

引用格式: ZHANG Yanan, LI Manman, YAN Shaohui, et al. Force and Torque Analysis of Micro-sized Particles in Perfect Optical Vortex Beams[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3):0308002

张亚楠, 李曼曼, 严绍辉, 等. 完美涡旋光中微米级粒子的受力与力矩特性分析[J]. 光子学报, 2021, 50(3):0308002

完美涡旋光中微米级粒子的受力与力矩特性分析

张亚楠^{1,2}, 李曼曼¹, 严绍辉¹, 周源^{1,2}, 李星^{1,2}, 姚保利^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于紧聚焦方法在几何焦平面处获得了完美涡旋光场, 理论分析了该光场中微米级尺寸微粒受到的光学力与轨道矩。结果表明, 该完美涡旋光可以在横平面上捕获微粒并驱动其绕光轴做轨道旋转运动, 微粒受到的轨道矩随着拓扑荷的增大先增大后趋近于稳定。此外, 分析了圆偏振、径向偏振和方位角偏振完美涡旋光对微粒施加的光学力和轨道矩。结果表明完美涡旋光的偏振态在一定程度上会影响微粒的轨道运动, 圆偏振完美涡旋光更适合用于诱导微粒轨道旋转。

关键词: 光学捕获; 偏振态; 完美涡旋光; 光学力; 轨道矩

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215003.0308002

Force and Torque Analysis of Micro-sized Particles in Perfect Optical Vortex Beams

ZHANG Yanan^{1,2}, LI Manman¹, YAN Shaohui¹, ZHOU Yuan^{1,2}, LI Xing^{1,2}, YAO Baoli^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the tightly focusing approach, the perfect optical vortex beams are generated at the geometric focal plane. The optical forces and torques exerted on the micro-sized particle in the perfect optical vortex beams are calculated. Numerical results show that the micro-sized particle is trapped on the ring of perfect optical vortex beams and is driven to rotate around the optical axis. The orbital torque will firstly increase and then tends to be stable with the increase of the topological charge value. In addition, the influence of circular polarization state, radial polarization state and azimuthal polarization state on the force and orbital torque of micro-sized particles are investigated in perfect optical vortex beams. The results show that the state of polarization of perfect optical vortex beams will affect the optically induced orbital motion to some extent. The circular polarization state of perfect optical vortex beams is superior to drive the orbital motion of the particle.

Key words: Optical trapping; Polarization state; Perfect optical vortex beams; Optical force; Orbital torque

OCIS Codes: 080.4865; 020.7010; 260.5430; 260.1960

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11974417, 11904395)

第一作者: 张亚楠(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光场微操纵理论。Email: zhangyanan2017@opt.cn

导师(通讯作者): 姚保利(1968—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为显微成像技术和光学微操纵技术。Email: yaobl@opt.ac.cn

收稿日期: 2020-09-24; 录用日期: 2020-11-04

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

自 ASHKIN A^[1]首次利用单光束捕获微米级粒子以来,光镊技术因其在操纵领域具有非接触和非侵入的特点,引起了人们的广泛关注^[2]。随着特殊光场的兴起,光镊技术对粒子的操纵手段逐渐多样化^[3-7]。偏振态空间变化的矢量光场在粒子的捕获与操纵上具有很大的优势。径向偏振(Radial Polarization, RP)光束不但可以实现对金属瑞利粒子的三维捕获,而且具有很好的轴向捕获效率,而方位角偏振(Azimuthal Polarization, AP)光束在横向捕获上具有一定优势^[8-9]。紧聚焦的偏振态角向变化矢量光束可以实现多个微粒的同时捕获并沿角向自旋,而偏振态径向变化矢量光束的紧聚焦场能够对手性纳米微粒进行对映选择性光学捕获^[10-11]。因此,不同偏振态光束对微粒的捕获与操纵存在差异。

拥有螺旋波前且携带轨道角动量的涡旋光束与介电微粒相互作用时能够将轨道角动量传递给微粒而使其旋转^[12],因而在光学微操纵上得到广泛应用^[13-17]。涡旋光束的偏振态和拓扑荷对驱动粒子做轨道运动有一定的影响^[18]。涡旋光束的环半径对拓扑荷有很强的依赖性,对于高阶拓扑荷的涡旋光束,其较大的环半径严重影响了其在光学微操纵领域的应用。2013年 OSTROVSKY A S等^[19]首次提出了完美涡旋光(Perfect Optical Vortex, POV)的概念。完美涡旋光束的理想模型是其环半径随着拓扑荷的增大而不发生变化,其复振幅可以用一个带有涡旋相位的 δ 函数表示。近年来完美涡旋光的研究得到迅速的发展,包括完美涡旋光的产生方法、光场调控和应用等。VAITY P等^[20]通过对贝塞尔光束的傅里叶变换,在其焦面上获得了完美涡旋光场。KOTLYAR V V等^[21]利用最优化相位光学元件以获取最佳完美涡旋光场。CHEN Yue等^[22]基于数字微镜器件利用二值振幅调制和窄高斯近似生成高拓扑荷值的完美涡旋光场。李新忠等^[23]提出了一种完美涡旋光束的空间自由调控技术,实现了完美涡旋光束中心亮环半径的自由调控。基于多种产生方法和调控技术,完美涡旋光在不同领域的应用受到研究者的关注。ZHANG Chonglei等^[24]将完美涡旋应用于结构光照明显微成像技术中,在超分辨成像中降低了激发荧光的背景噪声。REDDY S G等^[25]利用完美涡旋光获得了散射斑点不受拓扑荷影响的散射场。在微粒的操纵方面,CHEN Mingzhou等^[26]在实验上利用完美涡旋光成功捕获并驱动微粒转动。TKACHENKO G等^[27]利用分数阶完美涡旋光实现了微粒的捕获与翻转。LIANG Yansheng等^[28]利用近似完美涡旋光实现了对大尺寸低折射率微粒的旋转。

然而,对于完美涡旋光场中微粒的运动研究,主要集中于在实验上实现对微粒的旋转,而对于不同偏振态下完美涡旋光场中微粒受到的光学力和力矩的计算研究报道较少。本文采用带有锥镜相位和涡旋相位的人射场,基于Richards-Wolf矢量衍射理论,在几何焦面处获得了近似完美涡旋光场,研究了微米级尺寸球形粒子在该光场中受到的光学力和轨道矩随拓扑荷变化的关系,分析了入射场偏振态分别为圆偏振(Circular Polarization, CP)、径向偏振和方位角偏振时,近波长球形粒子在该完美涡旋光场中受到的光学力和轨道矩。

1 理论模型

1.1 完美涡旋光的产生

完美涡旋光可以通过相位掩模板法^[19]、锥透镜法^[29]、贝塞尔光束的傅里叶变换法^[20]、数字微镜器件法^[22]等实现。因为贝塞尔光束可以用锥镜相位来实现,因此用锥镜相位加涡旋相位聚焦可以获得完美涡旋光场^[28]。采用带有锥镜相位和涡旋相位的人射场,并考虑入射场的偏振态,基于Richards-Wolf矢量衍射理论,计算不同偏振态入射场的紧聚焦场在焦平面上的强度分布。

如图1,设入射场 $A_0(\vartheta, \varphi)$ 具有形式

$$A_0(\vartheta, \varphi) = (e_\rho A_{0\rho} + e_\varphi A_{0\varphi}) e^{i(l\varphi + a\varphi)} \quad (1)$$

式中, ϑ 是光线的会聚角, ρ 和 φ 表示入瞳面的径向和角向变量, e_ρ 和 e_φ 分别表示入瞳面径向和角向单位矢量, $A_{0\rho}$ 和 $A_{0\varphi}$ 分别为入射场振幅在两个方向的分量;完美涡旋的主要贡献来自相位项 $\exp[i(l\varphi + a\varphi)]$, l 表示涡旋相位的拓扑荷, a 是锥镜相位径向参数,决定完美涡旋光场的环半径^[28]。为获取合适的环半径,取 $a = 50 \text{ mm}^{-1}$ 。根据Richards-Wolf矢量衍射理论,可以得到焦点附近电场分布为

$$E(x) = C \int_0^{\vartheta_{\max}} \int_0^{2\pi} \sqrt{\cos\vartheta} (e_\rho A_{0\rho} + e_\varphi A_{0\varphi}) e^{i(l\varphi + a\varphi)} e^{ik \cdot x} d\Omega \quad (2)$$

式中, C 为常数, ϑ_{\max} 为由数值孔径决定的光线最大会聚角, k 为像空间的波矢, x 为焦点到观察点的位置矢量, $d\Omega$ 表示立体角微分元。因此, 描述完美涡旋光的主要参数包括拓扑荷、偏振态和光环半径。

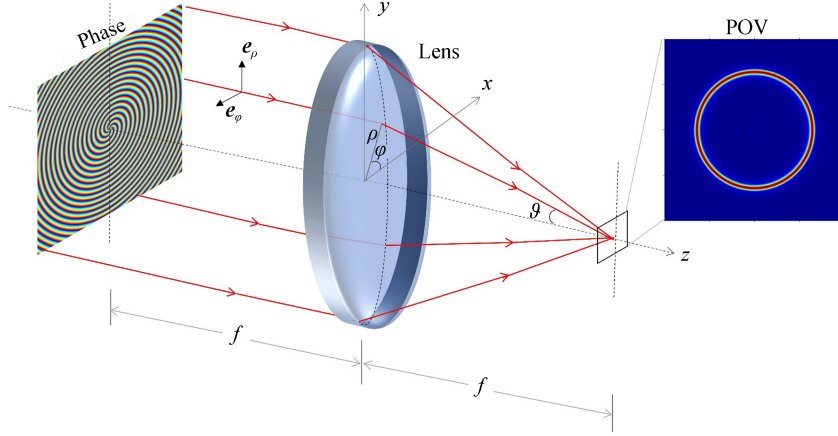


图1 完美涡旋光产生原理
Fig. 1 Schematic of generation of POV beams

1.2 微米级球形粒子受到的光学力与力矩

光与微粒相互作用时, 光场的线性动量会传递给粒子, 从而在粒子上施加光学力作用。通常, 作用在微粒上的时间平均光学力可通过考虑系统的动量守恒, 对 Maxwell 应力张量在包围微粒的闭合曲面 S 上积分获得, 即^[30]

$$\langle F \rangle = \oint_S \mathbf{n} \cdot \langle \vec{T} \rangle d\sigma \quad (3)$$

式中, $d\sigma$ 和 \mathbf{n} 分别表示积分面积元和相应的单位法矢量, \vec{T} 为 Maxwell 应力张量, 在国际单位制中表达式为

$$\vec{T} = \epsilon_1 \mathbf{E} \mathbf{E} + \mu_1 \mathbf{H} \mathbf{H} - \frac{\vec{I}}{2} (\epsilon_1 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* + \mu_1 \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^*) \quad (4)$$

ϵ_1 和 μ_1 分别是微粒周围介质的介电常数和磁导率, \vec{I} 是单位张量; $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{inc}} + \mathbf{E}_{\text{scat}}$ 和 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{inc}} + \mathbf{H}_{\text{scat}}$ 表示粒子外的总场, \mathbf{E}_{inc} 和 \mathbf{H}_{inc} 表示入射场, 而 \mathbf{E}_{scat} 和 \mathbf{H}_{scat} 表示散射场。对于均匀、各向同性的近波长球形粒子(本文所考虑的情况), 散射场可以通过电磁散射模型求解。

除了线性动量, 完美涡旋光场还携带光学轨道角动量, 在与粒子相互作用时, 会伴随着轨道角动量的传递, 导致微粒还受到力矩的作用。设微粒中心的位置矢量为 \mathbf{x}_c , 则微粒所受的轨道矩可以表示为^[30]

$$\langle \Gamma \rangle = \mathbf{x}_c \times \langle F \rangle \quad (5)$$

通常, 主要关注的是轨道矩的纵向分量, 即

$$\Gamma_z = \rho_c \langle F_\phi \rangle \quad (6)$$

式中, ρ_c 是微粒中心到光轴的径向距离, $\langle F_\phi \rangle$ 是微粒受到的角向力。

2 结果与分析

2.1 完美涡旋光的产生

通过式(2)计算完美涡旋焦场时, 设定相关参数: 入射光波长 $\lambda = 1\,064\text{ nm}$, 功率 $P = 0.1\text{ W}$, 矢量振幅 $(A_{0\varphi}, A_{0\varphi}) \propto e^{i\varphi} (1, i)$ (左旋圆偏振), 物镜数值孔径 $\text{NA} = 1.26$, 像空间折射率 $n_1 = 1.33$, 则在傅里叶焦面上得到的涡旋光强度分布如图2所示。图中给出了携带不同拓扑荷入射光的相位和相对应在傅里叶焦平面上得到的涡旋光横向强度分布, 可以看出在几何焦面上获得环状强度分布, 且其环半径随着拓扑荷的增大有微弱变化, 得到的完美涡旋光束属于近似完美涡旋光束^[21]。

为了更直观地看出产生的完美涡旋光与拓扑荷之间的变化关系, 在图3(a)中绘制了完美涡旋光的横向强度随拓扑荷的变化曲线, 可以看到, 随着拓扑荷 l 的增大, 完美涡旋光的强度逐渐减弱, 其环半径和环宽度

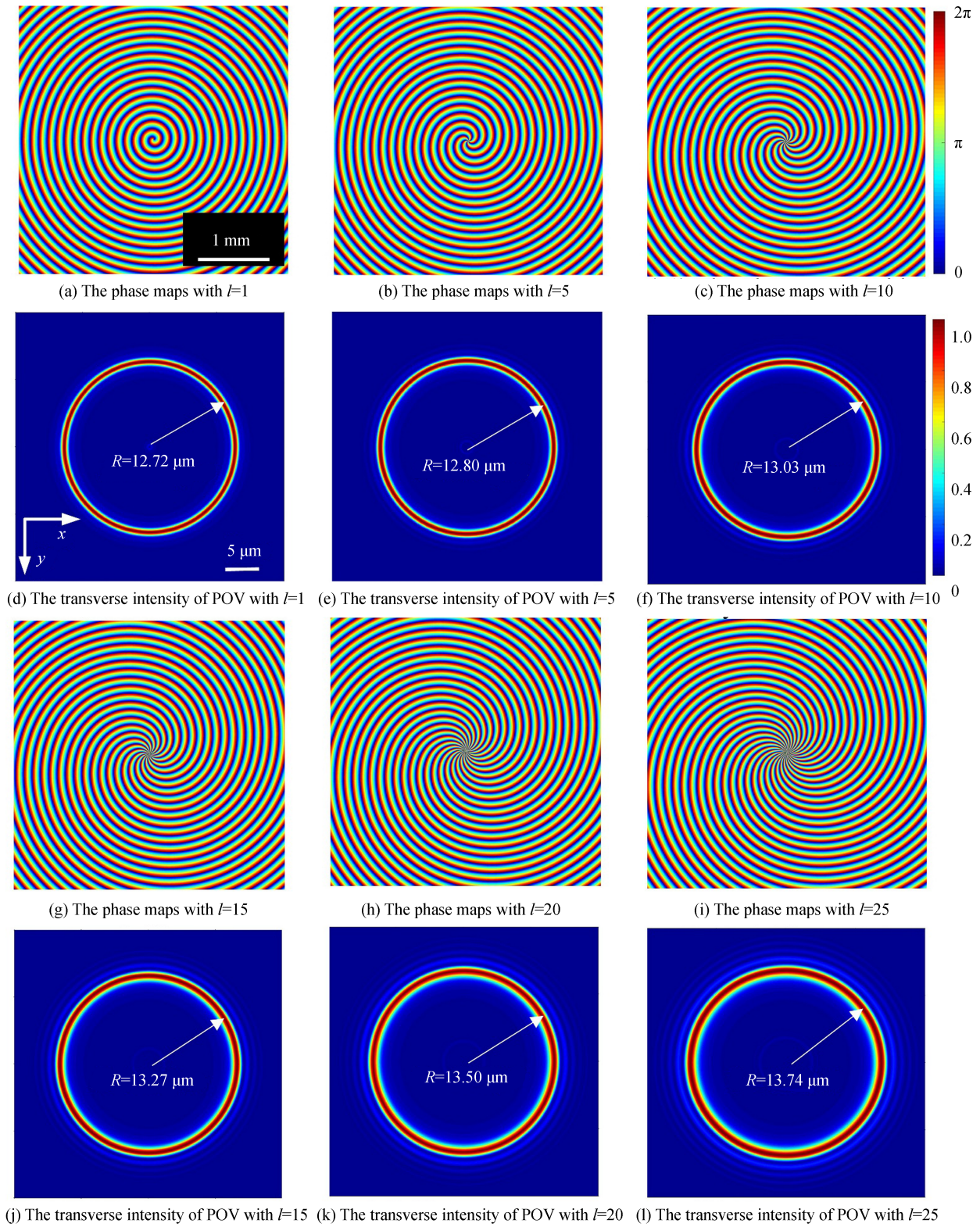


图2 不同拓扑荷的输入相位和对应的完美涡旋光横向强度分布

Fig. 2 The phase maps of incident beams and the transverse intensity distribution of POV beams with different topological charges

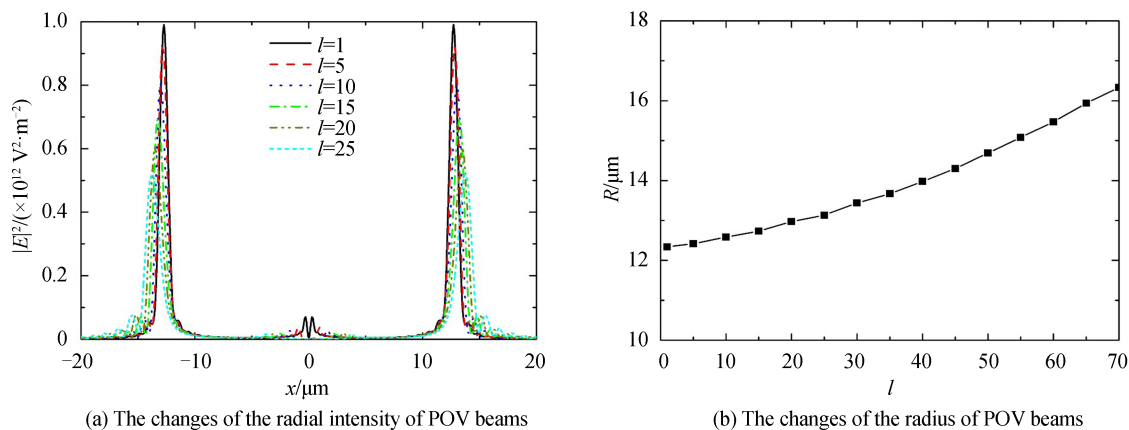


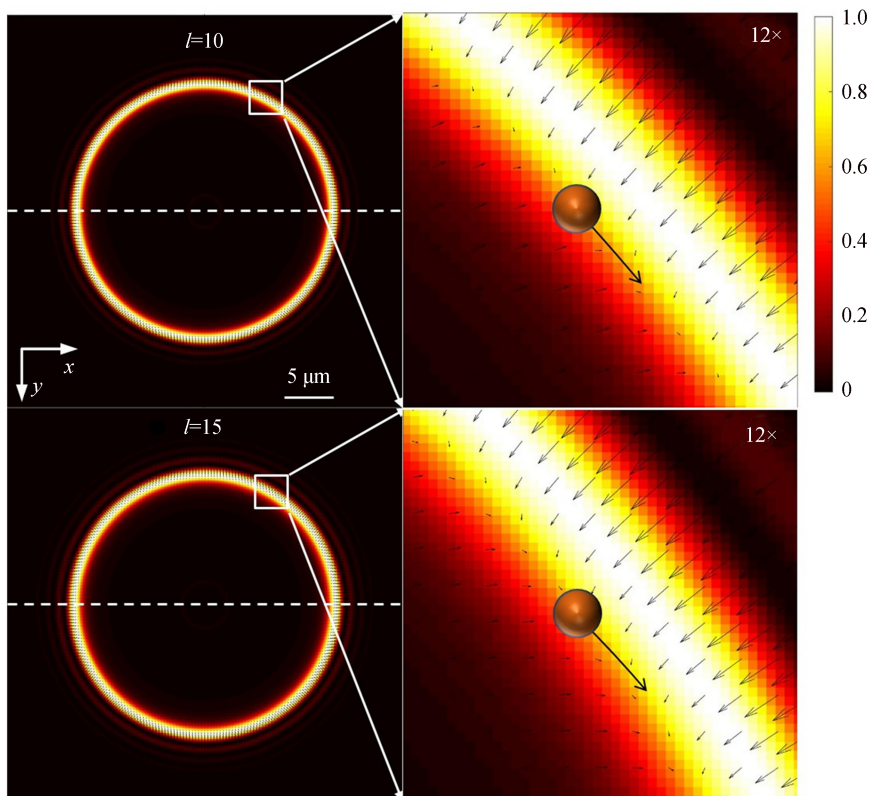
图3 完美涡旋光强度和环半径与拓扑荷的关系。

Fig. 3 The changes of the radial intensity and radius of POV beams with the topological charges

微弱增大。当拓扑荷进一步增大时,如图3(b)所示,完美涡旋光的环半径也继续增大,且增大的速度越来越快。因此,在选取完美涡旋光时,也要参考拓扑荷以满足实际需求。

2.2 完美涡旋光场中微粒受力和力矩分析

进行理论计算时,取微粒的半径为 $1\ \mu\text{m}$, 折射率为 1.59, 微粒在完美涡旋光场中的横向光学力如图4所示。从图4(a)中可以看到,当拓扑荷为10或者15时,微粒受到光学力的作用,如图4(b)所示,微粒在圆环上存在平衡位置且当微粒远离平衡位置时受到指向该平衡位置的光学力,因此微粒可以被横向捕获在该圆环上,但由于圆环光强最大值两侧其梯度外侧大于内侧,造成环外侧光学力大于内侧。考虑到微粒的尺寸效应,微粒的平衡位置会向内侧有微量的位移。除此之外,微粒在捕获位置上还受到角向力的作用如图4(c)所示,角向力的大小为恒定值且与拓扑荷的大小有关,即光场携带的轨道角动量转移到了微粒上,驱动微粒做轨道旋转。



(a) The distributions of optical forces when $l=10$ and 15

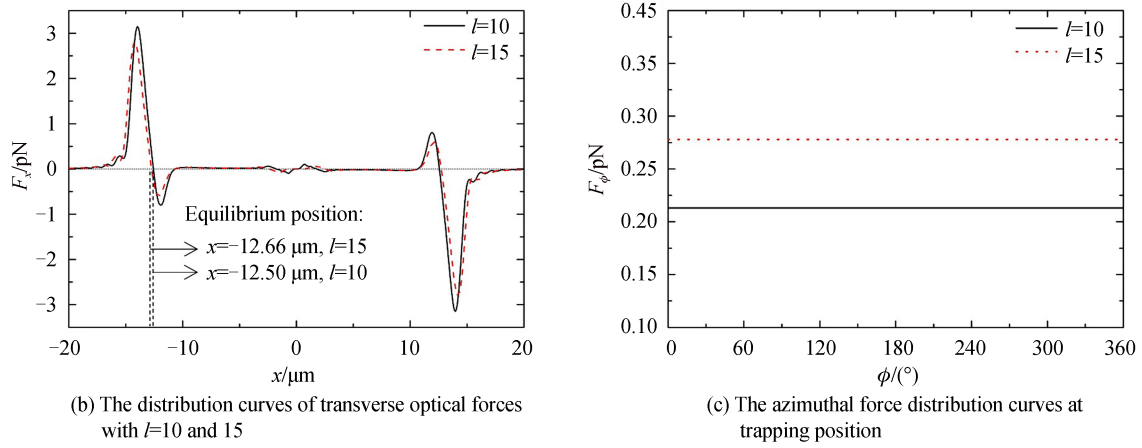


图4 完美涡旋光场中微粒受到的横向光学力和角向力
Fig. 4 The transverse optical force and azimuthal force exerted on the particle in POV beams

为进一步分析不同偏振态完美涡旋光场中微粒的受力情况,在式(1)中分别取入射光矢量振幅 $(A_{0z}, A_{0\phi}) \propto e^{i\varphi}(1, i)$ (左旋圆偏振, CP)、 $(A_{0z}, A_{0\phi}) \propto e^{i\varphi}(1, 0)$ (径向偏振, RP)和 $(A_{0z}, A_{0\phi}) \propto e^{i\varphi}(0, 1)$ (方位角偏振, AP),其余参数同上,得到圆偏振、径向偏振和方位角偏振完美涡旋光场中微粒受到的光学力情况。如图5所示,微粒可以被捕获在三种偏振态的完美涡旋光场中,并且受到的横向光学力几乎相同,如图5(a)所示,而微粒受到的角向力有明显的差异,如图5(b)所示。圆偏振、径向偏振和方位角偏振入射光形成的完美涡旋光场中,微粒受到的角向力沿角向不变,但几种偏振下的大小不同,其中圆偏振下微粒受到的角向力最大,径向偏振下的角向力最小,因此对于这几种偏振态下情况,圆偏振入射光形成的完美涡旋光场更适合用于驱动微粒轨道旋转。

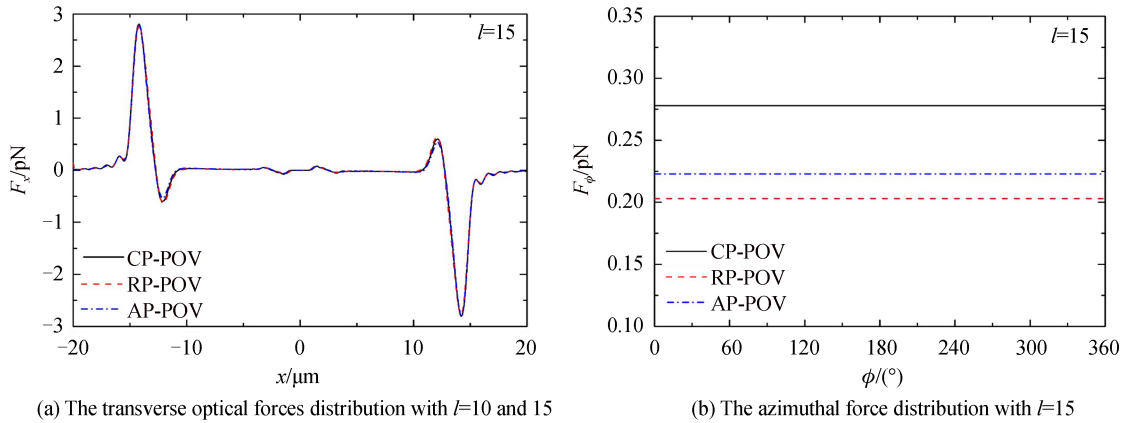


图5 圆偏振、径向偏振和方位角偏振下完美涡旋光场中微粒受到的光学力分布

Fig. 5 The optical force distribution exerted on the particle in POV beams with circular polarization, radial polarization and azimuthal polarization, respectively

为进一步揭示不同偏振态下微粒运动与拓扑荷的关系,三种偏振态下产生的完美涡旋光场中微粒受到的角向力和轨道矩随拓扑荷的变化情况如图6所示。随着拓扑荷的增加,三种偏振态下微粒受到的角向力和轨道矩变化趋势几乎一致,微粒受到的角向力随着拓扑荷的增加先增加后减小,这主要是由于在拓扑荷增加的过程中,完美涡旋光与微粒相互作用的轨道角动量逐渐增大,而完美涡旋光的环形焦斑在较小拓扑荷变化过程中近乎不变,因此,微粒受到的角向力因轨道角动量的增大而缓慢增大;而较大拓扑荷变化中完美涡旋光的环形焦斑会逐渐增大,导致其光强梯度减弱,从而微粒受到的角向力会缓慢减小。轨道矩随拓扑荷的变化趋势与角向力相似,但轨道矩到达极值点后趋近于稳定,其原因是完美涡旋光的环半径缓慢增大,根据式(6),轨道矩正比于角向力和微粒捕获半径,轨道矩的变化趋势与角向力既相似又略有不同。因

此,在实际实验中选取合适的拓扑荷才能实现稳定的微粒轨道转动操作。相比于径向偏振和方位角偏振,圆偏振下的角向力和轨道矩始终最大,因为圆偏振光本身携带自旋角动量,在聚焦的过程中有部分自旋角动量转化为轨道角动量^[30]。因此,圆偏振入射光下的完美涡旋光在驱动微粒轨道旋转方面始终具有优势。

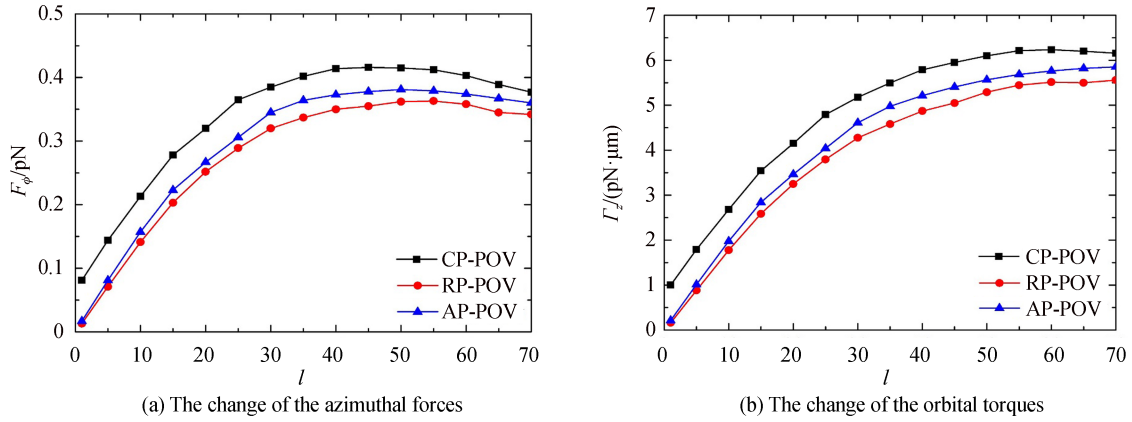


图6 圆偏振、径向偏振和方位角偏振下完美涡旋光场中微粒受到的角向力和轨道矩与拓扑荷的关系

Fig. 6 The change of the azimuthal forces and orbital torques exerted on the particle with the topological charge value of POV beams with circular polarization, radial polarization and azimuthal polarization, respectively

3 结论

本文基于紧聚焦方法产生了近似完美涡旋光场,计算了该光场中近波长微粒受到的光学力和轨道矩,研究了轨道矩与拓扑荷的关系以及偏振态对轨道矩的影响。结果表明,该完美涡旋光能够横向稳定捕获微粒并驱动微粒绕光轴做轨道旋转运动,微粒受到的轨道矩随拓扑荷的增大先增大后缓慢减小,并且不同偏振态下微粒受到的轨道矩不同,圆偏振态下的完美涡旋光更适用于驱动微粒轨道旋转。因此,通过调控完美涡旋光的拓扑荷数值大小和符号、偏振态、光强及光环尺寸,可以有效控制被捕获微粒的轨道运动。计算结果揭示了完美涡旋光场中微粒的力学特性,为实验上运用完美涡旋光捕获和操纵微粒提供了理论依据。

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] DHOLAKIA K, REECE P, GU M. Optical micromanipulation[J]. Chemical Society reviews, 2008, 37(1): 42-55.
- [3] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature, 2002, 419(6903): 145-147
- [4] BAUMGARTL J, MAZILU M, DHOLAKIA K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. Nature Photonics, 2008, 2(11): 675-678.
- [5] CHEN Jun, NG J, LIN Zhifang, et al. Optical pulling force[J]. Nature Photonics, 2011, 5(9): 531-534.
- [6] CARRUTHERS A E, WALKER J S, CASEY A, et al. Selection and characterization of aerosol particle size using a bessel beam optical trap for single particle analysis[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(19): 6741-6748.
- [7] RUFFNER D B, GRIER D G. Optical conveyors: a class of active tractor beams[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(16): 163903.
- [8] KOZAWA Y, SATO S. Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10828-10833.
- [9] ZHAN Qiwen. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3377-3382.
- [10] LI Manman, YAN Shaohui, LIANG Yansheng, et al. Transverse spinning of particles in highly focused vector vortex beams[J]. Physical Review A, 2017, 95(5): 053802.
- [11] LI Manman, YAN Shaohui, ZHANG Yanan, et al. Enantioselective optical trapping of chiral nanoparticles by tightly focused vector beams[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(8): 2099-2105.
- [12] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- [13] SATO S, ISHIGURE M, INABA H. Optical trapping and rotational manipulation of microscopic particles and biological cells using higher-order mode Nd:YAG laser beams[J]. Electronics Letters, 1991, 27(20): 1831-1832.

- [14] YAN Z, SCHERER N F. Optical vortex induced rotation of silver nanowires [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2013, 4(17): 2937-2942.
- [15] BLIOKH K Y, NORI F. Transverse and longitudinal angular momenta of light [J]. *Physics Reports*, 2015, 592: 1-38.
- [16] SHAO L, YANG Z J, ANDREN D, et al. Gold nanorod rotary motors driven by resonant light scattering [J]. *American Chemical Society Nano*, 2015, 9(12): 12542-12551.
- [17] PAEZ-LOPEZ R, RUZI U, ARRIZON V, et al. Optical manipulation using optimal annular vortices [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4138-4141.
- [18] LI Manman, YAN Shaohui, YAO Baoli, et al. Optically induced rotation of Rayleigh particles by vortex beams with different states of polarization [J]. *Physics Letters A*, 2016, 380(1-2): 311-315.
- [19] OSTROVSKY A S, RICKENSTORFF-PARRO C, ARRIZON V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 534-536.
- [20] VAITY P, RUSCH L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 597-600.
- [21] KOTLYAR V V, KOVALEV A A, PORFIREV A P. Optimal phase element for generating a perfect optical vortex [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(12): 2376-2384.
- [22] CHEN Yue, FANG Zhaoxiang, REN Yuxuan, et al. Generation and characterization of a perfect vortex beam with a large topological charge through a digital micromirror device [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8030-8305.
- [23] LI Xinzhong, MENG Ying, LI Hehe, et al. Generation of perfect vortex beams and space free-control technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026018.
李新忠, 孟莹, 李贺贺, 等. 完美涡旋光束的产生及其空间自由调控技术 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026018
- [24] ZHANG Chonglei, MIN Changjun, DU Luping, et al. Perfect optical vortex enhanced surface plasmon excitation for plasmonic structured illumination microscopy imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(20): 780-782.
- [25] REDDY S G, CHITHRABHANU P, VAITY P, et al. Non-diffracting speckles of a perfect vortex beam [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055602.
- [26] CHEN Mingzhou, MAZILU M, ARITA Y, et al. Creating and probing of a perfect vortex in situ with an optically trapped particle [J]. *Optical Review*, 2015, 22(1): 162-165.
- [27] TKACHENKO G, CHEN M, DHOLAKIA K, et al. Is it possible to create a perfect fractional vortex beam? [J]. *Optica*, 2017, 4(3): 330-333.
- [28] LIANG Yansheng, LEI Ming, YAN Shaohui, et al. Rotating of low-refractive-index microparticles with a quasi-perfect optical vortex [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): 79-84.
- [29] KONG J A. *Electromagnetic wave theory* [M]. WU Ji, et al, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
KONG J. *电磁波理论* [M]. 吴季, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [30] ZHAO Yiqiong, EDGAR J S, JEFFRIES G D M, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(7): 073901.