

·教育与教学·

## 前沿研究驱动的高分子综合性实验设计与实践 ——以可拉伸聚合物光伏电池的制备与表征为例

叶龙<sup>1,2\*</sup> 于梦琪<sup>1</sup> 韩德霞<sup>1</sup> 韩洋<sup>1,2</sup> 殷航<sup>3</sup> 贾慧珍<sup>1</sup> 马哲<sup>1</sup>

(天津大学 1. 材料科学与工程学院, 材料科学与工程国家级实验教学示范中心, 2. 智能传感功能材料  
全国重点实验室, 有机集成电路教育部重点实验室, 天津市分子光电科学重点实验室, 天津 300350;  
3. 山东大学物理学院, 物理国家级实验教学示范中心, 济南 250100)

**摘要:** 实验教学是高分子学科本科教学的核心环节, 将学科前沿知识与本科实验教学深度融合已成为高等教育改革的关键方向。柔性可拉伸电子技术作为颠覆性创新的前沿领域, 在服务国家战略需求、促进新质生产力发展及引领未来产业变革方面具有重大意义。本研究围绕可拉伸光伏电池开发了综合性的高分子科学实验教学方案。以廉价易得的共轭高分子材料——聚噻吩为研究对象, 通过热塑性弹性体物理共混的策略调控活性层形貌, 显著提升了光伏电池的拉伸性能, 成功制备出本征可拉伸聚合物光伏电池。综合实验设计基于多学科知识的交叉融合, 帮助学生系统掌握相关的理论知识与实验技能, 提高其综合运用专业知识的能力, 具有较高的推广应用价值, 为高分子专业的实验教学改革与实践提供了有益的探索和借鉴。

**关键词:** 高分子科学; 综合性实验; 聚合物光伏电池; 可拉伸电子; 教学改革

## Frontier-driven Comprehensive Experimental Design and Practice in Polymer Science:

### Taking Fabrication and Characterization of Stretchable Polymer Solar Cells as an Example

YE Long<sup>1,2\*</sup>, YU Meng-qi<sup>1</sup>, HAN De-xia<sup>1</sup>, HAN Yang<sup>1,2</sup>, YIN Hang<sup>3</sup>, JIA Hui-zhen<sup>1</sup>, MA Zhe<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, National Experimental Teaching Demonstration Center for Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Materials for Intelligent Sensing, Key Laboratory of Organic Integrated Circuits of the Ministry of Education, Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Science, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
3. School of Physics, National Experimental Teaching Demonstration Center for Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** The experimental course is a core component of undergraduate education in polymer science. The integration of cutting-edge knowledge and undergraduate experimental teaching has become a key direction in higher education reform. Flexible and stretchable electronics, as major disruptive innovations, are of significant importance in serving national strategic needs, promoting the development of new quality productivity, and leading the transformation of future industries. This study focuses on stretchable solar cells and designs a comprehensive experiment in polymer science. Using the low-cost conjugated polymer

2025-03-24 收稿, 2025-05-23 录用, 2025-07-16 网络出版

基金项目: 天津市杰出青年科学基金(基金号 23JCJQC00240), 天津大学中央教育教学改革专项经费

\* 通信联系人: 叶龙, E-mail: yelong@tju.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.25.088

material polythiophene as the research object, a thermoplastic elastomer physical blending strategy was adopted to modulate the morphology of the active layer, which significantly improved the stretch ability of solar cells. Accordingly, an intrinsically stretchable polymer solar cell was prepared. Based on the integration of multidisciplinary knowledge, the experiment helped students systematically master relevant theories and experimental skills, improving their ability to comprehensively apply professional knowledge. It holds great potential for broader applications and is well suited for experimental teaching reform and practice in polymer science programs.

**Keywords:** Polymer science; Comprehensive experiment; Polymer solar cells; Stretchable electronics; Teaching reform

**引用:** 叶龙, 于梦琪, 韩德霞, 韩洋, 殷航, 贾慧珍, 马哲. 前沿研究驱动的高分子综合性实验设计与实践: 以可拉伸聚合物光伏电池的制备与表征为例. 高分子通报, 2025, 38(9), 1439–1450.

**Citation:** Ye, L.; Yu, M. Q.; Han, D. X.; Han, Y.; Yin, H.; Jia, H. Z.; Ma, Z. Frontier-driven comprehensive experimental design and practice in polymer science: taking fabrication and characterization of stretchable polymer solar cells as an example. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(9), 1439–1450.

专业综合性实验在大学本科教学中扮演着至关重要的角色, 是培养学生专业实践能力的关键环节之一。这类实验注重实际操作与逻辑思维相结合, 帮助学生将理论知识应用于实践, 掌握实验技术与操作技能, 增强动手能力和实践经验。同时, 实验过程注重培养学生的批判性思维与创新能力, 提升独立分析与解决问题的能力<sup>[1]</sup>。综合性实验与理论教学相辅相成, 共同促进学生对专业知识的深入理解与灵活运用。

近年来, 柔性电子技术成为研究的热点<sup>[2]</sup>, 正深度融入国家战略布局。通过突破传统电子器件刚性束缚, 柔性电子技术广泛适用于智能纺织品、柔性电子产品以及可穿戴设备等多种场景<sup>[3]</sup>, 为生活、医疗、军工等领域注入了新动能, 助力赋能智能穿戴、重塑智慧医疗体系, 强化国防科技自主可控能力, 有望成为培育新质生产力、重构未来产业生态的核心驱动力。当前, 柔性电子技术的迅猛发展为可拉伸光伏电池提供了前所未有的创新契机。通过高分子材料和结构的优化设计<sup>[4]</sup>, 柔性可拉伸光伏电池已经取得了阶段性进展。更有研究证明通过引入具有高拉伸性的第三组分(如弹性体聚合物)或高分子量的缠结聚合物添加剂, 能够增强活性层的机械强度, 并在拉伸过程中实现功率输出的提升<sup>[5]</sup>。而柔性可拉伸光伏电池的进一步发展不仅推动新型光伏技术的突破, 更推动材料科学、智能制造等基础学科交叉融合, 助力国家在柔性电子产业国际竞争中抢占战略制高点, 为高质量发展提供核心科技支撑。

基于这一背景, 我们设计了一项高分子科学

综合性实验, 旨在将可拉伸光伏前沿技术引入实验教学中。通过热塑性弹性体与低成本聚噻吩材料物理共混的策略, 此项实验可实现可拉伸聚合物光伏电池的制备。实验训练不仅能帮助高分子专业本科生建立对可拉伸光伏电池的结构和工作原理的基础认知, 还能通过实验操作提高学生对科研常见测试与表征的了解。在实验结果的分析与处理环节, 进一步加强学生对高分子科学理论的理解和运用。此外, 实验中融入可持续发展的理念, 不仅让学生掌握专业知识和科研技能, 还引导他们深刻理解国家能源战略规划和柔性电子产业发展趋势。通过这样的综合性实验, 期望培养出既具备扎实专业技能, 又具备前瞻性思维的复合型科研人才。

## 1 教学设计

针对高分子材料相关专业大学本科三年级学生, 设计了综合性实验“可拉伸聚合物光伏电池的制备与表征”, 旨在培养学生的科研设计能力和实验操作能力, 同时提升综合素养与责任意识。实验为期2周, 总计48学时。实验设计思路与流程如图1所示。实验开始阶段, 教师通过背景介绍与仪器操作原理培训, 为学生打下理论与技术基础, 同时布置相关文献阅读。结合共轭高分子材料和聚合物光伏电池的发展历程<sup>[6–8]</sup>, 特别是我国老一辈科学家的奋斗经历, 激发学生的专业认同感与家国情怀。随后, 学生通过文献精读和自主查阅资料, 设计实验方案; 教师从资源配置、理论基础及技术可行性等方面进行评估与指导, 最终确定实验计

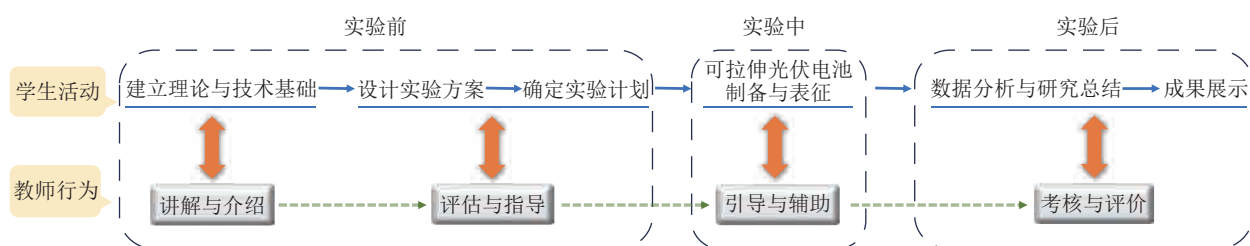


图1 高分子科学综合性实验的设计思路与流程

Figure 1 Design concept and process of comprehensive experiments in polymer science

划。学生在教师的引导下完成实验,掌握可拉伸光伏电池的制备与性能表征技术,深化对科研流程的理解,为后续实践与研究打下坚实基础。

实验以小组合作形式开展,每组由2~3名学生组成,内容包括5项主要任务:聚噻吩与弹性体基本性质表征、薄膜样品的制备与形貌表征、力学样品的制备与力学性能表征、本征可拉伸器件的制备与循环拉伸稳定性表征,以及可拉伸器件的应用展示。基本性质表征与形貌表征各6学时,其余任务安排12学时,涵盖实验设计、前期准备、实验实施、数据分析及研究总结的完整过程。通过全流程参与,学生能够掌握实验技能,强化科研流程理解,提升解决实际问题的能力,培养科研素养。

实验成绩考核分为4个部分:实验预习(20分),通过文献查阅和预习报告质量评估学生的准备情况;实验操作(30分),依据学生在实验中的规范性与独立操作能力评分;实验结果(25分),根据数据的准确性和完整性评分;分析讨论(25分),考察学生的实验结果分析能力与逻辑思维水平。综合评定全面衡量学生表现,确保课程目标达成,同时提升学生实验技能与科研综合能力。

## 2 实验设计

### 2.1 实验原理

实验开始前,教师将首先讲解可拉伸聚合物

光伏电池的结构及工作原理,为学生提供必要的理论基础。聚合物光伏电池的核心部分是位于阴极和阳极之间的光活性层,该层通常由高分子给体材料与非富勒烯受体材料组成。由于两电极之间存在功函数差异,形成内建电场,能够驱动载流子定向移动,从而产生光电流。在本实验中,我们采用本体异质结结构,通过将给体材料与受体材料溶解并混合,形成相分离的界面,以促进光生激子的解离。

性能评估将通过测试 $J-V$ 特性曲线进行,主要关注几个关键参数:开路电压( $V_{OC}$ )、短路电流( $J_{SC}$ )、填充因子(FF)和能量转换效率(PCE)。其中,PCE用于评价光伏电池对太阳光能量的利用效率; $V_{OC}$ 和 $J_{SC}$ 分别表示在光照条件下,电池能够提供的最大输出电压和最大输出电流;FF则反映了电池可提供的最大输出功率的能力。通过 $J-V$ 测试,学生将能够评估电池性能的优劣,分析影响电池性能的因素,为后续的研究和器件性能改进提供重要参考。

聚(3-己基噻吩)(P3HT)作为当前成本最低的共轭高分子给体材料,因其具有优良的光电性质而被广泛应用,其分子结构如图2(a)所示。然而,P3HT的刚性共轭骨架使得其在拉伸过程中容易发生断裂,尤其是与本征脆性的非富勒烯小分子受体共混时,力学性能难以满足可拉伸光伏器件

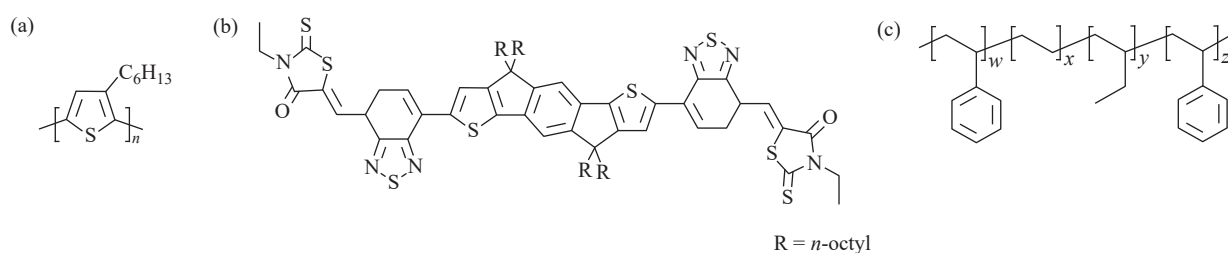


图2 (a)给体材料聚(3-己基噻吩)(P3HT)、(b)受体材料 O-IDTBR 和 (c)热塑性弹性体苯乙烯乙烯丁烯苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS) 的分子结构式

Figure 2 Molecular structural formulas of (a) donor material poly(3-hexylthiophene) (P3HT), (b) acceptor material O-IDTBR, and (c) thermoplastic elastomer SEBS

的需求。因此,本实验通过向P3HT与非富勒烯受体O-IDTBR(如图2(b)所示)组成的共混体系中引入低成本且具有优良力学性能的热塑性弹性体SEBS(如图2(c)所示),利用SEBS的弹性特性调控共混体系的聚集结构,从而有效改善力学性能。这一策略旨在提升可拉伸光伏电池的性能,并为可拉伸光伏器件的开发与应用提供理论依据与技术支持<sup>[9]</sup>。

## 2.2 实验目的

本实验旨在全面培养学生的实验操作能力、科研设计思维和团队协作能力,同时着重提升学生在高分子材料研究领域的数据分析与实际问题解决能力。通过系统学习与实验操作,学生将深入掌握材料分析方法,理解高分子物理理论的实际应用,从而增强分析和解决复杂问题的能力。实验内容涵盖聚合物光伏电池的工作原理及热塑性弹性体的性能特点,重点探讨热塑性弹性体的引入对光伏性能与力学性能的影响机制。此外,学生还将掌握可拉伸聚合物光伏电池的制备工艺,学习运用相关性能表征技术,从而能够对光伏电池的各项性能指标进行全面评估。

## 2.3 试剂与仪器

试剂: P3HT, 自制; O-IDTBR, 购自北京辰华远光科技有限公司, 99.9%; SEBS, 购自Sigma-Aldrich公司,  $M_w=1.18 \times 10^5$  g/mol; 聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT: PSS, 如图3a所示), 购自上海经年化工有限公司; 聚(9,9-双(3'-(N,N-二甲基)-N-乙基氨基丙基-2,7-芴)-alt-2,7-(9,9-二辛基芴))二溴化物(PFN-Br, 如图3b所示), 购自深圳睿讯光电材料科技有限公司, 99.0%; 1-氯萘, 购自Sigma-Aldrich公司, 99.9%; 氯仿, 购自北京恒欣研科技有限公司, 99.9%。

仪器: 热台(CMVC公司, 型号M-002H), 紫外-

臭氧清洗机(北京北科新仪科技有限公司, 型号CL1515), 匀胶机(中国科学院微电子研究所, 型号KW-4A), 台阶仪(德国Bruker公司, 型号Bruker Dektak 150), 原子力显微镜(德国Bruker公司, 型号Bruker Multimode 8), 透射电子显微镜(日本电子株式会社, 型号JEM-2100PLUS), Keithley 2400光源, Class AAA 太阳能模拟器(中国台湾光焱科技有限公司, 型号SS-F5-3A)。

## 2.4 实验步骤

每位学生选择2~3个不同热塑性弹性体的共混比例,并在小组内形成一个完整的共混比例梯度进行对比实验。实验前,学生需要根据相关资料和实验讲义,完成预习报告。实验开始时,教师将对实验的整体安排和基本原理进行详细介绍,并通过提问检查学生对实验原理的理解和掌握情况。接着,教师会评估学生的预习报告,确保预习充分、实验条件合理,并根据需要给予指导和调整。

在实验研究阶段,为系统考察聚噻吩半导体材料P3HT与热塑性弹性体SEBS的共混特性,首先采用示差扫描量热分析(DSC)和静态接触角测量技术对两相材料的基础物化性质进行表征。通过DSC测试定量测定材料的玻璃化转变温度( $T_g$ )及熔融焓( $\Delta H_m$ )等关键热力学参数,揭示复合体系的热稳定性与相变行为特征。进一步采用接触角测试仪,基于Young方程对SEBS/P3HT界面润湿性进行定量表征,通过计算表面自由能参数( $\gamma$ )评估两相材料的相容性。热分析数据与相容性参数的基础性质解析为后续SEBS调节共混活性层形貌结构提供了理论依据;在形貌样品的制备及表征阶段,每位学生将独立完成指定比例的共混薄膜制备。由于透射电子显微镜机时有限,教师将进行示范操作,并选择部分

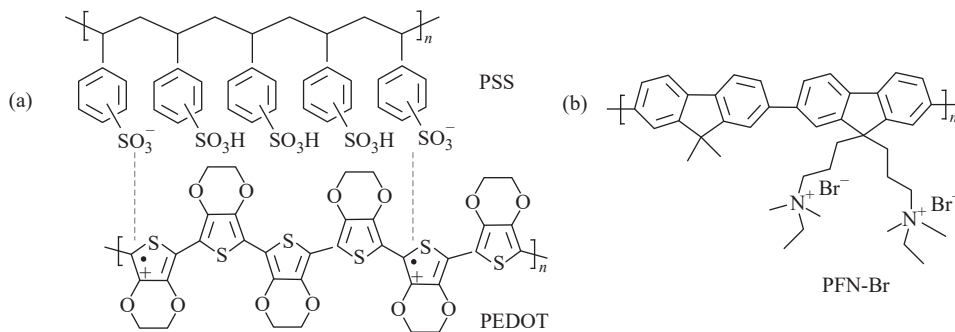


图3 (a)空穴传输层 PEDOT:PSS 结构式;(b)电子传输层 PFN-Br 结构式

Figure 3 (a) Structural formula of the hole transport layer PEDOT:PSS; (b) The electron transport layer PFN-Br

小组样品进行演示, 学生主要以观摩学习为主, 感兴趣的学生可在教师的指导下进行进一步操作。接下来, 在力学样品制备和性能表征部分, 学生需要掌握力学样品的制备方法, 并了解裂纹起始应变(COS)的方法, 从而掌握其力学性质, 并应用高分子物理知识进行分析。教师示范操作后, 学生将独立进行实验, 观察并记录各样品的相应参数。

基于前三部分的实验, 学生将独立完成可拉伸聚合物光伏电池的制备及性能测试, 并对器件的应用进行展示。实验报告中需要对小组内的实验数据进行对比分析, 并明确标注每位学生的实验数据。

#### 2.4.1 基础热性质表征与相容性表征

采用示差扫描量热仪(DSC, TA Instruments Q25)测试P3HT和SEBS的热性质, 具体操作流程如下: 分别称量4.50 mg P3HT和SEBS, 以质量浓度15 mg/mL溶于300  $\mu$ L氯仿中充分搅拌溶解后, 滴铸在干净的玻璃载玻片上, 并在真空中干燥过夜以去除残留溶剂, 剥离获得聚合物自支撑薄膜, 精确裁剪为(3.0 $\pm$ 0.2) mg样品并密封于标准铝制DSC坩埚内; 在氮气氛围下以10  $^{\circ}$ C/min速率从25  $^{\circ}$ C降温至-50  $^{\circ}$ C消除热历史, 随后以相同速率进行升温与降温过程, 记录第二次加热曲线用于分析玻璃化转变温度( $T_g$ )及熔融峰( $T_m$ ), 降温-升温循环重复3次以验证数据的可重复性。

采用悬滴法静态接触角测量系统(OCA25)对P3HT和SEBS薄膜的表面润湿特性进行定量分析。同上, 将P3HT和SEBS以质量浓度15 mg/mL溶于300  $\mu$ L氯仿中, 充分搅拌溶解后, 以3000 r/min转速在洁净ITO上旋涂30 s, 随后100  $^{\circ}$ C退火10 min; 通过高精度注射器分别在样品表面沉积3  $\mu$ L去离子水以及3  $\mu$ L乙二醇液滴, 使用高速相机实时记录液滴形态演化过程, 待液滴达到力学平衡后截取稳定图像; 每个样品平行测定5个不同位置以获取统计平均值, 并通过式(1)分别计算P3HT和SEBS的表面张力。

$$\gamma_L(1 + \cos\theta_L) = \frac{4\gamma_L^d\gamma^d}{\gamma_L^d + \gamma^d} + \frac{4\gamma_L^p\gamma^p}{\gamma_L^p + \gamma^p} \quad (1)$$

式中,  $\theta_L$ 为采用去离子水或乙二醇测试时样品的接触角,  $\gamma_L$ 为去离子水或乙二醇的表面张力,  $\gamma$ 为样品的表面张力, 等于色散分量 $\gamma^d$ 和极性分量 $\gamma^p$

的总和; 在公式(1)中分别代入去离子水和乙二醇的数据: 水的 $\gamma_L^d$ 为21.8 mN/m,  $\gamma_L^p$ 为51.0 mN/m; 乙二醇的 $\gamma_L^d$ 为29.0 mN/m,  $\gamma_L^p$ 为19.0 mN/m, 通过计算可以求得P3HT和SEBS的 $\gamma^d$ 和 $\gamma^p$ 。

#### 2.4.2 薄膜样品的制备与形貌表征

将给体P3HT与受体O-IDTBR按照质量比1:1的比例溶于氯仿中, 以45  $^{\circ}$ C、300 r/min搅拌4 h。将SEBS溶解于氯仿, 配制成质量浓度为10 mg/mL的溶液。按照设定的比例, 将SEBS添加到给、受体的混合溶液中, 配成总质量浓度为14 mg/mL的混合溶液。具体以SEBS质量分数为10%的混合溶液为例: 分别称量3.18 mg P3HT和3.18 mg O-IDTBR溶于436.4  $\mu$ L氯仿中, 随后移取提前溶解的10 mg/mL的SEBS溶液63.6  $\mu$ L加入上述混合溶液中。上述溶液中加入体积分数为2%的1-氯萘作为添加剂。玻璃片洗净吹干后UVO处理25 min, 修饰玻璃表面。处理后的ITO玻璃片上旋涂PEDOT: PSS (5000 r/min, 40 s), 然后在烘箱中150  $^{\circ}$ C退火20 min。退火后旋涂共混溶液(2000 r/min, 30 s)。最后, 使用热台在100  $^{\circ}$ C退火10 min。

原子力显微镜(AFM)测试采用轻敲模式, 选择薄膜样品的代表性区域进行扫描, 扫描速率为1 Hz; 对焦后, 拍摄样品表面的高度图和相图。透射电子显微镜(TEM)测试需将薄膜转移到铜网, 在透射电子显微镜中观察并记录图像。通过以上步骤, 可以全面表征共混薄膜的表面形貌、微观结构以及成分分布等关键信息, 为进一步的性能优化提供实验依据。

#### 2.4.3 可拉伸薄膜样品的制备与力学性能表征

该部分主要关注可拉伸样品的制备过程以及其力学性能的表征, 具体测试内容为裂纹起始应变(COS)的测试。

首先, 制备过程开始时, 选择2 mm厚的聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为基底, 将其固定在拉伸仪上。PDMS基底平整后, 将样品薄膜的一侧牢固地贴附在PDMS表面。接着, 将样品放入水中, 使牺牲层PSS溶解, 促使玻璃基底与样品分离。经过此步骤后, 使用洗耳球轻轻吹干薄膜, 并将其转移至偏光显微镜下进行观察。

在进行力学测试时, 样品逐步拉伸并同步观察薄膜表面的裂纹发展情况。每当出现裂纹时,

立即测量拉伸长度,并计算裂纹起始应变(COS)。通过拉伸至30%的应变,观察并记录薄膜的裂纹形态,进一步进行形态分析。这些裂纹形态的变化以及对应的应变数据,为后续力学性能优化提供了重要的参考。通过上述步骤,完成可拉伸样品的力学性能表征,为后续力学性能优化和可拉伸器件的开发提供参考。

#### 2.4.4 本征可拉伸器件的制备、测试及循环拉伸稳定性表征

基于上述共混体系,制备了TPU/改性PH1000/AI4083/P3HT: O-IDTBR:SEBS/PFN-Br/共晶镓铟(EGaIn)结构的本征可拉伸聚合物光伏电池,具体步骤如下:以10 mL的PH1000为例,向其中加入0.5 mL二甲基亚砷、0.2 mL乙二醇、0.05 mL 3-缩水甘油氧丙基三甲氧基硅烷和0.05 mL 氟碳非离子表面活性剂,搅拌过夜;将改性后的PH1000以1200 r/min的速率在经Plasma处理的热塑性聚氨酯基底上旋涂40 s,随后在100 °C下退火10 min;旋涂AI4083层,在4000 r/min下旋涂30 s,并在100 °C下退火10 min;将共混体系(活性层P3HT:O-IDTBR的质量比为1:1)用氯仿溶解,配置成总质量浓度为14 mg/mL的溶液,学生根据设计要求,在共混体系中添加不同比例的SEBS(按照给、受体材料质量之和的0%、5%、10%、30%、50%、100%添加),搅拌4~5 h后,加入体积分数为2%的添加剂1-氯萘,将上述共混溶液以3000 r/min在PEDOT: PSS层上旋涂30 s,100 °C下退火10 min;将质量浓度为1 mg/mL的PFN-Br的甲醇溶液在3000 r/min的转速下旋涂30 s;最后,使用共晶镓铟( $m(\text{GA}):m(\text{In}) = 3:1$ )合金沉积电极。

采用Keithley 2400光源和Class AAA太阳能模拟器,在AM 1.5 G, 100  $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下在氮气氛围手套箱中依次测量 $J-V$ 曲线。使用QE-R外量子效率测量系统测试器件的外量子效率;将可拉伸聚合物光伏电池在30%的应变下循环拉伸400次,分别测试其 $J-V$ 曲线,记录其效率变化;分别测试10% SEBS共混含量的可拉伸聚合物光伏电池在0、10%、20%、30%、40%及50%应变下的 $J-V$ 曲线,记录其效率变化。

#### 2.4.5 本征可拉伸器件的性能展示

最后,需要将制备的可拉伸器件经过一系列性能展示,以验证其在实际应用中的可行性与耐用

性。学生可以通过多样化的展示方式,全面体现这些器件的灵活性、机械稳定性以及在不同外部应力作用下的表现。例如,器件可以在不同的拉伸应变下进行工作测试,展示其在大幅度拉伸、弯曲等复杂机械负载下的稳定性和性能变化。此外,可以通过循环拉伸测试,评估器件在反复拉伸过程中的耐久性及其性能衰减情况,进一步确认其机械稳定性。通过这些展示,不仅能够展现可拉伸器件的结构强度和可靠性,还能够证明其在实际可穿戴设备、智能电子产品等领域中的应用潜力。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 基础热性质与相容性分析

图4为P3HT与SEBS的DSC测试结果。值得注意的是,两种材料的DSC曲线在测试温度范围内均未呈现显著的玻璃化转变特征台阶。对于P3HT,其在233 °C附近呈现明显的吸热熔融峰( $\Delta H=11.9 \text{ J/g}$ ),该特征峰的出现证实了材料中存在典型的半结晶性结构,这与聚噻吩主链的

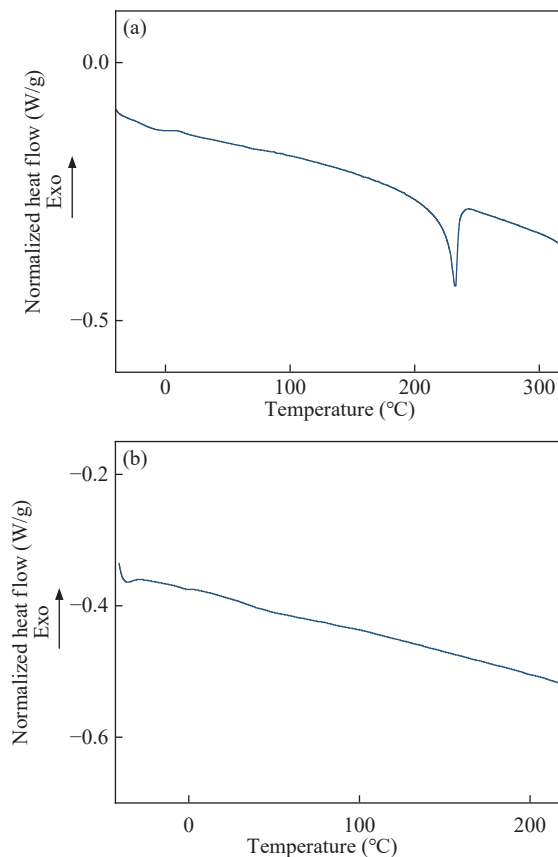


图4 P3HT (a) 和 SEBS (b) 样品的二次加热 DSC 曲线  
Figure 4 Second-heating DSC curves of P3HT (a) and SEBS (b) samples

刚性共轭骨架及烷基侧链的有序排列密切相关。相比之下, SEBS在整个扫描区间内未观察到明显的相转变峰, 这归因于其结构特性: 苯乙烯硬段形成的玻璃态微区与乙烯/丁烯软段的无定形区域相互制约, 抑制了长程有序晶格的形成, 导致该嵌段共聚物表现出典型的非晶态特征。上述热分析结果表明, DSC技术可有效表征P3HT的结晶特性与SEBS的非晶态本质, 为后续研究其共混相容性及相行为提供了重要的热力学参数依据。

P3HT与SEBS的接触角测试结果如图5所示。P3HT与SEBS的表面能参数表现出高度匹配性: P3HT的色散分量( $\gamma_d=15.8$  mN/m)与极性分量( $\gamma_p=4.0$  mN/m)与SEBS( $\gamma_d=15.4$  mN/m,  $\gamma_p=4.6$  mN/m)十分相近, 总表面能差值小于0.2 mN/m。通过界面张力公式计算:

$$\gamma_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - 2(\sqrt{\gamma_A^d \gamma_B^d} + \sqrt{\gamma_A^p \gamma_B^p}) \quad (2)$$

式中,  $\gamma_{AB}$ 为物质A和物质B的界面张力,  $\gamma_A$ 和 $\gamma_B$ 分别为物质A和B的表面张力。

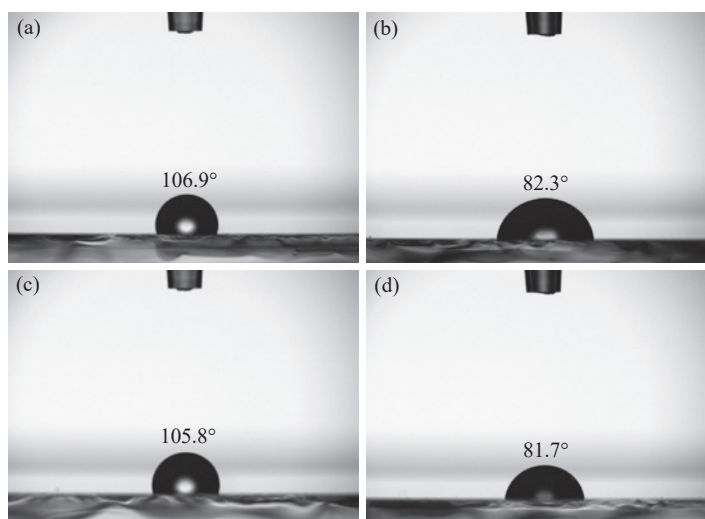


图5 P3HT薄膜的去离子水接触角(a)和乙二醇接触角(b)图像; SEBS薄膜的去离子水接触角(c)和乙二醇接触角(d)图像  
Figure 5 Water contact angle (a) and ethylene glycol contact angle (b) images of the top surface of P3HT film; Water contact angle (c) and ethylene glycol contact angle (d) images of the top surface of SEBS film

两相间界面张力约为0.02 mN/m, 这种表面能匹配特性预示共混体系具有优异的热力学相容性, 为通过热塑性弹性体与低成本聚噻吩材料物理共混的策略提供了理论依据。

### 3.2 薄膜形貌分析

本实验设计采用两种显微学技术对可拉伸共混薄膜的形貌进行测试。图6(a)展示了部分体系的AFM测试结果。可以观察到, SEBS主要分布在高度图像中较低的区域, 表明SEBS在共混体系中具有一定的聚集性。共混膜的均方根粗糙度 $R_q$ 分别为5.3 nm (未引入SEBS)和7.8 nm (引入5 wt% SEBS), 表明SEBS的引入显著增加了共混薄膜的表面粗糙度。

TEM进一步表征了共混膜的内部形态。如图6(b)所示, 随着SEBS含量的增加, 明亮区域的比例明显增大, 推测这些明亮区域代表了以SEBS为主体的相区, 而暗区则代表以P3HT: O-IDTBR为

主体的相区。可以总结出, 随着SEBS引入量的增加, 薄膜的相分离加剧, SEBS团聚现象增强, 且团聚体的体积增大, 这一趋势与AFM测试结果相一致。

### 3.3 力学性能分析

图7展示了通过FOE方法测量得到的P3HT: O-IDTBR: SEBS三元共混薄膜的力学性能测试结果。图7(a)显示了裂纹起始应变与SEBS物理共混量之间的关系。由图可知, 裂纹起始应变与SEBS的物理共混量呈正相关, 添加SEBS能够提升共混膜的拉伸性, 降低膜的刚度, 从而有效改善其力学性能。由图7(b)~7(d)可以看出, 纯P3HT: O-IDTBR膜在水中较为脆弱, 容易碎裂且变形性差; 而随着SEBS含量的增加, 共混薄膜的变形能力显著增强。特别是当SEBS物理共混量达到或超过30 wt%时, 预拉伸后的薄膜几乎没有出现褶皱, 说明其形变能力得到大幅提升。这一现象可归因于薄膜的COS较大, 使其不易产生褶

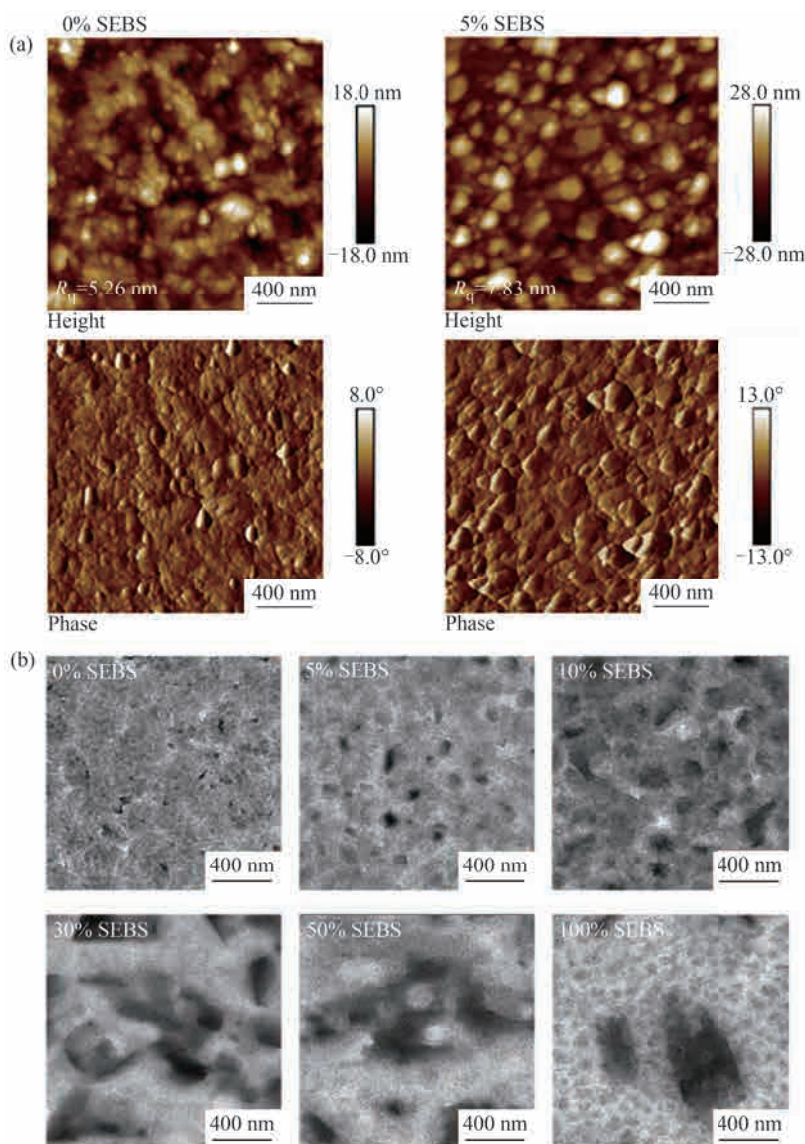


图6 (a)引入不同含量SEBS的P3HT:O-IDTBR:SEBS共混薄膜的AFM高度图和相图;(b)引入不同含量SEBS的P3HT:O-IDTBR:SEBS共混薄膜的TEM图像

Figure 6 (a) AFM height images and phase images and (b) TEM images of P3HT:O-IDTBR:SEBS blended films with different contents of SEBS introduced

皱或褶皱不明显。

### 3.4 可拉伸器件性能分析

制备的可拉伸聚合物光伏电池的结构如图8(a)所示。对其光伏性能的测试结果见图8(b),由图可知,随着SEBS含量的增加,器件的光伏性能呈下降趋势。具体而言, $PCE$ 和 $J_{sc}$ 随SEBS含量的增加不断降低,而 $V_{oc}$ 和FF则不发生明显变化。这表明,短路电流密度的下降是导致器件整体效率降低的主要原因。短路电流密度受活性层的光吸收能力和电荷迁移率影响。结合形貌表征结果分析可知,随着SEBS共混含量的增加,活性层内的相分离程度提高,使得共轭给受体材料的连续相分布遭

到破坏,从而降低了电荷的迁移率。同时,SEBS的掺入相当于稀释了活性层中的共轭组分,导致光吸收能力减弱。因此,随着SEBS含量的增加,器件的光生载流子产生效率下降,进而影响短路电流密度和整体光伏性能。这一结果可以通过外量子效率(EQE)的表征进一步验证,如图8(c)所示。随着SEBS含量的增加,EQE光谱整体下降,表明活性层对光的吸收能力降低,从而导致器件短路电流的降低。

为了评估上述热塑性弹性体调控的共混薄膜在可拉伸电子应用中的潜力,进一步对可拉伸器件的机械性能进行了表征。综合形貌表征、力学

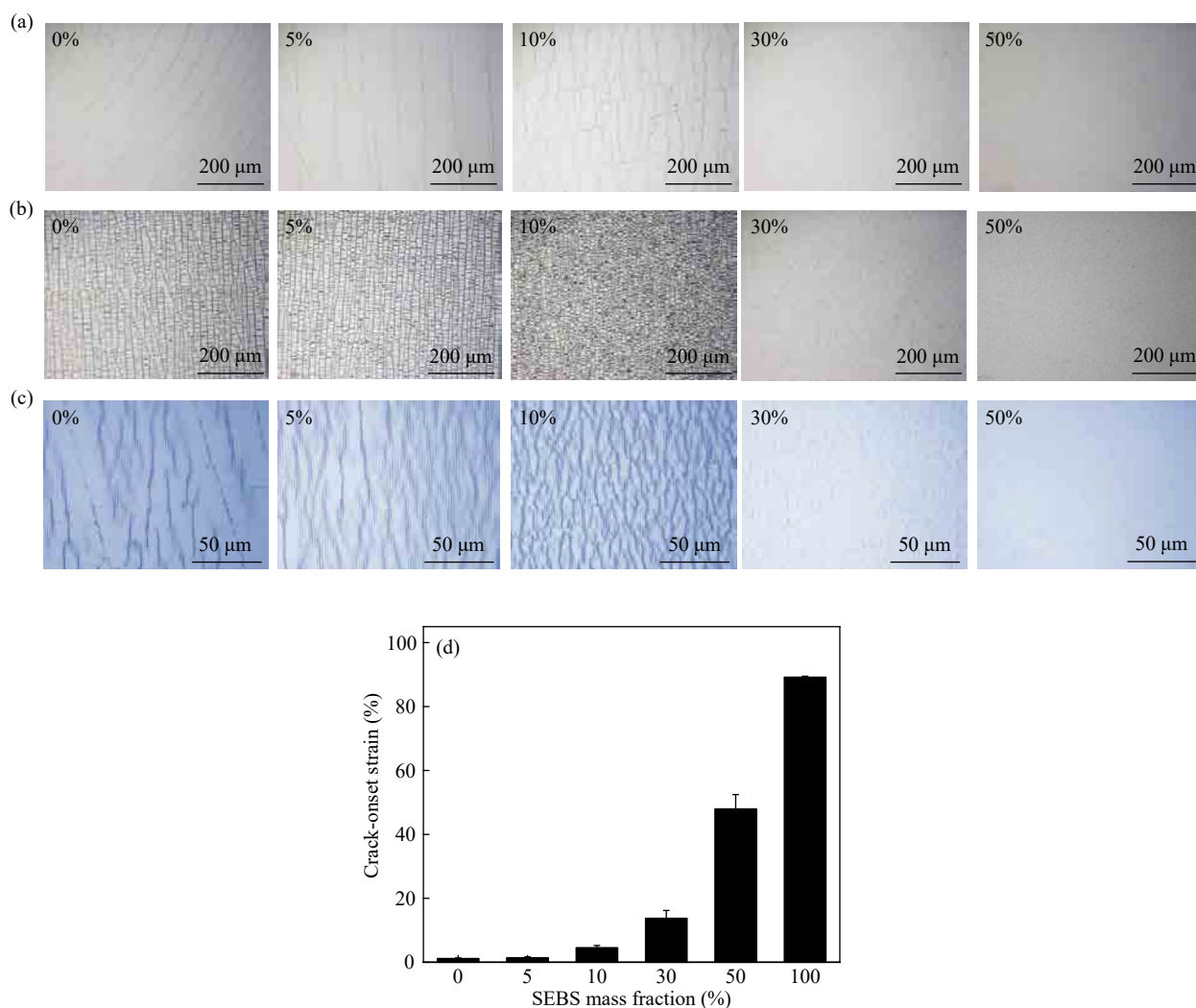


图7 由FOE测得的P3HT:O-IDTBR:SEBS三元共混薄膜的力学性能数据:(a)裂纹起始图像;(b)30%应变下的图像;(c)预拉伸5%后恢复原长的褶皱图像;(d)裂纹起始应变

**Figure 7** Mechanical property of P3HT:O-IDTBR:SEBS ternary blend films measured by FOE: (a) Crack initiation image; (b) Image at 30% strain; (c) Pre-stretch by 5% and then restore the wrinkled image of the original length; (d) Crack initiation strain

表征与光电性能表征结果,当引入SEBS的质量分数为10%时,SEBS在共混薄膜中分布较为均匀,且共混薄膜的模量得到了有效降低,光电性能保持在未引入SEBS体系的70%,因此选择SEBS共混含量10%的体系进行循环拉伸测试和应变-效率关系测试,结果如图8(d)和8(e)所示,器件在30%应变下经历400次循环拉伸-释放后仍能保持较高的光电转换效率。此外,对不同应变条件下的器件效率进行测试发现,随着应变的增加,器件效率下降较为缓慢,即使在50%应变下,仍能保持原始效率的50%以上,展现出较为优异的机械稳定性。

### 3.5 可拉伸器件在多场景下的功能展示

最后,学生可选择多样的方式对制备的器件进行成品展示。如图9所示,可拉伸器件可以贴合人体皮肤,在扭曲、弯折和拉伸等变形操作下不会失效,表明该可拉伸器件具有较好的柔韧性和机械稳定性。

综上可知,在P3HT:O-IDTBR体系中引入SEBS可有效提升器件的拉伸性能,同时保持较高的光伏转换效率。通过进一步优化加工工艺和调控薄膜形貌,有望获得兼具高能量转换效率和优异力学性能的低成本、可商业化的可拉伸聚合物光伏电池。

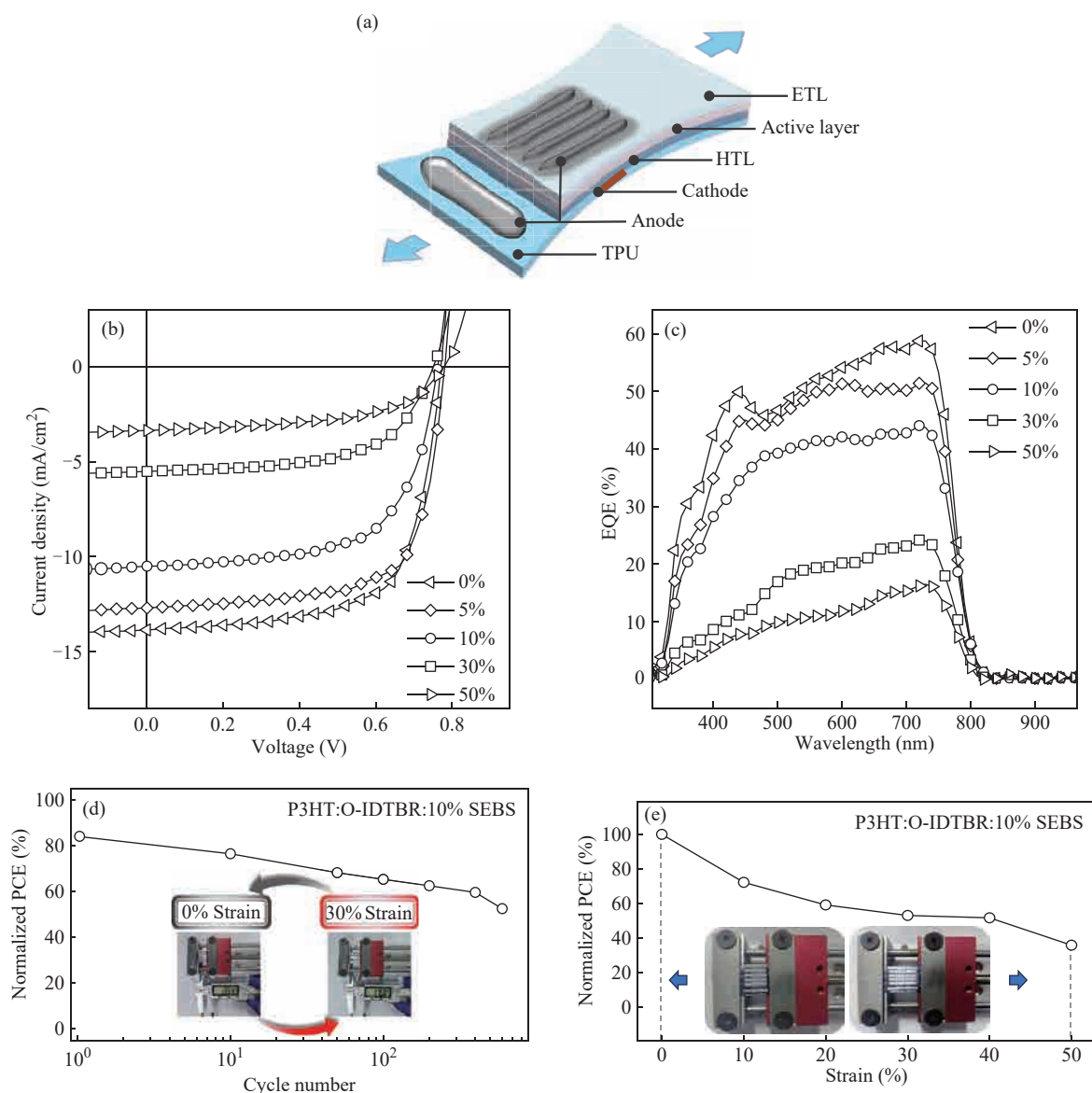


图8 本征可拉伸聚合物光伏电池的器件性能分析:(a)器件结构示意图;(b)  $J$ - $V$  曲线;(c)外量子效率曲线;(d) 5% SEBS 共混含量下的可拉伸聚合物光伏电池在30%应变下的循环拉伸稳定性;(e)不同应变条件下的器件效率变化关系。测试在 AM 1.5 G  $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  辐照下进行

**Figure 8** Device performance analysis of intrinsically stretchable polymer photovoltaic cells: (a) schematic diagram of device structure; (b)  $J$ - $V$  curves, (c) external quantum efficiency curves; (d) cyclic tensile stability of stretchable polymer photovoltaic cells with 10% SEBS blend content at 30% strain; (e) relationship of device efficiency variation under different strain conditions. The tests are performed under AM 1.5 G  $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  irradiation

#### 4 教学效果与反馈

本实验将可拉伸聚合物光伏技术这一前沿课题融入本科生实验教学,充分挖掘高分子材料在柔性电子领域教学的潜力。通过小组合作形式,学生完成了从资料调研、方案设计到制备研究的实践活动,构建了涵盖高分子材料物性测试、器件制备、性能表征及实际应用的完整实验链条。教学全过

程融入课程思政和“双碳”理念,实现理论知识与实践应用的深度融合,强化学生的科学思维能力,同时注重团队协作和实践创新能力的培养。

为了科学评估教学效果,针对修读该课程的高分子材料科学与工程专业的学生的实验结果进行了系统的统计与分析。截至目前,顺利完成该综合性研究实验的学生已超过30名。依据学生最终提交的实验报告结果统计,学生所制备的基于

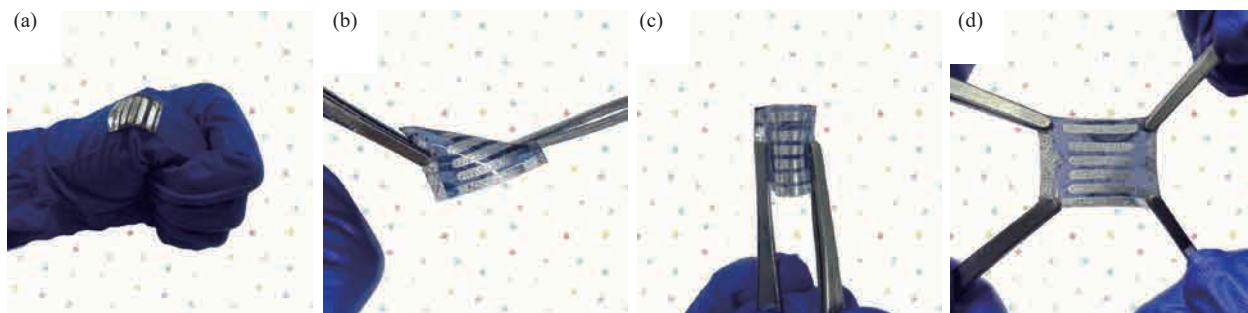


图9 本征可拉伸聚合物光伏电池的柔性应用展示:(a)贴合人体皮肤的实际应用示意图;(b)扭曲状态下的器件演示;(c)弯折状态下的器件演示;(d)在多轴拉伸状态下的器件演示

**Figure 9** Flexible application demonstration of intrinsically stretchable polymer photovoltaic cells: (a) schematic diagram of practical application that conforms to human skin; (b) demonstration of the device in the distorted state; (c) demonstration of the device in the bent state; (d) device demonstration in the multi-axial stretching state

TPU/改性PH1000/AI4083/P3HT:O-IDTBR:SEBS/PFN-Br/共晶镓铟(EGaIn)结构的本征可拉伸聚合物光伏电池,其最高效率达到了5.52%(SEBS共混含量为10%),平均效率为 $(4.8 \pm 0.6)\%$ 。值得注意的是,超过85%的学生所制备的光伏电池效率能够达到4%以上。在应变-效率关系测试中,超过60%的学生所制备的电池在50%应变条件下,能够保持原始效率的50%;其余学生所制备的电池也可以保持原始效率的30%。并且,学生们能够结合实验的背景知识,对实验结果进行细致的分析。

综合这些统计结果可以表明,学生们能够充分掌握实验的核心内容,并且具备对实验知识进行有效理解与灵活运用的能力。

经过3年的教学实践,本团队通过座谈和调查问卷等形式对高分子材料科学与工程专业的学生的学习成效进行了追踪分析。结果显示,该课程改革取得了显著成效:90%的学生认为在专业课程中引入综合性实验,不仅激发了学习兴趣,还增强了对专业的认同感。理论讲解与实践操作的结合,有助于深化对共轭高分子材料的理解,同时培养精益求精的工匠精神和团队协作能力;95%的学生表示,实验教学显著提升了他们对“双碳”理念的认知,更加明确光电功能高分子材料在实现“双碳”目标中的关键作用。

此外,该教学改革的成果也在学生的科研实践中得到了直接体现。参与实验的本科生以第一作者身份发表相关论文3篇<sup>[10-12]</sup>,其中1名学生荣获英国皇家化学会JMC-ABC十周年研讨会优秀墙报奖。本科毕业生大多继续深造,选择复旦大学、浙江大学、同济大学、天津大学等高校攻读

研究生,并专注于柔性电子方向。综上,该综合性实验不仅提升了学生的专业能力,还培养了其社会责任感和创新实践素养,为“双碳”目标下的科技人才培养提供了参考范例。

## 5 结语

以高分子科学的研究前沿为依托,将共轭高分子材料及其在可拉伸光伏电池中的应用引入本科生实验教学,同时融入思政教育,贯彻可持续发展理念。实验设计基于低成本聚噻吩光伏体系,通过引入热塑性弹性体,有效调控活性层薄膜的形貌,从而显著改善其力学性能,为实现高性能可拉伸聚合物光伏电池提供了可行路径。

实验内容融合了有机高分子材料基础、高分子物理、材料分析方法、材料力学性能及有机光电材料等多门专业课程,构建了跨学科的实验教学体系,不仅可以帮助学生巩固专业知识体系,还激发其科研兴趣与创新思维。实验教学坚持“学-思-践”一体化模式,通过理论讲解、实验操作与数据分析的有机结合,使学生在掌握实验技能的同时,深化对高分子材料前沿发展及其工程应用的理解,培养其解决复杂工程问题的能力。

此外,实验特别强调绿色化学理念和可持续发展意识的培养,使学生在科研实践中树立环保意识,契合全球柔性电子技术的快速发展趋势。整体而言,实验不仅为学生提供了接触学科前沿的机会,还有效提升了其跨学科整合能力、问题解决能力及创新实践素养,为“双碳”目标下的科技人才培养奠定了基础。

## 参考文献

- 1 战艳虎, 李光, 王双双, 李艳凯, 李玉超, 邓爱霞, 谢倩. 基于工程教育认证和科教融合的《高分子物理实验》教学改革. *高分子通报*, **2023**, 36(6), 764–768.
- 2 Bae, Y.; Kim, D.; Li, S. M.; Choi, Y.; Son, S. Y.; Park, T.; Ye, L. Stability of intrinsically stretchable polymer photovoltaics: fundamentals, achievements, and perspectives. *Prog. Polym. Sci.*, **2024**, 159, 101899.
- 3 吴小玲, 杜淼, 李水兴, 陈红征. 柔性电子器件: 想见未来生活方式. *高分子通报*, **2024**, 37(1), 1–11.
- 4 Khasbaatar, A.; Xu, Z.; Lee, J. H.; Campillo-Alvarado, G.; Hwang, C.; Onusaitis, B. N.; Diao, Y. From solution to thin film: molecular assembly of  $\pi$ -conjugated systems and impact on (opto)electronic properties. *Chem. Rev.*, **2023**, 123(13), 8395–8487.
- 5 Li, S. M.; Liu, J. W.; Kuvondikov, V.; Yan, J. Y.; Ye, L. Organic photovoltaics generate more power under stretching. *Matter*, **2025**, 8(4), 102062.
- 6 李永舫. 从导电聚吡咯到共轭聚合物光伏材料: 我在中科院化学所30年共轭高分子研究历程. *高分子通报*, **2016**, (9), 10–26.
- 7 王思怡, 钟文楷, 黄飞. 可拉伸高分子光电器件的研究进展. *高分子学报*, **2024**, 55(9), 1091–1110.
- 8 李伟伟. 高分子物理教学与共轭高分子前沿研究的融合探索. *高分子通报*, **2024**, 37(7), 979–987.
- 9 Li, S. M.; Gao, M. Y.; Zhou, K. K.; Li, X.; Xian, K. H.; Zhao, W. C.; Chen, Y.; He, C. Y.; Ye, L. Achieving record-high stretchability and mechanical stability in organic photovoltaic blends with a dilute-absorber strategy. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(8), 2307278.
- 10 Wu, J. J.; Gao, Y. P.; Zhou, Z. H.; Du, Y. H.; Liu, J. W.; Wang, J. J.; Wang, Q.; Zhou, K. K.; Xian, K. H.; Lin, Z. J.; Chen, Y.; Zhao, W. C.; Li, S. S.; Kuvondikov, V.; Yin, H.; Yan, J. Y.; Liu, Y. S.; Ye, L. Constructing high-performance solar cells and photodetectors with a doping-free polythiophene hole transport material. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(1), 2308584.
- 11 孙冰, 李赛萌, 周康康, 彭忠祥, 叶龙. 有机光伏薄膜的力学性能调控与预测. *高等学校化学学报*, **2023**, 44(9), 48–56.
- 12 Feng, J. T.; Sun, C. L.; Li, S. M.; Ye, L. Advancing the dynamic mechanical analysis of organic semiconductor materials. *Chem. Commun.*, **2024**, 60(78), 10795–10804.