

夹具约束对铝合金薄板焊接变形的影响

张建强¹, 赵海燕², 鹿安理², 罗传红¹, 郭嘉琳¹, 张国栋¹

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

(2. 清华大学, 北京 100084)

摘 要: 采用热弹性有限元技术对不同夹具约束情况下铝合金薄板焊接过程进行了数值模拟, 并利用脉冲氩弧焊接工艺、不同的夹具布置形式, 研究了厚度为 5 mm 铝合金薄板构件的挠曲变形。结果表明, 冷却过程中夹具对焊缝附近的塑性变形区的收缩等效于反向拉伸, 可减小纵向残余塑性应变, 因此利用夹具的约束作用可以控制和减小铝合金薄板焊接残余应力和变形, 但夹具对焊缝及附近区域的约束程度不同, 控制焊接变形的效果也不同。采用合理的夹具布置可以将薄板的纵向残余挠度控制在 1 mm 左右。

关键词: 铝合金薄板; 焊接应力; 塑性应变; 约束; 数值模拟

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)S3-165-05

铝合金薄壁焊接结构重量轻、耐腐蚀、加工性能优异、易于连接而广泛应用于航空航天飞行器制造工程领域。由于铝合金的热膨胀系数大、弹性模量小, 焊接变形问题相当突出, 严重影响结构的制造精度和使用性能^[1-6]。国内外对薄板结构焊接变形开展了大量的研究工作^[3-5], 但这些方法主要针对厚度小于 4 mm 的薄壁或薄壳结构。焊接应力应变的产生、分布规律复杂, 影响因素多, 准确获得焊接应力应变的分布规律并加以调节和控制相当困难, 数值模拟则是十分有效的研究方法之一。

外加约束影响加热与冷却过程中形成的非协调应变, 进而影响焊接变形的大小及分布。如果焊接过程中通过合理布置夹具、施加有效的约束作用能有效地控制铝合金薄板焊接变形, 无疑具有十分重要的意义^[6-8]。本实验通过对 4 种固定部分节点位移方式下铝合金薄板的焊接塑性应变进行数值模拟, 分析约束条件对纵向变形的影响。采用自动脉冲 TIG 焊接方法对控制变形的效果进行验证, 以期获得夹具控制焊接变形的效果, 对指导实际焊接工艺具有积极意义。

1 计算模型

1.1 接头形式及工艺参数

试验材料为 LF6 铝合金, 尺寸为 500 mm×150 mm×5 mm, 如图 1 所示。采用脉冲钨极氩弧焊, 基值

电流 160 A, 峰值电流 400 A, 电弧电压 16 V, 焊接速度 4.42 mm/s, 占空比为 54%, 热效率取 0.6, 钨极直径 6.0 mm, 焊丝直径 2.5 mm, 气体流量为 20 L/min。

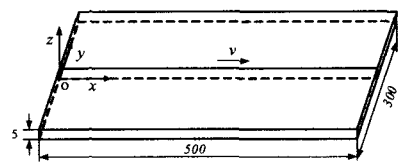


图 1 试样的形状、尺寸及坐标系

Fig.1 The configuration, size of the specimen and the coordinate system

1.2 网格划分

不同约束条件下的计算模型相同。焊缝中心为对称面, 取试样的 1/2 进行建模, 焊缝及附近的网格较密, 最小网格为 2.5 mm×2.5 mm×2.5 mm, 然后逐步加粗, 远离焊缝的试件边缘的网格尺寸最大, 为 20 mm×20 mm×2.5 mm, 模型的节点数为 5232, 单元数为 3200, 网格划分如图 2。

1.3 热源模型

采用高斯面热源模型, 距热源斑点为 r 的点的热流密度 $q(r)$ 为:

$$q(r) = q_m \exp(-3r^2 / R^2) \quad (1)$$

收稿日期: 2009-08-15

基金项目: 国家计委产业化前期关键技术研究项目 ((1998) 2077); 清华大学 985 重点项目

作者简介: 张建强, 男, 1964 年生, 博士, 副教授, 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072, 电话: 027-68772253, E-mail: Zhangjq123456@163.com

热源中心最大热流密度 q_m 为:

$$q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q \tag{2}$$

式中, Q 为热源有效功率。

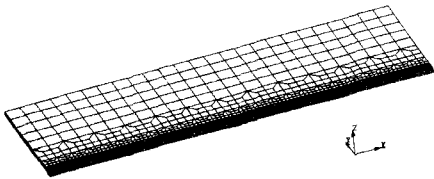


图 2 网格划分

Fig.2 The meshing scheme

1.4 材料的热物理性能参数

不同温度下 LF6 的比热容、线膨胀系数、导热系数如图 3, 弹性模量、屈服强度如图 4, 500℃ 以上数据用外推法获得^[8]。

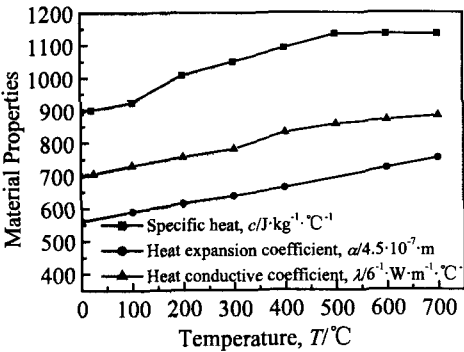


图 3 比热容、线膨胀系数、导热系数与温度的关系

Fig.3 The relationships between specific heat, heat expansion Coefficient as well as heat conductive coefficient and temperature

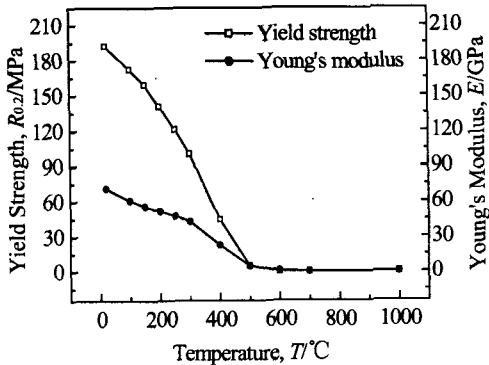


图 4 弹性模量、屈服强度与温度的关系

Fig.4 The relationships between young's modulus as well as yield strength and temperature

1.5 拘束条件的施加

4 种固定部分节点位移方式分别如图 5、图 6、图 7、图 8, 假定薄板表面部分节点 x 、 y 、 z 方向位移均为零。4 种约束方式对焊缝及附近区域加热和冷却过

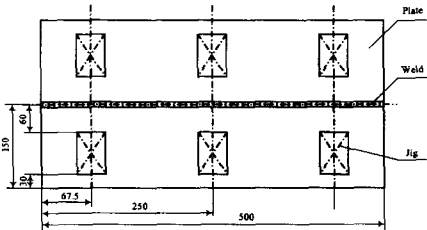


图 5 装卡方式 1—采用 3 对卡兰时的夹具布置示意图

Fig.5 The first clamping way—the arrangement scheme with three pairs of jigs

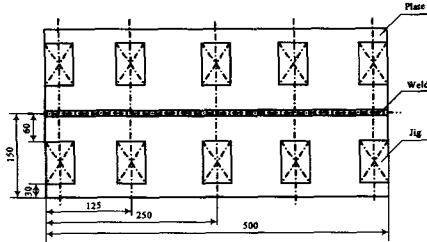


图 6 装卡方式 2—采用 5 对卡兰时的夹具布置示意图

Fig.6 The second clamping way—the arrangement scheme with five pairs of jigs

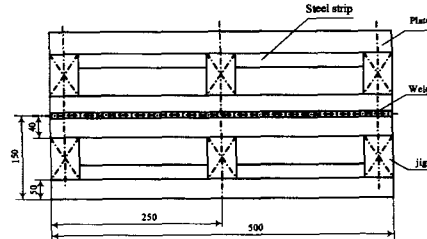


图 7 装卡方式 3—采用 3 对卡兰和压铁时的夹具布置示意图

Fig.7 The third clamping way—the arrangement scheme with three pairs of jigs and two steel strips

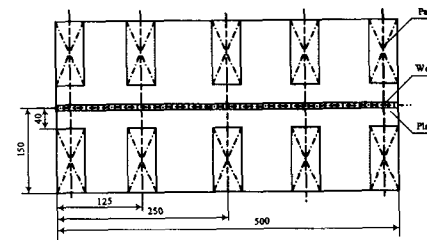


图 8 装卡方式 4—采用 5 对卡兰和垫块时的夹具布置示意图

Fig.8 The fourth clamping way—the arrangement scheme with five pairs of jigs and pads

程中塑性应变的形成和发展产生的影响不同，因而控制焊接应力变形的效果也不同。

2 模拟结果及分析

2.1 无拘束条件下模拟结果

提取 $x=100\text{ mm}$ 上表面离焊缝中心不同距离的点， $0\sim 90\text{ s}$ 之间的纵向塑性应变 ε_x^p 随时间的变化，如图 9。由图 9 可见， ε_x^p 主要集中在焊缝及附近区域，电弧通过该截面时， $y=5\text{ mm}$ 和 10 mm 位置产生的压缩塑性应变最大。 $t=25\text{ s}$ 时 ε_x^p 分别为 -0.00641 、 -0.00685 ；焊缝中心和 $y=15\text{ mm}$ 处次之。 $t=30\text{ s}$ 时焊缝中心 ε_x^p 为 -0.00479 。在 $t=20\text{ s}$ 时，离焊缝中心 15 mm 处 ε_x^p 为 -0.00436 。 $y=25\text{ mm}$ 的 ε_x^p 值比较小。且 ε_x^p 的变化较快， 90 s 后 ε_x^p 趋于稳定。因此，铝合金薄板焊接塑性应变发展速度快，为了控制变形，必须在焊接过程中采取措施抑制塑性应变。

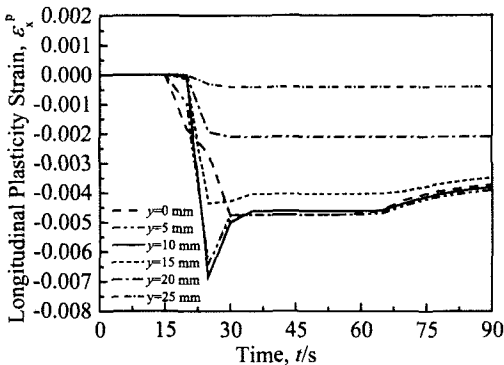


图 9 离焊缝中心不同距离点的纵向塑性应变 ε_x^p 与时间 t 的关系

Fig.9 The relationship between the longitudinal plasticity strain of the different points from the weld center and time

2.2 不同拘束情况下纵向塑性应变的演变

分别提取不采用卡具以及 4 种装卡方式下，同一截面上表面 ($x=140\text{ mm}$) 的 ε_x^p 随时间的演变过程。图 10 为装卡方式 1 下， $x=140\text{ mm}$ 的截面在电弧到来前 ($t<32\text{ s}$)、电弧中心位于该截面 (32 s)、电弧离开 ($t>32\text{ s}$)、完全冷却时 ε_x^p 的演变；图 11 为 $x=140\text{ mm}$ 截面上给定点 (焊缝中心 $y=0\text{ mm}$ ，塑性变形区剧烈部位 $y=10\text{ mm}$ ，塑性变形区边缘部位 $y=20\text{ mm}$) 的 ε_x^p 随时间的连续变化。

由 10 可见，电弧来到分析截面之前 ($t=30\text{ s}$)，由于夹具的拘束作用，近缝区的横向膨胀受到约束，产生横向挤压，焊缝及近邻区域形成拉伸塑性应变。 $t=35\text{ s}$ ，电弧离开此截面，焊缝区仍处于熔化状态，此时焊缝区形成很大的 ε_x^p ，夹具的约束导致 ε_x^p 高于自由状

态焊接时的数值。随着电弧的远离，焊缝附近的压缩塑性应变不断减小。由图 11 可见，夹具减小焊接变形的效果主要发生在焊接过程的冷却阶段。焊缝区的收缩受到强烈制约，高温加热阶段产生的压缩塑性应变不同程度地得到恢复。

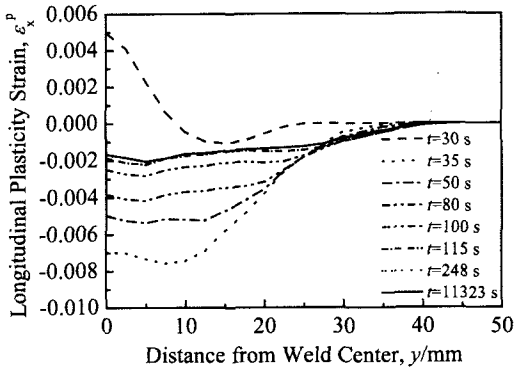


图 10 $x=140\text{ mm}$ 截面上纵向塑性应变的演变

Fig.10 The changes of the longitudinal plasticity strain in the section when x is 140 mm (the first clamping way)

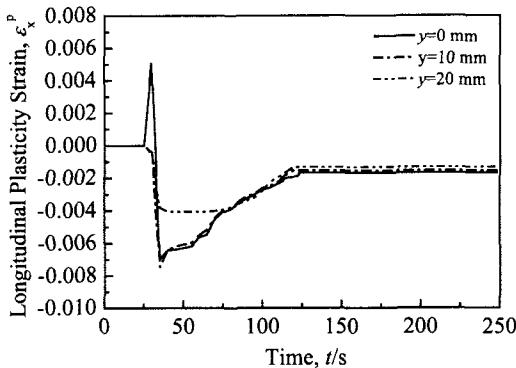


图 11 给定点纵向塑性应变随时间的连续变化

Fig.11 The continuous changes of the longitudinal plasticity strain of given points with the time (the first clamping way)

自由状态与 4 种装卡方式下 $x=140\text{ mm}$ 截面上 ε_x^p 的演变如图 12，焊缝中心 ε_x^p 随时间的变化如图 13，由图 12 和 13 可见，夹具能够明显减小 ε_x^p ，但变形区域宽度会增加，4 种装卡方式中，方式 3 和方式 4 减小焊接变形的效果优于方式 1、2。而第 4 种方式的效果最好，焊后的残余 ε_x^p 最小。

3 试验验证

4 种装卡方式对焊接变形的影响如图 14。采用卡具后，焊接变形大大减小。不采用卡具，薄板的纵向挠度 f_z 为 -7.2 mm 。采用卡具后， f_z 减小到 -3.6 mm 以下。增加焊缝长度方向的约束，即增加卡兰数量，卡

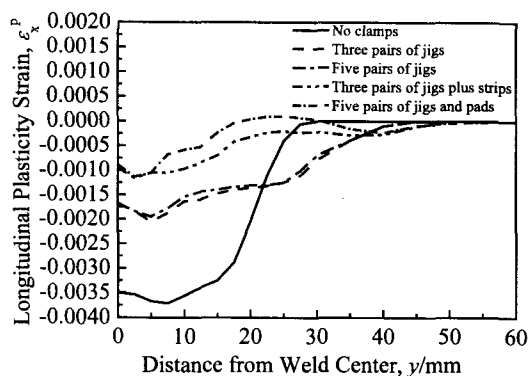
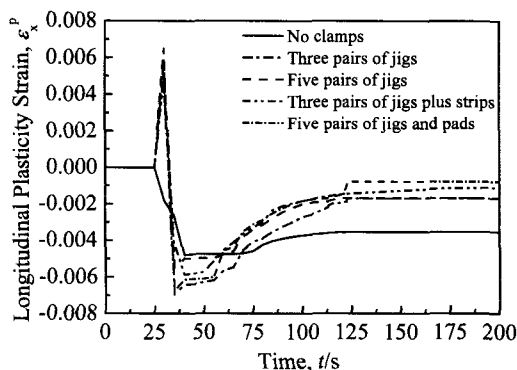
图12 夹具对 $x=140$ mm 截面上纵向残余塑性应变的影响比较Fig.12 Comparison of effects of clamps on the longitudinal plasticity strain in the section when x is 140 mm

图13 不同条件下焊缝中心纵向塑性应变随时间的变化

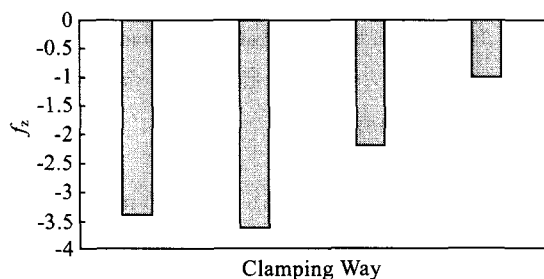
Fig.13 The changes of the longitudinal plasticity strain of weld center points with the time under different conditions ($x=140$ mm, $y=0$ mm)

图14 夹具对纵向挠度的影响

Fig.14 Effects of clamps on the longitudinal flexibility

兰由3对(装卡方式1-A13)增加到5对(装卡方式2-A14),对弯曲变形量的影响不大。第3(A15)、和第4种装卡方式(A16),对焊缝区的约束比较合理,可以抑制焊缝区在冷却过程中的塑性应变,有利于减小 f_z 。装卡方式4最为合理、试样A16焊接变形最小, f_z 降到-1 mm。

4 结论

1) 利用夹具的拘束作用可以控制和减小铝合金薄板焊接残余塑性应变,对焊缝及附近区域的拘束方式不同,控制纵向焊接残余塑性应变的效果也不同。

2) 虽然夹具不能有效控制加热时产生的压缩塑性应变,减小焊接变形的作用有限。但在冷却过程中夹具对焊缝附近的塑性变形区的收缩等效于反向拉伸,可减小纵向残余塑性应变。对焊缝附近区域的约束越强烈,冷却时的塑性拉伸作用越大,控制焊接变形效果越好,本试验研究条件下薄板的纵向挠度可以降低到1 mm以内。

参考文献 References

- [1] Preston R V, Shercliff H R, Withers P J et al. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2003, 8(1): 10
- [2] Webster P J, Ananthaviravakumar N, Hughes D J et al. *Applied Physics A: Materials & Processing*[J], 2002, 74(Suppl.): S1421
- [3] Guan Qiao(关桥), Guo Gelun(郭德伦). *Trans Chin Weld Inst(焊接学报)*[J], 1990, 11(4): 231
- [4] Guan Qiao(关桥), Zhang Chongxian(张崇显), Guo Gelun(郭德伦). *Trans Chin Weld Inst(焊接学报)* [J], 1994, 15(1): 8
- [5] Guo Shaoqing(郭绍庆), Xu Wenli(徐文立), Liu Xuesong (刘雪松) et al. *Trans Chin Weld Inst(焊接学报)* [J], 1999, 20(1): 34
- [6] Zhang Jianqiang(张建强), Zhang Haiquan(张海泉), Yue Hongjie(岳红杰) et al. *Trans Chin Weld Inst(焊接学报)*[J], 2005, 2(1): 21
- [7] Lindgren L E. *Journal of Thermal Stress*[J], 2001, 24(2): 141
- [8] Zhang Jianqiang(张建强), Zhang Guodong(张国栋), Zhao Haiyan(赵海燕) et al. *Trans Chin Weld Inst(焊接学报)*[J], 2007, 28(6): 5

Effects of Clamps on Welding Distortion in Thin Aluminum Alloy Plate

Zhang Jianqiang¹, Zhao Haiyan², Lu Anli², Luo Chuanhong¹, Guo Jialin¹, Zhang Guodong¹

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The three-dimensional numerical simulation of welding process for aluminum alloy thin plate under the conditions of different clampings was performed by means of thermal-elastic-plastic FEM technology, and the longitudinal flexibility in thickness of 5 mm aluminum alloy thin plate was investigated using pulsed TIG welding technology and different clamp arrangements. The results show that there is an tensile action on welding plasticity zone in cooling process, and residual longitudinal plastic strain is reduced. Therefore, residual welding stress and distortion can be controlled and reduced. However, effects of reducing welding distortion are different with the changes of constraintment of clamps on weld zone. The residual longitudinal flexibility in aluminum alloy thin plate can be controlled in the range of 1 mm.

Key words: thin aluminum alloy plate; welding stress; plasticity strain; constraintment; numerical simulation

Biography: Zhang Jianqiang, Ph.D., Associate Professor, School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China, Tel: 0086-27-68772253, E-mail: zhangjq123456@163.com