

# 复合材料在A400M军用运输机上的应用

## Application of Composites in Military Airlifter A400M

上海飞机制造有限公司 陈吉平 苏佳智 郑义珠 段跃新



陈吉平

工程师, 主要工作方向为复合材料成型工艺研究。

A400M 是一种新型战略战术运输机, 其开发旨在替换目前在世界空军, 尤其是欧洲空军的 C-130 和 C-160 运输机。A400M 是 21 世纪的新型运输机型, 其有效载荷和装载容量超过替代机型的两倍, 将有效地提升欧洲空军的空中运输能力<sup>[1-2]</sup>。

复合材料由于显著的质轻高强

等特点, 已成为航空器设计与制造先进性的一个重要标志。A400M 的复合材料用量达到全机重量的 30%, 这个数值远远超过了现役其他军用飞机。

等特点, 已成为航空器设计与制造先进性的一个重要标志。A400M 的复合材料用量达到全机重量的 30%, 这个数值远远超过了现役其他军用飞机。其采用的复合材料工艺技术如下<sup>[3-5]</sup>:

(1) 自动化工艺: 例如, 平尾、垂尾、机翼等大部件的制造采用自动铺带技术 (Automatic Tape Laying, ATL);

(2) 非热压罐 (Out of Autoclave, OOA) 成型工艺: 主要为树脂渗透 (Resin Infusion, RI) 技术的应用。例如, 大制件机身后部装卸坡道、飞机主要配件和引擎的勺型进气道。

A400M 项目首次实现了一些复合材料应用的突破: 如全碳纤维复合材料机翼、热塑性复合材料驾驶舱地板、全复合材料平尾、垂尾及货舱门等<sup>[6]</sup> (图 1)。

### A400M 的复合材料结构设计

从工艺方面来看, 树脂渗透工艺使用较多, 例如: 货舱门采用真空辅助注射工艺 (Vacuum-Assisted Process, VAP), 垂尾的铰链配件、方向舵的连接接头和平尾前缘部分采用 RTM 工艺 (表 1)。

### A400M 平尾前缘设计

平尾前缘展长约 9m, 锥度比为 1/3, 外形呈尖锐状, 由于外形曲率较大, 考虑到成型外形的精度要求较高, 因此该部分采用了闭模成型的 RTM 工艺。

平尾前缘由 6 个独立的可移动区段组成, 每个区段为碳纤维复合材料整体结构, 前突部分采用结构加厚, 每个区段中所有部分 (蒙皮、肋) 采用整体一次成型。另外, 前突部分



图1 A400M的复合材料结构分布

表1 A400M上的主要复合材料结构

结构形式	成型材料及工艺
外翼蒙皮	中模碳纤维单向带, ATL, 共胶接 T 型长桁
外翼梁	中模碳纤维单向带, ATL
中央翼蒙皮	高强 / 中模单向带, T 型筋条共固化
中央翼梁	高强 / 中模单向带梁
襟翼	蒙皮、筋条、梁、肋、前端保护罩和叶片: 高强单向带, 共固化
襟翼整流罩	固定及可移动整流罩: 高强材料, 铺丝工艺 (FP, Fiber Placement), 夹芯结构; 后锥体: 纤维织物, RTM (Resin Transfer Molding, 树脂转移模塑) 成型; 前突: 高强纤维织物, 夹芯结构
扰流板	高强单向带, 全厚度夹芯结构, 共胶接
副翼蒙皮和梁	高强纤维织物, 夹芯结构, 共胶接 / 共固化
平尾蒙皮和梁	中模单向带, ATL, T 型筋条共胶接
平尾前缘和梢部	织物, 蒙皮与肋整体 RTM 成型
升降舵	高强织物, 夹芯面板; 中模单向带, 梁与 T 型筋条共胶接
垂尾蒙皮、梁和肋	中模单向带, ATL, T 型筋条共胶接
垂尾前缘和梢部	碳纤维 / 玻璃纤维高强织物, 夹芯结构, 分区段
方向舵蒙皮	中模单向带, U 型前端共固化
方向舵肋	PPS 热塑性树脂复合材料
货舱门	蒙皮、框架、顶板和中央横梁: 无褶织物 (NCF, Non-Crimp Fabric), 树脂注射工艺
翼身整流罩	高强织物, 夹芯结构
翼梢浮筒	高强织物、碳纤维 / 玻璃纤维, 与夹芯面板整体成型
引擎罩	高强织物, 整体夹芯结构, RTM 成型

采用额外 4 层玻璃纤维铺层进行区域加强,用以改善机械性能,承受鸟撞载荷。前缘的 6 个区段和 7 个固定的金属肋进行连接,通过可卸的钛合金沉头螺栓和扭摆盒段上下面板进行连接。

## A400M 货舱门设计

A400M 货舱门是迄今为止使

用 VAP 工艺制造的最大复合材料飞机结构部件。其外形为轻微外拱,并且逐渐变尖的长方形,长 7m,宽 4m。舱门外蒙皮为碳纤维 / 环氧树脂层合板结构,蒙皮的内表面采用 16 根长桁进行加强,长桁腹板高度为 65mm,下缘条宽为 50mm,长桁的长度方向与机身段的长轴方向平行。在蒙皮的周边为大约 203mm 高的独

立边缘壁。在长桁上垂直分布 9 根加强横梁,横梁通过金属接头与蒙皮相连。在舱门内侧表面的中部覆盖有一窄蒙皮,用作增加部分内侧结构的刚度。这一窄蒙皮同样采用长桁增强。在舱门的外蒙皮上采用金属铰链与机身段相连和固定,舱门边缘壁上固定有一大型金属钩,用作在飞行时固定舱门(图 2)。



图2 A400M货舱门

A400M 货舱门的 VAP 工艺设计中最关键的一点为如何实现加强长桁与内外侧蒙皮的整体成型。舱门结构的整体成型节省了大量的部件生产时间和紧固接头。据相关设计人员介绍,整体成型使得货舱门在长桁与外蒙皮的连接方面减少了大约 3000 个金属铆钉的使用,在节省大量成本的同时,实现了部件的减重。

## A400M 平尾制造

在复合材料平尾制造方面,空客公司在之前的民机型号中已获得了较多的经验,在空客 A320、A340 和 A380 等型号中,平尾均为复合材料结构。在 A400M 上,平尾部位主要结构中的梁、肋、蒙皮与长桁在制造过程中采用了较多的自动化技术。

梁、肋与长桁的成型过程中,首先采用 ATL 工艺铺成结构的展开平板形式,并采用数控设备进行裁切,接下来将平板转移至最终的成型模具中,采用热隔膜技术进行处理,使平板预成型为最终形状,最后在模具上按照标准程序进行真空袋封装,热压罐成型。这一系列技术的生产效率很高,尤其对于层合平板结构,生产效率可达 10kg/h。

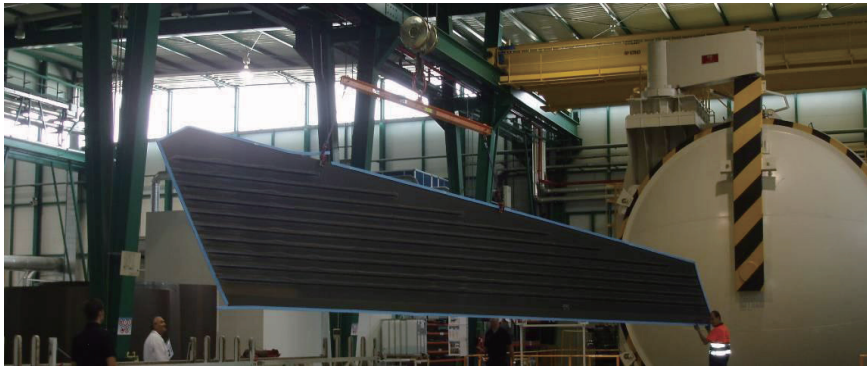


图3 A400M平尾蒙皮

由于平尾蒙皮大尺寸、小曲率的结构特点,蒙皮的铺贴采用了ATL技术,阴模成型。在设备铺贴产生的材料缝隙中,需要采用相同的预浸料窄条在一定压力下进行填补。

在加筋壁板的成型过程中,筋条首先经过预固化处理,然后和未固化的蒙皮进行组合,一体固化成型(图3)。这种工艺与之前的类似结构(之前采用过组合模具形式)成型相比,节省了单独固化然后进行二次胶接的进罐时间成本。

在产品的超声检测和修切过程中也存在相关的自动化技术。采用

自动化技术成型的产品缺陷率很低,从而节省了生产成本。并且,自动化工艺质量控制稳定,即使对自动化过程进行工艺微调,生产质量及稳定性也不会因此下降。

RTM工艺具有成型整体程度高,适合成型复杂结构的特点。在A400M之前的一些小型复杂部件成功已采用该工艺成型,并实现了控制稳定化和量产。A400M的平尾前缘由于其外形尺寸较大的缘故,采用RTM工艺成型面临挑战。目前,A400M的平尾前缘也已实现RTM工艺成型,相关的生产系统也已投入使用。A400M平尾前缘的成功研制使得空客公司关于大尺寸复杂结构的RTM成型经验(包括工艺和模具等)与能力得到了重要的积累与提高。另外,垂尾的一些配件、勺型进气道、整流罩(平尾梢部、后锥体)等(图4)也采用RTM工艺成型,轻质模具和复合材料低成本制造工艺技术得到了发展。

### A400M 货舱门制造

舱门外蒙皮的铺贴在复合材料阴模上进行,模具成型材料为碳纤维/环氧树脂。外蒙皮的成型材料为SAERTEX公司的包含 $0/90^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$ 方向的多轴向NCF和Hexcel公司的单轴向NCF。蒙皮为层合板结构,在层合板的最内侧,长桁与横梁进行相连的区域有额外的铺层。

整体成型的加强长桁截面为

“L-Z”型,截面形状类似于“Z”型,竖直腹板;或者说截面为两个反面相对的“L”叠加而成。长桁上缘条的铺层数为腹板的一半,水平下缘条由腹板铺层延伸弯折形成,和腹板铺层一致,长桁的成型材料和外蒙皮一致。在预成型过程中,长桁铺层被放置在廉价的木质模具上,为了使长桁在预成型时保持形状,所采用的纤维材料表面含有一层热塑性的聚酰胺薄膜,这种薄膜在受热时会融化并发粘,从而对纤维织物产生粘合和固定的作用。操作时,可在铺贴过程中使用小型热风枪对铺层表面的薄膜进行加热融化。上缘条铺层由单轴向NCF构成,腹板的连续铺层为多轴向NCF( $0/90^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$ )。在下缘条与蒙皮接触的R角由截面为三角形的碳纤维束(辫状束)进行填充。

长桁在完成预定型之后,被放置在完成铺贴的蒙皮上,在长桁的腹板两侧,放置有碳纤维/环氧树脂复合材料芯模,用以支撑和保证长桁在树脂注射过程中维持外形,并在固化过程中提供压实所需的压力。然后,在每个长桁和芯模表面采用GORE-TEX单向透气材料(该材料透气不透树脂)进行包裹,该种材料在树脂开始注射后,可以保证在过程中气体排出的同时,保留并引导树脂均匀地渗透到每根长桁的位置,因此,该种材料适用于不同部件整体固化成型,并能使最终成型部件的纤维体积含量达到最大,空隙率达到最低。

完成单向透气材料的包裹之后,按照常规的VAP工艺辅助材料铺层完成透气材料的铺放及真空袋的封装。采用的树脂为Hexcel公司的RTM-6单组份环氧树脂。这种树脂具有很好的注射流动性,并在 $180^\circ\text{C}$ 下具有很好的湿热性能,工艺窗口超过2h,适合用于注射成型大型部件。外蒙皮/长桁整体部件在完成树脂注射后,于 $180^\circ\text{C}$ 下固化成型,无需后固化处理。



(a)垂尾配件



(b)勺型进气道

图4 A400M的RTM成型件

货舱门的内侧窄蒙皮采用相同方法进行制造,长桁与蒙皮的整体成型采用相同的处理工艺。其余部件同样采用 VAP 工艺成型。出于减重的目的,在舱门边缘壁区域与横梁接头的位置部分采用 Rohacell-PMI 泡沫夹芯结构。

横梁为较厚的层合板结构,在底部边缘有一系列的切口,用于放置长桁。并且,在底部边缘有分散的缘条,用以和外蒙皮进行紧固连接。

货舱门在完成分部件制造后,需要在大型装配型架上进行各个分部件的固定、胶接、钻铆等装配操作。完成装配之后,完整部件将进行动态疲劳测试。

### A400M 的平尾装配技术

A400M 在全机总装之前的主要部装包括平尾装配、襟翼支撑整流罩装配和引擎结构装配。在这 3 项中,平尾装配过程中集中了空客在之前研制项目里的所有相关发展技术<sup>[7-9]</sup>。

平尾两侧外伸盒段及升降舵的内部结构通过复合材料的一次自动钻铆与盒段蒙皮连接。采用的设备为并联钻铆影像系统(Triceps<sup>®</sup>),其配备人工视觉技术、钻孔单元及完整的铆接模块。铆接模块具有钻紧力矩测量、密封处理和铆接安装等功能。一次翼板装配过程中需完成 10000 余次铆钉连接。采用这种自动钻铆技术的产品比传统工艺产生的缺陷率要低数十倍。空客公司已通过全比例翼板模型的装配验证了这种自动钻铆工艺的操作先进性与低缺陷率。

两侧平尾外伸盒段和后机身的对接装配采用了自动准直仪。自动准直仪由一套激光校直系统组成,用以装配过程中飞机部件固定后建立一个虚拟基准点,在校直过程中,激光提供部件的位置闭环反馈,控制两侧外伸盒段的接入,摆动及转角。这

些移动操作由 6 台机械传动装置完成,它们通过特定工装与机身固定,与控制台连接,通过控制软件,存储系统信息,对传动斧手进行操纵。控制台基于机身与盒段对接界面的最佳适配分析自动进行指令排序,对整个对接装配过程进行引导。同时,控制台也支持人工操作,其能根据人工激光跟踪显示,呈现翼板的校直图像信息。

在垂尾翼板和平尾翼板的连接面装配过程中,采用了快速建模系统(Rapid Prototyping System),此系统根据自动准直仪系统得到的最佳装配位置信息,对金属紧固件进行定制机加(图 5)。利用快速建模系统能采集通过照相技术得到的装配面数

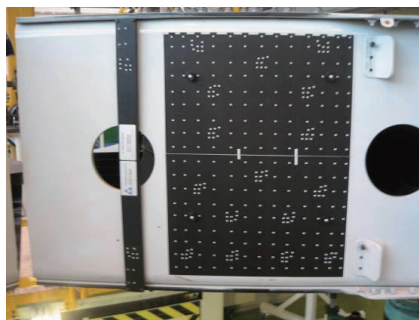


图5 A400M平尾装配面

据信息、装配面数字重建、CAD 模型准备及数控加工方案的生成信息,其中的每一个步骤都是通过软件自动控制进行,每两步骤之间通过综合软件进行数据管理。最后,原始部件按照常规机加步骤在数控加工中心进行机加处理,在装配时无需额外再对部件进行调整或填补。整个工艺过程能达到毫米级以下的装配容差,并且,通过这一系列的自动装配控制技术,如飞机翼板这种重型部件的装配效率能达到轻质部件装配的水平。

### 结束语

复合材料相对于传统的金属材料来说,是一种全新的材料及其成型应用。在原材料生产、制件成型、装配及检测等方面都需要新的探索,尤

其对于航空领域,复合材料的应用对这些方面的发展提出了更高的要求。空客公司通过 A400M 项目的研制,使得航空复合材料技术进一步发展,如货舱门的液体成型技术和大型平尾的整体装配自动化技术。

现阶段,我国的航空复合材料应用尚处于初步阶段,在原材料、新工艺及装配自动化技术等方面的研究较为空白。国产大型客机 C919 上将会应用到 15%~25% 的复合材料,这是一个挑战,同时也能带动我国航空复合材料技术整体向前发展。

### 参考文献

- [1] 陈亚莉. 复合材料在飞机上的新应用. 航空科学技术, 2005, 3: 31-32.
- [2] 张子东. A400M 战术运输机简介及设计特点分析. 航空科学技术, 2006(2): 16-19.
- [3] Jose M L D. Composites :30 years of continued R&D as the driving force behind aero structures process. SEICO12 SAMPE Europe 33rd International Conference and Forum, Paris, 2012.
- [4] Miguel A C G, Carlos D H, Jose M De F, et al. Requirements, design concepts and certification criteria of the A400M composite structural elements. SEICO12 SAMPE Europe 33rd International Conference and Forum, Paris, 2012.
- [5] 陈亚莉. 复合材料成型工艺在 A400M 军用运输机上的应用. 航空制造技术, 2008(10): 32-35.
- [6] Black S. A400M cargo door. Out of the autoclave. High-Performance Composites, 2007, 5: 60-63.
- [7] Garcia L R, Sanchez I M B, Carvajal R. Industrialization and pre FAL activities for A400M. SEICO12 SAMPE Europe 33rd International Conference and Forum, Paris, 2012.
- [8] Rico R C, Fernandez P L, Vazquez R C. The A400M final assembly line industrialization using the latest state of the art technologies. SEICO12 SAMPE Europe 33rd International Conference and Forum, Paris, 2012.
- [9] Tripero A M G, Serrano P A G. Use of new test control equipment techniques for full scale test : A400M. SEICO12 SAMPE Europe 33rd International Conference and Forum, Paris, 2012.

(责编 良辰)