

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.024

褐煤酯型蜡对碳纳米管在聚丙烯中的分散性能影响

刘静远, 马宇飞, 张中华, 吴福梅, 李晓峰

(北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要:利用褐煤酯型蜡独特的双亲性分子结构——极性酯基与非极性长碳链协同作用的特征,将其作为分散剂用于改善碳纳米管(CNT)在聚丙烯(PP)基体中的分散状态。通过双螺杆挤出机进行熔融共混,成功制备了PP/CNT/褐煤酯型蜡复合材料。为评估褐煤酯型蜡的引入对PP复合材料综合性能的影响,对其分散均匀性、导电性能、加工流动性及力学性能开展了系统表征。结果表明,相较于常规塑料加工助剂聚乙烯蜡,褐煤酯型蜡可更有效地抑制CNT在PP基体中的团聚行为,显著提升其分散均匀性。扫描电子显微镜观察证实,添加褐煤酯型蜡后复合材料中未出现微米级尺度的CNT团聚体;傅里叶变换红外光谱测试进一步验证了酯型蜡通过键合CNT活性基团抑制了CNT团聚。同时,PP复合材料的导电性能得到明显增强,添加1%质量分数的褐煤酯型蜡即可使PP材料的表面电阻降低1.5个数量级(由 $5 \times 10^6 \Omega$ 降至 $1.5 \times 10^5 \Omega$)。此外,褐煤酯型蜡对PP的加工性能亦具有显著改善作用,添加质量分数为1%时,熔体流动速率(MFR)提升约18%;当添加量增至5%时,MFR提升幅度约40%。值得注意的是,在褐煤酯型蜡添加量不高于3%的范围内,复合材料的力学性能基本得以保持,其拉伸强度、冲击强度、弯曲强度及弯曲模量等关键指标均未发生明显下降。综上所述,褐煤酯型蜡不仅可作为一种兼具分散、润滑与导电协同功能的新型多功能加工助剂,有效替代传统PE蜡,同时也为解决纳米填料(尤其是CNT)在非极性PP基体中难以均匀分散的技术瓶颈,提供了一条切实可行的新路径。

关键词:褐煤酯型蜡;碳纳米管;聚丙烯;分散性;导电性

中图分类号:TQ325.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)07-0209-08

Effect of lignite ester wax on dispersion of carbon nanotubes in polypropylene

LIU Jingyuan, MA Yufei, ZHANG Zhonghua, WU Fumei, LI Xiaofeng

(National Institution of Clean and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: Taking advantage of the unique amphiphilic molecular structure of lignite ester wax, which features the synergistic effect of polar ester groups and non-polar long carbon chains, it was used as a dispersant to improve the dispersion state of carbon nanotubes (CNT) in polypropylene (PP) matrix. Through melt blending with a twin-screw extruder, PP/CNT/lignite ester wax composites were successfully prepared. To evaluate the effect of lignite ester wax on the comprehensive performance of PP composites, systematic characterizations were conducted on the dispersion uniformity, electrical conductivity, processing fluidity and mechanical properties of PP composites. The results indicate that comparing with the conventional plastic processing aid polyethylene wax, lignite ester wax inhibits the agglomeration behavior of CNT in PP matrix more effectively, significantly improving their dispersion uniformity. Scanning electron microscopy observations confirm that no micron-scale CNT agglomerates are present in the composites after the addition of lignite ester wax. Fourier transform infrared spectroscopy tests further indicate that the lignite ester wax inhibits the agglomeration phenomenon of CNT by bonding with the active groups of CNT. Meanwhile, the electrical conductivity of PP composites is significantly enhanced: the sheet resistivity of PP material reduces by 1.5 orders of magnitude (from $5 \times 10^6 \Omega$ to $1.5 \times 10^5 \Omega$) with the addition of only 1 wt% lignite ester wax. Additionally, lignite ester wax also significantly improves the processing performance of PP: the melt flow rate (MFR) increases by approximately 18% with 1 wt% addition, and approximately 40% with 5 wt% addition of lignite ester wax. Notably, within the range of lignite ester wax addition not exceeding 3 wt%, the

通信作者: 刘静远, 博士, 工程师, 研究方向为煤炭清洁高效利用

收稿日期: 2026-05-11

引用格式: 刘静远, 马宇飞, 张中华, 等. 褐煤酯型蜡对碳纳米管在聚丙烯中的分散性能影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 209-216.

LIU Jingyuan, MA Yufei, ZHANG Zhonghua, et al. Effect of lignite ester wax on dispersion of carbon nanotubes in polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 209-216.

mechanical properties of the composites are basically maintained, and key indicators such as tensile strength, impact strength, bending strength and bending modulus do not show significant decreases. In conclusion, lignite ester wax can serve as a new type of multifunctional processing aid with combined dispersion, lubrication and electrical conductivity functions, effectively replacing traditional PE wax. It also provides a practical new approach to solve the technical bottleneck of the difficulty in uniformly dispersing nanofillers (especially CNT) in non-polar PP matrix.

Keywords: lignite ester wax ; carbon nanotube ; polypropylene ; dispersion ; electrical conductivity

碳纳米管(CNT)因其优异的导电性与高长径比,被视为聚丙烯(PP)功能化改性的理想纳米填料,在抗静电及电磁屏蔽领域应用潜力巨大^[1-3]。然而,CNT比表面积大、长径比高,分子间范德华力使其极易在PP基体中缠绕和团聚,严重制约了其导电、力学等性能的发挥^[4-6]。如何实现CNT的高效、稳定分散,是当前功能复合材料开发的核心难题之一。

解决该问题的策略主要分为化学改性与物理分散两类。化学改性通过接枝或修饰在CNT表面引入活性官能团,可有效抑制团聚,但工艺相对复杂^[7]。工业上更青睐操作简便的物理分散法,如高速搅拌、球磨等,但此类方法往往面临分散效率低、分散稳定性差的瓶颈,经处理的CNT在静置后易重新团聚^[8]。近年来,在加工过程中引入兼具极性基团与非极性长链的双亲性分散剂,被认为是一种兼顾分散效率与稳定性的有效策略。这类助剂的极性端与CNT表面键合,非极性端与PP基体相容,从而在界面形成空间位阻,实现长效稳定分散^[9]。

在众多加工助剂中,蜡类物质因其优异的润滑性和基体相容性而备受关注。其中,非极性的聚乙烯(PE)蜡是目前工业上广泛使用的加工润滑剂,主要依赖物理润滑降低熔体黏度来辅助分散,但因其与CNT表面缺乏有效相互作用,难以阻止CNT的再团聚^[10]。与之形成对比的是,褐煤酯型蜡(酯型蜡)是天然矿物褐煤蜡的精制产品,具有无致癌性、耐酸蚀、高化学稳定性及优良的电绝缘性等特点,广泛应用于工程塑料、橡胶、皮革及日化产品等领域^[11-12],其化学结构为长链(C26~C32)脂肪酸与多元醇构成的酯类化合物,分子一端为极性酯基,另一端为非极性长链烷基,具有典型的双亲性^[13-14]。其酯基理论上可与CNT表面的活性含氧官能团形成氢键或化学键合,从而实现化学锚定与物理润滑的协同分散效果,但目前在PP/CNT体系中鲜有研究报道。

基于此,本文以褐煤酯型蜡为分散助剂,并选取工业上常用的PE蜡作为对照,系统研究了它对

CNT在PP基体中分散性的影响,同时分析了PP/CNT/蜡复合材料的导电性、加工性能及力学性能的变化,揭示了其作用机理,从而为CNT分散难题提供一种新颖、环境友好的解决方案,同时拓展了褐煤蜡的高附加值应用领域。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP树脂:M100,南京扬子石油化工公司;

CNT:IM297C-12,中国科学院成都有机化学有限公司;

酯型蜡:Licowax®E,德国Clariant公司;

PE蜡:316A,美国Honeywell公司。

蜡的主要指标见表1。

表1 蜡的主要指标

Tab. 1 Main parameters of wax

Items	Lignite ester wax	PE wax	Reference standards
Acid value/(mg KOH·g ⁻¹)	15-20	15-18	ASTM D1386-15 (2022)
Saponification value/(mg KOH·g ⁻¹)	140-160	63-67	ASTM D1387-89 (2019)
Whiteness/WH	75-79	95-99	GB/T17749-2008
Drop point/°C	79-83	140-142	ASTM D3954-15 (2022)

1.2 仪器及设备

HAAKE 挤出机: Rheomex OS, 美国 Thermo Fisher Scientific公司;

注塑机: Systec80/420-200, 恩格尔机械(上海)有限公司;

模压机: Platen press P300 PM, 德国科林公司;

熔体流动速率(MFR)仪: SN22448, 意大利CEAST公司;

表面电阻仪: ACL-380, 美国ACL公司;

扫描电子显微镜(SEM): Nova Nano SEM 450, 美国FEI公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nicolet 8700, 美国Thermo Fisher Scientific公司;

万能力学试验机: 5965, 美国INSTRON公司;

缺口冲击试验机:9050,意大利CEAST公司。

1.3 试样制备

(1) PP改性制备。

将PP、CNT、酯型蜡、PE蜡等原料于实验前进行充分干燥。随后,按表2配方制备样品,将所有组分混合均匀后,采用HAAKE挤出机进行熔融共混、挤出并造粒。挤出工艺参数设定为:温度区间190~230℃,螺杆转速100 r/min,喂料速度8 Hz。所得粒料置于80℃的干燥箱中干燥4 h。

表2 实验配方

Tab. 2 Experimental formulation

PP	CNT	Wax		%
		Lignite ester wax (experimental group)	PE wax (control group)	
96.5	3.5	—	—	
96.0	3.5	0.5	0.5	
95.5	3.5	1.0	1.0	
95.0	3.5	1.5	1.5	
93.5	3.5	3.0	3.0	
91.5	3.5	5.0	5.0	

(2)力学性能测试样条制备。

样品采用注塑机进行标准样条制备,将干燥好的粒料通过喂料斗加入到注塑机中,其中注塑机的注射速度、压力以及各段温度被精确设置,注塑温度设置为:喂料区50℃,机筒温度区间190~230℃,模具温度40℃。

(3)表面电阻测试样条准备。

样品采用模压机进行制备,将干燥好的粒料称取6 g放入模压机的模具中,在200~240℃的设定温度预热10 min,随后在5 MPa的上下模板合紧压力下保压5 min,并在该压力下冷却到75℃以下。通过模具模压成直径100 mm的圆形薄片,用于表面电阻测试。

1.4 测试与表征

SEM分析:将不同蜡改性的PP复合材料的测试样条在液氮中放置15~30 min,充分冷却后迅速折断,然后将裁剪好的立方体小样条用导电胶带固定在样品台上,表面进行喷金处理以增强其导电性,在SEM下观察复合材料的形态结构。

FTIR测试:将各组的标准测试样条切薄片,保证薄片面积大于扫描窗口且平整。扫描范围500~4 000 cm^{-1} ,分辨率4 cm^{-1} ,累计扫描32次。

表面电阻率测试:根据MT 113-1995标准测试不同蜡改性的PP复合材料的表面电阻率,测试电压

为250 V,每组样品测试5次取平均值。待测样品为直径100 mm、厚0.5 mm的圆片,待测样品放置环境:室温23℃,湿度33%。

MFR测试:根据GB/T 3682.1-2018,采用MFR仪对熔体流动速率进行测试,测试温度230℃,测试负荷2.16 kg。

拉伸性能测试:根据GB/T 1040.1-2025表征不同蜡改性PP复合材料的拉伸强度,利用万能试验机进行测试,设定拉伸速率为5 mm/min。每种配方的共混物材料至少准备5个试样以确保测试结果的可靠性与重复性。

冲击性能测试:根据GB/T 1043.1-2008表征不同蜡改性PP复合材料的冲击强度。每种配方的共混物至少准备5个试样以确保测试结果的可靠性与重复性,缺口类型为A型,样品尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。

弯曲性能测试:根据GB/T 9341-2008表征不同蜡改性PP复合材料的弯曲强度。利用万能试验机进行测试,设定速率为2 mm/min。每种配方的共混物料至少准备5个试样以确保测试结果的可靠性与重复性,样品尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。

2 结果与讨论

2.1 分散性

图1为添加不同种类和含量蜡的PP基材料微观SEM形貌。如图1所示,系统考察了不同添加量下PE蜡和酯型蜡对CNT在PP基体中分散行为的影响,图中以黄色虚线标示典型炭黑团聚体。在未添加任何分散剂的对照组(图1a)中,可观察到尺寸约为4 μm ×6 μm 的CNT团聚体,说明团聚现象较为严重。当添加0.5%PE蜡时(图1b),团聚体尺寸未见减小,团聚现象仍然显著;而在相同添加量的酯型蜡作用下(图1c),团聚体的尺寸大幅降低,多数CNT以较小的聚集或初级粒子形态分散。随着添加量增至1%(图1d至图1e)和1.5%(图1f至图1g),两种蜡均进一步改善了CNT的分散状态,然而添加酯型蜡材料始终呈现出数量更少、尺寸更小的团聚体,且颗粒分布均匀性更优。当添加量进一步提高至3%(图1h至图1i)和5%(图1j至图1k)时,PE蜡处理样品中仍可观察到少量残余团聚体,而酯型蜡处理样品中几乎无可见团聚体,CNT呈高度均匀的单颗粒态分散。上述结果表明,酯型蜡对CNT在PP基体中的分散效果显著优于传统PE蜡。且当酯

型蜡添加质量分数为1%时,其对分散性的改善效果已趋于饱和,继续增加添加量并无明显增益,说

明酯型蜡在相对较低的添加比例下即可发挥最优的分散助剂作用。

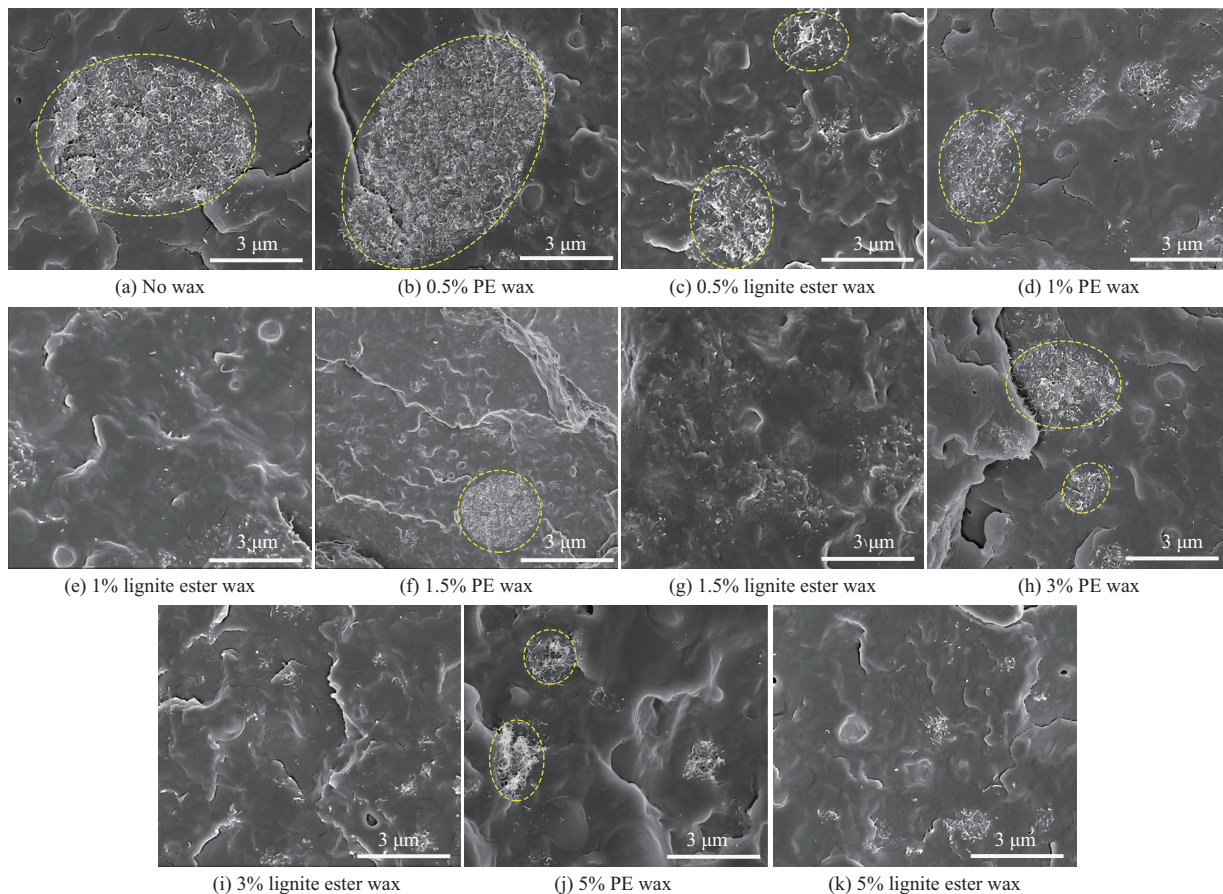


图1 添加不同种类和含量蜡的PP基材料微观SEM形貌

Fig. 1 SEM microstructural morphology of PP-based materials adding different types and contents of wax

酯型蜡对CNT分散行为的改善可归因于其独特的分子结构^[11-14],其为长链脂肪酸与多元醇构成的酯类化合物,具有一端极性酯基和一端非极性长链烷基的典型双亲性结构。在复合材料体系中,酯型蜡的一端非极性长碳链与非极性的PP基体具有良好的相容性,而另一端极性酯基基团则可与CNT表面的极性基团产生亲和作用。这种双亲结构使得蜡分子能够锚定在CNT表面,形成包覆,从而有效阻隔CNT之间的相互靠近与团聚,最终提高CNT在树脂基体中的分散稳定性与界面相容性^[15-16],如图2所示。

为进一步验证上述推测,利用FTIR仪对未添加蜡、添加1%PE蜡和1%酯型蜡的PP复合材料进行表征。如图3所示,三个样品的谱图在吸收峰位置上高度一致:归属于PP的特征峰,包括 2950 cm^{-1} 和 2916 cm^{-1} 附近的甲基和亚甲基不对称伸缩振动峰、 2870 cm^{-1} 和 2840 cm^{-1} 附近的甲基和亚甲基对称伸

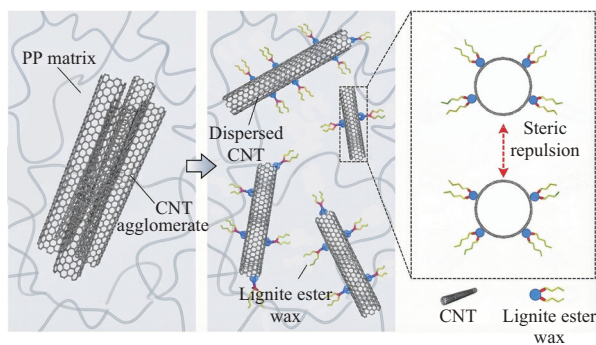


图2 褐煤酯型蜡促进PP基体中CNT分散作用机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the mechanism by which Lignite Ester wax promotes the dispersion of carbon nanotubes in PP matrix

缩振动峰、 1453 cm^{-1} 和 1374 cm^{-1} 附近的甲基和亚甲基弯曲振动峰等,均未出现明显位移;经归一化处理后,这些峰的相对强度也基本保持相同,表明蜡组分的引入并未改变PP基体自身的化学结构。除PP特征峰外,位于 1660 cm^{-1} 和 1632 cm^{-1} 附近的C=C骨架伸缩振动峰,以及 3363 cm^{-1} 附近的羟基

伸缩振动峰均归属于CNT,对比归一化后的峰强度可以发现:在未添加蜡的样品中,上述CNT特征峰的强度最高;添加PE蜡的样品中峰强度略有减弱;而在添加酯型蜡的样品中,这些峰的强度最低且谱带明显展宽。结合SEM观测结果推断,未添加蜡时CNT发生显著的宏观团聚,红外光斑区域内局部CNT浓度过高,导致吸收峰异常增强。添加PE蜡后峰强度仅呈微弱下降,说明PE蜡对CNT仅具有有限的物理分散作用。添加酯型蜡后,峰强度大幅降低且峰形展宽,可从两方面加以解释:一方面,酯型蜡分子中的极性酯基与CNT表面的活性基团(如羟基等)发生键合作用,消耗了CNT原有的特征官能团,致使相应吸收峰减弱^[17-18];另一方面,酯型蜡的润滑作用有效降低了CNT与PP基体之间的界面张力,使CNT能够以较小聚体的形式均匀分散在PP连续相中,避免了因宏观团聚导致的局部浓度富集,从而进一步削弱了CNT特征峰的吸收强度。

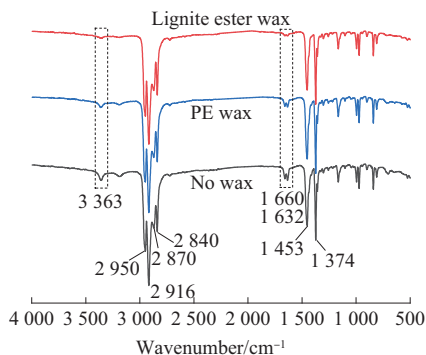


图3 未添加蜡、添加1%PE蜡和1%酯型蜡的PP复合材料FTIR谱图
Fig. 3 FTIR spectra of PP composites with no wax, 1% PE wax and 1% lignite ester wax

2.2 导电性

复合材料的导电性能主要取决于CNT的含量与分散效果,在含量不变的情况下,表面电阻下降即可说明CNT在聚合物体系中的分散性能得到明显提升,从而更有利于形成导电网络,大幅提高材料的导电性能^[19-20]。图4为添加不同含量蜡的PP/CNT复合材料表面电阻测试结果。结果显示,酯型蜡添加量仅0.5%时,复合材料的表面电阻从未添加蜡样品的 $5 \times 10^6 \Omega$ 降低至 $3 \times 10^5 \Omega$,降幅约1.2个数量级,导电性能大幅提升;添加量增加为1%时,可使材料的表面电阻降至 $1.5 \times 10^5 \Omega$,降幅可达1.5个数量级。这与图1中观察到的添加酯型蜡后CNT分散性得到提升的现象一致。相比之下,添加PE蜡最多仅能使材料电阻下降一个数量级,这说明相比

于现有技术中常用的PE蜡,少量添加酯型蜡更有利于使CNT在PP基体中分散,从而提升导电性能。而随着酯型蜡含量进一步增加($<0.3\%$),表面电阻进入平台期或略有增大,由此推测1%的添加量已达到其临界浓度,在CNT表面形成了饱和吸附层,在此条件下,继续添加蜡并不会进一步提升CNT的分散效果,仅能促使蜡分子数量增多,而过多的游离蜡分子则可能通过竞争性吸附作用夺取吸附层蜡分子,反而导致CNT分散体系的稳定性下降,表现为表面电阻不再下降甚至有所升高^[21]。这与图1中继续增大添加量,CNT的分散程度未观察到显著提升的现象一致。此外,添加量增至5%时电阻再次下降,推测由于过量的蜡在结晶时产生微观相分离,将CNT排斥浓缩至晶界处,使其局部有效浓度突破渗流阈值,表现为导电性提升^[21]。

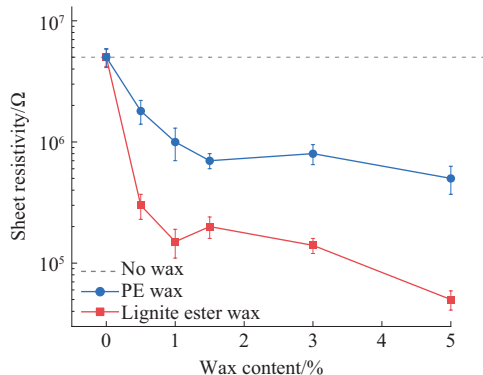


图4 添加不同种类和含量蜡对PP复合材料表面电阻的影响
Fig. 4 Effect of different types and contents of wax on sheet resistivity of PP composites

2.3 加工性能

通常在实际生产中需大量填充CNT方能获得优异的电学性能,以满足抗静电等功能要求,然而高填充量往往导致材料的加工流动性下降,增加成型加工难度,因此添加合适的助剂以提升材料的加工流动性尤为重要^[22]。图5为添加不同蜡含量的PP/CNT复合材料的MFR,从图中可以看出随着蜡含量的增加,材料的MFR呈现明显的上升趋势,其熔体流动性得到持续改善,酯型蜡的添加质量分数为1%时,可使复合材料的MFR提升约18%,添加3%时,MFR提升约26%,添加量增至5%时,复合材料的MFR升高约40%。这说明酯型蜡分子结构的双亲性不仅通过化学锚定作用改善了CNT的分散性,其柔顺的烷基链与PP基体的分子结构具有良好的热力学相容性,能够有效降低CNT与PP之间的界面张力,改善界面润湿性,使CNT更易于被熔体

浸润和分散。因此在熔融加工过程中,酯型蜡本身优异的润滑特性可降低PP分子链间的内摩擦及CNT团聚体与熔体间的外摩擦,还可能增强填料与PP基体之间的界面浸润性,其非极性长链部分可在基体中产生内部润滑作用,从而提升了复合体系的加工流动性^[23]。而添加PE蜡的样品MFR最高仅提升23%。以上结果进一步证明在提升复合材料加工性能方面,酯型蜡比传统的PE蜡更有优势。

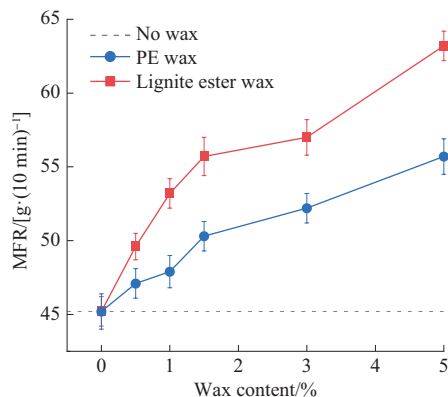
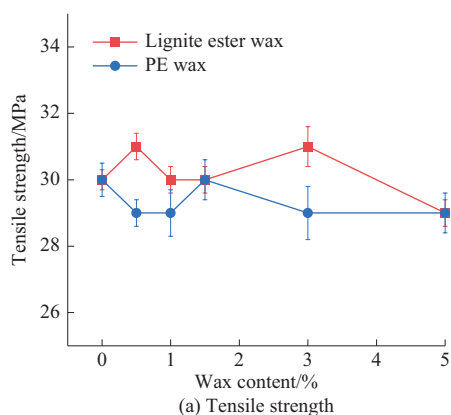


图5 添加不同种类和含量蜡对PP材料MFR的影响

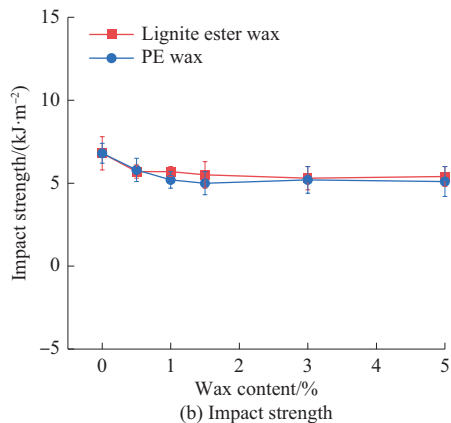
Fig. 5 Effect of different types and contents of wax on MFR of PP composites

2.4 力学性能

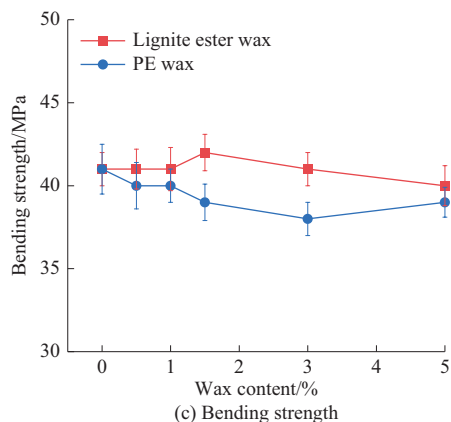
蜡作为助剂对塑料的力学性能影响通常遵循“适量改善、过量劣化”的普遍规律,适量添加可改善加工流动性,并通过促进填料分散间接提升强度与韧性,而过量添加则可能因过度润滑或相分离导致力学性能下降^[24]。本文对不同蜡添加量的PP基复合材料样品进行了拉伸、冲击及弯曲性能测试,结果如图6所示。总体而言,酯型蜡在保持或提升材料力学性能方面优于PE蜡。在拉伸强度方面,酯型蜡在0.5%和3.0%添加量下,最高值可达到31 MPa,而PE蜡在各添加量下多为29 MPa,且未呈现明显增强效果。冲击强度方面,未添加蜡时材料为6.8 kJ/m²,随着蜡含量增加,两种蜡均导致材料冲击强度有所下降,但酯型蜡的下降幅度略小于PE蜡(如1.5%时,添加酯型蜡为5.5 kJ/m²,添加PE蜡为5.0 kJ/m²)。弯曲强度数据表明,酯型蜡在各含量下维持在40~42 MPa,高于PE蜡添加时的38~41 MPa。弯曲模量方面,酯型蜡在0.5%~3.0%范围内均高于添加PE蜡的,仅在5.0%时略低。综上所述,酯型蜡对PP基体力学性能的负面影响较小,且在适量添加时(0.5%~3.0%)可保持或略微提升拉伸强度与弯曲模量,表现出优于PE蜡的力学性能保持



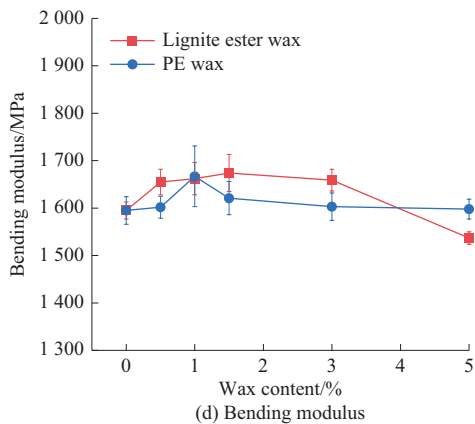
(a) Tensile strength



(b) Impact strength



(c) Bending strength



(d) Bending modulus

图6 添加不同种类和含量蜡对PP基材料的力学性能影响
Fig. 6 Effect of different types and contents of wax on mechanical properties of PP-based materials

能力。

3 结论

(1)相较于PE蜡,褐煤酯型蜡可有效抑制CNT在PP体系中的团聚,显著提升分散效果,明显提升材料的导电性能,当添加量仅1%时即可使PP材料表面电阻下降1.5个数量级。

(2)褐煤酯型蜡可显著提升PP材料的MFR,在添加量1%时MFR提升约18%,有效改善其加工性能。当质量分数不高于3%时,褐煤酯型蜡的添加能保持或略微提升PP材料原有的力学性能。

(3)在PP体系中,具备双亲性结构的褐煤酯型蜡通过化学锚定与物理润滑协同作用,可作为一种集分散、润滑与导电协同作用于一体的新型多功能加工助剂,既能有效替代传统PE蜡,也为突破纳米填料,尤其是CNT,在非极性PP基体中难以均匀分散的技术瓶颈,提供了一条切实可行的新路径。

参考文献

- [1] 李亚莎,赵光辉,曾跃凯,等.不同官能团修饰碳纳米管填充PP复合材料分子模拟[J].工程塑料应用,2024,52(3):13-20.
LI Yasha, ZHAO Guanghui, ZENG Yuekai, et al. Molecular simulation of PP composites modified by carbon nanotubes with different functional groups[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 13-20.
- [2] YU Y, YIN H, WANG X G, et al. Towards antistatic polypropylene composites: Enhancing carbon nanotubes dispersibility through dynamic covalent bonding[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2026, 37. DOI:10.1002/pat.70516.
- [3] 杨玺,任宏光,李辉,等.抗静电聚丙烯材料研究进展[J].当代化工研究,2025(1):5-9.
YANG Xi, REN Hongguang, LI Hui, et al. Modification and research progress of antistatic polypropylene materials[J]. Modern Chemical Research, 2025(1):5-9.
- [4] SHEN Z J, WANG S, BI Y C, et al. Recent research progress on the dispersion methodologies and their application within carbon nanotube-based polymer composites[J]. Materials Today Chemistry, 2026, 54. DOI:10.1016/j.mtchem.2026.103636.
- [5] KUMAR R, SRIVASTAVA P, AGRAWAL A P, et al. Development and characterization of polypropylene-carbon nanotubes (PP-CNT) composites: An overview toward hurdles and achievements[J]. Macromolecular Symposia, 2025, 414. DOI: 10.1002/masy.202400058.
- [6] LI G C, LIU T Y, CHEN X L, et al. Effect of matrix resin components on properties of the semi-conductive shielding material for high-voltage cable[J]. High Voltage, 2024, 9(2):419-428.
- [7] 陶淑,杨钰,林旺阳.多填料填充聚合物基辐射屏蔽材料研究进展[J].复合材料学报,2025. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250919.001.
- TAO Shu, YANG Yu, LIN Wangyang. Research progress in multifiller-filled polymer-based composites for radiation shielding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20250919.001.
- [8] 张梦辉,马忠雷,马建中,等.聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构设计性能研究进展[J].复合材料学报,2021,38(5):1358-1370.
ZHANG Menghui, MA Zhonglei, MA Jianzhong, et al. Research progress of structure design and performance of polymer-based electromagnetic shielding composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5):1358-1370.
- [9] 白鹏翔,闫闯,程庆魁,等.乙撑双硬脂酸酰胺在天然橡胶中的应用[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2020,41(5):81-87.
BAI Pengxiang, YAN Chuang, CHENG Qingkui, et al. Application of ethylene bis-stearamide in natural rubber[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(5):81-87.
- [10] 曲琳,李肖夫,李汝贤,等.聚乙烯蜡的制备、应用及市场[J].广东化工,2025,52(6):77-80.
QU Lin, LI Xiaofu, LI Ruxian, et al. The preparation, application and market of polyethylene wax[J]. Guangdong Chemical Industry, 2025, 52(6):77-80.
- [11] MICHAEL S, 严晴, 严一丰. PVC 润滑剂(2):PVC 高性能添加剂蒙旦蜡[J].塑料助剂,2020(4):1-4.
MICHAEL S, YAN QING, YAN Yifeng. Lubricants for PVC (2): Montan waxes-high-performance additives for PVC[J]. Plastic Additives, 2020(4):1-4.
- [12] 张敕,向诚,褐煤蜡:褐煤高效清洁综合利用[M].北京:冶金工业出版社,2018.
ZHANG Mi, XIANG Cheng. Montan wax: Efficient and clean comprehensive utilization of lignite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [13] EDWARDS V A, KIPPING P J, JEFFERY P G. Composition of montan wax[J]. Nature, 1963, 199:171-172.
- [14] BASSON I, REYNHARDT E C. An investigation of the structures and molecular dynamics of natural waxes. I. Beeswax[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21(9). DOI:10.1088/0022-3727/21/9/018.
- [15] 傅明利,侯帅,王磊,等.高压电缆半导电屏蔽料研究进展及关键技术分析[J].材料导报,2023,37(21):64-70.
FU Mingli, HOU Shuai, WANG Lei, et al. Research progress and key technologies of semi-conductive shielding materials for high-voltage cables[J]. Materials Reports, 2023, 37(21):64-70.
- [16] 侯帅,傅明利,黎小林,等.加工助剂对高压电缆半导电屏蔽料性能影响研究[J].中国电机工程学报,2023,43(3):1222-1230.
HOU Shuai, FU Mingli, LI Xiaolin, et al. Effect of processing AIDS on performance of semi-conductive shielding materials for high voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1222-1230.
- [17] AMBROGI V, gentile G, DUCATI C, et al. Multiwalled carbon nanotubes functionalized with maleated poly(propylene) by a dry

- mechano-chemical process[J]. *Polymer*, 2012, 53(2):291–299.
- [18] PARIJA S, BHATTACHARYYA A R. Multiwalled carbon nanotubes-based polypropylene composites: Influence of interfacial interaction on the crystallization behavior of polypropylene[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2017, 57(2):183–196.
- [19] 王建, 张谦, 邵明旺. 聚丙烯混杂碳质填料复合材料的导电性能[J]. *塑料工业*, 2022, 50(2):47–51.
- WANG Jian, ZHANG Qian, SHAO Mingwang. Electrical conductivity of polypropylene/carbonaceous filler hybrid composites[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(2):47–51.
- [20] 余欣, 聂闰盼, 吴吉, 等. 分散剂对高压电缆半导体屏蔽料的性能影响[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(11):6 496–6 506.
- YU Xin, NIE Runpan, WU Ji, et al. Effect of dispersants on performance of semi-conductive shielding materials for high-voltage cables[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(11): 6 496–6 506.
- [21] 曹素芝, 孙晓刚, 李静, 等. 分散剂对碳纳米管在聚合物基体中分散性能的影响[J]. *塑料*, 2008, 37(3):42–44, 81.
- CAO Suzhi, SUN Xiaogang, LI Jing, et al. The effect of dispersant on dispersion of carbon nanotube in polymer[J]. *Plastics*, 2008, 37(3):42–44, 81.
- [22] 徐曙, 章彬, 胡晨, 等. XLPE绝缘高压电缆屏蔽料树脂关键性能研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(2):91–95.
- XU Shu, ZHANG Bin, HU Chen, et al. Research on key properties of XLPE insulated high voltage cable shielding resin[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(2):91–95.
- [23] 李胤, 周松, 鲁超飞, 等. PP-g-MAH对尼龙6/炭黑复合材料性能和形貌的影响[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(1):44–48.
- LI Yin, ZHOU Song, LU Chao, et al. Effect of PP-g-MAH on properties and morphologies of nylon 6/carbon black composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(1):44–48.
- [24] WANG H H, QU Q, WANG J, et al. Recent advances in the dispersion and interfacial characteristics of carbon nanotubes within polyamide composites[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(9):7 763–7 784.

(上接第 198 页)

- [23] HOLZER L, MARMET P, FINGERLE M, et al. Tortuosity-porosity relationships: Review of empirical data from literature [M]//*Tortuosity and Microstructure Effects in Porous Media: Classical Theories, Empirical Data and Modern Methods*. Cham: Springer International Publishing, 2023:51–89.
- [24] SHIN D M, SON H, PARK K U, et al. Al₂O₃ ceramic/nanocellulose-coated non-woven separator for lithium-metal batteries[J]. *Coatings*, 2023, 13(5):916–932.
- [25] CHOI S, LIM Y, LIM J, et al. Coupled effects of separator microstructure and active material diffusion kinetics on high-power performance of lithium-ion batteries[J]. *Advances in Industrial and Engineering Chemistry*, 2025, 1(1). DOI:10.1007/s44405-025-00033-w.
- [26] KUNG D C N, MOON J, KANG H, et al. Enhancing CA-based separators with thermo-responsive ionic liquids: A path to eco-friendly membrane production and multifaceted applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 337. DOI:10.1039/d3nr06536 g.
- [27] ZHANG X J, WU Y, YU B, et al. Recent advances in functionalized separator for dendrites-free and stable lithium metal batteries[J]. *EcoEnergy*, 2024, 2(4):549–598.