

## 2A97 铝锂合金三层空心结构件超塑成形/扩散连接工艺

刘文俊<sup>1</sup>, 罗 斌<sup>1</sup>, 武 永<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 航空航天结构力学与控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 开展了 2A97 铝锂合金三层空心结构件的超塑成形/扩散连接工艺仿真和实验研究, 以获得合理的工艺参数。通过高温拉伸实验测得 2A97 铝锂合金在变形温度为 460 ℃、应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup> 条件下的伸长率为 183.4%, 表现出良好的高温塑性。采用 ABAQUS 有限元软件分析了芯板夹角和气压加载路径对三层空心结构件成形质量的影响, 得出合理的芯板夹角为 45°、合理的应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>, 在此条件下, 零件的最大减薄位于筋条与面板过渡区域, 最大减薄率为 59.4%。在变形温度为 460 ℃、整形压力为 2 MPa 条件下, 成功制备了 2A97 铝锂合金三层空心结构件, 芯板的最大减薄率约为 46.7%, 扩散接头剪切强度为 125.5 MPa, 固溶时效后剪切强度升高至 142.6 MPa。

**关键词:** 2A97 铝锂合金; 超塑成形/扩散连接; 三层空心结构件; 芯板夹角; 气压加载路径

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.011

中图分类号: TG302

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0078-06

## Superplastic forming and diffusion bonding process on 2A97 Al-Li alloy three-layer hollow structure part

Liu Wenjun<sup>1</sup>, Luo Bin<sup>1</sup>, Wu Yong<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The simulation and experiment research of superplastic forming and diffusion bonding process for 2A97 Al-Li alloy three-layer hollow structure part were carried out to obtain the reasonable process parameters. Then, the elongation of 2A97 Al-Li alloy is 183.4% under the conditions of the deformation temperature of 460 ℃ and the strain rate of 0.001 s<sup>-1</sup> measured by high-temperature tensile experiment which shows good high-temperature plasticity. Furthermore, the influences of core plate angles and air pressure loading paths on the forming quality of three-layer hollow structure part were studied by finite element software ABAQUS, and it is concluded that the reasonable core plate angle is 45° and the reasonable strain rate is 0.001 s<sup>-1</sup>. Under this condition, the maximum thinning rate of part is 59.4%, located in the rib-to-panel transition region. Finally, under the conditions of the deformation temperature of 460 ℃ and the shaping pressure of 2 MPa, a three-layer hollow structure part of 2A97 Al-Li alloy is successfully prepared, the maximum thinning rate of core plate is about 46.7%, the shear strength of diffusion bonded joint is 125.5 MPa which increases to 142.6 MPa after solution aging.

**Key words:** 2A97 Al-Li alloy; superplastic forming and diffusion bonding; three-layer hollow structure part; core plate angle; air pressure loading path

铝锂合金具有密度低、韧性强、耐损伤性能好等优点, 被广泛应用于航空航天领域<sup>[1-3]</sup>。作为

国产第 3 代铝锂合金, 2A97 铝锂合金 (Al-3.4Cu-1.5Li-0.5Zn-0.4Mg-0.3Mn-0.15Zr) 具有各向异性低、可焊性良好和可热处理等优异性能<sup>[4]</sup>, 通过强化相 δ'(Al<sub>3</sub>Li)、θ(Al<sub>2</sub>Cu)、T1(Al<sub>2</sub>CuLi) 的析出, 固溶时效后抗拉强度可达 560 MPa<sup>[5]</sup>。然而, 铝锂合金的室温变形抗力大、易开裂, 成形难度大, 难以制造复杂的零部件<sup>[6]</sup>, 热成形技术为解决此难点提供了一种思路<sup>[7]</sup>。在变形温度为 490 ℃、应变速率为 0.002 s<sup>-1</sup> 的条件下进行高温拉伸实验, 2A97 铝锂合金板材的伸长率高达 850%<sup>[8]</sup>, 表现出良好

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805256); 中央高校基本科研项目 (56XAC21017); 国家博士后基金资助项目 (2020M670792)

作者简介: 刘文俊 (2002-), 男, 本科生

E-mail: liuwenjun@nuaa.edu.cn

通信作者: 武 永 (1986-), 男, 工学博士, 副教授

E-mail: wuyong@nuaa.edu.cn

的高温塑性。在变形温度为 430 ℃ 和应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  条件下其伸长率仍高达 437%<sup>[9]</sup>。

超塑成形/扩散连接工艺 (Superplastic Forming and Diffusion Bonding, SPF/DB) 是一种批量制造复杂多层整体结构的高效率、低成本的制造方法<sup>[10-12]</sup>, 极大程度实现了结构轻量化<sup>[13]</sup>, 已用于大尺寸型面复杂 TC4 钛合金整体壁板<sup>[14]</sup>、TC4 钛合金双通道飞机隔热板<sup>[15]</sup>等构件的批量制造。SPF/DB 工艺要求金属板材兼具良好的扩散焊性能和优异的高温塑性。20 世纪 90 年代, 英国 BAE 公司探索了 8090 铝锂合金多层中空结构件的 SPF/DB 工艺, 实现减重 23%, 产品优势明显<sup>[16]</sup>, 但扩散连接质量不稳定。在扩散连接工艺中, 铝锂合金表面易形成致密、坚韧的氧化膜, 这阻碍了上、下界面原子之间的扩散, 大幅降低了扩散连接焊合率<sup>[17-18]</sup>。为此, 本文在真空 SPF/DB 机床中开展了 2A97 铝锂合金多层中空结构件的 SPF/DB 工艺实验研究, 为其工业化应用提供理论支撑。

## 1 材料与实验方法

### 1.1 实验材料

实验材料为郑州轻研合金科技有限公司生产的 2.8 mm 厚的 2A97 铝锂合金轧制板材, 其在 460 ℃ 和不同应变速率条件下的真实应力-真实应变曲线如图 1 所示。在应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  条件下, 伸长率达到了 183.4%, 稳态流动应力为 8.6 MPa。

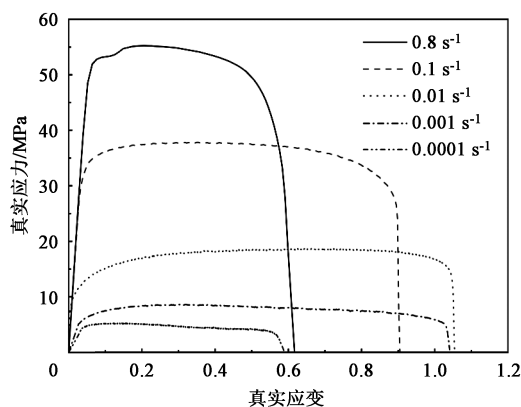


图 1 2A97 铝锂合金在 460 ℃ 时的真实应力-真实应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves of 2A97 Al-Li alloy at 460 ℃

### 1.2 有限元仿真模型

2A97 铝锂合金三层空心结构件如图 2 所示, 由上面板、芯板和下面板组成, 芯板分为扩散区域和筋条两个部分。图 2 中,  $a$  为扩散接头宽度,  $b$  为相邻扩散区域之间的距离,  $c$  为筋条厚度,  $t$  为面板厚

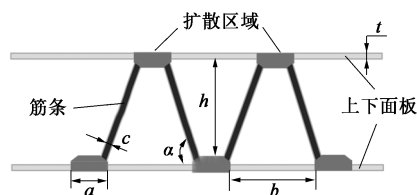


图 2 2A97 铝锂合金三层空心结构件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-layer hollow structure part for 2A97

Al-Li alloy

度,  $h$  为空心结构件高度,  $\alpha$  为芯板与面板间的夹角。设计的三层空心结构件中,  $a = 15 \text{ mm}$ 、 $h = 20 \text{ mm}$ 、 $t = 2.8 \text{ mm}$ 、 $c = 1.8 \text{ mm}$ , 成形区域为  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。通过有限元仿真优化合适的芯板夹角。

采用 ABAQUS 有限元软件模拟成形过程, 仿真模型如图 3 所示。模具为刚体, 面板与芯板选为壳单元, 采用 S4R 网格, 单元尺寸为 1 mm, 划分为 117834 个单元。设置摩擦因数为 0.2, 模具设为完全固定约束。材料密度为  $2.71 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 泊松比为 0.3。

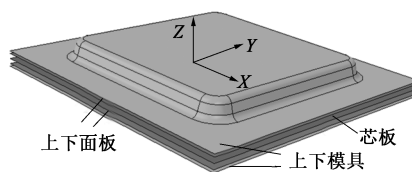


图 3 三层空心结构件有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model of three-layer hollow structure part

### 1.3 SPF/DB 成形实验

2A97 铝锂合金三层空心结构件实验在南京航空航天大学 150 t 的真空 SPF/DB 机床中进行, 真空度为  $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。实验前, 将芯板铣削至厚度为 1.8 mm 后, 在面板扩散焊区域铣削出扩散焊凸台, 并进行酸洗处理, 在非扩散焊处涂止焊剂。芯板、面板和模具装配后, 放入真空等温炉内, 在扩散温度为 460 ℃ 和扩散压力为 10 MPa 的条件下扩散连接 6 h, 再按设定的加载路径向芯板和面板间充入氩气, 面板受气压作用变形直至贴模, 芯板在面板拉力作用下发生塑性变形, 最终获得三层空心结构样件。采用线切割将 2A97 铝锂合金三层空心结构样件切开, 用卡尺测量其壁厚分布。采用江南 MR5000 型光学显微镜分析扩散焊缝的金相组织。

## 2 结果与讨论

### 2.1 芯板夹角对成形质量的影响

芯板夹角越小, 表面褶皱越不容易产生<sup>[19]</sup>, 但

随之带来的是结构稳定性的损失。选取芯板夹角分别为  $30^\circ$ 、 $37^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $53^\circ$  和  $60^\circ$  进行有限元仿真分析。图 4 为不同芯板夹角试样的仿真结果,按照最大应变速率为  $0.0001 \text{ s}^{-1}$  进行气压加载。图 4a 为区域 A 处的 Z 向位移情况,当芯板夹角为  $30^\circ$  和  $37^\circ$  时,圆角处最大位移分别为 10.9 和 11.1 mm,面板圆角处的贴模情况较差;当芯板夹角增大至  $45^\circ$ ,贴模情况

得到改善,最大位移达到了 11.36 mm,圆角处基本完成贴模;芯板夹角为  $53^\circ$  和  $60^\circ$  时,贴模情况与  $45^\circ$  与大致相同。图 4b 为区域 B 的 Z 向位移情况,位移分布存在起伏现象,说明面板存在“沟槽”现象;当芯板夹角为  $53^\circ$  和  $60^\circ$  时,“沟槽”现象加剧,沟槽深度差均超过了 0.15 mm;当芯板夹角为  $45^\circ$ 、 $37^\circ$  和  $30^\circ$  时,沟槽深度分别为 0.11、0.06 和 0.02 mm。

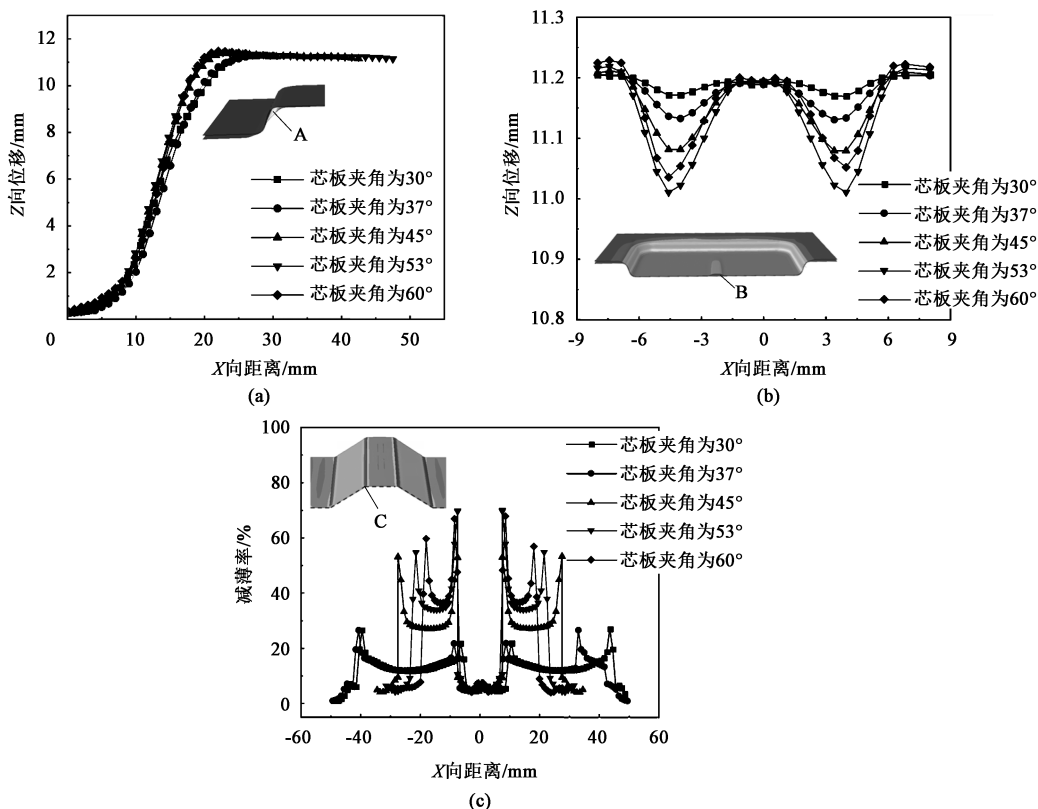


图 4 贴模情况及芯板减薄率分布

(a) 圆角处位移分布 (b) 下面板位移分布 (c) 筋条壁厚分布

Fig. 4 Die fittingness situation and thinning rate distribution for core plate

(a) Displacement distributions at round corner (b) Displacement distributions of lower panel (c) Thickness distributions of ribs

图 4c 为区域 C 的减薄率分布,最大减薄在上下面板扩散区域与筋条处的过渡区域。当芯板夹角为  $53^\circ$  和  $60^\circ$  时,最大减薄率分别为 70.1% 和 67.9%,筋条易发生断裂。当芯板夹角为  $45^\circ$  时,最大减薄率为 53.3%,最小厚度为 0.84 mm。当芯板夹角为  $30^\circ$  和  $37^\circ$  时,减薄率均低于 30%,未发生明显的减薄现象。综合考虑三层空心结构件的强度和成形难度,选定芯板夹角为  $45^\circ$  进行三层空心结构件的 SPF/DB 实验。

## 2.2 应变速率对成形质量的影响

气压加载路径曲线是三层空心结构件关键工艺参数之一,其影响了材料变形的应变速率和变形能力。采用 Marc 软件逆向求解出最大应变速率分别为 0.1、0.01、0.001 和  $0.0001 \text{ s}^{-1}$  时的气压加载路径

曲线,整形压力为 2 MPa,如图 5 所示。

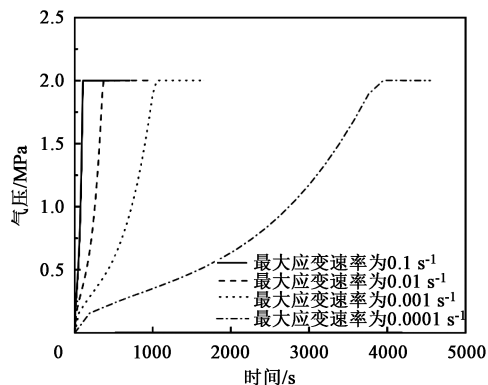


图 5 不同最大应变速率下的气压加载路径曲线

Fig. 5 Air pressure loading path curves under different maximum strain rates

按不同气压加载路径仿真出三层空心结构件, 芯板厚度分布如图 6 所示。当以最大应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  的气压加载路径曲线成形时, 芯板的最小厚度低至  $0.18 \text{ mm}$ , 减薄率为  $90\%$ , 真应变为  $2.3$ , 已发生破裂。当以最大应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$  的气压加载路径曲线成形时, 芯板的最小厚度为  $0.64 \text{ mm}$ , 减薄率为  $64.4\%$ , 真应变约为  $1.0$ , 接近破裂。当以最大应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  的气压加载路径曲线成

形时, 芯板的最小厚度为  $0.73 \text{ mm}$ , 减薄率为  $59.4\%$ , 真应变约为  $0.89$ , 未发生破裂。当以最大应变速率为  $0.0001 \text{ s}^{-1}$  的气压加载路径曲线成形时, 芯板的最小厚度为  $0.84 \text{ mm}$ , 减薄率为  $53.3\%$ , 真应变为  $0.76$ , 未发生破裂。考虑到最大应变速率为  $0.0001 \text{ s}^{-1}$  时的气压加载时间过长, 不符合工程实际, 因此, 选择最大应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  的气压加载路径进行实验研究。

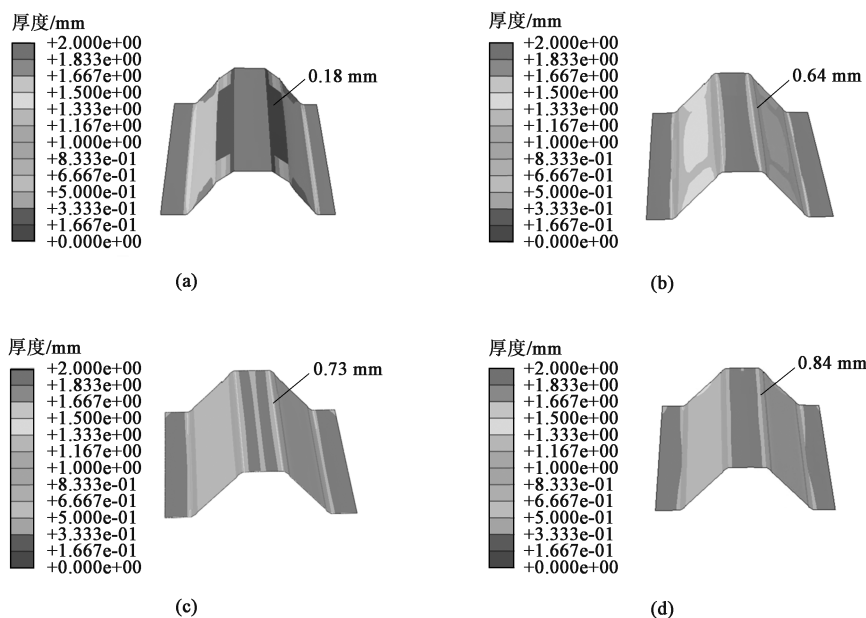


图 6 不同气压加载路径成形的零件的芯板厚度分布

(a) 最大应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b) 最大应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (c) 最大应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  (d) 最大应变速率为  $0.0001 \text{ s}^{-1}$

Fig. 6 Thickness distributions of core plate for parts formed along different gas pressure loading paths

(a) Maximum strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b) Maximum strain rate of  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (c) Maximum strain rate of  $0.001 \text{ s}^{-1}$  (d) Maximum strain rate of  $0.0001 \text{ s}^{-1}$

### 2.3 2A97 铝锂合金三层空心结构件的 SPF/DB 实验结果

选用图 5 中最大应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  的气压加载路径曲线, 开展芯板夹角为  $45^\circ$  的三层空心结构件的 SPF/DB 实验, 获得的成形件如图 7 所示, 可以发现, 筋条未破裂, 表面无明显凹陷, 成形质量良好。图 8 为三层空心结构件壁厚实验结果与仿真结果的对比图 (测量点如图 7 所示), 最大减薄在芯板与面板连接处, 两者的规律一致。

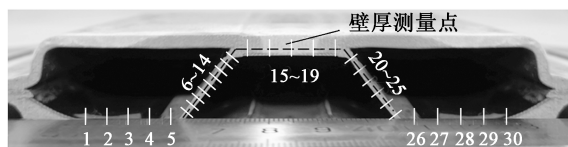


图 7 三层空心结构成形件

Fig. 7 Formed part with three-layer hollow structure

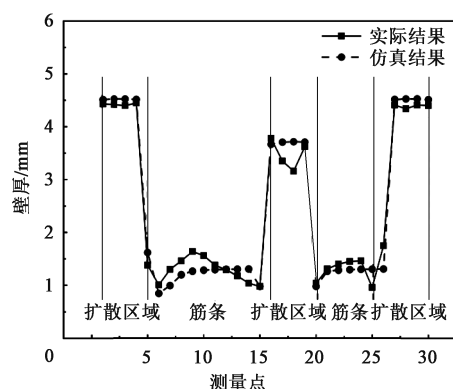


图 8 芯板壁厚对比图

Fig. 8 Comparison diagram of thickness for core plate

图 9a 和图 9b 分别为原始板材和 2A97 铝锂合金扩散连接接头的显微组织, 原始板材中存在较多细小的弥散相, 经过高温扩散连接后, 大部分弥散强化相被固溶至基体中。扩散连接界面无明显孔洞缺



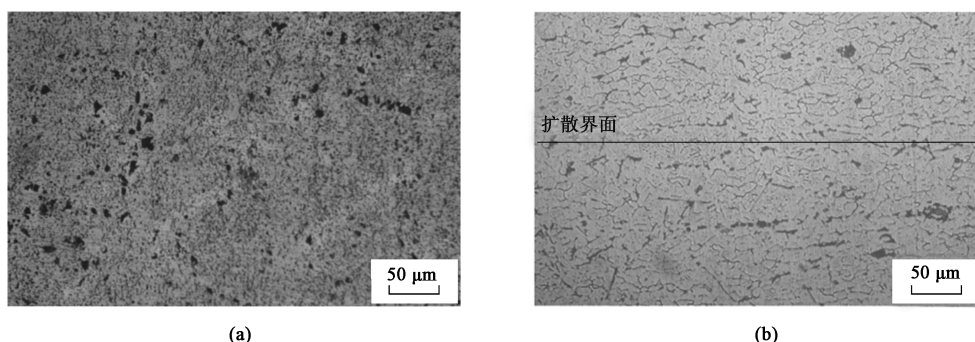


图 9 2A97 铝锂合金原始板材 (a) 及扩散连接接头 (b) 的金相组织

Fig. 9 Metallographics of original plate (a) and diffusion bonded joint (b) for 2A97 Al-Li alloy

陷, 界面有部分共晶组织, 质量较好。对扩散连接接头进行压缩剪切性能测试, 剪切强度为 125.5 MPa, 为原始板材的 77.8%, 经固溶时效热处理后, 扩散连接剪切强度升高至 142.6 MPa。

### 3 结论

(1) 2A97 铝锂合金板材在变形温度为 460 °C 和应变速率  $0.001 \text{ s}^{-1}$  条件下的高温拉伸性能最优, 伸长率达到了 183.4%。

(2) 仿真结果表明, 芯板夹角为 45°、应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  时, 芯板最大减薄处位于筋条与面板过渡区域, 减薄率约为 59.4%, 最小壁厚为 0.73 mm, 可兼具 2A97 铝锂合金的三层空心结构件的成形性和结构强度。

(3) 利用真空扩散连接机床, 在扩散温度为 460 °C、扩散压力为 10 MPa 条件下扩散连接 6 h 得到良好的 2A97 铝锂合金扩散焊接头, 其剪切强度为 125.5 MPa, 为原始板材剪切强度的 77.8%, 经固溶时效热处理后剪切强度升高至 142.6 MPa。

(4) 在变形温度为 460 °C、整形压力为 2 MPa 条件下, 成功制备了质量良好、表面无缺陷的 2A97 铝锂合金三层空心结构样件。

#### 参考文献:

- [1] 刘莹莹, 李洁洁, 杨健, 等. 孔挤压强化对 2A97 铝锂合金耳片疲劳性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (9): 1254-1260.
- [2] 章润喆, 马云龙, 刘丹阳, 等. 2195 铝锂合金力学性能和组织与冷热变形过程的相关性 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (2): 129-136.
- [3] Chen R, Wang H M, He B, et al. Effect of thermal cycling on microstructure and mechanical properties of 2A97 Al-Li alloy fabricated by direct laser deposition [J]. Vacuum, 2021, 190: 110299.
- [4] Zou G T, Ye L Y, Li J, et al. Microstructure evolution and deformation mechanisms of a banded-grained 2A97 Al-Cu-Li alloy during superplastic deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 876: 145178.
- [5] 王燕, 杜荣. 2A97-T84 铝锂合金型材形变热处理工艺技术研究 [J]. 铝加工, 2021, 263 (6): 49-52.
- [6] Ning J, Zhang L J, Bai Q L, et al. Comparison of the microstructure and mechanical performance of 2A97 Al-Li alloy joints between autogenous and non-autogenous laser welding [J]. Materials & Design, 2017, 120: 144-156.
- [7] Novotny S, Geiger M. Process design for hydroforming of light-weight metal sheets at elevated temperatures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138 (1-3): 594-599.
- [8] 张新明, 谢磊, 叶凌英, 等. 时效制度对 2A97 铝锂合金晶粒细化 and 超塑性的影响 [J]. 金属热处理, 2014, 39 (2): 88-93.
- [9] Jia L, Ren X P, Zhang Y L, et al. Forming-limits analysis of the superplastic 2A97 Al-Li alloy [J]. Materials and Technologies, 2020, 54 (3): 397-405.
- [10] Zhao Z C, Xu J H, Fu Y C, et al. An investigation on adaptively machining the leading and tailing edges of an SPF/DB titanium hollow blade using free-form deformation [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31 (1): 178-186.
- [11] Li Y M, Wang H L, Niu T, et al. Study on SPF/DB technology for two-sheet hollow structure of 1420 Al-Li alloy [J]. Metals, 2022, 12 (3): 389.
- [12] Zhang R Z, Ma Y L, Liu D Y, et al. Dependence of mechanical properties and microstructures of 2195 Al-Li alloy on cold and hot deformation [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (2): 129-136.

(下转第 209 页)