

引文格式: 武永, 周贤军, 吴迪鹏, 等. TC31 钛合金四层舵翼超塑成形 / 扩散连接工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(17): 34-40.
WU Yong, ZHOU Xianjun, WU Dipeng, et al. Superplastic forming and diffusion bonding process for four-sheet air rudder of TC31 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(17): 34-40.

TC31 钛合金四层舵翼 超塑成形 / 扩散连接工艺研究

武 永, 周贤军, 吴迪鹏, 汤国伟, 陈明和

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 为研究 TC31 四层舵翼的超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 工艺, 开展了高温拉伸、有限元仿真和舵翼件试验研究。结果表明, TC31 钛合金在 920℃ 和 0.001s^{-1} 应变速率下, 延伸率为 639%, 展现了良好的超塑性能; 四层舵翼超塑成形 / 扩散连接的 ABAQUS 仿真结果表明, 最大减薄处位于预置块边缘单胞的圆角处芯板上, 最大减薄率为 67.5%, 最大真应变为 1.04; 在 920℃, 利用 0.2MPa 背压和芯板内阶梯加压方法, 成功制备了无表面凹陷的 TC31 四层板舵翼件; 在 920℃ 和 3MPa 压力下扩散 2h, 扩散连接界面质量良好, 焊合率达到 97% 以上。

关键词: TC31 钛合金; 超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB); 有限元仿真; 四层舵翼; 壁厚减薄率

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.17.034



武 永

讲师, 工学博士, 研究方向为钛合金超塑成形 / 扩散连接工艺及装备、高温成形多尺度建模。

超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 是利用金属材料超塑温度与扩散连接温度相近的特点进行一体成形的加工方法^[1-2], 可制备出重量轻、性能好、结构复杂的中空构件^[3-4], 大幅降低部件的重量以及制造成本^[5]。钛合金的重量轻、强度高、高温成形性能好, 具备优秀的扩散性能, 是进行超塑成形 / 扩散连接工艺的理想金属材料^[6-8]。飞行器舵翼对重量、强度和热性能的要求较高^[9], 采用钛合金中空结构具有较大的优势。

SPF/DB 工艺可成形出包含密封腔体的多层中空结构, 如飞行器空心结构舵翼件^[10], 具有较广阔的应用前景, 国内外学者对此均进行了深入的研究。Salishchev 等^[11]采用超细晶 Ti-6Al-4V 钛合金在 750~800℃ 下制备了复杂的四层中空结构, 直立

筋成形质量好, 无明显缺陷。闫亮亮等^[12]利用有限元仿真优化了 TA15 钛合金四层结构超塑成形 / 扩散连接工艺参数, 在 930℃ 和 2MPa 压力下扩散连接 1.25h, 获得良好的扩散连接界面, 最终成功制备了四层方盒样件。刘雨生等^[13]研究了 Ti₂AlNb 金属间化合物中空结构超塑成形 / 扩散连接工艺, 在 940℃ 和 10MPa 压力下扩散连接 3h, 可获得良好的扩散连接界面质量, 并得到三层和四层空心结构件。

飞行器四层板中空舵翼是超塑成形 / 扩散连接工艺制造的一种典型结构, 由面板和内部加强筋组成。考虑到其转轴的传力, 需在舵翼内增加传力结构预置块, 这对舵翼的超塑成形 / 扩散连接工艺有了更高要求。秦中环等^[14]在 TA15 四层结构中增

加了区域增强块,在温度 920℃、气压 2MPa 下保压 1h 制备了区域增强四层结构,焊接率在 80% 以上。为提高四层中空舵翼超塑成形/扩散连接效率,王大刚等^[15]研究了芯板激光预焊的四层结构舵翼超塑成形/扩散连接工艺,显著提高了成形效率和舵翼芯板的焊接可靠性,减弱了晶粒尺寸粗化的影响。针对四层中空结构舵翼件的成形缺陷,李保永等^[16]分析了工艺参数对 TA15 四层板表面凹陷的影响,认为利用增大蒙皮与芯板厚度比值、在蒙皮处增加背压等方案可抑制表面沟槽缺陷。经过各国学者的研究,已基本探索出 TC4、TA15 等钛合金四层中空结构舵翼的超塑成形/扩散连接工艺解决途径,而短时耐高温的 TC31 钛合金等新材料的高强度、焊接脆性等为其空心舵翼研制带来困难。

TC31 钛合金名义成分为 Ti-6.5 Al-3Sn-3Zr-3Mo-3Nb-1W-0.2Si,在高温下具有良好的大载荷持久和蠕变性能,在 650~700℃ 下仍具有 550~700MPa 的抗拉强度,335~500MPa 的屈服强度,适用于短时高温工作的航空航天结构件^[17],其在 900℃ 以上高温具有良好的超塑性,是制造耐高温四层空心舵翼件的良好材料^[18]。本文研究 TC31 钛合金四层空心舵翼超塑成形/扩散连接的有限元仿真、制造工艺、舵翼件的壁厚及微观组织,为 TC31 高温钛合金空心舵翼的超塑成形/扩散连接工业化应用提供理论参考。

试验方法

1 试验材料

试验采用宝钛公司生产的厚度为 1.2mm 和 0.8mm 的 TC31 板料,其化学成分符合 GB/T 3620.1—2016,通过单向拉伸测得室温抗拉强度 1186MPa,延伸率约 4%。

TC31 钛合金在 900~950℃ 下具有良好的超塑性和扩散性能。考虑

到过高温对组织性能的不利影响和扩散连接效率,选择在 920℃ 下进行四层空心结构舵翼的超塑成形/扩散连接工艺研究^[19]。TC31 钛合金在 920℃ 下不同应变速率的流动应力曲线如图 1 所示。在应变速率 $0.001s^{-1}$ 下,延伸率达到了 639%,最大应变为 2.0,稳态流动应力为 38.3MPa。

2 有限元仿真

采用 ABAQUS 仿真软件模拟了 TC31 钛合金四层舵翼的气胀成形,舵翼目标件展长 422mm,弦长 738mm,最大厚度 44mm,压边宽度 30mm,如图 2 (a) 所示。舵翼芯板为典型的超塑成形/扩散连接的四层方格结构,网格边长 55mm 到 65mm 不等,布局如图 2 (b) 所示,画线为扩散连接边界,扩散焊区域宽度为 4mm。舵翼件的面板厚度为 1.2mm,芯板厚度为 0.8mm。

考虑到舵翼结构的对称性,只建立舵翼单侧有限元仿真模型。舵翼件包含承力预置块,其制造工序可以描述为:舵翼面板超塑气胀成形—芯板扩散连接—面板切割处理—面板、芯板和预置块的装配安装—舵翼芯板超塑气胀成形—舵翼芯板、面板、预置块的扩散连接。按照舵翼制造工序,需要两次加热成形,分别对面板超塑气胀成形和芯板超塑气胀成形进行仿真,模拟仿真模型如图 3 所示。

图 3 (a) 为舵翼面板超塑气胀成形仿真模型,模具设置为刚体,直接在面板上施加压力,压边区域固定。图 3 (b) 为芯板超塑气胀成形仿真模型,设置面板和预置块为刚体,芯板网格线区域为扩散焊区域,施加固定约束,在方格区域施加压力载荷,压边区域固定。面板和芯板的网格类型为 S4R,单元尺寸 2mm。为准确

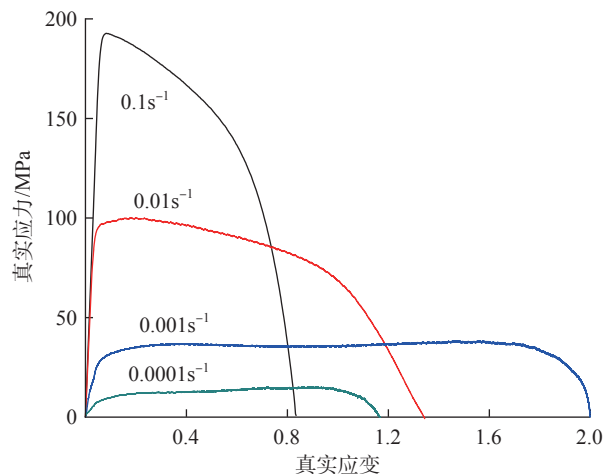


图 1 TC31 在 920℃ 的应力-应变曲线

Fig.1 True strain-stress curve of TC31 at 920℃

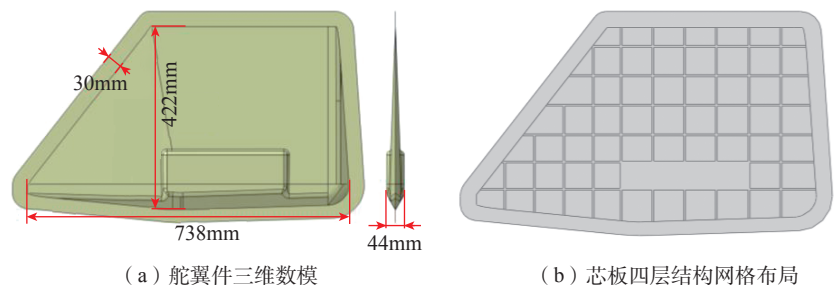


图 2 舵翼件结构

Fig.2 Structure of rudder wing part

仿真应变最大区域的壁厚分布,选择芯板最大变形区域进一步细分网格进行有限元仿真分析,如图3(c)所示,网格单元为S4R,尺寸为0.5mm,模型长69mm,宽68mm,最大深度为22mm。在ABAQUS仿真模型中,选择通用摩擦,摩擦系数为0.2。

根据拉伸结果,选择应变速率 $0.001s^{-1}$,采用ABAQUS的应变速率控制功能优化气胀加载曲线,得到的气压加载曲线如图4所示。

3 四层舵翼件超塑成形/扩散连接试验

利用南京航空航天大学研制的NUAA-150热成形机床,开展四层舵翼件的超塑成形/扩散连接试验,其气压控制精度为0.05MPa。首先对TC31芯板毛坯进行切割和酸洗保护处理,经过酸洗加工出扩散焊区域凸台;非焊接区域喷涂隔离剂,装配后装入不锈钢包套中,氩弧焊封闭并抽真空,放入热成形炉中扩散连

接,扩散压力3MPa,扩散时间2h;采用氩弧焊将TC31两个面板封焊,放入舵翼模具中,加热至高温,按照图4所示加载路径加压成形;取出扩散焊芯板和超塑面板,切割面板封焊带,与预置块一起酸洗,装配和封焊,充入氩气保护,放入热成形炉中加热至成形温度,按照气压加载路径完成超塑成形/扩散连接试验,待热成形机床冷却,取出四层舵翼件。为防止面板的典型凹槽缺陷,在超塑成形/扩散连接过程中加载背压。图5为四层舵翼件的超塑胀形气压加载曲线与背压加载曲线。为保证复杂四层舵翼件超塑成形过程的可靠性,在图4中芯板气胀压力曲线的基础上,于气压0.8MPa时增加保压时间0.5h,然后再增加至2MPa,并保压2h。开始阶段,背压加载至0.1MPa,后增加至0.2MPa,并保压至成形结束。

4 舵翼壁厚和组织分析

为验证四层空心舵翼件成形质

量,对舵翼件进行壁厚分布和微观组织分析。采用游标卡尺和超声测厚仪对舵翼件面板的壁厚分布进行测量。分别对原始板材、扩散焊接焊缝取样进行金相显微分析。采用线切割取下显微分析试样,经过800#、1000#、2000#砂纸打磨后进行机械抛光和Kroll试剂腐蚀,利用江南永新NM910显微镜进行金相观察。

结果与讨论

1 有限元仿真结果

图6为920℃采用图4气压加载路径下,四层舵翼件面板和芯板超塑气胀成形的仿真结果。图6(a)中,超塑气胀成形后,舵翼面板贴膜良好,最大变形在预置块区域的圆角处,最小厚度为0.96mm,减薄20%。因预置块区域深度较大,在超塑成形中发生了不同程度的减薄,厚度分布在0.96~1.12mm之间。图6(b)为舵翼芯板超塑成形壁厚分布结果,因

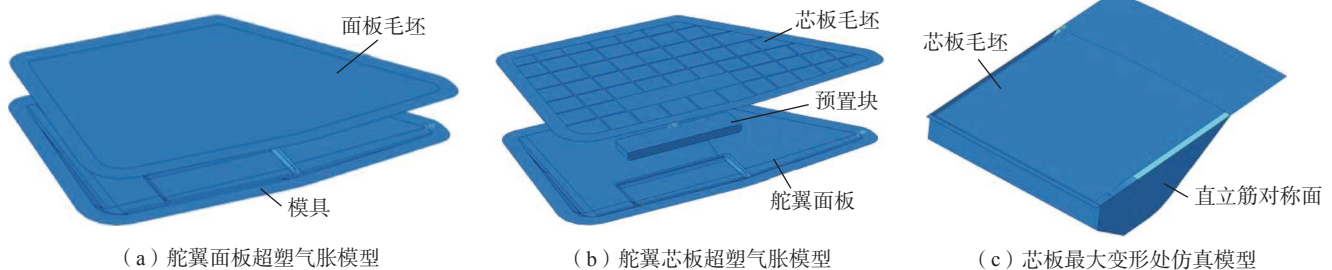


图3 舵翼超塑气胀仿真模型

Fig.3 Simulation model of rudder wing superplastic air expansion

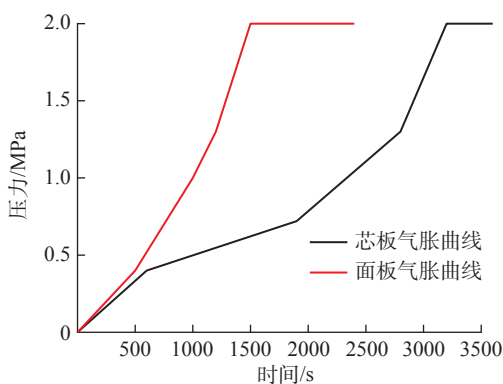


图4 仿真优化气胀压力曲线

Fig.4 Optimized air expansion pressure curve by simulation

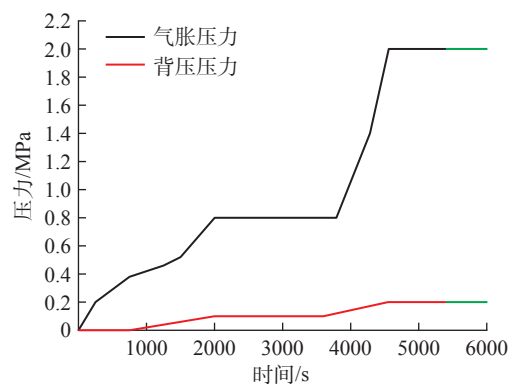


图5 试验芯板气压加载曲线

Fig.5 Pressure loading curve of core plate in experiment

四层结构的筋条限制,筋条圆角处变形量较大,四层结构直立筋成形较好。由于各四层结构单胞区域的深度不同,导致各单胞的变形量不同,最大变形量在靠近预置块的单胞圆角区域。

图7为最深区域单胞的仿真结果,芯板板料贴合模具程度好,变形最大区域在靠近预置块的圆角区域。尤其随着胀形气压加大,材料在圆角区域发生集中减薄变形,最薄壁厚为0.26mm,减薄率为67.5%,对应的真应变量为1.04。根据图1中TC31钛合金的高温变形行为,在 $0.001s^{-1}$ 拉伸曲线范围内,芯板板料发生变形,不会集中减薄破裂。而在实际加工中,板料由于前期受压,部分非扩散焊区域可能存在粘连,气胀时会出现突然撕裂的情况,当撕裂应变速率达到 $0.1s^{-1}$ 时,则会发生破裂。这对舵翼件超塑成形/扩散连接工艺仿真的精确性提出要求,需要根据仿真结果进一步调整成形工艺参数,再用于试验生产中。

图8为有限元仿真得到的四层结构舵翼的面板和芯板的壁厚分布图。图8(a)为沿着面板弦长方向测量的壁厚分布,沿着测量线的最薄壁厚为1.04mm,减薄率为13.3%,在预置块附近。图8(b)为沿着展长方向测量的壁厚分布,随着面板深度的增加,面板的厚度减少,在接近预置块的圆角区域,壁厚为1.16mm,减薄率为3.3%。图8(c)中四层板芯板的壁厚变化较大,其中预置块区域的四层板厚度最小,为0.28~0.3mm,最大壁厚减薄率达到了60%以上。图8(d)中,靠近预置块区域的芯板减薄最严重,达到了0.55mm,减薄率为31.3%。随着舵翼厚度增加,模具的深度增加,面板和芯板的变形量增加,材料减薄剧烈程度增加。仿真结果表明,四层结构中空舵翼面板的壁厚减薄并不大,而芯板的减薄较严重,且壁厚变化也相对剧烈。

将图8中仿真的面板和芯板相加,得到了舵翼件四层板材的合计壁厚分布,如图9所示。舵翼件的最薄区域在预置块圆角附近区域,最小壁厚1.31mm,减薄率为34.5%。

2 试验结果

图10为成形的TC31四层板舵

翼试验件,试验件外形完整,在0.2MPa的背压作用下,成形件表面无明显凹陷。

图11为通过超声测厚仪以及千分尺测量得到的气胀后的面板厚度分布,仿真能够较准确地预测预置块区域的厚度变化。弦长方向上

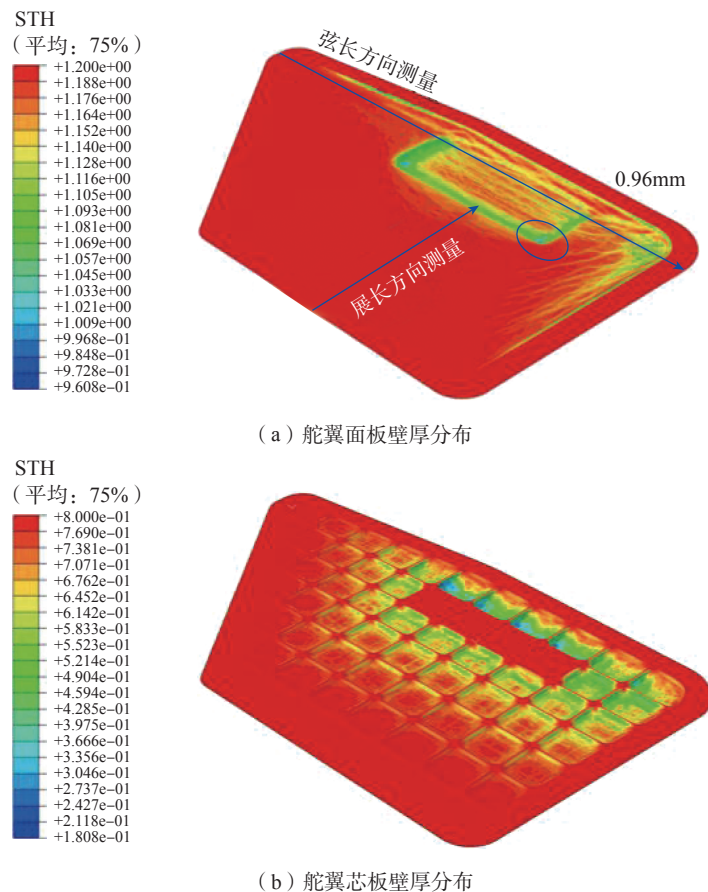


图6 四层舵翼件面板和芯板仿真结果

Fig.6 Simulation results of shell and four-sheet core plate forming

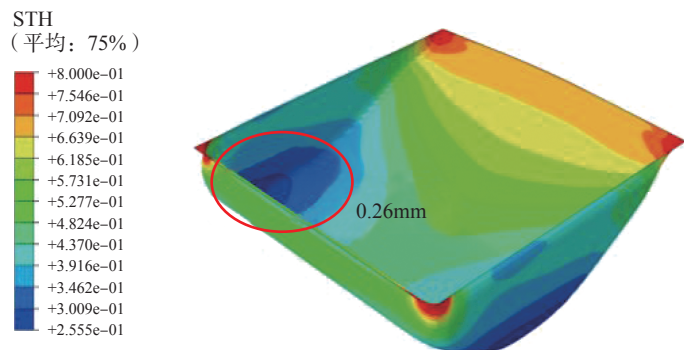


图7 芯板最大减薄单胞的壁厚分布仿真图

Fig.7 Thickness distribution of grid cell with the largest thinning rate

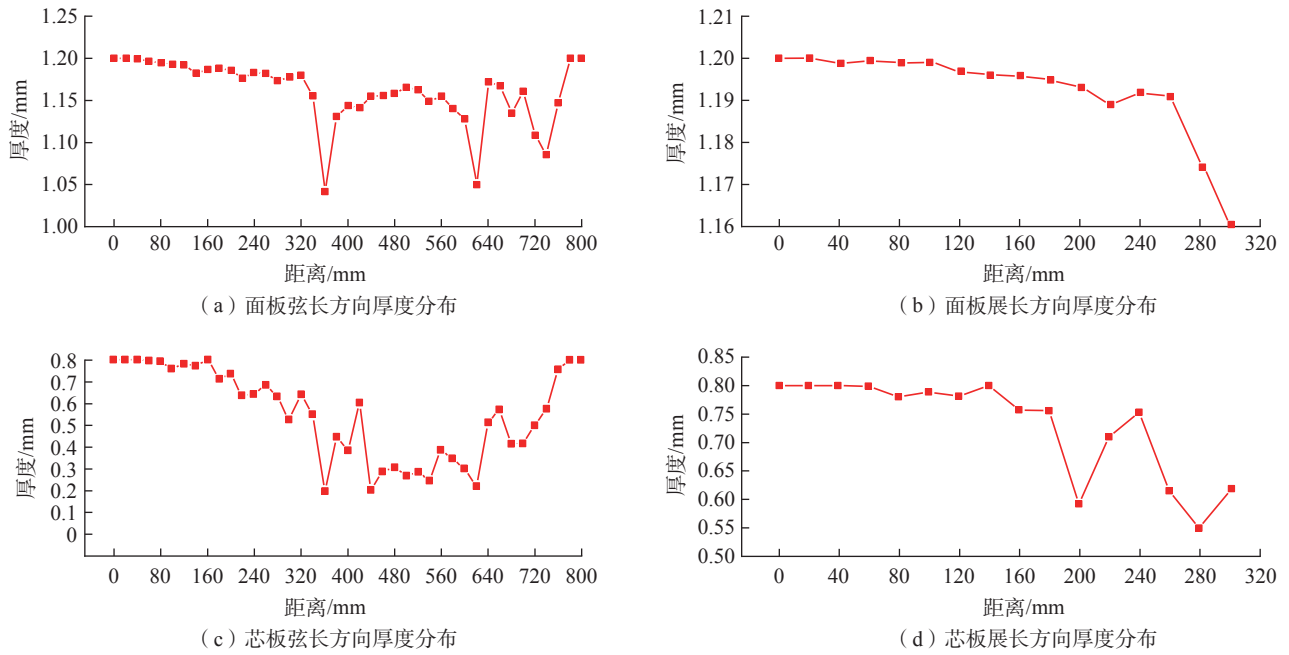


图8 有限元仿真面板和芯板厚度分布
Fig.8 Thickness distribution of shell and four-sheet core plate in simulation

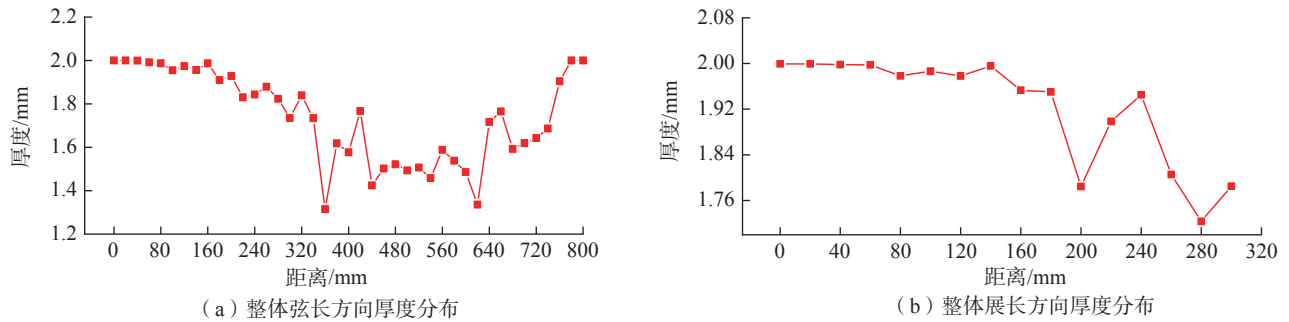


图9 仿真四层板舵翼整体厚度分布图
Fig.9 Thickness distribution of four-sheet rudder wing in simulation

部分区域厚度差异较大,试验中的厚度变化量为 0.1mm,而仿真中厚度变化量为 0.02mm。其他区域内两者基本一致。

图 12 为四层板芯板网格扩散连接处的显微金相图片。图 12 (a) 为 TC31 原始板材厚度截面 500 倍金相图,其晶粒呈现明显的轧制拉长形态。图 12 (b) 为扩散连接区域的厚度截面 50 倍金相图,视野中的焊缝长度为 2218 μm ,无可见未焊合缝隙。图 12 (c) 为扩散焊接区域的厚度截面 500 倍金相图,观察区域为焊

接区域边缘,经过扩散连接后, α 相晶粒发生明显长大,形状为典型的等轴晶粒,晶粒尺寸为 12~20 μm 。在边缘右侧扩散连接焊缝区域焊接紧密,无明显孔洞。通过对图 12 (b) 中的焊缝区域进行检查,计算得到 TC31 板材焊合率达到 97% 以上。这说明 TC31 在 920 $^{\circ}\text{C}$ 下以 3MPa 压力下扩散 2h,能够得到几乎无缺陷的扩散连接接头。

结论

本文通过仿真与试验研究了



图 10 四层板舵翼成形结果
Fig.10 Experiment result of four-sheet rudder wing

TC31 四层板舵翼件超塑成形 / 扩散连接工艺研究,得出如下主要结论:

- (1) 通过高温拉伸试验测试 TC31

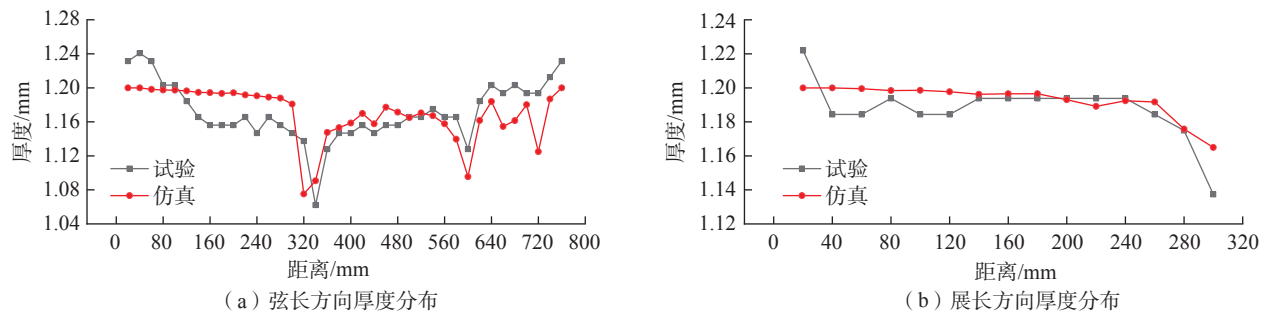


图 11 面板厚度对比图

Fig.11 Thickness distribution comparison of shell



(a) 原始板料500倍金相图片

(b) 焊缝区域500倍金相图片

(c) 焊缝区域500倍金相图片

图 12 母材以及扩散连接接头显微金相图片

Fig.12 Metallographic images of original material and diffusion bonding joint

钛合金在 920°C 下不同应变速率高温变形行为,表明 TC31 最佳应变速率为 0.001s^{-1} ,最大延伸率为 639%。

(2) 舵翼面板在预置块圆角区域减薄最大,约 20%,芯板在预置块附近的网格最深,减薄最大,为 67.5%。开展了中空舵翼件的超塑成形/扩散连接成形试验,在面板施加 0.2MPa 背压,成形得到了四层舵翼结构。

(3) TC31 钛合金在 920°C 温度和 3MPa 压力下扩散 2h,晶粒尺寸在 $12\sim 20\mu\text{m}$ 之间,焊接界面无明显缺陷,扩散焊合率 97% 以上。

参考文献

- [1] 张凯锋,王国峰. 先进材料超塑成形技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] WU Y, WU D P, MA J, et al. A physically based constitutive model of Ti-6Al-4V and application in the SPF/DB process for a

pyramid lattice sandwich panel[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(3): 1-17.

[3] 李志强,郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010, 53(8): 32-35.

LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(8): 32-35.

[4] 韩文波,张凯锋,王国峰. 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(6): 32-35.

HAN Wenbo, ZHANG Kaifeng, WANG Guofeng. Superplastic forming and diffusion bonding for multilayer structure of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005(6): 32-35.

[5] HEFTI L D. Innovations in the superplastic forming and diffusion bonded process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(2): 178-182.

[6] SANDERS D G, RAMULU M. Examination of superplastic forming combined with diffusion bonding for titanium: Perspective

from experience[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 13(6): 744-752.

[7] 李瑞婷,郭伟,朱颖,等. TC4 钛合金超塑成形研究现状及其发展展望[J]. 航空制造技术, 2012, 55(15): 91-94, 99.

LI Ruiting, GUO Wei, ZHU Ying, et al. Research status and development trend on superplastic forming of TC4 alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(15): 91-94, 99.

[8] MOSLEH A O, MIKHAYLOVSKAYA A V, KOTOV A D, et al. Experimental, modelling and simulation of an approach for optimizing the superplastic forming of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 262-272.

[9] 姚利兵,刘献伟,张鹏,等. 高强度钛合金导弹舵翼面设计制造技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 102-103.

YAO Libing, LIU Xianwei, ZHANG Peng, et al. Design and manufacture technology of high-strength titanium alloy rudder and wing on missile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 102-103.

[10] HEFTI L D. Advances in fabricating

superplastically formed and diffusion bonded components for aerospace structures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 13(6): 678-682.

[11] SALISHCHEV G A, GALEYEV R M, VALIAKHMETOV O R, et al. Highly superplastic Ti-6Al-4V sheet for superplastic forming and diffusion bonding[J]. Materials Technology, 2000, 15(2): 133-135.

[12] 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.

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.

[13] 刘雨生, 李萍, 王斌, 等. Ti₂AlNb 合金多层板结构超塑成形 / 扩散连接数值模拟及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 43-49.

LIU Yusheng, LI Ping, WANG Bin, et al. Numerical simulation and technical study on superplastic forming/diffusion bonding for multi-sheet structure of Ti₂AlNb alloy[J]. Journal of

Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 43-49.

[14] 秦中环, 李保永, 张凯锋, 等. 区域增强 TA15 四层结构 SPF/DB 工艺研究 [J]. 航天制造技术, 2016(6): 17-20.

QIN Zhonghuan, LI Baoyong, ZHANG Kaifeng, et al. SPF/DB processing and assessment for four-sheet structure of regional enhanced TA15 titanium alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(6): 17-20.

[15] 王大刚, 陈明和, 王宁, 等. 基于激光预焊芯板夹层的超塑成形 / 扩散连接先进工艺 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1536-1541.

WANG Dagang, CHEN Minghe, WANG Ning, et al. Advanced technology of superplastic forming and diffusion bonding with laser pre-welding core sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1536-1541.

[16] 李保永, 张铁军, 张凯锋, 等. 钛合金超塑成形 / 扩散连接四层结构表面沟槽控制方法研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(21): 63-67.

LI Baoyong, ZHANG Tiejun, ZHANG Kaifeng, et al. Research on control method of surface groove of titanium alloy SPF/DB four-

sheet structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(21): 63-67.

[17] 王小翔, 王伟琪, 马鸿海, 等. 700℃ 时高温高强 BTi-6431S 合金的组织与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 792-795.

WANG Xiaoxiang, WANG Weiqi, MA Honghai, et al. Microstructure and mechanical properties of high temperature and high strength BTi-6431S alloy at 700℃ [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 792-795.

[18] 吴迪鹏, 武永, 陈明和, 等. TC31 钛合金板材高温流变行为及组织演变研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 3901-3910.

WU Dipeng, WU Yong, CHEN Minghe, et al. High temperature flow behavior and microstructure evolution of TC31 titanium alloy sheets[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12): 3901-3910.

[19] 何辰佳, 陈明和, 谢兰生. TC4 钛合金扩散连接工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(17): 64-68.

HE Chenjia, CHEN Minghe, XIE Lansheng. Study on diffusion bonding process of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(17): 64-68.

Superplastic Forming and Diffusion Bonding Process for Four-Sheet Air Rudder of TC31 Titanium Alloy

WU Yong, ZHOU Xianjun, WU Dipeng, TANG Guowei, CHEN Minghe

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to study the superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) process of TC31 titanium alloy four-sheet air rudder, the high temperature tensile test, finite element simulation and air rudder experiment were conducted. The results indicated that the optimal deformation strain rate of TC31 titanium alloy at 920 °C was 0.001s⁻¹, and the maximum elongation rate was 639%, which showed good superplastic ability. The ABAQUS simulation results showed that the maximum thinning occurred at the edge of the preset block, the maximum thinning rate was 67.5%, and the maximum strain of core plate was 1.04. The four-sheet TC31 SPF/DB air rudder part with no surface depression was prepared by experiment with 0.2MPa back pressure and step pressure loading method applied. The interface quality of core plate diffusion bonding was good under the diffusion parameters of 920 °C/3MPa/2h, and the welding rate was 97%.

Keywords: TC31 titanium alloy; Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB); Finite element simulation;

Four-sheet air rudder; Wall-thickness reduction

(责编 七七)