

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.012

模内包覆注射成型 CFRT-PP 的制备与性能

陈杨,何继敏,常义

(北京化工大学塑料机械及塑料工程研究所,北京 100029)

摘要: 为克服传统模内混合注射成型制品力学性能较低、界面结合效果差、注塑层易脱离等缺点,采用模内包覆注射成型工艺,以网格状硬质预浸料为增强体预制件和高流动性聚丙烯(PP)为基体制备了连续纤维增强 PP 复合材料(CFRT-PP)。通过单因素实验研究注射速度、保压压力、模具温度和熔体温度等工艺参数及预制件层数对试样力学性能的影响,从微观角度解释基体与预制件间界面结合情况。研究表明,适当增加注射速度、保压压力、模具温度和熔体温度有利于熔体渗透纤维间隙,提高浸渍程度及基体与预制件间界面结合效果和力学性能,但过高的熔体温度会使 PP 纤维过多熔融和纤维间隙减小,导致试样力学性能下降。在 4 层预制件下成功制备了力学性能优异、界面结合强度高、包覆质量良好的“钢筋混凝土”结构的 CFRT-PP 制品,其拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度和层间剪切强度为 196.43 MPa, 187.91 MPa, 110.935 kJ/m² 和 21.49 MPa。

关键词: 模内包覆注射成型; 界面结合; 力学性能; 连续纤维

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0067-07

Preparation and Properties of In-Mold Overmolded Injection Molded CFRT-PP

Chen Yang, He Jimin, Chang Yi

(Institute of Plastic Machinery and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : In order to overcome the disadvantages of conventional in-mold hybrid injection molding products such as lower, poor interfacial bonding and easy detachment of injection layers, continuous fiber-reinforced thermoplastic polypropylene composites (CFRT-PP) were prepared by using an in-mold overmolding molding process with lattice-like rigid prepreg as reinforcement preforms and high-fluidity polypropylene (PP) as matrix. The effects of process parameters such as injection speed, holding pressure, mold temperature and melt temperature and the number of layers of preforms on the mechanical properties of the specimens were investigated by single-factor experiments to explain the interfacial bonding between the matrix and preforms from a microscopic perspective. It was shown that increasing the injection speed, holding pressure, mold temperature and melt temperature was beneficial to the melt penetration into the fiber gap, improving the degree of impregnation and the interfacial bonding effect and mechanical properties between the matrix and the precast, but too high melt temperature would cause excessive melting of PP fibers and reduction of the fiber gap, resulting in the degradation of the mechanical properties of the specimens. CFRT-PP products with excellent mechanical properties, high interfacial bonding strength and good cladding quality were successfully prepared under 4 layers of prefabricated parts with tensile strength, flexural strength, notched impact strength and interlayer bond strength of 196.43 MPa, 187.91 MPa, 110.935 kJ/m² and 21.49 MPa.

Keywords : in-mold overmolding ; interface combination ; mechanical property ; continuous fiber

目前,无论是短纤维增强热塑性复合材料(SFRT)注射成型还是长纤维增强热塑性复合材料(LFRT)注射成型都是利用螺杆对含纤基体进行混合、塑化,导致纤维断裂严重,制品性能较差。以纤维

织物、纤维毡等为增强体成型的连续纤维增强热塑性复合材料(CFRT)制品具有更优异的性能、质量轻、可回收利用和表面质量好没有浮纤等优点,被广泛应用于航天、汽车等行业^[1-2]。基于注射成型

通信作者: 何继敏,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为超高分子量聚乙烯注射成型及聚丙烯等注塑发泡成型

收稿日期: 2022-04-08

引用格式: 陈杨,何继敏,常义. 模内包覆注射成型 CFRT-PP 的制备与性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):67-73.

Chen Yang, He Jimin, Chang Yi. Preparation and properties of in-mold overmolded injection molded CFRT-PP[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):67-73.

的优点和 CFRT 制品优异的性能,人们提出了一种模内混合注射成型工艺,其原理是将纤维预制件放入模具中,通过在预制件上注射基体塑料而成型出 CFRT 制品^[3-4]。

Fiorotto 等^[5]将热压成型的 CFRT 板材作为预制件放入模腔中,注射 LFRT 塑料形成格栅肋结构,研究了注射速率、预制件表面温度和基体温度对界面粘结强度的影响。结果表明,当温度低于发生降解的温度时,基体温度的增加使界面间分子扩散和缠结增多,提高界面结合性能,预制件温度与注射速率对结合强度提升不大。Lafranche 等^[6]在玻纤质量含量为 70% 的 CFRT-PA6 (尼龙-6) 板材预制件上注射玻纤含量 30% 的 SFRT-PA6 基体。结果表明,试样的弯曲、界面剪切强度受预制件温度、模具温度与注塑温度影响。当预制件温度低于 150℃ 时,界面粘结性能较低,预制件温度在 150℃ 左右时,试样弯曲、层间剪切强度达到最大值。界面温度低于 150℃ 时,结合面分子不会发生自扩散和互扩散。朗盛公司以 CFRT-PA6 为预制件,注射成型了 SFRT-PA6 轻质 A 柱,相比传统的钢管质量减少了约 5 kg,但抗侧翻能力相同^[7]。而福吉亚汽车座椅公司利用该工艺成功制备了奥迪 A8 的后排座椅外壳,相比金属外壳减轻了 45%,同时拥有较强的抗冲击能力^[8]。

Wang 等^[9]利用模具分型面将聚丙烯 (PP) 编织布夹在模腔中间,注射纯 PP 熔体制备了 PP 单聚合物复合材料 (PP SPC),发现熔体温度和保压时间对 PP SPC 性能影响最大,而注塑压力主要提高熔体对纤维的渗透性,保压压力对界面粘附力起主要作用。Mao 等^[10]将高密度聚乙烯 (PE-HD) 熔纺成的纤维布为预制件,使用双面胶带分别将织物粘在模腔内壁上,注射 PE-HD 成型了 PE-HD SPC。结果表明,注塑温度对试样力学性能影响最大,提高注塑温度可以增加熔体流动性,提高熔体对纤维的浸渍能力。当注塑温度为 240℃ 时,30% 纤维含量 (质量) 的试样拉伸强度为 50 MPa,相比纯 PE-HD 试样提高了 2.8 倍。注塑温度从 200℃ 升到 240℃ 时,试样的剥离强度随之增加,最大值为 16.7 N/cm,证明界面间具有良好的粘结性和相容性。Solorza-Nicolas 等^[11]将 0/90° 或 (±45)° 取向的玻璃纤维编织网格布粘在聚碳酸酯薄膜上作为嵌件插入模腔中,注射聚碳酸酯基体后,利用注射压缩模具制备了新型复合材料板材。

为进一步提高 CFRT 注射成型试样的界面结合效果和力学性能,笔者开发出连续纤维增强复合材料模内包覆注射成型工艺,以连续纤维混编纱预浸渍成型的预制件作为增强体骨架,注射高流动性 PP 基体进行包覆、浸渍,制备了“钢筋混凝土”结构的 CFRT-PP 平板试样。图 1 为成型过程示意图。笔者研究试样成型过程中注塑工艺对试样力学性能的影响,从微观形貌观察预制件与基体界面间结合情况。

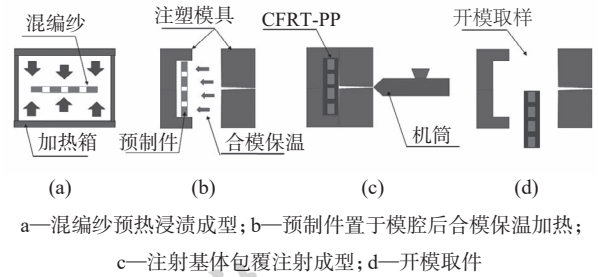


图 1 模内包覆注射成型过程示意图

1 实验部分

1.1 主要原材料

混编纱: 振石控股集团有限公司的复合纤维织物,使用硅烷处理的无碱连续玻璃纤维与 PP 纤维经织机织成 0°/90° 取向的无捻粗纱混编正交织物布,规格型号为 E/PP-60/40-WR750; PP 纤维与玻璃纤维质量比为 4 : 6,两者纤维直径相同,单位面积质量,分别为 750,950 g/m²;

PP: BX3920,熔体流动速率 100 g/(10 min),韩国 SK 集团综合化学株式会社公司;

磁性垫片: 宽 8 mm,厚 2 mm,磁性橡胶垫片,一侧有胶,美国 3M 公司;

增容剂: 5568-K,德国巴斯夫公司。

1.2 主要设备及仪器

注塑机: TTI-90F2 型,东华机械有限公司,注塑机参数见表 1;

干燥箱: DHG-9075A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

万能试验机: KXWW-20C 型,承德泰鼎公司;

嵌件式模具: 模腔尺寸为 195 mm × 40 mm × 4.2 mm,自制;

扫描电子显微镜 (SEM): S4800 型,日本日立公司。

表 1 注塑机参数

最大注射量/g	额定保压压力/MPa	额定注射速度/(mm·s ⁻¹)	螺杆直径/mm	锁模力/t	主马达功率/kW
130	170	100.8	35	90	7.5

1.3 试样制备

将一定尺寸的混编纱呈 0° 叠层铺放在电热恒温鼓风干燥箱的铁丝网架上,尽量使上、下层纤维束对齐,加热温度 185°C ,预浸渍时间 90 min。由于混编纱中的纤维束是由 PP 纤维和玻璃纤维混编而成,在高温下,PP 纤维受热熔融而浸渍周边玻璃纤维,使纤维束发生收缩,冷却后得到矩形通孔的预浸料片材;利用裁剪机对预浸料片材进行裁剪,形成略小于模腔尺寸 ($195\text{ mm} \times 40\text{ mm}$) 的预制件,其物理模型如图 2 所示。

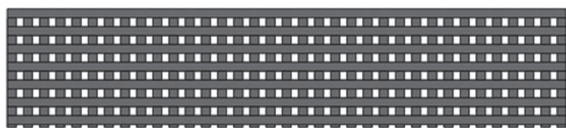
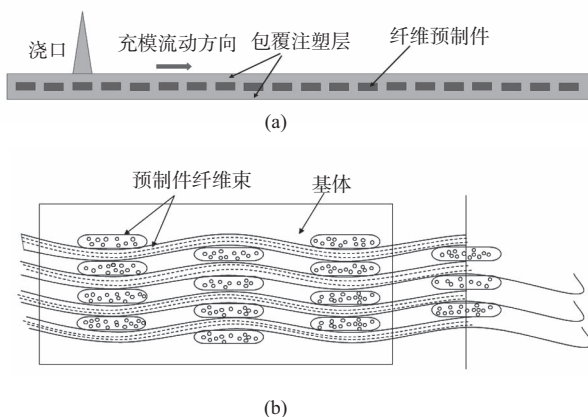


图2 预制件的物理模型

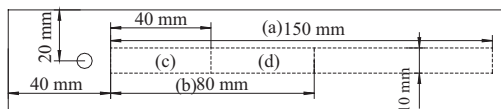
将 750 g/m^2 混编纱制成 2 层预制件,并沿基体流动方向在预制件的两面边缘粘上四条磁性橡胶垫片,放入嵌件式模具后吸附在动模板型腔内壁上,利用合模力对其进行夹紧固定;将 950 g/m^2 混编纱制成 4 层预制件,利用模具自身插针结构固定夹紧。保温 60 s 后注射 PP 基体,熔体穿越预制件网格进行流动,从预制件两侧对预制件进行包覆、浸渍,保压 15 s、冷却 45 s 后开模取样,图 3 为试样截面示意图。



a—纵截面; b—横截面

图3 CFRT-PP 试样截面示意图

使用锯齿裁剪机制得拉伸、弯曲、冲击与层间剪切力学测试样条,其取样位置如图 4 所示。



a—拉伸样条取样位置; b—弯曲、冲击样条取样位置;

c, d—层间剪切取样位置

图4 测试样条取样位置

1.4 注塑参数设置

对注射速度、保压压力、模具温度和熔体温度等四种工艺参数进行探索,采用单因素实验方案,各因素取值为:注射速度选择 5%,10%,15%,20%,25%,基准为 15%;保压压力选择 4,5,6,7,8,9 MPa,基准为 6 MPa;模具温度选择 50,60,70,80,90 $^\circ\text{C}$,基准为 70 $^\circ\text{C}$;熔体温度选择 240,250,260,270,280 $^\circ\text{C}$,基准为 260 $^\circ\text{C}$;预制件为两层,分析对比实验结果。实验注射速度与保压压力均指系统注射速度 (%) 和系统保压压力 (MPa),换算公式为:实际注射速度 (mm/s) = 设定注射速度 (%) $\times$ 额定注射速度 (mm/s) / 额定系统注射速度 (%),实际保压压力 (MPa) = 设定保压压力 (MPa) $\times$ 额定保压压力 (MPa) / 额定系统保压压力 (MPa)。

1.5 性能测试

拉伸强度测试:按照 GB/T 1447-2005,标距 80 mm,试验速度为 20 mm/min;

弯曲强度测试:按照 GB/T 1449-2005,跨距为 64 mm,试验速度为 10 mm/min;

冲击强度测试:按照 GB/T 1043-2008,跨距为 70 mm,V 型缺口,宽度为 2 mm;

层间剪切强度测试:按照 JC/T 773-2010,跨距为 20 mm,试验速度为 1 mm/min;

采用 SEM 对预制件与注塑层结合界面和试样断面的微观形态进行观察。

2 结果与讨论

2.1 注塑工艺参数对试样力学性能的影响

(1) 拉伸测试结果及分析。

图 5 为 CFRT-PP 试样拉伸随注射速度变化的关系图,可以看出拉伸强度先增大后减小。这是由于注射速度较低时,熔体充模时间延长,温度降低、黏度增加^[12],渗透纤维的难度增加,导致界面结合性能差,试样力学性能降低,注射速度在 5% 时拉伸强度最小为 67.51 MPa。当注射速度增加到 20% 时,拉伸强度达到最大值 73.75 MPa,提高了 9.24%。这是因为随着注射速度增大,熔体充模时间减少、剪切力变大,熔体温度升高,黏度降低,有利于熔体对纤维进行浸润^[13],从而提高了基体与预制件间界面结合性能,拉伸强度快速升高。当注射速度超过 20% 时,高温熔体一方面提高了界面粘结强度,另一方面造成 PP 纤维过多熔融使其丧失物理性能和力学性能,综合影响下导致试样拉伸强度下降。并

且熔体在高速下填充、包覆预制件时,预制件表面少量气体排出不及时而残留在界面结合处,导致界面粘结效果变差。

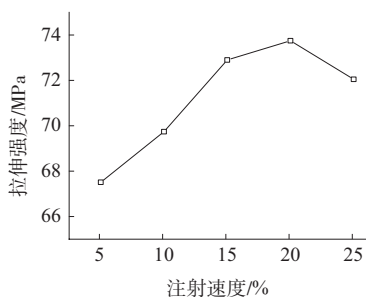


图5 不同注射速度时 PP 复合材料拉伸强度

拉伸强度与保压压力的关系曲线见图6所示。

由图6可以看到,拉伸强度先快速上升后缓慢增加,由4 MPa时的67.42 MPa增加到9 MPa时的最大值74.89 MPa,提高了11.08%。这是因为保压压力的增大提高了熔体对纤维束内部纤维的渗透和浸渍;并且纤维束在较大的保压压力下发生体积收缩,使内部纤维排列紧密,纤维间隙减小,提高了纤维间的界面结合效果;较大的保压压力同时有利于提高基体对预制件表面的粘附力,增加界面结合强度。当保压压力增加到8 MPa时,纤维间隙进一步减少,导致熔体渗透困难,熔体与纤维结合面积减小,力学性能下降;但基体与预制件之间、纤维与纤维之间的界面结合性能提高,所以拉伸强度继续增加,但增速放缓。

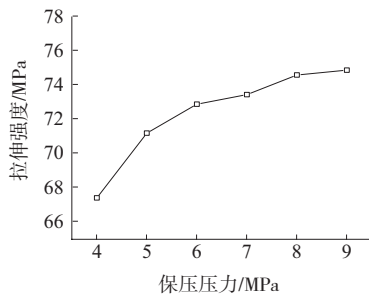


图6 不同保压压力时 PP 复合材料拉伸强度

拉伸强度与模具温度的关系曲线图,见图7所示。由图7可以看到,模具温度从50℃升到70℃时,拉伸强度从68.04 MPa快速升到72.9 MPa,增加了7.14%。这是因为过低的模具温度使充模流动的熔体快速冷却、黏度增加,熔体渗透纤维的能力减弱,与预制件间界面粘结效果变差。随着模具温度的升高,相同时间内预制件吸收到更多的热量,熔体和预浸片较小的温度差使界面间分子结晶增多^[14];熔体的熔融状态保持时间延长,与熔化的PP纤维

形成良好的界面粘结;此时熔体对预制件纤维的浸渍程度提高,同时预制件内部PP纤维进一步熔融,浸渍周边纤维,造成试样拉伸强度快速增大。当模具温度超过70℃时,熔体在模腔内热量损失减少、熔融保持时间大幅延长,导致PP纤维过多熔融而丧失了增强形态,拉伸强度随之下降到90℃时的69.55 MPa。

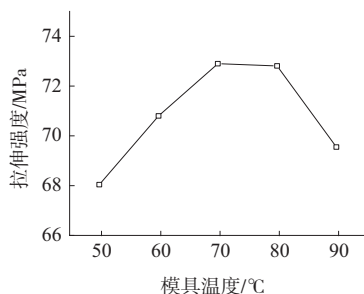


图7 不同模具温度时 PP 复合材料拉伸强度

拉伸强度与熔体温度的关系曲线见图8所示。

由图8可以看到,熔体温度从240℃升高至260℃,拉伸强度快速增加。这是因为随着熔体温度的升高,其黏度降低,有利于熔体对纤维束进行渗透、浸渍,并在270℃时达到最大值73.55 MPa,相比240℃时的67.28 MPa提高了9.32%。当熔体温度超过270℃时,PP纤维熔融过多、增强效果变差,并且PP纤维熔融后浸渍周围纤维形成界面结合,使纤维间隙减少,阻碍熔体进一步渗透,伴随着PP基体发生高温降解,试样拉伸强度快速下降。

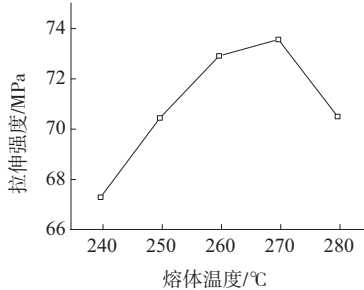


图8 不同熔体温度时 PP 复合材料拉伸强度

(2) 弯曲测试结果及分析。

弯曲强度与注射速度、保压压力、模具温度和熔体温度的关系曲线见图9~图12。由图可以看到,弯曲强度呈先上升后下降的趋势。这是因为随着注射速度、模具温度与熔体温度的增加,熔体温度升高、黏度下降,提高了对纤维的渗透能力以及基体与纤维界面结合强度。其中注射速度对弯曲强度的影响较大,由5%注射速度时的最小值58.41 MPa增加到20%时的最大值63.40 MPa,增加了8.54%,

可能是过高的注射速度对预制件造成了轻微的冲击变形,使预制件处于中性层下方,弯曲测试时预制件承受更大的弯曲应力,弯曲强度提高。而保压压力对弯曲强度的影响较小,8 MPa 时达到最大值 63.28 MPa,相比 4 MPa 时仅提高了 3.26%,这是因为适当增加保压压力的大小可以提高熔体对纤维的渗透能力和界面粘附力。而过大的保压压力导致纤维间隙减小,熔体渗透困难,试样力学性能下降,并且由于纤维束的收缩,纤维在试样中的分散程度下降,大大降低了预制件承受弯曲应力的能力,最终导致弯曲强度上升缓慢,并在 8 MPa 时开始减小。由图 11 可知,试样弯曲强度随模具温度先增大后减小,弯曲强度在 70℃ 时最大,为 62.04 MPa,仅比 50℃ 模温时提高 4.34%,对弯曲性能影响较小。由图 12 可知,随熔体温度升高,试样的弯曲强度先增加,由 240℃ 时的最小值 59.04 MPa 增加到 270℃ 时的最大值 62.67 MPa,提高了 6.15%,随后下降到 280℃ 时的 60.84 MPa,所以较低的熔体温度可以有效防止 PP 纤维熔化。

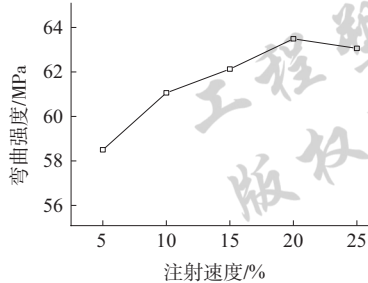


图 9 不同注射速度时 PP 复合材料弯曲强度

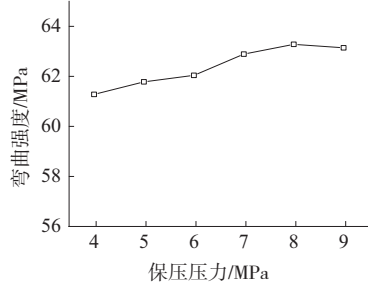


图 10 不同保压压力时 PP 复合材料弯曲强度

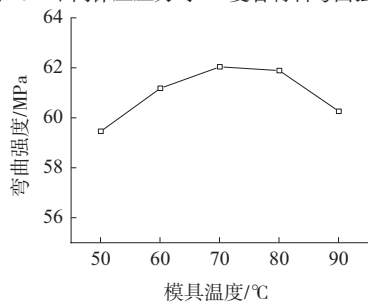


图 11 不同模具温度时 PP 复合材料弯曲强度

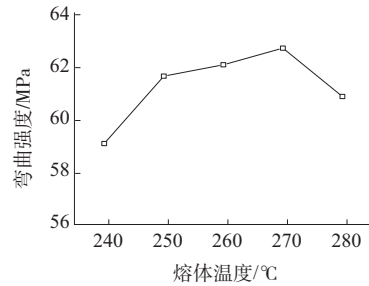
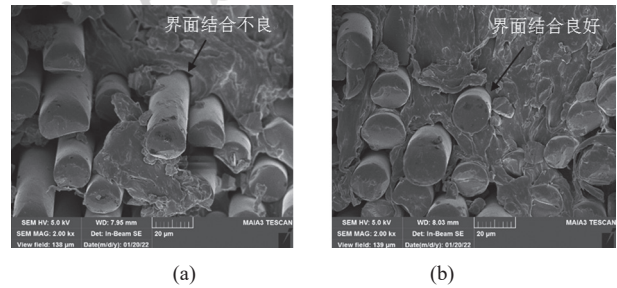


图 12 不同熔体温度时 PP 复合材料弯曲强度

2.2 界面结合分析

采用 SEM 对预制件微观结构形态进行观察,分析不同模具温度和熔体温度下基体与预制件间界面粘结情况,探究熔体充模温度对界面结合效果的影响。对不同模具温度下的成型试样在液氮下进行脆断,观察其断面微观形态,见图 13。如图 13a 所示,基体与纤维间存在较大间隙,界面结合效果差;当模具温度在 90℃ 时,基体与纤维紧密的黏附在一起,浸渍效果好,熔体的渗透程度提高。说明适当的增加模具温度有利于提高基体与预制件纤维的界面粘结效果,提高试样力学性能。

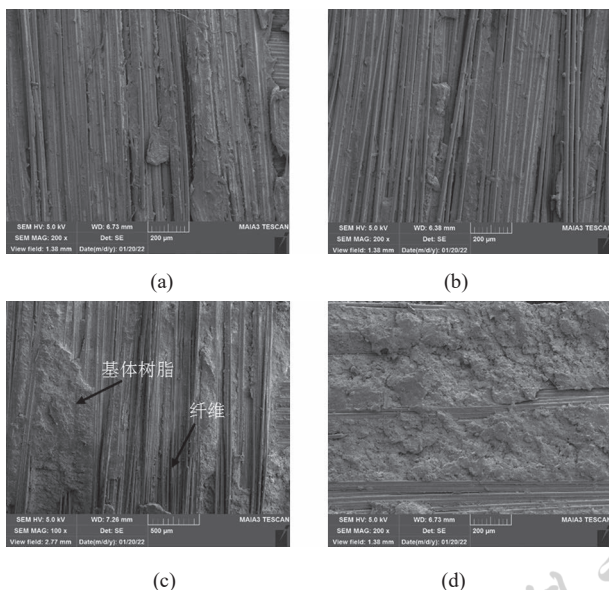


a—50℃; b—90℃

图 13 不同模具温度下 CFRT-PP 断面的 SEM 图

对不同熔体温度下成型试样的注塑层进行层间剥离,使用 SEM 观察预制件和注塑层表面形态,分析熔体温度对界面粘结性能的影响。图 14 为熔体温度从 240℃ 升高到 280℃ 时,层间剥离后预制件表面的微观结构图。从图 14a 可以看到,在 240℃ 时预制件表面黏附的基体树脂较少,这是因为较低的熔体温度导致其黏度升高,渗透阻力变大,纤维间隙减小,降低了熔体对预制件的浸润程度,界面结合性能变差,层间剥离力较小。由图 14c 可以看到,预制件表面残余的 PP 基体树脂增多,这是由于随着熔体温度升高,熔体黏度降低,熔体对纤维间隙的渗透能力增加,浸渍效果和界面粘结强度明显提高;而且较高的熔体温度使分子运动加剧,因分子扩散造成基体树脂与 PP 纤维熔融树脂接触面的高分子链纠缠、粘结数量增多,从而提高了界面粘结强度;

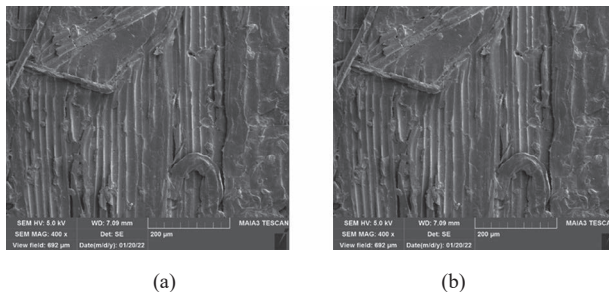
在对 CFRT-PP 试样进行层间剥离时,较大的剥离应力由结合界面传递到注塑层,导致注塑层基体撕裂而残留在预制件表面。图 14d 显示,在 280℃ 时预制件表面几乎被基体树脂完全覆盖,界面结合效果达到最佳。



熔体温度: a—240℃; b—260℃; c—270℃; d—280℃

图 14 CFRT-PP 试样层间剥离后预制件表面的 SEM 图

图 15 为熔体温度在 240℃ 和 260℃ 时,层间剥离后注塑层表面的微观结构图 SEM 图。如图 15a 所示,在 240℃ 时注塑层表面较为光滑,纤维拔出痕迹不明显,说明熔体对预制件表面纤维未进行有效渗透,导致基体与预制件界面粘结强度较低。图 15b 显示当熔体温度为 260℃ 时,注塑层表面的纤维拔出痕迹明显,熔体的渗透性提高。



熔体温度: a—240℃; b—260℃

图 15 CFRT-PP 试样层间剥离后注塑层表面的 SEM 图

2.3 预制件层数对试样力学性能的影响

为进一步提高试样力学性能,以 4 层 950 g/m² 混编纱浸渍成型为预制件,在 PP 基体中添加质量分数 2% 的马来酸酐增容剂,混合造粒后注射成型。为了使基体完全填充、包覆预制件,注射速度设为 50%,根据最优力学性能时其参数大

小,选择保压压力 8 MPa、模具温度 70℃ 和熔体温度 270℃,CFRT-PP 试样和纯 PP 试样力学性能对比见表 2。由表 2 可知,CFRT-PP 试样的拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度分别为 196.43 MPa,187.91 MPa,110.935 kJ/m²,相比纯 PP 试样分别提高了 876.29%,521.60%,1 122.56%;而层间剪切强度为 21.49 MPa,表明试样界面结合性能好,不容易发生层间脱离;因此使用模内包覆注射成型工艺制备的 CFRT-PP 试样具有优异的力学性能。

表 2 最优成型参数下试样力学性能对比

层数	预制件厚度/mm	玻纤含量/%	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	层间剪切强度/MPa
纯 PP	/	0	20.12	30.23	9.074	/
4	3.28	40.59	196.43	187.91	110.935	21.49

3 结论

(1) 单因素实验结果表明,注塑工艺对试样力学性能的影响具有一定规律性,即力学性能随着工艺参数增大呈现出先上升后下降趋势;当工艺参数为注射速度 20%,保压压力 8 MPa,模具温度 70℃,熔体温度 270℃ 时,试样能获得较好力学性能。

(2) 预制件微观结构形态和界面结合情况的改变是引起试样力学性能变化的根本原因,适当提高模具温度和熔体温度的大小可以增加熔体充模温度、降低黏度,有利于熔体对纤维间隙进行渗透,提高浸渍程度和界面结合性能;但过高的熔体温度会使 PP 纤维过多熔融和纤维间隙减小,导致试样力学性能下降。

(3) 对比纯 PP 试样,CFRT-PP 试样的最大拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度为 196.43 MPa、187.91 MPa 和 110.935 kJ/m²,相比纯 PP 试样分别提高了 876.29%,521.60%,1 122.56%,证明模内包覆注射成型工艺制备 CFRT-PP 具有可行性。

参考文献

- [1] Ma M, Yi H, Lu H, et al. On the light-weighting of automobile[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(9):20-27.
- [2] Fang Li, Li Xuwu, Zhou Xiaodong. The effect of fiber-reinforced interleaves on the interlaminar shear strength of continuous glass fiber-reinforced polypropylene laminates[J]. Journal of Polymer Engineering, 2013, 33(3): 221-227.
- [3] 陈杨,何继敏,常义,等.连续纤维增强复合材料模内混合注射成型研究进展[J].工程塑料应用,2021,49(9):145-149,154.
Chen Yang, He Jimin, Chang Yi, et al. Research progress of in-mold hybrid injection molding of continuous fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):145-149, 154.
- [4] 卢一,蒋炳炎,符亮,等.模内混合注塑成型聚丙烯与预制件

- 间界面黏结强度研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(7):1 626–1 633.
- Lu Yi, Jiang Bingyan, Fu Liang, et al. Interfacial bonding strength between polypropylene and perform on in-mold hybrid injection molding technology[J]. Journal of Central South University : Science and Technology, 2018, 49(7):1 626–1 633.
- [5] Fiorotto M, Luccheita G. Experimental investigation of a new hybrid molding process to manufacturing high-performance composites[J]. International Journal of Material Forming, 2013, 6(1):179–185.
- [6] Lafranche E, Renault T, Krawczak P. Effect of the interdiffusion at the polymer/polymer interface on the flexural properties of over-moulded short glass fibre/glass fabric reinforced pa6 composites[J]. Key Engineering Materials, 2014, 23(5):821–828.
- [7] 新型·连续纤维增强热塑性复合材料嵌件成为理想的 A 柱结构加强件[J]. 化工新型材料, 2019, 47(11):268.
- New type. Continuous fiber reinforced thermoplastic composite material inserts become ideal A-pillar structural reinforcements[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(11):268.
- [8] Grace. 朗盛 TEPEX 连续纤维增强复合材料用于量产各种轻量化汽车设计的结构部件[J]. 上海化工, 2019, 44(8):15.
- Grace. LANXESS TEPEX continuous fiber reinforced composite materials are used in the mass production of various lightweight automotive design structural components[J]. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(8):15.
- [9] Wang Jian, Wang Sui, Chen Dongjie. Development and characterization of insert injection moulded polypropylene single-polymer composites with sandwiched woven fabric[J]. Composites Science and Technology, 2015, 117(5):18–25.
- [10] Mao Qianchao, Wyatt T P, Chen Jinnan, et al. Insert injection molding of high-density polyethylene single-polymer composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2015, 55(11):2 448–2 456.
- [11] Solorza-Nicolas O, Hernandez-Moreno H, Susarrey-Huerta O, et al. Film-insert injection compression molding for reinforced polycarbonate with woven glass fiber oriented $90/0^\circ \pm 45^\circ$ [J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(2):1–8.
- [12] 苏全亮, 王利霞. 注射速度对微注塑成型充填过程及制品形态结构的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- Su Quanliang, Wang Lixia. Influence of injection speed on the filling process and product morphology structure of microinjection molding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [13] 姜南南. 聚丙烯单聚合物复合材料嵌件式注射成型过程的数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- Jiang Nannan. Numerical simulation for insert injection molding of poly propylene single-polymer composites[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [14] Meister S, Drummer D. Influence of mold temperature on mold filling behavior and part properties in micro injection molding[J]. International Polymer Processing, 2013, 28(5):550–557.
- 东华大学学报: 自然科学版, 2004, 30(5):39–43.
- Zhu Mei, Hu Hong. Fiber damage degree in the process of knitting glass fiber yarns[J]. Journal of Donghua University, Natural Science, 2004, 30(5):39–43.
- [26] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2007, 9(1):62–66.
- [27] 李博, 夏蕊, 王学文, 等. 基于响应面法的多因素交互作用下中部槽磨损试验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22):2 764–2 771.
- Li Bo, Xia Rui, Wang Xuewen, et al. Experimental study on wear of middle plates under multi factor interactions based on response surface method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(22):2 764–2 771.
- [28] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8):41–45.
- Li Li, Zhang Sai, He Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8):41–45.
- [29] 李潭, 顾轶卓, 王绍凯, 等. 碳纤维丝束起毛量测试方法[J]. 材料工程, 2017, 45(7):84–90.
- Li Tan, Gu Yizhuo, Wang Shaokai, et al. Measuring method for fuzz mass of carbon fiber tow[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(7):84–90.
- (上接第 60 页)
- [21] Liu Y, Shan Z, Lv Z, et al. Systematic deformation model of a square guide bar array in a flexible oriented 3D woven process[J]. Composite Structures, 2022, 280. DOI.10.1016/j.compstruct.2021.114849.
- [22] 单忠德, 战丽, 缪云良, 等. 复合材料构件数字化精确成形技术与装备[J]. 科技导报, 2020, 38(14):63–67.
- Shan Zhongde, Zhan Li, Miao Yunliang, et al. Digital precision forming technology and equipment for composite materials[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14):63–67.
- [23] 杜悟迪, 刘丰, 单忠德, 等. 碳纤维复合材料三维织造导向阵列变形研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17):182–189.
- Du Wudi, Liu Feng, Shan Zhongde, et al. Study on deformation of three-dimensional weaving guide array of carbon fiber composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17):182–189.
- [24] 潘月秀, 解锡明, 吴宁, 等. 碳纤维束间的摩擦磨损特性[J]. 复合材料学报, 2019(8):1 838–1 846.
- Pan Yuexiu, Xie Ximing, Wu Ning, et al. Frictional and worn behavior of inter-carbon fiber tows[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019(8):1 838–1 846.
- [25] 朱梅, 胡红. 玻璃纤维纱线编织过程中纤维损伤程度的探讨[J].