

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.004

N-CQDs/PVDF-HFP 荧光压力传感器的制备及性能

章丽娜, 徐顺建

(湖州学院智能制造学院, 浙江湖州 313000)

摘要: 通过两步法策略开发了一种具有黄色荧光的高压电性能柔性压力传感器, 以解决氮掺杂碳量子点(N-CQDs)在压电聚合物中因聚集诱导猝灭而导致的压电性能下降问题。该传感器采用高孔隙率海绵状的聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)薄膜作为基体, 将N-CQDs所具有的亮黄色荧光成功引入到N-CQDs/PVDF-HFP压电复合薄膜。N-CQDs丰富的表面官能团通过提供更多活性位点, 使得N-CQDs表面的官能团与PVDF-HFP中的氟原子形成化学键, 更多的卷曲构象(TGTG')的 α 相转向为锯齿状构象(TTTT)的 β 相, 提升了PVDF-HFP的 β 相含量。多孔结构的N-CQDs/PVDF-HFP压电薄膜所构建的柔性压电传感器的灵敏度可达102.21 mV/N, 比纯PVDF-HFP薄膜提高了43.74%。其复合薄膜的压电输出电压与外部压力之间表现出良好的线性响应, 决定系数达0.996。基于N-CQDs/PVDF-HFP的柔性压电传感器具备紫外激发荧光、力-电响应、自供电等优势, 有望在能源转换和智能系统应用中展现出巨大潜力。

关键词: 氮掺杂碳量子点; 两步法; 压电; 压力传感器; 聚偏氟乙烯-六氟丙烯

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0025-07

Preparation and performance of N-CQDs/PVDF-HFP fluorescent pressure sensors

ZHANG Lina, XU Shunjian

(School of Intelligent Manufacturing, Huzhou College, Huzhou 313000, China)

Abstract : A high-voltage flexible pressure sensor with yellow fluorescence was developed by a two-step strategy to solve the problem of piezoelectric performance degradation caused by aggregation-induced quenching of nitrogen-doped carbon quantum dots (N-CQDs) in piezoelectric polymers. The sensor employs the porous and sponge-like polyvinylidene fluoride hexafluoropropylene (PVDF-HFP) film as the matrix, successfully incorporating the bright yellow fluorescence of N-CQDs into the N-CQDs/PVDF-HFP hybrid film. The abundant surface functional groups of N-CQDs provided more active sites, enabling the functional groups on the surface of N-CQDs to form chemical bonds with fluorine atoms in PVDF-HFP. This interaction promoted the transformation of the coiled (TGTG') α -phase into the planar all-trans (TTTT) β -phase, leading to a significant increase in the β -phase content of PVDF-HFP. The sensitivity of the flexible piezoelectric sensor constructed with porous N-CQDs/PVDF-HFP piezoelectric films can reach 102.21 mV/N, which is 43.74% higher than that of pure PVDF-HFP films. Furthermore, the composite film exhibits an excellent linear response between output voltage and external pressure, with the coefficient of determination reaching 0.996. It also displays superior mechanical stability and durability. Flexible piezoelectric sensors based on N-CQDs/PVDF-HFP have the advantages of UV-excited fluorescence, force-electric response, self-power supply, etc., which have great potential in energy conversion and intelligent system applications.

Keywords : nitrogen-doped carbon quantum dots ; two-step method ; piezoelectricity ; pressure sensor ; polyvinylidene fluoride-hexafluoropropylene copolymer

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y24E020055), 湖州市科技项目(2024GZ164), 湖州学院科研项目(2024HXKM03)

通信作者: 徐顺建, 博士研究生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能传感材料、绿色能源材料、新型碳材料

收稿日期: 2025-04-12

引用格式: 章丽娜, 徐顺建. N-CQDs/PVDF-HFP 荧光压力传感器的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 25-31.

ZHANG Lina, XU Shunjian. Preparation and performance of N-CQDs/PVDF-HFP fluorescent pressure sensors[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 25-31.

随着智能系统在日常生活领域的蓬勃发展,压力传感器凭借自供能、灵活性、多功能性及高分辨率等特性,日益成为各领域不可或缺的关键元件^[1-2]。依据传感原理的差异,压力传感器被细分为压电式、压阻式、电容式及摩擦电式等主要类型^[3]。其中,压电效应以其独特的自驱动能力而备受瞩目。尤其是基于聚偏二氟乙烯共聚物,如聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)、聚偏氟乙烯-三氟乙烯[P(VDF-TrFE)]等的自供电柔性压力传感器,在柔性机器人和可穿戴电子设备、多功能电子皮肤等传感领域展现出了广泛的应用前景。为了进一步提高PVDF-HFP的压电性能,已有研究通过拉伸、电场或热场极化、引入纳米颗粒等促进偶极子的有序排列,有效诱导PVDF-HFP的 α 相转变为 β 压电相^[4]。其中纳米颗粒诱导极化技术作为新兴的紧凑化设计技术,具有较高的兼容性,可在实验混合阶段通过引入纳米颗粒促进PVDF-HFP中 β 相的形成。较常见的纳米颗粒有炭黑、碳纳米管和碳量子点(CQDs)等,由于纳米颗粒表面的诱导活性位点与PVDF-HFP偶极子的界面相互反应,其表现出诱导极化效应^[5-6]。

CQDs具有优异的光致发光性能、良好的生物相容性和成熟的加工技术,在荧光标记和生物传感等领域取得了显著进展^[7-8]。其中,氮掺杂碳量子点(N-CQDs)可有效改变原本CQDs的电子结构,进一步增强了荧光性能和化学稳定性。蒋云霞等^[9]人利用N-CQDs与聚乙烯醇(PVA)基体混合,利用水热法制备了N-CQDs/PVA复合膜用于检测 Fe^{3+} 离子,同时N-CQDs/PVA复合膜的荧光性可实现重复利用。具有丰富官能团的N-CQDs提供了大量的诱导活性位点,有效增强了诱导极化效应,促使PVDF-HFP中 β 压电相形成,提高了PVDF-HFP的压电性能。然而,当N-CQDs应用于固态材料领域时,常出现严重的聚集诱导猝灭现象,这主要受制备工艺及基质环境的影响^[10-12]。传统的一步法,即将N-CQDs与基质材料如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、PVDF-HFP和琼脂糖/聚乙烯醇(agarose/PVA)直接混合,虽然操作简便,但往往难以有效避免新化学环境下N-CQDs的荧光猝灭问题。

受前期团队研究成果的启发,笔者采取了创新的两步法策略,以解决CQDs在PVDF-HFP中因聚集诱导猝灭而导致的性能下降问题。首先,通过非

溶剂诱导相分离技术,制备了具有高孔隙率的PVDF-HFP薄膜,其独特的微观结构为N-CQDs提供了良好的分散空间。随后,将N-CQDs通过旋涂的方式均匀分布于PVDF-HFP薄膜之上,经过溶剂挥发和热处理,成功制备出N-CQDs/PVDF-HFP压电复合薄膜,并组装为薄膜器件。探究了N-CQDs对复合薄膜器件压电性能和机械耐久性的影响,研究了模拟场景中薄膜器件的传感性能,为荧光压力传感器的制作与应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVDF-HFP:分子量400 000,分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

柠檬酸:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

尿素:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

超纯水:电阻率 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (25°C),上海雷磁实验室;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF):高纯级,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

丙酮:分析纯,无锡市晶科化工有限公司;

透析袋:MD 44,截留分子量1 000,江苏麦格生物科技有限公司;

氧化铟锡掺杂的聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN-ITO)导电薄膜:电阻 6Ω ,厚度 0.125 mm ,深圳华南湘城科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

反应釜:WF-50ml,威海自控反应釜有限公司;

鼓风干燥箱:DHG-9145A,上海一恒科学仪器有限公司;

匀胶机:kw-4a,北京赛德凯斯电子有限公司;

示波器:TBS 1000X SERIES,优利德科技(中国)股份有限公司;

步进电机:FSK30,成都福誉科技有限公司;

高精度显示控制器:GJBLS-WS,蚌埠高精传感系统工程有限公司;

紫外分析仪:WFH-204B,上海精密仪器仪表有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FE-SEM):Sigma 550,德国卡尔蔡司公司;

原子力显微镜(AFM):Shimadzu SPM-9600,日

本岛津制作所;

X射线衍射(XRD)仪:Bruker D8 advance,德国布鲁克公司;

荧光光谱仪:FLS980,英国爱丁堡仪器有限公司;

同步热分析仪:STA8000,美国珀金埃尔默有限公司。

1.3 样品制备

(1)N-CQDs的制备:以柠檬酸作为碳源,尿素作为氮源,通过水热法进行合成N-CQDs。在30 mL的DMF中加入3 g柠檬酸和6 g尿素,搅拌充分后将混合溶液倒入50 mL的聚四氟乙烯反应釜内,放入鼓风干燥箱,设置160 °C保温4 h。反应完全后,将反应釜内胆内的溶液进行抽滤。抽滤结束后,将所得溶液进行透析,时间为24 h。最后,所得N-CQDs进行干燥处理,室温条件下保存。

(2)PVDF-HFP溶液的配制:每0.6 g PVDF-HFP中,加入3 mL DMF,2 mL 丙酮,磁力搅拌2 h得到PVDF-HFP溶液。

(3)碳点水溶液的制备:将3 mg N-CQDs完全溶解在1 mL超纯水中形成碳点水溶液,并用棕色小瓶子保存。

(4)N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的制备:采用ITO-PEN导电薄膜作为衬底,首先将50 μ L PVDF-HFP溶液旋涂于ITO-PEN导电薄膜上,接着在其上方旋涂50 μ L碳点水溶液,室温静置30 min,等待溶剂挥发后,进行退火处理(120 °C, 1 h),得到N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜。利用螺旋测微器,测得N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的厚度为1 μ m。

(5)PVDF-HFP薄膜的制备:不旋涂碳点水溶液,其余步骤与N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜制备过程一致。

(6)N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜器件及PVDF-HFP薄膜器件的组制备:将N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜涂覆有N-CQDs/PVDF-HFP的面朝上放置,取另一片PEN-ITO导电薄膜朝下,错位覆盖在其上表面,两导电薄膜未覆盖的部分连接引线,形成三明治结构,最后用绝缘胶带封装。使用同样方式组装PVDF-HFP薄膜器件。

1.4 性能测试及表征

(1)荧光定性分析:利用紫外分析仪在254 nm和365 nm波长的紫外线照射下,观察N-CQDs溶液颜色变化。

(2)SEM表征:采用FE-SEM观察N-CQDs/PVDF-HFP的表面形貌,设置在10 μ m和2 μ m的标尺下拍摄其样品形貌。

(3)AFM表征:利用AFM观察N-CQDs/PVDF-HFP的表面结构。

(4)XRD分析:采用XRD对N-CQDs/PVDF-HFP的晶体结构进行表征,其中扫描范围设置在5°~90°,步长设置为0.02°,扫描速度为4°/min,其Cu-K α 的辐射射线波长为0.154 8 nm。

(5)光致发光(PL)光谱分析:通过荧光光谱仪测量N-CQDs/PVDF-HFP的PL发射强度,其中入射光狭缝宽度设置为0.5 nm,扫描速度设置为80 nm/s,变化波长200~500 nm激发。

(6)差热分析(DTA):利用同步热分析仪研究N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的热行为,设置测试温度在40~240 °C。

(7)压电性能测试:利用自组装压电信号采集系统测试了器件的压电性能,周期设置为1 s,选择交流模式。

2 结果与讨论

2.1 表征结果分析

图1为N-CQDs在254 nm和365 nm波长激发下的颜色对比。如图所示,在254 nm紫外线照射下,N-CQDs溶液由淡黄色变为高亮度的深黄色;在365 nm紫外线照射下,N-CQDs溶液由淡黄色变为高亮度的黄蓝色。说明N-CQDs具有较强的荧光,为之后开发荧光柔性压力传感器奠定了的基础。

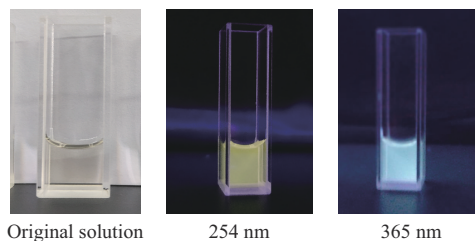


图1 N-CQDs在254 nm和365 nm波长激发下的颜色

Fig. 1 The color of N-CQDs when excited at wavelengths of 254 nm and 365 nm

PVDF-HFP具有独特的海绵状结构,这一结构使得N-CQDs可以均匀分布。图2为CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的微观形貌,如图所示,N-CQDs/PVDF-HFP的骨架薄,孔径分布为4~12 μ m,平均孔径为9.26 μ m。进一步说明基质具有较大的孔隙和纳米级的细长骨架。因此,PVDF-HFP基体的海绵状结构可以为N-CQDs提供有效的分散隔离支持,

从而扩大发光中心之间的距离,避免能量转移和聚集诱导猝灭现象^[14]。

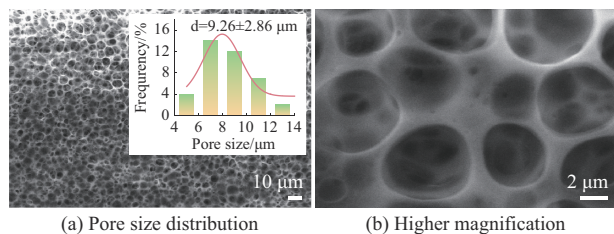


图2 CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的SEM图像

Fig. 2 SEM micrograph of N-CQDs/PVDF-HFP composite film

图3为CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的AFM图像,N-CQDs作为弥散相嵌入PVDF-HFP后,复合薄膜表面出现了许多纳米级的突起。推测纳米突起物可能为N-CQDs纳米颗粒,这一结构对荧光压电传感器具有增益作用。刚性N-CQDs团聚体作为应力传导点,将机械形变高效传递至PVDF-HFP压电相,有效提升压电性能。

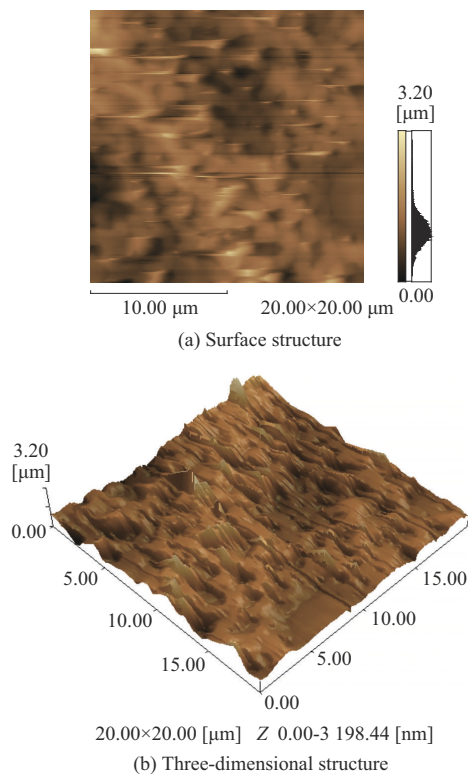


图3 CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的AFM图像

Fig. 3 AFM image of N-CQDs/PVDF-HFP composite film

N-CQDs在光吸收方面表现出色,主要集中在紫外区域,特别是在波长288 nm和350 nm处有两个明显的吸收峰值,分别与C=C段的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 转变和C=O键的 $n \rightarrow \pi^*$ 转变有关^[13]。根据N-CQDs的紫外吸收特性,可发现N-CQDs的最大激发波长为365 nm。

从图4中的PL发射光谱和强度可以发现,PVDF-HFP基质中的N-CQDs与纯溶液中的N-CQDs在相同的激发条件下具有相似的曲线轮廓。激发波长在365 nm时,PVDF-HFP基质中的N-CQDs与溶液中的N-CQDs的发射峰相比发生了蓝移,同时发射强度急剧增强。不难发现,混合薄膜中N-CQDs的发射强度比纯溶液的N-CQDs的发射强度高出1~1.5个数量级。

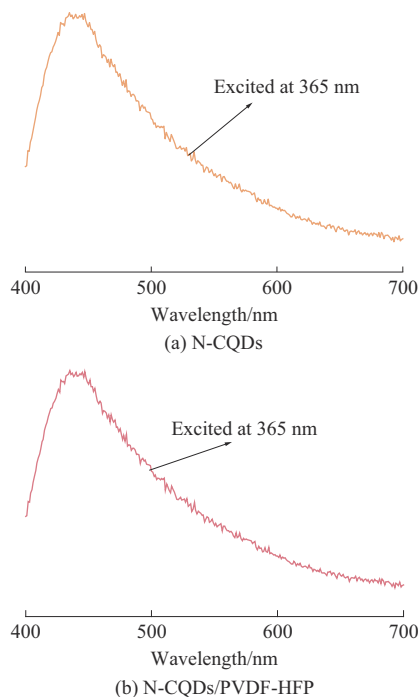


图4 在365 nm波长激发下试样的PL发射光谱

Fig. 4 PL emission spectra of the samples under 365 nm excitation.

为了进一步了解N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的晶体结构,对复合薄膜进行了XRD表征,所得结果如图5所示。PVDF-HFP的主要峰值出现在 $10^\circ \sim 25^\circ$ 范围内,位于 18° 的衍射峰归属于TG/TG' α 相的(020)晶面,而位于 20.5° 的衍射峰属于TTTT β 相的(110)和(200)晶面^[15]。由此可得N-CQDs作为弥散相

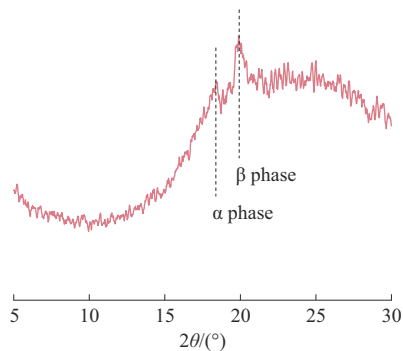


图5 N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的XRD图

Fig. 5 XRD pattern of N-CQDs/PVDF-HFP composite film

引入PVDF-HFP后,其 β 相结构没有发生明显的变化。

在两步法的制备过程中,设计DMF溶剂和ITO-PEN衬底的极性诱导产生的极化效应,以促进压电聚合物中 β 相的形成。同时,分散的N-CQDs表面的官能团通过与PVDF-HFP中的偶极(CH_2-CF_2)之间的氢键作用,成为诱导 β 相成核的活性位点,这一过程对于提高材料的压电性能至关重要。此外,在超过复合薄膜退火温度($120\text{ }^\circ\text{C}$)的条件下进行热处理,也有利于 β 相的形成。当复合薄膜从温度 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 以上开始冷却时,具有TGTG构象的 α 相将转变为TTTT'构象的 β 相^[16]。如图6所示,复合薄膜的相变临界温度(T_c)为 $105\text{ }^\circ\text{C}$,而熔化温度(T_m)为 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 。这一转变不仅提高了薄膜材料的压电性能,而且为开发高性能的荧光柔性压力传感器提供了坚实的基础。

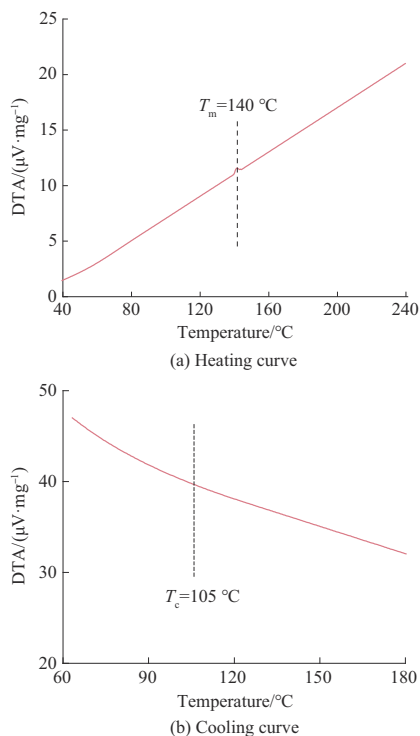


图6 N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的DTA曲线

Fig. 6 DTA curve of N-CQDs/PVDF-HFP composite film

2.2 N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜器件的压电性能

N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜优异的压电性能有利于提高预期器件的输出电压和灵敏度(S),由图7可知两种压电薄膜器件输出电压均随作用力的增加而逐渐增加,两者均呈良好的线性关系,其中复合薄膜器件曲线经Origin线性拟合所得的 R^2 值为0.996,纯PVDF-HFP薄膜器件曲线的 R^2 值为0.992。可以发现,随着作用力的增加,输出电压的差异更

加明显。当施加 20 N 左右的压力时,复合薄膜器件和纯PVDF-HFP复合薄膜器件的输出电压分别为 4.2 V 和 3.6 V ,输出电压提高了 0.17 倍。复合薄膜所具备的较高输出电压无疑有利于其在压电纳米发动机中的应用。同时,相应传感器的灵敏度($S=\Delta V/\Delta F$,其中 ΔV 为输出电压的变化量, ΔF 为所施加的力的变化量)从纯PVDF-HFP的 71.11 mV/N 提高到N-CQDs/PVDF-HFP的 102.21 mV/N ,即提高了 43.74% 。此外,如图8所示,复合薄膜器件具有良好的稳定性,在连续 $1\ 200\text{ s}$ 的周期重复施加相同的力作用下,其输出电压在 3.80 V 左右保持稳定。

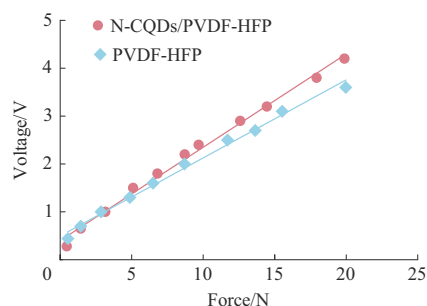


图7 PVDF-HFP薄膜器件和N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜器件的应力-电压曲线

Fig. 7 Force-voltage curves of PVDF-HFP thin-film device and N-CQDs/PVDF-HFP composite thin-film device

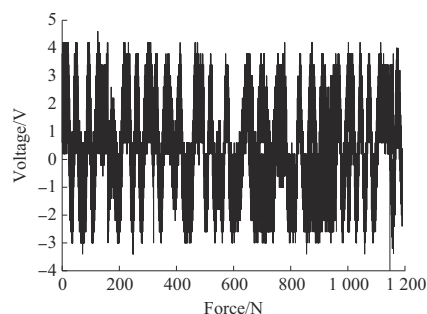


图8 N-CQDs/PVDF-HFP薄膜器件机械耐久性

Fig. 8 Mechanical durability of N-CQDs/PVDF-HFP thin-film device

2.3 N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜器件的应用

上述结果表明,使用N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜组装的器件可作为柔性压力传感器使用,且具有荧光。为了进一步探究N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜器件的实际应用,进行了5个模拟应用场景。第一个应用场景为人声的振动感知场景,如图9a所示,当人发出声音时,复合薄膜器件随着声音的强弱会产生电信号,其输出电压大小与声音强弱有着重要关系。第二,利用手机扬声器播放音乐所发出的声音对复合薄膜器件的传感应用进行了探索,由图9b可以发现音乐关停时其输出的电压也会随之

发生变化。第三个模拟场景是利用吹风机模拟的风能,其风力大小也会使复合薄膜器件所输出的电压有所变化,如图9c,说明器件在能量转换方面具有良好的可行性。第四个和第五个模拟场景主要用于人机交互领域。通过感知物体施压变化和持续弯曲变化,复合薄膜器件有相应的电压输出变化,具有高灵敏度,如图9d和9e所示。当人脚踏落在复合薄膜器件表面时,会产生强烈的电信号。而且脚踏重量的控制也会发现脚轻踏所输出的电信

号会比脚重踏所输出的电信号微弱,这表明该装置具有触觉感知和自动力特性。继而,当复合薄膜器件连续弯曲时,电压信号会不断输出,这意味着压力传感器不仅可以感知外部连续弯曲运动,还可以存储和利用少量产生的能量。因此,将复合薄膜组装的柔性压力传感器作为电子皮肤应用于智能机器人具有力电响应的触觉感知和能量转换的能力。此外。该复合材料的紫外激发荧光特性可以扩展光波化、荧光自我预警和荧光防伪等传感器的功能。

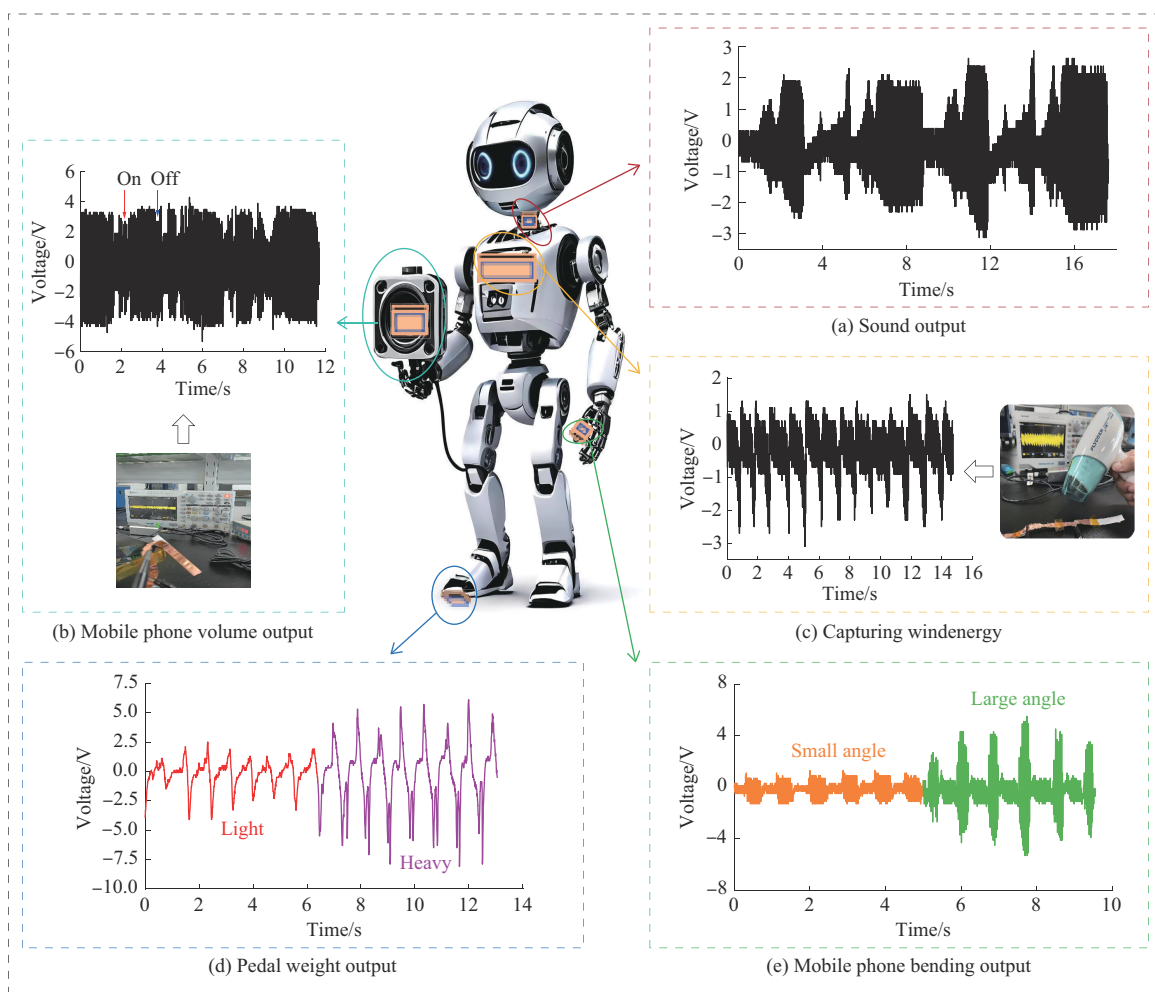


图9 基于荧光CQDs/PVDF-HFP压电混合薄膜的多功能压力传感器的应用场景

Fig. 9 Application scenarios of multifunctional pressure sensors based on fluorescent CQDs/PVDF-HFP piezoelectric hybrid films

3 结论

利用两步法策略使得N-CQDs作为弥散相在PVDF-HFP薄基质骨架高度分散,成功实现了N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的荧光和压电响应双功能耦合。N-CQDs表面丰富的官能团与PVDF-HFP中的氟原子形成化学键,使得更多(TGTG')的 α 相转向为(TTTT)的 β 相,有效提高了PVDF-HFP的压电性能。其所出现的诱导极化效应使复合薄膜的灵

敏度提高到了102.21 mV/N,相比于纯PVDF-HFP的灵敏度增加了43.74%。同时,N-CQDs/PVDF-HFP复合薄膜的受力和输出电压保持了良好的线性关系, R^2 值为0.996。制备的N-CQDs/PVDF-HFP荧光压力传感器,在触觉感知、自动力特性和捕获风能等方面具有巨大的应用潜力。

参考文献

- [1] SHI Z Y, MENG L X, SHI X L, et al. Morphological engineering

- of sensing materials for flexible pressure sensors and artificial intelligence applications[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1). DOI: 10.1007/s40820-022-00874-w.
- [2] MENG K Y, XIAO X, WEI W X, et al. Wearable pressure sensors for pulse wave monitoring[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(21). DOI:10.1002/adma.202109357.
- [3] 魏昌洲,唐霞,张韬,等.用于智能包装及物流监控的PVDF压电薄膜传感器研究[J].*传感技术学报*,2024,37(11):1 856–1 863.
- WEI Changzhou, TANG Xia, ZHANG Tao, et al. Research on PVDF piezoelectric thin film sensors for smart packaging and logistics monitoring[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2024, 37(11):1 856–1 863.
- [4] 麦忠海,徐玉亭,谢琪,等.聚偏氟乙烯 β 相形成的研究进展[J].*工程塑料应用*,2014,42(4):118–122.
- MAI Zhonghai, XU Yuting, XIE Qi, et al. Research advances in formation of β phase of PVDF[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(4):118–122.
- [5] 陈林,郭怡,黄欢,等.聚偏氟乙烯/酸化多壁碳纳米管复合材料的制备及性能[J].*工程塑料应用*,2019,47(1):38–43.
- CHEN Lin, GUO Yi, HUANG Huan, et al. Preparation and properties of PVDF/MWCNTs-COOH composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(1):38–43.
- [6] LIU Y, TONG W S, SONG W T, et al. Piezocatalytic performance enhancement using the sandwich structure of a PVDF-HFP/graphene film[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(8): 4 280–4 291.
- [7] KHAN M E, MOHAMMAD A, YOON T. State-of-the-art developments in carbon quantum dots (CQDs): Photo-catalysis, bio-imaging, and bio-sensing applications[J]. *Chemosphere*, 2022, 302. DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.134815.
- [8] WANG C J, YANG M, SHI H X, et al. Carbon quantum dots prepared by pyrolysis: Investigation of the luminescence mechanism and application as fluorescent probes[J]. *Dyes and Pigments*, 2022, 204. DOI:10.1016/j.dyepig.2022.110431.
- [9] 蒋云霞,王冠博,王彦霖,等.碳量子点/聚乙烯醇复合膜的制备及其荧光性能研究[J].*塑料科技*,2022,50(12):33–37.
- JIANG Yunxia, WANG Guanbo, WANG Yanlin, et al. Study on preparation and fluorescence properties of carbon quantum dots/polyvinyl alcohol composite membrane[J]. *Plastics Science and Technology*, 2022, 50(12):33–37.
- [10] ADSETTS J R, HOESTEREY S, GAO C J, et al. Electrochemiluminescence and photoluminescence of carbon quantum dots controlled by aggregation-induced emission, aggregation-caused quenching, and interfacial reactions[J]. *Langmuir*, 2020, 36(47): 14 432–14 442.
- [11] MOLAEI M J. Principles, mechanisms, and application of carbon quantum dots in sensors: A review[J]. *Analytical Methods*, 2020, 12(10):1 266–1 287.
- [12] 张艳萍,左胜利,刘建军,等.多色荧光碳点的溶剂回流合成及其复合高分子荧光薄膜的制备研究[J].*化学研究*,2018,29(3): 288–293.
- ZHANG Yanping, ZUO Shengli, LIU Jianjun, et al. Solvent refluxing synthesis of multicolor fluorescent CQDs and preparation of CQDs/polymer composite fluorescent films[J]. *Chemical Research*, 2018, 29(3):288–293.
- [13] XU A L, WANG G, LI Y Q, et al. Carbon-based quantum dots with solid-state photoluminescent: Mechanism, implementation, and application[J]. *Small*, 2020, 16(48). DOI: 10.1002/smll.202004621.
- [14] HUANG P, XU S J, ZHONG W, et al. Carbon quantum dots inducing formation of β phase in PVDF-HFP to improve the piezoelectric performance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 330. DOI:10.1016/j.sna.2021.112880.
- [15] 鲁忠孝,高国伟. PVDF压电复合材料及其应用的研究进展[J].*微纳电子技术*,2023,60(9):1 356–1 365.
- LU Zhongxiao, GAO Guowei. Research progress in PVDF piezoelectric composites and their applications[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(9):1 356–1 365.
- [16] 董莉,李向阳,杨宇明.利用碳量子点制备紫外线屏蔽PVDF复合薄膜[J].*工程塑料应用*,2020,48(3):125–129.
- DONG Li, LI Xiangyang, YANG Yuming. Preparation of UV shielding PVDF composite films using carbon quantum dots[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(3):125–129.