长玻纤直接注塑成型工艺及其性能的影响因素研究

胡世军[1,2]，邓祖作[1,2]，姚华[1,2]，沈晶晶[1,2]，栾玉亮[1,2]

（1.伊之密股份有限公司，广东 佛山 528300；
2.广东省智能化模压成型装备企业重点实验室，广东 佛山 528300）

摘要：使用长玻纤直接注塑成型机制备了30%玻纤增强PP复合材料，探讨了相容剂和润滑分散剂对长玻纤直接注塑成型PP复合材料性能的影响，同时利用扫描电子显微镜（SEM）分析了该复合材料的界面形貌，结果表明：相容剂对长玻纤直接注塑成型仍然有较好的效果，能明显改善玻纤增强复合材料的两相界面作用，复合材料的力学性能显著提高。与未添加相容剂的体系相比，3%的相容剂能使长玻纤直接注塑成型制备的玻纤增强PP复合材料的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度分别提高43%，52.6%，38.3%。润滑分散剂对长玻纤直接注塑成型制备复合材料的缺口冲击性能有一定的提升作用，适当提高熔胶温度有利于减少玻纤的团聚，复合材料的力学性能也会有小幅度提高。此外，通过长玻纤直接注塑成型得到的玻纤增强PP复合材料的力学性能优于目前市场上双螺杆挤出机制备的普通级玻纤增强PP，特别是缺口冲击强度，可以达到市场上普通级玻纤增强PP复合材料的两倍以上。

关键词：长玻璃纤维；直接注塑成型；纤维增强；力学性能；热变形温度

引用论文：胡世军，邓祖作，姚华，等．长玻纤直接注塑成型工艺及其性能的影响因素研究[J]．橡塑技术与装备，2026，52(6):52-57.

中图分类号：TQ320.66　　**文章编号**：1009-797X(2026)06-0052-06

文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.06.012

0 前言

相对于普通的玻纤增强塑料，长玻纤增强塑料因为其高强度、高刚性和高抗冲击性而在汽车、机械装备、家电家具等方面应用广泛。国内关于长玻纤增强塑料的成型工艺、注塑参数、玻纤形态等方面的研究文献也较多[1~14]。通常，长玻纤增强塑料主要通过双螺杆挤出机制备，制备过程包括原料配混、双螺杆挤出、冷却造粒、存储等步骤，然后运输到下游的厂家注塑成型，整个流程较长，而且塑料需要多次加热熔融和运输，导致较大的能量损耗。在节能减排和低碳环保的趋势下，一些企业和机构研发了在线配混和直接注塑成型的工艺，尝试将原料、添加剂、玻纤等直接加入注塑机系统，通过对注塑机混炼系统的改进，实现从原料到制品的一次成型，减少中间的挤出造粒和多次运输的过程[6,12~14]。

伊之密股份有限公司设计制造了国内首台长玻纤在线配混直接注塑成型机，该注塑机配备了一条加长的波浪螺杆[15]，在螺杆熔融段的恒定底径区开设了玻纤喂入口，在玻纤喂入口区域配备了玻纤剪切设备，并通过多条管道将连续玻纤送入剪切设备，裁剪成设定的玻纤长度，再通过一组双螺杆喂料系统，将裁剪好的玻纤喂入螺杆螺槽。最后，喂入的玻纤与熔融的胶料混合并完成储料计量，再射入模具型腔，直接成型得到玻纤增强的塑胶产品。

伊之密公司的长玻纤直接注塑成型机通过对螺纹元件的组合设计，改进了玻璃纤维在聚合物基体中分散性，并且玻纤喂料与螺杆动作协调一致，注塑过程稳定顺畅。同时，该注塑机结构简单，拆除掉玻纤喂料系统，可以作为一台普通注塑机使用。此外，玻纤含量和长度可以自由调配，并且通过附带的侧喂料或者色母机系统，还可以添加一些常用的塑胶添加剂，如色母，增韧剂，阻燃剂母粒等，实现配方的自主设计。

本文使用伊之密公司的长玻纤直接注塑成型机制备了一系列玻纤增强PP复合材料，探讨了相容剂、润滑分散剂（硬脂酸钙）、熔胶温度等对该机台免挤出直接注塑制备玻纤增强PP复合材料性能的影响，同时利用扫描电子显微镜（SEM）分析了直接注塑成型的玻纤增强PP复合材料的界面形貌，并对比了长玻

作者简介：胡世军（1983−），男，硕士，材料工程师，主要研究方向为高分子材料复合改性及高性能化。

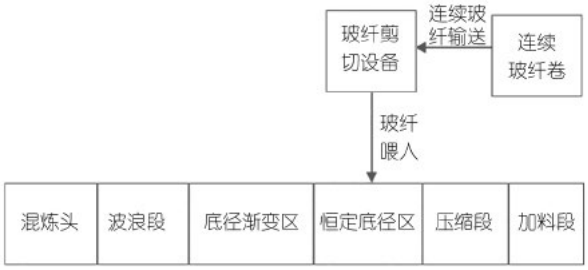


图 1　长玻纤直接注塑成型机原理简图

图 2　伊之密公司长玻纤直接注塑成型机实机

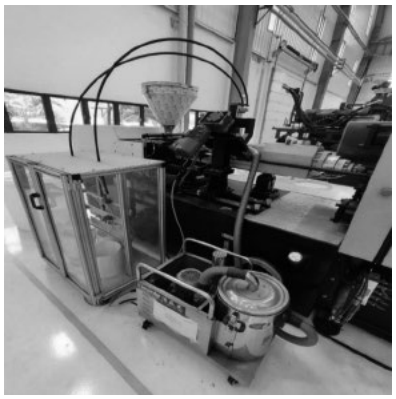


图 3　伊之密公司长玻纤直接注塑成型机纤维喂入系统

纤直接注塑制备的复合材料与市场上双螺杆挤出造粒工艺制备的同类材料的性能。

1　实验部分

1.1　主要原料

PP：SABIC 570P，沙伯基础创新塑料（中国）有限公司；

玻璃纤维：EDR17–2400–362k，中国巨石集团；

相容剂：PP 接枝马来酸酐（PP–g–MAH），OREVAC® CA100, 韩国 SK 化学；

硬脂酸钙：江西宏远化工有限公司

1.2　主要仪器及设备

注塑机：UN160A5S 型，螺杆直径 48 mm，长径比 32:1，广东伊之密股份有限公司；

微机控制电子万能材料试验机：型号 LD23.104，力试（上海）科学仪器有限公司；

液晶式摆锤冲击试验机：型号 LZ21.400–B，力试（上海）科学仪器有限公司；

热变形维卡软化点试验机：型号 ZWK1302–C，美特斯工业系统（中国）有限公司；

马弗炉：SX2–4–10 型，上海锦屏仪器仪表有限公司；

扫描电子显微镜（SEM）：Quanta FEG250 场发射扫描电子显微镜，美国 FEI 公司。

1.3　试样制备

打开注塑机电源，将注塑工艺参数按表 2 的要求设置，然后将准备好的 PP 原料、相容剂 CA100 和硬脂酸钙按表 1 的配比混合均匀，同时设置好连续玻璃纤维的剪切速度，调节剪切后的玻璃纤维长度为 16 mm。试验时混合料从注塑机尾部的料斗加入，玻璃纤维从注塑机中间位置的加纤口喂入。模具为冷流道设计，喷嘴直径 8 mm。待注塑机各区温度稳定后，启动注塑机，将各组配方注塑为标准测试样条。

表 1　试验配比表（质量分数）

试验编号	原料名称			
	PP	玻璃纤维	CA100	硬脂酸钙
1#	70	30	0	0
2#	69	30	1	0
3#	67	30	3	0
4#	65	30	5	0
5#	63	30	7	0
6#	64.8	30	5	0.2
7#	64.5	30	5	0.5

表 2　长玻纤直接注塑成型制备玻纤增强 PP 复合材料初始工艺参数

工艺参数	设定值
熔胶温度 /℃	230
螺杆转速 /（$r\cdot min^{-1}$）	80
注射速度 /（$mm\cdot s^{-1}$）	55
注塑压力 /MPa	100
保压压力 /MPa	40
保压时间 /s	5
模具温度 /℃	20
冷却时间 /s	20
喂纤速度（$m\cdot s^{-1}$）	0.8

1.4　测试与表征

（1）性能测试

拉伸强度按 ISO 527–2012 标准进行测试，拉伸速率为 50 mm/min；弯曲强度按 ISO 178–2019 标准进行测试，弯曲速率为 2 mm/min；悬臂梁缺口冲击强度按 ISO 180–2000 标准测试；简支梁冲击强度按

ISO 179–2010 标准测试；热变形温度按 ISO 75–2013 标准进行测试。

（2）复合材料断面分析

将冲击样条断面进行喷金处理后，通过扫描电子显微镜（SEM）对断面形态进行观察分析。

2 结果与讨论

2.1 相容剂的影响

2.1.1 力学性能

图 4~6 为长玻纤直接注塑成型得到的玻纤增强 PP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度对比，其中相容剂 CA100 含量分别为 0%,1%,3%,5%,7%（质量分数），试验结果表明，相容剂对长玻纤直接注塑成型工艺仍然有较好的效果，能显著提高复合材料的力学性能。随着相容剂含量的增加，拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度均呈现为先升高后下降的趋势，当相容剂添加量为 3% 时，拉伸强度、弯曲强度和简支梁缺口冲击强度达到最高，分别为 86.65 MPa，121.15 MPa，22.15 kJ/m^2，相对于未添加相容剂的体系，拉伸强度、弯曲强度、简支梁缺口冲击强度分别提高了 43%, 52.6% 和 38.3%。添加相容剂的复合材料体系力学性能大幅提升，这是由于相容剂的主要成份 PP–g–MAH 在聚合物基体和玻纤之间形成了化学键合作用，提高了玻纤与聚合物基体之间的界面结合力，增强了复合材料抵抗外力破坏的能力 [5~8]。但当体系中相容剂用量达到一定程度时，由于长玻纤直接注塑时，物料在注塑机螺杆中的停留时间较短，聚合物基体、相容剂和玻纤三者之间并不能充分反应，并且单螺杆的剪切分散作用较弱，导致相容剂在复合材料体系中部分反应和有限分散，这反而不利于玻纤对聚合物基体的增强作用。

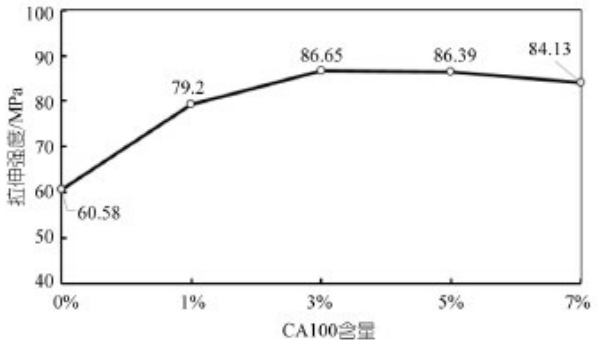


图 4 不同相容剂含量的玻纤增强 PP 复合材料拉伸强度对比

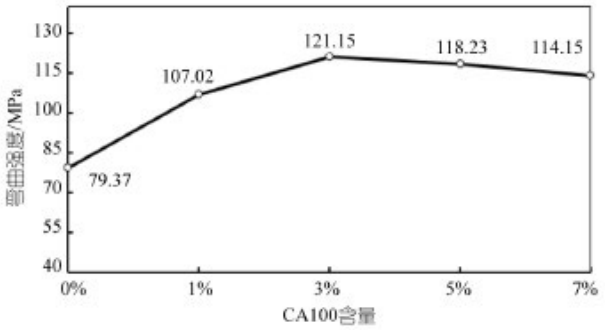


图 5 不同相容剂含量的玻纤增强 PP 复合材料弯曲强度对比

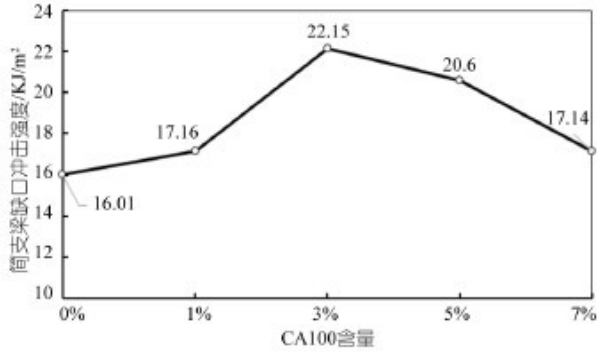


图 6 不同相容剂含量的玻纤增强 PP 复合材料缺口冲击强度对比

2.1.2 热变形温度

图 7 为长玻纤直接注塑成型得到的玻纤增强 PP 复合材料热变形温度对比，可以看出，加入相容剂后，直接注塑成型得到的玻纤增强 PP 复合材料的热变形温度略有提高，但提高幅度不大。这主要是由于，一方面玻纤和 PP 基体形成的界面可以有效地阻止高分子链在外力作用下的变形和在高温下的体积膨胀 [3,8]，而加入相容剂可以增强玻纤与 PP 基体之间的这种界面作用，从而可以进一步提高聚合物分子链在高温下的热变形能力；另一方面，相容剂 PP–g–MAH 在玻纤和 PP 基体之间引入的酸酐基团可以在界面处形成了较强的化学键连接而产生应变诱导作用，促进了玻纤与 PP 的界面结晶，从而提高了复合材料的结晶度 [8]，结晶度的提高，也有利于 PP 复合材料耐热性能的提高。当相容剂添加量达到 5%（重量分数）左右时，相容剂对玻纤和 PP 基体之间的两相界面作用达到饱和，进一步增加相容剂的用量，复合材料热变形温度变化不大。

2.2 润滑分散剂的影响

从表 3 可以看出，添加润滑分散剂硬脂酸钙后，

长玻纤直接注塑成型得到的玻纤增强 PP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度和热变形温度等变化不大，但简支梁缺口冲击强度和无缺口冲击强度有小幅度的提升，这可能是由于润滑分散剂硬脂酸钙提高了加工流动性，改善了玻纤在塑料基体中分布的均匀性，这有利于减少由于玻纤团聚而形成的应力集中点。

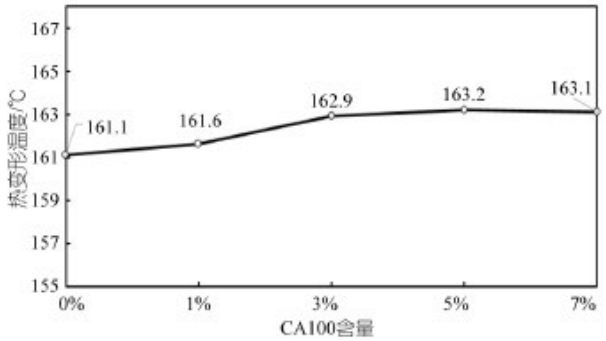


图 7　不同相容剂含量的玻纤增强 PP 复合材料热变形温度对比

表 3　添加硬脂酸钙的玻纤增强 PP 复合材料性能对比表

测试项目	测试标准	4# 样	6# 样	7# 样
拉伸强度 /MPa	ISO 527	86.39	86.6	87.05
弯曲强度 /MPa	ISO 178	118.23	118.7	117.5
弯曲模量 / MPa	ISO 178	4295	4283	4169
简支梁缺口冲击强度 /(kJ·m^{-2})	ISO 179	20.6	21.72	21.46
简支梁无缺口冲击强度 /(kJ·m^{-2})	ISO 179	54.64	56.39	55.8
热变形温度 /℃	ISO 75	163.2	162.8	163.9

2.3　熔胶温度的影响

清理玻纤喂入系统，将熔胶温度从 230 ℃分别调整为 210 ℃和 250 ℃，按表 1 中的 3# 配方混合各组分，对比测试熔胶温度改变前后复合材料的力学性能，同时观察样条中的玻纤分散情况，力学性能对比如表 4 所示，样条中的玻纤分布如图 8 所示。

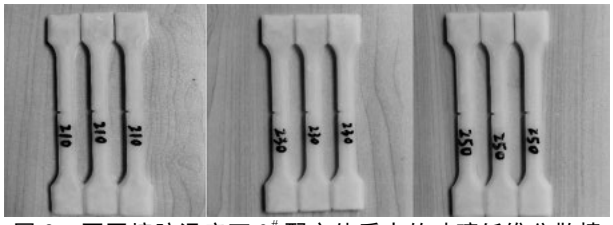


图 8　不同熔胶温度下 3# 配方体系中的玻璃纤维分散情况

从表 4 的测试数据可以看出，提高熔胶温度后，长玻纤直接注塑成型得到的玻纤增强 PP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度，冲击强度等均有小幅度的提高，这可能是由于：一方面提高熔胶温度降低了塑料熔体黏度，因此可以降低玻璃纤维在塑化过程中受到的剪切作用，减轻了玻纤在熔胶过程中的折损 [16]，另一方面，在高温时相容剂的活性更高，更容易与玻纤表面反应形成化学键合作用，这有利于提升玻纤与聚合物之间的界面结合点数量。

表 4　不同熔胶温度下 3# 配方体系力学性能对比

测试项目	测试标准	熔胶温度 210 ℃	熔胶温度 230 ℃	熔胶温度 250 ℃
拉伸强度 /MPa	ISO 527	80.2	86.65	90.94
弯曲强度 /MPa	ISO 178	110.4	121.15	128.28
弯曲模量 /MPa	ISO 178	4421	4548	4655
简支梁缺口冲击强度 /(kJ·m^{-2})	ISO 179	19.81	22.15	23.96
简支梁无缺口冲击强度 /(kJ·m^{-2})	ISO 179	51.2	54.81	60.11

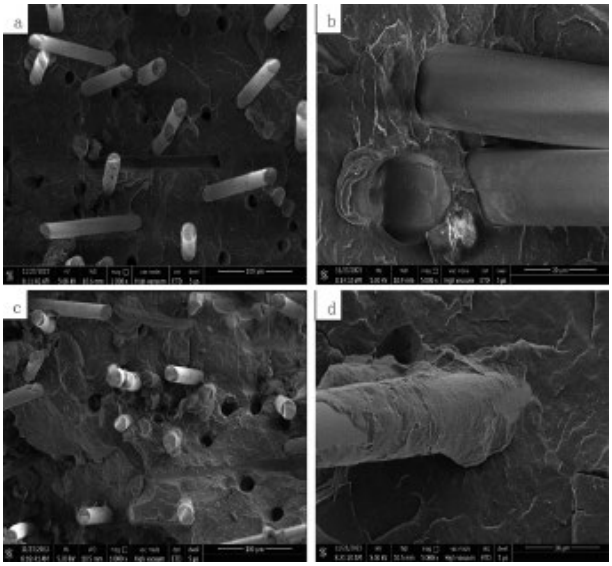
图 8 为不同熔胶温度下的玻璃纤维分散情况，其中的白色条状或者团状物为未完全分散开的玻纤束。可以看出，当熔胶温度从 210 ℃提高到 230 ℃和 250 ℃后，测试样条中玻纤团聚现象相对更少，样条中玻纤分散相对也更加均匀，玻纤分散更均匀同样有利于玻纤增强复合材料性能的提高。

2.4　界面形貌扫描电镜分析

图 9 为长玻纤直接注塑成型得到的玻纤增强 PP 复合材料界面形貌 SEM 照片，图 9(a) 和 (b) 是未加相容剂的体系，可以看出，未加相容剂的复合材料体系中，玻璃纤维与 PP 基体之间的两相界面清晰，断口中玻纤处于脱黏状态，周围几乎没有聚合物黏附，玻璃纤维与 PP 基体之间相容性较差；而添加 3% 的相容剂 CA100 后，玻纤和聚合物基体之间的两相界面变得模糊 (图 9(c))，放大后 (图 9(d))，可以清晰看到玻纤表面和界面处有大量聚合物黏附。因此，相容剂对长玻纤直接注塑成型仍然有较好的效果，能明显改善长玻纤直接注塑成型复合材料的两相界面作用。

2.5　长玻纤直接注塑成型制备玻纤增强 PP 复合材料与市场同类产品性能比较

表 5 为使用长玻纤直接注塑成型机制备得到的玻纤增强 PP 复合材料与市场同类产品性能对比，可以看出，直接注塑得到的玻纤增强 PP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量、冲击强度、热变形温度等均比目前市场上双螺杆挤出机制备的普通级玻纤增强 PP 复合材料要高，特别是缺口冲击强度，甚至可以达到市场上普通级玻纤增强 PP 复合材料的两倍以上。因此，长玻纤直接注塑成型制备的玻纤增强复合材料具有优异的力学性能。此外，通过模具设计，玻



（a），(b) 未加相容剂，（c），(d) 3% CA100 添加量

图 9　长玻纤直接注塑制备的玻纤增强 PP 复合材料界面形貌扫描电镜（SEM）图

璃纤维与树脂基体也可以通过该长玻纤注塑成型机直接复合注塑得到玻纤增强的复合材料制品，实现从原材料到制品的一步成型，减少中间的双螺杆挤出造粒和多次的物料运输过程，降低了能耗，符合低碳环保的发展趋势，具有较大的市场应用前景。

3　结论

（1）相容剂对长玻纤直接注塑成型仍然有较好的效果，能明显改善长玻纤直接注塑成型复合材料的两相界面作用，因此能显著提高复合材料的力学性能，与未添加相容剂的体系相比，3% 的相容剂能使长玻纤直接注塑成型制备的玻纤增强 PP 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度分别提高 43%，52.6%，38.3%；

（2）润滑分散剂对长玻纤直接注塑成型制备复合材料的缺口冲击性能有一定的提升作用，但是对复合材料的拉伸强度、弯曲强度和热变形温度影响不大；

（3）适当提高熔胶温度，长玻纤直接注塑成型得到的复合材料的力学性能会有小幅度提高；提高熔胶温度也有利于减少玻纤的团聚；

（4）通过长玻纤直接注塑成型机制备得到的玻纤增强 PP 复合材料的机械性能和热变形温度等优于目前市场上双螺杆挤出机制备的普通级玻纤增强 PP，特别是缺口冲击强度，甚至可以达到市场上普通级玻纤增强 PP 复合材料的两倍以上。

表 5　长玻纤直接注塑制备玻纤增强 PP 复合材料与市场同类产品性能对比

对比项目	测试标准	长玻纤直接注塑 PP GF30（典型值）	双螺杆挤出普通级 PP GF30（典型值）
拉伸强度 /MPa	ISO 527	90	80
弯曲强度 /MPa	ISO 178	128	95
弯曲模量 /MPa	ISO 178	4 655	4 000
简支梁缺口冲击强度 /(kJ·m^{-2})	ISO 179	23	10
悬臂梁缺口冲击强度 /(kJ·m^{-2})	ISO 180	25	11
热变形温度 /℃	ISO 75	160 (0.45 MPa)	151 (0.45 MPa)

参考文献：

[1] 崔峰波，曹国荣 . 玻璃纤维增强聚丙烯的性能研究 [J]. 玻璃纤维，2011(01).

[2] 邵静波，刘涛，张师 .PP-g-MAH 对玻璃纤维增强 PP 的影响 [J]. 合成树脂与塑料，2006(04).

[3] 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(01).

[4] 卢桂阳，李瑶，许广业 . 注塑条件对长玻纤增强聚丙烯性能影响研究 [J]. 工程塑料应用，2012,40(07).

[5] 张中伟 . 注塑工艺对长玻纤增强聚丙烯材料性能的影响 [J]. 上海塑料，2022,50(05).

[6] 李伟，童俊，胡满凤，等 . 在线配混工艺对 PP/LFT 复合材料力学性能影响 [J]. 工程塑料应用，2022,50(08).

[7] 肖茜 . 马来酸酐接枝聚丙烯对 PP/GF 复合材料力学性能的影响 [J]. 塑料科技，2021,49(11).

[8] 韩领，王雄刚，孟凡地，等 .GF 增强 PP 复合材料的尺寸稳定性与力学性能 [J]. 工程塑料应用，2017,45(05).

[9] 李锐，何亚东，信春玲，等 . 相容剂对玻纤增强聚丙烯复合材料性能的影响 [J]. 塑料 ,2021,50(03).

[10] 张道海，郭建兵，张凯舟 .PP-g-GMA 对长玻纤增强聚丙烯复合材料性能的影响 [J]. 塑料工业，2013,41(02).

[11] 周海，李飞，李荣群，等 . 注塑工艺对长玻纤增强聚丙烯材料性能及外观的影响研究 [J]. 塑料工业，2018,46(05).

[12] Rohde-Tibitanzl M.Direct processing of long fiber reinforced thermoplastic composites and their mechanical behavior under static and dynamic load[M].Munich: Carl Hanser Verlag，2016:9–22.

[13] Heidemeyer P,Deubel C,Kretschmer K,et al.Injection molding system and injection molding method for producing fiber-reinforced plastics material parts:US2015239158(A1)[P]. 2015-08-27.

[14] Toshihiko K,Naoki T,Munehiro N,et al.Injection molding apparatus and injection molding method:US2016009010[P]. 2016-01-14.

[15] 黄茂敬,蒋小军,冯文江,等. 一种塑料注射成型机及其注射杆: CN210257129U[P].2020-04-07.

[16] 蒋小军，黄茂敬，冯文江，等. 波浪螺杆注塑长玻纤增强聚丙烯的探究 [J]. 工程塑料应用 ,2020,48(10).

Research on the direct injection molding process of long glass fibers and the factors affecting its performance

Hu Shijun[1,2], Deng Zuzuo[1,2], Yao Hua[1,2], Shen Jingjing[1,2], Luan Yuliang[1,2]

(1.Yizumi Co. LTD., Foshan 528300, Guangdong, China;
2.Guangdong provincial key laboratory of intelligent molding equipment, Foshan 528300, Guangdong, China)

Abstract: This paper utilizes a direct injection molding machine for long glass fibers to prepare 30% glass fiber reinforced polypropylene (PP) composites. It explores the effects of compatibilizers and lubricating dispersants on the properties of these long glass fiber direct injection molded PP composites. Additionally, the interfacial morphology of the composites is analyzed using scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that compatibilizers still exhibit good performance in direct injection molding of long glass fibers, significantly improving the interfacial interaction between the two phases of the glass fiber reinforced composite, and notably enhancing the mechanical properties of the composite. Compared to systems without compatibilizers, the addition of 3% compatibilizer can increase the tensile strength, flexural strength, and notched impact strength of the glass fiber reinforced PP composite prepared by direct injection molding of long glass fibers by 43%, 52.6%, and 38.3%, respectively. Lubricating dispersants have a certain improvement effect on the notched impact performance of composites prepared by direct injection molding of long glass fibers. Properly increasing the melt temperature helps reduce glass fiber agglomeration, and the mechanical properties of the composite also experience a slight improvement. Furthermore, the mechanical properties of glass fiber reinforced PP composites obtained through direct injection molding of long glass fibers are superior to those of ordinary-grade glass fiber reinforced PP composites currently produced on the market, especially in terms of notched impact strength, which can be more than double that of ordinary-grade glass fiber reinforced PP composites on the market.

Key words: long glass fiber; direct injection molding; fiber reinforcement; mechanical properties; heat deflection temperature

(R-03)