

搅拌摩擦焊接材料流动模型及在缺陷预测中的应用

龙 玲^{1,2}, 史清宇², 刘 铁¹, 刘 浙¹, 孙占国³

(1. 成都航空职业技术学院 汽车工程学院, 成都 610100; 2. 清华大学 机械工程系先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 北京世佳博科技发展有限公司, 北京 100071)

摘 要: 为了研究搅拌头倾角对搅拌摩擦焊接过程的影响机理, 基于 DEFORM-3D 软件建立了带倾角的 FSW 三维热-力耦合模型, 模拟了搅拌摩擦焊接过程中焊缝区材料的三维运动轨迹, 对比分析了有无倾角时 FSW 过程中材料流动行为的差异. 结果表明, 前进侧材料绕搅拌针旋转后大部分沉积于搅拌头后方前进侧区域, 返回侧的材料大部分被搅拌头旋推至后方而沉积; 采用倾角可以增强搅拌头后方材料从返回侧运动至前进侧区间的流动性, 同时还有利于增强材料在厚度方向的运动能力. 根据模拟的材料流动行为对接头缺陷进行了趋势预测, 预测结果与试验结果吻合良好.

关键词: 搅拌摩擦焊; 流动行为; 搅拌头倾角; 数值模拟; 缺陷预测

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400017

0 序 言

搅拌摩擦焊接 (FSW) 技术最早由英国焊接研究所 (TWI) 发明^[1], 由于在 FSW 过程中产生的热量仅使材料处于塑性状态, 而未达到金属熔点, 因此 FSW 属于固态连接技术. 这其中, 搅拌头周围塑性材料的流动行为对焊缝成形及接头质量具有至关重要的作用^[2-3], 因此, 科研工作者在探索 FSW 过程中材料流动成形规律上展开了大量的研究, 其方法主要采用试验法和数值模拟分析, 但由于材料流动过程的不可见性, 采用可视化试验方法捕捉 FSW 过程中的材料流动轨迹难度很高^[4], 随着计算机技术的发展, 数值模拟成为研究与分析 FSW 过程中材料流动的重要方法^[5].

Colegrove 等人^[6]基于计算流体力学 (CFD) 方法模拟分析了带螺纹搅拌头周围材料流动规律, 但同时指出材料变形区域和焊接温度与试验结果存在一定偏差. Schmidt 等人^[7]应用 ABAQUES/Explicit 软件建立了 FSW 稳态焊接阶段的热-力耦合模型, 考虑了允许特定条件下搅拌针和材料接触面发生脱离, 模拟结果可预测孔洞的产生. Zhang 等人^[8]基于计算固体力学 (CSM) 方法模拟了不同工艺参数

下的材料流动情况. Buffa 等人^[9]采用 DEFORM-3D 软件对 FSW 三维热-力耦合过程进行了数值模拟, 研究与分析了不同工艺参数条件下材料温度分布、应变分布以及跟踪质点流动位移等变化情况.

搅拌头倾角是 FSW 过程中决定焊缝及接头质量的关键工艺参数之一, 但目前倾角对焊接成形过程中的影响机理依然不明确^[10]. 尽管之前关于 FSW 材料流动规律的研究已经取得了一些成果, 但采用数值模拟方法研究搅拌头倾角对焊接过程材料流动行为影响的研究工作未见报道, 鉴于此, 采用 DEFORM-3D 软件建立带倾角的 FSW 三维热-力耦合模型, 通过计算模拟 FSW 过程中焊缝区材料的三维运动轨迹, 在此基础上研究有无倾角时 FSW 过程中材料流动行为的差异, 预测不同倾角条件下 FSW 过程产生焊缝成形缺陷的趋势, 并通过试验初步验证了本模型的可靠性.

1 有限元模型

1.1 模型建立与网格划分

模型包括被焊试板 (材料为 AA6061-T6 铝合金) 和搅拌头 (材料为 H13 钢) 两部分, 试板尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, 搅拌头选用直径为 10 mm 的平面轴肩, 搅拌针为圆锥形, 锥度为 30° , 端部直径为 3.5 mm , 长度为 2.3 mm , 被焊试板和搅拌头

均采用四面体网格进行划分. 由于在 FSW 过程中搅拌头与被焊试板接触部分是材料发生塑性变形的的主要区域, 因此在此区域进行局部网格细划分, 其它区域网格尺寸逐渐放大, 以保证计算准确的同时提高运算效率. 此外, 材料在搅拌摩擦焊接过程中发生的是大塑性变形, 需要进行网格重划分, 为了避免计算过程中发生网格畸变, 采用绝对最小网格尺寸控制模拟过程中由网格重划分引起的尺寸变化, 重划分过程中, 最小网格尺寸值设为 0.2 mm, 被焊试板划分网格后共计生成大约 150 000 个四面体单元. 搅拌头单元边长从 0.15 mm 过渡到 2 mm, 共计生成 32 000 个四面体单元, 网格划分完成后的有限元模型如图 1 所示, 搅拌头沿逆时针方向旋转, 焊接方向为 x 轴负方向.

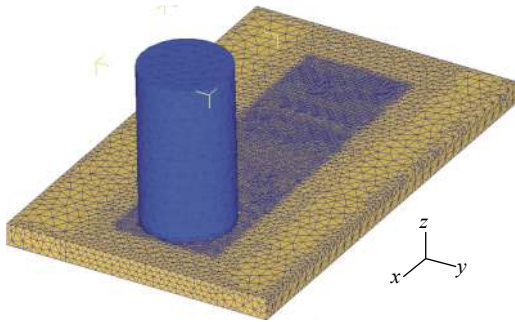


图 1 FEM 几何模型
Fig. 1 Geometric model in FEM simulation

1.2 边界条件及模拟工艺参数设定

由于搅拌头材料比被焊试板材料的强度高得多, 将搅拌头设为刚体, 被焊试板设为刚(粘)塑性体, 为了简化模型, 夹具和垫板没有在模型中进行构建, 而是通过在被焊试板的底面、侧面分别实施位移约束来限制其在厚度方向以及水平方向的移动.

在 FSW 中, 被焊试板与搅拌头接触部分以及被焊试板底部与垫板之间接触部分的接触压力较大, 因此有较高的热传导, 此外被焊试板和搅拌头自由面也与外界进行对流热交换, 参考文献[11, 12], 模型的热传递条件设置如下 (1) 被焊试板及搅拌头自由面与外界的对流热交换系数设为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; (2) 被焊试板与搅拌头接触部分的热传导系数设为 $11\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; (3) 被焊试板底面的热传导系数设为 $5\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

模拟过程中的焊接工艺参数设为搅拌头转速 $1\,000 \text{ r}/\text{min}$, 焊接速度 $100 \text{ mm}/\text{min}$, 压入量 0.2 mm , 选取焊接倾角分别为 2° 和 0° 两种工况进行对比研究.

1.3 材料性能模型

被焊试板材料 AA6061-T6 铝合金的密度设为常数 $2\,700 \text{ kg}/\text{m}^3$, 与温度相关材料热物理性能参考文献[13]. 材料属性根据 Sellars 和 Tegart^[14]提出的双曲正弦关系式, 得到材料流动本构方程来描述, 即

$$\dot{\varepsilon} = A \left[\sinh \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} \right) \right]^n \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; σ 为流变应力; R 为气体常数; T 为变形温度. 相关系数设为^[15] $A = 2.41 \times 10^8$, $n = 3.55$, $Q = 145$, $\sigma_R = 22.2$.

1.4 搅拌头与被焊材料间接触定义

由于金属材料在搅拌摩擦焊接过程中产生的是塑性体积成形, 当进入稳态焊接阶段后, 搅拌头与被焊试板接触面之间的相互作用设为剪切摩擦模型, 即

$$f_s = mk \quad (2)$$

式中: m 代表剪切摩擦系数, 因 FSW 焊接工艺过程的复杂性, 摩擦系数受界面上的温度、压力、速度等因素影响十分复杂, 但为了简化模型运算, 通常将摩擦系数设为常数, 参考文献[15], m 取值为 0.6; k 为被焊试板材料的剪切屈服应力.

2 模拟结果与讨论

在搅拌头前方沿焊缝横截面布置 100 个跟踪材料质点, 假设起始时刻 $t = 0 \text{ s}$ 时, 被跟踪材料质点分布在搅拌头轴肩边缘的前方, 并与搅拌头前沿有一定的距离, 此时的质点保持静止不动, 随着搅拌头的旋转前行, 观察被跟踪材料质点在焊接过程中的分布位置和运动轨迹. 图 2 为假设起始时刻 $t = 0 \text{ s}$ 时被跟踪材料质点的分布情况.

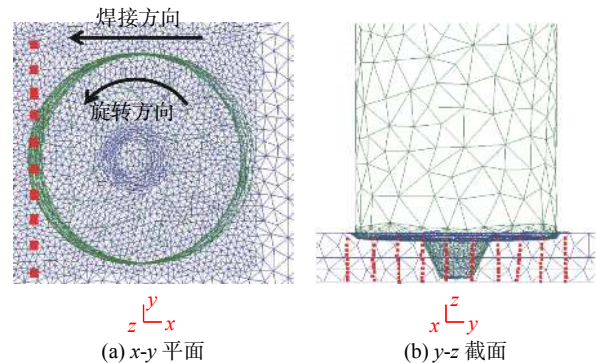


图 2 被跟踪材料质点的分布 ($t = 0 \text{ s}$)
Fig. 2 Distribution of tracking particles ($t = 0 \text{ s}$)

2.1 水平截面上的材料流动行为

图 3 所示为搅拌头倾角为 2° 时被跟踪材料质点在 $x-y$ 平面上的运动轨迹, 从图 3 中可观察出, 前进侧的大部分标识材料质点在搅拌针的作用下绕其旋转运动至搅拌头后方焊缝中心线附近, 随后逐渐沉积于焊缝中心与前进侧之间的不同位置. 位于返回侧的标识材料质点运动轨迹主要有两类, 一类是靠近焊缝中心线的材料质点的运动, 这部分材料绕搅拌针旋转约半周后沉积在搅拌头后方焊缝中

心靠前进侧附近的区域, 另一部分离焊缝中心线稍远的材料几乎不绕搅拌针做旋转运动, 而是被搅拌头旋推至后方焊缝中心线与返回侧之间的区域后逐渐沉积下来. 从图 3b, 3c 还可看出, 在前进侧有小部分材料质点绕搅拌针旋转几周后再逐渐沉积, 这部分材料可看作是随搅拌针旋转的同时, 还和搅拌头一起沿焊接方向往前运动, 最后沉积于前进侧前方, 如图 3d 所示. 跟踪材料质点在焊后的分布情况与近似工况下文献[16]的材料流动试验结果相吻合.

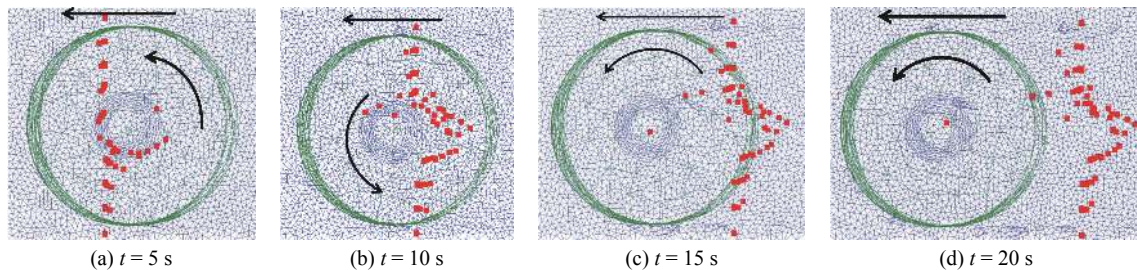


图 3 倾角为 2° 时 $x-y$ 平面被跟踪材料质点的流动轨迹

Fig. 3 Flow tracks of the tracking particles in the $x-y$ section with a tilt angle of 2°

为了对比不同倾角对材料流动行为的影响, 在其它条件不变的情况下, 将搅拌头倾角设为 0° , 模拟得到的被跟踪材料质点在焊接过程中的运动轨迹如图 4 所示. 通过与图 3 进行对比发现, 采用带倾角 FSW 时, 沉积在前进侧的材料质点比不带倾角 FSW 沉积于前进侧的材料质点更多, 且分布区

域更大, 部分材料质点沉积位置在 y 方向离焊缝中心线的距离大于不带倾角 FSW 条件下离焊缝中心的 y 向距离. 对比图 3b, 3c 和图 4b, 4c 所示的材料分布发现, 倾角为 0° 时随搅拌头旋转前行的材料质点少于倾角为 2° 时随搅拌头旋转前行的材料质点.

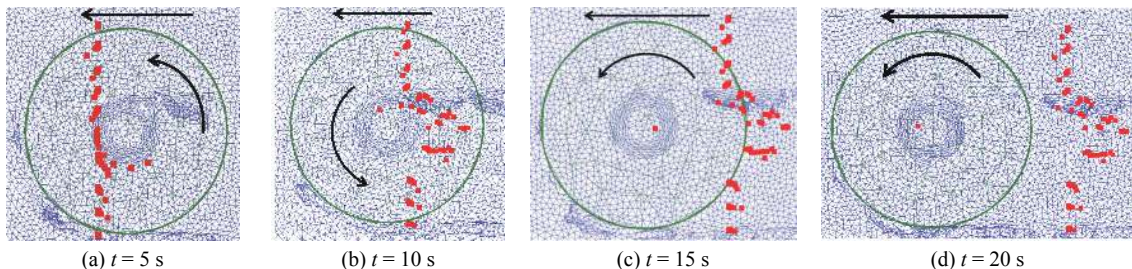


图 4 倾角为 0° 时 $x-y$ 平面被跟踪材料质点的流动轨迹

Fig. 4 Flow tracks of the tracking particles in the $x-y$ section with a tilt angle of 0°

为了更清楚的观察材料质点的流动轨迹, 在板厚方向中下部水平截面选取前进侧离搅拌针较近的材料质点 (分别标识为 P1, P2, P3), 对比它们分别在倾角为 2° 和 0° 工况下的运动轨迹, 图 5 为 $t = 0$ s 至 $t = 15$ s 期间材料标识质点 P1, P2, P3 在 $x-y$ 平面的相对运动轨迹. 对比观察图 5a, 5b 发现, 倾角为 2° 时, 部分标识材料 (如 P1, P2) 沿搅拌头圆周方向的运动圈数多于倾角为 0° 时标识材料的运动圈数,

且部分标识材料的沉积位置在 y 方向距离大于倾角为 0° 时对应材料质点的 y 向距离, 这使前面所述的观察结果得以进一步说明. 进一步对比发现, 带倾角 FSW 工况下的标识材料质点旋转至搅拌头后方并与搅拌针脱离后, 部分材料质点表现出继续随搅拌头做旋转推行的运动趋势, 而不带倾角 FSW 工况下与搅拌针脱离后的部分标识材料质点 (如 P1, P3) 几乎没有表现出继续旋转前行的运动迹象. 以上现象

说明采用搅拌头倾角可以增加材料从返回侧运动至前进侧区间的流动性, 而此区域是焊缝区材料塑

性流动最弱且容易发生成形缺陷的位置^[17]. 因此, 搅拌头倾角是影响焊缝成形及接头质量的重要因素.

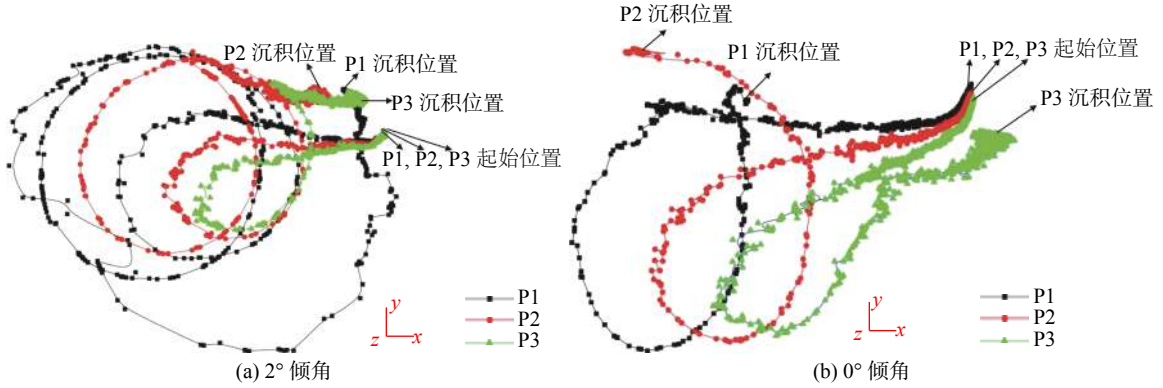


图 5 搅拌针附近材料标识质点在 $x-y$ 平面的流动轨迹
Fig. 5 Flow tracks of the tracking particles nearby the tool pin in the $x-y$ section

2.2 厚度方向材料流动行为

图 6 为 $t = 15$ s 时有无倾角 FSW 被跟踪材料质点在 $y-z$ 平面的分布, 通过对比发现, 相对于不带倾角 FSW 而言, 带倾角 FSW 焊后沉积于前进侧的材料质点在厚度方向上的分布更均匀, 而不带倾角 FSW 焊后沉积于前进侧焊缝区上部和下部的材料质点很少, 由此可推测倾角可有利于增强材料在厚度方向的运动能力, 避免工件表面及根部因材料流动回填不足而形成的沟槽或隧道型孔洞等缺陷的产生.

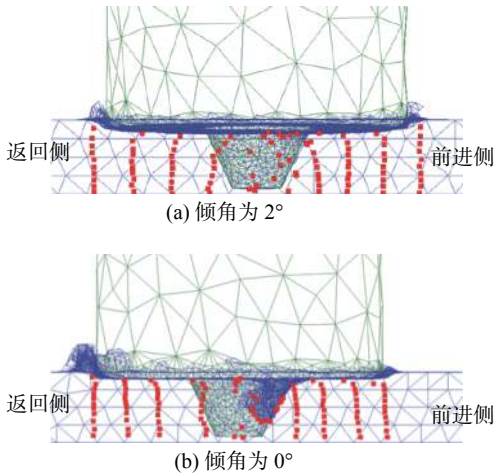


图 6 被跟踪材料质点在 $y-z$ 平面的分布 ($t = 15$ s)
Fig. 6 Distribution of tracking particles in the $y-z$ section ($t = 15$ s)

2.3 焊缝接头形貌模拟结果及试验验证

图 7 所示为带倾角和不带倾角条件下的 FSW 接头形貌模拟结果, 从图 7a 可看出, 采用带倾角 FSW 的焊缝接头形貌良好, 而从图 7b 发现, 采用不带倾角的 FSW 工况时, 在焊缝接头前进侧存在孔洞型缺陷. 图 8 为焊接试样在不同倾角 FSW 工

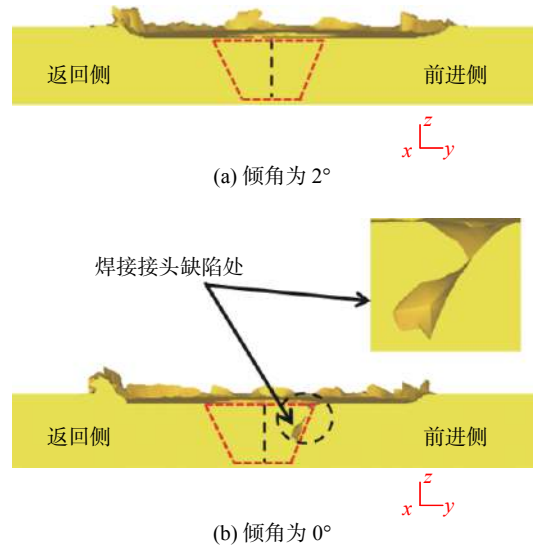


图 7 焊接接头形貌模拟结果
Fig. 7 Simulation results of joint morphology



(a) 倾角为 2°



(b) 倾角为 0°

图 8 焊接试样接头宏观形貌检测结果
Fig. 8 Metallographic experiments of joint morphology

况下焊后的焊缝接头宏观形貌, 试验检测结果显示, 搅拌头倾角为 0° 时, 焊缝接头发现有隧道型孔洞缺陷, 焊缝成形不合格, 搅拌头倾角为 2° 时, 焊缝接头未发现明显的孔洞等缺陷, 焊缝成形合格, 试验结果与数值模拟预测结果基本吻合, 说明采用本模型对焊缝成形及接头缺陷产生的趋势进行预测是可靠的。

3 结 论

(1) 前进侧材料绕搅拌头旋转后大部分沉积于搅拌头后方前进侧区域, 小部分随搅拌头旋转前行一段距离后沉积于前进侧前方。返回侧的材料大部分被搅拌头旋推至后方而沉积, 小部分材料绕搅拌头旋转约半周后沉积于焊缝中心靠前进侧附近。

(2) 带倾角 FSW 可以增加搅拌头后方材料从返回侧运动至前进侧区间的流动性, 同时还有利于增强材料在厚度方向的运动能力, 避免工件表面及根部因材料流动回填不足而形成的沟槽或隧道型孔洞等缺陷的产生。

(3) 通过模型模拟得到的焊接接头形貌与焊接试样截面金相试验所得接头宏观形貌进行对比, 结果显示吻合良好。

参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, *et al.* Friction stir welding: Great Britain, 9125978.8[P]. 1991-12-06.
- [2] 赵衍华, 林三宝, 吴 林. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接过程塑性金属流变可视化[J]. *焊接学报*, 2005, 26(6): 73 – 75.
Zhao Yanhua, Lin Sanbao, Wu Lin. Visualization of the plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(6): 73 – 75.
- [3] 陈高强, 史清宇. 搅拌摩擦焊接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 friction stir welding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(22): 11 – 21.
- [4] 柯黎明, 邢 丽, 黄奉安. 搅拌摩擦焊接接头形成过程的二维观察与分析[J]. *焊接学报*, 2005, 26(3): 1 – 4.
Ke Liming, Xing Li, Huang Feng'an. Two dimensional flow of plasticized materials in friction stir welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(3): 1 – 4.
- [5] 张 昭, 刘亚丽, 陈金涛, 等. 搅拌摩擦焊接过程中材料流动形式[J]. *焊接学报*, 2007, 28(11): 17 – 21.
Zhang Zhao, Liu Yali, Chen Jintao, *et al.* The material flow in friction stir welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(11): 17 – 21.
- [6] Colegrove P A, Shercliff, H R. 3-dimensional CFD modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(2): 320 – 327.
- [7] Schmidt H, Hattel J. A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding[J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2005, 13(1): 77 – 93.
- [8] Zhang H W, Zhang Z, Chen J T. 3D modeling of material flow in friction stir welding under different process parameters[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183(1): 62 – 70.
- [9] Buffa G, Hua J, Shivpuri R, *et al.* A continuum based FEM model for friction stir welding-model development[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 419(1-2): 389 – 396.
- [10] 严 铿, 曹 亮, 陈华斌. 搅拌头倾角对 FSW 成形和接头力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2005, 26(12): 35 – 38.
Yan Keng, Cao Liang, Chen Huabin. Effect of tool tilt angle on formation and mechanical property of FSW[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(12): 35 – 38.
- [11] Jain R, Pal S K, Singh S B. A study on the variation of forces and temperature in a friction stir welding process: a finite element approach[J]. *Journal of Manufacturing Process*, 2016, 23: 278 – 286.
- [12] Khandkar M Z H, Khan J A, Reynolds A P. Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, 8(3): 165 – 174.
- [13] Tello K E, Gerlich A P, Mendez P F. Constants for hot deformation constitutive models for recent experimental data[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(3): 260 – 266.
- [14] Sellars C M, Tegart W J. On the mechanism of hot deformation[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1966, 14(9): 1136 – 1139.
- [15] Frigaard O, Grong O, Midling O T. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(5): 1189 – 1200.
- [16] 王细波. 铝合金搅拌摩擦焊完全热-力耦合模拟及流动行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [17] Zhu Y C, Chen G Q, Qing Y S. Simulation of material plastic flow driven by non-uniform friction force during friction stir welding and related defect prediction[J]. *Material and Design*, 2016, 108: 400 – 410.

第一作者简介: 龙 玲, 女, 1979 年出生, 博士, 副教授. 主要从事金属塑性成形工艺、汽车先进制造工艺等方面的科研和教学工作. 发表论文 10 余篇. Email: sclongling@163.com.

通信作者简介: 史清宇, 男, 博士, 教授, 博士研究生导师. Email: shqy@tsinghua.edu.cn