

引文格式: 彭鹏, 刘太盈, 蒋少松, 等. TA15 钛合金局部减重中空双层结构超塑成形/扩散连接工艺[J]. 航空制造技术, 2023, 66(9): 68-74.  
PENG Peng, LIU Taiying, JIANG Shaosong, et al. Superplastic forming/diffusion bonding technology for hollow double layer structure of TA15 titanium alloy with local weight reduction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(9): 68-74.

# TA15钛合金局部减重中空双层结构超塑成形/ 扩散连接工艺

彭 鹏<sup>1</sup>, 刘太盈<sup>2</sup>, 蒋少松<sup>1,3</sup>, 侯晨睿<sup>4</sup>, 张晋源<sup>1</sup>, 李 阳<sup>1</sup>, 杨 尚<sup>1</sup>, 韩 聪<sup>1</sup>, 卢 振<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074;

3. 哈尔滨宇航精创科技有限公司, 哈尔滨 150010;

4. 中国航发北京航空材料研究院先进钛合金重点实验室, 北京 100095)

[摘要] 在应变速率为  $0.001\text{ s}^{-1}$ 、 $0.005\text{ s}^{-1}$ 、 $0.01\text{ s}^{-1}$ , 温度为  $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下对 TA15 钛合金进行了高温拉伸试验, 材料在  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上、 $0.005\text{ s}^{-1}$  以下的延伸率可超过 500%, 具有优异的超塑性能。计算了 TA15 钛合金的本构方程及在应变速率为  $0.005\text{ s}^{-1}$  时, 不同温度下的应变敏感性指数  $m$  值和材料常数  $K$  值。通过超塑成形/扩散连接 (SPF/DB) 工艺, 采用有限元模拟对双层结构件的壁厚分布进行分析, 并获得了气压加载压力-时间曲线。在温度为  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 采用预镂空面板制得了局部减重的中空双层结构件, 最小壁厚为  $0.31\text{ mm}$ , 采用超声波 C 扫描对零件的扩散面积进行分析, 结果表明, 焊合率高于 95%。

关键词: 超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB); TA15 钛合金; 双层中空结构; 局部减重; 超塑性

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.09.068



彭 鹏

博士研究生, 研究方向为钛合金薄壁中空轻量化结构超塑成形/扩散连接、高性能镁合金及金属基复合材料制备加工。

钛合金因其较低的密度、优良的力学性能和良好的耐热性能, 在航空航天、交通运输、化学和生物医学等领域被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。TA15 钛合金作为一种近年来在航空航天领域广泛应用的耐高温钛合金, 不仅具有较强的热强性与可焊性, 而且具有良好的超塑性能, 因此可以实现超塑成形/扩散连接 (Superplastic forming/diffusion bonding, SPF/DB) 工艺, 在有一定强度要求的结构制造中有着独特的优势<sup>[4-6]</sup>。超塑成形具有流动应力小、塑性流动均匀性高等特点, 是制造复杂几何零件的一种先进方法, 与传统制造方法相比, 具有显著的减重及节约成本的优点<sup>[7-10]</sup>。然而大型构件在采用现有的 SPF/DB 工艺制备时, 其获得的中空结构是以

等厚度连续板材为原料, 成形后连接区域的厚度与两层原始板料叠加后的厚度相等, 显著降低了减重效果, 鉴于此, 本文提出了采用预镂空减重板作为复杂中空结构的面板进行 SPF/DB 工艺, 实现构件在材料厚度和空间结构上的双重减重。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

本试验所采用的 TA15 钛合金由宝钛集团提供, 厚度分别为  $0.5\text{ mm}$  和  $0.8\text{ mm}$ , 化学成分如表 1 所示。

### 1.2 TA15 钛合金高温变形行为及应变敏感性指数 $m$ 值、材料常数 $K$ 值求解

为研究 TA15 钛合金的高温变形行为, 本节对 TA15 钛合金进行了不同

表1 TA15 钛合金化学成分(质量分数)  
Table 1 Composition of TA15 titanium alloy (mass fraction) %

Ti	Al	V	Mo	Zr	C	Fe	Si	O	N	H
余量	6.83	2.26	1.81	2.22	0.006	0.07	0.024	0.11	0.006	0.0025

温度及应变速率的高温拉伸试验。试验选用的应变速率为 $0.001\text{ s}^{-1}$ 、 $0.005\text{ s}^{-1}$ 及 $0.01\text{ s}^{-1}$ ,温度为 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

TA15 钛合金的真实应力-应变曲线如图1所示。可以看出,在TA15 钛合金刚开始变形时,工程应

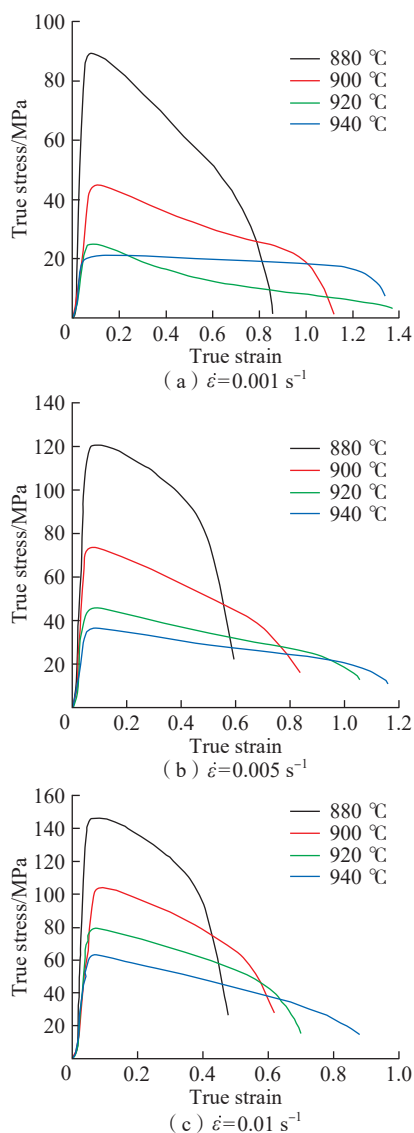


图1 TA15 钛合金不同温度下  
真应力-应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of TA15 titanium alloy at different temperatures

力随变形程度增加急剧升高并很快达到峰值。图1(a)和(b)中,当温度超过 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,工程应力在达到峰值之后略微下降,然后随应变增加不再明显变化,保持稳态行为。这是典型的合金在高温拉伸时体现出的超塑性特征。随着温度上升,TA15 钛合金峰值应力呈下降趋势,并且随着应变速率的增大,峰值应力呈上升趋势。

针对特定具有超塑性的材料,应变敏感性指数 $m$ 也是反映其特性的参数,即

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 为流动应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。

应变敏感性指数 $m$ 还可通过 Backofen 公式给出,即

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

式中, $K$ 为材料常数。

$$\ln \sigma = \ln K + m \ln \dot{\epsilon} \quad (3)$$

本文选取真应变 $\epsilon=0.2$ 计算超塑变形时 TA15 钛合金的 $m$ 、 $K$ 值。

根据式(3),并结合图2可算出 TA15 钛合金在不同温度下的 $m$ 和 $K$

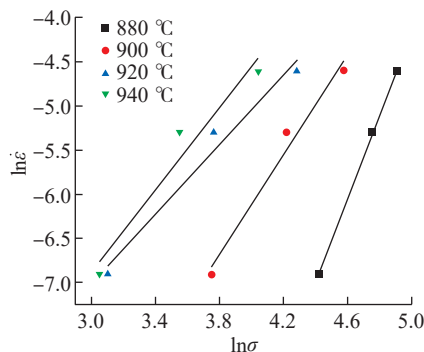


图2 TA15 钛合金高温拉伸过程中应变速率  
与流变应力的关系曲线( $\epsilon=0.2$ )

Fig.2 Relationship curve of strain rate and rheological stress during high temperature tensile of TA15 titanium alloy ( $\epsilon=0.2$ )

值,如表2所示。考虑到后续超塑成形过程中,低应变速率的试样在长时间的高温条件下对TA15 钛合金的组织造成不可逆的影响,后续成形的速率采用 $0.005\text{ s}^{-1}$ ,根据该速率下的 $m$ 值,选用 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为后续的SPF/DB温度。

## 2 双层 TA15 钛合金中空结构 SPF/DB 数值模拟

### 2.1 有限元模型建立

采用 MSC.Marc2018 对双层 TA15 钛合金中空结构的超塑成形过程进行了有限元数值模拟。具体建模过程如下。

为减少有限元模拟的计算量,本次模拟导入的模具模型为其型面的片体,上下面板采用 Hypermesh 进行网格划分,网格大小为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,单元类型选择 139 号四边形薄壳单元,共划分 40000 个单元及 40602 个节点。

面板的几何属性定义为三维壳结构(3D-shell),上下面板厚度分别为 $0.5\text{ mm}$ 和 $0.8\text{ mm}$ ,由于超塑变形过程为大变形,在变形过程中不发生黏弹性变化,回弹问题可忽略不计,故材料模型选为刚塑性模型。材料的变形方式遵循幂率准则(Power law),根据上文求得的 TA15 钛合金在 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的材料常数 $K=654.46\text{ MPa}$ ,应变速率敏感指数 $m=0.494$ 。

在进行接触体设置时,上下模具均定义为刚体,上下面板定义为变形体,板料之间的摩擦类型选择库仑双

表2 TA15 钛合金在不同温度下的 $m$ 和 $K$ 值  
( $\dot{\epsilon}=0.005\text{ s}^{-1}$ )

Table 2  $m$  and  $K$  values of TA15 titanium alloy at different temperatures ( $\dot{\epsilon}=0.005\text{ s}^{-1}$ )

$T/^{\circ}\text{C}$	$m$	$K/\text{MPa}$
880	0.210	356.43
900	0.347	456.17
920	0.494	654.46
940	0.408	341.97

线性模型,面板与模具的摩擦系数设置为0.3,超塑成形时上下面板分别与上下模具贴合,故接触表设置为上面板与上模具接触,下面板与下模具接触。

超塑变形模拟前需要对板料的边界条件进行设置,本次成形需要对双层板料之间的扩散连接区域进行位移约束,定义双层板的非变形区及扩散连接区域 X轴和 Y轴节点位移为0,面板成形过程采用超塑成形控制,载荷类型为单元面分布力(Face load),作用面分别为上下面板,载荷方向分别为 Z轴负向和 Z轴正向。部分边界条件设置如图3所示。

### 2.2 模拟结果分析

图4为TA15钛合金双层板成形后的上面板厚度分布模拟结果。对于此双层零件中3个典型特征筋格,即A-B的双“十”字筋格、C-D的单“十”字筋格以及E-F的“井”字筋格进行厚度分析,不同筋格在对应方向上的单元厚度分布如图5所示。

对3个方向上的厚度分布曲线进行分析,不难发现,在超塑成形后,无论是哪种形状的筋格,单元厚度都在十字交叉且筋格宽度中心处最大,圆角处筋格的单元厚度最小。这是因为在超塑成形初期,板料的变形方式为自由胀形,随着时间的延长,筋格的十字交叉区域首先贴膜,由于板料与模具的摩擦作用,贴膜后的板料很难继续发生变形,而未贴模的板料则继续减薄,圆角处的板料最后贴膜,因此此处减薄最为严重,单元厚度最小;超塑成形后的零件左下角的“十”字筋圆角处减薄最严重,因为零件在此处曲率较大,筋格的变形量最大,最小厚度约为0.266 mm,最大减薄率为46.8%。厚度云图显示筋格除圆角处的板料厚度大多在0.4 mm左右,筋格处整体减薄率约为20%。

图6为此次模拟得到的超塑成形气压加载曲线(p-t曲线),为后续的零件成形的工艺试验提供了理论指导。

### 3 局部减重 TA15 钛合金双层中空结构 SPF/DB 试验

双层中空结构材料为TA15钛合金,由7个形状不同的“井”字及“十”字筋格组成,上下蒙皮厚度分别为0.5 mm和0.8 mm,零件外形尺寸为1390 mm×732 mm,有一定的曲率。

局部减重TA15钛合金双层中空结构SPF/DB成形流程如图7所示。

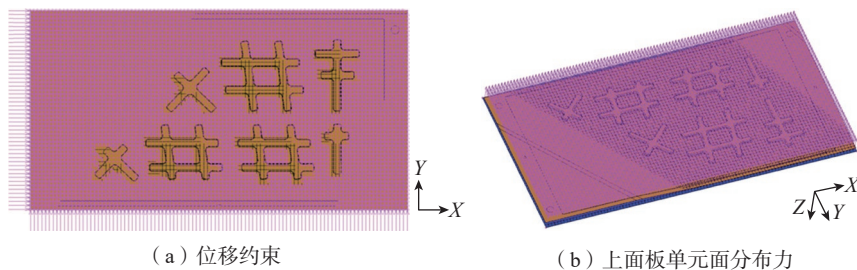


图3 TA15钛合金边界条件设置  
Fig.3 Boundary conditions of TA15 titanium alloy

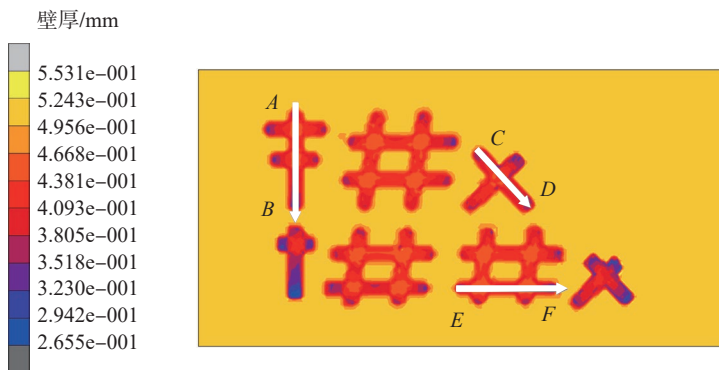


图4 TA15钛合金上面板超塑成形后壁厚分布  
Fig.4 Thickness distribution of TA15 titanium alloy upper panel after SPF

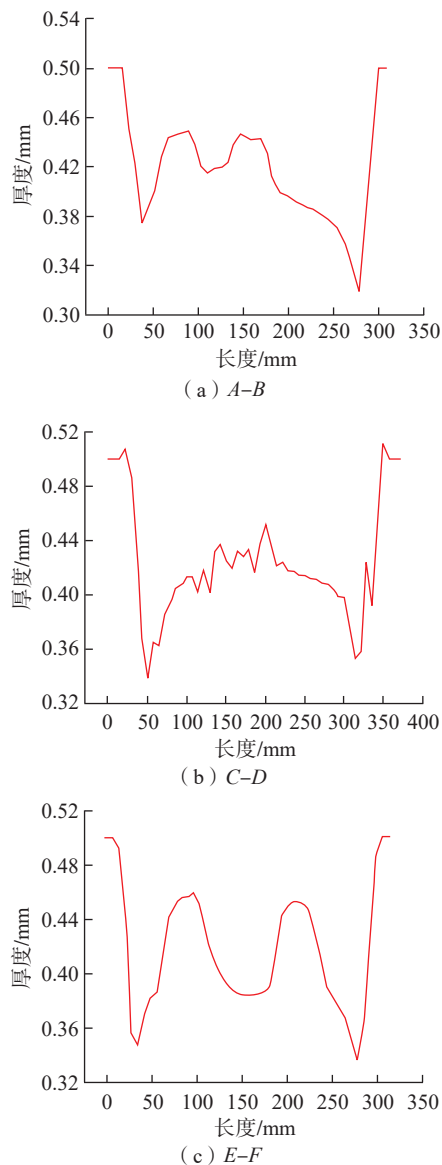


图5 TA15钛合金面板超塑成形不同方向壁厚分布模拟结果  
Fig.5 Simulation results of wall thickness distribution in different directions of TA15 titanium alloy panel SPF

示。本试验实现局部减重的关键为对预成形上面板的加工,图8为预成形上面板区域示意图,采用激光切割对上面板进行切割,在减重区的四周预留1 mm左右的连接宽度,方便后续成形后的翘取,对加工后的TA15钛合金面板进行化学处理去除表面氧化皮,酸洗液的体积配比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:3:7$ 。

酸洗时间为5~10 min,采用丙酮

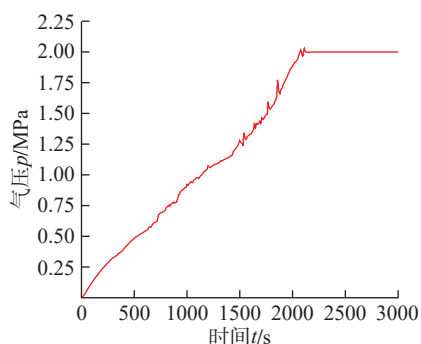


图6 超塑成形  $p-t$  曲线  
Fig.6  $p-t$  curve of SPF process

对酸洗后的板材进行清洗,去除板材表面残余的酸液及油污。随后对板材的非扩散区进行阻焊剂的涂覆,如图9所示,涂覆时保证筋格之间气道畅通。此外为实现整个 SPF/DB 过程中的真空环境,采用尺寸稍大于双层板料的上下覆板进行封边焊接,其中上下覆板内部喷有氮化硼隔离剂,防止在 SPF/DB 后,成形件与覆板粘连,封焊后的覆板与双层板料的气管要保证:其中一条抽气管与覆板相通,一条进气管与双层板料相通,检查气密性。

封焊好的板料入炉后,升温之前即开始抽真空,持续到 SPF/DB 试验结束。当温度升到 920 °C 时,向模具型腔与覆板之间通入 2 MPa 气压,保压 2~3 h,进行面板之间的扩散连接,随后根据模拟结果得到的加载曲线(图6)向面板之间通入气压,进行面板的超塑成形。最后,对降温取出

后的双层结构件的预镂空部分进行翘取(由于每块减重区域的连接部分均为4个1 mm宽的TA15钛合金面板,且减重区域喷涂隔离剂不会发生扩散连接,故 SPF/DB 后使用扁头螺丝刀即可轻松将减重区从零件上翘取下来),得到筋格完整、成形质量良好的局部减重双层中空结构件。如图10所示,根据体积不变原理,本试验所得到的局部减重 TA15 钛合金双层中空结构比传统结构减重幅度约达 20%。

对 SPF/DB 得到的局部减重 TA15 钛合金双层中空结构件进行超声波 C 扫描检测,利用 15Z6SJ30DJ 点聚焦探头对结合区域和未结合区域进行精细扫查,扫查间隔 0.2 mm,步进间隔 0.5 mm。调整水距使焦点落于界面结合处,得到扩散区域的焊合率大于 95%,具体成像如图 11 所示。由于零件部分区域翘曲严重、表面相对较粗糙,对检测信号造成偏移,图像显示不均匀,图像中气道和减重区域成像清晰,不计入复合区域面积。

为了分析 TA15 钛合金双层中空结构的厚度分布,取双“十”字筋格、单“十”字筋格以及“井”字筋格截面(图12)中不同位置进行厚度

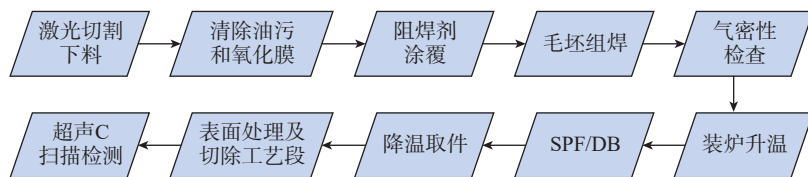


图7 TA15 钛合金 SPF/DB 成形流程图  
Fig.7 SPF/DB flow charts of TA15 titanium alloy

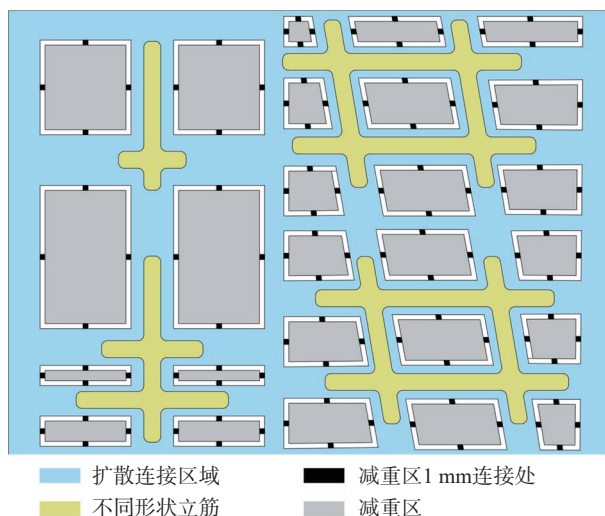


图8 上面板区域示意图  
Fig.8 Schematic diagram of upper panel area

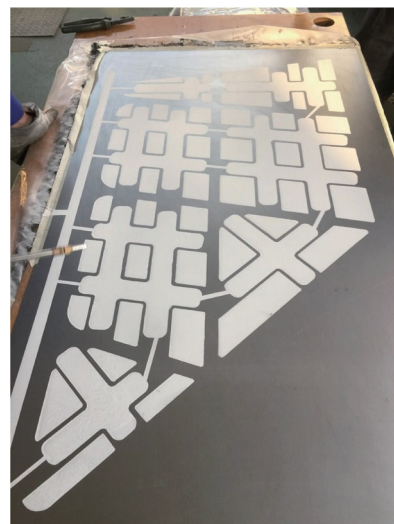


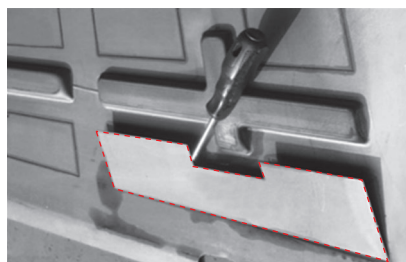
图9 隔离剂涂覆实物图  
Fig.9 Spacer coating physical picture

测量,将实际壁厚与模拟结果进行对比,结果如图 13 所示,模拟结果与实际结果相对比较吻合,对应位置的厚度变化差别较小,说明模拟结果可靠。TA15 钛合金双层中空样件的最小壁厚位于“十”字筋圆角处,为 0.31 mm,最大减薄率约为 38%。

#### 4 结论

本试验方法所得到的局部减重非贯通筋双层中空结构比传统 SPF/DB 结构减重幅度约达 20%。对提高空天飞行器的飞行速度、运载能力、运输效率、节约燃油成本具有积极的意义。

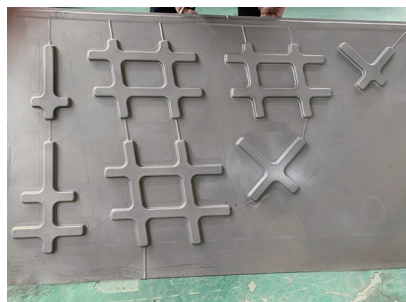
(1) 在应变速率为  $0.001\text{ s}^{-1}$ 、 $0.005$



(a) 减重区



(b) 空心筋格



(c) 成形件

图 10 SPF/DB 工艺成形零件

Fig.10 SPF/DB technology forming parts

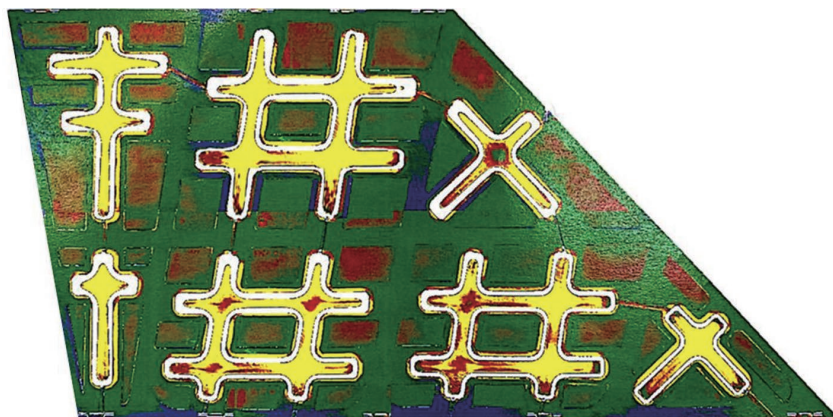
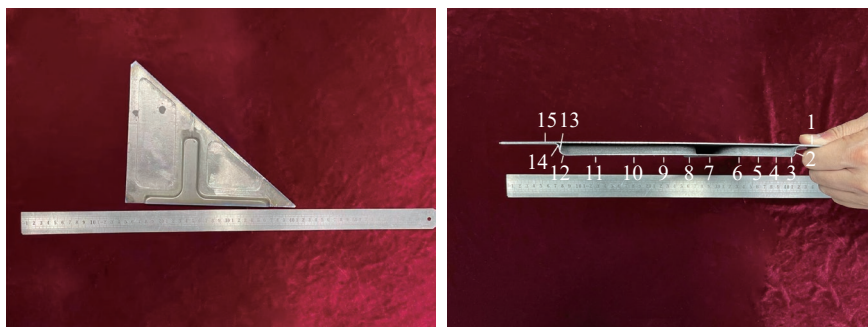


图 11 双层中空结构件的超声波 C 扫描结果

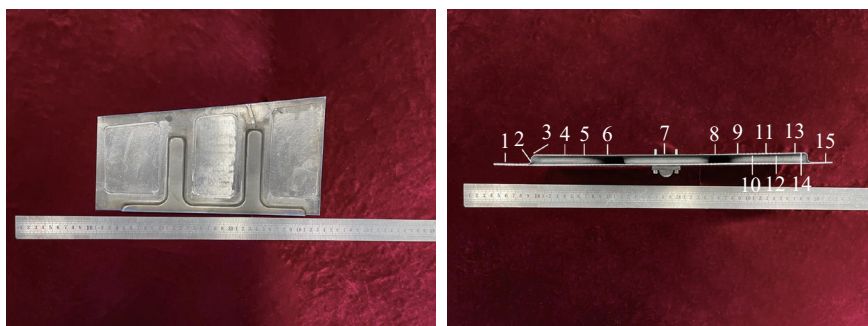
Fig.11 Ultrasonic C-scanning results of double hollow structural component



(a) 双“十”字筋格 (A-B)



(b) 单“十”字筋格 (C-D)



(c) “井”字筋格 (E-F)

图 12 双层结构件及壁厚测量点

Fig.12 Double layer structure and wall thickness measuring point

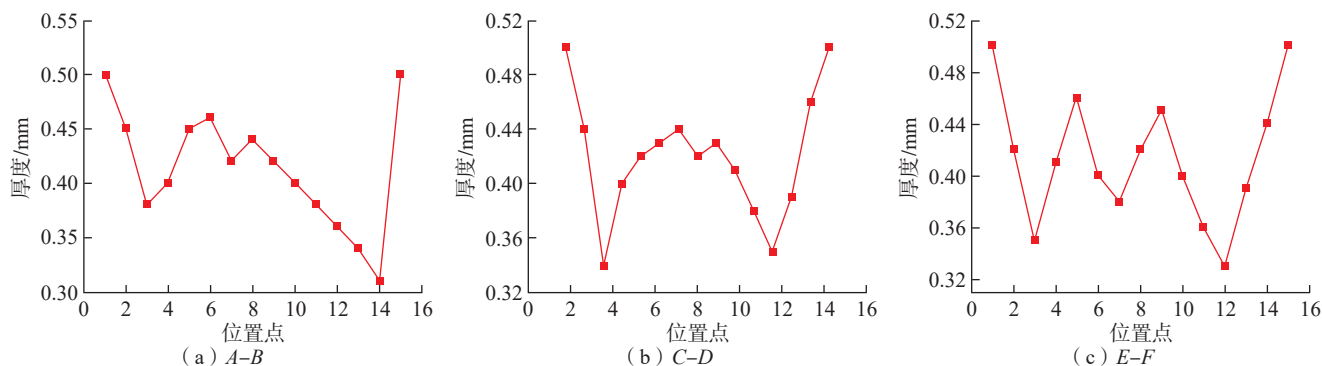


图 13 TA15 钛合金面板超塑成形后不同方向壁厚分布

Fig.13 Wall thickness distribution in different directions after SPF of TA15 titanium alloy panel

$s^{-1}$  及  $0.01 s^{-1}$ , 温度为  $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $940\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下对 TA15 钛合金进行了高温拉伸试验, 材料在  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上、 $0.005 s^{-1}$  以下延伸率可超过 500%, 具有优异的超塑性能。

(2) 对 TA15 钛合金不同温度下的应变敏感性指数  $m$  值、材料常数  $K$  值进行了计算。 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.005 s^{-1}$  条件下 TA15 钛合金的  $m$  值为 0.494,  $K$  值为  $654.46\text{ MPa}$ 。

(3) 对双层结构件的 SPF 进行有限元模拟, 获得了不同路径下的壁厚分布及气压加载  $p-t$  曲线。在超塑成形后, 无论是哪种形状的筋格, 单元厚度都在十字交叉且筋格宽度中心处最大, 圆角处筋格的单元厚度最小。“十”字筋圆角处减薄最严重, 最大减薄率为 46.8%, 筋格处整体减薄率约为 20%。

(4) 在  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  下, 采用预镂空板材制备了局部减重 TA15 钛合金双层中空结构, 最小壁厚位于“十”字筋圆角处, 为  $0.31\text{ mm}$ , 减薄率约为 38%。板材的减薄规律与模拟结果基本吻合。

## 参考文献

[1] SUN Q J, WANG G C. Microstructure and superplasticity of TA15 alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 606: 401-408.  
[2] 许平, 王昇, 苏智星. TA15 钛合金超塑成形/扩散连接的可行性研究[J]. 钛工业进展, 2014, 31(4): 16-19.

XU Ping, WANG Ao, SU Zhixing. Feasibility study on superplastic forming/diffusion bonding of TA15 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(4): 16-19.

[3] 李保永, 刘伟, 秦中环, 等. Ti60/TA15 合金四层结构舵面超塑成形/扩散连接技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 76-80.

LI Baoyong, LIU Wei, QIN Zhonghuan, et al. Research on superplastic forming/diffusion bonding for four-sheet structure rudder of Ti60/TA15 alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 76-80.

[4] 王斌, 朱冬妹, 刘章光, 等. TA15 钛合金四层板结构 SPF/DB 数值模拟及工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(6): 98-104.

WANG Bin, ZHU Dongmei, LIU Zhangguang, et al. Numerical simulation and process study of SPF/DB for four-sheet structure of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(6): 98-104.

[5] 王珏, 张晓巍, 王国峰.  $Ti_2AlNb$  合金超塑成形/扩散连接工艺[J]. 锻压技术, 2019, 44(11): 91-98.

WANG Jue, ZHANG Xiaowei, WANG Guofeng. Superplastic forming/diffusion bonding technology for  $Ti_2AlNb$  alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(11): 91-98.

[6] 纪博宇, 李细锋, 李剑飞. 置氢 Ti-55 钛合金变形本构方程及高温增塑机理研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1): 180-186.

JI Boyu, LI Xifeng, LI Jianfei. Constitutive equation and high temperature plasticizing mechanism of hydrogenated Ti-55 titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 180-186.

[7] 武永, 周贤军, 吴迪鹏, 等. TA15/ $Ti_2AlNb$  四层空心舵翼超塑成形/扩散连接工艺

研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(4): 102-108.

WU Yong, ZHOU Xianjun, WU Dipeng, et al. Superplastic forming/diffusion bonding technology for the four-layer hollow rudder of TA15/ $Ti_2AlNb$  alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(4): 102-108.

[8] 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, 97.

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, 97.

[9] 李保永, 蒋少松.  $Ti_2AlNb$  合金超塑性能及四层筋格结构超塑成形/扩散连接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 103-111.

LI Baoyong, JIANG Shaosong. Superplastic forming/diffusion bonding of  $Ti_2AlNb$  alloy hollow four-layer structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 103-111.

[10] 王石川, 童国权, 袁继军, 等. 含预置块的 TA15 钛合金四层板 SPF/DB 试验研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(1): 14-19.

WANG Shichuan, TONG Guoquan, YUAN Jijun, et al. Superplastic forming/diffusion bonding of TA15 four-sheet sandwich with enhancement plates[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(1): 14-19.

通讯作者: 蒋少松, 教授, 博士, 研究方向为高温钛合金、高强铝合金、耐热高强镁合金复杂薄壁中空轻量化结构成形理论与技术。

## Superplastic Forming/Diffusion Bonding Technology for Hollow Double Layer Structure of TA15 Titanium Alloy With Local Weight Reduction

PENG Peng<sup>1</sup>, LIU Taiying<sup>2</sup>, JIANG Shaosong<sup>1,3</sup>, HOU Chenrui<sup>4</sup>, ZHANG Jinyuan<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>,  
YANG Shang<sup>1</sup>, HAN Cong<sup>1</sup>, LU Zhen<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Xinghang Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China;
3. Harbin Hangyu Jingchuang Technology Co., Ltd., Harbin 150010, China;
4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**[ABSTRACT]** High-temperature tensile tests were performed on TA15 titanium alloy at strain rates of  $0.001\text{ s}^{-1}$ ,  $0.005\text{ s}^{-1}$ ,  $0.01\text{ s}^{-1}$  and temperatures of  $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The material exhibits excellent superplasticity with elongation exceeding 500% above  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  and below  $0.005\text{ s}^{-1}$ . The constitutive equations of TA15 titanium alloy and the strain sensitivity index  $m$  and material constant  $K$  values at different temperatures with strain rate of  $0.005\text{ s}^{-1}$  were calculated. Finite element simulations were used to analyze the thickness distribution of the double-layered structural component, and pressure-time curves were obtained. At the temperature of  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the hollow double layer structural parts with local weight reduction are made by using pre-hollow panels SPF/DB, the minimum wall thickness is 0.31 mm, the diffusion area of the component was analyzed by ultrasonic C-scan, and the results showed that the bonding ratio is higher than 95%.

**Keywords:** Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB); TA15 titanium alloy; Double hollow structural; Local weight reduction; Superplasticity

(责编 七七)

(上接第 67 页)

## Study on Integrated Forming Process of Internal Pressure Bulging and In-Situ Reaction for NiAl Alloy Conical Cylinder

HUANG Zhongsen, QIN Jintao, XUE Shuaibing, LIN Peng  
(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**[ABSTRACT]** In view of the technical difficulties in the preparation of NiAl alloy sheets and the secondary forming of the complex thin-walled components, a new integrated process of forming and in-situ reaction is proposed to manufacture NiAl alloy thin shell parts. First, the Ni foils and Al foils are alternately stacked in the mold and plastic forming is performed under the action of solid granules medium, then the formed Ni/Al laminated thin shell parts continue to stay in the mold and are heated under the pressure of the solid granules medium, leading to the in-situ reaction of Ni/Al layers into the NiAl alloy. Finally, the NiAl thin shells are manufactured. The microstructure of the component was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), and the high temperature mechanical properties were tested. The results show that the NiAl alloy conical shell is composed of single NiAl phase, and the coarse crystal layer and fine crystal layer are alternately distributed in the thickness direction, which is a typical bimodal structure without holes and other defects. The component hardness is 317HV and the distribution is uniform, the tensile strength is 71 MPa at  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the elongation can reach 74%.

**Keywords:** NiAl alloy; In-situ reaction synthesis; Thin-walled components; Solid granules medium forming; Bimodal structure  
(责编 七七)