

先进复合材料制造及过程控制技术

程文礼* 魏然 梁宪珠

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

摘要:

先进复合材料在民用飞机中的大量应用带来了突出的减重优势和经济效益,同时对复合材料制造技术和成型质量提出了高标准要求。针对先进复合材料在民用飞机中的应用,介绍了国内外先进的大型民用飞机中典型复合材料构件的制造方案,并按照过程质量控制要求,从原材料、工艺过程及产品检验三方面进行了复合材料构件制造过程质量控制分析。分析表明,发展基于自动化的先进复合材料整体成型技术并实现复合材料制造过程的高水平控制,对满足民机适航性和经济性的高标准要求、实现复合材料在民机领域的大规模应用与批产具有重要意义。

关键词: 先进复合材料;民用飞机;制造技术;过程控制技术

中图分类号: V258; TP273

文献标识码: A

OSID:



0 引言

基于先进复合材料比强度、比模量高,抗疲劳、耐腐蚀性能好,结构、功能可设计,可整体成型等优异特性^[1-2],复合材料与传统材料相比具有突出的减重优势,采用复合材料制造飞机结构件可使飞机的结构重量减轻 10%~40%,从而提高结构效率、降低燃油损耗,带来突出的经济收益。因此,自复合材料问世以来,波音、空客等国外先进的民机制造商始终将复合材料作为飞机制造的选材之一^[3-4]。复合材料在民机结构中的应用情况如图 1 所示。早期的民机机型中,复合材料的应用比例普遍低于 10%,彼时复合材料仅应用于飞机的起落架舱门、整流罩、方向舵等简单零部件;随后, A320、波音 777 等机型开始将复合材料应用于水平尾翼、垂直安定面和水平尾安定面等次承力结构,复合材料应用比例有所提高;2000 年以后,复合材料在飞机中的应用比例迅速增加,波音 787 客机率先应用复合材料制造飞机机身等大型主承力部件, A350 客机也紧随其后,采用复合材料制造了机身壁板、翼盒、垂尾、平

尾等结构,使飞机结构中的复合材料用量超过 50%,其燃油消耗比目前相同类别的飞机低 20%,复合材料民机制造实现了跨越式发展。

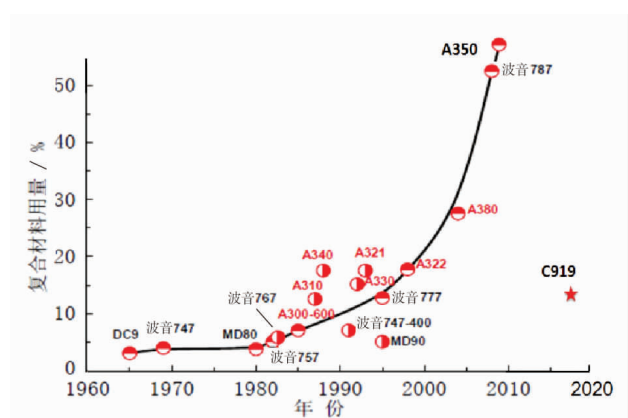


图 1 复合材料在民机结构中的应用增长趋势

相比国外,我国复合材料在民机领域的应用起步较晚。近年来,随着复合材料产品的成熟化和制造技术的不断推进,我国民机复合材料构件设计和制造水平均取得了长足进步,并在国产飞机的研制中实现了复合材料的应用。

* 通信作者. E-mail: 13552018131@163.com

引用格式: 程文礼,魏然,梁宪珠. 先进复合材料制造及过程控制技术[J]. 民用飞机设计与研究,2020(1):85-90. CHENG W L, WEI R, LIANG X Z. Manufacturing and process control technologies for advanced compositematerials[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(1):85-90(in Chinese).

综合分析国内外民机复合材料应用现状,我国民机复合材料应用和发展趋势与国际一致,表现出复合材料应用比例越来越大、应用结构由次承力向主承力结构转变、复合材料构件的复杂程度和整体化程度日益提高等特点^[11-13]。然而,在复合材料民机构件的研制和生产过程中也暴露出了一些问题,包括过度依赖人工导致的制造效率低、质量稳定性差以及制造成本较高等,难以满足民用飞机适航性和经济性的严苛要求,限制了复合材料构件在民机中的大规模应用与批产。

由于复合材料是多组分的各向异性材料,其材料制造和构件成型同步完成,对产品制造缺陷的修复空间狭小,要实现大型复杂结构件的高效、稳定制造,除了要具备性能优异的原材料以外,复合材料构件的制造技术至关重要。同时,复合材料制造过程工序内容多、影响成型质量的因素繁杂,必须针对复合材料产品制造全过程进行监测和控制,以保证复合材料产品的质量。因此,开展先进复合材料结构制造技术研究并实现复合材料制造过程的高水平质量控制,对满足民机适航性和经济性的高标准要求、实现复合材料在民机领域的大规模应用与批产具有重要意义。

1 先进复合材料结构制造技术

目前,用于大型民机复合材料结构的制造工艺按原材料类型主要分为两类:一是基于预浸料的制造方法,包括热压罐成型工艺、真空压力成型工艺和模压成型工艺;二是基于树脂转移的制造方法,包括树脂传递模塑成型、真空辅助树脂渗透成型和树脂膜融渗成型^[14]。其中,基于预浸料的热压罐成型方法成型质量高、工艺稳定可靠、应用领域广泛,是目前航空领域主承力和次承力结构用复合材料构件的首选制造方法^[15]。

传统的基于预浸料的热压罐成型工艺通过人工手糊的方式将预浸料逐层铺贴,制造过程受人为因素的影响严重,成型质量的好坏及稳定性难以得到保证。为了提高复合材料构件制造的生产效率和产品质量的一致性,民机复合材料主承力结构件越来越倾向于采用自动化技术和整体化制造工艺。通过自动铺放技术(自动铺带技术、自动铺丝技术等)、自动化装配技术、自动化检测技术等制造和检测复合材料构件可以有效提高复合材

料构件的生产效率,避免人工操作引入的质量不稳定问题,而采用整体化成型的设计和制造方案,可以减少连接件的数量和装配工序,降低制造成本、减少制造周期,特别适合用于大尺寸、复杂曲面复合材料结构件的成型或者大批量的流水线作业^[14-15]。目前,大型客机 A350、波音 787 的机身、机翼等结构均采用了以自动铺带、自动铺丝为代表的复合材料自动化制造技术,既保证了产品质量的稳定性,满足了适航要求,同时大规模自动化生产也降低了单机成本。

对于复合材料机体结构的制造,波音 787 采用了筒体结构整段制造的工艺方案,使用大型复合材料模具,将预成型/成型长桁埋入复合材料模具型腔内,采用卧式丝束铺放设备进行蒙皮铺放,最终通过热压罐共固化/共胶接工艺完成整体筒段结构成型。此种成型方法整体化程度高、制造效率高,但工装设计难度大,技术难度较大。针对 A350 的前、中、后机身,空客公司仅在锥度较大的尾段采用了整体结构制造,其余均采用了分块结构制造工艺,即将筒段机身划分为多块曲面壁板,通过自动铺丝工艺进行壁板蒙皮的铺放再与长桁胶接共固化,最终通过装配完成机身筒段的制造。针对复合材料机翼,波音 787 和 A350 均采用了自动铺放技术铺叠蒙皮毛坯再与长桁胶接共固化成型的工艺方案^[16-18]。在波音 777X 中,更是率先采用窄带铺放技术制造机翼蒙皮,根据轮廓和型面,通过独立压辊对每一条预浸带进行铺放,对于大型翼面类结构铺放效率极高。两大航空巨头的成功经验证实,由自动化技术支撑的整体化成型工艺方案是实现大型、复杂复合材料民机构件制造的有效途径^[19]。

随着国内大型复合材料结构件的应用,国内复合材料构件的自动化制造和整体化制造技术取得了长足进步^[20-22]。针对国产宽体客机机身复合材料结构,航空工业复材初步建立了以自动铺丝、自动铺带、叠层滑移^[21-22]为代表的大型复合材料机身壁板自动化成型及制造能力,突破了大尺寸复合材料长桁毛坯自动铺带/叠层滑移技术、大型机身蒙皮自动铺丝技术,自主设计制造了长桁毛坯叠层滑移装置、捻子条自动化制备装置,货舱地板梁(“J”形梁)毛坯叠层滑移制备装置等,并在全尺寸前机身等直段筒段试验件的研制上成功进行了应用,如图 2、图 3 所示。

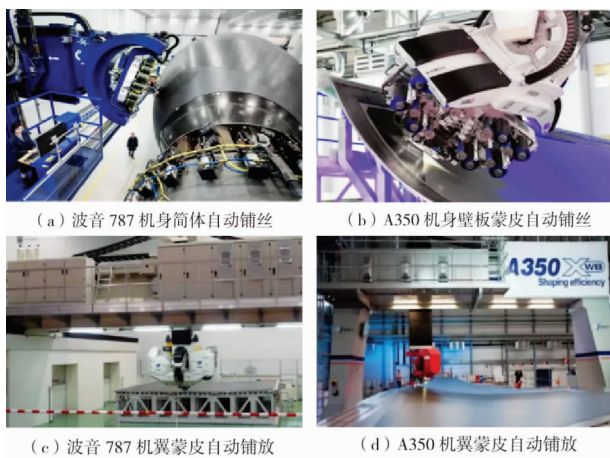


图2 国外大型客机复合材料构件制造

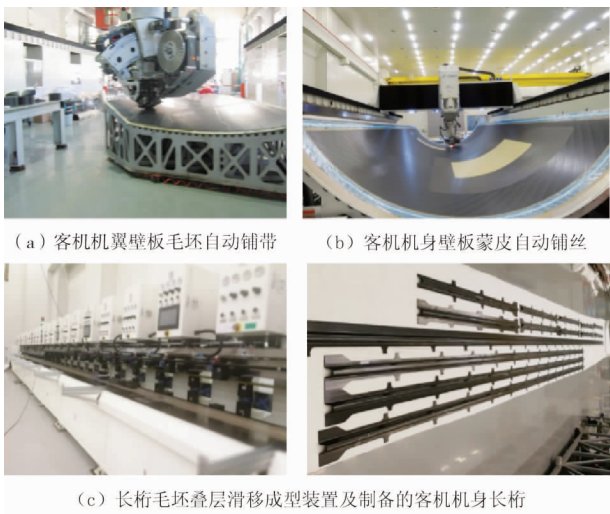


图3 国内大型客机复合材料构件制造

2 复合材料制造过程控制技术

安全性是民用飞机最关键、最严苛的性能要求。适航要求飞机每飞行小时发生一次灾难性事故的概率在 10^{-9} 以内,这就需要飞机结构件质量具备高度稳定性和可靠性。由于复合材料成型过程是多种材料复合、多道工序串联的复杂过程,影响最终产品质量的因素错综复杂,必须针对复合材料产品制造全过程进行质量监控,及时发现制造过程中出现的异常因素,以实现复合材料制造过程的有效控制^[23-25]。

先进复合材料制造过程控制针对复合材料产品生产的全过程,包括原材料的分析与控制、工艺过程分析与控制以及复合材料产品检验三部分^[26]。原材料的分析与控制是对预浸料、树脂、胶膜等原材料

的性能及分散性以及原材料的运输、贮存及取用条件等进行分析和控制;工艺过程的分析与控制针对复合材料的成型过程,以热压罐工艺为例,涉及铺叠、胶接、封装、固化、机加、装配等工序的分析与控制;复合材料产品检验则是对复合材料产品进行必要的检验,如无损检测、外形检测、外观检测等,找出不合格产品,控制交付产品的质量。

目前,国内复合材料产品制造的过程控制,一般通过研究制造过程质量控制的特点和要求,针对影响全过程质量的所有因素,如人员技术素质、工艺设施配备、材料性能保证、工艺方法选定、环境条件控制和检测方法合理性(人、机、料、法、环、测)^[27-28]等,明确、细化各要素的控制点,运用质量工具实施监视和测量,使过程要素处于受控状态,确保获得符合要求的产品。本文以基于预浸料的复合材料民机构件热压罐固化成型过程为例,按照过程质量控制要求,叙述关键工序的过程控制要素和控制方法。

2.1 原材料控制

复合材料成型过程是将多相材料结合为整体的过程。要实现复合材料成型过程的控制,首先要对原材料进行控制。根据复合材料产品的性能要求,选择能满足使用要求的原材料,并对原材料的运输、贮存、取用等过程的工艺参数进行把控,控制可能影响原材料及最终复合材料性能的因素,实现原材料的稳定使用。

预浸料是民机复合材料构件最主要的原材料,其组成和性能直接影响复合材料产品的成型质量。为实现预浸料的质量控制,对每批入厂材料进行复验,考察未固化预浸料的关键性能参数(树脂含量、纤维面积重量、挥发份含量、凝胶时间等)和层合板物理性能(固化后单层厚度、纤维体积含量、孔隙率等)及材料性能的稳定性,实现预浸料的性能评价和质量控制。此外,由于预浸料本身会发生固化反应,必须严格把控预浸料的运输、贮存条件,将预浸料密封在防潮袋内,贮存在低温冷库中;同时,控制预浸料的取用方法,避免因吸湿对预浸料及复合材料的性能造成不良影响,具体的做法是:从冷库中取出预浸料后,将预浸料置于室温环境下保持密闭直至外包装塑料袋擦干后无水汽产生。通过及时、准确记录预浸料的外置时间,确保材料的操作寿命和力学性能寿命满足材料规范的要求。

2.2 工艺过程控制

2.2.1 自动铺放过程控制

预浸料的铺层方式和铺叠质量是影响复合材料性能的关键因素。自动铺放技术采用自动化设备替代人工完成预浸料的铺放,可以有效减少人为因素的影响。然而,由于自动铺放技术在国内民机领域的应用尚处于起步阶段,铺放过程中因操作不当造成的层间夹杂、丝束搭接或屈曲褶皱等构件质量缺陷时有发生。自动铺放过程中的缺陷形成原因主要包括材料性能和规格不够稳定、工艺参数和铺放轨迹等不够合理、铺放过程中异常现象的识别和处理不够及时等。基于以上原因分析,自动铺放的过程控制主要针对材料的一致性、工艺参数的合理性、设备运行的稳定性以及铺放质量监控的实时性开展。材料的一致性可以通过入厂性能复验和料卷端面高度差测量进行检验控制;工艺参数的优化和设备运行的稳定性,可以通过对自动铺放过程进行建模,采用诸如工艺过程敏感性控制、反馈系统的参数控制和工艺输出反馈控制等控制方案,达到对温度、铺放压力等工艺参数稳定控制的目的^[29]。目前,为实现铺放质量的在线检查,设备厂商还开发了铺放过程实时监控系,如波音公司在采用窄带铺放设备制造 777X 客机机翼时,在铺放设备上单独增加了一个横梁,用于悬挂美国 Aligned Vision Laser Projection 在线投影及检测设备,提高工程人员对铺放状态的把控与铺放过程的可追溯性,如图 4 中上方部位的“LV”所示。



图 4 窄带铺放制造波音 777X 机翼蒙皮

2.2.2 胶接过程控制

民机复合材料构件整体化程度的不断提高,使胶接过程成为复合材料民机构件制造中不可忽视的

一个部分。由于胶接过程涉及材料种类多、界面复杂,胶接质量的好坏对胶接过程敏感性极高,因此必须进行严格的过程控制,具体包括胶接材料控制、胶接辅助材料控制、胶接前表面处理方法控制、胶接环境控制、胶接定位控制等方面。对于民机复合材料结构件,所用胶黏剂必须选自材料规范中的合格产品清单(Qualified Products List, 简称 QPL),所用胶接辅助材料和胶接前表面处理方法满足工艺规范的要求,胶接过程在净化间内进行。对于共胶接、二次胶接工艺成型的复合材料构件,胶接过程中的复合材料组件的定位至关重要,需要采用激光投影仪、定位卡板、工业机器人等专用设备结合必要的检测手段实现胶接定位的控制。

2.2.3 固化过程控制

复合材料的固化过程既是材料制备的过程也是构件成型的过程。复合材料一经固化,质量修复空间极小。因此,固化过程的控制对复合材料构件的成型非常关键。国内外针对固化过程的控制展开了广泛研究,普遍认为固化质量主要受到固化温度、固化压力、保温时间、升温速率等固化参数的影响^[30]。固化温度是实现树脂固化的前提,温度过高容易引起固化不充分,温度过低可能造成固化不完全,均会影响复合材料制件的力学性能。固化压力一方面可以促进预浸料中树脂的充分、均匀流动并减少孔隙率,另一方面可以使复合材料构件充分贴模、获得理想的外形。固化温度、固化压力与固化时间充分匹配,才能保证获得质量优异的复合材料构件。同时,固化过程中在制件边缘应放置一定数量的热电偶和真空计,实现固化过程温度和压力的在线监测和可追溯。

2.3 复合材料产品检验

合理的检验方法是评价复合材料成型质量的必要条件。民机复合材料构件产品常用的检验方法包括无损检测、外形检测、外观检测等。根据民机复合材料构件的组成、结构特点以及使用要求,选择合适的检测方法,应用自动化、数字化检测设备,建立规范的检验规程,对检验方法进行控制,从而通过复合材料产品检验,评价复合材料产品质量,确保交付产品的性能满足要求。

3 结论

为实现新一代民用飞机“轻质化、长寿命、高

可靠、高效能、低成本”的发展目标,应做到以下几点:

1) 在现有先进复合材料民机构件的制造技术的基础上,继续发展复合材料自动化制造技术,包括自动铺丝技术、自动铺带技术、自动化装配技术等,建立自动化生产线,进一步提高民机复合材料构件制造的自动化水平;

2) 发展大型、复杂复合材料构件的整体化成型技术,充分发挥复合材料可设计、可整体成型的优势,提高复合材料构件成型质量和制造效率,降低装配和维修成本;

3) 加强复合材料制造过程控制,实现复合材料构件制造全过程的全面监控,提高复合材料构件制造的质量及稳定性,为实现民机复合材料结构的高效、稳定制造和批产奠定技术基础。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 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.
- [3] 益小苏, 张明, 安学锋, 等. 先进航空树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(10): 72-76.
- [4] 吴利华, 袁宇慧. 先进纤维增强复合材料在大型客机上的应用现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(3): 100-103.
- [5] 吉桂兴. ARJ21 复合材料方向舵设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004: 10-35.
- [6] 轩立新, 肖辉江. MXB7701/7781 预浸料在 ARJ21 飞机雷达罩上的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 1: 66, 68.
- [7] 苏艳红, 王煜焱. ARJ21-700 飞机遮光板成形模制造技术难点及解决方案[J]. 宇航材料工艺, 2009, 4: 64-66.
- [8] 姜丽萍. C919 的制造技术热点及最新研制进展[J]. 航空制造技术, 2013, 22: 26-31.
- [9] 喻媛. C919 上用了哪些新材料[J]. 大飞机, 2018, 1: 29-31.
- [10] 马刚, 张晓哲, 唐文峰. 大型复合材料加筋壁板自动化制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 91-96.
- [11] 冯军. 复合材料技术在当代飞机结构上的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 22: 40-42.
- [12] 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.
- [13] 程文礼, 徐洪波, 何可馨, 等. 民用飞机复合材料机身典型结构制造技术[C]//2013年首届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2013: 49-54.
- [14] 谢富原. 先进复合材料制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017: 2-10.
- [15] 梁宪珠, 孙占红, 张铖, 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, 20: 26-30.
- [16] 范玉青. 波音 787 复材机身段的制造技术[J]. 航空制造技术, 2011, 15: 26-29.
- [17] 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.
- [18] 陈亚莉. 从 A350XWB 看大型客机的选材方向[J]. 航空制造技术, 2009, 12: 34-37.
- [19] 谭昕. 777X: 经典能否延续[J]. 大飞机, 2019, 4: 34-37.
- [20] 胡江波, 薛向晨, 梁宪珠. 一种基于方钢管骨架的壁板成型模具[J]. 航空制造技术, 2019, 13: 70-74.
- [21] 梁宪珠, 薛向晨, 王永贵, 等. 叠层滑移工艺制备 L 型、Π 型、Z 型、Ω 型毛坯[C]//复合材料: 创新与可持续发展(上册). 北京: 中国复合材料学会, 2010: 658-661.
- [22] 胡江波, 薛向晨, 郑晓玲, 等. 叠层滑移工艺对 M21C 层压板力学性能的影响[J/OL]. 复合材料学报, (2019-08-16) [2019-10-31]. <http://oninelibrary.wiley.com/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190816.001>.
- [23] 王振宝. 复合材料产品生产过程质量控制与管理[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 3-10.
- [24] 黄鹤, 丁庆强, 李雪. 浅谈统计技术在复合材料质量管理中的应用[C]//第二十一届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 哈尔滨: 中国硅酸盐学会, 2016: 187-189.
- [25] 李艳亮. 质量管理工具在提高复合材料制件合格率的应用[C]//第五届中国质量学术与创新论坛论文集(下). 深圳: 中国质量协会, 2012: 511-515.
- [26] 王天成, 葛云浩, 沃西源. 先进复合材料成型工艺过程中的质量控制[J]. 航天制造技术, 2011, 1: 42-45.
- [27] 凌日文, 朱林. 复合材料航空产品制造过程质量控制的应用研究[J]. 质量与可靠性, 2013, 3: 25-28.
- [28] 许丽丽, 殷永霞, 王晓芸. T 型桁条成型工艺过程探究及其质量控制措施[J]. 高科技纤维与应用,

2016, 41(2): 56-58.

- [29] 於仁明. 复合材料自动铺放过程中质量控制与监控系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 11-28.
- [30] 胡杰文, 冯振宇. 复合材料层合板结构制造工艺的质量控制[J]. 航天制造技术, 2010, 1: 49-50, 57.

作者简介

程文礼 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 复合材料结构制造。E-mail: 13552018131@163.com

魏 然 女, 博士, 工程师。主要研究方向: 复合材料结构制造。E-mail: bhweiran@163.com

梁宪珠 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 复合材料结构制造。E-mail: xianzhu177@sina.com

Manufacturing and process control technologies for advanced compositematerials

CHENG Wenli * WEI Ran LIANG Xianzhu

(AVIC Composite corporation ltd, Beijing 100131, China)

Abstract: The extensive application of advanced composite materials in civil aircraft has brought prominent advantages of weight reduction and economic benefits. At the same time, it presents high standard requirements for composite manufacturing technology and quality. In terms of the application of advanced composite materials in civil aircraft, the manufacturing process of typical composite structures in large civil aircraft at home and abroad is introduced in this paper. According to the requirements of process quality control, the whole process quality control of composite component manufacturing is analyzed from three aspects, that is raw materials, process and product inspection. The analysis shows that the development of advanced composite integral forming technology based on automation and the realization of high-level control of composite manufacturing process are of great significance to meet the high standard requirements of airworthiness and economy of civil aircraft, and to realize the large-scale application and batch production of composite materials in the field of civil aircraft.

Keywords: advanced composite materials; civil aircraft; manufacture technology; process control technology

* Corresponding author. E-mail: 13552018131@163.com