双层板激光焊接/超塑成形数值模拟及工艺研究

徐萌萌　　陈明和　　王大刚

（南京航空航天大学机电学院，南京　210016）

文　摘　选取 TC4 钛合金四层板加强结构中双层板为研究对象，采用激光穿透焊接工艺代替传统超塑成形/扩散连接（SPF/DB）工艺中涂止焊剂连接。借助 ABAQUS 有限元分析软件对超塑成形过程进行分析，得到优化的压力-时间（p-t）曲线，作为双层板超塑成形过程的气压加载曲线，进行实验验证。结果表明：成形后零件壁厚分布均匀，焊缝处无撕裂现象，与有限元模拟结果保持一致；用此新工艺代替传统 SPF/DB 工艺中的止焊剂具有可行性。

关键词　TC4 钛合金，激光焊接，超塑成形，数值模拟

Numerical Simulation and Laser Welding/Superplastic Forming Process Research of Core Sheets

Xu Mengmeng　　Chen Minghe　　Wang Dagang

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

Abstract　Two-layer core sheets of TC4 titanium alloy four-sheet strengthened structure were researched. The sheets were welded by laser penetration welding instead of traditional superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) process coated with check flux. The superplastic forming of the core sheets were simulated by ABAQUS finite element analysis(FEM). Optimized pressure-time (p-t) curve was obtained. The p-t curve was used as the pneumatic loading curve of this process, then use superplastic forming test to verify it. It reveals that the FEM results consist with the experimental results, the thickness distribution is homogeneous, no weld tear phenomenon occurred. So the proposed process is feasible.

Key words　TC4 titanium alloy, Laser welding, Superplastic forming, Numerical simulation

0　引言

超塑性成形与超塑成形/扩散连接（SPF/DB）工艺已成为航空航天领域制造钛合金多层板加强结构的一种重要工艺[1-5]。传统的 SPF/DB 技术热循环过程中，扩散连接需要板料在高温下停留一定时间，这对材质有不利影响；另外，双层板间的焊缝窄长，需精确留出气路，使得止焊剂图形制备比较困难，稍有不慎就会导致各成形单元之间连接不充分或气路堵死[6]，影响 SPF/DB 工艺的质量。

近年来，为解决超塑成形工艺中存在的问题，拓展超塑成形技术的应用范围，搅拌摩擦焊、激光焊、钎焊、等离子弧焊、真空电子束焊、热等静压等连接方式被引入到超塑成形技术中，用来代替一部分扩散连接，获得了良好的效果。其中，激光焊接以其独特的优势引起了航空制造部门的极大关注。激光焊接技术是在激光发生器上预先焊接双层板结构并精确的留出气路，整个过程不需要任何止焊剂，具有热源密度集中、热影响区小、可控性好等优点，激光焊接后残余应力和焊接变形小，所得焊缝窄[7-11]，从而消除单元间连接不充分或气路堵死等隐患，提高零件的精度与质量。

利用非线性有限元对超塑成形过程进行数值模拟已成为超塑成形研究中的重要手段。本文利用 ABAQUS 有限元分析软件对钛合金双层板结构的超塑成形过程进行数值模拟，得到优化 p-t 曲线，并以模拟结果为基础进行工艺研究。

收稿日期：2013-05-15

作者简介：徐萌萌，1988 年出生，硕士研究生，主要从事塑性材料新技术的研究工作。E-mail：xumengmeng_027@126.com

1 有限元数值模拟

1.1 有限元模型的建立

考虑到零件结构的对称性,在不影响计算精度和提高运算效率的前提下简化模型,使模拟结果直观化,可按照实际尺寸选取板料和模具的 1/4 模型建模,在 CATIA 三维软件里对模具与板料进行几何造型,如图 1 所示,所用超塑成形模具采用流线型外观设计,集多种外观特征为一体。

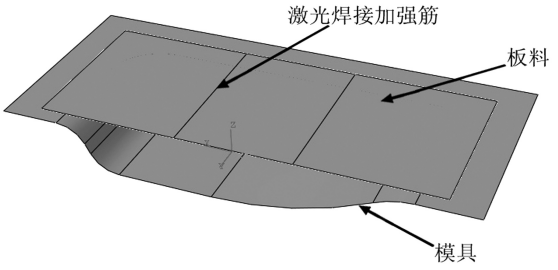


图 1 有限元建模模型

Fig. 1 Finite element modeling model

对此三维模型分析的网格单元可以采用薄膜单元或壳单元。薄膜单元基于平面应力假设,构造简单,内存要求较低,计算效率高,但薄膜理论忽略了弯曲效应,从而不能模拟弯曲效应引起的回弹和起皱;壳单元能处理弯曲和剪切效应,同时不需要实体单元的网格数量、计算时间和内存空间,并且可以忽略厚度方向的应力,故此模型采用四节点四边形壳单元 S4R,共划分单元 1 690 个,单元节点 1 782 个,板厚 0.6 mm。

1.2 材料属性

由于超塑成形的材料对应变速率特别敏感,具有非线性大变形的特性,因此采用非线性各向同性刚塑性模型。本文忽略其他因素,在只考虑应变敏感性的因素影响下,所用本构模型为蠕变模型,其本构关系模型如下[12-13]:

$$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{cr}} = A\sigma_{\mathrm{eq}}^{n} \tag{1}$$

式中,$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{cr}}$ 为单轴等效蠕变应变速率;σ_{eq}^{n} 为米塞斯各向同性情况下的等效应力;A、n 由材料、温度等因素决定,在钛合金最优成形温度[6](920±5)℃下,控制材料的应变速率为 9.8×10^{-4}/s,$A=6.58\times10^{-6}$,$n=1.754$。

1.3 接触定义和摩擦

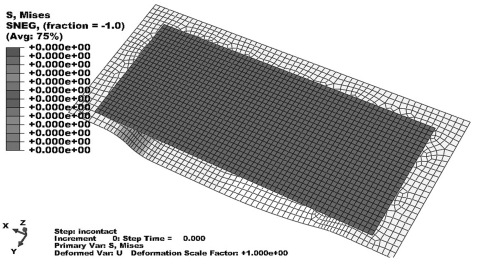
将板料与模具做如下假设:(1)成形过程中,板料处于高温蠕变超塑性变形状态,相较于板料,模具的刚度远远大于板料,因此设定板料为接触变形体,模具为离散刚体;(2)板料和模具、板料自身之间为干摩擦,符合库伦摩擦定律,摩擦因数分别为 0.1 和 0.2;(3)板料和模具及模具相互之间不能产生穿透。超塑成形过程是板料与模具不断贴合的接触摩擦过程,定义他们之间为一组接触;板料与板料自身也随着成形的进行形成一组接触。

1.4 边界条件及载荷

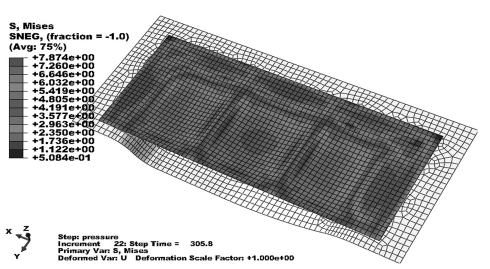
模具为刚体,对其进行固定约束;板料边缘节点沿 x、y、z 方向的位移为 0;板料对称两边的材料互不干涉,添加垂直于对称面方向的位移约束;采用固定线代替激光焊接加强筋,添加其在沿板料加载方向(z 方向)的位移约束;板料表面加载面载荷,并定义其大小满足某一幅值(Amplitude-solution dependent)关系,方向垂直于板料,指向模具,分析过程根据已定义的目标应变速率自动调整,并输出 p-t 曲线[14]。

1.5 数值模拟结果

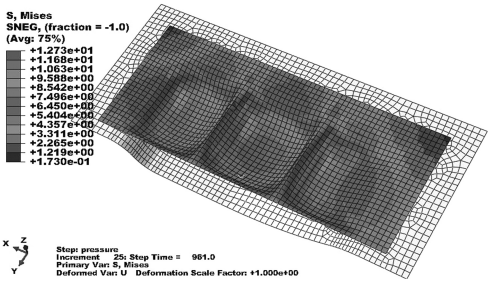
超塑成形通常是在高温密闭环境下进行的,不易对成形过程进行实时控制。ABAQUS 软件采用最大应变速率恒定法自动计算出 p-t 曲线,并得到板料厚度分布情况,可以直观地显示成形全过程,为实际应用提供理论依据。利用该优化曲线能够更精确地控制超塑成形过程,得到更为理想的零件。采用 ABAQUS 软件对上述 TC4 钛合金双层板结构的超塑成形过程进行模拟计算,成形过程及应力分布云图如图 2 所示:开始时大部分材料接近自由胀形,激光焊接加强筋周围变形缓慢,同时牵制附近的部分材料变形;中间腔的中心部位最先贴模,随后中心附近材料相继贴模,逐渐扩展到侧壁,直到板料完全贴模成形结束。超塑成形过程中流动应力非常小,最后贴模圆角处应变量较大,使得应力较大,表明在逐步贴模成形过程中,圆角处不易成形。



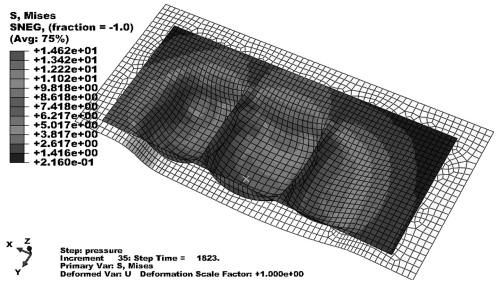
(a) $t=0$ s



(b) $t=305.8$ s



(c) t=961 s



(d) t=1 823 s

图 2 双层板结构超塑成形过程及应力分布云图

Fig. 2 Superplastic forming process and stress distribution of two-layer sheets

超塑成形最终厚度分布云图见图 3,成形过程基本按照贴模的先后顺序出现板料厚度的变化,先贴模处厚度较后贴模处大, 板料完全贴模时间为 1 823 s。厚度分布是对其成形质量的直接判断, 减薄率过大会引起材料缩颈或开裂等现象。超塑成形最终结果显示:成形过程中最后贴模板料出现在加强筋位置附近,在拉伸和剪切力的共同作用下,其塑性应变量较大,故相对于其他位置减薄率较大(厚 0.268 4 mm,减薄率 55.27%)。ABAQUS 软件模拟的恒定应变速率下 p–t 曲线,如图 4 所示。

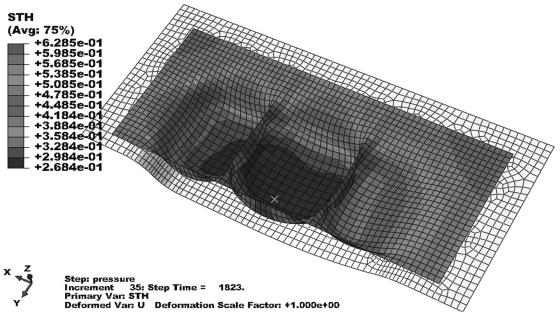


图 3 超塑成形后厚度分布

Fig. 3 Thickness distribution of the final forming result

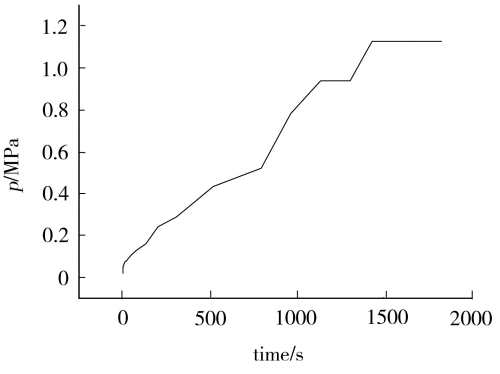


图 4 恒定应变速率下的优化 p–t 曲线

Fig. 4 Optimized p–t curve at constant strain rate

2 激光焊接双层板超塑成形工艺的验证

2.1 实验准备

选用 0.6 mm 厚的钛合金板(Ti–6Al–4V)。实验前先将其进行简单的表面清洁,并用丙酮清洗板料表面油污,然后将其放入 HF:HNO_3=1:3(体积比)的溶液里浸泡 30 s,用以去除板料表面氧化膜。为防止 TC4 钛合金板表面再次受到污染,处理好的钛合金板料必须尽快使用。

2.2 双层板的激光焊接工艺

板料在 BD–JG–600 型 Nd–YAG 激光发生器上进行焊接,激光器的最大输出功率为 500 W。焊接时板料的上下两面分别采用两路高纯氩气进行保护,排除空气中的有害物质使焊缝免受污染[15],且能增加对激光的吸收。选取板料上表面以下 0.3 mm 处为焦点,设计正交实验,根据接头的剪切强度、抗拉强度以及外观形貌,确定板料激光焊接的工艺参数:电流 110 A,脉宽 12 ms,频率 12 Hz,焊接速率 150 mm/min。

采用上述激光焊接参数,进行双层板激光穿透焊接,焊接后零件如图 5 所示,四周封焊成口袋状,与模具有槽位置相对应处加焊进气管。在合适夹具的作用下,焊接后板料几乎没有翘曲变形,表面未发生氧化,未发现微裂纹,保证后续实验的顺利进行。

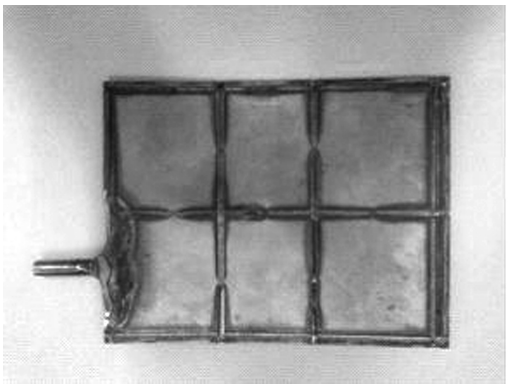


图 5 激光焊接后零件

Fig. 5 Laser welding part

2.3 超塑成形工艺

超塑成形在高温($T_{SPF} \geqslant 0.5T_{熔点}$)下进行的,TC4 钛合金的超塑成形最佳成形温度为(920±5)℃。实验采用自行设计的加热炉和控制系统,外加高吨位的机床。炉温低于 700℃,升温速率为 140℃/h;超过

700℃后,升温速率为70℃/h,待模具温度达到920℃左右时,按ABAQUS软件模拟得到优化的$p-t$曲线进行加压,完成整个超塑成形过程。

2.4 结果与分析

超塑成形后的零件,如图6所示,零件成形充分,壁厚分布均匀,加强筋无扭曲现象;焊缝完好,无撕裂现象;成形过程中气路保持良好,不存在堵气、漏气现象。对成形后壁厚进行测量,结果显示:对于超塑成形区域大部分板料厚度在3.8~4.9 mm,最薄处出现在靠近加强筋位置,其值为0.31 mm,减薄率为48.33%,比模拟结果(最薄处厚0.268 4 mm)更为理想。与模拟过程相对比:零件壁厚分布均匀,与有限元模拟结果具有一致性,符合预期。实验结果显示:不易成形的圆角处成形效果良好,比模拟结果更为理想。因此用激光焊接双层板工艺代替传统超塑成形过程涂止焊剂的工艺具有可行性。

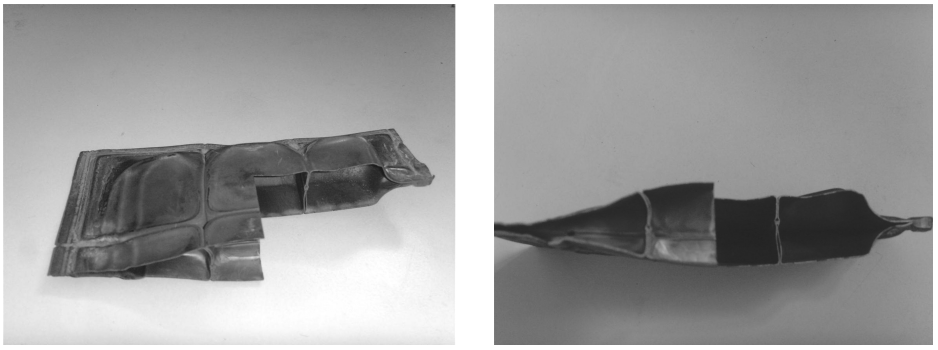


图6 超塑成形后零件

Fig. 6 Superplastic forming part

3 结论

(1)借助ABAQUS有限元软件进行建模、计算并获得了优化的$p-t$曲线,为实际超塑成形的压力控制提供理论依据,从而提高成形精度,并有利于提高成形件质量。

(2)在920℃,最大气压压力为1.2 MPa情况下超塑成形出合格的零件,零件焊缝处接触良好,壁厚分布均匀,无堵气、漏气、撕裂等现象,验证了激光穿透焊接双层板技术代替传统SPF/DB中涂止焊剂工艺的可行性。

参考文献

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

[2] 王晓东, 余心宏. TC4钛合金U形带筋板件超塑性成形的有限元数值模拟[J]. 锻压装备与制造技术, 2010, 45(6): 79-82

[3] 黄钢华, 张益华, 门向南, 等. 钛合金超塑成形/扩散连接的数值模拟及工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2009, 37(3):16-19, 35

[4] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering, 1996, A213:103-104

[5] 郭和平, 曾元松, 韩秀全, 等. 飞机钛合金整体结构的超塑成形/焊接组合工艺技术[J]. 焊接, 2008(11):41-45

[6] 李志强. 钛合金超塑成形/扩散连接四层夹层结构[J]. 航空科学技术, 1995(6):23-24, 34

[7] 虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2):261-268

[8] 王德军. 对激光焊接工艺方法的简要探讨[J]. 中国科技财富, 2009(4):34

[9] 姚伟, 巩水利. 激光焊接对SPF/DB Ti-6Al-4V合金疲劳性能的影响[J]. 焊接学报. 2009, 30(2):149-152

[10] Cheng D H, Huang J H, zhao X K, et al. Microstructure and superplasticity of laser welded Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31:620-623

[11] Annwa E M, Olabi A G. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1/3):22-23

[12] 赵毅, 陶华. 钛合金板超塑成形/扩散连接成形因素影响的数值模拟[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(1):41-43

[13] Cheng Jungho. The determination of material parameters from superplastic inflation test[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58:233-246

[14] Edwards P D. Sanders D G, et al. Thinning behavior simulations in superplastic forming of friction stir processed titanium 6Al-4V[J]. Journal of Materials Engineering and Performance. 2010, 19(4):481-487

[15] 戴景杰. 铝合金激光焊接工艺特性研究[J]. 电焊机, 2010, 40(3):20-23

(编辑 李洪泉)