

# 太阳能光热汽泡去除水中微塑料研究

洪崇杰<sup>1\*</sup>, 王琳<sup>1</sup>, 陈婷<sup>2#</sup>, 刘国华<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学, 低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京

<sup>2</sup>江汉大学, 光电材料与技术学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年12月21日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年2月21日

## 摘要

提出了一种利用光热汽泡涡流调控去除微塑料的新方法。通过利用热汽泡周围的Marangoni流效应, 塑料颗粒可以循环流入汽泡中, 并在汽泡内“熔炉”中聚集和融合成大块塑料, 从而可持续地收集水中的塑料颗粒。研究表明, 等离激元纳米结构阵列具有优异的吸光集热特性, 阵列单元形态的变化会影响光热性能; 而水体中光热汽泡所引起的涡流显著影响了微塑料的富集。此外, 汽泡的直径、颗粒浓度和粒径也会影响热汽泡对颗粒的富集效率。研究丰富了光热汽泡多相流理论, 并为水中微塑料去除研究提供了新的思路。

## 关键词

太阳能, 微塑料, 纳米结构, 光热汽泡, Marangoni对流

# Removal of Microplastics from Water Using Solar Thermal Bubbles

Chongjie Hong<sup>1\*</sup>, Lin Wang<sup>1</sup>, Ting Chen<sup>2#</sup>, Guohua Liu<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Materials and Technology, Jiangnan University, Wuhan Hubei

Received: Dec. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: Dec. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

A new method using solar thermal bubble vortex modulation for the removal of microplastics has been proposed. By exploiting the Marangoni flow effect around the hot bubbles, plastic particles

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 洪崇杰, 王琳, 陈婷, 刘国华. 太阳能光热汽泡去除水中微塑料研究[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(1): 27-36. DOI: 10.12677/aepe.2024.121004

can circulate into the bubbles and aggregate/fuse into larger plastic masses within the “melting pot” of the bubbles, allowing for sustainable collection of plastic particles from water. The study indicates that plasmonic nanostructure arrays exhibit excellent light absorption and heat collection characteristics, and the morphological changes of the array units can affect the photothermal performance. The vortices induced by the solar thermal bubbles in the water significantly impact the enrichment of microplastics. Additionally, the diameter of the bubbles, particle concentration, and particle size also affect the enrichment efficiency of the hot bubbles on the particles. This research enriches the theory of photothermal bubble multiphase flow and provides new insights into the research on the removal of microplastics from water.

## Keywords

Solar Energy, Microplastics, Nanostructures, Plasmonic Bubble, Marangoni Convection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微塑料是指直径小于 5 mm 的聚合物塑料碎片和颗粒，具有体积小、比表面积大、难降解的特点，容易受到物理、化学和生物因素的影响，进而改变其表面特性，从而对环境产生重大影响，随着人类活动的不断增加，微塑料污染已经成为全球性环境问题[1]。废弃微塑料可以在水体中持久存在，严重影响水环境安全，对人类健康构成潜在威胁[2] [3] [4]。

为了解决微塑料污染问题，研究者们提出了多种去除方法，其中气泡浮选法是一种较为有效的方法，通过向水中注入气体形成微气泡群，使颗粒和气泡碰撞并黏附，形成稳定的团聚体，漂浮到悬浮液表面，最后通过收集装置进行收集[5]。相较于传统物化方法，气浮法具有工艺简单、变负荷适应性强，效果稳定等优点[6]。然而，常规气泡浮选技术虽然对尺寸较大的微塑料分离效果较好，但不适合小尺寸的微塑料分离。其次，对于微塑料的形态和密度也有一定的要求，对于形态不规则或密度较大的微塑料去除效果不佳。此外，该过程需消耗大量电能并且添加的化学试剂还可能会导致二次污染。因此为了满足水体微塑料分离的需求，急需发展可持续性水体微塑料分离技术。

本文提出光热气泡涡流调控去除水中微塑料的创新思路，利用热气泡周围的 Marangoni 效应，驱动流体做漩涡运动，使塑料颗粒循环对流进入热气泡中，在高温气泡内熔融聚集，从而达到持续性俘获和富集水体中微塑料的目的。该技术可从源头上突破水体微塑料去除技术瓶颈，为利用太阳能光热气泡去除水体微塑料研究提供新思路。

## 2. 原理与模型构建

### 2.1. 原理

当金属纳米结构的尺寸和入射光波长相当时，入射光能够在近场范围内穿过金属并诱导传导电子极化。在金属纳米结构的内部，入射光的电场使导电电子相对于固定在晶格中的离子发生位移，粒子内部会形成偶极矩，在电场力的作用下，内部电子就像弹簧振子一样相对平衡位置发生振荡，进而产生一种震荡波，这就是等离激元共振效应[7] [8]。纳米结构在入射光的照射下，光能可以在非辐射跃迁下转变为

热能。等离子激元纳米结构有着优异的吸光性能和光热转换特性[9] [10]。光热材料和光吸收材料可作为热介导光学操作中目标物体的基底和热源。在光照下，金属纳米结构的局部表面等离子激元被激发，增加导电电子和晶格原子之间的碰撞频率，从而在金属纳米结构的激元表面建立温度梯度场[9] [10] [11] [12]。

图 1 是光热汽泡去除微塑料的原理示意图，激光束照射在等离子激元基底上，纳米结构阵列发生等离子体共振，吸光集热并在聚光点处达到汽泡成核温度，形成汽泡，汽泡诱发局域 Marangoni 涡流，水中的微塑料通过循环对流进入高温汽泡中熔融成大块塑料，再通过常规沉降、过滤等方式有效分离和去除。

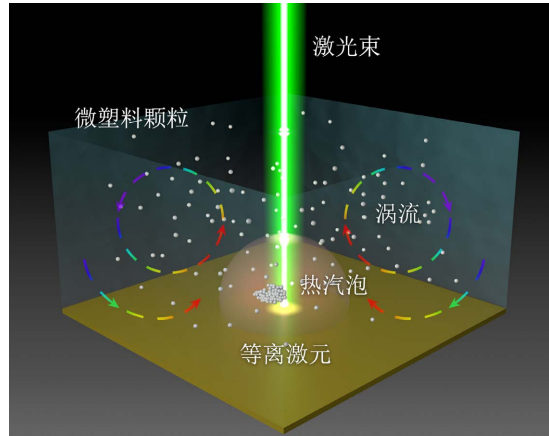


Figure 1. Diagram of microplastics removal by plasmonic bubbles  
图 1. 光热汽泡去除微塑料示意图

## 2.2. 物理模型

### 2.2.1. 电磁场频域模块

等离子激元共振可以用麦克斯韦方程(1)来描述[10] [13] [14]，麦克斯韦方程被表示为电场的波动方程。其中  $\mu_r$  是粒子的相对磁导率， $\mathbf{E}$  是电场， $k_0$  是自由空间波数( $k_0 = \omega/c_0$ ， $c_0$  为真空中的光速)， $\omega$  为入射光的角频率， $\sigma$  为电导率， $\epsilon_r$  是金的包含实部和虚部的相对介电常数。

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \tilde{\mathbf{E}}(x, y) e^{-ik_z z} \quad (2)$$

式(2)定义了沿  $x$  轴偏振，沿着  $z$  轴传播的背景电场，其中  $k_z = 2\pi n/\lambda$ ，为平面波振幅大小， $n$  为介质的折射率， $\lambda$  为波长[14]。

### 2.2.2. 传热和 CFD 模块

等离子激元效应产生的热量向周围环境释放，传递规律满足式(3)中导热微分方程[15] [16]。其中  $k$  为流体的热导率， $\mathbf{u}$  为流速， $Q$  为纳米金膜吸收的热量[17]。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3)$$

研究中雷诺数小于 1 ( $Re < 1$ )，粘性力占主导地位，忽略惯性项，用动量方程(4)来描述， $p$  为流体应力张量， $\mathbf{l}$  为单位张量， $\mathbf{F}$  为流体内部作用力，并考虑重力项  $\rho \mathbf{g}$  的影响。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nabla \cdot [-p \mathbf{l} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

模拟计算中使用蠕动流接口针对低雷诺数近似求解 NS 方程，蠕动流也被称为斯托克斯流[18]，适用于以粘性效应为主的情况。

### 2.2.3. 多物理场耦合

电磁热多物理场中把模型传热部分的热源表示成能量损失  $Q_e$ ，需要将式(3)右边改写成  $Q_e$ ，如(5)所示， $\mathbf{J}$  和  $\mathbf{E}$  分别为电流密度和电场强度[19]。

$$Q_e = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) \quad (5)$$

非等温流动多物理场耦合了传热和流体流动。当气液界面的表面张力受到某种物质的浓度或者温度分布的影响时，就发生 Marangoni 对流[20] [21]。Marangoni 效应是一种剪切应力，它取决于表面张力随温度梯度的切向和法向变化[22]，在蠕动流环境中可以用式(6)来表示，其中  $\sigma$  为表面张力系数， $\mathbf{n}$  为法向量，等号右边第一项表示与曲率效应相关的法向力，第二项表示切向力。

$$\mathbf{n} \cdot [-p\mathbf{l} + \mathbf{K}] = \sigma(\nabla_t \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} - \nabla_t \sigma \quad (6)$$

气液界面剪切应力可以用式(7)来描述[11]。

$$\tau_s = \eta \frac{\partial u_s}{\partial N} = -k_T \nabla T_s \quad (7)$$

$\tau_s$  是界面处的剪切应力， $\eta$  是流体运动粘度， $u_s$  和  $N$  表面上的切向速度和法向量， $k_T$  是表面张力的温度系数， $\nabla T_s$  是表面上的温度梯度。气液界面被加热时，温度高的界面具有较低的表面张力，液体流向表面张力较高的区域，Marangoni 对流流动将沿着界面附近的温度梯度移动，由于流体的连续性，从而表现为循环涡流。

### 2.2.4. 粒子示踪

公式(8)欧拉 - 拉格朗日方程定义了一组粒子位置分量的二阶常微分方程，可用于沿流线追踪粒子。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \mathbf{v}} \right) = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} \\ L = \frac{1}{2} m_p (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) \end{cases} \quad (8)$$

$L$  是拉格朗日量(单位: J)， $\mathbf{v}$  是粒子速度， $\mathbf{q}$  是粒子位置矢量。

光 - 热 - 流体多物理场模拟分两步进行，在纳米尺度的结构阵列中，对电磁波和传热进行耦合计算，在毫米尺度的反应池中，对传热和流体流动进行耦合计算，粒子轨迹示踪为单向耦合，忽略粒子对流体作用。

## 2.3. 模型参数与假设

Table 1. Parameter setting of model

表 1. 模型参数设置

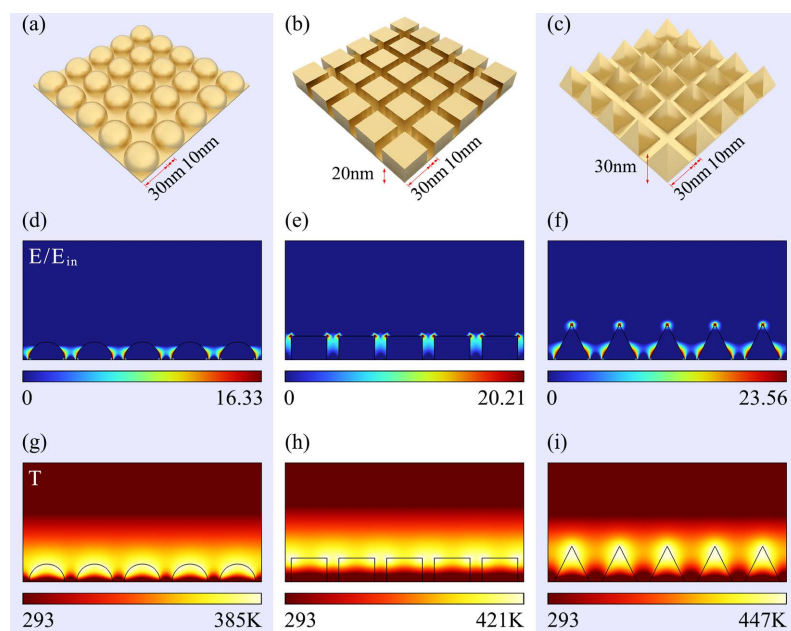
项目	名称	值
$\lambda/\text{nm}$	入射激光波长	520
$E_{\text{in}}/\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	空气介质中入射场强	$1.9 \times 10^7$
$T_0/\text{K}$	反应池初始温度	293
$d_1/\mu\text{m}$	聚焦光斑热点直径	10
$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	示踪颗粒密度	1.05

光热转换的几何模型是如图 2(a-c)所示的三种不同阵列单元的金纳米结构阵列,球形直径和三棱锥高为 30 nm、长方体高为 20 nm,阵列间距均为 10 nm。模拟涡流的反应水池的直径 0.6 cm,高 0.2 cm。其他参数设置,见表 1。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 纳米结构的吸光集热性能

模拟中用实验室中常见的 520 nm 激光垂直照射三种不同的金纳米结构阵列,得到相对于入射场强的稳态相对电场强度和中心截面温度分布云图,如图 2(d-f)和(g-i)所示。由于纳米结构中自由电子和光场相互作用产生的等离激元共振效应,光学近场范围内有局域电场极大增强的现象,局域电场的极值出现在纳米阵列的间隙和阵列结构的棱角处。这是因为纳米结构彼此靠近,建立了强等离激元耦合,使每个阵列单元暴露在入射光电场以及相邻多个单元的近场辐射中,每对阵列单元之间的电场相互叠加[13]。具有表面纳米结构的金薄膜类似于宽频带高效光吸收器,将吸收的光能转换为热能。此外,金属纳米结构在热管理方面也表现出优异的性能,可以用于控制热量的产生和传播[9] [23] [24] [25]。通过对入射电场放大倍数和产热聚热效果比较分析,得出以棱锥为单元的金纳米结构阵列的光热性能优于立方形、大幅度领先于球形,棱锥结构中叠加电场出现极值的相应位置出现局域高温,热量聚集不易扩散,表现出优良的吸光集热性能。

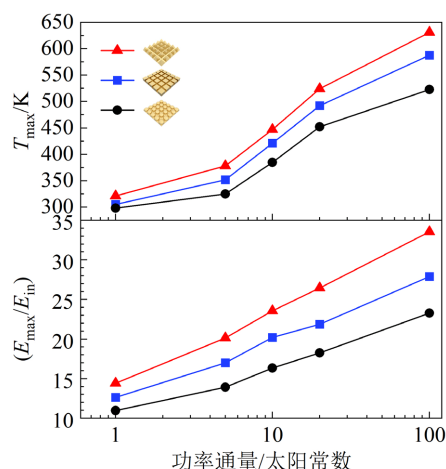


**Figure 2.** Light absorption and heat collection characteristics of gold nanostructure arrays with spheres, cuboids and pyramids as units: (a-c) are schematic diagrams of nanoarrays; (d-f) are simulated cloud diagrams of relative electric field intensity; (g-i) are simulated cloud diagrams of cross-sectional temperature distribution

**图 2.** 以球形、长方体和棱锥为单元的金纳米结构阵列的吸光集热特性: (a-c)为纳米阵列示意图; (d-f)为相对电场强度云图; (g-i)为截面温度分布云图

分别以 1、5、10、20、100 个太阳( $1357 \text{ W/m}^2$ )折算的功率密度照射三种不同的纳米结构阵列,结果如图 3 所示,三种结构的最大温度  $T_{\max}$  和最大相对电场强度( $E_{\max}/E_{in}$ )都随功率通量增加而变大,并且不同结构的最大温度/相对场强随功率增大差异越明显。棱锥单元的最高温度和场强放大倍数的极值均高于长方体和球形单元,在 10 个太阳照射下,其最大电场放大倍数达到 23.56,局部最高温度达到 447 K。





**Figure 3.** Maximum relative electric field strength and maximum temperature changes with power for three structural arrays

**图 3.** 三种结构阵列的最大相对电场强度和最大温度随入射功率的变化

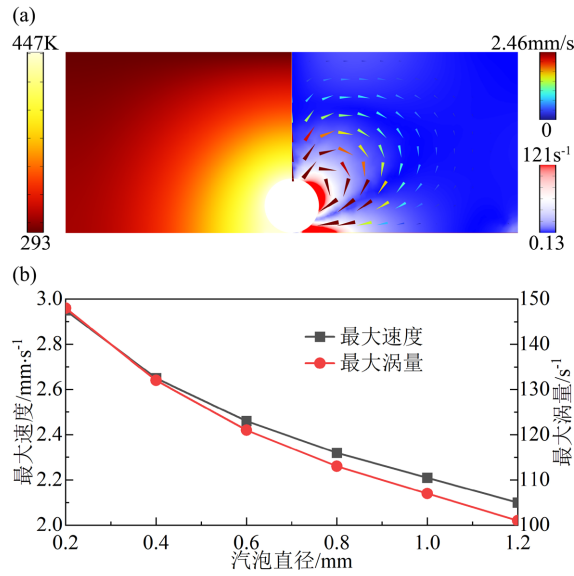
### 3.2. 反应池内的传热传质

将 10 个太阳照射棱锥金纳米结构阵列得到的光热转换最大温度 447 K 作为热点的边界条件, 考虑汽泡成核后, 耦合传热和流体流动模拟得到图 4 所示的结果, 图 4(a)左半部分是池内温度分布, 热汽泡表面和底面接触部分均认为达到纳米结构阵列的最高温度, 图右半部分是涡量云图, 分布的圆锥箭头为对应位置的速度矢量方向, 箭头大小和颜色梯度反应速度大小, 图 4(b)对比在相同过热度下汽泡大小对池内涡流的影响。

池底面纳米结构为汽泡成核生长提供大量潜在位点, 可以在金膜上通过激光照射产生汽泡, 与常规的汽泡不同, 这种汽泡在生成后可以保持与表面的接触, 以截断球形的形状增大到一定大小[26]。由于汽泡可以包覆在纳米结构上, 纳米结构周围的汽泡形成可以显著提高结构温度, 汽泡消散的速度比较缓慢[13]。这使得纳米结构表面的汽泡可以成为一个稳定的高温“熔炉”。当液体中存在微小汽泡或者其他异物时, 这些微小汽泡或异物可以作为汽泡核, 促使液体沸腾并形成汽泡, 汽泡大小取决于过热度、液体性质、汽泡核大小和数量等多种因素。

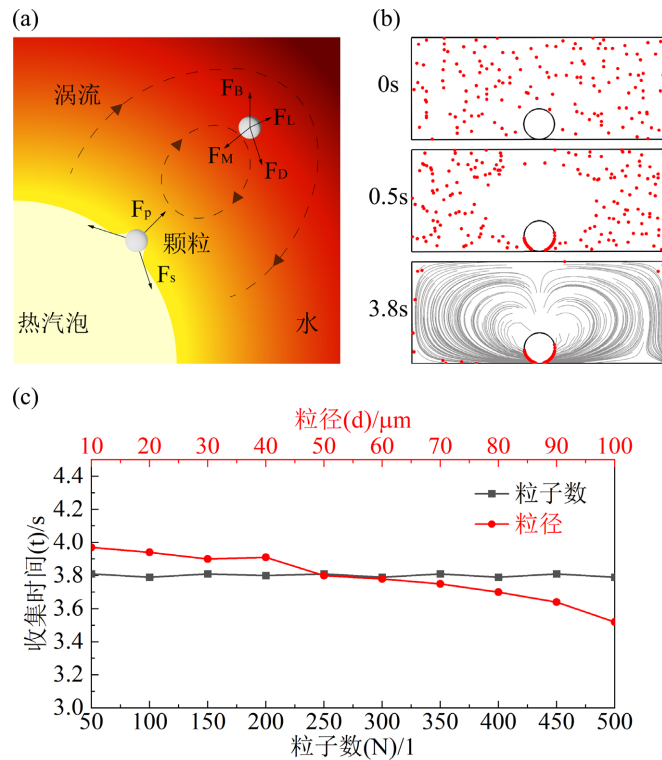
气液交界处存在较大温度梯度, 会导致界面上的应力不连续, 产生表面张力梯度, 进而引起传质现象, 相比于自然对流即在流体密度梯度作用下的传质流动, Marangoni 对流引起的涡旋较强, 可以操控纳米级物体[11]。如图 5(a)所示, 汽泡附近的微颗粒在流体域中受到附加质量力  $F_M$ 、曳力  $F_D$ 、浮力  $F_B$  和剪切引起的升力  $F_L$ , 颗粒位于气液界面时除了受到曳力外, 还会受到表面张力  $F_S$ , 另外压力  $F_P$  也会对颗粒运动产生影响, 这三种力沿汽泡径向平衡使得粒子被束缚在汽泡表面[27] [28]。图 5(a)中最大速度位于汽泡表面两侧和中下部位置, 可以观察到流域内流体流动成漩涡状, 流速较大的流体微团向热汽泡四周自上而下裹挟带动周围低速流体微团, 并将其卷入汽泡下部, 流体中微塑料颗粒在高温条件下融化, 并在被卷吸进入汽泡的过程中不断熔合聚集成块, 最后在汽泡内部汇聚。

改变汽泡直径, 选取同一时间断面, 从图 4(b)中折线走势可以看出, 直径较小的汽泡附近产生的涡量较大, 这意味着, 流体速度矢量旋转的强度越大, 涡旋强度的增大可以使水体微塑料颗粒的加速度增大, 强化颗粒在流体中运动能力。直径较小的汽泡能够提高流速, 提高对微颗粒的控制能力, 这对于捕获流体域中粒径稍大的微塑料颗粒是有利的, 此外由于较小汽泡比表面积较大, 对微颗粒的吸附性能更好, 诱导阵列结构不同位点产生多个小汽泡, 有利于提高对水体微颗粒的富集效率。



**Figure 4.** Effect of bubble diameter on velocity/vorticity value and distribution  
**图 4.** 气泡直径对速度/涡量大小及分布的影响

### 3.3. 粒子示踪模拟热气泡富集微塑料



**Figure 5.** (a) Particle force diagram; (b) Particle position distribution and trajectory diagram; (c) Effect of particle number and size on the particle collection efficiency of hot bubble

**图 5.** (a) 粒子受力图; (b) 粒子的位置分布和轨迹图; (c) 粒子数和粒径对热气泡收集颗粒效率的影响

用粒子追踪模块研究粒子的运动特点，在初始时刻流体域内随机位置释放粒子，前文模拟得到的流

体瞬态速度场作为初始条件, 粒子的位置和速度由拉格朗日方程确定, 两侧壁条件为漫散射, 本模拟中, 粒子示踪是单向耦合流体流动, 忽略流体与颗粒以及颗粒之间的相互作用, 仅考虑 Marangoni 对流驱动下的颗粒运动。模拟中认为气泡捕获颗粒为理想情况, 给气泡外边界设置粒子连续性条件即接触到热气泡的粒子会被吞噬, 并且给热气泡内边界设置黏附条件即进入热气泡内的粒子会附着在热气泡内壁上, 以此来模拟气泡富集微颗粒的效果。图 5(b)显示的是反应池内释放的 200 个粒子在初始 0 时刻、第 0.5 s 和第 3.8 s 的位置分布图, 热气泡附近的颗粒在初始较短时间内就被热气泡捕获, 第 3.8 s 发现绝大多数粒子(占总数约 90%)已经附着在热气泡中下部, 离热气泡较远的部分粒子还未被捕获, 随模拟计算时间推移, 这些粒子最终汇集在热气泡表面。在第 3.8 s 位置分布图的背景上绘制了各粒子从第 0 s 到第 3.8 s 的运动轨迹, 轨迹图与利用 Marangoni 效应和热毛细对流进行微操作的相关研究中报道的现象相似, 呈现涡旋流动特征[17] [29]。

图 5(c)研究了颗粒浓度和粒径对收集效率的影响, 当热气泡内统计的颗粒数占总数的 90%时可认为近乎收集完成, 记录相应时刻, 收集时间越长代表效率越低。模拟结果显示在一定浓度范围内收集效率受浓度变化影响较小, 在粒子数的取值范围内, 收集时间上下浮动 0.05 s, 占总时长 1%左右; 随着粒径增大, 收集时间减少, 粒径较大的颗粒质量大, 在重力影响下, 做涡旋运动的轨迹半径较小, 更容易被卷吸进入热气泡。

## 4. 结论

本文利用多物理场数值仿真模拟软件, 对金纳米结构阵列的光热特性和反应池中的涡量与流速分布进行了模拟计算, 验证了光热气泡去除微塑料思路的可行性, 结果表明:

- 1) 金纳米结构阵列具有优良的吸光集热性能, 可以显著增强入射光电场强度, 激光共振产生的热量聚集在纳米结构阵列表面上, 棱锥状单元纳米结构阵列的光热性能较为优异;
- 2) 热气泡诱发的 Marangoni 对流可以对微塑料颗粒的传质行为进行控制, 涡量/速度云图和粒子轨迹图均显示微颗粒做涡旋运动;
- 3) 直径较小的气泡能提高流速, 诱导阵列结构产生多个小气泡, 有利于提高微塑料富集效率;
- 4) 微颗粒浓度对收集效率的影响较小, 收集效率随粒径增大而提高;
- 5) 热气泡卷吸、熔融聚集并去除微塑料颗粒在技术理论上是可行的, 该技术为发展规模化太阳能驱动去除水中微塑料提供了科学依据。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(No.52306086, No.52376143)。

## 参考文献

- [1] Li, L.Z., Luo, Y.M., Li, R.J., *et al.* (2020) Effective Uptake of Submicrometre Plastics by Crop Plants via a Crack-Entry Mode. *Nature Sustainability*, **3**, 929-937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>
- [2] Li, D.Z., Shi, Y.H., Yang, L.M., *et al.* (2020) Microplastic Release from the Degradation of Polypropylene Feeding Bottles during Infant Formula Preparation. *Nature Food*, **1**, 746-754. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- [3] Pinheiro, H.T., MacDonald, C., Santos, R.G., *et al.* (2023) Plastic Pollution on the World's Coral Reefs. *Nature*, **619**, 311-316. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- [4] Rillig, M.C. and Lehmann, A. (2020) Microplastic in Terrestrial Ecosystems: Research Shifts from Ecotoxicology to Ecosystem Effects and Earth System Feedbacks. *Science*, **368**, 1430-1431. <https://doi.org/10.1126/science.abb5979>
- [5] Esfandiari, A. and Mowla, D. (2021) Investigation of Microplastic Removal from Greywater by Coagulation and Dissolved Air Flotation. *Process Safety and Environmental Protection*, **151**, 341-354. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.027>



- [6] Zhang, Y.S., Jiang, H.R., Bian, K., *et al.* (2021) Is Froth Flotation a Potential Scheme for Microplastics Removal? Analysis on Flotation Kinetics and Surface Characteristics. *Science of the Total Environment*, **792**, Article ID: 148345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148345>
- [7] Baffou, G., Polleux, J., Rigneault, H. and Monneret, S. (2014) Super-Heating and Micro-Bubble Generation around Plasmonic Nanoparticles under cw Illumination. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 4890-4898. <https://doi.org/10.1021/jp411519k>
- [8] Kamarudheen, R., Kumari, G. and Baldi, A. (2020) Plasmon-Driven Synthesis of Individual Metal@Semiconductor core@Shell Nanoparticles. *Nature Communications*, **11**, Article No. 3957. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17789-y>
- [9] Baffou, G., Berto, P., Bermúdez Ureña, E., *et al.* (2013) Photoinduced Heating of Nanoparticle Arrays. *ACS Nano*, **7**, 6478-6488. <https://doi.org/10.1021/nn401924n>
- [10] Jauffred, L., Samadi, A., Klingberg, H., *et al.* (2019) Plasmonic Heating of Nanostructures. *Chemical Reviews*, **119**, 8087-8130. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00738>
- [11] Chen, Z.H., Li, J.G. and Zheng, Y.B. (2022) Heat-Mediated Optical Manipulation. *Chemical Reviews*, **122**, 3122-3179. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00626>
- [12] Chen, Z.H., Kollipara, P.S., Ding, H.R., *et al.* (2021) Liquid Optothermoelectrics: Fundamentals and Applications. *Langmuir*, **37**, 1315-1336. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c03182>
- [13] Liu, G.H., Xu, J.L., Chen, T. and Wang, K.Y. (2022) Progress in Thermoplasmonics for Solar Energy Applications. *Physics Reports*, **981**, 1-50. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2022.07.002>
- [14] Baffou, G., Quidant, R. and García De Abajo, F.J. (2010) Nanoscale Control of Optical Heating in Complex Plasmonic Systems. *ACS Nano*, **4**, 709-716. <https://doi.org/10.1021/nn901144d>
- [15] Wang, X.J., Meng, X.R., Wang, Y.Q. and Cao, Y. (2019) Simulation of the Optical and Thermal Properties of Multiple Core-Shell Atmospheric Fractal Soot Agglomerates under Visible Solar Radiation. *The Journal of Physical Chemistry C*, **123**, 24225-24233. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b04909>
- [16] Xu, Y.Y., Long, S., Yang, Y.N., *et al.* (2019) Mathematical Simulation of Temperature Distribution in Tumor Tissue and Surrounding Healthy Tissue Treated by Laser Combined with Indocyanine Green. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, **16**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1186/s12976-019-0107-3>
- [17] Mallea, R.T., Bolopion, A., Beugnot, J., *et al.* (2017) Laser-Induced Thermocapillary Convective Flows: A New Approach for Noncontact Actuation at Microscale at the Fluid/Gas Interface. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22**, 693-704. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2639821>
- [18] Liu, Z.H., Lei, J.J., Zhang, Y., *et al.* (2016) Light-Induced Thermal Convection for Size-Based Microparticle Sorting. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, **33**, 1881-1887. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001881>
- [19] Wang, X.J., Wang, Y.Q., Yang, X.X. and Cao, Y. (2019) Numerical Simulation on the LSPR-Effective Core-Shell Copper/Graphene Nanofluids. *Solar Energy*, **181**, 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.018>
- [20] O'Shaughnessy, S.M. and Robinson, A.J. (2014) Convective Heat Transfer Due to Thermal Marangoni Flow about Two Bubbles on a Heated Wall. *International Journal of Thermal Sciences*, **78**, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.12.007>
- [21] Nabavizadeh, S.A., Eshraghi, M., Felicelli, S.D., *et al.* (2019) Effect of Bubble-Induced Marangoni Convection on Dendritic Solidification. *International Journal of Multiphase Flow*, **116**, 137-152. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.04.018>
- [22] Shardt, N., Wang, Y., Jin, Z. and Elliott, J.A.W. (2021) Surface Tension as a Function of Temperature and Composition for a Broad Range of Mixtures. *Chemical Engineering Science*, **230**, Article ID: 116095. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116095>
- [23] Lin, L.H., Wang, M.S., Peng, X.L., *et al.* (2018) Opto-Thermoelectric Nanotweezers. *Nature Photonics*, **12**, 195-201. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0134-3>
- [24] Manrique-Bedoya, S., Abdul-Moqueet, M., Lopez, P., *et al.* (2020) Multiphysics Modeling of Plasmonic Photothermal Heating Effects in Gold Nanoparticles and Nanoparticle Arrays. *The Journal of Physical Chemistry C*, **124**, 17172-17182. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c02443>
- [25] Coppens, Z.J., Li, W., Walker, D.G., *et al.* (2013) Probing and Controlling Photothermal Heat Generation in Plasmonic Nanostructures. *Nano Letters*, **13**, 1023-1028. <https://doi.org/10.1021/nl304208s>
- [26] Xie, Y.L. and Zhao, C.L. (2017) An Optothermally Generated Surface Bubble and Its Applications. *Nanoscale*, **9**, 6622-6631. <https://doi.org/10.1039/C7NR01360D>
- [27] Zhao, C.L., Xie, Y.L., Mao, Z.M., *et al.* (2014) Theory and Experiment on Particle Trapping and Manipulation via

- Optothermally Generated Bubbles. *Lab on a Chip*, **14**, 384-391. <https://doi.org/10.1039/C3LC50748C>
- [28] Lin, L.H., Peng, X.L., Mao, Z.M., *et al.* (2016) Bubble-Pen Lithography. *Nano Letters*, **16**, 701-708. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04524>
- [29] Winterer, F., Maier, C.M., Pernpeintner, C. and Lohmüller, T. (2018) Optofluidic Transport and Manipulation of Plasmonic Nanoparticles by Thermocapillary Convection. *Soft Matter*, **14**, 628-634. <https://doi.org/10.1039/C7SM01863K>