

Influence of Speed and Heat Source Power on Welding Residual Stress of Aluminum Alloy Sheet

Hengfu ZHOU, Qing ZHANG

College of Mechanical and Vehicular Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: The residual stress and welding deformation caused by the welding of aluminum alloy sheet will lead to some errors in the assembly and manufacture of the welding structure. This paper takes 5052 Aluminum Alloy plate as the research object, using ABAQUS finite element software called FORTRAN language DFLUX welding subroutine, by changing the welding speed and heating power, the change law of Aluminum Alloy sheet temperature field and residual stress. The results show that with the increase of welding speed and heat source power, welding seam center peak temperature, the farther away from the weld center distance, reduce the peak temperature change; welding residual stress difference is not obvious in the longitudinal seam, and obvious features in the transverse weld.

Keywords: Welding speed and heat source; Temperature field; Residual stress

速度和热源功率对铝合金薄板焊接残余应力的影响

周恒夫, 张青

重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆, 中国, 400074

摘要: 铝合金薄板焊接后产生的残余应力和焊接变形对焊接结构的装配及制造会产生一定的误差。本文以 5052 铝合金薄板为研究对象, 利用 ABAQUS 有限元软件调用 FORTRAN 语言编写的 DFLUX 焊接热源子程序, 通过改变焊接速度和热源功率, 研究铝合金薄板温度场和残余应力的变化规律。结果表明: 随着焊接速度和热源功率的增大, 焊接接头中心焊缝峰值温度升高, 离中心焊缝距离越远, 峰值温度变化减小; 焊接残余应力差异性在纵向焊缝上表现不明显, 而在横向焊缝上表现明显。

关键词: 焊接速度和热源; 温度场; 残余应力

1 引言

5052 铝合金材料是一种性能优异的金属材料, 其广泛应用于车辆制造、航空及造船工业。但铝合金材料在焊接过程中, 由于母材和焊缝填充材料的非线性热循环产生塑性应变, 使金属材料在焊后易产生较大的残余应力, 增加焊接疲劳损伤、应力腐蚀开裂及疲劳断裂的敏感性, 严重影响铝合金焊接材料的生产和装备。因此, 有效预测及控制铝合金材料的焊接残余应力及分布, 对于铝合金材料的生产、装备和制造, 具有重要的意义^[1]。

随着科学技术的发展, 对焊接结构残余应力的预测, 从过去的经验估计、理论计算, 发展到现在的有限元技术, 有限元数值仿真技术能准确的预测焊接结构的温度场、应力场和变形场的分布变化规律。本文以 5052 铝合金薄板为研究对象, 基于热-弹-塑性有限元方法, 采用充分考虑温度场和应力变形场双向耦合

作用的直接耦合算法, 分别研究焊接速度和热源功率对铝合金薄板焊接残余应力的影响, 探讨铝合金薄板在不同速度和热源功率下, 温度场和残余应力的分布变化规律。

2 有限元模型的建立

2.1 材料性能参数

由于铝合金焊接材料弹性模量小、线膨胀系数大及自身导热系数高等特性, 以至于铝合金焊接结构在焊后出现较大的焊接残余应力及焊接变形。为此, 在进行焊接有限元仿真时, 必须充分考虑材料的力学性能参数和热力学性能随温度变化的影响, 本文采用的 5052 铝合金材料泊松比为 0.33, 密度、弹性模量、热导率、屈服强度、比热容和热膨胀系数随温度的变化关系如图 1 和图 2 所示^[2]。

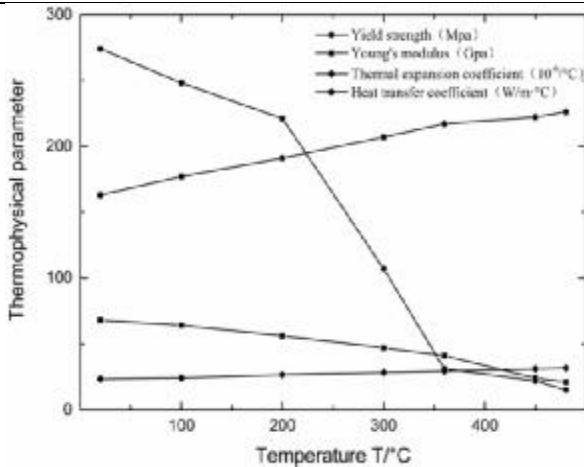


图 1. 5052 铝合金热物理参数

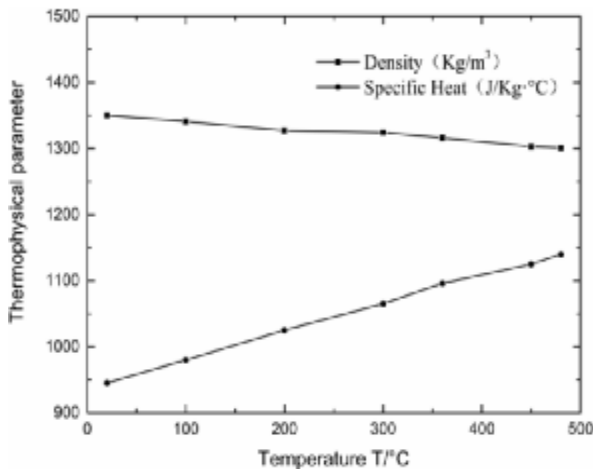


图 2. 5052 铝合金热物理参数

5052 铝合金具有优良的耐腐蚀性、成型性和焊接性，适用于气焊、点焊和氩弧焊等焊接方法，主要的化学成分为 Mg 和 Al，其相关化学成分如表 1 所示 [2]。

表 1. 5052 铝合金的化学成分

| Si | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Fe | Al |
|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|
| 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2-2 | 0.15 | 0.1 | 0.4 | 余量 |

2.2 热源模型的建立

在焊接数值模拟过程中，高斯热源和双椭球热源是两种常用的热源，都是利用 FORTRAN 语言编写的 DFLUX 热源子程序来实现热源的加载和移动。双椭球热源是由两个半椭球组成，前半椭球热源温度梯度陡变，适用于电弧挺度大和冲击效应大的焊接数值

模拟，其热流分布密度如下 [3]：

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_f b c p^{3/2}} \exp\left\{-3\left[\frac{(x-vt)^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right]\right\} \quad (1)$$

后半球的温度梯度变化缓慢，其热流分布密度为：

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c p^{3/2}} \exp\left\{-3\left[\frac{(x-vt)^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right]\right\} \quad (2)$$

式中： a_f ， a_r ， b 和 c 分别代表前半椭球长、后半椭球长、椭球的宽度和深度。Q 为热输入效率、 x ， y ， z 及 v 分别代表 X 坐标轴、Y 坐标轴、Z 坐标轴及热源移动速度。 f_r 和 f_f 前后椭球的能量分配。

2.3 网格划分及边界条件

网格划分的疏密与计算结果的准确性和效率之间存在着紧密的联系。网格划分的越细密，其有限元仿真的准确性就越高，但会降低计算效率，同时对计算机内存和硬件条件有着较大的要求。考虑到本文所用的铝合金薄板零件较为简单，以全板尺寸进行建模。在划分网格时，由于焊缝区热作用剧烈，远离焊缝的母材区域热作用相对平缓，因此采用非均匀网格划分，即在焊缝区网格划分密集，远离焊缝的母材区域逐渐稀疏。

在有限元仿真中，边界条件的约束对仿真结果的精度至关重要。对铝合金薄板施加相应的力学边界条件，以防止其产生刚性位移，使焊接产生的残余应力和变形能够自由释放。具体约束如图 3 所示，在焊缝起始端顶点处施加 X、Z 方向的位移约束，在焊缝尾部施加 Z 方向的位移约束。

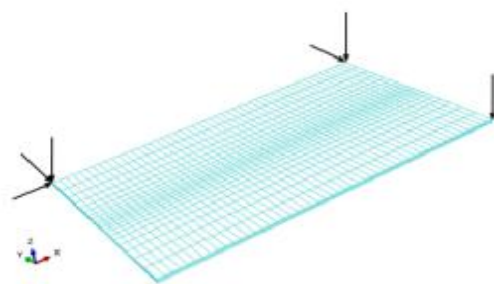


图 3. 网格划分及边界条件

3 计算结果及讨论

3.1 温度场计算结果及讨论

3.1.1 速度对温度场的影响

在焊缝中心线上，选取距离焊接起始点 150mm

处的点作为特征点，分别观察在焊接速度为 10mm/s 和 15mm/s 时，特征点温度随时间的变化规律如图 4 至图 6 所示：

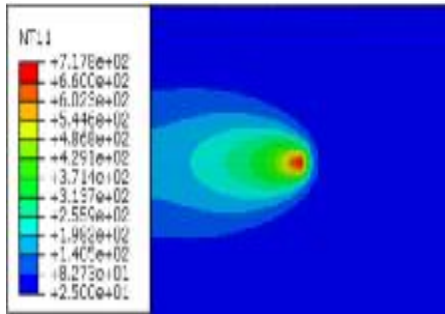


图 4. 焊速为 10mm/s 特征点的温度分布云图

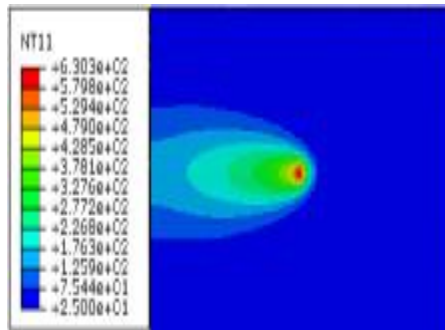


图 5. 焊速为 15mm/s 特征点的温度分布云图

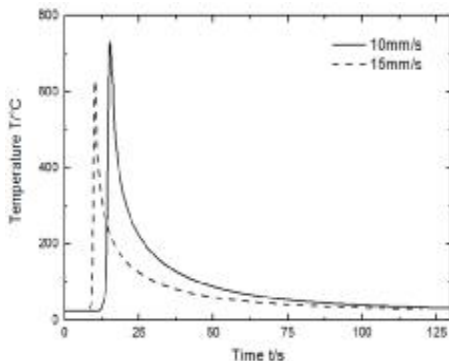


图 6. 不同焊速下焊缝中心特征点热循环曲线

通过分析可知：两种不同的焊接速度在中心焊缝方向上特征点的温度分布云图和热循环曲线的变化趋势基本一致，即热源到达特征点之后温度急速升高，达到材料的峰值温度，之后温度缓慢下降，最后趋于室温。但焊速 $v=10\text{mm/s}$ 比 $v=15\text{mm/s}$ 的特征点峰值温度大，因为在相同热量的情况下，速度慢的比速度快的能获得较多的单位热量。

3.1.2 热源功率对温度场的影响

取图 4 和图 5 同样的特征点，分别研究在热源功率为 1540J 和 1100J 下，特征点的温度变化规律如图 7 至图 9 所示：

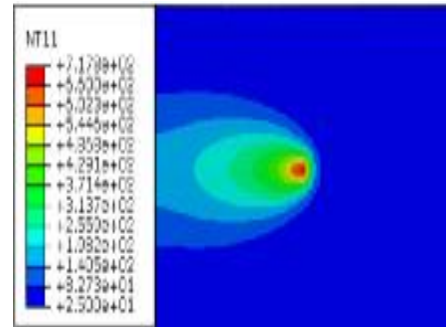


图 7. 热源功率为 1540 焦特征点温度分布云图

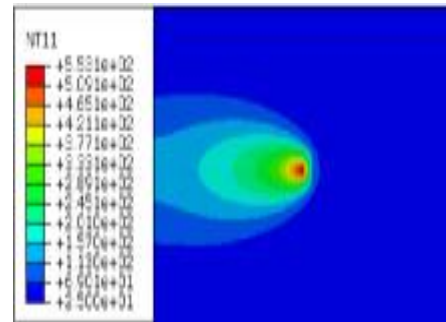


图 8. 热源功率为 1100 焦特征点温度分布云图

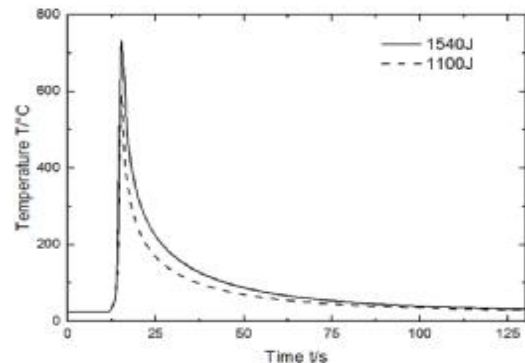


图 9. 不同热源功率下焊缝中心特征点热循环曲线

通过有限元仿真分析，得出不同热源功率下，其特征点的温度变化规律完全一致，热源功率为 1540 焦耳的特征点峰值温度为 718 摄氏度，而热源功率为 1100 焦耳的特征点峰值温度只有 553 摄氏度，低于 5052 铝合金材料的熔点^[4]。

3.2 应力场计算结果及讨论

在研究应力场时，焊接力学边界条件的约束甚为重要，因此，在焊接应力场的数值仿真中，应该建立合理地约束条件，以保证焊接应力的自由释放。

残余应力的不同。其中路径 1 在焊缝中心线上，路径 2 垂直焊缝中心线，且距离焊接起始点 100mm。

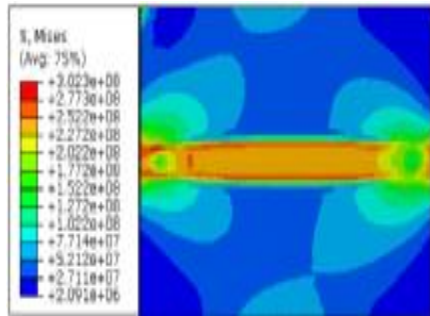


图 10. 5052 铝合金薄板焊接残余应力分布云图

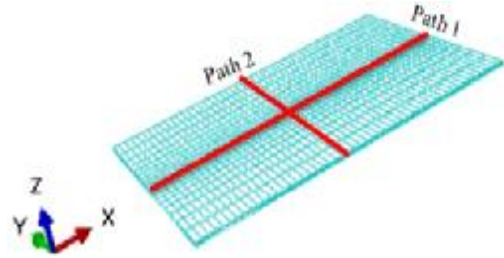


图 13. 路径分布图

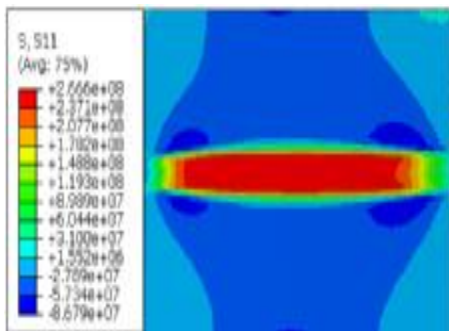


图 11. 5052 铝合金薄板纵向残余应力分布云图

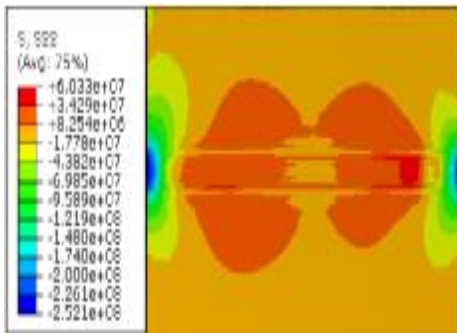


图 12. 5052 铝合金薄板横向残余应力分布云图

从图 10 可得，5052 铝合金薄板的焊接残余应力主要分布在焊缝及热影响区，距离焊缝的距离越远，其焊接残余应力越小，焊缝区域存在较大的残余应力。从图 11 和 12 可得：焊缝纵向截面上的横向残余应力比较小，起始端和尾端残余应力较大，容易引发焊接件的局部失稳。

建立图 13 所示的路径分布图，研究高斯热源和双椭圆热源在路径 1 的横向残余应力及路径 2 的纵向

3.2.1 速度对应力场的影响

铝合金薄板焊接构件在路径 1 的横向残余应力及路径 2 的纵向残余应力变化规律如图 14 和图 15 所示：在焊缝中心线上铝合金薄板残余应力分布表现为中间受拉应力、两端受压应力，垂直焊缝中心线板宽方向上残余应力分布表现为中间受拉应力、两端受压应力，与平板对接焊接残余应力分布理论^[5]描述相一致，有效的证明了有限元仿真的准确性。同时也说明了焊接速度对铝合金薄板残余应力的分布影响较小。

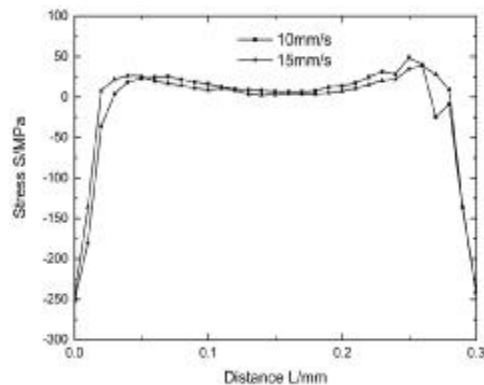


图 14. 路径 1 横向残余应力分布

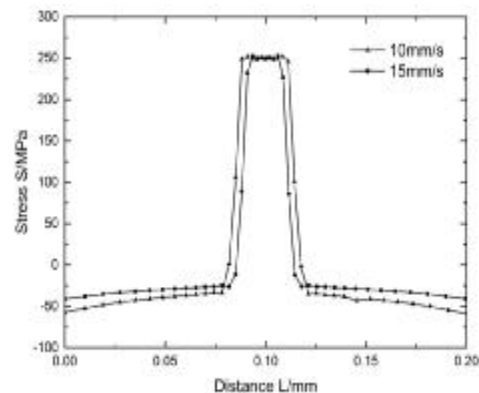


图 15. 路径 2 纵向残余应力分布

3.2.2 热源功率对应力场的影响

取热源功率为 1154 焦耳和 1100 焦耳, 研究焊接构件沿路径 1 的横向残余应力和路径 2 的纵向残余应力分布规律如图 16 和图 17 所示:

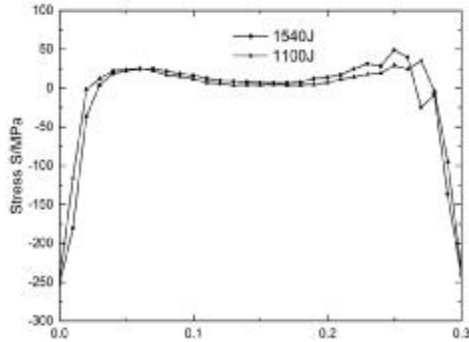


图 16. 路径 1 横向残余应力分布

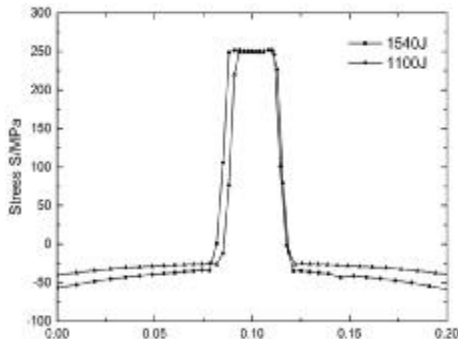


图 17. 路径 2 纵向残余应力分布

改变热源功率对铝合金薄板横向残余应力的影响不大, 而纵向残余应力影响较大。因为热源功率改变

是熔融和固相金属材料的热物理和机械性能的急剧变化所致。

4 结论

为研究焊接速度和热源功率对铝合金薄板焊接残余应力的影响, 基于直接耦合算法, 通过改变焊接速度和热源功率, 现得出如下结论:

(1) 速度和热源功率参数均成功的模拟了 5052 铝合金薄板焊接温度场、应力场的分布情况, 有效的预测铝合金薄板焊接残余应力的大小。

(2) 随着焊接速度和热源功率的增大, 焊接接头中心焊缝峰值温度升高, 离中心焊缝距离越远, 峰值温度变化减小; 焊接残余应力差异性在纵向焊缝上表现不明显, 而在横向焊缝上表现明显。

References (参考文献)

- [1] Pavelic V, Tankbachi R, Ueyehara O A, et al. Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates [J]. Welding Journal Research, 1969, 48:295-305.
- [2] Goldak J, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions, 1984, 15:229-305.
- [3] Feng Ma, Wei Liang, Kefeng Guo. Numerical simulation of welding process of aluminum alloy sheet base on direct coupling algorithm [J]. Welding Technology, 2016, 6:33-37.
- [4] Jing Zhou, Baohua Chang, Hua Zhang. Prediction of welding deformation of aluminum alloy by inherent strain method [J]. Welding Technology, 2010, 39(6):6-10.
- [5] Hongyuan Fang. Theory of welding structures [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002, 9.