

# 镁合金 AZ31 搅拌摩擦焊接温度场数值模拟\*

张 华 林三宝 吴 林 冯吉才

(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)

**文 摘** 针对 5 mm 厚 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接过程进行三维有限元传热分析, 并推导搅拌摩擦焊接 (FSW) 产热的数学模型, 计算 FSW 过程不同时刻和不同位置温度分布。计算结果表明: 起焊时有一个预热作用, 预热对搅拌摩擦焊接过程有利; 搅拌摩擦焊接过程中准稳态时最高温度为 460℃ 左右, 低于镁合金的熔化温度, 属于固相连接。温度场测量结果显示: 计算结果与测量结果较吻合, 说明温度场模型的建立基本符合搅拌摩擦焊接过程。

**关键词** 搅拌摩擦焊, AZ31 镁合金, 热源模型, 有限元

## Temperature Simulation of Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy

Zhang Hua Lin Sanbao Wu Lin Feng Jicai

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** A three-dimensional heat finite element modeling of friction stir welding (FSW) process on 5 mm thick AZ31 magnesium is presented and the simulation model is calculated in this paper. The temperature distribution of FSW at different position and time is calculated. Calculated results indicate that the beginning temperature has a preheat effect during FSW and the highest temperature at steady sub-state is about 460℃ and less than the alloy melt point. Therefore, FSW is a solid welding process. The measured result agrees well with the simulation results, which explains coincidence between the simulation model and FSW process.

**Key words** Friction stir welding (FSW), AZ31 magnesium alloy, Heat model, Finite element

### 1 前言

搅拌摩擦焊 (FSW) 是一种新型固相焊接工艺, 与传统的熔化焊接方法相比较, 避免了诸如凝固裂纹、气孔和氧化等缺陷, 可以获得较高质量的焊缝<sup>[1-4]</sup>。

搅拌摩擦焊的热源主要是轴肩与母材之间摩擦产热<sup>[5,6]</sup>, 另外搅拌头与母材的摩擦生热也提供一部分。对于搅拌头的产热, 与搅拌头形状有关, 过程相对复杂, 有的学者认为搅拌头产热占整个过程产热的 2% ~ 20%<sup>[7]</sup>, 故大部分学者都没有考虑搅拌

头在 FSW 过程中的产热。Y. J. Chao 与 Xinhai Qi 建立搅拌摩擦焊接产热功率的数学模型为  $Q = \frac{\pi\omega\mu F(r_0^2 + r_0r_i + r_i^2)}{45(r_0 + r_i)}$ , 不考虑搅拌头的作用, 认为  $r_i = 0$ 。上海交通大学的汪建华就是采用此数学模型进行 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接的模拟计算<sup>[8]</sup>。

本文在参考相关搅拌摩擦焊接温度场热源数学模型建立的基础上, 独立推导出能量密度公式, 利用 Marc 有限元程序进行温度场的模拟计算, 并进行温度测试验证。

收稿日期: 2003-12-11; 修回日期: 2004-04-05

\* 国家高技术研究发展专项经费资助项目: 2002AA331160

张华, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事镁合金搅拌摩擦焊接工艺及其机理的研究工作

## 2 数学模型的建立

FSW 温度场沿三个方向都有温度梯度,加上搅拌摩擦焊接过程的传递过渡特性,基于 Fourier's 2nd law 来表示搅拌摩擦焊接过程的温度场<sup>[5]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_0}{V} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为密度; $c$  为比热容; $q_0/V$  为源项。

### 2.1 求解算法

基于有限元微分,通过公式(1) 推出能量密度公式,采用不等网格分割方法,提高热流计算的准确度。模型认为热源沿  $x$  方向移动,如图 1、图 2 所示。

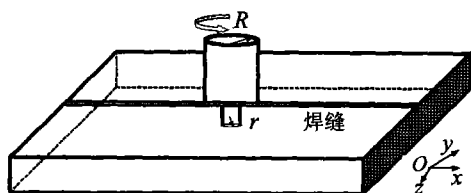


图1 FSW 过程轴肩与工件相对运动示意图

Fig. 1 Shoulder move along the workpiece

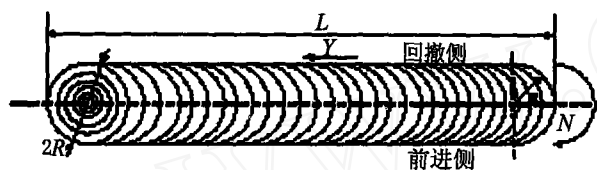


图2 搅拌摩擦焊接接头外观示意图

Fig. 2 Schematic of FSW

### 2.2 FSW 过程轴肩产热

如图 1 所示的理想状态时,在轴向压力的作用下,使搅拌头旋转所用的扭矩为<sup>[5]</sup>:

$$\int_0^{M_R} dM = \int_0^R \mu P(r_i) 2\pi r_i^2 dr = \frac{2}{3} \mu \pi P R^3 \quad (2)$$

式中, $M$  为扭矩; $\mu$  为摩擦系数,虽然摩擦系数在 FSW 过程中随着温度的变化而改变,为简化计算,假定焊接过程保持一个恒定的平均值; $0 \leq r_i \leq R$ , $R$  为轴肩半径, $P(r_i)$  为轴向压力,此处假设均匀分布于轴肩和母材之间。

如果轴肩产生的所有机械能都转为摩擦热,则每一区域和单位时间的平均热输入为:

$$q_0 = \int_0^{M_R} \omega dM = \int_0^R \omega 2\pi \mu P r^2 dr \quad (3)$$

宇航材料工艺 2004 年 第 6 期

式中, $q_0$  为净能量; $\omega$  为搅拌头角速度。

角速度与旋转速度  $N$  之间的关系为  $\omega = 2\pi N$ , 根据公式(3),可得

$$q_0 = \int_0^R 4\pi^2 \mu P N r^2 dr = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \quad (4)$$

从公式(4) 可以看出,热输入与旋转速度及轴肩的半径有关。 $q_0$  为单位时间内的输入热量,焊后接头外观如图 2 所示,焊接速度为  $V$ ,总长为  $L$ ,轴肩半径为  $R$ ,则面能量密度( $E_s$ ) 为

$$\begin{aligned} q_s &= \frac{q_0 t}{S} = \frac{\frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \frac{L-2R}{V}}{(L-2R) \times 2R + \pi R^2} \\ &= \frac{4\pi^2 \mu P N (L-2R) R^2}{(L-2R) \times 6V + 3\pi R V} \end{aligned} \quad (5)$$

### 3 模型的网格划分

为了更好地描述数学模型中热源的产生,将热源分为固定数量的网格。每一个网格的热量  $\Delta q_0$  根据结点数的多少可以求得,则 FSW 过程的产热可以计算得出。由于沿  $x$  轴对称,为简化计算过程,只采用一半工件进行温度场有限元数值模拟。

轴肩直径 22 mm, 3-D 模型长 360 mm、宽 50 mm、厚 5 mm、旋转速度为 900 r/min,焊接速度为 2 mm/s,计算步长为 0.025 s,保证足够的计算精度。整个模拟过程 180 s。

在求解过程中,由于试件(镁合金 AZ31) 表面主要是靠辐射散热,与热传导散热相比,辐射散热比例很小,故可以忽略不计。试样一般固定在不锈钢垫板上,底部主要靠热传导散热,采用比较大的热导率,其物理性能如表 1 所示。

表 1 镁合金 AZ31 热物理性能

Tab. 1 Thermal physical properties of AZ31 Mg

密度	热导率	比热容	线膨胀系数	弹性模量
$/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$/10^{-6} \text{K}^{-1}$	$/\text{GPa}$
1.78	100(100℃)	1 130(100℃)	26(20℃)	0.43(100℃)

### 4 计算结果分析

#### 4.1 不同时刻和不同位置的温度分布

焊接过程准稳态的温度场分布如图 3(a) 所示。焊缝中心最高温度为 463.0℃。焊接过程不同时刻的温度分布见图 4。

焊缝中心上部比下部宽,如图3(b)所示。摩擦热对FSW过程的预热作用明显,最近处预热温度可以达到 $400^{\circ}\text{C}$  ( $y = 7\text{ mm}$ )左右,即使离轴肩很远的位置( $y = 23\text{ mm}$ )预热也可以达到 $266^{\circ}\text{C}$ ,如图4(b)、(c)所示。预热可以更利于焊接工具的移动及保证材料达到充分塑性状态。

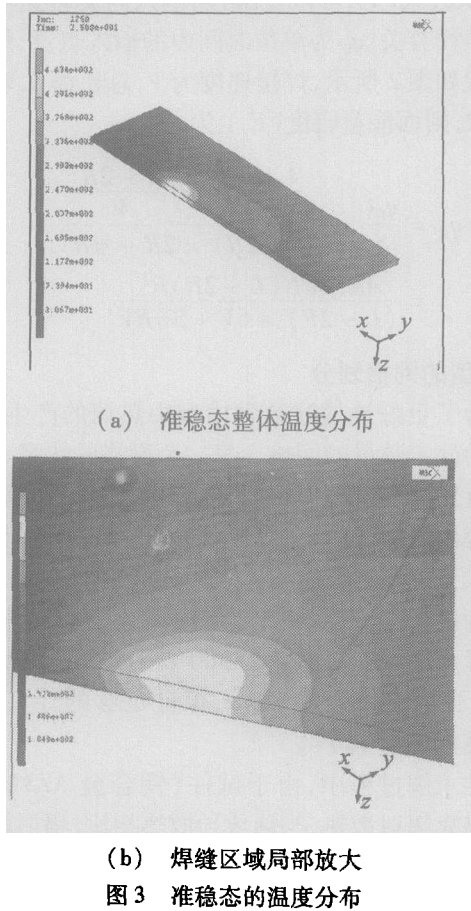


图3 准稳态的温度分布

Fig. 3 Temperature distributions at sub-steady state

由图4(a)知,焊缝后部的温度高于起焊时的温度。起焊位置最高温度为 $350^{\circ}\text{C}$ ,焊接一段时间后达到最高温度。 $x = 60\text{ mm}$ 处的最高温度为 $426^{\circ}\text{C}$ ,相邻两点之间的最高温度差为 $76^{\circ}\text{C}$ 。依次每隔 $60\text{ mm}$ 最高温度升高 $40^{\circ}\text{C}$ 左右。说明镁合金FSW过程对前部的预热作用显著。

由图4(b)可知,远离焊缝 $23\text{ mm}$ 处的最高温度( $266^{\circ}\text{C}$ )比焊缝中心温度( $463^{\circ}\text{C}$ )约低 $200^{\circ}\text{C}$ ;距离焊缝 $8\text{ mm}$ 处最高温度 $387^{\circ}\text{C}$ ;距离焊缝 $15\text{ mm}$ 处最高温度为 $326^{\circ}\text{C}$ 。其温度随时间的变化趋势一致。准稳态时这四个点的温度几乎一致,热扩散达到均衡。

— 60 —

图4(c)趋势与(b)的相同。搅拌头在 $x = 150\text{ mm}$ 处摩擦旋转,故在 $x = 150\text{ mm}$ 时均有一个最高温度值。已经焊完的接头部分温度维持在 $230^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 左右,轴肩对FSW过程的预热随着距离轴肩位置的增加而明显下降, $180\text{ mm}$ 处的温度只有 $120^{\circ}\text{C}$ 左右,而此后焊缝处的温度基本维持在室温。

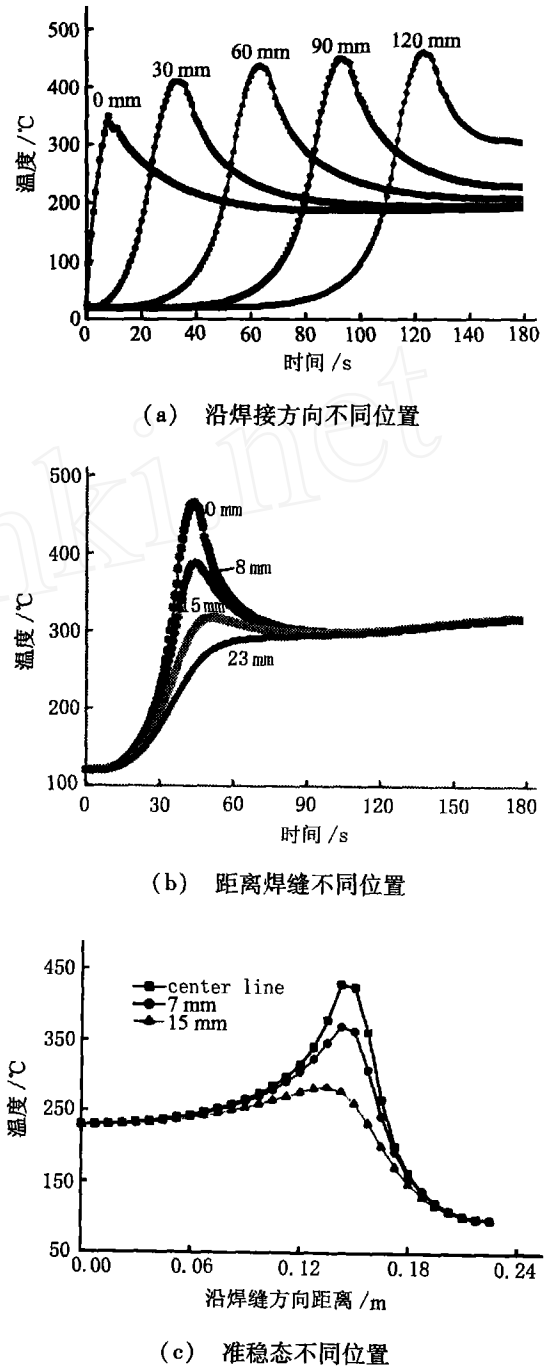


图4 焊接过程不同时刻的温度分布

Fig. 4 Temperature distributions at different welding time

宇航材料工艺 2004年 第6期

由于热传导作用,FSW 过程受到预热作用,沿着焊缝方向焊接最高温度存在稍微升高的趋势,但变化不大,说明温度场热源模型的建立与实际情况相吻合,除焊接起焊阶段需要一个热量的累加之外,焊接过程最高温度比较稳定。

#### 4.2 温度场测量结果

试验采用 5 mm 厚 AZ31 镁合金进行 FSW 过程温度场的测量,热电偶 ( $\Phi 0.2$  mm, K 型 NiCr - NiAl) 分布如图 5(a) 所示,焊接参数分别为 900 r/min 和 2 mm/s,测量结果见图 5(b)。由图可知,随着焊接过程的进行,沿焊缝方向焊接的最高温度稍有升高。距离焊缝中心 15 mm、最高温度为 362℃,与计算的结果吻合[见图 4(b)、(c)]。

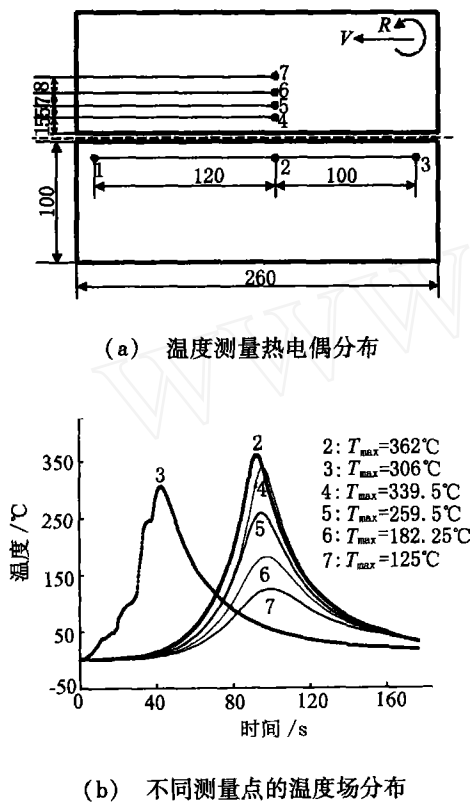


图 5 温度场测量结果

Fig. 5 Temperature distributions at different test area

图 5(b) 中的 2、3 点热电偶的温度有一个 56℃ 的温度差,与计算结果图 4(a) 温度变化趋势一致。2、4 点沿焊缝中心对称分布,其温度有很小的差别,

2 点的温度相对高些,这是因为 2 点处于回转头,搅拌头螺旋线和材料的运动方向相反,热塑性材料挤压摩擦变形产热比前进面作用明显。

#### 5 结论

(1) 成功地引入三维热有限元分析方法,推导出一个搅拌摩擦焊接传热计算模型,并推导出计算温度场所必需的面能量密度公式。

(2) 计算结果表明,对于 5 mm 厚 AZ31 镁合金,起始阶段轴肩对 FSW 过程有一个预热作用,起焊最高温度相对低些,需要停留一定时间产生足够的热量和塑性流体。预热对搅拌摩擦焊接过程有利。焊接过程最高温度维持在 460℃ 左右,低于镁合金的熔化温度,属于固相连接,与实际焊接过程相符。

(3) 温度场测量结果显示,计算结果与测量结果相吻合,说明温度场模型的建立基本符合搅拌摩擦焊接过程。

#### 参考文献

- 1 Thomas W M, Nicholas E D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design*, 1997; 16(4/6): 269
- 2 Karl-erik K, Bertil P. Friction stir welding process goes commercial. *Welding Journal*, 1997; 76(9): 55
- 3 Dawes C J. Causing a stir in welding circles. *Sheet Metal Industries*, 1995; 72(9): 22
- 4 Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding Journal*, 1996; 75(3): 41
- 5 Frigaard O. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2001; 32(5): 1 189
- 6 Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003; 43(6): 605
- 7 Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003; 46(6): 605
- 8 汪建华,姚舜,魏良武等. 搅拌摩擦焊接的传热和力学计算模型. *焊接学报*, 2000; 21(4): 60

(编辑 李洪泉)