**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.247 **中图分类号**：TM205 **文献标志码**：A

# 空间燃料电池静态排水技术现状研究

文 陈，冯 磊，王景润，崔庆新，万成安
(北京卫星制造厂有限公司，北京 100094)

**摘要**：受到空间微重力的影响，空间燃料电池水管理与地面存在较大差异，为了满足空间可靠性和轻量化燃料电池电堆应用需求，静态排水技术被应用于空间燃料电池电堆中，从而极大地优化了电堆结构，降低了电堆体积和重量。综述了静态排水技术原理、静态排水影响因素、电堆结构及静态排水技术的研究现状，可为空间燃料电池电堆设计和静态排水研究提供参考。

**关键词**：宇航；空间；氢氧燃料电池；质子交换膜；静态排水

# Research Status of Non-flow Through Water Management Technology for Space Fuel Cells

WEN Chen, FENG Lei, WANG Jingrun, CUI Qingxin, WAN Cheng'an
(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Due to the influence of microgravity in space, the water management of fuel cells in space is quite different from that on the ground. To meet the application requirements of space reliability and lightweight fuel cell stacks, the non-flow through water management technology is applied to space fuel cell stacks, thereby significantly optimizing the stack structure and reducing the corresponding size and weight. In this paper, the principle for the non-flow through technology, influencing factors of non-flow through, stack structures and research status of the non-flow through technology are reviewed, providing reference for the design of space fuel cell stacks and research on non-flow through water management.

**Keywords:** Aerospace; space; hydrogen-oxygen fuel cell; proton exchange membrane; non-flow through

氢氧燃料电池因不受卡诺循环的限制，具有转化效率高、质量比能量高等优势，且可以与航天器、登陆器、巡视器及舱外活动装备中的电力系统、生命保障系统、推进剂系统以及原位资源利用系统等有效兼容，是宇航能源系统重要的组成部分，在空间工程中具有很好的应用前景，对后续宇航电源发展具有重要意义[1-5]。1965 年，氢氧燃料电池首次用于宇航飞行即一举成功，从而带来了宇航燃料电池研究和应用的热潮，拉开了燃料电池宇航应用的序幕[2]。经过近 50 年的发展，NASA 通过“重返月球”规划论述了燃料电池应用场景，包括月球基地、月球车供电等，进一步推动了燃料电池宇航应用研究[3-5]。

空间燃料电池工作过程中水的稳定性对其输出性能具有重要的影响，然而，地面的水管理措施难以适应宇航水管理需求。在空间微重力环境下，以重力为推动力的分离手段已然失效，而以毛细管作用和压力差作为推动力的分离手段则成为了最有效的手段[6]。由于产水和排水过程主要为阴极排水，其排水受到重力的影响明显，而微重力条件下的水滴在流道内的分布存在较大差异，从而导致微重力水管理与地面存在较大差异[7-8]。

本文基于空间燃料电池水管理的静态排水技

**收稿日期**：2022-09-22；**修回日期**：2022-10-30；**录用日期**：2022-11-29；**网络首发日期**：2025-05-30
**基金项目**：国防科技工业局项目(JCKY2020203B056)
This work is supported by project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence under the grant JCKY2020203B056

术，分析静态排水的技术原理、研究现状以及研究进展，并结合宇航应用特点分析静态排水的影响因素等，为后续宇航应用水管理设计及静态排水研究提供参考。

## 1 静态排水原理

静态排水是相对于通过泵驱动的主动排水技术而言，其结构如图 1 所示[9]。静态排水是指在燃料电池阴极端，通过特殊的多孔膜实现水和气体的分离，相比于主动泵排水结构(图 1(a))，其采用膜式分离结构，具有更小的功耗和更高的可靠性。静态排水作用原理如图 2 所示[10]。

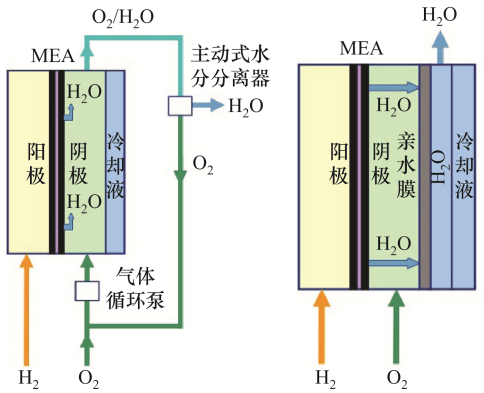



图 1 主动排水与静态排水结构[9]

**Fig. 1 Flow through and non-flow through drainage structures[9]**

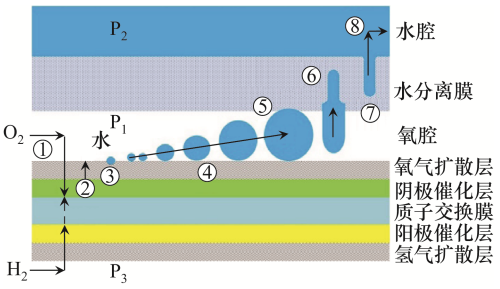



图 2 静态排水原理[10]

**Fig. 2 Principle for non-flow through water separation[10]**

静态排水过程如下：①→②氢气和氧气在质子交换膜和催化剂作用下反应生成水；②→③生成水在扩散层疏水作用下迁移至膜电极表面；③→④在氧腔中小水滴不断聚集长大；④→⑤水滴接触到水分离膜，在微孔毛细力作用下脱离氧腔；⑤→⑥在毛细力和压力作用下，水进入水分离膜；⑥→⑦水穿过水分离膜进入水腔；⑦→⑧水通过水腔导出电堆。其中，水气分离膜被水完全浸润，可实现水的表面张力大于气体压力，从而气体不会通过膜，实现透水阻气的功能，达到水气分离的目的。从静态排水原理可知，该过程水导出主要依赖于压力和水分离膜毛细作用力，因此，该过程重力依赖性小，特别适合空间微重力条件应用。同时，由于减少了主动分离所引起的功耗，静态排水的电堆尺寸将得到极大减小。

主动排水和静态排水电堆对比如图 3 所示，相比于主动排水电堆，静态排水电堆无论从体积还是质量上，都能够实现显著的优化[11-12]。因此，静态排水技术特别适合应用于宇航微重力/低重力燃料电池任务中。

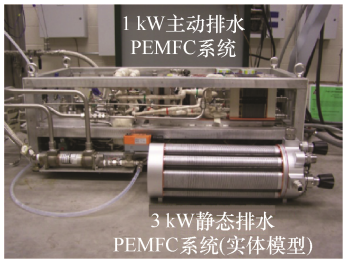



图 3 主动排水和静态排水电堆对比[11]

**Fig. 3 Comparison between flow through and non-flow through stacks[11]**

## 2 静态排水技术影响因素研究

静态排水效率对燃料电池的输出稳定性具有重要的影响，排水效率越高，越利于燃料电池产物水导出，促进反应的进行。然而，在燃料电池反应过程中，静态排水效率受到很多因素的影响。文献[13]分析了影响静态排水性能的参数，包括材料亲水性、孔隙率、流道长深比、反应气压力、排水压差、运行温度、电流密度和反应气计量比等，得到不同参数对静态排水效率的影响规律，见表 1。

结合表 1 可知，降低材料表面接触角、提高孔隙率、减小流道长深比，均有利于静态排水效率的提升；同时，提高反应气压力、排水压差，降低电

堆运行温度和电流密度，均利于排水。因此，通过电堆流道设计、排水结构设计以及材料选择，可以优化静态排水效果，使电堆工作在合理的压力、温度、计量比等范围，对促进排水效果同样有益，实际运行过程中，需结合空间应用具体环境和工况进行针对性设计，以满足特定的应用需求。

**表 1　不同参数对静态排水效率的影响**

**Tab. 1 Effects of different parameters on non-flow through efficiency**

| 影响参数 | 排水效率 | 影响参数 | 排水效率 |
|---|---|---|---|
| 接触角 | 减小 | 运行温度 | 降低 |
| 孔径 | 无关 | 电流密度 | 降低 |
| 孔隙率 | 增大 | 氧气化学计量比 | 降低 |
| 流道长深比 | 减小 | 排水压差 | 增加 |
| 运行压力 | 提高 | 重力加速度 | 增加 |

为了进一步分析各种因素对排水效果以及电堆性能的影响，很多学者对此开展了研究。文献[14]的研究表明，接触角可以通过影响液滴脱离半径和液滴成长的形状来影响液滴的成长时间，接触角越大，成长时间越长，从而越不利于水从扩散层分离和导出。文献[15]采用石棉膜静态排水技术研究了静态排水的影响因素，结果表明在低于 500 mA/cm$^2$ 时，静态排水与动态排水结构的电池性能差异不大，在高电流密度下静态排水结构的电性能略低。阴极扩散层性能和流道结构都对静态排水特性具有很大的影响。文献[16]研究了不同的微孔层尺寸、形式对水扩散的影响，如图 4 所示，结果表明较大的微孔层 MPL(micro porous layer)孔在催化剂中合并了许多小的液态水通路分层并在形态上稳定它们，从而为有效排水创造主要途径，利于静态排水效率的提高。文献[17]研究了扩散层不同聚四氟乙烯 PTFE(polytetrafluoroethylene)含量对排水特性的影响，如图 5 所示，结果表明多孔气体扩散层 GDL(gas diffusion layer)的 PTFE 含量对液态水传输行为有很大影响。GDL 的有效孔隙率随着 PTFE 含量的增加先增加后降低。当 PTFE 含量达到总质量的 10%时，传统 GDL 具有最大的有效孔隙率和最短的液态水和气体稳态时间。文献[18]研究表明，氢气和氧气以相反的方向通过燃料电池，能够更好地实现水管理，提高电堆性能。

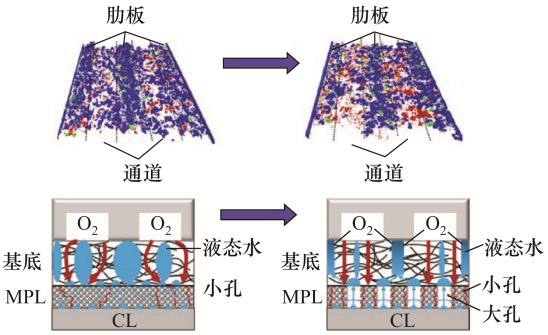



**图 4　不同多孔层形式对排水的影响[16]**

**Fig. 4 Effects of different forms of porous layer on drainage[16]**

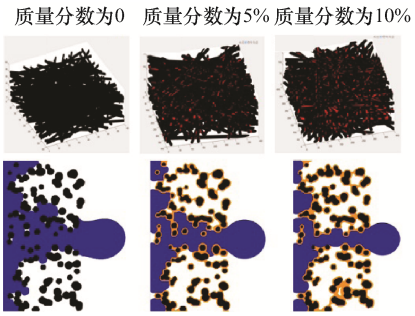
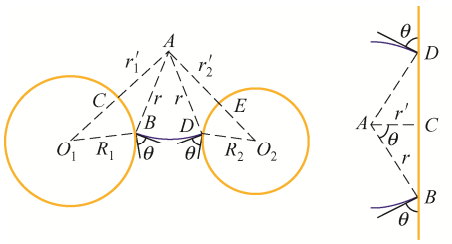



**图 5　不同 PTFE 含量对排水性能影响[17]**

**Fig. 5 Effects of different PTFE contents on drainage performance[17]**

通过阴极流道内水状态和分离过程的仿真，可以分析阴极流道内水的状态分布及多孔介质的导水过程，从而优化静态排水性能[19]。文献[20]提出了 1 种新的孔隙形态学方法(Lvca–PMM)，该方法通过考虑局部可变的接触角来增强，可以在不同的润湿性条件下再现多孔介质的准静态排水过程，提出的 Lvca-PMM 可以很好地捕捉毛细管压力−饱和度关系以及孔隙−尺度流体分布，呈现出的结果更好，孔隙形态学模型如图 6 所示。文献[21]通过阴

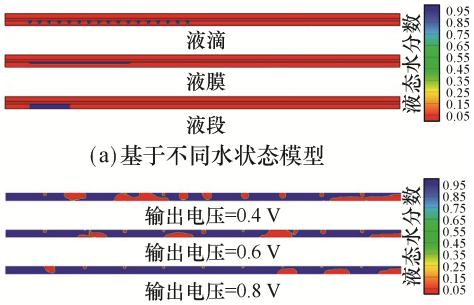



(a) 两圆存在界面　　(b) 边界存在界面

**图 6　孔隙形态学模型[20]**

**Fig. 6 Morphological models of pore[20]**

极流道的两相流模型研究，指出改善两相流对燃料电池导水具有重要的影响，基于不同水状态模型及不同电压下的分布结果如图 7 所示。文献[22]通过三维流体体积模型研究了微孔层(气体扩散层上的碳层)对液体流动形成和两相传输的影响，得到了裂纹形状、裂纹间距和裂纹数对液态水从微孔层至扩散层的影响。




(a)基于不同水状态模型

(b)基于不同电压

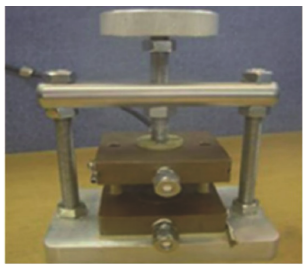
**图 7 基于不同水状态模型及不同电压下的分布结果[21]**

**Fig. 7 Distribution results based on different water state models and different voltages[21]**

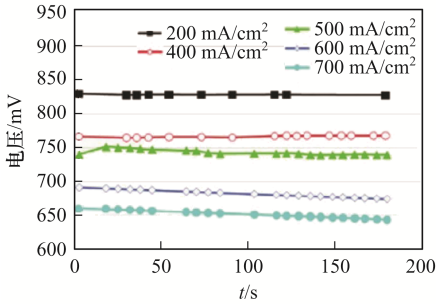
## 3 静态排水电堆研究

排水方式的改变对电堆结构也形成了一定的影响，同时，为了验证静态排水的性能和效果，通常需要将静态排水组件装成电堆，对电堆整体性能进行考核，从而评价和优化静态排水技术[23]。因此，很多学者研究了不同的测试电堆和静态排水电堆，以评价静态排水综合性能，获得最终的实际应用。多孔膜测试装置及不同电流密度下的电压特性如图 8 所示，文献[24]设计了 1 种简单的多孔膜静态排水板测试装置，并对不同电流密度下多孔膜的静态排水特性、不同孔径下的压差和泡点进行研究，结果表明 0.1 μm 高分子膜最小泡点达到 0.6 MPa，水通量可达到 5 L·min$^{-1}$·m$^{-2}$。

文献[13]设计了 1 种静态排水电堆结构，并对其影响分数进行分析，采用适宜的亲水多孔材料组装氢氧燃料电池电堆，证明当接触角为 15°、流道长深比为 500、微孔孔径为 0.1 μm、孔隙率为 1 %、反应气压力 0. 2 MPa、运行温度为 60 ℃、排水压差为 0.05 MPa 时，通过三维取向实验，验证了该参数下静态排水具有优异的导水性能和受重力的



(a)多孔膜测试装置




(b)不同电流密度下的电压特性

**图 8 多孔膜测试装置及不同电流密度下的电压特性[24]**

**Fig. 8 Porous membrane test device, and voltage characteristics at different current densities[24]**

影响较小，单池输出性能如图 9 所示，图中，A、A′、B、B′、C、C′分别表示氢氧燃料电池堆运行时的 6 个方向。

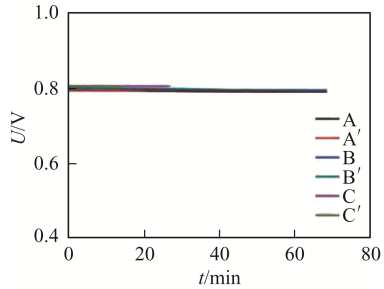


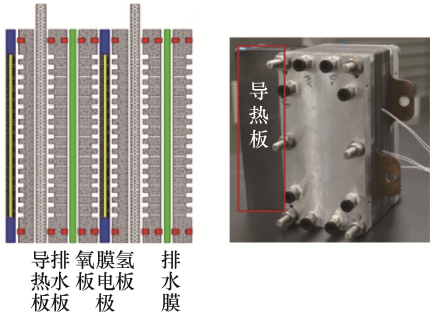

**图 9 各方向下电堆平均单池电压**

(200 mA/cm$^2$,333.15 K,0.2 MPa)

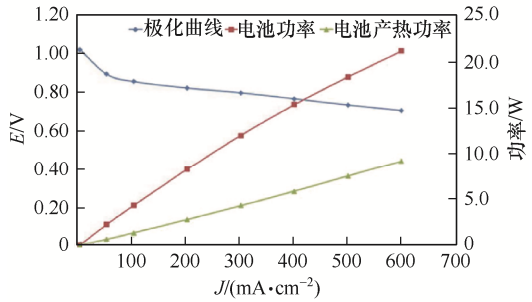
**Fig. 9 Average cell voltage of stack in different directions**

(200 mA/cm$^2$, 333.15 K, 0.2 MPa)

文献[25]研制了 1 种全被动的静态排水燃料电池，并对其性能进行了分析，如图10所示，研究结




(a)电堆结构 (b)电堆实物




(c)电堆性能

**图 10　全被动静态排水电堆结构及性能[25]**

**Fig. 10 Structure and performance of fully passive non-flow through stack[25]**

果表明，该结构设计电堆的输出特性较好，且热功率稳定，能够实现静态排水的需求。

## 4　结论

本文对空间静态排水技术原理和研究进展进行了综述，静态排水更加适合空间微重力条件水气分离，对系统功耗、重量优化和可靠性提高均有重要意义，为空间微重力条件静态排水设计研究提供参考。结论如下：

(1)静态排水通过压差和毛细作用力实现排水，重力依赖性小，能够实现电堆的质量体积优化，适应于空间环境燃料电池应用。

(2)静态排水影响因素包括仿真、结构设计、材料选择、运行工况设定等，通过选择最优因素结合实际空间环境进行针对性设计，可以有效提高排水效率，使电堆性能更优。

(3)通过静态排水电堆结构设计，可以实现三维取向相关性小且运行稳定的燃料电池研制，推动氢氧燃料电池空间应用发展。

**参考文献：**

[1] 郭苗苗, 文陈, 陈学成, 等. 基于 Fluent 的燃料电池建模及仿真研究[J]. 电源技术, 2019, 43(1): 113-116.
Guo Miaomiao, Wen Chen, Chen Xuecheng, et al. Modeling and simulation of fuel cell based on Fluent [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(1): 113-116. (in Chinese)

[2] 衣宝康. 燃料电池技术的应用[J]. 自然杂志, 1980, 2(10): 762-765.
Yi Baokang. Application of fuel cell technology [J]. Nature Magazine, 1980, 2(10): 762-765. (in Chinese)

[3] 吴再丰. 月球饭店的构想[J]. 飞碟探索, 1995(4): 38-40.
Wu Zaifeng. Conception of moon hotel [J]. The Journal of UFO Research, 1995(4): 38-40. (in Chinese)

[4] 倪生麟, 杨良才. 国外航天用化学电源的发展和我们的方向[J]. 航天控制, 1983, 1(2): 104-109.
Ni Shenglin, Yang Liangcai. Development of chemical power supply for aerospace abroad and our direction [J]. Aerospace Control, 1983, 1(2): 104-109. (in Chinese)

[5] 刘向, 张伟, 孙毅, 等. 空间燃料电池技术发展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(5): 472-476.
Liu Xiang, Zhang Wei, Sun Yi, et al. The development of space fuel cell technology [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(5): 472-476. (in Chinese)

[6] Jakupca I, Bennett W, Smith P, et al. Fuel cell research and development for earth and space applications [R]. Department of Energy Annual Merit Review, 2018

[7] Chen Shizhong, Wu Yuhou. Gravity effect on water discharged in PEM fuel cell cathode [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 2888-2893.

[8] Yu Yi, Tu Zhengkai, Zhan Zhigang, et al. Gravity effect on the performance of PEM fuel cell stack with different gas manifold positions [J]. International Journal of Energy Research, 2012, 36(7): 845-855.

[9] Hoberecht M A, Jakupca I J. Development status of PEM non-flow-through fuel cell system technology for NASA applications [R]. NASA, 2011: NASA/TM—2011-217107.

[10] Jakupca I, Guzik M, Bennett W R, et al. Non-flow-through fuel cell power module demonstration on the SCARAB rover [C]// 15th International Energy Conversion Engineering Conference. Atlanta, GA, 2017: 4611.

[11] Araghi K R. NASA non-flow-through PEM fuel cell system for aerospace applications [R]. NASA/JSC/EP3, 2011, 11.

[12] Zawodzinski C, Wilson M S, Gottesfeld S. Stainless steel wire mesh flow-fields for polymer electrolyte fuel cells [R]. Los Alamos National Laboratory, 1996: LA-UR-93-3233.

[13] 谢峰, 文陈, 邵志刚, 等. 氢氧燃料电池堆的静态排水影响因素研究[J]. 载人航天, 2021, 27(4): 489-494.
Xie Feng, Wen Chen, Shao Zhigang, et al. Study on static

water removal parameters of $H_2$-$O_2$ PEMFC stack [J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(4): 489-494. (in Chinese)

[14] 程伟, 余意, 涂正凯. 氢氧燃料电池电极中液态水的脱离时间研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(4): 652-656.
Cheng Wei, Yu Yi, Tu Zhengkai. Study on removal time of droplets in the electrolyte of hydrogen-oxygen fuel cell [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(4): 652-656. (in Chinese)

[15] 侯明, 吴金锋, 衣宝廉, 等. 质子交换膜燃料电池新型静态排水结构[J]. 电源技术, 2002, 26(3): 131-133.
Hou Ming, Wu Jinfeng, Yi Baolian, et al. A new structure of static water removal for proton exchange membrane fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2002, 26(3): 131-133. (in Chinese)

[16] Nagai Y, Eller J, Hatanaka T, et al. Improving water management in fuel cells through microporous layer modifications: fast operando tomographic imaging of liquid water [J]. Journal of Power Sources, 2019, 435: 226809.

[17] Wang Yulin, Xu Haokai, Zhang Zhe, et al. Lattice Boltzmann simulation of a gas diffusion layer with a gradient polytetrafluoroethylene distribution for a proton exchange membrane fuel cell [J]. Applied Energy, 2022, 320: 119248.

[18] 胡晶, 李海滨, 顾海涛. 燃料电池的空间应用技术发展[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(1): 97-104.
Hu Jing, Li Haibin, Gu Haitao. Development of space applied technology for fuel cells [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(1): 97-104. (in Chinese)

[19] 赵富强, 贾彦奎, 赵小军, 等. PEMFC 压差流道构型特征参数对电池性能的影响[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 110-118.
Zhao Fuqiang, Jia Yankui, Zhao Xiaojun, et al. Influences of configuration characteristic parameters of PEMFC differential pressure channel on cell performance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 110-118. (in Chinese)

[20] Liu Xin, Zhou Annan, Shen Shuilong, et al. Modeling drainage in porous media considering locally variable contact angle based on pore morphology method [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128157.

[21] Zhang Xiaoqing, Ma Xiao, Yang Jiapei, et al. Effect of liquid water in flow channel on proton exchange membrane fuel cell: Focusing on flow pattern [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115528.

[22] Shi Xin, Jiao Daokuan, Bao Zhiming, et al. Liquid transport in gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells: effects of micro-porous layer cracks [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(9): 6247-6258.

[23] 周浩然, 张永林, 宋少云, 等. 质子交换膜燃料电池排水技术现状研究[J]. 电源技术, 2020, 44(5): 774-777.
Zhou Haoran, Zhang Yonglin, Song Shaoyun, et al. Research progress of proton exchange membrane fuel cell drainage technology [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(5): 774-777. (in Chinese)

[24] 蒋永伟, 刘向, 朱荣杰, 等. 微孔过滤分离技术在空间氢氧质子交换膜燃料电池中的应用[J]. 载人航天, 2016, 22(5): 631-634, 640.
Jiang Yongwei, Liu Xiang, Zhu Rongjie, et al. The application of microporous filter technology in space hydrogen-oxygen PEMFC system [J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(5): 631-634, 640. (in Chinese)

[25] 孙毅, 张伟, 刘向, 等. 基于静态排水和被动排热技术的全被动氢氧燃料电池研究[J]. 载人航天, 2016, 22(5): 624-630.
Sun Yi, Zhang Wei, Liu Xiang, et al. The performance of fully passive hydrogen-oxygen fuel cell based on passive water and thermal management technology [J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(5): 624-630. (in Chinese)



文陈

**作者简介：**

文陈(1985— )，男，博士研究生，高级工程师。研究方向：燃料电池技术。E-mail：13552907280@163.com。

冯磊(1993— )，男，研究生，工程师。研究方向：燃料电池技术。E-mail：17888807730@163.com。

王景润(1983— )，男，研究生，高级工程师。研究方向：燃料电池技术。E-mail：wangjr49@163.com。

崔庆新(1978— )，男，通信作者，研究生，研究员。研究方向：燃料电池技术。E-mail：qxcui529@163.com。

万成安(1963— )，男，研究生，研究员。研究方向：空间电源技术。E-mail：wan001@vip.sina.com。

(责任编辑：陈国珍)