

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

段亚雄^{1,2}, 刘其鹏^{1,2}, 高月华^{1,2}, 李 雯^{1,2}, 柯黎明^{1,3}, 牛鹏亮^{1,2,4}, 徐 洋³

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

(2. 南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 江西 南昌 330063)

(3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

(4. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 基于耦合欧拉-拉格朗日 (coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 方法建立 AA5A06 铝合金与 AZ31B 镁合金对接搅拌摩擦焊接 (friction stir welding, FSW) 的全热力耦合数值模型, 并结合试验测试对 Al/Mg 异种金属 FSW 过程的温度场及材料混合流动特征进行研究。数值模拟所得特征点的温度循环曲线、焊缝表面形貌以及横截面上异种材料的混合分布状态均与试验结果吻合良好。在此基础上, 采用质点追踪法对材料混合流动行为进行了深入分析。结果表明, 高温区集中分布在轴肩下方区域, 返回侧 (镁侧) 温度较低, 温度梯度较大。焊缝区上表面材料熔合线偏向于前进侧 (铝侧)。搅拌针附近材料流动剧烈, 前进侧和返回侧的大部分材料都较均匀地沉积于搅拌针后方。前进侧与返回侧材料在水平和竖直方向上的交叉混合流动, 促使最终形成了 2 种材料“咬合式”的结合界面特征。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝/镁异种合金; 耦合欧拉-拉格朗日方法; 材料混合流动

中图分类号: TG453

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)07-2565-08

近年来, 铝、镁等轻质合金材料因其密度低、比强度和比刚度高等优点已广泛应用于轨道交通、航空航天、汽车、船舶等领域各类结构的设计、生产和制造。相应地, 铝-镁异种金属材料及结构的焊接与连接技术也得到了广泛关注, 性能良好的铝-镁焊接接头对此类轻质结构的进一步发展与应用具有重要意义^[1-2]。搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 作为一种新型固相连接技术, 已逐渐发展成为铝合金等轻质金属的重要且常规的连接方法之一^[3-4]。

在 FSW 过程中, 焊缝区塑性金属的流动行为与接头的成形质量及性能密切相关。材料流动行为的研究对于深入理解搅拌摩擦连接成形机理、预测接头成形质量以及改进焊接工艺参数等具有重要的理论与实际意义。由于 FSW 过程的复杂性, 现阶段仍无法通过实验手段直接观察焊缝区材料的流动过程^[5]。而数值模拟在节省实验成本的同时, 能够再现焊接全过程并能更加深入有效地捕获材料的流动行为, 因此在 FSW 的研究中各类数值模拟方法得到了大力发展与应用。通过数值模拟,

人们对同种材料 FSW 过程的材料流动行为获得了较为系统、深入的认识^[6-8]。在此基础上, 研究者也开始关注异种材料 FSW 的数值模拟。与同种材料相比, 由于涉及到多种不同材料的混合流动, 异种材料 FSW 数值模拟的建模与仿真面临着更大的难度和挑战, 仍在不断发展。目前用于异种金属 FSW 过程的数值模拟方法主要包括计算流体力学方法 (computational fluid dynamics, CFD) 和耦合欧拉-拉格朗日方法 (coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 2 种。

CFD 方法一般基于 VOF (volume of fluid) 模型和多相流理论求解异种材料的混合流动。Padmanaban 等^[9]基于该方法采用稳态粘塑性层流模型研究了 AA2024-AA7075 对接 FSW 过程的温度场和速度场, Tang 和 Shen 建立稳态粘塑性湍流模型分析了 AA2024-AA7075 搭接 FSW 过程的温度场及其影响因素^[10], 并研究了预热对铝-钢对接 FSW 的温度场和材料流动的影响^[11]。对于铝镁异种合金, Song 等^[12]建立了 3 mm 厚 AA2024 和 AZ31B 异种合金 FSW 过程材

收稿日期: 2022-07-02

基金项目: 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室基金 (EG202103420); 国家自然科学基金 (52105357); 先进焊接与连接国家重点实验室基金 (AWJ-23M12)

作者简介: 段亚雄, 男, 1995 年生, 硕士生, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063, E-mail: 18165265606@163.com

料流动 CFD 模型, 其中镁合金放置在前进侧, 分析发现当热输入量合适时材料流动形式主要为层流, 而过高的转速或过大的热输入会使得流动形式发生改变。Yang 等^[13]改进了 CFD 模型来研究 AA6061-T4 和 AZ31B-H24 合金 FSW 焊接中的材料流动, 很好地预测了铝镁异种接头中的材料混合和分布。Jiang 等^[14]基于多相流模型分析 AA6061-T6 和 AZ31B 异种合金的 FSW 过程, 发现搅拌针螺纹可增加材料在剪切层中的混合程度, 使铝镁界面更加曲折。

基于欧拉描述的 CFD 方法通常将待焊工件简化为刚粘塑性材料, 无法考虑其弹性性能和硬化行为, 且在捕捉材料边界信息和再现焊接缺陷方面仍有一定的局限性。考虑到 CEL 方法已成功应用于同种材料的 FSW 模拟, 一些研究者开始尝试对异种材料 FSW 过程进行 CEL 仿真研究, 以充分结合欧拉描述和拉格朗日描述的优势更好地再现材料流动规律。Grujicic 等^[15]采用 CEL 方法对比了 AA5083 同种材料及其与 AA5456 异种材料的 FSW 过程, 结果显示, 与同种材料相比, 异种材料 FSW 的工艺窗口显著变窄。Al-Badour 等^[16]采用 CEL 方法模拟了不同搅拌针形貌下 AA6061-T6 和 AA5083-O 铝合金的 FSW 过程, 结果表明在前进侧放置较硬的合金可降低峰值温度和应变速率, 使用螺纹型搅拌针可以更好地使材料混合。Shokri 等^[17]对铜-钢 FSW 的材料流动和残余应力开展了试验与仿真研究, 并分析了接触条件对材料混合流动行为的影响。Akbari 等^[18]研究了铝和黄铜的搭接 FSW 过程, CEL 仿真结果可大致预测搅拌区域形状和金属间化合物区域。苗臣怀等^[19]采用 CEL 方法对 3 mm 厚 5083 铝合金与 AM60 镁合金 FSW 过程的温度场和材料流动进行了数值模拟, 发现铝侧 (前进侧) 温度高于镁侧 (返回侧), 轴肩后方温度高于前方温度, 且焊核区域温度场呈近似对称的碗状。铝侧材料在轴肩带动下进入镁侧, 在轴肩后方形成焊缝并沿焊缝方向移动到搅拌针区域。

综上, 文献中对于铝-镁异种合金 FSW 的模拟研究多采用 CFD 方法^[12-14], 基于 CEL 方法的工作较少, 仍需进一步发展和完善。此外, 已有研究工作多针对薄板 (≤ 3 mm) 开展^[12-14, 19], 中、大厚度板材 FSW 的研究工作尚有待开展。因此, 本工作基于 CEL 方法建立 Al/Mg 异种金属 FSW 数值模型, 对 5 mm 厚的 AA5A06 铝合金和 AZ31B 镁合金对接焊接过程进行仿真分析, 将模拟结果与试验结果对比分析验证了所建立数值模型的合理性与有效性。在此基础上, 对 2 种材料 FSW 过程中的混合流动行为进行深入地探讨和分析。

1 实 验

AA5A06 铝合金和 AZ31B 镁合金板在由 X53K 铣床

改装的 FSW 焊接平台上进行焊接, 焊板尺寸为 150 mm $\times$ 80 mm $\times$ 5 mm, 焊接中铝合金置于前进侧, 镁合金置于返回侧, 2 种材料随温度变化的物理力学性能参数参考文献[20-21]。搅拌头材料为 H13 钢, 形状及尺寸如图 1 所示。试验中搅拌头转速 600 r/min, 焊速 37.5 mm/min, 倾角 2°, 无偏置, 下压量 0.2 mm。通过测量特征点温度获取焊接过程中温度的分布及变化情况, 测温孔位置如图 2 所示。

2 数值模型

2.1 几何模型与网格划分

本工作基于 ABAQUS 软件采用 CEL 方法对铝镁异种合金 FSW 进行数值模拟, 各部分的几何模型及尺寸信息如图 3 所示。搅拌头模型化为拉格朗日刚体, 待焊工件模型化为欧拉域, 前进侧 (前进方向的左侧) 为 AA5A06 铝合金, 返回侧 (前进方向的右侧) 为 AZ31B 镁合金。为了更好地反映材料的流动行为, 在焊缝区工件上方建立一个 3 mm 厚的空位层, 见图 3 中搅拌针下方矩形区域。为了提高计算效率, 数值模型中焊板宽度比试验中的小一些, 一般建议取搅拌头轴肩尺寸的 4 倍以上^[22], 因此模型中焊板所在欧拉域宽度取 80 mm, 长度和厚度方向与试验中的焊板尺寸保持一致。

模型中的欧拉域单元类型为 EC3D8RT, 为了提高计算效率采用分区网格划分方案, 如图 4 所示。焊缝

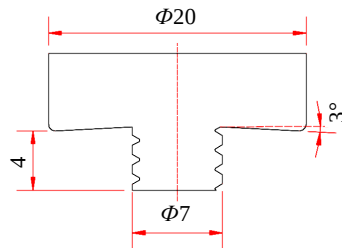


图 1 搅拌头横截面几何形状和尺寸

Fig.1 Geometry and dimension of the tool

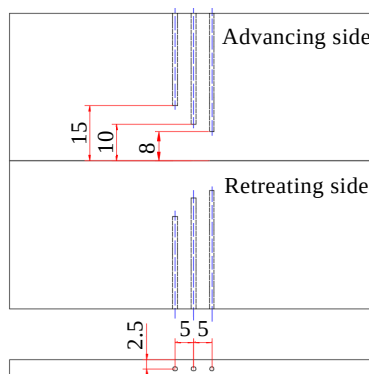


图 2 测温位置示意图

Fig.2 Locations for temperature measurement

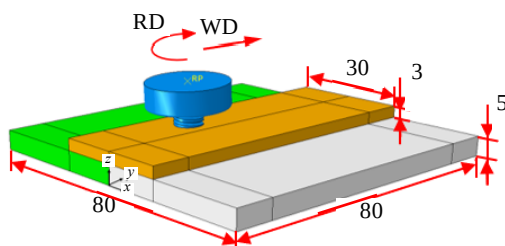


图 3 FSW 各部分的几何模型及尺寸

Fig.3 Geometry and dimension of each part in FSW modeling

区单元尺寸为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 焊缝区以外距焊缝越远单元尺寸越大, 欧拉域单元总数为 138 240。搅拌头采用 C3D4T 单元进行划分网格, 单元总数为 100 852 个, 如图 5 所示。

2.2 材料模型

FSW 过程中, 焊接区材料在高温、高应变速率作用下会发生严重的塑性变形。采用 Johnson-Cook 本构方程描述模型中材料的流动应力和应变、应变率以及温度之间的关系, 如式 (1):

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

其中, $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\epsilon}_{pl}$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; n 为应变硬化指数; T 为当前温度; T_{room} 是室温; T_{melt} 是材料熔点; A 为材料在室温和参考应变速率下的屈服强度; B 为应变硬化系数; C 为应变速率效应系数; m 、 n 分别为温度软化指数和应变硬化指数。AA5A06 铝合金和 AZ31B 镁合金 Johnson-Cook 本构方程中参数如表 1 所示^[23-24]。

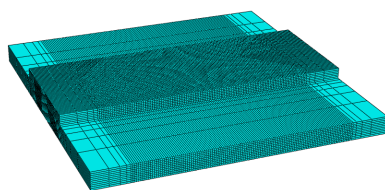


图 4 欧拉域网格划分

Fig.4 Mesh of the Eulerian domain

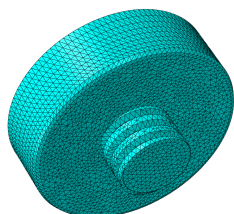


图 5 搅拌头网格划分

Fig.5 Mesh of the tool

表 1 2 种材料的 Johnson-Cook 参数

Table 1 Johnson-Cook parameters of the two kinds of materials^[23-24]

Material	A/MPa	B/MPa	C	n	m	$T_{melt}/^\circ\text{C}$
AA5A06	218.3	704.6	0.0157	0.62	0.93	580
AZ31B	228	306	0.013	0.631	1.497	630

2.3 产热模型

FSW 产热包括塑性变形产热和摩擦产热 2 个部分。塑性变形产热是指焊接过程中材料发生塑性变形所产生的热量, 其计算公式为:

$$q_{pl} = \eta_1 \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}_{pl} \quad (2)$$

其中: q_{pl} 为热流密度; η_1 为塑性产热率, 本文取 0.9。

搅拌头与工件之间的接触摩擦产热计算公式为:

$$q_f = \tau \dot{\gamma} \quad (3)$$

其中: q_f 为摩擦产热热流密度, $\dot{\gamma}$ 是搅拌头与工件之间的相对滑移率, τ 是摩擦切应力。按照经典库伦摩擦模型, 切应力可表示为:

$$\tau = \mu P \quad (4)$$

其中: P 为法向接触压力; μ 为摩擦系数, 模型中铝侧摩擦系数取 0.4, 镁侧摩擦系数取 0.2。

2.4 边界条件

FSW 过程中工件上表面和侧面直接与空气相接触, 铝侧换热系数设为 $50\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 镁侧换热系数设为 $100\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。工件底面存在金属垫板, 其接触换热不仅与材料属性有关, 还与其所受到的压力有关, 通常铝侧底面等效换热系数取 $2500\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 镁侧取 $3000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。焊接过程中, 欧拉体外表面固定不动, 其法向速度设置为零, 搅拌头的焊速、转速、倾角及下压量均与试验中保持一致。

2.5 示踪粒子

焊缝区域 2 种塑性金属的混合流动对焊缝成形至关重要, 为了深入研究材料的混合流动规律, 本工作将借助示踪粒子对 FSW 焊接过程中塑性金属的流动情况进行追踪, 示踪粒子位于稳态焊接阶段焊件横截面上, 其分布如图 6 所示。

3 结果分析

3.1 温度场

温度场实测和模拟均针对 FSW 全过程进行, 包括下压、停留、焊接和拔出 4 个阶段。图 7 和图 8 给出了前进侧 (advancing side, AS) 和返回侧 (retreating side, RS) 共 6 个特征点 (位置如图 2 所示) 的实测及模拟温度循环曲线, 各特征点的峰值温度及相对误差见表 2 所示。

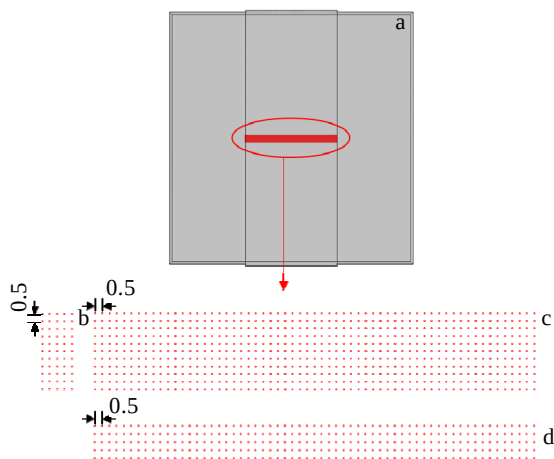


图 6 示踪粒子位置和分布

Fig.6 Location of tracking particles (a); side view (b), cross section view (c), and top view (d) of tracking particles layer

从图 7 和图 8 可以看出,在升温阶段,各特征点的温度模拟结果与实测结果一致性较高,在降温阶段,模拟结果略滞后于实测结果,这种滞后现象随着距焊缝中心距离的增加而不断减小,在距离达到 15 mm 时滞后现象基本消失。其主要原因是越靠近焊缝中心处温度值越高,而 2 种材料在高温下的热物性参数不易准确测量和确定^[20-21],从而使得模拟结果存在一定误差。从表 2 可以看出,对于特征点的峰值温度,模拟值与实测值一致性很好,最大和最小相对误差分别为 6.55% 和 0.002%,平均相对误差仅为 2.24%。此外,实测结果与模拟结果均显示,前进侧温度略高于返回侧。上述对比和分析表明,所建立数值模型能够有效地描述 Al/Mg 异种合金 FSW 焊接过程中温度场分布和变化规律。

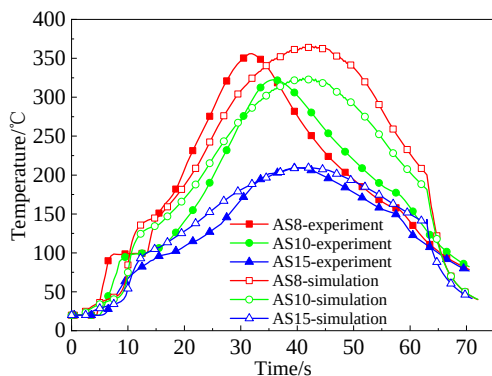


图 7 前进侧特征点的实测与模拟温度循环曲线

Fig.7 Measured and simulated temperature cycle curves of characteristic points on the advancing side

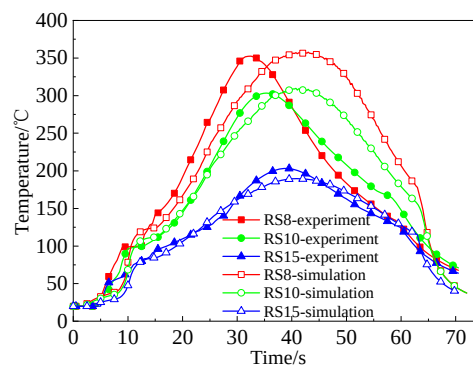


图 8 返回侧特征点的实测与模拟温度循环曲线

Fig.8 Measured and simulated temperature cycle curves of characteristic points on the retreating side

表 2 特征点峰值温度的实测与模拟结果对比

Table 2 Comparison of measured and simulated peak temperatures (T_{ex} , T_{sim}) at characteristic points

Point	$T_{ex}/^{\circ}\text{C}$	$T_{sim}/^{\circ}\text{C}$	Difference/%
AS8	356.1	365.5	2.64
RS8	352.4	357.9	1.56
AS10	322.4	324.4	0.62
RS10	303.5	309.7	2.04
AS15	209.4	209.8	0.002
RS15	203.1	189.8	-6.55

图 9 为焊接阶段焊缝区域上表面和横截面的温度场云图。可以看出,焊缝区域峰值温度为 548.3 $^{\circ}\text{C}$, 低于 AA5A06 和 AZ31B 2 种材料的熔点(分别为 580 和 630 $^{\circ}\text{C}$),符合 FSW 的固相焊接特征。峰值温度位于搅拌头轴肩后缘下方区域,这是由于焊接过程中搅拌头带有一定的倾角,轴肩后缘下方的材料受到的压力较大。高温区集中分布在轴肩与工件的接触区域,由轴肩区域向四周温度逐渐减小,返回侧(镁侧)工件边缘处温度明显低于前进侧(铝侧),相应的返回侧温度梯度大于前进侧。这与 2 种材料的热物性参数有关,与 Mg 相比,Al 的热导率较大且比热容较小,因此导热更快,温度场更加均匀。焊缝区域横截面上温度呈“碗形”分布,这是由于随着距上表面距离的增加,轴肩产热的影响逐渐减小。

3.2 焊缝形貌与材料混合分布状态

图 10 给出了焊接试验完成后焊缝的表面形貌。可以看出,2 种材料在上表面的分界线与焊缝中心线并不重合,而是偏向于铝侧(AS 侧),距焊缝中心线约 2.5 mm。同时在搅拌头后方以及材料分界线上出现断续分布的凹孔缺陷。此外,焊接过程中镁侧(RS 侧)

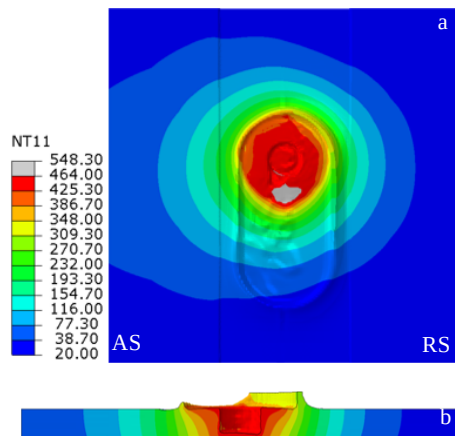


图 9 焊缝区域上表面及横截面温度云图

Fig.9 Temperature contours on the top surface (a) and cross section (b) of weld seam area

不断有较薄的丝状物飞边产生,但大多被搅拌头搅断,因此焊后宏观形貌上未能保留下镁侧完整的飞边,而铝侧在焊接过程中未形成明显飞边。

图 11 给出了模拟所得焊缝上表面形貌。模拟结果显示,上表面材料混合的分界线偏向于铝侧(AS 侧),距焊缝中心线约 4 mm,且在搅拌头后方及材料分界线上出现了不连续分布的凹孔缺陷。此外,从模拟结果也可看出镁侧有显著飞边产生,而铝侧无明显飞边。因此,所建立数值模型有效地反映了焊缝表面的形貌及材料混合状态,并再现了焊接缺陷。

图 12a 和 12b 分别给出了实验与模拟的横截面上 2 种材料的混合分布状态。对比两图可以看出,模拟所得材料的混合状态与实验结果的一致性很高。材料分布结果显示:在焊缝区内部,2 种材料的分界面呈互相嵌入的分段连续曲面形状,2 种材料在焊接区形成了良好的机械咬合;焊缝区上表面 2 种材料的分界线属于咬合面的垂向分布段,该段垂向分界面并不位于焊缝中心而是偏向于铝侧;2 种材料在焊缝区内部咬合界面上整体结合状态较好,仅在材料垂向分界面的中下方区域出现了孔洞缺陷,表明此部分材料的流动混合状态不够充分。

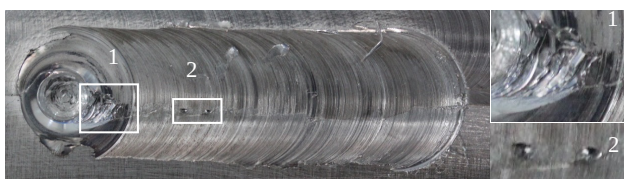


图 10 铝镁异质合金 FSW 的焊缝宏观形貌

Fig.10 Weld seam morphology of the experimental FSW Al/Mg

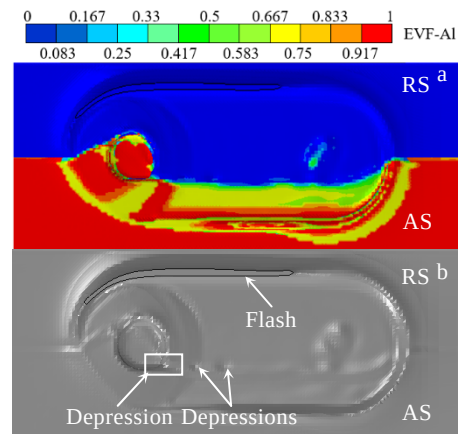


图 11 焊缝表面材料混合形貌及缺陷模拟结果

Fig.11 Numerical results of materials mixed morphology (a) and defects (b) on weld seam surface

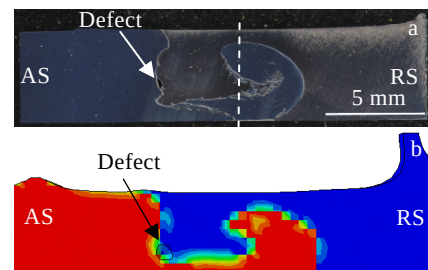


图 12 焊缝区横截面材料混合状态的实验与模拟结果

Fig.12 Experimental (a) and simulated (b) results of the mixed distribution of dissimilar materials on the cross section of weld seam

3.3 材料混合流动行为的深入分析

图 13 为不同时刻前进侧与返回侧示踪粒子在水平面内的分布图。当 $t=18$ s 时(见图 13a 和 13b),搅拌针前缘到达示踪粒子所在位置,此时已有少数示踪粒子在轴肩的作用下发生转动。搅拌头顺时针转动,靠近焊缝中心的前进侧的粒子开始随搅拌针旋转向返回侧移动,返回侧的粒子也开始随搅拌针向后方转动。需要注意的是,有少量粒子被轴肩推挤到搅拌头前方返回侧区域,在轴肩外缘形成飞边。

当 $t=22$ s 时(见图 13c 和 13d),搅拌针前缘接触到更多示踪粒子,因此更多前进侧的粒子绕搅拌针旋转移到返回侧,少量粒子绕回到搅拌针后方前进侧区域,部分返回侧粒子也移动到搅拌针后方返回侧区域。当 $t=24$ s 时(见图 13e 和 13f),搅拌头移动到示踪粒子中间区域,此时前进侧有更多的示踪粒子经过返回侧流回到前进侧;返回侧也有更多粒子向搅拌针

后方返回侧区域移动, 亦有部分粒子流入搅拌针后方前进侧区域。

当 $t=32$ s 时 (见图 13g 和 13h), 此时搅拌针后缘离开示踪粒子所在位置, 焊缝中心区域的大部分粒子都绕流到搅拌针后缘的前进侧与返回侧区域, 仅有少数前进侧粒子随着搅拌针继续向前移动。当 $t=48$ s 时 (见图 13i 和 13j), 搅拌头已经离开示踪粒子所在位置, 示踪粒子已不再随搅拌针绕流运动, 此时即为粒子的最终沉积位置。仅有前进侧的部分粒子移动到原始位置的前方, 其余前进侧粒子以及绝大部分返回侧粒子都沉积在了原始位置的后方, 且在水平方向上分布较为均匀。

综上, 水平方向上, 在搅拌头经过示踪粒子区域的整个过程中, 靠近搅拌针的区域材料流动最为剧烈, 且前进侧粒子明显比返回侧粒子运动剧烈。前进侧和

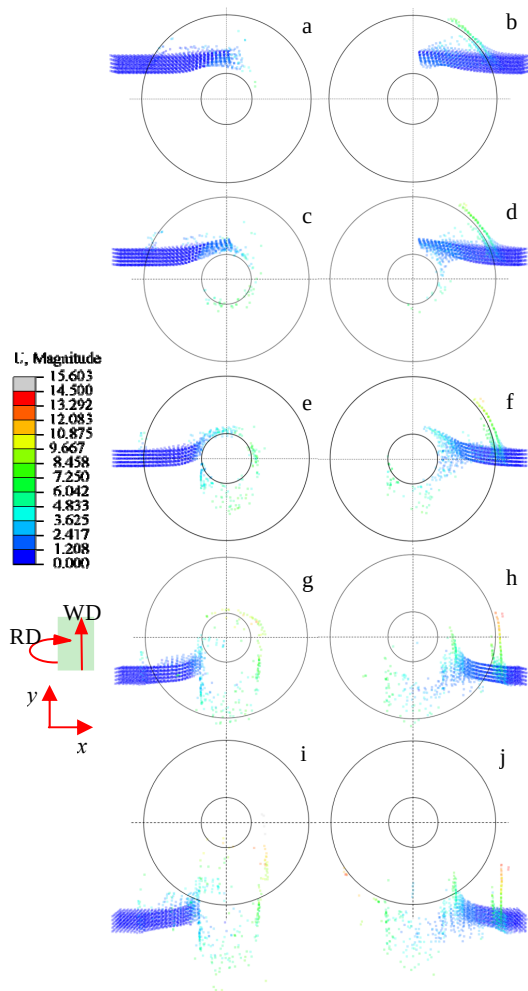


图 13 不同时刻前进侧与返回侧示踪粒子在水平面内分布图

Fig.13 Horizontal distribution diagrams of tracer particles on the advancing (left) and retreating (right) sides for different time: (a, b) $t=18$ s, (c, d) $t=22$ s, (e, f) $t=24$ s, (g, h) $t=32$ s, and (i, j) $t=48$ s

返回侧材料呈现出交叉、混合流动的特征, 搅拌头经过后, 示踪粒子在前进侧和返回侧有较均匀的分布。此外, 在轴肩前方外缘附近部分示踪粒子被轴肩推动至左右两侧, 导致了焊缝的飞边现象, 且返回侧飞边更加严重。

图 14 为不同时刻前进侧与返回侧示踪粒子在垂直面内的分布图。当 $t=18$ s 时 (见图 14a 和 14b), 搅拌头附近的两侧粒子均有向上移动的趋势。前进侧上层粒子在轴肩较强的摩擦作用下开始向返回侧移动, 返回侧上层部分粒子明显向上、向外移动从而在轴肩右前方形成了飞边。

当 $t=22$ s 时 (见图 14c 和 14d), 大量前进侧粒子在向上层移动的同时向返回侧移动, 仅有较少的粒子向下层移动, 返回侧粒子在垂直方向变化不大。当 $t=24$ s 时 (见图 14e 和 14f), 前进侧粒子明显开始向下沉积并向返回侧运动, 而此时搅拌针附近的返回侧粒子也有部分向下移动, 且部分粒子移动到前进侧。

当 $t=32$ s 时 (见图 14g 和 14h), 前进侧的粒子向下层流动, 在上层形成材料负压区, 使得返回侧粒子在抽吸挤压作用下向上层流动。在返回侧粒子向上层流动的同时, 在下层区域形成材料负压区, 又使得前进侧粒子在抽吸挤压作用下向下层流动。当 $t=48$ s 时 (图 14i 和 14j), 最终前进侧粒子大部分沉积在前进侧的下层以及返回侧的中下层区域, 而返回侧粒子则沉积在焊缝区上层区域。

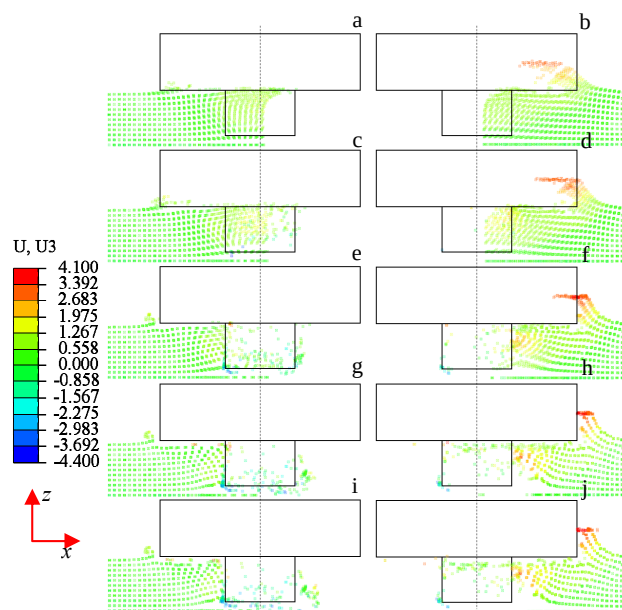


图 14 不同时刻前进侧与返回侧示踪粒子在垂直面内分布图

Fig.14 Vertical distribution diagrams of tracer particles on the advancing (left) and retreating (right) sides for different time: (a, b) $t=18$ s, (c, d) $t=22$ s, (e, f) $t=24$ s, (g, h) $t=32$ s, and (i, j) $t=48$ s

综上, 垂直方向上, 前进侧材料的流动过程为部分材料先以略微向上的趋势流动到返回侧, 之后材料向下方流动并沉积, 返回侧的材料向上层流动并沉积。前进侧和返回侧材料在相互的抽吸挤压作用下互补形成“交叉”和“咬合”界面形式。

4 结 论

1) Al/Mg 异种合金 FSW 过程中, 前进侧和返回侧特征点温度循环曲线的模拟结果与试验测量结果吻合较好, 表明所建立模型能够有效反映 FSW 过程的温度场。由温度场模拟结果可知, 焊缝区域峰值温度低于 2 种材料的熔点, 符合 FSW 的固相焊接特征。高温区集中分布在轴肩与工件的接触区域, 返回侧(镁侧)温度较低, 温度梯度较大。

2) 焊缝区表面形貌及横截面材料混合状态的模拟结果成功地再现了试验结果, 因此所建立模型有效地模拟了材料的混合流动特征。焊缝区上表面材料熔合线偏向于前进侧, 搅拌针后方及材料熔合线上出现断续的凹孔缺陷。横截面上 2 种材料呈“咬合式”的结合界面, 在前进侧结合界面下方区域出现缺陷。

3) 焊接过程中搅拌针附近的材料被搅动而发生显著流动, 发生明显的转动迁移。水平方向上, 前进侧材料随搅拌针旋转, 经由针的前方进入返回侧后, 部分材料沉积, 部分材料再次流回前进侧; 返回侧的小部分材料被挤推到轴肩外围形成飞边, 其余材料流动并沉积在搅拌针后方的前进侧和返回侧。竖直方向上, 前进侧材料先以略微向上的趋势流动到返回侧, 之后材料向下方流动并沉积, 返回侧的材料向上层流动并沉积。总体而言, 搅拌针附近前进侧和返回侧的大部分材料都较均匀地沉积于搅拌针后方, 前进侧与返回侧材料在水平和竖直方向上的交叉混合流动, 最终形成了 2 种材料“咬合式”的界面特征。

参考文献 References

- [1] Shah L H, Othman N H, Gerlich A. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2018, 23(3): 256
- [2] Singh V P, Patel S K, Ranjan A et al. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(3): 6217
- [3] Christy J V, Mourad A I, Sherif M M et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2021, 31(11): 3281
- [4] Venu B, BhavyaSwathi I, Raju L S et al. *Materials Today: Proceedings*[J], 2019, 18: 298
- [5] Song Bo(宋 波), Zuo Dunwen(左敦稳), Deng Yongfang(邓永芳). *Materials Reports(材料导报)*[J], 2016, 30(7): 15
- [6] Chen G Q, Li H, Wang G Q et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2018, 124: 12
- [7] Liu Q P, Han R, Gao Y H et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 114: 2457
- [8] Chu Q, Li W Y, Wu D et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2021, 171: 103 816
- [9] Padmanaban R, Kishore V R, Balusamy V. *Procedia Engineering*[J], 2014, 97: 854
- [10] Tang J M, Shen Y F. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 666: 493
- [11] Tang J M, Shen Y F. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2017, 29: 29
- [12] Song B, Zhai Y Y, Zuo D W et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(5): 1483
- [13] Yang C L, Wu C S, Shi L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 843: 156 021
- [14] Jiang T, Wu C S, Shi L. *Journal of Manufacturing Processes* [J], 2022, 74: 112
- [15] Grujicic M, Yavari R, Ramaswami S et al. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*[J], 2015, 11(3): 322
- [16] Al-Badour F, Merah N, Shuaib A et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 72: 607
- [17] Shokri V, Sadeghi A, Sadeghi M H. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 31: 46
- [18] Akbari M, Asadi P, Behnagh R A. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 113: 721
- [19] Miao Chenhuai(苗臣怀), Cao Lijie(曹丽杰), Wu Xiaohu(吴晓虎). *Ordinance Material Science and Engineering(兵器材料科学与工程)*[J], 2021, 44(4): 11
- [20] Shi Junwei(时君伟), Hu Mingying(胡敏英). *Aluminium Fabrication(铝加工)*[J], 2009(4): 4
- [21] Hou Zeng(侯 增). *Prediction of the Temperature Field during Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum 2024 and Magnesium AZ31 Alloys(2024 铝合金/AZ31B 镁合金异种金属搅拌摩擦焊温度场的数值模拟)*[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2017
- [22] Zhu Z, Wang M, Zhang H J et al. *Metals*[J], 2017, 7(7): 256
- [23] Lin Musen(林木森), Pang Baojun(庞宝君), Zhang Wei(张伟) et al. *Explosion and Shock Waves(爆炸与冲击)*[J], 2009, 29(3): 306
- [24] Ulacia I, Salisbury C P, Hurtado I et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 830

Temperature Field and Material Mixing Flow in Friction Stir Welding of Dissimilar Al/Mg Alloys Based on CEL Approach

Duan Yaxiong^{1,2}, Liu Qipeng^{1,2}, Gao Yuehua^{1,2}, Li Wen^{1,2}, Ke Liming^{1,3}, Niu Pengliang^{1,2,4}, Xu Yang³

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aviation Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(4. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A fully coupled thermo-mechanical numerical model is developed for the friction stir welding (FSW) of AA5A06 aluminum alloy and AZ31B magnesium alloy based on the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, and the temperature field and material mixing flow characteristics during FSW process are studied by numerical simulation and experimental tests. The temperature cycle curves, the weld surface morphology, and the mixed distribution of dissimilar materials on the cross section obtained by numerical simulation are in good agreement with the experimental results. On this basis, the particle tracking method is used to analyze the mixing flow behavior of dissimilar materials. The results show that the high temperature zone is located in the region below the tool shoulder, and the temperature in the retreating side (Mg side) is lower and its gradient is larger. The fusion line of dissimilar materials on the top surface is inclined to the advancing side (Al side). The materials near the pin flow significantly and most of the materials deposit evenly on the advancing and retreating sides behind the pin. The mixing flow of the materials on the advancing and retreating sides in the horizontal and vertical directions finally forms the zig-zag interface characteristics between the two kinds of materials.

Key words: friction stir welding; dissimilar Al/Mg alloys; coupled Eulerian-Lagrangian method; material mixing flow

Corresponding author: Liu Qipeng, Ph. D., Associate Professor, National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: 70955@nhu.edu.cn