

深海采矿沉积物羽流静水扩散特性试验研究^①

刘泽霖¹, 陈时平², 郑皓², 吴翔¹, 饶秋华¹

(1.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2.长沙矿冶研究院股份有限公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 采用 Fluent 软件建立深海采矿车行走对海底沉积物扰动作用的数值仿真模型, 分析了海底沉积物羽流产生机理, 并开展海底沉积物羽流静水扩散的大型水槽试验, 探明不同初始质量浓度下沉积物羽流扩散的形态特征和浓度变化规律。结果表明: 海底沉积物羽流主要由采矿车行走对海底沉积物扰动作用所致; 不同排放质量浓度下沉积物羽流扩散的整体形态特征大致相同, 可分为初始排放、初次沉降和扩散、反弹再沉降扩散 3 个阶段, 而羽流扩散浓度经历了快速上升、快速下降、缓慢下降至稳定 3 个阶段。

关键词: 深海采矿; 环境影响评价; 海洋环境保护; 采矿车; 海底沉积物; 悬浮物; 羽流; 大型水槽; 静水试验; 扩散; 沉降

中图分类号: TD857

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.010

文章编号: 0253-6099(2025)03-0063-06

Experimental Study on Diffusion Characteristics of Sediment Plumes in Still Water During Deep-Sea Mining

LIU Zelin¹, CHEN Shiping², ZHENG Hao², WU Xiang¹, RAO Qiuhua¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: A numerical simulation model was established with Fluent software to analyze the disturbance effect of a subsea collector vehicle on seabed sediments, and the generation mechanism of seabed sediment plumes was analyzed. A large-scale tank experiment on diffusion of sediment plume was conducted to investigate the morphological characteristics and concentration variation rule of sediment plume under different initial mass concentrations. The results show that seabed sediment plumes are created mainly by the disturbance due to the movement of a collector vehicle. The overall morphological characteristics of such sediment plume under different discharge concentrations are roughly similar, and the diffusion of sediment plumes can undergo three stages: initial discharge, primary settlement and diffusion, and re-settlement and diffusion. The plume concentration also varies in the following three steps: rapid rise, rapid decline, and slow decline before stabilization.

Key words: deep-sea mining; environmental impact assessment (EIA); marine environmental protection; collector vehicle; seabed sediment; suspension; plume; large-scale tank; still water test; diffusion; sedimentation

深海蕴藏着丰富的多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物等矿产资源, 具有巨大的经济价值和战略意义^[1-3]。近年来, 深海采矿受到了广泛关注。然而, 在深海采矿作业过程中, 采矿车辆会扰动海底沉积物, 使其悬浮并与海水混合形成沉积物羽流^[4-6]。沉积物羽流颗粒较小, 难以快速沉降, 会在数十年内扩散数千公里, 影响海洋生态环境。因此, 研究深海采矿沉积物羽

流的扩散特征, 对评价深海采矿的环境影响、制定合理的环境保护措施具有重要意义^[7]。

目前, 众多学者采用理论模型或数值模拟对深海采矿沉积物羽流的扩散特性^[8-12]进行了研究, 在理论模型方面, 文献[8]建立了对流-扩散-沉降模型, 文献[9]建立了新的不规则颗粒沉降阻力系数模型; 在数值模拟方面, 主要采用 CFD-DPM、Jankowski 模型、欧拉双流

① 收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0010)

作者简介: 刘泽霖(1995—), 男, 贵州织金人, 博士研究生, 主要研究方向为深海采矿。E-mail: 630740195@qq.com

通信作者: 郑皓(1981—), 男, 江西上饶人, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为深海矿产资源开发利用。E-mail: zhenghao19810620@126.com

饶秋华(1965—), 女, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要研究方向为深海矿产资源开发及断裂力学。E-mail: raoqh@csu.edu.cn

体模型等方法^[10-12]。上述理论和数值模型需要通过深海原位试验或实验室羽流扩散试验验证。深海原位试验主要采用声学、光学等方法对羽流扩散特性进行监测^[13-14]。由于深海环境的复杂性和监测技术的局限性,原位监测羽流扩散特征仍存在很大困难,因此通常采用实验室试验,现有的室内试验以小型水槽试验为主^[15-16],羽流可能转变为喷射,在研究深海采矿沉积物羽流扩散特性方面存在一定的局限性。

本文在分析深海采矿沉积物羽流形成过程的基础上,采用 Fluent 软件建立采矿车行走对海底沉积物扰动作用的数值仿真模型,计算并分析海底沉积物羽流产生机理;设计并开展海底沉积物羽流静水扩散的大型水槽试验,研究不同初始质量浓度下沉积物羽流扩散的形态特征和浓度变化规律,为深海采矿的环境影响评估提供试验依据。

1 深海采矿沉积物羽流形成机理

1.1 表层和海底沉积物羽流形成过程

在深海多金属结核采矿作业中,沉积物羽流按照产生位置的不同可分为两类:表层沉积物羽流和海底沉积物羽流,如图 1 所示。其中,表层沉积物羽流主要来源于水面船舶系统通过排放管将尾矿排入海洋所释放的大量废水,该废水通常包含海水、海底沉积物、结核碎屑及海底生物等。海底沉积物羽流是多金属结核采矿车在海底采集、行走以及矿物分离破碎作业过程中产生的。采用水力集矿时,高压水射流会对海底 10 cm 左右深度的矿物实施“剥离”操作,使得大量海底沉积

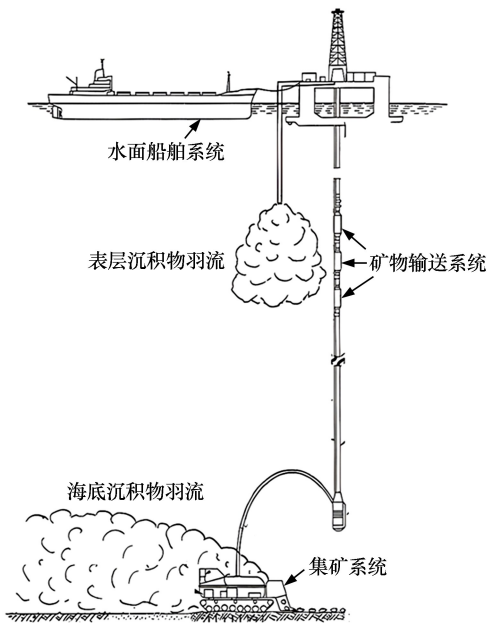


图 1 深海采矿沉积物羽流示意图

Fig.1 Schematic diagram of sediment plume in deep-sea mining

物被搅动起来,同时采矿车行走也会对海底沉积物形成扰动。其中大颗粒物质因重力作用会迅速沉降于海底;而较小颗粒物质(尤其是直径小于 50 μm 颗粒)由于自身尺寸微小、沉降速度低,在水体中长时间停留,并经历悬浮、絮凝、扩散以及再沉降等一系列运动过程,同时借助海底洋流的作用进行长距离的沉降和扩散运动,最终形成海底沉积物羽流。

1.2 采矿车行走对海底沉积物扰动作用的计算模型

采用 Fluent 软件建立采矿车行走时履齿与稀软底质作用的计算模型,如图 2 所示,设置海水密度为 1 045 kg/m^3 ,沉积物粒径为 65 μm 、湿密度为 1 350 kg/m^3 。采矿车滚轮陷入沉积物深度为滚轮高度的 25%~30%,选取滚轮直径 1 040 mm、陷入深度约 260 mm (25%)。根据采矿车的实际行进速度,利用 Fluent 软件的 UDF 函数设定滚轮的水平线速度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m/s 。

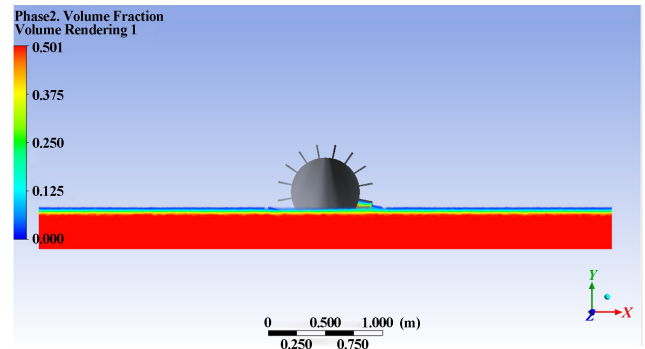


图 2 履齿与稀软底质作用的计算模型

Fig.2 Calculation model of interaction between caterpillar tracks and seabed sediments

考虑到该模型中固相和液相所受到的海水压强相同,每相均可采用欧拉坐标系计算,求解其动量方程和连续性方程。由于初始时刻沉积物中的泥土颗粒平铺在海床上且体积分数较高,选用 Gidaspow 曳力模型^[17]进行计算,当液相体积分数 $\alpha_1 > 0.8$ 时,固液两相间界面动量交换系数 K_{s1} 计算公式为:

$$K_{s1} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_1 \rho_1 |v_s - v_1|}{d_s} \alpha_1^{-2.65}$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_1 \text{Re}} [1 + 0.15(\alpha_1 \text{Re})^{0.687}] \quad (1)$$

当 $\alpha_1 \leq 0.8$ 时, K_{s1} 计算公式为:

$$K_{s1} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_1) \mu_1}{\alpha_1 d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_1 \alpha_s |v_s - v_1|}{d_s} \quad (2)$$

式中: C_D 为球形颗粒阻力系数; α_s 和 d_s 分别为固体颗粒体积分数和直径; v_s 和 v_1 分别为固相和液相的速

度;Re 为雷诺数; μ_l 和 ρ_l 分别为液体的黏度和密度。

选取计算精度较高的 $k-\varepsilon$ 模型作为海底沉积物扩散的湍流模型,其湍流动能和耗散率输送方程分别为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_l k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_l k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho_l \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_l \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho_l C_1 S_\varepsilon - \\ \rho_l C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2} S_{ij} \quad (4)$$

式中: k 为湍流动能; u_j 为平均相对速度分量; μ 为动力黏度; μ_t 为湍流黏度; σ_k 、 σ_ε 分别为湍流动能、湍动耗散率所对应的普朗特数($\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$); G_k 为湍流能量引起的浮力影响; G_b 为浮力影响引起的湍动能; ε 为湍流耗散率; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献; S_k 、 S_ε 均为用户自定义的源项; C_1 、 C_2 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 均为模型常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$; v 为动量扩散率; η 为湍流比率; S 为应变率的二阶不变量; S_{ij} 为平均应变率张量。

海底沉积物羽流体积分数的计算过程如下。

1) 网格划分:使用网格划分工具对几何模型划分网格,网格为2维结构化+非结构化网格(滚轮部分),数量为80000。

2) 多相流模型:欧拉多相流模型,湍流模型为 $k-\varepsilon$ 模型,相间相互作用模型设置为 Gidaspow。

3) 边界条件:模型底部四周设置为开放式水域,边界条件设置为对称边界;底部和滚轮边界条件设置为墙体。

4) 初始化流场:底部设置为沉积物与海水混合,沉积物体积分数为0.5,上方设置为海水。

5) 迭代计算:通过迭代求解质量、动量、能量守恒方程和相体积分数的输运方程。

6) 后处理:利用 Fluent 软件的后处理功能生成体积分数分布图,其中体积分数为某物质体积占混合体积分数的百分数,所有相体积分数总和为1。

1.3 海底沉积物羽流产生机理分析

不同行走速度、不同时刻的海底沉积物体积分布如图3所示,上部大面积部分代表小体积分数,下部小面积部分代表大体积分数。由图3可以看出,随着时间增加,无论采矿车行走速度多少,滚轮后方的沉积物均会被进一步卷起,且被卷起的沉积物高度和体积呈现上升态势。速度0.1 m/s,时间从0到10 s时,被卷

起的沉积物体积持续增加,只是高度相对较低。这是因为随着时间增加,滚轮持续作用于沉积物并不断为被卷起的沉积物提供一定的向上运动动能,即使在较低速度下,沉积物被卷起的高度也会逐渐增加而最终导致体积增加。随着速度增加,被滚轮卷起的沉积物范围和体积显著增大,并且其高度逐渐高于滚轮高度。速度0.5、0.7、0.9 m/s时,被卷起的沉积物体积逐渐增大,沉积物开始出现在滚轮四周且范围逐渐变大。这是因为速度增加时,滚轮对沉积物的动力作用显著增强,较高的线速度赋予滚轮更大的动量,致使沉积物能克服自身重力和颗粒间的内聚力而产生更大的运动,从而导致垂直高度超过滚轮高度。而斜向后的抛射力使得沉积物具有更大的向外运动分量,导致其体积逐渐增大并向四周扩散,最终分布范围逐渐变大。综上所述,采矿车的行走速度和时间均显著影响履齿卷起的沉积物体积分布,较高的速度和较长的时间都会引起更多的沉积物被卷起,集中在滚轮四周的范围更大,从而导致沉积物羽流的初始质量浓度和初始扩散速度增大,直接影响海底沉积物羽流的扩散特性。

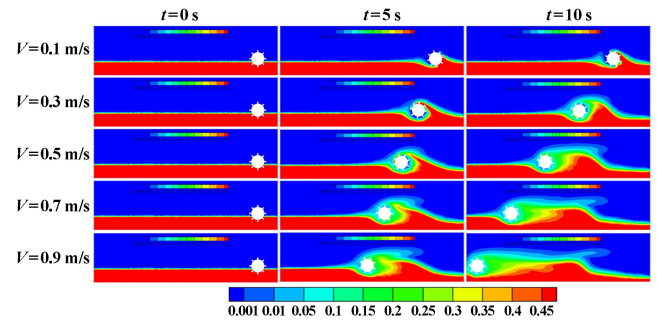


图3 海底沉积物体积分布

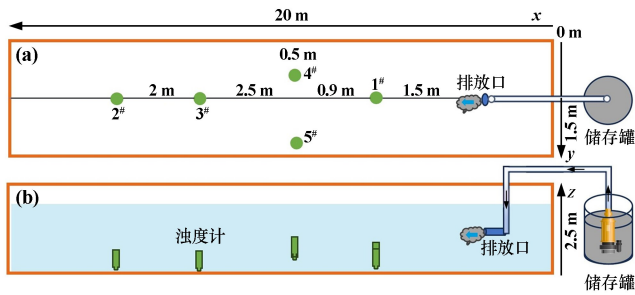
Fig.3 Volume distribution of seabed sediments

2 海底沉积物羽流静水扩散试验

2.1 大型水槽及试验设备

利用深海矿产资源开发利用国家重点实验室平台,设计并开展海底沉积物羽流静水扩散大型水槽试验,试验布置如图4所示,长方体水槽尺寸为20 m × 1.5 m × 2.5 m,顶部为开放式,便于在不同位置安装仪器;底部为钢制底板,承重能力强;四面为透明玻璃,可清晰观察羽流扩散过程。水槽配有沉积物排放系统和监测系统,其中沉积物排放系统包括排放口(x 、 y 、 z 分别为8、0.75、0.5 m,排放沉积物溶液)、储存罐(储存沉积物溶液)、沉积物抽吸泵(以恒定的排放速率抽取沉积物溶液)和流量计(控制和测量沉积物溶液的排放速率);监测系统包括5套 Sinomeasure 浊度计(测量羽

流的质量浓度)和2台摄像机(监测羽流的顶部和侧面扩散特征)。浊度计的位置坐标见表1。



(a) 俯视图; (b) 正视图

图4 试验布置图

Fig.4 Layout of test equipment

表1 浊度计位置坐标

Table 1 Coordinates of turbidimeter locations

| 编号 | 坐标/m | | |
|----|------|------|------|
| | x | y | z |
| 1# | 9.5 | 0.75 | 0.35 |
| 2# | 14.9 | 0.75 | 0.15 |
| 3# | 12.9 | 0.75 | 0.20 |
| 4# | 10.4 | 0.50 | 0.35 |
| 5# | 10.4 | 1.25 | 0.40 |

2.2 试验步骤

在设定的排放速度(30 L/min)和不同的沉积物溶液初始质量浓度(10、20、30 g/L)条件下,开展沉积物羽流静水扩散的大型水槽试验,试验步骤如下。

1) 注水及沉积物溶液准备:往水槽中注入高度0.8 m 自来水(约40 m³),注水完毕静置20 min 后开始试验,ADCP 监测结果显示排放前水槽内水无相对流动(静止状态);沉积物采集于太平洋矿区,其粒径分布如图5所示($d_{50} = 7.43 \mu\text{m}$)。根据沉积物含水量,制备体积40 L 但质量浓度不同的沉积物溶液,并采用大功率电动搅拌器进行充分搅拌(约3 min),直至混合均匀。

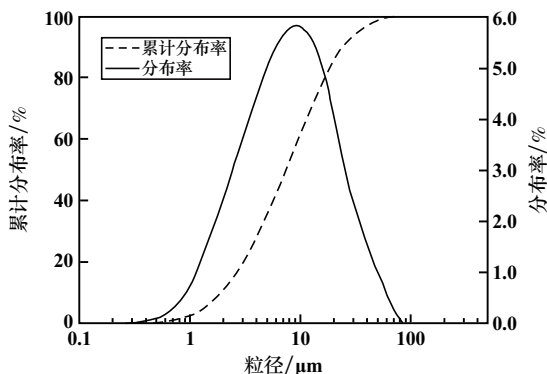


图5 深海沉积物的粒径分布

Fig.5 Size distribution of seabed sediments

2) 开始和停止排放沉淀溶液:在排放前通过搅拌器将沉积物再次搅拌混合均匀,而后将40 L 的沉积物溶液通过水管泵送至水槽的排放口完全排出,分别使用流量计、浊度计和摄像机实时监测排放速率、羽流扩散浓度和形态特征。

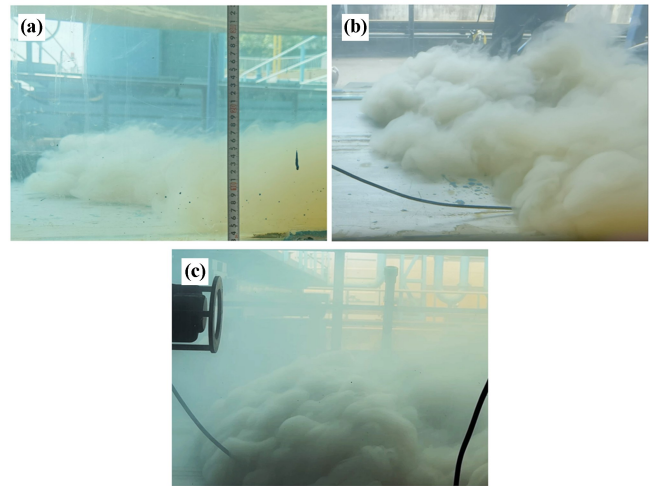
3) 停止试验:当沉积物羽流在水槽中的扩散和沉降速度基本不变时,即浊度计监测到的羽流质量浓度基本保持不变(约3 h)时,停止监测,结束试验。

4) 数据处理和分析:对收集的数据进行处理和分析,包括羽流扩散形态特征和质量浓度。

3 海底沉积物羽流静水扩散特性分析

3.1 羽流扩散形态特征

图6为不同排放质量浓度下沉积物羽流扩散的端部形态特征。由图6可以看出,随着排放质量浓度增加,沉积物羽流的端部呈现从稀薄、松散、扩散范围较大到紧密、集中、扩散范围较小的形态特征,其主要是颗粒间相互作用力和流体动力学效应的相互作用所致。排放质量浓度较低时,颗粒间的距离相对较大、相互作用力较弱,颗粒主要受到流体动力的作用,即流体对颗粒的拖曳力和浮力起主要作用,从而导致羽流端部颗粒较为分散和不规则^[18-19]。排放质量浓度较高时,颗粒间的距离减小、相互作用力(如范德华力、静电力等)增强,流体动力的影响减弱,致使颗粒更容易团聚起来抵抗流体的扩散作用,从而形成更为集中、规则的羽流端部形态。



(a) 10 g/L; (b) 20 g/L; (c) 30 g/L

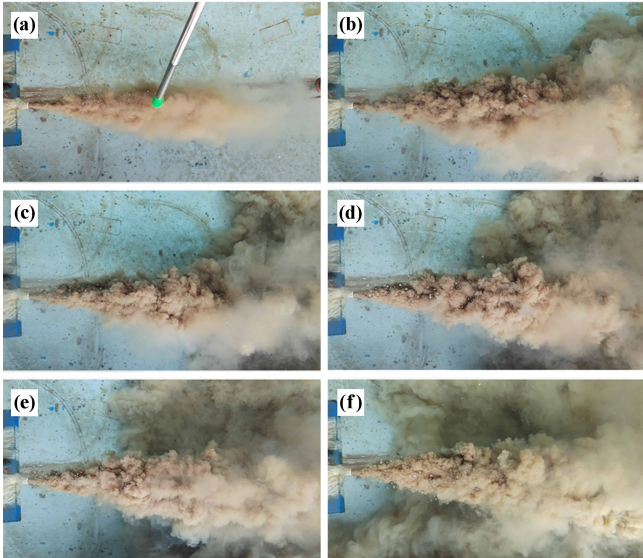
图6 不同排放质量浓度下沉积物羽流扩散的端部形态特征

Fig.6 Morphological feature of end part of diffused sediment plumes under different discharge concentrations

根据试验结果可知,不同排放质量浓度下沉积物

羽流扩散的整体形态特征大致相同,可分为初始排放、初次沉降和扩散、反弹再沉降扩散 3 个阶段,故选取排放质量浓度 30 g/L 的沉积物羽流扩散的整体形态特征进行阐述,如图 7 所示。在初始排放阶段,由于排放速度较快,沉积物在高压作用下迅速从排放口处集中

喷出而形成纺锤形(3 s),此时沉积物的动能较大,能够克服周围水体的阻力而保持较为集中的形态。在初次沉降和扩散阶段,沉积物因湍流作用向四周扩散,宽度不断增大(30 s);随着时间推移,沉积物动能逐渐减小,浮力和重力平衡被打破,沉积物开始沉降。沉积物羽流在重力、浮力及水体的黏性作用下开始向下沉降并不断扩散,羽流高度降低,宽度进一步增加(50 s)。在反弹再沉降扩散阶段,沉积物到达水槽底部后在反弹作用和湍流作用下开始迅速向四周扩散,底部扩散范围不断扩大(60 s)。最后,羽流中大颗粒基本沉降完毕,水体阻力也使细颗粒沉积物的沉降速度逐渐减缓到达稳定,最终在底部形成一层较厚的沉积层(70 s)。由此可见,沉积物羽流扩散的形态变化是由沉积物的初始排放动能、水中浮力和重力的合力、水体的黏性和湍流作用等多因素共同作用所致。



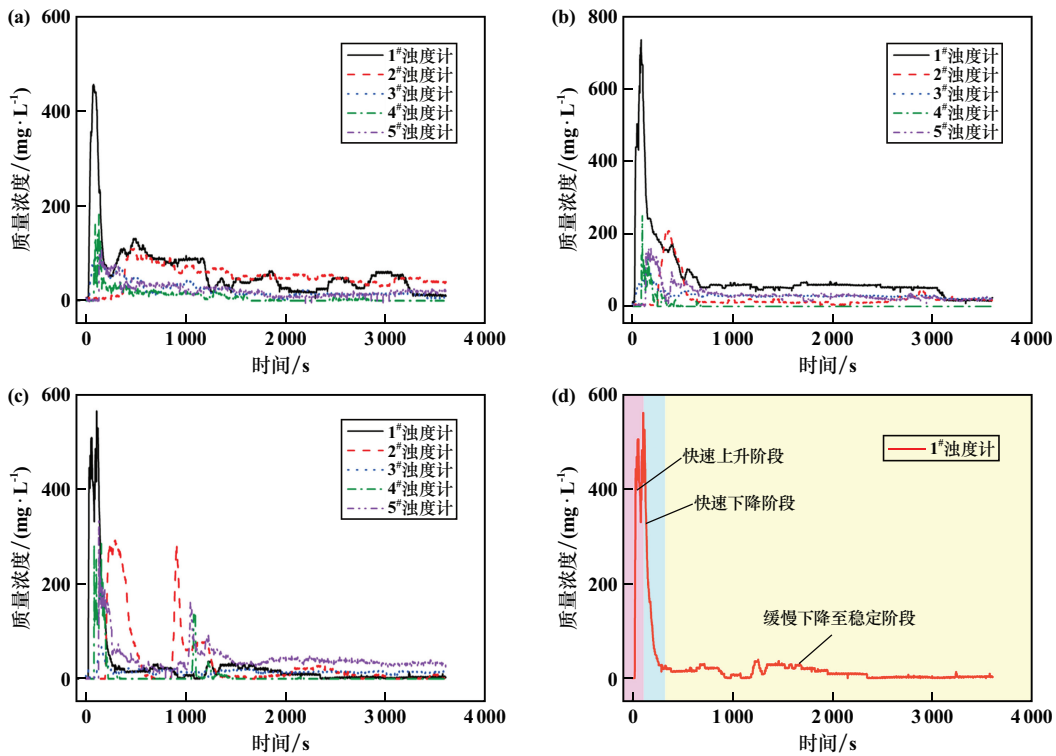
(a) 3 s; (b) 30 s; (c) 40 s; (d) 50 s; (e) 60 s; (f) 70 s

图 7 初始质量浓度 30 g/L 时沉积物羽流扩散的整体形态特征

Fig. 7 Overall morphological features of sediment plume diffusion under initial concentration of 30 g/L

3.2 羽流扩散浓度

图 8 为不同初始质量浓度下沉积物羽流扩散浓度(质量浓度)随时间的变化曲线图。由图 8 可知,各曲线都具有相近的变化趋势,可分为快速上升、快速下降、缓慢下降至稳定 3 个阶段。以初始质量浓度 30 g/L 时的 1#浊度计监测数据(图 8(d))为例进行分析,在沉积物溶液排放初期(第 1 阶段),由于排放速度快且质量浓度高,高质量浓度的沉积物颗粒迅速进入水体形



(a) 10 g/L; (b) 20 g/L; (c) 30 g/L; (d) 30 g/L-1# 浊度计

图 8 不同初始质量浓度下沉积物羽流扩散浓度随时间的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of sediment plume diffusion concentration with time under different initial concentrations

成羽流,并在短时间内大量进入监测点范围,从而导致羽流质量浓度急剧上升并达到峰值;随着排放时间不断增加(第2阶段),沉积物颗粒在周围水体中的扩散作用开始增强,水体的湍流和扩散作用将高质量浓度的沉积物颗粒稀释,且部分沉积物颗粒在重力作用下开始快速沉降,从而导致羽流质量浓度在达到峰值后快速降低;最后,大部分高质量浓度的粗颗粒已经完全沉降,低质量浓度的细颗粒沉降和扩散逐渐变缓,羽流扩散浓度降低较小,当细颗粒不再扩散时,羽流扩散浓度几乎不变而最终趋于稳定(第3阶段)。

不同初始质量浓度对沉积物羽流扩散浓度的影响表现为:初始浓度 10 g/L 时,羽流扩散的峰值浓度较低、峰值出现时间较晚,且最终稳定平均浓度较低;初始浓度 30 g/L 时,羽流扩散的峰值浓度较高、峰值出现时间较早,且最终稳定平均浓度较高。这是因为初始质量浓度越大,浓度梯度及扩散通量更大,对周围水体的扰动更大,湍流效果更明显,扩散速率更快(菲克定律),同时沉积物羽流中颗粒更多、持续扩散能力更强、沉降更快。因此沉积物扩散浓度峰值更高,出现时间更早,下降速度更快,最终稳定平均质量浓度更高。

4 结论

1) 采用 Fluent 软件建立了采矿车行走对海底沉积物扰动作用的数值仿真模型,计算并分析了海底沉积物羽流产生机理,通过海底沉积物羽流静水扩散的大型水槽试验,探明了不同初始质量浓度下沉积物羽流扩散的形态特征和质量浓度变化规律。

2) 深海采矿沉积物羽流分为表层沉积物羽流和海底沉积物羽流两类,海底沉积物羽流主要由采矿车行走对海底沉积物扰动作用所致,速度越快,滚轮的動力越大,向后的抛射力更大,卷起的沉积物高度更高、范围越大、质量浓度也越高,由此所引发沉积物羽流的初始质量浓度和初始速度更大。

3) 不同排放质量浓度下沉积物羽流扩散的整体形态特征大致相同,可分为初始排放、初次沉降和扩散、反弹再沉降扩散 3 个阶段。随着排放质量浓度的增加,沉积物羽流的端部形态特征从稀薄、松散、扩散范围较大变化到紧密、集中、扩散范围较小。

4) 羽流的扩散浓度演化经历了快速上升、快速下降和缓慢下降至稳定 3 个阶段。随着沉积物溶液初始质量浓度的增加,羽流扩散浓度在第 1 阶段峰值更高、出现时间更早,在第 2 阶段下降更快,而在第 3 阶段羽流最终稳定平均质量浓度更高。

5) 大型水槽试验虽然与真实的深海环境相比仍存在一定的差异,如尚未考虑复杂的海底地形和多变

的海洋流场等因素,但它能监测到沉积物羽流静水扩散的形态特征和质量浓度演变规律,可为深海采矿的环境影响评估提供试验依据。

参考文献(References):

- [1] 李满红,程阳锐,李小艳,等. 日本深海采矿发展现状分析及启示[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):16-20.
LI Manhong, CHENG Yangrui, LI Xiaoyan, et al. Analysis of current status of Japan's progress in deep sea mining and its revelations[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):16-20.
- [2] 饶秋华,刘泽霖,许锋,等. 深海稀软底质特性及采矿车行走性能研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(10):2795-2816.
RAO Qiuhua, LIU Zelin, XU Feng, et al. Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(10):2795-2816.
- [3] 邹丽,孙佳昭,孙哲,等. 我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023,44(5):708-716.
ZOU Li, SUN Jiazhao, SUN Zhe, et al. Deep-sea mining core technology in China: Current situation and prospects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023,44(5):708-716.
- [4] 张东宽,刘美麟,夏建新. 深海多金属结核采集过程对沉积物扰动试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):20-23.
ZHANG Dongkuan, LIU Meilin, XIA Jianxin. Experimental study on sediment disturbance during collection of deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):20-23.
- [5] 李秀,徐立新,窦培林,等. 深海采矿羽状流及其监测试验综述[J]. 船舶工程, 2024,46(增刊1):574-582.
LI Xiu, XU Lixin, DOU Peilin, et al. A review of deep-sea mining plume monitoring and experiments[J]. Ship Engineering, 2024,46(S1):574-582.
- [6] 陈旭光,栾鲁宝,张宁,等. 深海多金属结核采矿车与底质相互作用机制及其环境影响研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2023,52(6):1173-1190.
CHEN Xuguang, LUAN Lubao, ZHANG Ning, et al. A review on interacting mechanisms of the deep sea mining vehicle-the marine sediment and its environmental effects[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023,52(6):1173-1190.
- [7] 李家彪,王叶剑,刘磊,等. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2022,1(2):92-102.
LI Jiabiao, WANG Yejian, LIU Lei, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology[J]. Science and Technology Foresight, 2022,1(2):92-102.
- [8] OUILLOIN R, MUÑOZ-ROYO C, ALFORD M H, et al. Advection-diffusion settling of deep-sea mining sediment plumes. Part 2. Collector plumes[J]. Flow, 2022,2:E23.
- [9] LIU Z L, RAO Q H, YI W, et al. A modified drag coefficient model for calculating the terminal settling velocity and horizontal diffusion distance of irregular plume particles in deep-sea mining[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024,31(23):33848-33866.

(下转第 76 页)

- JIANG Jiangchen, YE Yongfei, LIU Xiaosheng. Thickness of horizontal pillar for safe extraction under arching effect of cemented backfill [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):39-43.
- [9] 陶干强,任青云,罗辉,等. 无底柱分段崩落法采场稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011,32(12):3768-3772.
- TAO Ganqiang, REN Qingyun, LUO Hui, et al. Stability analysis of stope in pillarless sublevel caving [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(12):3768-3772.
- [10] 赵兴东,周鑫,田斌,等. 西藏帮中锌铜矿采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):12-15.
- ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, TIAN Bin, et al. Optimization of stope structure parameters for Bangzhong Zinc-Copper Mine in Xizang [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):12-15.
- [11] 毛文杰,赵国彦,王玺,等. 基于围岩应力监测和振动监测的采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):1-4.
- MAO Wenjie, ZHAO Guoyan, WANG Xi, et al. Stope stability analysis based on monitoring of surrounding rock stress and vibration [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):1-4.
- [12] 李鹏飞,王帆,聂雄,等. 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016,38(9):1625-1629.
- LI Pengfei, WANG Fan, NIE Xiong, et al. Methods for calculating rock pressure of symmetrical multi-arch deep tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(9):1625-1629.
- [13] 蒋明杰,朱俊高,张小勇,等. 缩尺效应对粗颗粒土静止侧压力系数影响规律试验[J]. 工程科学与技术, 2023,55(2):259-266.
- JIANG Mingjie, ZHU Jungao, ZHANG Xiaoyong, et al. Experimental investigation on scale effect of the at-rest earth pressure coefficient of coarse-grained soil [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023,55(2):259-266.
- [14] 李顺群,刘继承,刘小兰,等. 基于三维应力状态的静止侧压力系数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022,39(5):193-201.
- LI Shunqun, LIU Jicheng, LIU Xiaolan, et al. Study on static lateral pressure coefficient based on three-dimensional stress state [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022,39(5):193-201.
- [15] 王少林,黄敏,方偏桃. 矿柱稳定性关键影响因素敏感性分析[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(8):31-35.
- WANG Shaolin, HUANG Min, FANG Piantao. Sensitivity analysis on key influence factors of pillars stability [J]. Mining Research and Development, 2020,40(8):31-35.
- [16] 王孟来,李小双,王运敏,等. 露天转地下房柱法开采扰动下采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):32-37.
- WANG Menglai, LI Xiaoshuang, WANG Yunmin, et al. Stope stability under disturbance in transition of open-pit to underground room and pillar mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(2):32-37.
- 引用本文: 向伟华,路燕泽,刘志义,等. 阶段空场嗣后充填法凿岩硐室矿柱对顶板稳定性的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):69-76.
- XIANG Weihua, LU Yanze, LIU Zhiyi, et al. Influence of pillars in drifting chamber on roof stability during sublevel open stoping with backfill [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):69-76.

(上接第68页)

- [10] LIU S H, YANG J M, LU H N, 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.
- [11] MA W B, SCHOTT D, RHEE C V. Numerical calculations of environmental impacts for deep sea mining activities [J]. Science of the Total Environment, 2019,652:996-1012.
- [12] BAI T B, ZHAO Y, ZHOU Y Q, et al. Numerical simulation and analysis of initial plume discharge of deep-sea mining [J]. Ocean Engineering, 2024,310:118794.
- [13] GILLARD B, PURKIANI K, CHATZIEVANGELOU D, et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific) [J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2019,7:5.
- [14] MUÑOZ-ROYO C, OUILLOU 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):eabn1219.
- [15] MOTT R W, WOODS A W. On the mixing of a confined stratified fluid by a turbulent buoyant plume [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009,623:149-165.
- [16] BAINES W D. Entrainment by a plume or jet at a density interface [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975,68(2):309-320.
- [17] 李慧君,王业库,张久意. 基于鼓泡流化床的新型曳力模型的验证分析[J]. 动力工程学报, 2022,42(8):715-721.
- LI Huijun, WANG Yeku, ZHANG Jiuyi. Verification and analysis of a new drag model based on bubbling fluidized bed [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022,42(8):715-721.
- [18] SHANMUGAM G. 密度羽流构型特征、控制因素及其对深水沉积的启示:对河口和其他环境中密度羽流进行的全球卫星调查[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(4):608-625.
- SHANMUGAM G. A global satellite survey of density plumes at river mouths and at other environments: Plume configurations, external controls, and implications for deep-water sedimentation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):608-625.
- [19] 范智涵,贾永刚,滕秀英,等. 深海多金属结核开采潜在工程地质环境影响研究进展[J]. 工程地质学报, 2021,29(6):1676-1691.
- FAN Zhihan, JIA Yonggang, TENG Xiuying, et al. Review on potential engineering geological environment impacts of deep-sea polymetallic nodules mining [J]. Journal of Engineering Geology, 2021,29(6):1676-1691.
- 引用本文: 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.