

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.04.013

基于多分散非球颗粒 CFD-DEM 的沉积物 排放扩散特性研究

杨晔峰, 韦桐忠, 王胤

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为从颗粒及流场尺度探究沉积物颗粒在水流作用下的悬浮与扩散机制, 在离散元中引入高斯曲率模型表征非球颗粒非线性接触特性, 并改进非球颗粒的拖曳力模型及孔隙模型, 建立了多分散非球颗粒 CFD-DEM 流固耦合数值方法; 通过与物理模型试验对比, 验证了该方法的有效性与优越性; 随后对沉积物在水流作用下的悬浮扩散过程进行模拟。研究表明, 沉积物沉降率与颗粒入流量成正相关, 与流速成负相关; 而逸出率与沉降率呈相反趋势; 在高初始排放量下, 颗粒团簇效应促进流体动能耗散, 颗粒所受重力作用超过惯性力作用, 颗粒快速沉降; 在低初始排放量下, 较高流体动能促进颗粒水平向输运; 在流速较小情况下, 颗粒形状对沉积物的空间分布影响不可忽略。

关键词: 悬浮与扩散; 沉积物; CFD-DEM 流固耦合数值方法; 多分散非球颗粒

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2024)04-0669-11

深海采矿设备在作业过程中需要将海床沉积物分离再排出, 这一过程会使沉积物颗粒悬浮在水中形成羽状流^[1], 重力作用下悬浮在水中的沉积物颗粒会在水流作用下再次沉积^[2]。由沉积物颗粒悬浮再沉降引起的底层羽状流会导致海水理化性质改变, 进而威胁海洋生态环境^[3]。因此, 开展沉积物颗粒排放过程中的悬浮扩散机理研究, 对降低深海矿石开采中造成的潜在环境影响具有重要意义。

关于沉积物排放扩散特性研究, 现有理论模型难以考虑沉积物颗粒在排放过程中的复杂碰撞情况所导致的沉降扩散现象。为此, 陈永平等^[4]通过试验对比分析了排放角度对沉积物颗粒的运动形态、时均速度场和浓度场的影响; 张中天等^[5]采用循环水槽试验探究了胶体颗粒在迁移过程中的沉积分布特征; 金小栋等^[6]通过试验探究了羽状流的扩散规律。但室内模型试验难以实时监测沉积物颗粒在水流作用下的时-空扩散范围及浓度变化。因此, 数值方法成为探究沉积物颗粒在水流作用下悬浮扩散特性的一种有效手段。当前数值模拟研究主要基于 Euler-Euler 连续体的多相流数值模型对沉积物颗粒排放过程中的悬浮扩散机理展开研究^[7-10]。该方法可以从排放后颗粒质量浓度分布和两相混合均匀性探究沉积物颗粒的沉降扩散范围, 但忽略了沉积物颗粒扩散过程中质量浓度降低对颗粒-流体及颗粒-颗粒相互作用的影响, 更无法从颗粒尺度追踪沉积物在重力和水流作用下的悬浮扩散机理。

深海沉积物可以视为由具有一定物理性质的非球颗粒组成的系统。因此, 通过建立动态模型描述深海采矿作业过程中沉积物颗粒扩散规律对生态环境影响评估是一种有效手段。由此可见, 通过基于拉格朗日质点的离散元 (DEM) 方法模拟颗粒的非均质、不连续运动特性, 并联合基于欧拉网格的计算流体动力学 (CFD) 方法模拟海水流动, 可有效模拟沉积物颗粒与海水的相互作用, 并从细微观尺度探究多因素影响下沉积物排

收稿日期: 2024-03-13; **网络出版日期:** 2024-07-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240725.1541.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51870935); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2022-KF-18-05)

作者简介: 杨晔峰 (1996—), 男, 江苏常州人, 博士研究生, 主要从事离散-连续体流固耦合数值方法和深海采矿方面的研究工作。E-mail: yang_yf_1996@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 王胤, E-mail: y. wang@dlut.edu.cn

放后的沉降扩散效应。近年来, CFD-DEM 流固耦合数值方法已广泛运用于多相流研究中^[11-14]。CFD-DEM 流固耦合数值方法大多基于球形颗粒, 而颗粒形状往往是影响颗粒-颗粒、颗粒-流体相互作用的重要因素。当前对非球颗粒 CFD-DEM 流固耦合数值方法, 需要准确描述颗粒形状、准确高效计算颗粒间的接触力、力矩, 及颗粒流体相互作用力。对于现有在离散元中构建非球颗粒的方法主要有多球模型、多面体模型、实际几何模型和超二次曲面模型^[15]等。其中, 超二次曲面模型通过调整 5 个参数可以构建 80% 以上具有凹凸性的非球颗粒形状, 且因较高的计算效率和计算精度使其受到广泛应用^[16]。另外, 对于如何准确模拟非球颗粒-流体相互作用的关键在于准确描述颗粒所占流体网格体积分数及所受流体拖曳力。

本文首先引入高斯曲率模型来准确反映非球颗粒间接触、碰撞等非线性接触特性; 通过对非球颗粒拖曳力模型和孔隙计算模型进行改进, 完成 cfemSuper 求解器的开发; 随后, 基于该数值方法对沉积物颗粒在不同流速及初始浓度影响下的输运过程进行数值模拟, 从颗粒空间分布、涡流流场及能量耗散机理探究沉积物颗粒在水流作用下的沉降与扩散机理。

1 CFD-DEM 流固耦合原理

1.1 固体颗粒控制方程

超二次曲面模型可以通过改变 5 个参数描述 80% 不同颗粒形状^[17], 其函数形式可以表示为^[18]

$$f(x, y, z) = \left(\left| \frac{x}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{y}{b} \right|^{n_2} \right)^{n_1/n_2} + \left| \frac{z}{c} \right|^{n_1} - 1 = 0 \quad (1)$$

式中: a 、 b 和 c 分别为颗粒在 x 、 y 和 z 方向的半轴长; n_1 、 n_2 为颗粒形状参数。图 1 所示为超二次曲面方程 5 个参数不同取值下所对应的非球颗粒形状。

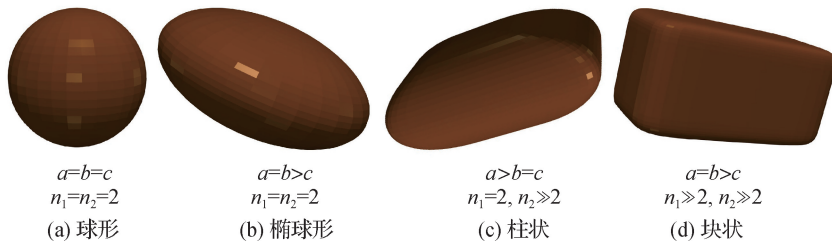


图 1 不同取值下的超二次曲面颗粒形态

Fig. 1 Superquadric particle shapes under various five parameters

在离散元方法中, 固体颗粒运动根据牛顿第二定律进行计算^[19], 主要考虑颗粒-颗粒间接触力、体积力, 以及颗粒-流体间的相互作用力:

$$m_i \frac{d\mathbf{U}_{i,p}}{dt} = \sum_{j=1}^{n_{i,c}} \mathbf{F}_{ij,c} + \mathbf{F}_{i,fp} + \mathbf{F}_{i,g} \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_{i,p}}{dt} + \boldsymbol{\omega}_{i,p} \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_{i,p} = \sum_{j=1}^{n_{i,c}} \mathbf{M}_{ij,c} \quad (3)$$

式中: m_i 和 $\mathbf{I}_i$ 分别为颗粒 i 的质量和转动惯量; $\mathbf{U}_{i,p}$ 和 $\boldsymbol{\omega}_{i,p}$ 分别为颗粒 i 的平动速度和角速度; $n_{i,c}$ 为颗粒 i 周围的接触颗粒数量; $\mathbf{F}_{i,g}$ 和 $\mathbf{F}_{i,fp}$ 分别为颗粒 i 的重力及所受流体作用力; $\mathbf{F}_{ij,c}$ 和 $\mathbf{M}_{ij,c}$ 为颗粒 j 作用于颗粒 i 所产生的接触力和力矩。

1.2 高斯曲率接触模型

颗粒单元间接触力主要由法向接触力和切向接触力组成, 其中法向接触力 ($\mathbf{F}_n$) 主要由弹性力 ($\mathbf{F}_{ne}$) 和黏滞力 ($\mathbf{F}_{m}$) 组成, 可分别表示为:

$$\mathbf{F}_{ne} = \frac{4}{3} E_p^* \sqrt{R_p^* \delta_n^{3/2}} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{nt} = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{2m_p^* E_p^* \sqrt{R_p^* \delta_n} \mathbf{v}_c} \quad (5)$$

式中: $E_p^* = \frac{E}{2(1-v^2)}$, $R_p^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, $m_p^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$; E 、 v 、 m 、 δ_n 和 $\mathbf{v}_c$ 分别为颗粒的弹性模量、泊松比、质量、重叠量和粒间法向相对速度; R 为颗粒局部接触点处的曲率半径 ($R = 1/K_G$)。其次, 本文通过引入高斯曲率模型来准确反映非球颗粒的非线性接触特性, 表述如下^[20]:

$$K_G = \frac{\nabla \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{H}^*(\mathbf{f}) \cdot \nabla \mathbf{f}}{|\nabla \mathbf{f}|^4} = \left| \begin{array}{cc} \mathbf{H}(\mathbf{f}) & \nabla \mathbf{f}^T \\ \nabla \mathbf{f} & 0 \end{array} \right| / |\nabla \mathbf{f}|^4, \quad \mathbf{H}(\mathbf{f}) = \nabla(\nabla \mathbf{f}) = \nabla^2 \mathbf{f} \quad (6)$$

式中: $\nabla \mathbf{f}$ 为接触点处梯度; $\mathbf{H}^*(\mathbf{f})$ 为 $\mathbf{H}(\mathbf{f})$ 的伴随矩阵。

1.3 流体运动控制方程

流体相由不可压缩 Navier-Stokes (N-S) 方程进行描述, 其连续方程和动量方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{U}_f) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_f \mathbf{U}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{U}_f \mathbf{U}_f) = -\nabla p_f + \rho_f \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{F}_{f,p} \quad (8)$$

式中: ρ_f 、 $\mathbf{U}_f$ 、 p_f 和 ε 分别为流体相密度、速度、压力和孔隙率; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}_{f,p}$ 为颗粒和流体相互作用力; $\boldsymbol{\tau}$ 为流体应力张量, 采用标准 k - ε 湍流模型:

$$\boldsymbol{\tau} = -\frac{2}{3}(\rho_f k_f + \mu_f \nabla \cdot \mathbf{U}_f) \mathbf{I} + \mu_f [\nabla \mathbf{U}_f + (\nabla \mathbf{U}_f)^T] \quad (9)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位张量; $\mu_f = \rho_f C_\mu k_f^2 / \alpha$ 为湍流黏度, k_f 为液相湍流动能, $C_\mu = 0.9$, α 为湍流动能耗散率。

1.4 颗粒与流体相互作用

流体-颗粒间的相互作用力包括拖曳力 ($\mathbf{F}_d$)、压力梯度力 ($\mathbf{F}_p$) 和浮力 ($\mathbf{F}_b$), 即

$$\mathbf{F}_{f,p} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_b \quad (10)$$

作用于单颗粒 i 上的拖曳力 ($\mathbf{F}_{i,fp}$) 常采用 Di Felice 模型计算, 考虑周围颗粒影响, 对 Di Felice 模型进行了修正^[21]:

$$\mathbf{F}_{i,fp} = \frac{1}{8} C_D \rho_f \pi d_v^2 |\mathbf{U}_f - \mathbf{U}_{i,p}| (\mathbf{U}_f - \mathbf{U}_{i,p}) \varepsilon^{1 - \{3.7 - 0.65 \exp[-\frac{(1.5 - \lg Re_p)^2}{2}]\}} \quad (11)$$

式中: C_D 为拖曳力系数; d_v 为与非球颗粒体积相等球形颗粒的直径; Re_p 为颗粒雷诺数; Hölzer-Sommerfeld 曳力模型^[22]常用于流体-非球颗粒间的相互作用:

$$C_D = \frac{8}{Re_p} \frac{1}{\sqrt{\varphi_\perp}} + \frac{16}{Re_p} \frac{1}{\sqrt{\varphi_{new}}} + \frac{3}{Re_p} \frac{1}{\varphi_{new}^{3/4}} + 0.42 \times 10^{0.4(-\log \varphi_{new})^{0.2}} \frac{1}{\varphi_\perp} \quad (12)$$

式中: $\varphi_\perp$ 为横向度, 即等体积球形颗粒的横截面积与实际颗粒在与流动方向垂直平面上的投影面积比值; $\varphi_{new} = \varphi / R_p$ 为笔者前期开展的大量室内物理模型试验对颗粒形状系数进行的修正^[23], 用于更好体现非球颗粒尖锐度对流体-颗粒相互作用影响, φ 为球形度, $R_p = A_{C-2D} / A_{P-2D}$ 为颗粒二维圆形度 (A_{C-2D} 为颗粒自然状态下的投影面积, A_{P-2D} 为与投影具有相同周长的圆形面积)。采用卫星点法计算孔隙率:

$$\varepsilon = 1 - \sum_i \frac{N_{ij} V_{p,i}}{N_m V_{cell,j}} \quad (13)$$

式中: N_{ij} 为颗粒 i 在流体网格 j 中的卫星点数量; N_m 为颗粒 i 上总卫星点数量; $V_{p,i}$ 和 $V_{cell,j}$ 分别为颗粒 i 和流体网格 j 的体积。

对于单个非球颗粒,所受到的压力梯度力($\mathbf{F}_{i,p}$)和浮力($\mathbf{F}_{i,b}$)可分别表示为:

$$\mathbf{F}_{i,p} = -\frac{1}{6}\pi d_V^3 \cdot \nabla P, \quad \mathbf{F}_{i,b} = -\frac{1}{6}\pi \rho_f d_V^3 g \quad (14)$$

式中:压力梯度 $\nabla P = (\partial P/\partial x, \partial P/\partial y, \partial P/\partial z)$, 表示压力随空间位置的变化率。

2 数值模型验证

2.1 非线性接触模型验证

采用超二次曲面方程构建 2 个椭球颗粒,分别模拟不同冲击角度下法向接触力与冲击角度之间的关系。离散元中颗粒参数为 $a=5\text{ mm}$ 、 $b=c=2.5\text{ mm}$ 、 $n_1=n_2=2$ 、 $E=1\times 10^{10}\text{ Pa}$ 、 $\nu=0.3$, 密度 $\rho_s=2\,500\text{ kg/m}^3$, 时间步长 $\Delta t_{\text{DEM}}=3\times 10^{-8}\text{ s}$, 并与 Zheng 等^[24]结果进行对比。

图 2 所示为采用不同接触模型计算所得 2 个椭球法向碰撞下法向接触力与重叠量之间的关系,以及不同冲击角度下最大冲击力随冲击角度变化的关系。结果表明,法向接触力随重叠量几乎呈线性增加;其次,冲击角度对法向接触力有显著影响,这主要是由于冲击角度改变了接触点位置,进而改变了 2 个颗粒间的法向接触力及回弹过程。对比有限元计算结果^[24],采用基于高斯曲率非线性接触模型的离散元模拟结果可以较好地反映非球颗粒的运动规律。

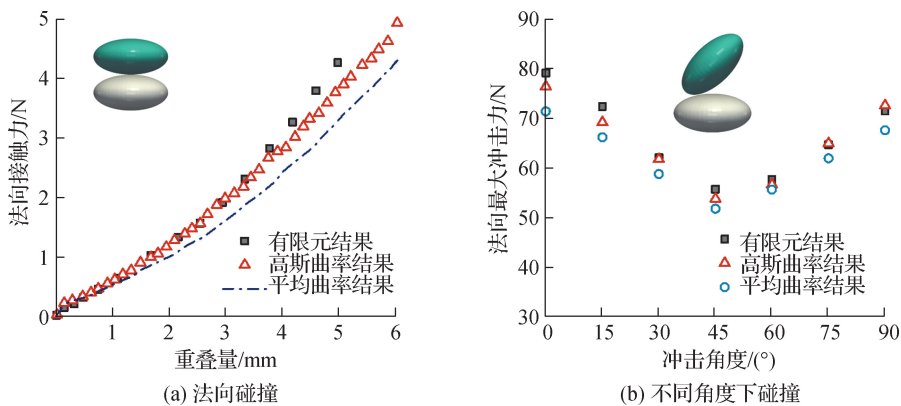


图 2 2 个椭球体碰撞离散元分析

Fig. 2 DEM analysis of two ellipsoidal collisions

2.2 CFD-DEM 流固耦合数值模型验证

采用水流作用下泥沙颗粒在圆管中流动为验证算例,并与 Gillies 等^[25]室内试验结果进行对比分析。其中,泥沙颗粒采用等效粒径为 $0.002\,7\text{ m}$ 的混合形状颗粒(33.3%球形颗粒,33.3%块状颗粒,33.4%椭球颗粒),入口处流速(U)和颗粒体积分数(C_l)分别为 5.4 m/s 和 0.1 , 海洋土颗粒形状及离散元模拟力学参数可参考笔者前期相关研究^[26-27]。其中,沉积物颗粒在 DEM 计算中的密度、杨氏模量(E_s)、回弹系数(e_s)、摩擦系数(μ_s)和泊松比分别为 $2\,650\text{ kg/m}^3$ 、 $2\times 10^6\text{ Pa}$ 、 0.9 、 0.84 、 0.2 ; 流体密度和动力黏度分别为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 和 $1\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$; DEM 和 CFD 时间步长分别为 $\Delta t_{\text{DEM}}=1\times 10^{-5}\text{ s}$ 和 $\Delta t_{\text{CFD}}=1\times 10^{-3}\text{ s}$ 。数值模型及边界条件设置如图 3 所示,在流动达到稳定状态后,计算出口处颗粒体积分数(C_e),其中, D 为圆管直径。

冲刷作用下,出口处颗粒分布受到多种因素的影响,主要包括初始流速、沉积物颗粒初始体积分数以及颗粒-颗粒和颗粒-流体间复杂的相互作用。图 4 所示为水流冲刷作用下,不同出口高度(h/D)处的颗粒体积分数分布情况。研究结果发现,由于颗粒在冲刷过程中受重力作用,出口处从顶部到底部的颗粒体积分数分布呈递增趋势;其次,随着入口处颗粒体积分数的增加,出口处的颗粒分布相对更均匀。这主要是因为入口

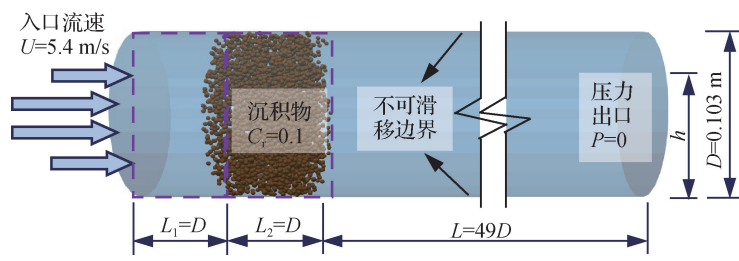


图 3 沉积物冲刷 CFD-DEM 数值模型

Fig. 3 CFD-DEM numerical model of sediments scouring

处颗粒体积分数的增加，加剧了非球颗粒粒间的强互锁咬合效应，促使颗粒之间形成明显的团簇效应。

同时本文研究结果表明，在颗粒体积分数较高时与试验结果吻合较好，而在体积分数较低时，吻合效果稍差。这主要是由于在颗粒体积分数较大时，颗粒的团簇效应使得颗粒间的相互作用变得更加重要；而在颗粒体积分数较小时，颗粒主要受流体作用力影响。除本文所考虑的拖曳力、压强梯度力和浮力以外，颗粒还受到升力、虚质量力等其他流体作用力的影响。总而言之，本文所建立的数值模型能够较好地模拟沉积物颗粒在水流冲刷作用下的悬浮与扩散机制。

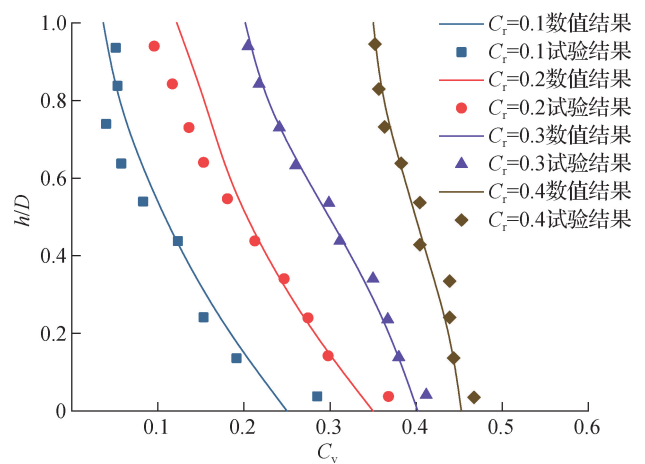


图 4 不同位置处颗粒浓度分布

Fig. 4 Particle concentration distribution at different locations

3 结果及分析

3.1 数值模型设置

为探究海底采矿过程中沉积物排放后在水流作用下的沉降与扩散机制，设置如图 5 所示数值模型。对应工程案例为海底采矿机在距海底 1.5 m 高处通过直径(D_c)为 0.5 m 的管道向外排放沉积物颗粒。

根据笔者前期采用扫描电镜(SEM)与图像处理技术对南海海床土颗粒形状分析结果^[26]，数值模拟采用等效粒径为 0.01 m 由 33.3% 球形颗粒、33.3% 椭球颗粒及 33.4% 块状颗粒所构成的沉积物泥沙颗粒，其具体形状信息如表 1 所示，物理属性及数值计算与 2.2 节一致。同时，考虑不同入口流速和颗粒入流量对沉积物输运过程中的颗粒沉降扩散影响。本文旨在探讨颗粒形状对沉积物颗粒悬浮扩散的影响机制，仅考虑了单一粒径，未考虑实际颗粒级配分布。

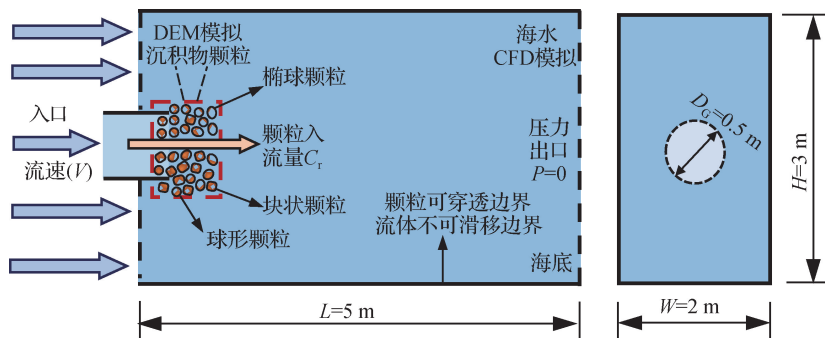


图 5 沉积物排放 CFD-DEM 数值计算模型

Fig. 5 CFD-DEM numerical model of sediments discharge

表 1 颗粒形状参数

Table 1 Parameters of particles

颗粒形状	球形	椭球	块状
5 个参数	$a = b = 5 \text{ mm}$, $c = 5 \text{ mm}$, $n_1 = n_2 = 2$	$a = b = 4.3 \text{ mm}$, $c = 4.6 \text{ mm}$, $n_1 = 10$, $n_2 = 2$	$a = b = 4.5 \text{ mm}$, $c = 3.5 \text{ mm}$, $n_1 = n_2 = 10$
φ	1	0.857	0.778

3.2 初始流量影响

为探究沉积物颗粒在水流作用下的扩散程度，本节拟采用质量损失率(离开计算域颗粒质量/总颗粒质量)作为评价指标，包括沉降率(透过海底边界颗粒质量/总颗粒质量)和逸出率(离出口处颗粒质量/总颗粒质量)。图 6(a)所示为流速 $V = 2 \text{ m/s}$ 条件下沉积物颗粒初始入流量对颗粒沉降及逸出影响。结果表明，在初始排放量较小时，沉积物颗粒在水中主要受流体作用力影响，流体作用下更容易发生扩散并从出口逸出；随着初始排放量增加，稠密颗粒加剧了颗粒间的强互锁咬合效应，促使颗粒间形成明显团簇效应，使之主要受重力作用透过海底边界而导致质量流失。

3.3 流速影响

流速是影响沉积物颗粒与流体相互作用的关键因素。图 6(b)所示为沉积物排放速率为 8.32 kg/s 条件下，不同流速对颗粒沉降及逸出影响。结果表明，当流速从 1 m/s 增大至 6 m/s 时，沉积物颗粒逸出率随流速线性增大；当流速从 6 m/s 增大至 8 m/s 时，逸出率增长不再明显。相应地，颗粒沉降率与逸出率呈相反

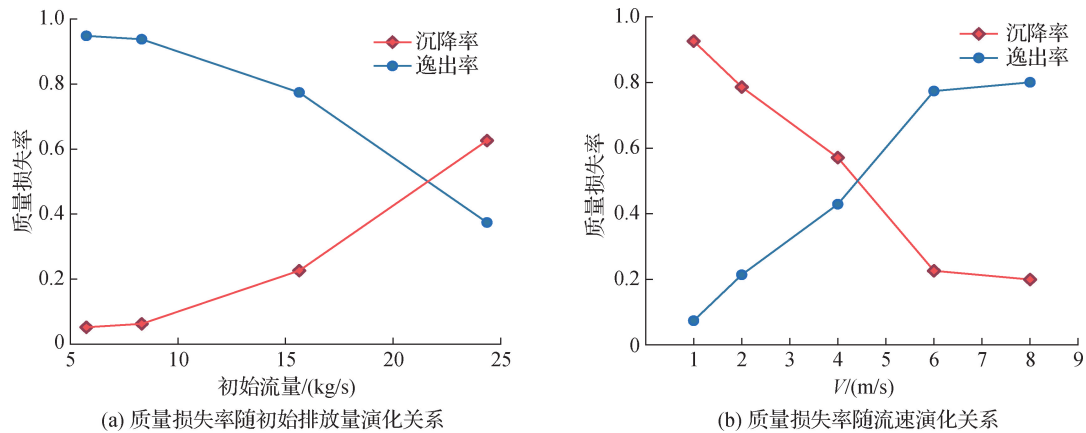


图 6 不同条件下的沉积物质量损失率

Fig. 6 Mass loss of sediments at different conditions

趋势。从颗粒流体相互作用动力学角度分析,沉积物颗粒的运动轨迹主要受颗粒流的惯性力及重力影响,较小流速情况下,重力起主导作用,导致颗粒更容易脱离主流而发生自由沉降;随着流速的不断增大,颗粒受到流体惯性力显著,重力作用影响随之减小,较大的流速会增加颗粒间的碰撞和湍流效应,增强颗粒间水平向相互作用,从而增加颗粒的逸出率。

3.4 沉积物颗粒流动能量演化

了解沉积物颗粒流动过程中各组分的变化,有助于探究整个沉积物颗粒在流动过程中的能量转换过程。本节对颗粒重力势能(E_{pp})、颗粒动能(E_{kp})和流体动能(E_{kf})进行分析^[13]。图7展示了在 $V=2\text{ m/s}$ 条件下,初始入流量 $Q_0=8.32、24.75\text{ kg/s}$ 时的沉积物头部颗粒重力势能、动能及流体动能在不同位置处的变化情况, $E_{pp}(L_0)$ 为头部颗粒在初始位置的重力势能; ΔE_{kp} 和 ΔE_{kf} 分别表示颗粒与流体动能与初始时刻相比的变化量。

首先, $Q_0=8.32\text{ kg/s}$ 的颗粒重力势能衰减较小,主要是较少颗粒发生沉降从底端逸出,颗粒保持了较高的高程。图7(b)表明初始入流量对初始位置($L/D<2$)处的流体动能和颗粒动能影响较小,这是由于该阶段主要受流速影响。随着沉积物颗粒流的进一步输运,由于沉积物颗粒在较高初始排放量下不断从底端逸出,颗粒动能不断减小。其次,在 $Q_0=24.75\text{ kg/s}$ 时,流体动能不断减小。这主要是因为在高初始排放量情况下,颗粒的团簇效应促进了流体动能的耗散。与之形成鲜明对比的是,在低初始排放量情况下,较高的流体动能促进了颗粒的水平向输运,从而导致颗粒从出口端逸出。由此可见,在低初始入流量情况下,较高的流体动能是导致颗粒从出口端逸出的主要因素。

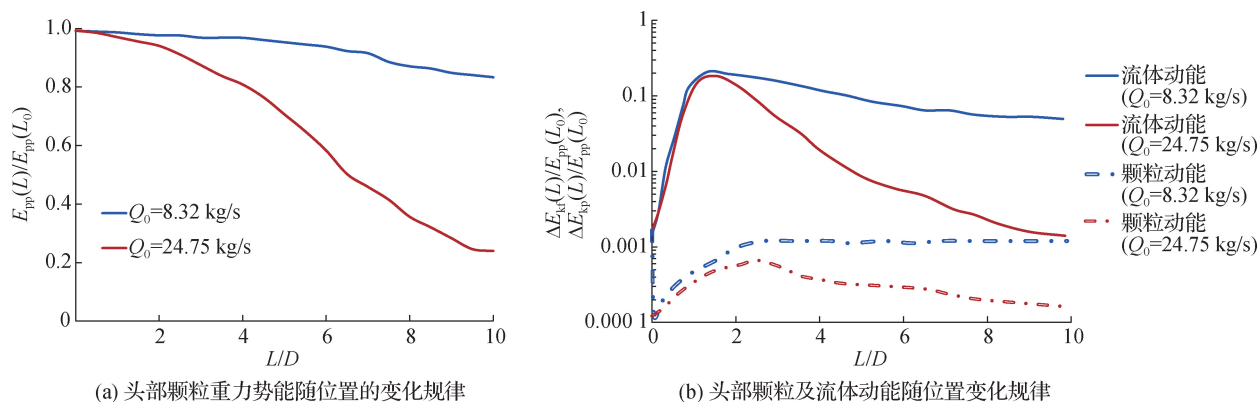


图7 头部颗粒重力势能、头部颗粒及流体动能随位置的变化规律

Fig.7 Variation of the gravitational potential energy of head particles with location, kinetic energy of fluids and head particles with location

3.5 沉积物颗粒及涡流结构动态演化分析

在沉积物颗粒排放过程中,受颗粒-颗粒和颗粒-流体间复杂相互作用,产生的涡流结构是影响沉积物沉积扩散的主要因素。 Q 准则通过计算流场中的涡旋强度来识别涡结构,可以清晰地识别出流场中的涡旋区域,可以从涡旋生成、发展和消散过程揭示沉积物颗粒的悬浮与扩散机制。图8所示为颗粒入流量 $C_r=8.32\text{ kg/s}$ 在不同入流流速下, $Q=0.05\text{ s}^{-2}$ 时涡流结构以及沉积物颗粒在不同时刻的动态演化过程。其中, $x、y、z$ 分别为3个方向的截面距离。

研究表明,沉积物颗粒在不同时刻的运动规律与涡流结构相一致,这说明了沉积物颗粒的运动状态受流场条件影响显著。如图8(a)—图8(b)与图8(e)—图8(f)所示,入口处在初始时刻形成一个连续且结构完整的马蹄涡,这主要由于沉积物颗粒与入射流之间形成的强烈剪切作用。因此,沉积物颗粒初始阶段主要受入射流速影响,惯性力主导作用下没有致使沉积物颗粒发生显著沉降。

3.6 颗粒形状对沉积物分布影响

为探究颗粒形状对沉积物颗粒在扩散过程中的空间分布影响,本节考虑不同颗粒入流量及不同流速等因素影响下,3种形状颗粒的空间扩散分布情况,其计算结果如图9所示。研究表明,在较小流速下($V=$

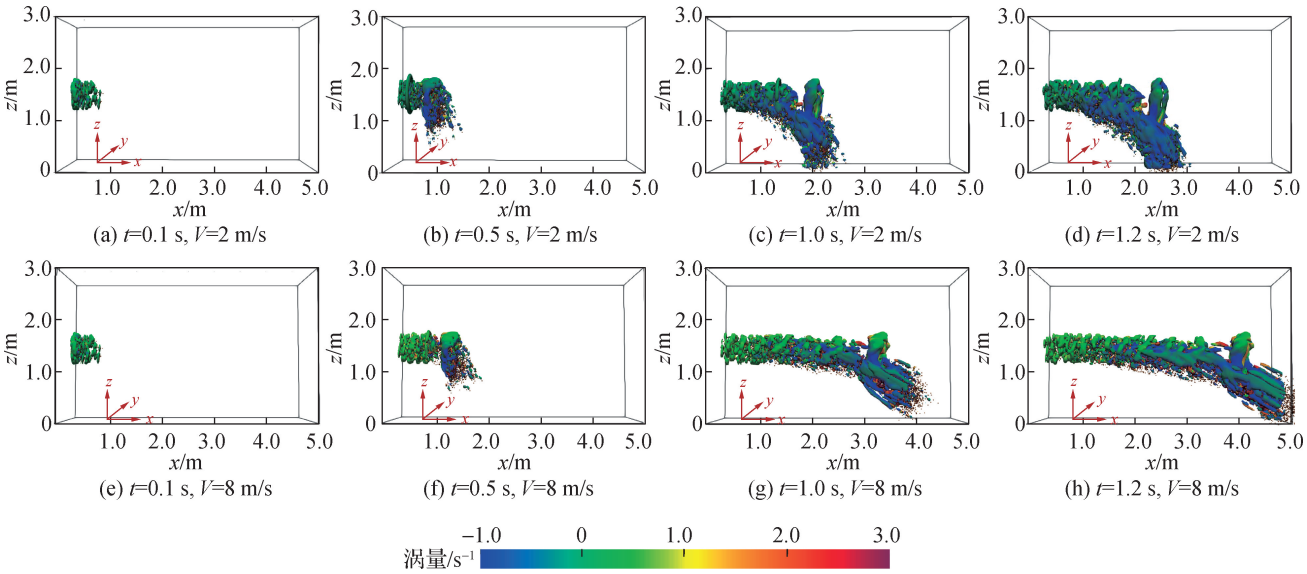


图 8 沉积物颗粒及涡流结构在不同流速下的动态演化过程

Fig. 8 Dynamic evolution of sediment particles and turbulent structure at different velocities

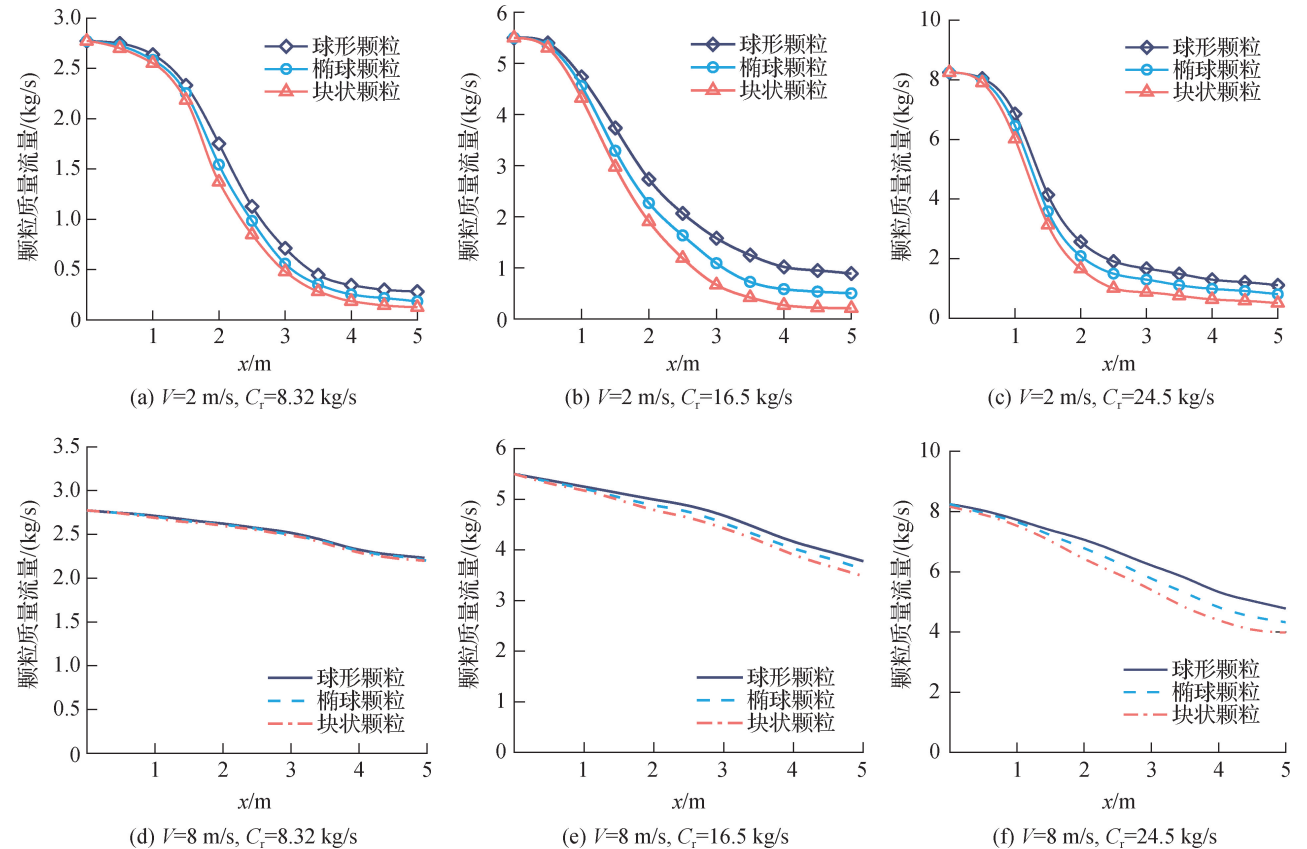


图 9 不同位置处沉积物质量分布曲线

Fig. 9 Mass distribution curve of sediment at different locations

2 m/s), 颗粒形状对沉积物空间分布有较大影响, 表现为颗粒沉降速度与沉降率随形状系数的增加而减小。这主要是由于非球颗粒具有较大的投影面积和复杂的几何形状, 增强了颗粒与流体的相互作用; 另一方面, 非球颗粒间的强互锁咬合效应往往会增加颗粒间的摩擦机制, 摩擦力的增加可以有效抵消颗粒上升浮力, 从而导致颗粒以较快速度下沉。在颗粒质量流量达到稳定点后, 颗粒主要受自身重力和浮力影响, 因此以相近的速率一同沉降。

而随着颗粒初始排放量的增加, 颗粒流线分布形态发生了变化。首先是颗粒质量流量的显著下降点提前, 且下降曲率增大, 这说明较高的初始颗粒排放量加快了泥沙颗粒的沉降过程; 其次, 颗粒质量流量的稳定点随着初始排放量的增加而提前。

在高流速作用下($V=8$ m/s), 颗粒形状对沉积物在低排放率($Q_0=8.32$ kg/s)下的沉降速度和沉降率影响并不显著。此时, 流速占主导因素, 高速流动下, 流体扰动急剧增加, 使得颗粒更容易被流体携带从右端逸出, 进而减小颗粒的沉降速度和沉降率。而随着排放量的增加($Q_0=24.5$ kg/s), 沉积物的沉降速度及沉降率随着球形度的减小而显著增加。这主要是由于颗粒体积分数的增加导致颗粒流重力影响逐渐超过其惯性力影响。

上述研究结果表明, 在低流速、高初始排放量下, 受颗粒-颗粒、颗粒-流体复杂相互作用关系, 颗粒形状对沉积物颗粒在排放过程中的沉降扩散过程有不可忽视的影响。

4 结 论

在已建立的 CFD-DEM 流固耦合模型框架下, 通过引入高斯曲率非线性接触模型, 并对拖曳力模型和孔隙计算模型进行改进, 完成了多分散非球颗粒的 CFD-DEM 流固耦合数值模型的二次开发。将计算结果与物理模型试验结果进行对比, 验证了数值模型的有效性和优越性; 随后开展了不同初始流量、流速、颗粒形状参数下的数值模拟研究工作, 得出以下主要结论:

(1) 颗粒入流量和流速对沉积物颗粒的沉降与扩散机制有显著影响。沉积物颗粒沉降率随颗粒入流量的增大而增大, 随流速的增加而减小; 逸出率则与沉降率呈相反趋势。

(2) 在高初始排放量时, 颗粒团簇效应促进了流体动能的耗散, 导致颗粒主要在重力作用下沉降; 在低初始排放量时, 较高流体动能促进颗粒水平向输运并从出口端逸出。

(3) 在低流速情况下, 颗粒形状对沉积物质量空间分布有显著影响, 这主要是由非球颗粒间的强互锁咬合效应及非球颗粒-流体复杂相互作用关系所导致。

(4) 在沉积物颗粒高排放量情况下, 颗粒体积分数的增加使颗粒重力影响超过其惯性力影响, 进而导致颗粒形状对沉降率产生较大影响。

参考文献:

- [1] PRISETIAHADI K, YANAGI T. Seasonal variation in the behavior of tailing wastes in Buyat Bay, Indonesia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 57(1/2/3/4/5): 170-181.
- [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. (FAN Z H, JIA Y G, TENG X Y, 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. (in Chinese))
- [3] LIU Z H, LIU K, CHEN X G, et al. Deep-sea rock mechanics and mining technology: state of the art and perspectives[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(9): 1083-1115.
- [4] 陈永平, 孙朴, 王娅娜, 等. 排放角度对波浪环境中圆管射流运动和稀释特性的影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 898-907. (CHEN Y P, SUN P, WANG Y N, et al. Effects of discharge angles on hydrodynamics and dilution of round jets in wave environment[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 898-907. (in Chinese))
- [5] 张中天, 金光球, 陈鹤翔, 等. 胶体颗粒在潜流带中沉积过程及机制[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 738-750.

- (ZHANG Z T, JIN G Q, CHEN H X, et al. Deposition process and mechanism of colloidal particles in hyporheic zone[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 738-750. (in Chinese))
- [6] 金小栋, 陈旭光, 刘金衷, 等. 深海采矿中不同成分底质对羽状流触发的影响[J]. *海洋工程*, 2024, 42(4): 150-163. (JIN X D, CHEN X G, LIU J Z, et al. The influence of different components of bottom material on the trigger of feather flow in deep sea mining[J]. *The Ocean Engineering*, 2024, 42(4): 150-163. (in Chinese))
- [7] 李艳, 贺加贝. 海底多金属硫化物集矿过程固液两相流数值模拟研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 461-470. (LI Y, HE J B. Numerical simulation of solid-liquid two-phase flow of the gathering process of seafloor massive sulfide [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(2): 461-470. (in Chinese))
- [8] 尹则高, 王盛, 孙灿. 规则波作用下垂直圆管负浮力射流的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(5): 780-790. (YIN Z G, WANG S, SUN C. Numerical simulation of negative buoyant jet with vertical round under the regular waves[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 780-790. (in Chinese))
- [9] 柴朝晖, 杨国录, 王茜, 等. 紊流对粘性细颗粒泥沙絮凝影响[J]. *水科学进展*, 2012, 23(6): 808-814. (CHAI Z H, YANG G L, WANG X, et al. Effect of turbulent flow on flocculation of fine cohesive sediment[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 808-814. (in Chinese))
- [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 G H, LIU L. Numerical simulation of fine particle plume flow in deep-sea mining[J]. *The Ocean Engineering*, 2023, 41(5): 150-160. (in Chinese))
- [11] 底瑛棠, 赵兰浩, 毛佳. 颗粒沉降问题的高解析度 CFD-DEM-IBM 流固耦合数值模拟方法[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 286-294. (DI Y T, ZHAO L H, MAO J. A CFD-DEM-IBM method for sedimentation of particles with high resolution [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 286-294. (in Chinese))
- [12] WANG T, CHEN S H, LI M L, et al. A resolved CFD-DEM investigation into sand production under water flooding in unconsolidated reservoir[J]. *Powder Technology*, 2024, 442: 119859.
- [13] XIE J F, HU P, ZHU C L, et al. Turbidity currents propagating down an inclined slope: particle auto-suspension[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, 954: A44.
- [14] 赵兰浩, 管策, 张海容, 等. 坝前冒泡现象的水气两相运移机理数值模拟[J]. *水科学进展*, 2020, 31(1): 91-101. (ZHAO L H, GUAN C, ZHANG H R, et al. Numerical simulation of water-gas two-phase movement mechanism of bubbling phenomenon in front of dam[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(1): 91-101. (in Chinese))
- [15] ZHONG W Q, YU A B, LIU X J, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications[J]. *Powder Technology*, 2016, 302: 108-152.
- [16] PODLOZHNYUK A, PIRKER S, KLOSS C. Efficient implementation of superquadric particles in Discrete Element Method within an open-source framework[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2017, 4(1): 101-118.
- [17] CHEN H, ZHAO S W, ZHOU X W. DEM investigation of angle of repose for super-ellipsoidal particles[J]. *Particuology*, 2020, 50: 53-66.
- [18] ZHAO Y Z, XU L, UMBANHOWAR P B, et al. Discrete element simulation of cylindrical particles using super-ellipsoids[J]. *Particuology*, 2019, 46: 55-66.
- [19] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47-65.
- [20] GOLDMAN R. Curvature formulas for implicit curves and surfaces[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2005, 22(7): 632-658.
- [21] DI FELICE R. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1994, 20(1): 153-159.
- [22] HÖLZER A, SOMMERFELD M. New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles[J]. *Powder Technology*, 2008, 184(3): 361-365.
- [23] 王胤, 周令新, 杨庆. 基于不规则钙质砂颗粒发展的拖曳力系数模型及其在细观流固耦合数值模拟中应用[J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 2009-2015. (WANG Y, ZHOU L X, YANG Q. New drag coefficient model for irregular calcareous sand particles and its application into fluid-particle coupling simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 2009-2015. (in Chinese))

- [24] ZHENG Q J, ZHOU Z Y, YU A B. Contact forces between viscoelastic ellipsoidal particles[J]. Powder Technology, 2013, 248: 25-33.
- [25] GILLIES R G, SHOOK C A, XU J H. Modelling heterogeneous slurry flows at high velocities[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 82(5): 1060-1065.
- [26] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491-497. (REN Y B, WANG Y, YANG Q. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 491-497. (in Chinese))
- [27] CHENG K, WANG Y, YANG Q, et al. Determination of microscopic parameters of quartz sand through tri-axial test using the discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 92: 22-40.

A study on the sediment dispersion characteristics based on the polydisperse non-spherical particle CFD-DEM model*

YANG Yefeng, WEI Tongzhong, WANG Yin

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To investigate the suspension and diffusion mechanisms of sediment particles under the action of fluids from both particle and flow field scales, a Gaussian curvature model is introduced in the discrete element method to characterize the nonlinear contact properties of non-spherical particles. Additionally, improvements are made to the drag force model and porosity models for non-spherical particles. By doing so, the polydispersed non-spherical particle CFD-DEM coupling numerical method is established. The accuracy and superiority of this model are validated through comparisons with physical experimental results. Subsequently, the suspension and diffusion processes of sediment under fluids are simulated. Results show that the sediment settling rate is positively correlated with the initial discharge quantity of particles and negatively correlated with flow velocity, while the escape rate shows an opposite trend. At high initial discharge, particle clustering effects promote fluid kinetic energy dissipation, causing gravity to surpass inertial forces and leading to rapid particle settling. At low initial discharge, higher fluid kinetic energy enhances horizontal particle transport. At lower flow velocities, particle shape significantly affects the spatial distribution of sediment particles.

Key words: suspension and diffusion; sediments; CFD-DEM coupling numerical method; polydispersed non-spherical particle

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51870935) and the Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (No. 2022-KF-18-05).