

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.026

连续纤维增强热塑性复合材料嵌件注射成型研究进展

郑津烁, 何继敏, 张文武, 张禹, 周麒

(北京化工大学塑料机械及塑料工程研究所, 北京 100029)

摘要: 连续纤维增强热塑性复合材料的嵌件注射成型工艺通过结合连续和非连续纤维增强热塑性复合材料的优势,提升了产品的力学性能和生产效率,广泛应用于航空航天和新能源汽车领域。介绍了连续纤维增强热塑性复合材料嵌件注射成型工艺特点及应用,综述了材料体系、界面改性、工艺参数对嵌件注射成型制件界面结合性能和力学性能的影响。最后总结了嵌件注射成型复合材料目前研究存在的问题以及提升界面性能的方法,并对未来发展趋势进行了展望。

关键词: 嵌件注射成型;连续纤维增强热塑性复合材料;界面改性;性能;进展

中图分类号: TQ315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0178-05

Research progress on insert injection molding of continuous fiber reinforced thermoplastic composites

ZHENG Jinshuo, HE Jimin, ZHANG Wenwu, ZHANG Yu, ZHOU Qi

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

Abstract: The insert injection molding process of continuous fiber reinforced thermoplastic composites enhances the mechanical properties and production efficiency of products by combining the advantages of continuous and discontinuous fiber reinforced thermoplastic composites. It is widely used in the aerospace and new energy vehicle sectors. The characteristics and applications of the insert injection molding process for continuous fiber reinforced thermoplastic composites were introduced, and the effects of material system, interface modification, and process parameters on the interface bonding performances and mechanical properties of insert injection molded parts were summarized. Finally, the current research problems and methods to improve the interfacial properties of insert injection molded composites were summarized, and the future development trends were discussed.

Keywords: insert injection molding; continuous fiber reinforced thermoplastic composites; interface modification; performance; progress

随着人们对环保越来越重视,新型高强度轻质复合材料的使用价值也越来越高。在航空航天、新能源汽车领域,零件的轻量化能很大程度减少能源消耗、降低废气排放,所以成本低廉的复合材料成型技术值得进一步研究。连续纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有高强度、高韧性、高抗冲击性等力学性能特点^[1],可以替换部分金属结构件,从而减轻产品质量,减少能耗。同时,热塑性树脂拥有良好的成型性能和可回收利用的特点,符合“节能减排”“绿色环保”的发展政策^[2],有助于“双碳”目标的实现,市场应用前景广阔。同时,随着高性能纤维增强复合材料在交通、能源、生活等领域的不断应用,其已经开始从简单的非承力配件向要求更为复杂的结构件及装配件发展。因此,开展新型连续纤维增强热塑性复合材料成型工艺,以满足复杂结构和高承载性能的

需求是纤维增强复合材料领域当前一大发展趋势。

顺应此发展趋势,嵌件注射成型技术表现出的成型周期短、加工效率高、可成型结构多样制品以及可实现自动化生产等优势,为CFRTP的应用提供了广阔前景。因此开展此成型工艺的研究具有重要意义。笔者通过介绍嵌件注射成型工艺特点及相关领域应用,重点分析嵌件注射成型的材料体系、界面处理、工艺参数等对制品界面结合性能及力学性能的影响,综述嵌件注射成型CFRTP的研究进展。

1 嵌件注射成型工艺特点及应用

纤维增强热塑性复合材料分类方式很多,按纤维增强方式有短纤维增强热塑性复合材料(SFRTP)、长纤维增强热塑性复合材料(LFRTP)和CFRTP 3种基本形式。CFRTP成型工艺包括模压成型、树脂传递模塑成型、自动铺放技术等^[3],

通信作者: 何继敏,博士,副教授,硕士生导师,主要从事超高分子量聚乙烯注射成型及聚丙烯、聚乳酸、PET等挤出发泡、注塑发泡、薄膜吹塑成型研究
收稿日期: 2024-07-04

引用格式: 郑津烁,何继敏,张文武,等.连续纤维增强热塑性复合材料嵌件注射成型研究进展[J].工程塑料应用,2024,52(9):178-182.

ZHENG Jinshuo, HE Jimin, ZHANG Wenwu, et al. Research progress on insert injection molding of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 178-182.

其成型制品具有高的强度和韧性,但较难成型结构复杂的零部件。SFRTTP的成型工艺有注塑、模压、喷射成型等^[4],其加工成型较容易,可以成型复杂结构制品,但成型的制品力学性能较低。随着纤维增强热塑性复合材料的应用日益广泛,某一种单独的成型工艺已经不能满足各领域需求,所以笔者介绍的嵌件注射成型技术是将模压与注射成型相结合的新型成型工艺,其工艺过程如图1所示^[5]。首先是嵌件注射成型所需材料的准备,即对注射用树脂进行增强改性以及对连续纤维嵌件进行表面处理;然后,将连续纤维嵌件嵌入注塑模腔中,注塑机向嵌件表面注射改性树脂熔体用于成型定位孔、加强筋、包覆等复杂功能附件^[6];最后,合模、冷却固化得到CFRTP一体化复杂构件。

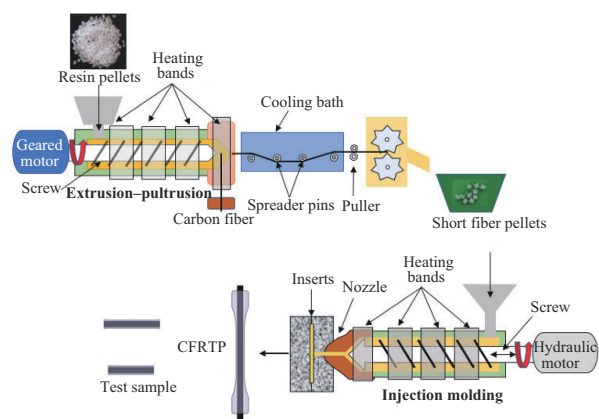


图1 CFRTP嵌件注射成型工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of insert injection molding process of CFRTP

与传统成型工艺相比,嵌件注射成型工艺能够充分利用CFRTP板材的优良性能,确保制品在主承力部位的强度、刚度和抗冲击性。同时,该工艺具备高自动化的注射成型优势,能迅速成型复杂功能附件的多层复合结构,满足功能、装配和设计的需求,有效解决了热塑性复合板材难以成型复杂构件的问题^[7]。

嵌件注射成型广泛适用于各种高性能复合材料制件的制造,特别是在对轻量化和强度有要求的领域。例如,在飞机的机翼、机身结构和内饰部件等方面,可以使制品轻量化和并提升制品的耐腐蚀特性;在汽车应用领域,用于制造仪表盘、门面板和座椅结构部件,以及车身部件、引擎罩和保险杠等外部部件,从而提高耐用性和减轻质量,降低燃油消耗;用于无人机机身和结构件,增强其抗冲击性与耐腐蚀性,也可用于制造手机外壳和其他电子设备的外部保护壳等。

目前通过嵌件注射成型制造的产品逐步增多,克劳斯玛菲开发的FiberForm工艺将有机板材热成型和注射成型融合到一个过程中^[8],可生产出轻量化程度较高且同时具有高强度的纤维增强型塑料部件,为宝马X车型等生产内饰和外部零部件。德国ENGEL公司研发了organomelt工艺^[9],该工艺使用热塑性织物和单向玻璃纤维(GF)或碳纤维(CF)增强的热塑性纤维复合预浸料作为嵌件。经过加热后,这些嵌件被

放入注塑模具中,利用注射成型技术直接成型加强肋或装配件等部件。该工艺已在戴姆勒和其他汽车产品的前端支架生产中得到大规模应用。

2 材料体系对嵌件注射成型CFRTP性能的影响

2.1 材料体系分类及特点

材料体系的选择对纤维增强热塑性复合材料界面性能有显著影响,其中嵌件注塑成型制品的材料主要包括聚合物基体(热塑性树脂)、纤维增强体(嵌件)等。

热塑性树脂在CFRTP中主要起通过剪切传递载荷以及承受纤维局部屈服应力的作用^[10]。例如聚苯硫醚(PPS)、聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酰亚胺(PEI)等高性能半结晶聚合物具备优异的热稳定性和力学性能,已广泛应用于航空及医疗等领域;热塑性工程塑料聚酰胺(PA)等具备较高耐磨性,同时具有良好的强度、韧性及生物相容性,也已广泛应用于齿轮、医用配件的生产^[11];除此之外,聚乳酸(PLA)^[12]等环保可降解的热塑性树脂也开始应用到需要生物降解的领域。

纤维增强热塑性复合材料常用增强纤维类型主要为有机纤维、无机纤维(CF和GF)以及天然植物纤维等。有机聚合物纤维作增强体嵌件并注塑同种聚合物基体材料时,所获得的复合材料称为单聚合物复合材料(SPC^[13])。其中,超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维因其具备轻质高强且化学性质稳定等优点,在航空航天、军事防护、海洋工程及纺织等领域得到广泛的应用^[14]。GF具有较高的比强度、优良的稳定性、绝缘耐磨损以及较低的价格^[15-16]。CF增强热塑性复合材料具有更高的比强度,同时具有毒性低、可回收、无腐蚀性、耐磨性好等特点。连续CF和连续GF作为嵌件注射成型的增强体(嵌件),所增强的热塑性复合材料具有轻质高强、模量高、耐高温、耐磨性好等特点^[17-18],具有广阔的发展前景。

天然(植物)纤维增强复合材料密度小,具有可回收、无毒无味、低VOC排放等特点^[19],且加工能耗少,契合绿色环保的要求,是聚合物基复合材料中重要的增强材料之一。

2.2 均质与异质材料体系的嵌件注射成型

嵌件注射成型所选的聚合物树脂基体对于嵌件注射成型用嵌件与注塑用树脂之间的界面结合性能至关重要。嵌件基体树脂与注塑用树脂相容性越好,界面结合性能越高。其中,均质材料的嵌件注射成型是指嵌件基体树脂与注塑用树脂为同种树脂,异质材料成型即使用不同种树脂材料。

在均质材料成型过程中,因使用相同树脂材料,不需要考虑树脂之间的相容性,只需要提高两种树脂在界面处的互相扩散能力。相对于均质材料的成型,当嵌件的树脂基体和注塑用树脂基体种类不同时,两种非均质树脂之间的相容性是影响最终制品界面结合性能的主要原因。

Wei等^[20]以连续CF/PA6为嵌件,分别注塑纤维体积分数为30%的短切GF(SGF)增强PA66(GF30/PA66)和纤维体积分数为30%的SGF增强PA6(GF30/PA6)。研究得出,在特定工艺参数下PA6/PA66界面的I型断裂能和II型断裂能分别比PA6/PA6界面高37.93%和100.87%,界面剪切强度比

PA6/PA6界面低21.18%。

Jiang等^[21]以连续CF增强PEEK基复合材料为嵌件,注射短CF增强PEEK以制备CFRTP试件。分析得出,试件的界面结合性能主要受CF含量、界面温度和纤维取向的影响。实验结果表明,通过调整材料和工艺参数,优化纤维钉扎效果,试件的层间剪切强度可提高32%。

符亮等^[22]采用嵌件注射成型技术制备连续GF增强聚丙烯(PP)预制件与短GF增强PA66复合材料平板试件,通过提高模具、嵌件及注射树脂基体的温度来提高复合材料界面温度,同时增大保压压力,实现PP和PA66两种不同类型树脂的融合共混,形成有效的界面互融区,提高了试件的弯曲强度等力学性能。

3 界面改性对嵌件注射成型CFRTP性能的影响

CFRTP由骨架材料连续纤维嵌件和注塑用树脂基体两类材料体系构成,两者之间的界面特性对于CFRTP的性能具有重要影响。目前研究发现,复合材料界面结合过程中,界面处的树脂融合、机械锁合和纤维钉扎^[23]等界面结合机制是影响复合材料界面性能的主要原因。良好的界面结合性能有助于载荷从外部树脂基体向连续纤维嵌件的有效转移。目前,界面改性研究主要聚焦于两个方面:一是对连续纤维嵌件进行表面改性以提高其表面粗糙度和表面极性,增加与注塑用树脂基体的融合及机械锁合;二是对注塑用树脂基体改性以改善连续纤维和树脂之间的浸润性^[24-25]。

3.1 连续纤维嵌件表面改性

在CFRTP中,理想的状态是基体树脂可以作为传递载荷的媒介有效地将载荷传递到连续纤维嵌件,由连续纤维嵌件分散载荷,从而使复合材料表现出更高的力学性能。但例如CF和GF等连续纤维,表面光滑且呈化学惰性,以至成型复合材料中嵌件与注射用树脂之间界面黏结较差,在界面处产生力学滑移,影响应力的传递,大大降低复合材料力学性能^[26]。为提高嵌件与基体树脂之间的界面结合性能,目前大多采用物理及化学处理方式对嵌件表面进行改性,通过提高嵌件表面粗糙度和表面极性来增强界面结合效果,从而提高制品性能。

Ding等^[27]以连续CF增强复合材料为嵌件,以SGF/PA6为注塑材料,采用了3种不同的表面预处理方法(表面硅化、等离子体处理和CO₂激光烧蚀)对嵌件表面进行处理,制得复合材料样件。通过单搭接剪切试验对预处理效果进行分析,得出以下结果:表面硅烷化导致热固性复合材料表面极性官能团的微弱增加,进而导致复合材料界面结合强度的微弱增加。与等离子体预处理相比,CO₂激光烧蚀可以获得最高的剪切结合强度,因为注入的熔融聚合物与连续CF嵌件之间形成了机械锁链,有利于提高界面黏接强度。

Tang等^[28]以连续GF增强PP复合材料层压板为嵌件,注射SGF/PP,为提高复合材料的界面强度,对连续GF增强PP复合材料层压板进行了等离子体处理。通过实验和分子动力学(MD)模拟研究了等离子体处理的影响。结果表明,等

离子体处理能提高复合材料的界面强度,其原因是产生极性基团。MD模拟量化了各因素对界面强度提高的贡献。发现产生的极性官能团能促进界面的扩散系数。此外,从界面处产生相互作用能的观点来看,引入 α -NH₂更可能提高键合强度。

Akpınar等^[29]以GF/PP板材为嵌件,注射SGF/PP材料,制备T型接头试件。通过成型前在GF/PP基板上钻锥形孔来提高界面结合强度,增强了界面处的机械锁合作用,在一定孔径范围内,多个孔有助于改善界面黏接效果。并且,经过预热的锥形孔复合材料的嵌件注射成型可使界面结合强度提高60%。同样,基材的预热在短时间内改善了界面附着力,但延长预热时间会导致黏合质量下降。

Liu等^[30]以连续GF为嵌件,SGF/PP为注塑材料,制得成型制件。使用一种新型两性性聚丙烯酸酯基水性涂料上浆剂对连续GF进行表面改性。首先将商用连续GF在超声波浴中用丙酮超声洗涤3 h,然后在100℃的真空烘箱中干燥6 h,得到裸露的GF。随后将裸露的纤维浸泡在上述上浆剂中10 s,并在100℃的真空干燥箱中干燥3 h,得到上浆的GF。分析得出,经过上浆处理后的GF表面的表面能从典型原始GF表面的74.51 mJ/m²降低到56.43 mJ/m²,接近原始PP的30.2 mJ/m²,促进了GF与PP的界面相容性。此外,单剪切试验评估的GF与PP的界面剪切强度从8.34 MPa(裸露GF)和11.14 MPa(商用GF)增加到17.62 MPa。值得注意的是,制备了一系列尺寸较小的GF/PP复合材料,制件的拉伸和弯曲性能都得到了提升。

3.2 注塑用树脂基体改性

另一方面,注塑用树脂基体的性能对CFRTP的性能至关重要。为进一步提高CFRTP性能,需对注塑用树脂进行改性处理,改善其流动性以及热膨胀系数(CTE),增强其与嵌件的界面结合,改善成型制品外观质量,提高制品力学性能。

赵子岳^[31]以连续CF增强聚芳醚酮(PAEK)复合材料(CCF-PAEK)为增强体预制件,采用嵌件注射成型工艺,分别注塑PEEK和短切CF(SCF)增强PEEK。研究发现,SCF的添加,提高了PEEK树脂基体强度,改变树脂流动性能,可以进一步提高模具及熔体温度,增强SCF在树脂基体互熔区的钉扎效应,增强界面剪切强度。

陈杨^[32]采用嵌件注射成型工艺,以网格状硬质连续GF/PP混编预浸料为嵌件,注射高流动性PP树脂,制备CFRTP试样。为进一步提高制件力学性能,在基体树脂颗粒中添加增容剂马来酸酐接枝PP(PP-g-MAH)改性,增容剂的添加增强了注射树脂与嵌件树脂之间的界面结合,试样的拉伸强度和弯曲强度都有所改善。

Deng等^[33]以编织CF(WCF)织物和PEEK树脂热压制成的复合层压板为嵌件,注射PEEK或SCF质量分数为30%的SCF/PEEK熔体成型双层板和加筋方盒制件。通过模拟和实验方法,研究CFRTP嵌件对注射成型制品翘曲的影响,发现注射树脂与各向异性嵌件之间的CTE差异成为嵌件注射

残余应力的来源,翘曲倾向于向注射件侧发展。在熔融塑料熔体中加入 SCF 后,注射熔体的 CTE 由 $100 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 降为 $40.1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,更接近于嵌件,减小了成型双层板的 U 形翘曲。因此选择具有相似收缩性能的材料组合是至关重要的。

4 工艺参数对 CFRTP 性能的影响

除材料体系及界面改性外,嵌件注射成型工艺参数也对 CFRTP 制品性能影响显著,提高嵌件预热温度和模具温度可改善界面性能,增加熔体温度和保压压力有利于提高复合材料界面性能。

Budiyantoro 等^[5]以单向连续 CF 作为嵌件,以 SCF 增强 PP 为注塑材料成型制品。研究了单向纤维的纤维预紧力、注射压力、熔融温度以及用于熔融和注射混合颗粒的背压对复合材料性能的影响。结果表明,熔融温度和纤维预紧力对成型制品的冲击强度和弯曲强度有显著影响。

Karakaya 等^[34]以环氧树脂基连续 GF 及 CF 增强复合材料为嵌件,以 PA6 为注塑材料。研究了增强纤维类型(CF/GF)、成型过程中的模具温度($30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)和复合材料表面粗糙度对复合材料界面黏结性能的影响。研究结果表明,高的表面粗糙度及更高的模具温度($80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)和采用 CF 增强,使复合材料拥有更好的界面黏结性能。

石武平^[35]以 U 型连续 GF 增强 PP 层合板为嵌件,注射 SGF/PP 成型加筋肋,研究嵌件温度、保压压力、熔体温度等对制品翘曲变形等影响,得到最优参数组合。并研究了嵌件温度、模具温度对制品层间剪切强度的影响,发现适当的升温可以提高制品的层间剪切强度,过高的温度则会降低层间剪切强度并影响表面形貌。

Fu 等^[36]研究了嵌件注射成型过程中嵌件预热温度对复合材料界面性能的影响。研究得出,随着预热温度的升高,嵌件的表面粗糙度增大,导致键合界面的机械连锁增强。

Paramasivam 等^[37]以 GF/PP 板材为嵌件,注射 SGF/PP 成型试件,研究了预热对嵌件注射成型复合材料力学性能的影响。注射合模前用热风枪在模具中加热嵌件,与未预热样品相比,预热样品的层间剪切强度提高了 17%,面内抗拉强度和抗折强度分别提高 15% 和 221%,并且预热样品的 I 型和 II 型层间扩展断裂韧性分别比未预热试样提高 655% 和 44%。

李福海^[38]选用连续单向 GF 预浸带为嵌件,注射质量分数 30% 的 SGF 增强 PA6 复合材料粒料,使用嵌件注射成型方法制备了不同工艺参数条件下的复合材料试件。研究表明,熔体温度较低时,粒料在塑化阶段会产生径向和轴向的温差,促使制品内部应力增加而发生翘曲变形。注射压力过大和保压时间过长会影响注塑充填时熔体的分子取向,造成嵌件制品内应力增加而发生翘曲变形。在较低熔体温度条件下,注射速度越大嵌件制品的翘曲越大,但是当熔体温度升高后,注射速度的升高可减少制品的翘曲变形。

Miao 等^[39]选用连续单向 CF 预浸料为嵌件,以 PA6 为注塑材料,制备单搭接剪切试验试件。研究表明,提高注射温度和预热温度对复合材料界面结合强度的提高有显著影响,

而注射速度对结合强度的提高影响不大。分子动力学模拟结果表明,注射过程中的高温高压对共固化界面结合强度的增强作用较弱,而共固化界面的化学反应是增强的主要原因,界面上发生的化学反应越多,界面结合越强。

Ohishi 等^[40]以连续 GF 为嵌件,注射 PA 树脂,采用陶瓷加热元件远红外加热器、金属加热元件中红外加热器和碳加热元件中红外加热器 3 种加热系统分别对 GF/PA6 板材进行预加热,研究成型过程中最有效的加热方法。结果表明,最有效的加热系统是带有中红外射线的金属加热器,用于预热混合成型中 CF/PA6 热塑性复合材料。

5 结语

目前,在嵌件注射成型工艺参数对 CFRTP 力学性能及界面性能影响方面已有了大量研究,但 CFRTP 中连续纤维表面和聚合物树脂分子链间的界面层性质特殊,因此如何提高异质树脂材料界面结合性能是嵌件注射成型制品的主要瓶颈。并且,嵌件注射成型工艺对注塑模具设计要求较高,模具加工困难也是制约该技术发展的主要原因之一。因此,在 CFRTP 未来的研究中,要进一步探索异质树脂材料界面结合机制,完善界面作用理论,探索新的连续纤维界面改性方法,或采用多种改性方法结合的方式,减小成型过程对连续纤维本体的损伤,提高连续纤维嵌件与树脂基体间的界面结合强度。另一方面,需要完善嵌件注射成型模具的创新设计,可以将仿真模拟与试验相结合,节省试验成本,同时获得更多界面信息。

参考文献

- [1] 张婷.航空制造技术,2013(15):32-35.
ZHANG Ting. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(15): 32-35.
- [2] 冯冰涛,等.中国塑料,2022,36(7):165-173.
FENG Bingtao, et al. China Plastics, 2022, 36(7): 165-173.
- [3] 李源,等.现代塑料加工应用,2022(5):52-55.
LI Yuan, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2022 (5): 52-55.
- [4] 赵颖志,等.工程塑料应用,2023,51(8):166-171.
ZHAO Yingzhi, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51 (8): 166-171.
- [5] BUDIYANTORO C, et al. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 5(4). DOI:10.3390/jmmp5040132.
- [6] THIJS D, et al. Advances in Polymer Processing 2020, 2020: 291-300.
- [7] 郑兵.编织碳纤维增强热塑性复合材料热压-注塑整体化成形关键技术[D].武汉:华中科技大学,2021.
ZHENG Bing. Key technologies of thermoforming-injection integrated forming process for woven carbon fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [8] 陈东,等.上海塑料,2019(1):46-51.
CHEN Dong, et al. Shanghai Plastics, 2019(1): 46-51.

- [9] 王昌斌,等.汽车文摘,2020(9):12-16.
WANG Changbin, et al. Automotive Digest, 2020(9): 12-16.
- [10] 龚友坤,等.河北工业大学学报,2020(2):1-26.
GONG Youkun, et al. Journal of Hebei University of Technology, 2020(2):1-26.
- [11] 张正,等.中国塑料,2024,38(5):113-119.
ZHANG Zheng, et al. China Plastics, 2024, 38(5):113-119.
- [12] 刘丰颀,等.塑料科技,2024,52(5):156-160.
LIU Fengjie, et al. Plastics Science and Technology, 2024, 52(5): 156-160.
- [13] 叶卓然,等.复合材料学报,2022,39(9):4 286-4 309.
YE Zhuoran, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 286-4 309.
- [14] 吕佳滨,等.高科技纤维与应用,2024,49(1):13-16.
LYU Jiabin, et al. Hi-Tech Fiber and Application, 2024, 49(1): 13-16.
- [15] PEREIRA A, et al. Materials, 2021, 14(23). DOI: 10.3390/ma14237299.
- [16] RAY K, et al. Materials Today: Proceedings, 2020, 33(8): 5 273-5 278.
- [17] 李奇辉,等.价值工程,2016,35(17):113-115.
LI Qihui, et al. Value Engineering, 2016, 35 (17):113-115.
- [18] 李威,等.中国光学,2011,4(3):201-212.
LI Wei, et al. Chinese Optics, 2011, 4(3):201-212.
- [19] 王翠翠,等.林业科学,2021,57(9):168-180.
WANG Cuicui, et al. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(9): 168-180.
- [20] WEI J L, et al. Composite Structures, 2023, 309. DOI: 10.3390/ma14237299.
- [21] JIANG W, et al. Polymer Testing, 2022, 108:107-119.
- [22] 符亮,等.中南大学学报(自然科学版),2019,50(5):1 075-1 081.
FU Liang, et al. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(5):1 075-1 081.
- [23] VALVERDE M. An improved description of the bonding and consolidation for overmoulded thermoplastic composite ribbed plates[D].Bristol:University of Bristol, 2021.
- [24] 李美琪,等.材料导报,2023,37(20):229-240.
LI Meiqi, et al. Materials Reports, 2023, 37(20):229-240.
- [25] 邓海,等.吉林大学学报(工学版),2023(1):18-30.
DENG Hai, et al. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2023(1):18-30.
- [26] 曹建凡,等.复合材料学报,2023,40(3):1 229-1 247.
CAO Jianfan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1 229-1 247.
- [27] DING Y D, et al. Polymer Composites, 2022, 43(2):1 038-1 047.
- [28] TANG H P, et al. Polymer Composites, 2022, 43(3):1 799-1 808.
- [29] AKPINAR S, et al. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(10): 3 206-3 217.
- [30] LIU W, et al. Composites Part B: Engineering, 2022, 241. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110029.
- [31] 赵子岳.碳纤维增强聚芳醚酮/聚醚醚酮热塑性复合材料二次成型工艺研究[D].上海:东华大学,2023.
ZHAO Ziyue. Overmolding process of carbon fiber reinforced poly aryl ether ketone/polyether ether ether ketone thermoplastic composites[D]. Shanghai:Donghua University, 2023.
- [32] 陈杨.连续纤维增强复合材料模内包覆注塑成型的研究[D].北京:北京化工大学,2022.
CHEN Yang. Research on in-mold overmolding of continuous fiber reinforced composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [33] DENG T, et al. Thin-Walled Structures, 2022, 180. DOI:10.1016/j.tws.2022.109804.
- [34] KARAKAYA N, et al. Composites: Part A, Applied Science & Manufacturing, 2020, 131. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105771.
- [35] 石武平.纤维增强热塑性复合构件热压—注塑工艺及力学性能研究[D].长沙:中南大学,2022.
SHI Wuping. Investigation on the hot pressing-injection process and mechanical properties of fiber reinforced thermoplastic composite components[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [36] FU L, et al. Polymer Testing, 2022, 105. DOI:10.1016/j.polymertesting.2021.107425.
- [37] PARAMASIVAM A, et al. Journal of Composite Materials, 2021, 55(29):4 387-4 397.
- [38] 李福海.连续纤维增强尼龙6复合材料嵌件式注射成型方法研究[D].北京:北京化工大学,2023.
LI Fuhai. Research on insert injection molding method of continuous fiber reinforced nylon 6 composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [39] MIAO T Y, et al. Polymers, 2023, 15(13). DOI: 10.3390/polym15132879.
- [40] OHISHI M, et al. Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2017, 7(1):1-7.