

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.009

混杂GF对GF增强PBT复合材料性能的影响

谢慧娟¹, 赵姜斌¹, 贾义军^{1,2}, 吴少珊¹

(1. 宁波华腾首研新材料有限公司, 浙江宁波 315400; 2. 北京市化学工业研究院有限责任公司, 北京 100084)

摘要: 以玻璃纤维(GF)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)树脂为原料,采用双螺杆挤出机熔融挤出造粒,制得GF增强PBT复合材料。首先考察了3种不同种类(圆GF ECS-3.0-T436H、扁平GF TFG-3.0-T436、扁平GF TFG-3.0-T4355)和含量的GF对复合材料力学性能和抗翘曲性能的影响,筛选出力学性能增强效果和翘曲改善效果最佳的单一GF。其次,将两种GF混杂,考察了混杂比对复合材料力学性能和抗翘曲性能的影响。最后,对最佳混杂比的GF增强PBT复合材料的流变性能进行研究。结果表明,所选3种不同种类GF中,增强PBT复合材料力学性能最佳的GF型号为圆GF ECS-3.0-T436H,改善翘曲效果最佳的GF型号为扁平GF TFG-3.0-T436。对比两种型号的扁平GF,扫描电子显微镜观察表明,与TFG-3.0-T4355型号的GF相比,TFG-3.0-T436型号的GF和PBT树脂基体具有更好的相容性。在质量分数30%GF混杂体系里,最佳混杂比为扁平GF TFG-3.0-T436占比60%、圆GF ECS-3.0-T436H占比40%,此时PBT复合材料的力学性能和翘曲性能取得最佳平衡,复合材料的拉伸强度为141 MPa、弯曲强度为205 MPa、非缺口冲击强度为74.2 kJ/m²、缺口冲击强度为11.9 kJ/m²、翘曲高度为2.62 mm。对混杂GF增强PBT复合材料进行流变性能测试,结果表明,混杂GF中不同扁平GF占比的PBT复合材料均为典型的假塑性非牛顿流体;随着剪切速率的逐步升高,复合材料的剪切黏度持续降低,表现出典型的“剪切变稀”特征。

关键词: 增强聚对苯二甲酸丁二酯复合材料;低翘曲;力学性能;复合材料;扁平玻璃纤维

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0068-08

Effects of hybrid GF on properties of GF reinforced PBT composites

XIE Huijuan¹, ZHAO Jiangbin¹, JIA Yijun^{1,2}, WU Shaoshan¹

(1. Ningbo Huateng Shouyan New Material Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

2. Beijing Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract : Reinforced polybutylene terephthalate (PBT) composites were fabricated through twin-screw extrusion compounding using glass fibers (GF) and PBT resin. Firstly, the effects of three different types (round GF ECS-3.0-T436H, flat GF TFG-3.0-T436, flat GF TFG-3.0-T4355) and content of GF on the mechanical properties and anti-warpage properties of composites were investigated, and the single GF with the best mechanical properties and warpage improvement effect was selected. Subsequently, hybrid GF systems were engineered to evaluate the influence of hybrid ratios on composite performance. Finally, the rheological properties of GF reinforced PBT composites with the best hybrid ratio were studied. The results show, that among the three different types of GF, the GF model with the best mechanical properties of reinforced PBT composites is circular GF ECS-3.0-T436H, and the GF model with the best warpage improvement effect is flat GF TFG-3.0-T436. Compared with the two types of flat GF, scanning electron microscopy shows that, compared with the TFG-3.0-T4355 type GF, the TFG-3.0-T436 type GF and PBT resin matrix has better compatibility. Within the 30 wt% GF hybrid system, the optimal hybrid proportion is determined to be 60% flat GF TFG-3.0-T436 and 40% round GF ECS-3.0-T436H, and the mechanical properties and warpage performance of PBT composite materials achieve the best balance, as follow: tensile strength is 141 MPa, flexural strength is 205 MPa, unnotched impact strength is 74.2 kJ/m², notched impact strength is 11.9 kJ/m², and the warpage height is 2.62 mm. All composites exhibit pseudoplastic non-newtonian behavior with pronounced shear-thinning characteristics under increasing shear rates.

通信作者: 谢慧娟, 硕士研究生, 主要从事工程塑料的改性等研究

收稿日期: 2025-06-20

引用格式: 谢慧娟, 赵姜斌, 贾义军, 等. 混杂GF对GF增强PBT复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 68-75.

XIE Huijuan, ZHAO Jiangbin, JIA Yijun, et al. Effects of hybrid GF on properties of GF reinforced PBT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 68-75.

Keywords : reinforced polytetramethylene terephthalate composite ; low-warpage modification ; mechanical performance ; composite material ; flat glass fiber

在玻璃纤维(GF)增强聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)体系中,由于PBT材料高结晶及GF本身取向特性的各向异性,使得材料在注射成型过程中不同方向的收缩率存在差异,导致PBT制件(尤其是大型薄壁构件)出现翘曲变形^[1-8]。针对PBT制件的翘曲问题,近年来,行业内主要采用无机物、共混合金的方式改善PBT材料的翘曲特性^[9-15]。高含量无机填料(如滑石粉、碳酸钙、云母等)虽能显著提升刚度和降低翘曲,但通常以牺牲冲击韧性和拉伸强度为代价,导致材料变脆。高填充量也会导致PBT材料加工困难及密度增加。不同聚合物共混改性PBT常面临相容性问题,需添加相容剂,增加了成本和工艺复杂性^[16-17]。

1972年, Hayashit^[18]提出了混杂GF增强复合材料的概念,以应对单一纤维增强材料固有的缺陷。利用混杂GF进行改性,既可消除单一GF的弱点,又能确保在所需性能的前提下大幅降低材料成本。研究表明,与碳纤维增强聚丙烯相比,碳纤维/GF混杂复合材料不仅展现出更高的断裂伸长率,其拉伸强度提升幅度超过40%^[19]。

基于以上背景分析,笔者通过“混杂圆GF和扁平GF”策略,研究不同混杂比的GF对PBT复合材料微观结构(纤维分散、取向、界面黏结)及宏观性能(拉伸性能、弯曲性能、冲击强度、抗翘曲性能)的影响,依据GF特性、系统调控混杂GF比例,旨在突破单一GF增强复合材料的性能瓶颈,实现高刚、高强、低翘曲等性能的综合平衡,为高性能精密热塑性复合材料制品的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBT: KH2083, 浙江日出精细化工有限公司;

增韧剂: E-515 (甲基丙烯酸缩水甘油酯接枝乙烯-辛烯聚合物), 宁波能之光新材料销售有限公司;

溴化环氧: EP-25K, 江苏兴盛化工有限公司;

三氧化二锑: 常德辰州锑品有限责任公司;

抗氧剂: 1010, 圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

抗氧剂: 168, 圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

润滑剂: PETs-AP, 余姚欧利塑化有限公司;

扁平GF: TFG-3.0-T436(短切长度3.38 mm, 长径比3.920, 单丝厚度7 μm , 截面形状扁平状), TFG-3.0-T4355(短切长度3.22 mm, 长径比3.810, 单丝厚度7 μm , 截面形状扁平状), 泰山玻璃纤维有限公司;

圆GF: ECS-3.0-T436H(短切长度3 mm, 直径11 μm), 泰山玻璃纤维有限公司。

1.2 主要仪器及设备

同向平行双螺杆挤出机: ZSK-30, 南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

注塑机: UN90A5S-V, 广东伊之密精密注压科技有限公司;

电子万能试验机: WDT-W-20A1, 承德精密试验机有限公司;

电子式简支梁冲击试验机: JC-25D, 承德精密试验机有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM): Thermo Apreo 2C, 赛默飞世尔科技公司(中国)有限公司;

毛细管流变仪: 英国马尔文RH2000, 天津嘉英特科技发展有限公司。

1.3 试样制备

(1)原料干燥: 将PBT树脂在鼓风干燥箱中于120 $^{\circ}\text{C}$ 下烘2 h除去水分, 放置2 h后冷却。

(2)物料共混: 将树脂、增韧剂、抗氧剂等按照一定比例使用高速混合机混合均匀。

(3)双螺杆挤出机挤出造粒: 将一定比例短GF通过侧喂料称进入螺杆挤出机中, 混合后的树脂、助剂等物料通过主喂料称进入螺杆挤出机中, 具体配方见表1; 挤出机1~10区温度分别为120, 200, 240, 230, 230, 235, 235, 235, 245, 245 $^{\circ}\text{C}$, 机头温度为255 $^{\circ}\text{C}$, 螺杆转速300~320 r/min。

(4)测试样条的制备: 所制得的样品粒料放入鼓风干燥箱中在120 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥2 h, 然后按照检测标准在245~255 $^{\circ}\text{C}$ 下使用注塑机制备标准样条。

1.4 测试与表征

(1)力学性能测试。

拉伸性能按GB/T 1040.2-2006测试, 拉伸速率为10 mm/min; 弯曲性能按GB/T 9341-2008进行测试, 加载速率为2 mm/min; 简支梁缺口冲击强度按GB/T 1043.1-2008进行测试, 摆锤能量为1 J; 简支

表1 不同种类GF增强PBT复合材料的配方(质量分数)
Tab. 1 Formulations of different types of GF reinforced PBT
composites(mass fraction)

Materials	P1	P2	P3
PBT KH2083	55.90	55.90	55.90
GF	30.00	30.00	30.00
Brominated epoxy EP-25K	9.40	9.40	9.40
Thermoplastic toughener E-515	2.30	2.30	2.30
Sb ₂ O ₃	1.96	1.96	1.96
Antioxidant 1010	0.08	0.08	0.08
Antioxidant 168	0.08	0.08	0.08
Lubricant PET-s	0.28	0.28	0.28

Notes: Type of GF used in P1 is ECS-3.0-T436H; Type of GF used in P2 is TFG-3.0-T436; Type of GF used in P3 is TFG-3.0-T4355.

梁非缺口冲击强度按 GB/T 1043.1-2008 进行测试, 摆锤能量为 4 J。

(2) 翘曲高度的测试。

基于对材料本征行为与工艺窗口的综合考量, 采用中心浇口设计的 $\Phi 100\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的注塑圆片, 注塑温度为 $245\sim 255\text{ }^{\circ}\text{C}$, 注塑试样均匀。为量化翘曲度, 将试样放于平整的实验台上, 沿四条直径方向($0^{\circ}/90^{\circ}/180^{\circ}/270^{\circ}$)测量其径向对称点的高度偏差, 取最大值作为该试样的翘曲高度, 同组实验样品重复测量 5 次, 取平均值, 作为翘曲高度。

(3) 收缩率测试。

注塑 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 板材, 将冷却后的方板在重物完全压平条件下, 使用千分尺测试其不同方向尺寸(取固定 3 个位置测试尺寸并取平均值), 除以模具原始尺寸后得到收缩率。

(4) 断面形貌表征。

在对拉伸试样断面实施喷金处理后, 运用 FESEM 对 PBT 复合材料拉伸断面的形态展开观察。

(5) 流变性能测试。

用毛细管流变仪测试复合材料的流变性能; 测试口模为 DA-1.0-16-180-15, 口模直径为 1 mm , 长径比为 16, 测试温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测试剪切速率设定为 $100\sim 3\ 000\text{ s}^{-1}$, 共测试 6 个剪切速率数据点。

2 结果与讨论

2.1 单一 GF 种类对 PBT 复合材料性能的影响

2.1.1 力学性能

在 GF 质量分数为 $10\%\sim 30\%$ 下, 考察了 3 种不同种类的 GF 作为 PBT 树脂的增强材料, 制备的样品分别标号为 P1, P2, P3, 具体实验配方见表 1, 对这 3 种样品综合力学性能及微观形貌进行了分析。力

学性能如图 1 所示, 微观形貌 SEM 照片如图 2 所示。

图 1 对比了不同含量的圆形 GF ECS-3.0-T436H、扁平 GF TFG-3.0-T436 与扁平 GF TFG-3.0-T4355 对 PBT 复合材料性能的影响。由图 1 可见, 随着 GF 含量的增加, 3 种复合材料的拉伸强度、弯曲强度、简支梁非缺口冲击强度、缺口冲击强度均随之增加。进一步研究两种扁平 GF 增强复合材料经拉伸断裂后的形貌, SEM 分析(图 2)显示, 两种扁平 GF 制得的 30%GF 增强 PBT 复合材料 P2 和 P3 中, 样品 P3 中的断面空穴较 P2 多, 断面中残留断裂的 GF 数量较少, 本质原因在于浸润剂化学结构的差异。“436”圆 GF 使用的浸润剂含有丰富的羟基, 不仅能与偶联剂协同作用, 更能与树脂基体形成大量氢键甚至共价键, 使得 GF 与 PBT 树脂基体有更强的界面黏结力, 受到外界作用力时, 复合材料中的 GF 能吸收更多的破坏能量。而“4355”的浸润剂官能团密度较低, 导致与树脂的相互作用强度和扩散程度不足, 使材料受外力拉伸作用下, GF 很容易从基体树脂中拔出, 并留下空穴^[20], 导致复合材料力学性能降低。因此, 从综合力学性能看, 圆 GF ECS-3.0-T436H 更适合作为 PBT 的增强材料, 质量分数为 30% 的圆 GF ECS-3.0-T436H 增强的 PBT 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度、缺口冲击强度分别为 147 MPa , 213 MPa , 64.9 kJ/m^2 , 10.8 kJ/m^2 。

2.1.2 翘曲性能

图 3 为不同质量分数的扁平 GF 及圆形 GF 改善 PBT 复合材料翘曲高度的对比图。由图 3 可以看出, 不同类型的 GF 改善翘曲效果不同。随着 GF 用量的增加, 扁平 GF 改善复合材料的翘曲效果优于圆形 GF, 原因在于圆形 GF 与 PBT 基体的接触面积较小(单位体积表面积低), 界面结合强度相对较弱, 易形成应力集中点, 导致局部应力释放不均, 加剧翘曲。而随着 GF 含量的增加, 扁平 GF 增强复合材料的翘曲高度呈现下降的趋势, 原因在于扁平 GF 的横截面为矩形结构, 具有一定的宽厚比, 且该截面方向在垂直于熔体流动方向上定向排布, 从而减小了流动方向和垂直于流动方向上的收缩率差异^[21-22], 因此翘曲变形量较小。扁平 GF TFG-3.0-T436 改善 PBT 复合材料翘曲效果优于扁平 GF TFG-3.0-T4355, 原因在于 TFG-3.0-T436 型扁平 GF 的浸润剂“436”与 PBT 树脂基体的相容性更好。因

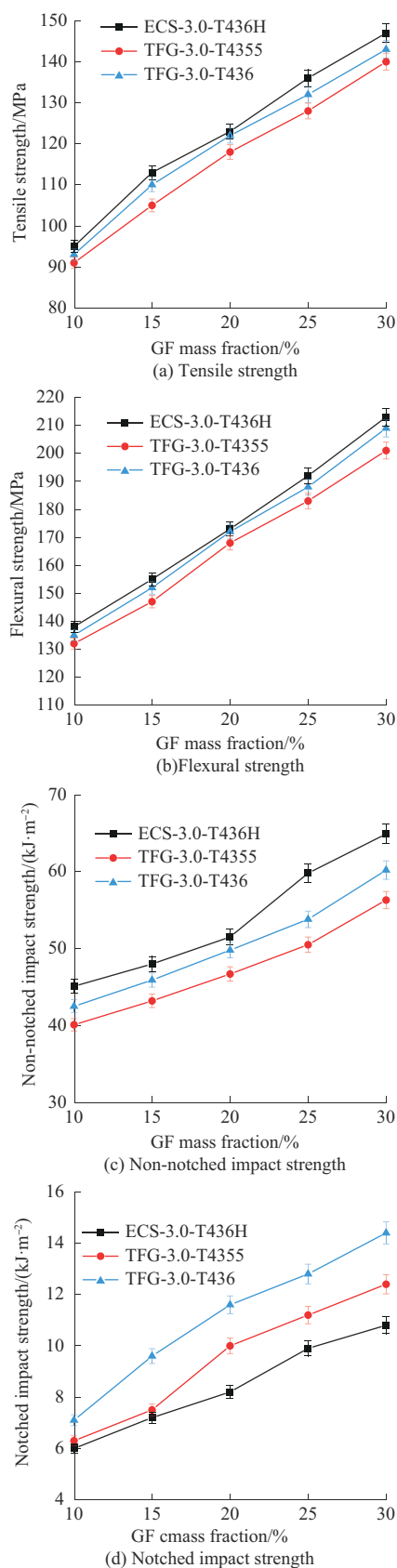


图1 不同含量及种类的GF增强PBT复合材料的力学性能
Fig. 1 Mechanical properties of GF reinforced PBT composites with different contents and types of GF

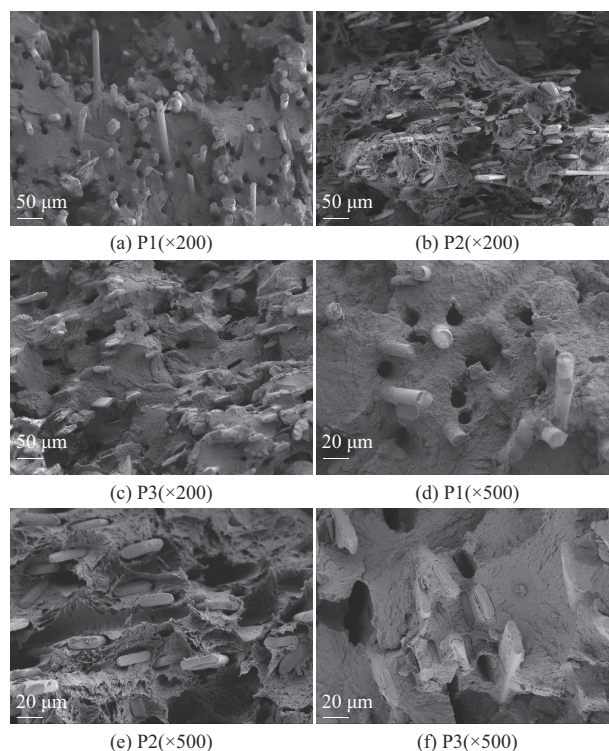


图2 不同GF增强PBT复合材料在不同放大倍数下的SEM照片
Fig. 2 SEM photos of different GF reinforced PBT composites at different magnifications

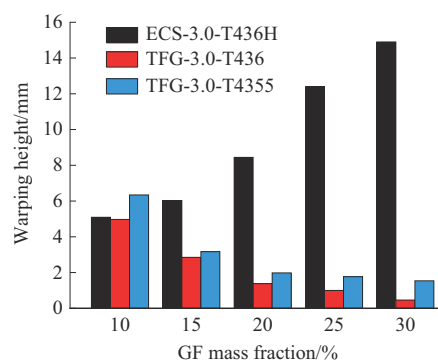


图3 不同GF改善PBT复合材料的翘曲高度对比
Fig. 3 Comparison of warpage heights of PBT composites improved by different GF

此,选取TFG-3.0-T436作为改善PBT翘曲性能的最佳材料,质量分数为30%的条件下,PBT复合材料的翘曲高度为0.46 mm。

2.2 圆GF和扁平GF混杂对PBT复合材料性能的影响

2.2.1 力学性能

由以上分析可知,圆型GF ECS-3.0-T436H改性PBT复合材料的力学性能好,扁平GF TFG-3.0-T436改性PBT复合材料的抗翘曲性能最佳。为平衡PBT复合材料的力学性能、抗翘曲性能及降低成本,将圆形GF ECS-3.0-T436H和扁平GF TFG-3.0-

T436改性的PBT复合材料进行混杂,考察了不同混杂比对PBT复合材料综合性能的影响。将1.3制备的复合材料按一定比例混合以形成混杂GF增强复合材料,混杂GF中圆GF和扁平GF的混杂比见表2,对应的样品编号为1[#]~6[#],不同混杂比对复合材料的力学性能影响如图4所示。

表2 1[#]~6[#]复合材料中圆GF与扁平GF在混杂GF中的占比

Tab. 2 Proportion of round GF and flat GF in hybrid fibers of 1[#]~6[#] composites

Fibers	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
Round GF	100	80	60	40	20	0
Flat GF	0	20	40	60	80	100

在GF质量分数为30%条件下,图4展示了圆GF和扁平GF混杂对PBT复合材料力学性能的影响。由图4可以看出,PBT复合材料的拉伸强度和弯曲强度随着扁平GF质量分数的增加呈现出下降的趋势,原因在于,圆GF加工时沿流动方向高度取向,构建单向增强网络,能够高效传递拉弯载荷;而扁平GF二维结构取向效率低,致使载荷传递路径分散,削弱增强效果。在圆GF/扁平GF混杂体系中,随着扁平GF (TFG-3.0-T436)质量分数的增加,其对整体复合材料性能的影响权重增加。对于纤维取向层面,扁平GF比例的上升导致体系中具有最优取向(平行于拉伸方向)的纤维比例降低。体系整体趋向于更随机的二维分散状态,显著削弱了“类单向增强”效应。在界面应力传递层面,引入更多的扁平GF意味着引入了更多潜在的应力集中点(边缘)和低效的应力传递单元。这导致界面早期损伤(脱黏、基体开裂)的萌生点增多,载荷在纤维网络中的传递路径受阻,整体应力传递效率下降。缺口冲击强度持续上升的原因主要在于扁平GF在缺口附近形成层状排列,延缓裂纹扩展。缺口诱导的应力集中激活了扁平GF的多重增韧机制(如界面脱黏、GF断裂、基体屈服等),形成了更复杂的能量耗散路径^[6]。

2.2.2 翘曲性能

图5为混杂GF对PBT复合材料抗翘曲性能的影响及纵横收缩率之比,由图5可以明显看出在固定P1和P2中GF质量分数30%的情况下,随着扁平GF在混杂GF中含量的增加,复合材料的翘曲高度及纵横收缩率之比表现出明显的下降趋势。原因在于传统圆GF在加工过程中(如注塑)易沿流动方

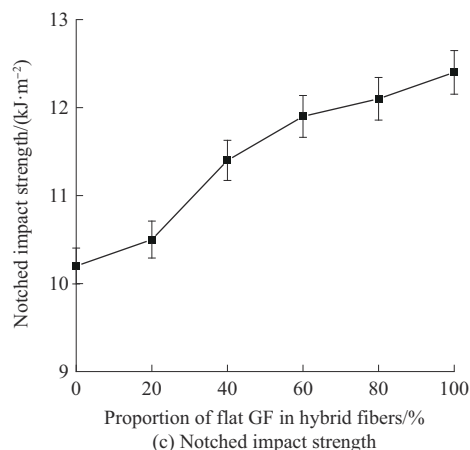
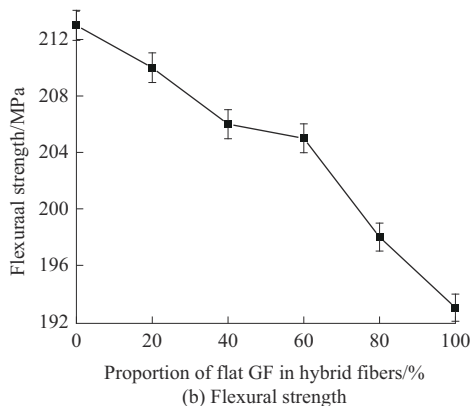
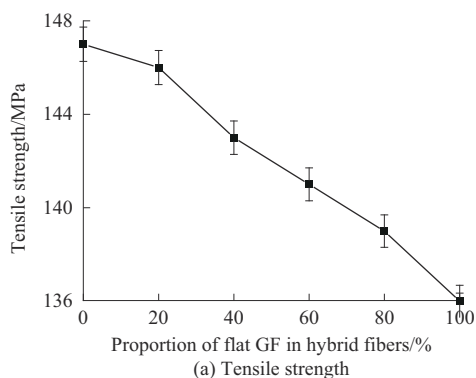


图4 圆GF和扁平GF混杂对PBT复合材料力学性能的影响

Fig. 4 Influence of hybrid fibers with round GF and flat GF on mechanical properties of PBT composites

向高度取向,形成单向增强结构,这种取向导致材料在流动方向和垂直方向的收缩率差异显著引发各向异性收缩,从而产生翘曲。扁平GF的二维平面结构可在流动方向和垂直方向同时提供机械约束,显著降低收缩率差异,从而抑制翘曲。当翘曲参数^[23]在0.03~0.04时,对于对角线长度为141 mm的制件,最大翘曲高度为4.2~5.6 mm,可认为翘曲程度较低,基于这样的事实,在同时考虑综合力学性能以

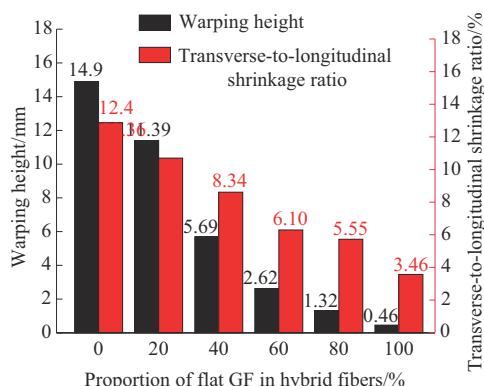


图5 混杂GF对PBT复合材料翘曲高度及纵横收缩率之比的影响

Fig. 5 Effect of hybrid GF on warpage height and transverse-to-longitudinal shrinkage ratio of PBT composites

及成本这两个重要因素之后,选择混杂纤维中质量分数40%的圆GF ECS-3.0-T436H和质量分数60%的扁平GF TFG-3.0-T436为最佳混杂比,此时PBT复合材料的拉伸强度为141 MPa、弯曲强度为205 MPa、非缺口冲击强度为74.2 kJ/m²、缺口冲击为11.9 kJ/m²、翘曲高度为2.62 mm。

2.3 流变性能

在实验温度为250℃,口模1 mm的条件下,选择综合性能最佳的混杂GF中扁平GF占比为60%的复合材料(4[#])作为研究目标,对比研究扁平GF含量占混杂GF质量0%和100%的复合材料(即1[#]和6[#]样品)的流变性能。图6对比展示了3种样品熔体剪切黏度随剪切速率的变化规律。

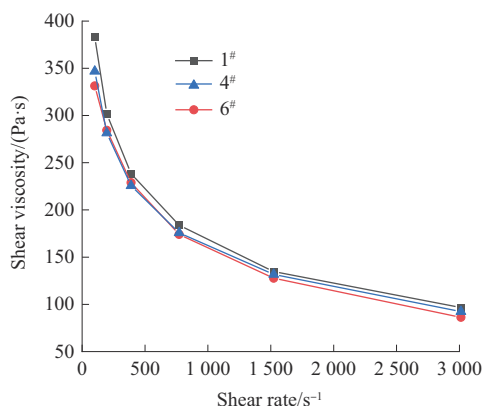


图6 不同剪切速率下3种复合材料熔体剪切黏度

Fig. 6 Shear viscosity of three composite melt under different shear rates

由图6可见,3种复合材料熔体均为典型的假塑性非牛顿流体,随着剪切速率的不断增大剪切黏度不断下降,呈现出“剪切变稀”现象。在剪切速率为100 s⁻¹条件下,扁平GF在混杂GF中占比0%时(只

含圆GF),PBT复合材料的剪切黏度高于扁平GF在混杂GF中占比100%(只含扁平GF)时复合材料的剪切黏度,扁平GF在混杂GF中占比60%增强PBT复合材料的剪切黏度大于只含扁平GF的PBT复合材料的剪切黏度,但明显低于只含圆GF的复合材料的剪切黏度,所以混杂圆GF与扁平GF的复合材料较只含圆GF的复合材料更容易进行加工成型,因此,结合力学性能加入适量的扁平GF熔体可以使复合材料表现出更大的流动性^[24],可实现力学性能和翘曲性能的平衡调节。

3 结论

(1)固定GF质量分数30%的情况下,所选3种GF中,圆GF ECS-3.0-T436H改善复合材料力学性能的效果最好,此时复合材料的拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度、缺口冲击强度分别为147 MPa, 213 MPa, 64.9 kJ/m², 10.8 kJ/m²。对比两种型号的扁平GF,型号为TFG-3.0-T436的扁平GF改善复合材料翘曲效果最优,翘曲高度为0.46 mm。

(2)在圆GF和扁平GF混杂体系中,选取质量分数60%的扁平GF TFG-3.0-T436和混杂质量分数40%的圆GF ECS-3.0-T436H增强PBT,可使PBT复合材料在力学性能和抗翘曲性能上取得最佳平衡,此时PBT复合材料的拉伸强度、弯曲强度、非缺口冲击强度、缺口冲击强度分别为141 MPa, 205 MPa, 74.2 kJ/m², 11.9 kJ/m²,翘曲高度为2.62 mm。

(3)混杂GF中不同扁平GF占比的GF增强PBT复合材料熔体为假塑性非牛顿流体;随着剪切速率的逐步升高,剪切黏度持续降低,表现出典型的“剪切变稀”特征。

参考文献

- [1] 朱腾. 玻纤增强PBT材料的注塑成型工艺优化与应用[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2021.
ZHU Teng. Optimization and application of injection molding process for glass fiber reinforced PBT material[D]. Huaiyin Institute of Technology, 2021.
- [2] 李登辉, 贾义军, 张宜鹏, 等. 不同增韧剂对PBT非增强及增强体系性能的影响[J]. 塑料工业, 2020, 48(S1): 166-169.
LI Denghui, JIA Yijun, ZHANG Yipeng, et al. Effect of different tougheners on the performance of PBT non-reinforced and reinforced systems[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(Suppl 1): 166-169.
- [3] 李明, 李仁勇, 苏童. 控制长GF塑件翘曲变形的工艺方法[J]. 模具工业, 2024, 50(10): 56-62.
LI Ming, LI Renyong, SU Tong. Process method for controlling

- warping deformation of long glass fiber plastic parts[J]. Die & Mould Industry, 2024, 50(10): 56-62.
- [4] 安朋. 玻纤增强PBT/PET复合材料的后翘曲变形及机理[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 122-127.
- AN Peng. Post-warpage deformation and mechanisms of glass fiber reinforced PBT/PET composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 122-127.
- [5] 许升, 章建忠, 樊家澍, 等. 玻纤形态对PP/GF复合材料的性能影响与优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 51-55.
- XU Sheng, ZHANG Jianzhong, FAN Jiashu, et al. Influence and optimization of glass fiber morphology on properties of PP/GF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 51-55.
- [6] 何勇, 彭珂, 曾庆文, 等. 高强度低翘曲PA66复合材料的研究[J]. 玻璃纤维, 2016(6): 1-4.
- HE Yong, PENG Ke, ZENG Qingwen, et al. The research of high strength and low warpage PA66 composite[J]. Fiber Glass, 2016 (6): 1-4.
- [7] 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.
- YUAN Li, LAN Xiucui, LI Qian, et al. Study on preparation and properties of halogen-free flame retardant reinforced PBT materials with high CTI and low warpage[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(12): 151-154.
- [8] 翁永华, 张祥福, 周文. 一种低翘曲、高表面光泽度玻璃纤维增强PBT复合材料: CN1563186A[P]. 2005-01-12.
- WENG Yonghua, ZHANG Xiangfu, ZHOU Wen. A low-warpage, high-surface-gloss glass fiber reinforced PBT composite material: CN1563186A[P]. 2005-01-12.
- [9] 孟凡地, 吴承然, 易琪伟, 等. 不同截面类型GF增强PA6的性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 43-48.
- MENG Fandi, WU Chengran, YI Qiwei, et al. Performance of PA6 reinforced with glass fibers of different cross-sectional types[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 43-48.
- [10] 胡志刚, 张作宁, 郭海涛, 等. 硫酸钙晶须对PBTGF增强材料的翘曲改善研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(1): 22-23.
- HU Zhigang, ZHANG Zuoning, GUO Haitao, et al. Study on the warpage improvement of PBT glass fiber reinforced material by calcium sulfate whisker[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(1): 22-23, 63.
- [11] 谢周昊. PBT塑料的低翘曲化无机填充改性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- XIE Zhouhao. Research on inorganic filler modification for low warpage of PBT plastics[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [12] 吕智. 增强阻燃PBT合金材料的开发[J]. 国外塑料, 2014, 32(10): 39-44.
- LYU Zhi. Development of enhanced flame-retardant PBT alloy materials[J]. Foreign plastics, 2014, 32(10): 39-44.
- [13] 冯健, 黄险波, 叶南彪, 等. 一种PBT材料及其制备方法与应用: CN112852119A[P]. 2021-05-28.
- FENG Jian, HUANG Xianbo, YE Nanbiao, et al. PBT material as well as preparation method and application thereof: CN112852119 A[P]. 2021-05-28.
- [14] 王晓斌, 戴春寿, 钱晨晨. PBT的改性研究及其在家电行业的应用[J]. 广州化工, 2021, 49(3): 17-19.
- WANG Xiaobin, DAI Chunshou, QIAN Chenchen. Modification of PBT and its application in home appliances[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(3): 17-19.
- [15] 熊泰熠, 陈继兵. PBT材料的改性方式研究进展现状综述及展望[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2021(7): 51-53.
- XIONG Taiyi, CHEN Jibing. Overview and prospect of the research status of PBT material modification methods[J]. China-Arab States Science and Technology Forum, 2021(7): 51-53.
- [16] 卜和安, 刘世军, 吴文洋, 等. PBT工程塑料改性的研究现状及应用进展[J]. 塑料科技, 2023, 51(2): 109-113.
- PU Hean, LIU Shijun, WU Wenyang, et al. Research status and application progress of modification of PBT engineering plastics [J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(2): 109-113.
- [17] 迟冬冬. PBT/ABS共混体系性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- CHI Dongdong. Study on the properties of PBT/ABS blending system[D]. Jinan: Shandong University. 2016.
- [18] HAYASHI T. On the improvement of mechanical properties of composites by hybrid composition[C]//Proceedings of the 8th International Reinforced Plastics Conference, Brighton, UK, 1972.
- [19] 张博明, 李嘉, 李煦. 混杂纤维复合材料最优纤维混杂比例及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2014 (7): 107-112.
- ZHANG Boming, LI Jia, LI Xu. Optimum mix ratio of hybrid fiber reinforced polymer composites and their researching progress [J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(7): 107-112.
- [20] 赵姜斌, 贾义军, 陈国军, 等. GF增强sPS复合材料的力学性能和结晶性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 130-135.
- ZHAO Jiangbin, JIA Yijun, CHEN Guojun, et al. Mechanical and crystallization properties of glass fiber reinforced sPS composites [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 130-135.
- [21] 许鸿基, 冯德才, 郑一泉, 等. 圆GF和扁平GF复配增强PA6及其性能研究[J]. 广东化工, 2019, 46(5): 71-73.
- XU Hongji, FENG Decai, ZHENG Yiquan, et al. Combination of round glass fiber and flat glass fiber in reinforced PA6 and its performance[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(5): 71-73.
- [22] 陈列. 扁平GF增强PA9T复合材料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

- CHEN Lie. Preparation and performance of flat GF reinforced PA9T composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2018.
- [23] 金发科技股份有限公司,上海金发科技发展有限公司.一种低翘曲GF增强PBT组合物及其制备方法和应用:202111633978.8[P].2023-11-24.
- Kingfa Technology Co., Ltd., Shanghai Kingfa Sci. &Tech. Dvpt. Co., Ltd. A low-warpage GF-enhanced PBT composition and its preparation method and application: 202111633978.8[P]. 2023-11-24.
- [24] 日东纺绩株式会社.含有扁平玻璃纤维的粒料、含有扁平玻璃纤维的热塑性树脂成型物以及它们的制造方法:200680051665.9[P]. 2009-02-04.
- Nitto Boseki Co., Ltd. Granules containing flat glass fibers, Thermoplastic resin moldings containing flat glass fibers and their manufacturing methods:200680051665.9[P]. 2009-02-04.