

基于电催化还原硝酸盐合成氨的综合实验 ——铜基催化剂制备表征、性能探究及应用设计

邹嘉沛¹, 张君阳¹, 伍旭明¹, 魏聪¹, 方思敏^{1,2,*}, 王钰熙^{3,*}

¹ 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026

² 化学国家实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230036

³ 中山大学柔性电子学院, 广东 深圳 518107

摘要: 电催化作为纳米材料和能源化学领域的研究热点, 是未来新能源存储与转化技术的关键所在。在“碳达峰, 碳中和”背景下, 电催化还原硝酸盐合成氨技术被认为是绿色、安全的技术, 为了填补这一前沿科研成果在实验教学中的空白, 我们开发了基于电催化还原硝酸盐合成氨的综合化学实验。本实验具有基础知识-科学研究-实际应用的一体化设计, 包含铜基催化剂制备表征、性能探究及应用设计的层次化内容, 有助于学生了解电催化的研究进展, 掌握电催化的基础知识与研究方法, 培养学生的创新意识与学以致用能力。

关键词: 电催化还原; 铜基催化剂; 合成氨; 科教融合

中图分类号: G64; O6

A Comprehensive Experiment Based on Electrocatalytic Nitrate Reduction into Ammonia: Synthesis, Characterization, Performance Exploration, and Applicable Design of Copper-based Catalysts

Jiawei Zou¹, Junyang Zhang¹, Xuming Wu¹, Cong Wei¹, Simin Fang^{1,2,*}, Yuxi Wang^{3,*}

¹ School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

² National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, China.

³ School of Flexible Electronics, SunYat-sen University, Shenzhen 518107, Guangdong Province, China.

Abstract: Electrocatalysis, as a focal point in the fields of nanomaterials and energy chemistry, holds the key to future energy storage and conversion technologies. Against the backdrop of “carbon peak” and “carbon neutrality”, electrocatalytic nitrate reduction into ammonia is recognized as a green and safe technique. In order to bridge the gap between cutting-edge research and experimental teaching, we have developed a comprehensive chemical experiment centered on electrocatalytic nitrate reduction into ammonia. With an integrated design of basic knowledge, scientific studies and practical applications, this experiment contains hierarchical contents of copper-based catalysts, including its synthesis and characterization, performance exploration and applicable design. This experiment is designed to help undergraduate students gain insights into the latest advancements in electrocatalysis, master its fundamental knowledge and research methods, and foster their innovation awareness and practical application abilities.

Key Words: Electrocatalytic reduction; Copper-based catalyst; Synthetic ammonia; Science and education integration

收稿: 2023-12-24; 录用: 2024-02-04; 网络发表: 2024-05-09

*通讯作者, Emails: fsm66@ustc.edu.cn (方思敏); wangyx558@mail.sysu.edu.cn (王钰熙)

基金资助: 安徽省高等教育重大决策部署研究项目(2022jcb066); 2023中国科学技术大学本科教学研究项目(2023xjyxm041)

电化学是本科化学教学内容的重要组成部分，是无机化学、分析化学和物理化学课程中理论与应用紧密结合的核心板块之一^[1]。电催化作为电化学的重要分支，因其具有条件温和、产物可控的优势，在能源转化、环境保护等领域具有潜在的应用价值。因此，电催化已成为国内外研究的前沿和热点领域，在电催化还原硝酸盐^[2,3]、二氧化碳电催化还原^[4]、电催化制氢技术^[5]等方面都取得了卓越的成果。

目前国内高校在实验教学中与前沿研究相关的电催化实验项目的开展还相对有限，需要设计相关的综合实验去帮助学生将电化学的基本知识(如能斯特方程、超电势)应用到实际电化学反应体系中，同时掌握电催化重要参数(效率、选择性、活性)的测试分析方法。经过文献调研，我们筛选出适合于本科教学实验的催化剂及反应体系，满足本科教学实验对安全、时长、成本的要求，并对实验条件进行了探索，成功将利用铜基催化剂电催化还原硝酸盐合成氨实验引入到本科实验教学中。

该综合实验涉及铜基催化剂制备表征、性能探究及应用设计，以期学生理解巩固电化学基础知识，掌握铜基催化剂的制备方法，学习电催化领域的主要研究方法，并应用电催化技术制备氨产品。该实验较好地将基础知识学习、科学前沿探索、实际应用模拟相结合，有助于学生将电化学基础知识融会贯通并加以应用，培养学生的研究能力和创新意识。

1 实验部分

1.1 实验原理

1.1.1 铜基催化剂制备

铜基催化剂被认为是最有潜力的电催化还原硝酸盐催化剂之一，在本实验中制备了铜纳米线(CuNW)和钌掺杂铜纳米线(Ru-CuNW)催化剂。图1展示了CuNW的制备过程。

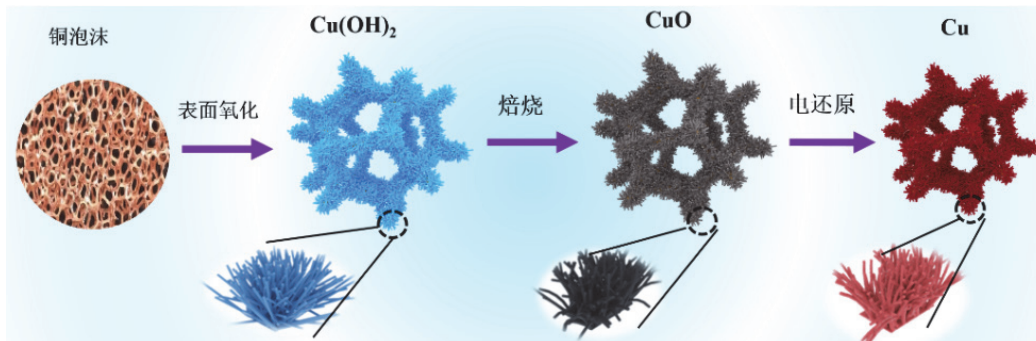
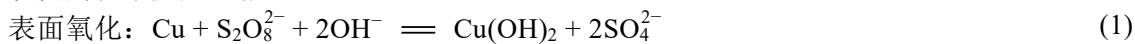


图1 CuNW制备过程示意图

涉及的化学反应包括：



1.1.2 电催化还原硝酸盐

电催化还原硝酸盐在H型电解池进行，采用三电极体系，工作电极为制备的催化剂材料，Pt电极作为辅助电极，Ag/AgCl电极作为参比电极(图2)。

阴极主要涉及的反应为：



阳极主要涉及的反应为：



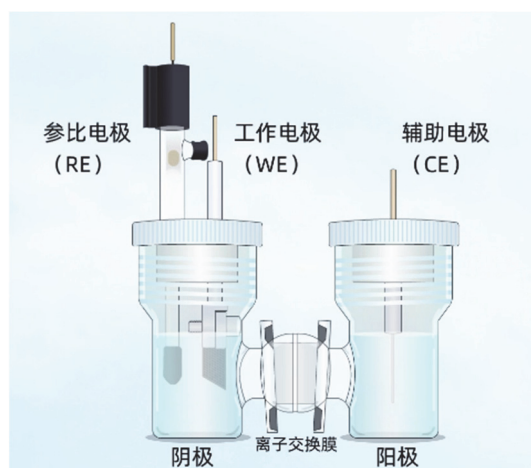


图2 H型电解池及三电极体系示意图

总反应为:



查询热力学数据表^[6], 总反应在标准状况下的吉布斯自由能的变化值为:

$$\begin{aligned} \Delta_r G_m^\ominus &= \Delta_f G_m^\ominus(\text{生成物}) - \Delta_f G_m^\ominus(\text{反应物}) \\ &= -16.45 + 0 - 157.244 - (-108.74) - (-237.129 \times 2) \\ &= 409.3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

总反应的标准平衡常数为:

$$K^\ominus = \exp(-\Delta_r G_m^\ominus/RT) = 1.8 \times 10^{-72} \quad (8)$$

据此可以判断, 反应很难自发进行。在电催化体系中通过施加电压促进反应发生。

1.2 试剂材料与仪器设备信息

实验所用试剂材料与仪器设备信息见表1与表2。

1.3 实验过程

1.3.1 教学设计

本实验包含铜基催化剂制备表征、性能探究及应用设计(图3), 内容丰富且具有层次性。不同高校可以根据培养需求与教学条件灵活选择实验内容, 将学生合理分组开展教学。

表1 实验试剂材料及用气信息

实验试剂	纯度	试剂来源	实验试剂	纯度	试剂来源
次氯酸钠溶液	分析纯	上海阿拉丁	氧化钙	分析纯	上海国药
乙醇(无水乙醇)	分析纯	上海国药	氯化铵	分析纯	上海国药
氢氧化钠	分析纯	上海国药	亚硝基亚铁氰化钠, 二水	分析纯	上海国药
氢氧化钾	分析纯	上海国药	柠檬酸三钠	分析纯	上海国药
水杨酸	分析纯	上海国药	H型电解池	-	天津日科实验器材销售中心
磺胺	分析纯	上海国药	Pt片电极夹	-	天津日科实验器材销售中心
氨基磺酸	分析纯	上海阿拉丁	Ag/AgCl电极	-	天津日科实验器材销售中心
N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐	分析纯	上海国药	泡沫铜	-	苏州科盛和金属材料
过二硫酸铵	分析纯	上海国药	Pt片电极	-	苏州科盛和金属材料
硝酸钾	分析纯	上海国药	氮气	高纯氮	南京特种气体厂股份有限公司
亚硝酸钾	分析纯	上海国药			

表2 实验仪器

名称	型号	制造商	测试方法
热分析仪	SetlineSTA	法国里昂塞塔拉姆公司	氢氧化铜纳米线热分析
马弗炉	BFC-1200-7.2L	合肥科睿仪器有限公司	氢氧化铜纳米线焙烧
电化学工作站	CH1760E A23420	上海辰华仪器有限公司公司	电化学测试
双光束紫外可见分光光度计	TU-1901	北京普析通用仪器有限公司	产物浓度检测
直流稳压电源	UTP3313TFL	苏州德计仪器仪表有限公司	氨产物提取
加热搅拌器	RCT basic S025	IKA	反应搅拌



图3 层次化与一体化实验教学设计开展

实验课前学生以小组为单位调研文献了解铜纳米线的制备方法, 结合所学知识以及教师提供的关键文献, 自主设计电催化还原硝酸盐影响因素探究以及模拟实际应用制备收集氨产品的实验方案。

第一节课, 教师组织学生首先对自主设计的实验方案进行修改讨论, 然后再完成铜基催化剂的制备。课后由教师进行扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射光谱(XRD)、电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)对铜基催化剂的表征, 供学生第二节课直接分析表征结果。第二节课学生主要进行电催化还原硝酸盐影响因素的探究, 不同小组选择不同的影响因素, 全班共享实验结果。第三节课学生完成氨产品的制备、收集与分析, 模拟实际应用, 从而提高学以致用能力。

1.3.2 铜基催化剂制备

CuNW制备包括基底预处理、表面氧化、焙烧和电还原四个步骤。Ru-CuNW制备则需在完成基底预处理、表面氧化步骤后, 将氢氧化铜纳米线浸泡在 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸钌溶液中, 静置10 h完成离子交换, 洗至洗液无色, 烘干后即得到Ru掺杂Cu纳米线(Ru-CuNW)催化剂。Ru-CuNW的制备及Ru含量测定由教师完成。

1.3.2.1 基底预处理

取泡沫铜($2.0 \text{ cm} \times 3.0 \text{ cm}$)于50 mL离心管中, 加入适量体积比1:1盐酸将其浸没, 超声5 min之后, 依次使用20 mL无水乙醇和20 mL去离子水各洗涤两次, 每次超声1 min辅助清洗。

1.3.2.2 表面氧化

取洗净的泡沫铜与50 mL氢氧化钠($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和过二硫酸铵($0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的混合溶液于冰水浴中反应45 min, 该过程发生表面氧化反应。然后依次使用去离子水清洗5次, 无水乙醇清洗2次。将洗净后的样品置于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥30 min, 完成氢氧化铜纳米线的制备。

1.3.2.3 焙烧

将氢氧化铜纳米线(约35 mg)和氧化铝(约35 mg)放置于热分析仪中, 设置温度范围为 $25\text{--}240 \text{ }^\circ\text{C}$, 升温速率为 $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 开始热分析测试。根据测试结果确定最佳焙烧温度。将氢氧化铜纳米线放入

马弗炉中，按照热分析结果设置升温程序。

1.3.2.4 电还原

采用三电极体系，取氧化铜纳米线(1.0 cm × 0.5 cm)作为工作电极。在H-型双池电解池中各加入30 mL氢氧化钾溶液(1 mol·L⁻¹)作为电解液。采用计时电流法，设置电位为-1.45 V，电解时间为300 s。随着电解时间的增加，氧化铜纳米线不断被还原为CuNW。采用线性扫描伏安法，设置初始电位为-0.6 V，结束电位为-2.0 V，扫描速率为0.01 V·s⁻¹，进行重复扫描，直至与上一次结果重合。

1.3.3 电催化还原硝酸盐影响因素探究

在三电极体系中，联合计时电流法、线性扫描伏安法和分光光度法，对制备的电极材料进行催化性能的影响因素探究，包括电解电位、电解时间和电极材料。

1.3.3.1 影响因素-电解电位

阴极电解液为30 mL的5.67 mmol·L⁻¹硝酸钾溶液，采用线性扫描伏安法，将得到的含硝酸钾溶液的氢氧化钾溶液(1 mol·L⁻¹)与不含硝酸钾的氢氧化钾溶液的测试曲线做对比，获得合适的电解电位范围。利用能斯特方程计算理论反应电位，与实验结果相互验证。采用计时电流法，在此电位范围内，设置不同的电解电位与相同的电解时间。每次电解结束后，取阴极池中的反应液，利用分光光度法测定其中的氨含量。

1.3.3.2 影响因素-电解时间

采用计时电流法，在最佳电解电位下，设置不同的运行时间。每次电解结束后从阴极池中取样，利用分光光度法测定目标物质的含量。

1.3.3.3 影响因素-电极材料

取Ru-CuNW (1.0 cm × 0.5 cm)作为工作电极，测试方法同1.3.3.1小节，与CuNW作为工作电极的结果进行对比。

1.3.4 开放性设计收集氨产品

凭借CuNW良好的电催化性能，自主设计制氨装置模拟实际应用，将电催化技术与气提法相结合获得氨产品。为了在教学时间内获得氨产品，本实验采用CuNW (1.5 cm × 1.5 cm)作为工作电极，电解电流为1.0 A，电解液为硝酸钾溶液(1 mol·L⁻¹)。

1.3.5 数据处理

硝酸根转化率计算式如下：

$$\alpha_{\text{NO}_3} = \frac{C_0 - C_{\text{NO}_3}}{C_0} \quad (9)$$

氨选择性计算公式如下：

$$S_{\text{NH}_3} = \frac{C_{\text{NH}_3}}{C_0 - C_{\text{NO}_3}} \quad (10)$$

亚硝酸根选择性计算公式如下：

$$S_{\text{NO}_2} = \frac{C_{\text{NO}_2}}{C_0 - C_{\text{NO}_3}} \quad (11)$$

法拉第效率(FE)计算式如下：

$$FE = \frac{nFVC_{\text{NH}_3}}{Q} \quad (12)$$

归一化面积电流密度(normalized current density)计算公式如下：

$$J = \frac{Q}{tA} \quad (13)$$

将测试电位校准转化为可逆氢电极(RHE)标度，转化公式如下：

$$E(\text{vs. RHE}) = E(\text{vs. Ag/AgCl}) + 0.197 + 0.059\text{pH}^{[7]} \quad (14)$$

其中, α_{NO_3} 为硝酸根转化率, S_{NH_3} 为氨选择性, S_{NO_2} 为亚硝酸根选择性, C_0 为初始反应液中硝酸根的浓度, C_{NH_3} 为电解反应后反应液中氨的浓度, C_{NO_3} 为电解反应后反应液中硝酸根的浓度, C_{NO_2} 为电解反应后反应液中亚硝酸根的浓度, 三类物质浓度由分光光度法进行检测得到. n 为反应中电子转移数(电催化还原硝酸盐合成氨反应中 n 为 8), V 为电解池中电解液体积(本实验为 30 mL), F (Faraday 常数) = $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$, Q 为测试过程中所消耗的总电量, 由电化学工作站直接给出. J 为归一化面积电流密度, t 为电解时间, A 为极板面积, $E(\text{vs. RHE})$ 为可逆氢电极(RHE)标度的电解电位, $E(\text{vs. Ag/AgCl})$ 为测试电位, 由电化学工作站直接给出.

2 结果与讨论

2.1 铜基催化剂制备与表征

2.1.1 焙烧温度探究结果

铜基催化剂制备需要经过基底预处理、表面氧化、焙烧和电还原四大步骤. 在焙烧步骤前, 学生须探究合适的焙烧温度, 将物理化学的热分析知识灵活应用于无机材料的制备. 氢氧化铜纳米线受热分解失水, 是个失重过程, 由热重曲线(TG)和微分热重曲线(DTG)可以给出氢氧化铜纳米线发生分解反应的温度区间为 149–182 °C (图 4a). 同时该反应是一个吸热反应, 在差热曲线(DTA)上反映为向下的吸热峰, 通过 DTA 和 DTG 对比可以进一步确认氢氧化铜纳米线完全分解为氧化铜纳米线的温度为 182 °C (图 4b). 根据热分析结果, 设置马弗炉匀速升温至 185 °C 并恒定 1 h, 获得氧化铜纳米线.

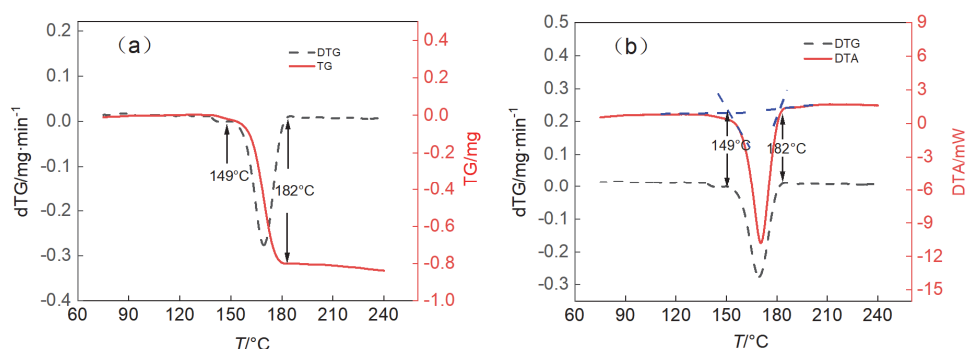


图4 氢氧化铜纳米线升温过程TG和DTG曲线(a)及DTA和DTG曲线(b)对比

2.1.2 表征结果

利用扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD)表征CuNW的形貌和组成. 图 5a 可以看出 CuNW 为线状形貌, 图 5b 的 X 射线衍射图从左到右的衍射峰分别对应铜单质的 (111)、(200) 和 (220) 面, 确认电还原后得到的是 CuNW.

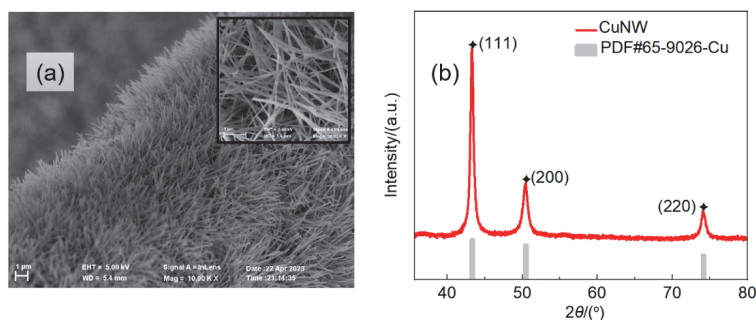


图5 CuNW的扫描电镜(SEM)图像(a)和X射线衍射(XRD)谱图(b)

2.2 电催化还原硝酸盐影响因素探究结果

通过探究电解电位、电解时间和电极材料对法拉第效率、选择性和活性的影响，评判电极材料的催化性能。法拉第效率是指在电化学反应中实际产生的电量与理想情况下所需的电量之比，法拉第效率越高表明反应的效率越高。电极的活性通常是指电极在电解过程中参与化学反应的能力，在电解过程中，电极材料的活性决定了电极的氧化还原反应速率，本文通过计算归一化面积电流密度来表征电极材料的活性。催化选择性是指所消耗的原料转化为目标产物的比例，表明主副反应进行程度的相对大小。

2.2.1 影响因素——电解电位

由于硝酸盐还原的反应需要外加电压才能顺利进行，具体施加的电位数值由学生通过计算结合实验验证得到。

$$\begin{aligned}\varphi_{(\text{NO}_3|\text{NH}_3)} &= \varphi_{(\text{NO}_3|\text{NH}_3)}^\ominus + \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_0}{C_{\text{NH}_3}} \\ &= 0.69 \text{ V} + \frac{8.314 \times 298.15}{8 \times 96485} \ln \left(\frac{5.67 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-4}} \right) = 0.70 \text{ V (vs. RHE)}\end{aligned}\quad (15)$$

其中 $\varphi_{(\text{NO}_3|\text{NH}_3)}^\ominus = 0.69 \text{ V vs. RHE (pH = 14)}$, $C_0 = 5.67 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, C_{NH_3} 根据实验结果近似取 $1 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

学生首先通过能斯特方程得到理论反应电位为 0.70 V (vs. RHE) ，说明至少需要外加 0.70 V 的电位才能推动反应的正向进行，在此理论数值指导下设置电解电位范围进行测试。将含 $5.67 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸钾溶液的氢氧化钾溶液 ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) (图6a虚线)与不含硝酸钾的氢氧化钾溶液的测试曲线(图6a实线)做对比，按照公式(14)将测试电位转化为可逆氢电极(RHE)电位，可观察到电解电位在 0.16 V 到 $-0.58 \text{ V (vs. RHE)}$ (对应图中阴影区间)范围时，相同电位下的电流产生较为明显的差异，说明电位低于 0.16 V 时，发生电解产氨反应，而电位低于 -0.58 V 时，开始明显受到副反应影响。

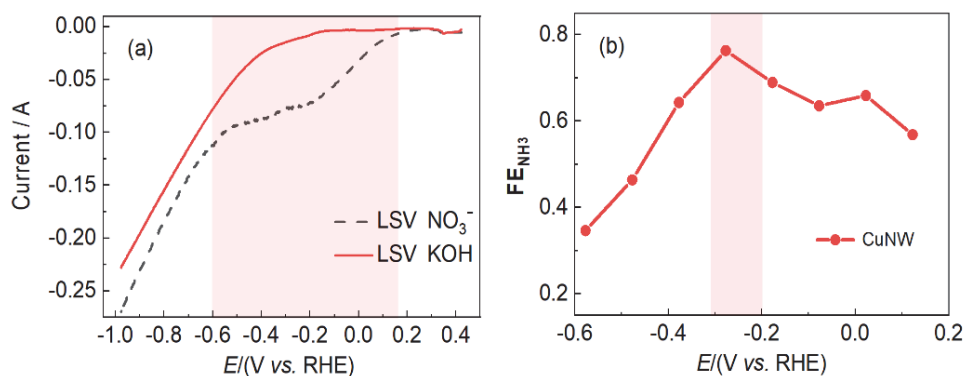


图6 CuNW在含 NO_3^- 和不含 NO_3^- 的KOH溶液中的线性扫描伏安(LSV)曲线对比(a)及CuNW在各电位下电解制氨的FE (b)

计算得到的理论电解电位是 0.70 V (vs. RHE) ，而实验结果显示是 0.16 V (vs. RHE) 开始发生电解产氨反应，这之间的差异便是由于超电势的存在，在实际电解时要使物质在阴极上发生还原，外加于阴极的电势必须比理论反应电位更负^[6]。学生通过计算指导实验，通过实验验证理论，并且从差异性中更加深入理解与体会超电势的存在对电解反应的影响。

我们选择 $0.16 - -0.58 \text{ V (vs. RHE)}$ 电解电位范围，以 0.1 V 为间隔设置电解电位，每次电解时间为 10 min 进行电解电位变量测试。测试结果表明氨的拉法第效率与电解电位密切相关，如图6b所示。随着电解电位的增大，CuNW的氨法拉第效率呈现出先增大再减小的趋势，在约 $-0.28 \text{ V (vs. RHE)}$ 时达到最大法拉第效率 0.76 ，该电位即CuNW的最佳电解电位。

2.2.2 影响因素——电解时间

在CuNW最佳电解电位下，依次设置电解时间为10、15、20、25、30、40、50 min，得到氨法拉第效率、硝酸根转化率、氨和亚硝酸根选择性随电解时间的变化结果。图7a显示CuNW在20 min前保持较高的氨法拉第效率，20 min后有所下降。主要由于溶液中 NO_3^- 的浓度不断降低，促进析氢副反应发生。图7b表明，硝酸根在电解20 min时转化率即超过55%，氨选择性在前20 min有比较快的增长，达到60%以上，而生成的亚硝酸根一直很少。理论计算结果表明，CuNW催化硝酸根还原生成氨经历的能量壁垒远低于生成其他产物(NO_2^- 、 NO 、 N_2)，从而导致CuNW具有较好的氨选择性^[2]。

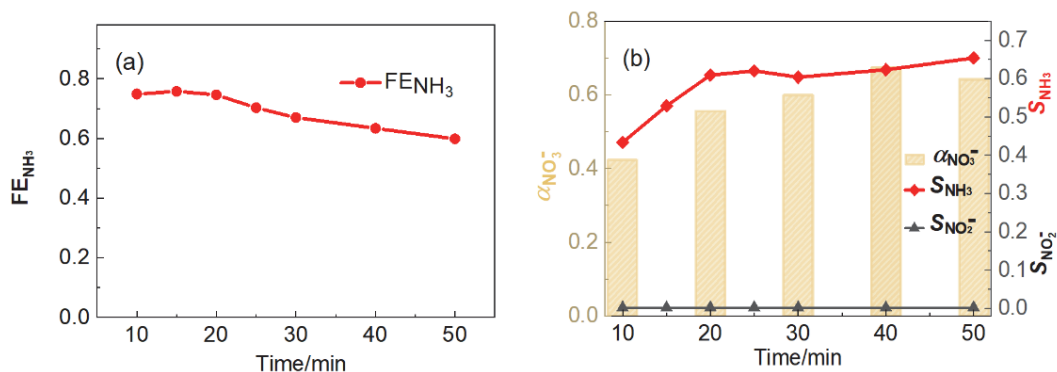


图7 CuNW在不同电解时间下氨的FE(a)与硝酸根转化率、亚硝酸根和氨选择性(b)

综上所述，CuNW具有较高的氨法拉第效率和选择性，对较低浓度 $5.67 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸盐溶液电解20 min时即达到良好的转化率。虽然在10 min时选择性和硝酸根离子的转化率并没有达到峰值，考虑到实践教学时间上的需要，而且此时已经具有了比较好的选择性，教学过程中采用电解时间为10 min也是可行的。

2.2.3 影响因素——电极材料

虽然制备的铜基催化剂有较好的法拉第效率与选择性，但是超电势仍然较大。为了解决此问题，学生通过调研文献，尝试掺钉改变电极材料。在相同测试条件下，工作电极选用CuNW与Ru-CuNW的催化性能进行对比。由图8a可知，和CuNW相比，Ru-CuNW的最佳电解电位低0.3 V，更加接近理论反应电位，超电势更小。此外，在各自的最佳电解电位下，CuNW与Ru-CuNW的氨法拉第效率相差约20%。图8b表明在相同的电解电位下，Ru-CuNW的归一化电流密度始终比CuNW要高；在各自最佳电解电位下，Ru-CuNW的归一化电流密度比CuNW高 $10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，说明Ru-CuNW的催化性能好于CuNW。理论计算结果^[2]给出了解释，与Ru-CuNW相比，CuNW吸附硝酸根所需的活化能要高0.34 eV，一定程度上限制了它的催化性能。

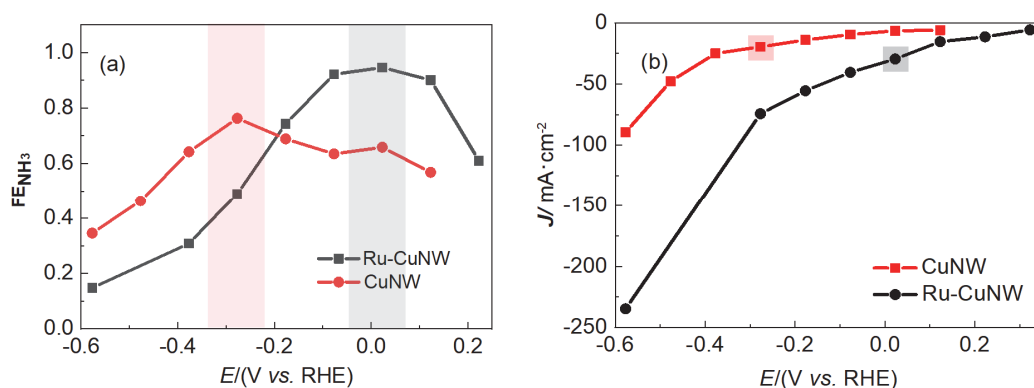


图8 CuNW与Ru-CuNW在各电位下电解产氨的FE (a)与活性(b)

2.3 开放性设计收集氨产品

电催化还原硝酸盐影响因素的探究结果表明CuNW具有良好的电催化性能，故尝试利用CuNW进行实际应用模拟。鼓励学生进行开放性设计，在教学时间内完成从CuNW的制备到实用氨产品收集的完整过程，从而帮助学生理论结合实际，提高学以致用能力。

如图9所示为学生设计的收集氨产品的装置，电解10 min后，开始向阴极池内通入氮气。在碱性环境中充分鼓泡可以将氨有效吹脱^[2,8]。释放的氨一部分伴随水蒸气，溶解到冷凝水中得到氨水，利用分光光度法检测氨水浓度约为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。另一部分与盐酸反应生成氯化铵，图10为制得氯化铵产品的XRD分析结果。

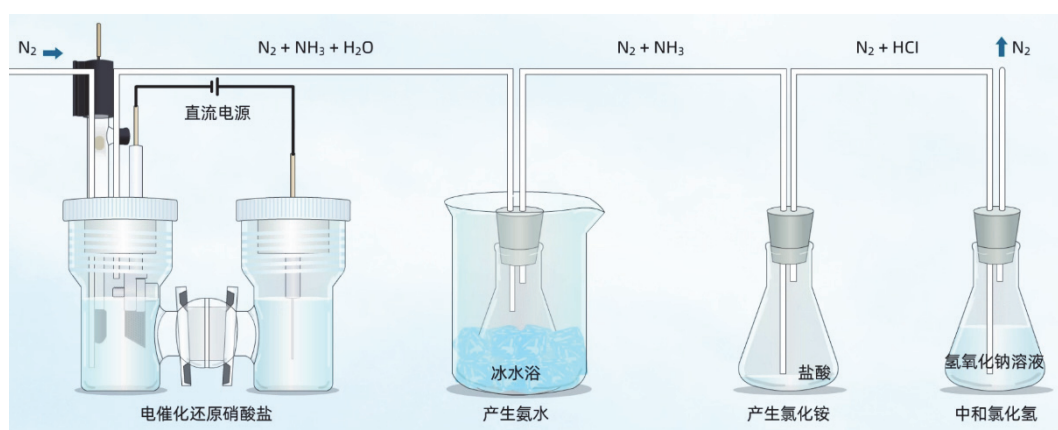


图9 收集电催化还原硝酸盐生成的 $\text{NH}_4\text{Cl}(\text{s})$ 和 $\text{NH}_3(\text{aq})$ 装置示意图

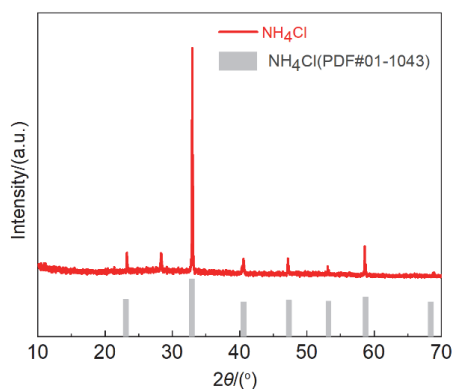


图10 合成的 $\text{NH}_4\text{Cl}(\text{s})$ 产物XRD分析结果

3 结语

本实验将前沿的电催化还原硝酸盐技术引入本科教学，包含铜基催化剂制备表征、性能探究及应用设计，具有验证-探究-设计的层次性与综合性。本实验将无机化学、物理化学等学科基础知识以及实际应用相融合，具有基础知识-科学研究-实际应用的一体化设计，使学生充分感受理论对于实验的指导意义以及实验对于理论的验证作用。本实验所用试剂与仪器安全性高，普适性强，催化剂性能稳定，成本适中，易于教学推广。

参 考 文 献

[1] 杨甫林, 李家欣, 冯立纲. 大学化学, 2023, 38 (9), 242.

- [2] Chen, F. Y.; Wu, Z. Y.; Gupta, S.; Rivera, D. J.; Lamberts, S. V.; Pecaut, S.; Kim, J. Y. T.; Zhu, P.; Finprock, Y. Z.; Meira, S. M.; *et al.* *Nat. Nanotechnol.* **2022**, *17*, 759.
- [3] Wang, Y. T.; Zhou, W.; Jia, R. R.; Yu, Y. F.; Zhang, B. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 5350.
- [4] Dey, S.; Masero, F.; Brack, E.; Fontecave, M.; Mougél, V. *Nature* **2022**, *607*, 499.
- [5] Li, Y.; Wei, X. F.; Han, S. H.; Chen, L. S.; Shi, J. L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 21464.
- [6] 傅献彩, 沈文祥, 姚天扬, 候文华. 物理化学(上册). 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 483–497.
- [7] Wang, P.; Nong, W.; Li, Y.; Cui, H.; Wang, C. X. *Appl. Catal. B Environ.* **2021**, *288*, 119999.
- [8] Wang, L. K.; Hung, Y.-T.; Shamma, N. K. *Advanced Physicochemical Treatment Processes*; Humana Press: Totowa, NJ, USA, 2006; pp. 47–79.