

# 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用

南京航空航天大学 肖军 李勇  
香港科技大学 李建龙



肖军

南京航空航天大学教授, 博士生导师, 中国复合材料学会常务理事, 主要从事复合材料缠绕、自动铺放等自动制造技术研究, 发表论文 40 余篇。

## 自动铺放技术及其优势

先进复合材料具有轻质量、高强度、高模量、结构功能一体化和制造一体化、易于成型为大型构件等优点, 在航空航天工业中起着非常重要的作用。复合材料用量已经成为先进航空航天器的重要技术指标之一, 国外先进战斗机复合材料使用量均超过 20%, 大型飞机达到 50%。为实现复合材料大量应用, 降低成本和提高质量已成为关键。自动铺放

自动铺放技术是工业发达国家近 30 年来发展和广泛应用的自动化制造技术, 包括自动铺带技术和自动铺丝技术。这两项技术的共同优点是采用预浸料, 并能实现自动化和数字化制造, 高效高速。自动铺放技术特别适用于大型复合材料结构件制造, 在各类飞行器, 尤其是大型飞机的结构制造中所占比重越来越大。

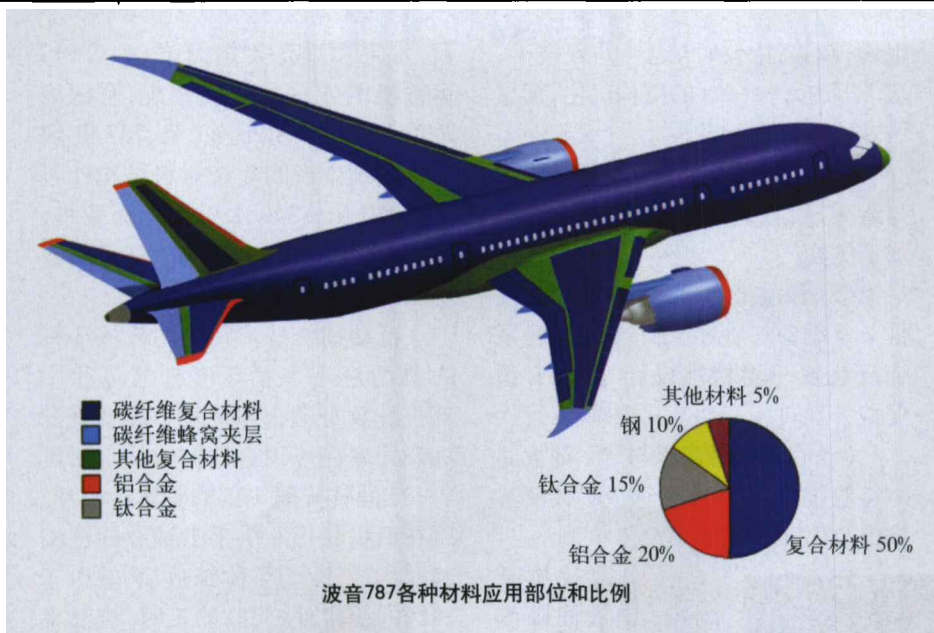
技术是工业发达国家近 30 年来发展和广泛应用的自动化制造技术。包括自动铺带技术和自动铺丝技术, 这两项技术的共同优点是采用预浸料, 并能实现自动化和数字化制造, 高效高速。自动铺放技术特别适用于大型复合材料结构件制造, 在各类飞行器, 尤其是大型飞机的结构制造中所占比重越来越大。

### 1 自动铺带技术 (Tape laying)

自动铺带技术采用有隔离衬纸的单向预浸带, 剪裁、定位、铺叠、辊压均采用数控技术自动完成, 由自动铺带机实现。多轴龙门式机械臂完成铺带位置自动控制, 核心部件铺带头中装有预浸带输送和预浸带切割系统, 根据待铺放工件边界轮廓自动完成预浸带特定形状的切割, 预浸带加热后在压辊的作用下铺叠到模具

表面。

按所铺放构件的几何特征, 自动铺带机分为平面铺带 (FTLM) 和曲面铺带 (CTL M) 两类。FTLM 有 4 个运动轴, 采用 150mm 和 300mm 宽的预浸带, 主要用于平板铺放; CTL M 有 5 个运动轴, 主要采用 75mm 和 150mm 宽的预浸带, 适于小曲率壁板的铺放, 如机翼蒙皮、大尺寸机身壁板等部件。自动铺带机由美国 Vought 公司在 20 世纪 60 年代开发, 用于铺放 F-16 战斗机的复合材料机翼部件。随着大型运输机、轰炸机和商用飞机复合材料用量的增加, 专业设备制造商 (如 Cincinnati Machine、Ingersoll 公司) 在国防需求和经济利益的驱动下开始制造自动铺带设备, 此后自动铺带技术日趋完善, 应用范围越



来越广泛。带有双超声切割刀和缝隙光学探测器的十轴铺带机已经成为典型配置,铺带宽度最大可达到300mm,生产效率达到每周1000kg,是手工铺叠的数十倍。经过30多年发展,美国自动铺带机已经发展到第五代,其中一个重要方向是多铺放头和针对特定构件的专用化铺带机(Boeing公司采用)。欧洲90年代开始研制生产自动铺带机,经过不断创新,重在实现自动铺带机的高效和多功能化,包括双头两步法(Frest-line公司采用)、多带平行铺放和超声切割复合化(M-torres公司采用)等等。

## 2 自动铺丝技术(Fiber placement)

自动铺丝技术综合了自动铺带和纤维缠绕技术的优点,铺丝头把缠绕技术中不同预浸纱独立输送和自动铺带技术的压实、切割、重送功能结合在一起,由铺丝头将数根预浸纱在压辊下集束成为一条宽度可变的预浸带(宽度变化通过程序控制预浸纱根数自动调整)后铺放在芯模表面,加热软化预浸纱并压实定型。典型的自动铺丝机系统包括7个运动轴和12~32个丝束(预浸纱或带背衬的切割预浸窄带)输送轴。

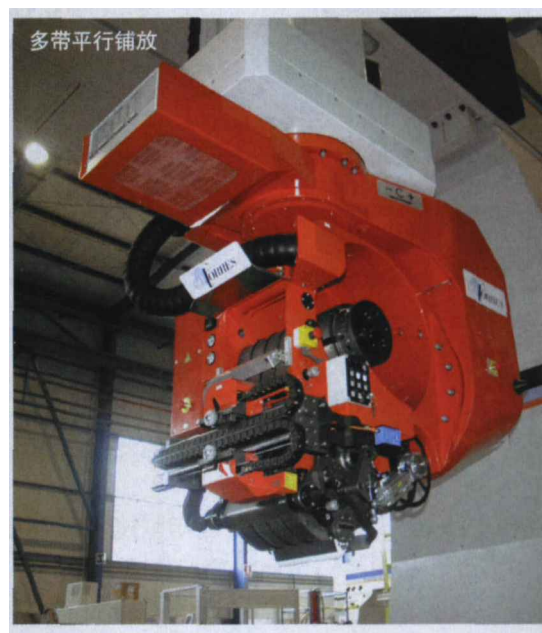
与自动铺带相比,自动铺丝技术有两个突出的优点:(1)采用多组预

浸纱,具有增减纱束根数的功能,根据构件形状自动切纱以适应边界,几乎没有废料,且不需要隔离纸,可以完成局部加厚/混杂、加筋、铺层递减和开口铺层补强等来满足多种设计要求。(2)由于各预浸纱独立输送,不受自动铺带中自然路径(Natural path)轨迹限制,铺放轨迹自由度更大,可以实现连续变角度铺放(Fiber steer技术),适合大曲率复杂构件成型。

自动铺丝技术由美国航空制造业在20世纪70年代开发,用于复合材料机身结构制造,主要针对缠绕技术的不足进行创新,其技术核心是铺放头的设计研制和相应材料体系与设计制造工艺开发。Boeing研制出“AVSD铺放头”,解决了预浸纱、切断与重送和集束压实的问题,1985年完成了第一台原理样机,法国宇航公司(Aerospatial)1996年研制出欧洲第一台六轴六丝束自动铺丝机,德国BSD公司2000年研制出七轴三丝束热塑性窄带铺丝试验机。20世纪80年代后期,专业数控加工设备制造商积极介入进一步研发自动铺丝机,Cincinnati Machine公司1989年设计出其第一台自动铺丝系统并投入使用,该系统申请注册的专利多达30余

项。其在硬件方面也不断进步:机型从原来的Viper1200、Viper3000、Viper4000升级到Viper6000,数控系统从模拟量控制的A975升级到全数字控制的CM100,开发了专用的CAD/CAM软件——ACES系统。Ingersoll公司1995年研制出其第一台自动铺丝机,该自动铺丝机采用FANUC数控系统和自行开发的CPS软件,其铺丝头结构独特、特性好,适于大型产品生产,尤其是该公司最新开发的大型立式龙门铺丝机,效率之高可以与自动铺带机相媲美,适于大面积、大曲率构件成型,为制造飞翼飞机复合材料构件提供了成型手段。美国的其他公司,包括设备制造商、飞机部件制造商和研究机构也不断开发自动铺丝技术,包括双向铺丝技术、丝束重定向控制、预浸纱整型、Fiber steer铺放、柔性压辊、热塑性自动铺丝、超声固结成型等技术。最新进展包括预浸纱气浮轴承传输、多头铺放、可换纱箱与垂直铺放、丝-带混合铺放等等。

20世纪90年代由专业软件制造商在高端CAD/CAM环境(CATIA、UG)进一步开发CAD/CAM软件(如美国Vistage的Fibersim),将自动铺放技术与其他



2008年第1期·航空制造技术 51

复合材料成型技术集成。尤其是 Dassault 公司开发的自动铺带软件, 直接与 CATIA 集成, 大大提高了效率。

### 3 自动铺放技术的发展

自动铺放技术已经成为发达国家航空复合材料构件的标准先进制造工艺: 自动铺带用于机翼和大型飞机机身壁板, 效率极高; 自动铺丝用于大曲率机身和复杂曲面成型, 如双曲翼身融合体、S 形进气道等。

复合材料自动铺带技术是装备技术、CAD/CAM 软件技术和材料

生成, 覆盖性分析与边界处理技术, 基于 Fiber steer 的结构优化, 铺层仿真技术。

(4) 铺放 CAM 技术: 干涉检验与避碰, 后置处理与铺层代码合成, 加工仿真。

(5) 预浸带 / 纱技术: 专用预浸带 / 丝制备与质量控制, 专用材料系统及其粘 - 温特性设计与控制, 预浸带 / 丝可变形性及其控制。

(6) 自动铺放工艺技术: 铺放间隙容差设计, 材料体系铺放参数及其控制, 铺放工艺规范。

(7) 铺放质量测控: 铺放间隙测控, 预浸带 / 丝质量控制。

(8) 模具技术: 模具结构设计, 模具浮动定位技术, 基于自动铺放的模具优化。

(9) 成本分析: 工艺效率优化, 自动铺放成本分析与优化。

(10) 一体化协同设计技术: 应用数字化技术实现结构设计、材料、工艺与工装模具的协同设计, 实现最优化。

装备技术是工艺技术研究的首要条件, CAD/CAM 软件技术是基础, 材料工艺技术则是

翼、水平和垂直安定面蒙皮, C-17 运输机的水平安定面蒙皮, 全球鹰 RQ-4B 大展弦比机翼, 787 机翼等。欧洲生产的复合材料结构件包括 A330 和 A340 水平安定面蒙皮, A340 尾翼蒙皮, A380 的安定面蒙皮和中央翼盒等等。

自动铺丝技术在第四代战斗机的典型应用包括 S 形进气道和中部机身翼身融合体蒙皮。波音直升机公司率先应用自动铺丝技术研制 V-22 倾转旋翼飞机的整体后机身。原有后机身由 9 块手工铺叠的壁板装配构成, 改为整体铺放后, 减少了 34% 的固定件、53% 的工时, 废品率降低了 90%。Raytheon 公司率先在商用飞机机身的研制中应用自动铺丝技术, 包括 Premier I 和霍克商务机的机身。Premier I 机身采用整体成型蜂窝夹层结构, 取消了框架和加强筋, 没有铆钉和蒙皮接点。前机身从雷达罩壁板一直延伸到后压力仓壁板 (长 8m), 包括行李舱、座舱和驾驶舱; 后机身从后压力壁板延伸到机尾 (长 5m), 采用整体复合材料结构的机身比铝合金机身减重 273kg。

自动铺丝技术在 Premier I 的成功应用为其在大型飞机上应用奠定了坚实的基础。自动铺丝技术最早在大型飞机上的应用包括 B747 及 B767 客机的发动机进气道整流罩试验件, 该整流罩试验件在制造过程中采用自动铺放与固化分立技术。自动铺放技术在 A380 飞机上的应用以自动铺带为主, 用于生产垂尾、平尾和中央翼盒等, 并开始在尾段采用自动铺丝技术。

举世瞩目的 B787 复合材料使用量达到 50%, 这在很大程度上得益于自动铺放技术: 所有翼面蒙皮均采用自动铺带技术制造, 全部机身采用自动铺丝技术整体制造, 首先分别由不同承包商分段制造, 然后在西雅图 Boeing 工厂组装。



工艺技术的综合技术集成, 包括:

(1) 自动铺放装备技术: 精密机械设计与制造, 专用开放式数控系统, 成形温度与压力在线测控, 自动铺放头, 柔性压辊。

(2) 预浸带 / 丝切割技术: 超声切割技术, 两步法铺带数控切割。

(3) 铺放 CAD 技术: 铺放轨迹

应用的关键。

### 自动铺放技术在飞机复合材料结构件制造中的应用

20 世纪 80 年代美国航空制造商大量应用自动铺带技术, 生产 B1、B2 轰炸机的大型复合材料结构, F-22 战斗机机翼, 波音 777 飞机机

## 国内自动铺放技术研究现状

目前国内高性能复合材料结构以手工铺层成型为主,尽管几家飞机公司和研究所引进的数控剪裁、激光投影辅助铺叠设备提高了下料自动化程度和铺叠精度,但是手工铺叠的环节仍不能完全消除。手工铺叠成型的复合材料不仅制造成本高、生产效率低,而且大型构件铺叠难度大,这直接影响了复合材料在武器装备中的大规模应用。

自动铺放成型技术国内研究较晚,南京航空航天大学“九五”期间开始着手调研,在学校贷款、航空支撑预研、国家科技部 863 项目资助下,完成了八丝束铺放试验系统、铺丝用精密低张力测控系统、铺丝开放式数控系统的研制和溶剂法专用预浸纱研究;开发了基于 OpenGL 的自动铺丝运动模拟设计与仿真软件和基于 CATIA 的自动铺丝 CAD/CAM 软件原型,形成了自动铺丝及装备技术储备。目前正在开展自动铺丝工程样机的研究工作,为开展自动铺丝技术应用研究奠定了基础。

2004 年起南京航空航天大学与中国一航材料院联合开发自动铺带技术,完成了小型铺带机试制、专用预浸带技术研究和基于 AutoCAD 的初级 CAD/ACM 软件开发,并着手研制中型自动铺带工程样机,为研制具有自主知识产权的自动铺带技术奠定基础。“十一五”期间,中国一航制造所、成都飞机工业公司和南京航空航天大学合作开展 6m×20m 大型工业自动铺带机研制工作,通过引进铺带头关键技术,将在“十一五”末期研制出大型工业化自动铺带机,用于新一代飞机和大型飞机的机翼及壁板类复合材料构件研制。

## 大型飞机复合材料结构件自动铺放技术的未来

现在自动铺带技术已经成为翼



采用自动铺丝技术制造的波音787机身段

面、中央翼盒及壁板类构件制造技术之首选,目前欧洲在研的 A400M 飞机采用以铺带技术为主的自动铺放技术,Ingersoll 公司研制的龙门式垂直自动铺丝机也将用于机翼制造,可望制造更加复杂的翼面结构,如翼身融合构件、飞翼飞机大型复合材料结构件等等。在机身制造技术方面,Boeing 公司全力推进自动铺丝技术并在 787 飞机上获得巨大成功,开创了整体机身制造的先河,在小型飞机支线客机上开展自动铺丝制造机身研制工作已经多方应用尝试;A350 超宽体客机复合材料用量将超过 52%,为此欧洲已经启动复合材料机身技术专项研究,A350 最终用有机身技术还是用自动铺丝整体制造技术或者更先进的设计制造技术还有待时间的证实,但采用自动铺丝技术整体制造复合材料机身,无论从机身整体性能还是从材料制造技术层面来看均具有突出的优势,可能成为复合材料机身技术的一种标准。

我国大飞机工程已经立项,并明确分为大型客机和大型运输机,复合材料规划用量初期要达到 15%,后期将随着材料与设计制造技术的成

熟逐步扩大,最终的上限可能接近甚至超过现有 787 飞机的复合材料用量水平,自动铺放技术作为关键技术之一应予以高度重视。自动铺带技术研究应用条件正在逐渐成熟,哈尔滨飞机工业公司已经引进西班牙 M-torres 自动铺带机,中国一航制造所等单位联合研制的自动铺带机将在近年试制成功。

对于现阶段复合材料用量 15% 的目标,翼面壁板类构件将成为主导,目前的首要工作是积极开展材料与工艺制造技术和 CAD/CAM 软件技术研究。对于 20 年研制周期的大型飞机计划,进一步提高飞机性能加大复合材料用量势在必行,复合材料机身技术将成为后期的关键技术。因此,采用自动铺丝整体制造技术研究应当及早启动,从试验件、小型飞机机身逐步发展到大型飞机机身。面对自动铺丝机进口管制瓶颈,应当加大自动铺丝技术自主研发的力度,开展自动铺丝 CAD/CAM 软件以及预浸纱材料和自动铺丝工艺技术的研究,形成丰厚的技术储备,为大型飞机复合材料机身技术奠定基础。

(责编 立十)