

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-09

航空复合材料智能制造探索与实践

何靓¹, 郭俊刚¹, 朱攀星¹, 苏霞¹, 胡大豹¹, 王小凯¹, 许英杰²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

(2. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘要: 智能制造是实现制造业升级的重要发展方向,也是世界各国提升工业现代化水平的主要“战场”之一。但是,由于制造工艺的特殊性,复合材料智能制造在工业界的实施仍处于探索阶段。本文结合智能制造发展现状及航空先进复合材料主流的热压罐成型工艺的特点,提出了复合材料“适度智能”生产线建设方案,并从面向复合材料制造工艺特征的智能生产线模型、标准体系建设、工业 4.0 相关使能技术等方面论述了复合材料智能制造探索与实践,为智能制造在复合材料领域的应用提供参考。

关键词: 复合材料;智能制造;工业 4.0;数字化;自动化

中图分类号: V261.97

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Explorations and practices on the intelligent manufacturing of aeronautical composite materials

HE Liang¹, GUO Jungang¹, ZHU Panxing¹, SU Xia¹, HU Dabao¹,
WANG Xiaokai¹, XU Yingjie²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The intelligent manufacturing is a key development direction to realize manufacturing upgrading, and one of the main competitive fields of industrial modernization around the world. However, the intelligent manufacturing of advanced composite materials is still in the exploration stage due to its particularity of manufacturing technology. In the present paper, the ideal of moderate intelligence for composite production line is proposed based on the state-of-the-art technology of intelligent manufacturing and the characteristics of the prepreg-autoclave processing, and explorations and practices on the intelligent manufacturing of composite materials are discussed from the perspectives of the intelligent production line model, the intelligent manufacturing standard system of composite materials, industry 4.0-enabling technologies. The present research can be used as guidance for the application of intelligent manufacturing of composite materials.

Key words: composite materials; intelligent manufacturing; industry 4.0; digitalization; automation

收稿日期: 2024-04-13; 修回日期: 2024-09-01

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3401700)

通信作者: 何靓(1992-), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: heliang@hrbeu.edu.cn

引用格式: 何靓, 郭俊刚, 朱攀星, 等. 航空复合材料智能制造探索与实践[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-9.

HE Liang, GUO Jungang, ZHU Panxing, et al. Explorations and practices on the intelligent manufacturing of aeronautical composite materials[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-9. (in Chinese)

0 引言

智能制造的研究可追溯于 20 世纪 70—80 年代, Kusiak^[1]首次明确提出了“智能制造系统”这一概念, 将智能制造定义为: 通过集成知识工程、制造软件系统和机器人控制来对制造技工们的技能与专家知识进行建模, 以使智能机器可自主地进行批量生产。如今为促进制造产业的技术发展和升级, 各国先后提出了智能制造规划。2011 年汉诺威工业博览会, 德国政府提出了工业 4.0 战略, 旨在通过物联网等新技术的应用提高德国制造业水平^[2]。此后, 其他国家也提出了类似的战略政策^[3], 如美国的先进制造业伙伴关系(AMP)、英国政府发布的《英国工业 2050 战略》、法国政府推出的“新工业法国”战略、日本的工业 4.1J、韩国的制造业创新战略 3.0 等。我国也发布了《中国制造 2025》^[4], 将智能制造上升为国家战略, 明确提出 2025 年基本实现工业化, 加速推进信息化、工业化融合, 推动制造业由大变强, 迈入制造强国行列, 实现中国制造转型升级。各国战略的陆续发布和实施, 标志着国际范围内智能制造竞争大幕已经拉开, 国内外制造业由此开始了大规模改造升级, 以智能制造为主攻方向, 推动制造产业模式优化升级。

先进复合材料的性能优异, 比强度和比刚度高, 可设计性强, 应用于航空飞行器不仅可以显著减轻结构重量, 还能大幅减少连接件数量, 提高结构可靠性, 降低制造成本和后期维护成本^[5-6]。因此, 复合材料用量已经成为衡量飞行器先进性的重要指标之一^[7]。近年来, 在我国中长期科技发展规划中大飞机重大专项的指导下, 复合材料制造技术得到了快速发展, 先进复合材料构件先后被应用于 ARJ21、C919、新舟 700 等飞机, 未来 C929 飞机也将大幅采用复合材料^[8]。经过多年的发展, 先进复合材料在我国航空领域的应用已经实现了从次承力构件向主承力构件的转变, 复合材料构件已由最初的中小型尺寸向大尺寸乃至超大尺寸迈进, 结构的复杂程度和制造难度呈指数级增加^[9]。受制造工艺限制, 现有的手工制造和自动化制造相结合的制造模式难以满足大尺寸复杂结构产品的制造需求, 亟需进行制造方式转型和升级。因此, 先进复合材料的智能制造成为突破当前困境、提升制造业市场竞争力的解决方案之一^[10]。

智能制造、智能工厂的合理规划和实施决定着谁将是第四次工业革命竞争中的优胜者^[4], 而先进复合材料制造不仅是国家大飞机战略的竞争, 更是决定未来航空复合材料制造企业发展的关键。特别地, 以波音/空客/通用公司为代表的欧美先进公司因其较早地布局复合材料智能生产和智能制造, 已经在产品质量、运行成本、效率提升以及产能等方面获得巨大利益。

由于复合材料制造技术体系的复杂性, 加之缺乏完善的可供企业参考执行的系列标准, 现阶段制造企业只能“摸着石头过河”去逐步实施智能制造产业升级。此外, 整个行业缺乏复合材料制造的相关基础知识库, 智能制造建设的投资收益难以量化且不能短期创造效益, 缺乏复合材料智能制造专业技术型人才等都是整个行业面临的问题。因此, 国内复合材料的智能制造(或工业 4.0)在工业界的实施目前仍处于研究和探索阶段。机遇与挑战并存, 国内复合材料制造企业应抓住发展机遇, 结合《中国制造 2025》国家战略, 开展先进复合材料智能制造实践, 迎头赶上国际先进企业。

本文结合复合材料制造工艺特点, 综述国内外在复合材料智能制造方面的探索与尝试, 以期国内航空复合材料智能生产线建设提供参考。

1 复合材料智能制造的特点与难点

现阶段航空复合材料产品的制造方式仍以手工铺贴为主, 其成型质量严重依赖人员技能水平和操作经验^[11]。经验丰富的高技能人才可以通过多年积累的手法使织物预浸料产生预变形, 从而赋形于复杂模具型面^[12-13]。同时, 复合材料制造属于特种制造工艺, 典型复合材料零件的制造流程包括预浸料片裁切、预浸料片铺贴、制作真空袋、热压罐固化、铣切、无损检测及外形检测等。由于复合材料零件的制造全流程涉及多道工序^[14], 制造过程的稳定性控制难度大, 产品质量存在分散性。

另一方面, 受树脂固化反应动力学^[15]、复合材料的各向异性特性、铺层顺序、结构形式等影响, 采用预浸料热压罐成型工艺制造的复合材料制件必然存在固化变形问题^[5]。现阶段工程上控制固化变形的的方法有模具的型面补偿^[5, 16]、固化工艺参

数优化^[17]、成型工艺方案优化^[18]等,但都存在不同程度的局限性。如模具型面补偿方法是基于激光扫描产品外形数据或仿真预测结果进行固化变形控制的一种方法,但如果补偿的型面不准确则会导致模具型面加工错误,甚至引起模具报废。复合材料制件的这种不同零件需采取不同成型方案的特点,也是阻碍其智能制造技术发展的关键问题之一。

随着航空复合材料制件朝着大尺寸一体化成型的方向发展,传统的手工制造在产品的质量稳定性和提产增效等方面存在的弊端也越发明显,严重阻碍了复合材料制造的发展。为此,国内外复合材料制造企业纷纷尝试从提升生产线的数字化和自动化率、工序标准化建设、加强操作技能培训与技能传承等方面逐步进行制造方式升级。如 Eugeni 等^[19]从技术适用性和易获得性的优势方面讨论和研究了工业 4.0 概念在航天工业领域的潜在应用,并以复合材料三明治夹芯结构为例介绍了航天复合材料构件的智能制造生产线的建设方案。Crawford 等^[20]等基于先进复合材料的制造过程分析、优化、反求和试验等建模过程来探索人工智能和机器学习等技术的创新应用,提出了基于工业 4.0 的复合材料制造过程建模方法论(包括基于模型和基于数据的知识工程),并通过碳纤维预浸料的热压罐固化成型工艺进行了系统研究。Ramezankhani 等^[21]针对复合材料制造数据样本量少,传统机器学习模型难以处理实际制造过程中的不确定性和生产数据随时间变化的问题^[22],提出了一种能够适应生产过程变化的迁移学习框架,并以复合材料热压罐成型工艺为例进行了对比研究,证明了该模型在提高泛化精度的同时还能降低计算时间成本。Jayasekara 等^[23]通过对比分析当前航空航天复合材料制造过程链的自动化水平,发现纵然复合材料制造核心流程(自动铺丝/铺带)的自动化水平已达中等(5~6 级)水平,但大多数流程依然较差,自动化程度仅为 1~4 级。研究表明复合材料制造过程的自动化还存在很强的升级潜力,未来应在复合材料全链条自动化领域进一步优化,以更好地迎接复合材料智能制造升级。马军等^[24]以航空复合材料数字化工厂建设为对象,详细论述了航空工业洪都公司在复合材料数字化工厂建设过程中的工序自动化、物联网终

端建设、设备集成管控、自动化仓储、物流管控、无纸化管理等方面的建设内容。通过复合材料智能制造研究进展分析不难发现,不同于汽车制造行业,航空产品制造具有质量要求高、批量小、结构复杂等特点。尤其是复合材料制造领域,由于缺乏充分的制造数据积累、缺乏复合材料制造的相关基础知识库、智能制造建设的投资收益难以量化且不能短期创造效益、缺乏复合材料智能制造专业技术型人才等,严重制约了复合材料智能制造技术的应用。

智能制造或工业 4.0 的目标是通过建立信息透明、去中心化决策、纵横集成等特点的工业系统以提升价值创造^[25]。同时,数字化、自动化、网络化是实现智能制造的必要条件,但是容易被忽略的是复合材料制造工艺的基础研究。对制造工艺、基础理论的研究和相关知识数据库建设,对复合材料制造全流程的原理性理解,是实现智能制造的重要基础。为此,我们结合自身发展现状及对航空先进复合材料主流的热压罐成型工艺特点和难点的深入分析,提出了“适度智能”的复合材料制造发展策略,其具体体现形式是“适度智能”复合材料生产线。该生产线基于产品对象的结构特点和成型工艺特点建设,具备专业化的特点,即适度智能生产线产品对象为已批产的同种类型的零件,具有唯一性,如长桁加筋壁板适度智能生产线等。

2 复合材料智能制造探索与实践

为响应《中国制造 2025》国家战略,秉承网络化为基础、数字化为手段、自动化为途径、智能化为方向的发展思路,积极探索大尺寸复合材料适度智能生产线,并取得了阶段性的进展。

2.1 面向复合材料制造工艺特征的智能生产线模型

基于航空智能制造动态感知、实时分析、自主决策和精准执行的典型特征^[26],结合大尺寸复合材料的预浸料-热压罐成型工艺特点,构建了基于复合材料制造工艺特征的智能生产线模型(如图 1 所示),主要包括联盟层、管理层、控制层、设备层和基础层五个部分。

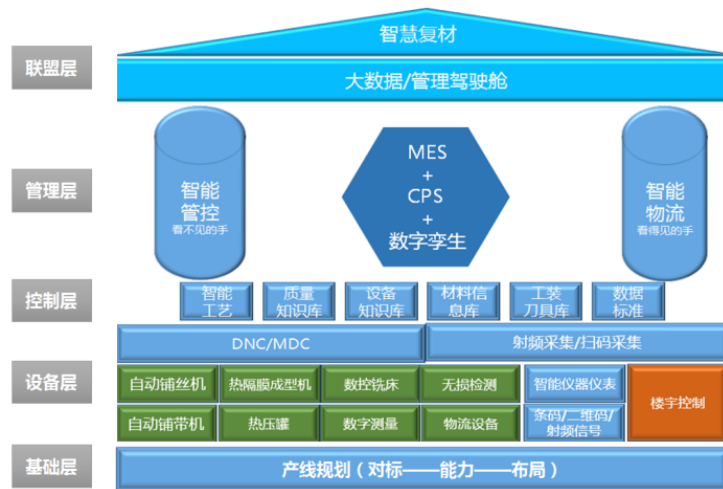


图1 基于复合材料制造工艺特征的智能生产线模型

Fig. 1 The intelligent production line model based the characteristics of composite material manufacturing process

联盟层与公司信息系统为垂直集成关系,与其他相关专业厂、保障部门的信息系统为水平集成关系,其作用是接收上级下发的生产任务等信息,统筹相关专业厂的生产情况、保障部门的材料储备及资源使用情况,向下下达生产计划。

管理层接收联盟层下达的生产指令,依托MES、CPS和数字孪生等技术,通过智能管控和智能物流对生产计划和生产状况进行实时管理。管理层与控制层保持垂直集成关系,管理层将控制层上传的状态信息及数据反馈给联盟层。

控制层的基本组成包括智能工艺知识库、智能质量知识库、智能设备知识库、材料信息数据库、工装及刀具数据库、标准规范知识库。控制层围绕作业计划、作业指令、数据程序等,结合复合材料构件的制造需求和制造工艺,借助信息模型及人工智能算法,处理多维度信息;利用前期建立的数据库和知识库构建计算机辅助决策模型,对实际生产状态和生产计划进行实时分析,并生成最优排产计划。控制层将决策内容通过DNC下发至设备层,同时利用MDC及射频技术实现对设备层的实时监控和分析,实现“动态感知—实时分析—自主决策—精准执行”的全闭环管控。控制层的主要作用是实现生产的有序、高效推进,保证产品按照生产计划完成的同时最大程度提高设备利用率。

设备层由物理层、设备控制层和设备决策层组成。设备层不仅包括引进自动铺带、自动铺丝、热隔膜成型、智能热压罐等关键自动化设备,还需

结合实际需求,借助智能传感器、控制器、射频技术、条形码/二维码等技术手段对相关设备进行升级或改造,实现有效数据传输及对上层决策的执行。设备层同样具备动态感知、实时分析、自助决策和精准执行的特点。同时进行智能楼宇建设,借助监控系统、广播系统、文宣展示系统、颜色标准体系等实现对生产状态、生产安全等方面的动态感知和精准决策。设备层将收集或分析处理的数据向上反馈给控制层。

基于产线产品特点进行精益布局设计、物流通道规划、厂房规划等构成了该模型的基础层。

2.2 标准体系建设

随着复合材料制件由次承力制件向主承力制件的转变,传统的复合材料制件制造标准体系急需转型升级,围绕产品维、沿着价值维、依托企业维迈向智能制造标准体系^[27]。

为保障复合材料制件智能制造技术的发展,依据《国家智能制造标准体系建设指南》制定了适度智能数字化车间标准体系。以高质量、低成本为目标,以设计制造一体化为指引,基于系统工程思想梳理航空复合材料产业价值链,涵盖设计研发、材料验证、技术研究、基础试验、产品试制等模块,构建基于适航理念的大中型复合材料构件正向研发体系(如图2所示),按照“研制体系框架构建,顶层研制流程再造、文件表单标准固化、机构优化技术创新、型号验证迭代优化”五步推进,推动关键技术突破,保障大型复合材料构件研制。

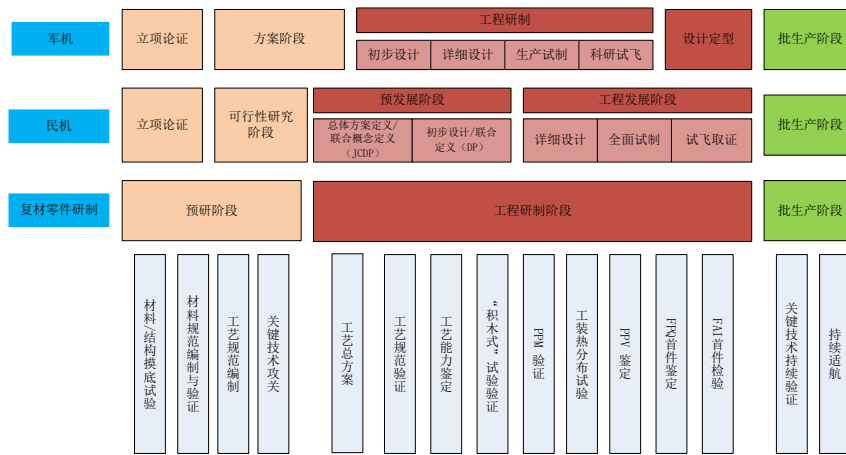


图2 复合材料智能制造标准体系

Fig. 2 The intelligent manufacturing standard system of composite materials

2.3 积极发展工业 4.0 相关使能技术

工业 4.0 作为未来大尺寸、大批量复合材料制造的解决方案,通过在制造过程中集成赛博物理系统(cyber-physical system),建立智能化、自适应的工业化智能制造体系,从而在复合材料制造初期预判并降低制造风险^[28],提升制造效率,降低生产成本^[25]。

在面向复合材料制造工艺特征的适度智能生产线模型的基础上,大力发展工业物联网、模拟仿真、自动化、纵横集成、大数据、云计算等工业 4.0 使能技术^[9],为复合材料智能生产线建设奠定技术基础。

1) 工业物联网建设

一方面,积极进行工业物联网升级,实现生产监控网、通信网、安防网等多网互通、设备互联。另一方面,进行工业物联网平台建设(如图 3 所示),利用工业物联网对现实物理资产进行感知、识别,进而通过大数据分析模型对数据进行分析处理并形成决策支持建议,同时结合相关应用与技术管理人员进行交互并形成指导意见,最终通过工业物联网按照决策控制执行实现物理资产的反馈响应。

2) 模拟仿真

模拟仿真主要包括两个方面的工作内容,一是专注于复合材料成型过程的模拟仿真^[29-30],掌握相关技术可保证复合材料构件的制造质量,并为基于数据的决策提供技术依据;二是利用数字孪生

等技术对生产过程、工艺过程等进行数字化建模仿真,从而实现虚拟系统对实际工况的动态感知和提前预测^[31]。

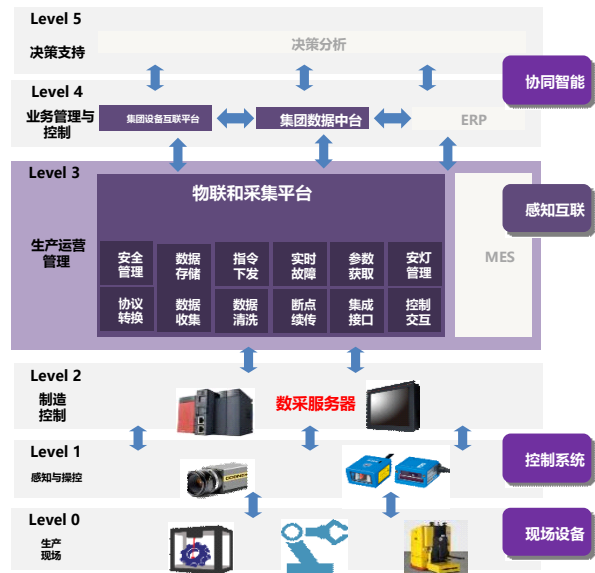


图3 工业物联网平台架构

Fig. 3 Platform configurations of Industrial Internet of Things

在成型过程的模拟仿真可以有效预测复合材料成型过程的变形、内部孔隙、分层等潜在缺陷,并根据仿真结果进行工艺方案的优化,降低传统试错法造成的资源浪费^[32]。为此,积极与国内科研院所开展相关研究,针对常用预浸料体系开展固化过程树脂固化交联反应机理研究,建立了树脂/复合材料热/力性能参数库,掌握了考虑性能参数时空演化的超大尺寸复合材料结构固化过程

热-化-力耦合分析方法;通过实验研究和理论分析相结合的方法,考虑固化过程中成形模具、橡胶压力垫等与零件的相互作用机制,建立了干长桁-湿蒙皮固化过程的多级等效建模方法,从而实现了采用预浸料热压罐固化工艺制造的大型复合材料壁板成型过程中应力和变形的高效率计算。同时,正积极开展热隔膜成型过程仿真、自动铺丝成型过程仿真、典型缺陷形成机理研究等相关研究工作。

在数字化建模仿真方面,通过地空大规模三维场景高精度构建技术,实现了复合材料制造车间的三维数字化建模。三维激光扫描技术为多站式实景建模解决方案,能直观真实地体现工厂现状,倾斜摄影技术以大范围、高精度、高清晰的方式全面感知复杂场景,直观反映地物外观、位置、高度等属性,通过将两种技术手段结合起来,将倾斜摄影测量数据和三维激光点云数据融合,并用于复合材料制造车间的三维建模中,并初步实现了物理空间与网络空间的数字孪生。

3) 自动化

基于面向复合材料制造工艺特征的智能生产线模型,结合大尺寸复合材料长桁加筋壁板的制造需求,积极进行复合材料制造全流程的自动化建设。具有代表性的关键设备已实现自动化,如长桁自动化制造的自动铺带机与热隔膜成型设备,进行蒙皮铺贴的自动铺丝设备,用于长桁蒙皮组合的定位设备和捻条制作设备,以及热压罐、铣床、检测等设备。通过新设备引进、老设备改造、数据治理与归集等途径,目前已初步实现了复合材料制作全流程的数字化和自动化。

同时,积极开展热隔膜成型工艺涉及的预成型体制备及缺陷抑制技术、自动铺丝/铺带工艺涉及的形性调控技术、大尺寸弱刚性复合材料壁板的高质量高效率铣切技术和结构缺陷与变形全场检测技术、大尺寸复合材料壁板的精确成型工艺等相关技术研究,在复合材料制造关键工序和关键技术研究方面取得了阶段性成果,在产品制造方面积累了丰富的经验,实现了复合材料壁板的数字化和自动化制造,为实现大尺寸复合材料壁板的智能制造创造了有利条件。

4) 系统集成

利用MES系统实现复合材料制造全业务信息化,对车间现场的生产执行过程进行执行监控及质量追踪,实时采集生产过程质量数据,实现生产现场的透明化、精细化管控,生产计划执行过程的实时跟踪。具体包含:计划管理、制造资源管理、作业执行管理、库存管理、现场质量管理、统计分析、可视化监控看板等功能。

5) 大数据

基于大数据平台的技术特点,结合单位自身信息化条件,以业务需求为驱动,以高效构建、提供大数据应用为目标,遵循基于Hadoop大数据技术架构搭建大数据应用环境的建设思路,通过“数据采集、数据开发、数据管理”等相关功能建设,逐步完善大数据应用架构,如图4所示。



图4 大数据应用架构

Fig. 4 The architecture of big data applications

2.4 典型复合材料构件“适度智能”制造

复合材料智能制造涉及自动化物流、知识工程、自动化制造、信息化升级、智能管控等多个维度,由于制造工艺特殊性等原因,国内航空复合材料智能制造仍处于探索阶段。本节从生产计划、工艺设计、制造过程三个方面简要论述,以更好地体现复合材料“适度智能”实践现状。

1) 生产计划

复合材料车间收到生产计划后检索材料、工装、制造指令等开工条件具备情况。基于生产计划的紧急程度、生产周期、产品固化参数、工装大小、热压罐装载空间/真空管路/热电偶通道、设备资源、人力资源等约束条件,通过智能排产算法生成排产计划,并通过MES系统向生产上下游单位

及车间内部下达生产计划。此外,全流程的制造数据均通过MES平台传递,实现无纸化制造。

2) 工艺设计

工程技术人员根据生产任务下达的复合材料构件信息,利用智能工艺平台、复合材料制造过程仿真等手段快速识别潜在制造风险,制定可靠的制造工艺方案。例如,通过多场耦合作用下复合材料固化过程残余应力及固化变形仿真分析预测复合材料构件固化后可能存在的固化变形缺陷,并通过仿真迭代确定定制化固化工艺参数、模具补偿型面等工艺方案,提前规避产品外形超差风险。随后,通过快速工艺准备、快速工装设计等平台完成工艺设计,缩短工艺设计周期。同时,所有零件制造过程中出现的各种生产数据,尤其是质量问题数据,均会在智能工艺平台进行数据存储、分析、修正、反馈,不断丰富工艺数据库、提升智能工艺平台决策能力。

3) 制造过程

在完成生产保障、生产准备、工艺准备等前期工序后,利用AGV将材料、工装等运输至生产工位。自动铺丝/铺带、热隔膜等预成型设备按照工艺指令进行预浸丝束铺贴后,再由AGV运输至热压罐完成固化,随后进行机械加工等工序。在复合材料制造全过程的制造状态信息迭代通过条形码实现,通过扫码及工序实施人员刷ID卡实现信息流和物质流在MES系统的传递与更新。此外,制造过程的部分工序具备了局部“动态感知、实时分析、自助决策和精准执行”特征。如自动铺丝过程中,视觉传感器实时监测丝束铺放质量,结合视觉识别算法和铺丝缺陷数据库对铺放过程丝束状态图像进行实时分析,自主识别丝束弯折、异物夹杂等工艺问题,并通过醒目标识提醒技术人员处理。

3 结束语

航空复合材料构件制造技术的发展方向之一是整体化成型。大尺寸复杂结构主承力构件的整体成型可减小装配工序、降低制造成本,从而提升飞行器的总体性能。其次,航空复合材料制造技术朝着结构功能一体化方向发展。基于复合材料

固有特性突破成型过程形性调控、多层异质界面热力耦合等关键技术问题,发展功能—感知—承载一体化复合材料,可满足重点型号复合型功能应用需求。最后,航空复合材料制造技术的发展愈发依赖工艺装备的自动化、数字化和智能化。目前,预浸料片裁切、激光投影辅助定位、自动铺丝/自动铺带、热隔膜/热模压、无损检测、外形检测等环节已实现了数字化、自动化,有效提升了复合材料构件的制造质量。面对复合材料大型化、整体化、功能结构一体化发展方向及高性能制造需求,智能制造展现了良好的应用前景^[33]。

智能制造是国家、企业实力的重要标志,航空结构大型化、整体化的发展加快了复合材料制造智能化转型的步伐。国内航空复合材料制造企业需结合复合材料制造工艺特点和我国智能制造技术发展现状,积极进行复合材料智能制造技术研究与实践探索,推动我国航空复合材料制造技术的发展。

参考文献

- [1] KUSIAK A. Intelligent design and manufacturing [M]. New York: Wiley, 1992.
- [2] 杜传忠, 杨志坤. 德国工业4.0战略对中国制造业转型升级的借鉴[J]. 经济与管理研究, 2015, 36(7): 82-87.
DU Chuanzhong, YANG Zhikun. Inspiration of transformation and upgrading of manufacturing industry in China from German industry 4.0 strategy [J]. Research on Economics and Management, 2015, 36(7): 82-87. (in Chinese)
- [3] KUO C C, SHYU J Z, DING K. Industrial revitalization via industry 4.0 - A comparative policy analysis among China, Germany and the USA [J]. Global Transitions, 2019, 1: 3-14.
- [4] 周济. 智能制造:“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese)
- [5] HE L, ZHAO A N, LI Y, et al. Effect of processing method on the spring-in of aircraft ribs [J]. Composites Communications, 2021, 25: 100688.
- [6] 何靓, 朱攀星, 徐小伟, 等. 复合材料残余应力与固化变形机理及控制研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2022(7): 121-128.
HE Liang, ZHU Panxing, XU Xiaowei, et al. A review on

- mechanism and control methods of residual stress and cured deformation of composite materials[J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(7): 121-128. (in Chinese)
- [7] 陈祥宝, 张宝艳, 邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J]. *中国材料进展*, 2009, 28(6): 2-12.
CHEN Xiangbao, ZHANG Baoyan, XING Liying. Application and development of advanced polymer matrix composites [J]. *Materials China*, 2009, 28(6): 2-12. (in Chinese)
- [8] 陈勇, 吴光辉, 钟科林, 等. 复合材料在大飞机上的应用现状[J]. *现代交通与冶金材料*, 2024, 4(2): 1-7.
CHEN Yong, WU Guanghui, ZHONG Kelin, et al. Application of composite materials in large aircrafts [J]. *Modern Transportation and Metallurgical Materials*, 2024, 4(2): 1-7. (in Chinese)
- [9] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(2): 317-322.
MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(2): 317-322. (in Chinese)
- [10] STOJKOVIC M, BUTT J. Industry 4.0 implementation framework for the composite manufacturing industry [J]. *Journal of Composites Science*, 2022, 6(9): 258.
- [11] BLOOM LD, ELKINGTON M, WARD C, et al. On prepreg properties and manufacturability[C]// 19th International Conference on Composite Materials. Canada: IEEE, 2013: 4397-4409.
- [12] ELKINGTON M, BLOOM D, WARD C, et al. Hand lay-up: Understanding the manual process[J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2015, 1(3): 138-151.
- [13] HANCOCK S G, POTTER K D. The use of kinematic drape modelling to inform the hand lay-up of complex composite components using woven reinforcements[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(3): 413-422.
- [14] 梁宪珠, 孙占红, 张铨, 等. 航空预浸料—热压罐工艺复合材料技术应用概况[J]. *航空制造技术*, 2011, 54(20): 26-30.
LIANG Xianzhu, SUN Zhanhong, ZHANG Cheng, et al. Application status of prepreg-autoclave composites technology in aviation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(20): 26-30. (in Chinese)
- [15] 何靓, 徐小伟, 胡大豹, 等. 国产 T800 级高韧性环氧树脂基预浸料的 TTT 图绘制[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(5): 25-31.
HE Liang, XU Xiaowei, HU Dabao, et al. Time-temperature-transformation (TTT) diagram of a domestic T800 carbon fiber epoxy prepreg [J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(5): 25-31. (in Chinese)
- [16] LI Y, XIAO Y, YU L, et al. A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures; Materials, structures and processes [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 154: 106762.
- [17] WANG B, FAN S J, CHEN J P, et al. A review on prediction and control of curing process-induced deformation of continuous fiber-reinforced thermosetting composite structures[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 165: 107321.
- [18] 何靓, 赵安安, 徐小伟, 等. 考虑单向预浸料弯曲性能的有限元仿真[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(7): 3822-3830.
HE Liang, ZHAO An'an, XU Xiaowei, et al. Finite element modelling considering the bending behavior of uncured unidirectional prepreps [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(7): 3822-3830. (in Chinese)
- [19] EUGENI M, QUERCIA T, BERNABEI M, et al. An industry 4.0 approach to large scale production of satellite constellations. The case study of composite sandwich panel manufacturing[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 192: 276-290.
- [20] CRAWFORD B, SOURKI R, KHAYYAM H, et al. A machine learning framework with dataset-knowledgeability pre-assessment and a local decision-boundary crispness score: An industry 4.0-based case study on composite autoclave manufacturing[J]. *Computers in Industry*, 2021, 132: 103510.
- [21] RAMEZANKHANI M, CRAWFORD B, NARAYAN A, et al. Making costly manufacturing smart with transfer learning under limited data: A case study on composites autoclave processing [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 59: 345-354.
- [22] KUSIAK A. Smart manufacturing must embrace big data [J]. *Nature*, 2017, 544(7648): 23-25.
- [23] JAYASEKARA D, LAI N Y G, WONG K H, et al. Level of automation (LOA) in aerospace composite manufacturing; Present status and future directions towards industry 4.0 [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 44-61.
- [24] 马军, 万建平, 任卫安, 等. 航空复合材料智能制造新模式的探索与实践[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(7): 44-53.
MA Jun, WAN Jianping, REN Weian, et al. Exploration and practice of new mode of intelligent manufacturing of aeronautical composite[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(7): 44-53. (in Chinese)
- [25] LIAO Y X, DESCHAMPS F, DE FREITAS ROCHA

- LOURES E, et al. Past, present and future of Industry 4.0—a systematic literature review and research agenda proposal [J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(12): 3609-3629.
- [26] 隋少春, 牟文平, 龚清洪, 等. 数字化车间及航空智能制造实践[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(7): 46-50.
SUI Shaochun, MOU Wenping, GONG Qinghong, et al. Digital workshop and intelligent manufacturing practices[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(7): 46-50. (in Chinese)
- [27] 陈建奎, 杨程丽, 寇洁. 基于全过程的航空复合材料制件制造标准体系研究与构建[J]. *航空标准化与质量*, 2022(3): 25-29.
CHEN Jiankui, YANG Chengli, KOU Jie. Research and Construction of the Standards System for Aviation Composite material Manufacturing Based on the Hall 3d model[J]. *Aeronautic Standardization & Quality*, 2022(3): 25-29. (in Chinese)
- [28] FABRIS J, POURSAARTIP A. Using process modelling as a job-aid to reduce composites manufacturing risk [C] // *Proceedings of the SAMPE Seattle*. [S. l. : s. n.], 2017: 2092-2105.
- [29] LI H, FOSCHI R, VAZIRI R, et al. Probability-based modelling of composites manufacturing and its application to optimal process design[J]. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(16): 1967-1991.
- [30] BARAN I, CINAR K, ERSOY N, et al. A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, 24(2): 365-395.
- [31] PHANDEN R K, SHARMA P, DUBEY A. A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38: 174-178.
- [32] 元振毅, 许英杰, 杨癸庚, 等. 基于多场耦合方法的厚截面复合材料固化过程的多目标优化[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2): 526-535.
YUAN Zhenyi, XU Yingjie, YANG Guigeng, et al. Multi-objective optimization for curing process of thick composite based on multi-physics coupling method[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 526-535. (in Chinese)
- [33] 单忠德, 宋文哲, 范聪泽, 等. 面向 2035 年复合材料构件精确制造发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(1): 113-120.
SHAN Zhongde, SONG Wenzhe, FAN Congze, et al. Development strategy for precision manufacturing of composite components facing 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 113-120. (in Chinese)

(编辑:马文静)