

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.005

PA12/MWCNTs 导电复合材料的制备与性能

韩百港,汪艳

(武汉工程大学材料科学与工程学院,武汉 430073)

摘要:以多壁碳纳米管(MWCNTs)为导电剂与尼龙12(PA12)复合制备导电复合材料,通过十二烷基苯磺酸钠与硅烷偶联剂KH560对MWCNTs进行改性,提高其分散性,研究了共混方式、改性剂品种及MWCNTs含量对复合材料力学性能、热性能、导电性能及熔体流动性能的影响,得到了制备该复合材料的最佳方法。结果表明,添加MWCNTs能够提高复合材料的力学性能、热性能和导电性,并且由溶液法制备的复合材料综合性能更好,在MWCNTs添加量为7%时综合力学性能最佳,维卡软化点随MWCNTs添加量的增加而提高,体积电阻率电阻率随MWCNTs添加量的增加而减小,MWCNTs添加量为12%时,其电阻率达到 $6\sim 8\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

关键词:尼龙12;多壁碳纳米管;导电性

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0023-05

Preparation and Properties of PA12/MWCNTs Conductive Composite

Han Baigang, Wang Yan

(Wuhan Institute of Technology Materials Science and Engineering, Wuhan 430073, China)

Abstract : Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) was used as conductive agent with nylon 12 (PA12) to prepare conductive composite materials. The MWCNTs was modified by sodium dodecylbenzene sulfonate and silane coupling agent KH560 to improve for its dispersibility. The effects of blending methods, different modifiers and MWCNTs content on the mechanical properties, thermal properties, electrical conductivity and melt flow properties of composite materials were studied, the best method for preparing the composite material was obtained. The results show that the addition of MWCNTs can improve the mechanical properties, thermal properties and electrical conductivity of the composite, and the composite material prepared by the solution method has better comprehensive performance. The overall mechanical properties are the best when the MWCNTs addition is 7%. The Vicat softening point of the composite materials increases with the increase of the MWCNTs addition, and the volume resistivity resistance decreases with the addition of MWCNTs. When the addition amount of MWCNTs is 12%, the resistivity can reach $6\sim 8\ \Omega\cdot\text{m}$.

Keywords : nylon 12 ; multi-walled carbon nanotubes ; conductivity

尼龙12(PA12)分子间存在着大量作用力极强的氢键,使其具有良好的力学性能、耐磨性、抗腐蚀性能,是一种性能优良的工程塑料^[1-3]。但由于尼龙(PA)是一种结晶型聚合物,分子内应力非常大,收缩性很强,所以PA材料在加工中存在着容易变形的问題。对PA进行改性,利用材料自身优点,规避和改善缺点才能使其应用更广泛^[4-7]。

碳纳米管(CNTs)通常也被称为巴基管,是一种圆柱状的分子,由石墨烯卷曲而成,其卷起方向决定了CNTs具有优良的电性能。碳纳米管目前已成为

聚合物基复合材料的一种高潜力的无机增强材料,它在增强原始聚合物力学、电学等性能方面可以取得相当优异的效果^[8-10]。但是由于其彼此包覆成团,在原始状态下很难均匀地分散在基质中,因此需要改善其表面能,以优化它们在基质之中的分散性。S. Kang等^[11]选择用双酚F,FS-100和硅烷偶联剂等不同改性剂预处理多壁碳纳米管(MWCNT),以提升其在PA66中的分散性,并研究了不同分散剂的效果。Guan Xiaoyang等^[12]选择静电吸附的方式,直接将MWCNT吸附在PA纤维上,利用两者

通信作者:汪艳,博士,教授,主要从事高分子材料共混改性与成型加工和3D打印高分子材料研究

收稿日期: 2021-07-05

引用格式:韩百港,汪艳. PA12/MWCNTs 导电复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用,2021,49(9):23-27,39.

Han Baigang, Wang Yan. Preparation and properties of PA12/MWCNTs conductive composite[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):23-27,39.

之间的氢键起到提升分散性的效果;南茜^[13]采用非共价法的表面活性剂、高分子和生物大分子改性MWCNT,成功提高了它的分散性。目前CNTs表面改性方法主要有非共价官能化和共价修饰两种方式^[14-16]。

将导电的纳米材料添加到高分子材料中可以得到具有功能性的复合材料,并且可以用于许多领域,例如电路、微电池、电子传感器和需要电磁屏蔽与吸波性能的外壳中等。笔者在PA12基材中填充多壁碳纳米管(MWCNTs),通过干法和湿法两种方式,探究最佳的共混方式,采用两种改性剂提升MWCNTs的分散性,并调整MWCNTs的比例,以获得最佳的综合性能。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA12 粉料: VESTAMID, 华科三维科技有限公司;

MWCNTs: 管径 3~15 nm, 管长 15~30 μm , 纯度 $\geq 97\%$, 比表面积 250~270 m^2/g , 堆积密度 0.06 g/cm^3 , 中森领航科技有限公司;

十二烷基苯磺酸钠(SDBS): 含量 $\geq 88\%$, 国药集团化学试剂有限公司;

硅烷偶联剂(KH560): 含量 $\geq 99\%$, 武汉格奥化学技术有限公司。

1.2 主要设备及仪器

微型密炼机: QE-70A 型, 武汉启恩科技发展有限公司;

立式注塑机: TY-200 型, 大禹机械有限公司;

自动缺口制样机: SPZQK-20 型, 承德市世鹏检测设备有限公司;

万能试验机: 5960 型, 美国 INSTRON 公司;

冲击试验机: XJU-22 型, 承德试验机有限责任公司;

热变形维卡试验机: ZWK1302-A 型, 美斯特工业系统有限公司;

高阻计: GT-1864 型, 东莞高铁检测仪器有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪: SRZ-400D 型, 长春市智能仪器设备有限公司;

高速球磨机: KNM 型, 湖南湘科控股集团有限公司。

1.3 PA12/MWCNTs 复合材料的制备

(1) 熔融法: 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中将 PA12 和

MWCNTs 干燥 24 h, 称取定量的 PA12 粉末和 MWCNTs, 并按照 MWCNTs 质量的 10% 分别加入分散剂 SDBS 和 KH560, 采用密炼机熔融共混制备 MWCNTs 所占质量分数 3% 的 PA12/MWCNTs 材料, 密炼机共混条件为: 前板、中板、后板均设为 230 $^{\circ}\text{C}$, 转子转速设置为 60 r/min , 密炼共混时间为 8 min。之后将密炼所得材料破碎得到粒料。

(2) 溶液法: 将 PA12 和 MWCNTs 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 24 h, 称取定量的 MWCNTs, 并按照 MWCNTs 质量的 10% 称取分散剂 SDBS, 溶于水溶液中, 超声分散 8 h; 同理, 称取 MWCNTs 和 KH560, 溶于乙醇溶剂中, 用乙酸酐调 pH 值至 5~6, 超声分散 8 h。将 PA12 按照比例分别加入超声后的分散液中, 搅拌均匀, 于真空干燥箱中烘干 24 h 得到干燥的粉末, 再将粉末置于高速球磨机中球磨 8 min, 得到 MWCNTs 所占质量分数分别为 3%, 5%, 7%, 10%, 12% 的 PA12/MWCNTs 复合材料的粉料。

用微型注塑机将用两种方法所得的 PA12/MWCNTs 粒料和粉料塑成测试样条, 注塑的实验参数为: 注塑温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 合模时间 5 s, 注射时间 8 s, 冷却时间 5 s。

1.4 性能测试

按照 GB/T1040.1-2006 对试样进行拉伸性能测试, 按照 GB/T9341-2008 对试样进行弯曲性能测试, 按照 GB/T1843-2008 对试样进行悬臂梁缺口冲击强度测试。

按照 GB/T 3682-2000 对试样进行 MFR 测试, 测试所用砝码质量 10 kg, 温度设为 230 $^{\circ}\text{C}$ 。

按照 GB/T 1633-2000 来对试样进行维卡软化温度测试, 测试所设置外力为 50 N, 将实验初始温度设为 40 $^{\circ}\text{C}$, 并将升温速率设为 120 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

用高阻计测试和计算材料的体积电阻率, 材料体积电阻率依照式 (1) 计算。

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (1)$$

式中: ρ 为样品的体积电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R 为电阻值, Ω ; S 为样品横截面积, m^2 ; L 为测试电流通过的距离, m 。

k 为样品的电导率, S/m , 按式 (2) 计算。

$$k = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

SEM 表征: SEM 观察试样冲击断面的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 不同混合方式对 PA12 材料性能的影响

表 1 为熔融法和溶液法两种共混方式对 3% MWCNTs 增强 PA12 的性能影响。

表 1 不同共混方式制备的 PA12/MWCNTs 复合材料性能对比

混合方式	拉伸强度 / MPa	弯曲弹性模量 / MPa	缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	断裂伸长率 / %	电阻率 / (Ω·m)
熔融法	46.78	1170.57	6.33	52.72	2.03×10^6
溶液法	49.05	1180.77	12.27	274.48	9.22×10^5

由表 1 可知,溶液法所得材料的性能整体明显高出熔融法,其中,拉伸强度和弯曲弹性模量略微高出,区别并不明显;但缺口冲击强度提升 93.84%;断裂伸长率提升 420.64%;体积电阻率减小了 54.58%。这是由于溶液法中, MWCNTs 经过溶液中的超声分散和烘干后的球磨,得到了更好分散;而熔融法中,只是经过密炼机的熔融共混,无法使 MWCNTs 均匀分布在 PA12 中,产生了团聚,影响了材料的性能。

2.2 MWCNTs 含量对 PA12 材料力学性能的影响

图 1 为 MWCNTs 的质量分数和使用改性剂的种类对复合材料拉伸性能的影响。

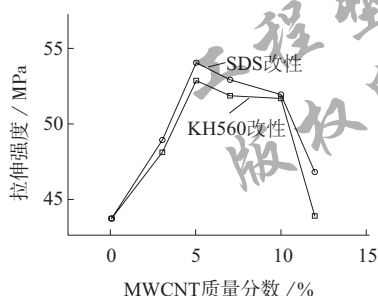


图 1 MWCNTs 不同质量分数和不同改性剂时 PA12 材料拉伸性能

由图 1 可知, MWCNTs 的添加可显著提高 PA12 的拉伸强度,当 MWCNTs 的质量分数为 5% 时,复合材料的拉伸强度最大, KH560 改性的 PA12 提高了 20.97%, SDS 改性的 PA12 提高了 23.69%。而当 MWCNTs 的质量分数超过 5% 时,复合材料的拉伸强度逐渐下降,但是不明显。这是由于虽然 MWCNTs 难分散而易团聚,但由于溶液法混合再球磨的分散方式分散效果较好,即使添加的 MWCNTs 质量分数较大,仍能使大部分 MWCNTs 保持较好的分散效果,从而使得强度下降幅度较小。两种分散剂都表现出了较好的分散效果,其中 SDS 各组分下效果均略优于 KH560,两者都是很好的改性剂。

图 2 为 MWCNTs 的质量分数和使用改性剂的

种类对复合材料弯曲性能的影响。MWCNTs 的添加使得材料的弯曲弹性模量显著提升,当质量分数小于等于 7% 时, SDBS 的改性效果要优于 KH560,当质量分数为 7% 时, KH560 改性的 PA12 弯曲弹性模量较纯 PA12 提升了 27.65%,而 SDS 改性的 PA12 弯曲弹性模量较纯 PA12 提升了 32.25%。当质量分数高于 7% 后, KH560 的效果较 SDBS 更好,这可能是因为 KH560 起到了更好的粘接作用,使得材料的韧性降低,同时刚性提升导致应变减小,最终弯曲弹性模量大大提升。

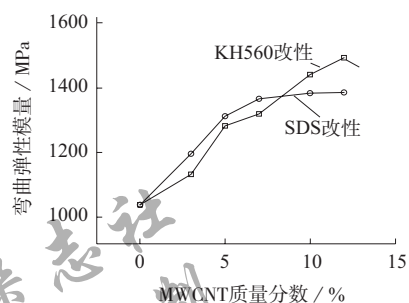


图 2 MWCNTs 不同质量分数和不同改性剂时 PA12 材料弯曲性能

图 3 为 MWCNTs 的质量分数和使用改性剂的种类对复合材料冲击性能的影响。MWCNTs 的添加使得材料的缺口冲击强度得到了大幅度的提升,当 MWCNTs 的质量分数仅为 3% 时,就得到了最佳的缺口冲击强度,其中 KH560 改性的 PA12 冲击强度较纯 PA12 提升了 216.53%,而 SDS 改性的 PA12 缺口冲击强度较纯 PA12 提升了 243.70%。随着 MWCNTs 质量分数的进一步增大,复合材料的缺口冲击强度也随之降低,这是因为随着材料中填料的不增多,材料的界面处结合变差,断裂时的界面能也随之降低,材料的韧性自然的也随之变差。即使 MWCNTs 的质量分数增加到了 12%,材料的冲击强度仍大大高于纯 PA12。

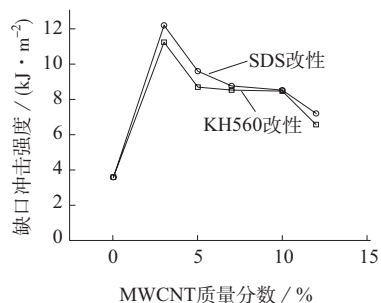


图 3 MWCNTs 不同质量分数和不同改性剂时 PA12 材料冲击性能

2.3 MWCNTs 含量对 PA12 材料电学性能的影响

图 4 为 MWCNTs 的质量分数和使用改性剂的种类对复合材料导电性能的影响。PA 的体积电阻

率为 $10^{13} \sim 10^{14} \Omega \cdot m$, 当质量分数达到 7% 和 10% 时, KH560 改性和 SDBS 改性较纯 PA 都提升了 11 和 13 个数量级; 随着 MWCNTs 的质量分数达到 12%, 体积电阻率达到最低的 $6 \sim 8 \Omega \cdot m$, 材料的电阻率虽有下降, 却仍只提升 13 个数量级, 提升并不明显。这说明, 随着 MWCNTs 的增加, 复合材料的体积电阻率稳定下降, 但其到达一定含量后, 难以分散, 导致电阻率没有显著变化。由于硅烷偶联剂本身可以改善材料的电气性能, 所以改性 PA12 材料中均是 KH560 改性的电阻率更低, SDBS 改性下虽然电阻率略高, 但是仍与前者保持在同一数量级, 说明 KH560 和 SDBS 两者都能分散 MWCNTs, 使复合材料获得良好的导电性能。

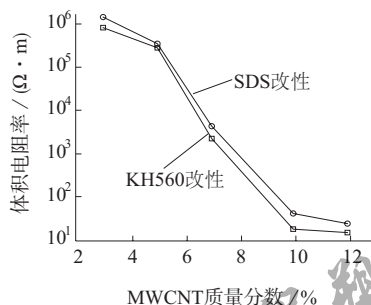


图4 MWCNTs 不同质量分数和不同改性剂时 PA12 材料导电性能

2.4 MWCNTs 含量对 PA12 材料维卡软化温度的影响

图 5 为 MWCNTs 的质量分数和使用改性剂的种类对 PA12 复合材料维卡软化温度的影响。

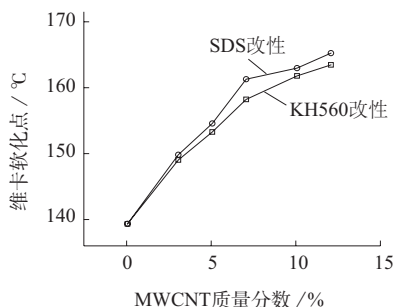


图5 MWCNTs 不同质量分数和不同改性剂时 PA12 材料维卡软化点

由图 5 可知, 随着 MWCNTs 质量分数的增多, 无论是何种改性剂, 复合材料的微卡软化温度都呈稳定上升的趋势, 这说明 MWCNTs 整体是较好分散在 PA12 中, 阻碍了高分子链的运动, 从而提高了其维卡软化温度。而 KH560 可能对材料结构产生了一定破坏, 导致改性后软化温度较低。当 MWCNTs 为 7% 时, SDBS 改性下的微卡软化温度为 160.9℃, 较纯 PA12 的 138.7℃ 提升了 22.2℃, 而 KH560 改性下则为 157.8℃, 提升了 19.1℃ 之后随

着 MWCNTs 添加到 12%, 提升幅度的增加并不大, 效果不是十明显。

2.5 MWCNTs 含量对 PA12 材料 MFR 的影响

图 6 为 MWCNTs 的质量分数和使用改性剂的种类对 PA12 材料 MFR 的影响。随 MWCNTs 添加量的提升, PA12 复合材料的流动性是逐步下降的, 仅添加 3% 就产生了较大下降, 填充 SDBS 改性 MWCNTs 的 PA12 复合材料 MFR 为 27.10 g/10 min, 较纯 PA12 下降了 20.10 g/10 min, KH560 改性下则为 27.01 g/10 min, 下降了 20.19 g/10 min。随着添加到 7%, 变化逐渐平稳, SDBS 改性下 MFR 为 20.58 g/10 min, 填充 KH560 改性 MWCNTs 的 PA12 的 MFR 为 19.47 g/10 min, 并没有很大变化。随着 MWCNTs 进一步添加, 添加量为 10% 时, SDBS 改性下复合材料的 MFR 仅为 8.64 g/10 min, KH560 改性下材料的 MFR 仅为 5.31 g/10 min, 加工性能都大大下降。SDBS 改性下材料整体流动性都高于 KH560 改性下的材料, 可能是因为 KH560 在 PA12 与 MWCNTs 之间产生更强化学键, 导致流动性变差。

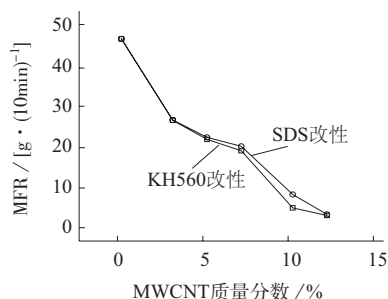


图6 MWCNTs 不同质量分数和不同改性剂时 PA12 材料 MFR

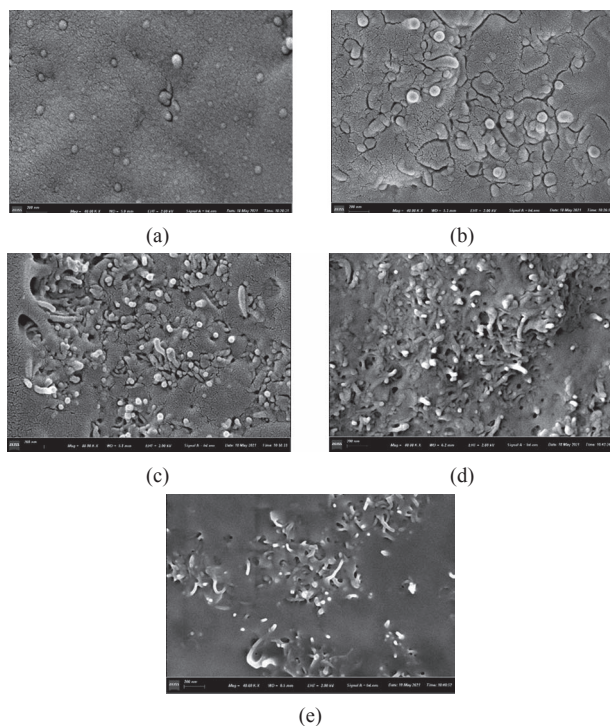
2.6 PA12 复合材料的微观形貌

图 7 为不同 MWCNTs 的质量分数时 PA12 试样的冲击断面图。在图 7a~7c 中, 可以观察到 MWCNTs 呈较好分散, 基本没有团聚的现象, 在 PA12 中起到了较好的增强增韧的效果; 而图 7d 和图 7e 中, MWCNTs 虽然仍能较好分散, 但是由于数量的提升, 难以避免产生了一定的团聚, 导致材料内部产生了应力集中和缺陷, 降低了断裂面界面能。

3 结论

在 PA12 中添加 MWCNTs 可以显著提升其各方面的性能, 在保持了一定的加工性能的同时, 提升了拉伸、弯曲和冲击性能, 同时使其导电性能大幅度提升, 在 MWCNTs 含量为 7% 时综合性能最佳。

对于力学性能来说, 当 MWCNTs 的质量分数为 5% 时, 拉伸强度改善效果最好, 填充 SDBS 改性



MWCNTs 含量: a—3%; b—5%; c—7%; d—10%; e—12%

图 7 不同比例 MWCNTs 填充 PA12 材料的冲击断面形貌

MWCNTs 的 PA12 提升了 23.69%; 而当 MWCNTs 的质量分数为 3% 时, 缺口冲击强度的改善效果最好, SDBS 改性下提升了 243.70%; 而弯曲弹性模量随着 MWCNTs 的质量分数提升而提升。

对于电学性能, 随着 MWCNTs 质量分数的提升, PA12 材料导电性大幅度上升, 当添加到 7% 时, 提升了 11 个数量级, 在添加到 10% 后, 基本达到了它的上限, 提升了 13 个数量级, 再进一步增加已经没有明显的效果。

对于加工性, 随着 MWCNTs 的加入, 导致了 PA12 流动性的下降, 但是 MWCNTs 的添加量从 3% 到 7%, 并没有显著减小, 而对于 PA12 复合材料的维卡软化温度, 当 MWCNTs 添加到 12% 时, SDBS 改性下的复合材料提升 18.89%。

所以, 对于不同的应用和需求, 可以选择不同比例的 MWCNTs 与 PA12 复合改性, 同时可以选择不同的改性剂来调整其性能, 以达到要求。

参考文献

- [1] Kwiatkowska M, Pelech R, Jędrzejewska A, et al. Different approaches to oxygen functionalization of multi-walled carbon nanotubes and their effect on mechanical and thermal properties of polyamide 12 based composites[J]. *Polymers*, 2020. doi.org/10.3390/polym12020308.
- [2] 方亮, 汪艳, 陈震. 3D 打印用 PA6 / PA12 复合粉末的制备与性能

[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(2):20–24, 51.

Fang Liang, Wang Yan, Chen Zhen. Preparation and properties of PA6 / PA12 composite powder for 3D printing[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(2):20–24, 51.

- [3] Kang S K, Kim J W, Park J H, et al. Multiwalled carbon nanotube pretreatment to enhance tensile properties, process stability, and filler dispersion of polyamide 66 nanocomposites[J]. *Composites Part B*, 2020. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108204.
- [4] Sethy S, Satapathy B K. Microstructural interpretations on thermo-mechanical relaxation and electrical conductivity of polyamide-12 / polypropylene-MWCNTs nanocomposites[J]. *Journal of Polymer Research*, 2020. doi.org/10.1007/s10965-020-02045-0.
- [5] Keshtkar M, Mehdipour N, Eslami H. Thermal conductivity of polyamide-6,6 / carbon nanotube composites: Effects of tube diameter and polymer linkage between tubes[J]. *Polymers*, 2019. doi.org/10.3390/polym11091465.
- [6] Azelee I W, Goh P S, Lau W J, et al. Enhanced desalination of polyamide thin film nanocomposite incorporated with acid treated multiwalled carbon nanotube-titania nanotube hybrid[J]. *Desalination*, 2017, 409:163–170.
- [7] 谭支林, 汪艳. 尼龙 12 / 氧化石墨烯纳米复合粉末的制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(5):93–97.
- Tan Zhilin, Wang Yan. Preparation and properties of nylon 12 / graphene oxide nanocomposite powder[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(5):93–97.
- [8] 王宝民, 韩瑜, 葛树奎, 等. 碳纳米管在水性体系中的分散性能及机理[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(10):1 206–1 211.
- Wang Baomin, Han Yu, Ge Shukui, et al. Dispersion performance and mechanism of carbon nanotubes in aqueous systems [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(10):1 206–1 211.
- [9] 卜路霞, 刘成成, 明媚, 等. 多壁碳纳米管在离子液体中分散工艺的优化[J]. *电镀与精饰*, 2016, 38(11):1–5.
- Bu Luxia, Liu Chengcheng, Mingmei, et al. Optimization of the dispersion process of multi-walled carbon nanotubes in ionic liquids [J]. *Electroplating and Finishing*, 2016, 38(11):1–5.
- [10] 邱丽, 单英杰, 曹宗双, 等. 碳纳米管表面改性对碳纳米管 / 尼龙 66 复合材料机械性能影响的研究[J]. *化工新型材料*, 2016, 44(9):75–77, 80.
- Qiu Li, Shan Yingjie, Cao Zongshuang, et al. The effect of surface modification of carbon nanotubes on the mechanical properties of carbon nanotube / nylon 66 composites[J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(9):75–77, 80.
- [11] Kang S, Kim J, Park J H, et al. Multiwalled carbon nanotube pretreatment to enhance tensile properties, process stability, and filler dispersion of polyamide 66 nanocomposites[J]. *Composites Part B*, 2020. doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108204.

2020,48(1):31-35.

- [4] 朱文,李坤泉,柴生勇,等.不同增韧剂对 PBT 增韧效果研究[J].塑料工业,2019,47(5):43-48.

Zhu Wen, Li Kunquan, Cai Shengyong, et al. Study on the toughening effect of the PBT by different toughening agents[J]. China Plastic Industry, 2019, 47(5):43-48.

- [5] 李建军,欧育湘.阻燃理论[M].北京:科学出版社,2013:65-85.
Li Jianjun, Ou Yuxiang. Flame retardant theory [M]. Beijing: Science Press, 2013:65-85.

- [6] 中广核高新核材科技(苏州)有限公司.纤维增强 PC/PBT 材料及其作为新能源汽车连接器用材料的应用:中国, CN110894348A[P].2020-03-20.

CGN high-tech nuclear material technology (Suzhou) Co., Ltd. Fiber reinforced PC/PBT material and its application as a new energy vehicle connector material: CN110894348A[P].2020-03-20.

- [7] 孙晋皓,冯欣,汤兆宾.柠檬酸环氧反应性增容改性聚乳酸/淀粉复合材料的研究[J].塑料工业,2016,44(4):26-30.

Sun Jinhao, Feng Xin, Tang Zhaobin. Preparation and characteration of PLA / starch blends compatilized by citric acid based epoxy[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(4):26-30.

- [8] 赵清香,罗楠,王玉东,等.SEBS-g-MAH 和 EP 复合增容 PA610/PC 合金的研究[J].工程塑料应用,2007,35(9):4-8.

Zhao Qingxiang, Luo Nan, Wang Yudong, et al. Study of PA610 / PC alloy compatibilized by SEBS-g-MAH and epoxy [J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(9):4-8.

- [9] 禄秋艺,马凤贺,杨青海,等.马来酸酐接枝物和环氧树脂联合增容对 PP/ABS 复合材料性能的影响[J].塑料工业,2014, 42(3):58-60.

Lu Qiuyi, Ma Fenghe, Yang Qinghai, et al. The effect of combination of maleic anhydride graft copolymers and epoxy resin on properties of PP/ABS blend[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(3):58-60.

- [10] 袁理,兰修才,李谦,等.高 CTI、低翘曲的无卤阻燃增强 PBT 材料的制备及其性能研究[J].塑料工业,2020,48(12):151-154.

.....
(上接第 27 页)

- [12] Guan Xiaoyang, Zheng Guoqiang, Wu Shasha. Carbon nanotubes-adsorbed electrospun PA66 nanofiber bundles with improved conductivity and robust flexibility[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(22):14 150-14 159.

- [13] 南茜.非共价功能化法修饰碳纳米管在溶剂及高分子中的分散研究[D].太原:太原理工大学,2017.

Nan Qian. Study on the dispersion of carbon nanotubes modified by non-covalent functionalization in solvents and polymers[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

- [14] 王一科.多壁碳纳米管改性聚合物复合材料的分散方法与性能研究[D].武汉:武汉纺织大学,2019.

Yuan Li, Lan Xiucan, Li Qian, et al. Study on preparation and properties of halogen-free flame retardant reinforced pbt materials with high CTI and low warping[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(12):151-154.

- [11] 孙静,杨其,王琦,等.环氧树脂对 SGF/PET 共混体系性能及微观结构的影响[J].塑料工业,2011,39(4):82-86.

Sun Jing, Yang Qi, Wang Qi, et al. Effects of EP on properties and microstructure of SGF / PET blends[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(4):82-86.

- [12] 何曼君,陈维孝,董西侠.高分子物理(修订版)[M].上海:复旦大学出版社,1986:17-20.

He Manjun, Chen Weixiao, Dong Xixia. Polymer physics (Revised Edition)[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1986:17-20.

- [13] 王良民,王龙礼,刘文哲,等.含溴阻燃 PBT 的阻燃性及紫外光稳定性[J].塑料工业,2020,48(8):47-51.

Wang Liangmin, Wang Longli, Liu Wenzhe, et al. Flame retardancy and ultraviolet stability of bromine flame retarded PBT composites [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(8):47-51.

- [14] 林小璋,金晶,张明鑫,等.聚磷酸铵/ZIF-67 协效阻燃环氧树脂研究[J].塑料工业,2020,48(9):131-134.

Lin Xiaozhang, Jin Jing, Zhang Mingxin, et al. The flame retardancy of ammonium polyphosphate and ZIF-67 on epoxy resin[J]. China Plastic Industry, 2020, 48(9):131-134.

- [15] 代海涛,张慧娟.有机硅无卤环保协效阻燃剂对 PS 阻燃作用的研究[J].塑料工业,2018,46(9):121-124.

Dai Haitao, Zhang Huijuan. Study on the effect of organosilicon halogen-free environmentally friendly synergistic flame retardant on flame retardancy of PS[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(9):121-124.

- [16] 黄俊,彭红梅,胡斌.三聚氰胺聚磷酸盐与金属氧化物协效阻燃聚丙烯研究[J].塑料工业,2018,46(9):93-96.

Huang Jun, Peng Hongmei, Hu Bin. Study of synergistic flame retardant of melamine pyrophosphate and metallic oxide modified polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(9):93-96.

Wang Yike. Study on dispersion method and performance of polymer composites modified by multi-walled carbon nanotubes [D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2019.

- [15] Shabani A, Babaei A, Zanjanijam A R, et al. Investigating the mechanical, morphological, and thermal behavior of PA6 / SAN / MWCNTs blends: Application of Taguchi experimental design[J]. Polymer Composites, 2019, 40(12):4 753-4 762.

- [16] 阳范文,欧阳阅翰,沈佳豪,等.碳纳米管改性 PA6 复合材料的制备与性能[J].工程塑料应用,2019,47(9):12-16,27.

Yang Fanwen, Ouyang Yuehan, Shen Jiahao, et al. Preparation and properties of carbon nanotube modified PA6 composites[J]. Application of Engineering Plastics, 2019, 47(9):12-16, 27.