

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.004

固-固相变聚氨酯基储热材料的制备及光热性能

徐瑾歌, 谭蕉君, 宋顺喜, 张美云, 陈瑛奇, 舒管沛

(陕西科技大学轻工科学与工程学院, 西安 710021)

摘要: 固-液相变材料可通过储存和释放潜热来提升热能利用率,在废热回收、温度调节、建筑保温等领域具有广阔的应用前景。然而,固-液相变材料的单一热量来源和泄漏问题限制了其广泛应用。为克服上述不足,以聚乙二醇(PEG)为软段单体、异佛尔酮二异氰酸酯为硬段、丁二醇和三羟甲基丙烷三巯基丙酸酯为扩链剂和交联剂,制备了固-固相变聚氨酯材料,将PEG基固-液相变材料转化为固-固相变聚氨酯基材料(SSPU)。研究了不同分子量的PEG、柔性组分对SSPU结构、力学性能和储热能力的影响,并引入光热染料(IR780)赋予SSPU光热转换能力,拓展其能量来源。结果表明,SSPU不仅保留了PEG的结晶能力和潜热吸收能力,且具有无泄漏风险、高热焓(122.1 J/g)、高热稳定性(热分解温度超过350℃)、循环稳定性好(循环热焓无衰减)、可变形、可循环再加工等优势。引入IR780后,SSPU表现出优异的光热转换、温度调控和循环稳定性,有望用于太阳能利用和热管理应用领域。

关键词: 固-固相变;聚氨酯;热管理;光热转换;无泄漏

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0023-08

Preparation and photothermal properties of solid-solid phase change polyurethane-based heat-storage materials

XU Jing, TAN Jiaojun, SONG Shunxi, ZHANG Meiyun, CHEN Yingqi, SHU Guanrui

(College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract : Solid-liquid phase change materials enhance thermal management and utilization by storing and releasing latent heat, offering significant potential in waste heat recovery, temperature control, and building insulation. However, challenges such as leakage and dependency on a single heat source have hindered their widespread adoption. To address these challenges, a solid-solid phase change polyurethane incorporating polyethylene glycol (PEG) was developed as the soft segment monomer, isophorone diisocyanate for the hard segment, and butanediol and trimethylolpropane tris (mercapto)-propionate as chain extenders and crosslinkers, thereby converting solid-liquid phase change PEG into solid-solid phase change polyurethane-based materials (SSPU). The effects of PEG with different molecular weights and flexible components on the structure, mechanical and heat storage capacity of the SSPU were investigated. A photothermal dye (IR780) was also incorporated to endow SSPU with photothermal conversion capabilities. The results show that SSPU retains the crystallization ability of PEG, exhibiting advantages such as no leakage risk, high latent heat (122.1 J/g), high thermal stability (temperature of thermal decomposition exceeds 350 °C), good cycling stability (no enthalpy deterioration during cyclic tests), high flexibility and re-processability. After introducing the IR780, the SSPU demonstrates excellent photothermal conversion, temperature regulation, and cycling stability, making it promising for applications in solar energy utilization and thermal management.

Keywords : solid-solid phase change ; polyurethane ; thermal management ; photo-thermal conversion ; no leakage

能源是现代社会发展和经济增长的支柱。目前,热能占全球能源消耗的50%以上,也是能源损失的主要形式之一^[1-2]。热能存储技术通过储存热能和按需释放,解决热能供需在时间、空间或强度

基金项目: 国家自然科学基金项目(51903142),陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBGY-474),广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室开放基金资助项目(KF201904)

通信作者: 谭蕉君,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为高性能纸基材料、热管理材料

收稿日期: 2024-12-03

引用格式: 徐瑾歌,谭蕉君,宋顺喜,等.固-固相变聚氨酯基储热材料的制备及光热性能[J].工程塑料应用,2025,53(1):23-30.

XU Jing, TAN Jiaojun, SONG Shunxi, et al. Preparation and photothermal properties of solid-solid phase change polyurethane-based heat-storage materials[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 23-30.

的不匹配,最大限度地提高热能利用效率,得到了广泛关注^[3-6]。相变材料可在接近恒温相变过程中储存和释放大热量,从而实现热管理和热能利用率的提升^[4,7]。同时,相变材料具有高储能密度、温度恒定及可逆性等优点,在电力移峰填谷、太阳能利用、废热回收、温度调节、建筑保温、电池热管理等领域表现出巨大的应用潜力^[8]。

相变储能材料包括无机、有机、有机-无机复合材料三大类。无机相变材料导热系数大、价格便宜,但存在过冷度高、腐蚀性强的缺陷。与无机相变材料相比,有机相变储能材料可以通过固-液、固-固相变两种方式储存、释放能量,具有过冷度低、稳定性好、腐蚀性小、温度可调控等优点,成为近年来相变储能领域的研究热点^[9]。聚乙二醇(PEG)是一种常用有机固-液相变材料,具有高相变焓(60~190 J/g)、可调相变温度(30~65 °C)、生物惰性和无毒等优点,是建筑保温和织物温度调控的理想选择^[10-12]。值得注意的是,PEG相变材料仍存在以下挑战:(1)固-液相变材料相变过程中存在相变泄漏、力学性能下降的缺点;(2)能量来源相对单一,对间歇性太阳能、风能等清洁能源利用不足。因此,防止相变泄漏、拓展能量来源对PEG基相变材料具有重要意义^[13]。

针对上述问题,笔者以PEG为聚氨酯软段单体,利用PEG末端羟基与异氰酸酯反应形成预聚体,进一步通过1,4-丁二醇(BD)、三羟甲基丙烷三巯基丙酸酯(TMMP)进行扩链得到聚氨酯,即利用聚氨酯分子链对PEG链段进行束缚和限域,将PEG基固-液相变材料转化为固-固相变聚氨酯基材料(SSPU)。研究了不同PEG分子量、材料组分对SSPU结构、力学性能、储热能力的影响,同时引入红外染料赋予相变材料光热转换能力。制得的SSPU具有高热焓、无泄漏、形状稳定、可再加工的优点,同时具备光热转化和太阳能利用潜力,在建筑节能、太阳能利用等领域具有广阔的应用前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PEG:相对分子量为2 000,4 000,6 000,上海Adamas试剂有限公司;

异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),BD,2,2'-二羟甲基丙酸(DMPA):纯度99%,上海Adamas试剂有限公司;

二月桂酸二丁基锡(DBTDL),TMMP:纯度95%,上海Adamas试剂有限公司;

聚丙二醇(PPG):相对分子量为1 000,上海Adamas试剂有限公司;

三乙胺(TEA):纯度99.5%,上海Adamas试剂有限公司;

红外染料(NIR-780 碘):纯度98%,上海Adamas试剂有限公司;

2-丁酮(MEK):纯度99%,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Vertex-70,德国Bruker公司;

X射线衍射(XRD)仪:D8 Advance,德国Bruker公司;

万能试验机:WDW-005,山东万辰试验机有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC Q2000,美国TA公司;

热重(TG)分析仪:STA7200RV,日本日立公司;

偏光显微镜:Axio Scope A1,德国Zeiss公司;

红外线灯泡:100 W,R95E,深圳安宏达光电有限公司;

远红外成像仪:FL-IR i7,美国FL-IR System OÜ公司。

1.3 SSPU的制备

以PEG 4000为例介绍SSPU的制备过程。首先,将PEG 4000在120 °C真空烘箱中真空干燥3 h,除去水分。其次,称取除去水分后的PEG 4000(40 g,10 mmol),IPDI(4.44 g,20 mmol)和催化剂DBTDL(0.1 g)加入装有搅拌的三口烧瓶中,在80 °C下连续预聚4 h后,得到预聚物。随后,向三口瓶中加入BD(0.81 g,9 mmol),TMMP(0.4 g,1 mmol)和稀释剂丁酮MEK(40 mL),在80 °C下继续聚合3 h,完成扩链过程。最后,减压蒸发MEK,得到SSPU,记为SSPU-4K。

以PEG 2000和PEG 6000为二元醇制备SSPU的过程类似,控制PEG:IPDI:BD:TMMP物质的量比1:2:0.9:0.1,分别记为SSPU-2K和SSPU-6K。整个制备过程如图1所示。

1.4 高韧性固-固相变聚氨酯基薄膜的制备

为了进一步提高SSPU的韧性,进一步制备了

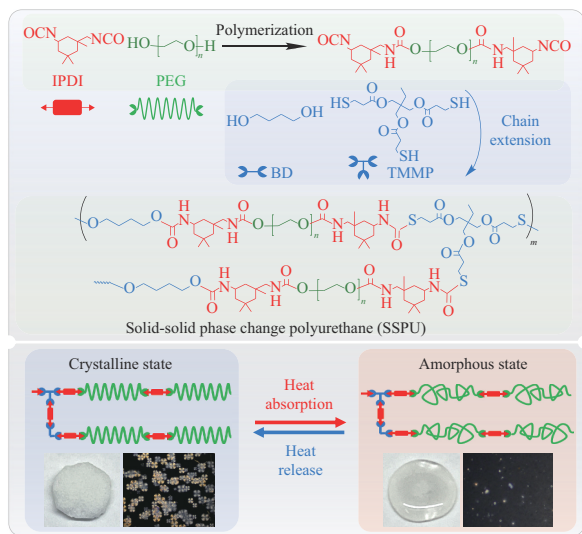


图1 SSPU的制备流程及相变机理

Fig. 1 Preparation process and phase transition mechanism of SSPU
高柔性水性聚氨酯(WPU),并将SSPU与WPU共混,制备了高韧性固-固相变聚氨酯薄膜。WPU的制备流程如下:首先,将PPG 1000在120℃真空烘箱中真空干燥3 h,除去水分;其次,称取除水后的PPG 1000 (10 g, 10 mmol), IPDI (4.44 g, 20 mmol)和催化剂DBTDL (0.1 g)加入装有搅拌的三口烧瓶中,在80℃下连续预聚4 h后,得到预聚物;然后向三口烧瓶中加入BD (0.45 g, 5 mmol), DMPA (0.67 g, 5 mmol)和稀释剂MEK (10 mL),继续在80℃下扩链3 h,冷却至40℃后加入三乙胺中和0.5 h,随后加入60 g水乳化,减压除去丁酮,得到固含量为20%的WPU。

将WPU与SSPU-6K按比例混合、溶解、烘干得到高韧性固-固相变聚氨酯膜。控制WPU与SSPU-6K的质量比分别为0.5:5, 1.5:5, 2.5:5,得到的相变薄膜分别记为SSPU-6K Film-1, SSPU-6K Film-2和SSPU-6K Film-3。

1.5 测试与表征

(1)单体及相变材料的化学结构利用FTIR仪进行测试,测试模式为透过模式,范围为4 000~400 cm⁻¹。

(2)结晶结构利用XRD仪测试,扫描速度为6°/min。

(3)力学性能通过通用测试机在室温下测量,加载速率为5 mm/min,样品尺寸为10 mm×30 mm,标距长度为10 mm。

(4)潜热、热储存性能和循环稳定性利用DSC仪测试,测试条件为氮气气氛,升温速率为10℃/min。

(5)热稳定性使用TG分析仪在氮气气氛下测

试,温度范围为50~800℃,升温速率为10℃/min。

(6)结晶过程利用偏光显微镜测试。

(7)利用100 W红外线灯泡和远红外成像仪对相变材料的光热转换性能和温度调控能力进行测试。

2 结果与讨论

2.1 SSPU的结构表征

图2为SSPU及其单体的FTIR图谱。由图2可知,PEG的羟基伸缩振动特征峰位于3 529 cm⁻¹处,醚键吸收峰位于1 109 cm⁻¹和1 024 cm⁻¹处。IPDI的异氰酸酯特征位于2 270 cm⁻¹处,TMMP的巯基特征峰位于2 570 cm⁻¹处。通过预聚和扩链后,SSPU-2K,SSPU-4K和SSPU-6K中均没有2 270 cm⁻¹和2 570 cm⁻¹处的吸收峰,表明异氰酸酯和巯基官能团反应完全。SSPU-2K,SSPU-4K和SSPU-6K样品在1 711 cm⁻¹和1 644 cm⁻¹处均出现了氨基甲酸酯的特征吸收峰,表明通过预聚和扩链成功制备了SSPU。

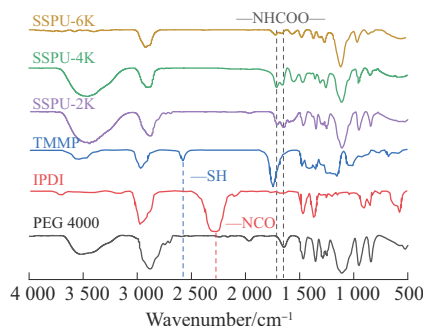


图2 SSPU及其单体的FTIR图谱

Fig. 2 FTIR spectra of SSPU and their monomers

图3为SSPU及不同分子量PEG的XRD谱图。PEG 2000, PEG 4000和PEG 6000谱图上可看到19.2°和23.2°附近出现了强衍射峰,分别对应PEG

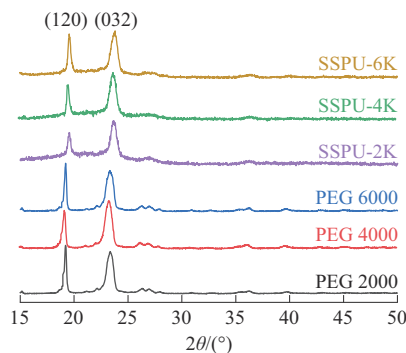


图3 SSPU及不同分子量PEG的XRD谱图

Fig. 3 XRD patterns of SSPU and PEG with different molecular weights

的(120)和(032)晶面,表明PEG是一种高结晶性物质。SSPU-2K, SSPU-4K和SSPU-6K样品也在19.2°和23.2°附近出现了衍射峰,强度有所降低,表明聚合物网络对PEG的结晶行为有所影响,但仍保留了结晶和蓄热能力,为SSPU相变储能奠定了基础。

2.2 SSPU的储热能力和热稳定性

储热能力、热稳定性和循环稳定性是相变材料最重要的性能,也是决定其应用领域和前景的关键因素。对不同分子量的PEG和SSPU在升降温过程中热量储存和释放行为进行研究,如图4a~图4c所示。在升温过程中,PEG 2000, PEG 4000和PEG 6000都有明显的吸热、融化峰,对应的熔融焓分别为168.2, 195.2 J/g和168.7 J/g;降温过程中,三者同样表现出明显结晶、放热峰,对应热焓为146.4, 170.2, 159.4 J/g,表现出PEG优异的热能储存和释放性能。由于聚氨酯网络对PEG的限制作用,SSPU-4K和SSPU-6K表现出与PEG相似的结晶-熔融行为,但熔点、结晶点、熔融焓和结晶焓均有所下降。SSPU-2K在10~70 °C范围内只有熔融峰,没有结晶峰,可能是由于PEG 2000的链段较短,受到聚氨酯网络限制作用更大,在该温度范围和降温速度下不及结晶。SSPU-4K和SSPU-6K熔融焓分别为85.3 J/g和122.1 J/g,结晶焓分别为76.8 J/g和106.0 J/g。图4d为SSPU的TG图,由图4d可以看出,SSPU-2K, SSPU-4K和SSPU-6K三种相变材料具有良好热稳定性,热分解温度均超过350 °C,满足绝大多数应用领域要求。

以上结果表明,通过预聚和扩链将PEG限制在聚氨酯网络中,能够从根本上解决PEG的泄漏问题,同时保留其结晶、熔融和热量存储-释放能力,有望大幅扩展其应用领域。

2.3 SSPU的形状稳定性和循环储热能力

泄漏是限制固-液相变材料应用最大的挑战,笔者通过聚氨酯网络限制PEG链段,将固-液相变的PEG转化成SSPU,解决相变泄漏难题。图5为不同分子量PEG及SSPU在80 °C加热30 min的泄漏结果。PEG 2000, PEG 4000和PEG 6000在加热后完全熔化,并发生明显泄漏。SSPU-2K, SSPU-4K和SSPU-6K在加热30 min后均无任何泄漏,三种材料仅从不透明的结晶态变成透明的无定形态,且能够保持自身形状。以上数据表明,聚氨酯网络具有出

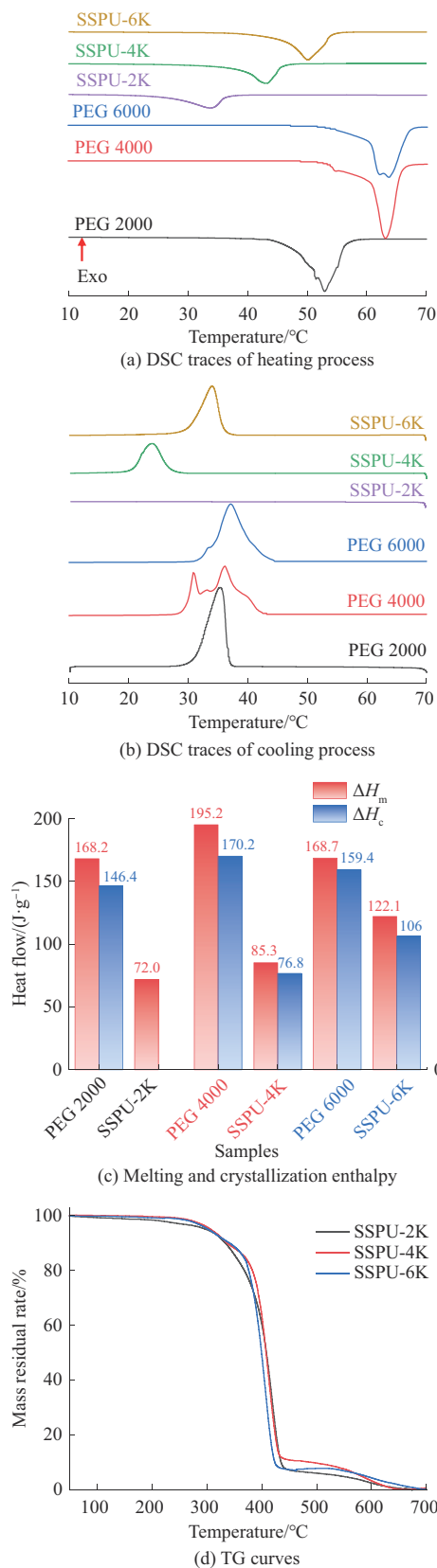


图4 不同分子量PEG及PPSU的热性能
Fig. 4 Thermal properties of PEG and PPSU with different molecular weights

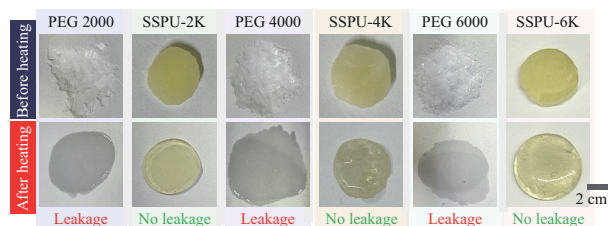


图5 不同分子量PEG及SSPU加热30 min的泄漏测试

Fig. 5 Leakage test of PEG and SSPU with different molecular weights after heating for 30 min

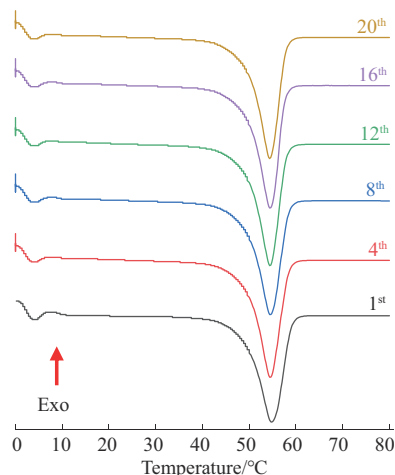
色的形状稳定性,能够有效抑制PEG泄漏。

稳定、可逆的相变过程对于相变材料的长期使用至关重要。三种SSPU中,SSPU-6K具有最大的熔融焓和结晶焓,故进一步对SSPU-6K进行20次熔融-结晶循环,并测试循环升降温过程中热量存储和释放性能。第1, 4, 8, 12, 16和20次加热和冷却DSC曲线如图6a和图6b所示。可以看出,在热循环前后,DSC曲线几乎没有变化,没有出现新的熔融峰或结晶峰,同时熔融焓和结晶焓也几乎没有变化,表明SSPU-6K具有高热焓和出色循环稳定性。

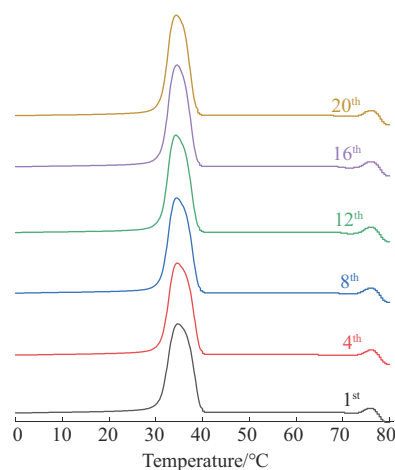
2.4 高韧性固-固相变聚氨酯基薄膜的性能

尽管SSPU具有优异的性状稳定性、高热焓和热稳定性,但高结晶性和聚合物的链段限制使其脆性大、延展性差、无法成膜,限制了SSPU的成型加工和后续应用。因此,笔者制备了WPU,进一步将SSPU-6K与WPU共混制备高韧性固-固相变聚氨酯薄膜。图7a和图7b为不同含量WPU的高韧性固-固相变聚氨酯基薄膜的应力-应变曲线、拉伸强度、拉伸弹性模量图。当WPU与SSPU-6K的质量比为0.5:5时,制得的SSPU-6K Film-1拉伸强度为12.2 MPa,断裂伸长率为7.3%,仍表现出强而脆的力学行为;当WPU与SSPU-6K质量比增加到为2.5:5时,制得的SSPU-6K Film-3拉伸强度为9.1 MPa,断裂伸长率为247.1%,表现出强而韧的力学状态,有利于后续的加工和应用。图7c为SSPU-6K Film-3的柔性及可再加工性能,该材料不仅能够弯曲、折叠,同时能够切碎、模压再加工成型,切碎样品在100 °C和10 MPa压力下模压15 min即可完成再成型过程,因此SSPU-6K Film-3具有出色的柔性、韧性和再加工性能。

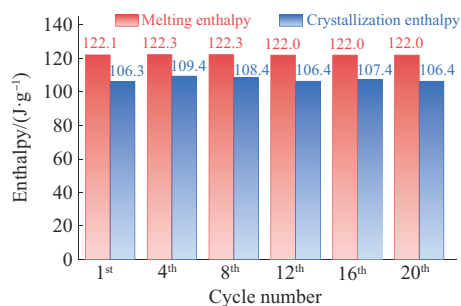
进一步对高韧性固-固变聚氨酯基薄膜的相变储热能力进行研究,结果如图8a~图8c所示。与纯SSPU-6K相比,引入WPU后的固-固相变薄膜的熔融温度、结晶温度、熔融焓和结晶焓均有所降低,即



(a) DSC curves of heating process



(b) DSC curves of cooling process



(c) Melting enthalpy and crystallization enthalpy

图6 SSPU-6K的储能性能

Fig. 6 Energy storage performance of SSPU-6K

WPU可提高SSPU-6K的韧性,但也对SSPU-6K的结晶有部分抑制作用^[14]。SSPU-6K Film-1, SSPU-6K Film-2和SSPU-6K Film-3的熔融焓分别85, 75, 66 J/g, 结晶焓分别为70, 60, 53 J/g。图8d为SSPU-6K Film-3在不同温度下偏光显微镜图,可以看出,室温条件下SSPU-6K Film-3具有十字交叉消光图案,表明材料中存在大量球晶;随着温度的升高,十字交叉消光图案逐渐减少;当温度升高到80 °C后,

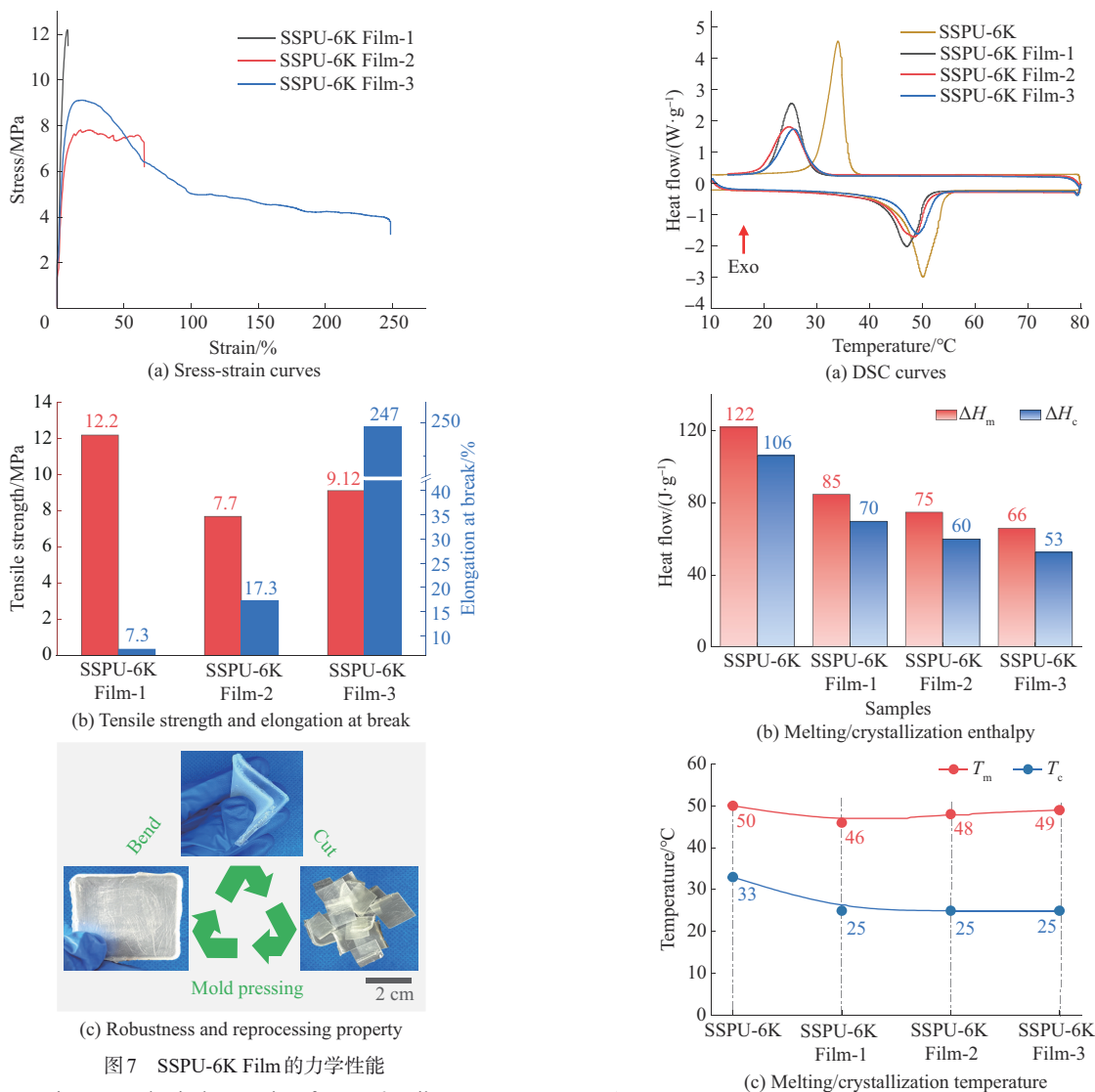


图7 SSPU-6K Film的力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of SSPU-6K Film

十字交叉消光图案完全消失,材料中晶体完全融化,变成无定形结构,这一结果也证实了 SSPU-6K Film-3 的结晶-融化过程和结晶结构。尽管 SSPU-6K Film-3 的储热能力与 SSPU-6 相比有所下降,但仍保持了良好水平,其出色的柔性、韧性和再加工性能为其后续使用奠定了良好基础。

2.5 SSPU-6K Film-3 的储热和温度调控能力

进一步利用红外热像仪对 SSPU-6K Film-3 的储热和温度调控能力进行研究,如图 9 所示。将 SSPU-6K Film-3 膜和参照样(WPU)放在 60 °C 的加热板上,并用红外热像仪记录 SSPU-6K Film-3 膜和参照样在加热和冷却过程中的温度变化趋势。可以看出,加热过程中参照样的颜色从蓝色迅速变为黄色、红色,表明其表面温度迅速升高。在自然降温过程中,参照样热像图颜色发生相反变化,由红

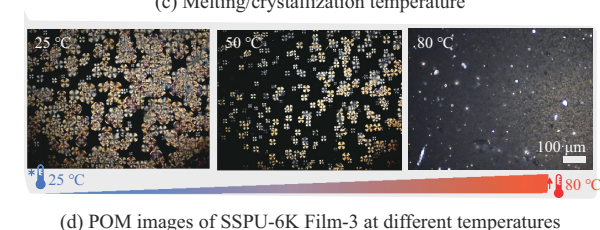


图8 SSPU-6K Film的DSC谱图、热焓、熔点及结晶温度及 SSPU-6K Film-3 在不同温度下的 POM 图

Fig. 8 DSC spectra, enthalpy, melting point and crystallization temperature of SSPU-6K Film and the POM spectra of SSPU-6K Film-3 at different temperatures

色迅速变为绿色,即表面温度的急剧下降。与参照样相比, SSPU-6K Film-3 膜在升温过程中颜色变化速度较慢,降温过程中也有明显的保温平台,即升降温过程中的温度变化都明显较参照样滞后。升降温过程中的温度滞后源自 SSPU-6K Film-3 在熔化和结晶温度范围内的潜热吸收和释放,表明其具

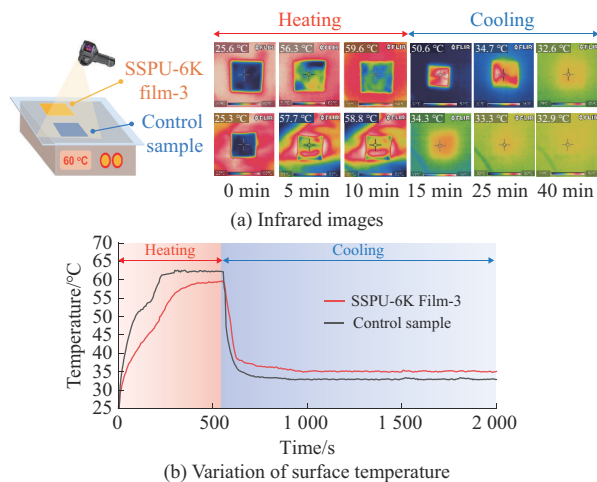


图9 SSPU-6K Film-3和WPU在加热和冷却过程中的红外热像图和表面温度的变化

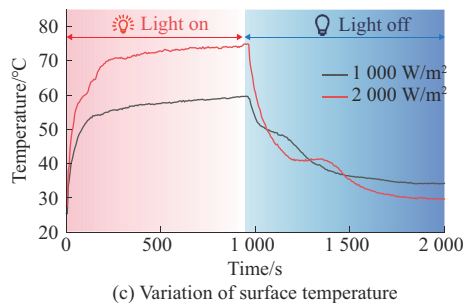
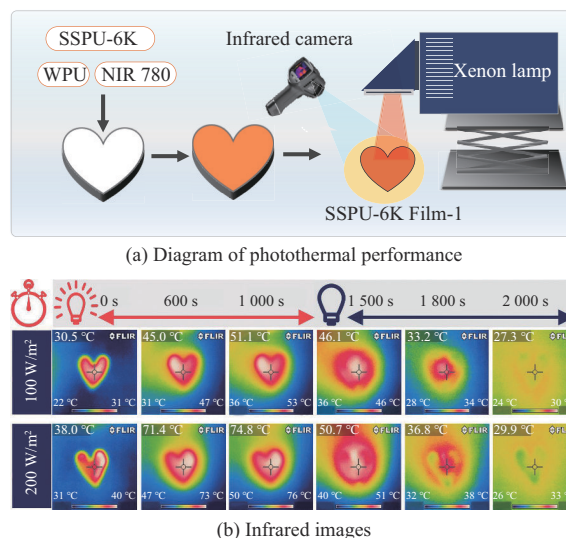
Fig. 9 Infrared thermal images and surface temperature changes of SSPU-6K Film-3 and WPU during heating and cooling process

有相变储能和温度调控能力。

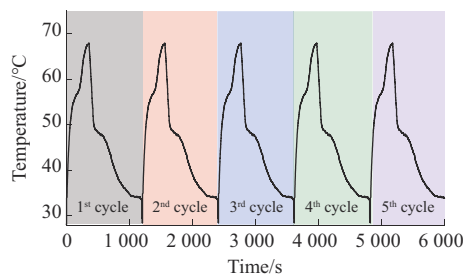
2.6 SSPU-6K Film-3的光热转换能力

通常,多数相变储能主要吸收废热,能量来源较为单一,如将清洁的太阳能转换、储存、利用起来,将极大拓展相变材料的能量来源和应用领域^[15-17]。本研究在高SSPU-6K Film-3制备过程中引入红外染料NIR-780碘化物,赋予SSPU-6K Film-3光热转换能力。NIR-780碘化物是一种近红外荧光染料,具有高摩尔消光系数和光热转换效率,在近红外波长的激光照射下能够产生大量的热量。在SSPU-6K和WPU混合过程中,加入5 mL 0.005 mmol的NIR 780染料甲醇溶液,超声混合均匀,干燥后得到具有光热转换能力的SSPU-6K Film-3,制备过程如图10a所示。

图10b和图10c为含NIR-780的SSPU-6K Film-3在1 000 W/m²和2 000 W/m²光强下的红外热像图和表面温度变化图。可以看出,在红外光辐照下SSPU-6K Film-3的热像图迅速由蓝变红,表面温度也快速上升。在1 000 W/m²的光强下,SSPU-6K Film-3由室温逐步提升到31 °C,再到45 °C,最终稳定在51 °C;在2 000 W/m²的光强下,SSPU-6K Film-3由室温逐步提升到38 °C,再到71 °C,最终稳定在75 °C。关闭红外灯后,SSPU-6K Film-3自然冷却,吸收的潜热在300 s逐步释放,并表现出明显的温度平台。图10d为含NIR-780的SSPU-6K Film-3在2 000 W/m²光强下循环光热转换和热能储存-释放性能。在5次光照吸热-冷却放热循环过程中,



(c) Variation of surface temperature



(d) Cyclic photothermal performance

图10 SSPU-6K Film-3和WPU的光热性能

Fig. 10 Photothermal properties of SSPU-6K Film-3 and WPU

SSPU-6K Film-3的温度曲线没有发生变化,即表现出稳定的太阳热转换行为。

上述结果表明,添加NIR-780的SSPU-6K Film-3具有良好的光热转换能力和循环稳定性,可实现太阳能利用和热管理应用。

3 结论

针对PEG相变材料泄漏、能量来源单一的不足,以PEG为聚氨酯软段单体,利用PEG末端羟基与异氰酸酯反应形成预聚体,进一步通过BD和TMMP进行扩链得到聚氨酯,将PEG基固-液相变材料转化为SSPU。研究了不同PEG分子量、材料组分对SSPU的结构、力学性能、储热能力的影响,同时引入红外染料并研究了相变材料光热转换能

力。具体结论如下。

(1)通过预聚和扩链反应,SSPU不仅实现了对PEG分子链的封装和限域,同时保留了PEG的结晶和储热能力。SSPU通过固态-固态转变实现能量的储存和释放,具有无泄漏风险、高热焓(122.1 J/g)、热稳定性好(分解温度高于350 °C)、循环稳定性好等优势。

(2)SSPU-6K与WPU共混成功制备了高韧性聚氨酯基固-固相变膜SSPU-6K Film-3,该材料具有良好的柔性、韧性、再加工性能、储热性能和温度调控能力,为后续使用奠定了坚实基础。

(3)在SSPU-6K Film-3中引入红外染料NIR 780实现对清洁光能的利用,添加NIR-780的SSPU-6K Film-3具有出色的光热转换、温度调控和循环稳定性,在太阳能利用和热管理应用领域具有广泛应用前景。

参考文献

- [1] LIU Lu, ZHANG Yuang, ZHANG Shufen, et al. Advanced phase change materials from natural perspectives: Structural design and functional applications[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(22). DOI: 10.1002/advs.202207652.
- [2] HUR Sunghoon, KIM Sangtae, KIM Hyun-Soo, et al. Low-grade waste heat recovery scenarios: Pyroelectric, thermomagnetic, and thermogalvanic thermal energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2023, 114. DOI:10.1016/j.nanoen.2023.108596.
- [3] AFTAB Waseem, HUANG Xinyu, WU Wenhao, et al. Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(6):1 392–1 424.
- [4] MATUSZEK K, KAR M, PRINGLE J M, et al. Phase change materials for renewable energy storage at intermediate temperatures[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(1):491–514.
- [5] MIRÓ L, GASIA J, CABEZA L F. Thermal energy storage (tes) for industrial waste heat (iwh) recovery: A review[J]. *Applied Energy*, 2016, 179:284–301.
- [6] KOU Xiaoxue, WANG Ruzhu. Controllable thermal energy storage by electricity for both heat and cold storage[J]. *Matter*, 2023, 6(8): 2 490–2 493.
- [7] WANG Ge, TANG Zhaodi, GAO Yan, et al. Phase change thermal storage materials for interdisciplinary applications[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(11):6 953–7 024.
- [8] USMAN Ali, XIONG Feng, AFTAB Waseem, et al. Emerging solid-to-solid phase-change materials for thermal-energy harvesting, storage, and utilization[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(41). DOI:10.1002/adma.202202457.
- [9] SHEN Zhenghui, QIN Mulin, XIONG Feng, et al. Nanocellulose-based composite phase change materials for thermal energy storage: Status and challenges[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16:830–861.
- [10] 梁超博, 霍强强, 隋绪文. 基于玻璃纤维织物的固-固相变树脂复合材料制备及电磁屏蔽性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(9): 35–40.
LIANG Chaobo, HUO Qiangqiang, SUI Xuwen. Preparation and EMI shielding properties of solid-solid phase change resin composites based on glass fiber fabrics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(9):35–40.
- [11] 闫东广, 葛驰, 吴奇, 等. 聚乙二醇基可加工固-固相变储能复合材料的制备与表征[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(10): 51–58.
YAN Dongguang, GE Chi, WU Qi, et al. Preparation and characterization of polyethylene glycol-based processable solid-solid phase change energy storage composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(10):51–58.
- [12] 李昕, 王杰, 张群, 等. 人体适宜温度智能调温交联聚氨酯固固相变材料的制备及其性能调控[J]. *高分子学报*, 2024(55). DOI: 10.11777/j.issn1000-3304.2024.24209.
LI Xin, WANG Jie, ZHANG Qun, et al. Preparation and property regulation of crosslinked polyurethane solid-solid phase-change materials with intelligent thermoregulation at suitable temperature for the human body[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2024(55). DOI: 10.11777/j.issn1000-3304.2024.24209.
- [13] KIM A, WERT N A, GOWD B, et al. Recent progress in peg-based composite phase change materials[J]. *Polymer Reviews*, 2023, 63(4):1 078–1 129.
- [14] DONG Jiankun, SHI Wenzhao, LIU Jinshu, et al. Flexibility and thermal storage properties of polyurethane adhesive supported phase change composites based on polyurethane phase change materials[J]. *Fibers and Polymers*, 2023, 24(9):3 061–3 074.
- [15] CHAI Zongce, FANG Minghao, MIN Xin. Composite phase-change materials for photo-thermal conversion and energy storage: A review[J]. *Nano Energy*, 2024, 124. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109437.
- [16] LUO Tianwen, KONG Lingli, LU Junjie, et al. Neuron-inspired flexible phase change materials for ambient energy harvesting and respiration monitoring[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36. DOI: 10.1002/adma.202411820.
- [17] 刘淑丽, 周文豪, 张少良, 等. 太阳能直接吸收相变集-蓄热器的放热特性研究[J]. *化工学报*, 2024. DOI: 10.11949/0438-1157. 20241139.
LIU Shuli, ZHOU Wenhao, ZHANG Shaoliang, et al. Heat release performance of direct absorption/storage solar collector[J]. *CIESC Journal*, 2024. DOI:10.11949/0438-1157. 20241139.