

基于气泡微机器人对自由液面处微小物体的多模式操控¹⁾

王雷磊^{*,+}, 陈力⁺, 盛敏佳⁺, 王丽娜⁺, 郑旭^{*,2)}, 崔海航^{+,2)}

^{*} (中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室, 北京, 100190)

⁺ (西安建筑科技大学, 建筑设备科学与工程学院, 西安, 710055)

摘要: 近年来, 基于仿生微生物游动及微尺度流体力学理论研发的高效泳动微机器人取得了巨大发展。这种无约束的微工具为宏观世界与微观流体环境的灵活交互提供了新的手段, 其中, 由于气泡微机器人强有力的驱动能力, 在药物输运、微纳流控等领域展现出诱人的应用前景。与传统的微观操控方法相比, 如使用微针或微移液管与目标物直接接触控制, 会带来对目标物周围环境不可避免的强相互作用影响, 微机器人可以独立精准操控微米尺寸的目标物, 而不影响目标物周围较大区域的环境。然而, 由于复杂的界面效应, 适用于气液界面附近工作的多功能微机器人很难实现。气液界面一方面提供了平衡的垂向力学条件, 便于开展二维操控, 但显著的界面效应也给微机器人的设计及目标物操控带来巨大挑战。复杂界面尤其气液自由界面“软”约束下气泡微机器人的驱动机理的系统研究仍处于空白。易变形的自由界面耦合气泡复杂的动力学过程, 将导致气泡微机器人运动中出现丰富的流动现象和新颖的驱动机制, 尤其是微气泡溃灭诱导的瞬态射流及其流动控制, 是微纳流控研究的重要前沿问题。

本工作以中空微球为模板制备了 Pt/Ni-SiO₂ 型 Janus 微球, 根据气泡成核机制, 微球直径大于 10 μm 时, 可由 Pt 侧表面催化分解 H₂O₂ 反应生成微气泡, 调控外加磁场作用于 Ni 层实现对运动方向的引导, 从而构建了可以漂浮于自由液面附近的微机器人系统。首先研究了周期性微气泡生长溃灭驱动微机器人运动机理。实验研究表明, 催化反应周期性产生的气泡兼具驱动及“抓手”的功能, 其物理机制在于自由液面受限条件下迥异的气泡动力学特性, 以及流场在时间与空间上的强烈非对称性。气泡在气液界面的溃灭还会诱导表面毛细波, 可延长作用的范围。此外, 通过可视化的实时磁引导, 可以精准调整微机器人的运动姿态, 进行运动路径的规划。基于此, 本文实现了微机器人的多运动模式(如启停、变速、转向)以及多工作模式(如推进、抓取、释放、近场作用, 远场作用)的灵活换切。通过上述单元操作的组合还有望实现更加复杂的功能, 在气液界面的微操作、微组装和生物工程中发挥重要的作用。

关键词: 微机器人; 气泡动力学; 微射流; 自由液面; 多模式

1) 资金资助项目 National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12072350, 11972351, and 11832017)