

# 复合材料热压罐成型工艺仿真 技术研究综述

徐 强

(浙江大学机械工程学院流体动力与机电系统国家重点实验室,杭州 310027)

**[摘要]** 工艺仿真技术是大型复合材料构件制造的重要支撑技术。在西方发达国家,仿真技术在大型复合材料主承力构件制造中的应用已趋于成熟。近10年来,我国工艺仿真技术研究也取得了阶段性成果,但是距国际先进水平仍有较大差距。对国内外复合材料热压罐成型工艺仿真技术研究现状进行综述,结合近期研究工作分析了国内航空制造领域对复合材料仿真技术的需求。最后,根据国内仿真技术现状对复合材料热压罐成型工艺仿真技术的发展提出建议。

**关键词:** 复合材料构件;工装设计;热压罐成型工艺仿真;固化变形

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.15.034



徐 强

副教授、硕士生导师,主要从事先进复合材料制造技术及工艺装备、复合材料力学等研究,参与完成多项国家自然科学基金和国防重大课题项目,在 *Int. J. Plasticity*、*Compos. Sci. Technol.*、*Composites Part A*、*Composites Part B* 等国际期刊发表SCI论文20余篇,荣获浙江省研究生教育成果一等奖。

超大型飞机复合材料主承力构件制造技术及装备,集中体现了一个国家的航空制造业硬实力。目前,热压罐成型工艺仍是航空复合材料构件制造领域最为广泛应用的成型方法之一<sup>[1]</sup>。在西方发达国家,以超大尺寸复合材料结构整体化制造、热压罐成型工装优化设计及型面补偿等先进技术的应用使航空复合材料制造技术达到了一个前所未有的水平。相比之下,我国大型飞机复合材料构件制造技术整体上落后于国际先进水平,特别是复合材料整体化制造工艺、工装及仿真技术等“卡脖子”问题亟待突破。

热压罐成型工艺仿真技术是随着复合材料成型工艺基础理论、复合材料构件成型实践经验,以及有限元仿真技术等发展而逐步形成的,其内容主要包括复合材料工装结构设计、热效率分析、复合材料固化变形预测和工装型面补偿等。利用热压罐工

艺仿真可以优化设计工装支撑结构,使其满足实际情况下刚度、强度稳定性要求的同时,改善工装结构热效率;在此基础上,进一步优化热压罐工艺参数,提高复合材料构件质量,可以显著降低大尺寸复合材料构件的研制成本与风险。

因此,本文从复合材料热压罐成型工装设计优化和固化变形仿真分析两个方面对国内外工艺仿真研究现状进行综述,并结合近期开展的复合材料壁板类构件工装设计和固化变形预测等研究工作分析了国内航空制造企业对复合材料热压罐成型工艺仿真技术的需求。最后,根据国内仿真技术现状对复合材料热压罐成型工艺仿真技术的发展提出建议。

## 复合材料热压罐成型 工装仿真分析

工装是复合材料预成型体铺放到构件固化成型过程的载体,其结构

形式及特征严重影响产品成型质量。工装设计一般涵盖材料的选择、结构刚强度设计、温度均匀性分析等。

### 1 工装结构设计与优化

为满足铺放、装运、吊装等载荷情况下结构刚强度及稳定要求,传统的工装支撑结构设计依赖于设计人员工程经验,采用过于保守的“安全系数法”,造成工装结构热效率低,脱模后复合材料构件翘曲变形严重,需

多次加工返修成型模具,直接导致工装制造成本和研制周期翻倍,如图1(a)所示。相比之下,通过开展工艺仿真分析可多次反复开展热压罐成型工装“预试验”,分析工艺参数-试验数据相关性,改进工装支撑结构设计,改善其传热效率并优化工艺参数,最终提高产品成型质量,如图1(b)所示。

国外关于热压罐成型工装设计

制造技术已经成熟,公开专利信息较多,但学术性论文较少。国内学者结合航空企业实际需求,将快速设计和知识重用结合到工装设计中,建立模块化、集成化的工装快速设计系统。安鲁陵等<sup>[2]</sup>基于CATIA CAA实现了复合材料构件成型工装设计向导和装配工装设计。李桂东等<sup>[3]</sup>对三维CAD软件进行二次开发,建立了框架式工装的计算机辅助设计系统。Bi等<sup>[4]</sup>在分析工装功能结构的基础上,基于几何特征于边界开发了框架式工装参数化建模系统。一些学者针对大尺寸壁板类工装型面特点,基于CATIA软件建立了多种工装曲面特征函数的参数化建模,如图2所示,这些模型可用于后续热压罐工艺仿真和优化<sup>[5-6]</sup>。尽管快速设计软件系统在一定程度上提高了工装设计建模的效率,但其特征曲面函数受限于复合材料构件型面特征,对于构型复杂的复合材料构件需要单独进行工装设计。因此,参数化设计软件难以在实际复合材料工装设计中大规模应用。

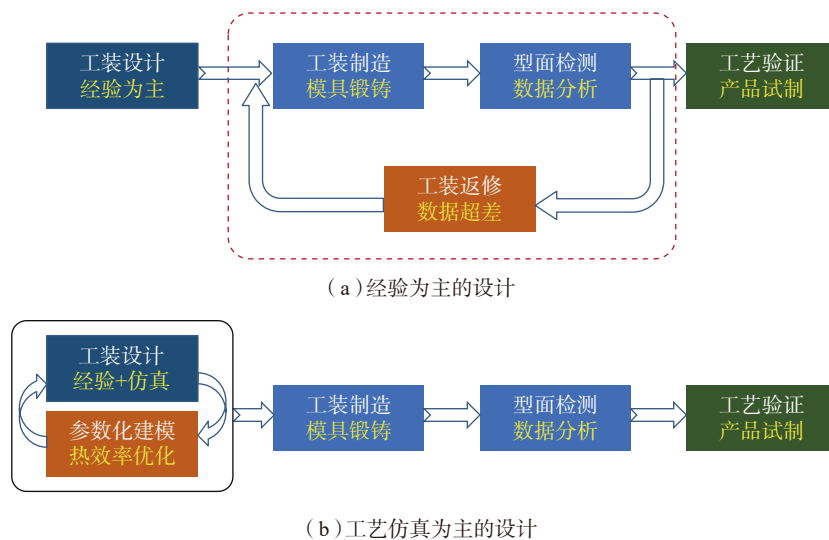


图1 复合材料工装设计流程  
Fig.1 Design process of layup tooling for composites

#### 装配文件结构树

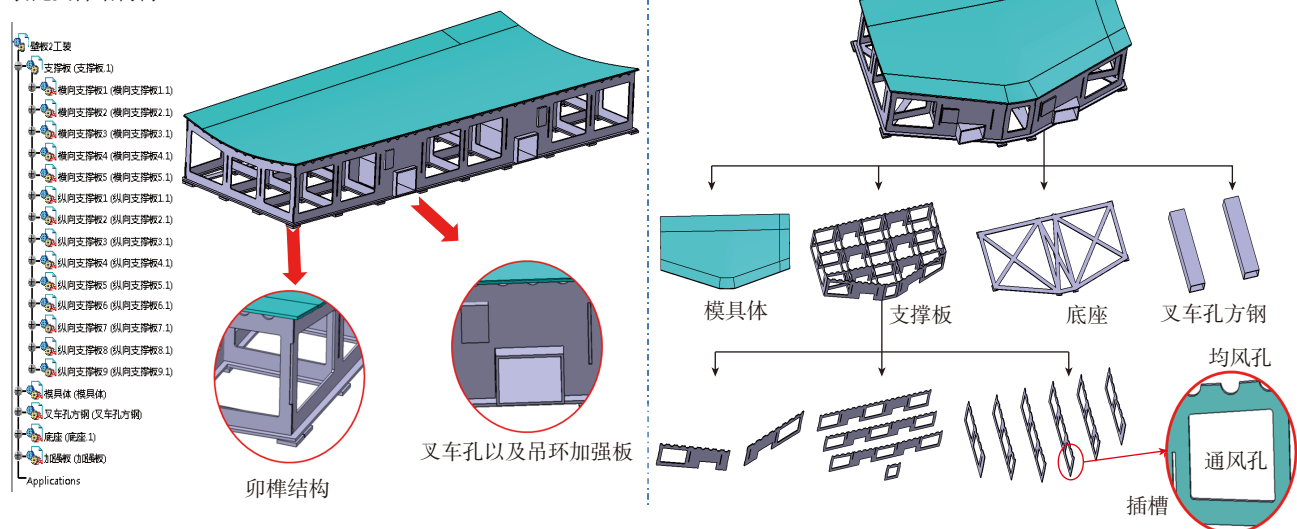


图2 飞机复合材料壁板类成型工装参数化建模  
Fig.2 Parametric modeling of composite panel tooling systems for aerospace industry

## 2 工装结构热效率分析及型面补偿

通过工艺仿真技术研究热压罐内气体流动和工装热传导等相关物理现象,可以明确不同工装支撑结构特征、工艺参数及工装摆放方位对复合材料构件成型工装传热效率的影响。例如,国外学者 Maffezzoli 等<sup>[7]</sup>针对工装在热压罐内的不同位置建立了带惩罚因子的目标函数,通过对目标函数进行求解得到工装的最佳位置。随后, Dios 等<sup>[8]</sup>建立了一种改进的混合整数线性规划模型以探索在复合材料构件批量固化时工装位于热压罐内的摆放位置及角度。在国内,一些学者基于工艺仿真建立了复合材料热压罐温度分布-工装支撑结构特征-工装传热效率的关联关系。例如,张旭生等<sup>[9]</sup>研究了工装底部支撑板所形成的3种不同风道(一型、十型、T型)布局方式下工装型面的温度均匀性,指出在T型风道的情况下型面温度均匀性相对最佳。林家冠<sup>[10]</sup>利用CFD分析软件对工装的温度场分布进行了模拟,提出在支撑结构处添加风扇以增强工装型面底部的空气流动,从而增加温度低谷的换热效率,提高复合材料构件固化过程的温度均匀性。傅承阳<sup>[11]</sup>提出了在工装的温度低谷区域布置加热装置以提升其升温效率,进而改善工装型面及复合材料构件的温度均匀性。赵一鸣<sup>[12]</sup>提出利用变厚度工装型面设计的方法对型面升温较快处进行加厚,以降低其局部升温速率。虽然从仿真层面上都能在一定程度上降低工装温度不均的问题,但由于其实现难度较高,大多未能应用于实际工程中。最近, Wang 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于局部隔离结构(Local Isolation Structure, LIS)的工装局部温度调控方法,如图3所示。与以往的研究不同,该方法的基本思想是抑制模具过热区域的加热速率,从而为构件提供相对均匀的加热环境。当工装采用 LIS 并对其进行优

化后,固化过程中构件内部最大温差从 30.8℃降低到 22.0℃,降幅达 29%。此外,也有一些学者基于复合材料工艺仿真预测结果提出了相应的工装型面补偿策略,有效降低了复合材料构件脱模后的回弹变形<sup>[14-16]</sup>。

### 复合材料热压罐成型工艺仿真

随着复合材料成型工艺仿真技术的发展,基于材料真实铺层参数、成型工艺、成型工装和约束条件的多物理场仿真,能够明确不同工艺参数、工装结构特征下复合材料构件成型过程的温度分布状态、流动密实特性、残余应力分布等,进一步结合工艺试验数据、可追溯或减少复合材料构件制造过程中产生的孔隙、富树脂区、褶皱、分层等缺陷,也可以准确预测脱模后复合材料构件回弹变形量来指导工装型面补偿。西门子基于 Simcenter 3D 提出了较为完整的复合材料成型工艺仿真解决方案,涵盖热压罐成型工艺过程中罐内复杂热流耦合分析、纤维在工装上的铺放分析、复合材料成型过程中的热化学、热结构非线性有限元分析等。基于有限元软件 ABAQUS 平台,加拿大

英属哥伦比亚大学开发了适用于复合材料构件固化成型工艺过程的商业化软件系统 COMPRO。该软件提供了一个相对成熟的技术,使用“虚拟制造”方法来实现热化学-树脂流动-固化应力的综合模拟,能够给出复合材料构件内部温度、树脂固化度、树脂流动和残余应力、变形的分布和数据,用以评估工艺参数变化及结构设计参数对产品质量的影响。目前,该软件已成功应用于波音 747、767 和 777 飞机的研制。ESI 公司开发了用于复合材料固化工艺仿真的 PAM-AUTOCLAVE 软件,主要用于解决热压罐内空气流动、传热以及预浸料的固化、回弹等问题,利用该软件可以优化工装结构及固化工艺参数,有效降低产品试验次数。目前,ESI 公司的复合材料固化工艺仿真软件已在空客、波音等飞机制造厂商得到了广泛应用。

近年来,我国也相继开展了复合材料成型工艺仿真研究,陈祥宝院士团队<sup>[17]</sup>系统地研究了复合材料制造过程模拟优化和自动化铺放技术,提高了我国树脂基复合材料成型制造领域应用技术水平。张钺<sup>[18]</sup>、晏冬秀<sup>[19]</sup>、唐占文<sup>[20]</sup>和元振毅等<sup>[21]</sup>在复合材料构件成型固化过程中变形机

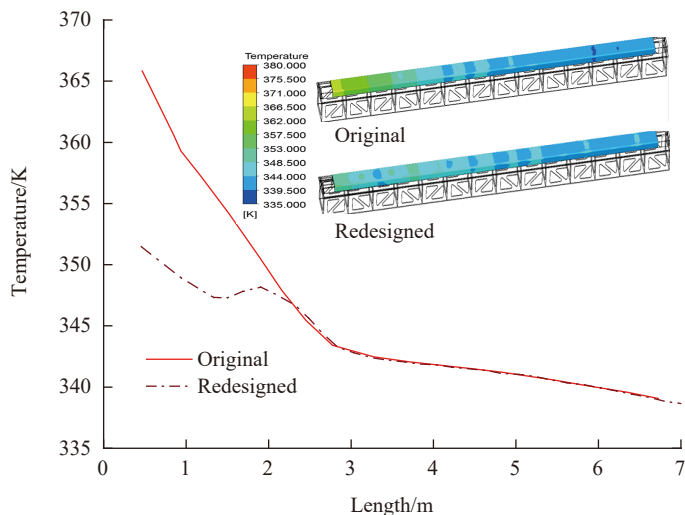


图3 含局部隔离结构的工装热效率分析

Fig.3 Thermal efficiency analysis of local-isolation structure in layup tooling

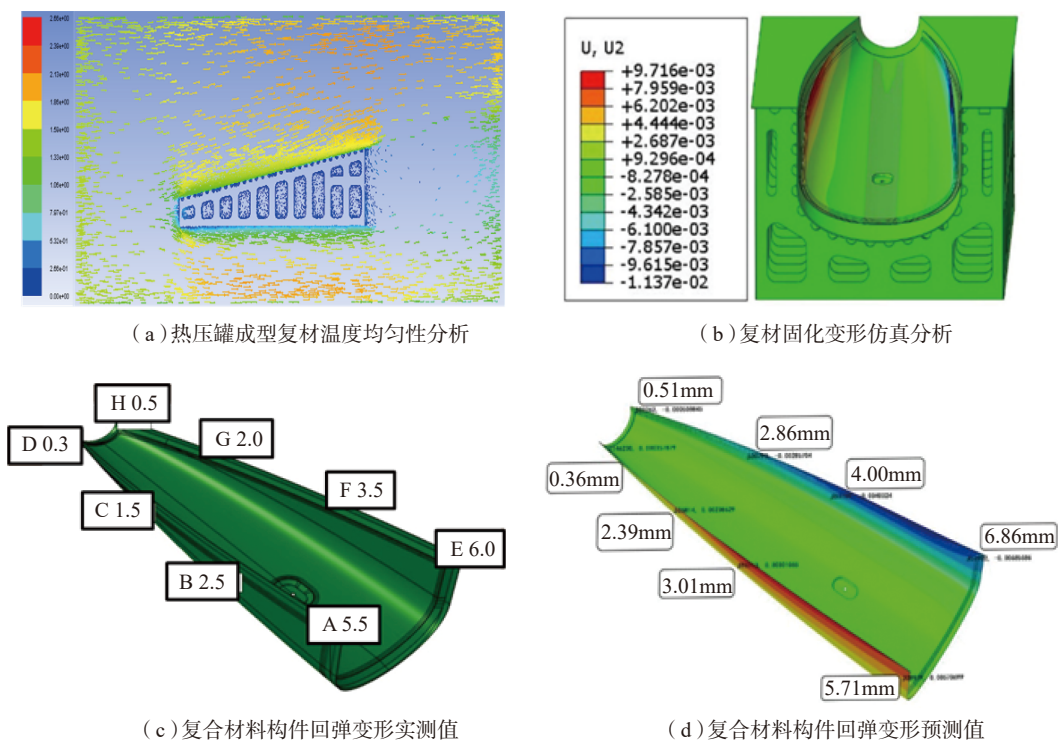


图4 复合材料U型构件热压罐成型工艺仿真

Fig.4 Simulation of spring-in of U-shaped composite parts during autoclave processing

理、温度场和固化度数值模拟、固化工艺参数优化等方面取得了一系列研究成果。Dolkun 等<sup>[22]</sup>建立了复合材料热压罐固化成型仿真分析模型,并通过有限元 ABAQUS 用户自定义子程序实现了复合材料厚板固化变形仿真分析及工艺参数优化,应用该模型进一步对复合材料 U 型构件进行了热压罐成型工艺仿真分析,如图 4 所示,其中仿真预测结果与试验数据吻合较好。最近, Ye 等<sup>[23-24]</sup>研究了固化工艺条件对固化后复合材料加筋壁板层间和层内性能的影响规律,对共固化、共胶接和二次胶接工艺条件的复合材料加筋壁板进行仿真分析,精确预测了加筋壁板非线性屈曲、后屈曲及层间分层和层内失效的力学行为。

值得注意的是,尽管国内复合材料固化成型工艺仿真方面研究工作取得了阶段性成果,但与发达国家成熟的工业仿真软件相比还有较大差距,仍然无法准确描述温度场和压力

场耦合作用下复合材料结构固化成型关键工艺过程,缺少综合考虑热应力、固化收缩应力、温度梯度与树脂固化度、压力分布和树脂流动、模具与零件的相互作用等因素的固化变形精确预测模型,其仿真分析结果难以准确呈现真实的工装结构特征、热压罐工艺环境及树脂流动密实固化等实际工艺状态,对实际工艺指导作用有限<sup>[25]</sup>。

## 结论

尽管我国航空制造技术及装备发展迅速,但航空复合材料构件成型技术体系仍不完整,研究基础十分薄弱,缺乏成熟的工艺仿真系统,难以从成型机理上构建工装结构、工艺参数与复合材料构件成型质量的对应关系,最终导致复合材料工装设计制造周期长,产品合格率低,综合制造成本高。因此,为更好地解决大型复合材料构件制造过程中的实际问题,建议从以下 3 个方面进一步发展复

合材料热压罐成型工艺仿真技术:

(1) 将复合材料自动铺丝缺陷(丝束间隙、重叠和断送纱三角区等)引入热压罐成型工艺仿真模型,研究铺放缺陷随固化过程的演化规律及其对复合材料力学性能的影响;

(2) 建立复合材料壁板成型辅助软膜结构设计-传压/传热均匀性与效率-成型质量关联关系,利用成型工艺仿真评估热压罐固化工艺全过程辅助成型软膜选材及排布策略;

(3) 建立涵盖共固化、共胶接和二次胶接工艺的热压罐工艺仿真模型,评估“干/湿蒙皮-干/湿长桁”不同组合的复合材料加筋壁板工艺方案及其成型质量。

## 参考文献

[1] 顾轶卓,李敏,李艳霞,等.飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J].航空学报,2015,36(8):2773-2797.

GU Yizhuo, LI Min, LI Yanxia, et al.

- Progress on manufacturing technology and process theory of aircraft composite structure[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(8): 2773-2797.
- [2] 安鲁陵, 李薇, 孙小峰, 等. 飞机复合材料构件工装的数字化设计[J]. *航空制造技术*, 2010, 53(6): 74-77.
- AN Luling, LI Wei, SUN Xiaofeng, et al. Digital design of assembly jig for aircraft composites structure[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 53(6): 74-77.
- [3] 李桂东, 周来水. 复合材料构件成型模具设计方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(6): 777-782.
- LI Guidong, ZHOU Laishui. Design method for composite component mold[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(6): 777-782.
- [4] BI F Y, JIN T G, PENG G L, et al. A rapid design and design knowledge management system for mould of autoclave forming resin matrix composite components[J]. *Polymer and Polymer Composites*, 2012, 20(1-2): 183-190.
- [5] WANG Q, WANG L Y, ZHU W D, et al. Design optimization of molds for autoclave process of composite manufacturing[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(21): 1564-1576.
- [6] 鲁成旺. 复合材料构件热压罐成型工装参数化设计及优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LU Chengwang. Parametric design and optimization design of the tooling for molding composite structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [7] MAFFEZZOLI A, GRIECO A. Optimization of parts placement in autoclave processing of composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20: 233-248.
- [8] DIOS M, GONZALEZ-R P L, DIOS D, et al. A mathematical modeling approach to optimize composite parts placement in autoclave[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2017, 24(1-2): 115-141.
- [9] 张旭生, 甘忠, 张海燕. 热压罐时效成形模具温度场优化研究[J]. *中国制造业信息化*, 2011, 40(19): 30-32, 37.
- ZHANG Xusheng, GAN Zhong, ZHANG Haiyan. Research on optimization of mold temperature fields in autoclave age forming[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2011, 40(19): 30-32, 37.
- [10] 林家冠. 复合材料构件热压罐固化的温度场分析与调控[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- LIN Jiaguan. Curing temperature field analysis and regulation of composite components in autoclave process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [11] 傅承阳. 飞机复合材料制件热压罐成型温度场模拟与改善方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- FU Chengyang. The temperature field simulation and improvement method of aircraft composite parts in autoclave process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] 赵一鸣. 复合材料构件热压罐成型模具温度场模拟与结构改进研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- ZHAO Yiming. Research on temperature field simulation and structure improvement of autoclave forming mold for composite material[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [13] WANG L Y, ZHU W D, WANG Q, et al. A heat-balance method for autoclave process of composite manufacturing[J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53: 641-652.
- [14] WUCHER B, MARTINY P, LANI F, et al. Simulation-driven mold compensation strategy for composites: Experimental validation on a doubly-curved part[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102: 96-107.
- [15] WUCHER B, LANI F, PARDOEN T, et al. Tooling geometry optimization for compensation of cure-induced distortions of a curved carbon/epoxy C-spar[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 56: 27-35.
- [16] 岳广全, 张嘉振, 张博明. 模具对复合材料构件固化变形的影响分析[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(4): 206-210.
- YUE Guangquan, ZHANG Jiazhen, ZHANG Boming. Influence of mold on cure-induced deformation of composites structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(4): 206-210.
- [17] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料制造模拟与优化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 7-15.
- CHEN Xiangbao. The simulation and optimization technology of advanced polymer composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 7-15.
- [18] 张铖, 梁宪珠, 王永贵, 等. 热压罐工艺环境对于先进复合材料框架式成型模具温度场的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, 29(4): 547-553.
- ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, WANG Yonggui, et al. Rules of impact of autoclave environment on frame mould temperature field of advanced composites[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2011, 29(4): 547-553.
- [19] 晏冬秀, 刘卫平, 黄钢华, 等. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(7): 49-52.
- YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(7): 49-52.
- [20] 唐占文, 张博明. 复合材料设计制造一体化中的固化变形预报技术[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(15): 32-37.
- TANG Zhanwen, ZHANG Boming. Prediction of curing deformation in integrated design and manufacture of composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(15): 32-37.
- [21] 元振毅, 王永军, 张跃, 等. 基于材料性能时变特性的复合材料固化过程多场耦合数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(1): 167-175.
- YUAN Zhenyi, WANG Yongjun, ZHANG Yue, et al. Multi-field coupled numerical simulation of curing process for composites with time dependent properties of materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(1): 167-175.
- [22] DOLKUN D, ZHU W D, XU Q, et al. Optimization of cure profile for thick composite parts based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(28): 3885-3894.
- [23] YE Y Y, ZHU W D, JIANG J X, et al. Computational modelling of postbuckling behavior of composite T-stiffened panels with different bonding methods[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 247-256.
- [24] YE Y Y, ZHU W D, JIANG J X, et al. Design and optimization of composite sub-stiffened panels[J]. *Composite Structures*, 2020, 240: 112084.
- [25] CAPEHART T W, MUHAMMAD N, KIA H G. Compensating thermoset composite panel deformation using corrective molding[J]. *Journal of Composite Materials*, 2007, 41(14): 1675-1701.

通讯作者: 徐强, E-mail: xuqiang@zju.edu.cn.  
(下转第 47 页)

## Status and Challenge of Materials Extrusion Additive Manufacturing for High-Performance Fiber Reinforced Poly (ether ether ketone) Composites

LUO Meng<sup>1</sup>, TIAN Xiaoyong<sup>1</sup>, SHANG Junfan<sup>1</sup>, Qin Yingjie<sup>1,2</sup>, ZHU Weijun<sup>3</sup>, LI Dichen<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Aerospace Composite Material Research Institute, Xi'an 710025, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. Beijing Spacecrafts Manufacturing Factory, Beijing 100094, China)

**[ABSTRACT]** Materials extrusion as a classical additive manufacturing process can melt, extrude and fabricate the thermoplastic components or their composites layer by layer. It has the advantages of no-molding, ability to form complex structure and low cost, thus to be used in medical, aerospace, and automobile fields. Poly (ether ether ketone), as a kind of semi-crystalline thermoplastic polymer, has many excellent characteristics such as light weight, high strength, good thermal stability, and corrosion resistance. Its components can be fabricated by materials extrusion technology in low cost. In this paper, the development status of the materials extrusion of fiber reinforced poly (ether ether ketone) composites were introduced. The mechanism of the process, development process of the technology and detailed performance comparison were respectively discussed. In the end, the challenges of the fiber reinforced poly (ether ether ketone) composites extrusion for further development were analyzed.

**Keywords:** Additive manufacturing; Materials extrusion; Poly (ether ether ketone); Composites; Fiber

(责编 大漠)

(上接第38页)

## A Review on Autoclave Process Simulation for Composites Manufacturing

XU Qiang

(State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic System, School of Mechanical Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**[ABSTRACT]** Process simulation plays an important role on modelling the fabrication process for manufacturing large geometrically structural components. In the western developed countries, simulation technology has widely used in manufacturing of the primary composite structures. In past ten years, we have obtained stage achievement on studying the modeling of composites manufacturing processes, but their use remains still limited due to the lack of fully validated modelling tools in contrast to the advanced international level. Hence, in this study, the autoclave process simulation for composites manufacturing is reviewed in detail. The requirements for the aerospace of the process simulation are presented by our previous works on the autoclave process simulations. The research efforts in the future are probably going to focus on the development of the autoclave process simulation during the composites manufacturing process.

**Keywords:** Composite component; Layup tooling design; Autoclave process simulation; Curing deformation

(责编 大漠)