

# 碳纤维复合材料U形构件角度收缩及模具补偿研究

於永红,刘兆朋,尚仰宏,杨静文,李泽英

(江苏恒神股份有限公司,丹阳 212314)

**[摘要]** 以两侧翼缘板高度不一致的碳纤维复合材料U形构件为研究对象,分别利用热压罐成型工艺和VARIM工艺制备了该U形构件,通过测量U形构件的外形角度,来研究这两种工艺所制U形构件的外形角度收缩情况,并根据试验结果优化设计了U形构件模具的补偿角。研究表明,通过热压罐成型工艺和VARIM工艺制备相同规格的U形构件时,所制构件的外形角度收缩程度不同。在设计U形构件模具的补偿角时,不能将不同成型工艺下的模具一概而论,要针对成型工艺的特点区别对待。此外,对于两侧翼缘板高度不一致的U形构件,不管通过何种工艺制备,高翼缘板侧的角度收缩程度比矮翼缘板侧的角度收缩程度小,在设计U形构件模具的补偿角时不可忽略此特征。

**关键词:** 碳纤维复合材料;U形构件;角度收缩;模具;补偿角

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.096



於永红

工程师,主要从事复合材料工装模具设计研究。

一般而言,复合材料主要由两大部分组成:基体与增强材料<sup>[1]</sup>。碳纤维增强树脂基复合材料(下面简称碳纤维复合材料)是以树脂为基体,以碳纤维为增强材料的新一代先进复

合材料。随着先进复合材料的发展,碳纤维复合材料以其轻质高强、耐疲劳性好、减振性好、耐化学腐蚀及可设计性强等特点在航空、航天、轨道交通、汽车工业以及军事等领域得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。

在碳纤维复合材料U形构件成型过程中,由于材料热胀或热缩效应、金属模具与复合材料之间的热膨胀系数差异、树脂基体的化学收缩效应等因素的影响,会在构件内部产生复杂的内应力<sup>[3-7]</sup>,导致成型出的U形构件出现外形角度收缩的现象。这种现象大大降低了产品的合格率,且给U形构件的性能造成了不利的影 响。因此,研究碳纤维复合材料U形构件的角度收缩问题及通过模具补偿来解决碳纤维复合材料U形构件的外形角度收缩问题,具有重要的意义。

关于碳纤维复合材料构件成型

过程中的固化变形和模具补偿方面的研究已有诸多报道。唐占文等<sup>[8]</sup>提出了大型复杂结构固化变形多层次预报技术;王永军等<sup>[9]</sup>认为对于简单的角度回弹问题,在模具设计时,预先把回弹角考虑进去,使制件脱模回弹后符合工艺数模要求;王仁宇等<sup>[10]</sup>对V型复合材料蒙皮构件进行了固化变形模拟,并得到了补偿过的工装型面,在该工装上成型的试件与设计形状基本一致。坎贝尔<sup>[11]</sup>指出通过有限元分析来计算回弹程度的工作虽已取得很大进展,但针对特定的材料体系、固化条件、铺层方向和厚度,仍然需要一些试验数据建立模具设计指南。

本文以两侧翼缘板高度不一致的碳纤维复合材料U形构件为研究对象,在同一副预先设有补偿角的模具中,分别利用热压罐成型(Autoclave Moulding)工艺和真空辅助树脂扩散

成型(Vacuum Assisted Resin Infusion Molding, VARIM)工艺制备同一规格的碳纤维复合材料U形构件,通过测量U形构件的外形角度,来研究这两种不同工艺所制U形构件的外形角度收缩情况,为以后设计模具的补偿角提供一定的指导作用。

## 试验方法

本试验分两步进行。首先,在同一副预先设有补偿角的模具中,分别利用热压罐成型工艺和VARIM工艺制备同一规格的碳纤维复合材料U形构件,测量U形构件的外形角度;其次,根据上一步测量的角度,重新优化设计模具的补偿角,利用优化后的模具再次分别利用热压罐成型工艺和VARIM工艺制备上述相同规格的碳纤维复合材料U形构件,测量其外形角度,检验优化效果。

### 1 仪器和设备

热压罐(无锡市锦凯锅炉有限公司)、自动裁剪机(格柏科技有限公司)、固化炉(ASC工艺系统公司)、龙门三坐标(海克斯康测量技术有限公司)。

### 2 原材料

本试验中热压罐成型工艺所用的主要原材料:碳纤维织物预浸料, EV101-2/HFW285SA/42;碳纤维单向预浸料, EV101-2/HFW285SA/42。VARIM工艺所用的主要原材料:树脂, EV101-3;碳纤维经编织物, HFK300B-07-1270;碳纤维单向织物, HFW160U-A3-1000。以上所用主要原材料均由江苏恒神股份有限公司生产制造(热压罐成型用预浸料 EV101-2 树脂及 VARIM 工艺所用 EV101-3 树脂为同一体系环氧树脂,只是针对不同成型工艺需求对配方进行调整,其固化收缩率相当)。

### 3 U形构件和模具

某边梁是一大厚度大长度的U形主承力结构件,厚15mm,长约20000mm,整个U形结构件局部区域的两侧翼缘板高度不一致。为了

较充分模拟某边梁构件的结构,选取一段两翼缘板高度不一致的某边梁样段作为研究对象。选取的研究对象是一个厚度为15mm的等厚U形构件,长600mm,宽218mm,一侧翼缘板高168mm,另一侧翼缘板高101mm,外圆角R22mm,且两翼缘板均与腹板垂直,没有脱模角。U形构件的截面结构见图1。

根据此U形构件的贴模面要求,将成型此构件的模具设计为既能用于热压罐成型工艺也能用于VARIM工艺的阴模结构,模具材料为Q235钢。因构件没有脱模角,且两翼缘板均与腹板垂直,考虑到这类U形构件在成型时两侧翼缘板均会发生外形角度收缩问题,故在设计模具时在模具两侧均预设了 $1.0^\circ$ 的补偿角。模具结构示意图如图2所示,模具主体截面结构如图3所示。

### 4 铺层设计

为便于试验对比,热压罐成型工艺及VARIM工艺铺层所用双向织物及单向织物厚度相近,两种铺层均采用 $\{[(\pm 45)/(0,90)/0]_3(\pm 45)/(0,90)\}_{2s}$ 对称铺层;其中 $(\pm 45)$ ,  $(0,90)$ 表示双向织物铺层,0表示单向织物铺层,两种工艺成型后试验件厚度相近。

### 5 试验过程

按照图4和图5所示的工艺流程及铺层顺序,分别利用热压罐成型工艺和VARIM工艺制备上述U形构件,每种工艺各制备3件,利用龙门三坐标测量U形构件的外形角度。根据测量的角度,重新优化设计模具的补偿角,利用优化后的模具进行第2步试验,即再次分别利用热压罐成型工艺和VARIM工艺制备上述U形构件,测量U形构件的外形角度,检验优化效果。

### 6 固化工艺制度

热压罐固化工艺制度:以不大于 $2^\circ/\text{min}$ 的升温速率从室温升至 $80^\circ\text{C}$ ,并在 $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下保温60min;

再以不大于 $2^\circ/\text{min}$ 的升温速率从 $80^\circ\text{C}$ 升至 $120^\circ\text{C}$ ,并在 $(120 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下保温120min;然后以不大于 $2^\circ/\text{min}$ 的降温速率从 $120^\circ\text{C}$ 降至 $40^\circ\text{C}$ ,全程压力 $(0.6 \pm 0.03)\text{MPa}$ 。

VARIM固化工艺制度:树脂在室温下进行抽真空导入,导入完成后以不大于 $2^\circ/\text{min}$ 的升温速率从室温升至 $50^\circ\text{C}$ ,并在 $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下保温120min;再以不大于 $2^\circ/\text{min}$ 的升温速率从 $50^\circ\text{C}$ 升至 $120^\circ\text{C}$ ,并在 $(120 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下保温120min;然后以不大于 $2^\circ/\text{min}$ 的降温速率从

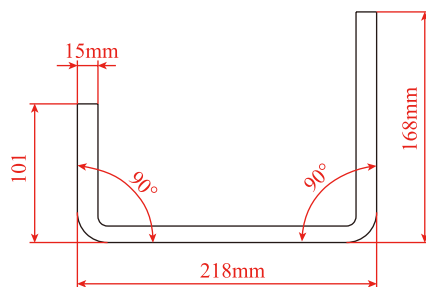


图1 U形构件截面图  
Fig.1 Section of part

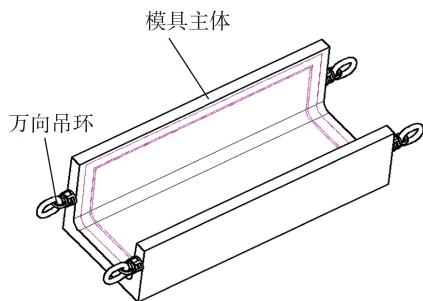


图2 模具结构示意图  
Fig.2 Drawing of mould structure

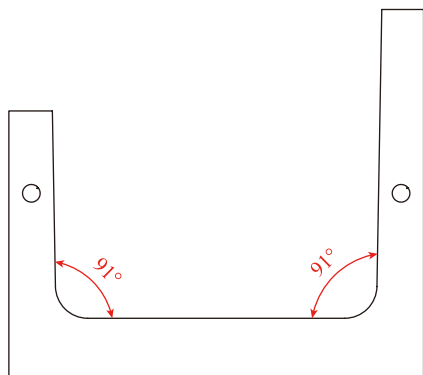


图3 模具主体结构截面图  
Fig.3 Section of mould

120℃降至40℃,全程抽真空,保证真空度在0.092MPa以上。

由于良好的工艺过程控制,两次热压罐成型及VARIM成型试验件厚度均在(15±0.6)mm范围内,满足设计要求。

## 试验结果与讨论

### 1 第1步试验结果与分析

图6是第1步试验制得的U形构件实物图。图7是第1步试验利用两种不同工艺制备的U形构件外形角度测量示意图。第1步试验制得的U形构件测量结果分别如表1和表2所示。图7中的 $\alpha$ 角代表短翼缘板侧的外形角, $\beta$ 角代表长翼缘板侧的外形角。

从表1和表2可以看出,同一种成型工艺制备的3个U形构件的 $\alpha$ 角和 $\beta$ 角彼此基本一致,差别很小,表明构件制备过程稳定,人为因素影响小。此外,不管热压罐成型工艺制备的U形构件,还是VARIM工艺制备的U形构件,其 $\beta$ 角都稍大于 $\alpha$ 角。这说明翼缘板的高度对回弹角度也有影响,较高的翼缘板回弹角度比较低翼缘板回弹角度小。

从第1步试验结果还可以看出,分别通过热压罐成型工艺和VARIM工艺制备出的相同规格U形构件的外形角度收缩程度不同。这是由拐角处层间树脂体积分量的不同引起的。复合材料完成固化并进行降温时,层间树脂的收缩会引起回弹变形,而由于工艺条件的限制,拐角处各层间树脂体积分量并非均匀分布,特别是当制件较厚时,在拐角处很难做到每一层都均匀压实,结果各层之间的树脂体积分量不一致,往往呈梯度分布,贴近模具面的树脂体积分量较低,远离模具面的树脂体积分量较高,这样在降温时远离模具面的树脂收缩量更大从而引起了回弹,梯度越大,回弹角度越大。本试验的试样件有15mm厚,相对于热压罐工艺,

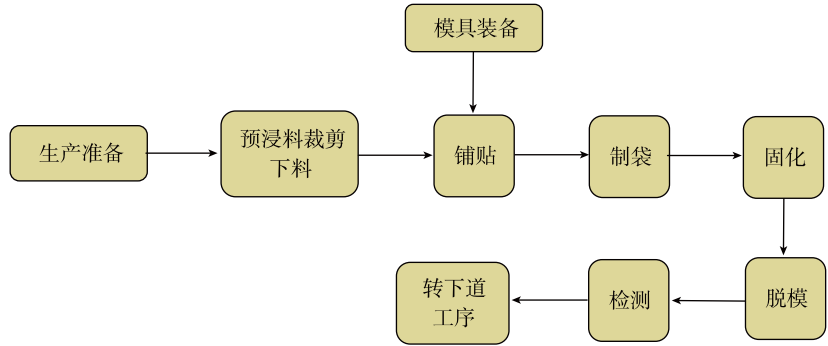


图4 热压罐成型工艺流程图

Fig.4 Process of autoclave

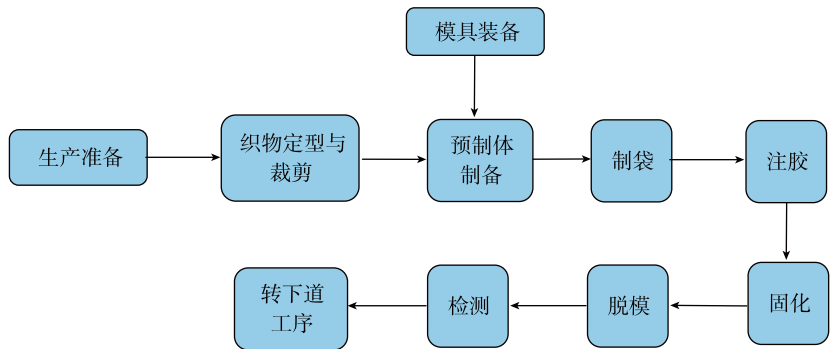


图5 VARIM工艺流程

Fig.5 Process of VARIM

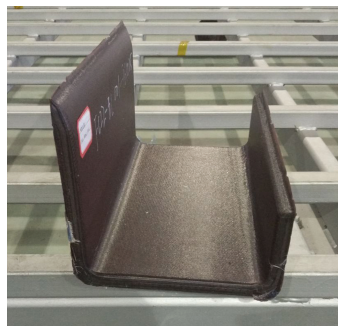


图6 U形构件实物图

Fig.6 U-shaped component

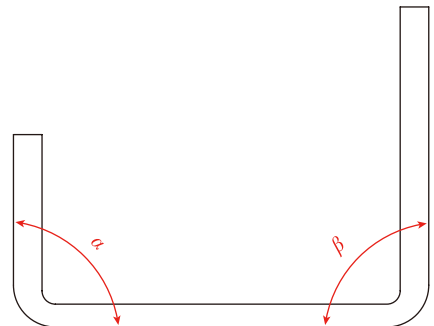


图7 U形构件外形角度测量示意图

Fig.7 Angle for U-shaped component

表1 热压罐成型工艺制备的U形构件外形角度测量结果 (°)

参数	第1件	第2件	第3件
$\alpha$	90.15	90.15	90.13
$\beta$	90.21	90.23	90.20

表2 VARIM工艺制备的U形构件外形角度测量结果 (°)

参数	第1件	第2件	第3件
$\alpha$	90.54	90.55	90.57
$\beta$	90.65	90.65	90.67

VARIM工艺在固化时只有一个大气压,对贴模面的纤维压实程度较小,贴模面的树脂体积分量相对较高,这使得梯度相对较小,导致回弹角度也较小。U形构件的外形角度收缩问

题是在很多复杂因素协同作用下产生的,不仅与构件本身的特点(厚度、尺寸及形状等)有关,还与其树脂特性、固化制度等因素密不可分。所以在设计U形构件模具的补偿角时,

不能将不同成型工艺下的模具一概而论,要针对不同成型工艺特点区别对待。

## 2 模具优化及第2步试验结果

根据第1步试验的测量结果,对模具补偿角进行优化设计,重新设计的模具分别如图8和图9所示。

利用优化后的模具进行第2步试验,即再次分别利用热压罐成型工艺和VARIM工艺制备上述U形构件,每种工艺各制备1件,检验优化效果。新制备U形构件的测量结果如表3所示。

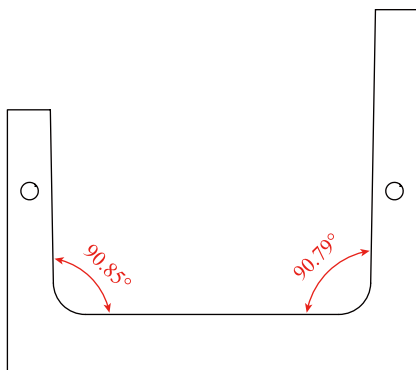


图8 优化后热压罐成型工艺用模具主体结构补偿角

Fig.8 Optimized compensation angle for autoclave mould

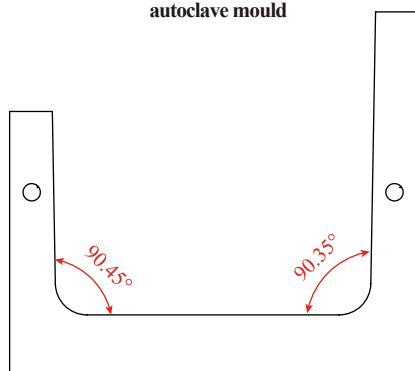


图9 优化后VARIM工艺用模具主体结构补偿角

Fig.9 Optimized compensation angle for VARIM mould

表3 新制备U形构件外形角度测量结果(°)

构件名称	$\alpha$	$\beta$
热压罐成型工艺新制U形构件	89.99	90.00
VARIM工艺新制U形构件	90.01	90.02

从表3可以看出,模具优化效果良好,优化后的两副模具能各自满足这两种不同工艺的使用要求,生产出基本符合要求的制品,外形角度偏差很小。

## 结论

(1) 通过热压罐成型工艺和VARIM工艺制备相同规格的U形构件时,尽管所有材料及铺层相近,但由于织物类型、成型工艺及固化参数的差异,所制构件的外形角度收缩程度会有所不同。所以在设计U形构件模具的补偿角时,针对不同的成型工艺及固化制度的特点,应区别对待。

(2) 对于两侧翼缘板高度不一致的U形构件,不管通过热压罐成型工艺制备,还是通过VARIM工艺制备,除考虑模具材料热膨胀影响外,还需要考虑制件本身尺寸对外角收缩的影响,高翼缘板侧的外角收缩程度比矮翼缘板侧的外角收缩程度小,在设计U形构件模具的补偿角时不可忽略此特征。

## 参考文献

- [1] 黄家康. 复合材料成型技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.  
HUANG Jiakang. Composite molding technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [2] 戴棣. 复合材料结构件的固化变形研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1999.  
DAI Di. Research on the curing deformation of composite materials parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [3] ERSOY N, POTTER K, WISNOM M R, et al. Development of spring in angle during cure of a thermosetting composite[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(12): 1700-1706.
- [4] DONG C. Process-induced deformation of composite T-stiffener structures[J]. Composite Structures, 2010, 92(7): 1614-1619.
- [5] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
ZHAO Qusen. Advanced composites manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

[6] 王晓霞, 贾玉玺, 程程, 等. 树脂传递模塑工艺的模内固化及复合材料脱模变形[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(9): 151-154.

WANG Xiaoxia, JIA Yuxi, CHENG Cheng, et al. Numerical analysis of curing reaction and demoulding deformation in resin transfer moulding processes[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2010, 26(9): 151-154.

[7] 李建川, 何凯, 彭建, 等. 纤维增强热固性复合材料构件的固化变形研究进展[J]. 纤维复合材料, 2013, 30(1): 45-48.

LI Jianchuan, HE Kai, PENG Jian, et al. Research development on the curing deformation of fiber reinforced thermosetting composite materials part[J]. Fiber Composites, 2013, 30(1): 45-48.

[8] 唐占文, 张博明. 复合材料设计制造一体化中的固化变形预报技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(15): 32-37.

TANG Zhanwen, ZHANG Boming. Prediction of curing deformation in integrated design and manufacture composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(15): 32-37.

[9] 王永军, 元振毅, 杨志宏, 等. 先进复合材料构件成型模具和工装技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(10): 32-35.

WANG Yongjun, YUAN Zhenyi, YANG Xuanhong, et al. Molding and tooling technology in advanced composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(10): 32-35.

[10] 王仁宇, 关志东, 王乾, 等. 复合材料V型构件的固化变形预测及其工装型面设计[J]. 材料导报, 2017, 31(1): 131-135.

WANG Renyu, GUAN Zhidong, WANG Qian, et al. Cure-induced deformation prediction and tool surface design for V profile composite part[J]. Materials Review, 2017, 31(1): 131-135.

[11] F.C. 坎贝尔. 先进复合材料的制造工艺[M]. 戴棣, 朱月琴, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.

CAMPBELL F C. Manufacturing processes for advanced composites[M]. Shanghai: DAI Di, ZHU Yueqin, Trans. Shanghai Jiao Tong University Press, 2016.

通讯作者: 於永红, E-mail: 419926487@qq.com.

## Study on Angular Contraction of Carbon Fiber Composite U-Shaped Component and Its Mould Compensation

YU Yonghong, LIU Zhaopeng, SHANG Yanghong, YANG Jingwen, LI Zeying  
(Jiangsu Hengshen Co., Ltd., Danyang 212314, China)

**[ABSTRACT]** In this paper, U-shaped components of carbon fiber composite with two different-height flange slabs are studied. Autoclave moulding process and VARIM process are used to prepare the U-shaped components. The U-shaped component angular contraction conditions are studied by measuring their angle. And based on the measurement results, the mould compensation angle is optimized and redesigned. The angular contraction conditions of the U-shaped components made by the two above-mentioned processes are different. When designing the compensation angle of the U-shaped component mould, it is impossible to generalize all the moulds used in different molding processes and we should treat them differently according to the molding process characteristics. In addition, for the U-shaped components with two different-height flange slabs, whichever kind of molding process they are made by, the degree of angular contraction on the high flange slab side is smaller than that of on the lower flange slab side. When designing the compensation angle of the U-shaped component mould, this distinction should not be neglected.

**Keywords:** Carbon fiber composite; U-shaped component; Angular contraction; Mould; Compensation angle

(责编 铃兰)

(上接第 84 页)

46(10): 31-39.

[8] 刘闯. 钣金件数字化制造数据库工程技术应用案例集 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

LIU Chuang. Cases of digital manufacturing database engineering technology for sheet metal parts[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

[9] 张曙. 工业 4.0 和智能制造 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1-5.

ZHANG Shu. The Industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8): 1-5.

[10] 范玉斌, 刘闯, 吴红兵, 等. 全三维模型驱动的复杂产品智能制造 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1176-1186.

FAN Yubin, LIU Chuang, WU Hongbing, et al. Intelligent complex product manufacturing driven by complete three-dimensional model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1176-1186.

通讯作者: 刘闯, E-mail: liuchuang@nwpu.edu.cn.

## Development and Application of Intelligent Manufacturing Technology of Aircraft Frame and Rib Parts

LIU Chuang<sup>1</sup>, SHI Hang<sup>1</sup>, LI Renhua<sup>2</sup>, FU Bin<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>, ZENG Yipan<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330024, China;

3. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110013, China;

4. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** To manufacture the aircraft frame and rib parts rapidly and precisely, the approach of intelligent manufacturing technology development is proposed from the viewpoints of knowledge base and manufacturing model, and the intelligent manufacturing flow is established. The scheme from technology analysis, implementation to application is designed according to the application target. The technology has been applied in AVIC corporations of Hongdu, Shenyang and Chengdu. The test result shows that the forming accuracy of outer shape, flange angle and height is improved significantly and precise forming is achieved. The technology can be further applied in the future.

**Keywords:** Intelligent manufacturing; Precise forming; Manufacturing model; Knowledge base; Frame and rib part

(责编 文竹)