

光学信息加密材料的综合化学实验设计

孔祥贵, 史文颖*

北京化工大学化学学院, 北京 100029

摘要: 该研究探讨化学实验教学改革, 结合光能存储技术和信息加密技术, 旨在提升学生实践能力、创新精神和问题解决能力。通过制备碳点-无机盐复合材料, 使学生理解光能存储原理; 设计信息加密实验, 强化信息安全意识和环保理念。强调实验教学培养学生素质、团队合作, 为化学教育改革提供新思路和实践案例。

关键词: 综合化学实验; 教学模式改革; 光能存储; 信息加密技术

中图分类号: G64; O6

Comprehensive Chemical Experimental Design of Optically Encrypted Materials

Xianggui Kong, Wenying Shi *

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

Abstract: This study investigates the reform of chemical experimental teaching by integrating light energy storage technology with information encryption technology, with the goal of enhancing students' practical skills, innovative thinking, and problem-solving abilities. By preparing carbon dot-inorganic salt composite materials, students develop an understanding of the principles of light energy storage. Additionally, the design of information encryption experiments fosters awareness of information security and promotes environmental sustainability. This research highlights the crucial role of experimental teaching in cultivating students' competencies and teamwork abilities, providing new perspectives and practical examples for the reform of chemical education.

Key Words: Comprehensive chemical experiment; Teaching model reform; Light energy storage; Information encryption technology

在21世纪, 科技飞速发展, 社会变革加快, 教育的角色和意义也在不断演变。化学实验教学作为化学学科中一项至关重要的教学形式, 不仅仅是传授知识和技能的过程, 更是培养学生探究精神、创新意识和实践能力的有效途径^[1]。尤其是综合化学实验课程, 能够提供一个多维度的实验环境, 使得实验设计更加贴近实际工业和科研需求。通过综合化学实验, 可以更好地理解化学原理在不同条件下的应用, 以及这些原理如何相互作用, 这对于化学领域的研究和教育都是极其宝贵的。为此, 我们基于文献调研以及笔者多年来对光能材料的制备及应用的研究成果^[2], 面向三年级本科生开设了“简单无机盐诱导碳点的光能可持续释放及其信息加密应用”的综合化学实验。

信息加密材料的制备对于当今社会的信息安全至关重要。随着信息技术的快速发展, 数据泄露和网络安全事件频发, 对高效、可靠的信息保护技术的需求日益增长。预计到2026年, 全球信息保

护市场的需求将达到约2087.1亿美元^[3]。在这种背景下,开发新型的信息加密材料,尤其是能够提供多级加密和动态存储的材料,变得尤为重要。本综合化学实验将简单的水热方法与溶剂蒸发方法相结合,获得了碳点-无机盐复合光学材料。选择了低成本、无毒性和易于合成的碳点(CDs)作为存储和转换的主体材料,不仅可以让学生了解和掌握前沿的纳米科技,而且能够激发他们对环保型材料的研究兴趣,建立起对可持续发展的认识。实验过程不仅将无机化学实验与荧光发射光谱、荧光稳态寿命分析、X射线粉末衍射等现代分析测试手段相结合,加强学生对实验结果的综合分析和问题解决能力;而且可以采用便携式紫外手电筒作为激发光源,能够提供即时的实验现象观察,极大地增强了实验的直观性和互动性。这种直观的观察方式能够让学生即时看到实验效果,如碳点-无机盐复合光学材料的光能存储和释放过程,从而有效地激发学生对化学现象的好奇心和探索欲。通过这种实验方式,学生能够更加深刻地理解光能转换和信息加密的化学原理,同时也锻炼了他们的观察力和实验技能。便携式紫外光源的引入,使得实验不再局限于传统的实验室环境,增加了实验的灵活性和趣味性,这对于提升学生的学习兴趣 and 积极性具有重要作用。本实验的制备方法简单,实验材料安全无毒、绿色环保^[4],非常适合在本科生教学中推广。

将科研成果应用于教学,特别是将前沿的无机基质诱导碳点的光学性能变化的研究^[5]纳入实验教学,对于高年级本科生来说,不仅能够提升他们的实验操作技能,还能增强他们分析问题的能力。通过设计以无机盐诱导碳点的合成及其性质研究为核心的综合化学实验,学生可以直接参与到光学材料的制备过程中,不但有助于理解光能存储和持续释放机制,还能通过实验操作掌握相关仪器的使用方法。这种教学方式能够培养学生的创新思维和解决实际问题的能力,对于他们的未来发展具有重要意义。

1 实验目的

(1) 理解光能存储原理:使学生掌握光能存储和持续释放的基本原理,了解光能转换和存储技术在新能源领域的应用前景。

(2) 掌握材料制备技能:通过实践操作,使学生熟练掌握碳点-无机盐复合材料的制备方法,包括EDTA与金属络合以及水热合成法。

(3) 培养科研探究能力:激发学生的科研兴趣,培养他们独立进行科学探究的能力,包括实验设计、数据分析和问题解决。

(4) 增强信息安全与环保意识:通过信息加密实验,提升学生的信息安全意识,同时强调实验中的环保操作,培养学生的绿色化学理念。

(5) 提升综合素质和团队协作:在实验过程中,强调团队合作的重要性,提升学生的沟通协调能力,同时通过撰写实验报告和展示成果,锻炼学生的学术表达和科研素养。

2 实验部分

2.1 实验原理

本实验课程的核心原理涉及复合材料制备、碳点光学性质、长持续发光、光能的存储与转换、信息加密技术的应用等,具体原理如下。

2.1.1 复合材料制备原理

Zn与EDTA-2Na-Mg的络合原理:在络合化学中,EDTA(乙二胺四乙酸)是一种常用的螯合剂,它能与多种金属离子形成稳定的螯合物。EDTA分子含有两个氮原子和四个氧原子,这些原子能提供孤电子对与金属离子形成配位键。EDTA与金属离子的络合能力取决于它们的络合常数,这是一个量化络合反应稳定性的参数。Zn能够与EDTA-2Na-Mg络合是由于Zn²⁺与EDTA形成的络合物通常具有较高的稳定性。三种离子的络合反应形成常数具有如下关系:

$$\lg K_{\text{Zn-EDTE}} (16.5) > \lg K_{\text{Mg-EDTA}} (8.7) > \lg K_{\text{Na-EDTA}} (1.7)$$

因此,在存在 Zn^{2+} 的情况下,它会与EDTA形成更稳定的络合物,从而替换掉原有的钠和镁离子。

碳点-无机盐复合光学材料的制备原理:本实验结合了水热法和溶剂蒸发法。首先,通过水热合成法制备小分子碳点(Carbon Dots, CDs)。该过程在封闭的反应釜中进行,含碳前驱体(Zn -EDTA)在高温、高压和水热环境下发生水解和聚合形成具有特定结构的碳点。这种方法利用了水在高温高压下的非极性溶剂特性,有助于CDs的形成和生长。其次,由于无机盐离子在水热条件下不变,随后在溶剂蒸发过程中,与形成的CDs共同结晶,形成了无机盐基质固定的CD复合光学材料。

2.1.2 碳点的光学性质

CDs作为一种新型的碳基纳米材料,具有独特的光学性质,如可调谐的荧光发射和良好的光稳定性^[6,7]。CDs的发光原理是一个复杂的过程,涉及到核心态和表面态的多种作用。

1) 核心态发光。核心态由 sp^2 和 sp^3 杂化的碳原子构成,这些碳原子可能形成多环芳烃结构或类似石墨烯的结构。核心态发光是指在这些结构中,电子可以通过 $\pi-\pi$ 和 $n-\pi$ 跃迁产生发光。此外,CDs的核心态还可能包含分子荧光团,这些荧光团的电子跃迁过程也是发光的重要来源;

2) 表面态发光。CDs表面态是指一些特定官能团(如羟基、羧基、氨基等)。表面态发光是指这些官能团可以作为发光中心,通过电子跃迁过程贡献发光。表面态的能带结构受到氧元素含量及氧化态的影响,从而改变发光波长和强度;

3) 随着CDs尺寸的减小,其能级间隙增大,导致发光波长发生红移。这种尺寸依赖的光学性质使得CDs在不同尺寸下展现出不同的发光特性。

2.1.3 长持续发光(LPL)现象

长持续发光,又称长余辉发光,是指材料在激发光源移除后,仍能保持一段时间的发光特性^[8,9]。LPL材料的发光原理涉及光致发光,即材料在光源激发下,电子从基态跃迁到激发态,然后在激发态存储能量。当激发停止后,这些电子逐渐返回到基态,同时将储存的能量以光的形式释放出来。这个过程涉及到两个关键的物理过程:电子的跃迁和能量的储存与释放。本实验中,CDs的三线激子在无机基质的两种结构效应诱导下,经历了两条不同的激子转移路径,使CD的LPL具有了不同颜色。例如,在二元无机盐 $Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl$ 的结构限域效应下,CDs的三线态激子的振动和转动被减弱,从而抑制了部分非辐射跃迁过程,增强了CDs的绿色LPL性能;在二元无机盐 $Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl$ 的结构缺陷效应下,利用缺陷提供能量陷阱,稳定和存储CDs的三线态激子,延长了寿命。由于激子经历的路径更多,使其能量损耗多,因此CDs的发射波长较长呈现黄色LPL性能。基于二元无机盐的两种结构效应的协同,CDs实现了时间相关的动态LPL现象(图1)^[10]。

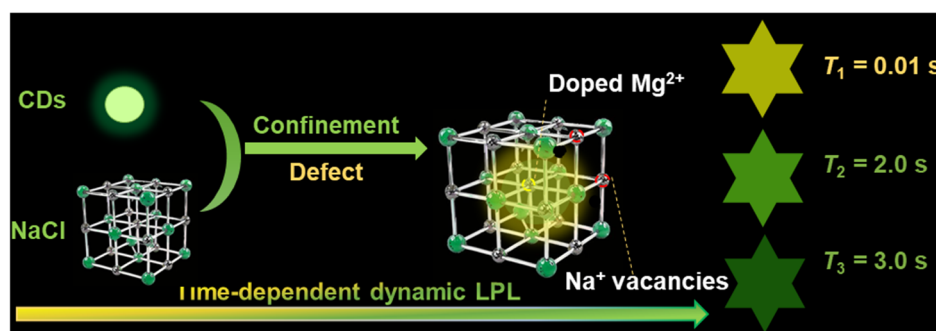


图1 碳点-无机盐复合材料的长持续发光现象的机理

2.1.4 光能存储与转换原理

光能存储材料能够通过吸收光源(如紫外光或可见光)激发电子到较高能级,随后在激发态电子返回基态时释放光能。本实验中的材料,碳点-无机盐复合材料,通过借助二元无机盐的结构限域和结构缺陷两种结构效应,使CDs实现了光能的有效存储和在特定条件下的持续释放(详解见2.1.3)。

2.1.5 信息加密应用

基于光能存储材料的发光特性,设计信息加密密码。例如,利用具有光能持续释放特性的材料来设计加密图案,在特定条件下(如关闭光源后)显示隐藏信息,实现信息的安全存储和传输^[11]。基于发射不同时间的颜色变化,实现动态信息加密^[12]。通过本实验,学生不仅能够深入理解上述原理,还能够通过实际操作观察和验证这些原理的实际应用,从而加深对材料科学和信息安全技术的认识。

2.2 实验试剂

乙二醇四乙酸二钠镁(EDTA-2Na-Mg)(分析纯,上海抚生实业有限公司)、氯化锌(分析纯,福晨化学试剂有限公司)、盐酸(优级纯,北京市通广精细化工公司)、去离子水、荧光粉(4,4'-联苯二甲酸)(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司)、硅胶(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司)。

2.3 实验仪器及耗材

烧杯、量筒、高压水热反应釜、培养皿、磁子、滤纸、药匙、玻璃棒、双面胶、移液枪、布氏漏斗、抽滤瓶、一次性滴管、记号笔、剪刀、厚手套(特厚,用于200度烘箱取样)、玛瑙研钵、酒精棉球、护目镜、电子天平、电热鼓风干燥箱、365 nm紫外灯(SV005 10 W)、395 nm 紫外灯(SV005 10 W)、磁力搅拌加热台、循环水式多用真空泵、pH计、X射线粉末衍射仪(D8A25,德国布鲁克仪器公司)、荧光分光光度计(F-7000,日本日立公司)、稳态-瞬态荧光光谱仪(FLS980,英国爱丁堡公司)。

2.4 实验步骤

2.4.1 Zn-CDs/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl复合材料的制备

(1) Zn与EDTA-2Na-Mg络合:将6 mmol EDTA-2Na-Mg粉末溶解在65 mL去离子水中,获得澄清透明溶液(溶液A)。将100 μ L浓HCl加入到20 mL的去离子水中制成溶液B,然后将6 mmol ZnCl₂溶解到溶液B中制成溶液C。将溶液C与溶液A混合,用浓HCl(未稀释)调节溶液pH=2,在室温下搅拌0.5 h,获得乙二醇四乙酸锌/无机盐复合材料溶液Zn-EDTA/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl,备用。

(2) Zn-CDs/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl粉末制备:取60 mL上述步骤(1)合成的Zn-EDTA/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl复合材料溶液转移到反应釜的内衬中。然后用恒温鼓风干燥箱在200 $^{\circ}$ C下加热3 h。关闭鼓风干燥箱,鼓风0.5 h。带上厚隔热手套和护目镜,取出反应釜,放入水池(千万不要先放水,以免手套浸湿烫手!),再开水龙头放水至反应釜的3/4高度,为节约用水每个水池可放5-6个反应釜。静置0.5 h后可取出反应釜。打开反应釜后,对溶液进行抽滤,然后将得到的滤液(注意!)倒入两个培养皿(12 cm \times 12 cm)中,随后在190 $^{\circ}$ C条件下干燥0.5 h,取出样品。待样品冷却至室温后,在365 nm紫外灯下观察光能释放时间(手机录像)。然后,研磨以获得粉末,备用(图2)。

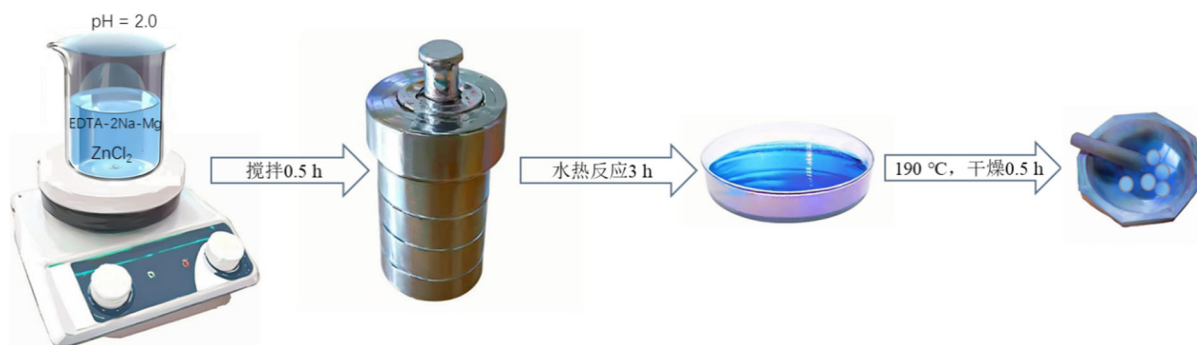


图2 水热法制备Zn-CDs/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl粉末的合成路线

2.4.2 Zn-CDs/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl复合材料的信息加密设计

用步骤2.4.1制备的粉末样品设计简单的信息加密密码:在10 cm \times 10 cm滤纸上画出数字模型“88”。用双面胶沿着数字“88”粘成“67”和其余部分,将Zn-CDs/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl粉末粘至“67”

处,其余部分粘贴荧光粉(4,4'-联苯二甲酸)。由于两种粉末的蓝色荧光背景相同,因此数字“88”在365 nm紫外灯激发下可观察到数字“88”,而在关闭365 nm紫外灯1 s内可看到黄色数字“67”,2 s时可看到绿色数字“67”。

3 结果与讨论

本研究成功合成了一系列具有时间依赖性磷光颜色(TDPC)特性的碳点(CDs)/无机纳米复合材料。实验结果表明,通过特定的化学结构设计,我们能够调控CDs的发光行为,实现从黄色到绿色的磷光颜色变化,这一现象在信息安全领域具有潜在的应用价值。

3.1 光致发光性质与TDPC特性

实验中观察到,Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 纳米复合材料在365 nm紫外灯照射下首先发出黄色磷光,并在约2 s后逐渐转变为绿色,持续时间可达4 s(图3a)。这种独特的TDPC现象归因于无机基质的结构限域和结构缺陷的双重效应。365 nm激发下,Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的荧光和磷光发射峰分别位于430和560 nm(图3b)。

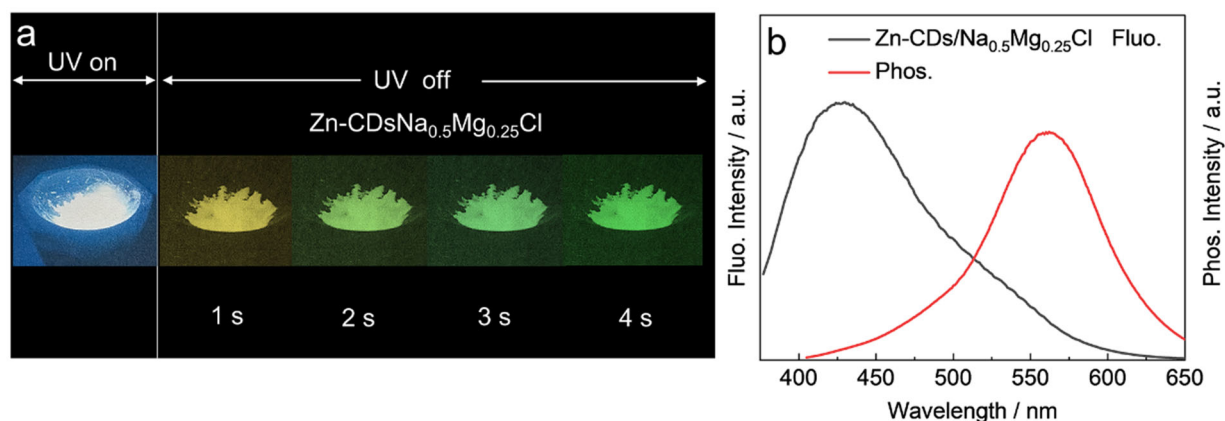


图3 (a) Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 在365 nm紫外灯开关前后的光学照片;
(b) Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的光致发光光谱(荧光, Fluo; 磷光, Phos)

3.2 结构特征分析

HRTEM图像中可以清楚地观察到晶格条纹,晶格间距为0.24 nm,其归属于石墨的(100)晶面(图4a),这表明客体部分Zn-EDTA经过水热之后变成Zn-CDs。NaCl晶体中的两个原子(Na和Cl)大小大致

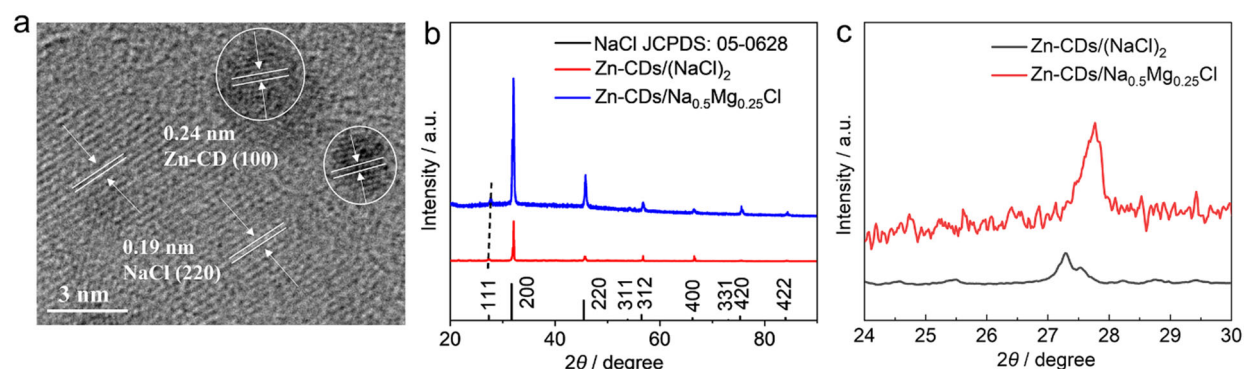


图4 (a) Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的HRTEM图像;(b) Zn-CDs/ $(\text{NaCl})_2$ 和Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的XRD谱图;
(c) Zn-CDs/ $(\text{NaCl})_2$ 和Zn-CDs/ $\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的XRD局部放大图

相等, 结构相对稳定。然而, MgCl_2 晶体中两个原子(Mg和Cl)大小不同, 导致其晶体结构不如NaCl稳定, 这可以通过 MgCl_2 的熔点(784 °C)比NaCl的熔点(802 °C)低来证明。因此, 即使合成过程中有 Mg^{2+} 存在, 产物中的无机基质仍以NaCl为主(图4b)。与 $\text{Zn-CDs}/(\text{NaCl})_2$ ($2\theta = 27.28^\circ$)相比, $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的衍射峰移动到 $2\theta = 27.75^\circ$, 证明 Mg^{2+} 掺杂到了NaCl的晶格(图4c)。经过上述的 Mg^{2+} 离子掺杂, 不但可以保留NaCl结构限域效应, 而且引入了结构缺陷, 为调控CDs的发光性质提供了新的途径。

3.3 瞬态磷光衰减谱图

图5a为 $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的磷光寿命衰减谱图, 拟合结果显示寿命符合双指数衰减模型, 磷光寿命为464 ms。显示出两个不同的衰减时间常数, 在0–100 ms内, 存在良好线性关系: $I^{-1} \times 10^6 = 8.38t + 333$, R^2 为0.99, 而在100–1000 ms时, 线性关系为 $I^{-1} \times 10^5 = 1.89t - 294$, 但是线性关系并不好, R^2 仅为0.95(图5b)。这一结果表明激子有两条传输路径, 一条为结构限域主导, 另一条为结构缺陷主导。系列研究结果显示 $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的磷光发射途径之一与隧穿相关, 其中NaCl基质中的钠缺陷(V_{Na})作为稳定和捕获中心, 引导激子的转移路径。

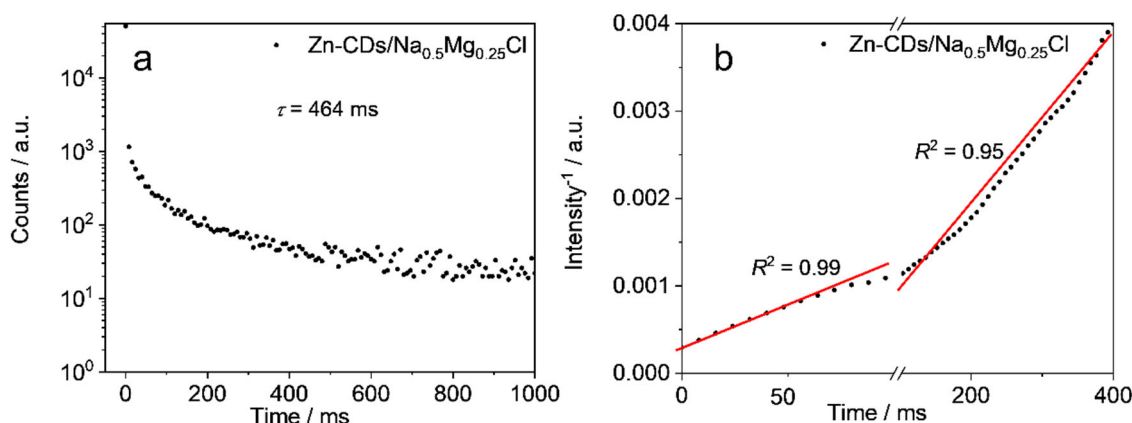


图5 (a) $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 磷光寿命衰减谱图;
(b) $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 磷光强度(I^{-1})和时间(t)之间的函数关系图

3.4 信息加密应用

利用 $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 的TDPC特性, 我们设计了一种数字磷光编码系统, 用于实现高级动态信息加密(图6)。通过在特定时间读取不同的磷光颜色, 可以解读出不同颜色的数字信息, 从而在时间维度上实现信息的加密和保护。



图6 $\text{Zn-CDs}/\text{Na}_{0.5}\text{Mg}_{0.25}\text{Cl}$ 粉末材料信息加密图

4 实验教学安排

本实验课程针对我校应用化学化学(优培计划)专业的大三学生开设,采用小组教学,每组人数3-4人,实验共10个学时,教学过程的流程如下:

第一阶段(1学时)。(1) 理论学习:各小组在课前在线整理与实验相关的资料,并准备相关问题。教师在线下对实验相关知识进行讲解,并针对学生提出的问题提供解答;(2) 实验准备:教师讲解实验流程、所需材料、仪器使用和安全规范。

第二阶段(5学时)。(1) 合成实践:每组学生分工合作,1人负责样品的称量,1人负责仪器固体样品溶解仪器的准备,1人负责液体样品的量取。通过水热法和溶剂蒸发法联合,制备Zn-CDs/Na_{0.5}Mg_{0.25}Cl复合材料;(2) 材料表征:教师现场演示仪器的使用方法,后续每位同学负责一台仪器的操作。使用X射线衍射(XRD)分析材料的晶体结构,利用瞬态和稳态的荧光和磷光光谱技术研究材料的发光特性。

第三阶段(2学时)。(1) 加密设计:教师指导学生如何利用材料的光能存储特性设计加密图案;(2) 实践操作:学生分组设计信息加密方案,2人负责固体粉末的密码设计,另外2人负责明胶封装的样品密码设计。

第四阶段(2学时)。(1) 数据分析:教师检查每组学生所获得粉末样品的光持续释放和密码的加密和解密的录像,并针对每组不同现象讲授实验过程中哪些参数的影响导致了现有结果,对学生所获得材料的光能存储效率和信息加密效果进行评估;(2) 报告撰写意见:针对每组观察到的不同现象给出撰写实验报告时需要关注的分析内容。最后学生课下完成实验报告撰写,一周后由课代表交给教师。

5 实验注意事项

5.1 实验室规章制度与安全教育

强调实验安全的重要性,确保学生在实验前接受全面的安全教育。学生必须熟悉并遵守实验室的所有规章制度,包括穿戴适当的实验服、安全眼镜和其他必要的个人防护装备。学生应了解紧急疏散路线和急救措施,熟悉消防设施和安全设备的位置。

5.2 节约使用试剂与环保意识

教育学生合理取用试剂,避免浪费,以减少化学废物的产生。强化环保意识,确保学生了解化学废物对环境的潜在影响,并按照规定的方法处理废液和废固。

5.3 实验操作与科学思维

鼓励学生在实验中积极思考,对于观察到的实验现象提出合理的假设。指导学生设计实验来验证自己的假设,培养他们的科学探究能力和解决问题的能力。

5.4 严谨的科学态度与数据真实性

培养学生严谨的科学态度,教育他们在实验过程中细致观察、准确记录。强调实验数据的客观性和真实性,要求学生在数据分析和报告撰写中保持诚实,不得篡改或伪造数据。

5.5 水热反应釜的安全操作

特别强调水热反应釜的安全使用,包括使用前的检查、装填物料的规范、监控温度和压力、冷却与开釜的正确方法。确保学生了解水热反应釜操作中的潜在风险,并掌握相应的安全措施。

通过这些详细的注意事项,可以为学生提供一个安全、高效、富有教育意义的实验学习环境,帮助他们掌握化学实验的基本技能,同时培养他们的环保意识和科学探究精神。

6 结语

通过本次光能存储和持续释放材料制备及其信息加密应用的实验课程,我们不仅成功加深了学生对化学科学的理解,而且辅助性地融入思政元素,旨在培养学生的综合素质和社会责任感。学生

们在掌握化学实验技能的同时,也增强了对国家安全、环境保护和科技创新重要性的认识。实验课程中,学生们通过亲手制备碳点-无机盐复合材料,学习光能存储和长持续发光的原理,并通过实验探索信息安全领域的应用。在此过程中,学生们体会到科学研究的严谨性和创新性,同时也意识到作为未来科研人员,对国家安全和社会进步所承担的责任。在实验安全方面,特别强调规范操作的重要性,确保每位学生都能在安全的环境下进行实验操作。通过实验流程的规范和安全教育,学生们学会如何在实验中保护自己和他人的安全,培养对环境保护的责任感。此外,实验课程还注重培养学生的团队合作精神和沟通协调能力。在小组合作中,学生们学会如何与同伴有效沟通,共同解决问题,这不仅能提升他们的社交技能,也为他们未来的职业生涯奠定了坚实的基础。通过这次实验课程,学生们能够将所学知识和技能应用到更广泛的学习和研究中,不断探索化学科学的奥秘,为社会的发展做出自己的贡献。我们期待看到学生们在未来的学术旅程中取得更多的成就,并成为各自领域的佼佼者。

参 考 文 献

- [1] 王小燕, 齐燕, 唐林, 王书文, 温会玲, 高洪涛. *大学化学*, **2024**, *39* (7), 40.
- [2] Sun, W.; Zhang, Y.; Yin, G.; Lu, S. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34* (37), 2402346.
- [3] Anti-Counterfeiting Market By Technology (Authentication Packaging Technology (Ink, Holograms, Dyes, and Others (Forensic, Overt, Covert)), Track & Trace Technology), and By Application (Food and Beverages, Pharmaceuticals, Cosmetics, Electronics, Clothing, and Others) Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis, and Forecast, 2024–2032. [2024-10-28].
<https://www.zionmarketresearch.com/report/anti-counterfeiting-market>
- [4] Shi, W.; Yao, J.; Bai, L.; Lu, C. *Adv. Funct. Mater.* **2018**, *28* (52), 1804961.
- [5] Li, Z.; Cao, S.; Zheng, Y.; Song, L.; Zhang, H.; Zhao, Y. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *34* (3), 2306956.
- [6] Li, Q.; Zhou, M.; Yang, M.; Yang, Q.; Zhang, Z.; Shi, J. *Nat. Commun.* **2018**, *9*, 734.
- [7] Geng, B.; Hu, J.; Li, Y.; Feng, S.; Pan, D.; Feng, L.; Shen, L. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 5735.
- [8] Tan, S.; Jinnai, K.; Kabe, R.; Adachi, C. *Adv. Mater.* **2021**, *33* (23), 2008844.
- [9] Yang, X.; Waterhouse, G. I. N.; Lu, S.; Yu, J. *Chem. Soc. Rev.* **2023**, *52* (22), 8005.
- [10] Shi, W.; Wang, R.; Liu, J.; Peng, F.; Tian, R.; Lu, C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62* (23), e202303063.
- [11] Yin, G.; Huo, G.; Qi, M.; Liu, D.; Li, L.; Zhou, J.; Le, X.; Wang, Y.; Chen, T. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34* (12), 2310043.
- [12] Tan, J.; Li, Q.; Meng, S.; Li, Y.; Yang, J.; Ye, Y.; Tang, Z.; Qu, S.; Ren, X. *Adv. Mater.* **2021**, *33* (16), 2006781.