

氧气泡生长动力学机理及影响因素研究

刘林林 杨天方 庞涛 万宇航 宋钢

(中国石油大学(北京)克拉玛依校区文理学院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要 本研究利用自主搭建的实验平台,在不同条件下对氧气泡的成核、生长与脱离过程进行研究,对单个氧气泡生长过程进行了可视化定量表征。电极电流升高可加快气泡生长速率并增大脱离时的半径;电解质性质对气泡演化具有显著影响,其中碱性环境有利于气泡快速生成与脱核;附 Pt 石墨电极相比石墨电极表现出更快的气泡生长速率与更小的脱附体积。基于实验结果建立的数学模型与理论拟合高度一致。这为理解微观尺度下的气泡动力学提供了新的实验依据,也为电极材料优化与电解质调控提升电解水效率提供了理论指导。

关键词 氧气泡动力学;压强;电流;电解质;电极活性

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.11.21.01

RESEARCH ON THE GROWTH MECHANISM AND INFLUENCING FACTORS OF OXYGEN BUBBLES

LIU Linlin YANG Tianfang PANG Tao WAN Yuhang SONG Gang

(College of Arts and Sciences, China University of Petroleum, Karamay, Xinjiang 834000)

Abstract This study utilizes a self-developed observation system and image processing methods to systematically investigate the nucleation, growth, and detachment processes of oxygen bubbles under different conditions, enabling the visual quantitative characterization of individual oxygen bubble evolution. An increase in current density accelerates bubble growth rate and enlarges the detachment radius. The properties of the electrolyte significantly influence bubble evolution, with an alkaline environment favoring rapid bubble formation and detachment. Platinum-coated graphite electrodes exhibit faster bubble growth rates and smaller detachment volumes compared to bare graphite electrodes. The mathematical model established based on experimental results shows high consistency with theoretical fitting, revealing the coupled mechanisms of electrode surface current density, electrolyte type, and material activity on bubble dynamics. This provides new experimental evidence for understanding bubble dynamics at the microscale and offers theoretical guidance for optimizing electrode structures and regulating electrolytes to enhance water electrolysis efficiency

Key words Oxygen bubble dynamics; Pressure; Current; Electrolyte; Electrode activity

收稿日期: 2025-11-21; 修回日期: 2026-02-15; 出版日期: 2026-05-20

基金项目: 教育部校企产学研协同育人项目“嵌入人工智能教学的创新开放实验室建设”(项目编号: 241100532020146)。

通信作者: 杨天方, tfyang@cupk.edu.cn。

引文格式: 刘林林, 杨天方, 庞涛, 等. 氧气泡生长动力学机理及影响因素研究[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 238-244.

Cite this article: LIU L L, YANG T F, PANG T, et al. Research on the growth mechanism and influencing factors of oxygen bubbles[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 238-244. (in Chinese)

随着能源需求增长和环境压力加剧,开发清洁高效的能源转换与存储技术已成为研究重点。氢能因能量密度高、产物清洁、储运便捷,被视为最具潜力的二次能源^[1]。电化学水分解制氢因反应条件温和、产物纯净、过程可控,已成为实现大规模氢气生产的重要途径。然而,析氧反应(OER)的缓慢动力学以及伴随发生的气泡行为显著影响了电极的有效反应面积和传质效率,造成显著损耗^[2]。

气泡演化通常经历成核、生长和脱离三个主要阶段。过饱和溶解氧引发气泡成核,受电极表面粗糙度、缺陷分布及局部过饱和度等因素的影响^[3-4],受压力差作用迅速进入惯性控制生长阶段^[5],该阶段时间极短。随后生长模式由电极活化面积决定是否扩散控制生长还是化学反应控制生长,此阶段受电化学反应速率、扩散传质以及溶液流动场等多重因素控制。到达临界尺寸时,浮力与黏附力、表面张力之间的平衡被打破,气泡随即从电极表面脱离^[6-8]。这一过程发生不及时,气泡会滞留在电极表面,造成局部浓度梯度异常和活性位点阻塞,电极表面被气泡覆盖可导致电流密度下降 20%~30%以及降低反应速率^[2,8-9]。

在氧气泡生长动力学优化的实验研究以及模拟研究中^[6-10],相关工作大多仅针对单个气泡进行探讨,整体上仍存在对氧气泡动力学认知不足的问题。成核过程发生在亚微米尺度,其超快特性导致直接观测存在挑战(目前光学尺度限制);宏观实验与微观模拟之间仍存在尺度差异,导致实验数据与理论模型的重合度有限。多因素(如电流密度、电解质类型、电极材料)对气泡成核及生长作用规律尚未被系统揭示^[11-13]。本文通过理论推导和实验验证,在宏观层面设计实验研究氧气泡生长动力学理论,同时探究了其生长规律受外界条件的影响。

1 实验原理及内容

在理想气体条件下,气泡内气体满足理想气体状态方程 $pV=nRT$ 。电极表面生成的单个气泡在上升过程中不断汇聚,形成气体总体积。若在恒定温度 T 和压强 p 下存在 N 个气泡,每个气泡体积为 V_i ,则气体总体积可表示为

$$V = \sum_{i=1}^N \frac{n_i RT}{p} = \frac{RT}{p} \sum_{i=1}^N n_i = \frac{nRT}{p} \quad (1)$$

其中, p 是压强, V 是体积, n 是物质的量, R 是理想气体常数, T 是热力学温度, n_i 是第 i 个气泡内气体的物质的量。

实验采用一定浓度的泡泡液收集气体。基于力学平衡关系,可由曲面两侧压力差与表面张力建立数学模型。假设系统处于静态平衡(无流动与加速度),表面张力系数 γ 为常数,且忽略重力等体积力影响(适用于小尺度情况)。

根据 Yang-Laplace 方程

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

其中, ΔP 是界面压差, γ 是表面张力系数, R_1 和 R_2 是液面曲率半径。若在液体中插入半径为 R 的导气管,管口形成半球气泡(初始半径 $R=R_1=R_2$),则气泡内外压力差为

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (3)$$

初始时刻压力最大为

$$\Delta P_{\max} = \frac{2\gamma}{R} \quad (4)$$

气泡形成需满足

$$P_{\text{in}} = P_0 + \Delta P_{\max} = P_0 + \frac{2\gamma}{R} \quad (5)$$

即气体压力必须克服外界静压 P_0 与表面张力附加压 $\Delta P_{\max}$ 。当 R 减小或 γ 增大时,所需临界压力升高。这与实验过程中观察到的现象一样。

对于毛细管处气泡图像,利用 Tracker 软件识别气泡图像(见图 1),根据几何关系可得

$$\frac{a}{\sin \theta} = 2R \quad (6)$$

因此有

$$R = \frac{a}{2 \sin \theta} \quad (7)$$

气泡半径 R 是描述气泡几何形态与动力学的关键参数。假设气泡近似为球体,则

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (8)$$

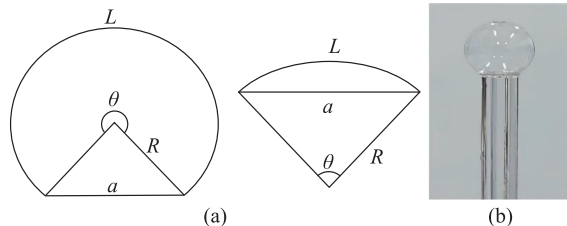


图 1 气泡截面圆示意图及气泡吹出实物图

(a) 气泡截面圆示意图; (b) 气泡实物图

气泡总体积(y)-时间(x)变化符合幂函数关系为

$$y = ax^b + c \quad (9)$$

其中, a, b, c 为待定常数。

单个气泡初始体积为 V_0 , 单位为 cm^3 , t_0 为初始时刻, 单个气泡包含氧分子数 N' (忽略气泡间的相互作用) 为

$$N' = \frac{y|_{x=t_0}}{V_0} = \frac{at_0^b + c}{V_0} \quad (N' \text{ 为常数}) \quad (10)$$

得到单气泡体积-时间方程

$$V = \frac{y}{N'} = \frac{ax^b + c}{N'} = \frac{ax^b + c}{at_0^b + c} V_0 \quad (\text{cm}^3) \quad (11)$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{ax^b + c}{N'} \quad (12)$$

变换后可得

$$r = \sqrt[3]{\frac{3(ax^b + c)}{4\pi N'}} \times 10^4 \quad (13)$$

或写为

$$r(t) = 10^4 \times \sqrt[3]{\frac{3V_0}{4\pi} \left(\frac{at^b + c}{at_0^b + c} \right)} \quad (14)$$

其中 a, b, c 为氧气泡生长模型中的拟合参数, t_0 、 V_0 分别为任意时刻及对应体积, 半径单位为 μm 。式(13)是本实验分析气泡生长动力学的主要依据。本实验通过手机摄像头记录气泡脱离电极前的体积 V_0 与时刻确定 t_0 , 并选取五个气泡取平均值进行计算。图 2 为电极气泡生长图, 对图片中的半径及体积做了一定的数字化处理, 以便能够测量半径和体积。

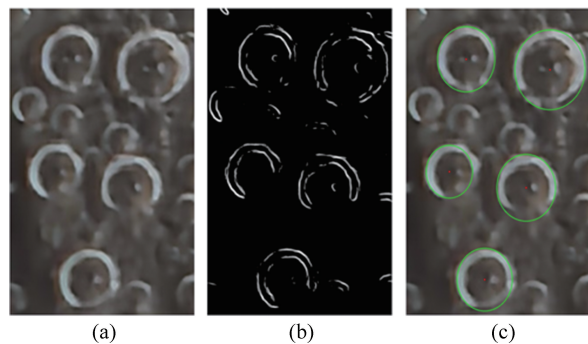


图 2 电极表面单个气泡生长图像

(a) 原始图像; (b) 边缘识别图像; (c) 拟合图像

2 实验装置及方法

实验系统如图 3 所示, 主要由三部分组成, 包括电源系统、反应系统和摄像系统。其中, 电源系

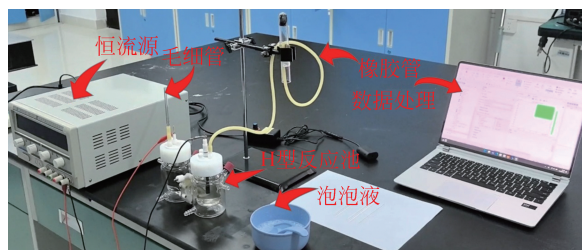


图 3 电解实验装置图

统包括双路可跟踪直流稳定电源以及鳄鱼夹导线。反应系统包括尺寸为容积 50ml 的 2H 型可换膜双层电解池、1mol/L 的硫酸钠电解液、1mol/L 的氢氧化钾溶液、1mol/L 的硫酸溶液、尺寸为 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的石墨电极、 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的附 Pt 石墨电极; 摄像系统包括石英毛细管 (规格见附录)、泡泡液、橡胶管、普通手机摄像机 ($\text{pfs}=60$) 和高亮度 LED 补光灯。

本实验采用两电极体系为实验提供恒电电压, 石墨电极/附 Pt 石墨电极作为阳极, 通过鳄鱼夹连接恒流源获得稳定电压, 高亮度 LED 补光灯提供摄像时的进光量, 泡泡液与毛细管组合收集气体, 手机摄像机安装拍摄气泡图像。

在实验中将电路连通, 直流稳定电源提供恒定电压并记录反应过程中的气泡生长参数; 在毛细管一头涂抹泡泡液构建气泡封闭体系, 收集气泡从电极成核脱离后生长参数。利用 Matlab、Python、Tracker 等图像处理软件分析拍摄到的气泡图像。

3 结果与讨论

根据初始参数 (V_0, t_0) 和式(11)得气泡体积与时间关系如图 4 所示。不同电流条件下, 气泡的生长速率增加, 气泡的半径曲线的曲率增大。通过实验可知, 增大电极电流会显著影响气泡的生长半径。通过实验相对比, 深入探讨电流密度对氧气泡生长的影响。由图 4 可知, 电流 $I = 1.75\text{A}$ 电极氧气泡体积与时间关系图中, 体积增长率较其他 (电流 $I = 1.98\text{A}$ 、 2.15A 、 2.50A) 小, 电极电流 ($I = 2.92\text{A}$ 、 3.19A) 条件下体积增长率逐渐增加至最大。

3.1 氧气泡生长成核规律

图 5 电极为恒定电流 3.19A 、根据式(14)可得氧气泡体积-半径变换的氧气泡半径时间关系

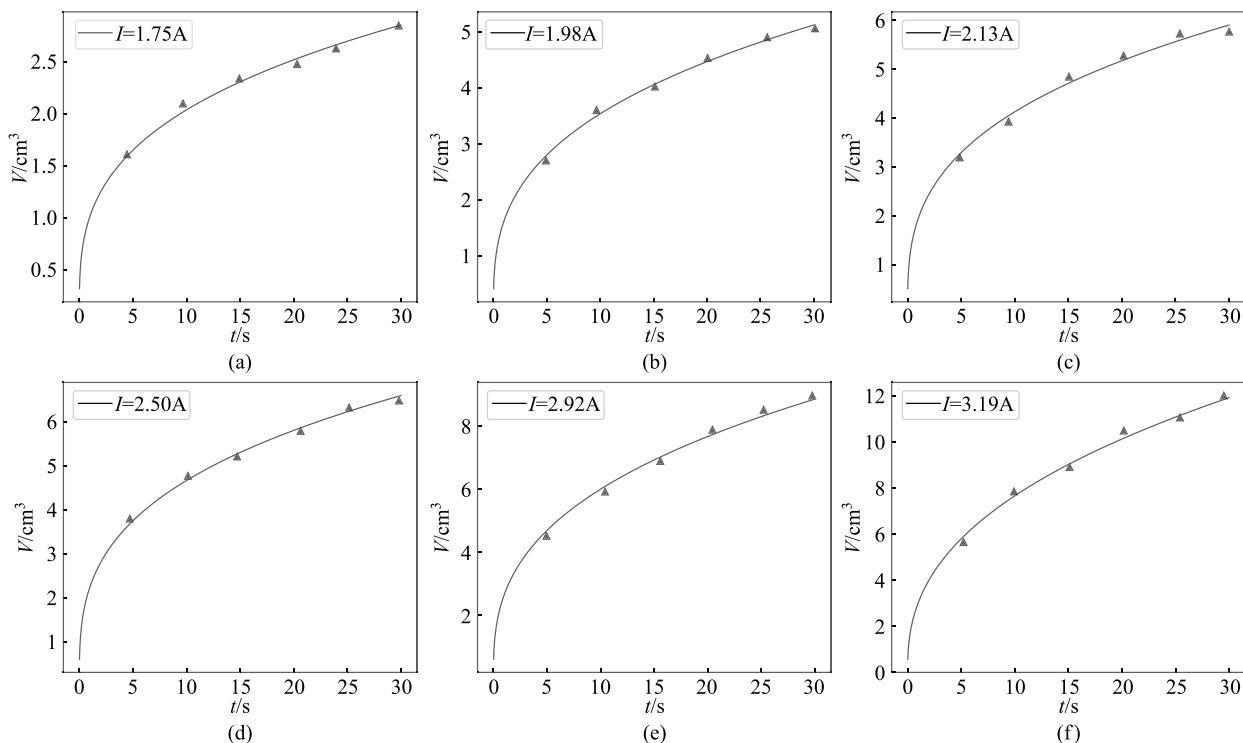


图4 不同电流条件下气泡体积-生长曲线

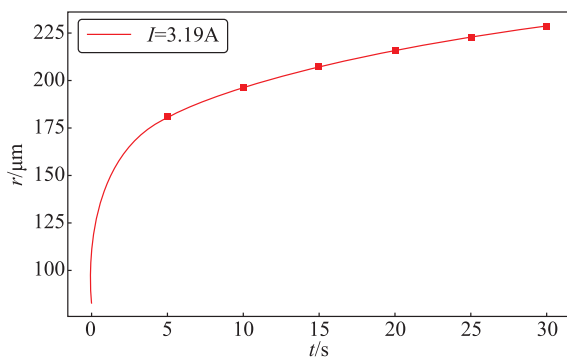
(a) $I=1.75\text{A}$; (b) $I=1.98\text{A}$; (c) $I=2.13\text{A}$; (d) $I=2.50\text{A}$; (e) $I=2.92\text{A}$; (f) $I=3.19\text{A}$ 

图5 电流为 3.19A 时气泡半径-时间关系曲线图

曲线,可以看出气泡半径随时间变化关系 $r \propto t^\alpha$, α 为指数。

气泡生长周期约为 30s,脱离半径约为 $248\mu\text{m}$ 。气泡在成核后短时间内由于气泡内外压差较大而迅速长大,1s 左右气泡半径已经生长至脱离半径的 30% 左右;此后,气泡半径生长率逐渐变小,当生长至 15s 左右时,气泡半径已经达到气泡脱离半径的 80% 左右;15s 之后气泡半径生长率变化变缓,直至最终脱离电极表面。该过程反映出气泡生长由初始快速扩张阶段逐步过渡到缓慢增长并趋于饱和的阶段。

图 6 给出不同电流条件下普通石墨电极上气

泡半径拟合曲线(数据见表 1),表 1 中的拟合指数范围为 $0.3 \sim 0.4$,这与参考文献^[9]拟合指数相吻合,这也说明氧气泡生长主要由化学反应影响^[9]。氧气泡核心形成后的很短一段时间内,内、外压力差的驱动气泡迅速长大,这个快速生长期大约持续 10s,可类比沸腾气泡成长初期的近等温膨胀阶段。10s 之后为是气泡生长的主要阶段,半径变化规律满足幂律生长特征。10s 的快速阶段相对于本实验的时间分辨率极短(见图 5)。

表 1 不同电流条件下气泡生长半径-时间拟合指数统计表

电流 I/A	拟合指数 α
1.75	0.3079
1.98	0.3342
2.13	0.3218
2.50	0.3112
2.92	0.3513
3.19	0.3978

通过对半径为 5mm 毛细管泡泡液气体体积增大的情况,见图 7。通过分析发现,气泡体积变化较大时坚持 18s 左右。图中显示 18s 之后,氧气泡体积变化明显减缓,这与氧气泡内外压力差减小有关。压力差越小,氧气泡体积增加越慢,氧气

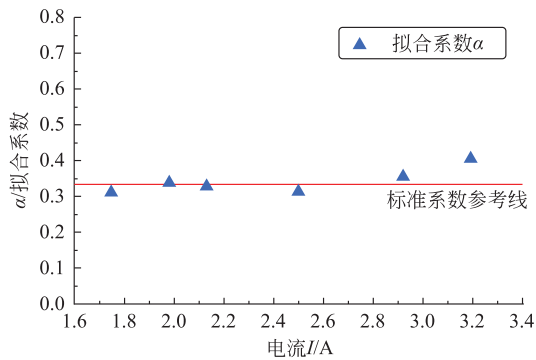


图6 不同电流下拟合系数分布图

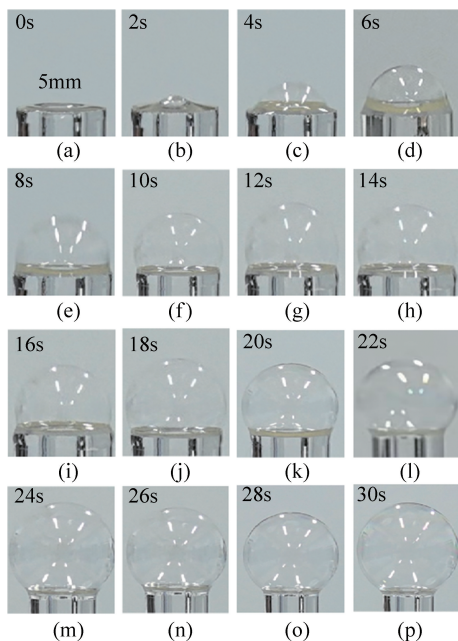


图7 不同时间下毛细管泡泡液气泡生长图像

(a) $t=0s$; (b) $t=2s$; (c) $t=4s$; (d) $t=6s$; (e) $t=8s$; (f) $t=10s$;
(g) $t=12s$; (h) $t=14s$; (i) $t=16s$; (j) $t=18s$; (k) $t=20s$; (l) $t=22s$;
(m) $t=24s$; (n) $t=26s$; (o) $t=28s$; (p) $t=30s$

泡半径增长率越慢,最终氧气泡脱离毛细管,这与电极气泡生长规律相符。

3.2 氧气泡成核分析

气泡成核通常伴随电位的瞬时下降^[9],可推测气泡成核在 0.04ms 左右,以 3.19A 下气泡生长曲线为例,代入时间得到半径约为 0.7μm。

本文通过高速显微摄像技术捕捉的最小气泡半径约为 0.7μm,假设此时气核为球形,根据理想气体方程 $pV=nRT$,可计算出相应体积内的氧气分子数量,对于压力

$$p = p_0 + \rho gh + \frac{2\gamma}{R} \quad (15)$$

其中, p_0 、 ρgh 、 $\frac{2\gamma}{R}$ 分别代表大气压、流体静压力和

Laplace 压力(γ 是表面张力系数, R 是气泡初始半径)。由于电解液深度 h 很小,流体静压力 ρgh 可忽略,气泡成核时半径很小, Laplace 压力 $\frac{2\gamma}{R}$ 大小与大气压相当,由此得到氧气分子数量为

$$N_{O_2} = N_A \cdot n = \frac{N_A p V}{RT} = \frac{8\pi N_A p r^3}{3RT} \approx 1.07 \times 10^8$$

因此,在本实验得到的最小成核尺度数量级约为 $10^{-7}m$,成核时间尺度数量级约为 $10^{-5}s$,所需氧气分子数量级约为 10^8 ,这与文献[9]所述相当。

3.3 氧气泡生长受条件影响

氧气泡生长行为受电流密度、电解液性质、电极活性、磁场、流动等多个因素调控^[15-19],本实验在宏观尺度上研究电流密度、电解质种类、电极活性对微观尺度氧气泡生长的影响与氧气泡成核与生长规律。

3.3.1 电流密度

图8展示了不同电流条件下气泡半径随时间的生长规律。随着电流的升高,气泡的脱离半径明显增大,且生长速率显著加快。这主要是由于较高电流密度下电极表面局部氧气浓度梯度和温度梯度均增大,促进更多氧气向气泡内部扩散,从而提升了生长速率。同时,梯度增强导致的 Marangoni 效应^[10]进一步增加了气泡对电极表面的附着力,使其在更大半径时才能脱离。

图8中 0~5s 气泡生长初始阶段,不同电流下的气泡生长曲线存在交叉现象。该时段曲线前期较为陡峭,而后期趋于平缓,说明气泡在初始阶段经历快速生长;低电流条件下(1.75~2.5A),前期生长速率相近,因此幂函数模型在经过常数变换后会呈现交叉特征。该现象表明在低电流密度条件下,气泡受反应速率控制的初始生长动力学相似。

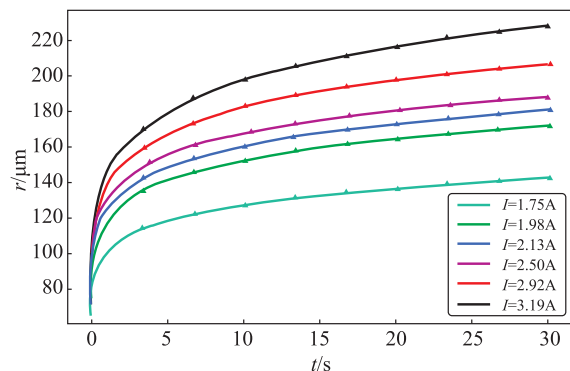


图8 不同电流条件下氧气泡生长曲线图

随着生长进行,远离气泡的电极表面也发生析气反应,此处生成的气体更多进入电解液本体而难以进入气泡,导致生长速率逐渐减缓。此外,电极表面周期性生成的微小气泡被大气泡吸收,引起瞬时半径突变,从而造成局部数据波动。

3.3.2 电解质种类

图9分别为普通石墨电极在2.50A与3.19A电流下,使用1mol/L的NaOH、H₂SO₄、Na₂SO₄作为电解质时的氧气泡生长图像。通过对图9的分析,电解质采取氢氧化钾对氧气泡生长的促进作用最高,而硫酸钠作为电解质时,氧气泡生长速率最低。

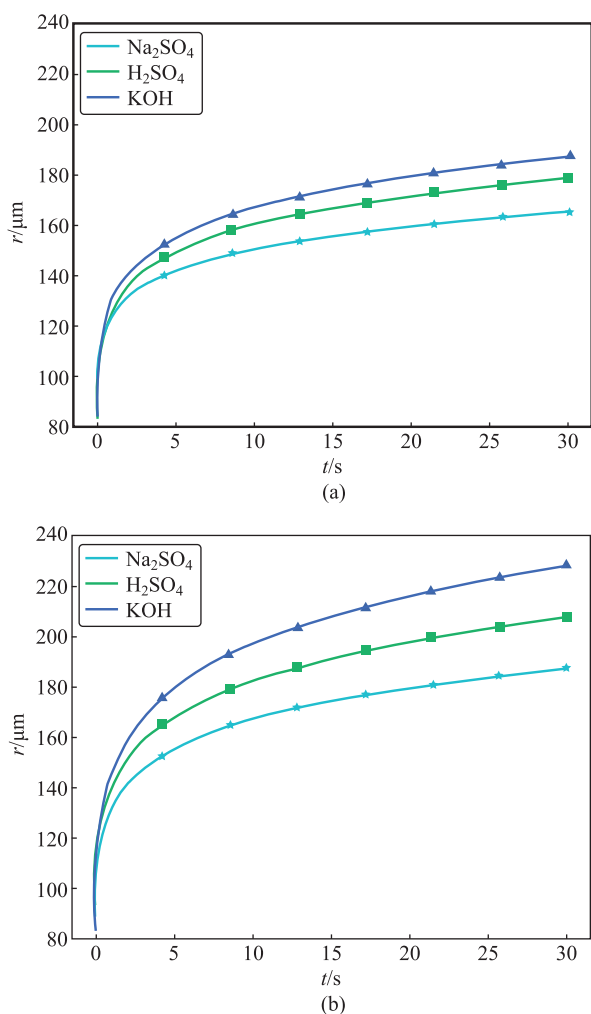


图9 不同电流条件(2.5A、3.19A)气泡半径-生长曲线
(a) $I = 2.50\text{ A}$; (b) $I = 3.19\text{ A}$

碱性环境下, OER 反应路径为 $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ 。在酸性环境中, OER 反应路径为 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ [18]。KOH 作为电解液

为高碱性环境,能够提供大量氢氧根离子,可以直接参与 OER 反应,而在酸性环境或中性环境下反应则需克服更高过电位。另外, OH^- 与 H^+ 在水中的迁移率大于 SO_4^{2-} 与 Na^+ [11],可以降低溶液电阻,使气泡快速析出。结合气泡脱落时间分析(见表2),碱性环境下更有利于气泡脱落,减少气泡覆盖,增加电位活性位点,进而加快电解水制氢反应进程。

表2 不同电解质下电极气泡脱落时间

电解质种类	氧气泡平均脱落时间 t/s
氢氧化钾	28.536
硫酸	30.196
硫酸钠	30.152

3.3.3 电极活性

如图10所示,在1.75A电流条件下,通过附铂石墨电极与未改性石墨电极比较发现,附铂电极上的气泡生长速度明显更快,瞬时体积也更大。气泡脱附时间约为18.43s,对应脱离时的气泡体积却显著小于相同时间下石墨电极的气泡脱附体积(见图10)。

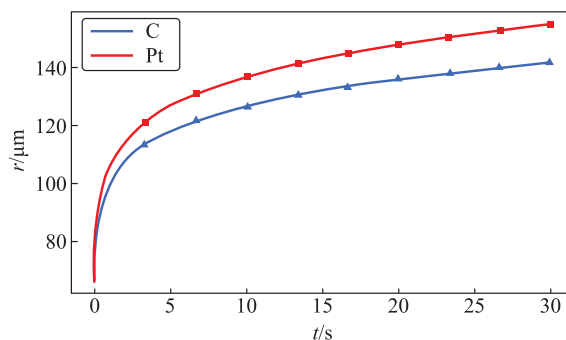


图10 不同电极上气泡半径-时间关系曲线图

实验过程中,气泡在脱离电极后,新气泡会迅速在相同位置再次成核生长,使得总气体体积在18.43s之后持续增加,形成前后气泡体积叠加效应。通过实验数据得到氧气泡生长曲线,从而准确反映氧气泡的生长动力学特征。

4 结语

实验结果表明,氧气泡体积生长符合典型幂律函数关系,气泡半径随时间的变化主要为化学反应控制生长[7]。电流密度对气泡动力学具有显

著影响,随电流密度升高,气泡生长速率加快,临界脱离半径增大。碱性电解质(如 KOH)更有利于促进气泡快速成核与脱离,减少电极表面覆盖效应,从而提升电解效率。附铂石墨电极表现出更快的气泡生长速率,脱离体积相对较小,其表面催化活性及润湿性对气泡附着力有显著调控作用^[20]。

本文从实验和理论方面不仅揭示了氧气泡动力学在不同实验条件下的演化规律(成核条件、生长规律),也为电极材料的整体优化及电解水效率的提升提供了实验依据与理论支撑。未来的研究可进一步结合多物理场模拟与原位表征手段,进一步阐明气泡界面动力学机制,优化气泡生长与脱附过程,从而突破电解水规模化应用中的效率瓶颈。

参 考 文 献

- [1] ZHANG S, CHEN W. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 87-92.
- [2] QIAN K, CHEN Z D, CHEN J J. Bubble coverage and bubble resistance using cells with horizontal electrode[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1998, 28(10): 1141-1145.
- [3] WANG Z, YU Y, QIN M, et al. Tuning electrode wettability to optimize nanobubble nucleation and reaction rates in electrochemical gas-evolving reactions[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 2341-2345.
- [4] YANG N, LI H, LIN X, et al. Catalytic electrode comprising a gas diffusion layer and bubble-involved mass transfer in anion exchange membrane water electrolysis: A critical review[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2025, 83: 116-135.
- [5] CHEN J, GUO L, HU X, et al. Electrolytic solvent effects on the gassing behavior in LCO||LTO batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2018: 274-278.
- [6] 聂腾飞, 徐强, 罗欣怡, 等. 水分解中氧气泡生长动力学研究[J]. *物理学报*, 2025, 74(10): 108210-108219.
NIE T F, XU Q, LUO X Y, et al. Kinetics of oxygen bubble growth in water decomposition[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2025, 74(10): 108210-108219. (in Chinese)
- [7] WANG Y, HU X, CAO Z, et al. Investigations on bubble growth mechanism during photoelectrochemical and electrochemical conversions[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2016, 505: 86-92
- [8] LIU H, PAN L ming, WEN J. Sorption, transport and biodegradation—An insight into bioavailability of persistent organic pollutants in soil[J]. *Can. J. Chem. Eng.* 2016, 94: 192-195.
- [9] 曹振山, 郭烈锦, 王晔春, 等. 光电催化过程中氧气泡成核—生长—脱离特性研究[J]. *物理化学学报*, 2018, 34(5): 512-520.
CAO Z S, GUO L J, WANG Y C, et al. Investigation on characteristics of bubble nucleation, growth and detachment during photochemical catalysis[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(7): 1488-1492. (in Chinese)
- [10] YAMILA P S, ESTEBAN D G, DAMIAN A S, et al. Mechanisms of nucleation and stationary states of electrochemically generated nanobubbles [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(7): 2742-2753.
- [11] AKAY Ö, BASHKATOV A, COY E, et al. Electrolysis in reduced gravitational environments: Current research perspectives and future applications[J]. *npj Microgravity*, 2022, 8: 56-59.
- [12] BASHKATOV A, PARK S, DEMIRKIR Ç, et al. Performance enhancement of electrocatalytic hydrogen evolution through coalescence-induced bubble dynamics [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(14): 10177-10186.
- [13] XUE G Y, FRANZISKA K, MARGITTA U, et al. Dynamics of Single Hydrogen Bubbles at a Platinum Micro-electrode[J]. *Langmuir*, 2015, 31(29): 8184-8193.
- [14] JANSSEN L J, VAN S D, BARENDRECHT E. Bubble behaviour on and mass transfer to an oxygen-evolving transparent nickel electrode in alkaline solution[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1984, 9(10): 849-853.
- [15] JANSSEN L J, SILLEN C W M P, BARENDRECHT E, et al. Bubble behaviour during oxygen and hydrogen evolution at transparent electrodes in KOH solution[J]. *Electrochimica Acta*, 1984, 29(5): 633-642.
- [16] VAN D L, MORENO S Á, PEÑAS L P, et al. Electrolysis-driven and pressure-controlled diffusive growth of successive bubbles on microstructured surfaces[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165(3): 129-136.
- [17] SANGTAM B T, PARK H. Review on bubble dynamics in proton exchange membrane water electrolysis: Towards optimal green hydrogen yield[J]. *Micromachines*, 2023, 14(12): 2234-2275.
- [18] SONI A, SARVATEJ K M, MANISHA M, et al. Exploring electrocatalysts for oxygen evolution: A comprehensive comparative review in alkaline and acidic medium[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 678: 232999-233007.
- [19] БУТИРИНА Т Є, ТИЩЕНКО А П, ТРЕЩУК С В. Особенности электролиза воды в условиях неравновесной низкотемпературной плазмы[J]. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2013, 3(42): 209-212.
- [20] WANG K, PEI P, PEI Y, et al. Magnetic field induced motion behavior of gas bubbles in liquid[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21068-21076.