

倾斜角度声表面驻波装置中粒子声泳的研究

刘子星¹, 倪正阳²

1. 物理学院, 南京大学, 江苏, 南京

2. 物理学院, 南京大学, 江苏, 南京

简介: 这里, 我们利用理论推导和模拟仿真系统地分析粒子在倾斜角度声表面驻波(TaSSAW)装置中的运动情况。研究了半径对粒子运动轨迹的影响展示了粒子的分离效果。

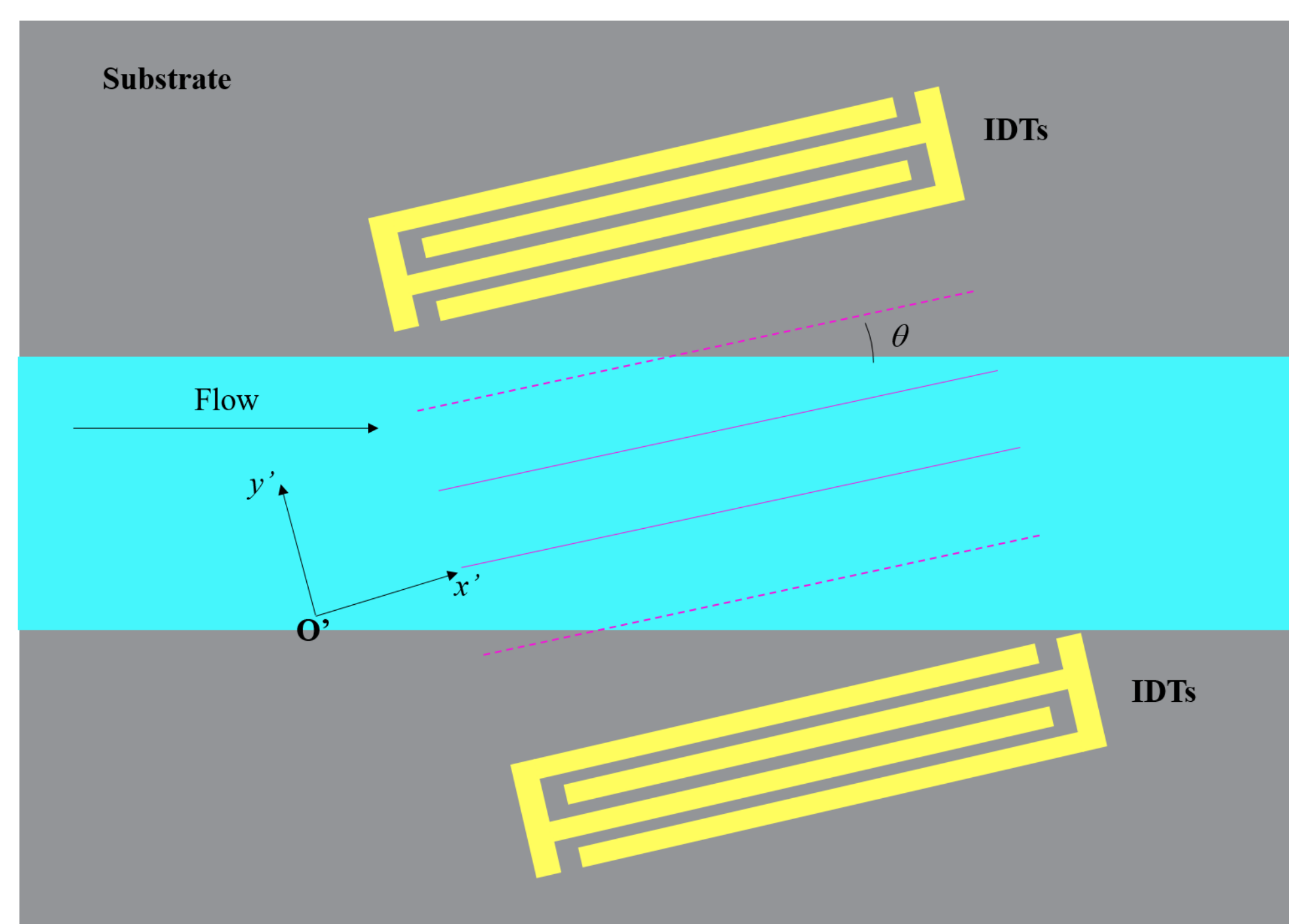


图 1. 模型示意图

计算方法: 假定粒子在z方向已经运动到了平衡位置, 将模型简化为2D模型。同时忽略微流控器件的基底和通道结构, 仅对其微通道内部的流体区域进行模拟建模。因此模型的计算区域简化为一矩形区域。使用“压力声学, 频域”接口来对无粘性流体中的声场进行建模。利用“蠕动流”接口来求解通道内的流体流动。最后, 在得到声场和流场后, 以此为基础, 利用“流体流动颗粒追踪”接口来对粒子的声泳运动进行建模。模型中仅考虑声场对粒子的声辐射力作用和流场对粒子施加的曳力。其中粒子受到的声辐射力可以用以下公式进行计算:

$$\mathbf{F}^{\text{rad}} = -\pi a^3 \left[\frac{2\kappa_0}{3} \text{Re}(f_1^* p_{\text{in}}^* \nabla p_{\text{in}}) - \rho_0 \text{Re}(f_2^* \mathbf{v}_{\text{in}}^* \cdot \nabla \mathbf{v}_{\text{in}}) \right]$$

$$f_1 = 1 - \frac{\kappa_p}{\kappa_0}, f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_0}$$

利用背景压力场来模拟流体中的声表面波, 并在模拟区域四周添加平面波辐射边界条件。在“蠕动流”接口和“流体流动颗粒追踪”接口添加相同的出口和入口, 如图2所示。



图 2. 模型的几何示意图

结果: 频率为19.4MHz, 倾斜角度为15°, 平均流速为1.5mm/s。声场和流场的结果分别如图3和图4所示。图5给出了Polystyrene(PS)粒子在微通道中的运动轨迹, 其中实线为轨迹的解析解, 虚线为此处有限元模拟得到的运动轨迹。表1为模拟中使用的材料参数。

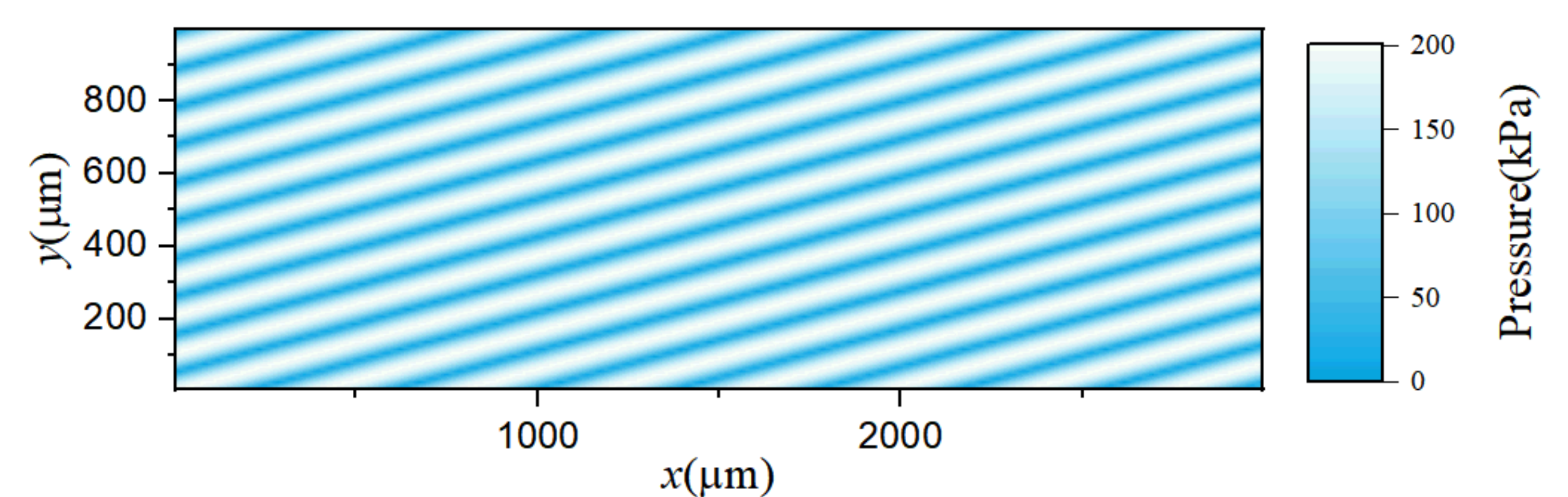


图 3. 微通道中声场

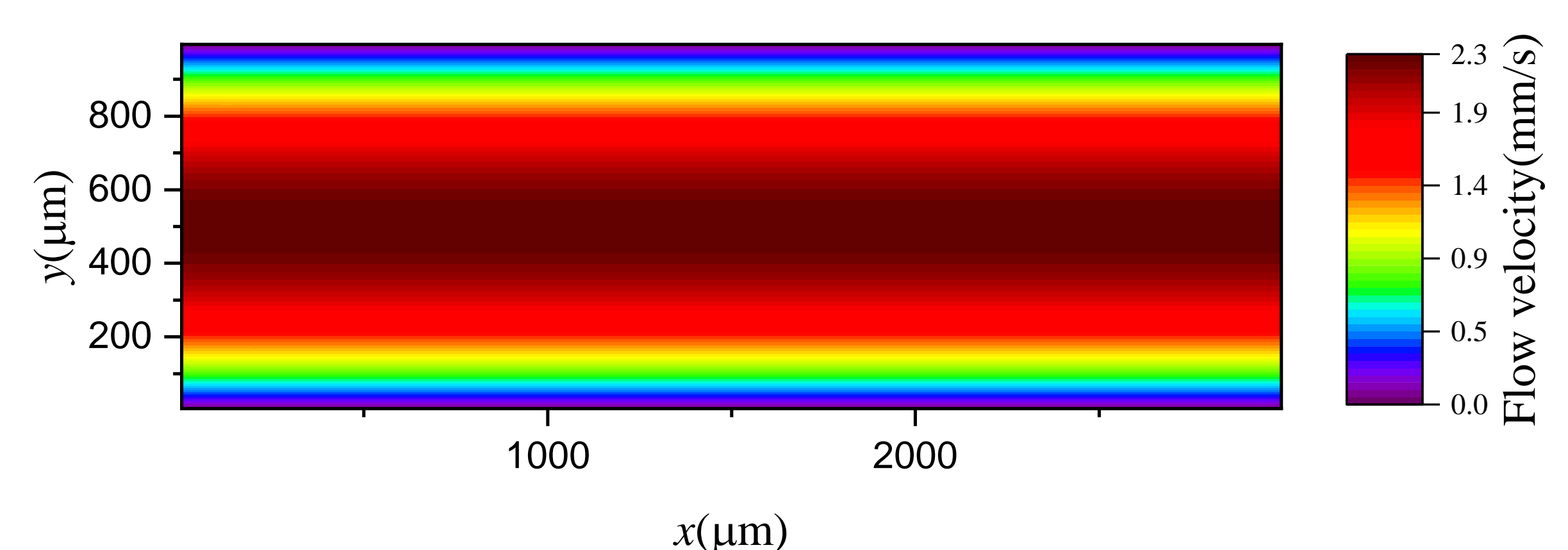


图 4. 微通道中流场

表 1. 材料参数

变量	数值	单位
流体密度	998	kg/m ³
流体声速	1495	m/s
流体压缩率	448	TPa ⁻¹
流体粘滞系数	0.893	mPa.s
PS粒子的密度	1050	kg/m ³
PS粒子的压缩率	249	TPa ⁻¹

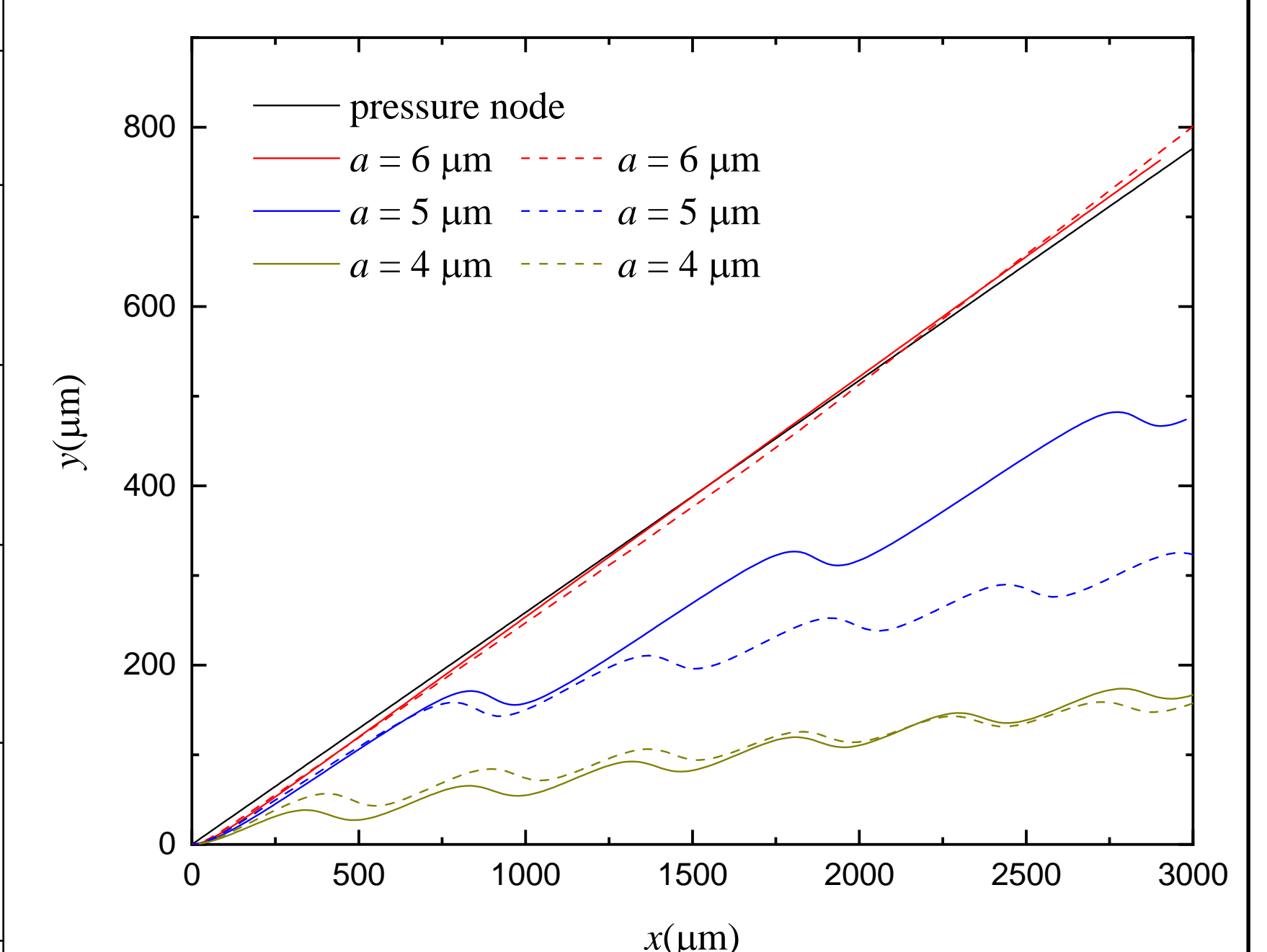


图 5. 粒子轨迹图

结论: 我们利用有限元模拟的方法成功的分析了粒子在倾斜角度声表面波中的运动轨迹, 通过将有限元模拟得到的结果与理论的解析解进行了对比, 验证了有限元模拟方法的正确性。利用这种有限元模拟的方法可以对粒子分离装置的性能进行优化对粒子分离的情况进行预测。有助于实现高通量的粒子或细胞的分离。未来我们可以进一步实现三维的全模型的微流控器件的有限元模拟, 来更好的对器件设计进行指导。

参考文献:

1. H. Bruus, Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles, 12 (1), 20-28 (2012)
2. X. Y. Ding, Z. L. Peng, S. C. S. Lin, M. Geri, S. X. Li, P. Li, Y. C. Chen, M. Dao, S. Suresh and T. J. Huang, Cell separation using tilted-angle standing surface acoustic waves, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111 (36), 12992-12997 (2014).