

复合材料自动成型工艺进展 及在航空中的应用

Development and Aviation Application of Automated Processes for Composite

西北工业大学机电学院 史耀耀 阎龙 莫蓉



史耀耀

西北工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机电控制及自动化、专用数控工艺装备、高速高效数控加工、加工表面光整技术等方面的研究工作。主持和参加各类科研项目 20 余项,发表学术论文 30 余篇,获国家发明专利三项,获国家、省部级奖励 5 项,入选“2006 年度中国高等学校十大科技进展”。

近 30 年来,由于大批新型飞机的出现,复合材料在飞机结构件中的应用得到了显著提高。尽管复合材料成本居高不下,仍无法阻碍其在航空领域的广泛应用^[1]。

飞机一旦设计定型,机身所选材

本文就复合材料飞机结构件的自动成型工艺进行了综述,重点介绍了纤维铺放成型、带材铺叠成型的特点与发展。复合材料自动成型工艺在航空领域的广泛应用,必将大幅降低飞机结构件的制造成本,极大地促进航空工业的发展。

料的不同(金属/复合材料)将直接决定飞机的性能及其制造成本。目前,减重增效已不再是使用复合材料制造飞机结构件的唯一目标,如何降低生产成本使其更具价格优势逐渐受到人们的重视^[1-2]。

加工工艺自动化已在金属制造业中广泛使用,大多数飞机制造商在金属部件的加工中采用了最新的制造技术。然而,复合材料制造业中可用成型工艺较少,且与之配套的设备非常昂贵。成型工艺的局限性与设备投资的高成本,严重阻碍了航空复合材料产业的发展。

尽管复合材料自动成型工艺有限,但其中几种工艺却在航空领域发挥了巨大作用。这些工艺在一定程度上提高了制品的生产效率,并降低了航空级复合材料的高成本。自动成型工艺在降低复合材料结构件制

造成本方面的作用如下^[3]。

(1) 加工制造工时的减少: 自动成型工艺过程将显著地减少复合材料部件的加工工时。

(2) 材料利用率的提高: 一般地,自动成型工艺过程的材料利用率为 90%~97%,相比较而言,手工成型过程的材料利用率仅有 60%~80%。材料利用率的提高是自动成型工艺降低复合材料结构件制造成本的主要因素之一。

(3) 工艺过程人工干预程度的降低: 由于预浸料的铺放通过计算机进行控制,因此无需专门的质检员对铺层质量及铺层方向进行检验。

(4) 制品的高质量和工艺过程的可重复性: 自动成型工艺过程的实施可提高制品质量并保证工艺过程的可重复。这是降低复合材料结构件制造成本的又一重要因素。

本文就复合材料飞机结构件的自动成型工艺进行了综述,重点介绍了纤维铺放成型、带材铺叠成型的特点与发展。复合材料自动成型工艺在航空领域的广泛应用,必将大幅降低飞机结构件的制造成本,极大地促进航空工业的发展。

复合材料自动成型工艺

带材铺叠(Automated Tape Layers, ATP)、纤维铺放(Fiber Placement, FP)与树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)成型是加工制造飞机复合材料结构件的主要工艺方法,其中又以带材铺叠成型和纤维铺放成型最为常用^[2-3]。

带材铺叠设备与纤维铺放设备不同于传统的工业机器人,这种以机床为基础的工艺过程能显著降低复合材料部件的加工制造成本,对大型结构件或型面复杂结构件成型效果更佳。

目前,世界上约有60台带材铺叠设备和35台纤维铺放设备投入飞机制造业,广泛地用于航空级碳纤维复合材料部件的加工制造^[2]。表1给出了通过带材铺叠或纤维铺放成型的典型飞机结构件^[3]。

带材铺叠设备和纤维铺放设备是用于复合材料加工的“机床”,其在复合材料制造业中的作用类似于金属制造业中的加工中心。铺叠/铺放工艺过程可概括为“逆向机加过程”,即该过程是一个材料堆积过程而非材料去除过程^[4]。

碳纤维预浸树脂复合材料具有黏性^[5],铺叠/铺放设备以一定的压力将其铺在芯模表面,不断使新铺层“粘附”在之前的铺层上。

本质上讲,铺叠/铺放设备是具有可编程运动轴、齿轮齿条机构、直线电机轴驱动器以及铺放头的数控机床^[2,4]。通过编程,铺叠/铺放设备严格按照芯模轮廓形状将预浸料铺到芯模表面。由于数控机床的发展

表1 通过带材铺叠或纤维铺放成型的飞机结构件

| | |
|---------|----------|
| 操纵面 | 襟翼 |
| | 副翼 |
| | 扰流板 |
| 机舱结构件 | 风扇整流罩舱门 |
| | 反推力装置整流罩 |
| | 进气罩 |
| 主翼结构件 | 翼梁 |
| | 蒙皮 |
| | 翼肋 |
| | 桁梁 |
| | 固定机翼后缘 |
| 垂直/水平尾翼 | 蒙皮 |
| | 翼梁 |
| | 翼肋 |
| | 桁梁 |
| 机身结构件 | 蒙皮 |
| | 翼肋 |
| 飞机尾椎 | |

已相当成熟,因此铺放头结构及控制技术就成为实现复合材料自动成型的关键。

纤维铺放成型

1 纤维铺放的特点

纤维铺放的概念最早出现于20世纪70年代末,该工艺过程与纤维缠绕(Filament Winding, FW)非常接近^[3]。纤维铺放工艺的提出旨在克服纤维缠绕在应用过程中的局限。纤维缠绕是实现复合材料自动成型的最初工艺形式,通常用于圆柱状部件(如火箭发动机壳体)和近圆柱飞机结构件的成型,然而大量非圆柱结构件却无法通过该工艺进行加工制造。

结构上,纤维铺放设备与纤维缠绕设备非常类似,由固定工作台(主轴箱+尾架)和铺放小车(沿平行于固定工作台的X轴床身运动)共同组成(见图1)^[4]。

与纤维缠绕不同,纤维铺放头与

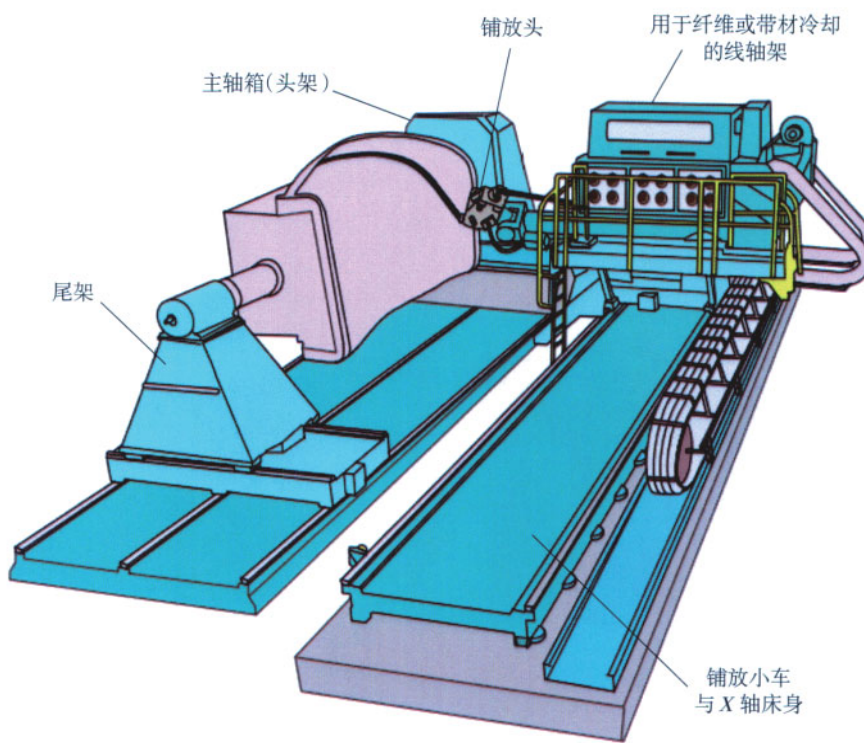


图1 典型纤维铺放设备结构示意图

芯模直接接触,并以小张力和一定压力将预浸料铺到其表面^[6]。纤维铺放头将数根预浸纤维或预浸带(带宽为0.125英寸(0.3175cm))集为一定宽度的纤维带后铺在芯模表面。铺放过程中,铺放头可停止、切断并调用其中任何一根预浸纤维(单丝束控制)。形成纤维带的丝束数通常为12、24和32,通过将变丝束纤维带铺贴并压实,可实现复杂结构件的铺放成型^[2-3]。

铺放过程中,每根纤维以其各自的速度运动使曲率铺放得以实现。如前所述,铺放机具有“单丝束控制”能力,因此可严格按照复杂型体的表面进行纤维铺放^[4,6]。通过增减外侧丝束,还可实现铺放工艺过程中纤维带宽度的改变。

此外,铺放机的“单丝束控制”能力使其能够实现锥形体表面(如飞机尾椎)的等厚度铺放。由于沿椎体的大端向小端铺放纤维带,通过去掉外侧丝束可减少纤维带宽度,进而消除铺层重叠及厚度堆积,最终实现铺层的等厚度。

2 纤维铺放成型的发展

位于美国西部的 Hercules 宇航公司(现在的 ATK 公司)对纤维铺放的研究始于20世纪80年代^[2,7]。该公司在纤维铺放工艺发展的最初阶段做了大量工作,在一台6轴纤维缠

绕设备的基础上,研制出其第一代纤维铺放设备。

1989年, Hercules 公司通过总结纤维铺放设备研制过程中的经验,开发出第二代纤维铺放设备,该设备第一次真正意义上实现了铺放工艺具备的所有优势^[2]。以此为基础, Hercules/ATK 公司不断进行纤维铺放设备的研制,并将其投入该公司内部使用。

Cincinnati 公司也积极参与铺放设备的研制开发。20世纪80年代,该公司将研发重点放在纤维铺放头的设计上,继而成为第一家能提供商用纤维铺放设备的机床公司^[8]。1990年前后, Cincinnati 公司开始销售其商用纤维铺放设备,目前该公司已成为世界上最大的纤维铺放设备供应商。

作为实现飞机复合材料结构件自动成型的成熟工艺,纤维铺放成型正广泛应用于飞机制造业,新一代波音787客机的绝大部分部件均采用该工艺进行加工制造^[2,5]。纤维铺放工艺已成为世界上主要飞机制造商的共同选择。

带材铺叠成型

1 带材铺叠成型的发展

20世纪60年代初,单向带材的引入为大型结构件的铺叠成型奠定了基础。70年代末,世界上第一台商用带材铺叠设备诞生了。到80年代前后,带材铺叠工艺主要用于军用飞机的制造,而商用飞机主要结构件的加工成型还无法采用该工艺^[7-8]。此后,由于缺乏适当的应用场合,带材铺叠工艺的使用大大减少了。

20世纪90年代末以来,带材铺叠工艺重新得到飞机制造商的青睐,

且带材铺叠设备的销量呈现出极佳态势。商用飞机复合材料结构件的大量使用,使带材铺叠工艺再次兴起,同时为带材铺叠设备的应用提供了广阔的市场。

带材铺叠工艺的材料利用率高,这一特点已得到广大飞机制造商的认可,并在飞机结构件的加工过程中得以充分利用。与前几代设备相比,新的带材铺叠设备不仅在工艺实现上更加灵活,其性能也有显著地提高。

2 带材铺叠成型技术

世界上绝大多数带材铺叠设备都采用开敞式龙门结构,包括高架X轴导轨,通过直线电机与齿轮齿条机构驱动沿X轴运动的横臂(Y轴)以及垂直固定在横臂上的Z轴^[2-3](见图2)。因此,带材铺叠设备是具有龙门结构运动与铺放头运动的多轴机床。

用于铺叠的芯模置于龙门架下(位于开敞空间的一侧)并固定在地面上,铺叠设备经初始化后与芯模表面接触,以一定压力将预浸带铺到芯模表面^[3]。通过编程可实现带材形状及尺寸的精确控制。此外,相邻带材间距离应控制在一定范围内,且不允许出现带材重叠。

带材铺叠设备有2种基本配置,一种用于如机翼蒙皮的曲面铺叠(Contour Tape Layer, CTL),另一种用于平面铺叠(Flat Tape Layer, FTL)^[3,8]。尽管2种铺叠设备在结构上基本相同,但由于前者既能实现曲面铺叠又能实现平面铺叠,因此更加灵活,应用场合也更广。目前,世界上大多数带材铺叠工艺均通过曲面铺叠设备实现。

与纤维铺放工艺一样,铺放头是实现带材铺叠工艺的关键。用于铺叠的单向预浸带宽度通常为3英寸、6英寸或12英寸(7.62cm、15.24cm或30.48cm)。带材铺叠技术有3种,分别为^[3]单相(single-phase)铺叠技术、双相(two-phase)铺叠技术、单

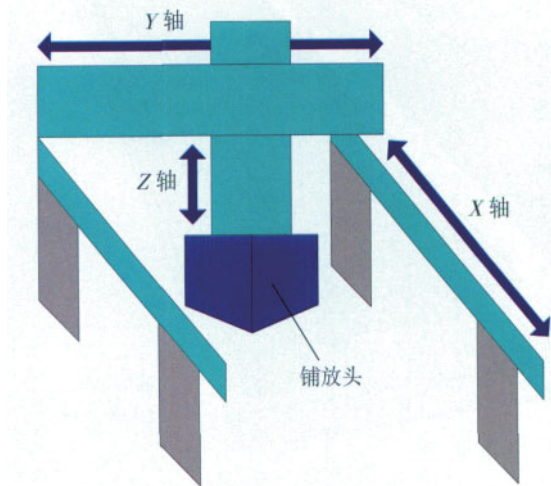


图2 典型带材铺叠设备结构示意图

双相复合 (dual-phase) 铺叠技术。

单相铺叠成型可视为铺叠工艺的标准,世界上绝大多数带材铺叠设备均采用该工艺技术。单相铺叠过程中,预浸带装入铺放头,并依次通过送带辊、导带槽和切带机构,其中切割机构仅切断带材而不损伤背衬纸。预浸带经裁切后形成需要的形状和尺寸,铺放头以一定压力将裁切后的预浸带铺到芯模表面,而背衬纸则通过收卷盘回收。单相铺叠过程中的预浸带切割需要设备在减速或停止状态下进行,然而整个铺叠过程是在一台设备上实现的。

对双相铺叠成型,离线切割机构将带材裁切成满足工艺要求的形状和尺寸,同时移除废料^[3](如图3所示)。切带完成后,先将预浸带上下表面贴上衬纸,随后绕上带盘。带盘上贴有条形码,标识预浸带的相关信息^[2-3]:材料缺陷、材料制作过程、该卷预浸带在铺叠成型过程中的使用顺序。经裁切和贴纸处理后的预浸带装入铺放头。由于离线切割机已将预浸带裁切成需要的形状和尺寸,因此双相铺叠设备的铺放头无切带功能。铺叠成型时,2类动作将导致工艺过程的中断,即带材的切割和废料的移除。然而,离线切割使双相铺叠成型避免了上述2类动作的出现,设备无需停机或减速来进行切割带材和移除废料,因而整个铺叠过程是在高速状态下完成的。与单相铺叠

成型相比,双相铺叠效率更高。

简单地说,单双复合铺叠就是上述2种铺叠成型技术的结合。顾名思义,单双复合铺叠铺放头的一侧为单相铺叠结构,另一侧为双相铺叠结构,而整个铺放头机构固联于Z轴。单双复合铺叠成型是目前最灵活、最高效的自动铺叠工艺形式。

目前,单双复合铺叠设备已用于波音787客机机翼结构件的制造。带材铺叠工艺在飞机制造业的广泛应用将大大增加航空制造商对铺叠设备的需求,进而为铺叠工艺提供广阔的发展前景。

此外,由于大型运输机尾翼等结构件必须通过带材铺叠工艺实现成型制造,使得通过该工艺加工的大型复合材料结构件多于其他成型方式,这也在一定程度上促进了带材铺叠工艺的发展。

复合材料自动成型的发展趋势

近年来,航空制造商将越来越多的飞机部件转包给零件供应商^[4,6]。伴随这一趋势,各中、小供应商对低成本复合材料自动成型设备的需求越来越大。机床公司会将更多的精力投入该领域,为用户提供低成本、小型化的纤维铺放设备以及带材铺叠设备。这样,大多数中小供应商就可购买复合材料自动成型设备用于飞机结构件的加工制造,进而推动航

空制造业的发展。

复合材料自动成型设备正在不断推陈出新。Forest-Line公司制造的小型带材铺叠设备完全具备其大型设备的全部功能,该单相铺叠设备的有效工作范围为16英尺(40.64cm)(长)×7英尺(17.78cm)(宽)^[2]。Forest-Line公司还计划研制同时具有带材铺叠和纤维铺放功能的龙门式机床,该机床的龙门架包括2个Z轴,其中一个与带材铺叠结构联结,另一个与纤维铺放结构联结。从结构上看,龙门式机床的床身很长,一端是纤维铺放用的固定工作台(主轴箱+尾架),另一端是用于带材铺叠的开敞空间^[3]。

纤维铺放和带材铺叠两类复合材料层压成型技术,可集成在各种结构和尺寸的机床上^[8]。随着复合材料在飞机制造业的广泛应用,越来越多的机床公司将涉足复合材料成型领域,并开发出各种基于纤维铺放和带材铺叠技术的大型自动成型设备。

参考文献

- [1] 阎龙,史耀耀,段继豪.先进树脂基复合材料制造技术综述.航空制造技术,2011(3):55-58.
- [2] 陈祥宝.先进复合材料低成本技术.北京:化学工业出版社,2004.
- [3] Grant C. Automated processes for composite aircraft structure. Industrial Robot, 2006, 33(2): 117-121.
- [4] Shirinzadeh B, Foong C W, Tan B H. Robotic fiber placement process planning and control. Assembly Automation, 2000, 20(4): 313-320.
- [5] 黄发荣,周燕.先进树脂基复合材料.北京:化学工业出版社,2008.
- [6] Sonmez F O, Akbulut M. Process optimization of tape placement for thermoplastic composites. Composites A, 2007, 38(9): 2013-2023.
- [7] 黄家康,岳红军,董永祺.复合材料成型技术.北京:化学工业出版社,1999.
- [8] Groppe D. Robots improve the quality and cost effectiveness of composite structures. Industrial Robot, 2000, 27(2): 96-102.

(责编 良辰)

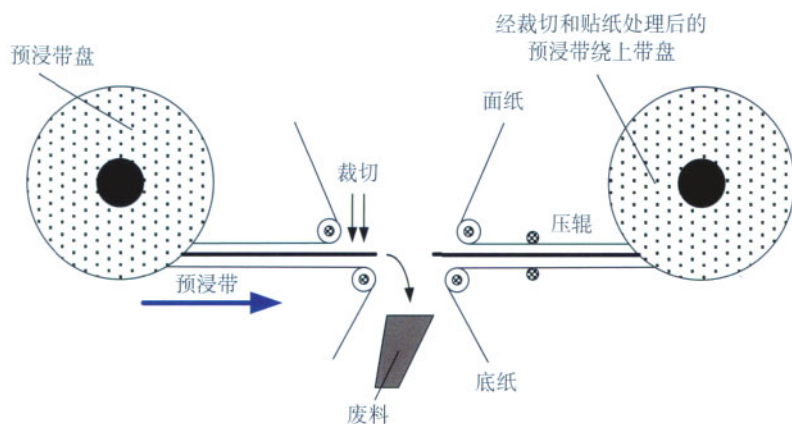


图3 双相铺叠成型的离线切割过程示意图