

文章编号: 1001-3806(2016)03-0353-05

激光辅助加热搅拌摩擦焊 3 维流场数值模拟

宋新华^{1,2}, 修腾飞², 金湘中², 袁江^{1,2}, 宋斌¹

(1. 张家界航空工业职业技术学院 航空制造工程系, 张家界 427000; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 为了优化激光辅助加热搅拌摩擦焊接工艺、为焊接实验提供理论依据, 采用数值模拟的方法, 进行了 Q235 钢激光辅助加热搅拌摩擦焊 3 维流场模拟仿真。模拟分析了粘塑性材料的流动行为及热量传递过程, 获得了被焊材料的流动场及温度场分布。结果表明, 在焊接过程中, 被焊材料主要是由后退侧向前进侧流动; 激光功率为 800W、焊接速率为 23.5mm/min、转速由 750r/min 增加至 1180r/min 的过程中, 被焊材料的流动性变好, 最高温度升高, 但未超过钢的熔点, 与实际实验过程中钢未熔化一致。激光作为辅助热源, 为焊接过程提供热量输入, 可改善焊接材料的流动性。

关键词: 激光技术; 搅拌摩擦焊接; 流动场; 温度场; FLUENT 软件

中图分类号: TG402

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.011

Numerical simulation of 3-D flow field on laser-assisted heating friction stir welding of steel

SONG Xinhua^{1,2}, XIU Tengfei², JIN Xiangzhong², YUAN Jiang^{1,2}, SONG Bin¹

(1. Department of Aerospace Engineering, Zhangjiajie Aviation Industry Vocation Technical College, Zhangjiajie 427000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to optimize welding parameters of laser-heated friction stir welding (FSW) and provide theoretical foundation for experiments, numerical simulation was adopted and simulation of 3-D flow field of Q235 steel laser-assisted heating FSW was conducted. Flow behavior and heat transfer process of viscoplastic material were analyzed. Flow field and temperature distribution of welding material were acquired. The results show that the welding material is transported mainly along the retreating side. When rotational speed increases from 750r/min to 1180r/min under the condition of 800W laser power and 23.5mm/min welding speed, the material flow gets stronger. The highest temperature rises, but not more than the melting point of steel. The phenomenon is consistent with that the steel does not melt in the process of the actual experiment. Laser, as an auxiliary heat source, can provide heat input during the welding process and can improve mobility of welding materials.

Key words: laser technique; friction stir welding; flow field; temperature distribution; FLUENT software

引言

搅拌摩擦焊技术(friction stir welding, FSW)以其焊后残余应力小、变形小和焊接接头强度高优点被广泛应用于铝合金、镁合金和铜合金等材料的焊接。它已被成功应用于航空、航天、铁道车辆、造船和汽车等制造领域^[1]。

国内外学者已经进行了大量的铝合金和镁合金等轻质合金的搅拌摩擦焊研究^[2-6]。但搅拌摩擦焊技术

在高熔点材料上的应用仍然受限于搅拌头的寿命。在焊接过程中, 搅拌针承受着巨大的剪切力和摩擦磨损。预热工件可以软化被焊材料, 是提高搅拌头寿命的方法之一。加热源可以是火、电和等离子体等。SHEN^[7]采用加热棒及电磁感应作为预热热源, 对 Q235 钢进行了焊前预热搅拌摩擦焊实验研究。LUO^[8]等人进行了电流辅助加热搅拌摩擦焊实验研究。研究发现, 引入电流热源后, 焊接接头焊核区的晶粒显著变细, 硬度增加, 并且证实了高强度合金搅拌摩擦焊接的可行性。CHOI^[9]等人进行了 SK5 火焰复合搅拌摩擦焊实验研究。为了控制焊缝的冷却速率, 在搅拌头后方利用火焰枪进行焊后加热, 结果表明, 利用火焰降低冷却速率, 焊接接头中马氏体的比例和焊缝的硬度都有所降低。本文中进行了 Q235 钢激光辅助加热搅拌摩擦焊 3 维流场模拟仿真。激光热源在搅拌

基金项目: 张家界航空工业职业技术学院科研资助项目 (ZHKT2015-008)

作者简介: 宋新华(1980-), 男, 硕士, 主要从事激光焊接实验与数值模拟的研究。

E-mail: sxhnuaa@163.com

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-04-07

头热源之前,起到预热工件的作用。模型考虑了激光对工件材料的预热、轴肩与工件的摩擦产热及搅拌针与工件材料的剪切变形产热,建立了激光与搅拌头双热源模型。采用用户自定义函数(user designed function, UDF)定义粘塑性材料的粘度,利用 FLUENT 软件对数值模型进行求解,获得了复合搅拌摩擦焊的流动场及温度场分布。模拟分析可以获得试件内部的温度、应力、应变、速率、流动压力和剪切力等关键场力的分布,可以分析不同的焊接工艺参量对 FSW 过程的影响。

1 数学模型的建立

1.1 控制方程

利用 FLUENT 对焊接流体进行 3 维流场分析,焊缝区塑性金属流动涉及质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。假设流体模型为稳态不可压缩单相非牛顿流体。对于不可压缩单相流体,其连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, u, v, w 分别对应速度矢量 \mathbf{u} 在笛卡尔坐标系中 x, y, z 这 3 个方向上的分量。

稳态单相动量守恒方程为:

$$\rho \mathbf{u} \nabla (\mathbf{u}) = -\nabla F + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中, ρ 是密度, F 是流体微元体上的压力, μ 是非牛顿粘度, \mathbf{u} 是速度矢量。

搅拌摩擦焊过程中,工件材料的粘度在高温及高的应变率条件下仍然是非常高的,粘度的准确预测直接关系到数值模型求解的正确性。

作者应用了 PERZYNA 的粘塑性计算模型,粘度的计算式为:

$$\mu = \sigma / (3\dot{\epsilon}) \quad (3)$$

式中, σ 为材料的流动应力, $\dot{\epsilon}$ 是有效应变速率。

采用 SHEPPARD 和 WRIGHT 提出的流动应力的计算式:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/m} \right] \quad (4)$$

式中, α, A 和 m 是材料常数, Z 是 Zener-Hollomon 参量,代表温度补偿应变速率。参量 α 取为 0.012, A 和 m 被看作等效应变的非线性函数^[10]:

$$\begin{cases} \ln A = 30.90801 + 3.15994\dot{\epsilon} - 1.48328\dot{\epsilon}^2 \\ m = 10.93345 - 22.24643\dot{\epsilon} + 19.43820\dot{\epsilon}^2 \end{cases} \quad (5)$$

Z 表示为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(QR^{-1}T^{-1}) \quad (6)$$

式中, Q 是激活能, R 是气体常数。模拟分析中, Q 取为 352.617 kJ/mol。

由上述公式可知,材料的动力粘度是温度及应变率的函数。温度升高,粘度降低;应变率升高,粘度降低。

稳态过程的能量守恒方程为:

$$\rho c \nabla (\mathbf{u}T) = \lambda \nabla^2 T + Q_{vd} \quad (7)$$

式中, c 是比热容, λ 是导热系数, Q_{vd} 是内热源。

激光辅助加热搅拌摩擦焊焊接原理图如图 1 所示。

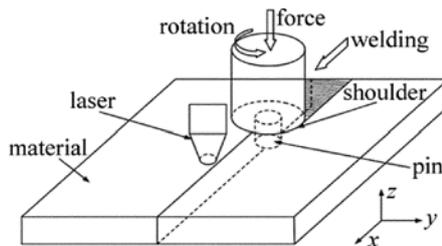


Fig. 1 Schematic of laser-assisted heating FSW

1.2 定解条件的确定

搅拌摩擦焊过程分为 3 个阶段:下压、焊接及拔出。焊接阶段,搅拌头以固定转速转动,工件相对于搅拌头以固定速率移动,搅拌头的产热速率是常数,而且焊接样品横截面具有相似的几何、微观结构和属性,因此搅拌摩擦焊过程可被视为准稳态的过程。计算时仅考虑稳态过程中焊缝区塑性金属的流动状态。塑性流动材料及外界环境的初始温度为 300K,考虑了随温度及应变率变化的动力粘度,更准确地预测焊接过程的流动场及温度场分布。导热系数对于各向同性液体无方向特性。Q235 钢的热物性参量如表 1 所示。

Table 1 The thermal physical parameters of Q235 steel

| temperature/K | thermal conductivity $\lambda /$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) | specific heat capacity $c /$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) |
|---------------|---|--|
| 293 | 50 | 460 |
| 523 | 47 | 480 |
| 773 | 40 | 530 |
| 1023 | 27 | 675 |
| 1273 | 30 | 670 |
| 1773 | 35 | 660 |

进口壁面设置为速率进口,其大小为焊接速率,出口壁面设置为出流边界。轴肩壁面与搅拌针壁面设置为旋转壁,其大小为搅拌头的旋转速率。假设材料与搅拌头接触的区域满足无滑移边界条件即旋转线速率等于搅拌头旋转速率与半径的乘积。

假设搅拌头轴肩/工件界面处的热量是摩擦热,轴肩处的热流密度为:

$$q_1 = \frac{4\tau_r n F_n (R_2^3 - r_1^3)}{3 \times 60 \times (R_1^2 - r_1^2)^2} \quad (8)$$

式中, q_1 是轴肩处热流密度, τ_r 是摩擦系数, F_n 是下压

力, n 是搅拌头转速, R_2 是计算点到搅拌头轴心的距离, R_1 和 r_1 分别是轴肩与搅拌针的半径。

搅拌针处产生的热量主要是工件材料受到搅拌针的剪切力发生塑性变形产生的, 搅拌针处的热流密度为:

$$q_2 = \frac{\pi^2 r_1^2 H n \bar{Y}}{30\sqrt{3}} / (2\pi r_1 H) = \frac{\pi r_1 n \bar{Y}}{60\sqrt{3}} \quad (9)$$

式中, q_2 是搅拌针处热流密度, H 为搅拌针的长度, \bar{Y} 为平均剪切应力。

Q235 钢的密度为 7800kg/m^3 , 熔点为 1773K , 激光功率为 800W , 光斑直径为 16mm , 在激光辅助加热的过程中, 激光与搅拌头固定不动, 移动工件, 实现焊接试件的固相连接。在焊接中, 激光热源作为辅助热源加热工件表面, 因此采用传导焊热源模型, 数值模拟时将激光热源看作 2 维面热源处理^[11], 一般认为激光束是基模高斯光束^[12], 其热流密度分布为高斯分布, 热流密度计算式为:

$$q_3 = \frac{aP}{\pi R_3^2} \exp\left(-\frac{ar_2^2}{R_3^2}\right) \quad (10)$$

式中, q_3 是激光处热流密度, a 为热流集中程度系数, 对应于 a 取为 1, 2, 3 时, 高斯热源的能量分布百分比分别为 63.2%, 86.4%, 95.2%。取 $a = 1$, R_3 为热流分布的特征半径, r_2 为计算点到光斑中心的距离, P 为有效功率。模拟分析中, 光斑直径较大, 激光功率和焊接速率较低, 因此, 取工件对光束的吸收率为激光功率。

其它壁面定义为对流换热边界条件, 上表面及侧壁面与空气接触, 其对流传热系数为 $30\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。工件底面与支撑板紧密接触, 两者之间进行传导换热, 为了简化模型, 假设底面的对流传热系数为 $150\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

激光辅助加热搅拌摩擦焊边界条件示意图如图 2 所示。

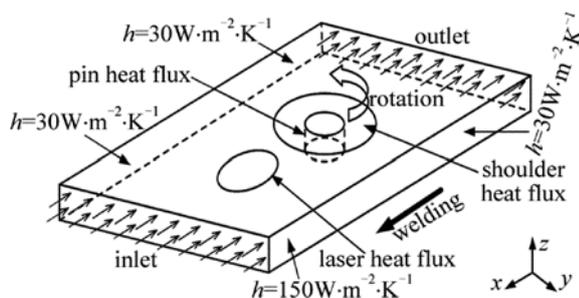


Fig. 2 Boundary conditions of laser-assisted heating FSW

2 有限元模型的建立

利用网格划分软件 ICEM CFD 对 3 维实体模型进

行网格划分, 采用均匀六面体网格技术, 生成 3 维有限元模型。为兼顾计算精度和速率, 对轴肩、搅拌针和激光壁面进行了网格加密处理。建立的有限元模型尺寸为 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 3\text{mm}$, 轴肩直径为 20mm , 搅拌针直径为 6mm 。为简化计算模型, 假设搅拌针穿透工件, 长 3mm 。激光热源位于搅拌头前方, 起到预热的作用。模拟分析中选取激光直径为 16mm , 与搅拌头之间的距离为 4mm 。建立的有限元模型如图 3 所示。

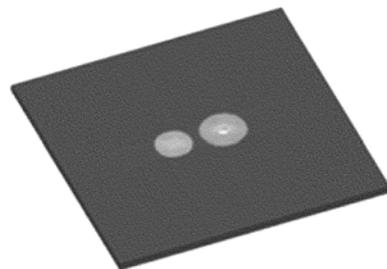


Fig. 3 Schematic of finite element model

将划分网格后的有限元模型导入 FLUENT 软件中, 仿真中用到的参量如表 2 所示。利用 UDF 将热流密度加载到轴肩、搅拌针和激光壁面边界上, 设定材料属性, 选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行计算求解。

Table 2 Simulation parameters of FSW

| parameter | value |
|---|------------|
| rotational speed $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 750 ~ 1180 |
| welding speed $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ | 23.5 ~ 45 |
| friction coefficient τ_f | 0.4 |
| tilt angle $\theta/(\text{°})$ | 0 |
| laser power P/W | 800 |
| laser spot diameter d/mm | 16 |

3 结果与讨论

3.1 材料流动场分布

搅拌头在下压力的作用下, 轴肩与工件紧密接触, 通过与工件上表面之间的滑动摩擦, 为焊接过程提供热量输入, 使搅拌头前缘的材料处于热塑性的状态, 在搅拌针搅拌及轴肩下压的作用下, 粘塑性材料沿着搅拌针外围由后退侧向前侧流动。

为了研究粘塑性材料的流动行为, 在相同焊速条件下 ($v = 23.5\text{mm}/\text{min}$), 模拟分析了不同转速对材料流动行为的影响。图中 x 轴正方向代表焊接方向, 逆时针为旋转方向。由图 4 可知, 焊速相同, 转速越高, 材料的流动性越好。这是由于转速越高, 单位时间内, 轴肩的产热量越高, 搅拌头前缘的材料剪切强度越低, 更容易受到搅拌头的影响, 在搅拌针搅动的作用下, 沿着搅拌针外侧流动。

图 5 显示了有无激光热源时, 焊接过程中材料的

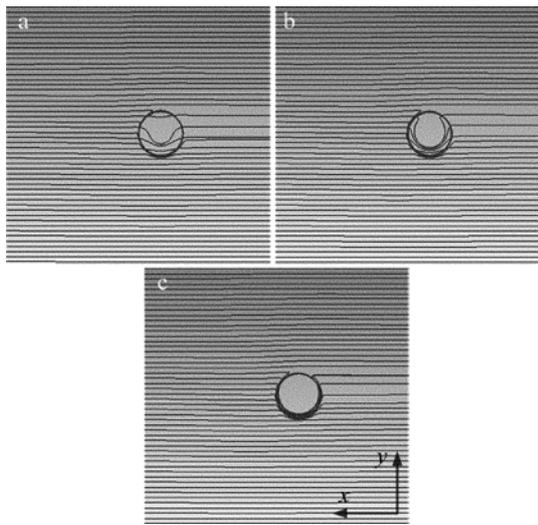


Fig. 4 Influence of rotational speed on material flow
a— $n = 750\text{r/min}$ b— $n = 950\text{r/min}$ c— $n = 1180\text{r/min}$

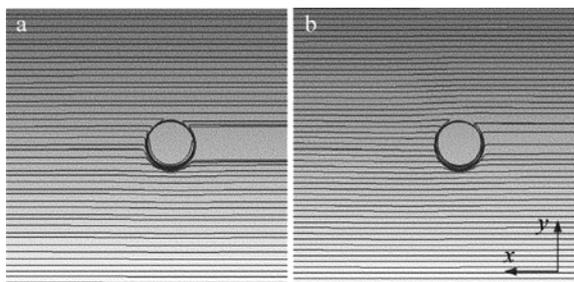


Fig. 5 Influence of laser source on material flow
a—no laser source b—laser source

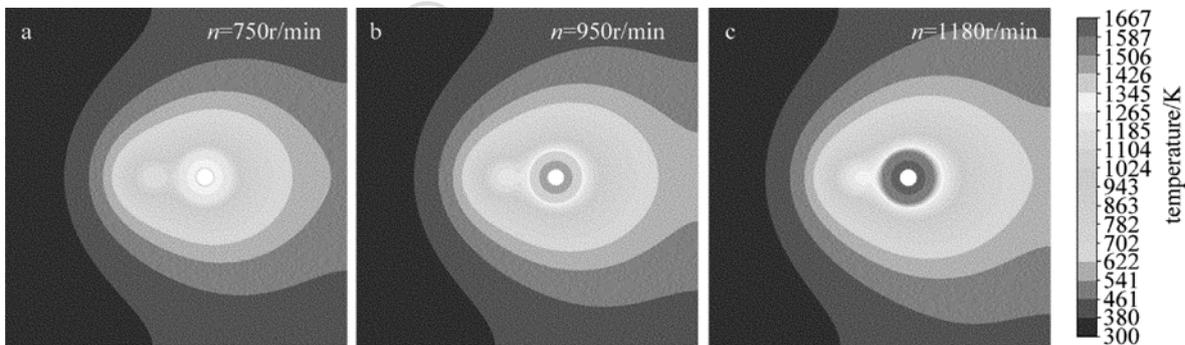


Fig. 6 Temperature contours of top surface
a— $n = 750\text{r/min}$ b— $n = 950\text{r/min}$ c— $n = 1180\text{r/min}$

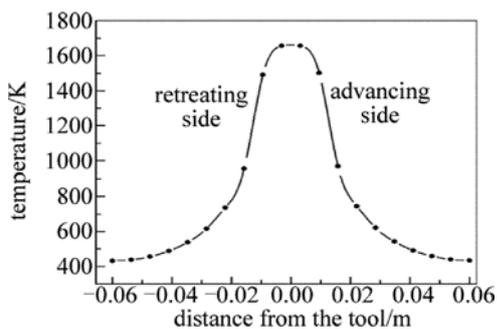


Fig. 7 Relationship between temperature of cross-section and distance
由于搅拌头的线性和旋转运动。前进侧温度比后退侧

流动曲线图。图中 x 轴正方向代表焊接方向, 逆时针为旋转方向。由图可知, 加载激光热源后, 材料的流动性更好。激光预热软化了搅拌头前进方向的工件材料, 不仅减少了搅拌针的摩擦磨损, 而且加强了材料的流动性。

由材料的流动曲线图(见图 5)可知, 粘塑性材料主要由后退侧向前进侧流动。实验过程中飞边主要发生在后退侧, 当有飞边缺陷产生时, 焊接接头的前进侧常常会伴有隧道型孔的产生。这主要是由于搅拌头前缘的材料并没有沿着搅拌针流动到前进侧, 而是溢出轴肩区域, 使得由于搅拌头的移动而在搅拌头后缘产生的空腔得不到足够的材料填充, 产生孔洞缺陷。由此也可以说明, 搅拌摩擦焊过程中, 工件材料是由后退侧向前进侧流动。

3.2 温度场分布

图 6 显示了模拟分析中转速对工件上表面温度场分布的影响。由图可知, 转速越高, 最高温度越高, 且最高温度出现在轴肩作用区。模拟获得的最高温度为 1667K, 没有超过钢的熔点。激光热源处于搅拌头热源之前, 起到预热工件的作用, 产热小于搅拌头产热。搅拌头前方的温度梯度大于搅拌头后方。

图 7 显示了 $v = 23.5\text{mm/min}$, $n = 1180\text{r/min}$ 时, 模拟分析得到的过搅拌头轴线横截面中线处的温度曲线图。由图可知, 温度曲线呈现略微的非对称性, 主要是

温度略高, 但这种非对称性可忽略不计。

4 结 论

(1) 利用计算流体力学软件 FLUENT 进行了 Q235 钢激光辅助加热搅拌摩擦焊流动场模拟仿真, 建立了激光与搅拌头双热源模型, 考虑了随温度及应变率变化的动力粘度, 获得了焊接过程的流动场及温度场分布。

(2) 焊速相同, 转速越高, 材料的流动性越好。焊接参量相同, 加载激光热源比不加激光热源, 材料的流

动性更好。模拟分析得到的最高温度出现在轴肩作用区,横截面温度场呈现非对称性,前进侧温度比后退侧温度略高,但这种非对称性可忽略不计。

参 考 文 献

- [1] WANG G H, ZHAO Y H. The friction stir welding of aluminum alloys [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 8-17 (in Chinese).
- [2] LUAN G H, NORTH T H, GUO D L, *et al.* Characterizations of friction stir welding on aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 62-66 (in Chinese).
- [3] YUAN G H, LIANG C L, LIU H, *et al.* Crystal orientation in nugget zone of friction stir welded 5083 aluminum alloy plates [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 79-82 (in Chinese).
- [4] JAGADEESHA C B. Dissimilar friction stir welding between aluminum alloy and magnesium alloy at a low rotational speed [J]. Materials Science and Engineering, 2014, A616(28): 55-62.
- [5] CHEN G Q, SHI Q Y, LI Y J, *et al.* Computational fluid dynamics studies on heat generation during friction stir welding of aluminum alloy [J]. Computational Materials Science, 2013, 79(14): 540-546.
- [6] SONG M, KOVACEVIC R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(6): 605-615.
- [7] SHEN Z K. Hybrid friction stir welding technology for steel [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011: 14-16 (in Chinese).
- [8] LUO J, CHEN W, FU G. Hybrid-heat effects on electrical-current aided friction stir welding of steel, and Al and Mg alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3002-3012.
- [9] CHOI D H, LEE C Y, AHN B W, *et al.* Hybrid friction stir welding of high-carbon steel [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(2): 127-130.
- [10] ZHANG M C, DONG J X, ZENG Y P, *et al.* Dynamical microstructure evolution of Q235 low carbon steel during high temperature deformation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(2): 183-186 (in Chinese).
- [11] LIU X X, HUANG R, YAO G, *et al.* Numerical simulation of the temperature field of laser butt welding of titanium alloy sheet [J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 700-704 (in Chinese).
- [12] HU Z R, ZHOU J Z, GUO H F, *et al.* Simulation of temperature field of laser welding by ABAQUS [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 326-329 (in Chinese).