

DOI:10.11784/tdxbz202405025

## 振荡流作用下近床面泥沙颗粒受力研究

杨 霖, 张庆河

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 在海岸地区, 泥沙运动对地形演变有着显著影响, 而泥沙颗粒受到的拖曳力是引起运动的主要作用力. 在采用离散颗粒模型研究泥沙运动时, 颗粒拖曳力的准确性直接决定了泥沙运动规律计算的合理性, 因此研究波浪作用下床(壁)面附近泥沙颗粒的受力对于深入了解泥沙运动规律具有重要意义. 采用颗粒解析模型对不同周期振荡流作用下单个泥沙颗粒在近壁面不同距离处的受力进行了模拟分析. 模拟结果表明: 在相同雷诺数情况下, 周期越大, 拖曳力系数越小; 壁面距离越小, 拖曳力系数越大, 当距离增大至 5 倍粒径以上时, 壁面的影响不明显. 借鉴振荡流作用下圆柱的拖曳力系数, 根据模拟结果拟合了振荡流作用下颗粒拖曳力系数随斯托克斯数和雷诺数变化的周期修正公式; 借鉴明渠流中颗粒拖曳力系数的壁面修正形式, 拟合了拖曳力系数随壁面距离和雷诺数变化的壁面修正公式.

**关键词:** 振荡流; 拖曳力系数; 近床面颗粒; 周期影响; 壁面影响

中图分类号: TV142 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2025)03-0323-08

## Forces Acting on Sediment Particles near Bed Under Oscillatory Flow

Yang Mi, Zhang Qinghe

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Sediment transport plays a significant role in the morphological evolution of coastal areas, with the drag force acting on sediment particles being the primary driver of movement. When discrete particle models are used to study the sediment transport, the accuracy of the drag force acting on particles directly determines the reasonableness of calculated sediment transport patterns. Therefore, the investigation on forces acting on sediment particles near the bed (wall) under wave actions is crucial for a deeper understanding of sediment transport mechanisms. In this paper, a particle-resolved model is employed to simulate and analyze the forces acting on one single sediment particle at varying distances from the wall under oscillatory flows of different periods. Simulation results indicate that, for a given Reynolds number, the drag force coefficient decreases with the increasing oscillatory period, while it increases as the distance to the wall decreases. When this distance exceeds five particle diameters, the influence of the wall becomes negligible. With a reference to the drag force coefficient of a cylinder under an oscillatory flow, a fitting formula is derived for the drag force coefficient of particles under oscillatory flows as a function of the Stokes number and Reynolds number based on simulation results. Furthermore, inspired by the wall correction form of the drag force coefficient of particles in an open channel flow, a wall correction formula is derived for the drag force coefficient as a function of wall distance and the Reynolds number.

**Keywords:** oscillatory flow; drag force coefficient; near-bed particle; period effect; wall effect

在海岸地区, 泥沙运动影响着海岸地形演变、港口航道淤积以及建筑物周围的冲淤变化, 一直是海岸

收稿日期: 2024-05-24; 修回日期: 2024-08-29.

作者简介: 杨 霖(1999—), 男, 博士研究生, yangmi1999@tju.edu.cn.

通信作者: 张庆河, qhzhang@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1906231).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1906231).

工程的研究重点<sup>[1]</sup>. 波浪作用是引起泥沙运动的主要动力因素之一,使得泥沙颗粒表现出周期性运动和再悬浮的特性,导致建筑物周围呈现更为复杂的冲淤变化. 泥沙颗粒的起动悬浮发生在波浪边界层内,振荡边界层与真实波浪边界层存在一定的差异,波浪边界层内切应力相位差异现象相对较小,且边界层更薄<sup>[2]</sup>. 但两者差异有限,受限于计算量和实验手段,通过振荡流研究波浪边界层仍然是 1 种常用手段. 通过特定的作用力模型描述粒子间、粒子和流体间相互作用的离散颗粒模型(discrete particle model, DPM)被广泛应用于波浪作用下的泥沙问题<sup>[3-5]</sup>. DPM 模型的准确性很大程度上取决于粒子和流体之间相互作用力的准确性<sup>[6]</sup>. 因此,研究振荡流作用下近床(壁)面泥沙颗粒受力规律,对于深入认识波浪作用下床面泥沙颗粒的运动机理具有十分重要的意义.

现有泥沙颗粒受力的研究主要集中于恒定流,如早在 19 世纪 50 年代,Stokes<sup>[7]</sup>就推导出了低雷诺数下球形颗粒在不可压缩流体中的拖曳力表达式. 之后,众多学者通过实验<sup>[8-9]</sup>研究了无界流中高雷诺数下颗粒拖曳力系数,并进一步通过拟合实验数据提出了多个经验关系式<sup>[10-15]</sup>. 在泥沙颗粒运动中,壁面的存在对泥沙颗粒受力会产生显著影响. 在低雷诺数的线性剪切流动中,与壁面接触的静止颗粒的拖曳力系数比无界均匀流动中 Stokes 公式计算的拖曳力系数要大 70%<sup>[16]</sup>. 为了准确描述近壁面颗粒的受力特性,Shi 等<sup>[17]</sup>通过颗粒解析模拟,研究了静止流体和均匀剪切流中壁面附近平移运动刚性球受到的拖曳力. Xie 等<sup>[18]</sup>通过理论推导确定了明渠层流作用下体现床面影响的拖曳力系数修正公式,并进一步通过数值模拟的结果拓展了应用该修正公式的雷诺数范围<sup>[19]</sup>. Ekanayake 等<sup>[20]</sup>通过直接数值模拟,研究了静止或剪切流中近壁面滑移运动颗粒所受到的升力和拖曳力. 总之,目前针对恒定流作用下近床面颗粒受力已有对应的公式可以应用.

目前关于振荡流作用下颗粒受力的研究还较少,Fischer 等<sup>[21]</sup>利用直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)研究了振荡流作用下的单颗粒升力和阻力,分析了升力和阻力的变化趋势,并着重分析了升力系数存在异常的原因. 丁磊<sup>[22]</sup>通过格子玻尔兹曼方法研究了粗糙床面振荡流边界层的床面阻力,并提出了粗糙床面颗粒所受拖曳力平均值的表达式,该表达式并未考虑周期的影响. Mazzuoli 等<sup>[23]</sup>通过直接数值模拟研究了粗糙床面上的球体周围的振荡流运动,分析了作用于颗粒上的受力变化,并且发现

随着 Keulegan-Carpenter 数(KC)增加,涡旋结构的范围会增大,阻力和升力的波动也会增大. Takagi 等<sup>[24]</sup>研究了低雷诺数条件下振荡平板上颗粒的受力,同样发现振荡周期会对流体颗粒之间的作用力产生重要影响. 从已有结果看,目前还缺乏全面考虑各种影响因素(特别是周期影响)的振荡流作用下近床面泥沙颗粒的拖曳力公式.

为此,本文通过对振荡流作用下近壁面泥沙颗粒的全尺度模拟,研究了泥沙颗粒的拖曳力系数随周期和距壁面距离的变化规律,根据模拟结果在拟合周期修正公式的基础上,参考 Xie 等<sup>[18]</sup>修正系数形式拟合壁面修正系数,为进一步利用离散颗粒模型研究波浪作用下的近床面泥沙运动奠定基础.

## 1 数值模型

基于 OpenFOAM 的 pimpleFoam 瞬态紊流不可压缩模型求解器,建立振荡流作用下的泥沙颗粒受力计算模型. 下面简要给出控制方程、紊流模型、数值离散方法和边界条件的设置.

### 1.1 控制方程与紊流模型

采用基于大涡模拟(large eddy simulation, LES)的不可压黏性流体连续性方程和动量方程描述振荡流运动,即

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \bar{f}_i \quad (2)$$

式中:上划线“ $\bar{\quad}$ ”表示物理量被空间滤波; $\rho$ 为密度; $t$ 为时间; $p$ 为压强; $\nu$ 为动力黏度; $x_i (i=1, 2, 3)$ 为坐标系统的 3 个方向; $u_i (i=1, 2, 3)$ 为沿  $x_i$  方向的流速大小; $\tau_{ij}$ 为亚格子尺度的雷诺应力大小; $f_i$ 为在  $x_i$  方向上所受的体积力大小.

采用自适应壁面局部涡黏性(wall-adapting local eddy-viscosity, WALE)模型求解紊流. WALE 模型与传统 Smagorinsky 模型相比,考虑了紊流壁面效应和动量传递的影响,保证了近壁面流场模拟的准确性. 亚格子尺度的雷诺应力和涡黏系数可以分别表示为

$$\tau_{ij} = -\nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\nu_t = \rho (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (4)$$

式中:  $\nu_t$  为亚格子涡黏系数;  $\delta_{ij}$  为克罗内克符号;  $C_w$  为 WALE 常数,  $C_w = 0.325$ ;  $\Delta = \Delta x \Delta y \Delta z$ , 其中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta z$  分别表示  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的网格尺寸;  $S_{ij}$  为应变率;  $S_{ij}^d$  为特征应变率. 式(3)和式(4)中各项参数或系数的详细计算见文献[25].

### 1.2 数值离散方法

pimpleFoam 求解器采用有限体积法 (finite volume method, FVM) 离散控制方程, 通过 PIMPLE 算法求解压力速度耦合方程, 详细的介绍见文献[26], 这里不再赘述.

### 1.3 模型设置与边界条件

根据 Fischer 等<sup>[21]</sup>的工作, 振荡流可以由振荡压力梯度驱动实现, 见式(5). 设定水深为  $H$  的振荡流中静止放置 1 个半径为  $D$  的球体颗粒, 为了在模拟中准确描述球体表面, 需生成贴体网格. 本文使用 OpenFOAM 中的 snappyHexMesh 工具生成球体表面的贴体网格. 该工具通过初始六面体网格的分割和调整, 生成符合颗粒表面的网格. 球体中心距离底部边界距离为  $h$ , 定义颗粒雷诺数  $Re_p = u_\infty D / \nu$ ,  $KC = u_\infty T / D$ , 其中  $u_\infty$  为颗粒上游自由流流速,  $T$  为运动周期. 水流对泥沙颗粒的拖曳力通过颗粒表面的压力和切应力积分得到, 见式(6), 其计算域示意图如图 1 所示.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho U_0 \omega \cos(\omega t), \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$F_D = \mathbf{e}_x \cdot \int_S (-p \mathbf{n} + \boldsymbol{\tau}) ds, \quad C_D = \frac{F_D}{2A\rho U_0^2} \quad (6)$$

式中:  $U_0$  为振荡流流速振幅;  $\omega$  为振荡的圆频率;  $\mathbf{e}_x$  为  $x$  方向的单位向量;  $\mathbf{n}$  为球表面单位外法线向量;  $\boldsymbol{\tau}$  为切应力张量;  $S$  为球体表面积;  $A$  为球体横截面面积;  $F_D$  为拖曳力的大小;  $C_D$  为拖曳力系数.

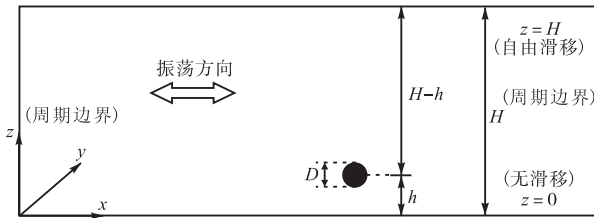


图 1 计算域示意

Fig.1 Schematic of computational domain

Fischer 等<sup>[21]</sup>建议的计算域大小如下:  $x$  方向上取 2 倍脱涡特征长度  $L_{ex} = u_\infty T / (2\pi)$ ,  $y$  方向上取  $5.5D \sim 9.0D$ ,  $z$  方向上取  $7.8D$ . 为了讨论更大范围内颗粒受力, 本文计算域在  $x$  方向上取  $24.0D$ , 在  $y$  方向上取  $16.0D$ , 在  $z$  方向上取  $20.0D$ .

在  $x$  和  $y$  方向上施加周期性边界条件, 在  $z$  方向

上的底部边界采用无滑移边界条件; 自由表面采用自由滑移边界条件, 球体表面采用无滑移边界条件, 见式(7).

$$\begin{cases} u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0 & z = 0 \\ \frac{\partial u_1}{\partial z} = 0, \frac{\partial u_2}{\partial z} = 0, u_3 = 0 & z = H \\ u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0 & \text{球面} \end{cases} \quad (7)$$

## 2 模型验证

### 2.1 光滑床面振荡流边界层水动力特性验证

在进行受力验证之前, 先进行光滑床面振荡流边界层水动力的验证. 计算参数见表 1, 其中  $a$  为水质点运动轨迹振幅,  $Re_a$  为边界层雷诺数,  $Re_a = U_0 a / \nu$ . 此时的流动处于层流状态, 层流状态下边界层内的流速表达式<sup>[27]</sup>为

$$u^* = \sin(\omega^* t^*) - e^{-z^*} \sin(\omega^* t^* - z^*) \quad (8)$$

式中:  $u^* = u_\infty / U_0$  为无量纲的流速;  $z^* = z / \delta$  为无量纲的水深;  $t^* = t / T$  为无量纲时间;  $\delta = \sqrt{2\nu / \omega}$  为边界层的厚度. 边界层流速分布如图 2 所示, 可见 LES-WALE 模拟的沿水深的流速剖面与理论解符合良好, 可以反映振荡流作用下边界层内的流速分布.

表 1 水动力验证计算参数取值

Tab.1 Values of computation parameters for hydrodynamic validation

计算参数	取值
$U_0 / (\text{m/s})$	0.152
$T / \text{s}$	9.72
$a / \text{m}$	0.235
$Re_a$	$3.3 \times 10^4$

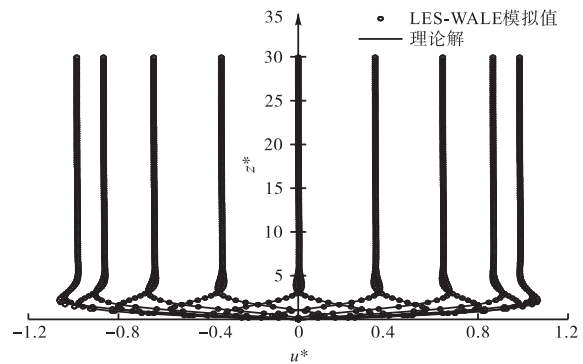


图 2 LES-WALE 模拟边界层流速分布 ( $\omega^* t^* = n\pi / 9, n = 1, 2, \dots, 18$ )

Fig.2 Flow velocity distribution in boundary layer simulated using LES-WALE ( $\omega^* t^* = n\pi / 9, n = 1, 2, \dots, 18$ )

### 2.2 光滑床面单颗粒受力验证

Fischer 等<sup>[21]</sup>和 Mazzuoli 等<sup>[23]</sup>利用 DNS 对光滑床面单颗粒受力进行了模拟, 可以将其模拟结果近似

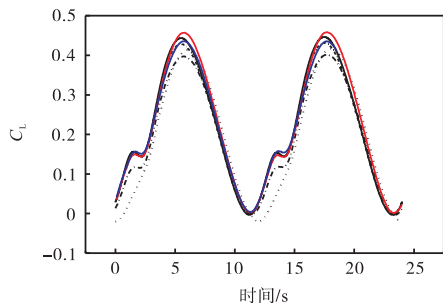
作为精确解,这里将本文的数值结果和文献[21, 23]的结果进行对比,以确定合理的网格和参数选择. 计算参数见表 2,其中  $Re_{p,U_0} = U_0 D/\nu$  表示通过幅值流速计算的颗粒雷诺数,  $h^* = h/D$  表示颗粒到壁面的无量纲距离.

表 2 升力系数验证计算参数取值

Tab.2 Values of computation parameters for lift force coefficient validation

计算参数	取值
$Re_{p,U_0}$	300
$h^*$	0.515 6

图 3 显示了网格大小分别为  $D/8$ 、 $D/16$ 、 $D/32$  和  $D/64$  时,连续计算 7 个周期达到稳定状态后颗粒在 1 个周期内的升力系数  $C_L = 2F_z/(A\rho U_0^2)$ ,其中  $F_z$  为  $z$  方向上的升力. 图 3 中同时还给出了 Fisher 等<sup>[21]</sup>和 Mazzuoli 等<sup>[23]</sup>的模拟结果. 由图 3 可知,当网格大小取  $D/32$  时,升力系数曲线和 DNS 模拟的结果基本吻合. 当网格加密至  $D/64$  时,升力系数变化已不明显;继续加密网格,计算量会显著增加,但计算精度不再明显提高. 因此,当网格大小取  $D/32$  时,本文的模型与 DNS 有较好的一致性,可以认为本文的模型较好地反映了振荡流作用下的颗粒受力,可以用于模拟分析更多的颗粒受力情况.



— 本文网格大小为  $D/64$     - - - 本文网格大小为  $D/16$     — Fischer-DNS<sup>[21]</sup>  
 - · - · 本文网格大小为  $D/32$     · · · 本文网格大小为  $D/8$     — Mazzuoli-DNS<sup>[23]</sup>

图 3 不同模型升力系数曲线对比

Fig.3 Comparison among lift force coefficient curves for different models

### 3 振荡流作用下颗粒拖曳力模拟分析

#### 3.1 周期对颗粒拖曳力系数的影响

根据谢琳等<sup>[19]</sup>对单颗粒受力的研究,壁面对  $10D$  范围以外的颗粒受力影响较小. 因此,本文暂时不考虑壁面作用,只分析周期对拖曳力系数的影响. 将直径为  $0.001\text{ m}$  的颗粒布置在计算域中部(即  $12D$ 、 $8D$  和  $10D$  处),保持颗粒的位置不变,取颗粒雷诺数  $Re_p$  分别为 10、25、50、75 和 100 和振荡流周

期  $T$  分别为 2 s、4 s、6 s、9 s、12 s 和 15 s 进行模拟,表 3 列出了各模拟工况条件及模拟结果.

表 3 周期变化的模拟工况及其结果

Tab.3 Simulation cases and corresponding results under variations in period

$Re_p$	$T/s$	$KC$	$1/\beta$	$C_D$ 模拟值	Cheng 公式 <sup>[28]</sup> 计算值	周期修正系数 $\lambda$
25	2	50.0	2	2.557	2.274	1.124
25	4	100.0	4	2.462	2.274	1.083
25	6	150.0	6	2.415	2.274	1.062
25	9	224.4	9	2.348	2.274	1.030
25	12	300.0	12	2.265	2.274	0.996
25	15	375.5	15	2.223	2.274	0.978
75	2	150.0	2	1.327	1.252	1.060
75	4	300.0	4	1.205	1.252	0.963
75	6	450.0	6	1.145	1.252	0.914
75	9	675.0	9	1.084	1.252	0.866
75	12	900.0	12	1.035	1.252	0.827
75	15	1 125.0	15	1.023	1.252	0.817
10	4	40.0	4	4.611	4.151	1.111
10	6	60.0	6	4.611	4.151	1.111
10	9	90.0	9	4.395	4.151	1.059
50	4	200.0	4	1.581	1.538	1.028
50	6	300.0	6	1.534	1.538	0.997
50	9	450.0	9	1.449	1.538	0.942
100	4	400.0	4	1.003	1.092	0.918
100	6	600.0	6	0.956	1.092	0.876
100	9	900.0	9	0.900	1.092	0.824

注:  $\beta$  为斯托克斯数.

Cheng<sup>[28]</sup>根据大量实验数据拟合了恒定流中球体颗粒的拖曳力系数公式,即

$$C_{D,0} = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.27 Re_p)^{0.43} + 0.47 \left[ 1 - \exp(-0.04 Re_p^{0.38}) \right] \quad (9)$$

图 4 显示了模拟得到的振荡流作用下颗粒雷诺数  $Re_p$  为 25 时  $C_D$  随  $KC$  的变化关系. 与恒定流相比,振荡流作用下颗粒拖曳力系数随  $KC$  增大而减小. 因此,振荡流作用下的颗粒拖曳力系数需要考虑周期影响对恒定流公式进行修正.

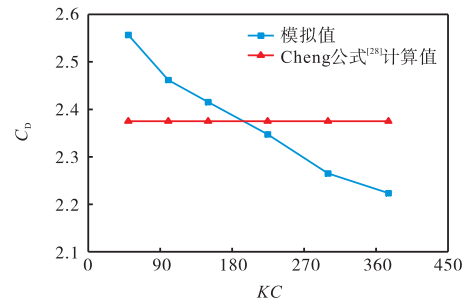


图 4 颗粒雷诺数  $Re_p$  为 25 时  $KC$  对拖曳力系数  $C_D$  的影响

Fig.4 Effect of Keulegan-Carpenter number  $KC$  on drag force coefficient  $C_D$  with  $Re_p$  of 25

利用周期修正系数 $\lambda$ , 可基于振荡流作用下颗粒拖曳力模拟结果对 Cheng 公式<sup>[28]</sup>进行修正, 即

$$C_D = \lambda C_{D,0} \tag{10}$$

参考振荡流作用下的圆柱拖曳力公式<sup>[29]</sup>, 引入斯托克斯数  $\beta = Re_p / (KC) = D^2 / (\nu T)$  作为拟合周期修正系数  $\lambda$  的参数. 根据模拟结果分析, 周期修正系数  $\lambda$  随  $1/\beta$  变化的关系可表示为

$$\lambda = A \left( \frac{1}{\beta} \right)^B \tag{11}$$

$$A = -0.0011 Re_p + 1.2292 \tag{12}$$

$$B = -0.0009 Re_p - 0.0525 \tag{13}$$

图 5 显示了利用式(11) ~ (13) 计算得到的振荡流作用下拖曳力拟合公式结果. 通过与表 3 所有模拟结果进行比较, 可以认为拟合公式较好地描述了不同周期和不同颗粒雷诺数条件下的颗粒拖曳力系数.

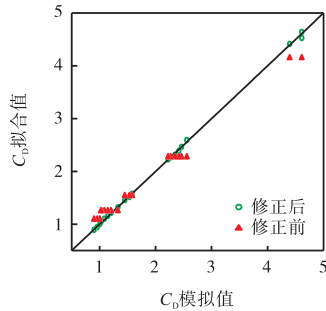


图 5 拖曳力系数的模拟值和拟合值(考虑周期的影响)比较

Fig.5 Comparison between simulation and fitting values (with consideration of effect of period) for drag force coefficient

### 3.2 壁面存在对拖曳力系数的影响

为了分析壁面修正系数, 将振荡周期  $T$  固定在 6 s, 取  $U_0$  分别为 0.010 m/s、0.025 m/s、0.050 m/s、0.075 m/s 和 0.100 m/s, 颗粒与壁面距离  $h/D$  分别为 0.60、0.85、1.10、1.60、2.50、5.00 和 10.00, 表 4 列出了各模拟工况条件及模拟结果.

根据 Xie 等<sup>[18]</sup>理论推导的结果, 壁面对颗粒所受拖曳力的影响只与无量纲距离有关. 图 6 显示了受颗粒与壁面距离影响的拖曳力系数模拟结果, 其中  $U_0$  为 0.100 m/s, 颗粒与壁面距离  $h/D$  分别为 0.60、0.85、1.10、1.60、2.10、5.00 和 10.00. 由图 6 可知, 距离较小时, 拖曳力系数会显著增大; 随着距离增大, 模拟的拖曳力系数  $C_D$  则趋近于前文提出的周期修正公式的计算值. 图 6 说明当颗粒与壁面距离增加到一定的程度时, 颗粒受壁面的影响可以忽略不计, 同时也说明了本文提出的周期修正系数  $\lambda$  是有效的.

表 4 距壁面距离变化的模拟工况及其结果

Tab.4 Simulation cases and corresponding results under variations in distance to the wall

$h/D$	$U_0 / (m/s)$	$Re_p$	$T/s$	$C_D$ 模拟值	壁面修正系数 $\eta$
0.60	0.010	4.1	6	10.227	1.136
0.60	0.025	10.3	6	5.090	1.149
0.60	0.050	20.6	6	3.127	1.150
0.60	0.075	30.9	6	2.480	1.194
0.60	0.100	41.2	6	2.080	1.209
0.85	0.010	5.6	6	7.219	1.023
0.85	0.025	14.0	6	3.698	1.038
0.85	0.050	27.9	6	2.368	1.066
0.85	0.075	41.9	6	1.847	1.085
0.85	0.100	55.8	6	1.554	1.102
1.10	0.010	6.8	6	5.930	0.984
1.10	0.025	17.1	6	3.082	0.997
1.10	0.050	34.2	6	1.970	1.014
1.10	0.075	51.3	6	1.508	1.011
1.10	0.100	68.4	6	1.213	0.985
1.60	0.010	8.7	6	4.809	0.961
1.60	0.025	21.8	6	2.540	0.971
1.60	0.050	43.7	6	1.603	0.968
1.60	0.075	65.5	6	1.217	0.959
1.60	0.100	87.4	6	1.003	0.963
2.10	0.010	9.9	6	4.377	0.958
2.10	0.025	24.7	6	2.365	0.982
2.10	0.050	49.4	6	1.483	0.971
2.10	0.075	74.2	6	1.140	0.977
2.10	0.100	98.9	6	0.931	0.976
5.00	0.010	10.2	6	4.457	1.001
5.00	0.025	25.6	6	2.378	1.011
5.00	0.050	51.2	6	1.496	1.002
5.00	0.075	76.8	6	1.128	0.990
5.00	0.100	102.4	6	0.942	1.013
10.00	0.010	10.0	6	4.655	1.027
10.00	0.025	25.0	6	2.415	1.011
10.00	0.050	50.0	6	1.535	1.012
10.00	0.075	75.0	6	1.145	0.988
10.00	0.100	100.0	6	0.957	1.010

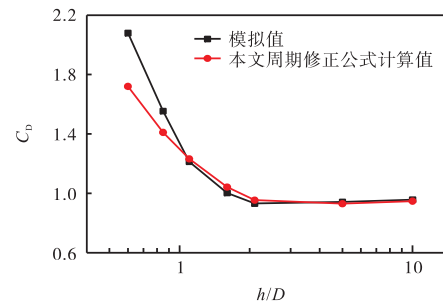


图 6 周期为 6 s 和  $U_0$  为 0.100 m/s 时无量纲距离  $h/D$  对拖曳力系数  $C_D$  的影响

Fig.6 Effects of dimensionless distance  $h/D$  on drag force coefficient  $C_D$  with  $T$  of 6 s and  $U_0$  of 0.100 m/s

利用壁面修正系数  $\eta$ , 可基于振荡流作用下颗粒拖曳力系数模拟结果对经过周期修正的公式(11) ~ (13) 进行进一步修正, 即

$$C_D = \eta \lambda C_{D,0} \quad (14)$$

颗粒与壁面不同距离和不同颗粒雷诺数下修正系数  $\eta$  和无量纲距离  $h/D$  的关系见图 7. 从图 7 可知, 当  $h/D$  为 0.60 时, 壁面影响显著, 壁面修正系数明显大于 1; 当  $h/D$  为 1.60 和 2.10 时, 壁面修正系数略微小于 1; 当  $h/D$  增大至 5.00 和 10.00 时, 壁面修正系数趋近于 1. 由模拟结果可知, 振荡流作用下的颗粒壁面修正系数与明渠流略有不同<sup>[8,30]</sup>: 明渠流中颗粒离壁面越近, 壁面修正系数越大, 远离壁面时修正系数趋于 1. Xie 等<sup>[18]</sup>基于理论推导提出了明渠流作用下的壁面修正系数形式, 其可表示为

$$\eta = C_1 + \frac{A_1}{\frac{2h}{D} - B_1} \quad (15)$$

式中  $A_1$ 、 $B_1$  和  $C_1$  为待定系数.

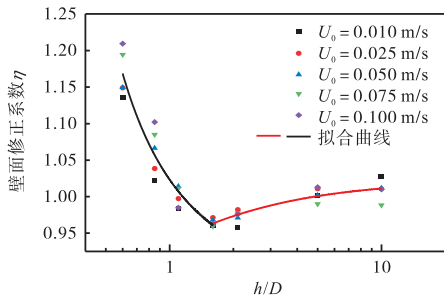


图 7 壁面修正系数  $\eta$  模拟结果及其拟合曲线

Fig.7 Simulation results and fitting curves of correction coefficient  $\eta$

Takemura 等<sup>[31]</sup>的研究表明, 壁面存在引起的速度梯度是近壁面拖曳力增大的 1 个重要原因. 对于振荡流而言, 近壁面边界层往往存在速度过冲, 如图 8 所示, 当  $h/D$  为 0.60 时, 颗粒整体均位于边界层内, 与明渠流一样, 流速梯度对颗粒拖曳力产生明显影响. 随着距离的增加, 当  $h/D$  为 1.60 和 2.10 时, 颗

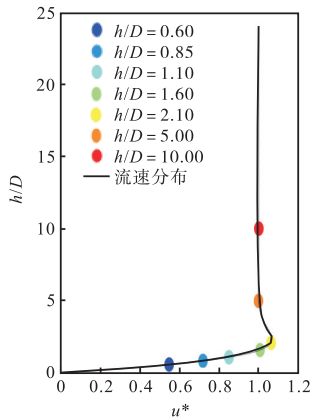


图 8 振荡流最大流速分布及相对应的颗粒位置

Fig.8 Maximum flow velocity distribution of oscillatory flow and corresponding positions of particles

粒处于边界层的过冲区附近, 因此颗粒上半部分和下半部分存在方向相反的速度梯度, 拖曳力受到抵消, 总的颗粒拖曳力因此减小, 壁面修正系数减小至小于 1; 当  $h/D$  继续增大至 5.00 和 10.00 时, 颗粒已经完全处于边界层外, 这时颗粒周围基本不存在受壁面影响的流速梯度, 颗粒表面的受力呈现对称性, 受力接近于无界振荡流中的颗粒受力, 因此壁面修正系数  $\eta$  接近于 1. 图 9 为振荡流作用下距壁面不同距离处颗粒周围的压力分布和流线, 由图 9 可以清楚地看出振荡流流速分布对颗粒表面压力变化的影响.

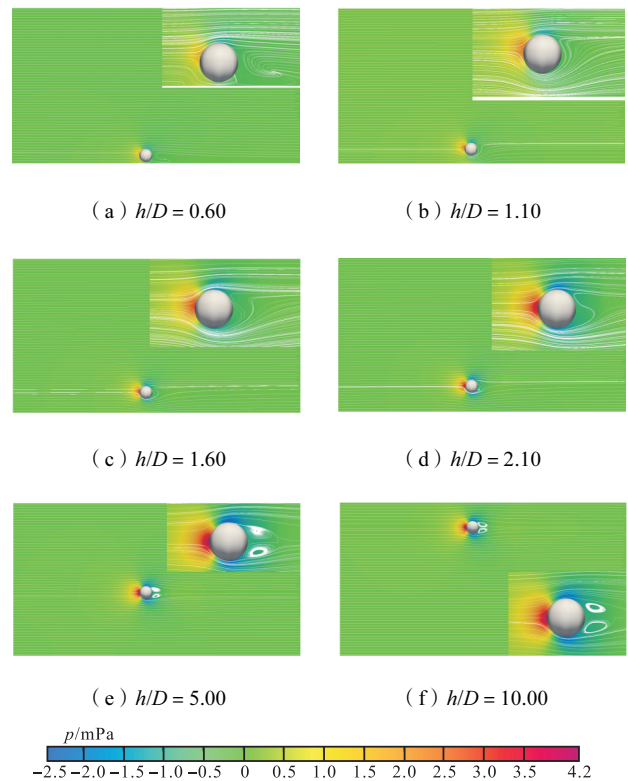


图 9  $t = 3\pi/2$ 时刻球体周围压力和速度

Fig.9 Pressure and velocity around the sphere at the moment  $t$  of  $3\pi/2$

参照式 (15), 可以将振荡流作用下的壁面修正系数进行分段拟合, 结果见式 (16) 和图 7 中的拟合曲线. 可以看出, 在不同雷诺数条件下, 壁面修正系数  $\eta$  和无量纲距离  $h/D$  具有较好的相关性.

$$\eta = \begin{cases} 0.87794 + \frac{0.23274}{\frac{2h}{D} - 0.39897} & h/D \leq 1.6 \\ 1.02226 + \frac{0.23052}{\frac{2h}{D} + 0.71293} & h/D > 1.6 \end{cases} \quad (16)$$

结合周期修正和壁面距离修正, 得到适用于振荡流的颗粒拖曳力系数公式, 即式 (14).

图 10 给出了式 (14) 给出的振荡流作用下拖曳力

系数拟合公式计算结果与表 4 所有模拟结果的比较, 可以认为拟合公式较好地描述了与壁面不同距离和不同颗粒雷诺数条件下的颗粒拖曳力系数。

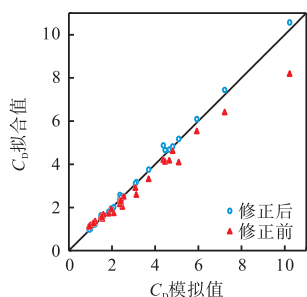


图 10 拖曳力系数的模拟值和拟合值(考虑壁面距离的影响)比较

Fig.10 Comparison between simulation and fitting values (with consideration of effect of distance to the wall) for drag force coefficient

## 4 结 论

本文以粒径为 1 mm 的颗粒为例, 通过直接数值模拟对振荡流作用下近床面颗粒受力进行了研究, 根据模拟结果分析了振荡周期和颗粒与壁面距离对颗粒拖曳力系数的影响, 分析了拖曳力在振荡流中的变化规律, 并提出了考虑周期影响和边壁影响的拖曳力系数综合修正公式, 为进一步应用至 DPM 研究波浪作用下泥沙颗粒运动提供了基础. 本文的主要结论如下.

(1) 本文建立的模型能够较好地模拟边界层内的流动, 通过与边界层流速理论解对比, 获得了水动力的验证. 网格敏感性分析结果表明, 颗粒周围网格加密至  $D/32$  时, 颗粒所受升力的模拟结果与 DNS 的结果有较好的一致性, 因此可以认为本文模型能够准确模拟振荡流边界层内的颗粒受力.

(2) 拖曳力系数  $C_D$  随  $KC$  和  $Re_p$  变化的模拟结果表明: 在相同雷诺数情况下, 周期越大, 周期修正系数  $\lambda$  越小; 周期修正系数  $\lambda$  与斯托克斯数  $\beta$  呈幂函数关系.

(3) 拖曳力系数  $C_D$  随壁面距离  $h/D$  和  $Re_p$  变化的模拟结果表明: 在紧靠壁面附近,  $h/D$  越小, 壁面修正系数  $\eta$  越大; 当距离增大至颗粒处于过冲区时, 壁面修正系数  $\eta$  略小于 1; 当距离增大至  $5D$  以上时, 壁面的影响很小, 壁面修正系数  $\eta$  几乎等于 1.

### 参考文献:

[1] 梁丙臣, 杨 博, 张 焱. 基于 CFD 的水动力与泥沙输

移模型研究及其在海洋海岸工程中的应用[J]. 海岸工程, 2022, 41(4): 388-411.

Liang Bingchen, Yang Bo, Zhang Qin. Study of hydrodynamic and sediment transport model based on the CFD and its application in ocean and coastal engineering[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(4): 388-411 (in Chinese).

[2] Xie M X, Zhang C, Li J Z, et al. Flow structure and bottom friction of the nonlinear turbulent boundary layer under stormy waves[J]. Coastal Engineering, 2021, 164: 103811.

[3] 苏东升, 张庆河, 孙建军, 等. 基于 CFD-DEM 耦合方法的近床面水流泥沙运动模拟研究[J]. 水道港口, 2016, 37(3): 224-230.

Su Dongsheng, Zhang Qinghe, Sun Jianjun, et al. Simulation of fluid-sediment particle motion near bed based on CFD-DEM coupling method[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(3): 224-230 (in Chinese).

[4] Harada E, Gotoh H, Ikari H, et al. Numerical simulation for sediment transport using MPS-DEM coupling model[J]. Advances in Water Resources, 2019, 129: 354-364.

[5] Mao J, Zhao L H, Di Y T, et al. A resolved CFD-DEM approach for the simulation of landslides and impulse waves[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 359: 112750.

[6] Jha S K, Bombardelli F A. Toward two-phase flow modeling of nondilute sediment transport in open channels[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F3): F03015.

[7] Stokes G G. Mathematical and Physical Papers: Volume 2[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

[8] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193-208.

[9] Brown P P, Lawler D F. Sphere drag and settling velocity revisited[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(3): 222-231.

[10] Clift R, Gauvin W H. Motion of entrained particles in gas streams[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1971, 49(4): 439-448.

[11] Flemmer R L C, Banks C L. On the drag coefficient of a sphere[J]. Powder Technology, 1986, 48(3): 217-221.

[12] Khan A R, Richardson J F. The resistance to motion of a

- solid sphere in a fluid[J]. *Chemical Engineering Communications*, 1987, 62: 135-150.
- [13] Swamee P K, Ojha C S P. Drag coefficient and fall velocity of nonspherical particles[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 117(5): 660-667.
- [14] Haider A, Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles[J]. *Powder Technology*, 1989, 58(1): 63-70.
- [15] Terfous A, Hazzab A, Ghenaïm A. Predicting the drag coefficient and settling velocity of spherical particles[J]. *Powder Technology*, 2013, 239: 12-20.
- [16] 谢琳. 近床面泥沙水流作用力及其在离散颗粒模型中的应用[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2019.  
Xie Lin. Hydrodynamic Forces of Sediment Particles near Bed and Their Application in Discrete Particle Model[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2019(in Chinese).
- [17] Shi P Y, Rzehak R, Lucas D, et al. Drag and lift forces on a rigid sphere immersed in a wall-bounded linear shear flow[J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6(10): 104309.
- [18] Xie L, Zhang Q H, Zhang J F, et al. Drag force and torque of a stationary sphere in a uniform laminar open channel flow[J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(12): 123302.
- [19] 谢琳, 张庆河, 张金凤, 等. 明渠层流近床面颗粒拖曳力研究[J]. *计算力学学报*, 2023, 40(2): 208-215.  
Xie Lin, Zhang Qinghe, Zhang Jinfeng, et al. Drag force of particle near bed in laminar open channel flow[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(2): 208-215(in Chinese).
- [20] Ekanayake N I K, Berry J D, Harvie D J E. Lift and drag forces acting on a particle moving in the presence of slip and shear near a wall[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 915: A103.
- [21] Fischer P F, Leaf G K, Restrepo J M. Forces on particles in oscillatory boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 468: 327-347.
- [22] 丁磊. 粗糙床面振荡流边界层的三维格子玻尔兹曼模拟研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2010.  
Ding Lei. Three-Dimensional Lattice Boltzmann Simulation of Oscillatory Boundary Layer Flow over a Rough Bed[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2010(in Chinese).
- [23] Mazzuoli M, Blondeaux P, Simeonov J, et al. Direct numerical simulation of the oscillatory flow around a sphere resting on a rough bottom[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 822: 235-266.
- [24] Takagi D, Strickler J R. Active hydrodynamic imaging of a rigid spherical particle[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 2665.
- [25] Nicoud F, Ducros F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 1999, 62(3): 183-200.
- [26] Barton I E. Comparison of SIMPLE- and PISO-type algorithms for transient flows[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1998, 26(4): 459-483.
- [27] Sleath J F A. Velocity measurements close to the bed in a wave tank[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 42(1): 111-123.
- [28] Cheng N S. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles[J]. *Powder Technology*, 2009, 189(3): 395-398.
- [29] Ren C J, Lu L, Cheng L, et al. Hydrodynamic damping of an oscillating cylinder at small Keulegan-Carpenter numbers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 913: A36.
- [30] Zeng L Y, Najjar F, Balachandar S, et al. Forces on a finite-sized particle located close to a wall in a linear shear flow[J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21(3): 033302.
- [31] Takemura F, Magnaudet J. The transverse force on clean and contaminated bubbles rising near a vertical wall at moderate Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 495: 235-253.

(责任编辑:武立有)