



基于 CEL 方法搅拌摩擦焊材料 流动及缺陷的模拟

朱 智, 王 敏, 张会杰, 张 骁, 于 涛, 吴振强

(中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 基于欧拉-拉格朗日耦合(CEL)方法, 建立一个新的搅拌摩擦焊多场耦合计算模型, 模拟焊接过程中焊缝区材料的塑性流动与缺陷形成, 并通过开展搅拌摩擦焊试验, 分别从温度场、焊缝宏观形貌、焊缝截面塑性应变及焊接缺陷几方面对模拟结果的准确性进行验证。结果表明: 模拟温度与实测数据吻合较好, 最大误差为 23.4 °C; 焊缝宏观形貌、焊缝截面塑性应变区的形状和尺寸均与实际焊缝吻合较好; 模型能够较准确地预测焊缝内部孔洞缺陷的形成, 且缺陷产生的位置与实际位置相吻合, 缺陷尺寸的模拟值略大于其实测值。

关键词: 搅拌摩擦焊; 材料流动; 焊接缺陷; 欧拉-拉格朗日耦合方法; 数值模拟

文章编号: 1004-0609(2018)-02-0294-06

中图分类号: TG453.9

文献标志码: A

搅拌摩擦焊接(FSW)是一种新型固态连接技术, 具有变形及残余应力小、接头强度高、综合力学性能优异等优点, 特别适合低熔点轻金属的优质焊接, 现已广泛用于航空、航天、船舶及轨道列车等工业领域。

对于 FSW 而言, 焊接工艺和焊接工具是影响接头质量的重要因素, 如果工艺参数选择不当或焊具设计不合理, 将直接影响焊接产热和焊缝区材料的塑性流动, 若材料的流动性较差, 则极易形成焊接缺陷, 导致接头质量降低^[1]。因此, 对 FSW 过程中材料流动行为的研究对于深入理解 FSW 缺陷的形成机理、对焊接缺陷的准确预测及有效控制具有重要意义。

目前, 对 FSW 材料塑性流动的研究包括试验和数值模拟两方面。常用的试验方法^[2-5]有钢球跟踪技术、标记嵌入技术和显微组织图像法等, 然而这些方法只能通过获取某一时刻的材料分布, 以间接表征 FSW 过程中材料的塑性流动行为, 因此, 这些方法的应用具有较大的局限性, 且耗时耗力。而数值模拟是研究 FSW 材料塑性流动的有效方法, 建立合适的 FSW 计算模型, 不仅可以计算焊接过程产热, 而且能够预测任意位置材料的动态流动。目前, 用于研究 FSW 材料流动行为的数值方法主要是以任意拉格朗日欧拉(ALE)技术为代表的固体力学方法^[6-8]和计算流体力学(CFD)方法^[9-14]。

采用 ALE 方法模拟 FSW 过程时, 不仅可以定义焊具与工件间的滑移摩擦相互作用, 而且能够同时考虑材料的软化和硬化行为。然而, 这种方法采用的是拉格朗日网格, 其内部必须时刻充满物质, 那么在处理 FSW 这种超大变形问题时, 会出现严重的网格畸变。而 CFD 方法采用的是欧拉网格, 网格与物质相互独立, 不存在网格扭曲问题。然而, CFD 方法在捕捉物体边界信息上较为困难, 不能够精确描述物质的边界, 而且采用 CFD 方法模拟 FSW 过程时, 无法考虑材料的硬化行为和弹性属性, 只能将其简化为刚粘塑性材料处理。此外, 在处理焊具与工件间的相互作用时, CFD 方法通常将两者间的接触行为假设成完全粘着状态, 这导致温度场和焊接载荷的模拟结果误差较大。综上所述可知, 以上两种数值方法均不适合模拟 FSW 过程的材料塑性流动。

欧拉-拉格朗日耦合(CEL)方法最早由 NOH^[15]提出, 该方法兼具拉格朗日网格和欧拉网格的优点, 建模时, 采用网格固定而材料可在网格中自由流动的方式, 不仅解决了大变形问题中单元变形奇异的弊端, 而且能够精确描述物质的边界。本研究正是基于 CEL 方法, 建立新的 FSW 多场耦合计算模型, 对 FSW 过程中的材料流动及焊接缺陷的形成进行模拟。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505471)

收稿日期: 2016-11-02; 修订日期: 2017-04-26

通信作者: 朱 智, 副研究员, 博士; 电话: 024-23970722; E-mail: stephen1985_chu@163.com

1 搅拌摩擦焊多场耦合计算模型

1.1 几何模型

本研究采用内凹轴肩、锥形搅拌针焊具对单块平板实施焊接, 根据 CEL 方法的基本原理, 在空间直角坐标系, 建立如图 1 所示的 FSW 实体模型。将工件和焊具分别设为欧拉体和拉格朗日体, 欧拉区域划分为工件层和空位层, 工件层与试板的初始形状及尺寸一致, 而空位层则用来容纳 FSW 过程中形成的飞边, 在焊接初始时刻, 其内部为空。

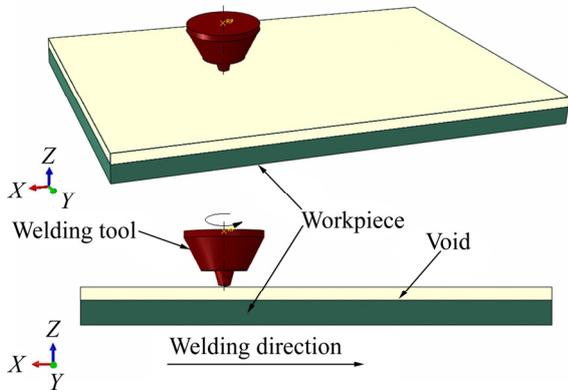


图 1 工件与焊具的几何模型

Fig. 1 Geometric model of workpiece and welding tool

1.2 热源模型

根据经典的 FSW 产热理论, 焊接过程中, 热量主要来自焊具与工件间的热机耦合相互作用, 包括摩擦产热和塑性变形产热, 如图 2 所示, 本研究同时考虑这两部分产热。

焊具与工件间的摩擦产热可由下式计算^[16]:

$$q_f = \eta_1 \tau \dot{\gamma} \quad (1)$$

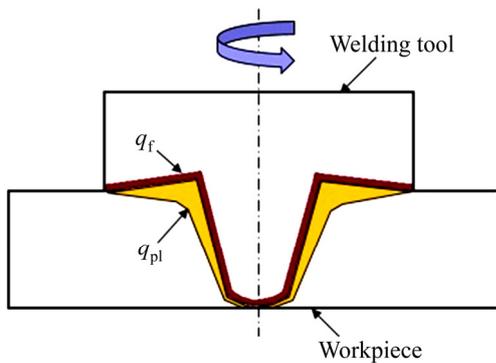


图 2 FSW 过程中的产热示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat generation during FSW process

式中: q_f 为面热流密度; η_1 为热效率, 本研究取 0.95; $\dot{\gamma}$ 为滑移率; τ 为摩擦剪切应力, 根据经典的 Coulomb 摩擦定律, τ 可表示为

$$\tau = \mu p \quad (2)$$

式中: μ 为摩擦因数; p 为焊具作用在接触面的法向压强。

塑性变形产热是指工件与焊具接触面附近剪切层内部的材料发生塑性变形所释放的热量, 该部分热量可由下式计算:

$$q_{pl} = \eta_2 \sigma \dot{\epsilon}_{pl} \quad (3)$$

式中: q_{pl} 为体热流密度; η_2 为功热转化效率, 本研究取 0.9; σ 为应力; $\dot{\epsilon}_{pl}$ 为塑性应变速率。

1.3 材料模型

本研究中, 工件材料为 6061-T6 铝合金, 焊具材料为 W6 合金, 由于焊具材料的硬度和强度远高于工件材料, 因此, 将焊具设置为刚体。对工件材料, 本研究采用 Johnson-Cook 模型描述流变应力与温度、应变、应变速率间的关系:

$$\sigma = \left(A + B \bar{\epsilon}_{pl}^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中: $\bar{\epsilon}_{pl}$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_{pl}$ 为等效塑性应变速率; A 、 B 、 C 、 n 和 m 为材料常数, n 表示应变硬化效应, m 表示高温软化效应, C 表示应变速率敏感程度, 常数 A 、 B 和 n 是在室温 T_{ref} 下通过试验获得; T_{melt} 为材料熔点。对于 6061-T6 铝合金, Johnson-Cook 本构模型中的材料参数如表 1 所列^[17-18]。此外, FSW 模拟中用到的其他材料热物理及力学性能参数均与温度相关^[17, 19]。

表 1 6061-T6 铝合金 Johnson-Cook 本构模型中的材料参数
Table 1 Material parameters in Johnson-Cook constitutive model for 6061-T6 aluminum alloy

A /MPa	B /MPa	C	n	m	T_{ref} /K	T_{melt} /K	$\dot{\epsilon}_0$
324	114	0.002	0.42	1.34	297	856	1.0

1.4 边界条件

1.4.1 热边界条件

FSW 过程中, 工件上表面和侧面通过对流和辐射将热量散失到空气中, 需在相应位置施加对流换热和辐射换热边界条件, 如图 3 所示。对流换热边界条件由下式表达:

$$q_{con} = h_{con}(T_a - T) \tag{5}$$

式中： q_{con} 为对流换热热流密度； h_{con} 为对流换热系数； T_a 和 T 分别表示环境温度和物体表面温度。

对于辐射换热而言，热流密度可以表示成如下形式：

$$q_{rad} = \sigma_b \epsilon_b (T_a^4 - T^4) \tag{6}$$

式中： σ_b 为斯蒂夫-玻尔兹曼常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^4$ ； ϵ_b 为材料表面黑度系数。

由于辐射换热问题较为复杂，为了方便建模，将辐射换热等效为对流换热处理，则对流和辐射的总热流密度为

$$q_{total} = h_{total}(T_a - T) \tag{7}$$

$$h_{total} = h_{con} + \sigma_b \epsilon_b (T_a^2 - T^2)(T_a + T) \tag{8}$$

式中： h_{total} 为总换热系数，经调试，总换热系数取常数 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

此外，工件与垫板、焊具及压块均发生接触换热，对工件内部的温度分布影响较大。研究表明，接触换热系数不仅与材料的固有属性有关，而且与接触面的温度、压力及接触状态等息息相关，目前还没有完善的理论描述固体间的接触换热行为。考虑到计算效率和软件功能上的限制，本研究忽略工件与焊具、工件与压块间的接触换热，同时，将工件与垫板间的接触换热简化为对流换热，经调试，换热系数取常数 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

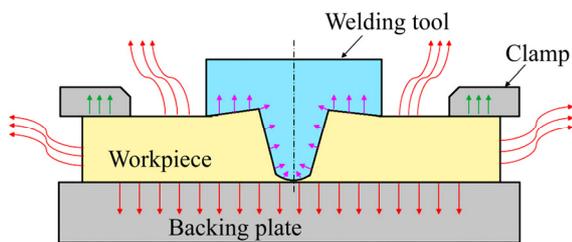


图3 FSW 过程中的热边界条件

Fig. 3 Thermal boundary conditions during FSW

1.4.2 力边界条件

FSW 过程中，为防止工件发生刚体位移，约束其底面和侧面的所有自由度，上表面自由。此外，将焊具上表面与轴线的交点设为参考点，通过控制该参考点的运动以实现焊具的转动和线性移动，进而模拟焊具的下扎和焊接过程，如图4所示。模拟采用的焊接工艺如下：焊具转速 600 r/min；焊接速度 120 mm/min；轴肩压入量 0.25 mm；焊具倾角 2.5°。

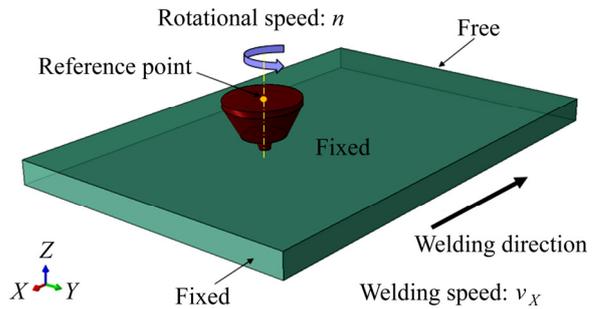


图4 FSW 过程中的力学边界条件

Fig. 4 Mechanical boundary conditions during FSW

1.5 有限元网格

根据工件与焊具的结构特征，采用八节点六面体欧拉单元(EC3D8RT)对工件实体进行网格剖分，如图5(a)所示。在保证计算精度的前提下，为了节省计算时间，在焊缝附近加密网格，而远离焊缝的区域则保持稀疏网格。此外，采用四节点刚体单元(R3D4)对焊具表面进行网格剖分，如图5(b)所示。

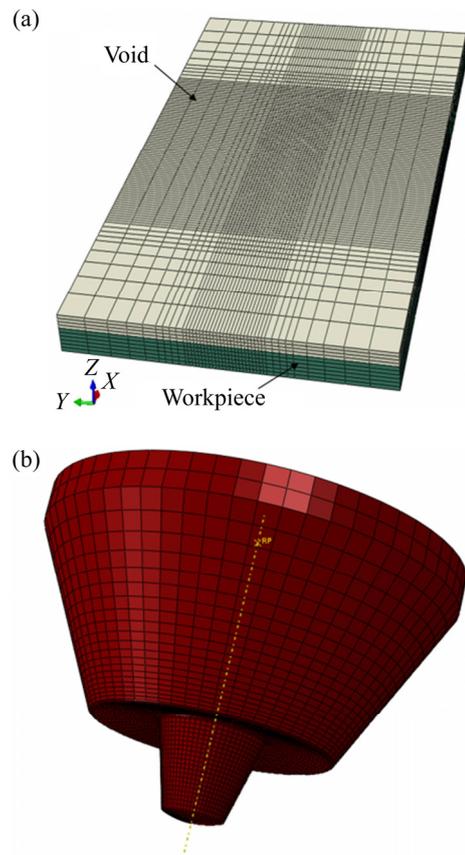


图5 工件与焊具的有限元网格

Fig. 5 Finite element mesh of workpiece(a) and welding tool(b)

2 模拟结果与验证

整个 FSW 模型的建立和运算均是在 Abaqus 6.14 软件平台上完成。为了验证模拟结果的准确性, 本研究在完全相同的焊接条件下开展 FSW 试验, 并分别从温度场、焊缝宏观形貌、焊缝截面塑性应变及焊接缺陷几方面对模型进行验证。

2.1 温度场

图 6 所示为 FSW 过程工件上表面的温度变化情况。由图 6 可以看到, 在 FSW 各个阶段, 温度场整体上沿焊缝中心对称分布, 但在稳态焊接阶段, 在焊缝附近的局部范围内, 特别是轴肩正下方, 温度场并不完全对称, 主要表现为焊缝返回侧温度高于前进侧, 焊具后方温度高于前方, 高温区域主要分布在轴肩下

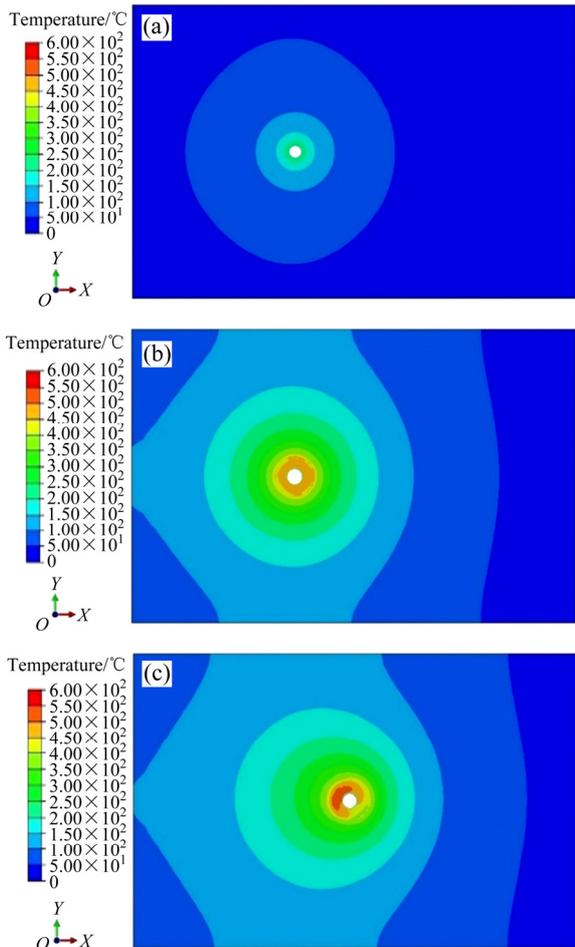


图 6 FSW 过程中工件上表面的温度场模拟结果
 Fig. 6 Simulated temperature field on top surface of workpiece during FSW process: (a) Plunging phase; (b) Welding initiation phase; (c) Steady-state welding phase

方焊缝返回侧的焊具后方, 这主要是因为焊接过程中高温材料在焊具的搅拌作用下, 由焊缝前进侧逐渐流动到返回侧, 并在焊具后方堆积。此外, 稳态焊接阶段, 焊缝峰值温度约为 525 °C, 略低于 6061-T6 铝合金的熔点 583 °C, 达到熔点的 90%, 材料仍为固相, 说明 FSW 为固相连接, 不会出现熔焊缺陷, 体现了其先进性。

为了验证温度场模拟结果的准确性, 将各测温点温度峰值的模拟结果与实测数据对比, 如图 7 所示。由图 7 可以看到, 各测温点温度峰值的模拟结果与实测数据间均有一定误差, 且返回侧距离焊缝较远的测温点误差相对较大, 最大误差为 23.4 °C, 但总体来看, 两者吻合很好, 说明本研究建立的产热模型能够较为真实地反映 FSW 过程的产热机理, 对 FSW 温度场的模拟是准确的。

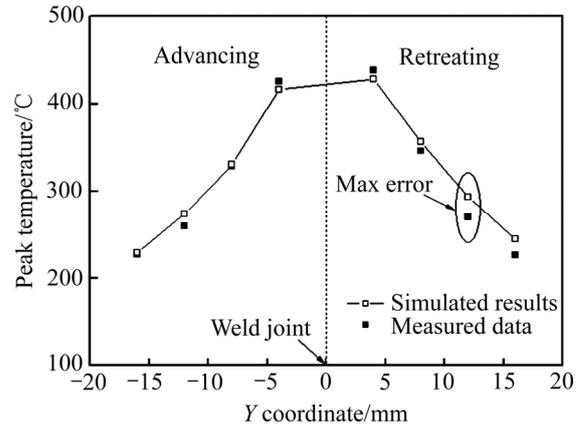


图 7 各测温点温度峰值模拟结果与实测数据对比
 Fig. 7 Comparison of simulated peak temperature of each measuring point with measured data

2.2 焊缝宏观形貌

图 8 所示为模拟焊缝宏观形貌与实际焊缝对比。由图 8 可以看到, 在焊缝的边缘, 两者均产生了明显的飞边, 且返回侧的飞边明显大于前进侧, 这符合典型的 FSW 焊缝特征, 不论是飞边的分布, 还是飞边尺寸, 两者均相吻合。此外, 实际焊缝表面产生了明显的弧形纹, 而模拟焊缝却没有, 这也是本模型的一个不足之处, 但是总体来说, 模拟焊缝与实际焊缝吻合很好。

2.3 焊缝截面塑性应变与孔洞缺陷

为了进一步验证模拟结果, 将焊缝区等效塑性应变模拟结果与实际焊缝的截面金相对比, 如图 9 所示。由图 9 可以看到, 模型能够较准确地预测焊缝塑性应变区的形状及尺寸。此外, 在焊缝区, 模拟焊缝与实

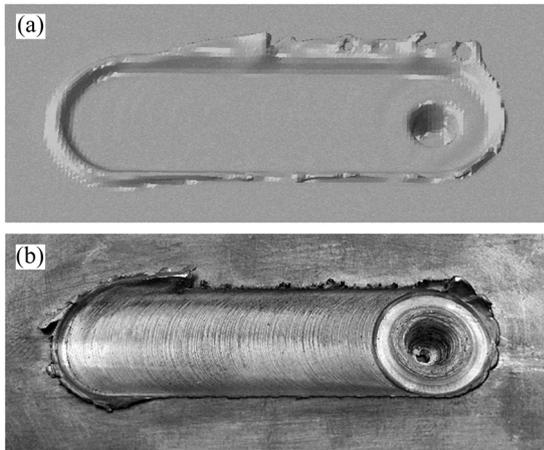


图8 模拟焊缝与实际焊缝宏观形貌的对比

Fig. 8 Comparison of macro morphologies of simulated weld(a) with experimental weld(b)

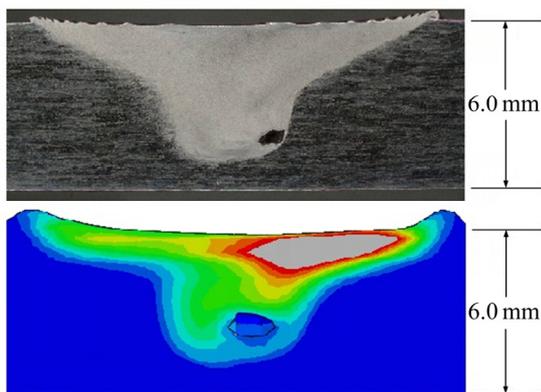


图9 焊缝截面塑性应变及缺陷的模拟结果与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation with experimental results of plastic strain and defect on cross section of welded joint

际焊缝均产生了孔洞缺陷,且两者的缺陷位置相吻合,均出现在焊缝前进侧搅拌针的端部附近。这是由于本研究采用的焊具为锥形光面搅拌针,与螺纹搅拌针比,光面搅拌针不能对焊缝材料进行充分的搅拌,材料流动性较差,特别是沿板厚方向的流动,因而无法有效填充焊接时搅拌针移动时留下的空腔,从而产生了孔洞缺陷。此外,也可以看到,缺陷尺寸的模拟值比实测值略大,这主要是由建模时所做的各种假设和简化导致的。

3 结论

1) 各测温点的模拟温度与实测数据吻合较好,说

明模型能够较准确地描述FSW过程的产热机理。

2) 焊缝宏观形貌以及焊缝截面塑性应变区的形状与尺寸均与实际焊缝吻合较好。

3) 模型能够较准确地预测焊缝内部孔洞缺陷的形成,且缺陷产生的位置与实际位置相吻合,缺陷尺寸的模拟值略大于实测值。

REFERENCES

- [1] 宋友宝, 杨新岐, 崔雷, 申志康, 侯晓鹏. 异种高强铝合金搅拌摩擦焊搭接接头的缺陷和拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1167-1174.
SONG You-bao, YANG Xin-qi, CUI Lei, SHEN Zhi-kang, HOU Xiao-peng. Defects and tensile properties of friction stir welded lap joints for dissimilar high-strength aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1167-1174.
- [2] GUERRA M, SCHMIDT C, MCCLURE J C, MURR L E, NUNES A C. Flow patterns during friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2002, 49(2): 95-101.
- [3] COLLIGAN K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum[J]. Welding Journal, 1999, 172(2): 229-237.
- [4] SCHMIDT H N B, DICKERSON T L, HATTEL J H. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3[J]. Acta Materialia, 2006, 54(4): 1199-1209.
- [5] LORRAIN O, FAVIER V, ZAHROUNI H, LAWRIANIEC D. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(4): 603-609.
- [6] HAMILTON R, MACKENZIE D, LI H J. Multi-physics simulation of friction stir welding process[J]. Engineering Computations, 2010, 27(8): 967-985.
- [7] VELJIC D M, SEDMAK A S, RAKIN M P, BAJIC N S, MEDJO B I, BAJIC D R, GRABULOV V K. Experimental and numerical thermo-mechanical analysis of friction stir welding of high-strength aluminium alloy[J]. Thermal Science, 2014, 18(1): 29-38.
- [8] ZHANG Z, WU Q. Numerical studies of tool diameter on strain rates, temperature rises and grain sizes in friction stir welding[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10): 4121-4128.
- [9] WU C S, ZHANG W B, SHI L, CHEN M A. Visualization and simulation of plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminium alloy plates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1445-1451.
- [10] CHEN G Q, SHI Q Y, LI Y J, SUN Y J, DAI Q L, JIA J Y, ZHU Y C, WU J J. Computational fluid dynamics studies on heat generation during friction stir welding of aluminum alloy[J]. Computational Materials Science, 2013, 79: 540-546.

- [11] SU H, WU C S, PITTNER A, RETHMEIER M. Thermal energy generation and distribution in friction stir welding of aluminum alloys[J]. *Energy*, 2014, 77: 720–731.
- [12] 石 磊, 武传松, 刘会杰. 逆向差速搅拌摩擦焊接材料塑性流变和热场的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(16): 140–146.
SHI Lei, WU Chuan-song, LIU Hui-jie. Modeling material plastic flow and thermal field in reverse dual-rotation friction stir welding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(16): 140–146.
- [13] SHI L, WU C S, LIU H J. The effect of the welding parameters and tool size on the thermal process and tool torque in reverse dual-rotation friction stir welding[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 91: 1–11.
- [14] 岳玉梅, 李政玮, 姬书得, 柴 鹏, 马轶男, 王 月. 搅拌头形状对回填式搅拌摩擦点焊过程中材料流动行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(9): 2428–2434.
YUE Yu-mei, LI Zheng-wei, JI Shu-de, CHAI Peng, MA Yi-nan, WANG Yue. Effect of tool geometry on material flow behavior during friction spot welding process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(9): 2428–2434.
- [15] NOH W F. CEL: A time-dependent, two-space-dimensional, coupled Eulerian-Lagrange code[M]. New York: *Methods in Computational Physics Academic Press*, 1964: 117–179.
- [16] 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.
ZHANG Zhao, ZHANG Hong-wu. Effect of contact model on numerical simulation of friction stir welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(1): 85–90.
- [17] AL-BADOUR F, MERAH N, SHUAIB A, BAZOUNE A. Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 1433–1439.
- [18] AL-BADOUR F, MERAH N, SHUAIB A, BAZOUNE A. Thermo-mechanical finite element model of friction stir welding of dissimilar alloys[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72: 607–617.
- [19] 张正伟, 张 昭, 张洪武. 搅拌摩擦焊接残余应力及残余变形数值分析[J]. *计算力学学报*, 2013, 30(S1): s16–s21.
ZHANG Zheng-wei, ZHANG Zhao, ZHANG Hong-wu. Investigations on residual stress and residual distortion of friction stir welding[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(S1): s16–s21.

Simulation on material flow and defect during friction stir welding based on CEL method

ZHU Zhi, WANG Min, ZHANG Hui-jie, ZHANG Xiao, YU Tao, WU Zhen-qiang

(State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: A new multi-physics coupling numerical model for friction stir welding was established based on coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. The model was utilized to simulate the material flow and defect formation in the weld during welding. The friction stir welding was conducted to verify the model through the comparison of temperature field, macro morphology of weld, plastic strain in the weld and welding defect. The results show that the simulation temperatures agree well with the measured data and the maximum error is 23.4 °C. The macro morphology of the weld, the plastic strain zone shape and size on the weld cross-section are in good agreement with the actual weld. The model can accurately predict the formation of void defect in the weld, and the simulated void position is consistent with the actual position. But the void size is overestimated slightly.

Key words: friction stir welding; material flow; welding defect; coupled Eulerian-Lagrangian method; numerical simulation

Foundation item: Project(51505471) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2016-11-02; **Accepted date:** 2017-04-26

Corresponding author: ZHU Zhi; Tel: +86-24-23970722; E-mail: stephen1985_chu@163.com

(编辑 李艳红)