高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

二维$PdIr_2$合金纳米片的合成及碱性电解水析氢性能

陶庆妹，程　浩，邓佩峰，张威陈，王运星，
刘佳伦，曹绪烨，杨真真，张根磊
（合肥工业大学化学与化工学院，合肥 230009）

摘要　近年来，电化学析氢反应（HER）已成为一种重要的制氢新途径. 在催化剂方面，Pd基材料被认为是替代贵金属Pt基催化剂的最具潜力的候选材料之一. 然而，Pd基催化剂对氢中间体的吸附过强，制约了其析氢性能的有效发挥. 针对这一问题，本文采用有机前体降解法制备了二维$PdIr_2$合金纳米片催化剂. 通过合金化策略调控Pd的电子结构，从而提升其在碱性介质中的HER性能. 实验结果表明，所制备的$PdIr_2$合金纳米片催化剂在10 mA/cm^{2}电流密度下的过电位仅为19 mV，Tafel斜率为51.4 mV/dec，性能显著优于商业铂碳（c-Pt/C）和商业钯碳（c-Pd/C）催化剂. 在稳定性方面，该催化剂在长达136 h内电压衰减仅为63 mV，平均衰减速率为0.46 mV/h，且在最后116 h内，电压衰减在10 mV以内，显示出优于对比催化剂的稳定性.

关键词　Pd基催化剂；PdIr合金；二维纳米片；碱性析氢
中图分类号　O646　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20260146

Synthesis of Two-dimensional $PdIr_2$ Alloy Nanosheets for Enhanced Alkaline Hydrogen Evolution Reaction Performance

TAO Qingmei, CHENG Hao, DENG Peifeng, ZHANG Weichen, WANG Yunxing,
LIU Jialun, CAO Xuye, YANG Zhenzhen*, ZHANG Genlei*
(*School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *China*)

Abstract　In recent years, the electrochemical hydrogen evolution reaction (HER) has emerged as a promising approach for sustainable hydrogen production. Among various catalysts, Pd-based materials are regarded as one kind of the most promising alternatives to Pt-based counterparts. However, the excessively strong adsorption of hydrogen intermediates on Pd surfaces limits their HER efficiency. In this study, the two-dimensional $PdIr_2$ alloy nanosheets was synthesized *via* an organic-precursor decomposition method. The formation of the alloy structure effectively modulates the electronic configuration of Pd, thereby enhancing its alkaline HER performance. Electrochemical measurements show that the $PdIr_2$ alloy nanosheet catalyst achieves an overpotential of only 19 mV at a current density of 10 mA/cm^2 and a Tafel slope of 51.4 mV/dec, significantly outperforming commercial Pt/C and commercial Pd/C catalysts. In addition, the catalyst exhibits excellent long-term stability, with a voltage decay of only 63 mV over 136 h (average decay rate of 0.46 mV/h). Notably, the decay voltage remains within 10 mV over the final 116 h, demonstrating superior stability compared to the reference catalysts.

Keywords　Pd-based catalyst; PdIr Alloy; Two-dimensional nanosheet; Hydrogen evolution reaction (HER) in alkaline

收稿日期：2026-04-08. 网络首发日期：2026-05-14.
联系人简介：杨真真，女，博士，副教授，主要从事生物质转化/电催化方面的研究. E-mail：zzyang@hfut.edu.cn
张根磊，男，博士，副教授，主要从事催化剂工程/电催化方面的研究. E-mail：genleizhang@hfut.edu.cn
基金项目：安徽省自然科学基金（批准号：JZ2023AKZR0560，JZ2024AKZR0546）资助.
Supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province, China(Nos.JZ2023AKZR0560, JZ2024AKZR0546).

近几十年来，传统化石燃料等不可再生资源的过度消耗导致全球能源危机和环境问题日益突出，因此，开发清洁能源是当前的首要目标[1,2]. 氢能因具有能量密度高、应用场景广泛等优点，被誉为21世纪最具发展潜力的清洁能源[3~5]. 目前，制氢技术主要分为灰氢、蓝氢和绿氢3类. 其中，绿氢技术在生产过程中完全不产生CO_2排放，有助于实现碳中和与碳达峰目标，因而受到广泛关注. 在各类绿氢技术中，电解水制氢凭借其工艺灵活性以及可与可再生能源耦合的优势，成为极具发展前景的制氢途径之一[6~8].

目前，铂(Pt)基催化剂被认为是氢析出反应(HER)中活性最优的电催化剂[9~11]. 然而，在碱性环境下，由于较弱的水解离能力及过强的OH^*结合力，Pt基催化剂的HER性能相较于酸性条件下显著下降，且高昂的成本严重制约了其在实际生产中的大规模应用[12]. 因此，开发高活性、低成本的非Pt基电催化剂对于推动电解水制氢技术的商业化进程具有重要意义[13]. 在众多替代材料中，Pd基催化剂因能够协同促进水解离并优化氢吸附强度，在碱性HER中展现出超越Pt的潜力，且其原料成本低于Pt，因而受到广泛关注[14~16]. 如，Chen等[17]制备的PtPd-高熵合金(HEA)催化剂在碱性析氢反应中展现出优异的电化学性能. 为实现Pd基催化剂的商业化应用，研究人员致力于通过不同的合成策略提高贵金属利用率并降低贵金属用量. 在此背景下，二维(2D)纳米片材料因具有较高的横纵比，能够显著增加表面原子数量而受到关注[18,19]. 纳米片表面的原子可作为活性中心直接参与催化反应，从而极大提高原子利用率[20,21]. 此外，相较于传统的一维和三维材料，二维材料因其良好的柔韧性、抗断裂能力以及易于改性的特点，在电催化领域得到广泛应用[22,23].

从析氢反应机理来看，碱性介质中的HER通常包括两个关键反应步骤：首先，水解离生成吸附态氢原子，为反应提供氢质子来源；随后，吸附态氢脱附，生成氢气. 这两个步骤均与催化剂对氢中间体的吸附强度密切相关[24,25]. 因此，氢吸附吉布斯自由能(ΔG_{H^*})常被视为描述HER催化性能的关键参数[26]. 对于Pd基催化剂，Pd对氢具有过强的亲和性，导致氢中间体在催化剂活性位点上吸附过强、脱附困难，从而占据活性位点，进而影响催化剂的稳定性和催化效率[27~29]. 为解决这一问题，制备合金化催化剂被证明是一种有效的策略[30]. 通过引入第二种金属组分，可调控Pd的电子结构，优化氢中间体的吸附能，降低HER的动力学障碍，从而从根本上提升HER活性[31]. 如，Liu等[32]采用原子层沉积结合退火的方法制备了$PdRu_x$合金纳米颗粒. 该催化剂在HER中表现出35.6 mV的起始电位，并且在长达40 h的计时电位测试中展现出优异的耐久稳定性. 其优异的催化性能主要归因于$PdRu_x$合金组分间优化的电子相互作用. 密度泛函理论(DFT)计算表明，氢结合能(HBE)显著降低，从而大幅提升了HER催化活性.

本文采用有机前体降解法制备了高效且稳定的二维$PdIr_2$合金纳米片催化剂，利用透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)等手段对其形貌与结构进行了表征. 值得注意的是，尽管金属Ir的单价高于金属Pt，但是对于电催化剂而言，经济性并不仅仅取决于原料价格，而是由贵金属的实际用量、原子利用率及使用寿命共同决定的. 从催化活性来看，Ir的氢吸附自由能(ΔG_{H^*}=−0.27 eV)接近理想值，且对水解离步骤具有良好的促进作用[33,34]，此外，Pd与Ir形成合金后可诱导电子由Pd向Ir转移，使Pd处于缺电子状态，从而降低氢吸附强度，提高本征活性. 在碱性HER中，二维$PdIr_2$合金纳米催化剂表现出优异的电化学性能，在10 mA/cm^{2}电流密度下的过电位仅为19 mV，Tafel斜率为51.4 mV/dec，显著优于商业铂碳(c-Pt/C)和商业钯碳(c-Pd/C)催化剂. 此外，在长达136 h的连续测试中，该催化剂的过电位仅衰减63 mV，平均衰减速率为0.46 mV/h，展现出优异的稳定性.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

乙酰丙酮铱[$Ir(acac)_3$，纯度97%]和乙酰丙酮钯[$Pd(acac)_2$，纯度95%]，上海拉丁试剂有限公司；硝酸钾(KNO_3，纯度99%)、氢氧化钾(KOH，纯度98%)、乙醇(CH_3CH_2OH，纯度98%)、商业铂碳(c-Pt/C，Pt质量分数20%)和商业钯碳(c-Pd/C，Pd质量分数5%)，国药集团化学试剂有限公司；去离子

水(电导率0.055 μS/cm)；氮气(N_2，99%)，南京上元气体厂.

CHI660E型电化学工作站，上海辰华仪器有限公司；JEM-1400Flash型透射电子显微镜(TEM)和JEM-2100F型高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)及其配备的能量色散X射线能谱仪(EDS)，日本电子株式会社；K-Alpha$^+$型X射线光电子能谱仪(XPS)，美国Thermo Fisher公司；D/max-2200型X射线衍射仪(XRD)，日本理学公司；Dimension Icon型原子力显微镜(AFM)，德国布鲁克公司.

1.2 催化剂的制备

1.2.1 二维PdIr合金纳米片的合成 首先，称取15.00 mg $Ir(acac)_3$、4.66 mg $Pd(acac)_2$和39.32 mg KNO_3置于25 mL烧杯中[$Pd(acac)_2$与$Ir(acac)_3$的摩尔比为1∶2]，加入12 mL乙醇和2 mL去离子水作为溶剂，超声分散均匀，得到前驱体溶液. 将该溶液于55 ℃下重结晶，随后，将所得固体研磨均匀，得到前驱体粉末. 将粉末置于管式炉中，在Ar气氛围下于300 ℃煅烧90 min. 反应结束后自然冷却至室温，所得产物用乙醇-水(体积比2∶1)混合溶液离心洗涤两次，再用无水乙醇离心洗涤一次，得到黑色粉末. 鉴于上述前驱体中Pd与Ir的原子比为1∶2，将该催化剂记为$PdIr_2$合金纳米片.

改变$Ir(acac)_3$和$Pd(acac)_2$的投料量，保持其它实验条件不变，制备了系列不同摩尔比的PdIr合金纳米片催化剂：当$Ir(acac)_3$和$Pd(acac)_2$的投料量分别为15.00和9.33 mg[$Pd(acac)_2$与$Ir(acac)_3$的摩尔比为1∶1]时，所得样品记为$PdIr_1$合金纳米片；当投料量分别为15.00和3.11 mg(摩尔比为1∶3)时，所得样品记为$PdIr_3$合金纳米片.

1.2.2 Pd纳米片的合成 称取10 mg $Pd(acac)_2$和20 mg KNO_3置于25 mL烧杯中，加入12 mL乙醇与2 mL去离子水作为混合溶剂，超声处理至完全溶解，形成均匀的前驱体溶液. 将该溶液置于55 ℃下蒸干溶剂以重结晶，将所得固体研磨均匀，得到前驱体粉末. 随后，将该粉末置于管式炉中，在Ar气氛下于300 ℃热处理90 min. 待反应体系自然冷却至室温后，将产物先用乙醇-水(体积比2∶1)混合溶液离心洗涤两次，再用无水乙醇离心洗涤一次，即得到Pd纳米片催化剂.

1.2.3 Ir纳米片的合成 Ir纳米片催化剂的合成方法与Pd纳米片相同，只是将反应物替换为15 mg $Ir(acac)_3$和30 mg KNO_3.

1.3 工作电极的制备

准确称取2.0 mg碳载催化剂，与30 μL Nafion溶液一同加入由0.2 mL乙醇和0.8 mL去离子水组成的混合溶液中，超声处理30 min，形成均匀的催化剂墨水. 取3.0 μL该墨水滴涂于经充分抛光处理的玻碳电极(直径3 mm，几何面积0.07605 cm^2)表面，于55 ℃下烘干，即得到工作电极.

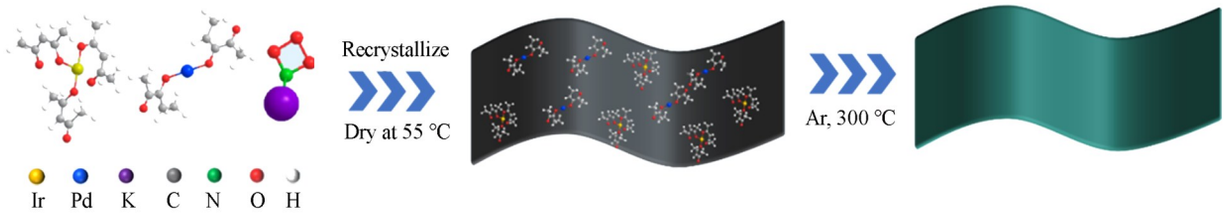
1.4 电化学性能测试

采用典型的三电极系统，在电化学工作站上进行所有电化学测试. 以制备的催化剂修饰玻碳电极(几何面积0.07605 cm^2)为工作电极，饱和Hg/Hg_2Cl_2电极为参比电极，碳棒电极为对电极. 所有测试电位均通过公式E(*vs.* RHE)=E(*vs.* Hg/Hg_2Cl_2)+0.244+0.059×pH转换为可逆氢电极(RHE)标度. 测试前，采用循环伏安法(CV)在1 mol/L KOH电解液中对催化剂进行电化学活化，扫描电位范围为0~0.5 V(*vs.* RHE)，扫描速率为100 mV/s. 采用线性扫描伏安法(LSV)评估催化剂的HER性能，电解液为1 mol/L KOH溶液，扫描电位范围为0~0.5 V(*vs.* RHE)，扫描速率为5 mV/s. 根据LSV曲线拟合得到Tafel斜率. 通过电化学交流阻抗谱(EIS)研究催化剂表面的电荷传输与物质传输行为，测试频率范围为10^{-2}~10^5 Hz，振幅为5 mV. 采用CV测试催化剂的双电层电容(C_{dl})，扫描电位区间为0.1~0.3 V *vs.* RHE，扫描速率依次为20，40，60，80，100 mV/s.

2 结果与讨论

2.1 催化剂的制备与形貌、结构表征

采用有机前驱体降解法合成二维PdIr合金纳米片. 在合成过程中，KNO_3作为盐模板发挥关键作用. 如Scheme 1所示，在55 ℃下干燥重结晶过程中，KNO_3首先析出形成二维片状盐模板；随后，加入的$Pd(acac)_2$和$Ir(acac)_3$前驱体吸附于KNO_3模板表面. 在300 ℃下Ar气氛煅烧过程中，吸附的前驱体在模板表面原位分解并形成PdIr合金，复制了模板的二维形貌. 最后通过乙醇/水混合溶液离心洗涤去



Scheme 1　Schematic illustration of the synthesis process of two-dimensional PdIr alloy nanosheets

除KNO_3模板，获得独立的二维合金纳米片.

采用TEM对所制备的PdIr合金催化剂形貌进行表征. 如图1(A)~(C)所示，$PdIr_1$，$PdIr_2$和$PdIr_3$催化剂均呈现出典型的二维纳米片形貌，表明不同前驱体比例下催化剂均保持了完整的纳米片结构. 通过XRD分析催化剂的物相结构. 如图2所示，$PdIr_2$合金催化剂在2θ=40. 24°和46. 88°处出现明显的特征衍射峰，分别对应于(111)和(200)晶面. 这两个衍射峰的位置介于单质Ir(PDF#46-1044，40. 12°和46. 66°)和单质Pd(PDF#46-1043，40. 66°和47. 30°)的标准衍射峰之间，证实了$PdIr_2$催化剂为合金结构，而非两种金属的简单物理混合. 类似地，$PdIr_1$和$PdIr_3$催化剂在相近的衍射角位置也观察到相应的衍射峰. 结果表明，$PdIr_1$，$PdIr_2$和$PdIr_3$合金催化剂的形貌与晶体结构保持一致，未发生明显变化.

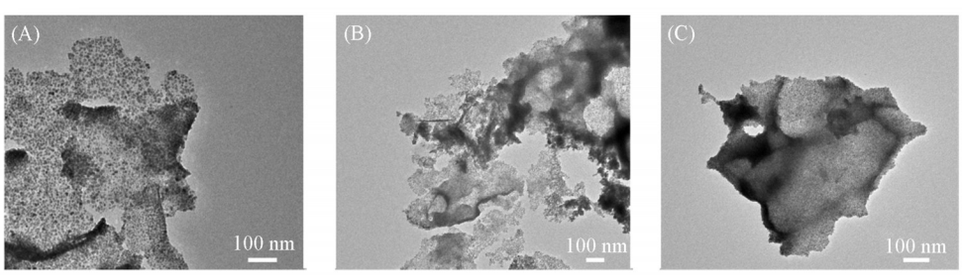


Fig. 1　TEM images of $PdIr_1$(A), $PdIr_2$(B) and $PdIr_3$(C)

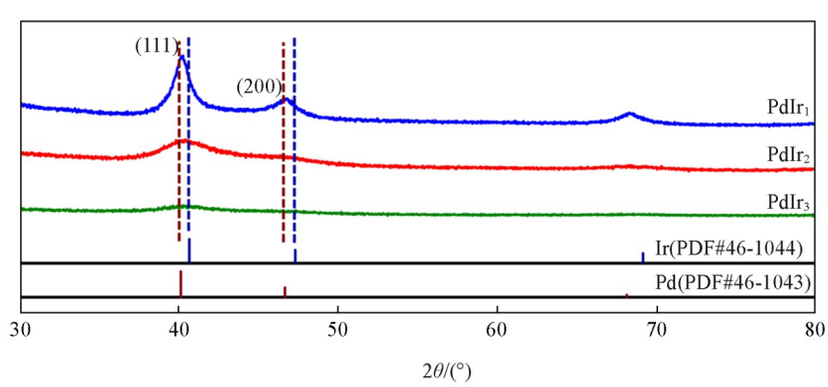


Fig. 2　XRD patterns of $PdIr_1$, $PdIr_2$ and $PdIr_3$

采用TEM和AFM对$PdIr_2$合金纳米催化剂的形貌进行了进一步表征. 如图3(A)所示，催化剂呈现出典型的二维纳米片形貌. 对50个$PdIr_2$纳米片的横向尺寸统计结果表明，纳米片的平均横向尺寸为194. 5 nm[图3(B)]，AFM测试表明纳米片的厚度约为4. 53 nm[图3(C)和(D)]，体现了$PdIr_2$合金纳米片具有较高的横纵比. 采用HRTEM对催化剂的微观结构进行进一步表征，如图4(A)所示，催化剂表面呈现出密集且清晰的晶格条纹. 对图4(A)中区域i进行局部放大后[图4(B)]，可观测到清晰的晶格条纹，间距为0. 223 nm. 该值介于单质Ir(PDF#46-1044，0. 222 nm)和单质Pd(PDF #46-1043，0. 225 nm)的(111)晶面间距之间，进一步证实了催化剂中Pd与Ir形成了合金结构. 此外，能量色散X射线光谱(EDS)元素面分布分析结果表明，Pd，Ir和C元素在纳米片上均匀分布[图4(C)].

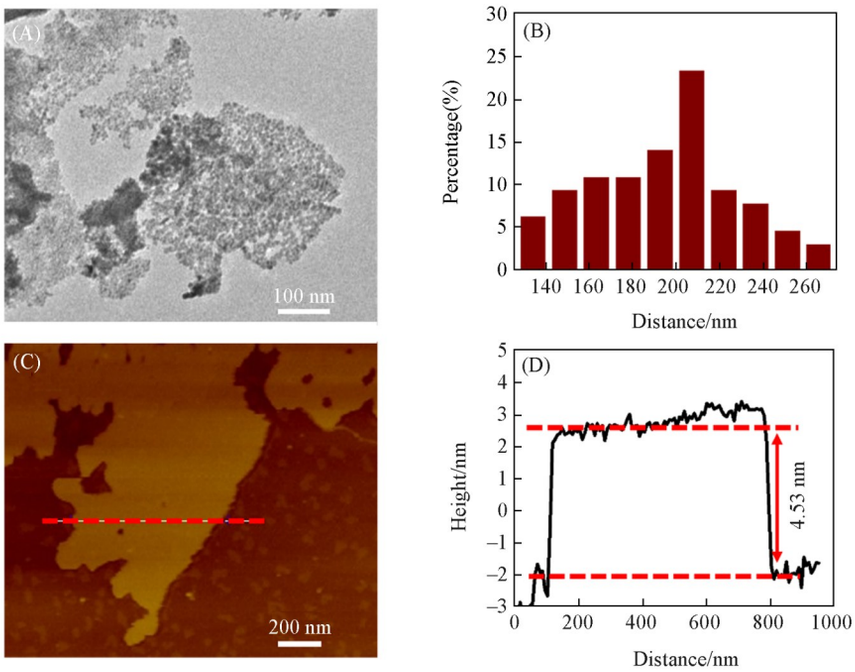


Fig. 3 TEM image(A), lateral size distribution histogram(B), AFM image(C), and corresponding height profile(D) of $PdIr_2$ alloy nanosheets

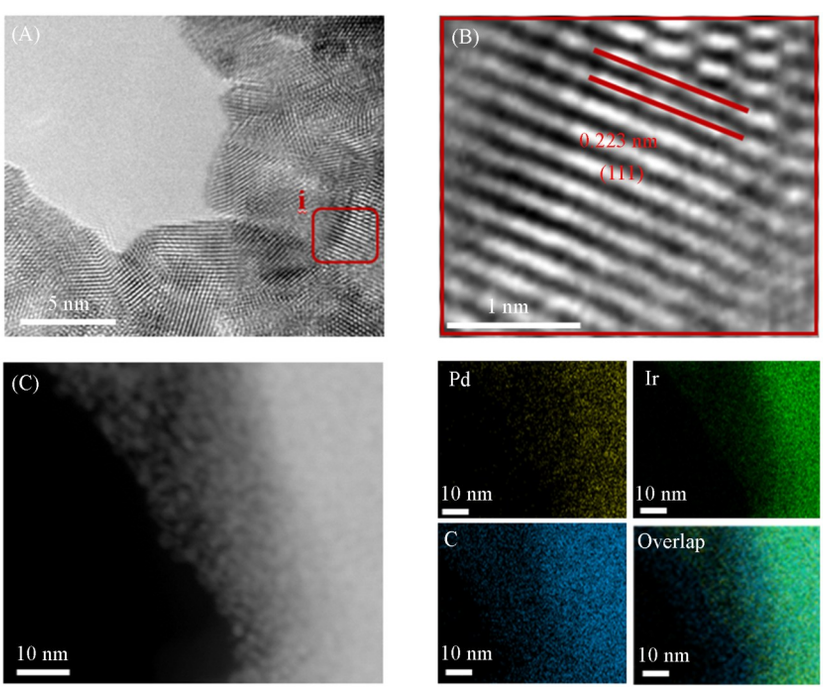


Fig. 4 HRTEM image(A), enlarged HRTEM image of the region marked in (A)(B), and TEM image(left) and TEM-EDS elemental mapping images of Pd, Ir, C and overlap(C) for the $PdIr_2$ alloy catalyst

采用XPS进一步分析了$PdIr_2$合金纳米催化剂、纯Pd催化剂和纯Ir催化剂的表面化学成分与电子状态. 图5(A)展示了$PdIr_2$合金纳米催化剂中Pd_{3d}的XPS谱图. 经高斯反褶积拟合后，Pd_{3d} XPS谱可分解为自旋-轨道分裂的$3d_{3/2}$和$3d_{5/2}$双峰，对应两种Pd物种：金属态Pd^0(蓝色峰，归属于金属钯)和部分氧化的$Pd^{\delta+}$(红色峰，归属于金属Pd表面的含氧物种). 二者的相对含量分别为61.88%和38.12%. 作为对比，纯Pd催化剂中也存在Pd^0和$Pd^{\delta+}$两种物种，其相对含量分别为81.32%和18.68%. 值得注意的是，$PdIr_2$合金中金属态Pd^0的结合能(335.95 eV)相较于纯Pd中金属态Pd^0的结合能(335.65 eV)向高结

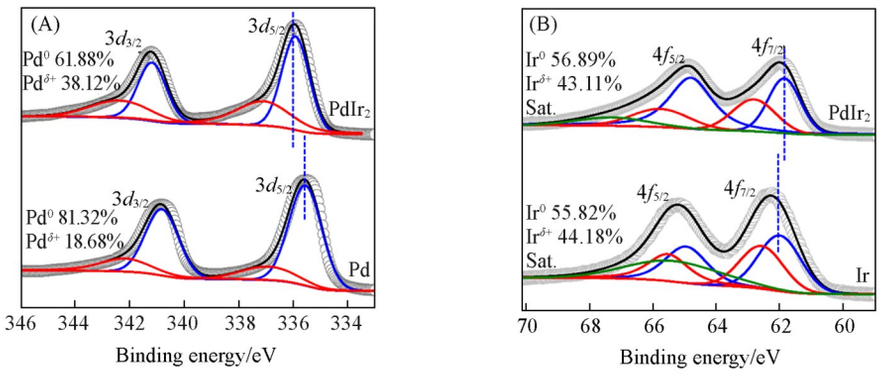


Fig. 5 High-resolution XPS spectra of Pd_{3d} for the $PdIr_2$ alloy catalyst and pure Pd catalyst(A) and Ir_{4f} for the $PdIr_2$ alloy catalyst and pure Ir catalyst(B)

合能方向偏移了0.30 eV. 图5(B)为$PdIr_2$合金催化剂中Ir_{4f}的XPS谱图. 与纯Ir催化剂类似，$PdIr_2$合金中的Ir元素也包含两种价态(Ir^0和$Ir^{\delta+}$)以及一个卫星峰. 值得关注的是，合金中金属态Ir^0的结合能为61.85 eV，比纯Ir催化剂中金属态Ir^0(结合能为62.03 eV)向低结合能方向偏移了0.18 eV. 上述金属态Pd^0和金属态Ir^0结合能的偏移证实所制备的催化剂以合金相形式存在，并且存在由金属态Pd^0向金属态Ir^0的电子转移. 该电子转移使得金属态Pd^0处于缺电子状态，从而实现了对Pd电子结构的调控，有助于降低催化剂对氢中间体的吸附强度，进而构建高效的电催化剂.

2.2 电化学性能

采用标准三电极体系，以1.0 mol/L KOH溶液为电解液，考察了一系列催化剂的碱性电解水析氢性能，初步评估了不同Pd/Ir比例催化剂的催化性能. LSV测试结果[图6(A)和(B)]表明，当催化剂中Pd/Ir摩尔比为1∶2时，其HER性能最佳.

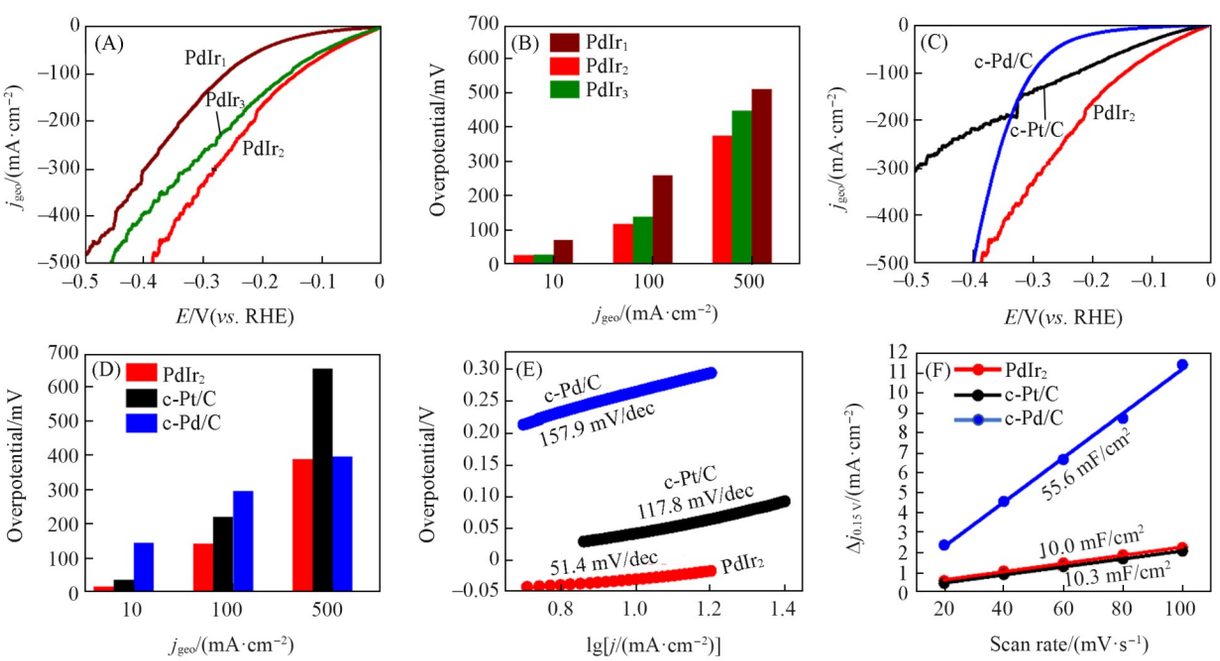


Fig. 6 LSV curves and overpotential comparison at 10, 100, and 500 mA/cm^2 of $PdIr_1$, $PdIr_2$, and $PdIr_3$ (A, B), LSV curves and overpotential comparison at 10, 100, and 500 mA/cm^2(C, D), Tafel plots (E) and double-layer capacitance(C_{dl}) values(F) of the $PdIr_2$ alloy nanosheets, c-Pd/C, and c-Pt/C

为系统研究$PdIr_2$合金纳米片催化剂的碱性HER性能，选用商用钯碳(c-Pd/C)和商用铂碳(c-Pt/C)作为参比催化剂进行对比测试[图6(C)和(D)]. LSV测试结果表明，$PdIr_2$合金纳米片催化剂的起始过电位(10 mA/cm^{2}电流密度下对应的过电位)仅为19 mV，明显低于c-Pt/C(39 mV)和c-Pd/C(146 mV). 同时，在高电流密度(100和500 mA/cm^2)下，$PdIr_2$合金纳米片催化剂仍保持较高的电催化活性，性能优于

两种参比催化剂. 上述结果表明，在Pd基催化剂中引入Ir元素形成合金，有助于显著提高Pd基催化剂在碱性HER中的表观活性. 图6(E)展示了催化剂的HER动力学分析结果. 通过LSV曲线计算与线性拟合得出$PdIr_2$合金纳米片催化剂的Tafel斜率为51.4 mV/dec，远低于c-Pt/C(117.8 mV/dec)和c-Pd/C(157.9 mV/dec)，表明该催化剂具有更快的反应动力学. 通过电化学双层电容法估算了催化剂的电化学活性面积，进一步评估了材料的真实催化活性[35~37]. 如图6(F)所示，$PdIr_2$合金纳米片催化剂的C_{dl}值为10.3 mF/cm^2，约为c-Pd/C(55.6 mF/cm^2)的18.52%，表明其电化学活性面积显著小于c-Pd/C. 但在过电位η=144 mV下，$PdIr_2$合金纳米片催化剂的电流密度为100 mA/cm^2，c-Pd/C催化剂的电流密度为9.85 mA/cm^2，经C_{dl}归一化后的电流密度表明，$PdIr_2$催化剂的本征活性约为c-Pd/C的55倍，证实通过Ir合金化可显著提高Pd基催化剂的单活性位点催化性能.

EIS揭示了催化剂与电解质界面上的电荷转移动力学，为评估电子与离子传输过程的效率提供了关键依据[38,39]. 如图7(A)所示，相较于c-Pt/C和c-Pd/C，$PdIr_2$合金纳米片催化剂表现出最小的电荷转移阻力，表明其具有最快的电子/质子转移动力学. 如图7(B)所示，$PdIr_2$合金纳米片催化剂具有最高的转换频率(TOF)，在过电位为144 mV时达到2.21 s^{-1}，分别为c-Pt/C(1.68 s^{-1})和c-Pd/C(0.18 s^{-1})催化剂的1.32倍和12.3倍，进一步证实了其优异的本征催化活性.

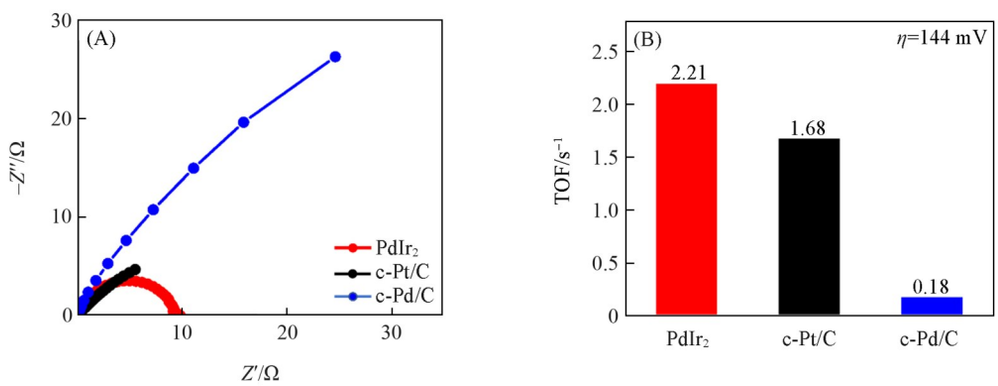


Fig. 7　EIS spectra(A) and TOF values(B) of the $PdIr_2$ alloy nanosheets, c-Pd/C and c-Pt/C

此外，以起始电位和Tafel斜率为关键指标，对比了所制备的$PdIr_2$合金纳米片催化剂与目前已报道的先进碱性HER催化剂的性能. 表1汇总了代表性催化剂的性能参数. 对比结果表明，$PdIr_2$合金纳米片催化剂的综合性能处于优势地位.

Table 1　Comparison of Tafel slopes and overpotentials at a current density of 10 mA/cm^2

Catalyst	Tafel slope/(mV·dec^{-1})	η_{10}/mV	Ref.
$PdIr_2$ alloy	51.4	19	This work
FeCoNiCuPtIr HEA	54.5	21	[40]
Pt_{SA}-Mn_3O_4	54	24	[41]
Ru@2D-NC-700	31	46	[42]
Pt_{SA}-NiSe-*V*	52	45	[43]
S-$NiFe_2O_4$	61	80	[44]
Pt@DG	53	37	[45]
Ru@V-RuO_2/CHMS	55.1	47	[46]
Ni_5P_4-Ru	54	56.7	[47]
Rh-$NiFeO_x$	54	57	[48]
Ru	69	87.2	[49]

上述结果表明，通过向Pd基催化剂中引入Ir形成$PdIr_2$合金纳米片，可实现对Pd电子结构的有效调控. 得益于此，催化剂的表观活性显著提升，反应动力学加快，电化学阻抗降低，同时本征催化效率也得到了明显提高.

2.3 催化剂稳定性

稳定性是评估高性能催化剂的关键参数之一. 采用计时电位法, 在10 mA/cm^{2}的恒定电流密度下对催化剂的稳定性进行了系统评估. 如图8(A)所示, 在长达136 h的连续不间断稳定性测试中, $PdIr_2$合金纳米片催化剂的过电位累计衰减63 mV, 平均衰减速率为0.46 mV/h. 值得注意的是, 在连续不间断测试的第21~136 h期间(后116 h), 过电位衰减振幅小于10 mV, 表明该催化剂具有优异的长期稳定性. 与之形成鲜明对比的是, c-Pd/C在14.5 h内过电位衰减了65 mV, 而c-Pt/C在近20 h内衰减了106 mV, 凸显了$PdIr_2$催化剂在耐久性方面的显著优势. 如图8(B)所示, 催化剂在136 h计时电位测试前后的LSV曲线没有出现明显变化, 进一步证实了$PdIr_2$合金催化剂优异的稳定性. 且经稳定性测试后, 催化剂的形貌没有明显变化[图8(C)和(D)].

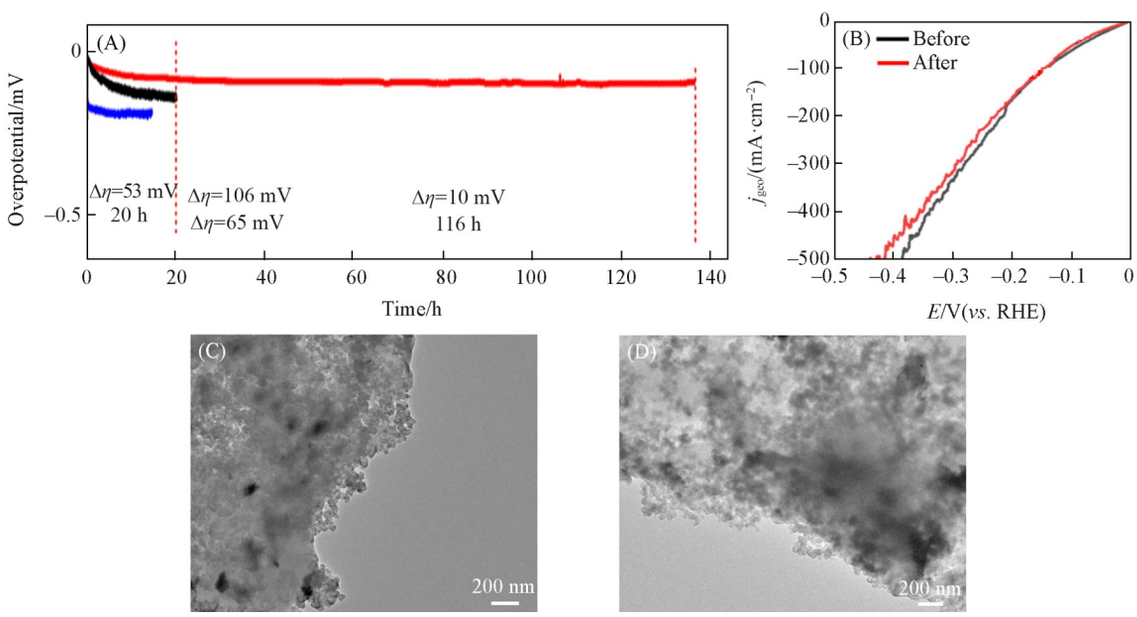


Fig. 8 Chronopotentiometry(CP) curves of $PdIr_2$ alloy nanosheets, c-Pd/C and c-Pt/C at 10 mA/cm^2(A), LSV curves(B) and TEM images(C, D) of $PdIr_2$ alloy nanosheets before(C) and after(D) stability test

3 结　　论

采用有机前体降解法合成了具有二维结构的$PdIr_2$合金纳米片催化剂. 通过在Pd基催化剂中引入Ir形成合金催化剂, 有效调控了Pd的电子结构. XPS分析表明, 电子由金属Pd定向流向金属Ir, 使Pd处于缺电子状态, 从而有助于降低其对氢中间体的吸附强度. 电化学测试结果表明, $PdIr_2$合金纳米片催化剂在10 mA/cm^{2}电流密度下的过电位仅为19 mV, Tafel斜率为51.4 mV/dec, 性能远优于c-Pt/C和c-Pd/C催化剂. 稳定性测试结果表明, 该催化剂在长达136 h的连续测试中, 过电位累计衰减了63 mV, 平均衰减速率约为0.46 mV/h; 且在后116 h内, 过电位衰减幅度在10 mV以内, 展现出优异的长期稳定性. 本研究为开发高性能Pd基催化剂提供了重要的设计思路和实验依据.

参　考　文　献

[1] Sapountzi F. M., Gracia J. M., Fredriksson H. O., Niemantsverdriet J. H., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **2017**, *58*, 1—35
[2] Yuan S., Pang S. Y., Hao J., *Appl. Phys. Rev.*, **2020**, *7*(2), 1—35
[3] Hunt J. D., Nascimento A., Romero O. J., Zakeri B., Jurasz J., Dąbek P. B., Wada Y., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*(1), 7723—7731
[4] Guo Y. J., Shi L., Shi X. S., Zhao T. T., Tian W. C., Zhang S. L., Liu D., Li Y. L., Zhong F. P., Zhao S. L., *Nat. Chem. Eng.*, **2025**, *2*(8), 474—483
[5] Wen Y., Chen R. S., Ni H. W., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, *46*(3), 20240464(文颖, 陈荣生, 倪红卫. 高等学校化学学报, **2025**, *46*(3), 20240464)

[6] Panwar N. L., Kaushik S. C., Kothari S., *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **2011**, *15*(3), 1513—1524
[7] Du L., Yang Y., Zhou L., Liu M., *Sustainability*, **2024**, *16*(11), 4602—4638
[8] Hong Q. L., Xiao X., Ai X., Liu H., Xu G. R., Xue Q., Chen Y., *Chem. Soc. Rev.*, **2025**, *54*(21), 9849—9875
[9] Zhu L., Yang B., Wu Z., Li C., Li H., Sun Y., *J. Mater. Sci. Technol.*, **2022**, *112*, 222—229
[10] Liu K., Yang H., Jiang Y., Liu Z., Zhang S., Zhang Z., Gao C., *Nat. Commun.*, **2023**, *14*(1), 2424—2435
[11] Xu G. R., Zhou X., Miao Y., Jiang B., Sun Q., Wu Z., Wang L., *Adv. Energy Mater.*, **2025**, *15*(37), e03590
[12] Guo Y., Hou B., Cui X., Liu X., Tong X., Yang N., *Adv. Energy Mater.*, **2022**, *12*(43), 2201548—2201558
[13] Yuan Z. H., Sun B., Zhong W., Ai X., Gao J. Z., Feng L. G., Chen Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, *64*(40), e202509944
[14] Zhang H., Jiang Q., Hadden J. H., Xie F., Riley D. J., *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, *31*(10), e2008989
[15] Wang X., Montaña G., Spadaro M. C., Arbiol J., Kallio T., Martínez-Alanis P. R., Cabot A., *ACS Nano*, **2025**, *19*(35), 31384—31394
[16] Zhu K., Yang H., Guo G., Wang Y., Tan W., Ma F., Peng S., *ACS Catal.*, **2025**, *15*(11), 9563—9573
[17] Ren L., Zhang K., Huang Y. C., Lu Y. R., Deng H., Ding Y., Chen J., *ACS Catal.*, **2025**, *15*(13), 11022—11033
[18] Deng J., Deng D., Bao X., *Adv. Mater.*, **2017**, *29*(43), 1606967—1606990
[19] Jahan M., Liu Z., Loh K. P., *Adv. Funct. Mater.*, **2013**, *23*(43), 5363—5372
[20] Stoerzinger K. A., Rao R. R., Wang X. R., Hong W. T., Rouleau C. M., Shao-Horn Y., *Chem*, **2017**, *2*(5), 668—675
[21] Stamenkovic V. R., Fowler B., Mun B. S., Wang G., Ross P. N., Lucas C. A., Markovic N. M., *Science*, **2007**, *315*(5811), 493—497
[22] Chandrasekaran S., Ma D., Ge Y., Deng L., Bowen C., Roscow J., Zhang H., *Nano Energy*, **2020**, *77*, 105080—105124
[23] Yuan Z. H., Wang T. J., Sun B., Hong Q. L., Ai X., Li S. N., Chen Y., *Appl. Catal. B: Environ. Energy*, **2025**, *366*, 125041—125060
[24] Li J., Chen Y., Yao B., Yang W., Cui X., Liu H., Zhang Z., *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, *146*(8), 5693—5701
[25] Du Y., Liu J., Chen J., Wang S., Tang Y., Wang A. L., Lu X. F., *Adv. Energy Mater.*, **2025**, *15*(10), 2404113—2404135
[26] Liu P., Zhang X., Fei J., Shi Y., Zhu J., Zhang D., Lai J., *Adv. Mater.*, **2024**, *36*(11), 2310591—2310598
[27] Fan H., Yang Q. Q., Fang S. R., Xu Y. N., Lv Y., Lin H. Y., Yang H. G., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*(51), e202412080
[28] Wang H., Qin Y., Wu Y., Qiu Y., Ling L., Fang Q., Zhu C., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*(1), 10289—10298
[29] Chen X., Liu J. Y., Yu J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(6), 20240042(陈鑫, 刘婧媛, 于静. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(6), 20240042)
[30] He Q., Shi Z., Yu D., Zuo Y., Jiang W., Liu H., Wang X., *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, *147*(46), 43067—43076
[31] Li X., Wan Y., Xie Y., Fu Y., Deng F., Zhou Y., Luo Y., Han L., Ma J., Dong F., Zhu Y., *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, *36*(21), e23047
[32] Liu Y., Zi T. Q., Huang Y., Zhang S., Syed J. A. S., Gao L., Li A. D., *ACS Appl. Nano Mater.*, **2025**, *8*(17), 8807—8815
[33] Zhou Z., Su Y., Tan H., Wang Y., Huang Q., Wang H., Zhao S., *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, *147*(5), 3994—4004
[34] Nørskov J. K., Bligaard T., Logadottir A., Kitchin J. R., Chen J. G., Pandelov S., Stimming U., *J. Electrochem. Soc.*, **2005**, *152*(3), 23—26
[35] Li X. B., Han T., Zhou Y. T., Wang M., Tian Z. L., Deng F., Luo Y. T., Xie Y., Huang J. T., Han L., Chen Z., Feng Z. J., Chen W., *Appl. Catal. B: Environ.*, **2024**, *350*, 123913—123924
[36] Li X. B., Han T., Zhou Y. T., Xie Y., Luo Y. D., Huang J. T., Chen Z., Deng F., *Sci. China Tech. Sci.*, **2024**, *67*(4), 1238—1252
[37] Liu M., Wan Y., Wang Y., Xu J., Li X., *J. Environ. Chem. Eng.*, **2024**, *12*(2), 112328—112356
[38] Wang J., Gao X., Li B., Lu Z., Chen C., Zhang K., Zhang G., *J. Mater. Chem. A*, **2025**, *13*(46), 39759—39765
[39] Li X., Wan Y., Deng F., Zhou Y., Chen P., Dong F., Jiang J., *Chin. Chem. Lett.*, **2025**, *36*(10), 111418—111441
[40] Lu Y., Huang K., Cao X., Zhang L., Wang T., Peng D., Huang Y., *Adv. Funct. Mater.*, **2022**, *32*(19), 2110645—2110653
[41] Wei J., Xiao K., Chen Y., Guo X. P., Huang B., Liu Z. Q., *Energy Environ. Sci.*, **2022**, *15*(11), 4592—4600
[42] Zhang X., Li J., Yan L., Huang S., Zhang P., Peng Z., Zhao C., *Appl. Surf. Sci.*, **2021**, *559*, 149978—1449985
[43] Chen Z., Li X., Zhao J., Zhang S., Wang J., Zhang H., Han X., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, *62*(39), e202308686
[44] Jin J., Yin J., Liu H., Huang B., Hu Y., Zhang H., Yan C. H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*(25), 14117—14123
[45] Yang Q., Liu H., Yuan P., Jia Y., Zhuang L., Zhang H., Yao X., *J. Am. Chem. Soc.*, **2022**, *144*(5), 2171—2178
[46] Li Y., Wang W., Cheng M., Feng Y., Han X., Qian Q., Zhang G., *Adv. Mater.*, **2023**, *35*(24), 2206351—2206360
[47] He Q., Tian D., Jiang H., Cao D., Wei S., Liu D., Song L., *Adv. Mater.*, **2020**, *32*(11), e2070079
[48] Liu F., Lui Y. H., Sun S., Huang W., Hu S., Zhang B., Jiang S., *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, *705*, 139529—139535
[49] Li Y., He J., Cheng W., Su H., Li C., Zhang H., Liu Q., *Sci. China Mater.*, **2021**, *64*(10), 2467—2476

(Ed.: Y, K, M)