

飞机复合材料构件成本问题的 技术分析及改进措施

Technical Analysis and Improvement for Cost of Aircraft Composite Structure

哈尔滨飞机工业集团 吴志恩

复合材料构件的大量采用对减轻飞机重量、降低燃油消耗、延长飞机维修周期,以及改善飞机性能方面作用显著。但是其发展也受到了一定的限制,主要原因是技术问题和成本问题。

近年来,复合材料在飞机结构上的使用率不断提高。复合材料构件的大量采用对减轻飞机重量、降低燃油消耗、延长飞机维修周期,以及改善飞机性能方面作用显著。但是其发展也受到了一定的限制,主要原因是技术问题和成本问题。例如 F-22 在 F-15、F-16 和 F-18 成功应用复合材料的基础上,原计划复合材料构件用到结构重量的 50%,而由于成本问题最终只用到 25%。为此,美国空军研究实验室启动了复合材料经济可承受性倡议(CAI)来应付发生的问题。欧直公司在海豚等机型上对复合材料的使用已取得很大成功,复合材料用量达到 70%。但其近年来开发的另一种直升机复合材料用量却有所减少,原因是该吨位的直升机市场竞争激烈,复合材料如果用得太多,价格上会失去竞争力,权衡得失,不得不在重量等问题上做些牺牲。因此对复合材料构件的成本问

题进行探讨并研究相应的解决办法,已引起了国内外有关方面的注意。

从各方面统计资料来看,20 世纪末到 21 世纪初,国外复合材料构件平均价格按当时外汇计算折合人民币约 7000 元/kg、金属构件约 4000 元/kg,两者构成 1.65 ~ 2 倍的比例关系。由于技术、设备、管理等差距,我国大部分产品尚未达到这个水平,有的复合材料构件成本甚至超出国外 30% 以上。这些更为复合材料构件生产的发展带来障碍。

虽然按照国外一些专家的预测:21 世纪以后复合材料构件成本会大幅度下降,例如 2007 年 3 月有报道说复合材料构件价格将会从 1100 美元/kg 降到 275 ~ 300 美元/kg。而事实上这个目标远未实现;相反,根据我国碳纤维预浸料进口情况来看,由于当前国际市场上碳纤维缺口很大,进口的碳纤维预浸料每年还有 2% ~ 3% 的价格上浮。因此,分析复

合材料构件的价格构成,从管理、技术上采取相应措施把价格降下来应是非常紧迫和必须的。

降低复合材料 构件成本的措施

1 从管理入手,全面规划和实施从订货到生产的一体化配套

因为复合材料是有寿命期的,而且寿命很短,碳纤维预浸料一般从出厂到失效为半年,而且要求放在 -18°C 的低温下保存,中间出库时间限制很严格,要有记录并相应计入有效期,因此要周密计算周期,做好订货工作。又由于预浸料都是成卷供应的,为减少浪费,一卷料应该一次性用完,在订货时要将同时生产的零件进行配套组合,做到同批订货同批生产,以保证材料的有效使用。

因为热压罐开一炉所需的能源消耗是基本固定的,无论件多件少,消耗的能源基本一样。所以要根据

热压罐的容量,将温度压力相同的零件组套,使之成组下料、成组进罐,充分发挥热压罐的作用。

2 开展整体化设计,结合实施共固化/共胶接等工艺

整体化设计可使零件数量、紧固件、装配时间减少,从而使整个生产成本下降。波音 787 机身采用复合材料为主的结构,减少了 31500 个零件;JSF 飞机的尾翼设计成复合材料整体化结构,零件由 13 个减为 1 个,取消了 1000 多个紧固件,减少制造成本 60%。复合材料构件整体化设计使得共固化、共胶接功能得到充分发挥。例如,一根 10m 的长桁要采用铆接结构、双排铆钉,按节距 25mm 计算,大致要打 80 个铆钉,采用了共固化/共胶接方法,可减少 80 个铆钉的重量,也省去了铆钉的购置费用和铆接工时。

3 大力开展液体成形工艺

液体成形工艺一直被称为低成本工艺,对某些产品来说,虽然全面衡量技术成熟性、工装复杂性以及可能达到的高性能指标,有时并不完全理想。但对一般产品来说,是可以满足要求的。液体成形工艺的特点是用液体树脂以不同的方式注入干纤维,从成本上看至少可节省大量的纤维预浸、运输、保管的费用,而且有的液体成形工艺能源消耗很低。液体成形的的方法有 20 ~ 30 多种,航空上常用下面 3 种:

(1) 传统的树脂转移模塑技术(Resin Transfer Moulding, RTM)。把缝合或编织的干纤维预成形件放在上下模具之间,合模后将树脂以 0.7 ~ 1.4MPa 压力注入,在所需温度下加压固化,开模取出产品。这是最早、最通用的液体成形技术。大型产品有 JSF X-35 的整体化尾翼, A380 前后机身部分组件及襟副翼部分肋与铰链。F/A-22 用此法生产了至少 400 种零件。过去 10 年内美国使用 RTM 的增长率为 20%

~ 25%, 欧洲为 8% ~ 10%。早期的 RTM 技术不大过关,主要原因是预成形件的制作问题以及适当黏度的树脂或树脂膜问题。早期 RTM 工艺生产的产品纤维含量为 20% ~ 45%,不算很高,生产成本比热压罐工艺低,但工装费用较高。目前由于新材料的开发和相应标准的建立,仿真技术的应用及注射系统自动控制的完善,产品质量不断提高。该技术适用于中小尺寸、形状复杂的产品。

(2) 树脂模熔渗技术(Resin Film Infusion, RFI)。将预先制成的树脂膜或稠状树脂块放在成形模具型腔底部,其上为编织或缝合的预成形毛坯,用真空袋封严,于热环境下用真空将树脂向上抽吸,填满整个型体空间后固化。具体的真空抽吸方法多有变化,但原则不变。

RFI 模具较 RTM 要求简单,虽成形压力不高但一般也要热压罐的支持。采用半模成形。但表面质量和精度不及 RTM,生产效率一般比 RTM 低。所用树脂黏度要求比 RTM 宽松。RFI 的优点是:树脂基体便于存储和运输,成形压力低,一般大于 10^6 Pa 即可;无需庞大成形工装,模具简单,模具材料选择性强;纤维含量接近 70%,孔隙率低(0 ~ 0.1%);树脂基体挥发物少, VOC 含量符合; IMO 环保标准。波音公司在 NASA 支持下进行过试验,认为 RFI 可减重 25%,降低成本 20%。

其主要问题与 RTM 相似,都是树脂基体的韧性不足,力学性能水平尚不能与预浸料热压罐工艺结果相当。故限制使用在大平面或不太复杂的曲面,特别是蒙皮结构。A380 的机翼后缘就是用这种方法制造的。

(3) 真空辅助树脂转移模造成型技术(Vacuum Aided Resin Transfer Moulding, VARTM)。该技术也是在 RTM 基础上改进的,增加了抽真空功能,纤维含量可提高 50% ~ 60%。波音 787 和

A380 的后压力框在德国 EADS 集团 Augsburg 分部用此技术进行生产。现 EADS 又在该技术的基础上进行改进,开发了 VAP 技术,其关键在于用了一种微孔薄膜将树脂与空气隔开,使孔隙率降低、纤维体积树脂含量提高。除压力框外, VARTM 也用于 A400M 的垂尾和机翼壁板的生产。

典型 VARTM 树脂在足够低的温度下固化,可不采用昂贵工装(可用中等密度的纤维板制造)、不进热压罐。试验证明该工艺可用作体积达 5.4m^3 产品的生产。结合设计的改进, VARTM 可使零组件数量减少到 80%,减少紧固件数量最大达到 100%,使制造成本降低 30% ~ 50%。

此外还有真空灌注成型(Vacuum Infusion Process, VIP)和真空辅助树脂注射成型(Vacuum Aided Resin Infusion, VARI)液体成形方法,两者都有一套抽真空装置,从外部将树脂吸入干纤维预制件中,固化后开模。VIP 可使产品纤维体积含量达 60% 左右。由于相应材料的解决,近年来国内开发 VARI 很有成效。这 2 种工艺方法当前尚未见到在大型飞机上应用的大量报道,但其前途值得关注。

西曼复合材料树脂熔渗成形法(Seeman Composite Resin Infusion Molding Process, SCRIMP)已是一个成熟的工艺方法,是对 RFI 的改进,主要特点为:在密封袋和产品之间再加上一些压块,增加加压效果。此法多用于造船业中。

4 开展数字化设计制造一体化

金属构件的数字化设计制造一体化可减少 80% 装配不协调问题,使得装配成本大大降低。而复合材料构件的数字化设计制造一体化在协调、效率、质量上对降低成本问题的效果更明显。复合材料构件的数字化设计制造一体化改变了传统的设计制造模式,使实施并行工

程和面向制造的设计 (Design For Manufacturing, DFM) 成为可能,做到在设计早期解决制造问题,实现设计与制造的无缝集成,减少了制造时间以及人工编程带来的误差。

在 JSF-32 飞机上,波音和洛克希德都使用了大量复合材料构件,并使用先进的数字化设计制造技术。圣路易公司通过数字化设计自动铺放生产复合材料进气道,成本节约 40%,生产时间减少 50%。洛克希德使用数字化设计自动铺层技术生产复合材料机翼上蒙皮和前机身以及进气道整体结构件,节约材料 28%,节约劳动力近 25%。数字化设计制造一体化包括以下程序:

- (1) 初步设计。
- (2) 工程详细设计。
- (3) 制造详细设计。

(a) 制造余量定义:设计时要从工艺上考虑固化后的修整问题;

(b) 可制造性分析:模拟铺放,及早发现翘曲、搭接等情况;

(c) 铺层展开及文档自动生成。

(4) 制造输出,直接生成设备所要求的输入文件格式,直接驱动设备运行,包括排样下料系统、激光投影系统、自动铺带/铺丝机运行所需运行的文件。

按上述程序实施,从(3)阶段开始,基本工作就必须设计和工艺联合进行,而最后一道程序(4)直接和设备运行结合起来。以上最明显的特点是很多地方模糊了工艺和设计的界限,促成了设计和制造的无缝搭接。这必然促使质量和生产效率的提高和生产成本的下降。

5 自动化生产

过去复合材料构件成本高,手工劳动量大,质量问题多,而自动化生产对解决这些问题起了关键作用。当前比较成熟的是铺层过程和检验过程的自动化。此外大量的复合材料构件切削用高速精密机床(包括超声设备)和刀具,以及解决了喷嘴

容易堵塞的大型喷水切割机(床身 36m × 6.5m,厚 6mm 的层板切割速度达 3m/min)的出现,都使我们在投资、质量、效率三者兼顾的条件下能有更多的选择。

波音 787 大量采用了铺带和铺丝工艺,例如,其垂直安定面装配工作量由原类似铆接构件占总工作量 55% 降到 25%,自动铺带是一个主要原因。其主要部件工厂 Frederickson 在波音 777 垂尾和平尾生产时就用了铺带工艺。当前波音 787 垂尾生产时,它将大部分组件分包到各地,但翼盒蒙皮的生产 and 翼盒装配仍由 Frederickson 负责。其他包括机翼和机身各个部分的蒙皮壁板,都用了铺带或铺丝工艺。波音 787 长桁大梁也配备了专用的铺带设备。目前最先进的铺带机已进入第 5 代,带有双超声切割刀和缝隙光学探测器的十轴铺带机带宽可达 300mm,效率为手工铺设的 10 倍,解决了手工铺层速度慢且压实不严谨而导致的铺层内部缝隙等问题。

除了大力发展复合材料构件检测设备的数字化、自动化外,对检测过程的装夹、调整、检测后的各项处理也应力求清晰、明朗、快速、准确。例如,复合材料构件大量的 C 扫描检查都是必须的,但大量的装夹及分析往往占用很多时间,而且容易出错。波音 787 机身 47 段购置了西班牙 M·Torres 专为波音 787 机身开发的 Torressonic 自动检测设备(超声检测系统),当机身固化以后,用专用的 AGV 自动小车将产品推到超声检验区,设备沿着机身旋转,对机身蒙皮外轮廓和机内桁条内轮廓进行扫描检查,并很快打印记录。

不断探索、研究和开发各种降低成本的新工艺

根据产品特点,归纳同类型产品,开发适应某类产品节省能源、节省劳动力、提高质量的工艺方法。

1 电子束固化

在室温下进行,主要设备是电子加速器,将产品铺层压实后,放真空袋内,在室温或低温下开动设备进行固化,固化后孔隙率、收缩率都很低。但完成此工序通常需产生 10MeV 以上能量的电子束,会激活金属骨架,有产生放射线的危险。若只用于外场修理,最多 9MeV 就够了。公开报道成功使用的有加拿大航空公司 90 年代修理过的一个 A320 整流罩。前几年意大利 Guastti 公司提出逐层电子束固化的想法,在铺设机上加一套机构,以 0.5MeV 的能量逐层固化,成功后将对复合材料构件成本减少起到很显著的作用。

2 Z-Pin 技术

该技术近年来国内开发成效很大,Z-Pin 工艺采用是由 Z 轴方向压入增强短纤维以改善厚度方向的刚度和强度的方法,是三维增强最有效的方法之一。另外,由于该方法还可以实现复合材料蒙皮、肋和筋条等整体成形,同时减少了紧固件的用量和装配工作量,从而将大大减少复合材料构件的制造成本。

3 隔膜成形技术

因为该技术有时离不开热压罐的支持,所以综合成本问题尚需进一步分析,但对某些要求较高的受力构件来说,在保证各项指标达到设计要求的情况下,其相对成本是较低的。近年来隔膜成形的发展,一些人认为非常适合于加工大型飞机机翼翼梁,A400M 的 C 形前梁即用此法生产。

此外,近年来由于国际上碳纤维供不应求,价格不但没有大幅下降,相反每年进口的原材料价格还有上浮,如从欧洲进口的碳纤维预浸布依然徘徊在平均 70 欧元/m² 左右,但国外几个领头的供应商都在拼命扩大生产,价格有望逐步下降。目前国产料虽然价格仍偏高,但质量已逐步过关,价格降到比进口料低应是可预料的事。(责编 小颖)