

航天视角下电解水产氢高效催化剂的研究性实验课程思政设计

杨爽¹, 王群^{1,*}, 苗彩琴¹, 耿子奇¹, 李欣然², 李杨¹, 吴晓宏^{1,*}

¹ 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 材料化学系, 哈尔滨 150001

² 哈尔滨工业大学未来技术学院, 哈尔滨 150001

摘要: 电解水分解反应是航天领域地外原位资源利用的核心技术之一, 高校自身特色的科研具有促进本校人才培养的重要属性, 遵循科教融合原则, 将航天特色的科研与本科生教学相结合设计了研究性教学实验。提出运用水热氧化和高温磷化两步法, 制备适用于航天微重力空间环境下的具有超亲水超疏气表面的泡沫镍自支撑双金属磷化物电极材料, 并对电解水产氢性能进行研究。同时, 挖掘并融入对应的本科物理化学课程中相关热力学知识点, 有效调动学生的学习主动性, 引导学生自主探究问题并建构地外电解水知识体系, 传承航天报国精神。

关键词: 电解水产氢; 航天; 研究性教学; 物理化学; 教学模式; 课程思政

中图分类号: G64; O6

Ideological and Political Education Design for Research-Oriented Experimental Course of Highly Efficient Hydrogen Production from Water Electrolysis in Aerospace Perspective

Shuang Yang¹, Qun Wang^{1,*}, Caiqin Miao¹, Ziqi Geng¹, Xinran Li², Yang Li¹, Xiaohong Wu^{1,*}

¹ Department of Material Chemistry, School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China.

² School of Future Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China.

Abstract: The electrolysis of water is a crucial technology for extraterrestrial *in situ* resource utilization in the aerospace sector. Scientific research with unique university characteristics plays a vital role in fostering talent development. Adhering to the principle of integrating science and education, this study combines aerospace-focused scientific research with undergraduate teaching to design a research-oriented experimental course. The approach involves using a two-step method of hydrothermal oxidation and high-temperature phosphidation to fabricate nickel foam self-supported bimetallic phosphide electrodes with ultra-hydrophilic and super-hydrophobic surfaces suitable for the microgravity environment of aerospace space. The performance of hydrogen production from electrolyzed water is investigated. Additionally, relevant thermodynamic concepts from undergraduate physical chemistry courses are incorporated to engage students actively, encourage independent exploration, facilitate the construction of knowledge on extraterrestrial water electrolysis, and uphold the spirit of aerospace patriotism.

Key Words: Electrolytic hydrogen production; Aerospace; Research-oriented teaching; Physical chemistry; Teaching models; Ideological and political education

收稿: 2024-03-13; 录用: 2024-05-08; 网络发表: 2024-05-27

*通讯作者, Emails: wangqun5992@hit.edu.cn (王群); wuxiaohong@hit.edu.cn (吴晓宏)

基金资助: 校研究生“点子”专题项目(23Z-DZ043)

航天器上携带足够多火箭燃料、水和氧气是未来人类往返火星的必要条件。水分解反应是航天领域地外原位资源利用的核心技术之一，国际空间站利用电化学分解水产生的氧气供航天员呼吸，氢气则通过燃料电池为航天器提供动力。因此，寻求廉价、高效的催化剂实现空间微重力环境下电解水制氢，为空间探索提供必须的物质供给具有重要的科学意义。

美国航空航天局2024年创新先进概念计划选出了13个获奖项目，其中包括美国佐治亚理工学院研究公司提出的一种用于长期太空旅行和火星转移中氧气和氢气生产的高效水分解体系结构^[1]。此外，加州理工学院团队展示了在模拟太空的近零重力下，光驱动水裂解产生氢气和氧气，通过调整纳米结构的形状促进气泡释放，维持低重力下的水裂解活动^[2]。“水循环”也是2035年未来我国部署空间地球科学重点研究领域的三个主要科学问题之一。赫尔曼·勒尔斯指出：“教学与科研统一是指教学与科研的整合，科研具有促进人才培养的重要属性。”创新人才培养是科教融合的出发点和落脚点，科研与教学在形式和内容上相互渗透，实现高校内部科研活动和教学活动的紧密融合发展^[3]。从学生知识能力发展方面而言，教师将科学研究中“科学原理-哲学思辨-数学推演-理论建立-应用探索”的系统方法论引入研究性实验教学过程，有效调动学生立志服务航天报国的学习主动性，培养学生的通用能力(实践能力、跨界整合能力、创新能力等)，引导学生自主探究问题，并建构相关知识体系^[4,5]。

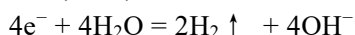
近年来，析氢反应的整体催化效率偏低主要由于水解离步的高能垒导致，水解离后所产生的吸附氢还需具备较合适的脱附动力学过程。同时，贵金属储量少、价格高等问题严重阻碍催化剂的大规模应用。而过渡金属磷化物作为一类间隙化合物，价格较低，具有高的导电性、电催化活性及电化学稳定性。本研究性实验立足于本科物理化学中的反应吉布斯自由能、表面化学接触角和电化学基础知识，设计合成了具有三维多孔骨架、丰富界面的双金属磷化镍-磷化钆杂化材料电催化剂，取代部分昂贵钌金属，异质结构的形成实现电子的重新分布，加速电子/质子转移，带来更加适中的活性氢吸附过程以及其后更加温和的H₂脱附过程，有效提升了电催化析氢反应(HER)活性，满足了航天微重力环境下的超亲水超疏气表面的要求，并从分子水平和纳米尺度视角下阐明了催化剂结构与电解水性能间的构效关系^[6,7]。

1 实验原理

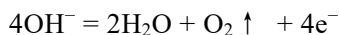
1.1 电解水科学原理

当直流电作用于氢氧化钾水溶液时，在阴极和阳极上分别发生下列化学反应，如图1a所示。

(1) 阴极(析氢)反应：电解液中的H⁺ (水电离后产生)接受电子而析出氢气：



(2) 阳极(析氧)反应：电解液中的OH⁻放出电子而成为水和氧气为：



电解水的净反应为： $H_2O(l) = H_2(g) \uparrow + 0.5O_2(g) \uparrow$ ， $\Delta_r G_m^\ominus(298\text{ K}) = 237\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ， $\Delta_r H_m^\ominus(298\text{ K}) = 286\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

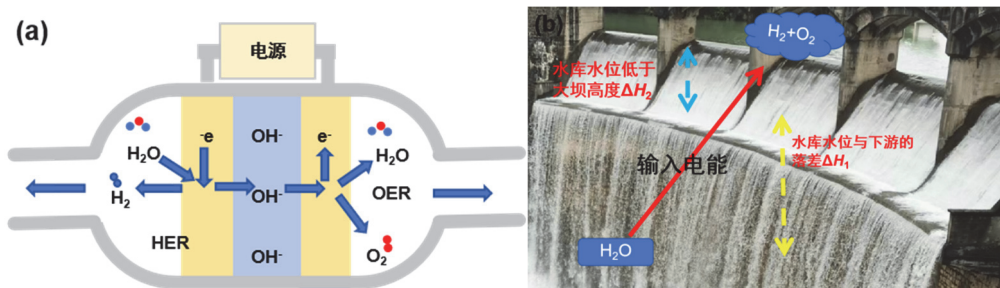


图1 (a) 电解水反应示意图；(b) 水库大坝示意图

1.2 哲学思辨

结合物理化学热力学第一定律和第二定律进行哲学思辨,前者阐述由1 mol氢气和0.5 mol氧气自发生成水,放出286 kJ热量,能量守恒,但是,把这些热量收集起来反过来加热水,却看不到水分解为氢气和氧气,说明除了热力学第一定律外,还有其他定律来约束着能量转变的方向。从哲学角度来看,热力学第二定律的意义在于揭示了自然界中存在的一种基本规律,即能量转变的不可逆性。

一个化学反应能否自发进行,取决于反应过程的化学热力学和动力学。化学热力学的核心包括热力学三大定律,热力学参数是自由能变化(ΔG)。化学动力学主要研究的是化学反应速率及各种因素(如浓度、温度、压力、催化剂)对反应速率的影响,以及反应物通过什么途径、按照哪些步骤才转变为产物的,动力学参数是反应活化能(ΔE)。为利于本科生更通俗形象化地理解,以水库为例阐明热力学和动力学对化学反应的影响(见图1b):在化学反应中,反应物分子的能量必须高于反应产物的能量,才能具备发生化学反应的条件,这就是化学反应的 ΔG ,好比是水库水位与下游的落差 Δh_1 ,只要落差存在,水就具备了向下流动的动力。但是水库有大坝存在,水依然无法流到下游,这就是因为水库水位低于大坝高度 Δh_2 ,好比是化学反应的活化能。把水库上游比喻为氢气和氧气,下游比喻为水,如果要把水从低处抽到高处即水变成氢气和氧气就要用抽水机,要输入电能(非膨胀功)。

1.3 数学推演和理论建立

理论上,根据物理化学热力学中吉布斯自由能(G)知识点数学推演,来理解电解水中输入的电压值。利用热力学第一、二定律微小变化的数学表达式联立得到:

$$-\delta W \leq -(dU - T_{\text{sur}}dS)$$

这里 W 包括膨胀功 W_e 和非膨胀功 W_f (通常为电功或表面功),当 $T_1 = T_2 = T_{\text{sur}} = T$ 时,

$$\delta W = \delta W_e + \delta W_f = -pdV + \delta W_f$$

得

$$pdV - \delta W_f \leq -d(U - TS)$$

当始、终态压力与外压相等,即 $P_1 = P_2 = P_e = P$ 时,

$$-\delta W_f \leq -d(U + pV - TS) \leq -d(H - TS)$$

Gibbs定义了一个状态函数: $G \xrightarrow{\text{def}} H - TS$, 则 $-\delta W_f \leq -dG$ 。

等号表示可逆过程 $-\delta W_{f,\text{max}} = (-dG)_{T,P}$, 即: 恒温、恒压、可逆过程中, 封闭系统对外所作的最大非膨胀功等于系统Gibbs自由能的减少值。理论上, 在标准状况下 $T = 298.15 \text{ K}$, $P = 1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$), 液态水的标准生成吉布斯自由能 $\Delta_f G_m^\ominus$ 是 $-237 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 反过来电解液态水消耗的能量就是 $237 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。在恒温、恒压、可逆电池反应中,

$$\Delta_r G = W_{f,\text{max}} = -nEF$$

式中 n 为电池反应中电子的物质的量, E 为可逆电池的电动势, F 为Faraday常数, 值为 $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$, 这是联系热力学和电化学的重要公式, 则可逆电解水过程的理论电压为: $E_{\text{cell}}(\text{理论}) = \Delta G/nF = 237000/(96485 \times 2) = 1.23 \text{ V}$ 。

实际上, 从动力学角度看, 由于复杂的电子和离子传输过程所引起的动力学缓慢现象, 使得实际发生的水裂解反应需要比1.23 V更大的电压。超过理论反应电压的额外电位称为过电位, 是由活化能、电解质扩散阻力、离子和气体扩散、导线和电极电阻以及气泡电阻等造成的。如图2所示, 电解槽的总电势(V_{cell})等于标准电势(V_0)加上过电势。过电位具有四个主要分量: 活化(V_{act})、欧姆(V_{ohm})、气泡(V_{bubble})和浓度(V_{con})^[8]。特别地, 对于极端太空微重力环境下, 气泡很难通过浮力脱离电极表面, 这将降低电化水分解反应的速率和能量转化效率。吸附水是反应发生的前提, 亲水性越强、水下疏气性越强, 产生的气体气泡越小、逃逸越快, 超亲水界面在水下表现出超疏气性, 可以排斥气泡, 使生成的气泡难以粘附在材料表面上, 利于气体传质, 所以对于液相反应物和气相产物催化电极材料, 应尽可能设计亲水疏气结构^[9]。大电流密度下, 该结构使得表面生成的气体像雾一样扩散开来。

反之，如果大气泡在表面长时间粘附，不仅阻碍了活性位点，还增加了界面接触电阻，获得同样的电流密度需要施加更大的电压，而且，大气泡脱附时的应力还可能会造成催化剂的脱落，不利于电极长期稳定性。因此，设计气相产物的快速传质结构是非常重要的。

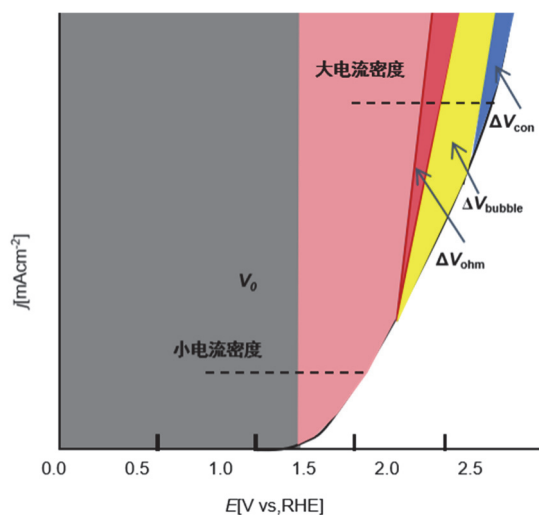


图2 不同电流密度下，电解水电极过电位影响因素^[8]

2 实验目的

- (1) 了解航天空间用电解水产氢的制约因素。
- (2) 掌握电解水物理化学知识，数学推导。
- (3) 分析电解水理论电压的计算原理及其过电位。

3 试剂及仪器

试剂：氯化钌水合物($\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)、硝酸六水合物($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、十二烷基硫酸钠(SDS)、乙二醇、氢氧化钾(KOH)、次磷酸钠一水合物($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)、Nafion(5.0 wt%)和氧化铱(IrO_2)，所有试剂均为分析纯。

仪器：电化学工作站(CHI 760E, 上海辰华)，扫描电子显微镜(SEM) (JSM-7800F, 日本电子株式会社)，场发射透射电子显微镜(TEM)和高分辨透射电镜图(HRTEM) (JEM-2100F, 日本电子株式会社)，X射线粉末衍射图谱(PXRD) (D/max 2500/PC, 日本理学公司)。

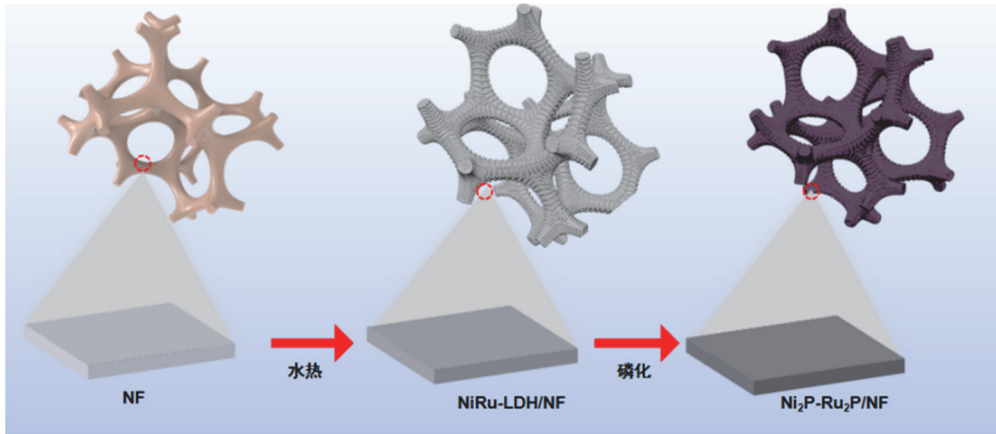
4 实验步骤

(1) NiRu-LDH的合成。

首先，通过水热法在泡沫镍(NF)上原位生长二维层状镍钌氢氧化物(NiRu-LDH)。具体制备过程如下：将 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (582 mg)、 $\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (104 mg)、十二烷基硫酸钠(144 mg)和尿素(1 g)溶解在去离子水(10 mL)和乙二醇(30 mL)的混合物中。然后，将其转移到聚四氟乙烯高压釜中。进而，将洗涤处理后的泡沫镍转移到上述溶液中，并在 150°C 下保持12 h。最后，依次用甲醇、去离子水洗涤样品，并在 60°C 下干燥5 h (命名为NiRu-LDH/NF)。

(2) $\text{Ni}_2\text{P}-\text{Ru}_2\text{P}/\text{NF}$ 复合物的合成。

将制备的NiRu-LDH/NF和 $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (50 mg)分别放置在管式炉的下游和上游。然后，在氩气气氛下加热至 350°C 并保持2 h，自然冷却后，得到 $\text{Ni}_2\text{P}-\text{Ru}_2\text{P}/\text{NF}$ ，如图3所示。(通过画图培养学生绘制样品制备流程图能力，可选择PPT，3Dmax软件。)


 图3 Ni₂P-Ru₂P/NF复合物的合成图

5 实验结果与讨论

根据物理化学相图知识点分析Ni-P二元相图。Ni-P二元相图更为复杂，但是仍可辨认出其是本科物理化学课程二组分完全不互溶Bi-Cd相图为主体的组合版，还包含稳定化合物、不稳定化合物，以及二组分部分互溶合金相图的复杂组合体。其形成化合物的系统分为两类：(1) 生成稳定化合物系统的相图(相合熔点)，相图里面垂线被曲线终结是稳定化合物，伞状图形特点；(2) 生成不稳定化合物系统的相图(不相合熔点)，T字型图形特点，如图4a所示，磷化镍中P占33%左右，是稳定化合物，XRD图也表明产物是Ni₂P，JCPDS卡片号是65-3544，如图4b。相图与XRD图相结合有助于学生更好的理解热力学控制下的物相产生，发生化学反应方程如下：

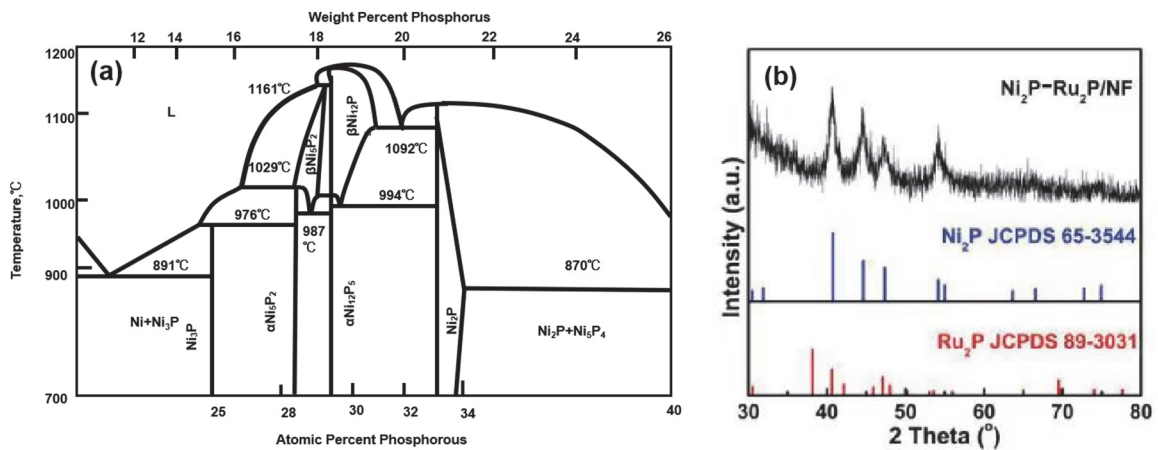
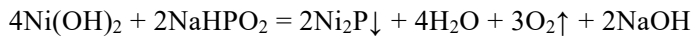
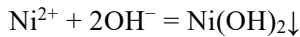
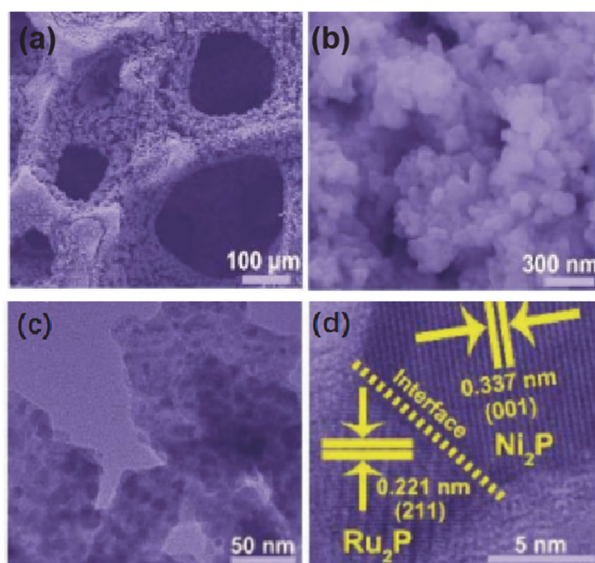


图4 (a) Ni-P相图；(b) XRD图

5.1 SEM和TEM分析

从图5a、b可以看出，制备泡沫镍自支撑的磷化镍-磷化钌异质结Ni₂P-Ru₂P/NF仍保持Ni泡沫的初始形貌特征。3D多孔结构有利于扩大与电解液的接触，促进质子/电子传输，加速气泡的释放。图5c为Ni₂P-Ru₂P/NF的TEM图，可以看出该复合物包含大量小尺寸晶粒。高分辨电镜(HRTEM)图中Ni₂P与Ru₂P纳米晶的异质界面用黄色虚线标注，见图5d。

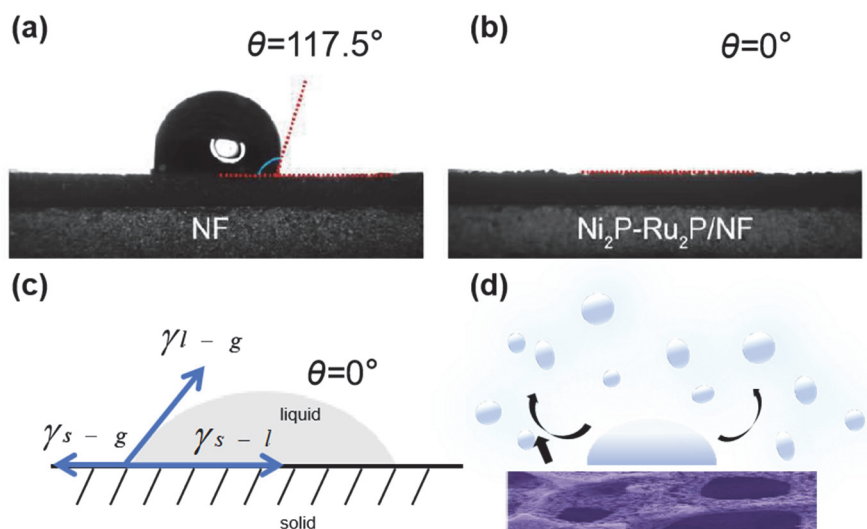

 图5 Ni₂P-Ru₂P/NF谱图

(a, b) SEM; (c) TEM; (d) HRTEM

5.2 接触角和气泡理论建立分析

对于空间微重力环境下电化学气泡生成过程,气泡的受力平衡影响其在电极表面的生长和脱离。在恒定电流密度条件下,电极表面产生的气泡随时间逐渐增长直到脱离电极表面,气泡的生长直接影响反应的界面电阻和电化学反应面积,气泡附着在电极表面的时间过长将急剧降低反应效率。

自支撑材料通常具有垂直生长的阵列结构,气泡在阵列结构上的接触角小,粘附力弱,容易脱附。通过接触角测试实验,来判断产物的亲水性,见图6a、b。原始泡沫镍接触角为117.5°,经过溶剂热-高温磷化策略制备的Ni₂P-Ru₂P/NF拥有0°的接触角,证明所得物具有良好的亲水性。结合物理化学表面化学知识分析,当温度、压力和组成恒定时,可逆使表面积增加dA所需要对系统作的非膨胀功,称为表面功,用公式表示为: $\delta W_f = \gamma dA_s$, γ 为表面张力。液体在固体的表面达到平衡时,在气、液、固三相交界处,气液界面和液固界面之间的夹角称为接触角,公式为 $\cos\theta = (\gamma_{s-g} - \gamma_{s-l})/\gamma_{l-g}$ 。


 图6 (a, b) NF和Ni₂P-Ru₂P/NF的水接触角图; (c) 接触角公式示意图; (d) 泡沫镍上H₂气泡脱附图

当接触角 $< 90^\circ$ 时, 则固体表面是亲水性的, 其角越小, 表示润湿性越好, 接触角接近 0° 时, 完全润湿, 见图6c。得益于良好的润湿性, 使得电解质在电极上完全铺展, 优越的亲水性有利于扩大电极与电解质间的接触面, 加速 H_2 气泡在3D多孔的 Ni_2P-Ru_2P/NF 上脱离, 见图6d, 从而导致高的催化活性和长期运行稳定性。

5.3 电催化分解水性能应用探索

5.3.1 线性伏安扫描测试(LSV)

电解水产氢性能测试是在 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钾溶液中, 通过电化学工作站CHI 760E, 采用三电极系统测试完成的。其中, Hg/HgO 电极作为参比电极, 石墨棒作对电极, 以所得泡沫镍自支撑磷化镍-磷化钌(Ni_2P-Ru_2P/NF)作为工作电极($1 \times 1 \text{ cm}^2$)。线性扫描伏安测试时的速度为 $2 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

如图7a所示, 不同样品的析氢性能排序为 $Ni_2P/NF < Ni_2P-Ru_2P/NF < Pt-C/NF$ 。尤其是, Ni_2P-Ru_2P/NF 仅分别需要101、185和228 mV的过电位即可获得10、100和200 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 优于 Ni_2P/NF (图7b)。过电位(η)是指析氢反应达到一定电流密度(i)时所需实际电压(E_i)超过理论电压($E_t = 1.23 \text{ V}$)的部分($\eta_i = E_i - E_t$), 是衡量催化剂催化活性的重要参数。 η 值越小, 耗能相对越小, 催化活性越高。

5.3.2 循环伏安法测试(CV)

通过循环伏安法计算了催化剂的电化学双电层电容值(C_{dl})。当采用双电层电流对扫描速度作图时, 得到直线的斜率为双电层电容 C_{dl} 。扫速从20到100 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$, Ni_2P-Ru_2P/NF 的 C_{dl} 值为 $27.2 \text{ mF}\cdot\text{cm}^{-2}$, 异质结的构成增加了活性位点, 见图7c。经1000 CV循环测试后(图7d), 证明材料 Ni_2P-Ru_2P/NF 具有良好的运行稳定性。

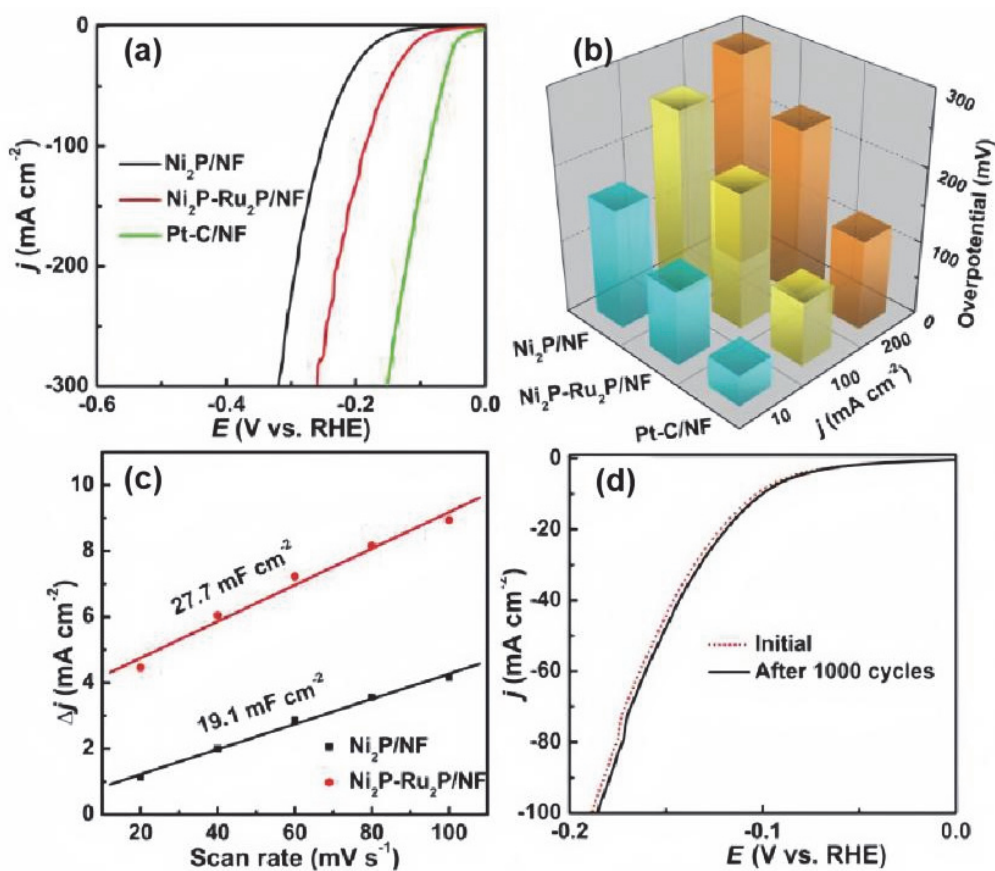


图7 催化剂的析氢性能测试

(a) LSV曲线; (b) 过电位比较; (c) C_{dl} ; (d) 1000圈CV前后的LSV曲线

6 教学组织实施

目前部分教学内容陈旧,与社会实际脱节,不能与时俱进,内容更新不持续化,无法反映出社会发展、科技进步和本学科领域的最新科技成果。而实验室现有雄厚科研资源(场地、仪器、文献资料、知识储备等)完全可以支持创新性教学实验的实施,且经过教师前期论证,实验可行性高,能够确保实验的顺利开展。同时充分考虑科研项目的长周期性和本科教学实验时长的限制,可以有选择性地选取和设计符合本科生现有水平的实验内容。

6.1 教学实施方案

本实验面向化学专业本科三年级的学生开设,考虑科研项目转化教学实验量大的特点,通常需要2–6 d,如吉林大学本科实验^[10]。故本实验5人一组,小组合作,分为两阶段进行,共计4 d。具体考核内容及评价标准如表1所示,按照研究性教学主线,学生前期进行调研,阅读相关文献并结合微课学习,设计实验方案。实验开始前,教师讲解推演数学公式,激发兴趣并进行实验安全培训学习(3 h)。后续通过小组合作探究实验(样品合成2 d,即水热氧化和高温磷化两步法。测试表征1 d,SEM、TEM、HRTEM等测试考虑学生现有操作水平,由教师协作完成,学生进行后续数据处理)。实验完成后书写实验报告,并通过小组PPT讨论展示的形式,师生共同探讨实际应用(实验结束后2周内完成)。

表1 思政教学目标达成度的考核设计

教学模块	考核内容及占比	思政教学目标	时长设置
文献调研、科学原理	有效整合数字资源,内容新颖详实(15%)	知识技能:掌握研究领域最新进展和趋势的方法技巧	课前学生自主完成 (教师提前3周布置)
微课学习、设计方案	高参与度,方案完整合理及创新性(15%)	思辨技能:个性化,灵活兴趣学习,提升独立思考能力	
安全培训、仪器操作	规范实验,熟悉相关仪器操作(10%)	操作技能:规范操作,培养严谨、细致的科学精神	3 h
数学推演、激发兴趣	基本原理公式推演(10%)	推演技能:拓展学术视野,训练逻辑思维能力	
团队协作、应用探索	合作完成度,实验过程表现(25%)	科学素养:团队协作,勇于探索	前期样品合成(2 d), 样品表征测试(1 d)
师生探讨、汇报总结	报告撰写、汇报,探究应用领域(25%)	社会责任:综合素质提升,认识电解水在航天领域的重要应用,培养学生科研报国意识	实验结束2周内完成

6.2 课程中的思政

哈工大立足国家航天事业,面向国际学术前沿,以未来航天领域水分解反应需求为导向,将航天特色的科研与本科生教学相结合,实验课程思政设计遵循研究性教学主线(科学原理、哲学思辨、数学推演、理论建立、应用探索)和思政教学目标(知识技能、思辨技能、推演技能、科学素养、社会责任)双螺旋轴,螺旋递进,相互交织,相互促进、相互支撑,避免简单的并行或独立运动(图8)。促使学生在掌握知识技能和提升科学素养的同时,提升思想综合素质(求知、理性、求真、合作、爱国),达到知识与素质的双重提升,厚植爱国情怀,从而让学生更好地完成专业学习和未来职业发展,培养一批专业精、素质强、重实践、有担当的兼备扎实基础和创新能力爱国人才。

6.3 考核内容设计意图及评价标准

教师坚持学生为本理念,导师引领兴趣驱动小组制自主学习,依据“输入–内化–输出”高效学习基本原理,设置课程学习阶段(前期调研及微课学习)–交流内化阶段(团队合作,师生共研)–成果产出阶段(成果汇报及实际应用分析),充分调动学生积极性,培养学生的思考能力和探究精神,高效、

有质量的学习^[11,12]。模块学习完成后,学生通过汇报总结的形式促进学习内化,知识转化为实际应用,掌握知识的同时达到价值引领的目的。

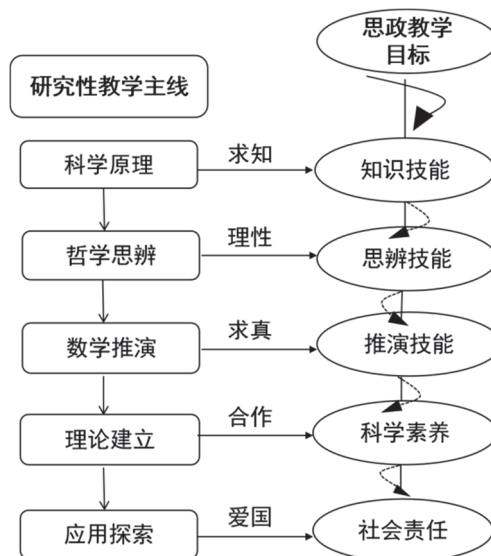


图8 研究性教学主线与思政教学目标结合的双螺旋教学示意图

7 结语

立足未来航天领域水分解反应需求,科研转化研究性教学,采用低温水热高温磷化策略设计电解水产氢高效催化剂,导师引领兴趣驱动小组制自主学习,通过前期微课、文献调研及实验培训,引导学生对研究体系进行设计,通过物理化学中的基础知识与电催化析氢领域研究热点进行结合,数学推理和前沿融合,激发学生对空间电催化领域的科研兴趣,树立正确的航空间背景下能源利用价值观,培养学生的科研热情和解决问题的能力。

参 考 文 献

- [1] Funding Future Tech: NASA Names 2024 Innovative Concept Studies. [2024-1-4].
- [2] Funding Future Tech: NASA Names 2024 Innovative Concept Studies. [2024-10-24].
<https://www.nasa.gov/news-release/funding-future-tech-nasa-names-2024-innovative-concept-studies/>
- [3] Brinkert, K.; Richter, H. M.; Akay, Ö.; Liedtke, J.; Giersig, M.; Fountaine, T. K.; Lewerenz, J. H. *Nat. Commun.* **2018**, 9 (1), 1.
- [4] 刘在洲, 谢晨霞, 赵映川. 现代教育管理, **2022**, No. 10, 58.
- [5] 周光礼, 周详, 秦惠民, 刘振天. 中国高教研究, **2018**, No. 8, 11.
- [6] 畅志兵, 初荣, 王新红, 王楚楚, 旷文昊. 实验技术与管理, **2022**, 39 (12), 153.
- [7] Yang, S.; Zhu, J. Y.; Chen, X. N.; Huang, M. J.; Cai, S. H.; Han, J. Y.; Li, J. S. *Appl. Catal. B-Environ.* **2022**, 304, 120914.
- [8] 张策, 杨金禄, 尹钊, 胡博韬, 熊劲松, 王兆龙, 赵俊凯, 姚伟. 中国空间科学技术, **2023**, 43 (6), 83.
- [9] Guo, M. R.; Qayum, A.; Dong, S.; Jiao, X. L.; Chen, D. R.; Wang, T. *J. Mater. Chem. A* **2020**, 8 (18), 9239.
- [10] Xu, W. W.; Lu, Z. Y.; Sun, X. M.; Jiang, L.; Duan, X. *Accounts Chem. Res.* **2018**, 51 (7), 1590.
- [11] 闫晓义, 马强, 魏士刚, 张志权, 郭玉鹏. 大学化学, **2022**, 37 (7), 2111033.
- [12] 赵卫光, 关英. 大学化学, **2023**, 38 (2), 32.