

引用格式: 晁聪聪, 臧致艺, 佟海滨, 等. 高性能热塑性树脂基复合材料发展: 材料、工艺及应用[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 1-18.

CHAO Congcong, ZANG Zhiyi, TONG Haibin, et al. Development of high-performance thermoplastic resin-based composites: materials, processes and applications[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 1-18.

高性能热塑性树脂基复合材料发展: 材料、工艺及应用

晁聪聪¹, 臧致艺¹, 佟海滨², 姚佳楠³, 邹柯¹, 王成博⁴, 张代军⁴,
刘刚^{1,2*}, 陈祥宝⁴

(1. 北京化工大学 先进技术与装备研究院, 北京 100029; 2. 东华大学 先进低维材料中心, 上海 201620; 3. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 100013; 4. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 高性能热塑性树脂基复合材料因其优异的力学性能、耐环境、耐介质、可回收性及可实现快速成型等优势, 在航空制造技术领域展现出广阔的应用前景。近年来, 随着聚苯硫醚(PPS)、聚醚酰亚胺(PEI)和聚芳醚酮(PAEK)等高性能热塑性树脂的商品化进程加快, 相关预浸料与成型技术不断优化, 推动了该类材料在工程技术领域的应用。本文系统综述高性能热塑性树脂基复合材料的发展现状, 重点分析其材料体系及商品化进展、预浸料制备、先进制造工艺及应用, 提出高性能热塑性树脂基复合材料重点发展方向, 以期为航空航天等工程技术领域人员提供参考, 推动高性能热塑性树脂基复合材料的创新发展与应用。

关键词: 高性能热塑性复合材料; 预浸料; 成型工艺; 航空应用

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000084

中图分类号: V258; TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)03-0001-18

Development of high-performance thermoplastic resin-based composites: materials, processes and applications

CHAO Congcong¹, ZANG Zhiyi¹, TONG Haibin², YAO Jianan³, ZOU Ke¹, WANG Chengbo⁴,
ZHANG Daijun⁴, LIU Gang^{1,2*}, CHEN Xiangbao⁴

(1. Institute of Advanced Technology and Equipment, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Center for Advanced Low-dimension Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. The Sixth Military Representative Office of the Airborne Equipment Department in Beijing, Beijing 100013, China; 4. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: High-performance thermoplastic resin-based composites have shown broad application prospects in the aviation manufacturing technology due to their excellent mechanical properties, environmental resistance, chemical resistance, recyclability, and rapid molding. In recent years, with the accelerated commercialization of high-performance thermoplastic resins such as polyphenylene sulfide(PPS), polyetherimide(PEI), and polyaryletherketone(PAEK), the related prepregs and molding technologies have been continuously optimized, promoting the industrial application of such materials. This paper systematically reviews the current development status of high-performance thermoplastic resin-based composites, focusing on their material systems and commercialization progress, prepreg preparation, advanced manufacturing technology and application. It proposes key development directions for high-performance thermoplastic resin matrix composites, in order to provide reference for personnel in engineering and technical fields such as aerospace, and promote the innovative development and application of high-performance

thermoplastic resin matrix composites.

Key words: high performance thermoplastic composites; prepreg; forming process; aerospace application

高性能热塑性树脂基复合材料,近年来在工业领域,展现出优越的综合性能^[1]。其高强度、耐环境侵蚀、良好的抗疲劳性及可回收加工特性,使其在航空航天领域的技术突破和产品升级中发挥关键作用^[2-4]。此外,较短的成型周期和较高的生产效率,也契合现代制造业对于高效制造的追求,展现出显著的成本优势^[5]。但国内在高性能热塑性复合材料专用树脂的产业布局方面仍存在不足。在预浸料制备工艺上,“熔体法”和“粉末法”等主流技术已取得显著进展,但高黏度树脂的浸渍难题以及纤维浸渍效率和均匀性问题仍需进一步优化。成型技术方面,热压成型、自动铺放成型、自动缠绕成型及焊接技术等已逐渐成熟,但国内在高精度数控缠绕设备、自动铺放设备及工程化应用方面与国外先进水平仍存在较大差距。

基于上述背景,本文系统综述高性能热塑性树脂基复合材料的发展现状,涵盖高性能热塑性树脂

体系及商品化发展、预浸料制备工艺及多种先进成型技术(如热压成型、自动铺放成型、缠绕成型等)的研究进展和应用实例,旨在为后续研究提供系统的参考,助力高性能热塑性树脂基复合材料的创新发展与应用。

1 商品化高性能热塑性树脂发展与性能

高性能热塑性树脂可实现多次加热熔融、冷却固结的重复加工过程,适用于高效制造和自动化生产。此外,其优异的韧性使其在结构材料应用中展现出巨大潜力。高性能热塑性树脂商品化发展应用主要集中在聚苯硫醚(poly phenylene sulfide, PPS)、聚芳醚酮(poly aryl ether ketone, PAEK)类半结晶型聚合物和聚醚酰亚胺(poly ether imide, PEI)类非晶型聚合物,相关基础物性见表 1^[6-11]。

表 1 高性能热塑性树脂基础物性^[6-11]
Table 1 Characteristics of high-performance thermoplastic resins^[6-11]

Property	Methods	PPS (Fortron® 0320)	PEEK (Vitrex PEEK 450G)	PEKK (Kepstan® PEKK 7002)	LMPAEK (Vitrex 103 PWD)	PEI (Ultem™ 1040P)
$T_m/^\circ\text{C}$	ISO 11357	280	343	338	303	
Tensile strength/MPa	ISO 527	90	98	114	91	90
Tensile modulus/GPa	ISO 527	3.5	4.0	3.9	3.8	3.0
Flexural strength/MPa	ISO 178	145	165	168	146	150
Flexural modulus/GPa	ISO 178	4.2	3.8	3.9	3.2	3.0
Izod impact strength/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	ISO 180/1A	2.6	8.0	5	7.6	
$T_g/^\circ\text{C}$	ISO 11357	90	143	162	156	217

20 世纪 60 年代,PPS^[12]作为首个实现工业化量产的高耐热结晶型热塑性树脂进入应用阶段。尽管早在 1897 年法国化学家 Grenvesse 便实现其合成,但直至美国 Phillips 石油公司突破并完善硫化钠法工艺后,PPS 才因其优异的耐化学腐蚀、自阻燃等特性而成为汽车发动机组件系统、电气系统和新能源汽车动力电池模组的优选材料。PPS 全球产能长期由日本 DIC、Toray 和比利时 Solvay 等企业主导,我国直至 2013 年浙江新和成建成首条千吨级产线才填补空白。

20 世纪 80 年代,PEI 的诞生填补了非晶型树

脂在高温领域的性能短板。美国通用电气(GE)公司历经 10 年研发,于 1982 年推出商品名为 ULTEM® 的 PEI 树脂^[13],其长期使用温度达 170~200 $^\circ\text{C}$,兼具燃烧时低烟雾、低毒性气体释放、高阻燃性与尺寸稳定性,因而迅速在航空飞行器内饰件与医疗器械领域获得应用。截至 2019 年,SABIC 通过收购 GE 塑料业务垄断全球 65% 以上市场。与此同时,国内上海合成树脂研究所开发的牌号为 PEI-YS30 的树脂,凭借优异的耐水解性能小规模在军工部件中实现应用。

20 世纪 90 年代至 21 世纪初,PAEK 家族(主

要包括 PEEK、PEKK 和 LMPAEEK 等, 分子结构见图 1) 凭借其卓越的综合性能表现, 重塑高性能热塑性树脂行业格局。英国 Victrex 公司推动聚醚醚酮 (poly ether ether ketone, PEEK) 工业化, 其连续使用温度最高可达 240 ℃, 可耐受除浓硫酸外的绝大多数化学试剂, 使其能够应用于航空结构件与石油钻探部件。吉林大学于 1990 年取得国内首个 PEEK 合成专利并建立 PEEK 小规模生产线, 标志着我国开始踏入这一尖端领域。相较于 PEEK, 聚醚酮酮 (poly ether ketone ketone, PEKK) 因加工温度略低、热稳定性良好等特性, Solvay 与 Arkema 的 PEKK 产品被 NASA 认证用于太空舱部件。在

此之后, 为进一步攻克 PEEK 及 PEKK 高熔体黏度、高加工温度的工艺瓶颈, Victrex 开发的低熔融温度聚芳醚酮 (low melting temperature poly aryl ether ketone, LMPAEEK) [14-15] 则通过降低约 50 ℃ 的加工温度提高工艺适用性同时兼顾耐热性 [16], 助推航空复合材料自动铺放工艺结构件的制备。2016 年后, 中研股份、吉大特塑等企业实现 PEEK 量产, 国产产能突破千吨, 但目前国内围绕高性能热塑性复合材料所专用的 LMPAEEK 树脂相关产业布局较少。汤原海瑞特工程塑料有限公司在国内率先推出 LMPAEEK 树脂, 年产 500 吨, 已经开始在航空领域形成小批量稳定供货。

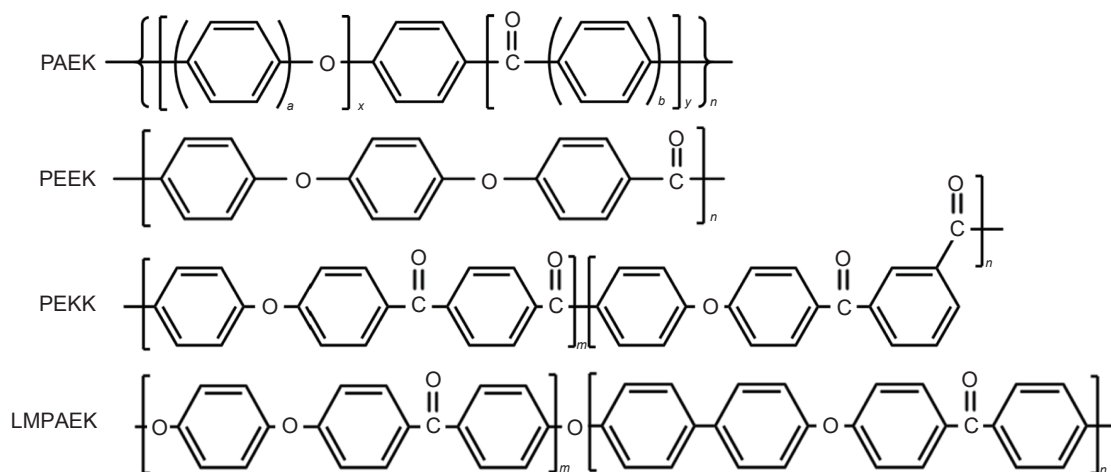


图 1 PAEK 类树脂分子结构

Fig. 1 Molecular structure of PAEK resins

高性能热塑性树脂发展历程见图 2。近年来, 针对热塑性复合材料所用的高性能热塑性树脂, 其发展重心转向工艺适配与可持续性, LMPAEEK 与 PEKK 通过分子结构改性降低熔融温度, 匹配自动铺放/自动缠绕-热压一体化设备, 使航空结构件

生产周期缩短约 30%; 国产化进程同步加速, 万吨级 PPS 基地 (新和成二期)、千吨级 PEI 产线建设试图突破产能限制, 而目前国内也已对标 Victrex LMPAEEK 树脂的性能特点完成了国产 LMPAEEK 树脂量产及工程验证。

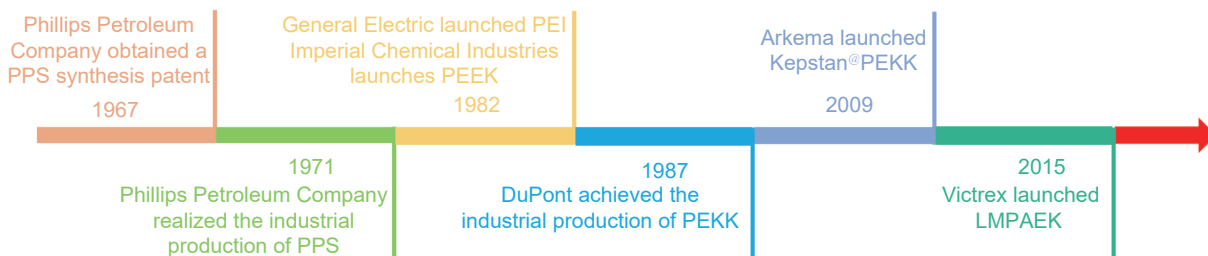


图 2 商品化高性能热塑性树脂发展简图

Fig. 2 Development chart of commercial high-performance thermoplastic resins

2 预浸料制备工艺

高性能热塑性树脂熔融温度高、熔体黏度大,

其预浸料制备的关键在于提高树脂对增强纤维的浸渍程度及效率 [17]。热塑性树脂预浸料主流制备方法是“熔体法”和“粉末法”, 此外, 热塑性预

浸料技术发展过程中,还出现过包括“溶液法”、“纤维混杂法”和“薄膜层叠法”等技术,以适应不同应用需求。

2.1 熔体法

“熔体法”作为最早推出且最先实现工程应用的热塑性树脂预浸料制备技术,其核心原理是通过加热使树脂熔融,在熔融状态下均匀浸渍增强纤维^[18-19],具有树脂含量控制精确、纤维准直性高、无溶剂残留且工艺成本低的优势,尤其适用于 PPS、PEEK 等结晶型热塑性树脂的预浸料生产。然而,该方法仅用于生产单向纤维预浸料,且要求树脂熔融温度低、熔体黏度适中并具备良好的纤维浸润性,同时熔融过程中不发生化学反应,以保证树脂的化学稳定性^[20]。

Cytec 公司(后被 Solvay 收购)于 20 世纪 80 年代推出的 APC 系列预浸料即为“熔体法”的典型代表,也是最早进入成熟应用的高性能热塑性预浸料。采用“熔体法”制造的预浸料 APC-2(碳纤维增强聚醚醚酮 CF/PEEK),利用高温高压热压罐成型,应用于 F22 战斗机舱门、武器舱门、口盖和发动机通道等非承力结构,最大限度发挥热塑性复合材料优异的抗冲击韧性。然而,“熔体法”的技术挑战集中于高黏度树脂与连续纤维的均匀浸渍问题,树脂需在毫米级纤维束间隙与微米级单丝孔隙中充分渗透^[21],其中后者因孔隙微小成为工艺控制难点,同时牵引过程中纤维张力不均易导致局部树脂富集。为此,浸渍温度、浸渍压力与牵引速度的精准调控成为关键。浸渍温度需平衡树脂黏度与热降解风险,增加浸渍压力有助于树脂渗透,但过高压力会导致纤维张力不均,引发弯曲缺陷。牵引速度能够控制纤维在浸渍区的停留时间,时间越长,浸润效果越好,但速度过低可能降低生产效率。

国外“熔体法”的发展主要集中在浸渍模具的优化。1982 年首次采用该工艺制备单向 CF/PEEK 预浸料后, Nygard 等^[22]对模具进行优化,将浸渍速率提升至 10 m/min, Prime 在纤维束入口处安装快门,控制浸渍流程。2010 年至今,该技术趋于成熟, Toray 公司进一步建立纤维预处理装置,实现预浸料厚度和宽度的精确控制。

国内“熔体法”技术起步较晚但进展显著。北京航空材料研究院于 1994 年最早建立熔融浸渍装置的基础体系。此后,北京航空航天大学团队自主研制出一条“熔体法”生产连续纤维增强热塑性预浸料的中试生产线,采用对称热辊挤出技术实现 CF/PEEK 预浸料纤维体积分数稳定(产量达

100 m²/8 h),无需高温模压与精密张力控制。无锡智上新材料科技有限公司采用“熔体法”制备出连续碳纤维增强 PPS 复合材料预浸料,孔隙率低且树脂含量可控。近年来,北京航空材料研究院与东华大学、北京化工大学联合团队成功研发了 LMPAEEK 预浸料的“熔体法”制备工艺并实现稳定连续生产。

2.2 粉末浸渍法

“粉末浸渍法”作为连续纤维增强热塑性预浸料的重要制备技术,将树脂粉末高效分散并附着于纤维表面,具有生产效率高、工艺稳定且易于控制的优点。“粉末浸渍法”可分为“悬浮液浸渍法(泥浆法)”、“流态化床浸渍工艺”和“静电流态化床浸渍工艺”^[23]。

“悬浮液浸渍法”是应用最为广泛的工艺之一,核心步骤为将树脂粉末及其他添加剂配制成为悬浮液,随后使连续碳纤维通过浸胶槽或喷涂装置,再经高温烘干定型制成预浸料。该工艺研究重点在分散剂配方和工艺参数优化,核心是粒径小且均匀的树脂粉末与表面活性剂、水等均匀混合成悬浮液。溶剂能有效浸渍纤维、减少磨损,利用毛细管效应使树脂粉末进入纤维束间,降低加工难度、提高成型质量,但需额外去除溶剂工艺,部分溶剂挥发会污染环境。日本东邦公司(Toho Tenax)提出制备 CF/PEEK 预浸料的分散剂种类、悬浮液浓度及浸渍时间,推动了该技术发展^[24]。近年来,水相分散体系成为研究重点^[25]。采用“悬浮液浸渍法”制备 PEEK 复合材料时,非离子表面活性剂可润湿粉末、避免颗粒絮凝。Song 等^[26]研究了悬浮液稳定性,选用 TritonX-100 和聚乙二醇(PEG)两种非离子表面活性剂混合制备 PEEK 水悬浮液和 CF/PEEK 复合材料。结果表明,两种表面活性剂协同空间位阻效应使 PEEK 悬浮液稳定时间超 50 min,制备的 PEEK 复合材料质量稳定,纤维体积分数约 60%,弯曲强度达 1336 MPa,层间剪切强度(ILSS)为 106 MPa。TenCate 公司(后被 Toray 收购)研发的 TC 系列预浸料采用“悬浮液浸渍法”工艺路线,如 TC1200 等牌号,但是这种方法需要制备 PAEK 树脂超细粉体,预浸料生产成本较高,目前主要集中于高端领域。国内中国航空制造技术研究院也进行了相关技术验证并开展材料、工艺研究工作。

“流态化床浸渍工艺”通过气流悬浮树脂粉末,使纤维穿过流化室时吸附粉末,再经熔融、冷却定型,具有设备简单、连续生产的特点,树脂利用率

高且含量可调,但纤维张力不均易导致粉末分布缺陷。“静电流态化床浸渍工艺”则进一步引入静电发生器,通过电荷吸附增强树脂粉末与纤维的结合力,提升沉积均匀性,但其设备复杂度与能耗较高。

粉末浸渍技术优势在于树脂熔融停留时间短、浸渍效率高、成本低,适用于大规模生产。然而,该方法的可行性取决于热塑性树脂能否经济、便捷地加工成粉末,且树脂粒径越小,加工成本越高。此外,纤维的有限张力难以确保树脂均匀分散,导致树脂粉末的吸附与富集不均,从而影响预浸料内部树脂分布,形成孔隙^[27]。

2.3 溶液法

“溶液法”通过将热塑性树脂溶解于特定溶剂形成低黏度溶液浸渍纤维,随后加热去除溶剂制备预浸料^[28],工艺简单但受限于树脂可溶性及溶剂污染问题。以 PEEK、PEKK 为例,其仅溶于浓硫酸等高腐蚀性溶剂,制约了“溶液法”制备预浸料的应用^[29-30]。为此,研究者通过分子改性拓展树脂的溶剂适配性。Li 等^[31]将氨基引入杂萘联苯聚醚酮(PPEK)制备出氨基化杂萘联苯聚醚酮(PPEK-NH₂),使其可溶于 N-甲基吡咯烷酮(NMP)并与杂萘联苯聚醚酮(PPBES)共混,制得的 CF/PPBES 预浸料层间剪切强度与弯曲强度较未改性材料提升 13%~17%。陈平团队^[32]采用 N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)溶解聚芳醚酮(PPEK),浸渍碳纤维制得预浸料,推动该工艺在航空航天领域的应用。然而溶剂残留导致的孔隙率升高^[33]、烘干能耗与环保隐患仍阻碍其工业化应用^[34]。

2.4 纤维混杂法

“纤维混杂法”通过将树脂纤维与增强纤维物理混合突破高黏度树脂浸渍难题,在编织过程中,纤维容易出现断裂损伤和屈曲^[35],导致复合材料性能受到影响,此外树脂纤维和增强纤维之间明显的界面及复合均匀性难以保证,导致其界面状态不如粉末浸渍法。“纤维混杂法”包括“混纤法”和“混编法”,其中,“混纤法”^[36]将树脂纤维与增强纤维合股成束后熔融定型,可灵活调节纤维/基体比例,但受限于树脂成纤性及纺丝高温导致的流动性下降^[37];“混编法”则将树脂纤维与碳纤维编织成混合织物,利用热压使树脂熔融渗透^[38]。

2.5 薄膜叠层法

“薄膜叠层法”则通过交替堆叠树脂薄膜与纤维织物加热加压浸渍,缩短树脂渗透路径^[39]。该方法要求树脂薄膜稳定均匀,在国际市场上,其价

格甚至高于热塑性预浸料^[40]。该工艺需精准平衡温度、压力与时间,压力过高会压缩纤维间隙阻碍树脂渗透,而温度过高则引发树脂降解,导致力学性能下降。尽管成本高昂,其工艺稳定性仍使其在特定高精度场景中占据一席之地,且仅用于生产织物型预浸料。

“熔体法”和“粉末法”都具有生产效率高、环保性好、成本控制佳、产品质量稳定以及对高性能热塑性树脂适用性强等优势,因此尽管已出现过多种预浸料工艺,但目前只有这两种工艺实现规模应用,未来随着自动化、智能化和环保型材料的应用,预浸料制备技术将进一步提升,满足各行业对高性能复合材料的需求。

3 商品化高性能热塑性预浸料发展

预浸料可通过铺层设计优化性能,充分发挥树脂基复合材料的可设计性^[41-42]。热塑性预浸料在 20 世纪就用于制造复合材料部件,尤其在军事和国防领域占据重要地位。经过一系列的并购整合,近年来主要由 Solvay 和 Toray 主导相关业务并形成全产业链优势。代表性产品如 Toray Cetex[®] TC1100 等碳纤维增强聚苯硫醚(CF/PPS)预浸料、Toray Cetex[®] TC1200 等 CF/PEEK 预浸料以及 Solvay APC 系列产品覆盖航空航天高端应用,相关预浸料性能如表 2^[43-45]所示。

3.1 PPS 热塑性预浸料

20 世纪 90 年代起,PPS 预浸料^[46]开始应用于航空领域。目前,Toray Cetex[®] TC1100 系列 PPS 预浸料产品成熟度较高,包括单向带及玻璃纤维织物增强聚苯硫醚(GFF/PPS)、碳纤维织物增强聚苯硫醚(CFF/PPS)热塑性预浸料,在航空领域应用广泛。Barrday 公司生产预浸料牌号为 TU100 PPS TAPE,此外,Teijin 和 Solvay 等企业开发的热塑性预浸料也实现商业化。目前工程应用的 PPS 热塑性预浸料多由国外企业提供,国内企业如苏州挪恩、亨博、韩塑、无锡智上等也已推出 CF/PPS 单向带,未来将批量化生产,有望打破国外垄断,降低成本,并推动国产材料在多领域的应用。

3.2 PAEK 类热塑性预浸料

PAEK 类热塑性预浸料是应用最为广泛的高性能热塑性复合材料,发展流程见图 3。Toray 的 PEEK 预浸料产品齐全,包括碳纤维、玻璃纤维和碳纤维织物增强的热塑性预浸料,牌号为 Toray Cetex[®] TC1200。Solvay 和 Barrday 以单向带为主,

表 2 商品化高性能热塑性预浸料性能^[43-45]
Table 2 Performance of commercialized high-performance thermoplastic prepregs^[43-45]

Property	Methods	CF/PPS (Toray Cetex [®] TC1100)	CF/PEI (APC PEI)	CF/PEEK (APC-2)	CF/LMPAEK (Toray Cetex [®] TC1225)
0° tensile strength/MPa	ASTM D 3039	2020	2000	2070	2410
0° tensile modulus/GPa	ASTM D 3039	134	131	138	135
90° tensile strength/MPa	ASTM D 3039	39		90	86
90° tensile modulus/GPa	ASTM D 3039	10		10.2	10
0° compressive strength/MPa	ASTM D 6641	1100	1100	1360	1300
0° compressive modulus/GPa	ASTM D 6641	117	117	124	124
90° flexural strength/MPa	ASTM D 7264	68			152
0° flexural strength/MPa	ASTM D 7264		1930	2000	
Interlaminar shear strength/MPa	ASTM D 2344				96.5
In plane shear strength/MPa	ASTM D 3518	82	138	186	152
In plane shear modulus/GPa	ASTM D 3518	3.5	5	5.7	4.3
Open-hole tensile strength/MPa	ASTM D 5766			386	448
Open-hole compressive strength/MPa	ASTM D 6484	267		324	310
Compression after impact/MPa	ASTM D 7137	216	352	338	310



图 3 PAEK 类热塑性预浸料发展流程图

Fig. 3 Diagram of the development process of PAEK thermoplastic prepregs

如 APC-2、TU200。Teijin 推出 Tenax[®]-E TPUD PEEK-HTS45 单向带和 Tenax[®]-E TPWF PEEK-HTA40 织物增强产品。国内江苏韩塑等公司也提供 PEEK 预浸料产品。

商品化 PEKK 热塑性预浸料产品以单向带为主, 牌号有 Toray Cetex[®] TC1320、APC(PEKK-FC)、TU300 PEKK TAPE。在 LMPAEK 热塑性预浸料方面, 国外主要供应商是 Toray、Victrex, 如以碳纤维增强单向带等形式销售的 Toray Cetex[®] TC1225 和 VICTREX AE[™]250。国内北京航空材料研究院与东华大学、北京化工大学合作成功开发出 CF/LMPAEK 预浸料生产线, 并实现小批量产及工程验证, 相关产品性能见表 3。

3.3 PEI 热塑性预浸料

目前 PEI 热塑性预浸料^[47] 的商业化产品主要

由 Toray、Solvay 和 Barrday 等公司提供, Toray 主要提供碳纤维织物增强聚醚酰亚胺(CFF/PEI)和玻璃纤维织物增强聚醚酰亚胺(GFF/PEI)热塑性预浸料, 牌号为 Toray Cetex[®] TC1000。Solvay 和 Barrday 则分别提供碳纤维增强聚醚酰亚胺(CF/PEI)单向带, 牌号为 APC[™](PEI)和 TU400 PEI TAPE。国内关于 PEI 预浸料的商业化应用很少, 现有产品多为科研领域的基础研究成果, 尚未形成较为成熟的商品化市场, 这主要与国内 PEI 树脂的工程化技术水平及应用领域限制有关。

4 高性能热塑性复合材料成型工艺发展及应用

自 1951 年首次采用玻璃纤维增强聚苯乙烯(GF/PS)制造复合材料以来, 连续纤维增强高性能

表3 国产 CF/LMPAEK 热塑性预浸料性能
Table 3 Properties of domestic CF/LMPAEK thermoplastic prepreg

Property	Methods	Domestic T700/LMPAEK	Domestic T800/LMPAEK	HS6/ LMPAEK	EW110C/ LMPAEK
0° tensile strength/MPa	ASTM D 3039	2456	2997	1169	317
0° tensile modulus/GPa	ASTM D 3039	143	174	65	18
90° tensile strength/MPa	ASTM D 3039	70	73		345
90° tensile modulus/GPa	ASTM D 3039	10	9		18
0° compressive strength/MPa	ASTM D 6641	1208	1382	1260	408
0° compressive modulus/GPa	ASTM D 6641	125	149	61	23
90° compressive strength/MPa	ASTM D 6641	179	182		398
90° compressive modulus/GPa	ASTM D 6641	10.6	9.8		23.6
0° flexural strength/MPa	ASTM D 7264	1695	1461	1247	425
0° flexural modulus/GPa	ASTM D 7264	143	133	48	22
Interlaminar shear strength/MPa	ASTM D 2344	90	90	83	63
In plane shear strength/MPa	ASTM D 3518	71	68	68	71
In plane shear modulus/GPa	ASTM D 3518	4.6	3.5	4.0	3.2
Open-hole tensile strength/MPa	ASTM D 5766	479	509		
Open-hole compressive strength/MPa	ASTM D 6484	310	310		
Compression after impact/MPa	ASTM D 7137	348	370		

热塑性复合材料因其高强度、耐环境性、可再加工性和良好抗冲击、耐疲劳性能等优势^[48],受到广泛关注,同时成型周期短、生产效率高,广泛应用于航空航天、海洋装备及交通运输等领域^[49-50]。在航空制造技术领域,可用于前缘、舱门、口盖等易受冲击或需频繁装卸的部位,有效弥补热固性复合材料层间韧性不足、抗冲击性和开孔性能较差的缺陷^[51-56]。

然而,由于树脂黏度高导致成型难度大、树脂含量难以控制等问题,使得低成本、高效制造工艺成为研究重点^[57]。近年来,随着高性能热塑性树脂体系的突破与成型工艺的创新,两者间的深度协同推动了材料从实验室迈向规模化生产。目前成熟的主流工艺包括热压、自动铺放、自动缠绕及焊接成型等。

4.1 热压成型

热压成型工艺是目前应用最广泛的热塑性复合材料成型技术,已获波音(Boeing)、空客(Airbus)等公司的认证,并成熟应用于多种民用飞机^[58]。根据加热加压方式不同,可分为热压罐成型和模压成型。航空领域的复合材料结构件超80%采用热压罐成型,包括机身、方向舵、尾翼、升降舵、机翼蒙皮等^[59]。该工艺能提供均匀的温度与压力场^[60],

因此产品成型质量稳定可靠,适用于大型复杂结构件。模压成型^[61]工艺工序简便,成型周期短、能耗低、成本较低,适用于加工预浸料或纤维编织物与树脂薄膜层叠料等片材^[62],主要适用于结构简单的制品,如机身连接框、蒙皮角片、活动面及操纵面的肋板等,对于形状复杂的制件仍存在成型难度,限制了其在高端制造中的应用^[63]。相比热压罐成型,该工艺在时间和成本上更具优势^[64]。

研究发现^[65-71],热压工艺制备的CF/PEEK复合材料抗冲击损伤能力和耐摩擦性能优异,湿热处理后弯曲及压缩性能几乎不受影响。因此可以代替传统金属材料应用于复杂的海洋环境中,如船用螺旋桨、轴系及传动部件等船舶推进系统。热塑性复合材料结构通过热压成型工艺,在Boeing、Airbus、Fokker等公司所生产的飞机中得到广泛应用,如机身、整流罩、升降舵和方向舵等部件^[59]。德国Xperion公司使用连续模压成型工艺,为Airbus A330/A340飞机研制出室内侧壁板横杆扣件(图4)^[72]。该结构件选用CF/PEI热塑性复合材料,与传统铝合金制件相比减重约50%,成本降低约21%。Airbus A340-500/600飞机的机翼前缘结构采用TenCate提供的GF/PPS复合材料,通过热压成型实现结构减重20%^[73]。随着技术成熟,

Airbus A380 机翼前缘广泛应用玻璃纤维增强聚苯硫醚 (GF/PPS) 热塑性复合材料, 每架 A380 包含 16 个前缘组件 (长 3~4 m), 由蒙皮和加强筋条构成。蒙皮采用自动铺放成型, 加强筋由 GF/PPS “半预浸料” 层压板热压成型, 并优化筋条设计, 实现超过 20% 的减重。



图 4 Xperion 公司研制的 CF/PEI 热塑性复合材料卡扣^[72]
Fig. 4 CF/PEI thermoplastic composite clip manufactured by Xperion^[72]

湾流 G650 飞机的方向舵和升降舵由 Fokker 航空公司采用 Toray Cetex®CF/PPS 预浸料热压成型制造, 这些部件通过高温热压罐固化, 并通过感应焊接技术连接至蒙皮和梁, 铰链则采用钛合金 3D 打印制造, 该技术荣获 JEC2010 创新奖, 目前已有超过 500 架 G650 正在服役, 证明了热压成型及感应焊接工艺的可靠性。此外, 巴西航空工业公司 (Embraer) 飞鸿 100 公务机的水平尾翼肋由 TenCate 提供的 CF/PPS 制造, 进一步证明该工艺的应用优势。基于热压成型的热塑性复合材料也广泛应用于民机副翼肋等结构件, 在成型周期、成本和减重方面展现出显著优势。

4.2 自动铺放成型

自动铺放原位成型 (automated fiber placement,

AFP) 在实际生产中常与热压工艺相结合制备性能合格的产品。自动铺放工艺可以分为自动铺丝和自动铺带两类, 与传统方法相比, 该技术可高效、高质量制造大型复杂构件, 并依托数字化控制确保纤维铺设方向的精准性。近年来, 激光加热技术的应用提升了热塑性复合材料铺放效率, 使其成为关键技术之一。成型过程中需将基体加热至熔融温度, 对熔融温度超过 300 °C 的基体常采用激光、热风枪和闪光灯等加热源^[74-75]。

红外激光器 (波长约 1000 nm) 广泛应用于 AFP 成型技术, 可提供高达 600 °C 的加热温度, 适用于 PEI、PAEK 等热塑性树脂基复合材料成型。通过调节激光功率和铺放速度可控制加热温度, 进而优化结晶度和最终制品性能。热风枪加热利用热对流作用, 使材料缓慢升温, 尽管效率较低, 但成本较低, 适用于熔融温度较低的纤维增强热塑性复合材料。近年来, HUMM3 快速闪光系统等新型热源技术得到发展, 英国贺利氏光源研发的 HUMM3 系统可实现与激光加热相似的加热效率, 并通过脉冲光精确控制传热, 具备更高的安全性和应用潜力。

国外在热塑性复合材料 AFP 成型技术方面起步较早, 已形成较成熟的技术体系。美国 Automated Dynamics 公司采用 AFP 原位成型技术生产热塑性复合材料制品, 年产量超 5 吨。2021 年, 德国航空航天中心 (DLR) 公布其热塑性复合材料自动铺丝设备进展 (图 5(a))^[76], 采用 CF/PPS 预浸料, 纤维体积分数 55%, 预浸料宽 12.7 mm、厚 0.19 mm, 设备包括 6 轴机器人, 采用半导体激光加热。同年, 澳大利亚新南威尔士大学研发出一款采用热风枪加热的机器人式自动铺放设备^[77]。2021 年起, 美国 Electroimpact (EI) 公司^[78] 多次发布其热塑性复合材料铺丝机进展。2021 年 1 月该公司推出 “Scorpion” 模块化系列设备 (图 5(b))^[79], 可用于

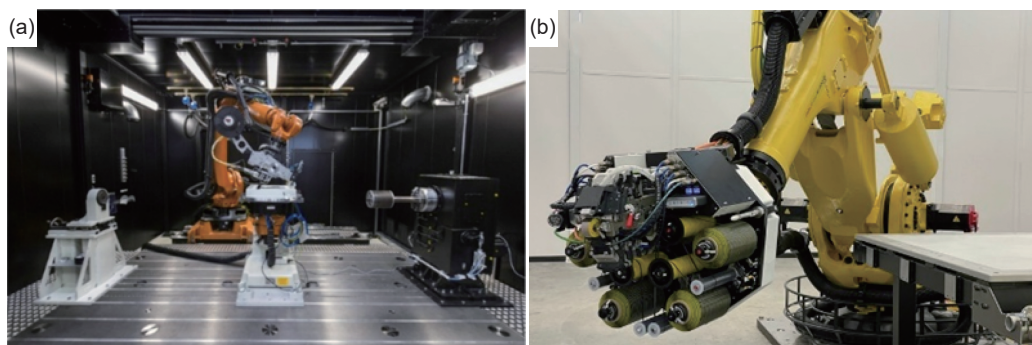


图 5 DLR 的热塑性复合材料自动铺丝设备 (a)^[76] 和美国 EI 公司 Scorpion 铺放系统 (b)^[79]

Fig. 5 Automatic thermoplastic composite placement equipment of DLR (a)^[76] and scorpion laying system of American EI company (b)^[79]

铺放热固性、热塑性及干纤维材料。2022年2月,美国NIAR-WSU大学和Vitrex公司联合使用EI公司铺丝机为AFP成型技术提供NCAMP材料和工艺认证,推进工业化应用。

国内在热塑性复合材料AFP成型技术方面研究起步较晚。20世纪90年代,北京航空材料研究院针对热塑性预浸带和火焰辅助自动铺放技术展开研究。南京航空航天大学也对热风枪加热低熔

融温度热塑性复合材料的AFP工艺进行了验证(图6(a))^[80]。近年来,西安交通大学团队自主研发了原位成型设备^[75, 81]。2018年,该团队研制出激光加热单通自动铺放设备,系统研究铺放压力等工艺参数对制品质量的影响。2021年,开发国内首台闪光系统加热机器人式自动铺放设备(图6(b)),温度可达到800℃,压力可超过1000N,满足PPESK等高性能基体成型需求^[81]。

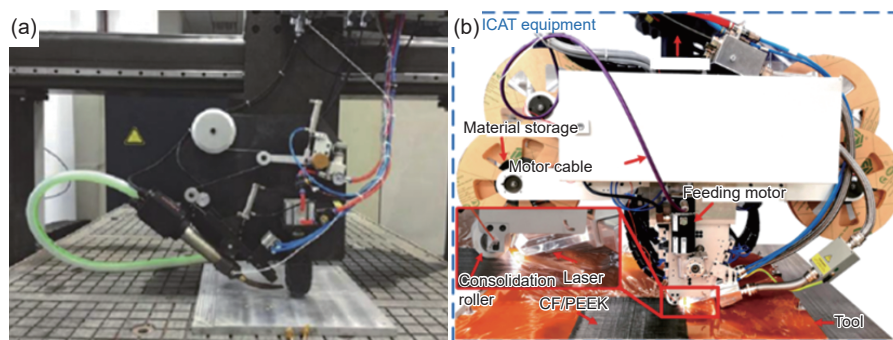


图6 南京航空航天大学自动铺放工艺试验机(a)^[80]和西安交通大学研发的六通道闪光系统加热原位成型设备(b)^[81]

Fig. 6 Automatic laying process testing machine of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(a)^[80] and the six-channel flash system *in-situ* forming equipment for heating developed by Xi'an Jiaotong University(b)^[81]

荷兰国家航空航天实验室(NLR)采用TC1320 CF/PEKK预浸料经AFP工艺成型制备发动机短舱吊梁(图7(a))^[82]。短舱吊梁长6m,厚度28mm,和原金属短舱吊梁相比,热塑性复合材料短舱吊梁显著降低制造成本和减轻结构质量。航天领域中DLR主导的ATEK项目中,以设计可重复使用、可回收的航天器部件为目标,将火箭结构中的铝金属部件替换成CF/PEEK复合材料(图7(b)),并成功用于探空火箭的测试,显著降低生产成本^[83]。

欧盟Clean Sky 2计划“多功能机身验证件”(MFFD)项目交付的热塑性上机身段(图8)^[84],采

用激光辅助加热技术原位固结成型,无需传统的真空袋或热压罐工艺,明显提高了生产效率。尽管AFP原位成型技术取得显著进展,但仍面临孔隙含量高、结晶度难控、层间性能差及翘曲变形等问题。原位成型构件孔隙含量平均3%~5%,而热压罐和热压处理的构件可低于0.5%^[85]。要满足航空航天领域孔隙含量低于1%的要求,仍需进一步优化工艺,以提升产品质量和可靠性。

因此,在航空领域实际应用过程中,常将热压成型或真空袋工艺与自动铺放工艺相结合,既能提高生产效率,又能进一步满足复合材料结构件质量

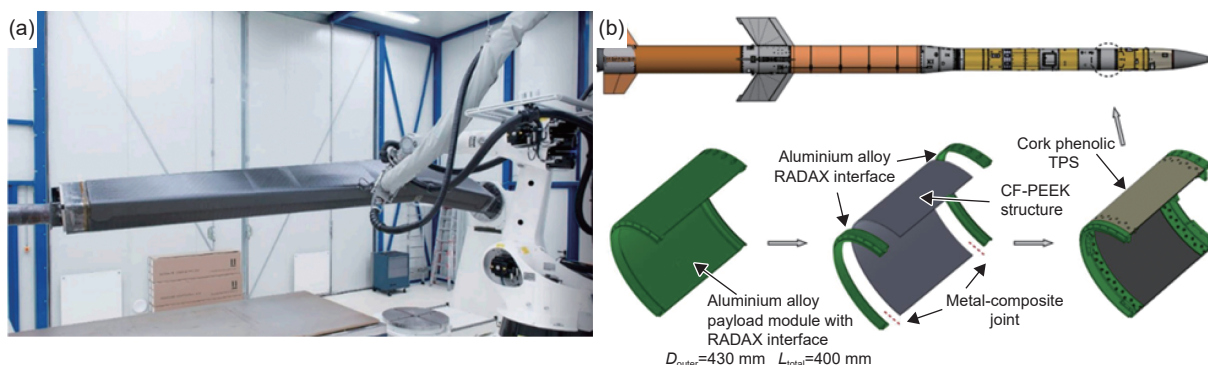
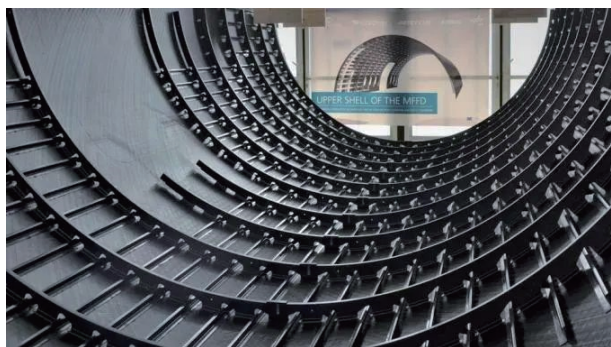


图7 TC1320成型发动机短舱吊梁(a)^[82]和ATEK项目中的火箭(上)以及被CF-PEEK热塑性复合材料替代的旧铝合金部件(下)(b)^[83]

Fig. 7 TC1320 molded nacelle pylon(a)^[82] and ATEK rocket(above) and reference module in original and CFRP replacement form(below)(b)^[83]

图8 MFFD项目交付机身段^[84]Fig. 8 Fuselage segment for the MFFD project^[84]

要求。MFFD项目的下半机身段以及地板梁等结构件的制造先使用自动铺放工艺快速铺层,再放入热压罐内进行固结。

如今,AFP自动化原位成型设备的发展伴随更低熔融温度与熔体黏度树脂(如LMPAEEK)的研发与工程化应用,工艺难度与成本逐步降低,生产效率稳步提升,应用前景广阔。然而,国内在高性能预浸料、自动铺放设备及工程化应用方面仍与国外存在差距,需加强技术攻关以推动产业化进程。

4.3 自动缠绕成型

自动缠绕成型通过将浸有热塑性树脂的纤维丝束在加热状态下按设定角度缠绕在芯模上,成型后脱模得到最终产品。该工艺适用于回转体结构制造,在圆柱形管道、压力容器、火箭发动机外壳等领域应用广泛。

早期缠绕技术主要用于热固性复合材料,因其树脂黏度低易于纤维浸渍,但需后固化且不可二次成型。相比之下,热塑性复合材料可原位固结,且可重复加热成型,成为自动化制造的研究重点。预浸料经激光加热后缠绕,随后加热加压以消除层间空隙,提高致密性。激光加热缠绕的温度场受激光功率、辐照角度、能量分布等因素影响,需精准控制以降低孔隙率、减少翘曲变形,提高层间结合性能。图9为激光加热自动缠绕成型设备^[86]。

20世纪80年代,随着连续纤维热塑性树脂浸渍技术的突破,热塑性缠绕成型工艺开始发展^[87]。Dupont公司研究了预浸料缠绕/后固化工艺,采用网格状预浸带进行初步成型,随后在非回转模具中加热熔融并固结以提高密实度。德国AFPT GmbH公司研发的单带缠绕头(STWH)、容器缠绕头(VWH)及环形绕组头(RWH)(图10)^[88]广泛应用于自动缠绕成型。STWH可精准控温,实现张力与压辊固结力的连续调节;VWH专用于热塑性压力容器缠绕;RWH适合集成旋转生产线,实现高效

图9 激光加热自动缠绕成型设备^[86]Fig. 9 Laser heating automatic winding molding equipment^[86]

连续制造。欧美国家已将该技术应用于航天部件、风力发电机叶片和深海压力容器等高端制造领域。

随着能源危机问题的加剧,氢能作为一种无污染且燃烧值高的清洁能源受到世界各国的重视。我国一系列政策推动了氢能源汽车的发展,同时氢能源汽车的飞速发展也对储氢气瓶提出更高的要求。经过50多年的发展,储氢气瓶已经从钢瓶发展到复合材料气瓶,安全性得到显著提高。复合材料气瓶经缠绕后固结成型,加拿大Dynetech企业推出的Dynercell储氢气瓶创新采用铝合金内胆结构,外层采用高强度碳纤维复合材料缠绕成型。该产品可在 $-45\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间实现安全使用。目前该企业已掌握70 MPa级复合材料高压储氢气瓶的规模化生产能力。

国内相关团队在热塑性复合材料缠绕成型工艺方面也开展了相关研究工作。南京航空航天大学开展了热塑性复合材料铺放及大张力成型方面的验证性工作,近10年来,完成热气炬、红外、超声、激光等不同热源自动铺放-缠绕原位固结成型技术研究工作,形成热塑性复合材料结构设计、材料开发、成型工艺、专用装备等成套自主知识产权技术。其中,基于国产T800级碳纤维增强热塑性复合材料大张力缠绕原位成型的部分产品已经实现装备列装。辽宁省先进树脂基复合材料制备技术重点实验室^[89]采用在线溶液浸渍缠绕/原位固结工艺制备PPESK复合材料套筒部件和NOL环,并研究出GF/PEK-C复合材料的原位固化缠绕成型工艺,分析工艺参数对NOL环ILSS的影响。近年来,哈尔滨工业大学等单位开展了基础研究,西安交通大学研制出六轴机器人驱动自动缠绕设备,并采用激光辅助加热实现原位固化成型。

总体而言,国内热塑性复合材料缠绕成型及相

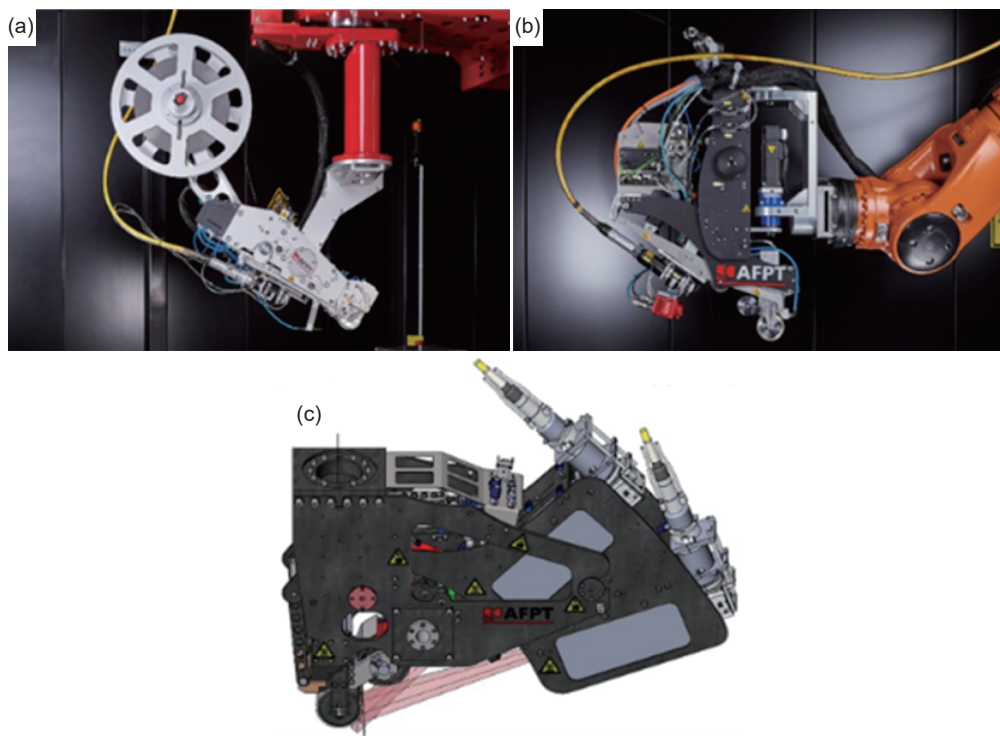


图10 德国AFPT公司研发的热塑性复合材料缠绕设备^[88] (a)单带缠绕头;(b)容器缠绕头;(c)环形绕组头

Fig. 10 Thermoplastic composite winding equipment developed by German AFPT company^[88]
(a)single-tape winding head; (b)vessel winding head; (c)annular winding head

关设备研究起步较晚,设备自动化、工艺控制及工程化应用方面与国际先进水平仍有较大差距,尤其在高精度数控缠绕设备领域存在一定的不足^[90]。未来需加强产学研用协同攻关,推动工程化应用,以提升先进复合材料自动化制造水平。

4.4 焊接技术

热塑性树脂可多次加热冷却而不影响其力学性能,因此焊接技术与热塑性树脂及其复合材料极为匹配,其连接强度与传统连接方式相同或更佳。焊接方法包括电阻焊接^[91]、感应焊接^[92]及超声波焊接^[93-94]等。有效焊接依赖于理解材料物理特性和对焊接过程中温度和压力的精确控制,以确保焊接质量满足工业应用需求^[95]。

国外焊接技术研究开展较早,并成功应用于航空结构件的制造。Xiao等^[96]通过优化工艺,使用APC-2预浸料制作加热元件焊接CF/PEEK复合材料,层合板单搭接剪切强度达到33.9 MPa。考虑到热固性复合材料的广泛应用及不同材料结合的优势,焊接技术也被用于连接热固性和热塑性复合材料,该过程通过在热固性层压板表面共固化热塑性聚合物层实现,如PEI、聚砜等热塑性材料用于提高环氧树脂韧性,但该工艺面临避免热固性聚合物在高温下热降解的挑战。Villegas等^[97]提出基于超声波焊接工艺,缩短加热时间至几十到几百毫

秒,从而有效防止热降解。部分学者则采用浸渍热塑性薄膜的纤维织物涂覆热固性复合材料层压板。Ageorges等^[98]研究了焊接压力、时间、功率等对单搭接接头强度的影响,绘制出GF/PEI复合材料层合板焊接功率与时间关系的工艺窗口,发现合适的工艺窗口能获得较大的单搭接剪切强度,并指出失效模式通常为加热元件或层合板撕裂。研究还发现,焊接长度增加时,电流泄漏会导致强度下降,通过使用GF/PEI夹层绝缘可以消除泄漏,从而实现大尺寸焊接。

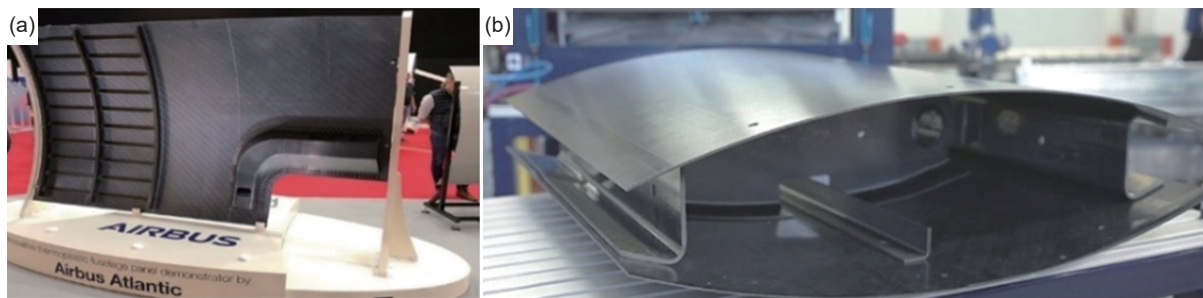
电阻焊接和感应焊接广泛用于航空组件制造装配,降低了装配时间和成本。电阻焊接通过在待连接零件之间植入电阻加热体,通过电阻发热熔融基体实现连接。如Airbus A340-600和A380机翼前缘(图11)^[99]、A400M军用运输机驾驶员座舱板主操纵面、Fokker50支线客机主起落架舱门均通过电阻焊接组装。2021年,DLR与Airbus合作,采用电阻焊接实现一种集成机身交叉件框架与夹板的焊接,该结构由CF/PAEK制成(图12)^[100]。

感应焊技术通过交变电磁场作用于焊接面,使材料产生感应电流并发热,从而实现熔化连接。碳纤维自身具备感应发热能力,但为了更有效地将感应生热集中在连接界面,通常还需要额外添加感应发热元件。Clean Sky 2计划中多功能机体演示器

图 11 A380 飞机机翼前缘^[99]Fig. 11 A380 J-shaped head^[99]

的法兰盘、Fokker 公司湾流 G650 型公务机和 Dassault Systèmes 公司 F6X 的方向舵和升降舵、湾流 G650 尾翼、Bell V-280 Valor 倾转旋翼机的方向

舵和 Airbus A220 的油箱检修板等由感应焊接组装^[101]。此外,感应焊接技术还用于汽车保险杠、仪表盘等热塑性部件的连接和组装。2020 年,一级飞机制造商 Aernnova Aerospace 使用自动感应焊接实现集成门壁板结构的制造。2021 年,美国 Qarbon Aerospace 公司采用感应焊接制造机翼盒结构,焊接速度达到 0.75 m/min。同年 Airbus 的一级供应商 Stelia Aerospace 联合其下游厂商,使用连续感应焊接设备,实现长达 1 m 的弯曲机身面板的制造(图 13(a))^[102]。2022 年,荷兰 KVE Composites 公司采用焊接制造尺寸达 0.6 m×0.6 m 的弧形扭转箱子(图 13(b))^[103],该构件多道曲面与平面感应焊缝,验证了感应焊接工艺对复杂结构的高适应性。

图 12 感应焊接制造曲面集成机身交叉件^[100]Fig. 12 Induction welding to manufacture curved integrated fuselage cross parts^[100]图 13 感应焊接制备 1 m 弯曲机身面板(a)^[102]和感应焊接制造弧形扭转箱(b)^[103]Fig. 13 Induction welding preparation of 1 m curved fuselage panel(a)^[102] and induction welding fabrication of arc-shaped torsion box(b)^[103]

超声波焊接(图 14)^[104]作为一种新兴的热塑性复合材料连接与修复技术,具有快速、高效等优势,能够在不到 5 s 的时间内形成热塑性复合材料焊接接头,因此适用于点焊。随着基于机器人应用的连续化超声焊接技术的推出,也为超声波焊接在大型结构中的应用提供了可能性。北京理工大学团队以带有开孔损伤的 CF/PPS 热塑性复合材料为研究对象,采用超声波焊接外部补片修复^[105]。实

验发现,当焊接时间控制在 1.25~1.5 s 时,修复后的样品拉伸强度较未修复的损伤样品提升约 40%,弯曲强度更是提高了约 115%。同时,超声波焊接修复显著降低了损伤区域周边的应力集中,有效缓解应力集中现象。

在航空领域,热塑性复合材料从次承力结构向主承力部件发展。但大厚度构件(如 28 mm 吊梁)的焊接热传导不均、多材料混合界面的结晶度差异

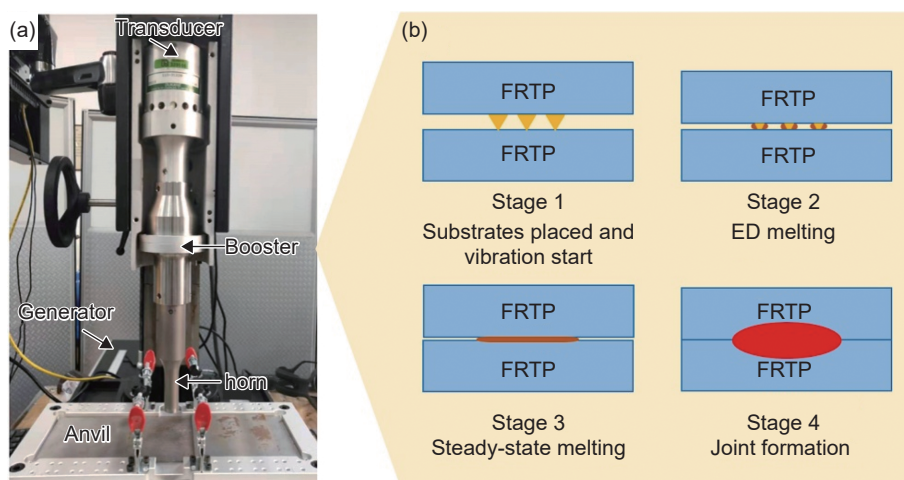


图 14 纤维增强热塑性复合材料的超声波焊接示意图^[104] (a)超声波焊机;(b)焊接阶段

Fig. 14 Schematic diagram of USW of FRTPs^[104] (a)ultrasonic welder; (b)welding stages during the welding process

等问题仍制约技术普及。可以预见,焊接与热压工艺的协同进化将持续释放高性能热塑性复合材料的潜能,推动高端装备制造向更轻、更强、更智能的方向跨越。

5 结束语

高性能热塑性复合材料的制造技术始终与树脂体系的演进紧密交织。材料方面,从最初工艺难度较大,成本较高的 PEEK 作为基体树脂的复合材料体系,向着具有较低工艺温度及制造成本的,以较低熔融温度 LMPAEEK 作为基体树脂的复合材料体系发展;工艺方面,耗能、耗时且制造成本居高不下的热压罐工艺,已向着高效率低成本自动铺放/缠绕原位成型、自动化焊接成型技术发展。未来发展方向将聚焦于以下 3 个方面:

(1)低成本工程应用:持续开展高性能热塑性复合材料应用基础和工程应用研究,发展完善低成本自动铺放/缠绕原位成型、整体结构自动化焊接技术,降低高性能热塑性复合材料制造成本,推动高性能热塑性复合材料在航空航天装备主承力结构应用。

(2)多功能一体化:高性能热塑性复合材料将朝着多功能一体化方向发展,在保持优异力学性能的同时,融入电磁屏蔽等功能,使复合材料产品更好地满足航空航天等领域的复杂需求。

(3)绿色可持续发展:随着环保意识的日益增强,高性能热塑性复合材料一方面将致力于优化回收技术,提高复合材料的可回收性,另一方面应积极探索生物基与可降解材料,降低对传统石油基原料的依赖,进而减少碳排放。

参考文献:

- [1] NISHIDA H, CARVELLI V, FUJII T, et al. Thermoplastic vs. thermoset epoxy carbon textile composites [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tokyo: IOP Publishing, 2018, 406(1): 012043.
- [2] 王兴刚, 于洋, 李树茂, 等. 先进热塑性树脂基复合材料在航天航空上的应用[J]. 纤维复合材料, 2011, 28(2): 44-47.
WANG X G, YU Y, LI S M, et al. Application of advanced thermoplastic resin matrix composites in aerospace[J]. Fiber Composites, 2011, 28(2): 44-47.
- [3] YAO S S, JIN F L, RHEE K Y, et al. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: a review[J]. Composites Part B, 2018, 142: 241-250.
- [4] GABRION X, PLACET V, TRIVAUDEY F, et al. About the thermomechanical behaviour of a carbon fibre reinforced high-temperature thermoplastic composite [J]. Composites Part B, 2016, 95: 386-394.
- [5] MANTELL S C, SPRINGER G S. Manufacturing process models for thermoplastic composites[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(16): 2348-2377.
- [6] CELANESE. CAMPUS plastics | datasheet FORTRON® 0320[EB/OL]. (2024-12-20)[2025-05-07]. <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/FORTRON%200320/Ticona/163/4cb0bd46/US>.
- [7] VICTREX.450G™PEEK[victrex][EB/OL]. [2025-05-07]. <https://www.victrex.com/zh-hans/products/polymers/peek-polymers/450g>.
- [8] ARKEMA. PEKK polyetherketoneketone | arkema global [EB/OL]. [2025-05-07]. <https://www.arkema.com/global/en/products/product-families/pekk-kepstan/>.
- [9] VICTREX. VICTREX LMPAEEK™ polymer 103 PWD-

- datasheet[EB/OL]. [2025-05-07]. <https://www.victrex.com/en/downloads/datasheets/victrex-Impaek-polymer-103-pwd>.
- [10] SABIC. ULTEM™ resin 1040P-SABIC material finder [EB/OL]. (2023-11-09) [2025-05-07]. <https://materialfinder.sabic-specialties.com/material/ultem-resin-1040p>.
- [11] KAYGINOK F, KARABAL M, YILDIZ A, et al. CNT reinforced PEI and PEEK nanocomposites: a comparison on the thermal and rheological properties[J]. *Polymer Testing*, 2024, 137: 108519.
- [12] 万涛. 聚苯硫醚的合成与应用[J]. *弹性体*, 2003, 13(1): 38-43.
WAN T. Synthesis and application of PPS[J]. *Elastomers*, 2003, 13(1): 38-43.
- [13] 王新威, 胡祖明, 刘兆峰. 聚醚酰亚胺的性能、聚合与纺丝研究[J]. *材料导报*, 2007, 21(增刊1): 408-412.
WANG X W, HU Z M, LIU Z F. Performance, polymerization and spinning research of PEI[J]. *Materials Review*, 2007, 21(Suppl 1): 408-412.
- [14] CARLILE D R, LEACH D C, MOORE D R, et al. Mechanical properties of the carbon fiber/PEEK composite APC-2/AS-4 for structural applications[M]// G M NEWAZ. *Advances in Thermoplastic Matrix Composite Materials*. Pennsylvania: ASTM International. 1989.
- [15] JOGUR G, NAWAZ KHAN A, DAS A, et al. Impact properties of thermoplastic composites[J]. *Textile Progress*, 2018, 50(3): 109-183.
- [16] YAP T, HEATHMAN N, PHILLIPS T, et al. Additive manufacturing of polyaryletherketone(PAEK) polymers and their composites[J]. *Composites Part B*, 2023, 266: 111019.
- [17] 杨洋, 徐捷, 原崇新, 等. 连续纤维增强聚苯硫醚预浸料自动铺丝工艺与热塑性复合材料性能研究[J]. *纤维复合材料*, 2020, 37(1): 3-9.
YANG Y, XU J, YUAN C X, et al. Research on the automatic fiber placement process of continuous fiber reinforced PPS prepreg and the properties of thermoplastic composites[J]. *Fiber Composites*, 2020, 37(1): 3-9.
- [18] 顾子琛. 喷熔法碳纤维聚苯硫醚预浸料的制备及性能表征[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
GU Z C. Preparation and characterization of melt-spun carbon fiber/ PPS prepregs[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [19] STUDER J, DRANSFELD C, CANO J J, et al. Effect of fabric architecture, compaction and permeability on through thickness thermoplastic melt impregnation[J]. *Composites Part A*, 2019, 122: 45-53.
- [20] CHEN J, WANG K, DONG A, et al. A comprehensive study on controlling the porosity of CCF 300/PEEK composites by optimizing the impregnation parameters[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(10): 3765-3779.
- [21] MA Y, JIN S, UEDA M, et al. Higher performance carbon fiber reinforced thermoplastic composites from thermoplastic prepreg technique: heat and moisture effect[J]. *Composites Part B*, 2018, 154: 90-98.
- [22] NYGARD P, GUSTAFSON C G. Continuous glass fiber-polypropylene composites made by melt impregnation: Influence of processing method[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004, 17(2): 167-184.
- [23] 秦滢杰, 韩建平, 陈书华. 热塑性复合材料原位成型工艺及关键技术[J]. *宇航材料工艺*, 2019(1): 9-14.
QIN Y J, HAN J P, CHEN S H. *In-situ* molding process and key technologies for thermoplastic composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2019(1): 9-14.
- [24] KOSUDA H, NAGATA Y, ENDOH Y. Method for producing carbon fiber reinforced thermoplastic resin product: EP19870118842[P]. 1994-09-28.
- [25] 肇研, 孙铭辰, 张思益, 等. 连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4274-4285.
ZHAO Y, SUN M C, ZHANG S Y, et al. Research progress of continuous carbon fiber reinforced high-performance thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4274-4285.
- [26] SONG J, 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.
- [27] 田振生, 刘大伟, 李刚, 等. 连续纤维增强热塑性树脂预浸料的研究进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(7): 53-58.
TIAN Z S, LIU D W, LI G, et al. Research progress on continuous fiber reinforced thermoplastic resin prepreg[J]. *[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(7): 53-58.
- [28] VAIDYA U K, CHAWLA K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. *International Materials Reviews*, 2008, 53(4): 185-218.
- [29] SON Y, CHUN Y S, WEISS R A. Improvement of the processability of poly(ether ketone ketone) by the addition of a thermotropic liquid crystalline polymer[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44(3): 541-547.
- [30] HOFFMANN T, POSPIECH D, HÄUSSLER L, et al. Novel phosphorous-containing aromatic polyethers-synthesis and characterization[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2005, 206(4): 423-431.

- [31] LI N, ZONG L, WU Z, et al. Compatibilization effect of aminated poly(phthalazinone ether ketone)s in carbon fiber-reinforced copoly(phthalazinone ether sulfone)s composites[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(11): 4139-4147.
- [32] 孙明, 陈平, 刘扬, 等. 连续纤维增强聚芳醚砜酮复合材料的性能[J]. *纤维复合材料*, 2004, 21(1): 3-6.
SUN M, CHEN P, LIU Y, et al. Properties of continuous fiber reinforced polyarylethersulfoneketone composites[J]. *Fiber Composites*, 2004, 21(1): 3-6.
- [33] LIU Y, ZHOU X, WANG Z. Effect of isothermal heat treatment on crystallinity, tensile strength and failure mode of CF/PPS laminate[J]. *High Performance Polymers*, 2021, 33(5): 497-508.
- [34] 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. Preparation technology and research progress of fiber reinforced thermoplastic resin prepregs[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(2): 42-53.
- [35] 蔡浩鹏, 王钧, 段华军. 热塑性复合材料制备工艺概述[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2003(2): 51-53.
CAI H P, WANG J, DUAN H J. Overview of the preparation process for thermoplastic composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2003(2): 51-53.
- [36] KALDENHOFF R, WULFHORST B. New developments and applications of textile reinforcements for composite materials[J]. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 1997, 22(4): 255-258.
- [37] 方立. 连续纤维增强热塑性复合材料制备及其性能的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
FANG L. Study on the preparation and properties of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [38] 安学锋, 张明, 唐邦铭, 等. 柔性混编预浸料制造热塑性复合材料加筋结构[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 217-221.
AN X F, ZHANG M, TANG B M, et al. Manufacturing of thermoplastic composite stiffened structures using flexible hybrid prepreg[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 217-221.
- [39] ZHANG J, REYNOLDS C, PEIJS T. All-poly (ethylene terephthalate) composites by film stacking of oriented tapes[J]. *Composites Part A*, 2009, 40(11): 1747-1755.
- [40] 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.
LIU Y K, GU Z C, WANG Z P. Preparation process and development trends of continuous fiber reinforced thermoplastic prepregs[J]. *China Plastics*, 2022, 36(2): 172.
- [41] 郭云竹. 热塑性复合材料研究及其在航空领域中的应用[J]. *纤维复合材料*, 2016, 33(3): 20-23.
GUO Y Z. Research on thermoplastic composites and their applications in the aerospace field[J]. *Fiber Composites*, 2016, 33(3): 20-23.
- [42] MILLER P H, SHADE J E. Analysis, fabrication, and testing of a composite bladed propeller for a naval academy yard patrol (YP) craft[R]. Annapolis, MD: U.S. Naval Academy, 2005.
- [43] TORAY ADVANCED COMPOSITES. Toray Cetex® TC1100-toray advanced composites[EB/OL]. (2024-07-30) [2025-05-07]. <https://www.toraytac.com/product-explorer/products/u017/Toray-Cetex-TC1100>.
- [44] TORAY ADVANCED COMPOSITES. Toray Cetex® TC1225-toray advanced composites[EB/OL]. (2025-02-19) [2025-05-07]. <https://www.toraytac.com/product-explorer/products/gXuK/Toray-Cetex-TC1225>.
- [45] SOLVAY. Aerospace thermoplastic composite qualifications[EB/OL]. [2025-05-07]. <https://www.solvay.com/en/chemical-categories/our-composite-materials-solutions/thermoplastic-composites/aerospace-tpc>.
- [46] 李方舟, 张翀, 尹立, 等. 聚苯硫醚基复合材料研究进展[J]. *塑料科技*, 2015, 43(5): 90-94.
LI F Z, ZHANG C, YIN L, et al. Research progress of PPS-based composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(5): 90-94.
- [47] 钱明球. 聚醚酰亚胺的研发现状与应用前景[J]. *合成技术及应用*, 2011, 26(3): 30-33.
QIAN M Q. Current research and development status and application prospects of PEI[J]. *Synthesis Technology and Application*, 2011, 26(3): 30-33.
- [48] 张婷. 高性能热塑性复合材料在大型客机结构件上的应用[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(15): 32-35.
ZHANG T. Application of high-performance thermoplastic composites in structural components of large passenger aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(15): 32-35.
- [49] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展和应用[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(增刊1): 198-204.
CHEN X B. Development and application of advanced resin-based composite materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2003, 23(Suppl 1): 198-204.
- [50] 史晓辉. 基于热压成型工艺的热塑性复合材料在民机上的应用[J]. *科技视界*, 2019(9): 4-6.
SHI X H. Application of thermoplastic composites based on hot press forming process in civil aircraft[J]. *Science & Technology Vision*, 2019(9): 4-6.

- [51] ISHIKAWA T, AMAOKA K, MASUBUCHI Y, et al. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 155: 221-246.
- [52] AHMED A, WEI L. Introducing CFRP as an alternative material for engine hood to achieve better pedestrian safety using finite element modeling[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 99: 97-108.
- [53] FRIEDRICH K. Carbon fiber reinforced thermoplastic composites for future automotive applications[C]// AIP Conference Proceedings. New York: AIP Publishing, 2016, 1736(1): 020001.
- [54] SUDHIN A, REMANAN M, AJEESH G, et al. Comparison of properties of carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites for aerospace applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 24: 453-462.
- [55] MURRAY R E, BEACH R, BARNES D, et al. Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade[J]. *Renewable Energy*, 2021, 164: 1100-1107.
- [56] YU K, MOROZOV E V, ASHRAF M A, et al. A review of the design and analysis of reinforced thermoplastic pipes for offshore applications[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(20): 1514-1530.
- [57] 孙银宝, 李宏福, 张博明. 连续纤维增强热塑性复合材料研发与应用进展[J]. *航空科学技术*, 2016(5): 1-7.
- SUN Y B, LI H F, ZHANG B M. Application of high-performance thermoplastic composites in structural components of large passenger aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016(5): 1-7.
- [58] KHURSHID M F, HENGSTERMANN M, HASAN M M B, et al. Recent developments in the processing of waste carbon fibre for thermoplastic composites—a review[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(14): 1925-1944.
- [59] 邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(2): 1-9.
- XING L Y, JIANG S C, ZHOU Z G. Progress in advanced resin-based composite materials manufacturing technology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(2): 1-9.
- [60] 王汝敏, 郑水蓉, 郑亚萍. 聚合物基复合材料及工艺[M]. 北京: 学出版社, 2004.
- WANG R M, ZHENG S R, ZHENG Y P. Polymer-based composite materials and processes[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [61] ARQUIER R, ILIOPOULOS I, RÉGNIER G, et al. Consolidation of continuous-carbon-fiber-reinforced PAEK composites: a review[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 104036.
- [62] SUN G, KONG X, WANG Z, et al. Experimental investigation into stamping of woven CF/PP laminates: influences of molding temperature on thermal, mesoscopic and macroscopic properties[J]. *Composite Structures*, 2021, 263: 113507.
- [63] WAKEMAN M, MÁNSON J E. Composites manufacturing—thermoplastics[M]// *Design and Manufacture of Textile Composites*. London: Elsevier, 2005: 197-241.
- [64] 陈宏达, 曹东风, 胡海晓, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料热压成型工艺研究进展[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(15): 24-37.
- CHEN H D, CAO D F, HU H X, et al. Research progress on hot pressing process of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(15): 24-37.
- [65] VIEILLE B, CASADO V M, BOUVET C. Influence of matrix toughness and ductility on the compression-after-impact behavior of woven-ply thermoplastic- and thermosetting-composites: a comparative study[J]. *Composite Structures*, 2014, 110: 207-218.
- [66] VIEILLE B, CASADO V M, BOUVET C. About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: a comparative study[J]. *Composite Structures*, 2013, 101: 9-21.
- [67] VIEILLE B, AUCHER J, TALEB L. Comparative study on the behavior of woven-ply reinforced thermoplastic or thermosetting laminates under severe environmental conditions[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 707-719.
- [68] SELZER R, FRIEDRICH K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture[J]. *Composites Part A*, 1997, 28(6): 595-604.
- [69] CHOQUEUSE D, DAVIES P, MAZÉAS F, et al. Aging of composites in water: comparison of five materials in terms of absorption kinetics and evolution of mechanical properties[M]// *High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites: 2nd Volume*. Pennsylvania: ASTM International, 1997.
- [70] ARHANT M, DAVIES P. 2-thermoplastic matrix composites for marine applications[M]// PEMBERTON R, SUMMERSALES J, GRAHAM-JONES J. *Marine Composites*. London: Woodhead Publishing, 2019: 31-53.
- [71] WANG Z, GAO D. Comparative investigation on the tribological behavior of reinforced plastic composite under natural seawater lubrication[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 983-988.
- [72] GARDINER G. Aerospace-grade compression molding

- [EB/OL].(2010-06-30) [2025-05-19]. <https://www.compositesworld.com/articles/aerospace-grade-compression-molding>.
- [73] OFFRINGA A. New thermoplastic composite design concepts and their automated manufacture: aeronautics[J]. JEC Composites, 2010(58): 45-49.
- [74] BOON Y D, JOSHI S C, BHUDOLIA S K. Filament winding and automated fiber placement with in situ consolidation for fiber reinforced thermoplastic polymer composites[J]. Polymers, 2021, 13(12): 1951.
- [75] ZHANG C, DUAN Y, XIAO H, et al. The effects of processing parameters on the wedge peel strength of CF/PEEK laminates manufactured using a laser tape placement process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11): 7251-7262.
- [76] SCHIEL I, RAPS L, CHADWICK A R, et al. An investigation of *in-situ* AFP process parameters using CF/LM-PAEK[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2020, 6(4): 191-197.
- [77] OROMIEHIE E, GAIN A K, PRUSTY B G. Processing parameter optimisation for automated fibre placement (AFP) manufactured thermoplastic composites[J]. Composite Structures, 2021, 272: 114223.
- [78] ASSADI M D. High speed AFP processing of thermoplastics[C]// SAMPE neXus Proceedings. California: Society for the Advancement of Material and Process Engineering-North America, 2021.
- [79] SLOAN J. Electroimpact launches plug-and-play AFP system [EB/OL].(2021-01-06) [2025-04-14]. <https://www.compositesworld.com/products/electroimpact-launches-plug-and-play-afp-system>.
- [80] 宋清华, 刘卫平, 肖军, 等. 热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1149-1157.
- SONG Q H, LIU W P, XIAO J, et al. Analysis and optimization of process parameters for automatic placement of thermoplastic composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(5): 1149-1157.
- [81] ZHANG C, DUAN Y, JOSHI S C, et al. Multi-objective optimization of HUMM3-assisted ICAT repass treatment using Taguchi method in DoE[J]. Composites Part A, 2024, 180: 108051.
- [82] Anon. NLR designs large composite aircraft part [EB/OL].(2017-03-08)[2025-05-20].https://www.helis.com/database/news/nlr_composite/[^d0m1q6tkfv3t18h8nv00^].
- [83] CHADWICK A R, DREHER P N, PETKOV I, et al. A fibre-reinforced thermoplastic primary structure for sounding rocket applications[C]//SAMPE Europe Conference 2019. Nantes, France: SAMPE Europe, 2019.
- [84] DLR. MFFD-using thermoplastics to replace aluminium in aircraft construction[EB/OL].(2023-07-18) [2025-04-14]. <https://www.dlr.de/en/latest/news/2023/03/mffd-thermoplastics-instead-of-aluminium-in-aircraft-construction>.
- [85] DONOUGH M J, ST JOHN N A, PHILIPS A W, et al. Process modelling of *in-situ* consolidated thermoplastic composite by automated fibre placement—a review[J]. Composites Part A, 2022, 163: 107179.
- [86] NEHLS G. Conbility delivers pre-pro 3D tape winding head to bilsing automation[EB/OL].(2021-11-21)[2025-05-20]. <https://www.compositesworld.com/news/conbility-delivers-pre-pro-3d-tape-winding-head-to-bilsing-automation>[^d0m1cfc6toifu417834g^].
- [87] 孙宝磊, 陈平, 李伟, 等. 先进热塑性树脂基复合材料预浸料的制备及纤维缠绕成型技术[J]. 纤维复合材料, 2009, 26(1): 43-48.
- SUN B L, CHEN P, LI W, et al. Preparation of advanced thermoplastic resin matrix composite prepreps and fiber winding molding technology[J]. Fiber Composites, 2009, 26(1): 43-48.
- [88] CICCARELLI L. TCC22 presentation[EB/OL]. [2025-05-20]. <https://acmanet.org/wp-content/uploads/2024/02/TCC22-presentation-LCiccarelli-FINAL.pdf>.
- [89] 李伟, 高维佳, 陈平, 等. 连续纤维增强 PEK-C 复合材料缠绕成型工艺及性能研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(2): 261-264.
- LI W, GAO W J, CHEN P, et al. Study on the winding process and properties of continuous fiber reinforced PEK-C composites[J]. Solid Rocket Technology, 2011, 34(2): 261-264.
- [90] 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 the current status and application trends of thermoplastic composite winding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 184-188.
- [91] STAVROV D, BERSEE H. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview[J]. Composites Part A, 2005, 36(1): 39-54.
- [92] AHMED T, STAVROV D, BERSEE H, et al. Induction welding of thermoplastic composites—an overview[J]. Composites Part A, 2006, 37(10): 1638-1651.
- [93] SURESH K, RANI M R, PRAKASAN K, et al. Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/2/3): 138-146.

- [94] TAO W, SU X, WANG H, et al. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 196-202.
- [95] RHODES P. Thermoset composite receives highest UL temperature rating[J]. Reinforced Plastics, 2009, 53(5): 44-45.
- [96] XIAO X, HOA S, STREET K. Processing and modelling of resistance welding of APC-2 composite[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(7): 1031-1049.
- [97] VILLEGAS I F, Van MOORLEGHEM R. Ultrasonic welding of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites through a PEI thermoplastic coupling layer[J]. Composites Part A, 2018, 109: 75-83.
- [98] AGEORGES C, YE L, HOU M. Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites part II: optimum processing window and mechanical performance[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(8): 1191-1202.
- [99] GARDINER G. Thermoplastic composites gain leading edge on the A380[EB/OL].(2006-03-01) [2025-04-14]. <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-gain-leading-edge-on-the-a380>.
- [100] GARDINER G. DLR Institute of structures and design increases maturity of thermoplastic composite fuselage structures[EB/OL].(2021-09-21) [2025-05-19]. <https://www.compositesworld.com/news/dlr-institute-of-structures-and-design-increases-maturity-of-thermoplastic-composite-fuselage-structures>.
- [101] GOUIN O'SHAUGHNESSEY P, DUBE M, FERNANDEZ VILLEGAS I. Modeling and experimental investigation of induction welding of thermoplastic composites and comparison with other welding processes[J]. Journal of composite materials, 2016, 50(21): 2895-2910.
- [102] Anon. Deux dates à ne pas manquer[EB/OL]. [2025-05-20]. <https://www.tolerie-mag.com/actus/deux-dates-a-ne-pas-manquer/>[^d0m1tsg51tq4943uf460^].
- [103] Anon. KVE INDUCT: Welding a torsion box demonstrator[EB/OL].(2022-05-20) [2025-05-20]. <https://www.compositesworld.com/articles/kve-induct-welding-a-torsion-box-demonstrator->[^d0m1uq64t3on8p64g9rg^].
- [104] WANG Y, RAO Z, LIAO S, et al. Ultrasonic welding of fiber reinforced thermoplastic composites: current understanding and challenges[J]. Composites Part A, 2021, 149: 106578.
- [105] ZHAO T, XU S, FENG Y, et al. Towards ultra-fast and high strength structural repair of damaged thermoplastic composites: ultrasonic welding[J]. Composites Part B, 2025, 298: 112385.

收稿日期: 2025-05-13; 录用日期: 2025-05-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (buctrc202509)

通讯作者: 刘刚(1978—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料, 联系地址: 北京市朝阳区北三环东路15号北京化工大学(100029), E-mail: 2024500053@buct.edu.cn

(本文责编: 张 琴)