

Ti-55 钛合金双层板的超塑成形/扩散连接数值模拟及工艺试验

周凌华, 沈中伟, 许 涛

(湖州机床厂有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 超塑成形/扩散连接技术是利用钛合金在低应变速率、合适的温度环境下伸长率高和变形阻力小的特点, 在一次加热条件下同时完成气胀成形和扩散焊接, 制造空心带夹层零件。选择典型的钛合金双层板中空构件为研究对象并制定成形工艺方案, 采用有限元分析方法, 模拟板件在超塑性状态下的成形过程, 观测其在模腔内的气胀成形过程。其次通过分析成形构件的壁厚分布情况, 调整并确定气压力-时间曲线用于指导工艺试验。最后对构件进行工艺试验和质量分析, 取得不同压力模式下的扩散连接金相组织, 以及与数值模拟相同取样点处的气胀成形壁厚数据, 验证数值模拟结果与实际成形结果的偏差。

关键词: 钛合金; 超塑成形/扩散连接; 工艺试验; 金相组织; 气胀成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.012

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 08-0076-07

Numerical simulation and process test on superplastic forming/ diffusion bonding for Ti-55 titanium alloy double-layer plate

Zhou Linghua, Shen Zhongwei, Xu Tao

(Huzhou Machine Tool Works Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Superplastic forming/diffusion bonding technology utilizes the characteristics of high elongation and low deformation resistance for titanium alloy under low strain rate and suitable temperature environment, and simultaneously completes inflatable forming and diffusion welding under one-time heating condition to manufacture hollow parts with interlayer. Therefore, for the typical hollow components of titanium alloy double-layer plate, its forming process plan was formulated and the forming process of the plate in the superplastic state was simulated by the finite element analysis method, then the inflatable forming process in the die cavity was observed. Secondly, by analyzing the wall thickness distribution condition of the formed components, the gas pressure-time curve was adjusted and determined to guide the process test. Finally, the process test and quality analysis of the components were carried out, and the metallographic structure of the diffusion bonding under different pressure modes as well as the wall thickness data during the inflatable forming at the same sampling point as the numerical simulation were obtained to verify the deviation between the numerical simulation and the actual forming results.

Key words: titanium alloy; superplastic forming/diffusion bonding; process test; metallographic structure; inflatable forming

当前的航空航天事业发展中, 飞行器减重是降低制造成本和使用成本的重要研究思路^[1]。而钛合金以其相对强度好、耐热性好、耐腐蚀、耐低温、导热性低、弹性模量小等特点, 成为飞行器制造的重要材料^[2]。但钛合金在常温下难以切削加工, 尤其是针对航空器壁板类的复杂曲面, 机械加工的废品率极高, 而超塑成形对于成品率的提升具有十分显著的作用^[3-4]。借助于计算机技术的进步, 数值

模拟技术以工艺开发成本低、结果精准、可视性高、开发周期短的优势, 成为塑性成形工艺开发和研究中极为重要的工具^[5-7]。

本文通过 Marc 有限元软件对钛合金双层板结构件成形过程进行数值模拟, 直接地观测成形过程中钛合金板材在封闭模腔中的变形状态, 分析贴膜过程与壁厚分布的关系, 并通过工艺试验对模拟结果进行了验证^[8]。

1 材料及工艺方案确定

本文研究的双层板钛合金结构件, 其中间部位为“王”字形状的中空结构, 四周进行扩散连接, 试验采用的原材料为尺寸为 300 mm×246 mm 的 Ti-

收稿日期: 2021-09-12; 修订日期: 2021-12-05

基金项目: 浙江省重点研发计划 (2020C01093)

作者简介: 周凌华 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhoulh@hzjcc.com

通信作者: 沈中伟 (1973-), 男, 本科, 工程师

E-mail: shenzw@hzjcc.com

55 轧制钛合金细晶板, 具有不大于 $10\ \mu\text{m}$ 的细小等轴晶粒组织, 其在特定的温度条件及应变速率下, 具有良好的超塑性能。成形方案选择为超塑气胀成形与扩散连接组合工艺^[9-11]。

(1) 板料准备阶段: 如图 1a 所示, 该双层板超塑成形/扩散连接结构的阻焊剂涂覆在中间气胀成形所需位置。

(2) 中间气胀成形、外围扩散连接阶段: 如

图 1b 所示, 因为钛合金的气胀成形和扩散连接的最佳温度非常接近, 因此, 在本阶段内, 双层板中间通过气压加载胀形的同时, 外围在压力机温度的同时作用下, 在未涂阻焊剂的位置开始扩散连接。

(3) 中间贴膜阶段: 如图 1c 所示, 双层板在持续通入胀形气体后, 中间与上下模型腔完全贴合, 且外围扩散焊接为一体。

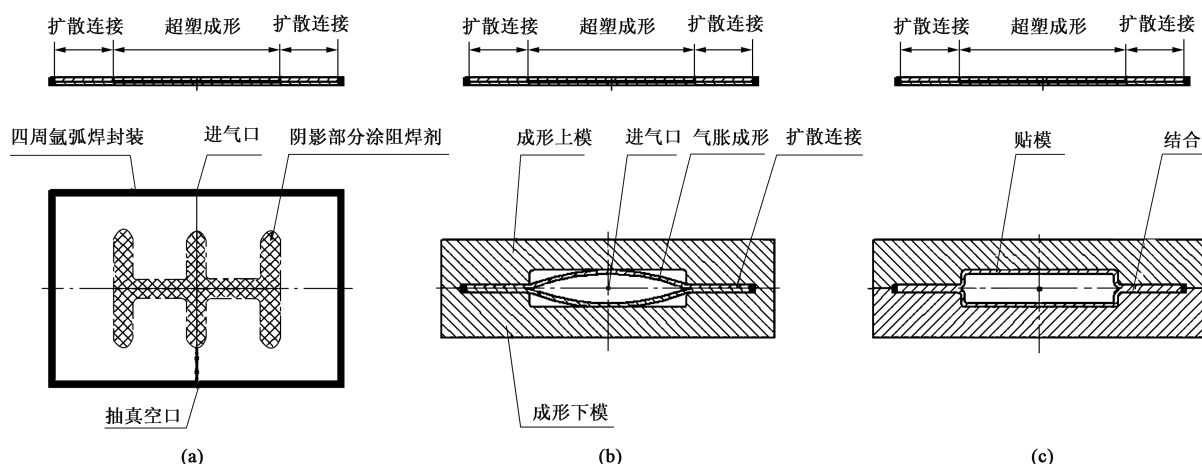


图 1 超塑成形/扩散连接工艺方案

(a) 板料封装 (b) 中间气胀和外围扩散阶段 (c) 中间贴膜阶段

Fig. 1 Superplastic forming/diffusion bonding process scheme

(a) Packaging of sheet (b) Stage of inflation in middle and diffusion in periphery (c) Stage of fitting to mold in middle

2 模型建立及模拟条件设定

2.1 模型建立

在 Solidworks 软件中按照实际尺寸建立板料和模具的三维壳体模型, 由于零件及模具结构具有完全的对称性, 为在有限网格数量下取得更小的单元划分, 取图 2 所示的上半模的 1/4 作为气胀成形的分析模型。

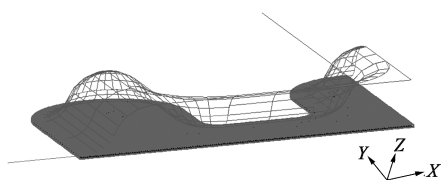


图 2 有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model

因模拟过程不涉及扩散连接工艺, 因此, 外围扩散连接部分已略去, 最终成形为一中空的“王”字, 图 3 为板料尺寸及中间气胀成形部位的尺寸。模型以 IGS 格式导入到 Marc 软件中。

2.2 定义几何特性及网格划分

设定板材为壳单元, 板材厚度为 $1.2\ \text{mm}$, 采用通

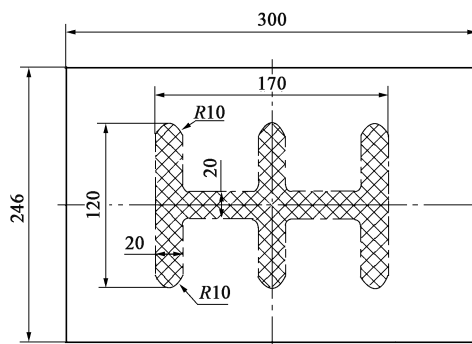


图 3 板料尺寸及气胀成形尺寸

Fig. 3 Sizes of sheet and inflatable forming

用的自动网格划分功能, 零件划分为 13640 个单元。

2.3 定义材料特性

模型设置为刚塑性, 材料的应力和应变关系基于本构方程 (式 (1)) 来表述。

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力; K 为材料常数; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; m 为应变速率敏感性指数。

根据文献 [12] 中对 Ti-55 钛合金在恒定应变速率下的伸长率与温度关系的研究, 得到如图 4 所

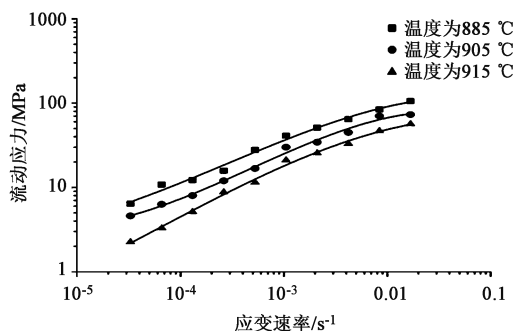


图 4 不同温度下的流动应力-应变速率曲线

Fig. 4 Curves of flow stress-strain rate at different temperatures

示的不同温度下的应变速率-流动应力曲线,并计算得到应变速率敏感性指数 m 对应的应变速率及材料常数 K 值,如表 1 所示。

表 1 不同温度下 m 值与 $\dot{\epsilon}$ 值、 K 值对应表Table 1 Correspondence chart for m values, $\dot{\epsilon}$ values and K values at different temperatures

温度/℃	应变速率敏感性指数 m	应变速率 $\dot{\epsilon}/(\times 10^4 \text{ s}^{-1})$	材料常数 K
885	0.49	7.23	1730
905	0.57	6.56	1040
915	0.55	6.56	920

本次模拟优先选取 m 值最大的一组数据进行导入,即成形温度为 905 °C 时, $m = 0.57$, $\dot{\epsilon} = 6.56 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $K = 1040$ 。

2.4 定义接触属性

定义板料为变形体,模具为刚性体。板材气胀成形及扩散连接的变形体定义有所不同,以粘结接触属性定义扩散连接部位,以接触属性定义板材与成形模具间的关系。根据机械设计手册^[13]中提供的

参考试验数值,常温下金属材料的摩擦因数一般取值为 0.10~0.15,而在高温下钛合金材料的滑动摩擦因数缺少相关的试验参考数值,因此,本次模拟中考虑相对恶劣工况,定义板材与模具间的摩擦因数 $\mu = 0.2$ 。

2.5 定义边界条件

由于扩散连接位置不发生变形,因此,该部位节点处的自由度全部设置为 0,气胀成形处的对称面的自由度设置为沿 X 方向 $Y=0$,沿 Y 方向 $X=0$ 。对气胀成形部分施加垂直面载荷,且载荷方向跟随板料变形,始终垂直于板料变形面。

2.6 定义分析工况

在超塑性压力控制面板内,预设压力大小为 0.001~2.500 MPa,目标应变速率设置为 $6.56 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,模拟采用恒定应变速率控制,选择应变速率最大值恒定的压力加载模式。设置成形时间共 2000 s,设置每步的保存时间为 5 s,总步数为 400 步。

2.7 设置作业参数

选用已设定的载荷工况,将接触控制定义为库伦反正切,相对速度门槛值为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;选择非线性大应变分析、载荷为随从力(载荷方向始终垂直于板料);选择本次模拟中需要输出的等效米塞斯应力、等效塑性应变率、单元厚度等结果。最后保存设置并提交运行。

3 数值模拟结果分析

3.1 模拟变形过程

在软件的后处理界面,可直观地观察到板料在成形过程中任意时刻的状态,图 5 为板料在不同时刻 t 的成形状况。

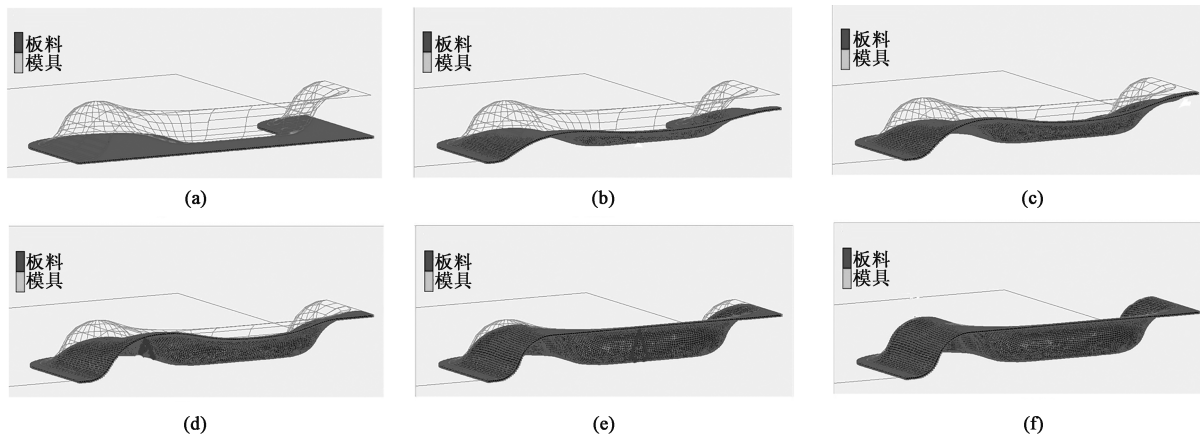


图 5 板料在不同时刻的成形状态

(a) $t=0 \text{ s}$ (b) $t=332 \text{ s}$ (c) $t=520 \text{ s}$ (d) $t=680 \text{ s}$ (e) $t=1000 \text{ s}$ (f) $t=1300 \text{ s}$

Fig. 5 Forming states of sheet in different time

从图5中可看出,当 $t=332\text{ s}$ 时,板料已完全包裹模具凸圆角; $t=520\text{ s}$ 时,模具底部最中心位置开始贴模; $t=680\text{ s}$ 时,模具底部两端中间位置开始贴模; $t=1000\text{ s}$ 时,模具底部横向已完全贴模; $t=1300\text{ s}$ 时,模具底部最远端凹圆角处多处完成同时贴模,至此整个板料与模具完全贴合,成形结束。

3.2 板料壁厚分析

通过对最终贴模后的成形结果进行分析,除模具凸圆角处(即贴模最早位置)的壁厚有明显的减薄外,其余部分的壁厚较为均匀。如图6中A处最

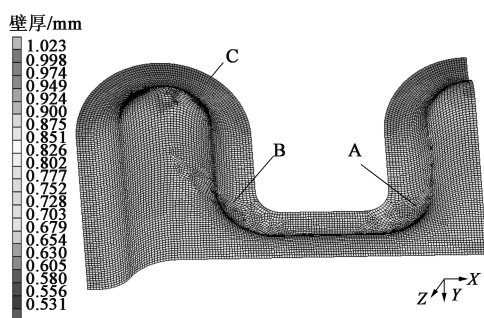


图6 壁厚分布云图

Fig. 6 Distribution nephogram of wall thickness

早完成贴模,局部初始变形速度最大,其模拟成形壁厚约为 0.78 mm ,减薄率为 35% ;而B处的局部初始速度略低于A处,壁厚减薄率略大于A处,模拟成形壁厚约为 0.72 mm ,减薄率为 40% ;C处为拉伸量最小的位置,模拟成形壁厚约为 0.98 mm ,减薄率为 18.3% 。

4 工艺试验

本次工艺试验设备选用湖州机床厂有限公司生产的HJY34-630超塑成形液压机,采用化学溶剂清洗板料表面,再采用稀释后的氢氟酸洗去表面的氧化物,采用碱中和残留的酸液;阻焊剂采用石墨水溶液,均匀地刷在板料的内外表面。为避免成形过程中工件与模具粘接,板料外表面与模具内表面全部涂覆阻焊剂,而板材内表面仅在气胀成形和进气通道部位进行涂覆,扩散连接部位不涂阻焊剂,图7a中网格状部位即为板材内表面阻焊剂涂覆位置。对板料四周封焊,并在水平进气位置预留通气管,将板料的D口、E口与模具的F口、G口分别连接气源,如图7b所示。

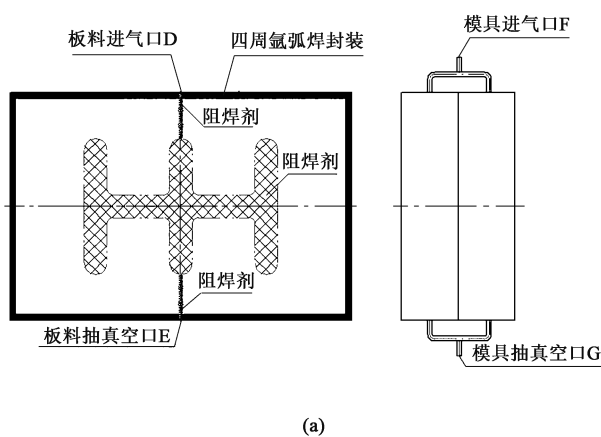


图7 试验准备

(a) 涂覆阻焊剂及气源接口 (b) 模具图

Fig. 7 Test preparation

(a) Coating solder resist and air source interface (b) Mold diagram

试验过程中气胀部分工艺参数的设定,与有限元分析过程中的气压加载曲线保持一致。试验过程如下:

(1) 预热:模具及工件加热至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前,液压力及气压力均不加压;

(2) 抽真空:模具及工件达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后,开始对模具施加液压锁模力 200 kN ,同时对模具和板料通氩气抽真空,如此反复3次,排尽模腔内空气,

并达到 $\leq 100\text{ kPa}$ 的真空度要求;

(3) 升温:继续升温至 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,保温 10 min ,使工件的温度更加均匀;

(4) 扩散连接:G口关闭,将氩气通入模具F口,维持气压为 2 MPa ,持续时间为 3600 s ,液压锁模力为 750 kN ,此时板料件未涂覆阻焊剂的部分发生扩散连接后形成牢固的整体,而涂覆阻焊剂的部分不发生连接;

(5) 气胀成形: E 口关闭, 将氩气通入 D 口, 按图 8 所示的由数值模拟得到的气压 p -时间 t 曲线加载气压, 并保压至 2000 s, 液压锁模力为 630 kN;

(6) 冷却: 关闭加热, 气体排出, 保留气压为 0.2 MPa, 待模具随炉冷却至 200 °C 下后取出。

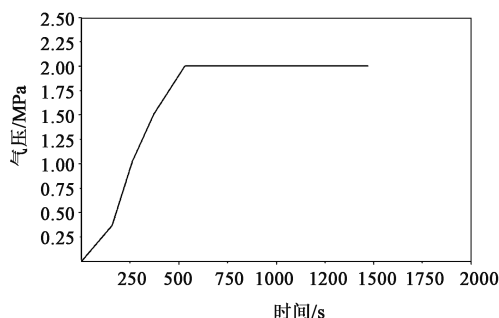


图 8 数值模拟取得的 p - t 曲线

Fig. 8 p - t curve obtained by numerical simulation

5 试验结果

钛合金超塑成形零件的质量分析主要包括两个方面: 扩散连接处的粘连程度和气胀成形处的壁厚分析。扩散连接的粘连程度通过剖切后观察其金相组织是否有明显的分界线; 壁厚分析通过气胀成形处多点的厚度测量, 分析其壁厚的均匀性和减薄率。

图 9 为超塑成形后的零件, 零件内外表面较为光整, 无明显的褶皱或破裂现象, 肋部及圆角处均成形饱满。

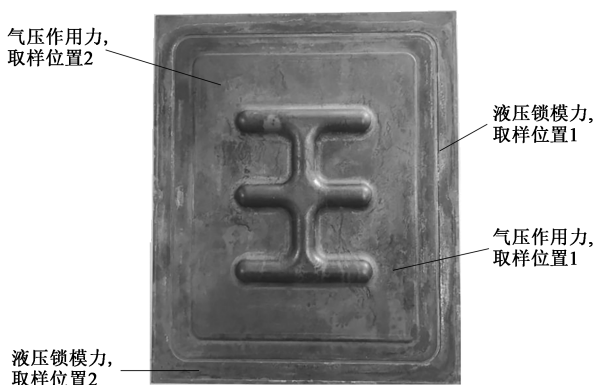


图 9 成形零件表面质量

Fig. 9 Surface quality of formed parts

5.1 扩散连接的粘连程度分析

在此工艺中, 扩散连接存在两种加压方式, 图 7a 中的外围黑色边框区域在液压锁模力作用下进行扩散连接, 而内部除中间网格状“王”字形部位

外, 其余部位在气压作用进行扩散连接, 由于压力作用方式的不同, 连接处产生的金相组织亦有所区别。

图 10a 和图 10b 为外围边框区域两处不同位置 (图 9) 的取样在液压锁模力作用下的金相组织, 可以看出, 金相组织的密度较高, 连接界面已基本全部消失, 扩散连接情况良好; 图 10c 和图 10d 为中间“王”字轮廓外围与边框之间区域两处不同位置 (图 9) 的取样在气压力作用下的金相组织, 可以看出, 金相组织的密度相对较小, 连接处无明显的分界线, 其中图 10c 由于在气压力下最后成形, 成形过程中的残留气体被挤入此空间, 因此出现了少许空洞。从金相组织整体分析而言, 材料的扩散连接状况良好, 已形成几乎没有缺陷的整体构件。

5.2 壁厚分析

超塑气胀成形过程中, 由于锁模部位的板料不发生移动, 因此, 气胀部位的表面积扩大与板料的减薄呈理论的线性比例关系, 但由于贴模过程中板料各部位的摩擦阻力、流动状态和贴模时间均不相同, 因此, 成形后零件各部位的壁厚均会减薄, 并且各部位的壁厚存在差异。

图 11 为数值模拟中成形零件的壁厚分布云图, 在实际成形零件上选取相应的测量点进行壁厚测量, 数值模拟壁厚及模拟减薄率与实际成形板料的壁厚及减薄率对比如表 2 所示。

由表 2 中数据可看出, 数值模拟壁厚与实际壁厚的相对误差较小, 其中:

(1) 最大相对误差位于点 10 位置, 相对误差为 8.97%。

(2) 数值模拟壁厚的平均减薄率为 33.08%, 实际成形零件壁厚的平均减薄率为 31.17%。

(3) 实际成形零件最大壁厚位于点 8 位置, 最小厚度位于点 2 位置, 壁厚差异率为 19.6%。

6 结论

(1) 将有限元分析与工艺试验取得的数据对比, 数值模拟的材料平均壁厚为 0.80 mm, 工艺试验取得的实物平均壁厚为 0.83 mm, 两者的相对误差较小, 平均相对误差仅为 5.87%。

(2) 经过对扩散连接部位进行金相分析, 液压力作用下的扩散连接处的金相组织密度相对较高, 而气压力作用下扩散连接处的金相组织密度相对较低, 且存在局部的空洞和气穴。

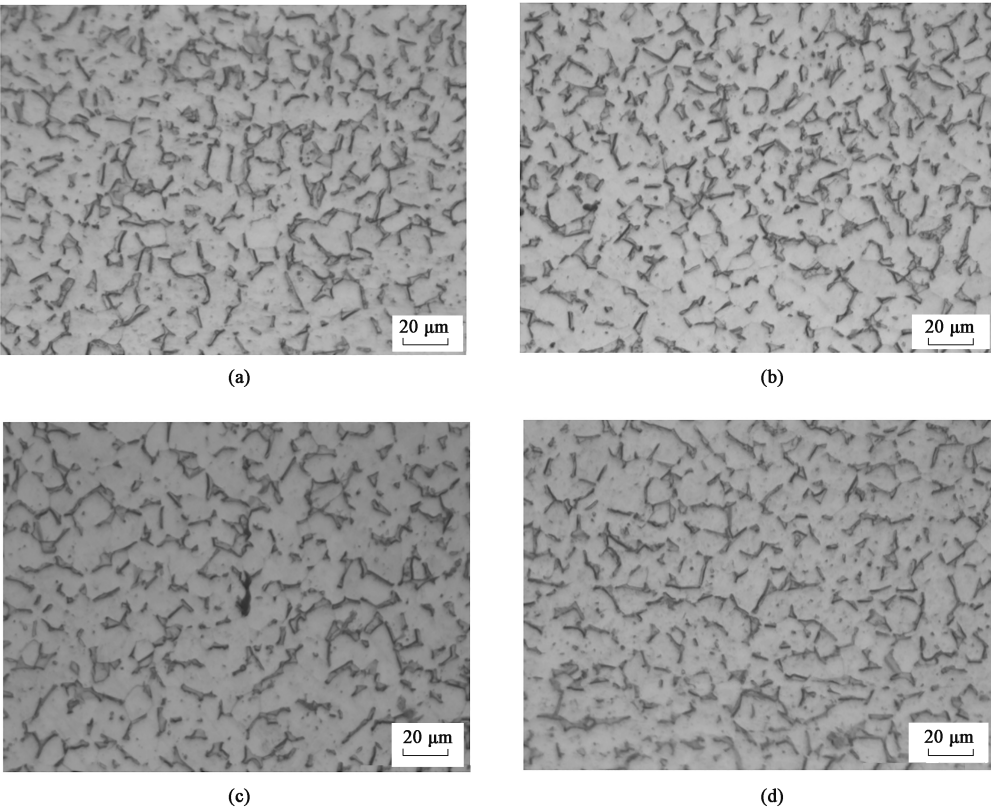


图 10 不同压力模式下的扩散连接金相组织图

(a) 液压锁模力作用下，位置 1 (b) 液压锁模力作用下，位置 2 (c) 气压力作用下，位置 1 (d) 气压力作用下，位置 2

Fig. 10 Metallographic structure diagrams of diffusion bonding under different pressure modes

(a) Under action of hydraulic clamping force, position 1 (b) Under action of hydraulic clamping force, position 2
(c) Under action of air pressure action, position 1 (d) Under action of air pressure action, position 2

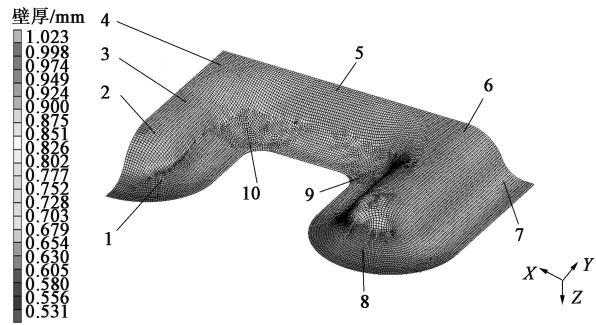


图 11 模拟壁厚分布云图及壁厚测量点

Fig. 11 Distribution cloud diagram for simulated wall thickness and wall thickness measurement points

参考文献：

[1] 胡丹. 飞机钛合金钣金件橡皮囊精确成形技术研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2014.
Hu D. Precision Forming Technology Research on Rubber Bladder Forming of Aircraft Titanium Alloy Sheet Metal [D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2014.

[2] 赵林博，徐珊珊. 钛合金超塑成形工艺及应用 [J]. 科技创新导报，2011，(19)：59-69.
Zhao L B, Xu S S. Superplastic forming process and application of titanium alloy [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, (19)：59-69.

表 2 成形零件壁厚对比

Table 2 Wall thickness comparison of formed parts

测量点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
模拟壁厚/mm	0.84	0.71	0.78	0.85	0.78	0.84	0.87	0.86	0.72	0.78	0.80
实物壁厚/mm	0.88	0.74	0.84	0.80	0.83	0.80	0.84	0.92	0.76	0.85	0.83
相对误差/%	4.76	4.23	7.69	5.88	6.41	4.76	3.45	6.98	5.56	8.97	5.87
模拟减薄率/%	30.00	40.83	35.00	29.17	35.00	30.00	27.50	28.33	40.00	35.00	33.08
实际减薄率/%	26.67	38.33	30.00	33.33	30.83	33.33	30.00	23.33	36.67	29.17	33.17

- [3] 洪慎章. 超塑性成形技术的应用 [J]. 机械制造, 1982, (1): 36-38.
Hong S Z. Application of superplastic forming technology [J]. Machinery, 1982, (1): 36-38.
- [4] 李细锋, 朱富慧, 陈长江, 等. 置氢钛合金超塑成形/扩散连接技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (16): 38-45.
Li X F, Zhu F H, Chen C J, et al. Research progress of superplastic forming/diffusion bonding of hydrogenated titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (16): 38-45.
- [5] Safiullin R V, Vasin R A, Enikeev F U. Determination of the parameters of superplastic forming for long rectangular thin sheet titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2000, 13 (2): 567-573.
- [6] 张宇翔, 汤泽军, 许爱军, 等. Ti55 钛合金管电辅助加热气压胀形圆角填充成形规律及多场耦合数值模拟 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 112-120.
Zhang Y X, Tang Z J, Xu A J, et al. Fillet filling law and multi-field coupling numerical simulation of Ti55 titanium alloy pipe in electric assisted heating bulging [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 112-120.
- [7] 李志强, 陆文林, 王伟亮, 等. 5A06 薄壁壳体超塑胀形过程壁厚分布规律及其控制 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 108-113.
Li Z Q, Lu W L, Wang W L, et al. Wall thickness distribution and its control of 5A06 thin-walled shell superplastic bulging [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 108-113.
- [8] 蒋少松. TC4 钛合金超塑成形精度控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Jiang S S. Accuracy Control of Superplastic Forming for TC4 Titanium Alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 王国峰, 张建威, 张晓巍, 等. 2B06 铝合金双层结构件 DB&SPF 组合工艺研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 187-191.
Wang G F, Zhang J W, Zhang X W, et al. Research on DB&SPF combination process of double-layer structural parts for 2B06 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 187-191.
- [10] 付明杰, 曾元松, 钱健行, 等. Ti-22Al-25Nb 合金扩散连接工艺及连接机制研究 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (12): 1233-1239.
Fu M J, Zeng Y S, Qian J H, et al. Diffusion bonding process and mechanism of Ti-22Al-25Nb alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (12): 1233-1239.
- [11] 付明杰, 李继忠, 曾元松. 搅拌摩擦焊 Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo 合金的超塑性变形行为研究 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (1): 1-8.
Fu M J, Li J Z, Zeng Y S. Superplastic deformation behavior of friction stir welded Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (1): 1-8.
- [12] 闫亮亮. Ti-55 双层板超塑成形/扩散连接试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Yan L L. Experiment Study on Process of Superplastic Forming/Diffusion Bonding for Double-sheet Structure of Ti-55 Titanium Alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [13] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Cheng D X. Handbook of Mechanical Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

