

# 建筑领域中TPU/碳纳米片增强复合材料的制备与应用性能分析

张鑫燧<sup>1</sup>, 杨琼<sup>2</sup>

(1. 无锡工艺职业技术学院环境艺术与设计学院, 江苏 无锡 214200;

2. 徐州工业职业技术学院建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为提升建筑领域中热塑性聚氨酯(TPU)的力学性能、热安全性及耐久服役能力, 采用熔融共混-注塑成型工艺制备不同碳纳米片(CNS)质量分数(0~2.0%)的TPU/CNS增强复合材料, 系统研究CNS含量对复合材料力学性能、热稳定性、阻燃性能、燃烧行为及耐老化性能的影响。结果表明: 随着CNS含量的增加, 复合材料的拉伸强度和弹性模量显著提高。当CNS质量分数为1.5%时, 拉伸强度由32.6 MPa提升至41.1 MPa, 增幅约26%, 缺口冲击强度达到61.8 kJ/m<sup>2</sup>, 表现出较优的强韧平衡。热重分析结果显示, CNS的引入有效提高材料的热稳定性, 添加1.5% CNS的复合材料热分解起始温度提升至约332 °C, 600 °C残炭率增至7.4%。阻燃性能测试表明, CNS可显著提升材料的阻燃与抑烟性能, 极限氧指数(LOI)由22.3%提高至26.1%, UL-94等级达到V-0。锥形量热结果进一步表明, 峰值热释放速率和总热释放量分别降低至742 kW/m<sup>2</sup>和63.9 MJ/m<sup>2</sup>, 烟生成速率和总烟释放量明显下降。在紫外/湿热加速老化条件下, TPU/CNS增强复合材料表现出更高的力学性能保持率和更小的外观劣化程度, 其中添加1.5% CNS的复合材料在老化28 d后拉伸强度保持率仍达90.5%。

**关键词:** 热塑性聚氨酯; 碳纳米片; 增强复合材料; 阻燃性能; 耐老化性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0117-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.021

## Preparation and Application Performance Analysis of TPU/Carbon Nanosheet Reinforced Composites in Construction Field

ZHANG Xinyi<sup>1</sup>, YANG Qiong<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Art and Design, Wuxi Vocational Institute of Arts & Technology, Wuxi 214200, China;

2. School of Architecture Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** To enhance the mechanical properties, thermal safety, and durable serviceability of thermoplastic polyurethane (TPU) in the construction field, TPU/CNS reinforced composites with different carbon nanosheet (CNS) mass fractions (0~2.0%) were prepared using a melt-blending and injection molding process. The effects of CNS content on the mechanical properties, thermal stability, flame retardancy, combustion behavior, and aging resistance of the composites were systematically investigated. The results showed that as the CNS content increased, the tensile strength and elastic modulus of the composites were significantly improved. When the CNS mass fraction was 1.5%, the tensile strength increased from 32.6 MPa to 41.1 MPa, with an increase of approximately 26%, and the notched impact strength reached 61.8 kJ/m<sup>2</sup>, demonstrating an optimal balance of strength and toughness. Thermogravimetric analysis revealed that the incorporation of CNS effectively enhanced the thermal stability of the material. The onset decomposition temperature of the composite containing 1.5% CNS rised to approximately 332 °C, and its char yield at 600 °C increased to 7.4%. Flame-retardant tests showed that CNS markedly improved both fire resistance and smoke suppression. The limiting oxygen index (LOI) rised from 22.3% to 26.1%, and the UL-94 rating reached V-0. Cone-calorimetry further indicated that the peak heat-release rate and total heat release dropped to 742 kW/m<sup>2</sup> and 63.9 MJ/m<sup>2</sup>, respectively, while the smoke

收稿日期 Submitted date 2025-07-24; 修回日期 Revised date 2025-08-28; 录用日期 Accepted date 2025-10-10

联系人, 13852470962@163.com

引用本文: 张鑫燧, 杨琼. 建筑领域中TPU/碳纳米片增强复合材料的制备与应用性能分析[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 117-122.

Citation: ZHANG X Y, YANG Q. Preparation and application performance analysis of TPU/carbon nanosheet reinforced composites in construction field[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 117-122.

production rate and total smoke release were significantly reduced. Under accelerated UV/humidity aging, TPU/CNS reinforced composites exhibit higher retention of mechanical properties and less surface deterioration. Notably, the composite with 1.5% CNS still retained 90.5% of its original tensile strength after 28 days of aging.

**Keywords:** Thermoplastic polyurethane; Carbon nanosheets; Reinforced composites; Flame retardancy; Aging resistance

热塑性聚氨酯(TPU)是一类由硬链段和软链段交替组成的嵌段共聚物,兼具橡胶和塑料的优异性能,如高弹性、耐磨性、耐低温性及可加工性,因此在汽车、电子、电线电缆、运动器材等领域具有较大的应用潜力<sup>[1]</sup>。然而,单一TPU基体在力学强度、热稳定性、阻燃安全性及长期服役耐老化性等方面的不足逐渐暴露,限制其在建筑等高安全性场景中的推广。为突破这些性能瓶颈,基于TPU的复合材料设计成为材料科学与工程领域的重要研究方向。

纳米级增强填料的引入是提高聚合物复合材料综合性能的有效途径。纳米填料如碳纳米管(CNTs)、石墨烯、纳米纤维及其他二维纳米片状材料等,因其超高比表面积和优异的力学、热学性能,被广泛用于聚合物基复合体系中,以改善力学和功能性能<sup>[2-4]</sup>。对于TPU基体而言,添加纳米碳填料不仅能够促进载荷传递,提高材料的模量和强度,还能通过形成纳米级热屏障延缓基体热分解过程,从而提升热稳定性和阻燃性能。已有研究表明,在TPU中引入CNTs或石墨烯能够显著改善聚氨酯的机械性能与热响应特性<sup>[5]</sup>。碳纳米片(CNS)作为一种新型二维纳米填料,具有比表面积大、层状结构有利于界面相互作用等优点,在复合材料增强中展现出独特的潜力<sup>[6]</sup>。与传统的一维纳米填料相比,CNS的二维形态能够在聚合物基体中形成更连续的纳米网络,提高载荷传递效率,同时更易于形成热阻隔层<sup>[7]</sup>。此外,CNS的高导热性和热稳定性使其在提升复合材料热响应行为方面具有潜在优势<sup>[8]</sup>。尽管在TPU/石墨烯和TPU/CNTs纳米复合体系中已有较多研究,但关于CNS均匀分散、界面结合及其对TPU多维性能影响的系统研究仍相对匮乏。

因此,本研究选取TPU为基体,以不同质量分数的CNS作为增强相,采用熔融共混-注塑成型工艺制备TPU/CNS纳米复合材料体系,系统探讨CNS含量对材料的力学性能、热稳定性、阻燃行为、燃烧热释放、烟雾生成特性以及耐老化性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

TPU粒料,工业级,TPU-1185A,德国科思创(Covestro)有限公司;马来酸酐接枝热塑性聚氨酯(TPU-g-MA),接枝率约1.0%~1.5%,张家港美景荣化工有限公司;CNS,质量分数 $\geq 99\%$ ,苏州恒球纳米科技有限公司;无水乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

真空干燥箱,DZF-6050,上海一恒科学仪器有限公司;

超声清洗器,KQ-500DE,昆山市超声仪器有限公司;高速混料机,SHR-10A,张家港市三全机械有限公司;双螺杆挤出机,SJSH-35,南京杰恩特机电有限公司;注塑成型机,MA1200/370,海天国际控股有限公司;电子万能试验机,CMT6104,美特斯工业系统(中国)有限公司;悬臂梁冲击试验机,XJJ-5,承德试验机有限责任公司;热重分析仪(TG),STA 449 F5,德国耐驰(NETZSCH);极限氧指数(LOI)测定仪,HC-2C,南京江宁分析仪器有限公司;UL-94垂直燃烧试验箱,CZF-5,南京江宁分析仪器有限公司;锥形量热仪,FTT iCone Classic,英国 Fire Testing Technology;紫外老化试验箱,QUV/se,美国 Q-Lab 公司;邵氏硬度计,LX-A,上海精科仪器有限公司;色差仪,CR-400,日本柯尼卡美能达。

### 1.3 样品制备

在制样前,将TPU与TPU-g-MA原料置于真空烘箱中,于80℃下预干燥8h,以充分去除吸附水分,避免熔融加工过程中因水解反应引起的性能波动。将CNS加入无水乙醇中,在超声清洗器中超声分散30min,以降低团聚程度,随后置于60℃烘箱中,干燥至恒重,备用。按设计配方将干燥后的TPU、TPU-g-MA及CNS进行称量,其中TPU-g-MA的质量分数在所有复合材料体系中保持一致(3%,基于TPU),仅作为相容/分散助剂使用。将称量后的物料置于高速混料机中预混5min,使CNS在基体中实现初步均匀分散。预混后的物料经双螺杆挤出机进行熔融共混,螺杆直径为35mm,长径比为40:1,各加热区温度依次控制在170~190℃,螺杆转速保持恒定,以获得稳定的熔体流动状态并减少加工条件对性能差异的影响。挤出物经水冷定型后切粒,制得各处理组TPU/CNS复合粒料。随后,采用注塑成型机制备标准测试样条,注射温度控制在180~200℃,模具温度保持一致。其中,未添加CNS的样品作为对照组(CK),添加0.5%~2.0% CNS的复合材料分别记为CNS-0.5、CNS-1.0、CNS-1.5和CNS-2.0。

### 1.4 性能测试与表征

力学性能测试:拉伸性能按照GB/T 1040.2—2022在室温条件下进行测试,试样采用标准哑铃形样条,样品总长度为170mm,标距段长度50mm,标距段宽度10mm,端部宽度20mm,厚度4mm。记录拉伸强度、断裂伸长率及弹性模量,结果取5个平行样的平均值。缺口冲击性能按照GB/T 1843—2008进行测试,采用标准缺口试样,计算缺口冲击强度,样品尺寸为80mm×10mm×4mm。

TG分析:材料的热稳定性采用热重分析仪,按照

GB/T 27761—2011 进行测试。在氮气保气氛下,以 10 °C/min 的升温速率从室温升至 800 °C,记录样品的质量损失随温度变化的关系,得到热分解温度( $t_{5\%}$ 、 $t_{10\%}$ 、 $t_{\text{onset}}$ )、最大失重速率温度( $t_{\text{max}}$ )及残炭率。

LOI 测试:材料的阻燃性能通过极限氧指数进行评价,按照 GB/T 2406.2—2009 进行测试。试样在规定尺寸条件下进行测试,测定材料维持稳定燃烧所需的最低氧浓度,结果取多次测试的平均值。

UL-94 垂直燃烧测试:材料的垂直燃烧性能按照 GB/T 2408—2021 进行测试。根据试样在规定火焰作用下的燃烧时间、自熄行为及滴落情况,对材料的阻燃等级进行判定。

锥形量热测试:材料的燃烧行为采用锥形量热仪,按照 GB/T 16172—2007 进行测试。热辐射强度 35 kW/m<sup>2</sup>。根据实验结果绘制热释放速率(HRR)、总热释放量(THR)、产烟率(SPR)和总烟释放量(TSP)曲线。

耐老化性能测试:材料的耐老化性能采用紫外光/湿热加速老化试验,按照 GB/T 16422.2—2022 进行评价。在规定老化时间后,对试样的拉伸性能、断裂伸长率、硬度及表观色差进行测试。其中,硬度测试按照 GB/T 531.1—2008 进行测试;表观色差( $\Delta E$ )采用色差仪测定,按照 GB/T 3978—2008 进行测试,以未老化样品为参比计算色差变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TPU/CNS 复合材料力学性能分析

表 1 为 TPU/CNS 复合材料的力学性能。从表 1 可以

表 1 TPU/CNS 复合材料的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of TPU/CNS composites

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	缺口冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> )
CK	32.6±0.8	462±18	38.5±1.2	52.4±2.1
CNS-0.5	35.8±1.1	438±21	42.9±1.6	56.7±1.8
CNS-1.0	39.4±0.9	412±17	48.6±1.4	60.3±2.4
CNS-1.5	41.1±1.0	385±19	52.8±1.9	61.8±2.0
CNS-2.0	39.2±1.3	341±23	55.6±2.2	57.9±2.6

### 2.2 TPU/CNS 复合材料热学性能分析

图 1 为 TPU/CNS 复合材料的 TG 曲线,表 2 为 TPU/CNS 复合材料的 TG 特征参数。从图 1 和表 2 可以看出,所有样品均在高于 300 °C 的温度范围内表现出主要的热降解阶段,且复合材料与 CK 相比其热分解特性存在明显差异。具体而言,CK 的初始热分解温度( $t_{\text{onset}}$ )约为 315 °C,而添加 CNS 后的复合材料样品(CNS-0.5、CNS-1.0、CNS-1.5 和 CNS-2.0)均表现出更高的  $t_{\text{onset}}$ (分别约为 322、328、332、330 °C),表明 CNS 的引入有助于提高 TPU 基体的热稳定性。在  $t_{\text{max}}$  方面,CNS-1.5 显示出最高的  $t_{\text{max}}$ (近 380 °C),高于 CK(约 370 °C)约 10 °C。此外,在 600~700 °C 的高温区段,复合材料的残炭率普遍高于 CK,CNS-1.5 残炭率最高。这表明填料的存在可促进炭渣的形成,增强热降解过程中的结构稳定性与隔热屏障效应。上述 TG 行为与碳基纳米填料对聚合物热稳定性影响的普遍规律一致。一方面,

看出,随着 CNS 质量分数从 0 增加至 1.5%,复合材料的拉伸强度从 32.6 MPa 提升至 41.1 MPa,幅度约 26%,表现出增强效应。这种强度的提升主要归因于纳米填料在基体内形成有效载荷传递网络,通过界面剪切作用增强应力分布均匀性,从而提高基体的承载能力。当 CNS 质量分数进一步增至 2.0% 时,拉伸强度出现轻微下降,可能源于 CNS 团聚所致的应力集中现象(高含量填料导致界面弱区形成)<sup>[9]</sup>。类似增强机制在聚氨酯基纳米复合材料中已有报道,石墨烯类纳米片可与聚合物基体通过界面作用提高力学强度与模量,但过高含量会引起填料团聚,从而限制性能的提升<sup>[10]</sup>。

弹性模量随 CNS 含量的增加呈现明显的增大趋势,这表明 CNS 有效限制了 TPU 链段的运动自由度,提高了材料的刚性特征,而断裂伸长率则随着 CNS 含量的增加呈现逐渐下降的趋势,显示材料的变形能力因硬质填料引入而降低。这一现象与典型纳米增韧材料中刚-韧性平衡规律一致,即刚性增强通常伴随韧性下降,因为纳米填料能增加弹性模量但同时削弱长链聚合物的延展性<sup>[11]</sup>。在冲击性能方面,CNS-1.5 展现出最高的缺口冲击强度(61.8 kJ/m<sup>2</sup>),较 CK 提升明显,表明在该填料水平下复合材料的能量吸收能力及裂纹扩展阻碍能力达到平衡状态;而在更高填料比(2.0%)时,冲击性能有所回落,可能同样受到填料团聚与界面弱结合点增多的影响。

CNS 与 TPU 链段之间良好的界面作用能够阻碍热运动的扩散,为基体提供额外的热屏障,从而延迟链段的断裂与降解起始<sup>[12]</sup>。此外,在 TPU 纳米复合体系中引入高热稳定性纳米碳材料可提高高温残余质量,这与纳米填料形成热阻层、抑制聚合物基体分解扩展的机理密切相关<sup>[13]</sup>。值得注意的是,当 CNS 含量过高时(如 CNS-2.0),因填料易发生团聚导致有效界面面积减少,其热稳定性提升趋势不再明显,这与复合体系中填料分散状态对热降解行为的影响密切相关<sup>[14]</sup>。

### 2.3 TPU/CNS 复合材料 LOI 与 UL-94 分析

LOI 表征材料维持燃烧所需的最低氧浓度,是衡量材料可燃性的常用指标<sup>[15]</sup>;UL-94 评价材料在不同火焰暴露条件下的自熄行为及滴落情况,是工业应用中广泛采用的火焰阻燃等级测试方法<sup>[16]</sup>。表 3 为 PU/CNS 复合材料 LOI 与 UL-94 结果。从表 3 可以看出,CK 表现出较低的 LOI

(约22.3%)并在UL-94垂直燃烧测试中仅获得V-2级别,这与前人研究中纯TPU的燃烧特性一致(LOI约19%~22%,UL-94等级V-2)<sup>[17]</sup>。随着CNS的引入,LOI呈现上升趋势,这可能与CNS在燃烧过程中促进炭化层形成及抑制热解产物释放有关,这在纳米填料增强聚合物阻燃体系中已有类似观察<sup>[18]</sup>。特别是在CNS质量分数为1.5%时,LOI提升至26.1%,并且UL-94等级提升至V-0,表现出明显改善的阻燃性能;而在CNS-2.0的LOI增益略微收敛,可能与过量CNS的团聚影响炭层连续性及其氧气隔绝效率有关。

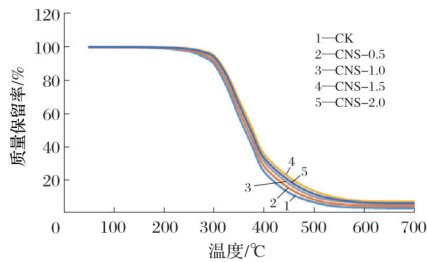


图1 TPU/CNS复合材料的TG曲线

Fig.1 TG curves of TPU/CNS composites

表2 TPU/CNS复合材料的TG特征参数

Tab.2 TG characteristic parameters of TPU/CNS composites

样品	$t_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$t_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{onset}}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	残炭率(600 $^{\circ}\text{C}$ )/%
CK	307.4	319.2	315.1	369.8	3.6
CNS-0.5	314.6	326.8	322.4	373.9	4.8
CNS-1.0	321.9	334.5	328.7	377.2	6.1
CNS-1.5	326.8	339.6	332.4	379.6	7.4
CNS-2.0	324.1	337.2	330.3	377.8	6.9

表3 TPU/CNS复合材料LOI与UL-94结果

Tab.3 Results of LOI and UL-94 of TPU/CNS composites

样品	LOI/%	UL-94等级
CK	22.3±0.5	V-2
CNS-0.5	23.6±0.4	V-2
CNS-1.0	24.8±0.3	V-2
CNS-1.5	26.1±0.4	V-0
CNS-2.0	26.3±0.5	V-0

## 2.4 TPU/CNS复合材料锥形量热分析

图2为TPU/CNS复合材料锥形量热燃烧曲线,表4为TPU/CNS复合材料锥形量热测试结果。从图2a和表4可以看出,CK的峰值热释放速率(PHRR)约1 085 kW/m<sup>2</sup>,随着CNS含量的增加,PHRR明显降低,CNS-1.5组降至约742 kW/m<sup>2</sup>,CNS-2.0组亦显著低于CK。这说明CNS的加入有效抑制了复合材料的燃烧剧烈程度,纳米填料通过促进炭层形成、改善热屏障效应来减缓热释放行为。TPU基体在未经填料增强时燃烧剧烈、HRR曲线尖锐的现象在多项研究中均有报道,且在纳米增强体系中出现显著抑制趋势<sup>[19]</sup>。已有研究报道,在TPU基体中引入二维碳基纳米填

料时,PHRR通常可由1 000 kW/m<sup>2</sup>以上降至700~850 kW/m<sup>2</sup><sup>[20]</sup>。本研究所得PHRR数值与上述已发表TPU/二维碳纳米增强体系的锥形量热结果处于相同量级范围,表明本实验数据具有良好的合理性与可靠性。从图2b和表4可以看出,随着CNS含量的增加,整个燃烧过程释放的THR总体下降。在600 s时,CK的THR达到约86.2 MJ/m<sup>2</sup>,而CNS-1.5组仅约63.9 MJ/m<sup>2</sup>。文献报道TPU/二维碳纳米复合体系的THR通常分布在60~75 MJ/m<sup>2</sup>范围内<sup>[21-22]</sup>,与本研究结果高度一致。这说明CNS在燃烧过程中能够促进连续炭层形成并降低可燃裂解产物释放,从而有效抑制热量积累。这表明燃烧过程中可燃组分的释放减少,热量积累和火灾风险降低。研究指出,纳米增强填料在聚合物基体燃烧过程中通过促进致密炭化层形成,减少基体与氧气的接触,从而有效降低THR,这是改善材料热安全性的关键指标之一<sup>[23]</sup>。

SPR和TSP是评价材料在燃烧过程中烟雾危害的重要指标。从图2c、图2d和表4可以看出,CK的SPR峰值约为0.312 m<sup>2</sup>/s,TSP最终达到约1 480 m<sup>2</sup>,而随着CNS含量的增加,SPR与TSP均呈下降趋势,CNS-1.5组的SPR峰值约为0.205 m<sup>2</sup>/s,TSP约为1 018 m<sup>2</sup>。已有研究指出,TPU/二维碳纳米填料体系的SPR和TSP可降低20%~40%<sup>[24-25]</sup>,本研究结果处于该变化区间,进一步说明所获得的锥形量热测试数据符合该类复合材料的典型燃烧行为特征。生成烟雾的减少对于建筑安全至关重要,因为烟雾是火灾中导致人员窒息伤亡的主要因素之一。已有研究表明,在聚氨酯类材料中添加纳米填料能够通过阻碍可燃气体释放及促进炭层隔离效应来降低烟雾生成速率与总烟量<sup>[26]</sup>。

## 2.5 TPU/CNS复合材料耐老化性能分析

表5~表8分别为TPU/CNS复合材料的拉伸强度保持率、断裂伸长率保持率、 $\Delta E$ 和硬度保持率。从表5可以看出,拉伸强度保持率随老化时间延长逐渐下降,但不同填料处理组之间差异显著,其中CNS-1.5组的拉伸强度保持率在28 d后仍达到约90.5%,明显高于CK(约81.2%)。这表明CNS的引入能够有效改善材料在长期环境暴露下的抗降解能力。这与碳基纳米填料在聚合物复合体系中抑制氧渗透、改善界面稳定性以延缓基体链段断裂的作用机制一致<sup>[27]</sup>。从表6可以看出,随着老化时间延长,各组样品的断裂伸长率均有所下降,但CNS增强组的降幅明显小于CK,特别是CNS-1.5的断裂伸长率保持率在28 d时仍高达约84.9%。这说明复合材料在老化过程中保持更好的韧性与形变能力,纳米级填料的界面约束效应可能减少基体链段的断裂与微裂纹扩展<sup>[28]</sup>。从表7可以看出,随着老化时间的延长,所有样品均发生不同程度的黄变或色差增加,但CNS增强组的 $\Delta E$ 增长较慢,尤其是CNS-1.5在28 d时的 $\Delta E$ 仅为4.8,相较CK(约7.2)明显更稳定。色差变化作为老化表征的宏观指标,与分子链断裂、氧化交联等微观降解过程密

切相关<sup>[29]</sup>。从表8可以看出,CNS增强复合材料老化后硬度下降幅度较小,尤其CNS-1.5在各时间段硬度保持率均最高。这说明在老化过程中复合材料的表面结构稳定性得以维持,这可能与CNS的界面增强和热稳定性提升有关。

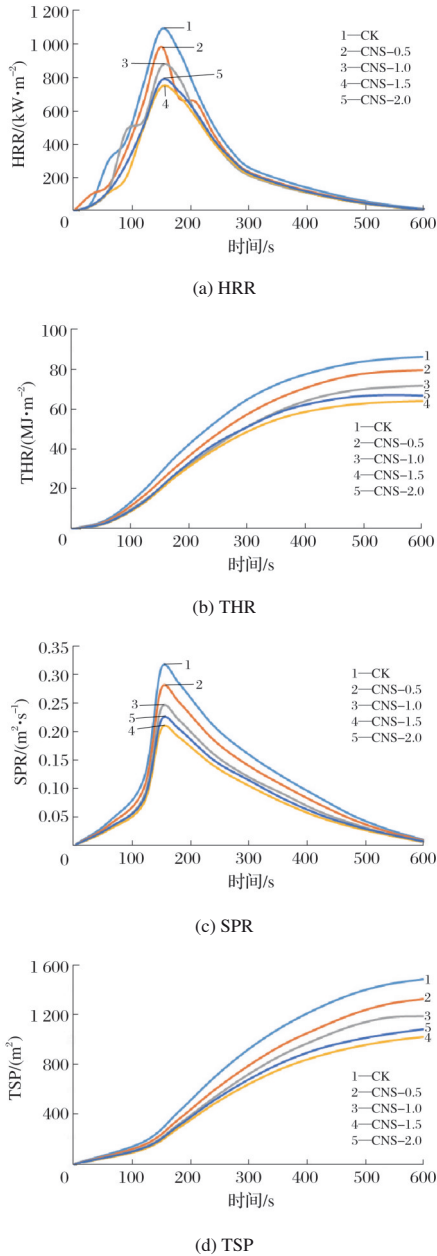


图2 TPU/CNS复合材料锥形量热燃烧曲线

Fig.2 Cone calorimetry combustion curves of TPU/CNS composites

表4 TPU/CNS复合材料锥形量热测试结果

Tab.4 Cone calorimetry test results of TPU/CNS composites

样品	点燃时间/s	PHRR/(kW·m <sup>-2</sup> )	THR/(MJ·m <sup>-2</sup> )	SPR/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	TSP/m <sup>2</sup>
CK	42±2	1 085±45	86.2±3.1	0.312±0.015	1 480±60
CNS-0.5	47±3	982±38	79.4±2.8	0.276±0.012	1 325±55
CNS-1.0	52±2	865±41	71.8±2.5	0.241±0.010	1 186±48
CNS-1.5	58±3	742±36	63.9±2.2	0.205±0.009	1 018±42
CNS-2.0	55±3	781±40	66.5±2.7	0.221±0.011	1 084±47

表5 TPU/CNS复合材料的拉伸强度保持率

Tab.5 Tensile strength retention rate of TPU/CNS composites

单位:%

样品	拉伸强度保持率			
	0 d	7 d	14 d	28 d
CK	100.0	93.1	87.5	81.2
CNS-0.5	100.0	94.8	89.6	83.7
CNS-1.0	100.0	96.2	91.7	86.9
CNS-1.5	100.0	97.9	94.3	90.5
CNS-2.0	100.0	96.5	92.8	88.6

表6 TPU/CNS复合材料的断裂伸长率保持率

Tab.6 Retention rate of elongation at break of TPU/CNS composites

单位:%

样品	断裂伸长率保持率			
	0 d	7 d	14 d	28 d
CK	100.0	88.4	82.9	75.5
CNS-0.5	100.0	89.7	85.1	78.6
CNS-1.0	100.0	91.1	87.6	81.7
CNS-1.5	100.0	93.6	90.2	84.9
CNS-2.0	100.0	91.9	88.5	82.5

表7 TPU/CNS复合材料的 $\Delta E$

Tab.7  $\Delta E$  of TPU/CNS composites

样品	$\Delta E$			
	0 d	7 d	14 d	28 d
CK	0	2.4	4.7	7.2
CNS-0.5	0	2.1	4.2	6.7
CNS-1.0	0	1.8	3.6	5.9
CNS-1.5	0	1.5	3.1	4.8
CNS-2.0	0	1.9	3.8	5.6

表8 TPU/CNS复合材料的硬度保持率

Tab.8 Hardness retention rate of TPU/CNS composites

单位:%

样品	硬度保持率			
	0 d	7 d	14 d	28 d
CK	100.0	96.8	92.3	87.5
CNS-0.5	100.0	97.4	94.1	90.2
CNS-1.0	100.0	98.1	95.8	92.6
CNS-1.5	100.0	98.9	97.4	95.0
CNS-2.0	100.0	98.2	96.1	93.7

### 3 结论

随着CNS含量的增加,TPU/CNS复合材料的拉伸强度、弹性模量和冲击性能均得到提升,但当CNS含量过高时,因填料团聚效应增强,力学性能和热稳定性提升趋势趋于减弱。在热学与阻燃性能方面,CNS的加入有效提高材料的初始热分解温度和残炭率,显著提升LOI并改善

UL-94阻燃等级。锥形量热测试结果进一步表明,CNS能够显著降低PHRR、THR及烟生成水平,从而有效降低火灾强度与烟雾危害。此外,在紫外/湿热加速老化条件下,TPU/CNS增强复合材料表现出更高的力学性能保持率、更小的色差变化及更稳定的硬度特征,显示出优良的耐环境老化能力。综合各项性能指标,CNS-1.5样品在增强效果与材料稳定性之间实现了最佳平衡。

### 参考文献

- [1] 范子林. 基于聚氨酯/聚芳醚腈纳米纤维的柔性SERS基底制备与性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [2] 贾海香, 张志毅. 氧化石墨烯负载氮化硼/天然橡胶复合材料的制备及性能研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(9): 663-668.
- [3] 于海涛. 碳纳米管的结构特性及界面强化对天然橡胶复合材料性能的影响研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [4] 杨巡宇. 氮化硼纳米管的制备及其应用研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(5): 462-465.
- [5] RUSSO P, LAVORIGNA M, PISCITELLI F, et al. Thermoplastic polyurethane films reinforced with carbon nanotubes: The effect of processing on the structure and mechanical properties[J]. European Polymer Journal, 2013, 49(2): 379-388.
- [6] 徐雪青. MOFs衍生碳基纳米材料的制备及其吸波性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [7] 周宇, 廖辉伟, 周艳娜, 等. 碳纳米管/氮化碳纳米片导热聚合物的制备和性能[J]. 西南科技大学学报, 2022, 37(1): 15-22.
- [8] 王艳艳. 聚酰亚胺/氮化碳纳米复合薄膜的微观结构设计及导热性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [9] 郑辉东. 3D氧化石墨烯纳米带-碳纳米管/TPU复合材料薄膜的制备与性能[J]. 材料工程, 2016, 44(6): 1-8.
- [10] 张德洲, 徐晨, 汪虹, 等. 石墨烯/聚氨酯纳米复合材料研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2021, 27(3): 174-180.
- [11] 王久强, 李永存, 刘朝阳, 等. “碳纤维-石墨烯”混合体系在3D打印聚氨酯复合材料力学及微波后处理工艺中的协同作用[J]. 高压物理学报, 2024, 38(3): 149-157.
- [12] RIGOTTI D, DORIGATO A, PEGORETTI A. Multifunctional 3D-printed thermoplastic polyurethane (TPU)/multiwalled carbon nanotube (MWCNT) nanocomposites for thermal management applications[J]. Applied Sciences, 2024, 14(20): 9614.
- [13] ROY S, SRIVASTAVA S K, PIONTECK J, et al. Montmorillonite-multiwalled carbon nanotube nanoarchitecture reinforced thermoplastic polyurethane[J]. Polymer Composites, 2016, 37(6): 1775-1785.
- [14] SATTAR R, KAUSAR A, SIDDIQ M. Advances in thermoplastic polyurethane composites reinforced with carbon nanotubes and carbon nanofibers: A review[J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2015, 31(2): 186-224.
- [15] 巩志伟. 耐火材料燃气窑炉氮氧化物减排实验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [16] 魏晓娟. 基于OBP电子产品用的无卤阻燃剂[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(2): 4.
- [17] ALTINAY J S, USTUNTAG S, OZMEN O, et al. Tailored flame retardant TPU eco-composites: Incorporating phytic acid polyethyleneimine complex and nanoclay[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025, 150(12): 8991-9002.
- [18] ARABY S, PHILIPS B, MENG Q S, et al. Recent advances in carbon-based nanomaterials for flame retardant polymers and composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 212: 108675.
- [19] WU W, ZHAO W J, GONG X J, et al. Surface decoration of Halloysite nanotubes with POSS for fire-safe thermoplastic polyurethane nanocomposites[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 101: 107-117.
- [20] LIU Y, YAO A S, FU L B, et al. Construction of fire safe thermoplastic polyurethane/reduced graphene oxide hierarchical composites with electromagnetic interference shielding[J]. Molecules, 2024, 29(13): 3108.
- [21] QIAN Y, HAN H Y, LI L, et al. Combustion behavior and thermal stability of TPU composites based on layered yttrium hydroxides and graphene oxide[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 142(1): 409-423.
- [22] QIAN Y, ZHENG J Y, LI L, et al. Application of the synergistic flame retardant europium hydroxide/graphene oxide hybrid material and zinc borate to thermoplastic polyurethane[J]. RSC Advances, 2021, 11(34): 21073-21083.
- [23] LIU C, SHI Y Q, FENG Y Z, et al. Design of core-multi shell flame retardant towards fire safe thermoplastic polyurethane composites with low toxic fumes generation[J]. Composites Communications, 2022, 35: 101339.
- [24] LIU C, WU W, SHI Y Q, et al. Creating MXene/reduced graphene oxide hybrid towards highly fire safe thermoplastic polyurethane nanocomposites[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 203: 108486.
- [25] LI M Q, CHEN Y J, KONG Z M, et al. Impact of a novel phosphoramidate flame retardant on the fire behavior and transparency of thermoplastic polyurethane elastomers[J]. ACS Omega, 2023, 8(20): 18151-18164.
- [26] 陈浩楠, 金勇, 周荣, 等. 阻燃聚氨酯纳米复合材料的研究进展[J]. 皮革科学与工程, 2024, 34(5): 50-59.
- [27] 章明秋, 阮文红, 容敏智. 纳米二氧化硅粒子增强聚丙烯的研究[C]//2014年全国高分子材料科学与工程研讨会学术论文集(上册). 成都: 中国化学会, 中国机械工程学会, 中国材料研究学会, 中山大学聚合物复合材料及功能材料教育部重点实验室, 2014.
- [28] FINNIGAN B, JACK K, CAMPBELL K, et al. Segmented polyurethane nanocomposites: Impact of controlled particle size nanofillers on the morphological response to uniaxial deformation[J]. Macromolecules, 2005, 38(17): 7386-7396.
- [29] LU T, SOLIS-RAMOS E, YI Y, et al. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 154: 203-210.