

物理参数对高温质子交换膜燃料电池性能的影响研究

邓美隆¹ 刘宇航² 张凯¹

(1.海南热带汽车试验有限公司,琼海 571400;2.海南大学,海口 570228)

【摘要】利用 COMSOL 软件建立了燃料电池三维模型,研究了工作温度、氧气浓度和膜厚度对燃料电池性能的影响。结果表明:提高工作温度可以提高燃料电池的性能,其适合的工作温度范围为 160~180 °C;提高氧气浓度,燃料电池的输出性能明显提高;增加膜层的厚度会降低燃料电池的输出性能,最佳的膜厚度为 20~60 μm。

关键词:高温质子交换膜燃料电池 工作温度 COMSOL 氧气浓度

中图分类号:U467.3 文献标志码:A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20220123

Investigation of the Effects of Physical Parameter on the Performance of High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Deng Meilong¹, Liu Yuhang², Zhang Kai¹

(1. Hainan Tropical Automobile Test Co., Ltd., Qionghai 571400; 2. Hainan University, Haikou 570228)

【Abstract】A three-dimensional model of the fuel cell was established by COMSOL software, and the effects of three parameters (operating temperature, oxygen concentration and membrane thickness) on the performance of the fuel cell were studied. The results show that the fuel cell performance can be improved by increasing the operating temperature, and the suitable operating temperature range is 160~180 °C. The output performance of the fuel cell is obviously improved by increasing the oxygen concentration, but the fuel cell performance is reduced by increasing the thickness of the film. The optimal membrane thickness is 20~60 μm.

Key words: HT-PEMFC, Operating temperature, COMSOL, Oxygen concentration

【引用格式】邓美隆,刘宇航,张凯.物理参数对高温质子交换膜燃料电池性能的影响研究[J].汽车工程师,2023(3):1-7.

DENG M L, LIU Y H, ZHANG K. Investigation of Physical Parameter Effects on the Performance of High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Automotive Engineer, 2023(3): 1-7.

1 前言

氢能和燃料电池技术能够有效缓解当前全球面临的能源危机和环境污染。在燃料电池类型中,质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)因其性能高、平衡装置简单等优点受到了学术界和工业界的高度关注^[1-3],但受到技术储备、基础设施及综合成本等多种因素的影响,实现燃料电池的进一步商业化还需提高电池的性能,解决成本、耐久性等关键性问题^[4-9]。根据工作温度的

不同,PEMFC可分为低温PEMFC(LT-PEMFC)和高温PEMFC(HT-PEMFC)2种^[10-13]。

许多学者已经进行了HT-PEMFC的研究^[14-17]。J. Benziger等^[18]研究了阴极氧气浓度对PEMFC性能的影响,结果表明,燃料电池的阴极处使用空气作为氧化剂会大幅降低其性能。F. J. Pinar等^[19]研究了基于单电池聚苯并咪唑(Polybenzimidazole, PBI)膜的HT-PEMFC使用重整制氢方式运行的性能,结果表明,阴极氧气浓度为30%时可以防止较高氧气浓度下发生腐蚀。P. V. Belyaev等^[20-21]利用MATLAB/

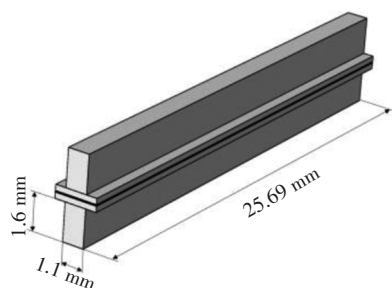
Simulink 软件建立了 HT-PEMFC 模型,通过提高氧气浓度的方法来补偿氧化剂消耗,结果表明,空气流速降低 100 L/min 可以增加 2.5% 的氧气浓度。陈果等^[22]借助 MATLAB/Simulink 平台,研究了空气和氧气分别通入 HT-PEMFC 中的性能,结果表明,用氧气作为氧化剂可显著提升燃料电池的功率。李赏等^[23]通过瞬态测试方法结合理论分析,研究了阴极氧气浓度对 PEMFC 动态响应特性的影响,结果表明,随氧浓度增加,PEMFC 动态响应时间线性减少。

根据现有的燃料电池相关研究,工作温度、膜层厚度和氧气浓度可能影响 HT-PEMFC 的性能。工作温度升高可以提高 HT-PEMFC 的性能^[24-25]。对于膜层的研究大多集中在材质方面^[26],膜层厚度对性能的影响方面研究较少,对于燃料电池中氧气浓度的研究也较少。因此,本文研究氧气浓度、工作温度和膜层厚度对 HT-PEMFC 性能的影响,建立 HT-PEMFC 的三维模型,并进行试验验证。

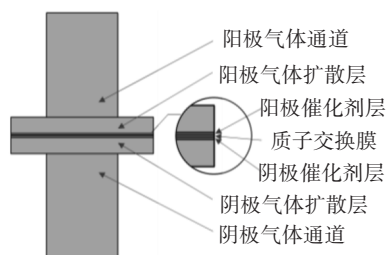
2 仿真模型

2.1 模型描述

本文通过多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 5.6 平台中的燃料电池模块建立了如图 1 所示的稳态 HT-PEMFC 模型,模型由阳极气体通道、阴极气体通道、阳极气体扩散层、阴极气体扩散层、阳极催化剂层、阴极催化剂层和质子交换膜组成。根据现有研究^[27]中提供的尺寸等物理参数建立了数学模型,模型中的几何参数如表 1 所示。



(a) 三维物理模型



(b) 结构示意图

图 1 HT-PEMFC 的几何模型

参数	取值
电池长度	25.69
气体通道高度	1.6
气体通道宽度	1.1
肋板宽度	1.1
气体扩散层高度	0.25
电极高度	0.02
电解质高度	0.02

为了简化计算,HT-PEMFC 模型计算过程中作如下假设:

- 所有的运行工况为稳态;
- 模型中的气体流动均为层流;
- 反应气体均为理想气体;
- 模型中的气体扩散层和催化剂层均为均质材料且各向同性;
- 质子交换膜不发生气体渗透现象;
- 电池工作温度保持在水的沸点以上,反应生成的水均为气态。

2.2 控制方程

该模型的控制方程涉及的守恒定律包括质量守恒、电荷守恒和动量守恒。在气体扩散层和质子交换膜中反应气体的传质只考虑扩散通量的方向。斯特凡-麦克斯韦 (Stefan-Maxwell) 方程和菲克 (Fick) 方程用于描述反应气体的扩散,法拉第定律用于表示电化学反应中电流与反应物消耗之间的关系,达西 (Darcy's) 定律用于描述气体扩散层、催化剂层和膜中的气体流动,巴特勒-沃尔默 (Butler-Volmer) 方程用于描述电流和电压之间的关系^[28]。

由于在燃料电池中存在不可逆的电压损耗,所以其输出电压总是小于理论电压。HT-PEMFC 的输出电压 V_{cell} 为:

$$V_{cell} = E_r - (\eta_{act} + \eta_{ohmic} + \eta_{conc}) \quad (1)$$

式中, E_r 为理论电压; η_{act} 为活化损耗; η_{ohmic} 为欧姆损耗; η_{conc} 为浓度损耗。

理论电压 E_r 由能斯特 (Nernst) 方程获得:

$$E_r = 1.229 - 0.00085(T - 298.15) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P(H_2)P(O_2)^{0.5}}{P(H_2O)} \right) \quad (2)$$

式中, T 为 HT-PEMFC 的运行温度; R 为气体常数; F 为法拉第常数; $P(H_2)$ 、 $P(O_2)$ 、 $P(H_2O)$ 分别为氢气、氧气、水的分压。

活化极化发生在电极表面之间,主要由于克服

电化学反应能垒引起。阴极活化极化现象可由塔菲尔(Tafel)方程表示为:

$$i_c = ai_{0,c} \left(\frac{C(O_2)}{C_{ref}(O_2)} \right) \exp\left(\frac{-\alpha_c}{RT} F\eta_c \right) \quad (3)$$

式中, i_c 为阴极电流密度; a 为催化剂层比表面积; $i_{0,c}^{ref}$ 为阴极参考电流密度; $C(O_2)$ 为氧气浓度; $C_{ref}(O_2)$ 为参考氧气浓度; α_c 为阴极转移电子数; η_c 为阴极电压损耗。

阳极极化现象可由巴特勒-沃尔默方程表示为:

$$i_a = ai_{0,a} \left(\frac{C(H_2)}{C_{ref}(H_2)} \right)^{0.5} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} \right) F\eta_a \quad (4)$$

式中, i_a 为阳极电流密度; $i_{0,a}^{ref}$ 为阳极参考电流密度; $C(H_2)$ 为氢气浓度; $C_{ref}(H_2)$ 为参考氢气浓度; α_a 为阳极转移电子数; η_a 为阳极电压损耗。

欧姆极化相当于燃料电池的内阻,其主要取决于电解质材料的电导率,温度对其影响不大。根据欧姆定律,欧姆极化现象可表示为:

$$\eta_{ohmic} = i(t_m / \sigma_m) \quad (5)$$

式中, i 为电流密度; t_m 为聚合物膜的厚度; σ_m 为电导率。

浓差极化主要发生在大电流工作条件下,电化学反应速度极快,电极处的反应物迅速消耗,燃料得不到及时补充导致压力下降,从而产生反应物浓度差。浓度损耗的计算公式为:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (6)$$

式中, i_L 为极限电流密度; n 为电子数。

燃料电池堆的输出电压由单片电池输出电压与串联成电池堆的单片电池数量计算得到:

$$V_{st} = V_{cell} \cdot n_{cell} \quad (7)$$

式中, V_{st} 为燃料电池堆的输出电压; n_{cell} 为 HT-PEMFC 堆中的单片电池数量。

HT-PEMFC 堆的输出功率等于电压与电流的乘积,电流由电流密度与电池的活性面积的乘积得到。HT-PEMFC 堆的输出功率 P_{FC} 为:

$$P_{FC} = V_{st} i A \quad (8)$$

式中, A 为燃料电池堆的活性面积。

2.3 模型参数与边界条件

本文提出了一种基于 PBI 膜的 HT-PEMFC 数学模型。HT-PEMFC 的运行温度为 160 °C,膜电导率为 9.86 S/m。单电池模型的阴极通入不同浓度的氧气,阳极通入纯氢气,氢气的入口浓度固定为 7.43%。

模型中使用的物理参数如表 2 所示。

表 2 模型中的输入参数

参数	数值
法拉第常数 $F/C \cdot \text{mol}^{-1}$	96 485
单片电池数量 $n_{cell}/\text{片}$	160
气体常数 $R/J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$	8.314
电解质的传导率 $S \cdot \text{m}^{-1}$	9.86
阴极入口流速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.5
阳极入口流速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.05
阴极传递系数 α_c	1
阳极参考交换电流密度 $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	10^5
阴极参考交换电流密度 $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	1
阳极传递系数 α_a	1
可逆电压/V	1.13

HT-PEMFC 模型中所使用的边界条件如下:

- 单元内的所有边界都是连续的;
- 通道外所有壁的边界条件为无滑移;
- 阴极和阳极的入口边界都设置为充分发展流动;
- 所有其他边界设置为对称;
- 阴极和阳极反应气体出口边界均以压力形式流出。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

使用 HT-PEMFC 模型前,须对其进行验证以确保模型的可靠性。根据单电池模型获得燃料电池的极化曲线结果,并与文献[29]中的试验结果进行比较,如图 2 所示。

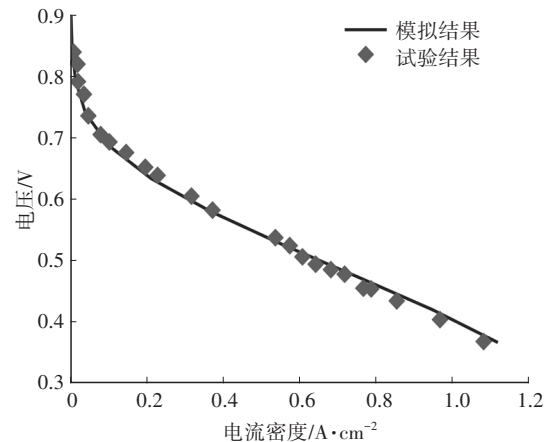


图 2 模拟结果与试验数据对比

由图 2 可知,燃料电池电压为 0.7 V 所对应的电流密度为 0.11 A/cm²,而单通道电池模型获得的电流密度为 0.10 A/cm²。模拟与试验结果之间的偏差是由燃料电池中电化学反应动力学引起的活化损

失造成的。通过改变仿真模型中的动态参数,可以使得模型模拟的结果与试验结果更接近。燃料电池运行电压为0.6 V时,HT-PEMFC模型中模拟对应的电流密度为0.38 A/cm²,而试验数据为0.39 A/cm²,二者非常接近,数值模拟得到的数据结果与试验结果相对偏差小于8.61%,模型得到验证。因此,HT-PEMFC模型的仿真结果可以很好地模拟燃料电池性能,该模型可以用于燃料电池的性能研究。

3.2 氧气浓度对HT-PEMFC性能的影响

建立单通道HT-PEMFC模型,在运行温度为160℃、标准大气压条件下进行模拟。在单通道电池模型中,得到不同氧气浓度下的最大功率。空气的化学计量比是影响燃料电池性能的主要因素,因此设定氢气的化学计量比为1.2。在单通道燃料电池模型中,阳极的氢气流量是固定的,阴极的气体通道始终通入氮气和氧气,因此无论氮气的浓度是多少,阴极处的水蒸气始终是均匀的。图3显示了在温度不变的条件下,HT-PEMFC单电池模型中阴极通入不同氧浓度得到的电压和功率密度与电流密度的极化曲线。

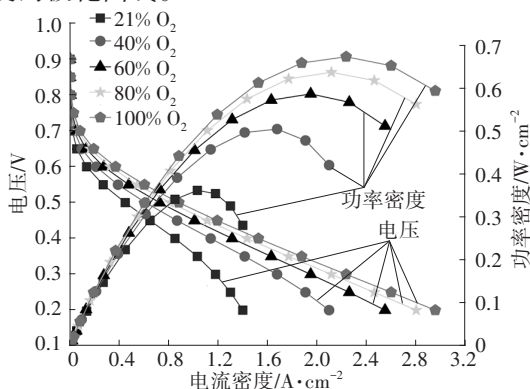


图3 不同氧气浓度条件下HT-PEMFC的极化曲线

由图3可以看出,随着供给到燃料电池阴极侧的氧气浓度提高,氧气与氢气发生反应产生的电流密度增大,提高了燃料电池的输出功率。由于燃料电池的电流密度与氧气浓度有关,在保证其他参数不变的条件下,氧气浓度越高,电流密度越大。燃料电池中通入空气和纯氧时产生的最大功率密度分别为0.36 W/cm²和0.67 W/cm²,对应的电流密度分别为1.03 A/cm²和2.24 A/cm²。

图3仅列出了氧气浓度分别为21%、40%、60%、80%和100%条件下通入HT-PEMFC的阴极中得到的功率密度和电流密度与电压的极化曲线,可以看出,氧气浓度为21%、40%、60%、80%、100%对应的最大功率密度分别为0.36 W/cm²、0.5 W/cm²、0.59 W/cm²、

0.64 W/cm²、0.67 W/cm²,并且每个氧气浓度对应的功率极化曲线中都有最大功率密度。在燃料电池中,阴极气体通道的气体成分与催化剂层的气体成分相同,那么纯氧或O₂/N₂混合气体之间极化曲线的热力学学位移取决于氧气浓度。氧气浓度对燃料电池的输出功率影响很大,可以通过改变燃料电池阴极侧的氧气浓度来提高HT-PEMFC的输出性能。氧气通入燃料电池阴极中的浓度不足可能会降低燃料电池的输出性能,缩短聚合物膜层寿命。

3.3 运行温度对HT-PEMFC性能的影响

图4所示为不同运行温度下模拟燃料电池得到的电压和功率密度曲线,可以看出,随着燃料电池运行温度的升高,HT-PEMFC的输出性能提高。燃料电池运行电压从0.9 V下降到0.6 V后,电压和电流密度的极化曲线几乎重叠,因为在该电压区域内,运行温度对电流密度没有显著影响,而该区域的电压降低是由燃料电池在反应过程中存在不可逆的活化损耗引起的,并且活化损耗不受燃料电池运行温度的影响。因此,HT-PEMFC模型中温度保持不变,燃料电池在低电流密度下的性能大致相同。燃料电池的极化曲线中欧姆损耗为线性部分,主要受膜电阻影响,聚合物膜中质子的传递机理表明,膜的离子电导率是温度的函数,因此,极化曲线的线性部分主要受膜电导率的影响,膜的电导率受HT-PEMFC的工作温度影响。从图4中可以得出,HT-PEMFC的工作温度在100℃、120℃、140℃、160℃和180℃条件下的功率密度分别为0.23 W/cm²、0.25 W/cm²、0.27 W/cm²、0.28 W/cm²和0.29 W/cm²。而燃料电池运行温度从100℃提高到120℃后,燃料电池的功率密度提高了8.6%,但燃料电池运行温度从160℃提高到180℃后,功率密度仅提高2.9%,温度变化对HT-PEMFC在低温条件下的性能影响更为显著。

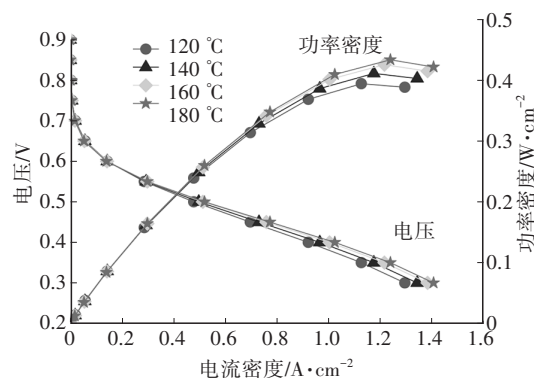


图4 HT-PEMFC在不同运行温度下的极化曲线

3.4 膜厚度对HT-PEMFC性能的影响

常见的PBI膜层厚度约为40 μm。因此,本文在运行温度为160 °C、催化层厚度为20 μm的条件下,研究膜层厚度分别为20 μm、40 μm、60 μm、80 μm、100 μm和120 μm时HT-PEMFC的性能。如图5所示,随着膜层厚度的增加,HT-PEMFC的各项性能逐渐降低。其中,膜层厚度不影响开路电压,但可能改变极化曲线中的欧姆损耗和浓度损耗。在HT-PEMFC中,离子导体是磷酸单晶体,而不是PBI膜,PBI膜结构中含有大量的磷酸单体。因此,HT-PEMFC中使用较薄的膜层具有较小的内阻,可减少欧姆损耗和浓度损耗,从而提高电池性能。然而,HT-PEMFC中使用的膜层不能过薄,因为PBI膜层要有足够的机械强度,以维持在高温条件下发生的电化学反应。燃料电池中的PBI膜层在长时间运行后,膜层降解速度越快、膜层厚度越薄,结构可靠性越差,越容易发生断裂。因此,最佳的膜厚度约为20~60 μm。

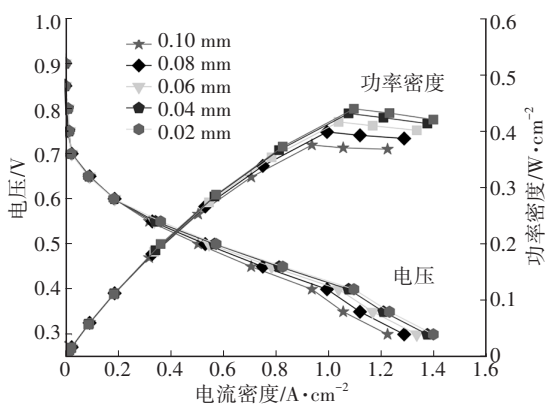


图5 不同质子交换膜厚度条件下得到的极化曲线

4 结束语

本文利用COMSOL软件建立了HT-PEMFC的三维模型,分析了工作温度、氧气浓度和质子交换膜厚度3个主要参数对燃料电池性能的影响。结果表明:提高氧气浓度和工作温度,HT-PEMFC的性能明显提高,工作温度从100 °C提高到180 °C后,HT-PEMFC的性能明显提高,合适的工作温度范围为160~180 °C,在此温度范围内,既保证了燃料电池的性能,又降低了高温条件下的维护成本;HT-PEMFC性能受质子交换膜厚度的影响,膜层越薄,其内阻越小,HT-PEMFC的性能越好,但是质子交换膜越薄,就越容易被机械和气体的挤压损坏,适宜的膜层厚度为20~60 μm。

参考文献

- [1] ZHANG C Z, ZHOU W J, ZHANG L, et al. An Experimental Study on Anode Water Management in High Temperature PEM Fuel Cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(13): 4666-4672.
- [2] SEMIZ L, SERIN R B, SANKIR N D, et al. Chemical Hydride Powered and Air Breathing PEMFC for UAVs[C]// 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Madrid, Spain: IEEE, 2013.
- [3] CHENG S J, MIAO J M, WU S J. Investigating the Effects of Operational Factors on PEMFC Performance Based on CFD Simulations Using a Three-Level Full-Factorial Design[J]. Renew Energy, 2012, 39: 250-260.
- [4] 叶玺臣, 章桐, 刘毅. 燃料电池系统阴极气体压力及流量闭环控制[J]. 汽车技术, 2022(6): 14-19.
YE X C, ZHANG T, LIU Y. Cathode Gas Pressure and Mass Flow Rate Closed-Loop Control in Fuel Cell System [J]. Automobile Technology, 2022(6): 14-19.
- [5] 丛铭, 马天才, 王凯, 等. 基于新型神经网络的燃料电池性能衰减预测[J]. 汽车技术, 2022(9): 23-29.
CONG M, MA T C, WANG K, et al. Fuel Cell Degradation Prediction Based on New Neural Network[J]. Automobile Technology, 2022(9): 23-29.
- [6] 顾荣鑫, 朱东, 杨彦博, 等. 质子交换膜燃料电池低温停机研究综述[J]. 汽车技术, 2022(6): 1-13.
GU R X, ZHU D, YANG Y B, et al. Review on the Research of the Cold Stop for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Automobile Technology, 2022(6): 1-13.
- [7] 秦彦周, 曹世博, 刘国坤, 等. 质子交换膜燃料电池堆冷却系统研究进展[J]. 汽车技术, 2021(11): 1-14.
QIN Y Z, CAO S B, LIU G K, et al. Research Progress on Cooling System for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack[J]. Automobile Technology, 2021(11): 1-14.
- [8] 许德超, 赵子亮, 盛夏, 等. 基于低温启动特性的PEMFC水热性能仿真与分析[J]. 汽车技术, 2021(5): 41-46.
XU D C, ZHAO Z L, SHENG X, et al. Simulation and Analysis of PEMFC's Hydrothermal Performance Based on Low Temperature Start-up Characteristics[J]. Automobile Technology, 2021(5): 41-46.
- [9] 程子枫, 李明, 郭勤, 等. 节温器布置形式对质子交换膜燃料电池电堆冷却性能的影响[J]. 汽车技术, 2021(1): 25-30.
CHENG Z F, LI M, GUO Q, et al. Effects of Thermostat Layouts on Cooling Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks[J]. Automobile Technology, 2021(1): 25-30.

- [10] 刘颖,赵洪辉,盛夏,等. 质子交换膜燃料电池双极板材料及制备综述[J]. 汽车文摘, 2021(5): 48-54.
LIU Y, ZHAO H H, SHENG X, et al. Review on Materials and Preparation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plates[J]. Automotive Digest, 2021(5): 48-54.
- [11] 曹婷婷,崔新然,马千里,等. 质子交换膜燃料电池气体扩散层研究进展[J]. 汽车文摘, 2021(3): 8-14.
CAO T T, CUI X K, MA Q L, et al. Research Progress of Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Automotive Digest, 2021(3): 8-14.
- [12] 陈飞,罗仁宏. 基于模型预测控制的水冷型燃料电池冷却系统研究[J]. 汽车技术, 2021(7): 8-13.
CHEN F, LUO R H. Research on Water-Cooled Fuel Cell Cooling System Based on MPC[J]. Automobile Technology, 2021(7): 8-13.
- [13] 刘颖,赵洪辉,盛夏,等. 燃料电池双极板机械性能设计要点综述[J]. 汽车文摘, 2022(12): 41-47.
LIU Y, ZHAO H H, SHENG X, et al. A Review on the Design Essentials of Fuel Cell Bipolar Plates[J]. Automotive Digest, 2022(12): 41-47.
- [14] 吴诗雨,梁荣亮,郭婷. 燃料电池电动汽车热平衡测试方法研究[J]. 汽车文摘, 2022(9): 33-37.
WU S Y, LIANG R L, GUO T. Investigation on Thermal Balance Test Method of FCEV[J]. Automotive Digest, 2022(9): 33-37.
- [15] 王国卓,王志军,郭婷,等. 燃料电池商用车低温启动过程中的能量流分析[J]. 汽车文摘, 2022(1): 31-34.
WANG G J, WANG Z J, GUO T, et al. Analysis of Energy Flow During Cold Start of Commercial Fuel Cell Vehicles[J]. Automotive Digest, 2022(1): 31-34.
- [16] 吴诗雨,郭婷,王国卓,等. 燃料电池汽车能量管理测评研究分析[J]. 汽车文摘, 2021(11): 59-62.
WU S Y, GUO T, WANG G Z, et al. Research on Hydrogen Consumption Measurement Methods for Fuel Cell Vehicles[J]. Automotive Digest, 2021(11): 59-62.
- [17] 赵金刚,张彦伟,王国增,等. 车用大功率燃料电池低温冷启动分析[J]. 汽车工程师, 2021(5): 40-41+47.
ZHAO J G, ZHANG Y W, WANG G Z, et al. ANALYSIS of Cold Starting Performance of High Power PEMFC Used for Vehicle[J]. Automotive Engineer, 2021(5): 40-41+47.
- [18] BENZIGER J, KIMBALL E, MEJIA-ARIZA R, et al. Oxygen Mass Transport Limitations at the Cathode of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. AIChE Journal, 2011, 57(9): 2505-2517.
- [19] PINAR J F, PILINSKI N, RASTEDT M, et al. Performance of a High-Temperature PEM Fuel Cell Operated with Oxygen Enriched Cathode Air and Hydrogen from Synthetic Reformate[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(15): 5432-5438.
- [20] BELYAEV P V, PODBEREZKIN D A, EM R A. The Research of Compensation for Changes in Air Flow Rate by Increasing the Oxygen Concentration of Oxidant in a Fuel Cell[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1050(1).
- [21] BELYAEV P V, PODBEREZKIN D A, EM R A. Investigations of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell at the Change of Oxygen Concentration[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1210(1).
- [22] 陈果,杨绿,谢庄佑. 空气/氧气之PEMFC输出特性与参数优化[J]. 电源技术, 2019, 43(6): 968-971.
CHEN G, YANG L, XIE Z Y. Performance and Parameter Optimization of PEMFC at the Condition of Inletting Air and Oxygen[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(6): 968-971.
- [23] 李赏,朱广文,华周发,等. 氧浓度对PEMFC动态响应的影响[J]. 电池工业, 2012, 17(1): 3-8.
LI S, ZHU G W, HUA Z F, et al. Effect of Oxygen Concentration on the Dynamic Response of Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Chinese Battery Industry, 2012, 17(1): 3-8.
- [24] SU A, FERNG Y M, HOU J, et al. Experimental and Numerical Investigations of the Effects of PBI Loading and Operating Temperature on a High-Temperature PEMFC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 7710-7718.
- [25] BELKHIRI Z, ZEROUAL M, MOUSSA H B, et al. Numerical Simulation of Exchange Membrane Fuel Cells in Different Operating Conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 5444-5451.
- [26] MEIER J C, GALEANO C, KATSOUNAROS I, et al. Degradation Mechanisms of Pt/C Fuel Cell Catalysts under Simulated Start/stop Conditions[J]. ACS Catalysis, 2012, 2(5): 832-843.
- [27] 武生威,付丽荣,刘维峰,等. 新型拓展流道PEMFC传质模拟与性能研究[J/OL]. 太阳能学报: 1-6(2022-07-22) [2023-02-20]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-1608>.
WU S W, FU L R, LIU W F, et al. Mass Transfer Simulation and Performance Study of PEMFC with New Extended Flow Channel[J/OL]. Acta Energetica Solaris Sinica: 1-6(2022-07-22) [2023-02-20]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-1608>.
- [28] AUTHAYANUN S, HACKER V. Energy and Exergy Analyses of a Stand-Alone HT-PEMFC Based

- Trigeneration System for Residential Applications[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 160: 230-242.
- [29] SEZGIN B, CAGLAYAN D G, DEVRIM Y, et al. Modeling and Sensitivity Analysis of High Temperature PEM Fuel Cells by Using Comsol Multiphysics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(23): 10001-10009.
- (责任编辑 弦 歌)
- 修改稿收到日期为2022年12月23日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊,是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊,国家新闻出版广电总局第一批认定的学术期刊。

《汽车工程师》以报道汽车产品开发领域的成果为主,专注于技术开发与应用,提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势,努力在电池技术、电驱技术、电控技术、高压技术、补能技术、燃料电池技术、智慧控制、智能驾驶、智享座舱、智能悬架、线控转向、线控制动、NVH、功能安全、预期功能安全、信息安全、数据安全、被动安全、高效动力、高效传动、低风阻、低滚阻、轻量化领域吸收优质稿源,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表,我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神,为强大中国汽车工业作贡献!

本刊使用协同采编系统处理稿件,请登陆期刊网站注册后投稿,投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的“作者指南”,网址:<http://tjqc.cbpt.cnki.net>。

《汽车工程师》编辑部