

柱状颗粒在矩形微通道内的惯性迁移效应²⁸

苏敬宏 陈晓东 胡国庆

(中国科学院力学研究所, 非线性国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 微纳尺度颗粒(包括细胞、细菌、人工合成微纳颗粒、生物大分子等)的精确操控在生物、医学、材料和环境等领域有着至关重要的应用。惯性效应是近几年出现的能够实现颗粒高通量精确操控的一种新颖微流控方法。众多人工合成颗粒、生物颗粒等具有非球形形状,非球形颗粒的惯性迁移效应研究逐渐开始受到重视。在此,我们研究了柱状颗粒在两种不同宽高比通道下的迁移规律,发现柱状颗粒存在汇聚为矩形环状结构,进而迁移至稳定平衡位置的迁移过程。通过对柱状颗粒与三种等效直径的球形颗粒的平衡位置进行比较,发现柱状形粒子的特征直径随雷诺数单调增加。

关键词: 非球形颗粒 惯性迁移 微流控 柱状颗粒

一、引言

微流控技术可以有效地实现颗粒或细胞的操控与分离,主要包括主动与被动两种方法。主动微流控方法一般通过施加力场实现,包括电场、磁场、声场等,但是存在需要施加外场,易破坏生物样品活性,通量难以提高等缺陷。而惯性微流控方法则不存在这些缺陷。惯性微流控的原理主要是微通道中的颗粒会由于惯性升力的作用而迁移到特定的侧向平衡位置[1, 2]。颗粒所受惯性升力主要来源于壁面与剪切率梯度的共同作用。壁面会扰动颗粒尾流引起尾流不对称性,进而使颗粒受到远离壁面的力。颗粒与壁面距离越小,壁面效应引起的升力越大。由于剪切率梯度的作用,颗粒会受到指向壁面的力,剪切率梯度越大,剪切率梯度引起的升力越大。针对于球形颗粒的相关研究已经取得了较好的成果[3, 4],而实际应用中所需要处理的各种生物及人造颗粒普遍是非球形的。目前可以通过惯性微流控器件实现一些非球形颗粒操控与分离,但是相关方面机理性研究还是比较缺乏。因此,我们利用三维直接数值模拟研究了柱状颗粒的惯性迁移规律。

二、模型建立

我们利用 *overture* 软件对柱状颗粒在微通道内的运动进行了三维直接数值模拟[5],采用重叠网格法对系统网格进行划分,总网格量为 25,000,000。图 1 显示了计算模型以及网格划分的示意图。柱状颗粒所受升力 F_L 与以下参数有关,

$$F_L = F(D, L, y, z, H, W, U_{\max}, \eta, \rho, t) \quad (1)$$

分别为柱状颗粒径长 D 与轴长 L , 颗粒侧向位置 (y, z) , 通道高度 H 与宽度 W , 流体最大速度 U_{\max} 、动力粘度 η 与密度 ρ 以及时间 t 。我们取 ρ 、 U_{\max} 、 H 为特征量对系统进行了无量纲化

²⁸国家自然科学基金项目(11572334)与中科院前沿科学重点项目(QYZDB-SSW-JSC036)资助

$$F\left(\frac{L}{H}/\frac{D}{H}, \frac{L}{H}, \frac{y}{H}, \frac{z}{H}, 1, \frac{W}{H}, 1, \frac{\eta}{\rho U_{\max} H}, 1, \frac{t}{H/U_{\max}}\right) = F\left(L/D, \kappa, \frac{2y}{H}, \frac{2z}{H}, \frac{W}{H}, Re, t \frac{2U_{\max}}{H}\right) \quad (2)$$

我们主要研究了通道雷诺数 ($Re = \rho U_{\max} H / \eta$) 50 到 400, 两种通道下 (宽高比 W/H 为 1, 2) 不同颗粒长细比 (L/D 为 2, 3, 4) 与阻塞比 ($\kappa = L/H$ 为 0.3, 0.2, 0.15) 的情况。文中重点研究了柱状颗粒长细比为 2, 阻塞比为 0.3 的情况。我们采用约束法[3, 6]来得到颗粒所受升力, 即约束在不同侧向位置静止释放的颗粒侧向速度为 0, 使其自由地平动和转动, 得到同相位的周期变化的升力分量, 然后对升力取平均等效为颗粒在不同侧向位置所受升力。

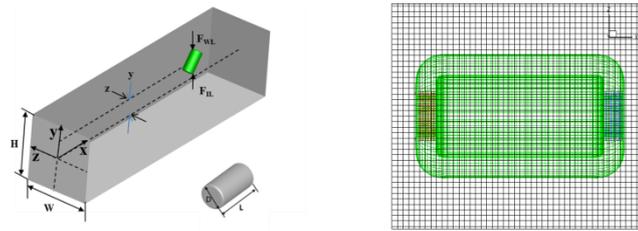


图 1 计算模型及网格划分示意图

三、结果与讨论

考虑到矩形通道截面对称性, 我们利用约束法得到了颗粒在 1/4 横截面上的不同位置的升力分布 (红色箭头) 及流线走向 (带黑色实点的绿色曲线) 用于表征柱状颗粒迁移过程, 如图 2 所示。我们研究了通道雷诺数 50 到 400 下, 两种通道中的惯性迁移过程, 约 600 个算例。蓝色实线将汇聚至不同平衡位置的颗粒所在区域隔开。红色实线空心圆表示稳定平衡位置, 红色虚线空心圆表示非稳定平衡位置。通过判断颗粒受到扰动偏离平衡位置后是否会重新返回至该平衡位置来确定稳定性。我们发现柱状颗粒在惯性迁移过程中存在两个阶段, 即: (1) 汇聚为矩形环状结构; (2) 迁移至稳定平衡位置。宽高比为 1 的通道有四个稳定平衡位置, 不随通道雷诺数改变。宽高比为 2 的通道起初有两个稳定平衡位置与两个不稳定位置, 当通道雷诺数由 100 变为 200 时, 宽高比为 2 的通道长轴上的非稳定平衡位置变为稳定平衡位置。我们另外通过对比自由释放的柱状颗粒在截面内的运动轨迹 (图 2(b) 中的蓝色实线) 验证了本文采用的方法。

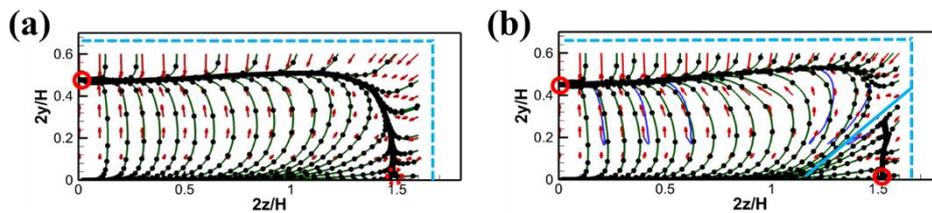


图 2 柱状颗粒在矩形微通道内的惯性迁移 (a) $Re = 100$ (b) $Re = 200$

我们将宽高比为 1 的通道下的柱状颗粒的平衡位置随通道雷诺数变化与球形颗粒做了对比, 并定义平衡特征直径, 即与非球形颗粒平衡位置相同的球形颗粒的直径, 以方便用球形颗粒表征非球形颗粒的平衡位置。发现随着通道雷诺数增大, 其柱状颗粒平衡位置逐渐向

直径大的球形颗粒靠近，即平衡特征直径逐渐增大。另外，柱状颗粒平衡位置随通道雷诺数变化向壁面移动的过程较球形颗粒更为平缓。

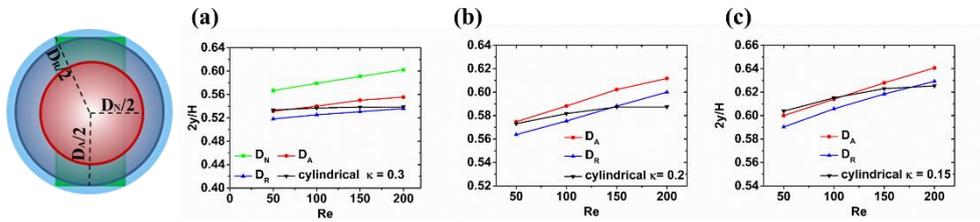


图 3 对比柱状颗粒与球形颗粒平衡位置。阻塞比分别为 0.3 (a), 0.2 (b), 0.15 (c)。

四、结论

我们研究了柱状颗粒在两种通道下的迁移规律。发现柱状颗粒在惯性迁移过程中存在两个阶段，即：(1) 汇聚为矩形环状结构；(2) 迁移至稳定平衡位置。通过对柱状形颗粒与球形颗粒的平衡位置进行比较，发现柱状形粒子的特征直径随通道雷诺数单调增加。

参 考 文 献

1. Segre, G. and A. Silberberg, Radial Particle Displacements in Poiseuille Flow of Suspensions, *Nature* **189**, 209 (1961).
2. Ho, B.P. and L.G. Leal, Inertial migration of rigid spheres in two-dimensional unidirectional flows, *Journal of Fluid Mechanics* **65**, 365-400 (1974).
3. Liu, C., et al., Inertial focusing of spherical particles in rectangular microchannels over a wide range of Reynolds numbers, *Lab on a chip* **15**, 1168-77 (2015).
4. Liu, C., et al., A generalized formula for inertial lift on a sphere in microchannels, *Lab on a Chip* **16**, 884 (2016).
5. W. D. Henshaw, P.F., Oges User Guide, Version 1.0, A Solver for Steady State Boundary Value Problems on Overlapping Grids, Technical Report LA-UR-96-3468, Los Alamos National Laboratory (1998).
6. Chen, X., et al., Inertial migration of deformable droplets in a microchannel, *Physics of Fluids* **26**, 112003 (2014).