

轻合金成形

# 基于 CEL 方法的 6005A 铝合金搅拌 摩擦焊数值模拟研究

李娅娜<sup>a\*</sup>, 解飞飞<sup>b</sup>, 张生芳<sup>c</sup>

(大连交通大学 a.中车学院 b.机车车辆工程学院 c.机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** **目的** 研究 6005A 铝合金搅拌摩擦焊全过程温度场及焊后残余应力的分布规律。**方法** 基于耦合的欧拉-拉格朗日 (CEL) 方法, 应用 Johnson-Cook 本构模型, 并采用质量缩放技术, 建立搅拌摩擦焊热力耦合仿真模型, 模拟分析 6005A 铝合金搅拌摩擦焊不同阶段的温度场变化和焊后应力分布情况。通过红外热像仪温度场试验、X 射线应力场试验和宏观形貌试验, 对数值模型进行验证。**结果** 在下压与预热停留阶段, 温度快速升高至 545 °C, 且呈对称分布; 在焊接阶段, 焊缝区域最高温度为 546 °C, 出现在返回侧, 返回侧温度略高于前进侧温度, 呈不对称分布。焊后残余应力集中在焊缝中心两侧 40 mm 范围内, 垂直于焊缝方向的横向/纵向残余应力分布曲线呈“M”形; 残余应力在焊缝两侧呈不对称分布, 表现为返回侧残余应力高于前进侧残余应力, 其中最大纵向残余应力为-174 MPa, 最大横向残余应力为 206 MPa, 应力最大点均出现在返回侧。待测点实测温度与模拟温度误差不超过 5%; 待测点实测残余应力与仿真值吻合较好, 横/纵向残余应力误差分别为 16.3%、16.45%; 模拟焊缝与实际焊缝宏观形貌吻合较好。**结论** 在搅拌摩擦焊过程中, 材料流动不充分使返回侧温度略高于前进侧温度, 而焊接过程中不均匀的热分布导致焊后残余应力也呈返回侧数值略高于前进侧数值的不对称分布; 通过将试验和模拟得出的温度场、应力场、宏观形貌进行对比分析, 可知试验与仿真误差较小, 数值模型能够反映真实的焊接过程, 从而验证了 6005A 铝合金 CEL 数值模型的正确性。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 6005A 铝合金; CEL 方法; 温度场; 残余应力

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2025.01.001

**中图分类号:** TG453.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2025)01-0001-08

## Numerical Simulation of 6005A Aluminum Alloy Friction Stir Welding Based on CEL Method

LI Ya'na<sup>a\*</sup>, XIE Feifei<sup>b</sup>, ZHANG Shengfang<sup>c</sup>

(a. The College of CR, b. College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, c. School of Mechanical Engineering,  
Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China)

收稿日期: 2024-06-18

Received: 2024-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 (52075066); 辽宁省教育厅项目 (LJKZ0497)

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (52075066); Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKZ0497)

**引文格式:** 李娅娜, 解飞飞, 张生芳. 基于 CEL 方法的 6005A 铝合金搅拌摩擦焊数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(1): 1-8.

LI Ya'na, XIE Feifei, ZHANG Shengfang. Numerical Simulation of 6005A Aluminum Alloy Friction Stir Welding Based on CEL Method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(1): 1-8.

\*通信作者 (Corresponding author)

**ABSTRACT:** The work aims to study the distribution law of temperature field and post-weld residual stress in the whole process of 6005A aluminum alloy stir friction welding. Based on the coupled Euler-Lagrange (CEL) method, Johnson-Cook eigen-structure model and mass scaling technology was used to establish a thermal coupling simulation model to simulate and analyze the temperature field changes and post-weld stress distribution in different stages of 6005A aluminum alloy stir friction welding. The numerical model was validated by an infrared thermography temperature field test, an X-ray stress field test and a macro morphology test. During the downward pressure and preheating dwell stage, the temperature rose rapidly to 545 °C and was symmetrically distributed. The highest temperature in the weld area during the welding stage was 546 °C, which occurred on the return side, and the temperature of the return side was slightly higher than that of the forward side, with an asymmetric distribution. The post-weld residual stress was concentrated in the weld center on both sides of the 40 mm range. That perpendicular to the weld direction of the transverse/longitudinal residual stress distribution curve was in a "M" shape; The residual stress in the weld on both sides of the asymmetric distribution, the performance of the return side of the side was higher than the forward side, which the maximum longitudinal residual stress of -174 MPa, the maximum transverse residual stress of 206 MPa, the maximum stress points all appeared in the return side. The error between the measured and simulated temperatures at the point measured did not exceed 5%. The measured residual stresses at the point to be measured matched well with the simulated values, and the errors of the transverse/longitudinal residual stresses were 16.3% and 16.45%, respectively. And the simulated weld and the actual weld macroscopic morphology were in good agreement. During the process of friction stir welding, the temperature of the return side is slightly higher than that of the forward side due to the insufficient material flow, and the asymmetric distribution of post-weld residual stresses, which is slightly higher than that of the forward side due to the inhomogeneous heat distribution in the process of welding, is also presented. Through the comparative analysis of the temperature field, stress field, and macroscopic morphology between the experimental and simulated ones, the experimental and simulated errors are relatively small, and the numerical model can reflect the real welding process, thus verifying the good agreement of the 6005A aluminum alloy weld with the actual weld. Thus, the correctness of the numerical model of 6005A aluminum alloy CEL is verified.

**KEY WORDS:** friction stir welding; 6005A aluminum alloy; CEL method; temperature field; residual stresses

6005A 铝合金被广泛用于汽车、轨道交通和航空航天领域, 由于其高强度、优异的抗腐蚀性和可成形性, 在制造业中备受青睐。搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是一种新型的固相连接技术, 具有低能耗、无污染、高焊接质量等优势, 在铝合金、钛合金、镁合金等材料的焊接领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。相比于传统焊接方法, 搅拌摩擦焊的接头具有变形小、焊缝美观、残余应力低且接头强度高特点。然而, 搅拌摩擦焊过程涉及材料大变形、热力耦合, 通过试验来研究温度场和残余应力分布规律具有一定的技术条件限制和复杂性, 数值模拟因具有可预见性、能处理复杂计算等优势, 在工程实践中得到了广泛的应用。

欧拉-拉格朗日方法 (CEL) 是一种耦合方法, 具有以下特点: 支持固体材料的大变形分析; 可预测宏观形貌; 可以提取任意点的应力变化和热循环曲线<sup>[3]</sup>。该方法避免了 FSW 模拟过程中大变形导致的网格畸变问题, 并能精确描述物质的边界条件, 在 FSW 模拟中具有一定的优势。随着 CEL 方法中质量缩放技术的发展, 在保证计算精度的前提下, 计算效率大大提高, 采用 CEL 法对 FSW 过程进行研究的案例逐渐增多。基于此方法, 朱智等<sup>[4]</sup>、弋翔宇<sup>[5]</sup>、Salloomi 等<sup>[6]</sup>研究了同种材料焊接过程中的温度分布, 分布结

果均表现为返回侧温度高于前进侧温度。段亚雄等<sup>[7]</sup>研究了铝镁异种金属焊接, 温度场表现为返回侧 (镁侧) 温度较低。马核等<sup>[8]</sup>、张帅等<sup>[9]</sup>、武晓燕等<sup>[10]</sup>研究了工艺参数对温度场的影响规律, 结果表明, 在一定参数区间内温度与转速成正比、与焊速成反比。Wen 等<sup>[11]</sup>、Akbari 等<sup>[12]</sup>、Das 等<sup>[13]</sup>研究了 FSW 过程的材料流动情况, 并模拟了隧道、飞边缺陷。马付建等<sup>[14]</sup>、吴晓虎等<sup>[15]</sup>研究了塑性应变的分布特点及范围, 发现塑性应变区在焊缝两侧一定范围内。

综上所述, 基于 CEL 方法的 FSW 研究多是围绕温度场、材料流动及缺陷展开讨论, 对焊后残余应力的研究较少, 而残余应力的存在对焊接接头的疲劳寿命有直接影响, 所以研究焊后残余应力分布规律在实际应用中有重要的现实意义。此外, 已有研究工作使用的工件材料大多是铝、镁合金材料, 如 6061、7055、AZ31 等牌号, 而 6005A 铝合金作为如今轻量化时代新能源汽车、智能动车组等产品的主要材料, 基于 CEL 法 FSW 的研究工作尚有待开展。因此, 本文采取数值模拟与试验相结合的方式, 首先基于 CEL 方法建立 FSW 热力耦合仿真模型, 在对 4 mm 厚的 6005A 铝合金搅拌摩擦对接焊进行温度场分析的基础上, 对焊后残余应力进行探讨和分析, 然后用相应的试验来验证数值模型的合理性与有效性。

# 1 试验

## 1.1 FSW 试验

本次试验使用 HT-JM20 型专业搅拌摩擦焊接设备, 如图 1 所示, 在焊接过程中, 主轴固定即搅拌头保持旋转但没有位移。搅拌头针长 3.5 mm, 头部直径为 3 mm, 根部直径为 5 mm, 轴肩直径为 10 mm, 有螺纹, 材料为 H13 钢。板材尺寸为 160 mm×75 mm×4 mm, 材料为 6005A 铝合金, 材料供货状态为 T6, 即固溶处理+人工时效。焊接工艺参数如下: 转速为 1 500 r/min、焊接速度为 120 mm/min、倾角为 2°、预热停留时间为 4 s、焊接有效距离为 120 mm。由于搅拌头与板材之间存在倾角, 搅拌头实际下压深度接近材料厚度, 焊后观察焊缝截面质量较好且底部无弱连接现象, 因此试验过程中没有设置轴肩下压量。



图 1 搅拌摩擦焊接设备  
Fig.1 Friction stir welding equipment

## 1.2 温度测量试验

为观察焊接过程中焊件表面温度分布和变化规律, 采用红外测温装置对焊接过程进行测温试验, 该装置由三脚架、红外测温仪、配套电脑等组成, 测温范围是 0~1 000 °C, 如图 2 所示。试验前将红外测温仪摆放好, 系统会自动测距对焦, 焊接开始后, 板材表面的温度信息会被完整拍摄下来, 后续可在系统软件中提取所需的温度信息。本文将测温仪摆放在前进侧, 试验当天室内温度约为 20 °C。

纵向残余应力的测量, 其中 1~4 号点在返回侧, 5 号点在焊缝中间位置, 6~9 号点位于前进侧, 为确保检测结果准确, 每一个点位至少检测 2 遍。

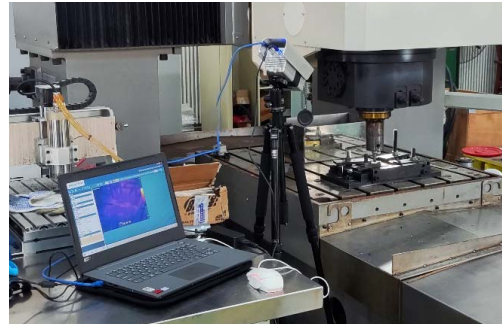


图 2 温度测量装置  
Fig.2 Temperature measurement device



图 3 X 射线应力测定仪  
Fig.3 X-ray stress tester

## 1.3 残余应力检测试验

为验证 FSW 有限元模拟焊后残余应力的大小和分布情况, 对实际焊接件进行残余应力检测。选用 X 射线法进行无损检测, 应力测定仪型号为 XL-640, 如图 3 所示。检测时先在焊板上用记号笔标出要检测的点位, 待测点位如图 4 所示, 对 9 个点进行横向和

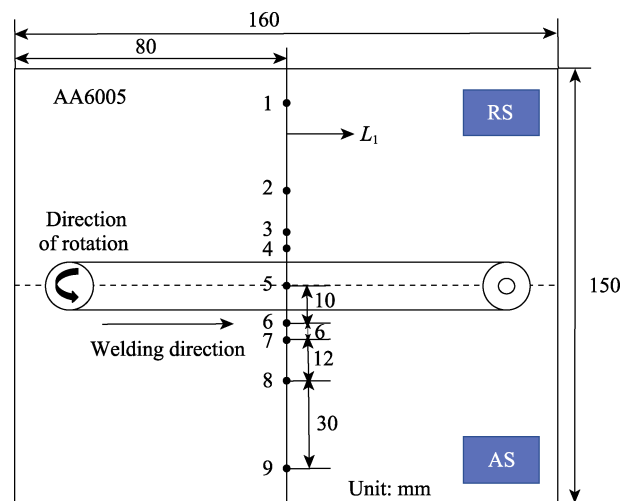


图 4 残余应力待测点示意图  
Fig.4 Schematic diagram of residual stress at point to be measured

# 2 FSW 有限元模型

## 2.1 几何模型

板材几何模型如图 5 所示, 模型设置为欧拉体,

厚度 4 mm, 长 160 mm, 宽 150 mm, 为了减少网格数量, 只在焊线 20 mm 宽度范围内建立 1 mm 的空位层, 用来模拟焊接时产生的飞边。搅拌头几何模型如图 6 所示, 与实际搅拌头相比忽略了螺纹和锥度, 其余完全一致, 由于不分析搅拌头, 将其设置为拉格朗日刚体。

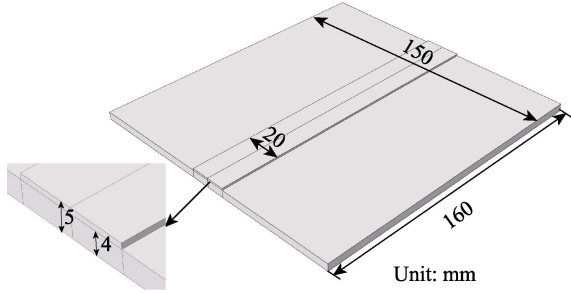


图 5 板材几何模型  
Fig.5 Geometry model of plates

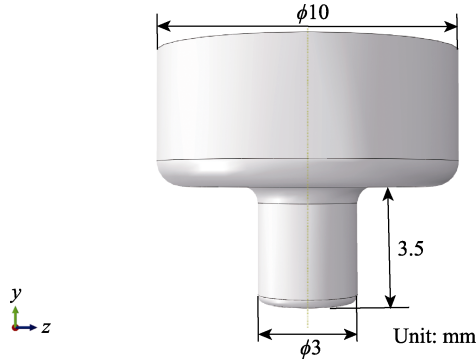


图 6 搅拌头几何模型  
Fig.6 Geometry model of tool

## 2.2 产热分析

FSW 的产热过程是温度场、材料塑性流动场共同耦合的动态变化过程, 包括摩擦产热<sup>[16-17]</sup>和材料内部的塑性变形产热, 而 CEL 方法实现了对温度场、材料流动同时耦合分析。在有限元建模过程中, 通过设置摩擦因数和塑性变形热转化速率系数来计算焊接过程中的温度, 本文取摩擦因数为 0.4, 转化系数为 1。

## 2.3 材料模型

在 FSW 过程中, 焊缝区域材料在复杂运动中会发生剧烈的塑性变形。采用 J-C 本构模型来描述材料之间的复杂关系, 如式 (1) 所示。

$$\bar{\sigma} = \left( A + B \bar{\epsilon}_{pl}^n \right) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $A$  为初始屈服应力;  $B$  为硬化系数;  $\bar{\epsilon}_{pl}$  为等效塑性应变;  $C$  为应变速率系数;  $\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}$  为等效塑性应变速率;  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变速率;  $T$  为当前温度;  $T_{room}$  为室温;  $T_{melt}$  为材料熔点;  $m$ 、 $n$  分别为

热软化指数和硬化指数。6005A 铝合金的 J-C 本构模型参数见表 1。

表 1 6005A 本构模型参数<sup>[18-19]</sup>  
Tab.1 Parameters of 6005A J-C intrinsic model<sup>[18-19]</sup>

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$C$	$n$	$m$	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_r/^\circ\text{C}$
228.69	330.3	0.007	0.59	0.008 4	660	25

此外, 考虑材料属性的温度敏感性, 设置与温度相关的热物理属性参数, 如表 2 所示, 所有参数由 JMatpro 软件计算所得。搅拌头材料采用 H13 工具钢, 密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。

表 2 6005A 铝合金材料属性  
Tab.2 Material properties of 6005A aluminum alloy

$T/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$
25	2 730	890	213	71	0.332	$2.4\times 10^{-5}$
100	2 710	930	216	68	0.335	$2.3\times 10^{-5}$
200	2 690	990	215	64	0.34	$2.2\times 10^{-5}$
300	2 670	1 070	210	59	0.346	$2.3\times 10^{-5}$
400	2 650	1 130	199	54	0.354	$2.4\times 10^{-5}$
500	2 620	1 290	190	48	0.361	$2.2\times 10^{-5}$
600	2 600	1 980	183	42	0.369	$2.5\times 10^{-5}$

Note:  $T$  is temperature;  $\rho$  is density;  $c_p$  is specific heat capacity;  $k$  is thermal conductivity;  $E$  is elastic modulus;  $\nu$  is Poisson's ratio;  $\alpha$  is coefficient of thermal expansion.

## 2.4 边界条件

### 2.4.1 机械边界条件

由于 CEL 方法将材料当成流体, 因此为了防止材料溢出, 将板材底面、侧面相对应的材料流动法向速度设置为 0, 如图 7 所示。在搅拌头中心设置一个参考点来控制搅拌头的运动, 由于搅拌头存在倾角, 故建立搅拌头局部坐标系, 同时修正该坐标系下的实际速度分量。

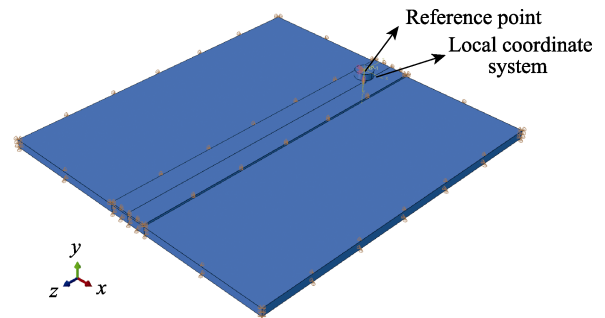


图 7 机械边界条件  
Fig.7 Mechanical boundary conditions

### 2.4.2 热边界条件

搅拌摩擦焊试验在常温下进行, 因此设置搅拌

头、板材与环境温度为 20 °C。考虑板材底面与工作台之间的热传导, 将板材底面的热传导系数设置为 4 000 W/(m<sup>2</sup>·K); 将板材侧面、上表面与空气之间的热辐射和热传导换算成热传导系数, 系数大小设置为 25 W/(m<sup>2</sup>·K)。热传导系数的设置与文献[20-21]中的保持一致。

### 2.5 网格划分

采用六面体实体网格对欧拉域进行网格划分, 单元类型为 EC3D8RT, 该单元是一种热力耦合单元。为了提高计算精度并兼顾计算效率, 经过多次仿真计算, 对焊缝区域网格进行加密, 网格大小设置为 0.5 mm, 其余部分网格大小设置为 6 mm, 可得到质量较好的焊缝表面, 网格数量为 184 320; 搅拌头采用 4 节点温度-位移耦合单元 C3D4T, 网格数量为 7 981。

### 2.6 质量缩放

搅拌摩擦焊 CEL 模型因涉及动力学以及大变形问题, 计算成本较高。一般情况下, 可以在 ABAQUS 的分析步中设置质量缩放系数来加快计算, 但是此项设置对 CEL 模型不起作用, 因此本文采用增大密度减小比热容的方法来加快计算, 以实现质量缩放的目的。通过研究 ABAQUS 系统底层方程, 了解到影响计算速度的纳维热弹性方程<sup>[22]</sup>, 如式(2)所示。

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \text{tr}(\mathbf{E}_s) - \alpha \lambda \nabla T = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  和  $\lambda$  为拉姆系数;  $\mathbf{u}$  为位移矢量;  $\mathbf{E}_s$  为

线性应变张量;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $t$  为时间分量。从式(2)可知整体计算时间由时间增量  $\Delta t$  决定,  $\Delta t$  计算公式如式(3)所示。

$$\Delta t = \frac{L_e}{C_d} \quad (3)$$

式中:  $L_e$  为网格尺寸;  $C_d$  为膨胀波速。从式(3)可以看出, 在网格大小确定好后,  $L_e$  是不变的, 要使  $\Delta t$  增大, 则需要减小材料的膨胀波速, 而  $C_d$  的计算公式如式(4)所示。

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

从式(4)可知, 材料的弹性模量  $E$  是固定的, 要使  $C_d$  减小, 需要增大材料密度  $\rho$ , 这里引入假想密度  $\rho^* = k_m \rho$  ( $k_m$  为放大系数), 同时引入修正比热容  $c^* = c k_m^{-1}$  进行补偿, 理论上可以将计算效率增加  $\sqrt{k_m}$  倍<sup>[5]</sup>。本文取放大系数  $k_m = 10^5$ 。

## 3 模拟结果与验证

### 3.1 温度场

将搅拌摩擦焊分为下压、停留、焊接、拔出、冷却 5 个阶段。每个阶段的温度场云图如图 8 所示。

图 8a 为搅拌头完全压入板材时的温度场分布。在该阶段, 搅拌头与板材之间的摩擦产热以及材料的塑性变形产热导致温度迅速升高, 最高温度为 540 °C, 最高温度出现在搅拌头轴肩与板材接触区域。图 8b 为预热阶段, 搅拌头停留在原处保持旋转

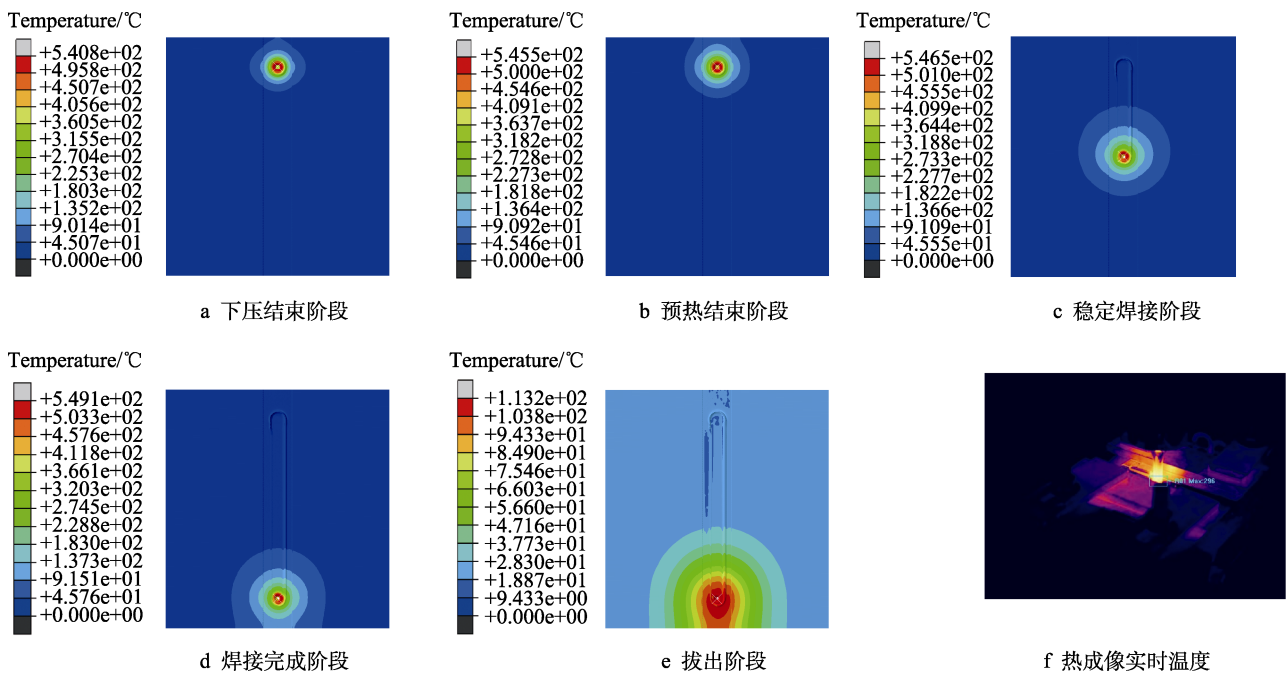


图 8 各阶段温度场

Fig.8 Temperature field of each stage: a) decompression completion phase; b) warm-up closing phase; c) stabilization welding phase; d) welding completion phase; e) pull-out phase; f) thermal imaging real-time temperature

持续产热，温度继续升高，达到 545 °C，热影响区范围进一步扩大。此前 2 个阶段的温度场呈对称分布。图 8c 为稳定焊接阶段温度场，最高温度保持在 546 °C，较上一阶段略有升高，这是因为材料从前进侧流动到返回侧，有少量材料堆积导致温度升高，并呈现不对称分布。图 8d 为焊缝尾端的温度场，最高温度相较稳定焊接阶段又有所提升，最高温度为 549 °C，这也是由材料堆积导致的温度升高。图 8e 为搅拌头拔出后的温度场，搅拌头拔出后，搅拌头与板材不再接触，故不再有热量产生，同时板材与垫板、空气之间又有存在热传导作用，所以此阶段温度快速下降，最高温度下降至 113 °C。随后为冷却阶段，直至温度下降到室温，整个焊接过程结束。图 8f 为稳定焊接过程中焊缝中间轴肩附近红外热成像实时温度，亮度越高表示温度越高，提取到前进侧轴肩附近最高温度为 296 °C，同时刻的仿真温度为 307 °C，误差较小。

截取中间时刻横截面的温度场，如图 9 所示，可以看出，返回侧有材料被挤出堆积产生的飞边，热量堆积导致温度比前进侧的高。

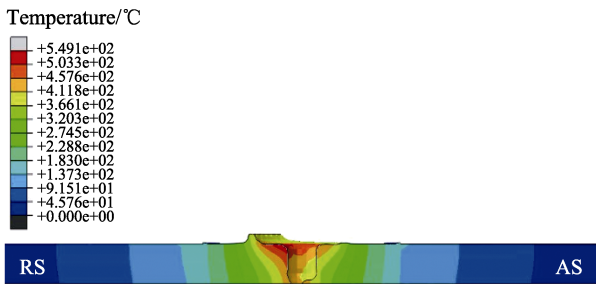


图 9 中间截面温度云图

Fig.9 Temperature contour of intermediate section

为了验证温度场不对称的现象，提取图 4 中路径 L1 上的仿真温度数据进行拟合，并将该路径上的实测温度与其进行对比，如图 10 所示，可以看出，该时刻前进侧温度略低于返回侧温度，且实测温度与模拟温度非常吻合，误差仅为 5%，因此可以验证温度

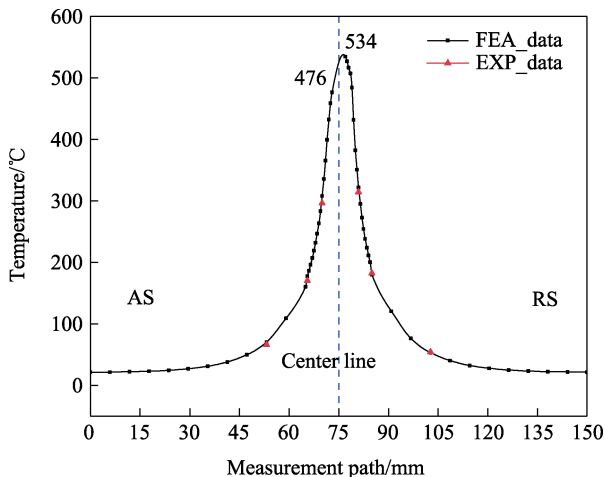


图 10 温度拟合曲线

Fig.10 Temperature fitting curve

场模拟的准确性。

### 3.2 残余应力

焊接过程中热分布的不对称性导致焊后残余应力也不是严格对称的，轴肩作用区域横向应力为拉应力，纵向应力为压应力，其毗邻轴肩区域横向应力为压应力，纵向应力为拉应力，而母材区应力较小，从而整体应力均衡。图 11 为焊后冷却至室温后的残余应力云图，可以看出焊缝区前进侧表现为拉应力，返回侧表现为压应力，而在毗邻轴肩作用区域一定范围内以纵向拉应力为主；在有效焊接距离之外及轴肩外侧一定区域内，横向应力为压应力，应力最大点在焊缝结束端且横/纵向都表现为拉伸应力。

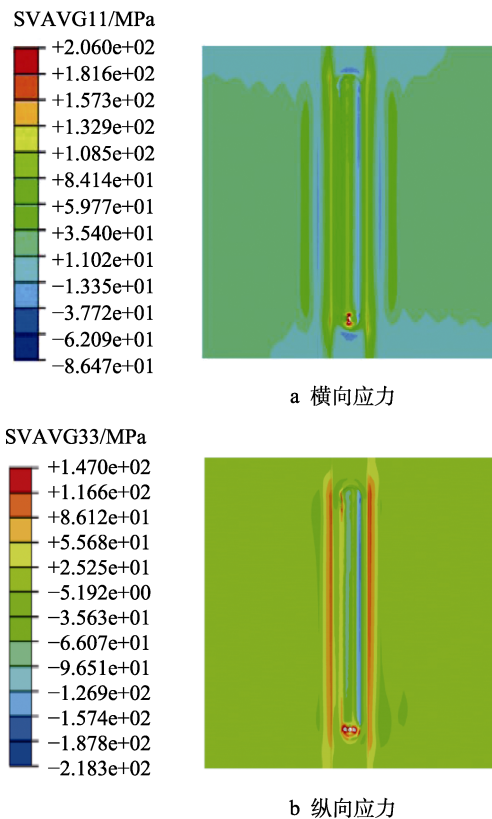


图 11 焊后残余应力云图

Fig.11 Contour of residual stress after welding: a) transverse stress; b) longitudinal stress

为了进一步研究残余应力的分布情况，提取图 4 路径 L1 上的横向和纵向残余应力，如图 12 所示。可以看出，残余应力在焊缝两侧并不是严格对称的，整体上呈现“M”形，焊缝中心残余应力低于其两侧的，这种差异是由焊接过程中温度波动造成的，此结果与文献[23-25]中所描述的结论一致。从图 12a 可以看出，总体上前进侧应力小于返回侧应力，而焊缝中心的横向应力小于轴肩作用区域的，应力最大值为 165 MPa，出现在返回侧；临近轴肩区域为压应力，远离焊缝的母材区横向残余应力较小，数值在 20 MPa 左右。焊缝中心纵向应力为压应力，向焊缝中心

两侧逐渐增大, 在返回侧轴肩作用区域达到最大值  $-174$  MPa, 然后在临近轴肩区域转变为拉应力, 在距焊缝中心约  $40$  mm 处接近  $0$  MPa, 如图 12b 所示。

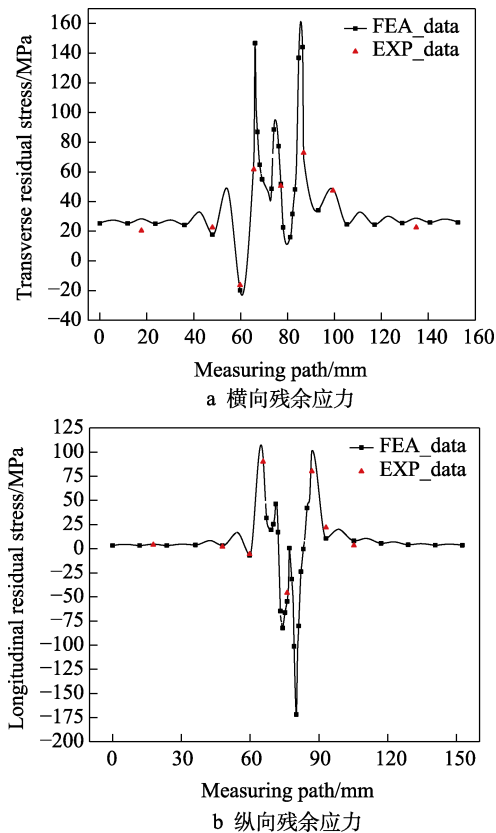


图 12 残余应力对比

Fig.12 Comparison of residual stress: a) transverse residual stress; b) longitudinal residual stress

将图 4 中 1~9 号点的实测应力与该路径上的应力分布曲线拟合, 可以看出实测应力与模拟应力的分布趋势一致, 由误差分析可知, 横向残余应力平均误差为  $16.3\%$ , 纵向残余应力平均误差为  $16.45\%$ , 误差在可接受范围内, 造成误差的原因是模拟过程存在一定的简化。由以上分析可知, 仿真应力数据与试验结果吻合较好, 从而验证了 CEL 数值模型应力场计算的正确性。

### 3.3 焊缝宏观形貌

图 13 为模拟焊缝与实际焊缝宏观形貌的对比。可以看出, 飞边均出现在返回侧, 而在实际过程中,

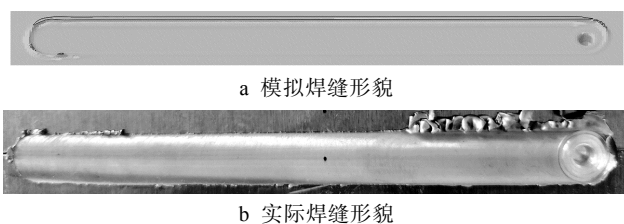


图 13 模拟焊缝与实际焊缝宏观对比

Fig.13 Macro comparison between simulated weld and actual weld: a) simulation of weld seam appearance; b) actual weld appearance

由于机械作用, 被挤出材料被带到了焊缝末端, 这从另一方面验证了模型的准确性。

## 4 结论

基于耦合欧拉-拉格朗日 (CEL) 方法, 建立了 6005A 铝合金热力耦合有限元模型, 对温度场、应力场和宏观形貌进行了分析, 得到以下结论:

1) 在下压、预热阶段, 温度场呈对称分布, 形状呈“椭圆”形; 在稳定焊接阶段, 温度场呈不对称分布, 表现为返回侧温度略高于前进侧温度; 实测温度与模拟温度吻合良好。

2) 焊后残余应力在热影响区同时存在拉、压应力, 母材区应力数值较小, 整体上应力均衡; 横/纵向应力分布曲线均呈“M”形, 返回侧应力略高于前进侧应力; 仿真应力结果与实测应力数据误差较小, 具有良好的可信度。

3) 模拟焊缝与实际焊缝宏观形貌对比结果较好, 均在返回侧产生了飞边缺陷。

综上所述, 验证了基于 CEL 法的 FSW 数值模型的合理性与有效性。

### 参考文献:

- [1] VICTOR C J, ISMAIL M A H, SHERIF M M, et al. Review of Recent Trends in Friction Stir Welding Process of Aluminum Alloys and Aluminum Metal Matrix Composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3281-3309.
- [2] VENU B, BHAVYA S I, RAJU L S, et al. A Review on Friction Stir Welding of Various Metals and Its Variables[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 298.
- [3] 苗臣怀. 5052 铝合金薄板搅拌摩擦焊的数值模拟研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.  
MIAO C H. Numerical Simulation of Friction Stir Welding of 5052 Aluminum Alloy Sheet[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021.
- [4] 朱智, 王敏, 张会杰, 等. 基于 CEL 方法搅拌摩擦焊材料流动及缺陷的模拟[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(2): 294-299.  
ZHU Z, WANG M, ZHANG H J, et al. Simulation on Material Flow and Defect during Friction Stir Welding Based on CEL Method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(2): 294-299.
- [5] 弋翔宇. 5083-O 铝合金搅拌摩擦焊接数值仿真及焊接性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
YI X Y. Numerical Simulation and Welding Performance of 5083-O Aluminum Alloy Friction Stir Welding[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [6] SALLOOMI K N, AL-SUMAIDAE S. Coupled Eulerian-Lagrangian Prediction of Thermal and Residual Stress Environments in Dissimilar Friction Stir Welding

- of Aluminum Alloys[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2021, 3: 100052.
- [7] 段亚雄, 刘其鹏, 高月华, 等. 基于 CEL 方法的 Al/Mg 搅拌摩擦焊温度场及材料混合流动研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(7): 2565-2572.  
DUAN Y X, LIU Q P, GAO Y H, et al. Temperature Field and Material Mixing Flow in Friction Stir Welding of Dissimilar Al/Mg Alloys Based on CEL Approach[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(7): 2565-2572.
- [8] 马核, 田志杰, 熊林玉, 等. 2A14-T6 铝合金搅拌摩擦焊温度场及黏流层数值模拟分析[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(8): 55-61.  
MA H, TIAN Z J, XIONG L Y, et al. Thermal Behavior and Pre-Molten Viscousness Layer Simulation of Friction Stir Welding on 2A14-T6 Aluminum Alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(8): 55-61.
- [9] 张帅, 王进. 基于 CEL 方法的搅拌摩擦焊 6061 铝合金温度场研究[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(3): 64-71.  
ZHANG S, WANG J. Temperature Field of 6061 Aluminum Alloy by Friction Stir Welding Based on CEL Technique[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(3): 64-71.
- [10] 武晓燕, 罗巍, 王怡嵩, 等. 基于 CEL 模型的搅拌摩擦焊接 7055 铝合金仿真模拟[J]. *焊接学报*, 2021, 42(7): 44-50.  
WU X Y, LUO W, WANG Y S, et al. Simulation on Friction Stir Welding 7055 Aluminum Alloy Based on CEL Model[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(7): 44-50.
- [11] WEN Q, LI W Y, GAO Y J, et al. Numerical Simulation and Experimental Investigation of Band Patterns in Bobbin Tool Friction Stir Welding of Aluminum Alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(9): 2679-2687.
- [12] AKBARI M, ASADI P, BEHNAGH R A. Modeling of Material Flow in Dissimilar Friction Stir Lap Welding of Aluminum and Brass Using Coupled Eulerian and Lagrangian Method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(3): 721-734.
- [13] DAS D, BAG S, PAL S. A Finite Element Model for Surface and Volumetric Defects in the FSW Process Using a Coupled Eulerian-Lagrangian Approach[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2021, 26(5): 412-419.
- [14] 马付建, 陈绍, 李锡伟. 超声辅助搅拌摩擦焊接温度场与材料流动数值模拟[J]. *大连交通大学学报*, 2023, 44(3): 34-40.  
MA F J, CHEN S, LI X W. Numerical Simulation of Temperature Field and Material Flow of Ultrasonic Assisted Friction Stir Welding[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2023, 44(3): 34-40.
- [15] 吴晓虎, 曹丽杰, 苗臣怀. 基于 CEL 方法的异种合金搅拌摩擦搭接焊数值模拟[J]. *农业装备与车辆工程*, 2023, 61(4): 63-68.  
WU X H, CAO L J, MIAO C H. Numerical Simulation of Friction Stir Lap Welding Based on CEL Method[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2023, 61(4): 63-68.
- [16] TÜRKAN M, KARAKAŞ Ö. Numerical Modeling of Defect Formation in Friction Stir Welding[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103539.
- [17] SALLOOMI K N, HUSSEIN F I, AL-SUMAIDAE S N M. Temperature and Stress Evaluation during Three Different Phases of Friction Stir Welding of AA7075-T651 Alloy[J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2020, 2020: 3197813.
- [18] PENG Y, CHEN X Z, PENG S, et al. Strain Rate-Dependent Constitutive and Low Stress Triaxiality Fracture Behavior Investigation of 6005 Al Alloy[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018(1): 2712937.
- [19] 彭一波, 王罡, 潘尚峰, 等. 考虑动态回复过程的 6005A 铝合金动态力学模型[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(10): 32-39.  
PENG Y B, WANG G, PAN S F, et al. 6005A Aluminum Dynamic Mechanical Model Considering the Dynamic Recovery Process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(10): 32-39.
- [20] JAIN R, PAL S K, SINGH S B. Numerical Modeling Methodologies for Friction Stir Welding Process[C]// *Computational Methods and Production Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 125-169.
- [21] CHAUHAN P, JAIN R, PAL S K, et al. Modeling of Defects in Friction Stir Welding Using Coupled Eulerian and Lagrangian Method[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34: 158-166.
- [22] NICHOLSON D W. *Finite Element Analysis*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [23] 杨佳润, 马佳良, 杨鑫华. 基于数值模拟的车钩连接板 FSW 残余应力及变形分析[J]. *焊接技术*, 2024, 53(1): 27-31.  
YANG J R, MA J L, YANG X H. Analysis of FSW Residual Stress and Deformation of Coupler Connecting Plate Based on Numerical Simulation[J]. *Welding Technology*, 2024, 53(1): 27-31.
- [24] 韩泽平, 曹丽杰. AA2195-AZ31B 搅拌摩擦焊温度与残余应力场的数值模拟[J]. *兵器材料科学与工程*, 2024, 47(2): 164-170.  
HAN Z P, CAO L J. Numerical Simulation of Temperature and Residual Stress Field in Stir Friction Welding of AA2195-AZ31B[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2024, 47(2): 164-170.
- [25] LIU X L, XIE P, WIMPORY R, et al. Residual Stress, Microstructure and Mechanical Properties in Thick 6005A-T6 Aluminium Alloy Friction Stir Welds[J]. *Metals*, 2019, 9(7): 803.