

LI Zihang, YU Ruijiao, YE Fang, DU Wangfang, CHEN Hao, GUO Hang. Experimental Research Progress on Fuel Cells and Electrolytic Cells under Unconventional Gravity (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(6): 1506–1517. CSTR:32142.14.cjss.2024-0157. DOI:10.11728/cjss2025.06.2024-0157

非常规重力条件下燃料电池和 电解池实验研究进展*

李自航¹ 于瑞佼¹ 叶芳¹
杜王芳^{2,3} 陈浩¹ 郭航¹

1(北京工业大学机械与能源工程学院 传热与能源利用北京市重点实验室 北京 100124)

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 燃料电池与电解池可以为空间长期任务和宇航基地提供能源支持,但是空间中不同的引力水平会对其性能造成影响,因此开展非常规重力环境中的相关实验研究对于航天用燃料电池与电解池的研发及改进是必要的. 本文综述了非常规重力条件下燃料电池和电解池的实验研究. 分析及讨论表明,重力水平的改变导致燃料电池与电解池内部气液两相流特性改变,从而对性能造成不同的影响. 目前仍缺少燃料电池在超重力与长期微重力下的实验数据以及再生燃料电池的非常规重力实验数据. 非常规重力条件下的燃料电池和电解池实验不仅有助于促进流体物理与热物理学与电化学之间的学科交叉,还将为空间再生燃料电池系统的研发提供数据依据.

关键词 燃料电池, 电解池, 微重力, 超重力, 空间电源

中图分类号 TM911.4, TQ151.1

Experimental Research Progress on Fuel Cells and Electrolytic Cells under Unconventional Gravity

LI Zihang¹ YU Ruijiao¹ YE Fang¹
DU Wangfang^{2,3} CHEN Hao¹ GUO Hang¹

1(Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, College of Mechanical and Energy Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

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

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

* 国家自然科学基金项目 (11102005, 50406010), 北京市自然科学基金项目 (3202007), 中国科学院微重力重点实验室
开放课题 (NML202409) 和中国博士后科学基金面上项目 (2024M750150) 共同资助

2024-11-07 收到原稿, 2024-12-30 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Fuel cells and electrolytic cells can provide energy support for long-term missions and bases in space, but different gravitational levels in space affect their performance, so experimental studies in unconventional gravity environments are necessary for the development and improvement of fuel cells and electrolytic cells for spaceflight. The experimental studies of fuel cells and electrolytic cells in unconventional gravity conditions are reviewed. The analyses and discussions show that the change of gravity level leads to the change of gas-liquid two-phase flow characteristics inside the fuel cell and electrolytic cell, which affects the performance differently. There is still a lack of experimental data on fuel cells in hypergravity and long-term microgravity, as well as unconventional gravity experiments on regenerative fuel cells. Fuel cell and electrolysis cell experiments under unconventional gravity conditions will not only help to promote the intersection of fluid physics and thermophysics with electrochemistry, but will also provide a data basis for the development of regenerative fuel cell systems in space.

Key words Fuel cells, Electrolytic cells, Microgravity, Hyper gravity, Space power source

0 引言

燃料电池和电解池的组合的出现为地外空间的长期任务(例如月球基地)提供了一种可行思路^[1]. 电解水制氧技术早已被应用在空间站上, 而燃料电池经过三代的发展, 在空间应用领域也已经具备了一定的经验^[2]. 燃料电池的优点是比能量高, 产出同等能量所需要的质量和体积更小, 且使用寿命长, 反应产物只有水, 可以供航天员饮用并供给电解池^[3]; 而电解池通过电解水制取氢气和氧气, 不仅可以供应给燃料电池, 生产的氧气能够供给航天员使用, 氢气在必要的时候可以作为飞船推进剂^[4]. 由燃料电池和电解池组合而成的可再生燃料电池, 配合光伏发电技术, 在地外空间向日工作时利用太阳电池作为主电源, 并通过电解池制取氢气和氧气作为燃料电池的储备能源; 背日工作时便可使用燃料电池作为电源进行供电, 为地外长期任务的实行提供了可能^[5]. 燃料电池和电解池的组合在减少负重的同时大大提高了物质利用效率, 在空间站、月球基地和月面探测车等领域具有应用潜力^[6]. 超重力技术能够强化相间传质和相间分离, 可以促进燃料电池和电解池的性能提升^[7]. 对于未来的载人深空探测任务, 电解制氧技术的发展有利于提升航天员生命保障系统的可靠性与稳定性^[8], 空间燃料电池技术也是解决月球基地能源问题的关键性技术^[9].

目前, 燃料电池和电解池在空间应用方面还面临着许多挑战, 其中之一就是空间环境的重力与地面常规重力不同, 这会对燃料电池和电解池的性能造成影响. 研究该影响规律及其机理有助于为空间活动提供稳定、高效、持续的电力供应. 因此, 非常规重力环境

中燃料电池和电解池运行特性的实验研究便显得至关重要.

需要注意的是, 非常规重力环境指的是重力条件(例如重力大小)与地面常规重力不同的环境, 对于地面常规重力条件下的倾角影响实验, 虽然有文献将之列入重力影响研究范畴, 但是考虑到其实验过程中重力矢量的大小和方向均未改变, 因此严格地说那只是安放方向影响实验而非重力影响实验. 本文仅对不同于地面常规重力条件下的燃料电池及电解池实验开展综述.

1 非常规重力实验

非常规重力环境实验目前可以在天基空间站进行, 也可以使用地基落塔(落井)自由落体实验以及抛物线飞行实验模拟短期微重力环境或使用离心机来模拟不同重力水平^[10].

1.1 天基空间站

当卫星、空间站、货运飞船在距离地面数百 km 的轨道上运行时, 将处于微重力状态. 目前在空间站上已经开展过许多技术开发、物理科学、生物学、人体研究等领域的微重力实验研究^[11], 但少有关于微重力下燃料电池的实验研究报道.

2007 年荷兰首次在国际空间站上开展微生物燃料电池的实验研究, 证明其在微重力环境下可以运行^[12]. 2022 年中国首次将实验用质子交换膜燃料电池送上空间以初步验证燃料电池在微重力等空间环境下的运行特性规律^[13]. 这是中国空间燃料电池实验的标志性事件之一.

电解水技术在空间站上的应用已经较为成熟,目前国际空间站上的美国国家航空航天局 (NASA) 氧气生成系统和俄罗斯 Elektro 系统都已使用电解制氧装置^[14]. 中国 TG-1 电解制氧飞行实验圆满完成任务,证明固体聚合物电解制氧和静态水气分离技术能够适应空间微重力环境^[15]. 在相关运行经验的基础上,中国已形成了较为成熟的空间电解制氧技术,在 TG-2 空间实验室及中国空间站上作为长期服役装置得到应用^[16].

天基空间站中微重力水平精确度高,测试时间长,是理想的微重力实验环境.

1.2 自由落体实验

自由落体实验是将实验装置放在真空的试验舱中,让其做自由落体运动,从而使物体处于微重力状态^[17]. 常用的自由落体实验在落塔(落井)中进行,实验装置在落塔内经历地面重力阶段、微重力阶段和回收阶段三个阶段.

目前开展过燃料电池与电解池自由落体微重力实验的有中国北京落塔、德国不来梅落塔和日本上砂川落井.

北京落塔高 116 m, 自由落体阶段高 61 m, 可提供 $10^{-5} g$ ($1 g$ 指地面常重力) 的微重力水平 3.6 s, 为中国载人航天和空间科学技术研究做出了巨大贡献^[18]. 不来梅落塔高 146 m, 自由落体阶段高 110 m, 可提供 $10^{-5} \sim 10^{-6} g$ 微重力环境 4.74 s, 配合塔底的弹射器将试验舱弹射至塔顶后自由落体可延长微重力时间至 9.3 s^[19]. 上砂川落井由一个高 710 m 的矿井改造, 自由落体高度高达 490 m, 能够稳定提供 10 s 的 $10^{-5} g$ 微重力水平, 是目前国际上最大的微重力实验系统^[20].

落塔自由落体实验中的微重力水平精确度较高,但持续时间短,且被测系统体积会受落塔的内径影响.

1.3 抛物线飞行实验

抛物线飞行实验是将实验装置放置在失重飞机上,失重飞机按照抛物线轨迹飞行,将会获得单次 22 s 左右的 $10^{-2} \sim 10^{-3} g$ 微重力环境,每次飞行可进行 20~40 次抛物线飞行,累计微重力时长可达到十几分钟^[21].

抛物线飞行轨迹分为平飞加速阶段、跃升拉起阶段、失重飞行阶段和俯冲恢复平飞阶段^[22]. 失重飞行阶段是通过调整飞机推力,使飞机所受升力与重力近

似相等,从而使飞机进入失重状态.

目前可开展抛物线飞行的大型失重飞机主要有美国的 KC-135-A、俄罗斯的 IL-76 MDK、法国的 Caravelle 6 R-234 和 A300 B2-100、日本的 MU-300 等几种机型. 其中燃料电池的抛物线飞行实验主要由 NASA 的 McDonnell Douglas C9 Skytrain II plane 以及一台波音 727-200 飞机开展^[23], 电解池的抛物线飞行试验主要使用法国的 A300 和 A310 失重飞机^[24].

抛物线飞行试验微重力时间长于落塔实验,但微重力水平精确度较低.

1.4 地面离心机实验

离心机实验利用高速旋转的离心加速度形成超重力环境,超重力水平最大可达 300 g ,且持续时间可长达数小时^[25].

目前离心机实验主要用于电解池的超重力实验. 利用离心机搭配抛物线飞行,可以调整出较为精确的月球重力 ($0.166 g$) 和火星重力 ($0.376 g$)^[26],为非常规重力实验的开展提供更多可能.

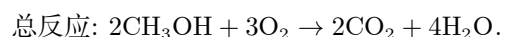
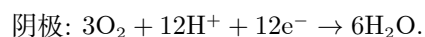
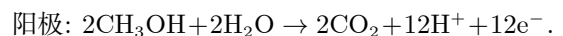
总之,目前的非常规重力实验中,超重力实验可以通过离心机实现稳定的长期超重力水平,而微重力实验中自由落体实验和抛物线飞行实验只能提供短期微重力条件,只有天基空间站可以提供长期的天然微重力环境.

2 燃料电池

燃料电池是一种通过电化学反应持续地将燃料和氧化剂中的化学能直接转化成电能电化学反应装置^[27]. 根据电解质与所用燃料的不同可以将其分为多个种类,目前开展过非常规重力研究的有直接甲醇燃料电池 (DMFC)、氢质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 和直接氨碱性燃料电池 (DAAFC)、微生物燃料电池 (MFC).

2.1 直接甲醇燃料电池

DMFC 直接使用甲醇作为燃料,具有原料易获取、响应速度快、能量密度高等优点^[28]. DMFC 内电化学反应如下.



阳极甲醇燃料进入流道后在向流道出口流动的

过程中会逐步向催化层扩散,并在催化剂的作用下与水发生反应生成 CO_2 气体、 H^+ 离子和电子, H^+ 离子通过电解质到达阴极与氧化剂 O_2 结合生成水,电子通过外部电路形成电流. 液态进料的 DMFC 阳极侧存在气 (CO_2) 液 (甲醇溶液) 两相流.

微重力落塔实验表明: 在微重力环境下, 物体所受的浮力小于常重力环境, 致使 DMFC 阳极反应中产生的 CO_2 气泡无法在浮力的作用下及时离开反应界面, 甚至会静止在生长点不动, 且气泡的尺寸随时间发展会逐渐增大, 最终可能会堵塞流道^[29,30]. 图 1 所示为微重力条件下 DMFC 流道内的两相流观测结果.

当 DMFC 处于高电流密度或高温条件下时, 反应速率加快, 产生的 CO_2 气泡数量增多, 堵塞流道的可能性会变得更大^[31]. 在电流密度较小或温度较低的时候产生的 CO_2 气泡数量少, 重力变化对 DMFC 的影响不明显^[32]. CO_2 气泡滞留在反应界面阻碍了甲醇溶液从流道供应到催化层, DMFC 阳极反应缺少反应物, 电化学反应速率降低. 若是 CO_2 气泡堵塞流道, 甲醇溶液向流道出口的运输受阻, 靠近流道出口的反应界面上甲醇浓度降低, 电化学反应的发生受阻, 加剧了 DMFC 的浓差极化, 从而造成 DMFC 性能降低. 重力对被动式 DMFC 性能的影响也主要是通过影响浓差极化实现的^[33].

常重力环境中竖直放置的 DMFC 进入微重力环境后, 重力的改变对其性能影响比水平放置的大, 这

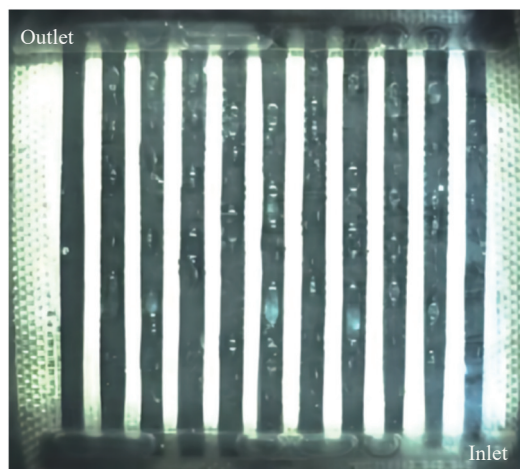


图 1 微重力下的 DMFC 流道内两相流观测^[30]

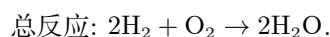
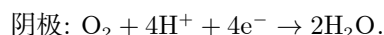
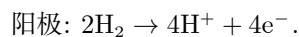
Fig. 1 Observation of two-phase flow in DMFC flow channel under microgravity^[30]

是因为垂直放置 DMFC 流道中的 CO_2 气泡上浮速度在不同重力环境中的差异更大; 而当 DMFC 水平放置时, 重力对两相流的影响不明显^[34]. 提高甲醇进料的物质的量浓度可以在一定程度上增加反应界面上的甲醇浓度, 能够促进电化学反应的发生, 有利于减弱重力效应对燃料电池性能的影响; 提高甲醇进料流量后 CO_2 气泡受到的液体黏性拖拽作用更强, 可以减小 CO_2 气泡的尺寸, 避免 CO_2 气泡堵塞流道^[35].

综合以上短时微重力实验的结果分析, 在其他工作参数相同的情况下, DMFC 的性能在微重力环境下会低于常重力环境, 这主要是因为 DMFC 阳极反应产生的气泡无法像在常重力环境中那样较快地离开反应界面, 阻碍了甲醇燃料与催化剂接触, 电化学反应速率降低, 浓差极化加剧而造成性能降低. 可以通过适当降低温度、在较低电流密度下运行、水平放置 DMFC、增加甲醇进料物质的量浓度与流量来削弱微重力条件对 DMFC 造成的负面影响.

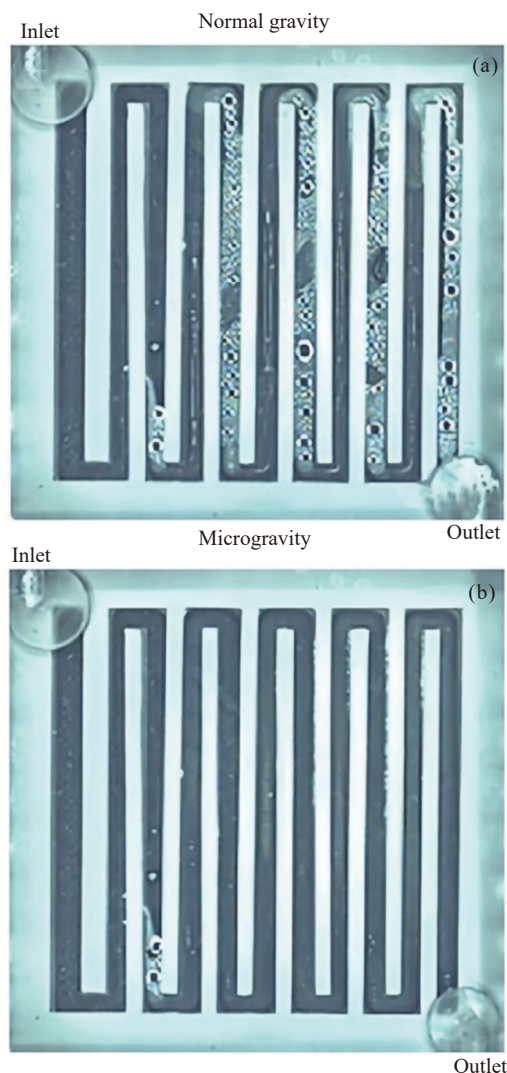
2.2 氢质子交换膜燃料电池

PEMFC 因其具有较高的能量转化效率、零排放、运行温度接近常温等优点, 有望成为空间任务下一代主电源之一^[36]. PEMFC 内电化学反应如下.



阳极 H_2 在催化剂的作用下反应生成 H^+ 离子和电子, H^+ 离子通过质子交换膜到达阴极与氧化剂 O_2 结合生成水, 电子通过外部电路形成电流. 电化学反应中生成的水会发生液化, 从而在电池内部形成两相流. 在常重力环境下, 竖直流道的 PEMFC 内阴极反应生成的多余的水有时会积存从而堵塞流道和扩散层表面, 阻碍 O_2 在流道内的运输及其与催化剂的接触, 使得 PEMFC 阴极反应受阻, 反应界面 O_2 浓度差增大, 加剧了浓差极化, 会对 PEMFC 的性能造成不利影响, 这也被称为水淹现象. 在进入微重力环境后, 由于液柱的重力效应变小, 水在反应气体的推动下向出口排出, 水淹现象得到缓解, 催化剂表面的 O_2 浓度增加, 电化学反应速率增加, 浓差极化减小, 从而提高了电池性能^[37]. 图 2 所示为竖直流道 PEMFC 在不同重力条件下流道内两相流的观测结果.

水平流道的 PEMFC 从常重力变至微重力环境时, 重力的减小会使原本可以正常排出液态水漂浮在

图2 PEMFC 流道两相流观测^[38]Fig. 2 Observation of two-phase flow in PEMFC flow channel^[38]

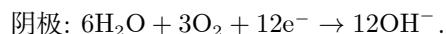
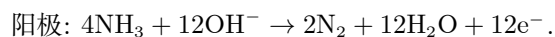
流道中造成水淹, 增大了浓差极化, 反而会造成电池性能下降^[38]. PEMFC 在常重力下水平流道性能优于竖直流道, 而在微重力环境下则刚好相反^[39]. 提高温度能够加快水的蒸发、增大氧气流量可以吹扫多余的水, 都有助于缓解微重力环境下发生的水淹^[40].

由已有实验可知, 重力因素对 PEMFC 性能的影响也是主要通过影响浓差极化来实现的, 在常重力下形成的 PEMFC 内部水淹现象在进入微重力环境中后有时会得到缓解. DMFC 在微重力环境下性能会下降, 而竖直流道的 PEMFC 性能在微重力环境下会得到提升. 因此, 在实际应用中要根据不同的燃料电池类型来设计燃料电池的流场和运行工况, 使燃料电

池有稳定输出^[41].

2.3 直接氨碱性燃料电池

直接氨碱性燃料电池直接使用氨气作为燃料, 电化学反应如下.



阳极 NH_3 在催化剂的作用下与 OH^- 反应生成 N_2 、水和电子, 电子通过外部电路形成电流, 并在阴极与水及 O_2 反应生成 OH^- . 阳极反应生成的 N_2 在常重力会受浮力作用离开燃料电池, 在此过程中会清洁铂催化剂表面, 使催化剂可以更多地氧化 NH_3 . 但是在微重力环境下, 氮气因为缺少浮力会停留在催化剂附近, 阻碍了 NH_3 与催化剂的接触, 阳极电化学反应受阻, 从而对燃料电池性能造成不利影响^[42]. NASA 通过抛物线飞行获得了 20 s 的 0.02 g 微重力条件, 实验后发现使用碳纳米管负载的铂催化剂对微重力下直接氨碱性燃料电池的性能有较明显的提高, 因为对催化剂进行纳米结构处理能够增加催化剂表面积, 有助于 NH_3 与催化剂表面接触, 促进阳极电化学反应的发生^[42]. 此外, NASA 还研究了不同孔径改性介孔碳对氨电化学氧化的影响, 效果最好的是 137 Å 介孔碳制备的铂催化剂^[43].

2.4 微生物燃料电池

微生物燃料电池利用微生物在阳极厌氧环境下将碳水化合物分解并释放自由电子和质子, 自由电子通过外部电路形成电流, 质子移动到阴极与氧化剂结合生成水^[44]. 在载人航天中可能将有机废物转化为能源, 具有一定的应用潜力.

荷兰开展的微生物燃料电池国际空间站实验中, 微生物燃料电池在空间中表现出与常重力下相同的放电曲线^[12], 关于空间微生物燃料电池实验未见更多的公开报道, 但已有报道已经证实其在空间微重力下可以运行. 综合分析, 燃料电池从常重力环境转到微重力环境后, 因为重力减小后反应生成的气体所受到的浮力也会减小, 导致其难以正常排出燃料电池, 降低了催化剂表面的反应物浓度, 增大了浓差极化从而使电池性能降低. 但是竖直流道 PEMFC 在常重力下存在的流道底部液态水堆积现象会在微重力环境下得到缓解, 电池性能会有所提升.

表 1 中按时间顺序汇总了非常规重力下燃料电

池的实验研究, 目前关于燃料电池的非常规重力实验主要集中在微重力领域, 已公开的实验数据大多来自地基短时微重力环境实验. 关于燃料电池的超重力实验及长期微重力环境中的实验研究尚很缺乏.

3 电解池

电解池是利用电解水来制取氢气和氧气的装置, 水电解技术是目前最理想且最具发展潜力的制氢技术之一^[45]. 同时, 水电解制氧在空间站和长期载人航天飞行器上被视为最具合理性的关键技术之一^[46]. 在空间电解领域, 固体聚合物电解质水电解技术和静态水气分离技术具有较大优势^[47,48].

电解反应中, H_2O 分子在电场的作用下分离成 OH^- 和 H^+ , H^+ 在阴极得到电子生成 H_2 , OH^- 在阳极失去电子生成 O_2 和水. 水电解生成的 H_2 和 O_2 与液态水形成电解池内的两相流体系.

3.1 微重力条件下的电解池实验

在微重力环境中, 电解水产生的 H_2/O_2 气泡体积会变大并形成多层膜附着在电极表面, 阻碍其与电解质接触^[49], 电解池阴极与阳极反应同时受阻, 导致性能下降. 此时电解过程并未结束, 因为较细的气泡聚集也为水电传输提供了良好的网络连接^[50]. 但是电解

池内电阻则会随着气泡膜厚度的增加而增大^[51], 电子传输阻力增大, 电解池电流密度会下降^[52], 性能降低.

微重力环境中电解池内的气泡有三种运动特征: 单气泡生长、气泡合并和气泡运动, 可以用 h (泡沫层厚度)、 d_B (气泡直径)、 θ (动态接触角)、 n (合并所用的时间) 和 τ (气泡在电极表面的停留时间) 等参数来进行表征^[53,54]. 其中单气泡生长过程可分为成核、生长、直径超过电极三个阶段^[55]. 气泡生长后有脱离电极横向运动、在电极表面持续缓慢增长、初始生长后停滞三种特殊情况. 其中气泡的横向运动是影响电解池性能的主要因素, 横向运动可以增强向电极的传质并提高电解池的产氢量, 但是同时也会加剧电解池的欧姆损失^[56].

重力因素通过影响电极表面的气泡运动、大小和数量, 对电解池电位产生影响. 微重力下生成的气泡体积更大、数量更多, 其中一大部分会附着在电极表面, 图 3 所示为不同重力条件下电解池电极表面的两相流观测结果. 另一部分则会脱离电极, 氢气泡脱离的部分更多, 而氧气泡附着的较多^[57]. 脱离的气泡运动缓慢甚至静止不动^[58], 电解池内欧姆电阻增大. 因此在产气量相同的情况下, 重力的减小会导致电解池电位增加^[59].

微重力下电解池性能降低主要是因为电解反应

表 1 非常规重力燃料电池实验研究总览

Table 1 Overview of experimental research on fuel cells under unconventional gravity

实验方法	重力水平	研究内容	发表年代	参考文献
国际空间站	μg	微重力, MFC, 可行性实验	2007	[12]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, DMFC, 两相流特征及电性能	2007	[30]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, DMFC, 两相流特征及电性能	2008	[29]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, DMFC, 电性能	2008	[31]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, DMFC, 两相流特征	2008	[32]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, DMFC, 不同放置条件	2009	[34]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, PEMFC, 两相流特征及电性能	2009	[37]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, DMFC, 甲醇进料流量及摩尔浓度	2010	[35]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, 全被动 DMFC, 不同倾角	2013	[33]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, PEMFC, 不同电流密度	2014	[40]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, PEMFC, 不同流场配置	2016	[41]
北京落塔	$<10^{-2} g, 3.6 s$	微重力, PEMFC, 不同负载	2017	[39]
抛物线飞机	$2 \times 10^{-2} g, 30 s$	微重力, DAAFC, 不同催化剂	2017	[42]
抛物线飞机	$2 \times 10^{-2} g, 20 s$	微重力, DAAFC, 不同催化剂载体	2017	[43]
货运飞船	μg	微重力, PEMFC, 新闻报导, 数据未见公开	2022	[13]

产生的气泡在电极表面形成了一层保护层, 导致水分子无法与电极表面接触, 电解反应无法进行, 且气泡层的欧姆电阻较大, 电子要穿过气泡层就需要更高的电压. 这就导致无论使用的是何种电解质, 阴极与阳极的电化学反应在微重力环境下都受到了极大的阻碍, 电化学反应速率下降, H_2/O_2 生产速率降低.

研究发现, 使用纳米结构电极可以促进氢气泡离开电极表面, 提高微重力下电解池的电流密度^[60]. 利用 p 型磷化铟光吸收剂和铈电催化剂组成半导体-电催化剂系统, 再使用阴影纳米圈光刻技术对催化剂进行纳米结构处理, 能够提高微重力下的电解效率^[61]. 中国设计并制备了具有微米结构的亲气疏水仿生 Janus 功能界面, 并构建了基于气液分离界面的电解水制氢器件, 将析氢电极表面微气泡的脱附时间减小至 2.4 ms^[62]. 因为微重力条件下亲水表面气泡接触角更小^[63], 有助于气泡脱离, 因此可以通过在电极表面沉积铈来控制电极表面的润湿性, 从而促进氢气泡离开电极表面^[64].

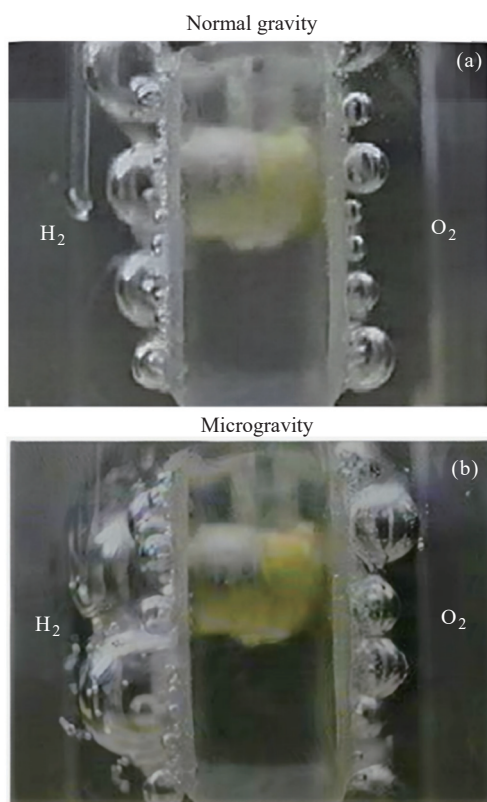


图 3 电解池电极表面两相流观测^[54]

Fig. 3 Observation of two-phase flow in electrolytic cell electrode surface^[54]

在微重力环境中, 利用外部磁场驱动排除气相产物, 可以强化水电解制氢/氧^[65]. 因为空间的微重力环境优势, 电解产生的氢气能够与水高度融合产生氢分子水, 这可以帮助宇航员对抗氧化威胁^[66].

电解水的循环利用, 依赖高效的气液分离, 目前常用的是静态水气分离技术. Zhao 等^[67]利用抛物线飞机研究发现, 静态分离器首级分离室内流型和再循环管道里的含气率总体上都不随重力水平的变化而变化, 这表明静态分离器的性能与重力水平基本无关.

由已有研究结果可知, 微重力下电解池内气泡数量增多、体积变大, 并会停留在电极表面阻碍电解质的传质, 妨碍电化学反应的进行, 从而对电解池性能造成不利影响. 采用外部磁场驱动气相分离、静态水气分离、纳米电极结构等方法能够有效提高空间电解效率.

3.2 超重力条件下的电解池实验

超重力条件可以明显提高水电解池的性能: 在 190 g (地面常重力水平为 1 g) 超重力条件下, 电解池电压降低的幅度可高达 700 mV^[68]. Wang 研究了超重力对水电解制氢的影响^[69], 发现电解池析氢电阻随重力的增加而降低, 因为氢气泡在超重力场下更容易形成并会从电极表面迅速脱离, 在电极表面的气体覆盖明显减少^[70]. 恒定电压时, 72 g 超重力场下氢的生成速率比正常重力条件下增加 20%^[71]. 超重力对氯碱电解也有提高性能的作用, 氯碱电解槽电压随重力系数的增加而降低, 并且电流密度越大, 槽电压降低的程度越大^[72]. 超重力对电解池性能的提升如图 4 所示, 图 4 中 G 表示重力系数 (常重力的倍数).

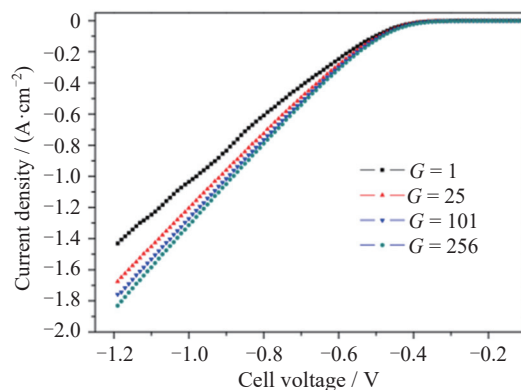


图 4 不同重力系数 G 下的电解池极化曲线^[70]

Fig. 4 Electrolytic cell polarization curves under different gravity coefficients G ^[70]

超重力下电解反应产生的气泡以远超重力下的速度离开电极表面, 增加了水分子与电极表面接触的机会, 电化学反应速率增加, 产气速率也增加. 且电解池内部的欧姆电阻因为气泡的快速去除而降低, 电子要穿过气泡层只需要较低的电压.

针对超重力对水电解的促进作用, Qiu 等^[73]研究了超重力场对镍电极制氢的强化作用: 泡沫镍电极有较低的槽电压, 更利于节能. 而 Yu 等^[74]则提出超重力场-电解液循环耦合, 可以强化水电解析氢的性能, 且超重力系数越大、电流密度越高, 槽电压的降幅越大, 电解效率越高. 目前已经证实通过旋转产生超重力可以提高电解池的效率^[75,76].

已有实验结果表明, 超重力环境能够促进电解质中的气泡离开电极表面, 促进了水电解反应的发生,

对水电解池的性能有较大提升作用. 重力水平越高, 性能提升的幅度越大.

分析可得, 电解池在微重力环境中生成的气泡难以脱离电极表面, 生长的尺寸更大, 容易在电极附近形成气泡层阻碍电解反应的继续进行, 从而导致电解池电位升高. 超重力对电解池的影响与微重力恰恰相反, 生成的气泡迅速脱离电极表面, 能明显提高电解效率.

表 2 中按时间顺序汇总了国内外非常规重力下电解池的实验研究, 对比表 1 和表 2 可以发现, 目前的非常规重力实验, 仅见针对燃料电池或电解池单独开展的. 而在空间的长期任务中应用潜力更大的是由燃料电池和电解池组合而成的再生燃料电池系统^[77], 其是未来空间电源发展的主要方向之一. 针对再生燃

表 2 非常规重力电解池实验研究总览
Table 2 Overview of experimental research on electrolytic cells under unconventional gravity

研究方法	重力水平	研究内容	发表年代	参考文献
抛物线飞机	$2 \times 10^{-2} g$, 20~25 s	微重力, 气泡特性 (未发生合并), 电流密度	1993	[52]
神奈川落井	$10^{-4} g$, 10 s	微重力, 不同电压下气泡特性及电流密度变化	1998	[49]
离心机	1~190 g	超重力, 不同温度与重力水平下电势变化	2002	[68]
神奈川落井	$10^{-5} g$, 8 s	微重力, 不同电解质中的气泡特性	2003	[53]
神奈川落井	$10^{-5} g$, 8 s	微重力, 气泡运动特性; 提出特征参数	2006	[54]
神奈川落井	$10^{-5} g$, 8 s	微重力, 气泡膜厚度与欧姆电阻相关	2006	[51]
离心机	1~256 g	超重力, 氯电解反应	2008	[72]
神奈川落井	$10^{-5} g$, 8 s	微重力, 单气泡生长过程	2009	[55]
离心机	1~256 g	超重力, 超重力的影响机理; 析氢反应	2009	[70]
离心机	1~451 g	超重力, 不同重力水平与电流密度下的电压损失	2010	[71]
离心机	1~170 g	超重力, 旋转电池	2011	[75]
神奈川落井	$10^{-5} g$, 10 s	微重力, 静态排水与静态馈电	2013	[50]
抛物线飞机	$10^{-2} g$, 20 s	微重力, 两相电解过程	2013	[57]
抛物线飞机	$10^{-2} g$, 20 s	微重力, 碱性水电解; 气泡过电势	2014	[59]
抛物线飞机	$10^{-5} g$, 20 s	微重力, 单气泡生长规律; 电极表面湿润性的影响	2014	[63]
不来梅落塔	$10^{-3} g$, 3.6 s	微重力, 质子交换电解池; 气泡运动	2015	[58]
不来梅落塔	$10^{-6} g$, 9.3 s	微重力, 光电化学反应; 纳米结构电极	2018	[60]
离心机	1~271.6 g	超重力, 镍电极; 泡沫镍孔径	2018	[73]
不来梅落塔	$10^{-6} g$, 9.3 s	微重力, 半导体-催化剂系统; 纳米结构	2019	[61]
离心机	1~84.5 g	超重力, 超重力场-电解液循环耦合	2021	[74]
抛物线飞机	$10^{-2} g$, 22 s	微重力, 氢气单气泡运动特征	2021	[56]
不来梅落塔	$10^{-6} g$, 9.2 s	微重力, 光化学电解; 电极表面沉积铈	2022	[64]
离心机 + 抛物线飞机	0~8 g	微重力、月球重力、火星重量以及超重力, 析氧电解效率	2022	[26]

料电池系统的非常规重力实验尚未见诸公开报道。但是目前已有针对空间微重力环境设计的同时具备无姿态供水和无姿态排水能力的再生燃料电池专利^[78], 也有在微重力下取得较好水分离效果的离心气液分离装置专利^[79]。这些都有助于未来空间大功率再生燃料电池系统的研发。

4 结论

对非常规重力下燃料电池与电解池性能变化规律进行了分析, 深入讨论其机理, 并根据目前的实验研究现状, 为未来的研究方向提供了建议, 具体结论如下。

(1) 在常重力向非常规重力转变时, 燃料电池和电解池内宏观尺度流道中的两相流会受到影响, 进而影响燃料电池和电解池的传质。浓差极化受影响越大, 燃料电池或电解池的性能受影响就越大。

(2) 目前已公开的燃料电池实验数据大多来自短时微重力环境实验, 而缺少燃料电池的超重力及长期微重力环境中的实验数据, 建议未来开展相关方向的实验研究。

(3) 目前非常规重力条件下电解池实验结果多于燃料电池, 如何在确保安全可靠的前提下提高空间电解制氧效率, 对提升在轨维护技术水平及载人深空探测能力具有重要意义。

(4) 目前仍未见有公开报道再生燃料电池系统的非常规重力实验。针对再生燃料电池系统在空间环境中的应用潜力, 有必要开展相关科技问题的基础实验研究以及在轨实验验证。

(5) 非常规重力条件下的燃料电池和电解池实验不仅有助于促进流体物理及热物理学与电化学之间的学科交叉, 还将为空间再生燃料电池系统的研发提供数据依据。鉴于天基微重力环境实验资源 (特别是长期持续微重力条件) 具有显著的稀缺性特征, 建议对基础科学实验与在轨技术验证实施协同推进策略, 采用基础研究与应用验证并重的双轨并行发展模式。

参考文献

- [1] WU Feng, YE Fang, GUO Hang, *et al.* The application of fuel cells in aerospace[J]. *Battery Bimonthly*, 2007, **37**(3): 238-240 (吴峰, 叶芳, 郭航, 等. 燃料电池在航天中的应用[J]. 电池, 2007, **37**(3): 238-240)
- [2] YANG Ziguang, YE Fang, GUO Hang, *et al.* Progress of space power technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, **31**(6): 1231-1237 (杨紫光, 叶芳, 郭航, 等. 航天电源技术研究进展[J]. 化工进展, 2012, **31**(6): 1231-1237)
- [3] SCOTT John H. The development of fuel cell technology for electric power generation: from NASA's manned space program to the "Hydrogen Economy" [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, **94**(10): 1815-1825
- [4] ZHOU Jie, ZHENG Yingping, XIE Jihong. Recent advances in hydrogen generation methods and its prospects for applications in fuel cell[J]. *Chemical Industry Times*, 2007, **21**(5): 71-75 (周洁, 郑颖平, 谢吉虹. 制氢技术研究进展及在燃料电池中的应用前景[J]. 化工时刊, 2007, **21**(5): 71-75)
- [5] KABIROV V A, SEMENOV V D, TORGAIEVA D S, *et al.* Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(24): 9057-9070
- [6] BELZ S, GANZER B, MESSERSCHMID E, *et al.* Hybrid life support systems with integrated fuel cells and photobioreactors for a lunar base[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, **24**(1): 169-176
- [7] MENG Long, WANG Zhe, WANG Lu, *et al.* Novel and efficient purification of scrap Al-Mg alloys using supergravity technology[J]. *Waste Management*, 2021, **119**: 22-29
- [8] XU Siyu, LI Haibing, YIN Zhao. Analysis on the technical upgrades to the international space station environmental control and life support system[J]. *Aerospace China*, 2024(4): 17-24 (许思宇, 李海兵, 尹钊. "国际空间站"环境控制与生命保障系统技术升级分析[J]. 中国航天, 2024(4): 17-24)
- [9] PEI Zhaoyu, PENG Jing, ZHANG Ming, *et al.* Key technologies and development trend of power system for international lunar research station[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, **43**(22): 8689-8700 (裴照宇, 彭兢, 张明, 等. 月球科研站能源系统关键技术及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2023, **43**(22): 8689-8700)
- [10] KANG Qi, HOU Rui. The applications of microgravity fluid management in the aerospace engineering[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, **29**(6): 328-335 (康琦, 侯瑞. 微重力流体管理在航天工程中的应用[J]. 自然杂志, 2007, **29**(6): 328-335)
- [11] HAN Lin, WANG Haiming, FAN Weiwei, *et al.* Progress of scientific research and application on the international space station in 2020[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, **27**(4): 530-536 (韩淋, 王海名, 范唯唯, 等. 2020年国际空间站科研与应用进展[J]. 载人航天, 2021, **27**(4): 530-536)
- [12] DE VET S J, RUTGERS R. From waste to energy: first experimental bacterial fuel cells onboard the international space station[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2007, **19**(5/6): 225-229
- [13] 付毅飞. 我国首台空间应用燃料电池升空 [N]. 科技日报, 2022-11-14(005)

- [14] STARR Michelle. Breathe deep: how the ISS keeps astronauts alive[EB/OL]. (2015-03-19)[2024-11-07] <https://www.cnet.com/science/breathe-deep-how-the-iss-keeps-astronauts-alive/>
- [15] LI Junrong, YIN Yongli, ZHOU Kanghan, *et al.* Progress of oxygen generation technology by water electrolysis in space station[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, **26**(3): 215-220 (李俊荣, 尹永利, 周抗寒, 等. 空间站电解制氧技术研究进展 [J]. 航天医学与医学工程, 2013, **26**(3): 215-220)
- [16] 资源再生系统助力空间站长期运行 [J]. 中国科学探险, 2022(4): 28-29
- [17] 韦明罡, 万士昕, 姚康庄, 等. 国家微重力实验室落塔及微重力实验研究 [J]. 载人航天, 2007(4): 1-3, 22
- [18] ZHANG Xiaolian, YUAN Longgen, WU Wendong, *et al.* Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC)[J]. *Science in China Series E Engineering & Materials Science*, 2005, **48**(3): 305-316 (张孝谦, 袁龙根, 吴文东, 等. 国家微重力实验室百米落塔实验设施的几项关键技术 [J]. 中国科学 E 辑, 2005, **35**(5): 523-534)
- [19] KUFNER Ewald, BLUM J, CALLENS N, *et al.* ESA's drop tower utilisation activities 2000 to 2011[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2011, **23**(4): 409-425
- [20] LEKAN Jack, NEUMANN Eric S, SOTOS Raymond G. Capabilities and constraints of NASA's ground-based reduced gravity facilities[C]//The Second International Microgravity Combustion Workshop. Cleveland, Ohio, USA: NASA Lewis Research Center, 1993: 45-60
- [21] QU Bin, WANG Qi, WANG Haiping, *et al.* Zero-g aircraft flight method research[J]. *Flight Dynamics*, 2007, **25**(2): 65-67, 71 (屈斌, 王启, 王海平, 等. 失重飞机飞行方法研究 [J]. 飞行力学, 2007, **25**(2): 65-67, 71)
- [22] TIAN Dake, FAN Xiaodong, ZHENG Xijian, *et al.* Research status and prospect of micro-gravity environment simulation for space deployable antenna[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, **57**(3): 11-25 (田大可, 范小东, 郑夕健, 等. 空间可展开天线微重力环境模拟研究现状与展望 [J]. 机械工程学报, 2021, **57**(3): 11-25)
- [23] ZHU Zhanxia, YUAN Jianping. Construction of Microgravity Environment for Spacecraft Operation[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013 (朱战霞, 袁建平. 航天器操作的微重力环境构建 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013)
- [24] PLETZER Vlafimir. Short duration microgravity experiments in physical and life sciences during parabolic flights: the first 30 ESA campaigns[J]. *Acta Astronautica*, 2004, **55**(10): 829-854
- [25] LIN Wei'an, LI Junchao, ZHAO Yu, *et al.* Exploration on opening and sharing of ZJU400 hypergravity centrifuge system[J]. *Experimental Technology and Management*, 2019, **36**(11): 282-285 (林伟岸, 李俊超, 赵宇, 等. ZJU400 超重力离心机系统开放共享探讨 [J]. 实验技术与管理, 2019, **36**(11): 282-285)
- [26] LOMAX Bethane A, JUST Gunter H, MCHUGH Patrick J, *et al.* Predicting the efficiency of oxygen-evolving electrolysis on the Moon and Mars[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 583
- [27] MEHTA Viral, COOPER Joyce Smith. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, **114**(1): 32-53
- [28] DUBALE Amare Aregahegn, ZHENG Yuanyuan, WANG Honglei, *et al.* High-performance bismuth-doped nickel aerogel electrocatalyst for the methanol oxidation reaction[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, **59**(33): 13891-13899
- [29] ZHAO Jianfu, GUO Hang, YE Fang, *et al.* Experimental study on two-phase flow and power performance of DMFC utilizing the Drop Tower Beijing[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(1): 17-21 (赵建福, 郭航, 叶芳, 等. DMFC 内部气液两相流动与电性能的短时落塔实验研究 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(1): 17-21)
- [30] GUO Hang, ZHAO Jianfu, YE Fang, *et al.* Two-phase flow in fuel cells in short-term microgravity condition[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2008, **20**(3/4): 265-269
- [31] YE Fang, ZHAO Jianfu, LÜ Cuiping, *et al.* Study of two-phase flow in fuel cells under short-term microgravity [C]//Proceedings of Annual Conference of Multi-Phase Flow. Daqing: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2007: 44-51 (叶芳, 赵建福, 律翠萍, 等. 燃料电池短时微重力条件下两相流研究 [C]//2007 多相流学术会议论文集. 大庆: 中国工程热物理学会, 2007: 44-51)
- [32] GUO Hang, ZHAO Jianfu, LÜ Cuiping, *et al.* Experimental study of fuel cells performance in short term microgravity condition[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, **29**(5): 865-867 (郭航, 赵建福, 律翠萍, 等. 短时微重力条件下燃料电池性能实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2008, **29**(5): 865-867)
- [33] XU Longyun. Study of Performance of Fuel Cells and Electrolytic Cells Based on Solid Electrolyte[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013 (徐龙云. 基于固态电解质的电解池及燃料电池性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013)
- [34] GUO Hang, WU Feng, YE Fang, *et al.* Two-phase flow in anode flow field of a small direct methanol fuel cell in different gravities[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(6): 1576-1582
- [35] YE Fang, WU Feng, ZHAO Jianfu, *et al.* Experimental investigation of performance of a miniature direct methanol fuel cell in short-term microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2010, **22**(3): 347-352
- [36] BAROUTAJI Ahmad, WILBERFORCE Tabbi, RAMADAN Mohamad, *et al.* Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, **106**: 31-40
- [37] GUO Hang, ZHAO Jianfu, LIU Xuan, *et al.* Experimental Study of performance of proton exchange membrane fuel cells in short-term microgravity condition[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(8): 1376-1378 (郭航,

- 赵建福, 刘璿, 等. 质子交换膜燃料电池短时微重力性能实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2009, **30**(8): 1376-1378)
- [38] GUO Hang, LIU Xuan, ZHAO Jianfu, *et al.* Effect of low gravity on water removal inside Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) with different flow channel configurations[J]. *Energy*, 2016, **112**: 926-934
- [39] GUO Hang, LIU Xuan, ZHAO Jianfu, *et al.* Gas-liquid two-phase flow behaviors and performance characteristics of proton exchange membrane fuel cells in a short-term microgravity environment[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, **353**: 1-10
- [40] GUO Hang, LIU Xuan, ZHAO Jianfu, *et al.* Experimental study of two-phase flow in a proton exchange membrane fuel cell in short-term microgravity condition[J]. *Applied Energy*, 2014, **136**: 509-518
- [41] GUO Qing, YE Fang, GUO Hang, *et al.* Gas/water and heat management of PEM-based fuel cell and electrolyzer systems for space applications[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, **29**(1/2): 49-63
- [42] ACEVEDO R, POVENTUD-ESTRADA C M, MORALES-NAVAS Camila, *et al.* Chronoamperometric study of ammonia oxidation in a direct ammonia alkaline fuel cell under the influence of microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, **29**(4): 253-261
- [43] POVENTUD-ESTRADA C M, ACEVEDO R, MORALES C, *et al.* Microgravity effects on chronoamperometric ammonia oxidation reaction at platinum nanoparticles on modified mesoporous carbon supports[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, **29**(5): 381-389
- [44] RABAEY L, OSSIEUR W, VERHAEGE M, *et al.* Continuous microbial fuel cells convert carbohydrates to electricity[J]. *Water Science and Technology*, 2005, **52**(1/2): 515-523
- [45] NI Meng, LEUNG M K H, SUMATHY K. Progress of hydrogen production through water electrolysis[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, **18**(5): 5-9 (倪萌, LEUNG M K H, SUMATHY K. 电解水制氢技术进展 [J]. 能源环境保护, 2004, **18**(5): 5-9)
- [46] WANG Fei, ZHOU Kanghan, GUAN Chunlei, *et al.* Application status and development of PEM water electrolysis in aerospace field[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2020, **37**(2): 23-29 (王飞, 周抗寒, 管春磊, 等. PEM水电解技术在航天上的应用现状与发展趋势 [J]. 上海航天 (中英文), 2020, **37**(2): 23-29)
- [47] 曾庆堂, 郑传先. 空间站水电解制氧技术 [J]. 航天医学与医学工程, 1990, **3**(3): 222-226
- [48] 周抗寒, 韩永强, 李俊荣. 空间站电解制氧技术研究 [J]. 载人航天, 2003(5): 25-29
- [49] IWASAKI A, KANEKO H, ABE Y, *et al.* Investigation of electrochemical hydrogen evolution under microgravity condition[J]. *Electrochimica Acta*, 1998, **43**(5/6): 509-514
- [50] SAKURAI Masato, SONE Yoshitsugu, NISHIDA Tetsuo, *et al.* Fundamental study of water electrolysis for life support system in space[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, **100**: 350-357
- [51] KIUCHI Daisuke, MATSUSHIMA Hisayoshi, FUKUNAKA Yasuhiro, *et al.* Ohmic resistance measurement of bubble froth layer in water electrolysis under microgravity[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2006, **153**(8): E138-E143
- [52] KANEKO Hiroko, TANAKA Kotaro, IWASAKI Akira, *et al.* Water electrolysis under microgravity condition by parabolic flight[J]. *Electrochimica Acta*, 1993, **38**(5): 729-733
- [53] MATSUSHIMA H, NISHIDA T, KONISHI Y, *et al.* Water electrolysis under microgravity: part 1. experimental technique[J]. *Electrochimica Acta*, 2003, **48**(28): 4119-4125
- [54] MATSUSHIMA H, FUKUNAKA Y, KURIBAYASHI K. Water electrolysis under microgravity: part II. description of gas bubble evolution phenomena[J]. *Electrochimica Acta*, 2006, **51**(20): 4190-4198
- [55] MATSUSHIMA Hisayoshi, KIUCHI Daisuke, FUKUNAKA Yasuhiro, *et al.* Single bubble growth during water electrolysis under microgravity[J]. *Electrochemistry Communications*, 2009, **11**(8): 1721-1723
- [56] BASHKATOV Aleksandr, YANG Xuegeng, MUTSCHKE Gerd, *et al.* Dynamics of single hydrogen bubbles at Pt microelectrodes in microgravity[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, **23**(20): 11818-11830
- [57] DERHOUMI Zine, MANDIN Philippe, ROUSTAN Hervé, *et al.* Experimental investigation of two-phase electrolysis processes: comparison with or without gravity[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2013, **43**(12): 1145-1161
- [58] CHENG Jun. Study of Performance and Two-Phase Flow of PEM Electrolyzer Under Different Gravity Conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015 (程俊. 不同重力下质子交换膜电解池性能及其内部两相流研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015)
- [59] MANDIN Philippe, DERHOUMI Zine, ROUSTAN Hervé, *et al.* Bubble over-potential during two-phase alkaline water electrolysis[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, **128**: 248-258
- [60] BRINKERT Katharina, RICHTER Matthias H, AKAY Ömer, *et al.* Efficient solar hydrogen generation in microgravity environment[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 2527
- [61] BRINKERT Katharina, AKAY Ömer, RICHTER Matthias H, *et al.* Experimental methods for efficient solar hydrogen production in microgravity environment[J]. *Journal of Visualized Experiments: Jove*, 2019(154): 59122
- [62] ZHANG Ce, YANG Jinlu, YIN Zhao, *et al.* Extraterrestrial hydrogen production technology based on bionic functional water splitting devices[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, **43**(6): 83-90 (张策, 杨金禄, 尹钊, 等. 基于仿生功能器件的地外水分解制氢技术 [J]. 中国空间科学技术, 2023, **43**(6): 83-90)
- [63] SAKUMA Go, FUKUNAKA Yasuhiro, MATSUSHIMA Hisayoshi. Nucleation and growth of electrolytic gas bubbles under microgravity[J]. *International Journal of Hy-*

- drogen Energy*, 2014, **39**(15): 7638-7645
- [64] AKAY Ömer, POON Jeffery, ROBERTSON Craig, *et al.* Releasing the bubbles: nanopotographical electrocatalyst design for efficient photoelectrochemical hydrogen production in microgravity environment[J]. *Advanced Science*, 2022, **9**(8): 2105380
- [65] Chongqing University. Device for driving and enhancing electrolytic water through microgravity magnetic field for oxygen production/hydrogen production: CN, 20161055-3399.5[P]. 2016-11-23 (重庆大学. 一种微重力磁场驱动强化电解水制氧/制氢的装置: CN, 201610553399.5[P]. 2016-11-23)
- [66] Shenzhou Tianchen Technology Industry Co. Ltd. Hydrogen molecule water preparation device and method under space microgravity environment: CN, 201810882126.4[P]. 2019-01-01 (航天神舟生物科技集团有限公司. 空间微重力环境下的氢分子水制备装置和方法: CN, 201810882126.4[P]. 2019-01-01)
- [67] ZHAO Jianfu, PENG Chao, LI Jing, *et al.* Experimental study on performance of a static water-air two-phase separator aboard reduced gravity airplane[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, **32**(5): 799-802 (赵建福, 彭超, 李晶, 等. 静态水气分离特性的失重飞机实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, **32**(5): 799-802)
- [68] CHENG H, SCOTT K, RAMSHAW C. Intensification of water electrolysis in a centrifugal field[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2002, **149**(11): D172
- [69] WANG Mingyong. Intensified Electrolysis for Hydrogen Production and Electrodeposition of Electrode Materials with Excellent Properties for Hydrogen Evolution Reaction Under Super Gravity Field[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011 (王明涌. 超重力强化电解制氢及电沉积高效析氢电极 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2011)
- [70] WANG Mingyong, WANG Zhi, GUO Zhancheng. Understanding of the intensified effect of super gravity on hydrogen evolution reaction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**(13): 5311-5317
- [71] WANG Mingyong, WANG Zhi, GUO Zhancheng. Water electrolysis enhanced by super gravity field for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, **35**(8): 3198-3205
- [72] WANG Mingyong, XING Haiqing, WANG Zhi, *et al.* Investigation of chlor-alkali electrolysis intensified by super gravity[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2008, **24**(3): 520-526 (王明涌, 邢海青, 王志, 等. 超重力强化氯碱电解反应 [J]. 物理化学学报, 2008, **24**(3): 520-526)
- [73] QIU Xinle, MENG Long, ZHONG Yiwei, *et al.* Effect of super gravity on the hydrogen production enhancement by nickel electrode electrolysis[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2018, **9**(6): 11-17 (邱鑫乐, 孟龙, 钟怡玮, 等. 超重力对镍电极电解制氢的强化研究 [J]. 有色金属科学与工程, 2018, **9**(6): 11-17)
- [74] YU Yu, QIU Xinle, ZHONG Yiwei, *et al.* Enhancing water electrolysis for hydrogen production by coupling super gravity field and electrolyte[J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2021, **41**(3): 10-14 (余瑜, 邱鑫乐, 钟怡玮, 等. 超重力场-电解液循环耦合强化水电解制氢 [J]. 江西冶金, 2021, **41**(3): 10-14)
- [75] LAO L, RAMSHAW C, YEUNG H. Process intensification: water electrolysis in a centrifugal acceleration field[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2011, **41**(6): 645-656
- [76] GUO Yuejiu. Water electrolysis hydrogen preparing method and device employing super-rotating centrifugal gravity: CN, 201210518651.0[P]. 2013-03-20 (郭越玖. 一种超旋离心重力水电解制氢方法及装置: CN, 201210518651.0[P]. 2013-03-20)
- [77] ARSAILS Alexandros, PAPANASTASIOU Panos, GEORG-HIOU George E. A comparative review of lithium-ion battery and regenerative hydrogen fuel cell technologies for integration with photovoltaic applications[J]. *Renewable Energy*, 2022, **191**: 943-960
- [78] Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences. Renewable fuel cell: CN, 201811527777.8[P]. 2020-06-23 (中国科学院大连化学物理研究所. 一种可再生燃料电池: CN, 201811527777.8[P]. 2020-06-23)
- [79] Beijing Aerospace Propulsion Institute. High-pressure high-flow microgravity centrifugal gas and liquid separation device: CN, 201610169496.4[P]. 2016-06-08 (北京航天动力研究所. 一种高压大流量微重力离心气液分离装置: CN, 201610169496.4[P]. 2016-06-08)

作者简介



李自航 男, 2001年3月出生于河南省平顶山市, 现为北京工业大学动力工程及工程热物理专业硕士研究生, 主要研究方向为空间应用燃料电池、质子交换膜燃料电池阴极介质切换。

E-mail: Lizihang0306@sohu.com



叶芳 (通信作者) 女, 1973年出生于浙江省江山市, 北京工业大学机械与能源工程学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为传热传质流动、氢能与燃料电池电解池, 且在与重力相关的方向上形成特色。

E-mail: yefang@bjut.edu.cn