



镁合金载流静轴肩搅拌摩擦焊接数值模拟

陈树君, 王磊, 蒋晓青, 王奕琳, 袁涛

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 传统镁合金搅拌摩擦焊接过程中材料流动性能较低, 从而焊缝容易出现缺陷。本文利用 COMSOL 仿真软件, 建立一种镁合金载流静轴肩搅拌摩擦焊(SSFSW)双热源数值模型, 研究输入电流对材料流动性能的影响。通过改变输入电流参数进行数值模拟得到焊接过程温度场, 应力场和速度场的演变规律。发现随着电流的提高, 温度场分布沿焊缝厚度方向趋于均匀化, 焊缝的温度梯度降低, 应力场峰值从 532 MPa 降低至 461 MPa, 呈明显降低趋势, 证明此时焊缝中材料流动性得到显著提高。在电流达到 150 A 时, 焊接温度峰值接近于材料熔点 650 °C, 在此温度下易于得到无缺陷的焊缝和性能优异的焊接接头。数值模拟有效地预测实际焊接实验中可能会出现的结果, 减少为了得到合理焊接参数所需大量实验的成本, 并且仿真结果对工艺参数的选择有重要的指导意义。

关键词: AZ31 镁合金; 载流静轴; 肩搅拌摩擦焊; 数值模型; 温度场; 应力场

文章编号: 1004-0609(2021)-07-1786-12

中图分类号: TG402

文献标志码: A

引文格式: 陈树君, 王磊, 蒋晓青, 等. 镁合金载流静轴肩搅拌摩擦焊接数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1786–1797. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40014

CHEN Shu-jun, WANG Lei, JIANG Xiao-qing, et al. Numerical simulation of electric assisted stationary shoulder friction stir welding of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1786–1797. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40014

镁合金拥有较强的热成型性、散热性以及较高的比强度^[1], 并且在高温下拥有良好的强度与抗疲劳性等一系列优良性能^[2]。搅拌摩擦焊作为一种新型的固相连接技术, 具有焊接变形小, 能量消耗少, 能有效细化晶粒等特点, 在连接镁合金方面具有很多熔化焊无法比拟的优势^[3]。除此之外, 罗键教授创造性地将电流引入搅拌摩擦焊接过程中, 可以产生更多的热量输入以减少对的下压力的需求^[4-5]。其课题组通过建立热、力、电耦合的载流-搅拌摩擦焊数值模型, 对载流搅拌摩擦焊的温度分布, 残余应力, 材料流动及搅拌头磨损进行了数值模拟研究^[6], 结果表明载流搅拌摩擦焊是一个电阻产热、温度、应力应变等多种因素相互影响、相互耦合的复杂过程, 同时也证明了电流的输入可以有效地减

少焊接缺陷以及降低搅拌针磨损程度^[7]。相对于传统 FSW, TWI 于 2004 年开发出的静轴肩搅拌摩擦焊消除了轴肩旋转对焊缝造成的不良影响^[8], 不仅在焊接厚度方向上提供了均匀的热输入, 还解决了传统 FSW 工件表面过热的问题^[9]。李文亚等^[10]对 AZ31B 镁合金进行了 SSFSW 实验, 在合理的工艺参数下得到了光滑无缺陷的焊缝, 焊接接头的极限拉应力和屈服强度均有显著的提升, 证明 SSFSW 能够有效地改善了镁合金焊缝成形和接头的性能。

如今, 热机加工的数值仿真研究已成为重要研究方向。MO 等^[11]利用 ANSYS 建立了铝钢异种合金 FSW 双热源三维模型, 对比了转速与焊速对焊接接头的温度场与应力场分布的影响, 并发现随着转速的升高, 焊接温度峰值与残余应力峰值有显著

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1306400); 国家自然科学基金资助项目(51604015); 北京市基础科学研究基金资助项目(PXM2019_014204_500032)

收稿日期: 2020-08-10; **修订日期:** 2021-03-15

通信作者: 蒋晓青, 讲师, 博士; 电话: 010-67392667; E-mail: xjiang@bjut.edu.cn

提升。YU 等^[12]利用 DEFORM-3D 软件模拟了搅拌摩擦焊接过程, 通过改变焊接速度和转速对搅拌区 (SZ) 的温度场和应变率场的变化进行分析研究, 发现在相同参数下, 温度场的分布对搅拌区晶粒尺寸的影响较大。SMRITY 等^[13]利用 COMSOL 建立 FSW 三维数值模型, 得到了焊接过程中的热分布规律, 并且通过 Masubuchi 和 Martin 方程确定 FSW 残余应力, 研究发现焊接峰值温度会随着焊接速度的增加而降低。

载流静轴肩搅拌摩擦焊这一焊接技术既保证充足的热量输入, 又可以使焊接过程中热量均匀的分布到焊缝当中, 是提高焊接接头力学性能的高效方法之一。但目前针对镁合金载流 SSFSW 实际实验数据相对较少, 因此本文通过仿真软件 comsol 对镁合金载流静轴肩搅拌摩擦焊接进行数值模拟分析, 设置基本参数与边界条件近似于实际实验环境, 通过对多个物理场的耦合模拟, 得到焊接温度场和应力场的分布特征, 为镁合金载流 SSFSW 工艺参数提供理论依据。

1 仿真模型

1.1 仿真模型的建立

载流-搅拌摩擦焊过程中, 工件的弹性变形相对于塑性变形可忽略不计。刚塑性有限元法基于小变形的位移关系, 忽略塑性变形中的弹性变形部

分。考虑到焊接过程中工件材料的应变率对流动应力具有明显影响, 且在高温下材料呈现出一种黏性特性, 因此将构件设置为刚黏塑性体, 采用刚黏塑性有限元法模拟载流-搅拌摩擦焊接过程。

1.2 工艺参数及材料属性

仿真模型以实际实验中的待焊工件和焊接工具的尺寸大小为基础进行建立。选取两块 AZ31B 镁合金板材进行对接焊, 板材尺寸为 400 mm×100 mm×3 mm, 材料性能如表 1 和 2 所示。焊接示意图如图 1 所示。设定焊接转速恒定 1000 r/min, 焊速恒定 60 mm/min, 轴向载荷 25 kN。搅拌针根部半径 3 mm, 轴肩半径 12.5 mm。模拟输入电流范围 0~150 A。

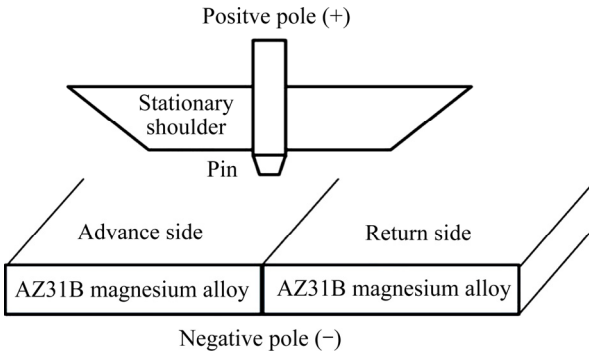


图 1 镁合金载流 SSFSW 模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electrically assisted stationary shoulder friction stir welding

表 1 室温下 AZ31B 镁合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of AZ31B magnesium alloy at room temperature

Tensile strength/MPa	Hardness, HRC	Reduction ratio in area/%	Elongation/%	Yield strength/MPa
242	45	18.4	9	130

表 2 不同温度下 AZ31B 镁合金热物理性能

Table 2 Thermophysical properties of AZ31B magnesium alloy at different temperatures

Temperature/ ℃	Specific heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	Thermal conductivity coefficient/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Coefficient of thermal expansion/K ⁻¹	Elastic modula/ MPa	Density/ (kg·m ⁻³)	Solidus/ ℃	Liquidus/ ℃	Fusing point/ ℃
20	1.02×10 ⁹	78.6	2.5×10 ⁻⁵	45000				
100	—	90	2.7×10 ⁻⁵	42000				
200	—	98	2.9×10 ⁻⁵	35200	1770	468–549	616–641	650
300	—	105	3.2×10 ⁻⁵	26000				
400	1.34×10 ⁹	112	3.5×10 ⁻⁵	20000				

1.3 热源方程

本研究中所建立的双热源数值仿真模型主要热源包含搅拌针与待焊工件摩擦产生的摩擦热和外加电流与接触电阻产生的焦耳热。搅拌针产热公式^[14]为

$$q_{\text{pin}}(T) = \frac{\mu}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} r_p \omega \bar{Y}(T) \quad (1)$$

式中： μ 为摩擦因数； r_p 为搅拌针半径； ω 为搅拌针转速； $\bar{Y}$ 为工件平均剪切应力。

模拟过程中在搅拌针上法向施加直流电流，输入电流大小分别为 50 A、100 A 和 150 A，在搅拌工具和板材的接触区域产生焦耳热，其表达式为

$$Q_j = \nabla(J_e - \nabla V \sigma) \quad (2)$$

式中： V 为直流电压； J_e 为直流电流密度； σ 为镁合金电导率。

1.4 控制方程

焊接传热过程包含热传导与热对流项，其方程表达^[6]为

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho c_p \mu \cdot \nabla T = Q \quad (3)$$

式中： T 为焊接温度； ρ 为密度； c_p 为比热容； Q 为热流密度； k 为热传导系数； μ 为对流速度； ∇ 为梯度算子。

热辐射反映出物体传热规律，仿真模拟过程中定义热辐射的表达式^[6]为

$$-n \cdot (-k \nabla T) = \varepsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (4)$$

式中： ε 表示表面发射率； σ 为 Stefan Boltzmann 常数； T_{amb} 表示环境温度。

载流 SSFSW 焊接模型中搅拌工具所覆盖的区域为焊接区，在数值模拟过程中焊接区材料被设定为具有高黏度的不可压缩的牛顿流体，其动量方程表达式^[7]为

$$\mathbf{F} + \left[-p + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \eta(\nabla \cdot \mathbf{u}) \right] \cdot \nabla = \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{F}$ 为体力矢量； p 为轴向压力； η 为动态黏度； $\mathbf{u}$ 为速度矢量； ρ 为密度。

镁合金板材在仿真过程中作为刚黏塑性材料在发生塑性变形时满足 Mises 屈服准则^[15]，表达式为

$$\frac{1}{2} \sigma'_{xy} \sigma'_{xy} = K^2 \quad (6)$$

式中： σ'_{xy} 为塑性区应力偏量； K 为常数且 $K = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s$ ， σ_s 为材料屈服应力。

由于考虑到对于载流搅拌摩擦焊接工艺需要选用合适的本构方程去描述塑性材料在高热量输入的情况下的应力应变关系，本次仿真中刚黏塑性体的焊接区主要以塑性变形为主，服从 Levy-Mises 流动理论，因此构建 Levy-Mises 应力应变方程作为本构方程^[16]，表达式如下：

$$\dot{\varepsilon}_{xy} = \dot{\lambda} \dot{\sigma}_{xy} \quad (7)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

式中： $\dot{\sigma}_{xy}$ 为塑性区各应力偏量； $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变速率， $\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy}}$ ； $\bar{\sigma}$ 为等效应力， $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\sigma}_{xy} \dot{\sigma}_{xy}}$ 。

1.5 网格划分

如图 2 所示，采用 COMSOL 网格划分模块对待焊工件进行划分，划分的结果为四边形单元：3158，三角形单元：1264，边单元：688，顶点单元：40，平均单元质量：0.9031。在该仿真软件中里网格质量接近于 1，则划分质量高；一般情况下，网格质量不低于 0.01，因此本研究对于仿真模型网格划分质量非常高。

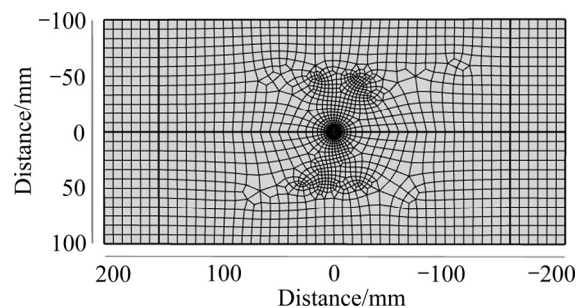


图2 网格划分模型

Fig. 2 Meshing model

1.6 边界条件

在仿真过程中,待焊工件的初始温度为 20 °C。工件两侧设置为无限域,防止边缘效应对仿真结果造成影响。待焊工件上下表面均由于自然对流和表面对环境辐射而散热,其中上表面在焊接过程中会产生剧烈的温度变化,其热通量表达^[17]为

$$q_{\text{up}} = h_{\text{up}}(T_0 - T) + \varepsilon\sigma(T_{\text{zmb}}^4 - T^4) \quad (9)$$

下表面热通量表达式^[17]同理:

$$q_{\text{down}} = h_{\text{down}}(T_0 - T) + \varepsilon\sigma(T_{\text{zmb}}^4 - T^4) \quad (10)$$

将待焊工件前侧定义为热流出边界,表达式^[17]为

$$h_f(T_0 - T) = 0 \quad (11)$$

式中: h_{up} 和 h_{down} 是自然对流的传热系数; h_f 为待焊工件前侧热传导系数; T_0 是相关的参考温度; ε 是表面辐射率; σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T_{zmb} 是环境空气温度。

搅拌针的上端设置为电场的终端,设定输入电流大小,待焊工件的两侧无限域末端设置为接地端,分别对应预热载流 SSFSW 和热处理载流 SSFSW 的情况,图 3 所示为待焊工件几何模型传热边界条件示意图。

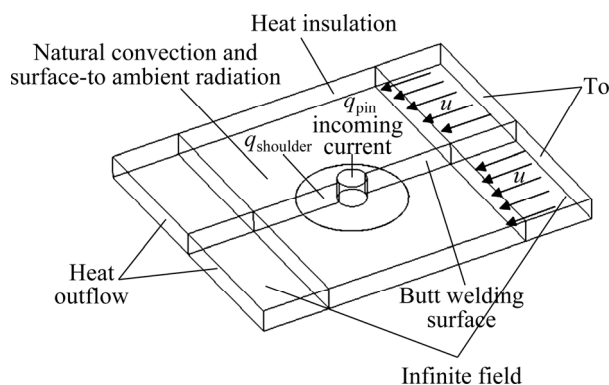


图 3 工件几何模型传热边界条件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of heat transfer boundary conditions of the geometry model for workpiece

由于载流搅拌摩擦焊接过程包含十分复杂的材料变形和流动,所以出于节省计算时间和模型稳定性方面的考虑,本文对搅拌摩擦焊进行有限元仿真时对所涉及的材料和焊接过程还做了如下的假设和简化。

1) 由于搅拌头和垫板在焊接过程中变形量很

小,因此将搅拌头和垫板视为刚性体,即忽略搅拌头和垫板的变形。

2) 将实际中搅拌摩擦焊对焊的两块工件简化为一块完整连续的板,以避免模拟过程中的不稳定性^[18]。

3) 只考虑载流-搅拌摩擦焊中搅拌头与工件之间的接触电阻,忽略导电块与工件之间、工件与垫板之间的接触电阻。

2 数值模拟结果及分析

2.1 温度场

首先分别选取焊接时间为 1 s、20 s 以及 50 s 的焊接云图,图 4 所示为载流静轴肩搅拌摩擦焊接过程温度分布(此时输入电流为 150 A)。焊接时间 $t=1$ s 时,搅拌针下压入待焊工件但并未开始横向移动,温度场围绕搅拌针周围呈圆形的不均匀分布。此时为焊接预热阶段^[19],温度峰值在 650 K 左右;当焊接温度 $t=20$ s 时,模型已处于稳定焊接过程,峰值温度 720 K 左右,约为 AZ31B 镁合金熔点温度 80%,此时工件为固相连接,温度场相对焊缝呈对称分布;当焊接时间 $t=50$ s 时,此时温度峰值接近 900 K,相对于焊接时间为 20 s 时有了较大的提

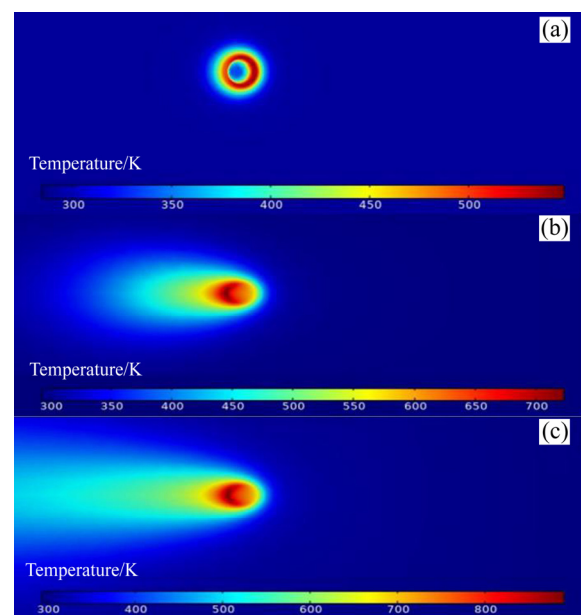


图 4 载流静轴肩搅拌摩擦焊接过程温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in process of electrically assisted stationary shoulder friction stir welding: (a) Welding time of 1 s; (b) Welding time of 20 s; (c) Welding time of 50 s

升,这是因为此时焊接过程接近尾声,工件散热面积减少且此时工件温度较高,产热量大于散热量^[23],这些因素使焊接温度在焊接过程即将结束时有了显著的提升。

如图 5 所示,建立镁合金载流静轴肩搅拌摩擦焊接模型,得到在输入电流不同情况下焊缝表面的温度场分布图。由图 5 可以看出,焊缝的整体温度分布随搅拌针的移动呈显著的椭圆形分布,温度随距搅拌针的距离的增加而降低,高温分布集中在搅拌针附近^[24],这是由于此时焊接过程的热输入全部来源于搅拌针产生的摩擦热和搅拌针与工件间接触电阻产生的电阻热^[25]。对比图 5(a)与图(b),在未载流的情况下,焊缝表面温度场整体温度较低;随着输入电流的升高,温度场的整体温度有了显著的提升;不仅如此,通过对比图 5(b)、(c)、(d)中载流后焊缝表面的温度分布,温度梯度的差异随着输入电流的升高而明显减少,即电流产生的热量有助于减缓焊接过后焊缝冷却的速率,焊缝处于高温状态的时间越长,越有助于消除焊缝缺陷的产生。但无论是载流还是未载流的情况,焊缝前进侧与后退侧温度场的分布规律较为相似,在铝合金 FSW 温度场分布研究中,在某些特定的工艺参数下也会出现类似的结果^[23-27]。如图 6 焊缝截面温度分布图所示,在厚度方向上温度场分布形状为柱形,这是由搅拌针针头形决定的^[28]。状未载流时焊缝上表面与下表

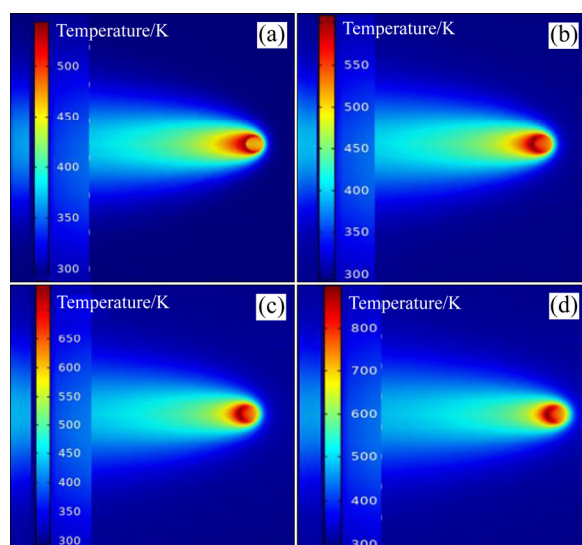


图 5 不同输入电流时焊缝表面温度场分布云图

Fig. 5 Weld surface temperature field distribution map with different input currents: (a) 0 A; (b) 50 A; (c) 100 A; (d) 150 A

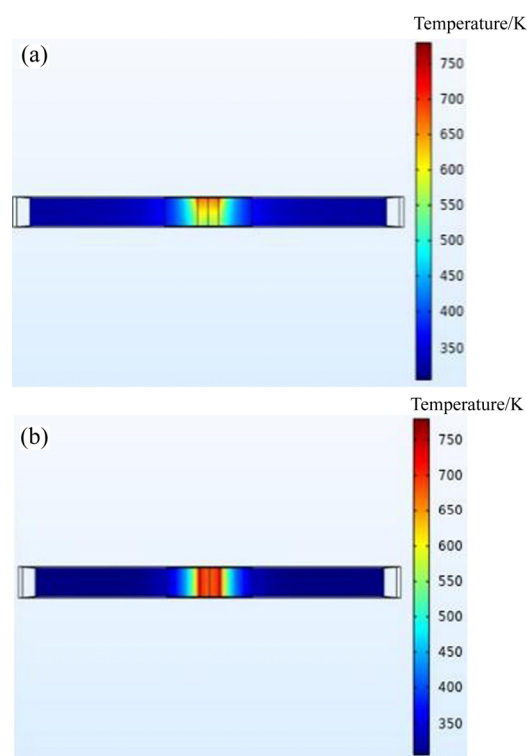


图 6 焊缝截面温度分布

Fig. 6 Weld cross-section temperature distribution: (a) Input current of 0 A; (b) Input current of 150 A

面存在显著温差,由图 6(a)可明显看出,焊缝表面温度高于底部,这也是形成根部缺陷的主要原因^[29];图 6(b)中载流后焊缝纵向温度分布较为均匀,因此可以预测在实际工程中,镁合金载流静轴肩搅拌摩擦焊在搅拌区的整个厚度范围内会产生更均匀的温度分布,这可以改善镁合金焊接接头的微观组织结构的不对称性,从而提高其力学性能。

在不同参数下焊缝温度峰值可由图 7 中直观地表示,与传统载流搅拌摩擦焊接相比,温度峰值整体降低。这是由于静轴肩搅拌摩擦焊没有轴肩摩擦产热,所以热输入相对较低,温度峰值也相对较低。本研究中仿真材料为 AZ31B 镁合金,熔点为 920 K 左右,理论上在实际实验中焊缝温度达到待焊工件的熔点的 80%即可形成有效焊接,进而可得到无明显缺陷的良好焊缝。当输入电流为 150 A 和 100 A 时,焊接峰值温度可分别近似达到 900 K 和 750 K 左右,均达到焊缝无缺陷的基本要求,因此理论上此时焊接接头的综合力学性能相对未载流的情况下得到的焊接接头会有显著提高。另外,所有焊接工艺参数下的温度峰值均未超过母材熔化点(920 K),表明此时焊接过程一直处于固相连接状态^[30]。

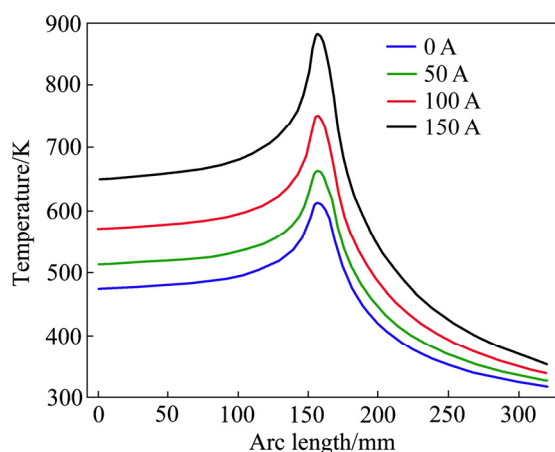


图7 温度峰值分布图

Fig. 7 Peak temperature profile

为了更好地研究载流静轴肩搅拌摩擦焊接温度分布规律, 本研究给出了静轴肩搅拌摩擦焊接过程中待焊工件等温线分布, 如图8所示, 等温线颜色越深代表温度越高。未载流的情况下, 颜色较深的温度线在搅拌针附近密集分布, 代表此时搅拌针摩擦产热为主要热源输入; 从图8(b)、(c)、(d)中可以看出, 随着输入电流逐渐升高, 深色温度线开始向搅拌针后侧转移, 此时电流产生的焦耳热在焊接中起到热处理的效果。即便如此, 搅拌针处的等温线相对于焊缝其他位置仍相对密集, 这是由于搅拌针与工件形成的接触电阻较大, 进而产生较大的焦耳热输入^[31]。除此之外, 焊缝整体的等温线密度随电流输入的升高而更加密集, 可探测到温度升高的范围也明显扩大, 这说明载流为搅拌摩擦焊提供了有效的热输入, 其产生的焦耳热效应被充分地利用到了焊接过程当中。

虽然随着电流的增大, 模拟温度分布场越来越趋于理想化, 但实际在焊接过程中焊件上表面的温度过高^[32]会造成 AZ31B 合金焊接接头沿焊缝厚度方向上的显微组织发生较大变化, 进而影响到接头

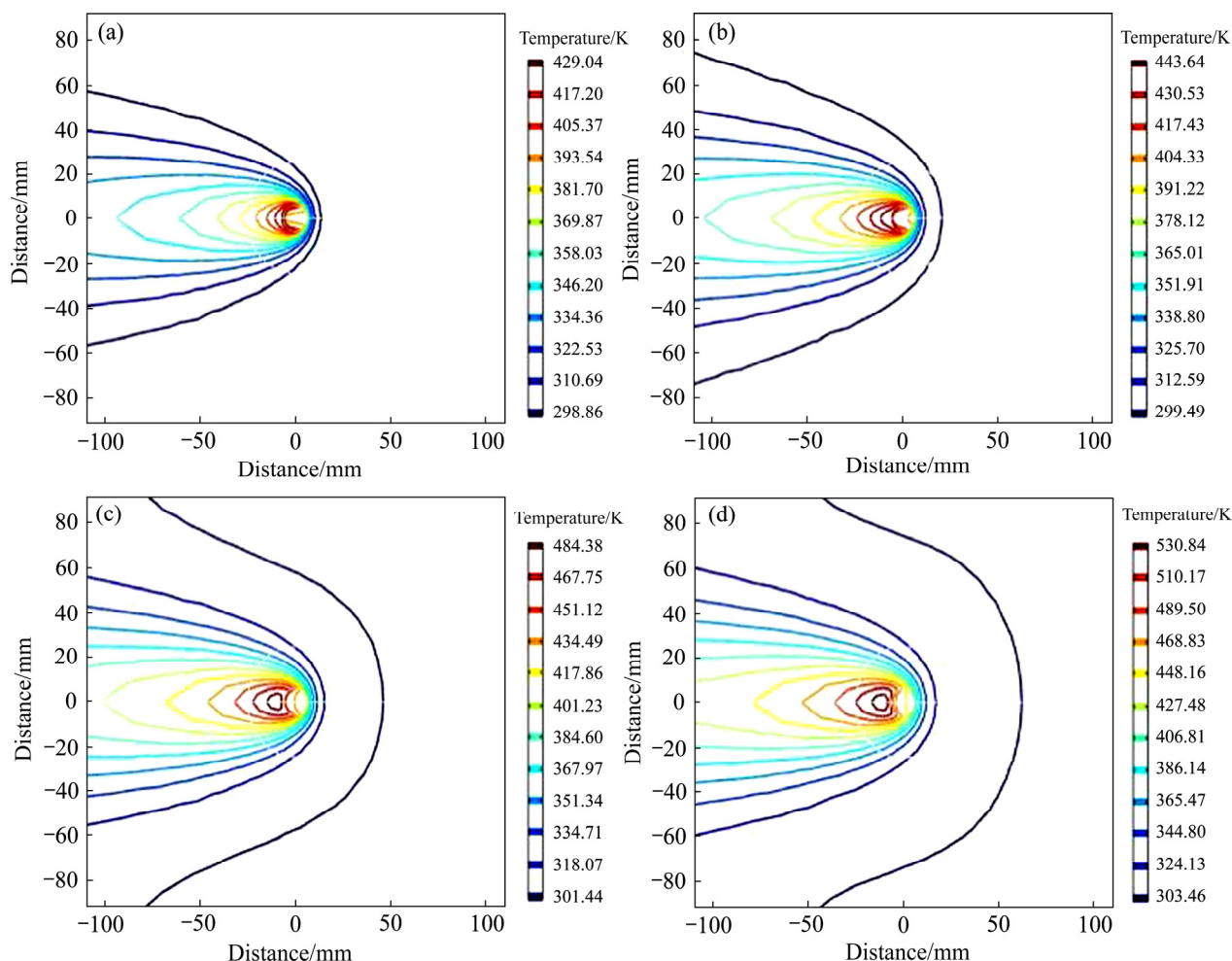


图8 待焊工件等温线分布图

Fig. 8 Isotherm distribution of welded plate with different input currents: (a) 0 A; (b) 50 A; (c) 100 A; (d) 150 A

的力学性能。尤其是在异种合金焊接时为防止待焊工件过热,搅拌针一般会偏置于熔点较低的金属一侧^[22]。在 TELMO 等^[33]的研究中,建立载流搅拌摩擦焊模型通过计算发现输入电流 70%流经待焊工件产生焦耳热源作用,其余 30%会向轴肩等焊接工具上分流。尤其在实验过程中由于材料电导率会随温度发生变化,因此,模型预测的值实际上高于在实践中可以验证的值^[34]。在镁合金静轴肩载流搅拌摩擦焊接过程中,焊件上下表面温差较小,因此有利于得到优异的焊接接头。

2.2 应力场

本模型中下压力取为 25 kN,在焊接时材料发生塑性变形后焊缝体积应变会随之发生变化。如图 9 所示,在输入电流逐渐增大的情况下,焊缝附近的体积应变范围出现一定的收缩,焊缝表面体积应变降低,这表明电流带来的高温作用促进了镁合金焊接过程的材料流动性,降低了材料流动所需要的应力大小,进而焊缝表面及附近的应变大小也随之改变;从图 9 还可以看出,在静轴肩搅拌摩擦焊接过程中体积应变在搅拌针周围分布并不均匀。虽然 SSFSW 轴肩不旋转,不参与产热,对焊缝一般不造成影响,但轴肩会紧紧贴合在焊缝表面,其下压作用在焊接过程中同样不可忽视,这也就解释了仿真结果中显示体积应变变化最剧烈的区域集中于搅拌针底部偏焊接反方向的位置上的原因,该区域受

到搅拌针搅拌以及轴肩下压的双重作用,从而证明了该区域是焊缝中最易发生变形的位

置。除此之外,焊缝的应变不仅仅发生在表面,其内部由于材料流动也会发生塑性变形,如图 10 所示。焊接过程中搅拌针周围的材料流动最为剧烈,前进侧与后退侧的体积应变呈对称分布,这表示这两个区域驱使材料流动所需的应力大致相等,相对于 FSW 此时的焊缝宽度明显变窄,这一点与 SUN 等^[35]的研究结果相一致。在镁合金 FSW 中前进侧焊缝过渡区域金属流动剧烈,而后退侧过渡区域的金属流动较缓和,这主要是轴肩旋转作用下造成的问题。因此静轴肩搅拌摩擦焊能够在一定程度上改善传统搅拌摩擦焊造成的焊缝两侧的热影响区金属流动形貌中关于焊缝中心不对称的问题。从图 10(a)中看出在未载流时焊缝体积应变纵向呈均匀分布,横向呈对称分布,但整体应变值偏大,因此整条焊缝在焊接过程中对应力需要始终在一个较高的水平上;对比图 10(b)、(c)、(d),载流后焊缝体积应变值逐渐降低,其大小随着与焊缝表面的距离的增大而减小,因此在焊缝底部体积应变最小,焊接时所需要的应力较低,证明其材料流动性能较好。在实际焊接实验中,经常会出现未焊透的情况下,从而焊接缺陷多集中于焊缝根部,称为根部缺陷。但搅拌针底部材料流动性越高,出现根部缺陷的几率就越低,因此可推测采用载流静轴肩进行搅拌摩擦焊可以增强焊缝底部材料流动性,有

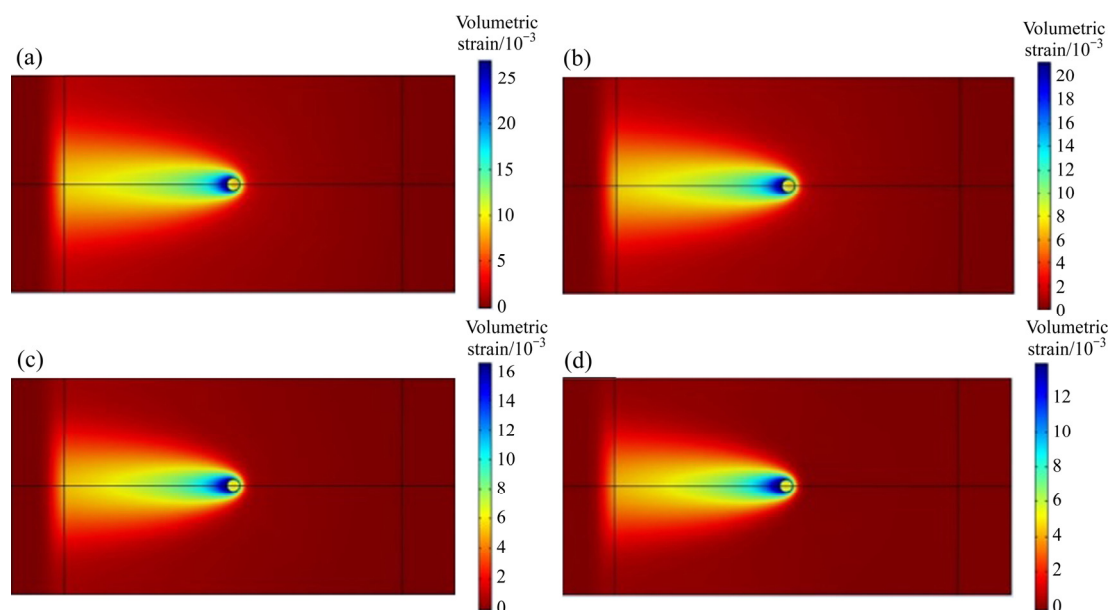


图9 焊缝表面体积应变分布图

Fig. 9 Volumetric strain profile of weld surface with different input currents: (a) 0 A; (b) 50 A; (c) 100 A; (d) 150 A

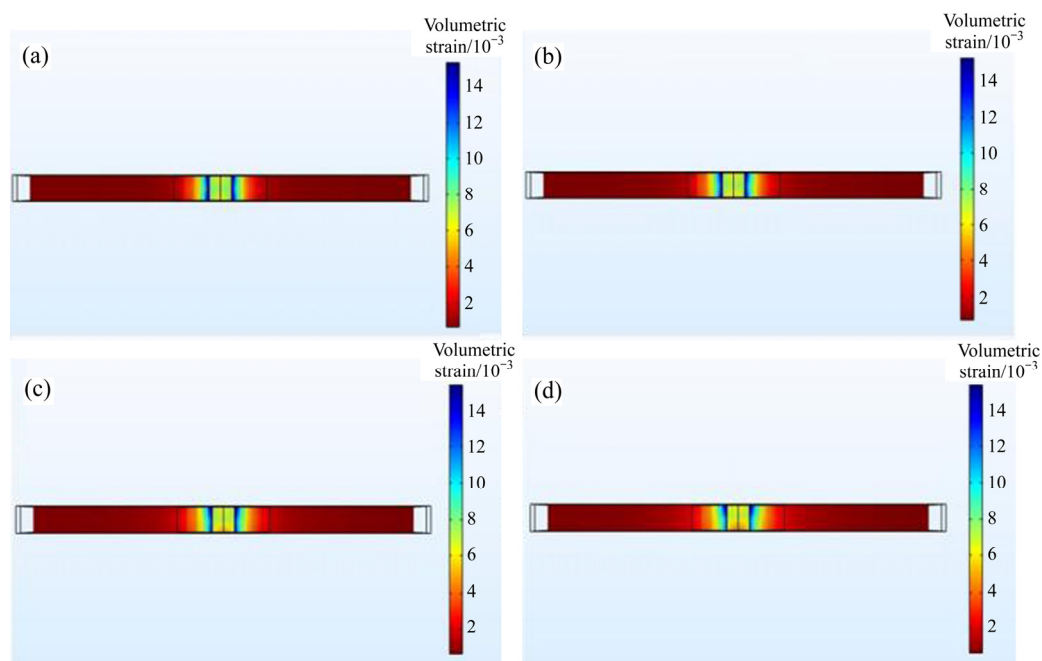


图 10 焊缝截面积应变分布图

Fig. 10 Volumetric strain profile of weld section with different input currents: (a) 0 A; (b) 50 A; (c) 100 A; (d) 150 A

助于消除根部缺陷。

图 11 所示为镁合金载流 SSFSW 情况下, 建立的 Von mises 应力分布模型。如图 11(a)、(b)所示, 较低的输入电流对焊缝应力分布规律变化的影响并不显著, 但当输入电流大于 0 A 时, 应力峰值会迅速出现降低趋势; 这是因为随着电流增加, 温度不断升高, 搅拌针附近材料流动性伴随着材料软化区域的扩张和塑性材料的增加而增强^[36], 促进材料变形的应力的峰值也会随之减小。另外前进侧与后退侧应力分布大致相同, 表明此时 AS 与 RS 材料流动均匀^[37], 这再次验证了 SSFSW 可以改善焊缝材料流动性, 使前进侧与后退侧微观组织结构得到相同的变化。除此之外, 每个图中的应力峰值均集中在搅拌针边缘处, 轴肩下表面所接触的区域应力值也相对较高, SMRITY 等^[38]在研究中证明了焊接应力包含轴肩下压而产生的应力 $\sigma = F/A$, 这就表明即使轴肩没有旋转摩擦, 它贴合于工件表面产生的下压作用也会对焊接应力产生影响。当电流从 0 A 增大到 50 A 时, 工件表面的应力峰值从 532 MPa 减少到 505 MPa, 这是由于随着外接电流输入, 焊接区域的电阻会产生焦耳热与搅拌针摩擦热形成复合热源, 高温作用下镁合金焊接区域材料流动性增强, 所需要的促进材料流动的应力值就会显著降

低, 因此未载流时就需要更大的应力促进材料流动从而使焊缝成形; 当电流从 50 A 增大到 150 A 时, 工件表面的应力峰值从 505 MPa 减少到 461 MPa, 此时的电流大小对应应力峰值影响十分有限, 即使再增大输入电流, 应力峰值也不会出现大幅度降低的现象。因为只有电阻热在总的热源中所占的比例达到一定程度时, 电流值对材料的塑性才会产生有效的影响。电流的变化会对焊接应力中的热应力和塑性应力产生影响, 而真正对焊接应力影响最大的是转速与焊速, 他们还分别影响着刀具的径向应力和轴向应力^[39], LOMBARD 等^[40]研究得出焊接速度是影响拉伸残余应力峰值的主要因素, 而转速主要只影响拉伸区宽度。在本数值模拟中, 应力峰值越低, 代表材料流动性越好。但在实际实验中, 电流作用下产生的电阻热对材料的塑性产生的积极影响是有限的, 同时待焊工件中所产生的应力需要大于镁合金屈服应力才可以形成焊缝, 因此应力值并不会随输入电流的增大而无限的减小。

2.3 速度场

镁合金静轴肩搅拌摩擦焊接的过程就是焊缝材料进行剧烈塑性变形的过程。图 12 所示为是镁合金 SSFSW 过程中输入电流从 0 A 变化至 150 A

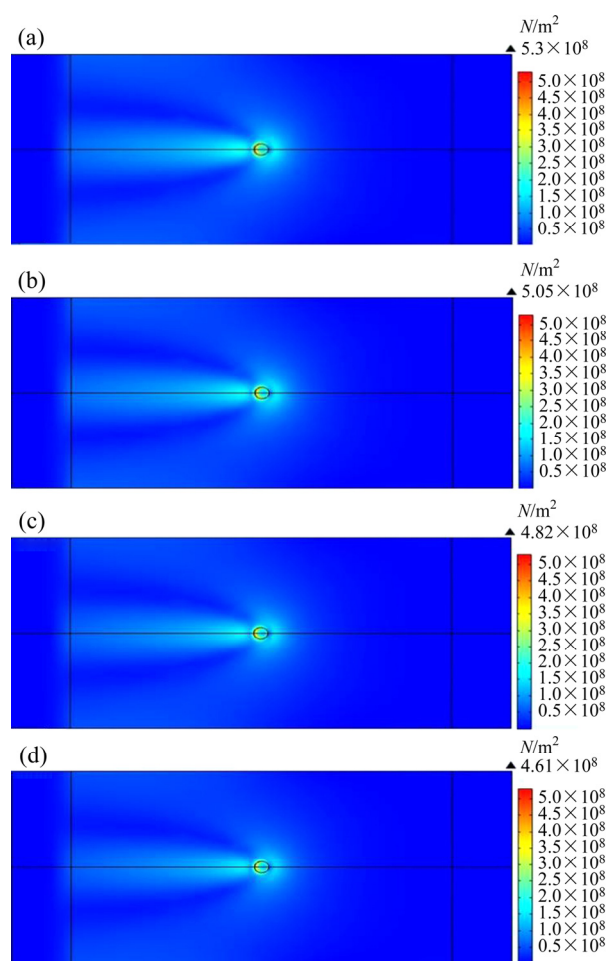


图 11 应力分布云图

Fig. 11 Stress distribution map with different input currents: (a) 0 A; (b) 50 A; (c) 100 A; (d) 150 A

时焊接区域的速度场分布。建立镁合金载流 SSFSW 仿真模型焊接速度为 1 mm/s, 搅拌针转速为 1000 r/min。从图 12 可以看出, 材料速度随着与搅拌针中心的距离的增大而显著提高, 在搅拌针边缘处材料速度达到峰值。超出搅拌针半径以外区域的速度场迅速降低近乎于零, 因为半径超出搅拌针的区域已不在焊缝范围之内, 其材料几乎不会受到搅拌针搅拌的影响。在本次仿真模型所设立的参数下, 材料速度场中最大速度应为焊接速度与搅拌针转速的合成速度, 约为 0.46 m/s, 但由于模型中搅拌头与工件存在相对滑移, 并不是完全黏性接触, 因此速度场仿真结果中的峰值达不到理论速度峰值, 约为 0.4 m/s; 另外, 转速对速度场影响因素十分关键, 但由于本次模拟中搅拌针转速保持变, 因此随着输入电流升高, 速度场峰值大小并没有太大变化。图 12(a)所示为未载流情况下镁合金 SSFSW 速度场模

拟结果, 速度峰值出现在边缘处, 且高速度场范围不大, 说明在该种焊接情况下, 搅拌针边缘处的焊接区内材料流动性较高; 在图 12(a)速度矢量分布图中, 水平方向为焊接方向, 焊接区材料流动方向与搅拌针旋转方向相同, 但前进侧与后退侧速度场分布存在差异, 因此镁合金 SSFSW 焊缝前进侧与后退侧材料流动的细微差异通过速度场可以直观地表现出来, 此时前进侧材料流动剧烈程度仍大于后退侧, 这是因为焊接进给速度与前进侧速度场方向相同, 起到促进作用^[41]。但随着电流从 50 A 提高到 150 A, 通过图 12(b)、(c)、(d)可以看出, 搅拌针边缘高速度场覆盖范围向内扩张, 在速度矢量图中代表速度矢量的箭头愈发密集和膨胀, 速度场对称性分布规律随电流的增大越发的明显, 此时前进侧与后退侧并无明显差异, 这是随着因为电流提升, 焊接区域温度场分布趋于对称和均匀化, 在高温作用下更能够促进材料塑化, 增强焊缝内部材料流动性, 当焊接接头各区域材料流动性均被提高且近似一致时, 其焊接过程中的速度场与应力应变场的分布将不再存在明显差异, 而仿真结果也证明, 提高输入电流辅助镁合金 SSFSW 会使焊缝处材料的流动性更好, 同时更易形成良好焊缝成形。

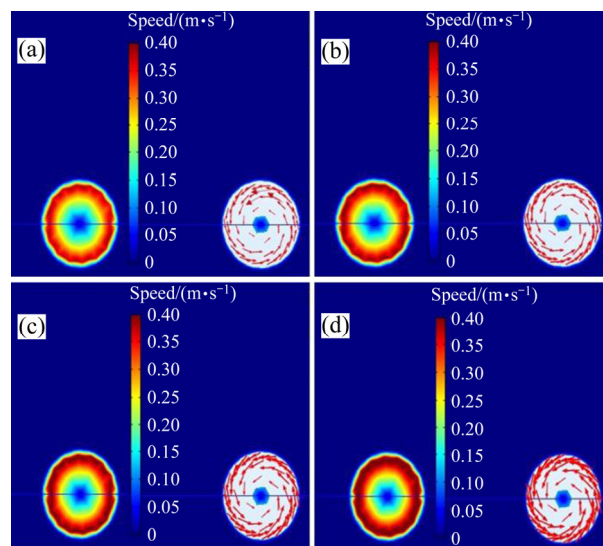


图 12 焊接区域速度场分布的云图(左)和矢量图(右)

Fig. 12 Cloud map(left) and vectogram(right) of velocity field distribution in welding area with different input currents: (a) 0 A; (b) 50 A; (c) 100 A; (d) 150 A

3 结论

1) 输入电流的升高会使温度场峰值温度增大,

同时也使焊缝温度梯度降低,有助于消除焊缝表面缺陷;沿厚度方向温度分布趋于均匀化,有助于消除根部缺陷。

2) 输入电流达到 150 A 时,焊接峰值温度接近熔点,易于得到无缺陷焊缝;电流产生焦耳热大范围覆盖于待焊工件表面,使得焊件上下表面温差较小,有利于得到优异的焊接接头。

3) 镁合金载流 SSFSW 有助于改善焊接过程中材料流动性,减少对焊接应力的需要,但输入电流对焊接应力大小仅在一定范围内产生影响。

4) 搅拌针外围材料流动剧烈程度较高,在高温下焊接区域温度场与应力场分布趋于均匀化,前进侧与后退侧出现对称化分布趋势。

REFERENCES

- [1] MORDIKE B L. Magnesium properties-applications-potential[J]. *Mater Sci Eng A*, 2001, 302(1): 37–45.
- [2] JI Shu-de, MENG Xiang-chen, ZENG Ya-ming, et al. New technique for eliminating keyhole by active-passive filling friction stir repairing[J]. *Materials & Design*, 2016, 97: 175–182.
- [3] WANG X, WANG K. Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 431(1/2): 114–117.
- [4] 罗 键, 王 颖. 导电-搅拌摩擦复合热源焊接方法及设备. 重庆: CN101323054[P]. 2008–12–17.
LUO Jian, WANG Ying. Welding method and Equipment of conductive-friction stir composite heat source. Chongqing: CN101323054[P]. 2008–12–17.
- [5] LUO Jian. New technological methods and designs of stir head in resistance friction stir welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14(7): 650–654(5).
- [6] 项俊锋. 载流-搅拌摩擦焊接行为的有限元分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
XIANG Jun-feng. Current-carrying capacity-finite element analysis of friction stir welding behavior[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [7] 陈 伟. 载流-搅拌摩擦焊接内生电阻热效应及搅拌头磨损行为的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
CHEN Wei. Study on thermal effect of Internal resistance and wear behavior of agitator head in current-carrying friction stir welding[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [8] JIANG Xiao-qing, WYNNE B P, MARTIN J. Microstructure and texture evolution of stationary shoulder friction stir welded Ti6Al4V alloy[J]. *Science and Technology, Welding and Joining*, 2015, 20(7): 594–600.
- [9] JIANG Xiao-qing, WYNNE B P, MARTIN J. Variant selection in stationary shoulder friction stir welded Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1): 198–208.
- [10] LI Wen-ya, NIU P L, YAN S R, et al. Improving microstructural and tensile properties of AZ31B magnesium alloy joints by stationary shoulder friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 37: 159–167.
- [11] 莫淑娴, 朱 浩, 马泽铭, 等. 铝/钢异种金属搅拌摩擦焊接头数值模拟[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(3): 13–18.
MO Shu-xian, ZHU Hao, MA Ze-ming, et al. Numerical simulation of friction stir welding joint of aluminum/steel dissimilar metals[J]. *Weapon Materials Science and Engineering*, 2020, 43(3): 13–18.
- [12] 余 炯, 杨 昭, 邓运来, 等. 基于数值模拟的搅拌摩擦焊晶粒分析[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(23): 130–133.
YU Jiong, YANG Zhao, DENG Yun-lai, et al. Grain analysis of friction stir welding based on numerical simulation[J]. *Hot Working Process*, 2019, 48(23): 130–133.
- [13] SMRITY C, TANMOY M, DURJYODHAN S, et al. Temperature distribution and residual stress in friction stir welding process[C]// *Materials Today: Proceedings*, 2020, ISSN 2214–7853.
- [14] SONG Ming-de, KOVACEVIC R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(6): 605–615.
- [15] MENG Chen-lu, HU Wei-ping, SANDLÖBES S, et al. The effect of large plastic deformation on elevated temperature mechanical behavior of dynamic strain aging Al-Mg alloys[J]. *Acta Materialia*, 2019, 181: 67–77.
- [16] 陈祥龙, 徐春国, 秦思晓, 等. 挤压态 ZK61M 镁合金热压缩变形行为与本构方程建立[J]. *锻压技术*, 2019, 44(5): 147–153.
CHEN Xiang-long, XU Chun-guo, QIN Si-xiao, et al. Thermally compressed deformation behavior and constitutive equation of ZK61M magnesium alloy in extrusion state[J]. *Forging Technology*, 2019, 44(5): 147–153.
- [17] 付 根. 载流搅拌摩擦焊多物理场耦合数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

- FU Gen. Numerical Simulation of multi-physical field coupling in current-carrying friction stir welding[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [18] FRATINI L, BUFFA G, MONACO L L. Improved FE model for simulation of friction stir welding of different materials[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(3): 199–207.
- [19] 苗臣怀, 曹丽杰, 殷凯, 等. 铝合金-钢搅拌摩擦焊温度场数值研究[J]. 轻工机械, 2019, 37(6): 82–87.
- MIAO Chen-huai, CAO Li-jie, YIN Kai, et al. Numerical study on temperature field of friction stir welding of aluminum alloy and steel[J]. Light Industry Machinery, 2019, 37(6): 82–87.
- [20] 万胜强, 吴运新, 龚海, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊温度与残余应力热力耦合模拟[J]. 热加工工艺, 2019, 48(13): 159–163.
- WAN Sheng-qiang, WU Yun-xin, GONG Hai, et al. Thermal-coupling simulation of friction stir welding temperature and residual stress of 2219 aluminum alloy[J]. Thermal Processing Technology, 2019, 48(13): 159–163.
- [21] AHMED M M Z, WYNNE B P, RAINFORTH W M, et al. Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium[J]. Scripta Materialia, 2010, 64(1): 45–48.
- [22] LIU Xun, LAN Shu-huai, NI Jun. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2015, 219: 112–123.
- [23] 周文静, 许振波, 杜柏松. 铝合金搅拌摩擦焊温度场及残余应力场研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(3): 74–79.
- ZHOU Wen-jing, XU Zhen-bo, DU Bo-song. Research on temperature field and residual stress field of aluminum alloy friction stir welding[J]. Orweapons Materials Science and Engineering, 2020, 43(3): 74–79.
- [24] 张渝, 杨霖. 铝合金差厚板搅拌摩擦焊温度场及残余应力分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 142–147.
- ZHANG Yu, YANG Lin. Analysis of temperature field and residual stress in friction stir welding of aluminium alloy differential thick plate[J]. Thermal Processing Technology, 2020, 49(1): 142–147.
- [25] 顾乃建. 搅拌摩擦焊温度场及流场数值模拟[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- GU Nai-su. Numerical Simulation of temperature field and flow field of friction stir welding[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.
- [26] ZHAO Peng-cheng, SHEN Yi-fu, HUANG Guo-qiang, et al. Numerical simulation of friction stir butt welding of 6061 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6): 1216–1225.
- [27] 刘其鹏, 顾乃建, 刘泽, 等. AA6061-T6 板材搅拌摩擦焊温度场仿真[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(3): 80–85.
- LIU Qi-peng, GU Nai-jian, LIU Ze, et al. AA6061-T6 plate friction stir welding temperature field simulation[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018, 39(3): 80–85.
- [28] 高月华, 潘杨, 刘其鹏. 搅拌头几何对 AZ91 镁合金搅拌摩擦焊温度场及材料变形的影响[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(3): 51–57.
- GAO Yue-hua, PAN Yang, LIU Qi-peng. Influence of geometry of stirring head on temperature field and material deformation in friction stir welding of AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 41(3): 51–57.
- [29] 赵颖昕. 铝合金搅拌摩擦焊焊接缺陷预测方法及组织性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- ZHAO Ying-xin. Research on prediction methods and Microstructure Properties of Aluminum alloy friction stir Welding defects[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [30] 赵翔, 朱政强, 王小乐. 铝合金搅拌摩擦焊温度场的数值模拟分析[J]. 焊接技术, 2018, 47(4): 15–17.
- ZHAO Xiang, ZHU Zheng-qiang, WANG Xiao-le. Numerical simulation analysis of temperature field in friction stir welding of aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2018, 47(4): 15–17.
- [31] HAN Yang, JIANG Xiao-qing, CHEN Shu-jun, et al. Microstructure and mechanical properties of electrically assisted friction stir welded AZ31B alloy joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 26–34.
- [32] KHAN N Z, SIDDIQUEE A N, KHAN Z A, et al. Understanding the dissimilar friction stir welding through force and temperature evolution[J]. Materials Today (Proceedings), 2018, 5(9): 17125–17131.
- [33] SANTOS T G, MIRANDA R M, VILAÇA P. Friction stir welding assisted by electrical joule effect[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2014, 214(10): 2127–2133.
- [34] LI Huan, CAO Biao, YANG Jing-wei, et al. Modeling of resistance heat assisted ultrasonic welding of Cu-Al joint[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2018, 256: 121–130.
- [35] SUN Tian-zhu, ROY M J, STRONG D, et al. Comparison of residual stress distributions in conventional and stationary shoulder high-strength aluminum alloy friction stir welds[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2017, 242: 92–100.

- [36] CHEN Shu-jun, ZHANG Hong-wei, JIANG Xiao-qing. Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 197–206.
- [37] LEMOS G V B, FARINA A B, NUNES R M, et al. Residual stress characterization in friction stir welds of alloy 625[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3): 2528–2537.
- [38] SMRITY C, TANMOY M, DURJYODHAN S, et al. Temperature distribution and residual stress in friction stir welding process[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26(2): 2296–2301.
- [39] YU Hai-dong, ZHENG Bin, LAI Xin-min. A modeling study of welding stress induced by friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2018, 254: 213–220.
- [40] LOMBARD H, HATTINGH D G, STEUWER A, et al. Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds[J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 501(1): 119–124.
- [41] LI Gao-hui, ZHOU Li, ZHANG Hai-feng, et al. Effects of traverse speed on weld formation, microstructure and mechanical properties of ZK60 Mg alloy joint by bobbin tool friction stir welding[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 776: 1228–1252.

Numerical simulation of electric assisted stationary shoulder friction stir welding of magnesium alloy

CHEN Shu-jun, WANG Lei, JIANG Xiao-qing, WANG Yi-lin, YUAN Tao

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In the traditional magnesium alloy friction stir welding process, the material flow performance is low, so the weld is prone to defects. In this paper, COMSOL simulation software was used to establish a dual heat source numerical model for magnesium alloy current-carrying static shaft shoulder friction stir welding (SSFSW), and the influence of input current on material flow performance was studied. The evolution law of temperature field, stress field and velocity field in welding process was obtained by numerical simulation by changing the input current parameters. The results show that with the increase of the current, the temperature field distribution tends to be homogenized along the direction of the weld thickness, the temperature gradient of the weld decreases, and the peak stress field decrease from 532 MPa to 461 MPa, showing an obvious decreasing trend, which proves that the material liquidity in the weld is significantly improved at this time. When the current reaches 150 A, the peak welding temperature is close to the melting point of the material at 650 °C. At this temperature, it is easy to get the weld without defect and the welded joint with excellent performance. The numerical simulation can effectively predict the possible results in actual welding experiments, reduces the cost of a large number of experiments in order to obtain reasonable welding parameters, and the simulation results will have important guiding significance for the selection of process parameters.

Key words: AZ31B magnesium alloy; electric assisted stationary shoulder friction stir welding; numerical mode; temperature field; stress field

Foundation item: Project(2018YFB1306400) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51604015) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(PXM2019_014204_500032) supported by the Basic Scientific Research Fund of Beijing, China

Received date: 2020-08-10; **Accepted date:** 2021-03-15

Corresponding author: JIANG Xiao-qing; Tel: +86-10-67392667; E-mail: xjiang@bjut.edu.cn

(编辑 王 超)