

# 纤维缠绕/铺带/铺丝成型设备的发展状况

Development of the Filament Winding/Tape Layer/Fiber Placement Machine

哈尔滨工业大学 富宏亚 韩振宇 路 华



富宏亚

哈尔滨工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机械制造自动化方面的教学与研究。主持和参加完成各类科研项目 30 余项,发表学术论文 50 余篇,获国家发明专利 5 项,软件著作权 3 项。在纤维缠绕/铺放成型技术、机床数控技术等方面取得多项科研成果。

目前,飞机复材构件的自动化成型工艺主要包括纤维缠绕、纤维带铺放和纤维丝铺放 3 种类型。其中,纤维缠绕技术是最早开发并广泛使用的加工技术,亦是最成熟的生产技术。所谓纤维缠绕成型工艺,就是将浸过树脂的连续纤维,按照一定规

在大飞机上大量应用复合材料是我国航空业实现跨越式发展的迫切需求,面对铺放设备的进口管制瓶颈,应当加大对具有自主知识产权的铺放设备研制的支持力度,同时开展自动铺放 CAD/CAM 软件和铺放工艺技术的研究,为复合材料在大型飞机上的大规模应用奠定基础。

律缠绕到芯模上并层叠至所需的厚度,然后在加热或常温条件下固化、脱模,获得一定形状制品的工艺方法。

自动铺带技术采用有隔离衬纸的单向预浸带,在铺带头中完成预定形状的切割、定位,加热后按照一定设计方向在压辊作用下,直接铺叠到曲率半径较大且变化较缓的模具表面。铺带机多采用龙门式结构,其核心部件是铺带头,须完成超声切割、夹紧、衬纸剥离和张力控制等功能。

铺丝技术综合了自动铺带和纤维缠绕技术的优点,由铺丝头将数根预浸纱在压辊下集束成为一条由多根预浸纱组成的宽度可变的预浸带后铺放在芯模表面,经过加热软化后压实定型。铺丝技术适用于曲率半径较小的曲面产品表面制备,铺设时没有皱褶,无须作剪裁或其他处理。

铺丝可以代替铺带,相对于铺带,它的成本较高、效率也低一些,但复杂的曲面表面必须用铺丝工艺完成。

在航空制造业,纤维缠绕技术主要用于雷达罩、发动机机匣、燃料储箱、飞机副油箱和过滤器等零部件的成型,现代大型喷气客机(如波音 747 等)上众多的高压气瓶都是用玻璃纤维复合材料缠绕成型的,它们为飞机提供了不可缺少的气动控制动力源。

纤维带铺放技术制造的飞机复材构件典型的有飞机机翼蒙皮、垂/平尾蒙皮、翼肋、方向舵和升降舵等。F-22 战斗机机翼和波音 777 飞机机翼、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、A330 和 A340 水平安定面蒙皮、A340 尾翼蒙皮以及 A380 的安定面

蒙皮和中央翼盒等,均采用铺带工艺成型。

铺丝技术的典型应用包括S形进气道、中机身翼身融合体蒙皮直至带窗口的曲面等。首先应用自动铺放技术的是波音直升机公司,它研制了V-22倾转旋翼飞机的整体后机身。在第4代战斗机的典型应用包括S形进气道和机身,F35的中机身翼身融合体蒙皮。在商用飞机方面有Premier I和霍克商务机的机身部件、大型客机波音747及波音767客机的发动机进气道整流罩试验件和波音787机身则全部采用复合材料自动铺丝技术分段整体制造等,自动铺放技术的应用大大简化了制造工艺,带来了航空制造技术的变革。

### 纤维缠绕成型设备的发展现状

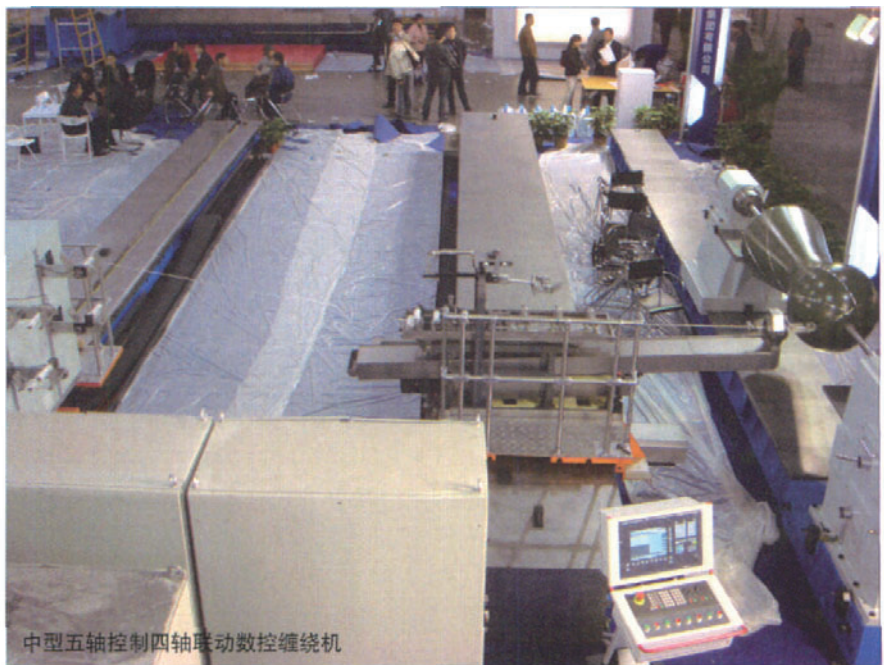
20世纪40年代中期,国际上正式提出了纤维缠绕技术的概念。60年代初期,出现第一代机械式纤维缠绕机,其控制系统是由皮带、齿轮、滑轮和链条等组成的机械系统。1973年Entec公司开发了第一台微处理器控制的纤维缠绕机。1976年第一个商业化标准的缠绕机型号McClellan Anderson 60型投放市场<sup>[1]</sup>。80~90年代,更多的计算机技术投入到缠绕机的开发当中,新一代微机控制纤维缠绕机开始研制。英国的Pultrex有限公司采用通用数控系统成功开发了四轴联动纤维数控缠绕机。当时,每台缠绕机的硬件部分都必须包括计算机和运动控制卡,机床的速度控制得到了极大改善,计算机控制系统能够更精确地跟踪机床的位置和速度并对其进行实时控制。与此同时,很多公司开始探索用计算机设计缠绕模式,即纤维缠绕CAD技术开始出现。用计算机辅助设计缠绕模式,大大简化了缠绕模式的设计,从而减少了产品的开发和工艺设计周期。同时,为了提高生产效率,

人产设计开发了多转轴缠绕机,即1台缠绕机同时缠绕多个部件或1台缠绕机上装有多出纱装置同时缠绕一个部件。

进入21世纪,缠绕机的功能更加完善,各种类型的缠绕机广泛应用于航空航天、军工和民用工业等领域。纤维缠绕设备的开发速度明显加快,同时提高劳动生产率已被置于首要地位,多主轴、多运动轴联动缠绕机逐渐成为标准。为了解决异型件的缠绕成型,研制出了计算机控制的六轴联动纤维缠绕机,解决了基本异型件的缠绕成型问题,结束了用手糊、半手糊方式生产常用管道配件——弯管和三通管的历史。更多运动轴缠绕机的引入使得缠绕形状更为复杂的产品成为可能,目前国际上已有七轴甚至多达十一轴的计算

McClellan Anderson公司和德国的BSD公司等。

除硬件外,目前国外的纤维缠绕CAD/CAM软件也已经发展到很高的水平。CAD/CAM软件不仅具有完善的回转体纤维缠绕轨迹设计功能,还具有异型件纤维缠绕轨迹设计功能。对于各种常见异型件,已经开发出完善的CAD/CAM软件进行芯模设计、线型规划以及后置处理,可以根据具体的数控系统生成相应的控制代码。如比利时MATERIAL公司的CADWIND<sup>[2]</sup>和英国Crescent Consultants Ltd的CADFIL,其中CADWIND历时12年研制成功,该CAD/CAM系统受到用户的广泛欢迎,经多年实践,开发了多个版本,其最高版本价格约为4万欧元。



机控制纤维缠绕机。但由于高性能和大型的缠绕机可用于航空航天等军工部门,国外对我国一直限制出口。对于中小型缠绕机虽然通过一些渠道可以出口,但价格昂贵,如可缠绕 $\phi 1.6\text{m}$ 、长度6m压力容器的四轴联动卧式数控缠绕机价格要在40万欧元以上。国外知名的缠绕机制造商主要有美国的ENTECC公司、

我国对纤维缠绕工艺的研究开始于1958年,其出发点是为“两弹一星”国防建设服务。60年代初我国开始了纤维缠绕技术的研究。随着微机和自动化技术的发展,目前国内大部分纤维缠绕设备实现了微机控制,中低档的两轴、三轴微机控制纤维缠绕机制造技术和缠绕工艺已经基本成熟,并在管道、储罐以及各

种压力容器的缠绕成型方面发挥了重要作用。但在中高档缠绕成型技术领域由于受到进口限制,发展水平相对落后。哈尔滨工业大学从80年代开始从事纤维缠绕技术方向的研究,具体研究工作是结合用于制备火箭发动机、卫星和导弹上复合材料缠绕构件的高性能数控缠绕机的研制进行的。所研制的数控环形气瓶缠绕机、卧式数控缠绕机和车载气瓶立式数控缠绕机等设备已在多家企业和科研单位获得应用。为航天系统某单位研制的中型卧式五坐标控制四坐标联动数控缠绕机的最大缠绕直径可达1.65m,最大缠绕长度达8m已经用于多种型号的研制生产。2000年,哈尔滨工业大学成功研制出了六轴微机控制缠绕机<sup>[3]</sup>,并对叶片、弯管和三通等非回转体异型工件的缠绕成型进行了研究。研究成果标志着我国在纤维缠绕工艺、控制软件和硬件等方面取得了巨大的进步。

缠绕理论方面1965年我国完全掌握了缠绕规律和缠绕速比计算方法,实现了螺旋缠绕排线机械化。1971年起开始研究异型件缠绕,提出了异型件截面的“相当圆假设”原理,解决了异型件截面纤维缠绕的近似计算问题。1987年提出了网格结构纤维缠绕计算原理,这项新技术的实现,不仅解决了某卫星的关键技术,而且标志着我国纤维缠绕技术进入了一个新的发展阶段。1996~1998年,一类新的非测地线——拟测地线路径算法被提出,它主要用于回转体的纤维缠绕稳定轨迹设计。哈尔滨工业大学结合缠绕设备的研制,所开发的缠绕软件Windsoft也日趋完善,通过不断改进,现在已经推出了第3个版本,逐渐成为一套比较成熟的纤维缠绕CAD/CAM软件。

### 自动铺带机的发展状况

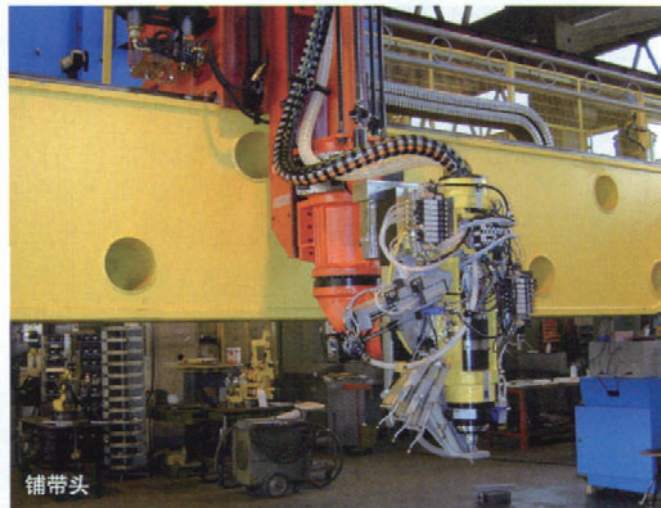
受采用复合材料生产F16战斗机的机翼部件应用的牵引,美国

Vought公司在20世纪60年代开发了世界上第一台自动铺带机。后来这一技术逐渐在其他种类飞机(如运输机、轰炸机和商用飞机机翼等)部件上获得应用。为此,生产铺带机的专业设备制造商投入了大量的人力物力研制相关的技术。铺带机属于技术含量比较高的专用设备,世界上只有为数不多的几家公司掌握核心技术。目前,铺带机功能日趋完善,自动铺带工艺也越来越成熟。自动铺带机的主体结构与桥架式龙门数控机床相类似,一般有约10个运动控制轴,其中有4~6个集中在核心部件铺带头上,铺带头的主要构成包括预浸带装夹系统、衬纸回收系统、缺陷检测系统、预浸带输送导向系统、预浸带超声切割系统、预浸带加热系统和柔性压实系统等。铺带机能进行 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$ 方向标准角度和铺放,铺带宽度最大可达300mm、生产效率可达1000kg/周,是手工铺叠的数十倍<sup>[4]</sup>。目前,能制造自动铺带机的专业厂商主要有美国Cincinnati Machine公司、CityMachine Tool&Die公司、ITW Workholding公司、Ingersoll公司和欧洲的M. Torres公司、FOREST-LINE和BSD公司等。它们所生产的设备价格昂贵,一般中等规格的一台铺带机也要500万欧元以上。

目前世界领先的复合材料专用设计/制造软件有CATIA CPD (CATIA Composite Design) 模块和VISTAGY公司开发的FiberSIM软件。前者与CATIA系统完全集成,后者亦能完全集成到CATIA、Pro/E、UG等CAD软件中。复合材料专用设计/制造软件可提供高效的复合材料数字化设计/制造工具,进行复合材料构件的结构设计、铺层

设计、铺层展开和制造数据准备等工作。

我国开始研究纤维铺放技术领域是近几年的事情,2004年南京航



空航天大学与中国一航材料研究院联合研发了一台小型铺带机,并进行了基于AutoCAD的初级CAD/CAM软件的开发<sup>[5]</sup>。目前已着手研制中型自动铺带工程样机。北京航空制造工程研究所在引进铺带头关键技术的基础上研制了一台中型铺带机,在自主研发方面迈出了可喜的一步。国内某飞机制造公司2008年引进了一台西班牙M. Torres公司生产的铺带机,并进行了一些机翼整体壁板铺放工艺流程方面的试验。成飞等几家单位也有引进国外先进铺放设备的意愿。

### 自动铺丝机的发展状况

最早开始研制纤维铺放技术的有Boeing公司、Cincinnati Milacron公司和Hercules公司等,20世纪80年代开始设备设计、工艺与材料研制等诸项工作。20世纪80年代初,Boeing公司的机械工程师Quentin Wood提出了“AVSD铺放头”(Automated Variable Strained Dispensing Head)设想,解决了纤维束压实、切断和重送的问题,1985年Hercules公司研

制出了第一台原理样机。1989年 Cincinnati Milacron 公司设计出其第一台纤维铺放系统并于1990年投入使用。1995年 Ingersoll 公司也研制出其第一台铺放机。随着自动铺放技术的不断发展,控制系统从模拟控制升级到全数字控制。20世纪90年代还开发了专用的CAD/CAM软件与硬件配套,使其功能日臻完善。设备制造商和飞机部件制造商也不断开发出自动铺放新技术,包括双向铺放头技术、丝束重定向控制技术、张力控制技术、预浸丝束整形技术、Fiber Steer 技术、柔性压辊技术、热塑性自动铺放技术、超声固接成型技术和CAD/CAM软件技术等<sup>[6]</sup>。目前铺丝机的单丝剪切、夹

面,堪萨斯大学开发了复合材料分析与设计系统(Steered Composite Analysis and Design System, SCADS),该系统集复合材料结构设计和分析于一体,将手工铺放和自动铺放有机结合,可根据复合材料零件实际工况优化纤维铺放路径<sup>[7]</sup>。SCADS的开发侧重于2个方面,一方面侧重于轨迹规划,并在被铺放曲面上仿真纤维路径;另一方面是纤维路径与现有的复合材料分析软件的整合。SCADS系统中的纤维铺放分析环境(FPA)具有在丝束级别上分析纤维性能的能力,包括纤维方向和曲面曲率分析,丝束缝隙和重叠的分析,以及对有限元网格节点的自动几何解析。

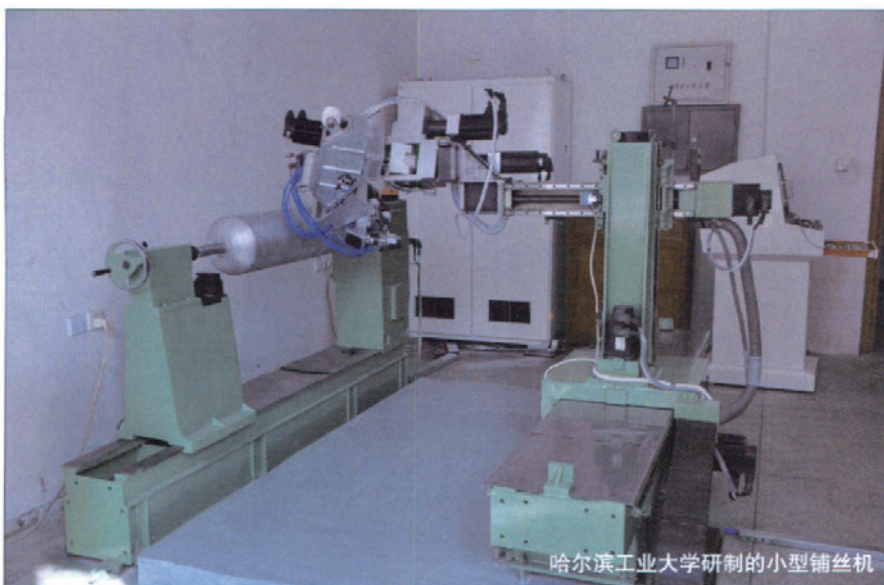
算机仿真。从原理上设计了一台纤维铺放机,能够实现四路丝束铺放,每路丝束可单独控制丝束切断或丝束重新输送。哈尔滨工业大学开发了纤维铺放轨迹规划设计与仿真软件,深入研究了基于机械手臂末端运动轨迹和基于机械手臂末端施压方向的2种机床后置处理算法,提出了新的铺放轨迹规划方法和优化方法,实现了铺放软件的前期规划、设计工作<sup>[8]</sup>。完成了七自由度四丝束纤维铺丝机的设计及调试工作,并进行了铺放试验。在铺放过程中,设备及数控系统工作稳定、可靠,运动位置准确,具有工程实用价值。

### 结束语

我国大飞机工程已经启动,复合材料规划用量初期要达到15%~25%,后期随着材料与设计制造技术的成熟将逐步扩大,最终的上限可能接近甚至超过现有波音787飞机的复合材料用量水平。在实现这一目标的过程中,复合材料成型设备及工艺很有可能会是一个技术瓶颈,成为制约大飞机研制的关键一环,应予以高度重视。目前,国家已经把大型自动铺丝机和铺带机列入了数控重大专项重点研制设备,而数控重大专项属于国家中长期规划的十六个重大专项之一。可见,复合材料自动化成型设备的研制已引起有关方面的高度重视。在大飞机上大量应用复合材料是我国航空业实现跨越式发展的迫切需求,面对铺放设备的进口管制瓶颈,应当加大对具有自主知识产权的铺放设备研制的支持力度,同时开展自动铺放CAD/CAM软件和铺放工艺技术的研究,为复合材料在大飞机上的大规模应用奠定基础。

本文有参考文献8篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 玉龙)



哈尔滨工业大学研制的小型铺丝机

紧和重送等动作均可在计算机协调控制下完成,所使用的纤维束主要是由12K预浸长纤维组成,标准宽度有3.2mm、6.4mm、12.7mm三种。铺丝宽度调节靠裁剪纤维束的根数完成,由32根纤维丝集束组成的丝束宽度可达300mm。铺丝张力约为1~3N,铺放精度可达到0.005mm。目前国际上主要的铺丝机生产商有美国Cincinnati machine、Ingersoll公司,欧洲的Automated Dyna Micro、M. Torres等。

在铺丝成型结构设计和分析方

国内对纤维铺丝技术的研究开展时间不长,起步基点较低,还没有定型产品设备在生产中得到应用。南京航空航天大学在总装“航空支撑项目”和国家“863项目”资助下,完成了国内第一台八丝束纤维铺放原理样机,开发了基于CATIA的自动铺放的CAD/CAM软件原型,进行了纤维铺放及装备的初步技术储备。武汉理工大学与北京航天工艺研究所和西安复合材料研究所等单位合作开展自动铺放研究,对圆锥体进行了铺放机理的研究并进行了计