

自驱动的Janus微球在具有不同障碍物的表面上的运动行为研究

张红 宗奕吾 杨明成 赵坤

The dynamics of self-propelled Janus microspheres near obstacles with different geometries

Zhang Hong Zong Yi-Wu Yang Ming-Cheng Zhao Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 134702 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190711

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190711>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

自驱动的Janus微球在具有不同障碍物的表面上的运动行为研究

The dynamics of self-propelled Janus microspheres near obstacles with different geometries

物理学报. 2019, 68(13): 134702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190179>

自驱动Janus微球近壁运动特性实验与数值模拟研究

Experiment and numerical study on the characteristics of self-propellant Janus microspheres near the wall

物理学报. 2015, 64(13): 134705 <https://doi.org/10.7498/aps.64.134705>

不同粒径Janus微球的自驱动:实验及驱动机制对比

Two different self-propulsion types of Janus microspheres: from the comparative experiments and driving mechanisms

物理学报. 2016, 65(22): 220201 <https://doi.org/10.7498/aps.65.220201>

自驱动颗粒体系中的熵力

Entropy forces of nanoparticles in self-propelled systems

物理学报. 2017, 66(19): 190701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.190701>

基于格子Boltzmann方法的自驱动Janus颗粒扩散泳力

Research on diffusiophoresis of self-propulsion Janus particles based on lattice Boltzmann method

物理学报. 2017, 66(8): 084703 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084703>

存在障碍物时电波传播抛物线方程分析及其验证

Research and verification for parabolic equation method of radio wave propagation in obstacle environment

物理学报. 2017, 66(12): 124102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.124102>

自驱动的 Janus 微球在具有不同障碍物的表面上的运动行为研究*

张红¹⁾ 宗奕吾^{1)†} 杨明成²⁾³⁾ 赵坤^{1)‡}

1) (天津大学化工学院, 系统生物工程教育部重点实验室, 天津 300350)

2) (中国科学院物理研究所, 软物质物理重点实验室, 北京 100190)

3) (中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

(2019年5月10日收到; 2019年5月16日收到修改稿)

自驱动粒子在靠近边界尤其是平面上障碍物的边界时, 会展现出奇特的运动行为. 本文通过实验研究了固定于平面上的微米级障碍物的几何效应 (包括大小和形状) 对双氧水驱动的 Janus 微球运动行为的影响. 实验结果表明, 当障碍物尺寸超过临界值后, 自驱动的 Janus 微球会被其“捕获”并沿着其边界定向运动. 自驱动粒子在障碍物边界的停留时间及运动速率随着双氧水浓度的增加而增大, 且其在圆柱形障碍物边界和球形障碍物边界的停留时间及运动速率均随着障碍物直径的增加而增大. 但在相同的双氧水浓度和障碍物直径条件下, 自驱动粒子在圆柱边界上的停留时间比其在球形障碍物边界上长; 在圆柱边界上的运动速率比在球形障碍物边界上小, 揭示了自驱动粒子在障碍物边界上的运动行为与障碍物的几何特性密切相关. 本研究有助于进一步理解自驱动粒子在不同大小及形状的障碍物中的运动特征, 掌握并利用这些特征在诸如设计特殊几何形状来引导自驱动粒子的运动等领域有很好的应用价值.

关键词: 自驱动, Janus 微球, 受限, 障碍物

PACS: 47.63.mf, 07.10.Cm, 47.57.J-

DOI: 10.7498/aps.68.20190711

1 引言

活性物质 (active matter) 是从外界摄取能量并转化为自身的运动或有用功的物质, 其具有时间反演不可逆的特征, 所构成的体系为非平衡体系, 有重要的理论研究价值. 活性物质在自然界中广泛存在, 马达蛋白、细菌、动物等都是常见的活性物质. 人工合成的自驱动 Janus 粒子组成的活性物质系统体系相对简单, 操控性较好, 是研究活性物质的理想模型, 因此受到人们的广泛关注. Janus 粒子是指两端具有不同形状或理化性质的

颗粒, 按形状可分为 Janus 球^[1]、Janus 棒^[2,3]等, 利用光场^[4,5]、电场^[6]或催化化学反应^[2,7]等方式可在粒子周围形成温度梯度场、浓度梯度场等从而驱动其运动. 科学家们在开展自驱动机理及其运动特点等基础研究的同时, 也根据其特点积极探索其在药物运输^[8,9]、环境修复^[10,11]等领域的应用. 而如何控制自驱动粒子的运动方向是对其进行应用研究的一个重点, 它是实现药物定点释放、环境定点修复等的基础. 施加外场 (例如磁场^[12]、光场^[13]) 可以有效操控自驱动粒子进行定向运动. 此外, 利用宏观的温度梯度场或化学浓度梯度场^[14]也可以引导自驱动粒子的运动方向. 然而, 施加外场的方

* 国家自然科学基金 (批准号: 11704276, 21573159, 11674365, 11874397) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yiwuzong@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: kunzhao@tju.edu.cn

法往往会因为对应用条件有特殊要求而限制了其应用范围, 而浓度或温度梯度又不易精确控制, 因而需要发展其他可控制自驱动粒子运动方向的新方法. 2014 年, Takagi 等^[15] 发现双氧水驱动的 Janus 微棒会被沉在底面的微米级球状粒子所“捕获”并绕其定向运动. 随后, Das 等^[16] 及 Simmchen 等^[17] 先后发现双氧水驱动的 Janus 微球会受限于某些与二维平面垂直的边界并围绕其定向运动, 并提出可利用二维平面上的几何形状的边界来引导自驱动的 Janus 微球, 同时他们也指出了流体动力学效应及 Janus 粒子周围的浓度梯度场在边界上重新分布对 Janus 粒子受限的作用. 此后, 科学家们开始在平面上设计不同的微结构来引导 Janus 粒子的运动. 2017 年, Wykes 等^[18] 利用平面上的泪滴柱实现了自驱动 Janus 微棒的定向运动; 2018 年, Katuri 等^[19] 利用棘轮状腔室实现了自驱动 Janus 微球的定向运动. 尽管人们已经开始利用几何形状来引导自驱动 Janus 粒子的运动方向, 但是对于 Janus 粒子在一些基本几何形状中的运动规律的研究还不完善. Simmchen 等^[17] 发现双氧水浓度的增加会促使自驱动的 Janus 微球绕圆柱边界运动的时长增加, 但没有阐释圆柱直径大小与自驱动微球运动特点的关系. 而且, 据我们有限的了解, 尚未有关于固定于平面上的球形粒子是如何影响自驱动 Janus 微球运动的实验报道. 本文旨在用实验的方法详细系统地研究固定于平面上的微米级障碍物的几何效应 (包括大小和形状) 对自驱动的 Janus 微球运动行为的影响, 加深对其运动特点的理解, 以期更好地对其进行应用.

2 实验

为了探索平面上障碍物的几何形状对自驱动 Janus 微球运动行为的影响, 实验中首先制备了 Janus 微球. 通过在盖玻片上沉积不同直径的圆柱和固定不同大小的聚苯乙烯 (PS) 微球来制备分别具有圆柱和球形障碍物的表面. 然后进行 Janus 微球在具有不同直径的圆柱 (或球形) 障碍物的平面上的自驱动实验, 并对其运动图像进行采集, 通过编写的交互式数据语言 (interactive data language, IDL) 程序完成对采集到的图像的分析处理.

2.1 Janus 微球的制备

通过自由基分散聚合的方法合成聚苯乙烯微

球, 用浓硫酸磺化使其带电 (实验细节见补充材料). 纳米粒度仪与 Zeta 电位仪的测试结果表明其流体动力学直径为 $3.2 \mu\text{m}$, Zeta 电位值为 -45.7 mV . Janus 微球的制备方法与文献 [20] 中的 Janus 微球制备方法类似, 先在玻璃片上均匀铺上一层带电聚苯乙烯微球水分散液的单层膜, 待水完全蒸发后, 利用磁控溅射技术在其上方喷镀一层 5 nm 厚的铂. 喷镀结束后将其置于水中超声, 使粒子从玻璃片上脱落, 从而获得半球镀铂的 Janus 粒子的水分散液. 图 1 是所制备的 Janus 微球的扫描电镜 (SEM) 图片. 为了清楚地分辨 Janus 粒子喷铂与未喷铂的两面, 使用罗丹明 B 对粒子进行染色. 染色后, 未喷铂的一面在 532 nm 波长的绿光激发下发射黄色荧光.

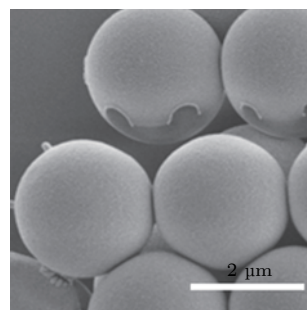


图 1 Janus 微球的扫描电子显微图像
Fig. 1. SEM image of Janus microspheres.

2.2 表面沉积有圆柱的盖玻片的制备

实验在中国科学院物理研究所微加工实验室进行. 使用 SUS 2005 光刻胶, 配合具有圆形图案的掩膜版, 利用紫外曝光技术, 在盖玻片上制备出高度为 $6 \mu\text{m}$, 直径分别为 $3, 10, 20 \mu\text{m}$ 的圆柱形障碍物.

2.3 表面黏附有微球的盖玻片的制备

通过自由基分散聚合的方法合成不同大小的聚苯乙烯微球 (实验细节见补充材料), 纳米粒度仪的测试结果表明其流体动力学直径分别为 $1.0, 1.8, 2.4, 7.2 \mu\text{m}$. 将不同粒径的聚苯乙烯微球粉末分别分散在经过疏水处理 (见补充材料) 的盖玻片上, 在 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 (稍高于聚苯乙烯的玻璃化转变温度) 加热 20 min , 使微球黏附于盖玻片上且保持球形.

2.4 Janus 微球自驱动实验

实验装置包括: Leica DMi8 全自动倒置荧光

显微镜 (100 倍物镜), Pecon GmbH 公司生产的型号为 TEMPCONTROLLER 2000-2 的样品池恒温装置, PHANTOM V2512 CMOS 相机. 将底面黏附有圆柱 (或微球) 的样品池放在显微镜载物台上, 在样品池中加入 Janus 微球的水分散液, 调整显微镜的焦距至样品池底面, 待微球沉降后加入一定浓度的双氧水溶液, 将显微镜切换至荧光模式 (绿色激发光), 以 100 帧/s 的拍摄速度进行图像采集. 为保持自驱动反应速率恒定, 样品池温度保持在 $(30 \pm 0.1)^\circ\text{C}$; 为尽量减小因为双氧水分解而导致的双氧水浓度的降低对颗粒自驱动行为的影响, 所有自驱动实验在加入双氧水后的 10 min 之内完成数据采集. 通过 imageJ 及 IDL 对拍摄的图像数据进行粒子识别及统计分析 (见补充材料).

3 结果与讨论

Janus 微球的水分散液在 1 mm 厚的样品池中静置数分钟后, 微球会因重力作用而沉降于样品池底部, 其在重力方向的位置会因热涨落而发生变化, 表现为微球随时间的变化不断进出焦面. 因铂的密度 ($21.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) 远大于 PS 的密度 ($1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), 重力产生的扭矩使 Janus 微球取向, 大多数时间可以观察到几乎整个铂面 (暗面). 加入双氧水后, Janus 微球的运动方式由布朗运动转变为自驱动运动, 视野中始终能看到 Janus 微球亮暗面的分界线 (即未喷铂与喷铂部分的分界线), 即 Janus 微球的取向从未加双氧水前的对称轴垂直取向变为加入双氧水后的对称轴近水平取向, 且很少观察到其进出焦面的转换, 显示其受限在平面上运动, 其位置在重力方向基本保持恒定. 该实验现象与其他相似体系中的自驱动实验现象一致 [16,17].

3.1 自驱动的 Janus 微球在圆柱边界的运动特征

当自驱动的 Janus 微球运动至圆柱边缘, 微球很大概率会被圆柱“捕获”, 随即沿着圆柱的边界定向运动. 双氧水的浓度为 1% 的情况下, 自驱动的 Janus 微球在具有圆柱的表面上的典型运动轨迹如图 2 所示. 可以看到 Janus 微球两次靠近直径为 $3 \mu\text{m}$ 的圆柱而未被“捕获”, 而靠近 $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的圆柱则一次便被“捕获”并沿着圆柱边界

做圆周运动, 说明不同直径的圆柱对自驱动的 Janus 微球的“捕获”能力不同. 为了进一步理解 Janus 微球在圆柱边界上的受限行为, 我们研究了双氧水浓度和圆柱的直径对 Janus 微球在圆柱边界的停留时间及运动速率的影响, 结果如图 3 所示. 对于同一直径的圆柱, Janus 微球在其边界的停留时间随双氧水浓度的增大而增加 (图 3(a)), 说明与双氧水浓度相关的泳效应同自驱动粒子被圆柱“捕获”是相关的. Janus 微球的半球覆盖有铂, 铂能够催化双氧水分解, 由于铂在 Janus 微球表面的非对称分布, 分解出的化学物质在 Janus 微球周围形成浓度梯度, 在浓度梯度的驱动下, Janus 微球进行运动 (泳效应). 双氧水浓度增大, 泳效应变强, 相应的停留时间也增加, 说明泳效应变强有利于 Janus 微球受限于圆柱. 从图 3(a) 也可以看出, 在双氧水浓度相同的条件下, 自驱动的 Janus 微球在直径为 $3 \mu\text{m}$ 的圆柱边界上的停留时间比在直径为 $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的圆柱边界上的停留时间短, 说明圆柱的直径大小会影响其对自驱动的 Janus 微球的束缚能力. Simmchen 等 [17] 研究了双氧水驱动的 Janus 微球在不同直径圆柱边界上的停留时间, 同样得出了随着双氧水浓度的增大, Janus 微球在圆柱边界上的停留时间增加的结论, 但却忽略了圆柱直径大小对 Janus 微球停留时间的影响. 这可能是由于其实验中最小的圆柱直径 ($15 \mu\text{m}$) 也远远大于其所用的 Janus 微球的直径 ($2 \mu\text{m}$), 而圆柱直径超过一定值后, 障碍物的尺寸效应对微球停留时间的影响就趋于恒定, 这与本研究中发现的 Janus 微球在直径为 $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的圆柱边缘的停留时间接近相吻合. 图 3(b) 展示了在不同双氧水浓度的条件下, 自驱动的 Janus 微球在光滑平面及不同直径圆柱边界上的运动速率. 结果显示, 在双氧水浓度相同的条件下, 自驱动的 Janus 微球在圆柱边界上的运动速率比在光滑平面上明显减小, 且其在圆柱边界上的运动速率随着圆柱直径的增加而增大. 这可能是因为当自驱动的 Janus 微球靠近圆柱, 铂催化双氧水分解产生的化学物质的浓度梯度因圆柱的存在而重新分布 (即与其在光滑平面上的分布不同), 导致其泳效应的改变, 从而影响自驱动的速率. Yu 等 [21] 的实验发现自驱动的 Janus 微球在微米级通道边界的运动速率要小于其在通道中间的运动速率, 这个结果在一定程度上支持了我们的上述推测, 但还需进一步实验加以证实.

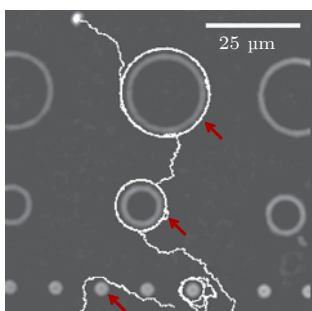


图 2 自驱动的 Janus 微球 358 s 内在具有圆柱形障碍物 (用红色箭头指示) 的盖玻片上运动的轨迹示例

Fig. 2. Examples of trajectories of Janus particles when cylindrical posts (as indicated by red arrow) are used as obstacles. The time period of the shown trajectories is 358 s.

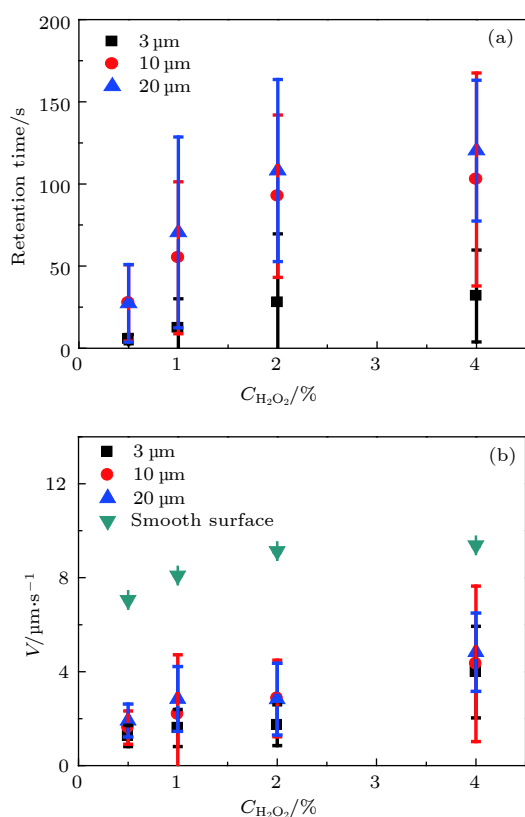


图 3 自驱动的 Janus 微球在不同双氧水浓度的条件下, 绕不同直径的圆柱公转的 (a) 停留时间及 (b) 运动速率

Fig. 3. (a) The retention time and (b) average speed of self-propelled Janus spheres when they are orbiting around cylindrical posts with different diameter at different concentrations of H_2O_2 . The results are obtained by averaging over 30–50 trajectories, and the error bars stand for standard errors.

3.2 自驱动的 Janus 微球在球形障碍物边界的运动特征

图 4 为在双氧水的浓度为 2% 的条件下, 自驱动的 Janus 微球在具有 PS 球作为障碍物的盖玻

片上的典型运动轨迹. 观察结果显示自驱动的 Janus 微球运动至直径为 $1.0 \mu\text{m}$ 及 $1.8 \mu\text{m}$ 的 PS 球边缘并未被其“捕获”, 而当自驱动粒子运动至直径为 $2.4 \mu\text{m}$ 及 $7.2 \mu\text{m}$ 的 PS 球边缘便会被其“捕获”并绕其边缘定向运动. 我们将自驱动的 Janus 微球在 PS 球边界上运动超过其周长一半定义为被“捕获”, 对数据进行统计后 (每组至少 30 个数据)(见图 5) 发现: 在相同双氧水浓度的条件下, 自驱动的 Janus 粒子受限与粒径大的 PS 球的概率更大; 对于相同粒径的 PS 球, 增加双氧水浓度, 自驱动的 Janus 粒子受限的概率增加. 与圆柱类似, 我们也研究了双氧水浓度和球形障碍物的直径对 Janus 微球在球形障碍物边界的停留时间及运动速率的影响. 结果如图 6 所示: 双氧水浓度增加或 PS 球尺寸增大均会使 Janus 微球受限的时间变长、在 PS 球边界上的运动速率增大. 与圆柱边界相似, 在本部分研究中 Janus 微球在 PS 微球边界上的运动速率比其在光滑平面上的运动速率明显减小, 这与自驱动的 Janus 微棒绕球形障碍物的运动不同. Takagi 等^[15] 的实验结果表明, 由双氧水驱动的双金属 Janus 微棒绕不同直径、不同种类的微球边界运动的速率与其在光滑平面上的运动速率基本相同. 由双氧水驱动的 Janus 微球与双金属 Janus 微棒绕障碍物运动时速率变化的差异可能是由于两者的自驱动机制不同. 双金属 Janus 微棒为自电泳机制, Janus 微球为自扩散泳机制, 因此两者自驱动运动产生的流场不同; 且铂催化双氧水分解的产物在两者周围的分布也不同, 导致两者靠近障碍物时, 障碍物对两者化学物质重新分布的影响也不同. 流场在自驱动粒子接近障碍物运动行为中的重要作用也有文献报道. Spagnolie 等^[22] 模拟了不同运动方式的微生物在球形障碍物中的运动行为, 结果表明运动方式不同的微生物所产生的流场不同, 相应地能够“捕获”微生物的障碍物的临界尺寸与微生物运动强度的依赖关系也不同.

3.3 自驱动的 Janus 微球在圆柱及球形障碍物边界的运动特征比较

对于圆柱及球形障碍物, 自驱动的 Janus 粒子在其边界上的停留时间及速率均随着障碍物的尺寸或双氧水浓度的增加而增大, 那么障碍物是圆柱形还是球形对自驱动的 Janus 粒子的运动特征的影响有什么不同呢? 对比自驱动的 Janus 粒子在

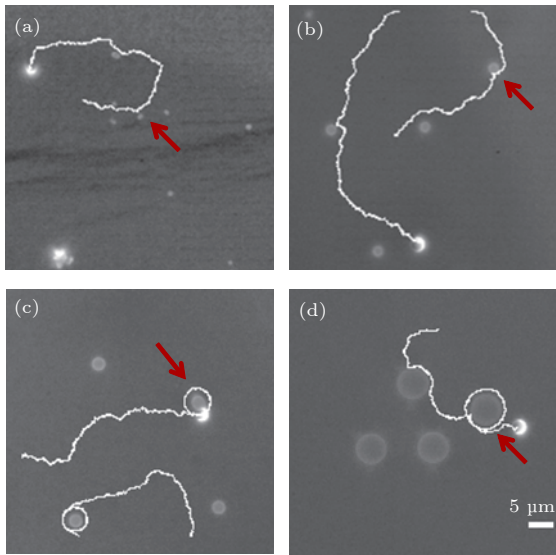


图 4 自驱动的 Janus 微球在具有 PS 球 (圆形暗斑, 如红色箭头所示) 作为障碍物的盖玻片上运动的轨迹举例, PS 球的粒径分别为 (a) 1 μm , (b) 1.8 μm , (c) 2.4 μm , (d) 7.2 μm

Fig. 4. Examples of trajectories of Janus particles when polystyrene spheres (as indicated by red arrow) are used as obstacles. Diameters of used polystyrene spheres are (a) 1 μm , (b) 1.8 μm , (c) 2.4 μm , (d) 7.2 μm .

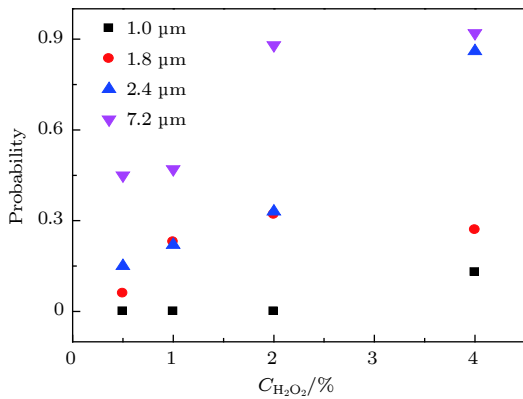


图 5 自驱动的 Janus 微球被不同粒径的 PS 微球所“捕获”的概率与双氧水浓度的关系

Fig. 5. The probability of the self-propelled Janus trapped by polystyrene microspheres with different diameter as a function of the concentration of H_2O_2 .

直径为 3 μm 的圆柱和直径为 2.4 μm 的球形障碍物边界处的运动, 在双氧水浓度相同的条件下, 其在圆柱边界上的停留时间比在微球边界上长; 在圆柱边界上的运动速率比在微球边界上小. 由于用于对比的圆柱障碍物的直径比球形障碍物大, 我们又对比了 3 μm 的圆柱和 7.2 μm 的球形障碍物, 也得到了同样的结论, 由此可以推断出, 当圆柱障碍物与球形障碍物粒径相同的情况下, 若双氧水浓度

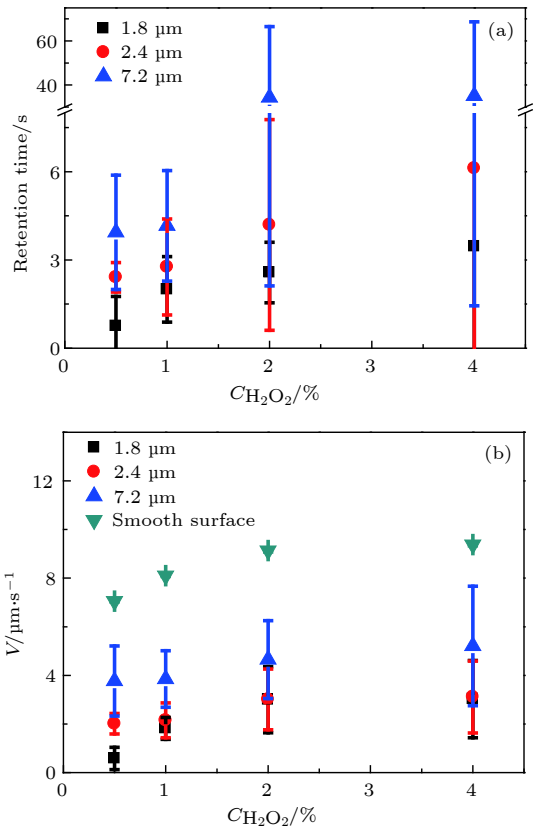


图 6 自驱动的 Janus 微球在不同双氧水浓度的条件下, 在不同粒径的 PS 微球边缘的 (a) 停留时间及 (b) 运动速率
Fig. 6. (a) The retention time and (b) average speed of self-propelled Janus microspheres on polystyrene microspheres with different diameter as a function of the concentration of H_2O_2 . The results are obtained by averaging over 30–50 trajectories, and the error bars stand for standard errors.

相同, 则自驱动的 Janus 微球在圆柱边界的停留时间比在球形障碍物边界长、围绕圆柱边界的运动速率比围绕微球边界时小, 揭示了自驱动的 Janus 微球在障碍物边界上运动的特点与障碍物的几何形状有关.

4 结 论

自驱动的粒子靠近平面上的障碍物时, 会展现出特殊的运动行为. 本文针对固定于平面上的微米级障碍物的几何效应 (包括大小和形状) 对自驱动的 Janus 微球的运动行为的影响进行了实验研究. 实验结果表明, 当障碍物尺寸超过临界值后, 自驱动的 Janus 微球靠近障碍物时会受限于其边界并沿其边界定向运动, 得到的主要结论如下:

1) 自驱动的 Janus 微球在微米级圆柱及微米级聚苯乙烯球边界上的运动速率及停留时间随着

双氧水浓度的增大而增加,同时随着障碍物直径的增大而增加;

2) 在双氧水浓度相同的条件下,若自驱动的 Janus 微球被相同直径的圆柱障碍物与球形障碍物(聚苯乙烯球)所“捕获”,则其在圆柱边界上的停留时间比其在球形障碍物边界上长,在圆柱边界上的运动速率比在球形障碍物边界上小.

本文的研究表明自驱动 Janus 微球的运动特征与障碍物的几何效应有关. 研究结果为自驱动的 Janus 微球在不同形状的障碍物中的动力学研究提供了实验基础,为通过设计障碍物的几何形状来引导自驱动 Janus 微球的运动等相关应用研究提供了实验依据.

参考文献

- [1] Howse J R, Jones R A L, Ryan A J, Gough T, Vafabakhsh R, Golestanian R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 048102
- [2] Paxton W F, Kistler K C, Olmeda C C, Sen A, St Angelo S K, Cao Y Y, Mallouk T E, Lammert P E, Cressi V H 2004 *J. Am. Chem. Soc.* **126** 13424
- [3] Fournier-Bidoz S, Arsenault A C, Manners I, Ozin G A 2005 *Chem. Commun.* **4** 441
- [4] Jiang H R, Yoshinaga N, Sano M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 268302
- [5] Palacci J, Sacanna S, Steinberg A P, Pine D J, Chaikin P M 2013 *Science* **339** 936
- [6] Bricard A, Caussin J B, Desreumaux N, Dauchot O, Bartolo D 2013 *Nature* **503** 95
- [7] Ebbens S, Gregory D A, Dunderdale G, Howse J R, Ibrahim Y, Liverpool T B, Golestanian R 2014 *Epl-Europhys. Lett.* **106** 58003
- [8] Martinez-Pedrero F, Massana-Cid H, Tierno P 2017 *Small* **13** 1603449
- [9] Kagan D, Laocharoensuk R, Zimmerman M, Clawson C, Balasubramanian S, Kong D, Bishop D, Sattayasamitsathit S, Zhang L F, Wang J 2010 *Small* **6** 2741
- [10] Soler L, Magdanz V, Fomin V M, Sanchez S, Schmidt O G 2013 *ACS Nano* **7** 9611
- [11] Zhang Z J, Zhao A D, Wang F M, Ren J S, Qu X G 2016 *Chem. Commun.* **52** 5550
- [12] Zhou D K, Li Y C G, Xu P T, Ren L Q, Zhang G Y, Mallouk T E, Li L Q 2017 *Nanoscale* **9** 11434
- [13] Lozano C, ten Hagen B, Lowen H, Bechinger C 2016 *Nat. Commun.* **7** 12828
- [14] Dey K K, Bhandari S, Bandyopadhyay D, Basu S, Chattopadhyay A 2013 *Small* **9** 1916
- [15] Takagi D, Palacci J, Braunschweig A B, Shelley M J, Zhang J 2014 *Soft Matter* **10** 1784
- [16] Das S, Garg A, Campbell A I, Howse J, Sen A, Velegol D, Golestanian R, Ebbens S J 2015 *Nat. Commun.* **6** 8999
- [17] Simmchen J, Katuri J, Uspal W E, Popescu M N, Tasinkevych M, Sanchez S 2016 *Nat. Commun.* **7** 10598
- [18] Wykes M S D, Zhong X, Tong J, Adachi T, Liu Y P, Ristroph L, Ward M D, Shelley M J, Zhang J 2017 *Soft Matter* **13** 4681
- [19] Katuri J, Caballero D, Voituriez R, Samitier J, Sanchez S 2018 *ACS Nano* **12** 7282
- [20] Zong Y W, Liu J, Liu R, Guo H L, Yang M C, Li Z Y, Chen K 2015 *ACS Nano* **9** 10844
- [21] Yu H L, Kopach A, Misko V R, Vasylenko A A, Makarov D, Marchesoni F, Nori F, Baraban L, Cuniberti G 2016 *Small* **12** 5882
- [22] Spagnolie S E, Moreno-Flores G R, Bartolo D, Lauga E 2015 *Soft Matter* **11** 3396

The dynamics of self-propelled Janus microspheres near obstacles with different geometries*

Zhang Hong¹⁾ Zong Yi-Wu^{1)†} Yang Ming-Cheng²⁾³⁾ Zhao Kun^{1)‡}

1) (*Key Laboratory of Systems Bioengineering (Ministry of Education), School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

2) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and CAS Key Laboratory of Soft Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 May 2019; revised manuscript received 16 May 2019)

Abstract

Self-propelled particles exhibit interesting behavior when approaching boundaries or obstacles, which has been drawn a lot of attention due to its potential applications in areas of cargo delivery, sensing and environmental remediation. However, our understanding on the mechanism of how they interact with boundaries or obstacles is still limited. Here, using video particle-tracking microscopy, we experimentally studied the dynamics of self-propelled Janus microsphere driven by H_2O_2 near obstacles. The Janus particles used are sulfuric polystyrene (PS) microspheres (hydrodynamic diameter is $3.2\ \mu\text{m}$) with only half surface being sputter-coated with a five-micron-thick platinum layer. Two different types of obstacles are used. One is cylindrical post and the other is PS microsphere. To understand the size effect of obstacles, cylindrical posts with three different diameters ($3\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$ and $20\ \mu\text{m}$), and PS microspheres with four different diameters ($1.0\ \mu\text{m}$, $1.8\ \mu\text{m}$, $2.4\ \mu\text{m}$ and $7.2\ \mu\text{m}$) are tested, respectively. The results show that when obstacles are larger than a critical size, the self-propelled Janus microspheres will be captured and orbit around them. The retention time and the orbiting speed of the Janus particles increase with the concentration of H_2O_2 , as well as with the diameter of obstacles no matter whether cylindrical posts or PS microspheres are used as obstacles. However, we found that under the same concentration of H_2O_2 , compared with the case of PS microspheres as obstacles, when Janus particles orbit around cylindrical posts, the retention time is larger and the average speed is smaller. These results indicate that the self-propelled behavior of Janus particles near obstacles is closely dependent on the geometrical properties of obstacles. Our results of Janus spheres are different from earlier work on Au-Pt Janus rods [Takagi D, Palacci J, Braunschweig A B, Shelley M J, Zhang J 2014 *Soft Matter* **10** 1784]. By comparing the speed of Janus particles before and after they are captured by spherical obstacles, for our case, the speed of Janus spheres is reduced, while for the case of Au-Pt rods, the speed of Au-Pt rods doesn't change much. Such discrepancies may originate from different driven mechanisms in these two systems (electrophoresis mechanism for Au-Pt micro-rods and diffusiophoresis mechanism for PS-Pt Janus microspheres), which are then resulted in different flow fields and different distributions of catalytic solutions. But to test this hypothesis, further work is needed. Our study provides us a better understanding on the dynamic behavior of self-propelled particles near obstacles, which will be helpful for applications in, for example, designing micro-structures to guide the motion of self-propelled particles.

Keywords: self-propelled, Janus microsphere, confinement, obstacles

PACS: 47.63.mf, 07.10.Cm, 47.57.J-

DOI: 10.7498/aps.68.20190711

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11704276, 21573159, 11674365, 11874397).

† Corresponding author. E-mail: yiwuzong@tju.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: kunzhao@tju.edu.cn