

# 基于光热效应的单光纤捕获方法与仿真分析

杨敏君<sup>\*\*\*</sup>, 湛位<sup>\*\*</sup>, 宋五洲<sup>\*</sup>

华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 针对光纤光镊捕获颗粒时直接接触易产生机械损伤的问题,提出了一种基于光热效应的单光纤远距离捕获方法。采用功率低于 20 mW 的 C 波段光纤宽带放大自发辐射光源,实现了对中尺度二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)小球的远距离捕获和操控,捕获距离长达 800 μm。为探明该捕获机理,采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件,仿真模拟了光纤在 SiO<sub>2</sub> 悬浮液不同高度位置处形成的温度场分布、对流速度场分布和粒子在溶液中的运动轨迹。研究发现,在光纤操控小球的过程中起主要作用的是热对流产生的曳力,同时调整光纤高度会改变捕获速度和捕获距离。这种光纤微流体装置结构简单、操作灵活,具备在低功率条件下大范围捕获大颗粒的条件。

**关键词** 光纤光学; 光操控; 光热效应; 有限元法; 微流控

中图分类号 Q632

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0806006

## Photothermal Effect Based Single Fiber Trapping Method and Simulation Analysis

Yang Minjun<sup>\*\*\*</sup>, Zhan Wei<sup>\*\*</sup>, Song Wuzhou<sup>\*</sup>

School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** To solve the mechanical damage caused by direct contact when the fiber optic tweezers captures particles, a single fiber long-distance capture method based on photothermal effect is proposed. Mesoscale silica spheres can be moved and trapped freely within 800 μm by utilizing a C-band fiber broadband amplified spontaneous emission source with a power of less than 20 mW. To find out the capture mechanism, COMSOL Multiphysics finite element analysis software is used to simulate the temperature field distribution, convective velocity field distribution, and particle motion trajectories when the fiber is at different heights in the silica suspension. It is shown that the drag force generated by the heat convection plays a crucial role in the process of the manipulation of microparticles, while the capture speed and capture distance can be changed by adjusting the fiber height. The optical fiber microfluidic device has the advantages of simple structure and flexible operation, and can realize large-scale capture of large particles by using low-power lasers.

**Key words** fiber optics; optical manipulation; photothermal effect; finite element method; microfluid

**OCIS codes** 060.2310; 350.4855; 350.5340

## 1 引 言

作为微操作的关键技术之一,颗粒捕获与操控已广泛应用于生物医学、化学分析、材料性能评定和微装配等领域。目前,操控微粒的方法主要分为接触式与非接触式两大类。其中,接触式操作方法采用夹子<sup>[1]</sup>、悬臂<sup>[2]</sup>等微操作工具直接对微粒进行操作;而低损伤的非接触式操作方法包括电场法<sup>[3]</sup>、电

磁法<sup>[4]</sup>、微流控法<sup>[5]</sup>和激光光镊法<sup>[6]</sup>等。激光光镊法通过高数值孔径物镜形成极强的会聚激光,利用产生的光学梯度力实现对电介质微粒的捕获,已成为备受关注的非接触式方法之一<sup>[7]</sup>。

已有报道中,Constable 等<sup>[8]</sup>提出将光纤引入光镊系统的方案,从而简化了光镊系统的光学结构。随后研究者们纷纷利用双光纤<sup>[9]</sup>、多光纤<sup>[10]</sup>光镊实现了对颗粒的空间捕获、操纵和旋转。为了降

收稿日期: 2019-03-11; 修回日期: 2019-04-15; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 华中科技大学 2016 人才引进基金(3004110112)

\* E-mail: wsong@hust.edu.cn; \*\* E-mail: 109570048@qq.com; \*\*\* E-mail: mjyang@hust.edu.cn

低光纤的对准及位置调整难度,研究人员将光纤加工成锥形端面<sup>[11]</sup>、半球形自透镜端面<sup>[12]</sup>和尖端带有轴锥体的端面<sup>[13]</sup>等,以实现单光纤光镊的捕获。光纤光镊不仅有着传统光镊所具备的低机械损伤、高定位精度等优点,而且其特有的构造简单、成本低和操纵灵活等优势,更使其成为了近年来用于细胞及微小颗粒捕获和操纵的研究热点<sup>[9-11,14]</sup>。但光纤光镊的捕获仍存在问题:1)捕获力弱、捕获范围小,难以在较大范围内操纵大量粒子;2)锥形光纤输出的光会在尖端顶点附近聚焦,导致被捕获颗粒直接与光纤尖端接触,易造成机械损坏;3)轴向梯度力大小由入射辐射照度以及介质与微粒的折射率差决定,在相同照度下低折射率的微粒与光的相互作用变弱、捕获力变小,而增加入射辐射照度会损伤微粒。因此,微粒的无损伤捕获和操纵仍具有较大的难度。

针对上述问题,已有研究表明光热效应能够有效地提高光捕获能力<sup>[15-20]</sup>。随着激光照射区域温度的升高,热泳和热对流的组合效应对微粒捕获起重要作用。为提高热对流效应,研究者们分别采用电阻加热装置<sup>[21]</sup>、吸收薄膜<sup>[22]</sup>、氢化非晶硅加热衬底<sup>[23]</sup>和横截面涂覆石墨烯的光纤<sup>[24]</sup>等进一步增强激光诱导的热对流效应,从而实现大颗粒的单个捕获和集体捕获。

本文提出了一种基于光热效应的光纤微流体操控装置,通过调整光纤在 SiO<sub>2</sub> 悬浮液中的高度位置实现对中尺度 SiO<sub>2</sub> 小球的远距离横向操控。为了阐明捕获机理并得到该系统的捕获范围和捕获速度,采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立相应模型,对光纤在颗粒悬浮液中的温度场和对流速度进行数值仿真,结合流体动力学和热力学综合分析光纤在悬浮液中不同高度位置对粒子运动轨迹的影响,同时给出 SiO<sub>2</sub> 小球在光场不同位置所受的光阱力分布情况。

## 2 实验及结果

图 1 为实验装置图。采用的光源为最大功率为 20 mW 的 C 波段光纤宽带放大自发辐射(ASE)光源(ASE-1550-25)。采用的单模光纤(芯径为 9 μm,包层直径为 125 μm)一端为与光源连接的 FC/APC 连接头,另一端为平端面,由光纤夹固定、三轴光纤调整台精确控制移动。采用玻璃毛细管包覆光纤(内径为 0.3 mm,壁厚为 0.1 mm),以减少周围环境波动引起的光纤探针的振荡。将滴有 SiO<sub>2</sub> 颗粒(直径为 100 μm)分散液的载玻片置于载物台上,光纤水平浸入其中。带有 CMOS 相机(ZWO ASI 178MM-Cool)的光学显微镜用于观测光纤操纵和捕获颗粒的过程。

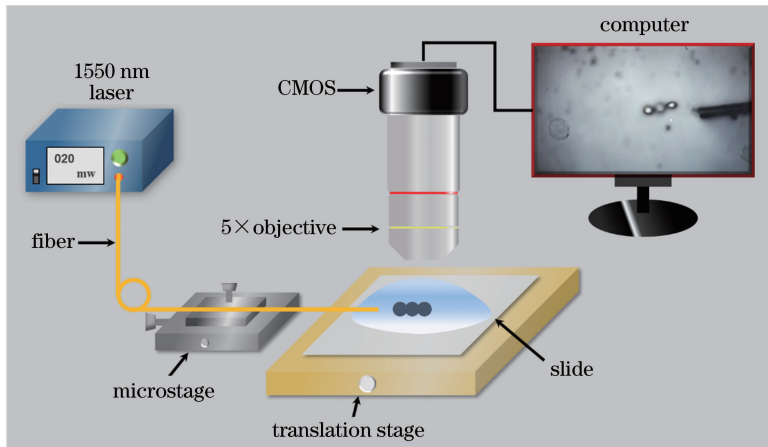


图 1 基于光热效应的颗粒捕获实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for particle capture based on photothermal effect

图 2 为基于热对流效应的光纤操纵 SiO<sub>2</sub> 小球过程示意图,其中  $x$  方向为光纤水平放置方向, $z$  方向的值代表液面高度,规定  $z=0$  处为液面最低处。当光纤与小球处于同一低水平面时,如图 2(a)所示,水溶液对 C 波段波长的光存在热吸收,在光纤端面产生温度梯度并形成热对流,拖动小球至光纤

端面附近,在静电力作用下,小球相互吸附形成链状结构。如图 2(b)所示,沿  $z$  轴正向移动光纤探头,被捕获小球会在升力作用下上升,在曳力作用下远离光纤探头直至在某位置达到平衡。如图 2(c)、(d)所示,分别沿  $y$  方向和  $x$  方向移动光纤,小球会随之沿同一方向移动。

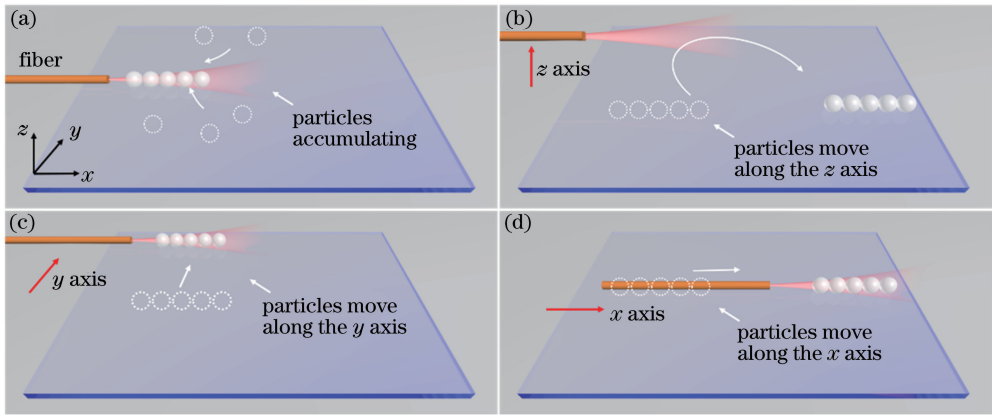


图 2 基于热对流效应的光纤操纵 SiO<sub>2</sub> 小球过程示意图。(a) 光纤静止;(b) 光纤沿 z 轴移动;(c) 光纤沿 y 轴移动;(d) 光纤沿 x 轴移动

Fig. 2 Diagrams of optical manipulation for SiO<sub>2</sub> sphere based on thermal convection effect. (a) Fiber being stationary; (b) fiber moving along z axis; (c) fiber moving along y axis; (d) fiber moving along x axis

采用 CMOS 相机记录实验过程, 光纤上下移动实现 SiO<sub>2</sub> 小球横向捕获, 实验结果如图 3 所示。当  $t=0$  s 时[图 3(a)], 光纤位于  $x=0, z=500 \mu\text{m}$  处, 小球位于  $x=500 \mu\text{m}, z=0$  处。当  $t=3.2$  s 时, 光纤沿 z 轴负向移动  $200 \mu\text{m}$ , 打开激光器, 小球靠近光纤端面直至两者相距  $300 \mu\text{m}$  左右[图 3(b)]。在  $5.8\sim 6.1$  s 过程中, 光纤下移直至与小球位于同一水平面, 最终将小球完全捕获[图 3(c)、(d)]。关闭激光器, 将光纤沿 z 轴正向轻轻移动  $350 \mu\text{m}$ , 小球

位置保持不变。打开激光器, 光纤端面附近的温度梯度产生热对流, 小球向 z 轴正向移动再次与光纤处于同一水平面, 在对流场作用下远离光纤端面[图 3(e),  $t=9.6$  s]。将光纤移至  $z=550 \mu\text{m}$  处, 小球继续远离光纤端面, 当  $t=11.3$  s 时被稳定捕获在  $z=500 \mu\text{m}$  的位置[图 3(f)], 沿 x 方向和 y 方向移动光纤, 小球会随之迅速移动, 表明在该实验条件下光纤具有灵活操控小球的能力, 根据实验结果计算得到捕获速度约为  $84.5 \mu\text{m}/\text{s}$ 。

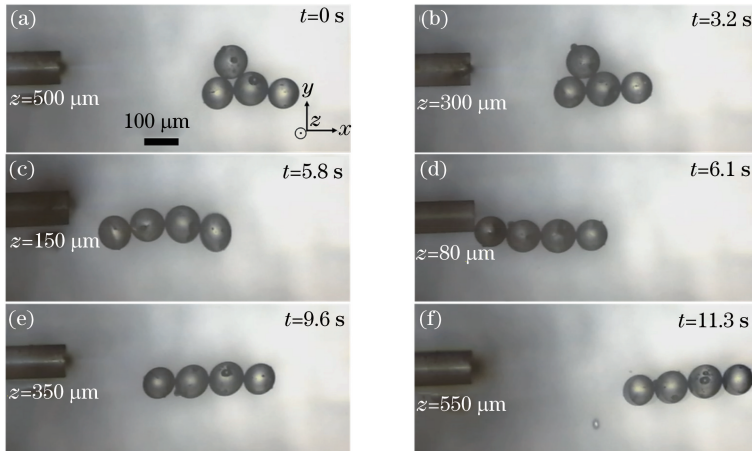


图 3 光纤上下移动操控 SiO<sub>2</sub> 小球横向移动过程的光学显微镜图像(俯视图)。(a)  $t=0$  s, 光纤位于  $z=500 \mu\text{m}$ ; (b)  $t=3.2$  s, 光纤位于  $z=300 \mu\text{m}$ ; (c)  $t=5.8$  s, 光纤位于  $z=150 \mu\text{m}$ ; (d)  $t=6.1$  s, 光纤位于  $z=80 \mu\text{m}$ ; (e)  $t=9.6$  s, 光纤位于  $z=350 \mu\text{m}$ ; (f)  $t=11.3$  s, 光纤位于  $z=550 \mu\text{m}$

Fig. 3 Optical microscope images of lateral movement of SiO<sub>2</sub> sphere by vertical movement of fiber (top view). (a)  $t=0$  s, fiber is located at  $z=500 \mu\text{m}$ ; (b)  $t=3.2$  s, fiber is located at  $z=300 \mu\text{m}$ ; (c)  $t=5.8$  s, fiber is located at  $z=150 \mu\text{m}$ ; (d)  $t=6.1$  s, fiber is located at  $z=80 \mu\text{m}$ ; (e)  $t=9.6$  s, fiber is located at  $z=350 \mu\text{m}$ ; (f)  $t=11.3$  s, fiber is located at  $z=550 \mu\text{m}$

### 3 仿真分析

#### 3.1 流体传热耦合模型

热对流效应本质上是光能向热能的转化过程<sup>[12]</sup>,产生的温度梯度会引起热对流和热泳现象<sup>[25]</sup>。水溶液对C波段波长的光波吸收率高,热效应明显<sup>[26]</sup>,因此当光纤水平浸入SiO<sub>2</sub>悬浮液时,光纤端面附近会形成温度梯度场,产生热对流和热泳效应。为深入探究光纤移动对场分布和捕获速度的影响,采用有限元分析方法对多物理场的微分方程进行求解,仿真模拟光纤位于液面不同高度时端面附近的传热场、流体场和粒子运动轨迹。

基于流体动力学与传热学相耦合的多物理场模型并通过求解Navier-Stokes方程<sup>[27]</sup>,得到稳态的温度场分布,即

$$\rho C_p \frac{\partial T(r)}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T(r) = \nabla \cdot [k \nabla T(r)] + \alpha \varphi(r), \quad (1)$$

式中: $T(r)$ 为空间温度分布; $\varphi(r)$ 为总注量率;材料参数包括热导率 $k=0.62 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;密度 $\rho=1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;热容量 $C_p=4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;水溶液吸收系数 $\alpha=11.13 \text{ cm}^{-1}$ ;  $r$ 表示空间中某一位置; $\mathbf{u}$ 为流体速度。

通过求解微分方程(2)式能够得到对流速度场分布,即

$$\begin{cases} \rho[\mathbf{u}(r) \cdot \nabla] \mathbf{u}(r) + \nabla p(r) - \mu \nabla^2 \mathbf{u}(r) = \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}(r)$ 、 $p(r)$ 分别代表空间的流体速度和压力分布; $\mathbf{F}$ 为浮力施加的体积力;动力黏度 $\mu=1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

光纤在水层不同高度位置处温度场和对流速度场的仿真结果如图4所示。图4(a)、(b)分别表示光纤位于 $z=50 \mu\text{m}$ 和 $z=550 \mu\text{m}$ 处的温度场分布。由于热吸收效应,光纤端面附近形成温度梯度,温度范围为293~320 K,距离光纤探针越近的位置,温度越高。光纤位于 $z=50 \mu\text{m}$ 处的流体速度场分布如图4(c)所示,箭头代表流体流动方向。从图中可以看出,光纤端面右侧形成回流,大量流体分子朝光纤端面附近流动,与光纤端面相距400  $\mu\text{m}$ 位置处流速最大(90  $\mu\text{m}/\text{s}$ )。而当光纤位于 $z=550 \mu\text{m}$ 处时[图4(d)],对流导致的速度场分布明显改变,回流圈中流速最大(60  $\mu\text{m}/\text{s}$ )的位置集中在光纤端面附近,流体沿 $z$ 轴正向快速流动至光纤端面,并在曳力作用下沿 $x$ 轴正向流动,充分表明热对流效应是控制颗粒先上升后远离光纤端面的主要因素。上述仿真结果表明,光纤作为热源沿 $z$ 轴方向的移动,会引起对流场分布的变化,从而实现了对SiO<sub>2</sub>小球沿 $x$ 轴方向的灵活操纵。

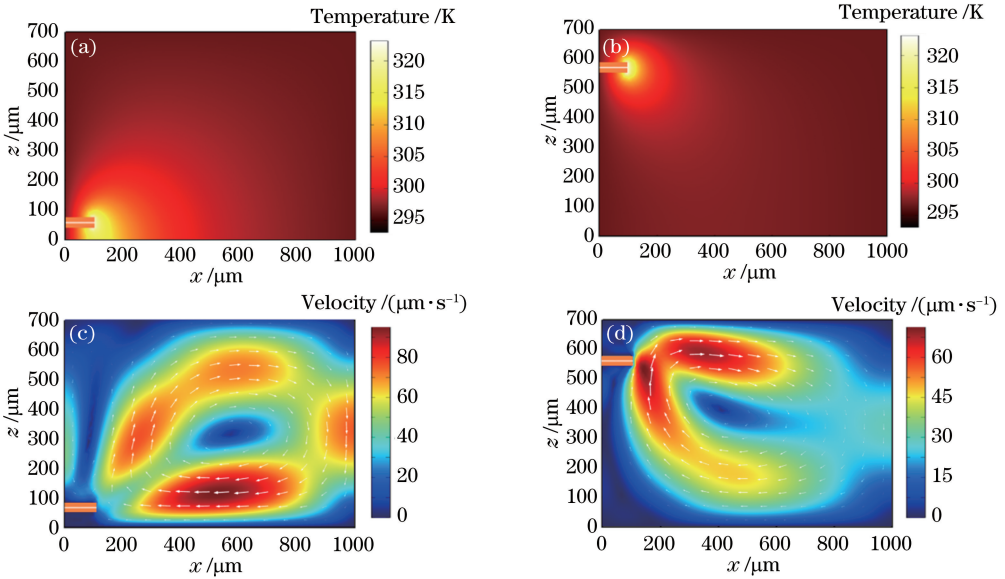


图4 光纤在不同高度位置处的温度场和对流速度场的仿真结果。(a)光纤位于 $z=50 \mu\text{m}$ 处的温度场分布;

(b)  $z=550 \mu\text{m}$ 处的温度场分布;(c)光纤位于 $z=50 \mu\text{m}$ 处的对流速度场分布;(d)光纤位于 $z=550 \mu\text{m}$ 处的对流速度场分布  
Fig. 4 Simulation results of heat transfer field (HT) and convective velocity field (FM) at different heights of fiber. (a) Temperature field distribution of fiber at  $z=50 \mu\text{m}$ ; (b) temperature field distribution of fiber at  $z=550 \mu\text{m}$ ; (c) convective velocity field distribution of fiber at  $z=50 \mu\text{m}$ ; (d) convective velocity field distribution of fiber at  $z=550 \mu\text{m}$



为了更直观地分析 SiO<sub>2</sub> 小球的运动轨迹,利用流体流动粒子追踪模块,综合曳力、热泳力和小球重力分析粒子运动。粒子的运动方程可表示为

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{tp}, \quad (3)$$

式中: $m_p$  代表颗粒质量; $\mathbf{v}$  为流体速度; $\mathbf{F}_D$  为热对流产生的曳力; $\mathbf{F}_g$  为重力; $\mathbf{F}_{tp}$  为热泳力。

热对流产生的曳力  $\mathbf{F}_D$  可定义为

$$\mathbf{F}_D = \left( \frac{1}{\tau_p} \right) m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}), \quad (4)$$

其中

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}, \quad (5)$$

式中: $\tau_p$  为层流中球形颗粒速度响应时间; $m_p$  为颗粒质量; $\mathbf{u}$  为流体速度; $\mathbf{v}$  为颗粒速度; $d_p$  为颗粒直径; $\rho_p$  为颗粒密度。

重力  $\mathbf{F}_g$  定义为

$$|\mathbf{F}_g| = m_p g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p}, \quad (6)$$

式中: $g$  为重力加速度。

热泳力  $\mathbf{F}_{tp}$  定义为

$$\mathbf{F}_{tp} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s \left( \frac{k}{k_p} \right) \nabla T}{\rho \left( 2 \frac{k}{k_p} + 1 \right) T}, \quad (7)$$

式中: $T$  为流体温度; $k_p = 1.38 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  为颗粒热导率; $C_s = 1.17$  为热泳校正因子。

根据(4)式和流体流速的仿真结果,计算得到热对流产生的曳力值约为  $10^{-5} \text{ N}$ 、热泳力值约为  $10^{-12} \text{ N}$ ,因此曳力是颗粒捕获过程中的主要因素。图 5 表示光纤位于  $z = 50 \mu\text{m}$  处 SiO<sub>2</sub> 小球在不同时刻的运动轨迹。在距离光纤端面  $650 \mu\text{m}$  处释放小球,可以明显看出在曳力作用下小球朝着光纤端面运动。图 6 表示光纤位于  $z = 550 \mu\text{m}$  处 SiO<sub>2</sub> 小球在不同时刻的运动轨迹。在光纤下方  $450 \mu\text{m}$  处释放小球,小球先上升至与光纤同一高度,之后远离光纤端面并落至  $x = 800 \mu\text{m}$  的位置,这充分验证了光纤沿  $z$  轴方向移动能引起小球在  $x$  轴方向运动的实验现象,并得到该系统的最大捕获距离可达  $800 \mu\text{m}$ 。

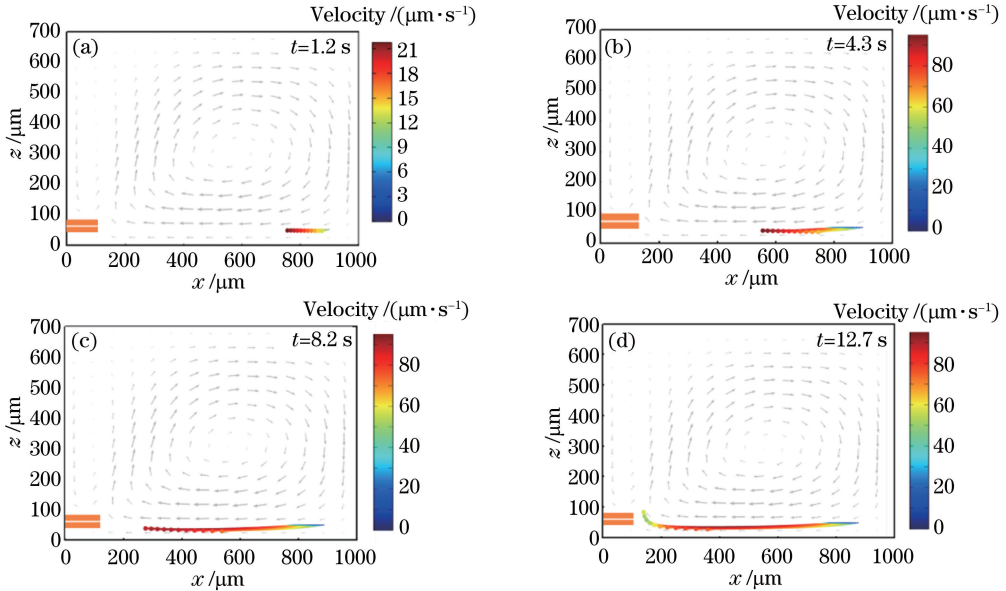


图 5 光纤位于  $z = 50 \mu\text{m}$  处 SiO<sub>2</sub> 小球在不同时刻的运动轨迹图。(a)  $t = 1.2 \text{ s}$ ; (b)  $t = 4.3 \text{ s}$ ; (c)  $t = 8.2 \text{ s}$ ; (d)  $t = 12.7 \text{ s}$

Fig. 5 Trajectories of silica sphere at  $z = 50 \mu\text{m}$  at different times. (a)  $t = 1.2 \text{ s}$ ; (b)  $t = 4.3 \text{ s}$ ; (c)  $t = 8.2 \text{ s}$ ; (d)  $t = 12.7 \text{ s}$

### 3.2 电磁场模型

除了光热效应产生的曳力和热泳力,激光作为一种电磁波与颗粒碰撞时引起动量变化,产生光力<sup>[28]</sup>。基于麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式,系统的总动量守恒定律可写成<sup>[29]</sup>

$$\int_V f dV + \frac{d}{dt} \int_V j dV = - \int_V \nabla \cdot \mathbf{T} dV = - \oint_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS, \quad (8)$$

式中: $f$  表示电荷系统的动量密度; $j$  表示电磁场的动量密度变化率; $\mathbf{T}$  为电磁场动量密度张量,即电磁场应力张量,其面积分即(8)式右边表示通过界面  $S$  流入  $V$  区域内的动量流。当电磁场为稳态分布,(8)式左边第二项为零,则  $V$  区域内电磁场作用于电荷系统的总作用力等于麦克斯韦应力张量在界面上的面积分。因此,基于电磁场动量守恒定律和时

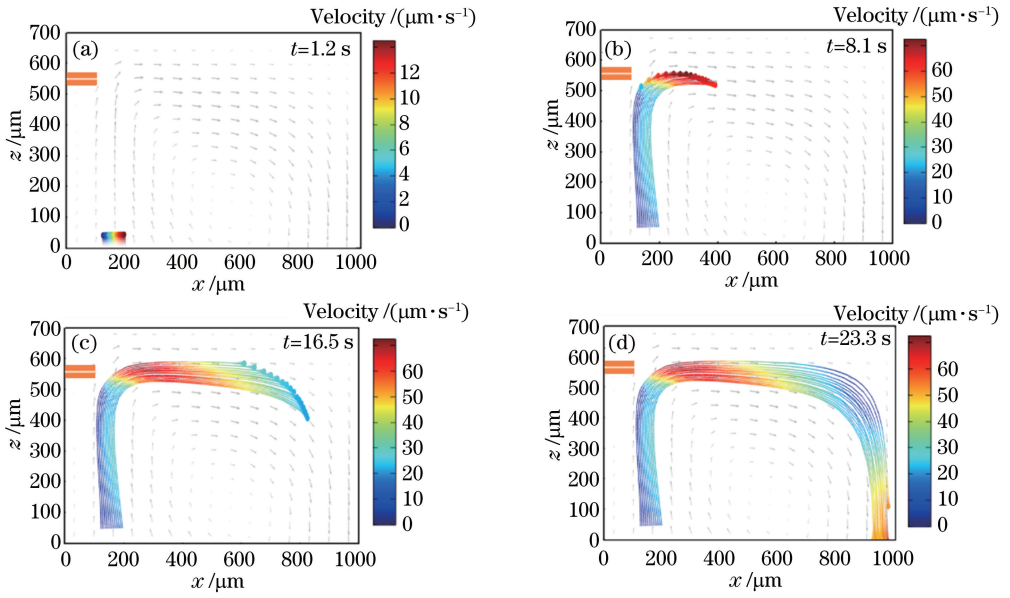


图 6 光纤位于  $z=550 \mu\text{m}$  处  $\text{SiO}_2$  小球在不同时刻的运动轨迹图。(a)  $t=1.2 \text{ s}$ ; (b)  $t=8.1 \text{ s}$ ; (c)  $t=16.5 \text{ s}$ ; (d)  $t=23.3 \text{ s}$   
 Fig. 6 Trajectories of silica sphere at  $z=550 \mu\text{m}$  at different time. (a)  $t=1.2 \text{ s}$ ;  
 (b)  $t=8.1 \text{ s}$ ; (c)  $t=16.5 \text{ s}$ ; (d)  $t=23.3 \text{ s}$

域有限差分法, 仿真分析单光纤光镊的光场分布, 以及产生的光阱力在不同位置的变化情况。

在 COMSOL 软件中利用电磁场射频接口建立仿真模型。周围液体环境设为水, 其折射率  $n=1.33$ ,  $\text{SiO}_2$  小球折射率设为 1.45, 光纤折射率设为 1.46, 完美匹配层厚度设为  $2 \mu\text{m}$ , 平端头光纤在水

中的出射光场分布如图 7(a) 所示, 距离光纤端面越近则电场强度越强。图 7(b) 为呈链状结构的小球对光场的影响, 每个被捕获的球体连续重新聚焦激光束, 沿着光束形成一个新的陷阱区域。图 7(c)、(d) 分别表示小球沿  $x$  方向和  $y$  方向不同位置的受力情况,  $d_x$ 、 $d_z$  分别表示小球与光纤沿  $x$  方向和  $z$

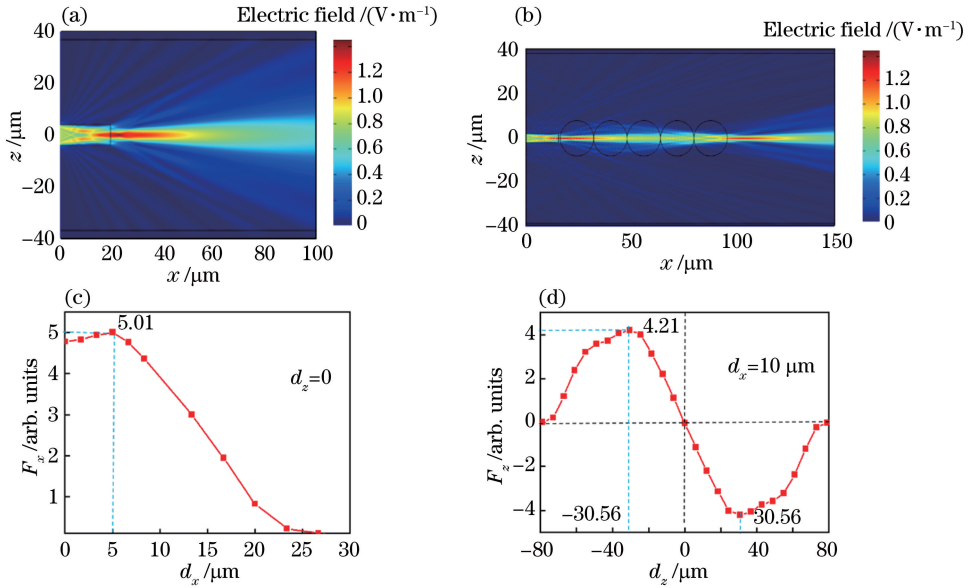


图 7 光纤的电磁场(EM)分布以及  $\text{SiO}_2$  小球所受光阱力分布。(a) 光纤在悬浮液中的 EM 分布; (b)  $\text{SiO}_2$  小球呈链状结构时的 EM 分布; (c)  $\text{SiO}_2$  小球所受的轴向光阱力分布; (d)  $\text{SiO}_2$  小球所受的横向光阱力分布

Fig. 7 Electromagnetic field (EM) distributions of fiber and optical trapping force distributions of  $\text{SiO}_2$  sphere. (a) EM distribution of optical fiber in suspension; (b) EM distribution of  $\text{SiO}_2$  sphere with chain structure; (c) axial optical force distribution of  $\text{SiO}_2$  sphere; (d) transverse optical force distribution of  $\text{SiO}_2$  sphere

方向的距离,  $F_x$ 、 $F_z$  分别表示轴向光阱力和横向光阱力, 负值表示光纤对小球具有吸引力。从图 7(c) 可以看出, 随着与光纤轴向距离的增大, 轴向光阱力呈先增加后减小的趋势, 在  $d_x = 30 \mu\text{m}$  附近趋于零, 整个过程均为正值, 表现为沿光传播方向的散射力。从图 7(d) 可以看出, 由于光场对称性, 小球位于  $d_z = 0$  时所受的横向光阱力为零, 随着与光纤横向距离的增大, 其绝对值呈先增大后减小的趋势, 在  $d_z = 80 \mu\text{m}$  附近趋于零。在颗粒捕获过程中, 光阱力远小于曳力的作用范围, 并且光阱力值大小在  $10^{-10} \text{N}$  左右, 对粒子远距离操控只起到辅助作用。

## 4 结 论

基于光热效应, 采用 C 波段光纤宽带 ASE 光源 (20 mW) 实现了对  $\text{SiO}_2$  小球的远距离灵活操纵。采用有限元分析方法仿真出光纤作为热源在  $\text{SiO}_2$  悬浮液中的温度场、对流速度场和光场分布, 研究了光纤在溶液中不同高度位置对对流场分布和粒子运动轨迹的影响。结果表明, 水溶液对 C 波段波长的光存在热吸收, 产生的温度梯度引起热对流和热泳现象, 同时光纤高度位置变化会引起对流场分布的改变, 在颗粒移动过程中热对流效应产生的曳力 ( $10^{-5} \text{N}$ ) 起主导作用, 远大于热泳力和光阱力。理论仿真得到的最大捕获距离为  $800 \mu\text{m}$ , 最大捕获速度约为  $84.5 \mu\text{m/s}$ 。与传统光镊相比, 这种光纤微流体装置操作简单且成本低, 在低功率条件下能够实现大颗粒的大范围稳定捕获, 能适应化学、生物等领域对中尺度颗粒非接触、无损伤操作的需要, 同时也有望应用于粒子的分选。

## 参 考 文 献

[1] Bernardoni P, Riwan A, Tsitsiris H, *et al.* From the mechanical analysis of a polyarticulated microgripper to the design of a compliant microgripper [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5383: 469-477.

[2] Haliyo D S, Dionnet F, Regnier S. Controlled rolling of microobjects for autonomous manipulation [J]. Journal of Micromechanics, 2006, 3(2): 75-101.

[3] Kawamoto H, Tsuji K. Manipulation of small particles utilizing electrostatic force [J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(5): 602-607.

[4] Gosse C, Croquette V. Magnetic tweezers: micromanipulation and force measurement at the molecular level [J]. Biophysical Journal, 2002, 82(6): 3314-3329.

[5] Squires T M, Quake S R. Microfluidics: fluid

physics at the nanoliter scale[J]. Reviews of Modern Physics, 2005, 77(3): 977-1026.

[6] Chiou P Y, Ohta A T, Wu M C. Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images [J]. Nature, 2005, 436(7049): 370-372.

[7] Zhang X Y, Cheng S B, Tao S H. Three-dimensional optical tweezers based on Fibonacci zone plate [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1035001. 张心宇, 程书博, 陶少华. 基于斐波那契波带片的三维光镊 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1035001.

[8] Constable A, Kim J, Mervis J, *et al.* Demonstration of a fiber-optical light-force trap [J]. Optics Letters, 1993, 18(21): 1867-1869.

[9] Li Y M, Gong L, Li D, *et al.* Progress in optical tweezers technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0101001. 李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0101001.

[10] Jensen-Mcmullin C, Lee H P, Lyons E R. Demonstration of trapping, motion control, sensing and fluorescence detection of polystyrene beads in a multi-fiber optical trap [J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2634-2642.

[11] Taguchi K, Ueno H, Hiramatsu T, *et al.* Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fibre [J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 413-414.

[12] Liang P B. Research on mode multiplexing single fiber optical tweezers with its application [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015. 梁佩博. 复用型单光纤光镊技术及应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

[13] Wu Z F, Liu Z H, Guo C K, *et al.* Numerical simulation and experiments of two fiber optical tweezers [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1971-1976. 吴忠福, 刘志海, 郭成凯, 等. 两种单光纤光镊捕获效果的数值仿真与实验研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1971-1976.

[14] Liu Z H, Guo C K, Wu Z F, *et al.* Numerical analysis and experiment of single fiber optic tweezers used in cell manipulation [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 900-904. 刘志海, 郭成凯, 吴忠福, 等. 一种用于细胞操作的单光纤光镊研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(4): 900-904.

[15] Berthelot J, Aćimović S S, Juan M L, *et al.* Three-dimensional manipulation with scanning near-field optical nanotweezers [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(4): 295-299.

- [16] Chen J J, Kang Z W, Kong S K, *et al.* Plasmonic random nanostructures on fiber tip for trapping live cells and colloidal particles[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3926-3929.
- [17] Zheng J P, Xing X B, Evans J, *et al.* Optofluidic vortex arrays generated by graphene oxide for tweezers, motors and self-assembly[J]. *NPG Asia Materials*, 2016, 8(4): e257.
- [18] Cheng Y P, Yang J X, Li Z B, *et al.* Microbubble-assisted optofluidic control using a photothermal waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(15): 151903.
- [19] Zhang C L, Gong Y, Wu Y, *et al.* Lab-on-tip based on photothermal microbubble generation for concentration detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 2504-2509.
- [20] Gelfand R M, Wheaton S, Gordon R. Cleaved fiber optic double nanohole optical tweezers for trapping nanoparticles[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6415-6417.
- [21] Tan W H, Takeuchi S. A trap-and-release integrated microfluidic system for dynamic microarray applications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(4): 1146-1151.
- [22] Ohta A T, Jamshidi A, Valley J K, *et al.* Optically actuated thermocapillary movement of gas bubbles on an absorbing substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(7): 074103.
- [23] Flores-Flores E, Torres-Hurtado S A, Páez R, *et al.* Trapping and manipulation of microparticles using laser-induced convection currents and photophoresis[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(10): 4079-4087.
- [24] Li Z B, Yang J X, Liu S J, *et al.* High throughput trapping and arrangement of biological cells using self-assembled optical tweezer [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34665-34674.
- [25] Wienken C J, Baaske P, Rothbauer U, *et al.* Protein-binding assays in biological liquids using microscale thermophoresis [ J ]. *Nature Communications*, 2010, 1(7): 100.
- [26] Deng R R, He Y Q, Qin Y, *et al.* Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900 ~ 2500 nm)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 192-206.  
邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等. 近红外波段(900-2500 nm)水吸收系数测量[J]. *遥感学报*, 2012, 16(1): 192-206.
- [27] Doering C R, Gibbon J D. Applied analysis of the Navier-Stokes equations: turbulence [M] // Applied analysis of the Navier-Stokes equations. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 40-60.
- [28] Guo Z H, Liu Z T, Chen Q M, *et al.* Application and progress of laser shaping devices in optical tweezers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090004.  
郭志和, 刘泽田, 陈启敏, 等. 激光整形器件在光镊中的应用及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090004.
- [29] Jing M J. Simulation of focus evanescent field based on FDTD and experimental design [ D ]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.  
荆敏娟. 单光纤光镊的FDTD模拟分析及实验设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.