

# 国内航空复合材料工程化应用相关问题探讨

Some Issues on Engineering Manufacture of Composites in Domestic Aviation

中航复合材料有限责任公司 邱启艳 程文礼 徐洪波 陈 静



邱启艳

高级工程师,毕业于沈阳航空工业学院,现在中航复合材料有限责任公司从事树脂基复合材料研发和制造工作,先后主持完成了歼十等多个型号的复合材料结构预研和生产工作,荣获二等功1次,三等功2次及总装高技术武器发展建设工程荣誉奖章1次。

先进树脂基复合材料具有比强度高、比模量高、可设计性强、抗疲劳断裂性能好、耐腐蚀、结构尺寸稳定性好、便于大面积整体成型以及电磁性能可调等特点,已广泛应用于飞机结构。复合材料用量已成为目前衡量飞机先进性的一个重要标志。国

目前,国内航空复合材料工程化水平与国外的差距表现为基础研究不充分,产品质量波动大,生产管理过程没有充分体现考虑成本的制造。应通过复合材料技术研究和工程应用过程,逐步解决关键技术及瓶颈问题,建立生产管理体系,完善标准及规范,提高标准化作业、设备控制精度、模具设计—制造、自动化及数字化的应用水平以及解决工艺问题的经验及技术手段,为我国日益增长的航空复合材料应用工程化制造提供依据。

外先进军机上复合材料用量约占全机重量的20%~50%,大型民用飞机用量已超过了50%。纵观国外复合材料工程应用的经验和做法,发达国家都是有步骤地逐一执行各项计划,开展务实而有效的预研工作,从而推动了复合材料应用的进展。在美国等航空工业发达国家,树脂基复合材料的总体发展水平很好地满足了当代最新型的战斗机(如F-22、F-35)和大型民用飞机(如A380、波音787)的相应需求,其设计和制造技术已经达到成熟的工程化应用水平,并形成了一系列的标准规范。国内先进军机上用量在6%~9%,已用于垂尾、平尾、副翼、鸭翼等结构,并且用量在一

直上升,新机型的用量将达20%以上,复合材料生产也具有一定的规模和水平。然而飞机复合材料构件的批生产历程短,制造技术工程化应用所依赖的批生产经验也相对较少,因此技术的工程化与技术本身的发展状况相比显著滞后。随着国内航空复合材料的发展,将面临更庞大的批量化生产需求和更为复杂的先进技术要求,如何使我国航空复合材料构件的生产达到系统性、计划性、周密性、完整性的工程化生产是航空复合材料行业急需解决的问题。本文总结了国外复合材料工程化应用过程,并在多年从事航空复合材料研究与生产的实践基础上指出了影响国内

航空复合材料工程化的主要问题并提出了相关建议,为国内航空复合材料工程化应用提供了一些可供参考的依据。

## 国内外航空复合材料研究与应用进展

### 1 国外航空复合材料研究与应用进展

先进复合材料于 20 世纪 60 年代中期一问世,即首先用于飞行器结构上。30 多年来先进复合材料在飞机结构上的应用走过了一条由小到大、由次到主、由局部到整体、由结构到功能、由军机应用扩展到民机应用的发展道路<sup>[1]</sup>。鉴于复合材料对飞机机体结构的重要性,美、欧等世界航空发达国家和地区十分重视复合材料技术的研究,从 20 世纪 70 年代开始,以美国为主导,进行了一系列旨在提高复合材料技术水平、降低复合材料成本的研究计划,并最终取得大量的研究成果,为如今复合材料在飞机上的大面积应用奠定了基础,表

1 列出了欧、美部分复合材料研究与应用计划。

可以看出,美、欧等国十分重视复合材料的基础研究,在复合材料发展的各个阶段开展了相应的研究计划,并以 NASA 等国家部门为发起者,各大制造厂商及科研单位参与的方式,这样目标明确,针对性强,在提高复合材料基础理论研究水平的同时,更注重成果的工程化应用,技术上的不断提升也为工程化批生产奠定了基础。

值得注意的是,美、欧航空工业发达国家十分注意技术的积累,并形成了一系列的标准规范,经过了几十年的工程化发展,在设计、材料、制造和试验等方面已经形成了规范化、标准化的完善体系,进而保证了目前如波音 787、A380、A350 等大型飞机的研制及生产。事实上,在复合材料研究的各个阶段也形成了相关的指导性文件,见表 2。这些指导性文件为航空复合材料结构设计、制造及适航

认证提供了依据和指导,也为工程化应用提供了理论基础。

此外,各大飞机公司也都形成了自己的设计手册,并不断修订,以起到指南和规范的作用。在材料和工艺上也形成了自己的规范,以确保复合材料部件具有良好的重复性。以波音公司为例,复合材料方面的材料标准(如 BMS8、BMS9 系列)就有几百项,包括了从第 1 代的 T300 及其环氧基复合材料到目前的 T800H 及其增韧复合材料。在成型工艺方面,最具代表性的就是 BAC5317 系列,操作标准可以明确产品的制造方法和要求,是标准作业和管理的根本,也是取得相关认证的基本条件。

### 2 国内航空复合材料研究与应用进展

国内航空复合材料的研究和发展于 20 世纪 70 年代初开始,30 多年来的研究发展也具有了一定的规模和水平,取得了相当的进步和成果。国内复合材料结构已用于各种军机,如某型号垂尾安定面整体结

表1 国外航空复合材料研究计划<sup>[2-3]</sup>

计划名称	年限	参加公司	研究目的
美国 ACEE 计划 ( Aircraft Energy Efficiency )	1976~1986	NASA、道格拉斯、洛克希德和波音	加速复合材料在飞机舵面、机翼和机身上的应用以减轻结构重量,节省燃油消耗 15% 以上
美国 ACT 计划 (Advanced Composite Technology)	1988~1997	NASA、波音、洛克希德等	飞机结构减重 30%~50%,降低生产成本 20%~30%,并提供材料和结构性能预测的科学依据,为运输类飞机机翼、机身大量应用复合材料提供技术支持
美国 CAI 计划 ( Composites Affordability Initiative )	1996~2007	美国国防部、NASA、FAA 和航空工业公司	实现在高效、低成本复合材料结构技术上的突破,达到综合成本下降 50% 的指标,使复合材料在飞机结构上广泛应用成为可能,其研究成果在美国 F-35 上得到应用
美国 AvSP 计划 (Aviation Safety Program ——AADP(Aircraft Aging & Durability Project)	2007~ (计划 10 年)	NASA 及航空工业公司	解决长期服役中复合材料性能蜕变、损伤演化和疲劳等的检测、预测和预防问题,以应对新一代大型飞机 A380、B787 以及 F-22 和 F-35 等先进战斗机对复合材料机体结构安全性的要求
欧洲 TANGO (Technology Application to the Near-term Goals and Objectives)	2001~2005	空客等欧洲 12 国共 34 个部门	实现减重 20%,降低成本 20%,研究成果使 A380 飞机突破了主承力结构复合材料应用关键技术,复合材料用量大幅提高
欧洲 ALCAS (Advanced Low Cost Aircraft Structures )	2005~2009	60 个航空制造企业、研究院所等	实现复合材料在主结构上高质量、低成本应用,目标使飞机结构重量减轻 20%~30%,成本降低 10%~20%,其客机平台主要针对 A350 飞机

表2 美国飞机复合材料结构技术发展及主要指导性文件<sup>[4]</sup>

时间	发展历程	指导性文件
20世纪60~70年代初	受力较小及非承力件上的应用	MIL HDBK-17A
20世纪70年代初~80年代初	次承力部件上的研究及应用	MIL HDBK-17B、 FAA AC20-107A、NASA RP 1142
20世纪80年代初~90年代	主承力结构应用技术研究及应用	FAA AC 21-26
20世纪90年代至今	低成本及可靠性研究	MIL HDBK-17F、FAA AC 20-107B

构、某型号机翼加筋壁板等。成型技术上如中航复合材料有限责任公司的整体加筋壁板共固化成形技术、蜂窝夹层结构共胶接整体成形技术等已接近世界先进水平。针对目前型号生产多品种、小批量的生产状况,相关单位已完成了工艺改进,优化排产,为工程化应用奠定了基础。另外,复合材料在国内大型民用飞机上的应用研究已经展开,图1为相关设计与研制部门完成的 $\pi$ 型加筋全尺寸复合材料平尾,已通过了静力试验。图2为正在研制的民机机身及中央翼复合材料结构。

经过多年的复合材料技术研究及应用实践,国内先后出版了《复合材料结构设计手册》、《先进复合材料手册》、《复合材料耐久性损伤容限设计指南》和《复合材料结构修理指南》等,并开发了相关设计、分析软

件,建立了比较完整的技术标准<sup>[5]</sup>。

虽然我国在复合材料研究与应用技术上取得了一定成就,但复合材料结构设计思想偏于保守,制造工艺相对落后,研制与生产成本较高,复合材料工程化应用水平相对较低。因此必须开展复合材料技术与工程化应用研究工作,以满足我国日益增长的航空复合材料结构需求。

## 国内复合材料工程化存在的主要问题

### 1 技术问题

国内复合材料工程化过程存在的主要技术问题有3点:第一,设计-制造分离:由于预研攻关阶段所承担的任务大多是新结构,一些技术还达不到设计的预期,并且设计阶段工艺人员参与少,技术反馈少,一旦定型,将出现当初“认为”的小问题可

能成为质量改进上的大问题,如高温树脂体系的高粘度特性与阴模成型拐角缺陷的关联性问题。另外,作为工艺方面遇到的一些问题有时也没有及时反应给设计方,造成再次设计时,还出现原来的问题。第二,相关缺陷机理认识不透;目前普遍存在的现象是技术储备少,预研周期短,投入不足,试验不充分。新技术一旦研发出来就投入应用,加上生产条件及认识的局限,一些问题的认识深度不够,经验不足,导致后期的批产中出现大量质量问题。如国内在RTM、RFI、VARI等低成本制造工艺及配套基体树脂方面具备了一定技术积累,但未形成涵盖设计/制造多方面的技术体系,存在材料,设计,制造技术的不完善。一旦进入工程化阶段,将暴露处很多技术问题。第三,过程波动无法彻底解决:主要表现在对原材料质量、工艺过程、外部配套等不稳定因素造成的产品质量问题不能从技术上制定出全面解决措施,因此产品质量的稳定性无法保证在一定范围内。

### 2 标准及规范

国内复合材料制造的相关标准和规范还不尽完善,目前,除了HB5342《复合材料航空制件航空质量控制》等极少标准外,制造过程中,可参考的标准规范很少。设计、材料、工艺方面缺乏明确的模式规范,新产品制造时,很难迅速地确定工艺步骤和具体内容,而且规范的制定过程主要依赖于经验和部分试验结果,缺乏量化的辅助分析手段,难以针对具体的生产对象建立既可保证制件质量要求,又可将生产成本控制在最小程度上的优化的工艺规范。出于相同原因,质量控制规范往往不得不采用模糊的,非数值化的规定方式,这对于构件批量生产过程中的质量控制是不利的。工艺规范单一地依赖于工艺试验结果,难以对不同批次产品生产过程中的各种不定因素



图1 全尺寸复合材料平尾



(a) 中央翼壁板(投影尺寸 4m × 3.3m)



(b) 机身帽型加筋壁板(投影尺寸 2.5m × 2.3m)

图2 民机复合材料结构

作出准确反应。由于复合材料基体树脂的性能分散性远高于一般金属材料,这方面的欠缺会在制造高质量要求的复合材料产品时导致较高报废率的问题。

### 3 成本问题

复合材料工程化应用直接带来了一个问题就是产品成本的急剧增加。造成复合材料成本过高的原因除了原材料(主要是碳纤维)成本因素外,还包括工艺成本如目前的热压罐成型技术,虽然可用来制造高性能的复合材料,但同时也存在设备投资高、耗能大、辅助材料费用高、工艺过程长等缺点,导致复合材料制造成本很高。另外,制造工艺方法不通用也是高成本的因素,如某一结构从大量试验摸索形成的一种较合理的工艺方案,只适用于该结构,一旦结构发生改变,又需重新试验,还存在相同的材料体系和类似的结构不同工艺参数的现象,这样就增加了人员及能耗成本。高成本的另一原因是自动化应用水平低,而且目前由于缺乏标准规范及实践经验,自动化设备的应用成本也较高。生产过程中还存在制造质量可控性差,成本意识低,缺少精益生产理念和实践,同时还存在缺陷产品的鉴定、评价、检

测、维护等高费用。

## 国内复合材料工程化相关建议

### 1 技术方面

复合材料生产过程中很多技术问题表面上看是在最初的设计-制造过程中没有充分考虑结构及材料体系适宜性,缺少结构、模具、材料体系及工艺参数等对缺陷形成机理的关联试验。实际上是缺少关键技术的研究,没有建立设计-制造一体化DFM(Design for Manufacture)技术,缺少具有针对性的复合材料的相关预研计划,没有相应的研究作为工程化作基础。建议以相关航空复合材料研究部门为依托,联合主机厂所、科研院所建立国家级的研究平台,研究内容包括复合材料结构设计,制造,检测,维修及可靠性评价。设计时要充分考虑发挥复合材料自身的优势,突破追求高性能的传统思想,转向追求高可靠性、低成本等综合平衡的设计理念,并且在设计阶段就要考虑制造和装配问题,从源头上解决成本问题,这样就可以加快产品的研制进度,提高效率,有效降低成本。在成型过程中要充分利用和开发自动化和数字化技术,如加快自动铺带/铺丝技术的工程化应用,提高过程控制

水平,减少人为因素的影响。另外,还应发展复合材料制造过程模拟与工艺参数优化技术,如大型构件和复杂构件的固化变形模拟分析技术,重视工程计算分析方法和相关设计软件的开发,消除传统的依赖于工艺试验和经验模式,转向基于模拟分析的快速预测和优化模式,实现复合材料制造过程数字化分析和制造。

### 2 标准方面

复合材料的研究和工程应用过程要注意和重视文件标准和规范的制定与执行。在标准规范的制定上要统一,开发编制国标、航标和企业标准,提高最终产品的一致性,其目的在于将复合材料的设计和鉴定文件化、规范化,形成统一指南,减少风险和降低成本。在设计上,虽然采用了“积木式”设计方法,但其材料许用值和设计许用值的确认缺乏科学方法,富裕度较大,导致复合材料优势不明显,因此必须加强结构强度等规范的研究,加强材料和设计许用值的确定方法,建立数据库。对于材料规范要规定材料性能及相应的工艺要求,一方面为设计和生产制造人员提供材料数据,另一方面也可以作为材料认证和材料供应商的依据,其相应的制造工艺要求应编入工艺规范,并规定满足该要求的详细工艺过程,这样在零件制造时,只需根据工艺规范编制制造大纲等操作文件,其操作方法及工艺相同,即相同材料的零件可以采用相同的工艺,可以同时制造、进罐。在材料应用方面,应尽快形成材料等同性判据准则以为材料的替代使用提供依据。另外,在模具设计方面,应形成模具设计-制造规范,并向数字化方向发展,还应考虑模具使用的成本问题,如考虑同类型模具的形式及模具的热容量,做到同类零件可以同时进罐固化,设计时还应考虑模具使用的防错方法等。

### 3 制造成本方面

复合材料制造成本包括:材料

(主材和辅助材料)成本、设备成本、人员成本和工艺成本。材料成本方面,在主材的应用上,采用尽量少的材料品种,实现一材多用的目标,这是由于使用新材料需要大量的投资以建立设计所需的庞大数据库,以及由于缺乏使用经验而需冒较大的风险。使用中应通过数字化铺层分析及下料,特别是针对复杂结构,再用CAD进行排版来提高材料利用率。在辅助材料的应用上,积极引用一些价格低廉、适用的辅助材料,以及辅助材料的重复利用来降低材料成本。设备成本方面,对于热压罐工艺可以通过多模具进罐及一模多件的方式来提高热压罐利用率,从而降低热压罐成本,而对于自动铺带设备,虽然可以降低人员成本,但设备价格昂贵,需要从技术成熟度、产品特性、生产计划方面来综合考虑。人员成本方面,可以针对复合材料工程化生产不同工序建立相应的操作班组,提

高人员操作的熟练程度,减少生产工时等。工艺成本方面,对于热压罐工艺可以通过提高材料的工艺性,如改善树脂的工艺性,取消吸胶工艺,固化时,直接加压,无需中间保温台阶,也可以通过工艺优化,缩短工艺路径和时间等方法来降低工艺成本。通过不断完善共固化/共胶接整体成型技术来减少紧固件及装配成本。还可以开发 OOA (Out of autoclave) 热压罐外固化预浸料体系及推广 RTM (Resin Transfer Moulding) 树脂转移模塑等低成本技术来降低成本。

### 结束语

目前,国内航空复合材料工程化水平与国外的差距表现为基础研究不充分,产品质量波动大,生产管理过程没有充分体现考虑成本的制造。应通过复合材料技术研究和工程应用过程,逐步解决关键技术及瓶颈问

题,建立生产管理体系,完善标准及规范,提高标准化作业、设备控制精度、模具设计-制造、自动化及数字化的应用水平以及解决工艺问题的经验及技术手段,为我国日益增长的航空复合材料应用工程化制造提供依据。

### 参考文献

- [1] 张佐光,李敏,陈绍杰.先进复合材料在飞机结构上的应用与发展.复合材料——基础、创新、高效//第十四届全国复合材料学术会议论文集(上),2006.
- [2] 杜善义,关志东.我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考.复合材料学报,2008,25(1):1-6.
- [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.中国工程塑料复合材料研讨会论文集,2009.
- [4] 杨乃宾.新一代大型客机复合材料结构.航空学报,2008,29(3):596-603.
- [5] 陈绍杰.复合材料技术发展及其对我国航空工业的挑战.高科技纤维与应用,2010,35(1):1-7.

(责编 良辰)

- WSUT-P是五森研制新一代超声波专用探伤设备,设计先进,选材精良,精工细作的制造工艺。
- 用于航空航天、核电电力、石油化工等重要产品的管、棒材超声波检测。
- 高精度的主机检测系统,采用国际先进的电容耦合技术,旋转头、三辊定心驱动装置集成在同一升降检测平台上,保证探伤区域同心度及产品检测稳定可靠。
- WSUT-P配置计算机控制系统,提供人机交互界面、动画显示、数据存储、报表打印、通讯等功能。



上海五森检测设备研制有限公司

地址:上海市宝山区大康路325号A-4  
电话:021-56484445 56484442

邮箱:wusunjiance@163.com  
网站:www.wusunjiance.com

广告索引号 13-064