

江苏省高等学校
大学生创新创业训练计划项目申报表
(创新训练项目)

项目编号	不填		
项目名称	面向工业水分解的新型稀土镍铁基催化剂：宽域 电流密度下稳定高效制氢		
项目主持人	姚守宇	联系电话	15615776451
所在学院	纳米科学技术学院		
学号	2314401045	专业班级	纳米材料与技术 1 班
指导教师	陈子亮		
申请日期	2025. 4. 16		
起止年月	2025 年 6 月-2027 年 6 月		

苏州大学

填写说明

1. 本申请书所列各项内容均须实事求是，认真填写，表达明确严谨，简明扼要。
2. 申请人可以是个人，也可为创新团队，首页只填主持人。“项目编号”一栏不填。
3. 本申请书为大 16 开本（A4），左侧装订成册。可网上下载、自行复印或加页，但格式、内容、大小均须与原件一致。
4. 申请金额及经费预算根据往届项目资助额度进行估算，实际支持数额以学校实际批复为准。往届项目资助总额为国家级重点支持 40000 元、国家级 20000 元、省级 6000 元。校级项目经费由学院统筹支持。
5. 主持人所在学院认真审核，经初评，签署意见后，将申请书报送苏州大学大学生创新创业综合服务平台科研项目管理系统。

一、 基本情况

项目名称	面向工业水分解的新型稀土镍铁基催化剂：宽域电流密度下稳定高效制氢						
项目级别	<input type="checkbox"/> 国家级（推荐）重点支持 <input checked="" type="checkbox"/> 国家级（推荐） <input type="checkbox"/> 省级 <input type="checkbox"/> 校级						
项目类型	创新训练项目						
所属学科	学科一级门： 材料类 学科二级类： 纳米材料与技术						
申请金额	<input type="checkbox"/> 40000 元（国重） <input checked="" type="checkbox"/> 20000 元（国） <input type="checkbox"/> 6000 元（省）		起止年月		2025 年 6 月-2027 年 6 月		
主持人	姚守宇	性别	女	民族	汉族	出生年月	2004 年 10 月
学号	2314401045	联系方式	邮箱： 15615776451@163.com 手机：15615776451				
指导教师	陈子亮	联系方式	邮箱： zlchen@suda.edu.cn 手机：18955599202				
项目简介	<p>镍铁层状双金属氢氧化物（NiFe-LDH）因其独特的二维层状结构和可控的电子性质，在碱性水分解析氧反应（OER）中应用广泛。然而，其在催化过程中易发生 Fe 物种流失，导致循环稳定性显著衰退，制约了其在工业中的应用。稀土元素（M）因其独特的 <i>f</i> 层电子结构及在碱性条件下非浸出等特性，有望与 NiFe-LDH 组元形成物理和/或化学耦合，抑制 Fe 析出。基于上述思考，本项目提出通过一步电沉积，将稀土掺杂进 NiFe-LDH 中，提高催化稳定性和活性。最终创制出一款高活性、长稳定性、低成本的一体式催化电极；并揭示稀土在碱性 OER 动态反应中的演变机制及对 NiFe-LDH 性能提升的作用机理。该项目有望获得稀土在水分解领域内的新理论和新知识。</p>						
负责人曾经参与科研的情况	负责人自大一下学期加入陈子亮副教授所在课题组，积极学习并开展有关碱性电解水制氢相关的研究。对于相关领域研究现状有了深刻了解，并且已经掌握所有与课题相关的电化学测试，以及能够独立使用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜等仪器表征方法。目前申请人已经独立完成一个课题，正在撰写论文						

		中；并以第二作者的身份在 SCI 一区发表论文一篇。			
指导教师承担科研课题情况		<p>研究领域：近十年来一直致力于新型金属基电催化剂在水分解领域的开发及其催化行为、性能和机理的系统性研究。率先在催化领域提出了有关金属基电催化剂的“气态氢工程”、“双碳限域”、“电子注入”等改性策略，并首次全面地综述了“<i>s</i>-、<i>p</i>- 和 <i>f</i>-区金属”在电催化关键反应中的作用机制。</p> <p>主要成果：以第一作者和通讯作者身份共发表与金属材料 and 电催化相关的高质量 SCI 学术论文近 40 篇，大多集中在先进材料、能源化学等领域国际权威刊物上（包括 Prog. Mater. Sci.*1 篇、Adv. Mater.*7 篇、Angew. Chem. Int. Ed.*2 篇、Energy Environ. Sci.*2 篇、Adv. Energy Mater.*2 篇、Adv. Funct. Mater.*3 篇、ACS Nano*2 篇等）。近年来，申请人多次赴德国和美国的高校和研究所进行国际合作、交流和报告，并荣获德国“洪堡学者”终身荣誉和国际先进材料学会终身会士。</p> <p>承担项目：主持国家自然科学基金面上、国家自然科学基金青年、江苏省自然科学基金青年、江苏省高等学校自然科学研究面上（A 类）、国家重点实验室开放基金、教育部重点实验室开放基金等近十项科研项目，荣获多项国内人才荣誉。</p> <p>指导学生竞赛成果：指导本科生获国家级大创项目立项一项，获全国大学生挑战杯竞赛国赛三等奖一项。</p>			
指导教师对本项目的支持情况		该项目立足国际研究前沿，也满足国家和地方的“氢能”战略目标，该项目有望针对 f 区金属在碱性 OER 中的作用提出新的理解，同时拓展非贵金属基 OBR 催化剂的范畴。非常支持。			
项目组主要成员 （含主持人在内不超过 5 人）	姓名	学号	专业班级	所在学院	项目中的分工
	姚守宇	2314401045	纳米材料与技术 1 班	纳米科学技术学院	项目进展的统筹规划、材料实验操作技术指导、数据分析部分
	张颖	2314401031	纳米材料与技术 1 班	纳米科学技术学院	相关文献的查阅、协助进行电化学测试
	王若涵	2314401048	纳米材料与技术 1 班	纳米科学技术学院	相关文献的查阅，协助进行材料表征测试
	谢子文	2314401017	纳米材料与技术 1 班	纳米科学技术学院	相关文献的查阅，协助进行数据分析

二、 立项依据（可加页）

（一）研究目的

随着化石能源的逐渐减少，寻找可代替的清洁绿色能源成了当下的当务之急。常见的可再生能源包括：风能、水能、核能、地热能以及氢能。其中，氢能因其清洁、高能量密度的优点，获得了国家的大力支持与发展。在 2025 年颁发的《中华人民共和国能源法》中提到：“鼓励和支持氢能开发利用以及储能、节约能源等领域基础性、关键性和前沿性重大技术、装备及相关新材料的研究、开发、示范、推广和产业化发展。”^[1]

在工业制氢领域，因水电解可与太阳能、风能结合，产出高纯度的氢燃料，被认为是最具有潜力的绿色制氢途径。然而其半反应，析氧反应（OER）的热力学和动力学反应缓慢，影响了水分解的效率，因此开发出阳极析氧反应的高效且廉价催化剂尤为关键，以实现高效率、高产率生产氢气。镍铁层状双金属氢氧化物（NiFe-LDH），因具有独特的二维层状结构和可控的电子特性，成为 OER 领域的研究焦点。然而 NiFe-LDH 通常存在电化导学导电性差、长期稳定性差，在很大程度上无法满足工业生产需求。^[2]因此，我们迫切需要设计出一种有效、直接的方法来优化 NiFeO_xH_y 的催化性能，从而增强其固有的 OER 活性、稳定性。

我们团队曾系统研究了 s、p、f 区元素在水电解中的作用，包括碱金属、碱土金属、稀土金属等，并阐述了其潜在的九种电催化作用。

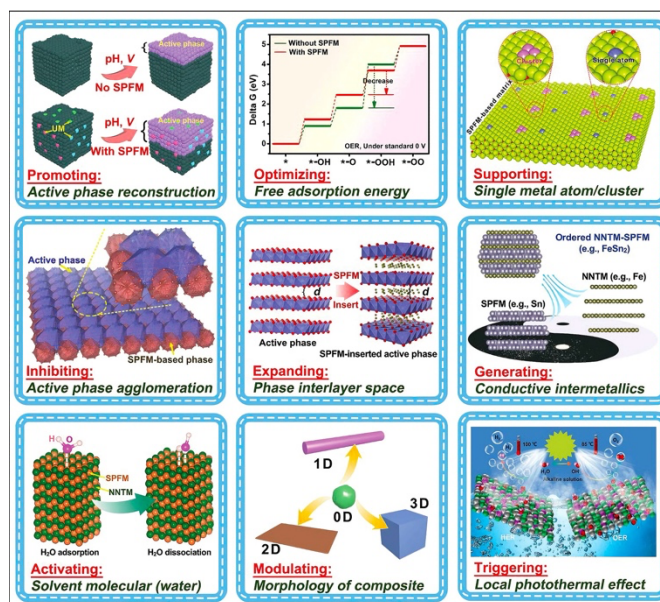


图 1:s、p、f 区金属在电催化中潜在的作用

稀土金属包括镧系元素（La）和钪（Sc）以及钇（Y）。因其拥有大量的 4f 电子以及大的元素半径，在电催化剂领域有着独特的作用。稀土金属的元素半径较大，当其掺杂进 NiFe-LDH 中时，会直接掺杂到 NiFe 基化合物的主体晶格中，改变 LDH 层的组成以及配体结构，进而诱导晶格畸变、形成氧空位，优化吸附自由能，有效促进吸附中间体的反应，使过电位降低。^[3]如 Xu 等人通过原位自组装策略成功制备了掺杂铈（Ce）的

NiFe-LDH/碳纳米管（CNT）复合材料（NiFeCe-LDH/CNT），使其过电位低至 227 mV。即使该类材料的性能较为优异但依然存在部分问题：1）稀土金属在碱性 OER 反应中机制不明，无法帮助我们有效拓展催化剂设计的思路；2）该类材料制备方法复杂。碳纳米管需经酸氧化修饰、金属共沉积，再进行 24h 老化，最后真空干燥；3）且催化剂中含有碳元素，易在较高的电压或电流下被氧化。^[4]不利于在工业大电流密度下应用。

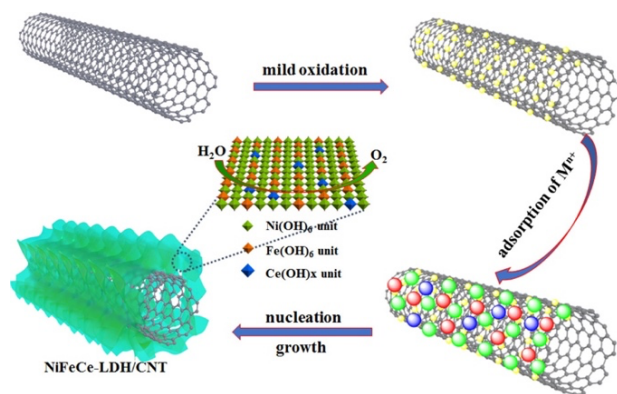


图 2:Ce 元素掺杂进入 NiFe-LDH 的主体晶格中

电化学沉积法可以在室温下通过施加恒定的电压或电流直接在导电基底上制备大面积的电极材料^[5]，这样简便的方法得到了很多工作的应用来制备 NiFe 基催化剂。^[6-8]稀土金属因其大的原子半径，能够有效掺杂到 NiFe 基化合物的主体晶格中，引起晶格畸变，且在原理上能够通过电沉积的形式实现稀土金属掺杂。^[9]

另外，我国是**稀土金属大国**，拥有着极为丰富且种类齐全的稀土金属资源。这些宝贵的资源是我国在全球能源与新材料领域占据重要地位的战略基石。利用好稀土金属元素能够极大地促进国内相关产业的创新发展，提升国家经济实力和国际竞争力，更为实现氢能经济的大规模应用提供了前所未有的可能性。

为此，我们希望通过电沉积的形式，实现**稀土金属与 NiFe 共沉积**得到高效催化剂，并通过一系列原位表征阐明稀土金属元素的作用机制，最后通过将设计好的催化剂应用到类工业电解槽中以实现**高效稳定产氢**。

参考文献

- [1] 国家能源局. 中华人民共和国能源法. https://www.nea.gov.cn/2024-11/09/c_1310787187.htm
- [2] Y. Shi, L. Song, Y. Liu, T. Wang, C. Li, J. Lai, L. Wang. Adv. Energy Mater. 2024, 14, 2402046.
- [3] Z. L. Chen, H. Y. Yang, Z. H. Kang, M. Driess, & P. W. Menezes. Adv. Mater. 2022, 34, 2108432.
- [4] H. J. Xu, B. K. Wang, C. F. Shan, P. X. Xi, W. S. Liu, & Y. Tang. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018, 10, 1234-1247.
- [5] M. Bernal Lopez and J. Ustarroz, Curr. Opin. Electrochem. 2021, 27, 100688.
- [6] H. Wang, L. Chen, L. Tan, X. Liu, Y. Wen, W. Hou and T. Zhan. J. Colloid Interface Sci. 2022, 613, 349-358.
- [7] Z. Liang, P. Zhou, Z. Wang, P. Wang, Y. Liu, X. Qin, X. Zhang, Y. Dai, Z. Zheng and B. Huang. Int. J. Hydrogen Energy 2020, 45, 8659-8666.
- [8] R. Xu, X. Wang, Z. Yang, Y. Chang, X. Chen, J. Wang and H. Li. ACS Appl. Energy Mater. 2024, 7, 3866-3875.
- [9] H. T. Hou, R. T. Yang, J. X. Xu, X. D. He, H. Y. Yang, P. W. Menezes, Z. L. Chen. Nanoscale 2024, 16, 15629-15639.

（二）研究内容

本研究基于稀土金属在电催化中表现出的功能性质，通过电沉积法将稀土金属 M 掺杂到 NiFe-LDH 上，旨在设计一款催化活性高、稳定性强、制备方法简便、成本较低、能大规模应用到工业上的 NiFe 基一体式电极。

本研究的主要内容如下：

聚焦于科研领域：

（1）**新型电极设计开发：**采用电化学沉积的方法成功将稀土金属 M ($M=\text{La Ce Er}$ 等) 原位掺杂到 NiFe-LDH 碱性 OER 催化剂中，得到 NiFe M -LDH。

（2）**性能测试：**采用课题组配备的 Ec-lab 测试催化剂的性能，找到最合适的催化剂反应条件，并研究催化剂的表面活性位点 (Cd1)，电化学阻抗 (EIS)，动力学 (Tafel slope) 等。

（3）**机理研究：**

a. 通过基础材料表征探究稀土金属 M 在预催化剂中存在形式以及对预催化剂结构的变化。

b. 通过原位表征探究在碱性 OER 电化学过程中，NiFe M -LDH 是否发生了结构重组以及掺入的 M 的存在形式。

c. 通过长时间的循环测试探究 M 掺杂的 NiFe-LDH 长时间大电流密度下的稳定性。

d. 采用课题组自主研发的瞬态光电压 (TPV) 设备研究催化剂表面电荷传输机制，并结合各种先进 (原位) 谱学表征技术 (如原位同步辐射、拉曼光源) 与理论计算分析方法，深入表征和分析材料催化行为，阐明稀土提高催化剂活性和稳定性的机理。

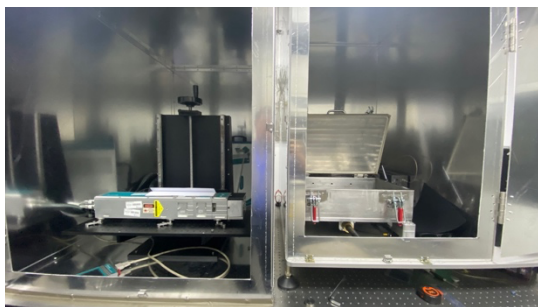


图 3 仪器示意图

左) 课题组瞬态光电谱设备 右) 亥姆霍兹能源柏林研究所的同步辐射大科学装置

（4）**参数反馈、优化。**

聚焦于工业领域：

（1）**创制新型经济的类工业电极：**能够在工业用镍网表面大规模沉积上目标催化剂，并且在实验室获得催化剂性能以及稳定性优异的一体式电极。

（2）**稳定高效产氢的工业器件测试：**将优化后的电极拓展应用到 AEM 器件中，即类工业碱性电解槽器件中，并在更大规模的 AEM 制氢场景下实现长期稳定氢气的生产。

（三）国、内外研究现状和发展动态

国内的研究重点在于通过稀土金属掺杂和晶格耦合来优化催化剂的电子结构和活性位点，提升 OER 性能。并深入研究了稀土金属掺杂对催化剂性能的影响。如 2018 年，Xu 等人将铈掺杂进 NiFe-LDH 中，发现铈的掺杂显著提升了 OER 的性能。同年，徐华杰等人研究了 CeO_x 层对 CoS 的保护作用，发现 CeO_x 层可以显著抑制 CoS 中氧化 Co 物种的溶解和损失，从而提高了 OER 的耐久性。在 2021 年，Yang et al. 实现了 CeO₂ 与 NiO 的晶格耦合，研究发现，CeO₂ 不仅促进了 NiO 向 NiOOH 的相重构，还通过电荷注入优化了氧中间体的吸附自由能，进而提升了催化活性。

国外研究主要关注稀土金属在电催化制氢中的应用，他们在实验设计和理论计算方面较为先进，能够更深入地揭示稀土金属掺杂对催化剂性能的影响机制。1983 年，Tamura 等人研究了 LaNi₅、LaCo₅ 和 MnNi₅ 等金属间化合物在碱性介质中的 HER 活性。发现这些金属间化合物在 HER 中的表现优于单独的金属，验证了稀土金属和过渡金属之间的协同效应。随后，在近几年，2017 年，Obata and Takanabe 比较了 NiFeO_x 和涂有 CeO_x 层的 NiFeO_x 在 OER 行为上的差异，发现 CeO_x 层可以有效抑制 Fe 离子的析出，进而提高催化的活性与稳定性。

但尽管稀土金属凭借其独特的性能，已逐渐成为国内外研究的热点，仍然缺少对于稀土金属在电催化过程中系统全面的机理解释以及稀土金属在碱性 OER 中的存在形式。同时，针对于自支撑型的稀土元素掺杂的催化剂研究较少。最后，大部分催化电极只限制在了实验室中，并未进行工业领域的推广。

（四）创新点与项目特色

（1）稀土掺杂策略的创新性：本研究将通过电化学沉积策略微量掺杂稀土金属以得到一体式电极，通过精确控制制备参数，实现了对 NiFe 基催化剂催化性能的显著提升，简化了材料制备工艺。

（2）机理研究的特色性：项目不仅关注催化剂的性能提升，还深入探讨了稀土金属掺杂后催化剂的作用机理明确其在碱性 OER 中的存在形式，凝练其对碱性 OER 的性能提升机理，为催化剂的进一步优化提供了理论基础。

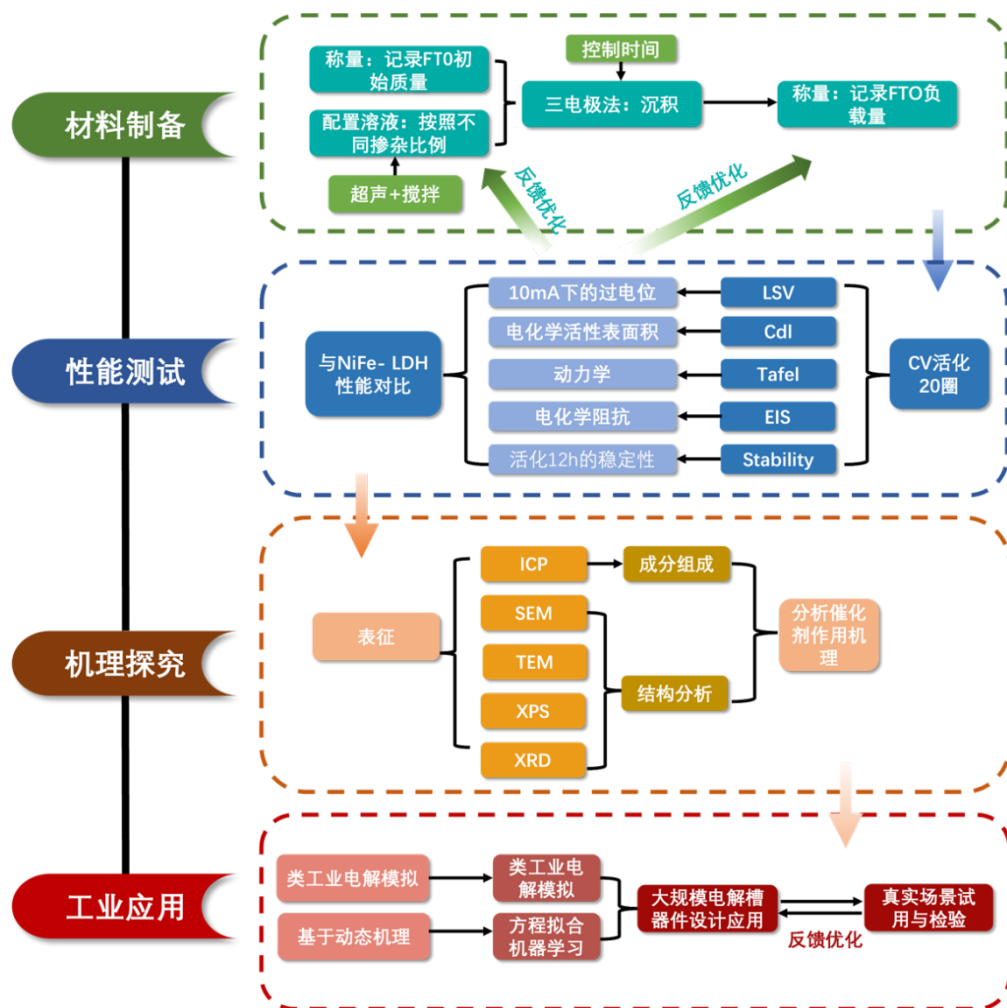
（3）面向工业产氢的现实性：本研究将放大实验室成果，并进一步在类工业条件下验证了催化剂的产氢效果，确保了技术的实用性、前景性和可靠性。

（4）低成本、高产量催化剂的系统性：针对工业应用的需求，项目将设计出价格低廉、产量大的工业型催化剂，有望显著降低工业制氢的成本。

（5）发展视角的可持续性：本研究积极响应全球可持续发展的呼声，符合国家氢能源发展规划，通过开发高效、低成本的催化剂，为推动氢能作为清洁能源的广泛应用做出了贡献并为产氢过程中的重大技术突破提供了新的思路。

（五）技术路线、拟解决的问题及预期成果

1. 技术路线



2. 拟解决的问题

- (1) 解决 NiFe 基催化剂长时间活性较差，稳定性不足的问题。
- (2) 解决实验室性能好的材料难以商业化的问题。
- (3) 解决制氢催化剂成本问题，找到了可替代贵金属的低成本催化剂。
- (4) 揭示稀土在碱性 OER 动态反应中的演变机制未知的问题。

3. 预期成果

- (1) 探究出NiFe-LDH最佳的催化剂负载量及稀土金属掺杂的最佳比例。
- (2) 性能得到提高：过电位：240 mV，大电流密度稳定运行 10 天以上，实现高效产氢。

- (3) 分析出稀土金属在碱性电催化过程中的**存在形式**以及作用以及其**催化机理**。
- (4) 依据上述得出的结论，探索其在类工业AWE电解槽乃至更大规模的AWE制氢场景下的效果。
- (5) 发表 1 至 2 篇与该项目相关的**SCI论文**（二区及以上）。
- (6) 申请一项发明专利。
- (7) 依托项目的研究成果，参加“三大赛”和校级比赛，力争进入省级和国家级比赛。

(六) 项目研究进度安排

时间	实验阶段	实验内容	预计目标
2025.6-2025.9	探寻 NiFeM 的最佳掺杂比以及最佳负载量	运用三电极装置，按照不同的掺杂比配置目标溶液，设置电压为-1.2 V，进行电化学沉积。记录号样品的初始质量和末质量。沉积完后的样品先进行 20 圈 CV 活化，再测试 LSV，记录在电流密度为 10 mA cm^{-2} 下的过电位，通过比较过电位，确定最佳掺杂比例和负载量。	找到性能最好条件下对应的最佳负载量与最佳掺杂比例。
2025.10-2026.1	电化学性能测试	将上一阶段确定的最佳的催化剂进行电化学阻抗谱（EIS）、双层电容（Cdl）、Tafel Slope 以及稳定性的评估。	预计掺杂稀土元素的催化剂的电化学阻抗减少、动力学被提升、稳定性被提升。 进行 Origin 绘图处理数据，比较并初步分析稀土金属对于 NiFe-LDH 催化性能的作用。
2026.2-2026.6	模拟工业环境进行测试，探索其在工业 AEM 电解槽制氢场景下的效果	运用第一阶段的成果，相同方法将催化剂沉积在泡沫镍（NF）上，进行电化学性能测试，比较在电流密度为 100 mA cm^{-2} 下的过电位。并模拟工业环境，在电流密度为 500 mA cm^{-2} 下，进行为期 5 天的稳定性测试。另外，测试其在碱性电解槽中的制氢效果。	将制备的新型催化剂在工业中进行测试，预计此催化剂能够在宽域电流密度下实现稳定高效制氢。
2026.7-2026.12	仪器表征	运用 SEM、TEM、XRD、XPS 等表征技术分析催化剂的作用机理。	学会这些仪器表征的操作；学会处理并分析表征数据。
2027.1-2027.6	实验数据的整理与文章撰写	整理总结实验数据，阅读文献，分析处理实验结果，理解此催化剂的作用机理，完成文章的撰写。	完成并发表一篇高质量的 SCI 学术论文。

（七）已有基础

1. 与本项目有关的研究积累和已取得的成绩

（1）目前已经独立完成了一项与该项目相关的课题，该课题涉及电化学沉积，表征以及相关数据分析等。本人现已具备独立完成实验的能力：掌握稀土金属掺杂 NiFe-LDH 的实验流程、电化学 Ec-lab 以及陈华等仪器的电化学测试，还有一些表征仪器的使用。

（2）参与了 HER 新型催化剂 $\text{Pt}_3\text{Sn}/\text{Co@N-CM}$ 的课题，与师兄师姐合作，协助测试了催化剂的电化学性能，如 LSV、EIS、CdI 等，并参与处理了部分数据，以第二作者身份，在 ACS materials letters 发表了论文一篇。

（3）前期，通过证明我们的猜想有效，我们将尝试了将稀土金属 Y 进行了掺杂，其具有优异的电化学性能和稳定性，证明了我们项目的可行性，目前正在各方面的机理研究。

2. 已具备的条件，尚缺少的条件及解决方法

（1）已具备的条件：

A. 实验资源条件：依托纳米科学技术学院丰富的公告实验平台资源，我们独立开展 SEM、TEM、XPS、XRD 等仪器表征；依托康振辉教授课题组，药品，电化学仪器资源充足。

B. 知识条件：课题组老师在电催化领域有着独到的见解，能够为我们的实验开展提供指导性的建议。另外团队成员有着扎实的物理、化学知识，相关电化学知识充足。

（2）缺少的条件：

缺少关于稀土金属方面的系统研究；对高级的表征方法以及理论技术方面不熟悉

（3）解决方法：

深入了解学习稀土金属在于电催化领域中更多的作用，帮助更好地理解机理。慢慢学习，先从简单的表征手法学起，再进一步学习操作复杂的仪器

三、 经费预算计划 （往届项目资助总额为国家级重点支持 40000 元、国家级 20000 元、省级 6000 元，实际预算制作及可支出类型以后期财务处要求为准，校级项目经费由学院统筹支持。）

开支科目	预算经费（元）	主要用途	阶段下达经费计划（元）	
			前半阶段	后半阶段
预算经费总额	<input type="checkbox"/> 40000 元（国重） <input checked="" type="checkbox"/> 20000 元（国） <input type="checkbox"/> 6000 元（省）	实验支出、学术交流	12500	7500

开支科目	预算经费（元）	主要用途	阶段下达经费计划（元）	
			前半阶段	后半阶段
1. 业务费	17500	实验测试、交流	10500	7000
（1）计算、分析、测试费	9000	理论计算、表征测试	5000	4000
（2）能源动力费	0	无	0	0
（3）会议、差旅费	8500	参加学术会议以及外出调研	5500	3000
（4）文献检索费	0	无	0	0
（5）论文出版费	0	无	0	0
2. 仪器设备购置费	0	无	0	0
3. 实验装置试制费	0	无	0	0
4. 材料费	2500	购买药品与电极等材料	2000	500
学校批准经费	不填			

四、导师推荐意见

	导师（签章）： 年 月 日
--	--

五、院系推荐意见

院系负责人签名：	学院盖章：
年 月	日

六、学校推荐意见

学校负责人签名：	学校盖章：
年 月 日	

苏州大学大学生创新训练计划项目申报

诚信声明

本人保证填报内容的真实性。所提交的用以申请大学生创新训练计划项目的全部材料(包括但不限于学科竞赛获奖、学术论文、科研项目成果、专利创造成果、文学艺术类成果以及创业实践类成果等)均为本人在校期间原创取得,不存在任何侵权、造假等违规行为,项目成员满足《关于做好2025年大学生创新训练计划立项工作的通知》规定的申报条件。

本人保证填报内容的有效性。如果获得立项,我与本项目组成员将严格遵守学校的有关规定,按照申报要求和申报计划,真实完成项目研究,按时报送有关材料。

本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。本人所提交的内容如涉嫌违规违法,本人愿意承担相应后果。

申请人签名: 姚宇峰 王若渊 张颖 谢子文

指导(证明)老师签名: 陈子虎

2025年 4 月 16 日