

拉盖尔-高斯光束捕获双层球的捕获力计算

王 娟 任洪亮

华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 基于T矩阵法,计算拉盖尔-高斯光束(LG_{pl}光束)光镊捕获双层球的捕获力。结果表明:随着数值孔径增大,光镊轴向和横向捕获效率最大值和捕获域均增加,数值孔径太小或太大时,光镊轴向和横向捕获效率会减小;球核折射率大于包层折射率时,随包层折射率增加,光镊轴向和横向捕获效率不断增大,球核折射率小于包层折射率时,光镊轴向和横向捕获效率会随包层折射率增加而减小;随LG_{pl}光束的角向节线数(l)增大光镊轴向捕获效率最大值先增加后减小,而随LG_{pl}光束的径向节线数(p)增加轴向捕获效率最大值渐渐减小,曲线逐渐平行于横坐标轴。

关键词 物理光学; T矩阵法; 拉盖尔-高斯光束; 双层球微粒; 捕获力

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0608001

Trapping Forces of Core-Shell Particles Using Laguerre-Gaussian Beams

Wang Juan Ren Hongliang

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract Trapping forces of core-shell particles trapped by Laguerre-Gaussian beams (LG_{pl} beams) are calculated using T-matrix method. The results show that both the maximum of axial and radial trapping efficiencies and trapping regions of optical tweezers increase with the numerical apertures of objective, while the axial and radial trapping efficiencies reduce with too big or too small numerical apertures of objective. The axial and radial trapping efficiencies of optical tweezers increase with the refractive indices of particles cladding, when the refractive indices of particles core are greater than the refractive indices of particles cladding. The axial and radial trapping efficiencies of optical tweezers decrease with the refractive indices of particles cladding, when the refractive indices of particles core are less than the refractive indices of particles cladding. The axial trapping efficiencies increase firstly and then decrease with the azimuthal model index (l) of the LG_{pl} beams. The maximum of axial trapping efficiencies decrease and the curve is parallel to x -axis gradually with the increase of the radial model index (p) of the LG_{pl} beams.

Key words physical optics; T-matrix method; Laguerre-Gaussian beams; core-shell particles; trapping force

OCIS codes 170.4520; 020.7010; 350.4855

1 引 言

近年来很多学者致力于多层球的研究,为生物细胞等多层活体结构提供理想化模型。早在1974年, Peterson等^[1]就提出T矩阵法可用于计算多层球的电磁散射,并对连续包层散射体的电场和磁场特性参数进行了研究。孙贤明等^[2]基于T矩阵法,以含核椭球粒子为模型,计算了含有吸收性内核的水凝物气溶胶的散射特性,给出了随机取向、轴对称、含核椭球粒子的散射计算方法。Farafonov等^[3]利用分离变量法(SVM)、扩展边界条件法(EBCM),研究了非均匀非球形多层微粒的光散射问题。Vinokurov等^[4]利用SVM研究了对称多

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(61178015)、福建省自然科学基金(2012J05120)、中央高校基本科研业务费专项基金(JB-ZR1146)

作者简介: 王娟(1988—),女,硕士研究生,主要从事光镊理论计算方面的研究。E-mail: 961655207@qq.com

导师简介: 任洪亮(1980—),男,博士,副教授,主要从事光镊建设和应用,光电检测和应用等方面的研究。

E-mail: renhongliang@hqu.edu.cn(通信联系人)

层非球型微粒,并与EBCM、广义多极子技术(GMT)和离散偶极子近似法(DDA)等的计算结果做了对比分析。韩一平等^[5]基于Mie理论利用高斯光束研究了多层球微粒的辐射捕获力,分析束腰半径、吸收系数和内外层相对厚度等参数对捕获力的影响。

操控对象及捕获光束性质是影响光镊捕获效率的两大因素。LG_{pl}光束是一种空心光束,利用其轨道角动量的转移可对红细胞^[6-8]、纳米线^[9]等微粒进行旋转,实验证明高阶LG_{pl}光束可以使纳米线在其亮环上旋转,且高阶LG_{pl}光束的角动量越大,纳米线旋转速度越快^[9]。王立刚等^[10]利用高阶聚焦LG_{pl}光束研究了角向节线数*l*和径向节线数*p*变化对瑞利尺度下介质球横向和轴向捕获效率的影响。

运用电磁学模型,利用T矩阵法计算LG_{pl}光束光镊对双层球(有包层的球型微粒)的捕获力情况,并将LG_{pl}光束的捕获效率与高斯光束的捕获效率进行了对比。通过分析数值孔径NA、微粒包层折射率*n*₂、LG_{pl}光束角向节线数*l*及径向节线数*p*等参数的大小对捕获力的影响,为多层球及自然界中存在的多层生物细胞的研究奠定基础。

2 双层球的T矩阵原理

如图1所示,1区为球核所在区域,折射率设为*n*₁,2区属球外层(即包层),折射率设为*n*₂,3区为微粒所处空间介质,折射率设为*n*₃,若*n*₁=*n*₂,则为单层球形微粒。在电磁学模型下,若微粒尺度大小和入射光波长相近,可将入射场、散射场以及内场的光束分解为一系列的球面矢量波的叠加形式,现将入射场光束分解为球面矢量波为:

$$E_{inc} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [\alpha_{nm} M'_{nm}(kr) + \beta_{nm} N'_{nm}(kr)], \quad (1)$$

式中球面矢量波函数 $M'_{nm}(kr)$, $N'_{nm}(kr)$ 可表示为:

$$M'_{nm}(kr) = (-1)^m d_n \exp(im\phi) j_n(kr) C_{nm}(\theta), \quad (2)$$

$$N'_{nm}(kr) = (-1)^m d_n \exp(im\phi) \times \left\{ \frac{n(n+1)}{kr} j_n(kr) P_{nm}(\theta) + \left[j_{n-1}(kr) - \frac{n}{kr} j_n(kr) \right] B_{nm}(\theta) \right\}, \quad (3)$$

$j_n(kr)$ 是球谐贝塞尔函数, d_n 是归一化常数, $B_{nm}(\theta)$ 、 $C_{nm}(\theta)$ 、 $P_{nm}(\theta)$ 均是角相关矢量球谐函数,其表达式为:

$$B_{nm}(\theta) = \hat{\theta} \frac{d}{d\theta} d_{0m}^n(\theta) + \hat{\phi} \frac{im}{\sin \theta} d_{0m}^n(\theta), \quad (4)$$

$$C_{nm}(\theta) = \hat{\theta} \frac{d}{d\theta} d_{0m}^n(\theta) - \hat{\phi} \frac{im}{\sin \theta} d_{0m}^n(\theta), \quad (5)$$

$$P_{nm}(\theta) = \hat{\theta} d_{0m}^n(\theta), \quad (6)$$

$$d_n = \left(\frac{2n+1}{4\pi n(n+1)} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中 $d_{0m}^n(\theta)$ 是魏格纳函数。

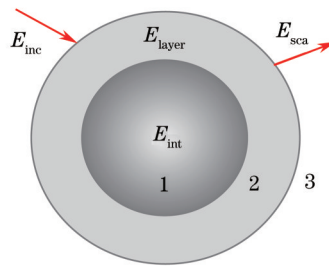


图1 双层球微粒模型

Fig.1 Double-layered spherical model

散射场用球面矢量波来表示,其表达式为:

$$E_{scat} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [p_{nm} M_{nm}(kr) + q_{nm} N_{nm}(kr)], \quad (8)$$

式中 $M_{nm}(kr), N_{nm}(kr)$ 是用第一类球汉开尔函数 $h_n^{(1)}(kr)$ 代替 $M'_{nm}(kr), N'_{nm}(kr)$ 中的球贝塞尔函数得到。

球核(1区)内场用球面矢量波表示为:

$$E_{\text{int}} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [c_{nm} M'_{nm}(n_1 kr) + d_{nm} N'_{nm}(n_1 kr)], \quad (9)$$

c_{nm}, d_{nm} 是内场的展开系数。

麦克斯韦方程具有线性特性,因此入射场、散射场和内场的展开系数之间存在一定的线性关系,现将入射场的展开系数 α_{nm}, β_{nm} 简写为 α 和 β , 散射场的展开系数 p_{nm}, q_{nm} 简写为 p 和 q , 内场的展开系数 c_{nm}, d_{nm} 简写为 c 和 d , 则入射场展开系数与内场展开系数的线性关系:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}, \quad (10)$$

散射场展开系数与内场展开系数的线性关系:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} = -B \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}, \quad (11)$$

这时,双层球微粒的 T 矩阵就可以表示为:

$$T = -B \times A^{-1} = - \left[B_2 \times B B_2 \times (-B_1 \times A_1^{-1}) \right] \times \left[A_2 + A A_2 \times (-B_1 \times A_1^{-1}) \right]^{-1}, \quad (12)$$

矩阵元 $B_2, B B_2, A_2, A A_2$ 及 $(-B_1 \times A_1^{-1})$ 的计算在参考文献[11]中有详细讲述。

3 数值模拟与分析

入射光束波长为 1064 nm, 并将入射光束焦点设定为坐标原点, 双层球微粒置于水溶液 ($n_3=1.33$) 中。模拟计算时, 分别以 NA, n_2, l, p 为变量, 其他参量均保持不变, 选取折射率为 1.59 的聚苯乙烯作为球核, 得到各种捕获效率 (Q 因子) 曲线, 要研究的主要是反向捕获效率及捕获域^[12], 反向捕获效率即为捕获效率取负值时的值, 而捕获域为反向捕获效率曲线与横轴围成的面积。

图 2 中分别取数值孔径为 0.25、0.40、0.65、0.75、1.25、1.30 和 1.35 的物镜, 以 LG_{02} 光束为入射光束, 捕获

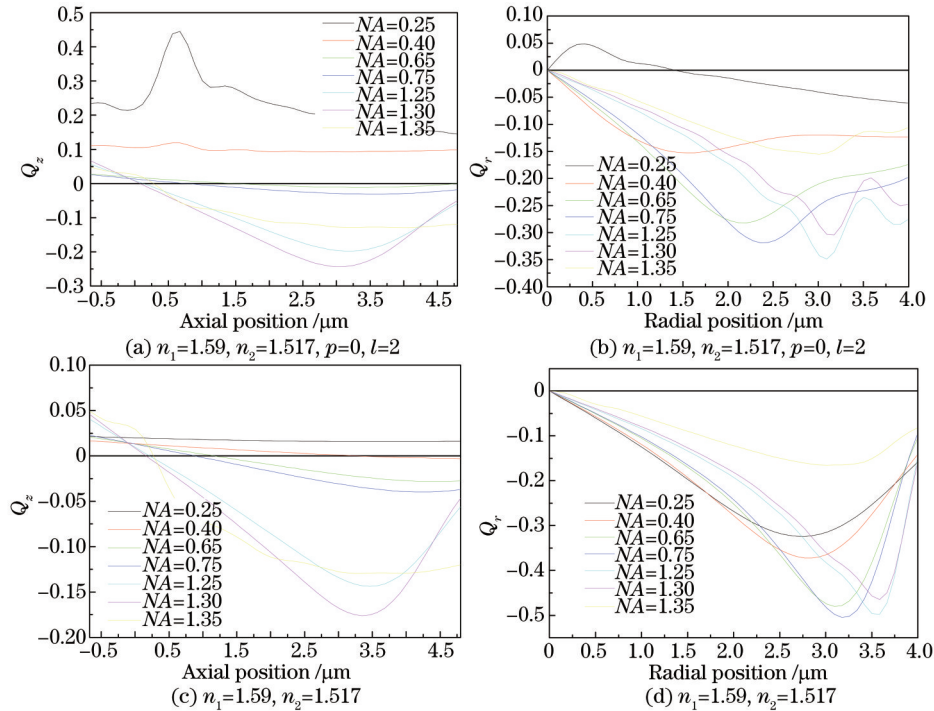


图 2 不同 NA 的捕获效率曲线。(a) LG_{02} 光束轴向捕获效率曲线; (b) LG_{02} 光束横向捕获效率曲线; (c) 高斯光束轴向捕获效率曲线; (d) 高斯光束横向捕获效率曲线

Fig.2 Trapping efficiency curves with different NA. (a) Axial trapping efficiency curves of LG_{02} beams; (b) radial trapping efficiency curves of LG_{02} beams; (c) axial trapping efficiency curves of Gaussian beams; (d) radial trapping efficiency curves of Gaussian beams

球核折射率为 1.59,包层折射率为 1.517 的双层球,通过改变显微镜数值孔径的大小,从而得到一系列有规律的捕获效率曲线。从图 2(a)中看出,数值孔径为 0.25 和 0.40 时,轴向捕获效率均为零,数值孔径为 0.65 时出现轴向捕获效率,且随着数值孔径逐渐增大,轴向捕获效率及捕获域均增大,但当值孔径为 1.35 时捕获效率反而降低,曲线变得比较平缓。图 2(b)中的横向捕获效率与捕获域是随着数值孔径的增大而增大,且横向捕获效率最大值逐渐远离原点,当数值孔径为 1.25 时捕获效率曲线出现最大的峰值,随后随着数值孔径的增加而减小,横向捕获效率逐渐降低。

如图 3 所示,依据数值孔径计算式 $NA = n \sin \theta$ 知,实验中,类似 0.25、0.40 这样放大倍数较小的数值孔径物镜不用于微粒的捕获,因其捕获效率太小或根本无法捕获,若数值孔径为 1.00 以上通常用油浸物镜。在图 2(a)、(b)中, LG_{p1} 光束 l 和 p 确定的情况下,捕获双层球,显微镜数值孔径越大,光束功率的透过率越大^[13],光束的会聚角也随之增大,光束对捕获微粒轴向和横向的梯度力均增加,轴向和横向的捕获效率都增大;随着数值孔径继续增大,光束的会聚角也越来越大, LG_{02} 光束对轴向梯度力贡献较大而对横向的梯度力贡献较小^[14]。图 2(a)、(b)中当 NA 取 1.35 值时,轴向 Q 因子和横向 Q 因子均变小,说明轴向和横向的捕获效率逐渐降低。

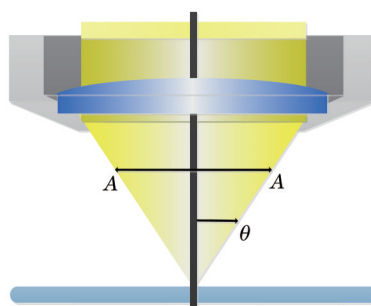


图 3 显微镜物镜

Fig.3 Objective lens of microscope

从图 2 (a)与(c)、(b)与(d)中看出, LG_{02} 光束与高斯光束的轴向和横向捕获率曲线变化趋势基本相同。但数值孔径较小时,高斯光束轴向和横向捕获效率优于 LG_{02} 光束,如 $NA=0.65$ 时,高斯光束的轴向捕获率最大值为 0.04,而 LG_{02} 光束的只有 0.01,同时,高斯光束的横向捕获率最大值为 0.35,而 LG_{02} 光束的只有 0.15,说明数值孔径较小时高斯光束更有利于捕获双层球。随着数值孔径增大,从图 2(a)与(c)、(b)与(d)中看出, LG_{02} 光束轴向捕获率最大值大于高斯光束的轴向捕获率最大值,如 $NA=1.25$ 时, LG_{02} 光束轴向捕获率最大值为 0.18,高斯光束的为 0.14,此时, LG_{02} 光束横向捕获率最大值为 0.35,高斯光束的为 0.50。轴向力主要起捕获微粒的作用,横向力又称逃逸力,主要对捕获的微粒有束缚作用,故从捕获效率曲线得知数值孔径较大时 LG_{02} 光束更有利于捕获双层球。实验中,捕获尺度大小与入射光波长相近的微粒,通常选用数值孔径较大的物镜,总的来说,选取大数值孔径有利于 LG_{p1} 光束对双层球微粒的捕获,但 $NA=1.35$ 这样的高数值孔径物镜对双层球的捕获效率反而不高,大数值孔径物镜的制造精度与价格都很高,从模拟的捕获效率曲线与成本角度考虑,建议实验时择优选取物镜。

图 4 中选用数值孔径为 1.25 的物镜, LG_{02} 光束为入射光束,球核折射率为 1.59,改变双层球包层折射率得到一系列捕获曲线。从图 4(a)、(b)中看出,包层折射率小于球核折射率时,随着包层折射率增大,轴向和横向捕获效率略有增加;包层折射率大于球核折射率时,随着包层折射率增大,轴向和横向捕获效率与捕获域均减小。当包层折射率为 2.00 时,图 4(a)中的轴向捕获效率为正值,说明此时光束对双层球微粒的梯度力小于散射力,微粒不能被捕获。从图 4(a)、(b)的轴向和横向捕获效率看,双层球微粒包层与球核折射率相近时,捕获效率高,说明微粒易被捕获。周业鹏等^[15]从几何光学角度解释,光束折射角越大,光束所形成的梯度力也就越大,对微粒的捕获效率就越高,说明微粒越容易被捕获。可看出电磁模型中包层球微粒折射率的变化与捕获效率的关系,与几何光学中的理论相吻合。从图 4(a)与(c)、(b)与(d)中看出, LG_{02} 光束与高斯光束的轴向和横向捕获率曲线变化趋势基本相同。 LG_{02} 光束轴向捕获率最大值与捕获域均大于高斯光束的轴向捕获率最大值与捕获域, LG_{02} 光束横向捕获率最大值与捕获域均小于高斯光束的轴向捕获率最大值与捕获域。如 $n_2=1.517$ 时, LG_{02} 光束轴向捕获率最大值为 0.20,高斯光束的为 0.14, LG_{02} 光束横向捕获率最大值为

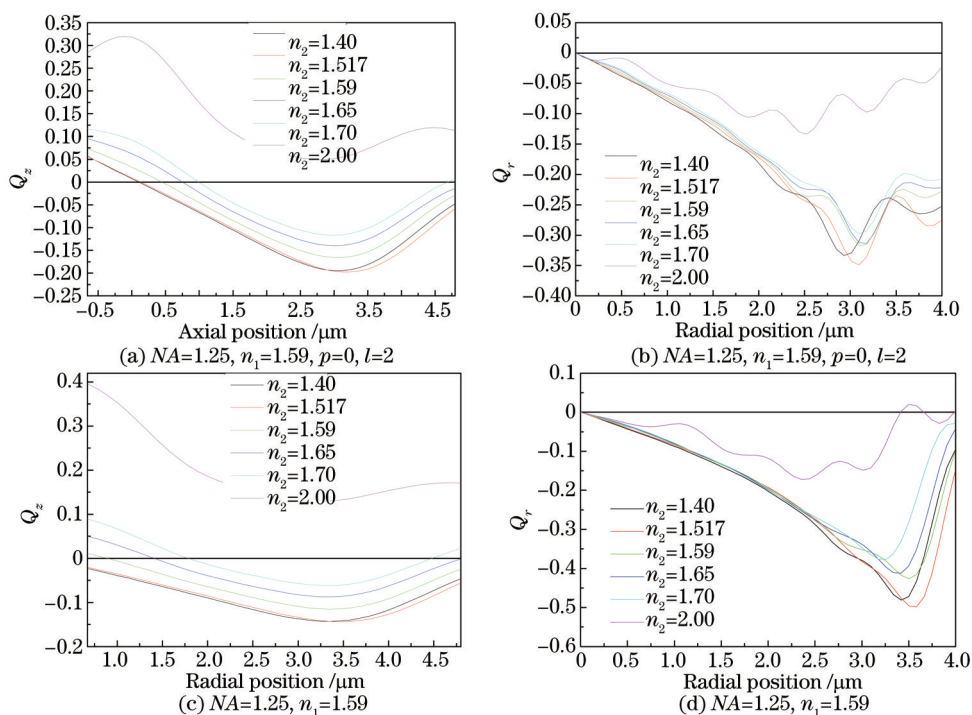


图4 不同 n_2 的捕获效率曲线。(a) LG_{02} 光束轴向捕获效率曲线;(b) LG_{02} 光束横向捕获效率曲线;
(c) 高斯光束轴向捕获效率曲线;(d) 高斯光束横向捕获效率曲线

Fig.4 Trapping efficiency curves with different n_2 . (a) Axial trapping efficiency curves of LG_{02} beams; (b) radial trapping efficiency curves of LG_{02} beams; (c) axial trapping efficiency curves of Gaussian beams; (d) radial trapping efficiency curves of Gaussian beams

0.35, 高斯光束的为 0.50。考虑轴向与横向力对微粒的作用, LG_{02} 光束仍然是最佳选择。
图 5 中选物镜数值孔径为 1.25 的显微镜, 以球核折射率为 1.59, 包层折射率为 1.517 的双层球为捕获对象, 模拟出 LG_{0l} 光束的阶数 $l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 的捕获效率曲线, 从图 5(a)、(b) 中看出, 随着 LG_{0l} 光束阶数的增加, 其轴向捕获效率先增大后减小, 横向捕获效率最大值逐渐减小, 这与捕获单层球微粒的捕获效率曲线变化规律基本一致^[12]。 LG_{0l} 光束的阶数 l 也表示光束暗环半径^[13], LG_{pl} 光束暗环半径增加能导致其角动量增大^[12]。图 5(a) 中轴向捕获效率最大值和捕获域变化幅度不大, 阶数为 2 和 3 时, 其捕获效率与捕获域达到最大, 而横向捕获效率随阶数增加有规律性的减小, LG_{pl} 光束具有角动量, 其角动量能使被捕获微粒旋转^[16], 进而被捕获微粒获得一个角速度, 该角速度的大小与 LG_{pl} 光束阶数的平方成反比关系^[16], 故 LG_{pl} 光束阶数越高, 微粒获得的束缚力越小, 所以横向捕获效率随阶数增加而减小。当 $l=0$ 时, 即为常用的高斯光束, 从图 5(a) 看出, 其轴向捕获效率最低, 综合理论知识与捕获效率曲线得出, 光束阶数在 1 到 5 之间是最佳选择。

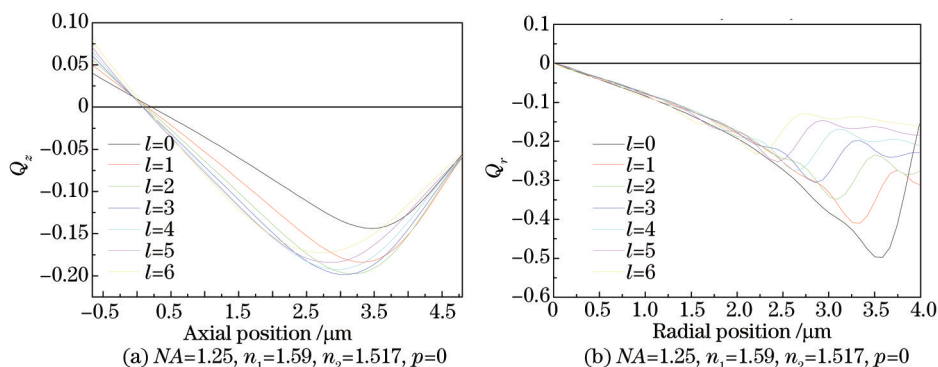


图 5 (a) 不同 l 的轴向捕获效率曲线;(b) 不同 l 的横向捕获效率曲线

Fig.5 (a) Axial trapping efficiency curves with different l ; (b) radial trapping efficiency curves with different l

图 6 所示的捕获曲线, 是以物镜数值孔径为 1.25 的显微镜, 球核折射率为 1.59, 包层折射率为 1.517 的双层球, 以 p 为变量模拟得出, 图 6(a) 中的轴向捕获效率曲线均随 p 的增大而减小, 最大值逐渐消失, 捕获域逐

渐减小, p 值越大曲线越平缓。图 6(b) 中, $p=2, 3$ 的轴向捕获效率最大值略大于 $p=0$ 的值, 总体来看, 轴向捕获效率最大值随 p 的增大而变化的幅度较小。 p 表示 LG_{pl} 光束暗环个数^[13], 在光功率透过率相同的情况下, 被捕获微粒的大小不变时, p 值越大暗环数越多, 捕获效率则会有所减小, 因此, 综合图 6(a)、(b) 可得: p 值取低阶更利于双层球的捕获。特别地, 当 $p=0$ 时, 光束为高斯光束, 仅从 p 值来看低阶是捕获双层球微粒的最佳值, 利用 LG_{pl} 光束捕获双层球微粒时, p 值的选择对获得一个最佳的光镊系统也很重要。

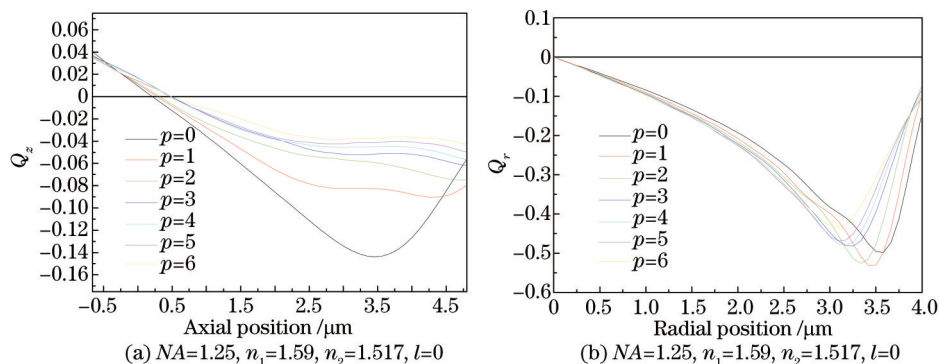


图 6 (a) 不同 p 的轴向捕获效率曲线; (b) 不同 p 的横向捕获效率曲线

Fig.6 (a) Axial trapping efficiency curve with different p ; (b) radial trapping efficiency curve with different p

4 结 论

选取的入射光束波长与被捕获的双层球相近, 基于电磁模型, 利用 T 矩阵法, 考虑改变 NA, n_2, l, p 等参量研究了 LG_{pl} 光束光镊对双层球捕获力的影响, 并与高斯光束的捕获效率进行对比。模拟结果表明, NA 的变化对光束的影响很明显, 捕获效率随着数值孔径的增加有规律性的增大, 也与功率通过率理论相吻合, 数值孔径较大, 有利于 LG_{pl} 光束捕获双层球; n_2 值的不同对捕获效率的影响也比较显著, 在包层折射率小于球核折射率时, 折射率增大, 轴向和横向捕获效率增大, 有利于微粒的捕获, 在包层折射率大于球核折射率时, 微粒的轴向捕获效率最大值与捕获域均逐渐减小, 总体来看, 微粒包层折射率增大不利于微粒的捕获; LG_{pl} 光束的角向节线数 l 对双层球的影响与单层球的基本相同, 轴向捕获效率随着 l 的增加先增大后减小, 得出 l 在 1 到 5 之间为捕获最佳值; LG_{pl} 光束的径向节线数 p 同样影响着微粒的捕获效率, 随着 p 值的增大, 轴向捕获效率最大值逐渐消失, 横向捕获效率逐渐减小, 相比较之下, p 值取低阶更有利于双层球的捕获。 LG_{pl} 光束对双层球的捕获研究为光镊在生物学中的应用进一步拓宽空间, 为 DNA、活细胞及微小生物体^[17]等具有多层膜结构微粒的研究打下基础。同时, 高阶 LG_{pl} 光束进一步可用于多微粒的捕获研究领域。

参 考 文 献

- 1 Bo Peterson, Staffan Ström. T-matrix formulation of electromagnetic scattering from multilayered scatterers[J]. Physical Review D, 1974, 10(8): 2670-2684.
- 2 Sun Xianming, Wang Haihua, Shen Jin, et al.. Scattering of polarized light by randomly oriented coated spheroidal particle[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 114216.
孙贤明, 王海华, 申 晋, 等. 随机取向双层椭球粒子偏振散射特性研究[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 114216.
- 3 V G Farafonov, V B Il'in, M S Prokopjeva. Light scattering by multilayered nonspherical particles: a set of methods[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 79-80: 599-626.
- 4 Alexander Vinokurov, Victor Farafonov, Vladimir Il'in. Separation of variables method for multilayered nonspherical particles[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2009, 110(14-16): 1356-1368.
- 5 Han Yiping, Du Yungang, Zhang Huayong. Radiation trapping forces acting on a two-layered spherical particle in a Gaussian beam [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4557-4562.
韩一平, 杜云刚, 张华永. 高斯光束对双层粒子的辐射俘获力[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4557-4562.
- 6 R Dasgupta, S Ahlawat, R S Verma, et al.. Optical orientation and rotation of trapped red blood cells with Laguerre-Gaussian mode [J]. Optics Express, 2011, 19(8): 7680-7688.

- 7 Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, *et al.*. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1768.
- 8 Dao M, Lim C T, Suresh S. Mechanics of the human red blood cell deformed by optical tweezers[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51(11-12): 2259-2280.
- 9 L Shi, J Li, T Tao, *et al.*. Rotation of nanowires with radially higher-order Laguerre-Gaussian beams produced by computer-generated holograms[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(26): 6398-6402.
- 10 H S Chai, L G Wang. Improvement of optical trapping effect by using the focused high-order Laguerre-Gaussian beams[J]. *Micron*, 2012, 43(8): 887-892.
- 11 Daniel J Ross, Reinhard Sigel. Mie scattering by soft core-shell particles and its applications to ellipsometric light scattering[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(5): 056710.
- 12 Wang Juan, Ren Hongliang, Zhou Yepeng. Trapping properties of the Laguerre-Gaussian beams optical tweezers[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2014, 3(35): 636-641.
王娟,任洪亮,周业鹏.拉盖尔-高斯光束光镊捕获性质[J].*华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 3(35): 636-641.
- 13 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 102-160.
吕百达. *激光光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 102-160.
- 14 Meng Binghuan, Zhou Jinhua, Zhong Mincheng, *et al.*. Improvement of transverse trapping efficiency of optical tweezers[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(6): 2300-2302.
- 15 Zhou Yepeng, Ren Hongliang, Wang Juan, *et al.*. Comparative analysis of the trapping force using Laguerre-Gaussian beam and Gaussian beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(11): 1300-1304.
周业鹏,任洪亮,王娟,等.拉盖尔高斯光束与高斯光束捕获力比较[J].*光子学报*, 2013, 42(11): 1300-1304.
- 16 Gao Hongfang, Ren Yuxuan, Liu Weiwei, *et al.*. Rotation dynamics of yeast cell in vortex optical tweezers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0404002.
高红芳,任煜轩,刘伟伟,等.酵母细胞在涡旋光阱中的旋转动力学研究[J].*中国激光*, 2011, 38(4): 0404002.
- 17 Wang Ruili, Zhang Jiachun, Shang Heling, *et al.*. Optical trapping and manipulation of microbe using tweezers[J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(10): 921-926.
王瑞丽,张加春,尚鹤龄,等.激光光镊对生物体的光操纵研究[J].*中国激光*, 2000, 27(10): 921-926.

栏目编辑: 刘丰瑞