

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.002

可剥离、压印、导电水性聚氨酯涂层的制备与性能

陈瑛奇, 谭蕉君, 杨斌, 张美云, 王雨生, 舒管沛

(陕西科技大学轻工科学与工程学院, 西安 710021)

摘要: 聚氨酯因其结构可设计性与优异综合性能在保护涂层、全息防伪、电磁防护等领域表现出巨大应用潜力, 但聚氨酯涂层的多功能集成仍是该领域难题。针对上述问题, 以4,4'-二环己基甲烷二异氰酸酯、聚醚胺、1,4-丁二醇和2,2-二羟甲基丁酸为原料, 通过丙酮法制备一系列不同过量比(R 值)的水性聚氨酯(WPU)乳液。研究发现, 通过软硬段和过量比优化可制备出具有优异涂布工艺性、剥离性能、模压转印性能的聚氨酯乳液。同时, 利用WPU和羟基化多壁碳纳米管(HMWCNT)制备了WPU/HMWCNT复合涂料, 所得复合涂层具有出色的电磁屏蔽、电热、光热性能。当HMWCNT质量分数为70%时, WPU/HMWCNT复合涂料可在纸张和聚对苯二甲酸乙二酯基底上形成均匀导电涂层, 电磁屏蔽效能分别达到27.4 dB与21 dB。该复合涂层还表现出优异电热转换和光热转换性能, 在6 V输出电压下, WPU/HMWCNT涂布纸的表面温度可从室温快速升至92.6 °C, 在1 000 mW/m²的光照下, 表面温度可在60 s内升高到100 °C以上。

关键词: 水性聚氨酯; 剥离涂层; 导电涂层; 电磁屏蔽; 电热转换性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0011-10

Preparation and properties of peelable, embossable and conductive waterborne polyurethane coatings

CHEN Yingqi, TAN Jiaojun, YANG Bin, ZHANG Meiyun, WANG Yusheng, SHU Guanrui

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

Abstract: Polyurethane has shown great application potential in protective coatings, holographic anti-counterfeiting, electromagnetic protection, and other fields due to its structural designability and excellent comprehensive properties. However, the integration of multiple functions into polyurethane coatings remains a challenge in this field. To address this issue, a series of waterborne polyurethane (WPU) emulsions were prepared with different excess ratios (R values) using dicyclohexylmethane diisocyanate, polyetheramine, butanediol, and dimethylol butanoic acid as raw materials through acetone method. It was found that by optimizing the ratio of soft and hard segments (R), a polyurethane emulsion with excellent coating processability, stripping performance and embossing transfer performance could be prepared. In addition, using WPU and hydroxylated multi-walled carbon nanotubes (HMWCNT), a WPU/HMWCNT composite coating was prepared which exhibits exceptional properties in electromagnetic shielding, electrothermal conversion and photothermal conversion. Specifically, when mass fraction of HMWCNT reaches 70 wt%, WPU/HMWCNT coating forms a uniform conductive layer on both paper and polyethylene terephthalate (PET) substrates, and its electromagnetic shielding effectiveness achieves 27.4 dB on paper and 21 dB on PET. Additionally, the composite coating exhibits remarkable electrothermal and photothermal conversion capabilities. When subjected to an output voltage of 6 V, the surface temperature of WPU/HMWCNT on paper rapidly increases from ambient to 92.6 °C. Under illumination of 1 000 mW/cm², surface temperature of the coating rises above 100 °C within 60 seconds.

Keywords: waterborne polyurethane; peelable coating; conductive coating; electromagnetic shielding; electrothermal conversion performance

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBGY-474)

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: 2025-10-29

引用格式: 陈瑛奇, 谭蕉君, 杨斌, 等. 可剥离、压印、导电水性聚氨酯涂层的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 11-20.

CHEN Yingqi, TAN Jiaojun, YANG Bin, et al. Preparation and properties of peelable, embossable and conductive waterborne polyurethane coatings[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 11-20.

聚氨酯(PUR)是一类具有嵌段结构的高分子材料,其力学性能、柔性、耐磨性和黏附性能可通过软硬段的种类和比例进行精确调控,因而在保护涂层、包装印刷、电子信息、交通运输和建筑建材等多个领域得到了广泛应用。在实际应用中,PUR凭借其优异的附着力和耐磨性,已成为金属、塑料、织物等基材的理想保护涂层;同时,其良好的阻隔性和柔韧性也使其成为包装印刷和电子封装领域的理想基材。近年来,随着材料功能化需求的不断升级,PUR凭借分子结构的灵活性和综合性能的优越性,在柔性电子^[1-5]、全息防伪、热管理^[6-7]和电磁防护^[8-10]等新兴领域展现出了巨大的应用潜力。然而,随着应用领域的不断拓展,对PUR性能的多元化要求也在不断提升,单一功能的PUR已难以满足复杂场景应用需求,功能集成化成为其发展核心方向^[11]。一方面,绿色环保的要求推动PUR向无溶剂化或水性化转型,水性PUR(WPU)因其低挥发性有机化合物含量和优异的环境相容性成为研究热点。另一方面,柔性电子、全息防伪、电磁防护等新兴领域对PUR提出了特殊的功能需求,例如可模压性(用于全息图案转印)、可转印性(适配柔性基材加工)和导电性(满足电磁屏蔽或电热功能)等。尽管目前已成功开发出大量商品化的WPU乳液,但WPU基多功能涂层仍面临着诸多挑战。对于可剥离涂层,需通过精准调控软硬段比例来优化表面能,以实现稳定可控的黏附性能,确保在使用过程中附着稳定且在剥离时能够无损移除;对于可模压转印涂层,则需要平衡内聚力与柔韧性,以确保全息模板的微观图像信息能够被清晰复制并稳定保留^[11-13]。因此,深入研究软硬段比例调控、内聚力-黏附力平衡及工艺稳定性对WPU基多功能涂料具有重要意义^[14-17]。

针对上述问题,本研究以4,4'-二环己基甲烷二异氰酸酯(HMDI)、聚醚胺(PEA)、1,4-丁二醇(BDO)和2,2-二羟甲基丁酸(DMBA)为原料,采用丙酮法制备了一系列不同过量比(R 值,即NCO/OH物质的量比)的WPU乳液。系统研究了 R 值对WPU乳液外观、粒径、涂布和转印性能的影响,并进一步将WPU乳液与羟基化多壁碳纳米管(HMWCNT)共混,制备了WPU/HMWCNT复合涂层。通过对复合涂层的电磁屏蔽、电热和光热性能进行深入研究,为WPU基多功能涂层的设计与应用提供了理论依

据和技术方案参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

HMDI、DMBA、BDO、二月桂酸二丁基锡(DBTDL)、三乙胺(TEA)、乙二胺(EDA):分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

PEA:数均分子量 M_n 为400和2 000,分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

丙酮(AC):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

HMWCNT:长度<10 μm ,外径>50 nm,内径5~15 nm,江苏先丰纳米材料科技有限公司;

水性红色颜料:西安天亿胶粘材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:VECTOR22,德国布鲁克科学仪器公司;

激光粒度仪:BI-90Plus,美国布鲁克海文仪器公司;

扫描电子显微镜(SEM):Vega 3 SBH,捷克TESCAN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;

四探针方阻仪:ST-2258C,苏州晶格电子科技有限公司;

矢量网络分析仪:PNA-L N5232B,美国Keysight Technologies公司。

1.3 WPU乳液与WPU/HMWCNT复合材料的制备

WPU乳液的制备过程如图1所示。首先,在氮气保护下将HMDI加到配备温度计、机械搅拌装置和回流冷凝管的三口烧瓶中,控制反应温度70~80 $^{\circ}\text{C}$,搅拌速率800 r/min,将PEA 400 (2000)与AC的混合溶液缓慢滴加至反应体系中,反应2 h,得到PUR预聚体。随后加入BDO和DBTDL进行扩链反应,经二丁胺滴定法检测异氰酸酯基含量达到预定值时,加入DMBA继续反应1 h,期间适时添加AC调节体系黏度,得到PUR。待PUR冷却至40 $^{\circ}\text{C}$ 后,向其中加入TEA中和30 min,再加入去离子水并高速剪切乳化30 min,控制固含量为20%。最后经减压蒸馏脱除丙酮,得到WPU乳液。将WPU乳

液与HMWCNT按一定比例共混、搅拌均匀、超声, 制得WPU/HMWCNT复合涂料。WPU乳液(过量

系数 R 为1.2)的制备配方见表1。不同 R 值制备WPU乳液的外观及稳定性见表2。

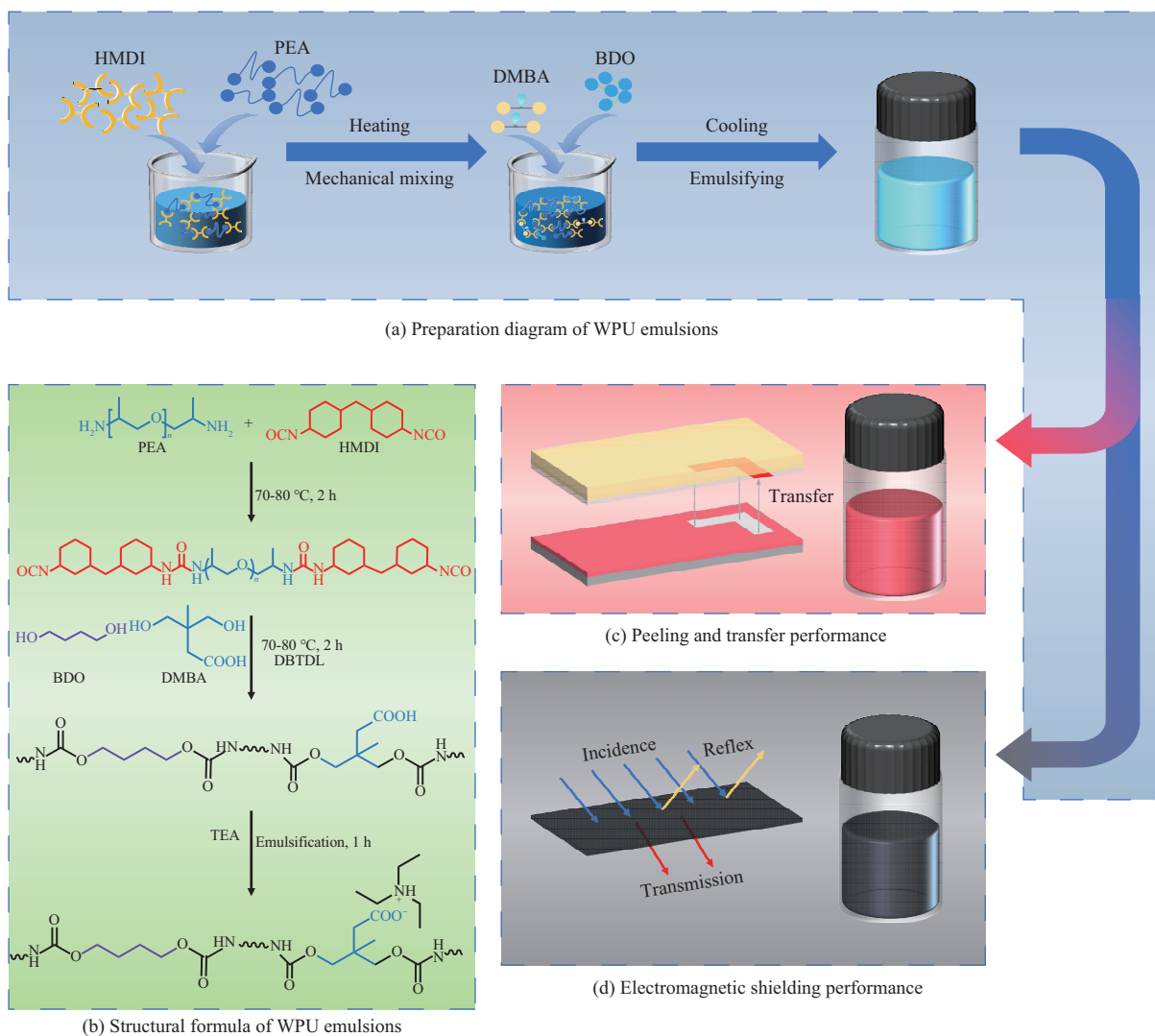


图1 WPU乳液制备过程、涂层剥离转印及电磁屏蔽性能示意图以及WPU乳液反应式

Fig. 1 Diagram of WPU emulsions preparation process, coating peeling transfer printing, electromagnetic shielding performance and reaction equation of WPU emulsions

表1 WPU乳液的合成配方

Tab. 1 Synthetic formula of WPU emulsions

Sample	M_n of PEA/(g·mol ⁻¹)	PEA content/ mol	HMDI content/ mol	BDO content/ mol	DMBA content/ mol	TEA content/ mol	Mass ratio of soft to hard segments/%
WPU-A	400	0.100	0.240	0.065	0.035	0.028	38.85
WPU-B	2000	0.100	0.240	0.043	0.057	0.047	75.42

Notes: Soft segment refers to PEA400/2000; hard segment refers to HMDI, BDO, DMBA.

1.4 表征方法

利用FTIR仪测试单体及WPU乳液化学结构, 测试模式为透过模式, 范围为4 000~400 cm⁻¹。

利用SEM表征WPU涂层及WPU/HMWCNT复合薄膜的形貌, 测试前对样品喷金处理。

采用激光粒度仪分析WPU乳液的粒径。测试

温度为25 °C, 在测试前对样品超声波分散5 min。

将3~5 mL WPU乳液滴加在聚对苯二甲酸乙二醇(PET)薄膜上, 用涂布棒涂布, 在90 °C烘箱中干燥10 min制备薄膜。随后用透明胶带黏附其一小部分, 沿PET薄膜斜面45°角撕下胶带, 观察并记录WPU薄膜的涂布和剥离性能。

表2 不同 R 值下PEA400与PEA2000制备的WPU乳液性能Tab. 2 Properties of WPU emulsions from PEA400 and PEA2000 with different excess ratios (R)

Sample	Excess ratio R	Appearance of emulsion	Centrifugal stability	Storage stability/months
WPU-A-1.1	1.1	Blue light translucent	Stable	>6
WPU-A-1.2	1.2	Blue light translucent	Stable	>6
WPU-A-1.3	1.3	Milky white blue light	Stable	>6
WPU-A-1.4	1.4	Milky white	Stable	>3
WPU-A-1.5	1.5	Milky white	Stable	>3
WPU-B-1.1	1.1	Blue light translucent	Stable	>6
WPU-B-1.2	1.2	Blue light translucent	Stable	>6
WPU-B-1.3	1.3	Blue light translucent	Stable	>6
WPU-B-1.4	1.4	Blue light translucent	Stable	>6
WPU-B-1.5	1.5	Blue light translucent	Stable	>6

选用高精度的四探针方阻仪,确保其校准合格且在有效期内,以保证测试结果的准确性。准备待测的WPU/HMWCNT样品,样品表面应平整、清洁,无明显缺陷和污染,且涂层厚度均匀一致。记录样品编号、尺寸等信息。

利用矢量网络分析仪测试PET薄膜和纸张上WPU/HMWCNT涂层的电磁屏蔽性能。待测样品被裁切为50 mm×20 mm的尺寸,每组取三个样品作为平行对照样。在8.2~12.4 GHz波长范围内测试其电磁屏蔽性能。根据测得的散射参数(S_{11} 和 S_{21})计算吸收系数(A)、反射系数(R)、传输系数(T)、总屏蔽效能(S_{ET})、吸收效能(S_{EA})和反射效能(S_{ER})。相关计算公式见式(1)至式(6)。

$$R = |S_{11}|^2 \quad (1)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (2)$$

$$A = 1 - R - T \quad (3)$$

$$S_{ER} = -10 \lg(1 - R) \quad (4)$$

$$S_{EA} = -10 \lg[T/(1 - R)] \quad (5)$$

$$S_{ET} = -10 \lg T = S_{EA} + S_{ER} \quad (6)$$

利用直流电源作为光热转换性能的驱动电源,通过远红外成像仪测试WPU/HMWCNT涂布纸和涂布PET膜在2、4、6 V电压下的升温5 min和降温1 min过程中温度变化。

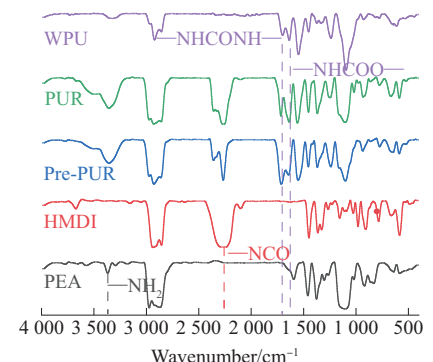
使用100 W红外灯模拟太阳辐射测试薄膜的光热性能,利用远红外成像仪记录WPU/HMWCNT涂布纸和涂布PET膜在升温5 min和降温2 min过程的温度变化。

2 结果与讨论

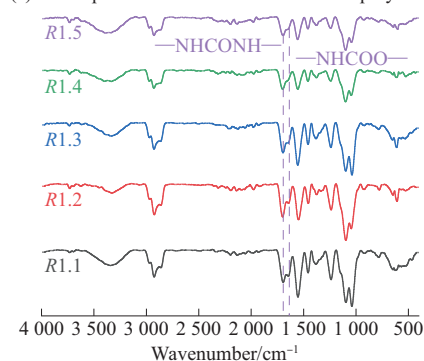
2.1 结构与形貌及粒径分析

图2为HMDI、PEA及聚合物的FTIR谱图。PEA在3 380 cm^{-1} 处出现氨基特征峰,在2 800~

3 000 cm^{-1} 处出现了饱和碳氢吸收峰,在1 150~1 050 cm^{-1} 处为醚键的伸缩振动峰。HMDI在2 270 cm^{-1} 处显示出明显的异氰酸酯基($-\text{NCO}$)特征吸收峰。随着聚合进行,PUR预聚体(Pre-PUR)和PUR中出现了明显的聚脲(1 710 cm^{-1})和氨基甲酸酯(1 642 cm^{-1})的特征吸收峰。值得注意的是,由于异氰酸酯是过量的,Pre-PU和PUR中异氰酸酯的吸收峰并没有完全消失。在加入TEA乳化后,WPU乳液中异氰酸酯特征峰完全消失,表明过量的异氰酸酯在乳化过程中会与体系中的水继续发生反应。



(a) FTIR spectra of reaction monomers and polymers

(b) FTIR spectra of WPU prepared at different excess ratios of R 图2 反应单体和聚合物及不同 R 值下WPU乳液的FTIR谱图Fig. 2 FTIR spectra of reactive monomers, polymers and WPU emulsions prepared at different excess ratios of R

不同过量比条件下制备的WPU乳液红外谱图基本完全相同。

图3为不同PEA体系、不同过量系数 R 条件下制备的WPU乳液粒径分布图。由图3可知,随着 R 的增大,PEA400体系制备的WPU乳液从半透明状态逐渐变成乳白色,平均粒径逐步变大,粒径分布范围基本呈现逐步变宽趋势。与PEA400体系相比,PEA2000体系乳液粒径随 R 值增加变化较小,粒径分布同样呈现变宽趋势。随着PEA分子量增加,聚合物分子链柔性增强,在乳化过程中具有更优的链段活动能力,具有更好的转水乳化能力,故乳液仍呈现蓝光半透明状态。对于PEA400体系,Pre-PUR中软段长度较短,链段刚性较大、活动能力较低;同时,大量聚脲结构可形成强分子间氢键,造成其水溶性和乳化能力降低,故高 R 值下PEA400体系的WPU乳液呈现出乳白色不透明状态,表明体系粒径较大、稳定性下降。图4为 R 为1.1、PEA400体系制备的WPU乳液外观图,可以看出乳液体系

均一,呈现出半透明状态。

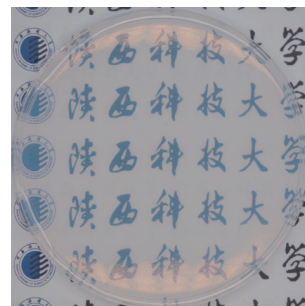


图4 WPU乳液外观图

Fig. 4 Appearance photograph of WPU emulsions

2.2 WPU乳液的涂布、剥离和转印性能

PUR是热转印涂层和临时保护涂层的理想选择,主要原因是其出色的结构设计性和综合性能使其实现转印时的高效附着与使用后的无损剥离。本研究进一步分析了PEA400体系和PEA2000体系WPU乳液的涂布、涂层剥离性能和热压全息性能。图5a为WPU乳液在PET基材上涂布和剥离测试示意图。为了模拟转移印花场景,在WPU乳液中加入水性红色颜料,并将其涂覆在PET薄膜基材上。由图5c可以看出,WPU乳液在PET基材上具有出色的涂布工艺性,涂覆后的PET薄膜表面光滑,无明显缩孔、挂点现象,且仍保持较高的透明度和均匀的颜色分布。从涂层的表面和截面形貌可以看出,WPU涂层的表面和界面均表现出较为均匀、光滑的形貌(图5d、图5e)。

在转移印花过程中,剥离行为本质上受材料内聚能及分子链间作用力的制约。图6为不同体系的WPU涂层剥离结果图。由图6a、图6b可见,不同 R 值下PEA400和PEA2000体系制备的WPU乳液都具有良好的成膜能力和剥离性能,即L形胶带可完整剥离红色WPU涂层。PEA400体系制备的WPU乳液涂布PET剥离后涂层边缘整齐,而PEA2000体系制备的WPU乳液涂布PET剥离后涂层边缘有少量缺口(R1.1、R1.2)或锯齿(R1.5),表明PEA400体系WPU涂层有更好剥离性能和切边性能。出现这种现象的原因是:PEA400体系的WPU乳液中软段较短,体系中聚脲、PUR链段密度更高,该材料具有大刚性、强内聚能和相对较低的黏附力,故在剥离过程中能够轻松、完整剥离,表现出良好的切边性能。对于PEA2000体系的WPU乳液,其软段较长,材料表现出高柔性、高黏附力、相对较低的内聚能,在剥离过程中容易发生内聚破坏,出现残留和拖尾

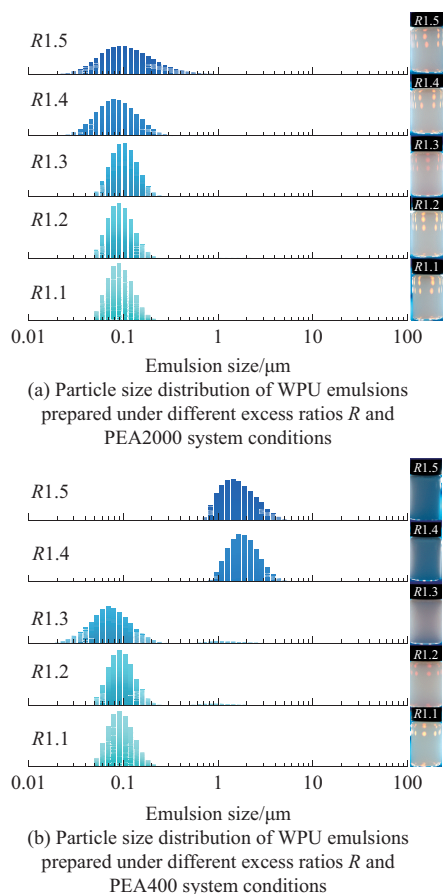


图3 在不同过量比 R 下采用PEA2000和PEA400制备WPU乳液的粒径分布图

Fig. 3 Particle size distribution of WPU emulsions prepared under different excess ratios R with PEA2000 and PEA400 system conditions

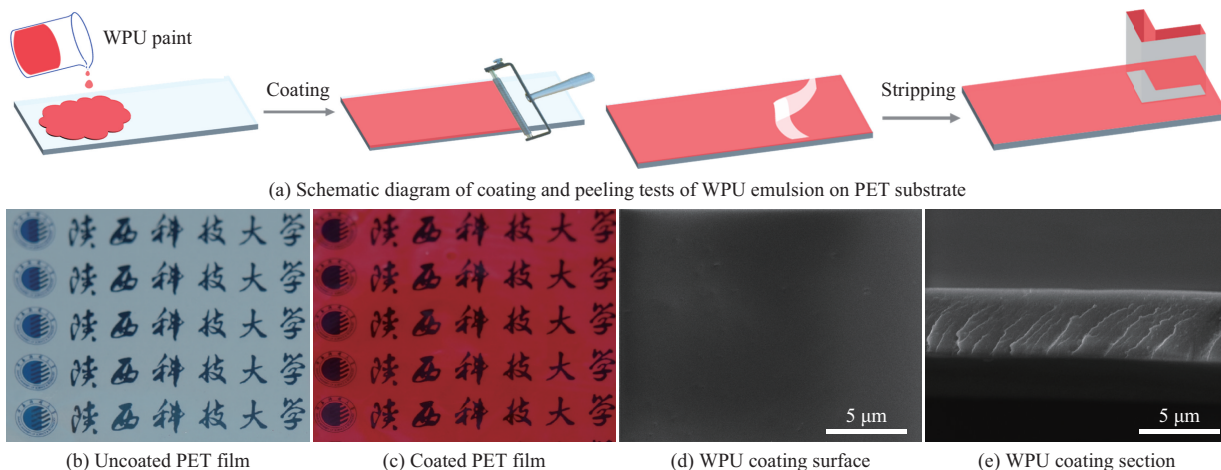


图5 WPU乳液的涂布、剥离测试示意图、涂覆PET薄膜实物图及微观形貌

Fig. 5 Schematic diagram of coating and peeling test, photographs of actual sample coated on PET film and microscopic morphology of WPU coating

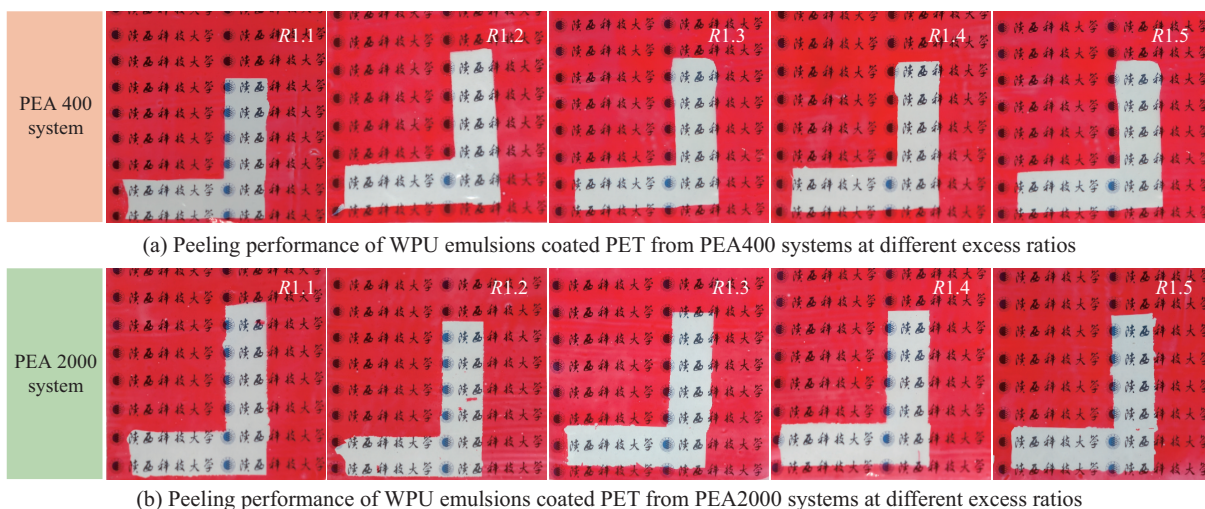


图6 在不同过量比 R 下采用PEA2000和PEA400制备WPU涂层剥离结果图

Fig. 6 Peeling test results of WPU coatings prepared under different excess ratios R with PEA2000 and PEA400 system conditions

现象。

整体而言, R 值1.3、PEA400体系的WPU乳液的内聚能和黏附力达到平衡,即材料的强韧性和剥离性得到合理平衡,既能够保证剥离时良好切边性,又能保证薄膜的力学性能。基于外观、涂布及内聚力调控因素考量,本研究选取 R 值1.3、PEA400体系的WPU乳液样品为代表,深入探讨其全息热压性能并与HMWCNT复合制备导电涂层。

WPU乳液表现出良好的涂布、成膜和剥离性能,有望通过全息模压技术制备PUR基无铝全息膜,故本论文进一步对其热压全息性能进行考察。

图7a为热压全息薄膜制备流程,即首先将WPU乳液涂布在PET基材上,利用热压法将全息不锈钢模板的微结构(光栅条纹)转印到WPU涂层上,WPU涂层上光栅条纹能够使光线在界面发生多次

反射与干涉,达到显色效果,这一特性使其在高端包装、防伪标识等领域具有广阔应用前景。图7b为制备的热压全息WPU薄膜和全息模板图,可以看出全息模板的结构成功转印到WPU全息膜上,WPU全息膜表现出明显的彩色条纹。图7c、图7d为不同角度下全息薄膜的显微镜图,WPU层上的全息光栅线条锐利、边缘清晰,保障了全息图案的高对比度。同时,随着入射角的偏移,满足衍射条件的方向发生变化,导致特定观察区域的亮度增强,这说明热压全息涂层具有规律周期性结构,表现出良好的全息模压性能。

2.3 WPU/HMWCNT复合涂层的电磁屏蔽性能

WPU乳液具有优异的涂布剥离性能和转移印刷性能,进一步将其与HMWCNT复合制备了WPU/HMWCNT复合导电涂料,将其涂布在纸张和PET基材上,并对其导电性进行了测试,如图8所示。当

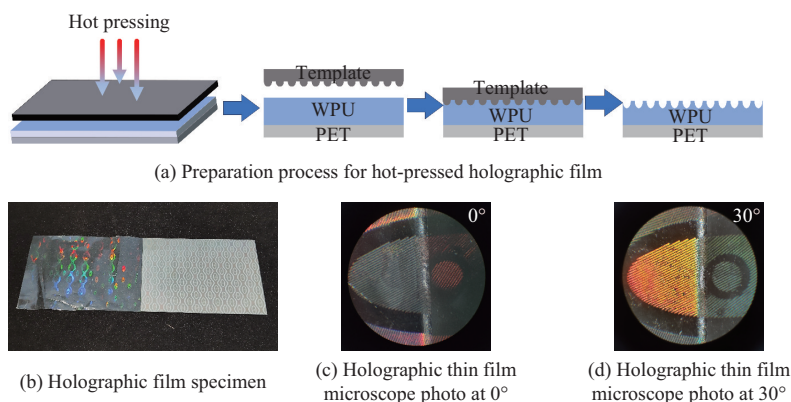
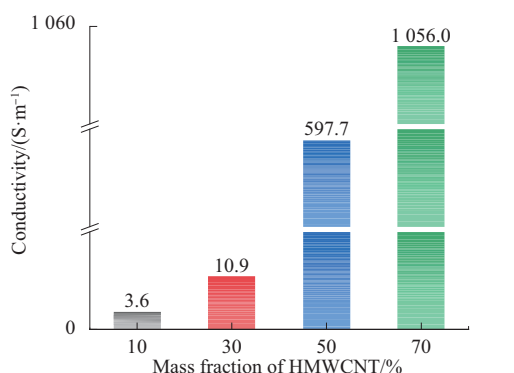


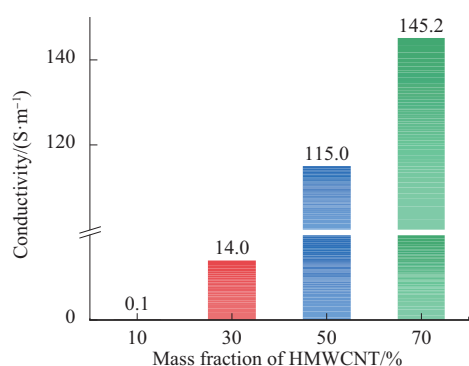
图7 全息薄膜的热压流程、实物图及不同角度下显微镜照片

Fig. 7 Hot pressing process, physical photograph and microscopic photos at different angles of holographic film

HMWCNT 质量分数超过 30% 时, WPU/HMWCNT 涂布纸张和 PET 均具有良好的导电性。随着 HMWCNT 质量分数从 30% 增加到 70%, 涂覆 PET 薄膜的电导率从 10.9 S/m 增至 1 056.0 S/m, 而涂覆纸张的电导率则从 14.0 S/m 增至 145.2 S/m。



(a) Conductivity of WPU/HMWCNT coated on PET film



(b) Conductivity of WPU/HMWCNT coated on printing paper

图8 WPU/HMWCNT乳液在PET薄膜和纸上涂布的电导率

Fig. 8 Electrical conductivity of WPU/HMWCNT emulsions coated on PET and paper

图9为WPU/HMWCNT涂料的干燥过程、涂布打印纸组装电路及导电性展示图。图9a为WPU/HMWCNT干燥过程,随着水和溶剂的不断蒸发,碳纳米管会团聚、重叠交错,形成良好的导电通路。

图9c至图9f为WPU/HMWCNT涂布打印纸组装电路示意图及点亮LED图片。可以看出,将WPU/HMWCNT涂料用作导电油墨,用刷子在纸张上直接绘制电路,能成功点亮LED灯。随着HMWCNT含量的增加,LED灯泡亮度也随之提高,表明导电性随着HMWCNT含量增大而逐步提升。

进一步对WPU/HMWCNT涂布PET和WPU/HMWCNT涂布纸的电磁屏蔽性能进行研究。电磁屏蔽性能主要依赖于材料对电磁波的反射、吸收和衰减能力,在WPU/HMWCNT涂料中, HMWCNT具有高导电性和高比表面积,能有效反射和吸收电磁波,其导电网络能够引导电磁波在材料内部多次反射和散射,从而增强电磁波的衰减效果,结果如图10所示,可以看出, WPU/HMWCNT涂布PET的 S_{ET} 随着HMWCNT含量增加而提升, WPU/70% HMWCNT涂布PET的 S_{ET} 达到21 dB,满足商用电磁屏蔽要求(20 dB)。当WPU/HMWCNT涂层应用于纸张时,其电磁屏蔽能力略优于PET, WPU/70% HMWCNT涂布纸的 S_{ET} 达到27.4 dB。

2.4 WPU/HMWCNT复合涂层的电热和光热转换性能

HMWCNT具有高度石墨化的结构,其碳原子以 sp^2 杂化方式排列,形成稳定的六边形晶格,赋予了其高电导率。当电流通过HMWCNT时,电子在导电路径上与晶格振动相互作用,产生焦耳热,因此HMWCNT在WPU乳液中的均匀分散状态对其电热性能至关重要。图11和图12分别为不同驱动电压下WPU/70% HMWCNT涂布PET/纸的温度升降-时间曲线及红外热像图。由图11和图12可知,在2~6 V的输出电压下, WPU/70% HMWCNT涂布PET和WPU/70% HMWCNT涂布纸的表面温度均迅速上升,在30 s内达到饱和温度并保持稳定。移

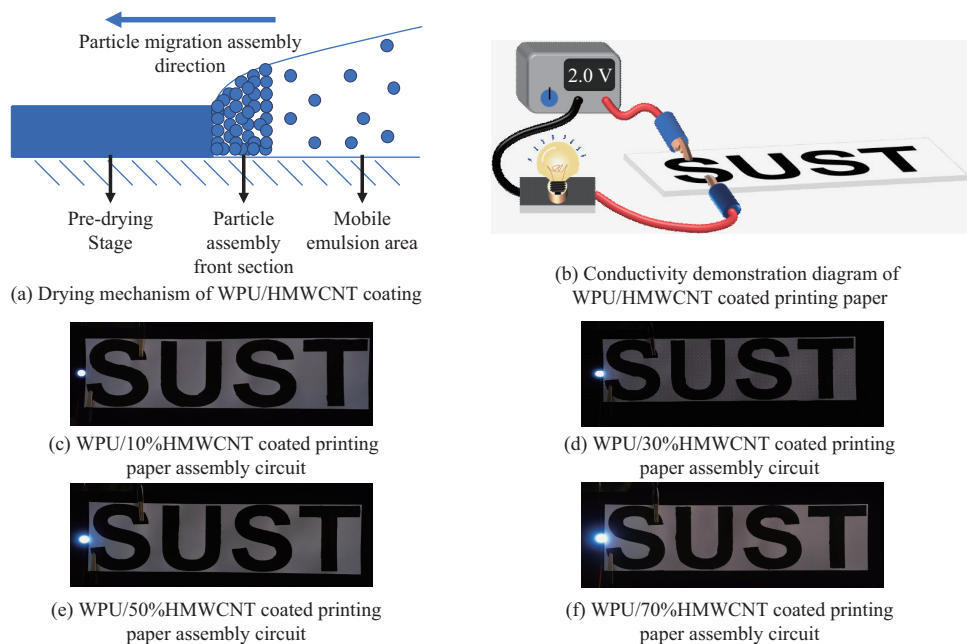
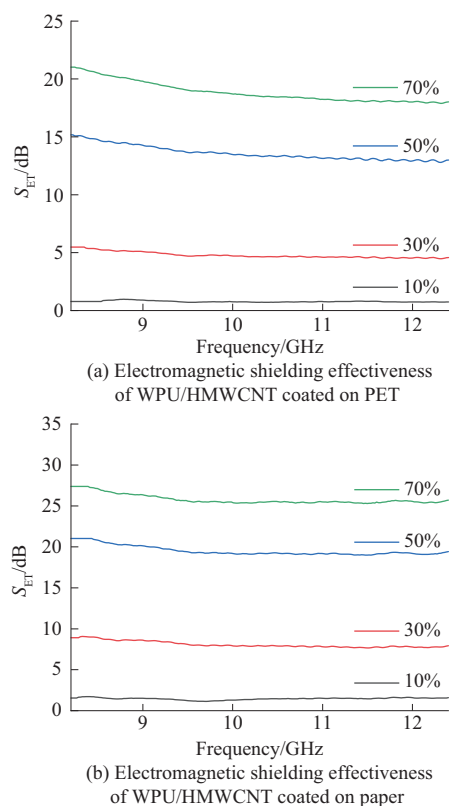
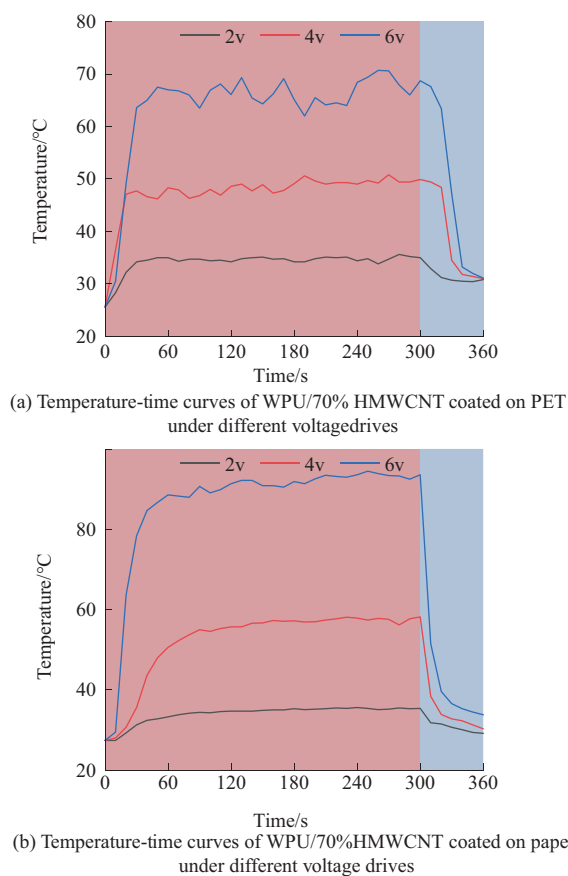


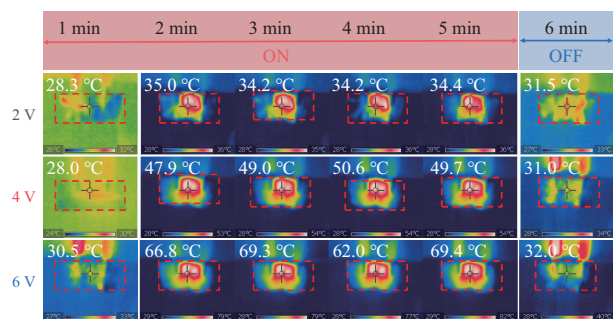
图9 WPU/HMWCNT涂料的干燥过程、涂布打印纸组装电路及导电性展示图

Fig. 9 Drying process, circuit assembly on coated printing paper and demonstration of electrical conductivity of WPU/HMWCNT coating

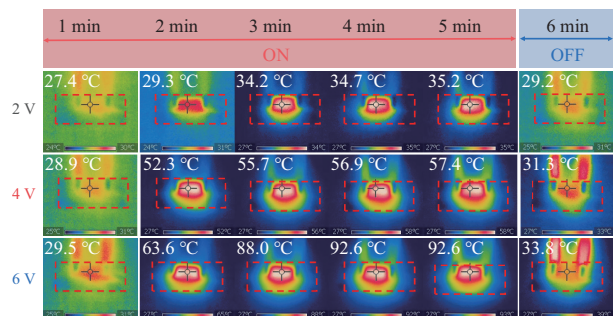
图10 不同HMWCNT质量分数的WPU/HMWCNT涂布PET/纸的 S_{ET}
Fig. 10 S_{ET} of WPU/HMWCNT-coated on PET/paper with different mass fractions of HMWCNT

除电压后,表面温度快速下降,10 s内快速冷却至室温。在6 V输出电压下,纸张涂层的表面温度达到近92.6 °C;PET涂层的表面温度达到69.4 °C,这是

图11 WPU/70%HMWCNT涂布PET/纸在不同电压驱动下电热升降温-时间曲线
Fig. 11 Electrothermal heating and cooling temperature versus time curves of WPU/70%HMWCNT coated on PET/paper driven by different voltages



(a) Infrared thermal images of WPU/70% HMWCNT coated on PET



(b) Infrared thermal images of WPU/70% HMWCNT coated on paper

图 12 WPU/70% HMWCNT 涂布 PET/纸在不同电压驱动下红外热像图

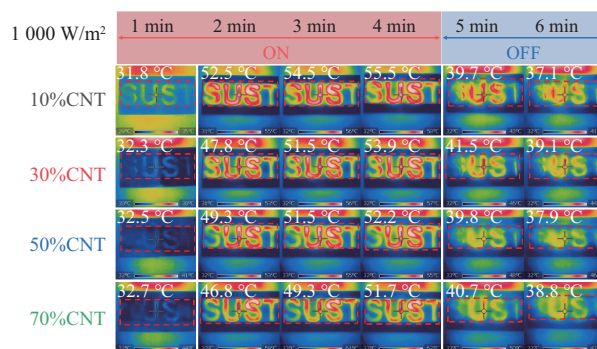
Fig. 12 Infrared thermal images of WPU/70% HMWCNT coated on PET/paper driven by different voltages

由于超薄涂层热响应速度极快,难以捕捉稳定状态。以上表明,WPU/70% HMWCNT 导电涂层具有优异的温度-电压响应特性和焦耳发热性能,在电力除冰、电热理疗等领域具有广阔应用前景。

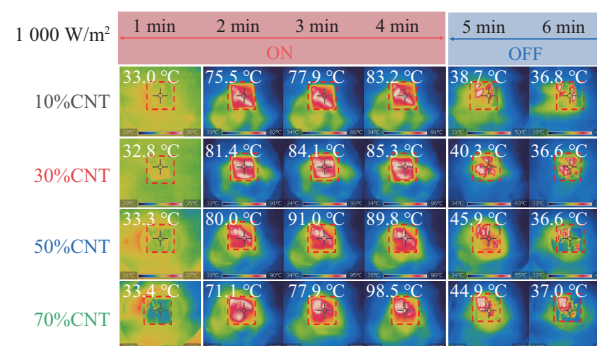
WPU/HMWCNT 的光热转换性能主要源于 HMWCNT 独特的结构和表面特性。HMWCNT 的多壁结构由多层石墨烯卷曲而成,这种结构赋予了其优异的光学吸收性能,羟基化增强了表面极性,使其在 WPU 乳液中具有更好的分散性,从而提高了光热转换效率。图 13 和图 14 分别为 WPU/HMWCNT 涂布 PET/纸在红外光下的温度升降-时间曲线和红外热像图。由图 13 和图 14 可知,在红外光下,HMWCNTs 具有高导热性和良好的光吸收性能,可吸收红外光能并将其转化为热量,热量传递至 WPU 基材,使涂层温度迅速升高。与 WPU/HMWCNT 涂布 PET 相比,WPU/HMWCNT 涂布纸表面平衡温度更高,达到 107 °C 以上。以上数据表明 WPU/HMWCNT 涂层能有效吸收光能并将其转化为热能,有望应用于光热转换和太阳能利用领域。

3 结论

(1)通过软硬段种类和比例调控可制备出兼具优异涂布工艺性、剥离性能和热压全息性能的 WPU



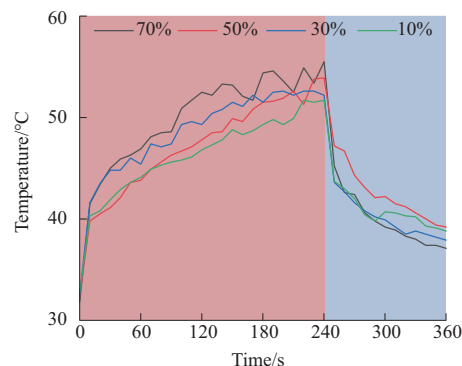
(a) Infrared thermal image of WPU/HMWCNT coated on PET



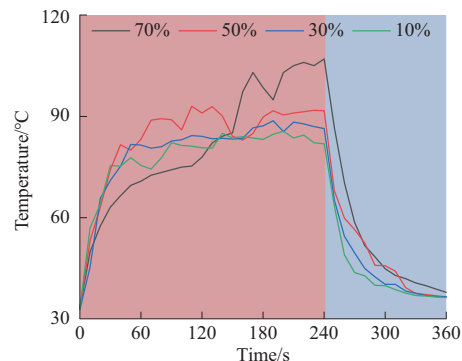
(b) Infrared thermal image of WPU/HMWCNT coated on paper

图 14 WPU/HMWCNT 涂布 PET/纸的红外热像图

Fig. 14 Infrared thermal images of WPU/HMWCNT coated on PET/paper



(a) Photothermal temperature-time curves of WPU/HMWCNT coated on PET



(b) Photothermal temperature-time curves of WPU/HMWCNT coated on paper

图 13 WPU/HMWCNT 涂布 PET/纸的光热升降温-时间曲线

Fig. 13 Photothermal heating rise and cooling versus time curves of WPU/HMWCNT coated on PET/paper

乳液,在剥离涂层、全息防伪领域具有广阔潜力。

(2) WPU乳液与HMWCNT具有良好的相容性,可制备出具有导电、电磁屏蔽、电热转换和光热转换功能的复合涂层。优化条件下,WPU/HMWCNT复合涂层电磁屏蔽效能超过商用标准要求。在6 V驱动电压下,WPU/HMWCNT涂布纸和WPU/HMWCNT涂布PET的表面温度可从室温快速升高到92.6 °C或69.4 °C。在1 000 W/m²光功率下,WPU/HMWCNT涂布纸在60 s内迅速升高到107 °C。

(3)本研究为绿色、多功能水性导电涂层的开发提供了可行路径,可使WPU基导电涂层在柔性电子、电磁屏蔽及高效热管理等领域得到更多的应用。

参考文献

- [1] YANG Y R, GAO W. Wearable and flexible electronics for continuous molecular monitoring[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(6):1 465–1 491.
- [2] TIAN Y S, WEI Y, WANG M, et al. Ultra-stretchable, tough, and self-healing polyurethane with tunable microphase separation for flexible wearable electronics[J]. *Nano Energy*, 2025, 139. DOI: 10.1016/j.nanoen.2025.110908.
- [3] TANG L X, SHANG J, JIANG X Y. Multilayered electronic transfer tattoo that can enable the crease amplification effect[J]. *Science Advances*, 2021, 7(3). DOI:10.1126/sciadv.abe3778.
- [4] 花蕾. 还原氧化石墨烯/聚氨酯柔性复合材料制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(12):34–40.
HUA Lei. Preparation and properties of reduced graphene oxide/polyurethane flexible composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(12):34–40.
- [5] ZHU Z J, TIAN Z Y, ZHANG F X, et al. Self-healing waterborne polyurethane-based wearable sensors with excellent thermal management and electromagnetic interference shielding for advanced biometric gait recognition[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025. DOI:10.1002/adfm.202511461.
- [6] LING Z C, ZHOU Q X. Effects of NIR-reflective pigments on waterborne polyurethane coatings and their thermal insulation performance[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 196. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108678.
- [7] 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 Jingge, 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.
- [8] KIM H, LEE H, HA I, et al. Biomimetic color changing anisotropic soft actuators with integrated metal nanowire percolation network transparent heaters for soft robotics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(32). DOI:10.1002/adfm.201801847.
- [9] CHAI H B, LUO J W, LI J, et al. Lightweight and robust cellulose/MXene/polyurethane composite aerogels as personal protective wearable devices for electromagnetic interference shielding[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 271. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.132435.
- [10] LIU Z X, WANG W Y, TAN J J, et al. Bioinspired ultra-thin polyurethane/MXene nacre-like nanocomposite films with synergistic mechanical properties for electromagnetic interference shielding[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(21):7 170–7 180.
- [11] LI X G, XIE Y B, HUANG M R, et al. Development of clean performance-tunable waterborne polyurethane using acetyl tributyl citrate for transferable holographic films[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123496.
- [12] KODIHALI S N, FERRAGUTO T, PANWAR A, et al. Fabrication of flexible polymer molds for polymer microstructuring by roll-to-roll hot embossing[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(7): 12 480–12 488.
- [13] 冯永强, 陈强, 李海柱, 等. 聚脲弹性体与不同底材的粘接性能[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(2):133–138.
FENG Yongqiang, CHEN Qiang, LI Haizhu, et al. Bonding properties of polyurea elastomers to different substrates[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(2):133–138.
- [14] LIANG G T, QI Y R, GONG R Z, et al. Nanocellulose-reinforced polyurethane as flexible coating for cork floor[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 178. DOI: 10.1016/j.porgcoat. 2023. 107480.
- [15] KAUSAR A. Polyurethane nanocomposite coatings: State of the art and perspectives[J]. *Polymer International*, 2018, 67(11): 1 470–1 477.
- [16] HU J W, TIAN S, LI R Q, et al. A review on polyurethane antifouling coatings[J]. *Corrosion Communications*, 2025. DOI: 10.1016/j.corcom.2024.10.005.
- [17] GOLLING F E, PIRES R, HECKING A, et al. Polyurethanes for coatings and adhesives – chemistry and applications[J]. *Polymer International*, 2019, 68(5):848–855.