

浅谈降低国内航空复合材料结构成本的途径

Approaches to Reducing Cost of Composites in Domestic Aviation

北京航空制造工程研究所 梁宪珠 张 铖



梁宪珠

毕业于北京航空航天大学飞行器设计专业,研究员,毕业至今一直在北京航空制造工程研究所从事飞行器复合材料制造技术研究工作,主持完成了多个型号的尾翼和机翼复合材料结构的制造技术攻关项目,主持完成了多个机身复合材料制造技术预研课题,荣获集团科技奖一等奖 2 次,二等奖 2 次,国防科技进步奖二等奖 1 次,荣立集团二等功 3 次,二等功 1 次。

从 20 世纪 60 年代末至今,先进树脂基复合材料(以下简称复合材料)以其轻质、高强、抗疲劳等优异性能及耐腐蚀、可设计、易于整体成型等特点,在航空领域得到极大的推崇。发展至今,不仅在军用飞机上获得大面积应用,民用飞机也后来居

目前,随着国内对飞机主承力结构采用复合材料的迫切需求,正确认识复合材料的成本问题,并在设计和制造中不断地降低复合材料的成本,仍是航空复合材料结构研究的重要目标。

上,其用量的多少已经成为衡量飞机先进性的指标之一。

然而,复合材料在航空领域能够如此大面积的应用却并非易事。长期以来,限制复合材料在飞机上扩大应用的原因主要有 2 个^[1]:(1)技术成熟度没有金属高;(2)复合材料制造成本过高,人们难以接受。

上世纪 80 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 列出了美国的部分低成本复合材料结构研究开发计划。如今,波音公司的 B787 飞机结构上的复合材料用量已突破性地达到了 50%,而空客公司的 A350 飞机结构上的复合材料用量更是达到了 52%,可以说,复合材料在航空上的应用已进入一个飞速发展的阶段,同时,这也表明了波音公司和空客公司已经

解决限制复合材料在飞机上大面积应用的 2 个主要障碍。

如今,我国航空工业的发展正处于一个井喷阶段,军用和民用飞机的结构对复合材料的需求都非常迫切。但是,与国外发达国家相比,在解决上述限制复合材料推广应用的问题上,我国存在较大的差距,尤其是在降低航空复合材料结构的成本方面。对于如何降低航空复合材料结构的成本,国内许多研究更多地关注低成本的制造技术。本研究旨在从更广泛的角度出发,浅谈降低国内航空用复合材料结构成本的途径。

航空复合材料结构的成本概念

成本属于一个重要的经济概念,其定义也随着社会对经济问题的不断认识而更新^[3]。随着这一认识的深入,人们对于飞机的成本问题也逐

表1 美国的低成本复合材料结构研究开发计划^[2]

计划名称	资助者	参加公司	预算 / \$	期间	研究目的
DMLCC (Design&Manufacturing of Low Cost Composites)	空军	Boeing MDG GE Bell	50M	~ 97	以 F-22 为模特的批生产飞机低成本制造工艺研究与以往复合材料结构相比降低成本 50%
AFS (Advanced Fuselage Structure)	海军 NASC		30M	3 年	以 F/A-18E/F 的固定翼外壳为对象减重 20%，降低成本 30%
LCCP (Low Cost Composites Processing)	Pratt & Whitney	MDC			小批量、试制机的低成本制造工艺研究
ACT (Advanced Composites Technology)	NASA	Boeing 等多公司		10 年	材料开发, 计算技术, 革新设计, 制造方法的开发比原金属结构降低成本 25%
ATCAS (Advanced Technology Composites Aircraft Structure)	NASA	Boeing MDC			以宽体商用飞机机身作为对象, 开发减重低成本复合材料结构, 代替金属结构

渐从简单的设计制造过程中的成本消耗, 过渡到了整个飞行器使用周期的全寿命周期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 上。

全寿命周期成本^[4]是指产品从开始酝酿, 经过论证、研究、设计、发展、生产、使用一直到最后报废的整个生命周期内所耗费的研究、设计与发展费用、生产费用、使用和保障费用及最后废弃费用的总和, 如图 1 所示。而航空复合材料结构的成本, 同样也应基于全寿命周期成本的概念, 涵盖从结构研发、制造、使用直至维修、报废的所有费用。

通常, 人们提到航空复合材料结构的成本问题, 总是忽略了从全寿命周期成本这一角度来阐述, 更多地提到的是其制造成本, 这是不全面的, 对于复合材料在飞机结构上的推广应用也是不利的。虽然目前国内航空复合材料结构的制造成本高于金属的制造

成本, 但从全寿命周期成本来看, 由于先进复合材料具备高比强度、高比刚度、耐腐蚀和耐疲劳等特性, 相比金属材料, 在飞机上的使用成本和维护成本明显具有成本优势^[5]。因此, 作为飞机结构的设计人员和购买飞机的使用方, 应从全寿命周期成本的角度看待航空复合材料结构的成本问题, 明确了这一概念, 有利于理解降低成本的途径。

航空复合材料结构面向成本的设计方法

面向成本的设计方法最早出现于 20 世纪 90 年代初期, 是指在满足用户需求的前提下, 通过分析和研究产品制造过程及其相关的销售、使用、维修、回收、报废等产品全生命周期中的各个部分的成本组成情况, 进行综合评价后, 对原设计中影响产品成本的过高费用部分进行修改, 以达到降低成本的设计方法。该设计方法是全生命周期成本作为设计的一个关键参数, 并为设计者提供

分析、评价成本的支持工具。其本质是在产品性能和成本的基础上求得一个平衡点, 确定一个折中的满意解, 目的是提高产品的性价比。

以往人们对于成本的关注更多的是放在制造成本上, 但在飞机的设计过程中, 并不仅仅需要考虑制造的因素, 使用过程和维护修理等环节也同样是设计阶段必须考虑的内容。当在设计的过程中全面衡量整个产品寿命周期的成本时, 复合材料诸多的优异性能在成本上也得到了量化。另外, 复合材料的可设计性为设计者在材料性能的选择上提供了自由的空间, 也为产品的性价比提供了可设计的途径。通过选择不同种类和工艺方法制造的复合材料, 可发挥其材料属性的可设计性, 进而最大限度地发挥复合材料性能的效果, 降低复合材料的应用成本。

由于目前航空复合材料结构的应用经验不足, 采用面向成本的设计方法来设计飞机复合材料结构还有很多问题需要解决, 如相关结构性能评估数据库的积累, 结构的成本模型的完善等。尽管如此, 还是要坚持倡导在飞机复合材料结构设计领域采用面向成本的设计方法, 并加大飞机复合材料结构与成本关系的研究力度。随着复合材料应用经验的丰富和完善, 我国将逐渐掌握飞机复合材料结构与成本之间的关系, 使得设计者在设计阶段即可较精确地控制航空复合材料结构的成本。

结构设计研发过程的标准化

航空复合材料结构的应用时间不长, 每种新型材料、结构的研发过程, 大多都要经历。从材料性能测试, 进而到结构单元、典型试验件、缩比件直至 1:1 制件的试验验证, 即通常所说的积木式试验验证过程。由此, 航空复合材料结构设计研发过程的成本也往往高于金属材料。这类研发成本高昂的本源, 一是新型材料



图1 航空复合材料结构全寿命周期成本

及其结构发展的必然过程,需要进行试验数据的积累,建立数据库;另一个则是相关的验证测试过程标准化程度不够,造成验证过程费用的增加。

航空复合材料结构通过近几十年来的发展,在国外已逐步形成了标准的材料性能测试和结构试验验证手段以及公共实验数据库。而国内因为起步较晚,在新材料、新工艺及复合材料应用范围和规模方面,以及材料和结构研制各阶段(选材、材料替换、各级别积木式验证试验)的数据获取、处理和应用等深层次的标准化方面均存在较大差距,导致在新型复合材料结构的研制过程中,仍然需要投入大量时间和金钱来进行重复的研究^[6]。

T800 级 / 高韧性树脂复合材料的开发

众所周知,航空材料追求轻质、高强度和高模,目的是降低结构重量,提高飞机的性能指标,对于民用飞机而言,大幅度降低结构重量,意味着飞机耗油量的下降,其使用成本也随之降低,因此,近年来,民用飞机在结构上大面积采用复合材料已经超过了军用飞机,其中的重要原因是为了降低飞机的使用成本,增加飞机的竞争力。

目前,飞机结构采用的是损伤容限设计。损伤容限设计是在设计载荷作用下,通过控制压缩许用应变使结构内部存在的损伤不扩展,从而保证在给定寿命下的结构安全性。因此,复合材料的许用应变值在很大程度上决定着结构的设计参数。从成本的角度,若许用应变值小于 0.2%,则复合材料结构的减重通常在 12% 左右,所获得的减重效果尚抵消不了由于更换材料所付出的代价^[7]。

由于主承力结构占飞机结构重量的比重很大,国外航空发达国家为

了更大限度地减重,在主承力结构上已经采用了高强中模的碳纤维,代表是 T800 碳纤维,其拉伸模量达 294GPa,拉伸强度达 5500MPa。波音公司提出了适用于民机主承力结构的复合材料规范 BMS8-276,用于主承力结构的复合材料设计许用应变要达到 0.6% ~ 0.8%^[8]。而 T300 碳纤维复合材料的设计许用应变只有 0.3% ~ 0.4%,不能满足主承力结构的设计要求。目前,波音 B787 机翼主承力结构上采用的 T800/3900 复合材料的 CAI 值在 315 MPa ~ 345 MPa^[9]。

因此,开发 T800 级 / 高韧性树脂复合材料,有助于提高复合材料的性价比,从而在满足设计要求的前提下减少材料的用量和制造费用。更为重要的是,结构自身重量的减少将会使飞机使用成本明显降低。由此,在制造成本提升幅度不大的情况下,开发 T800 级 / 高韧性树脂复合材料是降低复合材料结构全寿命周期成本的一个有效的途径。

由于 T800 级碳纤维的延伸率较大,必须采用与之匹配的高韧性树脂。因此,若要实现 T800 级碳纤维复合材料在飞机主承力结构上的应用,开发高韧性树脂和相关预浸料制备技术是必须解决的关键技术。其中碳纤维 /QY9611 复合材料的 CAI 值 (4.45J/mm) 达到 320 MPa,碳纤维 /BA9916- II 的 CAI 值 (6.67J/mm) 达到 270 MPa 和 (4.45J/mm)320 MPa,碳纤维 /BA9916- II S 的 CAI 值 (6.67J/mm) 达到 315MPa。这些研究成果为复合材料在我国飞机主承力结构上的应用奠定了基础。相信在未来的工程应用中,相关的研究成果能够

明显起到降低复合材料全寿命周期成本的作用。

整体结构的应用

材料与结构同时形成是复合材料的特点之一,这一特点使得复合材料更容易做成整体结构。对于飞机结构而言,利用共固化、胶接共固化或二次胶接等工艺,可以通过一次或多次固化将长桁或骨架与蒙皮形成一个整体构件,由此可大量减少零件和紧固件的数目,减轻装配工作量,进而减轻结构重量,降低装配成

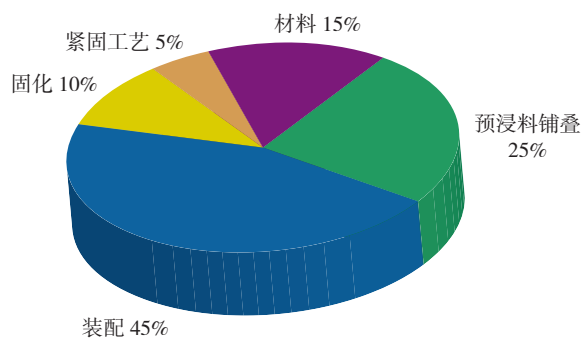


图2 航空复合材料结构产品的装配成本比重^[10]

本。图 2 为目前国内装配成本在飞机复合材料结构制造成本中的比重。

飞机复合材料整体结构一般可分为壁板整体结构和盒段整体结构。壁板整体结构指长桁与蒙皮整体形成为一块壁板,或者左右蒙皮与机身为一体的翼身融合壁板,壁板再与骨架用紧固件机械连接。如美国的 F-35 战斗机的机翼上蒙皮,采用了左右上蒙皮与机身为一体的翼身融合壁板,见图 3。波音 787、A350 及

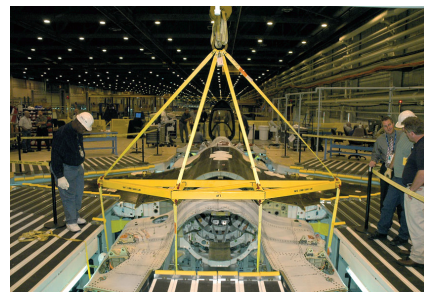


图3 F-35左右外翼和机身一体化整体蒙皮



图4 787的整体壁板

A400M 外翼主承力壁板均采用了长桁与蒙皮整体成形壁板,图4为波音787的整体壁板,由于金属受到原材料尺寸限制,上述壁板构件对金属而言是无法整体制造的。盒段整体结构指蒙皮与骨架或部分骨架整体成型为整体盒段,由于骨架与一侧或两侧蒙皮整体成型,与壁板整体结构比较,更能够发挥整体结构的优势,进一步减少零件和紧固件的数目、减轻结构重量、降低装配成本。如我国的某型号战斗机的基于 π 胶接接头的垂直安定面,欧洲的EF-2000机翼盒段整体壁板,见图5。

需要指出的是,复合材料结构的整体化程度需要适度,否则容易增加制造过程中的质量风险,造成后期维修的困难,反而不利于成本的降低。



图5 EF-2000机翼盒段整体壁板

复合材料结构设计 / 制造过程中的数字化技术

随着复合材料结构设计 / 制造

专用软件的开发以及各种复合材料数控制造设备(如预浸料自动剪裁设备、激光投影设备和纤维自动铺放设备等)的研制成功,复合材料构件数字化设计 / 制造技术已在国内外得到了大量的应用,并取得了很好的效果。复合材料结构数字化设计 / 制造以复合材料设计

/ 制造平台和复合材料数字化制造设备为软硬件基础,从根本上改变了传统复合材料的设计 / 制造方式,通过采用数字量形式对产品进行全面描述和数据传递,实现了设计与制造之间数据的无缝集成,并越来越体现了复合材料结构设计 / 制造一体化的特点^[11]。这使得复合材料结构的设计 / 制造环节的效率大大提升,从而大大降低了相应的成本。例如,在B787项目中复合材料构件均采用数字化设计,将设计数据向全球伙伴发放,从而保证了复合材料构件数据的唯一性和准确性。由于波音787大量采用数字化设计,因此其研发周期比波音777缩短了3年,相应的研发成本也得以大幅度降低^[12]。

虽然国内的复合材料结构设计 / 制造过程中的数字化技术相比国外起步较晚,但发展迅速,在近年来的众多型号预研中,已实现了设计 / 制造全过程的无纸化和数据无缝集成,大大缩短了相应的研制周期,并在降低成本方面取得了可观的效果。

碳纤维的国产化

由于各种各样的原因,过去我国航空领域使用的碳纤维一直没有完全国产化。在国际复杂的政治和经济环境下,碳纤维的价格在最近几年内一路飙升。而在航空复合材料结构的材料成本中,碳纤维的成本占据了绝大部分,由此也极大地抬高了国内航空复合材料结构的成本。目前

看来,国外碳纤维的高昂价格在短时间内不会发生变化。因此,若要大幅降低复合材料的材料成本,首先必须完成碳纤维的国产化。

目前,CCF300碳纤维完成了工程化生产应用研究,并已在航空结构上投入使用,下一步的主要任务是实现工业化大批量生产并进一步降低其生产成本。相信随着碳纤维生产技术的进一步提升,我国的航空用T300级碳纤维的成本将会与国际接轨,并有能力参与国际市场的竞争。

我国的T800级碳纤维还在研制阶段,还要经过工业化生产验证的过程。但只要坚持国产化为先的原则,相信T800级碳纤维也会像T300级碳纤维一样,实现在航空主承力结构上应用国产T800级碳纤维的目标,并参与国际市场的竞争。

降低制造成本的途径

在航空复合材料结构的制造过程,早期自动化、机械化程度低,中间过程冗长,成型过程耗能大。可以说,工时长、能耗大是早期航空复合材料结构制造工艺的特点,也是其成本高昂的最根本原因。

随着近几十年来国际上一系列的针对航空复合材料结构的研究计划的实施,涌现出了许多新型的设备、工艺方法和手段,通过减少工艺过程的工时和能耗,大大降低了复合材料的工艺成本。而国内近年来,通过引进、吸收和自主研发,在航空复合材料结构的制造工艺方面得到了极大的提高。着眼于降低航空复合材料结构成本的途径,从以下2个方面讨论降低工艺成本的途径。

1 减少工时

(1) 提高自动化、机械化水平。

在制造行业中,当所生产的产品数量达到一定的程度,通过提高制造过程中的自动化、机械化水平,将会有效地减少劳动工时,降低生产周期,同时更好地控制质量。从而在批

量生产产品时,大大降低单个产品的制造成本。

近 30 年来,随着航空复合材料结构大尺寸构件的不断出现,毛坯制造过程中人工成本过高、周期长、质量不易控制的问题凸显。由此,自动铺放技术成为广泛应用的自动化技术。它的出现,提高了铺叠/覆过程中的制造效率和质量,使得制造过程中的人工成本和工时得以大大降低。

自动铺放技术包括自动铺带技术和自动铺丝技术,其中自动铺带技术则主要用于大尺寸、中小曲率的构件,如机翼壁板蒙皮;而自动铺丝技术主要用于大曲率构件,如机身蒙皮^[10]。目前,国外大尺寸壁板蒙皮都采用自动铺带技术。而国内“十一五”期间,北京航空制造工程研究所也成功研制了 6m × 20m 大型自动铺带机,且已在新型飞机的研制中得到了应用。在自动铺丝技术应用方面,国外成功的案例也很多,在提高性价比、缩短开发时间方面都取得了令人瞩目的成绩^[10]。目前,国内在这方面也正在开展相应的研究,预计在未来几年内将会得到实际的应用。

由于目前国内代表着提升航空复合材料结构自动化水平的自动铺放技术刚刚起步,虽然已有一定程度的应用,可是在降低工艺成本方面还没有明显的体现。其主要原因是目前国内该技术的成熟水平还不足以应用到定型产品的批量生产中。但根据该技术的发展趋势,预计不久的将来,国内的自动铺放技术将会得到大量的应用,从而在降低航空复合材料结构的成本方面发挥作用。

(2) 开发新工艺。

开发新工艺,减少和改善工艺步骤,也是减少工时的一个重要途径。如国内研制了“零吸胶,常温加压”预浸料,去掉了以往热压罐-预浸料工艺中预吸胶的工艺步骤,减少了热压罐的使用时间和辅助材料的消耗;另外,该所开发的适用于大长细比构

件的“叠层滑移工艺”,通过预先铺叠层板,再将层板弯折成需要的构件毛坯单元,极大地提高了制造长纶的效率。由于层板铺叠过程可使用自动铺带设备,改变了以往的手工铺叠过程,大量减少了相应的人工工时。

2 减小耗能

热压罐是目前航空用碳纤维/热固性树脂材料制备飞机构件的关键设备,也是复合材料制造过程中能耗最大的设备。

为了能减少制造过程中的能耗,相关的研究主要从 2 个方面展开:(1) 开发新型的复合材料制备工艺,以避免和减少使用热压罐设备;(2) 开发低能耗的固化工艺与设备,如利用微波或电子束来进行固化过程中加热。

第一类技术研究的典型代表为复合材料液体成型工艺。该类工艺通过对模具的使用,避免了固化过程中需要利用设备内气体加压的要求,因此可使用普通烘箱进行固化,大大降低了该过程的能耗。第二类技术研究的代表是微波、电子束固化发生器。这类设备与传统的加热方式相比,在能源消耗方面具有巨大的优势。但在其相关的应用研究中,目前还无法解决使用该类设备固化后,材料的性能稳定性问题,因此,在航空复合材料构件上还没有应用,目前还是一个探索方向。

除此之外,传统的预浸料-热压罐工艺在能耗问题的解决上也积累了很多有效的手段。如采用大型热压罐,一次固化多个构件,其各个部件摊销的热压罐能耗费用将大大降低;另外通过优化工艺流程,减少进罐时间,如上文提到的“零吸胶,常温加压”,也在减少能耗方面取得了明显的效果。

结束语

成本高是制约复合材料在我国飞机结构上大面积应用的主要原因,

而降低航空复合材料结构的应用成本,则是一个需要系统考虑的问题。

近几十年来,随着国外针对航空复合材料结构研究计划的实施及其相关技术的发展,复合材料的成本得以大大降低。国内近年来在降低航空复合材料结构成本上也进行了大量的研究,通过引进、吸收和自主研发,已在降低成本的某些环节上取得了突破性进展,但仍有更多的潜力可以挖掘。目前,随着国内对飞机主承力结构采用复合材料的迫切需求,正确认识复合材料的成本问题,并在设计和制造中不断地降低复合材料的成本,仍是航空复合材料结构研究的重要目标。

参考文献

- [1] 梁滨. 航空级树脂基复合材料的低成本制造技术. 材料导报, 2009, 23 (4): 77-80, 85.
- [2] 平成 8 年度“航空宇宙系统用先进复合材料结构调查报告书”, 上卷. 日本机械工业联合会, 次世代金属、复合材料开发协会.
- [3] 刘志华, 邓卫玲. 成本概念研究. 合作经济与科技, 2005 (18): 25-26.
- [4] 侯鹏, 刘晓东, 李学文. 大型运输机全寿命成本模型分析. 航空计算技术, 2005, 35(1): 38-44.
- [5] 古托夫斯基 T G. 先进复合材料制造技术. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] 沈薇, 杨胜春, 沈真. 复合材料力学性能表征标准化研究新进展. 航空制造技术, 2009, 增刊: 25-27, 29.
- [7] 赵渠森. 降低树脂基碳纤维复合材料成本的工程途径. 中国工程科学, 2001, 3(9): 21-28.
- [8] 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.
- [9] 张耘. 复合材料在大型民机的应用进展 [EB/OL]. 2010 [2010-11]. <http://www.istis.sh.cn/list.aspx?id=6401>.
- [10] 淡蓝, 七丁. 复合材料低成本制造技术调查报告. 航空制造技术, 2009(15): 76-77.
- [11] 张丽华, 范玉青. 复合材料构件数字化设计制造解决方案. 航空制造技术, 2007(8): 56-59.
- [12] 肖军. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构制造中的应用. 航空制造技术, 2008(1): 53.

(责编 小城)