

海拔高度对质子交换膜燃料电池堆的性能影响

张 瞳, 夏玉珍, 张 丽, 胡桂林

(浙江科技大学机械与能源工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 在 ANSYS/Fluent 软件中建立全尺度的小型空冷型质子交换膜燃料电池(PEMFC)堆仿真模型, 并采用计算流体力学(CFD)方法进行求解。研究不同海拔高度和阴极过量系数对电池堆的输出性能、温度和氧气浓度的影响。结果表明: 海拔升高到 3200 m 时, 电池堆的峰值功率密度降低了 21.6%; 增加阴极过量系数可补偿因海拔升高而降低的氧气浓度, 提高电池堆的输出性能, 减小电池堆的内部温度差异。

关键词: 空冷型 PEMFC 堆; 海拔高度; 输出性能; 阴极过量系数; 数值模拟; 温度均匀性

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

0 引 言

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是一种高效率、零排放的能源转换装置^[1]。空冷型 PEMFC 由于其系统简单、成本低且易于维护, 在便携式电源、分布式发电、低空飞行无人机以及交通运输等领域具有广阔的发展前景^[2-4]。然而, 空冷型 PEMFC 在运行过程中会受到多种环境因素的影响^[5-8]。其中, 因海拔高度而引起的环境变化是非常重要的影响因素之一。

海拔高度的变化会引起环境压力、温度、湿度和氧气含量等多种环境因素的变化, 这些因素对 PEMFC 的输出性能有直接影响。特别是在高海拔环境下, 大气压力和温度的大幅下降会导致空冷型 PEMFC 的操作压力和进气温度的降低, 严重影响空冷型 PEMFC 的输出性能。Hordé 等^[9]在 200~2200 m 的海拔高度下测试了空冷型 PEMFC 堆的性能, 结果表明高海拔环境下较低的环境压力和空压机效率是导致电池堆性能下降的主要原因之一。Uno 等^[10]在高空测试了由 16 个单元构成的燃料电池堆, 发现较低的氧分压和水的凝结严重影响了电池堆的输出效率。为解决这一问题, 提高燃料电池堆的操作压力可有效减小内部水凝结带来的影响。González 等^[11]建立了 0~11000 m 的大气模型, 研究发现燃料电池在高海拔条件下, 大气压力和温度对极化曲线恶化的影响大于大气相对湿度的影响, 并研究验证 PEMFC 在中低空环境下的可行性。

目前, 有关海拔高度对空冷型 PEMFC 的影响的研究主要以实验或以单电池的模拟为主^[12-13]。然而, 仅依靠单电池的测试并不能准确反映整个电池堆的表现, 而相关实验研究

又受到地域条件的限制而变得复杂且成本巨大。因此, 本文建立全尺度的小型空冷型 PEMFC 堆模型, 包括氢气进气歧管^[14], 并基于计算流体力学(computation fluid dynamics, CFD)进行数值模拟, 分析 0、800、1600、2400、3200 m 的海拔高度对电池堆输出性能的影响。

1 几何设计和数学模型

1.1 几何结构

本文建立的空冷型 PEMFC 堆模型在 ANSYS Design Model 中完成建模。电池堆模型由 10 片单电池堆叠而成, 其中每片电池的阳极流道为 6 通道蛇形流道结构, 阴极流道是 25 个平行直流道, 阴、阳极气体采用交叉流动的方式。

1.2 网格划分

网格划分以六面体网格为主, 这种网格类型能较好地适应复杂几何结构, 并且在 CFD 模拟中具有较高的精度和稳定性。各层材料部件的网格划分: 在 Z 方向分成均匀的 200 个网格; X 方向分成均匀的 144 个网格; 在 Y 方向的网格分布为极板 4、扩散层 3、催化层 1、质子交换膜为 2, 共 18 个网格, 单片电池网格划分为 $18 \times 144 \times 200 = 518400$ 个网格单元。

电池堆模型的几何结构如图 1 所示, 其几何参数如表 1 所示。

1.3 数学模型

为平衡模型的准确性和实用性, 提高仿真效率和研究的可行性, 对 PEMFC 模型进行适当简化, 在本文建模过程中假设:

收稿日期: 2025-01-20

基金项目: 浙江科技大学基本科研业务费项目(2025QN075); 浙江省自然科学基金杰出青年基金(R1100065)

通信作者: 胡桂林(1975—), 男, 博士、教授, 主要从事燃料电池和气固两相流方面的研究。enehgl@163.com

- 1) PEMFC 堆模型在稳定状态下运行；
- 2) 膜和电极结构是各向同性材料,在所有方向上,渗透率、孔隙度一致；
- 3) 质子交换膜对气体不具有渗透性；
- 4) 反应过程生成的水以气态的形式存在；
- 5) 所有混合气体均为理想气体且不溶于水,流体流动为层流和不可压缩；
- 6) 不考虑重力的影响。

PEMFC 堆的反应过程涉及电化学反应、流体流动、组分传输、热传递等多个物理过程。

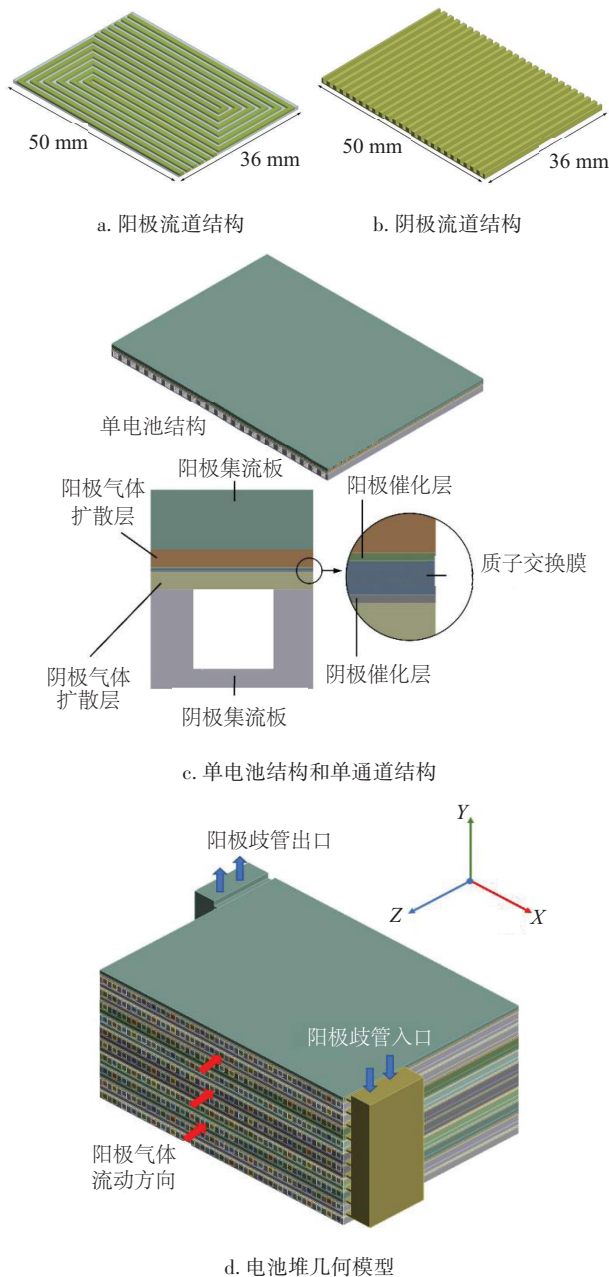


图1 电池组成和电池堆的几何结构

Fig. 1 Composition of cell and geometry of cell stack

表1 电池堆模型的几何参数

Table 1 Geometric parameters of stack model

参数	取值
阳极极板长×宽×高/mm	50×36×0.75
阴极极板长×宽×高/mm	50×36×1.25
阳极流道深度×宽度/mm	0.5×1
阴极流道深度×宽度/mm	1×1
流道肋宽度/mm	1
阴极/阳极流道数量	25/6
歧管长×宽×高/mm	11×4×24
气体扩散层厚度/mm	0.22
催化剂层厚度/mm	0.01
质子交换膜厚度/mm	0.04
单片电池数量	10
单片电池活性面积/cm ²	18

1.3.1 质量守恒方程

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

式中： ε ——多孔材料的孔隙率； ρ ——气体混合物密度， kg/m^3 ； ∇ ——哈密顿算子； $\mathbf{u}$ ——速度矢量， m/s ； S_m ——质量源项， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

S_m 与催化剂层发生的电化学反应相关,因此其在不同区域有不同表达:

$$S_m = \begin{cases} 0, & \text{流道和气体扩散层} \\ S_{m,H_2} = -\frac{M_{H_2}}{2F} J_a, & \text{阳极催化剂层} \\ S_{m,H_2O} + S_{O_2} = \frac{M_{H_2O}}{2F} J_c - \frac{M_{O_2}}{4F}, & \text{阴极催化剂层} \end{cases} \quad (2)$$

式中： J ——体积转移电流， A/m^3 ； F ——法拉第常数,取值为 $96485 \text{ C}/\text{mol}$ 。

1.3.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\mu\nabla\mathbf{u}) + S_u \quad (3)$$

式中： p ——气体压力， Pa ； μ ——混合物动力黏度， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ； S_u ——动量源项， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

动量守恒方程描述气体在流道、气体扩散层和催化剂层的流动, S_u 在这几个区域可表示为:

$$S_u = \begin{cases} 0, & \text{流道及其他区域} \\ \frac{\varepsilon^2\mu\mathbf{u}}{\kappa}, & \text{气体扩散层和催化剂层} \end{cases} \quad (4)$$

式中： κ ——气体扩散层和催化剂层的渗透率， m^2 。

1.3.3 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho u c_p T) = \nabla \cdot (\varepsilon k_{\text{eff}} \nabla T) + S_T \quad (5)$$

式中: c_p ——混合物的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T ——温度, K ; k_{eff} ——有效热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_T ——体积能量源项, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

有效热导率 k_{eff} 在多孔区域中可表示为:

$$k_{\text{eff}} = k_s(1 - \varepsilon) + k_g \varepsilon \quad (6)$$

式中: k_s ——多孔区域的固体材料的热导率; k_g ——多孔区域的混合气体的热导率。

1.3.4 组分守恒方程

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho u Y_i) = \nabla \cdot (D_i^{\text{eff}} \nabla Y_i) + S_i \quad (7)$$

式中: Y_i ——不同气体的组分浓度, mol/m^3 ; D_i^{eff} ——气体有效扩散系数, m^2/s ; S_i ——组分源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

S_i 在流道和气体扩散层中均为 0, 在催化剂层可表示为:

$$S_i = \begin{cases} S_{i, \text{H}_2} = -\frac{M_{\text{H}_2}}{2F} J_a, & \text{阳极催化剂层} \\ S_{i, \text{O}_2} = -\frac{M_{\text{O}_2}}{4F} J_c, & \text{阴极催化剂层} \\ S_{i, \text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{2F} J_a, & \text{阳/阴极催化剂层} \end{cases} \quad (8)$$

1.3.5 电荷守恒方程

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{\text{eff}} \nabla \varphi_s) = S_{\varphi_s} \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_m^{\text{eff}} \nabla \varphi_m) = S_{\varphi_m} \quad (10)$$

式中: σ_s^{eff} ——固相电导率, S/cm ; σ_m^{eff} ——膜相电导率, S/cm ; φ_s ——固相电位, V ; φ_m ——膜相电位, V ; S_{φ} ——电荷源项, A/m 。

S_{φ} 在不同区域可表示为:

$$S_{\varphi} = \begin{cases} S_{\varphi_s} = \begin{cases} -J_a \nabla, & \text{阳极催化剂层} \\ J_c, & \text{阴极催化剂层} \end{cases} \\ S_{\varphi_m} = \begin{cases} J_a, & \text{阳极催化剂层} \\ -J_c, & \text{阴极催化剂层} \end{cases} \\ 0, & \text{其他区域} \end{cases} \quad (11)$$

模型中活化过电位和体积转移电流密度可用 Butler-Volmer 表示, 即:

$$J = a i^{\text{ref}} \left(\frac{Y_i}{Y_i^{\text{ref}}} \right)^{\tau} \left\{ \exp \left(\frac{\alpha_a F \eta_c}{RT} \right) - \exp \left[\frac{(1 - \alpha_c) F \eta_c}{RT} \right] \right\} \quad (12)$$

式中: a ——有效反应面积, m^2 ; i^{ref} ——参考电流密度, A/m^2 ; Y_i^{ref} ——气体组分参考浓度, mol/m^3 ; τ ——对应气体浓度指数; α_c ——传递系数; η_c ——阳极或阴极的活化过电位, V 。

1.4 计算方法和物性参数

模型主要利用 ANSYS/Fluent 软件进行求解, 电池堆模型采用 Fluent 软件中内嵌的 PEMFC 模块。模型的求解算法采用 SIMPLE 算法。模型的进气入口采用质量流量入口, 出口

为压力出口, 电池堆的外壁面采用自然对流换热。模型的相关物性参数和模拟时的边界条件如表 2 所示。

表 2 模型的物性参数和边界条件

Table 2 Physical parameters and boundary conditions of model

参数	取值
阳极参考电流密度/ (A/m^2)	1×10^4
阴极参考电流密度/ (A/m^2)	10
阳极参考浓度/ (mol/m^3)	56.4
阴极参考浓度/ (mol/m^3)	3.39
开路电压/ V	1.1
初始阴、阳极进气温度/ K	298.15
初始阴、阳极操作压力/ Pa	101325
阳极化学计量比	1.5
阴极化学计量比	30/50/80/110
阳极进气湿度/%	80
阴极进气湿度/%	70
自然对流系数/ $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	20

1.5 模型验证

为保证电池堆模型具有较高的网格质量, 对模型每条边进行均匀划分, 生成以六面体网格为主导的网格模型。为在有限计算资源下提高模拟计算效率和结果准确性, 在电池堆输出电压为 6 V 时, 选取 4 组网格数量 (3906010、4770010、5346010、5922010) 进行网格无关性验证。当网格数量达到 5346010 后, 继续增加网格数量, 电流密度仅变化 0.2%。因此, 选择网格数量为 5346010 的模型进行后续研究。为保证电池堆模型的准确性, 将数值模拟得到的极化曲线与文献 [15] 中的实验数据 [15] 进行比较。如图 2 所示, 极化曲线与实验数据基本一致, 验证了电池堆模型的准确性。

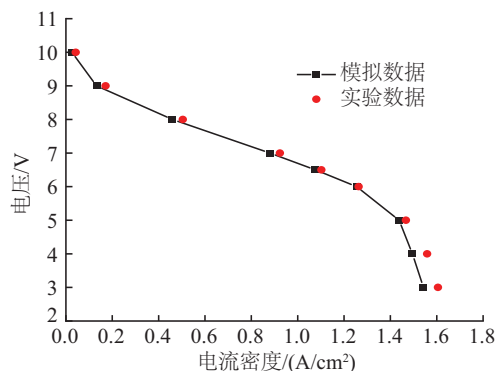


图 2 模拟的极化曲线与实验数据的对比

Fig. 2 Comparison of simulated polarization curves with experimental data

2 结果与讨论

2.1 海拔高度模型

海拔的升高会引起环境压力、温度等环境参数的变化。对于空冷型 PEMFC 堆,环境参数的变化会影响 PEMFC 堆的输出性能^[16]。为准确分析 PEMFC 在高海拔环境下的性能变化,建立 0、800、1600、2400、3200 m 的海拔高度模型来描述环境参数的变化。假设在海拔高度为 0 m 时,环境的初始压力 p_0 和初始温度 T_0 分别为 101325 Pa 和 298.15 K。环境温度 T_{env} 和环境压力 p_{env} 随海拔的变化可描述为:

$$T_{\text{env}} = T_0 - \lambda H \quad (13)$$

$$p_{\text{env}} = p_0 \left(1 - \lambda \frac{H}{T_0} \right)^{g/\lambda R} \quad (14)$$

式中: $\lambda=0.0065$ K/m; H ——海拔高度, m; g ——重力加速度, m/s^2 ; R ——空气常数。

环境参数随海拔高度的变化如表 3 所示。空冷型 PEMFC 堆的冷却主要依靠空气流动来实现。具体来说,阴极区域裸露在周围环境中,空气作为氧化剂的同时还起到冷却剂的作用。

表 3 不同海拔高度下的环境参数

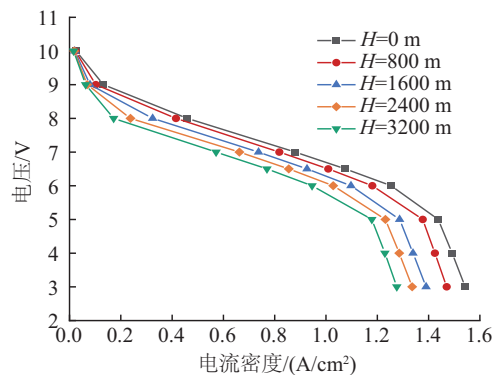
Table 3 Environmental parameters at different altitudes

海拔高度/m	环境压力/Pa	环境温度/K	氧气分压力/Pa
0	101325	298.15	21278
800	92076	292.95	19336
1600	83523	287.75	17539
2400	75625	282.55	15881
3200	68343	277.35	14352

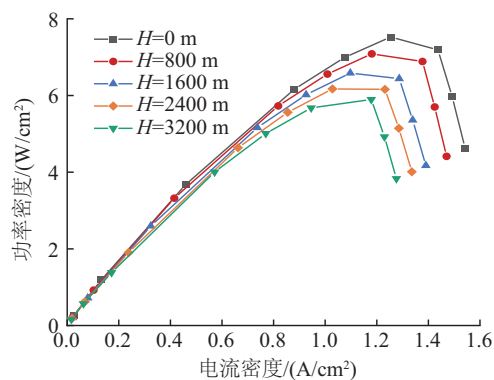
2.2 海拔高度对空冷型 PEMFC 堆性能的影响

海拔的升高会降低 PEMFC 堆的操作压力、进气温度和阴极氧气浓度,从而限制 PEMFC 堆的输出性能。为了控制空冷型 PEMFC 的温度,其阴极过量系数的选择从几十到上百不等^[17-18],本文 PEMFC 堆的阴极过量系数设置为 30、50、80 和 110。增加阴极过量系数可提供更多氧气,从而减少氧气在阴极催化剂层的浓度极化,提高电池堆的输出性能。增加阴极过量系数可显著提高空气流量,从而增强对流换热,带走更多的反应热量,降低电池堆的内部温度。本节讨论在阳极和阴极过量系数分别为 1.5 和 80 时,PEMFC 堆的输出性能随海拔高度的变化情况。图 3 为 PEMFC 堆在不同海拔高度下的极化曲线和功率密度曲线。如图 3a 所示,在相同输出电压下,电池堆的电流密度随海拔的升高不断减小。输出电压为 6.5 V 时,当海拔从 0 m 上升到 3200 m,电流密度从 1.07 A/cm² 降至 0.77 A/cm²,PEMFC 堆的电流密度降低了

28.2%。由图 3b 可知,在低电流密度下,电池堆的功率密度随海拔的变化相差不大。当海拔从 0 m 上升到 3200 m 时,电池堆的峰值功率密度从 7.52 W/cm² 降至 5.89 W/cm²,PEMFC 堆的输出性能衰减了 21.6%。模拟结果与理论分析一致,在高海拔环境下,操作压力的减小和较低的进气温度是限制 PEMFC 堆输出性能的主要原因之一。



a. 极化曲线



b. 功率密度曲线

图 3 不同海拔高度下电池堆的极化曲线与功率密度曲线

Fig. 3 Stack polarization and power density curves at different altitudes

2.3 海拔高度对电池堆温度分布的影响

在高海拔环境下,环境温度主要影响空冷型 PEMFC 堆的进气温度和对流温度。图 4 为 3200 m 海拔高度下,输出电压为 6.5 V 时,电池堆部分电池阴极催化剂层的温度分布情况。PEMFC 堆的最高温度出现在电池堆的中间区域(具体位置是阴、阳极气体进气方向的交汇处)。反应气体在流动过程中会带走反应时产生的热量,并且带走热量的能力沿流动方向逐渐减弱。这种现象是造成单片电池温度分布不均匀的主要原因之一。电池堆内各片电池之间的温度差异主要是由于电池间换热能力的不同导致的。在电池堆的中间区域,反应热较为集中,并且被其他电池包围,热量散失较少。相对而言,电池堆的边缘区域与外界环境之间的传导和对流换热更加明显,从而促进了边缘区域的散热。这种差异导致电池中间区域温度较高,而两端温度较低。

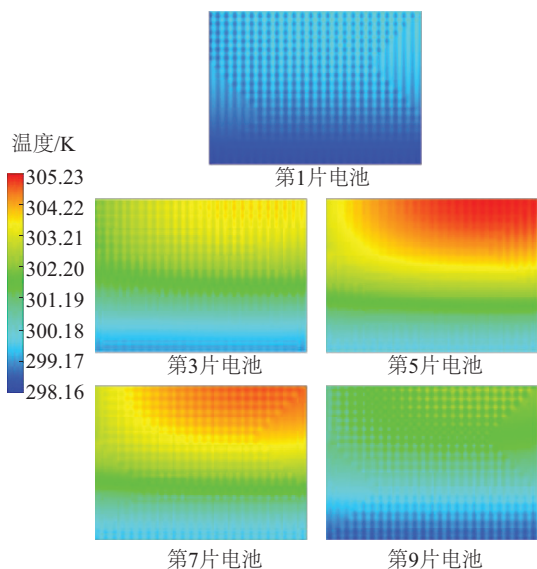


图4 阴极催化剂层的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of cathode catalyst layer

随着海拔的升高进气温度和对流换热温度均下降。根据能斯特方程分析,温度的降低会增加活化损失,导致电池性能的衰减,从而进一步降低电池堆温度。图5对比了不同海拔高度下 PEMFC 堆内各片电池的平均温度。在不同海拔高度下,电池堆内中间区域的单片电池平均温度最高,分别为 314.76、311.75、309.11、305.71、302.77 K。当海拔从 0 m 升高到 3200 m 时,最高平均温度降低了 11.99 K。在 0、800、1600、2400、3200 m 的海拔高度下,电池堆内的温度分布呈现出一致的趋势,即中间区域温度较高,两端温度较低。当海拔高度为 0 m 时,进气温度较高,导致电池堆内的化学反应更加剧烈,产生更多热量。在这种情况下,中间区域的热量积聚加剧,而两端的冷却效果相对较强,从而造成各片电池之间的温度差异更加显著。随着海拔的升高,进气温度和积累的反应热量逐渐降低,电池间的温度差异逐渐减小。

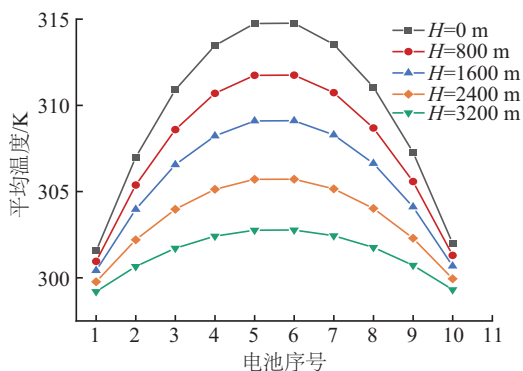


图5 不同海拔高度下堆内各片电池的平均温度

Fig. 5 Average temperature of each cell in stack at different altitudes

2.4 阴极过量系数对电池堆的影响

在空冷型 PEMFC 堆中,阴极过量系数是影响电池堆性能和传质的重要参数。增加阴极过量系数可提高氧气供应量,从而减少氧气在阴极催化剂层的浓度极化。当输出电压为 6.5 V 时,电池堆性能随阴极过量系数的变化如图 6 所示。在 3200 m 时,阴极过量系数对电池堆性能的提升更大。当阴极过量系数从 30 提升到 110 时,电池堆的平均电流密度从 0.68 A/cm² 增加到 0.79 A/cm²,提高了 16.2%。增加的阴极过量系数弥补了高海拔环境下较低的氧气浓度,减少了电池堆的浓度损失。

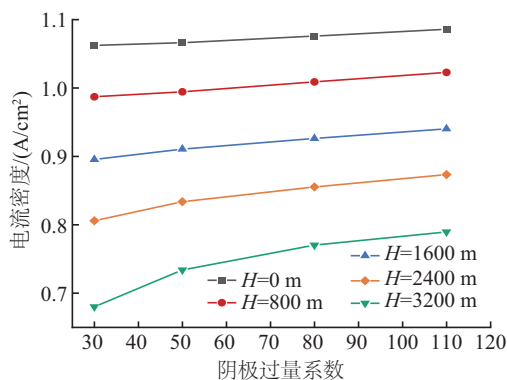
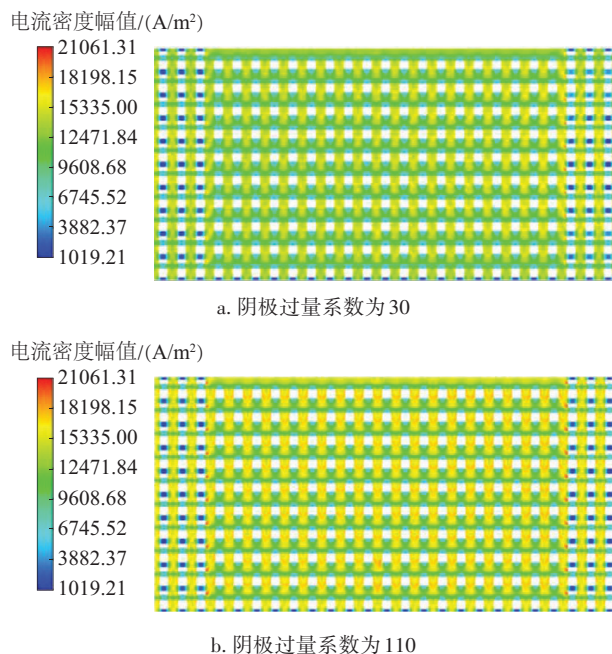


图6 阴极过量系数对电池堆性能的影响

Fig. 6 Effect of cathode stoichiometric ratio on stack performance

图7为阴极过量系数分别为30和110时,电池堆XY截面(Z=18 mm)的电子传输分布。相比于流道区域,肋区域与催化层直接接触,具有更好的导电性、更低的接触电阻和更短的传输路径。因此,电子主要在肋区域进行传输。海拔

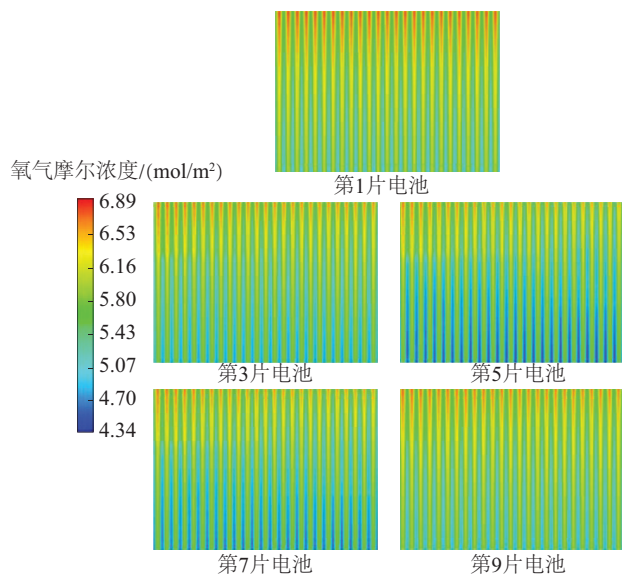


b. 阴极过量系数为110

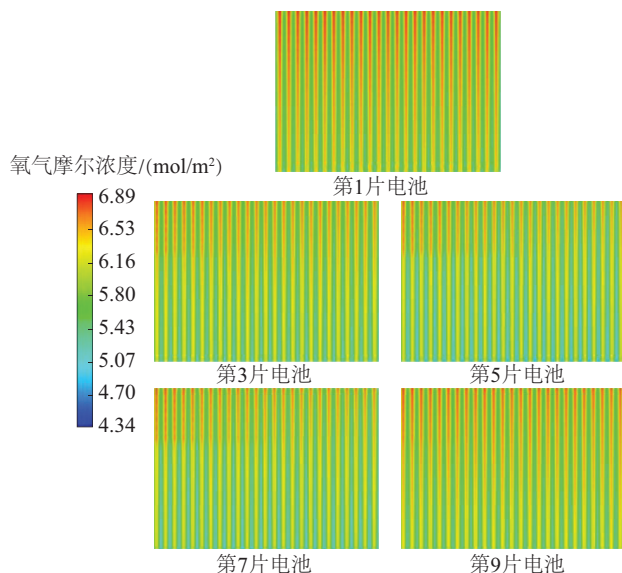
图7 电池堆截面(Z=18 mm)的电子传输分布

Fig. 7 Electron transport distribution of the cell stack cross section (Z=18 mm)

高度为 3200 m, 阴极过量系数从 30 增加到 110 时, 电子的传输增加了 10.8%。图 8 为阴极过量系数分别为 30 和 110 时, 电池堆内各电池的阴极催化剂层表面的氧气浓度分布。从单片电池的角度分析, 氧气浓度在进气口处最大, 在流动通道的方向上, 反应持续地消耗氧气。在氢气入口区域, 由于高速、低温的氢气进入, 导致该区域拥有较低的温度和反应速率。因此, 氢气入口区域的氧气浓度更高。肋下区域的氧气浓度普遍低于流道下的氧气浓度, 其原因是流道区域的氧气浓度更高, 更易扩散到反应界面。电池堆内不同位置的电池, 氧气浓度的分布存在差异。在电池堆中间位置的电池具有更高的电池温度, 电化学反应速率更高, 消耗的



a. 阴极过量系数为 30



b. 阴极过量系数为 110

图 8 阴极催化剂层氧气浓度分布(3200 m)

Fig. 8 Oxygen concentration distribution in cathode catalyst layer (3200 m)

氧气也更多。在阴极过量系数为 30 时, 阴极催化剂层表面的最低氧气浓度为 3.47 mol/m^3 , 当阴极过量系数为 110 时, 阴极催化剂层表面的最低氧气浓度为 3.71 mol/m^3 。如图 8 所示, 增大阴极过量系数, 可显著减小氧气浓度梯度。在氧气消耗更明显的区域, 增大阴极过量系数, 可更好补偿氧气的消耗。

图 9 为阴极过量系数对堆内温度的影响。阴极过量系数越高时, 冷却效果越明显。海拔高度为 3200 m, 阴极过量系数从 30 升高到 110 时, 电池堆内的最高温度从 310.15 K 降低到 303.25 K, 堆内最高温度降低了 6.9 K。同时, 较大的阴极过量系数也减轻了电池堆内中间温度的热积累, 增加了电池堆温度的均匀性。

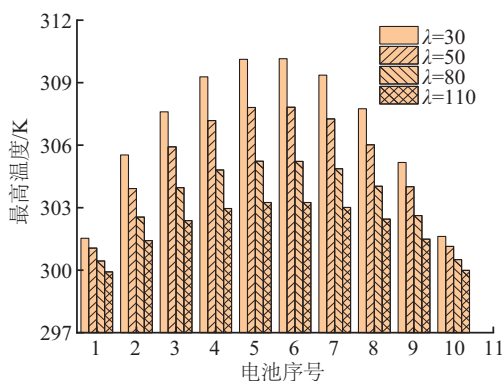


图 9 阴极过量系数对电池堆温度的影响

Fig. 9 Effect of cathode stoichiometric ratio on stack temperature

3 结 论

本文建立了全尺度的三维小型空冷 PEMFC 堆, 通过数值模拟, 分析了高海拔环境和阴极过量系数对燃料电池堆的输出性能、温度和氧气浓度的影响。所得主要研究结论如下:

1) 当海拔高度升高时, 电池堆的进气温度、操作压力和阴极氧气浓度减小, 严重影响电池堆的输出性能。海拔升高到 3200 m 时, 电池堆的峰值输出功率降低了 21.6%。

2) 在 3200 m 海拔条件下, 增加阴极过量系数可有效减小阴极催化剂层表面的氧气浓度梯度, 提高电池堆的输出性能。当阴极过量系数从 30 升高到 110 时, 电池堆的平均电流密度提升了 16.2%。

3) 增大阴极过量系数可显著降低电池堆内各片电池的最高温度, 减小电池堆内的温度差异。当阴极过量系数从 30 升高到 110 时, 电池堆内的最高温度降低了 6.9 K。

[参考文献]

- [1] 陈家城, 周苏. 大功率质子交换膜燃料电池建模及仿真[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 290-297.

- CHEN J C, ZHOU S. Modeling and simulation of high-power proton exchange membrane fuel cells [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(3): 290-297.
- [2] DIMITROVA Z, BOU NADER W. PEM fuel cell as an auxiliary power unit for range extended hybrid electric vehicles [J]. *Energy*, 2022, 239: 121933.
- [3] GONG A, VERSTRAETE D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: current status and research needs [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2017, 42(33): 21311-21333.
- [4] 刘宗巍, 史天泽, 郝瀚, 等. 中国燃料电池汽车发展问题研究 [J]. *汽车技术*, 2018(1): 1-9.
- LIU Z W, SHI T Z, HAO H, et al. Research on main problems associated with development of fuel cell vehicle in China [J]. *Automobile technology*, 2018(1): 1-9.
- [5] SONG W J, CHEN H, GUO H, et al. Research progress of proton exchange membrane fuel cells utilizing in high altitude environments [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2022, 47(59): 24945-24962.
- [6] 樊智鑫, 宋珂, 章桐. 空冷质子交换膜燃料电池性能优化研究综述 [J]. *汽车技术*, 2020(4): 1-8.
- FAN Z X, SONG K, ZHANG T. A review on performance optimization of air-cooled proton exchange membrane fuel cell [J]. *Automobile technology*, 2020(4): 1-8.
- [7] ZHANG J K, WANG C J, ZHANG A F. Experimental study on temperature and performance of an open-cathode PEMFC stack under thermal radiation environment [J]. *Applied energy*, 2022, 311: 118646.
- [8] GONG C Y, XING L, LIANG C, et al. Modeling and dynamic characteristic simulation of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stack for unmanned aerial vehicle [J]. *Renewable energy*, 2022, 188: 1094-1104.
- [9] HORDÉ T, ACHARD P, METKEMEIJER R. PEMFC application for aviation: experimental and numerical study of sensitivity to altitude [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2012, 37(14): 10818-10829.
- [10] UNO M, SHIMADA T, ARIYAMA Y, et al. Development and demonstration flight of a fuel cell system for high-altitude balloons [J]. *Journal of power sources*, 2009, 193(2): 788-796.
- [11] GONZÁLEZ-ESPASANDÍN Ó, LEO T J, RASO M A, et al. Direct methanol fuel cell (DMFC) and H₂ proton exchange membrane fuel (PEMFC/H₂) cell performance under atmospheric flight conditions of Unmanned Aerial Vehicles [J]. *Renewable energy*, 2019, 130: 762-773.
- [12] JIANG F F, WEI Z B, ZHANG C Z, et al. Cathodic supply optimization of PEMFC system under variable altitude [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2024, 71(11): 14298-14307.
- [13] 苗宇航, 邢路, 程文君, 等. 空冷型 PEMFC 高海拔地区运行特性研究 [J]. *电源技术*, 2021, 45(8): 1023-1026.
- MIAO Y H, XING L, CHENG W J, et al. Study on operation characteristics of air-cooled PEMFC in high altitude area [J]. *Chinese journal of power sources*, 2021, 45(8): 1023-1026.
- [14] 胡祎玮, 夏玉珍, 陆佳宙, 等. 基于计算流体力学的大型质子交换膜燃料电池电堆歧管尺寸优化分析 [J]. *汽车技术*, 2022(6): 20-26.
- HU Y W, XIA Y Z, LU J Z, et al. Optimization analysis of manifold dimension of large PEMFC stack based on CFD [J]. *Automobile technology*, 2022(6): 20-26.
- [15] ZHANG Y, HE S R, JIANG X H, et al. Full-scale three-dimensional simulation of air cooling metal bipolar plate proton exchange membrane fuel cell stack considering a non-isothermal multiphase model [J]. *Applied energy*, 2024, 357: 122507.
- [16] 赵杰, 李文浩, 杜常清, 等. 不同操作和环境条件下的 PEMFC 低温冷启动数值模拟研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 460-466.
- ZHAO J, LI W H, DU C Q, et al. Numerical simulation study of low temperature cold start of PEMFC under different operating and environmental conditions [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(6): 460-466.
- [17] YU X X, CHANG H W, ZHAO J J, et al. Effects of anode flow channel on performance of air-cooled proton exchange membrane fuel cell [J]. *Energy reports*, 2022, 8: 4443-4452.
- [18] 彭明, 夏强峰, 蒋理想, 等. 阴极过量系数与流场布置对风冷燃料电池性能影响的数值模拟 [J]. *化工学报*, 2023, 74(10): 4267-4276.
- PENG M, XIA Q F, JIANG L X, et al. Numerical simulation on the effect of cathode stoichiometric ratio and flow field arrangement on the performance of air-cooled fuel cells [J]. *CIESC journal*, 2023, 74(10): 4267-4276.

IMPACT OF ALTITUDE ON PERFORMANCE OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL STACKS

Zhang Tong, Xia Yuzhen, Zhang Li, Hu Guilin

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: A full-scale simulation model of a small air-cooled PEMFC stack is established in ANSYS/Fluent software, and the solution is obtained using computational fluid dynamics (CFD) methods. The effects of different altitudes and cathode stoichiometric ratios on the output performance, temperature, and oxygen concentration of the fuel cell stack are investigated. The results indicate that when the altitude increases to 3200 m, the peak power density of the fuel cell stack decreases by 21.6%. Increasing the cathode stoichiometric ratio can compensate for the decrease in oxygen concentration caused by higher altitudes, improve the output performance of the fuel cell stack and reduce the internal temperature differences within the stack.

Keywords: air-cooled PEMFC stack; altitude; output performance; cathode stoichiometric ratio; numerical simulation; temperature uniformity