

# T型加筋壁板共固化技术研究

闫恩玮, 杨绍昌

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

**[摘要]** 在系统梳理加筋壁板共固化工艺的基础上,以T型加筋壁板为研究对象,针对压力传导不均匀、蒙皮凹陷、内部质量控制等问题,通过改进长桁制造工艺、优化预压实参数、调整芯模配合方式、简化长桁定位方式等措施,进一步完善了T型加筋壁板共固化工艺的技术细节。所得制件表面平整、内部质量好、长桁轴线度准确。

**关键词:** 共固化; T型加筋壁板; T型长桁制造; 压力均匀传导; 内部质量; 轴线度

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.14.050



闫恩玮

硕士、工程师,主要从事先进复合材料制造工艺研究。

得益于较强的可设计性,复合材料在航空航天等领域得到了广泛的应用,由最初的内装饰零件逐步扩展至次承力件、主承力件,直至与合金钢、铝合金、钛合金并称为飞机制造的4大结构材料<sup>[1]</sup>。目前,复合材料的用量已成为衡量一款飞机先进程度的重要指标之一<sup>[2]</sup>。随着复合材料用量的增大,其结构的复杂程度不断攀升。能够充分发挥复合材料的潜力、大幅降低重量、进一步简化装配关系的整体化结构,逐步得到了设

计人员的青睐。通过胶膜将若干根长桁与一张蒙皮粘接在一起的加筋壁板组件即为整体化结构的典型代表。依据组合时长桁和蒙皮固化状态的不同,加筋壁板组件的制造工艺分为共固化(长桁、蒙皮均未固化)、共胶接(长桁或蒙皮已固化)、二次胶接(长桁和蒙皮均已固化)3种。共固化工艺由于能够明显缩短长桁和蒙皮暴露在高温环境下的累计时间,受到了研究人员的关注。但是,因组合时长桁、蒙皮均为湿态,在型面及内部质量控制等方面存在较多技术难点,研制风险较高。

长桁的净尺寸制造,长桁与蒙皮的精确组合,长桁、蒙皮及胶接部位的内部质量控制等是采取共固化工艺制造加筋壁板的技术关键点。杨博等<sup>[3]</sup>通过成型工装材质优化,使用专用定位框架等措施,提高了工型加筋壁板的外形精度和长桁轴线度。叶宏军等<sup>[4]</sup>通过水溶性芯模,成功采用共固化工艺制造出帽型加筋壁板,并深入探讨了不同的填充方式对帽型筋R区成型质量的影响。马刚等<sup>[1]</sup>从民用航空制造符合性审查的角度,探讨了帽型加筋壁板的共固化工艺;深入研究了气囊、橡胶气囊在

压力传递、制件表面质量控制、使用寿命等方面的差异,确定了一套行之有效的提高帽型筋质量的工艺控制措施。李林<sup>[5]</sup>通过采用设计制造一体化技术,验证了蒙皮的自动铺带,长桁与蒙皮的数字化对合等方案,大幅提高了T型加筋壁板的制造精度及质量稳定性。马军等<sup>[6]</sup>从低成本制造的角度探讨了共固化技术的工程化应用,通过采用金属+橡胶的组合芯模,进一步提高了产品的内部质量以及R区的表面质量,通过控制含胶量、气体导流、优化测试项目等措施,大幅降低了共固化技术工程应用的成本。

通过大量技术人员的努力,加筋壁板的共固化技术得到了持续不断的完善,在生产制造单位得到了不同程度的应用,所制产品的复杂程度及外形尺寸也在不断增加。但是,加筋壁板的共固化工艺依然存在一些值得改进的技术细节,本文以T型加筋壁板为研究对象,通过采取预压实参数优化、硬-软模配合、整体压力垫等措施,改进了长桁制造方法、完善了组件的压力传导、消除了胶接过程中可能产生的蒙皮凹陷,进一步完善了加筋壁板的共固化技术细节。

## 制造方案

### 1 结构特点

试验件为 T 型加筋壁板组件,由 1 张蒙皮、7 根 T 型长桁组成。蒙皮长度约 4000mm,尖部宽度约 900mm,根部宽度约 1200mm。蒙皮共分为 8 个厚度区域,由根部至尖部逐渐减薄,最厚处约 3.5mm,最薄处约 1.6mm。蒙皮上、下表面均为一层 T800 级碳纤维织物,其余为碳纤维单向带。长桁制造流程见图 1,壁板的制造流程见图 2。

长桁截面为 T 型(图 3),变厚度,带下陷,腹板高度约 30mm,缘条基

本宽度约 50mm。长桁由根部至尖部逐渐减薄,厚度约 2.7mm。长桁外表面为一层 T800 级碳纤维织物,其余为碳纤维单向带。长桁基准间距约 120mm,最大间距约 260mm。

### 2 材料

试验件主材料选用中航复材出品的碳纤维单向带及织物。辅助材料选用 Airtech 公司出品的真空袋、隔离膜、透气织物等,材料具体信息见表 1。

### 3 质量要求

长桁轴线度要求  $\pm 1.5\text{mm}$ 。纤维不允许出现屈曲,内部不允许有夹杂。允许分层缺陷的最大尺寸为 12mm,内部孔隙率要求  $\leq 1.5\%$ 。

## 结果与讨论

### 1 长桁制造

长桁制造是 T 型加筋壁板制造流程中的一个重要环节。T 型长桁一般由 4 部分组成。左、右两侧 L,中间 R 区填充物和底缘。T 型长桁的制造包括长桁各部分的铺贴及组合两个工艺过程。

制造 T 型长桁有多种工艺方法,其中,上、下合模结构较为常见。上、下合模结构有利于固化压力的传导,但必须进行上芯模的起吊和翻转,当上芯模尺寸较大时,需要使用专用的起吊及翻转设备,才能顺利完成上芯模与下芯模的对合,制造流程较为复杂,风险较高,并且采用上、下合模结构时,填充物的添加、底缘面的铺贴等操作都必须侧向进行,在重力作用下,可能出现填充物、底缘面的滑移,影响 T 型长桁的内部质量。

为提高产品质量、简化操作、降低风险,本试验制定了 T 型长桁左、右对合的制造方法。长桁一侧成型模固定在型板上,另一侧可以自由滑动。成型模端头安装有导引块,沿导引块推动滑动芯模,完成左、右成型模的精确对合(图 4)。其制造流程为:(1)在左、右成型模上分别铺贴 2 个 L;(2)推动滑动芯模,完成左、右两侧 L 型的对合;(3)放置 R 区填充物;(4)铺贴底缘面。采取此方法,将 T 型长桁上、下对合的方式转化为左、右对合,省去了成型模起吊、翻转等步骤,制造流程大为简化,操作风险大幅降低。在导引块的作用下,T 型长桁对合的精确性和稳定性更高。采用左、右对合的方式,填充物的放置、底缘面的铺贴均处于水平状态,更有利于操作者的实施。本装置的通用性较强,可用于湿态或干态 T 型长桁的铺贴、组合及固化。本试验采用此成型模固化了若干根 T 型长桁,制件表面光滑平整,内部致密。

采用共固化工艺时,由于后续无

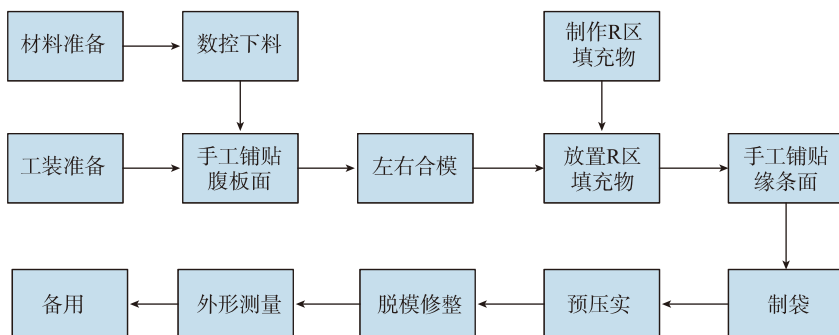


图1 长桁制造流程

Fig.1 Fabrication process of stringers

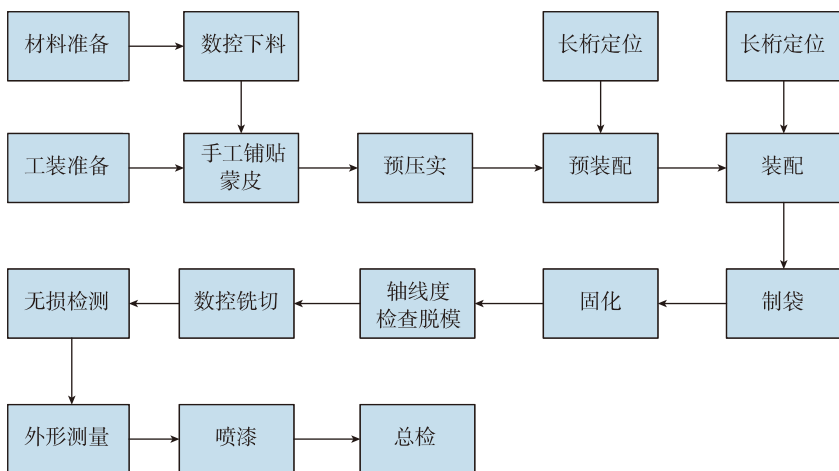


图2 壁板制造流程

Fig.2 Fabrication process of panel



图3 试验件截面图

Fig.3 Sectional view of part

表1 主辅材料清单

材料名称	牌号	使用部位	供应商
碳纤维单向带	—	蒙皮、长桁	中航复材
碳纤维织物	—	蒙皮、长桁	中航复材
玻璃布	BA9916-II/EW100A	长桁	中航复材
胶膜	J-116	长桁	黑龙江石化院
玻璃布	MXB-7668/7781	压力垫	Cytec
硅橡胶	Airpad	压力垫	Airtech
无孔隔离膜	Release Film A4000	—	Airtech
有孔隔离膜	Release Film A4000P3	—	Airtech
密封胶带	GS213	—	Airtech
密封胶带	GS213-2	—	Airtech
透气吸胶材料	Airweave N10	—	Airtech
压敏胶带	Flashbreaker	—	Airtech
脱模剂	Frekote 700NC	—	Loctite Frekote
脱模布	Vac-Pak 60001	—	Richmond

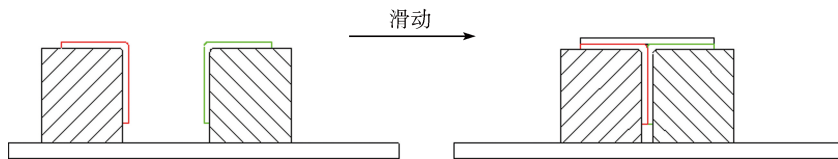


图4 长桁工装示意图  
Fig.4 Sketch of stringer mould

法对余量进行修整，T型长桁必须采用净尺寸制造的方法。采用净尺寸下料，受制于手工操作的准确度，长桁铺贴边缘的齐整度较差，容易出现空腔等缺陷。本试验采用带余量下料，铺贴后手工裁剪至净尺寸的方法，长桁组合完毕后，净尺寸转移至蒙皮。降低了操作难度，提高了长桁边缘的齐整度。图5是固化后的长桁，可以看出各边均光滑平整。

R区填充量的选择对长桁内部质量至关重要。填充量过大，长桁底面易出现凸起；填充量过小，长桁内部易出现空腔。组合时，长桁各部分均为湿态，其厚度及内部质量与固化后的状态相比，存在较大的差异。因此，在计算填充量时，需要充分考虑这一差异。本试验的实际填充量按公式(1)计算：

$$A = \alpha A' \quad (1)$$

式中， $A$ 为T型长桁组合时的R区的实际填充量， $A'$ 为按照数模计算

的理论填充量， $\alpha$ 为变化系数。 $\alpha$ 应综合考虑材料的基本特性及固化前、后R区截面积的变化，其取值一般在0.8~1.5之间。

常用制造R区填充物的方法包括：(1)将单向带手工捏制成圆柱状；(2)使用拉挤设备按所需截面尺寸制造填充物。采用手工方法，圆柱状填充物与所需外型不完全相符，在组合过程中，易发生单向带的屈曲、皱折。固化后，易出现空腔、鼓包等缺陷。采用拉挤设备制造填充物，其外型更为准确，但是制造成本相对较高，不利于小批量产品的制造。

本试验采用成型模制造R区填充物(图6)，其填充量按公式(1)计算，尺寸参考长桁R区理论尺寸。在保证外形准确度的前提下，大幅降低了生产成本。T型长桁R区平整，无纤维皱折、空腔等缺陷。

## 2 预压实参数优化

预压实工艺是指在复合材料零

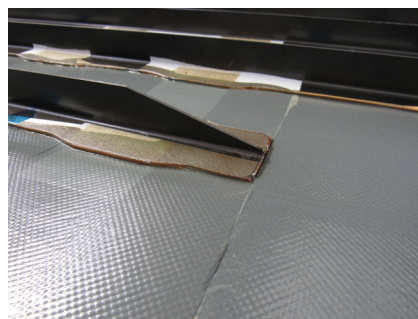


图5 固化后的长桁  
Fig.5 Stringers after curing

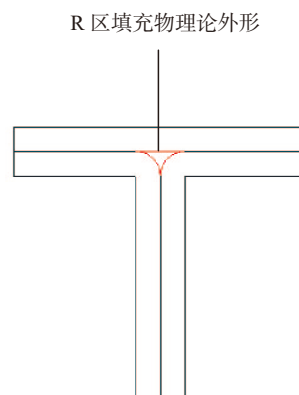


图6 R区填充物外形  
Fig.6 Shape of the fillers

(组)件正式固化前，通过热压罐或采用机械加压的方式，提升制件的内部质量。采取预压实工艺，不应影响后续工艺，降低零(组)件的质量，其压力不宜高于固化压力，温度应明显低于固化温度，累计时间应控制在1h以内。

采用共固化工艺制造T型加筋壁板，其难点之一在于需要将湿态T型长桁与湿态蒙皮准确组合在一起。一般而言，为降低制造难度，确保内部质量，在长桁和蒙皮铺贴完毕后，需要进行预压实处理。预压实参数的选择至关重要。从使用角度而言，对长桁和蒙皮的预压实，其目标略有差异。对T型长桁进行预压实，是为了确保其组成部分在后续转运、组合等工艺过程中的结构完整性及刚性，避免出现预浸料铺层散开、弯折等问题。对蒙皮进行预压实，是为了提高其密实程度的均一性，减少固化过程中长桁区域和非长桁区域间由于压

力传导的轻微差异而引起的蒙皮内部质量的差异性。消除固化过程中蒙皮厚度变化引起的长桁轴线偏移、倾倒等问题。

常见的预压实参数为：中温加热(30~50℃)，满压。此种参数可以完全实现预压实的预设目标。因此，这类工艺参数自公布后，得到了广泛的应用，取得了良好的效果。

但是，常见材料会随着温度的升高而发生不同程度的膨胀。表2对比了殷钢(Invar)、普通钢、环氧/碳纤维等材料在80℃和120℃下的膨胀量<sup>[7]</sup>，可以看出，即使是在中温条件下，普通钢的膨胀量与环氧/碳纤维复合材料、殷钢(Invar)相比，也存在较为明显的差异。

为降低制造成本，大部分试验件的成型模采用普通钢制造，当采用中温预压实时，制件会随成型模发生明显膨胀。在冷却过程中，成型模回缩至原尺寸，由于制件与成型模间的摩擦力，未固化的胚料无法完全回缩至原尺寸，而是在变厚度区、下陷区等特征点部位发生明显的皱折。皱折的出现，说明预浸料出现了纤维屈曲。即使将长桁或蒙皮单独再次固化或是采取手工擀实的方法，也无法完全消除内部纤维屈曲。为解决此问题，通常采用硬质匀压板，或使用价格昂贵的殷钢(Invar)工装。无论采取何种措施，制造成本均大幅提高。

常温预压实过程中，树脂不会发生明显的流动。相比于中温预压实，预浸料的延展性较差，不适用于曲率变化剧烈、厚度较大(>5mm)的制件。本文试验件较为平整、厚度适宜(最厚处约3.5mm)，因此本文在试验的基础上对预压实参数进行了优化，将中温预压实改为常温预压实，避免因温度变化引起的成型模、制件尺寸的变化，从而杜绝了皱折的出现。采用常温预压实，预浸料内部的树脂并未发生固化反应，不会因预压实影响后续的固化反应，从而降低制件的力

学性能。试验件经常温预压实，蒙皮内部质量好、表面平整、具有适宜的刚度，在后续组合及固化过程中，未发生因蒙皮厚度变化引起的长桁轴线偏差或倾倒等问题。蒙皮整体，尤其是与长桁的胶接部位，未出现凹陷、分层、空腔等缺陷。

### 3 长桁的定位

长桁与蒙皮的组合，是T型加筋壁板制造的又一技术难点。如何准确放置长桁，是这一阶段需要重点解决的问题。常用方法是利用卡板将T型长桁放置到位。但是，卡板安装后，蒙皮上方的操作空间狭小，影响操作的顺利进行。常用的将芯模和长桁整体放置在蒙皮上的方法存在风险：(1)在定位过程中，需要不断调整长桁的位置，同时要兼顾长桁与芯模的配合状态，定位准确度较低；当长桁放置到位后，还容易出现芯模与长桁间配合状态不佳的问题。(2)在反复调整长桁位置的过程中，芯模与长桁整体移动，若施力不当，极易出现长桁各组成部分散开或局部皱折等问题。(3)在调整长桁位置的过程中，胶膜可能被带起，进而发生破损、皱折等问题，影响胶接质量。

在总结经验的基础上，本文提出了激光投影初次定位、卡板二次校准

表2 工装材料热膨胀系数

材料	热膨胀系数 / ( $\times 10^{-6} \text{in}^{-1} \cdot \text{in}^{-1} \cdot ^\circ\text{F}^{-1}$ )
铝	12.6~13
钢	6~6.7
殷钢 36	1.5
殷钢 42	3.5
碳纤维/环氧	0~1.5



图7 卡板安装示意图

Fig.7 Assembly of the board

的方法：(1)蒙皮预压实完成后，使用激光投影系统标示出每根长桁的底缘轮廓；(2)按照激光投影标示出的轮廓，裁剪胶膜并铺贴于相应区域；(3)按激光投影线逐根放置长桁，确保长桁底缘与激光投影线吻合；(4)在每根长桁两侧放置金属芯模和非金属芯模；(5)将所有卡板安装到位(见图7)；(6)使用卡板逐根校准长桁位置。卡板与胶接工装组合时，其两侧的安装孔，一个为圆孔，一个为长圆孔。每次使用前，检查卡板定位基准面的精度，若其实际定位精度超出 $\pm 1.0\text{mm}$ ，则需返修工装。

此方法将长桁的定位细分为预定位和校准两个步骤，各步骤均有其侧重点，降低了操作难度，提高了质量稳定性。而且，此方法将胶膜和蒙皮压实在一起，胶膜与长桁未充分粘合。在长桁预定位和后续的校准过程中，可以依据实际情况，轻微调整长桁的位置，不会导致胶膜的破损。在放置金属芯模和非金属芯模后，依据卡板轻微调整其位置，排除了芯模放置过程中对长桁轴线度的影响。通过金属芯模定位长桁，准确度更高，避免了卡板与湿态长桁直接接触而引起的变形，或长桁局部位置准确而整体偏移的问题。在使用激光投影系统预定位的过程中，操作空间开敞，能够随意调整长桁的位置，操作更为便利。使用激光投影系统预定位，后续卡板的校准量较小，简化了操作，定位效果较好。图8显示了固化后的长桁轴线度实测值(正值表示长桁偏向壁板中心，负值表示长桁远离壁板中心)，可以看出长桁轴

线度准确。

#### 4 压力均匀传导

共固化工艺中,长桁和蒙皮均为湿态,因而其所有工艺装备兼具维形和传压双重功能。胶接工装结构复杂,相互作用的影响因素较多。在长桁与蒙皮的胶接部位,压力的传导最为复杂,也最为重要。需要保证T型长桁各组成部分之间均匀压实,尤其是R区填充部位,T型长桁与蒙皮充分贴实,T型长桁下方的蒙皮区域充分压实。在此基础上,还需要避免T型长桁之间的蒙皮区域出现压力真空。

在长桁区域,利用芯模实现压力传导和维形功能是工程中最为常用的方法<sup>[8-10]</sup>。对于T型长桁,采用左、右对合的芯模结构较为合理。其中,金属芯模最为常见,它具有突出的优点:制件表面光滑;循环使用次数高,有利于降低成本。但经反复验证,此方法也具有明显的不足:(1)对工装的制造精度要求高。左右芯模的对合面、芯模与蒙皮之间的对合面,其实际配合程度,会直接影响压力传导效果。金属芯模表面局部凹坑或凸起,都会引起制件对应区域或毗邻区域出现分层、孔隙密集等缺陷。(2)T型长桁的截面尺寸一般较小,立筋高度约50mm,底缘宽度约70mm。其金属芯模是一种典型的长径比较大的结构,刚度略低,在实际使用中呈现出偏软的特性。若储存、使用不当,易出现弯曲、变形,影响芯模

间的配合状态。受制于真空袋制作、操作空间需求等限制,不宜采取在芯模上设置加强筋等措施提高其刚度。随着T型长桁长度的增加,金属芯模的尺寸效应愈发凸显,严重影响其使用效果。

为改善上述问题,本文对芯模结构进行了改进:(1)将金属芯模改为一侧金属芯模,一侧非金属芯模。采用此种硬-软配合的方法,能够兼顾维形与传压两方面的需求。固化过程中,在压力作用下,金属芯模和非金属芯模紧密贴合。金属芯模起维形作用,保证T型长桁外形的准确性。非金属芯模则起到均匀传导固化压力的作用。由于非金属具有一定的弹性,当金属芯模存在局部凸起或凹陷时,非金属芯模在压力作用下,能够在对应位置形成局部凹陷或凸起,自适应金属芯模的变化,均匀传导固化压力。需要指出的是,这种自适应补偿作用也是有限度的,非金属芯模的型面应较为准确。因此,本文摒弃了传统的使用假件翻制非金属芯模的方法。采用专用成型模制造非金属芯模,提高了其型面精度,取得了良好效果,所有长桁均未出现分层、孔隙密集等缺陷。(2)将金属芯模改为分段式结构,每段长度约1~2m,且各段之间无连接关系。分段式的金属芯模,其每段相当于独立的个体,刚度更好。每段独立加工,降低了工装的制造难度。在固化过

程中,各段均可依据其实际配合状态,轻微调整其位置,互不影响。因此,可进一步改善左、右芯模的配合状态,减少分层、孔隙等缺陷的发生。此种结构形式摆脱了制件尺寸的影响。即使长桁尺寸长达10m,仍然可以满足要求。同时降低了储存、搬运的要求,延长了使用寿命。

蒙皮区域的压力传导也较为重要,如果处理不当,可能引起蒙皮局部孔隙密集或纤维屈曲。对于T型加筋壁板,其截面形状较为复杂,真空袋在长桁底缘的边缘区域易出现架桥,从而导致局部失压,制件内部出现缺陷。若不采取任何辅助措施,制件整体的内部质量较差。采用金属压板均匀传导固化压力时,能够形成光滑平整的表面,有助于长桁位置的限定。但是,压板与蒙皮接触的一侧,需按照蒙皮的型面进行加工。当蒙皮厚度变化较为剧烈且下陷区域较多时,金属压板的加工难度较大。为避免因膨胀率差异带来的质量隐患,对于尺寸较大的制件,需要采用昂贵的殷钢(Invar)压板,进一步提高了制造成本。本试验在反复测试的基础上,使用Airpad+玻璃布制造复合材料压力垫,取得了良好效果。Airpad为Airtech公司出品,邵氏硬度为65,最大伸长率400%,拉伸强度约8957kPa,单层厚度1.58mm。压力垫靠制件一侧为Airpad,具有良好的弹性,可以自适应蒙皮型面的变化。因此,压力垫可以直接在蒙皮成型模上制造,节省了成本。压力垫通过定位孔固定在工装上(图9),避免在固化过程中滑动。根据蒙皮表面型面变化的剧烈程度,调整Airpad与玻璃布的比例,即可充分调节压力垫的软硬状态,满足不同的使用要求。

通过采取分段式硬-软配合的芯模和复合材料压力垫,试验件所有长桁及蒙皮区域光滑平整,内部质量好,无分层、空腔等缺陷,孔隙率 $\leq 1.5\%$ 。经多次使用,分段式金属

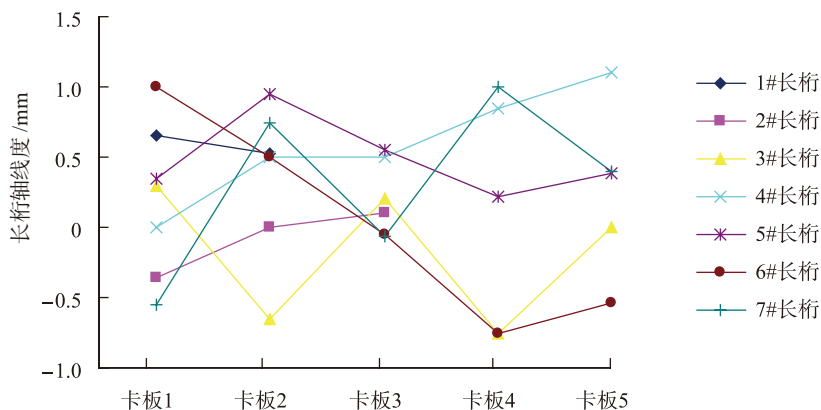


图8 长桁轴线度实测值

Fig.8 Measuring values of stringer axis

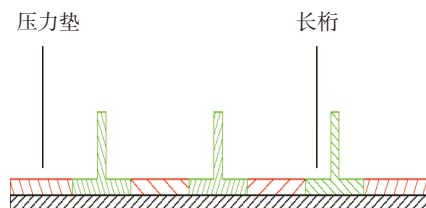


图9 压力垫放置示意图

Fig.9 Illustration of the Airpad position

芯模未出现明显的翘曲,非金属芯模表面光滑平整。相比于传统方法,制件表面及内部质量改善明显,工装使用及维护成本大幅降低。

## 结论

本文从 T 型长桁的制造、预压实参数的优化、T 型长桁的定位、压力的均匀传导等几个角度,分析讨论了采用共固化工艺制造 T 型加筋壁板的技术难点。提出并验证了 T 型长桁左、右对合制造,常温预压实,激光投影预定位,硬-软芯模配合等改进措施,取得了良好效果。长桁轴线精度达到了  $\pm 1.2\text{mm}$ ,内部质量好,无分层,孔隙等缺陷。本试验成果有助于进一步简化加筋壁板共固化工艺的制造流程,提升产品质量。

## 参考文献

[1] 马刚,唐文峰.民用航空含  $\Omega$  型长桁复合材料加筋壁板制造技术研究[J].航空制造技术,2017,60(12):74-77.

MA Gang, TANG Wenfeng. Study on

manufacturing technology of  $\Omega$  type stiffened panel with civil aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 74-77.

[2] 盛永清.工型复合材料加筋壁板制造工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

SHENG Yongqing. Research on manufacturing progress of reinforce carbon fiber composite laminate with I-stiffeners[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[3] 杨博,王菲,陈永清,等.大尺寸复合材料“工”型加筋壁板研制[J].航空制造技术,2014,57(15):112-115.

YANG Bo, WANG Fei, CHENG Yongqing, et al. Manufacturing of large composite panel with I-stiffeners[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(15): 112-115.

[4] 叶宏军,翟全胜,彭志霞,等.复合材料帽型结构水溶芯模共固化工艺研究[J].纤维复合材料,2009(4):3-5.

YE Hongjun, ZHAI Quansheng, PENG Zhixia, et al. Co-curing technology using water dispersible core for the hollow-structure composite parts[J]. Fiber Composites, 2009(4): 3-5.

[5] 李林.大型复合材料壁板先进制造技术及应用[J].航空制造技术,2017,60(11):105-109.

LI Lin. Advanced manufacture technology and application of large-sized composite panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(11): 105-109.

[6] 马军,龙国荣,林业明,等.先进复合材料热压罐共固化技术的低成本工程[J].航空制造技术,2009,52(22):47-49.

MA Jun, LONG Guorong, LIN Yeming, et al. Low-cost program of advanced composite material autoclave co-cured technology[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(22): 47-49.

[7] 牛春匀.实用飞机复合材料结构设计与制造[M].程小全,张纪奎,译.北京:航空工业出版社,2010:105-143.

NIU Chunyun. Composite airframe structures[M]. CHENG Xiaoquan, ZHANG Jikui, Trans. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 105-143.

[8] 罗刚堂,李敏,顾轶卓,等.共胶接 T 型加筋壁板模具设计及成型工艺研究[J].玻璃钢/复合材料,2012(5):58-64.

LUO Gangtang, LI Min, GU Yizhuo, et al. Study on design of mould assembly and molding progressing for co-bonding T-stiffened skin structure[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(5): 58-64.

[9] 刘文,古武,崔博,等.复合材料 J 型加筋壁板制作技术研究[J].航空制造技术,2017,60(16):69-74.

LIU Wen, GU Wu, CUI Bo, et al. Study on manufacture of J type stiffened panel composite material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(16): 69-74.

[10] 黄其忠.先进复合材料格栅结构软模辅助共固化工艺研究[D].大连:大连理工大学,2013.

HUANG Qizhong. Study on soft-mold aided co-curing process for advanced composite grid-stiffened structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

通讯作者:杨绍昌,研究员级高工,研究方向为先进复合材料制造工艺、模拟仿真等, E-mail: ysc172@163.com。

## Co-Curing of T Shape Stiffened Panel

YAN Enwei, YANG Shaochang

(AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** Aiming to resolve the technical matters such as uneven pressure on products, pits on the panel, improvement of the inner quality, based on the analysis of co-curing method, the T shape stiffened panels were researched in this paper. The match condition, process parameters and orientation of the stringer are analyzed and optimized. The fabrication process of T shape stiffened panels and technical details are improved. The results show that the test product quality is excellent, the product inner is compact, the surface is smooth and the stringer axis is accurate.

**Keywords:** Co-curing; T shape stiffened panel; Fabrication of T stringer; Even pressure on product; Inner quality; Stringer axis

(责编 逸飞)