

# 掺杂诱导的氢键网络介观组装及其磷光寿命调控

徐成硕<sup>1</sup>, 武桐玥<sup>1</sup>, 管伟江<sup>1</sup>, 吕超<sup>1,2</sup>

(1. 北京化工大学化工资源有效利用全国重点实验室, 北京 100029;  
2. 郑州大学化学学院, 平原实验室, 郑州 450001)

**摘要** 室温磷光(RTP)因其长发光寿命、大斯托克斯位移及对环境的敏感性, 在生物成像、照明显示和防伪等领域具有重要的应用前景. 氢键网络能够有效抑制非辐射跃迁、稳定三重态激发态, 是固态 RTP 材料设计中的常用策略, 但其磷光寿命的有效调控仍然具有挑战性. 基于羧酸-氨基氢键相互作用, 本文以三聚氰胺-间苯二甲酸(MA-IPA)为氢键网络构筑单元, 通过引入不同羧酸取代数目的苯类小分子对组装过程进行调控. 研究结果表明, 掺杂小分子并未改变 MA-IPA 氢键网络基本构筑单元, 但显著影响了其有序堆积方式与介观结构特征, 从而调节组装体的颗粒尺寸与比表面积, 改变空气中氧分子对三重态激子的猝灭程度. 由此构筑的系列材料在室温下均表现出稳定的磷光发射, 其磷光寿命最长可达 1.7 s. 本文为长寿命 RTP 材料的结构设计提供了新的思路.

**关键词** 室温磷光; 氢键网络; 磷光寿命; 分子掺杂

中图分类号 O633

文献标志码 A

doi: 10.7503/eju20250395

## Doping-induced Mesoscopic Assembly in Hydrogen-bonded Networks for Phosphorescence Lifetime Modulation

XU Chengshuo<sup>1</sup>, WU Tongyue<sup>1</sup>, GUAN Weijiang<sup>1\*</sup>, LU Chao<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Pingyuan Laboratory, College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract** Room-temperature phosphorescence (RTP) has been attracting more attention in recent years due to its long light-emitting lifetime, large Stokes shift, and sensitivity to the environment, which have important application prospects in the fields of bio-imaging, illumination display, and anti-counterfeiting. Hydrogen-bonded networks are widely employed in the design of solid-state RTP materials owing to their ability to suppress nonradiative transitions and stabilize triplet excited states; however, effective regulations of phosphorescence lifetime in such systems remain challenging. In this work, a hydrogen-bonded assembly based on melamine and isophthalic acid (MA-IPA) was constructed through carboxylic acid-amine hydrogen-bond interactions, and the assembly process was modulated by introducing benzene derivatives bearing different numbers of carboxyl substituents as molecular dopants. The results show that the introduction of dopant molecules does not alter the fundamental building units of the hydrogen-bonded network of MA-IPA but significantly affects the ordered packing mode and mesoscopic structural features. As a consequence, the particle size and specific surface area of the assemblies are effectively regulated, leading to

收稿日期: 2025-12-24. 网络首发日期: 2026-02-20.

联系人简介: 管伟江, 男, 博士, 副教授, 主要从事光谱与成像分析方面的研究. E-mail: wjguan@mail.buct.edu.cn

吕超, 男, 博士, 教授, 主要从事材料老化全生命周期分析及其服役寿命预测方面的研究. E-mail: luchao@mail.buct.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22534007, 22422401, 22374007, U22A20397, 22402006)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.22534007, 22422401, 22374007, U22A20397, 22402006).

different degrees of oxygen quenching of triplet excitons under ambient conditions. The resulting materials exhibit stable RTP, with phosphorescence lifetime up to 1.7 s. This study provides a viable strategy for the structural regulation of long-lived RTP materials based on hydrogen-bonded networks.

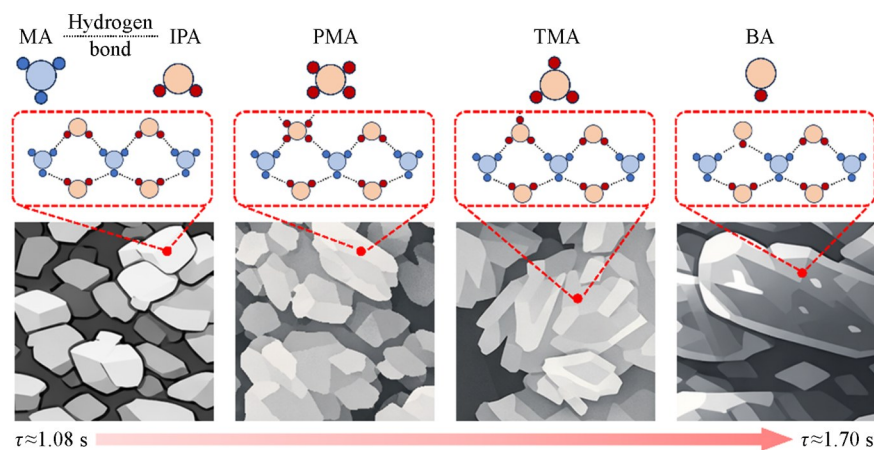
**Keywords** Room-temperature phosphorescence; Hydrogen-bonded network; Phosphorescence lifetime; Molecular doping

氢键网络能够有效限制分子振动从而稳定三线态激发态,抑制非辐射跃迁是室温磷光(RTP)实现的常用策略<sup>[1-5]</sup>,特别是小分子通过多重氢键形成晶体,磷光寿命通常可在秒量级<sup>[6-8]</sup>,在生物成像、照明显示及防伪等领域的应用具有显著优势<sup>[9-11]</sup>.然而,目前基于氢键网络的RTP材料磷光寿命的调节手段相对有限,已成为限制其进一步发展的主要障碍.

氧气会猝灭处于三重态激发态的分子,并通过非辐射跃迁耗散能量,造成磷光寿命大幅度缩短<sup>[12-14]</sup>.改变晶体结构是调节RTP参数(寿命、强度和发射波长等)的有效方式<sup>[15-17]</sup>,其本质是通过调节晶体尺寸改变晶体的比表面积进而影响与氧气的接触程度.因此当晶体尺寸越大,比表面积就会越小,与氧气接触程度也越小,最终越有利于磷光寿命的延长.

目前,对晶体结构的调控手段相对有限,晶体工程是常见策略<sup>[18-20]</sup>.通过温度调节、引入结构类似的小分子形成共晶等手段可改变结晶速率和缺陷出现程度<sup>[21-25]</sup>,但这种策略具有很多不可控因素,很难具有重现性.羧酸能够与氨基形成氢键,可以作为晶体内氢键网络的调节剂<sup>[26-28]</sup>.通过引入羧基取代数目或位置不同的小分子作为掺杂剂,有望调控氢键网络的结构特征及其形成过程,从而实现对结晶尺寸的有效控制,为调节RTP寿命提供一种新的途径.然而,目前针对该策略的系统研究仍较为有限.

基于此,有必要构建明确的模型体系,对掺杂分子结构调控氢键网络组装行为及其对RTP性能的影响进行系统研究.本文选取三聚氰胺(MA)和间苯二甲酸(IPA)构建基础氢键网络组装体系,并引入具有不同羧酸取代数目的苯类小分子作为掺杂剂,对氢键网络的介观组装行为进行了调控.如Scheme 1所示,通过调节掺杂分子的结构特征,实现了对组装体晶体尺寸和比表面积的有效调节,从而影响空气中氧分子对三重态激子的猝灭过程.为揭示结构调控与光物理性能之间的关系,采用形貌分析、结构表征及光物理测试等手段,对不同体系的组装结构特征和RTP行为进行了研究,并进一步构建基于三重态能量转移的功能复合体系,探索了其在信息防伪领域中的应用潜力.



Scheme 1 Schematic of dopant-triggered hydrogen-bond networks and associated phosphorescence lifetime modulation

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

三聚氰胺(MA, 纯度 99%)、间苯二甲酸(IPA, 纯度 98%)与罗丹明 B(RhB, 纯度 99%)购自上海

Macklin 试剂公司; 苯甲酸(BA, 纯度 99%)、均苯三甲酸(TMA, 纯度 99%)与 1,2,4,5-苯四甲酸(PMA, 纯度 99%)购自安耐吉化学(安徽当升); 二甲基亚砜(DMSO, 纯度 $\geq 99\%$ )与无水乙醇(分析纯)购自天津富裕精细化工有限公司; 所用试剂均为分析纯, 无需进一步纯化. 实验用去离子水采用 Merck Millipore (德国)生产的 Milli-Q Advantage A10 系统进行纯化.

FLS 980 型稳态瞬态光谱分析仪, 英国爱丁堡仪器公司; XRD-6000 型 X 射线衍射仪(XRD), 日本岛津公司; MAIA3 XMU 型扫描电子显微镜(SEM), 捷克 TESCAN 公司; Nicolet 6700 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 美国 Thermo 公司; F-7000 型分光光度计和 UV-3600 型紫外-可见分光光度计(UV-Vis), 日本日立公司. 所有照片均在室温环境下, 使用智能手机于紫外激发关闭前及关闭后的不同时间间隔拍摄.

## 1.2 实验过程

1.2.1 MA-IPA 的合成 称取 63.1 mg(0.50 mmol) MA 溶解于 25 mL 水中, 在超声辅助下溶解完全, 再取 124.6 mg(0.75 mmol) IPA 溶解于 2 mL DMSO 中; 将两种澄清溶剂混合搅拌 6 h. 由于氢键网络的形成, 溶液呈现为悬浊液, 经减压过滤得到白色固体, 用无水乙醇冲洗多次除去多余的 DMSO, 然后在 60 °C 下烘干 12 h 得到 MA-IPA 固体.

1.2.2 MA-IPA-BA 的合成 称取 63.1 mg(0.50 mmol) MA 溶解于 25 mL 水中, 在超声辅助下溶解完全, 再取 124.6 mg(0.75 mmol) IPA 与 2.4 mg(0.02 mmol) BA 溶解于 2 mL DMSO 中; 将两种澄清溶剂混合搅拌 6 h, 由于氢键网络的形成, 溶液为悬浊液, 经减压过滤得到白色固体, 用无水乙醇冲洗多次除去多余的 DMSO, 然后在 60 °C 下烘干 12 h 得到 MA-IPA-BA 固体. 对于制备不同掺杂剂含量的样品只需改变 BA 与 MA 的摩尔比, 选用  $n(\text{MA}):n(\text{BA})=125:1, 25:1, 5:1, 1:1$ . MA-IPA-TMA 和 MA-IPA-PMA 的合成方法与 MA-IPA-BA 相似.

1.2.3 MA-IPA-BA@RhB 的合成 称取 9.6 mg RhB 溶解于 2 mL 水中, 再称取适量的 MA-IPA-BA 加入 RhB 溶液中, 超声 5 min, 静置 24 h, 得到暗红色的悬浊液.

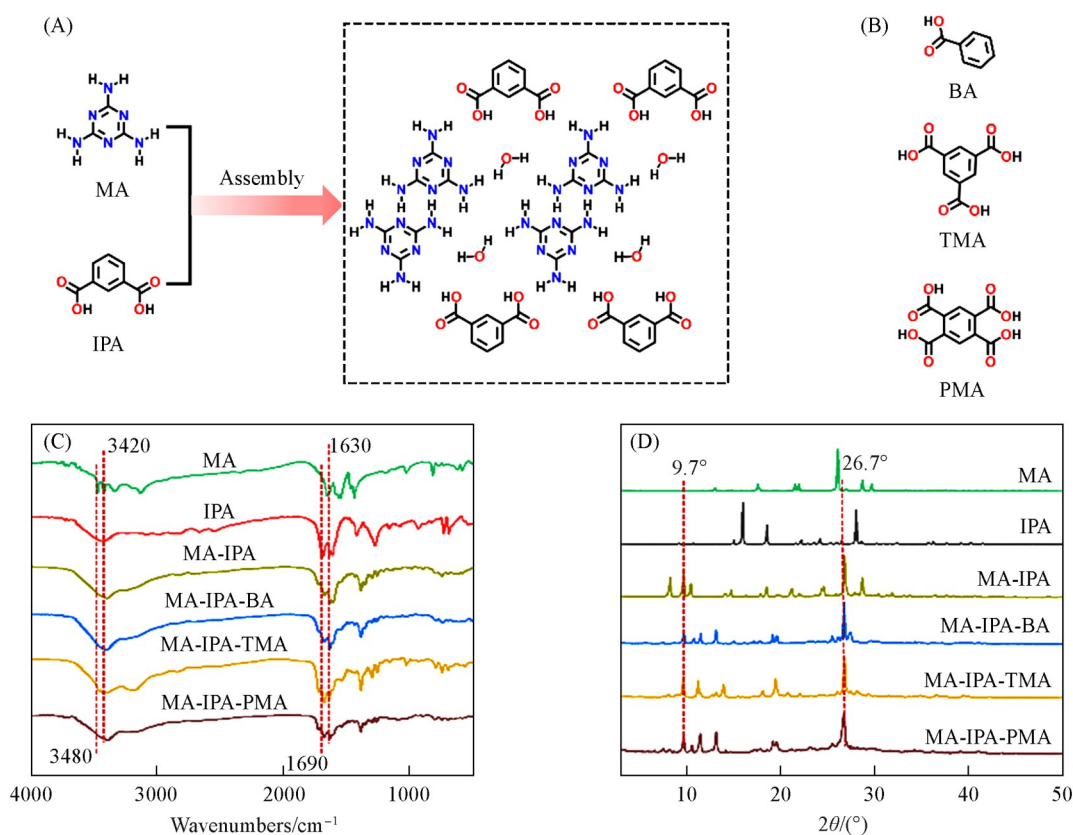
## 2 结果与讨论

### 2.1 氢键网络体系的构建及表征

在文献[29]报道方法的基础上, 将反应条件调整为室温, 以三聚氰胺(MA)和间苯二甲酸(IPA)为构筑单元, 构建了以氢键作用为主导的组装体系(MA-IPA). 如图 1(A)和(B)所示, 在合成过程中引入了具有不同羧酸取代数目的芳香小分子作为调控组分, 包括苯甲酸(BA)、均苯三甲酸(TMA)和 1,2,4,5-苯四甲酸(PMA), 所得样品分别记为 MA-IPA-BA, MA-IPA-TMA 和 MA-IPA-PMA.

采用傅里叶变换红外(FTIR)光谱对组装体系的分子间相互作用进行了表征. 如图 1(C)和图 S1~图 S3 (见本文支持信息)所示, 相较于纯 MA, MA-IPA 的 FTIR 谱中位于 3420 和 3480  $\text{cm}^{-1}$  处的游离氨基特征吸收峰消失; 同时, IPA 的 FTIR 谱中 1690  $\text{cm}^{-1}$  处的羰基伸缩振动峰在 MA-IPA 的 FTIR 谱中红移至 1630  $\text{cm}^{-1}$ , 表明 MA 与 IPA 之间存在显著的分子间氢键相互作用, 从而发生有序组装, 该结果与文献[29]报道的结构特征一致. 进一步引入 BA, TMA 和 PMA 后, FTIR 谱中未出现新的特征吸收峰或明显峰位变化, 表明体系仍以 MA 与 IPA 之间的氢键相互作用为主导.

采用 X 射线衍射(XRD)对组装体系的结构进行了表征. 如图 1(D)和图 S4~图 S6(见本文支持信息)所示, MA-IPA 体系呈现出较清晰的衍射峰, 表明材料具有一定程度的长程有序堆积特征. 与单独的 MA 和 IPA 相比, MA-IPA 在  $2\theta=9.7^\circ$  和  $26.7^\circ$  处出现新的衍射峰, 同时 IPA 在  $2\theta=16.0^\circ$  处的特征衍射峰消失, 说明 MA 与 IPA 发生共组装, 形成了不同于各自单组分的有序结构. 在引入 BA, TMA 和 PMA 后, 上述 2 个特征峰仍然存在, 同时出现了新的衍射信号. 其中, MA-IPA-BA 在  $2\theta=13.1^\circ$  和  $27.5^\circ$  处出现新峰, MA-IPA-TMA 在  $2\theta=14.0^\circ$  处出现新峰, 而 MA-IPA-PMA 的新峰位于  $2\theta=13.1^\circ$  处. 这些变化表明, 不同羧酸取代的小分子能够调控 MA-IPA 体系的组装方式, 影响氢键网络的堆积模式, 从而形成具有差异化结构特征的组装体系.



**Fig. 1** Assembly structures of MA-IPA(A) and doping reagents BA, TMA and PMA(B), FTIR spectra(C) and XRD patterns(D) of MA-IPA, MA-IPA-BA, MA-IPA-TMA, MA-IPA-PMA and the corresponding raw materials

(A) Schematic illustration of the MA-IPA structure based on Ref. [29].

## 2.2 氢键网络体系的磷光行为

以苯甲酸(BA)为例,制备了4种具有不同苯甲酸含量的氢键网络材料,分别为 $n(\text{MA}):n(\text{IPA}):n(\text{BA})=125:187.5:1$ ,  $25:37.5:1$ ,  $5:7.5:1$ ,  $1:1.5:1$ 。随着BA含量的增加,磷光性能随之增强,以 $n(\text{BA}):n(\text{MA})=1:25$ 时最佳,继续增加BA的含量,磷光性能随之减弱(图S7,见本文支持信息),故后续所用材料均采用此比例。MA-IPA氢键网络组装体在254 nm紫外光激发下呈现蓝色发光,关闭激发光源后可观察到明亮的蓝绿色余晖,持续时间约为10 s[图2(A)],表明该体系在室温条件下具有明显的磷光发射特征。由MA-IPA, MA-IPA-BA, MA-IPA-TMA和MA-IPA-PMA的磷光发射光谱测试结果[图2(B)]可以发现,掺杂前后磷光的最大发射波长基本保持一致,均位于约480 nm,说明发射中心未发生明显改变。在相同测试条件下,掺杂BA, TMA和PMA后的磷光强度比未掺杂样品分别提高了约3.1, 4.2和3.2倍; MA-IPA, MA-IPA-BA, MA-IPA-TMA和MA-IPA-PMA的RTP产率分别为20.4%, 25.1%, 24.2%和22.2%,表明芳基羧酸小分子的引入能够有效增强体系的磷光发射强度和RTP产率。

磷光寿命测试结果如图2(C)和(D)所示, MA-IPA的磷光寿命为1.08 s。相比之下, MA-IPA-BA, MA-IPA-TMA和MA-IPA-PMA的磷光寿命均表现出不同程度的延长,其中MA-IPA-BA的磷光寿命可达1.70 s,为3种掺杂体系中最长。同时,图2(A)展示了不同样品在关闭紫外光后的余晖颜色及持续时间变化情况,可见掺杂后余晖颜色基本保持一致,而余晖持续时间从MA-IPA-BA到MA-IPA-PMA逐渐缩短,其变化趋势与磷光寿命测试结果在定性上保持一致。为探究氢键网络的稳定性,以MA-IPA-BA为例,将其置于水溶液中24 h,由于水分子对晶体外层磷光的猝灭,致使其磷光强度减弱,但其磷光寿命基本保持不变(图S8,见本文支持信息)。将MA-IPA-BA置于pH=2.4的水溶液中静置24 h,在紫外灯照射下仍有磷光产生,磷光寿命为1.97 s(图S9,见本文支持信息),表明其能在酸性条件保持

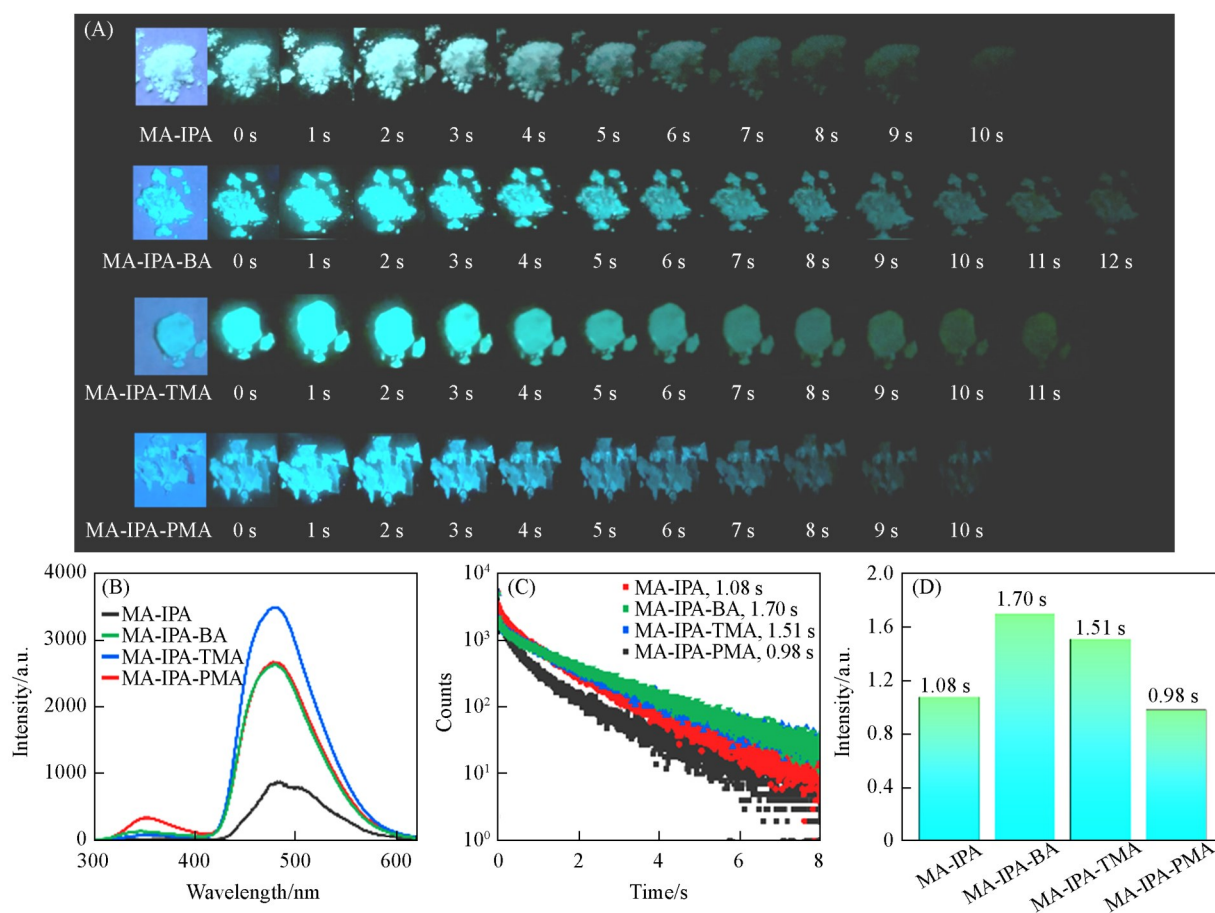


Fig. 2 Afterglow images(A), phosphorescence spectra( $\lambda_{\text{ex}}=254 \text{ nm}$ ) (B), lifetime decay curves( $\lambda_{\text{ex}}=254 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{em}}=490 \text{ nm}$ ) (C) and phosphorescence lifetime fitting results of MA-IPA, MA-IPA-BA, MA-IPA-TMA and MA-IPA-PMA(D)

稳定.

### 2.3 氢键网络体系的磷光寿命及调控机理

为进一步探究芳基羧酸小分子对氢键网络体系磷光寿命的调控作用,对其可能的作用机理进行了分析.如图3(A)和(B)所示,用于构筑材料的MA,IPA以及芳基羧酸小分子在固态条件下均表现出不同程度的长寿命发射特征.其磷光发射光谱显示,MA的发射波长最短,约为450 nm;随着羧酸取代基数量的增加,BA,IPA,TMA和PMA的发射波长逐渐由约460 nm红移至520 nm.其中,IPA的磷光发射峰位于约495 nm,与所构筑氢键网络组装体系的发射波长最为接近.此外,从发射光谱峰形来看,IPA表现为单一发射峰,而BA,TMA和PMA均呈现双峰结构,表明IPA的发射特征与组装体系中观察到的磷光行为具有更高的一致性,显示IPA可能在所构筑的氢键网络体系磷光发射中起主要作用.值得注意的是,相较于纯IPA,IPA在MA-IPA氢键网络组装体中的磷光发射峰进一步蓝移至约480 nm,这可能与更强的氢键约束及局部微环境变化有关.为验证所提出的氢键网络体系对温度变化的响应性,研究了MA-IPA-BA在80~280 K温度范围内的磷光寿命(图S10,见本文支持信息).结果表明,随着温度升高,其磷光寿命由2.81 s逐渐降低至1.94 s.该温度依赖性的磷光衰减行为表明分子间相互作用对热扰动较为敏感,从而在一定程度上支持了氢键网络在调控磷光过程中的作用.

影响磷光寿命的主要因素包括:(1)氧分子对三重态激子的猝灭作用;(2)三重态激子的非辐射跃迁过程.由于氧分子本身处于三重态,能够与发光分子的三重态激子发生高效的能量转移,从而导致磷光猝灭<sup>[30-32]</sup>.通常情况下,颗粒尺寸越大,其比表面积越小,与空气中氧分子的接触程度越低,有利于降低氧猝灭效应并延长磷光寿命.如图3(C)所示,MA-IPA的颗粒尺寸较小,多数约为1  $\mu\text{m}$ ,具有

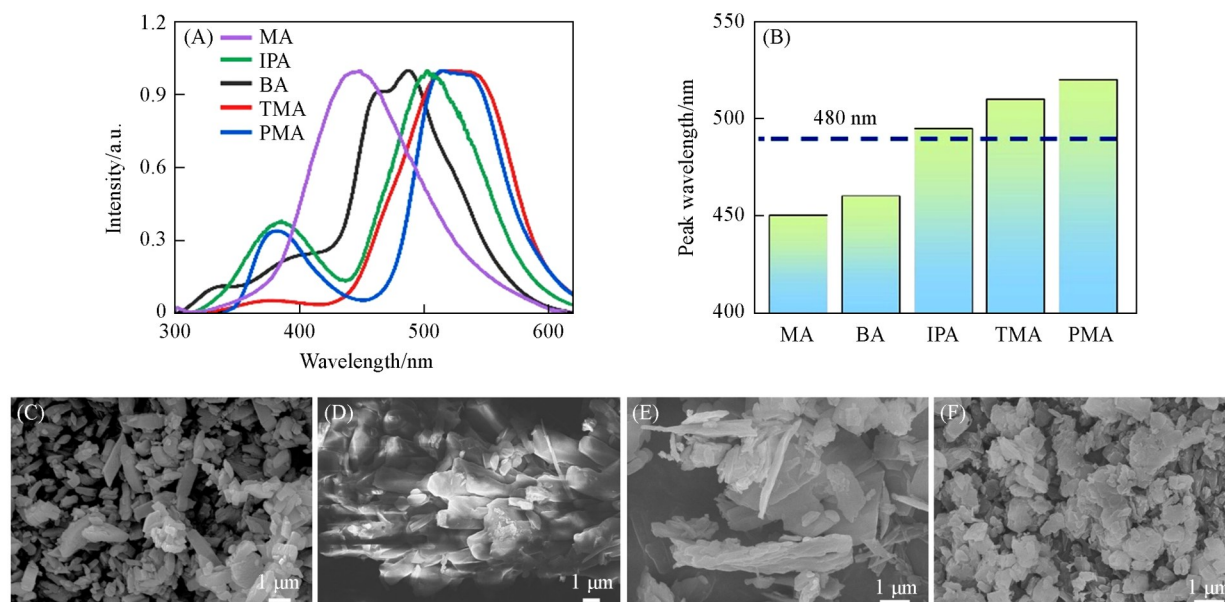


Fig. 3 Phosphorescence spectra(A) and corresponding wavelengths(B) of the raw materials and SEM images of MA-IPA(C), MA-IPA-BA(D), MA-IPA-TMA(E) and MA-IPA-PMA(F)

相对较大的比表面积。引入芳基羧酸小分子后，整个体系的组装形貌发生显著变化：MA-IPA-BA呈柱状结构[图3(D)]，MA-IPA-TMA呈条状结构[图3(E)]，而MA-IPA-PMA则表现为块状结构[图3(F)]。整体来看，随着掺杂分子中羧酸取代基数量的增加，组装颗粒尺寸呈减小趋势，其中MA-IPA-PMA的颗粒尺寸与MA-IPA最为接近。在所有样品中，MA-IPA-BA的结晶组装颗粒尺寸最大，对应较小的比表面积，从而有效降低了空气中氧分子对三重态激子的猝灭作用，表现为最长的磷光寿命。相反，MA-IPA-PMA的颗粒尺寸最小，比表面积最大，氧猝灭效应更为显著，导致其磷光寿命相对较短。在真空条件下对MA-IPA-BA进行了寿命测试，由于真空环境降低了空气中氧分子对三重态激子的猝灭作用，致使其寿命从1.70 s增加到1.82 s(图S11, 见本文支持信息)。上述结果表明，BA, TMA和PMA的引入通过调控氢键网络的微观组装方式和介观形貌影响到其磷光寿命。

#### 2.4 氢键网络体系磷光的多色调控及防伪应用

尽管MA-IPA及其掺杂体系表现出可观的RTP特性，其余晖发射颜色仍主要集中于蓝绿色区域。基于此，进一步引入三重态介导的能量转移策略，以实现体系余晖发射颜色的调控。

选取磷光寿命最长的MA-IPA-BA作为能量供体，以市售荧光染料罗丹明B(RhB)作为能量受体，构建了三重态到单重态能量转移体系。如图S12(见本文支持信息)所示，RhB的紫外-可见吸收光谱与MA-IPA-BA的磷光发射光谱之间存在良好的光谱重叠，为能量转移过程的发生提供了基础条件。在254 nm紫外光激发下，MA-IPA-BA@RhB体系在605 nm处出现了RhB的特征发射峰，同时480 nm处MA-IPA-BA的磷光发射强度明显降低，表明体系中存在有效的能量转移过程。以MA-IPA-BA作为能量供体，RhB作为能量受体，根据供体在加入受体前后磷光发射强度的变化，对MA-IPA-BA@RhB体系的能量转移效率( $E$ )进行了计算(图S13, 见本文支持信息)。所用公式如下：

$$E = \frac{I_D - I_{DA}}{I_D}$$

式中： $I_D$ 和 $I_{DA}$ 分别为无受体和有受体条件下供体的磷光发射强度，计算得到该体系的能量转移效率约为89%。值得注意的是，RhB分子带正电，而MA-IPA-BA体系中富含羧酸基团，局部呈现较高的负电性，二者之间的静电相互作用有助于缩短供体与受体之间的距离，从而促进能量转移效率的提高。因此，该能量转移体系的构建无需复杂的化学合成步骤，仅需将MA-IPA-BA分散于RhB水溶液中，即可获得发射红色余晖的MA-IPA-BA@RhB复合体系。如图4(A)所示，肉眼观察结果表明，在关闭紫外光源后MA-IPA-BA@RhB复合体系呈现出明显的粉红色余晖，持续时间约为4 s。

基于上述余晖颜色可调特性,以MA-IPA-BA作为涂料构建了“AIE”图案用于防伪演示.如图4(B)所示,在紫外光照射下,图案呈现蓝色荧光;关闭紫外光后,则显示出持续的青绿色余晖.当在图案表面滴加高浓度RhB水溶液后,紫外光下的荧光颜色由蓝色转变为橙色,而关闭紫外光后,余晖颜色由青绿色转变为粉红色,余晖持续时间仍保持在约4 s.上述荧光-磷光双模式颜色响应行为为多级防伪应用提供了可行的设计思路.

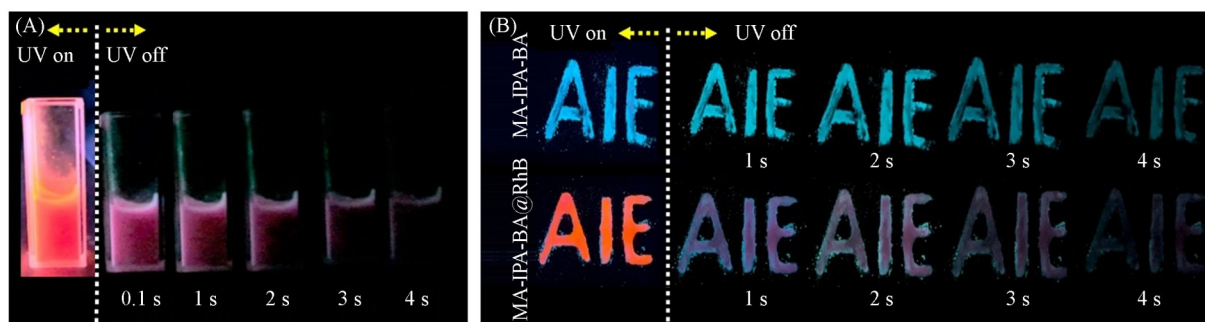


Fig. 4 Afterglow photograph of MA-IPA-BA@RhB(A), and its anti-counterfeiting application demonstrated with an “AIE” pattern(B)

### 3 结 论

以MA和IPA构建了氢键网络组装体系,并通过引入不同羧酸取代数目的小分子BA,TMA和PMA,对MA-IPA氢键网络的组装方式进行调控,构筑了一系列长寿命RTP材料.掺杂小分子的引入未改变MA-IPA氢键网络的基本构筑单元,但显著影响了其有序堆积方式和结构特征.光物理性能研究表明,所构筑的MA-IPA,MA-IPA-BA,MA-IPA-TMA和MA-IPA-PMA体系在室温下均表现出稳定的磷光发射行为,其发射峰位主要由IPA决定,其中MA-IPA-BA体系表现出较长的磷光寿命,可达1.7 s.进一步的形貌分析表明,掺杂小分子通过调节氢键网络的介观组装结构,改变了组装体颗粒尺寸和比表面积,从而影响空气中氧分子对三重态激子的猝灭程度,这是导致不同体系磷光寿命差异的重要原因.在此基础上,基于三重态介导的能量转移过程构建了具有红色余晖发射特征的MA-IPA-BA@RhB复合体系,并展示了其在多级防伪中的应用潜力.综上所述,本研究为基于氢键网络的长寿命RTP材料的结构调控与功能拓展提供了一种可行的设计思路.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20250395>.

### 参 考 文 献

- [1] Han X., Zheng H. Q., Yang Y., Cui Y. J., Qian G. D., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, *35*, 2425934
- [2] Yang Q., Yang X. Y., Wang Y. X., Fei Y. F., Li F., Zheng H. Y., Li K., Han Y. B., Hattori T., Zhu P. W., Zhao S. Q., Fang L. M., Hou X. Y., Liu Z. D., Yang B., Zou B., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*, 7778
- [3] Li Y., Jiang L., Liu W., Xu S., Li T. Y., Fries F., Zeika O., Zou Y., Ramanan C., Lenk S., Scholz R., Andrienko D., Feng X., Leo K., Reineke S., *Adv. Mater.*, **2021**, *33*, 2101844
- [4] Li D., Liu Z., Fang M., Yang J., Tang B. Z., Li Z., *ACS Nano*, **2023**, *17*, 12895—12902
- [5] Sun S., Wang J., Ma L., Ma X., Tian H., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*, 18557—18560
- [6] Zhou B., Yan D. P., *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, *29*, 1807599
- [7] Cai M., Qiu Y., Li F., Cai S., Cai Z. X., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, *16*, 46609—46618
- [8] Luo W. Z., Chen L. M., Yin G. Q., Yue C. J., Xie S. Y., Zhou J. Y., Feng W. H., Nie Y. J., Qiu H. K., Li F. M., Cai S. Y., Li Y. J., Cai Z. X., Chen T., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, *64*, e202423650
- [9] Yang J., Zhen X., Wang B., Gao X. M., Ren Z. C., Wang J. Q., Xie Y. J., Li J. R., Peng Q., Pu K., Li Z., *Nat. Commun.*, **2018**, *9*, 840
- [10] Lü Z. Q., Gao Q., Shi M. C., Su Z. H., Chen G., Qi H. S., Lü B. Z., *Peng F., Small Struct.*, **2024**, *5*, 2300567
- [11] Yang L., Zhang Q., Ma Y., Li H., Sun S., Xu Y., *Chem. Eng. J.*, **2024**, *490*, 151679

- [12] Zhou Y., Qin W., Du C., Gao H., Zhu F., Liang G., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, 12102—12106
- [13] Delgado W. T., Braun C. A., Boone M. P., Shynkaruk O., Qi Y., McDonald R., Ferguson M. J., Data P., Almeida S. K. C., de Aguiar I., de Souza G. L. C., Brown A., He G., Rivard E., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, *10*, 12124—12134
- [14] Guo X., Zhang H., Fu L. Y., Jian K., Zhao X., *ACS Appl. Nano Mater.*, **2023**, *6*, 15597—15605
- [15] Chen G., Guo S. J., Feng H., Qian Z. Y., *J. Mater. Chem. C*, **2019**, *7*, 14535—14542
- [16] Mao H., Gao J., Geng Y., Shan G. G., Shao K., Hua R., Su Z. M., *J. Mater. Chem. C*, **2024**, *12*, 8545—8550
- [17] Qu S. J., Shen K., Wu B. J., He Y., Zhao Z. W., Yin C., An Z., Yan S. C., Shi H. F., *Cryst. Growth Des.*, **2023**, *23*, 31—36
- [18] Lusi M., *Cryst. Growth Des.*, **2018**, *18*, 3704—3712
- [19] Dar A. A., Lone S. H., Ahmad I., Ahangar A. A., Ganie A. A., Femina C., *Mater. Adv.*, **2024**, *5*, 1056—1064
- [20] Saha S., Desiraju G. R., *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 1975—1983
- [21] Berry D. J., Seaton C. C., Clegg W., Harrington R. W., Coles S. J., Horton P. N., Hursthouse M. B., Storey R., Jones W., Frišćić T., Blagden N., *Cryst. Growth Des.*, **2008**, *8*, 1697—1712
- [22] Shen P., Zhang C. Y., Hu E. Z., Gao Y., Wei Y., Zhang J. Q., Qian S., Heng W. K., *Mol. Pharm.*, **2023**, *20*, 3412—3426
- [23] Frišćić T., Trask A. V., Jones W., Motherwell W. D. S., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2006**, *45*, 7546—7550
- [24] Chen J., Long Z., Li Y., Qiu H., *J. Anal. Test.*, **2024**, *8*, 170—179
- [25] Toledo-Neira C., Garrido-Morales F., Piña S., *J. Anal. Test.*, **2025**, *9*, 279—282
- [26] Liang Y. C., Shang Y., Liu K. K., Liu Z., Wu W. J., Liu Q., Zhao Q., Wu X. Y., Dong L., Shan C. X., *Nano Res.*, **2020**, *13*, 875—881
- [27] Wang D., Wu H., Gong J., Xiong Y., Wu Q., Zhao Z., Wang L., Wang D., Tang B. Z., *Mater. Horiz.*, **2022**, *9*, 1081—1088
- [28] Singh M., Shen K., Ye W., Gao Y., Lv A., Liu K., Ma H., Meng Z., Shi H., An Z., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*, e202410562
- [29] Bian L., Shi H., Wang X., Ling K., Ma H., Li M., Cheng Z., Ma C., Cai S., Wu Q., Gan N., Xu X., An Z., Huang W., *J. Am. Chem. Soc.*, **2018**, *140*, 10734—10739
- [30] Peng J., Sokolov S., Hernangómez-Pérez D., Evers F., Gross L., Lupton J. M., Repp J., *Science*, **2021**, *373*, 452—456
- [31] Schulman E. M., Parker R. T., *J. Phys. Chem.*, **1977**, *81*, 1932—1939
- [32] Chen K., Zhang Y., Lei Y., Dai W., Liu M., Cai Z., Wu H., Huang X., Ma X., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*, 1269

(Ed.: F, K)