

不同粒径 Janus 微球的自驱动: 实验及驱动机制对比

王雷磊 崔海航 张静 郑旭 王磊 陈力

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

Wang Lei-Lei Cui Hai-Hang Zhang Jing Zheng Xu Wang Lei Chen Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 220201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.220201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.220201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广义平面应变锂离子电池柱形梯度材料颗粒电极中扩散诱导应力分析

Stress analysis of a cylindrical composition-gradient electrode of lithium-ion battery in generalized plane strain condition

物理学报.2016, 65(10): 100201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100201>

硅薄膜太阳能电池表面纳米线阵列光学设计

Optical design of nanowire array on silicon thin film solar cell

物理学报.2016, 65(7): 070201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070201>

广义非线性薛定谔方程描述的波坍缩及其演变

Collapse and evolution of wave field based on a generalized nonlinear Schrödinger equation

物理学报.2016, 65(4): 040201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.040201>

点堆中子动力学方程组曲率权重法的解

Curvature weight method of solving the point reactor neutron kinetic equations

物理学报.2015, 64(22): 220201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.220201>

耦合高压斯特林制冷效应的复合磁制冷循环的数值模拟

Numerical simulation of a hybrid magnetic refrigeration combined with high pressure Stirling regenerative refrigeration effect

物理学报.2015, 64(21): 210201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210201>

不同粒径Janus微球的自驱动: 实验及驱动机制对比*

王雷磊¹⁾ 崔海航^{1)†} 张静¹⁾ 郑旭²⁾ 王磊¹⁾ 陈力¹⁾

1)(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

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)

(2016年7月6日收到; 2016年8月15日收到修改稿)

Janus颗粒是两侧具有不同性质的非均质颗粒的统称. 利用Pt-SiO₂型Janus微球的Pt一侧催化分解H₂O₂溶液, 可以使得颗粒自驱运动. 本文首先从实验角度对比了不同粒径、相同浓度下的两类自驱动现象, 结果表明在 $d \sim O(1 \mu\text{m})$ 时为扩散泳驱动, $d \sim O(10 \mu\text{m})$ 为气泡驱动, 二者在运动轨迹、驱动速度上存在很大差异. 随后, 分析了主导的力学因素, 并根据简化后的受力平衡关系建立了多场耦合的数值模型, 重点研究了大粒径下浓度及速度场的分布, 据此解释了气泡产生的位置及尺寸, 并推断壁面滑移系数是数值模型中的关键匹配参数, 及其在不同粒径下变化的可能机理. 这一研究将为深入理解自驱动的机理及提高自驱动器件的驱动能力提供理论基础.

关键词: Janus微球, 扩散泳, 气泡驱动, 滑移边界

PACS: 02.60.Cb, 07.10.Cm, 47.63.mf, 47.70.Fw

DOI: 10.7498/aps.65.220201

1 引言

Janus颗粒是两侧具有不同性质的非均质颗粒的统称^[1]. 在微纳尺度, 利用Janus颗粒的非对称结构可以在颗粒表面形成浓度、温度或光强等物理场的巨大梯度, 利用该梯度造成的非对称动量分布可以使得颗粒产生自主运动, 这一问题在微机电系统^[2]、微生物趋向性^[3]、低 Re 数流体力学等^[4]领域具有重要的应用. 从能量转换角度, 自驱动问题是能量从化学能向机械能转化的过程, 为研究化学与流动的力学耦合提供了新机制. 目前自驱动研究多使用球形微纳米颗粒, 这主要是由于其制备简单, 物理模型清晰.

常见的自驱动机理包括自扩散泳^[5-8]、气泡驱动^[9-12]、自电泳^[13]、自热泳等^[14]. 由于后两种驱动方式在微球结构及实验条件上与前两种方

式存在较大差异, 本文主要针对前两种驱动方式进行研究. 典型的自驱动体系是将微米级Pt-SiO₂型Janus颗粒置于H₂O₂溶液, 此时Pt催化剂一侧会分解H₂O₂产生O₂. 目前针对这一体系的自驱动问题已开展了较为系统的研究. 2007年, Howse等^[5]通过微加工手段制备了直径1 μm 的Janus微球, 建立了可控的实验手段研究自驱动问题, 获得了随机运动主导的颗粒运动轨迹, 颗粒的自驱动速度在10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 以下, 自驱动速度随浓度线性增加. 2012年, Manjare等^[10]采用直径20—50 μm 的Janus微球观察到气泡驱动的“前推”与“回拉”交替的准振荡式运动, 平均速率约为100—200 $\mu\text{m}/\text{s}$. 上述实验中H₂O₂溶液的浓度均介于1%—5%之间. 此外, Wang和Wu^[11]通过将直径1 μm 的Pt微球与聚苯乙烯微球相连形成二聚体, 在10%浓度的H₂O₂溶液中观察到直径10 μm 的气泡引起的振荡式运动, 平均速率约为40 $\mu\text{m}/\text{s}$. 除Janus微球

* 陕西省教育厅重点实验室项目(批准号: 15JS045)和国家自然科学基金(批准号: 11602187)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cuihaihang@xauat.edu.cn

之外, 还有棒状、管式、L形等不同形状的微结构所引起的自驱运动问题^[15].

通过比较现有的实验结果可以发现, 小粒径情况下为浓度梯度引起的扩散泳, 通常无气泡出现, 研究表明颗粒速度将会随着粒径的增加而减小. 在溶液浓度不变的情况下, 粒径增加至10 μm以上, 会观察到气泡出现^[10], 此时自驱动速度增加了约两个量级, 相关文献认为此时的驱动力为气泡生长形成的推力. 可见, 在几何尺度变化约一个数量级的情况下, 现有的两种机理尚无法衔接, 因此本文基于所开展的实验研究, 对两类实验现象进行对比, 并结合数值模型对驱动机制进行分析, 试图获得对这一问题的深入认识.

2 实验

本文实验包括两部分, 即两种尺寸(直径 $d = 20\text{--}40\ \mu\text{m}$ 与 $d = 1\text{--}2\ \mu\text{m}$)的Pt-SiO₂型 Janus 微球自驱动实验. 二者实验手段大体类似, 这里以大粒径实验为主进行介绍. 实验所用SiO₂微球购于马鞍山钢铁研究总院, 将微球与水混合滴在硅片上, 在匀胶机上旋转使得微球均匀铺展, 加热烘干形成单层SiO₂微球(图1(a)); 之后, 利用电子束蒸发镀膜工艺(中国科学院半导体研究所, 美国Innotec 电子束蒸发台)在微球上半表面蒸镀约20 nm厚的Pt层, 这样就获得了所需要的Pt-SiO₂型 Janus 颗粒(图1(b)). 自驱动实验在中国科学院力学研究所LNM实验室微流动实验台上进行. 实验系统包括Nikon ECLIPSE Ti-U 倒置荧光显微镜, 物镜为20×; 图像采集使用Phantom V7.3 CCD (Vision Research, Inc.), 空间分辨率为640×480像素, 视场范围约410×308 μm². 实验中通过不同配比获得不同体积百分数的H₂O₂溶液(100 μL 30%的H₂O₂与885 μL水混合得到3%的溶液). 将颗粒与溶液滴在盖玻片上, 等待溶液静止后, 寻找运动的Janus微球并移至视场中心, 迅速调好焦距拍摄并保存. 随后跟踪其他颗粒, 进行重复拍摄. 为保证实验中H₂O₂浓度恒定, 每次拍摄的时间控制在20 min以内, 随后更换新液滴, 实验温度保持在19 °C±1 °C. 随后结合Phantom CCD自带软件PCC及Image J, Video Spot Tracker, Matlab等软件对实验视频进行分析. 详细的实验过程及小粒径实验请参考之前的工作^[7,16,17]及相关文献^[18].

图2给出了两种不同驱动方式下微球运动的典型轨迹. 其中图2(a)为自扩散泳作用下小粒径($d = 1\ \mu\text{m}$) Janus颗粒的运动轨迹图^[19], 图2(b)为气泡驱动下大粒径($d = 20\ \mu\text{m}$) Janus颗粒的运动轨迹图. 两个实验中非催化剂侧(SiO₂侧)始终位于前进方向的前部, 催化剂侧(Pt侧)位于后方. 不同之处在于大粒径下会有气泡出现在Pt一侧, 微球的整体运动轨迹近似为圆弧形, 在短时间内则近似为直线; 小粒径颗粒的运动轨迹具有强烈的随机特征, 但其运动范围大于单纯的随机布朗运动.

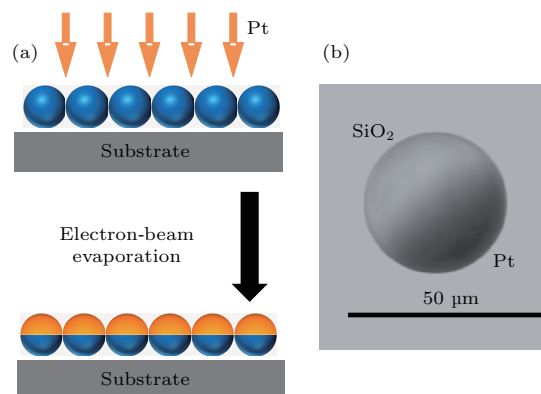


图1 (网刊彩色) 电子束蒸发制备 Janus 微球的示意图(a)及显微图像(b)

Fig. 1. (color online) Schematic of fabrication of Janus microspheres through electron beam evaporation (a) and the microscopic image of Janus microsphere (b).

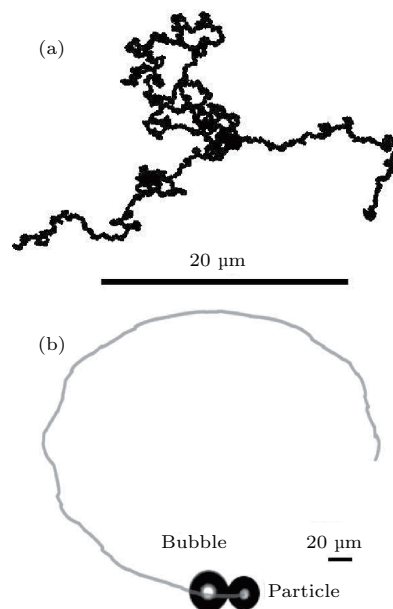


图2 不同自驱动模式下 Janus 微球的典型运动轨迹 (a) 自扩散泳; (b) 气泡驱动

Fig. 2. Typical movement trajectories of Janus microspheres in different self-propellant mode: (a) Self-diffusiophoresis; (b) bubble propulsion.

通过轨迹长度及时间间隔可计算得到Janus微球的平均速度, 以及运动速度与 H_2O_2 溶液浓度的关系, 结果如图3所示. 对于小粒径微球(图3(a)), 可以看出速度介于数微米每秒的量级, 且随着浓度的增加而增加[5]. 对于大粒径运动(图3(b)), 可以看到平均速度约为200—450 $\mu\text{m/s}$, 同样随着浓度的增加而增加. 针对不同粒径, 实验还表明在扩散泳自驱动中, 自驱动速度对半径并不敏感, 这是由于随着颗粒尺度的增加, 虽然催化分解反应的面积相应增加, 但由于自驱动的动力在于浓度梯度, 而颗粒尺度的增加会减小浓度梯度, 因此文献[20]给出了随半径增加自驱动速度下降的理论预测. 尽管如此, 随着粒径增大一个量级后, 实验表明气泡的出现使得驱动速度显著增加, 而在这一过程中反应类型与反应速率并未发生显著的变化.

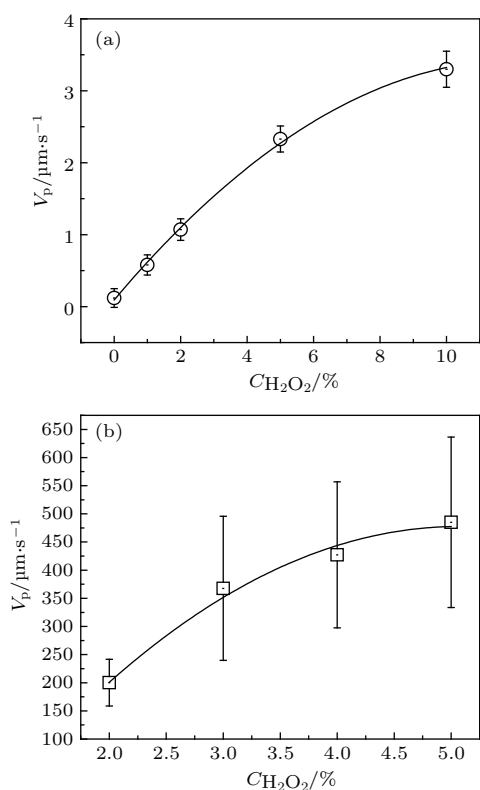


图3 微球 $d = 1-2 \mu\text{m}$ (a) 与 $d = 20-40 \mu\text{m}$ (b) 的运动速度 V_p 与浓度 $C_{H_2O_2}$ 的变化

Fig. 3. The relationship of velocity V_p versus H_2O_2 concentration $C_{H_2O_2}$ for microspheres with diameter $d = 1-2 \mu\text{m}$ (a) and $d = 20-40 \mu\text{m}$ (b).

3 数值模型

由实验可知自驱动过程可能涉及表面催化反应、传质过程、布朗运动、流动滑移边界及气泡动

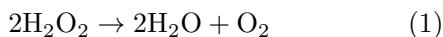
力学等问题, 建立完整的物理模型目前存在巨大困难. 此外, 由于实验过程中Janus微球与 H_2O_2 溶液始终处于混合状态, 显微镜下无法观测到Janus微球依靠自扩散泳力从静止到运动的过程, 因此目前尚未有实验研究该过程. 并且, 关于此过程数值模拟方法太过复杂, 不利于反映出自驱动物理问题现阶段的关键, 因此本文将重点研究Janus微球自驱运动的稳定状态. 本文将忽略随机布朗运动及气泡动力学等问题, 建立流动及传质的数值模型, 通过数值模拟获得主要物理量的空间分布, 为完整的物理模型奠定基础.

为简化物理模型, 需要计算相关的特征无量纲数. 在传质问题中, 以实验的自驱动速度 V_p 为特征速度、微球直径 d_p 为特征尺度, 使用溶解态 O_2 的扩散系数 $D_{O_2} = 2.3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 计算 O_2 传递过程的Peclet数 $Pe = V_p \cdot d_p / D_{O_2}$. 两种粒径下分别计算得到 $Pe_{d2} \sim 10^{-2}$ 及 $Pe_{d20} \sim 10$, 其中下角标 d2 和 d20 分别代表直径为 $2 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 的Janus微球. 可见小粒径问题是以扩散为主的问题, 而大粒径问题中对流与扩散均不可忽略. 同样, 还可以计算不同问题的Reynolds数, $Re = \rho V_p \cdot d_p / \mu$, 其中, ρ 为Janus微球周围流体的密度(单位为 kg/m^3), μ 为Janus微球周围流体的动力黏滞系数(单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$), 分别计算得 $Re_{d2} \sim 10^{-6}$ 及 $Re_{d20} \sim 10^{-3}$, 二者均属于低 Re 数流动问题.

接下来分析模型需要考虑的受力因素. 从图2中可以看出, 小粒径微球的运动轨迹具有强烈的随机特征, 因此这一问题是由扩散泳力 F_{DEP} 、随机布朗力 F_{Brown} 及Stokes阻力 F_{Stokes} 主导的. 对于大粒径微球的自驱动, 一般认为液体中颗粒直径大于 $5 \mu\text{m}$ 后布朗运动可以忽略, 此时分析图2中的圆弧形轨迹, 将其看作直线运动与另一旋转运动的叠加, 由于扩散泳力是切向力, 由壁面处的切向浓度梯度决定, 当由于某种原因(如加工误差造成的催化剂非对称分布)造成一定程度的不对称分布时, 这一切向力可以产生转矩进而造成旋转运动. 基于实验及上述分析, 本文认为扩散泳力是气泡驱动微球运动的主要动力之一. 需要说明, 在以往文献中, 简单地认为随着粒径增加浓度梯度减小, 而忽略了扩散泳力, 认为气泡推力是驱动微球运动的惟一动力. 但是, 微尺度下近乎球形的气泡与微球之间是一种点接触的方式(图2), 无法产生转矩, 那么气泡推动微球应始终保持直线运动. 此外, 由

于自驱动问题是化学能向机械能转化的过程, 动力的根本来源是Pt表面的催化分解反应, 气泡生长只是中间过程, 因此从能量来源判断壁面处的扩散泳力应为主要驱动力.

依据上述分析建立自驱动的初步数值模型. 首先, 当溶液中存在一定浓度的 H_2O_2 时, H_2O_2 与Pt接触会发生分解,



化学反应可以通过简化的一级反应动力学方程进行描述, 文献[5]给出的这一反应的反应速率常数 k_r 约为 2.5×10^{-3} m/s. 在模拟中需要将 H_2O_2 的体积百分数换算为相应的摩尔浓度, 1%的 H_2O_2 对应于 294 mol/m^3 . 据此可以计算出Pt表面 H_2O_2 的消耗通量 $Flux_{H_2O_2} = -k_r C_{H_2O_2}$, 以及近似的 O_2 的生成通量 $Flux_{O_2} = \frac{1}{2} k_r C_{H_2O_2}$, 单位为 $\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$. 这里需要用到 H_2O_2 的扩散系数, 为 $D_{H_2O_2} = 1.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. 结合低 Re 数的Navier-Stokes方程及对流扩散传质方程, 建立支配方程组如下:

$$\begin{cases} \nabla U = 0, \\ \mu \nabla^2 U = \nabla p, \end{cases} \quad (2)$$

$$U \nabla C - D \nabla^2 C = R_i, \quad (3)$$

$$R_i = -k_r C. \quad (4)$$

根据问题的对称性将其简化为二维轴对称问题, 计算域为矩形域中不含微球的区域, 数值模型的边界条件如图4所示. 由于Janus微球在不断地运动, 可通过时间平均消除布朗运动的影响后, 得到Janus微球的平均平动速度 V_p . 当自驱动力居于主导时, 随机外力的时均值大大低于自驱动力, 因此可以忽略. 在这一时间尺度下, 可以认为微球处于匀速直线运动状态, 这时这一非定常问题可以通过相对坐标的处理方式转化为定常问题, 即将微球固定, 将右侧入口边界设置为以 V_p 速度反向流入. 在入口处浓度条件为无 O_2 流入, H_2O_2 的浓度可根据体积浓度设定. 微球表面的流动边界条件为滑移边界条件, $U_{slip} = C_{slip} \nabla C_t$, 即滑移速度由浓度梯度 ∇C 在切向的投影 ∇C_t 与滑移系数 C_{slip} 所决定, 有关浓度梯度产生滑移的机理可以参考文献[8]. 微球Pt侧为通量条件, SiO_2 侧为无通量条件. 在其余部分, 左侧为出流条件, 上部边界为无通量及无黏性应力条件, 下部为对称轴.

问题的模拟, 由于造成旋转的非对称性并不大, 为了简化计算这里予以忽略. 自驱动问题的定解条件为低 Re 数下微球的合力为零.

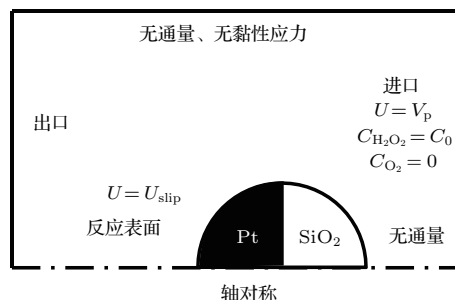


图4 自驱动Janus颗粒数值模拟的边界条件
Fig. 4. Boundary conditions for numerical simulation of self-propelled Janus particle.

可以看出, 这一问题的特殊性在于浓度场与流场的双向耦合, 流场的滑移边界条件由浓度梯度决定, 而传质的对流项与速度场关联, 本文采用Comsol Multiphysics多物理场耦合软件进行求解. 在模拟中将滑移系数作为关键拟合参数, 对于特定问题, 需要首先根据实验确定出相应的滑移系数, 在建立了完整的数值模型后, 可以在一定范围内改变其他参数, 研究不同因素的影响. 本文在根据实验获得的颗粒自驱动速度分别获得了两种粒径下的滑移系数, 分别为 $C_{slip2} = 3 \times 10^{-11} \text{ m}^5/\text{mol} \cdot \text{s}$ ($d = 2 \text{ }\mu\text{m}$)及 $C_{slip20} = 3 \times 10^{-10} \text{ m}^5/\text{mol} \cdot \text{s}$ ($d = 20 \text{ }\mu\text{m}$).

下面以大粒径下的自驱动问题为主, 说明主要物理量的空间分布, 并着重说明与气泡生成有关的内容. 对小粒径下的结果仅进行对比说明, 详细的结果请参考之前的文献. 图5分别给出了大粒径下的流场及 O_2 的浓度场, 模拟条件为 H_2O_2 浓度3%, $V_p = 400 \text{ }\mu\text{m/s}$. 图5已将模拟中颗粒相对静止的流场转换为颗粒运动的速度分布. 从图5(a)可以看出, 微球正前部流体被排开, 速度向右为正, 微球左侧正后方近壁附近速度方向仍为正, 前后对称点处的速度均为 $400 \text{ }\mu\text{m/s}$, 这反映了颗粒整体在以 V_p 的速度向右平动. 在微球正上方处, 受壁面滑移条件的影响, 该处速度为反向的最大值, 这是由于此处的浓度梯度最大, 在该点左侧反向速度逐渐减小. 图中的流线则给出了计算域内部流速方向的分布.

图5(b)为 O_2 浓度的分布, 可以看出, 在微球前端 O_2 浓度为零, 这是由于微球前部无催化剂存在, 且微球运动速度较大, 对流作用强于扩散作用

造成的; 在微球左侧后部则存在一个高浓度 O_2 的尾迹区, 其浓度随着距对称点距离的增加而迅速衰减, 意味着此处存在着很大的浓度梯度, 将产生很大的扩散泳力. 这一结果亦表明, 之前文献认为的粒径增加会导致浓度梯度下降是不严谨的, 这一结论仅在扩散为主导的过程下才成立, 而当对流作用很强时, 生成的 O_2 主要集中在小范围的尾迹区内, 造成很大的梯度.

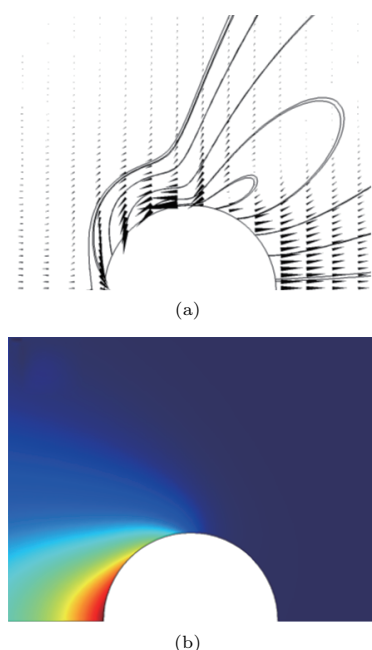


图5 (网刊彩色) Janus 微球的速度场 (a) 和 O_2 浓度分布 (b), 微球向右侧运动
 Fig. 5. (color online) The velocity field distribution (a) and O_2 concentration distribution (b) around Janus microsphere (microsphere moves to right side).

图6进一步给出了微球左侧对称轴上 O_2 浓度的分布及速度分布. 可以看出, 微球左端点处 O_2 浓度的最大值约为 $15\text{--}40\text{ mol/m}^3$, 浓度随着距微球距离的增加迅速衰减, 在 $100\text{ }\mu\text{m}$ 后趋于零, 估算得到浓度在水平方向的变化率约为 10^5 mol/m^4 . 从速度的变化可以看到, 微球左端点的速度为 $400\text{ }\mu\text{m/s}$, 方向向右. 随后速度迅速衰减, 大约在 $L = 10\text{ }\mu\text{m}$ 处变为零, 在 $L = 2\text{ }\mu\text{m}$ 处出现速度最小值, 即反向速度的最大值, 随后速度逐渐趋向于零. 在与上述条件类似的小粒径模拟结果中, O_2 浓度的最大值约为 4 mol/m^3 , 下降一个数量级, 但由于粒径本身较小, 浓度梯度仍处在同一量级; 微球的速度在大约 $4\text{ }\mu\text{m/s}$, 在 $L = 2\text{ }\mu\text{m}$ 处速度近似为零, 即在该点左右两侧速度方向发生了改变.

整体来看, Janus 微球后部 (左端点附近) 的尾迹区是流动及传质的关键, 在该点附近流动速度与颗粒运动方向一致, 附近区域的 O_2 会在流场的作用下向该点流动, 在左端点会累积高浓度的 O_2 , 最终与通过分子扩散向外部输运的 O_2 平衡. 因此当气泡成核条件具备时, 该处最易出现气泡. 而气泡的最大尺寸则由速度发生转折的位置 (图6中 $L = 20\text{ }\mu\text{m}$ 处) 决定, 当气泡的中心在该点右侧时, 气泡在右向流场的作用下无法与颗粒脱离, 气泡会逐渐生长, 当气泡长大至其几何中心位于该点的左侧时, 左向流场将作用于气泡将其推离颗粒, 气泡一旦脱离了高浓度的尾迹区, 外部的低浓度的 O_2 无法维持气泡的生长, 转而促使其发生溃灭. 在实验中观察到的气泡最大半径正处于这一量级, 可以在一定程度上说明上述模拟的正确性. 而小粒径情况下, 尾迹区的浓度较低, 速度转折点很近, 这些条件均不利于气泡的生成, 因此显微镜下难以看到可见的气泡.

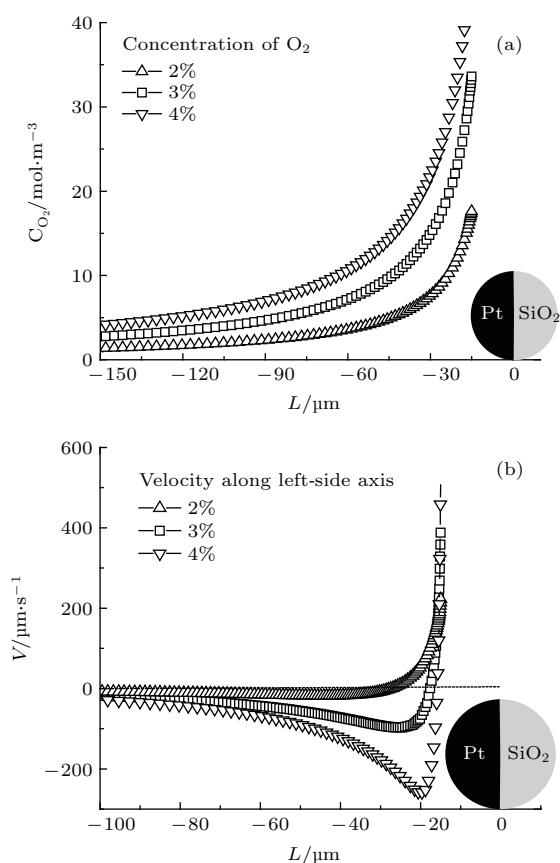


图6 直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的 Janus 微球左侧对称轴上的速度分布 (a) 及 O_2 浓度分布 (b)
 Fig. 6. The distributions of O_2 concentration (a) and flow velocity (b) along leftside symmetrical axis of Janus microsphere with diameter of $20\text{ }\mu\text{m}$.

进一步研究了大粒径情况下 H_2O_2 浓度对自驱动性能的影响, 此时所有拟合参数均已给定, 主要考虑了浓度对自驱动平均速度的影响. 可以看到, 对于1%—5%的浓度, 速度会随着浓度的增加而增加, 但浓度的增加与速度的增加并不完全对应, 当浓度增加5倍时, 速度近似增加了4倍, 这是由这一问题复杂的过程所决定的.

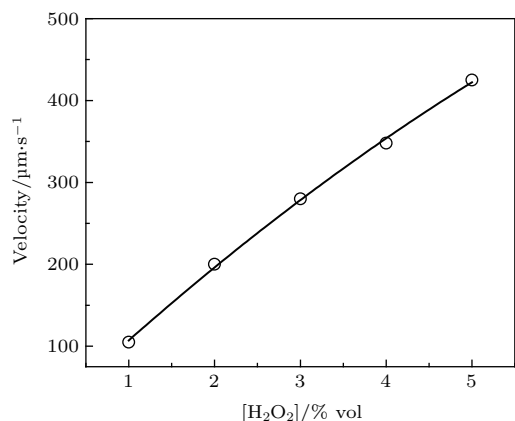


图7 Janus微球 ($d = 20 \mu\text{m}$) 自驱动速度与 H_2O_2 浓度的关系

Fig. 7. The relationship of velocity versus H_2O_2 concentration for Janus microspheres with $d = 20 \mu\text{m}$.

4 讨论与结论

本文主要目的是通过对比给出两种自驱动方式在实验现象上存在的差异, 然后分析不同方式中主导的力学要素, 在建立了微尺度流动与传质的耦合模型后, 通过实验条件及文献确定出数值模型中所涉及的物理参数, 并获得了微球外部的浓度及速度的分布. 这些结果有助于我们来理解这一复杂的物理过程, 尤其是与气泡生成有关的过程. 此外, 还对溶液浓度对自驱动速度的影响进行了数值研究, 结果与实验数据基本符合, 证明了本文所建立数值模型的合理性.

尽管如此, 由于问题的复杂性、非稳态等特点, 数值模型忽略了诸如旋转运动、气泡动力学过程以及气泡存在对流动传质的影响等问题, 稳态处理方式也与非稳态过程存在一定差异. 本文数值模型的核心参数为滑移系数, 分别给出了两类自驱动中的滑移系数, 二者相差一个数量级. 这里需要讨论这一参数发生变化的合理性. 在小粒径下 O_2 以溶解态的形式存在, 而且生成量并不大, 输运以分子扩

散为主, 非对称的动量主要是由近壁面一薄层中的 O_2 分子通过碰撞传递给微球的. 而随着粒径的增加, 曲率半径随之减小, 这时扩散受到固体壁面的抑制, 在尾迹区中 O_2 累积浓度增大, 这时给微球传递动量的 O_2 分子的厚度将增加, 甚至可以认为存在一些不可见的小气泡, 它们不断地生成与破灭, 对颗粒运动施加更大的影响, 从而导致滑移系数大幅增加.

参考文献

- [1] Gennes P G D 1992 *Angew. Chem. Int. Ed.* **31** 842
- [2] Kapral R 2013 *J. Chem. Phys.* **138** 020901
- [3] Cameron L A, Theriot J A 1999 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **96** 4908
- [4] Bickel T, Majee A, Würger A 2013 *Phys. Rev. E: Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* **88** 493
- [5] Howse J R, Jones R A L, Ryan A J, Gough T, Vafabakhsh R, Golestanian R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 048102
- [6] Brady J F 2011 *J. Fluid Mech.* **667** 216
- [7] Zheng X, Hagen B T, Kaiser A 2013 *Phys. Rev. E* **88** 032304
- [8] Wu M L, Zhang H Y, Zheng X, Cui H H 2014 *AIP Adv.* **4** 031326
- [9] Gibbs J G, Zhao Y P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 163104
- [10] Manjare M, Yang B, Zhao Y P 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 128305
- [11] Wang S, Wu N 2014 *Langmuir* **30** 3477
- [12] Manjare M, Yang B, Zhao Y P 2013 *Phys. Chem. C* **117** 4657
- [13] Paxton W F, Baker P T, Kline T R, Wang Y, Mallouk T E, Sen A 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 14881
- [14] Baraban L, Streubel R, Makarov D, Han L, Kar-naushenko D, Schmidt O G, Cuniberti G 2012 *ACS Nano* **7** 1360
- [15] Wang W, Chiang T Y, Velegol D, Mallouk T E 2013 *J. Am. Chem. Soc.* **135** 10557
- [16] Wu M L, Zheng X, Cui H H, Li Z H 2014 *Chin. J. Hydrodyn.* **29** 274 (in Chinese) [武美玲, 郑旭, 崔海航, 李战华 2014 水动力学研究与进展 A 辑 274]
- [17] Cui H H, Tan X J, Zhang H Y, Chen L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 134705 (in Chinese) [崔海航, 谭晓君, 张鸿雁, 陈力 2015 物理学报 **64** 134705]
- [18] Golestanian R, Liverpool T B, Ajdari A 2007 *New J. Phys.* **9** 265
- [19] Hu J, Zhang H Y, Zheng X, Cui H H 2014 *Chin. J. Hydrodyn.* **29** 377 (in Chinese) [胡静, 张鸿雁, 郑旭, 崔海航 2014 水动力学研究与进展, **29** 377]
- [20] Ebbens S, Tu M H, Howse J R, Golestanian R 2012 *Phys. Rev. E* **85** 02401

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

Wang Lei-Lei¹⁾ Cui Hai-Hang^{1)†} Zhang Jing¹⁾ Zheng Xu²⁾ Wang Lei¹⁾ Chen Li¹⁾

1) (School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

2) (State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

(Received 6 July 2016; revised manuscript received 15 August 2016)

Abstract

A Janus particle is a general term for a non-uniform particle that has different properties on different sides of particle. For a Pt-SiO₂ type of Janus microsphere, Pt side serves as the catalysis surface to decompose H₂O₂ solution, leading to the self-propulsion motion of particle. In this paper, the relevant experimental phenomena in two driven modes are compared first. The results show that under the same concentration of solution, the microsphere with a diameter of about 1 μm experiences self-diffusiophoresis propulsion; whereas, the one with an about 20 μm diameter experiences bubble self-propulsion. Significant differences in motional trajectory and propulsion velocity are found between them. Then, the dominated physical factors are analyzed and the multi-field coupling numerical model is constructed based on the simplified force balance analysis. Subsequently, the velocity field distribution and O₂ concentration distribution around Janus microsphere are also studied. According to these studies, we explain the position and size of the bubble generated. Further more, we infer that the wall slip coefficient is a key matching parameter in the numerical model, and two slip coefficients with a difference of an order of magnitude are given corresponding to the two types of self-propulsion modes. Then we explain the possible mechanism for the changes of wall slip coefficient under different particle sizes. The present study is beneficial to the in-depth exploration of the self-propulsion mechanism and also provides the theoretical foundation for improving the performance of self-propellant device.

Keywords: Janus microsphere, self-diffusiophoresis, bubble self-propulsion, slip boundary

PACS: 02.60.Cb, 07.10.Cm, 47.63.mf, 47.70.Fw

DOI: [10.7498/aps.65.220201](https://doi.org/10.7498/aps.65.220201)

* Project supported by the Special Research Project of Shaanxi Educational Committee, China (Grant No. 15JS045) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11602187).

† Corresponding author. E-mail: cuihaihang@xauat.edu.cn