particle hydrodynamics (SPH) study on polydisperse sediment from technical activities on seabed[J]. Physics of Fluids,2018,30(2):023302.

[11] 詹琳,于鑫雨,韩录维,等.西北太平洋多金属结核矿区沉积物沉降特性研究[J].泥沙研究,2023,48(2):17-21+29.

ZHAN Lin, YU Xinyu, HAN Luwei, et al. Study on the sediment deposition characteristics in the Western Pacific Polymetallic Nodules Mining Area[J]. Journal of Sediment Research,2023,48(2):17-21+29.

[12] LIU S H, YANG J, LU H, et al. A numerical investigation of the dynamic interaction between the deep-sea mining vehicle and sediment plumes based on a small-scale analysis [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11 (7):1458.

[13] MUÑOZ-ROYO C, OUILLON R, EL MOUSADIK S, et al. An in situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle[J]. Science Advances, 2022,8(38):1219.

[14] 牛作民.东太平洋洋底沉积物的物质组成与物理化学特征[J].沉积学报,1993(1):121-127.
NIU Zuomin. Composition and physicochemical features of the seafloor sediments in the Eastern Pacific Ocean[J]. Acta Sedimentologica Sinica,1993(1):121-127.

[15] 陈小玲.大洋多金属结核矿区表层沉积物的物理性质[J].东海海洋,2004(1):28-33.
CHEN Xiaoling. The physical properties of surface sediments in oceanic polymetallic nodule[J]. Donghai Marine Science,2004(1):28-33.

[16] 宋连清.大洋多金属结核矿区沉积物土工性质[J].海洋学报(中文版),1999(6):47-54.
SONG Lianqing. Geotechnical properties of oceanic polymetallic nodule sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica,1999(6):47-54.

[17] 地质矿产部广州海洋地质调查局. 太平洋地质科学调查(二)[M]. 北京:地质出版社, 1992.
Guangzhou Marine Geological Survey. Pacific geological survey (2)[M]. Beijing:Geology Press,1992.

[18] 地质矿产部广州海洋地质调查局. 太平洋地质科学调查(一)[M]. 北京:地质出版社, 1992.
Guangzhou Marine Geological Survey. Pacific geological survey (1).[M]. Beijing:Geology Press,1992.

[19] 国家海洋局.中太平洋北部锰结核调查综合研究报告[M].北京:海洋出版社, 1986.
State Oceanic Administration. Comprehensive research report on manganese nodule survey in the north Central Pacific Ocean[M]. Beijing: China Ocean Press,1986.

[20] LIN Y, WENG Z, GUO J, et al. Simulation study on the sediment dispersion during deep-sea nodule harvesting[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2022,11(1):10.

[21] 罗时明.深海集矿车扰动沉积物羽流抑制技术与装置开发[D].杭州:浙江理工大学,2023.
LUO Shiming. Device development and control technology of deep sea mining sediment plume[D]. Hangzhou:Zhejiang Scitech University,2023.

[22] 赵化淋,孙永福,贾超,等.基于 Burger's 蠕变模型的采矿车行驶海底稀软底质下陷研究[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(1):179-190.
ZHAO Hualin, SUN Yongfu, JIA Chao, et al. The subsidence by mining car traveling on deep-sea soft bottom based on Burger's creep model [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2024,44(1):179-190.