

Heat Source Model on Welding Residual Stress and Deformation of Aluminum Alloy Sheet

Qing ZHANG*, Yu ZHANG

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

Abstract: The residual stress caused by welding of aluminum alloy sheet will lead to some errors in the assembly and manufacture of welded structures. This paper takes 5052 Aluminum Alloy plate as the research object, FORTRAN language DFLUX welding subroutine using ABAQUS finite element software, using Gauss heat source and double ellipsoid heat source of Aluminum Alloy welding residual stress by numerical simulation. The results show that the different heat source models have little influence on the welding residual stress, but it has certain influence on welding deformation.

Keywords: Heat source model; Numerical simulation; Residual stress and deformation

热源模型对铝合金薄板焊接残余应力及变形影响的研究

张青*, 张渝

¹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, 分别采用高斯热源和双椭球热源对铝合金薄板焊接残余应力进行数值模拟。结果表明: 不同热源模型对焊接残余应力影响较小, 但对焊接变形具有一定的影响。

关键词: 热源模型; 数值模拟; 焊接残余应力和变形

1 引言

自上世纪 80 年代开始, 部分学者开始对焊接过程进行数值模拟仿真, 针对焊接过程中热源的认识经历了由集中热源、高斯热源及双椭球热源的过程。对于集中热源模型, 其主要缺点是在焊接热影响区和融化区, 温度误差比较大, 严重影响焊接变形及残余应力的计算。为解决集中热源本身的局限性, Pavelic 等人^[1]提出了高斯热源模型, 在焊接热影响区和融化区, 获得了比较理想的温度结果。但高斯热源的局限性在于没有考虑焊接电弧对焊接材料穿透力的影响, 为考虑焊接电弧穿透力的影响, Goldak 等人^[2]提出了双椭球热源模型, 充分的解决了高斯热源未考虑电弧穿透力影响的不足。鉴于以上分析, 本文以热-弹-塑性有限元分析为基础, 以 5052 铝合金薄板为研究对象, 采用充分考虑温度场和应力变形场相互作用的直接耦合算法, 利用 ABAQUS 有限元软件调用 FORTRAN 语言编写的 DFLUX 焊接热源子程序, 探

讨不同热源(高斯热源和双椭球热源)模型对铝合金薄板焊接残余应力和焊接变形的影响。

2 有限元模型的建立

2.1 材料性能参数

铝合金焊接材料是一种性能优异的金属材料, 其被广泛应用于汽车、造船及航空航天业等工业领域。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, 对铝合金焊接材料的装配及制造都会产生一定的影响。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 铝合金材料参数见参考文献 3, 与其对应的焊接工艺参数见表 1^[3,4]。

表 1 焊接工艺参数

电压	电流	热效率	尺寸
22	110	0.7	300×200×2

2.2 焊接热源的建立

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。其中高斯热源适合电弧挺度小、冲击效应小的焊接数值仿真，其数学模型如下^[5]：

$$q(x, y, z) = q_m \exp\left\{-\left(\frac{3x^2}{R^2}\right) - \left(\frac{3y^2}{R^2}\right)\right\} \quad (1)$$

q_m 为热源中心最大热流密度：

$$q_m = \frac{3Q}{\rho R^2} \quad (2)$$

Q 为焊接加热过程中的电弧热功率：

$$Q = U I \eta \quad (3)$$

式中： I 为焊接电流； U 为焊接电压； η 为焊接电源热效率； R 为热源有限半径； X 为平行于焊接方向的距离； Y 为垂直于焊缝方向的距离。

而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，其热流分布如下^[5]：

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c p^{3/2}} \exp\left\{-3\left[\frac{(x-vt)^2}{a_f^2}\right] + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right\} \quad (4)$$

后半球的温度梯度变化缓慢，其热流分布为：

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c p^{3/2}} \exp\left\{-3\left[\frac{(x-vt)^2}{a_r^2}\right] + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right\} \quad (5)$$

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系数，且满足 $f_r + f_f = 2$ 。

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，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 1 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。

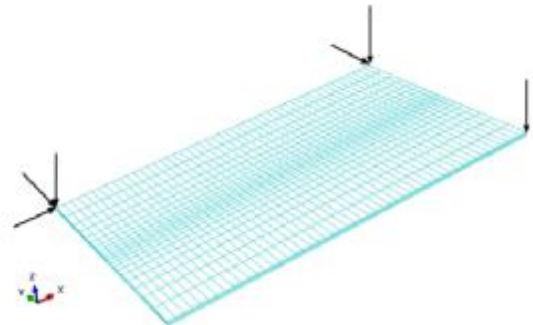


图 1. 网格划分及边界条件

3 计算结果及讨论

3.1 温度场计算结果及讨论

在焊缝中心线上等距离的选取两个特征点，在垂直焊缝中心线横截面上，选取距离焊缝中心线 50mm，75mm 的两个特征点，观察分别在高斯热源和双椭球热源的作用下，各特征点温度随时间的变化规律如图 2 所示。

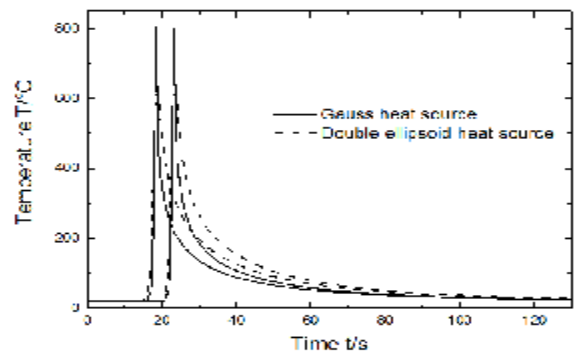


图 2. 薄板中心焊缝方向上特征点热循环曲线

从图 2 中可以看出，高斯热源和双椭球热源在中心焊缝方向上特征点的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，达到材料峰值温度，之后温度缓慢下降，最后材料温度趋于室温。但双椭球热源模型特征点的峰值温度比高斯热源

模型特征点的峰值温度高, 因为双椭圆热源热流密度不仅体现在 X、Y 轴两个方向上, 而且在焊缝深度(Z 方向)上也有分布, 但高斯平面热源模型热流密度只体现在 X、Y 轴两个方向上, 而在焊缝深度(Z 方向)上没有分布。

3.2 应力场计算结果及讨论

建立图 3 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。

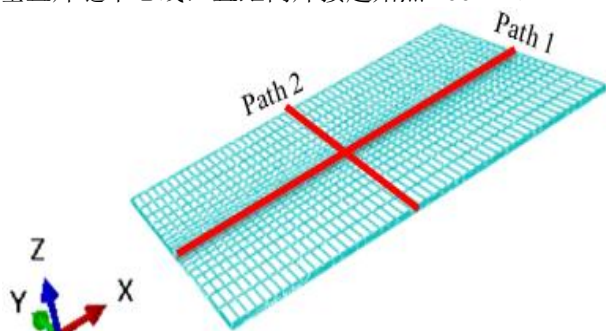


图 3. 路径分布图

从图 4 和图 5 可知: 高斯热源和双椭圆热源模型在路径 1 的横向残余应力及路径 2 的纵向残余应力变化规律基本一致, 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^[6]描述相一致, 进一步的证明了有限元仿真的准确性。同时也说明了焊接热源对铝合金薄板残余应力的分布影响不大。

失稳现象也是铝合金薄板焊后比较容易出现的问题。由图 5 数据可知: 铝合金薄板焊接残余应力主要分布在焊缝及材料的热影响区内, 距离焊缝越远, 其残余应力就越小。若焊缝中心的峰值温度超过材料的屈服应力, 那焊件将会发生裂纹, 甚至产生疲劳破坏, 严重影响焊件的使用寿命。因此焊后对焊接件进行必要的热处理工艺, 对减小焊接件的残余应力具有一定的参考作用^[6]。

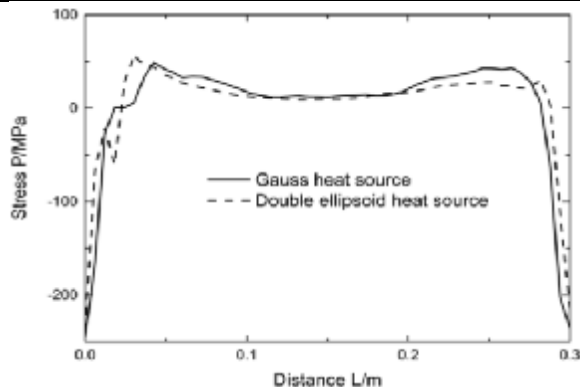


图 4. 路径 1 横向残余应力分布

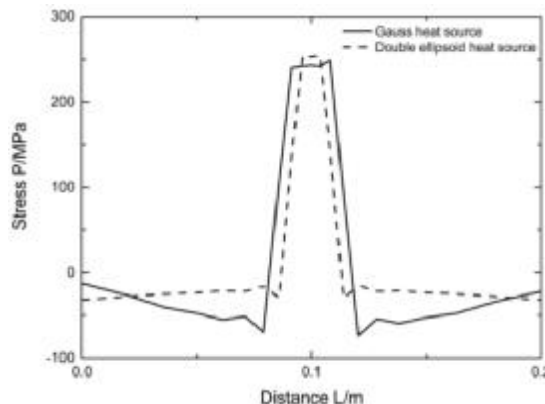


图 5. 路径 2 纵向残余应力分布

3.3 变形场计算结果及讨论

焊接变形严重影响焊接件的精度与装配, 造成大量工业材料、人力资源的浪费, 因此就工业生产而言, 开展焊接结构变形的预测极其重要。铝合金焊接材料由于弹性模量小、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变形。

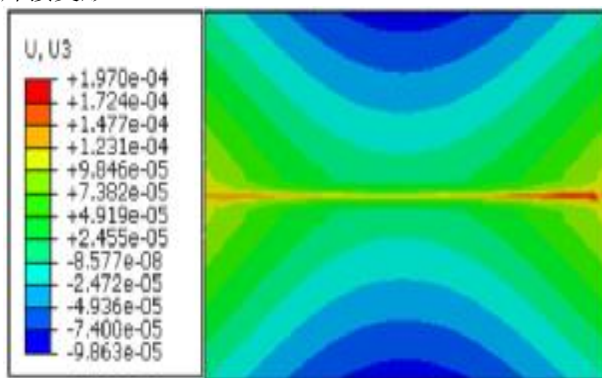


图 6. 双椭圆热源角变形分布云图

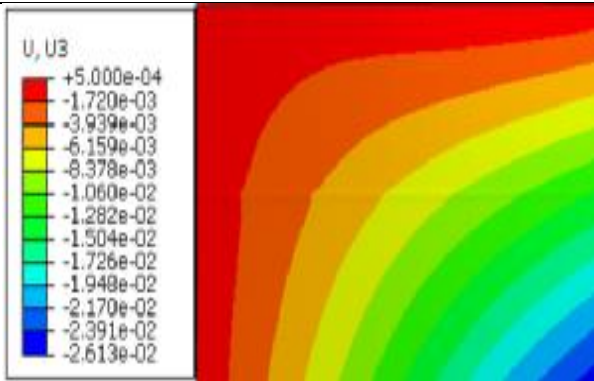


图 7. 高斯热源角变形分布云图

从图 6 和图 7 中可知：高斯热源模型和双椭球热源模型所产生的角变形量差别很大，其中高斯热源模型所产生的角变形量集中分布在 2mm 至 8mm 之间，而双椭球热源所产生的角变形量则很小，最大变形量为 0.2mm。因此采用双椭球热源模型可以减小焊接后变形。

4 结论

为研究高斯热源和双椭球热源模型对铝合金薄板

焊接残余应力和变形的影响，采用直接耦合算法的热-弹-塑性有限元模拟仿真，得出如下结论：

(1) 两种热源模型均成功的模拟了 5052 铝合金薄板焊接温度场、应力场和变形场的分布情况，有效的预测铝合金薄板焊接残余应力和变形的大小。

(2) 热源模型对铝合金薄板焊接残余应力影响不大，但对焊接变形，尤其是角变形量影响较大。

References (参考文献)

- [1] Pavelic V, Tankbakuchi R, Uyehara 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] Chunming Mo, Bainian Qian, Xuming Guo. Research progress in calculation model of welding heat source [J]. Transactions Of The China Welding Institution, 2001,22(3) :93-96.
- [6] Hongyuan Fang. Theor of weldingstructure [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.21-24.