

气泡推进型中空 Janus 微球运动特性的实验研究

张 静¹, 郑 旭^{2,*}, 王雷磊¹, 崔海航¹, 李战华²

(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, 北京 100190)

摘要:本文通过 Pt-SiO₂ 型(铂-二氧化硅型)中空 Janus 微球在低浓度 2%~4% H₂O₂ 溶液中的气泡驱动实验,观察到在每个气泡生长-溃灭周期内,Janus 微球的运动呈现 3 个特征阶段,分别为自扩散泳、气泡生长和气泡溃灭。其中气泡溃灭阶段微球在射流驱动下的推进速度可达每秒几十毫米,比前 2 个阶段的平均速度大 2~3 个数量级。实验观察到气泡生长阶段其半径与时间存在 $R_b \sim t^{1/3}$ 和 $R_b \sim t^{1/2}$ 两种标度率。由于气泡在 Janus 微球催化剂表面(Pt 侧)的生长点偏离对称轴位置,Janus 微球的运动轨迹呈圆弧形。随 H₂O₂ 溶液浓度的增加,还可以进一步提高 Janus 微球的运动速度。此研究不仅定量分析了 Janus 微球的运动特性,而且为实际应用中提高 Janus 双面微马达的运动速度和能量利用率提供了参考依据。

关键词:中空 Janus 微球;气泡驱动;气泡溃灭

中图分类号:O353.4; O353.5 **文献标识码:**A

Experimental study on the characteristic motion of bubble propelled hollow Janus microspheres

Zhang Jing¹, Zheng Xu^{2,*}, Wang Leilei¹, Cui Haihang¹, Li Zhanhua²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper studies the bubble propelled motion of Pt-SiO₂ hollow Janus microspheres in H₂O₂ solutions (concentrations between 2% to 4%). Three typical stages have been observed in every period of the bubble growth-collapse, which are self-diffusiophoresis, bubble growth and bubble collapse. At the bubble collapse stage, the speed propelled by a microjet can reach tens of millimeter per second, and it is about 2 or 3 orders of magnitude higher than the speed in the other two stages. In the experiment, two scaling laws between the bubble radius and the elapsed time during the bubble growth stage are observed: $R_b \sim t^{1/3}$ and $R_b \sim t^{1/2}$. Because the bubble growing point at the Janus microsphere's Pt side deviates from the axisymmetric point, the trajectory of the Janus microsphere is nearly a circle. With the increase of the H₂O₂ concentrations, the speed of the Janus microspheres can be enhanced. This study not only quantifies the characteristic motion of Janus microspheres, but also provides valuable information for improving the speed and energy utilization of Janus micromotors in practical application.

Keywords: hollow Janus microsphere; bubble propelled motion; bubble collapse

0 引 言

Janus 颗粒是指表面被 2 种不同性质材料覆盖的微纳米粒子,也称为“双面球”^[1]。利用 Janus 颗粒

表面非对称性质,可以在颗粒表面或近壁流场中形成浓度、温度、电场或光强等物理量梯度。这些物理量梯度场在颗粒表面形成非对称动量分布,使颗粒产生

收稿日期: 2016-10-11; 修订日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(11572335, 11272322, 11672358); 陕西省教育厅重点实验室项目(15JS045)

* 通信作者 E-mail: zhengxu@lm.imech.ac.cn

引用格式: Zhang J, Zheng X, Wang L L, et al. Experimental study on the characteristic motion of bubble propelled hollow Janus microspheres. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2017, 31(2): 61-66. 张 静, 郑 旭, 王雷磊, 等. 气泡推进型中空 Janus 微球运动特性的实验研究. *实验流体力学*, 2017, 31(2): 61-66.

运动,即自驱动^[2]。常见的自驱动包括自扩散泳^[3-4]、自热泳^[5]、自电泳^[6]和自光泳^[7]等。Pt-SiO₂型(铂-二氧化硅型)Janus颗粒在H₂O₂溶液中的自扩散泳是利用颗粒Pt侧催化分解H₂O₂生成O₂和H₂O分子,进而在颗粒的Pt与SiO₂两侧形成分子数浓度梯度引起颗粒运动,受力表达式为 $F_D \sim \nabla C$ ^[8]。

近年研究发现,对于催化分解生成难溶性气体分子的自扩散泳型Janus颗粒,通过改变形状^[9-10]或增大尺寸^[11],可以使生成的气体分子聚集成核形成气泡而推动Janus颗粒运动。相比于浓度梯度自驱动,气泡驱动具有更快的驱动速度和更高的应用价值,因此气泡驱动Janus颗粒运动的研究引起关注。在运动特性研究方面,Wu等通过将直径约1 μ m的Pt微球与PS微球相连制备成二聚体,在10%的H₂O₂溶液中,观察到周期性生长和溃灭的气泡驱动颗粒产生振荡式运动,平均速度约为40 μ m/s^[9]。Zhao等采用直径约20 μ m的Janus微球,在5%的H₂O₂溶液中,也观察到同一量级气泡的生长和溃灭及类似的振荡式运动,而平均速度提高到200 μ m/s^[11]。在应用研究方面,Sánchez等制备出直径60 μ m的Pt-活性炭Janus微球用于水净化。相比于单一活性炭微球,Pt-活性炭Janus微球在10%的H₂O₂溶液中形成了一个运动速度约500 μ m/s的高效运动吸附平台,使净化时间缩短,吸附性能显著提升^[12]。Soler等制备出直径50 μ m、长100 μ m的双层Fe(外层)/Pt(内层)管状微马达用于降解有机物。相比于传统的芬顿氧化法,Fe/Pt微马达在15%的H₂O₂溶液中使有机污染物的降解速率提高12倍,并且使溶液中的铁含量降低1~3个量级^[13]。

但目前对于气泡驱动Janus微球的运动特性和驱动力来源及定量分析尚缺少相关的实验研究,影响“气泡-颗粒”运动体系性能的改进。并且从应用中发现气泡驱动的Janus微球在运动过程中正负位移抵消过大,浪费能量。因此本文将系统地开展Pt-SiO₂型中空Janus微球在低浓度2%~4%的H₂O₂溶液中的气泡驱动实验,观察Janus微球在周期性生长和溃灭的气泡作用下的运动。实验发现,随着气泡生长和溃灭,Janus微球运动的每个周期呈现3个阶段,其平均速度可相差1~3个量级;解析分析表明气泡生长半径随时间遵循定量关系;Janus微球整体运动轨迹呈圆周形,与气泡在Janus微球Pt侧的生长位置有关;Janus微球平均运动速度与H₂O₂溶液浓度线性相关。

1 实验方法

1.1 实验系统

实验在中科院力学所LNM实验室进行。实验系统包括Nikon ECLIPSE Ti-U倒置荧光显微镜和Phantom v7.3高速CCD(Vision Research, Inc.)。设置CCD的空间分辨率为640pixel \times 480pixel,在20 \times 物镜下视场范围约为410 \times 308 μ m²,单像素尺寸为641nm。拍摄速度为9900fps,相应曝光时间为50 μ s。实验光源为白光。

1.2 Janus微球的制备

本文所用的Pt-SiO₂型中空Janus微球是在中空SiO₂微球一侧覆盖Pt制备而成。通过光学图像统计SiO₂微球(由马鞍山钢铁研究总院制备)的标称直径介于 ϕ 20.0 μ m~ ϕ 50.0 μ m,表观密度0.4g \cdot cm⁻³。首先将SiO₂微球水溶液均匀地滴在硅片上,随后将硅片放置在匀胶机上旋涂,形成紧密排列的单层SiO₂微球(见图1(a));之后,利用电子束蒸发镀膜工艺(中科院半导体所,美国Innotec电子束蒸发台)在微球表面蒸镀厚约20nm的Pt层。由于微球呈紧密的单层排列,蒸镀的Pt只能覆盖在微球上半表面,这样就获得了非均质的Pt-SiO₂型中空Janus微球(见图1(b)),本文简称为Janus微球。

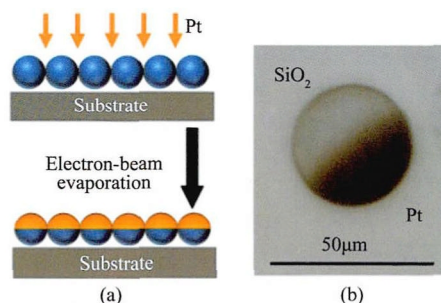


图1 (a)电子束蒸发制备Janus微球的示意图;(b)显微图像
Fig.1 (a) Schematic to show the fabrication of Pt-SiO₂ type Janus microspheres (JMs). (b) Optical image of a Pt-SiO₂ type JM

1.3 实验操作

用刀片刮取硅片表面的Janus微球,与超纯水混合,并通过超声振荡形成单分散状态的Janus溶液。其次取质量百分数为30%的H₂O₂溶液与Janus溶液混合,通过不同配比获得不同体积百分数的混合溶液,现配现用。然后取50 μ L混合溶液滴在盖玻片上,等待背景溶液静止后捕捉单个Janus微球拍摄。每次连续拍摄1.5万帧,随后跟踪其他微球进行拍摄。为保证实验溶液中H₂O₂浓度差异不大,现配混合溶液的反应时间控制在20min以内,然后重新配

置混合溶液,实验温度一般为 19°C 。

1.4 图像处理

用 Phantom 高速 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。为了从实验图像中识别 Janus 微球及气泡的位置,利用 Image J 图像处理软件中的 Find Edge 功能获得微球表面灰度的梯度分布,确定微球或气泡的边界,随后按照 Gauss 分布重构封闭边界内部的灰度值,灰度分布的高斯峰即为微球或气泡的几何中心^[14],分别定义为 (x_p, y_p) 和 (x_b, y_b) 。用 Video Spot Tracker 跟踪几何中心的运动,得到微球和气泡每个时刻的位置信息。然后通过 Matlab 处理相关信息,绘制微球和气泡的运动特性曲线。

2 实验结果

首先以体积分数 3% 的 H_2O_2 溶液中气泡驱动 Janus 微球的运动为例,介绍 Janus 微球的位移特性、气泡生长半径随时间的关系以及 Janus 微球运动轨迹与气泡生长点的关系等。随后改变 H_2O_2 溶液的浓度,对比 2%~4% 的 H_2O_2 溶液中气泡驱动 Janus 微球运动特性的差异。

2.1 气泡推进 Janus 微球位移与时间的关系

图 2 给出直径约为 $20.0\mu\text{m}$ 的 Janus 微球的一个完整运动周期,时间约为 44.2ms 。可以看出,Janus 微球密度较小,悬浮在混合溶液中,微球与生成的气泡几乎在同一个焦平面上。在初始时刻 $t=0\text{ms}$,微球右上方 Pt 侧没有气泡生成,这种状态会持续一段时间($t=4.5\text{ms}$);自 $t=5.4\text{ms}$ 起微球 Pt 侧开始出现可见的气泡,随后气泡逐渐生长,至 $t=20.0\text{ms}$ 时气泡的直径与微球的直径基本相当;随后在 $t=43.7\text{ms}$ 时气泡半径增长到最大,并在 $t=43.8\text{ms}$ 时发生溃灭;最终在 $t=44.2\text{ms}$ 时,微球运动几乎停止,一个运动周期结束。

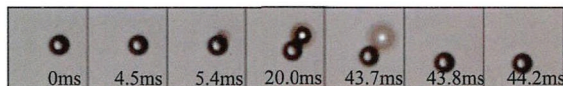


图 2 单个周期内气泡生长与溃灭的实验图像
($d_p=20.0\mu\text{m}$, $C_{\text{H}_2\text{O}_2}=3\%$)

Fig.2 Experimental image of bubble's growth and collapse in a single period ($d_p=20.0\mu\text{m}$ and $C_{\text{H}_2\text{O}_2}=3\%$)

图 3 给出 Janus 微球的位移 L 随时间 t 的变化。位移 L 随时间 t 的变化曲线由 7 个周期叠加而成,可以看出,7 个周期的位移曲线重复性良好。在每个周期内 Janus 微球运动分 3 个阶段。第 I 阶段(见图 3 插图 I)中,微球的位移很小,从 0ms 到 4.5ms ,位移仅为 $0.15\mu\text{m}$,运动平均速度为 $33.3\mu\text{m/s}$ 。第 II 阶段

中,微球运动时间从 4.6ms 到 43.7ms ,位移为 $12.5\mu\text{m}$,运动平均速度为 $318.9\mu\text{m/s}$;第 III 阶段(见图 3 插图 III)中,微球的位移首先在 0.1ms 的短时间内稍有减小,接着在 0.3ms 的时间内迅速大幅增加,随后从缓慢增加到不再改变;微球运动时间从 43.8ms 到 44.2ms ,位移为 $9.5\mu\text{m}$,运动平均速度为 23.8mm/s 。Janus 微球运动的 3 个阶段中,第 II 阶段平均速度约比第 I 阶段高 1 个量级,而第 III 阶段约比第 I 阶段高 3 个量级。

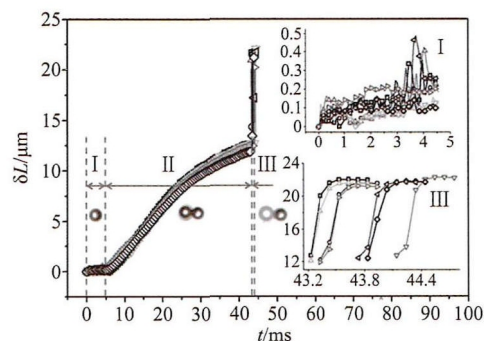


图 3 Janus 微球位移 L 与时间 t 的关系

Fig.3 Relationship of JM displacement L and time t

图 3 中的第 I 阶段,由于该阶段 O_2 分子未聚集成气泡,而且微球运动速度的量级与自扩散泳相当,因此该阶段 Janus 微球的运动由自扩散泳主导,为自扩散泳驱动阶段;第 II 阶段,Janus 微球的推进由气泡生长主导,为气泡驱动阶段;第 III 阶段,由于气泡溃灭导致原气泡中心处的压力降低,相当于流体中的 Stokes 汇,Janus 微球与周围流体在压力差的作用下向原气泡中心处运动,微球呈现短暂回撤。由于沿 Janus 微球与气泡中心方向(即水平方向)上的对称性被打破,从而产生了水平微射流,使得 Janus 微球沿原运动方向向前突进。该阶段 Janus 微球的推进由气泡溃灭主导,为气泡溃灭驱动阶段。由此,Janus 微球在一个周期内运动的 3 个阶段分别为自扩散泳驱动、气泡驱动和气泡溃灭诱发的射流驱动。

通过同样的方法对多个 Janus 微球位移特性进行分析。考虑实验中 Janus 微球的粒径不同,为了实验的可比性,用微球粒径对微球位移进行无量纲处理。无量纲位移为 L/d_p ,其中 d_p 为微球直径。图 4 给出了 4 个 Janus 微球的 L/d_p 随时间 t 的变化,其中每个 Janus 微球的无量纲位移包含 5 个周期。可以看出,对于每个微球,周期位移特性具有较好的重复性,即每个周期中,微球运动均分为 3 个阶段。对于不同的 Janus 微球, L/d_p 介于 $0.5\sim 1.1$ 范围,运动周期介于 $45\sim 65\text{ms}$ 范围;对于每个对应的推进阶段,其运动平均速度不同,但量级保持一致。其中在第 III

阶段,大多数 Janus 微球(见图 4(a)、(b)和(c),最大气泡半径 $R_{b,max}$ 与微球半径 R_p 的比值分别为 1.37、1.37 和 1.42)被气泡溃灭后产生的微射流向前推进。只有少数 Janus 微球(见图 4(d), $R_{b,max}/R_p$ 为 1.57)气泡溃灭后发生明显回撤。经统计发现,当 $R_{b,max}/R_p > 1.57$ 时,微球总是发生回撤而不会被射流向前推进。这是因为气泡溃灭后产生的水平方向上的微射流作用范围大于 Janus 微球,而导致一部分能量在 Janus 微球周围的流体中耗散,从而对 Janus 微球的推进减弱。由此可见,通过控制 Janus 微球 Pt 侧气泡的大小,可以实现对 Janus 微球推进速度的控制。

相比于正负位移抵消过大,浪费能量的实心 Janus 微球^[9,11],低浓度 H_2O_2 溶液中的 Janus 微球在 3 个阶段的持续推进下,运动速度和能量利用率得到明显提升。

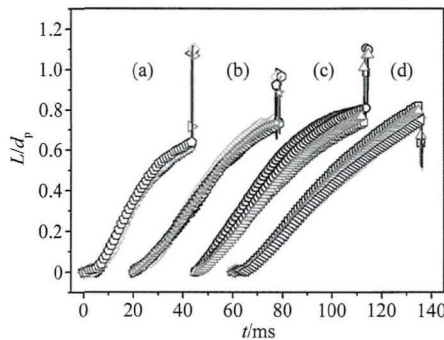


图 4 4 个 Janus 微球的无量纲位移 L/d_p 与时间 t 的关系
Fig.4 Relationship of normalized displacement L/d_p for four JMs and time t

2.2 气泡生长半径与时间的关系

图 5 给出了一个周期内单个 Janus 微球 Pt 侧气泡生长半径随时间变化的定量关系,同时给出微球的位移作为比较。可以看出,在 Janus 微球位移随时间变化的第 II 阶段,气泡生长半径与时间存在不同的指数关系:在气泡生长前期($t \approx 10 \sim 25$ ms),气泡生长半径随时间呈 $R_b \sim t^{1/2}$ 的关系;在气泡生长后期($t \approx 25 \sim 40$ ms),气泡生长半径随时间近似呈 $R_b \sim t^{1/3}$ 的关系,气泡生长最大半径约 $13.5 \mu\text{m}$,约为 $1.37R_p$ 。而且可以看出,气泡生长半径曲线与 Janus 微球位移曲线近似平行,且二者随时间的变化率均呈现减小的趋势。实验中观察到气泡生长半径及微球运动位移随时间的变化曲线在不同的周期中重复性良好。

从图 5 还可以看出气泡生长半径和 Janus 微球位移随时间的变化曲线几乎平行。这说明气泡对于 Janus 微球第 II 阶段的推进主要由气泡生长主导。在气泡生长初期,气泡体积较小,半径增长率高,对微球的驱动快;而在气泡生长后期,气泡体积较大,半径

增长率小,对微球的驱动慢,因此在气泡生长阶段,气泡生长半径和 Janus 微球位移随时间均表现为减小的趋势。

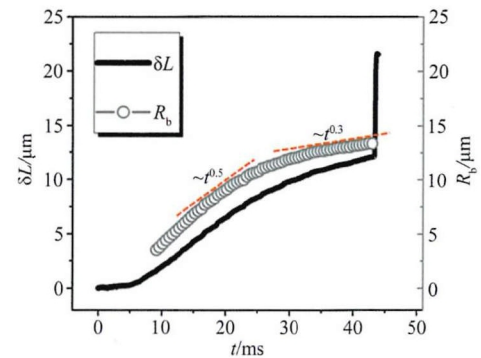


图 5 Janus 微球位移 L 与气泡半径 R_b 随时间 t 的变化
Fig.5 JM displacement L and the bubble radius R_b vs. time t

随后对多个 Janus 微球 Pt 侧的气泡生长半径进行研究,发现气泡生长半径随时间变化的整体规律类似:在气泡生长前期,气泡生长半径随时间变化在 $R_b \sim t^{0.5 \pm 0.1}$ 的范围,在气泡生长后期,气泡生长半径随时间变化在 $R_b \sim t^{0.33 \pm 0.04}$ 的范围;气泡生长最大半径介于 $0.9R_p \sim 1.6R_p$ 之间;而且对于大多数 Janus 微球而言,气泡生长半径曲线与 Janus 微球位移曲线近似平行,气泡生长半径和 Janus 微球位移随时间的变化率均呈现减小的趋势。

2.3 Janus 微球运动轨迹与气泡生长点

为了观测 Janus 微球的运动轨迹,取一个微球($d_p = 20.0 \mu\text{m}$)将连续拍摄的 1.5 万帧图像叠加,得到其运动轨迹并标注了 3 个不同时刻对应的实验图像(见图 6)。其中 t_0 、 $t_{0.4}$ 和 $t_{0.7}$ 的下标表示时刻,单位 s 。在气泡推进下,Janus 微球从 t_0 时刻按顺时针方向经过 9 个气泡生长和溃灭周期(每个周期约为 44.2 ms)运动到 $t_{0.4}$ 处,又经过 7 个周期运动到 $t_{0.7}$ 处,接着经过 18 个周期运动到 $t_{1.5}$ 处。Janus 微球从拍摄起点

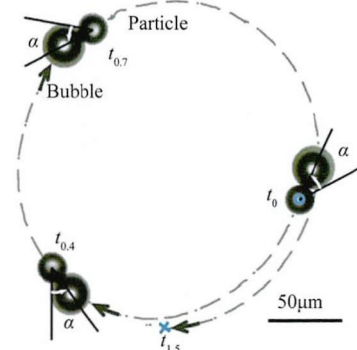


图 6 气泡推进型 Janus 微球在 1.5s 内的运动轨迹,“ t_0 ”运动轨迹起始点,“ $t_{1.5}$ ”终点,转角 α 定义见图 8($d_p = 20.0 \mu\text{m}$, $C_{H_2O_2} = 3\%$)

Fig.6 Typical motion trajectory of a bubble-driven JM in 1.5s, where “ t_0 ” and “ $t_{1.5}$ ” are starting and ending points respectively, α is given in Fig.8($d_p = 20.0 \mu\text{m}$ and $C_{H_2O_2} = 3\%$)

t_0 至终点 $t_{1.5}$, 经过连续 34 个气泡生长和溃灭周期推进, 在 1.5s 内形成明显的顺时针圆周运动轨迹, 运动轨迹直径约为 $10d_p$ 。

在 3% 和 4% 的 H_2O_2 溶液中, 观察到绝大多数的 Janus 微球在周期性生长和溃灭的单一气泡驱动下做近似圆周运动。通过同样的实验图像叠加方法对多个 Janus 微球的运动轨迹进行分析。图 7 给出 4 个 Janus 微球在 1.5s 时间内的运动轨迹, 微球直径分别为 20.0、23.3、19.2 和 24.0 μm 。微球的运动轨迹为顺时针(见图 7(a)和(b)), 或逆时针(见图 7(c)和(d))近圆周形, 其轨迹直径分别为相应 Janus 微球的 $10d_p$ 、 $9d_p$ 、 $8d_p$ 和 $7d_p$ 。

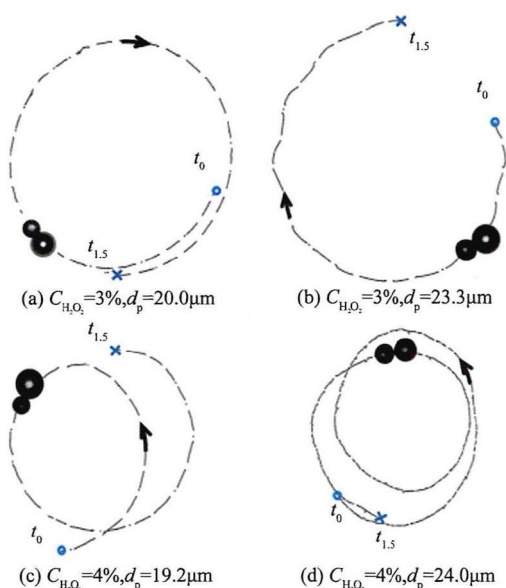


图 7 4 个不同 Janus 微球在 1.5s 内的运动轨迹

Fig.7 Typical motion trajectories of four JMs in 1.5s

为了探究气泡推进型 Janus 微球产生近似圆周运动轨迹的原因, 我们对所拍摄的视频进行了细致观察, 发现微球的近圆周运动轨迹可能与气泡在微球表面的生长位置有关。图 8 给出了 Janus 微球与表面气泡的实验照片与示意图, 可见, 气泡生长点位置在 Janus 微球 Pt 表面固定不变; 微球 2 种表面材料(Pt/SiO₂)交界面的法线为 on , 微球球心与气泡中心的连线为 oo' , 中心线 oo' 与法线 on 并不重合, 而是存在一个转角 α 。定义 on 沿逆时针转向 oo' 得到的 α 为正, 即 $\alpha > 0$; 顺时针转为负, 即 $\alpha < 0$, 图 8 中的 $\alpha > 0$ 。根据定义, 图 6 中微球在 3 个不同时刻实验图像的转角 α 均为正, 且在不同的气泡生长与溃灭周期中, 气泡生长点位置在 Janus 微球 Pt 表面固定不变, α 大小相同约为 39.3° 。我们同样测量了图 7 中不同微球与相应气泡的位置, 其法线到中心线的转角 α 介于 $\pm 20^\circ \sim 70^\circ$ 的范围。而且当 $\alpha > 0$ 时, 做顺时针圆

周运动, 而 $\alpha < 0$ 时, 做逆时针圆周运动。

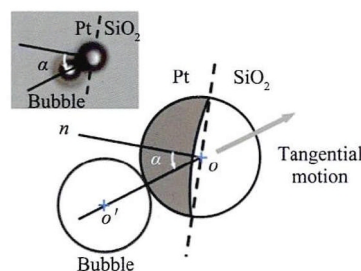


图 8 气泡在 Janus 微球表面生长点的实验照片与示意图
Fig.8 Experimental image and schematic of bubble growth position on JM surface

由于 Janus 微球运动过程中转角 α 存在且大小不变, 气泡对于 Janus 微球的作用力可以分解为沿 Janus 微球法线 on 方向的推力和垂直于 Janus 微球法线方向的向心力, 使得 Janus 微球表现出近圆周形运动轨迹。为什么气泡没有生长在法线方向而是在转角方向呢? 初步分析认为在气泡生长周期的初始阶段, 也即第 I 阶段, Janus 微球的 Pt 侧有多个活性点能够发生氧气核化, 但只有某一活性点位置率先形成微气泡。由于奥斯特瓦尔德熟化^[15], 此处的微气泡继续长大而其他活性点受到抑制不会形成可见气泡。而为什么存在这样的活性点位置, 可能与微球的尾迹性质与微球表面氧气的浓度梯度有关, 这有待后续的进一步分析。

2.4 H_2O_2 溶液浓度对微球运动的影响

为研究不同低浓度 H_2O_2 溶液中气泡驱动 Janus 微球的运动特性, 本文采用体积百分数为 2%~4% 的 H_2O_2 溶液分别进行实验。

实验观察到, 随着 H_2O_2 溶液浓度的增加, 主要有如下变化: (1) Janus 微球运动的周期范围几乎不变, 其位移却明显增加, 也即平均速度增大。Janus 微球运动的平均速度与 H_2O_2 溶液浓度呈近似的线性关系, 如图 9 所示, 平均速度约在 $200 \sim 450 \mu m/s$ 的范围; (2) 气泡的最大半径增大, 2% 浓度时气泡的最大半径在 $(1.2 \pm 0.3)R_p$ 的范围而 4% 浓度时增加到 $(1.6 \pm 0.4)R_p$ 的范围; (3) 2% 浓度时, 法线 on 到中心线 oo' 之间的夹角 α 约为 $\pm 20^\circ \sim 70^\circ$ 范围, 而 4% 浓度时减小到 $\pm 30^\circ \sim 50^\circ$ 范围, 夹角 α 的分散性减小, 中值约 $\pm 40^\circ$ 左右; (4) 当浓度增加到 4% 时, 实验观察到, Janus 微球 Pt 侧在产生主气泡的同时开始出现一些小气泡。小气泡的周期较短, 一部分溃灭, 另一部分与主气泡融合。小气泡的产生会使微球运动轨迹产生少量的偏离, 但整体近圆周运动轨迹不变。但随着溶液浓度增加, 在相同时间内微球运动的圈数增加, 如图 7(c)和(d)所示。

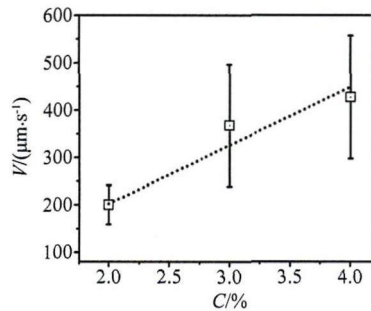


图9 Janus 微球平均速度与 H_2O_2 溶液浓度的关系
Fig.9 Average speed V_p of JM vs. the concentrations of H_2O_2 solution $C_{\text{H}_2\text{O}_2}$

3 结论

实验观察到低浓度 H_2O_2 溶液里,中空 Janus 微球在周期性生长与溃灭的气泡推进下,有如下运动特性:

(1) Janus 微球的单一周期运动分别由自扩散泳、气泡生长推进和气泡溃灭射流驱动 3 个阶段组成。第 I 阶段微球运动平均速度约为每秒数十微米,第 II 阶段微球运动平均速度比第 I 阶段提高 1 个量级,第 III 阶段比第 I 阶段提高约 2~3 个量级;

(2) 气泡生长半径与时间呈定量关系。在生长初期,近似满足 $R_b \sim t^{1/2}$ 的关系,在生长后期,近似满足 $R_b \sim t^{1/3}$ 的关系;

(3) 由于气泡生长点位置固定在 Janus 微球 Pt 侧某点,且中心线 oo' 与微球法线 on 存在夹角,使得微球在气泡推动下呈现近圆周形的运动轨迹;

(4) 随着 H_2O_2 溶液浓度的增加,气泡半径增长变快;微球运动速率变快,与溶液浓度增加近似呈线性关系;浓度增加到 4% 时,在产生单一主气泡的同时,周围出现多个小气泡。

研究可知,通过增大粒径可以实现 Janus 微球从低速自扩散泳到快速气泡驱动的转变,而采用中空型大粒径 Janus 微球可使运动速度和能量利用率得以进一步改善。

参考文献:

- [1] Gennes P G D. Soft matter (nobel lecture)[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1992, 31(7): 842-845.
[2] Chernyak V G, Starikov S A, Beresnev S A. Diffusiophoresis of an aerosol particle in a binary gas mixture[J]. *Journal of Applied Mechanics & Technical Physics*, 2001, 42(3): 445-454.

- [3] Howse J R, Jones R A, Ryan A J, et al. Self-motile colloidal particles: from directed propulsion to random walk[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(4): 048102.
[4] 武美玲, 郑旭, 崔海航, 等. Janus 颗粒有效扩散系数的实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2014, 29(3): 274-281.
Wu M L, Zheng X, Cui H H, et al. Experiment research on the effective diffusion coefficient of Janus particles[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(3): 274-281.
[5] Liu Z, Li J, Wang J, et al. Small-scale heat detection using catalytic microengines irradiated by laser[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(4): 1345-1352.
[6] Brenner H, Bielenberg J R. A continuum approach to phoretic motions: thermophoresis[J]. *Physica a Statistical Mechanics & its Applications*, 2005, 355(355): 251-273.
[7] Wu Z, Lin X, Wu Y, et al. Near-infrared light-triggered "on/off" motion of polymer multilayer rockets[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6097-6105.
[8] Wu M, Zhang H, Zheng X, et al. Simulation of diffusiophoresis force and the confinement effect of Janus particles with the continuum method[J]. *Aip Advances*, 2014, 4(3): 32-33.
[9] Wang S, Wu N. Selecting the swimming mechanisms of colloidal particles: bubble propulsion versus self-diffusiophoresis[J]. *Langmuir*, 2014, 30(12): 3477-3486.
[10] Magdanz V, Guix M, Schmidt O G. Tubular micromotors: from microjets to spermboats[J]. *Robotics & Biomimetics*, 2014, 1(1): 1-10.
[11] Manjare M, Yang B, Zhao Y P. Bubble driven quasioscillatory translational motion of catalytic micromotors[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(12): 128305.
[12] Jurado-Sánchez B, Sattayasamitsathit S, Gao W, et al. Self-propelled activated carbon janus micromotors for efficient water purification[J]. *Small*, 2015, 11(4): 499-506.
[13] Soler L, Magdanz V, Fomin V M, et al. Self-propelled micromotors for cleaning polluted water[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 9611-9620.
[14] Zheng X, Ten H B, Kaiser A, et al. Non-Gaussian statistics for the motion of self-propelled Janus particles: experiment versus theory[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(3-1): 3772-3774.
[15] Marqusee J A, Ross J. Theory of ostwald ripening: competitive growth and its dependence on volume fraction[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1983, 80(1): 536-543.

作者简介:



张 静(1991-),女,山西忻州人,硕士研究生。研究方向:Janus 颗粒的自驱动机理研究及应用。通信地址:陕西省西安市碑林区雁塔路 13 号西安建筑科技大学环境与市政工程学院(710055)。E-mail: 932073188@qq.com

(编辑:张巧芸)