

微通道中的惯性效应及颗粒操控*

刘超[†] 胡国庆

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室 北京 100190)

摘要 惯性效应广泛应用于微流控芯片中的颗粒操控,实现颗粒的聚焦、分离、筛选等操作。在流动的惯性效应明显时,惯性项的非线性效应使得剪切流动中悬浮的颗粒受到垂直于主流方向的惯性升力,从而发生侧向运动。通过适当调节雷诺数与通道几何形状控制颗粒侧向运动,可以实现颗粒的操控。但是颗粒受到惯性升力与这些因素间的依赖关系非常复杂,为应用装置的设计带来困难。在微流控领域,颗粒尺度与通道截面尺度通常在同一数量级,这种有限尺寸颗粒的情况加上有限雷诺数流动的非线性效应使得理论分析难度很大。本文结合直接数值模拟和实验方法,考察颗粒与通道相对尺寸、雷诺数和通道截面宽高比等因素对惯性升力分布的影响,更有效地指导惯性微流控芯片的设计。

关键词: 惯性效应, 微通道, 颗粒操控, 数值模拟

一、惯性微流控与惯性升力

1961年 Segre 和 Silberberg^[1]发现在有限雷诺数的圆管泊肃叶流中,悬浮颗粒自发地沿径向运动至离管轴 0.6 倍半径处,形成一个圆环,即惯性迁移现象。惯性迁移现象起源于惯性升力 F_L , 广泛地用于惯性微流控设计的公式由 Asmolov^[2]于 1999 年给出:

$$F_L = \frac{\rho U_{\max}^2 a^4}{H^2} C_L \quad (1)$$

上述公式基于颗粒直径远小于通道尺寸的前提,针对两无限平板间的情况推导。微流控实际应用中,对有限尺寸颗粒在有限雷诺数流动中的情况,结合直接数值模拟与实验研究这种情况下颗粒的运动和受力。

二、研究方法

2.1 数值模拟

本文采用基于重叠网格的有限差分方法进行数值模拟研究。颗粒适体网格与通道背景网格均为规则笛卡尔网格(图 1)。模拟颗粒运动三维动态过程:颗粒只在主流方向上自由移动,限制其垂直于主流方向的运动而将其位置保持在固定的截面位置,颗粒的旋转没有限制。颗粒加速至主流方向速度和转速都达到稳定后,颗粒在垂直主流方向的受力为惯性升力。

2.2 实验

颗粒实验用注射泵将含有微颗粒的液体注入微通道中,在显微镜下观测颗粒的运动。制作集成有微通道的芯片采用基于 PDMS 的标准软光刻技术。微通道是直的。将芯

*注: 973 课题(2011CB707604)、自然科学基金(11272321)资助

[†]报告人简介: 刘超, 1988.1-, 流体力学, 博士研究生: liuchao@imech.ac.cn.

片置于显微镜（Leica DMI 6000）载物台上，用 CCD 照相机获取实验图像。

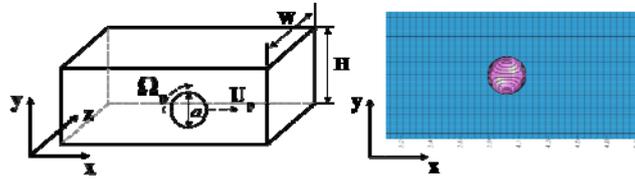


图1 研究问题的坐标系与计算网格

三、结果与讨论

3.1 雷诺数的影响

在高雷诺数下，惯性升力空间分布的特征与低雷诺数下的完全不同。雷诺数时影响颗粒平衡位置和数量的重要因素：以截面宽高比为 4 的通道为例，低雷诺数下颗粒运动至通道的长边中点附近；高雷诺数下颗粒运动至通道的长壁中点和四角附近（图 2）。

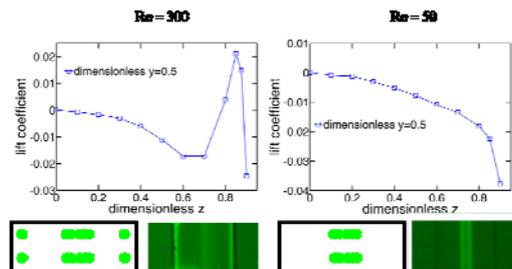


图2 高低雷诺数下的颗粒的受力与平衡位置（通道宽高比4）

3.2 升力公式

本文根据已有数值模拟的结果，借鉴相关理论分析的结果^[2-5]，以颗粒所在位置的剪切率等局部流场信息拟合升力公式（式 2），比用位置坐标作为自变量的公式更具有普适性^[6]：

$$F_L = \left(\rho U_{\max}^2 a^4 / H^2 \right) \left(c_1 \beta'^2 g_1 + c_2 \beta' \gamma' g_2 \right) + c_3 F_{L,Saffman} J^* + c_4 G^2 a^4 c_{nb}'' \quad (2)$$

前两项分别是壁面效应和剪切梯度效应，后两项为前两项的修正。

参 考 文 献

- 1 G. Segre, A. Silberberg. Nature, 1961; 189: 209~210
- 2 E. S. Asmolov. J. Fluid Mech, 1999; 381: 63~87
- 3 P. G. Saffman. J. Fluid Mech, 1965; 22: 385~400
- 4 B. P. Ho, L. G. Leal. J. Fluid Mech, 1974; 65: 365~400
- 5 R. Mei. Int J Multiph Flow, 1992; 18: 145~147
- 6 J. Sun, C. Liu, M. Li, J. Wang, Y. Xianyu, G. Hu, and X. Jiang. Biomicrofluidics, 2013; 7, 011802