质子交换膜燃料电池阴极催化剂专利技术综述

侯淼
（国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心，北京 100160）

摘　要：质子交换膜燃料电池（PEMFCs）凭借高效环保优势，已成为车载氢能汽车的核心动力装置。阴极催化剂是制约燃料电池生产成本以及整车性能的关键瓶颈。系统梳理国内外 PEMFCs 阴极催化剂相关专利，从活性组分和载体 2 个方面综述了催化剂降低成本以及提升性能的技术改进路线，旨在为上述领域技术的后续技术研发与产业化应用提供参考。

关键词：质子交换膜燃料电池；氧还原；催化剂
中图分类号：TM911.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1008-1100（2026）06-0011-06
DOI：10.19482/j.cn11-3237.2026.06.02

Overview of patent technologies on cathode catalysts for proton exchange membrane fuel cells

HOU Miao
(Patent Examination Cooperation (Beijing) Center of the Patent Office, CNIPA, Beijing 100160, China)

Abstract: Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), leveraging their advantages of high efficiency and environmental friendliness, have become the core power units for hydrogen-powered vehicles. The cathode catalyst was a key bottleneck restricting the production cost of fuel cells and the overall vehicle performance. This paper systematically reviewed domestic and international patents related to cathode catalysts for proton exchange membrane fuel cells. It summarized the technical improvement routes for reducing catalyst costs and enhancing performance from the perspectives of active components and catalyst supports, aiming to provide a reference for subsequent technological research and industrial application in this field.

Key words: proton exchange membrane fuel cells; oxygen reduction; catalyst

在全球能源结构向清洁低碳加速转型的背景下，质子交换膜燃料电池（PEMFCs）凭借能量转换效率高、运行过程零排放、启动速度快以及能量密度高的核心优势，成为推动交通、工业和分布式能源等领域实现深度脱碳的核心技术路径之一，为我国实现碳达峰、碳中和提供重要的技术支撑。国家发改委、国家能源局联合印发的《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》中明确将 PEMFCs 作为氢能高效利用的核心方向[1]，提出加快推进 PEMFCs 技术创新，开发关键材料，提高主要性能指标和批量化生产能力，持续提升燃料电池可靠性、稳定性、耐久性，进一步凸显了其在能源转型中的核心地位。

PEMFCs 由质子交换膜（Proton-Exchange Membrane，PEM）、催化剂层（Catalyst Layer，CL）、气体扩散层（Gas Diffusion Layer，GDL）、密封件和双极板（Bi-polar Plates，BP）组成。PEM 与其两侧的 CL 构成膜电极，将膜电极置于 2 个 GDL 间，通过热压工艺形成五合一组件（称为膜电极组件）。膜电极组件是 PEMFCs 的核心部件，同时也是化学能转化成电能的场所。当前，PEMFCs 已逐步从实验室研发走向示范应用。截

收稿日期：2026-04-16
作者简介：侯淼（1992-），女，硕士，知识产权师，研究方向为催化剂领域专利审查。

至 2024 年底，我国已累计建成加氢站超 540 座，推广燃料电池汽车约 2.4 万辆[2]，商用汽车领域示范规模国际领先。产业链国产化进程持续加速，但商业化大规模应用仍面临诸多瓶颈，其中成本过高是制约 PEMFCs 市场化的核心问题[3]。

催化剂作为电池中加速电化学反应的关键材料，是决定 PEMFCs 整体成本的核心环节。在 PEMFCs 的电化学反应过程中，阴极主要发生氧气还原反应（ORR），该反应动力学速率极为缓慢，且反应过程中易产生中间产物（如过氧化氢），导致催化剂活性衰减、稳定性下降[4]，因此阴极反应对催化剂的活性、稳定性、抗中毒能力要求更高。同时，阴极催化剂的贵金属载量远高于阳极，其性能的改进是提升燃料电池性能、降低整体成本的核心关键，也是当前 PEMFCs 领域的研究重点与核心方向。从材料组成来看，阴极催化剂主要包含活性组分和载体 2 大核心部分，活性组分提供氧还原反应的核心催化位点，载体则起到分散活性组分、优化传质及增强结构稳定性的重要作用，二者相互耦合、共同决定催化剂的综合性能。目前针对催化剂的性能优化与技术升级，也主要围绕活性组分改性与载体结构设计 2 大维度进行研究与突破。

本文立足专利技术视角，围绕阴极催化剂“降低成本、提升稳定性”的技术目标，从活性组分和载体 2 个角度系统梳理 PEMFCs 阴极催化剂领域的专利技术改进路径及创新趋势，为阴极催化剂技术创新、国产化突破及产业商业化应用提供针对性的参考。

1 催化剂活性组分

铂（Pt）基催化剂凭借优异的电催化活性与结构稳定性，是燃料电池阴极氧还原反应最具代表性且应用最广泛的电催化剂。尽管金属 Pt 存在地壳储量稀缺、市场价格高昂、成本居高不下等问题，但目前各类商用及产业化最成熟的阴极催化剂仍以碳载铂为核心体系。针对 Pt 基催化剂性能优化与降本增效的研究已成为电催化领域的热点方向。围绕活性组分的调控改性主要包括活性组分的尺寸调控、形貌调控和成分调控 3 个方面，通过精准调控几何结构与电子结构，进而实现催化活性、选择性与循环稳定性的协同提升。

1.1 尺寸调控

研究表明，随着纳米 Pt 颗粒尺寸减小，催化剂颗粒表面 Pt 原子配位数减少，活性比表面积随之增大，拥有的活性位点数量也将增多。在纳米尺度上，小尺寸效应将使催化剂活性比表面积增加至峰值。由于 ORR 只发生在催化剂表面层，内层原子的利用率很低，因此在一定范围内，颗粒尺寸越小，表面原子占比越高，也越有利于提高 Pt 的利用率。尺寸调控就是通过减小金属颗粒尺寸、提升颗粒尺寸均一性等方法来实现制备高活性和高稳定性电极催化剂的目的。

通过调整活性金属颗粒的尺寸，同时增加颗粒的分散程度，能够有效提高催化剂活性。CN02118282.5[5]利用氯化铵、氯化钾、溴化氨、溴化钾、碘化氨或碘化钾作为氯铂酸的锚定物，获得了 Pt 粒子在活性炭内部以及表面分布均匀、粒径均一、Pt 粒径主要为 4±0.5nm 的 Pt/碳电催化剂。JP2002129630A[6]通过将作为载体的科琴碳分散到作为溶剂的离子交换水和作为还原剂的乙醇的混合溶液中来制备负载金属的催化剂，煮沸上述溶液除去溶解氧，然后加入二硝基二氨铂，通过加热和回流所得溶液还原 Pt 离子以制备科琴碳载 Pt 胶体，使得 Pt 胶体的颗粒细化和高分散化，有效增加活性金属颗粒的表面积，提高催化活性。CN200780009028.X[7]通过将负载催化性 Pt 颗粒的平均尺寸提高至大于导电载体中微孔的尺寸，有效防止 Pt 金属颗粒进入导电载体中的微孔，使得导电载体、催化金属和聚合物电解质仅存在于导电载体的表面或者嵌入在孔口，以形成三相界面，由此能够减少无用的催化金属，提高 Pt 粒子的利用效率。CN201611022937.4[8]利用静电纺丝技术对钯/碳、全氟磺酸树脂、聚四氟乙烯和聚丙烯酸混合物进行纺丝，制备钯/碳催化层，然后欠电位沉积 Pt 单原子层，制备得到钯为核、Pt 单原子层为壳的催化层，极大的提高了 Pt 的利用率。CN201911356351.5[9]在真空度达到 3×10^{-4} Pa 时通入氩气，气体压力达到 6Pa 时，开始溅射，溅射功率为 100W，溅射时间为 8s，制得的 Pt 颗粒分布范围窄（2.5～3.5nm）、平均颗粒尺寸为 3nm，相比于商业 Pt/碳的电池功率密度增加。

1.2 结构调控

活性组分的形貌与催化剂的活性和耐久性密切相关，通过调控活性组分形状、晶面和金属元素分布等，可以实现采用更少的贵金属用量暴露更多的活性位点的技术效果，也可以有效的延缓活性组分的溶解和迁移，从而提高催化剂的催化活性和耐久性。

1.2.1　活性组分形貌

Pt 催化剂的活性和耐久性可以通过改变 Pt 的物理形态来进行改进，通过制备具有高表面积、稳定性和活性的伸展的 Pt 纳米结构，可以有效延缓其在燃料电池条件下发生的溶解和结构重组。CN200780014805.X[10]制备了一种无载体 Pt 纳米管和 Pt 基合金纳米管作为新型阴极催化剂，Pt 和 Pt 基合金纳米管直径 5～100nm、长 0.1～100m、壁厚 1～10nm，纳米尺寸的壁厚能够提高 Pt 的表面积，使催化剂具有显著的耐久性和高催化活性，微米尺寸的长度能够有效的消除或缓解催化剂的溶解。CN200780015831.4[11]以单层或多层的 1,2-双十八烷酰基-sn-甘油-3-磷酰胆碱（DSPC）囊泡作为模板，在抗坏血酸溶液中制备了直径 30～500nm 的圆形树枝状 Pt 纳米片，通过改变囊泡的组成，进一步制备了树枝状 Pt 纳米球。在 PEMFCs 条件下该纳米球比传统的 Pt 催化剂具有更高的催化活性和耐久性。CN201810680087.X[12]通过采用柠檬酸、柠檬酸钠或柠檬酸钾为络合剂，甲醛、甲酸或甲酸钠为还原剂，制备了枝杈状 Pt 电催化剂，其具有丰富的高指数活性晶面，同时具有高稳定性和高催化活性。CN201811084313.4[13]通过引入过渡金属铁、钴、镍、铜与贵金属 Pt 形成三元合金，通过选择特定的还原气体，使得过渡族金属离子与 Pt 形成合金的过程中会强烈选择八面体配位位置，从而形成八面体结构，不仅降低了 Pt 的含量，而且催化剂活性较纯 Pt 得到有效提升。CN202410629712.3[14]通过引入十六烷基三甲基溴化铵作为形貌控制剂制备了无序八面体催化剂，结合高气压辅助的高温退火工艺成功制备了有序 Pt 基金属间化合物八面体催化剂，其保留了大部分八面体形貌，具有较高的有序化程度，活性和稳定性得到提升。

1.2.2　核壳结构

核壳结构 Pt 基催化剂的共同特点是其活性成分 Pt 分布在外壳。内核材料包括过渡金属（铁、钴、镍和铜等）或合金、无机氧化物、其它贵金属（银、钯等），通过替代内核 Pt 从而有效提高 Pt 的利用效率，降低催化剂的 Pt 用量，还可以通过合金作用或晶格应力使表层 Pt 原子的 d 带中心向费米能级方向移动，改善催化材料表面与含氧中间体的结合力，从而提高催化剂的 ORR 催化活性。US20070438978A[15]以贵金属或含贵金属合金为壳，以非贵金属或无机氧化物陶瓷材料为核，通过限定壳体厚度为内颗粒芯直径的 5%～10%，且壳还包括至少 3 个 Pt 原子层，使催化剂颗粒表面趋向多晶块体 Pt 的特征，可以显著提高活性。CN201480047601.6[16]制备以 Pt 为壳、以钯为核的核壳催化剂，催化剂颗粒在个数基准的粒径频度分布中，平均粒径为 2.5～3.9nm，标准偏差 2.0nm 以下，且粒径在 5.0nm 以下的频度为 55%以上，Pt 壳的平均厚度为 0.20～0.35nm，实现钯核的覆盖率较高，催化剂性能增强。CN201711213907.6[17]采用铁、钴或镍金属纳米颗粒作为分散剂，制备 3nm 以下 Pt/过渡金属微晶核壳结构纳米颗粒作为燃料电池电催化剂。在将微晶金属纳米颗粒担载到碳载体的过程中，采用较高温度在溶液中进行热处理，一方面增强金属纳米颗粒与载体之间的相互作用强度；另一方面，加热过程促进金属纳米颗粒表面的不稳定的非 Pt 元素（铁、钴或镍）溶解，从而形成致密的 Pt 壳包覆合金的核壳结构。

1.3　成分调控

催化剂活性组分的组成与催化剂的性能密切相关，当前催化剂的成分调控方式主要包括 2 个体系：一是 Pt 基催化体系，主要包括铂与过渡非贵金属的合金化改性、铂与其他贵金属的合金化设计；二是无 Pt 催化体系，主要包括无 Pt 贵金属催化剂以及非贵金属催化剂。

1.3.1　合金化

合金的非贵金属相的选择一般有钴、镍、铁、钯、铬、钼、锰和铝等，其中以钴、镍和铁混合的合金催化剂活性最高，也有部分关于贵金属与 Pt 合金研究，贵金属相一般有钯、钌、金和银等。

US19940324140A[18]公开了一种 Pt 合金催化剂，包含在导电碳载体上的由 Pt、钴和铬组成的三元合金，先将金属的硝酸盐以氢氧化物的形式同时沉淀到悬浮的碳载体上，再进行还原得到上述催化剂。合金以高度分散的形式存在于导电碳载体上，其晶体尺寸不大于 60Å，比传统催化剂具有更高的活性和稳定性。US20040557911A[19]制备了一种由 Pt、钒和铁组成的合金催化剂，与纯 Pt 催化剂相比表现出更高的耐腐蚀性和活性，其中电催化活性增加至少 3 倍。CN202211167823.4[20]公开了一种以 Pt、镍为活性组分的催化剂，以镍单质或镍合金为内核，同时以 Pt 原子层为壳层包覆在上述内核的表面。含镍元素内核的晶型结构为密排六方结构，对含 Pt 元素壳层的几何效应和电子效应的调控能够提高催化剂的氧还原反应活性。

CN202511503636.2[21]公开了一种 Pt、镉合金催化剂，通过金属镉促进 Pt 基合金在低温下发生相转变，能够提高 Pt 基合金颗粒的有序化，同时又能够提高金属在碳材料上的负载量。

1.3.2 非 Pt 催化剂

由于 Pt 基催化剂的价格较高，而且抗甲醇和一氧化碳中毒性能较差，越来越多的研究者开始对具有高活性和高稳定性的非贵金属催化剂。金属氮碳催化剂、过渡金属氧化物、过渡金属硫化物、过渡金属碳化物和氮化物等均是本领域的研究热点。

JP2003207043[22]采用具有氧化还原功能的金属氧化物或金属氮化物作为电极催化剂，其中金属氧化物可以为氧化钌、氧化钛、氧化钒、氧化锰、氧化钴、氧化镍和氧化钨中的至少 1 种，金属氮化物可以为氮化钼，在保证催化活性和耐久性的同时，有效降低了催化剂的成本。US20080019937A[23]制备了由非 Pt 元素组成的金属簇催化剂作为活性组分的电极催化剂，金属簇包含金、钨、铜、钴、镍、铁、锰、钯、铼、铝、铱、铑、钌和 Pt 中的至少任何 1 种。与 Pt 催化剂相比，在保证催化性能的情况下，有效降低燃料电池的生产成本。CN200880106866.3[24]通过水热反应或者溶剂热反应制备含有硫化钼、硫化钌、硫化铑或硫化铼的微粒子和导电性微粒子的微粒子复合材料，用于制备低成本化的燃料电池用催化剂。JP2010105491[25]制备了一种过渡金属碳化物催化剂，其中过渡金属选自铁、钴和镍，催化剂是至少含有碳、氮和氢作为构成元素的碳催化剂，其碳的质量比例为 80%以上、氢与碳的元素比为 0.04～0.28、氮与碳的元素比为 0.005～0.06。该催化剂在不含昂贵的 Pt 等贵金属或其合金的情况下，依然具有较高的氧还原能力。CN201010522823.2[26]制备了一种钴/氮-碳阴极催化剂，采用钴盐与聚吡咯（PPy）直接浸渍，使钴与聚吡咯上的氮作用形成催化中心后，直接高温热处理使得聚吡咯发生热分解形成碳骨架。该碳骨架直接作为催化剂的碳载体以增强催化剂的导电性，同时钴和氮处于碳载体的骨架中，有效提高催化剂的稳定性。CN202011349927.8[27]公开了一种钴-镍-铁共镶嵌型非贵金属催化剂，在原料中加入相应有机配体和金属离子，形成金属有机骨架材料（MOFs）结构，同时在制备得到 MOFs 的过程中，将铁、钴、镍直接替换原有 MOFs 中金属离子，随后，在热解过程中形成活性位点直接镶嵌在 MOFs 中，多金属嵌入后的催化剂具有钴-氮-碳、镍-氮-碳和铁-氮-碳 3 种活性位点，催化剂的原子利用率显著提高。

2 催化剂载体

载体作为 PEMFCs 阴极催化剂的关键组成部分，在催化体系中发挥着不可或缺的作用。载体的物理化学性质可直接调控活性组分的纳米粒径、分散均匀性、电化学活性、催化稳定性及贵金属利用率，最终影响 PEMFCs 的性能和寿命。反应物与产物的传质行为、质子传导特性也与催化剂载体的理化性质密切相关，载体与活性组分之间可产生显著的界面协同效应，进而提升整体电催化性能。

2.1 碳载体

碳载体因其高比表面积和高电子传导性，被用作 PEMFCs 催化剂的典型载体材料，炭黑是商业化 PEMFCs 的主要载体。美国 Cabot 公司生产的 Vulcan XC 炭黑的 BET 比表面积约为 250m^2/g、中孔和大孔达 54%以上、电导率 2.77S/cm，基本满足电催化剂载体对比表面积和导电性的要求，是目前应用最为广泛的商业载体。近年来对碳载体的研究主要集中在新型碳载体的开发和利用上，碳纳米管、碳纤维、石墨烯、碳气凝胶和碳球等均作为载体被广泛的应用于催化剂中。碳纳米管导电性和稳定性好，抗电化学腐蚀性较好；石墨烯电导率高、抗电化学腐蚀性好且比表面积大；碳气凝胶具有可控的纳米多孔网络结构，能够均匀有效地负载 Pt、缓解 Pt 失活、降低传质阻力。

JP2004109048[28]采用螺旋状碳纳米管作为载体负载贵金属 Pt 制备阴极催化剂，有效抑制高电流密度下发电时电压下降的发生，减少无助于反应的 Pt 等贵金属催化剂的用量。US20030695214A[29]制备了一种碳气凝胶载体，其具有＞400m^2/g 的表面积和＞4nm 的孔径，由于导电碳气凝胶的介孔结构，可以容易地实现电催化三相接触，从而实现反应动力学性能的提升。EP06838053A[30]制备了一种用于催化剂载体的纳米线结构体以及包含该结构体的互连纳米线网络。该纳米线结构体包含纳米线芯、碳基层以及在纳米线芯上的纳米石墨片构成的碳基结构体，其互连得到可以形成膜或粒子的多孔结构，具有较高的结构稳定性和电连接性。US20040882361A[31]通过在催化剂的存在下热分解含烃气体合成碳纤维，其平均直径为 100～1000nm、比表面积为 200～500m^2/g。通过使碳纤维彼此充分接触来确保电子传导路径并增加催化剂

负载量，有效改善了燃料电池的输出特性。JP2018084384A[32]制备了一种具有三维网状结构的多孔碳载体，其孔由包含 2～3 层石墨烯的膜壁限定，具有 900m²/g 以上的 BET 比表面积，有效增加了催化剂金属担载位点，抑制 Pt 等催化剂粒子的粒径粗大化，能够实现作为燃料电池的小型化。CN202310244384.0[33]公开了一种 PEMFCs 催化剂及其制备方法，采用气氛球磨的方法将碳材料表面进行改性，在粉碎碳材料的同时，球磨过程中产生的热量能够使罐内材料升温至 30℃以上，促进了球磨罐内臭氧与碳材料的温和反应，能大幅度提高和调控纳米碳材料表面的含氧官能团比例，使得该碳材料表面能担载更多的活性组分，从而提高催化剂的催化性能。

2.2　改性碳载体

单一的碳载体在稳定性和活性组分分散性等方面还存在很多不足，因此对碳载体进行改性是目前的热门研究方向。通过对碳载体进行改性，能够进一步提高催化剂的催化活性和稳定性，降低碳载体的腐蚀问题的影响，常见的改性方式包括物理改性和化学改性。

CN200580024069.7A[34]将碳载体用合适的金属碳化物（包括钛、钨和钼）进行表面处理，有效保护了碳载体不受腐蚀，同时保持碳载体的所需特性。US201313771729A[35]制备了一种催化剂载体，其为单层石墨烯和磷化合物的堆叠体，且石墨烯的一些碳原子被氮原子取代，与不加入磷化合物的载体相比，能够有效减小碳腐蚀的影响，增强催化剂的耐久性。US201615377976A[36]将石墨烯用聚苯并咪唑、磺酸酯、磺酸基和羧酸酯等基团进行官能化，制得的催化剂比含炭黑的常规催化剂更稳定，有效地解决催化剂表面的颗粒表面迁移、溢流和腐蚀的问题。CN202310140532.4[37]以石墨化碳为载体负载 Pt 纳米颗粒，在制备过程中将碳和硫引入石墨化碳载体和/或 Pt 纳米颗粒上，碳原子在 Pt 纳米颗粒表面形成碳包覆，防止 Pt 纳米颗粒烧结团聚，硫原子可以与 Pt 配位，使得 Pt 纳米颗粒主要通过 Pt-硫键与石墨化碳载体复合，弥补了石墨化碳载体对 Pt 纳米颗粒负载率低的问题，使得石墨化碳负载 Pt 纳米颗粒具有较高的电化学活性面积，保证其具有耐腐蚀特性的同时还具有良好的催化活性。

2.3　非碳载体

造成催化剂稳定性下降的主要因素包括催化剂的分解、烧结、结块和碳载体的腐蚀，而碳载体的腐蚀是导致催化剂失效的最主要的原因。因此，尽管碳载体在阴极氧化原催化剂中得到了广泛的应用，但在燃料电池运行的环境下，催化剂载体的碳腐蚀导致催化剂电化学稳定性较低，影响了燃料电池的寿命，非常有必要寻找性能稳定的非碳载体取代碳载体材料，以提高燃料电池的耐久性。

CN200680015088.8[38]制备了一种具有纳米尺寸的碳化钛和/或氮化钛颗粒作为催化剂载体颗粒，碳化钛和氮化钛展现了类似于金属的导电性以及出色的抗化学氧化性和抗腐蚀性，有效提高催化性能以及增加的燃料电池电极耐久性。CN200680029098.7[39]采用一种多孔状的二氧化钛作为 Pt 或者其他合适的催化剂的高表面积载体，通过混合或者掺杂铌元素来提高载体材料的电导率，在氧化性的环境中二氧化钛担载的催化剂的耐久性优于碳担载的催化剂。CN202210909651.7[40]采用硫化锡（SnS_2）和氧化锡（SnO_2）形成的异质结构作为载体，其中 SnO_2 是将 SnS_2 部分氧化后原位生长在 SnS_2 上的颗粒，Pt 纳米颗粒主要负载在异质界面上，其余的 Pt 颗粒则负载于 SnO_2 纳米颗粒上，非碳异质结构载体与 Pt 纳米颗粒之间存在很强的金属载体相互作用，以此提升催化剂的稳定性和活性。同时，SnS_2 自身具有一定的氧还原性能，将其作为负载 Pt 的载体进一步提升了催化剂的活性。US202418653725A[41]采用具有中空三维骨架的沸石分子筛（ZSM-5）作为催化剂载体，将 Pt 纳米颗粒包裹在中空纳米沸石骨架中可以有效阻碍使金属纳米颗粒催化剂失活的有毒物质（例如离聚物）的吸附，并且具有优异的烧结、浸出和抗聚集性。此外，可以根据应用场景，基于每类沸石孔径的可用数据，选择具有针对该应用定制的特定孔径的沸石。

3　结论

本文围绕 PEMFCs 阴极催化剂，从活性组分和载体 2 大核心维度，系统梳理了全球相关专利技术的发展情况。综合来看，阴极催化剂专利技术始终围绕降低成本和提升稳定性 2 大核心目标，活性组分领域实现了从低 Pt 合金向有序金属间化合物、单原子催化的迭代，逐步向金属-氮-碳材料推进；载体领域则从传统碳纳米管、石墨烯等新结构碳载体，逐步升级为掺杂改性碳载体、高石墨化碳复合载体，进一步向非碳载体延伸。结合专利数据与技

术梳理可知，当前阴极催化剂专利布局已进入深耕细化阶段，低 Pt/非 Pt 替代、原子级结构设计和载体抗腐蚀改性成为技术创新的核心热点。

参考文献

[1] 国家发展改革委，国家能源局.氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)[R/OL].2022-03-23.https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html

[2] 国家能源局，中国氢能发展报告(2025)[R/OL].2025-04-30.https://www.nea.gov.cn/20250430/96022785b3a747248288ad1c57d3a025/c.html

[3] 王梦琦.质子交换膜燃料电池的研究进展与前景微探[J].当代化工研究，2020，(12)：8-10.

[4] Matthew M，Christopher Z，Anthony K.Performance measurements and modelling of the ORR on fuel cell electrocatalysts-the modified double trap model[J].Electrochimica Acta，2015，179：126-136.

[5] 中国科学院长春应用化学研究所.聚合物电解质膜燃料电池阴极纳米铂/炭电催化剂的制备方法：CN02118282.5[P].2002-11-20.

[6] 三菱重工株式会社.金属担持触媒並びにその製造方法及びこれを利用する固体高分子電解質型燃料電池：JP2002129630A[P].2003-11-11.

[7] 株式会社科特拉，丰田自动车株式会社.具有改进的贵金属利用效率的燃料电池电极催化剂、其制造方法及包括其的固体聚合物燃料电池：CN200780009028.X[P].2009-04-01.

[8] 中国科学院大连化学物理研究所.直接制备质子交换膜燃料电池用铂单原子层催化层的方法：CN201611022937.4[P].2018-05-25.

[9] 武汉理工大学.一种低铂载量质子交换膜燃料电池用高活性炭载铂型催化剂及其制备方法：CN201911356351.5[P].2020-04-10.

[10] 加利福尼亚大学董事会.作为用于燃料电池的电催化剂的铂和铂基合金纳米管：CN200780014805.X[P].2009-05-13.

[11] 北美丰田设计和制造公司，桑迪亚国家实验室.用于燃料电池和其它应用的树枝状金属纳米结构：CN200780015831.4[P].2009-07-29.

[12] 华南理工大学.一种枝杈状铂电催化剂及其制备方法与应用：CN201810680087.X[P].2018-12-07.

[13] 苏州擎动动力科技有限公司.一种高活性负载型八面体三元合金催化剂的制备方法：CN201811084313.4[P].2018-12-21.

[14] 河北工业大学.一种有序铂基金属间化合物八面体催化剂的制备方法：CN202410629712.3[P].2024-08-27.

[15] Umicore AG & CO KG.Core/shell-type catalyst particles and methods for their preparation：US20070438978A[P].2010-04-08.

[16] 丰田自动车株式会社.核壳催化剂及核壳催化剂的制造方法：CN201480047601.6[P].2016-04-13.

[17] 中国科学院大连化学物理研究所.一种燃料电池用单分散核壳纳米催化剂的制备方法：CN201711213907.6[P].2019-06-04.

[18] Degussa A G.Platinum alloy catalyst for fuel cells and method of its production：US19940324140A[P].1996-02-06.

[19] Symyx technologies inc，Honda motor Co.，Ltd.，Platinum alloy catalyst for fuel cells and method of its production：US20040557911A[P].2007-03-08.

[20] 国家电投集团氢能科技发展有限公司.负载型催化剂、其制备方法及质子交换膜燃料电池：CN202211167823.4[P].2023-04-18.

[21] 中国科学院理化技术研究所.一种铂基合金催化剂及其制备方法与质子交换膜燃料电池：CN202511503636.2[P].2026-01-30.

[22] 日東電工株式会社.燃料電池：JP2003207043A[P].2005-03-10.

[23] Hitachi Led.Fuel cell using the catalyst of metal clusters：US20080019937A[P].2008-08-14.

[24] 丰田自动车株式会社，国立大学法人高知大学.微粒子复合材料、其制造方法、固体高分子型燃料电池用催化剂和固体高分子型燃料电池：CN200880106866.3[P].2010-08-11.

[25] 帝人株式会社.炭素触媒及び炭素触媒の製造方法：JP2010105491A，2011-11-17.

[26] 中国科学院大连化学物理研究所.一种 M/N-C 催化剂及其制备和应用：CN201010522823.2[P].2012-05-16.

[27] 中国科学院大连化学物理研究所.一种非贵金属催化剂及其制备方法与应用：CN202011349927.8[P].2022-05-27.

[28] 丰田自动车株式会社.燃料電池用基体及び燃料電池：JP2004109048A，2025-10-20.

[29] Aerogel composite LLC.Aerogel and metallic composites：US20030695214A[P].2004-07-22.

[30] Nanosys Inc.Nanowire structures comprising carbon：EP06838053A[P].2008-08-06.

[31] Toshiba K K.Carbon fiber synthesizing catalyst and method of making thereof：US20040882361A[P].2010-11-23.

[32] 丰田自动车株式会社.燃料電池用電極触媒：JP2018084384A[P].2019-10-31.

[33] 国家电投集团氢能科技发展有限公司，宁波绿动燃料电池有限公司.一种质子交换膜燃料电池催化剂及其制备方法：CN202310244384.0[P].2023-05-30.

[34] 百拉得动力系统公司.用于电化学燃料电池的催化剂载体：CN200580024069.7[P].2009-03-11.

[35] Toshiba corp.Oxygen reduction catalyst and electrochemical cell：US201313771729A[P].2013-10-03.

[36] Univ indiana res & Technology corp.systems and methods of graphene supported catalysts：US201615377976A[P].2017-06-15.

[37] 中国科学技术大学.一种石墨化碳负载铂纳米颗粒、其制备方法及应用：CN202310140532.4[P].2023-05-12.

[38] 通用汽车环球科技运作公司.燃料电池催化剂的载体：CN200680015088.8[P].2008-04-30.

[39] 通用汽车环球科技运作公司，图兰教育基金管理人.燃料电池催化剂的载体：CN200680029098.7[P].2009-02-11.

[40] 华中科技大学.一种异质结构复合材料负载铂颗粒催化剂及制备方法：CN202210909651.7[P].2002-11-04.

[41] Uchicago Argonne LLC.Nano-engineered catalyst for improving the faradaic efficiency of energy conversion and electrolysis systems：US202418653725A[P].2024-11-21.