碱性膜燃料电池阳极催化剂研究进展

◆ 王雪阳[1,2]　王　健[1,2]　郑堂飞[1,2]　丁　炜[1,2]
1. 重庆大学化学化工学院特种化学电源全国重点实验室，重庆 401331；
2. 重庆大学前沿交叉学科研究院先进电能源化学研究中心，重庆 400045

摘　要　碱性膜燃料电池（anion exchange membrane fuel cell，AEMFC）凭借其在碱性环境中特有的低腐蚀性优势，可减少甚至完全摆脱对铂（Pt）系贵金属的依赖，在降低燃料电池成本、加速商业化进程方面起到重要的推动作用。然而，AEMFC阳极氢氧化反应（hydrogen oxidation reaction，HOR）动力学缓慢、催化剂非Pt化困难，是AEMFC发展面临的重大挑战。针对AEMFC阳极HOR催化剂活性低、抗氧化性差的问题，介绍基于电荷转移调控提升催化性能的两种策略：一是通过TiO_2界面成键实现电子定向转移，选择性调控钌（Ru）基催化剂d轨道填充水平，有效抑制含氧物种吸附，从而实现HOR活性与抗氧化性的提升；二是利用量子限域效应构筑Ni@C-MoO_x量子势阱催化结构，以化学吸附为触发信号湮灭界面偶极子、动态开启电子传递通路，对催化剂电化学氧化进行门控抑制，从而实现非贵金属阳极AEMFC的稳定运行与抗氢饥饿。

关键词：碱性膜燃料电池；氢氧化反应；阳极催化剂；非贵金属催化剂
中图分类号：TM911.42；O646.7　　**文献标识码**：A
文章编号：1009−2412(2026)02−0016−09
DOI：10.3724/cbs.202602002

0　引言

氢燃料电池是将氢能直接转化为电能的高效清洁装置，是实现碳中和目标的关键技术之一[1]。AEMFC凭借其在碱性环境中特有的低腐蚀性优势，有望拓宽催化剂的材料选择空间，减少甚至完全摆脱对铂（Pt）系贵金属的依赖[2−3]。目前，AEMFC碱性膜的电导率与机械强度均已超过Nafion膜[4−5]，以Pt为催化剂的AEMFC的功率密度已接近3.5 W/cm^2 [5]，阴极非贵金属氧还原催化剂的活性也已媲美Pt基催化剂[6−7]。然而，原本在酸性条件下动力学迅速的阳极氢氧化反应（hydrogen oxidation reaction，HOR）中，碱性微环境的变化出现动力学下降2个数量级的普遍现象[8−10]，导致AEMFC阳极需要使用远高于质子交换膜燃料电池的Pt催化剂载量，这反而加重了对贵金属Pt的依赖性[11]。此外，在HOR反应极化条件下，阳极非贵金属催化剂极易钝化失活，成为完全非贵金属驱动的AEMFC发展的瓶颈[9,12]。因此，发展高效非Pt阳极催化剂、降低阳极成本是推动AEMFC全面去Pt化的核心任务[13−14]。

这一目标的实现可从两条路径推进：一是开发价格稍低的钌（Ru）催化剂，降低对Pt的依赖性，实现有限降低降本；二是以储量更丰富的过渡金属（如Ni）替代贵金属，从根本上摆脱对Pt资源的依赖。然而，上述两条路径均面临严峻的催化活性与稳定性挑战。就Ru而言，其表面亲氧性强，在低阳极电位（0.1～0.3 V_{RHE}，RHE为可逆氢电极）下会优先生成Ru-O物种，从而导致HOR活性迅速衰减。就非贵金属（如Ni）而言，其在碱性介质中HOR的交换电流密度（j_0）比在酸性介质中的低4个数量级[9,15]，且Ni在阳极电位超过0.1 V_{RHE}时便会自氧化失活[12]，加之H、OH^-及界面水的竞争吸附严重制约氢活化过程[16−17]。基于此，在阳极采用非贵金属时，AEMFC的输出功率密度普遍低于0.35 W/cm^2；在阴阳两极均采用非贵金属时，AEMFC的输出功率密度仅为56 mW/cm^2，远低于实用要求[7]。

上述问题均指向同一困境，即在阳极极化条件下，催化剂表面随氧化过程的电子流失而钝化失活。因此，电荷转移调控是能够同时打破贵金属和非贵金属阳极催化剂性能瓶颈的切入点。本文重点介绍了两种策略：一是通过TiO_2界面成键引导电子定向转移，选择性调控Ru基催化剂d轨道填充水平，有效抑制含氧物种吸附，从而实现HOR活性与抗氧化性的提升[18−20]。

收稿日期：2025−12−15　修回日期：2026−02−26
项目资助：国家重点研发计划项目（2021YFA1502000）。
通信作者：丁炜，教授，dingwei128@cqu.edu.cn。

二是利用量子限域效应构筑Ni@C-MoO_x量子势阱催化结构，以H_2化学吸附为触发信号湮灭界面偶极子、动态开启电子传递通路，对催化剂电化学氧化进行门控抑制，从而实现非贵金属阳极AEMFC的稳定运行与抗氢饥饿。

1 基于TiO_2界面成键的Ru基催化剂电子定向转移

与Pt相比，Ru具有更合适的氢吸附能，且其价格仅为Pt的三分之一，是一种极具潜力的Pt替代催化剂。然而，金属Ru表面具有较强的亲氧性，即使在较低的氢区电位下（0.1～0.3 V_{RHE}），其表面也会优先形成Ru-O_{ads}表面，阻碍氢反应的进一步进行，因而Ru不适合作为HOR的主催化剂[21–22]。

过渡金属催化剂的吸附性能和催化特性与金属原子d轨道的填充程度息息相关[23]。电子定向转移就是利用金属氧化物载体中金属和氧原子构成的导带电子和价带空穴，通过以氧端成键实现电子脱离金属和以金属端成键实现电子注入金属，从而实现电子定向转移选择性调变金属d轨道的填充水平。

基于此，通过精细调控TiO_2界面氧端成键（图1a），可诱导电子从Ru金属流出至半填充水平[24]。如图1所示，TiO_2限域Ru簇（IO-Ru-TiO_2/C）结构触发了Ru向TiO_2中O的电子转移，使Ru原子氧化至接近Ru^{4+}态（图1b）。这种电子耗尽状态有效维持了Ru簇的金属性表面结构，并显著降低了其功函，从而削弱了对含氧物种（如OH^-）的吸附亲和力（图1c）。因此，在碱性条件下的HOR活性和抗氧化性均得到大幅提升。IO-Ru-TiO_2/C催化剂可在高达0.9 V_{RHE}的电势下有效催化HOR（图1d），其质量活性在0.05 V_{RHE}时高达0.907 A/mg_{Ru}，分别是Ru/C和PtRu/C的17.5倍和1.5倍（图1e）。相比之下，在阳极电位达到0.1～0.3 V_{RHE}时，传统Ru基催化剂表面优先生成Ru-O(H)物种，并被氧物种强烈吸附，从而导致HOR活性迅速衰减至近乎失活状态。

精细调控TiO_2界面金属端成键则可以实现电子的反向填充转移[25]。如图2所示，在TiO_2从无定形到高度结晶化的过程中，由于缺陷处较差的局部表面稳定性，以及高度匹配的Ru、TiO_2晶格，原子易在缺陷区域重构，使Ru纳米粒子在缺陷位处沿TiO_2晶格生长，形成以Ru-Ti键合的晶格限域结构。这种金属键合的晶格限域结构使电子从富电子的TiO_2转移到Ru的d轨道带上，使Ru的d轨道接近完全充满的状态，实现了反向的电子转移（TiO_2→Ru）。这种非常规电子充满的d轨道，一方面大幅减少了CO的σ电子向Ru金属d空轨道转移的概率，减缓/钝化第一步CO的吸附，赋予了Ru簇CO抗毒化的特性；另一方面提高了表面O_{ads}的反应能垒，大幅提升了金属Ru的抗氧化特性和HOR的催化活性。无论在酸性还是碱性条件下，Ru@TiO_2催化剂在高达0.9V_{RHE}下仍能有效催化HOR，且质量活性高于商业PtRu催化剂。甚至在CO含量较高的氢气中，Ru@TiO_2仍可以选择性地催化HOR，且催化稳定性超过100 h。

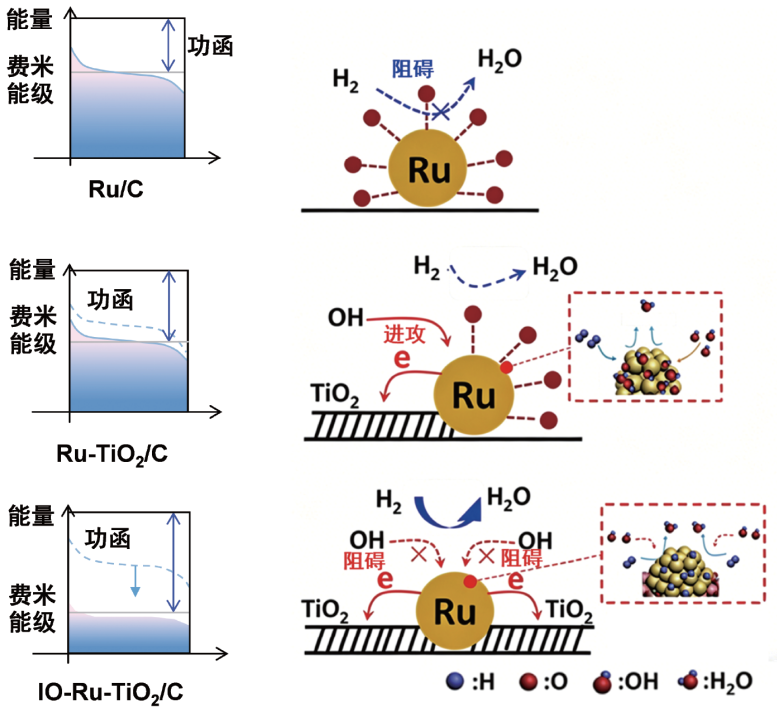
2 基于量子势阱的Ni基催化剂门控电荷传递与抗氧化失活策略

在电化学反应过程中，热力学条件的改变会显著影响催化剂本身的电子结构，使静态优化的电子结构难以满足不同热力学条件下的要求。这使大部分非贵金属HOR催化剂不耐受阳极极化，电子极易流失发生电化学氧化，从而导致电极失活、电池失效[26]。

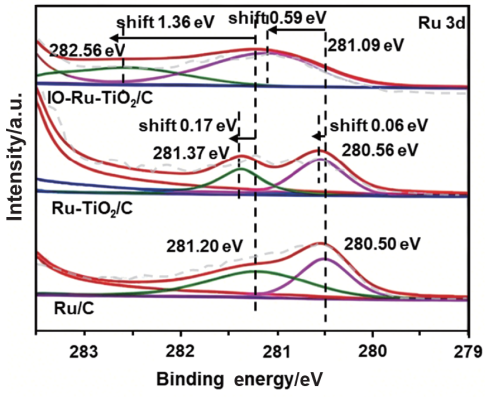
电子是电化学反应过程中关键的反应元素，即电子的流动决定电化学反应是否得以进行。门控电荷传递就是利用量子限域效应，通过构筑电子迁移路径的门控，实现电化学反应的选择性控制。其中，门控条件可以根据具体反应类型选择合适的触发条件，如化学吸附、电极电压等。在电化学反应过程中，实现门控电荷转移的首要条件是构筑量子势阱催化结构。

量子限域是指当材料的尺寸缩减到接近或小于其内部载流子（电子和空穴）的德布罗意波长或激子玻尔半径时，这些载流子的运动在空间上受到限制，从而导致其能级结构和物理性质（尤其是光学和电子学性质）发生显著改变的一种量子力学现象[27–28]。例如，当在两个半导体中间构筑一层厚度接近Bohr半径的阱层，光子的激发使电子在垒层和阱层间发生跃迁，分别形成跃迁电子与空穴，如图3所示[29]。电子与空穴间由于距离较近而产生库伦相互作用，从而会以整体粒子（即激子）的形态被限域在阱层之中[27,30]。

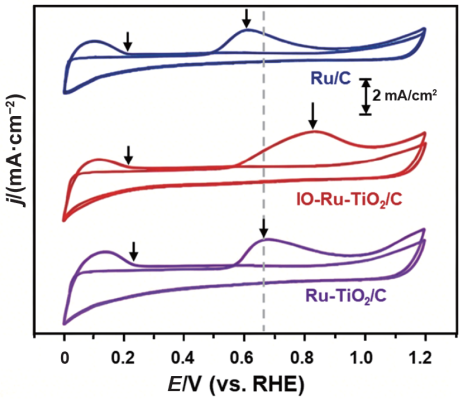
量子势阱催化结构是利用催化剂（如金属或氧化物）与势阱层（或势垒层）能级水平差异产生的类激子，即“迁移电子”与“空穴”对限域电子，继而通过化学吸附或其他条件补偿迁移电子或空穴释放电子，



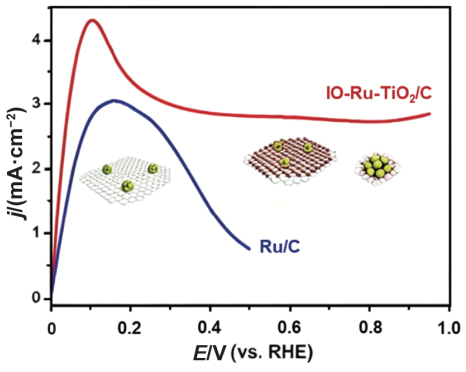
a. Ru金属催化剂氧端成键实现电子脱离金属



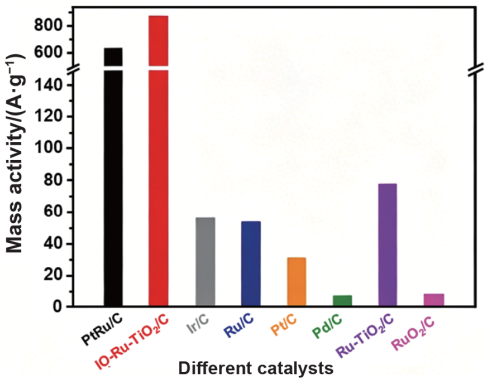
b. 金属Ru簇XPS图谱



c. CO溶出曲线



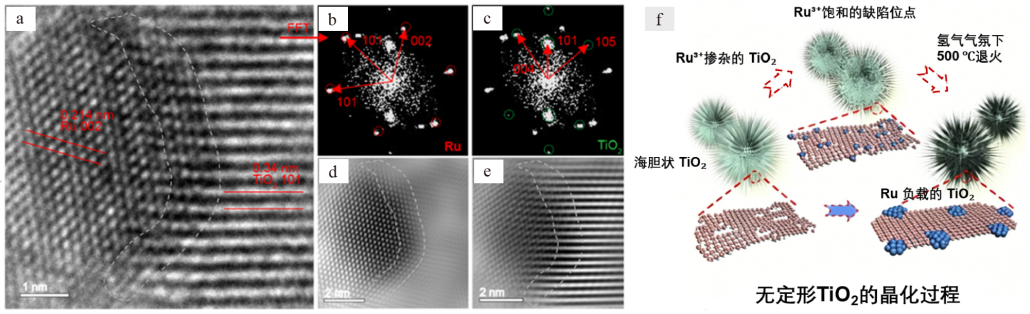
d. IO-Ru-TiO_2/C在不同气氛下的极化曲线



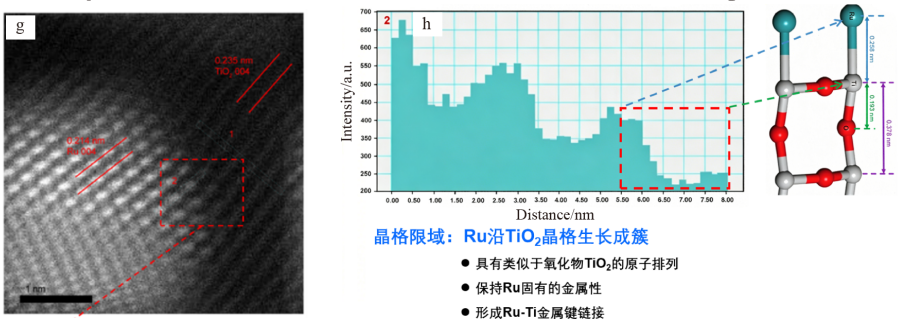
e. 不同催化剂的质量活性

图 1　TiO_2界面氧端成键诱导Ru电子定向转移及其HOR催化性能的提升[24]

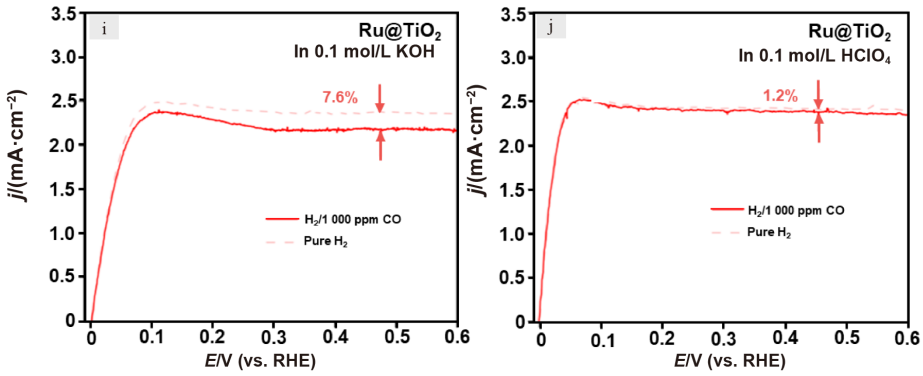
注：XPS为X射线光电子能谱。



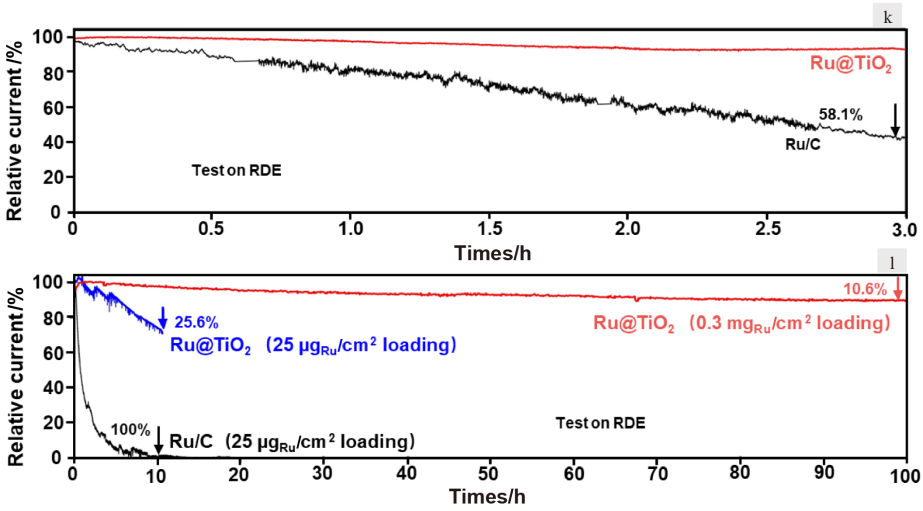
a. Ru@TiO_2的HRTEM图像　b~e. 选定区域的FFT图像　f. 晶格限域Ru@TiO_2制备过程中的晶格演化



g~h. Ru@TiO_2晶格限域示意图



i~j. Ru@TiO_2和PtRu/Ccom催化剂的HOR极化曲线



k~l. Ru@TiO_2和Ru/C的稳定性测试

图 2　晶格限域Ru@TiO_2结构的形成机制、表征分析及其HOR催化活性与稳定性[25]

注：RDE为旋转圆盘电极；HRTEM为高分辨透射电子显微镜；FFT为快速傅里叶变换；1 ppm = 1 mg/kg。

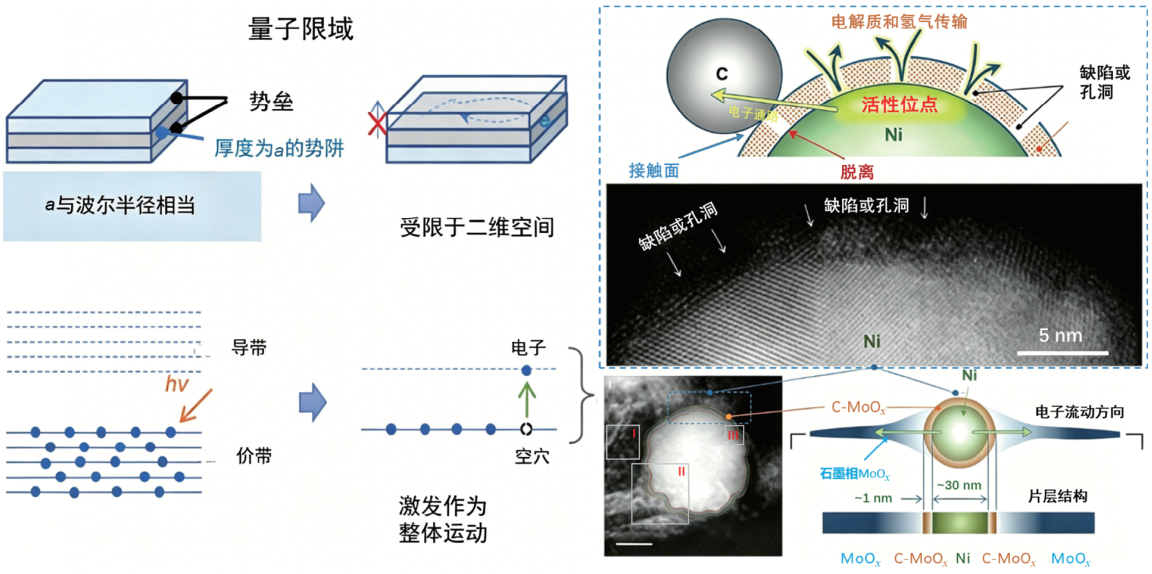


图 3　量子限域以及量子势阱催化结构[29]

来实现电化学催化过程中的门控电荷转移[31]。

Ni是碱性HOR非贵金属催化剂首选金属之一，其在地壳中的含量（丰度约为80 ppm）约为Pt的2万倍（丰度约为0.004 ppm）。然而，Ni金属在阳极电位超过0.108 V_{RHE}（pH=13）时，发生自氧化而失活，是一类阳极极化不耐受的典型现象[12]。

最新研究表明，在金属Ni表面构筑厚度接近Bohr半径的碳掺杂半金属层（C-MoO_x），可以在Ni、Mo和C的能级共振下产生界面偶极子（Mo的电子态和Ni的类空穴态，变价Mo提供电荷存储基元）[29]。如图4所示，在静态条件下，由于高价Mo产生量子势阱，金属Ni与高价Mo之间发生电荷转移，并将Mo的电子态和Ni的类空穴态限域在“量子阱结构”中，从而抑制Ni金属的电化学氧化；在动态条件下，反应物的吸附向Ni注入电子，从而湮灭界面偶极子并释放限域的电子，以打开电子传递通路。

基于此，Ni@C-MoO_x量子势阱催化结构可以如晶体管般实现电荷转移的开关控制，即门控。如图5所

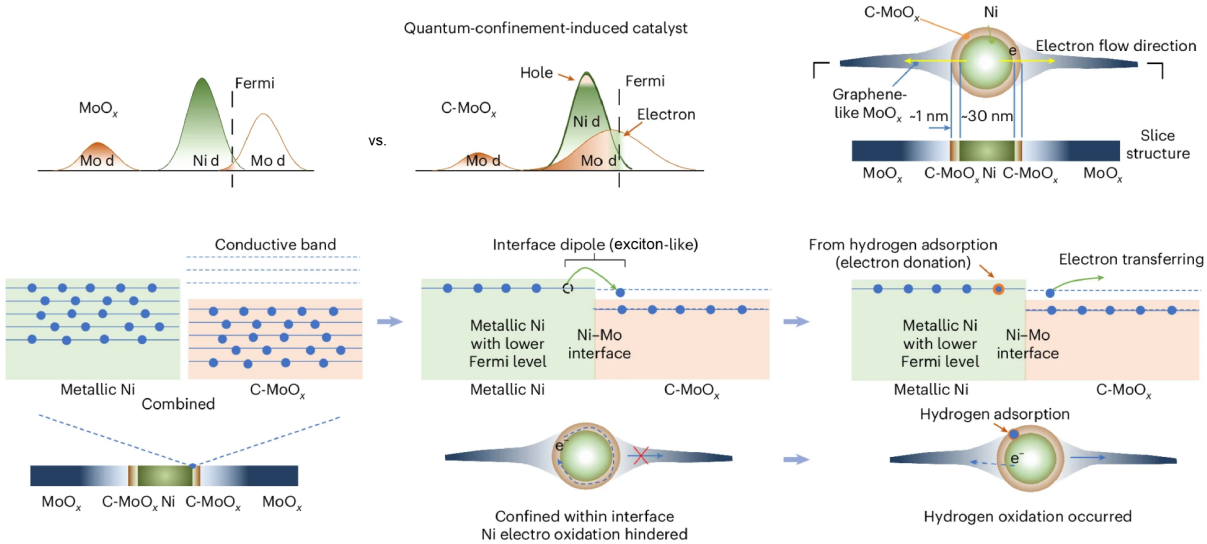
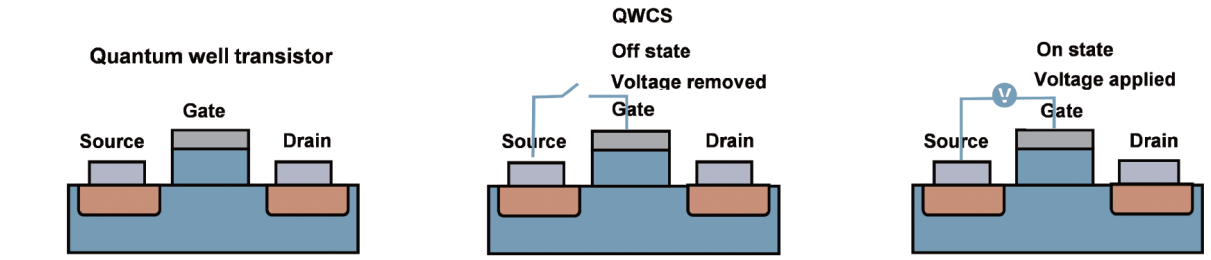
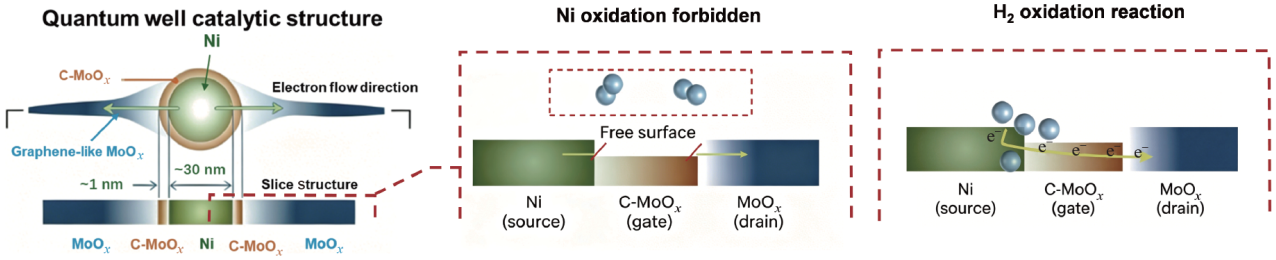


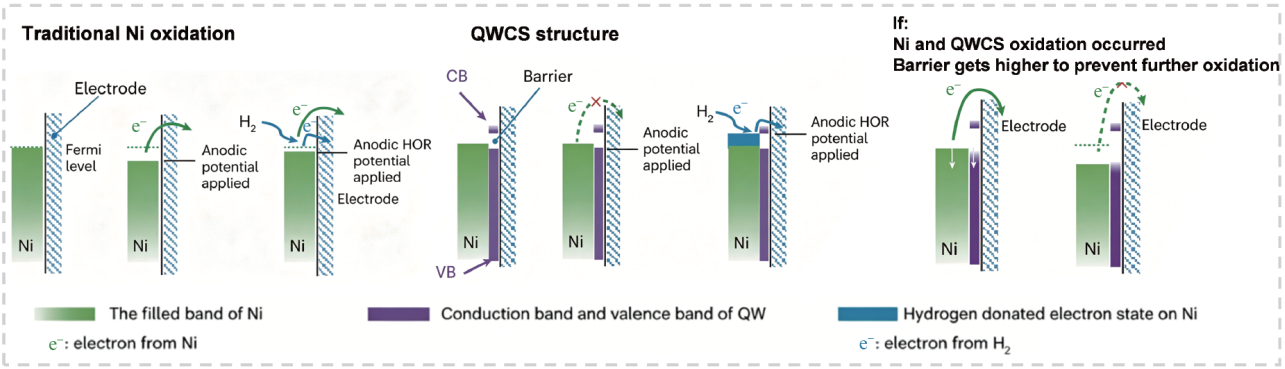
图 4　Ni量子势阱催化结构[29]



a. 量子阱晶体管的结构示意图



b. 量子势阱催化结构中Ni@C-MoO$_x$量子阱催化结构示意图



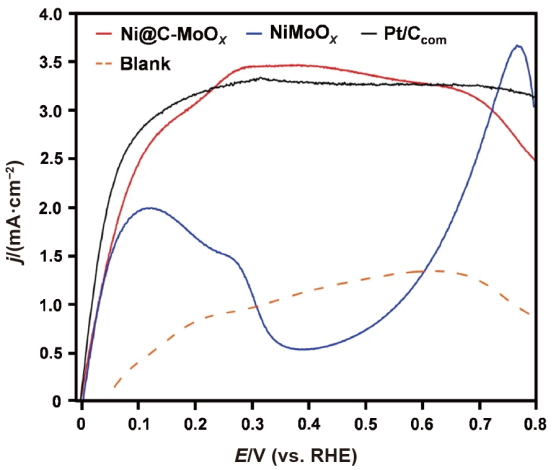
c. 量子势阱催化结构与传统Ni基催化剂的能带结构及电子传输过程示意图

图 5　Ni@C-MoO$_x$量子势阱催化结构的门控电荷传递机制与晶体管类比示意图[29]

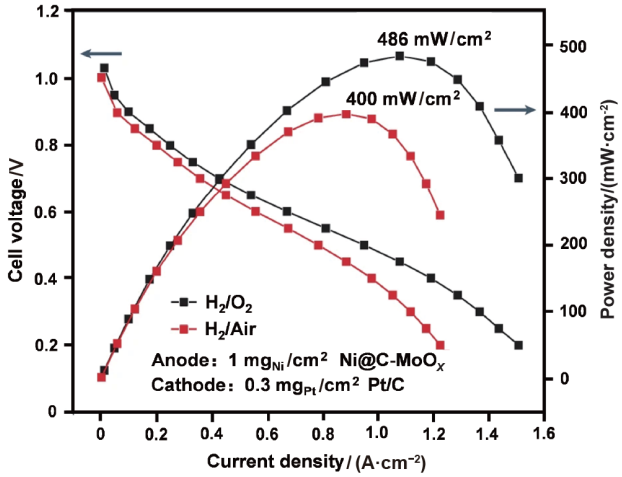
注：QWCS为量子阱催化结构；CB为导带；VB为价带。

示，在晶体管结构中，源极与漏极之间的导通状态由栅极电压控制。在栅极施加电压时，源极与漏极之间的电子沟道形成；在栅极未施加电压时，电子沟道关闭。在Ni@C-MoO$_x$量子势阱催化结构中，活性中心Ni与电子导体（C-MoO$_x$）之间的导通状态取决于反应物的吸附。即：当氢气吸附在Ni表面时，Ni-C-Mo界面偶极子湮灭（释放电子），从而开启电子通道；当含氧分子吸附或未吸附时，Ni-C-Mo界面偶极子增加或保持，则关闭电子通道。

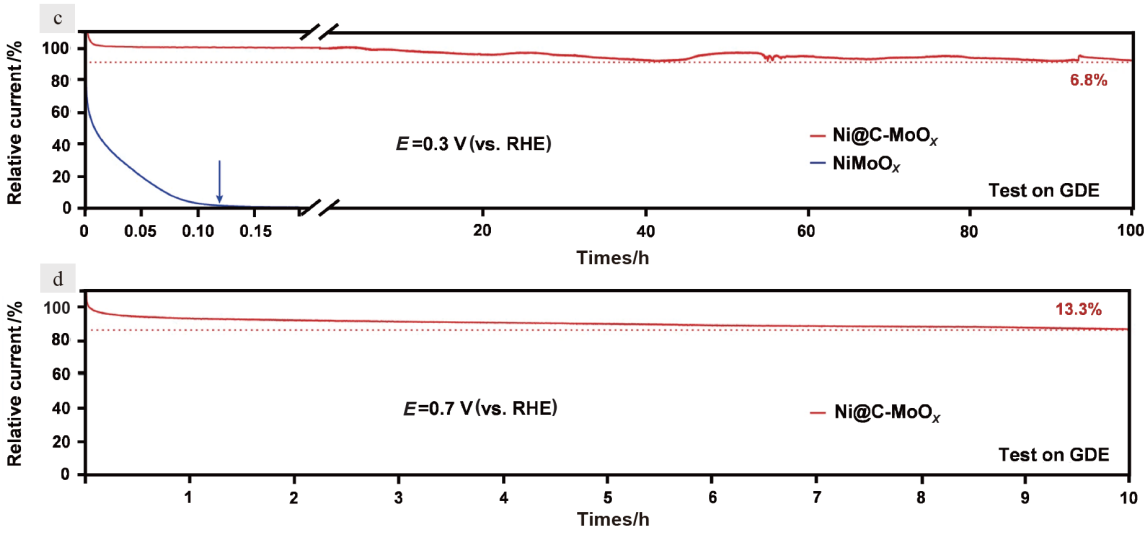
在Ni@C-MoO$_x$中，费米能级与HOR平衡电位间有1.1 eV能隙。因此，量子势阱催化结构可将Ni的氧化电位延后。如图6所示，Ni@C-MoO$_x$催化剂在0.1 mol/L的KOH溶液中表现出与商业Pt/C相当的HOR活性，同时成功将本应在0.108 V_{RHE}发生的金属Ni电化学氧化电位拓展至1.2 V_{RHE}，所制备的Ni@C-MoO$_x$催化剂在0.3 V_{RHE}电位条件下稳定连续地催化HOR超过100 h而不发生衰减，甚至在0.7 V_{RHE}电位条件下也能稳定催化HOR超过10 h。作为阳极组装的AEMFC，Ni@C-MoO$_x$首次实现了阳极非贵金属燃料电池抗氢饥饿，电池功率密度达到486 mW/cm^2，质量功率达486 mW/mg$_{Ni}$。



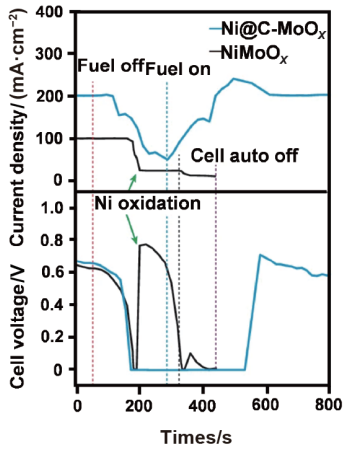
a. Ni@C-MoO$_x$、NiMoO$_x$，以及商业Pt/C催化剂的HOR极化曲线



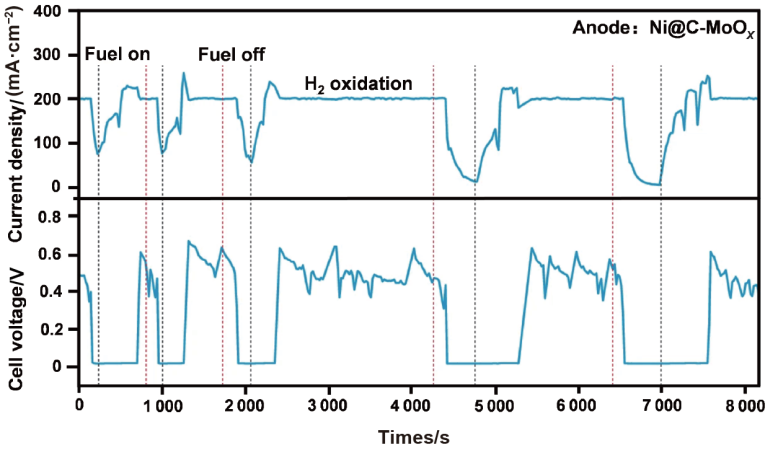
b. Ni@C-MoO$_x$的AEMFC性能测试



c~d. Ni@C-MoO$_x$和NiMoO$_x$催化剂不同电位下的计时电流曲线



e. Ni@C-MoO$_x$阳极和NiMoO$_x$阳极MEA的H$_2$饥饿试验



f. Ni@C-MoO$_x$阳极MEA的H$_2$饥饿试验

图 6　Ni@C-MoO$_x$的HOR催化活性、稳定性及AEMFC抗氢饥饿能力评估[29]

注：GDE为气体扩散电极；MEA为膜电极组件。

3 结语

AEMFC有望减少甚至完全摆脱对Pt系贵金属的依赖，从而加速氢燃料电池商业化进程，助力实现碳中和目标。而阐明非贵金属在HOR催化剂表面竞争吸附下的氢活化机制、提升催化剂本征活性和抗氧化性，是推动该技术发展的关键。本文介绍了电子定向转移和门控电荷传递两种方法，通过抑制阳极极化过程中的自氧化行为，展现了基于精准调控催化剂的电子能级和传输行为在突破催化剂原有限制的研究进展。从基于电子转移方向的静态调控，到基于电子迁移路径门控的动态调控，该过程具有重要意义。它不仅对非贵金属电催化剂在碱性HOR中的应用开辟了新途径、为设计先进的催化剂解锁了新的可能，还通过量子阱门控电子转移，抑制了不必要的氧化/表面钝化反应，从而为众多催化体系带来了变革性的启示。同时，该过程为解决极限环境催化与活性中心钝化的矛盾、实现电化学催化应用条件极限的突破奠定了理论基础。

针对AEMFC商业化需求，未来还需要针对催化剂应用场景，进一步开发兼具高活性、宽电位稳定性与可规模化制备的新型非贵金属阳极催化剂。同时，在由催化剂进一步组装的膜电极层面，需要解析离聚物与催化剂界面的水化行为、传质与水管理规律等问题。解决这些问题是显著提升电池的整体性能和寿命、推动燃料电池技术的全非贵金属化和大规模应用的关键。

参考文献

[1] STAFFELL I, SCAMMAN D, VELAZQUEZ ABAD A, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system [J]. Energy & environmental science, 2019, 12(2): 463–491.

[2] FIROUZJAIE H A, MUSTAIN W E. Catalytic advantages, challenges, and priorities in alkaline membrane fuel cells [J]. ACS catalysis, 2020, 10(1): 225–234.

[3] HYUN J, KIM H T. Powering the hydrogen future: Current status and challenges of anion exchange membrane fuel cells [J]. Energy & environmental science, 2023, 16(12): 5633–5662.

[4] DEKEL D R. Review of cell performance in anion exchange membrane fuel cells [J]. Journal of power sources, 2018, 375: 158–169.

[5] MANDAL M, HUANG G, HASSAN N U, et al. Poly(norbornene) anion conductive membranes: Homopolymer, block copolymer and random copolymer properties and performance [J]. Journal of materials chemistry A, 2020, 8(34): 17568–17578.

[6] MEN TRUONG V, RICHARD TOLCHARD J, SVENDBY J, et al. Platinum and platinum group metal-free catalysts for anion exchange membrane fuel cells [J]. Energies, 2020, 13(3): 582.

[7] GAO Y F, YANG Y, SCHIMMENTI R, et al. A completely precious metal-free alkaline fuel cell with enhanced performance using a carbon-coated nickel anode [J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2022, 119 (13): e2119883119.

[8] SHENG W C, GASTEIGER H A, SHAO-HORN Y. Hydrogen oxidation and evolution reaction kinetics on platinum: Acid vs alkaline electrolytes [J]. Journal of the electrochemical society, 2010, 157(11): B1529.

[9] DAVYDOVA E S, MUKERJEE S, JAOUEN F, et al. Electrocatalysts for hydrogen oxidation reaction in alkaline electrolytes [J]. ACS catalysis, 2018, 8(7): 6665–6690.

[10] DURST J, SIEBEL A, SIMON C, et al. New insights into the electrochemical hydrogen oxidation and evolution reaction mechanism [J]. Energy & environmental science, 2014, 7(7): 2255–2260.

[11] RAMASWAMY N, MUKERJEE S. Alkaline anion-exchange membrane fuel cells: Challenges in electrocatalysis and interfacial charge transfer [J]. Chemical reviews, 2019, 119(23): 11945–11979.

[12] DAVYDOVA E S, SPECK F D, PAUL M T Y, et al. Stability limits of Ni-based hydrogen oxidation electrocatalysts for anion exchange membrane fuel cells [J]. ACS catalysis, 2019, 9(8): 6837–6845.

[13] AN L L, ZHAO X, ZHAO T H, et al. Atomic-level insight into reasonable design of metal-based catalysts for hydrogen oxidation in alkaline electrolytes [J]. Energy & environmental science, 2021, 14(5): 2620–2638.

[14] REN J T, CHEN L, WANG H Y, et al. Hydrogen oxidation electrocatalysts for anion-exchange membrane fuel cells: Activity descriptors, stability regulation, and perspectives [J]. Energy & environmental science, 2024, 17(12): 3960–4009.

[15] SONG X Y, YANG Q M, ZOU K S, et al. Intrinsic activity: A critical challenge of alkaline hydrogen oxidation reaction [J]. Advanced functional materials, 2025, 35(5): 2414570.

[16] STRMCNIK D, UCHIMURA M, WANG C, et al. Improving the hydrogen oxidation reaction rate by promotion of hydroxyl adsorption [J]. Nature chemistry, 2013, 5(4): 300–306.

[17] SUBBARAMAN R, TRIPKOVIC D, STRMCNIK D, et al. Enhancing hydrogen evolution activity in water splitting by tailoring Li^{+}-$Ni(OH)_2$-Pt interfaces [J]. Science, 2011, 334(6060): 1256–1260.

[18] GIULIMONDI V, MITCHELL S, PÉREZ-RAMÍREZ J. Challenges and opportunities in engineering the electronic structure of

single-atom catalysts [J]. ACS catalysis, 2023, 13(5): 2981–2997.

[19] ANDO F, GUNJI T, TANABE T, et al. Enhancement of the oxygen reduction reaction activity of Pt by tuning its d-band center via transition metal oxide support interactions [J]. ACS catalysis, 2021, 11(15): 9317–9332.

[20] TAUSTER S J, FUNG S C, GARTEN R L. Strong metal-support interactions: Group 8 noble metals supported on titanium dioxide [J]. Journal of the American Chemical Society, 1978, 100(1): 170–175.

[21] ZHAO T H, LI M T, XIAO D D, et al. Pseudo-Pt monolayer for robust hydrogen oxidation [J]. Journal of the American Chemical Society, 2023, 145(7): 4088–4097.

[22] LI M Y, YANG P P, LYU W J, et al. Ultrastable ruthenium-based electrocatalysts for hydrogen oxidation reaction in high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. CCS chemistry, 2025, 7(6): 1760–1768.

[23] HAMMER B, NØRSKOV J K. Theoretical surface science and catalysis: Calculations and concepts [J]. Advances in catalysis, 2000, 45: 71–129.

[24] JIANG J X, TAO S C, HE Q, et al. Interphase-oxidized ruthenium metal with half-filled d-orbitals for hydrogen oxidation in an alkaline solution [J]. Journal of materials chemistry A, 2020, 8 (20): 10168–10174.

[25] ZHOU Y Y, XIE Z Y, JIANG J X, et al. Lattice-confined Ru clusters with high CO tolerance and activity for the hydrogen oxidation reaction [J]. Nature catalysis, 2020, 3(5): 454–462.

[26] LIU Q, RANOCCHIARI M, VAN BOKHOVEN J A. Catalyst overcoating engineering towards high-performance electrocatalysis[J]. Chemical society reviews, 2022, 51(1): 188–236.

[27] MILLER D A B, CHEMLA D S, DAMEN T C, et al. Band-edge electroabsorption in quantum well structures: The quantum-confined stark effect [J]. Physical review letters, 1984, 53(22): 2173–2176.

[28] ALIVISATOS A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots [J]. Science, 1996, 271(5251): 933–937.

[29] ZHOU Y Y, YUAN W, LI M T, et al. Quantum confinement-induced anti-electrooxidation of metallic nickel electrocatalysts for hydrogen oxidation [J]. Nature energy, 2024, 9(10): 1297–1309.

[30] ZHANG J, YANG Z L, LIU S, et al. Direct visualization and manipulation of tunable quantum well state in semiconducting Nb_2SiTe_4 [J]. ACS nano, 2021, 15(10): 15850–15857.

[31] CHENG X K, XING A T, LIAN J, et al. Electron reflection at an interface and its effect on electron states in a multi-quantum well structure [J]. Superlattices and microstructures, 2003, 33(1/2): 73–80.

Research Progress on Anode Catalysts for Anion Exchange Membrane Fuel Cell

WANG Xueyang[1,2], WANG Jian[1,2], ZHENG Tangfei[1,2], DING Wei[1,2]

1. State Key Laboratory of Advanced Chemical Power Sources, School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331;

2. Center of Advanced Electrochemical Energy (CAEE), Institute of Advanced Interdisciplinary Studies, Chongqing University, Chongqing 400045

Abstract: Anion exchange membrane fuel cell (AEMFC), benefiting from the intrinsically low corrosivity of its alkaline environment, offers significant potential to reduce or even eliminate reliance on platinum (Pt)-based precious metals, thereby lowering fuel cell costs and accelerating commercialization. However, the sluggish kinetics of the hydrogen oxidation reaction (HOR) at the anode and the difficulty of developing non-platinum catalysts remain major challenges for AEMFC development. This study addresses the key scientific issues of low activity and poor oxidation resistance in AEMFC anode HOR catalysts by introducing two strategies based on charge-transfer modulation to enhance catalytic performance. First, interfacial bonding with TiO_2 enables directional electron transfer, selectively tuning the d-orbital occupancy of Ru-based catalysts, thereby improving both HOR activity and oxidation resistance. Second, leveraging quantum confinement effects, a Ni@C-MoO_x quantum-well catalytic architecture is constructed, where chemisorption triggers gated charge transfer, effectively suppressing Ni electro-oxidation and enabling non-precious metal anode AEMFC to resist hydrogen starvation.

Keywords: anion exchange membrane fuel cell; hydrogen oxidation reaction; anode catalysts; non-precious metal catalysts