

# 航空先进复合材料铺放及缝合设备的发展及应用

## Development and Application of Placement and Stitching Equipments of Aeronautical Advanced Composites

西北工业大学陕西省数字化制造工程技术研究中心 王永军 何俊杰 元振毅  
中航飞机股份有限公司西安飞机分公司 王浩军 杨绍昌 苏霞



王永军

副教授、博士,研究方向为金属塑性成形、复合材料成型、计算机集成制造、成形设备数控技术。曾主持和参加研究课题 20 余项,发表论文 30 余篇,获得发明专利 5 项,获省部级二等奖 1 项,三等奖 1 项,获省级教学成果一等奖 1 项。

在航空领域,复合材料的应用从最初的次承力结构大幅扩展到机翼、机身等主承力结构,其用量和减重效果已成为衡量飞机先进性的重要标志,因此,先进复合材料制造技术

采用先进的自动化铺放设备进行飞机复合材料构件的制备,并采用自动缝合方法提高其损伤容限,是现代飞机复合材料制造技术发展的重要方向。因此,我国企业急需通过引进和研制先进的自动化铺带、铺丝设备以及热隔膜成型、缝合设备,大幅提高我国复合材料自动化制造设备水平,为军民飞机的型号研制打下坚实的基础。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.14.040

成为世界强国竞相发展的核心技术。国外先进复合材料在大型飞机结构上的用量已经达到甚至超过 50%,如波音 787 复合材料用量为 50%,其机身和机翼主要结构几乎全部由复合材料制成; A350 复合材料用量从最初的 37% 提高到 52%,主要用在机翼、机身、垂尾、平尾等结构中<sup>[1]</sup>。随着复合材料的大量应用,大型整体构件数量和尺寸的不断增长,各种先进复合材料制造设备迅速发展,并在航空制造业得到了广泛的应用。

本文重点介绍几种近年来发展较快的复合材料制造设备及应用情况。

### 自动铺放设备及应用

为保证复合材料整体构件的质量稳定性和提高制造效率,用于自动化铺放的自动铺带机与丝束铺放机得到快速发展,成为先进大型飞机制造的关键设备。

#### 1 自动铺带设备及应用

伴随着 20 世纪 60 年代由单向带形式开发的先进复合材料的出现,复材构件的传统生产方法主要为手工铺放,它具有成本高、效率低、报废率高和可重复性差的缺点。

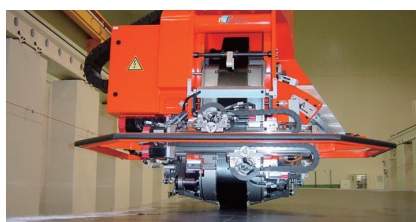
20 世纪 60 年代中期,针对小曲率的大型复合材料构件,美国率先在

先进复合材料制造领域开发并应用自动铺带设备,相对于手工铺放无论在生产效率还是产品质量上都有较大提高。

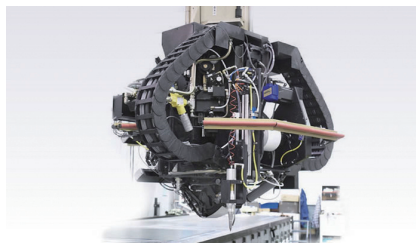
80年代以后,自动铺带开始广泛应用于飞机的制造领域,如:F-22战斗机(机翼)、波音777民用飞机(全复合材料尾翼、水平和垂直安定面蒙皮)和军用C-17运输机(水平安定面蒙皮)、V-22(旋翼蒙皮)等。欧洲复合材料铺带成型的产品有机翼蒙皮、尾翼、翼梁、增强肋等,主要包括空客A330/A340(水平安定面蒙皮)、A340-500/600(尾翼蒙皮)和A380(安定面蒙皮、中央翼盒)等<sup>[2-4]</sup>。

自动铺带机分为平板式自动铺带机(TLM)和曲面自动铺带机(TCLM)2种。TLM有4个联动轴,主要适用于平板或小曲率机翼壁板的制造;CTLTM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。其中铺带头作为自动铺带设备的核心部件,集两套3轴切割系统、预浸带输送控制系统、预浸料加热系统、预浸料成型压力控制系统、带料调整(间隙控制)系统、铺带头防撞系统等子控制系统于一体,实现了预浸带切割、输送和铺放等运动功能,以及铺带头运动相应的保护功能和预浸带质量检测功能。

不同厂家的自动铺带头的结构和功能略有差异。图1为欧美各国主要自动铺带机制造商研制的自动铺带头。其中,图1(a)为西班牙M-Torres公司自动铺带机Torreslayup的铺带头,其新型铺带头不但具有多带平行铺放的功能,而且其在传动链轴后面安装超声波切割装置,该设备可以当成三维切割系统来使用,可用于固体层压材料的三维切割<sup>[5]</sup>;图1(b)为美国Cincinnati公司自动铺带机CHARGERTM Tape



(a) Torreslayup 铺带头



(b) CHARGERTM Tape Layers 铺带头



(c) Daul-Phase Tape Laying 双工位铺带头

图1 欧美各种自动铺带机铺带头

Layers的铺带头;图1(c)为法国Forest-line公司自动铺带机Daul-Phase Tape Laying双工位铺带头,其上配备了一个单工序铺带头和一个双工序铺带头<sup>[6]</sup>。

自动铺带系统按预浸带的切割和铺叠实施方式可分为“一步法”和“两步法”两种工作方式。两者在同一铺带头上完成即为“一步法”,预

浸带的切割和铺叠分开实施,即不在同一头上完成则为“两步法”。这两种方法都能满足一般产品的加工要求,在复合材料自动铺带成型过程中,“一步法”自动铺带仍占主导地位;对于复杂形状铺层,“两步法”比“一步法”更容易实施,且铺放效率较高,但“两步法”较“一步法”的设备价格较高。

经过不断的发展和完善,自动铺带设备在美国和欧洲已经成熟,并大规模应用于航空复合材料结构件的制造。

目前,日本三菱公司负责生产的主翼蒙皮用的Linear Atlas铺带机是全世界最大的铺带机,尺寸达40m×8m,铺设速度为60m/min。西班牙M-Torres公司研制出11轴自动铺带机,法国Forest-Line公司研制出带有双向铺带头的自动铺带机。目前铺带宽度最大可达到300mm,铺带速度达1.3~20.4kg/h,生产效率可达到手工铺叠的数十倍。图2为M-Torres公司的自动铺带设备对A350机翼蒙皮进行铺带的过程。

马格·辛辛那提公司提供的Charger型机可以铺75mm、150mm或300mm无纬预浸带。Charger型面铺带机可以铺达25°锐角的特型铺层,它应用的是CNC 10轴龙门型系统,可自动下料、压实预浸带。该系统应用了独特的侧面加载头,可提供



图2 A350机翼蒙皮自动铺带

快速、简单更换 300mm 宽、 $\Phi 650$ mm 直径铺放压辊功能,用于生产 A320/A330/A340/A380 及 A400M 的机翼桁条、梁、蒙皮及升降舵、尾翼蒙皮、平尾、发动机短舱、机身蒙皮及机腹整流罩等。除了通用的铺带机外,马格·辛辛那提还开发出形状相同或相似的大批量生产的专用铺带机,如为沃特飞机公司开发了平面铺带机,用于制造长的平面构件;后续该公司还开发了小型平面铺带机(SFTL),用于生产长、窄、平面构件,多件铺层板,隔膜成型蒙皮等,典型用途为制造大梁、桁条、梁、剪切带、框、襟翼及蒙皮。

## 2 纤维束铺放设备及应用

纤维束铺放技术是 20 世纪 70 年代由美国 Boeing、Hercules 等公司在纤维缠绕和自动铺带技术基础上发展起来的<sup>[7-8]</sup>,用于复合材料机身结构制造。20 世纪 80 年代后期,专业数控加工设备制造商对该技术和设备作了进一步完善,1989 年 Cincinnati Machine 公司设计出其第一台纤维束铺放机并随后投入使用;1995 年 Ingersoll 公司研制出其第一台纤维束铺放设备<sup>[9]</sup>。

自动丝束铺放是在模具上铺放预浸丝束,在自动铺带的基础之上,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 3.2~25.4mm 宽的预浸丝束。

与自动铺带相比,自动丝束铺放的优点主要在于:按构件型面具有增减纱束根数的功能,可根据构件形状自动切纱适应边界,废料率很低(3%~8%),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,能适应大曲率复杂构件成型。

典型的自动丝束铺放机有 7 个运动轴,以及由计算机控制的 12~32 个丝束输送轴;丝束是指 3mm 或 6mm 的预浸丝束。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。

自动丝束铺放机机型已从 Viper1200、Viper3000 升级到 Viper6000。Viper6000 自动丝束铺放机能操作达 86180kg 的心轴,可以铺放并控制的纤维束由 24 个增到 32 个丝束,能对 32 条丝束或窄带进行送料、夹持、下料及铺放,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。目前,沃特飞机公司用其来生产波音 787 的机身段,空客 A350XWB 机身的 92% 用 Viper 制造。

图 3 为 M-Torres 公司的纤维铺放设备

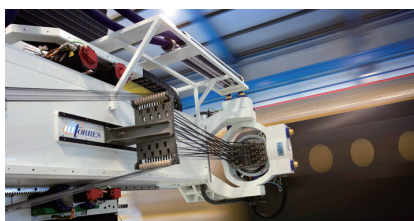


图3 M-Torres公司的纤维铺放设备



图4 A350XWB翼梁自动铺丝检查

放设备;图 4 为 A350XWB 翼梁自动铺丝过程的检查。

## 3 国内自动铺放设备

国内相关研究起步较晚,其中南京航空航天大学 2004 年起与北京航空材料研究院联合开发自动铺带设备,并于 2005 年研制成功国内第一台自动铺带原理样机,实现了自动铺带的基本功能<sup>[10-11]</sup>。

哈尔滨工业大学在原有的 6 轴缠绕机的基础上对自动铺丝技术进行改造,研制了一种 7 轴纤维铺放头。

2006 年,中航工业北京航空制造工程研究所与 Forest-Line 公司合作,采用引进自动铺带头关键部件集成的技术路线研制翼面大型自动铺带机,在国内首次采用“两步法”自动铺带技术成功研制出大尺寸壁板蒙皮<sup>[12]</sup>。

2010 年 4 月,由南京航空航天大学与齐齐哈尔二机床联合研制出 SKPC250/2000 型大型筒段铺缠一体机(图 5)在第六届中国数控机床展览会上展出。

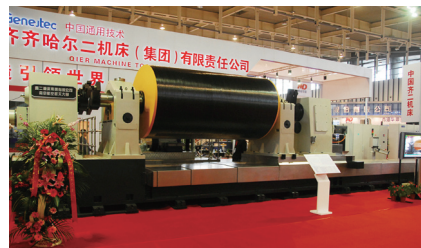


图5 国产大型筒段铺缠一体机

## 热隔膜成型设备及应用

热隔膜成型技术与自动化铺放技术相结合,在大型复合材料构件成型方面得到越来越多的应用。热隔膜成型技术已在 B777 长桁、V-22 长桁和 A400M 机翼前梁等大型构件中得到成功应用。目前国外供给热隔膜成型的设备(图 6)已经比较多,康泰公司(美国)作为供应热成型机相对较大的公司,其设备已提供给全球 70 多个国家地区,早在 20 世



图6 热隔膜成型设备

纪 80 年代就为英国 BAE 公司鹞式战斗机的生产提供此类设备,此后为 SAAB 公司的 Gripen 战斗机,后来又为直升机和鹞式维修工厂和欧洲战斗机项目,以及波音 787 提供了类似设备<sup>[13]</sup>。

这些设备除了具有一般热压机的特点外,还具备抽真空装置。另外,由于热隔膜成型件的尺寸往往都比较大,所以一般的热压机往往难以符合生产要求。A400M 机翼大梁用的热压机长 20 多米,就是美国 Aeroform. Ltd 公司专门为其设计制造的。

### 复合材料缝合设备及应用

缝合技术是针对传统工艺方法的不足而开发出的一种全新的技术。其原理是通过缝合手段使复合材料在垂直于铺层平面的方向得到增强。尽管缝合易引起一定程度的面内纤维的损伤,但克服了传统复合材料层间强度低、易分层的缺点,由于减少铆接、螺接等机械连接数量,从而更有利于减重和提高复合材料层间损伤容限。

国内外在缝合设备的研制和开发方面投入了大量的人力和物力,从最初的工业缝线机发展到了采用计算机控制的大型缝合设备,无论是缝合速度、缝合规模还是缝合质量都得到了大幅度提高,不但能够实现单曲面预成形体的缝合,而且可以实现各种复杂曲面预制体的缝合。

德国 KSL 公司使用机器人作为自动缝合设备,为了保证缝针垂直

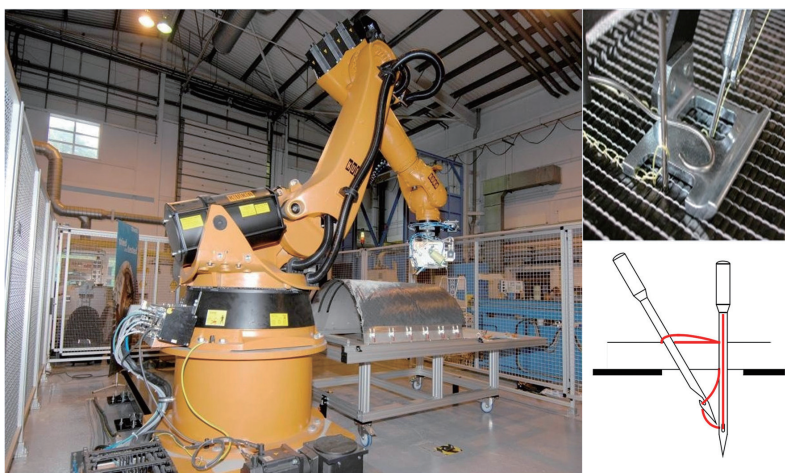


图7 德国KSL公司的复材缝合机器人

于零件表面,采用六自由度的机器人移动,可进行锁式缝合、改进的锁式缝合和链式缝合 3 种不同的缝合方式(图 7 中右上和右下两图分别为该设备缝针的照片和双针单边缝合原理图),其双针单边缝合步长可在 2~10mm 的范围内进行调整,最大材料缝合厚度可达 20mm,缝合速度达 500 针/mm。相比传统的工业缝线机,该设备在缝合速度、缝合规模以及缝合质量上都得到了大幅度提高。空客公司运用这种 3D 缝合机器人,缝合了 A380 尾部压力仓壁,该组件仅重 250kg。

另外,美国 NASA 联合波音公司开发了一种 28m 长的缝线机,用于制造复合材料机翼壁板,获得了 25% 的减重效果,较铝合金壁板降低成本 20%。

### 结论

采用先进的自动化铺放设备进行飞机复合材料构件的制备,并采用自动缝合方法提高其损伤容限,是现代飞机复合材料制造技术发展的重要方向。因此,我国企业急需通过引进和研制先进的自动化铺带、铺丝设备以及热隔膜成型、缝合设备,大幅提高我国复合材料自动化制造设备水平,为军民飞机的型号研制打下坚实的基础。

### 参考文献

- [1] 周晓芹,段友社,薛向晨,等. 飞机复材构件制造设备应用现状. 航空制造技术, 2013(7):53-56.
- [2] 周晓芹,曹正华. 复合材料自动铺放技术的发展及应用. 航空制造技术, 2009(S1): 21-26.
- [3] 富宏亚,韩振宇,路华. 纤维缠绕/铺带/铺丝成型设备的发展状况. 航空制造技术, 2009(22): 43-46.
- [4] 肖军,李勇,文立伟,等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展. 中国材料进展, 2009(6):28-32.
- [5] 丁韬. 自动铺带机. 航空制造技术, 2007(1):108-109.
- [6] 薛企刚. 高效全自动的碳纤维复合材料铺放设备. 航空制造技术, 2008(4):54-56.
- [7] Beckwith S W. Filament winding vs fiber placement manufacturing technologies. SAMPLE J, 2008, 44(2): 54-55.
- [8] Kisch R A. Automated fiber placement historical perspective//Proceedings of SAMPE conference. Long Beach, 2006: 1537-1547.
- [9] Carroll G. Fiber placement process utilization within the worldwide aerospace industry. SAMPE J, 2000, 36(4): 7-12.
- [10] 叶进. 复合材料自动铺带 CAM 技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [11] 肖军,李勇,李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用. 航空制造技术, 2008(1): 50-53.
- [12] 黄文宗,孙容磊,张鹏,等. 国内复合材料自动铺放技术发展. 航空制造技术, 2014(16): 84-88.
- [13] 吴志恩. 复合材料热隔膜成型. 航空制造技术, 2009(25): 113-116.

(责编 叶枫)