

## 超塑成形 / 扩散连接结构设计及试验研究

## Design and Test Research on SPF/DB Structure

中航工业成都飞机设计研究所 黄 瑞

**[摘要]** 概述了超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 结构的结构设计流程,并以口盖为例,对具体设计过程进行了阐述。同时针对口盖结构设计的合理性,设计了验证改进试验静力测试试验及壁厚估算试验,来作为口盖结构改进优化的依据。根据上述思路,建立了超塑成形 / 扩散连接结构的完整设计过程,为超塑成形 / 扩散连接的结构设计提供了借鉴。

**关键词:** 超塑成形 / 扩散连接 SPF/DB 结构设计 验证改进试验

**[ABSTRACT]** Design flow of which superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) structure is introduced briefly, and concrete design process of which cover is expatiated. Simultaneity, validating improving test such as static strength and panel thickness estimation is designed as the basis that cover is improved and optimized. According to the aboved thought, the whole design process are based and design reference are provided for superplastic forming/diffusion bonding structure.

**Keywords:** Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) structure design Validating improving test

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.059

超塑成形 / 扩散连接技术可以使复杂薄壁零件整体化,在降低飞行器结构质量,提高结构完整性和承载效率方面具有独特的技术优势<sup>[1]</sup>。超塑成形 / 扩散连接的整体结构具有成形性好、设计自由度大、成形精确、无残余应力、零件数量少等优点,在减轻飞行器结构质量,降低生产成本方面显示了极大的优越性<sup>[2-3]</sup>。

为充分利用 SPF/DB 技术的优点,本文对 SPF/DB 结构的设计过程进行了阐述,以期对 SPF/DB 结构的设计提供一个借鉴。

## 1 SPF/DB 结构设计流程

SPF/DB 结构的设计可按方案设计、详细设计、验证改进试验 3 个阶段进行,其设计流程如图 1 所示。

在方案设计阶段,主要是对结构的结构特点及设计难点进行分析,从而确定结构设计方案,经与工艺进行

沟通并多轮反馈后,可最终确定可行的结构方案。

在详细设计阶段,确定结构参数及设计进排气道,形成结构数模,进行强度校核,强度满足后,即可向工厂提交数模,并进行试制件的生产。

为减轻结构质量,在验证改进试验阶段,对已生产的试制件进行静力及壁厚估计试验,以验证在详细设计阶段所选择的结构参数是否还有改进的余地,如果有,可对板料的厚度进行优化,然后进行强度校核,如果有可能,还可进行结构的装机考核试验,从而确定最终可用于装机的数模及装机件。

## 2 SPF/DB 结构设计过程

以某口盖为例,按第 1 节中所述的结构设计流程,对 SPF/DB 结构的设计过程作详细的阐述。

### 2.1 方案设计

该口盖具有如下结构特点:大尺寸(2500mm×1600mm),大曲率。在设计的时候,要考虑的设计难点有:原材料尺寸、零件分块、零件脱模、工艺成形的实现。还需要考虑下面 4 方面的工艺因素:原材料的规格限制、设备能力的限制、单块 SPF/DB 成形模具规格、零件脱模限制。

在分析考虑了上述难点及工艺因素后,形成了图 2 所示的口盖设计方案。口盖纵向分为 2 块,横向分为 2 块,并采用激光拼焊将口盖拼接为整体。

### 2.2 详细设计

(1) 确定结构参数。

口盖为二层板结构,板料厚度初步按外层蒙皮厚度 1.0 mm,内层加筋板厚度 1.5 mm。加强筋设计参数:筋条高  $H$ 、筋条宽度  $W$ 、起筋角  $\gamma$ ,如图 3 所示。

假设起筋处变薄均匀,为保证加筋板的变薄量不大于 40%,则有下式成立:

$$\frac{2a+b}{W} \leq \frac{1}{1-\delta}, \quad (1)$$

其中,

$$a = \frac{H}{\sin \gamma}, \quad b = W - 2H \cot \gamma \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得:

$$\frac{2H(1-\cos \gamma)}{W \sin \gamma} \leq \frac{\delta}{1-\delta} \quad (3)$$

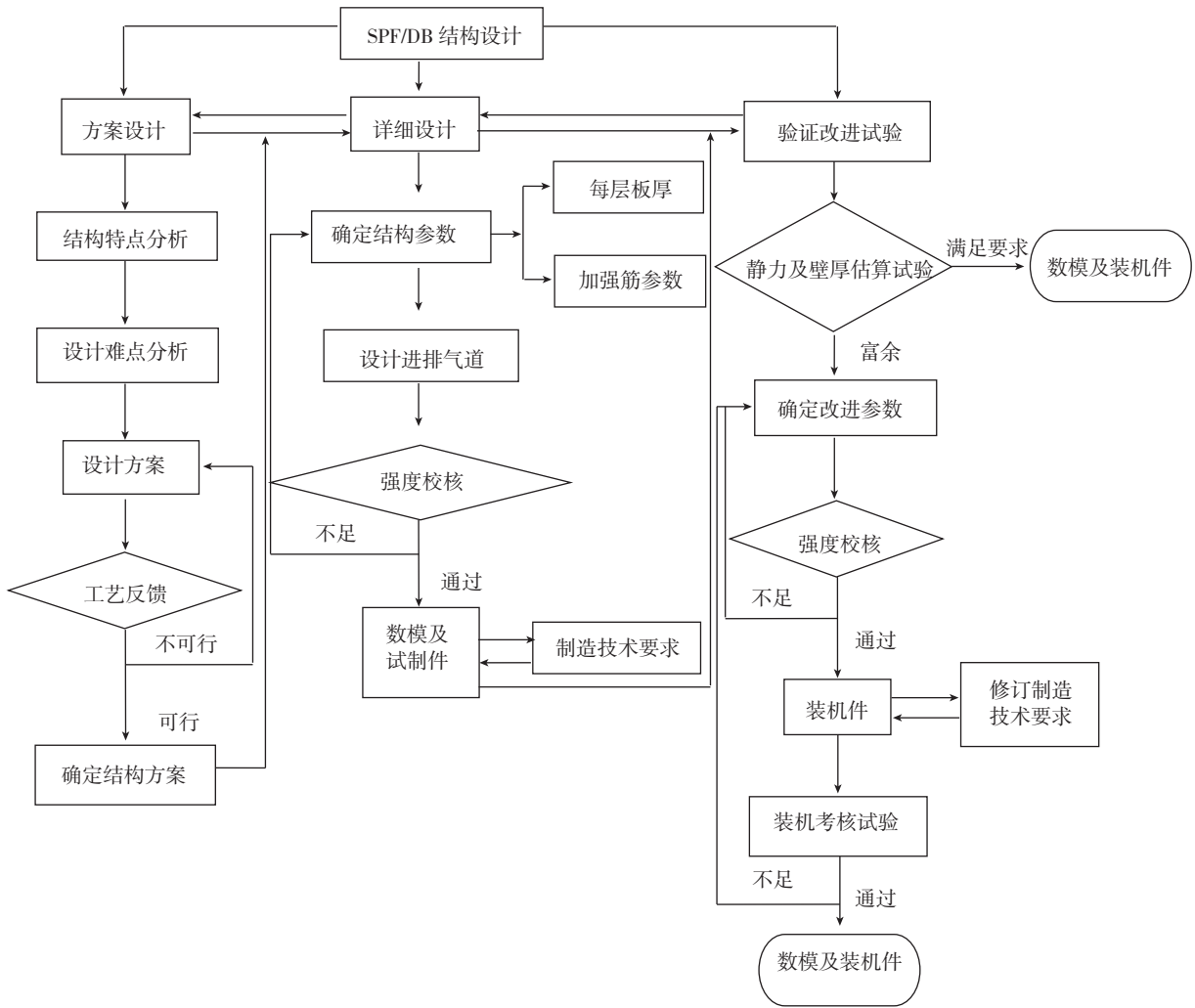


图1 SPF/DB结构设计流程

Fig.1 Design flow of SPF/DB structure

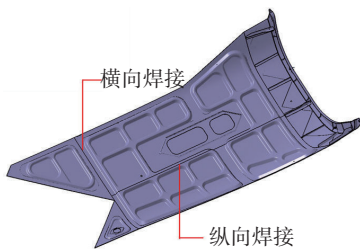


图2 SPF/DB口盖设计方案

Fig.2 Design proposal of SPF/DB cover

在确定了起筋角  $\gamma$  及筋条的宽度  $W$  后,即可根据式(3)大致确定筋条的高度  $H$ 。

(2)进排气道设计。

设计进排气道,是为了保证 SPF/DB 工艺的实现。图 4 中,在口盖边缘的内层板开一高约 3mm,宽约 6mm 的进排气道。

(3)强度分析。

由于口盖主要传递剪力,从图 5 的有限元计算结果看腹板剪力变化不大,而 7、8、17 号板的临界应力较小,因此对这 3 个板校核其稳定性。

7 号板:

$$\tau = -49.9 \times 1.5/2.5 = 30\text{MPa}; \text{M.S.} = 88/30 - 1 = 1.9;$$

8 号板:

$$\tau = 34.3 \times 1.5/2.5 = 20.58\text{MPa}; \text{M.S.} = 76/20.58 - 1$$

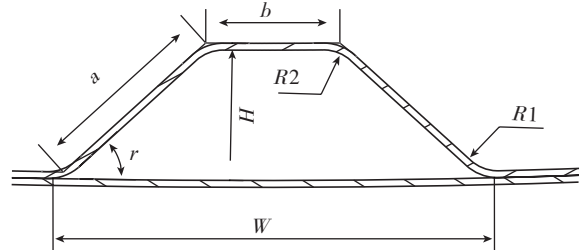


图3 筋条参数计算示意图

Fig.3 Schematic diagram for parameter computation of stiffener

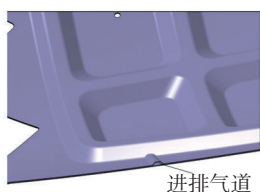


图4 进排气道设计

Fig.4 Design for inlet and exhaust duct

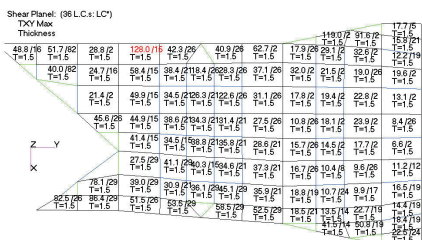


图5 口盖强度分析结果

Fig.5 Strength analysis result of cover

= 2.6;

17号板:

$\tau = 19.4 \times 1.5 / 2.5 = 11.64 \text{MPa}$ ;  $M.S. = 80 / 11.64 - 1 = 5.9$ 。

从计算结果可得出结论:口盖稳定性通过,口盖满足设计要求。

### 2.3 验证改进试验

验证改进试验的目标是进一步减轻结构质量,主要的改进参数是板料的厚度。

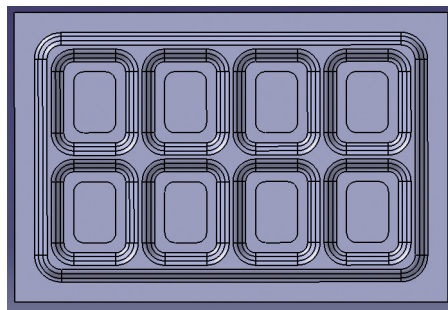
可通过下面2个试验来作为改进设计的依据:静力测试试验—对模拟件进行面内均匀剪切、均布气动载荷试验;壁厚估算试验—对试件切取截面实测壁厚以及软件模拟。

(1)静力测试性试验。设计试验模拟件,模拟件为2层平板件,内层板为1.5mm,外层板为1mm,对试验件进行面内均匀剪切、均布气动载荷试验,试验件及试验结果如图6所示。

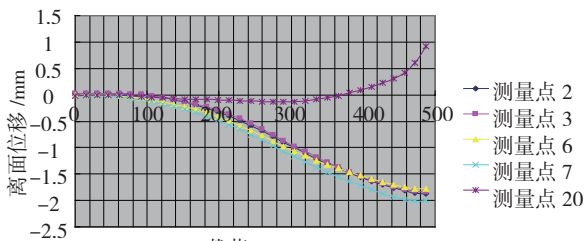
从试验结果可看出:试验件在面内均匀剪切、均布气动载荷加大到远大于设计载荷时,试验件均未破坏,表明试验件具有较强的承载能力及抗失稳能力,强度还有富余,板料厚度还有减薄的余地。

(2)壁厚估算试验。

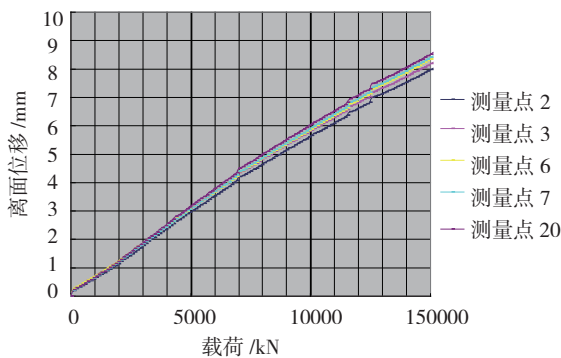
根据口盖上的典型截面形式,采用有限元分析的方法,模拟超塑成形后的厚度分布。采用MARC有限元软件,对两处典型截面区域进行超塑成形过程模拟,原始板料厚度为1mm。由于是等温超塑成形,因此忽略变形过程中的温度变化。本模拟中,为刚塑性材料模型,对超塑成形材料的应变硬化模型采用Backofen流变方程。



(a)口盖试验模拟件



(b)口盖剪切试验载荷—离面位移曲线



(c)口盖均布压试验载荷—离面位移关系曲线(第一件)

图6 口盖静力试验结果

Fig.6 Static test result of cover

由速度突变法得到  $m=0.63$ , 计算TC4钛合金的材料常数  $K$  值为  $1315.2 \text{MPa} \cdot \text{s}$ 。

从模拟结果可看出,若内层加筋板原始板料厚度减为1.0mm时,超塑成形后的内蒙皮壁厚应不低于0.7mm。因此,口盖内层加筋板选用厚度为1.0mm的板料,其成形后的壁厚在可接受的范围内。

(3)改进参数及强度分析。

根据上面的试验结果,选择内层加筋板料厚度为1.0mm,考虑到连接、承载以及防外部冲击等要求,内蒙皮板料厚度仍为1.0mm。

经过强度计算,改进厚度后的口盖满足强度要求。

## 3 结论

本文通过对SPF/DB口盖设计过程的阐述,针对(下转第65页)

(4) 工艺参数: 预留加工余量, 加工中两边均匀去除余量; 固化切削参数, 避免由于转速过高、进给过大、刀尖过大等造成加工时对零件表面的挤压产生应力;

(5) 对关键尺寸设置修整加工工序, 避免残余应力产生的变形。

### 2.2.3 环形榫槽加工及检测技术

环形榫槽加工难点突出表现在两个方面: 一是加工, 主要是刀具的设计和编程; 二是测量, 这种小结构凹槽采用三坐标检测无法实现。通过以下技术解决:

(1) 榫槽加工。

a. 刀具设计: 由于环形榫槽较小且外小里大, 不可能采用成型刀具, 只能设计专用刀具。通过研究, 确定选用图 7 结构形状的刀具加工环形榫槽。

b. 刀具材料: 由于榫槽加工周向尺寸较大, 而榫槽结构较小, 直接影响刀具刚性。所以选择带涂层的硬质合金刀片, 可避免加工中刀具的磨损和换刀造成的误差;

c. 编程: 由于榫槽结构小, 只能采用仿形加工, 同时考虑到加工中刀片的磨损, 要求精加工榫槽型面时必须更换刀片。

(2) 榫槽测量。由于叶片装于盘上时只考核摆动量, 而摆动量主要由榫槽的  $N$  尺寸和榫槽角度来控制, 所以采用在  $N$  尺寸点上用钢球测量求得真实值, 用模拟叶片最大实体的塞规来判断角度和其它综合因素影响的方法, 实现特殊结构环形榫槽的测量, 榫槽测量示意图见图 8。

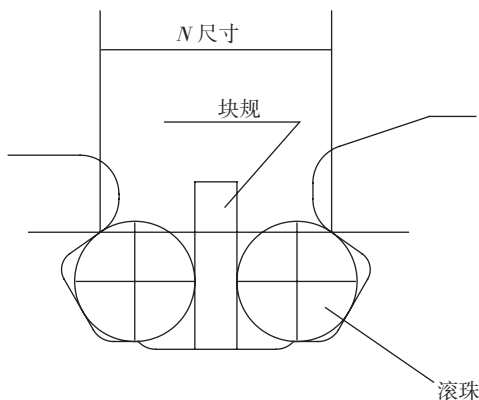


图8 榫槽测量示意图

Fig.8 Diagram of slot measurement

## 2.3 特种工艺技术研究

### 2.3.1 电子束焊接

通过调整电子束焊加速电压、束流、聚焦电流、焊接速度、聚焦位置和束流裕量等参数, 改变焊接线能量和焊缝与热影响区的冷却速度, 保证了焊缝质量。通过焊前退火和焊后多重热循环处理, 调整焊接接头的组织组

成, 改善焊接接头的塑性、韧性, 并降低焊缝的裂纹敏感性, 提高焊缝的抗疲劳性能。

### 2.3.2 TC25+TA15 自动氩弧焊技术研究

通过焊接部位前处理、接头形式、装配间隙、焊接保护方式等研究, 解决了焊接气孔和焊透率等问题。

## 2.4 无损检测技术研究

### 2.4.1 超声波检测

利用分区检测方法: 水浸超声波检测时采用分区聚焦检测, 使声能聚焦于零件不同深度的区域, 同时监控底波的变化, 从而保证整个厚度范围内的聚焦检测; 接触法检测时采用直探头和双晶探头从零件正反两面对零件不同深度范围进行分区检测。

通过对超声波探头频率、频带脉冲、聚焦方式以及各检测面用波束等研究, 确定了水浸超声波探伤选择较高频率、分区聚焦探头; 接触法探伤选择较低频率、平探头和一收一发双晶探头; 所有检测面均使用纵波 (LW)、宽频带窄脉冲探头, 解决了零件的超声波检测。

### 2.4.2 X 射线检测

通过实物透照, 再解剖进行金相对比焊缝根部、底层未熔化等研究, 制定了焊缝 X 光检验标准底片, 解决了机匣的 X 光检测问题。

## 3 结束语

通过对 TC25 热强钛合金  $\beta$  锻造盘环锻件制造关键技术的研究, 突破了热强钛合金大高径比盘件、高筒环件的  $\beta$  锻造及组织均匀性控制; 解决了网篮组织结构特点零件表面完整性控制, 超声检验衰减大、噪声高、信噪比低、可探性差, 电子束焊、自动氩弧焊工艺及焊缝无损检测等技术难题, 制造出了合格的零件, 实现了我国 550℃ 高温热强钛合金 TC25 新材料的工程应用。

TC25 热强钛合金  $\beta$  锻造盘环锻件制造关键技术研究将引领钛合金先进制造技术, 满足先进航空发动机零件制造需要, 为其他钛合金  $\beta$  锻造及其零件加工检测奠定良好技术基础。 (责编 台京)

(上接第 61 页)

SPF/DB 结构, 建立了一套行之有效的飞机 SPF/DB 结构设计流程与方法, 形成了一套工程适用的结构设计性试验方法, 可为 SPF/DB 结构的设计提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术的应用与发展现状. 航空制造技术, 2010(8):32-33.
- [2] 王哲. 钛合金超塑成形 / 扩散连接技术在飞机结构上的应用. 钛工业进展, 1999(16):23-25.
- [3] 王向明. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010. (责编 玲犀)