

钛合金激光焊接 / 超塑成形技术研究

Study on Laser Beam Welding/Superplastic Forming Technology of Titanium Alloy

北京航星机器制造有限公司 李保永 孙 燚 刘 洋 汪永阳
哈尔滨工业大学 蒋少松 张凯锋

[摘要] 采用气胀成形方法对 TA15 钛合金四层结构芯板加强结构的激光焊接 (LBW)/ 超塑成形 (SPF) 技术进行了研究。结果表明, 满足超塑成形的最佳激光穿透焊接工艺参数为: 功率 2300W, 焊接速率 $0.8\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, 离焦量 +1; 最佳超塑成形参数为: 成形温度 930°C , 成形压力 2.0MPa, 成形时间 60min; 芯板加强结构成形效果良好。

关键词: 钛合金 激光焊接 超塑成形

[ABSTRACT] The laser beam welding/superplastic forming technology of TA15 titanium alloy strengthen core board in four layers structure by inflatable forming method is studied. The most appropriate parameters of laser beam welding process for superplastic forming are that power 2300W, welding speed $0.8\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ and the defocusing amount +1. The most appropriate parameters of superplastic forming are that temperature 930°C , forming pressure 2.0MPa and forming time 60 min. The forming effect of the strengthen board is good.

Keywords: Titanium alloy Laser beam welding Superplastic forming

结构整体化已成为现代航空航天工业发展的主要方向之一, 整体构件在减小结构重量、改善结构完整性和提高机体承载效率等方面具有独特的优势^[1-4]。超塑成形 / 扩散连接三层板、四层板等中空夹层结构, 在航空航天工业中得到广泛运用, 如整体宽弦风扇叶片、飞行器翼面、舵面等构件的制造^[1-5]。随着中空夹层结构向着更加复杂大型的方向发展, 整体工艺难度和成形时间均大幅度增加, 使得超塑成形制品的合格率、力学性能、生产效率及成本控制难度显著提高, 并使扩散连接焊合率的判定更加困难。为解决上述难题, 超塑性成形与焊接的组合技术正日益受到重视和发展^[6]。采用焊接技术取代部分或全部扩散连接, 可以降低或消除扩散连接焊合率判定难度, 缩短工件高温曝露时间, 改进工件性能, 并可解决扩散性能较差的材料多层结构的成形难题。本文将激光焊接工艺与超塑成形工艺相结合, 探索采用激光焊接工艺取代四层中空夹层结构芯板之间

扩散连接的可行性, 以缩短常规四层超塑成形 / 扩散连接构件的制造周期, 提高零部件生产的质量与效率, 并降低生产成本。

1 试验材料与方法

试验材料为退火态 TA15 钛合金板材, 厚度 1.3mm。采用激光穿透焊接将两钛合金板材按照预定的图形穿透焊接获得总厚度为 2.6mm 的芯板加强结构毛坯。

使用 ROFIN-SINAR 公司生产的 SLAB DC-030 型数控 CO_2 横流连续激光发生器进行激光穿透焊接试验。最大功率 3kW, TEM01 光束模式, 聚焦直径 0.1mm, 加工定位精度 ± 0.03 。焊接试验方案如下: (1) 取焊接功率 2.0kW、焊接速率 $0.8\text{m}/\text{min}$, 分别对离焦量 +2、+1、0、-1 和 -2 进行穿透焊接试验, 以确定合理的离焦量; (2) 选择激光功率 1.7kW, 2.0kW 和 2.3kW, 焊接速度 $0.6\text{m}/\text{min}$, $0.8\text{m}/\text{min}$, $1.0\text{m}/\text{min}$, 进行激光穿透搭接试验。通过室温剪切试验、接头情况和断裂方式等综合确定最佳焊接参数。

进行四层中空夹层结构的芯板激光穿透焊接及芯板的封边、焊接进气通道, 完成四层中空夹层结构芯板超塑成形毛坯的制造。接着在数值模拟的基础上进行四层结构的芯板的超塑成形, 获得独立的芯板加强结构件。

2 激光焊接工艺参数的确定

在不同离焦量下获得的激光穿透焊接接头如图 1 所示。通过 X 光检测及局部断面金相检测, 各组参数下获得的接头均无明显气孔和咬边等缺陷。图 2 是 +1 离焦量时穿透接头的金相组织。由于 +1 离焦量时接头上、下对称度好, 中间接头也较宽, 两层板变形区相对一致, 有利于保证最终超塑成形的成功率和对称度, 故确定穿

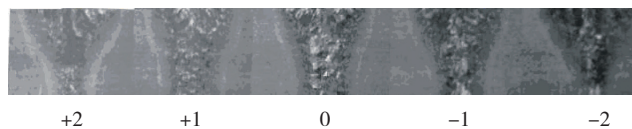


图1 不同离焦量下的穿透接头截面形状

Fig.1 Sections of overlap joint at different defocusing amount

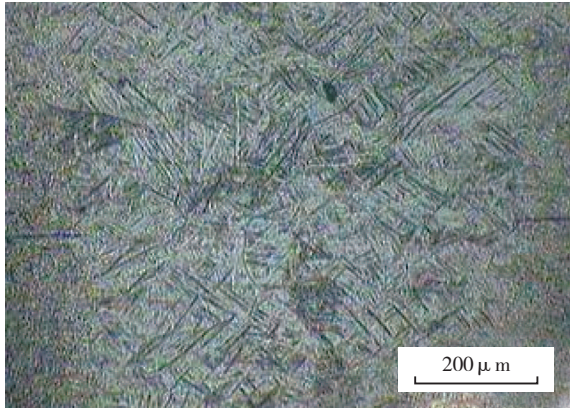


图2 +1离焦量时穿透接头的金相组织
Fig.2 Microstructure at overlap joint of +1 defocusing amount

透焊接离焦量为+1。

固定离焦量+1,按表1中的9组参数进行穿透搭接试验,搭接试样的示意及尺寸见图3。搭焊后进行室温剪切试验。从表中可以看出,焊透特定厚度(2.6mm)的搭接试件,焊接各个参数范围选择较宽,根据接头情况,确定了激光焊接的参数范围为功率2.0kW~2.3kW,焊接速率0.6m/min~0.8m/min。接头剪切断裂有两种形式,分别是剪切断裂和拉伸断裂。剪切断裂出现在两板相接的接头上,而拉伸断裂处则位于热影响区附近区域。由于不同参数下获得的焊接接头尺寸和形状不尽相同,采用线长度上所承受的最大剪切力来考察穿透焊接头的力学性能,称之为抗剪力 F_l :

$$F_l = \frac{F_{\max}}{l}$$

式中, F_{\max} 为最大剪切力,单位kN; l 为试样宽度,单位mm。

从图4可以看出,在所选的参数范围内,焊接速率固定时,随着焊接功率的增加,接头的抗剪力随之增加;

表1 不同焊接参数条件下获得的接头情况

序号	功率/kW	焊接速率/(m·min ⁻¹)	接头情况	断裂形式
1	1.7	0.6	焊透,焊缝窄	剪断
2	1.7	0.8	未焊透	剪断
3	1.7	1.0	未焊透	剪断
4	2.0	0.6	焊透,焊缝合适	拉断
5	2.0	0.8	焊透,焊缝窄	剪断
6	2.0	1.0	焊透,焊缝窄	剪断
7	2.3	0.6	焊透,焊缝宽	拉断
8	2.3	0.8	焊透,焊缝合适	拉断
9	2.3	1.0	焊透,焊缝窄	剪断

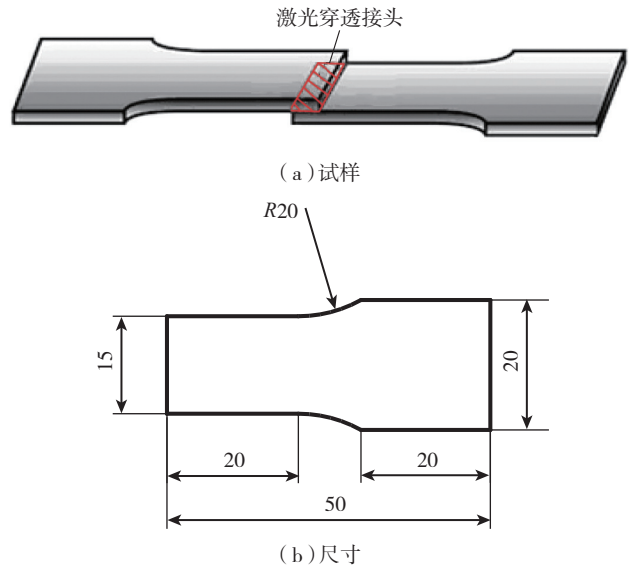


图3 搭接试样的示意及尺寸
Fig.3 Diagram and size of lap joint specimen

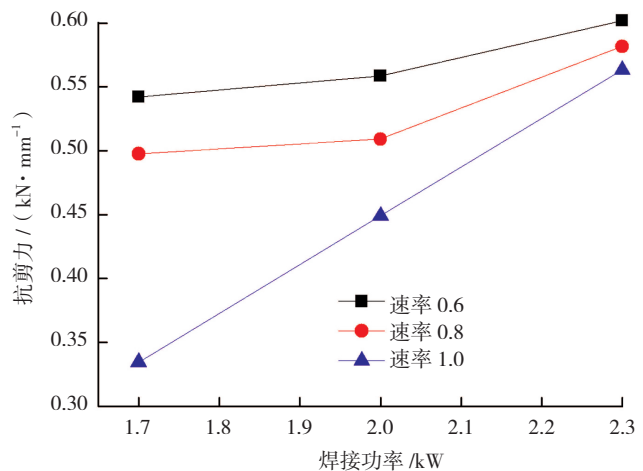


图4 不同焊接参数下接头的抗剪力
Fig.4 Shear capacity of joints with different welding parameters

反之,焊接功率不变时,随着焊接速率的增加,接头的抗剪力随之降低。一般来说,速率固定时,焊接功率越高,单位时间内激光器在穿透连接处输出的能量越多,此处母材熔化就越多,接头尺寸就越大,抗剪能力就强;反之,功率固定时,焊接速率越大,单位时间内激光器在穿透焊接部位输出的能量越少,造成焊缝熔深和熔宽均降低,抗剪能力越差。根据接头情况和断裂形式,综合抗剪性能,选定:激光功率2.3kW,焊接速度0.8m/min。

3 超塑成形数值模拟分析

应用MSC.MARC2005对芯板加强构件的超塑成形过程进行有限元模拟,在给定的应变速率下自动调整压力值并生成时间-压力曲线。板料设置为可变形体,模

具设置为刚体。初始网格为均匀划分单元,对局部大变形区采用自动网格细化功能优化计算。单元类型选择139号四节点薄壳单元。设置应变速率敏感系数 m 取值0.61, K (材料常数)取 $1080\text{MPa}\cdot\text{s}^m$ 。芯板模拟结果见图5。

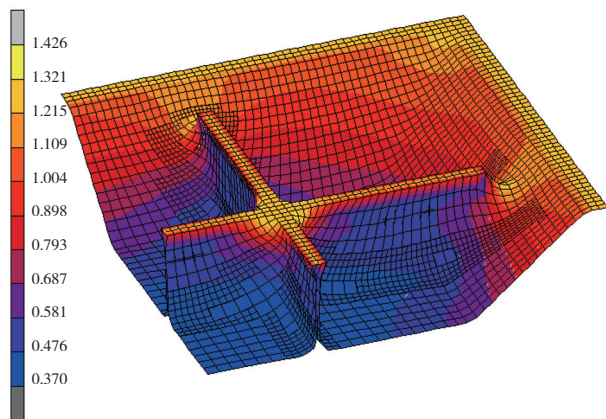


图5 芯板有限元模拟结果及厚度分布

Fig.5 Finite element simulation result and thickness distribution of core board

从中可以直观的看出成形过程中各阶段贴模先后、加强筋直立程度及芯板厚度的变化情况。由于焊接接头的约束,离接头较远的板料率先变形和贴模,随着变形的进行,各个加强筋逐渐直立并贴靠在一起形成直立加强筋。由于芯板不同部位变形先后顺序差别巨大,最后完成变形的直立加强肋板顶端区域变形最为严重,壁厚最小值在0.37mm左右;此外,焊缝接头处由于一直应力集中,变形也较为严重,壁厚最薄处约为0.5mm。

4 芯板结构的激光焊接和超塑成形

使用优选的激光穿透焊接工艺参数进行了芯板毛坯的焊接,见图6。封边焊管及焊装面板之后,在数值

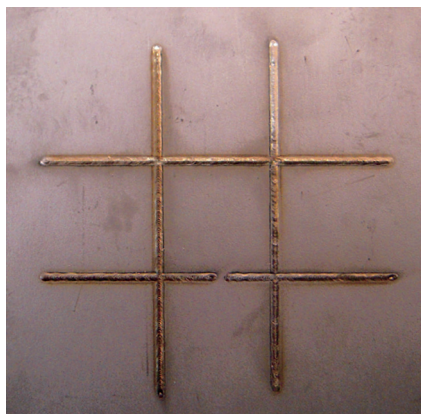


图6 芯板毛坯激光穿透焊接结果

Fig.6 Laser penetration welding results of core board

模拟的基础上进行了芯板加强结构样件的超塑成形。图7是数值模拟获得的压力加载曲线和超塑成形实际采用的修正曲线。

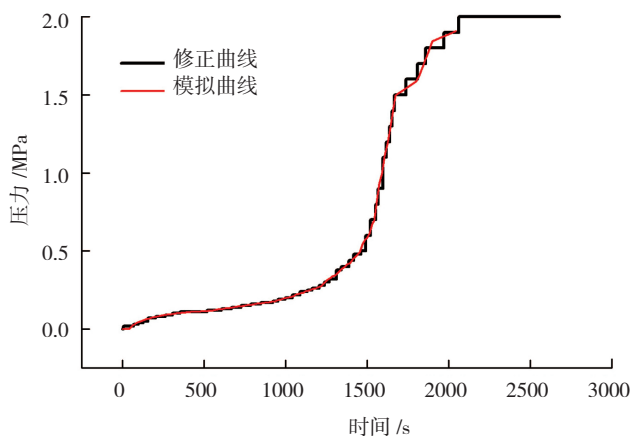


图7 芯板成形模拟曲线和修正曲线

Fig.7 Simulation and correction curves for core board forming

芯板加强结构的超塑成形在哈尔滨工业大学自主研制的1000kN超塑成形机进行,采用PID控温,试验温度为 930°C 。当温度加热到 930°C 并保温10min之后开始超塑成形,成形压力加载按图5中的修正曲线进行。成形结束后,工件随炉冷却至室温后取出。图8给出了成形后获得的芯板加强结构样件的内部视图。在该工艺下成形的芯板加强结构样件外观良好,加强肋板几乎完全直立,只在肋板顶部形成了半径很小的圆角,上下外表面基本完全贴模,无下塌、开裂等缺陷。成形结果与数值模拟结果基本相符,芯板加强构件的最薄处出现在直立加强肋板与上下面的交界处,此处变形持续时间最长,减薄最为严重;而加强肋板中部焊接接头周围区域由于应力集中,减薄也较为严重。该构件达到了常规超塑成形/扩散连接芯板加强结构的成形效果,说明采用激光焊接部分或完全取代芯板间的扩散连接,可以实现芯板加强结构的超塑成形需要。

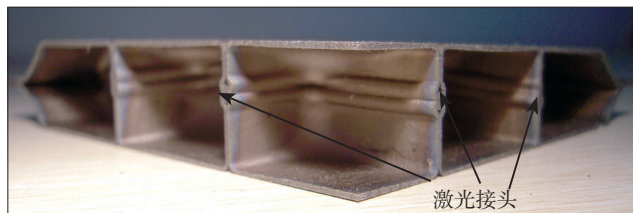
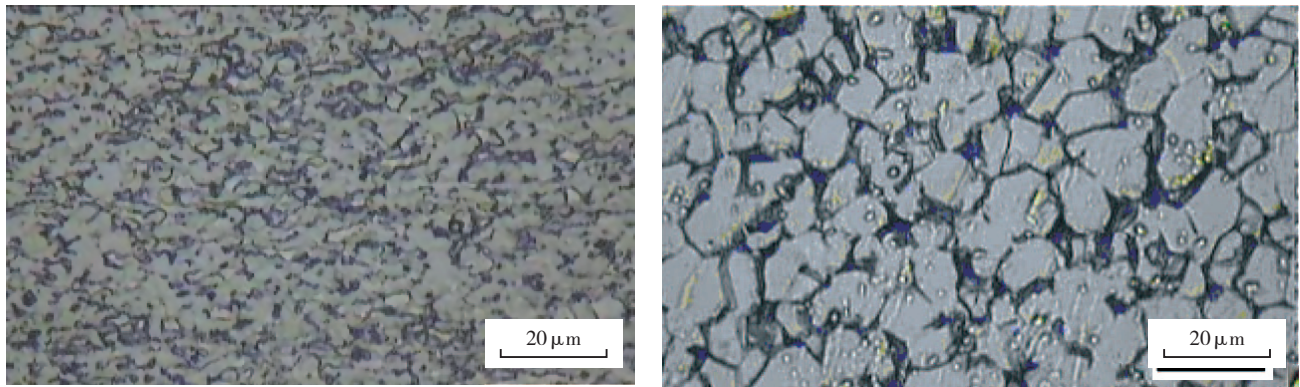


图8 激光焊接超塑成形芯板加强结构

Fig.8 Strengthening structure of laser welding core board

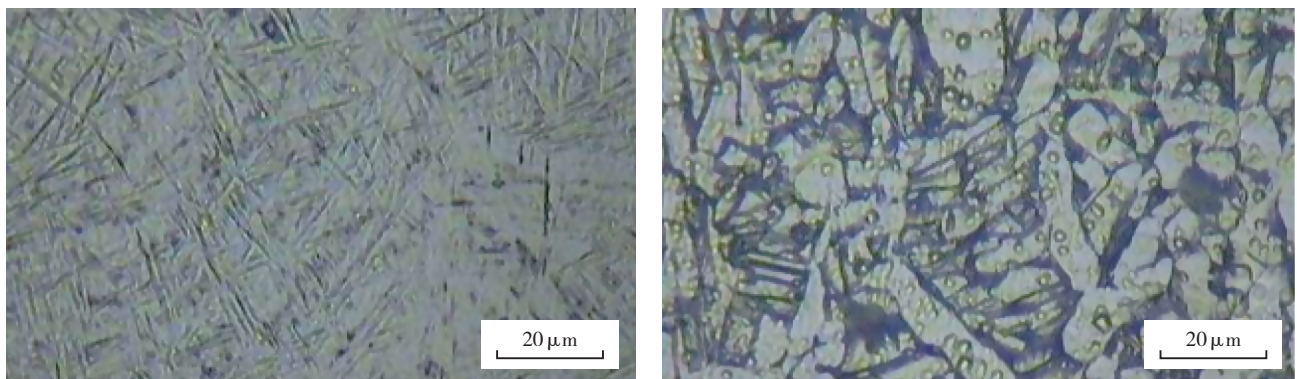
超塑成形前后,材料的组织发生了变化。图9是成形前后的板材组织变化金相照片。原始板材的晶粒细



(a) 原始组织

(b) 超塑成形后

图9 超塑成形前后板材组织变化
Fig.9 Microstructure of parent metal before and after SPF



(a) 超塑成形前

(b) 超塑成形后

图10 超塑成形前后焊接接头熔合区组织变化
Fig.10 Microstructure of joint fusion zone before and after SPF

小,经长时间的变形与热曝露后晶粒出现了显著长大。图 10 为超塑成形前后激光穿透焊接接头组织的变化状况。与成形前的较细小组织相比,成形后晶粒组织发生了明显长大,晶界也由模糊变得十分清晰,热影响区几近消失,说明超塑成形时焊接接头也发生了塑性变形,使得典型的快速冷却铸态组织向变形组织转变,一定程度上改善了接头组织,并且产生了片层状组织,形成综合性能较好的双态组织。

5 结束语

通过对 TA15 钛合金四层板芯板加强结构激光焊接 / 超塑成形技术的研究,获得如下结论:

(1) 对总厚 2.6mm 的两层 TA15 钛合金激光穿透焊接,确定的合理工艺参数为: 功率 2300W,焊接速率 0.8m/min,离焦量 +1。上述参数满足了芯板加强结构的超塑成形需要。

(2) 采用激光穿透焊接的两层板作为四层中空结构的芯板,进行了超塑成形。在有限元模拟的基础上,

获得了超塑成形效果良好的芯板加强结构样件。采用激光焊接部分或完全取代扩散连接,可以满足芯板加强结构的超塑成形需要。

参考文献

- [1] 薛晓波,陈明和. 基于 SPF/DB 工艺的某翼类构件内部结构优化分析. 南京航空航天大学学报, 2012,44:128-131.
- [2] Li Zhiqiang, Guo Heping. Application of superplastic forming and diffusion bonding in the aerospace industry. Materials Science Forum, 2005, 475-479: 3037-3042.
- [3] Todd R. Superplasticity in advanced materials ICSAM 2003. Materials Science Forum, 2004, 447-448: 3-7.
- [4] Xing H L, Wang C W, Zhang K F, et al. Recent development in the mechanics of superplasticity and its applications. Journal of Materials Processing Technology, 20-04, 151: 196-202.
- [5] Hefti L D. Innovations in the superplastic forming and diffusion bonded process. Journal of Materials Processing Technology, 2008,17:178-182.
- [6] 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. 焊接, 2008(11):41-45.

(责编 日午)