

短时微重力条件下燃料电池性能实验研究

郭 航¹ 赵建福² 律翠萍¹ 万士昕² 吴 峰¹ 叶 芳¹ 马重芳¹

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程节能教育部重点实验室,
传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100022;
2. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘 要 开展了不同重力情况下燃料电池性能的实验研究。利用微重力落塔, 对常重力和微重力条件下燃料电池发电时其内部的两相流动开展了可视化现场观测。对重力因素对燃料电池内部传质过程的影响进行了分析和讨论。实验结果表明: 当电流密度较大时, 在微重力环境中燃料电池性能较常重力环境中的有较明显下降。由于微重力条件下浮升力的消失导致气体不能及时从流道中排出, 进而对直接甲醇燃料电池内的传质过程产生负面影响。

关键词 燃料电池; 传质; 两相流; 可视化; 微重力

中图分类号: TM911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)05-0865-03

EXPERIMENTAL STUDY OF FUEL CELLS PERFORMANCE IN SHORT TERM MICROGRAVITY CONDITION

GUO Hang¹ ZHAO Jian-Fu² LÜ Cui-Ping¹ WAN Shi-Xin² WU Feng¹ YE Fang¹ MA Chong-Fang¹

(1. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education and Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An experimental investigation of fuel cells performance under different gravity conditions has been conducted. An in situ visual observation of two-phase flow inside fuel cells in normal gravity and microgravity has been performed, respectively, in a drop tower. The effect of gravity on mass transfer in fuel cells was analyzed and discussed. The experimental results indicated that when the fuel cells operate at high current density, its performance in microgravity is worse than it in normal gravity condition. Carbon dioxide bubbles can not discharge in time from the flow channels because of disappearance of buoyancy lift in microgravity condition. It results in a negative influence on the mass transfer in direct methanol fuel cells.

Key words fuel cells; mass transfer; two-phase flow; visualization; microgravity

0 前 言

燃料电池因其环境友好、比功率高、能量转换效率高等优点近二十多年来日益受到人们的重视。然而由于成本等原因, 燃料电池真正规模化用于车辆动力源等民用用途仍有待时日。但由于其独特优势, 燃料电池在一些成本容忍度较大的特殊领域, 如: 军事、航天等一直占有一席之地。

航天用燃料电池目前已经历经三代。从燃料电池在航天领域中的应用历史看, 其与载人航天息息相关。另外还有专家指出, 作为寿命一个月左右的

航天器主电源, 燃料电池具有传统航天电源(锌银电池组或硅、砷化镓太阳电池阵/镉镍、氢镍蓄电池组联合供电系统)无法比拟的优点, 是我国今后发展载人空间站补给货运飞船的首选电源。

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^[1]。空间电源与地面电源在运行环境上的差异主要集中在重力条件方面。而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

收稿日期: 2007-12-20; 修订日期: 2008-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50406010)

作者简介: 郭 航 (1970-), 男, 北京人, 副教授, 博士, 主要从事燃料电池热物理、制冷空调方面的研究。

化学反应过程, 进而对燃料电池的性能产生重要影响。以此为背景, 本文利用落塔对燃料电池在短时微重力条件下的传热传质和两相流现象及其对电池输出性能的影响开展了实验研究。

1 实验系统

微重力落塔实验对所搭载的实验系统的体积、重量、质心、供电、数据存储、抗冲击、监控及自控等方面都有严格的要求。为此专门自行设计搭建了微重力落塔实验专用的燃料电池实验系统, 还设计加工了实验用燃料电池。自行设计的燃料电池落塔微重力实验系统主要由阳极供液及排放系统、阴极供气及排放系统、加热及温度控制系统、压力测量系统、电池外电路负载及测量系统、拍摄及照明系统等组成。

自制的液态进料质子交换膜直接甲醇燃料电池采用镀金的不锈钢流场板。阴极和阳极流场板上均加工有平行流道。每条流道宽 2.5 mm, 深 2 mm, 相邻两条流道之间的脊的宽度为 2 mm。实验过程中燃料电池直立放置, 此时流道是竖直的, 而流场板的进口总管和出口总管是水平的。为方便二氧化碳气体排出, 阳极出口总管在上, 进口总管在下。为方便凝水排出, 阴极进口总管在上, 出口总管在下。阳极端板材料选用透明的聚碳酸酯以方便可视化拍摄。实验电池选用 Nafion 117 膜作固体电解质, 阳极催化剂为载量为 4 mg/cm^2 的 PtRu, 阴极催化剂为载量为 4 mg/cm^2 的 Pt, 膜电极组件的有效面积为 25 cm^2 。实验中采用纯度为分析纯的甲醇 (CH_3OH 含量不低于 99.5%) 与去离子水配制成一定浓度的甲醇水溶液作为阳极燃料。阴极的氧化剂采用高纯氧气 (O_2 含量不低于 99.995%)。

将实验系统放入落塔的吊仓中, 进行燃料电池地面性能的实验。然后封仓并将吊仓提升至 83 m 高度, 稳定后再次进行一次常重力下的实验。随后释放吊仓, 在吊仓自由落体下落过程中可以获得 $10^{-3}g$ 的微重力水平, 在吊仓下落的整个过程中系统自动进行微重力条件下的数据采集和拍摄。

2 结果与讨论

图 1 显示出重力因素对燃料电池性能的影响。除重力条件外, 实验过程中燃料电池的运行工况一直保持不变。阴极氧气进口流量为 400 ml/min , 阴极出口压力为 0 kPa (表压), 阳极甲醇溶液进口流量为 5.6 ml/min , 甲醇溶液浓度为 0.5 kmol/m^3 , 燃料电池工作温度为 80°C 。

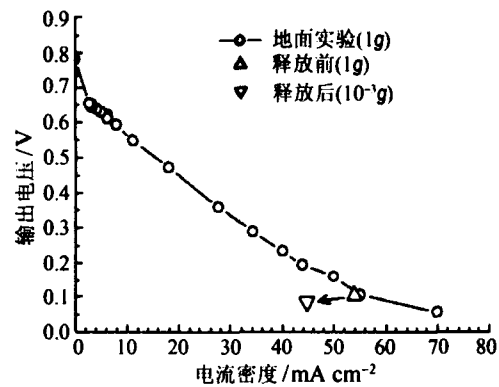


图 1 重力因素对燃料电池性能的影响

Fig.1 Influence of gravity on performance of a fuel cell

图 1 中的完整极化曲线实验是在地面完成的。在 83 m 高度吊仓释放前所做的一个实验点与地面的极化曲线吻合很好, 说明该次实验的复现性是有保证的。吊仓释放后, 尽管高质量的微重力时间只有 3.6 s, 但是已经使燃料电池性能受到了明显的影响。在燃料电池外电路电阻不变的情况下, 电流密度下降尤为明显。同步进行的燃料电池阳极流道内两相流动的可视化拍摄有助于我们对重力因素的影响机理做更深入的分析。作为重力水平的一个可视的参考, 在实验用燃料电池透明窗口的左上角放置了一个水平仪, 其中的气泡作为重力程度的参考气泡。在常重力环境中参考气泡呈椭球形(图 2), 在微重力环境中时变为如图 3 所示的圆球形。

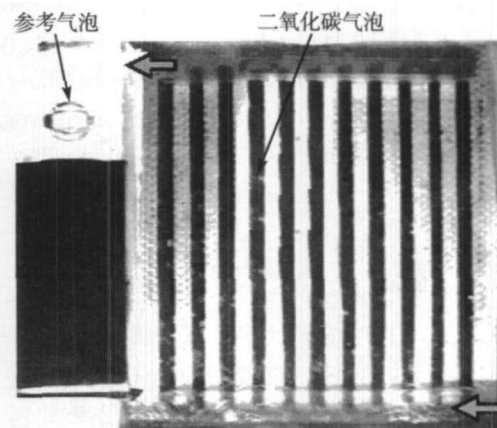


图 2 常重力下燃料电池阳极两相流可视化照片

Fig.2 Two-phase flow in a fuel cell in normal gravity

在常重力环境中, 二氧化碳气泡在多孔介质层内生成后进入流道, 继而迅速流出流道(图 2)。而在微重力条件下, 由于浮升力的影响已经非常弱, 导致气泡出现在流道的多孔介质壁面后, 无法很快脱离壁面。而是继续附着在壁面并持续长大(图 3)。这些气泡占据着通道, 阻碍了燃料向催化层的传质,

从而造成微重力下电池性能变差(图1)。重力因素是通过影响电池内部的传质,进而影响浓差极化,从而影响燃料电池性能的。

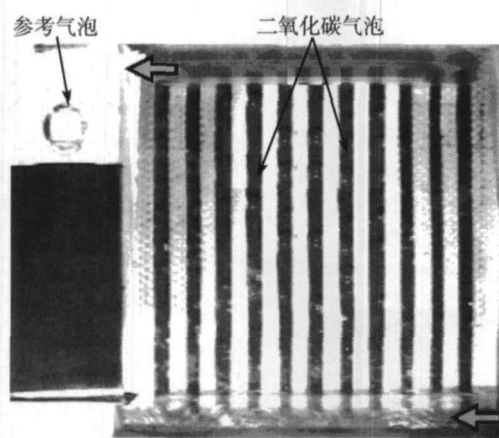


图3 微重力下燃料电池阳极两相流可视化照片

Fig.3 Two-phase flow in a fuel cell in microgravity

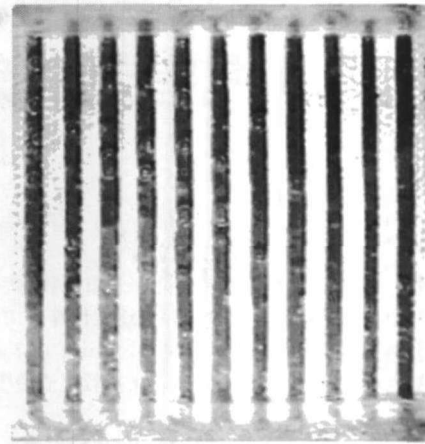
经过多次落塔实验结果对比表明,在电流密度较低时,浓差极化对燃料电池性能没有决定性影响,此时重力因素的影响也很小。在微重力环境中,随着电流密度增大,流道内气泡增多,气泡尺寸变大。在电流密度较高时,甚至出现气弹阻塞流道的现象。这是由于在常重力条件下,流道内的气泡受浮升力的作用向上移动,气泡的运动抑制了气弹的形成。而在微重力条件下,浮升力消失,气泡移动缓慢,甚至不运动,而随着电流密度的增大,产气量增加,则气泡在原地持续长大,多个气泡则容易结合成大的气弹。

若以释放吊仓(及其所载实验系统)使之自由下落作为进入微重力环境的时间起点,比较同一电流



(a) 释放后 2 s

(a) 2nd second after release



(b) 释放后 3 s

(b) 3rd second after release

图4 微重力条件下不同时刻的燃料电池阳极流道两相流

Fig.4 Two-phase flow in anode channels of a fuel cell at different moments in microgravity condition

密度下不同时刻直接甲醇燃料电池阳极流道内两相流动可以发现:释放前系统还处于常重力环境中,此时流道内的气泡运动速度较高,气泡尺寸小于释放后的。在微重力条件下,随着时间的推移,流道内气泡在流道内的宏观运动速度很小,气泡尺寸则明显随时间的增长而持续变大(图4)。

3 结 论

(1) 本文利用短时微重力落塔,开展了重力因素对燃料电池性能影响的实验研究。对常重力和微重力条件下燃料电池发电时其内部的两相流动开展了可视化现场观测。

(2) 重力因素是通过影响燃料电池内部的传质过程,进而影响浓差极化,从而影响燃料电池性能的。当电流密度较大时,在微重力环境中燃料电池的性能较常重力环境中的有较明显下降。

(3) 在微重力条件下,随着时间的推移,液态进料直接甲醇燃料电池阳极流道内的二氧化碳气泡在流道内的宏观运动速度很小,气泡尺寸则明显随时间的增长而持续变大。

参 考 文 献

- [1] Guo H, Ma C F, Wang M H, et al. Heat and Mass Transfer and Two Phase Flow in Hydrogen Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Direct Methanol Fuel Cells. In: Shah R K eds. Proceedings of First International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. 2003. New York: ASME, 471-476