

自主可控航空热塑模压复材典型设备构建

朱姝^{1,2,3}, 骆轶姝⁴, 张立娟¹, 任毅^{1,2}, 苏佳煜^{1,2}, 李心果^{1,2}, 周剑锋⁵, 黄朝阳^{1,*}

(1. 东华大学民用航空复合材料东华大学协同创新中心, 上海市高性能纤维复合材料省部共建协同创新中心, 上海市轻质结构复合材料重点实验室, 上海 201620; 2. 东华大学纤维材料改性国家重点实验室, 材料科学与工程学院, 上海 201620; 3. 江苏新视界先进功能纤维创新中心有限公司 (国家先进功能纤维创新中心), 江苏苏州 215228; 4. 东华大学资产管理处, 上海 201620; 5. 东华大学分析测试中心, 上海 201620)

摘要: C919 大型客机商业首飞成功使国人为之沸腾, 大飞机关键材料也受到人们的关注。得益于轻质高强等优点, 碳纤维增强聚苯硫醚 (CF/PPS)、碳纤维增强聚醚醚酮 (CF/PEEK) 等高性能热塑性复合材料在国产大型客机上具有广阔应用前景。2012 年起, 东华大学与中国商飞就热塑性复合材料国产化进行了卓有成效的合作, 基于高温热压机设备持续攻坚, 成功研制出先进热塑性复合材料零部件快速制造系统, 填补国内空白, 解决了航空热塑性复合材料成型效率低、成本高等问题。相关成果已进入中国商飞产业化验证通道, 科技成果转化达 800 万元, 并获得第三届“海聚英才”全球创新创业大赛十八强等多个奖项及地方引导性资金数千万元。

关键词: 热塑性复合材料; 快速成型系统; 冲压成型; 感应焊接; 热压机

中图分类号: V258

文献标识码: J

Typical Equipment Construction for Autonomous and Controllable Aerospace Thermoplastic Moulding Composites

Zhu Shu^{1,2,3}, Luo Yishu⁴, Zhang Lijuan¹, Ren Yi^{1,2}, Su Jiayu^{1,2}, Li Xinguo^{1,2},
Zhou Jianfeng⁵, Huang Chaoyang^{1,*}

(1. Center for Civil Aviation Composites, Shanghai Collaborative Innovation Center of High-Performance Fibers and Composites (Province-Ministry Joint), Key Laboratory of Shanghai City for lightweight composites, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Jiangsu New Horizon Advanced Functional Fiber Innovation Center Co., LTD. (National Advanced Functional Fiber

基金项目: 国家自然科学基金, 仿蜻蜓翼 CF/PEEK 超薄膜复合材料的互锁横晶结构设计与增强机制 (21K28101); 江苏新视界先进功能纤维创新中心有限公司 (国家先进功能纤维创新中心) 企业基金

Innovation Center), Jiangsu Suzhou 215228, China;4. Asset Management Office, Donghua University, Shanghai 201620, China;5. Research Center for Analysis and Measurement, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The success of the commercial maiden flight of the C919 large airliner had caused great excitement in China, and the materials used in the large aircraft had also garnered significant interest. Thanks to the advantages of light weight and high strength, high-performance thermoplastic composites such as carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (CF/PPS) and carbon fiber reinforced polyether ether ketone (CF/PEEK) have a broad application prospect on domestic large passenger aircraft. In 2012, Donghua University and COMAC collaborated on the localization of thermoplastic composites. A rapid manufacturing system for advanced thermoplastic composite parts, which filled the gaps in the domestic market was created. The system was based on high-temperature hot-press equipment and successfully solved the issue of low molding efficiency and high cost of aerospace thermoplastic composite materials. The relevant accomplishments have undergone industrialization verification by COMAC and the transfer of scientific and technological achievements had reached RMB 8 million. It also had received several recognitions including the Shanghai "Sea Gathering Talents" Top 18 awards and tens of millions of RMB of local guiding funds.

Keywords: thermoplastic composites; rapid manufacturing system; stamp forming; induction welding; Hot pressing machine

1 先进热塑性复合材料的发展及应用

1.1 航空高性能复合材料及其国产化趋势

2023年5月28日, 国产大飞机C919完成商业首飞, 国人振奋。在诸多报道及科普介绍中, C919的碳纤维复合材料使用率被反复提及。复合材料(composite material)指的是两种或者两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料, 综合了纤维、树脂、橡胶、金属和陶瓷等各种组分的优点, 是轻质、高强、可设计强的先进材料^[1]。以碳纤维复合材料为例, 其比强度可达到钢的14倍, 是铝的10倍, 比模量则超过钢和铝的3倍。实践证明, 利用碳纤维复合材料替代传统铝合金材料制造飞机结构件可使机身减重20%~40%, 以一架商用飞机20年的服役周期及200万公里的飞行里程计算, 每减重10%, 就能够引起可观的节能减排效果。因此, 复合材料使用比例已成为衡量新一代民用飞机先进性的关键指

标。目前，空客 A350 和波音 787 复合材料用量占飞机总重量 50% 以上，中央翼盒、机翼等主承力结构及多处次承力结构均使用了碳纤维复合材料（图 1）。相较于美国和欧盟较先进的民航客机而言，国产大飞机 C919 上碳纤维复合材料使用率仍偏低（仅为 12.7%~15%，图 2），是我国发展大型飞机的瓶颈之一，加之国外关键技术及产品的严格限制，因此我国迫切需要提升自主创新研发能力。

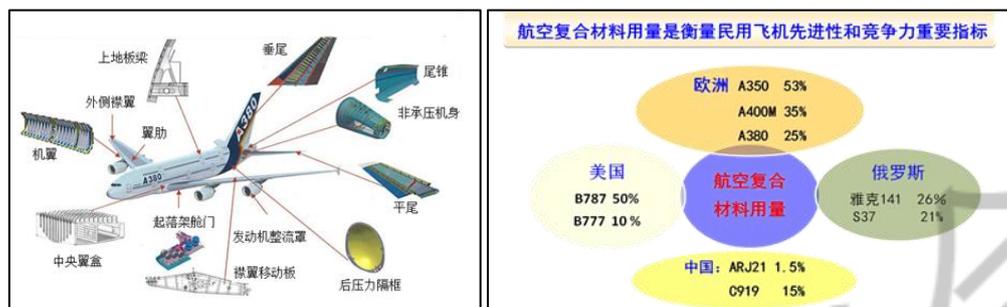


图 1 航空复合材料部件示意图及其在不同型号上的用量^[2]

依据基体树脂的不同，碳纤维复合材料可分为热固性复合材料与热塑性复合材料。热固性复合材料经过几十年的发展，仍有若干痛点问题无法解决：

- 回收利用难度极大，需要消耗大量能源，成本高，环境污染严重；
- 原材料需低温储存，且有一定的保质期；
- 成型速度慢，生产效率受到限制。

相较于热固性复合材料，以碳纤维增强聚苯硫醚(CF/PPS)、碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)等为代表的先进热塑性复合材料可二次成型、回收循环利用，且成型节拍快、其原料在室温下可无期限储存，这些优势极大降低了生产制造成本。除此之外，在材料特性上，先进热塑性复合材料还具有优异的抗冲击性能、耐湿热和抗溶剂性等优点。因此，先进热塑性复合材料受到学术界与产业界的广泛关注，并投入了大量资源进行研发。在欧美等发达国家，热塑性复合材料的应用已从航空次承力结构发展为主承力结构。空客、波音等世界知名飞机制造商均利用热塑性复合材料生产飞机窗框、机翼前缘、飞机座椅、机身连接件、龙骨梁、支架、起落架、舱门、垂直尾翼和方向舵等航空组件。

高性能碳纤维复合材料在国防军工、能源、汽车、海洋装备、先进制造等领域具有非常重要的经济、军事、政治战略意义。在政策方面，国务院多个部门与单位密集发布了《中国制造 2025》《重点新材料首批应用示范指导目录》等文件，并将碳纤维复合材料列入《“十四五”规划》及战略性新兴产业分类，为关键技术的研究与产业化提供了充足的政策支持。

在经济方面，新材料产业是上海乃至长三角地区的支柱产业之一，高性能纤维复合材料

则是新的增长极。2008 年中国商飞入驻上海后，对高性能纤维复合材料的强大需求促使长三角地区加快整合产业优势资源。经过十余年发展，长三角地区已具有完整的碳纤维复合材料产业链，集群效应初步显现。

由于国外厂商对高性能纤维复合材料的进口封锁，促使我们必须加快进行国产材料体系建设。在中国商飞和中国航发等企业的引领下，国产航空复材料全面替换进程可能由原来的 15 年缩短为 5 年，整个产业的目光都集中在“自主可控”——不仅要造出来，而且要形成竞争力。

1.2 东华大学复材聚焦自主可控、服务国家战略

东华大学是教育部直属、国家“211 工程”、国家“双一流”建设高校。学校秉承“崇德博学、砺志尚实”的校训，不断开拓奋进，已发展成为以纺织、材料、设计为优势，特色鲜明的多科性、高水平大学。学校坚持产学研用相结合的办学特色，承接国家重大科研任务，支撑国家产业转型升级和新兴产业发展等战略需求。新世纪以来，获国家自然科学奖、国家技术发明奖和国家科技进步奖 31 项。大批科研成果广泛应用于航天航空、重大建筑工程、环境保护等领域，为“天宫”“天舟”“北斗”“天通”“嫦娥”做出贡献。

东华大学民用航空复合材料协同创新中心（以下简称“复材中心”）一直服务于中国商飞 C919 和 C929 国产大型客机复合材料的研发，技术辐射航天、高铁、汽车及深海探测等领域，并以此为依托建设上海市高性能纤维复合材料省部共建协同创新中心、上海市轻质结构重点实验室、上海市复合材料学会等。

2022 年，复材中心牵头科技部“大丝束碳纤维及复合材料低成本高效制备与应用技术研究”“原位成型耐高温热塑性复合材料及其应用研究”两项复合材料国家重点研发计划，与中国商飞协同组织并参与“主承力复合材料构件高效自动化液体成型技术研究”复合材料国家重点研发项目。近年来，复材中心还承担了大量的弹、机、舰等军工类项目，研究方向包括高性能热塑性复合材料、无机复合材料、复合材料检测等。

经过十年建设，复材中心拥有针对复合材料完整的“材料—设计—成型—检测”研发链条，凭借于学科优势和与中国商飞的地缘优势，研发了 C919 全国产化液体成型升降舵、C919 三维编织复合材料隔框、复兴号复合材料中顶板、轨道交通三维编织复合材料转向架、冬奥会火炬、宁德时代复合材料电池盖等一系列先进轻量化高性能结构部件，成为整体水平国内领先、国际一流的高性能纤维复合材料研发基地，成为中国商飞、中国中车在复合材料领域

国内最为紧密的合作高校之一，也成为长三角地区复合材料产业创新发展的策源地之一。科技部、教育部、上海市领导视察中心（图2），并给予高度评价。



图2 上海市副市长翁铁慧 2015年（左图）、解冬 2023年（右图）视察中心

为了打破欧美日等对我国先进热塑性复合材料关键技术与装备封锁局面，加速国产大飞机先进材料的应用与发展，推动碳纤维复合材料产业升级，东华大学构建了完整的复合材料成型工艺，其中本团队开发了先进热塑性复合材料零部件快速制造系统，实现了机翼内典型零部件的快速高稳定性制备。

2 先进热塑性复合材料零部件快速制造系统的设计

目前，国内尚未有成熟、成套的高性能热塑性复合材料生产制造装备，现有设备多直接沿用金属材料领域的设备，从而导致航空高性能纤维增强复合材料加工成型装备自动化程度低，亟待国产突破。由此带来的另一个问题是当前国产高性能热塑性复合材料制造工艺稳定性较差、产品性能离散性大，严重限制了其在航空航天、海洋装备等高端领域的应用。为解决上述问题，满足工艺优化及大批量稳定生产要求，本团队针对热塑性树脂及其复合材料特性，设计研制了一套先进热塑性复合材料零部件快速制造系统，通过冲压成型将热塑性复合材料坯料加工成型材，再利用感应焊接的方式进行装配，从而实现航空热塑性复合材料的快速制造，本系统由冲压成型与感应焊接两个模块构成。

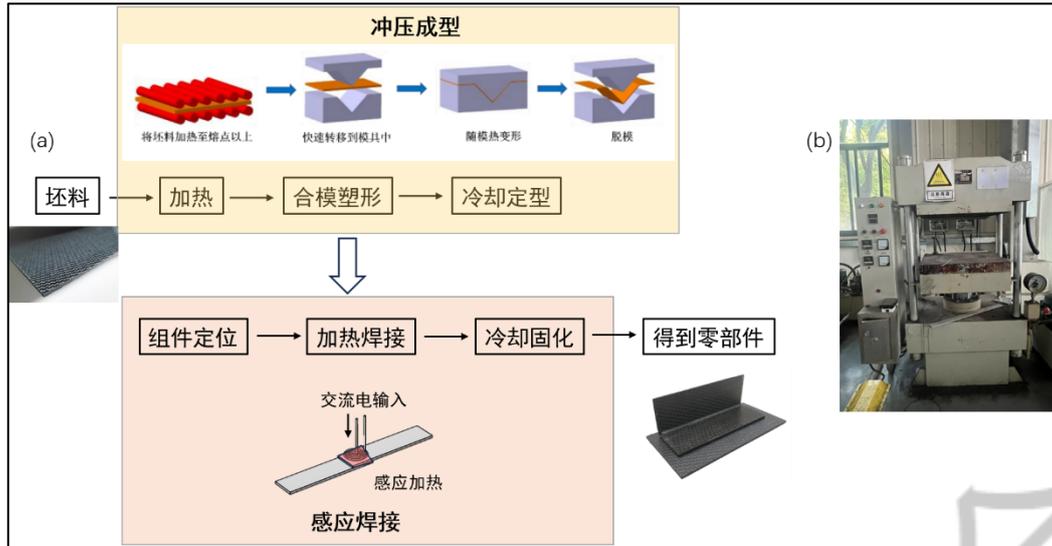


图3 热塑性复合材料快速制造路线及装备

2.1 冲压成型模块

冲压成型中的核心之一在于温度的控制。当坯料受热不均匀时，会导致部分区域树脂过度流动或降解，而加热不足区域熔融不充分，造成材料在后续的冲压过程中产生缺陷^[3,4,5]。因此，需要实现使坯料各处均匀的加热，并能够控制整个成型过程中的温度变化。本系统搭建了自主设计的加热单元，通过加热元件之间的相互协同，实际温度偏离设定温度的范围缩小至 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，且面内温度均匀性优异。

热塑性复合材料在不同温度下，由于模量发生变化导致其在加热时表现出不同的变形能力。因此，还需解决压力单元中施加压力与温度的耦合问题。通过优化本系统压力单元的油缸面积等参数，在保持拉伸性能基础上，提高了型材的弯曲性能。

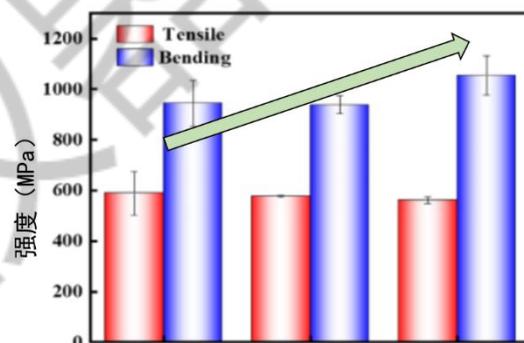


图4 热塑性复合材料型材力学性能^[6]

2.2 感应焊接模块

由于焊接质量受到温度的显著影响，因此需要充分了解感应焊接的发热机制，控制感应焊接的温度分布。其中，关键问题之一是将设定温度锁定在焊接面，并使焊接面内温度均匀。

这需要协同调控磁场分布、电流大小、压力等工艺参数，实现焊接温度的均匀控制。本系统搭建温度检测与感应电源输出电流闭环控制装置，将温度的波动性降低至 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内由于磁场在工件中的不均匀分布，导致焊接区域无法均匀加热。这直观表现为焊接工件边缘区域的过度加热，这将引起制件连接处性能的下降。因此，除了加热的单元优化外，本系统进一步通过感应线圈形状设计，解决了“边缘效应”^[7]导致的边缘烧糊等问题。

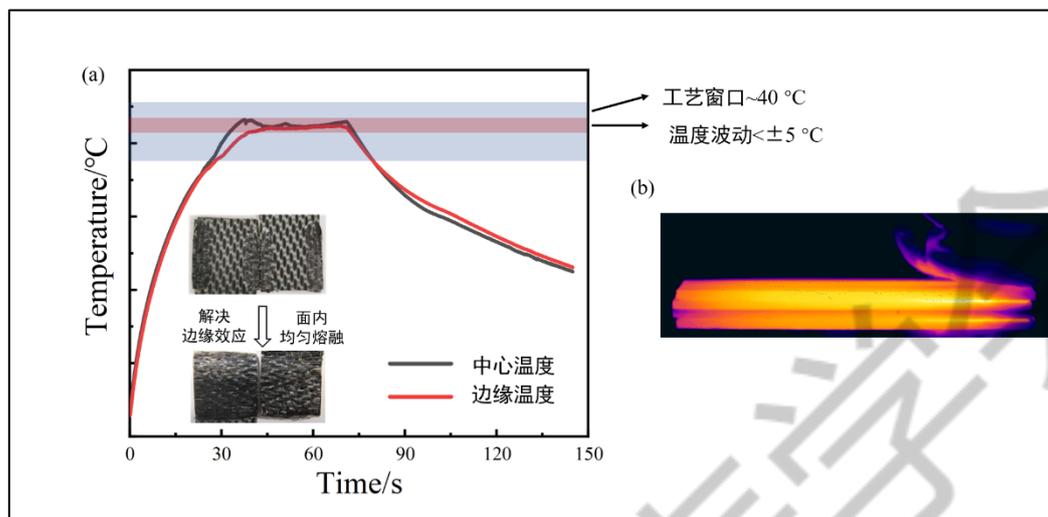


图5 (a)感应焊接过程中焊接面的中心温度与边缘温度; (b)对焊接过程中温度的实时检测

本系统通过感应焊接制备了 CF/PPS 复合材料与 CF/PEEK 复合材料的零部件，单搭接剪切测试表明接头强度超过文献报道值，如图 6 所示。

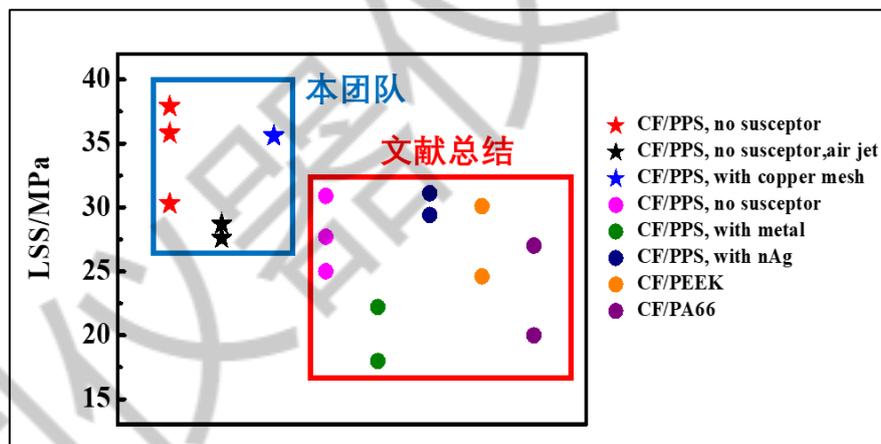


图6 本系统中感应焊接的焊接强度与全球范围内感应焊接的焊接强度的比较[8]

4 结论

(1) 中心利用冲压成型与感应焊接模块，建立了先进热塑性复合材料快速成型系统，解决了冲压过程中坯料加热不均的问题，将温度波动性降低至 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内，且面内均匀性好；同时，通过温度监测-输出电流闭环控制装置的搭建及感应线圈的设计，将感应加热温度波

动性降低至 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内，并解决了感应焊接中“边缘效应”问题。该系统提高了热塑性复合材料型材及其焊接接头的力学性能，实现了高性能热塑性复合材料的快速制造；

(2) 先进热塑性复合材料快速成型系统研究成果被列为中国商飞前瞻性技术储备，连续多轮获得中国商飞研发经费滚动支持，进入其产业化验证通道，为航空热塑性复合材料部件的持续适航保障提供技术支持，助力国产大飞机技术升级；

(3) 快速成型系统获得 SAMPE 中国 2022 复合材料产品创新奖、2022 年上海市首届高价值专利运营大赛百强、第九届中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛上海赛区银奖、工信部首届新材料创新大赛产品优秀奖、第三届“海聚英才”全球创新创业大赛十八强等多个奖项；

(4) 该系统实现科技成果转化达 800 万元，并获得地方引导性资金数千万元。

参考文献：

- [1] 吴玉程. 工程材料与先进成形技术基础[M]. 北京：机械工业出版社, 2022: 205.
- [2] Bellonte, M. Composite Materials in the Airbus A380 - From History to Future -, [EB/OL]. 2001
<https://www.semanticscholar.org/paper/Composite-Materials-in-the-Airbus-A380-From-History-Bellonte/31ffa71022ce6bb0549d1711facf792b6b171414#citing-papers>
- [3] Thomann U I, Sauter M, Ermanni P. A combined impregnation and heat transfer model for stamp forming of unconsolidated commingled yarn preforms [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(10-11):1637-1651.
- [4] Takeda S-i, Tsukada T, Minakuchi S, et al. Fiber-optic Sensing for Press Forming of L-shaped Thermoplastic Composites [J]. Procedia Engineering, 2017, 188:348-353.
- [5] Shun-Fa Hwang, Kun-Ji Hwang. Stamp forming of locally heating thermoplastic composites [J]. Composites: part A, 2002, 33:669-676.
- [6] 王天成. CF/PPS 复合材料航空典型结构成型及性能评价[D]. 上海：东华大学, 2022: 52
- [7] Ahmed TJ, Stavrov D, Bersee HE. Induction welding of thermoplastic composites—an overview[J]. Composites: Part A, 2006, 37(10): 1638-1651.
- [8] 钱盈. 碳纤维增强聚苯硫醚（CF/PPS）复合材料的低频感应焊接[D]. 上海：东华大学, 2020: 67