

Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的结构-性质-效能关系探究

蒋海英*, 穆玥如, 张媛媛, 孙雪, 王云侠, 郭慧林, 岳可芬

西北大学化学与材料科学学院, 西安 710127

摘要: 为了培养本科生综合运用所学知识分析和解决问题的能力, 本文基于最新研究成果, 深入挖掘其中所涉及的本科基础化学知识, 设计了探究苯乙炔铜(Ph-C≡C-Cu)基新型功能材料结构-性质-效能关系的综合实验。本实验通过光热合成法制备了三种含不同官能团的Ph-C≡C-Cu基新型功能材料, 利用红外(FT-IR)光谱、紫外-可见吸收(UV-Vis Abs)光谱和稳态水接触角表征了其结构和相关物理化学性质, 并研究了其结构对于有机染料甲基橙(MO)的吸附和降解效能的影响。作为本科生基础教学实验, 本实验考查了学生对有机化学中不同官能团的电子效应和物理化学中液-固界面相互作用、固体在溶液中的吸附、催化反应动力学以及反应级数的判定等知识的理解、掌握和应用。通过进一步总结与讨论Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的结构-性质-效能关系, 启发并引导学生以实际问题为导向, 根据所学理论和知识, 从源头上出发, 对功能材料的结构进行设计, 培养了本科生的逆向思维方式, 提升了本科生理论与实践相结合的能力。

关键词: 新型功能材料; Ph-C≡C-Cu; 结构-性质-效能关系; 逆向思维方式

中图分类号: G64; O6

Structure-Property-Effect Relationship of New Copper Phenylacetylene-Based Functional Materials

Hai-Ying Jiang*, Yueru Mu, Yuanyuan Zhang, Xue Sun, Yunxia Wang, Huilin Guo, Kefen Yue

College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Xi'an 710127, China.

Abstract: To develop the ability of undergraduates to analyze and solve problems using the knowledge they have acquired, this study designs a comprehensive experiment to study the structure-property-effect relationship of newly reported copper phenylacetylene (Ph-C≡C-Cu)-based functional materials. This experiment was designed based on the latest research results by thoroughly examining the basic chemistry knowledge of undergraduate students. In this experiment, different functional group modified Ph-C≡C-Cu materials were prepared, and their structures and physicochemical properties were characterized. Subsequently, their adsorption and photocatalytic degradation activities of methyl orange (MO) were studied. As a basic teaching experiment for undergraduates, this comprehensive experiment examined students' understanding, mastery, and application of the electronic effects of different functional groups in organic chemistry, liquid-solid interface interactions, solid adsorption in solution, catalytic reaction kinetics, and the determination of reaction orders in physical chemistry. Further summarizing and discussing the structure-property-effect relationship of new Ph-C≡C-Cu-based functional materials can encourage and guide undergraduates to design the structures of the target functional materials with specific properties and practical applications based on their knowledge and theories they have mastered, which will cultivate their reverse thinking mode and improve their ability to combine theory and practice.

收稿: 2023-04-18; 录用: 2023-06-08; 网络发表: 2023-06-12

通讯作者, Email: jianghy@nwu.edu.cn

基金资助: 教育部高等学校化学类专业教学指导委员会教学研究与实践项目(H20210602, H20210603); 高等教育理科研究课题(21ZSLK JYYB19); 西北大学本科人才培养建设项目(XM05211666, XM05211650, XM05222044, XM05222079)

Key Words: New functional materials; Copper phenylacetylene; Structure-property-effect relationship; Reverse thinking mode

在现代社会新工科的背景下,培养一大批具有实践性、综合性、创新性的人才,为实现“中国制造2025”行动纲领提供重要的智力和人才支撑,是化学专业最重要的教育目标之一^[1]。在化学和材料专业本科高年级开展化学综合实验,能够有效培养学生理论联系实际和实践操作的能力,指导他们综合运用化学基础知识解决实际生活生产问题的能力,提升学生的创新意识,增强学生学习的积极性^[2]。目前国内高校的综合化学实验中,涉及物理化学方面的综合化学实验较少^[3,4];且大多属于验证性实验,实验课程教学处于“自上而下”的被动教授状态,探索性和思考性不足,无法提升实际科研中所需的逆向思维能力。

Ph-C≡C-Cu是苯乙炔偶联反应过程中产生的一种中间体,长期以来在有机合成领域并没有引起科研工作者广泛的研究兴趣^[5-7]。随着科研的不断发展和深入,不同学科之间的交叉与融合逐渐成为当今科学研究的常态,这为Ph-C≡C-Cu基材料的发展和应用提供了新的机会和战场^[8,9]。本文选取最新报道的Ph-C≡C-Cu基新型功能材料作为研究对象,通过官能团修饰来调控其化学结构,分析不同官能团的电子效应,探究其材料物理化学性质对效能的作用关系。本实验的学习和实践不仅能够帮助学生深入了解科技前沿,将不同学科的知识融会贯通,引导学生理解绿色化学和光催化反应的重要意义,更能启发学生以实际问题为导向,根据所学理论和知识,从源头上出发,对功能材料的结构进行设计,同时也培养了学生“自下而上”的逆向思维方式,提升了学生理论与实践相结合的能力。

1 实验部分

1.1 实验目的

- (1) 掌握光热合成法制备Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的基本原理和方法;
- (2) 掌握红外光谱仪、紫外-可见吸收光谱仪、DSA25型接触角测试仪的仪器结构、测试原理和使用方法;
- (3) 学习并掌握光催化降解反应的实验流程和反应进度监测方法;
- (4) 深入理解Ph-C≡C-Cu基光催化剂的结构-性质-效能关系;
- (5) 启发并引导学生以问题为导向,根据已有的理论出发,从源头上对功能材料的结构进行设计,培养本科生的逆向思维方式。

1.2 实验原理

作为一个优良的可见光催化剂,Ph-C≡C-Cu具有良好的可见光响应,对甲基橙(MO)等染料污染物的降解去除非常有效。根据文献报道,Ph-C≡C-Cu基光催化剂的最高占据轨道(HOMO)主要由Cu的3d轨道组成,最低空轨道(LUMO)主要由sp和sp²杂化的C的2p轨道组成^[10]。如图1所示:将Ph-C≡C-Cu基光催化剂置于光照条件下,当入射光的能量大于或等于其HOMO和LUMO轨道之间的能量差时,电子会从一价铜的3d轨道跃迁到碳的2p轨道,形成具有一定氧化-还原能力的光生空穴-电子对。对于Ph-C≡C-Cu基光催化剂来说,光生电子具有很强的还原能力,可以活化分子氧,产生O₂^{•-}等一系列活性氧自由基,这些活性氧自由基能够有效地将MO等染料分子氧化成CO₂和H₂O等无毒小分子,从而实现工业废水中染料污染物的有效降解和去除。

通过研究Ph-C≡C-Cu分子苯环上取代基的种类和电子效应对Ph-C≡C-Cu基光催化剂的物理化学性质(比如亲疏水性和颜色)的影响,探索苯乙炔铜系列化合物对于MO去除效率(吸附和光催化降解)的影响,进一步讨论基于官能团修饰的Ph-C≡C-Cu基新型功能材料在降解MO过程中的结构、性质和效能之间的关系(如图2所示)。

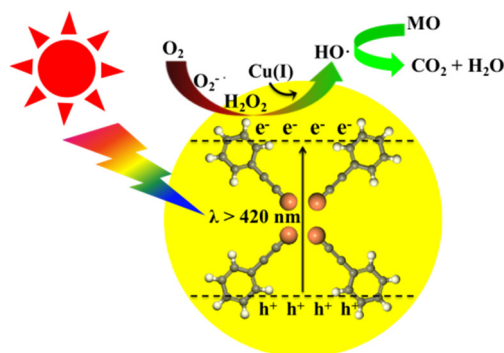
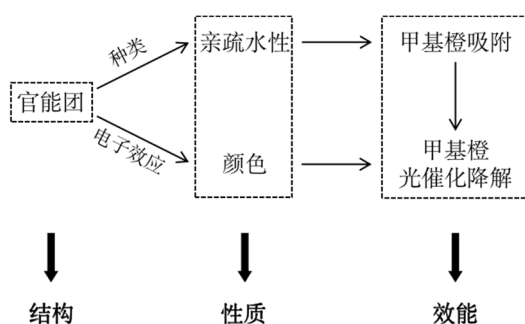
图1 Ph-C≡C-Cu光催化降解MO的示意图^[10]

图2 Ph-C≡C-Cu基材料的结构-性质-效能关系总结

1.3 试剂和仪器设备

实验所需要的主要试剂和仪器如表1和表2所示，其余仪器包含：50 mL烧杯、分析天平、烘箱、钥匙、磁子、铁架台、恒压滴液漏斗、超声波清洗器、250 mL容量瓶、玻璃棒、注射器、0.22 μm微孔滤膜、4 mL离心管。

表1 主要实验试剂

试剂名称	纯度/质量分数	生产工厂
Ph-C≡C-H	98% +	上海阿达玛斯试剂
4-F-Ph-C≡C-H	98% +	同上
3-OH-Ph-C≡C-H	98% +	同上
MO	分析纯	天津市天新精细化工开发中心
NaOH	96%	天津市天力化学试剂有限公司
CuCl	97%	阿拉丁
KBr	光谱纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
CH ₃ OH	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司

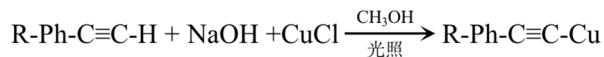
表2 主要实验仪器

仪器名称	型号	制造商
氙灯	PLS-SXE300D	北京泊菲莱
红外光谱	TENSOR 27	德国布鲁克
接触角测试仪	DSA25	德国Kruss
紫外-可见光谱仪	UV-3600 plus	日本Shimadzu

1.4 实验步骤

1.4.1 Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的制备

本实验通过光热合成法制备Ph-C≡C-Cu基新型功能材料^[11]:



(1) 称量211 mg CuCl和320 mg NaOH, 分别转移至于两个小烧杯中, 均溶于20 mL CH₃OH。将NaOH的CH₃OH溶液置于超声中振荡, 直至完全溶解。

(2) 将NaOH的CH₃OH溶液转移至恒压滴液漏斗, 在持续搅拌下加入CuCl溶液中, 控制滴速为: 前10 mL每3–4秒1滴, 后10 mL每秒1滴。

(3) 使用移液枪逐滴加入一定体积(如表3所示)含不同官能团的Ph-C≡C-H。需要注意的是, 4-F-Ph-C≡C-H在保存时为固体, 需待其融化方可取用。

表3 不同的苯乙炔原料所需的体积

Ph-C≡C-Cu基光催化剂	原料	体积/μL
3-OH-Ph-C≡C-Cu	3-OH-Ph-C≡C-H	400
Ph-C≡C-Cu	Ph-C≡C-H	440
4-F-Ph-C≡C-Cu	4-F-Ph-C≡C-H	458

(4) 将配好的混合液置于氙灯下搅拌1 h后, 即可得到的含有产物的悬浊液。

(5) 抽滤, 分别用水和乙醇洗涤2–3次, 并置于60 °C烘箱内进行干燥。

1.4.2 Ph-C≡C-Cu基光催化剂的结构表征

使用FT-IR表征含不同官能团的Ph-C≡C-Cu分子的特征振动峰, 利用KBr压片法测定Ph-C≡C-Cu及其系列材料的红外光谱:

(1) 样品制备: 取100–200 mg干燥KBr充分研磨后倒入压片模具中压制成透明薄片, 并保存在干燥器中; 另取1–2 mg干燥的Ph-C≡C-Cu基材料和100–200 mg干燥的KBr, 一并倒入玛瑙研钵中研磨直至混合均匀, 取少许上述混合物粉末导入压片模具中压制成透明薄片, 并保存在干燥器内。

(2) 以空气为参比扫描背景后, 进行样品测试。把样品放入样品室, 点“Sample”进行测试, 测试完成后可以获得样品的FT-IR谱图。

1.4.3 Ph-C≡C-Cu基光催化剂的性质表征

A、吸光性:

使用UV-Vis Abs测量Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的吸收光谱。取3 mg Ph-C≡C-Cu基材料溶于4 mL 二甲基亚砜(DMSO)中, 测量其200–800 nm的紫外吸收光谱。

B、亲疏水性:

(1) 通过测量含不同Ph-C≡C-Cu光催化剂的静态水接触角来表征其亲疏水性:

(2) 在制样板上分别制备Ph-C≡C-Cu、3-OH-Ph-C≡C-Cu、4-F-Ph-C≡C-Cu的粉末状薄片。

(3) 打开接触角的软件和光源旋钮, 进行亮度和对比度调节, 使电脑画面清晰。

(4) 点击“制造液滴”, 使液滴滴落在样品薄片上。

(5) 调整平台高度直至液滴完全显示在屏幕中并拍摄照片。

1.4.4 Ph-C≡C-Cu基光催化剂的性能表征

(1) MO标准曲线的绘制: 将预先配制好的200 mg·L⁻¹的MO储备溶液分别稀释至12 mg·L⁻¹、10 mg·L⁻¹、8 mg·L⁻¹、6 mg·L⁻¹、4 mg·L⁻¹、2 mg·L⁻¹。使用UV-Vis Abs计测定MO在463 nm处的吸光度, 得到MO的浓度–吸光度曲线。

(2) MO悬浮液配制: 将预先配制好的 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的MO储备溶液分别稀释至20和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。取 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的MO溶液各40 mL, 分别加入40 mg 3-OH-Ph-C $\equiv$ C-Cu、Ph-C $\equiv$ C-Cu和4-F-Ph-C $\equiv$ C-Cu, 进行后续的吸附和光催化降解实验。

(3) 吸附性能测试: 将混合好的MO悬浮液用锡纸包裹后避光搅拌, 每隔10 min用注射器各吸取2 mL MO悬浮液, 透过滤膜注入5 mL离心管中, 进行定量稀释后, 通过UV-Vis Abs进行检测, 监测吸附进程, 直至最大吸收波长处的吸收值不再减小, 即达到吸附平衡。需要注意: 当吸光度超过1时, 应将溶液稀释后进行测量, 以确保吸收值和浓度之间准确的线性关系。

(4) MO的光催化降解性能: 达到吸附平衡后, 将烧杯中的MO悬浮液转移至带有冷凝装置的烧杯中, 并将其置于氙灯下搅拌, 每隔10 min用注射器各吸取2 mL烧杯中的MO悬浮液, 透过滤膜过滤注入5 mL离心管中, 通过UV-Vis Abs检测并监测反应进程, 直至滤出液变成无色。

(5) 根据标准曲线计算吸附和光催化降解过程中所取各样的浓度, 绘制浓度-时间曲线。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

本实验通过红外光谱来表征Ph-C $\equiv$ C-Cu基新型功能材料的结构。如图3所示: 在Ph-C $\equiv$ C-Cu的红外光谱中, 3442 cm^{-1} 处为材料表面吸附水的O—H键的伸缩振动峰^[12]; $1700\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰为苯环骨架的伸缩振动峰^[12]; 746 cm^{-1} 和 683 cm^{-1} 处的峰说明其为单取代苯环^[12]; 515 cm^{-1} 处的峰说明分子中有C $\equiv$ C键^[13]。在3-OH-Ph-C $\equiv$ C-Cu的红外光谱中, 3340 cm^{-1} 和 1236 cm^{-1} 处分别为酚羟基的伸缩振动峰和面内变形振动峰^[12]; 1271 cm^{-1} 处的峰为酚的C—O键的伸缩振动峰^[12]; 779 cm^{-1} 和 679 cm^{-1} 处的峰说明分子中含间位取代的苯环^[12]。在4-F-Ph-C $\equiv$ C-Cu的红外光谱中, 1232 cm^{-1} 处的峰为C—F键的伸缩振动峰^[12]; 827 cm^{-1} 处的峰说明分子中含对位取代的苯环^[12]。通过对位、间位、单取代苯环的巧妙设计, 提高了同学们的红外解谱能力。

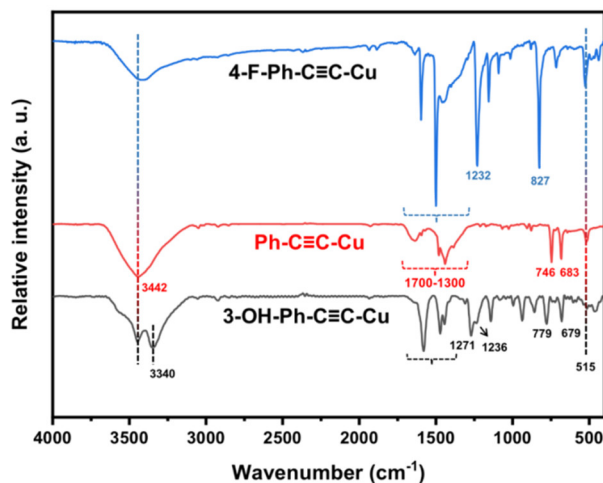


图3 Ph-C $\equiv$ C-Cu基材料的红外光谱

2.2 性质表征

2.2.1 颜色及吸光范围

本实验通过UV-Vis Abs来表征所制备Ph-C $\equiv$ C-Cu基新型功能材料对可见光的吸收。如图4所示: 3-OH-Ph-C $\equiv$ C-Cu的最大吸收波长 $\lambda_{\max} = 416\text{ nm}$ (图4A), Ph-C $\equiv$ C-Cu的 $\lambda_{\max} = 444\text{ nm}$ (图4B), 4-F-Ph-C $\equiv$ C-Cu的 $\lambda_{\max} = 467\text{ nm}$ (图4C)。由此结果可知, 当苯环上连接给电子基团(—OH)时, Ph-C $\equiv$ C-Cu的 $\lambda_{\max}$ 发生蓝移; 当苯环上连接吸电子基团(—F)时, Ph-C $\equiv$ C-Cu的 $\lambda_{\max}$ 发生红移。

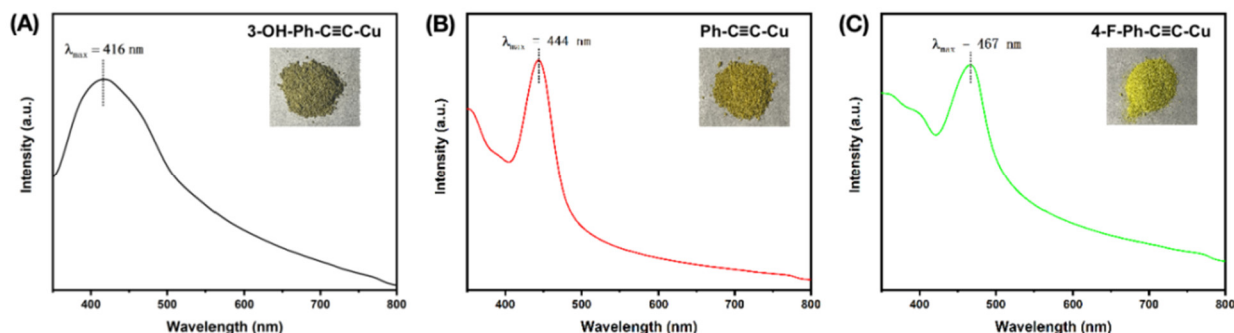


图4 Ph-C≡C-Cu基材料的紫外-可见吸收光谱和制备的粉末样品

根据互补色原理(图5)^[14], 3-OH-Ph-C≡C-Cu的最大吸收波长在紫色区, 因此表现出其互补色——黄绿色, Ph-C≡C-Cu和4-F-Ph-C≡C-Cu的 $\lambda_{\max}$ 在蓝色区, 因此表现出其互补色——黄色, Ph-C≡C-Cu的 $\lambda_{\max}$ 小于4-F-Ph-C≡C-Cu, 因此Ph-C≡C-Cu表现出的颜色偏绿。该实验进一步加深了同学们对于光和物质颜色的认识。

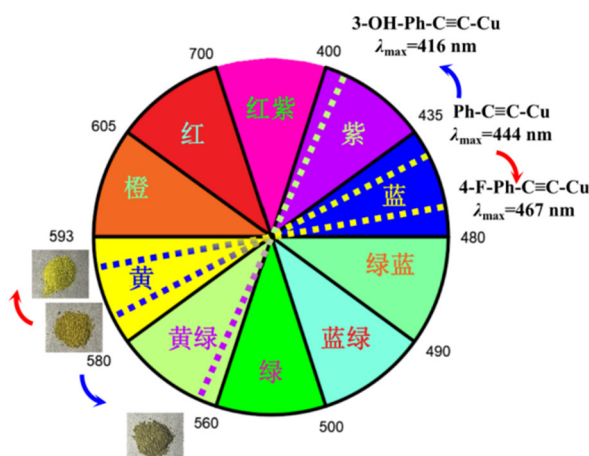


图5 Ph-C≡C-Cu基材料的本体颜色及互补可见颜色

电子版为彩图

2.2.2 亲疏水性

本实验通过测定所制备的Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的稳定水接触角来表征其亲疏水性。如图6所示: 3-OH-Ph-C≡C-Cu的稳定水接触角为70° (图6A), Ph-C≡C-Cu的稳定水接触角为137° (图6B), 4-F-Ph-C≡C-Cu的稳定水接触角为160° (图6C)。其中, 3-OH-Ph-C≡C-Cu为亲水性材料, Ph-C≡C-Cu和4-F-Ph-C≡C-Cu为疏水性材料。这是由于-OH为亲水性基团, -F为疏水性基团的缘故。该实验加强了同学们对界面现象的认识, 了解并掌握了接触角的测试原理和测试方法。

2.3 性能表征

2.3.1 标准曲线的建立

分别配制2 mg·L⁻¹、4 mg·L⁻¹、6 mg·L⁻¹、8 mg·L⁻¹、10 mg·L⁻¹、12 mg·L⁻¹的MO溶液, 在 $\lambda = 463$ nm (MO的 $\lambda_{\max}$)处测其吸收值, 可得MO在该波长处的吸收值和浓度之间的关系, 如图7所示。

2.3.2 吸附性能及其反应动力学

不同Ph-C≡C-Cu基材料对MO的吸附过程如图8所示。由图可知: 3-OH-Ph-C≡C-Cu亲水性更好, 更利于分散在水中与染料分子接触, 因此对MO的吸附量最大, 其饱和吸附量为171.7 mg·g⁻¹。而

Ph-C≡C-Cu和4-F-Ph-C≡C-Cu对MO的饱和吸附量分别为 $9.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这与其亲水性顺序一致,说明材料的亲水性是影响MO吸附的主要因素。

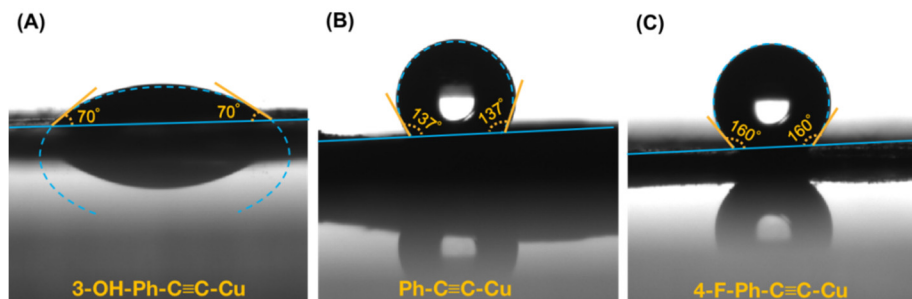


图6 Ph-C≡C-Cu基材料的稳定水接触角

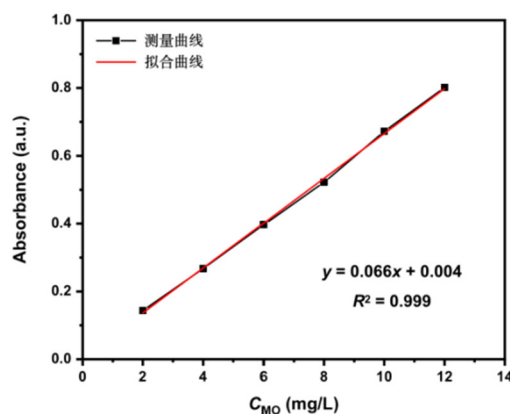


图7 MO在463 nm处的吸收值-浓度的标准曲线

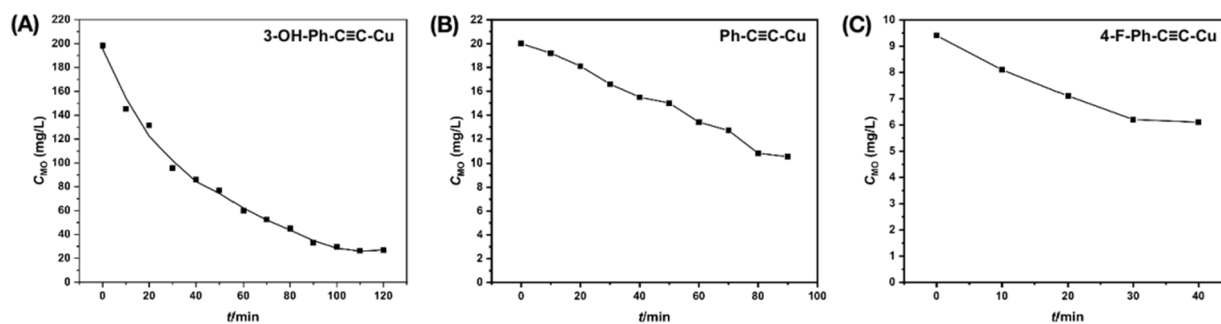


图8 不同Ph-C≡C-Cu基材料吸附MO实验: MO的浓度-时间曲线

我们对饱和吸附量最大的3-OH-Ph-C≡C-Cu吸附过程的动力学进行分析,通过不同反应级数的动力学方程对其吸附量-时间曲线进行拟合^[15],根据拟合结果中所得 k 值的 R^2 (拟合优度)来判断其反应级数。 R^2 越接近1,说明拟合曲线越接近真实曲线。如图9所示,3-OH-Ph-C≡C-Cu对MO的吸附过程最接近一级反应。

图中: C_0 为初始浓度, C_x 为剩余浓度,单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为反应时间,单位为min(分钟)。

2.3.3 光催化性能及其反应动力学

吸附平衡后,用全光谱氙灯对上述混合液进行光照,并检测不同时间、溶液中MO的浓度。不同

Ph-C≡C-Cu基材料对MO的光催化降解过程如图10所示。由图10可知：MO降解速率最快、降解效率最高的是3-OH-Ph-C≡C-Cu，其次为Ph-C≡C-Cu，最后为4-F-Ph-C≡C-Cu。该顺序与其饱和吸附量和亲水性一致。说明材料的亲水性能通过对水溶性染料分子MO的吸附的影响，来进一步影响其光催化降解效果。

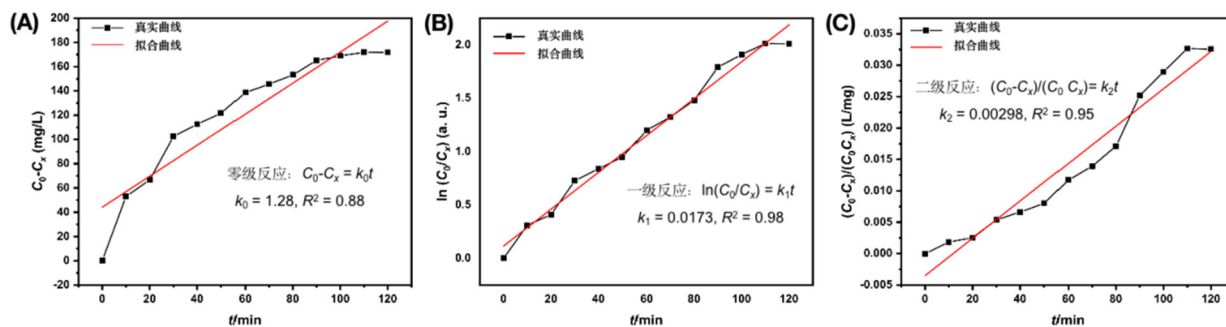


图9 3-OH-Ph-C≡C-Cu吸附MO的动力学过程：不同反应级数的拟合曲线

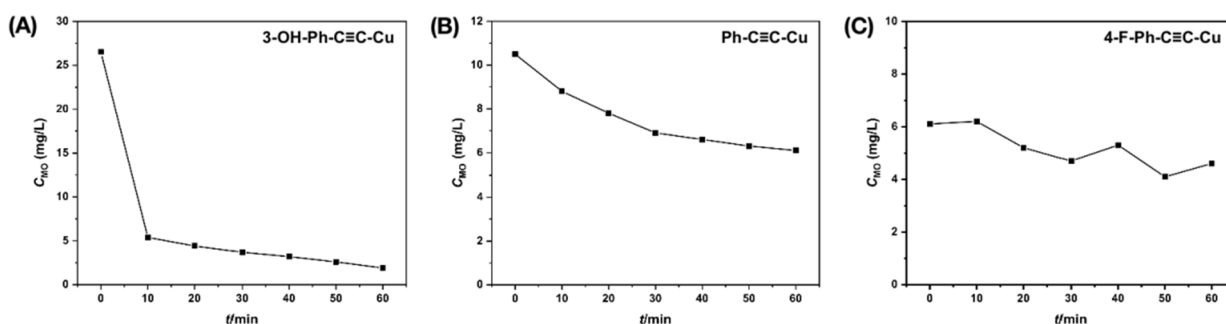


图10 不同Ph-C≡C-Cu基材料光催化降解MO实验：MO的浓度-时间曲线

实验结果表明：光催化降解效率最高的是3-OH-Ph-C≡C-Cu，其次为Ph-C≡C-Cu，最后为4-F-Ph-C≡C-Cu。该顺序与其亲水性和饱和吸附量一致。说明材料的亲水性能通过对水溶性染料分子MO的吸附来影响其光催化降解效果。同样，我们对效果最好的3-OH-Ph-C≡C-Cu光催化降解MO过程的动力学进行拟合分析，结果如图11所示：3-OH-Ph-C≡C-Cu对MO的光催化降解过程也同样最接近一级反应。这进一步巩固了反应动力学中反应级数的相关概念，也能促进学生对光催化反应的了解和认识。

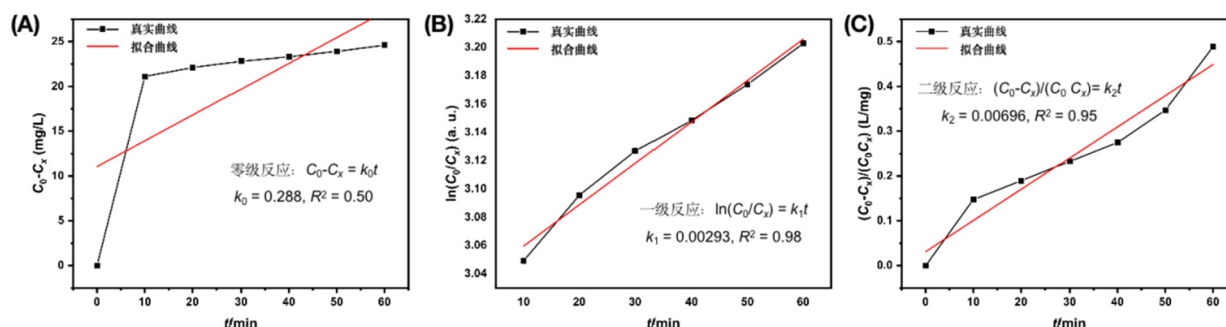


图11 3-OH-Ph-C≡C-Cu光催化降解MO的动力学过程：不同反应级数的拟合曲线

2.4 Ph-C≡C-Cu基新型功能材料的结构-性质-效能关系总结

(1) 当苯环上连接给电子基团(—OH)时, Ph-C≡C-Cu材料的 $\lambda_{\max}$ 发生蓝移;当苯环上连接吸电子基团(—F)时, Ph-C≡C-Cu材料的 $\lambda_{\max}$ 发生红移。

(2) 当苯环上连接亲水性基团(—OH)时, Ph-C≡C-Cu材料的稳定水接触角减小, 亲水性增强;当苯环上连接疏水性基团(—F)时, Ph-C≡C-Cu材料的稳定水接触角增大, 疏水性增强。

(3) Ph-C≡C-Cu基材料的亲水性越强, 对水溶性染料MO的吸附越多。

(4) Ph-C≡C-Cu基材料对MO的吸附越强, 光催化降解能力也越强;由于三种材料的 $\lambda_{\max}$ 接近, 因此对光催化降解能力影响不大。

3 思考与讨论

3.1 思考题

- (1) 什么是亲水材料、疏水材料、超亲水材料、超疏水材料? 各有什么应用前景?
- (2) 如何设计Ph-C≡C-Cu的结构, 能够增强其亲水性和疏水性?
- (3) 针对光催化分解水和CO₂还原反应, Ph-C≡C-Cu基光催化剂的结构应该如何设计?

3.2 拓展实验

- (1) 3-OH-Ph-C≡C-Cu吸附和光催化降解MO的最优条件探索(光源、温度、酸碱环境、共存离子等)。
- (2) 光催化降解MO的工业化应用和设计。

4 课程安排

本实验制备了三种不同官能团的Ph-C≡C-Cu基新型功能材料, 使用多种表征手段表征了其结构和相关物理化学性质, 探究其对甲基橙(MO)的吸附和降解性能, 涉及物理化学、有机化学、无机化学以及仪器分析等多个学科的实验操作技能, 因此建议以综合化学实验的形式在本科的高年级阶段开展。在实验过程中, 建议以小组为单位开展实验: 每四人为一组共同合作完成, 教学时间建议共计10小时, 表4是我们给出的教学时间安排建议:

表4 教学时间建议

时间	实验项目安排
第一天上午08:30-10:30	制备三种苯乙炔铜基材料
第一天下午14:30-17:00	测定样品的红外光谱及紫外-可见吸收光谱
第二天上午08:30-11:00	测定样品的亲疏水性并绘制MO的标准曲线
第二天下午14:30-17:30	三种材料对MO的吸附、降解实验

5 注意事项

在本实验的操作过程中, 请注意全程佩戴手套和口罩;制备样品的过程中, 由于苯乙炔具有一定挥发性和毒性, 请注意全程在通风橱中进行;使用氙灯时, 请佩戴好墨镜以防灼伤双眼。

6 实验效果

在传统的实验教学中, 我们往往会拿到一个结构已知、性质确定的化合物, 并对其性质和效能进行验证, 即一种从结构到性质到效能的“自上而下”的教学模式;而在实际的生产生活中, 我们往往需要跟据实际的需要, 对材料的结构进行设计, 即一种从效能反推性质、再到结构设计的“自下而上”的思维模式。这种思维方式无论在科研实践还是日常生产生活中都是非常必要的, 同时, 也是我们的学生最缺乏、最不擅长的。事实上, 在实际生产生活中, 我们往往需要根据实际需求对

材料及其结构进行筛选和设计。比如：我们需要寻找一种能够高效去除水溶性污染物的材料，那我们首先推测它需要具有良好的亲水性，然后对其结构进行修饰，使其同时具备亲水性和高效去除水溶性污染物的性能。因此，我们通过设置思考题，启发学生进行“自下而上”的思考。该实验的设置能很好地启发学生“自下而上”的思维模式，在实验的过程，我们也看到了更多同学有了根据实际需要思考所需结构的意识。

该实验所需的实验仪器及实验药品都较为廉价和易于获得，教学成本较低；以一次实验32人计算，共计八组，每人每次的实验成本约为10元。本实验已被本校高年级学生反复实验验证，表现出较好的重复性和易于操作性。

7 结语

本论文以 $\text{Ph-C}\equiv\text{C-Cu}$ 基新型功能材料为研究对象，通过研究和讨论苯环上官能团对其物理化学性质的影响，总结出基于官能团修饰的 $\text{Ph-C}\equiv\text{C-Cu}$ 基新型功能材料的结构-性质-效能关系。该实验融合了有机化学中不同官能团的电子效应、物理化学中液-固界面相互作用、固体在溶液中的吸附、催化反应动力学以及反应级数的判定等化学基础知识，教会学生综合运用不同学科的基础知识。基于传统“自上而下”的教学模式，本文通过思考题和拓展实验的设计，启发学生立足于已掌握的基础知识，从实际需求出发，有针对性地对材料的结构进行设计，不仅锻炼了学生的实验操作技能，还培养了学生“自下而上”的逆向思维模式，提升了学生的思维品质，能够很好地实现综合化学实验的教学和育人目标。

参 考 文 献

- [1] 赵德刚, 王琦. 教育教学论坛, **2018**, 10 (13), 205.
- [2] 李珏, 张逢星. 高等理科教育, **2003**, 11 (1), 50.
- [3] 李静萍, 王九思, 许力, 郝艳玲, 李丛芬. 天水师范学院学报, **2006**, 26 (2), 79.
- [4] 程爱玲, 耿平, 王清江, 陈启明. 实验室研究与探索, **2010**, 29 (11), 308.
- [5] Sagadevan, A.; Ragupathi, A.; Lin, C.-C.; Hwu, J. R.; Hwang, K. C. *Green Chem.* **2015**, 17, 1113.
- [6] Beniazza, R.; Lambert, R.; Harmand, L.; Molton, F.; Duboc, C.; Denisov, S.; Jonusauskas, G.; McClenaghan, N. D.; Lastécouères, D.; Vincent, J.-M. *Chem. Eur. J.* **2014**, 20 (41), 13181.
- [7] Oishi, T.; Yamaguchi, K.; Mizuno, N. *ACS Catal.* **2011**, 1, 1351.
- [8] Feng, N.; Gao, C.; Guo, C.-Y.; Chen, G. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 5603.
- [9] Liang, Q.; Chang, X.; Su, Y.; Mugo, S. M.; Zhang, Q. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 18014.
- [10] Jiang, H.-Y.; Zhou, P.; Wang, Y.; Duan, R.; Chen, C.; Song, W.; Zhao, J. *Adv. Mater.* **2016**, 28 (41), 9776.
- [11] Qian, J.; Dang, W.; Li, J.; Zhang, W.; Tian, M.; Wang, N.; Song, W.; Lv, L.; Jiang, H.-Y. *Catal. Sci. Technol.* **2021**, 11, 2379.
- [12] 常建华, 董绮功. 波谱原理及解析. 第3版. 北京: 科学出版社, 2012: 53-82.
- [13] Garbusova, I. A.; Alexanjan, V. T.; Leites, L. A.; Golding, I. R.; Sladkov, A. M. *J. Organometal. Chem.* **1973**, 54, 341.
- [14] 孙秀香. 物理教师, **1994**, 15 (12), 21.
- [15] 傅献彩, 沈文霞. 物理化学. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 163-165.