

复合材料机身 Z 型隔框变形控制研究

韩小勇，苏佳智，王霖，高龙飞

(上海飞机制造有限公司，上海 200436)

摘要：采用单向带预浸料在 Z 型隔框成型工装上完成零件的铺贴及固化,在零件切边以后采用三坐标测量机完成零件的型面测量,将测量数据与零件理论型面进行了分析对比。分析了零件缘条与腹板之间的回弹、零件在半径方向以及在腹板方向上的变形情况,并根据工程对零件型面的要求,对隔框成型工装进行了型面补偿,得到了工装设计的零件工艺数模。采用完成型面补偿以后的工装制造了全尺寸隔框零件,采用三坐标测量机对零件型面进行了测量,验证了工装型面补偿的有效性,零件型面轮廓度控制在 $\pm 0.375\text{ mm}$ 以内,隔框在与角片及蒙皮进行装配的过程中,很好地满足了装配公差的要求。

关键词：复合材料；Z 型隔框；变形控制

中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-8000(2020)01-0087-05

现代飞机的机身是一种加强的壳体,为了防止蒙皮在受压和受剪时失稳,需要安装隔框、长桁等加强构件。飞机隔框零件的制造从传统的钣金件发展到机加件,再到手铺复材件及 RTM 工艺复材件^[1,2]。复合材料隔框是整个机身的支撑零件,也是飞机的主承力结构件,隔框与角片通过金属紧固件同机身蒙皮进行连接^[3]。

1 试验部分

1.1 主要原材料

碳纤维单向带预浸料:M21C/34%/UD194/IMA/150ATL,Hexcel 公司;M21C/34%/UD194/IMA/6.35AFP,Hexcel 公司。

1.2 主要仪器及设备

三坐标测量机:GSMMA 1102,DEA 公司。

自动铺丝机:Coriolis 复合材料公司。

自动下料机:1.8 m×1.8 m,GERBER 公司。

热压罐:3 m×8 m,ASC 公司。

1.3 隔框零件制造

本试验采用自动铺丝+手工铺贴的方式完成隔框零件的铺贴,零件铺层数量为 14 层,其中 0°、45°及-45°铺层比例各占 28.6%,90°铺层比例为 14.2%,隔框零件截面构型如图 1 所示。其中腹板区域的 0°铺层采用自动铺丝机进行铺贴,零件弧长约为 1.7 m,

零件半径约为 3 m。零件铺贴成型工装在两缘条与腹板之间回弹角已补偿 1°,在半径方向已补偿+8 mm,零件铺贴完成以后,在指定位置上布置热电偶,铺上无孔隔离膜、工艺盖板、隔离膜、透气毡和真空袋,进行真空袋检漏后进罐固化,零件固化工艺为:180 ℃/2 h,0.6 MPa。本试验采用相同工艺制造了 4 件隔框零件进行对比研究,4 件隔框固化以后都切至零件净边。

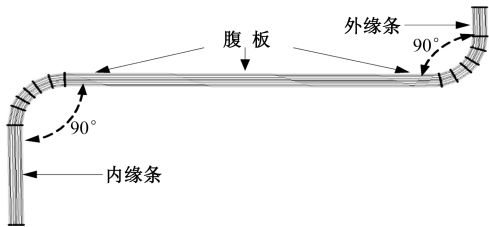


图 1 隔框构型

Fig. 1 Structure of frame

1.4 型面测量

采用三坐标测量机对隔框零件的外形进行检测,测量取点及检测坐标系建立如图 2 所示。坐标系建立如下:孔 1、孔 2 轴线与平面 1(腹板面的贴模面)的交点的连线为直线 1;孔 3 轴线与平面 1 的交点为原点;X 轴正方向为过原点作直线 1 的垂线方向的反向;Y 轴正方向垂直平面 1 指向下,由右手法则建立坐标系。

收稿日期:2019-04-09
本文作者还有谢飞。
作者简介:韩小勇(1985-),硕士,高级工程师,研究方向为复合材料制造工艺,hanxiaoyong@comac.cc。

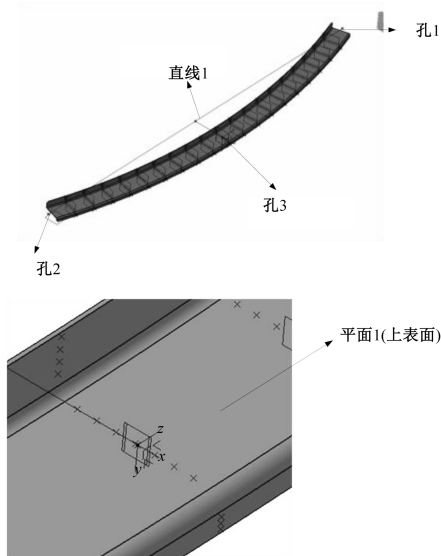


图2 测量点分布及坐标系建立

Fig. 2 Distribution of measured points & building axis system

测量过程中,零件平放在支撑立柱上,为了防止测量过程中零件产生移动,在有支柱支撑的地方放置两块压板压紧。分析零件型面的测量数据,得到隔框缘条与腹板之间的回弹、零件在半径方向以及在腹板方向的变形情况,通过与理论数据进行对比,可以获得零件的整体变形情况。

2 结果与讨论

隔框零件型面测量数据表明,零件存在复杂的变形,包括缘条与腹板之间的回弹变形,零件在半径方向的变形以及在腹板方向的变形。与零件理论型面对比,零件变形的最大正偏差为 0.56 mm,零件变形的最大负偏差为-0.635 mm,如图 3 所示,均超出了零件型面偏差接收限控制在 ± 0.375 mm 的要求。

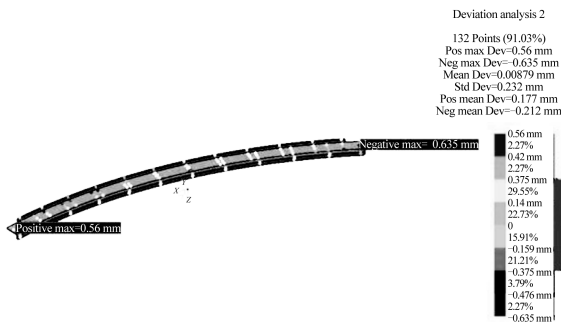
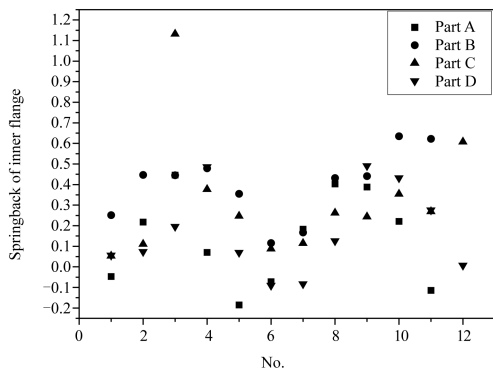


图3 Z型隔框变形分析

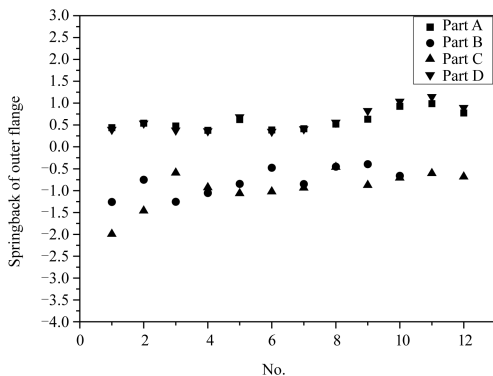
Fig. 3 Deformation of Z-shaped frame

2.1 缘条与腹板回弹分析

隔框铺贴成型工装在内缘条与腹板的夹角进行了 $+1^\circ$ 的补偿,外缘条与腹板的夹角也进行了 $+1^\circ$ 的补偿。测量结果表明零件在内缘条回弹角约为 $+0.2^\circ$,如图 4(a)所示,在工装补偿 1° 的情况下,内缘条型面处于过补偿,因此在全尺寸 Z 型隔框成型工装型面补偿时,将内缘条与腹板之间的回弹补偿修改为 $+0.8^\circ$;外缘条由于幅宽太短,且靠近 R 区,受 R 角的影响较大,零件自身扭曲变形对其也有较大影响,外缘条的回弹角没有明显的规律,如图 4(b)所示,因此全尺寸工装外缘条保持回弹补偿 $+1^\circ$ 不变。



(a)



(b)

图4 内缘条回弹(a)及外缘条回弹(b)

Fig. 4 Springback of inner flange (a) & springback of outer flange (b)

2.2 半径方向变形分析

采用位于外缘条及内缘条靠近腹板区域的三坐标测量数据点,分别对外缘条及内缘条拟合不同的圆,将该拟合的圆与理论的圆进行对比,得到隔框在半径方向的变形数据。将测量数据按图 5 所示方法在零件缘条处拟合 3 个圆,将每个圆与理论值的圆

进行对比,得到零件在半径方向的变形量,如图 5 所示。成型工装在半径方向上补偿+8 mm 的情况下,内缘条半径方向上还有 4 mm 的变形量,如图 6(a)所示,内缘条在半径方向出现了过补偿,因此全尺寸成型工装内缘条在半径方向补偿更改为+4 mm;外缘条尺寸较短,且靠近零件腹板区,受 R 角的影响较大,外缘条在半径方向的变形没有明显的规律,如图 6(b)所示,因此全尺寸成型工装外缘条在半径方向上保持+8 mm 的补偿量。

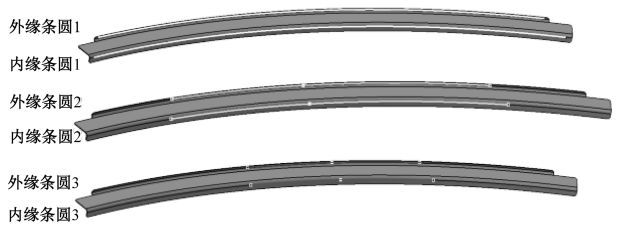
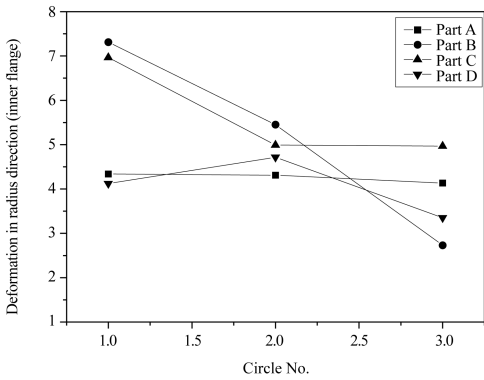
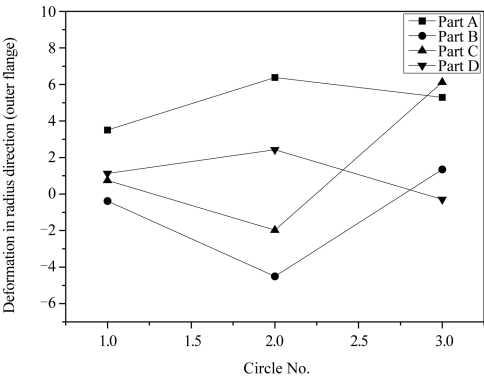


图 5 半径方向变形分析示意

Fig. 5 Demo. of deformation analysis in radius direction



(a)



(b)

图 6 内缘条(a)及外缘条(b)半径方向变形

Fig. 6 Deformation of inner flange (a) & outer flange (b) in radius direction

2.3 腹板方向变形分析

自由状态下隔框在腹板区域存在复杂的扭曲变形,如图 7 所示。由于腹板方向的变形受到缘条回弹以及零件在半径方向上的变形影响,为了避免后期工装型面补偿的影响因素过多,因此全尺寸隔框工装设计时暂不考虑对腹板区域的补偿。

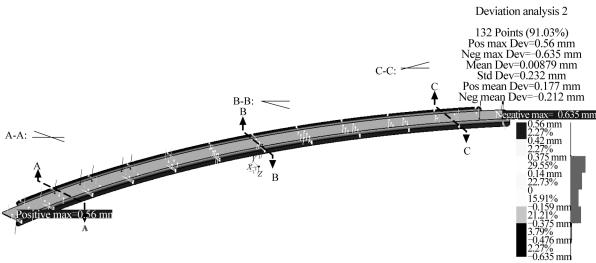


图 7 隔框零件腹板变形

Fig. 7 Deformation of frame's web

3 变形补偿

根据隔框型面检测结果,对隔框零件数模进行型面修正设计,具体方法是在隔框零件的工程数模中,修改零件缘条与腹板之间的翻折角度,以及腹板区域的半径值。按照修正以后的零件型面设计全尺寸隔框成型工装,修正如图 8 所示。

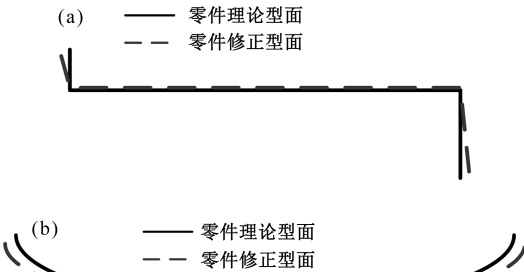


图 8 回弹补偿(a)及半径补偿(b)

Fig. 8 Compensation of springback (a) & radius (b)

4 补偿验证

采用型面经过修正以后的隔框成型工装完成隔框零件的制造,零件切边以后采用三坐标测量机测量零件型面,将测量数据与理论数据进行对比,分析了缘条回弹、半径方向变形以及零件的整体变形情况。测量坐标系建立如下:取零件腹板贴模面为平面 1,孔 1 和孔 2 在平面 1 圆心的中点与孔 2 和孔 3

在平面 1 圆心的中点连线为直线 1,取孔 1 和孔 2 在平面 1 的圆心的中点为原点, X 轴正方向沿直线 1 指向上, Z 轴正方向垂直于平面 1 指向上,建立右手坐标系,如图 9 所示。

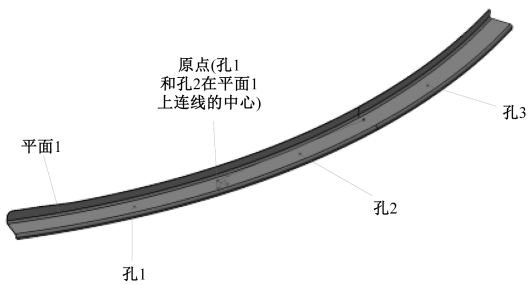
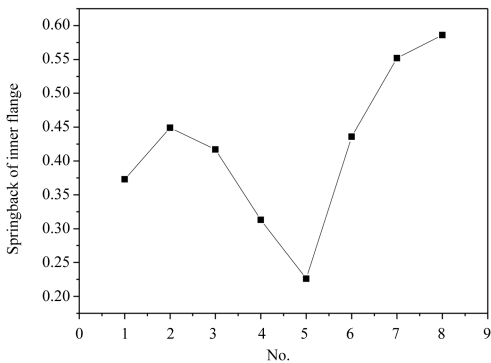
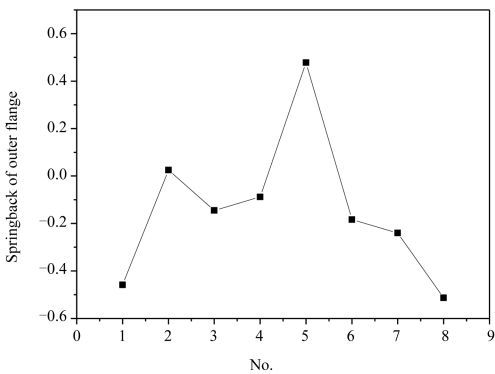


图 9 测量坐标系建立
Fig. 9 Building axis system

型面测量结果表明,内缘条回弹角约为 $+0.42^\circ$,外缘条回弹角约为 -0.15° ,如图 10 所示,可以看到,全尺寸隔框工装缘条回弹角进行补偿以后,隔框缘条的回弹角已变得很小。



(a)



(b)

图 10 内缘条(a)及外缘条(b)回弹

Fig. 10 Springback of inner flange (a) & outer flange (b)

全尺寸工装在半径方向进行补偿以后,零件在半径方向还存在变形,内外缘条在半径方向有约 -5 mm 的形变量(如图 11 所示),可以看到弧长为 2.1 m 的全尺寸隔框长桁由于弧长变大,导致了零件在半径方向的变形量增大。

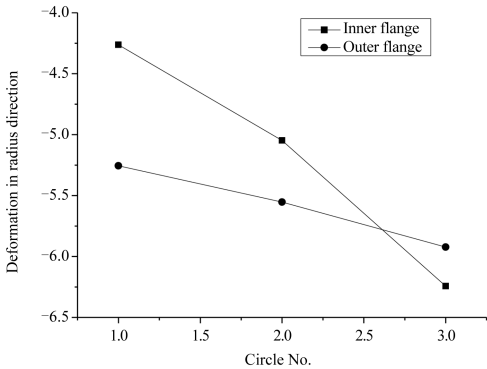


图 11 内外缘条半径方向变形

Fig. 11 Deformation in radius direction of inner & outer flange

将全尺寸隔框零件的型面测量数据与理论数据进行整体分析,结果表明零件最大正偏差为 0.307 mm ,最大负偏差为 -0.191 mm ,如图 12 所示。零件整体变形量控制在 $\pm 0.375\text{ mm}$ 的范围内,满足零件验收技术条件对零件型面公差的要求,验证了工装型面补偿的有效性。



图 12 零件变形情况

Fig. 12 Deformation of part

5 结 论

(1)由于铺层、零件几何结构、工装及固化制度等因素,复合材料机身 Z 型隔框零件在固化以后存在着复杂固化变形,包括缘条与腹板之间的回弹、腹板本身的扭曲变形以及零件在半径方向的变形;

(2)对于半径约为 3 m 的隔框零件,内缘条与腹板之间的回弹角补偿约为 0.8° ,外缘条与腹板之间的回弹角补偿量约为 1° ;

(3) 隔框零件固化以后, 腹板在自由状态下存在较为复杂的扭曲变形, 但由于隔框为细长类零件结构, 装配时可以在零件腹板区域隔 300 mm 施加一定的装配力, 基本可以抵消腹板的变形量, 同时为了减少隔框变形分析的影响因素, 隔框在腹板方向的变形可以不用考虑;

(4) 隔框在零件半径方向也存在变形, 在零件铺层及零件半径一定的情况下, 零件本身的弧长也

会影响零件在半径方向的变形量。

参考文献

- [1] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [2] Christos K. Minimum cost and weight design of fuselage frames, Part B: cost considerations, optimization, and results[J]. Composites, 1999, 30: 895-904.
- [3] 韩小勇, 苏佳智, 陈萍, 等. 复材机身隔框制造技术要求进展[J]. 航空制造技术, 2017, 13: 72-76

STUDY ON CONTROLLING THE DEFORMATION OF COMPOSITE FUSELAGE Z-SHAPED FRAME

HAN Xiao-yong, SU Jia-zhi, WANG Lin, GAO Long-fei

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

Abstract: Z-shaped frame was laid-up and cured on the lay-up & curing tooling using unidirectional prepreg. The profile of part was measured by coordination measurement machine (CMM), this paper analyzed the deformation of Z-shaped frame according to comparison measuring data of the part with theoretical profile of the part. The deformation contains springback between inner & outer flange and web of the part, deformation in the radius direction and deformation in the web direction of the part. Using the surface of frame which was compensated according to the part's acceptance document to modify the design of curing tooling, a full-scale part was manufactured on curing tooling which has been compensated. The part was measured by CMM again, the result showed the validation of compensation to curing tooling surface, surface profile tolerance of the part conformed to the part's acceptance document (± 0.375 mm). Z-shaped frame matched shear tie and skin perfect when it was assembled.

Key words: composite; Z-shaped frame; deformation controlling