

# 自动铺带技术与大飞机 复合材料结构

## Automated Tape-Laying Technology and Large Aircraft Composites Structure

中国商飞上海飞机设计研究院 袁新浩  
中航工业第一飞机设计研究院 窦润龙



袁新浩

2009年毕业于南京航空航天大学飞行器设计专业,获硕士学位。现在中国商飞上海飞机设计研究院从事复合材料中央翼设计工作。

目前,飞机上的复合材料使用量已经成为衡量其先进性的重要标准。波音 787、空客 A380 飞机都大量采用复合材料,空客 A350 上复合材料的用量更超过 50%。作为中国拥有完全知识产权的大型民用客机项目,为了保证其客机的市场竞争力并促进国内复合材料产业的发展,也必将大量采用先进复合材料。而自动铺

带工艺在提高复合材料在商用飞机及军用飞机上的使用方面起到了重要的作用。随着越来越多的零件从铝转换成复合材料,铺带将持续成为一个高可生产性和划算的解决方案。未来应用的例子会包括商用飞机复合材料机翼、民用结构零件以及汽车和其他运输工业的结构零件。相信通过大飞机项目的研发、设计制造,我们可以掌握复合材料自动铺带技术,为大幅度应用复合材料飞机结构积累经验。

带技术则是使用复合材料的关键技术之一。

### 先进复合材料的历史

先进复合材料是 20 世纪 60 年代早期以单向带的形式推出的。起初用手工铺贴,其工艺是劳动密集型的,容易引起质量问题。20 世纪 60 年代中期,航空工业的发展极大地推动了其自动化进程。早期的设备是航空公司或加工车间在材料供应商的指导下自己制造的。设备的构型涵盖了从手工辅助台式的原型机到由美国空军牵头、通用动力和 Conrac 公司合作研发的第一台全数

控龙门式铺带机。这台设备被用来为 F-16 生产复合材料零件,使用的是 75mm 宽的带子。20 世纪 70 年代末期至 80 年代初,设备制造者生产了第一台商业化的平面和曲面数控铺带机,这些设备被用在军事项目上(如 B-1 和 B-2 轰炸机)制造飞机的零件。曲面上带宽范围为 75 ~ 150mm,平面可以高达 300mm。20 世纪 80 年代末期,自动铺带开始广泛的使用于商用飞机上。整个 20 世纪 90 年代,设备、编程技术、铺带技术和 ATL 复合材料的进一步发展使铺带工艺操作更简单、性能更可靠、界面更友好。

## 复合材料工艺综述

单向碳环氧预浸带是在衬纸上成卷供应的,典型的宽度有 75mm、150mm 和 300mm 三种规格。曲面应用使用 75mm 和 150mm 带宽,平面应用使用 150mm 和 300mm 带宽。材料卷被装载在铺带的头部。铺带头在平面应用时被安放在 4 轴台架上,曲面应用时安放在 5 轴台架上。

### 1 优点

碳环氧预浸带极大地减少了手工铺层。在平面装料的情况下,相对于手工铺贴,碳环氧预浸带可以减少的人工劳动时间高达 70% ~ 85%,铺层效率可以高达 1000kg/周。曲面壁板的铺层效率取决于曲面的复杂性、精度要求、零件厚度和使用的带宽。平面到曲面过渡的零件也适合铺贴。零件越大,层数越多,铺层的生产性就越好。

另一个优点是铺带机的铺放头可以旋转  $\pm 190^\circ$ 。因此,纤维的角度不受限制,从  $0^\circ \sim 85^\circ$  角度范围内都可以铺放。对在小于全带宽度的部位,可切割单向带至所需宽度。

### 2 缺点

大曲率的零件不适合铺贴,因为带子在平面过渡区趋于翘曲和桥接。此外,衬纸也可能发生损坏。小的铺层数也降低了铺带的可生产性。

## 应用

由平面层压板制造的零件的例子有波音 777、空客 A330/340 和空客 A340-500/600 的尾翼结构零件(翼梁、肋、长桁、C 型槽和“工”字长桁)。曲面铺层零件的例子包括波音 777、空客 A330/340 和空客 A340-500/600 的水平/垂直安定面蒙皮。

## 设备描述

### 1 铺带头

一卷带子被加载在供应轴上,轴位于带头前方上方。带子在送料时

相继越过带子位置反馈系统、上面的带导轨以及刀具。最后穿过下面的带导轨,在压实底座段下面到达衬纸回收轴,轴位于带头的后面。复合材料带子穿过带头的运动被称为 *U* 轴。由供应轴和回收轴的马达控制着带子。

*V* 轴和 *Q* 轴这 2 个线性切割轴在构造上是一样的,都被安装在带头的前面,在供应轴和压实座段之间。它们在一个垂直于带子路径的方向上滑行。2 个旋转切割轴 *D* 轴和 *E* 轴使触针刀具朝向带子,这 2 个轴在构造上类似,*D* 轴固定于 *V* 轴,*E* 轴固定于 *Q* 轴。*V-D* 和 *Q-E* 轴的运动在带子上割出想要的角度。*D* 轴和 *E* 轴通常与 *X* 和 / 或 *Y* 轴同时到位,在进程的一开始就准备好下一次切割。切割通过复合材料带子但不通过衬纸。

压实座段是设计用来铺放复合材料带子在表面上的,如凹槽、拉伸件和全部蒙皮曲面,同时保持相当的压实力分布在底座的宽度方向上。尾部压实滚轴和带子底座相匹配。当带子的末尾为了适应单层的边缘而被对角剪成长条带的时候就需要这种滚轴。一个可编程的带子压实系统允许在铺带时带子压实压力不同。压力可以通过零件程序或者操

作员的输入而改变。

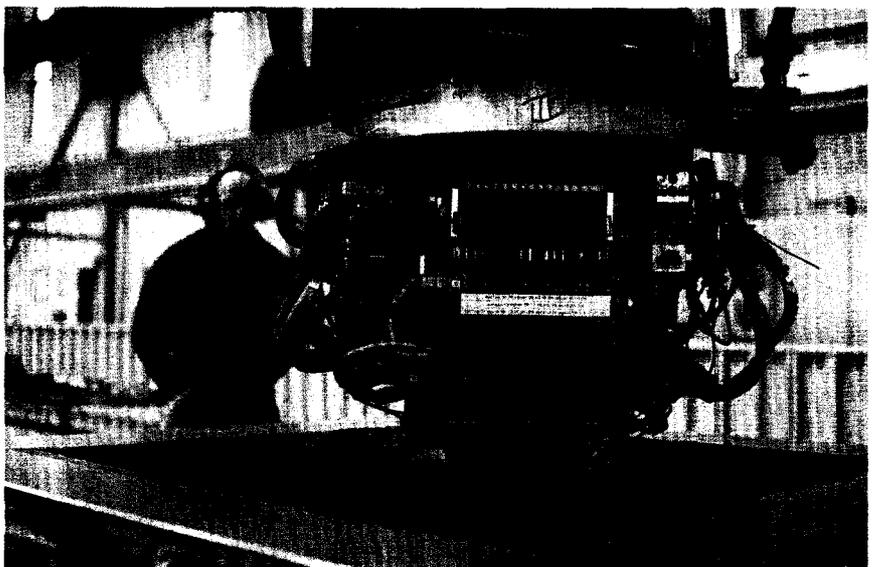
### 2 控制

数控系统是个多模块缓冲曲面系统,是专门为铺带应用设计的。这个系统不包含和普通目标数控相联系的转轴和加工功能(因为机器不需要),但是包含有附加的功能和弹性来适应不同的复合材料带铺层头。所有操作控制和监控,都被集成在一个位于工作区外面的控制仪表板里。作为仪表板的补充,还提供了—个手工控制的悬架按钮台以便操作员可以在工作包线内控制各种机器功能。

### 3 待机程序系统

设计和程序系统帮助使用者准备数控复合材料铺带机器的输入数据。编写零件程序需要特别的编程技术,因为带子必须顺着曲面模具所决定的自然路径。此外,单个的铺带过程必须到位以确保使用者的设计原则(包括空隙和纤维定位准则)被满足。

使用者可以定义刀具面、铺层边界、设计参数和机器工艺参数。使用这些文件输入,一个批程序可以和图形数据、日志文件和重启文件一起生成一个自动编程工具(APT)源代码,数据可以用图形进行分析。APT 源程序可以通过 APT 编码器和后处



理程序进行处理生成铺带的数控零件程序。

#### 4 铺带工艺描述

根据零件程序,执行适当的编码和轴向定位指令,使铺放头置于模面上。在接触之后,通过使用数控程序控制机器的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $C$ 、 $A$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $Q$ 、 $V$  和  $U$  轴的运动,以想要的方式将带子铺到模面上。当带子被放置在模面上以后,其头部被悬挂在刀具的上面,同时压力通过压实底座应用到铺层面上。这就减少了带子在通过断口和凹陷处的移动。压力是可控制的,从操作员的仪表板输入。整个 150mm 宽度上的带子压力从 265 ~ 1303N, 整个 300mm 带宽上的总的压力范围为 265 ~ 2675N。这些压实范围是用在正常的铺带模式下的。

在每个铺带流程结束之前,带子被剪裁来适应单层边缘的角度。带头静止做  $0^\circ$  剪裁或者运动做一定角度的剪裁。这项操作由 4 个数控驱动 ( $Q$ 、 $V$ 、 $D$  和  $E$  轴) 程序控制 2 个刀具的运动来实现。每个线性切割轴的速度和带速通过程序控制来建立关系以确定切割角度。另外 2 个驱动提供这 2 个刀具关于它们自己的轴 ( $D$  和  $E$  轴) 旋转自由度。程序控制的刀具旋转确保刀具总是沿着切割方向。切割通过复合材料但不通过衬纸。

#### 典型的材料型号和形式

总的来说,适合自动铺带的给料原材料包括热固树脂预浸润单向碳纤维或者玻璃纤维,在衬纸携带材料上成卷供应,其芯材内径为 255mm,预浸的纤维的边和衬纸齐平。

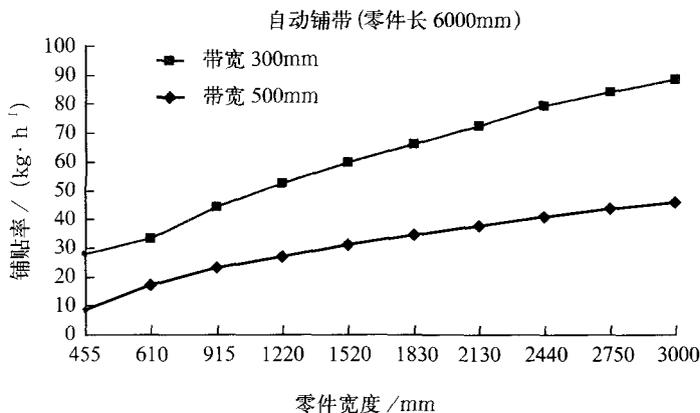
手工铺层和自动铺层的复合材料卷有不同的要求。衬纸携带材料的耐久性和分离涂层非常重要,使得 ATL 材料成卷成功地应用到自动铺贴上,比供应给手工铺贴的成卷供应更成功。例如,如果衬纸没有足够的

耐久性,衬纸破坏的情况就会发生。如果衬纸破坏,带头将需要重新穿线。不合适的分离涂层将影响带头在引导斜槽和压实装置里自由移动。另外,不合适的分离涂层也将影响复合材料带保持在衬纸上的难易程度和在将带子压到铺贴面上时,带子从

• 加强处 / 加强筋或者斜角必须适应,设备必须能够和模面相吻合且预浸带没有翘曲或者桥接;

• 复合材料预浸料的配方和形式必须适合零件的生产工艺;

• 诸如带头加热等工艺要求需要加以考虑;



150mm带宽和300mm带宽的铺贴率对比

衬纸上脱离的难易程度。如果预浸的复合材料带在切割、引导和压实装置之前从衬纸上分离,在模具上的铺贴就有可能出现错位。如果在压实期间,预浸的复合材料带不从衬纸上脱离或者分开,带子的位置也会受影响。

#### 设计准则

自动铺带是制作大型复合材料零件所用的工艺方法之一。为了最好地利用铺带工艺,必须考虑零件的几何形状和压实方法(平面或者曲面铺层)。根据零件的复杂性、尺寸和形状的不同,铺带的零件通常是平面到曲面的过渡并且属于前面所提及的零件范畴。大曲率的飞机部件(如机身、进气道等)比起铺带来说更适合纤维铺放技术。当考虑用自动铺贴的方法来生产零件时,以下的零件特征应该和机器的性能紧密匹配

• 铺层形状 / 纤维角度应该在可用的切割角度范围内;

• 曲面和模具公差要求必须和带头形状相关;

• 在剪裁铺层形状时带宽的选择要保证铺层效率最大化同时保证废料最少;

• 适当的材料选取必须能够满足零件的设计要求。

在工艺要求不能满足机器性能的区域,人工介入就非常重要。为了减少人工介入,在项目的开始最好考虑到可用的复合材料预浸料、设备的工艺性能和零件在车间的流向。

#### 展望

铺带工艺在提高复合材料在商用飞机及军用飞机上的使用方面起到了重要的作用。随着越来越多的零件从铝转换成复合材料,铺带将持续成为一个高可生产性和划算的解决方案。未来应用的例子会包括商用飞机复合材料机翼、民用结构零件以及汽车和其他运输工业的结构零件。相信通过大飞机项目的研发、设计制造,我们可以掌握复合材料自动铺带技术,为大幅度应用复合材料飞机结构积累经验。

(责编 玉龙)