

2014 铝合金搅拌摩擦焊接过程数值模拟*

赵衍华 林三宝 贺紫秋 吴 林

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要：将搅拌摩擦焊接过程中材料的流动看作是层流、粘性、非牛顿流体绕过旋转的搅拌头探针，并基于流体力学理论，建立了三维搅拌摩擦焊缝金属塑性流动的数值分析模型。提出了一种联合粘度场、速度场对焊接区域进行划分的方法：搅拌头周围的 h_0 (材料粘度值) 内易流动区域对应于焊核， h_0 外围与 h_1 粘度带之间的区域对应于 TMAZ 区。三维模拟中材料的垂直方向流动与“标记嵌入技术”流变可视化试验结果吻合较好：靠近探针的区域内，回撤边中下部的材料向上运动，前进边中下部材料向下运动。焊接速度过高，搅拌头轴肩与探针过渡处的易流动区容易发生材料的分离运动，实际焊接中在此处容易产生空洞缺陷。

关键词：搅拌摩擦焊 流动 数值模拟 2014 铝合金

中图分类号：TG453

0 前言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)与熔化焊相比，具有焊接变形小、质量高等优点，引起了焊接界的广泛关注。目前 FSW 研究主要集中在焊缝微观组织及力学性能上，对于搅拌摩擦焊接过程，尤其是焊缝金属在 FSW 过程中的塑性流动机理，尚处于探索阶段。FSW 过程中材料的塑性流动研究可以分为两大类：材料流变可视化试验和焊接过程的计算机数值模拟。通过试验方法虽然可以了解塑性金属的流动，而且取得了一定的成绩，但由于 FSW 过程的复杂性以及 FSW 本身的特点(无法直接看到材料流动的过程)而受到很大的限制^[1-4]。随着计算机技术的发展，运用解析和数学建模的方法来研究分析焊接过程中材料的流动也成为一种重要的研究手段。

XU 等^[5]应用固体力学方法建立了摩擦模型和滑移界面模型两种模型，并将试验获得的温度分布作为模型的温度边界条件，采用解耦方法应用 Arbitrary Lagrangian-Eulerian 有限元法进行了数学模拟。二维模型仅仅包括搅拌头探针而忽略了材料的一些与速度有关的参数。SEIDEL 等^[6]基于流体力学理论建立了二维的 FSW 模型。二维模型预测了焊缝金属的流动趋势，但由于二维模型过于简单，做了太多的假设，并不能代表真实的 FSW 流动特性。栾国红等^[7]在铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析中详细介绍了搅拌摩擦焊接头塑性流变数值模拟所

得到的结果，模拟结果显示了搅拌头轴肩下大约 1.5 mm 处搅拌摩擦焊前进边的塑性流体结构存在着不稳定区域——紊流区。COLEGROVE^[8]建立了 FSW 焊接过程模型，在那个模型中热量仅仅是由轴肩产生。模型包括一个球状热源和一个搅拌头附近的局部热源两部分。由于 COLEGROVE 应用了一个比较粗糙的网格，搅拌头附近区域的一些重要细节都没有考虑。还有许多学者对 FSW 过程的数学建模都做了过多的假设，认为探针是一个圆柱体，轴肩是一个平面等，这与实际焊接过程中采用的搅拌头形状有较大的差异^[9]。

国内外对 FSW 过程数值模拟的研究尚处于探索阶段，且由于 FSW 是一个非常复杂的过程，现在的研究仍然存在大量的问题。应用 Fluent 商用计算软件，基于流体力学理论，建立了“锥形螺纹探针 + 凹轴肩”搅拌头 FSW 焊接过程的三维模型，对焊缝金属的流动进行了分析。

1 三维搅拌摩擦焊接过程模型

1.1 模型的建立

将搅拌摩擦焊接过程中材料的流动看作层流、粘性、非牛顿流体绕过旋转的搅拌头探针，应用欧拉流动公式，采用商用计算流体力学软件 Fluent 进行建模。在搅拌摩擦焊接过程中，材料粘度在较高的温度和较高应变率的情况下仍然非常高，粘度在这个模型中起着非常重要的作用，热量完全由材料粘度耗散产生。另外，本模型仅仅考虑了 FSW 过程中稳态时焊缝金属的流动。

1.2 材料物理特性

应用流体理论建模需要粘度方程来模拟铝合金

* 国家 863 计划资助项目(2002AA331160)。20050727 收到初稿，20060204 收到修改稿

流动行为，粘度 h 在流场计算中是一个非常重要的物理参数，它与温度 T 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 有关。根据参考文献[9]，材料的粘度可以用式(1)表示

$$h(T, \dot{\epsilon}) = \frac{1}{3a} \ln \left\{ \left[\frac{Z(T, \dot{\epsilon})}{A} \right]^{1/n} + \left[\left(\frac{Z(T, \dot{\epsilon})}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

$$Z(T, \dot{\epsilon}) = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (2)$$

式中 a 、 A 、 n 、 Q 为与材料有关的常数，参考文献[10]给出了 1xxxx—7xxx 系列铝合金对应的常数值，本模型选用的参数主要为： $a = 0.0118 \text{ MPa}^{-1}$ ， $\ln A = 31.43 \text{ s}^{-1}$ ， $Q = 176867 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， $n = 5.86$ ，通用气体常数 $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。根据参考文献[11]，Al2014 的密度为 $2800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，对 Al2014 热物理性能参数进行曲线拟合处理，得到 Al2014 的热导率 I 和比定压热容 c_p 分别为

$$I = 103.264 + 0.241T$$

$$c_p = 754.08 + 0.3729T + 0.0012T^2$$

1.3 控制方程

焊接过程中材料的密度认为是常数，因此质量守恒方程(连续性方程)为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中 u, v, w ——三个方向上的速度

动量守恒方程可以采用 Navier-Stokes 形式写成方程组式(4)

$$\begin{cases} r \left[(m - m_0) \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\nabla p - \nabla t + rG \\ r \left[(m - m_0) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\nabla p - \nabla t + rG \\ r \left[(m - m_0) \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\nabla p - \nabla t + rG \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中 } t = h(T, \dot{\epsilon}) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

r ——平均密度

p ——静态压力

t ——切应力

G ——重力

m_0 ——焊接速度

稳态能量守恒公式可以写为

$$\frac{\partial r c_p T u}{\partial x} + \frac{\partial r c_p T v}{\partial y} + \frac{\partial r c_p T w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I \frac{\partial T}{\partial x} + ut \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I \frac{\partial T}{\partial y} + vt \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(I \frac{\partial T}{\partial z} + wt \right) \quad (6)$$

式(3)、(4)和(6)组成一个非线性、全耦合的控制方程，用来描述稳态、非牛顿、不可压、忽略体积力的流体流动。

1.4 模拟区域网格划分和边界条件设定

搅拌头形状为锥形螺纹探针+内凹轴肩，螺纹探针大径 8 mm，小径 6 mm，螺距 1 mm，轴肩直径为 24 mm，内凹锥度为 2° ，轴肩与探针作逆时针旋转运动。三维流动模拟区域的尺寸为 $200 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ，如图 1 所示。由于材料变形流动主要发生在搅拌头附近较小的区域内，故在探针和轴肩附近网格划分较细密。这样的划分结果共产生 58383 个四面体网格单元，且主要集中在探针和轴肩附近。

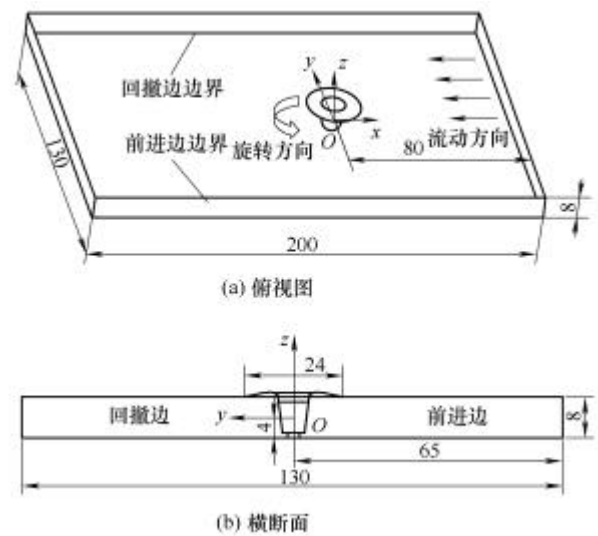


图1 三维 FSW 流体区域示意图

上表面、下表面、流体流动入口、流动出口、前进边和回撤边的边界均设置为移动墙，移动速度和焊接速度相同，为 1.67 mm/s 。焊接过程中，搅拌头固定，板材相对于搅拌头做平动，因此，模型中流体流入和流出的边界设置为速度入口边界条件，即仅有 x 方向速度且速度等于焊接速度。搅拌头旋转速度为 $400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。热边界条件设置如下：上表面、下表面以及前进边、回撤边与周围介质存在热对流(热传导)。上表面暴露于空气中，是一种热对流边界，热对流系数为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，下表面与垫板接触，热传导系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。前进边和回撤边部分与空气接触部分与夹具接触，设置其热传导对流系数为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在焊接过程中轴肩和探针均设置为绝热边界，忽略搅拌头与工件之间的热传递，这是因为焊接后搅拌头温度测量试验表明，在钢制搅拌头焊接铝合金时，传递到工件的热量远远大于传递到搅拌头的热量。参考文献[6]的研究表明边界温度对模拟结果的影响非常小，因此

上表面、下表面以及前进边和回撤边温度均设为环境温度 300 K。

2 模拟结果及分析

流动的主要影响因素是流体粘度，因此综合考察流体粘度与运动的关系可以获得对 FSW 焊接区域的重要信息。联合分析速度场与粘度场发现，轴肩及螺纹探针周围存在一个材料高速运动的区域，而在该区域之外材料的运动速度显著下降，下降幅度可达 50% 以上。以前进边为例，图 2 为 $x = -1$ mm 平面前进边速度场分布图，图 2 中左侧锯齿状实线代表探针外侧，上部直线代表轴肩平面，外围实线是粘度 $h_0 = 4 \times 10^5$ kg/(m · s) 等值线，可以看到，该粘度等值线是材料速度突变(速度变化幅度和变化梯度比较大)的分界线，在该线以内材料运动的线速度为 66.7~58.3 mm/s 以上，而该线以外材料运动速度降低至 41.7~16.7 mm/s 以下，因此可以认为 h_0 等值线以内是材料易流动区域。

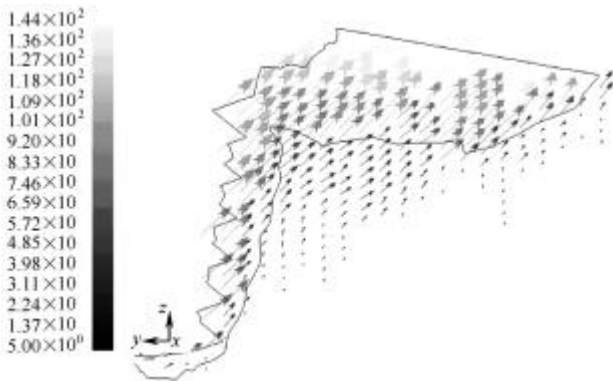


图 2 $x = -1$ mm 平面速度场及 h_0 易流动区(mm · s⁻¹)

易流动区域内材料运动速度较大，并且在螺纹的影响下产生垂直方向上的运动(建模时认为搅拌头与材料之间为无滑动模型)，贴近探针的材料甚至会随探针作数周的旋转运动。图 3 为 $z = 0$ mm 水平面的速度场分布，图 3 中矢量长度不代表大小仅代表方向，速度大小由灰度表示(注：如无特别说明，下文中涉及到的速度场均以这种方法显示)。探针周围有一个高速旋转的材料薄层。参考文献[3]采用急停试验也观察到探针周围存在这样的高速流动的材料薄层，如图 4 中 B 区即是随探针旋转的材料层。图 4 中 A 区为无任何材料的空隙，C 区为材料转移过渡区域，D 区显示为标记材料焊后分布形态。易流动区域以外粘度逐渐增大，流动性变差，材料虽然仍会运动或变形，但是塑性变形程度很小。以材料粘度 $1 \sim 2 \times 10^7$ kg/(m · s) 记为 h_1 粘度带，如图 3

所示。 h_1 粘度带实际上是材料进入或脱离焊接状态的分界，自右向左运动的材料在探针前方的 h_1 粘度带处发生变化，由以焊接速度向左直线运动的状态进入随搅拌头旋转的焊接状态，并在探针后方相应位置脱离焊接状态，继续以焊接速度向左直线运动。

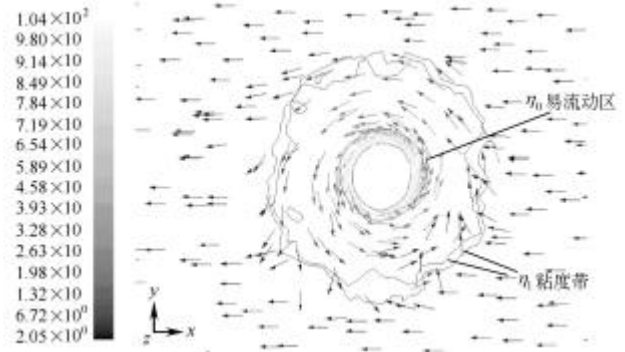


图 3 $z = 0$ mm 平面速度场及 h_0 易流动区(mm · s⁻¹)

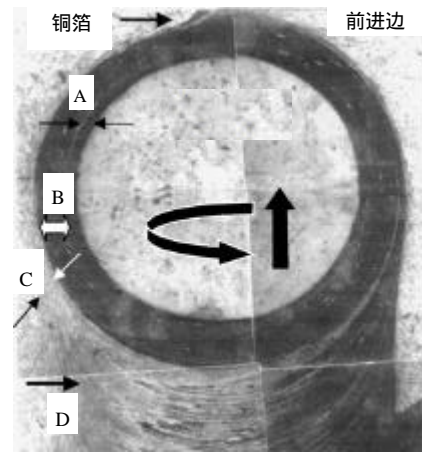


图 4 急停试验

进一步分析显示，以 h_0 划分的易流动区域对应于实际焊缝的焊核区， h_0 易流动区外围与 h_1 粘度带之间的过渡区域对应 TMAZ 区，如图 5 所示，模拟

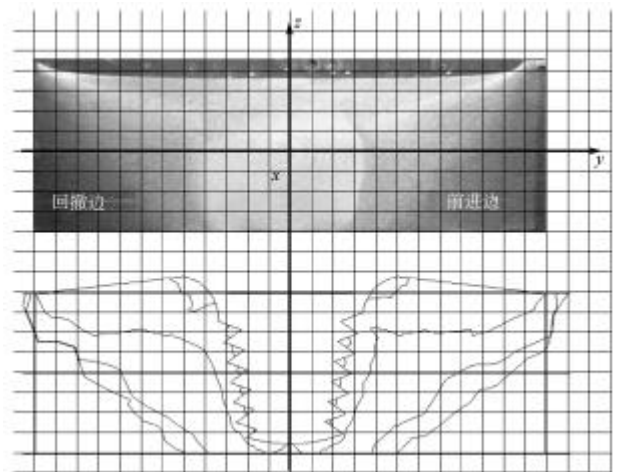
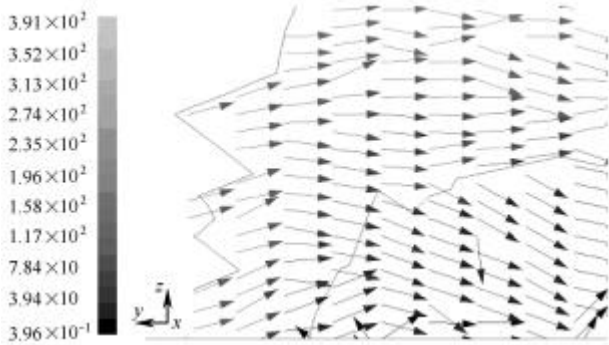


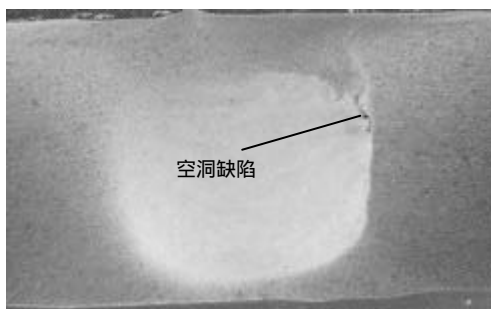
图 5 实际焊缝横断面与模拟焊缝横断面

结果取自探针后方 $x = -1 \text{ mm}$ 水平面。从图 5 中可以看出, h_0 和 h_1 边界正好对应于焊核与 TMAZ 的边界, 两者形状和大小非常接近, 模拟结果与试验结果吻合较好, 只是模拟结果所得到的轴肩影响区范围要大于实际焊接中的轴肩影响区范围。实际焊接中搅拌头倾斜且有一定的压入量, 模拟过程中没有考虑这些实际情况, 因此造成两者之间的差异。由此可见, 焊核实际上是由粘度很小且随搅拌头快速旋转的易流动材料形成的。TMAZ 区材料粘度很大, 不易产生如焊核区材料那样的高速流动, 但是仍然受到热和力的作用, 产生少量的运动和塑性变形。

实际焊接中发现, 以非常高的焊接速度施焊时, 容易在轴肩与探针过渡处产生“空洞”缺陷。对模拟结果中这一位置的速度场分析发现, 产生缺陷的原因是由于在易流动区附近出现了材料的分离运动, 如图 6 所示。



(a) 模拟结果($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

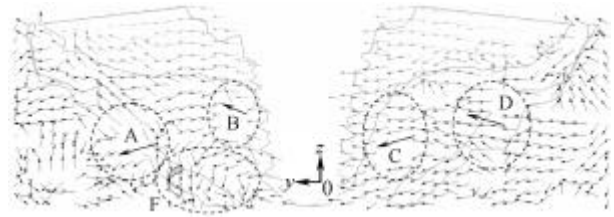


(b) 实际焊接缺陷

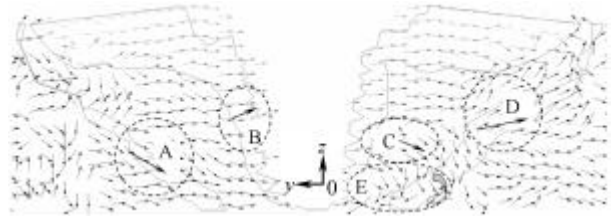
图 6 易流动区域材料的分离运动与焊接缺陷

搅拌摩擦焊接过程中材料的流动以水平面中的流动为主, 流动速度比较大, 如图 3 所示。但垂直方向上的流动直接关系到焊缝微观组织的形成, 最终对焊缝性能有重要的影响。对此, 研究了探针前方 $x = 1 \text{ mm}$ 和探针后方 $x = -1 \text{ mm}$ 平面内的速度场分布, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出以下几点。

(1) 探针前方的材料受搅拌头旋转运动的影响, 整体具有向左的运动趋势; 探针后方, 即 x 轴负半轴的材料具有向右的运动趋势(这说明材料的流



(a) 探针前方 $x = 1 \text{ mm}$ 平面内速度场



(b) 探针后方 $x = -1 \text{ mm}$ 平面内速度场

图 7 三维重建结果与模拟结果比较

动以水平面上流动为主, 与图 3 所示水平面速度场分布是一致的)。焊核区内, 螺纹探针带动其周围材料沿螺纹向上运动, 靠近轴肩的材料垂直方向的运动不大, 多表现为水平方向的运动。

(2) 轴肩下方, 随着与轴肩距离增大, 材料开始出现较明显的垂直方向的运动。图 7 中 B、D 区域的材料在探针前方和探针后方始终有向上的运动, 而 A、C 区域的材料始终有向下的运动。应当指出, 材料在探针后方形成焊后最终形态, 因此, 判断材料的运动和变形应以探针后方的运动为主, 探针前方的运动为辅。采用“标记嵌入技术”试验实现 FSW 过程中流体流动可视化, 从三维图像重建结果中可以观察标记材料垂直方向的运动, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 靠近探针的区域内, 回撤边中下部的材料向上运动, 前进边中下部材料向下运动, 即 B 区向上运动, C 区向下运动。而焊缝顶层的材料无论是回撤边还是前进边都有向下的运动趋势。远离焊缝的 TMAZ 区内, 在回撤边中间层观察到向下的变形, 前进边有向上的变形, 即 A 区向下运动, D 区发生轻微的向上变形。

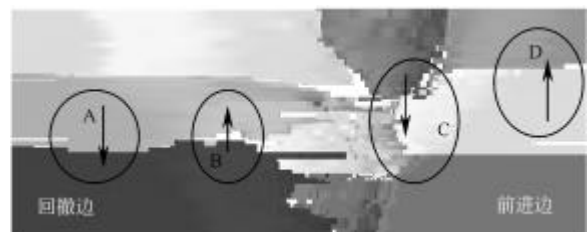
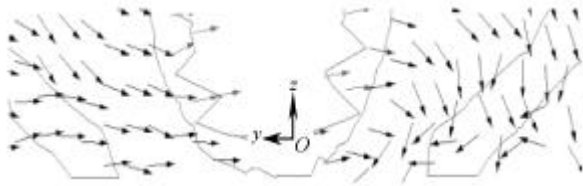


图 8 标记嵌入技术三维图像重建

(3) 在焊缝底部, 探针末端, 无论是探针前方还是探针后方, 材料绕过探针后均呈现漩涡状的运动, 如图 7 中 E、F 处。THOMAS 等^[12]对两块铝合

金板材进行搭接焊,在焊缝底部板件间隙处发现有向下的变形,如图 9 所示,模拟结果与试验结果吻合较好。



(a) 模拟结果中焊缝底部材料运动



(b) 搭接试验焊缝底部材料变形

图 9 焊缝底部材料运动情况

3 结论

(1) 建立了基于流体力学的三维搅拌摩擦焊接过程模型。搅拌摩擦焊接过程被模拟成一个三维、稳态、层流、非牛顿流体流经一个旋转的圆锥螺纹探针的过程,得到了材料流动的速度场分布。

(2) 联合粘度场、速度场对焊接区域进行了划分,在搅拌头周围存在一个 h_0 易流动区域,这个区域对应于实际焊缝中的焊核, h_0 外围与 h_1 粘度带之间的区域在焊缝横断面对应 TMAZ 区。

(3) 通过模拟结果分析发现,搅拌摩擦焊接过程中材料流动以水平面内运动为主;靠近探针的区域内,回撤边中下部的材料向上运动,前进边中下部材料向下运动,材料运动趋势与标记嵌入试验结果吻合较好;在焊缝底部,材料呈现漩涡状的运动。

(4) 焊接速度过高,搅拌头轴肩与探针过渡处的易流动区容易发生材料的分离运动,实际焊接中在此处容易产生空洞缺陷。

参 考 文 献

- [1] COLLIGAN K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum[J]. Welding Journal, 1999, 78(7): 229-237.
- [2] SEIDEL T U, REYNOLD A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials

Science, 2001, 32(11): 2 879-2 884.

- [3] GUERRA M, SCHMIDT C, MCCLURE J C, et al. Flow patterns during friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2002, 49(2): 95-101.
- [4] OUYANG J H, KOVACEVIC R. Material flow and microstructure in the friction stir butt welds of the same and dissimilar aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(1): 51-63.
- [5] XU S, DENG X. Two and three-dimensional finite element models for the friction-stir welding process[C]// Fourth International Symposium on Friction Stir Welding Park City, Utah, USA, 14-16 May, 2003.
- [6] SEIDEL T U, REYNOLDS A P. Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(3): 175-183.
- [7] 栾国红, North T H, 郭德伦, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 62-66.
- [8] COLEGROVE P A. 3 dimensional flow and thermal modelling of the friction stir welding process[C]// Second International Symposium on Friction Stir Welding Gothenburg Sweden, 26-28 June, 2000.
- [9] SEIDEL T U. The development of a friction stir welding process model using computational fluid dynamics[D]. Columbia SC: The University of South Carolina, 2001.
- [10] SHEPPARD T, JACKSON A. Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys[J]. Materials Science and Technology, 1997, 13: 203-209.
- [11] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册(3)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [12] THOMAS W M, JOHNSON I K, CHRISTOPH S W. Friction stir welding - recent development in tool and process technologies[J]. Advanced Material Science, 2003, 5(7): 485-490.

NUMERICAL SIMULATION OF 2014 ALUMINIUM ALLOY FRICTION STIR WELDING PROCESS

ZHAO Yanhua LIN Sanbao HE Ziqiu WU Lin
(State Key Laboratory of Advanced Welding
Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: A three-dimensional friction stir welding(FSW)

process model is developed based on fluid mechanics. The material transport in the welding process is regarded as a laminar, viscous and non-Newtonian liquid flows past a rotating pin. A criterion to divide the weld zone is given on the basis of cooperation of velocity field and viscosity field. That is, the h_0 -easy-flow-zone existed near the tool pin is corresponded to the weld nugget zone, the area between the h_0 -easy-flow-zone and h_1 -viscosity-band is corresponding to TMAZ. Results of the simulation show that the material in the middle part of the weld flows vertically. In the retreating side the material is pushed up and in the advancing side the material is pushed down. Material

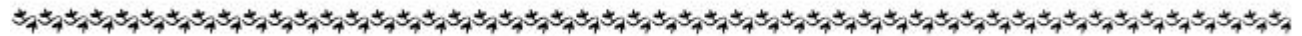
flow visualization experiments of marker insert technology are used to validate the simulated results. The experimental images can agree well with the simulated results. Under higher welding speeds, material separated motion can be seen in the shoulder-pin transition part, and an actual welding defect of void is observed at the same position in the weld seam.

Key words : Friction stir welding Flow

Numerical simulation Al 2014 alloy

作者简介：赵衍华，男，1977 年出生，博士研究生。主要从事铝合金搅拌摩擦焊的研究。

E-mail : zaneyanhua@hit.edu.cn



(上接第 91 页)

capacity and move agility, which is satisfactory to the request of the all position on the large workpiece. Through abundance experimentation, the moving ability of mobile machine is analysis and it's kinematics model is built up. A kind of switch controller is designed aim at the complexity of the robot system. Then the cooperative control between mobile machine and crosshead is obtained to achieve seam tracking accurately. The trackability experiment and the all position multilayer and multipass welding experiment are proceeded, the satisfactory result

is obtained. The automation welding process of the large workpiece is realized.

Key words : Crawling robot

Seam tracking technique

Welding on large workpiece

作者简介：张华，男，1964 年出生，教授，博士生导师。主要研究焊接过程自动化、工业焊接机器人智能化和移动焊接机器人技术。

E-mail : hzhang@ncu.edu.cn

潘际奎，男，1927 年出生，院士，教授，博士生导师。主要研究焊接过程自动化、机器人焊接技术。