

# 大尺寸复合材料翼梁的制造技术发展

## Development of Manufacturing Technology in Large Composites Wing Spar

中航复合材料有限责任公司 杨博 王菲 陈永清



杨博  
高级工程师,主要研究方向为树脂基复合材料的成型技术。

复合材料以其高比强度/比刚度、抗疲劳、可设计性好和易于整体成型等一系列优点,在航空航天领域得到广泛应用,其用量高低成为衡量飞行器先进性的重要指标。近几年,复合材料在大飞机上的应用从尾翼等次承力结构迅速扩展到机翼、机身等主承力结构,其用量从25%左右激增到52%左右。在大飞机领域,

随着复合材料在大飞机机翼上应用,复合材料在翼梁上也得到相应的应用。为了保证翼梁的成型质量、制造成本和生产效率,翼梁的成型模具建议采用采用殷钢材料,阳模结构形式,在热压罐中固化成型。翼梁的制造方式从手工制造发展为自动化制造,自动化制造从热隔膜成型发展到纤维束铺放成型。

空客军用运输机A400M复合材料用量为38%左右,首次在机翼上使用复合材料;波音787客机的复合材料用量为50%,首次在民机机身和机翼上使用复合材料;空客A350客机的复合材料用量为52%。

随着复合材料在机翼壁板上的应用,复合材料在翼梁上的也得到应用。复合材料在翼梁上的应用不仅是出于翼梁的减重需要,更是为了保证翼梁的热膨胀系数和复合材料机翼壁板的热膨胀系数相匹配,这也是复合材料翼梁没有先于复合材料机翼壁板在大飞机上得到应用的原因。

复合材料翼与机翼的上、下壁板构成机翼盒段,除了承受飞机的正常飞行载荷以外,还要承受来自发动机、襟翼、副翼及扰流板等高度集中的载荷,翼梁的结构作用决定了翼梁具有受力大、厚度大、精度高的特点,常用翼梁的截面呈U形。

### A400M 翼梁

欧洲A400M大型军用运输机是空客军用公司研制的远程战略战术运输机,于2009年12月首飞。在A400M之前,在大飞机上采用复合材料翼梁的飞机只有B2轰炸机。



图1 A400M翼梁

A400M 的结构材料与传统的军用运输机和客机有明显的不同,首次在机翼上使用碳纤维复合材料,其复合材料用量达到 38%, A400M 的翼梁同其机翼一样,也采用碳纤维复合材料。

常重视制造成本和生产效率, GKN 公司采用了创新的热隔膜成型法,显著提高了生产效率和成型质量,其基本流程是:用自动铺带机(图 2)将 Cytec 公司提供的 977-2 碳纤维增韧环氧预浸带铺出预成形件,用热隔膜成型机将预成形件热弯成型出 C 形截面,然后转移到用殷钢制成的阳模成形模上,进入热压罐固化。在预成形件热弯过程中,要解决预成形件的均匀加热问题和预浸料的皱褶问题,保证翼梁的成型质量。



图2 自动铺带机

A400M 翼梁(图 1)包括前翼梁和后翼梁,前翼梁和后翼梁分别由两段组成,前翼梁的长短分别为 12m 和 7m,后翼梁分别为 14m 和 5m,每一翼梁的两段通过复合材料 C 形夹和紧固件连接,由英国 GKN 航空航天公司研制<sup>[1-2]</sup>。翼梁的腹板厚度约为 5 ~ 6mm,在加厚区厚度约为 10mm,这些局部的厚度变化对设计及制造带来挑战。

当今制造任何一种飞机都要非



图3 A350前翼梁

GKN 公司 A400M 翼梁的研制的初期,迫于生产进度的要求,为降低制造风险,在 A400 翼梁的前 6 架的翼梁制造中采用了手工铺贴,余下的采用自动铺带。据其介绍,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,这也验证了自动化制造的高效和低成本。

### 波音 787 翼梁

波音 787 是波音公司研制的宽体双发远程客机,于 2004 年 4 月正式启动,在 2009 年 12 月首飞。波音 787 首次在大中型民用飞机的机翼和机身上使用复合材料,将复合材料的应用从次承力构件扩展到主承力构件,将复合材料在大中型民用飞机上的用量从 A380 的 25% 提升到了 50%,对民机复合材料产业产生了重要影响。波音 787 的翼梁是首次在民用飞机上使用复合材料翼梁的飞机<sup>[3-4]</sup>。

波音 787 的机翼由日本三菱重工制造,其翼梁由日本三菱重工委托日本新明和工业株式会社研制,其长度约为 28m。据 Dave Trop 介绍,波音 787 的翼梁是整体的,由人工在阳模上铺贴,采用热压罐固化而成。

## A350 前翼梁

空客 A350 是空客公司研制的宽体双发远程客机,2005 年 10 月正式启动,于 2013 年 6 月首飞。A350 使用的材料几经修改,最终和波音波音 787 类似,在机翼和机身上使用复合材料。空客 A350 是空客公司首次在民机机翼和机身上使用复合材料的飞机,其用量达到 52%。

A350 的前翼梁(图 3)位于翼盒的前端,与机翼上、下壁板以及后翼梁共同构成翼盒,前翼梁支撑机翼前缘,承受高应力和高载荷,由美国

伴。MTorres 公司专门设计的两台自动铺丝系统以往的设备具有更大柔性和生产率。据报导,这些自动铺丝系统的铺丝速度高达 60m/min,大大高于以前的速度,这对于梁的低成本和高效生产是非常重要的。MTorres 公司已经向 GKN 公司交付一台类似设备,用于研制 A350 后翼梁。这些自动铺丝机是专门针对 A350 翼梁的结构特点开发设计的,比如为了保证翼梁的严格的 U 形几何形状,考虑了在纤维丝束按 45° 角铺带到 90° 弯角时边缘可能出现的问题;考虑

到使用的 Hexcel 的 M21E 增韧环氧预浸料的低粘度性,铺丝头可以提高更高的温度和更大的压力。

## A350 后翼梁

A350 后翼梁位于翼盒后端,与机翼上、下壁板及后翼梁共同构成翼盒,后翼梁支撑襟翼、副翼,及起落架装置,承受高应力和高载荷<sup>[2]</sup>。同 A400M 的翼梁一样, A350 的后翼梁同样由英国 GKN 航空航天公司研制。后翼梁分为 3 段(图 4),每段长约 10m,受力最大的内侧段重达 500kg,复合材料根部的厚度厚达到 25~30mm;中间段上有很多连接点,重约 150kg,外侧段重约 100kg。后翼梁的宽度从内侧段根部的 2m 左右逐渐过渡到外侧段翼尖的 0.2m 左右。

后翼梁(图 5)同前梁一样,也采用自动纤维铺放(图 6),在旋转的芯轴上铺放纤维丝束,铺放完成后,切割成两件,转移到固化模具上,进热

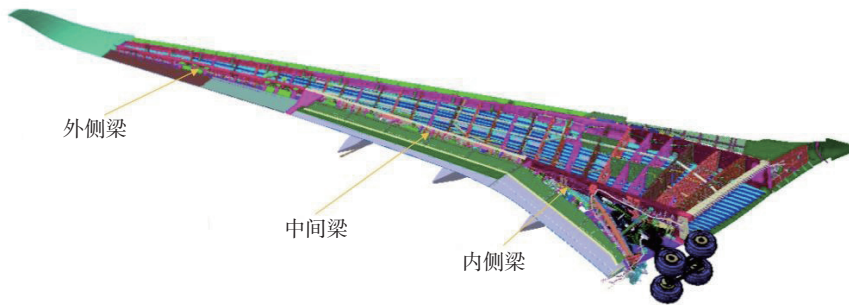


图4 A350后翼梁结构示意图

Spirit 公司研制,是 Spirit 公司研制的最大的梁,也是 Spirit 公司研制的第一个全复合材料梁<sup>[5]</sup>。前翼梁长约 31.2m,由 3 部分组成,从翼根到翼尖分别是:7m 长的内侧梁、12.7m 长中间梁和 11.5m 长的外侧梁;前翼梁的宽度从内侧段根部的 1.8m 左右逐渐过渡到外侧段翼尖的 0.3m 左右;前翼梁由 100 层碳纤维预浸料制成。单侧 3 段前翼梁的重约为 500kg,其中外侧段翼梁重约为 100kg。

前翼梁采用 Hexcel 的 M21E 增韧环氧碳纤维预浸料,具有良好的机械性能和冲击韧性,在 A350 上得到广泛应用,包括垂尾、机身和机翼等。前翼梁采用自动纤维丝束铺放技术,同时在 15m 殷钢芯轴上铺两个梁,然后进热压罐进行固化,固化后进行自动化无损检测、转孔、切割和装配等工作。自动铺丝机由 MTorres 公司提供,MTorres 公司是 Spirit 公司梁研制能力的关键合作伙



图5 A350后翼梁

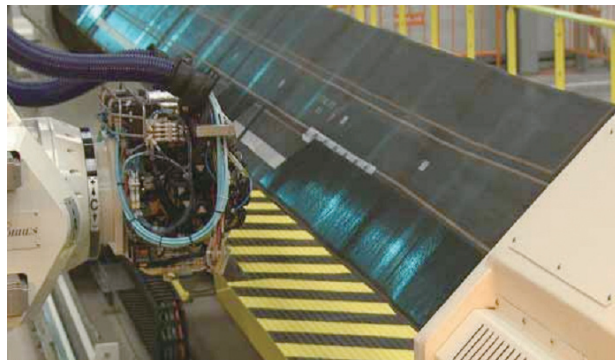


图6 A350后翼梁丝束铺放

压罐进行固化。

A400M 的翼梁和 A350 的后翼梁均由 GKN 提供,从常规的技术继承性和成本控制来说,A400M 和 A350 翼梁的成型方法应该一样,但实际两者使用的成型方法并不相同,先研制的 A400M 翼梁采用了“自动铺带+热隔膜”成型方法,而 A350 后翼梁并没有采用 A400M 翼梁的成型方法,而是采用新的“纤维铺放”成型方法。这主要因为以下几个原因:一是 A350 使用的 Hexcel 的 M21E 增韧环氧碳纤维预浸料的粘度比 A400M 使用的 977-2 增韧环氧碳纤维预浸料更低,自动铺丝机能够提供更高的压力和温度;二是 A350 翼梁比 A400M 翼梁的曲率更大,形面更复杂,尤其是翼梁的内段,自动铺带机会造成纤维弯曲,已无法胜任如此复杂的形面;而自动铺丝机的每束丝的宽度很小,而且每束可以独立控制,可以更好胜任曲率变化大的情况;三是 A350 翼梁比 A400M 翼梁的厚度更大,如果采用热隔膜成型,回遇到较难克服的纤维皱褶问题;四是为了满足 A350 翼梁 14 件/月的产能,A350 翼梁的纤维铺放芯模的截面是四边形,一次纤维铺放可以成型两件翼梁,可以更好地满足产能需求;五是如果采用自动纤维铺放,可以省去热隔膜成型这一工序,降低生产成本,并提高生产效率。

## 大尺寸复合材料梁成型讨论

### 1 大尺寸复合材料梁成型模具的结构形式

大尺寸复合材料梁成型模具的结构形式有阳模和阴模两种,其两种结构形式各有优缺点,比较结果见表 1。

### 2 大尺寸复合材料梁成型模具的材料

复合材料的成型模具常用的材料有普通钢、殷钢和复合材料等,其

表1 模具结构形式的比较

结构形式	优点	缺点
阳模	模具易于加工,成本较低;R角成型质量容易保证;易于手工铺叠;易于自动铺丝,且生产效率高;易于热隔膜成型	制件外形随预浸料质量的变化会有所变动
阴模	成型出的制件外形规整	模具加工成本较高;R角手工铺叠难度较大,成型质量保证较困难;不适合自动铺丝技术;热隔膜成型较难实现

表2 模具材料的比较

模具材料	优点	缺点
普通钢	材料成本低;加工成本低;耐久性好	热膨胀系数大;密度大、重量大
殷钢	热膨胀系数较小;耐久性好	材料成本高;加工成本较高;密度大、重量大
复合材料	热膨胀系数较小;密度小、重量轻	材料成本高;加工成本高;高温下使用,耐久性较差

表3 成型方法的比较

成型方法	成型方法简介	优点	缺点
手工铺贴法	手工铺贴,热压罐固化	设备要求低;灵活,对零件外形限制少	生产效率低;人工成本高;质量一致性稍差
热隔膜成型法	自动铺带铺贴,热隔膜成型,热压罐固化	生产效率较高;人工成本低;质量一致性好	对零件外形限制多;生产工序较多;设备要求高
丝束铺放成型法	纤维丝束铺放,热压罐固化	对零件外形限制少;生产效率高;人工成本低;质量一致性好	设备要求高

优缺点见表 2。对于大尺寸复合材料梁的尺寸大,固化模具的热膨胀的影响较大,为了保证零件的外形和内部质量,建议使用殷钢模具;如果大尺寸复合材料梁采用自动纤维丝束铺放,其芯模的尺寸大,建议使用复合材料模具。

### 3 大尺寸复合材料梁的成型方法

常见的大尺寸复合材料梁的成型方法按铺贴方式分主要有:传统的手工铺贴法、热隔膜成型法和丝束铺放成型法,其特点见表 3。

## 结束语

随着复合材料在大飞机机翼上应用,复合材料在翼梁上也得到相应的应用。为了保证翼梁的成型质量、制造成本和生产效率,翼梁的成型模

具建议采用采用殷钢材料,阳模结构形式,在热压罐中固化成型。翼梁的制造方式从手工制造发展为自动化制造,自动化制造从热隔膜成型发展到纤维丝束铺放成型。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Marsh G. Wing worker for the world. Reinforced Plastics, 2012, 5: 24-28.
- [3] Trop D. Structural configuration overview and update, 2005.
- [4] Jenks M. Boeing 787—challenges of complex global systems//2010 MIT SDM systems thinking conference, 2010.
- [5] 吴志恩. A350 的复合材料构建制造. 航空制造技术, 2013, 13:32-35.

(责编 良辰)