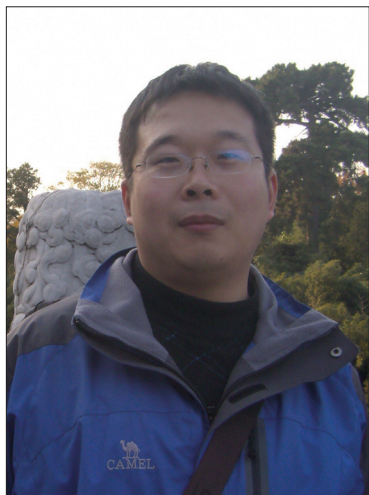


# 航天复合材料自动化成型技术 研究现状

## Present Research Situation of Composites Automated Processing Technology in Astronautics Industry

航天材料及工艺研究所 张建宝 王俊锋 孙宏杰 董波 梅立 郝卫



张建宝

博士, 航天材料及工艺研究所工程师, 主要从事复合材料自动化成型(自动铺带、自动铺丝、缠绕)及工艺优化研究工作。曾获得国防科技进步一等奖1项, 发表论文20余篇。

先进复合材料因其性能优异, 在航空航天、舰船、交通运输、建筑、体育运动以及能源等行业领域得到广泛应用。因复合材料构件的结构形式、服役载荷和使用环境复杂, 微小的缺陷经跨层次的蔓延生长可导致构件的失效, 故其安全性和可靠性是

为提高复合材料构件质量的可靠性和稳定性, 减少人为因素的影响, 复合材料成型自动化是复合材料成型技术发展的必然趋势。

其应用中首要考虑的内容<sup>[1]</sup>。为提高复合材料构件质量的可靠性和稳定性, 减少人为因素的影响, 复合材料成型自动化是复合材料成型技术发展的必然趋势。

### 复合材料自动化成型技术及应用

自1985年以来, 自动化成型技术在复合材料制造业中的应用范围不断扩大, 已经逐渐渗透到复合材料设计和制造的各个领域(缠绕成型、自动铺放成型、拉挤、编织、缝合和RTM等), 在推动复合材料设计和制造技术发展、降低构件制造成本中的巨大作用已达成广泛共识<sup>[2]</sup>。复合材料成型自动化不仅提高了复合材料构件的生产效率, 降低了生产成本, 而且通过对成型工艺参数和技术指标的精确控制, 可以极大地提高复

合材料构件质量的可靠性和稳定性。复合材料自动化成型技术作为将结构设计、材料和制造连接一体的纽带和桥梁, 将机械制造技术、信息处理技术、自动控制技术、伺服驱动技术、传感器技术、软件技术等多个学科技术引进到复合材料成型过程, 尤其适合手工成型难以完成的大尺寸、超大尺寸以及复杂形面构件的成型。

目前为止, 国外复合材料自动化成型技术已经相当成熟。以自动铺放技术为例, 已在多种航空航天器的各种结构件上得到应用, 如航天载荷适配器、整流罩、燃料储箱、机翼、尾翼、垂尾、进气道、中央翼盒等<sup>[3-6]</sup>。

国内复合材料自动化成型技术发展较晚, 航天材料及工艺研究所积极推动复合材料自动化成型技术在国内的应用与发展, 在激光铺层定位、自动铺带、纤维缠绕、自动铺丝等技术的

工程应用研究取得了阶段性进展,实现了多项自动化成型的工程应用。

## 航天复合材料自动化成型关键技术

### 1 自动下料与激光铺层定位技术

目前,手工铺层仍被广泛使用,尤其适合一些复杂型面的小型构件成型,甚至像 B-2 轰炸机及一些通用飞机的制造也采用了大量手工铺层工序<sup>[7]</sup>。如何通过数字化手段提高手工铺层的构件质量和劳动效率,充分发挥手工铺贴在蒙皮厚度调整、局部加强、金属加强片嵌入、加强筋增强以及蜂窝夹芯区等方面的技术优势,是手工铺层技术的研究热点。

航天材料及工艺研究将复合材料自动下料与激光铺层定位技术引进到复合材料手工成型过程中,通过对数控下料机、激光投影设备以及辅助设计制造软件的综合运用,实现了复合材料构件数字化辅助人工铺放。采用复合材料构件设计制造软件将构件的三维实体数模展开生成铺层排料的二维数据,生成复合材料构件各铺层的 2D 轮廓数据,并将轮廓信息输入至数控剪裁机进行自动下料,并借助激光定位系统在预先固定好的模具上显示铺层轮廓和轴线,保证在铺叠过程中的准确定位。

采用自动下料和激光铺层定位技术辅助进行手工铺层技术,下料准确度显著提高,降低了铺层取向误差,产品质量可以有效保证,可提高成型构件质量的稳定性,而且降低了劳动强度,提高手工成型的生产效率,对操作人员的技艺水平和施工经验要求显著下降。

### 2 自动铺带技术

随着复合材料构件在航空航天器上的大量应用,完全人工铺放和数字化辅助人工铺放缺点日益显露,要求铺层人员有很高的技艺和施工经验,手工铺贴费工费时,效率低、成本高,难以适应大批量生产和大型复

杂复合材料制件的生产要求。自动铺带应运而生,作为手工带铺放的替代,其采用自动控制技术实现预浸带的定位、铺放、压实、剪裁等功能,尤其适合小曲率曲面构件(如筒段、翼面、壁板等)的自动化成型<sup>[8]</sup>。

航天材料及工艺研究所以大型筒形结构复合材料构件为目标开展了自动铺带技术工程应用研究。突破了高性能干法预浸料制备技术,研制出了适于自动铺带使用的预浸料 JT300/605,其性能如表 1 所示,实现了自动铺带用预浸料的批量生产;突破了预浸料分切技术(见图 1),形成了各种幅宽的自动铺带用预浸带的分切制备能力,分切宽度达 10~150mm,分切精度为  $\pm 0.5\text{mm}/100\text{m}$ ,初步满足了现阶段航天复合材料自动铺带成型的原材料需求;以圆筒形结构构件为对象,采用研制的 JT300/605 热熔法预浸带,基于自动铺带成型系统,开展自动铺

带成型用大尺寸筒形结构模具的设计经验,掌握了自动铺带成型用筒形结构模具设计技术。在国内首次实现了复合材料自动铺带技术的工程化应用,研究成果已推广应用于多种航天产品的研制生产。

### 3 纤维缠绕技术

纤维湿法缠绕成型是实现复合材料“低成本、高性能”的重要手段之一,也是发展较早、技术相对成熟的复合材料自动化成型技术。在先进复合材料,尤其航天航空高性能复合材料结构制造中应用极为广泛,占据相当重要的地位,主要包括各类压力容器、固体火箭发动机壳体、承力碳管、管道、贮罐、发电机叶片等。

复合材料压力容器已成为航空航天结构动力系统的关键组成部件之一,无论从结构重量还是从所占据的几何空间上看,都占有极高的比例,而其减重要求是制约着新一代先进发动机系统的研制和发展的技术

表1 热熔法预浸料的性能

项目	预浸料面密度 / (g·m <sup>-2</sup> )	纤维面密度 / (g·m <sup>-2</sup> )	树脂含量 / %	挥发份含量 / %	厚度 / mm	铺覆性
实测值	250 ± 10	165 ± 5	34 ± 3	≤ 0.2	0.15	优良

带成型工艺,分别从铺放角度范围、铺放质量、铺放效率、铺放精度等方面对筒形结构自动铺带工艺进行了分析研究及技术改进,显著提高了预浸带的铺层精度和质量一致性,预浸带间隙或重叠  $\leq 1\text{mm}$ ,铺带角度与理论铺带角度偏差  $\leq 0.2^\circ$ ;通过筒形结构件的铺放试验研究,积累了自动



图1 预浸带分切技术

瓶颈之一。如何设计和制备出轻量化的复合材料压力容器,最大化地减轻系统的重量,是复合材料研究人员追求的目标。世界发达国家均将发展轻量化复合材料压力容器技术列为太空探索的关键技术之一,如美国 NASA 提出的新航空研究计划(New Aeronautics Research Program)、2030 年前的太空探索规划(3rd Space Exploration Conference & Exhibit)、欧洲木星探索计划等<sup>[9]</sup>。

航天材料及工艺研究所已经开展了纤维湿法缠绕成型技术在航天结构件的应用开发研究。基于航天环境对基体树脂的特殊需求,改进了复合材料湿法缠绕树脂的配方,开发了高韧性环氧树脂体系 C601;突破

了高性能复合材料气瓶的湿法缠绕成型技术,初步建立了复合材料压力容器设计、制备、试验和测试评价一体化的技术集成系统,有效地提高了复合材料气瓶成型的设计制造能力,为轻量化复合材料压力容器的可靠应用提供了技术保障。

目前,航天材料及工艺研究所形成了涵盖多类内衬(铝合金内衬、钛合金内衬等)、多类纤维(玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等)、多种结构形式(柱形、球形、环形)的复合材料压力容器研制能力,研制出了满足设计要求的增压系统用复合材料气瓶结构件,满足新一代运载火箭系统轻量化的发展需要。

#### 4 网格缠绕技术

复合材料网格结构又称为先进格栅增强结构(AGS),与已有的铝合金格栅结构相比,提高了结构的比强度和比模量,大幅度提高了结构效率,增加了有效载荷,同时增强了结构的抗腐蚀能力,而且可以利用自动化制造方法降低成本,最为突出的是增加了结构设计、制造的灵活性,已成为制造复合材料高性能结构件的新途径和新方法。

先进格栅增强结构由于其突出的综合性能优势而受到普遍重视,NASA Langley 研究中心的研究人员把先进格栅增强结构技术列入未来航天结构技术发展的六大方向之一的低成本结构技术之内;美国空间实验室把 AGS 技术列为迎接未来空间系统技术挑战的四大结构技术之一,并且指出了这项技术未来在航天器燃料储箱、机身等大型复杂部件应用的广阔前景<sup>[10]</sup>。俄罗斯 CRISMB 提出的应用对象包括级间段、内压容器、有效载荷适配器、运载飞船整流罩、飞机中机身舱段、翼盒、直升机垂尾梁、空间望远镜镜身以及建筑结构等<sup>[11]</sup>。

目前,复合材料网格结构一般采用手工铺放成型工艺和湿法缠绕工

艺。手工铺放工艺需要加压釜进行固化,故其产品空隙含量低,纤维体积含量易于控制,但生产成本较高,成型过程中纤维张力不宜控制;湿法缠绕工艺成型过程中树脂含量不易控制,制件纤维体积含量低,成型过程中废料率高,但成本低,尤其是纤维张力易控制。航天材料及工艺研究所基于复合材料网格缠绕成型系统,开展了回转体网格结构干法预浸丝自动缠绕技术研究。根据柱形网格结构的特点,解决了网格结构小角度缠绕成型的问题;根据缠绕成型试验的实际工况,对缠绕机张力系统及张力控制制度进行了技术改造和工艺优化;初步实现了柱形舱段矩形和三角形网格的自动化缠绕成型,并对成型构件的轴压性能、筋条拉压性能、网格筋条与蒙皮界面剪切性能、网格单元压缩性能等进行评价研究。

#### 5 自动铺丝技术

自动铺丝技术(纤维铺放技术或自动丝束铺放成型技术)是在纤维缠绕技术和自动铺带技术的基础上发展起来的一种独特的复合材料全自动化成型技术。它融合了纤维缠绕成型中的预浸纱(窄带)运输技术和自动铺带成型中的压力铺放、切断和重定位技术,使其具有更高的优越性和适应性。自动铺丝技术克服了缠绕技术“周期性、稳定性和不架桥”和自动铺带“自然路径”的限制,可以实现连续变角度铺放和变带宽铺放<sup>[12-13]</sup>。因此,自动铺丝技术可用于复杂型面复合材料构件的铺放成型,并可以对铺层进行裁剪以满足局部加厚/混杂、铺层递减及开口铺层等多方面的需要,其典型应用构件有整流罩、燃料储箱、进气道、机身等<sup>[14-18]</sup>。

目前,国内自动铺丝技术用材料体系、工艺应用研究薄弱,尚未实现工程应用。航天材料及工艺研究所、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、航空制造工程研究所等单位已在此领域开展了相关

研究,并对铺丝成型工艺进行了试验研究<sup>[13,19-20]</sup>。

航天材料及工艺研究所以典型曲面结构复合材料构件自动铺丝成型为应用对象,开展了热熔法预浸丝直接浸渍制备技术研究和热熔法预浸丝分切制备技术研究,突破了自动铺丝用预浸丝分切技术;联合国内相关单位开展大型卧式自动铺丝机研制及配套软件开发,已完成了铺丝机及关键部件铺丝头的设计工作。

### 结束语

新型航空航天器的先进性标志之一是结构的先进性,而先进复合材料是实现结构先进性的重要物质基础和先导技术。我国大型复合材料制造技术现状严重制约了航天型号的顺利研制,急需突破复合材料自动成型技术中的材料、装备、工艺等方面的重大、关键、共性技术,提升我国复合材料设计制造水平。航天材料及工艺研究所以复合材料自动化成型技术的工程应用为目标,坚持自主创新,在复合材料自动化成型领域取得了阶段研究成果,部分研究成果已在型号生产中工程应用,初步形成了涵盖自动下料与激光铺层定位、自动铺带、纤维缠绕、网格缠绕和自动铺丝等多种复合材料成型技术研究体系。

要以我国航天技术发展需求为牵引,提高自身制造水平、工艺水平为目的,积极发展复合材料自动化和数字化制造技术,形成集设计技术、材料技术、成形工艺、性能表征和质量控制技术一体化的复合材料技术体系,进一步提高大型复合材料构件制造效率和质量,推动超大型复合材料结构在航天领域的应用推广,为航天型号的研制提供有力的技术支撑,提高国产高性能材料技术自主保障能力。

本文共有参考文献 20 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)