



单颗粒和双颗粒在聚丙烯酰胺溶液中 沉降过程的数值模拟

耿明亮, 王艳萍, 邓晓烽, 祖也航, 李 晔

(浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对钻井过程中停钻工况下岩屑在钻井液中的沉降问题, 以球形颗粒代替岩屑, 以聚丙烯酰胺 (Polyacrylamide, PAM) 溶液代替钻井液, 采用计算流体动力学-离散元法 (Computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM) 分别模拟了单颗粒和双颗粒在 PAM 溶液中的沉降过程, 探究颗粒粒径和 PAM 溶液浓度对单颗粒沉降过程的影响, 考察颗粒粒径和颗粒初始间距对水平排列的双颗粒沉降过程的影响, 并简要分析了颗粒的受力情况。结果表明: 单颗粒在 PAM 溶液中的沉降速度比在水中小, 随粒径的增大而增大, 随 PAM 溶液浓度的增加而减小; 水平排列的双颗粒在沉降过程中受 Magnus 力和 Saffman 力的显著影响, 颗粒间距越小, 粒径越大, Magnus 力的作用越明显; 在沉降过程中, 水平排列的双颗粒垂直下落速度大于单颗粒的沉降速度, 且呈波动增长。研究结果可为钻井现场工艺实施、颗粒在黏性流体中的沉降机理及相关工程应用研究提供一定的参考。

关键词: 双颗粒; 颗粒间距; 沉降速度; 非牛顿流体; 数值模拟

中图分类号: O359

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2024)09-0674-07

引文格式: 耿明亮, 王艳萍, 邓晓烽, 等. 单颗粒和双颗粒在聚丙烯酰胺溶液中沉降过程的数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(5): 674-680.

Reference Format: GENG Mingliang, WANG Yanping, DENG Xiaofeng, et al. Numerical simulation on the sedimentation process of single and double particles in polyacrylamide solution[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(5): 674-680.

Numerical simulation on the sedimentation process of single and double particles in polyacrylamide solution

GENG Mingliang, WANG Yanping, DENG Xiaofeng, ZU Yehang, LI Yi

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the sedimentation of cuttings in the drilling fluid under the condition of drilling stopping during the drilling process, the spherical particles and polyacrylamide (PAM) solution were chosen to substitute for cuttings and drilling fluid, respectively. The computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) was used to simulate the sedimentation process of single and double particles in PAM solution, and the effect of particle size and PAM solution concentration on the sedimentation process of the single particle as well as that of particle size and initial distance of particles on the sedimentation process of the double particles arranged horizontally were analyzed. The force on the particles was briefly analyzed. The results showed that the sedimentation velocity of the single particle in PAM solution was smaller than that in water, and it increased with the increase of particle size and decreased with the increase of PAM solution concentration; the Magnus and Saffman forces significantly effected the sedimentation of the double particles arranged horizontally, and the smaller the distance of

收稿日期: 2024-02-22 网络出版日期: 2024-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE0126600, 2022YFC280150); 浙江省重点研发计划项目 (2022C01194)

作者简介: 耿明亮 (1996—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事流体机械优化设计方面的研究。

通信作者: 王艳萍, E-mail: wangyp@zstu.edu.cn

double particles and the larger the particle size, the more significant the effect of Magnus force. Moreover, compared to single particles, the vertical descent speed of double particles arranged horizontally during the sedimentation process was greater than that of single particles and shows fluctuating growth. This study will provide certain reference for the research on process operation of the drilling site, the sedimentation mechanism of particles in viscous fluids and related engineering application.

Key words: double particles; particle distance; sedimentation velocity; non-Newtonian fluid; numerical simulation

0 引 言

颗粒沉降广泛存在于自然界和工业生产中,如河道中颗粒的沉积、空气中灰尘等细小颗粒的沉降、钻井过程中岩屑颗粒在钻井液中的沉降、污水处理中污染物的过滤沉降等。掌握颗粒在介质中的沉降规律,有助于相关领域的科学研究和工程应用开发。

国内外学者对颗粒的沉降规律已开展了相当多的研究工作,其中针对颗粒在牛顿流体中沉降的研究尤为深入,已取得了较为丰硕的成果。研究人员能够通过高速相机成像技术捕获双颗粒在静止流体、层流流体($Re = 33$)、湍流流体($7000 < Re < 15000$)的运动轨迹和运动速度的变化^[1-3]。计算流体动力学-离散元法(Computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)、格子玻尔兹曼方法、直接力浸入边界法等数值计算方法的应用弥补了多颗粒沉降实验中颗粒追踪困难的不足,使得对颗粒沉降的动力学特性的研究更加深入^[4-7]。根据文献报道,颗粒在牛顿流体中沉降的数值模拟和实验结果的误差目前已经可以控制在 10% 以内^[8]。

与以上对颗粒在牛顿流体中沉降的研究相比,有关颗粒在非牛顿流体中沉降的研究则相对较少,但实际生产生活中很多流体属于非牛顿流体。由于非牛顿流体的流变特性与牛顿流体不同,因此颗粒在非牛顿流体中的沉降规律也不同于牛顿流体。在实验研究方面,颗粒在非牛顿流体中沉降同样依靠高速相机或 PIV 成像技术^[9-10],但在数值模拟研究中多采用直接数值模拟方法(Direct numerical simulation, DNS)^[11-12],通过研究颗粒在非牛顿流体中所受的曳力与非牛顿指数的关系,进而获得颗粒的流动特性。为节省计算资源,提高计算效率,Casarin 等^[13]采用双向耦合的 CFD-DEM 方法模拟了颗粒在静态宾汉流体中的沉降过程,结果发现计算所得的颗粒沉降速度与实验测试的结果非常吻合,该结果不但验证了 CFD-DEM 数值模拟结果的准确性,同时也说明了采用 CFD-DEM 方法研究固

相颗粒在非牛顿流体中的运动特性是可行的。

在石油钻井工艺中,钻井液属于非牛顿流体,起着悬浮和携带岩屑的作用,影响着井筒的清洁和安全^[14]。钻井停泵后,钻井液中的岩屑受自身重力的影响发生沉降,可能引发岩屑沉降卡钻的事故。为了防止事故发生,除努力研发各种钻井液技术外,更需要研究岩屑颗粒在钻井液中的沉降规律,以指导钻井工艺设计提升钻井技术水平。本文采用 CFD-DEM 方法,以密度为 2600 kg/m^3 的球形颗粒代替岩屑,以聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)溶液代替钻井液,研究停钻工况下岩屑在钻井液中的沉降规律,分别考察单颗粒和水平排列的双颗粒在 PAM 溶液中的沉降特性,以及颗粒粒径、PAM 溶液浓度、颗粒初始间距等因素对沉降过程的影响,以准确预测岩屑颗粒的沉降速度,掌握岩屑在钻井液中的沉降规律,从而为钻井现场工艺实施和颗粒-非牛顿流体固液两相流的工程应用提供一定的参考。

1 CFD-DEM 数值计算

1.1 控制方程

液相由不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程控制,连续性方程和动量方程^[15]如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + (\mathbf{u}_f \cdot \nabla) \mathbf{u}_f = \mathbf{F}_f - \frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}_f \tag{2}$$

其中: \mathbf{u}_f 为流体速度, m/s ; \mathbf{F}_f 为施加在流体上的外力, N ; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; p 为流场中的压强, Pa ; ν 为流体的运动黏度, m^2/s 。

由于流体惯性作用影响很小,惯性项 $(\mathbf{u}_f \cdot \nabla) \mathbf{u}_f$ 可以忽略不计。当流体雷诺数趋向于 0 时,非定常项

$\frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t}$ 也可忽略,所以上述方程可以简化为:

$$\nabla p = \rho_f \mathbf{F}_f + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_f \tag{3}$$

其中: μ 为流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

颗粒相控制方程^[15]为:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m_p \mathbf{g} + \mathbf{F}_p \tag{4}$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt}=\frac{\boldsymbol{M}_p}{\boldsymbol{I}_p}$$

(5)

$$\boldsymbol{M}_p=\boldsymbol{F}_p\boldsymbol{R}$$

(6)

$$\boldsymbol{I}_p=\frac{2m_pR^2}{5}$$

(7)

其中: m_p 为颗粒相质量,kg; \boldsymbol{u}_p 为颗粒相速度,m/s; \boldsymbol{g} 为重力加速度,m/s²; \boldsymbol{F}_p 为颗粒受到除重力以外的合力,如阻力、浮力和附加质量力等的合力,N; $\boldsymbol{\omega}_p$ 为颗粒旋转的角速度,rad/s; \boldsymbol{M}_p 为颗粒的转动合力矩,N·m; \boldsymbol{I}_p 为颗粒的转动惯量,kg·m²; R 为颗粒半径,m。

1.2 物理模型和网格无关性验证

物理模型为长 1500 mm、内径 100 mm 的管道,几何模型如图 1(a)所示。利用 ICEM 软件进行网格划分,横截面采用 o 型网格,如图 1(b)所示。

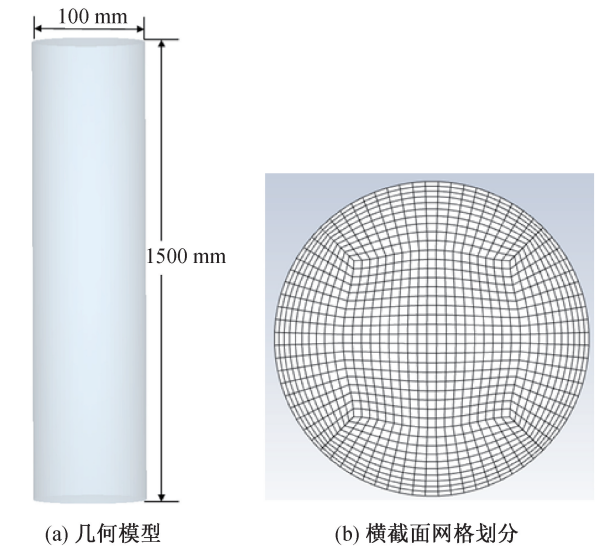


图 1 管道几何模型和网格划分示意图

对模型管道计算域划分了 30 万、50 万、90 万、150 万等 4 种不同数量的网格。以 4 mm 单颗粒在清水中的沉降速度为例,分析网格数量对计算结果的影响。不同数量网格下颗粒沉降速度曲线如图 2 所示,从图中可以看出,当网格数量达到 50 万以上时,网格数量对颗粒沉降速度的影响基本消失,因此本文在后续计算中选取 50 万的网格数。

1.3 数值计算方法和计算条件设置

a)数值计算方法。固液两相流的数值模拟采用 CFD-DEM 耦合方法,耦合过程示意图见图 3。其中,流体相采用 Fluent2022R1 软件计算,颗粒相采用 EDEM2021.2 软件计算。

b)计算条件设置。液相介质选用水和不同质量浓度的 PAM 溶液,25 ℃时水的密度为 1000 kg/

m³,动力黏度为 8.9×10⁻⁴ Pa·s,PAM 溶液的流变参数^[16]见表 1。由于本文模拟的是颗粒在竖直管道的沉降运动,流动相对简单,且不考虑壁面的影响,为了减少计算量,提高计算速度,在数值计算中选取 *k-ε* 标准模型,流体均视为等温不可压缩定常流体;固相颗粒设为球形,直径分别为 3、4、5、6 mm,颗粒参数见表 2,由颗粒工厂生成,在入口释放,初始速度为 0。模型管道入口为压力入口,其余均为无滑移壁面,时间积分为欧拉积分,瑞利时间步长为 5×10⁻⁷ s,设定 EDEM 中时间步长与 Fluent 中的时间步长比例为 1:10000。

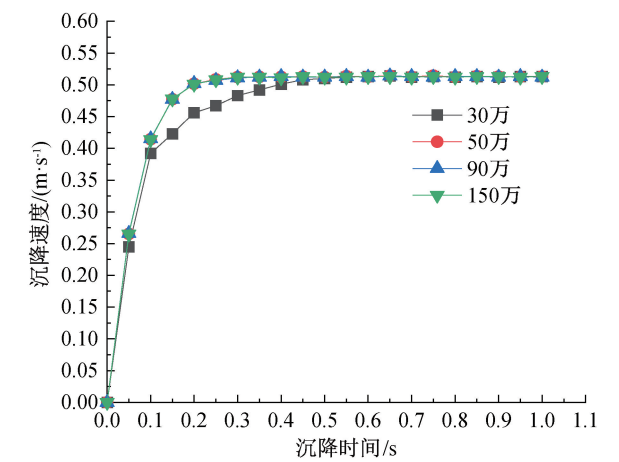


图 2 不同数量网格下颗粒沉降速度曲线

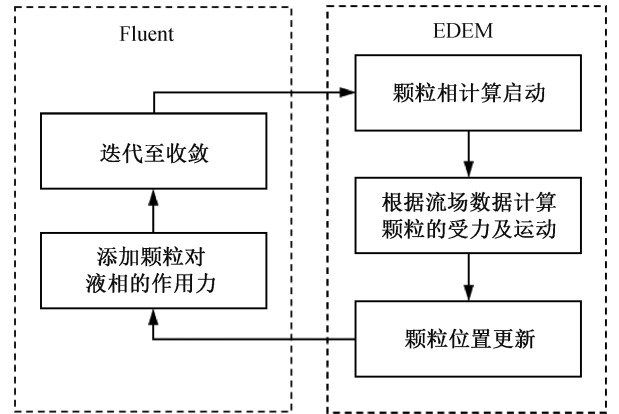


图 3 CFD-DEM 耦合过程示意图

表 1 PAM 溶液的流变参数

编号	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	稠度系数/ (Pa·s ⁿ)	流性指数	密度/ (kg·m ⁻³)
1	320	0.024	0.625	952.56
2	550	0.050	0.623	959.52
3	700	0.067	0.590	950.00
4	800	0.072	0.663	955.67

注: n 为流性指数,指非牛顿指数,表征流体偏离牛顿型流动的程度。

表 2 EDEM 软件中的颗粒参数设置

泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切 模量/Pa	恢复 系数	静摩擦 系数	滚动 摩擦系数
0.15	2600	2×10^{10}	0.5	0.5	0.01

2 结果与讨论

2.1 单颗粒沉降

2.1.1 单颗粒粒径对沉降的影响

为了考察粒径大小对单颗粒沉降过程的影响,分别模拟了直径为 3、4、5、6 mm 的颗粒在质量浓度为 800 mg/L 的 PAM 溶液中的沉降过程,颗粒从模型管道的中心处释放,其沉降轨迹和沉降速度如图 4 所示。

由图 4(a)可知,不同粒径大小的颗粒从管道中心释放后始终保持沿轴向方向的竖直沉降,均未发生水平偏移。这说明对从管道中心释放的单颗粒进行受力分析时,只需考虑竖直方向的力。该结果得到了文

献[17]的验证,表明仿真结果准确,计算方法可行。

由图 4(b)可知,4 种不同粒径颗粒的沉降过程均经历了加速阶段和相对匀速阶段。随着粒径增大,加速阶段的时间增长,最终达到匀速阶段的沉降速度也越大。3 mm 颗粒在 0.20 s 时达到稳定,速度值约为 0.177 m/s;4 mm 颗粒在 0.25 s 时达到稳定,速度值约为 0.307 m/s;5 mm 颗粒在 0.30 s 时达到稳定,速度值约为 0.437 m/s;6 mm 颗粒在 0.40 s 时达到稳定,速度值约为 0.616 m/s。由此可见,单颗粒的沉降速度与颗粒粒径成正比,当颗粒的粒径增大时,颗粒的沉降速度也增大。该结果也与文献[17]报道的结果接近。这是因为颗粒在沉降时受到自身的重力、流体的浮力以及流体对颗粒的阻力的作用,改变颗粒的粒径直接影响到颗粒竖直方向上所受的合力大小,进而影响到颗粒的沉降运动;当颗粒所受的重力、浮力和阻力三者相平衡时,颗粒沉降的速度达到稳定状态。

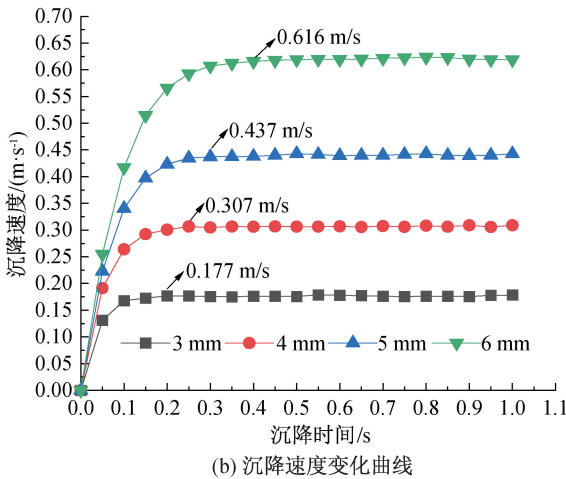
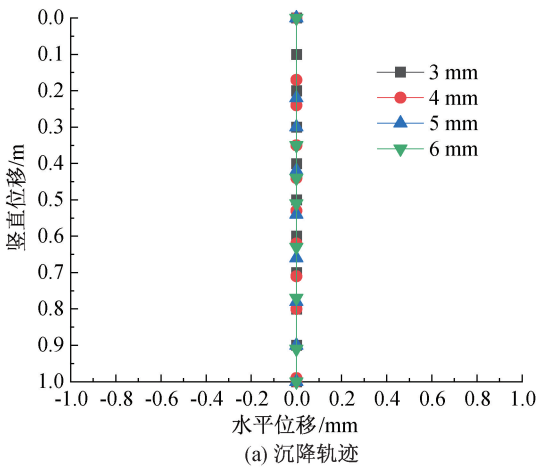


图 4 不同粒径的单颗粒沉降轨迹和沉降速度变化曲线

2.1.2 PAM 溶液浓度对单颗粒沉降的影响

为了探究 PAM 溶液的质量浓度对单颗粒沉降的影响,模拟了 4 mm 单颗粒在水和不同质量浓度 PAM 溶液中的沉降过程,颗粒从模型管道的中心处释放,结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知,颗粒在水中的最终沉降速度为 0.512 m/s,在质量浓度为 320、550、700、800 mg/L 的 PAM 溶液中的最终沉降速度分别为 0.410、0.351、0.335、0.307 m/s。颗粒的沉降速度随 PAM 溶液质量浓度的增加而下降,这是因为 PAM 溶液浓度增加增大了颗粒沉降过程中的阻力,颗粒沉降的加速度减小,从而使颗粒的沉降速度小于其在水中的沉降速度,并随着 PAM 溶液浓度的增加而下降。从图 5(b)可以看出,相对于水,4 mm 颗粒

在 320、550、700、800 mg/L 的 PAM 溶液中的沉降速度分别下降了约 20%、31%、35%、40%。

2.2 水平排列的双颗粒沉降

以中心线为对称线,从入口处为中心线两侧释放颗粒,研究双颗粒初始间距(定义为释放位置距中心线距离的 2 倍)、粒径对水平排列双颗粒的沉降过程的影响。由于两个颗粒的运动轨迹在管道中是对称的,因此只选取左侧颗粒进行分析,并与相同位置处释放的单颗粒进行比较。PAM 溶液的质量浓度为 800 mg/L。

2.2.1 粒径对双颗粒沉降的影响

为了探究粒径对双颗粒沉降过程的影响,在管道的入口距中心线水平距离 4 mm 处释放颗粒,模拟粒径为 3、4、5、6 mm 的双颗粒沉降过程,结果如图 6 所示。

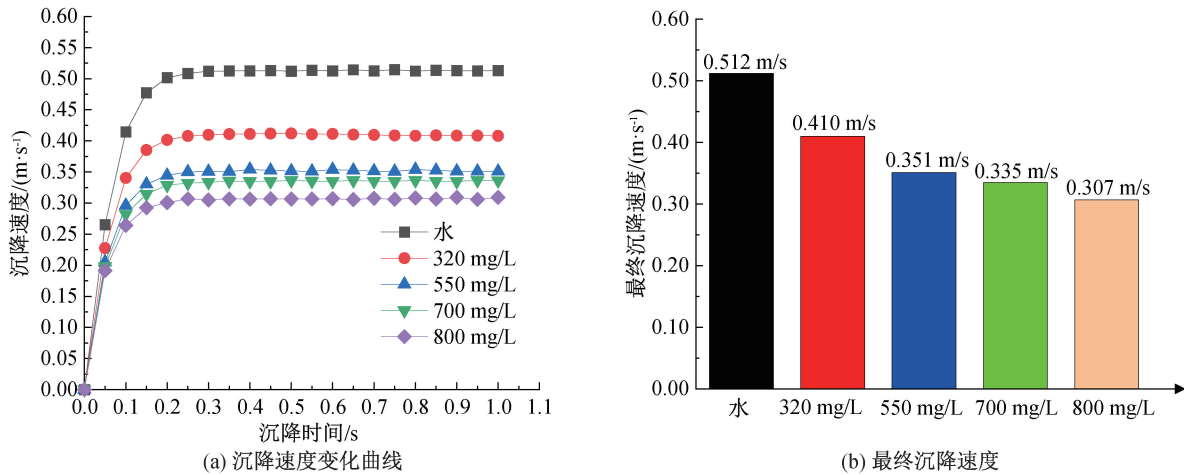


图 5 单颗粒在水和不同质量浓度 PAM 溶液中的沉降速度变化曲线和最终沉降速度

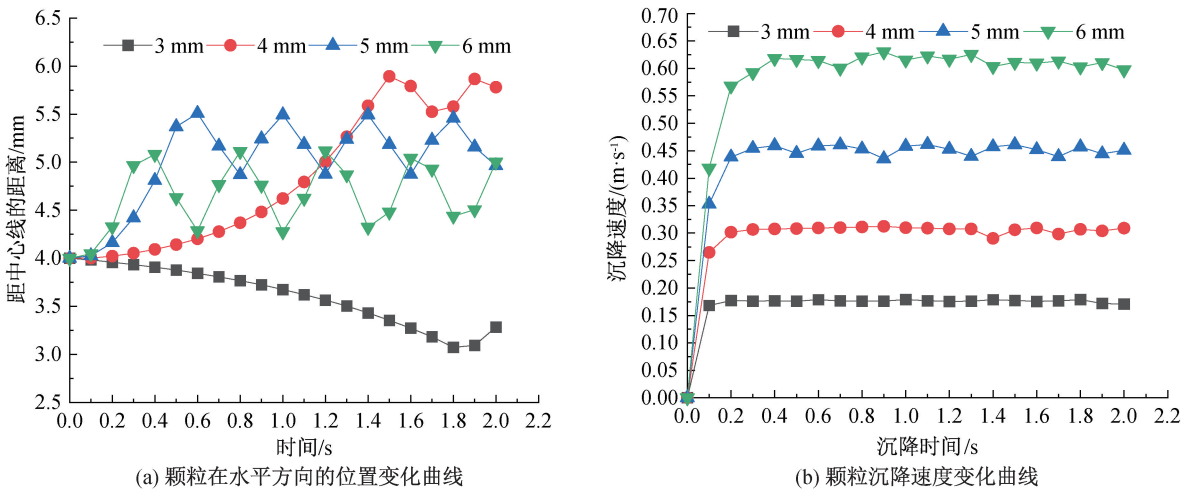


图 6 不同粒径的双颗粒沉降特性曲线

图 6(a)显示,除粒径 3 mm 的颗粒在沉降开始时两个颗粒在水平方向上是相互靠近的之外,其他 3 种粒径的颗粒间距都是增大的。其中粒径 5 mm 和 6 mm 的颗粒较早出现“远离-靠近”的往复过程,但在该过程中:粒径 5 mm 颗粒的最大间距大于粒径 6 mm 颗粒的最大间距;粒径 4 mm 的颗粒直至其间距增至 12 mm 左右时才开始出现“靠近-远离”的过程;粒径 3 mm 的颗粒相互靠近至约 6 mm 间距时开始远离。该结果与文献[15]中数值仿真显示的两个柱状颗粒的降落轨迹变化规律一致。

从图 6(b)可以看出,颗粒在垂直方向上的沉降速度随颗粒直径的增大而增大,相应地,颗粒在稳定沉降阶段的沉降速度幅值的变化频率和颗粒在水平方向上颗粒间距的变化频率基本吻合,但 4 种颗粒稳定沉降速度的幅值变化都不大。

以上结果表明,不同粒径的双颗粒在沉降过程中,除沿中心线方向下降外,在水平方向上也有位移。即双颗粒在沉降过程中除受到竖直方向的作用

力影响之外,同时还受到其他流场力的影响,从而使颗粒在沉降的同时在水平方向上也会产生一定的位移,垂直下降的速度也呈现出与颗粒间距变化频率一致的微小振动。该流场力与颗粒大小、颗粒之间的距离有关。

2.2.2 初始间距对双颗粒沉降过程的影响

为了进一步分析颗粒间距对颗粒沉降的影响,改变颗粒释放的初始间距,模拟初始间距(定义如图 7 所示)为 0、 d 、 $2d$ 、 $3d$ (d 为颗粒直径)的 4 mm 双颗粒在 PAM 溶液中的沉降过程,颗粒间距的变化及竖直方向的沉降速度如图 8 所示。

由图 8(a)可知,除初始间距为 $3d$ 的两个颗粒在沉降之初首先出现“靠近-远离”外,其他 3 种初始间距的颗粒均先发生远离运动。其中:初始间距为 d 的颗粒在颗粒间距达到约 6 mm 时开始出现“靠近-远离”的往复运动;初始间距为 0 和 $2d$ 的颗粒间距变化趋势相近,颗粒出现往复运动的时间比较迟,在颗粒间距分别为增至约 6 mm 和 12 mm 时开始

出现“靠近-远离”的往复运动。

由图 8(b)可知:不同初始间距的颗粒沉降在加速阶段和稳定沉降阶段的最大速度基本相同,说明初始间距对垂直方向的作用力基本没有影响;但双颗粒沉降的加速度比单颗粒大,说明在双颗粒沉降过程中,由于受颗粒之间的流场的相互影响,作用在颗粒的垂直方向的合力增加了。初始间距为 0 时颗粒的速度波动最小,初始间距为 d 时颗粒的速度波动最大。图 8(b)中速度曲线的波动幅度很小,但其

频率与图 8(a)中曲线的波动状态基本对应。该结果与图 6(b)一致,再次说明作用在颗粒上的其他流场力的作用效果主要体现在对颗粒在水平方向上的运动的影响,对沉降速度的影响较小。

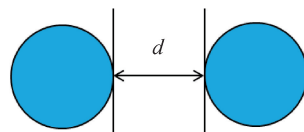


图 7 颗粒初始间距示意图

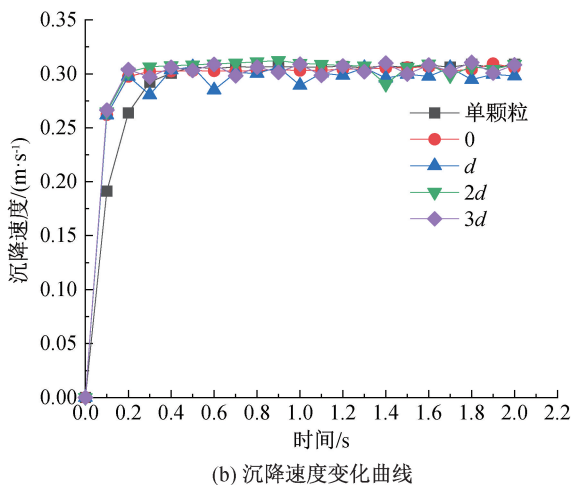
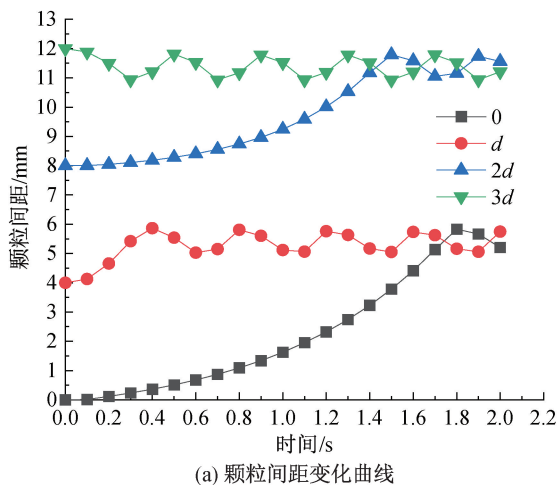


图 8 不同初始间距的双颗粒沉降曲线

2.2.3 颗粒间的相互作用力分析

以上双颗粒粒径、颗粒沉降初始间距对沉降过程的影响分析表明,与单颗粒沉降不同,双颗粒沉降过程中除受到自身的重力、流体的浮力、流体的阻力外,还存在着导致颗粒水平间距变化和沉降速度波动的力,即 Magnus 力和 Saffman 力。当两个水平排列颗粒沉降时,两个颗粒内侧的流场压力要大于外侧的流场压力,在压力差的作用下两个颗粒做方向相反的旋转,带动周围流体做圆周运动形成 Magnus 力,推动两个颗粒在水平方向做相互排斥的运动。Magnus 力 F_{Ma} 的计算公式^[18]为:

$$F_{Ma} = \frac{1}{8} \pi d^3 \rho_f \omega_p (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \quad (8)$$

当颗粒与其周围的流体存在速度差并且流体的速度梯度垂直于颗粒的运动方向时,由于颗粒两侧的流速不一样,产生 Saffman 力,使颗粒在水平方向上相互靠近。Saffman 力 F_s 的计算公式^[18]为:

$$F_s = 1.61 (\mu \rho_f)^{\frac{1}{2}} d^2 (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \sqrt{\left| \frac{d\mathbf{u}_f}{dy} \right|} \quad (9)$$

Magnus 力促使颗粒间距变大。随着颗粒间距增大,Magnus 力越来越小,颗粒间相互排斥的作用逐渐减弱;此时由于 Saffman 力的作用,颗粒又开始

靠近。因此双颗粒在沉降过程中,出现远离后又靠近的反复运动,并且伴随着周期性的速度波动。由此可见,不同粒径的双颗粒在相同初始间距下的沉降过程中出现图 6 所示的现象,是受 Magnus 力和 Saffman 力共同作用的结果。颗粒越大 Magnus 力的效应越明显,颗粒越小则 Saffman 力的作用效果越显著,因此 3 mm 颗粒在沉降过程的初期,颗粒是相互靠近的。但当颗粒增大到一定时,随着颗粒增大,其惯性也增大,Magnus 力越难以推动颗粒做排斥运动,导致颗粒间距的最大值减小,所以 6 mm 颗粒的最大间距小于 5 mm 颗粒的最大间距。图 8 显示的不同初始间距条件下颗粒沉降过程中间距的变化情况与上述规律基本吻合,再次显示了 Magnus 力和 Saffman 力在双颗粒沉降过程中的综合作用效应。

3 结 论

本文以钻井过程中停钻工况下岩屑在钻井液中的沉降问题为背景,以球形颗粒代替岩屑,以 PAM 溶液代替钻井液,采用 CFD-DEM 数值模拟方法,对球形单颗粒和双颗粒在 PAM 溶液中的沉降过程

进行了研究,分析了粒径、PAM溶液浓度对单颗粒沉降的影响,考察了水平排列的双颗粒的粒径和沉降初始间距对双颗粒沉降的影响,并简要分析了双颗粒沉降所受的流场力,所得主要结论如下:

a)单颗粒的沉降速度受颗粒粒径和PAM溶液浓度的影响。在其他条件不变的情况下,当颗粒的粒径为3~6 mm时,颗粒粒径增大,沉降速度增加;颗粒在PAM溶液中的沉降阻力比在纯水中大,且随着PAM溶液质量浓度的增加,颗粒的沉降速度下降。

b)水平排列双颗粒沉降过程中受Magnus力和Saffman力的影响,其大小与粒径大小、颗粒的间距及介质的性质等因素有关,在惯性力不足以克服Magnus力和Saffman力的条件下,颗粒间距大小随Magnus力和Saffman力的综合作用效应呈规律性变化。

c)水平排列的双颗粒在沉降过程中的加速度比单颗粒大,而且在加速度过程结束后出现速度波动,这与双颗粒在沉降过程中所受流场力的作用和PAM溶液的流变性能有关。

本文研究结果可为颗粒在黏性流体中的沉降机理研究及相关工程应用研究提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Hwang B, Park H S, Jung W H, et al. Numerical validation and investigation for the sedimentation of solid particles in liquid pool using the CFD-DEM coupling algorithm[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 355: 110364.
- [2] 徐熔俊, 涂程旭, 包福兵, 等. 不同密度并列双颗粒在水中沉降特性研究[J]. 中国计量大学学报, 2020, 31(2): 168-176.
- [3] 王智豪, 肖洋, 刘杰卿, 等. 双球体颗粒沉降过程实验研究[J]. 水力发电, 2019, 45(9): 52-56.
- [4] Lv K, Min F F, Zhu J B, et al. Experiments and CFD-DEM simulations of fine kaolinite particle sedimentation dynamic characteristics in a water environment [J]. Powder Technology, 2021, 382: 60-69.
- [5] Hu J J, Guo Z L. Effect of interaction between a particle cluster and a single particle on particle motion and

distribution during sedimentation: A numerical study [J]. Physics of Fluids, 2019, 31(3): 033301.

- [6] 丁周, 周锟, 孙科, 等. 基于直接力浸入边界法的线形排列多球颗粒沉降特性研究[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(4): 297-304.
- [7] 龙佳, 吴维新, 苗子旭, 等. 相邻两颗粒在水中沉降的动力学模拟[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 848-853.
- [8] 肖之敏, 熊鹰, 周晓龙. FCC油浆中固体颗粒沉降特性与沉降速度模型[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(3): 368-375.
- [9] 王庆, 张佳伟, 孙铭浩, 等. 大庆油田古龙页岩岩屑在幂律流体中的沉降阻力系数研究[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 54-60.
- [10] Yang S S, Tu C X, Dai M L, et al. Sedimentation of two side-by-side heavy particles of different density in a shear-thinning fluid with viscoelastic properties [J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 7113.
- [11] 曹元博, 苏晓辉. 低雷诺数下幂律流体中密相颗粒曳力模型研究[J]. 当代化工, 2023, 52(12): 2790-2794.
- [12] Alghalibi D, Fornari W, Rosti M E, et al. Sedimentation of finite-size particles in quiescent wall-bounded shear-thinning and Newtonian fluids[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 129: 103291.
- [13] Casarin J J, Franco A T, Germer E M, et al. Numerical simulation of the particle settling in a Bingham fluid using the two-way coupling CFD-DEM scheme [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 60(3): 409-422.
- [14] 孙金声, 蒋官澄, 贺垠博, 等. 油基钻井液面临的技术难题与挑战[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 76-89.
- [15] 刘佳君, 刘雪东, 吕圣男, 等. 柱状颗粒沉降过程的CFD-DEM联合仿真和实验研究[J]. 过程工程学报, 2022, 22(12): 1643-1651.
- [16] 孙晓峰, 纪国栋, 冯松林, 等. 幂律流体中岩屑颗粒沉降速度实验[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 120-124.
- [17] Elgaddafi R, Ahmed R, George M, et al. Settling behavior of spherical particles in fiber-containing drilling fluids [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 84/85: 20-28.
- [18] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 27-32.