

## 综合化学实验设计：一种基于苯并咔唑超长有机室温磷光材料的制备与表征

王光辉<sup>1</sup>, 钱晨<sup>1</sup>, 马志勇<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>北京化工大学化学工程学院, 北京 100029

<sup>2</sup>北京化工大学有机无机复合材料全国重点实验室, 北京 100029

**摘要:** 超长有机室温磷光(UORTP)材料凭借其独特的低成本、低毒性、刺激响应特性和可调光学性能在生物成像、先进加密和防伪以及高灵敏度传感器方面具有广阔的应用前景。本实验以7*H*-苯并[*c*]咔唑(BCz)和3-溴-5-氟苯腈为原料, 通过芳香族化合物取代反应合成供体-受体(D-A)型分子CNBrBCz, 利用核磁共振氢谱、碳谱和高分辨率质谱表征CNBrBCz的化学结构。之后将BCz、CNBrBCz分别掺入聚丙烯酸甲酯(PMMA)膜并探究掺杂薄膜的磷光性能。有机磷光材料为功能材料化学重要研究方向之一, 通过将前沿的科学研究方法与性质表征引入基础化学实验中, 进一步丰富了化学实验的教学内容, 锻炼了学生的实验基础操作能力与精密仪器使用能力, 培养了学生学以致用的科学素养和科学创新能力, 同时也可以让学生观察到奇妙的发光现象, 感受到化学之美。

**关键词:** 综合化学实验; 超长有机室温磷光; 苯并咔唑; 掺杂; 科教融合

**中图分类号:** G64; O6

## Preparation and Characterization of 7*H*-Benzo[*C*]Carbazole Based Ultra-Long Organic Room Temperature Phosphorescence Material

Guanghui Wang<sup>1</sup>, Chen Qian<sup>2</sup>, Zhiyong Ma<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China.

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Organic and Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China.

**Abstract:** Ultra-long organic room temperature phosphorescent (UORTP) materials exhibit significant potential in bioimaging, advanced encryption and anti-counterfeiting, and high-sensitivity sensors, owing to their low cost, low toxicity, stimulus responsiveness, and tunable optical properties. In this study, a donor-acceptor (D-A) type molecule, CNBrBCz, was synthesized from 7*H*-Benzo[*c*]carbazole (BCz) and 3-bromo-5-fluorobenzonitrile through a typical aromatic substitution reaction. The chemical structure of CNBrBCz was characterized using <sup>1</sup>H nuclear magnetic resonance (NMR), <sup>13</sup>C NMR, and high-resolution mass spectrometry. Subsequently, BCz and CNBrBCz were separately doped into polymethyl methacrylate (PMMA) films, and the phosphorescence properties of these doped films were investigated. Organic phosphorescence materials represent a crucial area of research in functional materials chemistry. By integrating advanced scientific research methods and property characterization into fundamental chemistry experiments, this study not only enriches the teaching content of chemical experiments but also enhances students' proficiency in basic experimental operations and the use of precision instruments. Furthermore, it cultivates students' scientific literacy and innovation capabilities, while allowing them to observe fascinating luminescence phenomena and appreciate the beauty of chemistry.

收稿: 2024-12-11; 录用: 2025-03-17; 网络发表: 2025-07-02

\*通讯作者, Email: mazhy@mail.buct.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金面上项目(22175015, 22375013)

**Key Words:** Comprehensive chemical experiment; Ultra-long organic room temperature phosphorescence; 7H-Benzo[c]carbazole; Doping; Integration of science and education

2018年,教育部发布了《关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见》,基本原则中提出“因课制宜选择课堂教学方式方法,科学设计课程考核内容和方式,不断提高课堂教学质量。积极引导學生自我管理、主动学习,激发求知欲望,提高学习效率,提升自主学习能力。”2019年,《教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中提出,“强化科研育人功能,推动高校及时把最新科研成果转化为教学内容,激发学生专业学习兴趣。”同时,《化学类专业化学实验教学建议内容》中也强调了《实验建议内容》不与课程直接挂钩,不规定具体实验和学时,其排列顺序也不是教学顺序。各专业可以自主设计实验,确定实验学时,将实验组成相应课程,再根据学生实验知识学习、实验技能形成和科学素质养成的逻辑顺序对课程进行编排,构建一体化、多层次、开放式的实验课程体系。在如今国家对于教育大力支持和改革的背景下,将化学领域前沿研究成果与本科基础化学实验结合起来是一种顺应教育教学、科学发展潮流的有效创新教学措施。

超长有机室温磷光(UORTP)材料<sup>[1]</sup>具有斯托克斯位移大、发射寿命长等独特的光物理性质,以其独特的低成本、低毒性、可调光学性能和刺激响应特性而成为一类前景广阔的发光材料。UORTP材料在有机发光二极管(OLED)、信息加密和防伪、高分辨率生物成像、数据存储等方面具有广泛的应用。因此,设计和制备性能良好的UORTP材料已成为近年来的研究热点<sup>[2,3]</sup>。为了构建性能优异的室温磷光(RTP)材料,有两个关键问题需要解决:(1)如何提高系统间交叉(ISC)产率( $\Phi_{ISC}$ )<sup>[4-6]</sup>;(2)如何稳定三重态激子<sup>[7,8]</sup>。目前已经提出了许多策略来指导UORTP材料的设计。晶体粉末是最常见的UORTP材料形式,其结晶引起的H-聚集和多重分子间相互作用不仅可以极大地稳定三重态激子,而且可以增加产率<sup>[9]</sup>。然而,由于粉状材料难以应用于软智能材料或柔性电子设备,此类材料通常具有显著的应用局限性。软质UORTP材料的设计仍然是一个挑战,对其实际应用具有重要意义。同时,除了纯UORTP材料的开发,许多科研人员把焦点聚集在通过多组分掺杂策略来构建UORTP材料,这种策略可以有效地拓展RTP材料的范围,提高磷光性能<sup>[10]</sup>。

目前已经有一些研究人员将前沿的有机发光材料成果引入了本科教学实践中,比如具有聚集诱导发光(AIE)特性的发光材料的制备与研究、有机长余辉材料的制备与表征。然而,基于掺杂策略的有机磷光材料的研究还未引入本科教学实践中。因此,本实验以有机磷光基元(7H-苯并[c]咔唑, BCz)<sup>[9]</sup>为构筑单元,制备其衍生物CNBrBCz,将BCz和CNBrBCz分别掺杂进入聚甲基丙烯酸甲酯PMMA薄膜中并对比两种薄膜的磷光性能。本实验药品价廉易得,实验仪器常规,实验过程涉及有机合成、产物结构表征以及发光性能表征,非常适合用于本科综合性化学实验。本实验是一个探究性的实验,有助于拓展学生的科研视野,打开学生的创新思维。不仅巩固了有机化学方面的知识,而且提高了创新研究意识,符合教育部对于学生的创新性思维以及自主学习能力的要求。

## 1 实验目的

- (1) 掌握取代反应的原理;
- (2) 掌握荧光和磷光的机理和区别;
- (3) 掌握光谱仪、荧光分光光度计等仪器的使用;
- (4) 学会使用核磁共振氢谱、碳谱和高分辨质谱来分析化学结构;
- (5) 了解重原子效应、薄膜掺杂对磷光的影响。

## 2 实验原理

### 2.1 芳香亲核取代反应原理

芳香亲核取代反应是与芳环反应的试剂为亲核基团或试剂,其结果是可以发生此亲核基团在芳

苯环上取代了一个离去基团的反应。卤代芳香族亲核取代的反应机理如图1所示：第一步为进攻试剂与底物成键形成 $\delta$ -中间体，这个过程为速控步骤；第二步为离去基团X离去<sup>[11]</sup>。

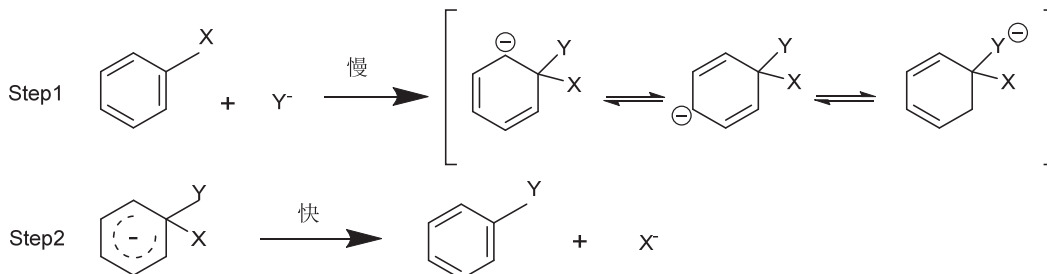


图1 芳香亲核取代反应原理图

本实验中以BCz和3-溴-5-氟苯腈为原料合成CNBrBCz对于芳香族化合物亲核取代机理进行概述。将3-溴-5-氟苯腈作为卤代芳香烃，BCz作为亲核试剂。在碱性条件下，BCz失去N-H活泼氢，形成氮负离子，随后进攻与氟相连的碳原子，形成中间体后，再离去基团氟离子，得到目标产物CNBrBCz。化学反应方程式如图2所示。

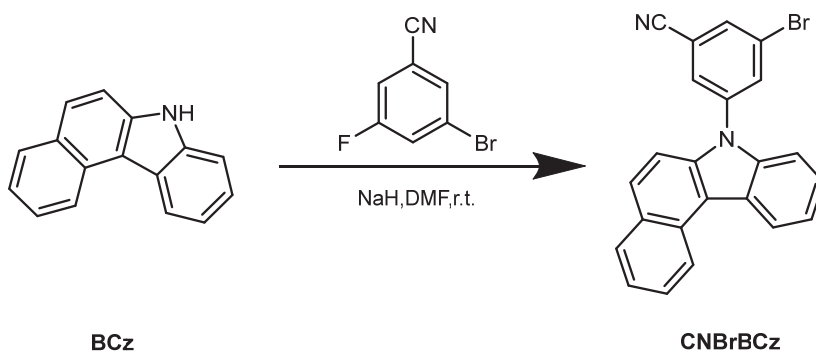


图2 CNBrBCz合成反应方程式

## 2.2 单组分有机室温磷光发光原理

有机小分子的发光是分子从单重或者三重激发态通过辐射弛豫跃迁到最低单重基态的过程，其中从三重激发态跃迁到基态的辐射过程称为磷光。有机分子的磷光发射过程可以概括为如下步骤：处于基态( $S_0$ )的有机分子的电子被光激发后，吸收能量并跃迁到高能级的单重激发态( $S_n, n \geq 1$ )。然后受激发电子通过系间窜越(Intersystem Crossing, ISC)过程跃迁至能级相近的三重激发态( $T_n, n \geq 1$ )并伴随电荷自旋方向翻转。随后高能级的激子通过快速内转换(internal conversion, IC)弛豫到最低激发三重态( $T_1$ )。最后，处于 $T_1$ 态的激子通过发射磷光释放能量并返回 $S_0$ 态<sup>[12]</sup>。发光机理如图3所示。

## 2.3 多组分有机室温磷光发光原理

UORTP的能量传递过程涉及三个步骤。以本实验中磷光基元BCz及PMMA基质构建的掺杂体系为例，第一步：紫外光照射掺杂体系，中性BCz分子被光激发，吸收能量并跃迁到高能级的单重激发态；第二步：受激发电子通过ISC过程跃迁至能级相近的三重激发态并伴随电荷自旋方向翻转；第三步：通过电荷转移过程，BCz分子的激子被电荷分离态捕获而生成BCz自由基阳离子。自由基阴离子向邻近的基质分子扩散，BCz自由基阳离子被缺陷捕获，产生超长有机室温磷光。同时，由于电荷在基质中的扩散，使得电荷分离过程和电荷复合过程达到了动态平衡，极大地稳定了激子，延长了磷光寿命。发光机理如图4所示。

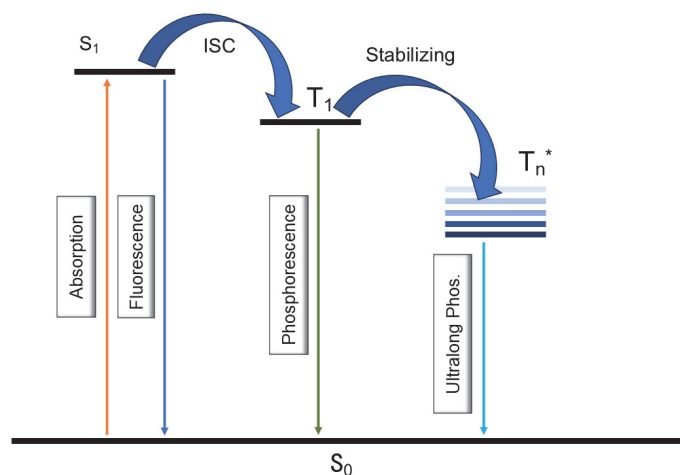


图3 单组分有机室温磷光发光机理图

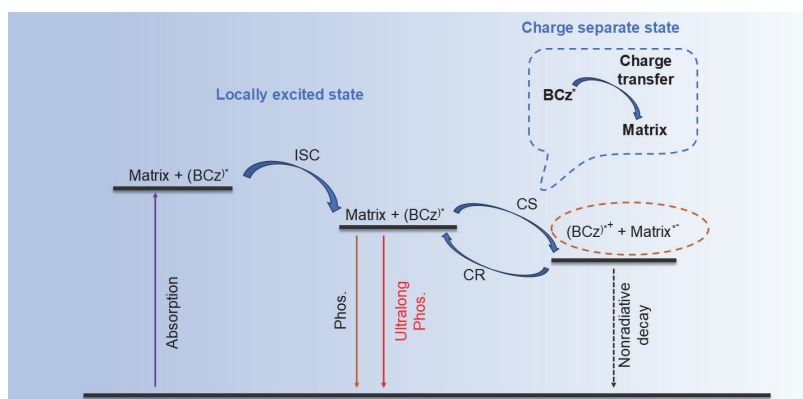


图4 多组分有机室温磷光发光机理图

### 3 试剂和仪器

实验所用试剂和仪器见表1、表2。

### 4 实验步骤

#### 4.1 CNBrBCz的合成和表征

(1) CNBrBCz的合成：将NaH (0.160 g, 60%, 4.0 mmol)和BCz (0.434 g, 2.0 mmol)溶于*N,N'*-二甲基甲酰胺(DMF) (4 mL, AR级)中，加入100 mL茄形瓶中。在0 °C搅拌1 h，加入3-溴-5-氟苯腈(0.440 g, 2.2 mmol)，溶于1 mL DMF，室温搅拌24 h，粗产物经硅胶柱纯化(石油醚和二氯甲烷的体积比1:1为洗脱液)，得到产物CNBrBCz。

(2) CNBrBCz的结构表征：将10 mg产物溶解在氘代氯仿( $\text{CDCl}_3$ )中，将溶液倒入核磁管中，采用400 MHz (Bruker ARX400)核磁共振仪测得CNBrBCz的核磁共振氢谱与碳谱。将10 mg产物溶解在乙腈溶液中，采用Waters Xevo G2 Q1质谱仪来测得高分辨率质谱。之后解析谱图数据，以确认产物结构。

#### 4.2 BCz/CNBrBCz掺杂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄膜的制备

分别称取2 mg BCz或2 mg CNBrBCz与200 mg PMMA加入2 mL的二氯甲烷中，在室温条件下超声30 min直至完全溶解，将超声后的样品小心倒入培养皿中，自然晾干，最终得到浓度为1% (质量

百分比)的BCz@PMMA薄膜和CNBrBCz@PMMA薄膜。

表1 实验所用试剂

实验试剂	纯度	生产厂家
7H-苯并[c]咪唑	分析纯	上海阿达玛斯试剂公司
3-溴-5-氟苯腈	分析纯	上海阿达玛斯试剂公司
NaH	分析纯	上海阿达玛斯试剂公司
DMF	分析纯	上海阿达玛斯试剂公司
四氢呋喃	分析纯	上海阿达玛斯试剂公司
聚甲基丙烯酸甲酯	分析纯	上海阿达玛斯试剂公司

表2 实验所用主要仪器

实验仪器名称	型号	生产厂家
电子分析天平	ME104	瑞士梅特勒公司
400 MHz核磁共振仪	400 MHz	德国Bruker公司
高分辨率质谱仪	Xevo G2 Qt	美国沃特世公司
荧光光谱仪	FLS980	英国爱丁堡仪器公司
质谱分析仪	STA449F5	德国耐驰仪器公司
便携式紫外灯		江苏光宇仪器
氙灯	450 W	江苏光宇仪器
微秒灯	80 W	江苏光宇仪器

### 4.3 BCz/CNBrBCz掺杂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄膜的磷光性能测试

将制备的BCz@PMMA薄膜和CNBrBCz@PMMA薄膜在室温条件下,放在16 W的便携式紫外灯下照射一段时间,在这个过程中观察并利用相机拍摄样品的磷光激活过程。

采用FLS 980稳态瞬态荧光磷光谱仪,在365 nm下分别以氙灯(450 W)和微秒灯(80 W)为激发光源,扫描范围为390–700 nm,得到样品的稳态和延迟光谱以及磷光寿命。利用计算机进行数据处理,通过分析荧光光谱图来探究BCz@PMMA薄膜和CNBrBCz@PMMA薄膜的磷光性能。

## 5 结果与讨论

### 5.1 产物性状和结构表征

CNBrBCz为白色固体粉末。

目标产物CNBrBCz核磁共振氢谱如图5所示,分析数据如下: $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  8.85 (d,  $J = 8.4$  Hz, 1H), 8.71–8.60 (m, 1H), 8.05 (dd,  $J = 4.0, 2.2$  Hz, 2H), 7.92 (dd,  $J = 17.7, 8.8$  Hz, 3H), 7.78 (t,  $J = 7.3$  Hz, 1H), 7.62–7.44 (m, 5H)。

目标产物CNBrBCz核磁共振碳谱如图6所示,分析数据如下: $^{13}\text{C}$  NMR (101 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  139.74, 139.34, 137.64, 135.19, 133.71, 129.85, 129.65, 129.56, 129.35, 128.13, 127.44, 125.14, 124.48, 124.17, 123.83, 123.42, 122.48, 121.84, 116.51, 116.46, 115.64, 110.57, 109.68。

目标产物CNBrBCz高分辨率质谱如图7所示,分析数据如下:HR-ESI-MS  $\text{C}_{23}\text{H}_{14}\text{BrN}_2$   $[\text{M}+\text{H}]^+$ 理论值397.033487,实测值397.033451。

对于CNBrBCz分子进行核磁共振波谱和高分辨质谱(HR-MS)谱图表征,结果表明得到了实验设计的CNBrBCz分子。通过核磁共振仪的学习,学生可以将理论知识与实验技术结合起来,加深对于

核磁共振原理的理解, 提高了学生的实验操作技能。同时通过分析谱图的过程, 学生可以进一步学习掌握基础有机化学中对于核磁共振图谱积分曲线、化学位移、峰形以及耦合常数等知识, 培养学生的数据处理与分析能力。

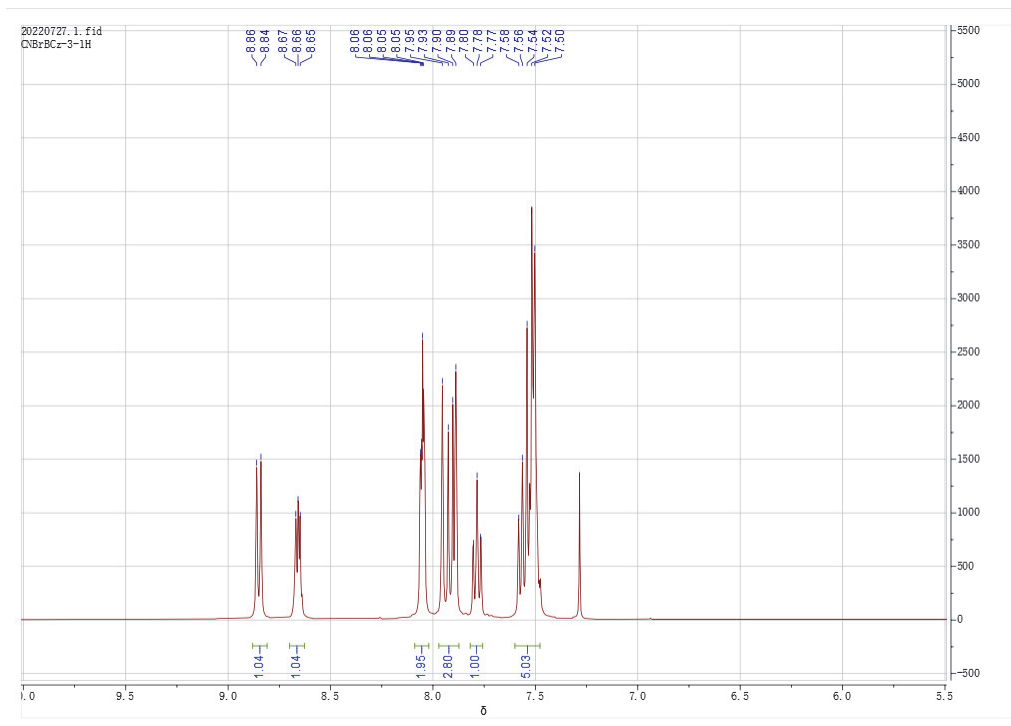


图5  $\text{CDCl}_3$ 中CNBrBCz的 $^1\text{H}$  NMR图

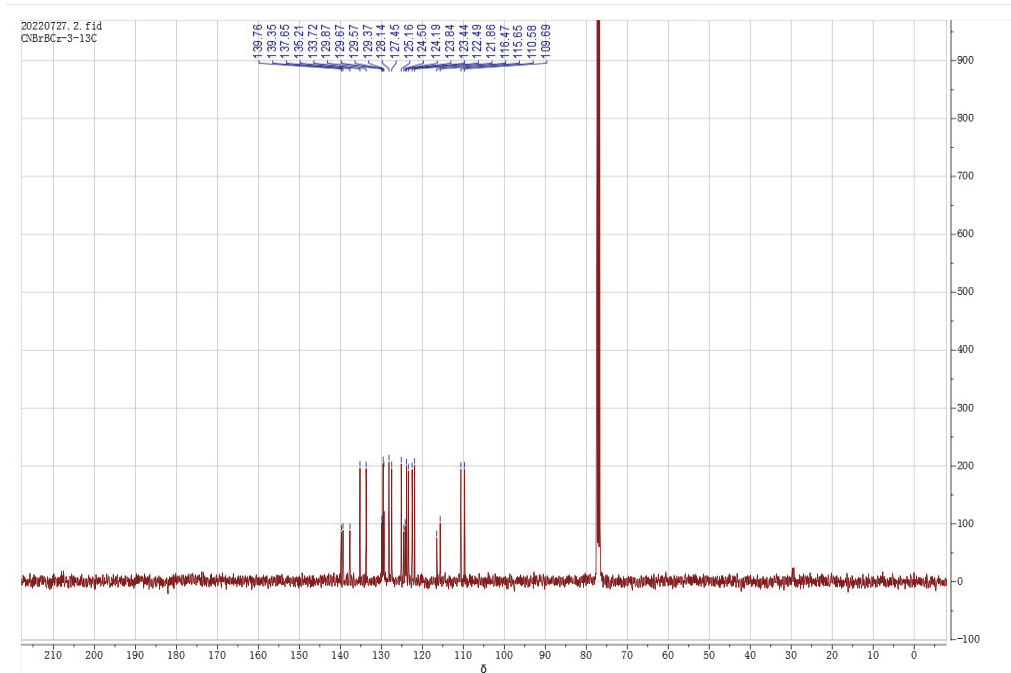


图6  $\text{CDCl}_3$ 中CNBrBCz的 $^{13}\text{C}$  NMR图

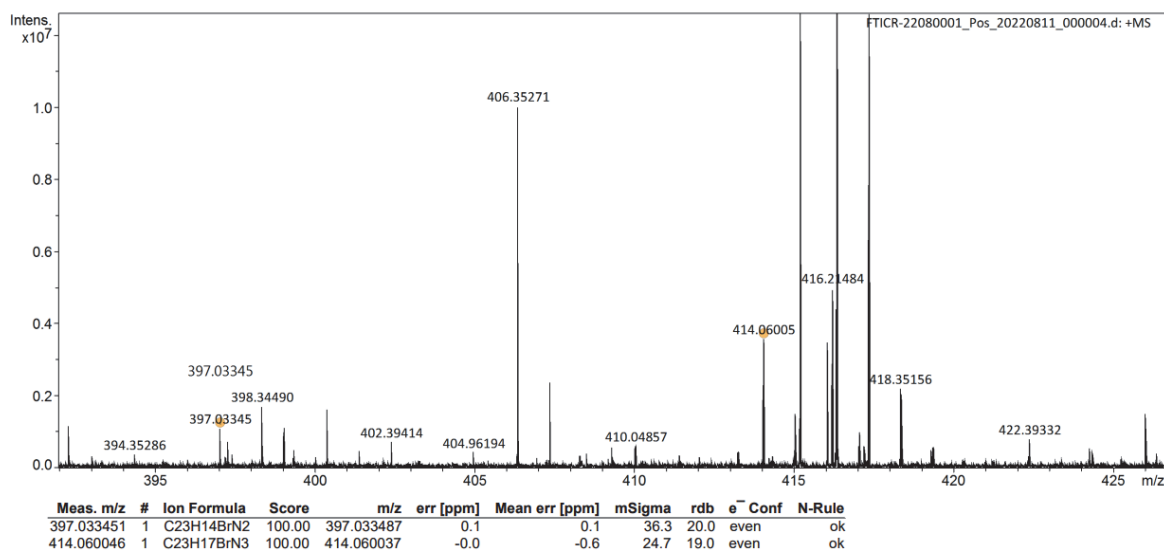


图7 CNBrBCz的HR-MS图

## 5.2 BCz/CNBrBCz的PMMA薄膜的磷光性能测试

通过观察CNBrBCz@PMMA薄膜的整个光活化过程，可以发现：即使BCz、CNBrBCz粉末在室温下仅显示蓝色荧光，但将其掺杂到浓度为1% (质量百分比)的PMMA中分散后，得到的BCz@PMMA薄膜和CNBrBCz@PMMA薄膜在环境条件下可以观察到明亮的光激活绿色超长磷光。如图8所示，在初始状态下，掺杂PMMA薄膜无色透明，立即移除激发光源(365 nm, 便携式紫外灯, 16 W)后没有观察到磷光；但随着照射时间的延长，在4 s时开始出现绿色超长磷光，进一步的光照扩大了激活区域，掺杂PMMA薄膜最终在24 s时完全被激活，显示出最强的绿色磷光。此时，去除紫外光源后，激活的绿色超长磷光持续时间大于4 s。通过观察和分析CNBrBCz@PMMA薄膜的整个光活化过程，可以加深学生对于有机室温磷光发光现象的认识，提高学生的实验兴趣。

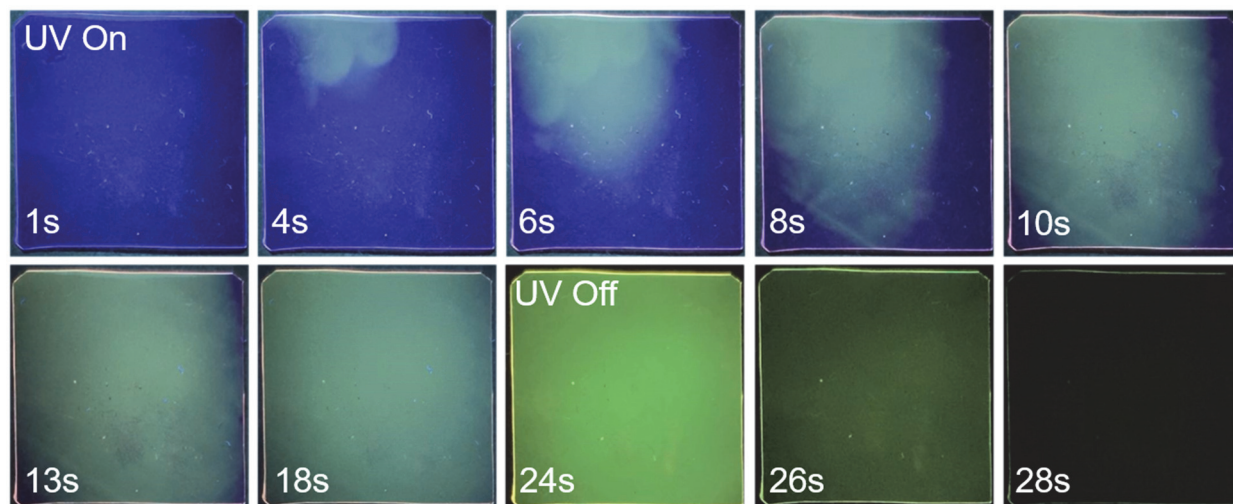


图8 CNBrBCz@PMMA膜在整个光活化过程中不同时间点的发光图像

对CNBrBCz@PMMA薄膜和BCz@PMMA薄膜进行光谱测试，如图9(a)所示，CNBrBCz@PMMA薄膜的磷光被激活后，在387 nm处出现一个荧光峰，在500、539、578 nm处出现三个磷光峰。如图

9(b-c)所示, CNBrBCz@PMMA薄膜在387、406 nm处的寿命约为3.1 ns, 为荧光发射。如图9(d-f)所示, CNBrBCz@PMMA薄膜在500、539、578 nm处的磷光寿命分别为1296.4、1273.8、1238.3 ms。如图10(a)所示, BCz@PMMA薄膜的磷光被激活后, 在455 nm处得到一个荧光峰, 在490、528、570 nm处得到三个磷光峰。如图10(b)所示, BCz@PMMA薄膜在455 nm处的荧光寿命约为14.8 ns。如图10(c-e)所示, BCz@PMMA薄膜在490、528、570 nm处的磷光寿命分别为1099.5、1087.5、1098.6 ms。

本实验制备的CNBrBCz在BCz的基础上引入了Br原子, 由于Br的重原子效应, 从单重态到三重态能级间的ISC过程被大大增强, 从而使含有Br原子的CNBrBCz的磷光量子产率增大, 磷光强度肉眼可见地增强。因此, 在稳态和瞬态光谱中, 相较于BCz@PMMA薄膜, CNBrBCz@PMMA薄膜的磷光信号强度显著增强。同时, 由于ISC过程被加速, CNBrBCz@PMMA薄膜的磷光寿命相较于BCz@PMMA薄膜有所下降。

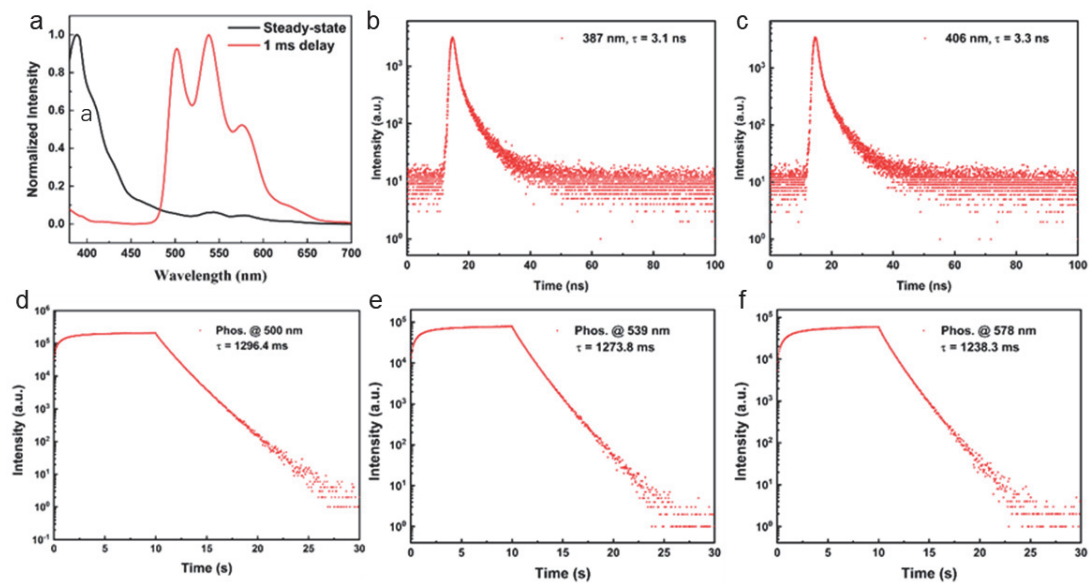


图9 (a) CNBrBCz@PMMA薄膜的稳态和延迟光谱; (b-f) 环境条件下的衰减谱

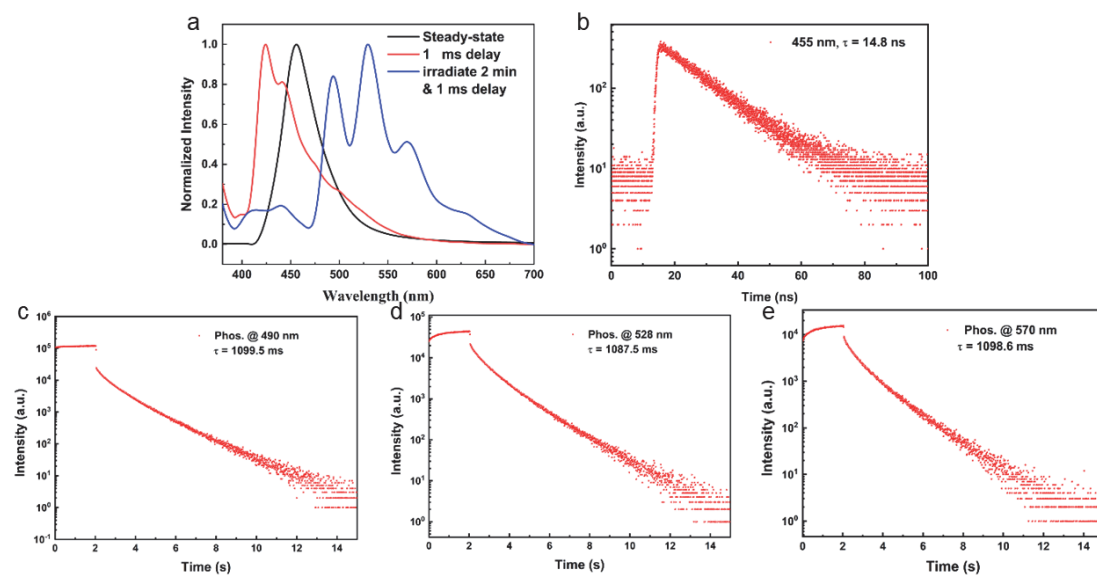


图10 (a) BCz@PMMA薄膜的稳态和延迟光谱; (b-e) 环境条件下的衰减谱

通过BCz@PMMA薄膜和CNBrBCz@PMMA薄膜的磷光性能对比,可以加深学生对于多组分有机室温磷光发光机理的理解,提高学生对于稳态和延迟光谱谱图的分析能力。同时这一实验策略拓展了学生的知识视野,培养了学生的创新思维和解决问题的能力。

## 6 实验教学过程

### 6.1 教学安排

本实验根据不同专业基础化学实验的开展情况,作为一个综合性化学实验课程,针对本校参加“互联网+”创新创业大赛以及“萌芽杯”科技创新及学术论文大赛的参赛学生进行实验启迪与实践。本实验已经在比赛参赛的80余名学生中开展了三年的教学实践,实践效果良好。该实验设计为一个16学时的综合性基础化学实验,主要内容分为课前预习、课堂教学和课后总结三个环节完成,同时根据各个专业教学目标要求情况适当调整实验内容以及学时。建议设置为三个模块进行开展:CNBrBCz的合成和结构表征(8学时)、BCz和CNBrBCz的PMMA薄膜的制备(4学时),以及磷光性能测试(4学时),建议由3-4名学生以小组形式完成。教学安排如表3所示。

表3 教学安排

教学环节	实验模块	每组人数/组数	学时	具体内容	关联课程
课前预习	线上预习	4/2	课前一周	(1) 要求学生结合实验内容查阅文献,学习掌握取代反应的原理;了解荧光和磷光的机理以及区别;了解重原子效应、薄膜掺杂对磷光的影响 (2) 要求学生通过线上视频学习光谱仪、核磁共振仪的使用和操作规程;学习核磁共振氢谱、碳谱和高分辨质谱分析化学结构的原理和方法	有机化学 仪器分析 荧光化学
课堂教学	实验安全教育	4/2	1	实验操作之前,老师进行实验室药品使用安全规范、实验室仪器设备使用安全规范、实验室人员安全防护规范等知识的讲授	实验室安全教育
	CNBrBCz的制备以及仪器学习	4/2	3	(1) CNBrBCz的制备:以4人为小组,根据实验预习和实验步骤在老师的指导下合成CNBrBCz (2) 荧光光谱仪和核磁共振仪的学习:在实验反应过程中,老师讲解并实操荧光光谱仪的操作步骤和实验规范	有机化学 仪器分析
	CNBrBCz的性能表征	4/2	4	(1) 依托核磁共振仪,结合实验预习和老师讲解内容,完成CNBrBCz核磁共振氢谱、碳谱以及高分辨率质谱的测试 (2) 根据测试结果分析目标产物的化学结构	有机化学 仪器分析
	BCz/CNBrBCz的PMMA薄膜的制备	4/2	4	以4人为小组,根据实验预习和实验步骤利用合成的CNBrBCz以及原料BCz完成BCz/CNBrBCz掺杂PMMA薄膜的制备	材料化学
课后总结	BCz/CNBrBCz的PMMA薄膜磷光性能测试	4/2	4	(1) 依托便携式紫外灯和相机,完成BCz/CNBrBCz的PMMA薄膜的光活化过程的观察记录 (2) 依托光谱仪,结合老师测试方法和使用规范的讲解,完成BCz/CNBrBCz的PMMA薄膜的稳态光谱、延迟光谱以及衰减谱的测试 (3) 根据测试结果进行磷光性能分析	有机化学 仪器分析 荧光化学
	数据处理和撰写报告	4/2	课后一周	实验完成后,学生根据实验内容以及实验结果进行分析和归纳,完成课后思考题以及实验报告,对实验做出总结	科技写作

## 6.2 教学效果

该实验设计方案将前沿科研成果转化为本科实验教学，学生在实验过程中直接接触和应用最新的科学发现，不仅可以将本科基础化学知识付诸于实践，而且可以了解到有机掺杂长余辉发光材料、有机室温磷光、仪器分析等相关的拓展知识。本实验的开展有科教融合的特点，不仅可以增强学生的实践能力和数据分析能力，而且可以培养学生交叉学科思维和创新意识。

本实验作为一个综合性化学实验，在开展的三年教学实践以来，得到了学生的肯定和好评，学生普遍反映通过独立制备RTP材料，丰富了有机化学的知识储备以及提高了学以致用能力；通过对于化学分析仪器的使用和总结，学习到了新的仪器分析知识；通过对于磷光性能的测试结果分析，学习到了发光化学的知识，对于有机磷光有了更加深刻的认识和理解。本实验培养的学生在经过实验启迪之后，对RTP材料有了浓厚的兴趣，通过自主文献检索、内容拟定，在“萌芽杯”科技创新及学术论文大赛和“互联网+”创新创业大赛中获得奖项，并且有6名学生已经保研继续在有机发光领域深造学习。

## 6.3 教学建议和总结

在教学实践过程中也发现了实验的一些不足：在实验预习环节中，学生的自主预习意识有待提高，不充分的预习导致了实验仪器操作不规范的问题，影响了实验进程；另外，实验过程中学生对于有机室温磷光材料的应用表现出浓厚的兴趣，在之后的教学实践中，可以设计增加有机室温磷光材料的应用部分，让学生了解到其在光学防伪、生物成像领域的应用。

同时，在开展该实验过程中，提出以下教学建议。(1) 实验合成以及表征步骤较多，建议教学老师结合实验教学安排和学校教学课程要求合理分配各部分教学时长以及侧重点。(2) 该实验部分步骤例如CNBrBCz合成反应需要持续24 h进行，为保证实验顺利开展，提出以下方案以供参考：该合成实验安排在连续两天进行，第一天4个学时进行实验室安全和实验原理讲解，学生搭反应，之后进行荧光光谱仪和核磁共振谱仪的使用讲解；反应室温持续24 h，安全可不用监控，第二天4个学时，后处理反应获得CNBrBCz。(3) 该实验内容属有机功能材料范畴，对于实验反应要求较为严格，建议教师在实验过程中加强对学生实验操作的指导，避免因操作不当导致较大的实验误差以及不必要的损坏。(4) 目标产物的有机室温磷光现象具有很好的视觉体验，建议教师陪同学生完成磷光现象展示部分，并再次简要阐述发光机理，使学生体会化学之美，培养实验的兴趣和科研的激情。

## 7 结语

本实验以BCz和3-溴-5-氟苯腈为原料，通过芳香族化合物取代反应合成了供体-受体(D-A)型分子CNBrBCz，并将BCz和CNBrBCz分别掺杂到PMMA薄膜中，制得性能优异的有机室温磷光材料，之后探究了有机室温磷光性能。实验将前沿科研成果应用于本科教学实践，丰富了化学实验的教学内容，并且由浅入深，依次递进，适合多个阶段、多个专业的本科生进行教学应用。通过产品制备和结构表征，使学生对有机合成反应的实验流程搭建有了进一步的理解，并且培养了学生的实验操作技能。通过光谱测试和分析，加强了学生对仪器基本原理的理解，提升了学生的仪器操作能力以及实验数据分析能力。通过实验现象的观察，使学生感受化学之美，提高学生的实验兴趣。本实验紧跟政策导向，本着科教融合的目标，引导学生发现问题、查阅资料、分析问题、解决问题，从而培养学生的科学思维和创新能力。

## 参 考 文 献

- [1] Wang, X.; Pan, G.; Ren, H.; Li, J.; Xu, B.; Tian, W. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202114264.
- [2] Tao, Y.; Liu, C.; Xiang, Y.; Wang, Z.; Xue, X.; Li, P.; Li, H.; Xie, G.; Huang, W.; Chen, R. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 6946.
- [3] Huang, L.; Qian, C.; Ma, Z. *Chem. Eur. J.* **2020**, *26*, 11914.

- [4] Yang, Z.; Xu, C.; Li, W.; Mao, Z.; Ge, X.; Huang, Q.; Deng, H.; Zhao, J.; Gu, F. L.; Zhang, Y.; *et al.* *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 17451.
- [5] Wang, H.; Jiang, S.; Liu, W.; Zhang, X.; Zhang, Q.; Luo, Y.; Xie, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 11093.
- [6] Zhao, W.; Cheung, T. S.; Jiang, N.; Huang, W.; Lam, J. W. Y.; Zhang, X.; He, Z.; Tang, B. Z. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 1595.
- [7] Yuan, J.; Wang, S.; Ji, Y.; Chen, R.; Zhu, Q.; Wang, Y.; Zheng, C.; Tao, Y.; Fan, Q.; Huang, W. *Mater. Horiz.* **2019**, *6*, 1259.
- [8] Wang, Y.; Yang, J.; Tian, Y.; Fang, M.; Liao, Q.; Wang, L.; Hu, W.; Tang, B. Z.; Li, Z. *Chem. Sci.* **2020**, *11*, 833.
- [9] Qian, C.; Zhang, X.; Ma, Z.; Fu, X.; Li, Z.; Jin, H.; Chen, M.; Jiang, H.; Ma, Z. *CCS Chem.* **2024**, *6*, 798.
- [10] 孙佳瑶. 基于供受体结构的具有酸响应的双组分纯有机磷光材料[硕士学位论文] 北京: 北京化工大学, 2023.
- [11] 吕华星, 顾若冰, 倪骥腾, 韩春苗, 许辉. *大学化学*, **2023**, *38* (4), 319.
- [12] Zhao, W.; He, Z.; Tang, B. *Nat. Rev. Mater.*, **2020**, *5* (12), 869.