

Ag掺杂CuO和电解液中碘离子双调控促进电催化CO₂还原 ——推荐一个综合化学实验

周夕婷, 韩志鹏, 张欣蕾, 朱诗萱, 车铖, 徐亮*, 孙振宇*, 郝磊端, 杨志宇
北京化工大学化学工程学院, 北京 100029

摘要: 本实验针对电催化CO₂还原反应, 设计了一个利用催化剂和电解液双调控策略促进生成多碳(C₂₊)化合物的实验。该实验设计合成了Ag掺杂CuO(Ag-CuO)作为催化剂, 对不同卤素阴离子引入的KHCO₃阴极电解液进行筛选, 在H型电解池中利用三电极测试系统进行性能分析。通过考察施加电位、催化剂第二组分(Ag)掺杂、卤素电解液种类和浓度对催化反应性能的影响, 筛选出最佳反应体系。本实验内容包含无机化学、物理化学、分析化学等多学科知识和实验操作, 在加强学生对化学基础知识理解的同时, 培养学生化学类专业核心素养、科学思维以及科研创新能力, 提升学生能动性, 符合新时代学科发展要求。

关键词: 铜基催化剂; 卤素电解液; 电催化; CO₂; 多碳产物

中图分类号: G64; O6

Dual Modulation via Ag-Doped CuO Catalyst and Iodide-Containing Electrolyte for Enhanced Electrocatalytic CO₂ Reduction to Multi-Carbon Products: A Comprehensive Chemistry Experiment

Xiting Zhou, Zhipeng Han, Xinlei Zhang, Shixuan Zhu, Cheng Che, Liang Xu*, Zhenyu Sun*,
Leiduan Hao, Zhiyu Yang

College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China.

Abstract: This study presents a dual-regulation strategy combining catalyst modification and electrolyte engineering to promote CO₂ electroreduction toward multi-carbon (C₂₊) products. We synthesized Ag-doped CuO (Ag-CuO) catalysts and systematically evaluated their performance in KHCO₃ electrolytes containing various halide anions using a three-electrode H-cell configuration. The experimental design investigates the synergistic effects of applied potential, Ag doping concentration, and halide species/concentration on catalytic performance. This interdisciplinary experiment integrates fundamental concepts and techniques from inorganic, physical, and analytical chemistry. Beyond reinforcing core chemical principles, it cultivates essential competencies including scientific reasoning, research innovation, and self-directed learning—attributes crucial for chemistry education in the contemporary research landscape.

Key Words: Copper-based catalyst; Halide electrolyte; Electrocatalysis; Carbon dioxide;
Multi-carbon products

收稿: 2024-12-11; 录用: 2025-02-17; 网络发表: 2025-05-23

*通讯作者, Emails: xl@buct.edu.cn (徐亮); sunzy@mail.buct.edu.cn (孙振宇)

基金资助: 北京化工大学2024年研究生教育教学改革项目(G-PT-202405); 北京化工大学化学工程学院课程建设项目(HG-ZDJS-202408); 北京化工大学2024年本科研究性教学示范课程项目; 北京化工大学2024年本科全英文课程建设项目; 国家自然科学基金(22302006); 国家资助博士后研究人员计划(GZB20230049); 中央高校基本业务费(BH202402)

1 引言

提升当代大学生的创新和综合能力是高校人才培养中尤其重要的一环,针对化学类专业,设置综合实验是践行这一目标的有效途径。大学化学综合实验开设在基础化学(包括无机化学、分析化学、有机化学和物理化学)实验之后,涉及知识面广泛,且能充分考验学生分析问题、解决问题的能力,以提升学生的科学素养。但当前一些综合化学实验存在技术较为老旧、仪器较为单一等问题,限制了学生接触领域前沿的机会。基于此,通过科教融合的方式,将前沿的科研方向和科研成果转化为综合化学实验是解决这一问题的有效方法。因此,我们基于课题组的研究方向设计了“Ag掺杂CuO和电解液中碘离子双调控促进电催化CO₂还原”这一综合实验。

在全球经济高速发展的今天,煤炭、天然气等不可再生化石燃料仍是人类获取能源的主要来源,由此产生的CO₂,常被认为是导致温室效应等环境问题的主要原因之一。同时,CO₂自身是一种丰富的碳资源,将其转化为高附加值化学品和燃料,对于减轻对化石能源的依赖、实现双碳目标具有重要研究意义。在CO₂转化的技术中,电催化CO₂还原技术是一种可以利用太阳能、风能等可再生能源提供的电力驱动,且直接以水为氢源将CO₂转化为高附加值化学品的有效途径,具有反应条件温和、装置结构相对简单、可调控性强等优点。电催化CO₂还原可以将CO₂分子转化为一氧化碳(CO)、甲酸(HCOOH)等C₁产物和乙烯(C₂H₄)、乙醇(CH₃CH₂OH)等多碳(C₂₊)产物^[1]。其中C₂₊产物由于具有更高的能量效率和使用价值,更具研究意义。

铜(Cu)基催化剂是最常用也是最有效的能够将CO₂还原为C₂₊产物的催化剂,但存在选择性低、稳定性差等缺点,因此需要对催化剂进行改性以优化其催化效果^[2]。同时,通过合理设计电解液的组分和配比,也能有效调控电催化CO₂还原的产物选择性,促进多碳产物的生成^[2]。

基于此,针对大学生创新实验开发,本实验设计了一种Ag掺杂CuO催化剂(Ag-CuO),同时利用卤素对阴极电解液进行调控,在三电极体系中进行电化学性能测试,探究催化剂和阴极电解液对电催化CO₂还原产物选择性的影响。本实验内容丰富且具有前瞻性,实验所涉及的理论和操作与实际紧密结合,能够有效培养本科生的思考与动手能力。一方面本实验可以作为本科生教学实验,让学生了解电催化CO₂还原反应的基本原理和电化学工作站的使用方法,另一方面可以引导学生关心国家能源低碳发展战略,同时为未来将可再生电能转化为化学能提供一种可行的路径。

2 实验部分

2.1 实验目的

(1) 以实验内容为载体,引导学生独立查阅文献资料,了解电催化CO₂还原的基本原理和性能评价指标,培养学生分析和解决实际问题的能力。

(2) 通过小组合作式实验实践,掌握基于三电极体系的电化学性能评价方法和操作过程,掌握气相色谱仪、核磁共振仪等实验设备的操作方法和谱图分析方法,培养动手能力和合作精神。

(3) 交流实验成果,合作探究拓展Cu基催化剂和电解液对反应体系的微观作用机制,培养科学素养。

2.2 实验原理

2.2.1 电催化CO₂还原反应原理

电催化CO₂还原反应主要分为阴极和阳极两个半反应(图1)^[3],阴极半反应为CO₂还原为CO、HCOOH等C₁产物和C₂H₄、C₂H₆O等C₂₊产物,阳极半反应为电解H₂O产生氧气。

2.2.2 Ag-CuO和卤素电解液的微观作用机制

铜与其他异质元素(第二组分)复合可能会在不同元素之间产生以下效应^[4]。(1) 协同效应,铜与其他异质元素复合,二者可能在电子转移、反应物吸附与活化等方面相互配合,共同促进反应的进行。(2) 约束效应,异质元素的加入可能会对铜基催化剂的结构产生一定的限制作用,使其活性位点的几何结构、配位环境等发生改变。(3) 合金效应,第二组分的加入可能会改变铜的电子结构。

(4) 串联效应, 对于多步发生的反应, 铜和第二组分可以发挥不同作用使反应依次进行。(5) 化学态效应, 掺杂元素会改变催化剂中铜的化学态, 即改变其氧化还原状态、配位数等。(6) 微观结构效应, 异质元素的引入可能会导致铜基催化剂的微观结构(如晶粒大小、晶面取向、缺陷密度等)发生变化。(7) 电子效应, 与铜核外电子排布相似的金属可以调整铜电子的能量状态和分布。上述这些效应均可能会对铜基催化剂的电子性质、反应物的吸附能、反应中间体的稳定性以及电荷转移等过程产生影响, 进而改变催化反应的活性和选择性。在本实验中, Ag的加入可以通过串联效应和电子效应, 促进电催化CO₂还原反应过程中*CO中间体的形成, 从而促进相邻的Cu位点上C-C偶联的发生, 以提高C₂₊产物的生产效率。

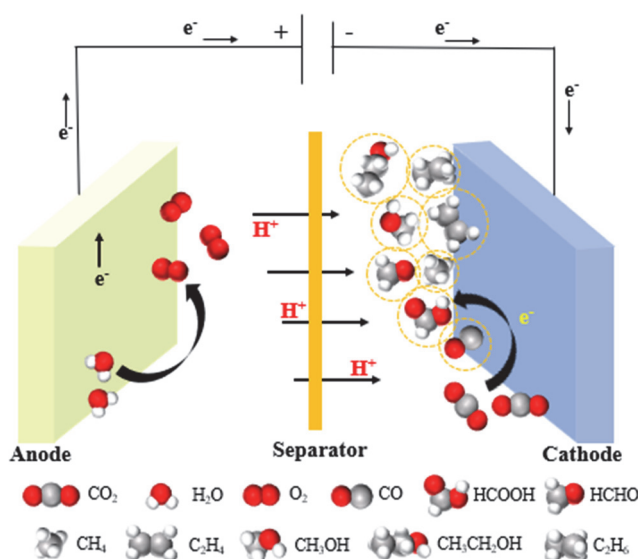


图1 电催化CO₂还原相关装置及产物图^[3]

同时已有研究表明, 将卤素离子作为添加剂加入到电解液中, 会产生以下影响作用^[5]: (1) 掺杂到催化剂中可以活化电解液中的H₂O, 促进关键中间体*CHO的生成; (2) 改变CuO的纳米结构和表面粗糙度; (3) 卤素离子吸附在内亥姆霍兹层后, 会影响反应中间体的吸附作用, 例如与反应中间体*COOH会形成强范德华相互作用以稳定*COOH, 促进关键中间体*CO的生成, 从而改变催化活性和选择性。

2.3 电催化CO₂还原的性能参数

评估电催化CO₂还原的性能参数通常包括电流密度(j)、法拉第效率(FE)等。

2.3.1 j

j 指的是单位面积上所通过的电流, 单位为mA·cm⁻², 这一指标与CO₂的转化率紧密相关。同时为了评估单一产物的生成效率, 会进一步计算各产物的分电流密度 $j_{\text{产物}}$, 其为总电流密度 j 和相对应的单一产物的FE的乘积。

2.3.2 FE

FE描述的是: 对于给定的产物, 参与其生产过程的电荷量占消耗的总电荷量的百分比。这是评估反应效率的重要参数之一。

气相产物的法拉第效率公式如下:

$$FE = (n \times q_v \times y_{\text{gas}} \times F)(I \times V_m)$$

其中 n 为CO₂还原为气相产物转移电子数, q_v 为气体产物体积流量, y_{gas} 为气相分率, F 为法拉第常数, I 为电解过程的平均电流, V_m 为标准状况下的气体摩尔体积。

液相产物的法拉第效率公式如下:

$$FE = (n \times c \times V \times F) / Q$$

其中 n 为CO₂还原对应液相产物反应转移的电子数, c 为液相产物的摩尔浓度(根据不同产物的核磁标准曲线得到), V 为反应体系总电解液体积(12 mL), F 为法拉第常数, Q 为电解过程通过电极的电荷量。

2.4 实验试剂及仪器

本实验使用的实验试剂、实验仪器等相关信息如表1和表2所示。

表1 实验所用化学试剂

名称	化学式	规格	生产厂家
三水合硝酸铜	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	99%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
硝酸银	AgNO ₃	AR	国药集团化学试剂有限公司
氢氧化钠	NaOH	97%	上海麦克林生化科技有限公司
碳酸氢钾	KHCO ₃	AR 99.5%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
硫酸	H ₂ SO ₄	99%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
碘化钾	KI	AR ≥ 99.0%	上海麦克林生化科技有限公司
溴化钾	KBr	AR	国药集团化学试剂有限公司
氯化钾	KCl	AR 99.5%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
氘代DMSO	C ₂ D ₆ O	99.9%	安诺伦(北京)生物科技有限公司
Nafion溶液	—	AR	美国杜邦公司
高纯CO ₂	CO ₂	99.999%	北京海普气体有限公司

表2 实验所用仪器

仪器名称	型号	生产厂家
电子天平	XA205DU	梅特勒托利多科技(中国)有限公司
液晶超声波清洗器	KS-1200D	昆山洁力美超声仪器有限公司
烘箱	DGX-9143B-2	上海福玛实验设备有限公司
电化学工作站	CHI600E	上海辰华仪器有限公司
气相色谱仪	HA-500C	北京中科汇恒技术开发有限公司

2.5 实验步骤/方法

2.5.1 催化剂制备

向100 mL烧杯中加入40 mL去离子水(6–7 °C); 称取604 mg的Cu(NO₃)₂·3H₂O、6.6 mg的AgNO₃加入上述去离子水中, 搅拌5 min使其完全溶解, 然后称取240 mg的NaOH溶于5 mL去离子水中, 超声至溶解, 在搅拌条件下逐滴加入至上述溶液中, 将混合后的溶液转移至100 mL高压反应釜中(图2a), 140 °C恒温反应2.5 h(图2b); 反应结束后, 待反应釜自然冷却至室温, 将得到的沉淀用去离子水反复离心-洗涤三次, 80 °C下真空干燥12 h(图2c), 得到棕黑色固体, 用研钵研磨成粉末(图2d), 即得到Ag-CuO催化剂。制备CuO时, 无需加入AgNO₃, 其余步骤与合成Ag-CuO催化剂方法相同。

称取1.2 mg催化剂, 加入480 μL的异丙醇水溶液(异丙醇和水按体积比为1 : 1比例配制)以及2.4 μL 5 wt% (质量分数)的Nafion溶液, 将它们混合至1 mL离心管中并超声30 min使其分散均匀(图2e)。然后用100 μL的移液枪将其缓慢滴加在碳纸(1.2 cm × 0.5 cm)上(图2f), 并在滴加过程中用紫外灯对其进行烘干处理, 最终达到约1.0 mg cm⁻²的催化剂负载量。

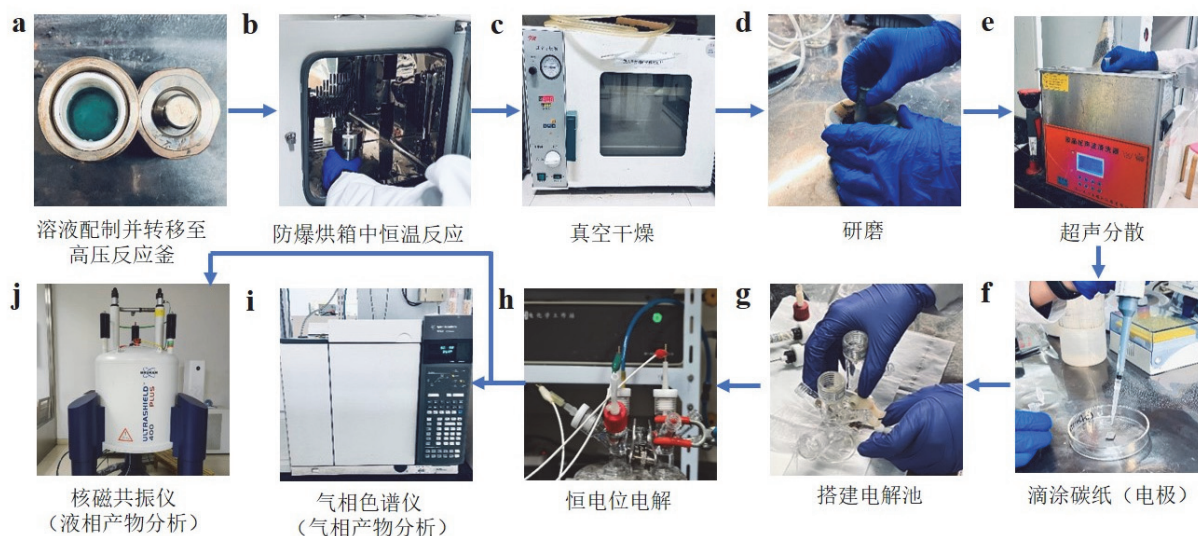


图2 实验流程图

2.5.2 卤素电解液配制

本实验选取卤素(Cl^- , Br^- , I^-)浓度分别为0.05、0.10和0.15 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的电解液进行实验。

以含 I^- 浓度为0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的电解液为例：称取166 mg的KI固体，移至12 mL 0.10 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KHCO_3 溶液中，使其充分溶解。

2.5.3 搭建三电极反应体系

采用H型双室电解池(以Nafion117阳离子交换膜为隔膜)，担载电催化剂的碳纸作为工作电极， Ag/AgCl 电极作为参比电极，Pt片作为对电极，搭建三电极反应体系(图2g)。阴极室加入12 mL卤素- KHCO_3 电解液；阳极室加入等体积的0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸溶液。阴极室放置工作电极和参比电极，阳极室放置对电极，同时在两极室分别放入磁子。最后对电解池的密封性进行检查。

2.5.4 电催化 CO_2 还原性能测试及产物分析

反应前，首先向阴极电解液中通入 CO_2 气体(气速80 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)，通气30 min(电解液中的 CO_2 达到饱和)后，改变气速为20 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ，在恒电位电解条件下进行测试(图2h)。为了确保反应气体在电解过程中能够充分混合，同时减少浓差极化现象，在整个电解过程中维持恒定搅拌速度(转速500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)，以实现均匀混合和稳定反应环境。通过施加不同反应电位进行恒电位电解，电解时间为2 h，开始反应后即用电袋收集气体，记录实验最终的电荷量、电流，并收集整个反应过程的气体与反应后的电解液，进行气相产物和液相产物分析(图2i和2j)。

本实验选取的施加电位为： -2.05 、 -2.15 和 -2.25 V vs. Ag/AgCl ，相对于可逆氢电极(RHE)的电位转换公式如下：

$$E(\text{vs. RHE}) = E(\text{vs. Ag/AgCl}) + 0.0591 \times \text{pH} + 0.197$$

pH为电解液的酸碱度，本实验所用 CO_2 饱和的0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KHCO_3 的pH = 6.8。

本实验中，电催化 CO_2 还原的气相产物分析结果如图3a所示，包括 CO 、 C_2H_4 和 H_2 。在电解过程中用气袋收集反应过程中的气体，并用针管吸取2 mL气体注入气相色谱系统(GC)的进样口，进行产物分析。气相色谱的色谱柱型号为安捷伦DB-1，检测器型号为TCD热导池检测器和FID氢火焰离子化检测器，通过TCD分析 H_2 和 CO 的浓度，通过FID分析 CH_4 和 C_2H_4 等烃类产物浓度。通过色谱图上的出峰时间和出峰面积对气体进行定性和定量。

液相产物分析结果如图3b所示，包括 HCOOH 、 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 、 CH_3COOH 和 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ 。取2 mL反应后的阴极电解液于5 mL离心管内，通过核磁共振氢谱($^1\text{H NMR}$)进行产物分析。核磁测试样品配制方式：使用1000 μL 的移液枪精准量取300 μL 的电解液、300 μL 的 D_2O 和10 μL 的10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

DMSO溶液, 充分混合后转移至核磁管中, 进行核磁测试。根据核磁谱图上的出峰位置和出峰面积对液体产物进行定性和定量分析。

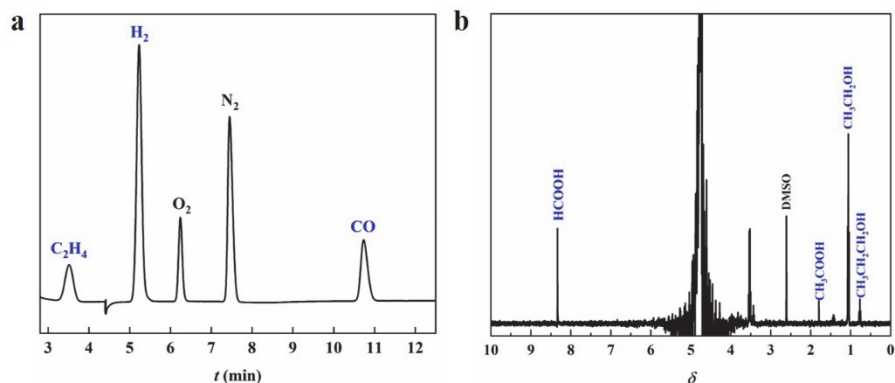


图3 (a) 气相产物分析图; (b) 液相产物分析图。

3 结果与讨论

3.1 材料表征

图4是CuO和Ag-CuO的X射线衍射(XRD)谱图, 从图4a可以看出, 制备的CuO与标准衍射谱图(JCPDS Card No.45-0937)相一致。掺杂Ag后, Ag-CuO的XRD谱图(图4b)中除了CuO的特征衍射峰外, 出现了Ag的特征衍射峰, 与Ag(JCPDS Card No.12-0793)的(200)、(220)和(311)晶面较好地吻合, 说明Ag已经被掺杂至CuO中。

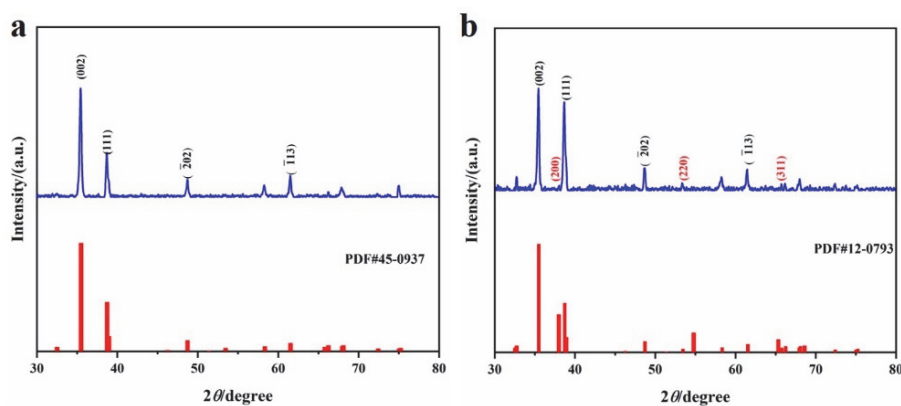


图4 CuO (a)和Ag-CuO (b)的XRD谱图

图5为Ag-CuO(图5a)和CuO(图5b)的扫描电子显微镜(SEM)图, 从图中可以看出, 两种催化剂均具有片状结构, Ag的掺入并没有明显改变CuO的形貌。

3.2 电催化CO₂还原性能评价

3.2.1 Ag掺杂对催化剂电催化CO₂还原性能的影响

首先对Ag-CuO和对比样CuO两种催化剂在未加卤素的0.1 mol·L⁻¹ KHCO₃电解液中进行电催化CO₂还原性能评估, 如图6所示, 两种催化剂的电催化CO₂还原产物均包括C₁产物CO和HCOOH, C₂₊产物C₂H₄、CH₃CH₂OH、CH₃COOH和CH₃CH₂CH₂OH。从图6a中可以看出, CuO的电催化CO₂还原性能较差, 在所选取的电压范围内, 析氢反应占据主导地位。在-1.1 V vs. RHE时C₂₊产物的FE达到最大, 只有22.64%。Ag掺杂后Ag-CuO的电催化CO₂还原性能得到提升, 析氢反应被一定程度的抑制。

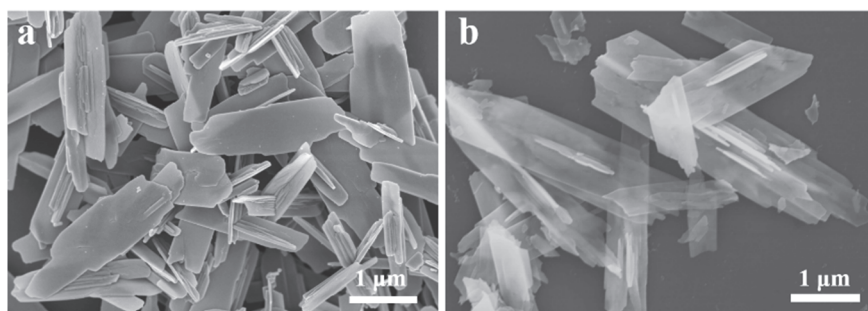
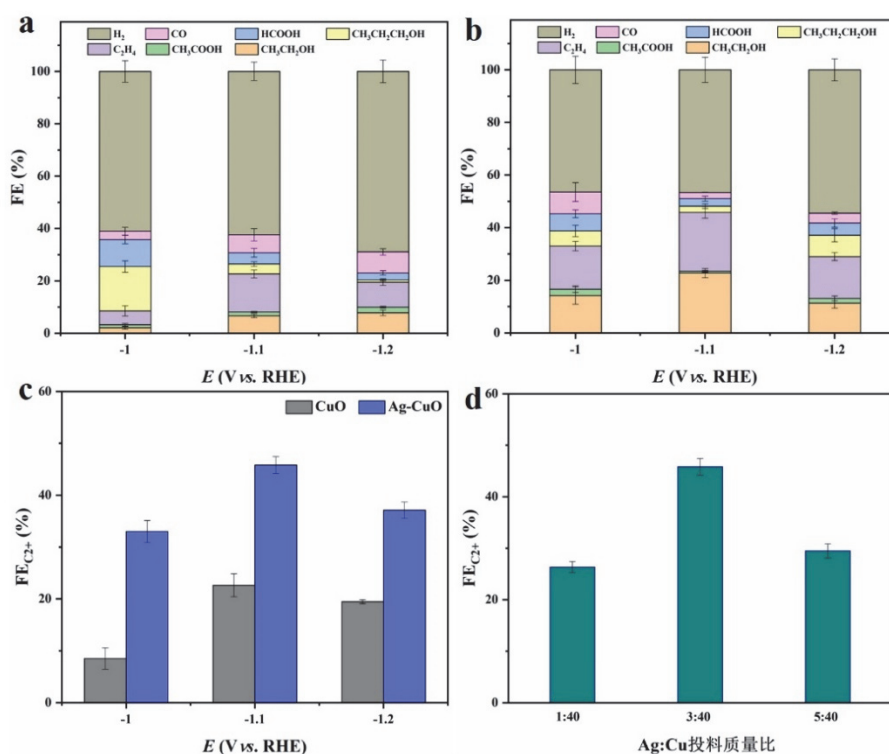


图5 Ag-CuO (a)和CuO (b)的SEM图


 图6 (a) Ag-CuO和(b) CuO在不同电位下电催化CO₂还原生成不同产物的法拉第效率图; (c) Ag-CuO和CuO在不同电位下电催化CO₂还原生成C₂₊产物的法拉第效率对比图; (d)不同Ag:Cu投料质量比的Ag-CuO在-1.1 V vs. RHE电位下的电催化CO₂还原生成C₂₊产物的法拉第效率对比图

在-1.1 V vs. RHE时C₂₊产物的FE达到最大, 为45.81% (图6b)。从图6c中可以更加直观地看到, Ag掺杂后Ag-CuO的电催化CO₂还原生成C₂₊产物的FE明显提升。同时, 对Ag的掺杂量进行了优化, 通过改变合成过程中Ag与Cu的质量比, 分别为1:40、3:40和5:40, 得到三种不同Ag含量的催化剂。并对三种催化剂的电催化CO₂还原性能进行评估, 其C₂₊产物的FE对比结果如图6d所示, 在-1.1 V vs. RHE电位下, 投料比Ag:Cu为3:40的Ag-CuO催化剂性能最优。从电子因素角度分析其原因, 推测可能原因为Ag的加入可以降低Cu的d带中心, 使得Cu对关键中间体*CO的吸附强度适中^[6,7]。同时Ag能促进CO₂还原产生*CO, 增大Cu表面*CO的覆盖率。两种作用均有利于C-C耦合过程, 提高C₂₊产物的选择性。(需要说明的是, 投料比Ag:Cu为3:40的Ag-CuO催化剂在-1.1 V vs. RHE电位下FE_{C₂₊}达到最优, 因此在后面的研究中我们均选用投料比Ag:Cu为3:40的Ag-CuO催化剂, 且选用-1.1 V vs. RHE作为实验的反应电位。)

3.2.2 电解液中卤素离子种类对Ag-CuO电催化CO₂还原性能的影响

在-1.1 V vs. RHE电位下, 在0.1 mol·L⁻¹ KHCO₃ + 0.1 mol·L⁻¹ KX (X= Cl, Br, I)电解液中, 探究卤素阴离子种类对体系产生C₂₊产物法拉第效率的影响。结果如图7所示, 在含Cl⁻、Br⁻、I⁻的电解液中, C₂₊产物法拉第效率分别为46.27%、51.59%和61.71%。在0.1 mol·L⁻¹ KHCO₃ + 0.1 mol·L⁻¹ KI电解液中性能达到最佳, 说明I⁻的引入更有利于C-C偶联, 促进C₂₊产物的生成。

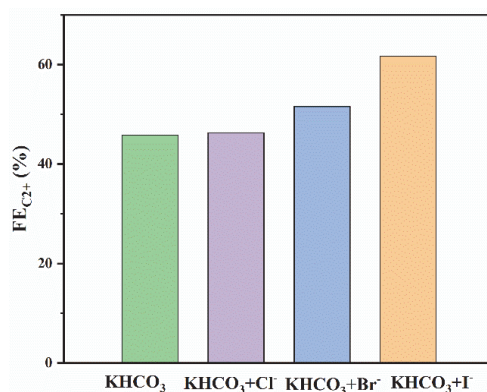


图7 在-1.1 V vs. RHE电位下, 卤素离子种类对电催化CO₂还原生成C₂₊产物法拉第效率的影响

3.2.3 电解液中I⁻的浓度对电催化CO₂还原生成C₂₊产物性能的影响

进一步对卤素I⁻的浓度进行优化, 在0.1 mol·L⁻¹ KHCO₃溶液中分别加入不同浓度梯度的KI溶液 (0.05、0.1和0.2 mol·L⁻¹), 对Ag-CuO进行电催化CO₂还原性能测试, 结果如图8所示, 在-1.1 V vs. RHE电位下, C₂₊产物法拉第效率分别为50.24%、61.71%、57.32%。因此得出电解液最优条件为0.1 mol·L⁻¹ KHCO₃ + 0.1 mol·L⁻¹ KI。

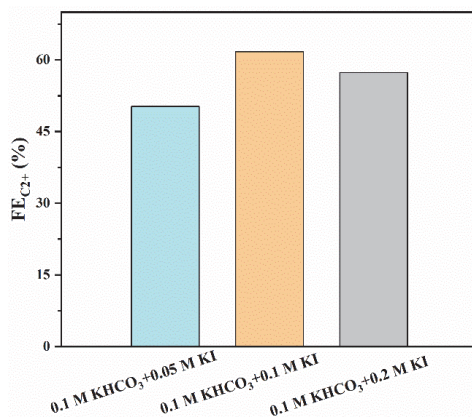


图8 -1.1 V vs. RHE电位下, 电解液中不同I⁻浓度对电催化CO₂还原生成C₂₊产物的法拉第效率的影响

4 教学实验安排建议

(1) 时间安排: 由于本实验所需时间较长, 建议以班级为单位, 3-5名同学为一组, 设计8学时的综合性实验。建议实验课时安排如表3所示。

(2) 授课对象: 本实验内容丰富, 涉及知识面广泛, 适合向具有一定分析化学和物理化学基础的高年级本科生开设, 同时该实验设计还具有研究性拓展的可能, 可以根据实际情况进行拓展。

(3) 由于实验时长限制和设备较少等问题, 教师也可以根据学校实验条件、课时数及不同年级学生水平灵活安排实验教学, 统一由实验室制备电极, 学生直接进行电化学测试和产物分析。

表3 建议实验设计

实验环节	教学内容
课前	在实验前一周布置实验内容, 引导学生查阅文献, 进行实验原理和方法讨论, 解析影响实验结果的相关因素, 设计可行的实验方案
课上(8学时)	(1) 催化剂的制备, 由指导老师指导学生按照步骤制备催化剂(注: 由于本过程处理材料用时较长且实验温度偏高, 这两部分操作可由实验教师提前完成, 催化剂储存在真空干燥器中) (2) 电极制备和电催化性能评价, 学生根据上述操作进行工作电极制备, 改变催化剂组分、反应电位、电解液组成进行测试, 最后使用气相色谱仪和核磁共振仪对气相和液相产物进行分析。(注: 由于核磁测试仪器较少, 可由指导老师完成, 由学生对核磁测试谱图进行分析)
课后	完成实验后, 整理汇总实验数据、图表并进行分析, 写出实验报告。课后开展研讨, 教师总结点评。鼓励和启发学生, 通过实验推测反应过程的机理, 并查阅文献进行验证, 加深对电催化CO ₂ 还原的理解, 进一步揭示其微观过程。

5 结语

本实验通过水热法制备Ag掺杂的Ag-CuO催化剂, 同时利用卤素离子对阴极电解液进行调控, 采用三电极电解系统对催化体系进行电催化CO₂还原制备C₂₊产物性能评价, 实现了CO₂至C₂₊产物电催化转化性能提升。本实验包括催化剂的制备、电催化性能测试和产物分析三部分, 涵盖知识点丰富, 综合性强, 可以作为电化学实验开设, 亦可以作为高年级的综合化学实验开设。本实验的开设有利于学生理解电催化CO₂还原的过程, 培养学生的科学思维和积极思考的能力, 拓宽学生的知识面, 激发学生开展科学研究的热情。

6 创新性/特点声明

创新性:

- (1) 基于绿色温和的电催化技术实现了将CO₂转化为乙烯、乙醇等高附加值的多碳产物。
- (2) 利用催化剂组分和电解液组成双调控策略, 实现催化体系CO₂至C₂₊产物电催化转化性能提升。

特点:

- (1) 本实验很好地融入“科教融合”的教学理念, 将前沿科研方向和科研成果转化为综合化学实验, 对学生学习理论知识、了解科学前沿、培养科学创新思维具有促进作用。
- (2) 本实验中选用的试剂温和, 不涉及剧毒、易燃、易爆和腐蚀性; 选用的仪器操作相对简单; 反应条件温和, 在常温常压下即可进行; 与本科生的知识储备和操作水平相适应。

参 考 文 献

- [1] Du, Y.; Meng, X.; Ma, Y.; Qi, J.; Xu, G.; Zou, H.; Qiu, J. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34*, 2408013.
- [2] Li, X.; Chen, Y.; Zhan, X.; Xu, Y.; Hao, L.; Xu, L.; Li, X.; Umer, M.; Tan, X.; Han, B.; *et al.* *The Innov. Mater.* **2023**, *1*, 100014.
- [3] Zhang, W.; Hu, Y.; Ma, L.; Zhu, G.; Wang, Y.; Xue, X.; Chen, R.; Yang, S.; Jin, Z. *Adv. Sci.* **2017**, *5*, 1700275.
- [4] 孟怡辰, 况思宇, 刘海, 范群, 马新宾, 张生. *物理化学学报*, **2021**, *37* (5), 2006034.
- [5] 彭奎霖, 李桂林, 江重阳, 曾少娟, 张香平. *高等学校化学学报*, **2022**, *43* (7), 20220238.
- [6] Wang, S.; Li, F.; Zhao, J.; Zeng, Y.; Li, Y.; Lin, Z. Y.; Lee, T. J.; Liu, S.; Ren, X.; Wang, W.; *et al.* *Nat. Commun.* **2024**, *15*, 10247.
- [7] Wei, D.; Wang, Y.; Dong, C. L.; Zhang, Z.; Wang, X.; Huang, Y. C.; Shi, Y.; Zhao, X.; Wang, J.; Long, R.; *et al.* *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62*, e202217369.