

基于二芳基乙烯的光响应型室温磷光材料^{*}

刘懿玮 马良伟 王巧纯 马骧^{*}

(结构可控先进功能材料及其制备教育部重点实验室 费林加诺贝尔奖科学家联合研究中心
材料生物学与动态化学前沿科学中心 华东理工大学 化学与分子工程学院 上海 200237)

摘要 有机室温磷光(room-temperature phosphorescence, RTP)材料由于其长发光寿命、三线态相关的辐射跃迁过程而在传感、防伪、生物成像等方面具有巨大的潜力. 另一方面, 光致变色材料的性能能够通过光照的方式精准调控. 因此, 构建光响应型有机室温磷光材料具有重要的研究价值和应用潜力. 本工作通过 sp^2 和 sp^3 两种连接方式将高效发光的磷光体(硫代色满-4-酮)连接到光致变色分子(二噻吩乙烯)两端, 得到两种化合物 **BTE1o** 和 **BTE2o**. 这两种化合物在溶液和聚合物基质中均表现出典型的光致变色现象且具有良好的抗疲劳性. 在聚乙烯醇基质中, 化合物显示出明显的 RTP 发射和毫秒级别的寿命, 此外, 推测四氢呋喃溶液和聚合物薄膜中的发光(荧光和磷光)猝灭现象均为辐射能量转移或发光异构体转化为不发光异构体导致的, 而不是非辐射能量转移机制.

关键词 光致变色; 室温磷光; 光响应; 能量转移

Light-Responsible Room-Temperature Phosphorescence Materials Based on Diarylethene^{*}

Liu, Yiwei Ma, Liangwei Wang, Qiaochun Ma, Xiang^{*}

(Key Laboratory for Advanced Materials and Feringa Nobel Prize Scientist Joint Research Center, Frontiers Science Center for Materiobiology and Dynamic Chemistry, School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract Photochromic molecules show great potential in biological imaging, logic gates, super-resolution imaging and other fields due to the sensitivity, accuracy and penetrability of light. By utilizing their variations on physical properties upon light irradiation, the fluorescence signal of photochromic dyes can be turned on or off accurately by specific wavelength. As an important luminescent dye, organic room-temperature phosphorescence (RTP) materials have attracted great research interest of scientists by the triplet state radiation process, and have potential in sensing, anticounterfeiting, photo-dynamic therapy, and so forth. In this work, we combine the phosphorescence and photochromic properties together by connecting a classic photochromic dye (bithienylethene) with an efficient phosphor (thiochroman-4-one) via sp^2 and sp^3 linker (**BTE1o** and **BTE2o**). These compounds show typical photochromic phenomenon in solution and polymer matrix and have good fatigue resistance. During the irradiation, a clear isosbestic point can be observed, indicating the quantified transition between two isomers. The emission quenching of derivatives is considered as the radiative energy transfer between fluorescent open form and non-fluorescent closed form. It's interesting that the fluorescence lifetime of **BTE1o** and **BTE2o** increases after ultraviolet (UV) irradiation, which rules out the possibility of non-radiative energy transfer mechanism of the fluorescence quenching phenomena. In the poly(vinyl alcohol) (PVA) matrix, these compounds show decent RTP emission and millisecond level lifetime. And the RTP emission can also be reversibly turned "ON" or "OFF" via irradiation of different wavelengths. It's very interesting that the phosphorescence lifetime also increases (from 16.1 to 19.4 ms) with the irradiation of UV light, which is identified with the variation of fluorescence lifetime in solution and PVA matrix. The increase of lifetime can rule out the non-radiative energy transfer mechanism for the phosphorescence quenching phenomena. Considering the fluorescence quenching phenomena in tetrahydrofuran (THF) solution, the fluorescence and phosphorescence quenching in PVA matrix should also be attributed to the form conversion and the radiative energy transfer process between open and closed isomers.

^{*} Dedicated to the 90th anniversary of *Acta Chimica Sinica*.

^{*} E-mail: maxiang@ecust.edu.cn

Received March 10, 2023; published April 10, 2023.

Supporting information for this article is available free of charge via the Internet at <http://sioc-journal.cn>.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (21788102, 22125803, and 22020102006), Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (2018SHZDZX03), the Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (20XD1421300), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, the China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (BX20220106), and China Postdoctoral Science Foundation (2022M721140).

^{*} 庆祝《化学学报》创刊 90 周年.

国家自然科学基金项目(21788102, 22125803, 22020102006)、上海市科技重大专项(2018SHZDZX03)、上海市优秀学术带头人项目(20XD1421300)、中央高校基本科研专项基金、中国博士后创新人才支持计划(BX20220106)和中国博士后科学基金面上项目(2022M721140)资助.

Keywords photochromic; room-temperature phosphorescence; photoresponsive; energy transfer

1 引言

刺激响应型材料因在仿生、传感、细胞成像、高分辨率显微成像、分子机器、信息存储、防伪等领域的应用潜力而引起了广泛的研究兴趣^[1-9]. 在各种刺激响应材料中, 光致变色染料是一类非常重要的响应单元. 在光的刺激下, 这些化合物的分子构型、吸收光谱、发射性能等方面能够发生显著的可逆变化. 利用它们在光照前后物理性质的显著变化, 光致变色染料能够应用在细胞成像、逻辑门、数据存储、超高分辨率显微成像、生物成像、仿生、智能材料等领域^[10-18]. 荧光信号具有较高的灵敏度、准确度和穿透性, 非常适合作为刺激响应型体系的输出信号. 在以荧光信号为输出信号的生物成像等应用中, 通过合适的分子设计, 即使在生物活体的深层组织, 也能得到清晰图像. 此外, 光致变色染料能够在特定波长光的照射下精准地调控荧光发射强度. 利用发射信号的“闪烁”和背景信号的“不闪烁”可以大幅提高检测的信噪比^[15,19-20]. 光致变色染料的这一特性在随机光学重建显微镜(stochastic optical reconstruction microscopy, STORM)中具有巨大应用潜力.

作为另一个重要的光致发光现象, 磷光发射, 尤其是纯有机室温磷光发射, 已经成为一个热门的研究课题^[6,21-25]. 室温磷光(room-temperature phosphorescence, RTP)材料因其三线态相关的辐射跃迁过程和较长的发光寿命而在光电器件、生物成像、光动力治疗等方面具有巨大潜力^[26-30]. 此外, 利用磷光对微环境的依赖, 受各种刺激(如机械力、化学物质、湿度)控制的刺激响应 RTP 材料也有所报道^[31-38]. 这些材料在防伪、传感、加密、逻辑门等方向有很大的应用前景. 然而, 光响应型的有机室温磷光材料很少被报道^[39-41].

除了扰乱磷光体的微环境或堆积方式外^[27,31,42], 通过光开关控制磷光体(能量供体)和刺激响应单元(能量受体)之间的能量转移(energy transfer, ET)过程是获得光响应磷光材料的另一种可行策略. 该策略制备的室温磷光材料的发光可在光的作用下打开或关闭. 利用 ET 机制和二芳基乙烯的光响应性, 我们在之前的工作中成功地获得了光响应 RTP 材料^[40]. 这些材料的余辉可以通过光照射在不同颜色之间可逆地切换. 然而, 由于光致变色染料的锥形交叉和纯有机化合物的自旋轨道耦合(spin-orbit coupling, SOC), 制备同时具有光致变色和 RTP 性能的染料仍然是一个巨大的挑战.

最近, 我们发现一个有趣的磷光体(硫代色满-4-酮), 它有很强的 SOC、几乎 100% 的系间窜越(intersystem crossing, ISC)效率和 44% 的磷光量子产率^[22]. 我们猜想, 如果将硫代色满酮衍生物连接到光致变色分子上, 如二噻吩乙烯(bithienylethene, BTE), 那么得到的分子可能会同时表现出光致变色和磷光发射两种性能. 因此, 我们通过两个不同的链接单元, 通过 Suzuki 反应将硫代色满-4-酮和 BTE 拼接(图 1, **BTE1o** 和 **BTE2o**). 所得两种化合物在溶液和聚合物基质中都表现出典型的光致变色现象. 更重要的是, 在聚乙烯醇(poly(vinyl alcohol), PVA)基质中, 这两种化合物都表现出明显的 RTP 发射和毫秒级别的发光寿命. 此外, RTP 发射可以通过不同波长的光的照射可逆地打开或关闭.

2 结果与讨论

2.1 BTE1o 和 BTE2o 在溶液中的光物理性质

如图 2a 所示, **BTE1o** 在 274 nm、314 nm 和 367 nm 处显示出明显的吸收峰. 前两个吸收峰应主要归属于

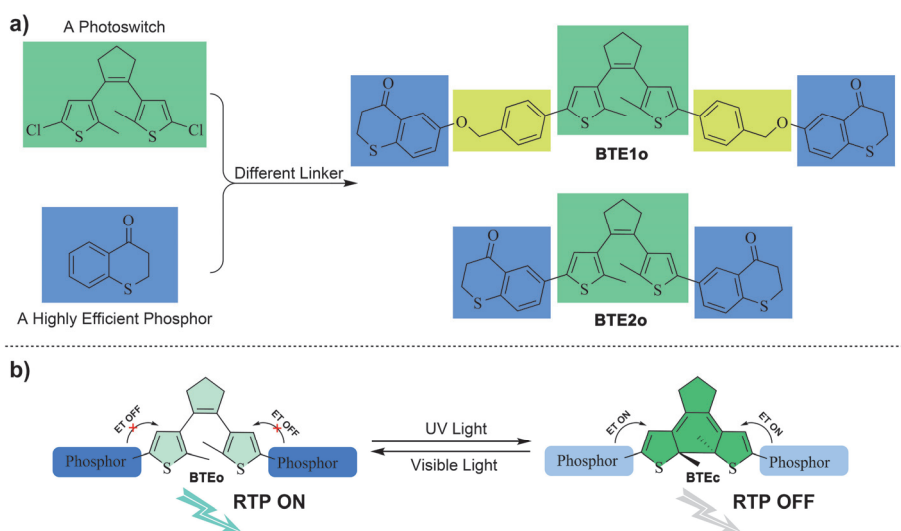


图 1 光响应型 RTP 材料的设计原理和工作机制示意图

Figure 1 Schematic diagram of design principle and working mechanism of the light-responsive RTP system

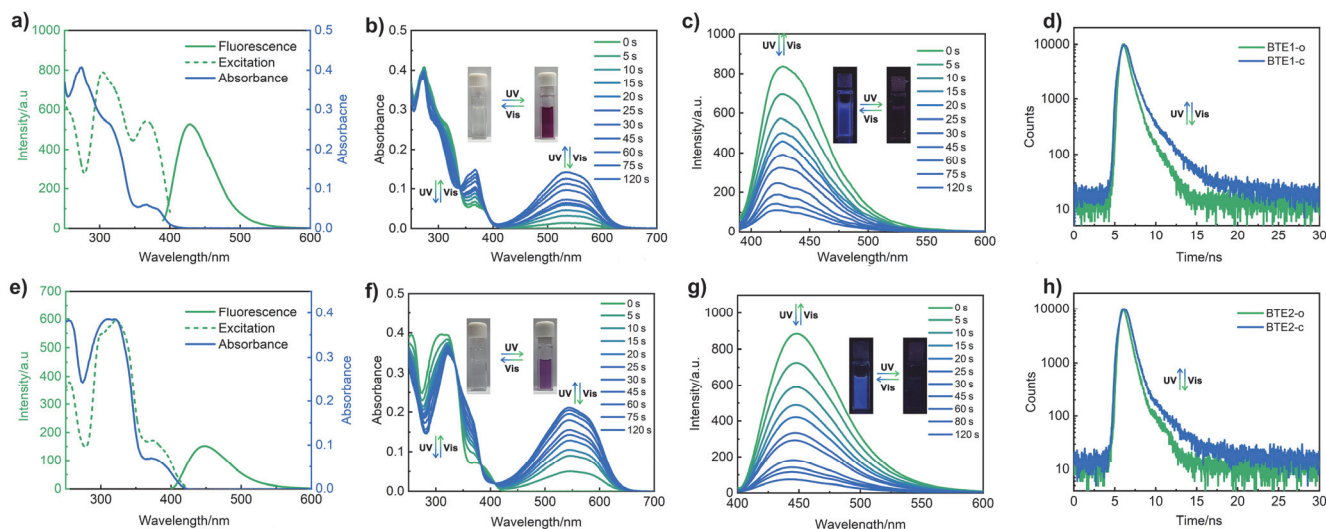


图2 紫外光照射前 **BTE1o** (a)和 **BTE2o** (e)的吸收、荧光、激发光谱. 紫外光照射前后 **BTE1o**(上)和 **BTE2o**(下)的吸收(b, f), 荧光(c, g)和寿命衰减(d, h)光谱的变化(**BTE1o** 为 365 nm, **BTE2o** 为 405 nm); 插图: **BTE1o** 或 **BTE2o** 的四氢呋喃溶液在日光或 365 nm 光下的图像. 浓度: 1.0×10^{-5} mol/L, 激发波长为 365 nm

Figure 2 Absorption, fluorescence and excitation spectra of **BTE1o** (a) and **BTE2o** (e) before UV light irradiation. Variation of the absorption (b, f), fluorescence (c, g) and lifetime decay (d, h) spectra of **BTE1o** (up) and **BTE2o** (down) under light irradiation (365 nm light for **BTE1o** and 405 nm light for **BTE2o**); inset: photograph of the THF solution of **BTE1o** or **BTE2o** under daylight or 365 nm light. Concentration: 1.0×10^{-5} mol/L, $\lambda_{\text{ex}} = 365$ nm

BTE 的吸收^[43]. 367 nm 附近的吸收峰峰形波长均与硫代色满-4-酮的吸收一致, 考虑到硫代色满-4-酮结构不与 BTE 共轭, 因此 367 nm 附近的吸收峰应归属于硫代色满酮的吸收峰^[22]. 在 380 nm 的光照射下, **BTE1o** 的溶液在 352 和 532 nm 附近产生了一个新的吸收峰, 同时 274 和 314 nm 附近的峰值吸收逐渐降低(图 2b). 此外, 在辐照过程中, 可以在 338 nm 处观察到清晰的等吸收点. 这些现象表明在 380 nm 光照下, 两种异构体之间发生了 1:1 的转化, 几乎没有其他的光化学反应发生^[44]. 在 120 s 连续照射后, **BTE1o** 的溶液达到光稳定状态. 此时, 无色溶液变成深红色. 此外, 当用可见光进一步照射该溶液时, 吸收光谱可以恢复到初始状态. 这些现象证明了光致变色的发生. 另外 **BTE1o** 具有良好的抗疲劳性能. 533 nm 处的吸光度在 10 个紫外-可见光照射循环后仅轻微下降(见支持信息, 图 S1a). 当用 365 nm 的光照射 **BTE2o** 的 THF 溶液时, 可以观察到类似的变化. 但值得注意的是, **BTE2o** 的结构中 BTE 与硫代色满-4-酮直接以 C—C 单键相连, 噻吩单元到硫代色满-4-酮结构的电荷转移作用使得 **BTE2o** 的吸收光谱红移到 425 nm(图 2e), 这为可见光诱导的环化过程提供了可能性. 因此, 我们进一步利用 405 nm 的可见光照射溶液, 并记录了它的吸收光谱的类似变化. 如图 2f 所示, 光稳态下吸收光谱的峰形与 365 nm 光诱导的光环化过程相同. 当用可见光进一步照射时, 这两种溶液都可以恢复到初始状态. 此外, 不同波长的光引发的光环化过程均有相同的等吸收点. 这些现象验证了可见光引发光环化过程的发生.

BTE1o 的 THF 溶液的发射波长在 425 nm 左右(图

2c), 而 **BTE2o** 的最大发射波长在 460 nm 左右(图 2g), 与 **BTE1o** 相比红移了 35 nm. 噻吩单元到硫代色满-4-酮部分的电荷转移作用可能是 **BTE2o** 发射波长红移的关键. 分别利用 380 nm 和 405 nm 的紫外光照射 **BTE1o** 和 **BTE2o** 的 THF 溶液时, 二者发射强度均逐渐降低. 在 150 s 后逐渐达到光稳定状态, 此时发光几乎完全猝灭. 随后利用可见光照射它们, 发射强度又能够逐渐恢复到初始状态. 有趣的是, **BTE1o** 的荧光寿命在紫外照射后从 0.25 ns 增加到 0.79 ns(图 2d). 相似地, **BTE2o** 的荧光寿命也从 0.66 ns 增加到 1.58 ns(图 2h). 一般来说, BTE 衍生物的发射猝灭被认为是发光团到 BTE 的福斯特共振能量转移(Förster resonance energy transfer, FRET)过程^[45-46]. 然而, **BTE1o** 和 **BTE2o** 荧光寿命的增加排除了这种机制的可能性. 我们推测光照后 **BTE1o** 和 **BTE2o** 的荧光猝灭有两点可能的原因: (1)紫外光照射下发光的开环态异构体逐渐转化为不发光的闭环态异构体, 发光物种的含量大幅下降; (2)发光的开环态异构体与不发光的闭环态异构体之间存在辐射能量转移过程, 开环态异构体的发光被闭环态异构体吸收.

2.2 **BTE1o** 和 **BTE2o** 在薄膜中的光物理性质

PVA 基质能够抑制分子的非辐射跃迁并隔离氧气从而实现室温磷光发射^[47-49]. 将有机小分子包埋进 PVA 基质已经被证实是一种简便可行的构建室温磷光材料的策略. 为了实现 RTP 发射, 我们将 **BTE1o** 和 **BTE2o** (0.3% (w))分别包埋进 PVA 基质中(分别命名为 **BTE1o@PVA** 和 **BTE2o@PVA**). **BTE1o** 在 PVA 中的吸收光谱的峰形与其在 THF 溶液中的吸收光谱基本一致.

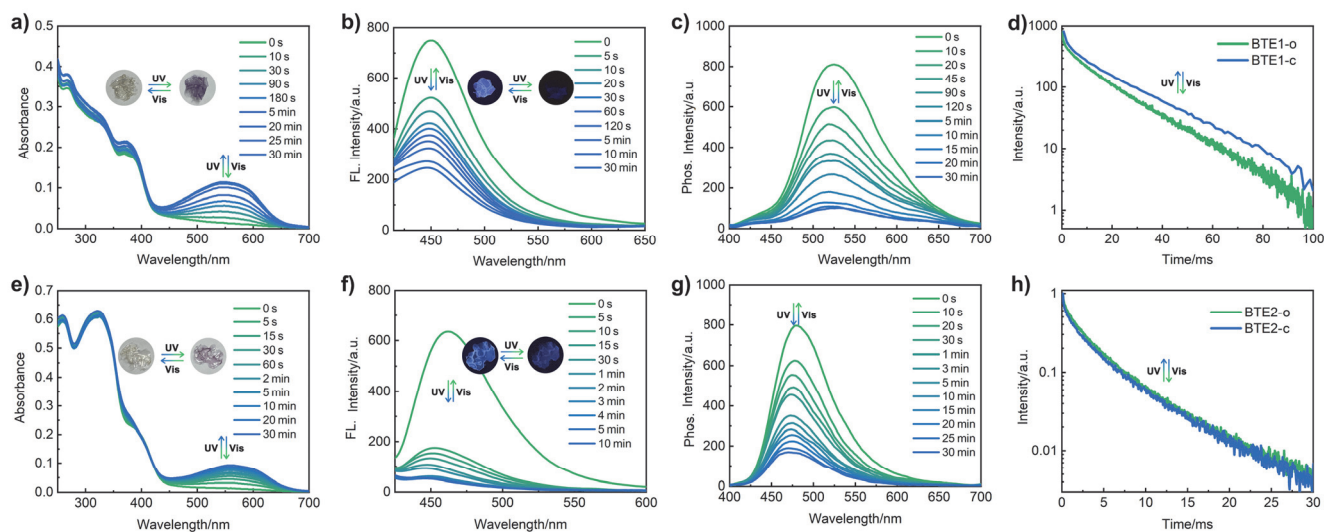


图3 BTE1o@PVA(上)和 BTE2o@PVA(下)在 PVA 基质(0.3% (w))中吸收(a, e), 荧光(b, f), 磷光(c, g)和寿命衰减(d, h)光谱变化, 激发波长为 365 nm

Figure 3 Variation of the absorption (a, e), fluorescence (b, f), phosphorescence (c, g) and lifetime decay of phosphorescence (d, h) spectra of BTE1o@PVA (up) and BTE2o@PVA (down) in PVA matrix (0.3% (w)), $\lambda_{\text{ex}}=365$ nm

与 THF 溶液类似, 在 380 nm 的光照射下, **BTE1o@PVA** 的吸收光谱在 543 nm 左右逐渐出现新的吸收峰(图 3a). 可见光进一步照射该薄膜后, 吸收光谱逐渐恢复到初始状态. 这些现象表明 **BTE1o** 在 PVA 基质中也具有光致变色性能. **BTE2o@PVA** 也可以观察到类似的光致变色现象(图 3e). **BTE1o@PVA** 的荧光发射峰在 450 nm 左右(图 3b). 与 THF 溶液的变化类似, 随着紫外光的照射, 荧光发射强度逐渐降低. 连续照射 30 min 后达到光稳定状态, 发射强度降至最低, 此时薄膜的发光几乎完全猝灭. 进一步利用可见光照射该薄膜, 荧光发射强度缓慢恢复至初始状态. 与 **BTE1o** 的 THF 溶液类似, 薄膜的荧光寿命在紫外光照射后从 8.29 ns 增加到 8.45 ns(见支持信息, 图 S3), 这排除了非辐射能量转移过程导致发光猝灭的可能性. 除了发射波长红移至 460 nm 外, **BTE2o@PVA** 表现出与 **BTE1o@PVA** 类似的荧光光开关现象.

在延迟发射光谱(延迟时间 = 1.0 ms)中, **BTE1o@PVA** 在 525 nm 处显示较强的磷光发射峰(图 3c), 且荧光磷光发射波长均与甲氧基取代的硫代色满-4-酮(**MeTO**)在 PVA 基质中的发射一致. **BTE1o@PVA** 的荧光和磷光的激发光谱可以与吸收光谱匹配(见支持信息, 图 S4). 此外, 激发光谱也可以与 **MeTO** 在 PVA 基质中的激发光谱相吻合(见支持信息, 图 S5). 这些现象表明磷光来自硫代色满酮的发光. 随着紫外光的照射, 磷光强度逐渐降低(图 3g). 与紫外-可见吸收光谱和荧光光谱一致(图 3f), 在持续照射 30 min 后薄膜达到光稳定状态. 非常有趣的是, 磷光寿命也随着紫外光的照射而增加(从 16.1 ms 增加到 19.4 ms), 这与溶液和 PVA 基质中荧光寿命的变化相一致(图 3d). **BTE2o@PVA** 在

紫外光照射前后也观察到了类似的寿命增加的现象(图 3h). 寿命的增加可以排除磷光猝灭现象的非辐射能量传递机制. 正如我们对 THF 溶液中的荧光猝灭现象所推测的那样, PVA 基质中的荧光和磷光猝灭也应归因于发光的开环态异构体到不发光的闭环态异构体的转换以及开环和闭环异构体之间的辐射能量转移过程.

3 结论

在本工作中, 通过将磷光体与光致变色分子 **BTE** 以不同的连接方式拼接, 获得了两种具有 RTP 发射的光致变色染料. 这些染料表现出典型的光致变色现象和优异的抗疲劳性能. 在 PVA 基质中掺杂后, 这些化合物显示出 RTP 发射且 RTP 可以通过特定波长的光远程调控. 更重要的是, 我们发现紫外光照射前后能量供体的发光寿命增加, 发光(荧光和磷光)猝灭不是非辐射能量传递过程的结果. 我们认为猝灭是发光的开环态异构体到不发光的闭环态异构体的转换以及开环和闭环异构体之间的辐射能量转移过程.

References

- [1] Sharifian, M. H.; Mahdavian, A. R.; Salehi-Mobarakeh, H. *Langmuir* **2017**, *33*, 8023.
- [2] Zhan, L.; Chen, Z.; Gong, S.; Xiang, Y.; Ni, F.; Zeng, X.; Xie, G.; Yang, C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 17651.
- [3] Mu, Y.; Liu, Y.; Tian, H.; Ou, D.; Gong, L.; Zhao, J.; Zhang, Y.; Huo, Y.; Yang, Z.; Chi, Z. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 6367.
- [4] Zhang, Q.; Rao, S.-J.; Xie, T.; Li, X.; Xu, T.-Y.; Li, D.-W.; Qu, D.-H.; Long, Y.-T.; Tian, H. *Chem* **2018**, *4*, 2670.
- [5] Chen, S.; Wang, Y.; Nie, T.; Bao, C.; Wang, C.; Xu, T.; Lin, Q.; Qu, D. H.; Gong, X.; Yang, Y.; Zhu, L.; Tian, H. *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 17992.
- [6] Ma, L.; Ding, B.; Yuan, Z.; Ma, X.; Tian, H. *ACS Mater. Lett.* **2021**, *1300*.

- [7] Li, Q.; Li, Z. *Acc. Chem. Res.* **2020**, *53*, 962.
- [8] Wu, B.; Xu, X.; Tang, Y.; Han, X.; Wang, G. *Adv. Optical Mater.* **2021**, *9*, 2101266.
- [9] Peisheng, C.; Qian, C.; Peng, W. *Chin. J. Chem.* **2023**, *41*, 979.
- [10] Hou, L.; Ringstrom, R.; Maurer, A. B.; Abrahamsson, M.; Andreasson, J.; Albinsson, B. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 17758.
- [11] Li, Z.; Wang, G.; Ye, Y.; Li, B.; Li, H.; Chen, B. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 18025.
- [12] Ma, L. W.; Wang, S.; Li, C. P.; Cao, D. R.; Li, T.; Ma, X. *Chem. Commun.* **2018**, *54*, 2405.
- [13] Ma, L. W.; Li, C. P.; Yan, Q.; Wang, S.; Miao, W. G.; Cao, D. R. *Chinese Chem. Lett.* **2020**, *31*, 361.
- [14] Zhang, J.; Wang, J.; Tian, H. *Mater. Horiz.* **2014**, *1*, 169.
- [15] Zhang, J.; Fu, Y.; Han, H. H.; Zang, Y.; Li, J.; He, X. P.; Feringa, B. L.; Tian, H. *Nat. Commun.* **2017**, *8*, 987.
- [16] Wu, Y.; Guo, Z.; Zhu, W.-H.; Wan, W.; Zhang, J.; Li, W.; Li, X.; Tian, H.; Li, A. D. Q. *Mater. Horiz.* **2016**, *3*, 124.
- [17] Luo, W.; Tang, Y.; Zhang, X.; Wu, Z.; Wang, G. *Adv. Optical Mater.* **2023**, *11*, 2202259.
- [18] Song, J.; Ma, X. *Chin. J. Org. Chem.* **2021**, *41*, 4519 (in Chinese). (宋金明, 马骥, 有机化学, **2021**, *41*, 4519.)
- [19] Qi, Q.; Li, C.; Liu, X.; Jiang, S.; Xu, Z.; Lee, R.; Zhu, M.; Xu, B.; Tian, W. *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 16036.
- [20] Fu, Y.; Han, H.-H.; Zhang, J.; He, X.-P.; Feringa, B. L.; Tian, H. *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 8671.
- [21] Ma, L.; Ma, X. *Sci. China Chem.* **2022**, *66*, 304.
- [22] Ma, L.; Sun, S.; Ding, B.; Ma, X.; Tian, H. J. A. F. M. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31*, 2010659.
- [23] Gao, H.; Ma, X. *Aggregate* **2021**, *2*, e38.
- [24] Wang, Z.; Cheng, X.; Xie, Y.; Liu, S.; Dong, M.; Zhao, J.; Liang, F.; An, Z.; Huang, W. *CCS Chem.* **2023**, *5*, 292.
- [25] Luo, W.; Wang, G. *Adv. Optical Mater.* **2020**, *8*, 2001362.
- [26] Wang, J.; Huang, Z.; Ma, X.; Tian, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 9928.
- [27] Yang, J.; Fang, M.; Li, Z. *Acc. Mater. Res.* **2021**, *2*, 644.
- [28] Ye, W.; Ma, H.; Shi, H.; Wang, H.; Lv, A.; Bian, L.; Zhang, M.; Ma, C.; Ling, K.; Gu, M.; Mao, Y.; Yao, X.; Gao, C.; Shen, K.; Jia, W.; Zhi, J.; Cai, S.; Song, Z.; Li, J.; Zhang, Y.; Lu, S.; Liu, K.; Dong, C.; Wang, Q.; Zhou, Y.; Yao, W.; Zhang, Y.; Zhang, H.; Zhang, Z.; Hang, X.; An, Z.; Liu, X.; Huang, W. *Nat. Mater.* **2021**, *20*, 1539.
- [29] Luo, W.; Xu, X.; Tang, Y.; Wu, Z.; Wang, G. *Sci. China Mater.* **2022**, *66*, 1180.
- [30] Tian, Y.; Tong, X.; Li, J.; Gao, S.; Cao, R. *Chin. J. Chem.* **2021**, *40*, 487.
- [31] Song, J.; Ma, L.; Sun, S.; Tian, H.; Ma, X. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, e202206157.
- [32] Yuan, Z.; Wang, J.; Chen, L.; Zou, L.; Gong, X.; Ma, X. *CCS Chem.* **2020**, *2*, 158.
- [33] Gui, H.; Huang, Z.; Yuan, Z.; Ma, X. *CCS Chem.* **2021**, *3*, 481.
- [34] Zhou, Y.; Qin, W.; Du, C.; Gao, H.; Zhu, F.; Liang, G. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 12102.
- [35] Zhang, X.; Du, L.; Zhao, W.; Zhao, Z.; Xiong, Y.; He, X.; Gao, P. F.; Alam, P.; Wang, C.; Li, Z.; Leng, J.; Liu, J.; Zhou, C.; Lam, J.; Phillips, D.; Zhang, G.; Tang, B. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 5161.
- [36] Wu, Q.; Ma, H.; Ling, K.; Gan, N.; Cheng, Z.; Gu, L.; Cai, S.; An, Z.; Shi, H.; Huang, W. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, *10*, 33730.
- [37] Mei, J.; Leung, N. L.; Kwok, R. T.; Lam, J. W.; Tang, B. Z. *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 11718.
- [38] Wang, J.; Li, Z. *Acta Chim. Sinica* **2021**, *79*, 575 (in Chinese). (王金凤, 李振, 化学学报, **2021**, *79*, 575.)
- [39] Wang, C.; Ma, X. K.; Guo, P.; Jiang, C.; Liu, Y. H.; Liu, G.; Xu, X.; Liu, Y. *Adv. Sci.* **2022**, *9*, e2103041.
- [40] Ma, L.; Xu, Q.; Sun, S.; Ding, B.; Huang, Z.; Ma, X.; Tian, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, e202115748.
- [41] Tian, Y.; Yang, X.; Gong, Y.; Wang, Y.; Fang, M.; Yang, J.; Tang, Z.; Li, Z. *Sci. China Chem.* **2021**, *64*, 445.
- [42] Bhattacharjee, I.; Acharya, N.; Ray, D. *Chem. Commun.* **2019**, *55*, 1899.
- [43] Zhang, Z.; Wang, W.; Jin, P.; Xue, J.; Sun, L.; Huang, J.; Zhang, J.; Tian, H. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 4232.
- [44] Irie, M.; Fukaminato, T.; Matsuda, K.; Kobatake, S. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 12174.
- [45] Giordano, L.; Jovin, T. M.; Irie, M.; Jares-Erijman, E. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 7481.
- [46] Kim, D.; Kwon, J. E.; Park, S. Y. *Adv. Funct. Mater.* **2018**, *28*, 1706213.
- [47] Su, Y.; Phua, S. Z. F.; Li, Y.; Zhou, X.; Jana, D.; Liu, G.; Lim, W. Q.; Ong, W. K.; Yang, C.; Zhao, Y. *Sci. Adv.* **2018**, *4*, eaas9732.
- [48] Xu, Q.; Ma, L.; Sun, S.; Ma, X. *J. Mater. Chem. C* **2021**, *9*, 14623.
- [49] Gan, N.; Shi, H.; An, Z.; Huang, W. *Adv. Funct. Mater.* **2018**, *28*, 1802657.

(Cheng, B.)