

引用格式: 刘优林, 李董艳, 沈岳松. 基于结构调控的 Pt 基氧还原催化剂的研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(9): 765-772.
LIU Y L, LI D Y, SHEN Y S. Research Progress on Pt-Based Catalysts Based on Structural Regulation for Oxygen Reduction Reaction[J]. Materials China, 2024, 43(9): 765-772.

特约专栏

基于结构调控的 Pt 基氧还原催化剂的研究进展

刘优林¹, 李董艳², 沈岳松¹

- (1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816)
(2. 南京工业大学化学与分子工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 贵金属 Pt 基催化剂作为氧还原反应(ORR)中重要的催化剂之一, 因储量有限且价格昂贵, 限制了其规模化应用。如何提高 Pt 的利用率是目前开发高性能氧还原催化剂的关键。特别是, 对催化剂进行结构调控(形貌、晶相、晶面、电子结构), 可以有效提升 Pt 原子利用率及其本征活性, 但由于表面效应和小尺寸效应使 Pt 纳米粒子具有较高的表面能和化学活性, 导致它在化学反应中不稳定, 影响催化剂的寿命。因此, 开发具有高本征活性、高暴露活性晶面且结构稳定的 Pt 基催化剂依然是质子交换膜燃料电池领域的一个重大挑战。针对近年来该领域催化剂的研究进展进行综述。重点讨论通过调控 Pt 基纳米催化剂的形貌、晶相、晶面和电子结构等结构要素, 提高 Pt 基纳米催化剂氧还原性能的设计理念与制备技术。最后简要总结 Pt 基纳米催化剂面临的挑战和研究重点。

关键词: 结构调控; Pt 基纳米催化剂; 氧还原反应; 形貌; 晶面; 晶相; 电子结构

中图分类号: O643.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)09-0765-08

Research Progress on Pt-Based Catalysts Based on Structural Regulation for Oxygen Reduction Reaction

LIU Youlin¹, LI Dongyan², SHEN Yuesong¹

- (1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)
(2. School of Chemistry and Molecular Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Precious-metal Pt-based catalysts, as one of the important catalysts in oxygen reduction reaction (ORR), have the limited reserves and high prices, limiting their large-scale application. How to improve the utilization rate of Pt is currently the key to develop high-performance catalysts for ORR. Especially, structure regulation (morphology, crystal phases, exposed crystal planes, electronic structure) of catalysts can effectively improve the utilization efficiency and intrinsic activity of Pt atoms. However, Pt nanoparticles have high surface energy due to their surface effect and small size effect, which leads to their instability in chemical reactions and affects the lifespan of the catalyst. Therefore, it remains still a major challenge to obtain Pt nanoparticles with high intrinsic activity, high exposure activity, and stable structure for Pt-based catalysts in the field of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). This article provides a review of the research progress in this field in recent years. The focus is on discussing the design concept and preparation technology of improving the oxygen reduction performance of Pt based nanocatalysts by regulating their structural elements such as morphology, crystal phase, crystal plane, and electronic structure. Finally, a brief summary is given for the challenges and research priorities faced by Pt-based catalysts for ORR.

Key words: structural regulation; Pt-based nanocatalyst; oxygen reduction reaction; morphology; crystal phase; crystal phase; electronic structure

收稿日期: 2024-01-15 修回日期: 2024-07-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3504102);
江苏省自然科学基金资助项目(BK20160982)

第一作者: 刘优林, 男, 1986 年生, 副教授, 硕士生导师

通讯作者: 沈岳松, 男, 1981 年生, 研究员, 博士生导师,

Email: shenyuesong@njtech.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202401017

1 前言

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是一种将氢气和氧气的化学能直接转换成

电能的装置(图 1),该装置具有工作温度低、启动速度快、能量转化效率高、适用范围广等优点,在新能源汽车、便携式移动电源等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。PEMFC 是实现能源清洁化、低碳化发展的重要途径之一。在 PEMFC 中,阴极氧还原反应(oxygen reduction reaction, ORR)是一个动力学迟缓的过程,氧气被还原成水的过程中涉及到 4 个质子和 4 个电子($O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$),还原途径有 2 种:可通过直接一步四电子还原为水,或者通过间接两电子先还原为过氧化氢然后再还原为水^[3,4]。

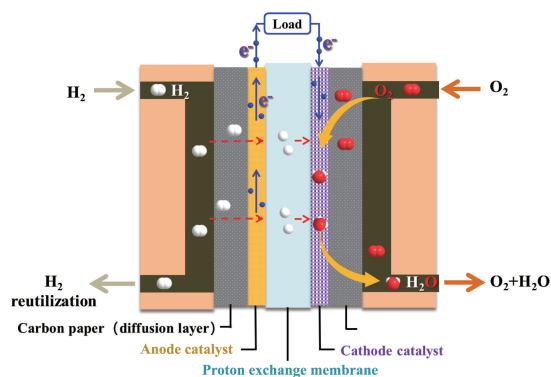


图 1 质子交换膜燃料电池结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of proton exchange membrane fuel cell

在 Pt 催化剂表面, ORR 通常经历四电子途径。其中,直接四电子 ORR 可以通过解离或缔合途径发生,该途径的选择取决于氧气分子在还原前是否解离(图 2)^[5]。该 ORR 过程电子传递多步、速度慢且传质效率低,成为制约能量转换效率的一个关键因素。因此,开发高效 ORR 催化剂成为发展 PEMFC 的核心和关键。当前 PEMFC 阴极催化剂为贵金属 Pt 基催化剂,然而 Pt 价格昂贵、储量有限,阻碍了 PEMFC 规模化应用^[4,6-8]。因此,开发高性能的低 Pt 氧还原催化剂是燃料电池领域研究的重点^[7,9]。

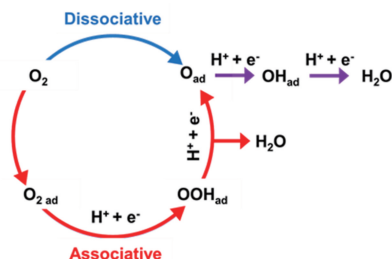


图 2 直接四电子氧还原反应途径示意图(红色和蓝色箭头分别表示结合和解离途径;紫色箭头表示两种途径中发生的反应)^[5]

Fig. 2 Schematic diagram of the direct four electron ORR pathway (red and blue arrows represent binding and dissociation pathways, respectively; purple arrows represent reactions occurring in both pathways)^[5]

目前,低 Pt 催化剂的研究主要集中在多级结构调控方面。形貌调控:通过构筑特定结构的形貌,暴露更多活性位点;晶面调控:通过选择性暴露出高活性晶面实现性能提升;电子结构调控:通过与其他金属合金化实现 Pt 合金的电子结构调控,而电子结构的改变会直接影响到反应物种与活性位点的吸附能,从而影响催化反应的动力学及选择性。通过对催化剂的形貌、尺寸、晶面、电子结构等的调整和优化,可以提升和改善催化剂活性及稳定性^[10-14]。此外,载体对催化剂的性能起着关键作用^[15-20]。本文基于 Pt 基催化剂结构调控方面的研究,对近几年发表的相关研究工作进行了总结和综述。

2 结构调控

2.1 零维 Pt 基纳米催化剂

具有零维纳米结构(球型、立方体及多面体)的 Pt 基纳米催化剂具有高的外比表面积,能够极大地提升 Pt 原子的利用率和催化位点的本征活性。超细纳米催化剂对于减少 Pt 负载量同时提供足够的催化位点是必不可少的,但由于其表面能较高,导致稳定性较差,在长期运行过程中易于团聚长大,影响催化剂使用寿命^[12]。最近发现,掺杂过渡金属可显著提高 Pt 纳米颗粒的活性和耐久性, Jia 等^[21]将 Mo 原子掺杂到 PtNi 八面体中制备出 Mo 掺杂的 PtNi/C 催化剂(Mo-PtNi/C)。结合电化学、非原位和原位光谱技术与理论计算结果表明, Mo 以氧化物的形式优先位于 Mo-PtNi/C 的顶点和边缘位置,这些表面 Mo 氧化物稳定了相邻的 Pt 位点,稳定了富含(111)晶面的八面体形状。此外,表面敏感 $\Delta\mu$ 分析揭示了 Mo-PtNi/C 催化剂非常规的电势依赖性氧覆盖趋势,这表明 Mo 掺杂还可以通过改变表面上 Pt 原子的配位环境来改善 ORR 动力学。Cheng 等^[22]报道了一种合成 Pt 基金属间化合物的介孔限域策略,制备得到超小尺寸的 Pt 基金属间化合物(Pt_3Co 、 $PtCo$ 和 Pt_3Ti),该化合物在燃料电池中具有超长循环稳定性。根据实验和理论计算结果分析可知, Pt_3Co 表现出收缩应变,提高了催化剂的内在活性和稳定性,在高工作电流下的恒电位测试中, Pt_3Co 化合物在 500 h 内的电流密度几乎没有降低。

Zhao 等^[23]采用石墨烯袋包裹超细纳米粒子的设计思路和构筑策略,制备出由石墨烯纳米袋包覆的超细 PtCo 纳米催化剂(图 3),该催化剂在实际的 Membrane Electrode Assembly 应用中显示出优异的活性和稳定性。其中,石墨烯纳米袋的存在限制了催化剂聚焦并延缓了其氧化溶解、聚集和长大过程,确保了催化剂出色的耐久性。该催化剂在超低 Pt 负载量($0.070 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)条件下保证了 PEMFCs 仍具有高效的催化性能,质量活性高达

$1.21 \text{ A} \cdot \text{g}_{\text{PGM}}^{-1}$, 额定功率高达 $13.2 \text{ W} \cdot \text{mg}_{\text{PGM}}^{-1}$, 同时该催化剂呈现出优异的耐久性(在 $0.8 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 电压损失仅为 18.8 mV), 上述结果都超过了美国 Department of Energy (DOE) 2020 目标的相关指标。

Chen 等^[24]创新性采用空间限制策略合成出具有良好

有序结构的超小 PtFeCoNiCuZn 高熵合金化合物(图 4), 该高熵合金化合物具有超高质量活性($2.40 \text{ A} \cdot \text{mg}_{\text{Pt}}^{-1}$, 0.9 V), 比现有商业 Pt/C 催化剂的质量活性高出 19 倍。该高熵合金组装的 PEMFC 表现出高的功率密度($1.4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)和高质量的标准额定功率($45 \text{ W} \cdot \text{mg}_{\text{Pt}}^{-1}$),

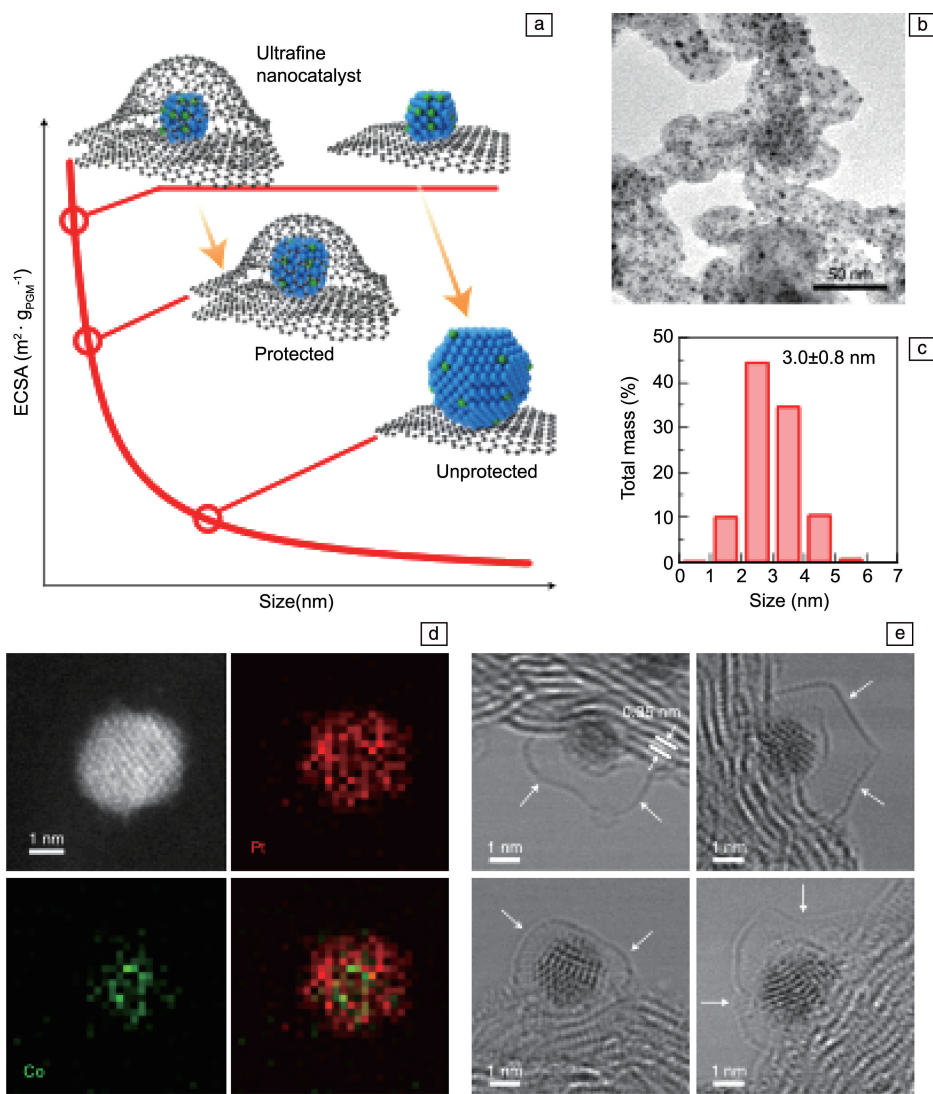


图 3 PtCo@Gnp 保护性纳米袋设计示意图(a~c)和表征分析照片(d, e)^[23]

Fig. 3 Design schematic diagram (a~c) and characterization images (d, e) of protective nanobags of PtCo@Gnp^[23]

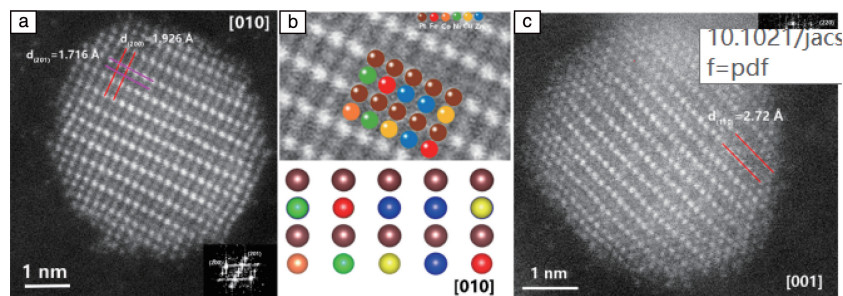


图 4 单个 PtFeCoNiCuZn 高熵合金纳米颗粒的 HAADF-STEM 照片(a, c)及相应的局部结构照片(b)^[24]

Fig. 4 HAADF-STEM images (a, c) and corresponding local structure images (b) of a single high entropy PtFeCoNiCuZn alloy nanoparticle^[24]

理论计算表明,该高熵合金纳米颗粒表面过渡金属原子的外层电子受到调制,表现出多活性中心的结构特征,该工作为在原子水平上控制合成高度有序的高熵合金提供了新的研究方向。

2.2 一维 Pt 基纳米催化剂

相对于零维纳米结构催化剂,一维结构金属纳米材料具有各向异性,会暴露出更多的活性位点,同时具有更好的结构和催化稳定性^[25, 26]。Li 等^[27]将溶液合成的 Pt/NiO 核/壳纳米线通过热退火过程转化为 PtNi 合金纳米线,再通过电化学脱合金转化为锯齿状的 Pt 纳米线。该锯齿状纳米线表现出 $118 \text{ m}^2 \cdot \text{g}_{\text{Pt}}^{-1}$ 的电化学活性面积和 $11.5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 ORR 比活性 (0.9 V vs. RHE), 产生 $13.6 \text{ A} \cdot \text{mg}_{\text{Pt}}^{-1}$ 的质量比活性。反应分子动力学模拟表明,相比于松弛的催化剂表面,锯齿状 Pt 纳米线的高应

力、欠配位的富含菱形的表面构型增强了 ORR 活性。Jiang 等^[28]报道了合成亚纳米直径 Pt 合金纳米线的通用方法。相比于 Pt 合金纳米线,亚纳米 Pt 合金纳米线在 0.9 V 下表现出优异的质量比活性 ($4.20 \text{ A} \cdot \text{mg}^{-1}$) 和比活性 ($5.11 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)。理论计算表明,增强的氧还原活性可归因于亚纳米 Pt 合金纳米线中高密度 (111) 晶面上具有较多活性位点。同时,该催化剂具有很好的催化稳定性,连续循环反应 30 000 次活性衰减可忽略。该研究工作在原子水平上最大限度地提高 Pt 的催化效率以实现高效的电催化性能。Tian 等^[29]采用化学腐蚀方法对 PtNi 纳米笼的近表面结构和组分进行调控,构筑出具有独特一维结构的串状 PtNi 纳米笼(图 5),该串状 PtNi 纳米笼催化剂展示出了较高的氧还原催化活性和稳定性。原位 X 射线吸收光谱表征和理论计算表明,串状 PtNi 纳米笼的

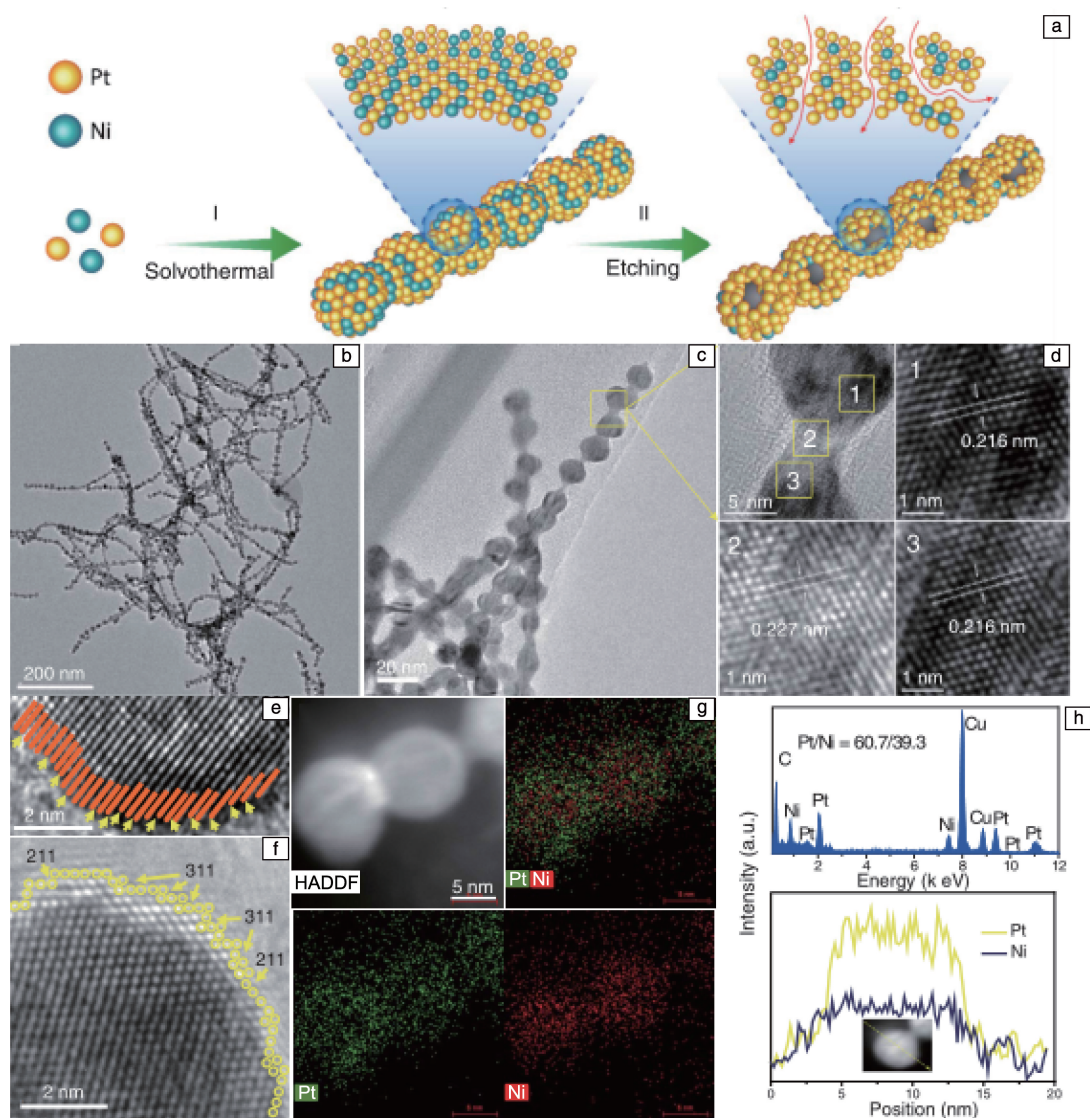


图 5 $\text{Pt}_{1.5}\text{Ni}$ -BNSs 的合成过程示意图(a)以及结构和组成表征图(b~h)^[29]

Fig. 5 Schematic diagram of synthesis process(a), structure and composition characterization diagram (b~h) of $\text{Pt}_{1.5}\text{Ni}$ BNSs^[29]

高活性和高稳定性来自于其独特的形貌结构、合适的组分分配比、应力和配位效应的协同作用,有效结合了高稳定性的一维结构和高活性的合金空心结构等优点,从而改善了 PtNi 合金催化剂稳定性。Yao 等^[30]发现了超细 Pt 纳米线的 ORR 反常尺寸效应,结果表明, Pt 纳米线的直径进一步降低至 1 nm 仍然可维持高的催化活性和稳定性。深入研究发现,应力和配位数是决定催化性能的关键因素,纳米线直径减小会增加纳米线的压缩应力,缩短 Pt 原子间的距离,使得催化剂的 d 能带中心降低,从而降低对 OH⁻ 的吸附能力,促进 ORR 的催化性能。同时,随着纳米线直径的减小,低配位 Pt 原子比例会增加,导致催化剂对 OH⁻ 的吸附作用提升,从而降低其 ORR 催化性能。因此,催化剂的催化性能由应力和配位数两种因素对催化剂的综合影响结果决定。

2.3 二维 Pt 基纳米催化剂

二维贵金属纳米材料因其高比表面积、多表面不饱和和配位原子数,具有卓越物理和化学性质,因而广泛应用于能源、催化、生物成像等领域^[31]。目前,二维金属纳米片的合成仍然是当前金属纳米材料合成的一大挑战,因为金属本质上的生长行为具有各向同性。

Bu 等^[32]采用化学法合成出单分散 PtPb 纳米片(图 6)。结果分析发现,原子级的 Pt 层可以完美地覆盖在 PtPb 纳米片表面,形成独特的核/壳结构 PtPb/Pt。其中, Pt(110) 晶面高强度的拉应力极大地促进催化活性,使得该催化剂显示出优异的 ORR 性能。该催化剂用于催化阳极反应,同样展现出卓越的催化氧化性能。该研究展示了二维 Pt 基纳米催化剂的独特优势及重要性,为高性能

二维 Pt 基纳米催化剂的合成开辟了新途径,对燃料电池的发展起到了一定的推动作用。Tao 等^[33]采用精确控制合成技术在 PdRu 纳米片上生长 Pt 层,构筑出无晶格失配的核/壳结构 PdRu/Pt,精确控制表面 Pt 的 d 带中心位置。研究表明,由于 PdRu 的电子向 Pt 发生转移,产生了“配体效应”,调变了 Pt 的 d 带中心。PdRu/Pt 纳米片在碱性/酸性电解质中均表现出优异的氧还原活性和稳定性。

2.4 三维 Pt 基纳米催化剂

三维金属纳米材料具有独特的连续多孔结构特点,不仅保留了金属特有的化学性质,而且表现出高比表面积、大孔体积和低密度等特点^[34, 35],是近年来纳米材料领域的重要研究方向。金属纳米材料的孔结构和相结构的调控对于其物理化学性质的调变及催化性能的提升都具有重要意义。Chen 等^[36]基于 PtNi 双金属纳米晶体的结构演变策略,合成了一类高活性、耐久性的氧还原催化剂。他们将结晶 PtNi₃ 多面体在溶液中通过内部侵蚀转化为三维多孔的 Pt₃Ni 纳米框架材料。这种由纳米级 Pt 表皮结构组成的 PtNi 纳米开放框架材料表现出增强的氧还原活性。在长时间稳定性测试过程中, Pt₃Ni 纳米框架结构催化剂的质量活性和比活性都有显著提升。

Lv 等^[37]制备出两种不同晶型的有序介孔 PtGa 纳米颗粒(meso-i-Ga₃Pt₅ 和非对称手性的 meso-i-Ga₁Pt₁),通过调整 Ga 盐的种类,实现了对不同晶相有序介孔 PtGa 纳米粒子的可控构筑(图 7)。研究发现,两种晶相催化剂的不同原子排列和表面暴露的 Pt 位点显著改变了它们的表面电子结构和吸/脱附性能,从而改变了 ORR 活性,并使它们保持完全相反的催化性能。其中,具有手性原

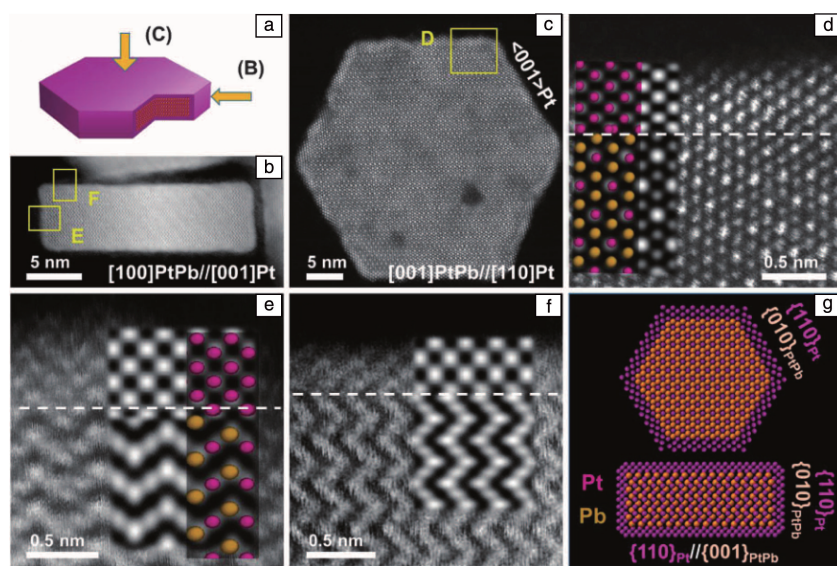


图 6 PtPb 纳米片的结构表征^[32]

Fig. 6 Structural characterization of PtPb nanosheets^[32]

子的 meso-i-Ga₁Pt₁ 表现出高的 ORR 活性, 分别比 meso-Pt 和 Pt/C 高 2.4 和 3.2 倍。Jin 等^[38] 设计合成了各向异性介孔 Pt 基复合核壳纳米线。该多级结构的催化剂由一维超细原子级锯齿状 Pt 纳米线核和三维开放 PtNi 骨架壳(含晶格应变)构筑而成, 实现了高效的 ORR 活性、强的稳定性以及高的 Pt 利用率。在多级骨架核壳催化剂的介孔中, 实现了高度暴露的活性表面, 从而最大限度地提高了 Pt 原子的利用率, 同时加快了反应质过

程。该多级结构催化剂表现出优异的电催化 ORR 性能, 如 0.9 V vs. RHE 下高的质量活性($6.69 \text{ A} \cdot \text{mg}_{\text{Pt}}^{-1}$)和比活性($8.42 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)。同时, 该催化剂还具有优异的稳定性, 连续循环 50 000 次后, 半波电位仅损失 4 mV。

Nie 等^[39] 采用一步还原法制备出新型结构的 PtMn 纳米枝晶(图 8), 该合金枝晶具有低电负性和低收缩能力, 结果表明, Mn 收缩引起的适度应变效应可以改善催化剂的催化活性, 而低电负性的 Mn 可以提高燃料电

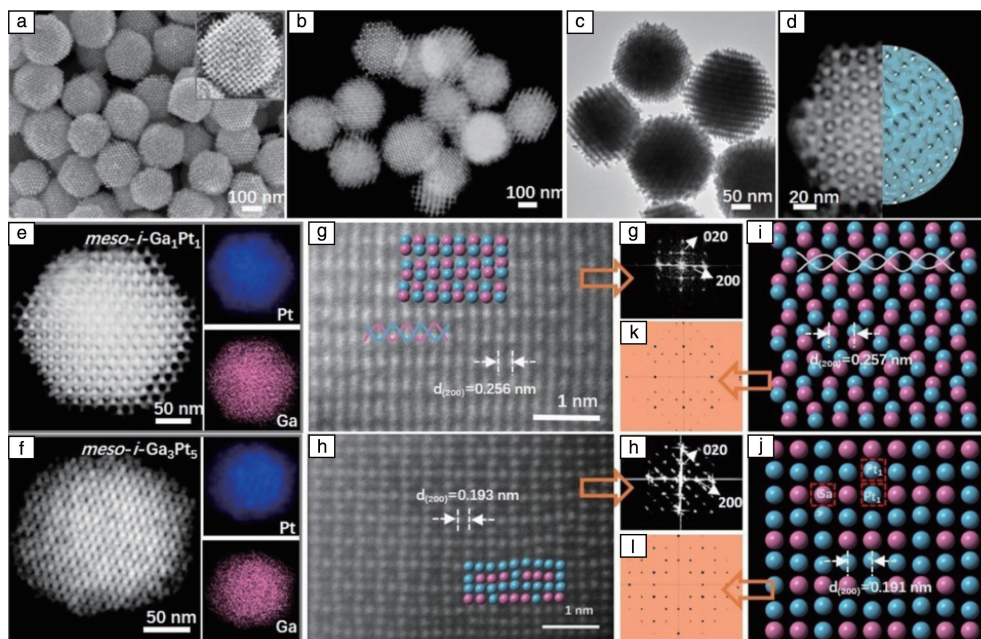


图 7 有序介孔 i-Ga₁Pt₁ 纳米催化剂形貌和结构分析图(a~d), 两种不同晶型的有序介孔 i-Ga₁Pt₁ 和 i-Ga₃Pt₅ 纳米催化剂结构分析图(e~j)^[37]

Fig. 7 Morphological and structural analysis of ordered mesoporous i-Ga₁Pt₁ nanocatalysts (a~d), structural analysis of ordered mesoporous i-Ga₁Pt₁ and i-Ga₃Pt₅ nanocatalysts with two different crystal forms (e~j)^[37]

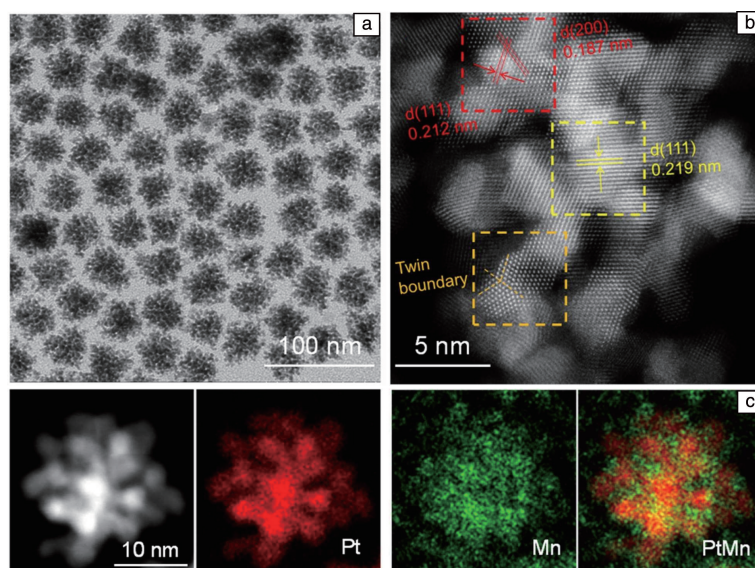


图 8 PtMn 纳米枝晶的结构及组成表征(a~c)^[39]

Fig. 8 Structure and composition characterization of PtMn nanodendrites (a~c)^[39]

池的氧还原耐久性。该工作为进一步开发低成本、高性能的氢燃料电池催化剂提供了新思路。Wang 等^[40]采用多孔硬模板法和高温还原法,制备了具有原子有序排列的介孔 PtPdFeCoNi 高熵金属间化合物,该合金化合物表现出高效的氧还原活性($E_{1/2}$: 0.91 V vs. RHE), 深入研究表明该高熵金属间化合物具有更高效的电子转移过程和优化的电子构型,有利于 ORR 性能的提升。此外,通过简单的改变金属盐类型的方式,可实现高熵合金组分的有效调控,并且该方法可扩展到高熵氧化物、高熵硫化物等材料的可控制备。

3 结 语

在过去的 10 年里,人们致力于开发各种高效的 Pt 基纳米催化剂,并取得了显著的研究进展。针对高性能 Pt 基纳米催化剂的结构调控,人们研究新的合成方法、制备工艺以及改性方式,调变 Pt 基纳米催化剂的形貌、尺寸、形态、表面结构、晶相、晶面、电子结构以及金属间的应变,进而影响其活性及稳定性。在提高氧还原反应催化剂活性的同时,增强其耐久性仍然是一项极具挑战性的任务,因为高活性往往都不太稳定,因此,对催化剂的设计和构筑提出了更高的要求。对于耐久性的高性能 Pt 基纳米催化剂的预测设计和合理合成方面仍然存在重大挑战。从分子或原子水平进行的机理研究对于未来高效催化剂的设计预测至关重要。此外,载体的结构及其反应微环境同样对催化反应起着关键的作用,随着先进表征技术的快速发展,对反应过程和机理研究越来越深入,载体结构的作用也越发突出,尤其是反应微环境的调控。总之,对催化剂的结构进行多层次的设计和优化,可构筑出更高性能氧还原反应催化剂,从而实现催化剂在质子交换膜燃料电池中的高效稳定运行。

参考文献 References

- [1] STEPHENS I E L, ROSSMEISL J, CHORKENDORFF I. *Science*[J], 2016, 354(6318): 1378–1379.
- [2] DEBE M K. *Nature*[J], 2012, 486: 43.
- [3] WANG X X, SWIHART M T, WU G. *Nature Catalysis*[J], 2019, 2(7): 578–589.
- [4] NIE Y, LI L, WEI Z. *Chemical Society Reviews*[J], 2015, 44(8): 2168–2201.
- [5] LIU Z, ZHAO Z, PENG B, *et al.* *Journal of the American Chemical Society*[J], 2020, 142(42): 17812–17827.
- [6] KODAMA K, NAGAI T, KUWAKI A, *et al.* *Nature Nanotechnology* [J], 2021, 16(2): 140–147.
- [7] CHONG L, WEN J, KUBAL J, *et al.* *Science*[J], 2018, 362(6420): 1276–1281.
- [8] LI M, BI X, WANG R, *et al.* *Matter*[J], 2020, 2(1): 32–49.
- [9] 李静, 冯欣, 魏子栋. *电化学*[J], 2018, 24(6): 589–601.
LI J, FENG X, WEI Z D. *Journal of Electrochemistry*[J], 2018, 24(6): 589–601.
- [10] NESSELBERGER M, ASHTON S, MEIER J C. *Journal of the American Chemical Society*[J], 2011, 133(43): 17428–17433.
- [11] HE D, CHENG K, LI H, *et al.* *Langmuir*[J], 2012, 28(8): 3979–3986.
- [12] SHAO Y, YIN G, GAO Y. *Journal of Power Sources*[J], 2007, 171(2): 558–566.
- [13] PEREZ-ALONSO F J, MCCARTHY D N, NIERHOFF A, *et al.* *Angewandte Chemie International Edition* [J], 2012, 51(19): 4641–4643.
- [14] SHAO R Y, NIU X, XU X C, *et al.* *Nano Letter*[J], 2024, 24(18): 5578–5584.
- [15] XUE D, YUAN Y, YU Y, *et al.* *Nature Communications*[J], 2024, 15(1): 5990.
- [16] ZHANG W, SHERRELL P, MINETT A I, *et al.* *Energy & Environmental Science*[J], 2010, 3(9): 1286–1293.
- [17] NI B, SHEN P, ZHANG G, *et al.* *Journal of the American Chemical Society*[J], 2024, 146(16): 11181–11192.
- [18] ZHOU S, BI W, ZHANG J, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2024, 36(28): 2400808.
- [19] LIN Z, SATHISHKUMAR N, XIA Y, *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2024, 63(26): e202400751.
- [20] HU S N, XU W C, TIAN N, *et al.* *Energy & Environmental Science* [J], 2024, 17(9): 3099–3111.
- [21] JIA Q, ZHAO Z, CAO L, *et al.* *Nano Letter*[J], 2018, 18(2): 798–804.
- [22] CHENG H, GUI R, YU H, *et al.* *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [J], 2021, 118(35): e2104026118.
- [23] ZHAO Z, LIU Z, ZHANG A, *et al.* *Nature Nanotechnology*[J], 2022, 17(9): 968–975.
- [24] CHEN T, QIU C, ZHANG X, *et al.* *Journal of the American Chemical Society*[J], 2024, 146(1): 1174–1184.
- [25] HE Y, CHEN Y, WU R, *et al.* *Nano Research*[J], 2024, 17(6): 5298–5304.
- [26] LIANG J, LI S, LIU X, *et al.* *Nature Catalysis*[J], 2024, 7(6): 719–732.
- [27] LI M, ZHAO Z, CHENG T, *et al.* *Science*[J], 2016, 354(6318): 1414–1419.
- [28] JIANG K, ZHAO D, GUO S, *et al.* *Science Advances*[J], 2017, 3(2): 1601705.
- [29] TIAN X, ZHAO X, SU Y Q, *et al.* *Science*[J], 2019, 366(6467): 850–856.
- [30] YAO Z, YUAN Y, CHENG T, *et al.* *Nano Letter*[J], 2021, 21(21): 9354–9360.
- [31] AO W, REN H, CHENG C, *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2023, 62(30): e202305158.

- [32] BU L, ZHANG N, GUO S, *et al.* Science[J], 2016, 354(6318): 1410–1414.
- [33] TAO L, WANG K, LV F, *et al.* Nature Communications[J], 2023, 14(1): 6893.
- [34] SUN L, LV H, FENG J, *et al.* Advanced Materials[J], 2022, 34(31): 2201954.
- [35] WANG Y, LV H, SUN L, *et al.* ACS Nano[J], 2021, 15(12): 18661–18670.
- [36] CHEN C, KANG Y, HUO Z, *et al.* Science[J], 2014, 343(6177): 1339–1343.
- [37] LV H, ZHENG Y, WANG Y, *et al.* Angewandte Chemie International Edition[J], 2023, 62(24): e202304420.
- [38] JIN H, XU Z, HU Z Y, *et al.* Nature Communications[J], 2023, 14(1): 1518.
- [39] NIE Y, SUN Y, SONG B, *et al.* Angewandte Chemie International Edition[J], 2024, 63(7): e202317987.
- [40] WANG Y, ZHANG X Y, HE H, *et al.* Advanced Energy Materials[J], 2024, 14(8): 2303923.
- (编辑 费蒙飞)



专栏特约编辑沈岳松



特约撰稿人刘优林



特约撰稿人彭洪根



特约撰稿人古飒飒



特约撰稿人瞿 赞

沈岳松：男，1981 年生，南京工业大学材料科学与工程学院研究员、博士生导师，国家重点研发计划青年科学家。长期从事环境与能源催化新材料和结构催化化学研究。获授权发明专利 65 件，在 *Small*, *Chemical Engineering Journal*, *Journal of Materials Chemistry A* 等学术期刊发表 SCI 论文百余篇，参编国家标准 1 项、团体标准 1 项。获江苏省科学技术奖一等奖等省部级科技奖励 7 项，获国际科学组织 Veblo 协会会士 (Veblo Fellow)、IFAM 青年科学家奖等学术荣誉。入选江苏省“333 工程”、“青蓝工程”中青年学术带头人、江苏省“六大人才高峰”高层次人才。担任国家科技专家库专家、

安徽省纳米碳基材料与
环境健康国际联合研究
中心学术委员会主任、
《中国材料进展》青年编
委等。

刘优林：男，1986 年生，南京工业大学材料科学与工程学院副教授、硕士生导师。主要从事新型多孔复合材料以及电催化、金属-空气电池、燃料电池以及大气污染治理等方面的研究。申请国家发明专利 30 件，获授权 10 件，在 *Chemical Engineering Journal*, *Applied Surface Science* 等期刊发表学术论文 30 篇。获中国化工学会技术发明奖一等奖 (2022) 和天津市自然科学奖三等奖 (2018)。主持国家重点研发计划项目子课题 1 项、江苏省自然科学基金项目 1 项

和企业委托项目 4 项。

彭洪根：男，1981 年生，南昌大学资源与环境学院教授、博士生导师，教育部 2022 年度“长江学者奖励计划”青年学者、省学科学术与技术带头人、国家重点研发计划 (青年) 项目首席科学家。长期从事大气污染治理与温室气体转化相关研究工作。申请专利 25 件，获授权 7 件，在 *Nature Communications*, *Chem*, *Angewandte Chemie*, *Advanced Materials*, *Environmental Science & Technology* 等 SCI 收录学术期刊发表论文 110 余篇，论文他引 3800 余次，H 因子 41，ESI 高被引论文 3 篇。主持和完成国家重点研发计划项目 (青年科学家项目) 和子课题各 1

项)、国家自然科学基金青年和面上项目 (2 项)、江西省杰出青年人才资助项目、江西省自然科学基金青年重点项目、国家重点 (工程) 实验室开放基金等国家和省部级项目 10 余项。

古飒飒：女，1988 年生，南京工业大学材料科学与工程学院讲师。江苏省双创博士。主要研究方向为环境与能源催化材料、大气污染物治理新材料、有机废料制氢及合成碳纳米管。发表 SCI 收录文章 20 余篇，主持新疆自治区重大科技专项课题 1 项、企业委托横向课题 2 项，参与国家重点研发计划项目 1 项。

瞿 赞：男，1977 年生，上海交通大学环境科学与工程学院研究员、

博士生导师。长期从事大气污染控制技术领域的教学和科研工作，针对工业烟气典型的硫氧化物、氮氧化物、重金属和细颗粒物等污染物开发了多项协同控制技术，相关技术已在多个行业烟气治理工程中得到应用，并取得良好的污染物减排效果。获授权发明专利 87 件，发表 SCI 论文 160 余篇，SCI 论文他引 6500 余次，H 因子 47。主持和参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 以及国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 等国家级项目 10 余项。获教育部技术发明一等奖等省部级奖励 6 项。