

高斯光作用下纳米流体液滴内的Marangoni对流

喻泽雄¹, 王雷磊¹, 崔海航^{1,*}

1. 西安建筑科技大学, 陕西西安

*:Email:cuihaihang@xauat.edu.cn

问题描述: 如何高效驱动微纳米颗粒快速运动一直是研究热点。实验中在光强具有高斯分布UV光作用下, 微液滴内悬浮纳米颗粒受迫产生~mm/s的运动, 并诱导流体形成涡流。非均匀光热效应及其所诱导的Marangoni对流是可能的物理机制之一。液滴尺寸是影响涡流速度的重要因素, 在仿真中, 通过改变液滴的尺寸, 探究这一因素的影响, 以获取能高效驱动纳米颗粒的最优液滴尺寸。

它们之间的耦合关系如下图所示:

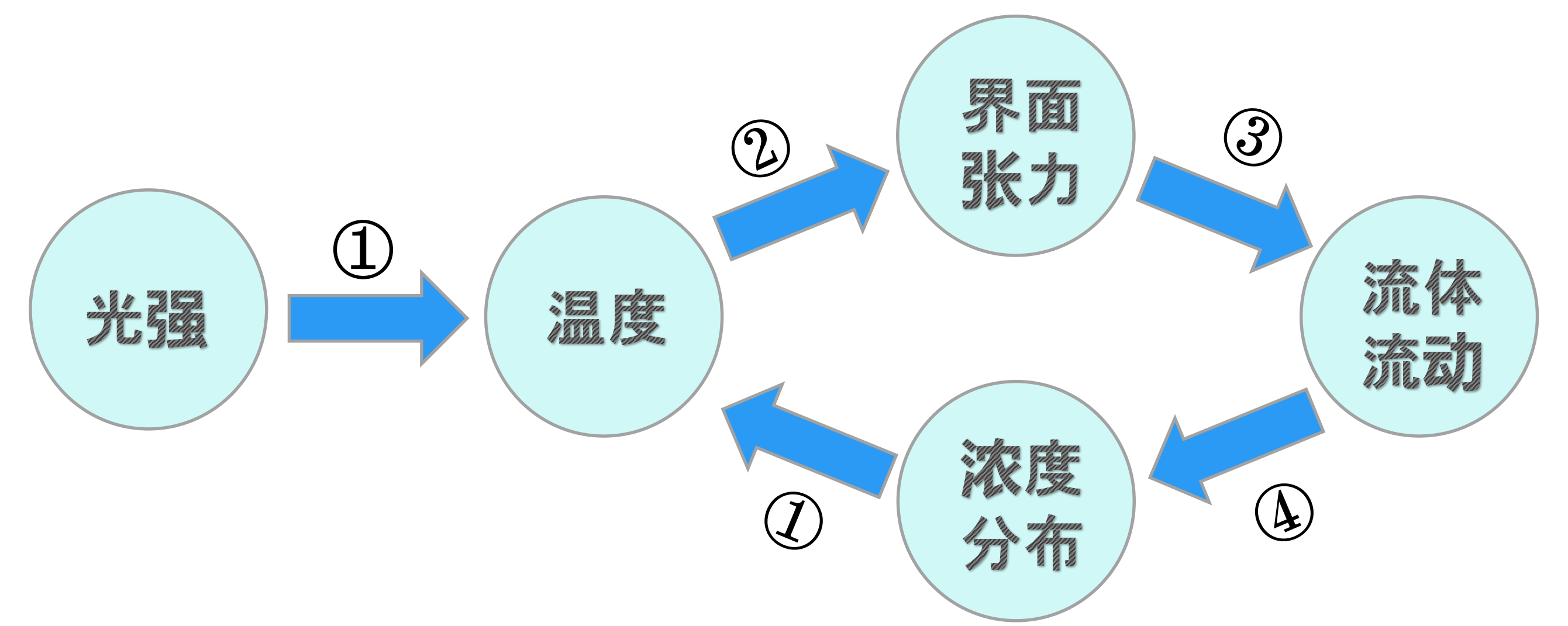


图3. 耦合关系图

结果: 如下图所示, 在高斯分布光强的UV光作用下, 液滴中心处温度最高, 随着半径的增加而逐渐降低。液滴底部流体向中心流动, 且速度为mm/s量级, 这与实验结果基本一致。

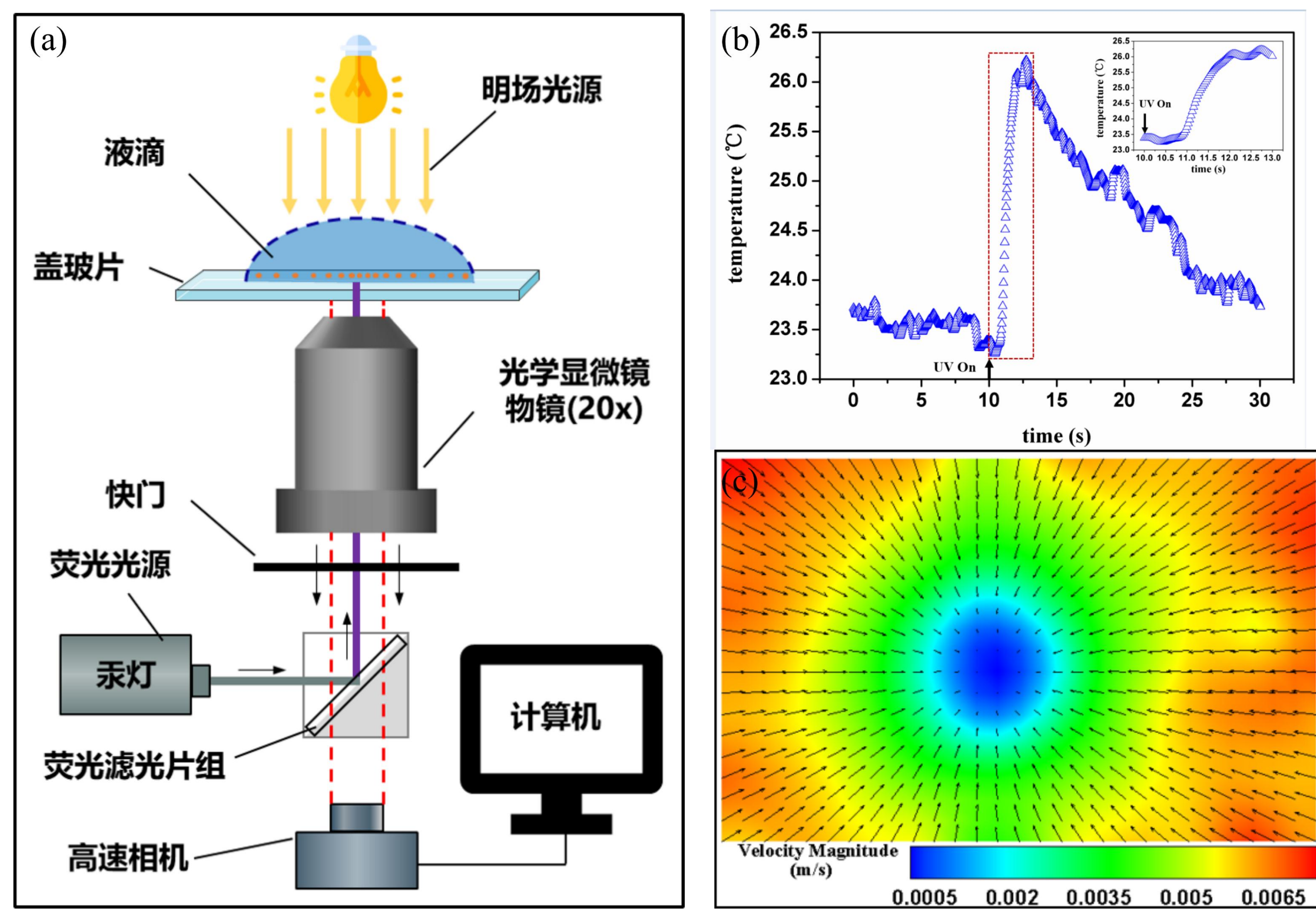


图1. (a)实验装置图;(b)液滴表面温度随时间变化曲线图
(c)液滴底部纳米颗粒速度分布图

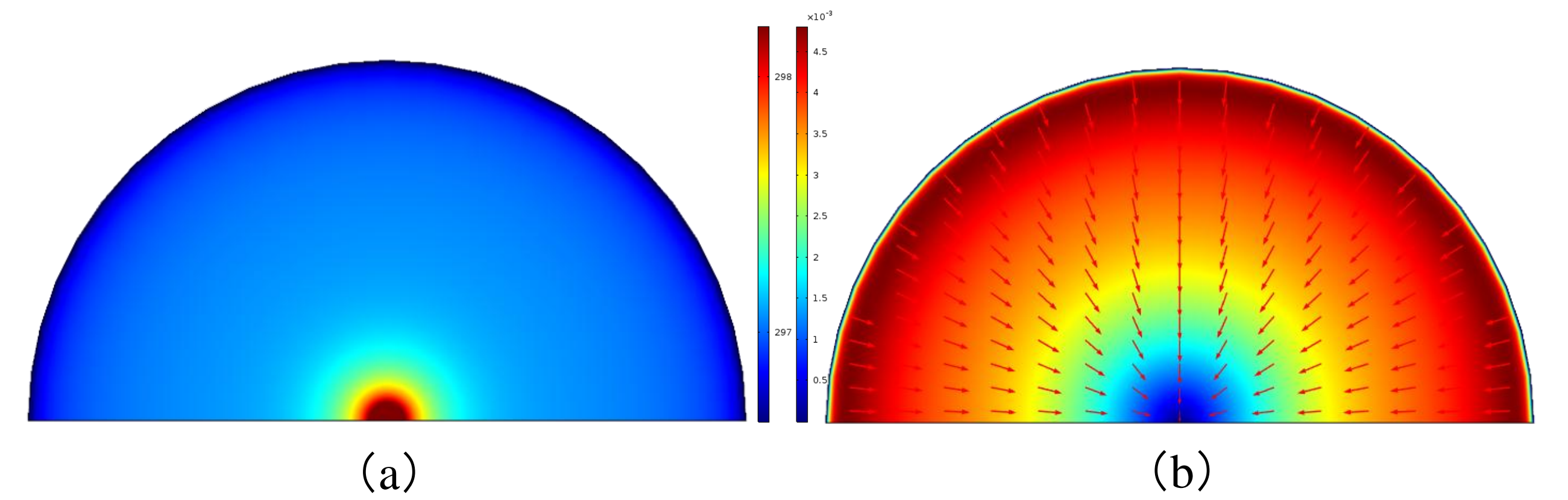


图4. (a)底部温度分布云图;(b)底部速度分布图

计算方法: 在COMSOL Multiphysics采用二维轴对称模型, 建立了包含给定光强分布、稀物质传递及非等温流动模型, 并考虑了体热源及边界表面张力梯度条件。所建模型如下图所示, 液滴尺寸为毫米级。

液滴尺寸的影响: 液滴尺寸的不同主要体现在液滴接触角 θ 与高度 h , 它们都会对液滴界面表面张力产生影响。仿真中分别改变了 θ 与 h , 得出液滴内最大速度随它们的变化如下图所示。

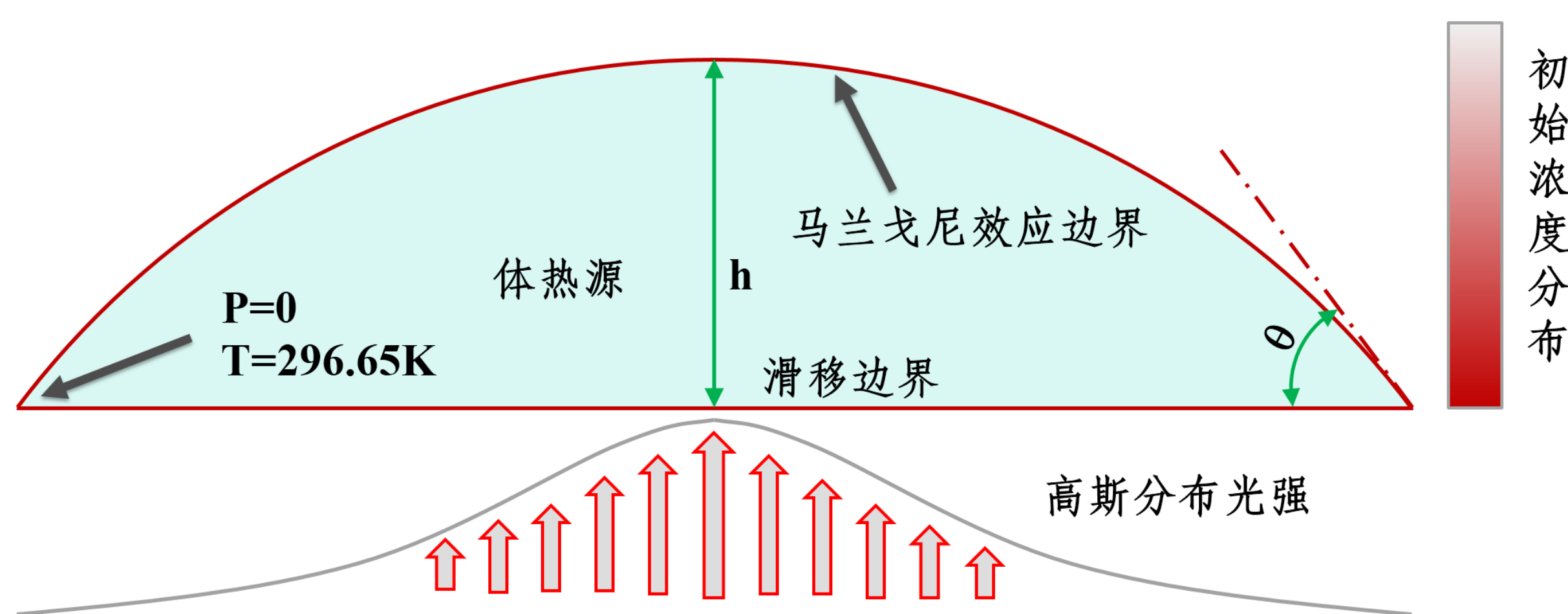


图2. 模型示意图

光强分布 I_G , 颗粒初始浓度分布 c_0 , 热源强度 Q , 以及气液界面表面张力 σ 的表达式如下所示(其中 r_0 、 z_0 、 c_{max} 、 α 、 β 、 γ 均为根据实验所定的系数):

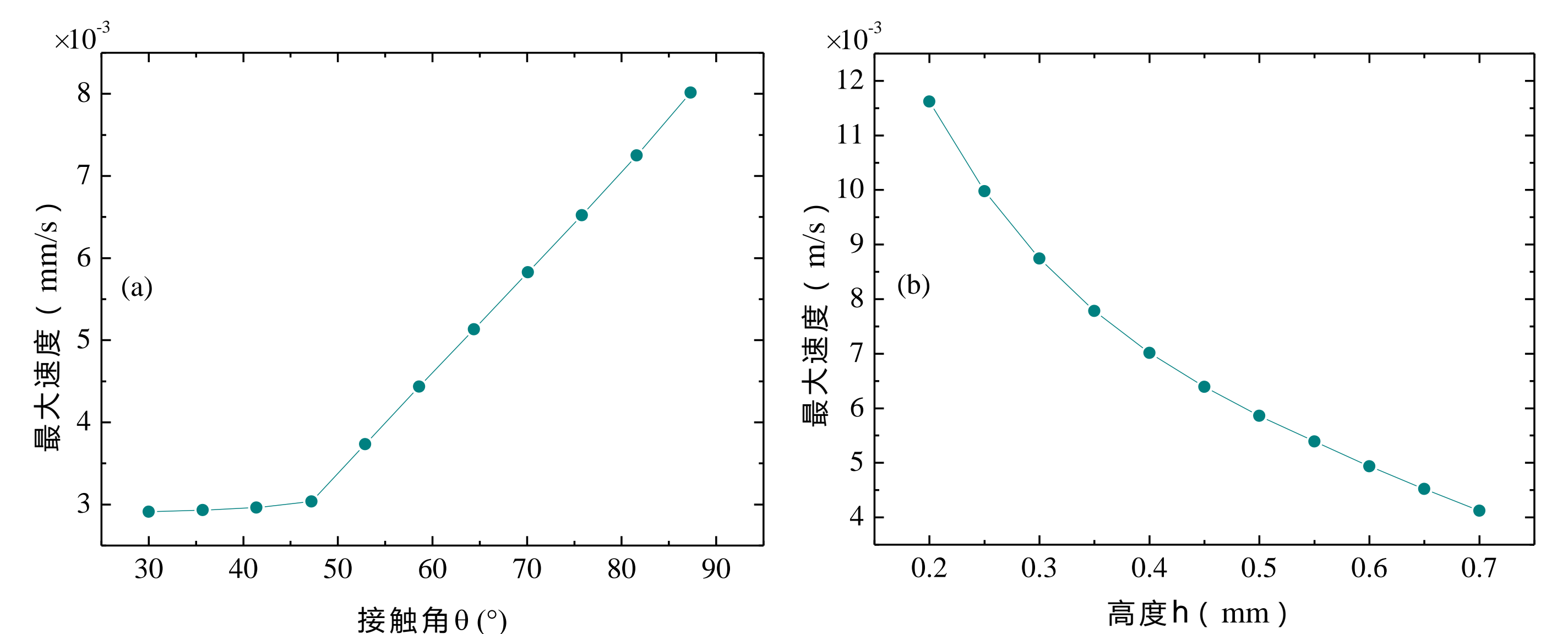


图5. (a) 随接触角的变化;(b)随高度的变化

结论及展望: 从图中可知, 液滴内最大速度随着液滴接触角的增大而增大, 随高度的增大而减小。在液滴较薄, 接触角较大的尺寸下, 液滴内的涡流速度更大, 微纳米颗粒的运动更快, 这对高效驱动纳米颗粒有着重大的意义。另外, 本次仿真中考虑的物理机制为在液滴顶部的表面张力的作用, 但是若考虑在液滴底部有由四周向中心的表面压力或者在液滴内部具有对称轴线的集中体力作用, 液滴内部仍可产生对称涡流, 它们分别作用的不同点需要进一步研究验证。

参考文献:

1. Long Jiao, Zhibin Wang, Rong Chen, Xun Zhu, Qiang Liao, Dingding Ye, Biao Zhang, Wei Li, Dongliang Li, Simulation on the Marangoni flow and heat transfer in a laser-heated suspended droplet, Chemical Engineering Science 209(2019) 115202

$$I_G = \frac{e^{-\left(\frac{|r|}{r_0}\right)^2}}{\left(\frac{z_0 + z}{z_0}\right)^3}$$

$$c_0 = c_{max} - \frac{c_{max}}{h} \times z$$

$$Q = I_G \times c \times \alpha \quad \sigma = \beta - \gamma \times T$$