

# 深海多金属结核采集过程对沉积物扰动试验研究<sup>①</sup>

张东宽, 刘美麟, 夏建新  
(中央民族大学 环境系, 北京 100081)

**摘要:** 为探究深海多金属结核开采过程对海底沉积物的扰动情况, 开展了不同射流速度、不同离底高度、不同行进速度条件下多金属结核采集头射流冲刷沉积物水池实验, 探究了冲沟深度变化和沉积物迁移扩散规律。结果表明, 多金属结核采集过程不仅冲刷沉积物颗粒, 也会冲刷沉积物块, 导致冲沟表面凹凸不平; 沉积物被扰动后, 通过上层羽状流和底层重力流形式迁移扩散。

**关键词:** 深海采矿; 深海多金属结核; 采集头; 沉积物扰动; 采集机构; 羽状流

中图分类号: TD807

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.005

文章编号: 0253-6099(2023)03-0020-04

## Experimental Study on Sediment Disturbance During Collection of Deep-Sea Polymetallic Nodules

ZHANG Dongkuan, LIU Meilin, XIA Jianxin

(Department of Environment, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to explore disturbance of seabed sediment during mining of polymetallic nodules, a pool experiment was carried out to scour sediment by a waterjet from polymetallic nodules collector. Variation of gully depth, and migration and diffusion regulation of sediments were investigated in the experiment by setting the waterjet at different speed, with nozzle at different height from sediment, and collector at different traveling speed. The results show that the collecting process of polymetallic nodules brings scour to both particles and blocks of sediment, leading to uneven surface of the gully. Then, disturbed sediment migrates and diffuses through upper plume flow and bottom gravity flow.

**Key words:** deep-sea mining; deep-sea polymetallic nodules; nodules collector; sediment disturbance; collecting machine; plume flow

深海蕴藏着丰富的多金属结核资源, 这些资源的开发对于保障我国关键金属资源供给具有战略意义<sup>[1-2]</sup>。深海资源开发面临一系列技术瓶颈, 其中采集机构是关键环节。目前深海多金属结核采集方式有机械式、水力式以及机械水力混合式。机械式运动部件较多, 可靠性难以保障, 因此水力式是当前研究的重点<sup>[3]</sup>。水力式采集通过水射流收集多金属结核, 采集头位于采矿系统的最前端, 依靠水动力对沉积物进行破土, 使多金属结核被剥离、悬浮和采集, 是比较有前景的采集方式<sup>[4]</sup>。采集过程难免对沉积物产生扰动, 特别是射流冲刷可能将沉积物扬起到一定高度, 扬起的沉积物颗粒在近底水体中形成羽状流。羽状流不仅直接影响海底生物活动, 其沉积也会给底栖动物带来

不利影响<sup>[5]</sup>。深海开发规章中明确给出了羽状流浓度和再沉积厚度等环境影响阈值, 对采集机构的设计提出了要求。本文研究了采集头射流在不同工作参数下的冲沟特征和沉积物的扩散形态, 并以冲沟深度为衡量内容, 分析采集头对沉积物扰动的影响因素及其定量关系。研究内容可为环境友好型采集机构的设计和采集过程环境影响评价提供依据。

## 1 采集过程对沉积物影响的因素分析

### 1.1 沉积物扰动

水力式多金属结核矿石采集是利用双排喷嘴水射流将矿石和沉积物一起悬浮起来, 再利用抽吸作用将矿石通过输送通道送至料仓<sup>[6]</sup>。根据这种采集头的

① 收稿日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(U1906234, 51339008); 国家重点研发计划(2021YFC2801500)

作者简介: 张东宽(1995—), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 主要研究方向为深海矿产资源开发技术。

通信作者: 夏建新(1969—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 长期从事深海矿产资源开发技术研究。

工作原理,可以得到如图1所示的沉积物扰动模型。其主要参数有喷嘴射流速度 $v$ (m/s)、喷嘴离底高度 $h$ (cm)、采集头行进速度 $u$ (m/s)及冲刷沉积物的深度 $H$ (cm)。

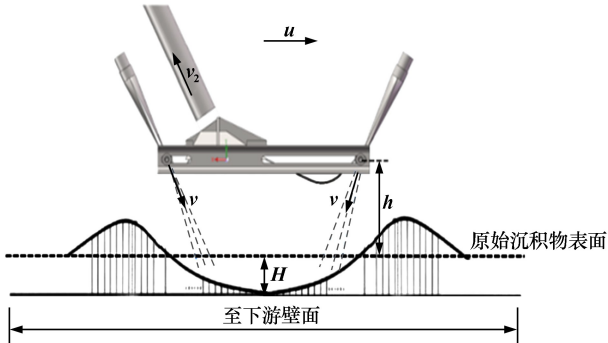


图1 沉积物扰动模型

## 1.2 量纲分析

研究采集过程对海底沉积物的扰动,分析采集头对沉积物扰动的影响因素及其定量关系,为绿色采集提供依据。基于量纲分析法 $\pi$ 定理<sup>[7]</sup>,选取基本变量设立无因次数,通过方程变换,求得沉积物扰动深度与主要集矿参数之间的关系。采集头扰动沉积物的深度取决于 $v$ 、 $h$ 、 $u$ 、流体密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、流体黏度系数 $\mu$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )。

模型方程为:

$$F(v, h, u, \rho, \mu, H) = 0 \quad (1)$$

利用参数无量纲 $\pi$ 定理进行方程变换,得:

$$\frac{H}{h} = f\left(\frac{u}{v}, \frac{\mu}{\rho v h}\right) \quad (2)$$

采集头正常运行时,流场保持稳定状态,雷诺数可以看作一个固定的常数,式(2)可表示为:

$$\frac{H}{h} = f\left(\frac{u}{v}\right) \quad (3)$$

## 2 采集过程对沉积物扰动实验研究

### 2.1 实验装置和材料

深海原位实验成本高、风险大,因此采用水池实验进行研究。所用沉积物来自中国大洋75航次第一航段m2多金属结核矿区79站位(153.67987°N, 19.04005°E)水深5610m处。实验装置包括两个水池(主水池和辅助水池联通)、采集系统、运动电机和控制系统,如图2所示。运动电机可以0~1m/s的速度带动水池上方的采集系统水平运动,采集头也随之向前运动。控制系统通过控制抽吸泵和射流泵的功率来调节抽吸管道和射流喷嘴出口的水流速度。实验采集头两排喷嘴之

间的距离为52cm,喷嘴为长30cm、宽1mm的矩形喷嘴。采集头下方设置长1m、宽46cm、高10cm的玻璃沉积物槽,每次实验时装满沉积物,采集头到沉积物表面的高度可以通过将沉积物槽垫高不同高度来实现。

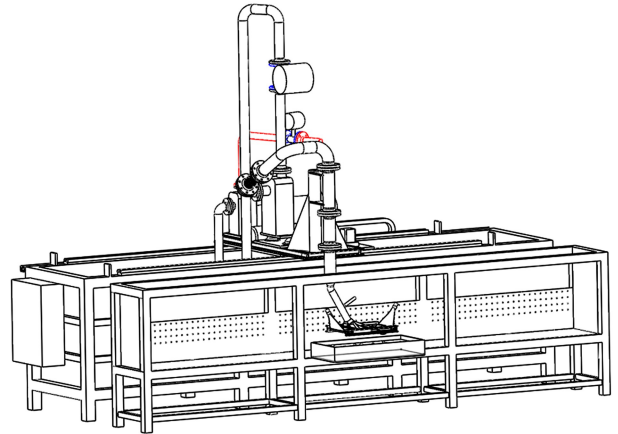


图2 实验装置示意

### 2.2 实验工况

为了探究 $u/v$ 、 $v$ 、 $h$ 、 $u$ 对 $H$ 的影响,固定采集头的抽吸速度为5m/s,采集头的行进速度应保持在1m/s以内<sup>[8]</sup>,最终设计实验工况见表1。

表1 实验工况

工况	$h/\text{cm}$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	12	1~10	0.3, 0.5, 0.7
2	8~16	$u/0.03$	0.3, 0.5, 0.7
3	12	3, 6, 9	0.1~1.0

采集头分别以不同工况条件通过沉积物槽上方,然后记录和测量采集头通过沉积物上方后沉积物的冲沟形态和平均冲沟深度,每组实验重复3次。

## 3 实验结果

### 3.1 沉积物冲沟形态与扩散形式

#### 3.1.1 冲沟形态

沉积物颗粒是微米级的黏性土,黏聚力较高,射流采矿过程不仅冲刷沉积物颗粒,也会冲刷沉积物块,导致射流后呈现冲沟表面凹凸不平。随着射流速度增加,采集头的倾斜淹没射流对沉积物的扰动由表面冲刷逐渐过渡到破土并使沉积物颗粒和沉积物块呈流化状态;采集头经过后,呈流化态的颗粒和块状沉积物沉降,形成凹凸不平的锯齿状表面。射流速度越高,冲沟剖面锯齿状越明显,冲沟整体呈中间低两边高的状态。射流前后冲沟形态对比,如图3所示。可见冲沟宽度与采集头宽度接近。

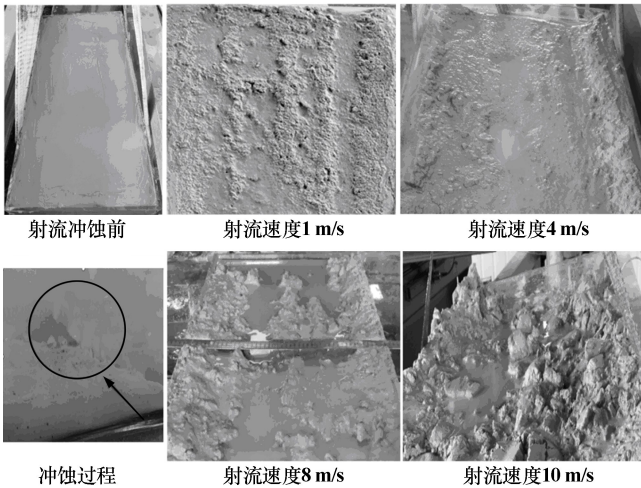


图3 沉积物冲刷前后形态对比

### 3.1.2 沉积物扩散形式

采集头射流冲刷沉积物后沉积物的迁移扩散形态如图4所示。在靠近采集头的位置,沉积物被扰动进而悬浮,越靠近采集头,沉积物被扰动的水动力越大,沉积物扰动强度越大,水体越浑浊,扰动起来的沉积物整体表现为羽状流特征。沉积物被扰动后,可以划分为悬浮、沉降、水平扩散三个过程,上部表现为羽状流形式迁移扩散,底部靠近原始沉积物表面处表现为碎屑状重力流形式迁移扩散,羽状流在水平方向的扩散速度为3~4 cm/s。



图4 沉积物迁移扩散形态

## 3.2 沉积物扰动深度

### 3.2.1 射流速度对沉积物扰动深度的影响

射流喷嘴到沉积物表面高度固定为12 cm,冲沟平均深度随射流速度的变化如图5所示。射流速度与

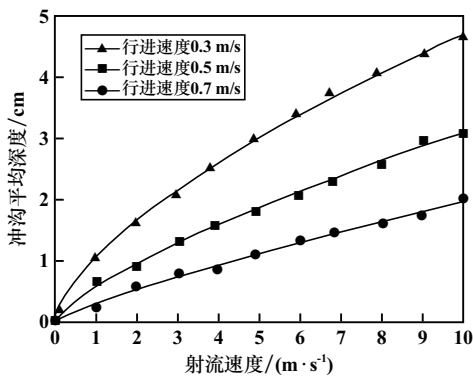


图5 冲沟平均深度随射流速度的变化

冲沟深度之间呈现正相关,随着射流速度增加,冲沟深度逐渐增加。采集头以不同的行进速度在模拟沉积物上方通过时,冲沟的平均深度与射流速度近似幂函数关系。在行进距离内,行进速度越慢,采集头射流冲刷沉积物的时间越长,冲沟会逐渐趋于力学状态下的动态平衡,冲沟尺寸逐渐趋于稳定。随着射流速度增加,深度的增加会逐渐缓慢,行进速度越慢,这个规律越明显。

### 3.2.2 喷嘴离底高度对沉积物扰动深度的影响

当  $u/v=0.03$  时,冲沟平均深度随着喷嘴到沉积物表面垂直距离的变化如图6所示。冲沟平均深度与喷嘴到沉积物表面的距离呈负相关,行进速度越慢,射流冲沟平均深度越深。随着喷嘴到沉积物表面垂直距离加大,射流达到沉积物表面的距离会变得越来越远,射流的能量衰减越来越大。为使射流能量衰减最小,喷嘴到沉积物表面的垂直距离应尽可能接近多金属结核突出沉积物表面的高度。

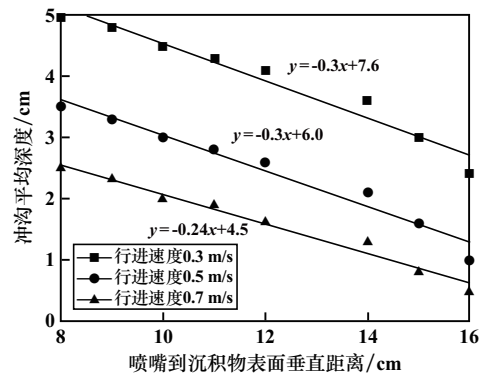


图6 冲沟平均深度随喷嘴离地高度的变化

### 3.2.3 行进速度对沉积物扰动深度的影响

射流喷嘴到沉积物表面高度为12 cm,冲沟平均深度随着行进速度的变化如图7所示。冲沟平均深度与行进速度之间呈现负相关,行进速度越快,采集头射流在单位行进距离上对沉积作用的时间越短,冲沟平均深度越浅。

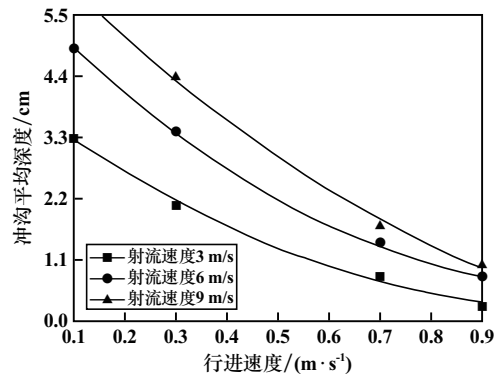


图7 冲沟平均深度随行进速度的变化

### 3.2.4 $H/h$ 与 $u/v$ 的关系

$H/h$  与  $u/v$  呈负相关, 可用反比例函数对实验结果进行拟合, 结果见图 8。随着  $u/v$  增大,  $H/h$  快速下降, 说明采集头射流冲沟平均深度受到射流速度和行进速度的综合影响, 喷嘴离底高度一定时, 射流速度越大、行进速度越慢, 冲沟越深。

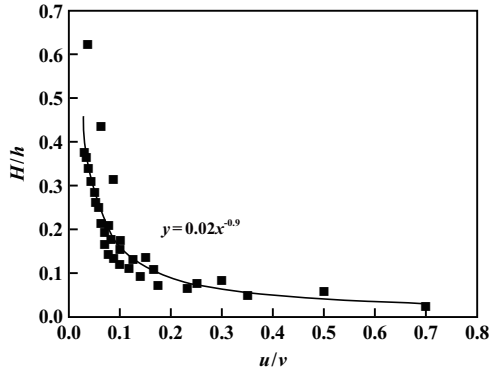


图 8  $H/h$  与  $u/v$  的关系

通过进一步计算, 可得到  $H$  与  $u$ 、 $v$ 、 $h$  的关系式为:

$$H = 0.02 \left( \frac{u}{v} \right)^{-0.9} h \quad (4)$$

当采集头的采集宽度为  $L$  (m) 时, 由式(4)可以进一步得到单位时间内采集头扰动沉积物的源强, 即扰动沉积物的体积量为:

$$V = HLu = 0.02 \left( \frac{u}{v} \right)^{-0.9} hLu \quad (5)$$

式(4)得到了试验的多金属结核采集头射流扰动沉积物的深度与喷嘴离底高度、射流速度、行进速度之间的拟合关系, 可为进一步控制采集头射流扰动沉积物的深度提供支撑。式(5)得到了采集头扰动沉积物体积量影响因素的定量关系, 可为多金属结核的绿色采集提供方法和依据。

沉积物最上层 10 cm 的一层处于流体状态, 称为半液态层, 多金属结核大多位于这一层<sup>[9]</sup>。采集头工作时, 在保证多金属结核可被有效采集的情况下, 应尽可能使射流对沉积物扰动的深度控制在半液态层以内。

## 4 结 论

采集头采集过程中, 沉积物扰动影响因素及其定量关系不确定, 是制约深海多金属结核实现低环境扰动的关键问题。基于西太平洋多金属结核矿区沉积物和一定几何尺寸的采集头对沉积物扰动情况进行了试验探究, 得到如下结论:

1) 射流采矿过程不仅冲刷沉积物颗粒, 也会冲刷沉积物块, 导致射流后呈现冲沟表面凹凸不平, 沉积物被扰动后, 上层羽状流和底层重力流形式迁移扩散。

2) 采集头扰动沉积物深度与射流速度呈正相关, 与喷嘴离底高度和采集头行进速度呈负相关。

3) 建立了采集头射流扰动沉积物的深度分别与射流喷嘴离底高度、射流速度、行进速度之间的拟合关系, 得到了采集头扰动沉积物体积量影响因素的定量关系。

### 参考文献:

- [1] 阳 宁, 夏建新. 国际海底资源开发技术及其发展趋势[J]. 矿冶工程, 2000(1): 1-4.
- [2] 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.
- [3] 官 雷, 张东宽, 夏玉超, 等. 深海多金属结核采集方式及其结构参数比较分析[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(5): 62-70.
- [4] 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.
- [5] 刘大海, 万 浏, 王春娟, 等. 基于深海采矿过程的环境影响分析与对策建议[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 367-378.
- [6] YANG N, TANG H. Several Considerations of the Design of the Hydraulic Pick-Up Device [C]//The Proceedings of the 5th (2003) ISOPE Ocean Mining Symposium. 2003: 119-122.
- [7] 赵国成, 肖龙飞, 杨建民, 等. 深海水力集矿球形颗粒受力特性试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(8): 907-912.
- [8] 陈 铭, 冷 静. 深海大型爬行机器人研究现状[J]. 海洋工程, 2020, 38(5): 156-168.
- [9] 王树仁, 阳 宁, 王贵满. 太平洋 C—C 区中国矿区深海沉积物的强度特性研究[J]. 矿冶工程, 2000(3): 21-24.

引用本文: 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.