

# 大飞机复合材料机翼 研制技术现状

## Status of Manufacturing Technology in Large Aircraft Composites Wing

中航工业北京航空制造工程研究所 段友社 周晓芹 侯军生



段友社

中航工业北京航空制造工程研究所高级工程师,主要从事树脂基复合材料成型工艺研究工作。

复合材料因其优越的可设计性、抗疲劳、抗腐蚀以及较高的减重效率,已经成为目前各种先进飞机结构的必选材料。复合材料在国外先进飞机上的应用比例逐年提高,波音 787 飞机复合材料应用比例已经超过 50%,空客从 A310 的 5% 复合

国外通过几十年复合材料的研制应用,复合材料在各种机型上的应用比例逐步提高,形成了相对成熟的设计理念和方法,相应地开发出各种先进的成型工艺、设备、检测方法和高效的装配工艺等,这都为国内研发复合材料机翼提供了大量可借鉴的经验。

材料到 A380 的 25%,最新研制的 A350XWB 已经超越波音 787 的复合材料用量,达到 53%。

复合材料在飞机上的应用遵循由小到大、由简到繁、从次承力结构到主承力结构的规律,机翼作为飞机主承力构件,由于其结构尺寸大、受力复杂等原因,也是先在小型飞机和军用飞机上进行设计应用,在长期使用过程中积累了大量的设计、成型、使用和维护等工程经验后,才逐步在大飞机上展开应用。本文结合目前国内外大飞

机复合材料机翼的研制现状,主要对大飞机复合材料机翼的结构形式、选材、成型工艺以及先进的成型技术进行分析汇总,以期为国内大飞机的研制提供借鉴意义。

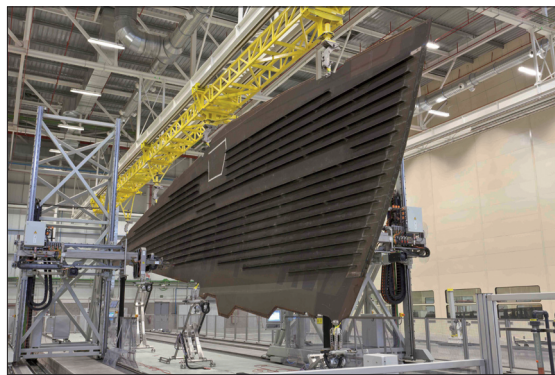


图1 空客 A350XWB 机翼下壁板

## 复合材料机翼设计 及结构形式

设计是复合材料的基础,先进的设计理念思路对后续的复合材料研制至关重要,通过优化设计,可以更好地发挥复合材料的优势,发挥更好的结构效益和经济效益。

目前,国外大飞机机翼多采用全复合材料整体壁板,翼盒结构布局为双梁多肋结构型式,机翼壁板采用复合材料蒙皮加筋结构形式,筋条采用“T”形和“工”字型等形式。空客 A350XWB 机翼长约 35m,壁板采用是“T”形加筋形式(见图 1),波音 787 机翼壁板采用“工”字型加筋形式。空客和波音在机翼壁板口框的设计上稍有区别,空客采用的是单排连续排列形式,波音采用的是双排分段连续排列形式。

### 机翼壁板选材

复合材料材料体系的发展推动着复合材料在飞机主承力结构上的应用,同时先进的飞机设计理念及更高性能的结构要求又促进材料体系的发展改进。

第 1 代复合材料呈现脆性材料性能特征,层合板对横向载荷(如冲击载荷)引起的沿厚度方向的损伤,特别是分层损伤敏感,并不适用机翼等主承力构件。为此,波音开发了增韧环氧树脂基体和改进结构损伤容限特性的结构设计,并提出采用冲击后压缩强度 CAI 作为复合材料结构应用性能的评价指标<sup>[1]</sup>。

1982 年波音公司提出了新的复合材料预浸料标准 BMS82276,概述了主承力结构复合材料性能目标,根据新规范要求,波音公司提出改进碳纤维性能,要求碳纤维拉伸弹性模量提高 30%、拉伸强度提高 50%,同时,开发高抗分层能力的韧性树脂基体,欲将复合材料结构设计许用应变由第 1 代复合材料的 0.3%~0.4% 提高

到 0.6%~0.8%,以使新一代复合材料适合民机主承力结构应用。1989 年中模量、高强度型碳纤维 T800 达到波音公司碳纤维材料标准 BMS9217 要求,并与同期研发的 180℃ 固化(使用温度 80~100℃)韧性环氧树脂构成的复合材料(如 T800H/3900-2)达到波音公司材料标准 BMS82276 要求。并在波音 777 尾翼蒙皮、桁条、翼梁和地板梁上得到了应用验证。

从标准模量碳纤维(T300 级)到现在的高强中模(T800 级),以及与之相匹配的改性高韧性环氧树脂,材料的发展极大地促进了复合材料在飞机各种结构上的广泛应用。

### 复合材料机翼的成型

复合材料设计是基础,成型是关键。成型技术和设备是成型复合材料的重点,随着复合材料在飞机上的广泛使用,各种相对应的先进成型技术也迅速发展,先进的预浸料制备技术、自动铺带(丝)技术及设备、激光投影、激光跟踪仪以及工装设计和加工等都为复合材料的成型提供了坚实的基础。

#### 1 机翼壁板成型工艺

目前,大尺寸加筋壁板成型工艺常见有以下 4 种:

(1) 二次胶接(长桁和蒙皮分别固化,然后组装二次胶接);

(2) 共固化(蒙皮与长桁分别铺叠预成型,再组装胶接共固化);

(3) 胶接共固化(长桁先固化,再与预成型蒙皮胶接共固化);

(4) 胶接共固化(蒙皮先固化,再与预成型长桁胶接共固化)。

3 种成型工艺各有优缺点,在选择成型方式时必须结合产品的结构形式、外形尺寸和设计使用要求等确定适合的成型方式。

大尺寸机翼复合材料壁板结构的成型目前普遍选择胶接共固化工艺,相对于二次胶接,胶接共固化有较好的胶接质量,节省了一次热压罐的使用,成型效率较高。相对于共固化,胶接共固化模具结构相对简单,工装设计加工成本低。

波音 787 复合材料机翼长 30m,其复合材料机翼壁板成型选用胶接共固化成型方式,筋条先固化,再和蒙皮定位组装后进行胶接固化。

空客在机翼壁板结构上同样采用胶接共固化成型方式,A400M(见图 2)和 A350XWB(见图 3)复合材料机翼采用长桁先固化,再和蒙皮胶接共固化的成型方式。采用胶接共固化成型方式,可以保证长桁的成型

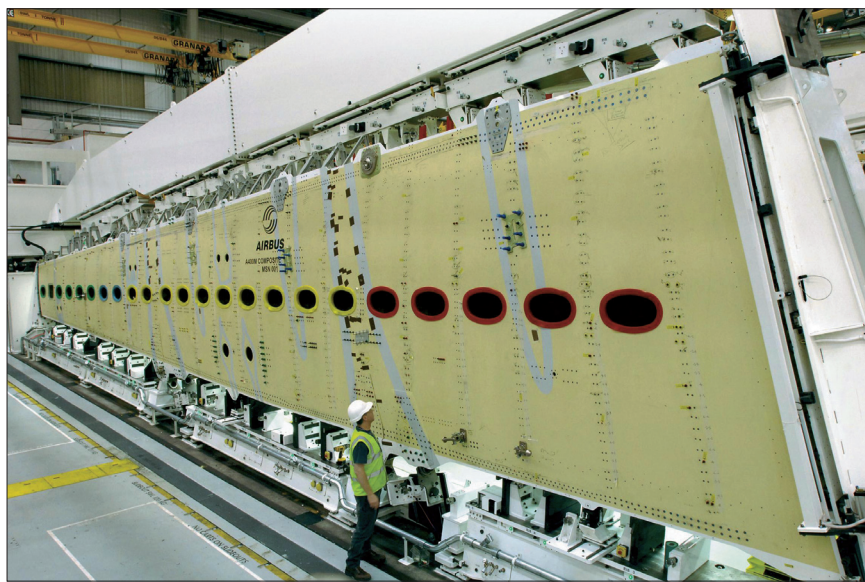


图2 空客A400M复合材料机翼



图3 空客 A350XWB 复合材料机翼

质量和加工精度,长桁在和预成型蒙皮胶接共固化时胶接质量较易保证,长桁定位方便,工装成本低。

## 2 机翼自动铺带成型技术

随着复合材料在飞机上应用比例的逐步增大,复合材料构件的尺寸也随着增加,传统的手工铺叠等方法已经远远不能满足大尺寸结构件研制生产的需要。当复合材料零件的尺寸较大时,人工铺叠难度相应增大、成型效率低、产品质量也难以保证,因此,相应的自动铺带技术(Automated Tape Laying, ATL)和纤维自动铺放技术(Automated Fiber Placement, AFP)等自动化制造技术应运而生。

自动铺带效率可达 20kg/h,而传统手工铺叠,即使是熟练操作工铺叠效率一般也只有 1.5kg/h<sup>[2]</sup>,因此自动铺带技术从诞生后就飞速发展,目前在美国和欧洲已经非常成熟,并大规模应用于航空复合材料结构件的制造。从 20 世纪 80 年代至今,美国采用自动铺带技术生产 B1、B2 轰炸机的机翼蒙皮, F-22 战斗机机翼蒙皮,波音 777 飞机机翼、水平和垂直安定面蒙皮, C-17 运输机的水平安定面蒙皮,波音 787 机翼蒙皮等。欧洲采用自动铺带技术生产 A330 和 A340 水平安定面蒙皮, A340 尾翼蒙皮, A380 的机翼蒙皮和安定面蒙皮,

A350 机翼蒙皮(见图 4)和中央翼盒, A400M 机翼蒙皮和机翼大梁等。

目前较为先进的铺带机是法国 Forest-Line 公司的“大力神”双头自动铺带机。该机特点是有两个机头进行铺带,一个用绕在线轴上的无纬带铺带,另一个用预

环氧树脂, IM7/977-2 的 CAI 值 260~298MPa)。

由于热隔膜成型技术对材料体系有特殊的要求,进而限制了新型材料体系在翼梁结构上的应用,因此 A350 翼梁舍弃热隔膜成型技术,而采用自动铺丝技术。

A350 复合材料翼梁在筒形工装上用自动铺丝机进行铺叠,固化后切为两件 C 形梁,提高了铺叠效率和精度,相对于热隔膜成型降低了翼梁 R 角区的缺陷率。材料选用三代增韧的 M21E/IMA 预浸料, M21E/IMA 是



图4 空客A350XWB复合材料机翼蒙皮铺带

先切割的材料,可快速进行复杂形状的铺叠。

## 3 翼梁成型

翼梁由于结构尺寸大、变截面多和铺层复杂,采用传统手工铺叠成型效率低下。鉴于此,国外开发出了成型效率较高的热隔膜成型技术(Hot Drape Forming, HDF)。

A400M 前后梁均长 19m,其中前梁由分别长 7m 和 12m 的内外段前梁连接而成,后梁由分别长 14m 和 5m 的内外段后梁连接而成。用自动铺叠设备将翼梁铺成平板,大在地提高了铺叠效率,用热隔膜成型设备预成型出“C”梁,再将其放置在殷瓦钢模具中固化。材料选用 Cytec 公司较为适合热隔膜成型技术<sup>[2]</sup>的 977-2 环氧树脂(二代改性

T800/M21 的改性, CAI 值接近 T800S/3900-2 (T800S/3900-2 的冲击后压缩强度 CAI 达到 315~345MPa)。

## 4 热压罐智能控制技术

热压罐成型是目前大型复合材料构件主要成型手段,针对大尺寸构件固化过程中温度场不均匀、温差大等现象,国外开发出超大尺寸的热压罐系统和先进的热压罐空气循环系统,图 5 所示为三菱重工新型热压罐。

该系统将热压罐分为 3 个区,每个区有 3 个独立运行的气流控制单元,所有气流控制单元由计算机系统控制,可根据不同区域的温度进行独立调整,能有效降低大尺寸复合材料构件成型过程中的温差,降低单位重量复合材料构件的能耗,且有利



图5 三菱重工新型热压罐

于保证复合材料构件的成型质量。

Ashida Mfg. Co. Ltd 和 Hiroshima Ryoju Engineering Co. Ltd 设计研发出全球最大的先进空气循环系统热压罐,该热压罐有效内径 8m,长 40m,重 700t,可满足 30m 长复合材料机翼的成型。三菱重工用这套热压罐系统为波音 787 生产复合材料机翼。

### 5 新型雷击防护技术

复合材料正逐渐取代铝合金成为飞机的主要结构,但它的导电性很差,因此不进行保护的话,在雷击时比一般金属结构损伤要严重得多。此外,复合材料导致大量的电流进入机载系统,不能为机内电气系统提供足够的雷电防护。

目前使用较为普遍的是表面火焰喷涂铝和复合材料固化时表面覆盖铜网或者铝网。典型的即为波音 787,它机翼表面主要采用“全屏蔽”方案,即在复合材料机翼表面铺放铜网,但又使得使飞机增重,仅电防护装置就增重达 1t。

鉴于此,空客 A350XWB 采用多功能电网结构,抛弃了传统的铜网屏蔽方案而代之以铜带方案,用金属条带代替一般回流用的电缆,另外在靠近机载设备、座椅滑轨、复合材料框架等处安装金属型材及条带,这样做的效果是减轻屏蔽装置的重量,提高效率。空客公司已用 6063 铝合金条带做了模拟试验,取得良好效果,可保证设备电流的回流、导体的所有部位处于同一电位、雷击感生电流的引出等,保持电的连续性,实现与金

属机身等同的电网。

## 复合材料机翼加工、无损检测

### 1 复合材料高压水切割

复合材料制件成型后,需进行机械加工,复合材料属脆性各向异性材料,常规加工方法不能满足大型复杂结构复合材料加工质量要求。传统切割方式在加工纤维材料时具有切割速度慢、效率低、切割精度难以保证、易发生分层破坏等缺点;在切割高韧性材料时,刀具和钻头磨损失快、损耗大。因此要求复合材料生产需配备大型自动化高压水切割机、超声切割设备和数控自动化钻孔系统等专用设备,以满足复合材料制件经加工后无分层磨损且符合装配尺寸精度的要求。

机翼蒙皮一般采用大型高压水切割机进行切割,目前世界上最大切割机的床身为 36m × 6.5m,由 Flow International 公司制造。这种磨粒喷水切割机可以快速切割厚的层合板而不致产生层合板过热,25mm 厚的层合板可以 0.67m/min 速度切割,对 6mm 薄的层合板,切割速度可以高达 3m/min,厚的蒙皮可以 0.39m/min 速度切割<sup>[3]</sup>。

### 2 大尺寸复合材料构件精确加工

大尺寸复合材料构件的精确加工也是复合材料加工的难点,因为工件和机床床身之间的热膨胀系数不同,机床床身是钢制的,热膨胀系数高( $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),而碳纤维复合材料的热膨胀系数接近于 0。

保证梁的长度不变的传统方法是将机床放在空调室内运转。但其设备投资大、效率低,对此 GKN 与某大学合作开发了一个软件,该软件可对机床床身温度、工件的环境进行传感,然后对软件发给切削头的指令进行修正,这样可以消除两者的温差带来的影响,使机床实现工件所需的精

度。由于这种方案可使切削加工不必在专门的空调环境中进行,不仅减少了部分固定资产的投资,也降低了能耗,该技术在 A400M 翼梁的加工上成功应用。

### 3 复合材料无损检测(NDT)

由于复合材料机翼构件尺寸大,结构外形复杂,采用普通超声扫描设备很难满足其无损检测需要,因此需要配置大型超声 C 扫描设备,从而提高检测效率和检测精度。

英国超声波科学有限公司(USL)为英国宇航系统公司提供的 17 轴全自动超声 C 扫描检测系统能够在 0.5m/s 的扫描速度下,检测出复合材料约 4mm × 4mm 的制造缺陷,并且拥有最高可达 2 $\mu\text{m}$  的分辨率,最高可重复性亦可达 5 $\mu\text{m}$ ,能够准确标注缺陷位置,提高了定量检测缺陷的能力以及定量分析的精度。

## 结束语

国外通过几十年复合材料的研制应用,复合材料在各种机型上的应用比例逐步提高,形成了相对成熟的设计理念和方法,相应地开发出各种先进的成型工艺、设备、检测方法和高效的装配工艺等,这都为国内研发复合材料机翼提供了大量可借鉴的经验。

一流的企业做标准,二流的企业做品牌,三流的企业做技术,四流的企业做产品。在注重复合材料设计、成型和设备等开发的同时,积极制定民机复合材料研制的相关标准和规范更是重中之重,只有有组织地统一制订标准和规范,才能将复合材料的设计和成型文件化、规范化,形成统一的指南,为国内复合材料研制奠定坚实的基础。

本文共有参考文献 3 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)