

电阻辅助加热对 2519A 铝合金搅拌摩擦焊接成形性的影响

方晨^{1,2}, 刘胜胆^{1,2,3}, 易铁^{1,3}, 姜科达^{1,4}

(1. 中南大学, 长沙 410083; 2. 中南大学 轻质高强结构材料重点实验室, 长沙 410083; 3. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083; 4. 台山市金桥铝型材厂有限公司, 台山 529261)

摘要: 采用试验与数值模拟相结合的方法探究了电阻辅助加热温度对 2519A-T87 铝合金搅拌摩擦焊接头成形性的影响, 基于耦合欧拉-拉格朗日方法建立了电阻辅助加热搅拌摩擦焊的三维热-力耦合模型, 分析了焊接过程温度场分布和材料流动行为, 阐明了电阻辅助加热工艺消除搅拌摩擦焊隧道型缺陷的作用机理。结果表明, 辅助加热工艺使焊接峰值温度从 483 °C 提高至 549 °C, 并增加了 350 °C 以上高温区间的停留时间, 扩大了高温分布区域, 降低了材料变形抗力, 增强了材料从焊核区后退侧运动至前进侧的流动性, 使材料回填更充分, 从而消除了焊缝内部隧道型缺陷。

创新点: (1) 采用电阻辅助加热搅拌摩擦焊工艺, 成功实现了 2.5 mm 的 2519A 铝合金板材的无缺陷对接焊接。

(2) 基于数值模拟分析, 阐明了电阻辅助加热搅拌摩擦焊消除隧道型缺陷的机理, 并精确预测了隧道型缺陷的产生。

关键词: 搅拌摩擦焊; 电阻辅助加热; 铝合金; 隧道型缺陷; 数值模拟

中图分类号: TG 457.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230105001

0 序言

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是一种固相连接技术^[1], 能够避免热裂纹、气孔等缺陷, 适用于铝合金等材料的焊接, 广泛地应用于船舶、火车、航空航天等行业^[2]。搅拌头周围的材料流动行为直接影响 FSW 焊缝成形及接头质量^[3-4], 由于铝合金导热系数大且 FSW 焊接热输入不足, 通常会导致材料流动不充分, 从而在焊缝中形成孔洞缺陷^[5-6], 这将严重降低接头的力学性能。因此, 在实际中常常通过提高搅拌头转速或降低焊接速度来提高焊接热输入, 以期消除孔洞缺陷。然而, 增加转速对设备提出了更高的要求, 而降低焊接速度则降低了生产效率^[7]。基于上述不足, 通过外加能量辅助 FSW 提高焊接热输入的方法应运而生。外加能量常分为热能和机械能, 热能辅助的方法有感应加热、激光加热、电弧加热等, 机械能辅助的方法有超声

波辅助^[8]。通过外加能量辅助可以软化被焊材料, 改善材料流动, 从而改善焊缝成形^[9]。例如, Yi 等人^[10]通过常规 FSW 和钨极惰性气体 (TIG) 电弧辅助 FSW 获得两种 2.5 mm 厚 2519-T87 铝合金接头, 结果表明, TIG 电弧辅助 FSW 消除了孔洞缺陷, 减少了洋葱环面积, 从而提高了接头力学性能。因此, 研究外加能量辅助 FSW 过程中材料流动行为有助于深入理解孔洞缺陷的形成机理, 并且对孔洞缺陷的准确预测及有效控制都具有重要意义。

在探索 FSW 过程中材料流动成形规律方面, 科研工作者已经展开了大量的研究, 其中以试验方法和数值模拟分析为主^[3, 11]。目前, 常用的试验方法有标记材料法、微观组织观察法和异种材料焊接法等^[5, 11]。这些方法主要分析焊缝中材料流动的最终状态, 从而间接研究焊接过程中的材料流动行为。然而, 这些方法只能获得最终时刻的材料分布, 不能连续地观察材料流动行为和可视化 FSW 缺陷的形成过程^[5]。

数值模拟方法能够有效地获得 FSW 过程的温度场、等效塑性应变场以及材料的流动行为, 并且

可以预测缺陷的产生^[11]. Tang 等人^[12]基于流体力学方法研究预热处理对 6061 铝合金和 E235A 钢 FSW 接头温度分布和材料流动的影响, 结果表明, 预热处理提高了钢的峰值温度, 增加了材料的流速, 减小了两种材料的差异. Yaduwanshi 等人^[13]采用等离子辅助 FSW 进行铝、铜异种焊接, 通过数值模拟与试验结合的方法研究预热对焊接热循环和微观组织的影响, 结果表明预热有助于提高搅拌头前方工件的温度从而使材料易于焊接, 且会降低铜的屈服强度, 从而获得高质量的接头. 然而, 以往采用数值模拟方法研究辅助加热工艺对焊接过程的影响更多关注的是温度场的变化, 而对材料流动行为和缺陷形成的关注较少. 因此, 难以深入认识辅助加热工艺对隧道型缺陷的影响机制.

在试验中, 电阻辅助加热 FSW 能够有效地消除隧道型缺陷. 基于耦合欧拉-拉格朗日 (coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 方法建立了 FSW 三维热-力耦合模型, 综合研究了辅助加热工艺对焊接温度场以及焊缝材料的分布及流动行为的影响规律, 阐明了辅助加热 FSW 消除隧道型缺陷的机理, 并对焊缝质量进行了精确的预测. 这为提高铝合金搅拌摩擦焊接接头质量提供了一种有效的方法.

表 1 2519A-T87 铝合金板材化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 2519A-T87 aluminum alloy sheet

化学成分(质量分数, %)									力学性能			
Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zr	Al	余量	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{P0.2}$ /MPa	断后伸长率 A (%)	硬度 H/HV
5.80	0.10	0.20	0.30	0.02	0.05	0.19	余量		467	422	9.2	144

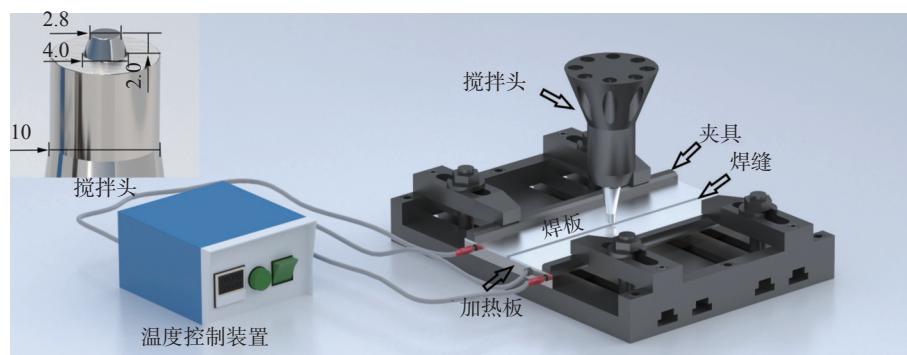


图 1 辅助加热 FSW 示意图
Fig. 1 Schematic of auxiliary heating during FSW

为了研究辅助加热工艺对焊接热循环的影响并验证模型准确性, 焊接时在距焊缝中心 10 mm 的前进侧放置热电偶, 采用 QT-6-k 高精度六通道测

温仪采集温度数据, 采样频率为 10 Hz.

焊接完成后, 制备好焊接接头横截面金相试样, 先使用体积分数为 30% NaOH 试剂对其表面浸

蚀约 40 s, 然后使用体积分数为 3% HNO₃ 试剂清洗干净。最后, 在 LEICA DM2700M 显微镜下观察组织形貌。

1.2 有限元分析

ABAQUS 基于体积分数原理能够预测材料塑性变形过程中自由表面以及内部缺陷的变化。基于 CEL 方法在 Explicit 求解器中建立 FSW 全热力耦合模型。模拟采用内凹轴肩和无螺纹的锥形搅拌针进行平板焊接, 其尺寸与搅拌头实际尺寸一致。将工件定义为欧拉体, 采用八结点热耦合欧拉六面体单元 (EC3D8RT) 对工件进行网格划分。将搅拌头定义为拉格朗日体, 同时施加刚体约束, 采用四结点线性四面体单元 (C3D4) 对搅拌头进行网格划分。

为防止材料流出欧拉域, 约束底面 Z 方向自由度, 即 $v_z = 0$; 约束前后两面 X 方向自由度, 即 $v_x = 0$; 约束侧面 Y 方向自由度, 即 $v_y = 0$; 上表面自由。建立如图 2 所示的几何模型。通过定义换热系数模拟工件的热传递过程。设置预定义场定义工件的初始温度, 并且通过改变底面环境温度实现不同辅助加热温度的焊接。具体换热系数设置见表 2。

FSW 过程涉及大变形、高应变速率及快速剪切温升, 因此选择合适的材料本构模型至关重要。Johnson-Cook 模型能够有效地描述流变应力与材料加工硬化效应、应变率效应及高温软化效应之间的关系, 因此被广泛应用于 FSW 数值模拟分析^[14], 流动应力 σ 可表示为^[15]

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

式中: A 为参考应变率和参考温度下的初始屈服应力; B 和 n 为材料应变硬化模量和硬化指数; C 为材

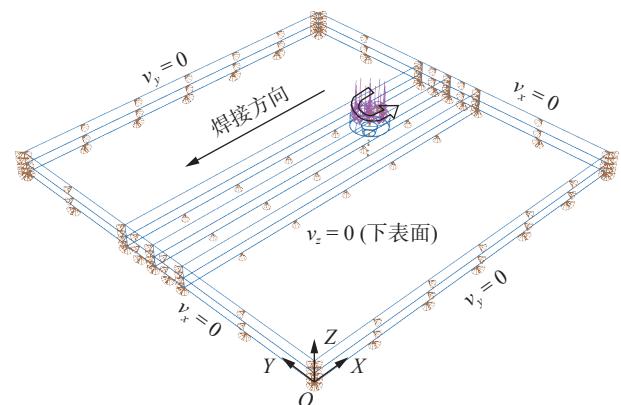


图 2 FSW 过程中速度边界条件
Fig. 2 Velocity boundary conditions in FSW process

表 2 换热系数设置

Table 2 Heat transfer coefficients

方法	表面	对流换热系数	环境温度
		$K/(W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1})$	$T_h/^\circ C$
C-FSW	底面	300	30
	上表面和侧面	30	30
(100 °C)	底面	3	100
	上表面和侧面	30	30
(200 °C)	底面	3	200
	上表面和侧面	30	30

料应变率强化参数; m 为材料软化指数; $\bar{\varepsilon}_{pl}$ 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_{pl}$ 为等效塑性应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率; T 为工件材料温度; T_{melt} 为材料熔点; T_{ref} 为参考温度。对于 2519A-T87 铝合金, Johnson-Cook 本构模型材料参数见表 3^[16]。由于 2519A 铝合金与 2219 铝合金成分相似, 因此文中采用 2219 铝合金的材料物理性能参数作为参考^[17-18]。

表 3 2519A-T87 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数

Table 3 Material parameters in Johnson-Cook constitutive model for 2519A-T87 aluminum alloy

初始屈服应力 A/MPa	材料应变硬化模量 B/MPa	材料应变率强化参数 C	硬化指数 n	材料软化指数 m	参考温度 $T_{ref}/^\circ C$	材料熔点 $T_{melt}/^\circ C$	参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$
452.68	282.60	0.0142	0.42	0.74	30	542	1.0

FSW 产热主要来自搅拌头与工件之间的摩擦热, Schmidt 等人^[19]建立了搅拌头与工件接触界面上的产热公式, 即

$$Q_{total} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega \left[(R_S^3 - R_P^3)(1 + \tan \alpha) + R_P^3 + 3R_P^2 H_P \right] \quad (2)$$

式中: Q_{total} 为总产热, $\tau_{contact}$ 是搅拌头-工件界面处

的剪应力, ω 是搅拌头转速, R_S 和 R_P 分别是轴肩和搅拌针半径, H_P 是搅拌针长度, α 是轴肩内凹角度。其中 $\tau_{contact}$ 由界面上的压力、摩擦因数、材料屈服强度以及滑动-黏着状态决定, 即

$$\tau_{contact} = \delta \tau_{yield} + (1 - \delta) \mu_f P_0 \quad (3)$$

式中: τ_{yield} 为材料剪切屈服强度, P_0 为轴肩下压力,

μ_f 为摩擦系数, δ 为黏着系数.

为了缩短模拟时间, 文中采用质量缩放技术. 值得注意的是欧拉网格不支持直接采用设置质量缩放因子的方法实现质量放大. 本文采用显示求解方法进行模拟, 其中显示积分方法是一种稳定积分方法, 要求时间增量小于临界时间增量 Δt_{crit} .

Δt_{crit} 根据整个系统的质量和刚度特性计算^[20]

$$\Delta t_{crit} = \min\left(\frac{L_{ci}}{C_d}\right) \quad (4)$$

式中: L_{ci} 为每个单元 i 的长度; $C_d = \sqrt{E/\rho}$ 为材料中的波速, 其中 E 为材料的弹性模量、 ρ 为材料密度.

材料的热弹性由 Navier 方程描述^[21]

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + u) \nabla \operatorname{tr}(\varepsilon_e) - \alpha \lambda \nabla T = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中: λ 、 μ 为拉梅系数; α 为线膨胀系数; ε_e 为线性应变张量为位移; t 为时间.

温度场控制方程如下

$$-k \nabla^2 T = \alpha \lambda T_0 \operatorname{tr}(\dot{\varepsilon}_e) + \rho c_e \dot{T} \quad (6)$$

式中: k 为导热系数; T_0 为参考温度; $\dot{\varepsilon}_e$ 为应变率; c_e 为比热容. 等式右边第一项为应变率对温度场的影响.

质量放大技术可以与速率和时间相关的参数一同使用, 由式(4)可知, 通过增加材料密度可以增大临界时间增量, 从而提高计算速度. 通过引入一个虚拟密度 $\rho^* = k_m \rho$ (其中 $k_m > 0$) 代替原密度 ρ , 达到质量放大的目的, 即

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + u) \nabla \operatorname{tr}(\varepsilon_e) - \alpha \lambda \nabla T = \rho^* \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (7)$$

选择质量缩放因子 k_m 时要保证等式右侧的惯性力较小^[22]. 一般情况下, FSW 选择的质量缩放因子为 1×10^6 ^[23], 即将材料的密度放大 1×10^6 倍, 可将稳态时间增量从 10^{-8} s 提高至 10^{-5} s, 从而将计

算速度提高 1 000 倍.

使用质量放大技术时, 需要通过调整材料热物理性能来保持热时间常数稳定. 当式(7)中用虚拟密度 ρ^* 取代原密度 ρ 而造成热时间常数发生改变时, 可通过引入一个虚拟的比热容 $c_e^* = c_e k_m^{-1}$ 来抵消这种效应造成的热时间常数变化, 即

$$-k \nabla^2 T = \alpha \lambda T_0 \operatorname{tr}(\dot{\varepsilon}_e) + \rho^* c_e^* T \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 焊缝形貌

图 3 展示了 C-FSW 和 P-FSW(100/200 °C) 模拟与试验测得的焊缝表面宏观形貌. 与 C-FSW 相比, P-FSW 的后退侧产生了更为明显的飞边, 并且随加热温度升高, 飞边变得更加严重. 飞边是材料流动挤出形成的, 这表明辅助加热工艺下材料流动性较好^[24]. 图 4 代表性地给出 C-FSW 和 P-FSW(100/200 °C) 模拟与试验获得的焊缝横纵截面形貌. 可以看出 C-FSW 焊缝前进侧底部为低应变区域, 有明显的隧道型缺陷, 该缺陷为贯穿焊缝的连续体积缺陷, 模拟获得的缺陷尺寸为 0.55 mm^2 , 实验测得的缺陷尺寸为 0.34 mm^2 , 如图 4a 所示. 模拟测得的缺陷尺寸大于试验结果, 其原因可能是模拟中采用的摩擦系数为定值, 而实际焊接过程中摩擦系数是随温度的改变而改变. 随辅助加热温度升高隧道型缺陷面积减小, 当辅助加热温度为 100 °C 时, 模拟与试验结果均未观察到隧道型缺陷, 焊缝成形良好, 然而在此温度下前进侧底部仍存在一个低应变区, 说明此处变形仍不充分, 如图 4b 所示. 当辅助加热温度为 200 °C 时, 在前进侧底部没



图 3 模拟焊缝与实际焊缝宏观形貌照片

Fig. 3 Simulated and actual image of weld surface. (a) simulated image of weld surface in C-FSW; (b) simulated image of weld surface in P-FSW(100 °C); (c) simulated image of weld surface in P-FSW(200 °C); (d) actual image of weld surface in C-FSW; (e) actual image of weld surface in P-FSW(100 °C); (f) actual image of weld surface in P-FSW(200 °C)

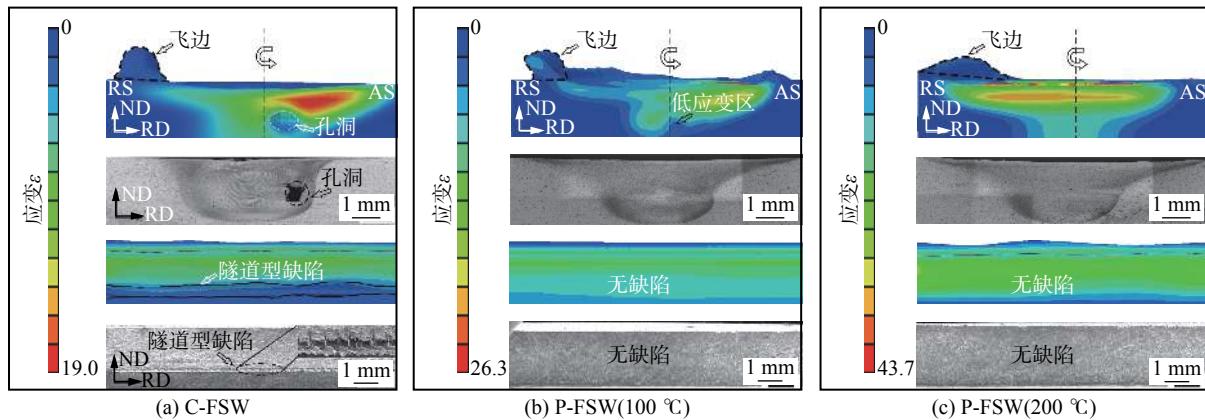


图 4 截面塑性应变及缺陷的模拟结果与试验结果照片

Fig. 4 Images of simulation results and experimental results of section plastic strain and defects. (a) C-FSW; (b) P-FSW(100 °C); (c) P-FSW(200 °C)

有观察到低应变区, 整个截面变形充分, 隧道型缺陷也随之消失。由此可以看出相对于 C-FSW, P-FSW 可以有效消除隧道型缺陷, 改善焊缝成形。虽然模拟测得的缺陷尺寸与试验结果略有差异, 但在相同工艺参数条件下本模型测得的缺陷产生趋势与实验结果一致, 说明该模型能够成功地预测接头中缺陷的产生。

2.2 温度场

图 5 展示了 C-FSW, P-FSW100 °C 和 P-FSW

200 °C 温度场模拟结果。稳态焊接阶段温度场呈椭圆形, 沿着焊缝中心线对称分布。轴肩影响区为高温区域, 而远离轴肩的位置温度逐渐降低, 搅拌头前方温度梯度大于搅拌头后方, 并且随着辅助加热温度升高, 高温分布区域变宽。为了验证该模型的准确性, 将热电偶处实测的焊接热循环曲线与模拟结果表示在图 6 中, 模拟的焊接热循环曲线与实测的曲线形状相似, 且温度值接近, 最大误差仅为 2%, 说明所建立模型具有较好的准确性。

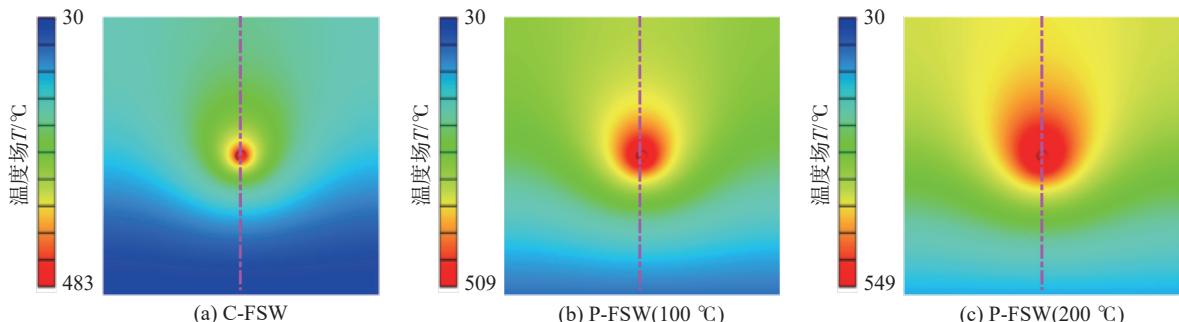


图 5 温度场模拟照片

Fig. 5 Images of temperature field simulation results. (a) C-FSW; (b) P-FSW(100 °C); (c) P-FSW(200 °C)

在高于 350 °C 的条件下变形时, 2519 铝合金会发生动态再结晶^[25], 位错相互抵消和重排, 导致材料的流变应力降低^[26], 因此, 在高于 350 °C 温度范围内的停留时间对材料的流动行为具有显著影响。图 7 展示了焊核区的模拟焊接热循环曲线。C-FSW 的峰值温度为 483 °C, 350 °C 以上高温停留时间为 6 s; P-FSW(100 °C) 的峰值温度为 509 °C, 高温停留时间为 9.3 s; P-FSW(200 °C) 的峰值温度为 549 °C, 高温停留时间为 34.6 s。根据结果可知, 随着辅助加热温度的升高, 焊接峰值温度增加,

350 °C 以上的高温停留时间也随之增加。

由 FSW 产热模型公式 (2) 和公式 (3) 知, 一方面辅助加热提高了系统的热输入, 但另一方面却降低了材料的屈服强度 τ_{yield} , 这导致摩擦状态由滑动摩擦状态转为部分滑动/部分黏着的混合摩擦状态, 摩擦系数 μ_f 减小, 黏着系数 δ 增加, 从而总摩擦产热相对减少。在这两种竞争机制的作用下, 焊缝金属峰值温度升高。

2.3 材料流动

为了探究辅助加热对 FSW 过程中材料流动行

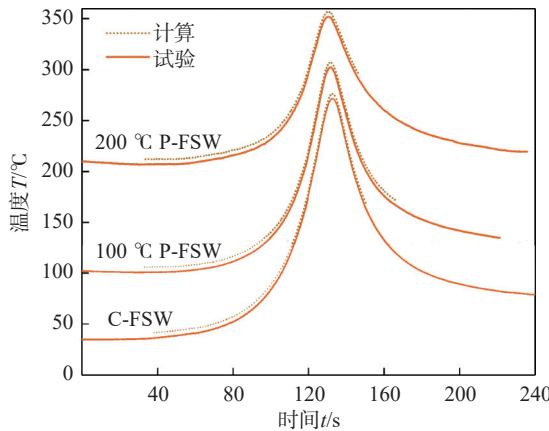


图 6 测量点模拟与实测焊接热循环曲线

Fig. 6 Calculated and experimental welding thermal cycle at the measuring point

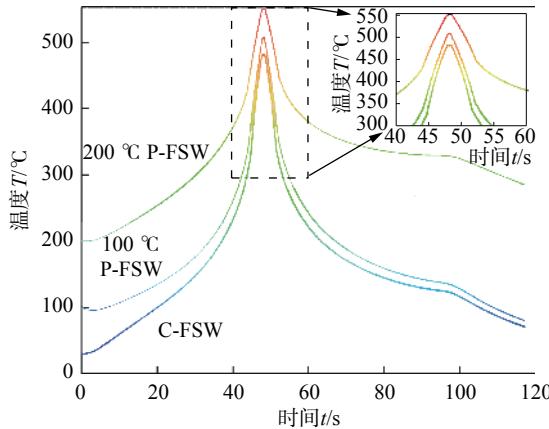


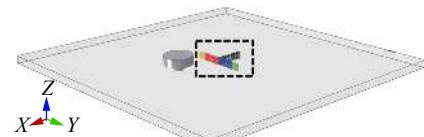
图 7 焊核区模拟焊接热循环曲线

Fig. 7 Welding thermal cycle simulation results of nugget zone

为的影响，并阐明其消除缺陷的作用机理，文中采用示踪粒子技术可视化材料在焊缝不同位置的分布情况及其运动轨迹来分析辅助加热对 FSW 过程材料流动的影响。

图 8 展示了示踪粒子的初始位置及特征点的选取位置。其中，焊缝中心的粒子为黑色，前进侧轴肩影响区的粒子为红色，后退侧轴肩影响区的粒子为蓝色，远离轴肩的区域的粒子为黄色和绿色；在焊缝横截面选取前进侧靠近搅拌针的粒子，标识为 P，并绘制其运动轨迹。

图 9a 展示了在俯视视角下 C-FSW 不同时刻示踪粒子分布情况，其中，远离轴肩的粒子几乎不受搅拌作用，停留在初始位置，见图 9a 中黄色和绿色粒子。当焊接至 4 s 时，焊缝中心的粒子在搅拌头的牵引下进入后退侧；在焊接 4-6 s 期间，焊缝中心粒子继续跟随搅拌头一起运动，更多的粒子进入后退侧；当焊接至 8 s 时，焊缝中心部分粒子绕过后退侧与前进侧之间的中心线最终在前进侧沉积，另一部分粒子则滞留在后退侧，见图 9a 中黑色粒子。前进侧靠近轴肩及搅拌针的粒子运动情况与焊缝中心粒子运动情况类似，这些粒子在搅拌头牵引作用下进入后退侧，跟随搅拌头旋转迁移，大部分粒子越过焊缝中心进入前进侧并与搅拌头脱离，最终在此沉积，回填前进侧产生的瞬时空腔，只有小部分粒子滞留在后退侧，见图 9a 中红色粒子。后退侧粒子被搅拌头推至其后方，未跟随搅拌头做旋转运动，见图 9a 中蓝色粒子。



(a) 示踪粒子分布

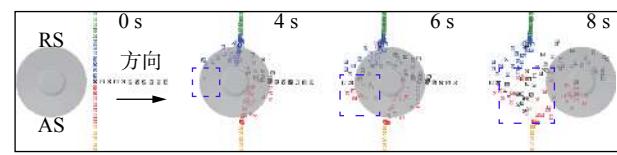


(b) 特征点选取

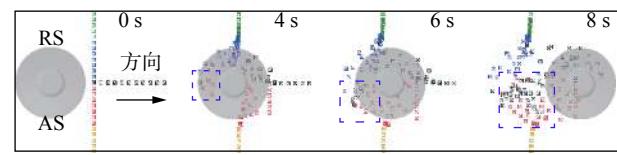
图 8 示踪粒子及特征点的选取

Fig. 8 Selection of tracer particles and characteristic point. (a) Distribution of tracer particles; (b) Selection of the characteristic point

侧与前进侧之间的中心线最终在前进侧沉积，另一部分粒子则滞留在后退侧，见图 9a 中黑色粒子。前进侧靠近轴肩及搅拌针的粒子运动情况与焊缝中心粒子运动情况类似，这些粒子在搅拌头牵引作用下进入后退侧，跟随搅拌头旋转迁移，大部分粒子越过焊缝中心进入前进侧并与搅拌头脱离，最终在此沉积，回填前进侧产生的瞬时空腔，只有小部分粒子滞留在后退侧，见图 9a 中红色粒子。后退侧粒子被搅拌头推至其后方，未跟随搅拌头做旋转运动，见图 9a 中蓝色粒子。



(a) C-FSW



(b) P-FSW

图 9 俯视视角下不同时刻示踪粒子分布

Fig. 9 Tracer particles distribution at different times from top view. (a) C-FSW; (b) P-FSW

由于 P-FSW(100 °C) 过程中示踪粒子的分布情况和流动轨迹与 P-FSW(200 °C) 相似，因此下文仅讨论 P-FSW(200 °C) 示踪粒子分布情况，如图 9b 所示。对比 C-FSW 和 P-FSW 不同时刻示踪粒子分布情况，发现焊接至 4 s 时，P-FSW 越过焊缝中心的粒子数目更多；焊接至 6 s 时，P-FSW 示踪粒子已沉积在前进侧，而 C-FSW 前进侧几乎没有示踪粒子回填；焊接结束时 P-FSW 示踪粒子数目更多、密

度更大, 由此推测 P-FSW 增强了金属塑性流动的能力, 使其回填前进侧瞬时空腔的作用更强。

图 10 展示了 C-FSW 和 P-FSW 在厚度方向上不同时刻示踪粒子分布情况。在 C-FSW 中, 随着离轴肩距离的增加, 粒子所受搅拌作用减弱, 迁移量变小, 后退侧靠近轴肩的粒子受到较大的摩擦力并在轴肩的作用下向上迁移, 部分离开工件表面的粒子形成飞边, 如图 10a 蓝色粒子所示; 由于搅拌针周围温度低, 塑化金属不足, 前进侧中心层大部分粒子停留在初始位置, 随焊接的进行, 搅拌头前进在此处形成空腔。P-FSW 示踪粒子分布更均匀, 发生迁移的粒子更多, 避免了根部材料回填不足而形成隧道型缺陷, 然而由于向上迁移粒子的增多, 预热条件下会产生更为严重的飞边, 如图 10b 所示。这些结果与图 3 中的试验结果一致。

图 11 展示了三维空间中搅拌针附近材料标识

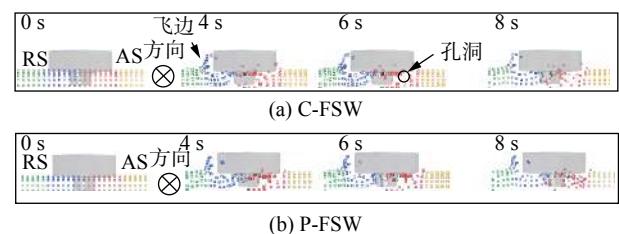
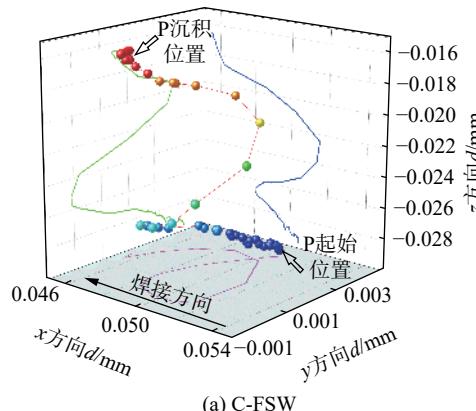


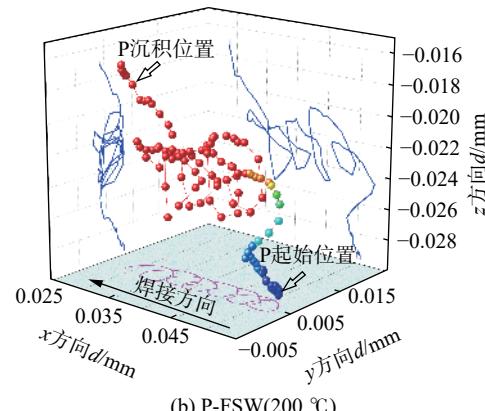
图 10 侧视视角下不同时刻示踪粒子分布

Fig. 10 Tracer particles distribution at different times from side view. (a) C-FSW; (b) P-FSW

质点 P 的流动轨迹以及在 $x-y$ 、 $x-z$ 、 $y-z$ 平面的投影。对比两种工艺发现, P-FSW 标识质点沿搅拌头旋转运动圈数多于 C-FSW 的, 运动轨迹更长。此外, P-FSW 的标识质点会跟随搅拌头做旋转前进的趋势运动, 而 C-FSW 的标识材料跟随搅拌针旋转一周便发生脱离, 前进距离更短。综上所述, P-FSW 显著地增加了焊缝金属的流动性, 从而改善了焊缝成形。



(a) C-FSW



(b) P-FSW(200 °C)

图 11 三维空间中搅拌针附近标识质点 P 的流动轨迹

Fig. 11 Flow path of marked particle P near the pin in 3D space. (a) C-FSW; (b) P-FSW(200 °C)

3 结论

(1) 基于 CEL 方法建立的电阻辅助加热 FSW 三维全热-力耦合模型所获得的热电偶处焊接热循环曲线最大温度误差仅为 2%, 能够准确描述 FSW 产热过程, 而且该模型预测的飞边和缺陷的产生趋势与实验结果一致, 能够精确模拟焊接过程中的材料流动行为。

(2) 相比于 C-FSW, P-FSW 将焊接峰值温度从 483 °C 提高至 549 °C、350 °C 以上高温停留时间从 6 s 延长至 34.6 s, 软化了焊缝金属, 降低了材料变形抗力。

(3) P-FSW 提高了焊缝金属流动性, 增加了由后退侧回填至前进侧的塑性金属, 避免了隧道型缺陷的产生, 但会产生较为明显的飞边。

参考文献

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C. Friction stir welding. Great Britain. 9125978.8[P]. 1991-12-06.
- [2] Dialami N, Cervera M, Chiumenti M. Defect formation and material flow in friction stir welding[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2020, 80: 103912.
- [3] 文旭峰, 苗臣怀, 曹丽杰, 等. 5052 铝合金搅拌摩擦焊的材料流动数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2022, 51(5): 105 – 109.
Wen Xufeng, Miao Chenhuai, Cao Lijie, et al. Numerical simulation on material flow during friction stir welding of 5052 Al

- alloy[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(5): 105 – 109.
- [4] 龙玲, 史清宇, 刘铁, 等. 搅拌摩擦焊接材料流动模型及在缺陷预测中的应用 [J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 84 – 88.
Long Ling, Shi Qingyu, Liu Tie, et al. Modeling of material flow during friction stir welding and the application for defect prediction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 84 – 88.
- [5] 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.
Chen Gaoqiang, Shi Qingyu. Recent advances in numerical simulation of material flow behavior during frictions stir welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 11 – 21.
- [6] Kim YG, Fujii H, Tsumura T. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 415(1-2): 250 – 254.
- [7] De P S, Mishra R S. Friction stir welding of precipitation strengthened aluminium alloys: scopes and challenges[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2013, 16(4): 343 – 347.
- [8] Padhy G K, Wu C S, Gao S. Auxiliary energy assisted friction stir welding – Status review[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2015, 20(8): 631 – 649.
- [9] 宋新华, 修腾飞, 金湘中, 等. 激光辅助加热搅拌摩擦焊 3 维流场数值模拟 [J]. 激光技术, 2016, 40(3): 353 – 357.
Song Xinhua, Xiu Tengfei, Jin Xiangzhong, et al. Numerical simulation of 3D flow field on laser-assisted heating friction stir welding of steel[J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 353 – 357.
- [10] Yi T, Liu S D, Fang C, et al. Eliminating hole defects and improving microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of 2519 aluminum alloy via TIG arc[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 310: 117773.
- [11] 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 Zhi, Wang Min, Zhang Huijie, 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.
- [12] Tang J, Shen Y. Effects of preheating treatment on temperature distribution and material flow of aluminum alloy and steel friction stir welds[J]. The Society of Manufacturing Engineers, 2017, 29: 29 – 40.
- [13] Yaduwanshi D K, Bag S, Pal S. Numerical modeling and experimental investigation on plasma-assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials[J]. Materials & Design, 2016, 92: 166 – 183.
- [14] He X C, Gu F S, Ball A. A review of numerical analysis of friction stir welding[J]. Progress in Materials Science, 2014, 65: 1 – 66.
- [15] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(10): 31 – 48.
- [16] Liu W H, He Z T, Chen Y Q. Dynamic mechanical properties and constitutive equations of 2519A aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2179 – 2186.
- [17] 郭怀志, 潘家敬, 赵朋成, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊接过程数值分析 [J]. 青岛科技大学学报 (自然科学版), 2021, 42(3): 94 – 100.
Guo Huazhi, Pan Jiajing, Zhao Pengcheng, et al. Numerical analysis of friction stir welding of 2219 Aluminum alloy[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 94 – 100.
- [18] 徐韦峰, 刘金合, 朱宏强. 2219 铝合金厚板搅拌摩擦焊接温度场数值模拟 [J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 63 – 66.
Xu Weifeng, Liu Jinhe, Zhu Hongqiang. Numerical simulation of thermal field of friction stir welded 2219 aluminum alloy thick plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 63 – 66.
- [19] Schmidt H, Hattel J, Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12: 143 – 157.
- [20] Fuller C B. Friction stir tooling: Tool materials and designs[J]. Friction Stir Welding and Processing, 2007.
- [21] Nicholson D W. Finite element analysis: thermomechanics of solids, second edition[J]. CRC Press, 2008.
- [22] Constantin M A, Nițu E L, Diakhate M, et al. An efficient strategy for 3D numerical simulation of friction stir welding process of pure copper plates[J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2020, 916(1): 012021.
- [23] 李文亚, 余敏, 李京龙. 质量放大因子对搅拌摩擦焊接插入过程的影响 [J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 1 – 4.
Li Wenya, Yu Min, Li Jinglong. Effect of mass scaling factor on the plunge stage of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 1 – 4.
- [24] 朱涵文. 底部辅热搅拌摩擦焊工艺及其温度场数值模拟研究 [D]. 镇江, 江苏科技大学, 2021.
Zhu Hanwen. Process and numerical simulation of temperature field of friction stir welding with auxiliary heating[D]. Zhenjiang, Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [25] 李慧中, 梁霄鹏, 张新明, 等. 2519 铝合金热变形组织演化 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(2): 226 – 230.
Li Huizhong, Liang Xiaopeng Zhang Xinming, et al. Microstructure evolution of 2519 aluminum alloy during hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 226 – 230.
- [26] Alam M P, Sinha A N. Fabrication of third generation Al–Li alloy by friction stir welding: a review[J]. Sādhanā, 2019, 44(6): 1 – 13.

第一作者:方晨, 硕士. Email: 203112087@csu.edu.cn.

通信作者:刘胜胆, 教授, 博士. Email: lsd_csu@csu.edu.cn.