文章编号: 1004-0609(2013)06-1536-06

基于激光预焊芯板夹层的超塑成形/扩散连接先进工艺

王大刚,陈明和,王 宁,谢兰生

(南京航空航天大学 机电学院,南京 210016)

摘 要:针对传统多层空心整体结构在超塑成形/扩散连接(SPF/DB)工艺过程中存在的中心夹层焊接可靠性差的关键工艺问题,以某飞行器 TC4(T-6AI-4V)钛合金舵体四层空心复合整体结构为对象,提出了激光预焊芯板夹层的超塑成形/扩散连接新工艺。基于有限元软件模拟仿真分析及相应的试验研究,采用激光预焊芯板夹层的 SPF/DB 先进工艺,进行某飞行器 TC4 钛合金四层空心复合整体舵体零件的研制。结果表明:运用 SPF/DB 新工艺,在 920 ℃、真空度为 5×10⁻³ Pa、最大气压压力为 1.2 MPa 条件下超塑成形/扩散连接成形出合格的舵体零件,其焊合率达 95%以上,壁厚分布均匀性大于 90%,晶粒尺寸长大控制在 35%以内。 关键词: TC4 钛合金;激光焊接;超塑成形;扩散连接;有限元模拟;舵体 中图分类号: TG457.19 文献标志码: A

Advanced technology of superplastic forming and diffusion bonding with laser pre-welding core sheets

WANG Da-gang, CHEN Ming-he, WANG Ning, XIE Lan-sheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In view of the traditional multilayer hollow structure superplastic forming and diffusion bonding (SPF/DB) process which leads to a poor reliability of welding core interlayer, a new method based on laser pre-welding for core layers was raised up for the aircraft rudder of four TC4 (Ti-6Al-4V) titanium alloy layers with composite hollow structure. With the experimental study and corresponding finite element simulation analysis carried out, a forming method of the four layers aircraft rudder body part was developed based on the new SPF/DB process of laser pre-welding core sheets. The results show that: adopting the new SPF/DB technology under the conditions that at the temperature of 920 °C, vacuum degree of 5×10^{-3} Pa, and the maximum pressure of 1.2 MPa, the rudder body part is qualified reaching a welding rate above 95% and wall thickness distribution uniformity greater than 90%,and controlling the grain size growth in 35%.

Key words: TC4 titanium alloy; laser welding; superplastic forming; diffusion bonding; finite element simulation; rudder

轻量化、高可靠性是现代航空航天飞行器的发展 趋势,整体结构代替传统的多部件组合结构是促进其 实现的有效途径。SPF/DB 技术能够实现飞行器异形 件一次整体精密成形,从而减轻结构质量,降低生产 成本,实现结构设计与制造的灵活性,尤其在多层板 结构的制造方面具有很大优越性,为这一发展趋势提 供了可能。但是传统的 SPF/DB 工艺存在一系列问题 和局限性:止焊剂图形制备困难,易导致连接不充分 或者气路堵死,成形零件晶粒粗大等。英国和俄罗斯 等国研究者分别采用点滚焊来焊接芯板,该方法所得 焊缝宽度大,焊缝边缘呈锯齿状且不连续,在超塑成 形过程中容易导致板料破裂^[1-8],故急需寻求一种更好

收稿日期: 2012-09-13; 修订日期: 2012-11-18

通信作者: 陈明和, 教授; 电话: 025-84892508; E-mail: meembchen@nuaa.edu.cn

的方法来弥补传统工艺的不足。

激光焊接具有能量密度高、效率高、精度高和操 作方便等优势,而且所得焊缝窄、热影响区及焊接变 形小,适用于多层板 SPF/DB 工艺芯板预焊^[9-12]。近 两年来,已有不少学者将激光焊接技术引入到 SPF/DB 中,YAN 等^[13]研究了 5083 铝合金三层板 LBW/SPF (Laser beam welding,简称 LBW)的成形;QU 等^[14]研 究了 Inconel718 合金三层圆柱形加强结构 LBW/SPF 的成形;李保永^[15]研究了 TA15 钛合金多层结构 LBW/SPF/DB 工艺;曲凤盛等^[16]研究了 GH4169 高温 合金三层板结构的 LBW/SPF 组合技术^[13-16],但都仅 限于基础研究,所研究零件结构比较简单,且对 TC4 钛合金,以往学者只限于对其激光焊缝微观组织及超 塑性行为进行研究,并未对整套 LBW/SPF/DB 工艺进 行研究。本文作者利用激光焊接芯板,结合 SPF/DB 工艺研究了某 TC4 钛合金舵体复杂结构的成形工艺。

1 实验

本实验所用TC4 钛合金细晶板材面板和芯板厚度 分别为 1.0 和 0.6 mm。其主要化学成分见表 1, 原始 显微组织如图 1 所示,常温下的力学性能见表 2。实 验前先用丙酮溶液清洗板料,再用 HF、HNO₃、H₂O(体 积比 1:3:6)混合酸溶液清洗 30 s,去除表面氧化膜。



图1 TC4 钛合金的原始显微组织

Fig. 1 Original microstructure of TC4 titanium alloy

表1 TC4 钛合金的主要化学组成

 Table 1
 Chemical components of TC4 titanium alloy (mass fraction, %)

Ti	Al	V	Fe	С	N	Н	0
Bal.	5.5-6.5	3.5-4.5	0.3	0.1	0.05	0.001 5	0.2

表 2 常温下 TC4 钛合金的力学性能

Table 2Mechanical properties of TC4 titanium alloy at roomtemperature

$\sigma_{0.2}/\mathrm{MPa}$	σ _b /MPa	E/GPa	δ /%
942	962	112	12

芯板的激光熔焊在 BD-JG-600 型 Nd-YAG 激光发 生器上进行,激光器的最大输出功率为 500 W。焊接 时板料由合适的夹具夹持,正反两面均采用高纯氩气 保护。设计正交试验来确定两层板激光熔焊的最优工 艺参数,激光焊接接头的剪切强度测试在电子万能试 验机上进行。舵体超塑成形/扩散连接实验在超塑成 形/真空扩散连接机床上进行,其示意图如图 2 所示。 实验过程中真空度保持在 5×10⁻³ Pa,待模具温度加 热到 920 ℃时保温 30 min,开始向芯板之间通入高纯 氩气,气压加载曲线由有限元软件 ABAQUS 模拟得出。

对成形后舵体扩散连接部分进行微观组织分析, 金相试样经打磨抛光后用 5%HF+10%HNO₃(体积分 数)水溶液侵蚀腐蚀 10 s,采用 OLYMPNS-GX51 显微 镜观察金相组织。



图 2 舵体超塑成形/扩散连接工艺示意图

Fig. 2 Schematic illustration of SPF/DB process for rudder: 1—Cavity die; 2—Face sheet; 3—Core sheet; 4—Laser welding position

2 结果与分析

2.1 芯板激光熔焊

实验选取焦点在板料上表面以下 0.3 mm 处,通 过设计的正交试验,在不同的激光焊接参数组合下分 别焊接了剪切试样,对接头进行了室温单拉实验,根 据接头的剪切强度(剪切断裂)或抗拉强度(拉伸断裂) 以及外观形貌,确定了两层板激光熔焊的最优工艺参 数如下:电流 110 A,脉宽 12 ms,频率 12 Hz,焊接 速度 150 mm/min,由此组参数焊接的接头强度达 780 MPa,为母材抗拉极限的 81%。

Ė

根据已确定的激光焊接参数,进行两层芯板的激 光穿透焊接,激光焊接后芯板照片如图3所示。由图 3可以看出,焊缝外观良好,表面呈银白色,几乎没 有氧化,焊缝热影响区未产生微裂纹,且整块板在合 适的夹具作用下没有翘曲变形,保证了后续实验的顺 利进行。



图 3 激光焊接后芯板照片

Fig. 3 Photo of core sheets after laser welding

2.2 舵体超塑成形/扩散连接

在本实验中,上、下两层面板在680 ℃已预先成 形,其照片如图4所示,仅需进行芯板的超塑成形, 在芯板超塑成形的同时完成芯板和面板以及芯板直立 筋之间的扩散连接。与传统方法相比,不仅省去了面 板超塑成形这一步,减少了板料在高温环境中的时间, 有效防止了板料晶粒尺寸的严重长大,能够保证成形 后零件的力学性能,而且只需要一个通气管路,简化 了气路设计。

成形压力对控制多层结构的外形十分重要,压力 的主要作用是确保芯板在超塑成形时完全贴膜以及贴 膜后与面板的扩散连接,合理控制气压和时间,可使



图 4 预成形面板照片 Fig. 4 Photo of face sheet after post forming 成形后的多层结构具有良好外观形状及均匀的壁厚分布,芯板超塑成形气压的加载曲线由有限元软件 ABAQUS 模拟得出,模拟分析所用本构关系模型如下:

$$=A\sigma_{\rm eq}^n\tag{1}$$

其中: ἐ 为单轴等效蠕变应变速率; σ_{eq} 为米塞斯各 项同性情况下的等效应力; A、n 由材料、温度等因素 决定,在本实验成形条件下, A=6.58×10⁻⁶, n=1.754。 模拟过程中控制目标应变速率为 9.8×10⁻⁴ s⁻¹。图 5 所示为气压加载模拟曲线以及修正后曲线; 图 6 所示 为芯板超塑成形最终厚度分布模拟结果。由图 6 可知, 模拟成形构件大部分区域厚度在 0.45~0.60 mm,说明 成形件壁厚是相对均匀的。

SPF/DB 成形后的舵体零件照片如图 7 所示。在 该工艺条件下成形的零件贴膜完全且外观质量良好, 表面不存在沟槽、坍塌等传统工艺中常见的缺陷,表 明 SPF/DB 所选取的参数较为合理。



图 5 SPF/DB 工艺中压力一时间关系曲线





图 6 厚度分布云图 Fig. 6 Cloud picture of thickness distribution



图7 成形后舵体照片

Fig. 7 Photo of rudder after forming

2.3 成形零件壁厚分布

超塑成形质量优劣的一个重要指标是成形零件是 否具有均匀一致的壁厚分布。图8所示为沿图7所示 两条线所截取的舵体剖面图。从图8可以看出,舵体 内部加强筋完全直立,上下对称,没有扭曲或者弯曲 现象,激光焊接处也不存在撕裂现象。表4所列为成 形后芯板各部位实测厚度(由于芯板厚度无法直接测 量,通过测量面板和芯板总厚度,然后减去面板厚度 1 mm)与模拟厚度分布对照。对表4中数据进行分析, 可知超塑性成形后的芯板壁厚较均匀,平均尺寸为 0.47 mm,直立加强筋扩散连接部分平均壁厚为 0.81 mm,实测厚度与模拟厚度最大相差 0.08 mm,说明模 拟结果与实测结果有很好的一致性,为 SPF/DB 工艺 提供了非常有价值的参考。另外,模拟结果与实测结 果同时显示,加强筋附近的壁厚小于两加强筋中间位 置的壁厚,这是由于靠近加强筋位置的材料在超塑成



图8 舵体局部横截面实物图

Fig. 8 Photo of partial cross sections of rudder

耒 ₄	舵休局部厚度分布	
12.4	心乎ற丽疗/之力"	

Table 4Thickness distribution of rudder shown in Fig. 8

Location No	Simulated	Measured	
Location no.	thickness/mm	thickness/mm	
1	0.46	0.46	
2	0.52	0.46	
3	0.45	0.43	
4	0.82	0.90	
5	0.44	0.44	
6	0.50	0.48	
7	0.42	0.44	
8	0.76	0.78	
9	0.41	0.42	
10	0.49	0.47	
11	0.50	0.46	
12	0.45	0.47	
13	0.42	0.49	
14	0.39	0.47	
15	0.72	0.71	
16	0.42	0.50	
17	0.42	0.46	
18	0.43	0.47	
19	0.80	0.84	
20	0.49	0.53	

形过程中最后贴膜,在拉伸和剪切共同作用下,其塑 性变形量较大,故相对于其他位置减薄较大,模拟结 果显示芯板最大减薄率为43%,在可接受的范围内。

2.4 扩散连接微观组织分析

图 9 所示为直立筋与面板交汇处金相组织。从图 9 可以看出: 芯板与芯板之间(即直立筋)以及芯板与面



图 9 直立筋与面板交汇处微观组织

Fig. 9 Microstructure at junction of vertical rib and face sheet



图 10 扩散连接各部位的微观组织

Fig. 10 Microstructures of each part of diffusion bonding shown in Fig. 9: (a) Zone a; (b) Zone b; (c) Zone c; (d) Zone d

板之间已形成较好扩散连接,只是在芯板与面板交汇 处未完全贴合,形成一个截面为三角形的未闭合区域。 其原因是此区域材料在超塑性成形过程中最后贴膜, 且直立筋与面板在此处形成直角,需要更大的压力才 能成形完全,因此,可以考虑在最终成形时将压力提 高到 1.5 MPa,尽量减小此未闭合区域。此外,在直 立加强筋之间即激光焊缝处也存在两条未闭合区域, 需要提高成形压力以便消除此缺陷,对于这两处问题 有待于进一步研究解决。

图 10 所示为图 9 中各部位的显微组织放大照片。 图 10(a)和(b)所示为面板与芯板焊缝金相组织,可以看 出,绝大部分接合面都互相融合,扩散连接在一起, 只有在直立筋与面板交汇处存在少量未闭合空洞;图 10(c)和(d)所示为芯板与芯板之间的焊缝金相组织,从 图中已找不到空洞的存在,说明焊合效果很好。国内 外对扩散连接焊合率还没有完善的检测手段,目前主 要通过金相组织观察焊缝,然后统计焊合率。本文作 者通过对零件纵向和横向各部位等距离取样观察焊 缝,结果显示整体焊合率可达 95%。与材料的原始组 织相比(见图 1)可以看出,成形后材料晶粒明显长大, α 晶粒尺寸增大了 35%,但比较此工艺与传统的工艺 可知^[17](α 晶粒尺寸增大了 69%),由于材料在高温环 境中的时间大幅缩短,晶粒长大现象得到了很好控制, 这对成形后零件的力学性能有很大改善。

3 结论

1) 在 920 ℃、真空度为 5×10⁻³ Pa、最大气压压 力为 1.2 MPa 情况下超塑成形/扩散连接成形得到合格 的舵体零件,验证了芯板激光焊接代替扩散连接工艺 的可行性,从而可以改进传统 SPF/DB 工艺中存在的 一系列问题。

2) 有限元模拟可以获得优化的气压加载曲线,为 实际超塑成形的压力控制提供重要依据,从而提高成 形精度,并有利于提高成形件的质量。壁厚分布模拟 结果也为 SPF/DB 工艺提供了非常有价值的参考。

3) 通过正交实验确定了厚度为 0.6 mm 的两层 TC4 板料激光熔焊的工艺参数如下:离焦量-0.3 mm, 电流 110 A,脉宽 12 ms,频率 12 Hz,焊接速度 150 mm/min。

 4)成形零件晶粒尺寸较传统方法晶粒尺寸小,成 形后零件力学性能较传统方法好,总体焊合率可达
 95%。

REFERENCES

- [1] 王宝仁,纪文海. TC4 钛合金超塑成形/扩散连接组合工艺应用研究[J]. 航空学报,1989,10(6):B309-B314.
 WANG Bao-ren, JI Wen-hai. The research of superplastic forming and diffusion bonding for Ti-6A1-4V alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1989, 10(6):B309-B314.
- [2] 于卫新,李淼泉,胡一曲.材料超塑性和超塑成形/扩散连接 技术及应用[J].材料导报,2009,23(6):8-14.
 YU Wei-xin, LI Miao-quan, HU Yi-qu. Superplasticity and application of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Materials Review, 2009, 23(6): 8-14.
- [3] 郭和平,曾元松,韩秀全,李志强.飞机钛合金整体结构的超 塑成形/焊接组合工艺技术[J]. 航空航天焊接专题,2008,11: 41-45.
 GUO He-ping, ZENG Yuan-song, HAN Xiu-quan, LI Zhi-qiang.

Superplastic forming/welding combination technology of titanium alloy integrated structure of aircraft[J]. Welding Technology in Aeronautics and Astronautics, 2008, 11: 41–45.

[4] 韩文波, 张凯峰, 王国锋. Ti-6Al-4V 合金多层板结构的超塑成形/扩散连接工艺研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(6): 29-32.

HAN Wen-bo, ZHANG Kai-feng, WANG Guo-feng. Superplastic forming and diffusion bonding for multilayer structure of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(6): 29–32.

- [5] LI Zhi-qiang, GUO He-ping. Application of superplastic forming and diffusion bonding in the aerospace industry. Materials Science Forum[J]. 2005, 475: 3037–3042.
- [6] HAN Wen-bo, ZHANG Kai-feng, WANG Guo-feng. Superplastic forming and diffusion bonding for honeycomb structure of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183: 450–454.
- [7] YOON J H, LEE H S, YI Y M. Finite element simulation on superplastic blow forming of diffusion bonded 4 sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201: 68–72.
- [8] SANDERS D G, RAMULU M. Examination of superplastic forming combined with diffusion bonding for titanium: Prspective from experience[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 13: 744–752.
- [9] CHENG Dong-hai, HUANG Ji-hua, ZHAO Xing-ke, ZHANG Hua. Microstructure and superplasticity of laser welded Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31: 620–623.
- [10] 程东海, 黄继华, 林海凡, 赵兴科, 张 华. 钛合金激光焊缝

的超塑性变形行为及显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 67-71.

CHENG Dong-hai, HUANG Ji-hua, LIN Hai-fan, ZHAO Xing-ke, ZHANG Hua. Superplastic deformation behavior and microstructures of laser welded titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 67–71.

- [11] 邹世坤,汤 昱, 巩水利. 钛合金薄板激光焊接技术研究[J]. 焊接技术, 2003, 32(5): 16-18.
 ZOU Shi-kun, TANG Yu, GONG Shui-li. Study on technology of laser welding titanium alloy sheets[J]. Welding Technology, 2003, 32(5): 16-18.
- [12] 杨 静,程东海,黄继华,张 华,赵兴科,孙 占. TC4 合 金激光焊接工艺参数与接头组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(17): 15-18.
 YANG Jing, CHENG Dong-hai, HUANG Ji-hua, ZHANG Hua, ZHAO Xing-ke, SUN Zhan. Effect of laser welding parameters

on microstructure and mechanical properties of TC4 welded joints[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(17): 15–18.

- [13] YAN H H, ZHANG K F. Processing of multi-sheet structures of an aluminum alloy by laser welding/superplastic forming[J]. Materials and Design, 2010, 31: 2220–2223.
- [14] QU F S, LU Z, XING F , ZHANG K F. Study on laser beam welding/superplastic forming technology of multi-sheet cylinder sandwich structure for Inconel718 superalloy with ultra-fine grains[J]. Materials and Design, 2012, 39: 151–161.
- [15] 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,2010:1-57.
 LI Bao-yong. LBW/SPF/DB Processing of multi-sheet structure for TA15 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 1-57.
- [16] 曲凤盛,张凯锋,吕宏军. GH4169 高温合金多层板结构的激 光连接/超塑成形组合技术[J]. 航空材料学报, 2009, 25(4): 27-32.

QU Feng-sheng, ZHANG Kai-feng, LÜ Hong-jun. LBW/SPF complex forming for multi-sheet structure of GH4169 superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 25(4): 27–32.

[17] 门向南. TC4 三层板结构超塑成形/扩散焊接工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010: 52-57.
MEN Xiang-nan. Research on superplastic forming and diffusion bonding for three-sheet structure of TC4 titanium alloy[D].
Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010: 52-57.

(编辑 龙怀中)