

湍流环境下颗粒与气泡黏附过程的数值模拟研究

张志军, 黄旭贝

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 研究湍流环境中颗粒与气泡的黏附过程对于探究浮选微观过程具有重要意义。基于 EDEM 的 API(应用程序编程接口) 二次开发模块, 建立了颗粒与气泡黏附过程相互作用的三维离散元法 (DEM) 模型。在 Fluent 软件中通过构建规则格栅以激发各向同性的湍流, 并将湍流环境通过计算流体力学-离散元 (CFD-DEM) 加入到 EDEM 软件中。模拟了颗粒粒径为 0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30 mm, 颗粒密度为 1 500、2 000 和 2 500 kg/m³, 球形度为 0.746 ~ 0.854 的不规则颗粒, 和气泡直径为 1.00、1.20、1.60 和 2.00 mm, 在气泡与格栅间距离为 1.00、1.50、2.00 和 3.00 mm 的湍流环境下颗粒与气泡的黏附过程。研究了颗粒、气泡、流场各参数对于颗粒与气泡黏附过程的影响。结果发现, 无论规则颗粒还是不规则颗粒在湍流环境中与气泡的黏附均存在临界脱附流速(颗粒与气泡发生脱附的最小湍流流场流速)。密度大的颗粒和粒径大的颗粒与气泡黏附的临界脱附流速更小, 表明粒径和密度大的颗粒与气泡难以稳定黏附。气泡的直径越大, 颗粒与气泡稳定黏附的临界脱附流速越小, 颗粒越难以稳定黏附。在相同的流速下, 气泡与格栅间距离越小, 则流场湍流强度越大, 颗粒与气泡稳定黏附的临界脱附流速越小, 表明湍流强度的增加不利于颗粒与气泡的稳定黏附。球形度小的颗粒与气泡稳定黏附的临界脱附流速也较小, 表明球形度小的颗粒与气泡难以稳定黏附。

关键词: 浮选; CFD-DEM; 颗粒; 气泡; 黏附; 湍流数值模拟

中图分类号: TD923 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)04-2057-10

Numerical simulation of the attachment process of particles and bubbles in a turbulent environment

ZHANG Zhijun, HUANG Xubei

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The study of the attachment process between particles and bubbles in a turbulent environment is essential for understanding the microscopic process of flotation. The interaction force model between particles and bubbles is developed based on the API (Application Programming Interface) secondary development module of EDEM. The model establishes a three-dimensional discrete element method (DEM) to simulate the interaction process between particles and bubbles. Isotropic turbulence is generated by constructing regular grids in the Fluent software. The turbulent environment is then incorporated into the EDEM software using the computational fluid dynamics discrete element (CFD-DEM). The simulation consists of regular particles with sizes ranging from 0.10 to 0.30 mm and densities of 1 500, 2 000 and 2 500 kg/m³. Additionally, the irregular particles with sphericity values ranging from 0.746 to 0.854 are included. Bubble sizes

收稿日期: 2024-01-10 修回日期: 2024-03-01 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0074

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274281); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4100900)

作者简介: 张志军 (1984—), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士生导师。Tel: 010-62339638, E-mail: zzhun1984@126.com

引用格式: 张志军, 黄旭贝. 湍流环境下颗粒与气泡黏附过程的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2057-2066.

ZHANG Zhijun, HUANG Xubei. Numerical simulation of the attachment process of particles and bubbles in a turbulent environment[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2057-2066.



移动阅读

are set at 1.00, 1.20, 1.60, and 2.00 mm. To study the attachment process between particles and bubbles, the distance between the grid and the bubble in the turbulent environment are set as 1.00, 1.50, 2.00, and 3.00 mm. The results demonstrate the existence of a critical detachment flow rate (the minimum turbulent flow velocity where particles and bubbles cannot achieve a stable attachment state) for both regular and irregular particles adhering to bubbles in a turbulent environment. It is found that the particles with larger density and diameter exhibit a smaller critical detachment flow velocity when adhering to bubbles, indicating that particles with larger diameter and density have difficulty in achieving stable attachment with bubbles. As the bubble diameter increases, the critical detachment flow velocity required for stable particle-bubble attachment decreases, making it more difficult for particles to achieve stable attachment. At the same flow velocity, a smaller distance between the bubbles and the grid results in a higher turbulent flow intensity, leading to a smaller critical detachment flow velocity for stable particle-bubble attachment, suggesting that an increase in turbulent intensity is detrimental to the stable attachment of particles and bubbles. Furthermore, the particles with lower sphericity also exhibit a smaller critical detachment flow velocity for stable attachment to bubbles, indicating that the particles with lower sphericity have difficulty in achieving stable attachment with bubbles.

Key words: flotation; CFD-DEM; particle; bubble; attachment; turbulent numerical simulation

泡沫浮选是基于矿物表面疏水性差异实现微细粒物料中不同矿物颗粒分离富集的有效分选方法,被广泛应用于各种领域,如选矿、选煤、废水处理、油砂处理、粉煤灰脱碳和纸浆脱墨^[1-4]。浮选过程中,空气被旋转的叶轮或气体喷射器引入浮选槽产生微小的气泡,在气-液-固三相浮选体系内,颗粒与气泡会发生相互作用,包括碰撞、黏附和脱附^[5-6]。在颗粒与气泡碰撞-黏附过程中,只有使颗粒与气泡间的水化膜薄化直至破裂出一个核孔,形成稳定的三相润湿周边,矿物颗粒才能黏附在气泡上,进而在上升水流作用下到达泡沫层^[7-8]。因此,目的矿物颗粒稳定地黏附在气泡上是泡沫浮选过程中的关键环节^[4,9-11]。

浮选槽内的湍流环境会极大地影响矿物浮选过程中颗粒与气泡的相互作用。已有实验研究表明,强湍流流场可以提高颗粒与气泡的碰撞概率,有利于湍流环境中颗粒与气泡的黏附^[12-13],但同时也会增加颗粒的离心力,从而导致颗粒与气泡脱附。目前获得湍流环境最直接有效的方法是安装格栅。固定格栅会对经过格栅的流体产生扰动作用,从而在格栅后产生近似各向同性湍流。MAZELLIER 和 VASSILICOS^[14]定义了参数 $X^* = L_0^2/H_0$ (其中, L_0 、 H_0 分别为最大条形的长度、厚度),该参数区分了具有高各向异性的近格栅区域和具有近各向异性的远格栅区域^[15]。MELINA 等^[16]研究了 3 种不同格栅的流场特征,即单一方形格栅、均匀格栅和分形格栅。为保证格栅后流场的稳定性,笔者选择了简单的方形格栅。

目前,计算流体力学-离散元 (CFD-DEM) 模拟是研究颗粒-流体两相流的一种强有力工具。使用计算流体力学 (CFD) 求解流体相,使用离散元法 (DEM) 求解颗粒相,可以准确模拟两相行为和颗粒-流体之

间的相互作用。此外,颗粒的粒径、密度等参数可在模拟中得到准确体现。

为了模拟颗粒与气泡的碰撞-黏附过程,学者们建立了多尺度浮选机 CFD 模型^[17]。KOH 等^[18-19]通过 CFD 的群平衡模型来模拟浮选过程中的颗粒与气泡黏附过程。SASIC 等^[20-21]采用直接数值模拟 (DNS) 框架和流体体积法 (VOF) 来研究沉降颗粒与上升气泡的相互作用水动力,分析了分离距离、气泡形状和颗粒密度对颗粒与气泡轨迹的影响。WANG 等^[22]使用 CFD 模拟研究不同湍流强度对颗粒-气泡碰撞效率的影响,提出了分析湍流扩散模型 (TD),用于量化湍强度对碰撞效率的影响。MAXWELL 等^[23]采用三维 DEM 数值模拟,研究了单颗粒或颗粒群与固定气泡的碰撞动力学以及颗粒在气泡表面的滑动动力学,首次计算并分析了颗粒群在气泡表面的滑动时间和堆积排列。MORENO-ATANASIO 等^[24]采用离散元法 (DEM) 分别模拟了静态和动态流体环境中,颗粒群初始状态对气泡捕获颗粒数量的影响。研究发现,在静止流体的情况下,颗粒在气泡上方生成时 (顶部分布) 气泡捕获颗粒的概率要比颗粒围绕气泡生成时 (球形分布) 大。YASMIN 等^[25]基于 DEM 开发了一个单向耦合声场的颗粒与气泡间相互作用的三维离散元模型,其中气泡的振荡行为采用一维 Rayleigh-Plesset 方程控制,模拟实际浮选中加入声场可以提高矿物浮选回收率的情形。GE L 等^[26]使用 CFD-DEM 耦合法构建了一个颗粒群-气泡间相互作用的三维离散元模型,用于模拟不同固体体积分数 (0.01~0.25) 的颗粒群与静止气泡 (气泡雷诺数为 50~200) 的相互作用。

现有关于颗粒与气泡黏附过程的数值模拟主要

在静水环境下进行,对湍流环境下颗粒与气泡黏附的模拟研究鲜有报道。因此,笔者在颗粒与气泡间力学理论的基础上,结合 CFD-DEM 方法对湍流环境下颗粒与气泡间的黏附过程进行了模拟研究。

1 模拟方法

1.1 模型构建

在 Creo 软件中建立几何模型,模型计算域如图 1 所示,长方体计算域系统尺寸为 $L_x \times L_y \times L_z = 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,在流场入口下方 1.00 mm 处构建格栅为气泡周围激发湍流流场环境。格栅参数如图 2 所示。

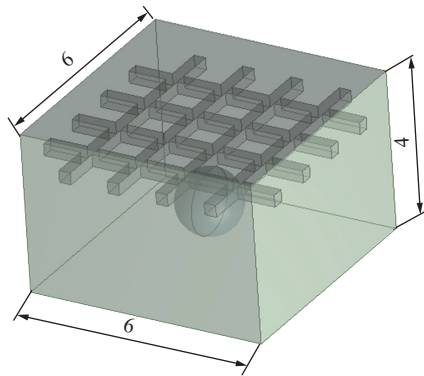


图 1 几何模型示意

Fig.1 Schematic diagram of geometric model

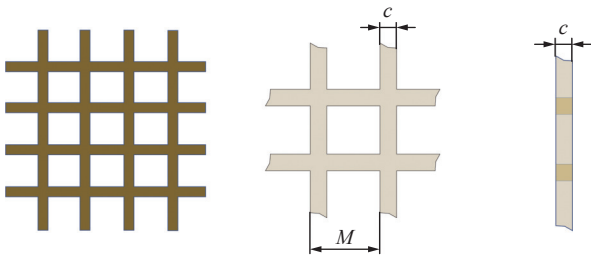


图 2 格栅结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid structure

为了避免流动的不稳定性,应使用阻碍率小于 0.50 的格栅^[27],阻碍率 γ 计算公式为

$$\gamma = [M^2 - (M - c)^2] / M^2 \quad (1)$$

其中, c 为格栅中条形的底边长度; M 为相邻条形间的距离。经过计算,选择 $c = 0.30 \text{ mm}$ 和 $M = 0.96 \text{ mm}$ 时可在气泡周围产生稳定的湍流环境。

在 EDEM 软件构建出颗粒与气泡的模型,根据以前的研究气泡被建模为弹性球体。修改设定参数使模拟结果的颗粒接触角与已有实验结果达到一致,从而确定颗粒的泊松比、剪切模量和恢复系数等参数。

为研究颗粒密度对黏附过程的影响,选用密度为 1 500、2 000 和 2 500 kg/m^3 的 3 种矿物颗粒模型进行模拟研究。本研究不涉及颗粒的材料特性和表面粗

糙度,所有颗粒设定为统一的泊松比、剪切模量和摩擦系数。颗粒和气泡的材料属性参数见表 1。

表 1 颗粒和气泡的材料属性参数

Table 1 Material property parameters of particles and bubbles

材料属性	颗粒	气泡
泊松比	0.25	0.01
剪切模量/Pa	2.00×10^9	64.00
恢复系数	0.20	
静摩擦因数	0.01	

为了研究颗粒的大小、形状对黏附过程的影响,在 EDEM 软件中建立了颗粒直径 $d = 0.10$ 、 0.15 、 0.20 、 0.25 、 0.30 mm 的 5 个球形颗粒模型。此外,利用颗粒堆叠模块构建了 6 个不同球形度的不规则形状颗粒^[28],如图 3 所示,其形状参数见表 2。

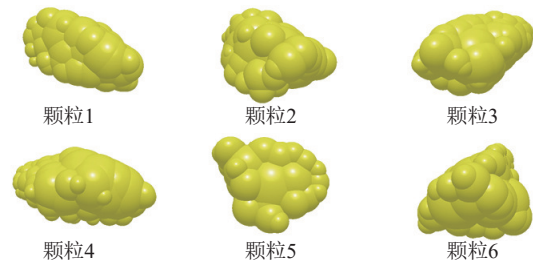


图 3 不规则颗粒形状示意

Fig.3 Schematic diagram of irregular particle shape

表 2 不规则颗粒的形状参数

Table 2 Shape parameters of irregular particles

颗粒	体积/ mm^3	表面积/ mm^2	球形度
颗粒1	0.004 19	0.147	0.856
颗粒2	0.004 19	0.151	0.833
颗粒3	0.004 19	0.152	0.826
颗粒4	0.004 19	0.157	0.799
颗粒5	0.004 19	0.158	0.798
颗粒6	0.004 19	0.168	0.746

计算域网格采用 ICEM 网格划分软件中的六面体结构网格进行划分。根据湍流模型的要求,边界层的特征参数 y^+ 不得大于 1,以实现对气泡周围湍流场的精确模拟, y^+ 计算公式为

$$y^+ = \frac{y \rho u_\tau}{\mu}, u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

其中, y 为第 1 层网格厚度; ρ 为介质密度; μ 为介质动力黏度; τ_w 为壁面剪切应力速度。据计算,边缘网格尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 时,可保证所有模拟工况下 y^+ 均小于 1。

为了确保计算的准确性,需要进行网格独立性验证,该验证通过在 50×10^4 、 75×10^4 、 100×10^4 和 125×10^4

的 4 种网格数量模型模拟单相水流流动。计算有着相同的设置参数。选择气泡周围流场的湍流强度进行分析,各模型在气泡近表面的湍流强度如图 4 所示。

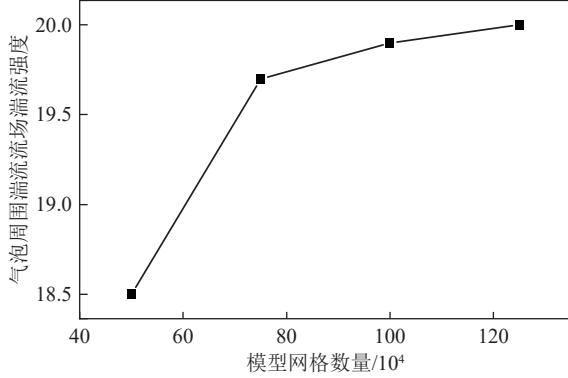


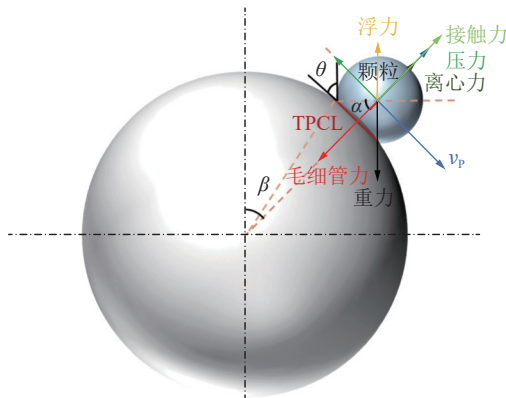
图 4 网格独立性检验结果

Fig.4 Grid independence test results

由图 4 可知,网格数量大于 100×10^4 ,随着网格数量的增加湍流强度几乎不变。满足网格独立性的要求,因此选择 100×10^4 网格数量模型进行后续计算。

1.2 颗粒与气泡黏附受力模型

从力学角度研究黏附在气泡上的颗粒运动,根据力的作用效果可以将黏附过程中作用在颗粒上的力分为 2 种:黏附力和脱附力^[29]。其中,黏附力为保持颗粒黏附在气泡上的力,而脱附力则促使颗粒与气泡脱附。这些力之间的平衡决定了颗粒的运动。通常情况下,当颗粒与气泡结合体处于稳定的黏附状态时,黏附力被认为等于脱附力。颗粒与气泡黏附过程受力如图 5 所示。



注: β 为极角; α 为中心角; θ 为接触角; TPCL 为三相接触周边; v_p 为颗粒速度。

图 5 颗粒与气泡黏附过程受力示意

Fig.5 Schematic diagram of force on particle-bubble attachment process

黏附力中的毛细管力 F_c 为颗粒与气泡黏附的最主要力,它由液体的表面张力产生,沿气液界面切向作用于由颗粒、气泡和液体形成的三相接触线。其表

达式为

$$F_c = -2\pi\sigma R_p \sin \alpha \sin (\theta - \alpha) \quad (3)$$

式中, σ 为液体表面张力; R_p 为颗粒半径; α 为颗粒的中心角; θ 为颗粒的三相接触角。

总压力 F_p 由拉普拉斯压力和静水压力组成。其中拉普拉斯压力可以用式 (4) 计算:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_b} \quad (4)$$

式中, R_b 为气泡半径。

考虑到由于弯曲的气液界面而在水中出现的气泡,拉普拉斯压力和静水压力之间的竞争决定了总压力的大小和方向,可以用式 (5) 来计算:

$$F_p = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{2\sigma}{R_b} - \rho_l g H \right) \quad (5)$$

式中, ρ_l 为液体的密度; g 为重力加速度; H 为气泡顶部到三相接触面的垂直距离。

浮选过程中浮力有利于维持颗粒与气泡的黏附。考虑颗粒被液体淹没的体积故颗粒浮力为

$$F_b = \frac{1}{3} \pi R_p^3 \rho_l g (2 + 3 \cos \alpha - \cos^3 \alpha) \quad (6)$$

重力 F_g 属于脱附力,垂直向下作用。公式为

$$F_g = 4\pi R_p^3 \rho_p g / 3 \quad (7)$$

式中, ρ_p 为颗粒的密度。

由于处于湍流流场中,颗粒会受到离心力的作用, SCHULZE^[23]认为,颗粒在湍流场中受到离心力的作用,在气泡表面做圆周运动,离心力达到一定程度,导致颗粒与气泡脱附。

$$F_a = \frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_p b_m \quad (8)$$

$$b_m = 1.9 \frac{\varepsilon^{2/3}}{D_b^{1/3}} \quad (9)$$

式中, b_m 为颗粒的加速度; D_b 为气泡直径; ε 为湍流动能耗散率。

1.3 离散元法 (DEM)

DEM 中离散相颗粒运动应满足牛顿第二定律,颗粒单元应满足以下控制方程:

$$m \frac{du_p}{dt} = F_g + F_{ad} + F_d \quad (10)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = T \quad (11)$$

式中, u_p 为颗粒的速度; t 为运动时间; F_d 为颗粒与流

场之间的作用力; I 为颗粒的转动惯量; ω 为颗粒的旋转角速度; T 为作用在颗粒上的转矩; F_{ad} 为黏附过程中颗粒与气泡间的作用力, $F_{ad} = F_c + F_p + F_b$ 。

本研究通过 EDEM 的 API 接口, 将颗粒与气泡间作用力编译到颗粒与气泡的接触模型中, 从而模拟颗粒与气泡的黏附过程。

接触力模型是基于 C++ 语言以 Visual Studio 软件作为编译平台开发的。使用 Visual Studio 软件调用了 Hertz-Mindlin 模型相关函数和参数并对模型中受力计算主函数和基础模型部分进行修改。将 EDEM 目录中的 2 个 API 接口文件进行了修改并编译成 ×64 位动态链接库文件 (CFroce.dll)。并插入到 EDEM 软件的接触模型文件夹中。导入文件至 EDEM 软件中, 设置为默认的接触力模型。

1.4 Fluent 设置

将建立的几何模型导入 Fluent 软件, 并检查是否有负体积网格。计算域上方的壁面被设置为流场的速度入口, 下方的壁面设置为压力出口, 压力为 101 325 Pa。其余面均设为无滑移壁面。

求解器选择基于压力的求解器。由于研究中没有对涡流进行细致研究, 所以选择了具有良好收敛性和稳定性的标准 k - ε 模型。标准 k - ε 模型的湍流动能 k 和耗散率 ε 的方程为

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (12)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

其中, x_i 为 i 方向的空间坐标; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为用于浮力影响引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流中脉动膨胀的影响; σ_ε 和 σ_k 分别为湍流动能和湍流耗散率的湍流普朗特数; μ_t 为湍流黏性系数。根据工程经验, 经验常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$ 。

计算域设为流体, 液相设置为水。为了计算的稳定性和效率, 选择 SIMPLE 求解方法和二阶迎风格式。

1.5 EDEM-Fluent 耦合

为了说明 Fluent 和 EDEM 之间的耦合计算过程, 图 6 展示了一个时间步长内的耦合示意。在 Fluent-EDEM 的耦合过程中, 作用在颗粒上的力是通过从包含颗粒中心的流体网格单元中提取参数来计算的。

EDEM 的时间步长常被设为 Rayleigh 时间步长的 10%~30%, 明显小于 Fluent 所使用的时间步长。因此, 将 2 个软件的时间步长设定为 1:1 是不合适

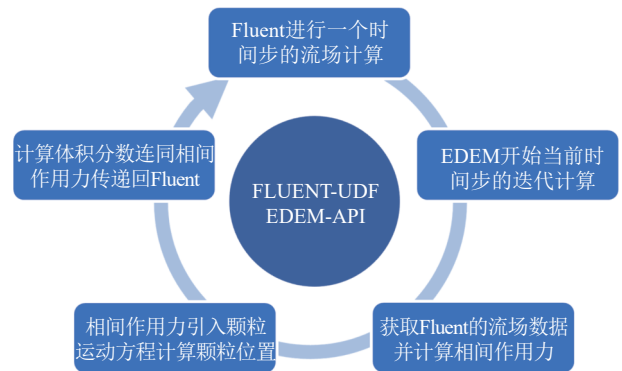


图6 耦合计算示意

Fig.6 Schematic diagram of coupled calculation

的。在 Fluent 中, 时间步长应足以使流体计算收敛, 而在 EDEM 中, 时间步长应符合 Rayleigh 时间步长的设定标准, 并且不能超过 Fluent 中的时间步长。为了确保 EDEM 时间步长和颗粒 Rayleigh 时间步长之间具有整数比例, 我们需要计算 EDEM 的时间步长, 并使用 Rayleigh 时间步长的 10~20 倍系数来调整 Fluent 的时间步长。模拟中采用颗粒直径为 0.10 mm、密度为 2 500 kg/m³, 其对应 Rayleigh 时间步长的 18.468 3%。通过计算, 得到 EDEM 的时间步长为 5.00×10⁻⁷ s, 而 Fluent 的时间步长为 1.00×10⁻⁵ s, 这样的时间步长比例为 1:20。另外, EDEM 每隔 1.00×10⁻⁴ s 保存 1 次数据, 而 Fluent 每隔 10 步即 1.00×10⁻⁴ s 保存 1 次数据, 因此 2 者的比例为 1:1, 满足耦合计算的要求。

Fluent 和 EDEM 的耦合方法可以分为欧拉法耦合和拉格朗日法耦合 2 种。考虑到本次模拟中颗粒的固相体积分数小于 10%, 因此选用 Lagrangian 法双向耦合。在 FLUENT 中为单向流计算, 流体-颗粒通过自定义源项传递相互作用。曳力模型主要分为 3 种: Free stream 曳力模型、Ergun 和 Wen-Yu^[30]模型、Di Felice^[31]曳力模型。其中 Free stream 曳力模型适用于颗粒数目和颗粒碰撞较少的情况, 适合于本研究工况。故选择 Free stream 模型。在求解控制器中, 设置采样点为 10、动量膨胀为 0.70、体积膨胀为 0.70。

1.6 可视化模拟过程

为了模拟颗粒与气泡在湍流环境的黏附行为, 首先要构建相应的湍流流场。选取气泡直径为 1.20 mm 且与格栅间距离 1.50 mm 的模型, 在 Fluent 软件按上述操作设置且初始流场速度为 0.50 m/s 稳定计算 5 000 步。从模型中提取出速度矢量, 如图 7(a) 所示。此外, 为了更好地理解流场模型, 截取垂直于格栅平面 Y 轴方向的中心截面显示流场的湍流强度, 如图 7(b) 所示。可知, 越接近气泡, 流场的湍流强度越大, 流场流速越

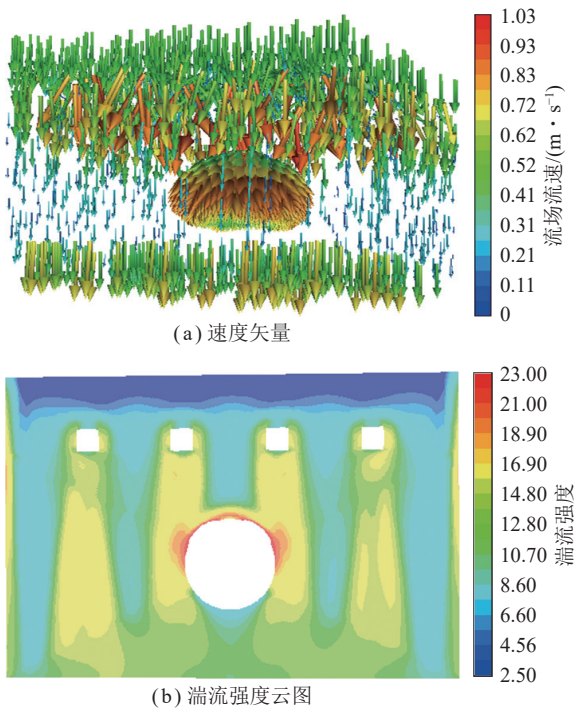


图7 流场示意

Fig.7 Schematic diagram of flow field

大, 对称分布均匀。

颗粒工厂设置在气泡顶部 0.10 mm 处, 颗粒生成后, 在湍流流场曳力和自身重力的共同作用下, 向着气泡方向运动并与气泡碰撞接触, 然后颗粒沿着气泡表面运动, 过程中数据以 0.001 s 的时间间隔保存。数据通过 EDEM 软件后处理导出。图 8 显示了密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 的 0.10 mm 粒径的颗粒与 1.20 mm 直径的气泡的黏附过程, 实现了湍流流场中颗粒与气泡黏附过程的可视化。

在湍流流场环境中的颗粒与气泡碰撞-黏附/脱附过程如图 8 所示。最初, 颗粒在流场曳力和重力的共同作用下加速绕流, 在一定速度下与气泡接触, 在浮力、毛细管力、压力和重力的综合作用下, 颗粒沿着气泡表面运动。当颗粒到达气泡底部时, 它们不会立即停止, 而是继续轻微的来回摆动, 直到它们最终静止并实现稳定黏附, 如图 8(a) 所示。图 8(b) 为颗粒与气泡碰撞-黏附后, 在强湍流环境的影响下再次脱附。这种行为凸显了准确建模和模拟颗粒与气泡黏附的复杂物理现象的重要性。

以不规则颗粒 1 替代模拟中的 0.10 mm 规则颗粒, 其余参数不变, 模拟了其在不同流速 (0.10、0.11 m/s) 下的碰撞-黏附/脱附行为。图 9 展示了不同流场流速的湍流流场中不规则颗粒 1 与气泡的碰撞-黏附/脱附过程。由图 8、9 可知, 无论规则颗粒还是不规则颗粒在湍流环境中与气泡的黏附均存在临界脱附流速。当湍流流场的流速小于临界脱附流速时, 颗粒在与气

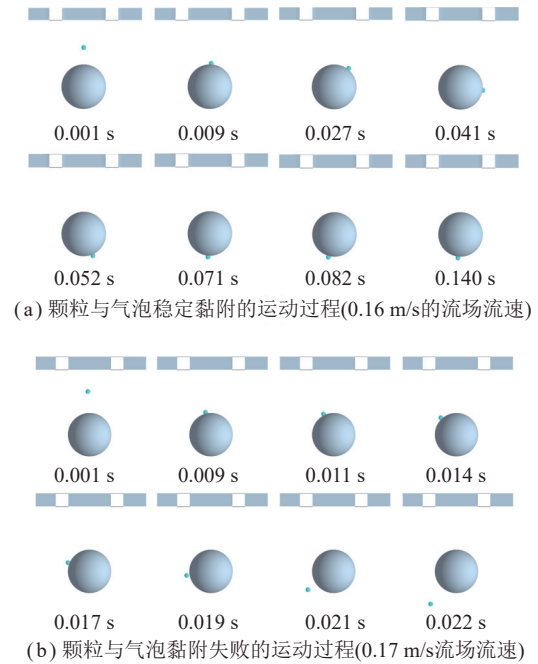


图8 规则颗粒与气泡黏附运动过程

Fig.8 Regular particle and bubble attachment motion process

泡碰撞后会沿着气泡表面运动并最终稳定黏附在气泡底部。当流速大于临界脱附流速后, 颗粒与气泡首先碰撞黏附形成稳定三相周边。在强湍流环境作用下颗粒速度不断增大, 颗粒所受到的离心力也逐渐增大。直到颗粒受到的毛细管力等无法维持颗粒与气泡黏附状态, 颗粒与气泡脱附。将模拟结果与 VERRELLI 等^[32]的实验数据进行比照, 如图 10 所示。

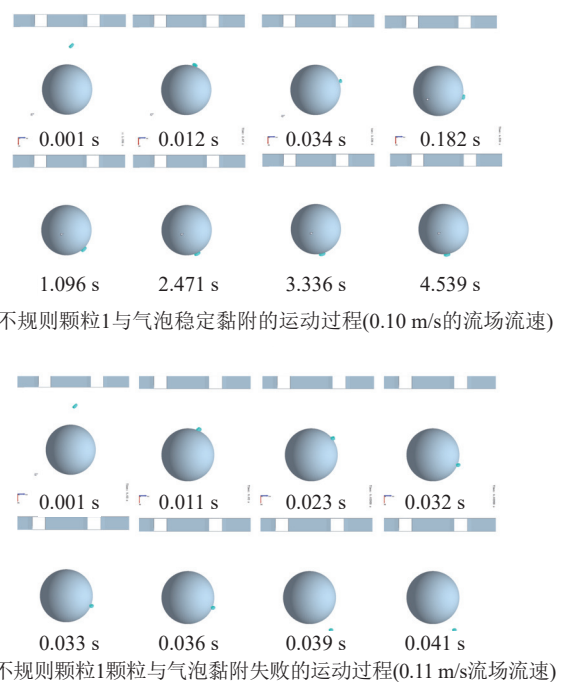


图9 不规则颗粒 1 与气泡黏附运动过程

Fig.9 Irregular particle 1 and bubble attachment motion process

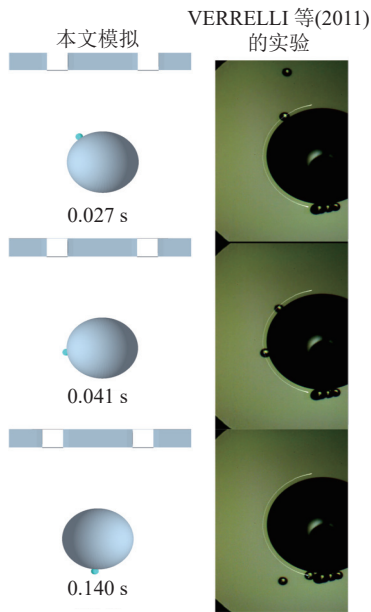


图 10 本模拟与 Verrelli 等的实验颗粒运动轨迹对照

Fig.10 Comparison the particle trajectory of this simulation with experiments by Verrelli et al

由图 10 分析可知, 本模拟结果与实验结果在一定范围内相吻合, 证明本模拟的可行性和准确性。

2 结果与讨论

通过 CFD-DEM 模拟湍流流场环境下颗粒与气泡的黏附过程, 量化分析了颗粒与气泡黏附过程中的颗粒参数、气泡参数和湍流流场参数对颗粒与气泡黏附过程的影响。

2.1 颗粒大小和密度对颗粒与气泡黏附的影响

颗粒的密度和粒径在颗粒与气泡黏附过程中起着重要作用, 颗粒密度和粒径直接影响着作用在颗粒上的重力、浮力、总压力、离心力和毛细管力。

为了研究颗粒密度和粒径对颗粒与气泡黏附的影响, 模拟了不同密度和粒径的颗粒与气泡在不同流速下的黏附过程。在不同密度和粒径条件下, 观察并记录了颗粒的临界脱附流速, 精度为 0.01 m/s。图 11 展示了不同粒径 (0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30 mm) 和密度 (1 500、2 000 和 2 500 kg/m³) 的颗粒与直径为 1.20 mm 的气泡黏附的临界脱附流速, 气泡与格栅间距离为 1.50 mm。

如图 11 所示, 颗粒粒径越大, 颗粒的临界脱附流速越小, 即越容易脱附。例如, 当颗粒密度为 2 000 kg/m³ 时, 颗粒的粒径从 0.10 mm 增加到 0.30 mm 时, 临界脱附流速从 0.19 m/s 减小到 0.15 m/s。颗粒密度越大, 颗粒的临界脱附流速越小, 即越容易脱附。例如, 当颗粒粒径为 0.25 mm 时, 颗粒的密度从 1 500 kg/m³ 增大到 2 500 kg/m³ 时, 颗粒的临界脱附流速从 0.20 m/s

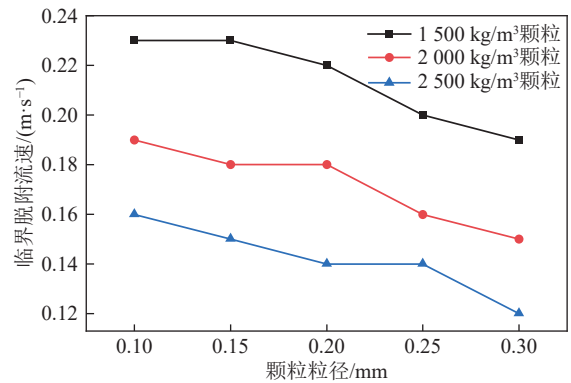


图 11 不同密度和粒径颗粒的临界脱附流速

Fig.11 Critical detachment velocity of particles with different densities and sizes

降低到 0.14 m/s。对过程受力分析可知, 重力和离心力是主要的脱附力, 它们与颗粒的质量密切相关。随着颗粒密度和粒径的增加, 脱附力也会增加, 需要更大的黏附力才能达到黏附平衡状态, 颗粒更难以稳定黏附。

2.2 气泡对颗粒与气泡黏附的影响

气泡会对颗粒与气泡间相互作用力产生影响, 进而导致浮选效果的差异。

为了研究气泡对颗粒与气泡的黏附过程的影响, 模拟了颗粒与不同直径气泡的黏附过程。图 12 展示了不同密度 (1 500、2 000 和 2 500 kg/m³)、粒径为 0.10 mm 颗粒, 与不同直径 (1.00、1.20、1.60 和 2.00 mm) 的气泡, 在湍流环境中的临界脱附流速, 气泡与格栅间距离为 1.50 mm。

如图 12 所示, 气泡直径越小, 颗粒的临界脱附流速越大, 即黏附越稳定。例如, 当颗粒密度为 2 500 kg/m³ 时, 气泡的直径从 2.0 mm 下降到 1.0 mm 时, 临界脱附流速从 0.17 m/s 增大到 0.21 m/s。此外, 在相同的气泡直径条件下, 颗粒的临界脱附流速随着颗粒密度的降低而增加。以气泡直径 1.2 mm 为例, 颗粒的密度从 2 500 kg/m³ 降至 1 500 kg/m³, 临界脱附

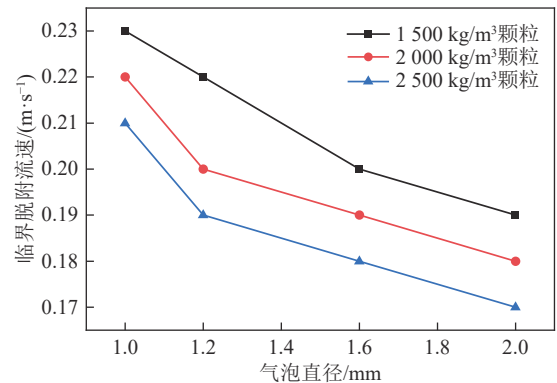


图 12 不同密度颗粒与不同直径气泡的临界脱附流速

Fig.12 Critical detachment velocity of particles with different densities and bubbles with different sizes

流速从 0.19 m/s 增大至 0.22 m/s。

图 13 展示了密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 的不同粒径颗粒 (0.1、0.2 和 0.3 mm) 与不同直径气泡 (1.0、1.2、1.6 和 2.0 mm) 在湍流环境中的临界脱附流速, 其中气泡与格栅间距离为 1.50 mm。

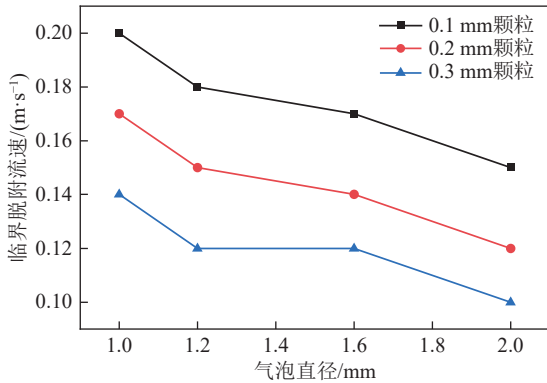


图 13 不同粒径颗粒与不同直径气泡的临界脱附流速

Fig.13 Critical detachment velocity of particles with different sizes and bubbles with different sizes

图 13 结果与图 12 一致。气泡直径越小, 颗粒的临界脱附流速越大, 即黏附越稳定。例如, 当颗粒粒径为 0.2 mm 时, 气泡的直径从 2.0 mm 下降到 1.0 mm, 临界脱附流速从 0.12 m/s 增大到 0.17 m/s。在相同的气泡直径下, 颗粒脱附所需流速随着颗粒粒径的减小而增加。例如, 在气泡直径为 1.2 mm 时, 颗粒的粒径从 0.3 mm 减小到 0.1 mm, 临界脱附流速从 0.12 m/s 增大至 0.18 m/s。

结合图 5 颗粒与气泡黏附平衡的受力分析, 毛细管力是最主要的黏附力。而较小的气泡在与颗粒黏附时会产生较大的毛细管力来维持稳定黏附。因此, 较小气泡更容易稳定黏附颗粒。

2.3 湍流流场对颗粒与气泡黏附的影响

浮选机槽内的流场是影响浮选过程的一个关键因素。为了在气泡周围激发不同湍流强度的湍流场, 选择将气泡与格栅间距离作为变量, 并在 Fluent 软件中建立了 4 个气泡与格栅间距离 (分别为 1.0、1.5、2.0 和 3.0 mm) 模型。图 14 展示了模型在不同流场流速下气泡周围湍流强度。

由图 14 可知, 气泡与格栅间距离越大, 气泡周围湍流强度越小。例如, 当流场的流速为 0.4 m/s 时, 气泡与格栅间距离 1.0 mm 时的湍流强度为 24.70, 气泡与格栅间距离增大到 1.5 mm, 再增大到 2.0 mm 和 3.0 mm 时, 其湍流强度降至 22.90, 再降至 20.90 和 17.90。且随着流场流速的降低, 气泡与格栅间距离对气泡周围流场的湍流强度的影响也逐渐减小。

图 15 展示了不同密度 ($1\,500$ 、 $2\,000$ 和 $2\,500\text{ kg/m}^3$)、

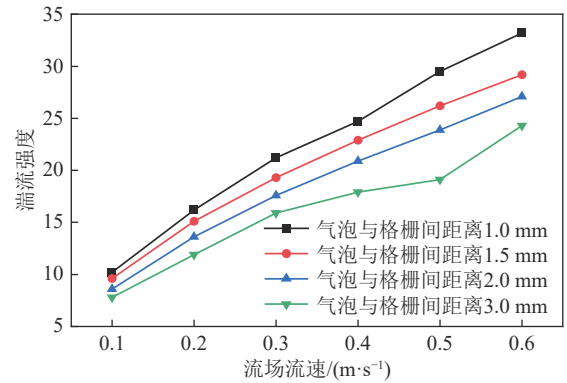


图 14 不同流速下气泡与格栅间距离对流场湍流强度的影响

Fig.14 Turbulence intensity of flow field with different distances between bubbles and grids at different flow velocities
粒径为 0.1 mm 颗粒、直径为 1.2 mm 气泡、在不同气泡与格栅间距离 (1.0、1.5、2.0 和 3.0 mm) 的流场环境中的临界脱附流速。由图 15 可知, 气泡与格栅间距离越大, 颗粒的临界脱附流速越大, 即黏附越稳定。例如, 当颗粒密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 时, 气泡与格栅间距离从 1.0 mm 增大到 3.0 mm, 而临界脱附流速从 0.13 m/s 增大到 0.25 m/s。同时, 在气泡与格栅间距离保持不变的条件下, 颗粒脱附所需流速随着颗粒密度的降低而增加。例如, 在气泡与格栅间距离为 1.5 mm 时, 颗粒的密度从 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 降至 $1\,500\text{ kg/m}^3$, 临界脱附流速从 0.17 m/s 增大至 0.23 m/s。

图 16 展示了密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 的不同粒径 (0.1、0.2 和 0.3 mm) 颗粒与直径 1.2 mm 的气泡, 在不同气泡与格栅间距离 (1.0、1.5、2.0 和 3.0 mm) 的流场环境中的临界脱附流速。图 16 结论与图 15 一致。气泡与格栅间距离越大, 颗粒的临界脱附流速越大, 即黏附越稳定。例如, 当颗粒粒径为 0.2 mm 时, 气泡与格栅间距离从 1.0 mm 增大到 3.0 mm, 临界脱附流速从

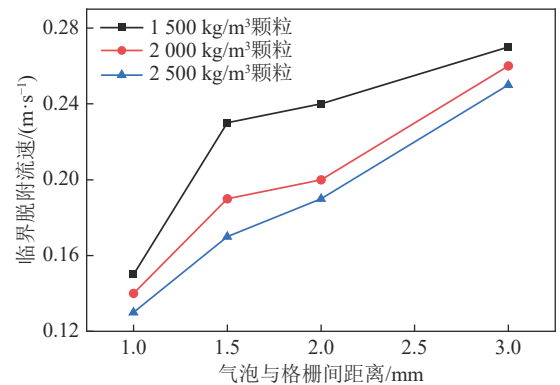


图 15 不同密度颗粒在不同气泡与格栅间距离流场的临界脱附流速

Fig.15 Critical detachment velocity of particles with different densities in turbulent flow field with different distances between bubbles and grids

0.13 m/s 增大到 0.21 m/s。在相同的气泡与格栅距离下, 不同粒径的颗粒达到临界状态所需的流速随着颗粒粒径的减小而增加。例如, 在气泡与格栅间距离为 1.5 mm 时, 颗粒的粒径从 0.3 mm 降至 0.1 mm, 临界脱附流速从 0.12 m/s 增大至 0.16 m/s。

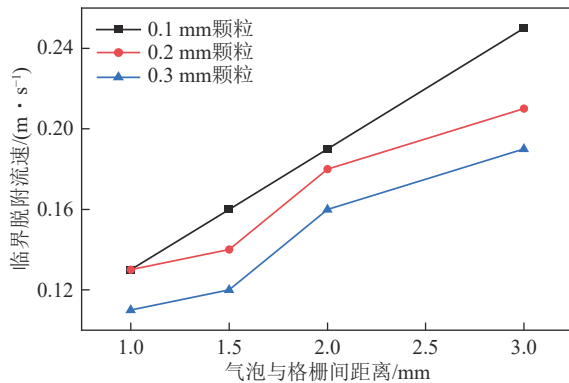


图 16 不同粒径颗粒在不同气泡与格栅间距离流场的临界脱附流速

Fig.16 Critical detachment velocity of particles with different sizes in turbulent flow field with different distances between bubbles and grids

根据受力分析可知, 较小的气泡与格栅间距离会产生较大的湍流强度, 而较大的湍流强度会导致颗粒在湍流环境中产生较大的加速度, 这种加速度会产生更大的离心力, 这是导致颗粒从气泡上脱附的主要脱附力。气泡与格栅间距离越小, 湍流强度高的流场使颗粒与气泡越难以稳定黏附。

2.4 颗粒球形度对颗粒与气泡黏附的影响

颗粒形状对颗粒的浮选回收利用起到重要作用^[33], 尤其对湍流流场中颗粒与气泡的碰撞-黏附过程。为了研究颗粒形状对颗粒与气泡黏附的影响, 模拟以不规则形状矿物颗粒为研究对象。图 17 展示了密度为 2500 kg/m^3 的不规则颗粒与直径为 1.2 mm 气泡, 在不同气泡与格栅间距离 (1.0、1.5、2.0 和 3.0 mm) 的流场环境中的临界脱附流速。

如图 17 所示, 颗粒球形度越大, 颗粒的临界脱附流速越大, 即黏附越稳定。例如, 在气泡与格栅间距离为 3.00 mm 时, 从颗粒 1 至颗粒 6, 球形度从 0.856 降至 0.833、0.826、0.799、0.798 和 0.746, 而临界脱附流速从 0.25 m/s 降至 0.21、0.17、0.12、0.09 和 0.07 m/s。

随着颗粒球形度的降低, 颗粒与气泡黏附过程中颗粒与气泡稳定性也随之降低。颗粒与气泡接触后, 由于其接触面积小, 颗粒与气泡之间的液膜薄化速度快, 有利于三相接触线的形成。但不规则颗粒在流场中的气泡表面易发生滑动, 导致颗粒与气泡间的三相接触线在滑动过程中也会发生位置和大小变化, 从

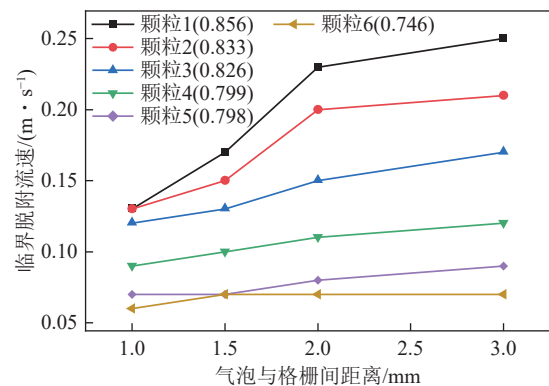


图 17 不同球形度颗粒在不同气泡与格栅间距离流场中的临界脱附流速

Fig.17 Critical detachment velocity of particles with different sphericity in turbulent flow field with different distances between bubbles and grids

而影响颗粒与气泡的黏附平衡, 使得已黏附的颗粒在湍流环境下发生脱附。由此说明球形度的降低不利于颗粒与气泡稳定黏附。

3 结 论

(1) 密度大的颗粒和粒径大的颗粒与气泡黏附的临界脱附流速更小, 表明粒径和密度大的颗粒与气泡难以稳定黏附。

(2) 气泡的直径越大, 颗粒与气泡稳定黏附的临界脱附流速越小, 颗粒越难以稳定黏附。

(3) 在相同的流速下, 气泡与格栅间距离越小, 则流场湍流强度越大, 颗粒与气泡稳定黏附的临界脱附流速越小, 表明湍流强度的增加不利于颗粒与气泡的稳定黏附。

(4) 球形度小的颗粒与气泡稳定黏附的临界脱附流速也较小, 表明球形度小的颗粒与气泡易发生脱附。

参考文献(References):

- [1] VASHISTH S, BENNINGTON C P J, GRACE J R, et al. Column flotation deinking: State-of-the-art and opportunities[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(12): 1154-1177.
- [2] DRELICH J, MILLER J D. Improved flotation deinking of sorted office papers by flocculation of ink particles[J]. *Progress in Paper Recycling*, 2001, 11(1): 38-46.
- [3] EJTEMAEI M, GHARABAGHI M, IRANNAJAD M. A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method[J]. *advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 206: 68-78.
- [4] BLOOM F, HEINDEL T J. A theoretical model of flotation deinking efficiency[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997, 190(1): 182-197.
- [5] CROSS M. Modeling and simulation of mineral processing systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2003, 217(1): 77.

- [6] SCHULZE H J. Physico-chemical elementary processes in flotation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 152: 501–502.
- [7] SHI S, ZHANG M, FAN X, et al. Experimental and computational analysis of the impeller angle in a flotation cell by PIV and CFD[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 142: 2–9.
- [8] SCHWARZ M P, KOH P T L, WU J, et al. Modelling and measurement of multi-phase hydrodynamics in the Outotec flotation cell[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 144: 106033.
- [9] ZHAO G, SHI X, WU Y, et al. 3D CFD simulation of gas-solids hydrodynamics and bubbles behaviors in empty and packed bubbling fluidized beds[J]. *Powder Technology*, 2019, 351: 1–15.
- [10] BOCCIOLONE M, CHELI F, CORRADI R, et al. Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(5): 584–610.
- [11] CERMAK J E. Progress in physical modeling for wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 54: 439–455.
- [12] DAI Z, FORNASIERO D, RALSTON J. Particle–bubble collision models—A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2000, 85(2–3): 231–256.
- [13] HASSANZADEH A, FIROUZI M, ALBIJANIC B, et al. A review on determination of particle-bubble encounter using analytical, experimental and numerical methods[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 122: 296–311.
- [14] MAZELLIER N, VASSILICOS J. Turbulence without richardson–kolmogorov cascade[J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(7): 075101.
- [15] GOMES-FERNANDES R, GANAPATHISUBRAMANI B, VASSILICOS J C. Particle image velocimetry study of fractal-generated turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 711: 306–336.
- [16] MELINA G, BRUCE P J K, VASSILICOS J C. Vortex shedding effects in grid-generated turbulence[J]. *Physical Review Fluids*, 2016, 1(4): 044402.
- [17] SCHWARZ M P, KOH P T L, VERRELLI D I, et al. Sequential multi-scale modelling of mineral processing operations, with application to flotation cells[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 90: 2–16.
- [18] KOH P T L, SCHWARZ M P. CFD modelling of bubble-particle attachments in flotation cells[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(6–8): 619–626.
- [19] KOH P T L, SCHWARZ M P. CFD modelling of bubble-particle collision rates and efficiencies in a flotation cell[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(11): 1055–1059.
- [20] SASIC S, SIBAKI E K, STRÖM H. Direct numerical simulation of a hydrodynamic interaction between settling particles and rising microbubbles[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2014, 43: 65–75.
- [21] STRÖM H, SIBAKI E K, SASIC S. Numerical simulations of the interaction between a settling particle and a rising microbubble[J]. *American Institute of Physics*, 1479: 113–116.
- [22] WANG A, HOQUE M M, EVANS G, et al. Effect of turbulence dispersion on bubble-particle collision efficiency[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 177: 107374.
- [23] MAXWELL R, ATA S, WANLESS E J, et al. Computer simulations of particle-bubble interactions and particle sliding using discrete element method[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 381(1): 1–10.
- [24] MORENO-ATANASIO R, GAO Y, NEVILLE F, et al. Computational analysis of the selective capture of binary mixtures of particles by a bubble in quiescent and fluid flow[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, 109: 354–365.
- [25] YASMIN D, MITRA S, EVANS G M. Analysis of dynamic interactions in a bubble-particle system in presence of an acoustic field[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 131: 111–123.
- [26] GE L, EVANS G M, MORENO-ATANASIO R. CFD-DEM investigation of the interaction between a particle swarm and a stationary bubble: Particle-bubble collision efficiency[J]. *Powder Technology*, 2020, 366: 641–652.
- [27] COMTE-BELLOT G, CORRISIN S. The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, 25(4): 657–682.
- [28] CHEN Y, ZHUANG L, ZHANG Z. Effect of particle shape on particle-bubble interaction behavior: A computational study using discrete element method[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 653: 130003.
- [29] NUTT C W. Froth flotation: The adhesion of solid particles to flat interfaces and bubbles[J]. *Chemical Engineering Science*, 1960, 12(2): 133–141.
- [30] TSUO Y P, GIDASPOW D. Computation of flow patterns in circulating fluidized beds[J]. *AIChE Journal*, 1990, 36(6): 885–896.
- [31] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48(2): 89–94.
- [32] VERRELLI D I, KOH P T L, NGUYEN A V. Particle–bubble interaction and attachment in flotation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(23): 5910–5921.
- [33] PITA F, CASTILHO A. Separation of plastics by froth flotation. The role of size, shape and density of the particles[J]. *Waste Management*, 2017, 60: 91–99.