

高温质子交换膜燃料电池实验测试系统搭建与结果分析

戴贞瑞, 郑东*

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月3日; 发布日期: 2026年4月10日

摘要

本文在现有质子交换膜燃料电池测试平台的基础上, 通过集成加热系统, 搭建了一套适用于高温质子交换膜燃料电池(HT-PEMFC)的实验测试系统。详细阐述了该系统的加热装置设计方案, 以及升温速率、控温精度等关键技术指标。利用该系统, 在操作压力为1 bar、氢气/空气流量为0.2/0.5 slpm的工况下, 对HT-PEMFC在150°C~200°C温度范围内的升温速率、控温精度以及输出性能进行了测试。实验结果表明, 所集成的加热系统能够快速、稳定地将电池温度提升至设定值; HT-PEMFC的功率密度随温度升高呈现先增后减的变化趋势, 并在180°C时达到峰值。本研究为HT-PEMFC的性能测试提供了一个稳定、可靠的测试平台。

关键词

HT-PEMFC, 测试系统, 加热装置, 功率密度

Construction and Result Analysis of HT-PEMFC Experimental Test System

Zhenrui Dai, Dong Zheng*

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: March 10, 2026; accepted: April 3, 2026; published: April 10, 2026

Abstract

In this paper, a test system for high-temperature proton exchange membrane fuel cells (HT-PEMFCs) was constructed by integrating a heating system onto an existing proton exchange membrane fuel cell test bench. The design scheme of the heating device and key technical indicators such as heating

*通讯作者。

rate and temperature control accuracy are described in detail. Using this system, tests were carried out on the heating rate, temperature control accuracy and output performance of HT-PEMFC in the temperature range of 150°C~200°C under the operating conditions of 1 bar pressure and hydrogen/air flow rates of 0.2/0.5 slpm. The experimental results show that the integrated heating system can rapidly and stably raise the cell temperature to the set value; the power density of HT-PEMFC first increases and then decreases with rising temperature, reaching the maximum at 180°C. This study provides a stable and reliable test bench for the performance evaluation of HT-PEMFC.

Keywords

HT-PEMFC, Test System, Heating Device, Power Density

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

质子交换膜燃料电池(PEMFC)作为高效清洁的能源转换装置,凭借零排放、高功率密度及快速启动特性,已成为氢能交通、分布式发电等领域的核心技术方向。其中,低温质子交换膜燃料电池(LT-PEMFC)以 20°C~80°C 的运行温度、快速启动等优势,在乘用车、通信基站等场景中得到广泛应用[1]。然而,LT-PEMFC 存在显著技术瓶颈:对氢气纯度要求严苛(CO 耐受度 < 10 ppm),因此需要复杂的燃料预处理系统;同时低温环境导致电化学反应动力学缓慢,且水热管理系统复杂,易出现水淹或膜干涸现象,严重制约了其在重载运输、高温工况等场景的应用拓展[2] [3]。

为突破 LT-PEMFC 的技术局限,高温质子交换膜燃料电池(HT-PEMFC)应运而生,其运行温度提升至 120°C~200°C,核心依赖磷酸掺杂 PBI 膜等高温耐受材料。相较于 LT-PEMFC,HT-PEMFC 展现出三大核心优势[4]-[6]:这些技术优势使 HT-PEMFC 成为解决 LT-PEMFC 应用痛点的关键方向,但其测试系统的开发仍面临高温环境模拟、温度均匀性控制等技术挑战。

现有 HT-PEMFC 测试系统多依赖定制化平台,成本高昂且兼容性不足,而基于成熟测试系统的升级改造成为高效可行的技术路径。针对高温运行的核心需求,本研究在商用原有的测试系统基础上,设计集成了加热装置。该装置采用 PID 自适应温度控制策略,实现电池温度的精准调控与均匀分布。并且电池温差控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内,满足高温燃料电池测试的稳定性要求。

为验证测试系统的可靠性与实用性,本研究选取 150°C~200°C 作为核心测试温度区间,系统开展电池性能测试。测试内容包括不同温度下的极化曲线、功率密度输出。通过该测试系统,能够得到 HT-PEMFC 在目标温度区间的性能规律,为 HT-PEMFC 结构设计及系统集成提供实验数据支撑。本研究搭建的 HT-PEMFC 测试系统,既保留了原有测试平台,又通过加热装置实现了高精度高温工况,为 HT-PEMFC 的测试提供了稳定可靠的测试平台。

2. 方法

2.1. 实验系统

本研究基于原有质子交换膜燃料电池测试平台,通过集成加热系统,搭建了一套适用于 HT-PEMFC 的实验测试平台。该系统主要由原有质子交换膜燃料电池测试平台本体、HT-PEMFC 单电池、加热调控单元组成(如图 1 所示)。各模块通过耐高温接口与密封件连接,可实现 100°C~200°C 高温工况下 HT-PEMFC

的稳态性能测试及关键参数影响规律的研究。

加热系统是平台改造的核心, 采用“单电池加热 + 气管伴热保温”的双重加热方案, 适配 HT-PEMFC 的高温工作需求(主要设备及型号见表 1)。单电池加热选用 2 根功率为 100 W 的高温不锈钢加热棒(直径为 5 mm)以及两块 100 W 加热铜块(面积为 80 mm × 80 mm)进行加热, 加热棒均匀嵌入夹具端板预留孔中, 加热铜块安装在夹具两端。气体管路加热则采用耐高温自限温电伴热带(加热功率为 35 W)紧密缠绕于进排气管路外壁, 有效防止了气体在传输过程中的温度损失, 保证了进入电池的反应气体温度稳定。温控单元通过在夹具端板内部距离膜电极 5 mm 处安装 1 个 PT1000 铂电阻温度传感器(测量精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$), 温度信号实时传输至高精度 PID 控制器(控温精度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$)。通过动态调节加热棒与伴热带的供电功率, 实现电池温度与进气温度的同步精准控制, 温度调控范围 $100^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$, 满足 HT-PEMFC 快速升温与稳定保温的实验需求。

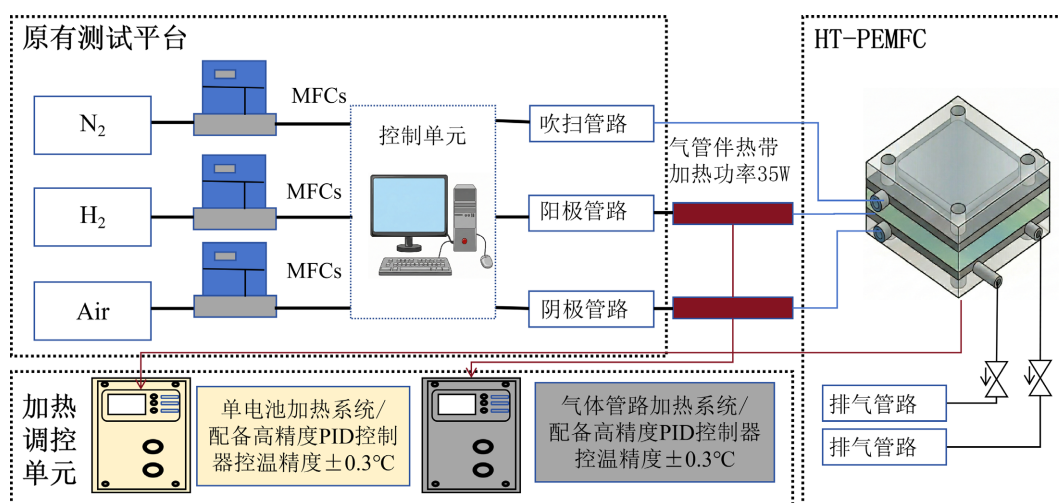


Figure 1. System diagram of HT-PEMFC test bench
图 1. HT-PEMFC 测试平台系统图

Table 1. Equipment used in the experiment

表 1. 实验过程中所使用的设备

设备名称	型号或规格	来源
燃料电池单电池测试系统	YK-A10-100W	大连宇科创新科技有限公司
电池 PID 控制器	CHPZ-DL	浙江程豪电气科技有限公司
气体管路 PID 控制器	CHB702	霍宇仪器仪表有限公司
气管伴热带	/	无锡隆义电热器
热成像仪	H21PRO	杭州海康威视数字技术股份有限公司

电池选用自主组装的 HT-PEMFC 单电池, 如图 2(b)所示, 其有效工作面积 25 cm^2 。膜电极制备是通过气体扩散电极法(GDE)将催化剂与去离子水、异丙醇、PTFE 混合超声成浆料喷涂在气体扩散层并与膜组装制备而成[7]。核心膜电极组件采用: Celazole PBI-55 膜, HCP120 碳纸(气体扩散层), 阴极/阳极催化层为 PtCuNi/C 催化剂(催化剂载量分别为 0.8 mg/cm^2 和 0.76 mg/cm^2)。双极板选用表面改性石墨材料, 密封采用耐高温氟橡胶密封垫圈, 通过螺栓均匀加压(预紧力 $5.5\text{ N}\cdot\text{m}$), 确保 $100^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 高温下的密封性, 防止气体泄漏与磷酸挥发。

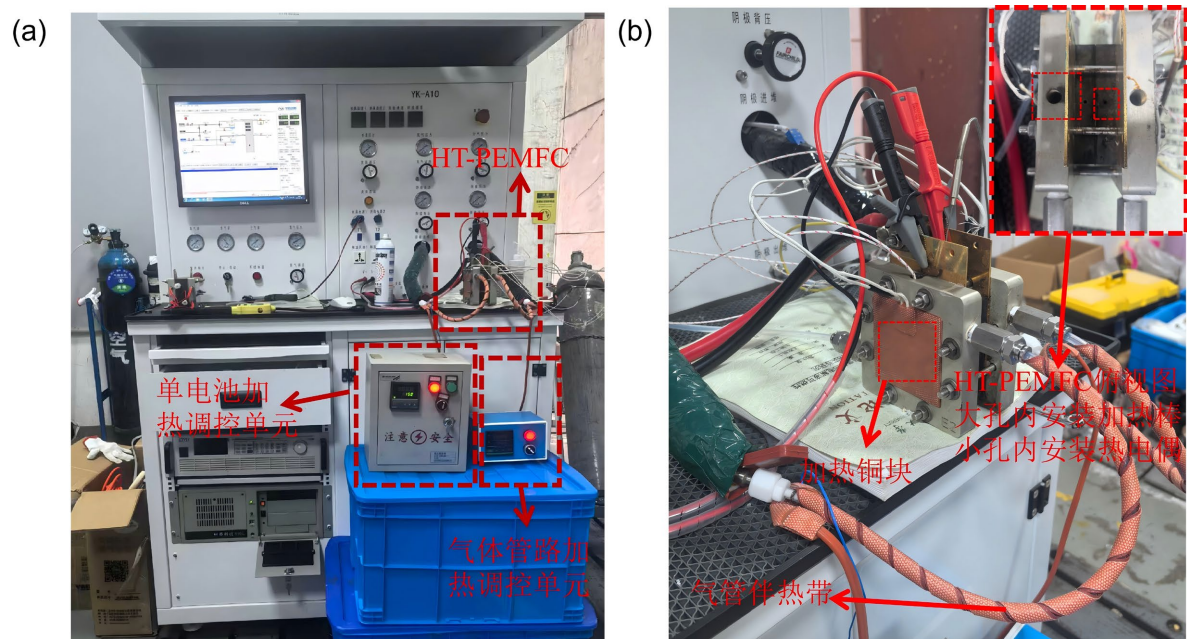


Figure 2. Picture of the HT-PEMFC test platform (a) and single cell (b)
图 2. HT-PEMFC 测试平台(a)及单电池(b)实物图

实验前对系统进行密封性与高温稳定性测试：向系统通入 0.5 MPa 氮气，用肥皂水进行检漏，若无明显气泡则密封性良好；随后，将电池温度设定在 150℃~200℃ 范围内的不同值，待温度稳定后持续运行 5 分钟，期间使用红外线热成像仪对电池表面进行实时监测，确保温度场分布均匀且无明显波动。

2.2. 实验工况

通过上述实验系统，本文测量了 HT-PEMFC 的功率密度，其具体工况见表 2：

Table 2. HT-PEMFC test conditions and parameters

表 2. HT-PEMFC 测试工况参数

工况	压力	阳极流量(H ₂)	阴极流量(Air)	温度
1	1 bar	0.2 slpm	0.5 slpm	150℃~200℃

3. 结果与讨论

3.1. 加热速度分析

加热速度是衡量 HT-PEMFC 测试系统动态性能的关键指标，直接影响测试效率与工况切换的灵活性。本研究通过记录系统从室温(约 10℃)升温至 150℃~200℃ 各目标温度点的耗时，评估了加热装置的升温速率(如图 3 所示)。升温速率由公式(1)计算得出。

$$v_T = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

式中， v_T 表示升温速率， ΔT 表示升温前后温度差， Δt 表示升温所需时间。

测试结果表明，系统升温过程高效且稳定：电池本体从室温升至 150℃、170℃ 和 200℃ 的目标温度分别耗时 946 s、1211 s 和 1797 s，平均升温速率约为 6.3℃/min；而采用伴热带加热的气体管路，升至

150℃、170℃和200℃分别仅需246 s、424 s和806 s, 平均升温速率为14℃/min。整个升温过程中, 系统未出现明显的速率衰减或突升现象, 这种快速且稳定的加热性能为HT-PEMFC的多工况循环测试提供了高效支持, 显著减少了不同温度点测试之间的等待时间, 提升了实验效率。

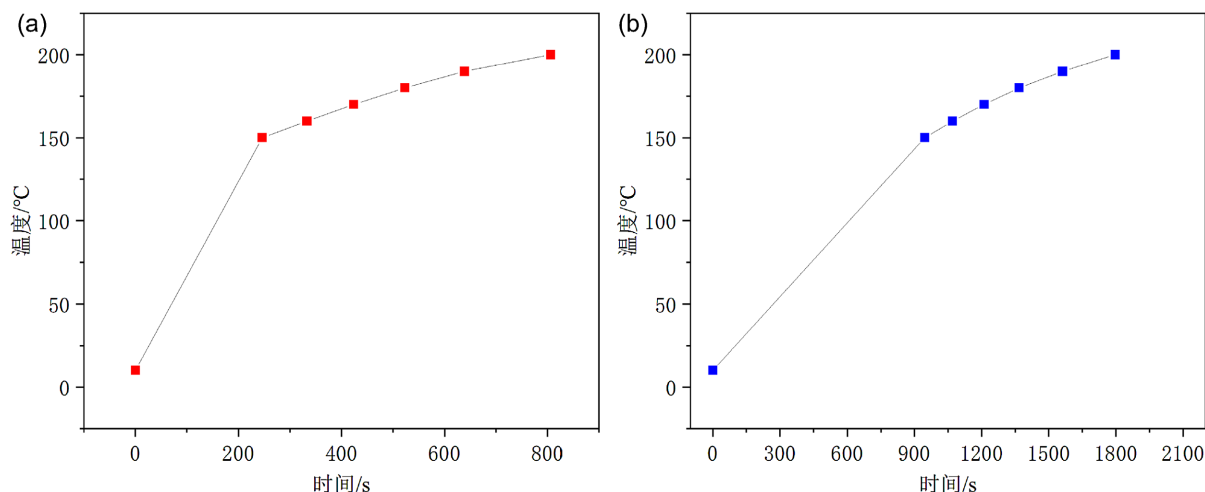


Figure 3. Heating rate profiles of the single cell (a) and gas line (b)

图 3. 单电池(a)与气体管路(b)的升温速率图

3.2. 加热温度精度与均匀性

本研究搭建的HT-PEMFC测试系统, 其核心优势体现在加热温度的高响应精度与卓越的稳定性。通过红外线测温仪实时监测电池表面的温度分布, 验证了系统在150℃~200℃目标区间内的精准控温能力。

图 4 红外线热成像云图直观地展示了电池在150℃至200℃不同设定温度下的温度场分布, 细节分析表明, 电池各区域的温度场均匀性极佳。这一特性不仅有效避免了因局部高温导致的质子交换膜降解, 还保障了电池各反应区域反应速率的一致性, 为后续电性能测试结果的准确性奠定了坚实基础。

定量分析数据显示, 在150℃~200℃的整个测试区间内, 系统加热温度的响应误差始终被严格控制在±2℃以内。例如, 在150℃恒温阶段, 电池中心区域的实测温度为150.5℃; 160℃时为160.9℃; 170℃时为169.7℃, 各温度点的实际波动均未超出±2℃的设计范围。这一结果充分证明, 该加热系统通过实时反馈并动态调节加热功率, 能够有效抑制温度超调与滞后现象的发生。

综上所述, 本系统的加热温度响应精度达到了±2℃以内的高水平, 兼具出色的稳定性与均匀性, 完全能够满足HT-PEMFC在150℃~200℃温度区间内的测试需求, 为深入探究温度对电池性能的影响规律提供了可靠的实验条件。

3.3. 不同温度下的HT-PEMFC性能测试

温度是影响HT-PEMFC电动力学与质子传导特性的关键因素, 直接决定其功率输出。本研究在150℃~200℃区间内开展了系统测试, 通过极化曲线与功率密度曲线的定量分析(如图5所示), 探讨了温度对电池性能的影响规律。

结果表明, HT-PEMFC的功率密度随温度升高呈现先提升后下降的趋势: 150℃时最大功率密度为203 mW/cm², 随温度升高, 180℃达到峰值232 mW/cm², 随后190℃与200℃时分别降至223 mW/cm²与214 mW/cm², 由此判定180℃为目标温度区间内的最优运行温度。极化曲线特征进一步揭示了内在机理: 在低电流密度区域(<0.1 A/cm²), 150℃~180℃范围内活化极化损失随温度升高而逐渐减小, 表明高温环境

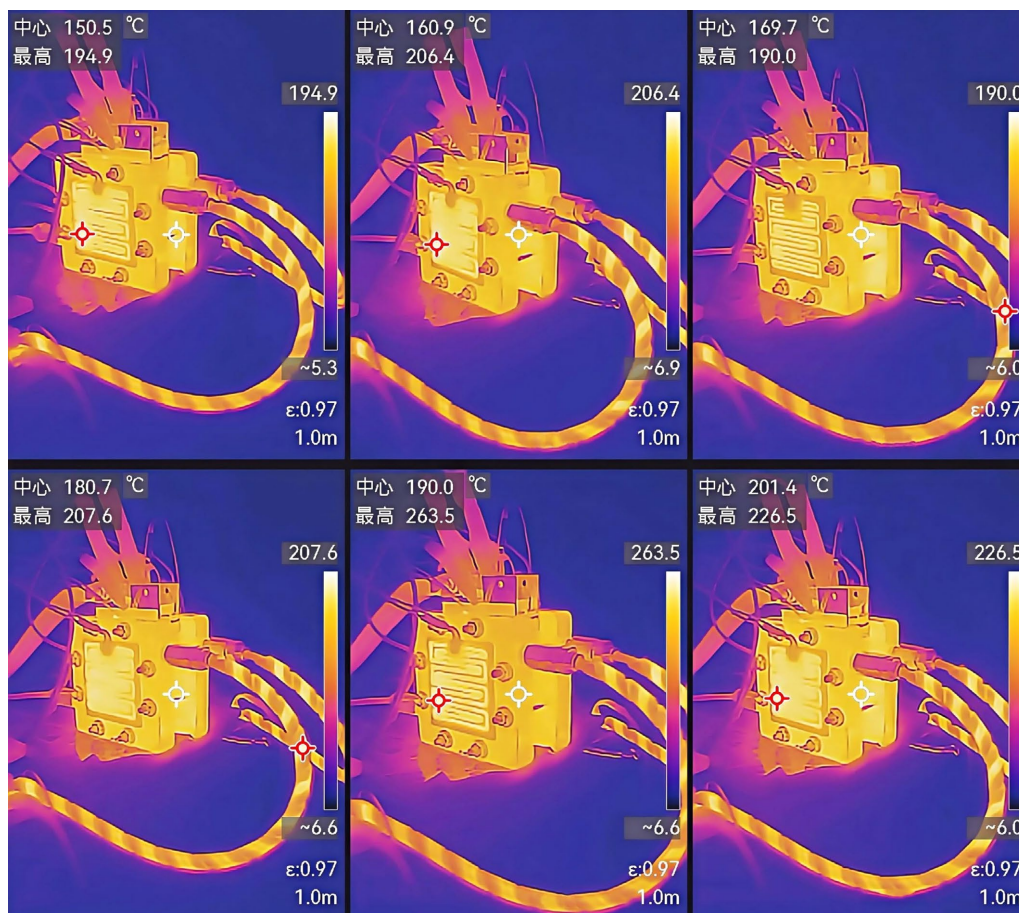


Figure 4. Thermal images of the single cell surface at different set temperatures.

图 4. 不同设定温度下的单电池表面热成像图

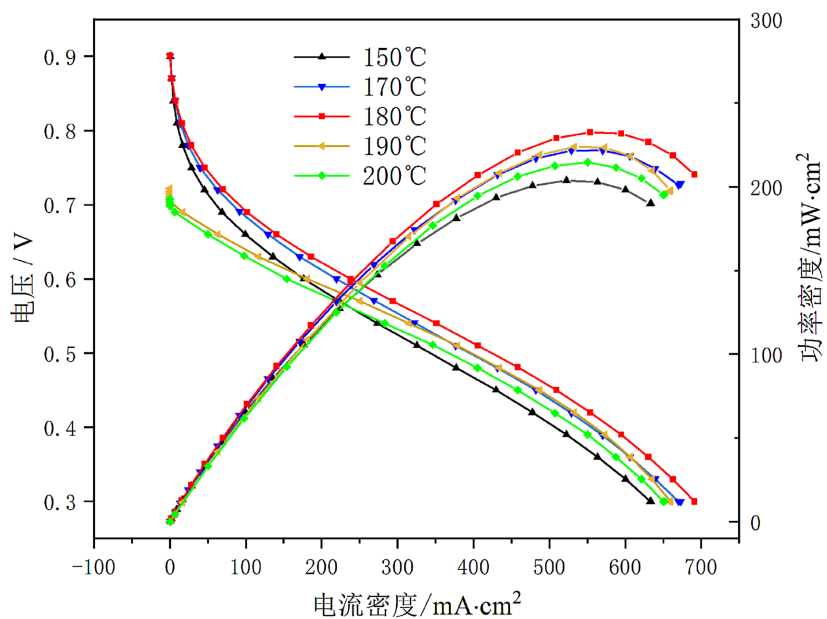


Figure 5. Polarization curves and power density plots of the single cell at different temperatures

图 5. 不同温度下单电池的极化曲线与功率密度图

加速了电极表面的电荷转移过程。然而,当温度超过 190℃后,电极表面的电荷转移反应反而减小,这是由于高温环境下加剧了催化剂颗粒的团聚,从而导致输出性能下降。此外,温度对膜的电导率(欧姆极化区域 0.1~0.4 A/cm²)具有显著影响,极化曲线显示,150℃~190℃区间内欧姆损失逐渐降低,归因于磷酸掺杂 PBI 膜的质子电导率随温度升高而增大。性能转折出现在 200℃,与 190℃时相比,此时欧姆损失增大,极化曲线斜率增大。其核心原因在于磷酸在 200℃以上易发生脱水缩合反应生成焦磷酸从而导致质子电导率降低,进而引发欧姆极化损失显著增大。这与文献中所报道的一致[8]-[10]。

4. 结论

本文基于原有测试平台,通过加热系统改造,成功搭建了适用于 100℃~200℃工况的 HT-PEMFC 实验测试平台。并使用该平台对 HT-PEMFC 进行了温度范围为 150℃~200℃的性能测试,得到了以下结论:

(1) 所搭建的测试平台加热系统实现了对电池温度的精准调控。系统升温过程高效且稳定,在 150℃~200℃的测试区间内,温度响应误差被严格控制在±2℃以内,温度场分布均匀,确保了测试的可靠性。

(2) 不同温度下的电池性能测试表明,HT-PEMFC 功率密度随温度升高呈先升后降趋势,180℃为最优运行温度,此时最大功率密度达 232 mW/cm²。190℃及以上性能下降源于高温环境下导致了催化剂颗粒的团聚以及磷酸脱水缩合导致的质子传导效率降低。

参考文献

- [1] 童鑫,熊哲,高新宇,侯俊伟,刘怡颖,廖铠丰,吴伟创,吴伟斌,齐龙,王海林,蔡位子. 质子交换膜燃料电池研究现状及发展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3243-3258.
- [2] 梁金桥. 质子交换膜燃料电池性能测试与机理分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [3] 武小花,杨钢,周鸿旭,等. 质子交换膜燃料电池水热管理技术现状与展望[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(17): 7031-7109.
- [4] Devrim, Y., Albostan, A. and Devrim, H. (2018) Experimental Investigation of CO Tolerance in High Temperature PEM Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**, 18672-18681. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.085>
- [5] Haider, R., Wen, Y., Ma, Z., Wilkinson, D.P., Zhang, L., Yuan, X., et al. (2021) High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Progress in Advanced Materials and Key Technologies. *Chemical Society Reviews*, **50**, 1138-1187. <https://doi.org/10.1039/d0cs00296h>
- [6] Song, C., Hui, S. and Zhang, J. (2008) High-Temperature PEM Fuel Cell Catalysts and Catalyst Layers. Springer, 861-888.
- [7] Bhosale, A.C., Ghosh, P.C. and Assaud, L. (2020) Preparation Methods of Membrane Electrode Assemblies for Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Unitized Regenerative Fuel Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **133**, Article 110286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110286>
- [8] Araya, S.S., Zhou, F., Liso, V., Sahlin, S.L., Vang, J.R., Thomas, S., et al. (2016) A Comprehensive Review of PBI-Based High Temperature PEM Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**, 21310-21344. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.024>
- [9] Daletou, M.K., Geormezi, M., Vogli, E., et al. (2013) The Interaction of H₃PO₄ and Steam with PBI and TPS Polymeric Membranes. A TGA and Raman Study. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 1117-1127. <https://doi.org/10.1039/c3ta13335d>
- [10] Melchior, J.P., Kreuer, K.D. and Maier, J. (2016) Proton Conduction Mechanisms in the Phosphoric Acid-Water System (H₄P₂O₇-H₃PO₄-2H₂O): A 1H, 31P and 17O PFG-NMR and Conductivity Study. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **19**, 587-600. <https://doi.org/10.1039/c6cp04855b>