

一步法合成固态荧光氮掺杂碳化聚合物点及多色LEDs的构建

金鹏¹, 赵刘曦², 王巍¹, 孙争光¹, 马会娟², 詹园¹

(1. 湖北大学材料科学与工程学院, 功能材料绿色制备与应用教育部重点实验室, 高分子材料湖北省重点实验室, 武汉 430062; 2. 湖北三峡实验室, 宜昌 443007)

摘要 以柠檬酸、尿素和丙烯腈为原料, 乙醇为溶剂, 通过一步溶剂热法制备了氮掺杂碳化聚合物点(NCPDs), 其粒径分布范围约为12~22 nm. NCPDs粉末不仅可发射黄色荧光($\lambda_{em}=570$ nm), 而且荧光强度和发射峰位置具有显著的浓度依赖性. 将NCPDs分散在硅溶胶中制备成NCPDs质量分数为0.15%~45%的NCPDs/硅溶胶复合薄膜, 该复合材料的固态荧光发射波长随NCPDs的浓度增加逐渐从蓝色红移至红色(453~638 nm), 且具有良好的稳定性. 将NCPDs应用于发光二极管(LEDs), 可构建蓝光到红光的多色LEDs. 此外, NCPDs优异的固态荧光性能使其在指纹识别领域展示出潜在的应用前景, 因此评估了其在指纹识别中的适用性.

关键词 碳化聚合物点; 氮掺杂; 固态荧光; 多色发光二极管; 指纹识别

中图分类号 O631; O644

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240194

One-step Synthesis of Solid-state Fluorescent Nitrogen-doped Carbonized Polymer Dots and Construction of Multicolor LEDs

JIN Peng¹, ZHAO Liuxi², WANG Wei¹, SUN Zhengguang¹, MA Huijuan², ZHAN Yuan^{1*}

(1. Key Laboratory of Polymer Materials Hubei Provincial Key Laboratory,

Functional Materials Green Preparation and Application Key Laboratory of the Ministry of Education,

College of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China;

2. Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang 443007, China)

Abstract Nitrogen-doped carbonized polymer dots (NCPDs) were prepared by one-step solvothermal method using citric acid, urea and acrylonitrile as raw materials, and ethanol as solvent. The particle size of NCPDs is about 12–22 nm. NCPDs powder not only can emit yellow fluorescence ($\lambda_{em}=570$ nm), but also has excellent concentration-dependent fluorescence. Therefore, the NCPDs/silica sol composite films with different NCPDs mass fraction from 0.15% to 45% were prepared by dispersing NCPDs in silica sol, and the solid-state fluorescence emission wavelengths of these composites gradually shift from blue to red region (453–638 nm) with the increase of NCPDs concentration. Furthermore, those NCPDs composites have good fluorescence stability. The NCPDs composites were further applied to construct light emitting diodes (LEDs), and multicolor LEDs from blue light to red light can be obtained. In addition, the excellent solid-state fluorescence properties of NCPDs make them show potential application prospects in the field of fingerprint recognition, so their applicability in fingerprint recognition was also evaluated.

Keywords Carbonized polymer dots; Nitrogen doping; Solid-state fluorescence; Multicolor light emitting diodes; Fingerprinting

收稿日期: 2024-04-17. 网络首发日期: 2024-05-20.

联系人简介: 詹园, 女, 博士, 讲师, 主要从事高分子复合材料方面的研究. E-mail: zy@hubu.edu.cn

基金项目: 湖北三峡实验室开放课题项目(批准号: SK232014)资助.

Supported by the Open Project of the Hubei Three Gorges Laboratory, China(No.SK232014).

固态荧光材料在发光二极管、防伪、太阳能集光器、指纹识别等领域具有重要的应用前景。目前常见的固态荧光材料主要包括有机染料、稀土荧光粉及半导体量子点等。然而,这些荧光材料通常存在一些固有的局限性,例如有机染料的稳定较差且易光漂白,稀土荧光材料含有不可再生的稀土金属,半导体量子点含有有毒金属(铅、镉等),限制了它们的实际应用^[1]。因此,开发稳定性好、环境友好且荧光性能优异的新型荧光材料对于构建高性能光学器件和提高指纹识别性能具有重要意义。

碳化聚合物点(CPDs)是一类碳核表面修饰有聚合物链,兼具碳点(CDs)和聚合物特性的碳基纳米材料^[2-4]。通过调节聚合物链的结构可以控制碳核间距,实现CPDs发光性能的有效调控^[5]。同时,CPDs的聚合物特性使其与绝大多数封装材料具有较好的相容性,因此在发光二极管(LEDs)器件领域具有广泛的应用前景。Zhao等^[6]采用水热法,以邻苯二胺和L-色氨酸为原料,通过调节体系的pH值分别制备了具有液态蓝光和液态红光的CPDs,并将其与聚乙烯醇复合制备了蓝光、黄光 and 红光LEDs器件。然而,由于超分子相互作用或 π - π 相互作用,CPDs在固态下荧光性能急剧下降甚至猝灭^[7]。目前所报道的CPDs不仅难以实现固态荧光性能,而且其荧光主要集中在蓝光或绿光范围^[8,9],限制了CPDs在固态光学器件中的应用。因此,设计和开发具有固态荧光性能的CPDs对于拓展其在固态光学器件中的应用具有重要意义。

本文以柠檬酸、尿素与丙烯腈为原料,通过一步溶剂热法制备固态荧光氮掺杂碳化聚合物点(NCPDs)。由于NCPDs的荧光性能具有浓度依赖性,将不同质量的NCPDs与硅溶胶混合制备了NCPDs质量分数为0.15%~45%的NCPDs/硅溶胶复合材料,实现了固态荧光发射从蓝光到红光的调控,且荧光性能稳定性好。将NCPDs/硅溶胶复合材料应用于LEDs,通过改变LEDs芯片类型可制备蓝光到红光的全彩色LEDs。同时,研究了NCPDs粉末在指纹识别中应用,结果表明,采用简单的粉末除尘方法将NCPDs涂附在指纹上具有肉眼可见的黄色荧光指纹纹路以及良好的分辨率,实现了潜指纹(LFP)的可视化识别。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

柠檬酸(CA)、尿素(Urea)、丙烯腈(AN)和氨丙基三乙氧基硅烷(APTES),分析纯,上海阿拉丁化学有限公司;石油醚,分析纯,天津富宇精细化工有限公司;乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

JEOL JEM 2100F型高分辨透射电子显微镜(HRTEM),日本电子株式会社; Nicolet iS50型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),美国ThermoFisher公司; D8 Advance型X射线衍射谱仪(XRD),德国Bruker公司; Escalab 250Xi型X射线光电子能谱仪(XPS),美国赛默飞世尔科技公司; Pico-Quant Fluo Time 300型荧光光谱仪,德国Pico-Quant公司; UV-3600型紫外-可见(UV-Vis)吸收光谱仪,日本Shimadzu有限公司。

1.2 实验过程

1.2.1 NCPDs的制备 将2.81 mmol CA, 17.98 mmol Urea和106.32 mmol AN溶解于20 mL乙醇中,超声混合均匀后转移到内衬聚四氟乙烯的不锈钢高压釜中并在180 °C保温12 h。自然冷却后,将红色液体以10000 r/min的转速离心10 min,收集上清液;将上清液滴入石油醚中,静置沉淀,直到上层液体无色透明。将沉淀转移至培养皿中,于40 °C真空干燥24 h,得到黄色块状NCPDs,将其研磨成粉末(可重新分散在乙醇中)用于后续实验。

改变反应物,在相同的反应条件合成对比样品:用2.81 mmol CA和17.98 mmol Urea制备氮掺杂碳点(NCDs);仅以106.32 mmol AN作为原料制备丙烯腈碳化聚合物点(A-CPDs);用2.81 mmol CA和106.32 mmol AN制备柠檬酸-丙烯腈碳化聚合物点(CA-CPDs);用17.98 mmol Urea和106.32 mmol AN制备尿素-丙烯腈碳化聚合物点(UA-CPDs)。真空干燥得到的A-CPDs与NCDs为黑色粉末,CA-CPDs为黑色凝胶,UA-CPDs为黄色粉末。

1.2.2 多色 LEDs 的制备 在室温下将 APTES、超纯水和乙醇以体积比 10:7:3 混合, 搅拌 24 h 后得到用作封装材料的硅溶胶. 将不同质量的 NCPDs 分散在 1.0 g 硅溶胶中, 混合均匀后直接滴到 LEDs 芯片上, 在 60 °C 的烘箱中静置 3 h, 以获得不同发光颜色的 LEDs. 分别将 0.0015 g 和 0.0101 g NCPDs 与 1.0 g 硅溶胶混合后(NCPDs 在 NCPDs/硅溶胶中的质量分数分别为 0.15% 和 1%)滴加在 365 nm UV-LEDs 芯片上制备蓝光和绿光 LEDs; 分别将 0.0204, 0.0526 和 0.8182 g NCPDs 与 1.0 g 硅溶胶混合后(NCPDs 在 NCPDs/硅溶胶中的质量分数分别为 2%, 5% 和 45%)滴加在 395 nm UV-LEDs 芯片上, 制备黄绿光 LEDs、黄光 LEDs 和红光 LEDs.

1.2.3 指纹识别 利用玻璃基板采集指纹. 测试者洗净双手后, 将右手大拇指在前额上轻轻擦拭, 之后 轻轻按压玻璃基板, 再将 NCPDs 粉末均匀撒在基板表面, 然后轻轻刷洗以去除多余 NCPDs 粉末, 在 365 nm 紫外灯下观察指纹图像.

2 结果与讨论

2.1 NCPDs 的形貌与结构

图 1 给出了 NCPDs 的 HRTEM 照片、粒径分布图及 XRD 谱图. 由图 1(A)中可以看到, NCPDs 颗粒呈球形, 分散良好, 无明显团聚. 由图 1(B)中可以看出, NCPDs 粒径分布在 12~22 nm 之间, 平均粒径为 16.29 nm. 此外, 在 HRTEM 照片中 NCPDs 显示为黑点, 并未观察到明显的晶格条纹, 表明在溶剂热过程中 NCPDs 没有形成石墨化结构, 而是低碳化的类聚合物碳核的交联结构^[10-12]. 由图 1(C)可以看出, NCPDs 的衍射峰是以 $2\theta=22^\circ$ 为中心的宽峰, 属于典型的聚合物特征峰^[13], 表明 NCPDs 表面存在大量聚合物结构和非晶碳相.

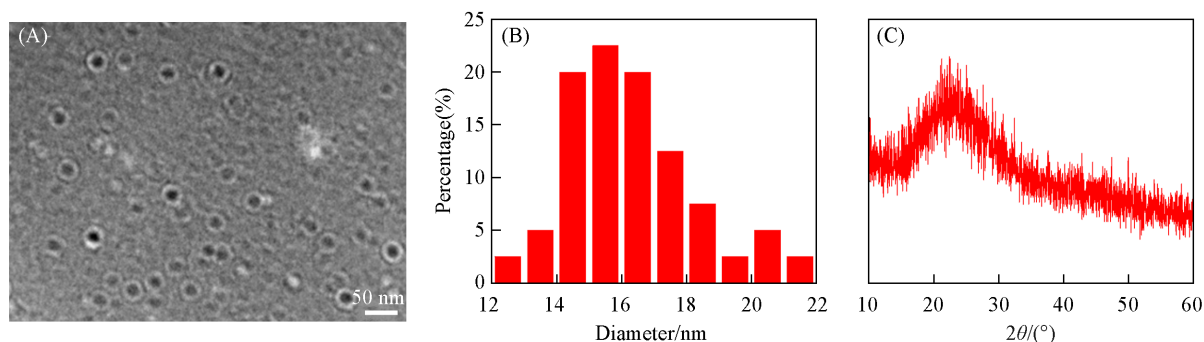


Fig. 1 HRTEM image(A), particle size distribution(B) and XRD pattern(C) of NCPDs

图 2 示出了 NCDs, A-CPDs, CA-CPDs, UA-CPDs 和 NCPDs 的 FTIR 谱图. 可以看出, 这些聚合物点具有相似的结构, 均在 $3000\sim3700\text{ cm}^{-1}$ 处出现 O—H/N—H 的伸缩振动峰^[9], 在 $2700\sim2980\text{ cm}^{-1}$ 处出现 C—H 的伸缩振动峰, 而 NCDs 在此范围内的伸缩振动峰较弱^[14,15]. 此外, AN 单体在 970 cm^{-1} 处出现 C=C 的伸缩振动峰, 而 AN 参与反应的 A-CPDs, CA-CPDs 和 UA-CPDs 在 970 cm^{-1} 处均未出现明显吸收峰, 表明在高温高压下 AN 单体发生聚合以及胺基与乙烯基迈克尔加成反应^[16]. 同时, NCPDs 和 UA-CPDs 在 2228 cm^{-1} 处归属属于氰基的吸收峰较弱, 这是由于氰基与胺基发生亲核加成反应生成了胍^[17].

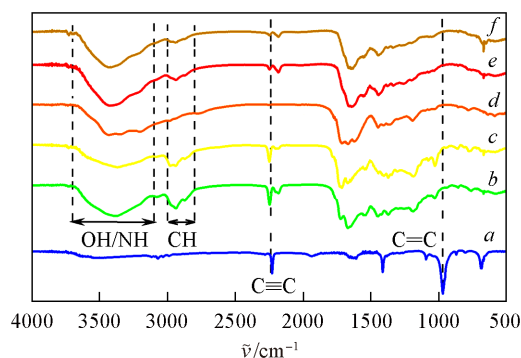


Fig. 2 FTIR spectra of AN(a), A-CPDs(b), CA-CPDs(c), NCDs(d), UA-CPDs(e) and NCPDs(f)

图 3 给出了 NCPDs 的 XPS 全谱及 C_{1s} , N_{1s} 和 O_{1s} 分峰 XPS 谱图. 图 3(A)中 285.1, 399.0 和 531.3 eV 处的 3 个强峰分别归属于 C_{1s} , N_{1s} 和 O_{1s} , 表明 NCPDs 主要由 C, N 和 O 3 种元素组成. 图 3(B)为 NCPDs

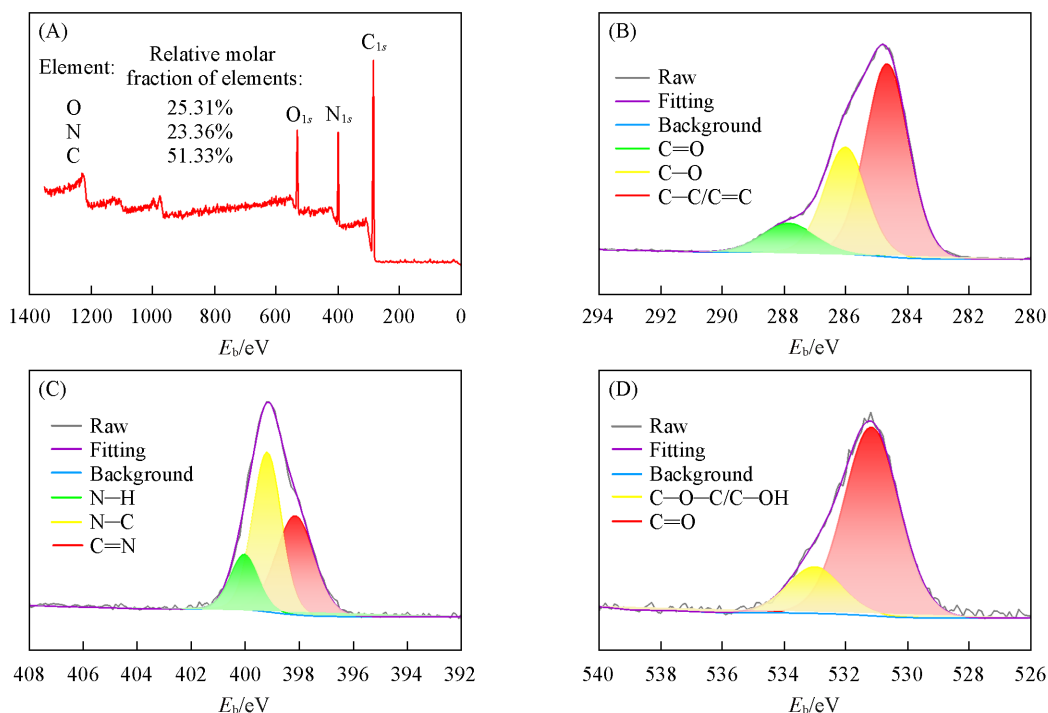


Fig. 3 XPS full spectrum(A) and XPS high-resolution C_{1s} (B), N_{1s} (C) and O_{1s} (D) XPS spectra of NCPDs

的高分辨率 C_{1s} XPS 谱图, 显示了 $C-C/C=C$ (284.7 eV)、 $C-O$ (286.0 eV) 和 $C=O$ (287.8 eV) 的存在^[18,19]. 图 3(C) 为 NCPDs 的高分辨率 N_{1s} XPS 谱图, 在 398.1、399.2 和 400 eV 处可以反卷积为 3 个峰, 分别对应 $N=C$, $N-C$ 和 $N-H$ ^[20,21]. 图 3(D) 为 NCPDs 的高分辨率 O_{1s} XPS 谱图, 显示了 $C=O$ (531.2 eV) 和 $C-O-C/C-O-H$ (533.0 eV) 的存在^[22,23]. 综上所述, NCPDs 形成过程中发生丙烯腈聚合、氨基与胺基的亲核加成反应以及胺基与乙烯基之间的迈克尔加成反应, 丙烯腈参与碳核的形成并包覆在碳核表面形成聚合物结构, 实现了氮掺杂.

2.2 NCPDs 的光学性质

图 4(A) 为 NCPDs 乙醇溶液 (0.1 mg/mL) 的紫外吸收光谱. NCPDs 在 200、265 和 330 nm 处有明显的吸收峰, 分别归属于 $C=C$ 键的 $\pi-\pi^*$ 跃迁^[24]、孤立羰基的 $n-\pi^*$ 跃迁^[25] 和羰基簇的 $n-\pi^*$ ($C=O$ 和 $C=N$) 跃迁^[26]. 由图 4(B) 可见, 浓度为 0.5 mg/mL 的 NCPDs 溶液在 365 nm 紫外光激发下发射出蓝色荧光, 发射波长为 473 nm, 荧光量子产率为 13%. 由图 4(C) 可见, 浓度为 0.5 mg/mL 的 NCPDs 溶液的发射峰位置表现出激发波长依赖性, 随着激发波长从 360 nm 增加到 480 nm, 发射峰从 442 nm 红移到 520 nm. 图 4(D) 为不同浓度 (0.3~35 mg/mL) 的 NCPDs 溶液在 365 nm 紫外光激发下的荧光发射光谱. 可以看出, 随着 NCPDs 浓度的增大, 发射峰从 444 nm 红移到 600 nm, 荧光强度整体上逐渐下降, 表现出依赖于浓度的荧光发射行为.

由图 5(A) 可见, 在 0.1 mg/mL 的 NCPDs 乙醇溶液中, 紫外吸收光谱和发射光谱有较大的重叠, 这表明 NCPDs 之间存在共振能量转移 (RET) 效应^[27], 即短波长的发射光谱被重新吸收后重新发射出长波光. RET 效应通常发生在粒子间距小于 R_0 (供体和受体发生能量转移时粒子间的距离) 的体系中, 且粒子间距越小, RET 效应越明显^[28]. 因此, 随着浓度的增加, NCPD 之间的距离变短, 导致 NCPDs 之间发生 RET 效应, 从而表现出明显的发射红移^[29]. 由图 5(B) 可见, 浓度为 0.3 mg/mL 的 NCPDs 乙醇溶液的荧光寿命为 4.95 ns, 高于 NCPDs 粉末的荧光寿命 (2.13 ns), 这是由于辐射跃迁与 RET 竞争会缩短荧光寿命. 为了进一步探究不同浓度 NCPDs 乙醇溶液中内滤效应与 RET 效应的影响, 表征了浓度分别为 0.3、5 和 35 mg/mL 的 NCPDs 乙醇溶液的荧光寿命. 随着 NCPDs 浓度的增大, NCPDs 会团聚成不同尺寸的聚集体, 这些聚集体会导致发射光子的自吸收和随后的重新发射 (内滤效应), 为电子提供了更多的非辐射交叉弛豫途径, 最终决定了 NCPDs 溶液的发射特性以及荧光寿命^[30]. 由图 5(B) 可知, 随着

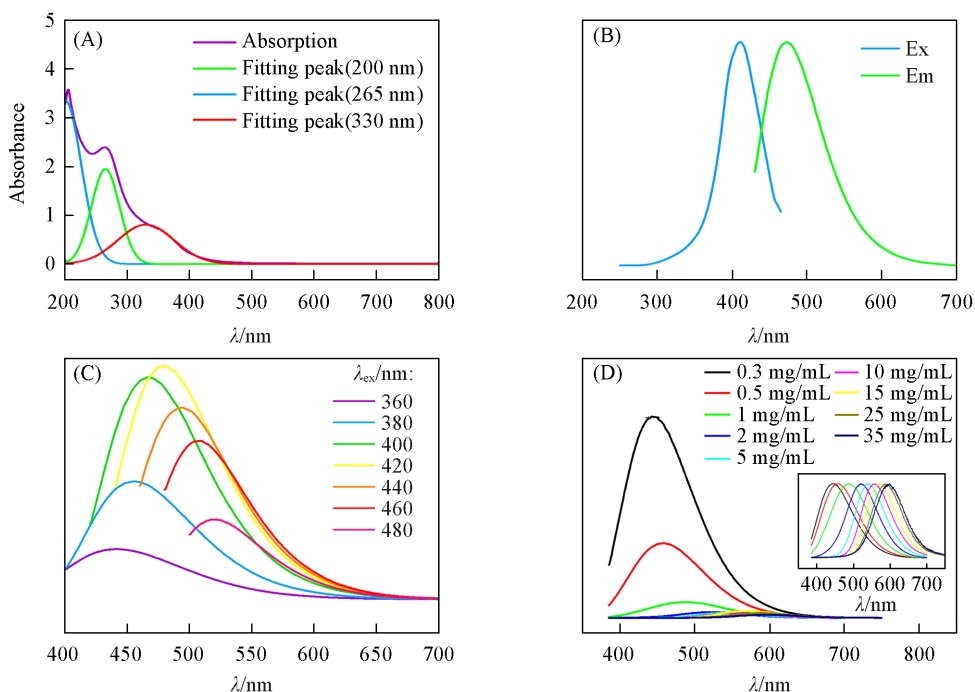


Fig. 4 UV absorption spectra of 0.1 mg/mL NCPDs in ethyl alcohol(A), excitation and emission spectra of 0.5 mg/mL NCPDs in ethyl alcohol(B), excitation dependence of emission peak of 0.5 mg/mL NCPDs in ethyl alcohol(C) and emission spectra of NCPDs in ethyl alcohol with different concentrations(D)

Inset of (D): the normalized emission spectra of NCPDs in different concentrations of ethanol.

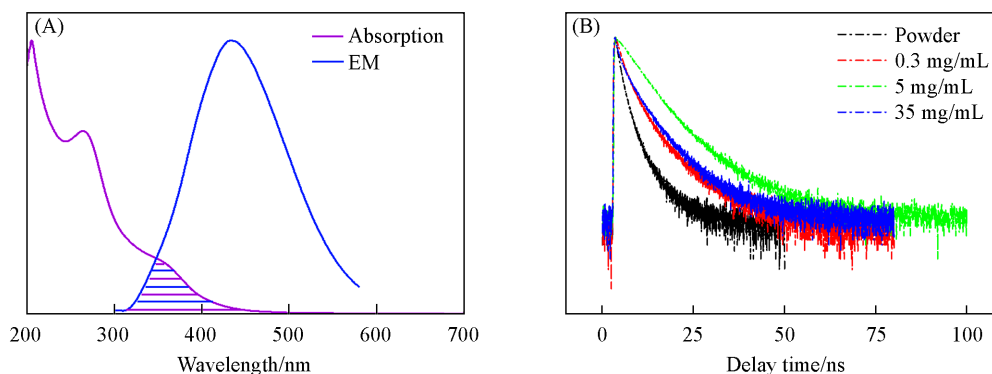


Fig. 5 Absorption and emission spectra(A) and fluorescence lifetime profiles(B) of solid NCPDs and different concentrations of NCPDs solution

浓度的提升, NCPDs 乙醇溶液的荧光寿命从 4.95 ns 增加到 6.37 ns, 然后又下降到 5.05 ns, 表明在 NCPDs 乙醇溶液中同时存在内滤效应和 RET 效应, 随着 NCPDs 浓度的增大, 内滤效应与 RET 效应相互竞争, 最终诱导 NCPDs 的荧光红移.

2.3 基于 NCPDs 的 LEDs 的构建和表征

由于 NCPDs 具有显著的浓度依赖性荧光, 因此分别制备了质量分数为 0.15%, 1%, 2%, 5% 和 45% 的 NCPDs/硅溶胶复合薄膜. 由图 6(A) 可见, 随着 NCPDs 浓度的增加, 复合薄膜透明度逐渐降低, 并且在紫外光激发下荧光颜色从蓝色逐渐变为红色. 进一步测试了薄膜的稳定性. 在室温下, 将薄膜保存 10 d 后发现, 其荧光强度均保持在保存前的 88% 以上[图 6(B)], 表明薄膜具有较好的室温存储稳定性. 将薄膜暴露在大气中, 使用 365 nm 紫外光 (1 W/cm^2) 照射, 每 10 min 对薄膜的荧光性能进行测试. 由图 6(C) 可见, 经过大功率紫外光持续照射 70 min 后, 薄膜的荧光强度依旧保持在照射前的 80% 以上, 表明薄膜具有较好的光学稳定性. 对薄膜的热稳定性进行了表征. 将薄膜暴露在大气中, 在

100 °C下恒温处理, 每 10 min 对薄膜的荧光性能进行测试, 结果如图 6(D)所示. 薄膜经过热处理 70 min 后荧光强度依旧保持在热处理前的 80% 以上, 高于大多数有机染料的热稳定性.

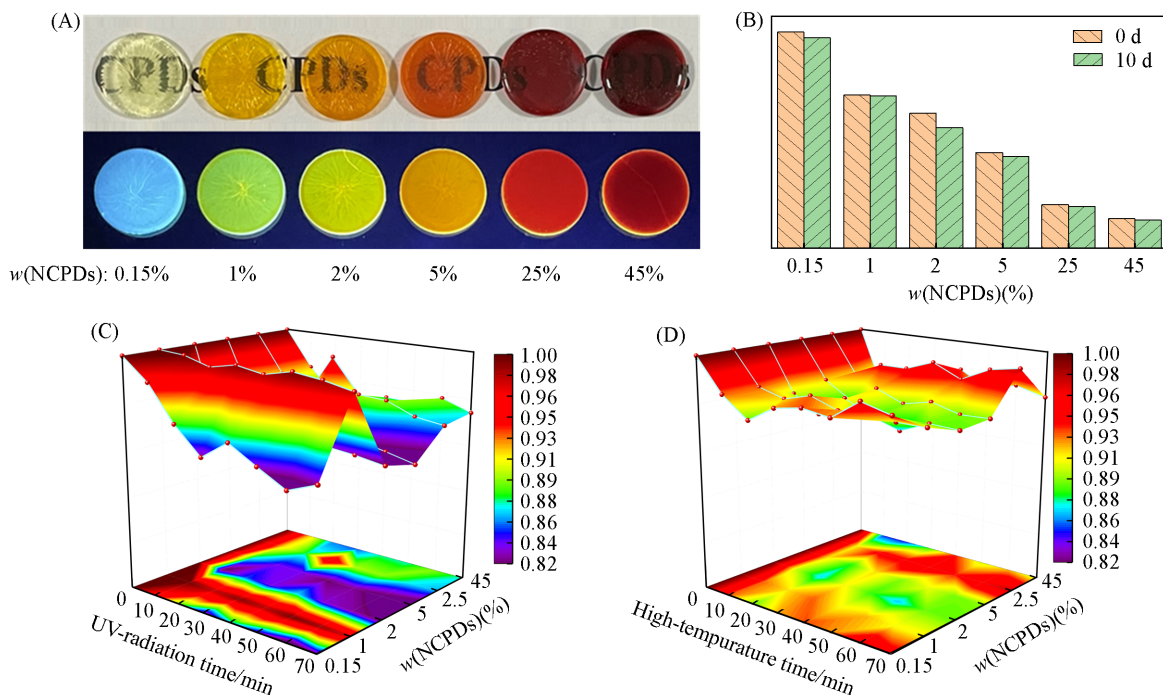


Fig. 6 Photographs of NCPDs composite films in daylight(top) and under UV lamp(bottom)(A), storage stability(B), UV-light stability(C) and high temperature stability(D) of NCPDs composite films

进一步将 NCPDs/硅溶胶复合溶液滴涂在不同的 LED 芯片上, 构建不同发光颜色的 LEDs. 由图 7(A)~(E)可见, 将 NCPDs 质量分数为 0.15% 和 1% 的 NCPDs/硅溶胶复合溶液滴涂在激发波长

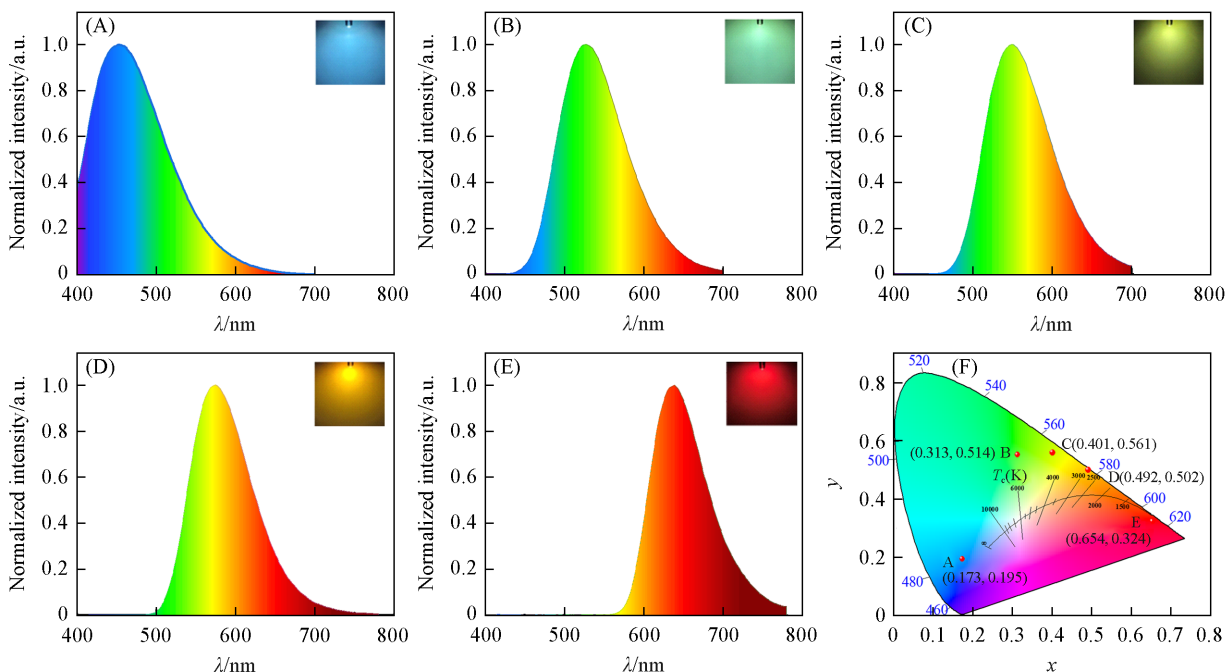


Fig. 7 Fluorescence spectra of blue(A), green(B), yellow-green(C), yellow(D) and red(E) LEDs and CIE coordinates of multicolor LEDs prepared by NCPDs(F)

Mass fraction of NCPDs in silica sol(%): (A) 0.15; (B) 1; (C) 2; (D) 5; (E) 45. Insets of (A—E): working image.

365 nm 的紫外芯片上, 以及将质量分数为 2%, 5% 和 45% 的 NCPDs/硅溶胶复合溶液滴涂在激发波长 395 nm 的 LED 芯片上, 然后在 60 °C 下恒温固化 3 h 得到不同颜色的 LEDs. 图 7(F) 示出了这些 LEDs 的 CIE (国际照明委员会) 坐标, A (0.173, 0.194), B (0.313, 0.554), C (0.401, 0.561), D (0.492, 0.502) 和 E (0.653, 0.324) 分别对应于蓝色、绿色、黄绿色、黄色和红色荧光, 其主要发射峰分别位于 453, 527, 550, 574 和 638 nm, 几乎覆盖了整个可见光谱. 其中黄绿色、黄色和红色荧光 LEDs 表现出较高的颜色饱和度. 总的来说, 通过简单地调控 NCPDs 在硅溶胶中的浓度以及芯片的激发波长即可实现多色 LEDs 的制备.

2.4 基于 NCPDs 的指纹识别

CPDs 溶液可以作为指纹显影剂识别 LFP, 但操作复杂、辨识度较低且在纸或其它易吸水的材料表面容易发生扩散, 这极大地限制了 CPDs 指纹识别的应用场所^[31,32]. NCPDs 粉末在 365 nm 紫外光激发下发射出明亮的黄色荧光, 荧光波长为 570 nm, 且粒径小、分散性良好, 能够均匀地附着在指纹上, 因此将 NCPDs 粉末进一步用于指纹识别. 图 8(A) 和 (B) 分别为日光下以及 365 nm 紫外光照射下被 NCPDs 粉末标记的指纹照片. 可见, 在日光下无法观察到指纹的纹路, 而在紫外光下可以观察到清晰且完整的指纹纹路. 由图 8(C) 和 (D) 可见, 在光学显微镜下获得的 LFPs 图像表现出明亮、分辨率较好的脊线细节, 能清晰地观察到汗孔、分叉和末端等指纹二级特征. 结果表明, NCPDs 粉末有效克服了 CPDs 溶液在指纹识别中操作复杂、扩散等问题, 且其较小的粉末粒度有利于提升指纹识别的清晰度, 黄色荧光有助于克服背景荧光的干扰, 在指纹识别中具有独特的优势.

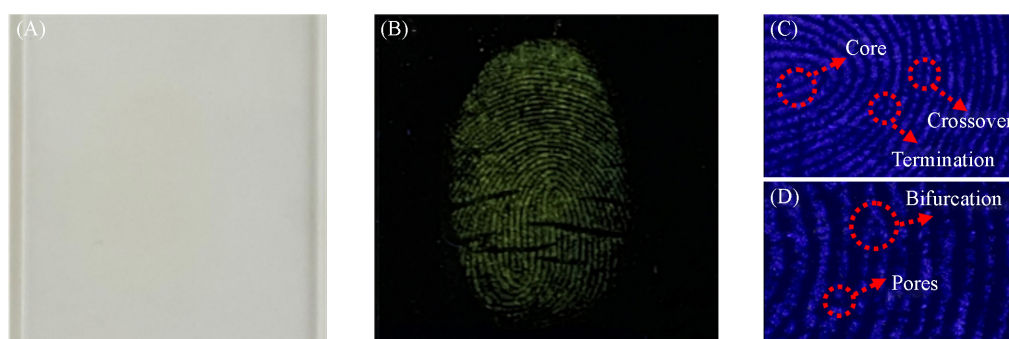


Fig. 8 Photos of NCPDs powder coated fingerprint under daylight(A) and UV light(B) and two-level detail feature(C) and three-level detail feature(D) of fingerprint

3 结 论

采用一步溶剂法合成了具有固态荧光的 NCPDs, 并根据其荧光红移性质构建了从蓝色到红色的多色 LEDs. 同时利用 NCPDs 良好的固态荧光性质, 进一步探索了其在指纹识别中的应用前景, 结果表明: (1) 利用丙烯腈作为聚合链单体制备的 NCPDs 具有优异的浓度依赖性荧光性能, 通过调控 NCPDs 在硅溶胶中的浓度, 可获得全彩色荧光复合材料, 且荧光性能稳定. (2) 通过改变 LEDs 芯片类型和 NCPDs/硅溶胶复合材料中 NCPDs 的浓度就可获得从蓝色 (453 nm) 到红色 (638 nm) 的多色 LEDs, 其中黄绿色到红色的 LEDs 具有较高的色饱和度, 在光电器件上表现出重要的应用潜力. (3) NCPDs 特有的固态荧光性能在指纹识别领域显示出独特的优势, 获得的 LFPs 图像表现出明亮、分辨率较好的脊线细节以及二级指纹特征, 为指纹识别提供了一种新途径.

参 考 文 献

- [1] Zhao L. X., Cao X. Y., Jiang X. F., Zhang Y. H., Shang B., Sun Z. G., Zhan Y., *Spectrochim. Acta A*, **2023**, 299, 122815
- [2] Ma Y. R., Zhang M. L., Wang H. B., Wang B., Huang H., Liu Y., Kng Z. H., *Mater. Today Commu.*, **2020**, 24, 101222
- [3] Wang J. M., An J., Zhang G. H., Wang R. Y., Xu Y. F., Zhu F. F., Shen K. L., Wang Y. Z., *Mater. Lett.*, **2022**, 307, 131093
- [4] Zhang X., Geng Y. J., Tao S. Y., Xu S. P., Xu W. Q., *Chem. J. Chinese Universities*, **2019**, 40(12), 2521—2525 (张雪, 耿乙迦,

- 陶渊源, 徐抒平, 徐蔚青. 高等学校化学学报, **2019**, *40*(12), 2521—2525)
- [5] Ru Y., Ai L., Jia T. T., Liu X. J., Lu S. Y., Tang Z. Y., Yang B., *Nano Today*, **2020**, *34*, 100953
- [6] Zhao X. H., Tang Q. L., Zhu S. J., Bu W. H., Yang M. X., Liu X. C., Meng Y., Yu W. X., Sun H. C., Yang B., *Nanoscale*, **2019**, *11*(19), 9526—9532
- [7] Ge M., Huang X., Ni J. X., Han Y. Q., Zhang C. L., Li S. J., Cao J., Li J., Chen Z. J., Han S. Y., *Dyes Pigments*, **2021**, *185*, 108953
- [8] Wang G. P., Zhang P., Wang G. Y., *Chem. J. Chinese Universities*, **2019**, *40*(12), 2583—2589(王桂萍, 张平, 王桂燕. 高等学校化学学报, **2019**, *40*(12), 2583—2589)
- [9] Tao S. Y., Song Y. B., Zhu S. J., Shao J. R., Yang B., *Polymer*, **2017**, *116*, 472—478
- [10] Feng T. L., Zhu S. J., Zeng Q. S., Lu S. Y., Tao S. T., Liu J. J., Yang B., *ACS Appl. Mater. Inter.*, **2017**, *10*(15), 12262—12277
- [11] Shao J. R., Zhu S. J., Liu H. W., Song Y. B., Tao S. Y., Yang B., *Adv. Sci.*, **2017**, *4*(12), 1700395
- [12] Kwak B. E., Yoo H. J., Kim D. H., *Adv. Opt. Mater.*, **2019**, *7*(23), 1900932
- [13] Quan Y., Wang B., Liu G. P., Li H. M., Xia J. X., *Chem. Eng. Sci.*, **2021**, *232*, 116338
- [14] Liu G. X., Li B. Q., Liu Y., Feng Y. J., Jia D. C., Zhou Y., *Appl. Surf. Sci.*, **2019**, *487*, 1167—1175
- [15] Yang Q., Zhu J. C., Li Z. X., Chen X. S., Jiang Y. X., Luo Z. W., Wang P., Xie H. L., *ACS Appl. Mater. Inter.*, **2021**, *13*(22), 26522—26532
- [16] Patir K., Barman B., Basumatary S., *Iran. J. Sci. Technol. A*, **2021**, *45*, 1301—1310
- [17] Zhou Z. D., *Chemistry*, **1961**, (4), 15—21(周祖德. 化学通报, **1961**, (4), 15—21)
- [18] Meng W. X., Wang B. Y., Ai L., Song H. Q., Lu S. Y., *J. Colloid Interf. Sci.*, **2021**, *598*, 274—282
- [19] Cao W. B., Wu Y. H., Li X., Jiang X. F., Zhang Y. H., Zhan Y., Sun Z. G., *Nanotechnology*, **2021**, *33*(11), 115703
- [20] Stachowska J. D., Murphy A., Mellor C., Fernanders D., Gibbons E. N., Krysmann M. J., Kelarakis A., Burgaz E., Moore J., Yeates S., *Sci. Rep.*, **2021**, *11*(1), 1—14
- [21] Wu Y. H., Zhan Y., Xin W., Cao W. B., Li J. H., Chen M., Jiang X. F., Wang J. Y., Sun Z. G., *ACS Appl. Energy Mater.*, **2022**, *5*(2), 1781—1792
- [22] Li H., Ye S., Guo J. Q., Kong J. T., Song J., Kang Z. H., *J. Mater. Chem. C*, **2019**, *7*(34), 10605—10612
- [23] Wu W. Z., Wu X. Y., He M., Yuan X. L., Lai J. P., Sun H., *RSC Adv.*, **2021**, *11*(37), 22993—23001
- [24] Wang B. Y., Yu J. K., Sui L. Z., Zhu S. J., Tang Z. Y., Yang B., Lu S. Y., *Adv. Sci.*, **2021**, *8*(1), 2001453
- [25] Liu B., Chu B., Wang Y. L., Hu L. F., Hu S. L., Zhang X. H., *Green Chem.*, **2021**, *23*(1), 422—429
- [26] Wang K. J., Chen J. L., Li H. X., Zhang M. M., Liao Q. X., Wang L. T., Zhang Y. H., Niu X. H., *Ionics*, **2021**, *27*(11), 4907—4916
- [27] Chen Y. H., Zheng M. T., Xiao Y., Dong H. W., Zhang H. R., Zhuang J. L., Hu H., Lei B. F., Liu Y. L., *Adv. Mater.*, **2016**, *28*(2), 312—318
- [28] Wang H. J., Hou W. Y., Hao Y. W., Jiang W. S., Chen H. L., Zhang Q. Q., *Spectrochim. Acta A*, **2021**, *250*, 119340
- [29] Niu X. Q., Song T. B., Xiong H. M., *Chinese Chem. Lett.*, **2021**, *32*(6), 1953—1956
- [30] Esmacili M., Wu Z., Chen D., Singh A., Sonar P., Thiel D., Li Q., *Adv. Powder Technol.*, **2022**, *33*(5), 103560
- [31] Li F., Tang L., Liu Y., Shao J., *Opt. Mater.*, **2022**, *128*, 112356
- [32] Li F., Wang X., Liu W., Wang L. Q., Wang G. Y., *Opt. Mater.*, **2018**, *86*, 79—86

(Ed.: W, K, M)