

# 基于多级力学耦合的气传孢子分离微流控芯片设计

徐佩锋<sup>1, 2</sup>, 杨宁<sup>1</sup>, 刘海龙<sup>1</sup>

1. 电气信息工程学院, 江苏大学, 江苏, 镇江

2. 信息工程学院, 江苏农林职业技术学院, 江苏, 镇江

**简介:**基于气溶胶颗粒运动理论, 设计了多级力学耦合的气传孢子提取微流控芯片。利用COMSOL Multiphysics的CFD和粒子追踪功能, 设计多弯曲通道的一级分离结构, 实现气流中单孢子和团聚态孢子的预处理和初级分离。然后根据单向受力加速原理, 设计径向鞘流加速的二级分离结构, 实现对气流中特定孢子提取的二级分离。在两级分离结构之间设置了台阶递降和双鞘流聚焦耦合结构, 以保证通道宽度和气流速度的匹配。研究表明, 该芯片对多种不同质量和粒径的真菌孢子的分离率达98%, 表现出了优越的分离性能。

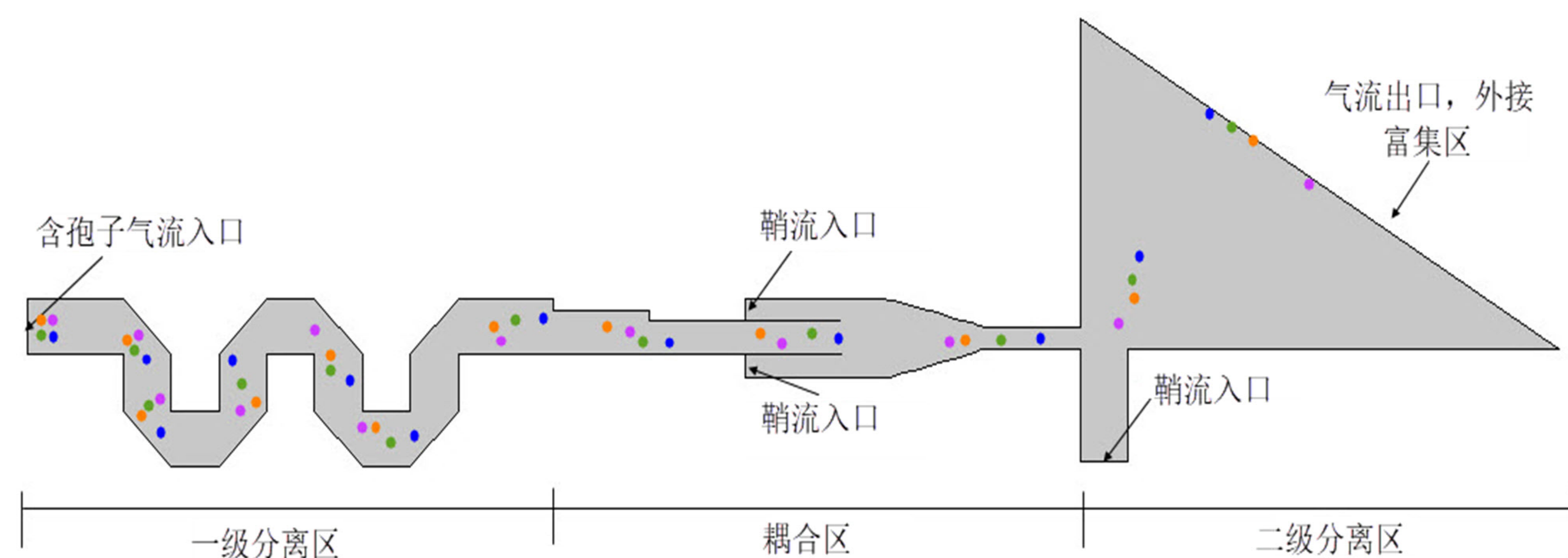


图1. 芯片结构图

**计算方法:**孢子的气流中所受合力作用的状态是随时间变化的线性运动, 用牛顿第二定律描述为:

$$\frac{d}{dt}(m_p v_p) = F_D + F_g + F_b + F_{ext}$$

对于稀疏颗粒—流体两相流场, 颗粒粒径远大于空气分子的平均自由程, 因此气体可视为连续介质; 颗粒受力主要包括流体曳力 $F_D$ 、重力 $F_g$ 、浮力 $F_b$ , 其他如Magnus力、

Basset力、Saffman力等, 这里统一用 $F_{ext}$ 表示, 由于微尺度下气流的流动特性表现为稀薄效应, 微通道又具有较高的宽高比, 而单个孢子的尺度均较小, 占流场体积的比例小于10%, 因此, 认为 $F_{ext}$ 对气流参数和颗粒运动总体影响较小, 可以忽略。

曳力 $F_D$ 是气流中颗粒运动最重要的力, 根据斯托克斯 (Stokes) 曳力方程定义为:

$$F_D = \left(\frac{1}{\tau_p}\right) m_p (u - v_p)$$

创建芯片的3D几何模型如图2所示, 设置微通道宽度为500um, 高度为70um。

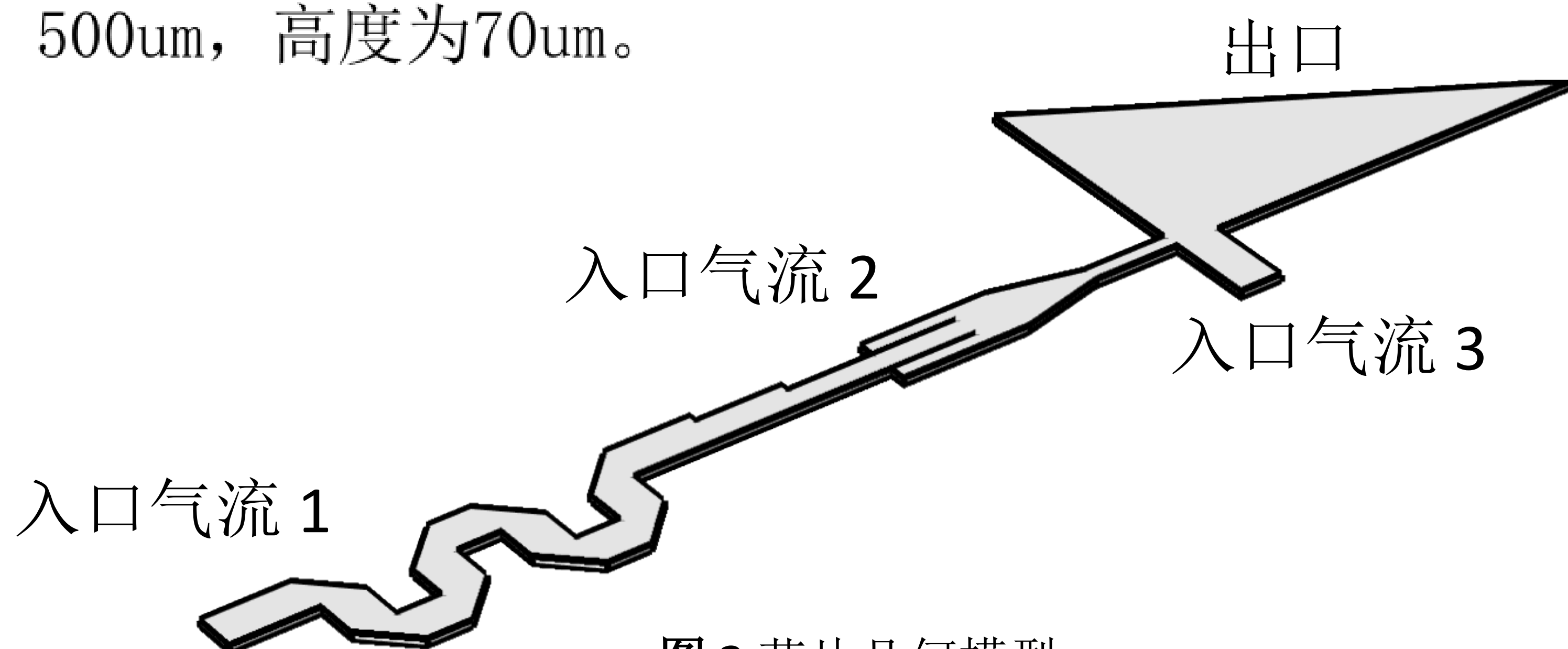


图2. 芯片几何模型

**结果:**针对不同流速、通道宽度、聚焦等因素下孢子分离效果的仿真研究, 优化得到理想的芯片结构。

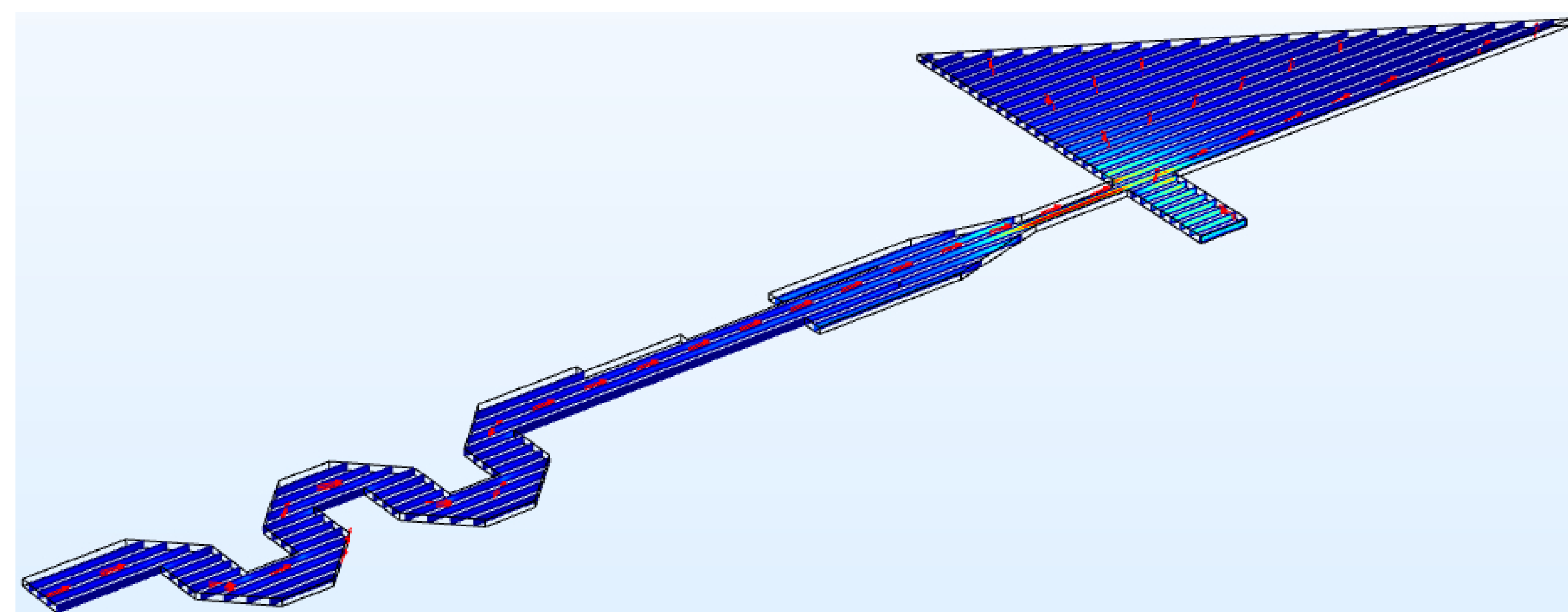


图3. 微通道速度分布图

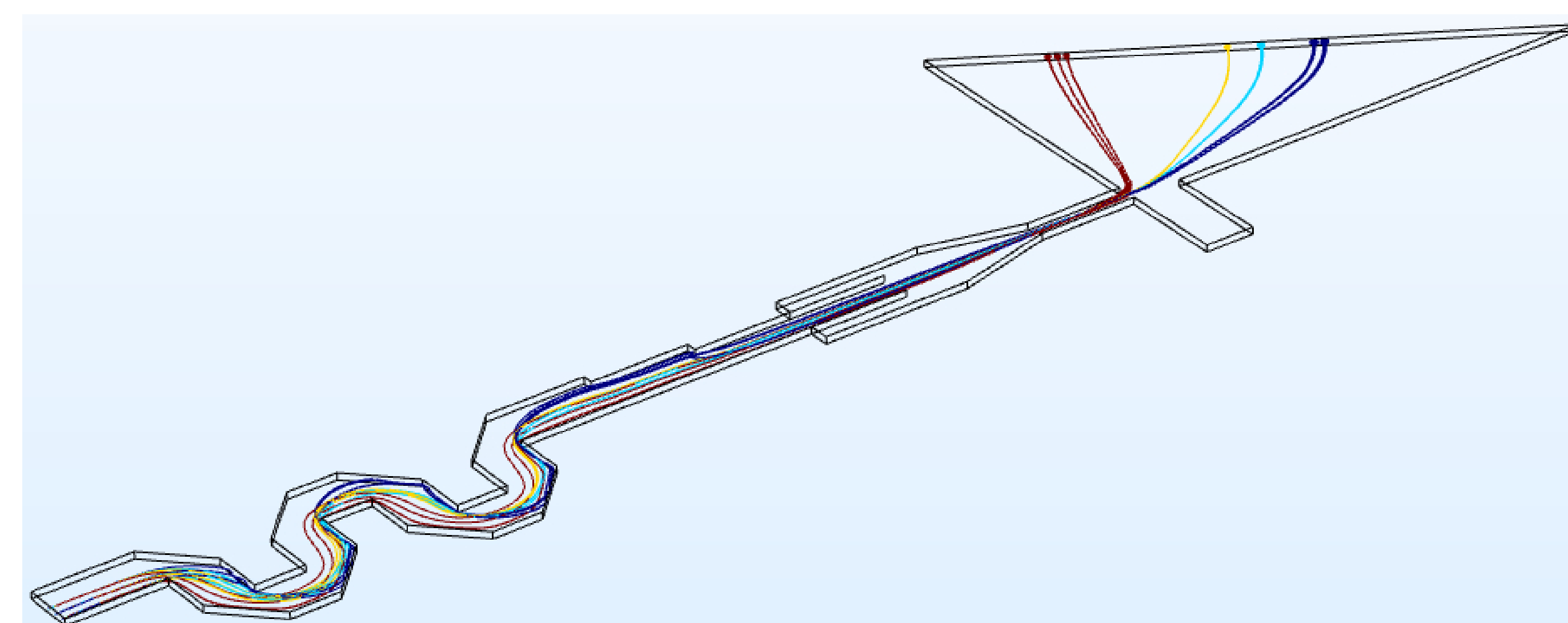


图4. 不同孢子的分离效果

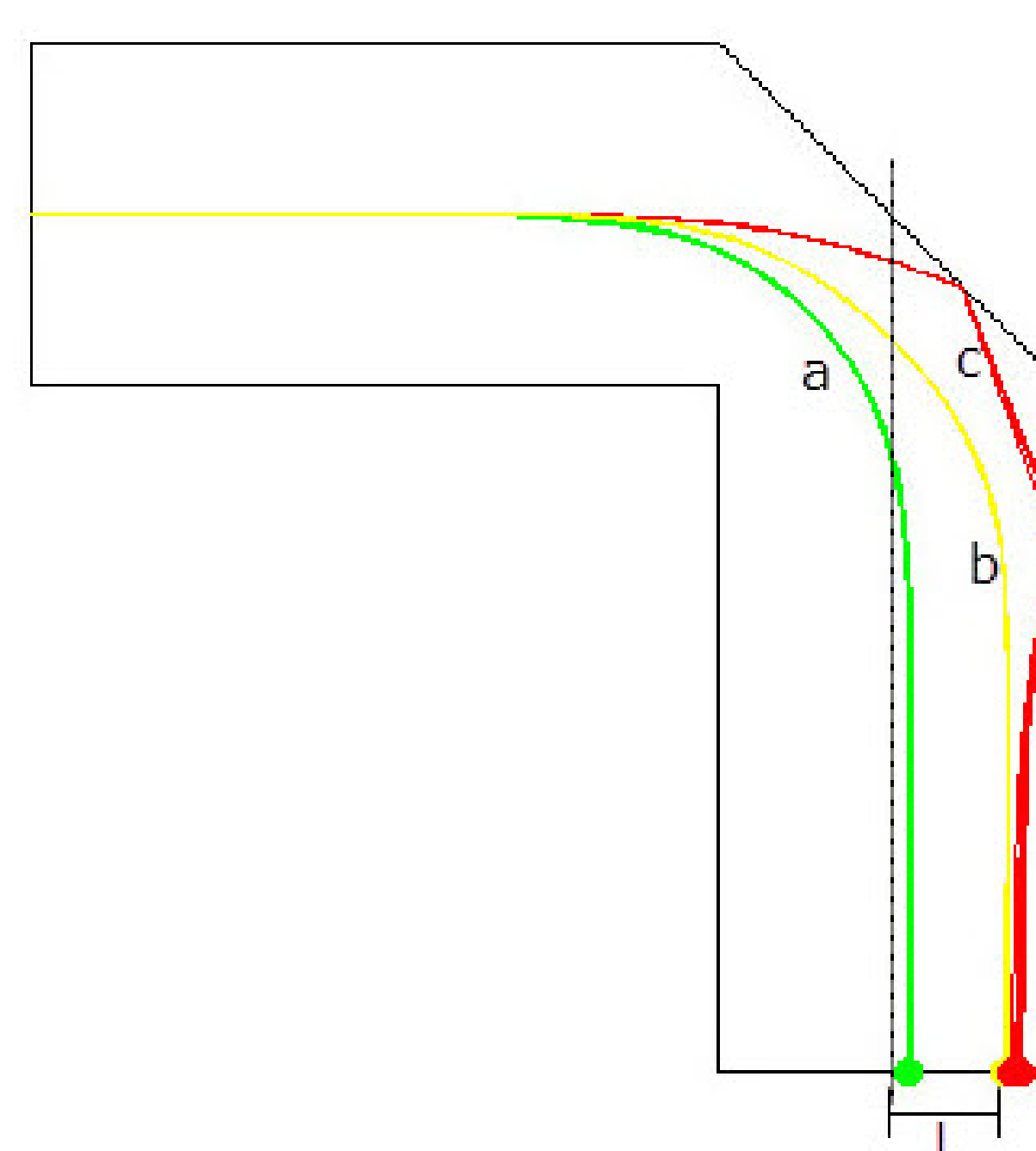


图5. 弯曲通道中孢子的运动轨迹

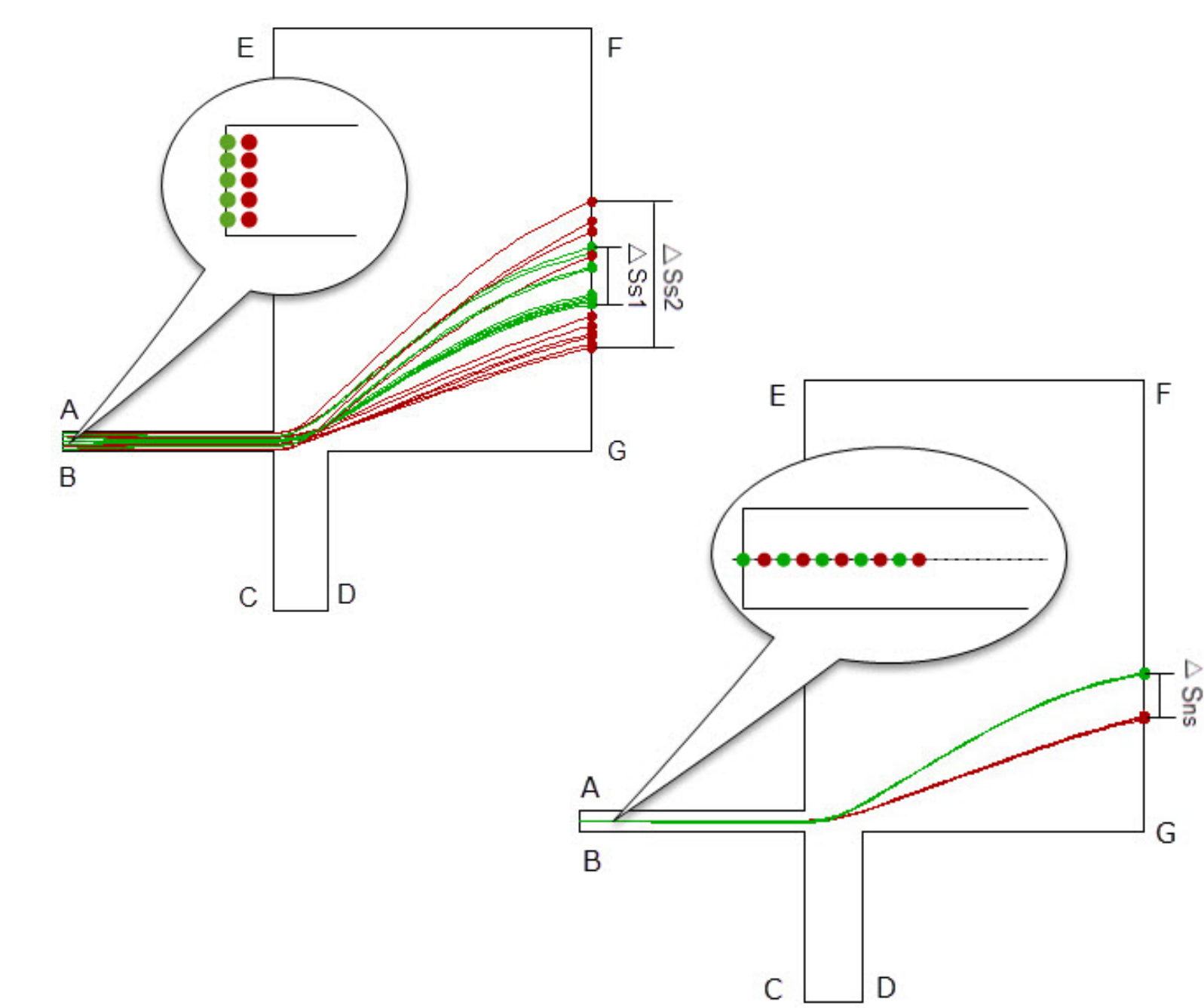


图6. 聚焦对孢子分离的影响

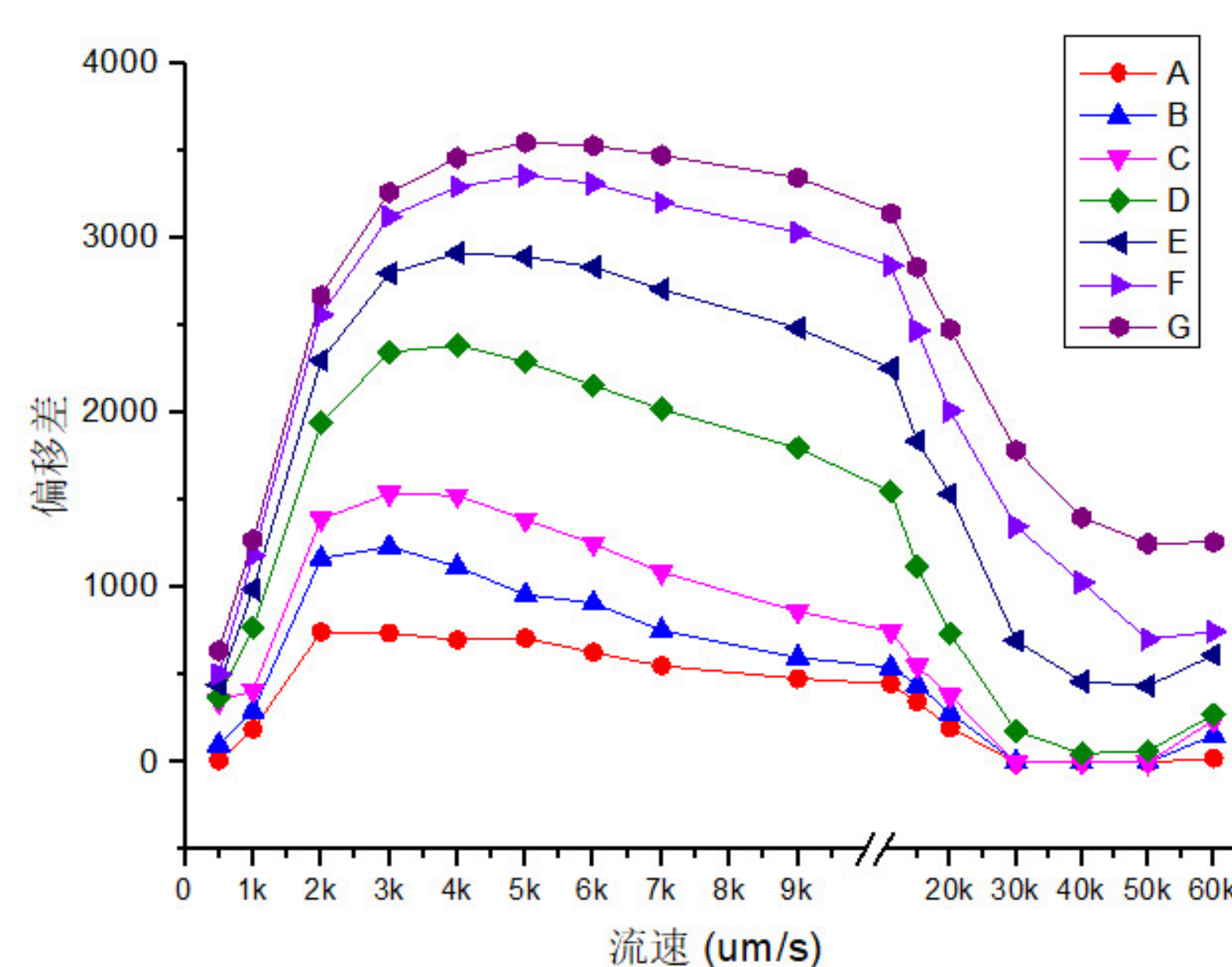


图7. 不同流速对颗粒发散距离的影响

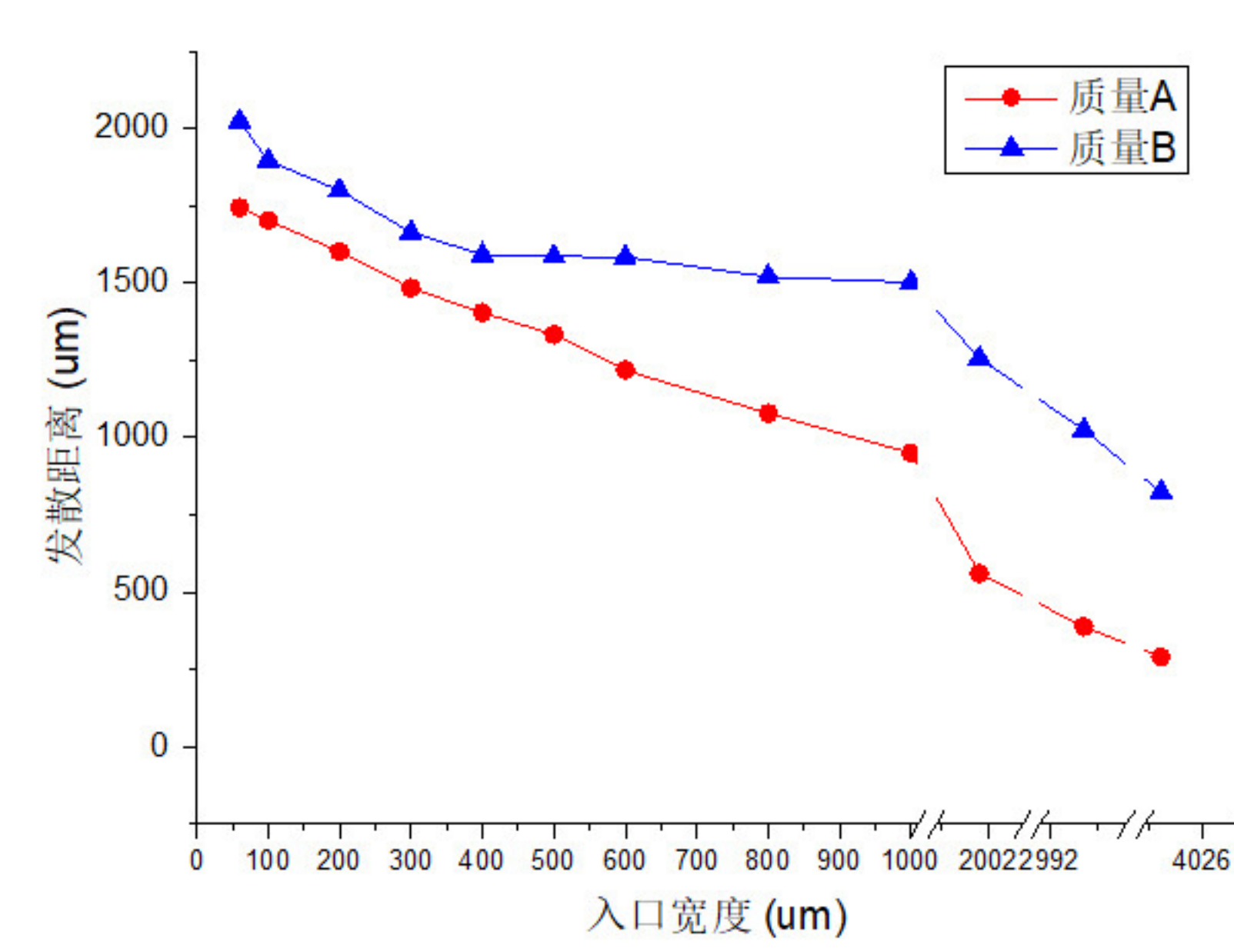


图8. 不同入口宽度对颗粒发散距离的影响

**结论:**论文设计了一种用于精确提取空气中真菌孢子的微流控芯片, 通过仿真分析对各功能段的通道尺寸和流速进行优化后, 不同颗粒间的平均偏移距离差可达496um, 表现出较好的提取效果, 对农作物真菌病害早期快速检测生物传感器的研发有实际的指导意义。

**参考文献:**

1. Xu X M, Harris D C, Berrie A M. Modeling infection of strawberry flowers by Botrytis cinerea using field data. *Phytopathology*, 2000, 90:1367-1374.
2. S. C. Hong, J. S. Kang, J. E. Lee, S. S. Kim, J. H. Jung, Continuous aerosol size separator using inertial microfluidics and its application to airborne bacteria and viruses. 2015, *Lab Chip* 15, 1889-1897.
3. WANG Qikun, SUN Ren. Advances in the research on "inertial focus of particles" and its application in microfluidics. *Advances in mechanics*, 2012, 42(6): 692-703.