

基于簇发光的延迟荧光模板

袁乐天[#], 郭佳晨[#], 武桐玥, 高水涛, 黄建滨, 阎云
(北京大学化学与分子工程学院, 北京分子科学国家实验室, 北京 100871)

摘要 通过压力诱导静电组装的方式构建了一种可作为“延迟荧光模板”的簇发光材料. 阴离子聚丙烯酰胺 (APAM)与聚六亚甲基双胍盐酸盐(PHMB)的静电复合物在压力作用下形成块体材料. 材料中胍基与羧酸根、酰胺基团之间通过静电和氢键作用紧密结合, 通过空间作用表现出簇发光. 由于嵌入其中的荧光染料能够与两种高分子中的任意一种发生静电作用或极化作用, 不同类型的染料分子被引入该材料后, 均表现出延迟荧光, 如模板一样激活任意荧光分子的延迟荧光性能. 通过将不同荧光染料嵌入模板中, 可实现动态磷光防伪. 本文研究结果为延迟荧光的实现与应用提供了新的思路与平台.

关键词 延迟荧光; 簇发光; 磷光共振能量转移

中图分类号 O644 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20260075

Template for Delayed Fluorescence Based on Clusteroluminescence

YUAN Letian[#], GUO Jiachen[#], WU Tongyue, GAO Shuitao, HUANG Jianbin, YAN Yun^{*}
(Beijing National Laboratory for Molecular Sciences (BNLMS), College of Chemistry and Molecular Engineering,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract A clusteroluminescent material serving as a “delayed fluorescence template” was constructed *via* pressure-induced electrostatic assembly. Bulk materials were formed through the electrostatic complexation of anionic polyacrylamide (APAM) and polyhexamethylene biguanide hydrochloride (PHMB). Within this matrix, guanidyl, carboxylate, and amide groups are tightly interconnected *via* electrostatic and hydrogen bonding interactions, facilitating clusteroluminescence through through-space interactions. Notably, the embedded fluorescent dyes interact with either polymer component through electrostatic or polarization effects. Consequently, upon the incorporation of various dyes, the material exhibits delayed fluorescence, effectively acting as a template that activates this property in diverse fluorophores. By embedding distinct dyes, dynamic phosphorescent anti-counterfeiting applications are realized. This work provides a novel strategy and platform for the realization and application of delayed fluorescence.

Keywords Delayed fluorescence; Clusteroluminescence; Phosphorescence resonance energy transfer

发光现象在照明显示^[1,2]、成像^[3-5]及防伪^[6,7]等领域都扮演着至关重要的角色, 如何调控分子的光物理性质始终是科研领域备受关注的焦点. 目前, 发光技术呈现出材料形式多样化、发光基团丰富化的发展趋势: 一方面, 随着人们对聚集诱导发光(AIE)现象的不断探索, 各类固态发光材料不断被合成出来, 为应用领域注入了新活力^[8-12]; 另一方面, 发光基团不再局限于经典的 π 共轭体系, 利用羟基、羰基等基团通过空间共轭实现的簇发光现象^[13-15]正逐渐成为科研人员探索的新热点. 此外, 随着机理认识的不断深入, 人们已不再满足于简单的荧光与磷光, 而是开始深入挖掘能量传递^[16,17]、延迟荧

收稿日期: 2026-02-08. 网络首发日期: 2026-04-09.

联系人简介: 阎云, 女, 博士, 教授, 主要从事分子自组装方法学研究. E-mail: yunyan@pku.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22332001)资助.

Supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China(No.22332001),

[#] 共同第一作者.

光^[18,19]等更为复杂的光物理过程,为发光技术的创新性应用开辟了更广阔的空间。

延迟荧光是一种特殊的光致发光现象。它的发射光谱通常与常规荧光相同,但寿命远远长于常规荧光,可达毫秒(ms)级别^[20,21]。最常见的延迟荧光类型是热活化延迟荧光(TADF),它通过热能驱动单重态与三重态之间的系间窜跃及反向系间窜跃实现^[22,23]。为促进这一过程,单线态与三线态的能级差需尽可能小,这要求对发光分子结构进行精妙设计,例如供体(D)与受体(A)分离的扭曲型分子^[24-26]或D和A交替出现的聚合物^[27-29]。除电子转移机制外,能量转移也为延迟荧光提供了新思路:将荧光客体掺入磷光主体内,利用偶极-偶极相互作用实现磷光共振能量传递(PRET),从而激活客体分子的延迟发光^[30-32]。然而,现有磷光主体多为 π 共轭基团修饰的聚合物,工艺相对复杂。而许多含极性基团(如羟基、羰基)的聚合物本身即可通过空间共轭产生磷光,具有来源广泛且成本低廉的天然优势^[33],有望作为一种新型磷光主体,通过能量传递实现材料的延迟荧光发射。

本文开发了一种基于簇发光的延迟荧光模板。首先构筑具有磷光发射的簇发光基底 APAM-PHMB (APAM=阴离子聚丙烯酰胺, PHMB=聚六亚甲基双胍盐酸盐),随后引入不同类型的染料分子,即可普适性地激活染料分子的延迟荧光。基于所选染料分子本身的发光性质,可以实现多种颜色的延迟荧光,进而应用于信息加密等领域。本文研究结果为延迟荧光材料的构筑提供了一条区别于分子合成与特定给受体分子间能量转移的新路径,也为多色、可编程延迟荧光体系的设计提供了新的材料范式。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

APAM[重均分子量(M_w)约为 1.2×10^7],上海生工生物工程公司; PHMB,上海毕得医药科技股份有限公司; 荧光素钠(FS)、六氯荧光素(HEX,纯度95%),尼罗红(NR,纯度95%)和荧光桃红B(PB,纯度95%),上海笛柏试剂公司; 四溴二氯荧光素(PA),分析纯,北京沃凯生物科技有限公司; 吖啶橙(AO)和2',7'-二氟荧光素(DFP),分析纯,东京化成工业株式会社(TCI试剂公司)。

Shimadzu UV-3600型紫外-可见-近红外光谱仪(UV-Vis-NIR),日本岛津公司、FLS980型稳态瞬态荧光/磷光光谱仪(77~500 K)和FLS1000型稳态瞬态荧光/磷光光谱仪,英国爱丁堡仪器有限公司; AVANCE III型400 MHz核磁共振波谱仪(NMR),德国Bruker公司; Rigaku Dmax-2400型X射线衍射仪(XRD),日本Rigaku公司; Spectroline FC-100F型紫外灯光源,波长为365 nm,美国Spectroline Model公司; 所有照片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

将2.84 g APAM加入400 mL蒸馏水中,加热搅拌使其溶解,得到均一透明的APAM溶液; 将3.66 g PHMB加入200 mL蒸馏水中,加热搅拌使其溶解,得到均一透明的PHMB溶液。

1.2.1 APAM-PHMB块体材料的制备 将20 mL APAM溶液和20 mL PHMB溶液混合,生成白色沉淀,离心并收集沉淀,将沉淀置于聚四氟乙烯板之间,用手按压(约0.5 MPa, 10 s)将沉淀压实并挤压出多余的水分,自然干燥即得到块体材料APAM-PHMB。

1.2.2 APAM-PHMB@Dye掺杂材料的制备 以APAM-PHMB@AO的制备为例,将500 μ L 2 mmol/L的AO水溶液加入20 mL PHMB溶液中,混合均匀后与20 mL APAM溶液混合,得到APAM-PHMB@AO沉淀,离心压实,静置干燥后即得到块体材料APAM-PHMB@AO。

2 结果与讨论

2.1 延迟荧光模板的构筑与发光性质

实验选择具有丰富极性基团的APAM和PHMB作为延迟荧光模板的构筑基元,其原因是APAM和PHMB本体无论是各自的粉末状态,还是溶解后旋涂得到的薄膜,均具有典型的簇集诱导发光(CTE)性质(图S1,见本文支持信息),并且在中性条件下分别带负电和正电,具有良好的水溶性,从而可利用溶液进行共组装。通过混合一定浓度的APAM溶液和PHMB溶液可以自发形成白色沉淀,收集沉淀

并施加压力即可得到块体材料 APAM-PHMB[图 1(A)]. 与共组装前对比, 在 ^{13}C NMR 谱图中于 δ 180 处出现新峰, 这是 APAM 的羧基与 PHMB 的双胍基团相互作用后相连的碳产生的峰, 证明两者间存在静电与氢键相互作用(图 S2, 见本文支持信息).

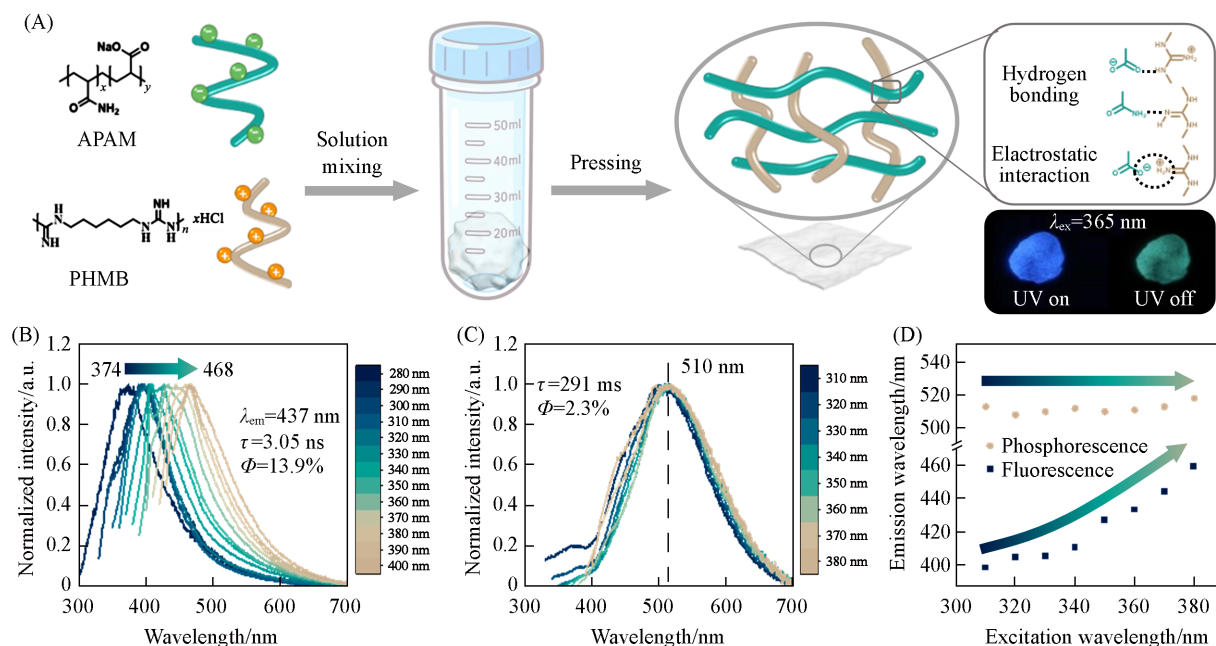


Fig. 1 Systematically illustration of electrostatic self-assembly and intermolecular force of APAM and PHMB with digital images(A), normalized fluorescence spectra of APAM-PHMB(B), normalized phosphorescence spectra of APAM-PHMB(C), and emission wavelength of fluorescence and phosphorescence of APAM-PHMB with excitation wavelength variations(D)

APAM-PHMB的发射光谱呈现较宽的单峰, 且发射峰位置具有激发波长依赖性[图 1(B)和(D)及图 S3, 见本文支持信息], 随着激发波长从 280 nm 增加到 400 nm, 其发射峰位置从 374 nm 红移到 468 nm. 这是由于体系中双胍基团、羧基、氨基在空间内以不同形式聚集, 形成了空间共轭程度不一的发光簇; 不同激发波长被具有匹配能隙的簇捕获并发出相应的光, 从而产生了激发波长相关的发光, 属于典型的簇发光行为. 然而与常规簇发光体系不同的是, APAM-PHMB 薄膜在 510 nm 处具有磷光发射, 且发射波长不随激发波长变化而变化[图 1(C)和(D)及图 S3]. 这与本课题组^[34-36]之前报道的相关体系光物理现象一致. 与 APAM 和 PHMB 单体相比, APAM-PHMB 的荧光发射峰位置发生了变化, 这是因为簇生色团由 APAM 的酰胺和羧基及 PHMB 的双胍基团, 变成了 APAM-PHMB 中的羧基、酰胺与双胍基团混合的新团簇; 且磷光寿命有了明显的提升(表 S1, 见本文支持信息). 可见, 静电与氢键等相互作用对空间共轭轨道的极化有影响并对分子构象起到固定作用.

2.2 延迟荧光模板的普适性

由于 APAM-PHMB 内部具有丰富的非共价相互作用网络, 可以容纳各种电性的发光染料, 如带正电的 AO、带负电的 DFF 以及电中性的 NR[图 2(A)]. 通过共沉淀的方法, 可以将这些染料以一定比例方便地引入 APAM-PHMB 中得到 APAM-PHMB@Dye. 以掺杂 AO 分子的 APAM-PHMB@AO 为例, 当 AO 掺杂量较少时, 425 nm 处 APAM-PHMB 本身的发光仍然比较明显, 而在 AO 掺杂量到达 500 μL 时, 主要表现为 546 nm 处的荧光发射(图 S4, 见本文支持信息), 即 AO 本身的发光, 故选择该比例开展后续研究. XRD 结果显示, 掺杂 AO 前后均在 $2\theta=21.1^\circ$ 处出现对应分子间距离为 0.42 nm 的无定形宽峰(图 S5, 见本文支持信息), 无明显变化, 证明了染料分子的良好分散, 没有对原网络结构产生影响.

在 365 nm 光激发波长下, APAM-PHMB@AO 具有与 AO 分子自身荧光发射位置相同的延迟荧光发射, 且具有 52.9 ms 的荧光寿命[图 2(B)和(E)]. APAM-PHMB@DFF[图 2(C)和(F)]和 APAM-PHMB@NR[图 2(D)和(G)]也表现出与染料本身近乎相同的发射位置与毫秒级的荧光寿命, 印证了

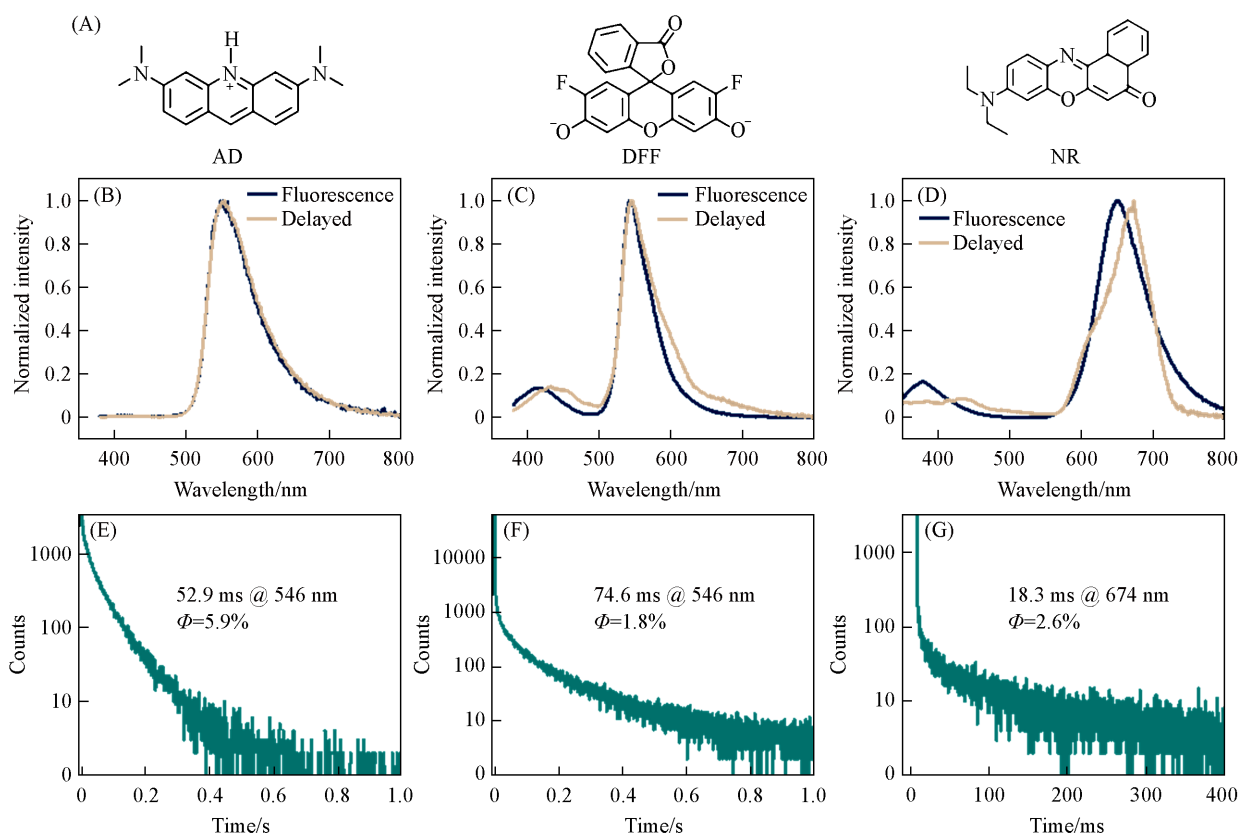


Fig. 2 Molecular structures of AO, DFF and NR(A), fluorescence, delayed fluorescence spectra(B, C, D) and lifetime decay curves(λ_{ex} =365 nm, E, F, G) of APAM-PHMB@AO(B, E), APAM-PHMB@DFF(C, F) and APAM-PHMB@NR(D, G)

APAM-PHMB作为延迟荧光模板的可行性. 其中, APAM-PHMB@NR的发射波长与NR分子本身的发射波长相比产生了20 nm的红移, 这可能来源于极性环境对电荷分离态的影响^[37].

FS和HEX等分子也可采用相同的方法和比例引入APAM-PHMB, 进而实现毫秒量级寿命的延迟荧光, 这证明了APAM-PHMB作为延迟荧光模板的普适性(图S6, 见本文支持信息).

2.3 延迟荧光模板的机理

为阐明APAM-PHMB作为延迟荧光模板的机理, 以APAM-PHMB@AO为例开展了研究. 由图3(A)可以看出, APAM-PHMB的磷光发射谱与AO的吸收光谱具有显著重叠, 而AO在365 nm激发波长处吸收很弱, 这表明在365 nm光照下, 主要激发的是APAM-PHMB本身, 受激发的APAM-PHMB经系间穿越(ISC)到达其三线态(T_1), 随后通过共振转移(TS-PRET)将能量传递给AO的单线态(S'_1), 从而引发了AO的延迟荧光发射[图3(E)]. 随着温度升高, 延迟荧光强度增强[图3(B)], 说明三线态的能量转移过程具有热活化特性, 这与热活化延迟荧光(TADF)机制相符. 同时, APAM-PHMB的荧光发射与AO分子的吸收光谱几乎没有重合(图S7, 见本文支持信息), 这排除了荧光共振能量转移的可能. 此外, APAM-PHMB的磷光寿命和APAM-PHMB@AO的延迟荧光寿命在低温下保持不变且长短相当, 而在240 K以上均开始下降[图3(C)]. 这可能是因为两者均依赖于APAM-PHMB本身的 T_1 能级, 因而在低温下两者寿命相当, 当温度升高, 分子热运动增强, 两者寿命以相似的趋势变小. 这进一步证实了磷光共振能量转移是引发延迟荧光的原因.

随着激发波长的增大, APAM-PHMB@AO的荧光强度和延迟荧光强度均呈现先减小再增大的趋势, 而APAM-PHMB的磷光强度则先增大又减小(图S8, 见本文支持信息). 可见, 在较长波长处APAM-PHMB本身的磷光发光已经减弱, 但延迟荧光强度反而上升. 这表明在该体系中, 通过激发APAM-PHMB并进行磷光共振能量转移并不是延迟荧光产生的唯一路径. 因而, 本文尝试采用AO的最

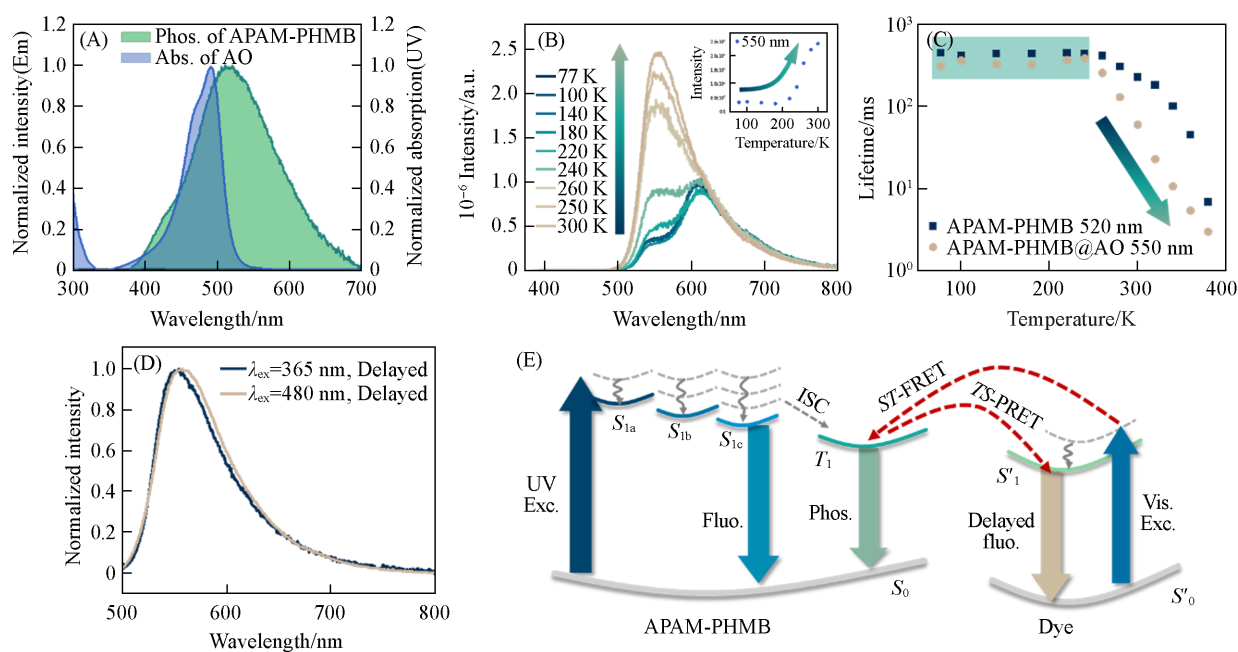


Fig. 3 Normalized absorption spectrum of AO solution (blue) and phosphorescence spectrum of APAM-PHMB (green, $\lambda_{\text{ex}}=365$ nm, A), delayed fluorescence spectra of APAM-PHMB@AO and intensity at 550 nm (inset) with temperature variations (B), lifetime of phosphorescence of APAM-PHMB ($\lambda_{\text{ex}}=365$ nm, $\lambda_{\text{em}}=520$ nm) and lifetime of delayed fluorescence of APAM-PHMB@AO with temperature variations (C), delayed fluorescence spectra of APAM-PHMB@AO (D), and systematically illustration of the energy transfer process in APAM-PHMB@Dye (E)

大激发波长 (480 nm) 直接激发 APAM-PHMB@AO, 同样观察到延迟荧光 [图 3(D)]. 此时 AO 是主要被激发的单元, 延迟荧光的产生可归因于 AO 的 S'_1 能级与 APAM-PHMB 的 T_1 能级之间的可逆能量传递: AO 被光激发后, 部分能量通过单线态-三线态共振能量转移 (ST-FRET) 转移至 APAM-PHMB 的 T_1 能级储存; 光照停止后, 在热扰动下能量又可通过三线态-单线态共振能量转移 (TS-PRET) 过程传递回 AO, 进而从 S'_1 通过辐射跃迁的方式产生延迟荧光 [图 3(E)]. 可见, APAM-PHMB 所具有的适宜的三线态能级是使其能够作为有效的延迟荧光模板的重要原因.

为了进一步加深对染料掺杂体系中相互作用以及其能够作为延迟荧光模板原因的认识 [图 4(A)],

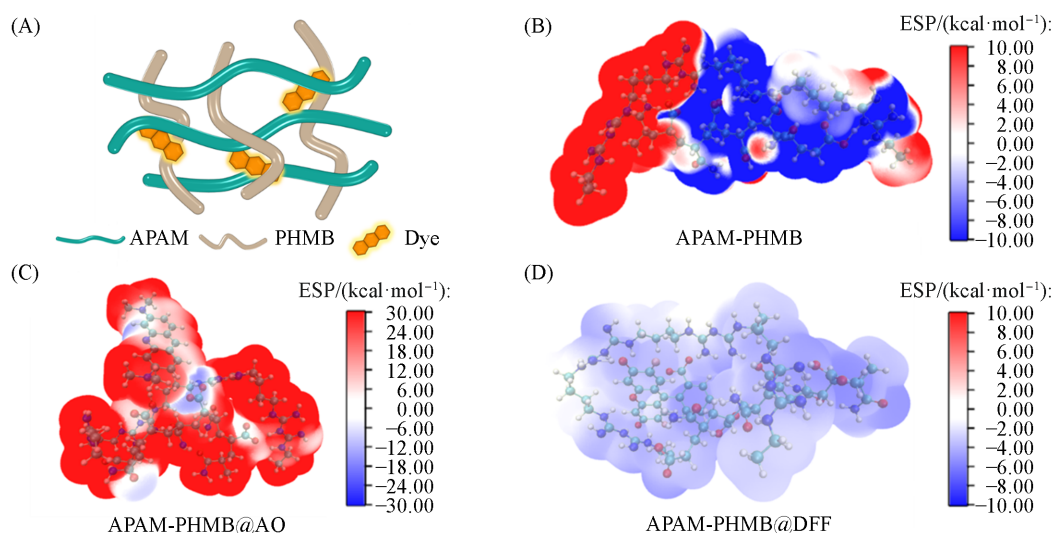


Fig. 4 Schematic of APAM-PHMB@Dye (A), surface electrostatic potential maps of APAM-PHMB (B), APAM-PHMB@AO (C), and APAM-PHMB@DFF (D)

利用高斯软件进行了构筑基元间相互作用能(表S2~S4, 见本文支持信息)与表面静电势分布(图S9, 见本文支持信息)的计算(1 kcal=4184 J). 计算结果显示 APAM 与 PHMB 间的静电相互作用是使两者结合的主要驱动力, 结合过程是热力学有利的; 从表面静电势分布图中, APAM 与 PHMB 接触处也显示出电荷的中和[图 4(B)], 进一步印证了这一点. 引入染料 AO 后, AO 主要与 APAM 存在强烈的静电相互作用, 但也伴随着距离过近导致的排斥力的上升; 值得注意的是, AO 的正电荷会弥散在整个网络中[图 4(C)], 意味着 AO 在分子层级上可以很好地分散在 APAM-PHMB 网络当中. 而物种间的能量转移正需要空间上的紧密相邻, 这进一步为能量转移机理提供了支持. 同理, 带负电的 DFF 与 PHMB 间存在较强的相互作用, 其负电荷也会弥散在整个网络之中[图 4(D)], 这也在理论上印证了 APAM-PHMB 作为延迟荧光模板机理的普适性.

2.4 延迟荧光模板的应用

APAM-PHMB@AO 具有明亮的黄色延迟荧光, 余晖可达 2.5 s 以上[图 5(A)]. 而 APAM-PHMB 作为延迟荧光模板的普适性, 为在同一体系中实现多种颜色的延迟荧光发射提供了可能(图 S10, 见本文支持信息).

APAM-PHMB@Dye 材料有良好的可塑性, 在 100% 湿度下剪切拼接后在空气中静置干燥, 即可加工成各种图案; 掺杂不同染料的材料具有不同的荧光发射颜色及寿命, 提升了材料构筑的多样性. 以 APAM-PHMB, APAM-PHMB@AO 和 APAM-PHMB@PB 作为原料, 构筑了图案化的具有多重防伪功能的材料[图 5(B)]. 其中, 窗户和机头部分为 APAM-PHMB, 机翼部分为 APAM-PHMB@AO, 而机身部分由 APAM-PHMB@PB 构筑. 在自然光下, 三者分别呈现白色、红色和黄色; 在紫外灯下, 分别显示深蓝色, 黄绿色和浅红色. 关闭紫外灯后, 三者的余晖分别呈浅绿色、浅黄色和红色. 其中 APAM-PHMB@PB 寿命最短, 最先变暗; APAM-PHMB 由于发光效率较低, 随后变淡; 而 APAM-PHMB@AO 则具有最长的持续时间, 最后消失. 体现了材料在形状, 颜色和时间 3 个维度上的多重防伪特性.

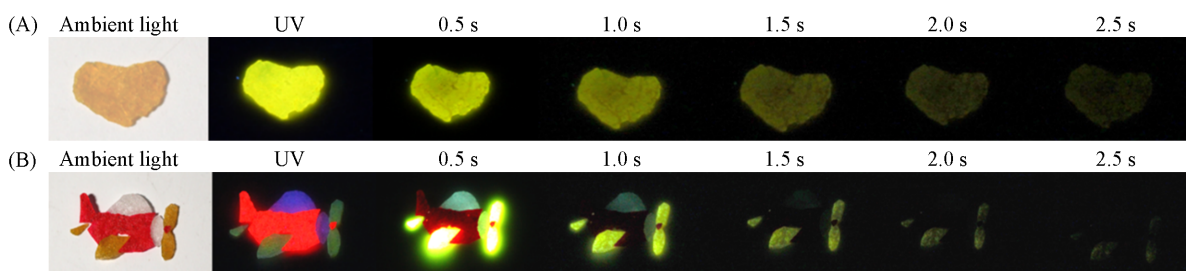


Fig. 5 Delayed fluorescence photo of APAM-PHMB@AO(A) and demonstration of advanced multi-coding data encryption utilizing APAM-PHMB@Dye with time-dependent and excitation-dependent afterglows(B)

3 结 论

基于聚电解质 APAM 和 PHMB 共组装构筑了具有簇发光和磷光的块体材料 APAM-PHMB, 其可以作为延迟荧光模板. 将不同类型的市售染料分子引入该模板中后, 均可实现延迟荧光的激活, 荧光寿命达到毫秒级. 这可能是由于染料分子不仅与 APAM-PHMB 模板在空间上紧密相邻, 而且染料分子的 S_1 能级与模板的 T_1 能级能量相近, 因而能量可以在其间可逆传递. 在此基础上, 利用不同染料掺杂的体系构筑了图案化的材料, 证明了其在多重防伪领域的应用潜力, 为延迟荧光的实现与应用提供了有效的思路与新的平台.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20260075>.

参 考 文 献

- [1] Salehi A., Fu X. Y., Shin D. H., So F., *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(15), 1808803
[2] Miao W. C., Hsiao F. H., Sheng Y., Lee T. Y., Hong Y. H., Tsai C. W., Chen H. L., Liu Z., Lin C. L., Chung R. J., Ye Z. T., Horng

- R. H., Chen S. C., Kuo H. C., He J. H., *Adv. Opt. Mater.*, **2024**, *12*(7), 2300112
- [3] Wang S., Ren W. X., Hou J. T., Won M., An J., Chen X. Y., Shu J., Kim J. S., *Chem. Soc. Rev.*, **2021**, *50*(16), 8887—8902
- [4] Wang F., Zhong Y., Bruns O., Liang Y., Dai H., *Nat. Photonics*, **2024**, *18*(6), 535—547
- [5] Chen P. Y., Zhang G. Y., Li J. G., Ma L. J., Zhou J. Y., Zhu M. G., Li S., Wang Z., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, *40*(2), 293—304
- [6] Shen Y., Le X. X., Wu Y., Chen T., *Chem. Soc. Rev.*, **2024**, *53*(2), 606—623
- [7] Cai Y. T., Huang J. B., Yan Y., *Chem. Commun.*, **2025**, *61*(92), 18053—18063
- [8] Chen Y., Lam J. W. Y., Kwok R. T. K., Liu B., Tang B. Z., *Mater. Horiz.*, **2019**, *6*(3), 428—433
- [9] Zhao Z., Zhang H., Lam J. W. Y., Tang B. Z., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59* (25), 9888—9907
- [10] Wang H., Li Q., Alam P., Bai H., Bhalla V., Bryce M. R., Cao M., Chen C., Chen S., Chen X., Chen Y., Chen Z., Dang D., Ding D., Ding S., Duo Y., Gao M., He W., He X., Hong X., Hong Y., Hu J. J., Hu R., Huang X., James T. D., Jiang X., Konishi G. I., Kwok R. T. K., Lam J. W. Y., Li C., Li H., Li K., Li N., Li W. J., Li Y., Liang X. J., Liang Y., Liu B., Liu G., Liu X., Lou X., Lou X. Y., Luo L., McGonigal P. R., Mao Z. W., Niu G., Owyong T. C., Pucci A., Qian J., Qin A., Qiu Z., Rogach A. L., Situ B., Tanaka K., Tang Y., Wang B., Wang D., Wang J., Wang W., Wang W. X., Wang W. J., Wang X., Wang Y. F., Wu S., Wu Y., Xiong Y., Xu R., Yan C., Yan S., Yang H. B., Yang L. L., Yang M., Yang Y. W., Yoon J., Zang S. Q., Zhang J., Zhang P., Zhang T., Zhang X., Zhang X., Zhao N., Zhao Z., Zheng J., Zheng L., Zheng Z., Zhu M. Q., Zhu W. H., Zou H., Tang B. Z., *ACS Nano*, **2023**, *17*(15), 14347—14405
- [11] Xiong J. Y., Wu M. J., Yao L. Y., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, *40*(5), 887—893
- [12] Sun Z. H., Yin P. P., He S. Y., Zhang K. G., Pan X. R., Wang J. Y., Hao P. N., Zhou Z., Yang X. G., Ma L. F., Tan C. L., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, *41*(3), 519—524
- [13] Wu R., Wu T., Guan W., Lu C., *Chem. Commun.*, **2026**, *62* (2), 365—378
- [14] Zhang H., Zhao Z., McGonigal P. R., Ye R., Liu S., Lam J. W. Y., Kwok R. T. K., Yuan W. Z., Xie J., Rogach A. L., Tang B. Z., *Mater. Today*, **2020**, *32*, 275—292
- [15] Zhang Y. W., Zhang Y., *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **2017**, *55*(4), 560—574
- [16] Wu L., Huang C., Emery B. P., Sedgwick A. C., Bull S. D., He X. P., Tian H., Yoon J., Sessler J. L., James T. D., *Chem. Soc. Rev.*, **2020**, *49*(15), 5110—5139
- [17] Dai X. Y., Huo M., Liu Y., *Nat. Rev. Chem.*, **2023**, *7*(12), 854—874
- [18] Frédéric L., Desmarchelier A., Favereau L., Pieters G., *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, *31*(20), 2010281
- [19] Chen X., Zhang X., Xiao X., Wang Z., Zhao J., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, *62*(16), e202216010
- [20] Zhu L., Zhang Z., Liu Y., Deng Z., Luo Y., Liu Y., Zhao Z., Tang B. Z., *J. Phys. Chem. C*, **2024**, *128*(38), 15763—15777
- [21] Yang X., Waterhouse G. I. N., Lu S. Y., Yu J. H., *Chem. Soc. Rev.*, **2023**, *52*(22), 8005—8058
- [22] Yang Z., Mao Z., Xie Z., Zhang Y., Liu S., Zhao J., Xu J., Chi Z., Aldred M. P., *Chem. Soc. Rev.*, **2017**, *46*(3), 915—1016
- [23] Fang F., Zhu L., Li M., Song Y., Sun M., Zhao D., Zhang J., *Adv. Sci.*, **2021**, *8*(24), 2102970
- [24] Im Y., Kim M., Cho Y. J., Seo J. A., Yook K. S., Lee J. Y., *Chem. Mater.*, **2017**, *29*(5), 1946—1963
- [25] Endo A., Sato K., Yoshimura K., Kai T., Kawada A., Miyazaki H., Adachi C., *Appl. Phys. Lett.*, **2011**, *98*(8), 083302
- [26] Luo M., Li X., Ding L., Baryshnikov G., Shen S., Zhu M., Zhou L., Zhang M., Lu J., Ågren H., Wang X. D., Zhu L., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59*(39), 17018—17025
- [27] Shao S., Hu J., Wang X., Wang L., Jing X., Wang F., *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*(49), 17739—17742
- [28] Xie Y., Li Z., *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **2017**, *55*(4), 575—584
- [29] Hu J., Li Q., Wang X., Shao S., Wang L., Jing X., Wang F., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*(25), 8405—8409
- [30] Li Z., Yue Q., He Y., Zhang H., *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2024**, *16*(19), 25415—25421
- [31] Huo M., Song S. Q., Dai X. Y., Li F. F., Hu Y. Y., Liu Y., *Chem. Sci.*, **2024**, *15*(14), 5163—5173
- [32] Cheng Q., Ma X. K., Zhou X., Zhang Y. M., Liu Y., *Small*, **2024**, *20*(17), 2309732
- [33] Liao P., Huang J., Yan Y., Tang B. Z., *Mater. Chem. Front.*, **2021**, *5*(18), 6693—6717
- [34] Liao P., Wu T., Ma C., Huang J., Yan Y., *Adv. Opt. Mater.*, **2023**, *11*(5), 2202482
- [35] Wu T., Guo J., Huang J., Yan Y., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *457*, 140974
- [36] Wu T., Liao P., Qi W., Song H., Li H., Huang J., Yan Y., *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, *35*(8), 2415525
- [37] Golini C. M., Williams B. W., Foresman J. B., *J. Fluoresc.*, **1998**, *8*(4), 395—404

(Ed.: W, K, M)