

# 复合材料成型工艺在A400M 军用运输机上的应用

Application of Composite Forming Technique in Military Freighter A400M

中国航空工业发展研究中心 陈亚莉



陈亚莉

中国航空工业发展研究中心研究员。长期从事航空材料情报研究工作。曾先后荣获先进国防科技情报工作者、“九五”、“十五”军用航空预研三等功等奖励。

A400M 是由空客公司的军机公司于 2003 年推出的军用运输机，

A400M 的结构材料与传统的军用运输机有明显的不同，特别在碳纤维复合材料的应用上，A400M 是空客首次在机翼、尾翼、操纵面上大量应用碳纤维复合材料的军用运输机。A400M 的特点之一是复合材料制造技术上的创新，其中包括机翼梁的热隔膜成型、舱门及后压力隔框的真空辅助成型 (VAP) 以及 FiberSim 软件在复合材料模拟上的应用。

2009 年将首次交付产品，首批生产 6 架。它是一种多用途、低成本的军用运输机，可用来代替 C-130，性能接近 C-17 运输机。

A400M 的主要特点之一是复合材料制造技术上的创新，其中包括机翼梁的热隔膜成型 (Hot Drape Forming)、舱门及后压力隔框的真空辅助成型 (VAP) 以及 FiberSim 软件在复合材料模拟上的应用等技术。

## 全复合材料机翼翼梁的热隔膜成型

历史上，在大飞机上采用复合材料翼梁的只有 2 种机型，即著名的 B2 隐身飞机和 A400M。

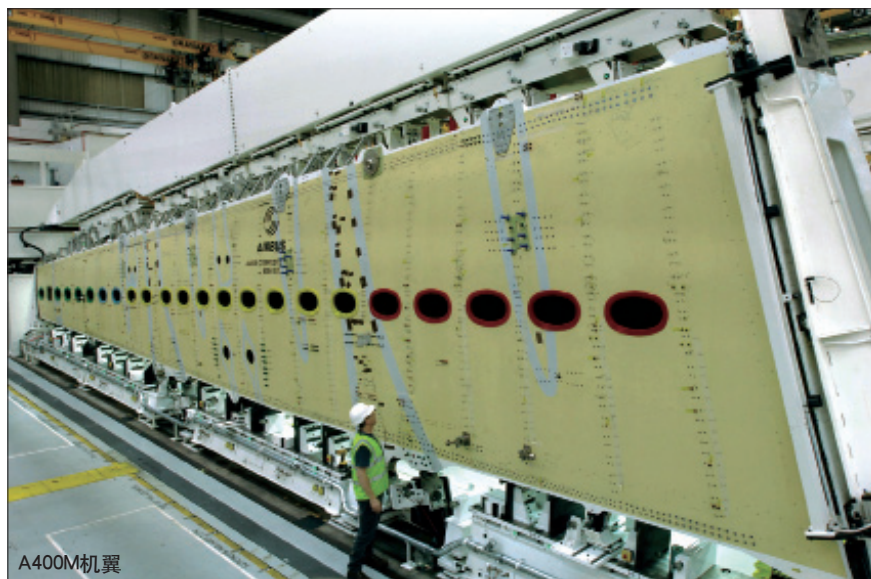
A400M 的结构材料与传统的军用运输机有明显的不同，特别在碳纤维复合材料的应用上，结构重量比增加到 35% ~ 40%，而 C-17 只有 8%。A400M 是空客首次在机翼、尾翼、操

纵面上大量应用碳纤维复合材料的军用运输机,碳纤维机翼的重量是等强度铝翼的75%或80%,而且碳纤维结构有利于维护,抗疲劳性能好。

A400M的机翼从端到端均为碳纤维复合材料,是首次将碳纤维用于主机翼制造的机型,虽然总面积还不及A380的水平安定面大,但是在“全复合材料机翼”方面开创了一个新记录。梁长19m的机翼和蒙皮均为复合材料整体件,只有翼肋采用铝合金(承受压应力)。另外,除机翼前缘和后缘的支撑结构以及铰链为铝合金外,其余的活动面均为复合材料。中央翼盒以及中央翼盒与外翼盒的连接配件也是碳纤维复合材料。

A400M机翼是空客飞机有史以来制造的第一个最大的碳纤维增强塑料机翼。整个承力结构由碳纤维梁及上下蒙皮组成,结构比较简单,前缘为铝合金,无大的展弦比,无复杂的三维曲率,无起落架安装机构。尽管如此,制造仍有相当难度。

A400M要求在不长于1150m的短跑道上起降,由4台大功率的TP400-D6涡轮螺桨发动机驱动。A400M的每一根翼梁要承受飞机的



A400M机翼

正常飞行载荷以及高度集中的载荷(来自2个襟翼、副翼及扰流板)。机翼前梁要承受发动机的载荷。

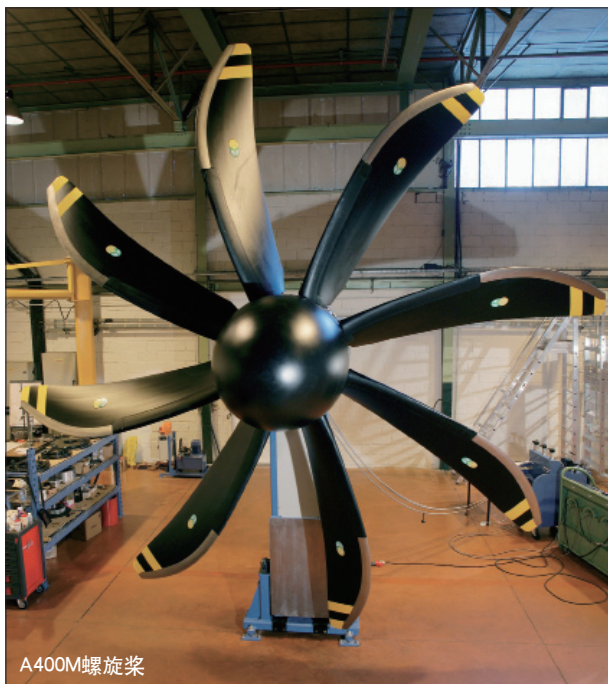
发动机对飞机的推动是通过发动机的螺旋桨在前梁连接点上的扭矩来实现的,通过减速箱产生大于7500kW的功率(10000轴马力)来驱动每台发动机的复合材料桨叶。飞机上4台发动机的螺旋桨共重约1t,起飞时桨叶转速850r/min,产生8700N·m的扭矩,该扭矩通过螺接在前梁上的接头来传递。梁的腹板厚度约为5~6mm(在发动机接头点附近),但在发动机安装架的连接点处,腹板及缘条的厚度加倍到约10mm,在梁与翼盒连接处附近也有类似的厚度变化。这些局部的厚度变化对设计及制造带来挑战。

现今,制造任何一种飞机都要实现可接受的成本。A400M翼梁的设计和制造采用自动化工艺,以满足承受如此重载的大而复杂

的复合材料构件的质量要求。

承担A400M机翼制造任务的是十大知名一级供应商之一的英国GKN航空航天公司,它的前身是著名的道氏联合技术公司,积累了丰富的复合材料结构制造经验。该公司认为,如果A400M的机翼用手工铺层,效率太低,铺层率一般只有0.75kg/h,因此在批生产中将应用自动化铺带机进行铺层并在随后用热隔膜成型机成型出C字形截面梁,其自动铺层率应达25kg/h。为此,GKN投资购买了一台由西班牙M.Torres公司制造的20m床身的大型自动铺带机。该铺带机能用Cytec工程材料公司(英国)提供的977-2碳纤维增韧环氧预浸带铺出复杂预形件。

为成型出C截面,预形件被送到由英国Aeroform公司提供的热隔膜成型机上成型。为便于抽真空,预形件应夹在2个由俄亥俄州的杜邦电子技术公司提供的卡普顿(Kapton)聚酰亚胺薄膜制成的隔膜之间。隔膜之间的空间抽真空,然后从零件上面进行红外加热,直到1h内将温度升到60℃,这样可以保证即使在梁根端的最厚截面中心也可均匀加热到同一温度。然后缓缓对2隔膜间层合板加压,并使其与轻



A400M螺旋桨

质模具贴合而形成梁的内表面。在30min内C字形截面成型缓慢完成之后,去掉卡普顿薄膜。

这一工艺过程设计的难点在于:在发动机接头处额外增加的材料以及在缘条中的纵向纤维的路径长度



A400M虚拟模型

大于纤维在梁的其余部分,在多数情况下,这会起皱,从而在梁的关键处产生不可接受的性能恶化。为了解决这一难点问题,在成型过程中采用轻缓的成型力,这可以使层合板产生层内滑移,路径长度较短的纤维材料便会从梁端挤压出来,从而避免皱褶的产生。

热隔膜成形后,铺层件转移到第2个由殷钢制成的阳膜上。当梁就位后,在梁的几个关键处用手工铺上一层编织的工艺用牺牲层,放在热压罐中进行传统的固化。热压罐直径为3.5m或4m,长20m。模具材料可用碳纤维复合材料或金属,关键是两者要有相同的热膨胀系数。

每个机翼的翼梁制成2段,前翼梁分成12m和7m两段,后梁分为14m和5m两段。每一翼梁两段之间的连接板也是复合材料制成的C形夹,C形夹置于接头的内面和外面并用紧固件加以紧固。由于梁和连接板之间的配合必须精确到0.25mm,为此对梁上原来置放工艺牺牲层的部位可以局部进行切削,以实现精密配合。这样的接头一般采用金属连接板,但GKN公司认为

用复合材料做连接板不仅可以减重,而且有可能降低热应力及减缓腐蚀。

对14m长的梁进行切削加工也是一个难点,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( $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),

而碳纤维复合材料梁的热膨胀系数接近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。GKN与一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投资,也降低了能耗。

由于采用了自动化的铺层工艺,14m长的梁段的生产只用24h,而不是手工铺层所需的6~8天。最短的一段梁如果用手工铺层需180h,而用机器只需90min。

A400M前6架的翼梁用手工铺层,首批梁已于2006年5月底运往空客的费尔顿厂,余下171套翼梁则用自动铺带机生产。

在航空工业界,许多人都奇怪为什么空客和GKN公司决定用传统的预浸带来制造A400M的机翼梁。因为GKN公司以创新著称,它参与了欧盟的复合材料开发计划(ALCAS),在该计划中GKN用非卷曲织物以树脂膜熔渗法(RFI)来制造翼梁,并与空客合作将该法用于A380机翼后缘的制造,其制造成本可降低10%,工装材料、固定资产投资和风险都可降低。据GKN官员说,由于用户要求短期内完成,为减少风

险采用了传统的预浸带复合材料制造工艺。不过他不排除在将来的翼梁上采用RFI及纺织技术。

A400M的机翼梁制好后送往空客(英国)的费尔顿工厂新成立的A400M机翼装配中心进行装配。该中心于2006年10月开始运转,在8000m<sup>2</sup>的装配中心内安装有2套装配型架,第一套装配型架可满足日产3套机翼的需要。装配中心投资1亿欧元,装备了自动化机器,其中包括高精度机翼钻孔设备。A400M的翼盒由预先生产装配的复合材料后缘、金属肋以及20m长带有纵向加强筋的整体梁组成。机翼装上液压、气动、燃油及电气系统以及飞行控制面后,经全面试车,然后运到西班牙总装厂进行总装。

除了A400M的翼梁外,GKN公司的先进自动化复合材料技术还有不少其他用途,其中包括生产控制面(机翼偏转器、蒙皮、后缘等)、短舱(进气道、整流罩)以及风扇叶片之类的发动机零部件。为此,公司准备安装第2台MTorres自动铺带机,该机为十一轴龙门式机器人自动铺带机,可以进行立式及卧式铺带。

A400M军用运输机的首副机翼已在2006年夏完成零部件总装,左翼盒尺寸为23m×4m,重约3t。下一步将装上液压、气动、燃油和电气系统进行综合测量,装上传感器并进入地面及飞行试验阶段,然后将机翼运往西班牙的A400M飞机总装线。

### 货舱门及后压力隔框的真空辅助成型技术

A400M的货舱门在机身后部,7m×4m的全复合材料的上部货舱门可向上及向内旋转,备有金属装货板的下货舱门可同时向外及向下转动以便装卸货物。关闭时2扇门可形成光滑的后机身下腹部。

A400M的货舱门用欧洲航空及防务系统(EADS)公司的专利真空

辅助成型法(VAP)制造,以使成本达到最低。VAP用真空方法使环氧树脂渗入干态的碳纤维增强体,然后放入加热炉(而不是热压罐)中固化。

舱门由几个部分组成,最大的外蒙皮是一个稍呈圆顶形及有斜度的矩形件,它由实心的没有芯子的碳/环氧层合板组成,蒙皮的内表面用16根平行于机身长轴的桁条加强。一个单独的203mm高的门缘壁构成门框。9根横梁垂直于桁条并用金属紧固件连接在外蒙皮上。较窄的内蒙皮覆盖门内表面的中央部分,起局部增强刚性的作用。内蒙皮也用几根小桁条加强。栓接在外蒙皮

供良好的180℃湿热性能,熔渗处理需要2个多小时,足够熔渗到整个零件。

进行VAP时,在外面GORE-TEX真空袋上抽真空,可让空气从每一桁条的真空袋撤出。当引入树脂时,只用真空压力将其引入每一桁条及蒙皮,GORE-TEX可保证树脂停留在每一桁条袋上以完成全部熔渗。这种特殊的薄膜使共固化得以进行。GORE-TEX可让空气而不是树脂通过,从而保证空气全部撤出。

然后将外蒙皮、桁条放在固化炉内,在180℃温度下保持几小时进行固化,不需进行后固化。舱门的窄蒙

承受极端载荷,强度应尽可能高。为保证严格的结构要求,以及改善设计效率,土耳其航空航天公司将在FiberSIM先进复合材料环境中应用以区为主的设计方法,确定层合板的要求,界定区与区之间的过渡以及自动确定所需的铺层几何形状。详细的横断面及设计站将用来验证复合材料的设计是否满足结构要求,FiberSIM的模拟将用来验证复合材料在复杂曲率上铺叠引起的偏离是否在严格的极限内,从而保证零件的强度均一性。工程人员也将应用软件的工具输出平面模型以便进行铺层自动化切割,输出激光投影数据用以指导铺层。

机侧突座的整流罩位于机身一侧,罩内有6轮式主起落架,机轮装有专门设计的低压轮胎,可在短距及粗糙跑道上起落。罩为混合结构,在金属框架上覆盖有复合材料(混杂玻璃/C-C)壁板,以限制结构重量并能承受来自跑道的碎片冲击。为了保证安全,中央段用金属壁板重新设计,每一机侧突座重900kg。

4个前起落架舱门用复合材料(夹层碳纤维)制造,门内有铰链系统,可以在不降低性能的前提下减重,每一舱门重90kg。

A400M的起落架则由Messier-Bugatti公司制造,刹车盘用SepcarbIII碳/碳复合材料制成,该材料具有良好的耐久性及抗氧化性,2次维修间的起落次数预期近1000次,寿命大致达3.7年。A400M有2个前起落架机轮和12个刹车盘。由于机轮数量多,并采用低压轮胎,飞机可在被损坏或未准备好的跑道上起降。此外,A400M有时将不得不在约550m的非常短的距离内降落,这意味着过载将达到0.50g,远高于普通民用飞机的0.30g。A400M尺寸为43.18cm的碳刹车盘包含6个致动器及3个转子。

(责编 依然)



A400M起落架

上的金属铰链将门连接在机身上。舱门的设计及VAP的关键要素是加强桁条整体性,并与内外蒙皮共固化,从而取消了大约3000个紧固件。

由SAEREX公司提供按0°/90°/±45°取向铺设的多轴碳纤维增强体,由Hexcel公司提供干态单轴向织物,两者组成层合板。最内部的铺层还有与桁条和横梁连接的台阶。

当所有桁条置放到位并放上真空袋时,技术人员将标准的透气材料以及真空袋膜放在整个舱门上并准备进行树脂熔渗。所用的树脂是由Hexcel公司制造的RTM6单组份环氧,这种熔渗树脂易于处理,可提

皮如法炮制。A400M及A380的后机身压力隔框也是用EADS公司的VAP技术制造的。

### 其他零部件的复合材料制造技术

热塑性复合材料在A400M上也开展了广泛的验证工作,如碳/PPS制造的副翼翼肋和单向碳纤维/PEEK制造的油箱口盖等。

在A400M的复合材料制造中,也广泛采用了软件,如在CATIA V5 CAD模拟环境中利用FiberSIM为A400M设计副翼及扰流片,这些零件由上百个复合材料层合板制成。由于副翼及扰流片在飞行时要