0254-6124/2020/40(3)-382–12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Xiaotian, WU Chuanjia, MA Peng, WANG Shuangfeng, LI Mingyu, YIN Yongli. Numerical simulation of two-phase heat flow and water distribution for water electrolyzer in microgravity (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(3): 382-393. DOI:10.11728/cjss2020.03.382

微重力水电解槽两相热流动与水量分配数值模拟 *

刘晓天[1,2] 吴传嘉[3,4] 马 鹏[3,4]
王双峰[3,4] 李明雨[1] 尹永利[2,5]

1(哈尔滨工业大学 (深圳) 先进焊接与连接国家重点实验室 深圳 518055)

2(深圳市绿航星际太空科技研究院 深圳 518055)

3(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

5(中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室 北京 100094)

摘 要 建立了固体聚合物电解槽单体的三维两相流动模型和电解槽系统供水过程模型, 对电解槽的供水、两相流动和温度场特性进行模拟仿真, 分析放置方式和微重力环境等因素对其工作性能的影响. 电解槽单体的数值模拟结果表明, 在微重力条件下或者水平放置时, 其内部速度场和温度场都分布均匀. 但是采用竖直放置且水平供水方式时, 电解生成的氧气在电解槽上部聚集, 出现局部缺水现象. 对电解槽系统供水过程的数值模拟结果表明, 无论在地面还是微重力条件下, 电解槽系统的水量分配都是不均匀的. 水平放置时, 电解槽系统内的电解槽单体进出口水量从底部至顶部先减少后增加; 在竖直放置或微重力条件下, 水量从其底部至顶部持续增加.

关键词 水电解技术, 数值模拟, 重力效应, 两相流, 水量分配

中图分类号 V 524

Numerical Simulation of Two-phase Heat Flow and Water Distribution for Water Electrolyzer in Microgravity

LIU Xiaotian[1,2] WU Chuanjia[3,4] MA Peng[3,4]

WANG Shuangfeng[3,4] LI Mingyu[1] YIN Yongli[2,5]

1(*State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology at Shenzhen, Shenzhen* 518055)

2(*Space Science and Technology Institute, Shenzhen* 518055)

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

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

5(*National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing* 100094)

* 广东省省级科技计划项目资助 (2017B010122001)
2020-02-25 收到原稿, 2020-04-09 收到修定稿
E-mail: xiaotianlll@163.com

Abstract Water electrolysis technology is a green-hydrogen process, and it is also a critical oxygen filling technology for medium- and long-term manned space missions. To study the effect of gravity on the performance of solid polymer water electrolyzer, the 3D two-phase model and the system model of electrolyzer were established. The water distribution, flow and temperature field were simulated and the effects of microgravity and normal-gravity on the electrolyzer were analyzed. When the electrolyzer placed in microgravity or horizontally, the numerical simulation of the electrolyzer with single-cell showed that the flow and the temperature fields in the electrolyzer are distributed uniformly. However, when the electrolyzer was placed vertically and water supplied horizontally, the water shortage appeared in the electrolyzer due to the oxygen gathered in the upper part. The numerical simulation of the system model indicated that the water distribution of the system is nonuniform in both normal-gravity and microgravity conditions. When the electrolyzer system was placed horizontally, the system flow rates firstly decrease then increase from the bottom cell to the top cell. While when the electrolyzer system was placed in microgravity or vertically, the system flow rates always increase from the bottom cell to the top cell.

Key words Water electrolysis, Numerical simulation, Gravity effect, Two-phase flow, Water distribution

0 引言

在中长期载人航天飞行环境中, 水电解制氧是一种实现充足氧气供应的有效方法, 可以维持氧气供给, 保障航天员生命安全. 目前主要的电解技术有碱性电解技术, 固体聚合物电解技术 (Solid Polymer Electrolysis, SPE), 固体氧化物电解技术 (Solid Oxide Electrolysis, SOE) 等 [1−3]. 由于固体聚合物电解技术电流密度大、电解效率高、反应时间快、制取气体纯度高, 其被认为是最先进的水电解技术之一. 目前 SPE 是公认的最适合中长期载人航天任务的氧气补给技术 [4−6], 最早由美国通用公司在 1966 年开发. 20 世纪 80 年代, 通用公司将其应用于海狼号核潜艇高压水电解制氧系统的任务, 但系统结构复杂、重量大. 随着催化剂和膜电极制备技术的发展, Hamilton Standard 公司将该技术改进, 应用于海军、空间站环控生保系统、可再生能源系统、在轨气瓶充装等项目中. 近年来, 随着氢燃料电池的升温, 各国加大了对 SPE 的研究, 加拿大 Hydrogenics、俄罗斯库加托夫研究所、德国 H-Tec 公司、瑞典 Brown Boveri 公司、挪威 Nel 公司等均在 PEM 水电解器的研究与制造方面开展了较多工作. 中国 SPE 技术起步较晚, 中国航天员训练中心在 20 世纪 90 年代才开始将其应用于航天技术中 [7−9].

水电解槽是水电解装置的核心部件, 也是水电解过程的反应场所. 由于水电解反应过程产生大量热量, 电解槽内部为氢气、氧气和水的混合物, 因此水、气、热的管理是影响电解制氧装置工作稳定性的重要因素 [10]. 在微重力与常重力环境中, 两相流特性存在差异 [11], 这可能会导致电解制氧装置在轨使用过程中出现两相流控制异常及不能正常启动的情况发生 [12−14]. 因此, 研究水电解槽在微重力环境下的两相热流动对提升水电解槽的工作稳定性具有重要意义. 此外, 电解槽中的气液流动不是单纯的两相流问题, 而是耦合了电化学反应、传热传质、多孔介质内部水气传输、流体运动等过程的复杂问题, 很难通过实验的方法对供水效果、流场和温度场特性进行观测 [15−17]. 数值模拟是一种得到电解槽内部流动规律的有效方法 [18−20].

目前, 对电解槽内流动和热力学特性的研究虽然引起了广泛关注, 然而已有的数值模拟仿真局限于电解芯体单侧流道内的流场和温度场 [21−23], 没有考虑芯体组件之间的耦合效应, 模拟结果不能充分反映实际的流动和热力学特性. 同时, 对于工程研制十分关心的供水问题, 电解芯体局部特性的模拟结果无法提供电解制氧系统内的水量分配特性. 为了得到微重力与常重力环境下电解槽内部速度场、温度场、两相分布和系统水量的分配情况, 提高地面和空间水电解装

置设计的合理性, 本文建立了包含 SPE 电解槽阴极和阳极的三维气液两相流动模型及电解槽系统供水过程模型, 使用计算流体力学软件 FLUENT 进行仿真模拟, 并对计算结果进行比较和分析.

1 电解槽单体模型

这里研究的是一个圆形结构 SPE 电解槽. 一个电解槽单体由膜电极、多孔板、基板、基板框架以及密封圈组成, 其结构如图 1 所示, 几何参数列于表 1. 电解槽的基板流道上布满方柱形扰流体, 如图 2 所示, 需要注意的是这些扰流体并非轴对称布置. 在电解槽的阳极, 水流从进水口进入, 在扰流体的分流作用下向流道各处扩散, 生成的氧气与水流从出水 (气) 口流出. 电解槽的阴极没有进水口, 只有两个出水 (气) 口.

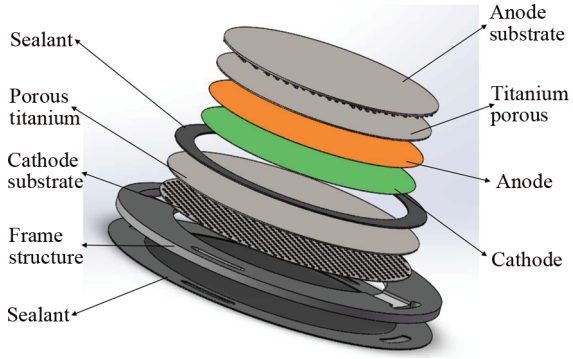


图 1 电解槽单体结构组成

Fig. 1 Structure composition of the electrolyzer with a single cell

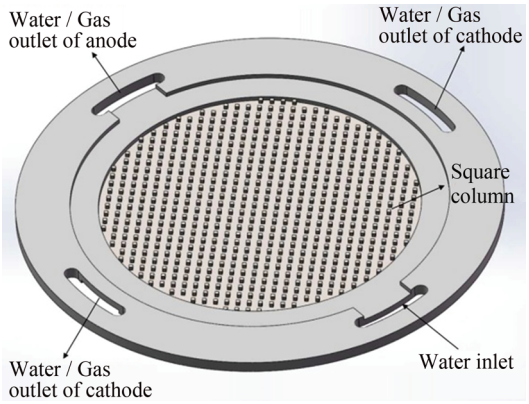


图 2 基板流道的结构

Fig. 2 Structure of the substrate plate

1.1 计算理论模型

计算模型基本假设如下: 电解槽处于稳态运行, 电解质膜不能渗透气体, 多孔介质均为各向同性, 电化学反应产生的热量由阳极超电势产生 [21].

采用气–液混合两相流动模型 (Mixture 模型) 描述电解槽内的流动过程. 由于流道中流速较小, 整体呈现层流特性, 但由于流动过程复杂, 局部流动可能为湍流状态. 因此, 采用低雷诺数 κ-ε 湍流模型进行数值模拟 [22], 基本控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程. 连续方程中的质量源项, 即电解过程中水的消耗率、渗透率和氧气、氢气的生成率利用法拉第定律描述如下 [21].

水的消耗率

$$S_{\mathrm{H_2O}} = \frac{(4n+2)iAM_{\mathrm{H_2O}}}{4FV}. \tag{1}$$

氧气生成率

$$S_{\mathrm{O_2}} = \frac{iAM_{\mathrm{O_2}}}{4FV}. \tag{2}$$

氢气生成率

$$S_{\mathrm{H_2}} = \frac{iAM_{\mathrm{O_2}}}{2FV}. \tag{3}$$

水从阳极渗透到阴极的速率

$$S'_{\mathrm{H_2O}} = \frac{niAM_{\mathrm{H_2O}}}{FV}. \tag{4}$$

式中: n 为电渗透阻力系数, 取 $n=3.5$; i 为反应电流

表 1 电解单体的几何参数

Table 1 Geometric parameter of the electrolysis cell

电解芯体构件	尺寸
扰流体 (阳极)	2.0 mm×2.0 mm×2.2 mm
扰流体 (阴极)	2.0 mm×2.0 mm×0.6 mm
扰流体间距/mm	4.0
基板本体厚 (阳极)/mm	1.3
基板本体厚 (阴极)/mm	0.6
多孔板厚度/mm	1.0
多孔板孔隙率	0.3
流场直径 (阳极)/mm	172
流场直径 (阴极)/mm	202
进出口宽度/mm	32
膜电极厚度/mm	0.2

密度; $F = 96\,500\,\mathrm{C\cdot mol^{-1}}$ 为法拉第常数; A 和 V 分别为催化层反应活化表面积和体积, M 为摩尔质量. 能量方程中的源项即催化层中水电解反应产生的热量, 由阳极超电势产生, 其计算公式为

$$S_{\mathrm{E}} = \frac{\eta_{\mathrm{a}} i A}{V}. \tag{5}$$

其中 η_{a} 为阳极超电势, 这里 $\eta_{\mathrm{a}} = 0.35\,\mathrm{V}$.

由于电解槽工作压力为 4.0 MPa, 此时理想气体状态方程不适用. 因此采用 Soave-Redlich-Kwong 方程描述气体状态, 即

$$p = \frac{RT}{V_{\mathrm{m}} - b} - \frac{a(T)}{V_{\mathrm{m}}(V_{\mathrm{m}} + b)}. \tag{6}$$

式中: p 为压力; V_{m} 为气体摩尔体积; R 为气体常数; a 和 b 为范德华常数, 其表达式分别为

$$a(T) = 0.427\,42\frac{R^2T^2}{p_{\mathrm{c}}}\Big[1 + (0.480 + 1.574w - 0.176w^2)\Big(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{\mathrm{c}}}}\Big)\Big]^2, \tag{7}$$

$$b = 0.086\,64\frac{RT_{\mathrm{c}}}{p_{\mathrm{c}}}. \tag{8}$$

其中, T_{c} 为临界温度, p_{c} 为临界压力, w 为偏心因子.

1.2 几何建模

对完整的电解槽单体进行建模. 其进口采用质量流量边界条件, 流量为 $0.005\,\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$ ($0.3\,\mathrm{L\cdot min^{-1}}$), 进口水温 50°C, 电流密度 $1.2\,\mathrm{A\cdot cm^{-2}}$; 出口采用压力边界条件; 阳极和阴极多孔板均采用多孔介质模型; 外壁面采用绝热边界条件, 不与周边环境交换热量. 电解质膜产生热量、氢气、氧气, 并消耗水, 产生的热量和气体质量根据式 (1)~(5) 计算得到.

使用前处理软件 ICEM 对完整电解槽单体进行网格划分, 所有网格均为结构性网格. 如图 3 所示, 网格单元总数为 1 577 684, 包含基板本体、扰流体、电解质膜、橡胶圈等固体部分网格以及阳极流道、阴极流道、多孔板区域、进出口区域等流体部分网格. 网格数量增加 20% 或者 40%, 得到的计算结果基本相同, 因而可认为其具有网格独立性.

采用 SIMPLE 算法对上述模型求解, 对流项、粘性项的空间离散采用二阶迎风差分格式.

2 电解槽单体计算结果

2.1 微重力条件

在微重力环境下, 阳极流道中间高度截面上的速度场如图 4(a) 所示, 进水口位于右下角, 出水 (气) 口位于左上角. 水流通过进水口进入阳极流道后迅速扩展, 在进口附近的流动速度较快. 在方柱形扰流体的作用下, 进入阳极流道内的水被分散成多股水流, 分散进入阳极流道, 与流道壁面交换热量并带走氧气. 随着流道截面积变大, 水气混合物流速逐渐减小, 之后水气混合物再逐渐汇聚, 速度增大, 汇聚后的流体最终从阳极出水口流出. 流道内大部分区域的流速为 $0.01\sim0.06\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 进出口附近的流速约为 $0.06\sim0.2\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Li 等 [23] 采用激光粒子图像速度场测量系统 (Particle Image Velocimetry, PIV) 对电解槽的速度场进行测量, 其实验所用电解槽尺寸、结构以及入口流量与本文计算模型接近, 因此可用于验证本文计算结果. 其实验结果表明电解槽内的流速量级为 $10^{-3}\sim10^{-2}\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 与本文计算结果接近.

阴极流道中间高度截面上的速度场如图 4(b) 所示. 与阳极流道相比, 阴极流道有两个出口, 分别位于图 4(b) 中截面的左下角和右上角, 阴极两个出口的中心线垂直于阳极进出口中心线. 由于阴极内主要是从阳极渗透过来的少量水以及在阴极电解产生

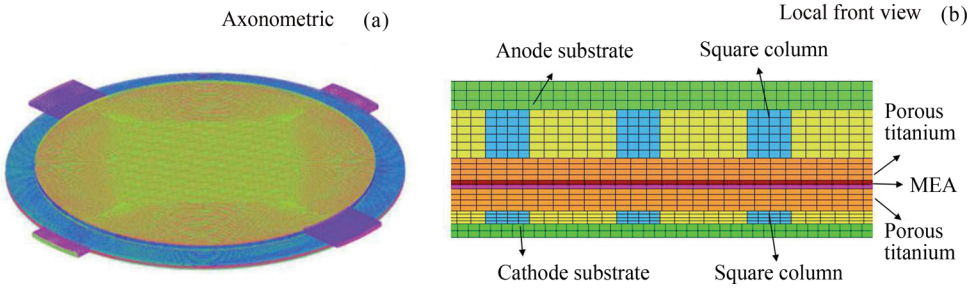


图 3 电解槽单体网格

Fig. 3 Grid of the electrolyzer with a single cell

的氢气, 相对于阳极, 阴极流道内的流速较小, 最大速度不超过 0.05 m·s^{-1}, 平均速度约 0.015 m·s^{-1}. 与阳极速度场类似, 在靠近出口的位置, 由于水气混合物汇聚, 阴极流道内流速较大, 而靠近流道中间的部位流速最小.

阳极流道中的氧气分布如图 5(a) 所示. 可以看到, 在流动的携带作用下, 电解产生的氧气逐渐向出口位置汇集. 在 4.0 MPa 的工作压力下, 气体被大幅压缩, 在水气混合物中所占体积分数较低. 在靠近阳极出口处, 氧气的体积分数可以达到 6%. 阴极流道的氢气分布如图 5(b) 所示. 进入阴极的水量占总供水流量的比例较小, 整个阴极流道几乎被氢气充满, 氢气体积分数在 85% 以上. 另外, 由于流速较小, 在流道中间部位有更多氢气聚集.

阳极流场中间截面上的温度场如图 6(a) 所示. 可以看到, 进口处温度为 50°C 的水流进入流道后, 经过方柱形扰流体的分流作用, 分散流入整个阳极流道. 电解槽在工作时发生电化学反应产生热量, 流体温度不断升高. 由于基板的材料为 45 钢, 导热性较好, 基板 (主要是扰流体) 内部的热量传递比流体内部热量传递更快, 因此方柱形扰流体的温度比周围流场的水温略高.

阴极流场中间截面上的温度场如图 6(b) 所示. 由于阴极与阳极存在热交换, 阴极温度场受到阳极温度场的影响, 靠近阳极进口位置处的阴极流场温度最低, 而阴极流场最高温度出现在靠近阳极出口位置的两侧. 由于模拟的水电解槽扰流体并未完全按中心线对称布置, 因此图 4~6 略有不对称.

图 7 给出了电解槽主要构件的最高温度和体积加权平均温度. 可以看出, 作为电化学反应发生的位置, 膜电极周围的温度最高; 热量通过热传导向多孔板、基板和流道内的流体介质传递, 最后随流体流动

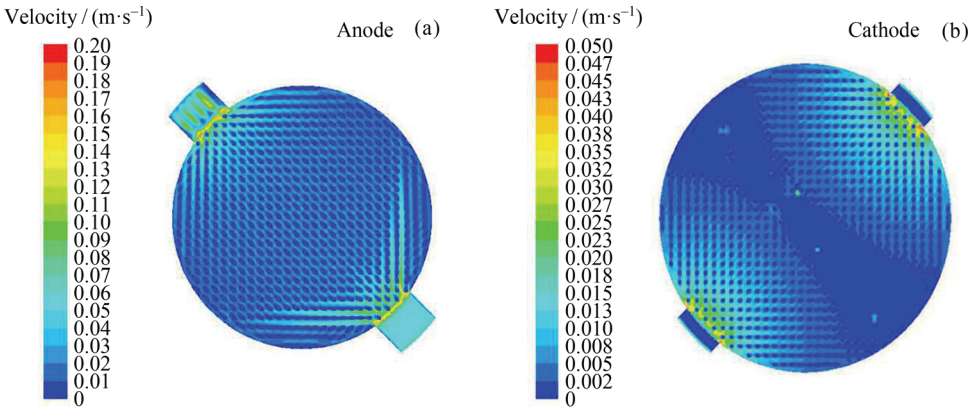


图 4 电解槽单体的内部速度场

Fig. 4 Internal flow field of the electrolyzer with a single cell

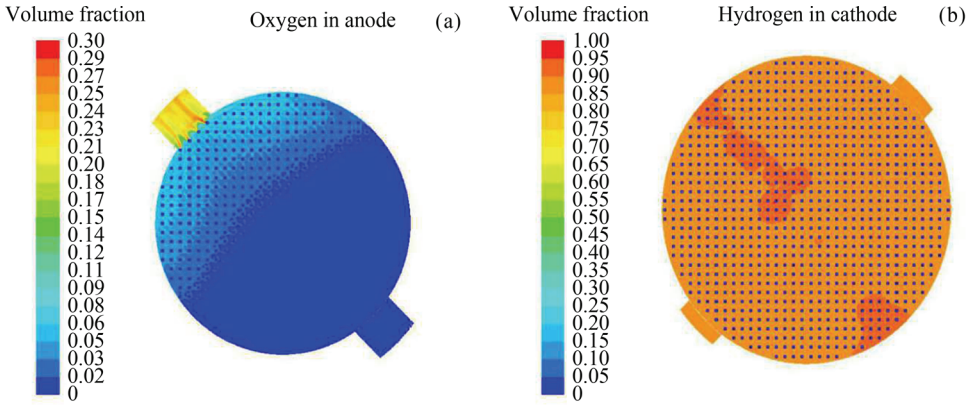


图 5 电解单体的气体体积分数

Fig. 5 Gas volume fraction of the electrolyzer with a single cell

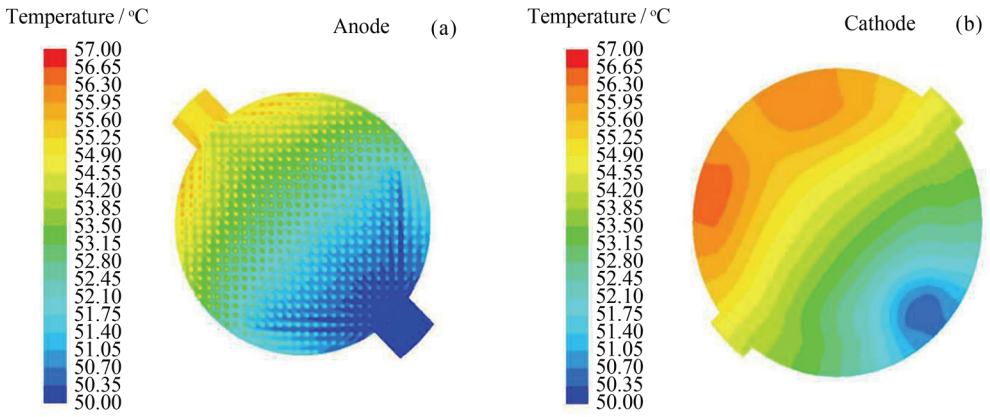


图 6 电解槽单体温度场

Fig. 6 Temperature field of the electrolyzer with a single cell

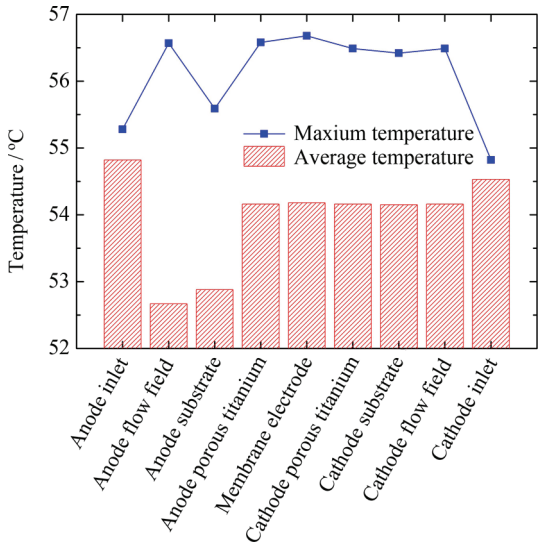


图 7 电解槽单体中主要构件温度

Fig. 7 Temperature of the main structures in the electrolyzer with a single cell

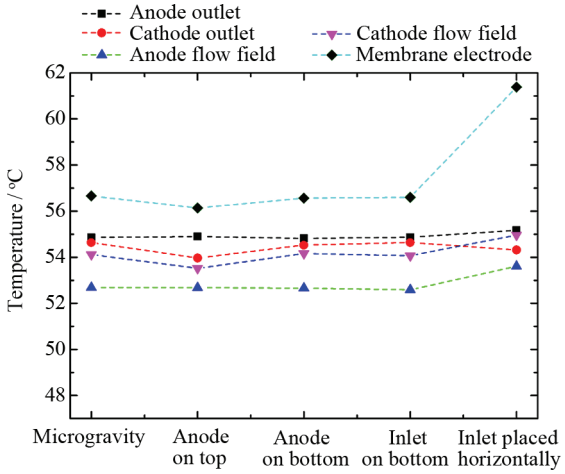


图 8 重力效应对特征温度的影响

Fig. 8 Effect of gravity on the characteristic temperature

排出电解槽. 因此, 阳极和阴极流道出口的平均温度最高. 电解槽最高温度反映了电解槽内最不利的工作条件, 因此膜电极是电解槽热防护的重点.

2.2 常重力条件

在常重力环境下, 电解槽的放置方式也可能影响其中两相热流动的重力效应. 图 8 给出了在微重力和不同电解槽放置方式下的特征温度. 总体而言, 与微重力相比, 除进水口水平 (电解槽竖直) 的放置方式外, 微重力、阳极在上 (电解槽水平)、阳极在下 (电解槽水平)、进水口在下 (电解槽竖直) 等情况下的电解槽特征温度变化不大.

分析相应的基板流场可以发现, 后面三种情况下供水均能连续到达整个基板流道, 重力 (浮力) 的作用未改变两相流场的基本特征. 进水口在上 (电解槽竖直) 时, 由于浮力的影响, 电解过程生成的气体向上部进水口聚集, 因此未求得收敛解, 无法得到电解槽内部各物理场的分布特征.

电解槽阳极在上 (水平放置) 和进水口水平 (竖直放置) 时, 电解槽内的速度场、温度场、氧气浓度分布分别如图 9 所示. 综合分析可以看出, 当进水口水平时, 重力效应彻底改变了流动和温度分布的原有特点. 在浮力作用下, 电解生成的氧气向电解槽上部聚集, 水流无法达到这一区域, 出现局部缺水现象, 从而该处的温度最高. 显然, 如果采用该放置方式, 电

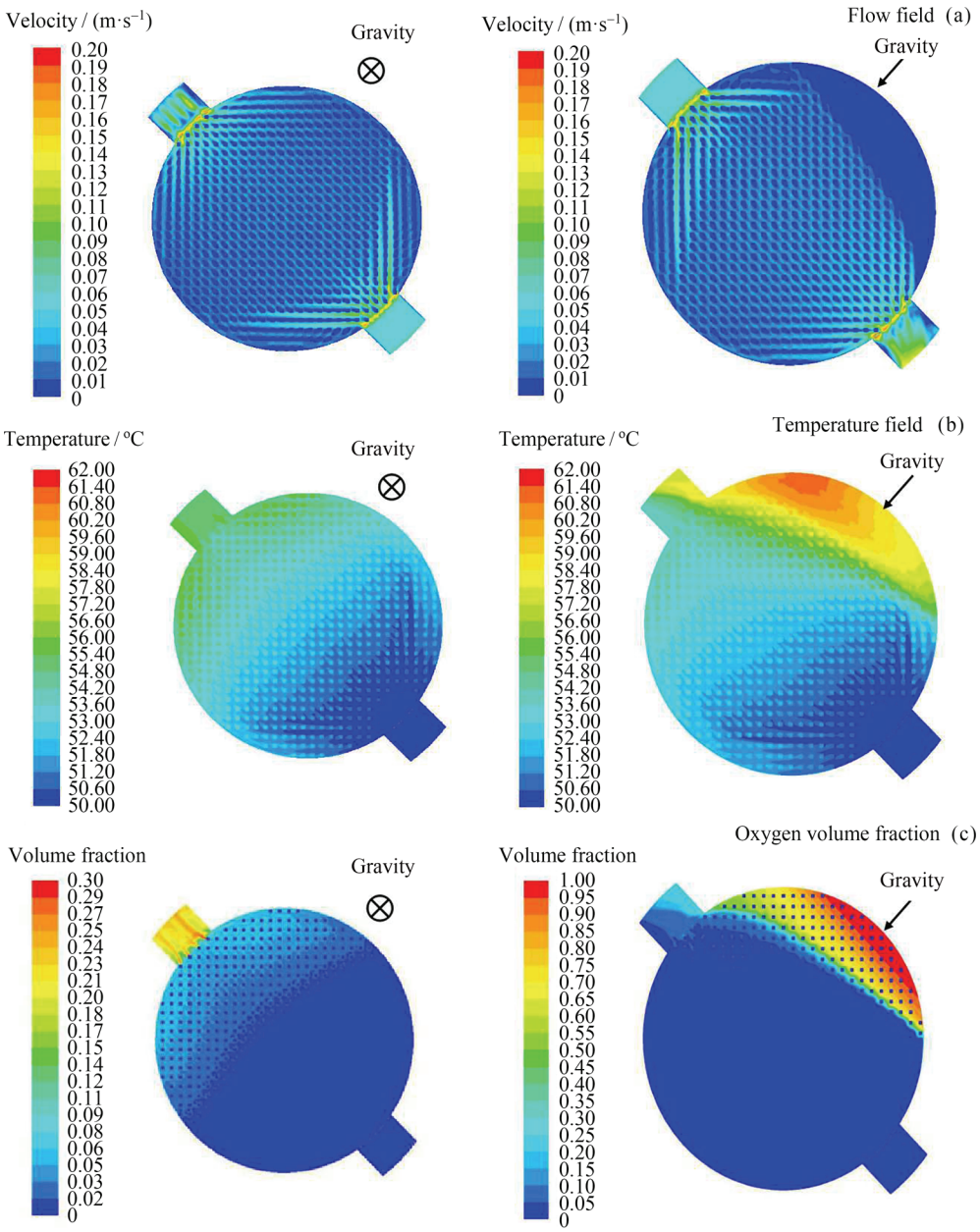


图 9 电解槽阳极在两种放置方式下的物理场

Fig. 9 Physical field of the anode in two placement modes

解槽很有可能会出现 “干烧”, 在实际应用中是不可取的. 因此当电解槽竖直放置时, 应尽可能将水电解槽的进水口放在下部; 而水平放置不会对电解槽的工作性能产生太大影响.

3 电解系统模型建立

一个完整的电解槽组件系统在实际工作中往往会并联多个电解槽单体, 以保证充足的氧气供给, 如图 10 所示. 通常电解槽组件系统工作时的供水流量不大于 30 L·min^{-1}, 工作压力 4 MPa, 电流密度为 1.2 A·cm^{-2}, 若达到最大产氧量 3.0 m^3·h^{-1}, 需要 48 个电解槽单体, 因此这里以 48 个电解槽单体为基准, 研究电解槽组件系统内部水量分配情况.

电解槽单体在供水过程中可视为多孔介质模型, 每个单体消耗部分水, 产生氧气和释放热量, 对流动形成阻力. 并联的多组电解槽单体与进水管和出水 (气) 管共同构成电解制氧装置.

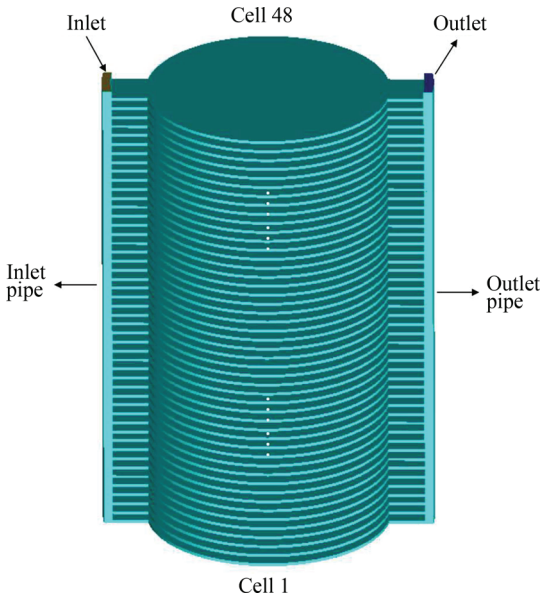


图 10 电解槽系统结构

Fig. 10 Structure of electrolyzer system

建立上述过程的仿真模型. 电解槽系统输入参数包括水的消耗率、气体和热量生成率以及压降, 这些参数可根据电解槽单体内气液两相热流动的数值模拟结果进行确定. 由于电解槽的流动阻力与流量相关, 在电解槽单体模拟中可通过改变供水流量, 得到压降与流量的拟合关系, 进而得到阻力系数, 模拟多组电解槽并联供水时电解槽单体的阻力效应.

对进水管和出水 (气) 管按照实际设计的结构进行物理建模. 流动模型与电解槽单体选用的计算模型保持一致, 将电解槽模化为多孔介质模型进行处理. 电解槽内水消耗速率和产氧速率作为多孔介质连续方程的源项, 产热速率作为多孔介质能量方程的源项, 电解槽单体模拟得到的进出口压差作为阻力输入到多孔介质模型中. 进出口压差 Δp 与供水流量 Q 存在如下关系:

$$\Delta p = a'Q^2 + b'Q. \tag{9}$$

其中, a' 和 b' 为拟合系数. 电解槽进口平均流速 v 与流量 Q 的关系为

$$v = \frac{Q}{A'}. \tag{10}$$

式中 A' 为进口截面积, Δp 与流速 v 的关系可写为

$$\Delta p = av^2 + bv. \tag{11}$$

式中 a 和 b 为系数. 多孔介质中的动量源项 S 是由压差阻力引起的, 可以表示为

$$S = \frac{\mu v}{\alpha} + \frac{1}{2}C_2\rho v^2. \tag{12}$$

其中, μ 为流体动力黏性系数, $1/\alpha$ 为惯性阻力系数, C_2 为黏性阻力系数, ρ 为流体密度. 动量源项与压差阻力的关系为

$$\Delta p = S\Delta n. \tag{13}$$

其中 Δn 为电解槽进口至出口的长度, 则式 (12) 中惯性阻力系数和黏性阻力系数可分别表示为

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{b}{\mu\Delta n}, \tag{14}$$

$$C_2 = \frac{2a}{\rho\Delta n}. \tag{15}$$

按照上述原理对电解槽系统进行建模, 进口采用质量流量边界条件, 出口采用压力边界条件, 外壁面处采用绝热边界条件. 所有网格均为结构性网格, 网格单元数为 1 127 148. 与电解槽单体类似, 当网格数量增加 20% 或者 40%, 得到的计算结果基本相同, 因而可认为电解槽系统网格具有独立性.

电解槽在实际使用过程中, 进出口既可以放置在电解槽组件同侧亦可以放置在两侧. 这里研究不同重力条件下两种进出口布置方式对水量分配的影响.

4 电解系统计算结果

4.1 微重力条件

微重力环境下, 采用不同进出口布置方式时, 电解槽组件各物理场如图 11 所示. 图 11 中两侧竖条代表实际进出水管, 中间横条代表各个电解槽单体, 共有 48 个. 可以看到, 当电解槽组件处于微重力环境时, 无论进出口在其同侧还是两侧, 都是进出口处位置的流速大, 而且气体均是在远离电解槽组件进出口的位置聚集, 因此远离电解槽组件进出口位置的温度更高. 对于每一层单体, 其流速均先减小后增大, 这是由于沿着流动方向, 单体的横截面先增大后减小, 因此流速有这种变化趋势, 这与单体的计算结果 (见图 4) 一致. 微重力下各个电解槽单体的水量分配情况如图 12 所示, 电解槽单体从下向上编号. 可以看

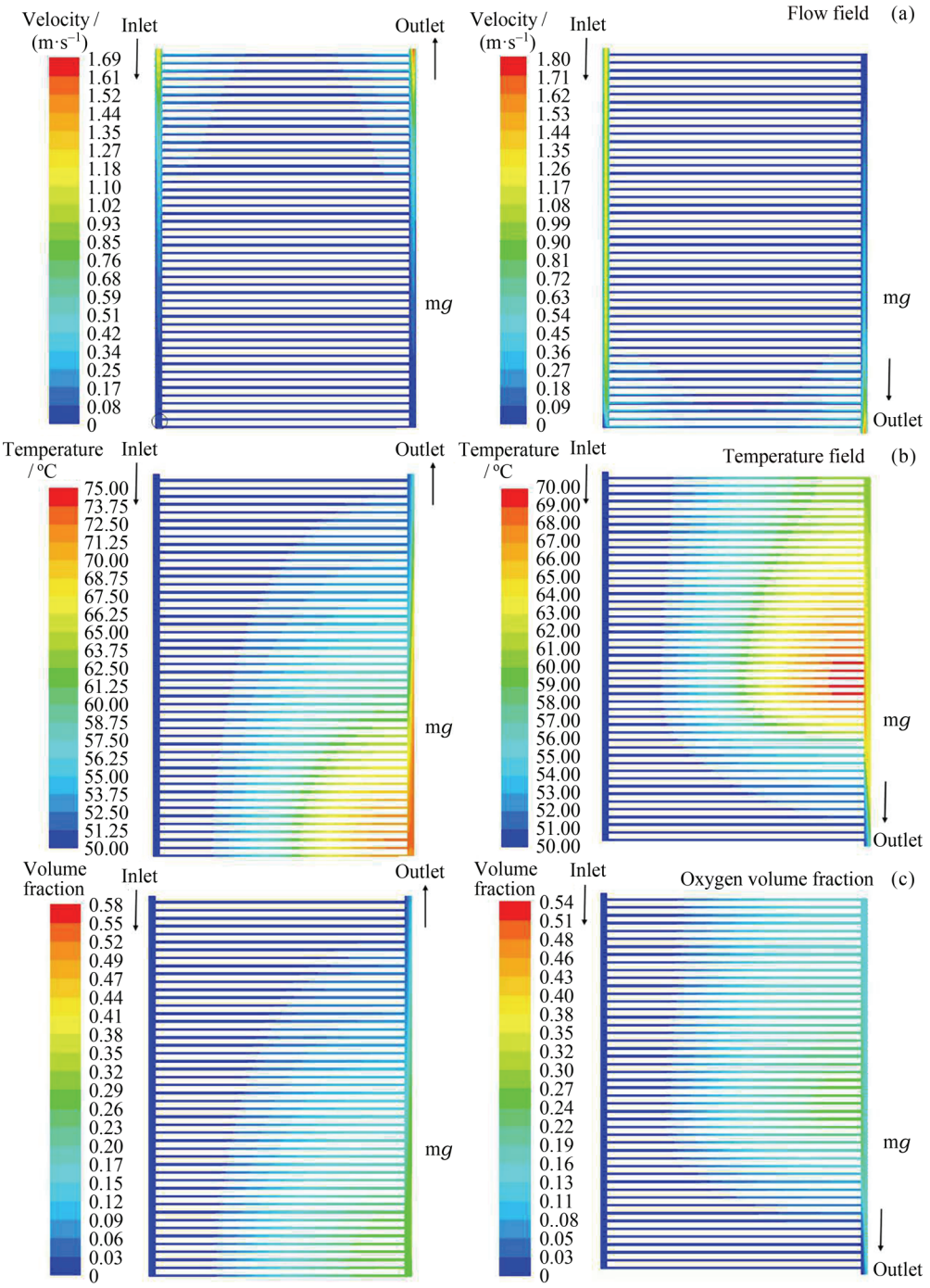


图 11 微重力条件下电解槽系统在两种进出口布置方式下的物理场

Fig. 11 Physical field of the anode under two types of inlet/outlet arrangements in microgravity condition

出, 电解槽单体间水量分配不均匀, 出口附近的电解槽单体获得了较多的水量, 而远离出口的电解槽单体水量较少. 以电解槽的平均供水流量 ($0.3\,\mathrm{L\cdot min^{-1}}$) 为参考, 约有 2/3 的电解槽单体的流量偏低, 最小流量约为平均流量的 30%. 正是由于电解槽内部阻力不同, 导致水量分配不均匀, 进而影响到各个电解槽单体内部的温度场和气体体积分布. 电解槽单体的温度和氧气含量与流经单体内的水流量紧密相关, 流速越低, 传输热量和气体的速率越慢, 使得单体内部温度升高且氧气体积分数增大. 此外, 当进出口布置

在电解槽组件同侧时, 水量分配比布置在电解槽组件两侧时更为均匀.

4.2 常重力条件

当电解槽组件水平放置且进出口布置在其两侧时, 生成的气体在重力作用下向电解槽组件上部聚集, 难以通过出水管从出口排出, 导致计算无法收敛. 因此电解槽组件水平放置时不应采用这种进出口布置方式. 当电解槽组件水平放置时, 这里只研究进出口在电解槽组件同侧时电解槽内部各物理场的分布.

与微重力情况不同, 当电解槽组件水平放置时, 热量在电解槽组件出口侧的中部附近聚集, 使得这里出现一个面积较大的高温区, 如图 13 所示. 此外, 电解槽单体间水量也与微重力下具有显著区别. 不同于微重力下出口位置的电解槽单体水量最大, 水平放置时上下两端的电解槽单体获得了较多的水量, 而中部电解槽单体的水量较少. 以电解槽组件的平均供水

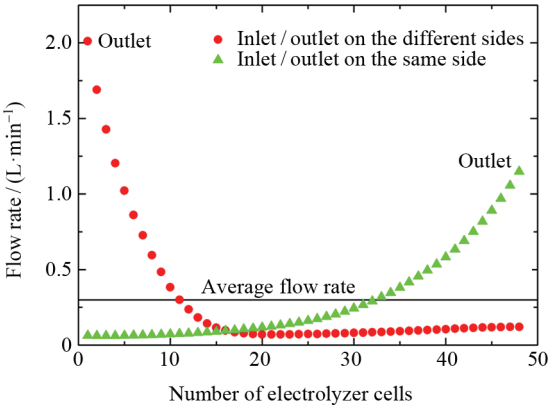


图 12 微重力条件下电解槽系统水量分配

Fig. 12 Water distribution of the electrolyzer system in microgravity condition

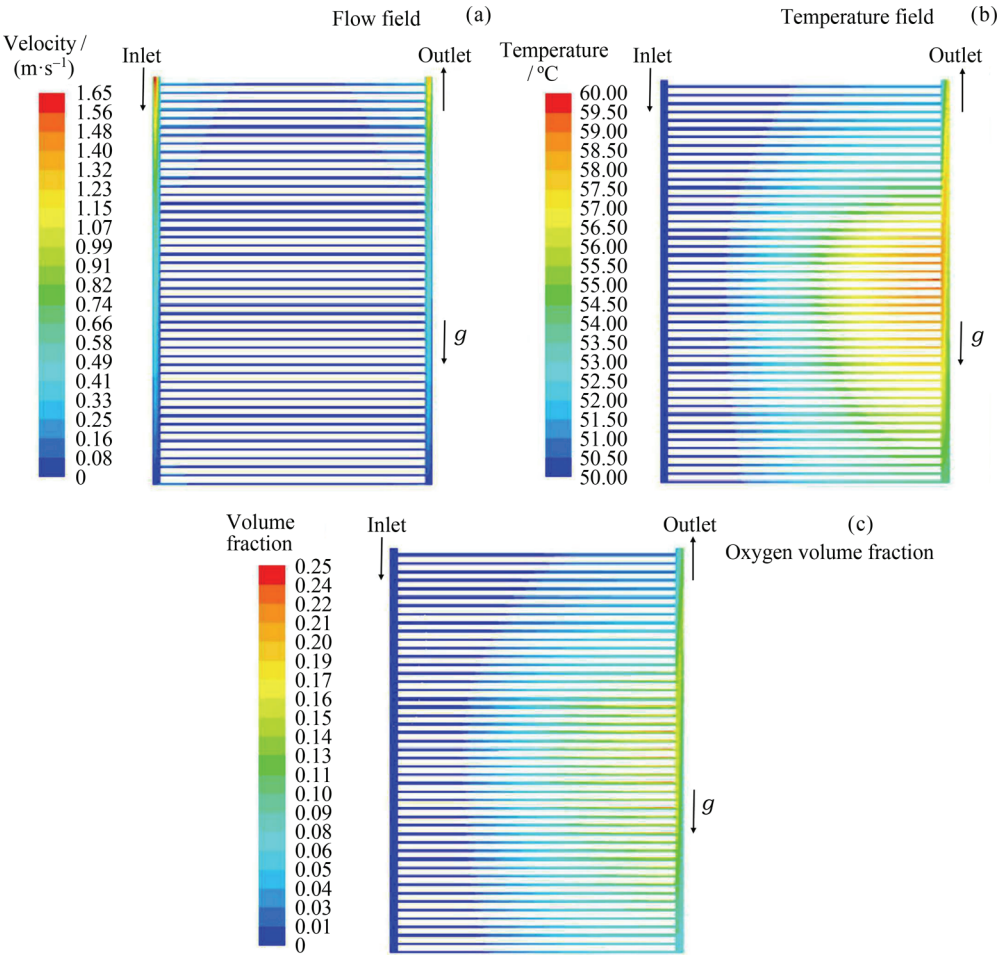


图 13 水平放置条件下电解槽系统的物理场

Fig. 13 Physical fields of the electrolyzer system in horizontal condition

流量 (0.3 L·min^{-1}) 为参考, 水平放置条件下, 电解槽的速度场、温度场以及氧气浓度如图 14 所示. 图 14 中约有 2/3 的电解槽单体流量偏低, 最小流量约为平均流量的 50%, 最大流量约为平均流量的 3.3 倍.

当电解槽组件竖直放置时, 无论进出口在电解槽的同侧还是两侧, 气体均是在远离出口的电解槽组件内聚集, 与微重力情况类似. 每个单体的水量分配情况如图 15 所示, 远离出口处的电解槽单体水量最小, 接近出口处的电解槽单体水量最大, 这种水量分配情况与电解槽组件水平时的趋势完全不同, 而与微重力下比较接近. 这是由于竖直放置时, 水平方向上无浮力作用, 主要受进出口压差影响, 重力效应不明显, 可以忽略不计, 因此导致微重力与竖直放置时的物理场比较接近. 此外, 进出口布置在电解槽组件同侧时的水量分配比布置在电解槽组件两侧时更加均匀. 因此在竖直放置时, 要从下部进水, 而且进出口应布置在电解槽组件的同侧.

对比常重力和微重力条件下电解槽系统的水量分配情况可以发现, 即使在微重力条件下, 进出口分布在电解槽组件两侧时水量分配仍比在同侧时更加不均匀, 因此这种进出口布置方式不宜采用.

5 结论

建立了水电解槽三维气液两相流动模型和电解槽系统供水过程模型, 并对不同重力条件下电解槽内两相流动和温度场特性以及电解槽供水进行了模拟仿真, 主要结论如下.

阳极在下 (电解槽水平)、阳极在上 (电解槽水平)、进水口在下 (电解槽竖直) 以及微重力等条件下的电解槽流场和温度场均匀, 而进水口水平 (电解槽竖直) 时, 流动和温度分布发生显著改变, 局部区域因缺水出现高温. 进水口在上 (电解槽竖直) 时, 由于浮力的影响, 气体在进水口处汇聚, 此时流场不存在稳态解.

电解槽系统竖直放置时, 进水管应放置在下部, 此时从底部至顶部的电解槽水量保持增加, 与微重力环境下的水量分配趋势一致; 水平放置时中间电解槽的水量低, 进出口两端的水量高.

无论采用何种方式放置电解槽, 进出口放在电解槽组件同侧时水量分配均比放在两侧时更均匀.

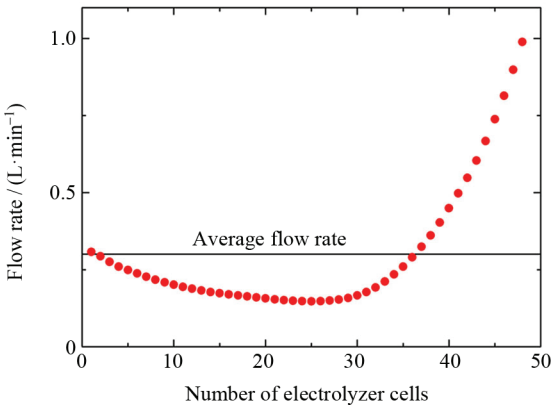


图 14 水平放置条件下电解槽系统水量分配

Fig. 14 Water distribution of the electrolyzer system in horizontal condition

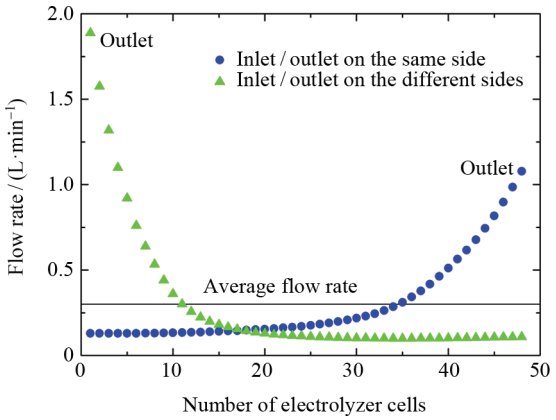


图 15 不同进/出口布置方式时电解槽系统水量分配

Fig. 15 Water distribution of the electrolyzer system under different inlet/outlet arrangements

参考文献

[1] LIN Zidong, BAI Song, ZHANG Xiaohui. Development prospect of water electrolysis hydrogen production technology [J]. *J. Ship Chem. Defense*, 2014, **2**: 48-54 (吝子东, 白松, 张晓辉. 水电解制氢技术发展前景 [J]. 舰船防化, 2014, **2**: 48-54)

[2] CHENG Jun, YE Fang, ZHANG Wei, *et al.* Development status of proton exchange membrane electrolyzer for energy storage [J]. *J. Chem. Bioeng.*, 2015, **32**(01): 1-7 (程俊, 叶芳, 张伟, 等. 储能用质子交换膜电解池的发展现状 [J]. 化学与生物工程, 2015, **32**(01): 1-7)

[3] YIN Xuling, YE Fang, GUO Hang, *et al.* Two-dimensional numerical simulation of transient response of two-phase heat and mass transfer in a proton exchange membrane electrolyzer cell [J]. *J. Sust. Energ.*, 2018, **8**(1): 10-22 (伊许玲, 叶芳, 郭航, 等. 质子交换膜电解池两相传热传质瞬态响应二维数值模拟 [J]. 可持续能源, 2018, **8**(1): 10-22)

[4] CARMO M, FRITZ D L, MERGE J, *et al.* A comprehensive review on PEM water electrolysis [J]. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2013, **38**(12): 4901-4934

[5] LI Junrong, YIN Yongli, ZHOU Kanghan, *et al.* Progress of oxygen generation technology by water electrolysis in space station [J]. *J. Aerosp. Med. Med. Eng.*, 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)

[6] ZENG Qingtang, ZHENG Chuanxian. Oxygen generation technology by water electrolysis in space station [J]. *J. Aerosp. Med. Med. Eng.*, 1990, **3**(3): 222-226 (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)

[7] YIN Yongli, ZHOU Kanghan, LI Junrong, *et al.* Study on environmental adaptability design and test of pxygen generation assembly by electrolysis [J]. *J. Aerosp. Med. Med. Eng.*, 2015, **28**(5): 358-362 (尹永利, 周抗寒, 李俊荣, 等. 电解制氧装置环境适应性设计与试验研究 [J]. 航天医学与医学工程, 2015, **28**(5): 358-362)

[8] ZHOU Kanghan, REN Chunbo, WANG Fei, *et al.* Development and test of 5 MPa high pressure proton exchange membrane water electrolysis system [J]. *J. Aerosp. Med. Med. Eng.*, 2012, **25**(5): 368-371 (周抗寒, 任春波, 王飞, 等. 5 MPa 高压质子交换膜水电解装置的研制与试验 [J]. 航天医学与医学工程, 2012, **25**(5): 368-371)

[9] ZHANG Xinrong, REN Jianxun, LIANG Xingang. Mass optimization of SPE oxygen generation system in manned spacecraft [J]. *Tsinghua Sci. Technol.*, 2002, **42**(08): 1106-1109 (张信荣, 任建勋, 梁新刚. 载人航天器 SPE 水电解制氧系统的轻量化研究 [J]. 清华大学学报.: 自然科学版, 2002, **42**(08): 1106-1109)

[10] PENG Chao. Experimental Study on Gravity Effect and Electrical Properties of Two-Phase Flow in Transparent SPE Electrolytic Cell [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2012 (彭超. 透明 SPE 电解电池内两相流重力效应及其电性能实验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012)

[11] PENG Chao, ZHAO Jianfu, DU Wangfang, *et al.* Experimental study of the orientation influence on performance of electrolytic cell [J]. *J. Eng. Thermophys.*, 2013, **34**(8): 1491-1493 (彭超, 赵建福, 杜王芳, 等. 安装方位对电解电池性能影响的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, **34**(8): 1491-1493)

[12] ZHAO Jianfu, HU Wenrui. Novel Investigation on the principle of similarity for microgravity two-phase flow [J]. *J. Appl. Found. Eng. Sci.*, 2002, **1**: 1-7 (赵建福, 胡文瑞. 微重力两相流相似模拟准则新探 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, **1**: 1-7)

[13] KURMAZENKO E A, SAMSONOV N M, GAVRILOV L I, *et al.* Off-normal situations related to the operation of the electron-VM oxygen generation system aboard the international space station [R]. Rome: SAE Technical Paper, 2005

[14] Millet P. Water electrolysis using EME technology: temperature profile inside a nafion membrane during electrolysis [J]. *Electrochim. Acia*, 1991, **36**(2): 263-267

[15] HAN Bo, MO Jingke, KANG Zhenye, *et al.* Modeling of two-phase transport in proton exchange membrane electrolyzer cells for hydrogen energy [J]. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2017, **42**(7): 4478-4489

[16] ALDAS K, PEHLIVANOGLU N, MAT M D. Numerical and experimental investigation of two-phase flow in an electrochemical cell [J]. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2008, **33**(14): 3668-3675

[17] AUBRAS F, DESEURE J, KADJO J-J A, *et al.* Two-dimensional model of low-pressure PEM electrolyser: two-phase flow regime, electrochemical modelling and experimental validation [J]. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2017, **42**(42): 26203-26216

[18] OLESEN A C, ROMER C, KAR S K. A numerical study of the gas-liquid, two-phase flow maldistribution in the anode of a high pressure PEM water electrolysis cell [J]. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2016, **41**(1): 52-68

[19] NIE J, CHEN Y. Numerical modeling of three-dimensional two-phase gas-liquid flow in the flow field plate of a PEM electrolysis cell [J]. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2010, **35**(8): 3183-3197

[20] ARBABI F, MONTAZERI H, ABOUATALLAH R, *et al.* Three-dimensional computational fluid dynamics modelling of oxygen bubble transport in polymer electrolyte membrane electrolyzer porous transport layers [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2016, **163**(11): 3062-3069

[21] YU Jiang, YAN Kangping, XIA Guangyi, *et al.* Numerical simulation for temperature field in the anode of SPE water electrolyzer [J]. *Sichuan J. Chem. Ind.*, 2007, **10**: 9-12 (于江, 闫康平, 夏广义, 等. SPE 水电解槽阳极温度场数值模拟 [J]. 四川化工, 2007, **10**(05): 9-12)

[22] LI Linlin, ZHANG Jili, ZHOU Kanghan. Numerical simulation analysis of single-phase flow field in micro-flow-channels of the small square cylinders in the electrolysis oxygen generation [J]. *J. Aerosp. Med. Med. Eng.*, 2009, **22**(1): 22-26 (李林林, 张吉礼, 周抗寒. 电解水制氧槽方柱群微小流道单相流场数值模拟分析 [J]. 航天医学与医学工程, 2009, **22**(1): 22-26)

[23] LI Linlin, ZHANG Jili. Experimental study on single phose flow field of micro-square cylinder group in oxygen generation sample by PIV technique [J]. *J. Harbin Univ. Technol.*, 2008, **40**(8): 1222-1226 (李林林, 张吉礼. 电解制氧槽试件微柱群单相流场 PIV 测试 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(8): 1222-1226)