

# Ti60/TA15合金四层结构舵面超塑成形/扩散连接 技术研究\*

李保永<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>2</sup>, 秦中环<sup>2</sup>, 蒋少松<sup>1</sup>, 薛杰<sup>2</sup>, 李信<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;  
2. 北京航星机器制造有限公司, 北京 100013)

**[摘要]** 采用有限元软件对芯板的超塑成形过程进行了分析, 获得了壁厚分布规律曲线和气压加载  $p-t$  曲线。在温度为 920℃ 时, 制得 Ti60/TA15 四层结构舵面样件, 并对舵面进行了壁厚分析。结果显示, 最小壁厚为 1.24mm, 最大壁厚为 1.80mm。采用三维扫描对 Ti60/TA15 合金四层结构舵面的型面进行分析。结果表明, 90% 以上型面的公差在  $\pm 0.2\text{mm}$  以内, 整体型面的公差不超过  $\pm 0.5\text{mm}$ 。对扩散连接界面进行了金相分析。得出在温度为 920℃ 时, TA15 同种材料之间以及 Ti60/TA15 异种材料之间的扩散连接界面基本消失, 3 种扩散连接界面处已经看不出空洞。  
**关键词:** Ti60; TA15; 四层结构; 超塑成形 / 扩散连接; 舵面

## Research on Superplastic Forming/Diffusion Bonding for Four-Sheet Structure Rudder of Ti60/TA15 Alloy

LI Baoyong<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, QIN Zhonghuan<sup>2</sup>, JIANG Shaosong<sup>1</sup>, XUE Jie<sup>2</sup>, LI Xin<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. Beijing Hangxing Machine Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**[ABSTRACT]** The superplastic forming process of the core was simulated by using the finite element software, to obtain the thickness distribution and the pressure-time curves. The four-sheet structure rudder of Ti60/TA15 alloy was obtained at 920℃. The thickness of the rudder was investigated. The results show that the minimum thickness is 1.24mm and the maximum thickness is 1.80mm. The moulding surface for the four-sheet structure rudder of Ti60/TA15 alloy was measured by using the 3D scanning. The results show that the tolerance of more than 90% is less than  $\pm 0.2\text{mm}$ , and the global is less than  $\pm 0.5\text{mm}$ . The interface of diffusion bonding was investigated by the metallograph observation. The results show that at 920℃, interfaces of diffusion bonding between the same materials of TA15 and between the different materials of TA15 disappear basically, and no holes can be seen at the three diffused interfaces.

**Keywords:** Ti60; TA15; Four-sheet structure; Superplastic forming/Diffusion bonding; Rudder

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.076

随着航空、航天等发动机对性能要求的不断提高, 对高温结构材料的性能也提出了更高要求: 即“更强、更刚、更耐热和更轻”<sup>[1-2]</sup>。Ti60 合金是由中科院金属研究所和宝钛集团联合研制的一种 600℃ 用近  $\alpha$  型高温钛合金。相对于其他高温钛合金, Ti60 合金中添加了更高含量的 Al、Si、Sn 等合金元素, 进一步提升了合金的热强性; 同时, 加入 1% 的稀土元素 Nd 后, Ti60 合金组织细化且抗氧化能力提高。一方面, 稀土元素的内氧

化作用使合金形成了富含 Nd、Sn 和 O 的稀土氧化物相, 降低基体中氧含量, 起到了净化基体、改善合金稳定性的作用<sup>[3-6]</sup>。另一方面, 弥散析出的稀土氧化物粒子的热膨胀系数不同于基体, 冷却时易在周围形成位错环, 进一步强化基体<sup>[7-8]</sup>。

钛合金超塑成形 / 扩散连接 (Superplastic Forming/Diffusion Bonding, SPF/DB) 技术是一种先进的钣金轻量化成形技术, 采用 SPF/DB 技术制造的钛合金钣金结构件已广泛用于航空航天等领域。闫亮亮等<sup>[9]</sup> 研究表明, 在温度 930℃ 和应变速率  $5.25 \times 10^{-4}/\text{s}$  时, TA15 四

\* 基金项目: 装备预研基金 (6144290902417)。

层板结构 SPF/DB 成形整体质量良好。Elias 等<sup>[10]</sup>发现, TC4 合金 SPF/DB 后连接面的抗拉强度可达 820MPa。但是目前还未见关于 Ti60/TA15 异种合金 SPF/DB 方面的相关研究报道。本文进行了四层舵面的 SPF/DB 技术研究,进行了芯板超塑过程数值模拟,获得了超塑过程壁厚减薄规律曲线和气压加载曲线,开展了 Ti60/TA15 合金四层结构舵面 SPF/DB 工艺试验,并成功制备了四层舵面样件。通过 TA15/Ti60 异种钛合金的扩散连接,将 Ti60 高温钛合金作蒙皮以提高表面耐高温能力,将 TA15 中温钛合金作芯板以充分发挥其优异的超塑成形性能,从而研制出具有梯度耐热能力的四层结构舵面,将钛合金四层结构超塑成形 / 扩散连接工艺适用范围扩大,得到更耐热的钛合金轻量化结构件。

## 1 试验材料

本试验所用 Ti60 合金的名义成分为 Ti-5.6Al-4.8Sn-2.0Zr-1.0Mo-1.0Nd-0.35Si, TA15 合金的名义成分为 Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr,规格均为 1mm,由宝钛集团生产。Ti60 合金和 TA15 合金的化学成分如表 1、表 2<sup>[11]</sup>所示。试验选用的模具材料为 ZGCr25Ni20。

## 2 有限元模拟

### 2.1 前处理

本文对四层结构舵面芯板的超塑成形过程进行了有限元模拟,为了提高效率本文仅选取单个芯板的一部分进行计算。在有限元软件中建立有限元模型,单元类型为 Thick Shell 140 四边形壳单元,共划分 12240 个单元,单元节点为 12505 个。

超塑成形过程属于大变形问题,几乎没有回弹,基本可忽略弹性变形,故材料模型选为刚塑性模型。刚塑性模型使用的本构方程遵循指数准则(Power Law),为流动应力与应变和应变速率之间的关系,在材料和变形温度不发生变化时满足公式:  $\sigma = K\dot{\epsilon}^n \epsilon^m$ 。在超塑性温度下,一般不考虑材料应变硬化的影响,即  $n=0$ 。因此,材料在超塑性温度的本构方程满足公式:  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 。式中,  $\sigma$

为流变应力;  $\epsilon$  为应变;  $n$  为应变硬化指数;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率;  $K$  为材料常数,与变形温度和材料自身结构有关;  $m$  为应变速率敏感性指数,受应变速率影响<sup>[12-13]</sup>。

查阅 TA15 合金超塑性拉伸相关文献,得出当超塑性温度  $T=920^\circ\text{C}$ ,应变速率  $\dot{\epsilon}=0.0005/\text{s}$  时,材料的伸长率最大,此时  $K=989.5$ ,  $m=0.57$ 。因此,定义材料参数时选用 Power Law 准则,其中  $B=989.5$ ,  $n=0.57$ <sup>[10]</sup>。

定义接触体时,模具定义为刚体,芯板间扩散连接的部分和芯板超塑成形的部分分别定义为变形体 1 和变形体 2。3 个接触体的摩擦类型均选择双线性库仑摩擦模型,摩擦系数均设为 0.2。成形时,芯板发生超塑性变形一方面与模具型面贴合,另一方面超塑变形后芯板与芯板相互贴合。故接触表设置为变形体 2 与刚体接触,变形体 2 与变形体 2 接触。

本文是对局部进行有限元模拟,施加的边界条件和载荷类型主要有 4 种,分别对应图 1 中的 a、b、c、d 4 个区域。其中, a 区域为芯板超塑成形部分施加均布的面载荷 Face Load,模拟超塑成形时的气压加载; b 区域为模具压边部分设置为固定约束,模拟模具锁模力,即  $X=Y=Z=0$ ; c 区域为芯板扩散连接部分,设置为对称约束,即  $Z=0$ ; d 区域粗实线为模拟截面设置为对称约束,即  $Y=0$ 。

### 2.2 分析计算

定义超塑性压力控制,采用的气压范围为 0.001~2.0MPa,目标应变速率参考拉伸试验设置为 0.0005/s,采用最大应变速率恒定法加载压力,设置总的加载时间 5500s,固定步长时间 5s。作业参数设置中,在非线性分析中选择大应变、载荷为随动力。

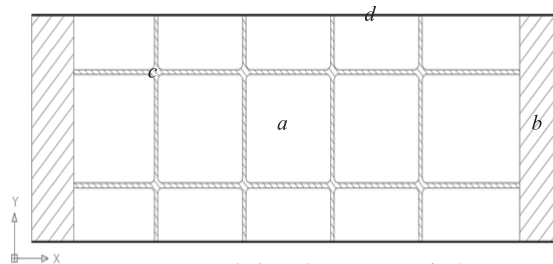


图1 TA15芯板超塑成形过程边界条件

Fig.1 Boundary conditions of TA15 core in superplastic forming process

表1 Ti60合金化学成分(质量分数)

Table 1 Composition of Ti60 alloy

%

| Ti | Al      | Sn      | Zr      | Mo      | Si      | Nb      | Ta      | C         | Fe   | O    | N    | H     | 其他元素  |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|------|------|------|-------|-------|
| 基  | 5.2~6.5 | 3.0~4.5 | 2.5~4.0 | 0.2~1.2 | 0.2~0.6 | 0.2~0.7 | 0.7~1.5 | 0.04~0.08 | 0.25 | 0.15 | 0.03 | 0.012 | ≤ 0.3 |

表2 TA15合金化学成分(质量分数)

Table 2 Composition of TA15 alloy

%

| Ti | Al      | Mo      | V       | Zr      | Fe   | Si   | C    | O    | N    | H     | 其他元素  |
|----|---------|---------|---------|---------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 基  | 5.5~7.1 | 0.5~2.0 | 0.8~2.5 | 1.5~2.5 | 0.25 | 0.15 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.015 | ≤ 0.3 |

### 2.3 模拟结果分析

模拟结果得到 TA15 芯板超塑成形过程的壁厚分布规律如图 2 所示,选取了由 A 到 B 和由 C 到 D 两个方向的厚度分布数据并绘制曲线,如图 3 所示。

结果显示,芯板超塑成形完成后在 A 向 B 的方向厚度总体上逐渐变大,因为由 A 向 B 的方向芯板的变形量逐渐变小;具体到一个栅格厚度则先变小后变大再变小,原因是芯板总在栅格中心贴模,贴模后芯板不再发生变形,而未贴模的部分则继续减薄,芯板在栅格边缘处最后贴模,此处减薄最严重,厚度也最小。在 C 向 D 的方向上不同栅格的同一位置的厚度相近,表明此处的变形量相近。超塑完成后芯板的最小厚度约为 0.6mm,最大减薄率为 40%。模拟结果还得到了芯板超塑成形过程的气压加载曲线( $p-t$  曲线),如图 4 所示。模拟得到的  $p-t$  曲线可指导工艺试验的气压加载情况。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 Ti60/TA15 四层舵面 SPF/DB 试验

试验选用 1.0mm 厚的 TA15 合金板为芯板,用

1.0mm 厚的 Ti60 合金板为蒙皮。根据模型内部栅格结构将芯板喷涂阻焊剂图样,采用手工氩弧焊将四层板进行封焊。Ti60/TA15 四层舵面 SPF/DB 过程可分为两个步骤:一是在芯板与蒙皮之间通入气压实现蒙皮的超塑成形以及芯板之间的扩散连接;二是在两芯板之间通入气压实现芯板的超塑成形,芯板与蒙皮的扩散连接,以及芯板与芯板之间的扩散连接。其中,栅格直立加强筋即是由芯板与芯板扩散连接得到。

本试验 Ti60/TA15 四层舵面 SPF/DB 温度  $T=920^{\circ}\text{C}$ 。SPF/DB 第 1 步的气压加载情况是 60min 加载到 2.5MPa,保压 2h,以完成蒙皮的超塑成形和芯板之间的扩散连接;第 2 步的气压加载曲线如图 4 所示,最终得到了栅格成形完整,表面质量较好的 Ti60/TA15 四层舵面样件,如图 5 所示。

### 3.2 Ti60/TA15 四层舵面壁厚分析

为了分析 Ti60/TA15 四层舵面 SPF/DB 后的壁厚分布,取图 5 截面共 26 个点进行测量,具体位置如图 6 所示。得到的壁厚数据绘制成表 3。结果显示,同一栅格在芯板最先贴模的 1、3、5、7、9、11、13 以及 1'、3'、5'、

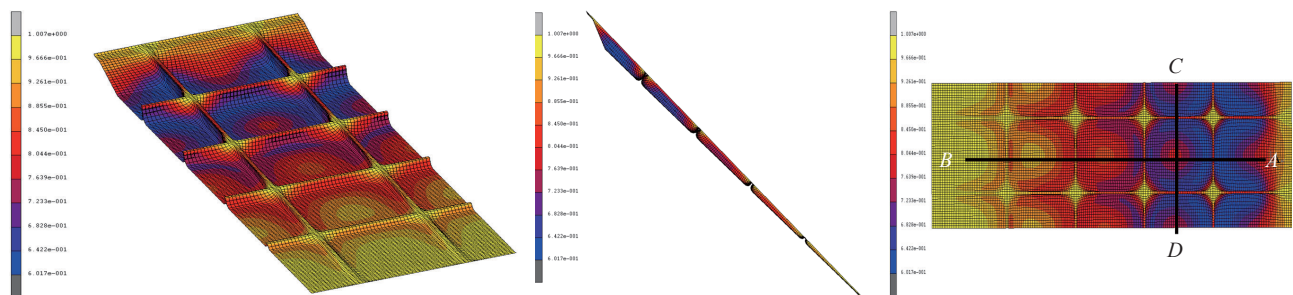


图2 TA15芯板超塑成形过程壁厚分布图

Fig.2 Thickness distribution of TA15 core in superplastic forming process

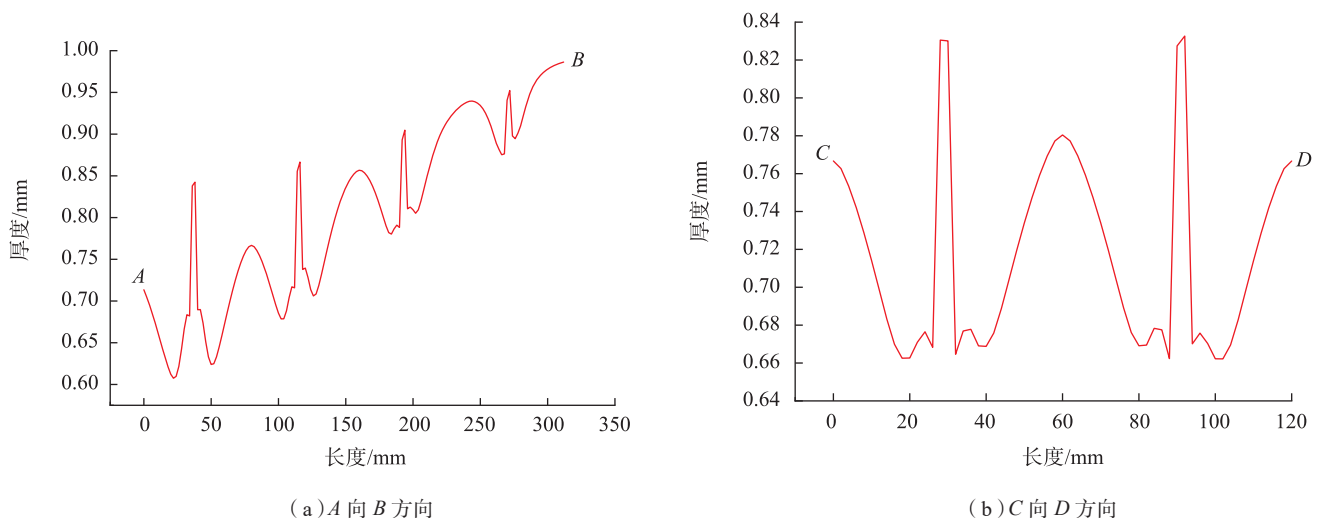


图3 TA15芯板超塑成形过程不同方向壁厚分布规律

Fig.3 Distribution of thickness in different directions in superplastic forming process

7'、9'、11'、13'处的壁厚比最后贴模的2、4、6、8、10、12以及2'、4'、6'、8'、10'、12'壁厚大;不同栅格的相同位置处最先贴模的变形量小,壁厚也越大,舵面的最小壁厚为1.24mm,最大壁厚为1.80mm。

### 3.3 Ti60/TA15四层舵面型面精度分析

本试验对SPF/DB后Ti60/TA15四层舵面的型面精度进行了检测,采用的方法是激光三维扫描法,通过扫描贴有定位标点的零件表面,得到零件型面点云,再通过后处理将点云与零件三维模型进行比对分析,得到图7所示的比对结果。图7显示,SPF/DB得到的Ti60/TA15四层舵面型面90%以上误差均在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内,整体型面误差不超过 $\pm 0.5\text{mm}$ 。表明SPF/DB得到的零件变形小,型面精度较高。

### 3.4 Ti60/TA15四层舵面扩散连接质量分析

为了分析Ti60/TA15四层舵面扩散连接质量,在图5中 $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$ 3处切取金相试样。其中 $a'$ 为SPF/DB第1步TA15芯板之间的扩散连接,温度 $T=920^\circ\text{C}$ ,气压 $P=2.5\text{MPa}$ ,时间 $t=2\text{h}$ ;  $b'$ 为SPF/DB第2步TA15芯

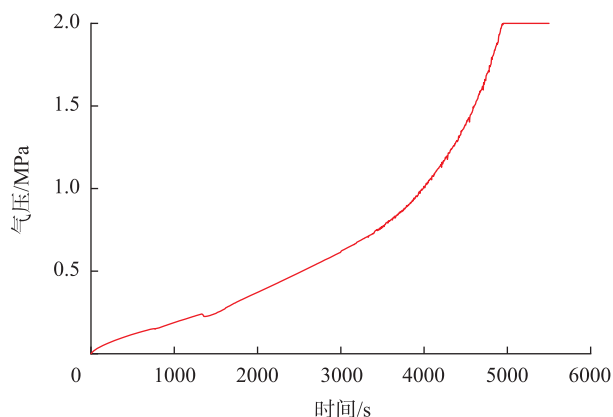


图4 芯板超塑成形 $p-t$ 曲线

Fig.4  $p-t$  curve of core in superplastic forming

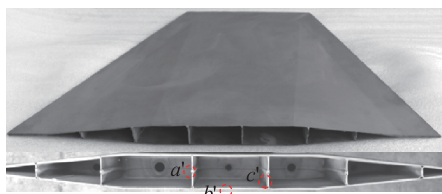


图5 Ti60/TA15四层舵面样件

Fig.5 Ti60/TA15 four-sheet structure rudder sample

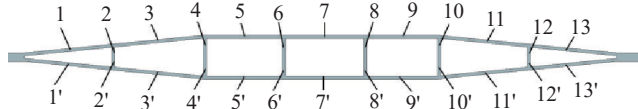


图6 Ti60/TA15四层舵面壁厚测量点

Fig.6 Thickness measuring point of Ti60/TA15 four-sheet structure rudder

板与Ti60蒙皮之间的扩散连接,温度 $T=920^\circ\text{C}$ ,气压 $P=2.0\text{MPa}$ ,时间 $t=2\text{h}$ ;  $c'$ 为SPF/DB第2步TA15芯板之间的扩散连接,温度 $T=920^\circ\text{C}$ ,气压 $P=2.0\text{MPa}$ ,时间 $t=2\text{h}$ 。得到的金相图片如图8所示。

金相结果显示,Ti60合金与TA15合金的金相组织为均匀的等轴晶,两种合金的晶粒尺寸均小于 $10\mu\text{m}$ ,且Ti60的组织更细小。与TA15合金相比,Ti60合金组织中基体 $\alpha$ 相所占的百分比更大。TA15同种材料之间以及Ti60与TA15异种材料之间的扩散连接界面基本消失,3种扩散连接处已经看不出空洞。本文制得的Ti60/TA15具有梯度耐热能力的四层结构舵面具有TA15合金高延伸率的优势,保证了四层轻量化结构的成形,同时又具有Ti60合金的耐高温特性,可为航空航天飞行器速度和性能的提升提供保障。

## 4 结论

(1)进行了芯板超塑成形有限元模拟,获得壁厚分布规律曲线和气压加载 $p-t$ 曲线。

(2)在 $T=920^\circ\text{C}$ 时,制得Ti60/TA15四层舵面样件。对样件壁厚进行分析,得出舵面的最小壁厚为1.24mm,

表3 Ti60/TA15四层舵面SPF/DB后的壁厚分布  
Table 3 Wall thickness distribution of Ti60/TA15 four-sheet structure rudder after SPF/DB

| 测量点 | 壁厚/mm | 测量点 | 壁厚/mm |
|-----|-------|-----|-------|
| 1   | 1.78  | 1'  | 1.76  |
| 2   | 1.58  | 2'  | 1.60  |
| 3   | 1.70  | 3'  | 1.66  |
| 4   | 1.30  | 4'  | 1.32  |
| 5   | 1.66  | 5'  | 1.68  |
| 6   | 1.28  | 6'  | 1.20  |
| 7   | 1.68  | 7'  | 1.68  |
| 8   | 1.24  | 8'  | 1.28  |
| 9   | 1.74  | 9'  | 1.70  |
| 10  | 1.32  | 10' | 1.34  |
| 11  | 1.74  | 11' | 1.76  |
| 12  | 1.78  | 12' | 1.80  |
| 13  | 1.76  | 13' | 1.78  |

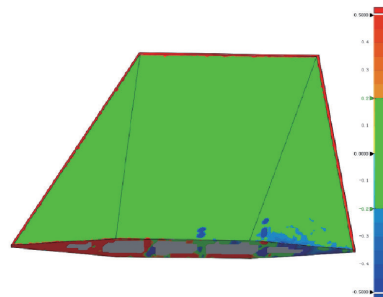
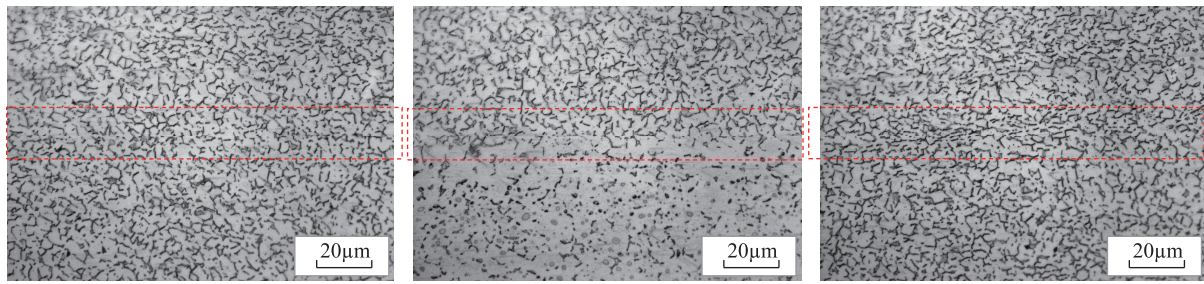


图7 Ti60/TA15四层舵面三维扫描结果

Fig.7 Three dimensional scanning results of Ti60/TA15 four-sheet structure rudder



(a) 上芯层与下芯层之间对称接头处扩散连接界面 (b) 下芯层与下蒙皮之间扩散连接界面 (c) 下芯层与下芯层之间扩散连接界面

图8 Ti60/TA15四层舵面扩散连接界面金相图

Fig.8 Metallographic of Ti60/TA15 four-sheet structure rudder diffusion bonding interface

最大壁厚为 1.80mm。开展了 Ti60/TA15 四层舵面型面精度分析,得出舵面 90% 以上型面的公差在  $\pm 0.2\text{mm}$  以内,整体型面的公差不超过  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

(3) 通过对扩散连接界面进行金相分析,得出在  $T=920^\circ\text{C}$  时,TA15 同种材料之间以及 Ti60 与 TA15 异种材料之间的扩散连接界面基本消失,3 种扩散连接处已经看不出空洞。本文制得的 Ti60/TA15 具有梯度耐热能力的四层结构舵面具有 TA15 合金高延伸率的优势,保证了四层轻量化结构的成形,同时又具有 Ti60 合金的耐高温特性,可为航空航天飞行器速度和性能的不不断提升提供保障。

### 参考文献

[1] 李世琼, 张建伟, 程云君, 等. Ti3Al 和 Ti2AlNb 基金属间化合物结构材料研发现状 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 104-109.

LI Shiqiong, ZHANG Jianwei, CHENG Yunjun, et al. Research and development status of Ti3Al and Ti2AlNb based intermetallic compound structural materials[J]. Journal of Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(S3): 104-109.

[2] WANG T, LI Z, FU S H, et al. Hot deformation behavior and microstructure of U720Li alloy[J]. Advanced Materials Research, 2013, 709: 143-147.

[3] WANJARA P, JAHAZI M, MONAJATI H. Hot working behavior of near- $\alpha$  alloy IMI834[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 396: 50-60.

[4] 魏寿庸, 石卫民, 王鼎春, 等. 600℃时高温钛合金 (Ti60) 的组织与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 801-806.

WEI Shouyong, SHI Weimin, WANG Dingchun, et al. Microstructure and mechanical properties of high temperature titanium alloy(Ti60) at 600℃ [J]. Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2010, 20(1): 801-806.

[5] 贾蔚菊, 曾卫东, 俞汉清, 等. 热暴露对 Ti60 合金性能及断裂行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(6): 1032-1037.

JIA Weiju, ZENG Weidong, YU Hanqing, et al. Effect of thermal exposure on properties and fracture behavior of Ti60 alloy[J]. Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2009, 19(6): 1032-1037.

[6] 屈雅倩, 郭鸿镇, 姚泽坤, 等. Ti60 高温钛合金的超塑性拉

伸行为及组织演变 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(14): 49-52.

QU Yaqian, GUO Hongzhen, YAO Zekun, et al. Superplastic tensile behavior and microstructure evolution of Ti60 high temperature titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(14): 49-52.

[7] 黄旭. 先进航空钛合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

HUANG Xu. Advanced aviation titanium alloy materials and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

[8] 刘莹莹, 陈子勇, 金头男, 等. 600℃高温钛合金发展现状与展望 [J]. 材料导报, 2018, 32(6): 1863-1869.

LIU Yingying, CHEN Ziyong, JIN Tounan, et al. Development status and prospect of 600℃ high temperature titanium alloy[J]. Materials Reports, 2018, 32(6): 1863-1869.

[9] 闫亮亮, 童国权, 刘剑超, 等. TA15 四层板结构超塑成形 / 扩散连接技术研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(19): 88-90.

YAN Liangliang, TONG Guoquan, LIU Jianchao, et al. Research on superplastic forming/diffusion bonding for Four-Sheet structure of TA15 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(19): 88-90.

[10] ELIAS KL, DAEHN G S, BRANTLEY W A, et al. An initial study of diffusion bonds between superplastic Ti-6Al-4V for implant dentistry applications[J]. Journal of Prosthetic Dentistry, 2007, 97(6): 357-365.

[11] 李保永. TA15 钛合金多层结构 LBW/SPF/DB 工艺 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

LI Baoyong. LBW/SPF/DB processing of multi-sheet structure for TA15 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[12] BOTTOMLEY I E. Superplastic forming and diffusion bonding of aircraft structure[J]. Proceedings of Mechanical Engineers, Part G:Journal of Aerospace Engineering, 1995, 209(3): 227-231.

[13] 杜志豪. TA15 钛合金多层结构 SPF/DB 工艺与评价 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

DU Zhihao. SPF/DB processing and assesment for multi-sheet structure of TA15 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

通讯作者: 李保永, 高级工程师, 研究方向为轻质材料轻量化整体结构高温精密成形及连接复合技术, E-mail: libaoyonght239@163.com。

(责编 铃兰)