

共胶接复合材料加筋壁板的精确制造技术研究

单玉才 文诗琦 王阳 崔博

[成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092]

文 摘 为提升复合材料加筋壁板的制造精度,本文基于复合材料共胶接成型工艺,研究了复合材料加筋壁板筋条的结构组成,分析得出了制备筋条R区填充料所需预浸料用量的计算模型,实现了共胶接复合材料加筋壁板筋条R区的精确填充;优化了共胶接复合材料加筋壁板的成型工装结构设计,改善了工装定位销的定位精度,实现了筋条轴线位置的精确控制;制作了筋条外形轮廓的辅助切割检查样板,实现了筋条轮廓边距的准确切割。通过筋条R区的精确填充、筋条轴线位置的精确控制及筋条轴线边距的准确切割实现了共胶接复合材料加筋壁板的精确制造。

关键词 共胶接,复合材料,加筋壁板,精确制造

中图分类号:TH122

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.009

Research on the Precision Manufacturing Technology of Co-bonded Composite Stiffened Panels

SHAN Yucui WEN Shiqi WANG Yang CUI Bo

(Chengdu Aircraft Industry Co., Ltd., Chengdu 610092)

Abstract To improve the manufacturing accuracy of composite stiffened panels, this paper study the structural composition of composite stiffened panels based on the co-bonded forming process of composite stiffened panels. A calculation model is derived for the amount of prepreg required to fill the R region of the stiffeners, achieving precise filling of the R zone of co-bonded composite stiffened panels. The structural design of the molding fixture for composite stiffened panels is optimized, improving the positioning accuracy of the positioning pins and achieving precise control of the stiffener axis line position. A cutting template is made for the outline of the stiffener to achieve accurate cutting of the stiffener edge distance. By precisely filling the R zone of the stiffeners, precisely controlling the stiffener axis line position, and accurately cutting the stiffener edge distance, the precise manufacturing of composite stiffened panels with stiffeners is achieved.

Key words Co-bonding, Composite, Stiffened panel, Precision manufacturing

0 引言

先进复合材料由于其所具有的高比强度、高比模量、优异的耐疲劳性能、耐腐蚀性能以及良好的可设计性等特性,已经在航空航天领域得到了广泛应用^[1-3]。随着复合材料成型技术的不断发展,其应用范围也不断扩展^[4]。一方面,复合材料的结构重量在飞行器中所占的比重迅速增加;另一方面,复合材料的应用范围逐渐由最初的非承力或次承力结构向主承力结构扩展转变,并伴随着大型化、整体化的发展应用趋势,其中,加筋壁板结构是其中数量较大的典型应用结构之一^[5-6]。

在复合材料壁板结构中引入加强筋可以显著提

高复合材料壁板的整体刚度^[7-8],但传统的加筋壁板多采用机械连接的方式,如使用铆钉、高锁螺栓等连接件将筋条结构与蒙皮进行连接,机械连接过程中安装的连接件需要在蒙皮及筋条结构中制孔安装,一方面会破坏结构的完整性与连续性,另一方面使用连接件会增加壁板结构的重量,还增加了不菲的装配成本。使用高强度的结构胶膜在高温条件下将筋条与蒙皮直接黏接,既降低了零件的数量和重量,又减少了装配件的使用,并可实现复合材料加筋壁板的整体成型^[9-10],但部分结构复杂的复合材料加筋壁板零件结构中筋条数量多,筋条结构及位置关系复杂,对筋条的成型质量、轴线位置及边距尺寸的精

收稿日期:2022-10-17

第一作者简介:单玉才,1990出生,高级工程师。

度要求较高。

本文的研究目的在于通过理论计算与实验验证,解决复合材料加筋壁板筋条R区的精确填充、筋条轴线偏移及轮廓边距超差等问题,实现共胶接复合材料加筋壁板的精确制造成型。

1 实验

1.1 实验材料与设备

试验件制备所用预浸料的纤维使用T700级碳纤维 ZT7H 系列,由中简科技有限公司提供;预浸料的树脂使用5429双马树脂,由中航复合材料有限责任

公司提供;筋条与蒙皮胶接用的胶膜为J-299,由黑龙江石油化工研究院提供。

1.2 复合材料蒙皮的固化工艺

复合材料加筋壁板采用真空袋-热压罐工艺成型,蒙皮的铺叠及组装封袋方式见图1,蒙皮的固化工艺参数为:室温下抽真空,真空压强不小于0.095 MPa,以1~3 °C/min的速率升温,升温至130~160 °C,恒温50~65 min;继续升温至170~190 °C,恒温100~120 min;继续升温至190~210 °C,恒温280~300 min,以不大于2 °C/min的速率冷却至60 °C以下,取出制件。

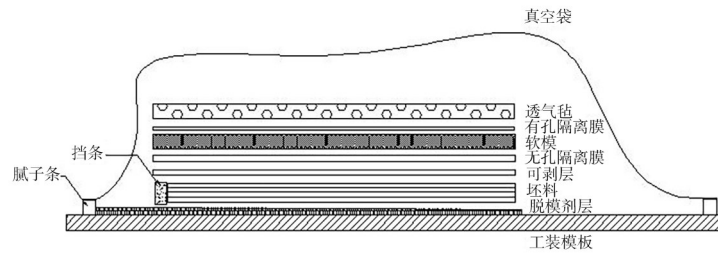


图1 复合材料蒙皮的组装封袋示意图

Fig. 1 Schematic diagram of package assembly of composite skin

1.3 复合材料加筋壁板的胶接工艺

蒙皮固化完成后将蒙皮的待胶接区进行打磨粗化处理,筋条毛坯铺叠完成后在待胶接面铺放J-299

结构胶膜,使用框架结构的工装定位筋条后组装封袋,组装封袋方式见图2。采用真空袋-热压罐工艺成型,热压罐的固化工艺与1.2相同。

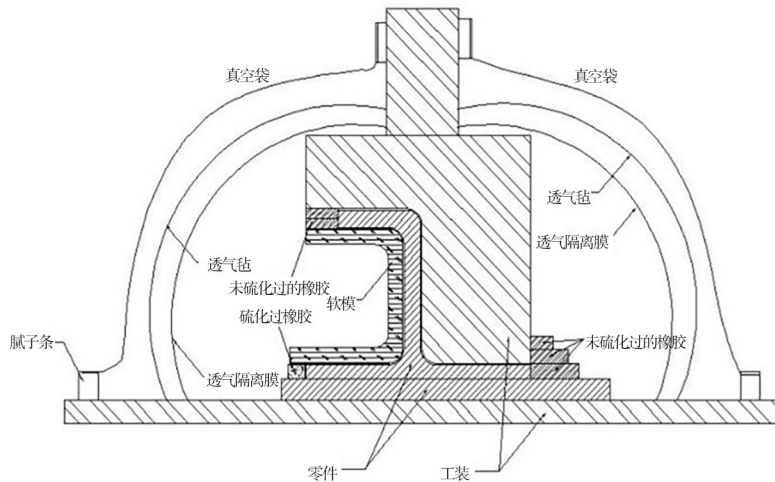


图2 复合材料加筋壁板组装封袋示意图

Fig. 2 Schematic diagram of package assembly of composite stiffened panel

2 结果与讨论

2.1 复合材料加筋壁板的典型结构描述

复合材料加筋壁板的典型结构如图3所示,图3(a)所示为复合材料单向加筋结构,筋条呈“J”型+“T”型的组合式结构;图3(b)所示为复合材料纵横加筋结构,筋条为“T”型结构,典型结构所涉及的筋条在装配过程中与周边金属件均有装配配合关系,因此对筋条的成型质量、轴线位置及轮廓边距尺寸精度要求极高。

2.2 复合材料加筋壁板的成型工艺选择

复合材料加筋壁板的成型工艺可分为二次胶接、共固化和共胶接三种。二次胶接工艺为预先固化蒙皮及筋条,再通过结构胶膜将二者胶接到一起,该工艺周期长、胶接质量难以保证,且成本较高;共固化工艺为通过结构胶膜将未固化的蒙皮/筋条一次整体固化/胶接成型的方法,该工艺具有工艺周期短、成本低、胶接质量好的特点,但同时固化/胶接过程控制难度极大,质量缺陷风险大;共胶接技术可分为先固化蒙皮和先固

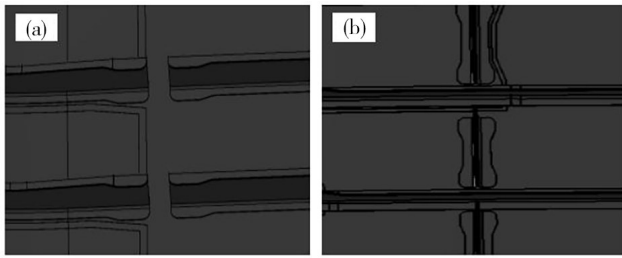


图3 复合材料加筋壁板的典型结构示意图

Fig. 3 The schematic diagram of typical structure of composite stiffened panels

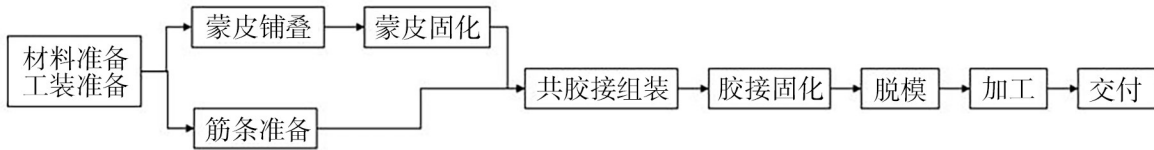


图4 复合材料加筋壁板共胶接工艺流程图

Fig. 4 Process flow diagram of composite stiffened panels

2.3 筋条转角R区的精确填充

典型结构的复合材料加筋壁板结构所涉及“T”型筋条与“J”型筋条的结构组成如图5所示,可以看出“T”型筋条与“J”型筋条的R区均存在一个三角形的间隙区域,在筋条与蒙皮的共胶接过程中,为保证零件无孔隙等缺陷,确保零件的力学性能,必须使用R区填角料将该区域填充完全。按照制造要求,该区域的填角料需与零件使用相同牌号的预浸料与胶膜,制备过程中通常将同牌号的预浸料卷曲呈细棒状,再在其外表面裹一层同牌号的胶膜,进罐预压出基本形状后,在筋条与蒙皮的共胶接时使用。

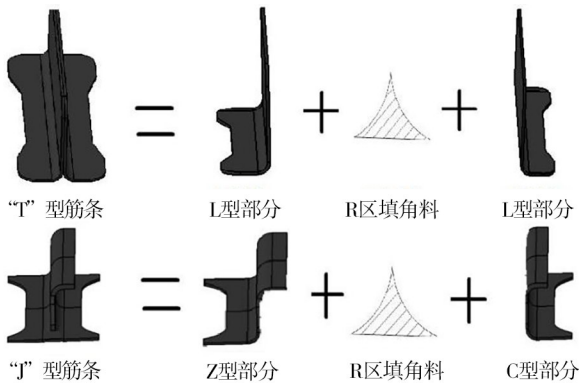


图5 典型“T”型、“J”型筋条结构示意图

Fig. 5 The schematic diagram of typical “T” type, “J” type rib structure

为确保R区的填充质量,制作R区填角料时需准确确定所用预浸料的宽度,根据图6所示的R区填角料截面示意图,通过计算它的截面积,结合预浸料的理论厚度,可以计算出所需预浸料的宽度,计算方法:

$$w = \frac{2r^2 - \pi r^2 / 2}{d} \quad (1)$$

式中, w 为所需预浸料的宽度; r 为筋条外形的R区半

径;两种方式,即预先固化蒙皮,再将铺叠预压好的未固化筋条组件通过结构胶膜一体胶接到蒙皮上,或预先固化筋条,再将筋条通过一定加压方式放置于未固化蒙皮上,再与蒙皮一起胶接固化。相比于其他两种成型方式,共胶接方式流程较短,质量可控,工艺难度较低,是成型各类加筋壁板的主流选择^[2]。为了保证机体表面蒙皮的固化质量和结构强度,本文研究过程中选择了先固化蒙皮的共胶接方式成型复合材料加筋壁板,工艺流程如图4所示。

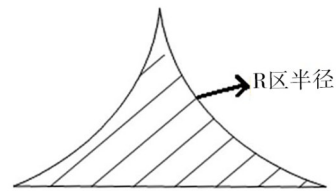


图6 R区填角料截面示意图

Fig. 6 Section sketch of packing in R area

径; d 为所用预浸料的厚度。

通过计算出所需预浸料的宽度,结合零件的外形及R区半径,设计并制作了R区填角料的精确成型模具,工装理论模型及实物图如图7所示。制作芯材的过程中将预浸料按照计算的宽度裁剪好,卷成棒状长条,包裹胶膜,放入成型模具,合模后封装真空袋并在热压罐内进行预成型。该方法通过对填充芯材进行预成型,获得所需理论外形,该方法操作简便,制备的芯材结构稳定,可实现R区间隙的精确填充。

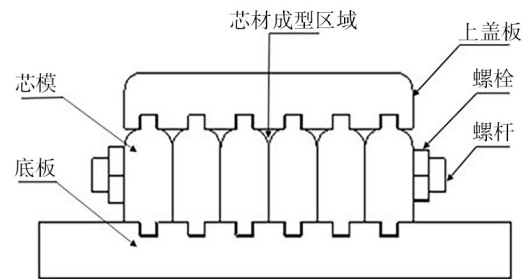


图7 R区填角料成型模具示意图

Fig. 7 Schematic diagram of R area filling angle molding die

2.4 筋条轴线位置的精确控制

典型复合材料加筋壁板的成型工装多采用框架式插销定位的结构模式,其结构如图8所示。该工装采用龙门架的形式,按照筋条的位置设计布局框架,

从框架上的衬套中伸出的定位插销插入到筋条成型模的定位立柱中以定位筋条,每个筋条外型模至少使用两个定位插销来定位,筋条的轴线位置主要靠筋条成型模的结构与定位销的定位精度来保证。

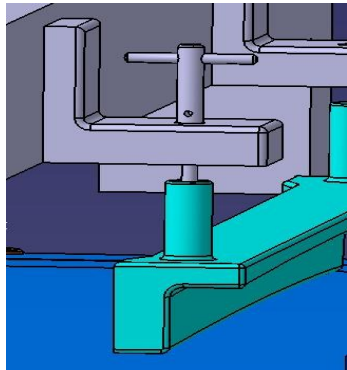


图8 框架式插销定位工装结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of frame type latch positioning tooling

为保证安装金属件时金属件与复合材料筋条间不出现间隙、干涉等现象,要求同排筋条的轴线位置要准确,因此在工装设计制造中对成型模的结构与定位销的定位精度提出了更高的要求,通过建立模型对图8所示的框架定位的复材加筋壁板成型工装结构进行了简化,简化后的示意图如图9所示。

一种基于框架定位的复材加筋壁板的筋条精确定位模型,模型中筋条偏移量 δ 的推导计算过程如下:

$$x_{11} = \frac{x_1 \cdot (h_1 + h_2 + h_3)}{h_1} \quad (2)$$

$$\delta_1 = \frac{x_{11} \cdot (h_3 + h_4)}{h_3} = \frac{x_1 \cdot (h_1 + h_2 + h_3) \cdot (h_3 + h_4)}{h_1 \cdot h_3} \quad (3)$$

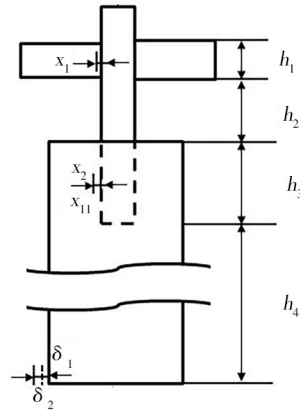
$$\delta_2 = \frac{x_2 \cdot (h_3 + h_4)}{h_3} \quad (4)$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{x_1 \cdot (h_1 + h_2 + h_3) \cdot (h_3 + h_4)}{h_1 \cdot h_3} + \frac{x_2 \cdot (h_3 + h_4)}{h_3} = \frac{h_3 + h_4}{h_3} \left[\frac{x_1 \cdot (h_1 + h_2 + h_3)}{h_1} + x_2 \right] \quad (5)$$

从式(5)中可以看出,复材加筋壁板零件成型过程中筋条偏移量 δ 与 x_1 筋条定位销与定位框架之间的间隙、 x_2 筋条定位销与筋条成型模定位立柱之间的间隙、 h_2 为后续操作所必要的定位销的预留长度、 h_4 筋条成型模的高度四个参数呈绝对正相关的关系,与 h_1 筋条定位销在定位框架内的有效定位长度、 h_3 筋条定位销在筋条成型模内的有效定位长度有关。

从式(5)可以看出,减少筋条轴线位置的偏移量 δ 的途径有如下3种:①减少孔径间隙量 x_1 和 x_2 ;②减小龙门架的定位面至胶接面的距离 h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 ;③增加有效定位高度 h_1 和 h_2 。

按式(5)所得出的分析结论,选用典型件对其成



注: h_1 为筋条定位销1在定位框架2内的有效定位长度; h_3 为筋条定位销1在筋条成型模3内的有效定位长度; h_2 为后续操作所必要的定位销1的预留长度; h_4 为筋条成型模3高度的一部分,筋条成型模3的总高度为 (h_3+h_4) 。 x_1 为筋条定位销1与定位框架2之间的间隙; x_2 为筋条定位销1与筋条成型模3之间的间隙; x_{11} 为因 x_1 导致的筋条定位销1的偏移量; δ_1 为因 x_{11} 筋条定位销1的偏移导致的筋条成型模3的偏移量; δ_2 为因 x_2 导致的筋条成型模3的偏移量;零件成型过程中筋条的位置偏移量 $\delta=\delta_1+\delta_2$ 。

图9 筋条定位销插入成型模定位立柱后的结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the rib locating pin inserted into the molding die to locate the column

型工装进行了返修优化,返修优化前后零件筋条轴线位置的极限偏移量见表1。

表1 工装返修前后数据及效果

	mm						mm
Tab. 1	Data and effect before and after tooling repair						mm
	h_1+h_2	h_3+h_4	h_1	h_3	x_1	x_2	极限偏移量
优化前	16	130	10	20	0.11	0.04	0.97
优化后	36	110	25	30	0.11	0.04	0.25

工装按要求返修后,筋条轴线位置的极限偏移量显著减小。减小 x_1 (筋条定位销与龙门架衬套间的间隙)与 x_2 (筋条定位销与筋条成型模定位立柱间的间隙)的尺寸后,筋条定位销插入龙门架的衬套及筋条成型模的定位立柱时,不能确保筋条定位销处于满销状态。若定位销处于悬空状态,有效定位尺寸 h_2 减小,从而导致筋条轴线位置的偏移。为防止出现该现象,保证筋条定位销的有效定位长度,在定位销的端面设置了如图10所示的满销状态刻线标示。

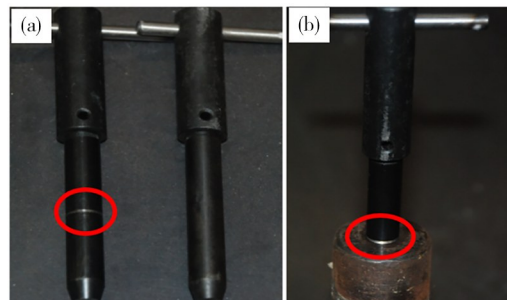


图10 带满销标示的定位销示意图

Fig. 10 Schematic diagram of positioning pin with full sales label

2.5 筋条轮廓边距的精确控制

图 11 所示的筋条结构为异形结构,按照零件线手工切割时,因零件线的不准确性及手工切割误差,筋条轮廓及边距尺寸极易超差,在装配过程中边距不足故障频发。



图 11 异形筋条结构示意图

Fig. 11 Sketch of special-shaped rib structure

按照筋条结构的轮廓尺寸,通过三维建模的方法,设计制造了图 12 所示的筋条轮廓辅助切割检查样板,使用该样板可以消除零件与工装热膨胀不匹配导致的零件线偏差及复杂筋条结构手工切割带来的加工误差。样板使用过程中以数控加工的蒙皮边缘(X向)、筋条腹板面(Y向)及蒙皮厚度方向(Z向)为定位基准定位样板,然后按照样板轮廓尺寸进行划线切割,切割过程中使用样板检查筋条的轮廓及尺寸。使用该辅助切割检查样板后,该典型件的筋条轮廓及尺寸再未出现过超差现象。

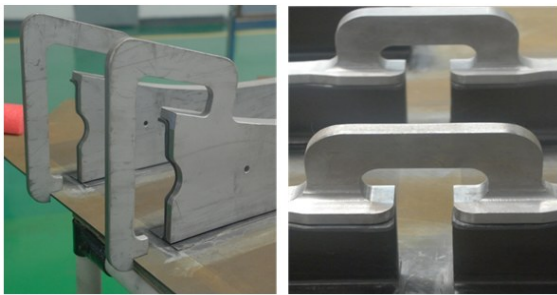


图 12 筋条轮廓辅助切割检查样板

Fig. 12 Template for auxiliary cutting and inspection of rib profile

3 结论

通过共胶接复合材料加筋壁板精确制造技术研究,得出以下结论:

(1) 通过分析筋条各部分组合后出现的 R 区外形的截面结构,得出了 R 区精确填充所需预浸料宽度的计算公式,并根据 R 区结构设计制作了 R 区填角料的成型模具,制作了 R 区填角料,实现了筋条转角 R 区的精确填充;

(2) 针对装配过程中对筋条轴线位置要求极高的纵横加筋结构,优化了同排筋条的工装结构形式;通过分析筋条定位销与龙门架衬套及筋条成型模定位立柱的配合关系,优化了框架式插销定位工装的定位精度,从而实现了筋条轴线位置的精确控制;

(3) 针对装配过程中对异形筋条结构的轮廓边距的高要求,设计制造了用于辅助切割检查筋条轮廓的样板,实现了筋条轮廓尺寸的精确控制。

参考文献

[1] 马绪强, 苏正涛. 民用航空发动机树脂基复合材料应用进展[J]. 材料工程, 2020, 48(10): 48-59.

MA X Q, SU Z T. Progress application of civil aviation engine resin base composite materials [J]. Materials Engineering, 2020, 48(10): 48-59.

[2] 尹翔, 冯宇, 张辉, 等. 航空复合材料短柱加筋板压缩性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(12): 55-59.

YIN X, FENG Y, ZHANG H, et al. Experimental study on compressive properties of aeronautical composite plates stiffened by stub columns[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(12): 55-59.

[3] ZHANG T J, LI S L, CHANG F, et al. An experimental and numerical analysis for stiffened composite panel subjected to shear loading in hygrothermal environment [J]. Composite Structures, 2016, 138: 107-115.

[4] 刘文, 古武, 崔博, 等. 复合材料“J”型加筋壁板制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(2): 105-111.

LIU W, GU W, CUI B, et al. Research on manufacturing technology of composite “J” stiffened panel [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(2): 105-111.

[5] 李义, 叶宏军, 翟全胜. 两种复合材料加筋壁板筋条“R”区质量控制技术研究[J]. 科技与创新, 2018(05): 13-15.

LI Y, YE H J, ZHAI Q S. Study on quality control of “R” zone of two kinds of composite stiffened panel [J]. Technology and Innovation, 2018(05): 13-15.

[6] PERRET A, MISTOU S, FAZZINI M. Global behavior of a composite stiffened panel in buckling. Part 1: Numerical modeling[J]. Composite Structures, 2011, 93: 2610-2618.

[7] 蒲永伟, 湛利华. 航空先进复合材料帽型加筋构件制造关键技术探究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(4): 78-82.

PU Y W, ZHAN L H. Research on key technology of manufacturing cap-stiffened components of advanced aeronautical composite material [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(4): 78-82.

[8] 彭坚, 程勇, 祝君军, 等. 复合材料加筋壁板结构筋条倒角对蒙皮铺层褶皱及纤维屈曲的影响[J]. 化工新型材料, 2021, 49(08): 169-173.

PENG J, CHENG Y, ZHU J J, et al. The effect of rib chamfering on fold and fiber buckling of composite stiffened panel [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(08): 169-173.

[9] 闫恩玮, 杨绍昌. T型加筋壁板共固化技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 50-55.

YAN E W, YANG S C. Study on co-curing technology of T-stiffened panel [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 50-55.

[10] DONG C S. A parametric study on the process-induced deformation of composite T-stiffener structures [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(4): 515-520.