

引用格式: 霍红宇, 姚鑫, 高亮, 等. 高性能连续纤维增强热塑性预浸料及复合材料制备工艺研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(3): 44-53.

HUO Hongyu, YAO Xin, GAO Liang, et al. Research progress in preparation technology of high performance continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg and its composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(3): 44-53.

高性能连续纤维增强热塑性预浸料 及复合材料制备工艺研究进展

Research progress in preparation technology of
high performance continuous fiber reinforced
thermoplastic prepreg and its composites

霍红宇, 姚鑫, 高亮, 周典瑞, 吴天宇, 张宝艳*

(中国航空制造技术研究院 复合材料技术中心, 北京 101300)

HUO Hongyu, YAO Xin, GAO Liang, ZHOU Dianrui,

WU Tianyu, ZHANG Baoyan*

(AVIC Manufacturing Technology Institute Composite

Technology Center, Beijing 101300, China)

摘要: 热塑性复合材料具备耐疲劳性能优异、成型周期短、可二次加工、可焊接、无储存条件限制等优势, 为更好地实现热塑性复合材料的工程化制备, 满足航空航天、轨道交通等领域的应用需求, 研究热塑性预浸料的制备以及成型方式具有重要意义。本文对连续纤维增强热塑性预浸料的制备工艺方法进行了详细介绍, 包括溶液浸渍法、熔融浸渍法、薄膜层叠法、粉末浸渍法、悬浮热熔法和纤维混编法等工艺, 同时对热塑性复合材料成型工艺方法进行了重点论述, 包括模压成型、缠绕成型、自动铺放成型、原位固结成型、3D 打印成型等方法, 针对每种预浸料制备与成型工艺特点梳理了工程化应用的可行性, 最后对热塑性复合材料的未来趋势进行了展望, 并给出了发展建议。

关键词: 热塑性预浸料; 制备工艺; 悬浮热熔法; 成型工艺; 自动铺放

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000874

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)03-0044-10

Abstract: The thermoplastic composites have advantages in excellent fatigue resistance, short forming cycle, secondary processing, weldable and no storage condition restrictions, it is significant to study the preparation and forming method of thermoplastic prepreg to realize the engineering preparation of thermoplastic composites and meet the application requirements of aerospace, rail transit, and other fields. In this paper, the preparation process of continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg is introduced in detail, including solution impregnation, melt impregnation, film lamination, powder impregnation, suspension hot melt, and fiber mixing. At the same time, the thermoplastic composite molding process is emphatically discussed, including hot pressing molding, winding molding, automatic laying molding, *in-situ* consolidation molding and 3D printing molding. Meanwhile, the feasibility of the engineering application is sorted out according to the characteristics of each prepreg preparation and molding process. Finally, the future trends of thermoplastic composite are prospected, and development suggestions are given.

Key words: thermoplastic prepreg; preparation process; suspension hot melt method; molding process; automatic placement

树脂基复合材料在航空航天等装备领域应用广泛, 其用量已成为衡量装备先进性的重要标志^[1]。先进树脂基复合材料具有比强度高、比模量高、可设计性强、耐腐蚀及易于整体成型等特点, 充分满足轻量

化、高性能化、长寿命等需求。以航空领域为例, 国外先进战机 F-22 中复合材料用量已达结构质量的 24%, 直升机 RAH-66, NH-90 中高达 90%, 复合材料的使用显著提高了飞机结构的制造效率。

树脂基复合材料按树脂基体的不同可分为热固性复合材料和热塑性复合材料两种,相比于热固性复合材料,热塑性复合材料具有较高的抗冲击性能、耐疲劳性能、工艺周期短、可焊接、可二次加工、无储存条件限制等优势^[2-4]。近年来,在欧美航空制造企业推动下,热塑性复合材料及自动化制造应用技术快速发展。F-22 战斗机中各类舱门(弹舱门、电子设备舱门等)均使用牌号 APC-2 的碳纤维/聚醚醚酮(PEEK)热塑性复合材料,占结构总质量的 0.4%。此外,热塑性复合材料在 F/A-18 机翼壁板、F-117A 尾翼、C-130 机身壁板、法国 Rafale 机身蒙皮部位中得到应用。综合考虑未来装备制造全生命周期管理的因素(包括材料利用率、贮存及使用效能、制造效率、可修复性),热塑性复合材料的应用潜力巨大^[5-6]。

影响热塑性复合材料性能的关键因素在于热塑性预浸料的制备与成型工艺的配合,根据不同热塑性树脂的特点选用不同的预浸料制备工艺路线进行制备,根据结构件的研制要求再选择合适的成型工艺进行结构件的制备^[7-10]。连续纤维增强热塑性预浸料通常采用碳纤维、玻璃纤维等增强体与不同的高性能热塑性树脂复合制备得到单向或织物形式的热塑性预浸料。在预浸料制备过程中,树脂黏度、分子量分布、浸渍方式及工艺参数等是影响热塑性预浸料性能的关键因素^[11-14]。连续纤维增强热塑性复合材料通常采用模压、缠绕、自动铺放等成型工艺进行制备^[15-17],成型温度、成型时间等因素会影响制件的质量和性能。本文主要介绍了高性能连续纤维增强热塑性预浸料的不同制备工艺以及成型工艺,并对未来热塑性复合材料的发展方向进行展望。

1 热塑性预浸料制备工艺

目前,高性能连续纤维增强热塑性预浸料常用制备工艺主要包括:溶液浸渍法、熔融浸渍法、薄膜叠层法、粉末浸渍法(硫化床粉末法和撒粉法)、悬浮热熔法以及纤维混编法等。

1.1 溶液浸渍法

溶液浸渍法也称溶剂法或湿法,是制备热塑性预浸料最原始的方法。该方法通常选用一种或几种溶剂将树脂溶解制得低黏度的溶液以浸渍纤维,通过除去溶剂制得预浸料,图 1 为溶液浸渍法制备预浸料的工艺流程图。溶液浸渍法克服了热塑性树脂熔融黏度高的缺点,能够充分浸渍纤维,工艺流程简单、投资少。但该方法仅适用于可溶性的热塑性树脂,且对

溶剂的种类要求较高,树脂的分解温度不应低于溶剂的沸点,而溶剂的沸点应高于浸渍温度而低于树脂的成型温度,以便去除。

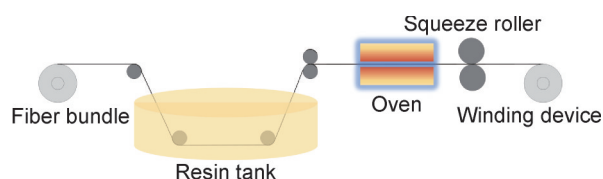


图 1 溶液浸渍法工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of solution impregnation method

申维新等^[18]使用聚醚砜(PES)与偶联剂 7020 溶解于 N,N-二甲基乙酰胺溶剂中,制备得到活化 PES 溶液,该溶液作为第三组分的改性活化剂,采用上浆设备对东丽 T700 碳纤维进行表面改性,而后制备出聚醚醚酮(PEEK)碳纤维复合材料,当碳纤维的含量为 30%(质量分数,下同)时,复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度相比纤维 PES 改性前分别提高了 13.69%,21.70% 和 36.97%,说明活化 PES 不仅能够促进碳纤维的均匀分散,同时还能起到显著的界面黏结作用。焦梦晓^[19]使用聚醚醚酮(PEKK)树脂(5601-100)与 T700 碳纤维作为原材料,先后通过两个浸渍槽与轧辊,其浸渍液为聚醚醚酮/三氟乙酸/二氯乙烷(PEKK50/50/CF₃COOH/CHCl₂CH₃),而后经过高温烘箱除掉溶剂制备得到聚醚醚酮碳纤维增强预浸带,其树脂含量为 32%,同时优化层合板制备工艺为成型温度 360℃,预热 20 min,保温保压 20 min,复合层板的拉伸模量达 33.38 GPa,相比纯 PEKK 树脂的拉伸模量提升近 10 倍。Shi 等^[20]使用聚酯树脂 Vylon 与平纹玻璃纤维织物(WF230100BS6)和 T300 平纹碳纤维织物(CO6343)分别制备织物预浸料,通过热压成型制备的玻璃纤维复合材料的纤维体积分数为 58.7%,拉伸强度为 327.4 MPa,性能高于使用热熔法和 3D 打印方法制备的力学性能(分别为 189.8 MPa 和 240.66 MPa);碳纤维复合材料的纤维体积分数为 59.1%,拉伸强度为 546.2 MPa,约为热熔法和 3D 打印方法强度的 3.7 倍和 3.1 倍。

该方法需要较为繁琐的去溶剂过程,树脂含量控制精度较低,存在安全环保问题,具有较大的安全隐患;另外由于树脂可以被溶剂溶解,复合材料制品的使用环境也会受到一定限制,因此现阶段在工程化应用上极少使用溶液浸渍法来制备热塑性预浸料。

1.2 熔融浸渍法

熔融浸渍法是一种常用的热塑性预浸料制备方法,先将热塑性树脂加热熔融,再充分浸润纤维束后

得到预浸料,其中树脂的分解温度应高于熔融过程中的温度,图2为熔融浸渍法制备预浸料的工艺流程图。由此种方法制备的预浸料挥发份含量低,避免了由于溶剂未除净导致内部存在孔隙的情况。该方法的优点是树脂含量控制精确,纤维准直性好,可最大程度发挥热塑性复合材料的力学性能优势。

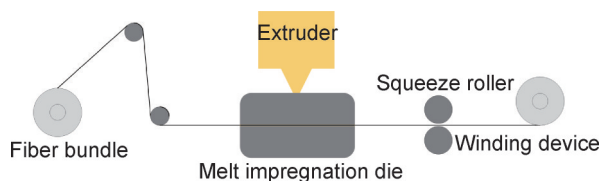


图2 熔融浸渍法工艺流程图

Fig. 2 Process flow diagram of melt impregnation method

李兴乐^[21]使用PEEK树脂与碳纤维丝束经过熔融浸渍拉挤装置制备出热塑性预浸带,为提高PEEK树脂的浸渍能力对碳纤维丝束进行了展宽工艺研究,当初始张力5 N、收丝速度2.3 m/min时可将单丝纤维展宽至13 mm。对浸渍机理进行了分析,发现浸渍时间与树脂黏度、加热辊直径成正比;与纤维宽度、初始张力成反比。同时对浸渍拉挤工艺进行优化验证,当拉挤温度为360℃时,预浸丝束的平均拉伸强度最高可达1660 MPa;当拉挤温度为370℃时,预浸丝束的平均拉伸强度最低,仅有1230 MPa。白艳博^[22]使用尼龙6(PA6)与12K碳纤维(拉伸强度3750 MPa)通过螺杆挤出与模具熔融浸渍的方式制备连续纤维预浸带,并验证了浸渍压力、浸渍温度、纤维束厚度等参数与理论模型间的吻合关系,同时优化了浸渍模具的包覆角、模具长度与浸渍辊个数,预浸带的纤维体积分数和孔隙率可分别达66.5%和1.33%,同时测试该复合材料的拉伸强度和模量分别为2291 MPa和151 GPa。张帆等^[23]使用聚碳酸酯(PC)和东丽T300碳纤维通过熔融浸渍工艺连续制备复合丝材,研究发现当拉丝速度为5 mm/min,浸渍温度为280℃,浸渍辊个数为3时,制备得到的复合丝材浸润效果最佳,达到99.62%。

该种工艺也存在较多的缺点,在树脂熔融浸渍纤维过程中通常需要较高的温度和压力,因此对设备的要求较高,同时对于浸渍过程中的模具设计与设备清理有较高的要求。熔融浸渍法对树脂加工工艺窗口要求极为严格,需要热塑性树脂的熔点尽可能低,在熔融状态下能够保持较低的黏度,同时加工过程中应有较好的稳定性和较小的黏度波动。但对于PEEK等航空结构用高性能树脂,单纯通过树脂熔体状态难以实现对纤维的有效浸润,往往导致孔隙率较高,影响了层间和界面性能,不适于自动铺放原位固结以及3D

打印等热塑性复合材料自动化成型制造工艺。

1.3 薄膜叠层法

薄膜叠层法也被称为树脂膜叠层法。该工艺的基本原理是:首先将基体树脂制成树脂薄膜,然后将树脂薄膜与增强纤维(通常为纤维织物)复合^[24],经过加热、加压等工艺将热塑性树脂膜熔化并充分浸渍纤维,工艺流程图如图3所示。相对于熔融浸渍工艺,薄膜叠层法的制备工艺较为简单,而且可以将浸渍过程分解为成膜、复合、浸渍等独立步骤,并对质量实施分段控制。

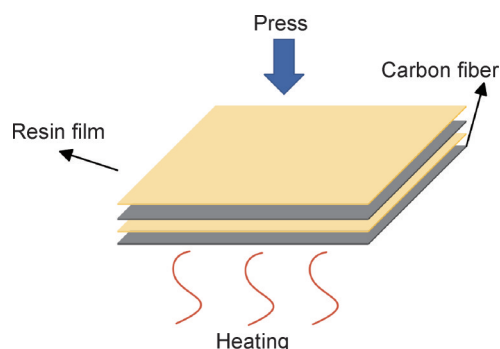


图3 薄膜叠层法工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram of thin film lamination method

Nunez-Carrero等^[25]使用5-氨基间苯二甲酸(纯度为98%)作为三官能团接枝剂与低黏度聚酰胺(Akulon K222-D)共混挤出造粒获得星形接枝的低黏度的改性尼龙6(sPA6),并采用压延工艺制备了厚度为160 μm的薄膜,挤压温度为240~245℃,而后与面密度为520 g/m²的玻璃纤维织物进行连续堆叠复合,通过薄膜堆积的方法制备复合材料。当接枝含量为2.5%时,复合材料的拉伸强度相比改性前提升了17%,同时超声焊接强度也提升了20%。

同熔融浸渍法类似,该方法一般适于黏度较低的热塑性树脂,对于PEEK等高黏度树脂,采用树脂膜与增强体复合工艺制备的预浸料浸润效果并不如热固性预浸料,一般需要在后续热压成型过程中进一步对纤维浸润;但当复合压力过大时会导致纤维褶皱变形^[26],使树脂无法有效浸润到织物中,因此在薄膜叠层法制备的过程中压力是关键工艺参数。

1.4 粉末浸渍法

(1)硫化床粉末法

硫化床粉末法的基本原理是在静电硫化床的基础上将导电纤维束蓬松分散并展宽展薄,使热塑性树脂粉末填充到纤维之间,并通过加热固结的方法将这些热塑性树脂粉末固定在纤维束上,图4为硫化床粉末法制备预浸料的工艺流程图。硫化床粉末技术

研究的关键在于树脂粒径的控制和浸渍装置的改进方面,该方法对树脂粉末的粒径要求很高,一般在 5~25 μm 才能吸附在纤维表面。

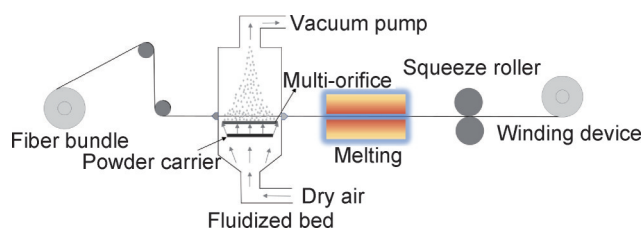


图 4 硫化床粉末法工艺流程图

Fig. 4 Process flow diagram of fluidized bed powder method

王志平等^[27]使用聚苯硫醚(PPS)树脂颗粒进行静电喷涂,均匀地附着在 T300 碳纤维织物表面,通过探究静电压、喷粉时间等参数对预浸料树脂含量的影响,得到树脂含量 50% 以上且浸润状态良好的预浸料,使用热压工艺制备复合材料层合板,拉伸强度和弯曲强度分别为 877.3 MPa 和 737 MPa。

不过该方法对预浸料整体幅宽的树脂含量精度控制困难,树脂超细粉加工也较为困难,且具有一定粉尘爆炸的风险,目前在工业上很少使用该种方法制备热塑性预浸料。

(2) 撒粉法

撒粉法通过撒粉的方式将树脂粉末均匀分布在纤维上方(通常为纤维织物),通过加热炉或加热传送带等方式制备得到连续纤维预浸料,通常用于织物预浸料或高树脂含量预浸料的制备。撒粉法同样需要控制热塑性树脂的粒径,以便实现预浸料树脂含量的精准控制,同时此种方法适用于熔融状态下流动性较好的树脂,对于高黏体系无法确保对纤维的浸润效果。

郭焕祥等^[28]在制备聚丙烯玻纤板过程中开发了改进型撒粉法工艺,针对原撒粉过程中包含的针刺过程不利于聚丙烯粉末、发泡微球与玻璃纤维的均匀分布等问题,优选承托式的特氟龙带或特氟龙网作为传送介质,直接加热和冷却制备得到汽车用聚丙烯玻纤板材,能耗更低,工艺合理,可用于低成本工程化制备汽车内饰。

1.5 悬浮热熔法

悬浮热熔法也称粉末悬浮液法,基本原理是将热塑性树脂微细粒子悬浮分散于液体介质(一般为水)中,纤维在牵引系统作用下通过浸胶系统使树脂粉末附着在纤维表面,树脂微细粒子在浸胶导辊的压力下进入纤维束内部,纤维经过树脂悬浮液充分浸渍后,进入加热炉中烘干除去水分及助剂,最后加热固结制

备得到预浸料,图 5 为悬浮热熔法制备预浸料的工艺流程图。

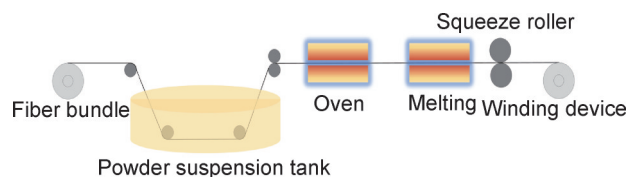


图 5 悬浮热熔法工艺流程图

Fig. 5 Process flow diagram of suspension hot melt method

该技术使用水作为介质,无毒、安全性好,且选用纤维较广泛,可实现连续生产。悬浮热熔法是目前制备高性能、高质量 PEEK 和 PPS 等热塑性预浸料的主要技术路线,已经实现了工程化。该技术的研究重点是对分散体系的改进控制、分散剂或分散介质的有效去除以及预浸料的连续稳定制备与控制。

目前国外使用此种工艺制备连续纤维增强热塑性预浸料已经实现批量化生产和应用。美国 Barrday 公司的 PEEK 和 PPS 单向带预浸料产品均是采用悬浮热熔方法制造,其中使用碳纤维 IM7 制备的连续纤维增强 PEEK 预浸料,纤维面密度 145 g/m^2 ,树脂含量 34%,玻璃化转变温度 143 $^{\circ}\text{C}$,0 $^{\circ}$ 拉伸强度 2669 MPa,0 $^{\circ}$ 拉伸模量 174 GPa,0 $^{\circ}$ 弯曲强度 1937 MPa;使用碳纤维 AS4D 制备的连续纤维增强 PPS 预浸料,纤维面密度 150 g/m^2 ,树脂含量 34%,玻璃化转变温度 95 $^{\circ}\text{C}$,0 $^{\circ}$ 拉伸强度 2231 MPa,0 $^{\circ}$ 拉伸模量 132 GPa。日本 Toray 公司同样采用该方法制备热塑性预浸料产品,其中 Toray Cetex TC1320 PEKK 产品纤维面密度 145 g/m^2 ,树脂含量 34%,0 $^{\circ}$ 拉伸强度 2410 MPa,0 $^{\circ}$ 拉伸模量 135 GPa,冲击后压缩强度 303 MPa;Toray Cetex TC1220 PEEK 产品(中模量碳纤维),0 $^{\circ}$ 拉伸强度 3100 MPa,0 $^{\circ}$ 拉伸模量 159 GPa,冲击后压缩强度 331 MPa。

赵鹏艳^[29]采用无水乙醇:去离子水=1:1 作为分散剂,将 PEEK 粉末超声悬浮在分散液中,制备得到浆料,与碳纤维织物(W-3011)充分浸渍后经过烘干、熔融得到预浸料。经过实验对比使用 390 $^{\circ}\text{C}$,10 MPa 压力制备得到的复合材料层合板层间剪切强度可达 53.3 MPa,弯曲强度 481.9 MPa,冲击强度 87.7 kJ/m^2 ,相比薄膜叠层法和粉末浸渍法的力学性能有显著提升,其复合材料的初始分解温度提升为 591 $^{\circ}\text{C}$ 。王志远^[30]分别使用 PEEK、PPS 树脂粉末与高强玻璃纤维 S6 复合,通过纤维展纱、超声悬浮液浸渍(S 型浸胶),去除乙醇分散剂经过高温熔融浸渍玻璃纤维丝束,最后经过高温口模拉挤成型,冷却收卷,实现悬浮法制

备玻纤预浸料,树脂含量可达30%,PEEK预浸纱和PPS预浸纱的孔隙率分别达到1.21%和0.63%。该方法通过超声波在悬浮介质中传播引起的空泡作用将堆叠的纤维束分散并充分展开,利于树脂粉末浸渍,工艺稳定可行。Song等^[31]使用悬浮浆料法制备聚醚醚酮增强T700级碳纤维(PEEK/T700SC)预浸料,探究了两种表面活性剂的分散效果和机理,最终选取由曲拉通(Triton-100)和聚乙二醇(PEG)复配,增加悬浮液的空间位阻效应,悬浮工艺窗口时间可达50 min,悬浮液固含量为20%,可制备得到纤维体积含量60%的复合材料,其弯曲强度可达1336 MPa,层间剪切强度可达106 MPa。

1.6 纤维混编法

纤维混编法是首先将热塑性树脂加工成微细纤维束,然后将树脂纤维和增强纤维互为经纬线混编成平纹或缎纹织物,或将热塑性树脂纱线和单向纤维直接复合形成混纤纱后进行编织。利用纤维柔软性和悬垂性良好的特征,混编织物中树脂纤维和增强纤维之间可发生一定程度的滑动和旋转,具有一定的变形能力^[32]。在制备复杂曲面结构时,通过纤维间相对滑移、节点处的旋转、网格变形实现紧密贴模。成型过程中热塑性树脂纤维高温下熔融并在压力下实现树脂对纤维的浸润。该方法优点是复合材料的成型只需对现成的织物进行加工,工艺大大简化;成型过程中织物柔性好,适于制备复杂结构。

Hasan等^[33]使用再生碳纤维(rCF)纺丝到纱线结构,利用纤维长度且取向性高、结构均匀等特点,制备一种直径60 mm的新型的纱线结构,同时通过降低纱线的捻度,保证纤维取向与纱线轴线平行,从而提高复合材料的力学性能,复合材料的拉伸强度和模量可分别达到 (1364 ± 49) MPa和 (100 ± 15) GPa。张雷等^[34]将T300碳纤维原有的环氧上浆剂通过高温加热的方式除去,再浸渍聚酰胺6专用的水性上浆剂(PA845H-TDS-CN),而后将碳纤维和尼龙纤维长丝作为机织原材料编织成平纹织物,碳纤维为经纱,经向密度4根/10 cm,纬向密度4根/10 cm,幅宽为300 mm,通过热压成型制备出复合材料层合板。热压工艺参数为:成型温度240℃,压力3 MPa,保温时间15 min,织物复合材料拉伸强度可达825 MPa,弯曲强度可达520 MPa。

此种方法的局限性在于选用的热塑性树脂需能够进行纺丝,成本相对较高,部分树脂难以纺丝,应用受限;复合材料中纤维体积含量一般不会太高以及树脂难以浸透纤维;织造过程中会对纤维造成损伤而影响性能等。由于树脂没有提前浸润纤维,这种方法无

法应用于自动铺放原位固结以及3D打印等热塑性复合材料自动化制造工艺。

2 热塑性复合材料成型工艺

为了更好地利用热塑性预浸料可快速成型的特点制备热塑性复合材料,常用的成型工艺主要包括:模压成型、缠绕成型、自动铺放成型、原位固结成型和3D打印成型等方法。

2.1 模压成型

模压成型工艺是将预浸料或纤维编织物与树脂膜组成的层叠料等材料裁切为模具大小的片材层叠置于模具中,通过加热、加压后冷却成型制备得到热塑性复合材料。该种工艺方法操作简单、成型周期短是目前工业上最常用的成型方式,其易于实现自动化,成为重点发展的低成本、规模化制造技术,已应用于飞机制件的自动化制造中。

徐鹏等^[35]针对聚苯硫醚热塑性纤维织物(5枚缎纹5HS)预浸料和单向预浸料开展模压工艺研究,包括模具温度、加热温度、成型压力、冷却时间、铺层等因素对复合材料表面成型质量和树脂浸渍状态的影响。结果表明,当加热温度在310~330℃时树脂软化程度适中,流动性较好,当温度过高时会影响材料的性能,温度过低时树脂流动性较差无法满足高质量层合板的制备;当模具温度在290℃左右对塑性成型效果最好,同时兼顾了成型效率与成型表面质量;当冷却时间在1 min以内,能够控制层合板的应力均匀变化,满足质量要求,结合产品表现及生产效率可将冷却时间缩短在10 s;当成型压力为9 MPa时可得到合格产品,既避免了压力大导致的纤维滑移,也能够满足成型制品低孔隙率的要求。王晓雨^[36]使用自制的碳纤维自阻加热模压实验平台开展T300碳纤维织物/PA6复合材料层合板制备实验,对模压工艺进行了正交实验优化,结果表明,当成型温度在270℃,成型压力2.5 MPa,保温时间15 min时,能够制备性能最优的复合材料板材,层合板孔隙率仅为0.62%,弯曲强度可达519.87 MPa。Dominik等^[37]通过以玻璃纤维增强聚酰胺(GF/PA6)为建模研究对象,分析模压成型过程中树脂材料流动的顺序和阶段,包括局部起皱与不完全填充模具等现象,采用拉格朗日和欧拉离散化等建模方法,对模具内部的树脂黏度进行流变学表征,揭示了成型过程中黏度的显著各向异性,结论显示兼顾各向同性与各向异性的黏度流动对整体成型至关重要。使用PA6玻璃纤维增强预浸料进行特定压力、间隙的成型实验验证,发现0 s时树脂开始流动,

设定力阈值 10 kN, 当压力为 300 MPa 时随着压力的增加延迟时间较小, 增加了过程中的散射, 对于其他压力下 (如 150 MPa) 都存在着 (13.46 ± 1.64) s 的延迟区间, 随着达到最大力后树脂流动结束。

模压成型作为初级且传统的成型方式, 目前虽然在各个领域应用较广, 但该种成型工艺仅能适用于结构较为简单的整体成型制件, 无法实现复杂形状的大制件制备。

2.2 缠绕成型

缠绕成型工艺使用连续纤维预浸丝束或浸有树脂浆料的连续纤维作为原料, 通过加热烘道和压辊的作用, 在一定的牵引张力加载下缠绕到圆柱形模具上, 经过加热工序固结制备出圆柱形或筒形制件。该种成型工艺操作简单、成本低、制件的质量稳定, 在制备过程中将连续纤维不停切断以满足制件模具的形状需求, 同时调节缠绕过程中的张力值以实现预浸丝束紧密贴合模具表面, 实现自动化生产。

袁松等^[38]使用玻璃纤维和聚丙烯 (PP) 树脂, 以铝合金 6061 作为内衬, 采用湿法直浸法进行浸胶, 使用螺旋缠绕和环向缠绕两种方法交替在一起进行加热缠绕。容器总长度为 345.2 mm, 直筒长度为 133 mm, 底部半球体的半径为 62 mm。针对容器的特点对缠绕过程中的缠绕角、缠绕速比等参数进行研究, 当螺旋缠绕角为 54.4° , 缠绕速比为 2.25, 头部包角接近 180° 时缠绕效果最好, 并成功制备出目标压力容器, 便于后期进行水压、爆破和疲劳等测试。Zhang 等^[39]根据热塑性预浸带缠绕过程中张力波动对缠绕质量的影响, 针对力矩电机、参数变化灵敏度、变频盲区、齿槽转矩等控制系统动态参数, 开展一种基于鲁棒扩展卡尔曼滤波 (REKF) 的模糊比例 PID 控制器, 该种控制系统在各个步骤中指定输入和输出变量从而激活附属函数, 通过反馈和在线调整减小控制误差, 与传统的 PID 相比, 基于 REKF 的模糊 PID 控制器具有很强的鲁棒性和抗干扰能力, 缠绕过程张力控制精度提高 $40\% \sim 42\%$ 。

缠绕成型方式可以初步满足自动化成型需求, 但采用该种方式制备的制件层间力学性能较低, 且仅适用于生产圆管类、筒类、储罐及容器类等制件, 有较大的使用局限性^[16,40]。

2.3 自动铺放成型

自动铺放成型工艺是将预浸带或预浸丝束通过自动铺放设备铺贴在模具表面后再经过热压罐或压机进行进一步的热压成型。通过自动铺放工艺可实现热塑性预浸带或预浸丝束直接在模具表面加热、连续铺放、冷却成型, 从而大幅提高加工效率, 显著降低

制造成本, 目前已在国外的大型结构件中实现广泛应用^[41-42]。

但在传统的自动铺放过程中压辊压力较低, 且铺放速度过快, 导致经自动铺放成型的复合材料相比于模压成型, 往往具有较高的孔隙率和相对薄弱的层间结合性能。针对此问题, 许多研究者使用激光固结成型技术与自动铺放结合, 利用激光束作为热源加热预浸料。该方法具有更大的热流率和更精准的温度控制能力, 进一步减少能耗、降低污染、提高铺层速率以及制件性能。丝束浸渍体放到结构件上时完全凝固, 且限制在熔融区域附近, 所以在制备具有厚横截面和大表面区域的制件时没有限制。

刘鑫^[43]使用连续玻璃纤维增强聚丙烯预浸丝束作为原材料 (玻璃纤维质量分数为 65%), 研究在自动铺放过程中制品翘曲、树脂挤出、纤维及层内波纹等缺陷产生的原因和机理, 并提出了一种针对半结晶热塑性丝束的工艺优化方案, 即等温结晶铺放工艺。将铺放层表面的温度分别维持在 132, 134, 136 $^\circ\text{C}$ 和 138 $^\circ\text{C}$ 进行铺放实验, 结果显示, 结晶度比非等温结晶过程高出较多; 从铺放层合板外观看无明显的纤维和层波纹; 随着保温平台的温度升高, 层间富树脂层减少甚至消失; 层合板纵向翘曲下降明显, 横向翘曲有缓慢下降趋势; 短梁强度和弯曲强度等结果比非等温组有较大提升。梁宜楠等^[44]选用碳纤维增强聚醚醚酮 (CF/PEEK) 热塑性复合材料, 使用细观尺度层合板为研究对象开展自动铺放工艺研究, 并开展多因素耦合综合分析。结果表明, 铺放速度对复合材料的层间剪切强度影响最大, 铺放压力影响其次, 铺放温度影响最小: 当铺放压力为 14 N, 铺放速度为 60 mm/min, 铺放温度为 408 $^\circ\text{C}$ 时, 层间剪切强度可达到 68.23 MPa, 该测试结果与模型拟合结果相吻合, 变异系数较小。

2.4 原位固结成型

原位固结成型工艺是在自动铺放成型工艺基础上优化而来, 该方法充分利用热塑性树脂可熔融再加工的特点, 自动铺放后原位冷却直接成型制备得到复合材料制件, 是一种发展前景广泛的工艺技术。在此成型工艺中, 热塑性树脂的选择与结晶度控制对于成型构件的性能调控尤为重要。目前, 对于原位固结成型过程, 复合材料结晶度的调控主要通过改变模具温度实现, 通过控制不同模具的温度实现热塑性预浸料降温速率的变化。同时还应关注原位成型过程中制件的层间剪切性能, 优化铺放速度、铺放温度、树脂黏度等参数, 以减少铺放过程中的层间空隙。

原位固结成型工艺需要依靠材料、工艺、装备多种维度协同共进, 目前国外已开展相关工程化应用工

作,而国内仅停留在实验室研究阶段。目前德国航空航天中心结构与设计研究所(DLR)已完成多功能机身演示器(MFFD)上壳体全尺寸8 m长机身蒙皮的原位固结铺放,选用了Cetex TC1225低熔体聚芳醚酮(LM-PAEK)碳纤维热塑性预浸料作为基体材料,通过LDM二极管激光器和AFPT GmbH多丝束铺设头进行激光加热原位固结成型。经相关专家评估,“目前该种铺放成型的吞吐量为4.4 kg/h,相当于32 h的生产时间,当铺放丝束的数量增加后可以满足每月100架份飞机的目标”。

赵大成^[45]以碳纤维增强聚苯硫醚预浸料(CF/PPS)为研究对象,针对自动铺放原位成型过程的温度场、树脂热降解、树脂结晶度控制、层间固结机理进行了研究,建立了三维热传递模型,对模具温度与铺放温度变化因素提供理论支撑;利用动力学模型探究PPS的热降解温度不高于550℃;同时研究模具温度与复合材料结晶温度窗口的匹配性,有助于提高层间剪切强度和弯曲强度;同步开展激光加热度对原位固结成型层合板层间剪切强度的影响。宋清华等^[46]根据热塑性复合材料能够实现非热压罐原位成型的特点,通过建立铺层间紧密接触模型于高温高压下分子链扩散模型,使用CF/PPS进行原位固结铺放研究。结合层间结合模型计算与实际铺放过程进行对比,结合CF/PPS的热分解曲线发现升温速率对热失重的影响较大,当提高加热的升温速率,不仅可以快速提高预浸料的温度还能扩大预浸料的工艺窗口。当压辊压力为1500 N时,铺层间紧密接触度可达到1;同时通过提高升温速率等方式缩短树脂分子链的扩散时间,选用最大激光加热功率为6 kW,铺放速度为10~12 m/min时,最大的分子链扩散程度可达85%左右,所制备得到的原位成型制品层间剪切强度可达到热压罐成型的70%。

2.5 3D打印成型

3D打印成型工艺是近年来发展较为迅速的成型方式,基于逐层打印累积成型的增材制造技术,实现三维复杂结构件的成型,具有自动化、高效率等优点^[47]。目前在热塑性复合材料制造领域中应用较为广泛的主要包括选择性激光烧结法(SLS)和熔融沉积法(FDM)。其中,SLS则是基于热塑性树脂粉末烧结的制造技术,利用激光照射树脂粉末使其烧结,按照设定的控制程序逐层堆叠,从而打印出目标结构件;FDM是基于挤出丝束制造技术,丝束主要由热塑性树脂制成,树脂和连续纤维经熔融后从喷嘴挤出,按照设定轨迹层层堆积,从而打印出目标结构件^[48]。3D打印成型可以制备任意复杂程度的结构件,可设计性较

强,但由于打印过程中的层层堆积导致其层间的力学性能和纤维的浸润程度并不理想,因此对打印过程中的打印温度、打印速度等工艺参数需要进一步优化。

同时利用3D打印成型和静电纺丝结合的手段,可以制备出低孔隙率、形状可控、机械强度高的医用纳米纤维复合材料,广泛应用于医用领域,比如用于组织神经、软骨修复、药物输送等方面^[49]。

苏文璐等^[50]以短切CF增强尼龙6为基体,连续碳纤维(CCF)为增强体使用自制的双喷头3D打印机进行打印,打印层的目标厚度为0.2 mm,经过正交实验验证当打印间距为0.5 mm,CCF打印隔层数为1,打印温度250℃、打印速度900 mm/min时为最佳工艺状态,打印制件的拉伸强度可达109.73 MPa,弯曲强度可达119.14 MPa,同时得出对拉伸强度影响因素排序为CCF打印间距>CCF隔层数>打印温度>打印速度。于颖等^[51]研制出一套3D打印用连续碳纤维预浸装备,主要包括纤维架、张紧装置、展丝装置、熔融浸渍等部分,采用滚轮被动展丝的方法将原本较窄的纤维束分散成较宽的纤维带。文献中使用聚乳酸(PLA)与碳纤维进行预浸丝束连续打印,预浸丝束表面光滑且截面为圆形,直径约为0.4 mm,观察SEM截面照片可发现纤维单丝均被树脂均匀包裹,界面结合性能较好,制备得到的预浸丝束拉伸极限可达130 N,相较原丝提升了83%。

3 结束语

经过近几十年的发展,我国目前在高性能热塑性复合材料制备方面实现了一定的技术突破,各种热塑性预浸料和复合材料制备方法均取得了小规模的研究成果,但在热塑性预浸料制备和复合材料成型的工程化应用上仍存在许多问题亟待解决,与国外发达国家的工程化应用情况存在较大差距。

(1)关于热塑性预浸料的制备工艺方面,本文中论述的各种工艺方法的重点在于实现热塑性树脂与纤维的充分浸渍,但就工程化制备而言目前国内仍处于初级阶段,暂未实现批量应用于航空航天等领域,受制于国产热塑性树脂(聚芳醚酮、聚苯硫醚等)工艺稳定性差、预浸料生产装备缺乏等因素,而欧洲、美国、日本等发达国家已在航空航天等领域实现了工程化应用。因此选择可实现工程化放大的工艺方法进行优化,并开发具备可稳定生产的热塑性预浸料制备设备是今后重要的发展方向。

(2)关于热塑性复合材料成型工艺方面,本文中论述的各种成型工艺方法重点在于利用热塑性树脂

的成型快、可反复加工等特点实现复合材料的快速成型,同时需保持住复合材料的层间性能。目前国内已实现模压成型、缠绕成型等的工程化应用,相关的关键技术基本突破;但在自动化程度较高的自动铺放成型、原位固结成型、3D打印成型等方面仍处于技术成熟度较低的状态,国外已基本实现完整的成型制造技术、工程化应用等技术体系。因此,在未来的研究工作中亟须针对高效自动化成型技术开展更深入的研究,实现在航空航天、轨道交通等领域的应用。

(3)目前国内外在热塑性复合材料的应用情况存在较明显差距,主要体现在材料、工艺、装备、制造等技术的落后。随着国内热塑性复合材料迅速发展的趋势,国内的科研院所、民营企业和高校等科研工作者在热塑性复合材料领域内已实现了技术突破,正在向工程化应用迈进,有望在热塑性树脂、预浸料工程化制备工艺、预浸料制备设备、成型装备等方面有重要进展,引领国内热塑性复合材料的快速发展和深入应用。

参考文献

- [1] 李军,刘燕峰,倪洪江,等.航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J].材料工程,2022,50(6):49-60.
LI J, LIU Y F, NI H J, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(6): 49-60.
- [2] 罗楚养,梦梦,朱龙宇,等.先进复合材料研究现状及其在机载武器上的应用展望[J].航空兵器,2023,30(2):1-20.
LUO C Y, SHANG M H, ZHU L Y, et al. Research status of advanced composites and its application prospect in airborne weapons[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(2): 1-20.
- [3] 任荣,李文强,陈浩,等.热塑性复合材料感应植入焊技术研究进展[J].材料工程,2023,51(7):22-32.
REN R, LI W Q, CHEN H, et al. Research progress in induction implant welding of thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(7): 22-32.
- [4] 周典瑞,高亮,霍红宇,等.热塑性树脂基复合材料用碳纤维上浆剂研究进展[J].复合材料学报,2020,37(8):1785-1795.
ZHOU D R, GAO L, HUO H Y, et al. Research progress of carbon fiber sizing agents for thermoplastic composites[J]. Acta Materialiae Composites Sinica, 2020, 37(8): 1785-1795.
- [5] 罗云烽,姚佳楠.高性能热塑性复合材料在民用航空领域中的应用[J].航空制造技术,2021,64(16):93-102.
LUO Y F, YAO J N. Applications of high performance thermoplastic composites in civil aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(16): 93-102.
- [6] 谢为.热塑性复合材料增材制造工艺与装备研究进展[J].航空材料学报,2023,43(3):1-11.
XIE W. Research progress of additive manufacturing process and equipment for thermoplastic composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(3): 1-11.
- [7] 屈李端,陈书华,沈镇,等.连续CF/PEEK预浸料制造技术研究进展[J].航空制造技术,2020,63(5):87-92.
QU L D, CHEN S H, SHEN Z, et al. Research progress on continuous CF/PEEK prepreg manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(5): 87-92.
- [8] 许云鹏,颜春,刘东,等.连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺的研究进展[J].复合材料科学与工程,2020(8):123-128.
XU Y P, YAN C, LIU D, et al. Progress in preparation technology of continuous fiber reinforced thermoplastic prepreps[J]. Composites Science and Engineering, 2020(8): 123-128.
- [9] 滕凌虹,曹伟伟,朱波,等.纤维增强热塑性树脂预浸料的制备工艺及研究进展[J].材料工程,2021,49(2):42-53.
TENG L H, CAO W W, ZHU B, et al. Research progress in the preparation of fiber reinforced thermoplastic resin prepreg[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(2): 42-53.
- [10] 滕凌虹,曹伟伟,朱波,等.纤维增强热塑性树脂预浸料的制备工艺及研究进展[J].材料工程,2021,49(2):42-53.
TENG L H, CAO W W, ZHU B, et al. Research progress in the preparation of fiber reinforced thermoplastic resin prepreg[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(2): 42-53.
- [11] 张淦,刘建超,张承双.纤维增强树脂基预浸料的制备技术及应用进展[J].炭素,2022(1):27-32.
ZHANG G, LIU J C, ZHANG C S. Preparation technology and application progress of fiber reinforced resin based prepreg[J]. Carbon, 2022(1): 27-32.
- [12] 石业琦,崔永辉,薛平,等.连续碳纤维增强热塑性树脂预浸片材制备技术的研究进展[J].塑料工业,2019(11):1-4.
SHI Y Q, CUI Y H, XUE P, et al. Research progress on the preparation of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic resin prepreg sheet[J]. China Plastic Industry, 2019(11): 1-4.
- [13] 华泽天,薛平,贾明印,等.粉末浸渍法制备连续纤维增强热塑性复合材料研究进展[J].塑料科技,2022,50(10):118-122.
HUA Z T, XUE P, JIA M Y, et al. Research progress of continuous fiber reinforced thermoplastic composites prepared by powder impregnation[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(10): 118-122.
- [14] 肇研,刘寒松.连续纤维增强高性能热塑性树脂基复合材料的制备与应用[J].材料工程,2020,48(8):49-61.
ZHAO Y, LIU H S. Preparation and application of continuous fiber reinforced high-performance thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 49-61.
- [15] 李源,张琦,夏礼栋,等.碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺研究进展[J].现代塑料加工应用,2022,34(5):52-55.
LI Y, ZHANG Q, XIA L D, et al. Research progress on forming process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2022, 34(5): 52-55.
- [16] 宋晨曦,林海涛,赖恩平,等.碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J].纺织科学与工程学报,2023,40(4):86-93.
SONG C X, LIN H T, LAI E P, et al. Research progress of the forming process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(4): 86-93.

- [17] 马全胜,李俊含,田思钺.热塑性复合材料的成型工艺及其在航空器中的应用[J].化工新型材料,2022,50(6):263-266,271.
MA Q S, LI J H, TIAN S Q. Forming technology of thermoplastic composite and its application in aircraft[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(6): 263-266, 271.
- [18] 申维新,姜云龙,朱爱萍.聚醚砜对连续碳纤维/聚醚醚酮复合材料性能的影响[J].复合材料学报,2021,38(6):1809-1816.
SHEN W X, JIANG Y L, ZHU A P. Effect of polyethersulfone on the properties of continuous carbon fiber/polyetheretherketone composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1809-1816.
- [19] 焦梦晓.聚醚醚酮结晶形态及热力学性能的调控研究[D].上海:东华大学,2021.
JIAO M X. Study on the crystal morphology and thermodynamic property regulation of polyetheretherketone[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [20] SHI J, MIZUNO M, BAO L, et al. A facile molding method of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites and its mechanical property[J]. Polymers, 2022, 14(5): 947.
- [21] 李兴乐.PEEK基碳纤维预浸丝束成型工艺研究[D].郑州:河南工业大学,2023.
LI X L. Research on PEEK-based carbon fiber prepreg tow forming process[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [22] 白艳博.连续纤维增强PA6预浸带制备及其耐久性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
BAI Y B. Study on the preparation and durability of continuous fiber reinforced PA6 prepreg tapes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [23] 张帆,陈港,贵树峰,等.PC/CCF制备工艺对浸渍程度的影响及3D打印性能分析[J].工程塑料应用,2023,51(3):69-75.
ZHANG F, CHEN G, GUI S F, et al. Influence of PC/CCF preparation process on impregnation degree and 3D printing performance analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 69-75.
- [24] 刘延宽,顾子琛,王志平.连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺与发展趋势[J].中国塑料,2022,36(2):172-181.
LIU Y K, GU Z C, WANG Z P. Preparation technology and development trend of continuous-fiber-reinforced thermoplastic prepregs[J]. China Plastics, 2022, 36(2): 172-181.
- [25] NUNEZ-CARRERO K C, HERRERO M, ASENSIO M, et al. Star-branched polyamides as the matrix in thermoplastic composites[J]. Polymers, 2022, 14(5): 942.
- [26] QMAR H C, ISIDRO D C, PHILIP L J, et al. Film-stacking method as an alternative agave tequilana fibre/PLA composite fabrication [J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103853.
- [27] 王志平,顾子琛.静电粉末流化法碳纤维/聚苯硫醚预浸料的制备及性能表征[J].塑料工业,2019,47(10):22-26.
WANG Z P, GU Z C. Preparation characterization of carbon fiber/polyphenylene sulfide prepreg by powder fluidized impregnation[J]. China Plastic Industry, 2019, 47(10): 22-26.
- [28] 郭焕祥,李海帆,王国淑,等.聚丙烯玻纤板的轻量化进展[J].汽车工程师,2020(2):14-15.
GUO H X, LI H F, WANG G S, et al. Lightweight development of polypropylene glass fiber board[J]. Auto Engineer, 2020(2): 14-15.
- [29] 赵鹏艳.编织碳纤维增强聚醚醚酮复合材料界面调控及性能研究[D].太原:中北大学,2023.
ZHAO P Y. Interfacial modulation and properties study of carbon fiber fabric reinforced poly(ether ether ketone) composites [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [30] 王志远.疏水功能化热塑性预浸纱制备及固结工艺研究[D].南京:南京航空航天大学,2023.
WANG Z Y. Study on fabrication and consolidation process of hydrophobic functionalized thermoplastic prepreg [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [31] SONG J P, ZHAO Y, XIONG S, et al. The synergistic steric hindrance effect in the preparation of polyether ether ketone composites by powder slurry method[J]. Polymer Composites, 2022, 43(4): 2384-2395.
- [32] GROUP M M F I. CF/AR/thermoplastic hybrid yarns for requirement-based thermoplastic composites[J]. Man-Made Fibers International, 2023, 73(2): 26-30.
- [33] HASAN M M B, BACHOR S, ABDKADER A, et al. Low twist hybrid yarns from long recycled carbon fibers for high performance thermoplastic composites[J]. Materials Science Forum, 2022, 1063: 147-153.
- [34] 张雷,李静,庄毅,等.连续碳纤维/聚酰胺6混编织物复合材料的成型及性能研究[J].材料导报,2023,37(增刊1):566-571.
ZHANG L, LI J, ZHUANG Y, et al. Preparation and properties of continuous carbon fiber/nylon 6 mixed braid fabric composites [J]. Materials Reports, 2023, 37(Suppl 1): 566-571.
- [35] 徐鹏,侯进森,岳广全,等.连续碳纤维增强聚苯硫醚复合材料模压成型的表面质量研究[J].航空制造技术,2023,66(17):72-78.
XU P, HOU J S, YUE G Q, et al. Research on surface quality of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites molding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(17): 72-78.
- [36] 王晓雨.碳纤维增强尼龙6自阻加热模压成型工艺及性能研究[D].长沙:中南大学,2022.
WANG X Y. Research on the process and properties of carbon fiber reinforced nylon 6 composites formed by compression molding process with self-resistance electric heating technology [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [37] DOMINIK D, NAVRAJ S H, RYAN C R, et al. Rheological characterization and macroscopic modeling and simulation of the molding process of a PA6 glass mat thermoplastic (GMT) [J]. Composites Part A, 2024, 176: 107780.
- [38] 袁松,翟建广,张斌,等.纤维增强热塑复合材料高压容器制备工艺[J].上海工程技术大学学报,2019,33(2):102-105.
YUAN S, ZHAI J G, ZHANG B, et al. Preparation technology of high-pressure vessel of FRTC[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2019, 33(2): 102-105.
- [39] ZHANG H J, TANG H, SHI Y Y. Precision tension control technology of composite fiber tape winding molding [J]. Journal of

- Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(7): 925-945.
- [40] 王承刚, 余进娟, 高信康, 等. 热塑性复合材料缠绕技术现状及应用趋势分析[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 184-188.
WANG C G, SHE J J, GAO X K, et al. Analysis of current situation and application filament winding technology of thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 184-188.
- [41] DHINAKARAN V, SURENDAR K V, HASUNFUR R M S, et al. Review on study of thermosetting and thermoplastic materials in the automated fiber placement process[J]. Materials Today, 2020, 27(2): 812-815.
- [42] SHADMEHRI F, HOA S V, FORTIN-SIMPSON J, et al. Effect of *in situ* treatment on the quality of flat thermoplastic composite plates made by automated fiber placement (AFP)[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2018, 4(2): 41-47.
- [43] 刘鑫. 热塑性预浸带自动铺放制品缺陷探究及等温结晶工艺优化研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
LIU X. Research on product defects and isothermal crystallization optimization of ATP process with thermoplastic prepreg[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [44] 梁宜楠, 杨睿, 王俊龙, 等. 热塑性复合材料点阵铺放工艺对层间剪切强度的影响研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(10): 61-66.
LIANG Y N, YANG R, WANG J L, et al. Effects of automated placement process of lattice structure with thermoplastic composites on the inter-laminar shear strength[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2021(10): 61-66.
- [45] 赵大成. CF/PPS 热塑性复合材料自动铺放原位固结成型机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
ZHAO D C. Study on mechanisms during automated fiber placement *in situ* consolidation process of CF/PPS thermoplastic composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [46] 宋清华, 刘卫平, 刘小林, 等. 热塑性复合材料原位成型过程铺层间结合强度[J]. 航空学报, 2019, 40(4): 422543.
SONG Q H, LIU W P, LIU X L, et al. Interlaminar bonding strength for thermoplastic composite in an *in-situ* consolidation process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(4): 422543.
- [47] 曹丰, 曾志勇, 黄建, 等. 连续纤维增强复合材料的 3D 打印工艺及应用进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(11): 1815-1833.
CAO F, ZENG Z Y, HUANG J, et al. Printing process and application progress of 3D printing continuous fiber reinforced composites[J]. Scientia Sinica Technology, 2023, 53(11): 1815-1833.
- [48] 杨洋. 3D 打印用碳纤维/聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
YANG Y. Preparation and properties of carbon fiber/poly(ether ether ketone) composites private for 3D printing[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [49] GHOSH A, ORASUGH J T, RAY S S, et al. Integration of 3D printing-coelectrospinning: concept shifting in biomedical applications[J]. ACS Omega, 2023, 8(31): 28002-28025.
- [50] 苏文璐, 卢立成, 钱波, 等. 连续与短切 CF 增强 PA6 复合材料双喷头 3D 打印工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 71-77.
SU W L, LU L C, QIAN B, et al. Process parameters for dual-nozzle 3D printing of continuous and chopped CF composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 71-77.
- [51] 于颖, 徐惠良, 王玉. 基于熔融浸渍的 3D 打印用连续碳纤维预浸渍设备开发[J]. 机电工程技术, 2023, 52(4): 37-40, 167.
YU Y, XU H L, WANG Y. Development of continuous carbon fiber preimpregnation equipment for 3D printing based on melt impregnation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 53(4): 37-40, 167.

收稿日期: 2023-12-26; 修订日期: 2024-11-25

通讯作者: 张宝艳(1967—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为先进树脂基复合材料, 联系地址: 北京市顺义区时骏街1号中航复材厂区(101300), E-mail: zhangbaoyan0916@126.com

(本文责编: 解 宏)