

# 飞机大梁带缠绕成型装置的设计及应用

## Design and Application of Winding Device for Aircraft Crossbeam Strap

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司工程技术部 朱剑英

**[摘要]** 基于模块化、参数化设计方法,将数字化技术用于加工飞机大梁带缠绕成型装置的设计中,可有效简化设计过程和提高缠绕成型装置的研制效率,满足新机研制的要求。针对飞机大梁带成型的特点,对传统缠绕成型装置中存在精度低、效率低的问题提出了逐层缠绕一步到位的缠绕方法,解决传统缠绕成型装置裁剪时所造成的原材料的浪费和成型误差。介绍了缠绕成型装置的工作原理和总体结构,并阐述了缠绕成型装置在缠绕过程中产生缺陷的原因和影响大梁带加工质量的主要因素。该缠绕成型装置研制的成功,为保证飞机大梁带达到相应标准要求提供了可靠的科学手段,并可为同类装置的设计在理论和实践上提供了可行的途径。

**关键词:** 复合材料 大梁带 滑块组件 缠绕组件

**[ABSTRACT]** Based on means of modularization and parameterization, digital technology is used in the design of manufacturing aircraft crossbeam strap winding device. It is effective to reduce design process and improve the device development efficiency to meet new aircraft development requirement. For the device specialty, a way is given to improve precision and efficiency, reduce material waste and manufacturing error. The device working theory and total structure, fault reason and main factor affecting quality are introduced. The device provides a scientific means to ensure plane crossbeam strap to meet relevant standard requirement and gives a way in theory and practice for similar device.

**Keywords:** Composites Crossbeam strap Slip block component Winding component

缠绕技术是近年来发展最快、最有效的复合材料成型制造技术。飞机大梁带成型的加工就是将浸过树脂胶液的连续纤维按照一定规律均匀地缠绕到缠绕成型装置上,经过整形固化和脱模制成大梁带的最终形状。因此飞机大梁带成型质量的好坏直接取决于缠绕成型装置的设计质量。目前国内这方面缠绕成型装置的结构大多比较庞大,缠绕成型装置需绕缠绕机中心轴进行旋转缠绕,最后所有预浸带缠绕成一个环体,缠绕结束

后再用切割刀按每层裁剪图的要求进行手工裁剪处理。该技术陈旧、落后,与西方航空大国相比差距明显,缠绕成型精度低、效率低、工人劳动强度大,无法有效改变厚度,经常出现缠绕厚薄不均和缠偏等缺陷造成成型精度误差,又不能连续生产,在成品后续固化过程中经常会出现很多问题,降低了最后成品的合格率,并产生预浸带的浪费。这制约了飞机大梁带缠绕成型制造技术的发展和水平的提高,而国内关于飞机大梁带缠绕成型装置的设计在理论上缺少明确阐述,在结构和参数方面存在弊端。

由于飞机客户的需求在不断变化,现代飞机正在进入更新换代的时代,传统的缠绕成型装置已不能满足产品成型质量的要求。因此为了提高飞机大梁带缠绕效率,保证缠绕精度,避免预浸带浪费,首先脱离传统缠绕成型装置的设计方法,结合飞机大梁带裁剪图和成型工艺要求,将缠绕成型装置由原来的旋转运动设计成相对缠绕头静止不动,而缠绕头相对于缠绕成型装置做旋转运动;再通过采用逐层缠绕一步到位的缠绕方法和模块化、参数化设计方法设计出一种成型精度高、通用性比较强的飞机大梁带缠绕成型装置。

### 1 缠绕成型装置的工作原理

根据缠绕机缠绕工艺的要求,首先依据大梁带的内形预先制作好芯模(如图1所示)。芯模通过上、下定位板及螺钉将其定位和固定在缠绕组件上的定位中心件上。通过采用模块化、参数化设计方法,按照大梁带每层所要裁剪预浸带长度的大小,设计出几组滑块。为保证

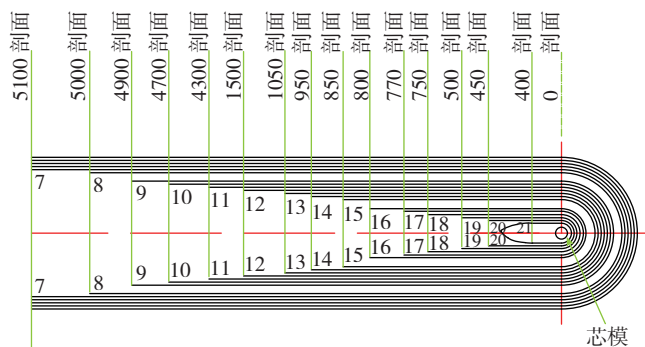


图1 飞机大梁带裁剪图

Fig.1 Tailor diagram of aircraft crossbeam strap

每层预浸带受力均匀,再通过力学计算,找出一些参数进行数控编程,缠绕机上的缠绕头就在这些数控软件编程的控制指令下自动地移动到指定空间位置,将预浸带一端缠在芯模上,然后将第一层预浸带按照第一层规定的路径由起点到终点平稳、精确地缠绕在芯模和滑块组件1上。为了避免相邻2层预浸带之间产生缝隙,并排除层与层之间的空隙,再用压辊对已缠绕的预浸带进行预压,以使缠绕制品致密牢固,有利于树脂的渗透和带层之间气泡的排出,并防止预浸带起皱。每缠一层滑块就沿导轨向前滑动,滑动到上一缠绕层滑块的后面后静止不动,缠绕头就按照这层缠绕规定的路径进行缠绕,使缠绕过程中预浸带受力均匀,重复以上操作直至制成所需要的层数。缠绕完毕后,沿着切割区域只需经过一次裁剪就可以满足各缠绕层长度的要求,再经过固化和脱模制成大梁带的最终形状,完成大梁带成型的加工。

## 2 缠绕成型装置总体结构的设计

### 2.1 缠绕成型装置的设计依据

(1)要有足够的强度和刚度,能够承受制品成型加工过程中施加于缠绕成型装置的各种载荷,如缠绕张力、固化应力等。

(2)能满足制品形状和尺寸精度要求,如形状尺寸、表面质量等。

(3)在保持制件和成型装置完整性的条件下制件和成型装置能顺利分离。

(4)保证纤维在缠绕过程中不打滑和架空,纤维应均匀地完全覆盖在芯模和滑块组件的表面上。

### 2.2 飞机大梁带缠绕规律的分析

任何一种缠绕类型都是缠绕成型装置与缠绕头做相对运动完成的,任意绕制出来的制品纤维分布情况极不均匀,不能满足制品的设计要求。为了避免缠绕制品出现堆积造成浪费,减少生产工序和成型精度误差,提高最后成品的合格率,决定按图1所示各层预浸带裁剪的位置,从最内层开始直至最外层,一层层缠绕,最后缠绕成所需的形状。

### 2.3 缠绕成型装置的组成及其结构性能

缠绕成型装置是由支架1、缠绕组件2、滑块组件3、缠绕架4组成,如图2所示。

#### 2.3.1 缠绕组件

缠绕组件由螺柱1、螺母2、上定位板3、定位中心件4、下定位板5、连接板6、螺钉7、芯模8、导向件9、插板10、挡板11组成(如图3所示),用来定位和固定芯模,保证预浸带在缠绕过程中的缠绕精度。

#### 2.3.2 滑块组件

滑块组件由滑动罩1、滑块2、导柱3、螺钉4组成(如

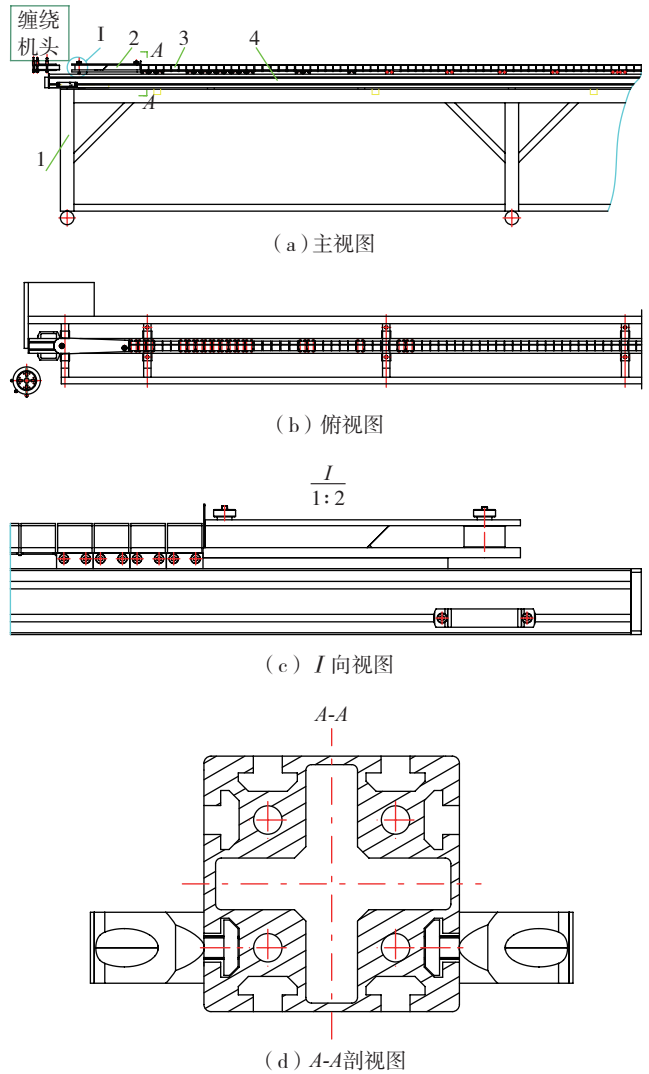


图2 飞机大梁带缠绕成型装置  
Fig.2 Winding device for aircraft crossbeam strap

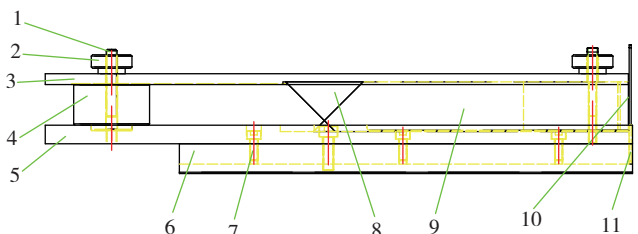


图3 大梁带缠绕成型装置缠绕组件主视图  
Fig.3 Main view of aircraft crossbeam strap winding device component

图4所示)。根据大梁带裁剪图各缠绕层大小的要求设计成几组模块式的滑块,每组滑块根据各缠绕层大小的要求在缠绕导轨上进行滑动。当滑块组件滑动到它所需的位置时静止不动,缠绕头就绕着它进行旋转缠绕,来满足各缠绕层的质量要求。为了充分发挥大梁带在缠绕过程中纤维的拉伸强度,滑动罩采用耐磨性和回弹性比较好的尼龙做成塑模。

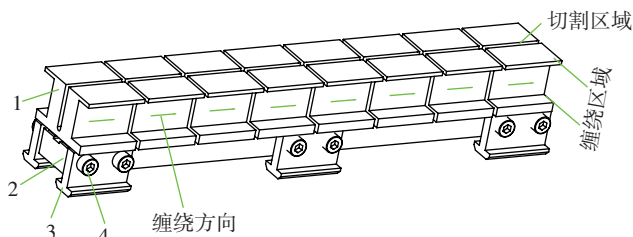


图4 飞机大梁带缠绕成型装置中一组滑块  
Fig.4 A group of slip block in aircraft crossbeam strap winding device

### 2.3.3 缠绕架

缠绕架由缠绕导轨 1、把手 2、螺钉 3、螺母 4、挡板 5 组成(如图 5 所示),用来固定和支撑缠绕组件并对滑块组件起到导向作用。

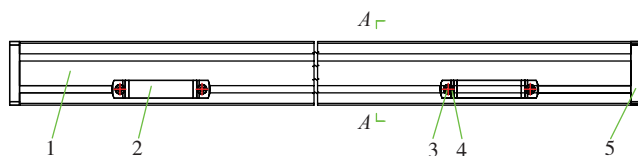


图5 飞机大梁带缠绕成型装置中缠绕架的主视图  
Fig.5 Main view of aircraft crossbeam strap winding device winding rack

## 3 缠绕成型装置总体结构的特点

- (1) 按产品承受应力情况来设计纤维的缠绕顺序,使之充分发挥纤维的抗拉强度,使产品实现等强度结构。
- (2) 因连续生产可减少材料的损耗和缠绕时间。
- (3) 预浸带可以直接裁剪,一次成形,提高成型精度和生产效率。
- (4) 避免缠绕制品出现堆积造成浪费,减少生产工序和成型精度误差。
- (5) 避免预浸带交织点与纤维末端的应力集中。
- (6) 传力直接,固化后部件易于移走,避免纤维扭曲及缠绕机和缠绕装置干涉<sup>[1]</sup>。

## 4 大梁带缠绕成型装置使用及效果

### 4.1 大梁带缠绕成型缺陷种类和原因

表 1 即为大梁带缠绕成型缺陷种类及其原因分析<sup>[2]</sup>。

### 4.2 纤维在缠绕过程中实现稳定缠绕的必要条件

#### 4.2.1 纤维不架空的条件

根据缠绕成型装置曲线上  $P$  点受力图(如图 6 所示),可知在曲线上任意取一小段  $\Delta l$ ,  $\Delta l$  在受到  $\vec{F}_1$  (缠绕机的纤维拉力)、 $\vec{F}_2$  (纤维的张力)、 $\vec{F}_p$  (缠绕面对纤维支撑力)、 $\vec{f}$  (纤维与缠绕面之间产生的摩擦力)这 4 个力作用下平衡。在缠绕过程中当纤维拉紧时,应贴紧芯模

表 1 大梁带缠绕成型缺陷种类和原因

| 缺陷          | 缺陷产生的原因                  |
|-------------|--------------------------|
| 内表面缺陷       | 缠绕成型装置表面清理不完全、缠绕层出现滑移    |
| 裂纹          | 材料表面和树脂粘结不牢              |
| 分层          | 预浸带质量不均匀、固化工艺不当、隔离物埋入缠绕层 |
| 树脂积聚产生气泡和疏松 | 预浸带含胶量过高、固化时树脂流动聚集       |
| 树脂固化不完全     | 固化压力不足                   |
| 壁厚不匀        | 压紧力大小不匀                  |

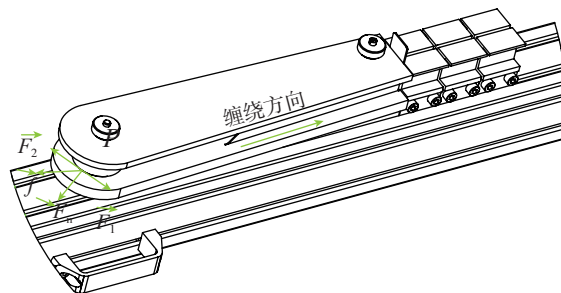


图6 大梁带缠绕成型装置曲线上P点受力图  
Fig.6 P point stress graph of aircraft crossbeam strap device curve

和滑块组件的表面而不应离开芯模和滑块组件的表面,这就取决于正压力  $\vec{F}_p$  的方向。如果正压力  $\vec{F}_p$  指向远离芯模和滑块组件的表面则将产生架空现象,反之则不架空。根据公式以及法矢量  $\vec{n}$  的取向,得出纤维缠绕不架空的条件:

$$F_p \cdot n < 0, \text{即法曲率 } K_n < 0.$$

#### 4.2.2 纤维不打滑的条件

纤维之所以能经受一定的侧滑力而不打滑,主要靠 2 种材料之间的摩擦力,所以根据力学平衡原理得到了纤维稳定缠绕的充要条件:

$$|\vec{f}| \leq |\vec{f}_{\max}| = |\vec{F}_n| \mu_{\max}, \text{才能使纤维不打滑。}$$

一般情况下,  $K_n \neq 0$  时,  $|K_g/K_n| \leq \mu_{\max}$ ,  $\lambda = |K_g/K_n|$ 。

当  $K_n < 0$  时得到了纤维稳定缠绕的充要条件:

$$\lambda = |K_g/K_n| \leq \mu_{\max},$$

其中  $\vec{F}_n$  为正压力,  $K_n$  为纤维上  $P$  点的法曲率,  $\mu_{\max}$  为最大摩擦系数,  $\lambda$  为打滑系数,  $K_g$  为纤维上  $P$  点的曲率<sup>[3]</sup>。

### 4.3 缠绕过程中影响大梁带加工质量的主要因素

(1) 缠绕张力。缠绕张力是缠绕工艺的重要参数,张力的均匀性对制品质量影响极大,因此在缠绕过程中必须严格控制纤维缠绕张力大小。

(2) 缠绕速度。缠绕速度是指纤维缠绕到缠绕成

型装置上的线速度,缠绕速度直接影响生产效率。

(3)环境温度、湿度。缠绕过程中环境的温度、湿度对制品有很大影响,树脂胶液粘度随温度降低而增大,为保证胶纱在缠绕过程中的浸滞效果,同时避免某些固化剂低温析出,因此在缠绕过程中须严格控制温度。在缠绕过程中湿度不应过大,否则纤维吸潮后缠绕到制品上会使纤维与树脂间粘结力降低,加速制品老化。

(4)胶液浸滞及含量控制。复合材料制品中胶液含量的高低变化及分布对纤维缠绕制品性能影响很大,一是直接影响制品质量和厚度,二是从强度角度看,含胶量过高使制品复合强度降低,含胶量过低使制品空隙率增加,制品气密性、耐老化性能及剪切强度下降,同时影响纤维强度的发挥。胶液含量过大的变化会引起不均匀的应力分布,并在某些区域引起破坏,因此纤维浸胶过程必须严格控制含胶量大小<sup>[4-5]</sup>。

#### 4.4 缠绕成型装置应用的效果

对图7所测数据进行分析得到:用此缠绕成型装置缠绕的大梁带所受的缠绕应力值仅仅在前几层时增长很快,而当达到一定值后,其值便处于平稳状态,即不随缠绕而改变。在缠绕完毕后各层缠绕成型装置所受缠绕应力从根上实现了等应力分布,可以很好地满足缠绕成型精度的要求。

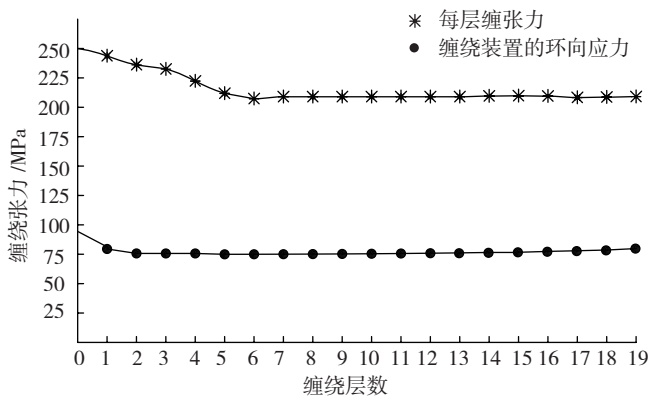


图7 大梁带缠绕成型装置缠绕应力变化曲线

Fig.7 Variation curve of winding stress of aircraft crossbeam strap winding device

## 5 结论

(1)采用逐层缠绕一步到位的缠绕方法,解决了传统缠绕成型装置裁剪时所造成原材料的浪费和成型误差。

(2)可以实现直接裁剪一次成型,不需要再进行二次加工,解决了缠绕成型效率低的问题。

(3)采用参数化和模块化的方法可以有效地改变缠绕层的厚度,适合任意长度产品的加工,弥补了传统缠绕工艺的不足。

(4)只需更换芯模和滑块组件的数量就可以满足任何机型飞机大梁带缠绕成型工艺要求。该缠绕成型装置具有较高的通用性和实用性,达到了飞机大梁带缠绕成型国内国外相应标准的要求,获得国内外专家的认可,在国内同行业处于领先水平。

### 参考文献

- [1] 黄家康. 复合材料成型技术. 北京: 化学工业出版社, 1999:41-42.
- [2] 沃丁柱. 复合材料大全. 北京: 化学工业出版社, 2000:36-39.
- [3] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 车剑飞. 复合材料及其工程应用. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 尹洪峰, 魏剑. 复合材料. 北京: 冶金工业出版社, 2010:4-10.

(责编 亿霖)

(上接第29页)

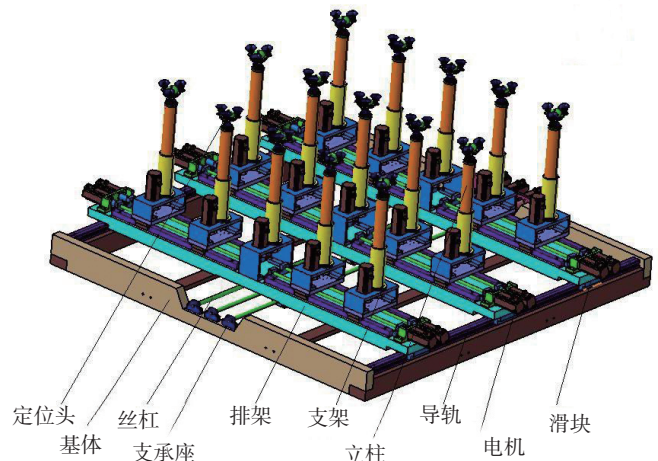


图7 定位工装系统的结构图

Fig.7 Structure diagram of tooling system

法的研究,提出了曲面定位点坐标的求解方法,通过系统结构的柔性设计,使得一个工装系统可以同时满足多个薄壁类零部件的快速装夹要求,实现装配工艺的柔性化、敏捷化。

### 参考文献

- [1] 范玉青. 航空宇航制造工程飞行器制造技术. 重庆: 重庆出版社, 2000.
- [2] 张楠, 汤军社. 数字化飞机钣金件加工定位用柔性夹具的设计. 中国制造业信息化, 2010, 39(1): 41-44.
- [3] 邹方, 薛汉杰. 飞机数字化柔性装配关键技术及其发展. 航空制造技术, 2006(9): 30-35.
- [4] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

(责编 深蓝)