

TA15 四层板结构超塑成形 / 扩散连接技术研究

闫亮亮¹, 童国权¹, 刘剑超¹, 刘海建¹, 刘太盈², 熊亮同²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 北京星航机械装备有限公司, 北京 100074)

[摘要] 进行了 TA15 合金超塑拉伸试验, 在温度 920℃ 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 时, TA15 合金的最大延伸率约为 1100%, 其应变速率敏感性指数约为 0.57。在较佳超塑变形条件 930℃ 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 附近, TA15 合金的超塑本构方程为 $\sigma = 949 \varepsilon^{0.55}$ 。对 TA15 四层板结构超塑成形过程进行了有限元分析, 获得了压力 p - 时间 t 曲线。在 $T=930^\circ\text{C}$ 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 下, 成功进行了 TA15 四层板结构 SPF/DB 成形试验, 试验件的整体质量良好, 无沟槽等缺陷, 金相组织观测表明, TA15 四层 SPF/DB 试验件扩散连接质量优良。

关键词: TA15; 四层板结构; 超塑成形 / 扩散连接; 有限元分析

Research on Superplastic Forming/Diffusion Bonding for Four-Sheet Structure of TA15 Titanium Alloy

YAN Liangliang¹, TONG Guoquan¹, LIU Jianchao¹, LIU Haijian¹, LIU Taiying², XIONG Liangtong²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China;

2. Beijing Xing Hang Machinery & Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

[ABSTRACT] The optimal superplastic deformation condition of TA15 titanium alloy is determined by tensile test. The maximum elongation of 1100% could be obtained at 920℃ at strain rate of $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, and its strain-rate sensitivity index is 0.57. The constitutive equation of TA15 titanium alloy is $\sigma = 949 \varepsilon^{0.55}$ at 920℃ at strain rate of $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$. The processes of superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) of four-sheet structure of TA15 are simulated to obtain the pressure-time curve by the finite element Marc software. The forming test of TA15 titanium alloy four-sheet structure is conducted successfully at 930℃ at strain rate of $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$. No grooves or other defects are found on the surface of the test pieces. According to metallographic observational, the diffusion bonding is in good quality and attained the metallurgical connection.

Keywords: TA15 titanium alloy; Four-sheet structure; Superplastic forming/diffusion bonding; Finite element analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.19.088

超塑成形 / 扩散连接 (Superplastic Forming/Diffusion Bonding, SPF/DB) 技术是一种推动现代航空航天结构设计概念发展和突破传统钣金成形方法的先进制造技术, 采用 SPF/DB 技术制造的钛合金结构件已广泛应用于航空航天领域, 并取得良好的技术效益和经济效益^[1-2]。但在 SPF/DB 的研究和应用方面, 主要侧重于 $\alpha + \beta$ 两相钛合金 TC4^[1-3], 而对于可以在 500℃ 下长期工作、能够满足 3Ma 以上高速飞行器需求的近 α 型钛合金 TA15 的研究报道较少。在超塑单向拉伸基础上, 针对 TA15 四层 SPF/DB 试验件, 本文进行了数值

模拟, 获得了超塑加载压力 p - 时间 t 曲线, 并开展了四层 SPF/DB 工艺试验, 成功制备了四层 TA15 空心试验件。

1 材料及试验模具

TA15 (BT20) 合金是前苏联研制的一种高 Al 当量的近 α 型钛合金, 其名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。本试验所用 TA15 板材厚度为 1.0mm 和 1.2mm, 由宝鸡钛业股份有限公司生产。试验模具型腔尺寸为 238mm × 188mm × 40mm, 型腔侧壁单面斜度为 18°, 上下型腔对称。试验模具材料为 Ni7N。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375396)。

2 有限元模拟

2.1 有限元模型的建立

为了提高有限元计算效率和方便观察芯板成形过程,取四层板的 1/2 结构进行有限元模拟,选用 Marc 软件提供的 Thick Shell 140 单元类型,在用 AUTOMESH 进行网格划分时,采用四边形单元,共划分为 18450 个单元。

2.2 材料参数及超塑本构方程的确立

在超塑成形温度下,超塑材料的本构方程可表示为 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$,式中, K 为材料常数、 m 为应变速率敏感性指数^[4]。在超塑变形中,如果应变速率变化不大, K 和 m 都可近似地看作常数。

为了确定材料常数,在温度 880、900、920 和 930℃ 下,进行了 TA15 恒应变速率超塑单向拉伸试验,每一个温度下,在 $3.28 \times 10^{-5} \sim 1.68 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间用 10 根试样进行超塑拉伸试验。结果表明:TA15 合金最佳超塑变形条件为 920℃ 和 $5.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,此时最大延伸率 δ 为 1100%, $m \approx 0.57$;在 930℃ 和 $5.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下, δ 为 1030%。鉴于 TA15 四层板 SPF/DB 试验件具有较大面积需要扩散连接,本文选取温度 930℃ 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 为四层板结构 SPF/DB 的工艺条件,在此条件下,TA15 合金的超塑本构方程为 $\sigma = 949 \dot{\epsilon}^{0.55}$,原始试样与该条件下拉伸断裂后的试样照片如图 1 所示。

依据 TA15 超塑拉伸试验,选取了材料的超塑成形工艺参数 $m=0.55$ 和 $K=949$,应变速率 $\dot{\epsilon}=5.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。由于超塑性变形过程属于大变形问题,回弹极小,基本忽略弹性变形,采用刚塑性模型^[5],定义材料参数时选用 POWER LAW 准则,其中 $n=0.55$, $B=949$ 。

2.3 边界条件定义

板料四周压边以及焊缝处全约束,对称面限制垂直于面方向的移动,对板料表面施加超塑性控制的面载荷,以及第一阶段成形后面板的约束。

2.4 接触设置

模具定义为刚体^[6],面板整体定义为 1 个变形体,另将芯板与面板扩散连接区域、芯板与芯板扩散连接区域和芯板不需要扩散连接区域分别定义为 3 个不同的变形体,根据成形过程的两个阶段定义两个接触表:第 1 个定义面板与模具的接触;第 2 个定义芯板与面板、芯板之间的接触。

2.5 分析及模拟结果

定义超塑性压力控制,采用的压力大小范围在 0.001~2.0MPa,目标应变速率参考拉伸试验设置为 0.000525 s^{-1} ,采用最大应变速率恒定法加载压力,设置总的工况时间 4500s,固定步长时间 $5 \text{ s}^{[6-9]}$ 。

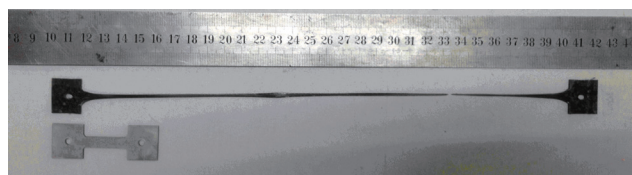


图1 TA15在930℃和 $5.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下超塑拉伸断裂试样
(最大延伸率 δ 为1030%)

Fig.1 Superplastic tensile failure sample of TA15 at 930℃ and $5.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (maximum elongation δ : 1030%)

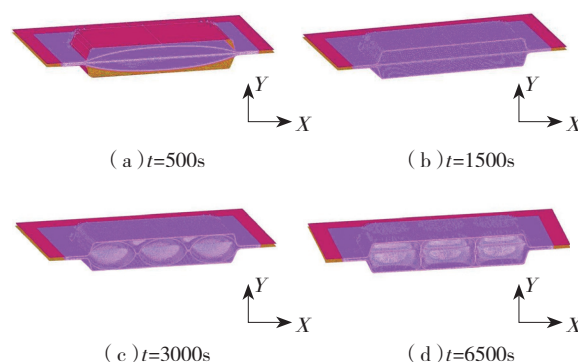
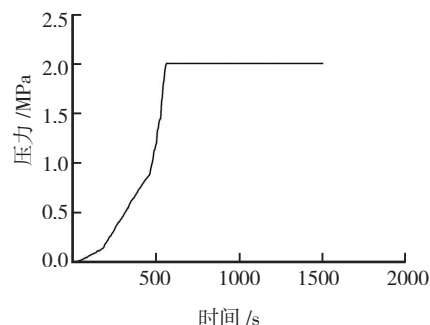
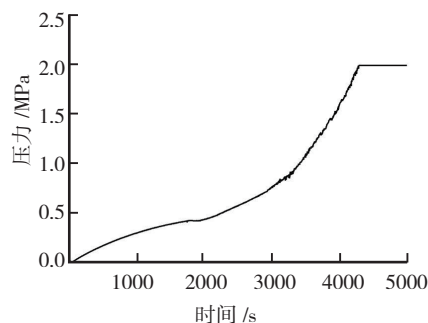


图2 TA15四层板结构超塑成形过程模拟

Fig.2 Simulation of TA15 four-sheet structure's superplastic forming processes



(a) 面板 SPF 芯板, DB 阶段的压力 p -时间 t 曲线



(b) 芯板 SPF、芯板/芯板 DB 和
芯板/面板 DB 阶段的压力 p -时间 t 曲线

图3 TA15四层板结构SPF/DB压力 p -时间 t 曲线

Fig.3 Pressure-time curves (p - t) of TA15 four-sheet structure's SPF/DB process

作业参数设置中接触控制选择修正的库仑摩擦模型,临界相对速度 $2 \times 10^{-5} \text{mm/s}$,在非线性分析中选择大应变、载荷为随动力。

模拟结果得到四层板的成形过程与压力曲线,钛合金四层板结构超塑成形的模拟过程如图 2 所示。在应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$,超塑压力 2.0MPa 条件下,MSC. Marc 软件生成的压力 p -时间 t 曲线如图 3 所示,该理论曲线经过适当修改可用作试验研究的工艺曲线。

3 试验与结果分析

3.1 TA15 四层板结构 SPF/DB 试验

本文选定的 TA15 四层板结构有 3×3 共 9 个筋格,由两个面板和两个芯板组成,面板厚度为 1mm,芯板厚度为 1.2mm,毛坯外形尺寸 $310 \text{mm} \times 246 \text{mm}$ 。

TA15 四层板 SPF/DB 整个试验过程大致分为 3 个阶段:(1)前期准备阶段,包括板料准备、止焊剂涂敷和板料周边焊接等;(2)成形试验阶段,包括模具加热和到达目标温度后的成形等;(3)成形后处理,包括降温取件、表面处理和金相组织分析等。其中试验过程又分为两个阶段:(1)面板 SPF、芯板 DB 阶段;(2)芯板 SPF、芯板之间的 DB 以及芯板和面板之间的 DB 阶段。

TA15 四层板结构 SPF/DB 成形温度选定为 $T=930^\circ\text{C}$,为了保证扩散连接接头的焊合率,对有限元模拟获得的压力 p -时间 t 曲线进行修正。对图 3(a)的第一成形阶段,在 2.0MPa 下保压 2400s 后,将扩散连接压力提高至 2.5MPa;对图 3(b)的第二成形阶段,在 2.0MPa 下保压 3600s 后,将扩散连接压力提高至 2.5MPa。第一阶段成形时间 $t_1=7240\text{s}$,第二阶段成形时间 $t_2=14260\text{s}$ 。

TA15 四层板 SPF/DB 成形件照片如图 4 所示,成形件整体效果良好,表面无沟槽等缺陷,直立加强筋完全成形,且接头部位处于零件的上下对称面上,需要扩散连接的部位全部实现了连接。

韩文波等^[10]报道了 TC4 四层空心瓦楞结构 SPF/DB 的研究结果,其成形过程为:在一个热循环中,先将 4 块板料按需在要连接的部位进行 DB,接着对毛坯进行 SPF,由于面板上已经 DB 区域的厚度远大于其余区域,因此其试验件表面出现了明显的沟槽。而本文的成形过程为:在一个热循环中,2 块面板 SPF 的同时,2 块芯板在需要连接的部位 DB,在面板/芯板之间卸载后,接着进行芯板 SPF、芯板/芯板 DB 以及芯板/面板 DB,TA15 成形件表面没有出现沟槽。

3.2 扩散连接质量分析

为了分析 TA15 四层 SPF/DB 试验件扩散连接的质量,在试验件的 4 个部位切取金相试样,如图 4 所示。A 位置

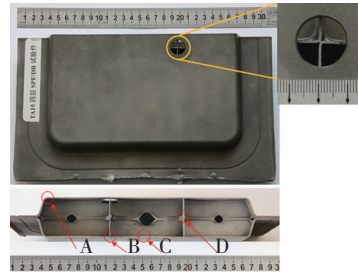


图4 TA15四层SPF/DB试验件

Fig.4 SPF/DB test pieces of TA15 four-sheet sandwich

是面板与芯板圆角处扩散连接部位; B 位置是直立加强筋靠近三角区的扩散连接部位; C 位置是面板与芯板扩散连接部位; D 位置是直立加强筋接头扩散连接部位。

试验件扩散连接位置金相组织,成形后的 TA15 合金的晶粒为均匀的柱状晶粒组织,晶粒的尺寸大小约 $15\mu\text{m}$ 。由扩散连接接头金相组织照片可知: A、C、D 位置扩散连接情况均良好,连接界面几乎完全消失; B 位置的连接界面基本消失,只出现了少许空洞,这是因为 B 位置三角区域是芯板最后成形的部位,芯板与面板之间会有一些残留的气体,不可避免的产生了微小空洞。整体来说,试验件各个位置扩散连接的情况基本一致,各连接处均实现了良好可靠的冶金连接,形成了一个整体且几乎没有缺陷。本文试验研究结果为 TA15 合金 SPF/DB 结构在高速飞行器上的应用提供了可靠的成形工艺数据,并为具有预置钛合金块的 SPF/DB 结构制造奠定了基础^[11]。

4 结论

(1) 超塑拉伸试验显示,在温度 920°C 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 时,TA15 合金的最大延伸率约为 1100%,其应变速率敏感性指数约为 0.57,在较佳超塑变形条件 930°C 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 附近,TA15 合金的超塑本构方程为 $\sigma=949 \dot{\epsilon}^{0.55}$ 。

(2) 对 TA15 四层板结构超塑成形过程进行了有限元分析,获得了压力 p -时间 t 曲线。

(3) 在 $T=930^\circ\text{C}$ 和应变速率 $5.25 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 下,成功进行了 TA15 四层板结构 SPF/DB 成形试验,试验件的整体质量良好,无沟槽等缺陷,金相组织观测表明,TA15 四层 SPF/DB 试验件扩散连接质量优良,本文试验研究结果为 TA15 合金 SPF/DB 结构在高速飞行器上的应用奠定了基础。

参考文献

[1] 李志强,郭和平.超塑成形/扩散连接技术在航空航天工业

(下转第97页)