

文章编号: 1005-5630(2025)01-0065-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202401300017

一阶涡旋角向偏振圆对称艾里光束对瑞利粒子光力的研究

朱仡谦, 耿滔

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 详细研究了一阶涡旋角向偏振圆对称艾里光束对瑞利颗粒的光力特性。轨道角动量的引入导致角向偏振光束焦平面自旋角动量局域化, 使得偏振奇点消失, 原先的暗焦斑变为亮焦斑。首先使用矢量瑞利-索末菲衍射积分, 计算分析了不同光束参数对矢量圆对称艾里光束的自聚焦特性影响。然后计算了玻璃微粒和气泡在焦点区域的散射力和梯度力分布, 分析了不同受力平衡位置的光阱刚度。研究结果表明, 矢量圆对称光束可以在纵向和横向上高效地束缚玻璃微粒, 光强要求远低于同等条件的高斯光束。对于气泡, 矢量圆对称光束只能保持纵向的束缚, 且对光强的要求要远大于玻璃微粒, 而同等条件的高斯光束无法束缚气泡。

关键词: 圆对称艾里光; 角向偏振; 微粒操作

中图分类号: O 436.1 **文献标志码:** A

Optical force of azimuthally polarized circular Airy beams with a first order vortex on Rayleigh particles

ZHU Yiqian, GENG Tao

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, the optical force characteristics of the azimuthally polarized circular Airy beams with a first order vortex on Rayleigh particles are studied in detail. The introduction of orbital angular momentum leads to the localization of the spin angular momentum in the focal plane of the azimuthally polarized beam. The polarization singularity disappears and the original dark focal spot becomes a bright focal spot. In this paper, the influence of different beam parameters on the auto-focusing characteristics of the circular airy beams was calculated and analyzed by using the vector Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral. Then, the scattering force and gradient force distribution of glass particles and bubbles in the focal area were calculated, and the trap stiffness at different force equilibrium positions was analyzed. The results show that the vector circularly Airy beams can efficiently confine glass particles in both longitudinal and transverse directions, with

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(61975125); 上海市自然科学基金(21ZR1443800)

第一作者: 朱仡谦(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光场调控。E-mail: 1309454963@qq.com

通信作者: 耿滔(1978—), 男, 教授, 研究方向为光场调控。E-mail: Gengtao@usst.edu.cn

much lower intensity requirements than Gaussian beams under the same conditions. For bubbles, the vector circularly Airy beams can only maintain the confinement in the longitudinal direction, and the intensity requirement is much larger than that of the glass particles, while the Gaussian beam with the same condition cannot confine the bubbles.

Keywords: circular Airy beam; azimuth polarization; particle manipulation

引 言

自 20 世纪 80 年代 Ashkin 发明光镊以来, 光镊已被应用于许多领域, 成为研究生物细胞、DNA 分子和其他粒子不可或缺的工具^[1]。传统光镊一般由高斯光束 (Gaussian beam, GB) 构成, 聚焦高斯光束的梯度力会将粒子稳定地困在束腰处^[2]。许多研究都表明一些其他光束也可以用于光学操作, 比如拉盖尔高斯光可以在多平面对粒子进行捕获^[3-4]。此外, 柱矢量光束、洛伦兹-高斯光束等对微粒的辐射力也有相关的研究报告^[5-6]。

将一维艾里光束做径向对称处理可以获得圆对称艾里光 (circular Airy beam, CAB)^[7]。它是一种特殊的自聚焦光束, 在自由空间中传播时, 由于保持了艾里光束的自加速特性, 光场能量沿抛物面汇聚于焦点, 因此 CAB 能一直保持极低的光强直到焦点前, 而在焦点处的光强会突然增大到之前的数十倍甚至上百倍^[8-10]。与普通聚焦光束相比, CAB 在到达预定的治疗区域前 (即焦点位置) 能保持极低的光强分布, 不会对其传播路径上的健康细胞造成损伤, 从而能实现精准定点治疗的效果, 可应用于激光手术治疗和光动力治疗等领域^[7]。CAB 还具有“相位记忆”特性。Fedorov 等^[11]发现 CAB 在非线性质介质中产生的高阶谐波能与基波保持相同的相位分布, 这一特性在非线性质光学中有着广阔的应用前景。此外, CAB 的焦点位置在较长一段距离内变化时, 其焦点的体积元素特征, 包括形状和尺寸等都能几乎保持不变, 因此 CAB 可应用于激光直写三维微结构加工技术。与聚焦高斯光束相比, 使用 CAB 能够加工出质量更高的微纳器件^[12]。

在 CAB 的众多应用领域中, 光学操控是最受关注的一个。CAB 由于在焦点处的光强突变会产生极大的光学梯度力, 因此被认为在光学微

操作领域具有无可替代的先天优势。2011 年, Zhang 等^[13]首先通过实验验证了 CAB 能够高效地捕获和引导微粒。2013 年, Jiang 等^[14]理论研究了 CAB 对瑞利粒子的光力特性, 发现 CAB 的光阱刚度要远大于高斯光束。2019 年, Lu 等^[15]理论研究了 CAB 对米颗粒的光力特性, 发现 CAB 同样可以有效地操控米颗粒。2022 年, Shou 等^[16]使用 CAB 实现了在较大范围内操控颗粒的运动。

然而目前 CAB 的光力研究仅针对标量光束, 对矢量 CAB 光力的研究还未有报道。因此本文详细研究了一阶涡旋角向偏振 CAB 的自由空间传播特性以及其对瑞利颗粒的光力特性, 发现矢量 CAB 同样可以高效地对瑞利颗粒进行操控, 效率远大于普通高斯光束。

1 自聚焦性质

角向偏振光由于光轴上存在偏振奇点, 因此聚焦后焦斑呈中空分布。当引入一阶涡旋相位后, 由于轨道角动量的引入使得焦斑的自旋角动量发生了局域化现象, 因此暗焦斑变为亮焦斑, 在紧聚焦条件下, 其焦斑横向尺寸甚至小于纵向分量占主导地位的径向偏振光焦斑^[17]。

涡旋角向偏振圆对称艾里光束的电场分布可表示为

$$E(r, \theta) = A(r) \exp(im\theta) \hat{e}_\theta \quad (1)$$

式中: m 为拓扑荷数; $A(*)$ 为切趾艾里函数, 可表示为^[7]

$$A(r) = \text{Ai}\left(\frac{r_0 - r}{w}\right) \exp\left[\alpha\left(\frac{r_0 - r}{w}\right)\right] \quad (2)$$

式中: r_0 为主光环半径; w 为比例因子, 决定了光环的疏密程度; α 为指数衰减因子, 决定了艾里函数的衰减速度, 如图 1(a) 所示。当 r_0 足

够大时, CAB 在自由空间传播表现出突然的自动聚焦特性, 该特性来源于艾里函数的自加速。

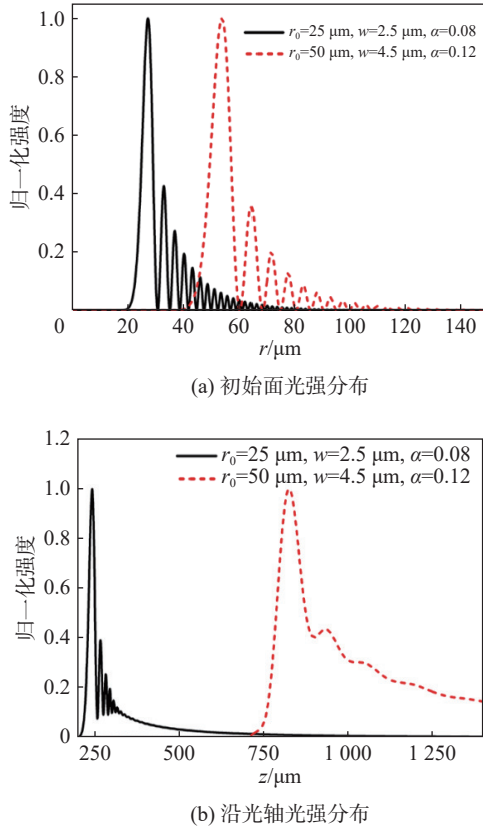


图 1 不同参数的一阶涡旋角向偏振 CAB 的光强分布
Fig. 1 The intensity distribution of first order vortex angular polarization CAB with different parameters

角向偏振光束的自由空间传播可由瑞利-索末菲衍射积分计算获得^[18]

$$E_r(\rho, \phi, z) = -(-i)^m \frac{imz}{\rho \sqrt{z^2 + \rho^2}} \exp(ik \sqrt{z^2 + \rho^2}) \exp(im\phi) \int A(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\sqrt{z^2 + \rho^2}}\right) J_m\left(\frac{k\rho r}{\sqrt{z^2 + \rho^2}}\right) dr \quad (3)$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = (-i)^m \frac{kz}{2(z^2 + \rho^2)} \exp(ik \sqrt{z^2 + \rho^2}) \exp(im\phi) \int A(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\sqrt{z^2 + \rho^2}}\right) \left[J_{m-1}\left(\frac{k\rho r}{\sqrt{z^2 + \rho^2}}\right) - J_{m+1}\left(\frac{k\rho r}{\sqrt{z^2 + \rho^2}}\right) \right] r dr \quad (4)$$

式中 k 代表波数。由于此时光束传播仍在傍轴范围内, 纵向 z 分量远远小于横向分量, 所以忽略

不计。图 1(b) 分别给出了不同参数的一阶涡旋角向偏振 CAB 的光轴光强分布, 在本文的计算中 $m=1$ 。从图 1 中可以看到, 矢量 CAB 也保持了突然自聚焦特性, 在焦点处的光强突增。

图 2 给出了 CAB 参数 r_0 , w , α 对光束自聚焦特性的影响。为了便于比较, 不同参数下初始面光场能量设为 1。参数 α 控制艾里函数的振荡衰减速度, α 越小衰减速度越慢, 外环光圈数量增多。从图 2(a) 可知, α 的变化对自聚焦焦距几乎不产生影响, 这表明焦距主要由主光环决定, 受外环光圈影响很小; 从图 2(d) 可知, 焦斑尺寸会随着 α 的增加而增大, 这是由于随着 α 的增加, 光束的高频分量减少, 使得焦斑变大。焦点峰值也相应随 α 的增加而减小, 如图 2(g) 所示。

参数 r_0 决定了主光环的位置, 从图 2(b), 图 2(e) 可知, 焦距随着 r_0 的增大而增大, 与之相反, 焦斑尺寸随 r_0 的增大而减小, 但当 r_0 增大到一定数值后, 焦斑尺寸基本保持不变, 不再随着 r_0 的增大而减小。由图 2(h) 可知, 焦点光强峰值随 r_0 的增大而减小。

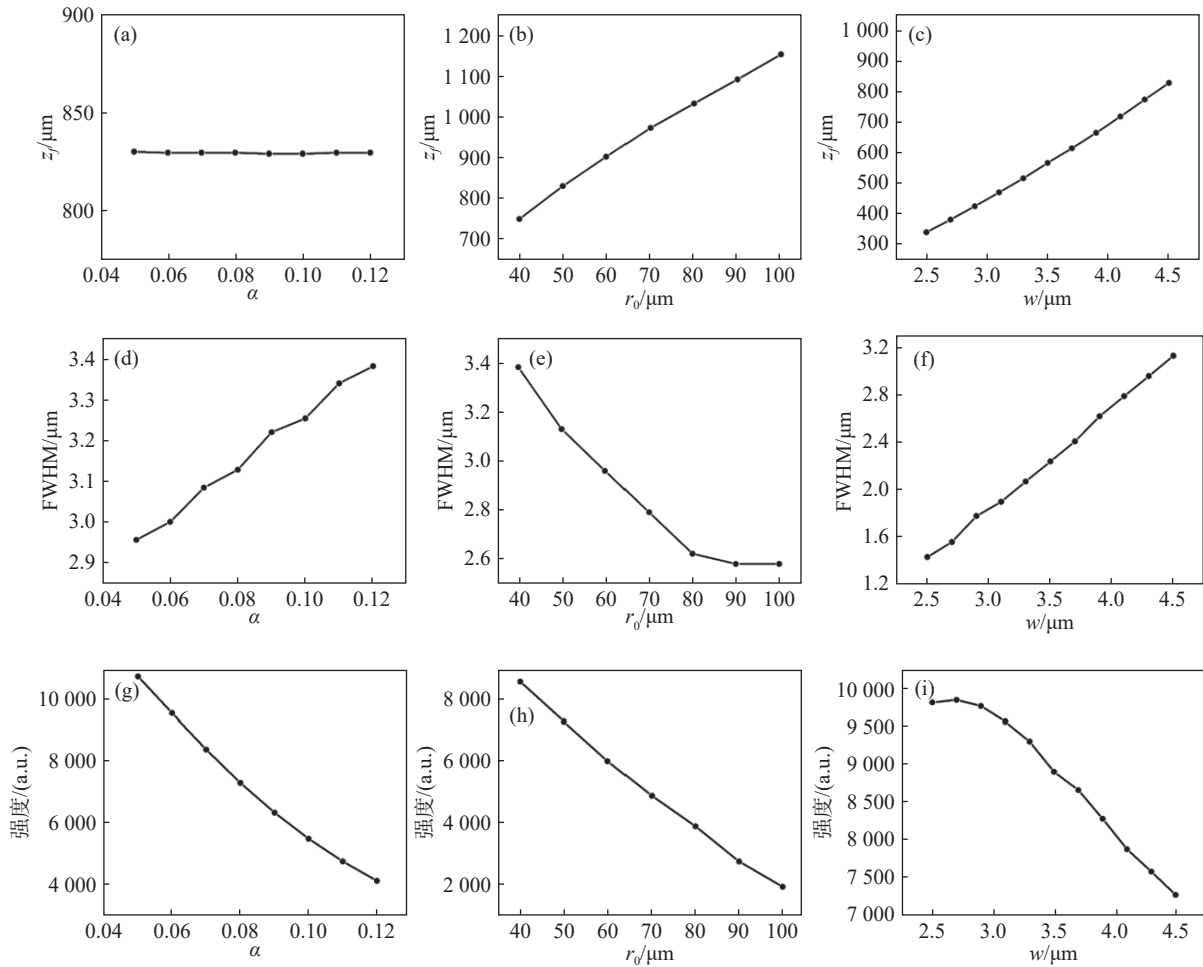
参数 w 控制了光环的疏密程度, w 越小, 光环分布越密, 频谱中高频分量越多。从图 2(c), 图 2(f) 可知, 焦距与焦斑尺寸都随着 w 的增大而单调递增。相应的, 焦点光强峰值随 w 的增大而递减, 如图 2(i) 所示。从图 2 中可以看到, 参数 w 对光束焦距特性的影响远大于 α 和 r_0 。与标量 CAB 的空间传播特性相比^[7], 一阶涡旋角向偏振 CAB 自聚焦性质随不同参数的变化趋势与标量光束一致, 这说明涡旋相位的引入以及偏振态的改变对 CAB 的自聚焦性质影响较小。由于参数 w 对光束自聚焦性质的影响是最大的, 本文只讨论 w 的改变对光场力的影响。

2 瑞利颗粒的辐射力

瑞利介电粒子可以看做光场中的电偶粒子。极化率 β 为^[19]

$$\beta = 4\pi R^3 \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{\varepsilon_p + \varepsilon_m} \quad (5)$$

式中: R 为粒子半径; ε_p 和 ε_m 分别为粒子和所



(a) 焦距随 α 的变化曲线 ($w = 4.5 \mu\text{m}$; $r_0 = 50 \mu\text{m}$); (b) 焦距随 r_0 的变化曲线 ($\alpha = 0.08$, $w = 4.5 \mu\text{m}$); (c) 焦距随 w 的变化曲线 ($\alpha = 0.08$, $r_0 = 50 \mu\text{m}$); (d) 焦斑半高全宽随 α 的变化曲线 ($w = 4.5 \mu\text{m}$, $r_0 = 50 \mu\text{m}$); (e) 焦斑半高全宽随 r_0 的变化 ($\alpha = 0.08$, $w = 4.5 \mu\text{m}$); (f) 焦斑半高全宽随 w 变化 ($\alpha = 0.08$, $r_0 = 50 \mu\text{m}$); (g) 焦点峰值光强随 α 的变化 ($w = 4.5 \mu\text{m}$, $r_0 = 50 \mu\text{m}$); (h) 焦点峰值光强随 r_0 的变化 ($\alpha = 0.08$, $w = 4.5 \mu\text{m}$); (i) 焦点峰值光强随 w 的变化 ($\alpha = 0.08$, $r_0 = 50 \mu\text{m}$)

图 2 不同参数变化对一阶角向偏振 CAB 自聚焦性质的影响

Fig. 2 Effects of different parameters on the self-focusing properties of first order vortex angular polarization CAB

处环境介质的介电函数。由此可以进一步推导出粒子的梯度力 F_g 和散射力 F_s [20]

$$F_g = \frac{1}{4} \epsilon_0 \epsilon_m \text{Re}(\beta) \nabla |E^2| \quad (6)$$

$$F_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_m^3 k_0^4}{12\pi} |\beta^2| |E^2| \quad (7)$$

式中： ϵ_0 为真空的介电常数； k_0 为真空波数。在以下计算中设微粒为球形，半径 $R = 40 \text{ nm}$ 。玻璃微粒的折射率 $n_p = 1.59$ ，环境介质为空气，折射率 $n_m = 1$ 。在可见光波段有 $\epsilon_p = n_p^2$ 和 $\epsilon_m = n_m^2$ 。计算时保持参数 $\alpha = 0.08$ ， $r_0 = 50 \mu\text{m}$ ， $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 不变。为了排除峰值强度大小因素的干

扰，单独比较光强分布对微粒所受辐射力的影响，以便于比较，在以下计算中设焦平面峰值光强为 1。

2.1 玻璃颗粒

图 3 给出了玻璃微粒在 $w = 2.5 \mu\text{m}$ 时的横向与纵向辐射力的分布，从图 3(a) 和图 3(b) 可知，当 $w = 2.5 \mu\text{m}$ 时，纵向梯度力大于散射力，但处于一个数量级，图 3(c) 的纵向合力主要取决于梯度力。粒子可以在纵向梯度力的作用下，在 $z_a = 338 \mu\text{m}$ 处被捕获，由于散射力的影响， z_a 的位置从焦点略微向前移动。梯度力沿光轴振荡，所以后续存在多个平衡位置，例如在 z_b 位

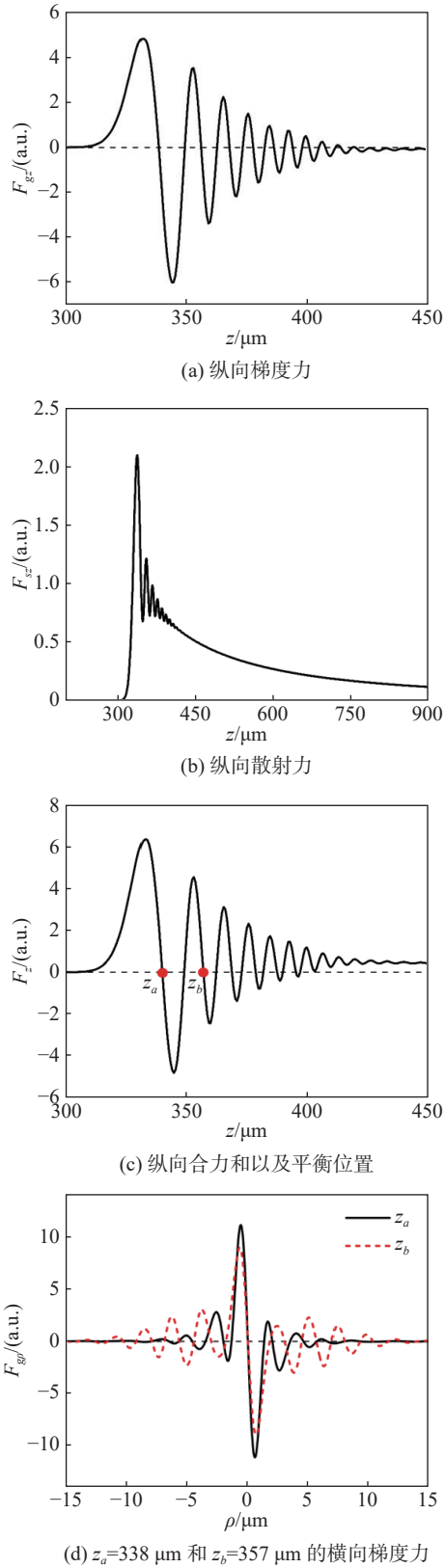


图 3 $n_p=1.59$, 光束参数 $w=2.5 \mu\text{m}$ 时玻璃微粒的受力情况

Fig. 3 The force of glass particles with $n_p=1.59$, $w=2.5 \mu\text{m}$

置也可被捕获。图 3(d)分别给出了 z_a 和 z_b 位置的横向梯度力, 从图中可以看到, 在 z_a 和 z_b 位置都可以有效地约束住微粒的横向位置。 z_a 位置由于更靠近焦点, 其势阱刚度明显大于 z_b 位置。

图 4 给出了 $w=4.5 \mu\text{m}$ 时玻璃粒子的受力情况, 其他计算参数与图 3 相同。通过对比图 3 和图 4 可以看出, 随着 w 的增大平衡位置向远离初始面的方向移动, 这是由于 w 的增大会让光束的焦距增大, 平衡位置跟随焦点位置移动, 如图 1(c) 所示。从粒子的受力情况来看, w 的增大对粒子的纵向散射力峰值的影响较小, 但使得纵向梯度力大幅减小, 因此纵向合力中散射力的影响随着 w 的增大而增加, 如图 4(c) 所示。这是由于随着 w 的增大, 焦斑区域的突然自聚焦性和焦斑尺寸都随之下落, 使得纵向梯度力和横向梯度力都有较大幅度的减小。因此, 为了增强光阱刚度, 应尽量选择 w 较小的光束作为光源。但另一方面, w 的减小会增加光束产生难度, 且 w 的取值过小反而会降低自聚焦性能^[21]。

2.2 气泡

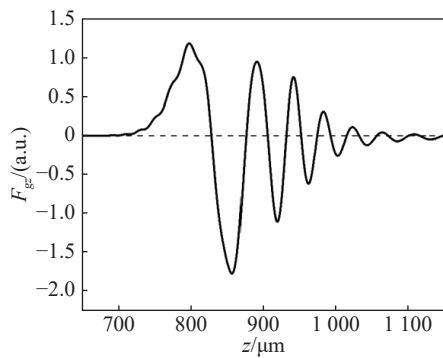
图 5 给出了气泡 $n_p=1$ 在水中 ($n_m=1.33$) 时的受力情况。与玻璃粒子受力相比, 纵向散射力明显增大, 如图 3(b) 和图 5(b) 所示, 这使得平衡位置的光阱刚度下降, 如图 3(c) 和图 5(c) 所示。从图 5(d) 中可知, 纵向平衡位置 z_a 和 z_b 并不是横向平衡位置, 即不能在横向方向将气泡限制在光轴位置, 而是会发生横向运动。

3 捕获稳定性分析

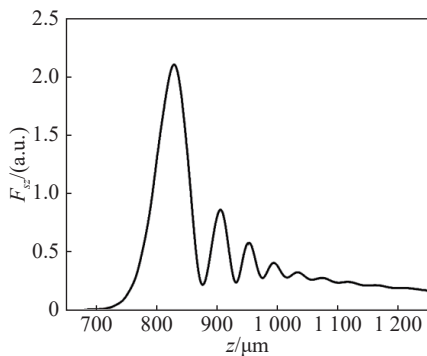
要使光阱可以稳定捕获粒子需满足几个必要条件。首先, 向后的纵向梯度力必须大到足以克服向前的散射力, 存在纵向平衡位置。从图 3 至图 5 可知, 无论是玻璃微粒还是气泡, 这一条件是可以满足的。然后, 光阱的约束力必须能够大到克服微粒的重力与浮力的影响, 并大于由热运动导致的布朗力。最大布朗力可表示为^[16]

$$F_b = \sqrt{12\pi\eta Rk_B T} \quad (8)$$

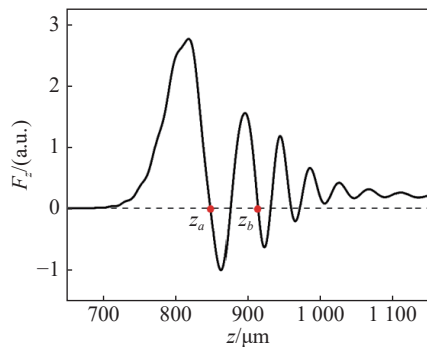
式中: η 为环境介质的动力学粘度, 空气和水分



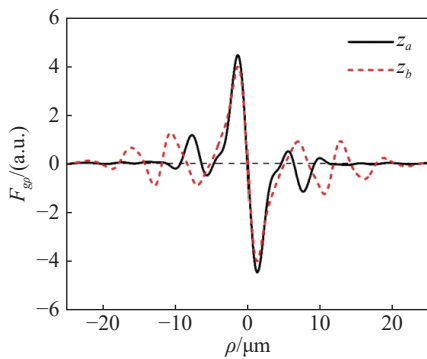
(a) 纵向梯度力



(b) 纵向散射力



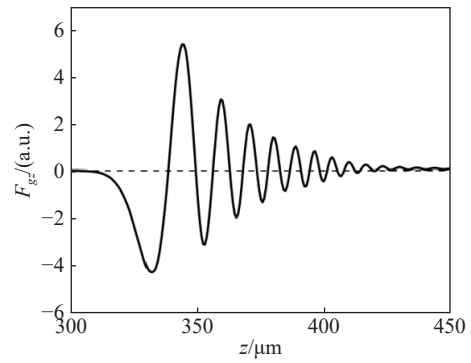
(c) 纵向合力和以及平衡位置



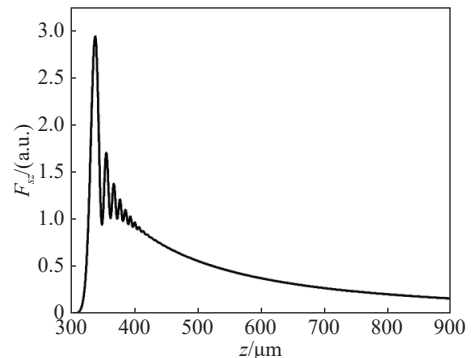
(d) $z_a=833 \mu\text{m}$ 和 $z_b=908 \mu\text{m}$ 的横向梯度力

图 4 $n_p=1.59$, 光束参数 $w=4.5 \mu\text{m}$ 时玻璃微粒的受力情况

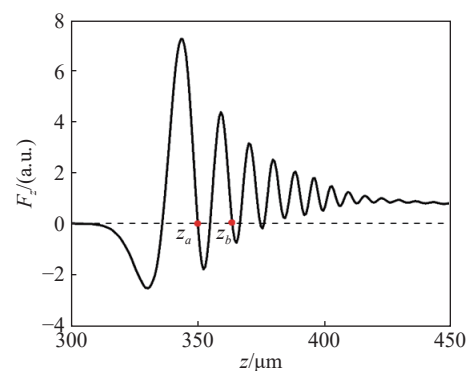
Fig. 4 The force of glass particles with $n_p=1.59$, $w=4.5 \mu\text{m}$



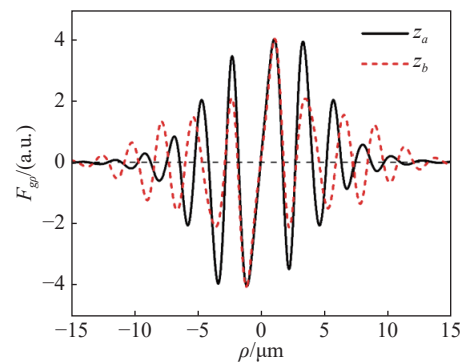
(a) 纵向梯度力



(b) 纵向散射力



(c) 纵向合力和以及平衡位置



(d) $z_a=350 \mu\text{m}$ 和 $z_b=362 \mu\text{m}$ 的横向梯度力

图 5 $n_p=1$, 光束参数 $w=2.5 \mu\text{m}$ 时气泡的受力情况

Fig. 5 The force of bubble particles with $n_p=1$, $w=2.5 \mu\text{m}$

别为 $1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $8 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ k_B 为玻尔兹曼常数; T 为环境温度, 本文取常温 $T = 300 \text{ K}$ 。由式(8)计算可知, 当微粒半径 $R = 40 \text{ nm}$ 时, 空气中的玻璃微粒和水中的气泡, 其最大布朗力分别为 0.34 fN 和 2.24 fN 。而微粒的重力和浮力约在 10^{-3} fN 量级, 远小于最大布朗力, 可忽略不计。

当 $w = 2.5 \mu\text{m}$ 时, 对于玻璃微粒, 矢量 CAB 在纵向平衡位置 z_a 能克服最大布朗力, 焦点光强峰值需要约 $9 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ 。而要满足 z_b 也能克服最大布朗力, 焦点光强峰值则需要约 $12.6 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ 。由于横向梯度力大于纵向梯度力, 因此满足纵向束缚要求也能满足横向束缚要求。对比同等条件的高斯光束, 焦点光强峰值则要达到约 $56.7 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ 。

对于气泡, 横向方向无法将气泡束缚在光轴。这是由于此时横向梯度力与位移同向, 如图 5(d) 所示, 因此气泡在光轴位置处会受到一个推力作用, 使其远离光轴。通常横向束缚低折射率粒子需要构造暗焦斑。在纵向方向, z_a 和 z_b 位置能克服最大布朗力, 焦点光强峰值分别需要约 $126 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ 和 $207 \text{ W}/\mu\text{m}^2$, 远大于玻璃微粒的要求。而同等条件的高斯光束, 其梯度力无法克服散射力, 因此无平衡位置, 无法束缚气泡。

4 结 论

本文首先讨论了一阶涡旋角向偏振 CAB 的自由空间传播特性, 发现其仍然保持了标量 CAB 的突然自聚焦特性, 且自聚焦特性与标量 CAB 类似。这说明涡旋相位的引入以及偏振态的改变对 CAB 的自聚焦性质影响很小。接下来, 本文讨论了矢量 CAB 对瑞利球形颗粒的捕获能力。研究表明, 矢量 CAB 在沿光轴的若干不同位置均可以捕获玻璃微粒和气泡。但对于气泡, 矢量 CAB 无法在横向方向将其束缚在光轴位置。最后, 本文讨论了矢量 CAB 的光阱刚度问题, 发现纵向束缚气泡的要求远大于束缚玻璃微粒的要求, 再次证明低折射率微粒更难被束缚。

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(5): 288 – 290.
- [2] HARADA Y, ASAKURA T. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime[J]. *Optics Communications*, 1996, 124(5/6): 529 – 541.
- [3] BAUMGARTL J, MAZILU M, DHOLAKIA K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 675 – 678.
- [4] HE H, FRIESE M E J, HECKENBERG N R, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(5): 826 – 829.
- [5] ZHAO C L, CAI Y J, LU X H, et al. Radiation force of coherent and partially coherent flat-topped beams on a Rayleigh particle[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1753 – 1765.
- [6] LIU Z R, ZHAO D M. Radiation forces acting on a Rayleigh dielectric sphere produced by highly focused elegant Hermite-cosine-Gaussian beams[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2895 – 2904.
- [7] EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N. Abruptly autofocusing waves[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4045 – 4047.
- [8] 崔省伟, 陈子阳, 胡克磊, 等. 部分相干 Airy 光束及其传输的研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094205.
- [9] QIAN J, LIU B Y, SUN H X, et al. Broadband acoustic focusing by symmetric Airy beams with phased arrays comprised of different numbers of cavity structures[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 114304.
- [10] 张泽, 刘京郊, 张鹏, 等. 多艾里光束合成自聚焦光束的实验实现 [J]. *物理学报*, 2013, 62(3): 034209.
- [11] FEDOROV V Y, PAPAOGLOU D G, TZORTZAKIS S. Transformation of ring-Airy beams during efficient harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 2974 – 2977.
- [12] MANOUSIDAKI M, PAPAOGLOU D G, FARSARI M, et al. Abruptly autofocusing beams enable advanced multiscale photo-polymerization[J]. *Optica*, 2016, 3(5): 525 – 530.
- [13] ZHANG P, PRAKASH J, ZHANG Z, et al. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2883 – 2885.

- [2] 巩立. 新型 PSD 光电自准直仪的研发 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [3] 郭梁, 张晓庆, 昌明, 等. 基于 PSD 的新型光电自准直仪的研究 [J]. 物联网技术, 2019, 9(2): 65 – 67.
- [4] 董彦维, 贾军强, 万琦, 等. 一种高精度线阵 CCD 二维自准直仪四狭缝目标中心的定位方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2016(1): 81 – 84.
- [5] ARP T B, HAGEDORN C A, SCHLAMMINGER S, et al. A reference-beam autocollimator with nanoradian sensitivity from mHz to kHz and dynamic range of 10^7 [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9): 095007.
- [6] 杨子煜. 光电自准直仪图像传感器控制技术的研究 [D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
- [7] 王韵竹. 光电自准直仪光学系统设计与技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [8] 吴晨光, 沈小燕. 基于 F-P 微小角度测量原理的装置设计与实验研究 [J]. *中国计量大学学报*, 2023, 34(3): 342 – 347.
- [9] 李永刚, 姜苏洋, 冯伟利, 等. 光电自准直经纬仪水平角测量误差分析 [J]. *宇航计测技术*, 2022, 42(2): 43 – 49.
- [10] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 37 – 39.
- [11] 宋敏, 陈尘, 黄博. 一种便携式光电自准直系统设计 [J]. *长江信息通信*, 2021, 34(2): 132 – 134, 137.
- [12] 李湘宁, 贾宏志, 张荣福, 等. 工程光学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 23 – 27.
- [13] 吴中华. 发射车专用光电自准直仪光学系统研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [14] 安正杰. 高精度二维自准直仪研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [15] 李小明, 朱国帅, 郭名航, 等. 基于光学自准直的旋转轴平行度测量与不确定度分析 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(5): 20220794.
- [16] 王晔, 于建楠, 周志炜. 二维光电自准直仪中分划板研究 [J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(12): 24 – 26, 29.
- [17] 沈亮, 朱世鸿, 梁秀玲. 用于电晕检测的日盲紫外光学系统设计 [J]. *光学仪器*, 2023, 45(4): 40 – 46.
- [18] 徐苗, 梁秀玲. 中长焦透射式日盲紫外光学系统设计 [J]. *光学仪器*, 2017, 39(2): 43 – 47.

(编辑: 张 磊)

(上接第 71 页)

- [14] JIANG Y F, HUANG K K, LU X H. Radiation force of abruptly autofocusing Airy beams on a Rayleigh particle [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24413 – 24421.
- [15] LU W L, SUN X, CHEN H J, et al. Abruptly autofocusing property and optical manipulation of circular Airy beams [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(1): 013817.
- [16] SHOU Q, KUANG W H, LIU M H, et al. Two dimensional large-scale optical manipulation of microparticles by circular Airy beams with spherical and oblique wavefronts [J]. *Optics Communications*, 2022, 525: 128561.
- [17] 蒋驰, 耿滔. 角向偏振涡旋光的紧聚焦特性研究以及超长超分辨光针的实现 [J]. *物理学报*, 2023, 72(12): 124201.
- [18] KOTLYAR V V, KOVALEV A A. Nonparaxial propagation of a Gaussian optical vortex with initial radial polarization [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(3): 372 – 380.
- [19] DIENEROWITZ M, MAZILU M, DHOLAKIA K. Optical manipulation of nanoparticles: a review [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2008, 2(1): 021875.
- [20] DRAINE B T. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains [J]. *Astrophysical Journal*, 1988, 333: 848.
- [21] 邓攀, 刘正楠, 耿滔. 具有精细结构的圆对称爱里光束的传输特性研究 [J]. *光学仪器*, 2019, 41(4): 48 – 53.

(编辑: 张 磊)