

DMFC 内部气液两相流动与电性能的 短时落塔实验研究^{*}

赵建福¹ 郭航² 叶芳² 万士昕¹ 韦明罡¹
吴峰² 律翠萍² 马重芳²

¹(中国科学院力学研究所 国家微重力实验室 北京 100080)

²(北京工业大学环境与能源工程学院)

摘要 利用国家微重力实验室落塔提供的短时微重力实验环境,对常重力和微重力条件下直接甲醇燃料电池(DMFC)内部的气液两相流动形态和相应电性能等的影响进行了实验研究,发现在微重力条件下,DMFC阳极流道内CO₂气泡速度很小,气泡尺寸随着时间的推移而不断长大,甚至堵塞流道;流道堵塞现象随电流增大而急剧强化.电性能曲线显示,在浓差极化区存在显著的重力效应,电性能的恶化随浓差极化程度的加强而增大.

关键词 DMFC; 两相流动; 微重力; 落塔

中图法分类号 V 524

Experimental Study on Two-Phase Flow and Power Performance of DMFC Utilizing the Drop Tower Beijing

ZHAO Jianfu¹ GUO Hang² YE Fang² WAN Shixin¹ WEI Minggang¹
WU Feng² LÜ Cuiping² MA Chongfang²

¹(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology)

Abstract Utilizing the Drop Tower Beijing/NMLC, the characteristics of two-phase gas-liquid flow and power performance of a direct methanol fuel cell (DMFC) are studied experimentally in normal and microgravity conditions. It's found that CO₂ bubbles in anode channels of DMFC move much slowly in microgravity, and that their shapes change from ellipsoid to globosity and their sizes increase with time, even block the whole channel and then the flow pattern changes into slug flow gradually. Larger current density, more easily is it to block the channel. It's also shown in the power curves that there exists an evident influence of gravity in the regime of the concentration polarization. The diminution of the power performance of DMFC in microgravity increases with the degree of the concentration polarization.

Key words DMFC, Two-phase flow, Microgravity, Drop tower

* 国家自然科学基金项目(50406010, 10432060),北京市重点实验室开放基金和北京市属市管高等学校人才强教计划项目共同资助
2007-08-22 收到原稿, 2007-10-28 收到修定稿

1 引言

质子交换膜燃料电池因其环境友好、比功率高、能量转换效率高等优点,在军事、航天^[1]等领域一直受到人们的重视.近年来 NASA 等机构纷纷加强了针对航天应用方面的研究^{[2]~[6]},但限于空间实验机会等,目前尚未相关实验报道.

质子交换膜燃料电池内不仅有电化学反应,同时还存在着传热传质和两相流现象,而这些现象与电化学反应伴随发生并相互影响,更增加了问题的复杂性.重力环境的差异无疑将改变燃料电池内部的流体分配和温度分布规律,从而影响电化学反应过程,进而对燃料电池的性能产生重要影响.

为深入理解不同重力条件下质子交换膜燃料电池内部复杂的传热传质和两相流现象及与电池电性能间的关系,探索我国航天用燃料电池研发和运控经验,本文利用国家微重力实验室百米落塔,采用直接甲醇燃料电池(DMFC),对在短时微重力条件下其内部传热传质和两相流现象及电性能开展了实验研究.落塔实验分两个阶段,分别针对甲醇溶液浓度、流量、外电路负载及安装方位等因素,对常

重力和微重力条件下 DMFC 内部伴有电化学反应的气液两相流动形态和相应电性能等的影响进行了实验研究*. 本文主要对内部流道垂直向上的情形进行分析和讨论.

2 实验装置与流程

DMFC 落塔实验系统如图 1 所示*,包括实验用 DMFC、气相回路、液相回路、温控单元及电阻负载等.实验过程控制、数据采集与存储等则由国家微重力实验室落舱实验系统负责,输入范围 0~5 V, 8 位 AD 转换,采样频率为 125 Hz/通道.限于落舱内部尺寸、重量等条件,实验中电池负载由功率 5 W、阻值 0.1~1 Ω 的若干固定电阻串/并联而成.

实验用带透明窗口的可视化 DMFC 结构,如图 2 所示.在图 2 中,膜电极组件(Membrane Electrode Assembly, MEA)采用杜邦公司的 Nafion 117 膜,扩散层为碳布,阳极催化剂为载量 4 mg/cm² 的 Pt-Ru/C,阴极催化剂为载量 4 mg/cm² 的 Pt/C,有效面积为 25 cm².

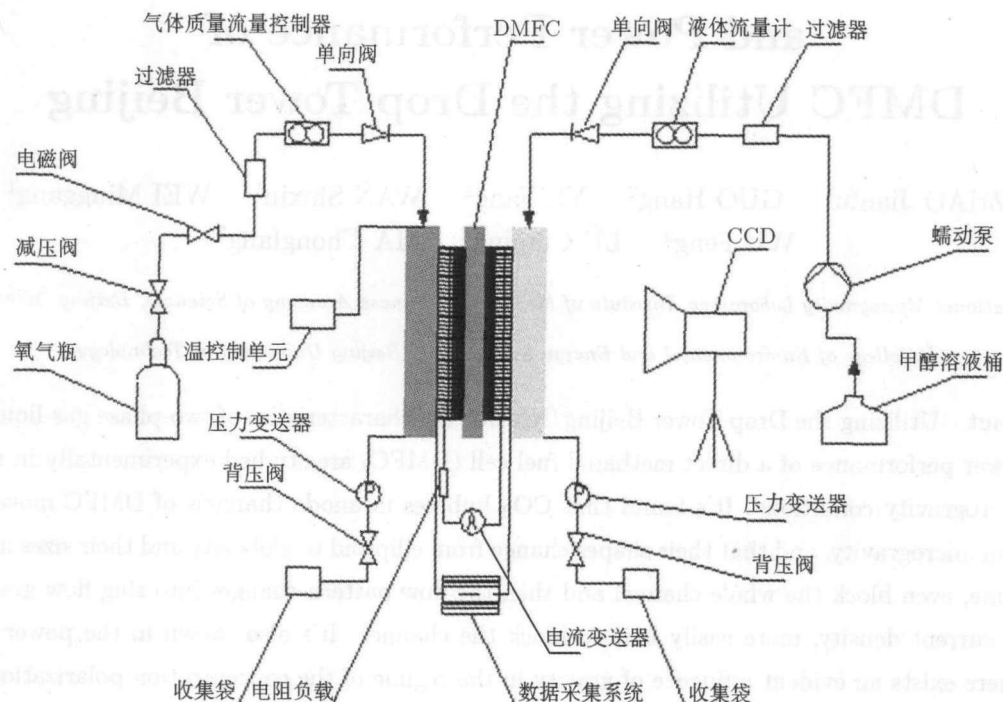


图 1 直接甲醇燃料电池落塔实验系统

Fig.1 Test rig for DMFC in the Drop Tower Beijing

* 律翠萍. 微重力下直接甲醇燃料电池阳极流道内两相流的实验研究. 北京工业大学硕士学位论文, 2006

吴峰. 小型直接甲醇燃料电池在微重力环境中的实验研究. 北京工业大学硕士学位论文, 2007

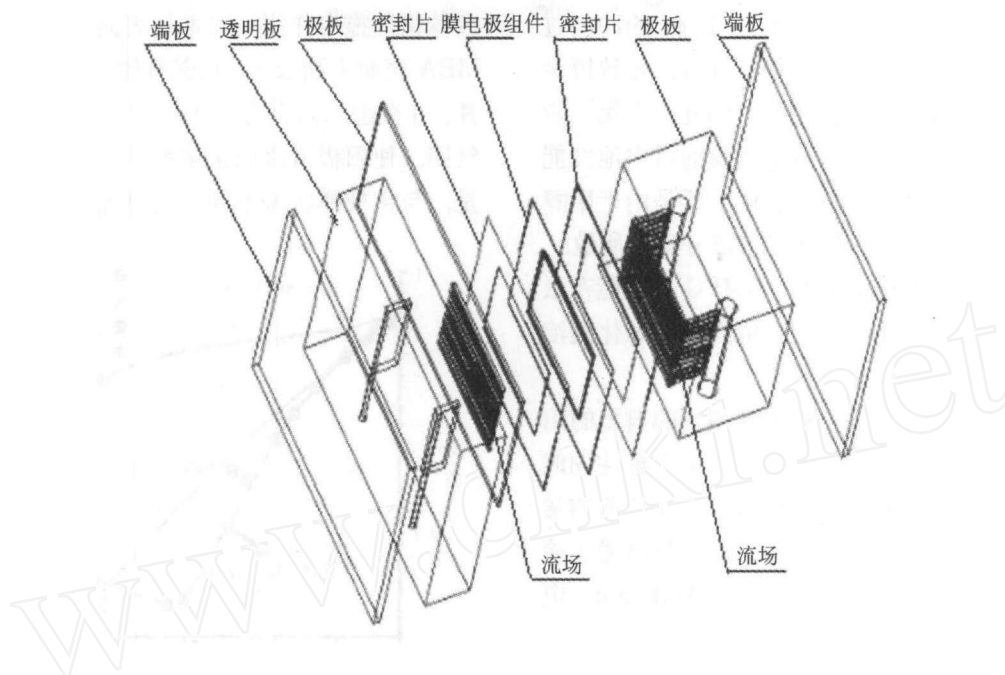


图 2 测试用直接甲醇燃料电池结构

Fig.2 Constructure of the test DMFC

在第一阶段实验中,极板采用镀金的不锈钢(1Cr18Ni9Ti)板,在第二阶段实验中则换为石墨板.流场采用平行流场,阴、阳两极均采用11条流道构成,其中,阴极流场直接刻在极板上,而为了观测阳极 CO_2 气泡生长及气液两相流动特征,在薄集电板上刻出11条平行槽,外侧加盖密封垫片和10mm厚的聚碳酸酯板形成观测窗口,最后形成的阳极流道宽2.5mm,深2mm,脊宽为2mm,流道的长度为48mm.电池端板位于电池极板的外侧,固定并使阴、阳极两侧的极板适度夹紧膜和电极.为了充分利用电池余热,甲醇溶液先通过阴极端板预热后再由阳极端板进入电池.另外,为控制电池工作温度,在阴极端板放置有面积 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 、加热功率115W的加热片,并与温控系统相连接.实验中氧化剂为氧浓度大于99.995%的高纯氧,燃料(甲醇溶液)则采用浓度不小于99.5%分析纯级甲醇与去离子水配制而成.

阳极流道内的气液两相流动特征通过CCD记录下来.在第一阶段实验中,采用WN-938S型CCD,帧速25帧/s,分辨率480线.在第二阶段实验中换用VITcam CTC高速数码摄像机,帧速250帧/s,分辨率 1280×1024 pixel.照明均采用LED提供.

实验在国家微重力实验室落塔内完成,由于DMFC实验系统尺寸与重量的原因,落舱采用单舱结构,残余重力水平约 $10^{-2}g_0$ (这里, g_0 为地面重

力加速度).落塔实验开始前,首先需要用氮气吹扫清楚整个管路系统.其次,利用地面电源开启实验系统,设置液体流量、电池温度、气体流量等,待电池预热至设定温度后,测量开路电压及常重力条件下的实验数据与图像(为节省时间,在第二阶段实验时,常重力实验数据与图像采用释放前5s的结果).然后,封闭落舱,调整质心,并提升至落塔83m处待命(在提升及随后过程中,可以通过遥测、遥控系统在落塔中央控制室监测和控制整个实验过程).在确认落舱系统及DMFC实验系统均正常无误后,释放落舱.落舱进入回收网后,遥控关闭DMFC实验系统,待回收后开舱,读取实验数据和图像记录结果,检查实验系统状态,并清洗DMFC,以备后续实验.

3 实验结果

图3为第一阶落塔实验部分结果及与该阶段实验前后地面对比实验结果的比较.实验条件如下:电池工作温度 80°C ,阳极流道垂直向上,甲醇溶液进口流量 $5.6\text{mL}/\text{min}$,浓度 $0.5\text{mol}/\text{L}$,氧气进口流量 $400\text{mL}/\text{min}$,出口背压 0kPa (表压).图3中还标注了落塔实验日期,从中清楚显示了电池性能的变化.分析原因,最大可能在于不锈钢镀金层的

结合强度不足, 在落舱回收时高达 $15g_0$ 的冲击过载, 会引起极板和 MEA 间的相对位移, 导致镀金层剥落, 致使电极接触电阻增大. 因此, 在第二阶段实验中改用石墨极板后, 落塔实验前后电池性能的变化甚微, 这里微弱的性能恶化主要是由于甲醇透过 MEA 渗漏到阴极引起催化剂部分失效所致.

不过, 图 3 仍然明确说明, DMFC 电性能在浓差极化区存在显著的重力效应, 电性能的恶化随浓差极化程度的加强而增大.

图 4 显示了第二阶段实验中观测到的典型的阳极流道内部的气液两相流动特征. 图 4 中标注的时间零点对应落舱释放时刻, 即负值对应释放前的常重力条件, 而正值则对应微重力条件. 与前述实验条件不同的是甲醇溶液进口流量为 10 mL/min , 电流密度约 160 mA/cm^2 .

从图 4 可以看到, 在常重力条件下, CO_2 气泡在 MEA 表面生成后, 由于重力和流体粘性拖曳的共同作用, 在很小尺寸即脱落, 并以相当快的速度向出口运动, 在阳极流道内形成泡状流. 但是, 进入微重力环境后, MEA 表面生成的气泡, 只受到

流体粘性拖曳作用, 很难从表面脱落, 而是附着在 MEA 表面不断长大, 相邻气团足够大时会接触、合并, 并在进入微重力约 3s 前后, 形成明显的 Taylor 气团, 使阳极流道内呈现弹状流特征. 需要说明的是, 与常规弹状流不同, 这里气团的一个侧面是与

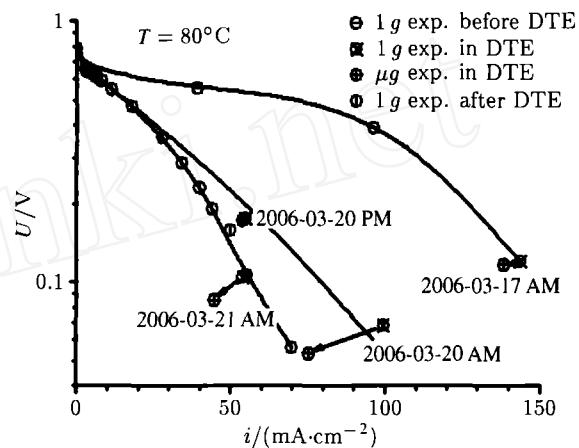


图 3 重力因素对直接甲醇燃料电池电性能的影响
Fig.3 Effects of gravity on electric performance of DMFC

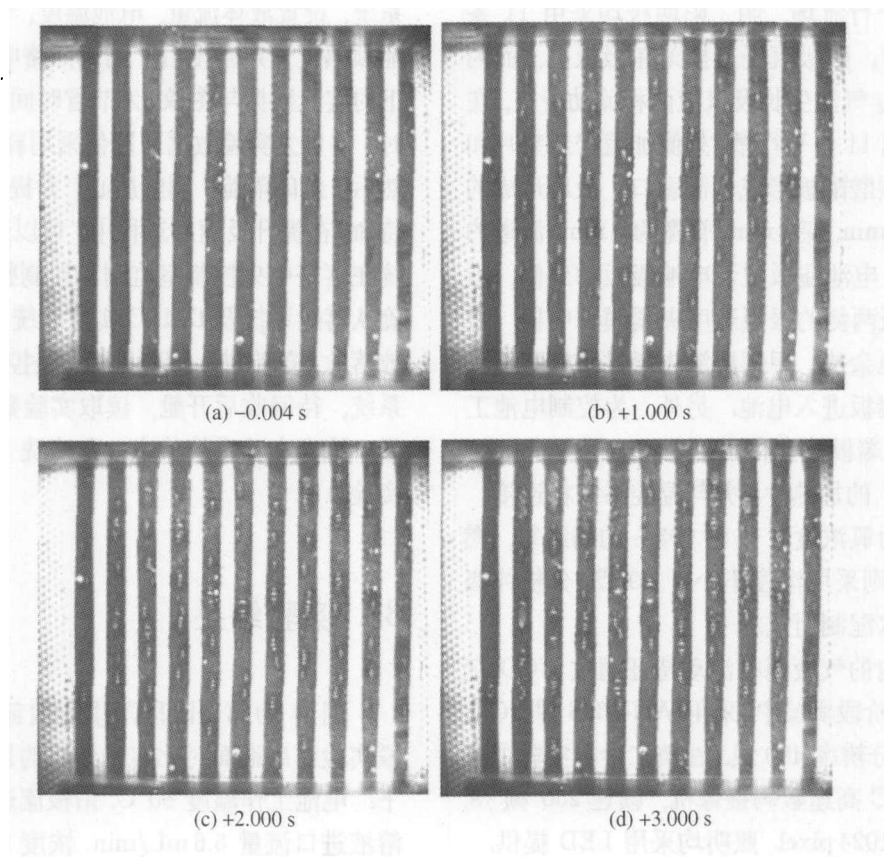


图 4 不同重力条件下 DMFC 阳极流道内的气液两相流动特征

Fig.4 Two-phase flow patterns in the anode channels of DMFC in different gravity

流道的一个侧面(即 MEA 表面)相连接的。因此, Taylor 气团的形成会阻碍甲醇向 MEA 运动, 导致传质恶化, 受传质影响的浓差极化现象提前出现, 并逐渐强化, 最终引起电池电性能的下降。实验还发现, 随着电流密度的增大, 产气量增加, 不同重力条件下的两相流动特征差异更为明显, 流道内甚至出现气团阻塞流道的现象, 并导致不同流道间流动特征的巨大差异。

可以推断, 在长期微重力环境下, 必须对流道及其内部流动速度进行细致的优化设计, 保证在失去浮力作用后气泡仍能及时脱落, 从而避免浓差极化现象的出现。

4 结论

通过对 DMFC 在不同重力条件下的阳极流道气液两相流特征和电性能进行实验研究和比较分析, 发现在微重力条件下, DMFC 阳极流道内 CO_2 气泡速度很小, 气泡尺寸随着时间的推移而不断长大, 甚至堵塞流道, 流道堵塞现象随电流增大而急剧强化。电性能曲线显示, 在浓差极化区存在着显著的重力效应, 电性能的恶化随浓差极化程度的加强而增大。

本研究表明, 对于运行于长期微重力环境中的燃料电池, 必须对其流场及流道内部两相流动进行细致的优化设计, 保证在失去浮力作用后气泡仍能及时脱落, 从而避免或减弱浓差极化, 以保证电池正常工作。

参考文献

- [1] Ma Shijun. Satellite's Power System. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2001. in Chinese (马世俊. 卫星电源技术. 北京: 宇航出版社, 2001)
- [2] Jan D L, Rohatgi N, Voecks G *et al.* Thermal, mass and power interactions for lunar base life support and power systems. In: International Conference Environmental Systems, 1993, Colorado Springs, CO, United States, SAE Paper 932115
- [3] Bents D J, Scullin V J. Hydrogen-Oxygen PEM Regenerative Fuel Cell Energy Storage System. NASA/TM-2005-213381, 2005
- [4] Mitlitsky F, Myers B, Weisber A H. Reversible (Un-titled) PEM fuel cell devices. *Fuel Cell Bull.*, 1999, 2:6~11
- [5] Sone Y, Ueno M, Naito H *et al.* One kilowatt-class fuel cell system for the aerospace applications in a micro-gravitational and closed environment. *J. Power Source*, 2006, 157(2):886~892
- [6] Sone Y, Ueno M, Kuwajjima S. Fuel cell development for space applications: fuel cell system in a closed environment. *J. Power Source*, 2004, 137(2):269~276