

石墨烯对聚丙烯复合材料性能影响的优化掺量研究

王 韡¹, 殷兆奎¹, 陈 萍¹, 龚晓莹^{2*}

(1. 云南工商学院智能科学与工程学院, 云南 昆明 651700; 2. 昆明冶金高等专科学校, 云南 昆明 650033)

摘要: 以石墨烯微片(GNPs)为阻燃剂和抗静电剂改性聚丙烯(PP), 制备PP/GNPs复合材料, 通过力学性能、阻燃性能和抗静电性能研究得出 GNPs 对复合材料综合性能的影响规律, 并建立曲线相关性方程。研究表明: 随着 GNPs 含量的增加, 复合材料的拉伸强度和弯曲强度先增加后降低。GNPs 提高了复合材料的阻燃性能。GNPs 质量分数为 0~8% 时, 极限氧指数(LOI)、总热释放量(THR)和总烟释放量(TSP)的变化规律与 GNPs 含量接近线性关系; 进一步增加 GNPs, LOI 增长缓慢, THR 和 TSP 降低缓慢。GNPs 提高了复合材料的抗静电性能。GNPs 质量分数为 0~8% 时, 表面电阻率与 GNPs 含量呈线性降低关系; 进一步增加 GNPs, 表面电阻率基本稳定。GNPs 质量分数达到 8% 后, 复合材料抗静电性能在不同温度和湿度下保持稳定。GNPs 质量分数为 8% 时, 复合材料综合性价比较高, 与纯 PP 相比, LOI 提高 71.2%, THR 和 TSP 降低 55.1% 和 51.2%, 表面电阻率降低近 10 个数量级且满足相关标准要求。

关键词: 石墨烯微片; 聚丙烯; 力学性能; 阻燃性能; 抗静电性能

中图分类号: TQ325.1⁺4; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0045-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.008

Study on Optimization Dosage of Graphene on Properties of Polypropylene Composites

WANG Wei¹, YIN Zhaokui¹, CHEN Ping¹, GONG Xiaoying^{2*}

(1. School of Intelligent Science and Engineering, Yunnan Technology and Business University, Kunming 651700, China;

2. Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China)

Abstract: Graphene nanoplatelets (GNPs) were used as flame retardants and antistatic agents to modify polypropylene (PP) to prepare PP/GNPs composites. Through the study of mechanical properties, flame retardancy, and antistatic performance, the influence of GNPs on the comprehensive properties of the composites was determined, and curve correlation equations were established. The research indicated that as the amount of GNPs increased, the tensile and flexural strengths of the composites first rose and then declined. GNPs enhanced the flame retardancy of the composites; when the mass fraction of GNPs was between 0 and 8%, the changes in the limiting oxygen index (LOI), total heat release (THR), and total smoke release (TSP) were nearly linear with the GNP content. However, further increases in GNPs led to a slower rise in LOI and a slower decline in THR and TSP. GNPs also improved the antistatic performance of the composites; with a GNP mass fraction of 0 to 8%, the surface resistivity decreased linearly with increasing GNP content. Beyond this range, the surface resistivity remained relatively stable. When the GNP mass fraction reached 8%, the antistatic performance of the composites remained stable under different temperature and humidity conditions. At a GNP mass fraction of 8%, the composites exhibited a high comprehensive performance. Compared with pure PP, the LOI increased by 71.2%, while THR and TSP decreased by 55.1% and 51.2%, respectively. The surface resistivity was reduced by nearly 10 orders of magnitude, meeting the relevant standard requirements.

Keywords: GNPs; PP; Mechanical properties; Flame retardancy; Antistatic performance

收稿日期 Submitted date 2025-04-13; 修回日期 Revised date 2025-05-20; 录用日期 Accepted date 2025-06-23

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2021J0910)

*联系人, 515166244@qq.com

引用本文: 王 韡, 殷兆奎, 陈萍, 等. 石墨烯对聚丙烯复合材料性能影响的优化掺量研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 45-50.

Citation: WANG W, YIN Z K, CHEN P, et al. Study on optimization dosage of graphene on properties of polypropylene composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 45-50.

聚丙烯(PP)是一种化学稳定性好、耐热性较高、加工简单、质轻且力学性能良好的热塑性聚合物,广泛应用于建筑、包装、交通、电器、医疗和航空航天等领域^[1-3]。然而,PP也存在一些缺点,尤其是易燃和抗静电性能差,这些特性限制其在特定领域的应用^[4-6]。在建筑行业中的墙板和管道等产品以及在交通运输领域的汽车和飞机的内饰,使用PP制品时都需要具备良好的阻燃性能,以避免火灾对人员和财产造成危害^[7-8]。此外,在采矿等领域,对PP材质电器外壳的静电控制要求极高,以防止静电引发的安全事故^[9-10]。因此,通常需要对PP进行阻燃和抗静电改性。常规方法是向PP中添加阻燃剂和抗静电剂^[11-12]。

石墨烯(GN)是一种二维碳纳米材料,具有高度共轭的 π 电子体系。此外,GN的碳碳键能高,结构稳定,不易发生热分解和燃烧,具有优异的热导率,能够快速传导热量,因此展现出卓越的力学、电学、热学和阻燃性能^[13-15]。周莹等^[16]将GN引入密胺复合泡沫材料,发现GN显著提升了复合泡沫的压缩强度、热稳定性和阻燃性,而其热导率仅上升0.006 W/(m·K)。陈小婷等^[17]将合成的GN与水性聚氨酯复配后,通过超声处理加入涤纶织物中以改善其抗静电性。研究表明,使用5 g/L的GN制备的涤纶织物表面静电半衰期为0.54 s,经过20次皂洗后,静电半衰期仍可达0.62 s。因此,GN能够显著提高聚合物的综合性能且性能稳定。但由于GN尺寸小,比表面积大,容易团聚,通常需要对其进行改性处理^[18-19]。石墨烯微片(GNPs)由多层片状GN堆叠而成,继承了GN的优异性能,且由于其厚度大于单层GN,粉体间的范德华力相对较小,不易发生团聚,有助于在聚合物中均匀分散,同时GNPs的成本更低^[20-21]。GNPs是一种罕见的能够同时提升聚合物阻燃和抗静电性能的功能材料。然而,目前关于GNPs对PP阻燃和抗静电性能影响规律及机理的研究文献较少。

本文以GNPs为改性填料,兼顾阻燃剂和抗静电剂功能,制备PP/GNPs复合材料,研究了不同掺量GNPs对复合材料性能的影响规律,并建立关系模型,旨在制备综合性能优异的PP/GNPs。

1 实验部分

1.1 主要原料

等规PP,J801,上海倡仕塑化有限公司;GNPs粉末,厚度10~25 nm,平均直径15 μm ,广州宏武材料科技有限公司。

1.2 仪器与设备

智能电子拉力试验机,XLW,济南兰光机电技术有限公司;锥形量热仪,FTT2000,英国FTT公司;极限氧指数测试仪(LOI),LT-101S,上海理涛自动化科技有限公司;扫描电子显微镜,Nano 430,美国FEI公司;高阻计,ZC-90E,阜阳菲勒科技有限公司。

1.3 样品制备

表1为PP/GNPs复合材料的配方。按表1比例称取干

燥的GNPs和PP,先将PP加入温度为170 $^{\circ}\text{C}$ 、转速为50 r/min的混炼机中混炼10 min,使其熔融,再将GNPs加入混炼机中继续混炼20 min。然后将混炼均匀的GNPs和PP混合物注入温度为200 $^{\circ}\text{C}$ 的平板硫化机的模具中,在15 MPa压力下模压10 min。模压成型后停止加热,样品在模具中自然冷却至室温,最后脱模,得到PP/GNPs复合材料。放置24 h后,根据检测要求裁切样品。

表1 PP/GNPs复合材料的配方
Tab.1 Formula of PP/GNPs composites 单位:%

样品	W_{PP}	W_{GNPs}
PP	100	0
PP/GNPs(2%)	98	2
PP/GNPs(4%)	96	4
PP/GNPs(6%)	94	6
PP/GNPs(8%)	92	8
PP/GNPs(10%)	90	10
PP/GNPs(12%)	88	12
PP/GNPs(14%)	86	14
PP/GNPs(16%)	84	16

1.4 性能测试与表征

拉伸强度测试:按GB/T 1040.2—2022进行测试,试样为哑铃形,厚度4 mm,拉伸速率50 mm/min。样品尺寸为50 mm \times 10 mm \times 4 mm。

弯曲强度测试:按GB/T 9341—2008进行测试,弯曲速率2 mm/min,试样尺寸80 mm \times 10 mm \times 4 mm。

LOI和SEM测试:按GB/T 2406.2—2009进行测试,试样尺寸80 mm \times 10 mm \times 4 mm,并采用SEM观察试样燃烧后的表面形貌。

锥形量热分析:按GB/T 16172—2007测试热释放速率(HRR)、总热释放量(THR)、烟释放速率(SPR)和总烟释放量(TSP),试样尺寸100 mm \times 100 mm \times 3 mm。

抗静电性能测试:按GB/T 31838.3—2019测试试样不同温度和湿度下的表面电阻率,试样厚度4 mm。

2 结果与讨论

2.1 PP/GNPs复合材料力学性能分析

图1为PP/GNPs复合材料的拉伸强度和弯曲强度。从图1可以看出,随着GNPs掺量的增加,复合材料的拉伸强度和弯曲强度先增加后降低。这是因为GNPs在PP基体通过承担和传递应力起到增强复合体系作用,能够阻碍PP分子链在外部载荷下的滑移,并且GNPs自身的弯曲强度高于PP。同时,GNP能够促进PP成核,PP晶粒增多分散了应力,进而提高PP抵抗变形的能力^[22-23]。然而GNPs的加入会增加复合材料制备过程中的黏度,尤其是GNPs过量时会出现团聚、堆叠现象。这些现象均容易使复合材料内部出现孔隙、空洞或界面缺陷,导致GNPs无法充分发挥自身强度优势,进而使力学性能下降。

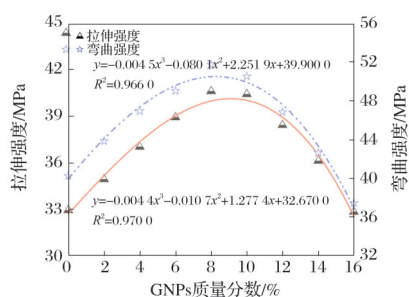


图1 PP/GNPs复合材料的拉伸强度和弯曲强度

Fig.1 Tensile strength and bending strength of PP/GNPs composites

表2为PP/GNPs复合材料的拉伸强度和弯曲强度的拟合结果。从表2可以看出,拉伸强度和弯曲强度与GNPs并非简单的线性关系,拟合后的曲线拟合度较高,拉伸强度拟合曲线的最大值为40.08 MPa(此时GNPs质量分数为9.06%),弯曲强度拟合曲线的最大值为50.50 MPa(此时GNPs质量分数为8.28%),拉伸强度和弯曲强度的拟合结果与实际测试数据非常接近。此外,当加入少量GNPs时,复合材料的力学性能增长迅速。然

表2 PP/GNPs复合材料的拉伸强度和弯曲强度的拟合结果

Tab.2 Fitting results of tensile strength and bending strength of PP/GNPs composites

项目	拟合曲线方程	R^2	x 取值范围/%	y_{\max} /MPa	y_{\max} 对应的 x /%
拉伸强度	$y = -0.0044x^3 - 0.0107x^2 + 1.2774x + 32.6700$	0.970	0~16	40.08	9.06
弯曲强度	$y = -0.0045x^3 - 0.0801x^2 + 2.2519x + 39.9000$	0.966	0~16	50.50	8.28

根据拟合曲线模型,PP的拉伸强度和弯曲强度分别为32.67 MPa和39.90 MPa,复合材料拉伸强度最大值为40.08 MPa(GNPs质量分数为9.06%),弯曲强度最大值为50.50 MPa(GNPs质量分数为8.28%),分别比PP提高22.7%和26.6%。因此,GNPs质量分数为8%~9%时,复合材料具有较优异的综合力学性能。

2.2 PP/GNPs复合材料阻燃性能分析

图2为GNPs质量分数对PP/GNPs复合材料LOI和THR的影响。图3为GNPs质量分数对PP/GNPs复合材料TSP的影响。从图2和图3可以看出,PP的LOI为17.7%,THR为104.1 MJ/m²,TSP为12.31 m²/m²,这说明PP易燃烧,其阻燃性差^[24]。加入GNPs后,LOI逐渐增大,而THR和TSP逐渐降低,GNPs质量分数为2%~8%时,LOI、THR和TSP的变化规律与GNPs掺量接近线性关系,拟合度较高。而进一步增加GNPs时,LOI增长缓慢,THR和TSP降低缓慢。这是因为GNPs自身的阻燃性能极高,并且二维片状的GNPs在燃烧过程中能够作为成炭的核心,诱导聚合物分子在其表面发生成炭反应,形成一层坚硬的炭层,隔绝热量和氧气,起到阻燃作用^[25-26]。当GNPs掺量较低时,GNPs均匀分散在PP基体中,因此LOI、THR和TSP的变化与GNPs掺量基本呈线性相关,而当GNPs过量时,过多的GNPs对复合材料阻燃性能提高效果有限。

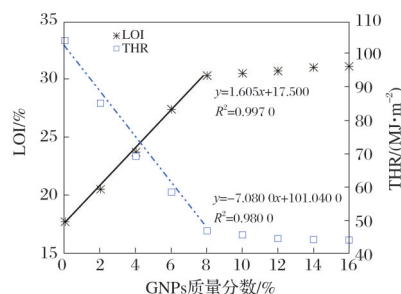


图2 GNPs质量分数对PP/GNPs复合材料LOI和THR的影响

Fig.2 Effect of GNPs mass fraction on LOI and THR of PP/GNPs composites

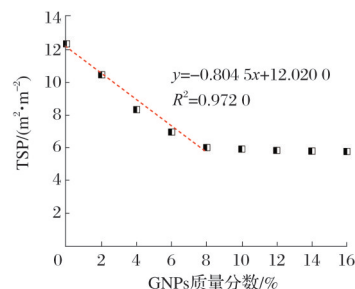


图3 GNPs质量分数对PP/GNPs复合材料TSP的影响

Fig.3 Effect of GNPs mass fraction on TSP of PP/GNPs composites

为了进一步了解GNPs掺量对燃烧热量和烟雾释放量的影响,对GNPs质量分数为0、4%、8%和12%时的HRR、THR、SPR和TSP曲线进行了分析。

图4为HRR随时间的变化。从图4可以看出,PP的HRR曲线先快速上升后快速下降,说明PP燃烧剧烈,短时间内释放大量的热量。而GNPs的加入使复合材料的HRR曲线向右移动且热释放速率峰值不断下降,这说明燃烧发生滞后且燃烧剧烈程度变弱。

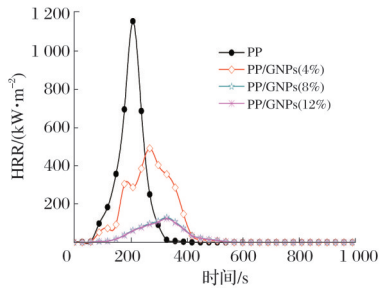


图4 HRR 随时间的变化

Fig.4 Change of HRR with time

图5为THR随时间的变化。从图5可以看出,同一样品的THR随着时间的延长先快速增大,最后基本稳定。与PP相比,GNPs质量分数为4%、8%和12%的复合材料的THR曲线不断向右下方平移,这说明GNPs使复合材料的THR降低。

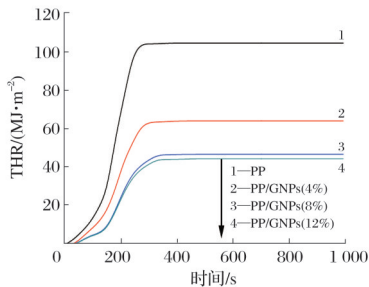


图5 THR 随时间的变化

Fig.5 Change of THR with time

图6为SPR随时间的变化。从图6可以看出,PP的SPR曲线先快速上升后快速下降,这与HRR的曲线变化规律基本一致。但对比图4和图6可知,SPR的峰值比HRR的峰值出现时间稍有提前,这可能是因为剧烈燃烧前往往容易产生烟雾。GNPs的加入使复合材料的SPR曲线向右下方移动,这说明GNPs使复合材料在燃烧过程中产生烟雾的时间滞后且产烟量减少。

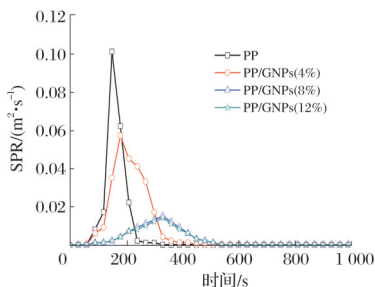


图6 SPR 随时间的变化

Fig.6 Change of SPR with time

图7为TSP随时间的变化。从图7可以看出,同一样品的TSR随着时间的延长逐渐增大,最后基本稳定。与PP相比,GNPs质量分数为4%、8%和12%的复合材料的TSR曲线向右下方平移,这说明将GNPs加入PP基体中起到抑烟效果。

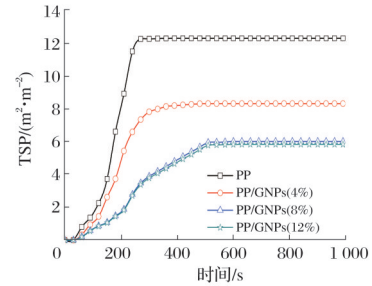


图7 TSP 随时间的变化

Fig.7 Change of TSP with time

此外,相比PP,PP/GNPs(8%)的LOI提高71.2%,THR和TSP降低55.1%和51.2%,而与PP/GNPs(8%)相比,PP/GNPs(12%)的LOI仅提高0.7%,THR和TSP仅降低4.9%和2.8%。这说明GNPs质量分数从8%增加至12%时,复合材料阻燃性能虽然继续提高,但是提高效果不明显。这是因为,随着GNPs添加量的增加,复合材料阻燃性能不断提高,但是当GNPs完全分布于PP中,GNPs的阻燃效果基本达到饱和。

图8为PP/GNPs复合材料燃烧后的SEM照片。从图8a可以看出,PP熔融严重,表面出现了明显空洞且无炭层形成,说明PP燃烧剧烈。这是因为PP燃烧过程中不断熔融、降解且不断释放气体。而随着GNPs添加量的增加,复合材料燃烧后的残留物中形成的炭层逐渐增多,且残留物致密性逐渐增加。从图8b可以看出,PP/GNPs(4%)燃烧残留物的熔融状态比PP有所减弱,且部分区域形成了炭层。从图8c可以看出,PP/GNPs(8%)燃烧残留物表面基本被整个炭层覆盖。从图8d可以看出,PP/GNPs(12%)残留物的表面也完全被炭层覆盖。另外,图8c与图8d的炭层致密程度基本一致,只是PP/GNPs(12%)残留物的GNPs层状结构更加清晰且出现了堆叠。这是因为二维结构GNPs的加入诱发PP复合材料燃烧后逐渐形成炭层,抑制PP燃烧降解^[25-26]。以上结果验证了GNPs可提高复合材料的阻燃性能,当GNPs质量分数为8%~12%时,复合材料的阻燃性能提高效果不明显。

2.3 PP/GNPs复合材料抗静电性能分析

表面电阻率(ρ)是表征材料抗静电性能的主要参数之一, ρ 越大表明静电积累越多,则抗静电性能越差。

图9为在20℃、50%湿度下PP/GNPs复合材料的 ρ 。从图9可以看出,此时PP的 ρ 高达 $7.52 \times 10^{16} \Omega$,表明PP抗静电性能较差,表面容易积累静电^[27]。GNPs的加入使复合材料的 ρ 不断降低。当GNPs质量分数为0~6%时, ρ 缓慢下降;当GNPs质量分数为8%时, ρ 显著下降;继续增加

GNPs, ρ 则极缓慢下降。与 PP 相比, GNP 质量分数为 6% 时, ρ 降为 $4.31 \times 10^{11} \Omega$; GNP 质量分数为 8% 时, ρ 陡降至 $2.57 \times 10^7 \Omega$, 降幅达到近 10 个数量级。GNPs 继续增加至 16% 时, PP/GNPs(16%) 的 ρ 为 $1.82 \times 10^7 \Omega$, 与 PP/GNPs(8%) 同属一个数量级, 说明提高幅度不大。根据图 9 的数据拟合 GNP 不同掺量下的曲线, GNP 质量分数为 0~6% 时, ρ 与 GNP 掺量呈线性关系下降; GNP 质量分数为 6%~8% 时, ρ 与 GNP 掺量也呈线性关系下降且下降幅度明显增大; 继续增加 GNP 质量分数至 8%~16% 范围内, ρ 下降幅度极小, 说明此时 GNP 对 ρ 的影响趋于稳定。这是因为 GNP 由层状石墨烯形成, 而石墨烯具有极高的电导率, 在 PP/GNPs 复合材料体系中, 即使 GNP 之间没有直接接触 (即 GNP 掺量较低时), 由于量子隧道效应, 电子也有可能从相邻的 GNP 之间跃迁, 因此只有少量的 GNP 加入时, 复合材料的 ρ 也会降低。GNP 掺量较少时, GNP 未形成连续的导电网络结构, 复合材料的 ρ 降低不明显。当 GNP 在 PP 树脂中分散量足够多且均匀时, GNP 间距变小, 甚至直接接触, 电子可以通过量子隧道效应穿过 PP 树脂形成的势垒或通过 GNP 形成的导电网络通路实现电传导, 使复合材料的导电性能显著增加, ρ 显著降低; 但是 GNP 导电网络完成形成后, GNP 继续增加对整个复合材料体系的电传导影响不大, 此时 ρ 降低幅度变小^[26]。标准 GB/T 3836.1—2021 中要求外部非金属外壳材料的 $\rho \leq 10^9 \Omega$, 因此 PP 远达不到标准要求的抗静电性能, 而 PP/GNPs(8%) 的 ρ 比标准要求高了近 2 个数量级。

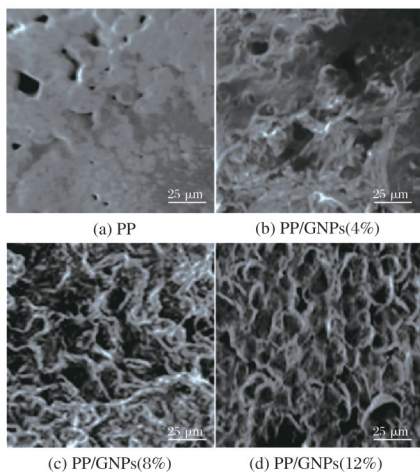


图 8 PP/GNPs 复合材料燃烧后的 SEM 照片(2 000×)
Fig.8 SEM images of PP/GNPs composites after combustion (2 000×)

为了研究 GNP 提高复合材料抗静电性能的稳定性, 对复合材料在不同温度和湿度下的 ρ 进行分析。图 10 为温度对 PP/GNPs 复合材料 ρ 的影响, 图 11 为湿度对 PP/GNPs 复合材料 ρ 的影响。

从图 10 可以看出, 随着温度升高, 不同样品的 ρ 变化规律不同。对于 PP, ρ 逐渐下降; 对于 PP/GNPs(4%), ρ 出现小幅度下降; 而 GNP 质量分数为 8%~16% 时的 ρ 基本

不变。这是因为随着温度升高, 电子迁移速率增大。PP 导电性较低, 温度带来的电子迁移提高样品的导电性, 因此 ρ 下降; PP/GNPs(4%) 中 GNP 还未完全形成导电网络通道, 但是 PP/GNPs(4%) 的 ρ 仍显著低于 PP, 温度带来的电子迁移能够促进其导电性, 但是贡献有限, 因此 ρ 有所降低, 但幅度不大; 对于 GNP 质量分数为 8%~16% 的样品, 高导电性的 GNP 使试样的表面形成完整的导电通道, 样品导电性较大, 温度对整个试样的导电网络通道基本没有影响, 并且 GNP 具有极高热稳定性, 温度对 GNP 的性能和结构不会产生影 响, 此时样品的 ρ 对温度不敏感, 基本保持不变。

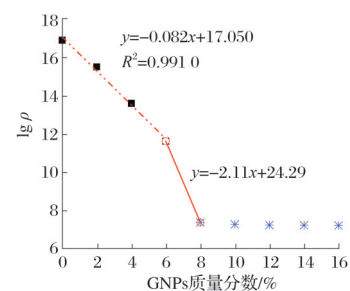


图 9 在 20 °C、50% 湿度下 PP/GNPs 复合材料的 ρ
Fig.9 ρ of PP/GNPs composites under the condition of 20 °C and 50% humidity

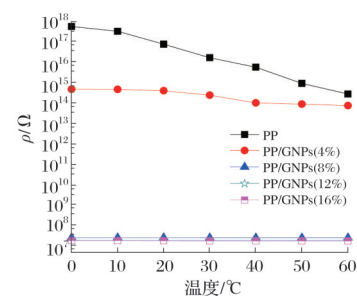


图 10 温度对 PP/GNPs 复合材料 ρ 的影响
Fig.10 Effect of temperature on ρ of PP/GNPs composites

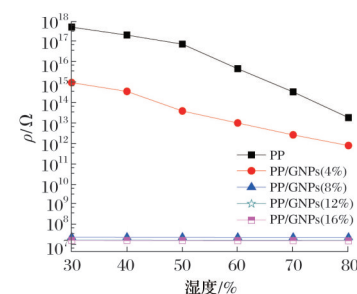


图 11 湿度对 PP/GNPs 复合材料 ρ 的影响
Fig.11 Effect of humidity on ρ of PP/GNPs composites

从图 11 可以看出, 随着湿度的增大, 不同样品的 ρ 变化规律不同。GNP 质量分数为 0~4% 的样品 ρ 下降幅度较大, 而 GNP 质量分数为 8%~16% 的样品 ρ 基本不变。这是因为随着湿度的增大, 更多的水蒸气凝结成水停留在样品表面。PP 或 PP/GNPs(4%) 的 ρ 较大, 即导电性较差,

其表面水分增多则给电子迁移提供了导电通道,因此PP或PP/GNPs(4%)的 ρ 随着湿度的增加而下降;而对于GNPs质量分数8%~16%的样品,高导电性的GNPs使样品表面形成了完整的导电通道,样品导电性较大,湿度造成样品表面水分增大,对整个试样的导电网络通道基本没有影响,此时样品的 ρ 对湿度不敏感,基本保持不变。

综上所述,加入GNPs能够降低复合材料的 ρ ,尤其是GNPs质量分数达到8%后,复合材料具有较高的抗静电性能,在温度和湿度变化条件下,复合材料仍能保持稳定的抗静电性能。

3 结论

随着GNPs掺量的增加,复合材料拉伸强度和弯曲强度先增加后降低。复合材料拉伸强度最大值为40.08 MPa(GNPs质量分数9.06%),弯曲强度最大值为50.50 MPa(GNPs质量分数8.28%),分别比纯PP提高22.7%和26.6%。GNPs提高了复合材料的阻燃性能。加入GNPs后,样品的LOI增大,热量产生时间和烟雾产生时间滞后,放热量和烟雾释放量降低。GNPs质量分数为0~8%时,LOI、THR和TSP的变化规律与GNPs掺量接近线性关系。进一步增加GNPs时,LOI增长缓慢,THR和TSP降低缓慢。GNPs提高了复合材料的抗静电性能。加入GNPs后,GNPs质量分数为0~6%时, ρ 缓慢下降;GNPs质量分数为8%时, ρ 显著下降;GNPs质量分数为8%~16%时, ρ 极缓慢下降,说明此时GNPs对 ρ 的影响趋于稳定。随着温度的升高,不同样品的 ρ 变化规律不同。纯PP的 ρ 逐渐下降;PP/GNPs(4%)的 ρ 出现小幅度下降;GNPs质量分数8%~16%时的 ρ 基本不变。随着湿度的增大,不同样品的 ρ 变化规律不同。GNPs质量分数为0~4%的样品 ρ 下降幅度较大,而GNPs质量分数为8%~16%时的 ρ 基本不变。

结合力学性能、阻燃性能和抗静电性能以及复合材料制备成本,GNPs质量分数为8%时,复合材料具有较优异的综合性能,与纯PP相比,LOI提高71.2%,THR和TSP分别降低55.1%和51.2%,表面电阻率降低近10的数量级且满足相关标准对抗静电性能的要求。

参考文献

- [1] 王鑫, 蒋敏, 陈思月, 等. 聚丙烯复合材料界面增强的研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 127-131.
- [2] 潘筱晨, 何宇, 许顺雯, 等. 物理增韧聚丙烯的研究进展[J]. 上海塑料, 2024, 52(2): 1-7.
- [3] 陈泽华, 王涛. 高性能共聚聚丙烯的产品开发及应用进展[J]. 广东化工, 2025, 52(6): 74-76.
- [4] 张振环, 马航, 万邦隆, 等. 磷系阻燃剂包覆技术及对PP树脂阻燃改性研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 43-47.
- [5] 张志豪. 膨胀型阻燃体系和协效剂的表面改性及其在聚丙烯中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [6] 刘阳冬. 抗静电剂的设计合成及其对聚丙烯性能的影响研究[D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2023.
- [7] 陈锋, 董斌. 抗老化PP复合管材的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 61-65.
- [8] 庞龙凤, 张朝山, 董虹星. 汽车仪表板用改性聚丙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(5): 57-61.
- [9] 黄传兵, 祝志东, 邓兆敬. 电容器薄膜用聚丙烯树脂的发展现状[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 27-34.
- [10] 展召顺, 申津锋, 石启星. 微胶囊阻燃抗静电聚丙烯的制备及其性能[J]. 黑龙江科技大学学报, 2025, 35(1): 43-50.
- [11] 李明, 欧红香, 冉镒柠, 等. 焦磷酸哌嗪/壳聚糖膨胀阻燃聚丙烯制备及性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(10): 10165-10171.
- [12] 杨奎, 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.
- [13] 陈洪派, 杨行, 刘银东, 等. 石墨烯材料制备技术及其在电化学领域的应用[J]. 石化技术与应用, 2023, 41(1): 73-77.
- [14] 鲍大顺. 石墨烯制备阻燃型聚苯乙烯保温材料力学性能和热学性能的研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(5): 101-103.
- [15] 徐钰东, 穆柄臻, 刘梦琪, 等. 碳填料/天然橡胶复合材料热导率及层间接触热阻对微波加热效果的影响[J]. 橡胶工业, 2024, 71(4): 287-292.
- [16] 周莹, 刘世盟, 赵近川, 等. 石墨烯纳米片/密胺复合泡沫性能增强机制研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(6): 1-11.
- [17] 陈小婷, 吴诗雯, 任豪, 等. 石墨烯在抗静电涤纶织物上的应用[J]. 印染, 2019, 45(3): 10-13.
- [18] 陈加亮, 卫敏. 改性石墨烯对锦纶复合材料性能影响研究[J]. 中国纤检, 2024(3): 99-102.
- [19] 王昊, 王熙宇, 熊英, 等. 苯基反应型石墨烯分散剂及其在增强聚乙烯醇复合薄膜中的应用[J]. 应用化学, 2024, 41(12): 1712-1720.
- [20] 汪文, 丁宏亮, 张子宽, 等. 石墨烯微片/聚丙烯导热复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 14-20.
- [21] 刘慧瑜, 李蕾, 张文忠, 等. 垂直取向石墨烯微片/环氧树脂复合材料的制备与性能研究[J]. 纺织工程学报, 2024(4): 25-34.
- [22] 孙晓辉, 张婧婧. 石墨烯/聚丙烯纳米复合材料流变与拉伸性能[J]. 塑料, 2020, 49(2): 152-155.
- [23] 汪国美, 张阳, 吴宏, 等. 石墨烯纳米片原位分散及对聚丙烯力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(7): 48-55.
- [24] 裴玉杰, 胡艳丽, 冯东, 等. 哌嗪改性聚磷酸铵阻燃聚丙烯的研究[J]. 现代塑料加工应用, 2024, 36(5): 1-5.
- [25] 朱晓菲. 石墨烯-聚苯乙烯复合材料的制备及阻燃性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(7): 7091-7097.
- [26] 高嘉祥, 靳昕怡, 杨佩鑫, 等. 石墨烯在聚合物阻燃改性中的研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(2): 36-41.
- [27] AN J E, JEON G W, JEONG Y G. Preparation and properties of polypropylene nanocomposites reinforced with exfoliated graphene[J]. Fibers and Polymers, 2012, 13(4): 507-514.