

# 飞机复合材料构件 自动铺带/丝束铺放典型设备

北京航空制造工程研究所 王天玉 梁宪珠 杨进军



王天玉

工学硕士,2005年毕业于哈尔滨工业大学应用化学系化学工艺专业。现任北京航空制造工程研究所飞机工艺研究室工程师,主要从事树脂基复合材料以及飞机复合材料制造的研制工作。

复合材料在航空领域的应用按结构特征和应用部位可分为大曲率的机身结构和小曲率的壁板结构2类,其制造工艺主要为热压罐固化成型工艺和液体成型工艺。美国民用飞机制造商提供的信息表明,在先进复合材料结构的成本组成中,材料占15%,预浸料铺叠占25%,装配占45%,固化占10%,紧固工艺占5%,由此可以看出,预浸料铺叠和装配在成本组成中占了绝大部分。而且,在

过去,对于先进复合材料的研究及开发的重点一般放在材料性能和工艺的改进上,目前已将重点放在了降低构件制造成本上。为了提高生产效率,降低成本,保证大型复合材料构件的铺叠质量,便发展了能代替手工铺叠的制造设备——自动铺带机和自动丝束铺放机。

材料成本中,预浸料废弃率平均为40%。

过去,对于先进复合材料的研究及开发的重点一般放在了材料性能和工艺的改进上,目前已将重点放在降低构件制造成本上。为了提高生产效率,降低成本,保证大型复合材料构件的铺叠质量,便发展了能代替手工铺叠的制造设备——自动铺带机和自动丝束铺放机。这2种设备的开发可替代预浸料自动下料机和激光投影仪,从而提高了复合材料构件的铺叠效率,降低了成本。

## 飞机复合材料构件 自动铺带设备与技术

### 1 自动铺带技术

自动铺带技术主要用于铺放小曲率的大型复合材料构件,如翼面类构件的蒙皮。伴随着20世纪60年代由单向带的形式开发的先进复合材料的出现,自动铺带成为了这种新材料铺叠成型的自动工艺

方法。第一台计算机数控(CNC)自动铺带机是在美国空军材料实验计划下由General Dynamics公司和Conrac公司合作开发的,于80年代正式用于航空复合材料构件制造,自动铺带技术从此发展成为被最广泛使用的大型复合材料构件制造技术。90年代后,西欧开始研制生产自动铺带机,如西班牙M.TORRES公司研制出的11轴自动铺带机和法国FOREST-LINE公司研制的带有双向铺带头的自动铺带机。目前,自动铺带技术为了适应不同种类的航空复合材料构件的需求,在加工能力方面提出了灵活性更强的要求。截至到目前为止,制造自动铺带机的厂商有美国American GFM Corporation公司、Cincinnati Machine公司、City Machine Tool & Die Company公司、ITW Workholding公司、Ingersoll公司和欧洲的M.TORRES公司、FOREST-LINE公司等。

## 2 典型的自动铺带设备

自动铺带机分为平板式自动铺带机(FTLM)和曲面自动铺带机(CTLM)2种。FTLM有4个联动轴,主要适用于平板或小曲率机翼壁板的制造;CTLM有5个联动轴,适用于单曲面中等曲率壁板(如大尺寸机身)的制造。自动铺带机系统由台架系统(平行轨道、横梁及立杆)和铺带头组成,分为单架式和双架式。其中双台架自动铺带机的特点是机器长度可调,为长机翼蒙皮构造,适合于连续操作。

(1) 台架系统。目前的自动铺带机是台架型机器,可铺叠曲面的自动铺带机的台架系统有5个联动运动轴。台架系统由平行轨道、可在平行轨道上精确移动的横梁、可带动铺带头上下移动的立杆构成,其中铺带头是可旋转的。

(2) 铺带头。铺带头是自动铺带设备的核心,它有5个预浸带输送轴与切割轴。铺带头的主要构成包括:预浸带装夹和释放系统、衬纸回收系统、缺陷检测系统、预浸带输送导向系统、预浸带切割系统、预浸带加热系统、铺带和压实系统。其中预浸带通过铺带头的输送轴和拉紧轴传送。

(3) 独立工作单元。一般自动铺带机所具有的独立工作单元包括:用于准确定位模具表面的施料辊、用于压实模具表面的预浸带、预浸带加热装置、模具坐标系校准系统、表面探测定位系统和光学预浸带缺陷检测系统等。由于不同的制造商所提供的预浸带各有不同,所以每一批次铺叠操作的工艺参数也会有所不同。一般为了增加预浸带的粘性,以便提高预浸带的铺敷性,会在预浸带铺到模具表面前按程序指令使得加热系统自动加热预浸带,一般预浸带的加热温度控制在 $26^{\circ}\text{C} \sim 43^{\circ}\text{C}$ 范围内。模具坐标系校准系统包括激光跟踪仪,它可以利用模具表面的靶标点快

速确定并校准铺带机在模具表面的坐标系。由于模具的变形引起的精度偏差以及预浸带的厚度偏差,会导致模具或制件表面与计算机中存储的程序有一定偏差,而表面探测定位系统提供了表面探测定位装置,使得铺带头在接近制件表面时缓慢移动,直到接触为止。此外,为了减少废料并避免二次路线操作,需要确保铺层结尾处按模具的精确形状切割,每一铺带路径都要切割起始和结束位置的预浸带。

## 飞机复合材料构件 自动铺带机的应用状况

80年代,自动铺带机主要用于军用航空复合材料构件的制造,而近年来,自动铺带机越来越多地用于民用航空复合材料构件的制造,今后这种趋势还将继续。目前,在世界范围内自动铺带机用于复合材料构件制造的状况见表1。

波音商用飞机是世界航空界使用自动铺带机的先驱者。早期自动铺带机起源于美国Vought公司,用于铺放F16战斗机的复合材料机翼。随着飞机复合材料用量的增加,80年代,波音为大型复合材料结构(B2隐形轰炸机项目)大力投资自动铺带系统。波音777商用飞机采用全复合材料尾翼,并采用自动铺带机制造水平和垂直安定面蒙皮壁板。空客的687架A330/A340飞机均采用自动铺带机,制作了1512块大型蒙皮壁板,这种壁板长9m,宽2m,重200kg。

## 飞机复合材料构件 自动丝束铺放技术

### 1 自动丝束铺放技术

自动丝束铺放与自动铺带技术同样具有高效、低成本的特点,是专为曲率较大的双曲面蒙皮构件的铺叠而开发的技术。这项技术起初主要用于克服纤维缠绕的缺点,它是纤维缠绕与自动铺带的结合,其核心技术是铺丝头。

自动丝束铺放技术是在模具上铺放预浸丝束,在自动铺带的基础上,铺丝头的压辊将数根预浸丝束压在模具的表面,并集成为一条宽度可变的预浸带,然后再加热软化并进行压实定型,宽度的变化由程序来控制,预浸丝束根数自动调整。对应不同曲率的不同需求,自动丝束铺放机可适应 $3.2 \sim 25.4\text{mm}$ 宽的预浸丝束。

与自动铺带技术相比,自动丝束铺放技术的优点主要在于:按构件型面具有增减约束根数的功能,可根据构件形状自动切纱适应边界,废料率( $3\% \sim 8\%$ )很低,不需要隔离衬纸,可完成局部加厚、加筋、铺层递减、开口补强等操作,铺放轨迹自由度更大,可变角度铺放,能适应大曲

表1 使用自动铺带机的复合材料构件

制造商	机型	复合材料构件
波音公司	B777/B787 商用飞机	水平尾翼蒙皮
Vought 飞机公司	C-17 军用运输机	水平尾翼蒙皮
Textron 公司	A330/340/380	副翼蒙皮、平尾、垂尾
SABCA	Dassault Falcon	水平安定面蒙皮

率复杂构件成型。

### 2 典型的自动丝束铺放设备

典型的自动丝束铺放机如图1所示,这种自动丝束铺放机有7个运动轴,由计算机控制的 $12 \sim 32$ 个丝束输送轴,丝束是指 $3\text{mm}$ 或 $6\text{mm}$ 的预浸丝束。典型的铺丝头结构如图2所示,铺丝头把预浸丝束独立输送并将其压实、切割,每一根预浸丝束从丝束筒上抽出,通过预浸丝输送系统到达铺丝头,在铺丝头集束后铺放到模具表面。

## 飞机复合材料构件自动丝束铺放技术的应用状况

自动丝束铺放技术是由美国航空制造界于 20 世纪 70 年代开发的, 80 年代后期, 美国数控加工设备制造商进一步研发了自动丝束铺放机, 1989 年 Cincinnati Machine 公司设计出第一台自动丝束铺放机并于 1990 年投入使用。诺斯罗普·格鲁门公司 1995 年购进第一台自动丝束铺放机, 将其用于 F/A-18E/F 的进气道、机身蒙皮、平尾蒙皮的制造。1990-2004 年, 美、英和欧洲其他一些国家已有 25 台大小不等的自动丝束铺放机, 机型已从 Viper1200、Viper3000 升级到 Viper6000。Viper6000 自动丝束铺放机可铺多种零件, 具有高敏捷性和准确性, 由于采用单侧纱架, 还具有操作友好性, 到 2010 年将有 40 ~ 50 台机器投入使用。世界各国自动丝束铺放技术在飞机复合材料领域应用的大致状况如表 2 所示。

波音公司与赫尔克里斯公司首先应用铺丝技术研制了 V-22 倾转旋翼飞机的整体后机身。该机型原有后机身由 9 块手工铺叠的壁板装配构成, 改为整体自动铺放后, 减少了 34% 的紧固件, 53% 的工时, 降低了 90% 废料率, 后机身的成功研制

推动了自动铺丝技术在其他部件, 如储油箱、旋翼整流罩、主起落架舱门上的应用。Northrop Grumman 公司在 F-18 上机身蒙皮和进气口蒙皮上应用自动铺丝技术, F-18 中 12 块机身蒙皮, 10 块进气管蒙皮, 4 块水平尾翼蒙皮都是采用自动铺丝设备完成的。Raytheon 公司首次将自动铺丝技术应用在商用飞机上。近年来, 自动铺丝技术的应用逐渐转向大型商用飞机, A380 的后机身所有蒙皮壁板 19 段都是采用 Viper FPS 自动铺丝机制造的, 而 B787 的机身则采用碳纤维复合材料自动铺丝整体分段制造。

### 结束语

目前, 自动铺带技术大多用于铺叠对强度要求高的大型构件的蒙皮, 如机翼壁板, 而自动丝束铺放机用于铺叠对强度要求高且曲率较大的双曲面构件的蒙皮, 适用于大曲率机身和复杂曲面的成型, 如军用和民用飞机双曲面翼身融合体、S 形进气道等。在经过了十几年的发展后, 自动铺带/丝束铺放技术已经成为发达国家航空复合材料构件的成熟制造技术, 具有高效率、高质量和低成本

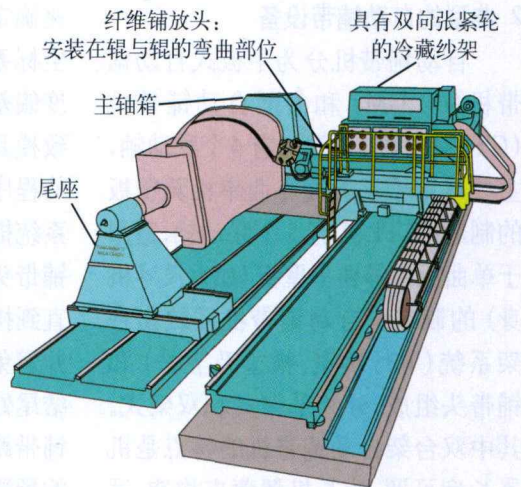


图1 典型的自动丝束铺放机

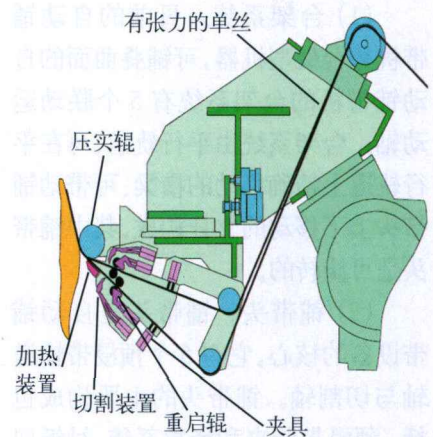


图2 典型的自动铺丝头及其结构

的优点。

自动铺带机和自动丝束铺放机是航空复合材料构件制造业目前亟需配置的关键设备。目前, 国内先进复合材料构件以手工铺叠为主, 引进的数控下料机和激光投影仪虽然提高了效率, 但无法摆脱预浸料手工铺叠工艺的本质特性对于结构优化的制约作用。由于设备的制约, 目前对自动丝束铺放技术研究较少, 而复合材料自动铺放技术的研究与应用对提高我国航空技术发展有着重要作用, 加速其研究与应用可加速我国装备技术与复合材料技术的进步, 而自动铺放技术又是装备技术、软件技术、材料工艺技术的集成, 覆盖面宽, 技术内涵丰富, 国内起步晚, 建议尽快组织研发适应生产的大型自动铺放设备, 促进应用。

(责编 微凉)

表2 自动丝束铺放技术应用状况

飞机型号	使用部位	用量/块	生产商
V-22	前机身	3	波音
V-22	中机身侧蒙皮	2	波音
V-22	旋翼支柱	6	贝尔直升机
F/A-18E/F	水平尾翼蒙皮	4	波音
F/A-18E/F	进气道蒙皮	16	Northrop
F/A-18E/F	机身蒙皮	12	Northrop
C-17	整流进气门	8	Northrop
C-17	起落架护板	4	波音
B-22	水平转轴	2	Alliant Tech