

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.023

6082 铝合金高速搅拌摩擦焊温度场的数值模拟

史雨霁, 武凯

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:基于耦合欧拉-拉格朗日方法,建立 6082 铝合金高速搅拌摩擦焊的三维完全热力耦合有限元模型,并与试验得到的温度值进行对比,验证模型的准确性。对焊接过程温度场进行数值模拟研究,分析搅拌头旋转速度、焊接速度对温度场的影响规律。结果表明:高速搅拌摩擦焊稳定焊接阶段的温度场分布呈现不对称的情况,前进侧温度高于后退侧,搅拌头后方温度高于前方,轴肩和搅拌针底面的温度高于搅拌针侧面;随着搅拌头旋转速度增大,高速搅拌摩擦焊全过程温度升高;焊接速度增大,下压及预热阶段不变,稳定焊接阶段温度降低。

关键词:高速搅拌摩擦焊;6082 铝合金;温度场;数值模拟

中图分类号:TG453.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0116-05

Numerical Simulation of Temperature Field in High-speed Friction Stir Welding of 6082 Aluminum Alloy

SHI Yuji, WU Kai

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract:Based on the Coupled Eulerian-Lagrangian method, a three-dimensional fully thermodynamically coupled finite element model of high-speed friction stir welding of 6082 aluminum alloy was established, and the results were compared with the values obtained from the test to verify the accuracy of the model. The temperature field of the welding process was studied by numerical simulation, and the influence law of the stirring tool rotation speed and welding speed on the temperature field was analyzed. The results show that the temperature field distribution in the stable welding stage of high-speed friction stir welding presents an asymmetric situation, with the temperature on the forward side being higher than that on the backward side, the temperature behind the stirring tool being higher than that ahead, and the temperature on the shaft shoulder and the bottom surface of the pin being higher than that on the side of the pin. As the stirring tool rotation speed increases, the temperature of the whole process of high-speed stir friction welding increases; the welding speed increases, the inserting and preheating stage remains unchanged, and the temperature of the stable welding stage decreases.

Keywords:high-speed friction stir welding; 6082 aluminum alloy; temperature field; numerical simulation

0 引言

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所在 1991 年发明的一种新型固相焊接技术^[1]。与传统的焊接方法相比,FSW 具有效率高、耗能低、焊接形变小、绿色环保等优点^[2]。FSW 可以对同种或异种金属进行焊接,特别适用于铝及镁合金等轻质合金的焊接,并能取得较高质量的焊接效果^[3]。因此,FSW 在航空航天、汽车制造、高速列车等诸多领域有着广泛的应用^[4]。

FSW 过程中,热输入、材料流动和机械作用等多个物理场耦合作用^[5],相互影响,共同决定了焊接接头的质量。因此,研究 FSW 过程中的温度

场,对于研究 FSW 作用规律具有重要的意义^[6]。目前,许多学者运用数值模拟方法,对 FSW 过程温度场进行研究。MEYGHANI 等^[7]基于任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法,建立 6061-T6 铝合金 FSW 三维热力耦合数值模型,观察到沿焊缝中心线不对称的温度分布,前进侧的温度高于后退侧。ALI ANSARI 等^[8]基于 CEL 方法,模拟了 5083 铝合金 FSW 包括插入、停留和横移的整个过程,评估了刀具转速和轮廓尺寸对温度场、塑性应变场等的影响规律。LU 等^[9]基于 Abaqus/CEL 建立了 2219 铝合金 FSW 三维数值模型,得到了焊接过程中特征点的温度分布和循环曲线,通过试验验证了仿真结果

基金项目:江苏省科技成果转化专项(BA2019029)

第一作者简介:史雨霁(1996—),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为先进加工工艺与装备,1782529842@qq.com。

的有效性,并探讨了刀具转速和焊接速度对温度场的影响规律。

然而,目前FSW的焊接速度一般都在1 000 mm/min以内的较低水平^[10],对于高速FSW过程的研究鲜有报道,这也限制了FSW技术在商业上的大规模运用^[11]。本文使用Abaqus软件,基于CEL方法,建立高速FSW三维完全热力耦合数值模型,对高速FSW过程的温度场分布及变化规律进行研究。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型及工艺参数

FSW采用对接焊的形式。欧拉域设置为80 mm×60 mm×3.5 mm的长方体,其中下部的2 mm为材料层,设置为工件材料;上部的1.5 mm为Void层,不分配材料,用来容纳因搅拌头压入工件而溢出的材料。搅拌头轴肩直径12 mm^[12],使用圆台状搅拌针,长度为1.8 mm,底部直径3 mm,锥角为12°,各处圆角处理为0.5 mm,忽略各处螺纹。欧拉域及搅拌头几何模型如图1所示。

工艺参数方面,常规FSW的焊接速度一般在1 000 mm/min以内,搅拌头旋转速度一般在2 000 r/min以内。由于采用3 000 mm/min的高焊接速度,因此需要提高搅拌头的旋转速度来获得足够的热输入,结合实际试验,最终采取5 000 r/min的搅拌头旋转速度。搅拌头与工件法线倾角1.5°,搅拌头轴肩压入工件0.15 mm。

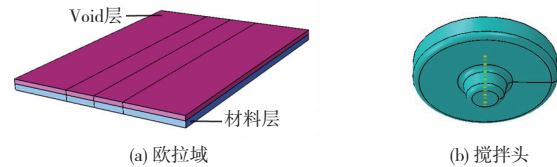


图1 几何模型

1.2 材料属性

被焊工件材料为6082-T6铝合金,其与温度相关的热物性参数如表1所示^[13]。搅拌头材料为H13热模具钢,由于其强度与硬度远高于工件材料,且非本文的研究对象,因此在模拟中约束为刚体。

表1 6082-T6 铝合金热物性参数

温度/℃	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	线膨胀系数(×10 ⁻⁶)/K ⁻¹	热导率/(W/(m·K))	比热容/(J/(kg·K))
25	2 680	75	22.8	201	955
100	2 670	69	23.2	212	1 001
200	2 650	56	24.7	213	1 064
300	2 620	40	25.5	223	1 103
400	2 600	26	26.5	240	1 150
500	2 580	18	27.5	246	1 241
583	2 580	—	28.5	256	1 350

在高速FSW过程中,材料升温进入黏塑性状态,在搅拌头旋转和横移锻压作用下发生流动^[14],从而形成致密的焊接接头。因此,正确描述高速FSW过程材料的塑性流动行为对数值模型的准确性至关重要。本文采用Johnson-Cook本构模型对高速FSW过程中材料的流变应力进行描述^[15]:

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

式中: $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,一般取为1; T 为材料温度; T_{melt}

为材料熔点; T_r 为参考温度,一般取为室温; A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料参数,一般通过试验确定。6082-T6铝合金的Johnson-Cook本构模型各项参数如表2所示^[16]。

表2 6082-T6 铝合金 Johnson-Cook 本构参数

A/MPa	B/MPa	C	n	m	$T_{\text{melt}}/\text{℃}$	$T_r/\text{℃}$
285	94	0.002	0.41	1.34	583	25

1.3 热输入模型

高速FSW过程中,热输入主要来自搅拌头与工件的摩擦热和工件材料的塑性变形热。搅拌头与工件的摩擦热可表示为^[17]

$$q_f = \eta_1 \tau_f \dot{\gamma} \quad (2)$$

式中: q_f 为面热流密度; η_1 为摩擦功热转换效率,这里取为 0.9; τ_f 为摩擦引起的切应力; $\dot{\gamma}$ 为摩擦剪切速率。根据经典库伦摩擦理论, τ_f 可表示为

$$\tau_f = \mu p \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦因数,经调试,取 0.3; p 为搅拌头与工件之间的法向应力。

工件材料的塑性变形热是材料受剪切而发生塑性形变产生的热能,可表示为^[18]

$$q_p = \eta_2 \sigma \dot{\epsilon}_p \quad (4)$$

式中: q_p 为体热流密度; η_2 为塑性功热转换效率,这里取 0.9; σ 为材料流变应力; $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变速率。

1.4 边界条件

1) 热边界

高速 FSW 过程中,工件四周和上表面与空气接触,通过对流与辐射的形式进行热交换,需添加相应的对流和辐射换热边界。

对流换热边界可表示为

$$q_{\text{cond}} = h_{\text{cond}} (T_{\text{air}} - T) \quad (5)$$

式中: q_{cond} 为对流换热的热流密度; h_{cond} 为对流换热系数; T_{air} 为空气温度。

辐射换热边界可表示为

$$q_{\text{rad}} = \sigma_b \epsilon_b (T_{\text{air}}^4 - T^4) \quad (6)$$

式中: q_{rad} 为辐射换热的热流密度; σ_b 为 Stefan-Boltzmann 常数; ϵ_b 为发射率。

由于辐射换热较复杂,将其转化为对流换热处理,则工件四周和上表面总的对流热流密度可表示为

$$q_{\text{total}} = h_{\text{total}} (T_{\text{air}} - T) \quad (7)$$

式中: q_{total} 为总的对流换热热流密度; h_{total} 为总的对流换热系数,经调试,取其为常数 $120 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

此外,工件下表面与垫板接触,换热条件比较复杂,从提高计算效率的角度出发,将其简化为对流换热条件。经调试,下表面换热系数取为常数 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

2) 机械边界

高速 FSW 过程中,需对工件的四周和底面的自由度进行约束,以避免工件发生位移。同时,保持工件顶面的自由度,以模拟材料受搅拌头压入而溢出的效果。此外,定义搅拌头下表面与旋转轴线交点为参考点,以控制搅拌头的旋转与平动。

1.5 网格划分

欧拉域为长方体结构,因此采用六面体 EC3D8RT 欧拉单元进行网格划分。采取“外疏内密”的原则,欧拉域外部区域网格相对稀疏,网格密度设为 3 mm 以提高计算效率;欧拉域内部的焊缝核心区域则将网格密度设为 0.5 mm ,以保证模拟效果。考虑到工件厚度为 2 mm ,搅拌针长度 1.8 mm ,焊接时搅拌针底部材料厚度明显小于 0.5 mm ,对材料层厚度方向采取上大下小的过渡网格密度,最下层网格密度为 0.1 mm 。最终欧拉域划分得到 130 560 个单元。搅拌头为不规则结构,采用四面体 C3D4T 拉格朗日单元进行网格划分,网格密度设置为 0.5 mm ,最终搅拌头划分为 15 199 个单元。

2 模拟结果与分析

2.1 温度场

为了验证所建立数值模型的准确性,如图 2 所示,采用相同参数进行试验。在测温点安装 K 型热电偶,对高速 FSW 过程温度进行测量。各测温点位置如图 3 所示,测温点 A、B、C、D 均位于工件长度方向的对称线上,距离工件上表面 1 mm 。测温点 A、C 在距离焊缝中心线 8 mm 、 16 mm 的前进侧,测温点 B、D 与 A、C 关于焊缝中心线对称。



图 2 试验现场

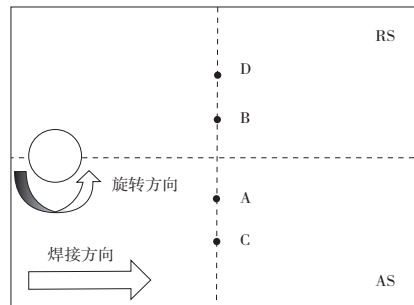


图 3 测温点位置

图4为分别由数值模拟和试验测量得到的各测温点温度时间曲线。可以看出,模拟结果与试验测量的曲线变化趋势基本相同。A、B、C、D各点模拟与试验测得的最大温差分别为16.1℃、4.7℃、12.2℃、8.5℃,相对误差分别为5.5%、1.8%、9.3%、7.3%,均在误差允许范围内,验证了所建立数值模型的准确性。

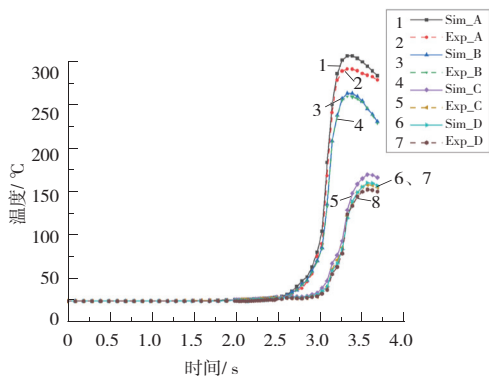


图4 测温点温度时间曲线

图5所示为高速FSW过程各阶段工件表面温度场云图。可以看到,在下压及预热阶段,温度场大致沿焊缝中心线对称分布,最高温度分别为331.7℃和516.2℃。但进入横移稳定焊接阶段后,温度场则明显表现出不对称分布的情况。高温区域形状类似火焰,主要沿搅拌头轴肩根部分布,最高温度达到543.7℃,前进侧温度高于后退侧,搅拌头后面的温度高于前面。这是由于在稳定焊接阶段,搅拌头前方温度较低的材料首先被扫到后退侧,在摩擦和剪切作用下升温软化,并最终在搅拌头后方的前进侧沉积。

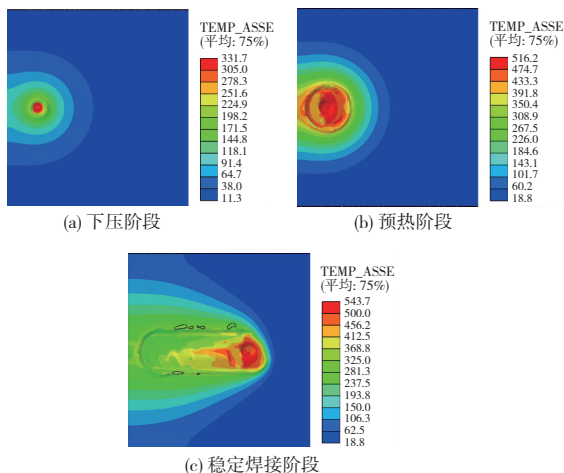


图5 高速FSW过程工件表面温度场云图

图6所示为稳定焊接阶段工件沿焊缝中心线

截面的温度场云图(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。可以看出,高温区域主要沿搅拌头轴肩及搅拌针表面分布,搅拌针侧面的温度相较轴肩和搅拌针底面约低40℃。这是由于高速FSW过程中,主要热输入为搅拌头轴肩及搅拌针与材料的摩擦热,而轴肩和搅拌针底面贡献的摩擦热大于搅拌针侧面。同时,可以看到搅拌头前方的温度梯度较高,而后方则较低。这是因为高速FSW的焊接速度较高,搅拌头前方的材料加热时间较短,因此温度变化较大;而后方材料由于高温塑性材料的回填沉积,获得了保温效果,所以温度变化比较平缓。

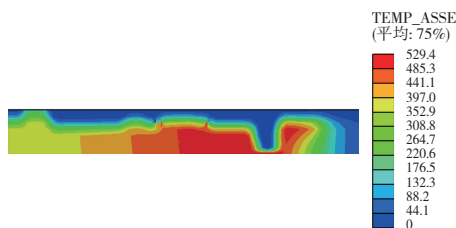


图6 稳定焊接阶段沿焊缝中心线截面温度场云图

2.2 搅拌头旋转速度对温度场的影响

保持其他参数不变,搅拌头旋转速度分别取3 000 r/min、4 000 r/min、5 000 r/min进行数值模拟。图7为不同旋转速度下焊缝表面的峰值温度时间曲线。可以看出,各旋转速度下曲线的变化趋势大致相同。随着旋转速度的增大,各阶段峰值温度均有所提高,其中稳定焊接阶段平均值由526.3℃提高到536.2℃,最终达到541.8℃。这主要是因为提高旋转速度,焊接的热输入随之增大,被焊材料的温度自然升高。相较于0~2.0 s的下压阶段,2.0~2.5 s的预热阶段及2.5 s后的稳定焊接阶段峰值温度随旋转速度增大而升高的幅度收窄。这是由于高温下材料软化,搅拌头与工件之间的法向压力减小,摩擦热降低,限制工件温度继续升高,进入准稳态阶段。因此,旋转速度增加带来的加热作用被削弱。

2.3 焊接速度对温度场的影响

保持其他参数不变,焊接速度分别取3 000 mm/min、3 500 mm/min、4 000 mm/min进行数值模拟。图8为不同焊接速度下焊缝表面的峰值温度时间曲线。可以看出,在下压及预热阶段,焊缝表面峰值温度保持不变;进入稳定焊接阶段后,随着焊接速度的增大,峰值温度出现下降,平均值由

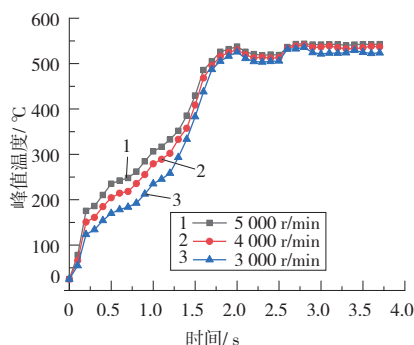


图7 不同旋转速度焊缝表面峰值温度曲线

541.8 °C 降低到 537.4 °C, 最终降低到 534.6 °C。这是因为改变焊接速度对下压及预热阶段没有任何影响, 只对稳定焊接阶段产生作用。随着焊接速度的增大, 被焊材料受到加热升温的时间减少, 焊缝表面峰值温度随之下降。

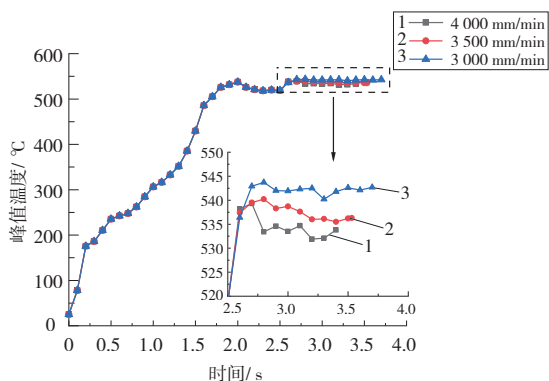


图8 不同焊接速度焊缝表面峰值温度曲线

3 结语

1) 数值模拟得到的温度与实际试验中热电偶测得的温度值相吻合, 验证了数值模型的准确性。

2) 高速 FSW 的稳定焊接阶段, 温度场表现出不对称分布的情况。前进侧温度高于后退侧, 搅拌头后方温度高于前方, 轴肩和搅拌针底面的温度高于搅拌针侧面。

3) 搅拌头旋转速度和焊接速度对高速 FSW 过程的温度场有着影响。旋转速度增大, 高速 FSW 各阶段温度升高; 焊接速度增大, 下压及预热阶段不变, 稳定焊接阶段温度降低。

参考文献:

[1] 杨明鄂, 李治国. 车身搅拌摩擦焊温度场仿真分析及实验验证[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 165-168.
[2] 张华, 林三宝, 吴林, 等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 91-97.

[3] 武凯, 贾贺鹏, 孙宇, 等. 搅拌摩擦焊技术的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 1-9.
[4] 陈高强, 史清宇. 搅拌摩擦焊中材料流动行为数值模拟的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 11-21.
[5] 乔柯. 孪生诱发塑性钢搅拌摩擦焊接接头微观组织演变和变形行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
[6] 卢晓红, 张昊天, 滕乐, 等. 重型运载火箭燃料贮箱 FSW 核心区温度监测[J]. 焊接学报, 2024, 45(9): 30-41.
[7] MEYGHANI B, AWANG M, WU C S. Finite element modeling of friction stir welding (FSW) on a complex curved plate[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 1: 100007.
[8] ALI ANSARI M, SAMANTA A, BEHNAGH R A, et al. An efficient coupled Eulerian-Lagrangian finite element model for friction stir processing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5): 1495-1508.
[9] LU X H, SUN X D, SUN S X, et al. Numerical simulation of thermal field of FSW 2219 aluminum alloy thick plate[J]. China Welding, 2021, 30(4): 1-8.
[10] HOVANSKI Y, UPADHYAY P, CARSLY J, et al. High-speed friction-stir welding to enable aluminum tailor-welded blanks[J]. JOM, 2015, 67(5): 1045-1053.
[11] XU A L. Properties of high speed friction stir welded 6063-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1676(1): 012107.
[12] 祝宗煌, 左立生, 李泽阳, 等. 一种搅拌头轴肩临界值的计算方法[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 66-69.
[13] 陈彦君. 基于 ABAQUS 的搅拌摩擦焊仿真模拟分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2019.
[14] 蒋洋, 陈学良, 冯存义, 等. 焊接参数对 6082-T6 挤压铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2024(9): 50-54.
[15] 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.
[16] 夏弘扬. 6082-T6 铝合金高转速搅拌摩擦焊工艺研究及温度场模拟[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
[17] 张昭, 张洪武. 接触模型对搅拌摩擦焊接数值模拟的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 85-90.
[18] TÜRKAN M, KARAKAŞ Ö. Numerical modeling of defect formation in friction stir welding[J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103539.

收稿日期: 2023-08-25