

DOI:10.11918/202502006

磁性人工类细胞的仿生行为分析

张伟伟¹, 赵锦浩¹, 赵壮志¹, 杨磊¹, 林耀国¹, 张军¹, 王成明¹, 王林²

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 郑州 450001;

2. 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150001)

摘要: 细胞是生命的奥秘之源,也是生物所有生命活动的基本单元,因此构建一个有生命的人工系统所面临的首要挑战是如何复制生命的原始形式——细胞。为创造具有生命活力的类细胞系统,创新性地提出了一种设计策略,即通过磁场编程控制封装在气/液界面液滴中的磁性颗粒集群,制备出了具有活力的人工类细胞,并对其捕食和寄生等仿生行为的内在机制进行了详细的分析。首先,通过调控人工类细胞的基体液滴和磁场参数,复现了自然界中细胞的基础生命活动,包括迁移、捕食和寄生等。其次,通过研究液滴质量浓度、尺寸和液体种类对类细胞行为模式的影响规律,揭示了人工类细胞仿生行为的内在机制。最后,利用人工类细胞独特的捕食和寄生特性,设计并实施了一系列的水面污染物清理和微化学反应试验。研究结果表明,文中构建的人工类细胞系统具有良好的稳定性和操控性,能够完成多种细胞仿生行为,同时有望为医疗诊断与治疗、试剂检测 and 环境保护等领域提供了潜在的解决方案。

关键词: 人工类细胞; 磁场驱动; 液滴; 微化学反应; 仿生行为

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)04-0204-08

Bionic behavior analysis of magnetic artificial cells

ZHANG Weiwei¹, ZHAO Jinhao¹, ZHAO Zhuangzhi¹, YANG Lei¹, LIN Yaoguo¹,
ZHANG Jun¹, WANG Chengming¹, WANG Lin²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and Systems (Harbin Institute of Technology), Harbin 150001, China)

Abstract: Cells are the mysterious source of life and the fundamental unit of all life activities in living organisms. The primary challenge in constructing a living artificial system lies in replicating the original form of life, namely, the cell. In order to create a system of cells with vitality, this paper innovatively proposed a design strategy. Specifically, by employing magnetic field programming to control clusters of magnetic particles encapsulated within droplets at gas/liquid interfaces, artificial cells with vitality were successfully fabricated. Furthermore, the paper conducted a detailed analysis of the underlying mechanisms driving their bionic behaviors, such as predation and parasitism. Firstly, by regulating the matrix droplets and magnetic field parameters of artificial cells, the basic life activities of cells in nature were reproduced, such as migration, predation, and parasitism. Then, according to the influence of the concentration, size, and liquid types of droplets on the behavior patterns of artificial cells, the paper revealed the underlying mechanism of the bionic behaviors of artificial cells. Finally, based on the predation and parasitism capabilities learned from the artificial cells, the paper designed and carried out a series of experiments on water surface pollutant removal and microchemical reactions. The results indicate that the artificial cell system presented here is of good stability and controllability, and it can achieve various bionic behaviors of cells. Moreover, it is expected to provide potential solutions for fields such as medical diagnosis and treatment, reagent testing, and environmental protection.

Keywords: artificial cell; magnetic field driving; droplet; microchemical reaction; bionic behavior

细胞是生命的神秘源泉,也是所有生物活动的基本单位。通过生存斗争,大自然成功地从单细胞生物进化到复杂的生命形式,赋予了细胞多功能性。

例如,细胞可以集体迁移,形成自我组装的功能性组织和器官。免疫系统中的巨噬细胞能够自发地捕食并消化入侵的细菌和病毒,同时清除碎片和死亡细

收稿日期: 2025-02-10; 录用日期: 2025-03-17; 网络首发日期: 2026-01-06

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20260106.1522.005>

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(242300421232); 河南省大学生创新训练计划项目(S202510459156)

作者简介: 张伟伟(1985—),男,博士,副教授; 王成明(1980—),副教授,博士生导师

通信作者: 王成明, hitwcm@zzu.edu.cn; 王林, linwang@hit.edu.cn

胞。此外,像沙眼衣原体和立克次体这样的原核细胞寄生在宿主细胞内,获取其生长和繁殖所需的营养。各种功能性细胞的合作,造就了物种的复杂性和多样性,并维持了自然的生态平衡。几个世纪以来,科学家们一直着迷于构建具有生命活力的类细胞系统^[1]。然而,科学家在模仿自然进化道路上创造生命的过程中,面临的第1个挑战是如何复制生命的原始形式——细胞。

液滴,由于其卓越的可重构性和对各类外部刺激的出色响应^[2],如光^[3]、热^[4]、化学^[5-6]、声^[7-8]、电场和磁场^[9-12],因此成为构建人工类细胞的理想载体。这些外部刺激能够灵活地调控液滴的行为,赋予其动态变化的特性。此外,液体的物理或化学性质使得液滴具备了必要的功能性和界面活性,从而为类细胞系统的构建提供了支持。在微液滴的多种控制策略中,磁场驱动策略因其独特的优势而脱颖而出。磁场不仅便于产生和控制,而且能够安全地穿透生物组织和其他多种材料,这使得它在控制微液滴方面具有显著优势。通过精确调控磁场,研究人员可以激活液滴的运动活力,使其按照预定轨迹和速度进行移动和操作。此外,磁场驱动还具有易于获取、生物安全性高,以及编程简便等诸多优点,在微液滴的研究和应用中具有广阔的前景^[13-19]。然而,尽管磁场驱动液滴在理论和试验上均取得了显著进展,但目前对于如何构建更加复杂的类细胞系统的研究仍然是一大挑战。

本文提出了一种新策略,通过磁场编程控制封装在气/液界面液滴中的磁性颗粒集群,成功创造出浮游于水面的油基人工类细胞系统。通过将磁性颗粒掺入漂浮在水面上的油滴中来制备人工类细胞,并由磁场以编程方式触发多种运动模式,以重现自然细胞的独特生命活动,包括迁移、捕食和寄生等仿生行为。此外,还详细研究了类细胞系统的仿生机理,并探讨了其在化学微反应和水面污染油处理等领域的潜在应用。

1 方法

制备人工类细胞时,首先,在一个洁净玻璃容器中用移液器将正十二烷滴至去离子水表面,因正十二烷密度小于水,液滴会漂浮在水面上。试验中所使用油滴尺寸通过移液器刻度进行准确标定,文中所涉及的最小液滴尺寸为5.0 μL 。其次,将直径为100 μm 的镍球定量转移到漂浮的油滴中,生成所需的人工类细胞。在试验中,液滴的质量浓度控制在0.4~0.6 g/mL的范围内,以确保其具有良好的稳定性和操控性。最后,将人工类细胞放置到电磁驱

动装置的工作空间中,类细胞将能够按照预定的轨迹和速度进行移动和操作,展现出其独特的类细胞仿生行为。由于微液滴是漂浮在气液界面上,而气液界面对环境温度和pH的变化非常敏感。为了减少外界环境的干扰,在每次试验前需要使用超声清洗容器3 min,以去除表面灰尘和残余试剂,保证试验器具的洁净。并使用空调将实验室温度控制在室温25 $^{\circ}\text{C}$,确保试验在恒定的环境条件下进行,减少温度对实验结果的影响。

人工类细胞的电磁操控系统由计算机、数据采集卡、功率放大器、光学显微镜,以及六轴亥姆霍兹线圈构成。类细胞的所有仿生操作均由线圈中激励的磁场驱动,该磁场控制信号由计算机通过LabVIEW程序触发,然后由电流放大器放大获得高达15 mT的磁感应强度以满足试验要求。在磁驱动试验中,通过调控亥姆霍兹线圈的输入电流,能够在工作区域内生成并编程控制外部磁场,从而在设定模式下构建出类细胞系统。

2 理论分析

2.1 迁移受力分析

为了研究人工类细胞的动力来源,本文对磁性颗粒、油滴和气液界面所构成的磁性液滴进行了力学分析,见图1(a)。决定液滴运动的力主要有3个:驱动力是施加在磁性粒子上的磁力(f_m);阻力则主要由两部分组成,即:由液滴形变产生的弹性力(f_e),以及油滴与气液界面间的作用力(f_y)。故液滴受到的净力为^[20]

$$f_d = f_m - f_e - f_y = \int_{V_m} \nabla (M \cdot B_{\text{ext}}) dV - E\varepsilon A - \gamma_{\text{ab}} \cos \theta_a \cdot l \quad (1)$$

式中: M 为磁性颗粒的磁化强度, B_{ext} 为外部磁场的磁感应强度, V_m 为磁性材料的体积, E 为油滴的弹性模量, ε 为油滴的应变变量, A 为油滴的横截面积, γ_{ab} 为界面张力, θ_a 为油滴在气液界面上的前进接触角, l 为向前移动的接触线的长度。如果驱动力 f_m 可以克服迁移阻力(即 $f_d > 0$),则液滴将沿磁场方向自由运动。

2.2 寄生行为受力分析

要实现人工类细胞的寄生,需要解决的首要问题是如何摆脱寄生母体的约束。根据液滴形状的演变,液滴行为由前端(图1(b)-i)和后端(图1(b)-ii)的三相接触线的运动决定。液滴前部的净力为^[20]

$$f_{\text{head}} = f_m - f_e - f_{\text{front}} = \int_{V_m} \nabla (M \cdot B_{\text{ext}}) dV - E\varepsilon A - \gamma_{\text{ab}} \cos \theta_a \cdot l_1 \quad (2)$$

式中 f_{front} 为前端三相线的界面张力。如果驱动力 f_m 可以克服迁移阻力(即 $f_{\text{head}} > 0$), 则人工类细胞将向驱动力方向移动或脱离母体液滴, 具体取决于后端的力平衡。否则, 如果驱动力无法克服阻力(即 $f_{\text{head}} \leq 0$), 液滴将静止不动。

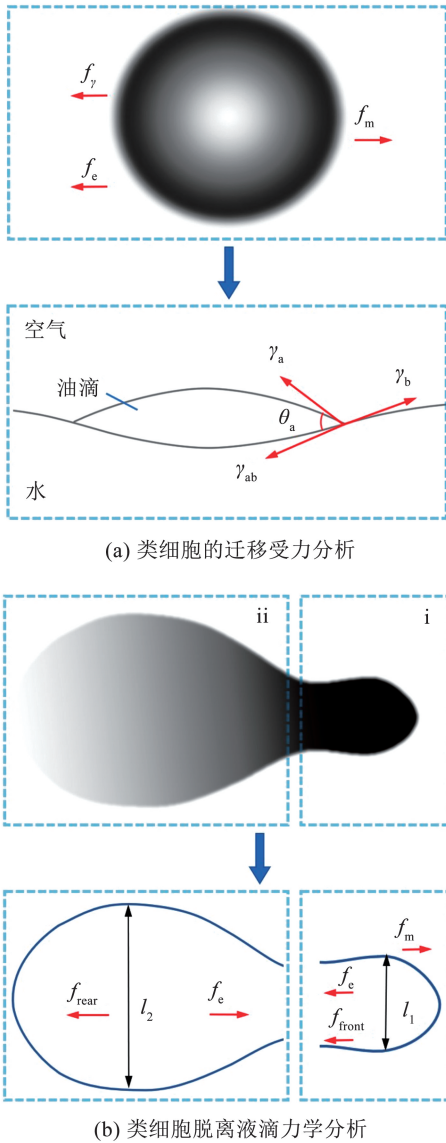


图 1 人工类细胞的受力分析

Fig. 1 Force analysis of artificial cells

同时, 人工类细胞能否摆脱寄生母体还取决于液滴后端的受力平衡, 包括前端液滴变形产生的弹性力(f_e)和后端三相线的界面张力(f_{rear})。因此, 液滴后部的合力为

$$f_{\text{tail}} = f_e - f_{\text{rear}} = E\epsilon A - \gamma_{\text{ab}} (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \cdot l_2 \quad (3)$$

式中: θ_r 为液滴在表面上的后退接触角, l_2 为液滴与表面之间三相接触线的最大宽度。如果弹性力无法克服黏附力(即 $f_{\text{tail}} \leq 0$), 则后端三相接触线将被固

定, 人工类细胞可以从母体液滴中脱离。

3 试验研究

为了追求足够的营养来生长和繁殖, 假单胞菌等寄生细胞甚至进化出在多个宿主之间寄生和转移的能力。受自然界中细胞运动的深刻启发, 本文在人工类细胞的设计与操控上积极探索并实现了类似细胞的仿生行为。通过控制液滴的磁粉质量浓度以及磁感应强度, 可以实现人工类细胞多样化的仿生行为, 如图 2(a) 所示。

当磁粉质量浓度较低时(i 区域), 由于磁性颗粒数量较少, 在较弱的磁场作用下, 液滴的磁核难以克服母体的弹性阻力, 因此整体表现出迁移特性。而在较强的磁场区域(ii 区域)内, 当驱动力随磁场增大到足以突破界面阻滞时, 磁核将脱离寄生液滴(图 2)。且随液滴的磁粉质量浓度增加, 脱离寄生所需的临界场强表现出先减小后增加的趋势。当质量浓度达到 0.6 g/mL 附近时, 磁核脱离寄生液滴所需的场强达到极小值。而当磁粉质量浓度继续增大时, 会导致界面黏附力增加, 反而使磁核不易脱离母体液滴, 临界场强表现为反向升高的趋势(图 2(a))。

此外, 本文还研究了液滴尺寸对临界磁场参数的影响规律(图 2(b))。随着液滴尺寸的增大, 脱离寄生所需的临界场强表现出下降的趋势。这是由于液滴尺寸增大导致液滴界面黏滞力增加所引起的。由式(3)可知, 液滴后端的界面黏滞力在脱离寄生中起到决定性作用。液滴的尺寸越大, 后端接触线就越长, 由此产生的界面黏滞力也越大。当后端界面黏滞力 f_{rear} 增大到足以克服弹性力 f_e 时, 类细胞才会从母体液滴中脱离。因此, 液滴尺寸越大, 越容易触发脱离寄生行为(图 2(b))。而当液滴尺寸增加到 10 μL 以上时, 磁核能否脱离寄生完全取决于磁力的大小, 表现为临界场强保持恒定。图 2(c) 分析了液体种类对液滴行为模式的影响规律。由图 2 可以看出, 随着烷烃分子链长度的增加, 脱离寄生所需的临界场强表现出增大的趋势。这是由于液滴的表面张力随烷烃分子链长度的增大而增加所引起的。由式(2)可知, 液滴的弹性力 f_e 越大, 脱离寄生所需的磁场力也越强。只有当前端的磁场力 f_m 增大到足以克服弹性力 f_e 和前端界面黏滞力 f_{front} 时, 类细胞才会从母体液滴中脱离。因此, 液滴烷烃分子链越短, 越容易触发脱离寄生行为(图 2(c))。

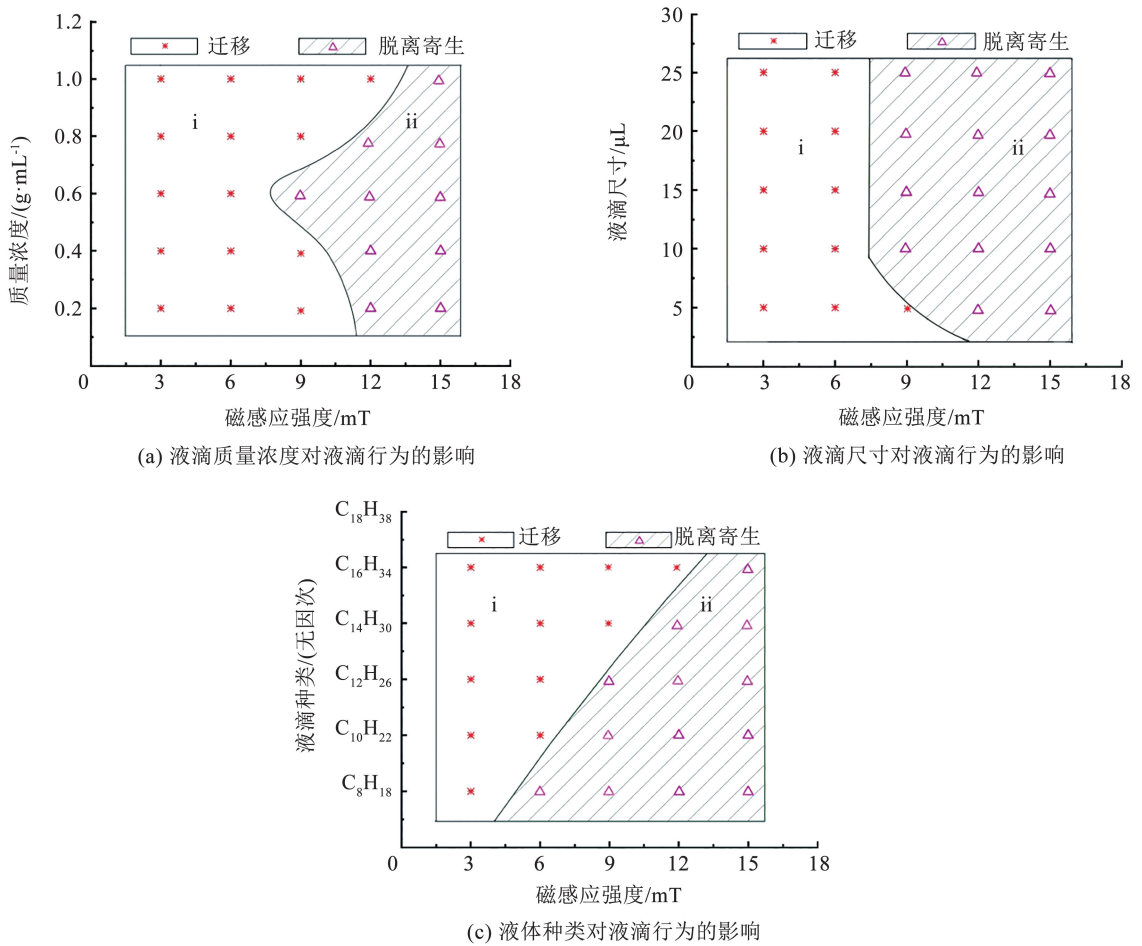


图2 磁场和液滴参数对人工类细胞行为模式的影响

Fig. 2 Influence of magnetic fields and droplet parameters on behavior patterns of artificial cells

3.1 迁移行为研究

细胞迁移是活细胞普遍存在的一种运动形式,涉及捕食、免疫防御和组织形态等生理功能。首先通过轨迹跟踪测试了人工类细胞的机动能力。图3(a)展示了液滴的运动轨迹磁驱控制原理。通过控制4轴亥姆霍兹线圈的通电顺序,操控液滴沿着合成磁场梯度方向移动。漂浮的磁性液滴对磁场方向非常敏感,并且能够精确和快速地响应磁场梯度的变化,使得类细胞可以进行复杂轨迹运动。在此基础上研究了迁移模式下磁场梯度对液滴运动速度的影响规律,见图3(b)。随着线圈单元磁感应强度的增加,液滴的迁移速度呈单调上升趋势。为兼顾人工类细胞的操控精度和效率,本文在后续的迁移和捕食行为研究中均采用较低的磁感应强度($B = 4 \text{ mT}$)进行驱动。图3(c)展示了在磁场驱动下类细胞的圆形轨迹运动情况。通过编程调整磁场梯度的方向,液滴可以精准地沿着一个预设的圆形轨迹迁移运动。人工类细胞出色的可重构性是其另一亮点,通过自适应调整形态和结构,类细胞可以适应周围复杂多变的地形。图3(d)展示了类细胞能

够自如地导航穿越弯曲的通道。无论是平坦的开阔地带,还是曲折蜿蜒的狭窄通道,类细胞都能凭借其卓越的自适应能力,轻松应对各种挑战。该人工类细胞的可编程运动能力,以及其出色的可重构性和地形适应能力,为类细胞在各种应用场景中的广泛应用奠定了基础。

3.2 捕食行为研究

除了出色的机动能力外,本文还对人工类细胞的捕食行为进行了深入的研究。在捕食应用中,需根据类细胞基液种类(十二烷)和液滴尺寸($5 \mu\text{L}$)选择对应的磁感应强度($B = 4 \text{ mT}$)和颗粒质量浓度(0.4 g/mL),确保类细胞工作在迁移模式。为了研究类细胞的捕食潜力,本文分别测试了两种不同类型的捕获目标。对应不同材料的猎物,人工类细胞采取了两种完全不同的捕食策略。第1种策略是吸附作用,类细胞捕获固体目标,包括两个关键阶段:1)操纵液滴分别移动和接近浮动目标,分散的固体小球被类细胞的油水界面逐一吸附捕获,见图4。2)在旋转磁场的驱动下,类细胞旋转并扩散以包裹所有浮球。

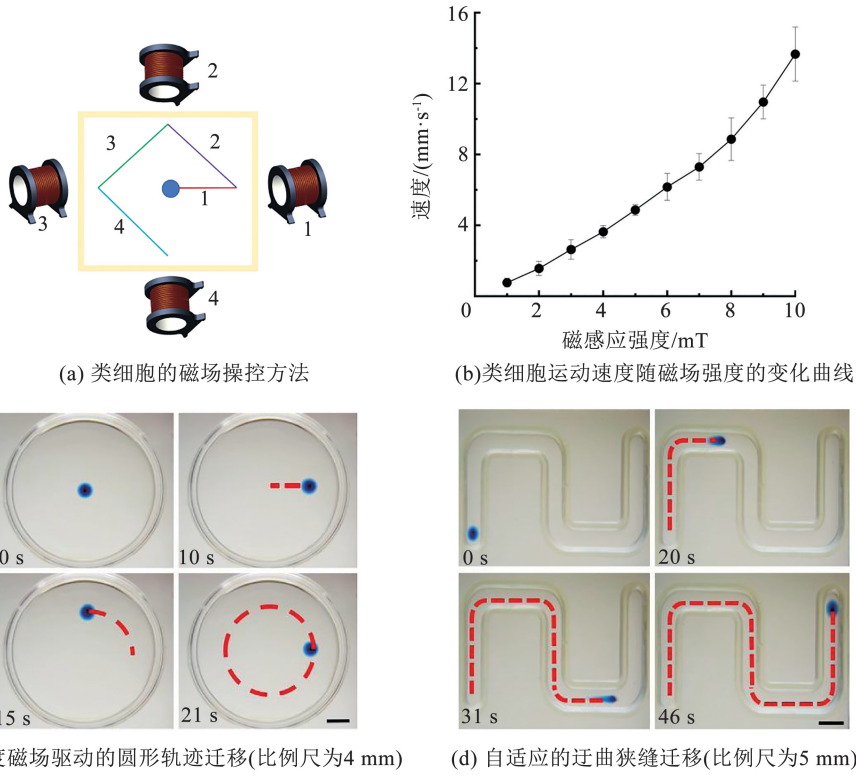


图 3 人工类细胞的迁移行为

Fig. 3 Migration behavior of artificial cells

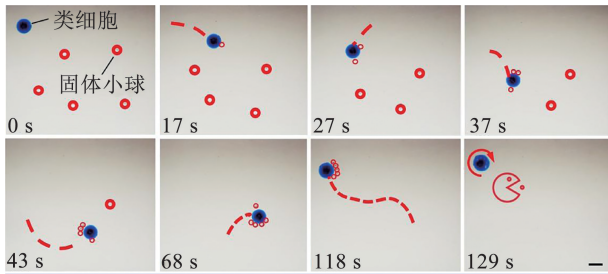


图 4 人工类细胞的固体颗粒捕食行为

Fig. 4 Predatory behavior of artificial cells towards solid particles

第 2 种策略是人工类细胞通过 Cheerios 效应直接捕获漂浮的液滴。在捕获过程中,液滴之间主要靠毛细力组装在一起,见图 5(a)。在气液界面处,距离为 r 的两个液滴之间的毛细力可以表示为^[21]

$$f_c(r) \propto \frac{r}{\sqrt{\gamma/\rho_s g}} \left[1 - \exp\left(-\frac{r}{\sqrt{\gamma/\rho_s g}}\right) \right] \quad (4)$$

式中: ρ_s 为液体的密度, g 为重力加速度。运动所产生的附加惯性力可以表示为

$$f = \rho_s V_c \frac{dU}{dt} \quad (5)$$

式中: V_c 为液滴的体积, dU/dt 为液滴的加速度。

液滴的捕食主要靠毛细力,横向毛细管力的来源是气液界面的变形,在没有液滴的情况下,气液界面应该是平坦的。液滴产生的界面变形越大,它们之间的毛细管相互作用就越强。漂浮在液体界面上的两个相似的粒子会相互吸引,这种吸引力的出

现是因为液体弯月面变形,使得两个液滴的势能在相互接近时降低而引起的。

如图 5(b) 所示,驱动类细胞(蓝色)逐渐接触猎物液滴(红色),然后通过相邻疏水液滴周围半月板的毛细管力组装在一起。如果类细胞和猎物液滴之间的吸引力足够强,并突破了液滴在气液界面的运动阻力,就可以实现 Cheerios 效应诱导的液滴捕食行为。

此外,为了展示人工类细胞在微观尺度下的操作精准度与灵活性,本文还设计了液滴分选试验,见图 5(c)。在试验过程中,类细胞被精确地操控,对一群混合且颜色各异的液滴进行准确的颜色分类,并成功地将它们重新组装成界限分明的单色液滴簇(图 5(c))。首先,类细胞在磁场操控下精准地捕捉到目标蓝色液滴,并利用毛细力成功地将它们从密集的液滴簇中分离出来($t = 168$ s)。其次,在到达预定的目的地位置后,迅速调整姿态,利用急加速运动甩脱并卸载捕获的蓝色液滴。然后,类细胞又开始了新一轮的捕猎行动,逐个地捕获那些分散在周围的红色液滴($t = 230$ s)。最后,在类细胞的不懈努力下,原本杂乱的混合液滴最终被整齐地分选,并组装成了两个分离的单色液滴簇。这一研究也为人工类细胞处理水面油污等潜在应用提供了新的解决思路。

3.3 寄生行为研究

寄生作为衣原体、立克次体等原核细胞从活宿

主细胞中获取营养的一种独特生存技能,其机制在类细胞系统的设计中得到了借鉴。人工类细胞的寄生行为同样是通过动态调整液滴内磁性颗粒来触发和演化的。图 6(a)详细展示了类细胞从寄生液滴中的释放过程。液滴内颗粒首先通过编程的振荡磁场实现紧密的聚集,随后施加水平梯度磁场使类细胞能够突破寄生油滴的界面限制($t = 40$ s),当磁核所产生磁力足以克服油滴本身的弹性阻力时,类细胞从寄生液滴中释放出来($t = 74$ s)。这为人工类细胞模拟自然界中假单胞菌等微生物的异源性寄生

行为,并寻找替代宿主提供了可能性。图 6(b)则展示了使用寄生策略的类细胞在捕食过程中的精彩表现。首先,在梯度磁场的操控下类细胞被引导至目标液滴附近,并发起寄生行动($t = 30$ s)。其次,在振荡磁场的驱动下,磁性颗粒均匀地覆盖在整个液滴表面($t = 40$ s),这一步骤确保了捕获的宿主液滴在后续运输过程中不会意外丢失。最后,当与水平梯度磁场再次叠加时,寄生液滴通过一个狭窄的间隙,并被安全地输送回左侧区域。

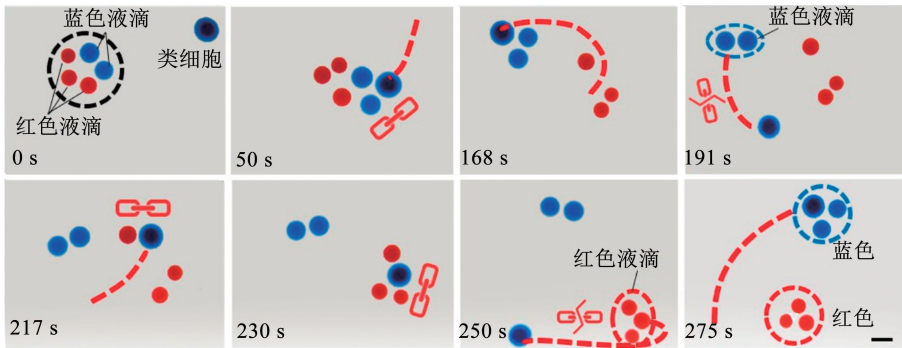
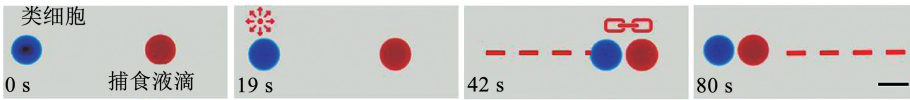
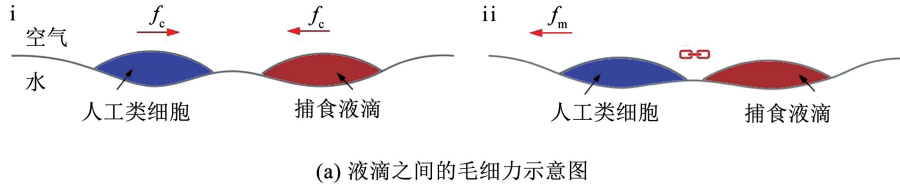


图 5 基于 Cheerios 效应的液滴捕食行为

Fig. 5 Predatory behavior towards droplets based on Cheerios effect

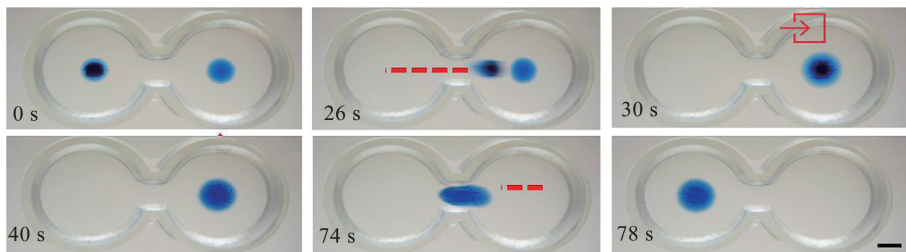
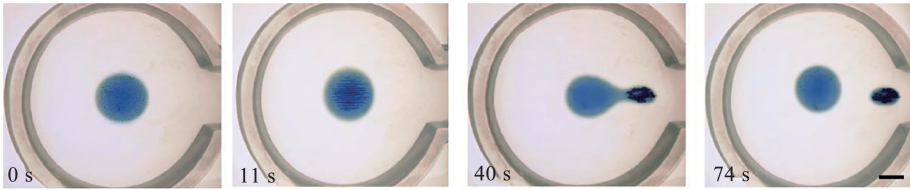


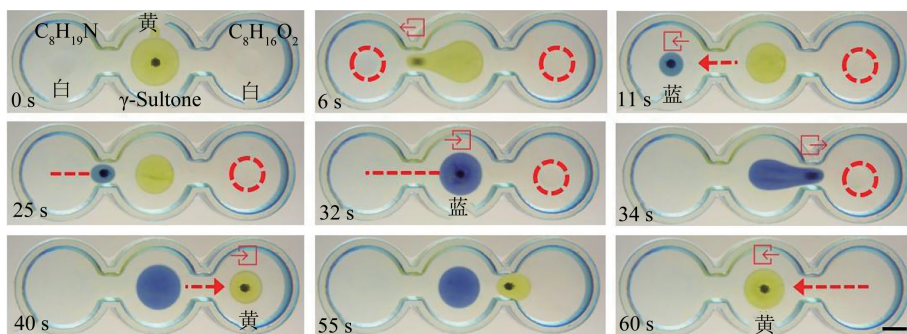
图 6 人工类细胞的寄生行为

Fig. 6 Parasitism behavior of artificial cells

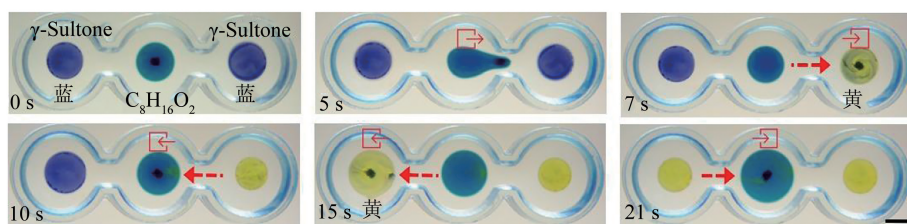
此外,本文还通过液滴操纵进一步展示了类细胞在微化学反应中的潜在应用。图 7(a)展示了通过寄生进行逐步微化学反应的过程。在微化学反应的应用中,需根据液体种类(十二烷基液)和液滴尺寸($10\ \mu\text{L}$)选择对应的磁感应强度($B = 10\ \text{mT}$)和颗粒质量浓度参数($0.6\ \text{g/mL}$),确保人工类细胞工作在脱离寄生模式,高效地从寄主液滴中脱离并转移到目标位置。首先,类细胞在梯度磁场的操控下从溴甲酚绿溶液的宿主液滴(中)中释放出来,侵入左侧容器中的目标液滴。因此,溶解在类细胞中的溴甲酚绿指示液检测到无色液滴(左)中的辛酸,导致碱性溶液中出现淡蓝色($t = 11\ \text{s}$)。其次,寄生辛酸液滴(左)被引导与指示剂液滴(中)合并,并发生显色反应,颜色从亮黄色变为深蓝色($t = 32\ \text{s}$)。然后,右侧的辛酸液滴被装载溴甲酚绿的类细胞寄生,

并从无色变为黄色,指示溶液是酸性的。最后,剩余液滴在中间容器汇合后,辛酸与辛酸溶液发生酸碱中和反应,指示剂恢复亮黄色的原始颜色。

值得注意的是,类细胞内磁性粒子的振荡可以加速反应。更有趣的是,人工类细胞在微化学反应中展现出异质性特征,为多试剂分析带来了意想不到的便利性和高效性,如图 7(b)所示。人工类细胞最初是从一个由绿色的辛酸宿主液滴(中间)中分离出来的,随后,它被驱动并寄生在待测的液滴(右)之中。在这一过程中,磁性粒子可以增强搅拌,注入的辛酸能够迅速而充分地与液滴内部所含的化学物质发生反应,可使待测液滴的颜色从原本的蓝色转变为黄色,这一颜色变化表明了右侧待测溶液中存在碱性试剂。



(a) 通过寄生作用逐步化学微反应的演示(比例尺为5 mm)



(b) 通过异源性进行多试剂测定(比例尺为5 mm)

图 7 人工类细胞的微化学应用

Fig. 7 Microchemical applications of artificial cells

在异质性的助力之下,辛酸被依次且精准地输送到每一个待测的液滴之中,进而通过寄生反应实现了对各个液滴中试剂的依次且高效的分析。同时也简化了操作流程,为复杂的多试剂分析任务提供了一种全新的潜在解决方案。同时也简化了操作流程,为复杂的多试剂分析任务提供了一种全新的潜在解决方案。

4 结 论

1) 提出了一种新策略,通过磁场编程控制封装在气/液界面上液滴中的磁性颗粒集群,制备出了人工类细胞系统。通过调控人工类细胞的基体液滴和

磁场参数,复现了自然界中细胞的基础生命活动,包括迁移、捕食和寄生等。

2) 通过研究液滴质量浓度、尺寸和液体种类对类细胞行为模式的影响规律,揭示了类细胞仿生行为的内在机制,即其行为模式取决于基体液滴所受的磁力、液滴形变产生的弹性力,以及界面黏滞力之间的力平衡关系。

3) 利用人工类细胞独特的寄生和捕食行为特性,设计并实施了一系列的颗粒捕捉、液滴捕捉和化学微反应试验。结果表明该类细胞在微环境中具有良好的稳定性和操控性,且在试剂分析、医疗健康,以及环境保护等领域展示出广阔的应用潜力。

参考文献

- [1] XIONG Jianyun, LI Xing, HE Ziyi, et al. Light-controlled soft bio-microrobot [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 55. DOI:10.1038/s41377-024-01405-5
- [2] ZHANG Weiwei, DENG Yuguo, ZHAO Jinhao, et al. Amoeba-inspired magnetic venom microrobots [J]. *Small*, 2023, 19(23): 2207360. DOI:10.1002/smll.202207360
- [3] LI Tianlong, YU Shimin, SUN Bei, et al. Bioinspired claw-engaged and biolubricated swimming microrobots creating active retention in blood vessels [J]. *Science Advances*, 2023, 9(18): eadg4501. DOI:10.1126/sciadv.adg4501
- [4] LI Qilong, FENG Feng, XU Min, et al. Multifunctional liquid microrobots based on paramagnetic microdroplets [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2023, 4(2): 101279. DOI:10.1016/j.xcrp.2023.101279
- [5] SUN Mengmeng, TIAN Chenyao, MAO Liyang, et al. Reconfigurable magnetic slime robot: deformation, adaptability, and multifunction [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(26): 2112508. DOI:10.1002/adfm.202112508
- [6] SUN Daxing, ZHOU Dekai, GAO Yuan, et al. Phototaxis motion behavior of a self-propelled submarine-like water droplet robot in oil solvent [J]. *ChemNanoMat*, 2020, 6(11): 1611. DOI:10.1002/cnma.202000352
- [7] TANG Songsong, ZHANG Fangyu, GONG Hua, et al. Enzyme-powered Janus platelet cell robots for active and targeted drug delivery [J]. *Science Robotics*, 2020, 5(43): eaba6137. DOI:10.1126/scirobotics.aba6137
- [8] THIRISANGU J, HEMACHANDRAN E, SUBRAMANI K. Suspending droplets beyond the Rayleigh limit: the interplay of acoustic and gravity forces [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(12): 122012. DOI:10.1063/5.0171492
- [9] O'CALLAGHAN J A, LEE D, HAMMER D A. Asymmetry-enhanced motion of urease-powered micromotors from double emulsion-templated microcapsules [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(44): 50799. DOI:10.1021/acsami.3c10222
- [10] YUAN Zichao, LU Chenguang, LIU Cong, et al. Ultrasonic tweezer for multifunctional droplet manipulation [J]. *Science Advances*, 2023, 9(16): eadg2352. DOI:10.1126/sciadv.adg2352
- [11] YIANNACOU K, SHARMA V, SARIOLA V. Programmable droplet microfluidics based on machine learning and acoustic manipulation [J]. *Langmuir*, 2022, 38(38): 11557. DOI:10.1021/acs.langmuir.2c01061
- [12] KIM Y, CHAE J K, LEE J H, et al. Free manipulation system for nanorobot cluster based on complicated multi-coil electromagnetic actuator [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 19756. DOI:10.1038/s41598-021-98957-y
- [13] ZHAO Peiran, YAN Liang, GAO Xiaoshan. A programmable ferrofluidic droplet robot [J]. *The European Physical Journal E*, 2023, 46(9): 87. DOI:10.1140/epje/s10189-023-00348-w
- [14] WANG Ben, ZHANG Baofeng, TAN Yongzhu, et al. Leech-inspired shape-encodable liquid metal robots for reconfigurable circuit welding and transient electronics [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(9): 2200080. DOI:10.1002/aisy.202200080
- [15] FAN Xinjian, DONG Xiaoguang, KARACAKOL A C, et al. Reconfigurable multifunctional ferrofluid droplet robots [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(45): 27916. DOI:10.1073/pnas.2016388117
- [16] FAN Xinjian, JIANG Yihui, LI Mingtong, et al. Scale-reconfigurable miniature ferrofluidic robots for negotiating sharply variable spaces [J]. *Science Advances*, 2022, 8(37): eabq1677. DOI:10.1126/sciadv.abq1677
- [17] SUN Mengmeng, FAN Xinjian, TIAN Chenyao, et al. Swarming microdroplets to a dexterous micromanipulator [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(19): 2011193. DOI:10.1002/adfm.202011193
- [18] RAMOS-SEBASTIAN A, LEE J S, KIM S H. Multimodal locomotion of magnetic droplet robots using orthogonal pairs of coils [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(9): 2300133. DOI:10.1002/aisy.202300133
- [19] LIU Cong, LI Deke, HUANG Jinxia, et al. High-performance magnetic and electric control of liquid metal droplets [J]. *Langmuir*, 2023, 39(21): 7495. DOI:10.1021/acs.langmuir.3c00888
- [20] LI An, LI Huizeng, LI Zheng, et al. Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot [J]. *Science Advances*, 2020, 6(7): eaay5808. DOI:10.1126/sciadv.aay5808
- [21] WANG Qianqian, YANG Lidong, WANG Ben, et al. Collective behavior of reconfigurable magnetic droplets via dynamic self-assembly [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(1): 1630. DOI:10.1021/acsami.8b17402

(编辑 张红)