

# 基于Sysweld的6061铝合金T型接头热力耦合模拟

## Thermo-mechanical Coupling Simulation of 6061 Aluminum alloys T-joint Based on Sysweld

供稿|李志强 / LI Zhi-qiang

内  
容  
导  
读

采用双椭球体热源分布模型，基于Sysweld仿真软件，对6061铝合金T型接头焊接过程进行热力耦合数值模拟仿真。首先通过SolidWorks建立三维模型并导入Visual-Mesh进行网格划分，之后在Visual-Weld中对焊接过程进行模拟仿真，获得了温度场及应力应变的分布情况，然后对焊接过程温度云图及焊件整体形变进行分析。结果表明：熔池金属在焊缝边缘且体积较小，加热面积小、功率密度大，对周围金属的热影响较小，位移误差最大处2.64 mm，焊接应力在夹具处最大，热源选择误差不大，仿真结果可信，可以为后续实验提供指导。

6061铝合金是经热处理预拉伸工艺生产而成的一种高品质合金材料，主要合金元素是镁与硅，并形成 $Mg_2Si$ 相。因其具有中等的强度、氧化效果较好、同时抗腐蚀性和可焊接性良好，使其具有良好的加工性能且加工后不变形、材料致密、易于抛光及上色膜等众多优点，已被广泛应用于航空航天、交通运输、建筑装饰、电子家电、板带、包装、印刷等领域<sup>[1]</sup>。

目前，大部分企业仍然采用MIG焊来焊接铝合金材料，但是在焊接过程中，因其在高温焊接环境下强度非常低，不足以使熔化形成的熔池金属得

到支撑，从而会出现一些焊接缺陷，如焊缝成形不良、塌陷和烧穿等缺陷<sup>[2]</sup>。另外在焊接中由于铝合金表面的氧化膜极易吸收气体水分，在焊缝金属一次结晶过程中来不及逸出而形成气孔<sup>[3]</sup>。Javier等<sup>[4]</sup>比较了不同热输入对6061铝合金力学性能的影响，母材由于热输入的作用形成不同的区域，热影响区中存在一个硬度最低区域。

在现代工业生产中，焊接质量主要由焊工熟练的焊接技能来保证，而焊接时的线能量多少、焊件温度分布及应力影响难以掌握，需要大量实验。采用数值模拟的方法，利用有限元对温度分布及应力

作者单位：青海高等职业技术学院，青海 海东 810700

应变进行预测, 确定合适的焊接工艺参数。

本文采用双椭球热源模型, 利用Sysweld软件, 对6061铝合金T型接头焊接过程进行热力耦合数值模拟仿真, 计算求解在焊接过程中的焊接温度场、位移及变形、应力应变, 分析所选焊接参数的可行性, 为后续实验提供参数依据。

## T型接头的有限元分析建模

### 有限元模型建立

焊接件为6061铝合金, 翼板尺寸为200 mm×100 mm×4 mm, 腹板尺寸为200 mm×50 mm×4 mm, 焊脚高4 mm。通过Solidworks进行建模并以IGES格式导出。

### 网格划分

将由Solidworks导出的IGES格式模型导入到Visual-Mesh进行网格的划分, 为保证焊缝及其附近高温区域得到较为精确的温度分布, 焊缝区及附近区域划分为密网格, 其他区域为疏网格。采用8节点6面体单元对几何模型进行网格划分。整个模型中共有3D单元16974个, 22610个节点。根据实际焊接工况, 设置了边界条件约束, 其中红色节点限制了 $z$ 方向位移, 为了消除刚体位移, 底部选取3节点分别限制 $x$ 、 $xy$ 、 $xyz$ 方向位移, 具体网格划分如图1所示。

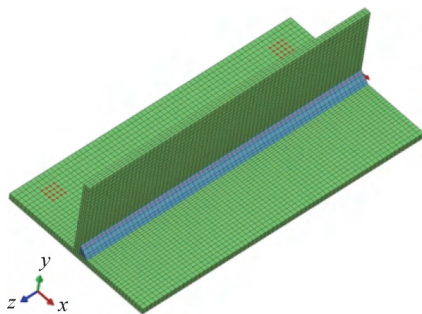


图1 网格的划分

### 组的创建

由于Sysweld数值模拟是模拟焊接过程中焊枪沿固定轨迹进行起弧焊接, 因此采用Visual-Weld软件对焊接件进行分组处理。因实验设备局限, 用FNUAC弧焊机器人进行实际焊接操作, 焊枪一次

性焊接完成一条角焊缝。焊接过程中所需焊接轨迹线、焊接参考线、焊接起始点、焊接终止点、焊接开始单元等条件(见图2)由Visual-Weld完成。

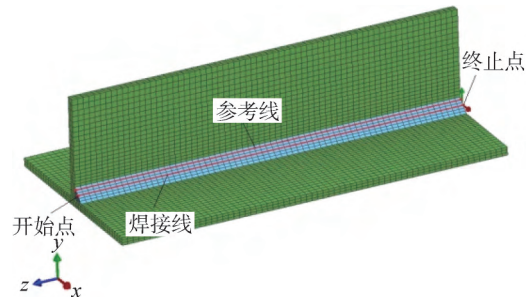


图2 焊接件分组

### 材料性能参数

为提高模拟仿真结果准确性, 鉴于6061热导率大, 因而在构件的焊接过程中需了解6061铝合金的热物理性能和机械力学性能参数随温度的变化<sup>[5]</sup>。在Sysweld仿真软件的材料数据库中, 热导率、比热容等热物理性能和杨氏模量、屈服强度等机械力学性能都可以根据材料的变化特征在Sysweld中加载图表。其中, 比热容、热导率随温度的变化曲线如图3所示, 杨氏模量、屈服强度参数如图4所示。

## Sysweld求解

### 热源数字模型的建立

在MIG焊接的数值模拟中, 双椭球热源模型是最为通用的三维模型<sup>[5]</sup>, 因在焊接方向上, 热源前后能量密度不一致, 而椭球形呈几何体状, 有着不同的轴长, 可以准确反映出焊接方向上的能量密度不对称。在Sysweld模拟软件中, 直接调用双椭球模型的热源拟合模型。

在实验过程中, 设置了电流和焊接速度两个变量进行尝试性实验, 考虑到焊接过程的稳定性、焊缝成形、焊接热影响等因素, 最终确定参数为焊接电压: 18.75 V, 焊接电流: 120 A, 焊接速度: 5 mm/s, 焊接线能量: 450 J/mm。

### 焊接向导及求解

按照所需焊接条件, 根据Sysweld焊接向导以及前期所做工作对焊接件进行焊接前处理, 具体焊接

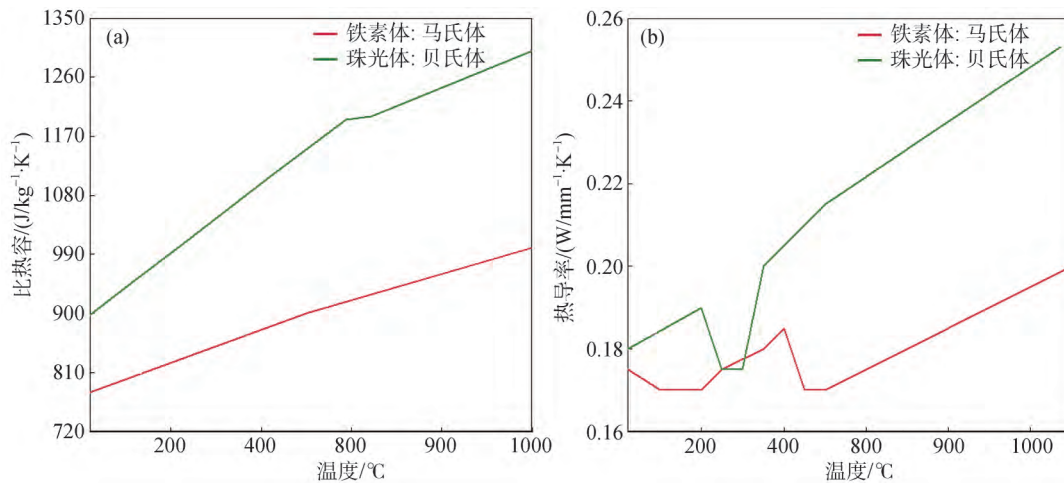


图3 材料的热物理性能参数随温度变化曲线: (a) 比热容; (b) 热导率

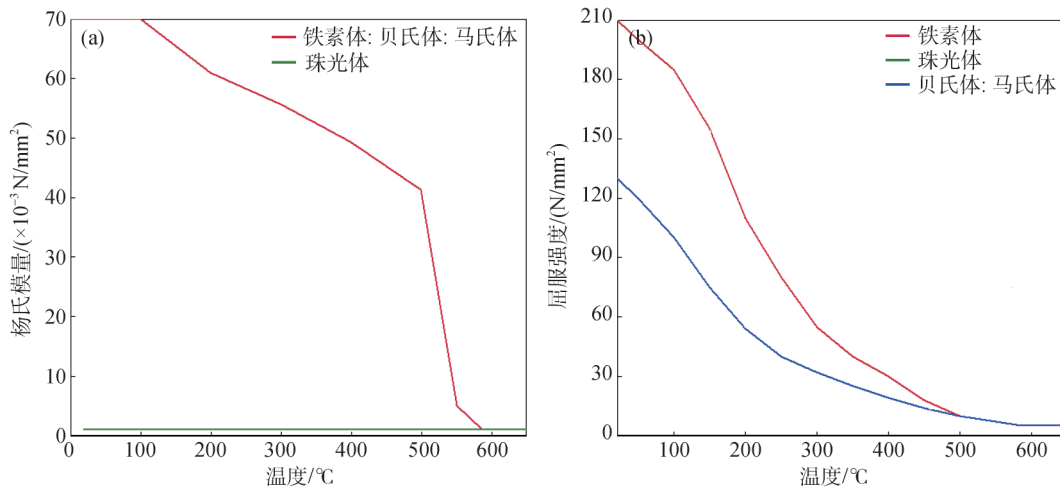


图4 材料的力学性能参数随温度变化曲线: (a) 杨氏模量; (b) 屈服强度

向导流程如表1所示。检查所有工艺过程数据、边界条件, 保证焊接求解过程的准确性, 完成所有检查工作, 进行计算求解。

表1 焊接向导流程

操作步骤	具体操作	备注
热源函数	Hsf.fct	双椭球热源模型
散热函数	对流和辐射	空冷, 边界温度20 °C
导入网格	T-joint.vdb	Visual-Mesh导出的网格
焊接操作	焊接线、参考线、焊接起始点	Visual-Weld分组材料
机械约束	$U_x, U_y, U_z$	三个方向的约束

## 数值模拟及分析结果

### 焊接瞬时温度场分析

6061铝合金热导率大, 试件内部热量传递较

快, 图5为在焊接模拟过程中15 s时刻的瞬时温度场分布云图。从图中可以看出, 粉红色部分区域呈现椭球状, 黄色、黄绿色、绿色等等温区域也呈现椭球状, 整个热源的温度场在构件上呈现椭球分布。热源前段等温线密集, 温度梯度大, 温度变化剧烈, 热源后端等温线稀疏, 温度梯度较小, 变化较慢, 焊缝处金属最高温度达到800 °C左右。随着热源的运动, 焊接温度场处于动态变化过程, 其中粉色、红色区域基本上达到焊缝边缘且体积较小, 说明此热源在6061铝合金T型接头焊接时满足加热面积小、功率密度大等理想热源的特征, 对周围金属的热影响较小, 适合焊接。

在焊缝横截面上, 选取热源及其邻近的3个节点, 绘制每个节点的热循环曲线, 如图6所示。由



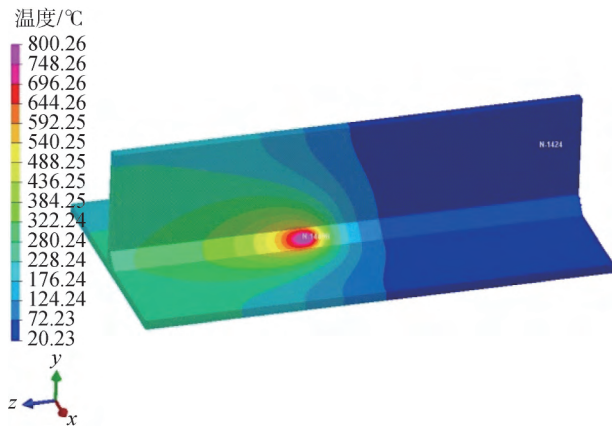


图5 15 s时T型接头瞬时温度场分布云图

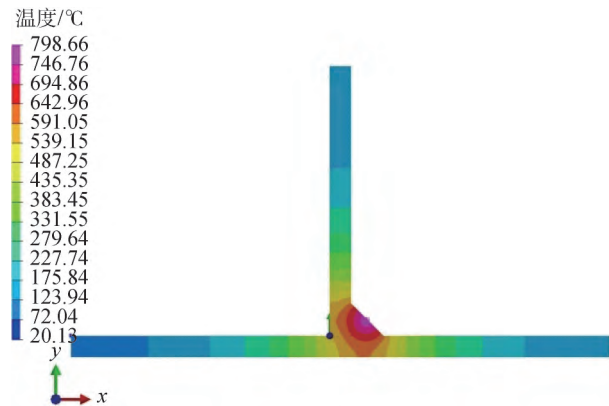


图7 20 s时刻的xOy截面温度场云图

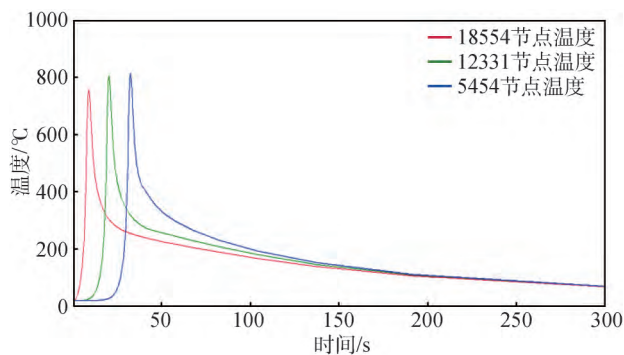


图6 焊缝截面上3节点的热循环曲线

图可知，在热源作用下，需要焊接部分加热速度极快，温度迅速上升到800℃左右，其他近缝点温度也迅速上升并达到材料的熔点，说明焊接所用线能量满足实际焊接的要求。当温度达到相变温度之后，在相变温度以上的停留时间比较短，说明在焊接过程中，发生相变的时间短，保证了原焊件的性能。当温度达到峰值温度之后，冷却速度也非常快，在5 s内就可以从峰值温度冷却到300℃，随后缓慢冷却到室温。

### 焊接变形分析

在焊接过程中，选取20 s时刻的xOy截面温度场云图，如图7所示。从图中可以看出，焊缝在翼板和腹板的上表面且焊缝处温度处于最高，导致翼板和腹板上下表面靠近焊缝处的节点受热的影响不同，所经历的焊接热循环不同；同样翼板和腹板距离焊缝远近不同的各点，温度分布极不均匀。这种温度极不均匀就导致了焊件在厚度方向上的横向收缩变

形，导致构件发生变形。

焊件变形位移量云图如图8所示。从图可知，在翼板焊缝一端，由于受热影响大，并且夹具少，焊接变形量大，最大处可达2.64 mm；腹板上最大位移量在起焊段腹板边缘处，位移量达到1.76 mm，但是只有极少部分，占据整个腹板的比例很小，从整个T型构件尺寸来看，位移量在可控范围内。

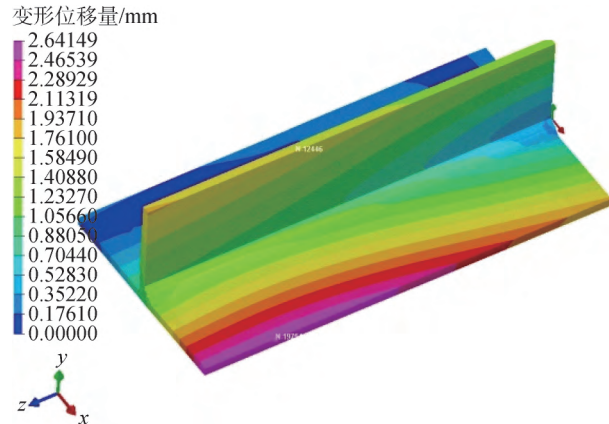


图8 焊接变形位移量

### 焊接应力分析

构件焊接时的应力云图如图9所示。由图可知，焊缝处存在较大的纵向应力和横向应力，厚度方向应力较小，粉色、黄色区域为焊接时模拟夹具所在位置，应力最大，达到220 MPa。三个方向上的应力是由于各个方向上的收缩变形引起的，纵向和横向应力由于构件尺寸大，焊缝处收缩变形受到周围金属的约束而产生较大的应力分布<sup>[5]</sup>。

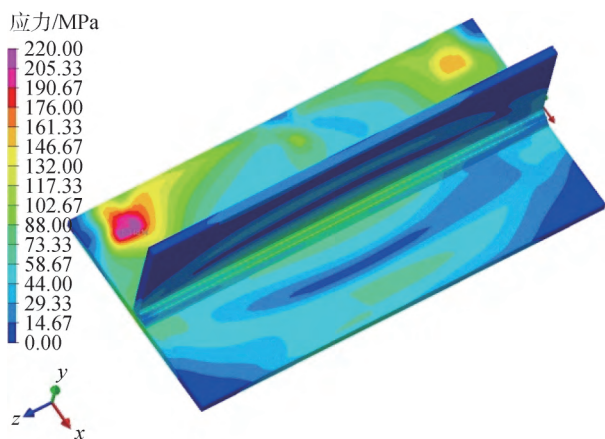


图9 构件焊接时的应力云图

### 结束语

采用双椭球体热源分布模型，基于Sysweld仿真软件，对6061铝合金T型接头焊接过程进行热力耦合数值模拟仿真，获得温度场、应变场的变化规律，熔池金属在焊缝边缘且体积较小，加热面积小、功率密度大，对周围金属的热影响较小，位移误差最大处2.64 mm，焊接应力在夹具处最大，热源选择误差

大，仿真结果可信，可以为后续实验提供指导。

### 参考文献

- [1] 李智钟, 周建平, 许燕, 等. 基于Sysweld的T形管焊接件温度及应力应变场数值模拟分析. 焊接学报, 2016, 37(4): 77
- [2] Wilhelm C, La Caille G, Wright N, et al. Mechanical properties and microstructure characterization of coated AM2 Al 6061-T6 mats exposed to simulated thermal blast. *Eng Fail Anal*, 2009, 16(1): 1
- [3] 罗维. 大厚度6061-T6铝合金板搅拌摩擦焊研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010
- [4] Javier A V, Jaime E T, Jovanny A P, et al. Analysis of heat input effect on the mechanical properties of Al-6061-T6 alloy weld joints. *Mater Des*, 2013, 52(12): 556
- [5] 侯越峰. 铝合金模板MIG焊工艺优化及焊接数值模拟[学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2015

基金项目: 青海高等职业技术学院学院科学研究项目(No: GZYYJ201803)。

作者简介: 李志强(1990—), 男, 甘肃白银人, 本科, 助教, 主要从事材料成型教育教学。通信地址: 810700青海省海东市乐都区青海高等职业技术学院, E-mail: 991174683@qq.com。



【封堵铁流】喻跃生