

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.11.025

玻纤增强聚丙烯复合材料研究进展

万炳甲¹, 王明义^{1,2}

[1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 聚威工程塑料(上海)有限公司, 上海 201612]

摘要: 综述了近年来国内外聚丙烯/玻璃纤维(PP/GF)复合材料的研究进展,重点分析了加工工艺、GF含量、GF长度及材料界面结合性对PP/GF复合材料力学性能的影响。通过优化加工工艺、确定GF最佳添加量、提高GF残留长度并改善PP与GF间的相容性可有效提高PP/GF复合材料的力学性能。最后,对PP/GF复合材料的应用前景及发展方向进行了展望。

关键词: 玻璃纤维; 聚丙烯; 加工工艺; 界面结合; 力学性能

中图分类号: TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)11-0139-05

Research Progress of Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites

Wan Bingjia¹, Wang Mingyi^{1,2}

[1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Polystar Engineering Plastics (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201612, China]

Abstract: The research progress of polypropylene/glass fiber (PP/GF) composites at home and abroad in recent years was reviewed. The effects of processing technology, GF content, GF length and interfacial bonding on the mechanical properties of PP/GF composites were emphatically analyzed. The comprehensive properties of PP/GF composites can be effectively improved by optimizing the processing parameters, determining the optimum content of GF, increasing the residual length of GF and improving the compatibility between PP and GF. In the end, the application and development direction of PP/GF composites were prospected.

Keywords: glass fiber; polypropylene; processing technology; interfacial adhesion; mechanical property

随着汽车制造、电子电器等行业的不断升级,聚丙烯(PP)改性复合材料以其轻量化、高性能等特点,成为当前新型材料研究的热点^[1-2]。PP由于密度小、加工性能和热稳定性好、成本较低等诸多优点而被广泛应用于生活和生产的诸多领域;然而,PP又具有低温脆性、耐冲击性能较差等缺点,这在一定程度上限制了其在某些领域的应用^[3-4]。因此,如何对PP进行增强增韧改性,以拓宽其应用领域是当前PP材料研发的重点方向。

玻璃纤维(GF)具有良好的绝缘性、耐热性、优异的力学强度,是一种理想的金属替代材料。从20世纪40年代起,GF就开始被用作塑料增强材料,而GF增强热塑性树脂因其优异的力学强度,良好的耐热、耐蠕变性能而被广泛应用于航空航天、电子通信、汽车轻量化零部件制造等领域^[5-6]。

为了满足不断发展的市场需求,如何对PP/GF复合材料的配方及加工工艺等进行研发和设计极具现实意义。笔者对近年来PP/GF复合材料研发和生产中出现的新配方、新技术、新工艺等进行了总结和分析,重点综述了加工工艺条件、GF含量、长度和界面结合性对PP/GF复合材料力学性能的影响,可为未来新型PP/GF复合材料的发展提供方向性参考。

1 加工工艺对PP/GF复合材料力学性能的影响

物料选择和工艺参数的设定是决定PP/GF复合材料性能最为关键的因素。如何根据不同的生产要求以优化加工压力、时间和温度等工艺参数并分析其对制品的影响,是当前复合材料改性研究的重点^[7-8]。

唐荣华^[9]采用模压成型法制备了长玻璃纤维(LGF)增

基金项目: 国家自然科学基金项目(21206152),中央高校基本业务经费资助项目(222201814023)

通讯作者: 王明义,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事高分子材料成型加工及设备、聚合物超临界流体发泡成型方面的研究工作 E-mail: wangmingyi1892@126.com

收稿日期: 2019-09-01

引用格式: 万炳甲,王明义. 玻纤增强聚丙烯复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2019,47(11): 139-143,155.

Wan Bingjia, Wang Mingyi. Research progress of glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11): 139-143, 155.

强 PP 复合材料 (PP-LGF), 他将模压成型过程细分为预热、模压、成型操作和成型设计四个工艺过程, 并通过正交试验和单因素实验法研究了各工艺参数对 PP-LGF 力学性能的影响。结果表明, 相比工艺参数的统一优化, 对成型工艺过程进行细分, 可优化、分析更多的工艺参数, 避免无关因素的干扰, 增加工艺分析的准确性, 其中成型压力对力学性能影响最大; PP-LGF 预浸渍板的最佳成型工艺参数为: 加热温度 225℃, 保温时间 5 min, 成型压力 8 MPa, 模具温度 80℃, 保压时间 1.5 min, 转移时间 10 s 内, 排气 1 次。

李梦等^[10]以 LGF 增强 PP 复合材料为材料, 利用自行设计带有压缩功能的模具, 基于单因素实验方法, 研究了压缩距离、压缩速度和压缩力对注射压缩成型 (ICM) 试样的 GF 残余长度和力学性能的影响规律。研究表明, GF 残余长度是引起 ICM 试样力学性能变化的主要因素, 随着压缩距离、压缩速度以及压缩力的增加, 试样内的 GF 残余长度均先增大后减小, 力学性能也随之先上升后下降; 与拉伸强度相比, 工艺参数对缺口冲击强度的影响更为明显。与常规注塑成型 (IM) 相比, ICM 可减少充模过程中 GF 的断裂程度, 提高 GF 增强效率和制品的力学性能。

I. G. Lee 等^[11]采用 X 射线衍射和差示扫描量热法 (DSC) 研究了冷却速率对 PP/GF 复合材料力学性能的影响。实验表明, 在较高冷却速率下, 由于 GF 与 PP 的粘结强度较低, PP/GF 复合材料的拉伸强度会下降, 而其断裂韧性、层间剪切强度及冲击强度则随着冷却速率的增加而提高, 这是由于随着冷却速率的提高, PP 结晶度会提高, 其球晶间的粘结强度也越高。

宋清华等^[12]以 PP/GF 复合材料层合板为研究对象, 研究了热压成型工艺参数对复合材料层合板力学性能的影响规律。研究表明, 热压温度、时间和压力的改变均会对 PP/GF 复合材料层合板的力学性能产生一定的影响; 其中热压温度对 PP/GF 复合材料层合板力学性能的影响最大, 其次为热压时间; 当热压温度为 228℃、热压时间为 6 min、热压压力为 1.1 MPa 时, PP/GF 复合材料层合板力学性能最优。

胡章平^[13]基于正交旋转组合试验设计及响应面法, 研究了热模压成型工艺中预热温度、预热时间、保压时间和压力等工艺参数对 PP/LGF 复合材料力学性能的影响。研究表明, 考虑多因素间的交互作用, 得到的优化工艺参数组合可使模压件的力学性能进一步提高, 最优工艺参数组合为: 预热温度 215.5℃, 预热时间 16 min, 压力 3.8 MPa, 保压时间 3 min。

Mi Dashan 等^[14]采用马来酸酐接枝聚丙烯 (PP-g-MAH) 和 β 成核剂 (β -NA) 对 GF 增强等规 PP (iPP/GF) 复合材料进行了改性并研究了多流振动注射成型 (MFVIM) 和传统

注塑成型 (CIM) 对复合材料界面粘合性、GF 取向、结晶形态及力学性能的影响。研究结果表明, 加入 PP-g-MAH 改善了 PP 及 GF 的界面粘合性, 在 MFVIM 多流过程的瞬时高压和剪切作用下, iPP/GF 复合材料中会产生 γ 晶体, 从而形成具有增强表层和增韧芯层的分级结构。因此, 采用 MFVIM 制备的 iPP/GF/ β -NA 复合材料与采用 CIM 制备的 iPP/GF 复合材料相比, 其拉强度提高了 60%, 冲击强度提高了 80%。

He Ying 等^[15]利用自制的浸渍装置制备了 PP/LGF 复合材料并研究了浸渍时间对复合材料力学性能、结晶行为等特性的影响。研究表明, 经浸渍处理后, GF 和 PP 之间有良好的界面相容性; 浸渍时间长短对复合材料的综合性能影响较大; 当浸渍时间为 7.03 s 时, PP/LGF 复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度分别达到 152.9 MPa 及 31.2 kJ/m², 同时材料的刚度较高。

Zhang Daohai 等^[16]采用自制的熔融浸渍设备制备了 PP/LGF 复合材料并研究了注塑温度对复合材料综合性能的影响。热重 (TG) 分析表明, 随着注塑温度的提高, PP/LGF 复合材料的熔体温度增大, 黏度降低; 动态热机械分析 (DMA) 结果显示, 当注塑温度为 290℃时, PP/LGF 复合材料的储能模量最高且损耗因子的峰值最小, 表明此时复合材料的力学性能最佳。

L. Sorrentino 等^[17]基于层间界面强度梯度 (IGIS) 的设计理念, 利用薄膜堆叠技术制备了 GF 织物增强 PP 复合材料, 并通过实验对复合材料的力学性能进行了表征。结果表明, 偶联剂的加入强化了复合材料间界面粘结性, 改善了材料的静态弯曲性能, 但降低了低速冲击阻力以及纤维断裂前的最大负载; 通过 IGIS 设计, 并对界面强度分级, 可使材料兼具高弯曲性能和高冲击性能。

L. Crema 等^[18]以质量分数为 30% 的 LGF 为增强材料, 采用快速热循环成型法 (RHCM) 制备了 PP/LGF 复合材料, 并通过改变模具温度和注射速度研究了 RHCM 对复合材料微观结构及极限拉伸强度的影响。实验表明, 模具温度与注射速度对复合材料的性能有较大影响; 当模具温度由 60℃提高至 120℃, 注射速度由 10 mm/s 增加至 100 mm/s 时, 复合材料的纤维长度减小; 随着注射速度的增加, 材料的极限拉伸应力降低。

2 含量和形态对 PP/GF 复合材料力学性能的影响

2.1 GF 含量对 PP/GF 复合材料力学性能的影响

在 PP/GF 复合材料中, GF 作为增强材料, 当其含量较低时, GF 对复合材料的增强作用不能完全消除其自身所引起的材料应力缺陷, 即复合材料的力学性能不理想。随着 GF 含量增加, GF 间的缠结程度提高, 并形成紧密的三维交

叉骨架结构,可将外界载荷传递至材料的各个区域,从而对复合材料起到良好支撑并缓解外界冲击的作用^[19-20]。当GF含量进一步增加时,GF难以在复合材料中均匀分布,则会导致材料内部缺陷和力学性能下降。因此,GF在复合材料中的添加量存在一个最佳值。

马旭辉等^[21]利用熔融浸渍的方法制备了PP/LGF复合材料,并研究了PP基体流动性、玻纤含量等因素对PP/LGF复合材料力学性能的影响。结果表明,增加PP基体的流动速率和添加适量的增容剂均能显著改善PP/LGF复合材料的力学性能;当玻纤质量分数达到50%时,复合材料的力学性能达到相对较高的水平。

张志坚等^[22]通过将增容剂、抗氧化剂和PP共混得到基体材料,并采用熔融浸渍工艺制备了PP/LGF复合材料,研究了GF含量对PP/LGF力学性能的影响。扫描电子显微镜(SEM)分析表明,当加入质量分数为50%的GF时,PP/LGF复合材料界面的相容性较好,其综合力学性能最优,拉伸强度约为150 MPa,弯曲强度约为260 MPa,冲击强度约为50 kJ/m²。

王波等^[23]在采用熔融浸渍法制备PP/LGF母粒的基础上,将母粒与PP以不同配比共混注塑得到了多种实验样条,并通过实验分析了LGF含量、增容剂及增韧剂对复合材料力学性能的影响。研究表明,增容剂PP-g-MAH的引入增强了PP与LGF界面间的粘结性,加强了其骨架支撑作用;随着LGF含量的增加,纤维分散均匀,骨架支撑效果明显提高,PP/LGF复合材料的刚性也显著提升;当LGF的质量分数为35%时,PP/LGF复合材料的综合力学性能最优,拉伸强度约为120 MPa,弯曲强度约为185 MPa,缺口冲击强度约为35 kJ/m²。

Y. Tanimoto等^[24]研究了GF含量和色素颜料对PP/GF复合材料颜色和弯曲性能的影响。研究表明,当GF质量分数为10%或20%、色素质量分数为2%时,复合材料的弯曲强度均超过60 MPa,弯曲弹性模量均超过1.5 GPa。综合分析表明,当GF质量分数为10%或20%、色素质量分数为2%时,制备得到的PP/GF复合材料有足够的刚度和良好的外观,是非金属卡环齿的理想材料。

陈生超等^[25]制备了不同LGF含量的PP/LGF复合材料注塑试样并研究了LGF含量对PP/LGF复合材料力学性能的影响。实验表明,当LGF长度一定时,随着其含量的增加,PP/LGF复合材料的力学性能得到改善且冲击强度提升较为明显;当LGF质量分数超过30%时,其在制品内会出现大量团聚现象。

魏来等^[26]以无卤阻燃PP/GF复合材料为研究对象,研究了GF含量对复合材料力学性能的影响。研究表明,当

调节复合材料中GF含量时,无卤阻燃PP/GF复合材料的力学性能受到明显影响,但这种影响效果具有一定的局限性;随着GF含量的增加,复合材料的拉伸强度提高并在达到一定值后趋于平缓,其弯曲性能则随着GF含量的增加而提高;当GF质量分数达到20%时,无卤阻燃PP/GF复合材料的拉伸强度为52.58 MPa,断裂伸长率为1.35%,弯曲强度为76.74 MPa,弯曲弹性模量为5.54 GPa,悬臂梁缺口冲击强度为6.54 kJ/m²,UL94燃烧等级为V-0级,综合性能最佳。

2.2 GF长度对PP/GF复合材料力学性能的影响

GF长度也是影响PP/GF复合材料力学性能的重要因素之一,不同长度的GF对树脂性能增强的效果明显不同^[27]。相对于短玻璃纤维(SGF),LGF由于长度更长,复合材料的界面结合力就越大。此外,在PP/LGF复合材料中,LGF保留长度明显更长,有更大的面积去承载外界的冲击应力作用,复合材料的强度会更好,但LGF的长度不能无限制增加,其受到GF加工条件以及工艺要求的限制。

刘国刚等^[28]采用熔体浸渍包覆技术和双螺杆挤出技术分别制备了PP/SGF和PP/LGF两种复合材料,通过实验分析了预浸渍GF长度对复合材料力学性能和微观形貌的影响。研究表明,相对PP/SGF复合材料,PP/LGF复合材料的保留长度更接近临界长度,因此其力学性能更优异;随着LGF长度的增加,复合材料的耐冲击性能和拉伸强度呈先增加后降低的趋势,且当LGF预浸渍长度为8~10 mm、加工温度为280℃时,PP/LGF复合材料的综合力学性能最佳,拉伸强度为117.3 MPa,弯曲弹性模量为8.8 GPa,缺口冲击强度为40.4 kJ/m²。

阳玉球等^[29]采用长度为3 mm的SGF粒料与11 mm的LGF粒料共混制得了PP/GF复合材料,利用电子计算机X射线断层扫描观察了复合材料在常规力学性能实验条件下材料内部的纤维取向,分析了纤维排列和长度对复合材料力学性能的影响。实验表明,当SGF与LGF混合比为1:9时,材料内部的纤维排列明显改善,综合力学性能最优,其拉伸强度为98.19 MPa,弯曲强度为173 MPa,单悬臂梁冲击强度为23 kJ/m²。

播磨一成等^[30]以不同长度的GF粒料增强PP复合材料为研究对象,分析了GF长度对复合材料力学性能的影响。研究表明,注射成型后GF会产生一定的断裂,料粒的长度均会降低一半以上,并且GF残留纤维长度与GF原始长度成正比,同时复合材料的拉伸性能和弯曲强度随着GF长度的增加而提高,并在达到一定数值后保持稳定,而其冲击强度随着GF长度的增加而不断提高。

吴维新等^[31]以长度分别为6,12,24 mm的GF作为增

强材料,通过预混粉体浸渍法制备了多种 PP/GF 复合材料。研究表明,随着 GF 长度增加,复合材料的骨架结构越稳定,其力学性能如拉伸强度、冲击强度均得到明显提升;当 GF 含量较高时,这种提升效果更明显。

肖利群等^[32]分别采用直接挤出、侧喂挤出和长纤维挤出加工工艺制备了三种 GF 短切纱增强 PP 复合材料 PP-30G1, PP-30G2, PP-30G3,同时以 GF 直接纱为增强填料,采用包覆法制得了 GF 增强 PP 复合材料 PP-30G4,研究在不同工艺条件下 GF 长度对复合材料力学性能的影响。研究表明,当 GF 含量一定时,随着 GF 长度的增加,复合材料的断面外观更为粗糙,材料力学性能越好;复合材料 PP-30G4 的拉伸强度、缺口冲击强度等力学性能的增强效果最为显著,其后依次为 PP-30G2, PP-30G3, PP-30G1。

朱春龙等^[33]将抗氧剂、PP-g-MAH 和 GF 以及 PP 等以一定的质量比共混挤出得到 PP/GF 复合材料粒料,然后通过注射成型得到多种试样样条,研究了 GF 长度对复合材料性能的影响。研究表明,相比 LGF,SGF 在一定长度范围内对材料力学性能的增强效果更为显著,且 4.5 mm 的 SGF 保留长径比高于 3 mm 的 SGF,其对复合材料力学性能的增强效果也更为明显。

3 界面粘结性对 PP/GF 复合材料力学性能的影响

PP 是一种饱和的非极性热塑性树脂材料,与较大极性的 GF 间很难形成有效的界面粘结。因此,为了提高复合材料界面间的粘结力,通常对 GF 表面进行处理或者对 PP 进行改性以改善 PP/GF 复合材料的界面粘结性^[34-37]。偶联剂是一种可实现两者界面粘结的改性剂,其分子结构中兼有与 GF 表面的某些基团和非极性的树脂材料反应的两种不同性质的官能团物质,这种特性使得偶联剂在 GF 增强树脂材料中得到广泛的应用。

Song Jiuqiang 等^[38]将经硅烷偶联剂和 PP-g-MAH 处理过的 GF 与 PP 经热压制得 PP/GF 复合材料,并分析了 PP-g-MAH 含量变化对复合材料力学性能的影响。结果表明,经 PP-g-MAH 处理后,PP/GF 复合材料界面之间的结合力明显增强;随着 PP-g-MAH 含量的增加,复合材料表现出较高的力学性能,当 PP-g-MAH 质量分数为 55% 时,复合材料拉伸强度约为 105 MPa,弯曲强度约为 92 MPa,冲击强度接近 110 kJ/m²,综合力学性能最佳。

张志成^[39]在传统界面改性的基础上,采用化学接枝法将 KH550 硅烷偶联剂处理过的纳米 SiO₂ 修饰到 GF 表面,并研究了该方法对所制备的 PP/GF 复合材料力学性能的影响。结果表明,将纳米颗粒通过偶联剂以化学接枝的方法修饰纤维可以增加单根纤维的比表面积和粗糙度,提高纤维与树脂的界面结合强度;纳米 SiO₂ 采用化学接枝方法修饰 GF

表面制备的 GF 增强 PP 复合材料,其拉伸强度和弯曲强度分别提高了 107.4% 和 71.4%,界面剪切强度和界面断裂韧性分别提升了 61.5% 和 1092.6%,实现了界面协同增强增韧。

杨建军等^[40]研究了添加 PP-g-MAH 以及经硅烷偶联剂 KH550 表面处理过的纳米 SiO₂ 对 PP/GF 复合材料力学性能和界面结合力的影响。研究表明,GF 在经 KH550 处理后的纳米 SiO₂ 修饰后,其表面的分散吸附性明显提高;通过在 PP 中添加 PP-g-MAH 并采用纳米 SiO₂ 对 GF 表面进行修饰,复合材料间的界面结合性得到有效的提升,其层间剪切强度、拉伸强度和弯曲强度分别提高了 116.06%,109.14% 和 99.85%。

Luo Guojun 等^[41]以一定含量的 PP-g-MAH 和 β 成核剂 TMB-5 作为 GF 成膜剂 (GFf),将 GFf 处理后的 GF 与加入 PP-g-MAH 的 PP 浸渍制得 PP/GF 复合材料,并研究了基体中 PP-g-MAH 含量和成膜剂 GFf 对复合材料力学性能和界面形态的影响。实验表明,当基体中加入质量分数为 2% 的 PP-g-MAH 时,PP/GF 复合材料的力学性能显著提高,其拉伸强度提高了 100%,冲击强度提高了 178%;随着 PP-g-MAH 含量的继续增加,复合材料的拉伸强度略有提升,但其冲击强度降低。

Zhang Daohai 等^[42]通过自制浸渍装置制备了 PP/LGF 复合材料,研究了不同增容剂对复合材料力学性能和动力学特性的影响。实验表明,甲基丙烯酸缩水甘油酯接枝 PP (PP-g-GMA) 的加入降低了复合材料的力学性能和弹性变形能力;当 PP-g-MAH 的质量分数为 7% 时,PP/LGF 复合材料的综合力学性能最优,缺口冲击强度约为 25 kJ/m²,拉伸强度约为 135 MPa,弯曲强度约为 175 MPa;综合比较,PP-g-MAH 对复合材料的性能改善效果优于 PP-g-GMA。

Cui Linfang 等^[43]利用 PP-g-MAH 接枝 PP 获得 PP 混合物,通过 β 成核剂 TMB-5 处理过的 GF 再增强 PP 混合物,最终得到 PP/GF 复合材料,并研究了 TMB-5 的加入对复合材料力学性能的影响。研究发现,当采用质量分数为 0.1% 的 TMB-5 和质量分数为 20% 的 GF 时,复合材料的力学性能明显提高,相对于纯 PP,其拉伸强度提高了 64.8%;GF 与 TMB-5 能够提高 PP/GF 复合材料界面的结合性,因此对其力学性能有明显增强作用。

吴亚东等^[44]通过 GF 毡与双螺杆挤出增容剂改性 PP 膜的多层叠合,以熔融浸渍法制得了 PP 基 GF 毡增强热塑性塑料 (GMT) 复合材料,并研究了增容剂 PP-g-MAH 和 PP 接枝丙烯酸 (PP-g-AA) 对复合材料力学性能的影响。实验表明,在加入 PP-g-MAH 后,复合材料的冲击性能受到抑制,而其拉伸强度、弯曲强度则明显提升;当 PP-g-MAH 用量为 5% 时,复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量达到最大值,

与未改性复合材料相比分别提高了 80.6% 和 17.1%; 同时, PP-g-AA 可明显提高复合材料的冲击性能,但不利于拉伸与弯曲性能的提高,只有当 PP-g-AA 用量超过 5% 后,拉伸性能才有所提升。

Russo Yadong 等^[45]以 PP/GF 复合材料为研究对象,分析了不同含量 PP-g-MAH 增容剂对复合材料性能的影响。结果表明,PP-g-MAH 的加入提高了复合材料的弯曲弹性模量和弯曲强度;当 PP-g-MAH 质量分数为 2% 与 5% 时,这种增强效果较为明显,复合材料的弯曲弹性模量分别达到 (16.8 ± 0.4) GPa 及 (18.2 ± 0.6) GPa,弯曲强度分别达到 (180 ± 10) MPa 及 (181 ± 8) MPa。

4 结语

PP/GF 复合材料作为一种高性能材料,广泛应用于汽车、仪器仪表、电子电器、运动器材等诸多领域。尽管我国在 PP/GF 复合材料研发方面已经取得了长足发展,但与工业发达国家相比,在高性能、功能化 PP/GF 复合材料的研发方面还存在一定差距,如浸渍成型过程中对 GF 的损伤,GF 取向控制,GF 残存率等问题都有待进一步研究。随着我国经济的高速发展,对高性能、功能化 PP/GF 复合材料的需求会日益增加,而各种高性能、功能化 PP/GF 复合材料的成功开发则会进一步拓宽其应用领域。因此,笔者认为,加大政策支持力度,开发低成本、高性能、多功能化 PP/GF 复合材料在我国显得尤为紧迫,未来 PP/GF 复合材料的研发将重点围绕着开发新型增容剂、创新共混工艺和设备等方向进行。

参考文献

- [1] 安峻莹,等. 工程塑料应用,2016,44(6):132-136.
An Junying, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6): 132-136.
- [2] 赵玉梅. 合成树脂及塑料,2016,33(6):91-94.
Zhao Yumei. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(6):91-94.
- [3] 宋传江,等. 中国塑料,2015,29(3):9-15.
Song Chuanjiang, et al. China Plastics, 2015, 29(3):9-15.
- [4] 胡智清,等. 工程塑料应用,2017,45(6):145-148.
Hu Zhiqing, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6): 145-148.
- [5] 祖群. 玻璃钢/复合材料,2014(9):19-23.
Zu Qun. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9):19-23.
- [6] 马明明,等. 化工新型材料,2016,44(2):38-40.
Ma Mingming, et al. New Chemical Materials, 2016, 44(2):38-40.
- [7] 陈卫. 不同增强体改性聚丙烯复合材料成型技术与工艺的研究[D]. 上海:华东理工大学,2014.
Chen Wei. Study on molding technology and process of polypropylene composites modified by different reinforcement[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2014.
- [8] Youssef A H, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(6):849-862.
- [9] 唐荣华. 长玻璃纤维增强聚丙烯复合材料成型工艺与实验研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
Tang Ronghua. Research on forming process and experiment for long glass fiber reinforce polypropylene composites[D]. Changsha:Hunan University, 2016.
- [10] 李梦,等. 塑料工业,2017(8):76-80,88.
Li Meng, et al. China Plastics Industry, 2017(8):76-80, 88.
- [11] Lee I G, et al. Composite Structures, 2017, 177:28-37.
- [12] 宋清华,等. 复合材料学报,2016(12):2740-2748.
Song Qinghua, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016(12): 2740-2748.
- [13] 胡章平. 长玻璃纤维增强聚丙烯复合材料模压成型工艺研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
Hu Zhangping. Study on forming process of long glass fiber reinforce polypropylene composites[D]. Changsha:Hunan University, 2015.
- [14] Mi Dashan, et al. Polymer Composites, 2017, 38(12):2707-2717.
- [15] He Ying, et al. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2018, doi:10.1002/vnl.21543.
- [16] Zhang Daohai, et al. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2018, doi:10.1002/vnl.21563.
- [17] Sorrentino L, et al. Composites Part B:Engineering, 2015, 76:201-208.
- [18] Crema L, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2018, 107:366-373.
- [19] 张超,等. 塑料工业,2017,45(12):78-82.
Zhang Chao, et al. China Plastics Industry, 2017, 45(12):78-82.
- [20] 何建明,等. 橡塑技术与装备,2014,40(24):29-31.
He Jianming, et al. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2014, 40(24):29-31.
- [21] 马旭辉,等. 塑料科技,2013,41(12):65-68.
Ma Xuhui, et al. Plastics Science and Technology, 2013, 41(12): 65-68.
- [22] 张志坚,等. 工程塑料应用,2013,41(1):35-38.
Zhang Zhijian, et al. Engineering Plastics Application, 2013, 41(1): 35-38.
- [23] 王波,等. 塑料科技,2017,45(10):35-38.
Wang Bo, et al. Plastics Science and Technology, 2017, 45(10):35-38.
- [24] Tanimoto Y, et al. Journal of Prosthodontic Research, 2018, doi: 10.1016/j.jpor.2018.01.002.
- [25] 陈生超,等. 工程塑料应用,2013,41(12):44-48.
Chen Shengchao, et al. Engineering Plastics Application, 2013, 41(12):44-48.
- [26] 魏来,等. 塑料工业,2016,44(8):120-124.
Wei Lai, et al. China Plastics Industry, 2016, 44(8):120-124.
- [27] Kallel T K, et al. Polymer Composites, 2017, DOI:10.1002/pc. 24369.
- [28] 刘国刚,等. 塑料科技,2017,45(10):25-29.
Liu Guogang, et al. Plastics Science and Technology, 2017,

- [41] 郭孝乐,等. 北京服装学院学报,2019(2):1-8.
Guo Xiaole, et al. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology, 2019(2):1-8.
- [42] 方科益,等. 高分子学报,2011(1):55-62.
Fang Keyi, et al. Acta Polymerica Sinica, 2011(1):55-62.
- [43] Salmeia K A. Polymer Degradation and Stability, 2015, 113:119-134.
- [44] Xie Mingchen, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134:1-11.
- [45] 王欣欣,等. 高分子学报,2019(4): 419-428.
Wang Xinxin, et al. Acta Polymerica Sinica, 2019(4): 419-428.
- [46] 赵婉,等. 塑料,2015,44(6):41-44.
Zhao Wan, et al. Plastics, 2015, 44(6):41-44.
- [47] 林涛,等. 塑料科技,2017,45(5):114-118.
Lin Tao, et al. Plastics Science and Technology, 2017, 45(5):114-118.
- [48] Feng Xiaming, et al. Journal of Hazardous Materials, 2016, 320: 252-264.
- [49] Tao Wei. Applied Surface Science, 2018, 456:751-762.
- [50] 刘策. 无卤阻燃玻纤增强尼龙 6 复合材料的制备及性能 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
Liu Ce. Preparation and properties of halogen-free flame retardant glass-fiber reinforced nylon 6 composites[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.
- [51] 肖媛芳,等. 工程塑料应用,2016,44(1):45-48.
Xiao Yuanfang, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):45-48.
- [52] Chen Yinghong, et al. Polymer Degradation & Stability, 2006, 91:2 003-2 013.
- [53] 孙建红,等. 无机盐工业,2019,51(2):1-7.
Sun Jianhong, et al. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(2): 1-7.
- [54] 党力,等. 中国塑料,2018(9):1-8.
Dang Li, et al. China Plastics, 2018(9):1-8.
- [55] Gao Yanshan, et al. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2:10 996-11 016.
- [56] Mateen M, et al. Materials, 2015, 8:5 621-5 646.
- [57] Duquesne S, Thermochimica Acta, 2013, 551:175-183.
- [58] 唐小强,等. 工程塑料应用,2018,46(12):42-47.
Tang Xiaoqiang, et al. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):42-47.
- [59] 陈薪如,等. 化工新型材料,2018(7):151-154, 158.
Chen Xinru, et al. New Chemical Materials, 2018(7):151-154, 158.
- [60] 袁志刚. 二丙基次膦酸铝 / 三聚氰胺及其盐 / 纳米氢氧化镁对尼龙 6 的阻燃作用研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
Yuan Zhigang. Synergistic flame retardancy of aluminium dipropylphosphinate / melamine and its salts / nanometer magnesium hydroxide in polyamid 6[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014.
- [61] Li Maolin. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133:10.1002 / app.42932.
- [62] He Wentao. Polymer Degradation and Stability, 2017, 144:442-453.
- [63] Li Lili, et al. Polymer composites, 2015, 36:892-896.
-
- (上接第 143 页)
- 45(10):25-29.
- [29] 阳玉球,等. 产业用纺织品,2017,35(8):21-25.
Yang Yuqiu, et al. Technical Textiles, 2017, 35(8):21-25.
- [30] 播磨一成,等. 产业用纺织品,2017,35(6):14-20.
Issei Harima, et al. Technical Textiles, 2017, 35(6):14-20.
- [31] 吴维新,等. 工程塑料应用,2013,41(1):23-26.
Wu Weixin, et al. Engineering Plastics Application, 2013, 41(1):23-26.
- [32] 肖利群,等. 塑料工业,2015(8):65-69.
Xiao Liqun, et al. China Plastics Industry, 2015(8):65-69.
- [33] 朱春龙,等. 现代塑料加工应用,2017(3):29-31.
Zhu Chunlong, et al. Modern Plastics Processing and Application, 2017(3):29-31.
- [34] 彭文理,等. 工程塑料应用,2017,45(11):131-135.
Peng Wenli, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(11):131-135.
- [35] 李敬媛,等. 中国塑料,2013,27(12):47-51.
Li Jingyuan, et al. China Plastics, 2013, 27(12):47-51.
- [36] 崔晓倩,等. 塑料工业,2016,44(4):106-110.
Cui Xiaoqian, et al. China Plastics Industry, 2016, 44(4):106-110.
- [37] Guo Jianbing, et al. Advanced Materials Research, 2013, 652-654:93-97.
- [38] Song Jiuqiang, et al. Polymers and Polymer Composites, 2017, 25(1):23-28.
- [39] 张志成. 玻璃纤维织物增强聚丙烯复合材料浸渍机理及界面结合性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
Zhang Zhicheng. Research on the impregnation mechanism of glass fabric / polypropylene composites and interface bonding performance[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [40] 杨建军,等. 玻璃钢 / 复合材料,2016(9):49-54.
Yang Jianjun, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2016(9):49-54.
- [41] Luo Guojun, et al. Composites Part B:Engineering, 2017, 111:190-199.
- [42] Zhang Daohai, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(5):643-655.
- [43] Cui Linfang, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(5):doi:10.1002 / app.45768.
- [44] 吴亚东,等. 工程塑料应用,2017,45(6):1-6.
Wu Yadong, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6): 1-6.
- [45] Russo P, et al. Polymer Composites, 2016, 37(8):2 452-2 459.