·燃料电池关键材料与系统性能优化技术专题·

燃料电池催化剂介孔碳载体研究进展*

吴磊　黄晔　郑化安　师铜墙　张旭

（陕西氢能研究院有限公司，西安 712046）

【欢迎引用】吴磊，黄晔，郑化安，等．燃料电池催化剂介孔碳载体研究进展[J]．汽车文摘，2026(6)：8-12.

【Cite this paper】WU L, HUANG Y, ZHENG H A, et al. Research Progress on Mesoporous Carbon Supports for Fuel Cell Catalysts[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 8-12.

【摘要】为了系统梳理介孔碳材料作为新型质子交换膜燃料电池催化剂载体的研究进展，阐述了模板法、溶胶-凝胶法、化学气相沉积法及静电纺丝法等制备技术，并深入分析了有序介孔碳、分级多孔碳及杂原子掺杂介孔碳等不同形态载体的微观结构对催化性能的影响机制。研究表明，介孔碳凭借规则可调的孔道结构、高比表面积及优异的化学稳定性，能显著提升Pt的分散度与氧传输效率。未来，介孔碳载体研究将围绕本征稳定性增强、低成本规模化制备、结构功能精准设计及与低Pt/非Pt催化剂协同优化4个方向，推进其工程化应用。

关键词：燃料电池；催化剂；碳载体；介孔碳

中图分类号：TM911.4　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250188

Research Progress on Mesoporous Carbon Supports for Fuel Cell Catalysts

Wu Lei, Huang Ye, Zheng Huaan, Shi Tongqiang, Zhang Xu

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

【Abstract】To systematically review recent advances in mesoporous carbon materials as novel catalyst supports for proton exchange membrane fuel cells, this paper outlines synthetic strategies including templating, sol-gel, chemical vapor deposition, and electrospinning, and elucidates how the microstructures of diverse supports such as ordered mesoporous carbons, hierarchical porous carbons, and heteroatom-doped mesoporous carbons govern catalytic performance. The research results indicate that the regular pore architecture, high specific surface area, and excellent chemical stability of mesoporous carbons significantly enhance Pt dispersion and oxygen transport efficiency. Future research will focus on 4 key directions: enhancing intrinsic stability, enabling low-cost scalable synthesis, achieving precise structural design, and optimizing synergy with low-Pt and non-Pt catalysts, thereby accelerating their engineering application.

Key words: Fuel Cells, Catalysts, Carbon Supports, Mesoporous Carbon

0　引言

燃料电池作为高效清洁能源转换装置，在交通动力、发电储能领域应用前景广阔，其中质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC）因工作温度低、启动速度快成为研究热点。但PEMFC商业化面临成本与耐久性挑战，核心是阴极氧还原反应（Oxygen Reduction Reaction，ORR）动力学迟缓，需使用大量贵金属铂（Pt）作为催化剂，且常规载体碳在苛刻工况下易腐蚀降解，限制催化剂性能[1]。传统Pt/C催化剂用炭黑（如Vulcan XC-72）作载体，其微孔结构不利氧气和质子传输，高电位下还易氧化腐蚀，导致Pt纳米颗粒脱落团聚，催化剂活性衰减。介孔碳材料因具有规则可调的孔道结构、高比表面积和良好的导电性，被认为是高效的催化剂载体[2]。通过总结近年来燃料电池催化剂用介孔碳载体的研究进展，系统梳理介孔碳材料的特性与优势及其主要制备方法，总结介孔碳材料应用现状、

*基金项目：陕西省重点研发计划项目（2024CY2-GJHX-19）。

面临的挑战以及未来发展趋势。

1 介孔碳材料

介孔碳材料通常是指孔径在2~50 nm范围内的多孔碳材料，与传统活性炭（炭黑）相比介孔碳的孔道结构更规则有序，具有可调控的孔径且分布更集中（图1）。这使介孔碳在催化、能源存储等领域展现出明显优势。介孔碳具有高比表面积和大孔容，能够提供丰富的活性位点实现金属纳米颗粒的高分散负载。其连贯的大孔径较则更有利于反应气体和质子在孔道内的传输与扩散，进一步降低燃料电池内的传质阻力，并提高电化学反应速率[3]。优异的化学稳定性与热稳定性，使得介孔碳能够在燃料电池的酸性环境和电位循环中拥有更好的抗腐蚀能力。

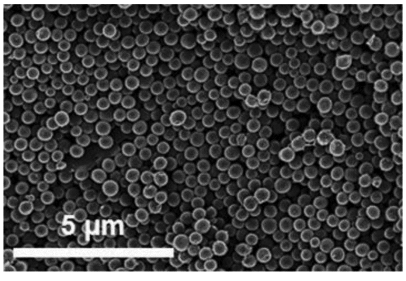


图1 介孔碳

介孔碳作为催化剂载体时，能够提高Pt的利用率和催化剂层的三相界面质量，从而提升燃料电池性能（图2）。日本丰田公司研究表明[4]，相较于传统Pt/C碳载体，将Pt负载在有序介孔碳上。能够获得更高的ORR活性和稳定性，主要原因是介孔载体改善了氧气传输并抑制了Pt颗粒的迁移团聚。

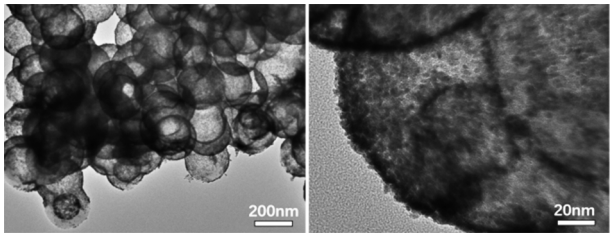


图2 催化剂透射电子显微镜图

2 介孔碳载体的制备方法

2.1 模板法

模板法通过利用特定模板的孔道结构限域生长碳骨架，是制备有序介孔碳的经典策略（图3）。根据模板性质的不同，可分为硬模板法与软模板法。

硬模板法通常以具有有序孔结构的固体材料如介孔二氧化硅、分子筛等作为模板，将碳前驱体引入模板的孔道中，经固化和碳化后，再将模板溶解去除从而得到与模板孔结构互补的介孔碳。韩国科学技术院[5]首次提出以有序介孔硅材料为硬模板制备有序介孔碳的“纳米浇铸法”，并以SBA-15为模板成功合成出CMK-3型有序介孔碳。

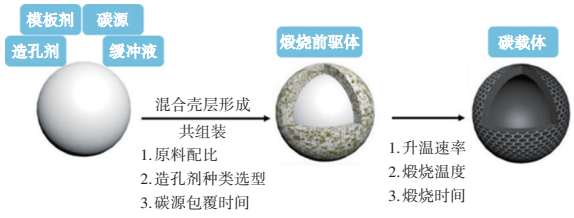


图3 模板法工艺

软模板法则利用两亲性表面活性剂在溶液中自组装形成的胶束或液晶相作为软模板，与酚醛树脂、蔗糖等碳前驱体混合后，通过共组装使前驱体填充于表面活性剂胶束之间，再经固化、碳化去除模板，得到介孔碳。软模板法操作相对简便，无需额外的模板合成和去除步骤，更易于放大生产。软模板法[6]对浓度、温度、pH值等反应条件较为敏感，孔结构的有序度和可调性略逊于硬模板法。

2.2 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法[7]是利用含碳前驱体如间苯二酚-甲醛树脂、酚醛树脂等含碳化合物，在酸、碱或金属离子等催化剂作用下，通过水解与缩聚反应完成溶胶-凝胶转变形成三维交联有机凝胶。后续经干燥与惰性气氛保护下的高温碳化，使有机凝胶骨架石墨化，最终得到多孔碳材料。通过温度、pH值、催化剂种类、前驱体浓度等关键参数协同可实现调控结构作用。此外，溶胶-凝胶法在凝胶形成阶段可便捷引入金属盐或非金属掺杂剂，借助凝胶网络的限域作用与分散性，使功能性组分在碳基体中实现原子级或纳米级均匀分布，无需后续修饰即可一步合成负载型介孔碳催化剂，大幅简化制备流程。

2.3 化学气相沉积法

化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition, CVD）制备介孔碳载体的核心流程是以Fe、Co、Ni等过渡金属纳米颗粒为催化剂，在高温环境下通入乙炔、丙烯等气态碳源[8]。碳源在催化剂表面分解并沉积，借助催化剂的空间限域作用形成介孔碳骨架。通过调控沉积温度、气体流量、催化剂分布，或结合多孔氧化铝等硬模板及金属颗粒等软模板，可定制载体孔结构，如有序阵列、网络状等。其优势在于载体结晶度高、导电性与稳定性优异，且开放孔道利于活性组分负载与物质传输。

2.4 静电纺丝法

静电纺丝法(Electrospinning)主要通过将聚丙烯腈(PAN)、聚乙烯醇(PVA)等含碳聚合物,与可溶盐、可热分解高分子等致孔剂混合配制纺丝液。在高压电场作用下,纺丝液喷射形成纳米纤维,经收集后依次进行预氧化与高温碳化,最终得到具有介孔结构的碳纳米纤维载体[9]。载体性能可通过多维度调控实现定制,调整纺丝液性质、电场参数,能控制纤维直径。能够通过添加牺牲模板或采用2种不相容聚合物共纺改变前驱体组成,优化载体孔隙特征,形成相互连通的介孔网络。其在燃料电池气体扩散层、催化剂层等领域具备潜在应用价值。

不同制备方法的优势和瓶颈分析如表1所示。

表1 制备方法对比

制备方法	优势	瓶颈
模板法	孔结构可控,可制备高比表面积、孔道规整的介孔碳	模板去除工艺复杂,步骤复杂,原料利用率低
溶胶凝胶法	孔结构精准调控,易功能化,纯度高	依赖有机溶剂,凝胶化时间长成本高
化学气相沉积法	产物石墨化程度高,导电性、稳定性优异	需去除金属催化剂,孔结构难精准控制,产量低
静电纺丝法	工艺简单,规模化生产潜力大,纤维直径调控范围广	纺丝参数控制难度大,纤维膜比表面积低于粉末材料

3 介孔碳载体的多种形态

3.1 有序介孔碳载体

有序介孔碳(Ordered Mesoporous Carbon, OMC)以长程有序的孔道结构、均一孔径为核心特征,是高性能PEMFC催化剂的优质载体,相较传统无序炭黑载体优势显著。其不仅可以提升氧气在催化剂层的传输效率,减少传质极化,直接改善燃料电池性能,同时由于规则孔道能限制Pt纳米颗粒迁移与团聚,能大幅提高催化剂稳定性。赵东元[10]开发的CMK-3负载Pt催化剂在PEMFC测试中,其功率密度与耐久性远超商业Pt/C催化剂。Pak等[11]研究表明,当孔径控制在4~7 nm时,三相界面(Triple Phase Boundary, TPB)质量最佳、ORR活性最高,且OMC可作为模板制备有序Pt合金,进一步提升催化活性与抗溶解能力,为高性能燃料电池催化剂设计提供关键平台。

3.2 分级多孔碳载体

分级多孔碳是同时含微孔、介孔、大孔等多尺度孔隙的碳材料,作为燃料电池催化剂载体,能以微孔提供高比表面积负载Pt纳米颗粒,介孔与大孔构建“高速通道”促进气液传输,突破传统单一孔结构载体瓶颈。Taguchi等[12]较早采用双模板合成分级多孔碳,证实其高电流密度下性能优于单一介孔载体。北京化工大学向中华团队[13]通过静电纺丝-氨气蚀刻制得介孔、大孔贯通的碳纳米纤维膜,负载催化剂的膜电极最大功率密度较传统催化剂提升43%。复旦大学赵东元团队[14]提出静电力辅助单胶束限域组装法,定制分级介孔碳结构增强氧通量,助力Zn-空气电池稳定运行。华南理工大学王小慧、王蕾团队[15]开发的分级载体,借大孔快速排水避免微孔堵塞,提升湿态气体渗透率。其制备常用双模板法、模板-活化结合法,且4~7 nm介孔与微米级大孔的组合能实现最优传质-负载平衡,能够有效提升燃料电池高电流密度性能与抗水淹能力。

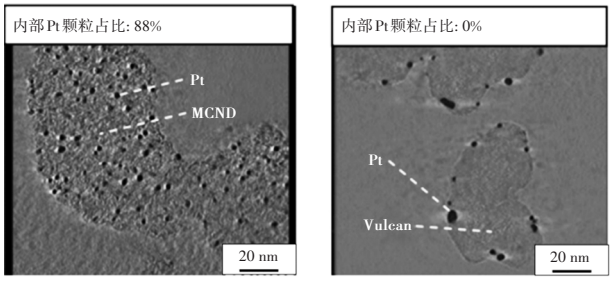
3.3 掺杂介孔碳载体

杂原子掺杂是介孔碳载体性能优化的关键策略,通过引入氮、硼、硫等原子改变碳表面电子结构,增强与Pt纳米颗粒相互作用,同步提升催化活性、稳定性与抗中毒能力。氮掺杂研究最广,三聚氰胺为氮源、SBA-15为模板制得N掺杂CMK-3,其负载Pt的质量活性较商业Pt/C高50%,老化后衰减更低。Zhang等[16]还发现吡啶N与吡咯N可优化Pt表面电子态,提升ORR动力学活性。硼掺杂领域,Bose等[17]通过硼烷气相沉积制得B掺杂介孔碳,抗氧化能力提升40%,高电位下孔结构保留率超90%。硫掺杂领域,Yang等[18]以硫脲为硫源,在碳孔壁形成C-S-C官能团,负载Pt后电子转移效率提升25%。双元素共掺杂中,Zhang等[19]制备的N-S共掺杂介孔碳,使Pt催化剂抗CO中毒能力翻倍。

4 介孔碳载体在PEMFC中的应用情况

在车用燃料电池催化剂载体领域应用场景,尤以新日铁(Nippon Steel)的介孔碳纳米球(Mesochannel Carbon Nanospheres, MCND)和东洋炭素(Toyo Tanso)的Cnovel介孔碳载体为商用代表。根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)的分类,多孔材料按照孔径大小可分为:微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)和大孔(>50 nm)材料[20]。如图4所示,第二代Mirai燃料电池的MCND介孔碳以乙炔银为前驱体,采用独创技术开发了具有纳米尺寸多孔的枝晶结构催化剂载体。MCND介孔碳材料的比表面积可达1 200 m^2/g,

微孔容积约0.2 mL/g，介孔容积约0.9 mL/g。根据丰田公布资料，第二代Mirai燃料电池阴极催化剂使用MCND载体后，约80%的Pt催化剂位于载体孔隙内，最大程度上改善了聚合物和Pt的直接接触，减缓了磺酸基团吸附在Pt上引起催化剂的中毒。相比第一代Mirai使用的低比面积载体，新型Mirai燃料电池PtCo合金催化剂的活性提升了50%，显著降低了催化剂成本。如图5所示，采用MCND载体的膜电极功率密度达到1.5 W/cm^2。



Pt/MCND　　Pt/Vulcan

图4　MCND和Vulcan载体担载催化剂对比

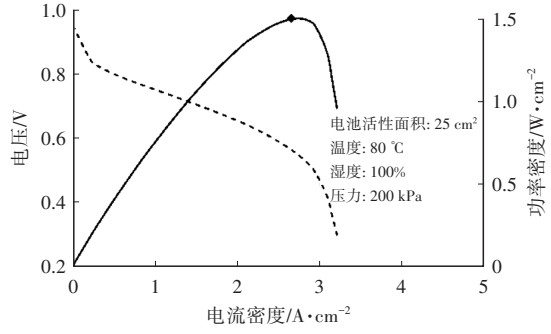


图5　MCND载体膜电极性能测试

5　面临的挑战

5.1　稳定性不足

在燃料电池阴极高电位与强酸性的协同作用下，介孔碳骨架易发生电化学氧化反应生成CO_2，导致孔结构坍塌、Pt纳米颗粒失去锚定位点而脱落或团聚，这是PEMFC长期运行中活性衰减的主要诱因。尽管介孔碳因石墨化程度高于普通炭黑而具备一定耐腐蚀性，但在车辆频繁启停导致阴极电位骤升至1.5 V以上等极端工况下，其腐蚀速率显著加快，稳定性仍无法满足商用需求[21]。当前主流应对策略主要包括：高温、高热处理或过渡金属催化石墨化，表面包覆氧化物或碳氮化物形成钝化层，以及开发非碳复合载体等技术方向。

5.2　制备成本较高

现有介孔碳制备技术多依赖模板剂、特殊表面活性剂或高纯度前驱体，且工艺步骤繁琐、反应条件苛刻。这些因素使介孔碳制备成本普遍高于商用炭黑，较难以满足燃料电池对低成本载体的需求。未来，绿色低成本制备技术开发将成为发展趋势，通过废弃物或工业副产物为碳源、采用自模板法或开发连续化纺丝沉积工艺，实现介孔碳的低成本、规模化制备。

5.3　调控难度大

介孔碳的孔径大小、孔分布均匀性及孔道连通性直接决定催化剂的传质效率与Pt分散度，孔径过小会限制氧气与质子扩散、阻碍离聚物渗透以形成有效三相界面，孔径过大则会降低比表面积并导致Pt纳米颗粒团聚长大，而介孔碳中的过量微孔虽能提升比表面积，却易在高湿度工况下被生成水填充，致使活性位点因“水淹”无法参与反应[22]。

5.4　兼容性不足

膜电极组件催化剂层中，介孔碳载体需与离聚物、扩散层及质子交换膜协同，其表面性质与结构形貌影响电极性能。表面润湿性或官能团与离聚物不匹配会致离聚物分布不均，形貌和堆积方式影响孔隙率兼容性。目前，表面改性是改善兼容性的主要手段，但仍需兼顾三相界面质量、机械稳定性及长期结构完整性，并结合MEA集成工艺进行系统优化。

6　未来发展趋势

未来燃料电池催化剂介孔碳载体研究将围绕4个核心方向展开。

（1）聚焦稳定性提升，通过高温石墨化、过渡金属催化石墨化增强碳材料抗氧化性，或在其表面包覆掺杂稳定氧化物、碳化物形成“核–壳”结构，同时探索介孔氮化碳等非碳材料作载体，缓解腐蚀问题。

（2）推动降本与规模化，利用生物质、高分子废料等廉价前驱体，结合自模板法及连续纺丝、喷雾干燥等工艺，简化制备流程、降低成本。

（3）强化结构功能定向设计，如设计梯度孔结构优化催化剂层性能分布，借理论计算与机器学习指导杂原子掺杂，或引入智能响应材料实现孔结构表面性质动态调节。

（4）深化与低Pt、非Pt催化剂协同发展，为Pt基合金催化剂提供支撑，通过表面官能团与孔结构设计提升新型催化剂整体性能。

参　考　文　献

[1] 衣宝廉. 燃料电池: 原理·技术·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[2] 冯彬彬, 卢明佳, 黄志宏, 等. 碳载体在质子交换膜燃料

电池中的应用及优化[J]. 化工学报, 2024, 75(4): 1469-1484.

[3] 卢明佳, 梁锦辉, 曾彬文, 等. 介孔碗状碳载体促进燃料电池阴极氧气传输(英文)[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2025, 72(5): 254-265.

[4] SHINTANI H, MIYATA N, SUGAWARA Y. A Model for Mesoporous Carbon-Supported Platinum Catalyst/Electrolyte Interfaces in Polymer Electrolyte Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2021, 487: 229414.

[5] RYOO R, JOO S H, JUN S, et al. Ordered Mesoporous Carbon Molecular Sieves by Templated Synthesis: The Structural Varieties[J]. Studies in Surface Science and Catalysis, 2001, 135(1): 150-150.

[6] 郭颖慧. 软模板法合成介孔碳材料的研究进展[J]. 四川化工, 2017, 20(3): 29-31.

[7] 柳召永. 溶胶凝胶法中孔炭材料的制备及其吸附性能研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.

[8] SHAH K A, TALI B A. Synthesis of Carbon Nanotubes by Catalytic Chemical Vapour Deposition: A Review on Carbon Sources, Catalysts and Substrates[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2016, 41: 67-82.

[9] KIM C, JEONG Y I, NGOC B T N, et al. Synthesis and Characterization of Porous Carbon Nanofibers with Hollow Cores through the Thermal Treatment of Electrospun Copolymeric Nanofiber Webs[J]. Small, 2007, 3(1): 91-95.

[10] KIM N I, SEONG J, YANG M J, et al. Durability of Pt Catalysts Supported on Ordered Mesoporous Carbon for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. ECS Transactions, 2013, 58(1): 1277.

[11] PAK C, KIM J M, CHANG H. Mesoporous Carbon-Supported Catalysts for Direct Methanol Fuel Cells[J]. Electrocatalysis of Direct Methanol Fuel Cells: From Fundamentals to Applications, 2009: 355-378.

[12] TAGUCHI A, LINDÉN M. Carbon Monoliths Possessing a Hierarchical, Fully Interconnected Porosity[J]. Advanced Materials, 2003, 15(14): 1209-1211.

[13] LENG Y, HAN Q, ZHANG J, et al. Active-Sites-Integrated Hierarchical Porous Nanofibers for Improved Oxygen Reduction in Fuel Cells[J]. Small, 2025: 2504253.

[14] FAN X, WANG J, HAN Z, et al. Regular Mesoporous Superparticles with a Tailored Opening Window and Tunable Surface Crisscrossed Grooves[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 146(26): 22460-22472.

[15] HE P, WANG L, TANG H, et al. Mitigating the Pathway Competition between Moisture and Gas via Hierarchical Fibrous Paper for Humidity-Adaptive Fuel Cells[J]. Rare Metals, 2025, 44(5): 3234-3243.

[16] ZHANG H, LI H, ZHANG X, et al. Enhanced Metal-Support Interaction of Nitrogen-doped Carbon Supported Pt Nanoparticles with High Activity for Electrocatalytic Oxygen Reduction Reaction[J]. Carbon Neutrality, 2025, 4(1): 1-10.

[17] BOSE A B, YANG J, LI W. Synthesis of Highly Electrically Conductive and Electrochemically Stable Porous Boron-Doped Carbon Microspheres[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(3): 206.

[18] YANG C L, WANG L N, YIN P, et al. Sulfur-Anchoring Synthesis of Platinum Intermetallic Nanoparticle Catalysts for Fuel Cells[J]. Science, 2021, 374(6566): 459-464.

[19] ZHANG X, QU Y, ZHANG W, et al. N/S Codoped Porous Carbon Spheres by Extended Stöber Method for Highly Efficient Oxygen Reduction Reaction and Loaded with Pt for Methanol Oxidation Reaction[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(43): 18326-18333.

[20] MCCUSKER L B, LIEBAU F, ENGELHARDT G. Nomenclature of Structural and Compositional Characteristics of Ordered Microporous and Mesoporous Materials with Inorganic Hosts(IUPAC Recommendations 2001)[J]. Pure & Applied Chemistry, 2001, 73(2): 381-394.

[21] FOROUZANDEH F, LI X, BANHAM D W, et al. Understanding the Corrosion Resistance of Meso-and Micro-Porous Carbons for Application in PEM Fuel Cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(6): F3230-F3240.

[22] CHOWDHURY A, RADKE C J, WEBER A Z. Relative-Humidity Dependence of Electrochemically Active Surface Area in Porous Carbon Catalyst Layers[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2023, 170(11): 114525.

（责任编辑　**明慧**）