高温质子交换膜燃料电池膜材料的应用进展

吴磊

（陕西氢能研究院有限公司，西安 712046）

摘要：膜材料作为高温质子交换膜燃料电池的核心组件，其高温稳定性、动态工况适应性与成本直接决定氢能在商用车领域的商业化进程，因此，梳理了高温质子交换膜从实验室研发到汽车工程化应用的技术演进脉络，分析了全氟复合膜、磷酸掺杂聚苯并咪唑膜及新型复合膜在商用车典型工况下的性能表现与衰减机制，探讨膜材料与燃料电池系统的匹配瓶颈及适配优化路径，从材料结构设计、制备工艺革新与系统集成协同3个维度提出解决方案，并展望了数字化监测、绿色低碳制备等未来发展方向。

关键词：高温质子交换膜　燃料电池汽车　动态工况　膜电极匹配

中图分类号：TM911.4　　**文献标志码：**B　　**DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250339

Progress in Membrane Materials for HT-PEM Fuel Cells

Wu Lei

(Shaanxi Hydrogen Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 712046)

Abstract: As a core component of high-temperature proton exchange membrane fuel cells, membrane materials determine the commercial viability of hydrogen energy in the commercial vehicle sector, particularly in terms of their high-temperature stability, adaptability under dynamic operating conditions, and cost. Therefore, this paper reviews the technological evolution of high-temperature proton exchange membranes from laboratory research to automotive engineering applications. The performance characteristics and degradation mechanisms of perfluorinated composite membranes, phosphoric acid-doped polybenzimidazole membranes, and novel composite membranes under typical commercial vehicle operating conditions are analyzed. The compatibility bottlenecks between membrane materials and fuel cell systems are examined, along with optimization pathways for better integration. Solutions are proposed from three dimensions: material structural design, preparation process innovation, and system integration synergy. Future development directions, such as digital monitoring and green low-carbon manufacturing, are also discussed.

Key words: HT-PEM, FCV, Dynamic operating conditions, MEA matching

1 前言

商用车在交通运输领域中的碳排放占比较高，其电动化进程备受关注，重型柴油载货汽车保有量不足5%，却贡献了超过25%的汽车碳排放，长途客车单位里程碳排放是乘用车的8~10倍。传统锂电池在商用车领域面临续驶里程受限、低温性能衰减、载货效率下降等问题，而燃料电池汽车[1]（Fuel Cell Vehicle，FCV）凭借长续航、快速加氢、零碳排放的优势，成为商用车电动化的重要技术路径之一。作为FCV的核心技术分支，高温质子交换膜燃料电池（High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell，HT-PEMFC）运行温度区间为120~180 ℃，相较于低温质子交换膜燃料电池（Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell，LT-PEMFC），其CO耐受浓度大幅提升，水热管理系统质量可降低60%~70%，更适配商用车复杂工况[2]。近年来，潍柴动力、丰田[3]等企业部分高温质子交换膜燃料电池车型已逐步示范应用，但膜材料仍是规模化应用的核心瓶颈之一，动态工况下的温

作者简介：吴磊（1993—），男，工程师，硕士学位，研究方向为质子交换膜燃料电池关键材料。

参考文献引用格式：

吴磊. 高温质子交换膜燃料电池膜材料的应用进展[J]. 汽车工艺与材料, 2026(3): 12-17.

WU L. Progress in Membrane Materials for HT-PEM Fuel Cells[J]. Automobile Technology & Material, 2026(3): 12-17.

度波动、发动机振动会导致质子传导率波动、磷酸流失率倍增,使膜寿命仅为5 000 h,远未达到商用车15 000 h的行业目标[4]。

因此,聚焦实际工况优化膜材料性能与系统适配性,是高温质子交换膜燃料电池汽车商业化的关键。

2　膜材料的技术发展

2.1　技术需求

为适应实际需求,高温质子交换膜需适配严苛工况,核心功能聚焦宽温域、抗振动、长寿命、快响应,因此,膜材料需满足如下特性[5-6]:

a. 在温度为120~180 ℃的无增湿条件下,质子传导率不低于0.06 S/cm,动态温度变化条件下性能稳定;

b. 具备优异的热机械性能,在180 ℃高温和持续振动下保持结构完整,强度与延展性满足车载振动与热循环要求;

c. 拥有优异的磷酸保持能力和抗氧化性,满足20 000 h以上的耐久性目标;

d. 适配-20 ℃快速冷启动,质子传导通道在低温下有效;

e. 气体渗透率低、工艺可规模化生产、成本可控,满足商用车全场景运行需求。

2.2　技术发展路径

汽车应用的实际需求促进了高温质子交换膜(High-Temperature Proton Exchange Membrane,HT-PEM)的技术迭代。早期全氟磺酸膜(如杜邦Nafion)的高温改性研究中,虽通过掺杂等手段优化性能,但高温低湿条件下的质子传导率难以稳定在0.05 S/cm以上,且长期运行易发生结构退化,制约了其工程化应用[7]。磷酸掺杂聚苯并咪唑(Polybenzimidazole,PBI)膜能在160 ℃以上无增湿条件下稳定运行,质子传导率通常高于0.08 S/cm,推动了高温燃料电池的示范应用,因此,研究重点转向进一步提升其长期运行的化学与机械稳定性[8],但汽车振动工况导致磷酸流失率较高,高昂的维护成本制约了其规模化推进[9]。2020年以来,复合膜技术成为研发热点,通过将UiO-66-NH_2等金属有机框架(Metal-Organic Frameworks,MOFs)、碳纳米管等掺入PBI基体,有效提升了膜的稳定性与抗振动性能,推动HT-PEM膜向工程化迈进[10]。

当前,高温质子交换膜领域呈现出以磷酸掺杂聚苯并咪唑膜和全氟磺酸(PerFluorinated Sulfonic Acid,PFSA)复合膜为主的技术路线。PBI膜以其优异的高温无湿性能主导高温应用领域,而全氟复合膜则凭借其卓越的低温性能,在需要快速启动的场景中占据重要地位。与此同时,以MOFs材料等为代表的新型复合膜技术在解决磷酸流失、提升长期稳定性方面具备较高潜力,已成为重要的研发方向。如图1所示,高温质子交换膜的典型代表技术发展路径具有3个核心阶段,从早期全氟磺酸膜的材料基础,到PBI膜的关键突破,再到近年新型复合膜的实用化探索,展示出从性能优化到技术突破、再向实用化推进的发展脉络。

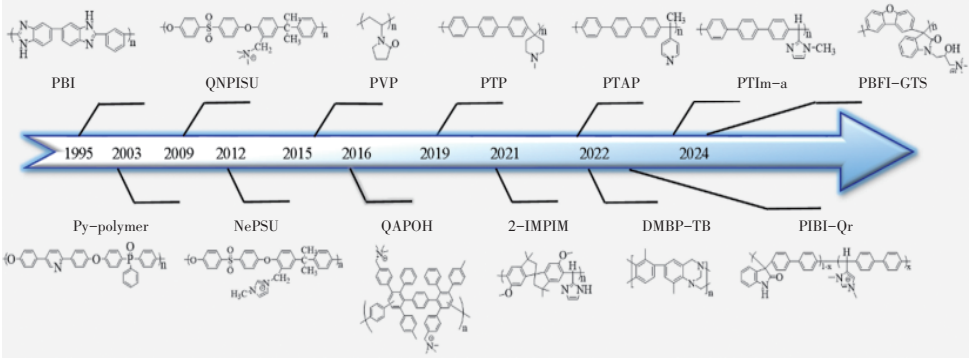


图1　高温质子交换膜的典型代表[11]

3　膜材料的种类

3.1　全氟复合膜

全氟复合膜以全氟磺酸树脂为基体,通过掺杂SiO_2、ZrO_2、TiO_2、氟化锂等无机纳米颗粒优化高温稳定性与机械性能,核心竞争优势在于化学稳定性优异且与现有汽车燃料电池生产线兼容性强。其加工工艺与主流Nafion膜相近,无需大规模改造产

线，仅需调整部分参数即可实现量产，显著降低了技术转化成本[12]。Nafion掺杂SiO_2等的复合膜在110 ℃温度下表现出较高的质子传导率[13]。该类膜的技术局限主要体现在质子传导高度依赖水，温度超过140 ℃或长期高温低湿运行时，质子解离能力显著下降；同时，全氟原料合成工艺复杂，成本偏高，难以满足商用车大规模推广的成本需求。

3.2 磷酸掺杂PBI膜

磷酸掺杂PBI膜凭借分解温度高于400 ℃的优异高温稳定性、高质子传导率及低燃料成本优势，已成为现阶段重型商用车用HT-PEM系统的主流膜材料。其核心调控参数为磷酸掺杂量，即膜与磷酸的质量比。掺杂量不足将导致传导性能缺失，过量则引发机械强度衰减。精准控制掺杂比例能够使膜材在160 ℃温度下保持较高的质子传导率，同时拉伸强度保持在25 MPa以上，实现传导性能与机械稳定性的平衡[14]。但在汽车动态工况下，磷酸的流失是影响PBI膜寿命的关键因素，振动与温度波动会破坏膜内氢键网络，导致磷酸析出并引发传导率下降、双极板及催化剂腐蚀等问题。BASF公司的Celtec®-P膜是该类膜的典型代表，通过表面改性与无机填料复合增强机械稳定性，但动态工况下的磷酸流失仍为寿命瓶颈[15]。图2所示为4种典型的PBI化学结构：间位连接的*m*-PBI与对位连接的*ρ*-PBI的区别在于苯环与咪唑环的连接位置；结构单元更丰富的AB-PBI和引入醚键的OPBI均为PBI的典型结构类型。

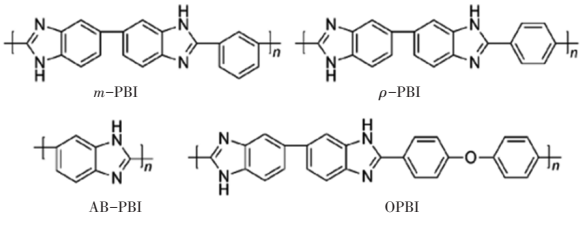


图2 具有代表性的PBI结构[16]

3.3 复合膜

复合膜通过有机基体与无机填料的协同作用，平衡了高温传导、低温启动与机械稳定性，是下一代汽车用HT-PEM的重要发展方向。杂多酸复合膜以磷钨酸等为填料，与基体形成“双重质子通道”杂多酸复合质子导体，在160 ℃无增湿条件下传导率可达0.041 S/cm，-10 ℃启动时间为45 s，满足冷链物流车低温运行需求[17]。MOFs凭借其超高比表面积和可调控的孔结构，在提升高温质子交换膜性能方面展现出巨大潜力。将MOFs引入聚合物基体制成复合膜，可有效提升膜的保水能力和质子传导率。研究表明，磺化聚磷腈复合膜在80 ℃、100%相对湿度下的传导率可达0.179 S/cm，该类材料理论上有助于解决磷酸流失问题，提升稳定性[18]。目前，复合膜还存在诸多问题，规模化制备中填料易沉降团聚导致性能波动大，界面结合不稳固受振动易剥离，不同组分热膨胀系数差异引发热应力裂纹与高温收缩，高性能填料与复杂制备成本高，且长期运行易受活性物质侵蚀，寿命与可靠性仍待提升。

4 HT-PEM应用瓶颈

4.1 动态工况下性能易衰减

汽车运行时，频繁启停使膜温度在100~180 ℃范围内快速波动，加上持续振动冲击，是HT-PEM性能衰减的主因，具体体现在3个方面：

a. 爬山路、急加速等工况导致膜温度短时间内由120 ℃升至180 ℃，剧烈温差产生20~30 MPa热应力，引发纳米级微裂纹，加速磷酸流失[19]；

b. 机械振动破坏无机填料与有机基体的界面结合，导致质子传输通道断裂，传导率下降20%以上[20]；

c. 燃料电池运行中产生的-OH自由基攻击PBI分子链的C-N键，大幅降低机械强度[21]。

4.2 成本高制约应用

成本居高不下是制约高温质子交换膜商业化应用的核心问题之一。HT-PEM目前仍处于发展初期，市场价格显著高于已实现大规模生产的低温质子交换膜。成本高的核心原因为：PBI树脂、高纯度MOFs等特种原材料价格高昂；制备工艺复杂，技术门槛高；产能规模小，尚未形成规模效应。当前全球质子交换膜市场高度集中，以戈尔为代表的头部企业在车用领域占据主导地位，年产能已达数百万平方米量级。相比之下，HT-PEM的产能规模较低，尚未形成有效的规模效应，难以通过批量生产降低成本。与此同时，终端需求不确定等结构性难题进一步制约了HT-PEM的商业化进程。因此，若

在成本敏感的商用车领域大规模应用,仍需在材料创新、工艺简化与产能提升上取得突破,从核心环节破解成本瓶颈与市场适配难题。

4.3　系统适配性不足

HT-PEM在120~180 ℃的高温运行环境中仍面临多重材料适配与系统应用挑战。非铂催化剂(如Fe-N-C)虽兼具成本优势与耐久性,但与膜的界面阻抗较大,加剧了电池电压衰减,而铂基催化剂(如Pt/C)虽能有效降低界面阻抗升高幅度,但成本较高,且在高温酸性环境下易发生铂颗粒烧结、溶解及活性位点流失,高温耐久性欠佳[22]。汽车常用的乙二醇冷却液虽能以-40 ℃的冰点适配低温环境,却会通过渗透作用(非直接化学反应)破坏膜内磷酸的稳定状态,试验显示,PBI膜在浓度为20%的乙二醇溶液中浸泡1 000 h后,磷酸流失率达8%,寿命同步缩短30%。此外,部分PBI膜在高温环境下会出现约2%的尺寸收缩,破坏与双极板的适配精度,进而导致密封失效,大幅提高氢气泄漏的风险。

5　HT-PEM应用瓶颈应对策略

5.1　HT-PEM结构设计

通过引入交联剂如戊二醛、环氧类化合物,在分子链间构建三维共价网络,可显著提升膜的机械强度、尺寸稳定性和抗氧化性。研究表明,使用环氧交联剂的PBI复合膜在180 ℃的无增湿条件下质子传导率仍保持0.029 S/cm,交联PBI膜组装的燃料电池可稳定运行超过9 000 h,表现出极低的性能衰减率。因此,交联技术已成为开发高性能、长寿命PBI膜的关键策略[23]。为解决复合膜界面剥离隐患,采用KH550等硅烷偶联剂对MOFs填料进行表面修饰,可引入氨基基团与PBI基体N原子形成氢键结合,提升填料与基体结合强度。经振动疲劳测试后的MOFs/PBI复合膜质子传导率保持率达95%,较未修饰膜显著提升。同时,通过制备多孔PBI膜等微观结构调控手段,可降低膜的热膨胀系数,进一步缓解温度骤变引发的裂纹问题[24]。解决磷酸掺杂PBI膜后低温启动问题的关键在于通过分子设计降低质子传输能垒。现有研究通过在其分子链中引入柔性烷基磺酸侧链、梳状咪唑鎓阳离子桥或特罗格尔碱(Tröger's Base,TB)结构等策略,成功构建了更高效的质子传输通道,显著提升了膜的宽温域性能,所开发的改性PBI膜已在-20 ℃的低温条件下实现稳定运行[25];将磺化聚芳醚与PBI进行共混或复合,构建一种兼具磺酸基团传导机制与PBI高温稳定性的双传导体系,理论上能拓宽质子交换膜的工作温区[26]。综上,材料结构设计是解决膜材料衰减的有效途径之一。

5.2　工艺革新

采用狭缝式涂布机的连续化工艺替代传统流延法,可将膜厚度偏差由20 μm减小至10 μm以内。针对复合膜填料分散不均的问题,超声与离心复合分散技术通过先破碎团聚体再利用离心力场均匀分散的组合方式,使MOFs填料分散均匀性提升80%,生产线产品性能波动由15%降至5%以下[27]。原位聚合法则通过在PBI聚合过程中直接加入填料的方式从根源解决了分散问题,目前,实验室样品性能波动已控制在3%以内。在原材料端,探索使用木质素等可再生生物质资源替代石油基原料来合成PBI树脂,是降低其成本的重要途径之一。在复合材料领域,木质素的引入可降低原料成本20%~50%。在回收利用端,基于N-甲基吡咯烷酮(N-Methyl-2-pyrrolidone,NMP)等溶剂的溶解再生工艺,能够实现废弃PBI膜中聚合物基体与掺杂剂的有效分离与回收[28]。与此同时,在保证性能不受影响的前提下,将膜厚度由50 μm减至30 μm,不仅能减少30%的原材料消耗,还能使膜的欧姆阻抗降低25%,进而推动电池功率密度的提升,实现成本与性能的双重优化。综上,工艺革新是推动HT-PEM规模化应用与成本下降的核心举措,其突破方向集中于制备效率提升与资源利用优化。

5.3　系统集成

传统基于Nafion的黏结剂在超过80 ℃的高温下会软化与相变,难以适应高温质子交换膜燃料电池的工作环境。因此,选用耐高温材料作为黏结剂是保障膜电极在高温下长期稳定运行的关键,该类材料能有效维持催化层结构稳定,降低各类传输阻力,从而提升电池的整体性能和耐久性[29]。从实际应用来看,优化后的脉冲喷涂技术能将催化剂涂层厚度偏差控制在1 μm之内,使催化剂颗粒均匀附着在膜表面,进一步降低界面阻抗。膜与冷却液的

兼容性问题同样需要针对性解决，通过氟代涂层处理膜表面，可形成接触角大于110°的疏水保护层，大幅减小冷却液与膜的接触面积，使乙二醇冷却液导致的磷酸流失率从8%/1 000 h降至1%/1 000 h[30]，将传统乙二醇替换为丙二醇的专用配方，能进一步降低流失率。热管理的协同设计能进一步挖掘系统潜力，膜与电池一体化热管理系统通过换热器将膜产生的高温余热精准传递给驾驶室供暖系统和电池预热系统，在-20 ℃的低温环境下，既能满足驾驶室大部分供暖需求，又能减少电加热系统的能耗，提升整车综合效率[31]。综上，通过完善系统集成能够提升系统适配性。

6 结束语

高温质子交换膜研究聚焦商用车场景，针对其动态工况性能衰减、成本高及系统适配性不足等核心问题，通过结构设计、工艺革新、系统集成可实现精准优化。结构设计通过强化膜的工况耐受性与宽温域适配能力，从根源抑制衰减；工艺革新进一步巩固衰减控制效果，同时有效降低材料制备与应用成本；系统集成则通过改善膜与整车系统的界面及功能匹配，精准破解适配问题。

未来，高温质子交换膜燃料电池膜材料研究将围绕以下方向展开：

a. 设计特定分子结构高温质子交换膜，借分子内作用强化质子载体锁定，延长服役周期，研发复合改性膜，提升低温启动与传导恢复能力，适配严寒场景；

b. 传感器监测膜性能并反馈参数，配合车载系统动态调控，数字孪生优化膜电极匹配，降低工程化不确定性，提升系统稳定性；

c. 建立膜材料全生命周期回收体系，推广再生工艺实现资源循环，采用生物基与低成本环保材料制膜，适配汽车低碳转型；

d. 通过膜材料结构精准设计、工艺规模化革新与系统协同适配，有望突破技术瓶颈，平衡高传导、结构稳定与低成本，解决商用车电动化续航补能问题。

参考文献：

[1] 衣宝廉. 燃料电池和燃料电池车发展历程及技术现状[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[2] QU E L, HAO X F, XIAO M, et al. Proton Exchange Membranes for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Challenges and Perspectives[J]. Journal of Power Sources, 2022, 533(15).

[3] YUMIYA H, KIZAKI M, ASAI H. Toyota Fuel Cell System (TFCS)[J]. World Electric Vehicle Journal, 2015, 7(1): 85-92.

[4] WANG S F, ZHENG Y, XÜ C H, et al. Performance Failure Mechanisms and Mitigation Strategies of High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Progress in Materials Science, 2025, 148.

[5] 日本新能源产业技术综合开发机构. 汽车和重型车用燃料电池技术开发路线图[R]. (2025-02-03)[2025-12-18].

[6] U. S. Department of Energy. Automotive Perspective on PEM Evaluation[R]. (2009-05-18)[2025-12-18].

[7] LIU L Y, CHEN W D, LI Y Q. An Overview of the Proton Conductivity of Nafion Membranes through a Statistical Analysis[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 504: 1-9.

[8] ZHOU Z P, ZHOLOBKO O, WU X F, et al. Polybenzimidazole-Based Polymer Electrolyte Membranes for High-Temperature Fuel Cells: Current Status and Prospects[J]. Energies, 2020, 14(1).

[9] DESANTES J M, NOVELLA R, LOPEZ J M, et al. Experimental Assessment of a Heavy-Duty Fuel Cell System in Relevant Operating Conditions[J]. Applied Energy, 2024, 376.

[10] MUKHOPADHYAY S, DAS A, JANA T, et al. Fabricating a MOF Material with Polybenzimidazole into an Efficient Proton Exchange Membrane[J]. ACS Applied Energy Materials, 2020, 3(8): 7964-7977.

[11] 王乐乐, 王潜, 李雷, 等. 燃料电池用高性能耐高温质子交换膜的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2024, 40(5): 366-375.

[12] NOTO V D, PIGA M, GIFFIN A G, et al. Structure-Property Interplay of Proton Conducting Membranes Based on PBI5N, SiO_2-Im and H_3PO_4 for High Temperature Fuel Cells[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13(26): 12146-12154.

[13] SHI S W, WEBER A Z, KUSOGLU A. Structure/Property Relationship of Nafion XL Composite Membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 516: 123-134.

[14] CHEN J L, WANG L, WANG L. Highly Conductive Polybenzimidazole Membranes at Low Phosphoric Acid Uptake with Excellent Fuel Cell Performances by Constructing Long-Range Continuous Proton Transport Channels Using a Metal-Organic Framework (UIO-66)[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2020, 12(37): 41350-41358.

[15] 张振国, 张奇, 张劲, 等. 燃料电池用宽温域质子交换膜研究进展[J]. 武汉大学学报(理学版), 2023, 69(4): 476-491.

[16] PU H T. Polybenzimidazole-Based Materials: From Synthesis to Application[M]. Amsterdam: Elsevier, 2025.

[17] PENG J W, FU X Z, LUO J L, et al. Constructing Novel Cross-Linked Polybenzimidazole Network for High-Performance High-Temperature Proton Exchange Membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 643.

[18] FENG K R, MENG L X, XU J M, et al. Introduction of Bifunctionalized UIO-66-NH_2 for Highly Conductive and Long-Term Stable Fluorene-Based Sulfonated Poly (aryl ether ketone sulfone) PEMs[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6(17): 10916-10926.

[19] PENG R, PEI P C, LI Y H, et al. Degradation Mechanisms of Proton Exchange Membrane Fuel Cell under Typical Automotive Operating Conditions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 80.

[20] DAI J M, ZHANG Y, WANG G, et al. Structural Architectures of Polymer Proton Exchange Membranes Suitable for High-Temperature Fuel Cell Applications[J]. Science China Materials, 2021, 65: 273-297.

[21] SU Y K, LIU S Q, YUAN H, et al. Optimizing Proton Transfer of Polybenzimidazole Membrane through Grotthuss Mechanism by an Acid Swelling Strategy[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521.

[22] RIZWAN H, WEN Y C, MA Z F, et al. High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Progress in Advanced Materials and Key Technologies[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(2): 1138-1187.

[23] HAN M, ZHANG G, LIU Z, et al. Cross-Linked Polybenzimidazole with Enhanced Stability for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(7): 2187-2193.

[24] ZHU C Y, PENG Y, YANG W S. Modification Strategies for Metal-Organic Frameworks Targeting at Membrane-Based Gas Separations[J]. Green Chemical Engineering, 2021, 2(1): 17-26.

[25] CHEN C, CHEN Y, ZHAO B, et al. Comb-Shaped Cationic Bridges in Phosphoric Acid-Doped PBI Gel Membranes: A Pathway to Flexible and Efficient Fuel Cell Operation From -20 ℃ to 200 ℃[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 522.

[26] FENG P J, LIU Z, LIU S Y, et al. Novel Sulfonated Poly (ether ether ketone)/Polybenzimidazole Blends for Proton Exchange Membranes[J]. High Performance Polymers, 2013, 25(6): 697-704.

[27] TAGHIPOUR A, RAHIMPOUR A, RASTGAR M, et al. Ultrasonically Synthesized MOFs for Modification of Polymeric Membranes: A Critical Review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90.

[28] KELOTH R, OBEWHERE O A, ACURIO-CERDA K, et al. Lignin-Derived Sustainable Cationic Polymers for Efficient High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(10): 4132-4147.

[29] GE C, TANG H Y, JU Q, et al. Fluorinated Polybenzimidazole as Binders for High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2023, 556.

[30] GUO Z M, PEREZ-PAGE M, CHEN J N, et al. Recent Advances in Phosphoric Acid-Based Membranes for High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 63: 393-429.

[31] SINGH U R, BHOGILLA S, KUO J K. A Novel Thermally Integrated High-Temperature PEM Fuel Cell and Absorption System for Sustainable Heating/Cooling Application[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 137: 1064-1074.

AT&M