

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.009

PE-UHMW/PP/HNTs 三元复合材料制备及性能

闫文强¹, 负鹏¹, 丁筠^{1,2}, 薛平¹, 杜啸¹, 马海霞³, 杜悦³

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2. 先进功能高分子复合材料北京市重点实验室, 北京化工大学, 北京 100029;

3. 北京燕山石化高科技术有限责任公司, 北京 102500)

摘要: 以超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 为基体, 添加聚丙烯 (PP) 和埃洛石纳米管 (HNTs), 采用熔融挤出法制备了综合性能优异的 PE-UHMW/PP/HNTs 三元复合材料, 研究了 PP 和 HNTs 含量对复合材料力学性能、热性能、表面硬度、断面形貌以及 PE-UHMW 晶体结构的影响。结果表明, 使用 PP 和 HNTs 对 PE-UHMW 的综合改性效果优于仅使用 PP 对 PE-UHMW 的改性效果, 扫描电镜显示 HNTs 在二元复合体系中分散较均匀。在 PP 树脂和 HNTs 纳米材料的协同作用下, 复合材料的多项性能有显著改善。当 PP 质量分数为 20%, HNTs 质量分数为 1.5% 时, 三元复合材料的邵氏硬度提高到 71 HD, 拉伸强度相比于纯 PE-UHMW 的拉伸强度提高了 58.6%, 热变形温度相比于纯 PE-UHMW 提高了 54℃; 热重分析显示, 复合材料在 400℃ 之前无明显热降解, 表明复合材料具有良好的热稳定性。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 埃洛石纳米管; 三元共混; 热性能; 力学性能

中图分类号: TQ325.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0051-05

Preparation and Properties of PE-UHMW/PP/HNTs Ternary Composites

Yan Wenqiang¹, Yun Peng¹, Ding Yun^{1,2}, Xue Ping¹, Du Xiao¹, Ma Haixia³, Du Yue³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Beijing Key Laboratory of Advanced Functional Polymer Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3. Beijing Yanshan Petrochemical High-Tech Company Limited, Beijing 102500, China)

Abstract: With ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) as the matrix, adding polypropylene (PP) and halloysite nanotubes (HNTs), the PE-UHMW/PP/HNTs ternary composites with excellent comprehensive properties were prepared by melt extrusion. The effects of different variables of PP and HNTs on the mechanical properties, thermal properties, surface hardness, section morphology and PE-UHMW crystal structure of the composites were investigated. The results show that the comprehensive modification effect of PP and HNTs on PE-UHMW is much better than that of PP alone. The scanning electron microscope observations show that HNTs are homogeneously dispersed in the ternary composites. Under the synergistic effect of PP and HNTs, many properties of the composites are significantly improved. When the PP content is 20wt% and the HNTs content is 1.5wt%, the shore hardness of the ternary composite is 71 HD, the tensile strength is 58.6% higher than that of pure PE-UHMW, and the thermal deformation temperature is increased by 54℃ compared with pure PE-UHMW. In addition, the composite has no obvious thermal degradation behavior before 400℃, which exhibits excellent thermal stability.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene; halloysite nanotubes; ternary blends; thermal property; mechanical property

超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 是一种半结晶性的高性能特种聚合物, 极高的分子量和缠结密度赋予其优异的耐磨损、高抗冲等性能, 但 PE-UHMW 存在表面硬度和热变形温度低, 熔体黏度高以及加

工困难等缺点^[1-4]。因此, 需对其进行合理改性以满足不同应用领域的加工及使用要求^[5-6]。在众多改性方法中, 无机纳米材料增强耐温改性是一种高效且经济的改性手段。通过将树脂基体的特性与纳

通信作者: 丁筠, 副教授, 主要研究方向为聚合物功能改性材料和色母粒

收稿日期: 2021-08-18

引用格式: 闫文强, 负鹏, 丁筠, 等. PE-UHMW/PP/HNTs 三元复合材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11): 51-55, 61.

Yan Wenqiang, Yun Peng, Ding Yun, et al. Preparation and properties of PE-UHMW/PP/HNTs ternary composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 51-55, 61.

米材料的高模量、刚性及耐热性等性能相结合,可获得性能良好的复合材料。近年来,埃洛石纳米管(HNTs)因具有优异的力学性能、热稳定性、生物相容性及高长径比等优点而成为研究热点。此外,与其它纳米材料(石墨烯、蒙脱土等)相比,HNTs表面羟基数量较少,结构单元间的氢键相互作用较弱,具有适当纵横比的纳米管状结构,因此更容易在聚合物基体中维持良好的分散状态^[7-8]。

然而,通过添加单一纳米材料提升部分性能的同时,也不可避免地因其团聚效应而导致纳米材料分散性变差及复合材料加工性能降低等问题。采用多元复合改性的方式,利用不同增强相间的协同效应来制备综合性能优异的复合材料是一种更有效的改性方法。

笔者选用HNTs及高流动性的聚丙烯(PP),对PE-UHMW进行增强耐温改性研究。采用熔融挤出方法成功制备了PE-UHMW/PP/HNTs多元增强复合材料,对复合材料的力学性能、晶体结构、断面形貌、邵氏硬度以及热性能进行探究。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-UHMW:粉末状,德国泰科纳公司;

HNTs:工业级,市售;

PP:粒料,市售;

加工润滑剂:粉体,自制。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:KS-21型,昆山科信橡塑机械有限公司;

单螺杆挤出机:北京化工大学自主研发;

干燥箱:SFG型,黄石市恒丰医疗器械有限公司;

热变形温度测定仪:KXRW型,承德泰鼎试验机制造有限公司;

万能试验机:KXWW型,承德泰鼎试验机制造有限公司;

邵氏硬度计:BS61型,德国ZWICK公司;

差示扫描量热(DSC)仪:TA-Q100型,美国TA公司;

热重(TG)分析仪:TA-Q500型,美国TA公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-4700型,日本Hitachi公司。

1.3 样品制备

称取一定量的PP和HNTs在烘箱中80℃下

干燥4h,将HNTs经偶联剂处理并与不同比例PP预混后,和PE-UHMW粉体高速混合10min,混合后的物料经双螺杆挤出机造粒,并通过单螺杆挤出机挤出板材。单螺杆挤出机各段温度分别设置为165,240,260,260,200,195±5℃。制备的材料命名为PE-UHMW/xPP/yHNTs,其中x和y分别代表PP和HNTs在复合体系中的质量分数×100。

1.4 性能测试

拉伸强度按GB/T 1040-2006测试。

冲击强度按GB/T 1043.1-2008测试,缺口样品。

邵氏硬度按GB/T 2411-2008测试。

XRD分析:电压40kV,电流50mA,Cu靶,扫描测试范围2θ=5~40°。

DSC测试:称取5~8mg样品,以10℃/min的升降温速率进行测试,PE-UHMW的结晶度(X_c)按式(1)计算。

$$X_c = \Delta H_c / (\Delta H_c^* \cdot \xi) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_c 为PE-UHMW二次升温曲线的焓值; ΔH_c^* 为PE-UHMW 100%结晶的焓值,取288 J/g; ξ 为PE-UHMW的质量分数。

SEM分析:将样品在液氮中淬断并喷金,在10kV加速电压下观察断裂表面形貌。

热变形温度按GB/T 1633-2000测试。

TG分析:在恒定的氮气氛围(20 mL/min)中进行,每个测试样品以10℃/min的速率从25℃加热至700℃。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

图1为PE-UHMW/PP/HNTs复合材料的拉伸强度曲线。由图1可知,在相同HNTs含量下,PP含量越高的复合体系的拉伸强度也越高。

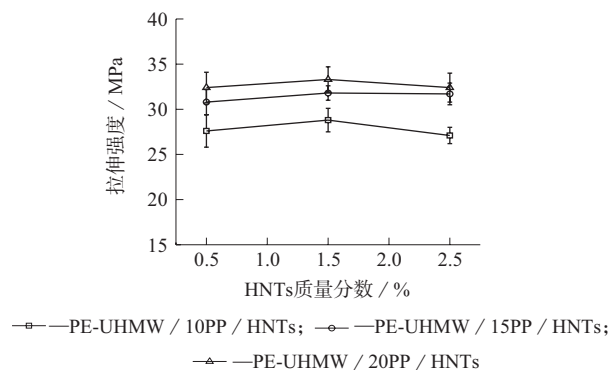


图1 PE-UHMW/PP/HNTs复合材料的拉伸性能

在相同 PP 含量下,不同复合体系的拉伸强度均随 HNTs 含量的增加呈现先升高后降低的变化趋势。PE-UHMW/20PP/1.5HNTs 复合材料的拉伸强度最高,为 33.3 MPa,相比于纯 PE-UHMW 的 21.0 MPa,提高了 58.6%,这可能是由于 PP 的加入在提高材料强度的同时改善了 PE-UHMW 的加工流动性,降低了 PE-UHMW 的物理缠结密度,促进了 HNTs 在体系中的均匀分散^[9]。同时,HNTs 具有高模量及长直的管状结构,在片材挤出过程中沿挤出方向发生一定程度的取向排列,显著提高了复合材料的拉伸强度。但过量的 HNTs 易造成团聚问题,导致材料在拉伸测试中易产生应力集中现象并引发微裂纹,造成拉伸强度下降。

PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的冲击强度测试结果如图 2 所示。当 PP 质量分数超过 10% 时,尽管复合材料的冲击强度出现明显下降,但最低冲击强度值仍维持在 30 kJ/m² 左右,可满足大部分应用场所的使用要求^[10]。在 PP 含量不变的情况下,冲击强度随 HNTs 含量增加表现为先下降后趋于稳定。以上现象可能由于加入 PP 后导致体系整体韧性下降;其次,体系中各相间界面相容性较差,粘附力较低,无法有效传递冲击应力。

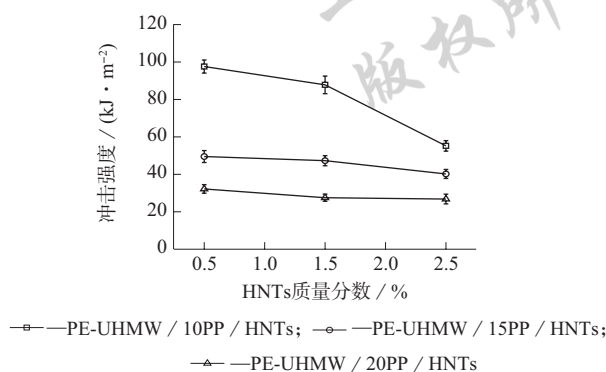


图2 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的冲击强度

综合来看,HNTs 质量分数为 1.5% 时,不同 PP 含量三元复合体系均表现出较好力学性能。因此,选取 HNTs 质量分数为 1.5% 的复合材料进行后续实验探究。

图 3 为 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的邵氏硬度曲线。可以看出,PE-UHMW/PP 体系的硬度值随着 PP 含量的增加基本不变,表明加入 PP 对体系的硬度影响不大。当添加 1.5% 的 HNTs 后,PE-UHMW/PP/HNTs 三元复合体系的表面硬度大幅提高。随 PP 含量的增加呈先增后降的变化趋

势。当 PP 质量分数为 20% 时,由纯 PE-UHMW 的 65HD 增加到 71HD。硬度的明显改善归因于 HNTs 具有比树脂基体高得多的硬度,同时在体系中充当刚性支撑点,能有效承担和传递载荷,从而提高复合材料的表面硬度。

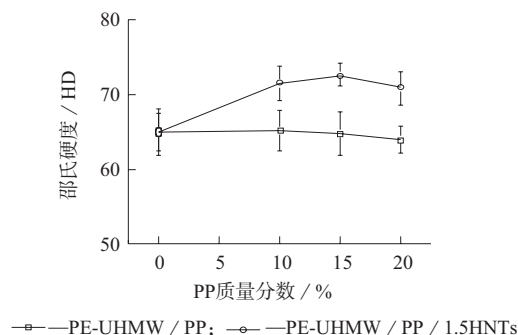


图3 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的邵氏硬度

2.2 晶体结构分析

图 4 为 PP, PE-UHMW, PE-UHMW/20PP 和 PE-UHMW/20PP/1.5HNTs 的 XRD 曲线。由图可知,纯 PE-UHMW 在 21.49° 和 23.86° 处呈现两个主要的特征峰,归属于 PE 正交晶系的 (110) 和 (200) 晶面,表明 PE-UHMW 晶型为 α 晶。纯 PP 在 14.24°, 16.62°, 18.24° 和 21.78° 处也出现了 α 晶型的特征峰,对应于 PP 晶系的 (110), (040), (130) 和 (301) 晶面。此外,三元复合体系中未出现明显的新峰,说明加工过程中无新物质产生且 PE-UHMW 未发生链段裂解现象^[11]。

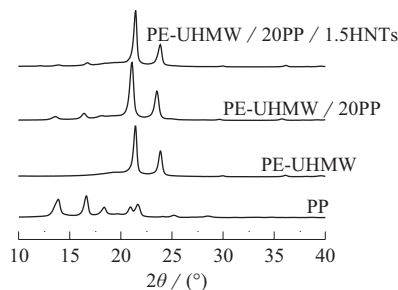
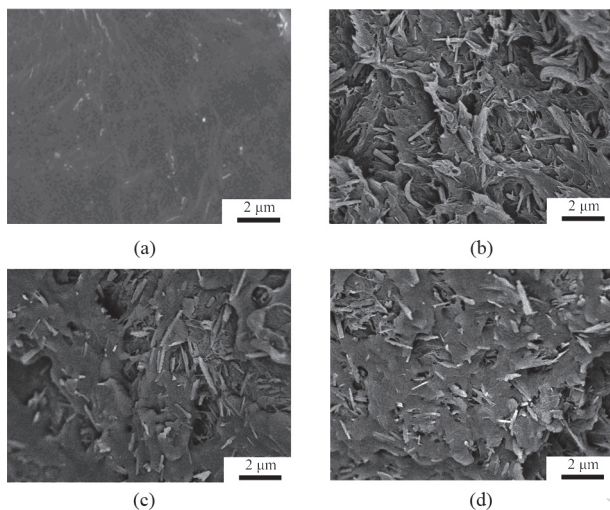


图4 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 XRD 曲线

2.3 微观形貌分析

图 5 为不同复合材料的 SEM 照片。由图 5a 可知,纯 PE-UHMW 的断裂截面较为平坦。由图 5b ~ 图 5d 可以看出,HNTs 较为均匀地分散在树脂基体中,能看到其一维中空管状结构且无明显套管现象,表明熔融挤出过程没有破坏 HNTs 的形态结构。同时,HNTs 结构单元间的氢键相互作用较弱,促进其在树脂基体中的均匀分散。随着 PP 含量增加,凸显的 HNTs 数量逐渐减少,这可能与 HNTs 在

不同基体中的选择性分布有关。由于 HNTs 与 PE-UHMW 的界面能高于 HNTs 与 PP 的界面能,因此 HNTs 在熔融共混过程中更倾向于分散在黏度较低的 PP 相或 PE-UHMW/PP 两相界面处。此外,在 PE-UHMW/PP/有机蒙脱土等复合材料中也报道过类似现象^[12-13]。



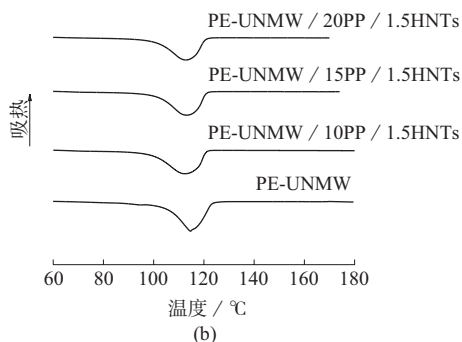
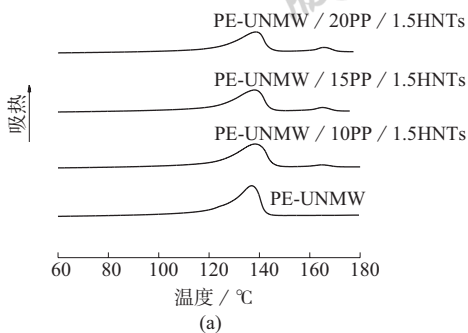
a—PE-UHMW ; b—PE-UHMW / 10PP / 1.5HNTs ;

c—PE-UHMW / 15PP / 1.5HNTs ; d—PE-UHMW / 20PP / 1.5HNTs

图5 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 SEM 照片

2.4 DSC 分析

图6为不同配比复合材料的DSC升降温曲线,相关数据见表1,其中 T_m 为熔融温度, T_c 为结晶温



a—升温曲线; b—降温曲线

图6 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 DSC 升降温曲线

表1 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 DSC 测试数据

材料	$T_m / ^\circ\text{C}$	$T_c / ^\circ\text{C}$	$\Delta H_c / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$X_c / \%$
纯 PE-UHMW	136.6	114.7	140.4	48.7
PE-UHMW / 10PP / 1.5HNTs	138.2	113.7	123.5	48.5
PE-UHMW / 15PP / 1.5HNTs	137.9	113.3	122.4	50.9
PE-UHMW / 20PP / 1.5HNTs	138.8	107.9	113.2	50.1

度, ΔH_c 为结晶焓。由表1可以看出,在 HNTs 固定含量的情况下, PE-UHMW/PP/HNTs 复合体系的结晶度随 PP 含量的增加呈现先增大后减小的变化趋势。其中,当 PP 质量分数为 15% 时, PE-UHMW/PP/HNTs 复合体系结晶度达到最大值 50.9%, 相比于纯 PE-UHMW 提高了 4.3%。这可能是加入分子量较低的 PP 提高了 PE-UHMW 分子链的运动能力, 有利于 PE-UHMW 分子链的解缠结, 从而促进 PE-UHMW 的结晶。由图 6a 中 DSC 升温曲线可知, 三元复合体系出现两个熔融峰, 熔融峰的位置变化不大, 这是由于 PP 与 PE-UHMW 的混溶性较差所致。而图 6b 显示复合体系仅有一个冷却结晶峰, 表明 PP 与 PE-UHMW 具有相同的结晶温度范围, 这可能是由于 PE-UHMW 的分子链段较长, 熔体黏度大, 冷却过程中表现出宽泛的结晶温度区间, 从而将 PP 的结晶区间覆盖^[12]。

2.5 热变形温度分析

热变形温度对于 PE-UHMW 而言是一项亟需提升的性能参数, 其反映材料抵抗热变形的能力。图7为不同配比复合材料的热变形温度。如图7所示, 在 PE-UHMW/PP 复合体系中, 热变形温度随 PP 含量的增加缓慢提高。当 PP 质量分数为 20% 时, 热变形温度从纯 PE-UHMW 的 68 °C 提高到 86 °C, 增加了 26.5%。添加 1.5% 的 HNTs 后, PE-UHMW/PP/HNTs 复合体系的热变形温度大幅提高, PE-UHMW/20PP/1.5HNTs 的热变形温度最高 (122 °C), 较纯 PE-UHMW 提高 54 °C, 增幅为 79.4%。热变形温度的提高归因于作为物理交联点的 HNTs 限制了 PE-UHMW 大分子链的运动^[14]。

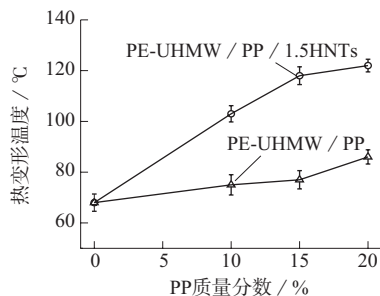


图7 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的热变形温度

此外, HNTs 作为无机刚性材料增强了体系耐热及抵抗塑性变形的能力,大幅提高了热变形温度。

2.6 热稳定性分析

图 8 为 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 TG 曲线,相应的测试结果见表 2,其中 T_5 , T_{10} , T_{50} 分别代表失重 5%,10%,50% 时的温度。由图 8 和表 2 可知,热稳定性依次为 PE-UHMW/10PP/1.5HNTs>PE-UHMW/15PP/1.5HNTs>PE-UHMW/20PP/1.5HNTs>PE-UHMW。从局部放大图可以看出,在 HNTs 固定含量的情况下,随着 PP 含量的增加,初始分解温度(失重 5% 时)逐渐降低。此外,加入 HNTs 后显著提高了复合体系的初始分解温度,初始分解温度从纯 PE-UHMW 的 438.8℃ 提高至 PE-UHMW/10PP/1.5HNTs 的 460.6℃,这可能与 HNTs 在复合体系中抑制 PE-UHMW 分子链段运动有关。其次, HNTs 具有优异的耐热性,可以有效阻隔热量的传递,一定程度上延缓聚合物链段的裂解^[15-16]。此外,所有复合材料在 400℃ 之前无明显热降解行为,此温度远高于复合材料的使用及加工温度,表明复合体系具有良好的热稳定性。

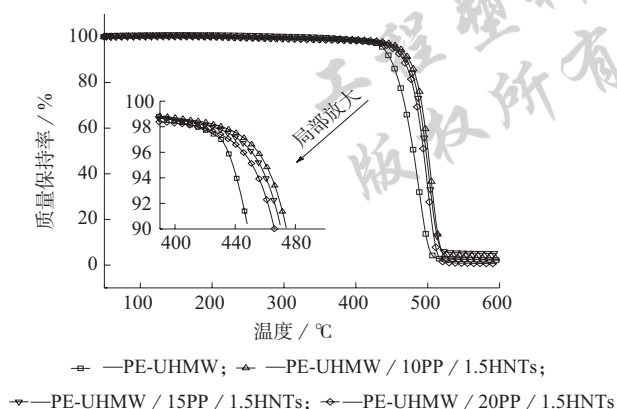


图 8 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 TG 曲线

表 2 PE-UHMW/PP/HNTs 复合材料的 TG 参数

材料	$T_5 / ^\circ\text{C}$	$T_{10} / ^\circ\text{C}$	$T_{50} / ^\circ\text{C}$
纯 PE-UHMW	438.8	448.4	480.4
PE-UHMW/10PP/1.5HNTs	460.6	473.7	501.3
PE-UHMW/15PP/1.5HNTs	456.7	470.6	497.6
PE-UHMW/20PP/1.5HNTs	450.9	466.1	494.1

3 结论

(1) 在 PP 和 HNTs 协同作用下,复合材料的力学性能表现出不同程度的提高。当 PP 质量分数为 20%, HNTs 质量分数为 1.5% 时,复合材料的拉伸强度为 33.3 MPa,相比于纯 PE-UHMW 的 21.0 MPa 提高了 58.6%。邵氏硬度达到 71HD,提高了 9.2%。

(2) SEM 分析结果表明, HNTs 在树脂基体中分散较为均匀并更倾向于分散在黏度较低的 PP 相。

(3) PP 和 HNTs 的加入显著改善了复合材料的热性能。当 PP 质量分数为 20%, HNTs 质量分数为 1.5% 时,复合材料的热变形温度,相比于纯 PE-UHMW 提高了 54℃; TG 分析显示,复合材料 5% 失重分解温度同样有显著提高,热稳定性也得以改善。

参考文献

- [1] 王新威,张玉梅,孙勇飞,等. 超高分子量聚乙烯材料的研究进展[J]. 化工进展,2020,39(9):3 403-3 420.
Wang Xinwei, Zhang Yumei, Sun Yongfei, et al. Research progress of ultra-high molecular weight polyethylene materials[J]. Chemical Progress, 2020, 39(9):3 403-3 420.
- [2] Mohammad A P, Mahyar P S, Amir A S, et al. LDPE/MWCNT and LDPE/MWCNT/UHMWPE self-reinforced fiber-composite foams prepared via supercritical CO₂:A microstructure-engineering property perspective[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2021, 174:1-11.
- [3] Liu L, Hu D, Wan D, et al. Low velocity impact behavior and simulation of parametric effect analysis for UHMWPE/LLDPE thermoplastic composite laminates[J]. Composite Structures, 2020. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113180.
- [4] Patel K, Chikkali S H, Sivarani S. Ultrahigh molecular weight polyethylene:Catalysis, structure, properties, processing and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2020. doi:10.1016/j.progpolymsci.2020.101290.
- [5] 李飞,肖荔人,曹长林,等. 超高分子量聚乙烯/聚丙烯共混改性研究进展[J]. 化学工程与装备, 2020(2):199-201.
Li Fei, Xiao Liren, Cao Changlin, et al. Research progress of UHMWPE/polypropylene co-blending modification[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2020(2):199-201.
- [6] Hashmi S, Neogi S, Pandey A, et al. Sliding wear of PP/UHMWPE blends:effect of blend composition[J]. Wear, 2001, 247(1):9-14.
- [7] 高金玲,李媛,苏似鑫,等. PLA/埃洛石纳米管复合材料制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(12):21-26.
Gao Jinling, Li Yuan, Su Sixin, et al. Preparation and properties of PLA/halloysite nanotubes nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):21-26.
- [8] Sangeetha V, Gopinath D, Prithivirajan R, et al. Investigating the mechanical, thermal and melt flow index properties of HNTs-LLDPE nano composites for the applications of rotational moulding[J]. Polymer Testing, 2020. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106595.

(下转第 61 页)

- and properties of high content glass fiber reinforced PA66 / PA6I composite material[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12):140–143.
- [11] 李先红, 兰修才, 唐勇, 等. PA6 相对黏度对玻纤增强 PA6 复合材料性能的影响 [J]. 塑料工业, 2018, 46(11):30–32.
- Li Xianhong, Lan Xiucui, Tang Yong, et al. Effect of PA6 relative viscosity on the properties of glass fiber reinforced PA6 composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12):140–143.
- [12] Lee K H, Lim S J, Kim W N. Rheological and thermal properties of polyamide 6 and polyamide 6 / glass fiber composite with repeated extrusion[J]. Macromolecular Research, 2014, 22(6):624–631.
- [13] Matsunaga T, Sato Y, Goda K. Major cause of strength improvement of a ramie / PA composite with low fiber contents[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2018, 1(1):93–98.
- [14] 罗玉航. 共聚酰胺 6 / 66 的制备及性能研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
- Luo Yuhang. Preparation and properties study of copolyamide 6 / 66[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2017.
- [15] 解廷秀, 杨桂生. 尼龙 1212 / 尼龙 6 共混体系的非等温结晶行为 [J]. 高分子学报, 2005(2):227–230.
- Xie Tingxiu, Yang Guisheng. Nonisothermal crystallization behavior of nylon1212 / nylon6 blends[J]. Acta Polymerica Sinica, 2005(2):227–230.
- [16] 李杨, 姜金分, 周琴. PA6 / CaCl₂ / 玻璃纤维复合材料非等温结晶动力学研究 [J]. 塑料工业, 2007, 45(1):40–43.
- Li Yang, Lou Jinfen, Zhou Qin. Non-isothermal crystallization kinetics of PA6 / CaCl₂ / glass fiber composite[J]. China Plastics Industry, 2007, 45(1):40–43.
-
- (上接第 55 页)
- [9] Liu G, Li H. Extrusion of ultrahigh molecular weight polyethylene under ultrasonic vibration field[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 89(10):2 628–2 632.
- [10] Xie M, Liu X, Li H, et al. Influence of poly(ethylene glycol)-containing additives on extrusion of ultrahigh molecular weight polyethylene / polypropylene blend[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100(2):1 282–1 288.
- [11] 张晓华, 周士静, 顾晓华, 等. 超高分子量聚乙烯 / 石墨烯纳米复合材料的制备及其热性能的研究 [J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(5):85–90.
- Zhang Xiaohua, Zhou Shijing, Gu Xiaohua, et al. Preparation and thermal properties of UHMWPE / GNS composites[J]. Materials Science and Technology, 2016, 24(5):85–90.
- [12] 翟家驹, 瞿金平. 偏心转子挤出机制备 UHMWPE / PP / OMMT 纳米复合材料及表征 [J]. 塑料工业, 2020, 48(9):135–140.
- Zhai Jiaju, Qu Jinping. Preparation and characterization of UHMWPE / PP / OMMT nanocomposites by eccentric rotor extruder[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(9):135–140.
- [13] Chen J, Du X, Zhang W, et al. Synergistic effect of carbon nanotubes and carbon black on electrical conductivity of PA6 / ABS blend[J]. Composites Science and Technology, 2013, 81(14):1–8.
- [14] Qiao X, Na M, Ping G, et al. Halloysite nanotubes reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposite films with different filler concentration and modification[J]. Polymer Testing, 2017, 57:133–140.
- [15] Zhai W, Sun R, Sun H, et al. Segregated conductive CNTs / HDPE / UHMWPE composites fabricated by plunger type injection molding[J]. Materials Letters, 2018, 229:13–16.
- [16] 董鹏刚, 陈有双, 唐忠锋, 等. γ 射线辐照对超高分子量聚乙烯 / 改性纳米伊蒙土复合材料的拉伸性能及热稳定性的影响 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2017, 35(4):53–58.
- Dong Penggang, Chen Youshuang, Tang Zhongfeng, et al. Thermostability and tensile-property of ultra-high molecular weight polyethylene / modified illite-smectite interstratified clay minerals composites irradiated by γ -rays[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2017, 35(4):53–58.