文章编号:1674-2869(2024)06-0612-06

# 咔唑类衍生物的合成及其室温磷光性能研究

张丹阳,陈祖昱,徐 康,李嘉荣,陈云峰,王 璨*
武汉工程大学化学与环境工程学院,湖北 武汉 430205

**摘 要**:利用不同种类的烷基链作为合适间隔基团,设计并合成了3个咔唑类衍生物(PhOCz-$C_3$, PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$)。在咔唑基团上引入芳基酮单元,以增强分子内电荷转移和自旋轨道耦合效应。PhOCz-$C_5$具有室温磷光特性,其在晶体中的排列方式呈鱼骨状,其分子间相互作用较强,包括C—H…O/ C—H…N氢键和C—H…π相互作用。长程有序的聚集方式可以锁定相邻的分子,以增强晶体整体的刚性,这有利于室温磷光特性的产生。结果表明:通过整合多种分子设计策略获得室温磷光化合物,有助于深入理解有机化合物的堆积形式与光电性能之间的关系,也为刺激响应型材料的设计提供新的思路。

**关键词**:室温磷光;聚集态;堆积方式;刺激响应型材料;咔唑类衍生物
**中图分类号**:O621.22 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202304001

# Synthesis of carbazole derivatives and their room-temperature phosphorescence properties

***ZHANG Danyang*, *CHEN Zuyu*, *XU Kang*, *LI Jiarong*, *CHEN Yunfeng*, *WANG Can****
School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract**: Three carbazole derivatives, namely PhOCz-$C_3$, PhOCz-$C_4$ and PhOCz-$C_5$, have been designed and synthesized, using different types of alkyl chains as suitable spacer groups. The aryl ketone unit was introduced onto the carbazole group to enhance the intramolecular charge transfer and spin-orbit coupling effect. PhOCz-$C_5$ exhibits room-temperature phosphorescence property, and its arrangement in the crystal is fishbone-shaped, with strong intermolecular interactions, including C—H…O / C—H…N hydrogen bonds and C—H…π interactions. The long-range ordered aggregation can lock adjacent molecules, enhancing the rigidity of the entire crystal, which is beneficial for the generation of room-temperature phosphorescence characteristics. The results show that integrating multiple molecular design strategies to obtain room-temperature phosphorescent compounds can help us deeply understand the relationship between the stacking form and the photoelectric properties of organic compounds, and also provide new ideas for the design of stimulus-responsive materials.

**Keywords**: room temperature phosphorescence; aggregated state; packing mode; stimulus response materials; carbazole derivatives

刺激响应型光学材料由于具有高效性、敏感性和特异性等特点,在生物成像[1-2]、人工生物组织[3-4]、多重防伪和信息存储系统[5-6]等方面具有广泛的应用前景。目前研究中存在多种刺激源,如光源刺激、电源刺激、机械应力刺激和磁场刺激等[7-8]。纯有机室温磷光(room-temperature

**收稿日期**:2023-04-01
**基金项目**:国家自然科学基金(22105150);武汉工程大学校内科学研究基金(K2021073);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2021334)
**作者简介**:张丹阳,硕士研究生。Email: 1003922190@qq.com
***通信作者**:王 璨,博士,讲师。Email: chemwang@wit.edu.cn
**引文格式**:张丹阳,陈祖昱,徐康,等. 咔唑类衍生物的合成及其室温磷光性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):612-617.

phosphorescence，RTP）化合物作为光刺激响应材料中的研究热点，具有巨大的潜在研究和应用价值。近些年，随着该领域的不断发展，科研人员合成了许多具有优异光电性能的新型有机光电材料，并对其结构与性能之间的关系进行了系统的研究[9-11]。武汉大学李振教授课题组提出了“Molecular Uniting Set Identified Characteristic（MUSIC）”的概念，可以清晰地揭示从单个分子到分子聚集态的演化过程，为有机光电材料的分子设计提供了一些新颖的理念[12-16]。但是，由于室温磷光化合物结构和光学性质之间的联系很难构建，对这类刺激响应型化合物的研究较少。近年来研究表明，一些吩噻嗪和三苯乙烯衍生物具有室温磷光性质，这显示了设计刺激响应材料的可行性。尽管如此，如何获得优异室温磷光性能与化合物堆积方式之间的联系仍然是待解决的关键问题[17-18]。为了深入地探究这些响应特性与分子聚集方式之间的联系和区别，多种分子设计理念需要进行结合。

咔唑单元由于其具有较好的平面构型被选为主要的分子骨架，其可以有效地提高化合物在聚集态时的发光强度，确保了其衍生物具有较高的光致发光量子产率（PLQY，$\Phi_P$）[19]。由于N—N，C=S和C=O等基团或吡啶、吡咯、嘧啶等杂环化合物可以改善发光分子自身的n-π*跃迁，所以选择芳基酮作为功能结构单元引入到咔唑骨架上，进一步增强化合物的自旋轨道耦合效应，有效地稳定三线态激子以获得优异的室温磷光性质[20-21]。为了控制聚集态下分子骨架结构的堆积方式，咔唑的N原子上引入了不同的烷基链（*n*-丙基、*n*-丁基和*n*-戊基），削弱了刚性平面的π-π相互作用，提供了晶态中分子之间的空间缺陷[22-27]。最后，通过整合多种分子设计理念，设计并合成了3个咔唑衍生物PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$（图1）。

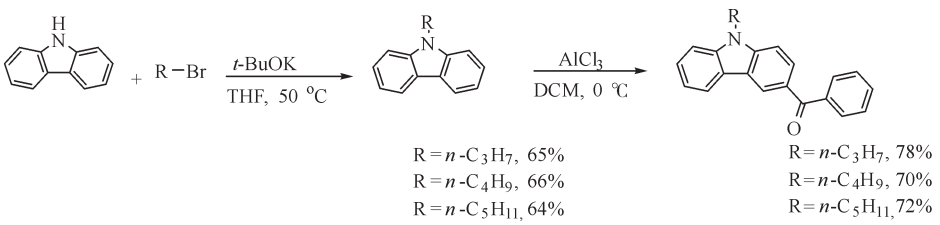



**图1　化合物PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$的合成路线**

Fig. 1　The synthetic routes of PhOCz-C3，PhOCz-C4，and PhOCz-C5

## 1　实验部分

### 1.1　仪器与试剂

主要仪器：Mecuryvx 300 pectrometer核磁共振仪；Finnigan PRACE mass质谱仪；Perkin-Elmer microanalyzer元素分析仪；Shimadzu UV-2500紫外可见吸收光谱仪；Hitachi F-4600光致发光光谱仪；Bruker Smart Apex II CCD单晶衍射仪。

所用试剂均为化学纯或分析纯。

### 1.2　中间体和目标产物的合成

1.2.1　9-正丙基-9*H*-咔唑的合成　将1-溴丙烷（1.92 g，11.97 mmol）加入含咔唑（2 g，11.97 mmol）和叔丁醇钾（2.68 g，23.94 mmol）的THF（20 mL）溶液中，在50 ℃下搅拌12 h。完成后，将反应混合物倾倒入水（120 mL）中，用乙酸乙酯（30 mL）提取3次。将合并的有机相提取物在无水硫酸钠中干燥，并在减压下除去溶剂。在乙醇中重结晶可进一步纯化。产品为白色固体1.62 g，产率为65%，熔程是52~53 ℃。

1.2.2　9-正丁基-9*H*-咔唑的合成　该合成过程与9-正丙基-9*H*-咔唑的步骤相似。

在乙醇中重结晶可进一步纯化。产品为白色固体1.73 g，产率为66%，熔点是54~56 ℃。

1.2.3　9-正戊基-9*H*-咔唑的合成　该合成过程与9-正丙基-9*H*-咔唑的步骤相似。

在乙醇中重结晶可进一步纯化。产品为白色固体1.81 g，产率为64%，熔点是51~52 ℃。

1.2.4　PhOCz-$C_3$的合成　在氮气保护下，将9-正丙基-9*H*-咔唑（400.00 mg，1.79 mmol）、无水三氯化铝（250.60 mg，1.79 mmol）混入反应瓶中，并用注射器注入10.00 mL二氯甲烷进行溶解。在冰浴条件下缓慢地将苯甲酰氯（0.21 mL，1.79 mmol）加入反应瓶中，随后将温度升高至25 ℃反应24 h。反应结束后用稀盐酸淬灭并用二氯甲烷（25 mL，3次抽提）萃取有机相，干燥浓缩。*V*（乙酸乙酯）/*V*（石油醚）（1∶5）为淋洗剂，柱层析分离纯化，得白色固体483.00 mg，产率78%，熔程是104~105 ℃。$^1$H NMR（400 MHz，Chloroform-d）$\delta$ 8.52（s，1H），

8.01（m，1H），7.94（m，1H），7.77~7.75（m，2H），7.53~7.48（m，1H），7.42~7.40（m，3H），7.37~7.34（m，2H），7.31~7.19（m，1H），4.22（t，$J$=8.0 Hz，2H），1.90~1.81（m，2H），1.00（t，$J$=8.0 Hz，3H）。$^{13}$C NMR（100 MHz，Chloroform-d）$\delta$ 196.6，143.1，141.2，139.0，131.6，129.9，128.4，128.4，128.1，126.4，124.0，123.1，122.3，120.7，119.9，109.2，108.3，44.8，22.3，11.7. MS（EI），$m/z$：312.25（[M$^+$]，calcd for $C_{22}H_{19}NO$，313.15）。Found：C，84.2；H，6.2；N，4.9%；molecular formula $C_{22}H_{19}NO$ requires C，84.3；H，6.1；N，4.5%。

1.2.5 PhOCz-$C_4$的合成 该合成过程与PhOCz-$C_3$的步骤相似。

柱层析分离纯化，得到白色固体480.00 mg，产率70%，熔程是129~130 ℃。$^1$H NMR（400 MHz，Chloroform-d）$\delta$ 8.60（s，1H），8.10~8.08（m，1H），8.01（m，1H），7.85~7.80（m，2H），7.60~7.56（m，1H），7.52~7.47（m，3H），7.44~7.40（m，2H），7.28~7.23（m，1H），4.32（t，$J$=8.0 Hz，2H），1.90~1.82（m，2H），1.42~1.37（m，2H），0.94（t，$J$=8.0 Hz，3H）。$^{13}$C NMR（100 MHz，Chloroform-d）$\delta$ 196.6，143.0，141.1，139.0，131.6，129.8，128.4，128.4，128.1，126.4，124.0，123.1，122.4，120.7，119.9，109.2，108.2，43.1，31.0，20.5，13.8. MS（EI），$m/z$：327.30（[M$^+$]，calcd for $C_{23}H_{21}NO$，327.16）。Found：C，84.5；H，6.3；N，4.6%；molecular formula $C_{23}H_{21}NO$ requires C，84.4；H，6.5；N，4.3%。

1.2.6 PhOCz-$C_5$的合成 该合成过程与PhOCz-$C_3$相似。

柱层析分离纯化，得到白色固体404.00 mg，产率70%，熔程是110~111 ℃。$^1$H NMR（400 MHz，Chloroform-d）$\delta$ 8.62（s，1H），8.12~8.10（m，1H），8.06~8.04（m，1H），7.87~7.85（m，2H），7.63~7.59（m，1H），7.54~7.50（m，3H），7.46~7.44（m，2H），7.29（m，1H），4.34（t，$J$=8.0 Hz，2H），1.93~1.89（m，2H），1.41~1.35（m，4H），0.90（t，$J$=8.0 Hz，3H）。$^{13}$C NMR（100 MHz，Chloroform-d）$\delta$ 196.6，143.0，141.1，139.0，131.6，129.9，128.4，128.4，128.1，126.4，124.0，123.1，122.4，120.7，119.9，109.2，108.2，43.3，29.3，28.6，22.4，13.9. MS（EI），$m/z$：341.35（[M$^+$]，calcd for $C_{24}H_{23}NO$，341.18）。Found：C，84.6；H，6.6；N，4.4%；'molecular formula $C_{24}H_{23}NO$ requires C，84.4；H，6.8；N，4.1%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光物理性质

化合物PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$的紫外/可见吸收光谱如图2所示，其在稀的四氢呋喃（THF）溶液中的最大吸收波长较为相似，分别位于369、375和376 nm，这是由于这3个化合物具有相同的核心构筑骨架。所有的峰值均分布在300~450 nm的区间内，这主要是由于咔唑基团之间的π-π*跃迁和分子内的电荷转移效应。因为不同长度的烷基链对化合物单分子的发光性质影响甚微，3个化合物在稀溶液中的光致发光光谱也几乎相同，其最大发射波长位于450 nm左右。

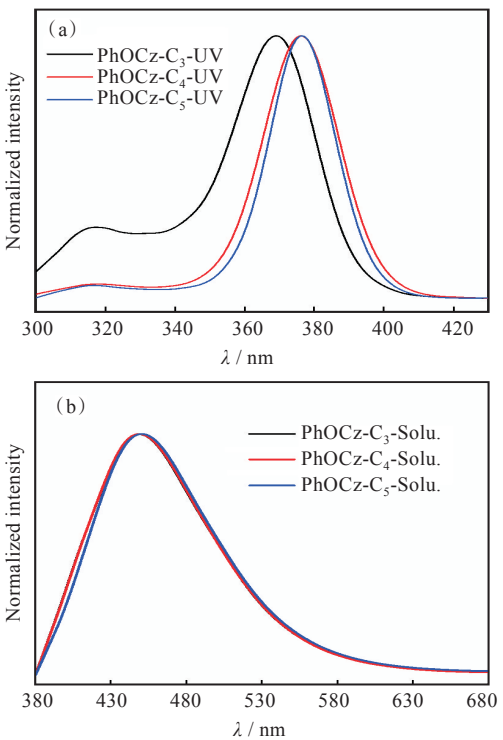



**图2 化合物PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$在THF溶液（$10^{-5}$ mol/L）中的紫外可见吸收光谱（a）和光致发光光谱（b）**

Fig. 2 The UV-visible spectra (a) and emission spectra (b) of PhOCz-$C_3$, PhOCz-$C_4$ and PhOCz-$C_5$ in dilute THF solution (Concentration: $10^{-5}$ mol/L)

通过混合溶剂扩散法培养得到3个化合物的单晶，并对PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$分子在不同状态下的光致发光光谱进行了测定和深入分析。根据图2可知，3种化合物在晶态时的室温磷光性能明显优于其在粉末状态时的性能，这说明不同种类的烷基链对咔唑衍生物的堆积方式存在很大的影响。其中PhOCz-$C_5$在室温下可以看到肉眼可见的黄绿色余晖，是该系列化合物中室

温磷光性能最优的化合物。PhOCz-$C_5$在晶态下的磷光寿命为71 ms，明显长于该系列化合物中的其他晶体（< 10 ms）。对比PhOCz-$C_5$在不同状态下的寿命数据，可以发现分子在聚集态时的寿命明显长于其在单分子状态下（图3和表1），这归因于不同烷基链所产生的空间效应。

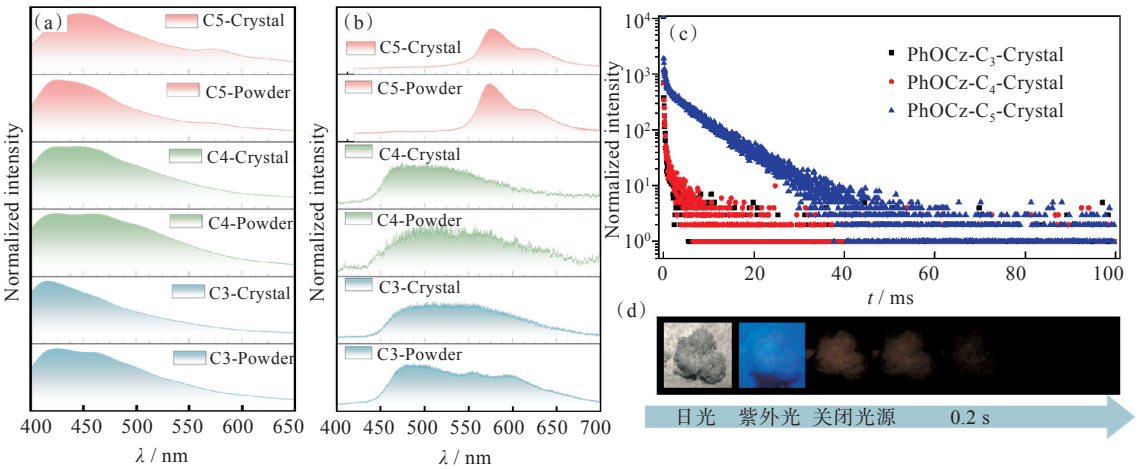



**图3　室温下化合物PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$在不同状态下的荧光光谱（a）、磷光光谱（b）、磷光寿命衰减图谱（c）以及化合物PhOCz-$C_5$在不同条件（白光，紫外光以及关闭光源）下的照片（d）**

Fig. 3　The fluorescence (a), phosphorescence(b) and phosphorescence decay spectra (c) of PhOCz-$C_3$, PhOCz-$C_4$ and PhOCz-$C_5$ in different states at room temperature and their photographs taken at different conditions (daylight, before and after turning off the UV lamp (365 nm)) (d) under ambient conditions

**表1　PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$晶体的基本光学数据**

Tab. 1　The basic optical data of PhOCz-$C_3$, PhOCz-$C_4$ and PhOCz-$C_5$ in crystal

| 化合物 | 空间群 | RTP | | Fluorescence | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 活性 | $\tau$@575 nm[a] / ms | $\lambda_{em}$[b] / nm | $\Phi$[c] / % | $\tau$[d] / ns |
| PhOCz-$C_3$ | P21/c | invisible | 7.5 | 449 | 2.82 | 237 |
| PhOCz-$C_4$ | Pna21 | invisible | 7.7 | 451 | 3.99 | 282 |
| PhOCz-$C_5$ | Pna21 | visible | 71 | 451 | 7.20 | 62 |

**注：**（a）化合物在575 nm发射峰的磷光寿命；（b）最大发射波长；（c）光致发光量子产率以及（d）荧光寿命。

## 2.2　单晶数据分析

PhOCz-$C_5$作为一种刺激响应材料，可以在光源刺激下激发出优异的室温磷光性能。由于分子在晶态时的排列方式对其室温下的磷光发射起着关键作用，因此对3个化合物的晶体结构进行了详细的分析与研究。虽然3个分子的化学结构仅有微弱的变化，但是由于烷基链空间效应的影响，分子在晶态时的排列方式差异较大。咔唑的扭曲结构可以有效地提高化合物在聚集态下的光致发光量子产率，不同的烷基链长度可以适当地调节整个晶体中分子的排列方式。对于晶体中单个分子的数据分析可以发现，由于烷基链长度的变化，直接导致苯环和咔唑母核的扭曲角度略有不同。而对整体分子排布而言，较长的烷基链可以延伸到相邻分子之间的间隙中（图4），这导致PhOCz-$C_3$分子呈现反向平行排列，而PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$分子呈现鱼骨交错排列。

进一步解析3个化合物晶体中相邻分子的堆积方式可以发现，PhOCz-$C_3$的晶体堆积结构中存在3种类型的二聚体。在$C_3$-dimer1中，存在3种不同类型的C—H···O相互作用（距离为0.308 90~0.371 83 nm），1种类型的C—H···N相互作用（距离为0.337 45 nm）以及8种不同类型的C—H···π相互作用（距离为0.315 53~0.399 29 nm）。在$C_3$-dimer2和$C_3$-dimer3中，分别存在2种不同类型的C—H···O相互作用（距离为0.357 78~0.394 94 nm）。PhOCz-$C_3$的晶体为中心对称结构，相邻分子间的相互作用较少，其整体排列方式较为松散。PhOCz-$C_4$的晶体堆积结构中存在4种类型的二聚体。在$C_4$-dimer1中，存在2种不同类型的C—H···O相互作用（距离为0.344 03和0.348 55 nm），3种不同类型的C—H···N相互作用（距离为0.340 45~0.391 39 nm）以及10种不同类型的C—H···π相互

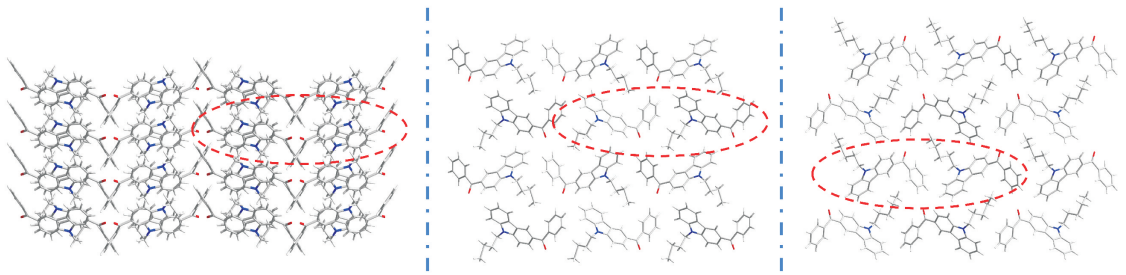



**图4 化合物PhOCz-$C_3$，PhOCz-$C_4$和PhOCz-$C_5$在晶体中分子构型和堆积方式**（CCDC号224082，2240831和2240832）

Fig. 4 The molecular conformations and packing modes of PhOCz-$C_3$, PhOCz-$C_4$ and PhOCz-$C_5$ (CCDC NO. 224082, 2240831 and 2240832)

作用（距离为0.296 28~0.399 19 nm）。在$C_4$-dimer2中，存在1种类型的C—H···O相互作用（距离为0.298 13 nm）。在$C_4$-dimer3中不存在较强的分子间相互作用。在$C_4$-dimer4中，仅存在2种不同类型的C—H···O相互作用（距离为0.261 93和0.310 48 nm）。对比此两化合物，PhOCz-$C_5$的晶体堆积结构呈现出更加紧密的堆积，其晶体中存在4种类型的二聚体[图5(a)]。在$C_5$-dimer1中，存在3种不同类型的C—H···O相互作用（距离为0.326 46~0.383 67 nm），3种不同类型C—H···N相互作用（距离为0.342 24~0.394 09 nm）及9种不同类型C—H···π相互作用（距离为0.322 61~0.395 11 nm）。在$C_5$-dimer2中，存在4种不同类型的C—H···π相互作用（距离为0.357 78~0.394 94 nm）。在$C_5$-dimer3中，存在2种不同类型的C—H···O相互作用（距离为0.287 65和0.398 98 nm）和2种不同类型的C—H···π相互作用（距离为0.316 43和0.325 39 nm）。在$C_5$-dimer4中，存在4种不同类型的C-H···O相互作用（距离为0.306 84~0.397 98 nm）和2种不同类型的C—H···π相互作用（距离为0.328 40和0.359 99 nm）。选取晶胞中27个分子作为比较对象，如图5(b)中所示，PhOCz-$C_5$晶体中具有较多的强分子间相互作用，这促使分子在晶体中形成具有长程有序的网状堆积结构。通过分子间的C—H···O，C—H···N和C—H···π相互作用，整体的堆积状态呈现出鱼骨状的堆积，有效地限制了分子自身的转动和振动，削弱了非辐射跃迁所消耗的能量，为产生室温磷光发射提供了条件。烷基链的引入增强了相邻分子间的联系，这种堆积方式也为设计刺激响应型材料提供了新的设计策略。

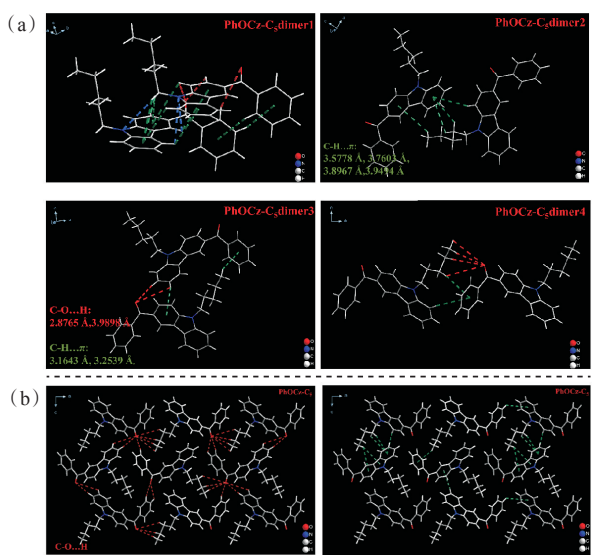



**图5 PhOCz-$C_5$晶体中的四种二聚体及其分子间相互作用(a)和网状分子间相互作用示意图(b)**

Fig. 5 Four dimers and their intermolecular interactions(a) and the reticular intermolecular interactions(b) in crystal of PhOCz-$C_5$

## 3 结 论

本文以不同的烷基链作为功能性的合适间隔基团，设计并制备了3个易合成的咔唑类衍生物，其中化合物PhOCz-$C_5$呈现出最优异的室温磷光性能。通过分析晶体结构，探索了分子堆积形式与发光性能之间的联系。分子间强的相互作用和长程有序的网络结构可以有效地抑制化合物在聚集态时的非辐射跃迁，从而增强化合物的室温磷光性能。因此，本工作研究了多种分子设计策略来获得刺激响应型化合物，有助于深入理解有机化合物的堆积方式与其光电特性之间的关系，为设计新型刺激响应型材料提供了新的思路。

**参考文献**

[1] MURA S, NICOLAS J, COUVREUR P. Stimuli-responsive nanocarriers for drug delivery[J]. Nature Materials, 2013, 12(11): 991-1003.

[2] LÜ J A, LIU Y Y, WEI J, et al. Photocontrol of fluid slugs in liquid crystal polymer microactuators[J].

Nature,2016,537(7619):179-184.
[3] WANG S W, GU K Z, GUO Z Q, et al. Self-assembly of a monochromophore-based polymer enables unprecedented ratiometric tracing of hypoxia [J]. Advanced Materials,2019,31(3):1805735.
[4] WANG Y, SUN L J, WANG C, et al. Organic crystalline materials in flexible electronics [J]. Chemical Society Reviews,2019,48(6):1492-1530.
[5] TERASAKI N, ZHANG H W, YAMADA H, et al. Mechanoluminescent light source for a fluorescent probe molecule[J]. Chemical Communications,2011,47(28):8034-8036.
[6] 于聪,沈裕强,万佳琪,等. 氮/氧与氮/硫双原子混杂六并苯的合成及光电性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2019,41(3):226-231.
[7] GULATI G K, GULATI L K, KUMAR S. Recent progress in multi-stimulable photochromic oxazines with their wide-ranging applications [J]. Dyes and Pigments,2021,192:109445.
[8] 董攀飞,徐志高,吴明,等. N263-HSCN体系负载有机相的反萃取行为研究[J]. 武汉工程大学学报,2022,44(1):31-35.
[9] FAN Y Y, LIU S W, WU M, et al. Mobile phone flashlight-excited red afterglow bioimaging [J]. Advanced Materials,2022,34(18):2201280.
[10] YU Y, FAN Y Y, WANG C, et al. Achieving enhanced ML or RTP performance: alkyl substituent effect on the fine-tuning of molecular packing [J]. Materials Chemistry Frontiers,2021,5(2):817-824.
[11] CHEN C J, CHI Z G, CHONG K C, et al. Carbazole isomers induce ultralong organic phosphorescence [J]. Nature Materials,2021,20(2):175-180.
[12] LI Q Q, LI Z. The strong light-emission materials in the aggregated state: what happens from a single molecule to the collective group [J]. Advanced Science,2017,4(7):1600484.
[13] LI Q Q, LI Z. Molecular packing: another key point for the performance of organic and polymeric optoelectronic materials [J]. Account of Chemical Research,2020,53(4):962-973.
[14] 宁靖,李广芳,陈嵘,等. Au@g-$C_3N_4$纳米复合材料光催化产氢[J]. 武汉工程大学学报,2022,44(5):509-515.
[15] LIAO Q Y, LI Q Q, LI Z. Substituent effects in organic luminogens with room temperature phosphorescence[J]. ChemPhotoChem, 2021, 5(8): 694-701.
[16] LI Q Q, LI Z. Miracles of molecular uniting[J]. Science China Materials,2020,63(2):177-184.
[17] WANG C, YU Y, CHAI Z F, et al. Recyclable mechanoluminescent luminogen: different polymorphs, different self-assembly effects of the thiophene moiety and recovered molecular packing via simple thermal-treatment[J]. Materials Chemistry Frontiers,2019,3(1):32-38.
[18] YU Y, WANG C, WEI Y, et al. Halogen-containing tpa-based luminogens: different molecular packing and different mechanoluminescence [J]. Advanced Optical Materials,2019,7(18):1900505.
[19] WU Y A, CHEN X J, MU Y X, et al. Two thermally stable and AIE active 1, 8-naphthalimide derivatives with red efficient thermally activated delayed fluorescence[J]. Dyes and Pigments 2019, 169: 81-88.
[20] WANG J F, CHAI Z F, WANG J Q, et al. Mechanoluminescence or room-temperature phosphorescence: molecular packing-dependent emission response [J]. Angewandte Chemie (International Edition),2019,58(48):17297-17302.
[21] LIU H C, PAN G C, YANG Z Q, et al. Dual-emission of fluorescence and room-temperature phosphorescence for ratiometric and colorimetric oxygen sensing and detection based on dispersion of pure organic thianthrene dimer in polymer host[J]. Advanced Optical Materials,2022,10(12):2102814.
[22] 王金凤,李振. 聚集态分子排列对光电性能的影响[J]. 化学学报,2021,5(79):575-587.
[23] 常凯,李倩倩,李振. 力致发光现象及其应用研究进展[J]. 有机化学,2020,40(11):3656-3671.
[24] 李雅琴,吴进军,刘茂松,等. 溴代蒽并及酚嗪并噻二唑衍生物的合成及光电性能研究[J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(1): 25-30.
[25] YU Y, FAN Y Y, WANG C, et al. Phenanthroimidazole derivatives with minor structural differences: crystalline polymorphisms, different molecular packing, and totally different mechanoluminescence [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(44): 13759-13763.
[26] WANG C, YU Y, YUAN Y H, et al. Heartbeat-Sensing mechanoluminescent device based on a quantitative relationship between pressure and emissive intensity[J]. Matter,2020,2(1):181-193.
[27] 张曼琳,胡顺龙,刘荣荣,等. 两种新MOFs的合成、表征及光催化性质[J]. 武汉工程大学学报,2021,43(5):481-486,495.

本文编辑:张　瑞