

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.006

新能源汽车充电小门用玻纤增强PBT/PC复合材料的开发与应用

李陵洲^{1,2}, 冉宝清^{1,2}, 王廷^{1,2}, 朱永军^{1,2}, 狄春峰^{1,2}, 郑雄峰^{1,2}

(1.湖北合聚高分子材料有限公司,湖北江陵 434100; 2.武汉合聚实业集团有限公司,武汉 430000)

摘要: 新能源汽车充电小门尺寸较传统燃油车油箱小门尺寸大2~3倍,要求材料具有更高的尺寸稳定性。针对尼龙6(PA6)吸水性较强、收缩率较大易影响充电小门正常闭合的缺陷,基于聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)/聚碳酸酯(PC)合金材料具有较好的加工性、较低的吸水性和收缩率的特点,制备了玻璃纤维(GF)增强PBT/PC复合材料,探究了PBT和PC树脂黏度、树脂含量、GF含量,以及不同GF类型对GF增强PBT/PC复合材料物理力学性能的影响。结果表明,随着PBT和PC树脂黏度的提升、PBT/PC合金中PC树脂含量的增加,以及GF含量的增加,GF增强PBT/PC复合材料的整体力学性能呈增加趋势,熔体流动速率(MFR)逐渐降低;与普通圆形GF相比,扁平GF可使质量分数为50%的GF增强PBT/PC复合材料的力学性能和MFR均有明显提升,同时使复合材料具有更低的吸水率和收缩率,从而具有良好的尺寸稳定性。进一步从力学性能、热性能、微观形貌、收缩率、吸水率等角度分析对比了扁平GF增强PBT/PC复合材料与扁平GF增强PA6复合材料的性能。结果表明,当GF质量分数为50%时,扁平GF增强PBT/PC复合材料的吸水率和收缩率远低于扁平GF增强PA6复合材料,在耐热性和加工流动性上两者较为相近,扁平GF增强PBT/PC复合材料可替代扁平GF增强PA6复合材料应用于充电小门产品。

关键词: 充电小门;吸水性;尺寸稳定性;玻璃纤维增强复合材料;扁平玻璃纤维

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0040-08

Development and application of glass fiber reinforced PBT/PC composites for charging port doors of new energy vehicles

LI Lingzhou^{1,2}, RAN Baoqing^{1,2}, WANG Ting^{1,2}, ZHU Yongjun^{1,2}, DI Chunfeng^{1,2}, ZHENG Xiongfang^{1,2}

(1. Hubei Heju Polymer Materials Co., Ltd., Jiangling 434100, China; 2. Wuhan Heju Industrial Materials Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract : The charging port door size of new energy vehicles is 2–3 times larger than the fuel tank port door size of traditional fuel vehicles, requiring higher dimensional stability of materials. According to the defect that polyamide 6 (PA6) has strong water absorption and large shrinkage rate, which is easy to affect the normal closure of the charging port door, based on the characteristics of good processability, low water absorption and low shrinkage of poly (butylene terephthalate) (PBT)/polycarbonate (PC), the glass fiber (GF) reinforced PBT/PC composites were prepared, the effects of the viscosity of PBT and PC resin, resin content, fiber content, and different fiber types on the physical and mechanical properties of the GF reinforced PBT/PC composites were explored. The results show that, with the improvement of the viscosity of PBT and PC resin, the increase of PC content in PBT/PC alloy, and the increase of GF content, the overall mechanical properties of the GF reinforced PBT/PC composites increase, and the melt flow rate (MFR) gradually decreases. Flat GF significantly improves the mechanical properties and MFR of 50 wt% GF reinforced PBT/PC composite compared to ordinary round GF, and the composite has a lower water absorption and shrinkage, which indicates it has good dimensional stability. Further analysis and comparison were conducted on the properties of flat GF reinforced PBT/PC composite and flat GF reinforced PA6 composite from the perspectives of mechanical properties, thermal performances, microstructure, shrinkage and water absorption. The results show that, when the GF mass fraction is 50%, the water absorption and shrinkage of flat GF reinforced PBT/PC composite are much lower than those of flat GF reinforced PA6 composite, and the two composites are relatively similar in heat resistance and processing flowability. Flat GF reinforced PBT/PC composite can replace flat GF reinforced PA6 composite in the application of charging port door products.

Keywords : charging port door ; water absorption ; dimensional stability ; glass fiber reinforced composite ; flat glass fiber

基金项目: 湖北省揭榜制科技项目鄂科技发资项目(2020BED009)

通信作者: 李陵洲,工程师,研发高级经理,主要从事聚合物改性、聚合物结构与性能以及聚合物共混改性、功能材料等方面的研究

收稿日期: 2024-12-27

引用格式: 李陵洲,冉宝清,王廷,等. 新能源汽车充电小门用玻纤增强PBT/PC复合材料的开发与应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 40–47.

LI Lingzhou, RAN Baoqing, WANG Ting, et al. Development and application of glass fiber reinforced PBT/PC composites for charging port doors of new energy vehicles[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 40–47.

传统燃油车时代,油箱小门常采用质量分数50%玻璃纤维(GF)增强尼龙6(PA6)复合材料^[1]。新能源汽车将油箱小门改成充电小门之后,部件尺寸增大了2~3倍,PA6材料分子链结构中含有胺基和羰基,具有较高的吸水率,这会导致材料体积膨胀、模量下降,在应力作用下发生明显蠕变^[2]。同时,PA6结晶性较强,且结晶效率低易于发生翘曲^[3],导致充电小门在长期使用后,容易产生形变,无法正常闭合。

聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)是一种半结晶性工程塑料,具有优异的电学性能、耐溶剂性和优良的加工性能等优点^[4],但存在缺口冲击强度低等缺点。聚碳酸酯(PC)是一种非结晶性塑料,具有缺口冲击强度高、耐热性好等优点^[5-6],但同时存在注塑加工流动性差、不耐化学溶剂等缺点。由于技术与成本的限制,将两种材料共混取长补短是一种比开发新材料更便捷有效的方法^[7-8],通过将PBT与PC共混改性得到的PBT/PC合金兼具两者的优点。PBT/PC合金材料兼具PBT优异的电学性能、耐溶剂性、良好的注塑加工性能和PC的高缺口冲击强度、高耐热性等优点^[9],结晶度相对较低,能有效降低翘曲度,尺寸稳定性佳。采用GF增强PBT/PC复合材料,可使材料具有更高的力学性能、耐热性,以及良好的尺寸稳定性,还降低了生产成本^[10-11],被广泛应用于汽车、电子电器、家电以及激光焊接等领域^[12]。

目前GF种类对GF增强PBT/PC复合材料的微观结构、热性能、尺寸稳定性(及收缩率)、吸水率方面的研究报道较少,同时为满足上述新能源汽车充电小门产品对材料的要求,开发了新能源汽车充电小门用GF增强PBT/PC复合材料,探讨了树脂黏度、树脂含量、GF含量以及GF类型对复合材料物理力学性能的影响,并将该复合材料与GF增强PA6复合材料进行性能对比,探究GF增强PBT/PC复合材料替换GF增强PA6复合材料的可行性,最后对使用GF增强PA6复合材料制造的新能源充电小门产品进行了装车试验验证,测试结果满足产品的各项技术指标要求,材料得到成功应用,为新能源汽车充电小门产品材料的开发提供了借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBT: TH6082 (以下简称PBT1),特性黏度0.82 dL/g,熔体流动速率(MFR)为65~80 g/10 min

(250 °C/2.16 kg),新疆蓝山屯河聚酯有限公司;

PBT: TH6100 (以下简称PBT2),特性黏度1.00 dL/g, MFR为23~32 g/10 min (250 °C/2.16 kg),新疆蓝山屯河聚酯有限公司;

PC: H-3000R (以下简称PC1),低黏度PC, MFR为30~35 g/10 min (300 °C/1.2 kg),日本三菱化工有限公司;

PC: A1220 (以下简称PC2),中黏度PC, MFR为18~22 g/10 min (300 °C/1.2 kg),万华化学集团股份有限公司;

PA6: YH400,相对黏度2.4,湖南岳阳化工股份有限公司;

扁平GF: ECS301HP-3-M4 (尼龙专用,以下简称GF1), ECS307AT-3-M4 (聚酯专用,以下简称GF2), GF1和GF2的有效单丝直径为15~17 μm,短边单丝直径为6~8 μm,长度为(3±1) mm,异形比为4±0.4,重庆国际复合材料有限公司;

普通圆形GF: ECS303H-3 (聚酯专用,以下简称GF3),其纤维直径(10±1) μm,长度(3±1) mm,重庆国际复合材料有限公司;

增容剂甲基丙烯酸甲酯-丁二烯-苯乙烯共聚物(MBS): E920,阿科玛(中国)投资有限公司;

抗氧剂: RIANOX 1010/168 (按质量比2:3复配),天津利安隆新材料股份有限公司;

润滑剂季戊四醇硬脂酸酯(PETS): Glycolube,美国龙沙集团股份有限公司;

炭黑: M800,卡博特(中国)投资有限公司。

1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机: STS25,科倍隆(南京)机械有限公司;

电热鼓风干燥箱: CD-5,长沙信易机械有限公司;

注塑机: 130SEKII,东华机械有限公司;

万能拉力试验机: CMT4204,美斯特工业系统(中国)有限公司;

热变形温度(HDT)试验机: TSV302C,深圳万测试验设备有限公司;

MFR试验机: MFI452B,深圳万测试验设备有限公司;

冲击试验机: PIT501 J-3,深圳万测试验设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-IT800,日本电子株式会社;

热重(TG)分析仪:TGA,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC-3,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.3 试样制备

将PBT,PC树脂原料置于110℃干燥箱中干燥6 h,然后将除GF外所有原料按一定配比称取并由高混机均混1 min,混合后的原料由双螺杆挤出机主喂料口加入,同时按一定配比称取GF并由挤出机侧喂料口加入,挤出加工温度控制在220~260℃,调整螺杆转速350 r/min,同时调整侧喂料转速控制GF含量,所有原料经挤出、造粒、冷却、风干等工艺,得到GF增强PBT/PC复合材料。GF增强PA6复合材料的制备类似以上工艺,除PA6树脂原料干燥温度为90℃、挤出加工温度控制在230~250℃外,其他不变。将以上制备的复合材料置于110℃干燥箱中干燥4 h,然后利用注塑机在240~260℃的注塑温度下注塑成标准测试样条。

1.4 性能测试与表征

TG分析:称取5~10 mg干燥试样,在N₂保护下,以10℃/min的升温速率从30℃加热到800℃,记录升温曲线。

DSC分析:称取5~10 mg干燥试样,在N₂保护下,以20℃/min的升温速率从25℃加热到250℃,恒温5 min以消除热历史;然后在10℃/min的升降温速率下,从250℃降到25℃,记录降温曲线,再从25℃升到250℃,记录升温曲线。

SEM表征:将弯曲样条于液氮下脆断,在80℃恒温真空中干燥48 h,表面喷金处理,加速电压3 kV,分别在100倍和500倍下观察断面形貌。

物理力学性能测试:拉伸强度按ISO 527-1:2019测试,拉伸速率50 mm/min;弯曲强度按ISO 178:2019测试,弯曲速率1.0 mm/min;缺口冲击强度按ISO 179-1:2023测试;MFR按GB/T 3682.1-2018测试,测试条件为250℃,5 kg;HDT按ISO 175:2010测试,压力为1.8 MPa。

阿基米德螺旋线测试:将被测材料在一定温度与压力的作用下,注入阿基米德螺旋线模具内,用熔体的流动长度来表示该材料的流动性,流动长度越长,熔体的流动性越好。

吸水率测试:吸水率按ISO 62:2008中的方法1测试,在室温水浸泡24 h。

收缩率测试:收缩率按GB/T 17037.4-2003测试,将被测材料在一定温度与压力的作用下,注入收缩板模具内(尺寸为60 mm×60 mm×2 mm),然后在试验室温度下测量干燥后的收缩板尺寸,通过计算其与收缩板模具型腔的尺寸差异得到材料实际收缩率。

2 结果与讨论

2.1 树脂黏度对GF增强PBT/PC复合材料性能的影响

根据表1的配方制备了不同树脂黏度的GF增强PBT/PC复合材料,表2为相应的物理力学性能数据(表2中TS为拉伸强度,FS为弯曲强度,FM为弯曲模量,NIS为缺口冲击强度,下同)。从表2可发现,不同黏度PBT和PC树脂按照相同配比组合后,高黏度树脂整体上能提高GF增强PBT/PC复合材料的力学性能,但提升幅度较小。树脂黏度对MFR影响较大,随着PBT和PC树脂黏度的提高,基体树脂分子量增大,GF增强PBT/PC复合材料的黏度^[13]随之提高。由于充电小门产品大多采用高填充增强材料,故更加关注材料的加工流动性及产品外观,材料的熔体流动性尤为重要,结合以上对比数据,在力学性能差异不大的情况下,优选1#低黏度PBT与低黏度PC组合的高流动方案。

表1 不同树脂黏度的GF增强PBT/PC复合材料的各组分质量分数

Tab. 1 Mass fraction of components in GF reinforced PBT/PC composites with different resin viscosities						%
Samples	PBT1	PBT2	PC1	PC2	GF2	Additives
1 [#]	28	0	20	0	50	2
2 [#]	28	0	0	20	50	2
3 [#]	0	28	20	0	50	2
4 [#]	0	28	0	20	50	2

Notes: Additives including antioxidant, compatibilizer MBS, lubricant PETS and carbon black, their mass fractions are 0.5%, 0.6%, 0.5%, 0.4% respectively, the same as in the following table.

表2 不同树脂黏度的GF增强PBT/PC复合材料的物理力学性能

Tab. 2 Physical and mechanical properties of GF reinforced PBT/PC composites with different resin viscosities					
Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]
1 [#]	159.2	214.5	14 742	15.4	4.8
2 [#]	158.4	216.3	14 132	15.0	3.9
3 [#]	163.3	215.8	14 887	15.4	3.4
4 [#]	167.1	226.4	15 162	15.7	1.5

Notes: TS is tensile strength, FS is flexural strength, FM is flexural modulus, NIS is notched impact strength, the same as in the following table.

2.2 树脂含量对GF增强PBT/PC复合材料性能的影响

结合2.1的结论,选用低黏度PBT与低黏度PC,进一步验证树脂含量对GF增强PBT/PC复合材料性能的影响,相关配方见表3。根据表3的配方制备了不同树脂含量的GF增强PBT/PC复合材料,表4为相应的物理力学性能数据。从表4可发现,采用相同黏度PBT和PC树脂,以不同配比组合后,随着PBT/PC合金中PC树脂含量的增加,GF增强PBT/PC复合材料的力学性能均升高,MFR逐渐降低。PC树脂的高刚性、高韧性对GF增强PBT/PC复合材料的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度均有一定提升,同时由于PC树脂熔体黏度高,注塑加工温度高于PBT树脂^[13],其低流动性也降低了GF增强PBT/PC复合材料的熔体流动性。PBT和PC两种树脂分子结构中均含有一定量的反应性酯基官能团,挤出加热塑化过程中,PBT和PC树脂之间易发生酯交换反应,具有一定的相容性。另外,MBS核-壳结构改性增容剂的加入,进一步提升了PBT/PC合金的相容性。PBT和PC树脂共混后,所得合金兼具两种树脂的优点,力学性能发生较明显的提升。综合力学性能和熔体流动性,优选PBT占主的1[#]方案。

表3 不同树脂含量的GF增强PBT/PC复合材料的各组分质量分数

Tab. 3 Mass fraction of components in GF reinforced PBT/PC composites with different resin contents

%				
Samples	PBT1	PC1	GF2	Additives
5 [#]	48	0	50	2
1 [#]	28	20	50	2
6 [#]	24	24	50	2
7 [#]	20	28	50	2
8 [#]	0	48	50	2

表4 不同树脂含量的GF增强PBT/PC复合材料的物理力学性能

Tab. 4 Physical and mechanical properties of GF reinforced PBT/PC composites with different resin contents

Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]
5 [#]	143.6	197.9	14 088	13.2	6.2
1 [#]	159.2	214.5	14 742	15.4	4.8
6 [#]	162.4	215.2	14 830	15.6	4.0
7 [#]	164.1	219.3	14 957	15.9	3.2
8 [#]	160.6	195.4	15 365	16.5	1.1

2.3 GF含量对GF增强PBT/PC复合材料性能的影响

结合2.2的结论,选用PBT占主的PBT/PC合金基础树脂方案(控制低黏度PBT与低黏度PC质量比

在1.4左右),选用GF2,进一步验证GF含量对GF增强PBT/PC复合材料性能的影响。根据表5的配方制备了不同GF含量的GF增强PBT/PC复合材料,表6为相应的力学性能数据。从表6可发现,随着GF含量的增加,GF增强PBT/PC复合材料的力学性能均逐渐升高,MFR逐渐降低。高GF填充大大降低了GF增强PBT/PC复合材料的熔体流动性,不易注塑加工,易形成表面浮纤,影响产品光洁度。综合力学性能和熔体流动性,优选GF质量分数为50%的1[#]方案。

表5 不同GF含量的GF增强PBT/PC复合材料的各组分质量分数

Tab. 5 Mass fraction of components in GF reinforced PBT/PC composites with different GF contents

%				
Samples	PBT1	PC1	GF2	Additives
9 [#]	39	29	30	2
10 [#]	34	24	40	2
1 [#]	28	20	50	2
11 [#]	22	16	60	2

表6 不同GF含量的GF增强PBT/PC复合材料的物理力学性能

Tab. 6 Physical and mechanical properties of GF reinforced PBT/PC composites with different GF contents

Samples	TS/MPa	FS/MPa	FM/MPa	NIS/(kJ·m ⁻²)	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]
9 [#]	135.5	190.7	9 582	10.4	9.2
10 [#]	144.9	198.2	12 874	11.6	6.9
1 [#]	159.2	214.5	14 742	15.4	4.8
11 [#]	177.3	220.3	15 931	16.2	2.5

2.4 不同类型GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料性能对比

2.4.1 物理力学性能对比

结合2.3的结论,进一步选用质量分数50%的普通圆形GF(以下简称圆纤)和扁平GF(以下简称扁纤)两种不同类型GF分别对同种PBT/PC合金进行增强,对比两种材料的性能差异,同时与质量分数为50%的扁纤(以下简称50%扁纤)增强PA6复合材料进行对比,相应配方见表7,表8为对应的物理力学性能。从表8可发现,50%扁纤增强PA6复合材料的拉伸强度、弯曲强度为50%扁纤增强PBT/PC复合材料的1.3~1.4倍,两者的缺口冲击强度和MFR相近,HDT都大于150℃,具有良好的耐热性。50%扁纤增强PBT/PC复合材料相比质量分数为50%的圆纤(以下简称50%圆纤)增强PBT/PC复合材料,拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度提高了1.5~1.7倍,MFR提高近1.9倍,这说明扁纤的引入大幅提高了PBT/PC的力学性能和加工流动性,扁纤

的扁平结构可使纤维的取向性大幅提高,从而提高了GF的堆叠密度和取向流动性,前者有效提高了

复合材料的力学性能,后者有效提高了复合材料的注塑加工性。

表7 不同类型GF增强PBT/PC复合材料与扁纤增强PA6复合材料的各组分质量分数

Tab. 7 Mass fraction of components in different types of GF reinforced PBT/PC composites and flat GF reinforced PA6 composites

Samples	PA6	PBT1	PC1	GF1	GF2	GF3	Antioxidant	Compatibilizer	Lubricant	Carbon black
12 [#]	48.6	0	0	50	0	0	0.5	0	0.5	0.4
1 [#]	0	28	20	0	50	0	0.5	0.6	0.5	0.4
13 [#]	0	28	20	0	0	50	0.5	0.6	0.5	0.4

表8 不同类型GF增强PBT/PC复合材料与扁纤增强PA6复合材料的物理力学性能

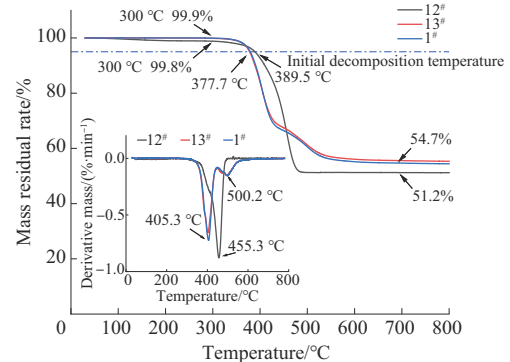
Tab. 8 Physical and mechanical properties of different types of GF reinforced PBT/PC composites and flat GF reinforced PA6 composites

Samples	TS/ MPa	FS/ MPa	FM/ MPa	NIS/ (kJ·m ⁻²)	MFR/ [g·(10 min) ⁻¹]	HDT/ °C
12 [#]	215.3	300.1	16 250	14.7	5.0	208
1 [#]	159.2	214.5	14 742	15.4	4.8	162
13 [#]	142.6	174.5	11 619	9.6	2.7	160

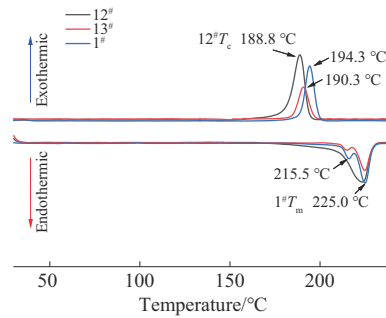
2.4.2 热性能对比

图1a为质量分数为50%的GF(以下简称50%GF)增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的TG曲线,图中小图为DTG曲线。由图1a看出,50%扁纤增强PBT/PC复合材料和50%圆纤增强PBT/PC复合材料的分解温度曲线、分解速率曲线基本相同,说明GF种类对50%GF增强PBT/PC复合材料热稳定性无明显影响。50%扁纤增强PBT/PC复合材料的初始分解温度、最大分解速率温度略低于50%扁纤增强PA6复合材料,分别为377.7 °C和405.3 °C,远高于使用需求,可用于替换50%扁纤增强PA6复合材料,表8中HDT对比情况也证明了前者在耐热性上能够替换后者。需要注意的是,100~300 °C时,50%扁纤增强PA6复合材料失重较为明显,这可能是PA6内的结合水脱去导致^[3],这也从侧面说明,GF增强PBT/PC复合材料较GF增强PA6复合材料在低吸水性上更为优良。

图1b为50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的DSC曲线。PBT结晶温度在187 °C附近,研究证明GF能有效提高PBT/PC合金材料的结晶性能^[14],由图1b看出,50%扁纤增强PBT/PC复合材料、50%圆纤增强PBT/PC复合材料、50%扁纤增强PA6复合材料的熔融温度(T_m)极为相近,结晶温度(T_c)依次降低,前者说明GF增强PBT/PC复合材料在注塑加工温度上与GF增强PA6复合材料几乎一致,具有良好的替换性,近期研究报道也证明,PBT/PC的加工温度与PA6相近^[15];后者说明50%扁



(a) TG curves



(b) DSC curves

图1 50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的TG曲线和DSC曲线

Fig. 1 TG and DSC curves of 50%GF reinforced PBT/PC composites and PA6 composites

纤较50%圆纤在PBT/PC合金材料中具有更为显著的异相成核作用,提高了结晶效率与结晶温度。其中扁纤增强的复合材料的熔融焓与结晶度较圆纤增强的更高,这说明扁纤较圆纤对材料的结晶性能影响更为显著。

2.4.3 微观形貌对比

与圆纤相比,扁纤具有更高的比表面积,从填充角度看,更高的比表面积意味着纤维与树脂间的界面作用面积更大、总界面结合力更强,能有效提高GF增强复合材料的力学性能^[16]。图2为50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的断面SEM照片。从图2看出,经脆性断裂后,圆纤大多与树脂基体脱离(图2b),而扁纤则与树脂间结合牢固、保持

着良好的留存率。进一步地,可以看到扁纤较圆纤具有更高的取向度(有序性)、更高的堆砌密度,良好的取向度(有序性)和堆砌密度意味着更好的注塑流动性与更高的力学性能,表8的性能数据也证明了该点。同时,从图2b和图2d可以看出,PBT/PC合金基体树脂未出现明显的相分离、界面分层等现象,样条断面呈现粗糙的非平滑面,进一步说明PBT/PC合金的相容性良好。

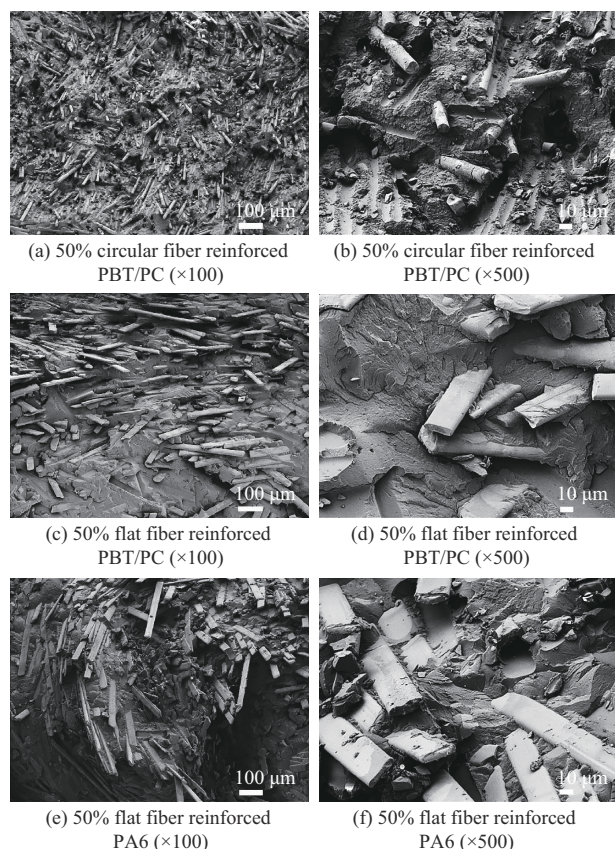


图2 50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的断面SEM照片

Fig. 2 SEM photos of cross-section of 50%GF reinforced PBT/PC composites and PA6 composites

在PA6基体和PBT/PC合金基体树脂中,扁纤取向度、形貌、完整度、留存率基本一致,这说明相同规格参数的扁纤(不同表面处理)在不同树脂基体中具有较好的性能稳定性。

2.4.4 流动性对比

图3为50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的加工流动性。由图3看出,50%扁纤增强PA6复合材料的阿基米德螺旋线数值为4.3,50%扁纤增强PBT/PC复合材料的阿基米德螺旋线数值为4.1,50%圆纤增强PBT/PC复合材料的阿基米德螺旋线数值为3.3,这说明扁纤具有良好的取向性能,

具有增强复合材料注塑流动性的效果,其中50%扁纤增强PBT/PC复合材料与50%扁纤增强PA6复合材料的流动性相近,表8两者的MFR相近也佐证了该点,该实验证明50%扁纤增强PBT/PC复合材料替换50%扁纤增强PA6复合材料在注塑加工上具有一定的可行性,结合前面DSC及SEM分析结论,50%扁纤增强PBT/PC复合材料在加工工艺上对50%扁纤增强PA6复合材料具有良好的替换性。



图3 50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的加工流动性(注塑)

Fig. 3 Processability of 50%GF reinforced PBT/PC composites and PA6 composites (injection molding)

2.4.5 收缩率对比

图4为50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的收缩率。由图4可以看出,50%扁纤增强PA6复合材料在流动方向(L向)的收缩率分别是50%扁纤增强PBT/PC复合材料和50%圆纤增强PBT/PC复合材料的2倍和1.7倍;50%扁纤增强PA6复合材料在垂直方向(H向)的收缩率分别是50%扁纤增强PBT/PC复合材料和50%圆纤增强PBT/PC复合材料的2.4倍和1.9倍。这说明50%GF增强PBT/PC复合材料较PA6复合材料具有更低的收缩率,这可能是因为PBT/PC具有更低的结晶度,能大幅降低50%GF增强复合材料的收缩率,从而减少在注塑过程中因冷却结晶导致的尺寸稳定性差的问题。50%扁纤增强PBT/PC复合材料的收缩率较50%圆纤增强PBT/PC复合材料更低,这与SEM分析结论

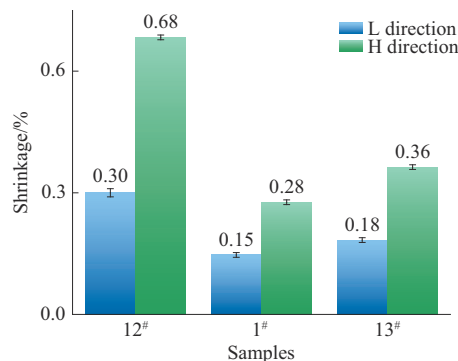


图4 50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的收缩率

Fig. 4 Shrinkage of 50%GF reinforced PBT/PC composites and PA6 composites

一致,扁纤由于其良好的取向度,在L向、H向具有更高的有序性、堆砌密度,从而大幅降低了50%扁纤增强PBT/PC复合材料的收缩率^[17-19],在成型结构复杂或大尺寸制品上较50%圆纤增强PBT/PC复合材料具有明显的优势。

2.4.6 吸水率对比

图5为50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的吸水率。由图5可以看出,50%扁纤增强PA6复合材料的饱和吸水率分别是50%扁纤增强PBT/PC复合材料和50%圆纤增强PBT/PC复合材料的11.8倍和11.2倍,50%扁纤增强PA6复合材料在室温水浸泡24 h的吸水率分别是50%扁纤增强PBT/PC复合材料和50%圆纤增强PBT/PC复合材料的13.4倍和11.2倍。这说明50%GF增强PBT/PC复合材料的吸水率远低于PA6复合材料,能大幅降低50%GF增强复合材料的吸水率,从而降低在使用过程中因吸水导致的尺寸不稳定性。扁纤的引入能有效降低吸水率,这可能得益于扁纤在材料中的堆砌结构,提高了“迷宫效应”作用^[20-21],从而进一步降低了50%GF增强PBT/PC复合材料的吸水率,满足开发需求。

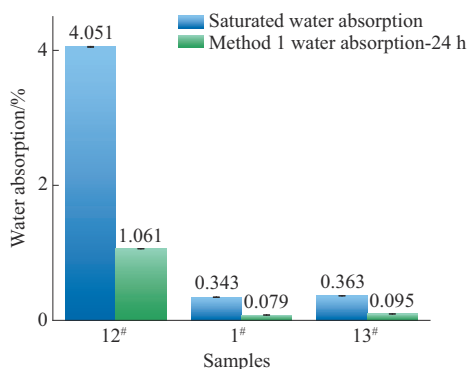


图5 50%GF增强PBT/PC复合材料与PA6复合材料的吸水率

Fig. 5 Water absorption of 50%GF reinforced PBT/PC composites and PA6 composites

根据以上结果,将50%扁纤增强PBT/PC复合材料注塑加工成充电小门,发现该材料能够满足产品的各项性能指标要求,已在多个客户端完成试模、组装验证工作,成功应用于新能源汽车充电小门项目。

3 结论

(1)探究了PBT和PC树脂黏度、树脂含量、GF含量,以及不同GF类型对GF增强PBT/PC复合材料物理力学性能的影响。随着PBT和PC树脂黏度的提升,PBT/PC合金中PC树脂含量的增加,以及

GF含量的增加,GF增强PBT/PC复合材料的整体力学性能呈增加趋势,MFR逐渐降低;与圆纤相比,扁纤使50%GF增强PBT/PC复合材料的力学性能和MFR均有明显提升,同时使复合材料具有更低的吸水率、收缩率,即具有更好的尺寸稳定性。

(2)探究了50%扁纤增强PBT/PC复合材料在尺寸稳定性(以收缩率和吸水率为表征指标)、热性能、力学性能上替代50%扁纤增强PA6复合材料的可行性。研究结果表明,50%扁纤增强PBT/PC复合材料的尺寸稳定性远优于50%扁纤增强PA6复合材料,在使用温度范围、使用力学性能、注塑加工上具有良好的替换性。

(3)对50%扁纤增强PBT/PC复合材料注塑充电小门零件进行了装车试验验证,结果能满足产品的各项性能指标要求。

(4)该50%扁纤增强PBT/PC复合材料可以直接注射成型,加工成新能源汽车充电小门,可以解决现有技术中50%扁纤增强PA6复合材料易翘曲、尺寸稳定性差的技术弊端,也能满足更多新能源电气产品的技术需求。

参考文献

- [1] 王艺璇,马驰,陈宇辰,等.汽车加油(充电)口盖选型趋势研究[J].汽车科技,2020(5):53-58.
WANG Yixuan, MA Chi, CHEN Yuchen, et al. Analysis and research on the choice of trend of vehicle's fuel filler cap[J]. Auto Sci-Tech, 2020(5):53-58.
- [2] 陆龙威,颜菲,卢津强,等.玻纤增强尼龙6材料水煮后性能变化[J].工程塑料应用,2024,52(1):128-131, 145.
LU Longwei, YAN Fei, LU Jinqiang, et al. Performance changes of glass fiber reinforced nylon 6 material after boiling in water[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):128-131, 145.
- [3] 黄锋,董鑫,聂丹,等.高强度低翘曲PA6板材专用料研制[J].工程塑料应用,2019,47(11):25-29.
HUANG Feng, DONG Xin, NIE Dan, et al. Preparation of high strength and low warpage PA6 plate materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):25-29.
- [4] AKSIT M, GRÖSCHEL S, KUHN U, et al. Low-density polybutylene terephthalate foams with enhanced compressive strength via a reactive-extrusion process[J]. Polymers, 2020, 12(9). DOI: 10.3390/polym12092021.
- [5] WANG C Y, YU X D, JIANG M H. Fracture forms and multiple undulated morphology of polycarbonate LTW by introducing carbon black coated copper film[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141. DOI:10.1016/j.optlastec.2021.107132.
- [6] KAUSAR A. A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications[J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2018,

- 34:60–97.
- [7] PHAM N T, NGUYEN V T. Morphological and mechanical properties of poly(butylene terephthalate)/high-density polyethylene blends[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020(1). DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108878.
- [8] ZHANG W Y, SHI J G, JIANG S C. Temperature dependence of deformation behavior in amorphous poly(butylene terephthalate)/poly(carbonate) blends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2022, 62(8):2 684–2 691.
- [9] 赵书营, 林洁龙, 张可振, 等. PC组分及色粉对玻纤增强PBT/PC的结晶影响[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(3):15–21.
- ZHAO Shuying, LIN Jielong, ZHANG Kezhen, et al. Effect of PC components and color powder on the crystallization of glass fiber reinforced PBT/PC[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(3):15–21.
- [10] WILKINSON A N, TATTUM S B, RYAN A J. Melting, reaction and recrystallization in a reactive PC-PBT blend[J]. *Polymer*, 1997, 38(8):1 923–1 928.
- [11] 梁伟成, 阮静, 张浩. 组分对PC/PBT/GF三元复合材料的影响[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(2):108–113.
- LIANG Weicheng, RUAN Jing, ZHANG Hao. Effects of components on PC/PBT/GF ternary composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(2):108–113.
- [12] DECHET M A, GÓMEZ BONILLA J S, LANZL L, et al. Spherical polybutylene terephthalate (PBT)-polycarbonate (PC) blend particles by mechanical alloying and thermal rounding[J]. *Polymers*, 2018, 10(12). DOI:10.3390 / polym10121373.
- [13] 陈伟, 陈锐, 冯健, 等. 树脂粘度及复配比例对PBT/PC合金性能影响研究[J]. *广东化工*, 2019, 46(3):45–47.
- CHEN Wei, CHEN Rui, FENG Jian, et al. Effect of resin viscosity and blending ratio on properties of PBT/PC alloy[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, 46(3):45–47.
- [14] 陈晶斌, 潘勇军, 黄岐善. 玻纤增强PC/PBT合金的结晶行为[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(9):38–41, 46.
- CHEN Jingbin, PAN Yongjun, HUANG Qishan. Crystallization of glass fiber reinforced PC/PBT alloys[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(9):38–41, 46.
- [15] 余兴兴, 焦贵宁, 任济夫, 等. PBT/PC共混挤出中酯交换反应的影响因素探究[J]. *塑料工业*, 2023, 51(2):48–54, 67.
- YU Xingxing, JIAO Guining, REN Jifu, et al. Study on impacting factor of transesterification reaction in PBT/PC blending extrusion[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(2):48–54, 67.
- [16] 何勇, 彭珂, 曾庆文. 扁平玻纤对PA66复合材料性能的影响[J]. *玻璃纤维*, 2017(1):17–19, 35.
- HE Yong, PENG Ke, ZENG Qingwen. The influence of flat glass fiber on PA66 composite[J]. *Fiber Glass*, 2017(1):17–19, 35.
- [17] 许鸿基, 冯德才, 郑一泉, 等. 圆玻纤和扁平玻纤复配增强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.
- [18] 孟凡地, 吴承然, 易琪伟, 等. 不同截面类型玻纤增强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.
- [19] 易新, 张永, 吴长波, 等. 阻燃PA66复合材料翘曲性能研究[J]. *中国塑料*, 2021, 35(1):19–24.
- YI Xin, ZHANG Yong, WU Changbo, et al. Study on warpage of flame-retardant PA66 composites[J]. *China Plastics*, 2021, 35(1):19–24.
- [20] 唐伟家, 吴汾, 李茂彦. 尼龙纳米复合材料及其在包装上应用[J]. *塑料包装*, 2008, 18(2):47–53, 59.
- TANG Weijia, WU Fen, LI Maoyan. Nylon nanocomposite and its application in package[J]. *Plastics Packaging*, 2008, 18(2):47–53, 59.
- [21] 徐强, 郭杰. 尼龙纳米复合材料在包装上应用分析[J]. *化工设计通讯*, 2020, 46(9):43–44.
- XU Qiang, GUO Jie. Application analysis of nylon nanocomposites in packaging[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, 46(9):43–44.