

文章编号: 1000-7032(2025)06-1075-07

手性苝酰亚胺衍生物的超分子结构与圆偏振发光性质

连宁晓¹, 黄国斌¹, 田凯丽^{1*}, 黄汉军¹, 曲雅茹¹, 王 婕²,
苏玉鹏², 潘宏斐², 任相魁^{1,2*}

(1. 天津大学化工学院 天津市膜科学与海水淡化技术重点实验室, 天津 300350;

2. 天津大学浙江研究院, 浙江 宁波 315201)

摘要: 手性发光材料在未来光学领域具有广阔的应用前景, 但如何精确构筑圆偏振发光材料, 如何阐明其超分子结构与圆偏振发光性质的内在关系, 依然是手性发光材料领域亟需解决的两个关键科学问题。本文以苝酰亚胺(PDI)为模型分子, 分别将手性取代基和位阻取代基引入PDI分子体系, 设计并合成了两种具有凝胶性能的手性PDI衍生物 POSS-PDI-B6、C10C8-PDI-B6, 并通过紫外-可见吸收光谱、荧光光谱、X射线衍射及圆偏振发光光谱对其超分子结构和光物理性质开展了详细的研究。实验结果表明, POSS-PDI-B6和C10C8-PDI-B6均可形成发光凝胶, 在POSS及烷基链取代基的位阻效应、B6取代基手性诱导效应的协同作用下, PDI衍生物可形成具有手性特征的螺旋超分子结构, 进而赋予PDI凝胶优异的圆偏振发光性能。这些结果为手性光学材料的设计和制备提供了重要的理论和实验参考。

关键词: 苝酰亚胺; 超分子结构; 凝胶; 圆偏振发光

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250018 CSTR: 32170.14.CJL.20250018

Supramolecular Structure and Circularly Polarized Luminescence Property of Chiral Perylene Diimide Derivatives

LIAN Ningxiao¹, HUANG Guobin¹, TIAN Kaili^{1*}, HUANG Hanjun¹, QU Yaru¹,
WANG Jie², SU Yupeng², PAN Hongfei², REN Xiangkui^{1,2*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Membrane Science and Desalination Technology, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Zhejiang Institute of Tianjin University, Ningbo 315201, China)

* Corresponding Authors, E-mail: tkl168@tju.edu.cn; renxiangkui@tju.edu.cn

Abstract: Chiral luminescent materials have wide application prospect in the field of optics. However, the precise construction of circularly polarized luminescent materials and the elucidation of the intrinsic relationship between their supramolecular structures and circularly polarized luminescence properties remain key scientific challenges that urgently need to be addressed in the field of chiral luminescent materials. In this study, we use perylene diimide (PDI) as the model compound, to introduce chiral substituents and steric hindrance substituents into the PDI system, and then synthesize two chiral PDI derivatives (namely POSS-PDI-B6 and C10C8-PDI-B6) with gelation property. Their supramolecular structures and photophysical properties were comprehensively characterized using ultraviolet-visible absorption spectroscopy, fluorescence spectroscopy, X-ray diffraction and circularly polarized luminescence spectroscopy, respectively. The experimental

收稿日期: 2025-02-08; 修订日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(22175129); 宁波市“科创甬江2035”重点研发计划国际科技合作项目(2024H017)

Supported by National Natural Science Foundation of China (22175129); International Sci-tech Cooperation Project under the “Innovation Yongjiang 2035” Key R&D Programme of Ningbo Municipality (2024H017)

results demonstrate that both POSS-PDI-B6 and C10C8-PDI-B6 are capable of forming luminescent gels. Under the synergistic effects of steric hindrance from POSS and alkyl chain substituents, as well as chiral induction from the B6 substituent, the PDI derivatives can assemble into helical supramolecular structures with chiral characteristic, thereby endowing the PDI gels with excellent circularly polarized luminescence property. These results provide valuable theoretical and experimental reference for the design and preparation of chiral optical materials.

Key words: perylene diimide; supramolecular structure; gel; circularly polarized luminescence

1 引 言

超分子自组装是指构筑单元通过弱作用力(如氢键、 π - π 堆积、疏水作用力、配位作用及静电作用等)自发形成有序结构的过程^[1-2]。与传统的化学合成方法相比,超分子自组装具有高度的可逆性、灵活性和可调控性,能够从简单分子转变为复杂结构,并赋予体系独特的物理化学性质和功能^[3-4]。基于这些特性,超分子自组装在光诊疗、基因递送、传感等领域展现出巨大的应用潜力^[5-9]。近年来,强 π - π 相互作用的共轭芳香体系成为超分子自组装研究的热点^[10-12],其中茈萸亚胺(Perylene diimide, PDI)衍生物因其优异的光物理性能、化学稳定性,在液晶显示、荧光传感、场效应晶体管等领域具有重要应用^[13-15]。同时,由于具有较大的共轭结构,PDI容易自组装成有序超分子结构^[16-17]。通过引入不同功能基团(如位阻取代基、手性基团等),能够有效调节PDI分子间相互作用及其超分子结构,赋予体系独特的物理化学性质^[18-19]。

圆偏振发光(Circularly polarized luminescence, CPL)材料在液晶显示、光电探测和信息存储等领域具有广阔的应用前景^[20-23]。CPL性能不仅取决于分子本身的结构特征,还与分子的自组装方式及形成的超分子结构密切相关^[24-25]。通过精确调控自组装行为,可以实现手性在超分子结构中的传递和放大^[26-27]。例如,Kawai团队^[28]利用手性联萸基团合成PDI二聚体,该二聚体在三氯甲烷溶液中形成螺旋超分子结构,其不对称因子高达0.02;Wei团队^[29]合成一种糖基取代PDI,该分子在不同的溶剂中自组装具有相反手性信号的螺旋结构等。尽管CPL材料的研究已取得了一定进展,但依然面临诸多挑战。如何从分子层面精确调控材料的超分子结构,如何阐明材料超分子结构与CPL性质的构效关系,是手性发光材料领

域亟需解决的两个关键科学问题。

针对上述问题,我们分别将聚倍半硅氧烷(POSS)、2-辛基十二胺作为位阻取代基,B6分子作为手性取代基和凝胶因子引入PDI体系,合成了POSS-PDI-B6、C10C8-PDI-B6两种PDI衍生物。通过紫外-可见吸收光谱、圆偏振发光光谱及X射线衍射等对其超分子结构及光物理性质开展了详细研究。实验结果表明,在 $\text{CHCl}_3/\text{C}_8\text{H}_{18}$ 混合溶液体系中,随着不良溶剂比例的增加,POSS-PDI-B6和C10C8-PDI-B6均展现出明显的手性信号。此外,两种PDI衍生物在甲苯溶液中均可形成具有螺旋超分子结构的凝胶,且具有优异的圆偏振发光性能,其不对称因子分别为0.037和0.068。这些结果为超分子手性光学材料的制备与调控提供了重要的理论和实验参考。

2 实 验

2.1 材料

1,6,7,12-四氯-3,4,9,10-茈萸四羧酸二酐(95%),华威锐科化工有限公司;D-葡萄糖酸内酯(98%),上海毕得医药科技股份有限公司;2-辛基十二胺(>99%),天津希恩思奥普德科技有限公司;p-Aminopropylisobutyl POSS(97%),Hybrid Plastics公司;1,6-己二胺(>99%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;3,4-二氯苯甲醛(>99%),天津希恩思奥普德科技有限公司;1,4-二氧六环(分析纯),天津希恩思奥普德科技有限公司;4-二甲氨基吡啶(DMAP,99%),上海迈瑞尔生化科技有限公司。药品和试剂从厂商购买后未经其他处理,直接使用。其他溶剂均购买自天津市江天化工技术有限公司,除另有说明外,均无需进一步提纯。

2.2 分析测试仪器与合成方法

凝胶因子B6、POSS-PDI-B6及C10C8-PDI-B6合成路线如图1所示。实验仪器及具体合成方法见补充文件。

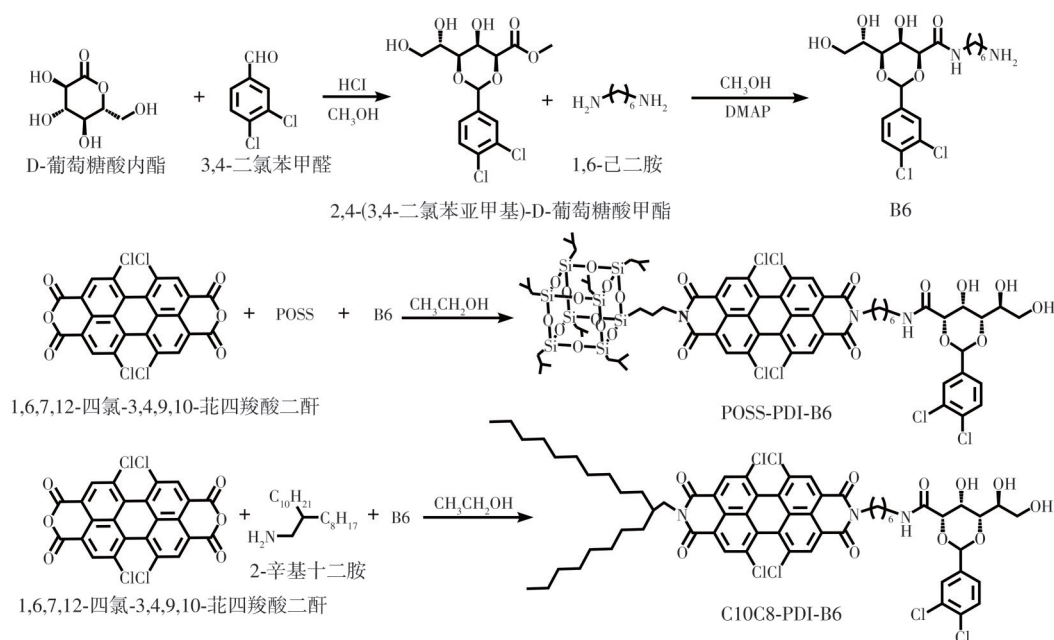


图1 B6、POSS-PDI-B6和C10C8-PDI-B6的合成路线

Fig. 1 Synthetic routes of B6, POSS-PDI-B6 and C10C8-PDI-B6

3 结果与讨论

3.1 热稳定性

我们通过热重分析实验研究了 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 的热稳定性,测试结果如图 2 所示。POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 失重 5% 时的分解温度分别为 300 °C 和 200 °C,说明二者均具有一定的热稳定性。但 POSS-PDI-B6 的分解温度相较于 C10C8-PDI-B6 显著提高,说明 POSS 取代基在一定程度上提高了花酰亚胺衍生物的热稳定性。

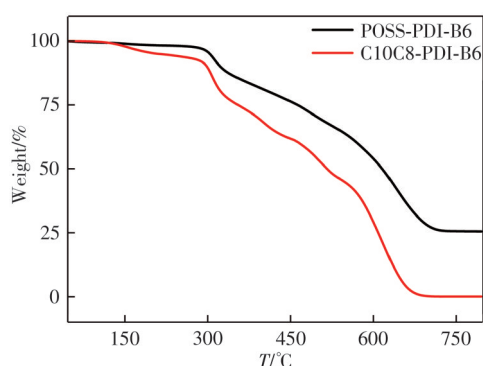


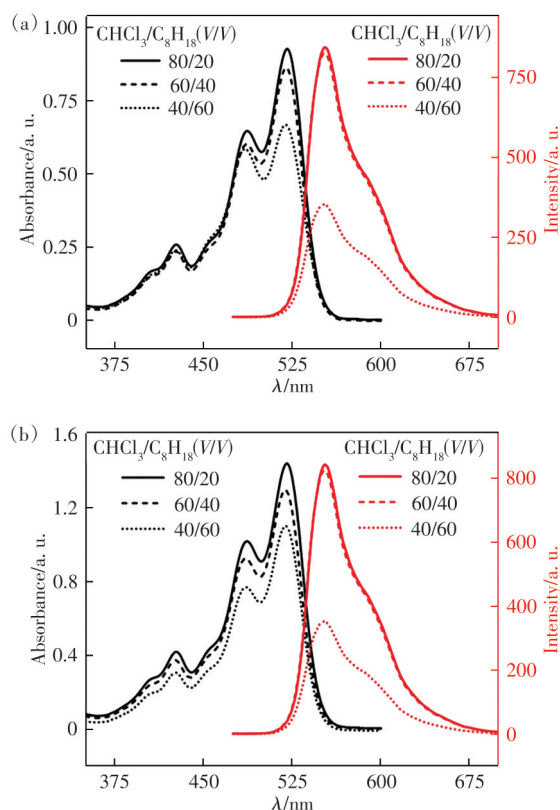
图2 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 的 TGA 曲线

Fig. 2 TGA curves of POSS-PDI-B6 and C10C8-PDI-B6

3.2 光物理性质

POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 在三氯甲烷 (CHCl₃)、四氢呋喃 (THF) 和甲苯等溶剂中溶解度较高,但在辛烷 (C₈H₁₈) 中几乎不能溶解。因此,我们研究了 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 在

不同比例的 CHCl₃/C₈H₁₈ 混合溶剂 (浓度为 5 × 10⁻⁵ mol/L) 中的光物理性质,结果如图 3 所示。

图3 紫外-可见吸收光谱和荧光光谱:(a)POSS-PDI-B6;(b)C10C8-PDI-B6。浓度为5×10⁻⁵ mol/LFig. 3 UV-Vis absorption spectra and fluorescence spectra: (a)POSS-PDI-B6, (b)C10C8-PDI-B6. $c=5 \times 10^{-5}$ mol/L

两种样品呈现相似的光物理性质,以 POSS-PDI-B6 为例(图 3(a)),其吸收光谱在 455 nm、485 nm 和 520 nm 处显示出 3 个典型的特征吸收峰,分别对应于 S_{0-2} 、 S_{0-1} 和 S_{0-0} 分子能级跃迁。随着辛烷的加入,POSS-PDI-B6 的 S_{0-0} 与 S_{0-1} 吸收峰强度比值显著降低,吸收峰略微向短波长处移动,这表明 POSS-PDI-B6 随着不良溶剂比例的增加而聚集。

此外,从荧光光谱也可以分析不良溶剂对分子聚集行为的影响。如图 3 所示,两种样品的荧光光谱与其吸收谱成近似的镜像关系,且随着不良溶剂的加入,荧光强度显著降低,说明分子产生了聚集。

3.3 圆二色(CD)光谱性质

CD 是研究体系基态手性的有效工具,所以对 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 在 $\text{CHCl}_3/\text{C}_8\text{H}_{18}$ 混合溶剂(浓度为 5×10^{-5} mol/L)中的圆二色性进行了研究,结果如图 4 所示。POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 在混合溶剂中以单分子状态存在时,几乎没有 CD 信号,但随着辛烷比例的增加,样品分子产生聚集,在 400 ~ 560 nm 范围内表现

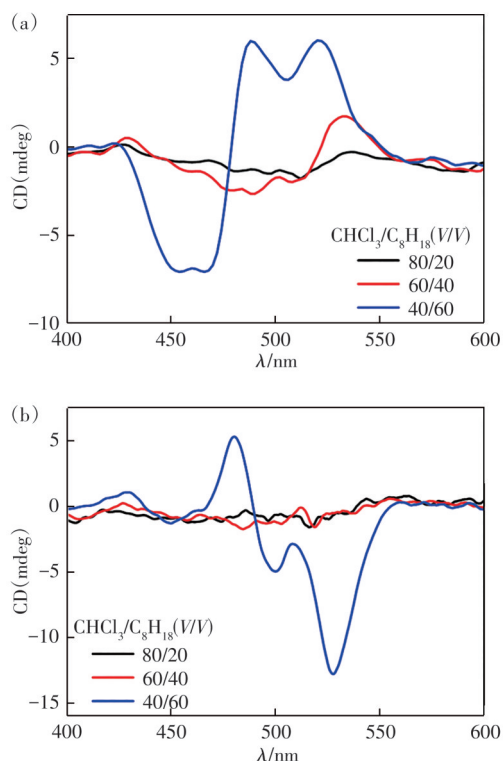


图 4 CD 光谱:(a)POSS-PDI-B6;(b)C10C8-PDI-B6。浓度为 5×10^{-5} mol/L

Fig. 4 CD spectra: (a) POSS-PDI-B6, (b) C10C8-PDI-B6. $c = 5 \times 10^{-5}$ mol/L

出明显的 Cotton 效应,且 CD 信号位置与吸收特征相对应。这表明不良溶剂比例的增加促进了手性信号的有效传递。此外,两种样品之间相反的 Cotton 信号表明,取代基的差异可能影响了分子间的相互作用力,进而影响分子堆积行为。

3.4 超分子结构与圆偏振发光性质

为了进一步研究 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 的超分子结构和圆偏振发光性质,我们制备了其相应的甲苯凝胶,如图 5 所示。通过一维 X 射线衍射(1D-XRD)对两种样品干凝胶的聚集态结构进行了分析,结果如图 6 所示。POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 在小角区域均出现了较尖锐的衍射峰,说明两种样品均存在有序超分子结构。并且,POSS-PDI-B6 在 $2\theta = 8.5^\circ$ 附近还具有一个较明显的衍射峰,表明 POSS 结构单元也通过自组装形成了有序结构。此外,SEM 实验还展示了两种样品的干凝胶形貌,如图 5 所示,POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 均自组装形成了带状纤维,进而构筑了网状结构。

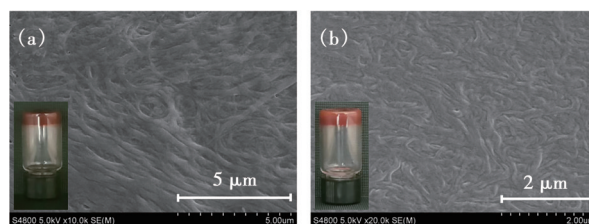


图 5 凝胶实物图和干凝胶的微观形貌:(a)POSS-PDI-B6;(b)C10C8-PDI-B6

Fig. 5 Gel diagram and the micromorphology of dry gel: (a)POSS-PDI-B6, (b)C10C8-PDI-B6

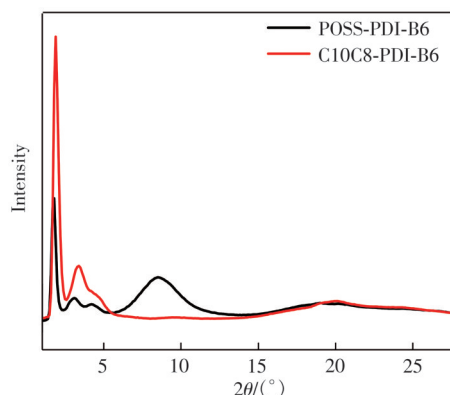


图 6 一维 XRD 谱图

Fig. 6 1D XRD patterns

尽管 1D-XRD 和 SEM 结果表明 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 形成了有序的超分子结构,但无法详细反映材料的三维超分子结构信息。为此,

我们进一步开展了取向样品的二维X射线衍射(2D-XRD)实验,结果如图7所示。

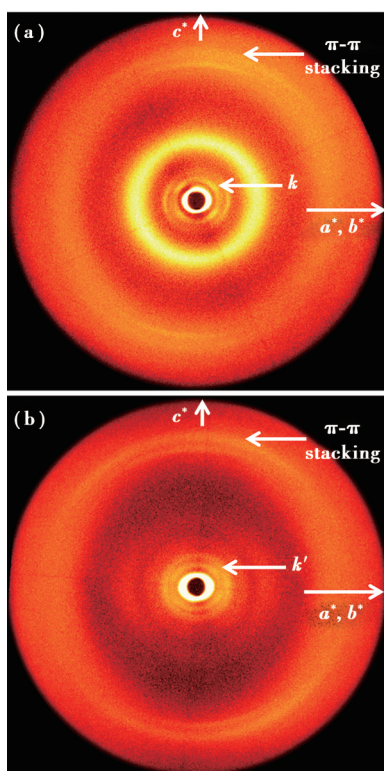


图7 二维XRD谱图:(a)POSS-PDI-B6;(b)C10C8-PDI-B6
Fig. 7 2D XRD patterns: (a)POSS-PDI-B6, (b)C10C8-PDI-B6

以 POSS-PDI-B6 为例(图 7(a)),不仅子午线和赤道线上具有明显的衍射弧,在区间内也存在较锐利的衍射弧(如 k 所示),说明 POSS-PDI-B6 分子可自组装为三维有序的超分子结构。在子午线方向,广角区域的衍射弧对应于 PDI 芳核之间的 π - π 堆叠,在 $2\theta = 8.5^\circ$ 附近的衍射环对应于 POSS 的自组装结构。值得一提的是,从区间内的 k 衍射弧向子午线作垂线,垂足所对应的晶面间距远远大于 PDI 芳核之间的 π - π 堆叠距离,这说明在 POSS 位阻效应和 B6 手性中心的协同作用下,POSS-PDI-B6 形成了螺旋柱状结构,如图 8 所示。这种特殊的螺旋柱状结构为手性中心的传递和放大提供了基础,同时考虑到 PDI 芳核的发光性质,我们推测 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 的凝胶材料很可能具有手性发光性质。

为验证上述猜测,我们考察了 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 凝胶的圆偏振发光(CPL)光谱。如图 9 所示,POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6 凝胶均表现出显著的手性信号,且具有圆偏振发光性质,不对称因子 g_{lum} 值分别为 0.037 和 0.068。这些结果

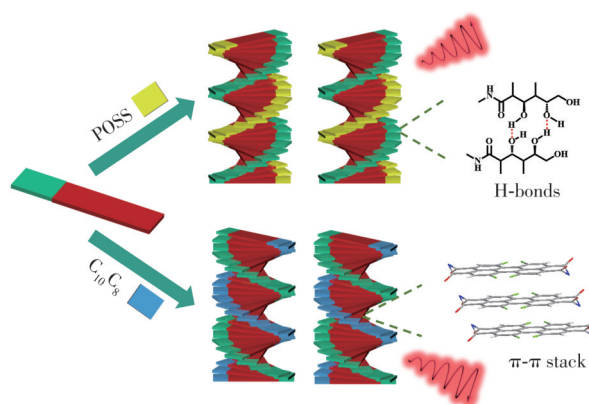


图8 超分子结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of supramolecular structure

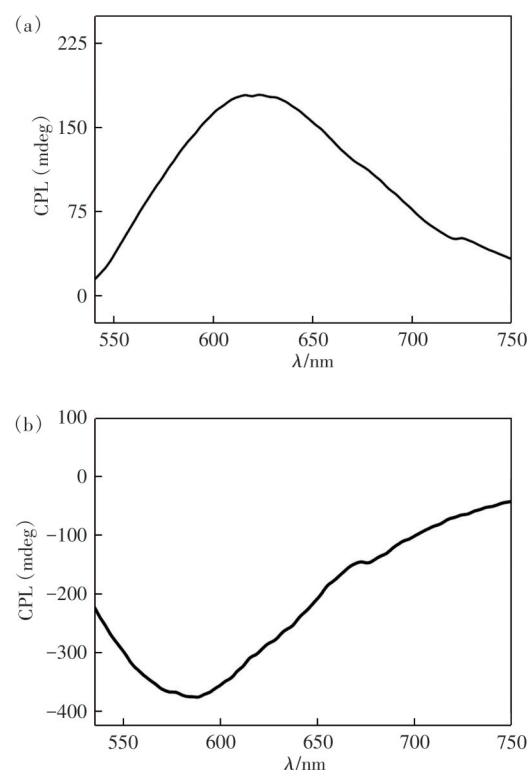


图9 CPL光谱:(a)POSS-PDI-B6;(b)C10C8-PDI-B6

Fig. 9 CPL spectrum: (a)POSS-PDI-B6; (b)C10C8-PDI-B6

表明,取代基的位阻作用、PDI的发光特性、B6的手性诱导作用和凝胶化效应共同构筑了具有手性特征的螺旋超分子结构,赋予了PDI凝胶优异的圆偏振发光性能;并且,还可以通过改变取代基来实现左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的切换。

4 结 论

综上所述,本工作主要将手性取代基和位阻取代基引入茚酰亚胺(PDI)分子,设计并合成了两种具有凝胶性能的手性PDI衍生物 POSS-PDI-B6 和 C10C8-PDI-B6。实验结果表明,在 $\text{CHCl}_3/\text{C}_8\text{H}_{18}$ 混合溶液体系中,POSS-PDI-B6 和 C10C8-

PDI-B6呈现出显著的手性组装信号。两种PDI衍生物均能在甲苯溶液中形成凝胶,并通过POSS/烷基链取代基的位阻效应、B6取代基手性诱导效应的协同作用形成螺旋超分子结构,进而展现出优异的圆偏振发光性能。上述结果为手性光学材

料的设计和制备提供了重要的理论和实验参考。

本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250018>

参 考 文 献:

- [1] CAMERON J M, GUILLEMOT G, GALAMBOS T, *et al.* Supramolecular assemblies of organo-functionalised hybrid polyoxometalates: from functional building blocks to hierarchical nanomaterials [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2022, 51(1): 293-328.
- [2] 张希, 王力彦, 徐江飞, 等. 聚合物超分子体系: 设计、组装与功能 [J]. 高分子学报, 2019, 50(10): 973-987.
ZHANG X, WANG L Y, XU J F, *et al.* Polymeric supramolecular systems: design, assembly and functions [J]. *Acta Polym. Sinica*, 2019, 50(10): 973-987. (in Chinese)
- [3] 王嘉慧, 曾晓璇, 吴玥, 等. 具有pH响应性能的聚集诱导发光材料制备与表征 [J]. 发光学报, 2021, 42(3): 311-318.
WANG J H, ZENG X X, WU Y, *et al.* Synthesis and characterization of pH-responsive material with aggregation-induced emission property [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(3): 311-318. (in Chinese)
- [4] CHEN J W, LEUNG F K C, STUART M C A, *et al.* Artificial muscle-like function from hierarchical supramolecular assembly of photoresponsive molecular motors [J]. *Nat. Chem.*, 2018, 10(2): 132-138.
- [5] 张志军, 康苗苗, 王媛玮, 等. 聚集诱导发光材料在光学诊疗中的研究进展 [J]. 发光学报, 2021, 42(3): 361-378.
ZHANG Z J, KANG M M, WANG Y W, *et al.* Recent advances of aggregation-induced emission materials in phototheranostics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(3): 361-378. (in Chinese)
- [6] REN X K, FENG Y K, GUO J T, *et al.* Surface modification and endothelialization of biomaterials as potential scaffolds for vascular tissue engineering applications [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44(15): 5680-5742.
- [7] 杨学琴, 来守军, 丁媛媛, 等. 四苯乙烯类聚集诱导发光探针在生物分子检测领域的应用 [J]. 发光学报, 2022, 43(6): 961-985.
YANG X Q, LAI S J, DING Y Y, *et al.* Application of tetraphenylene aggregation-induced emission probes in field of biomolecular detection [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(6): 961-985. (in Chinese)
- [8] 宋学智, 宋一凡, WONG SHIQING, 等. 用于全氟辛烷磺酸盐检测的“开启”式荧光探针 [J]. 发光学报, 2024, 45(5): 846-852.
SONG X Z, SONG Y F, WONG S Q, *et al.* A “Turn-On” fluorescent probe for detection of perfluorooctane sulfonate [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(5): 846-852. (in Chinese)
- [9] 顾丹丹, 赵浩儒, 江晓泽, 等. 羧基改性花酰亚胺与钙离子的络合组装及荧光增强 [J]. 发光学报, 2025, 46(3): 474-485.
GU D D, ZHAO H R, JIANG X Z, *et al.* Complexation and fluorescence enhancement of bay-site carboxyl modified perylene diimide with calcium ion [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(3): 474-485. (in English)
- [10] CAI K, XIE J J, ZHAO D H. NIR J-aggregates of hydroazaheptacene tetraimides [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136(1): 28-31.
- [11] LI G L, ZHUO Z, WANG B, *et al.* Constructing π -stacked supramolecular cage based hierarchical self-assemblies via $\pi\cdots\pi$ stacking and hydrogen bonding [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2021, 143(29): 10920-10929.
- [12] 郑军峰, 宫佳鑫, 程晓帆, 等. 一种三态发光的液晶基元合成、自组装及光物理性质 [J]. 发光学报, 2022, 43(6): 869-878.
ZHENG J F, GONG J X, CHENG X F, *et al.* Synthesis, self-assembly and photophysical properties of a three-state highly emissive mesogen [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(6): 869-878. (in Chinese)
- [13] SCHMIDT R, OH J H, SUN Y S, *et al.* High-performance air-stable n-channel organic thin film transistors based on halogenated perylene bisimide semiconductors [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131(17): 6215-6228.
- [14] ZHANG X Y, TIAN K L, LIU J, *et al.* Perylene diimide incorporated polyurethane polymer as potential colour filter

- material with non-fluorescent property [J]. *Chin. J. Chem.*, 2023, 41(11): 1348-1354.
- [15] 张丹, 刘婕, 石栋, 等. 基于硅氧烷修饰的苝二酰亚胺氟离子荧光传感器 [J]. *发光学报*, 2021, 42(6): 855-862.
ZHANG D, LIU J, SHI D, *et al.* Fluorescent sensor for fluoride ions based on perylene diimide tethered with siloxane moieties [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(6): 855-862. (in English)
- [16] TIAN K L, HUANG H J, BERMESHEV M V, *et al.* Perylene diimide tethered with multi-POSS nanocages for polymer composite material with nonlinear optical property [J]. *Dyes Pigm.*, 2024, 229: 112270.
- [17] SHARMA P, VENUGOPAL A, VERDI C M, *et al.* Heparin binding induced supramolecular chirality into the self-assembly of perylenediimide bolaamphiphile [J]. *J. Mater. Chem. B*, 2024, 12(30): 7292-7297.
- [18] LIU J, GAO S Y, ZHANG X Y, *et al.* POSS-containing polynorbornene with pendant perylene diimide: from a unique supramolecular structure to tunable luminescence properties [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(22): 8791-8796.
- [19] CHEN Y, TAO K, JI W, *et al.* Histidine as a key modulator of molecular self-assembly: peptide-based supramolecular materials inspired by biological systems [J]. *Mater. Today*, 2022, 60: 106-127.
- [20] ZHANG Y D, YU S, HAN B, *et al.* Circularly polarized luminescence in chiral materials [J]. *Matter*, 2022, 5(3): 837-875.
- [21] PAN H F, HUANG H J, LIU Y, *et al.* Supramolecular chiral J-aggregates of an amphiphilic boron-azadipyrromethene dye: kinetic pathway and circularly polarized near-infrared luminescence [J]. *Chem. Mater.*, 2024, 36(8): 3745-3753.
- [22] XU L T, LIU H, PENG X L, *et al.* Efficient circularly polarized electroluminescence from achiral luminescent materials [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(20): e202300492.
- [23] AI Y Y, FEI Y X, SHU Z, *et al.* Visible-light-controlled ternary chiroptical switches with high-performance circularly polarized luminescence for advanced optical information storage and anti-counterfeiting materials [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 450: 138390.
- [24] WANG F, FENG C L. Stoichiometry-controlled inversion of supramolecular chirality in nanostructures co-assembled with bipyridines [J]. *Chem. Eur. J.*, 2018, 24(7): 1509-1513.
- [25] LUO H, REN X K, ZHANG B H, *et al.* Synthesis and properties of tetraphenylethylene derivatives with different chiral substituents: from helical supermolecular structure to circularly polarized luminescence [J]. *Dyes Pigm.*, 2021, 188: 109148.
- [26] HUANG S, YU H F, LI Q. Supramolecular chirality transfer toward chiral aggregation: asymmetric hierarchical self-assembly [J]. *Adv. Sci.*, 2021, 8(8): 2002132.
- [27] HUANG H J, TIAN K L, WONG S Q, *et al.* Room-temperature liquid crystalline tetraphenylethylene-surfactant complex with chiral supramolecular structure and tunable circularly polarized luminescence [J]. *Chem. Eur. J.*, 2024, 30(57): e202402667.
- [28] KUMAR J, NAKASHIMA T, TSUMATORI H, *et al.* Circularly polarized luminescence in chiral aggregates: dependence of morphology on luminescence dissymmetry [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2014, 5(2): 316-321.
- [29] HU J C, KUANG W F, DENG K, *et al.* Self-assembled sugar-substituted perylene diimide nanostructures with homochirality and high gas sensitivity [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, 22(19): 4149-4158.



连宁晓(1999-),女,河北邯郸人,硕士研究生,2022年于河北工业大学获得学士学位,主要从事苝酰亚胺、苝酰亚胺衍生物的制备及性能的研究。
E-mail: lianningxiao@tju.edu.cn



任相魁(1980-),男,河北邢台人,博士,教授,2010年于南开大学获得博士学位,主要从事小分子及高分子材料的聚集态结构及性能的研究。
E-mail: renxiangkui@tju.edu.cn



田凯丽(1999-),女,河北保定人,博士研究生,2021年于河北大学获得学士学位,主要从事苝酰亚胺衍生物的制备及性能的研究。
E-mail: tk1168@tju.edu.cn