

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.05.005

GF 增强 PP 复合材料的尺寸稳定性与力学性能

韩领,王雄刚,孟凡地,邓凤阳,黄安民

(株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南株洲 412001)

摘要: 研究了马来酸酐接枝聚丙烯 (PP-g-MAH) 含量及玻璃纤维 (GF) 含量对 GF 增强聚丙烯 (PP) 复合材料尺寸稳定性与力学性能的影响。结果表明,加入 PP-g-MAH 后,复合材料的线性膨胀系数和收缩率下降,结晶度、拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度提高,但断裂伸长率下降。相比不添加 PP-g-MAH 的复合材料,当 PP-g-MAH 质量分数达到 6% 时,复合材料在流道方向上的线性膨胀系数从 $29.88 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 降低至 $24.93 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,在流道方向上的收缩率从 0.20% 下降至 0.18%,拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度基本达到最大值,分别提高 130.18%、96.52% 和 49.20%;随着 GF 质量分数的增加,复合材料的线性膨胀系数和收缩率均显著下降,拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度提高,而断裂伸长率和结晶度下降。相比不添加 GF 的复合材料,当 GF 质量分数为 40% 时,复合材料在流道方向上的线性膨胀系数从 $101.30 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 降低至 $18.08 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,在流道方向上的收缩率从 1.43% 下降至 0.08%,结晶度从 45.05% 下降至 23.96%,拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度分别提高 168.87%、306.40% 和 129.52%。

关键词: 聚丙烯;玻璃纤维;复合材料;马来酸酐接枝聚丙烯;线性膨胀系数;收缩率;力学性能

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)05-0024-05

Dimension Stability and Mechanical Properties of GF Reinforced PP Composites

Han Ling, Wang Xionggang, Meng Fandi, Deng Fengyang, Huang Anmin
(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 421001, China)

Abstract: The effects of maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) and glass fiber (GF) content on dimension stability and mechanical properties of GF reinforced polypropylene (PP) composites were investigated. The results indicate that with the addition of PP-g-MAH, the coefficient of linear thermal expansion and shrinkage of composite decrease, the crystallinity, tensile strength, flexural strength and Izod notched impact strength increase, but the elongation at break decreases. Compare with the composite free of PP-g-MAH, when the mass fraction of PP-g-MAH is 6%, the coefficient of linear thermal expansion of composite on the flow direction decreases from $29.88 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ to $24.93 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, the shrinkage on the flow direction decreases from 0.20% to 0.18%, and the tensile strength, flexural strength and Izod notched impact strength approximately reach the maximum, increase by 130.18%, 96.52% and 49.20%, respectively. With increase of GF content, the coefficient of thermal expansion and shrinkage of composite decrease obviously, the tensile strength, flexural strength and Izod notched impact strength increase, but the elongation at break and crystallinity decrease. Compare with the composite free of GF, when the mass fraction of GF is 40%, the coefficient of thermal expansion of composite on the flow direction decreases from $101.30 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ to $18.08 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, the shrinkage on the flow direction decreases from 1.43% to 0.08%, the crystallinity decreases from 45.05% to 23.96%, and the tensile strength, flexural strength and Izod notched impact strength increase by 168.87%, 306.40% and 129.52%, respectively.

Keywords: polypropylene; glass fiber; composite; maleic anhydride grafted polypropylene; coefficient of linear thermal expansion; shrinkage; mechanical property

玻璃纤维 (GF) 增强聚丙烯 (PP) 复合材料具有强度高、耐热、耐化学腐蚀等优点,被广泛应用于制造汽车、电子电器等零件^[1-2]。由于 PP 本身尺寸稳定性差,线性膨胀系数和收缩率大^[3-4],因此研究 GF 增强 PP 复合材料的尺寸稳定性非常重要。J. L. Thomason 等^[5]采用湿法沉淀工艺制备了长 GF 增

强 PP 层压制品,考察了 GF 长度和含量对复合材料热性能的影响,发现线性膨胀系数受 GF 长度影响较小,随 GF 含量增加显著下降。王利霞等^[6]研究了注塑工艺和 GF 含量对 GF 增强 PP 制品收缩的

联系人:韩领,硕士,工程师,主要从事高分子改性加工方面的研究
收稿日期:2017-02-17

影响,结果表明,GF 含量、熔体温度、保压压力和注射时间对制品收缩有较强影响。笔者采用双螺杆挤出工艺制备了 GF 增强 PP 复合材料,研究了马来酸酐接枝 PP (PP-g-MAH) 含量和 GF 含量对复合材料线性膨胀系数、收缩率、结晶及力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP: PPH-T03, 中国石化扬子石油化工有限公司;

PP-g-MAH: HS1-009A, 广州合诚化学有限公司;

GF: EDR14-2000-988A, 中国巨石股份有限公司;

分散剂: TAF, 苏州兴泰国光化学助剂有限公司;

抗氧剂: 1010, 168, 天津利安隆新材料股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机: SHJ-35 型, 南京富亚橡塑机械有限公司;

注塑机: 东华 90T 型, 东华机械有限公司;

鼓风干燥箱: 101A-41B 型, 上海康路仪器设备有限公司;

微机控制电子万能试验机: CMT-4503 型, 美特斯工业系统有限公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC7750-C 型, 美特斯工业系统有限公司;

缺口型制样机: QYJ1251 型, 深圳市新三思材料检测有限公司;

热机械分析仪: TMA Q400 型, 美国 TA 仪器公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: JYH-115 型, 梅特勒-托利多国际有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): EVO18 型, 德国 Carl Zeiss 公司。

1.3 试样制备

按照表 1 中的配方称量原料, 混合均匀后在温度为 180~230℃ 范围内经过双螺杆挤出机造粒, 粒料在烘箱中干燥 2 h, 然后在 180~210℃ 温度范围内注塑测试试样, 试样在 (23±3)℃ 条件下调节 12 h 以上。

1.4 性能测试

拉伸性能按照 GB/T 1040.2-2006 测试;

表 1 GF 增强 PP 复合材料配方

组分	试样编号								
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
PP	70	67	64	61	58	84	74	64	54
PP-g-MAH	0	3	6	9	12	6	6	6	6
GF	30	30	30	30	30	10	20	30	40
分散剂	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
抗氧剂 1010	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
抗氧剂 168	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

悬臂梁缺口冲击强度按照 GB/T 1843-2008 测试;

弯曲强度按照 GB/T 9341-2008 测试;

收缩率按照 ISO 294-4-2001 测试;

线性膨胀系数测试: 升温速率为 5℃/min, 测试温度范围为 -40~40℃。

DSC 测试: N₂ 保护, 升温速率为 5℃/min, 温度区间为 50~200℃。结晶度计算公式为:

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\%$$

式中: X_c ——结晶度

ΔH_m ——熔融热;

ΔH_m^0 ——100% 结晶时的熔融热, 取 209 J/g^[7]。

SEM 分析: 对冲击试样断面表面进行喷金处理, 用 SEM 观察分析。

2 结果与讨论

2.1 PP-g-MAH 含量对复合材料性能的影响

(1) PP-g-MAH 含量对复合材料尺寸稳定性的影响。

不同 PP-g-MAH 含量下复合材料在流道方向和垂直流道方向的线性膨胀系数如图 1 所示。

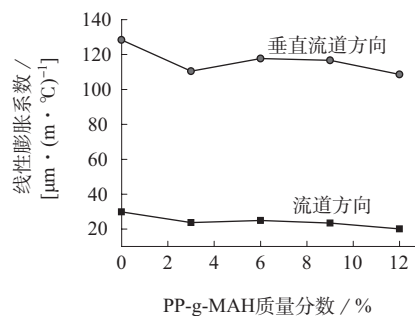
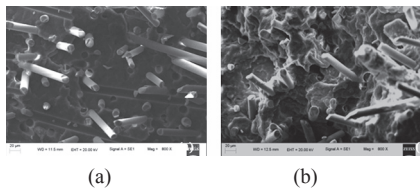


图 1 PP-g-MAH 含量对复合材料线性膨胀系数的影响

从图 1 可以看出, 随着 PP-g-MAH 含量的增加, GF 增强 PP 复合材料在流道方向和垂直流道方向上的线性膨胀系数均降低。当 PP-g-MAH 质量分数为 6% 时, 复合材料在流道方向上的线性膨胀系数从未添加 PP-g-MAH 时的 29.88 μm/(m·℃) 降低至 24.93 μm/(m·℃), 降幅为 16.57%;

复合材料在垂直流道方向上线性膨胀系数从未添加 PP-g-MAH 时的 $128.40 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 降低至 $117.70 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 降幅为 8.33%。这是由于未添加 PP-g-MAH 时,基体树脂 PP 与 GF 界面作用弱,复合材料受热时 GF 对 PP 分子链运动的限制小,线性膨胀系数比较高。加入 PP-g-MAH 可以在 PP 与 GF 界面形成化学键,分子链与 GF 表面相互作用增强^[8-10],复合材料受热时 GF 对分子链的运动限制作用大,因而线性膨胀系数降低。同时,加入 PP-g-MAH 可以促进 GF 与 PP 的界面结晶^[11],提高结晶度,晶区分子链段活动能力低,也有利于降低线性膨胀系数。

添加 PP-g-MAH 前后复合材料冲击断面的 SEM 照片如图 2 所示。



PP-g-MAH 质量分数: a—0%; b—6%

图 2 添加 PP-g-MAH 前后复合材料冲击断面的 SEM 照片

由图 2a 可以看出,未添加 PP-g-MAH 时复合材料的 GF 从基体树脂 PP 脱离后在断面形成了很多规则的圆形孔洞,表面光滑。这是由于 PP 与 GF 界面相互作用弱造成的。由图 2b 可以看出,加入 PP-g-MAH 后,复合材料断面没有规则的圆形孔洞,GF 表面被树脂包裹。这是由于酸酐基团在 GF 表面可以形成键合作用,使基体树脂与 GF 界面的相容性得到很大提升。

不同 PP-g-MAH 含量下复合材料的结晶性能列于表 2。

表 2 不同 PP-g-MAH 含量下复合材料的结晶性能

项目	PP-g-MAH 质量分数 / %				
	0	3	6	9	12
$T_m / ^\circ\text{C}$	167.05	167.68	167.52	167.39	168.39
$T_c / ^\circ\text{C}$	121.34	122.44	124.08	123.81	123.71
$\Delta H_c / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	71.24	71.67	73.39	75.26	76.12
$\Delta H_m (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	56.90	57.48	59.43	59.42	59.40
$X_c / \%$	27.22	27.50	28.44	28.43	28.42

注: T_m 代表熔融温度, T_c 代表结晶温度, ΔH_c 代表结晶焓, ΔH_m 代表熔融焓, X_c 代表结晶度。

从表 2 可以看出,随着 PP-g-MAH 含量增加,复合材料的熔融温度、熔融焓、结晶温度、结晶焓和结晶度均呈上升趋势。当 PP-g-MAH 质量分数达到 6% 时,复合材料的结晶温度从未添加 PP-g-MAH 时的 $121.34 ^\circ\text{C}$ 升高至 $124.08 ^\circ\text{C}$, 结晶度从 27.22%

增加到 28.44%, 而继续增加 PP-g-MAH 用量时结晶度不再增加。在成型过程中,基体树脂由于冷却收缩会产生界面应力, PP-g-MAH 在 GF 和 PP 之间引入了酸酐基团,在界面处形成了较强的化学键连接,而界面应力可促使连接在 GF 表面的 PP 分子链与基体树脂之间产生取向应变诱导作用,从而提高复合材料的结晶度^[11]。

不同 PP-g-MAH 含量下复合材料在流道方向和垂直流道方向的收缩率如图 3 所示。

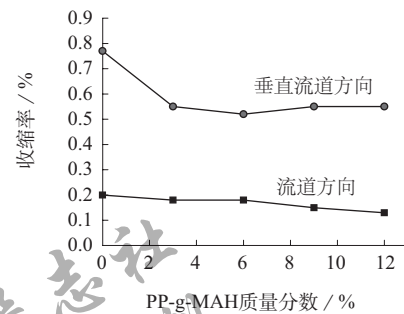


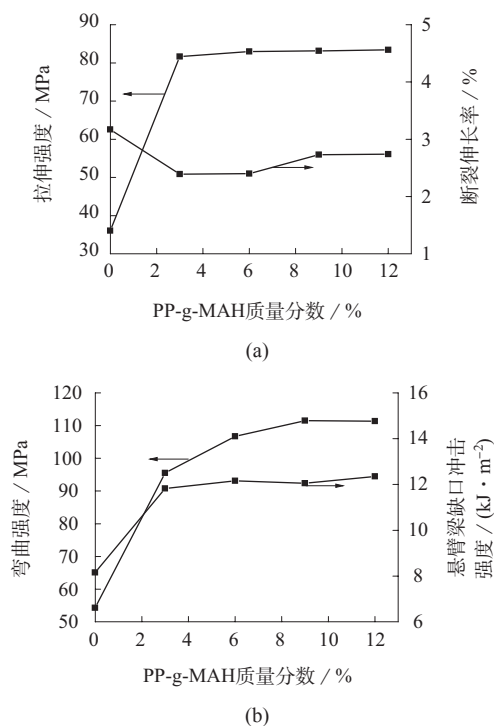
图 3 不同 PP-g-MAH 含量下复合材料的收缩率

由图 3 可以看出,添加 PP-g-MAH 后,复合材料在流道方向和垂直流道方向上的收缩率均降低。从表 2 的分析可知, PP-g-MAH 起到诱导界面结晶的作用,使复合材料的结晶温度升高,制品在模腔内结晶更加充分,出模后的后收缩减小,所以收缩率降低^[4]。当 PP-g-MAH 质量分数达到 6% 时,复合材料在流道方向上的收缩率从未添加 PP-g-MAH 时的 0.20% 降低至 0.18%, 降幅为 10.00%; 复合材料在垂直流道方向上的收缩率从未添加 PP-g-MAH 时的 0.77% 降低至 0.52%, 降幅为 32.5%。加入 PP-g-MAH 后,复合材料在流道方向和垂直流道方向上的收缩差异减小,有利于减小制件因为收缩差异引起的翘曲变形。

(2) PP-g-MAH 含量对复合材料力学性能的影响。

不同 PP-g-MAH 含量下复合材料的力学性能如图 4 所示。

由图 4 可以看出,添加 PP-g-MAH 后,除复合材料的断裂伸长率降低外,复合材料的其它力学性能显著上升,当 PP-g-MAH 质量分数为 6% 时基本达到最大值,其中拉伸强度从未添加 PP-g-MAH 时的 36.05 MPa 增加至 82.98 MPa, 增幅为 130.18%; 弯曲强度从未添加 PP-g-MAH 时的 54.29 MPa 增加至 106.69 MPa, 增幅为 96.52%; 悬臂梁缺口冲击强度从未添加 PP-g-MAH 时的 $8.15 \text{ kJ}/\text{m}^2$ 增



a—拉伸强度和断裂伸长率; b—弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度

图4 不同 PP-g-MAH 含量下复合材料的力学性能

加到 12.16 kJ/m^2 , 增幅为 49.20%。这表明 PP-g-MAH 在 GF 表面形成了化学键活性点, 有效增强了基体树脂与 GF 之间的界面结合, 随着 PP-g-MAH 用量增加, 活性点数量增加, 复合材料的力学性能随之增加, 而当 PP-g-MAH 用量增加到一定程度时, GF 表面的活性点接近饱和, 继续增加用量对材料力学性能的提升较小。

2.2 GF 含量对复合材料性能的影响

(1) GF 含量对复合材料尺寸稳定性的影响。

不同 GF 含量下复合材料在流道方向和垂直流道方向的线性膨胀系数如图 5 所示。

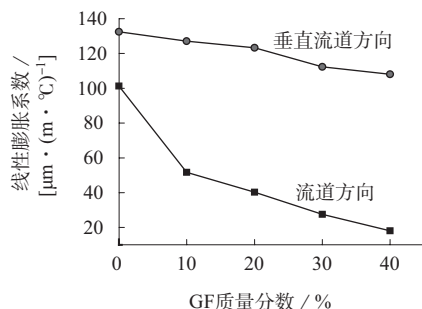


图5 不同 GF 含量下复合材料的线性膨胀系数

从图 5 可以看出, 随着 GF 含量增加, 复合材料在流道方向和垂直流道方向上的线性膨胀系数均逐渐降低。这是由于 GF 的线性膨胀系数小, 并且在 PP-g-MAH 的增容作用下, 基体树脂与 GF 界面形

成了化学键, 随着 GF 含量的增加, 参与界面作用的基体分子链数量增加, 从而有效降低了复合材料的线性膨胀系数^[12]。当 GF 质量分数为 40% 时, 复合材料在流道方向上的线性膨胀系数从未添加 GF 时的 $101.30 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 降低至 $18.08 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 降幅为 82.15%; 复合材料在垂直流道方向上的线性膨胀系数从未添加 GF 时的 $132.50 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 降低至 $108.10 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 降幅为 18.42%。

不同 GF 含量下复合材料的结晶性能列于表 3。

表3 不同 GF 含量下复合材料的结晶性能

项目	GF 质量分数 / %				
	0	10	20	30	40
$T_m / ^\circ\text{C}$	168.53	167.79	166.98	167.52	166.56
$T_c / ^\circ\text{C}$	122.20	122.89	122.98	124.08	123.41
$\Delta H_c / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	109.30	91.17	82.55	73.39	65.78
$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	94.16	73.39	65.26	59.43	50.07
$X_c / \%$	45.05	35.11	31.22	28.44	23.96

从表 3 可以看出, 随着 GF 含量增加, 复合材料的结晶温度有所上升, 而熔融温度、熔融焓、结晶焓和结晶度均呈下降趋势。当 GF 质量分数为 40% 时, 复合材料的结晶温度从未添加 GF 时的 122.20°C 升高至 123.41°C , 而结晶度从未添加 GF 时的 45.05% 下降至 23.96%。这是由于一方面 GF 可以起到异相成核的作用, 提高了 PP 分子链的结晶温度; 另一方面, GF 限制了结晶过程中的分子链运动, 破坏了基体树脂的结晶过程, 随着 GF 含量增加, 结晶度下降^[13]。

不同 GF 含量下复合材料在流道方向和垂直流道方向的收缩率如图 6 所示。

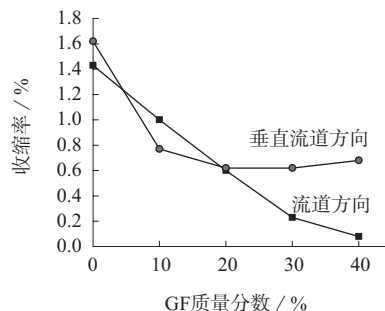


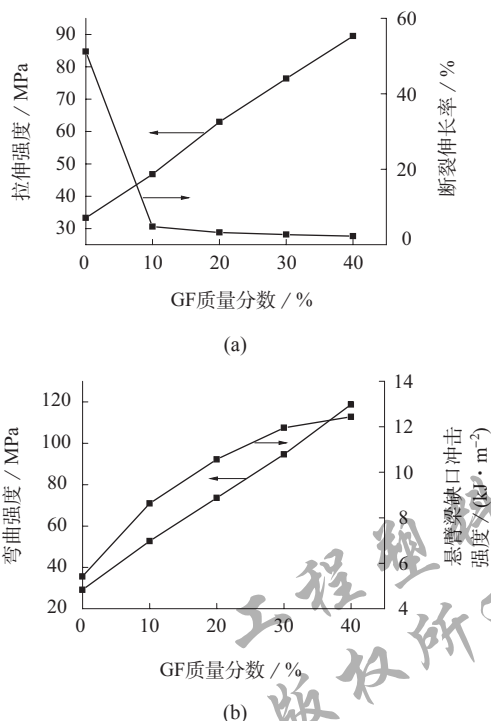
图6 不同 GF 含量下复合材料的收缩率

从图 6 可以看出, 随着 GF 含量增加, 复合材料在流道方向和垂直流道方向上的收缩率均呈下降趋势。这是因为在熔体流动中 GF 能使 PP 分子链按照 GF 方向进行取向, 较大地限制了分子链的运动, 破坏了基体树脂结晶^[14], 制品出膜后的后收缩减小, 因而收缩率降低。当 GF 质量分数为 40% 时,

复合材料在流道方向上的收缩率从未添加 GF 时的 1.43% 降低至 0.08%, 降幅为 94.41%; 复合材料在垂直流道方向上收缩率从未添加 GF 时的 1.62% 降低至 0.68%, 降幅为 58.02%。

(2) GF 含量对复合材料力学性能的影响。

不同 GF 含量下复合材料的力学性能如图 7 所示。



a—拉伸强度和断裂伸长率; b—弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度

图 7 不同 GF 含量下复合材料的力学性能

在复合材料体系中, GF 起到骨架结构增强作用, 承担应力和载荷。由图 7 可以看出, 由于 GF 强度高, 随着 GF 含量增加, 除复合材料的断裂伸长率外, 复合材料的其它力学性能逐渐增加, 当 GF 质量分数为 40% 时, 复合材料的拉伸强度从未添加 GF 时的 33.28 MPa 增加至 89.48 MPa, 增幅为 168.87%; 弯曲强度从未添加 GF 时的 29.22 MPa 增加至 118.75 MPa, 增幅为 306.40%; 悬臂梁缺口冲击强度从未添加 GF 时的 5.42 kJ/m² 增加至 12.44 kJ/m², 增幅为 129.52%, 而断裂伸长率有很大下降, 从未添加 GF 时的 51.16% 下降至 2.28%。断裂伸长率下降是由于拉伸过程中基体树脂在纤维末端形成裂纹, 随着 GF 含量增加, 基体树脂与纤维界面处形成的裂纹增加, 导致断裂伸长率下降^[15]。

3 结论

(1) 加入 PP-g-MAH 降低了复合材料的线性膨胀系数和收缩率, 提高了复合材料的结晶度、拉伸强

度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度, 但使断裂伸长率下降。当 PP-g-MAH 质量分数为 6% 时, 与未添加 PP-g-MAH 的复合材料相比, 复合材料在流道方向上的线性膨胀系数和收缩率降幅分别为 16.57% 和 10.00%, 结晶度从 27.22% 增加到 28.44%, 拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度的增幅分别为 130.18%, 96.52% 和 49.20%。

(2) 加入 GF 可以显著提升复合材料的尺寸稳定性、拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度, 但结晶度和断裂伸长率下降。当 GF 质量分数为 40% 时, 与未添加 GF 的复合材料相比, 复合材料在流道方向上的线性膨胀系数和收缩率降幅分别为 82.15% 和 94.41%, 结晶度从 45.05% 下降至 23.96%, 拉伸强度、弯曲强度和悬臂梁缺口冲击强度的增幅分别为 168.87%, 306.40% 和 129.52%。

参考文献

- [1] Suresh S, Senthil Kumar V S. Experimental determination of the mechanical behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Procedia Engineering, 2014, 97:632-641.
- [2] 吴维新, 任璞, 李宾, 等. 玻纤形态对长玻纤增强聚丙烯性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(1):23-26.
- [3] Wu Weixin, Ren Pu, Li Bin, et al. Effect of glass fiber morphology on properties of long glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(1):23-26.
- [4] Thomason J L, Yang L. Temperature dependence of the interfacial shear strength in glass-fibre polypropylene composites[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71:1600-1605.
- [5] 娄小安, 苏吉英, 孟成铭, 等. 改性 PP 收缩率的研究[J]. 中国塑料, 2011, 25(12):59-62.
- [6] Lou Xiaolan, Su Jiyang, Meng Chengming, et al. Research on shrinkage of modified polypropylene[J]. China Plastics, 2011, 25(12):59-62.
- [7] Thomason J L, Groenewoud W M. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 2. Thermal properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996, 27(7):555-565.
- [8] 王利霞, 李燕, 庄卫国. 注塑工艺和玻纤含量对玻纤增强 PP 注塑制品收缩的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(9):135-137, 141.
- [9] Wang Lixia, Li Yan, Zhuang Weiguo. Influence of processing parameters and fiber content on shrinkage of fiber reinforced PP injection-molded part[J]. Polymer materials science and engineering, 2009, 25(9):135-137, 141.
- [10] Karsli N G, Aytac A. Effects of maleated polypropylene on the morphology, thermal and mechanical properties of short carbon fiber

(下转第 56 页)

- [4] 纪少思,周万立,刘鹏清,等. 硅凝胶包覆三聚氰胺焦磷酸盐阻燃改性聚乙烯醇薄膜[J]. 高校化学工程学报,2016,30(3):693-699.
Ji Shaosi, Zhou Wanli, Liu Pengqing, et al. Microencapsulation of melamine pyrophosphate with silicon dioxide for flame retardant modification of polyvinyl alcohol[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2016, 30(3):693-699.
- [5] Xu Lingfeng, Lei Caihong, Xu Ruijie, et al. Hybridization of α -zirconium phosphate with hexachloro-cyclotriphosphazene and its application in the flame retardant poly(vinyl alcohol) composites[J]. Polymer Degradation & Stability, 2016, 133:378-388.
- [6] Liu Pengju, Chen Wenhua, Liu Yuan, et al. Thermal melt processing to prepare halogen-free flame retardant poly(vinyl alcohol)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 109:261-269.
- [7] 王琪,李莉,陈宁,等. 聚乙烯醇热塑加工的研究[J]. 高分子材料科学与工程,2014,30(2):192-197.
Wang Qi, Li Li, Chen Ning, et al. Thermal processing of poly(vinyl alcohol)[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 30(2):192-197.
- [8] 李远莉,李莉,陈宁,等. 水在聚乙烯醇/水体系中的状态及氢键作用[J]. 塑料,2011,40(4):1-4.
Li Yuanli, Li Li, Chen Ning, et al. The Water states in poly(vinyl alcohol)/water and their H-bonds[J]. Plastics, 2011, 40(4):1-4.
- [9] Wu Qian, Chen Ning, Wang Qi. Crystallization behavior of melt-spun poly(vinyl alcohol)fibers during drawing process[J]. Journal of polymer research, 2010, 17(6):903-909.
- [10] Li Li, Wang Qi, Wang Ru. Enhancing mechanical properties of poly(vinyl alcohol)blown films by drawing and surface crosslinking[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98(2):774-779.
- [11] 陈晓,陈宁,王琪. 聚乙烯醇/纳米羟基磷灰石复合材料微型注塑研究[J]. 高分子通报,2013(6):26-32.
Chen Xiao, Chen Ning, Wang Qi. Microinjection molding of poly(vinyl alcohol)/nano-hydroxyapatite composites[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2013(6):26-32.
- [12] 杨芳,熊宪辉,王琪,等. 改性聚乙烯醇的流变行为及其吹塑加工研究[J]. 高分子材料科学与工程,2007,23(3):190-193.
Yang Fang, Xiong Xianhui, Wang Qi, et al. Study on rheological properties and thermal blow molding of modified PVA[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, 23(3):190-193.
- [13] Liu Pengju, Bai Shibing, Wang Qi. Preparation of aluminum hydroxide/aluminum phosphinate flame-retardant poly(vinyl alcohol)foam through thermal processing[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(23):doi:10.1002/app.42020.
- [14] 王琪,李莉,史浩,等. 聚乙烯醇极性泡沫塑料及其制备方法:中国,101153089[P].2008-04-02.
Wang Qi, Li Li, Shi Hao, et al. Polyvinyl alcohol polarity sponge plastics and method of producing the same:CN, 101153089[P].2008-04-02.
- [15] Daniliuc L, David C. Intermolecular interactions in blends of poly(vinyl alcohol)with poly(acrylic acid):2. Correlation between the states of sorbed water and the interactions in homopolymers and their blends[J]. Polymer, 1996, 37(23):5219-5227.
-
- (上接第28页)
- reinforced polypropylene composites[J]. Materials & Design, 2011, 32:4069-4073.
- [8] 杨诗润,梁珊,罗筑,等. 长玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的力学性能研究[J]. 塑料工业,2012,40(6):37-40.
Yang Shirun, Liang Shan, Luo Zhu, et al. Mechanical properties study on long glass fiber reinforced PP composite[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(6):37-40.
- [9] He Bobing, Liu Heng, Leng Jinhua, et al. Mechanical properties of long glass fiber-reinforced polypropylene composites and their influence factors[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 30(3):222-228.
- [10] 汤俊杰,李昌鸿,史鹏伟,等. PP-g-MAH 相容剂 TVOC 含量对玻纤增强聚丙烯热氧化性能的影响[J]. 塑料工业,2016, 44(2):113-117.
Tang Junjie, Li Changhong, Shi Pengwei, et al. Effect of TVOC in PP-g-MAH on the thermo-oxidative aging properties of glass fiber reinforced PP[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(2):113-117.
- [11] 王宏岗,郑安呐,戴干策. 聚丙烯与玻璃纤维界面结晶行为的研究[J]. 高分子材料科学与工程,1999,15(4):99-102.
Wang Honggang, Zheng Anna, Dai Gance. Crystalline behavior of polypropylene on the interface of its composite reinforced with glass fiber[J]. Polymer materials science and engineering, 1999, 15(4):99-102.
- [12] Lombardo N. Effect of an inhomogeneous interphase on the thermal expansion coefficient of a particulate composite[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65:2118-2128.
- [13] 张志坚,龚颖,卢康利,等. GF 含量对长纤维增强 PP 性能的影响[J]. 工程塑料应用,2013,41(1):35-38.
Zhang Zhijian, Gong Ying, Lu Kangli, et al. Influence of fiber content on properties of long glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(1):35-38.
- [14] 赵文聘,黄海清,杨健,等. 聚丙烯改性料的收缩率探讨[J]. 工程塑料应用,2000,28(11):8-10.
Zhao Wenpin, Huang Haiqing, Yang Jian, et al. Discussion on the shrinkage of modified PP[J]. Engineering plastics application, 2000, 28(11):8-10.
- [15] Fu S Y, Lauke B, Mader E, et al. Tensile properties of short-glass-fiber-and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Composites: Part A, 2000, 31:1117-1125.