

SHEN Xinhua, WANG Jin, LAN Ding, ZHAI Sihan, CHEN Hao. Simulation of Bubble Behavior and Energy Efficiency in Proton Exchange Membrane Electrolyzers Based on Fluid Phase Field under Microgravity Conditions (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(3): 726–734. CSTR:32142.14.cjss.2025–0153. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025–0153

微重力下基于流体相场的质子交换膜电解槽 气泡行为与能量效率仿真*

沈鑫华^{1,2} 王进¹ 蓝鼎^{2,3}
翟思涵² 陈浩^{1,2}

1(青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266520)

2(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘要 质子交换膜电解槽是一种前景广阔的清洁可再生能源制氢技术装置,也是空间站环控生保系统的关键技术之一。目前,空间站中质子交换膜电解槽存在因气泡行为导致的能量效率下降,因此质子交换膜电解槽内部的气泡行为研究极为重要。提出一种基于电化学模型耦合流体相场模型的多物理场模型,对比研究常重力环境与微重力环境下质子交换膜电解槽的气泡行为及其对能量效率的影响,针对性解决因气泡行为导致的能量效率下降。结果表明,在微重力环境下,入口水流速从 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,下壁气泡覆盖率升高 9.5%,在流道深度为 0.8 mm 时,易形成扁平状气泡流覆盖流道下壁。在常重力环境下,流道深度较低时易形成薄膜流堵塞流道,进而解决了质子交换膜水电解能量效率波动、长期工作稳定性不足以及气泡管理困难等问题。

关键词 质子交换膜水电解槽, 气泡行为, 流体相场, 能量效率, 微重力

中图分类号 V524

Simulation of Bubble Behavior and Energy Efficiency in Proton Exchange Membrane Electrolyzers Based on Fluid Phase Field under Microgravity Conditions

SHEN Xinhua^{1,2} WANG Jin¹ LAN Ding^{2,3}
ZHAI Sihan² CHEN Hao^{1,2}

1(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

2(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

* 中国科学院战略性先导科技专项项目资助 (XDA0470100)

2025-09-01 收到原稿, 2025-11-27 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Proton Exchange Membrane Electrolyzers (PEMELs) constitute a promising, clean, and renewable technology for hydrogen production and represent a critical component of life-support and environmental control systems aboard space stations. At present, PEMEL operation in space environments exhibits reductions in energy-conversion efficiency attributable to complex bubble dynamics within the cell; accordingly, a systematic investigation of intradevice bubble behavior is essential for optimizing overall system performance. In this study, we develop a multiphysics modeling framework that couples a detailed electrochemical model with a fluid phase-field model to perform a comparative analysis of how fundamental operating and geometric parameters — specifically inlet water velocity, outlet pressure, and channel depth — affect bubble dynamics in PEMELs under both normal-gravity and microgravity conditions, and to quantify the consequent effects on energy efficiency; the coupled model is validated through quantitative comparison with data from high-quality published literature. The simulation results indicate that, under both gravity regimes, increasing the inlet water velocity from $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ drives a transition of flow regime from wavy flow to dispersed bubble flow, yielding higher bubble coverage and a concomitant decrease in energy efficiency, and therefore high inlet water velocities (*e.g.*, $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) should be avoided. As the outlet pressure increases from 1 atm to 10 atm, the bubble regime progressively shifts from dispersed bubble flow toward wavy or thin-film flow, which increases bubble coverage and degrades energy efficiency; accordingly, high outlet pressures (*e.g.*, 10 atm) should be avoided. Increasing channel depth from 0.8 mm to 1.2 mm promotes a transition from wavy flow to dispersed bubble flow, reduces lower-wall bubble coverage, and improves energy efficiency, suggesting an optimal channel depth range of approximately 1.0~1.2 mm. Variations in gravity direction exert only minor influence on bubble behavior and energy efficiency for millimeter-scale flow fields. These findings provide valuable guidance for bubble-management strategies and for the design and operation of PEMELs to enhance energy-conversion efficiency in both terrestrial and microgravity environments.

Key words Proton exchange membrane water electrolyzer, Bubble behavior, Fluid phase field, Energy efficiency, Microgravity

0 引言

在空间站环控生保系统以及可再生能源系统中,水电解槽技术是可以提供充足氧气供应的有效方法,并且可以为可再生能源系统提供氢气,实现能源循环利用,在保障航天员生命安全的同时,为能源系统提供原料.目前,主要的电解技术有碱性水电解(AWE)、质子交换膜水电解(PEMWE)和固体氧化物电解(SOEC)^[1-3].由于PEMWE电解技术电解效率高、制取氢气纯度高,是目前公认最具潜力的空间站环控生保系统中的氧气补给技术^[4].

目前,PEMWE的研究集中在开发新的催化剂和电极材料以降低制造成本,但往往忽视了电解产物(氢气泡与氧气泡)对PEMWE实际工作性能的影响^[5,6].最近研究表明,PEMWE长时间运行后具有气泡覆盖率高、气泡分离缓慢等问题,使得电解反应面积不足以及电解产物(氢气泡与氧气泡)排出困难,

导致PEMWE能量损失高以及工作性能难以长期保持稳定^[7,8].因此,研究PEMWE气泡行为及其对能量效率的影响至关重要.由于中子成像技术观测气泡行为存在局限性,亟须发展新的技术进行研究.

数值模拟可以将PEMWE流道内复杂气泡行为完整展现,同时更高效验证不同参数下的气泡行为,既提供一种便捷研究手段,同时可与中子成像技术对比验证.Nouri-Khorasani等^[9]建立了一维数学模型,发现催化剂层表面的气泡可以阻断催化剂活性位点,导致电化学活性表面积减小.Hoseini Larimi等^[10]开发了二维两相数值模型,发现不同水流速度会影响流道中的气泡行为.Qiu等^[11]开发了基于流体体积(VOF)方法的高压PEMWE二维流体动力学模型,发现毛细管压力驱动多孔介质中的气泡流动,而水对流决定了流道中的气液两相流.Zhu等^[12]采用气-液混合两相流动模型描述电解芯体内的流动过程,发现当工作电流一定时,电解槽存在极限供水量情况.这

些研究关注了常重力环境下的气泡行为,但未将气泡行为与能量效率关联,同时未研究微重力环境下气泡行为及其对能量效率的影响.

针对微重力环境下 PEMWE 气泡行为及其对能量效率影响的研究空白,基于电化学模型耦合流体相场模型(将电化学模型稳态解中流道-气体扩散层界面氧气生成速率的平均值导入流体相场模型中,再将流体相场瞬态解(伪稳态)中流道-气体扩散层界面氧气覆盖率的平均值导入电化学模型中),进行常重力环境和微重力环境下 PEMWE 不同基本参数(不同入口水流速、出口压力以及流道深度)的气泡行为及其对能量效率影响的仿真研究,克服了电化学过程与气液界面两相流过程进行耦合的难题,更加真实地反映常重力环境和微重力环境下 PEMWE 流道和流道-气体扩散层界面的气泡行为,进而解决了 PEMWE 能量效率波动、长期工作稳定性不足以及气泡管理困难等问题.

1 仿真模型与方法

1.1 结构与假设

将电化学模型中的气体扩散层与质子交换膜简化为匀质几何结构,催化剂层简化为电极表面,通过调整几何结构简化模型;流体相场模型中,不考虑膜电极(MEA)的影响,仅捕捉流道-气体扩散层界面和流道内的气泡行为.为了便于模型计算,电化学模型采用的三维几何结构可以更直观地反映 PEMWE 的性能;流体相场模型中三维几何结构相比于二维几何结构计算量呈指数型增长,因此流体相场模型采用二维几何模型.流体相场模型主要由阳极流道和氧气入口组成,这些氧气入口尺寸(孔径和线径)基于孔隙率进行公式计算得到.钛网的孔径 d_{pore} 和线径 d_{wire} 的关系为

$$d_{\text{pore}} \approx k \cdot d_{\text{wire}} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

其中, ε 为孔隙率, k 为堆积因子(钛毡取 1.05~1.2).当孔隙率为 0.6 时, $d_{\text{pore}} \approx 1.5d_{\text{wire}}$. 流体相场模型的几何参数如表 1 所示^[13]. 电化学模型耦合流体相场模型原理如图 1 所示.

为了提高电化学模型和流体相场模型计算效率,在模型开发中做出如下假设.

表 1 几何模型参数

Table 1 Geometric model parameters

参数	符号	数值
流道的长度和深度/mm	L, H	30, 0.8
钛网的孔径和线径/mm	$d_{\text{pore}}, d_{\text{wire}}$	0.3, 0.2
孔隙率	ε	0.6

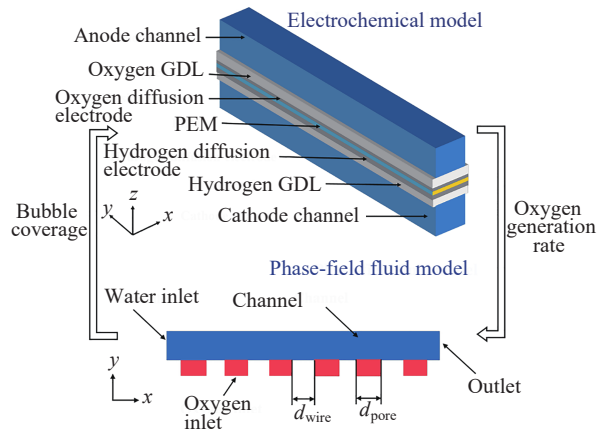


图 1 电化学模型耦合流体相场模型原理

Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical model coupled fluid phase field model

(1) 采用毫米级流场,且入口水流速 $\leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.通过 $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$ 计算低雷诺数 ($Re=500$),远低于层流上限雷诺数,因此假设液态水和氢氧气体为不可压缩和层流的.

(2) 电极和气体扩散层在本研究中假定为各向同性和均匀的.

(3) 在实际的 PEMWE 系统中,阴极和阳极均使用循环水,液态水中氧气维持饱和状态,新产生的氧气以气体形式扩散.因此,该研究在仿真中定义氧气不溶于液态水,直接形成气体从气体扩散层扩散至流道排出.

(4) 催化剂层和气体扩散层之间的尺寸长度相差几个数量级,且解析催化剂层特性成本极高.本文主要研究氧气泡行为在常重力和微重力环境下的宏观运输,因此将催化剂层简化为电极表面.

通过将 PEMWE 表面电极电流密度进行积分得到总电流. PEMWE 仿真效率为

$$\eta = \frac{Q_{\text{H}_2} \cdot v_{\text{H}_2}}{E_{\text{cell}} \cdot I}. \quad (2)$$

其中, E_{cell} 为 PEMWE 供给电压; I 为 PEMWE 供给

电流; v_{H_2} 为 PEMWE 产氢速率, 通过提取气体扩散层-流道界面的氢气生成速率得到; Q_{H_2} 为氢气的低热值 ($241.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

1.2 数值求解方法与模型验证

利用多物理场仿真软件中的有限元法求解流体饱和模型中的守恒方程. 使用结构化长方形网格对计算域进行网格划分, 所有变量的相对容差设置为 1×10^{-4} . 采用基于 PARDISO 求解器的分离法和直接法求解各变量. 图 2 给出了微重力环境下的伪稳态曲线. 由图 2 可以看出, 在微重力环境下, 随着时间的推移, 流道-气体扩散层界面、流道上壁和流道域内的气泡覆盖率波动趋于稳定. Wu 等^[14]将这种稳定性波动称为伪稳态.

基于电化学模型耦合流体相场模型进行仿真计算, 将电化学模型中的 I - V 曲线与已发表部分数据进行对比验证^[15], 对比结果良好; 将流体相场模型达到伪稳态后的结果数据与已发表部分数据进行对比分析, 结果吻合度良好; 将耦合气泡覆盖率后模型中的 I - V 曲线与已发表部分数据进行对比^[15], 结果显示 I - V 曲线基本吻合, 数值差异小且呈现完全相同的变化规律. 综上所述, 这里的电化学模型和流体相场模型准确度良好, 足以准确预测 PEMWE 的电化学性能以及气泡行为. 下壁氧气泡覆盖率如图 3 所示, I - V 曲线对比数据如图 4 所示.

1.3 物理参数与边界条件

电化学模型阳极和阴极均采用去离子水供应, 阳极供应水作为反应物消耗, 阴极供应水主要用于冷却电解槽并将产生的氢气带离阴极流道. 通过提取三维

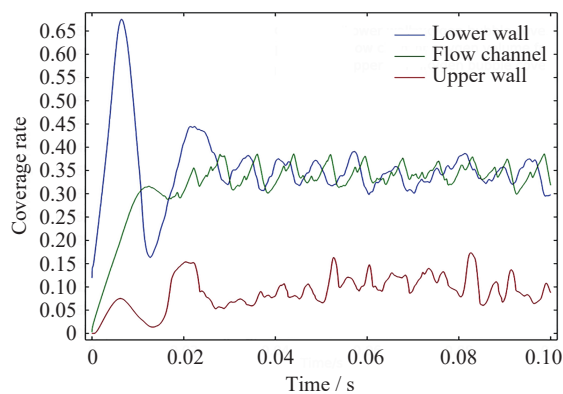


图 2 微重力环境下伪稳态曲线

Fig. 2 Pseudosteady-state curves in microgravity environments

两相 PEMWE 电化学仿真中的氧气生成速率, 进行单位转换并通过比例因子放大得到氧气入口速度. 流体相场边界条件列于表 2, 工作参数列于表 3.

2 仿真结果与分析

基于电化学模型耦合流体相场模型, 研究常重力 (方向垂直流道、方向平行流道) 环境和微重力环境不同参数 (入口水流速、出口压力和流道深度) 下气泡行为及其对能量效率的影响, 针对性地解决了将电化学过程与气液界面两相流过程进行耦合的难题, 实现了气泡行为与电化学性能相结合, 更加真实地反映常

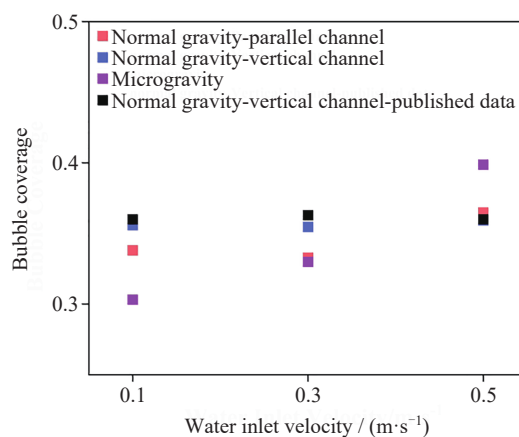


图 3 下壁气泡覆盖率对比数据

Fig. 3 Comparison of bubble coverage on the lower wall

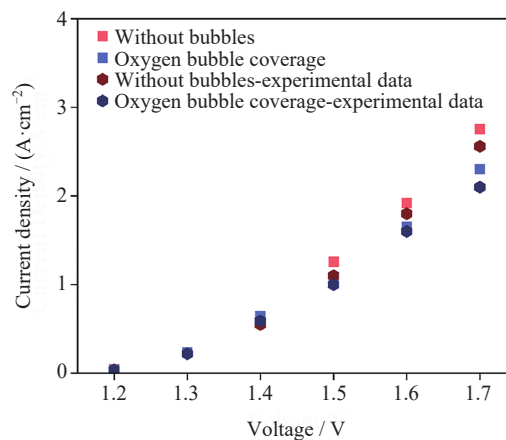


图 4 I - V (电流密度-电压) 曲线对比数据

Fig. 4 I - V (current density-voltage) curve comparison data

表 2 流体相场边界条件

Table 2 Fluid phase field boundary entrance

参数	值
水的黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.001
氧气的黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.919×10^{-5}
表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	0.0726
比例因子	100
进水速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.1, 0.3, 0.5
出口压力水平/($\times 10^3$)/kPa	1, 5, 10
流道深度/mm	0.8, 1, 1.2

表 3 工作参数

Table 3 Working parameters

参数	符号	值
工作温度/K	T	353.15
阳极参考交换电流密度/($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)	$i_{\text{ref},a}$	10000
阴极参考交换电流密度/($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)	$i_{\text{ref},c}$	1000
阳极和阴极转换系数 ^[15]	α_a, α_c	0.5, 0.5
阳极和阴极气体扩散层的孔隙率 ^[15]	$\varepsilon_{\text{GDL},a}, \varepsilon_{\text{GDL},c}$	0.6, 0.6
气体扩散层的绝对渗透率 ^[16] / m^2	K_{GDL}	1×10^{-12}
气体扩散层的电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	σ_{GDL}	5000
膜的导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	k_M	0.68

重力环境和微重力环境 PEMWE 流道和流道-气体扩散层界面的气泡行为。

2.1 不同入口水流速下的气泡传输特性对能量效率的影响

图 5 表明, 随着入口水流速从 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在常重力环境下下壁氧气泡覆盖率呈现小幅度波动, 微重力环境下下壁气泡覆盖率从 30% 上升到 40%, 同时流道内氧气泡减少, 表明微重力环境下流速变化对气泡行为的影响更显著。

由图 6(a)(g)(b)(h)(c)(i) 可知, 入口水流速从 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 氧气泡由波浪流逐渐转变为气泡流, 表明提升流速可以有效促进气泡分裂, 阻碍气泡积聚。由图 6(a)(b)(d)(e)(g)(h) 对比可知, 在 1 mm 深度的流道中, 不同重力方向对气泡行为的影响微小。

由图 5 和图 7 可知, 随着入口水流速从 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在微重力环境下, 下壁气泡覆盖率增加 9.5%, 能量效率下降 3.2%; 在常重力环境下, 能

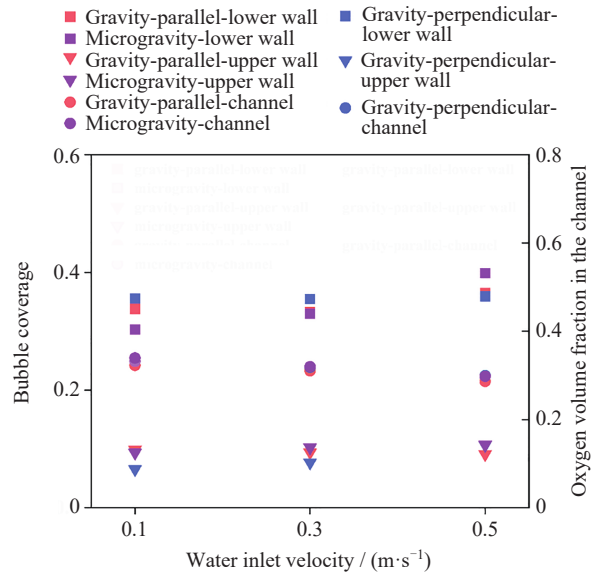


图 5 常重力环境和微重力环境不同入口水流速下的气泡覆盖率和氧气体积分数

Fig. 5 Bubble coverage and oxygen volume fraction under different inlet water flow rates in normal gravity and microgravity environments

量效率变化不明显, 常重力不同方向对能量效率影响微小。由图 7 可知, 当电化学模型耦合流体相场模型后, 能量效率下降平均约 12%。

2.2 不同出口压力下的气泡传输特性对能量效率的影响

图 8 表明, 在常重力环境下, 当出口压力从 $1\times 10^2 \text{ kPa}$ 增加到 $1\times 10^3 \text{ kPa}$ 时, 壁气泡覆盖率和上壁气泡覆盖率以及流道内气体体积分数影响不大; 在微重力环境下, 当出口压力从 $1\times 10^2 \text{ kPa}$ 增加至 $5\times 10^2 \text{ kPa}$, 上壁气泡覆盖率减小约 4%, 下壁气泡覆盖率略微升高。

图 9(a)~(f) 显示, 随着出口压力从 $1\times 10^2 \text{ kPa}$ 增加到 $1\times 10^3 \text{ kPa}$, 在常重力环境下, 流道中气泡行为略微变化; 图 9(g)~(i) 显示, 在微重力环境下, 随着出口压力从 $1\times 10^2 \text{ kPa}$ 增加至 $1\times 10^3 \text{ kPa}$, 气泡逐渐趋于波浪流。例如 9(b) 中, 在流道出口处 0.55 s 和 0.95 s 处观察到气泡流到波浪流的转变, 因此在微重力环境下应避免高出口压力。

图 10 给出了常重力环境和微重力环境不同流道深度对能量效率的影响。由图 8 和图 10 可知, 随着出口压力从 $1\times 10^2 \text{ kPa}$ 增大至 $1\times 10^3 \text{ kPa}$, 在常重力环境下, 能量效率略微浮动; 在微重力环境下, 能量效率

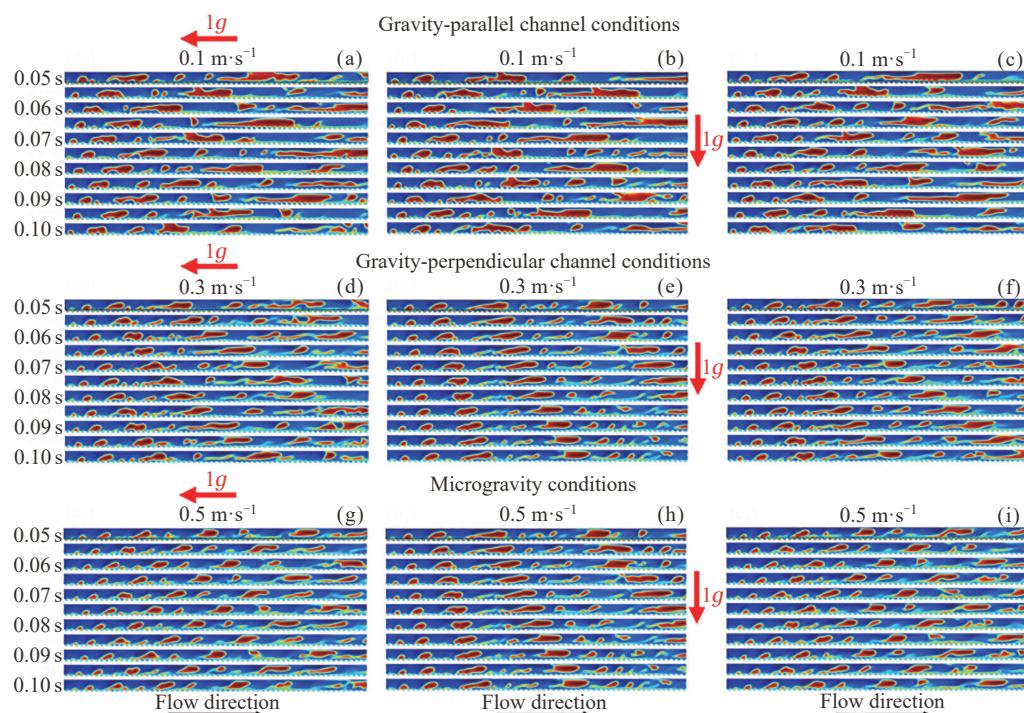


图6 常重力环境与微重力环境不同入口水流速对两相流的影响

Fig. 6 Effect of different inlet water velocities on two-phase flow in normal gravity and microgravity environments

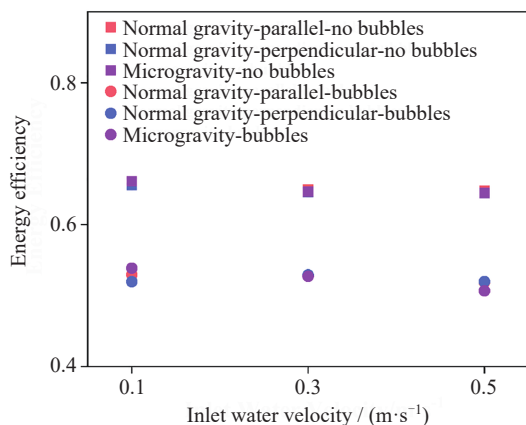


图7 常重力环境和微重力环境不同入口水流速对能量效率的影响

Fig. 7 Effect of different inlet water flow rates on energy efficiency in normal gravity and microgravity environments

呈现略微下降的趋势, 由此可知, 出口压力的增加对能量效率的影响微小.

2.3 不同流道深度下的气泡传输特性对能量效率的影响

由图 11 显示, 随着流道的深度从 0.8 mm 增加

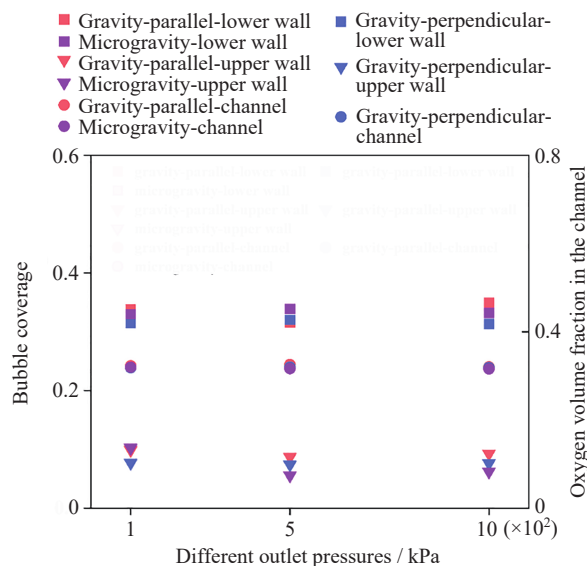


图8 常重力环境和微重力环境不同出口压力下气泡覆盖率和氧气体积分数

Fig. 8 Bubble coverage and oxygen volume fraction under different outlet pressures in normal gravity and microgravity environments

到 1 mm, 在微重力环境下, 下壁气泡覆盖率和上壁气泡覆盖率分别上升 5.2% 和 2.7%, 当流道深度增加

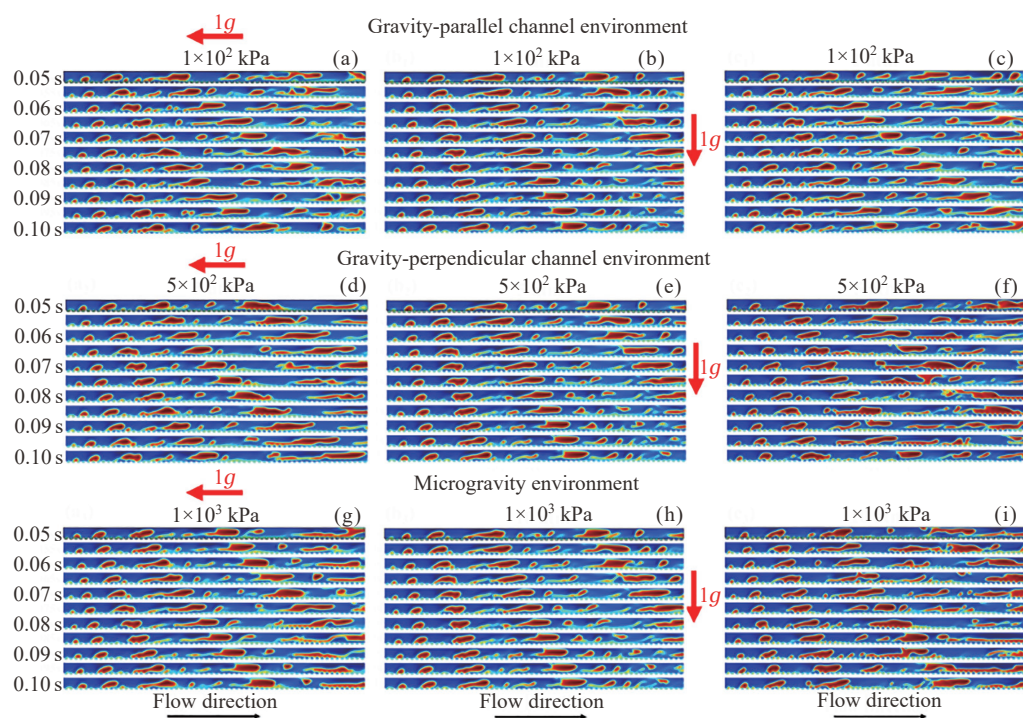


图9 常重力环境与微重力环境不同出口压力对两相流的影响

Fig. 9 Effect of different outlet pressures on two-phase flow in normal gravity and microgravity environments

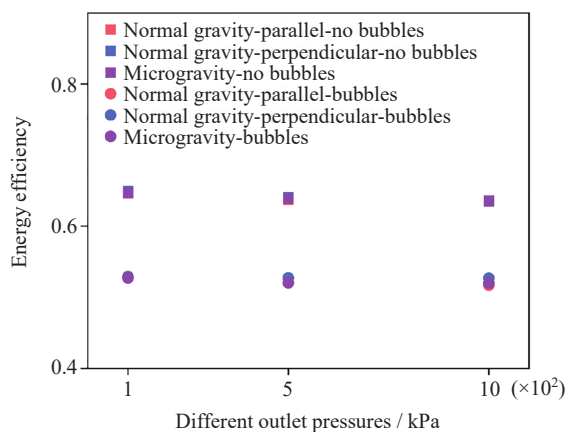


图10 常重力环境和微重力环境不同通道深度对能量效率的影响

Fig. 10 Effect of different channel depths on energy efficiency in normal gravity and microgravity environments

到 1.2 mm, 下壁气泡覆盖率和上壁气泡覆盖率均略微下降, 且在通道深度为 0.8 mm 时, 下壁气泡覆盖率明显低于平均水平; 在常重力 (方向平行通道) 环境下, 气泡覆盖率和通道氧气体积分数变化微小。

由图 12 可知, 当通道深度为 0.8 mm 时, 通道内

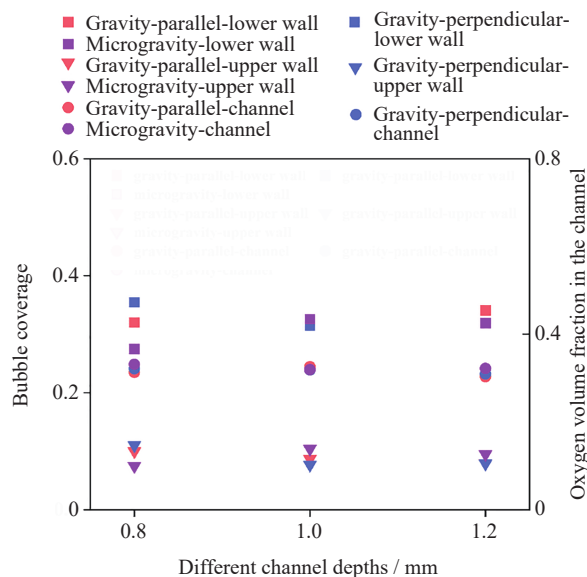


图11 常重力环境和微重力环境不同通道深度下的气泡覆盖率和氧气体积分数

Fig. 11 Bubble coverage and oxygen volume fraction at different channel depths under normal gravity and microgravity environments

气泡更多以薄膜流的形式存在, 当通道深度从 0.8 mm 增大到 1 mm, 再增大到 1.2 mm 时, 气泡逐渐

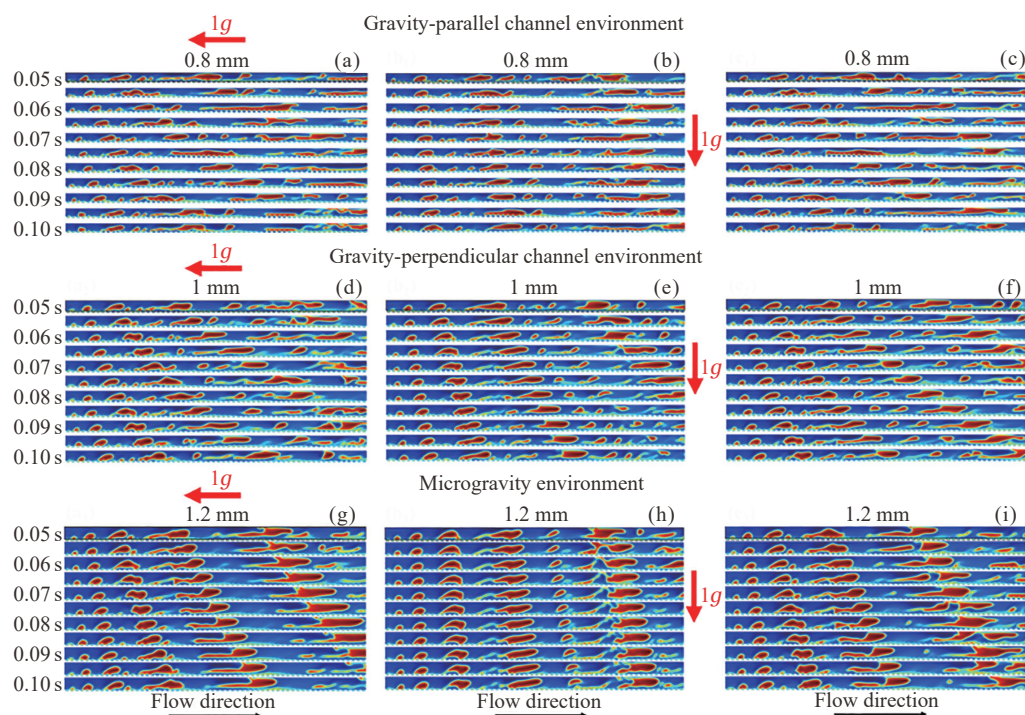


图 12 常重力环境和微重力环境不同流道深度对两相流的影响

Fig. 12 Effects of different channel depths on two-phase flow in normal gravity and microgravity environments

演变为气泡流的形式, 且气泡形状逐渐趋于稳定. 由图 12(a)(d), (b)(e) 和 (c)(f) 三组对比可知, 重力方向对气泡行为的影响微小.

图 11 和图 13 显示, 在微重力环境下, 当流道深度为 1 mm 时, 下壁气泡覆盖率增大导致能量效率略有下降; 在常重力环境下, 当流道深度从 1 mm 增大到 1.2 mm 时, 由于下壁气泡覆盖率的升高, 能量效率下降 1.08%, 常重力不同方向, 在无气泡和耦合气泡覆盖率时, 能量效率变化微小.

3 结论

提出一种质子交换膜电解槽电化学模型耦合流体相场模型的多物理场模型, 在常重力环境和微重力环境研究不同基础参数下的气泡行为及其对能量效率的影响, 克服了电化学过程与气液界面两相流过程耦合的难题, 更加真实地反映常重力环境和微重力环境 PEMWE 流道与流道-气体扩散层界面的气泡行为, 进而解决了 PEMWE 能量效率波动、长期工作稳定性不足以及气泡管理困难等问题. 结果表明, 常重力环境和微重力环境下, 随着入口水流速从 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

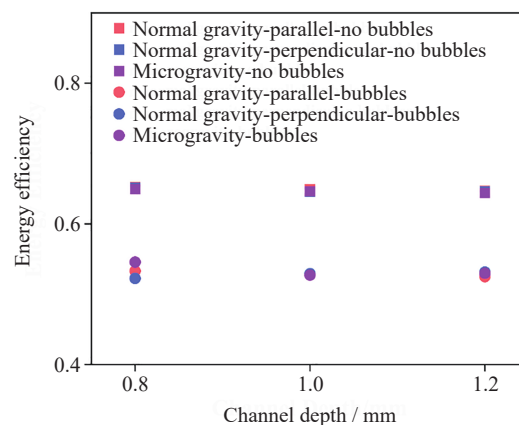


图 13 常重力环境和微重力环境不同流道深度对能量效率的影响

Fig. 13 Effect of different channel depths on energy efficiency in normal gravity and microgravity environments

逐渐增加到 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 气泡从波浪流逐渐演化为气泡流, 导致高气泡覆盖率以及能量效率下降, 因此应避免高入口水流速 ($0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$); 随着出口压力从 $1 \times 10^2 \text{ kPa}$ 逐渐增加到 $1 \times 10^3 \text{ kPa}$, 气泡逐渐从气泡流转变为波浪流或薄膜流, 导致高气泡覆盖率以及能量

效率下降, 因此应尽量避免高出口压力 (1×10^3 kPa); 当流道深度从 0.8 mm 增加至 1.2 mm 时, 气泡逐渐从波浪流转变为气泡流, 下壁气泡覆盖率降低, 能量效率升高, 因此流道深度保持在 1~1.2 mm 性能最佳. 不同重力方向对 1 mm 级流场中质子交换膜电解槽的气泡行为及能量效率的影响甚微.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] FENG Q, YUAN X Z, LIU G Y, *et al.* A review of proton exchange membrane water electrolysis on degradation mechanisms and mitigation strategies[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, **366**: 33-55
- [2] ZOU J X, HAN N, YAN J Y, *et al.* Electrochemical compression technologies for high-pressure hydrogen: current status, challenges and perspective[J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2020, **3**(4): 690-729
- [3] LEE C, HINEBAUGH J, BANERJEE R, *et al.* Influence of limiting throat and flow regime on oxygen bubble saturation of polymer electrolyte membrane electrolyzer porous transport layers[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(5): 2724-2735
- [4] LIU R T, XU Z L, LI F M, *et al.* Recent advances in proton exchange membrane water electrolysis[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, **52**(16): 5652-5683
- [5] MURUGAIAH D K, SHAHGALDI S. Recent progress in understanding the dispersion stability of catalyst ink for proton exchange membrane fuel cell and water electrolyzer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, **66**: 156-169
- [6] ZHOU T T, WANG C, CHENG X Z, *et al.* Two-phase flow characteristics on porous layer in PEM electrolyzer under different flow channel layouts[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, **80**: 249-260
- [7] SU X, XU L J, ZHU D, *et al.* Electrochemical performance study of proton exchange membrane electrolyzer considering the effect of bubble coverage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(70): 27079-27094
- [8] JEON D H, KIM S, KIM M, *et al.* Oxygen bubble transport in a porous transport layer of polymer electrolyte water electrolyzer[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, **553**: 232322
- [9] NOURI-KHORASANI A, TABU OJONG E, SMOLINKA T, *et al.* Model of oxygen bubbles and performance impact in the porous transport layer of PEM water electrolysis cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(48): 28665-28680
- [10] HOSEINI LARIMI S Z, RAMIAR A, ESMAILI Q, *et al.* The effect of inlet velocity of water on the two-phase flow regime in the porous transport layer of polymer electrolyte membrane electrolyzer[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, **55**(7): 1863-1870
- [11] QIU Y, ZHANG R M, LIU C, *et al.* Numerical investigation on two-phase flow of PEM water electrolyzers under high operating pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, **105**: 817-834
- [12] ZHU Feng, JIAO Feifei, WANG Fei, *et al.* Critical operating conditions and water supply optimization of electrolytic oxygen generation system under microgravity environment[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2025, **45**(2): 42-50
- [13] GARCÍA-SALABERRI P A. 1D two-phase, non-isothermal modeling of a proton exchange membrane water electrolyzer: an optimization perspective[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, **521**: 230915
- [14] WU L Z, ZHANG G B, XIE B, *et al.* Integration of the detailed channel two-phase flow into three-dimensional multiphase simulation of proton exchange membrane electrolyzer cell[J]. *International Journal of Green Energy*, 2021, **18**(6): 541-555
- [15] ZHOU H R, MENG K, CHEN W S, *et al.* 3D two-phase and non-isothermal modeling for PEM water electrolyzer: heat and mass transfer characteristic investigation[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, **46**(12): 17126-17143
- [16] ZHANG Z Q, XING X H. Simulation and experiment of heat and mass transfer in a proton exchange membrane electrolysis cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, **45**(39): 20184-20193

作者简介



沈鑫华 男, 1999 年 8 月出生于山东省临沂市, 现为青岛理工大学在读硕士研究生, 2024 年 3 月至今在中国科学院力学研究所联合培养, 主要研究方向为能源集成.
E-mail: shenxinhua@imech.ac.cn



王进 (通信作者) 男, 1978 年 4 月生, 现为青岛理工大学机械与汽车工程学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为先进材料成形理论与工艺、材料表面工程、新型金属材料开发.
E-mail: wangjin@qut.edu.cn



蓝鼎 (通信作者) 男, 1977 年 11 月生, 现为中国科学院力学研究所微重力重点实验室副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间材料表面物理力学、在轨飞行器失效与防护技术.
E-mail: landing@imech.ac.cn