

类抛物线形单孔悬挂芯光纤光镊设计与微粒操控

李红 牛田森 周雅妮 邢诗梦 娄小平

Design and particle manipulation of parabolic single-hole suspended-core fiber tweezers

LI Hong, NIU Tiansen, ZHOU Yani, XING Shimeng, Lou Xiaoping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20240220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光阱中微粒位置高精度检测技术

High precision detection technology of particle positions in optical trap

红外与激光工程. 2019, 48(12): 1213001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1213001>

基于MMI滤波器的可调谐连续光全光纤OPO

Tunable CW all-fiber optical parametric oscillator based on the multimode interference filter

红外与激光工程. 2019, 48(5): 520002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0520002>

基于单模光纤传输的单模-无心-单模光纤型表面等离子体共振传感器 (特邀)

Single mode-no core-single mode fiber based surface plasmon resonance sensor (*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(12): 20201055 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201055>

摆线光束的微粒等间距操控 (特邀)

Equal spacing control of particle via cycloidal beam (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20210380 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210380>

抑制频率互调效应的阵列式光镊技术研究

Optical tweezer array with suppressed frequency intermodulation

红外与激光工程. 2023, 52(7): 20230128 <https://doi.org/10.3788/IRLA20230128>

基于负曲率空芯光纤的光泵太赫兹光纤激光器的理论研究

Theoretical investigation on optically pumped THz fiber laser based on negative curvature hollow-core fiber

红外与激光工程. 2020, 49(2): 0205001 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0205001>

类抛物线形单孔悬挂芯光纤光镊设计与微粒操控

李 红^{1,2}, 牛田森¹, 周雅妮², 邢诗梦², 姜小平^{1,2,3*}

1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;
2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016;
3. 广州南沙光子感知技术研究院, 广东 广州 511462)

摘要: 为提高光镊系统中光纤波导耦合度与微通道集成度, 实现对微粒的多样操控, 提出了一种类抛物线形单孔悬挂芯光纤光镊结构, 从双光束聚焦光场机制出发, 分析并建立了光镊探针尖端横向和轴向光阱力数学模型, 通过出射光场分布仿真模型的计算, 探究了类抛物线形悬挂芯光纤中空孔直径、微粒尺寸与纤芯功率等参量对出射光场和光阱力的影响。结合悬挂芯光纤流道的气压控制, 利用 CO₂ 激光熔融工艺制备了光纤光镊探针, 建立了针对直径 2、5、10 μm 的聚苯乙烯微粒操控实验。研究为单孔悬挂芯光纤应用于光纤光镊实现微粒操控乃至输运提供了技术基础, 也为光纤光镊提高集成度与灵活性提供了新的思路。

关键词: 光纤光镊; 单孔悬挂芯光纤; 抛物线形; 光阱力; 光操控

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240220

0 引言

光镊技术利用光电力学效应来实现对微粒的控制, 开创了光学微观操控研究的新纪元^[1]。不同于传统意义上的机械操作, 光镊能够实现对微粒的无接触、无损伤、无侵害的操控。随着时代的进步, 光镊技术已经在微小粒子操控^[2]、生物细胞检测^[3-5]、微/纳米结构组装分离^[6-7] 等领域快速发展和应用。

早期的空间光镊通常采用高数值孔径的物镜来形成足够梯度力的高聚焦入射光^[8], 整体光路系统复杂, 体积巨大, 且难于移动^[9-10]。光纤作为一种柔性易弯曲、灵活轻便且光传导效率高的光传导器件, 逐渐纳入到光镊的研究范围中。光纤光镊将复杂的光路系统简化为一根或多根光纤, 可以集成在一些小型装置中, 如导管、光流体平台等^[11], 摆脱了传统光镊所受的空间上的限制, 在化学分析^[12]、生物合成^[13]、药物输送等^[14] 领域优势显著。然而光纤光镊在多维度可控操作方面如输运、分选等, 通常需要配合微通道或

微流控技术进行分析^[15]。微流控器件的制备复杂, 且与光纤作为相互独立的器件, 系统光耦合效率及集成度较低^[16], 因此需要一种更加简便高效且集成度高的微粒或细胞操控与输运的方法。带中空孔的光纤作为一种将光纤与微通道(光纤内中空孔)集成在一起的特种光纤, 能够实现储存、输运、分析检测等功能, 为研究人员提供了新的思路。ZHANG^[17] 等人提出了中空孔环形芯端面研磨锥角形成光镊探针的方法, 主要利用单模光纤错芯耦合方式提供光源, 环形芯波导完成光束汇聚, 进而实现了聚苯乙烯微球的捕获。近年来, 具有中空孔微流道结构特征的光纤波导在光纤光镊应用领域备受关注, 单孔悬挂芯光纤的出现拓展了光镊在微反应器领域的应用思路, 在中空孔、大表面积比和高柔韧度的结构特性基础上, 其偏芯和悬挂芯结构更易实现光场耦合输入, 同时不对称的出射光场令悬挂芯光纤光镊在微粒捕获以及灵活操控方面具有天然优势。针对中空孔悬挂芯光纤波导光场传输机制、光镊结构光阱力的优化设计以及工艺摸索尚

收稿日期: 2024-06-28; 修订日期: 2024-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61903042); 北京学者计划研究项目(BJXZ2021-012-00046)

作者简介: 李红, 女, 副教授, 博士, 主要从事光纤微纳结构传感及应用等方面的研究。

通讯作者: 姜小平, 女, 教授, 硕士, 主要从事光纤传感与光电精密检测技术等方面的研究。

需深入研究。

因此,文中基于单孔悬挂芯光纤的结构优势,提出了一种类抛物线形的光纤光镊探针结构,分析了光阱力形成机理,通过光纤波导结构设计仿真计算了光镊主要影响参数,搭建了实验系统,分析验证了单孔悬挂芯光纤光镊的微粒操控性能。

1 光纤光镊原理分析和结构设计

单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊结构如图 1 所示。悬挂芯光纤内有一中空孔,悬挂芯 (C1) 悬挂于中空孔内壁,偏芯 (C2) 位于包层中。其光纤包层外直径为 125 μm,中空孔位于光纤的中心,孔内径为 42 μm,两纤芯直径为 8 μm。类抛物线形光纤光镊结构如图 1(b) 所示。光纤锥尖结构总体呈抛物线形状,可以实现来自不同纤芯传输的光束聚焦,有效避免了光束从探针端面出射后迅速向四周发散,减少了能量损失。不同光束由光纤锥尖出射后光束交会,从而产生了聚焦光场,通过控制不同纤芯的光功率,实现了横

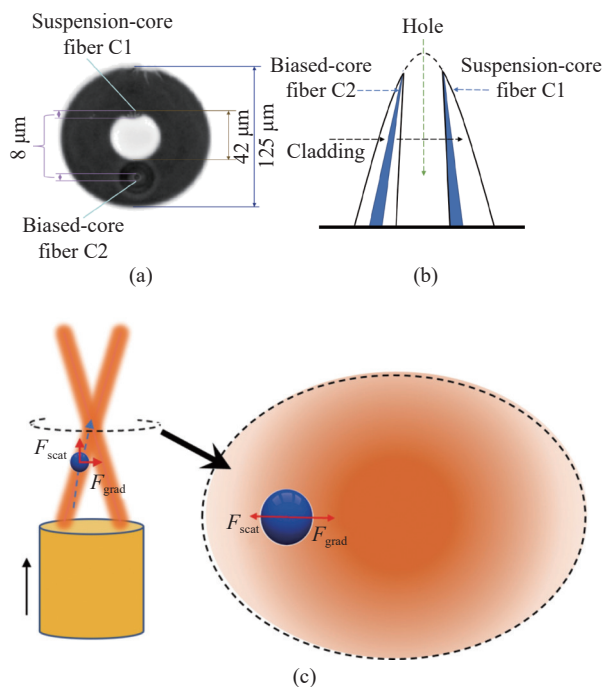


图 1 单孔双芯偏芯悬挂光纤结构图。(a) 端面显微照片;(b) 抛物线形悬挂芯光纤光镊结构;(c) 双光束聚焦光力作用

Fig.1 Structure of single-hole dual-core biased-core suspension. (a) Photo of fiber end face; (b) Parabolic-shaped suspension-core fiber optical tweezers; (c) Optical force generated by dual beam focusing

向捕获点的移动、曲线输运,以及打破了光阱俘获点平衡,实现了释放、弹射功能。

光镊产生的光阱力主要由沿光传播方向的散射力 (F_{scat}) 和空间梯度方向上的梯度力 (F_{grad}) 两个力共同作用。对于一般情况,光散射力占主导地位,会使微粒沿着光传播方向,即远离光纤探针的方向运动,而在激光焦点处,较大强度的光梯度力占据主导地位,则使微粒运动方向指向光场强度最大处,即被捕获至光阱内。如图 1(c) 所示,在悬挂芯的不同纤芯传输的光束在探针尖端汇聚产生的散射力和梯度力对微粒构成了光学梯度阱合力。

光纤尖端横向和轴向的光阱力可以基于电磁理论的数值模拟与计算来实现^[5]。利用有限元分析法,计算麦克斯韦应力张量,表示如下:

$$\vec{T}_{ik} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 |\mathbf{E}|^2 + \mu \mu_0 |\mathbf{H}|^2}{2} \delta_{ik} - \epsilon_0 \epsilon_1 \mathbf{E}_i \mathbf{E}_k - \mu \mu_0 \mathbf{H}_i \mathbf{H}_k \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} , \mathbf{H} 表示电磁场在自由空间的矢量;下标 i , k 表示 x , y 或 z 向; ϵ_0 , ϵ_1 分别表示真空和介质的介电常数; μ , μ_0 分别表示介质和真空中的磁导率。在二维 TM 模式下,电磁场分量为 $(\mathbf{H}_y, \mathbf{E}_x, \mathbf{E}_z)$ 。根据电磁场基本定律以及麦克斯韦应力张量,可以推得轴向光阱力为:

$$F_z = \frac{1}{2} \oint_S \left(-\frac{1}{2} (\mu \mu_0 [\mathbf{H}_y]^2 + \epsilon_0 \epsilon_1 |\mathbf{E}_x|^2 - \epsilon_0 \epsilon_1 |\mathbf{E}_z|^2) \right) dx + \frac{1}{2} \oint_S \epsilon_0 \epsilon_1 \text{Re}(\mathbf{E}_x \mathbf{E}_z^*) dz \quad (2)$$

横向光阱力为:

$$F_x = \frac{1}{2} \oint_S \left(-\frac{1}{2} (\mu \mu_0 [\mathbf{H}_y]^2 + \epsilon_0 \epsilon_1 |\mathbf{E}_z|^2 - \epsilon_0 \epsilon_1 |\mathbf{E}_x|^2) \right) dz + \frac{1}{2} \oint_S \epsilon_0 \epsilon_1 \text{Re}(\mathbf{E}_x \mathbf{E}_z^*) dx \quad (3)$$

式中: S 表示二维平面 XOZ 包括的仿真空间的外边界。悬挂芯光纤光镊实现光力操控的关键是光纤锥尖结构的优化和光场调控。

2 单孔悬挂芯光纤光镊出射光场分布计算与分析

光纤光镊操控是光纤尖端探针出射光场分布与微粒形成光阱力共同作用的结果。为分析单孔悬挂芯光纤光镊探针出射光场的特点,文中基于光束传播法建

立了光镊探针结构模型,分析了出射光场分布情况。

设置单孔悬挂芯光纤纤芯折射率为 1.46,包层折射率为 1.45,周围环境为水,折射率为 1.33,仿真光源波长为 980 nm,按单孔悬挂芯光纤双芯结构特征设置双芯与包层,取其尖端 50 μm 长度作为分析对象,研究了不同中空孔直径与纤芯功率对光镊探针出射光场分布的影响。

2.1 不同中空孔直径的光纤探针出射光场分布

为保证形成稳定的捕获光场,需要对光纤探针尖端结构进行优化设计。中空孔直径过大纤芯波导的光束不能聚焦,无法形成稳定捕获点,如果孔直径过小可能会造成光阱力分布不均匀。不同中空孔直径时光镊探针出射光场分布特征如图 2 所示。

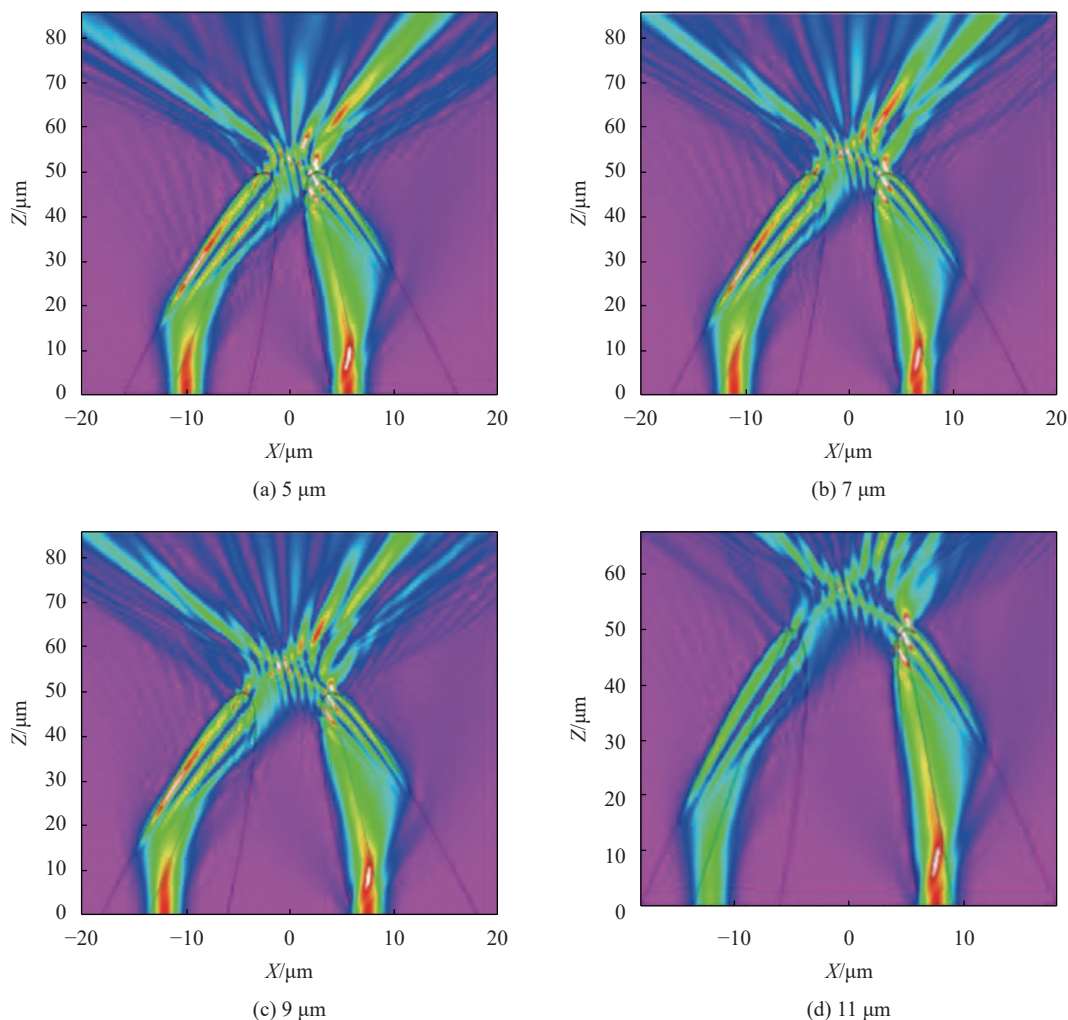


图 2 不同中空孔直径的光纤探针出射光场分布

Fig.2 Optical field distribution of the fiber probe with different hollow hole diameters

可以看出,当中空孔直径为 9 μm 以上时,光场集中区域会偏移至光镊右侧尖端。中空孔直径为 9 μm 以下时,类抛物线形单孔双芯偏芯悬挂芯光纤探针对出射光具有一定的会聚作用,两束光在光纤尖端附近会聚后出现光强明显得到加强的现象。同时,光会聚后的再出射光束光强分布不均匀,大部分光强明显分

布在纤芯的出射光束中,且由于两根纤芯位置的不对称性,聚焦光束呈现非常明显的斜向,光束环境较为复杂,无法通过光场分布初步判断微粒操控力的分布,需要根据光场聚焦情况在不同位置进行计算分析。因悬挂芯光纤中空孔微流道的应用需求,光束汇聚的结构设计需要合理选取中空孔直径与光束汇聚

约束关系。

2.2 不同纤芯功率的光纤探针出射光场分布

为探究不同纤芯功率对出射光场的影响,选择 $9\ \mu\text{m}$ 中空孔直径的类抛物线形单孔双芯偏芯悬挂光纤探针作为模型。按照 Fullwave 计算模块中 P_0 和平均功率 P_{Aw} 的定义关系 $P_{\text{Aw}} = n_{\text{eff}} \times P_0 \times A \times \alpha / 2 \times Z_0$, 约定使用 $A=1$ 、 $\alpha=1$ 、 $Z_0=376.7$; n_{eff} 为有效折射率, 值取为 1.46, 此时 P_0 设置为 $1\ \text{W/m}$ 的平均功率, P_{Aw} 约为 $2\ \text{mW}$, 符合经光纤光路耦合及光纤尖端拉锥等环节的光强损耗后光纤锥尖探针形成光镊光场强度范围。在仿真模块的 FW Launch power 中分别设置悬挂芯 C1 与偏芯 C2 功率为“1、 $1\ \text{W/m}$ ”, “0.5、 $1\ \text{W/m}$ ”与“1、 $0.5\ \text{W/m}$ ”, 其光场分布如图 3 所示。

可以看出, 当悬挂芯纤芯功率由 $1\ \text{W/m}$ 减小至 $0.5\ \text{W/m}$ 时, 除光场强度的变化外, 对出射光场的分布

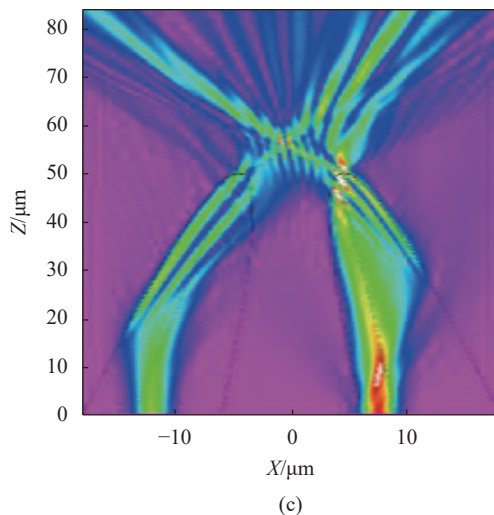


图 3 不同纤芯功率的光纤探针出射光场分布。(a) C1 和 C2 均为 $1\ \text{W/m}$; (b) C1 为 $0.5\ \text{W/m}$, C2 为 $1\ \text{W/m}$; (c) C1 为 $1\ \text{W/m}$, C2 为 $0.5\ \text{W/m}$

Fig.3 Optical field distribution of the fiber probe for different core powers. (a) C1 is $1\ \text{W/m}$, C2 is $1\ \text{W/m}$; (b) C1 is $0.5\ \text{W/m}$, C2 is $1\ \text{W/m}$; (c) C1 is $1\ \text{W/m}$, C2 is $0.5\ \text{W/m}$

主体部分 (即由光纤尖出射会聚后重新分布的靠右侧大部分光强会聚处) 并无较大影响, 而当偏芯功率由 $1\ \text{W/m}$ 减小至 $0.5\ \text{W/m}$ 时, 出射光场的分布主体部分除光强变弱外, 其分散程度也更强, 捕获能力也相应减弱。

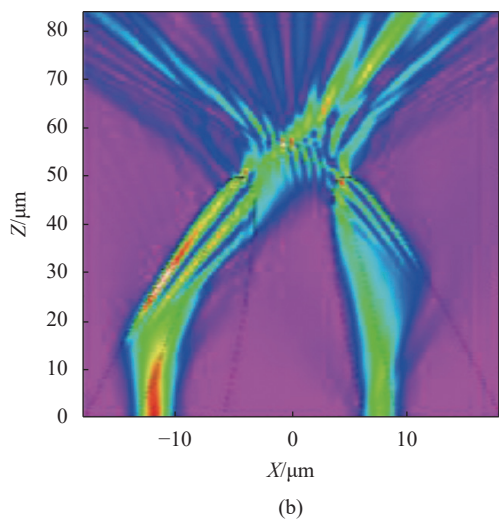
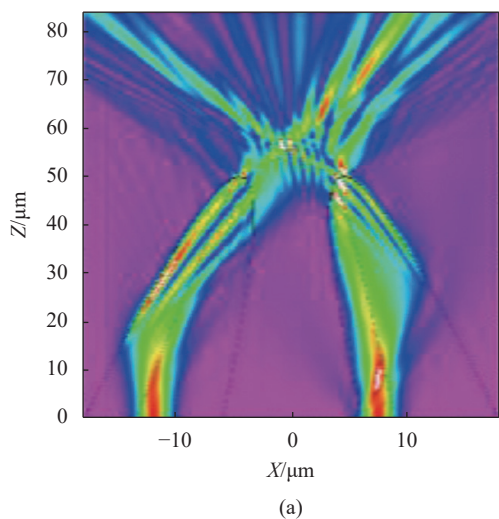
3 光阱力仿真与影响因素分析

从仿真分析和光纤结构特点可以判断, 中空孔直径、微粒直径以及纤芯功率对球形微粒所受光阱力都会产生影响, 因此在构建的光纤探针模型中, 文中将光纤探针尖端中空孔直径 d 、微粒半径 dr 、纤芯功率 P_0 等参数设为变量, 研究微粒受力影响, 设置微粒的折射率为 1.59 (其中 dx 和 dz 分别为微粒球心距光纤探针尖端横向和轴向的垂直距离)。

3.1 中空孔直径对光阱力的影响

在不同中空孔直径的类抛物线形单孔双芯悬挂芯光纤探针模型下, 对 $5\ \mu\text{m}$ 直径的微粒进行横向及轴向光阱力计算。设置纤芯功率均为 $1\ \text{W/m}$, 光纤探针的中空孔直径分别为 5 、 7 、 $9\ \mu\text{m}$, 其横向与轴向光阱力分布如图 4 所示。

$5\ \mu\text{m}$ 直径的微粒在不同中空孔直径探针模型下



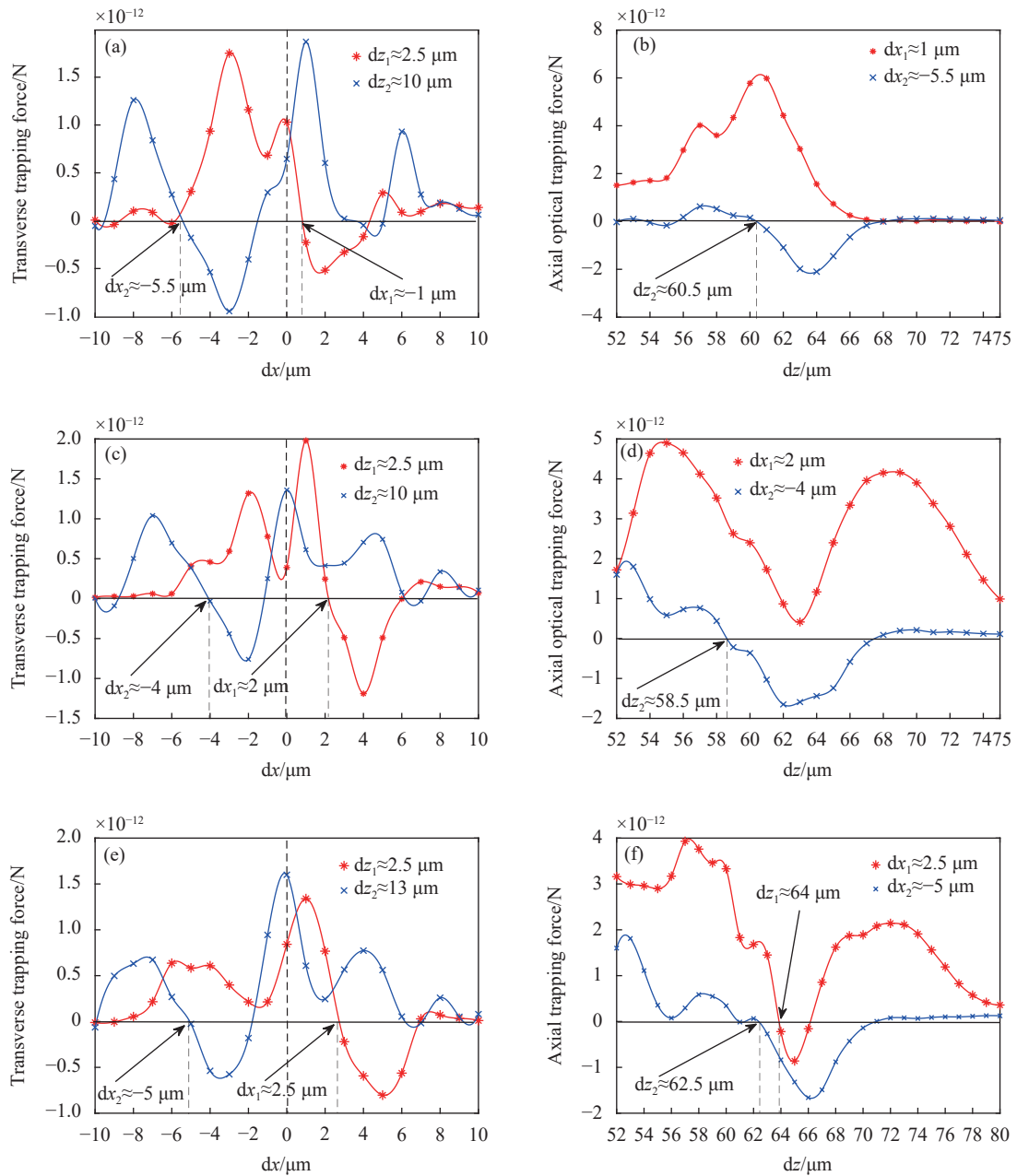


图 4 不同中空孔直径下微粒受到的横向和轴向光阱力对比。(a)~(b) 5 μm ; (c)~(d) 7 μm ; (e)~(f) 9 μm

Fig.4 Comparison of transverse and axial optical trapping forces on particles with different hollow hole diameters. (a)-(b) 5 μm ; (c)-(d) 7 μm ; (e)-(f) 9 μm

受到的横向光阱力仿真结果如图 4 (a)、(c)、(e) 所示。可以看出,三者横向位置均有稳定的捕获点。其中 9 μm 中空孔直径的光纤探针横向光阱力分布规律,且两个方向的横向光阱力大小近似,较易实现横向捕获,表现最佳。而 5 μm 与 7 μm 中空孔直径的光纤探针虽然也有可以实现的稳定横向捕获点 ($dx_1 \approx 1, 2 \mu\text{m}$; $dx_2 \approx -5.5, -4 \mu\text{m}$),但两个方向的横向光阱力大小均出现明显差距,且稳定捕获点两侧方向力均出现分布不均匀的情况,稳定性有所降低,分布较

复杂。

轴向光阱力仿真结果如图 4 (b)、(d)、(f) 所示。5 μm 与 7 μm 中空孔直径对应的轴向光阱力均只存在一个轴向稳定捕获点 ($dz_2 \approx 60.5, 58.5 \mu\text{m}$),但零点右侧横向稳定捕获点在轴向提供的光阱力全为推力,无法实现稳定捕获;9 μm 中空孔直径的类抛物线形单孔双芯偏芯悬挂光纤探针具有两个轴向捕获点 ($dz_1 \approx 64 \mu\text{m}$ 、 $dz_2 \approx 62.5 \mu\text{m}$),虽然 2.5 μm 对应的轴向捕获点 ($dz_1 \approx 64 \mu\text{m}$) 左右两侧轴向方向力的分布非常不均匀,

捕获力值与分布范围均非常小,捕获并不稳定,但整体上其捕获稳定性与光阱力分布上表现最佳。

综上分析,较大的中空孔直径可以提供较稳定的横向与轴向捕获点,中空孔直径较小会导致轴向捕获点减少,且捕获点周围两个方向的光阱力分布不均匀,影响捕获效率。因此,在后续的分析中,将选择 9 μm 中空孔直径的抛物线形单孔双芯偏芯悬挂光纤探针作为仿真模型。

3.2 微粒直径对光阱力的影响

在 9 μm 空孔直径的类抛物线形单孔双芯偏芯悬挂光纤探针模型下,对直径分别为 2、5、10 μm 的微粒进行横向及轴向光阱力计算。设置纤芯功率均为 1 W/m,其横向光阱力与轴向光阱力分布如图 5 所示。

直径分别为 2、5、10 μm 微粒所受的横向光阱力仿真结果如图 5(a)、(c)、(e) 所示。可以看出,2 μm 微粒在微粒紧贴光纤探针尖端与微粒球心距离光纤探

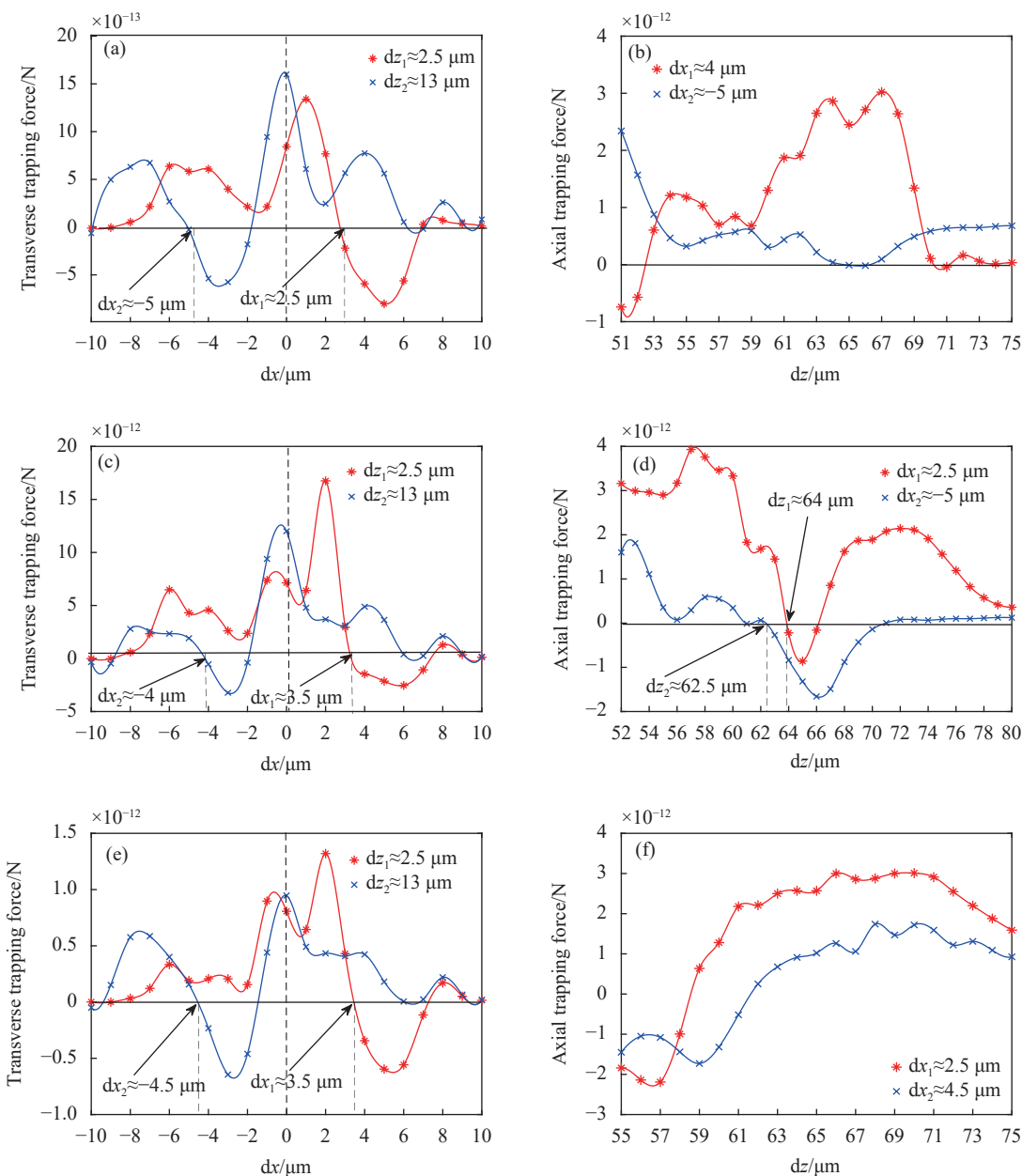


图 5 不同直径微粒在 9 μm 中空孔直径光纤探针下受到的横向和轴向光阱力对比。(a)~(b) 2 μm ; (c)~(d) 5 μm ; (e)~(f) 10 μm

Fig.5 Comparison of transverse and axial optical trapping forces on particles with different diameters under a 9 μm hollow hole diameter fiber probe.

(a)-(b) 2 μm ; (c)-(d) 5 μm ; (e)-(f) 10 μm

针 13 μm 的位置均有一个横向稳定捕获点, 分别为 $-5 \mu\text{m}$ 与 $4 \mu\text{m}$ 处, 但是在 $4 \mu\text{m}$ 处横向捕获难度大。5 μm 微粒的横向光阱力在横向捕获点 ($dx_1 \approx 2.5 \mu\text{m}$ 、 $dx_2 \approx -5 \mu\text{m}$) 左右分布较均匀, 可以实现稳定横向捕获。10 μm 微粒在微粒紧贴光纤探针尖端与微粒球心距离光纤探针 13 μm 的位置处所受的横向光阱力分布十分不均匀, 两个方向力的大小也相差较大, 理论上捕获非常难实现。

不同直径微粒在 9 μm 中空孔直径的光纤探针模型下受到的轴向光阱力分别如图 5 (b)、(d)、(f) 所示。对于 2 μm 直径的微粒, 仅仅在横向 4 μm 上拥有轴向捕获点, 捕获位置位于光纤探针尖端 ($dz_1 \approx 53 \mu\text{m}$), 捕获力范围仅约 2 μm , 力值较小, 因此捕获并不稳定。对 5 μm 直径的微粒, 横向 2.5 μm 与 $-5 \mu\text{m}$ 处分别具有一个稳定易实现轴向捕获点 ($dz_1 \approx 64 \mu\text{m}$ 、 $dz_2 \approx 62.5 \mu\text{m}$)。对 10 μm 直径的微粒, 横向 2.5 μm 与 4.5 μm 位置对应的轴向光阱力曲线走向十分相似, 均可以在光纤探针尖端实现接触式捕获, 且捕获较为稳定。

综合分析, 不同直径的微粒, 对横向与轴向光阱力的影响不同, 对于横向光阱力, 微粒直径过大或过小均会对其分布以及捕获产生影响, 而对于轴向光阱力, 微粒越大则其捕获越稳定。因此, 在后续分析中, 选择 9 μm 中空孔直径的抛物线形单孔悬挂芯光纤探针与 5 μm 直径的微粒作为仿真模型进行计算分析。

3.3 纤芯功率对光阱力的影响

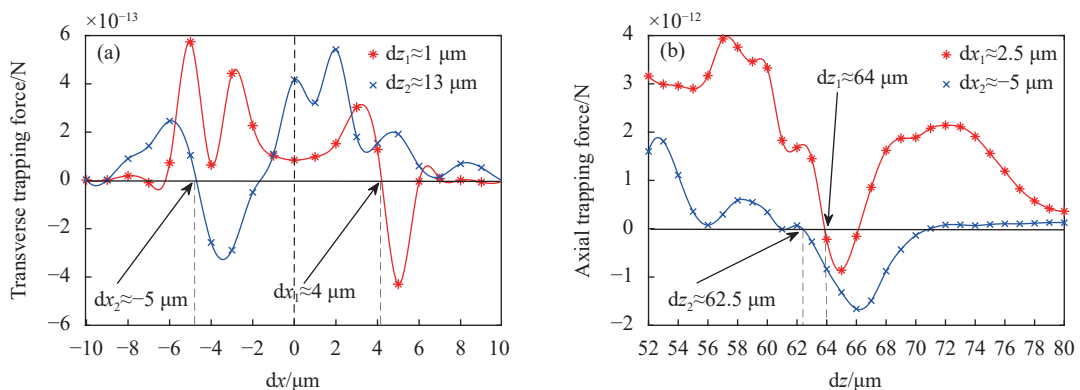
在 9 μm 中空孔直径的类抛物线形单孔悬挂芯光纤探针模型下, 设置两根光纤内纤芯功率不同, 对直径为 5 μm 微粒进行横向及轴向光阱力分析计算。设置偏芯纤芯和悬挂芯纤芯功率分别为“1、1 W/m”、

“1、0.5 W/m”与“0.5、1 W/m”, 其光阱力分布如图 6 所示。

横向光阱力仿真结果如图 6 (a)、(c)、(e) 所示。可以看出, 不同纤芯的功率变化对微粒所受的横向光阱力走向与横向捕获点位置影响较小, 对力值大小影响较大。偏芯功率与悬挂芯功率相同的条件下, 微粒所受横向光阱力最佳, 分布规律捕获稳定, 其中悬挂芯的功率相比于偏芯的功率对横向光阱力影响较大, 尤其是捕获点右侧的光阱作用力 (负值区域), 这将直接影响横向捕获点的稳定性, 偏芯纤芯的功率对横向光阱力的影响较小。

受到的轴向光阱力仿真结果如图 6 (b)、(d)、(f) 所示。可以看出, 偏芯纤芯与悬挂芯功率相同时, 有两个轴向捕获点, 且类型相同, 轴向捕获最合适; 悬挂芯内光功率对轴向光阱力的影响较大, 其减小会造成部分区域捕获力减小, 导致捕获点不稳定, 偏芯功率主要影响零点右侧横向捕获点对应的轴向光阱力, 偏芯功率的减少会导致光纤探针尖端附近的轴向光阱力推力减小转变为捕获力。

综合分析, 两根纤芯的光功率对微粒在横向与轴向上所受的光阱力分布有一定影响。两根纤芯的功率相同时, 光阱力分布规律, 存在横向及轴向的稳定捕获点, 两根纤芯功率不同时, 悬挂芯的功率对横向以及轴向的光阱作用力值影响较大, 这对捕获点的稳定性有重要影响, 而偏芯功率相对来说影响较小, 一定程度上会影响轴向光阱力在光纤探针尖端附近的力场。因此, 在实际实验中, 保持光纤内两根纤芯功率一致或悬挂芯功率足够是较为理想的实验条件。



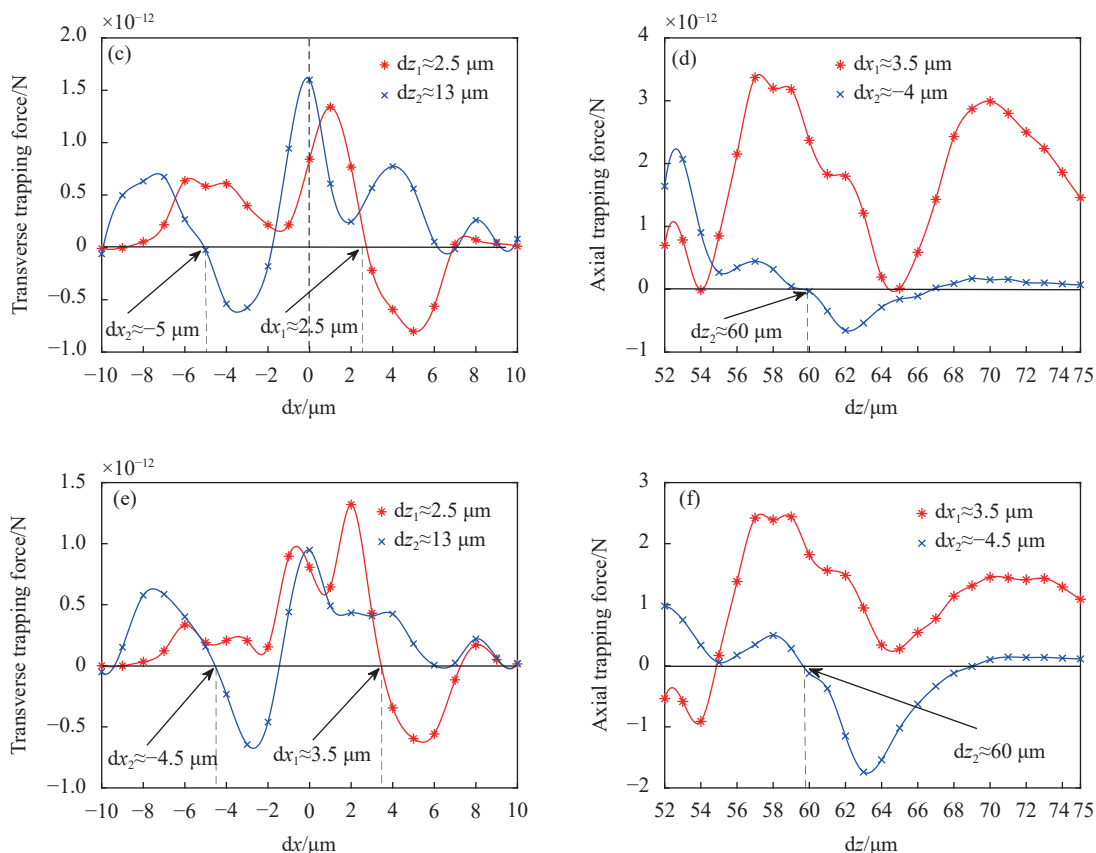


图 6 不同纤芯功率条件下微粒在光纤探针中受到的横向和轴向光阱力对比。(a)~(b) C1 为 1 W/m, C2 为 1 W/m; (c)~(d) C1 为 0.5 W/m, C2 为 1 W/m; (e)~(f) C1 为 1 W/m, C2 为 0.5 W/m

Fig.6 Comparison of transverse and axial optical trapping forces on particles in the fiber probe model under different core power conditions. (a)-(b) C1 is 1 W/m, C2 is 1 W/m ; (c)-(d) C1 is 0.5 W/m, C2 is 1 W/m; (e)-(f) C1 is 1 W/m, C2 is 0.5 W/m

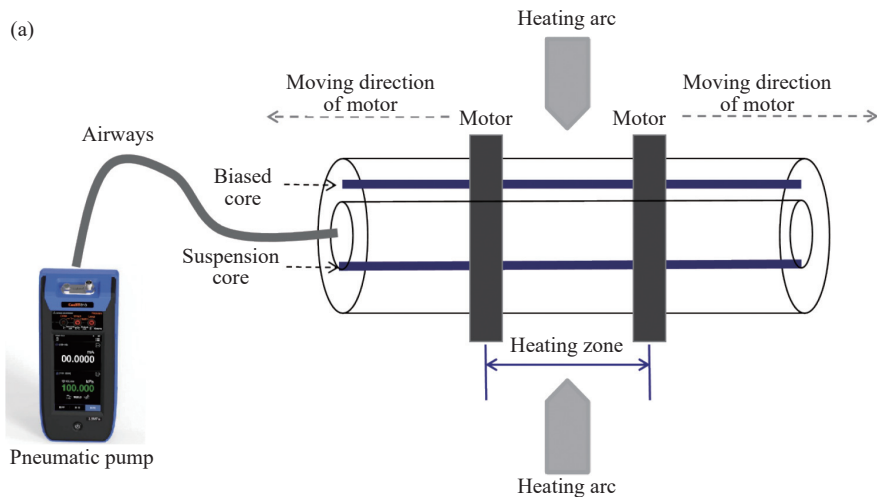
4 单孔悬挂芯光纤光镊的制备与性能测试

采用 CO₂ 激光熔融拉锥工艺结合气压控制实现了单孔光纤光镊探针的制作, 搭建了实验系统, 并利用制作的单孔悬挂芯光纤光镊探针对不同直径的微粒

完成了操控实验, 并分析了其微粒操控性能。

4.1 单孔悬挂芯光纤探针的制备

利用 CO₂ 激光熔融加热设备 (Fujikura, LZM-100) 与气压泵配合制备光纤探针的流程图如图 7(a)~



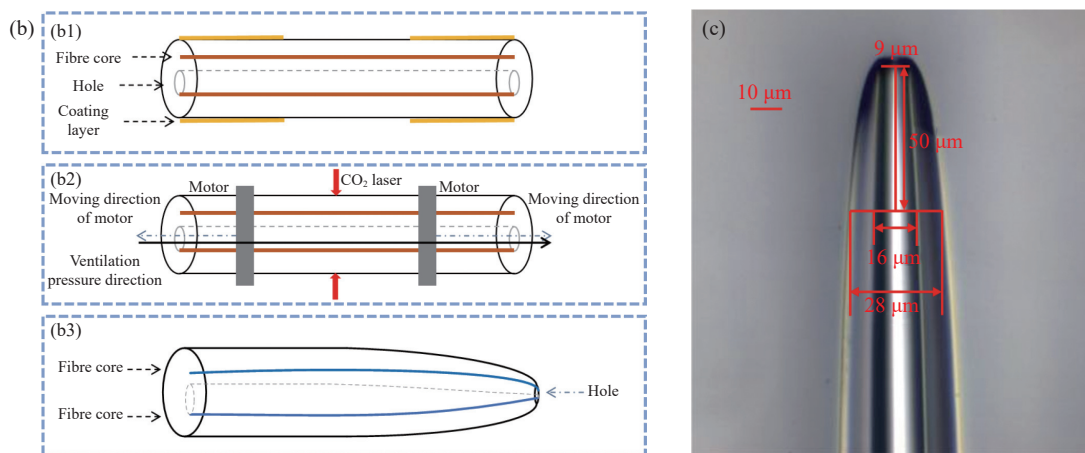


图 7 光纤光镊探针制备流程及探针实物图

Fig.7 Fiber optic tweezers probe preparation process and the photo of a prepared fiber optic tweezers probe

(b) 所示。将预处理后的单孔双芯偏芯悬挂芯光纤与气压泵进行固化相连,放入熔接机中。选取合适的气压通入光纤内中空孔,设置熔接机的通光功率、放电时间、马达方向与马达距离,进行探针制备。其中通光功率和气压是光纤探针结构的重要影响因素,因此根据仿真所得的适用于微粒操控的最佳单孔双芯偏芯悬挂光纤探针结构参数,选择熔接功率为 370 bit,气压值为 30 kPa。

4.2 实验系统的搭建

单孔双芯偏芯悬挂芯光纤光镊实验系统如图 8 所示。采用中心波长为 980 nm 的激光二极管配合激光控制器作为光源,输出功率 P 的调节范围为 0~200 mW。单孔双芯偏芯悬挂芯光纤探针置于三维精密位移台上,并将聚苯乙烯悬浮液滴在光纤探针上,通过三维位移台控制 x 、 y 、 z 三维方向上的移动,通过显微镜 (50×物镜镜头) 与 CCD 成像观测系统观

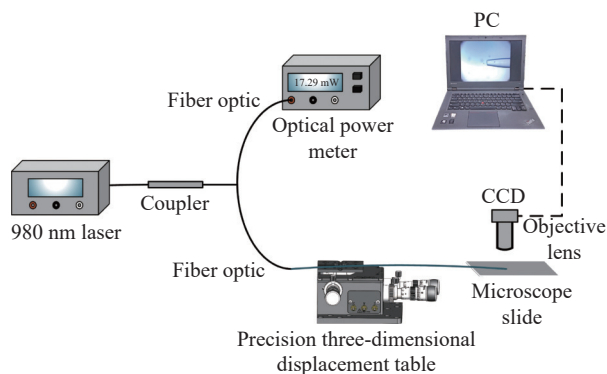


图 8 光纤光镊实验系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of fiber optic tweezers experimental system

察,并记录实验现象。

4.3 微粒操控实验

分别对直径为 2、5、10 μm 的聚苯乙烯微粒进行单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊微粒操控实验。

4.3.1 直径 10 μm 微粒操控实验

光镊探针捕获 10 μm 聚苯乙烯微粒并控制微粒移动的过程如图 9 所示。微粒受光阱力影响被捕获在探针尖端,通过三维精密位移台 y 方向旋钮移动光纤探针可以实现被捕获微粒向后移动,如图 9 (c)~(d) 所示。由此,直径为 10 μm 的聚苯乙烯微粒可以被类抛物线型单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊探针稳定捕获至光纤探针尖端。

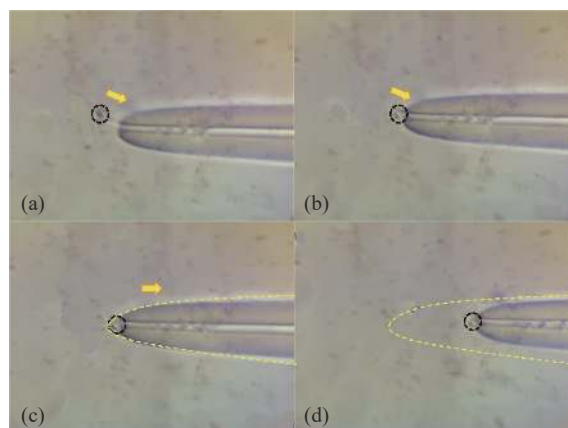


图 9 捕获 10 μm 直径的聚苯乙烯微粒。(a)~(b) 捕获聚苯乙烯微粒; (c)~(d) 操控移动聚苯乙烯微粒

Fig.9 Capture of 10 μm diameter polystyrene particles. (a)~(b) Capture of particles; (c)~(d) Manipulation of moving particles

4.3.2 直径 5 μm 微粒操控实验

直径为 5 μm 的微粒被捕获在光纤探针尖端, 捕获过程如图 10 (a)~(b) 所示。捕获微粒后, 通过三维位移台操控光纤探针可以实现被捕获微粒的沿光纤轴向或横向方向移动, 如图 10 (c)~(d) 所示。可以看到, 微粒捕获稳定。

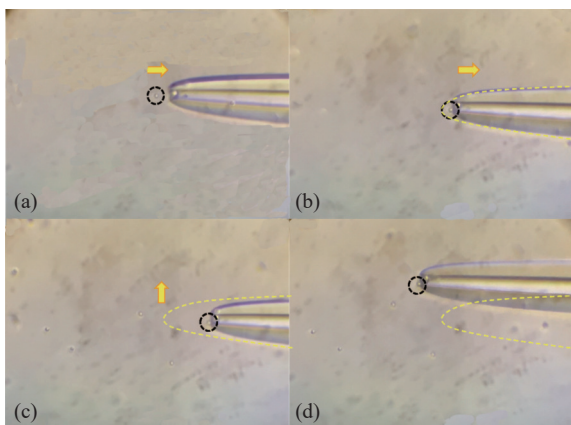


图 10 在探针尖端捕获 5 μm 直径的聚苯乙烯微粒。(a)~(b) 捕获聚苯乙烯微粒; (c)~(d) 操控移动聚苯乙烯微粒

Fig.10 Capture of 5 μm diameter polystyrene particles at the probe tip. (a)-(b) Capture of particles; (c)-(d) Manipulation of moving particles

对于 5 μm 直径的聚苯乙烯微粒, 类抛物线形单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊探针不仅可以实现探针尖端接触式捕获, 还可以实现非接触式捕获, 如图 11 所示。微粒在距光纤探针 3 μm 距离时慢慢停止移动直

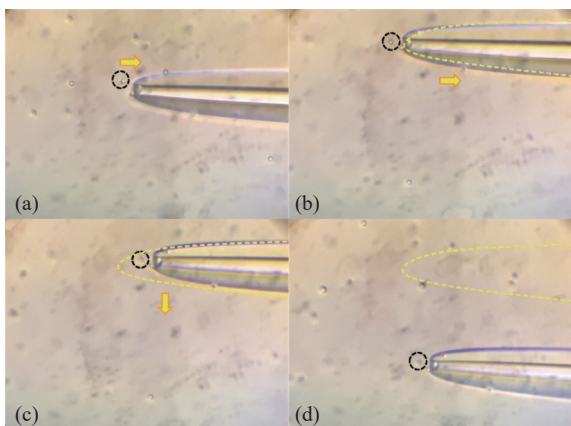


图 11 非接触式捕获 5 μm 直径的聚苯乙烯微粒。(a)~(b) 捕获聚苯乙烯微粒; (c)~(d) 操控移动聚苯乙烯微粒

Fig.11 Non-contact capture of 5 μm diameter polystyrene particles. (a)-(b) Capture of particles; (c)-(d) Manipulation of moving particles

至被捕获, 如图 11 (a)~(b) 所示。同样操控光纤探针向光纤轴向或横向方向移动, 被捕获微粒可以跟随光纤探针移动, 如图 11 (c)~(d) 所示。

当光纤光镊的光梯度力能够克服光散射力的作用时, 可实现微粒的捕获, 而当光梯度力无法克服光散射力时, 微粒会受光散射力作用沿光传播的方向运动, 表现为“弹射”。类抛物线形单孔悬挂光纤光镊探针也可以实现对直径为 5 μm 的聚苯乙烯微粒弹射功能, 如图 12 所示。将光纤探针移动至目标微粒附近, 此时微粒在光纤探针前方做无规则的布朗运动, 打开激光光源, 微粒受到光散射力作用, 被“弹射”出去。以黑色虚线圈内的微粒为目标微粒, 激光光源打开的时间 $t=0$ s, 图 12 (a)~(d) 分别为 0、0.2、0.4、0.6 s 时目标微粒的位置, 以蓝色虚线圈内的微粒作为对比, 可以看出目标微粒明显被“弹射”出去。

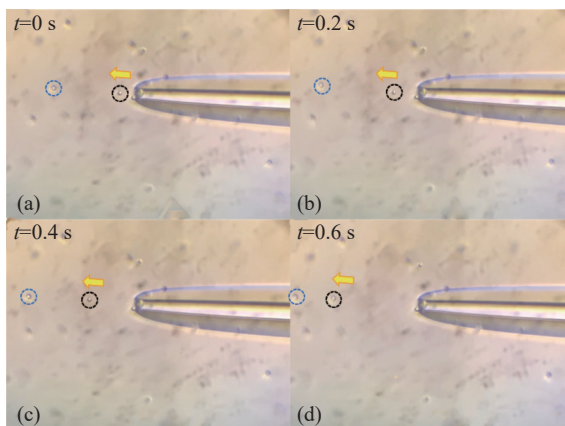


图 12 对 5 μm 直径的聚苯乙烯微粒实现弹射功能

Fig.12 Ejection of 5 μm diameter polystyrene particles

4.3.3 直径 2 μm 微粒操控实验

2 μm 直径的微粒受到光散射力的作用, 被“弹射”出去, 如图 13 所示。以蓝色虚线圈内的微粒做对比, 可以看出, 黑色虚线圈内的微粒在短时间 (0.2 s) 内, 明显被推离光纤探针附近, 实现弹射功能。

综上所述, 类抛物线形单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊探针可以实现对直径 2、5、10 μm 的聚苯乙烯微粒的操控, 不同直径的聚苯乙烯微粒光镊操控实验中所看到的捕获和弹射现象也同时验证了 3.2 节所述横向和轴向区域的光阱力分布规律。其中 2 μm 聚苯乙烯微粒可以实现微粒弹射功能, 5 μm 聚苯乙烯微粒可以实现尖端捕获和非接触式捕获, 一定距离还观察到

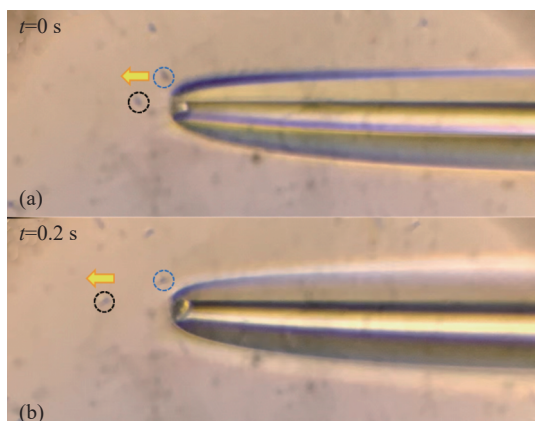


图 13 对 2 μm 直径的聚苯乙烯微粒实现弹射功能
Fig.13 Ejection of 2 μm diameter polystyrene particles

5 μm 聚苯乙烯微粒受到推力弹射的现象, 10 μm 的聚苯乙烯微粒则可以在探针尖端实现捕获。相比之下, 类抛物线型单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊对 5 μm 的聚苯乙烯微粒操控性能最佳, 理论上可以在不同位置实现不同的微粒操控功能, 选择直径较小(如 2 μm)的微粒或距离较远处则可以实现弹射功能。

5 结 论

文中根据单孔双芯偏芯悬挂光纤的结构特点, 提出了一种类抛物线型单孔双芯偏芯悬挂光纤探针结构。通过仿真探索了不同参量对光镊出射光场与光阱力的影响, 并制备了光镊探针, 对其操控微粒的特性进行了实验验证, 实现了结构简单的光镊对微粒的多样操控。9 μm 中空孔的类抛物线型单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊能够对直径为 2 μm、5 μm 以及 10 μm 的微粒实现不同操控, 其中对于 5 μm 直径的微粒, 既可实现捕获, 也可实现弹射, 操控性能最佳。经分析与验证, 类抛物线型单孔双芯偏芯悬挂光纤光镊为提高光纤光镊系统集成度开拓了新的可能, 并为光纤光镊在粒子操纵与分选等方向提供了一种新的思路, 具有重要研究意义。在悬挂芯光纤光镊的深入研究中, 对悬挂芯光纤结构的设计、材料参数的优化、工艺可靠性和成熟度都将值得深入探索。

参考文献:

[1] ASHKIN A, DZIEDZIC J M, BJORKHOLM J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Optics Letters*, 1986, 11: 288.

[2] BRANDON R, Pan Y L. Optical trap for both transparent and absorbing particles in air using a single shaped laser beam [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2798-2801.

[3] LI Y C, XIN H B. Living nanospear for near-field optical probing [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(11): 10703-10711.

[4] JIANG Chunlei, SHUI Huasheng, CHEN Peng, et al. Controllable manipulation of long-distance microparticles based on fiber optic tweezers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(13): 1555-1563. (in Chinese)

[5] ZHANG Yuquan, WU Xiaojing, WANG Yijia, et al. Monitoring SKOV3 cell apoptosis based on dynamic laser tweezers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1104001. (in Chinese)

[6] JIANG C L, WANG Y K, DONG T J, et al. Completely non-invasive cell manipulation in lens-integrated microfluidic devices by single-fiber optical tweezers [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(8): 2130-2133.

[7] GILLIBERT R, MAGAZZU A, CALLEGARI A, et al. Raman tweezers for tire and road wear micro- and nanoparticles analysis [J]. *Environmental Science-nano*, 2022, 9(1): 145-161.

[8] HU Chunguang, LI Enci, ZHAI Cong. et al. Progress in microspheric lens based super-resolution microscopic imaging technology with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210438. (in Chinese)

[9] NEUMAN K C, BLOCK S M. Optical trapping [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(9): 2787-2809.

[10] ZHU Y, YOU M, SHI Y, et al. Optofluidic tweezers: efficient and versatile micro/nano-manipulation tools [J]. *Micromachines*, 2023, 14(7): 1326.

[11] LI Hong, ZHU Yingxin, ZHOU Yani, et al. Advances in optical fiber tweezer technology based on hetero-core fiber [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1293-1304. (in Chinese)

[12] CAI Chen, ZHANG Yunhong. Application of optical tweezers technology in physical chemistry characterization of aerosol [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 641-655, 703. (in Chinese)

[13] MELZER J E, MCLEOD E. Assembly of multicomponent structures from hundreds of micron-scale building blocks using optical tweezers [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2021(3): 163-171.

[14] FILIPPI J, GIUSEPPE D, CASTI P, et al. Exploiting spectral information in opto-electronic tweezers for cell classification and drug response evaluation [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 368: 132200.

[15] GEROMEL R, RENNERICH R, ZENTGRAF T, et al.

- Geometric-phase metalens to be used for tunable optical tweezers in microfluidics [J]. *Liquid Crystals*, 2023, 50(7-10): 1193-1203.
- [16] HU Xin, ZHANG Wenpan, YIN Ruiguang, et al. Coupling efficiency and transmission mode of laser beam in tapered multimode fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 372-375. (in Chinese)
- [17] ZHANG Y, LI Y, ZHANG Y, et al. HACF-based optical tweezers available for living cells manipulating and sterile transporting [J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 563-566.

Design and particle manipulation of parabolic single-hole suspended-core fiber tweezers

LI Hong^{1,2}, NIU Tiansen¹, ZHOU Yani², XING Shimeng², Lou Xiaoping^{1,2,3*}

- (1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;
3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China)

Abstract:

Objective Fiber optic tweezers have characteristics of compactness, high integration capability, and excellent portability, rendering them advantageous in applications such as chemical analyses, biosynthesis, and drug delivery systems. Single-hole suspension core fiber naturally integrates fiber waveguide and microfluidic channel, which can not only capture particles but also store, transport, analyze, and detect particles such as cells or drug molecules if applied in fiber optic tweezers. However, fiber-optic tweezers typically necessitate integration with microchannels or microfluidic technologies to perform multidimensional manipulations like transportation and sorting. The manufacture of microfluidic devices is complicated, and microfluidic devices and optical fibers as mutually independent devices with low system optical coupling efficiency and integration. Therefore, a simpler more efficient, and highly integrated method for particle or cell manipulation and transport is needed. For this reason, this thesis carries out research on fiber optic tweezer technology based on single-hole suspension core fibers to address the key issue of particle manipulation by suspension core fibers with hollow hole structures.

Methods The particle manipulation principle of single-hole-suspended-core fiber optical tweezers is analyzed, the analytical model of single-hole-suspended-core fiber optical tweezers is established from the mechanism of the double-beam focused light field, the analytical calculation method of the light trapping force is determined, and the characteristics of single-hole-suspended-core fibers with symmetric and off-core structures are analyzed at the same time. A parabolic-shaped single-hole-suspended-core fiber optical tweezers probe is designed, and its simulation model is used to calculate the optical field and optical trapping force, analyze the energy distribution and the characteristics of the optical trapping force, and investigate the specific effects of the hollow aperture, particle size, and core power on the optical trapping force manipulation performance. A parabolic-shaped single-hole-suspended-core fiber probe with a diameter of 9 μm at the tip of the probe was prepared by the CO_2 laser melt-drawing cone method with pneumatic pressure control, and an experimental system was constructed to realize the manipulation experiments on polystyrene particles with diameters of 2 μm , 5 μm , and 10 μm .

Results and Discussions Simulations using Rsoft's Beamprop module were performed to analyze the optical field intensity distribution of single-hole-suspended-core fiber optical tweezers with different hollow apertures and core powers. The results show that increasing the hollow aperture enhances the light convergence effect

(Fig.2). A model was established based on this simulation to investigate the effects of hollow aperture diameter, particle size, and fiber core power on the force on the particles. It was found that, the large aperture facilitates the provision of stable transverse and longitudinal capture points (Fig.4); Large-diameter particles facilitate longitudinal capture, while transverse capture requires appropriately sized particles (Fig.5); And the power of the suspension core has a significant effect on the transverse and longitudinal optical trapping forces, while the bias core has a lesser effect on the optical trapping forces (Fig.6). Finally, through the preparation and experimental verification of optical tweezers probes, it was confirmed that this parabolic single-aperture, dual-core, bias-suspended fiber optic tweezers could effectively manipulate particles with diameters of 2 μm , 5 μm , and 10 μm , and in particular showed the best performance for the manipulation of 5 μm particles (Fig.12).

Conclusions A parabolic single-aperture dual-core biased suspended fiber probe structure is proposed. The structural parameters of the probe are optimized through simulation analysis, which significantly affects the optical tweezer optical field and capture force, and the optical tweezer probe is experimentally prepared, thus verifying that the probe can flexibly manipulate particles with diameters of 2 μm , 5 μm , and 10 μm . In particular, it demonstrates an excellent capture and ejection ability for 5 μm particles. These optical tweezers probe enhances the integration potential of fiber optic tweezers and brings new perspectives on particle manipulation and sorting technology, which is of great scientific value.

Key words: fiber optic tweezers; single-hole suspended-core fiber; parabolic shape; optical trap force; optical manipulation

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61903042); Beijing Scholars Program Research Project (BJXZ2021-012-00046)