

电化学合成在有机化学教学中的应用

张任秀¹, 赵新², 张云飞^{1,*}

¹ 中国农业大学理学院, 北京 100193

² 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

摘要: 电化学在分析化学和物理化学中被广大学生学习以及应用, 但是在有机化学中却鲜有提及。电化学在有机化学中也有重要的用途, 本文目的在于普及电化学在有机化学理论和实验教学中的运用, 让学生建立“绿色化学”的理念, 了解有机电化学合成技术对服务人类生态文明、国家需求和维护人民生命健康的重要意义, 从而提高学生的专业认同感和社会责任感。将电化学在有机化学中的运用实践起来, 提高有机化学的教学质量, 推动有机化学研究的深入发展。

关键词: 有机电化学; 绿色合成; 教学方法

中图分类号: G64; O6

Application of Electrochemical Synthesis in the Teaching of Organic Chemistry

Renxiu Zhang¹, Xin Zhao², Yunfei Zhang^{1,*}

¹ College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China.

² College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China.

Abstract: Electrochemistry is extensively studied and applied in analytical and physical chemistry; however, its integration into organic chemistry remains limited. This article aims to promote the incorporation of electrochemical techniques in both theoretical and experimental organic chemistry education. We seek to instill a “green chemistry” ethos among students and to elucidate the significance of organic electrochemical synthesis technologies in advancing ecological sustainability, addressing national needs, and safeguarding public health. This approach is intended to enhance students’ professional identity and social responsibility. By implementing electrochemical applications in organic chemistry and providing guidance for their educational use, we aim to improve the quality of organic chemistry instruction and foster the deeper development of research in this field.

Key Words: Organic electrochemistry; Green synthesis; Teaching method

21世纪以来, 一场以节约资源和能源、保护生态环境为主的绿色工业革命正在蓬勃兴起。绿色化学是更高层次的化学, 它的主要特点是原子经济性, 即在获取新物质的化学过程中充分利用每个原料原子实现“零排放”, 既充分利用资源又不产生污染。有机电化学合成技术以电子作为清洁的“试剂”直接参与化学反应, 为合成化学家提供绿色合成的崭新思路以及有力工具^[1]。

收稿: 2024-06-27; 录用: 2024-09-05; 网络发表: 2024-09-25

*通讯作者, Email: zyfeichem@cau.edu.cn

基金资助: 中国农业大学教改项目(BZY2024036)

有机电化学合成是集电化学、化学工程、有机化学等多学科为一体的交叉学科，符合新质生产力的要求，具有清洁绿色、节能高效、条件温和、调控灵活的优点，近年来逐渐成为有机合成领域的热点，随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入人心和国家“碳达峰、碳中和”战略的逐步推进，集中体现着绿色化学理念的有机电合成技术也将迎来更好的发展前景^[2]。

然而，本科化学教育中，普通化学与有机化学课程在电化学领域的衔接上存在一定的脱节现象。普通化学课程深入探讨了电解池的工作机制，包括电池的构造与功能、电解过程的基本原理以及电解反应的应用，这部分内容往往侧重于无机体系，如详细阐述了水的电解以及NaOH等简单无机化合物的电解过程。然而，对于有机化合物在电化学环境下的行为与电解反应，教材通常简略带过或干脆未予涉及，导致学生在这一块的知识构建上可能会有空白^[3-6]。

另一方面，有机化学课程虽然专注于有机分子的结构、性质、反应及其合成方法，但在讲解电化学相关的应用时，通常仅作为边缘内容提及，未能充分展开。有机化学的教学重点多放在诸如加成、消除、取代等典型的有机反应类型上，对于电化学在有机合成等方面的应用仅作浅尝辄止的介绍。这无疑限制了学生对有机电化学这一前沿交叉领域全面而深刻的理解^[7-10]。

因此，将有机电合成技术引入学校有机化学实验课程，在基础实验课中为学生提供接触、学习有机电合成技术的机会，不仅有助于开拓学生科学视野、提高综合研究能力，还能够加强学生对绿色化学理念的认知，培养学生的社会责任担当。

1 有机电化学合成的基本原理与特点

1.1 基本原理

有机电化学合成是一种利用电场作用下的电化学反应来合成有机化合物的方法。其基本原理涉及电荷传递与转化以及电极与溶液界面的相互作用。

1) 电荷传递与转化。

在有机电化学合成过程中，电荷传递是关键环节。电子在电极和有机分子之间传递，从而实现氧化还原反应。这些反应涉及电子的得失，导致有机分子结构发生变化，生成新的化合物。电荷传递的效率和方向取决于电极电位、电解质种类和浓度等因素。

2) 电极与溶液界面。

电极与溶液界面是有机电化学合成中的另一个重要环节。在这个界面上，电解质溶液中的离子和电极上的电子进行交换，促使电化学反应的进行。界面现象如双电层结构、电极表面吸附和电荷传递阻力等都对电化学反应的速率和选择性产生影响。

1.2 特点概述

有机电化学合成有着精准控制的特点，使其在有机合成领域具有广泛的应用前景。有机电化学合成可以通过调节电极电位、电流密度和电解时间等参数来精确控制反应进程和产物结构。这种精准控制有助于合成具有特定结构和功能的有机化合物，提高产物的纯度和收率。

2 电化学合成在有机化学教学中的应用

2.1 理论教学中的应用

课程设计旨在将有机电化学合成的先进理念无缝融入有机化学教学体系，提升学生的综合实践与创新能力。本设计覆盖电解基础知识的巩固、针对性的电化学案例分析，以及前沿科学研究的融入，具体规划如下。

2.1.1 电解知识的复习

鉴于学生可能对前期电化学原理有所遗忘，课程初期将在卤代烃章节安排对电解基本原理的回顾，涵盖电解池工作原理、电极(阴极与阳极的角色及功能)以及电解质的选择与作用，确保学生在进入有机电化学合成专题前具备坚实的基础。

2.1.2 有机化学教学中的电化案例设计

(1) 在卤代烃章节，以3M公司开发的全氟烷烃电化学合成技术为例(图1)，阐述电化学合成在复杂分子构建中的独特价值和环境友好特性。

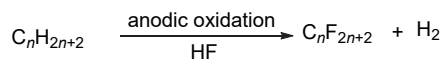


图1 电化学合成全氟烷烃

(2) 在醛酮醌章节，通过巴斯夫公司的实例(图2)，展示电化学方法在芳香醛合成中的应用，强调此绿色合成路径相较于传统方法的优势。

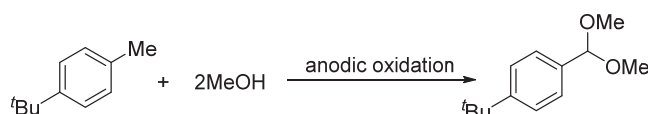


图2 电化学合成芳香醛

(3) 在羧酸及衍生物章节，引入孟山都公司开发的丙烯腈电化学制备己二腈过程(图3)，此案例不仅加深学生对羧酸类化合物电化学转化的理解，还展示了工业应用的可行性。

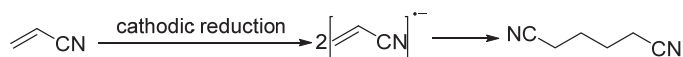


图3 电化学合成己二腈

2.1.3 电化学前沿科技成果的融入

在教学中，可以引入最新的科技成果，包括笔者所在课题组的研究成果，加强科教融合。笔者所在课题组尝试的实践如下。

(1) 消除反应的创新视角：教学中一般说明遵循扎依采夫规则，二级H比一级H更容易消除，反应生成热力学稳定产物。利用笔者所在课题组研究成果(图4)^[11]，展示有机电化学在控制消除反应区域选择性方面的潜力，通过实例说明如何突破传统扎依采夫规则限制，实现霍夫曼消除，增强学生对反应机制的深入理解。

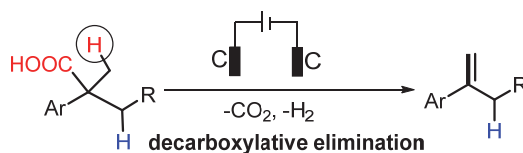


图4 电化学脱羧消除反应

(2) 电化学傅克酰基化反应：引入笔者所在课题组开发的新方法(图5)^[12]，该方法无需使用三氯化铝，降低了环境污染，展现了电化学合成在传统反应改进上的广阔前景。



图5 电化学傅克酰基化反应

(3) 电化学氧化内酯化：引入笔者所在课题组开发的电化学氧化内酯化反应(图6)^[13]，对比传统酯化工艺，突出笔者所在课题组电化学方法在效率、环保及操作简便性方面的显著优势，引导学生思考绿色化学的重要性。

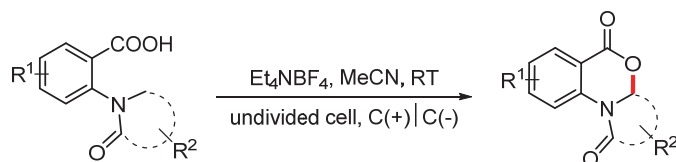


图6 电化学氧化内酯化反应

此外，鼓励学生探索有机电化学合成与材料科学、环境科学等领域的交叉影响，如通过电化学合成在新型材料制备中的应用，提升学生跨学科解决问题的能力，培养未来科研所需的综合素养。

综上所述，本课程设计通过理论与实践相结合的方式，系统地将有机电化学合成嵌入有机化学教学，旨在培养学生在掌握传统知识基础上，进一步探索和掌握现代有机合成的最新技术和理念，促进其科研思维与创新能力的不断发展。

2.2 实验教学中的应用

在有机化学实验教学中，传统有机合成方法条件有着高成本、低效率、污染环境等优点。引入有机电化学合成方法，可以丰富实验内容，提高实验的趣味性和实用性。例如，可以通过电化学方法合成具有特定结构的有机化合物，如芳香烃、酮类等，让学生亲身体验有机电化学合成的魅力。

2.2.1 可用于本科教学实验中的有机电化学合成反应要求

在本科教学实验中选用的有机电化学合成研究应当满足以下条件(图7)，以确保既安全合适，又能有效促进学生的学习和发展。

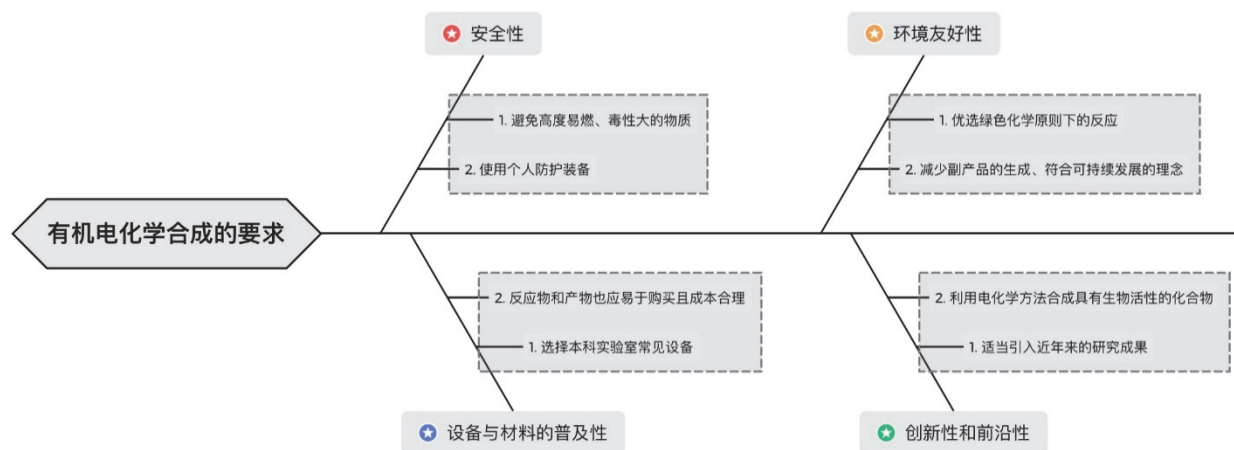


图7 有机电化学合成的要求

2.2.2 将科研实验室的研究引入本科生实验教学中的实践

如何将科研实验室的研究引入本科生实验教学中呢？笔者所在课题组尝试的具体实践如下(图8)。

通过这样的教学设计，不仅可以让学生掌握电化学合成噁唑的基本技能，还能激发他们对科学研究的兴趣，培养解决实际问题的能力。并且课题组通过实践证明，该方法确实有效。

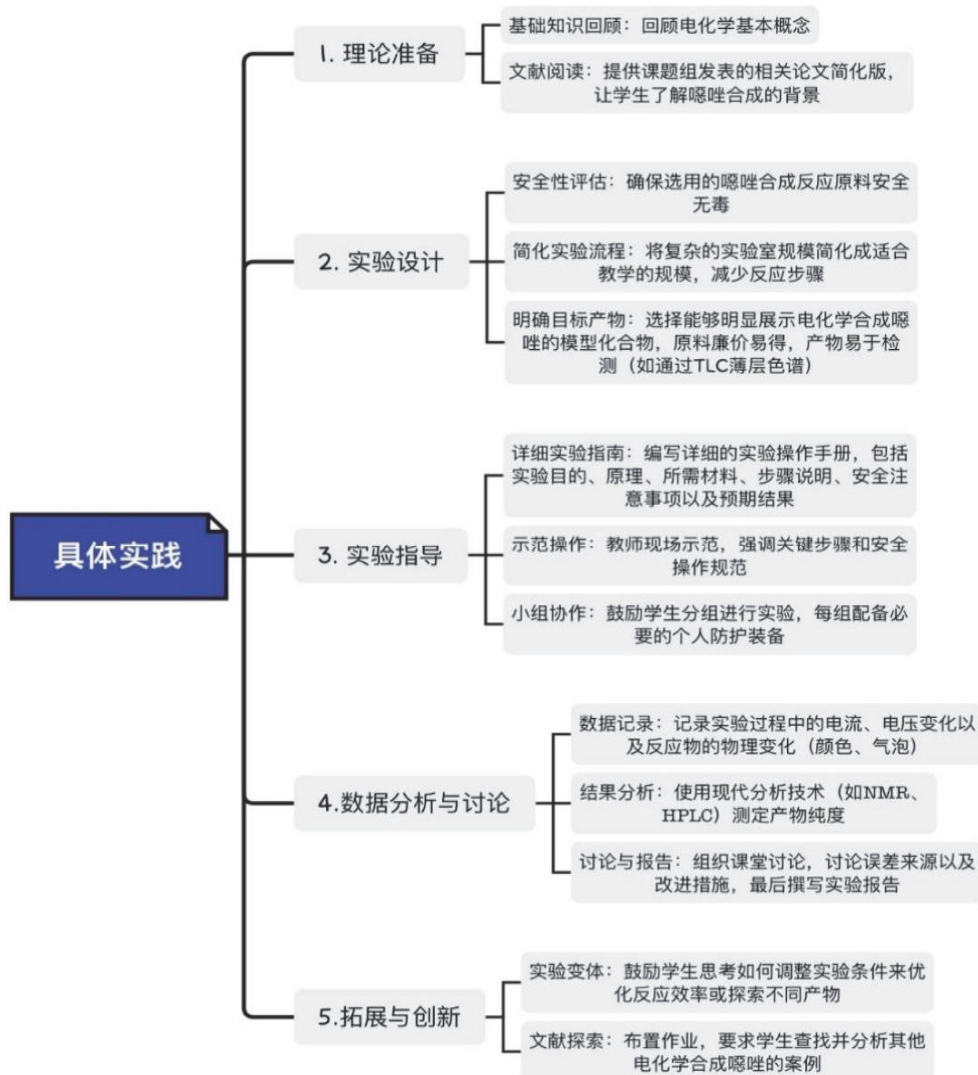


图8 实验教学中的实践

2022年, 笔者所在课题组指导本科生李闻怡、张娜、王凌琪参加了第三届“微瑞杯”全国大学生化学实验创新设计大赛(图9)。鉴于传统有机化学实验较少使用电化学, 而电具有清洁、绿色的优势, 团队将电化学合成应用于本科实验中, 填补了该领域的空白。从选题到PPT、视频制作, 笔者所在课题组对学生都进行了精心指导。功夫不负有心人, 学生团队最终在国内410所高校的908支队伍中脱颖而出, 获得了华北赛区一等奖和全国决赛二等奖, 取得了学校在该竞赛中的最好成绩。

2.3 教学反馈

将有机电化学合成引入有机化学理论与实验教学中, 不仅丰富了教学内容, 还极大地提升了学生的学习兴趣与实验技能, 以下是具体的教学反馈总结。

(1) 教学内容的丰富与更新。

理论与实践的深度融合: 通过将电化学合成原理与有机化学反应相结合, 学生能够从更广阔的视角理解有机合成的多样性。例如, 电化学氧化/还原反应作为传统化学方法的补充, 展示了化学反应的新维度, 促进了学生对反应机理和条件优化的深入思考。

跨学科知识的引入: 电化学合成的加入促使学生接触物理学、电化学、材料科学等领域的知识, 增强了学科间的联系, 培养了学生的跨学科思维能力。

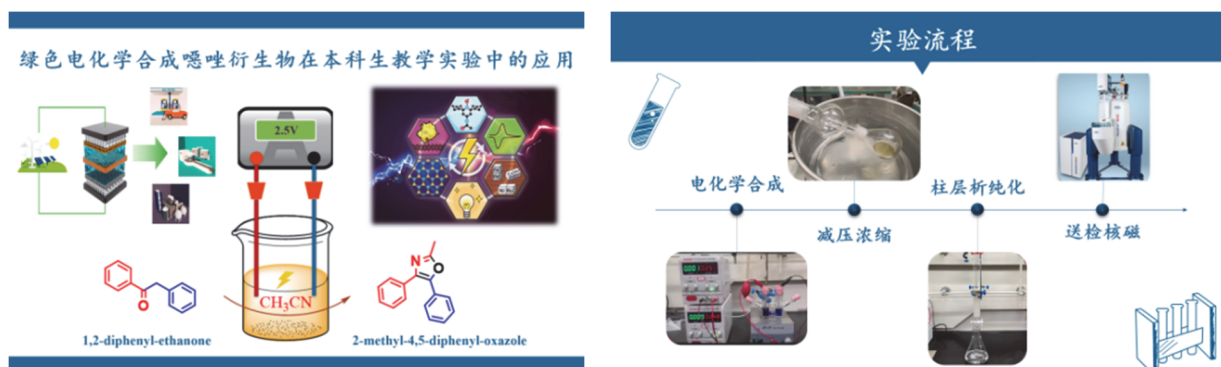


图9 第三届“微瑞杯”全国大学生化学实验创新设计大赛获奖PPT

科研前沿的触达：通过介绍笔者所在课题组的最新研究成果，学生得以了解有机电化学合成的前沿动态，激发了他们对科学研究的兴趣，有的学生甚至表达了将来从事相关研究的愿望。

(2) 实验技能与科学素养的提升。

实验操作能力的增强：学生在亲手操作电化学合成实验的过程中，掌握了电解池的组装、电极材料的选择、电流电压的调控等技能，这对于培养学生的实验操作能力和问题解决能力极为有益。

数据分析与批判性思维的培养：通过分析实验数据，学生学会了如何评估反应效率，识别并解决实验中遇到的问题，这种批判性思维的训练对提升他们的科研素质至关重要。

(3) 学生反馈。

学习动力的激发：学生普遍反映，电化学合成实验增加了课程的趣味性和挑战性，让他们对有机化学产生了更浓厚的兴趣，不少学生表示愿意投入更多时间进行课外探索。班级平均分从70提升到74，不及格率从17%降到9%。同时，对教师的教学评价也在96分以上。

对未来职业规划的影响：部分学生表示，通过接触有机电化学合成，他们对有机化工有了全新的认识，计划在研究生阶段进一步深造，甚至考虑未来在相关行业就业。

综上所述，将有机电化学合成引入有机化学教学中，不仅充实了课程内容，还激发了学生的学习热情，提高了他们的实验技能和科研素养，为培养具备创新能力的化学人才开辟了新的途径。未来，我们期望进一步优化教学设计，引入更多互动式、项目导向型的教学活动，以更好地适应21世纪化学教育的需求。

3 结语

有机电化学合成作为一种新型的合成方法，在有机化学教学与研究中具有广泛的应用前景。通过将有机电化学合成引入有机化学教学和实践，不仅可以提高学生的学习兴趣和实践能力，还可以推动有机化学研究的深入发展。然而，目前有机电化学合成在有机化学教学中仍面临一些挑战，如对学生跨学科的知识体系的要求、教学资源与教材更新、实验设施的更新等。因此，未来需要继续深入研究和探索有机电化学合成在理论和实验教学中的应用，为这一新质生产力在有机化学的教学中提供更加有效的手段和方法。

参 考 文 献

- [1] 边磊, 关玲, 李田, 徐烜峰, 王婕妤, 张奇涵. 实验室研究与探索, 2022, 41 (12), 172.
- [2] 郭维斯, 王书文, 李明. 大学化学, 2023, 38 (5), 157.
- [3] 张林宝, 郭维斯, 王书文, 宋然, 李明. 大学化学, 2024, 39 (11), 204.
- [4] 胡良楨, 倪黎, 牛子怡, 张晓慧, 秦波, 熊燕. 大学化学, 2024, 39 (6), 350.

- [5] 林彩霞, 施兆江, 余意, 鄢剑锋, 叶克印, 袁耀锋. 大学化学, **2024**, *39* (2), 61.
- [6] 贾敬佩, 仇友爱. 大学化学, **2024**, *39* (12), 265.
- [7] 胡新伟, 阮志雄. 大学化学, **2023**, *38* (9), 263.
- [8] 赵梦龙, 苑岱雷, 叶梓, 房芳, 于月娜. 大学化学, **2022**, *37* (5), 2109108.
- [9] 张子杭, 李思哲, 阚立言, 温俊, 卞江. 大学化学, **2021**, *36* (12), 2102001.
- [10] 张震, 王世龙, 刘珊珊, 李文佐, 何涛, 李家柱. 大学化学, **2023**, *38* (8), 128.
- [11] Yu, J.; Liu, T.; Sun, W.; Zhang, Y. *Org. Lett.* **2023**, *25*, 7816.
- [12] Liu, C.; Yu, J.; Bao, L.; Zhang, G.; Zou, X.; Zheng, B.; Li, Y.; Zhang, Y. *J. Org. Chem.* **2023**, *88*, 3794
- [13] Liu, C.; Liu, Y.; Yang, S.; Zheng, B.; Zhang, Y. *Org. Lett.* **2024**, *26*, 1936.