·燃料电池关键材料与系统性能优化技术专题·

氢燃料电池催化层产业化关键技术进展*

李海力[1] 矫淑杰[2] 林玉祥[1] 郑丽萍[3] 谢义淳[3]

（1.福建省亚南科技股份有限公司，福安 355000；2.哈尔滨工业大学，哈尔滨 150001；3. 福建亚南电机有限公司，宁德 352000）

【欢迎引用】李海力，矫淑杰，林玉祥，等．氢燃料电池催化层产业化关键技术进展[J]. 汽车文摘，2026(6): 1-7.

【Cite this paper】LI H L, JIAO S J, LIN Y X, et al. Progress in Key Technologies for the Industrialization of the Catalytic Layer of Hydrogen Fuel Cells[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 1-7.

【摘要】为了提高燃料电池性能、降低其使用成本，从电化学原理及商业化需求角度，对催化层材料、结构和接触界面改善方面具有工业落地可行性的技术进行了总结，系统梳理了氢燃料电池催化层在铂基催化剂、载体、离聚物材料优化、结构设计及膜电极界面工程方面的关键技术进展，并在明确低铂化、结构有序化、界面强化的核心技术方向的基础上，进一步分析了氢燃料电池催化层仍存在的挑战与未来发展方向。

关键词：氢燃料电池；催化层；催化剂；界面改善

中图分类号：TM911.42　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250048

Progress in Key Technologies for the Industrialization of the Catalytic Layer of Hydrogen Fuel Cells

Li Haili[1], Jiao shujie[2], Lin Yuxiang[1], Zheng Liping[3], Xie Yichun[3]

（1. Fujian Yanan Technology Co., Ltd., Fu'an 355000; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001; 3. FUJIAN YANAN POWER Co., Ltd., Ningde 352000）

【Abstract】To enhance the performance of fuel cells and reduce their application costs, from the perspectives of electrochemical principles and commercialization requirements, the paper summarizes industrially feasible technologies for improving catalyst layer materials, structures, and contact interfaces. It systematically reviews key technical advances in hydrogen fuel cell catalyst layers, including platinum-based catalysts, supports, ionomer optimization, structural design, and membrane electrode interface engineering. Moreouer, it analyzes existing challenges and future development directions.

Key words: Hydrogen fuel cells, Catalytic layer, Catalysts, Interface improvement

0 引言

随着石油资源的不断消耗，具有清洁能源特性且可输出较高功率的质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Hydrogen Fuel Cell，PEMFC）受到了广泛关注。与传统能源转化方式相比，PEMFC供能转换效率和功率密度更高且输出更稳定，是未来重要的能源技术之一。美国、日本、韩国等国家提出，在未来5~10年实现氢燃料电池的商业化应用落地[1]。我国计划在10年内实现燃料电池在汽车领域商业化且燃料电池汽车保有量达100万辆[2]。目前，我国已初步建立了包含燃料电池系统以及相关关键零部件组装和氢能供应在内的相关产业链。近年来，针对提升燃料电池性能的相关技术研究取得较多突破，但在影响电池关键性能、寿命和可靠性方面的关键技术尚未达到量产水平且部分关键原材料无法实现量产[3]。

为了实现PEMFC商业化生产和应用，需在保证性能基础上降低电池成本、提升其稳定性。近年来，研发人员从材料、电池结构、界面等维度展开了广泛研究，其中PEMFC催化层相关技术成为研究热点，主

*基金项目：船舶用高性能燃料电池发动机系统的开发研究（2022HZ028024）。

要原因包括：(1)在降本方面，PEMFC膜电极成本占电池系统的30%，而膜电极中催化层成本较高；(2)在性能方面，催化层技术进展直接影响燃料电池功率密度以及膜电极稳定性。目前，国内外多家公司和研究机构在催化层催化性能提升及量产化方面积极开展研究[4]。在批量生产制备方面，目前仅能实现小批量生产试样，量产程度低，在生产规划、生产工艺和批次稳定性方面仍需进一步提高[5]。

考虑到大规模量产后市场对产品稳定性和一致性的需求，催化层界面结构及可控性已成为不容忽视的关键因素。因此，本文重点对PEMFC的催化层材料组成、微观结构以及层界面优化的相关问题进行深入分析。

1 催化层材料进展与挑战

1.1 催化剂材料优化

PEMFC商业化需要降低成本，减少催化剂使用量。对比当前汽车催化转化器中的铂(Pt)负载量可知，PEMFC中的催化剂负载量应降低至10%。目前，PEMFC用催化剂按所用材料类别不同可分为Pt基和非Pt基[6-7]。与传统Pt基催化剂相比，非Pt基催化剂在形状控制、性能稳定性、催化活性和批量生产条件下的稳定性仍存在一定差距。因此，目前主流量产催化剂仍为Pt基催化剂。依据Sabatier原理，在催化反应中，Pt基催化剂表面原子与反应中间体结合需适中，金属材料催化活性呈现先上升后下降态势且Pt金属位于峰值。基于此特性和商业化生产技术可行性，本文重点关注Pt基催化材料的相关技术进展。传统氢燃料电池采用的Pt基催化剂是用活性炭支撑的高分散铂纳米颗粒，存在较多缺陷位点、晶界及低配位原子，在多次电化学反应过程中催化活性将降低。基于氧还原反应(Oxygen Reduction Reaction，ORR)过程中催化效率与催化剂表面状态密切相关的特点，Pt基催化剂材料的优化可以通过对材料表面以及近表面结构进行调控实现[8]，如电子结构调控、几何结构调控及价键环境优化等。其中，Pt催化材料的晶面和形状调控是最常用的方法[9-10]。针对低指数单晶的催化反应动力学的相关研究结果表明，同比Pt(100)晶面、Pt(111)晶面和Pt(110)晶面，铂(111)晶面表现出最佳性能。在合成方法方面，研发人员在高温有机相合成技术的基础上，提出了一种简便、环保、易合成的工艺，可以通过调控反应物浓度制备形状可控的Pt纳米晶体材料。该合成方法引用了聚二甲基二烯丙基氯化铵(Poly DiallylDimethylAmmonium chlorid，PDDA)材料，在水热反应过程中，随着PDDA使用量降低，依次实现了Pt立方体、八面体、球体等结构Pt基催化材料的制备[11]。在该反应过程中，PDDA同时发挥封端剂、稳定剂和还原剂作用。进一步对不同结构的Pt基催化剂性能进行测试发现，由Pt(111)晶面包围的Pt八面体表现出最高的ORR活性，结合扫描电化学显微镜在纳米尺度的分析，进一步验证了Pt催化剂性能对其纳米尺度表面结构的依赖性。

除了通过晶面调控提升Pt基材料性能外，还可以通过不同金属之间的电负性和晶格参数差异实现电子结构调制，如通过掺入内部杂原子或在钯金(Pd)沉积Pt[12-13]。电沉积是一种电极尺度技术，难以大规模量产，文献[14]提出利用乙醇的易还原能力在非贵金属上实现Pt层沉积[14]，使在不含贵金属的核上设计Pt层有了进一步商业化应用的可能。现阶段制备的Pt基纳米结构催化剂在催化ORR过程中展现出的活性远高于传统Pt、碳催化剂，能更高效地促进反应进行，显著提升反应速率和效率。以纳米线和纳米管为例，其表面缺陷焦点和晶格边界较少、更少的表面缺陷位点，使其更易进行电子传输，且具有更好的电催化活性，从而不易发生溶解、奥斯特瓦尔德熟化和团聚等问题，稳定性更高。由此可见，催化材料的形貌结构和尺寸调控至关重要。在催化剂表面的电子结构确定时，其氧还原能力与催化性能可通过活性反应位点与反应中间体的吸附能进行平衡，这一规律被称为“火山模型”[15]。该研究为阴极催化剂性能进一步提升提供了重要依据。

在该纳米级催化剂工程概念的指导下，不同结构催化材料的环保性能和可控合成已成为研究重点。文献[16]研究发现，反应溶液的组成、溶剂选择、反应液PH值以及反应温度等均会对材料的形貌、尺寸产生影响，未来仍需进一步明确影响机理并量化影响规律。除此之外，催化材料的后处理工艺对其催化性能和稳定性也至关重要，如高温退火或脱合金。退火工艺可以提升催化性能的主要原因是退火可增加催化剂的结晶程度，同时还可去除制备过程残留的有机物，使催化的表面充分暴露，进而使催化效率进一步提高。

综合以上分析可知，目前针对Pt基催化剂性能研究已取得一定进展，如何基于目前进展结合分子或原子层级进行仿真预测，进一步实现催化效率和催化剂

性能稳定性提升至关重要。随着相关研究不断深入，仿真设计与试验的有机结合必然带来更加高效的催化效率提升方案。

1.2 载体材料优化

PEMFC催化层通常由Pt族金属组成，且通常负载于具有较厚基底的导电多孔材料（即催化剂支撑材料）。该类材料主要包括各种碳材料和非碳材料[17-18]，对催化剂负载量和催化性能具有较大影响。目前，研究人员正在开发新型催化层以减少Pt的负载量并对不同载体材料进行优化。碳基载体材料的优化方法主要包括载体材料的选择、复合使用、载体材料的掺杂等，如石墨烯（rGO）的二维结构可防止Pt溶解但存在堆叠问题[19]，采用碳黑和rGO复合载体可防止rGO堆叠，确保了氧气分子有效扩散并提升电催化活性及耐久性。针对载体掺杂技术，相关研究表明，掺杂氮的碳基载体材料的活性和稳定性大幅提升。载体材料不仅有物理支撑和电子传输作用，还可以改变催化剂的活性和性能稳定性[20-21]。鉴于碳载体在严苛工况下存在易腐蚀的问题，多数研究聚焦于非碳基载体[22]。非碳金属载体可通过直接调节催化剂的原子结构实现晶格应变调节，进而提高催化剂活性，如锂钴氧化物载体材料可使催化剂的催化活性提高约90%[23]。由此可见，Pt催化剂与具有界面作用的载体材料复合是开发高性能ORR催化剂的新路径，但针对商业化应用场景的性能验证及量产可行性仍需进一步深入研究。

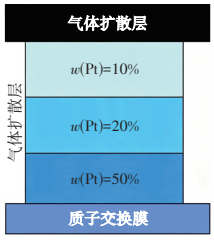
1.3 离聚体材料优化

全氟磺酸（PerFluoroSulfonic Acid，PFSA）是PEMFC最常用的离聚物。PFSA主链由半结晶聚四氟乙烯（Polytetrafluoroethylene，PTFE）构成，具有疏水性。而侧链由磺酸基团（—SO_3H）组成，具有亲水性[24]。侧链基团形成亲水性离子簇，离子簇通道彼此连接，成为可供离子、水分子传输的通道。影响PFSA性能的主要因素包括用量、离子交换容量以及侧链长度。短侧链离聚物在一定湿度条件下不仅具有更低的质子转移电阻，同时微孔体积更大，有利于氧气传质[25]。除此之外，如何改善因磺酸基团在Pt表面吸附造成的氧气和水传输阻力增加的问题成为研究热点[26]。为降低或避免磺酸基团在Pt表面的聚集，相关研究提出了多种方法，如采用短侧链离聚物限制磺酸基团迁移，用吸附性弱的基团取代磺酸基团以及对离聚物主链进行改性等。此外，有研究提出直接在碳载体上培养纳米粒子[27-28]，该方法可以在一定程度降低表面活性位点利用率，同时阻碍催化剂与载体之间的电子传输[29]。

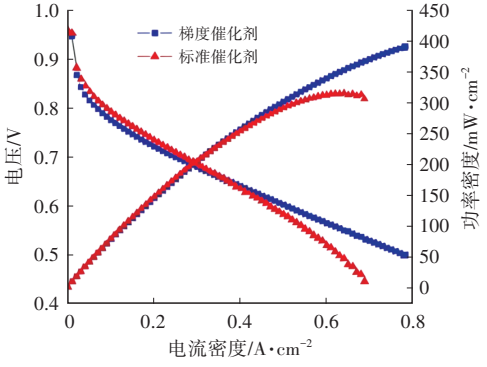
2 催化层结构设计

催化层结构设计需考虑催化层中各层材料的形态结构和分布调控。在燃料电池使用过程中，电压、电流、温度、气体浓度、水分含量等存在不均匀性，可以将梯度设计引入电极结构，从而改善该问题[30-31]。王厚朋等[32]基于电化学和流体力学基本原理，建立了燃料电池工作状态仿真模型，并模拟了不同电势下氧气分布情况。分析发现，氧气在小孔附近分布集中，随着氧气与孔距离增加，其浓度降低。在电势较高位置的氧气浓度可达到0。基于该分析可知，多孔膜电极有利于氧气传输和均匀分布。然而，较大空隙可能造成内阻增大。该团队也模拟了在催化层厚度方向催化剂梯度分布对燃料电池性能的影响。结果表明，水分和氧气在膜电极中均呈现不均匀分布。在扩散层附近位置，催化层氧气浓度高，氧化还原反应发生快。因此，膜电极设计时可以在靠近质子膜附近喷涂浓度相对较高的催化剂，在扩散层附近喷涂低浓度催化剂，进而实现从扩散层到质子交换膜区域梯度化电极设计。该电极设计可以通过调控氧气浓度和催化剂含量实现膜电极催化效率均匀化。Taylor等[33]利用油墨打印方法实现了梯度化催化层制备并验证了其对提升催化性能的效果。具体结构及电池性能改善情况如图1所示，该梯度化电极主要通过调节催化剂浓度实现，将具有不同Pt浓度的催化剂逐层沉积，使从电极到质子交换膜的Pt浓度逐渐升高，质子交换膜附近区域具有最高的铂浓度。

发挥传导质子和吸附水分子作用的离聚体使膜电极催化活性位点降低，即离聚体配比影响催化层的催化效率和质子传输速度。因此，当催化剂浓度变化时，需调整离聚体含量，使电池性能达到最优。虽然梯度化是膜电极性能提升的重要思路，但若以商业化量产为目标，仍需要解决2个问题：（1）可靠的梯度化电极量化模型开发，需从对催化效率、质子传输、气体输送等角度量化仿真，获取最优梯度化电极方案参数。针对该问题，王厚鹏等[32]提出了一种团聚体模型和参数量化和择优方案，未来有望通过梯度化设计实现电池性能进一步提升；（2）考虑商业化应用批量生产过程对产品一致性要求，需进一步研究梯度不一致性影响，优化梯度化催化层可控制备技术，确保将生产不一致性控制在合理范围。



(a)梯度化电极示意



(b)梯度化电极与均匀结构电极性能对比

图1　梯度化电极示意及梯度化电极与均匀结构电极性能对比[33]

虽然在梯度化催化层中,针对催化剂材料用量、孔隙浓度等进行了设计,但从材料形态分布看,催化层仍呈现无序结构,导致催化效率降低等问题[34]。因此,有序化电极技术开发是目前重点研究方向。催化层有序化包含一维(1D)有序化和三维(3D)有序化[35]。1D有序化如基于纳米线/纳米管结构的一维纳米催化材料开发。目前,只有3M公司实现了基于纳米线的有序膜电极的商业化制备[36],我国已有相关企业搭建了产线,但仍处于试验阶段。3D有序化指催化剂或催化剂载体具有垂直取向结构[37],目前仍处于技术研究阶段。纳米阵列结构是现阶段最成熟的制备方法,可以利用纳米阵列制备有序催化层。有序阵列研究包括载体、催化材料、离聚体等方面。在载体有序化方面,已有研究发现基于垂直碳纳米管阵列制备的催化层,其催化效率得到有效提升且具有较高的导电性和机械稳定性,但其量产应用仍存在合成难度大、不利于批量生产以及长期稳定性不足的问题。基于金属氧化物的相关研究表明,二氧化铌(NbO_2)[38]等虽具有较强的耐酸性和抗氧化性但存在导电性较差的问题。有序导电聚合物纳米结构也被用于构建有序电极并获得了较高的比功率密度和稳定性,如全氟磺酸树脂(Nafion)掺杂的聚吡咯(PolyPyrrole,PPy)纳米线阵列(NfnPPy)[39]。除上述有序化设计,Pt及其合金纳米线也被引入到膜电极组件(Membrane Electrode Assembly,MEA)的有序结构中[40]。铂及其合金纳米线具有特殊的晶面且表面缺陷更少,相较于传统的铂、碳具有更高催化活性。在碳粉层上原位生长Pt纳米线制备电催化剂层研究中发现,碳基体中的离聚物对离子电导率以及铂纳米线的团聚和分布也有影响。目前离聚物有序化主要通过静电纺丝工艺实现相关结构制备,不易批量生产。

3　催化层界面优化

目前界面优化技术主要为材料层级优化。材料层级优化可通过调控材料比例、对材料表面进行处理等方法改善孔结构、材料分布以及接触稳定性,如离聚物与碳(I/C)比例调整实现孔结构调控、通过碳表面官能团改性实现离聚物的分散性和均匀性优化[41-42]。

有序电极尚未实现工业化量产,膜电极的商业化和批量生产主要依赖于无序电极结构,如何通过优化工艺降低界面接触阻抗、提高稳定性成为研究重点方向。例如,针对催化层与PEM层剥离问题,制备工艺由最初的将催化层直接涂在气体扩散层,升级为将催化层直接涂覆在PEM两侧,再与GDL同时进行热压的二代工艺。二代工艺制备的MEA,其催化层与PEM的结合力更强,制备的MEA不易剥离且界面阻抗降低,已被大部分MEA制造商采用。在此基础上,目前技术已从通过催化剂涂覆质子交换膜(Catalyst Coated Membrane,CCM)方法所实现的二维界面结构开始向质子交换膜与催化剂层之间的三维工程化界面转变。Yildirim等[43]制备的带有线性图案的全氟磺酸树脂膜具有更高的催化剂利用效率以及更低的膜溶胀。目前图案化质子交换膜制备可通过等离子体蚀刻技术、浇铸法以及热压印法实现[44],其中热压印技术因操作简单、成本低的特点受到广泛关注。然而,热压制备过程的高温高压环境存在使膜电极组件材料结构损坏的风险。针对该问题,Koh等[45]开发了室温图案化的制备方法,该方法无需热压,利用弹性聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane,PDMS)模具就能制作出带有排列整齐的质子交换膜微的纳米图案,制备过程如图2所示。首先,通过已烷稀预聚物与固化剂进行PDMS模具制作。然后,将Nafion溶液(质量分数为5%的低级脂肪醇与水的混合溶液)倒在已图案化的PDMS模具表面。在室温下完全干燥12 h后,即可得到对应尺寸的图案化Nafion膜。其中不同图案和尺寸可通过使用不同硅母版实现,考虑目前光刻工艺发展现状,此技术路线的可行性和可控性比较高。

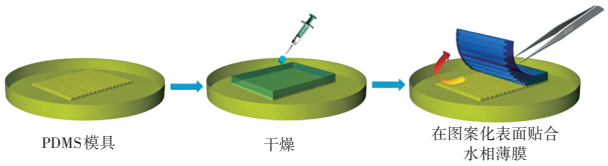


图2　通过浇铸法制备表面图案化全氟磺酸树脂膜的工艺示意[45]

试验结果表明，膜图案的尺寸对催化效率影响较大。通过宽度为3 mm、间距为5 mm的微图案膜制备的膜电极组件在0.60 V和0.75 V电压下的电流密度比无图案化膜的相应膜电极组件高53%和59%。然而，纳米图案化膜主要为离聚物，无法充分渗透至有凹槽表面，从而导致膜与电极之间的机械接触和电学接触不良，从而降低膜电极组件性能。未来，随着制备技术的精进，有望进一步通过对图案的形状以及尺寸参数进行调节实现膜电极更高的传输效率和催化效率[46]。

4　结束语

近年来氢燃料电池相关研究已取得了一定成果，但目前主要问题在于已有成果距离商业需求仍存在差距，需进一步加快关键材料、结构设计及界面优化相关的量产技术攻关和应用验证。在催化层优化、材料优化方面，需进一步从原子和分子角度建立评估模型，综合多种表面电子和结构调整方法进一步实现性能的提升，同时需要注意可商业化批量生产的工艺开发。梯度化催化层结构与有序膜电极思路被认为是催化层技术的关键发展方向，如何借助模型仿真及制备工艺优化实现商业化落地是目前亟待解决的问题。除此之外，考虑到商业化落地对批量生产可行性和长期使用稳定的要求，界面层相关优化及工艺提升是不可忽视的重要内容，相关方面技术研究需进一步加强。以商业化应用为目标的催化层优化一方面要遵从电化学反应基本原理和基本特性，考虑其工作性能受结构、界面以及所采用的制备技术影响，否则就会导致新技术无法量产应用、商业化应用停滞的困境。为实现该目标，不仅需要国家层面的重点关注和大力支持，相关研究机构和产业也要重点针对氢能关键材料、结构优化、界面改善以及制备工艺等展开联合攻关。

参　考　文　献

[1] ZHU M Z, ZHAO C, LIU X K, et al. Single Atomic Cerium Sites with A High Coordination Number for Efficient Oxygen Reduction in Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. ACS Catalysis, 2021(11): 3923-3929.

[2] 李骏，张晓艳，付磊，等. 汽车低碳化与动力总成技术创新[J]. 汽车技术，2017(4): 1-5.

[3] BELMESOV A A, SHMYGLEVA L V, BARANOV A A. Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Processes-Materials-Design in Current Trends[J]. Russian Chemical Reviews, 2024(93): RCR5121.

[4] 张镇，吴辉. 国内外质子交换膜燃料电池关键材料的性能和成本分析[J]. 电池工业，2019(23): 305-326.

[5] 于力娜，普星彤，朱雅男，等. 车用质子交换膜燃料电池膜电极关键材料与结构设计进展[J]. 汽车文摘，2023(5): 9-23.

[6] LI C J, HUANG B L, LUO M C, et al. An Efficient Ultrathin PtFeNi Nanowire/Ionic Liquid Conjugate Electrocatalyst[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019(256): 117828-117829.

[7] MARTENS S, ASEN L, ERCOLANO G, et al. A Comparison of Rotating Disc Electrode, Floating Electrode Technique and Membrane Electrode Assembly Measurements for Catalyst Testing[J]. Journal of Power Sources, 2018(392): 274-283.

[8] KONG F P, SHI W Z, SONG Y J, et al. Surface/Near-Surface Structure of Highly Active and Durable Pt-Based Catalysts for Oxygen Reduction Reaction: A Review[J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2021(2): 2100025-2100026.

[9] XIA Y, XIONG Y, LIM B, et al. Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2009(48): 60-80.

[10] SANCHEZ-SANCHEZ C M, SOLLA-GULLON J, VIDAL-IGLESIAS F J, et al. Imaging Structure Sensitive Catalysis on Different Shape-Controlled Platinum Nanoparticles[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010(132): 5622-5624.

[11] DU L, ZHANG S, CHEN G, et al. Polyelectrolyte Assisted Syhthesis and Enhanced Oxygen Reduction Activity of Pt Nanocrystal with Controllable Shape and Size[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6: 14043-14049.

[12] ZHANG Y, HSIEH Y C, VOLKOV V, et al. High Performance Pt Monolayer Catalysts Produced via Core-Catalyzed Coating in Ethanol[J]. ACS Catalysis, 2014(4): 738-740.

[13] HSIEH Y C, ZHANG Y, SU D, et al. Ordered Bilayer Ruthenium-Platinum Core-Shell Nanoparticles as Carbon Monoxide-Tolerant Fuel Cell Catalysts[J]. Nature Communications, 2013(4): 2466-2470.

[14] ZHOU W P, YANG X, VUKMIROVIC M B, et al. Improving Electrocatalysts for O_2 Reduction by Fine-Tuning the Pt-Support Interaction: Pt Monolayer on the Surfaces of a $Pd_3Fe(111)$ Single-Crystal Alloy[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009(131): 12755-12788.

[15] STAMENKOVIC V R, MUN B S, ARENZ M, et al. Trends in Electrocatalysis on Extended and Nanoscale Pt-Bimetallic Alloy Surfaces[J]. Nature Materials, 2007(6): 241-247.

[16] XIA Y, XIONG Y, LIM B, et al. Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2009(48): 60-103.

[17] GU J, ZHANG Y W, TAO F F. Shape Control of Bimetallic Nanocatalysts Through Well-Designed Colloidal Chemistry Approaches[J]. Chemical Society Reviews, 2012(41): 8050-8055.

[18] WANG C, DAIMON H, LEE Y, et al. Synthesis of Monodisperse Pt Nanocubes and their Enhanced catalysis for oxygen reduction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007(129): 6974-6979.

[19] DU L, ZHANG S, CHEN G, et al. Polyelectrolyte Assisted Synthesis and Enhanced Oxygen Reduction Activity of Pt Nanocrystals with Controllable Shape and Size [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014(6):14043-14049.

[20] SANCHEZ-SANCHEZ C M, SOLLA-GULLON J, VIDAL-IGLESIAS F J, et al. Imaging Structure Sensitive Catalysis on Different Shape-Controlled Platinum Nanoparticles[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010(132): 5622-5626.

[21] MADHESWARAN D K, THANGAVELU P, KRISHNA R, et al. Carbon-based Materials in Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Critical Review on Performance and Application[J]. Carbon Letters, 2023(33): 1495 - 1518

[22] HO V T T, PAN C-J, RICK J, et al. Nanostructured $Ti(0.7)Mo(0.3)O_2$ Support Enhances Electron Transfer to Pt: High-Performance Catalyst for Oxygen Reduction [J]. Journal of the American Chemical Society, 2011(133): 11716-11724.

[23] XIE S, CHOI S I, LU N, et al. Atomic Layer-by-Layer Deposition of Pt on Pd Nanocubes for Catalysts with Enhanced Activity and Durability toward Oxygen Reduction[J]. Nano Letters, 2014(14): 3570-3576.

[24] KUSOGLU A, WEBER A Z. New Insights into Perflorinated Sulfonic-Acid Ionomers[J]. Chemical Reviews, 2017(117): 987-1104.

[25] GARSANY Y, ATKINSON R W, SASSIN M B, et al. Improving PEMFC Performance using Short-Side-Chain Low-Equivalent Weight PFSA Ionomer in the Cathode Catalyst Layer[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018(165): F381-F391.

[26] KONGKANAND A, MATHIAS M F. The Priority and Challenge of High-Power Performance of Low-Platinum Proton-Exchange Membrane Fuel Cells[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2016(7): 1127-1137.

[27] ZHAO Z P, FENG M, ZHOU J, et al. Composition Tunable Ternary Pt-Ni-Co Octahedra for Optimized Oxygen Reduction Activity[J]. Chemical Communications, 2016(52): 11215-11218.

[28] HUANG X Q, ZHAO Z P, CHEN Y, et al. A Rational Design of Carbon-Supported Dispersive Pt-based Octahedra as Efficient Oxygen Reduction Reaction Catalysts[J]. Energy & Environmental Science, 2014(7): 2957-2962.

[29] LIU M, ZHAO Z, DUAN X F, et al. Nanoscale Structure Design for High-Performance Pt-Based ORR Catalysts[J]. Advances Materials, 2019(31): 1802234.

[30] CHEN M, ZHAO C, SUN F M, et al. Research Progress of Catalyst Layer and Interlayer Interface Structures in Membrane Electrode Assembly (MEA) for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) System[J]. eTransportation, 2020(5): 100075.

[31] XING L, SHI W, SU H, et al. Membrane Electrode Assemblies for PEM Fuel Cells: A Review of Functional Graded Design and Optimization[J]. Energy, 2019(177): 445-464.

[32] 王厚朋, 程涛, 彭茜等. 质子交换膜燃料电池梯度化膜电极的模型构建与设计[J]. 石油学报(石油加工), 2024(40): 494-499.

[33] TAYLOR A D, KIM E Y, HUMES V P, et al. Inkjet Printing of Carbon Supported Platinum 3-D Catalyst Layers for Use in Fuel Cells[J]. J Power Sources, 2007(171): 101-106.

[34] CONDE J J, FOLGADO M A, Ferreira-Aparicio P, et al. Mass-Transport Properties of Electrosprayed Pt/C Catalyst Layers for Polymer-Electrolyte Fuel Cells[J]. J Power Sources, 2019(427): 250-2599.

[35] SHIN S, KIM A-R, UM S. Computational Prediction of Nanoscale Transport Characteristics and Catalyst Utilization in Fuel Cell Catalyst Layers by the Lattice Boltzmann Method[J]. Electrochimica Acta, 2018(275):

87-99.

[35] MIDDELMAN E. Improved PEM Fuel Cell Electrodes by Controlled Self-Assembly[J]. Fuel Cell Bulletin, 2002(11): 9-12.

[36] QIU Y, ZHANG H, ZHONG H, et al. A Novel Cathode Structure with Double Catalyst Layers and Low Pt Loading for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013(38): 5836-5844.

[37] DEBE M K. Tutorial on the Fundamental Characteristics and Practical Properties of Nanostructured Thin Film (NSTF) Catalysts[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2013(160): F522-F534.

[38] CHEN M, WANG M, YANG Z, et al. High Performance and Durability of Order-Structured Cathode Catalyst Layer based on TiO2@PANI Core-Shell Nanowire Arrays[J]. Applied Surface Science, 2017(406): 69-76.

[39] XIA Z, WANG S, JIANG L, et al. Bio-Inspired Construction of Advanced Fuel Cell Cathode with Pt Anchored in Ordered Hybrid Polymer Matrix[J]. Science Report, 2015(5): 16100.

[40] SU K, SUI S, YAO X, et al. Controlling Pt Loading and Carbon Matrix Thickness for a High Performance Pt-nanowire Catalyst Layer in PEMFCs[J]. The International Journal of Hydrogen Energy, 2014(39): 3397-3403.

[41] WEI Z, HE A, SU K, et al. Carbon Matrix Effects on the Micro-Structure and Performance of Pt Nanowire Cathode Prepared by Decal Transfer Method[J]. The Journal of Energy Chemistry, 2015(24): 213-218.

[42] KARAN K. PEMFC Catalyst Layer: Recent Advances in Materials, Microstructural Characterization, and Modeling[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2017(5): 27-35.

[43] YILDIRIM M H, BRAAKE J T, ARAN H C. Micro-Patterned Nafion Membranes for Direct Methanol Fuel Cell Applications[J]. Journal of Membrane Science, 2010(349): 231-236.

[44] BREITWIESER M, KLINGELE M, VIERRATH S, et al. Tailoring the Membrane-Electrode Interface in PEM Fuel Cells: A Review and Perspective on Novel Engineering Approaches[J]. Advanced Energy Materials, 2018(8): 1701257.

[45] KOH J K, JEON Y, CHO Y I, et al. A Facile Preparation Method of Surface Patterned Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cell Applications[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014(23): 8652-8659.

[46] AIZAWA M, GYOTEN H, SALAH A, et al. Pillar Structured Membranes for Suppressing Cathodic Concentration Overvoltage in PEMFCs at Elevated Temperature/Low Relative Humidity[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2010(157): B1844-B1851.

（责任编辑　**梵玲**）

《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，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，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。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

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