

引用格式: WANG Jing, LIU Bo, LIU Kunxiang, et al. Trapping Characteristics of Optical Tweezers in Deep-sea Environment[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0214001

王京, 刘博, 刘坤香, 等. 光镊在深海环境中的捕获特性[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0214001

# 光镊在深海环境中的捕获特性

王京<sup>1,2</sup>, 刘博<sup>1,2</sup>, 刘坤香<sup>1,2</sup>, 陈福原<sup>1,2</sup>, 李备<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 在深海原位环境下精确捕获和收集单个目标微生物是当前深海微生物研究中的一大挑战。设计了一个应用在深海环境中的光镊捕获系统方案, 系统包含光镊模块、微流控芯片、耐压外罩等部分, 可实现原位捕获收集深海微生物。建立了位于南海北纬 18° 附近, 1.5 km 深处的海水折射率模型, 预估了深海对光镊系统激光功率的损耗。使用 T 矩阵法计算对比了光镊在深海中和陆地上的纯水中对不同折射率和不同大小的球形微生物的捕获力。结果表明, 相比于纯水中, 光镊在 1.5 km 的深海中的最大轴向捕获力平均降低了 25%, 最大横向捕获力平均降低了 20%。本研究可为未来基于光镊技术开发的深海微生物分选设备的下海实验提供参考。

**关键词:** 光镊; 光镊捕获力; T 矩阵法; 深海环境; 深海微生物; 海水折射率

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0214001

## 0 引言

1986 年, ASHKIN A 等首次发现一束高度聚焦的激光在光束焦点处产生的光场梯度可以像镊子一样将微米级尺寸的粒子稳定地捕获在光阱中, 从而提出了光镊的概念<sup>[1-2]</sup>。光的力学效应是光的动量守恒定律的体现, 光携带动量, 当光场中的微粒散射光时, 光场的动量发生变化, 微粒获得了动量也就受到相应的力。关于光镊捕获力的影响因素已有很多研究工作。WRIGH W H 等<sup>[3]</sup>证明了最大轴向捕获效率随着物镜数值孔径(Numerical Aperture, NA)和微球直径的变大而增大。周业鹏等<sup>[4]</sup>证明了以拉盖尔-高斯光束为代表的空心光束在捕获较大的微粒时, 在轴向捕获力上比高斯光束更有优势。曹志良等<sup>[5]</sup>比较了四种不同偏振态光场捕获二氧化硅微粒的三维刚度, 结果表明: 当微粒的尺寸和波长相近时, 圆偏振光和线偏振光的光阱刚度大于径向和角向偏振光; 而当微粒尺寸变大时, 角向和径向偏振光的光阱刚度大于圆偏振和线偏振光。SHI Yuzhi 等<sup>[6]</sup>研究表明, 利用椭圆偏振光波以倾斜角度照射三角棱镜形状的介电质纳米颗粒时, 纳米颗粒的旋转方向与椭圆偏振光的自旋角动量方向相反。通过调节入射角, 可以实现粒子旋转方向在顺时针和逆时针之间的切换。

然而, 目前大多数光镊的研究集中在纯水和空气介质中, 鲜有研究报告光镊在深海环境中的应用和捕获力特性的变化。本文提出了一个将光镊应用于深海环境的设计方案, 该方案能在深海中使用光镊原位捕获和分选深海微生物。介绍了基于 T 矩阵法计算光镊捕获力的原理, 研究了深海环境对光镊捕获力的影响因素。建立了位于南海 18°N 附近, 在深度 1.5 km 处的海水折射率模型, 并根据已有的研究数据给出了 1.5 km 处海水对 785 nm 光波的衰减系数估计值。在其他实验参数一致的情况下, 使用 T 矩阵法分别计算高斯型光镊在深海环境中和在纯水中对不同尺寸和折射率的球形微生物的捕获力并进行对比分析。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(No. XDA22020403)

第一作者: 王京, wangjing1@ciomp.ac.cn

通讯作者: 李备, beili@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2023-07-19; 录用日期: 2023-09-15

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

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验设计方案

深海中的光镊捕获系统设计如图1所示,主要包含光镊系统、图像识别系统、微流控芯片、微量注射泵和耐压外罩等。为了原位捕获到深海中的微生物,仪器的外形设计采取凹槽形,使深海海水直接进入凹槽,微流控分选芯片固定在凹槽内,通过微量注射泵将含有深海微生物的海水输送到芯片中。激光束通过扩束后,经物镜汇聚穿过水下光窗和海水层,最终聚焦到微流控芯片的海水通道中,实现在深海原位环境中对深海微生物的捕获。成像照明光束经聚光镜聚焦到微流控芯片的样品区域,进行实时成像。为了实时、准确地捕获到深海原位环境中的微生物,设计方案配备了图像识别系统,可根据微生物的形貌特征对每帧图像中的所有微生物进行标定,并触发光镊捕获系统对目标微生物进行捕获和分选。为了避免深海高压环境对光镊仪器造成的损坏,整个仪器安装在标准大气压下的耐压外罩内。

光镊操控微粒运动方式主要有主动操控和被动操控两种。主动操控利用压电反射镜控制光束在一定角度内偏转,实现光斑的移动。被动操控则通过固定光镊,然后移动样品位移台,实现捕获目标与周围液体环境的相对运动。考虑到被动操控需要体积大且重量重的高精密位移台,不易于装置在系统中,本实验设计方案采用主动操控方式,使用体积小、重量轻的压电反射镜控制光束的偏转,实现光镊移动。图2展示了主动操控式光镊系统的光路原理。

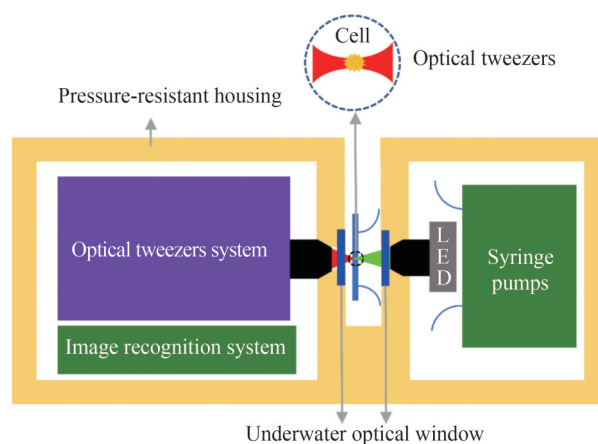


图1 深海中的光镊捕获系统设计示意图

Fig. 1 Schematic design of an optical tweezers capture system in the deep sea

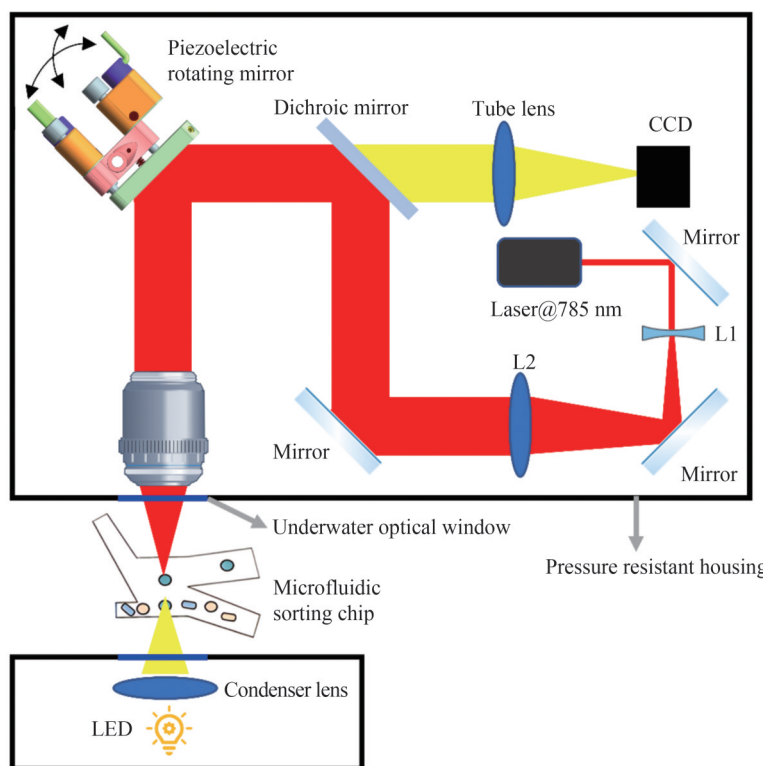


图2 光镊系统的光路原理

Fig. 2 Schematic diagram of the optical path of the optical tweezers system

## 1.2 光镊捕获力的计算

在光力的计算中,实际上涉及到微粒的散射问题,通过计算微粒对光场的影响,可以得到入射场和散射场的动量差,从而计算出光力。光力的计算根据捕获微粒尺寸与激光波长大小,选择不同的理论模型。当微粒直径  $r > 10\lambda$  时,光波近似为几何射线,采用几何光学模型;当  $r < 0.1\lambda$  时,微粒近似为偶极矩,采用瑞利散射模型;当  $r$  在  $0.1\lambda$  和  $10\lambda$  之间,即微粒尺寸和入射波长相近时,通常将光镊中激光与微粒相互作用看作电磁散射。可以使用麦克斯韦方程组来描述散射场,求解方法包括:广义洛伦兹-米氏散射理论(General Lorenz Mie Theory, GLMT)<sup>[9]</sup>、T 矩阵法(T-matrix method)<sup>[10]</sup>、有限元法(Finite Element Method, FEM)<sup>[11]</sup>、时域有限差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)<sup>[12]</sup>等。这些方法各有优缺点,计算所要求的边界条件各不相同,王娟等<sup>[13]</sup>已详细比较了上述几种方法的优缺点。其中,T矩阵法是基于广义洛伦兹-米氏散射理论的一种计算方法,是计算光阱中非球形粒子光力和力矩最有效的方法之一,其最显著的优点在于它仅取决于微粒大小、形状、折射率以及微粒在光阱中的位置,不受入射场的影响。因此,对于任何微粒,T矩阵只需计算一次,就可重复计算光力和力矩<sup>[14-15]</sup>。

在 T 矩阵法中,入射场( $E_{in}$ )和散射场( $E_{out}$ )均使用矢量球谐函数(Vector Spherical Wave Functions, VSWFs)和的形式展开,其表达式为<sup>[16]</sup>

$$E_{in} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_{nm} M_{nm}^{(1)}(kr) + b_{nm} N_{nm}^{(1)}(kr) \quad (1)$$

$$E_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n p_{nm} M_{nm}^{(3)}(kr) + q_{nm} N_{nm}^{(3)}(kr) \quad (2)$$

式中, $a_{nm}$ 、 $b_{nm}$ 为入射光场的展开系数, $p_{nm}$ 、 $q_{nm}$ 为散射光场的展开系数, $M_{nm}^{(1)}(kr)$ 和 $N_{nm}^{(3)}(kr)$ 分别为第一类和第三类矢量球谐函数, $k$ 为微粒周围介质的波数, $r$ 为观察点坐标。在实际计算中 VSWFs 展开式最高终止于  $n = n_{max} = kr_0$  即可,其中  $r_0$  为光束的束腰半径。若要求更高的精度则  $n_{max} = kr_0 + 3(kr_0)^{1/3}$ 。

由于麦克斯韦方程和边界条件具有线性性质,因此入射场的展开系数与散射场的展开系数也具有线性关系,可用 T 矩阵表示为

$$p_{nm} = \sum_{n'=1}^{n_{max}} \sum_{m'=-n'}^{n'} (T_{mm'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mm'n'}^{12} b_{m'n'}) \quad (3)$$

$$q_{nm} = \sum_{n'=1}^{n_{max}} \sum_{m'=-n'}^{n'} (T_{mm'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mm'n'}^{22} b_{m'n'}) \quad (4)$$

将  $a_{nm}$ 、 $b_{nm}$  和  $p_{nm}$ 、 $q_{nm}$  分别简写为  $a$ 、 $b$  和  $p$ 、 $m$ , 则式(3)和(4)用可用矩阵符号表示为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{11} & T^{12} \\ T^{21} & T^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (5)$$

即为 T 矩阵法的基本表达式。

使用 T 矩阵法计算出散射场的展开系数后,就可得到入射场和散射场的动量差,再根据动量守恒定律可求出作用在微粒上的光力。通过对麦克斯韦应力张量在包含微粒封闭曲面上的积分,可计算出作用在微粒上的平均时间光力为<sup>[17]</sup>

$$\langle F \rangle = \oint_S \mathbf{n} \cdot \langle \vec{T} \rangle d\sigma \quad (6)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示时间平均值, $\mathbf{n}$ 为外向单位矢量, $S$ 为包含微粒的任意闭合曲面, $d\sigma$ 为单位面积元, $\vec{T}$ 为 Maxwell 应力张量,其表达式为

$$\vec{T} = \frac{1}{4\pi} \left[ \epsilon_1 \mathbf{E} \mathbf{E} + \mu_1 \mathbf{H} \mathbf{H} - \frac{1}{2} (\epsilon_1 E^2 + \mu_1 H^2) \vec{I} \right] \quad (7)$$

式中, $\epsilon_1$ 和 $\mu_1$ 分别为微粒周围介质的介电常数和磁导率,电场强度 $E$ 和磁场强度 $H$ 均指微粒外部的总场, $\vec{I}$ 为单位张量。将式(7)代入到式(6)中,在半径为 $r$ ( $r$ 大于微粒半径 $a$ )的球面上积分可计算出激光束作用在微粒上总的光力为

$$\langle F \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left\langle \left( \epsilon_1 E_r E + \mu_1 H_r H - \frac{1}{2} (\epsilon_1 E^2 + \mu_1 H^2) r \right) \right\rangle r^2 \sin \theta d\theta d\phi \Big|_{r>a} \quad (8)$$

式中,  $E_r$  和  $H_r$  分别为电场强度和磁场强度的  $r$  分量。最后, 将式(1)和(2)代入到式(8)中, 并进行大量的代数运算, 可得到光力在  $x, y, z$  方向的级数表达式。关于光力的  $z$  分量和  $x, y$  分量的详细表达式可参考文献[17]。

## 2 深海环境对光镊的影响

影响光镊在深海环境中捕获力大小的因素主要有: 1) 低温高压: 在 1.5 km 处的深海中, 温度下降到 3 °C 左右, 压强达到了 15 MPa; 2) 海水折射率: 受海水盐度、温度和压强的影响, 海水较纯水具有更高的折射率; 3) 海水对光的衰减: 海水对光的吸收和散射更强, 导致激光在海水中的功率衰减更明显。针对高压环境, 可以将光镊仪器放入到耐高压舱体中, 避免仪器进水或受压损坏。深海中影响光镊捕获力的主要因素是海水的折射率和海水对激光的衰减。因此, 有必要先分析海水的折射率变化和光波在海水中的衰减特性, 然后根据 1.5 km 处的海水折射率和衰减系数计算光镊在深海环境中的捕获力。

### 2.1 海水折射率的相关研究

目前, 有关海水折射率的研究主要依赖于几个高质量的测量数据集, 如 AUSTIN R W 和 HALIKAS G 的数据集<sup>[18]</sup>、STANLEY E M 的数据集<sup>[19]</sup>和 DAIMON M 与 MASUMURA A 的数据集<sup>[20]</sup>。这些数据集包含了大量温度、盐度、压力、波长和海水折射率等测试数据。基于这些测量数据集, 已经发展了多种经验方程, 如 MILLARD R C 和 SEAVER G<sup>[7]</sup>建立的 MS 方程以及 QUAN X 和 FRY E S<sup>[21]</sup>的 QF 公式。研究者还对这些经验方程进行了比较研究。例如, HU L 等<sup>[22]</sup>使用三个高质量的实验数据库 (Mehu and Johannin-Gilles, 1968; Stanley, 1971; Daimon and Masumura, 2007), 对比了 MS 方程和 QF 公式的计算值与实际测量值的偏差, 结果显示 MS 方程的计算值与测量值的偏差比 QF 经验公式的计算值更小。因此本文选择 MS 方程来计算海水的折射率。

适用于海水的 MS 方程包含波长、温度、盐度和压强四个变量, 使用最小二乘回归 (Least Squares Regression, LSR) 对几个海水折射率数据库进行分析与建模, 其公式为<sup>[7]</sup>

$$N(T, \rho, S, \lambda) = N_I(T, \lambda) + N_{II}(T, \lambda, S) + N_{III}(\rho, T, \lambda) + N_{IV}(S, \rho, \lambda) \quad (9)$$

MS 方程由四个独立区域 ( $N_I, N_{II}, N_{III}, N_{IV}$ ) 构成, 共有 27 项参数, 每个区域都由独立的一套变量 (波长  $\lambda$ 、压强  $\rho$ 、盐度  $S$ 、温度  $T$ ) 组合构成, 且每个区域的独立变量只适用于该区域。

### 2.2 深海温度、盐度的分布特征

由 MS 海水折射率方程可知, 要计算出 1.5 km 处的海水折射率需要得到 1.5 km 处海水的温度、盐度和压强数据。海水温度反映的是海水的状况, 主要受太阳辐射、暖流寒流以及深度的影响。一般来说, 海水温度随海水深度的增加而降低, 在 1 000 m 以下, 海水温度随深度的变化很缓慢, 在 3 000 m 以下, 水温随深度基本不变, 维持在 2 °C 左右<sup>[23]</sup>。海水的盐度指海水中无机物的含量, 主要由钠、镁、钙、钾等阳离子以及氯、硫酸盐、溴化物、碳酸氢等阴离子组成, 这些离子化合物占溶质总量高达 99.9%。由于海水的化学成分基本保持不变, 因此通常通过测定氯的含量来确定海水的盐度, 海水的盐度分布在 33‰~37‰ 之间, 平均盐度为 35‰<sup>[24]</sup>。

本文使用的海水温度盐度数据来自南海海洋断面科学考察 CTD 温盐观测数据集<sup>[8]</sup>, 选择了南海 18.009°N 到 17.992°N、119.336°E 到 116.995°E 区域内所有站点在 1.5 km 处的海水温度和盐度数据。由于海水温度受太阳热辐射的影响, 同一深度位置的海水温度在不同季节乃至不同年份可能存在些许差异。为了减小测量误差和不同季节海水温度的差异, 选取了该区域内所有观测站点从 2009 年至 2012 年期间在该深度处的温度和盐度的平均值。统计结果显示, 1.5 km 处的海水平均温度为 3.0 °C, 平均盐度为 34.586‰。

### 2.3 海水深度与压强的转换关系

海水的压力与水深成正比, 海水深度与压强的换算常用简单的线性流体静力学方程表示为

$$p = -\rho gh \quad (10)$$

式中,  $\rho$  为海水参考密度,  $g$  为重力加速度,  $h$  为海水深度。然而, 该线性换算关系忽略了海水的温度和密度随深度变化对压强的影响, 在海水深度增加的过程中误差会逐渐增大<sup>[25]</sup>。在海洋学研究中, 常用的深度与压强的转换方法有 EOS-80 (Equation of State of Seawater 1980, EOS-80) 方法<sup>[26]</sup>、TEOS-10 (Thermodynamics



Equation of Seawater 2010, TEOS-10)方法<sup>[27]</sup>和海水吉布斯函数方法<sup>[28]</sup>。考虑到计算复杂度、效率和准确度,本文采用计算方便且精度较高的EOS-80标准进行深度与压强的换算。EOS-80方法的计算公式为

$$p = \frac{(1 - c_1) - \sqrt{(1 - c_1)^2 - 4c_2H}}{2c_2} \quad (11)$$

式中, $p$ 为压强(单位为dbar,1 dbar=0.1 MPa), $H$ 为海水深度(单位为m), $c_1 = (5.92 + 5.25\sin^2\Phi) \times 10^{-3}$  ( $\text{m} \cdot \text{dbar}^{-1}$ ), $c_2 = 2.21 \times 10^{-6}$  ( $\text{m} \cdot \text{dbar}^{-2}$ ), $\Phi$ 为纬度值。根据式(11)可计算出在北纬18°附近,海深1.5 km处的海水压强为15.15 MPa。

#### 2.4 海水折射率模型的建立

将2.2和2.3节中得到的海水温度、盐度均值和压强值代入MS海水折射率方程中,可计算出不同波长色光的折射率。用Schott色散公式对这些波长-折射率值进行拟合,即可得到1.5 km处海水的色散曲线。最终,拟合得到的1.5 km处海水介质的折射率方程为

$$n^2 = 1.787 - 1.208 \times 10^{-2} \times \lambda^2 + 7.200 \times 10^{-3} \times \lambda^{-2} - 1.858 \times 10^{-5} \times \lambda^{-4} + 1.574 \times 10^{-5} \times \lambda^{-5} - 5.593 \times 10^{-7} \times \lambda^{-8} \quad (12)$$

1.5 km处的海水(1.5 km seawater)和纯水的色散曲线如图3所示。由图可知,两条曲线形状几乎相同,曲线相对平缓,阿贝数均大于55,海水的色散较小。海水折射率曲线相对纯水折射率曲线整体向上偏移,折射率更大。在波长785 nm处,1.5 km处的海水折射率为1.34,比纯水折射率1.33高出0.01。

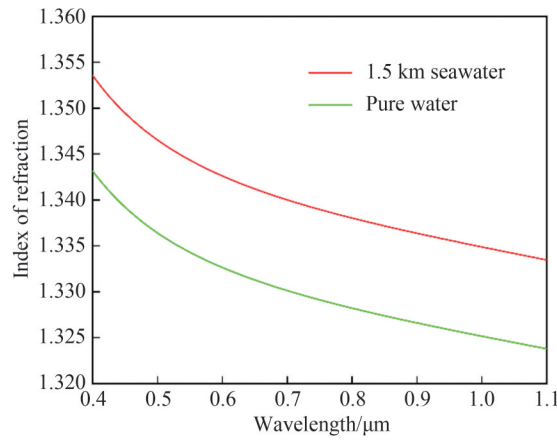


图3 1.5 km处的海水色散曲线和纯水的色散曲线  
Fig. 3 Dispersion curves of seawater at 1.5 km and pure water

#### 2.5 激光在海水中的衰减

海水的光衰减特性与海水中盐度、浊度、温度以及波长有关。这些因素的相对贡献和影响程度会因海域的地理位置、季节变化和海洋特征而有所不同。根据比尔定律,水下环境中的光衰减定义为

$$I = I_0 \cdot e^{(-c(\lambda) \cdot d)} \quad (13)$$

式中, $I$ 为传播 $d$ 距离后的功率, $d$ 为光束的传播距离, $I_0$ 为初始功率, $c(\lambda)$ 为关于波长的衰减系数,等于吸收系数 $a(\lambda)$ 与散射系数 $b(\lambda)$ 之和<sup>[29]</sup>, $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ 。海水吸收系数 $a(\lambda)$ 由纯海水的吸收系数 $a_w(\lambda)$ 、有色溶解有机物质的吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 、浮游植物的吸收系数 $a_{\text{phy}}(\lambda)$ 和碎屑的吸收系数 $a_{\text{det}}(\lambda)$ 四部分组成, $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda) + a_{\text{phy}}(\lambda) + a_{\text{det}}(\lambda)$ 。其中,纯海水对光的吸收作用主要来源于水分子和溶解在水中的各种无机盐,在400~500 nm波段,纯海水的吸收率较低,而对波长较长的红光吸收较强。有色溶解有机物是一类存在于各类水体中的溶解性有机物,对420~450 nm波段的光有较强的吸收,随着波长变长,吸收系数降低。浮游植物属于藻类生物,主要分布于表层水体,对400~500 nm的光吸收性较高。碎屑主要包括活的有机颗粒(浮游动物、细菌等微生物)和无机颗粒(石英和粘土等),其吸收光谱的曲线走势与有色溶解有机物吸收光谱一致。对于深海海水,则主要由纯海水的吸收系数 $a_w(\lambda)$ 、有色溶解有机物质的吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 和碎屑的吸收系数 $a_{\text{det}}(\lambda)$ 三个部分组成,这三种成分的吸收光谱如图4(a)~(c)所示。可知,在近红外波段处,纯海水的吸收系数 $a_w(\lambda)$ 在几种海水成分的吸收系数中数值最大。值得注意的是,温度和盐度

都会影响水的分子结构,从而影响水的吸收特性。然而,研究表明盐度对海水的吸收系数影响有限,淡水和盐水之间的吸收系数差异低于10%<sup>[30]</sup>,而温度对海水的吸收系数影响相对较大<sup>[31]</sup>。

海水的散射主要与海水中的颗粒物浓度有关。海水散射系数由纯海水的散射系数 $b_w(\lambda)$ 、浮游植物的散射系数 $b_{phy}(\lambda)$ 和碎屑的散射系数 $b_{det}(\lambda)$ 三部分组成。这三种散射系数都随波长的变长而降低。深海海水的水质较为纯净,颗粒物很少,可认为是纯海水<sup>[32]</sup>。纯海水的散射光谱如图4(d)所示,可以看出,在近红外波段,纯海水的散射系数非常小,与吸收系数相比可以忽略不记<sup>[33]</sup>。

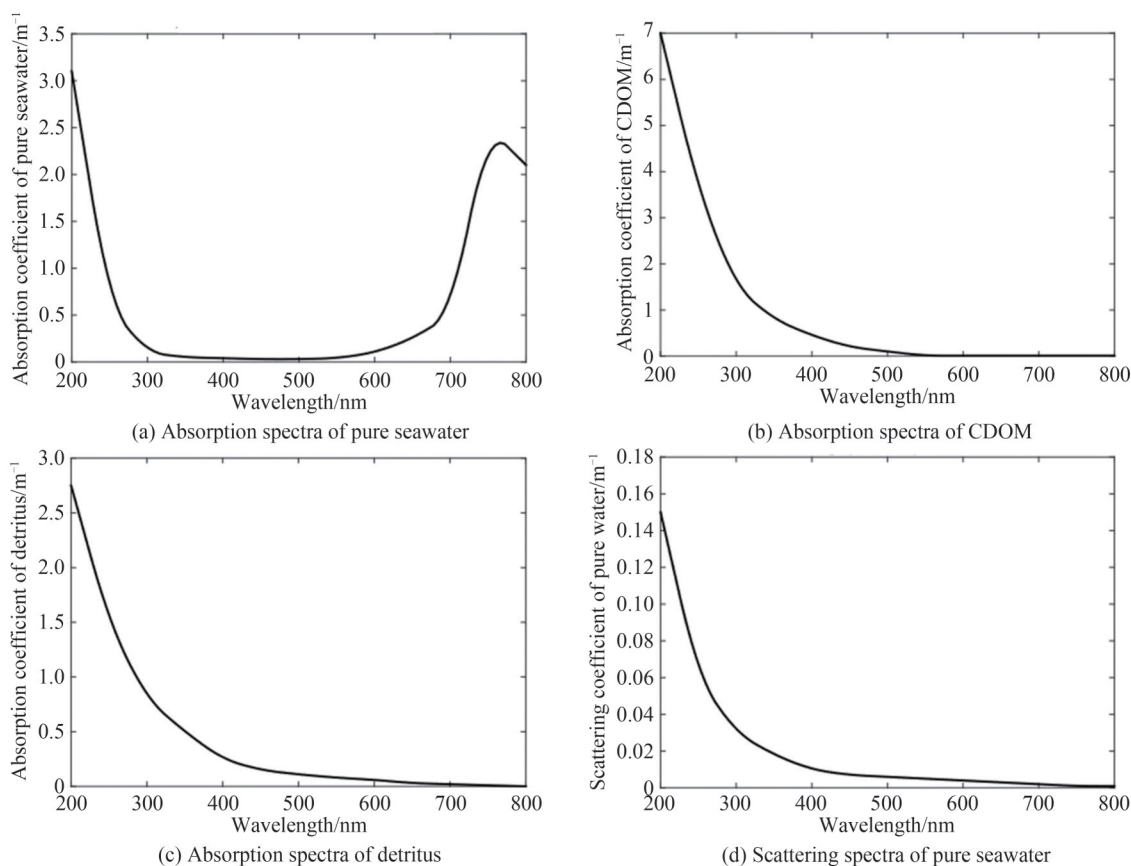


图4 纯海水、有色溶解有机物和碎屑的吸收光谱以及纯海水的散射光谱<sup>[29-30]</sup>

Fig. 4 Absorption spectra of pure seawater, colored dissolved organic matter and impurities, and scattering spectra of pure seawater<sup>[29-30]</sup>

综上所述,深海海水的衰减系数在近红外波段主要由海水吸收系数决定,而海水吸收系数中纯海水的吸收系数占比最大。在室温22℃时,纯海水在波长785 nm处的吸收系数约为 $2.3 \text{ m}^{-1}$ <sup>[29]</sup>。由于缺乏低温下纯海水的吸收系数测试数据,需要进行进一步实验测试以获得更精确的数据。本文的光镊系统使用NA=0.8的水浸物镜,其工作距离在3.5 mm以内,海水层的厚度 $d$ 取值为3.5 mm。根据式(13),可计算出激光在深海中传输3.5 mm后功率降低为初始功率的0.92倍,此时海水的透射率为92%。此外,深海中的光镊系统还包含一个蓝宝石材质的水下光窗。根据实验测试结果,镀完增透膜和憎水膜后的水下光窗的透射率约为94%。因此,水下光窗和海水对785 nm激光功率的损耗约为14%。

### 3 仿真结果与分析

计算了光镊在深海环境中捕获不同尺寸和折射率的球形微生物的光阱力,并与在陆地上纯水环境中的光阱力进行对比,验证了光镊在深海环境中应用的可行性。深海环境中光镊捕获力的衰减主要由三个方面引起。首先,海水折射率的升高导致相对折射率降低,从而降低了捕获力。其次,海水对激光的吸收和散射使得激光功率在焦点处降低。第三,为了防止海水和压力对光学系统造成损坏,光镊系统需安装在高压舱中,光线穿过较厚的水下光窗聚焦到微流控芯片中实现原位捕获深海微生物,而水下光窗的透射率也会引

起激光功率的衰减。值得注意的是这里不考虑平板型水下光窗引入的像差使物镜性能下降导致光镊捕获效率的降低,假设深海环境中使用的是已对平板和海水校正良好的定制物镜。

两组对比实验中,激光波长和功率分别为 785 nm 和 400 mW,激光的偏振态为圆偏振。以两组实验在激光焦点处的功率作为光力计算时的实际激光功率,考虑光镊系统的透过率为 50%,则激光从物镜出射的功率为 200 mW。两组实验使用的物镜数值孔径为 0.8,捕获的目标为球形微生物。微生物和细胞的主要成分为水,因此微生物的折射率一般略高于水的折射率,但大部分细胞的折射率不超过 1.5<sup>[34]</sup>。

首先,分别计算了光镊在深海 1.5 km 处和在纯水环境中捕获半径为 1  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  四种尺寸的球形微生物的光力,四种尺寸的微生物折射率  $n_p$  分别取值 1.35、1.4、1.5。根据 2.4 节中建立的海水折射率模型,深海海水和纯水在 785 nm 波长处的折射率  $n_{ms}$ 、 $n_{mp}$  分别为 1.34、1.33。两组实验的激光功率均为 200 mW。两组实验的光镊轴向捕获力曲线和横向捕获力曲线如图 5 和 6 所示。图 5 中横坐标表示微生物在  $z$  轴方向所处的位置, $z$  为负表示微生物在激光焦点以内,为正表示在焦点之外,0 点为激光聚焦点的位置。纵坐标表示微生物在不同位置处所受的轴向光力  $F_z$  的大小, $F_z$  为正代表光力的方向沿着正光轴方向,表现为推力, $F_z$  为负则代表光力的方向沿着负光轴的方向,表现为拉力。由图 5 和 6 的计算结果可知,尽管深海的折射率只比纯水的折射率高了 0.01,但光镊在深海中的轴向捕获力和横向捕获力均出现了不同程度的下降。

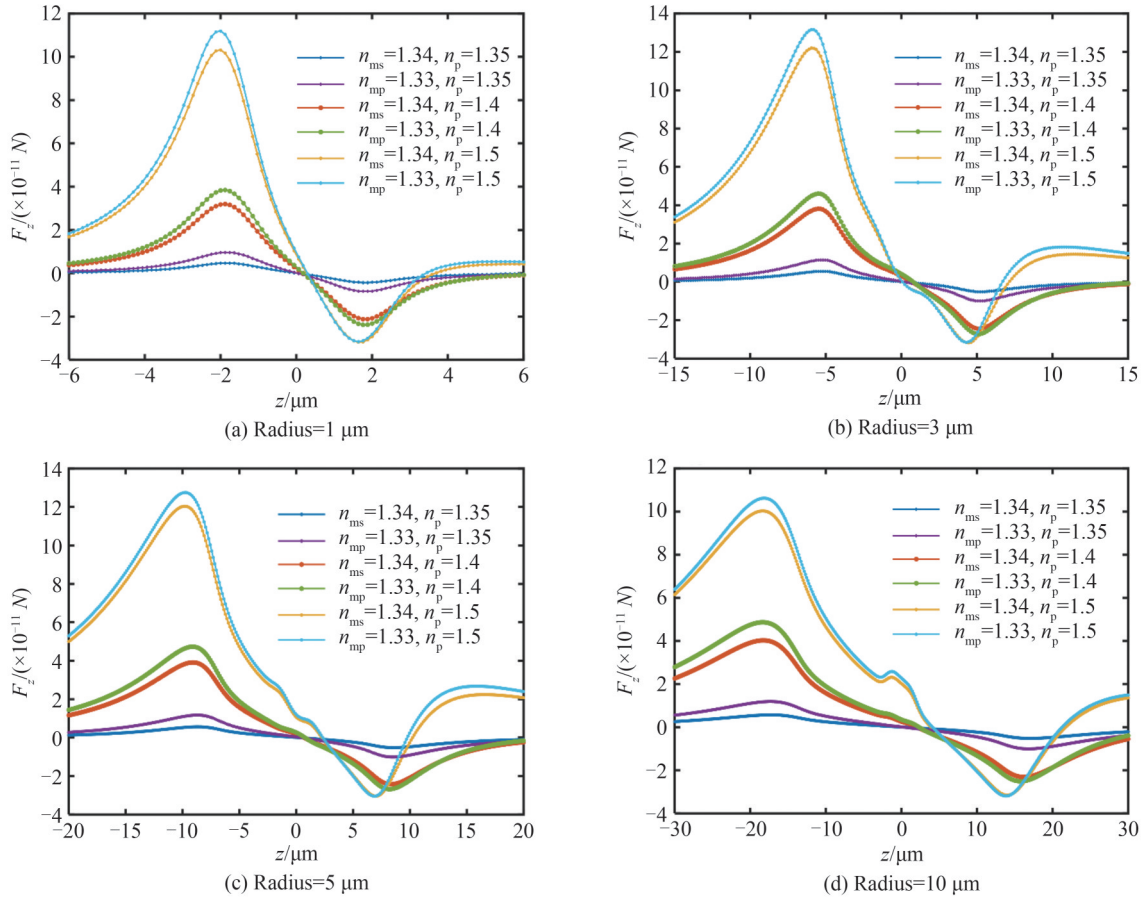


图 5 海水和纯水中,光镊对不同半径微球的轴向捕获力( $F_z$ )曲线

Fig. 5 Axial capturing force ( $F_z$ ) curves of optical tweezers on microspheres with different radii in seawater and pure water

从图 5 和 6 中可以观察到,随着微生物折射率从 1.35 增大到 1.5,光镊的轴向和横向捕获力随之变大,这与前人已有的研究结果相符合。此外,捕获力曲线在  $F=0$  N 处的斜率大小反映了微粒在平衡位置处的光阱刚度大小,光阱刚度越大越容易稳定捕获微粒。根据图 5 和 6 结果,四种尺寸的微生物的轴向光阱刚度和横向光阱刚度都随相对折射率的增大而增大。从图 5 和 6 的曲线对称性上可以进一步观察到,光镊的横向捕获力曲线关于原点对称分布,而轴向捕获力曲线不再关于原点对称分布,同时微粒的平衡位置也位于焦

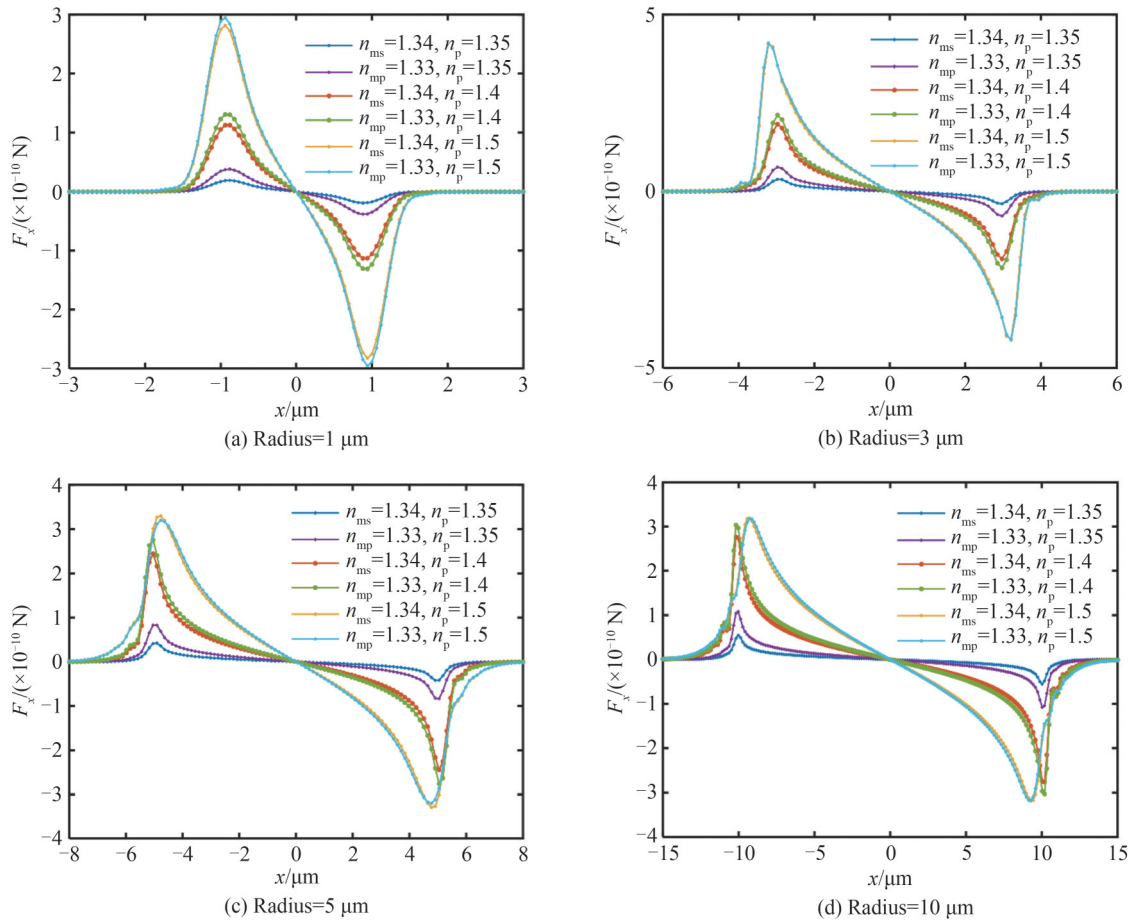


图6 海水和纯水中,光镊对不同半径微球的横向捕获力( $F_x$ )曲线

Fig. 6 Lateral capturing force ( $F_x$ ) curves of optical tweezers on microspheres with different radii in seawater and pure water

点之外。这是因为光力中包含的散射力抵消了部分轴向拉力,导致陷阱的深度变小,降低了光镊在 $z$ 方向上的捕获稳定性。因此,轴向捕获力曲线不再具有关于原点的对称性。而沿着光轴正方向的散射力不会影响与其垂直的横向捕获力的对称性,因此 $x$ 方向的受力分布仍然关于原点对称分布。

最后,统计了光镊在深海中和在纯水中的轴向和横向捕获力的最大值。图7展示了不同折射率的球形

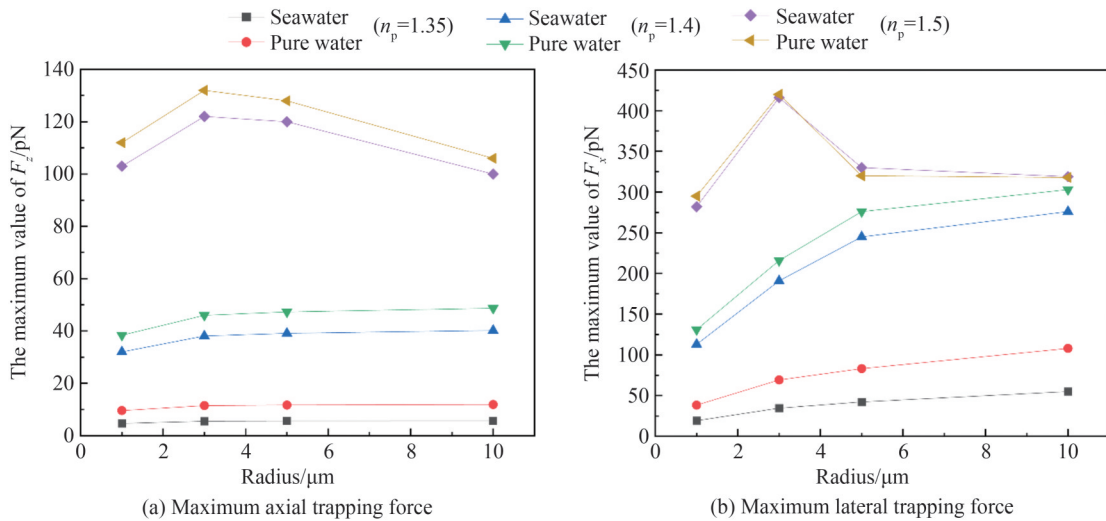


图7 光镊在1.5 km的深海中和在纯水中的最大轴向捕获力和最大横向捕获力点线图

Fig. 7 Point-line plots of maximum axial capture force and maximum lateral capture force for optical tweezers at 1.5 km depth and in pure water



微生物所受的最大捕获力随半径变化的点线图。对于半径为1  $\mu\text{m}$ 的三种折射率(1.35、1.4、1.5)微球,光镊在深海中相比在纯水中的最大轴向捕获力和横向捕获力平均降低了25.49%和22.67%;对于半径3  $\mu\text{m}$ 微球,光镊最大 $F_z$ 和 $F_x$ 平均降低了25.58%和20.87%;对于半径5  $\mu\text{m}$ 微球,光镊最大 $F_z$ 和 $F_x$ 平均降低了25.18%和19.09%;对于半径10  $\mu\text{m}$ 微球,光镊最大 $F_z$ 和 $F_x$ 平均降低了25.1%和19.22%。光镊在深海中捕获这四种尺寸的微球的最大 $F_z$ 和 $F_x$ 平均降低了约25%和20%。可以发现,捕获目标周围介质折射率的升高对轴向捕获力的影响比横向捕获力的影响更大。值得注意的是,以上两组光镊实验使用了相同的激光功率,若考虑到激光功率在深海中相比纯水中有更多的衰减,则光镊捕获力的降低幅度与激光功率的衰减幅度成正比。

## 4 结论

本文提出了一种用于原位捕获和分选深海微生物的光镊系统设计方案,建立了位于南海北纬18°附近,水深1.5 km处的海水折射率模型。发现在785 nm波长处,海水的折射率相较于纯水增加了0.01。通过分析深海海水中各成分的吸收系数和散射系数,确定了纯海水的吸收系数在深海中起主导作用,并根据纯海水的吸收光谱曲线,预估了深海海水的衰减系数为 $2.3 \text{ m}^{-1}$ 。此外,以NA为0.8、工作距离为3.5 mm的水浸物镜为例,计算出了此时海水层的透射率约为92%。需要注意的是,深海中低温纯海水的吸收系数需要进一步的测试以提高数据的准确性。以不同尺寸和折射率的球形微生物为例,研究结果表明:在激光焦点处功率相等的条件下,光镊在深海环境中相比在陆地上的纯水中,最大轴向捕获力平均下降了约25%,最大横向捕获力平均下降了约20%。将光镊技术用于深海微生物的原位捕获,扩展了光镊技术的应用范围和领域,也是对光镊仪器更深的探索。研究方案和结论可为深海微生物资源的开发提供技术支持。

### 参考文献

- [1] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [2] 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.
- [3] WRIGHT W H, SONEK G J, BERNS M W. Parametric study of the forces on microspheres held by optical tweezers[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(9): 1735-1748.
- [4] ZHOU Yepeng, REN Hongling, 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.
- [5] CAO Zhiliang, LIANG Yansheng, YAN Shaohui, et al. Comparison investigation of the three-dimensional stiffness of optical tweezers with different polarization fields[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 0726002.  
曹志良,梁言生,严绍辉,等.不同偏振态光镊三维光阱刚度的比较研究[J].*光子学报*,2019,48(7): 0726002.
- [6] SHI Y, ZHU T, LIU A Q, et al. Inverse optical torques on dielectric nanoparticles in elliptically polarized light waves[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(5): 053902.
- [7] MILLARD R C, SEAVER G. An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density, and wavelength[J]. *Deep Sea Research Part A*, 1990, 37(12): 1909-1926.
- [8] XU Cao, LI Sha, CHEN Rongyu, et al. 2009-2012 South China Sea section scientific CTD data sets[DB/OL]. *Science Data Bank*. DOI: [10.11922/sciencedb.170.12](https://doi.org/10.11922/sciencedb.170.12).
- [9] LOCK J A. Calculation of the radiation trapping force for laser tweezers by use of generalized Lorenz-Mie theory. I. Localized model description of an on-axis tightly focused laser beam with spherical aberration[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(12): 2532-2544.
- [10] WATERMAN P C. Matrix formulation of electromagnetic scattering[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(8): 805-812.
- [11] WHITE D A. Numerical modeling of optical gradient traps using the vector finite element method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 159(1): 13-37.
- [12] HU Gengjun, LI Jing, LONG Qian, et al. FDTD numerical simulation of the trapping force of microspheres in single optical tweezers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 45-50.  
胡耿军,李静,龙潜,等.时域有限差分法数值仿真单光镊中微球受到的光阱力[J].*物理学报*,2011,60(3):45-50.
- [13] WANG Juan, REN Hongliang, ZHOU Yepeng. Applications of T-matrix method in optical tweezers and its progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 70-82.
- [14] WANG Juan. Study on trapping force of optical tweezers based on T matrix method[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2015.

- 王娟. 基于 T 矩阵法的光镊捕获力研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2015.
- [15] MISHCHENKO M I. Calculation of the amplitude matrix for a nonspherical particle in a fixed orientation[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 1026-1031.
- [16] MISHCHENKO M I. Scattering, absorption, and emission of light by small particles[M]. Cambridge University Press, 2002: 167-171.
- [17] BARTON J P, ALEXANDER D R, SCHAUB S A. Theoretical determination of net radiation force and torque for a spherical particle illuminated by a focused laser beam[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(10): 4594-4602.
- [18] AUSTIN R W, HALIKAS G. The index of refraction of seawater[R]. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1976.
- [19] STANLEY E M. The refractive index of seawater as a function of temperature, pressure and two wavelengths[J]. *Deep Sea Research & Oceanographic Abstracts*, 1971, 18(8): 833-840.
- [20] DAIMON M, MASUMURA A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3811-3820.
- [21] QUAN X, FRY E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18): 3477-3480.
- [22] HU L, ZHANG X, PERRY M J. Light scattering by pure seawater: Effect of pressure[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 146: 103-109.
- [23] ODUMODU C F R, MODE A W. Geothermal gradients and heat flow variations in parts of the eastern Niger delta, Nigeria[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2016, 88(1): 107-118.
- [24] HUBER C, KLIMANT I, KRAUSE C, et al. Optical sensor for seawater salinity[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2000, 368(2): 196-202.
- [25] JI Tianyu, JIANG Guorong, SHI Jian, et al. Methods of depth and pressure conversion in the ocean [J] *Marine Forecasting*, 2015, 32(2): 45-50.  
冀天宇, 蒋国荣, 史剑, 等. 海洋中深度与压强的转换方法[J]. *海洋预报*, 2015, 32(2): 45-50.
- [26] SAUNDERS P M. Practical conversion of pressure to depth [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(4): 573-578.
- [27] MCDUGALL T J, BARKER P M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) oceanographic toolbox[J]. *Scor/Iapso WG*, 2011, 127(532): 1-28.
- [28] SUN Y, SHI J, YANG H. The thermodynamic equation of seawater 2010 and its comparison with the equation of seawater 1980[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 1014-1025.
- [29] ZENG Z, FU S, ZHANG H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [30] SMITH R C, BAKER K S. Optical properties of the clearest natural waters (200 - 800 nm)[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 177-184.
- [31] PEGAU W S, GRAY D, ZANEVELD J R V. Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: dependence on temperature and salinity[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 6035-6046.
- [32] GABRIEL C, M-AKHALIGHI, BOURENNANE S, et al. Channel modeling for underwater optical communication [C]. 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011: 833-837.
- [33] RÖTTGERS R, MCKEE D, UTSCHIG C. Temperature and salinity correction coefficients for light absorption by water in the visible to infrared spectral region[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25093-25108.
- [34] GUL B, ASHRAF S, KHAN S, et al. Cell refractive index: models, insights, applications and future perspectives[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2021, 33: 102096.

## Trapping Characteristics of Optical Tweezers in Deep-sea Environment

WANG Jing<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>1,2</sup>, LIU Kunxiang<sup>1,2</sup>, CHEN Fuyuan<sup>1,2</sup>, LI Bei<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

**Abstract:** A significant hurdle in current deep-sea microbial research remains the inability to capture these microbes in their natural habitat. Optical tweezers, with their non-contact, low-damage, and highly precise capabilities, present an ideal solution for capturing and manipulating microorganisms in liquid

environments, showing promise in capturing deep-sea microbes. However, existing research on optical tweezers primarily focuses on ideal mediums such as pure water and air, with few studies exploring their application and the alteration of trapping force characteristics in the deep-sea environment.

In order to address the challenge of accurately capturing and collecting deep-sea microorganisms, this paper presents a designed optical tweezers acquisition system tailored for deep-sea environments. The system incorporates an optical tweezers module, a microfluidic chip, and a pressure-resistant cover, facilitating the in-situ capture and sorting of deep-sea microorganisms. In examining the alteration of trapping force in optical tweezers in deep-sea conditions compared to pure water, this study initially outlines the principle and methodology for calculating trapping force using the T-matrix method. Subsequently, it investigates the factors influencing optical tweezers' trapping power in the deep-sea environment, including changes in seawater's refractive index and light wave attenuation. To achieve this, a refractive index model for seawater at 1.5 km north latitude of 18° in the South China Sea is established, and the attenuation coefficient of seawater to light waves is estimated based on prior research data. Furthermore, under consistent experimental parameters, the study employs the T-matrix method to calculate the trapping force of Gaussian optical tweezers in both deep-sea conditions and pure water. This aims to capture spherical microorganisms of varying sizes and refractive indices, assessing the decrease in trapping force of optical tweezers in the deep-sea compared to pure water.

Our experimental findings reveal that the shape of the dispersion curve of seawater at 1.5 km is almost the same as that of pure water on land, indicating a relatively gentle curve and an Abbe number exceeding 55, indicating minimal dispersion in seawater. Notably, compared to pure water, the refractive index of seawater is slightly higher, measuring 1.34 at a wavelength of 785 nm, a marginal increase from pure water's 1.33. At this juncture, the attenuation coefficient of seawater stands at approximately  $2.3 \text{ m}^{-1}$ , resulting in a 92% transmittance through a 3.5 mm thick seawater layer. The study calculates the optical forces exerted by optical tweezers on spherical microorganisms with radii of 1  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , and 10  $\mu\text{m}$  in both the 1.5 km deep-sea environment and a pure water environment, with refractive indices of 1.35, 1.4, and 1.5, respectively. The findings indicate an average decrease of approximately 25% in maximum axial capturing force and about 20% in maximum transverse capturing force in the deep-sea environment compared to pure water on land. This emphasizes the greater influence of the increase in the medium's refractive index surrounding the target on the axial capturing force than on the transverse capturing force. Notably, these optical tweezers experiments employed the same laser power. Considering the greater attenuation of laser power in the deep-sea compared to pure water, the maximum trapping force of optical tweezers is proportional to the attenuation amplitude of the laser power.

In summary, this study applies optical tweezers technology to in-situ capture deep-sea microorganisms, extending the technology's application domain. Additionally, it represents a comprehensive exploration of optical tweezers' functionality in a distinctive and demanding environment. These findings could serve as a valuable reference for future experiments developing deep-sea microbial sorting equipment utilizing optical tweezers technology.

**Key words:** Optical tweezers; Optical tweezers capture force; T-matrix; Deep-sea environment; Deep-sea microorganisms; Refractive index of seawater

**OCIS Codes:** 140.7010; 290.5850; 010.1030; 010.4450