

国产大型双柱立式数控七轴联动铺缠一体化成型装备研究开发应用

湖北三江航天红阳机电有限公司 王华侨

湖南江南四棱数控机械有限公司 苏国荣

武汉华中数控股份有限公司 郑武

华中科技大学 杨建中

南京航空航天大学 王显峰

本文在对异形舱体采用传统铺缠装备成型时暴露的缺陷基础之上，系统介绍了七轴联动铺缠装备的核心关键技术，从双柱立式铺缠主机、铺缠头核心功能部件、华中数控 HNC848 系统、RTCP 铺缠成型控制、异形舱体铺放轨迹设计及铺放软件功能模块等进行了简略介绍。最后对某异形舱体进行了铺缠试验验证和 RTCP 控制的优势进行了分析，并从铺缠程序轨迹优化、数控系统、铺缠头功能部件等三个方面提出了改进意见。全球首台套双柱立式铺缠成型装备突破了系列装备主机、功能部件、数控系统、铺放编程、铺放工艺等关键技术，取得并展示了较多的技术创新点。

一、异形舱体传统铺缠成型的缺陷

舱体热防护层是飞行器在飞行过程中的外保护层，保证飞行器在恶劣的环境中稳定可靠的工作。传统的三轴数控缠绕机，能够完成筒形、锥形、幂次曲线形回转体的防热层缠绕成型，但无法完成异形曲面的防热层成型。使用传统三轴布带缠绕机仅能完成模具旋转及预浸带固定，防热层的铺放成型靠人工完成，预浸带在铺放中人为施加张力，导致防热层之间贴合不实，比理论圆周偏大，在后续加压固化过程中容易形成较大褶皱，影响防热层防热效果。成型效率低下且预浸布浪费严重，产品质量不高。通过平行重叠缠绕、斜纹

布斜叠缠绕成型固化后，进行外防热层的加工后，表观质量如图 1 所示。

通过平行重叠缠绕、斜纹布斜叠缠绕成型固化后加工存在的主要缺点有三个。首先，固化成型加工后存在皱褶、架桥、分层、开裂等多种质量缺陷，导致产品质量可靠性、稳定性和一致性差；其次是材料利用率低下导致材料成本高，传统缠绕成型的材料利用率不到 30%，大面积材料在固化后切削掉，浪费极其严重；第三是需要通过机械切削加工去除，存在加工成本高、切削粉尘污染严重、工序周转周期长导致总体成本高周期长等众多缺点。



图1 传统铺缠装备产品缺陷示意图

除回转体类热防护零件采用布带缠绕机缠绕成型外，其余产品成型均无自动化装备，需要靠手工成型。复杂内网格

筋结构件是起承载作用，纤维铺放方向、精度及铺放质量对舱段承载能力影响较大。手工铺放首先需要对模具进行预热，保证预浸料可以较好地贴模；预浸丝束铺放的角度、缝隙拼接均由人工控制；为了保证预浸料之间贴合良好，每铺2~3层，需要包真空进行一次预压；下次铺层前需要再对模具进行预热，已铺层在模具上的预浸料时常需经历多次加热过程。该成型过程周期漫长，动辄数月才能完成1件大型复合材料构件的铺层成型，且手工成型的复合材料结构件的纤维铺放角度、纤维束之间的拼缝、预浸料的树脂含量、纤维拉直程度等均无法保证，产品质量时好时坏，无法满足航天产品对质量稳定性的高要求，更无法适应现代化的高效率生产节奏。

二、数控双柱立式铺缠主机结构

国内较早就对自动丝束铺放技术进行了技术跟踪和探索研究，南京航空航天大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、武汉工业大学等开展了一些理论和实验室研究。自动丝束设备、工艺技术及相应的预浸丝束制备等技术都没有进行过系统研究，这为该成型技术的工程化应用带来了很大难度。目前，国内未研制出一台能够完全满足工程应用的自动丝束铺放设备，而必要的配套技术，如丝束预浸技术、驱动软件、铺放工艺和模具设计技术等研究也不多，这主要是因为国内缺乏必要的丝束铺放设备作为研究平台，无法做到对自动丝束铺放技术系统深入的研究。

1. 数控双主铺缠装备主机结构

国内首台数控双柱立式布带铺缠一体化成型主机采用华中数控 HNC848 数控系统及伺服驱动。各坐标轴定义如图1所示：铺缠头径向移动—X 坐标，铺缠头横向移动—Y 坐标，铺缠头升降—Z 坐标；工作台（芯模）旋转—C 坐标；铺缠头旋转—A 坐标，铺缠头俯仰—B 坐标，铺缠头偏航—C1 坐标；铺缠头送带—U 坐标。

机床床身为双立柱，横梁沿立柱上下移动，方滑枕沿横梁左右移动，方滑枕前后移动的龙门落地式结构，中心悬挂方滑枕。工件放置在工作台上，与工作台一起旋转。双立柱采用对称布置的形式，立柱上通过直线导轨安装横梁，横梁上下移动采用双电机驱动、双精密减速机及高精度滚珠丝杠传动机构，并配有气液动平衡系统。数控同步保证左、右两根滚珠丝杠同步运转。装备主机总体结构及装备实物如图2何图3所示。

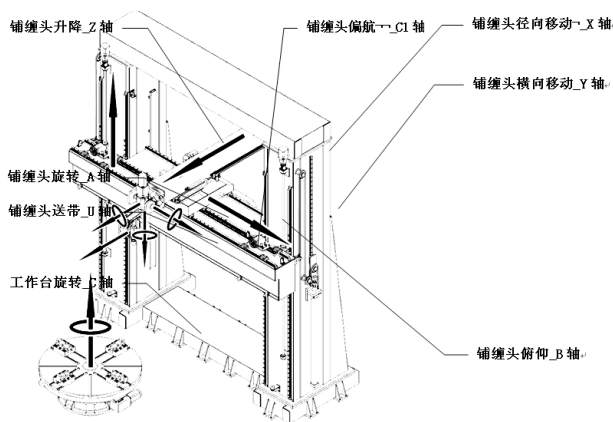


图2 双柱立式铺缠机结构设计示意图



图3 数控双立柱铺缠带机实物图

横梁上通过直线导轨安装方滑台，方滑枕移动采用电机驱动、双精密减速机及高精度齿轮齿条传动机构。方滑枕上通过直线导轨安装伸臂，伸臂移动采用电机驱动、双精密减速机及高精度齿轮齿条传动机构。伸臂装有高精度的铺缠头重心平衡补偿系统及滑枕伸出自重变形补偿系统，消除铺缠头及方滑枕前移而产生的下垂变形，确保铺缠头系统的精度及刚度。

伸臂前端面安装铺缠头，铺缠头采用三轴旋转手腕结构，可完成异形回转体的自动铺年缠成型，具备大范围铺缠张力自动控制功能、预浸带自动纠偏功能、热风加热温度自动控制功能和预浸带覆膜自动卷绕功能，具备铺缠压力可调的双压辊系统。

工作台采用双电机消除驱动，结构简单、承载大、精度高。机床操作站采用独立吊挂的可伸缩以及旋转的操作站台，

操作简单方便。横梁两侧配有随横梁上下升降的操作维修平台，平台亦可沿横梁手动移动靠近铺缠带头，方便更换料卷以及检测和观察铺缠质量状态。立柱两侧安装有上到立柱顶部的安全通道，方便安装以及维修更换立柱两侧的驱动电机及丝杠。

复合材料铺缠带机是复合材料自动化高效成型工艺的主要装备之一，通常由铺缠头，铺缠手腕，床身、芯模回转系统以及机床控制系统等几部分组成。辅助设备各包括压辊装置、预浸带加热装置，布带张力控制系统、布带切断装置，纱架、纠偏装置等。机床主要关键技术指标规格如表1所示。

表1 数控双柱立式铺缠主机技术规格

项目名称	技术规格	项目名称	技术规格
主机结构	双柱立式	铺缠角偏差	±0.5°
工作台最大直径	2000 mm	铺缠头旋转行程A轴	±90°
最大装夹长度	3500 mm	铺缠头旋转速度	20m/min，加速度：70°/s2
最大工件重量	5000 kg	铺缠头俯仰行程B轴	±30°
主轴转数C轴	0 ~ 10 r/min，加速度：70°/s2	铺缠头俯仰速度	10m/min，加速度：70°/s2
伸臂径向移动行程X轴	1 m	铺缠头偏航行程C1轴	±70°
伸臂径向移动速度	18 m/min，加速度：1 m/s2	铺缠头偏航速度	10m/min，加速度：70°/s2
伸臂横向移动行程Y轴	2000mm	铺缠头送带速度U轴	20m/min，加速度：70°/s2
伸臂横向移动速度	30m/min，加速度：1 m/s2	铺缠带张力可调	5 ~ 200N
横梁垂直移动行程Z轴	3500mm	主辊压力	≥ 500N
横梁垂直移动速度	8m/min，加速度：1 m/s2	辅助辊压力	≥ 500N
最大铺缠速度	30m/min	热风温度可调	最大 150℃
铺缠带隙精度	±2.5mm	自动纠偏功能	精度 ±1mm；行程 ±10mm
铺缠带厚度偏差	±0.5mm	数控系统	华中数控 HNC848

2. 主机综合实验及精度检测

(1) 运动控制综合试验。

①各运动轴动作试验，试验其动作的灵活性和可靠性。主轴进行正转、反转、停止及变换转速试验（无级变速机构作低、中、高速，有级变速机构作各种转速）。其他运动轴做低、中、高运转速度及快速运转变换试验。

②各运动轴的联动试验：试验各运动轴坐标的超程保护、手动数据的输入、坐标位置显示、回基准点、程序序号指示和检查、程序暂停、程序结束、程序消除、单步进给、直线插补、圆弧插补、螺距补偿、间隙补偿等功能的可靠性和动

作的灵活性。

③空运转功率试验(抽查):各运动轴传动系统空运转功率应符合设计文件低于5%的规定。空运转实验:最大速度下的空载功率。

④整机连续空运转试验:用数控程序在全部功能下模拟工作状态做不铺缠连续空运转试验,整个运转过程中不应发生故障。连续空运转时间为8小时,每个循环时间不大于15分钟,每个循环之间休止时间不得超过1分钟。

⑤机床铺缠实验:选定标准试件用数控程序在全部功能下模拟工作状态做铺缠连续运转试验,整个运转过程中不应发生故障。连续运转时间为8小时,每个循环时间不大于15分钟,每个循环之间休止时间不得超过1分钟。检验铺缠精度和厚度误差。

(2) 机床综合精度检测。

①铺缠带隙精度的检验:在标准圆柱体芯模上或平板类模具,用标准预浸带,通过运行铺带程序在芯模连续铺带多次。用游标卡尺测量多遍铺带之间的间距误差,取最大值。

②铺缠角度偏差的检验:在标准圆柱体芯模上或平板类模具,用标准预浸带,通过运行铺带程序在芯模连续铺带多次。用游标角度尺测量多遍铺带之间的角度误差,取最大值。

③铺放速度的测量:在标准圆柱体芯模上或平板类模具,用标准预浸带,通过运行铺带程序在芯模连续铺带多次。用秒表计量时间,用游标卡尺测量多遍铺带长度,或在料卷上测量退卷的长度,计算取最大值。

三、自动铺缠头核心关键技术

铺缠头系统是一个集成系统,其包括施压装置、加热装置、张力控制系统、收膜装置、检测系统、防撞报警装置等功能模块,各模块协同工作实现特种料卷在复杂工件上的优质铺缠。如图4所示的布带自动铺缠头能够实现大型异形回转体防隔热层的自动铺放和自动缠绕两种成型工艺。在自动铺放成型过程中,隔热带采用低张力铺放,铺放张力要求隔热带张紧不松弛,并能适度变形,实现“随型就位”,特别是在构件凹曲面处的铺放,过大的铺放张力会引起凹面处的架桥缺陷。在自动缠绕成型过程中,预浸带的缠绕张力较大,控制精度较高,特别是在曲率半径较小的棱缘处,隔热带的缠绕张力需使隔热预浸带紧贴棱缘。该铺缠头具备大范围铺缠张力自动控制功能、预浸带自动纠偏功能、热风加热

温度自动控制功能和预浸带覆膜自动卷绕功能,具备铺缠压力可调的双压辊系统。另外,该铺缠头还安装有视频监控系统、成型工艺参数采集系统。各部分组成如下:

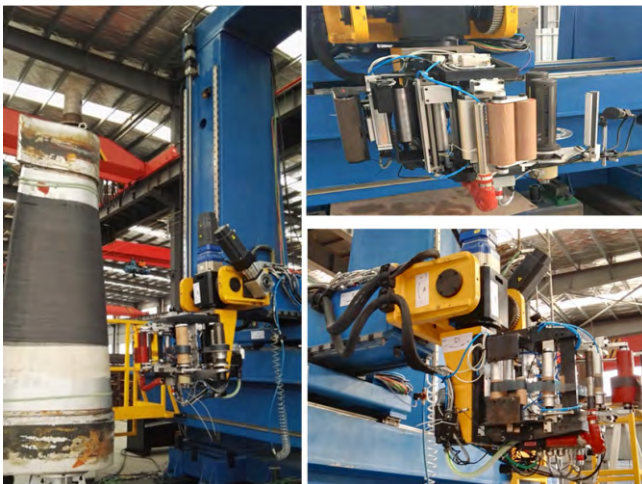


图4 三自由度铺放图核心功能部件

(1) 铺缠张力自动控制系统:铺缠张力控制系统能够实现大范围铺缠张力自动控制,最小5N,最大200N。为了兼顾铺缠张力调节范围和铺缠成型工艺所需的控制精度,该铺缠头将系统铺缠张力分为两段:大张力段50N~200N和小张力I段5~50N,大张力段主要用于自动缠绕成型,小张力段主要用于自动铺放成型。

(2) 热风加热系统:通过对预浸带和待铺缠区域的加热,增加预浸带黏性。热风加热方式具有加热均匀的优点,该铺缠头采用压缩空气作为空气加热器的气源,加热后的空气经过笛形管喷射到待加热区域。空气加热器的最高出口温度可达400℃,加热温度可根据工艺需求进行自行设定,通过出口温度传感器进行闭环控制。此系统既可手动运行,也可自动方式运行。

(3) 双辊压系统:该铺缠头采用双辊压系统提高预浸带的贴合性。其主辊和副辊均采用橡胶制成的柔性辊,以提高复杂型面的适应性。主辊可沿直线导轨平动,采用4个 $\phi 25\text{mm}$ 气缸提供辊压力,供气压力0.6MPa时,辊压力可达1200N。副辊可绕主辊轴线摆动,采用2个 $\phi 25\text{mm}$ 气缸提供辊压力,供气压力0.6MPa时,气缸推力可达600N,模具表面法向的辊压力大小随副辊摆动角度的变化而变化。副辊的摆动行程可满足凹面最小曲率半径R250mm,凸面最小曲率半径R15mm,满足目标产品的外形曲率。双压辊系统运动机构如图5所示。

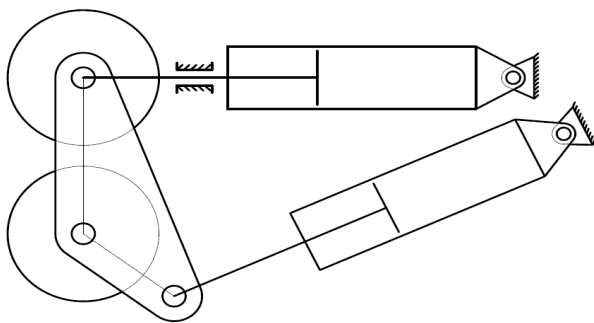


图 5 双压辊结构示意图

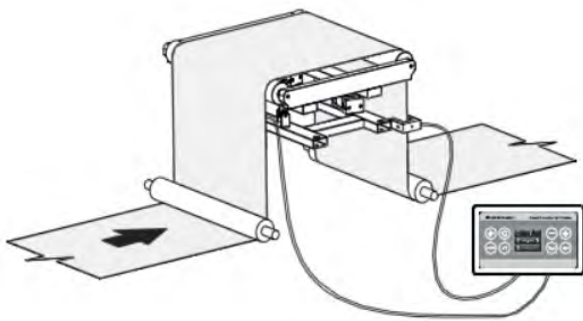


图 6 自动纠偏系统

(4) 自动纠偏系统：在铺缠缠绕成型过程中，由于布带斜缠变形、导辊的安装误差、布带速度及张力的波动等因素影响，预浸带会发生横向偏移，即跑偏现象。预浸带跑偏会影响成型制件的性能。因此，自动纠偏系统是铺缠缠绕成型的关键之一。该铺缠头采用行进过程纠偏方式，如图 6 行进过程纠偏是根据位置检测器的反馈控制预浸带传送路径中两根平行导辊的偏转角度，实现预浸带铺缠缠绕位置的控制。采用红外线纠偏传感器进行预浸带边缘位置偏差检测，并反馈给自动纠偏控制器进行闭环控制。

(5) 自动收膜系统：预浸料卷中除了用于构件成型的预浸料外，还有用于隔离预浸料的 PE 膜。自动收膜系统的功能就是在铺缠成型过程中将预浸料的背覆膜自动回绕成卷。该系统采用力矩电机驱动收膜气胀轴，通过铺缠速度和

收膜转速进行收膜张力的开环控制，力矩电机的驱动电流与驱动力矩的关系需提前校准。该系统能够实现卷绕速度高于铺缠速度，且卷绕张力低于铺缠张力；具有自动和手动控制两种方式。

(6) 视频监控和工艺参数采集系统：在铺缠头上安装摄像头拍摄铺放区域，操作人员通过操作台的监视器观察铺放区域的质量和现场状态，同时将铺放过程视频存储，从而实现质量和安全控制的闭路电视系统。另外，该铺层头上安装温度、压力传感器，可实现铺缠成型温度、压力以及环境温度、湿度等工艺参数的记录，便于产品质量系统的追溯。

四、自动铺缠轨迹规划与编程

轨迹设计系统是集轨迹设计、轨迹优化、后置处理、轨迹仿真等功能于一体的设计制造一体化软件系统，针对不同的工件构型提供了不同的轨迹设计方案、针对构件的复杂程度以及铺缠效率进行了轨迹优化、基于冗余七轴的机床架构实现了后置处理算法、为便于轨迹设计与验证提供了轨迹仿真分析功能模块。根据自动铺放的工作模式和技术特点，铺放轨迹须满足一定的设计要求，主要包括以下几方面：方向性要求、可铺放性要求、满铺覆性要求和经济性要求等。

(1) 可铺放性要求：轨迹的可铺放性即保证铺放过程中预浸料不发生畸变（屈皱、撕裂）的能力。预浸料可变形范围很小，对复杂曲面进行铺放时只能沿特定的轨迹，否则会导致褶皱或撕裂，继而影响构件的铺放质量；如图 7 所示。在复杂曲面构件自动铺放轨迹规划时，其算法必须根据构件曲面外形综合考虑预浸料在铺放过程中的变形因素。由于预浸料中增强纤维弹性模量非常高，铺放过程中纤维纵向拉伸变形能力有限，而纤维纵向受压缩作用产生的微屈曲是预浸带变形的主要机制。

(2) 满铺覆性要求：满铺覆性要求是指进行单层铺放时丝束满足间隙容差设计的要求，实现丝束的满覆盖、不重

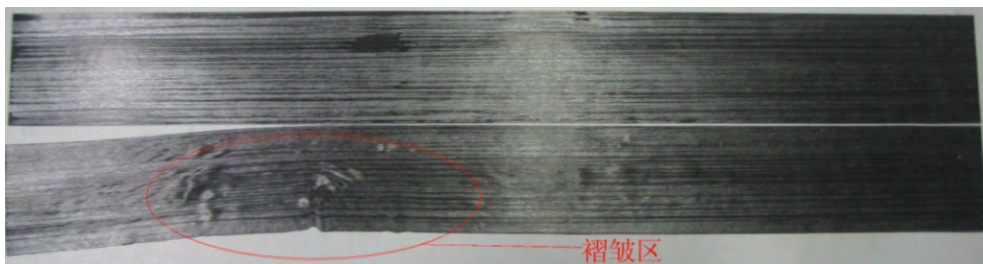


图 7 曲线铺放时预浸带的变形

图 8 纱束切送前后效果图

图 9 为铺缠轨迹规划流程, 在轨迹规划设计流程的上进行铺缠轨迹规划软件设计时, 为规避不同曲面类型、规划算法对软件通用性的影响, 将软件分为六大模块进行编写: (1) STL 文件拓扑重建模块、(2) 参考线生成模块、(3) 参考轨迹生成模块、(4) 其它轨迹生成模块、(5) 轨迹边界处理模块、(6) 轨迹规划后处理模块、(7) 轨迹仿真模块。

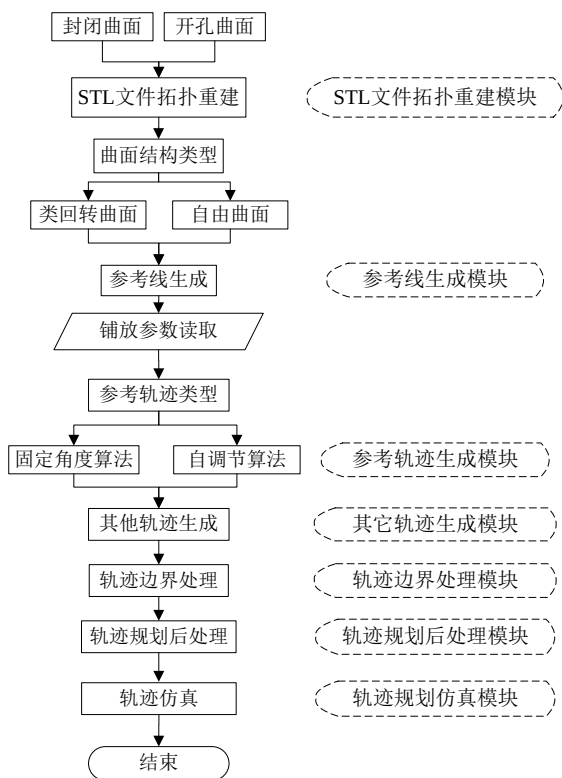


图 9 铺缠轨迹规划设计流程

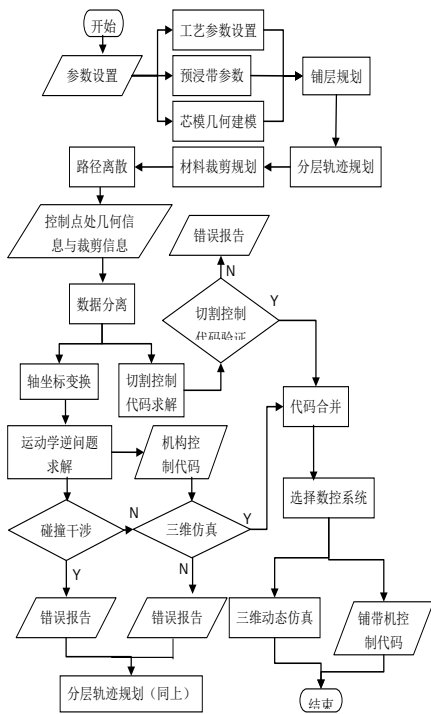


图 10 铺缠轨迹规划软件模块功能划分

五、自动铺缠成型工艺试验验证

通过自动铺放成型工艺试验,对设备功能情况、数控匹配性、程序拟合情况、预浸布自动铺放可行性、自动铺放工艺设计等方面进行摸索和验证,为后续型号产品的生产应用奠定基础。自动铺放工艺试验以具备一锥段结构和二锥段结构的某舱体为对象。通过此试验件铺放工艺摸索,实现一锥段结构和二锥段结构的自动铺放可行性,从而推广应用到三锥段结构的自动铺放成型,进而实现某异形型号全结构制品的自动铺放成型。

自动铺缠轨迹设计编程:三维模型(产品三维模型)——提取曲面——网格化(UG、SYSPLY、CATIE等)——数据重构——生成轨迹(AFP&ATL-Software1.0)——后处理(CAM软件)——自动铺放(自动铺放设备)。按照上述流程在调试期间开展多轮自动铺放成型工艺试验,不断优化材料、工艺、程序等。

1. 铺缠成型总体工艺原则

针对该产品异形锥度结构特点,从小端往大端进行平行重叠缠绕是可以实现的,但平行重叠缠绕一次铺缠成型每个舱体的布带宽度及其重叠量等难以实现,且非常难以实现一次到位而不需要进行外形面加工;如果采用平行往复缠绕,其布带宽度及其对应的重叠量同样很关键……布带变形容许情况,往复平缠以双向为佳,只要层间强度够,开缝的影响可以将至最低。另外通过前期检测烧后试样性能可以推出,平行往复缠绕比平行重叠缠绕好。因此本试验主选平行往复缠绕成型,备选重叠缠绕成型。具体三条原则如下:

(1) 纤维布带连续性原则:陶瓷化防热层近零烧蚀,带走热量少,且高温导热系数较大,必然导致表面层急剧升温导致很大热应力,防热层是热-力双功能服役。对复合材料的强度尤其是热强度提出较高要求,实现方式是尽可能保证纤维连续。原则上要求使用的布带在成型方向上为连续结构,不能使用短纤维结构形式,因此预浸布带要求为连续结构。

(2) 铺缠后不进行切削加工原则:通过前期平缠试样经过高温实验后观察可知,树脂基本挥发殆尽;从截面观察其轴向结构,可见经过外形切削后只余下短短的一截,这种纤维经过高温及高速冲刷肯定不堪一击;它的优点是环向是连续的,但是轴向纤维长度太短,无法支持环向连续纤维形成整体效应;如果是斜缠结构,则纤维在轴向以及环向均为短纤维结构,其整体强度理论上讲会更弱……因此,针对

此非烧蚀复合材料防热层另一个基本原则是尽量少加工或不加工。自动铺放成型目标是外型面轮廓度要求 < 0.5 , < 0.8 可让步接受。

(3) 轴向性能优先原则:通过力学性能测试可知,不同结构试样常温情况都差不多(树脂和纤维共同作用),超过 300°C 后树脂慢慢融化,接近 450°C 后出现急剧变化,总体趋势呈现为,高温性能排序是整体平铺(布带太宽无法实现自动化) $>$ 平行往复缠绕(布带越宽越好) $>$ 平行重叠缠绕(需要切削加工且浪费严重) $>$ 斜纹布斜缠(纤维短高温下散架) $>$ 整体模压。通过此次攻关预计可提高环向的整体强度,但是轴向在气动加热环境下是否出现沿轴向的脱开(整体环向裂纹)问题尚不能确定;因此要求通过工艺设计实现轴向拉伸性能增强。

2. 自动铺放成型工艺参数

自动铺放试验目标包含如下几个方面:① 40mm宽大步距平行往复缠绕常规布带走通;② 40mm宽小步距平行重叠缠绕验证可行性;③ 采用通过验证的铺放工艺参数、使用正式布带进行正式铺缠试验件,进行性能取样、检测、对比;④ 依据第三步结果,解决工艺设备程序可靠性、工艺程序优化、RTCP应用、编程和工艺自动化以及效率等问题。

铺缠过程中预期存在三个方面的问题:第一是两侧棱角处的加减速问题,第二是背风面两个负曲率凹面贴膜问题,第三是总体外形曲面特征条件下的布宽及其等量重叠度。第一个问题,将锐角处的R圆角偏置合适的距离进行铺缠,考虑后面的弹性压辊能够在拐点处跟上节拍;第二个问题主要还是压辊的跟随节奏;第三个问题需要对曲面进行直纹化拟合,拟合精度 < 0.5 或者 < 1 的前提下求解直纹的长度,从而得到最佳布宽。重叠量影响到轴向拉伸性能,轴向性能跟不上可能导致环向纤维散架而不耐冲刷。



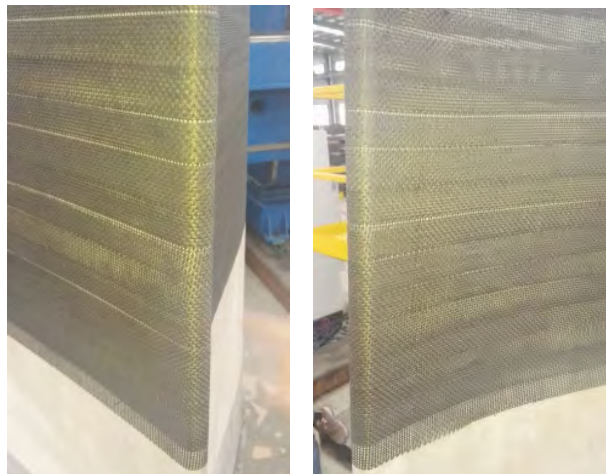


图 11 自动铺缠改进前试验效果

自动铺放过程中按照平行往复铺缠 + 重叠铺放设计结合的思路进行铺缠轨迹设计。原因是为避免气流冲刷，因此收缠的最后一层要求从大端向小端进行，以形成顺气流结构；同时为提高重叠铺放的表面轮廓度，需进行重叠铺放等距错距循环铺放。平行往复铺放设计为：自动铺放从上向下进行一次，然后自动铺放从下向上进行一次，接着人工铺层一张用于提高轴向性能；后续则按此重复铺放直至厚度满足设计

值，铺放至最终厚度时取消人工铺层那一层。重叠铺放设计从小端向大端进行，布带宽度暂选 40mm，采用 55% 的重叠量进行铺放，按照 4—8 次错距循环铺放。铺缠顺利进行后为提高整体销量，逐步调整加宽布带到 60—80mm；进给量为由 20mm/r 逐步提升到 30mm/r。

按照方案确定的铺放参数设计进行了 8mm 厚度隔热层的自动铺放成型摸索及验证，初步确定一锥和二锥段参数如下：开启加热 180℃（传感器显示温度为 123℃），张力输出值为 14%，主压辊压力为 200N，辅压辊压力为 65N，收膜张力为 0.3N，缓冲张力为 1N，速度倍率为 100%。针对母线锥度较大部分，采用 60mm 布带铺放易形成褶皱或架桥，后采用 40mm 布带铺放成型；针对母线锥度较小部分，采用 60mm 布带进行铺放，采用较大宽度布带进行铺放，铺放周期从 1h6min 降低为 44min；非 RTCP 控制程序，单次铺放周期为 1 小时 7 分钟 15 秒。如图 11 和图 12 分别为铺放改进前后的实物效果对比示意图。



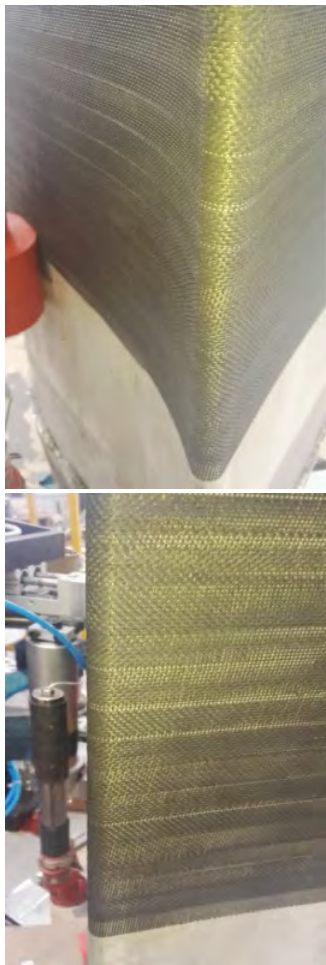


图 12 改进后的自动铺缠表现质量

3. 异形舱体自动铺缠试验小结

针对目前的异形结构产品实现自动铺放是可行的，自动铺放程序和轨迹可行性基本得到验证，但效率亟待提高；不论往复铺放，还是重叠铺放，建议后续以 40mm 布宽为基础，布宽过大易形成大褶皱，布宽过小可能影响母向性能；往复铺放和重叠铺放表现质量通过调整重叠量为 55%，同时在布宽范围内等距错位分 4—8 次循环，均匀化表现不平度，有效的提高了表面轮廓度。

通过多次调试，对自动铺放成型的效率和质量（目前质量问题主要包含褶皱、架桥和波纹状）两方面影响因素进行了初步摸索和验证，详见下图所示。针对网格预浸布在不同结构锥段上的铺放工艺参数进行了研究，掌握了异形结构防热层制品的自动铺放成型参数。如图 13 为总结的铺缠试验工艺质量问题结构树，根据质量故障结构树可以针对铺放工艺过程中的具体问题采取有效的控制改进措施。

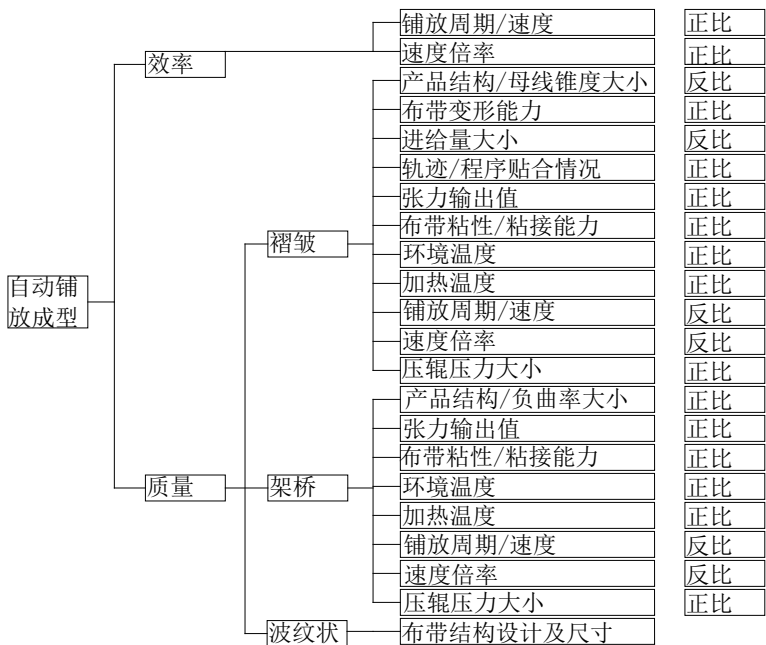


图 13 铺缠试验工艺质量问题结构树



六、铺缠轨迹优化与 RTCP 控制

1. 自动铺缠 RTCP 控制优势

国内首台立式八轴控制七轴联动自动铺缠成型装备数控系统采用华中数控 HNC848，系统具备多轴联动控制功能，如图 14 所示。经过试验验证，数控系统稳定可靠。采用 RTCP 控制和非 RTCP 控制的铺缠轨迹及产品铺缠质量和效率存在较大差异。

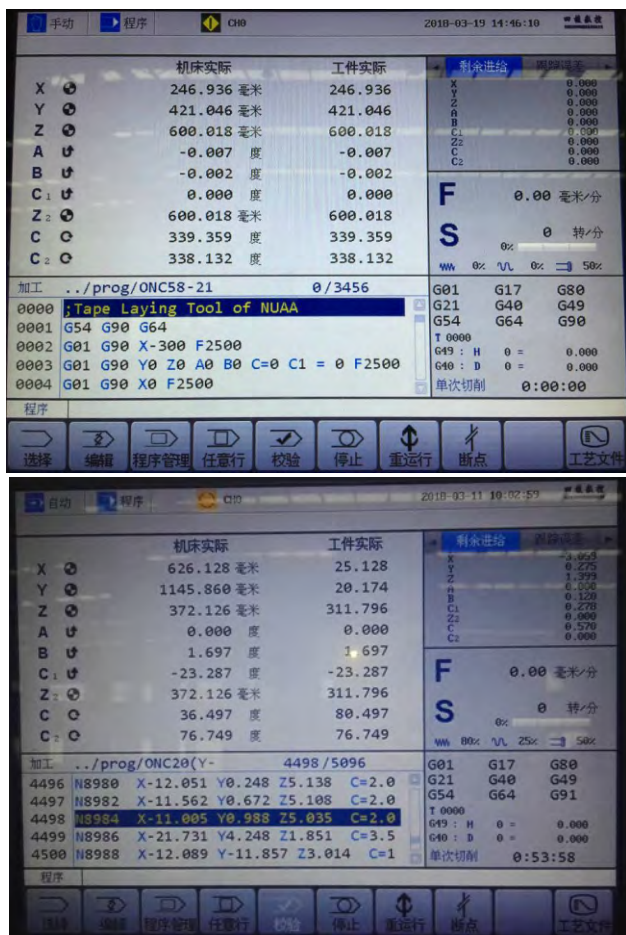
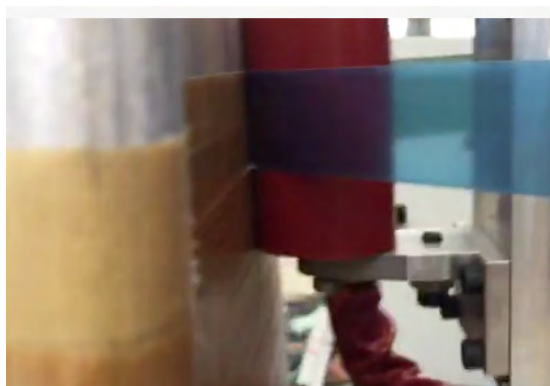
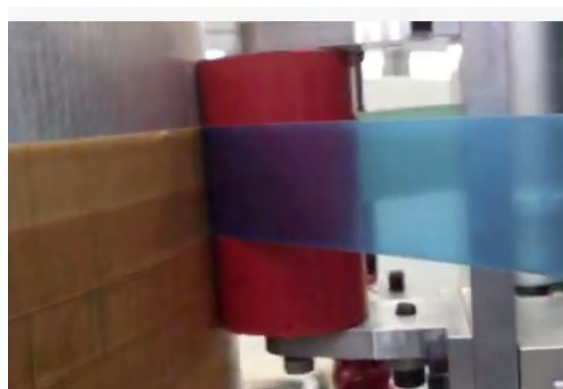


图 14 华中数控 HNC848 自动铺缠控制系统

采用非 RTCP 控制铺缠时，主要存在铺缠效率不高和轨迹速度不稳定。铺缠经过工件棱角边缘时，铺缠速度显著变慢，导致铺缠效率不高；铺缠工件其他区域速度不稳定，凹面的速度大于凸面的速度，导致机床速度变化大，如图 15 所示。



压辊过楞缘



压辊过凹面



压辊过凸面

图 15 铺缠过程中压辊姿态示意图

非 RTCP 铺缠时整个铺缠过程中速度不稳定，提速时部分联动轴会出现抖动，尤其是旋转工作台 C 轴抖动十分明显，如图 16 所示。两位一个方面是铺缠表现为增材加工特点，压辊气缸浮动行程有限，铺到一定厚度后需要修改类似于五轴机床切削时的刀具长度后重新生成铺缠成型程序，操作比较麻烦。主要原因是计算轨迹弧长时没有考虑机床结构。多轴小线段拟合是在多维空间下。速度规划受不正确的曲线拟合结果的干扰，如图 17 所示。

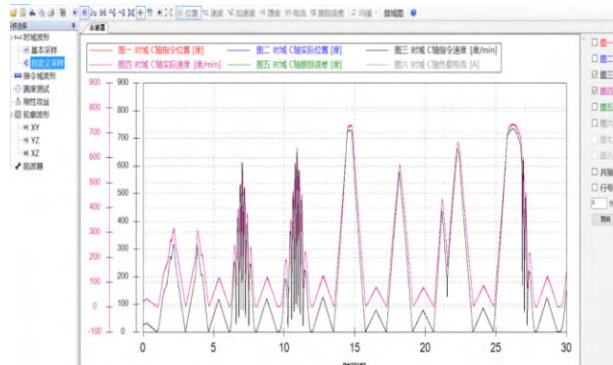


图 16 SSTT 采集 C 轴速度和速度波动曲线

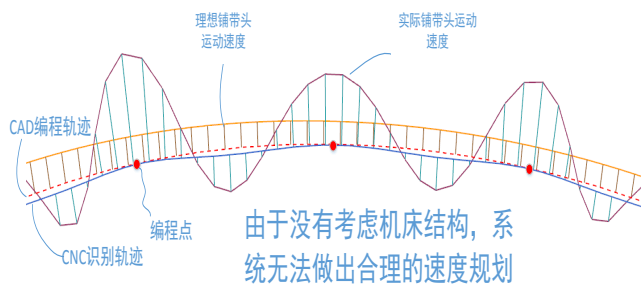


图 17 速度规划曲线拟合误差

采用 RTCP 功能进行七轴铺缠联动控制时，在进行系统内部运动学求解运算时，考虑了机床的运动结构参数。RTCP 功能控制原理是在工件坐标系下进行样条拟合与速度规划，使得机床运动更平稳，没有频繁的加减速现象，加减速也不会出现抖动的现象；提高了各运动轴的光顺性从而缠效果效率更高；采用进给量为 2000 时，铺缠一圈时间大约为 1m8s；非 RTCP 时间大约为 1m50s。与此同时 RTCP 可以做刀具长度补偿，解决厚度补偿的问题从而提高编程的效率。

2. 铺缠系统设计改进措施

按照调试确定的状态对主压辊与辅压辊进行定型设计与完善，硬件方面改进主要包含压辊分段设计、勾腿间距优化、提体分离薄膜优化、主辅压辊压力优化组合等。同时规划采用双带铺放机头设计及验证，以便进一步提高效率。同时不减少预浸布预压时间。

数控系统方面，将多轴联动 RTCP 控制功能完善到铺缠轨迹控制程序中，以消除铺放过程中的“脉冲式”问题，实现铺放轨迹的连贯性与平顺性。自动铺放数控程序方面，需要对程序点数进行进一步优化，实现更优的拟和效果；进一步提高效率；同时需对铺放程序进一步研究，设计适应周向不同位置的张力输出值、铺放速度等参数动态自适应调整，以便合理控制不同位置铺放质量。

七、技术总结与创新点

数控双立柱铺缠带机具备七轴联动功能，可实现绝大部分异形舱体结构复合材料壳体制品铺 / 缠带成型。以某异形舱金属壳体为对象，采用数控双立柱铺缠带机进行了多轮自动铺放成型工艺试验，通过采用不同布宽、不同铺放工艺参数、不同的铺放程序控制交叉组合进行了自动铺放工艺摸索。摸索过程中对程序轨迹优化、数控系统匹配、铺放输出张力、

热风温度、薄膜收卷方式、铺放参数设计优化等方面进行了较为全面验证，最终实现了某异形舱防热层试验件的自动铺放成型。

国内首台双柱立式大型数控铺缠一体化成型装备攻克了系列关键技术，拥有较多具有自主知识产权的技术创新亮点。主机采用湖南江南四棱数控开发的立式双柱铺缠主机，提高新型复合材料干法铺缠适应性；铺带头核心功能部件全部采用具有自主知识产权的南航铺缠头；自动铺缠编程与仿真采用南航自主二次开发铺放软件；采用国产华中数控系统 HNC848 进行八轴控制七轴联动铺放；系统配备 30m/min 高速进给系统提高异形曲面铺缠的适应性，同时通过 RTCP 进行控制有效的提高了铺放轨迹的光顺性和铺放效率；采用 40–60mm 宽布带，设置 55% 铺放重叠量结合非重叠区等距细分进行往复循环铺缠成型提高铺放的轮廓度。