

# 创新复材自动化制造解决方案

## ——走进南航复合材料工程自动化技术研发中心

### Innovative Automated Manufacturing Solutions for Composite Materials

[编者按] 作为国内最早开展复合材料自动铺放技术研究的单位,南京航空航天大学复合材料工程自动化技术研发中心以先进复合材料预浸料成型为主要对象,紧密结合航空航天工程应用,从先进缠绕起步,开展自动铺放、三维增强等自动化制造技术研究。南航复材中心先后完成了国内首台自动铺带机、自动铺丝机、预浸纱自动分切卷绕、Z-pin 拉挤/植入机和先进拉挤等装备系统,形成了硬件平台及相应的 CAD/CAM 软件系统和运动仿真软件原型,初步形成了复合材料成型装备技术、软件技术和成型工艺技术储备。多年来,南航复材中心围绕复合材料在航空航天器上的应用开展研究工作,陆续承担了高档数控机床国家重大科技专项、国家科技部 863 项目、973 课题、总装 S863 项目、国防基础科研项目、总装航空支撑预研项目等多项国家课题,在复合材料自动铺放、复合材料结构制造与研究等方面取得了一系列成果,形成了“通设计、精工艺、专装备、重应用”的鲜明特色,先后获得多项省部级奖励和多项发明专利。

#### 成型装备

南京航空航天大学复合材料工程自动化技术研发中心在国家 863 项目等支持下研制出国内第一台自动铺丝原型机、第一台复合材料自动铺带原理样机、第一套三维增强系统和第一套模块化预浸料拉挤系统,并与航天材料及工艺研究所联合研制  $\Phi 4.5\text{m}$  大型自动铺丝系统,为自动铺丝技术在国内应用奠定了基础。目前实验室具有国内领先的复合材料制造自动化研究的软硬件条件。

(1) 铺丝设备。南京航空航天大学复合材料工程自动化技术研发中心一直进行大型多轴联动铺丝系统的设计和开发,完成了 8 丝/16 丝/24 丝丝束铺放试验系统、铺丝用精密低张力测控系统、铺丝开放式数控系统的研制,并开发了自动铺丝 CAD/CAM 软件和运动仿真软件。实验室自研的自动铺丝机适用于大型复杂构件的铺丝成型。它具有多轴联动功能;能够实现数控独立输送、切

断与重送、止纱等功能,并且可分别对各束纱进行制冷、加热和施压;配套 CAD/CAM 软件系统和仿真功能,能够实现封闭曲面、大型自由曲面的铺丝轨迹规划和丝束管理功能。在 8 丝束龙门铺丝平台上开展了大量的复合材料自动铺丝工艺研究工作,完成了加筋曲板、翼梁、翼身融合体、S 型蛇形进气道等一系列复合材料构件的铺放试验。

(2) 分切-复卷设备。自动分切-复卷机是将宽幅预浸料/PE 膜分切成多条窄丝束,并在线对多条窄丝束进行同步复卷的机器,主要用于自动铺丝用预浸丝束的制备。分切机采用先进的机械设计、制造工艺和精确的控制方法,具有分切丝束宽度控制精准、复绕线性可控、复卷单元模块化、使用操作方便等特点。同时可实现 1/8 英寸、1/4 英寸、1/2 英寸预浸料/PE 膜的分切,具有热台搭接功能。

(3) 三维局部增强。碳纤维增强复合材料铺层具有很强的面内性

能,而层间性能一致是科研人员关注的重点,缝合、编织等均是提高层间性能的有效方法。南航复材中心探索了 Z-pin 层间增强技术,该技术采用胶接-机械混合连接方式,可以整体共固化成型树脂基复合材料加筋蒙皮结构,减少零件及机械连接件数量,保证层间剪切性能的同时大幅度减轻结构重量,Z-pin 三维增强技术的发展为复合材料构件的连接提供了新的方法和选择。Z-pin 技术可以作为整体成型先进复合材料机身的连接方案,在预浸料坯体预压实的过程中同步完成 Z-pin 的植入,成本低、效率高。碳纤维增强复合材料 Z-pin 首先被用于 F/A-18 大黄蜂战机,代替钛合金螺栓增强帽型加筋与蒙皮的连接界面。南京航空航天大学在国内率先开展 Z-pin 增强树脂基复合材料制备工艺、成型装备及性能研究,打破技术壁垒,利用自主研发的成型制造相关设备,根据材料相容性原理开发了多种体系复合材料 Z-pin,并完成了其力学性能的全面

评价。

(4)先进拉挤成型设备。南航复材中心最早于2010年研制开发先进拉挤成型技术。它是预浸料在牵引力作用下,通过层叠、折弯成需要的产品形状,并在模具中完成预固化,通过步进式连续拉挤可以生产出长度不受模具长度限制的复合材料型材。目前,实验室通过研究形成具有自主知识产权的预浸料拉挤复合材料型材制造ADP成型工程设备,其综合了自动铺放成型、热压固化等工艺过程的优势,使拉挤进程实现全程自动控制,可以制备高性能、低成本各类复合材料型材。其制品性能达到了热压罐工艺的水准,并且实现了在较短模具中生产较长制品的目的。应用自研的ADP设备相继制造出了豆荚杆复合材料、C型梁、工字梁、T型梁和帽型梁等各种结构件,对我国复合材料制造技术以及航空航天工业的发展具有重要作用。

### 研究成果及典型应用

为提高铺放效率,设计出24丝束铺丝头。与现有8丝束铺丝头相比,24丝束在铺放过程中压辊扫略过的曲面宽度更大,显著提高了铺放效率。为进一步提高设备的执行效率,研制出双向铺放头。在双向铺放头中有一个换向机构,该构型通过换向机构的动作切换铺放轨迹的方向,省去了回程的空行程和末端执行器的姿态调整所占用设备使用时间。

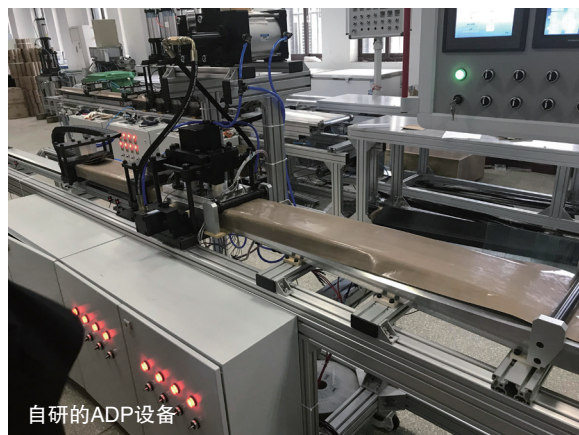
针对航天大型轨道器体、支撑舱、承力筒及球冠类复合材料构件自动化制造,研制出16丝束自动铺丝设备平台和高效高柔性双弧轨式自动铺丝头。对于球面轨迹铺放,双弧轨式铺丝头的双弧轨仅需很小的摆幅即可实现轨迹的铺放过程,在机械平台和轨迹精度方面均便于实现精确控制和顺利实施。

实验室从平面、可展曲面简单复合材料构件的轨迹规划入手,积

极开展自动铺放软件研究工作。目前基于CATIA Automation技术,利用Microsoft Visual Studio 2010集成开发环境,采用模块化设计开发了具有自主知识产权的铺放软件,该软件将缺陷抑制、轨迹规划和冗余后置处理有机地结合在一起,保证了轨迹设计的合理性及冗余纤维铺放机高速大惯量多轴系统在最优或较优状态下工作,从而使高质高效铺放成为可能。该系统使每个模块均以可视化界面呈现,具有良好的人机交互效果。根据模块化设计,减少了软件开发工作量及提高了系统可靠性。同时也一直注重铺放过程仿真分析,基于CATIA平台和基于VC应用OPENGL技术进行了开发,仿真软件可显示轨迹和各关节运动,同时具有干涉检验功能。

国内对双机器人协调铺放系统的研究还限于特定结构的模具,对不同的模具进行铺放时,轨迹的设计分配及双机器人的后置处理还鲜有研究。基于此,实验室搭建了双机器人自动铺放仿真平台,开发了后置处理程序。将控制程序导入运动仿真模块,通过模拟机器人自动铺放环境可以清楚地看到铺丝路径及机床各轴的运动,同时验证了机器人后置处理算法的正确性。

南京航空航天大学长期从事复合材料成型技术的研究,对当前国际上最新的复合材料自动化成型加工技术有着深入的了解,2008年以来为航材院研制8丝束小型自动铺丝-缠绕系统,2011年完成了预浸纱分切-卷绕系统研制,承担航天材料及工艺研究所16丝、24丝铺丝机研制任务,2012年承担航天812所特种铺丝机研制任务,分别于2013、2016、2019年承担沈阳飞机设计研究所某型号进气道铺丝研究任务等。经过多年不懈努力,南航复材中心在铺放技术研究积累了许多宝贵经验,已具备了很好的开展复合材料成型



研究的硬件技术条件、开发软件环境和理论基础,培养了一支强有力的科研队伍。

### 发展趋势

经过多年的研发,国产自动铺丝装备已经实现了工程化应用,但仍然需要从以下4个方面入手开展研制工作。

(1)自动铺丝装备结构设计。针对自动铺丝机床结构设计开展专门的研究,设计出满足多自由度、高速、大惯量要求的自动铺丝机床结构。

(2)自动铺丝装备的智能化控制。国内研制的自动铺丝头已经能够可靠地实现自动铺丝功能,但是在自动铺丝过程的在线检测,包括断纱、缺纱、缺陷、边界检测,模具的自动标定,温湿度和预浸丝束张力的精确控制等方面与国外还有一定差距,需要进一步提高装备的智能化程度,减少操作人员的操作难度。

(3)高精度自动铺丝头研制。需要在自动铺丝头机械结构精度和铺丝动作控制精度方面进行深入研究,提高国产自动铺丝头铺放精度。

(4)CAD/CAM软件系统开发。国外已经发展出功能完备的商用自动铺丝CAD/CAM软件,国内软件系统初具雏形,需要从算法效率、工艺支撑和后置处理仿真等环节不断完善。特别是针对复杂型面复合材料构件,如飞机进气道等复合材料构件开发出适应性更强的路径规划算法。

(采访 李丹)