

引用格式: 李金哲, 王琪, 张鹏. 6061 铝合金/AZ31 镁合金异种金属搅拌摩擦焊温度场的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2024, 53(9): 59-63.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20213559
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

6061 铝合金/AZ31 镁合金异种金属搅拌摩擦焊 温度场的数值模拟

李金哲, 王琪, 张鹏

(太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 使用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立了 6061 铝合金/AZ31 镁合金异种金属搅拌摩擦焊的三维传热模型, 实现了搅拌摩擦焊温度场的模拟, 并分析了焊接速度、搅拌头转速参数对温度分布的影响。结果表明: 焊接过程中高温区域温度场呈椭圆状分布, 温度最高处位于搅拌头后方镁板侧, 且轴肩接触处的尤为突出。随着焊接速度的增加、搅拌头转速的减小, 高温区域的面积减小, 峰值温度明显降低。焊接速度比搅拌头转速对温度场的影响更为显著。

关键词: 搅拌摩擦焊; 传热模型; 6061 铝合金; AZ31 镁合金; 温度场

中图分类号: TG453⁺.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)09-0059-05

Numerical Simulation of Temperature Field in Friction Stir Welding of 6061 Al Alloy/AZ31 Mg Alloy Dissimilar Metals

LI Jinzhe, WANG Qi, ZHANG Peng

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The three-dimensional heat transfer model of friction stir welding of 6061 Al alloy/AZ31 Mg alloy dissimilar metals was established by COMSOL Multiphysics finite element software, and the temperature field of the friction stir welding was simulated. And the influence of the welding speed and rotation speed of the stirring head on the temperature distribution was analyzed. The results show that the temperature field of the high temperature area is elliptically distributed during the welding process. The highest temperature is located at the side of the magnesium plate behind the stirring head, and the temperature of the contact area at the shaft shoulder is particularly prominent. With the increase of welding speed or the decrease of rotation speed of the stirring head, the area of the high-temperature region decreases, the peak temperature decreases obviously. The effect of welding speed on the temperature field is more significant than that of the rotation speed.

Key words: friction stir welding; heat transfer model; 6061 aluminum alloy; AZ31 magnesium alloy; temperature field

异种金属焊接构件可利用材料的各自优点, 获得更好的经济效益^[1]。搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是一项固态焊接技术, 可避免母材发生宏观熔化, 杜绝了气孔、热裂纹等缺陷, 具有噪声低、污染小^[2-3]、接头强度高^[4-5]、绿色环保等优势, 在铝合金构件的制造中得到了广泛应用^[6-7]。Song 等^[8]建立了搅拌摩擦焊的三维传热模型, 通过使用固定在搅拌头上的移动坐标系降低了模拟难度, 使复杂的传热问

题变成了易于模拟的稳态对流传导问题。刘震磊等^[9]基于 ABAQUS 软件模拟镁、铝合金的搅拌摩擦焊接, 重点研究了搅拌针不同偏置位置对于搅拌区温度峰值以及焊缝表面成形的影响。卢翔等^[10]建立了搅拌摩擦焊摩擦产热的热输入模型, 通过 ABAQUS 软件模拟钢、铝异种材料的搅拌摩擦焊接, 重点研究了板材温度场的分布规律, 分析了搅拌头偏置位置及焊接参数对接头温度场的影响。周文静等^[11]利用 COMSOL 软件建立了三维传热模型, 对同种铝合金搅拌摩擦焊接的温度场进行了模拟, 研究了焊速、转速对于工件温度场的影响。高恩志等^[12]基于流体力学 CFD 理论, 建立搅拌摩擦焊接热流耦合模型对焊接过程中的温度场进行模拟, 并对材料流动情况进行分析, 但模型中使用的流体材料并不

收稿日期: 2021-12-26

作者简介: 李金哲(1995-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要研究方向: 铝合金搅拌摩擦焊接工艺;

E-mail: 18435138298@163.com

通讯作者: 王琪(1964-), 女, 北京人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 机械设计及理论; E-mail: wqmqngp@163.com

能代替实际焊接中所用的材料。

本文使用 COMSOL Multiphysics 软件对 6061 铝合金 /AZ31 镁合金异种材料搅拌摩擦焊接进行温度场的模拟,模拟焊接时温度的稳态分布情况并分析原因,同时对焊速、转速等工艺参数对温度场的影响进行研究。

1 模型的建立

1.1 几何及材料属性

所焊异种材料为 6061 铝合金及 AZ31 镁合金,尺寸为 180mm×60mm×8mm,连接方式为搅拌摩擦焊对接工艺。6061 铝合金、AZ31 镁合金的热物理性能参数分别见表 1、2。

表 1 6061 铝合金的热物理性能参数^[13]

Tab.1 Thermal physical properties of 6061 Al alloy^[13]

温度 T/K	298	310.8	421.9	477.4	533	588.6	644.1	699.7	842.3
比热容 $c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	896	920	1004	1028	1052	1078	1104	1142	1155
热导率 $k/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	167	170	184	192	201	207	217	223	243

表 2 AZ31 镁合金的热物理性能参数^[14]

Tab.2 Thermal physical properties of AZ31 Mg alloy^[14]

温度 T/K	293	373	473	573	673	778
比热容 $c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1130	1172	1214	1256	1299	1341
热导率 $k/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	96	100	104	111	119	128

搅拌摩擦焊几何模型如图 1 所示,轴肩半径为 12mm,搅拌针半径为 4mm,焊接速度为 2.2mm/s,转速为 750r/min,轴肩下压力为 12kN。

1.2 热源模型

该模型使用固定在搅拌头轴上的移动坐标系,通过对工件内部添加对流热量项从而捕捉搅拌头的运动,即使用具有相同进给速度的参照对模型简化,同时忽略搅拌针的压入阶段。搅拌摩擦焊接过程中,主要有摩擦产热、金属塑性流动产热等过程对生热做出贡献^[15],本文对所建立的热源模型做出以下假设:①摩擦功全部转化为热能;②焊接过程中相变潜热较少,因此忽略;③忽略材料的搅拌过程。

摩擦热主要由两部分组成:搅拌头轴肩与工件界面处的摩擦及搅拌针表面与工件内部的摩擦。当工件温度低于熔化温度时,搅拌头轴肩距中心 r 处的热流密度 q_s 及搅拌针与工件接触界面的热流密

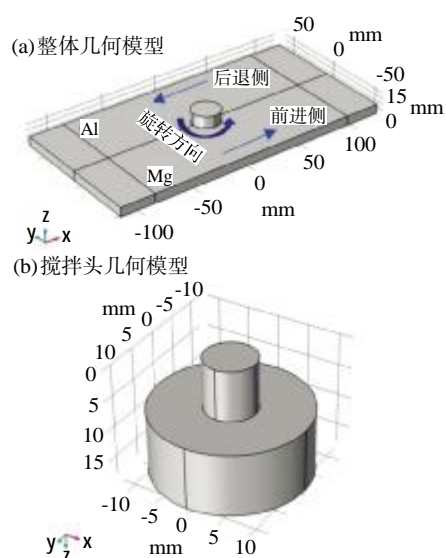


图 1 搅拌摩擦焊几何模型

Fig.1 Geometric model of friction stir welding

度 q_p 分别为:

$$q_s = \frac{\mu F_n}{A_s} \times r \omega \quad (1)$$

$$q_p = \frac{\mu}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} \times r_p \omega \bar{Y}(T) \quad (2)$$

式中: μ 为工件所受的摩擦系数; F_n 为工件所受压力; A_s 为轴肩与工件接触表面积; ω 为转速; r_p 为搅拌针半径; $\bar{Y}(T)$ 为工件屈服强度。当搅拌区域温度接近工件熔点的某温度区间,摩擦系数减小,搅拌头与板材的摩擦减少,焊接逐渐达到稳态。

1.3 网格划分

模型采取内置物理场网格划分,其中工件部分及轴肩区域网格为自由四边形网格,搅拌针网格为自由四边形网格,如图 2 所示。

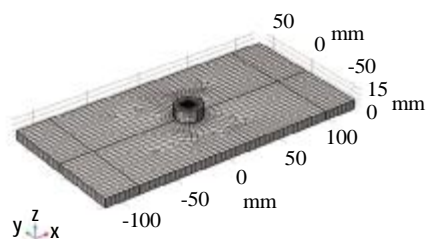


图 2 模型网格划分

Fig.2 Meshing of the model

1.4 边界条件

焊接过程中,搅拌头的局部产热使板材温度分布不均匀。工件自身发生热量传递并与周围介质(空气)发生热交换,其热传导由傅里叶方程控制:

$$\rho C_p(T) \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot [-k(T) \cdot \nabla T] = Q \quad (3)$$

式中: ρ 为板材密度; C_p 为比热容; k 为热导率; \vec{u} 为焊接速度; Q 为热源。

焊接过程中,工件焊接局部高温区域与低温区域以及外界接触介质的热传导是以自然对流及表面对环境辐射的方式进行的,而由于辐射造成的热损失较少,因此焊接过程中的热损失主要来自工件上下表面的自然对流,由纽曼条件方程进行控制,公式如下:

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (4)$$

式中: h 为对流传热系数; T_{ext} 为相关参考温度。为确保温度仅通过自然对流和表面辐射与无限远处的平衡,并忽略工件边缘对搅拌区域温度场的影响,在工件前后端引入无限元域,将出口处定义为环境温度300K。

2 模拟结果分析

2.1 温度场模拟结果分析

工件在焊接速度2.2mm/s、转速750r/min参数下的整体温度云图如图3所示(彩图见电子版,下同)。可以看出,工件最高温度位于搅拌头后方区域,达到846K,为镁合金工件熔点的91.66%,且温度分布较为均匀。在搅拌头的前方,高温区域的形状较窄,并且温度低于搅拌头后方区域的。这主要是由于在焊接过程中摩擦产热主要来源于搅拌头与工件间的摩擦,并且在热传导的作用下内部温度均匀地向周围传导,而搅拌头前方随着新材料的变形使得温度有所降低。

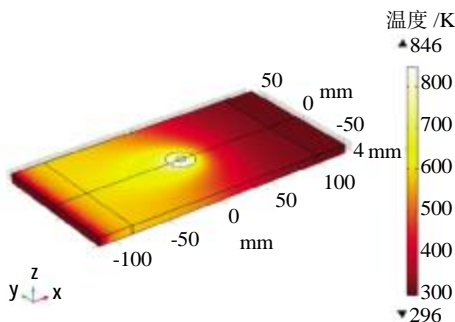


图3 工件的温度云图
Fig.3 Temperature cloud diagram of the workpiece

图4为搅拌头轴心后方8mm处工件横截面的温度云图。从图中清晰看出由焊缝向母材过渡的过程中温度逐渐降低,且镁板侧温度略高于与焊缝呈对称位置处铝板的温度。结合图3可知,焊接过程中温度最高处位于搅拌头后方镁板侧热影响区,且与

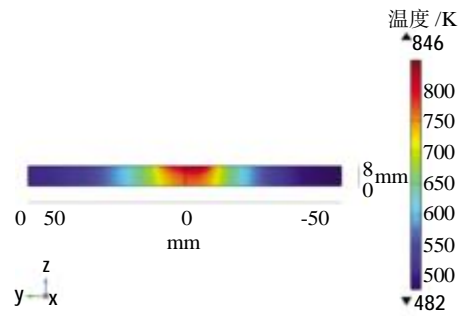


图4 工件横截面的温度云图

Fig.4 Temperature cloud diagram of workpiece cross section

轴肩接触处尤为突出。这主要是由于镁合金工件热导率低于铝合金的,而搅拌头轴肩与工件的摩擦为主要产热源,低热导率致使该处热量无法及时向周围传递,造成热量集中。这也是造成实际焊接过程中接头处镁侧易产生缺陷的重要原因。

焊接过程中工件的温度等值面图如图5所示。工件与搅拌头接触界面温度最高,搅拌头前方的等值面较致密,温度梯度较大,而后方的等温线呈椭圆形分布,且相对稀疏。这主要是由于工件受到搅拌作用,内部材料受热塑性形变并被甩向后方,越远离搅拌头处,曲率越大。工件Mg侧的温度等值面比Al侧的较为密集,这也是由于镁合金较低热导率所致。

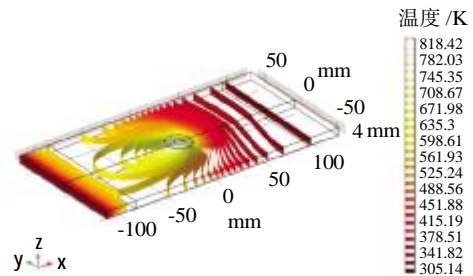


图5 工件的温度等值面图

Fig.5 Temperature isosurface of the workpiece

2.2 工艺参数的改变对温度场的影响

当搅拌头转速为750r/min,改变焊接速度时,工件的温度云图如图6所示。焊接速度为2.0、2.2、2.4、2.6mm/s的工件峰值温度分别为866、846、829和815K,温度场呈椭圆状,且随着焊接速度的增加,高温椭圆区域面积明显减小,曲率发生明显变化,峰值温度明显降低,热影响区范围逐渐减小。

保持焊接速度为2.2mm/s,改变搅拌头转速时,工件的温度云图如图7所示。工件峰值温度与搅拌头转速呈正相关,700、750、800、850r/min转速下的工件峰值温度分别为814、846、878、910K,而当峰值温度达到910K时,工件可能会出现部分熔化。由

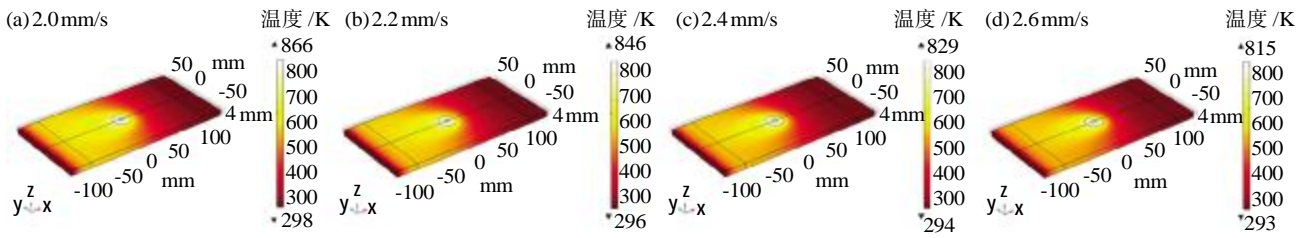


图6 不同焊接速度下工件的温度云图

Fig.6 Temperature cloud diagram of the workpiece under different welding speeds

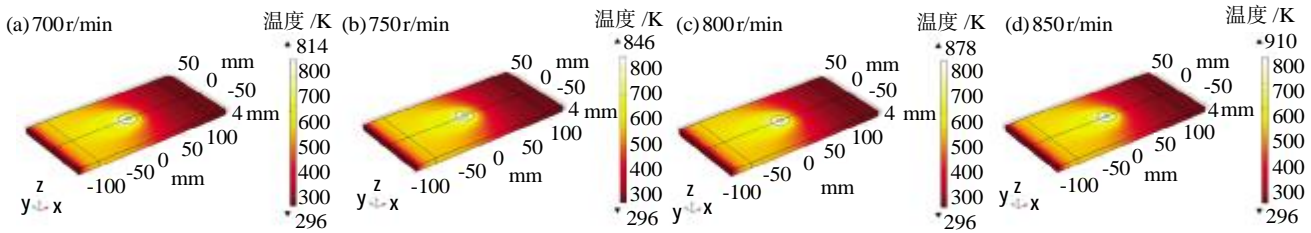


图7 不同转速下工件的温度云图

Fig.7 Temperature cloud diagram of the workpiece at different rotating speeds

于转速的增加,焊接过程中的热流密度变大,因此整体温度有所提高,但椭圆状温度场的曲率并无明显变化。结合图6可知,在搅拌摩擦焊接过程中,焊接速度对温度场的影响比转速对温度场的影响更加显著,故在实际焊接操作中,为避免因温度过高引发的接头缺陷,需优先考虑焊接速度的合理性。

由上述可知,在搅拌摩擦焊接过程中,焊接速度的变化对工件的温度场有更明显的影响。图8(a)、(b)分别为焊接速度不同时搅拌头轴心所在截面的温度变化曲线。由图可以看出,不同焊接速度下的

温度曲线具有一定相似性,搅拌头后方温度变化较为平缓,温度在搅拌头热影响区达到峰值。随着焊接速度的增加,横截面上不同位置的温度均有所下降,且该差值沿y方向在轴肩区域即 $-12\text{ mm} < y < 12\text{ mm}$ 范围内较大。在该范围内前进侧温度普遍高于后退侧温度,两侧对称位置的温度差值保持在 $18\sim 36\text{ }^\circ\text{C}$ 之间且该差值在距搅拌头轴心6 mm处达到最大。这主要是由于搅拌头在前进侧与工件的压力较大会产生较大的摩擦力,而摩擦产热为搅拌摩擦焊接过程中主要的热源贡献。

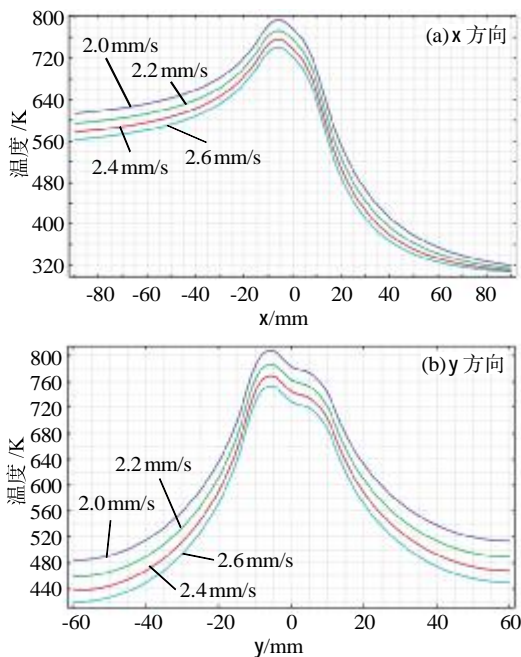


图8 不同焊接速度下沿x,y方向的温度变化曲线
Fig.8 Temperature curves along the x and y directions at different welding speeds


3 结论

(1) 镁铝异种合金焊接过程中温度最高处位于搅拌头后方镁板侧,这主要是镁合金热导率较低导致热量集中。这也是造成实际焊接过程中接头处镁侧易产生缺陷的重要原因。

(2) 搅拌头后方的温度场呈椭圆状,且随着焊接速度的增加,高温椭圆区域面积减小,曲率发生明显变化,热影响区范围逐渐减小,焊接速度对温度场的影响比转速的影响更加显著。

参考文献:

- [1] 王恒,刘黎明,柳绪静. 镁铝异种材料 TIG 焊接接头扩散行为分析[J]. 焊接学报,2005(7):5-8.
- [2] 韩锐,刘其鹏,高月华,等. 型材结构搅拌摩擦焊全热力耦合仿真分析[J]. 塑性工程学报,2019,26(4):293-299.
- [3] 于海静,白志富,王国庆,等. 铝合金搅拌摩擦焊在 NASA 的研究与应用[J]. 航天制造技术,2019(1):1-6.

- [4] 朱树红,夏罗生,欧学卫. 基于复合搅拌摩擦焊的6063铝合金焊接接头残余应力控制研究[J]. 热加工工艺,2018,47(7):215-217.
- [5] 侯振国,钮旭晶,李充,等. 搅拌摩擦焊技术在高速列车制造中的应用[J]. 电焊机,2018,48(3):32-36.
- [6] 王昌盛,熊江涛,李京龙,等. 2024铝合金搅拌摩擦焊焊缝区疲劳过程中的温度演变[J]. 材料工程,2015,43(9):53-59.
- [7] 栾国红. 搅拌摩擦焊技术在轨道列车制造中的应用[J]. 焊接,2015(1):7-12.
- [8] Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2003,43(6):605-615.
- [9] 刘震磊,崔祐涛,姬书得,等. 温度峰值影响6061铝/AZ31B镁异种材料FSW接头成形的规律[J]. 焊接学报,2016,37(6):23-26.
- [10] 卢翔,邵良臣,李志勇,等. DP590钢/AA6061-T6铝合金异种金属对接搅拌摩擦焊温度场的数值模拟[J]. 热加工工艺,2021,50(1):151-155.
- [11] 周文静,杜柏松,卢小明. 铝合金搅拌摩擦焊温度场数值模拟及参数影响分析[J]. 热加工工艺,2021,50(7):156-160.
- [12] 高恩志,尹治利,刘冰洋. 基于计算流体力学的搅拌摩擦焊数值模拟[J]. 沈阳航空航天大学学报,2016,33(6):49-53.
- [13] Mohammad R, Hamidreza N. Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2011,55(1/4):143-152.
- [14] 陈影. 铝合金5083/镁合金AZ31异种金属搅拌摩擦搭接焊及连接机理研究[D]. 大连:大连交通大学,2012.
- [15] 朱金芳. A356铝合金搅拌摩擦焊接热力耦合分析[J]. 特种铸造及有色合金,2015,35(8):813-817. 

(上接第58页)

- [6] Du Lin, Li Weijuan, Zhao Shengshi, et al. Internal Friction Study of Aging Hardening and Kinetics in Low Carbon Steel [J]. Procedia Engineering,2017,207:645-650.
- [7] Huang Z Y, Wagner D, Wang Q Y, et al. A low cycle fatigue model for low carbon manganese steel including the effect of dynamic strain aging[J]. Materials Science and Engineering A,2016,654:77-84.
- [8] Mishet'yan A R, Phillipov G A, Chevskaya O N. Effect of strain aging on the rate dependence of the strain resistance and the cold resistance of low-carbon steels with ferritic-pearlitic and bainitic structures [J]. Russian Metallurgy (Metally),2021(10):1284-1288.
- [9] 汤文杰,何煜天,牟战旗. 碳含量及铝+硼复合添加对低碳钢抗时效性能的影响[J]. 机械工程材料,2020,44(6):54-58.
- [10] Huang Ankang, Wang Zhigang, Yuan Qiangqiang, et al. Study on serration flow and dynamic strain aging of Cr-Ti-B low-carbon steel [J]. Journal of Materials Research and Technology,2021,12:1543-1551.
- [11] 胡燕慧,孔凡庆,滕华湘,等. 卷取温度对低碳铝镇静钢热镀锌板抗时效性能的影响[J]. 钢铁,2013,48(11):57-59.
- [12] 李雯. 快速加热后冷轧低碳钢的时效特性[J]. 金属热处理,2019,44(5):148-152.
- [13] 邝春福,张深根,李俊,等. 快速热处理对低碳钢烘烤硬化性能的影响[J]. 材料研究学报,2014,28(4):262-268.
- [14] 康永林. 现代汽车板工艺及成形理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [15] 沈中城,张进峰,严勇健,等. 精密扭摆内耗仪的研究进展及其钢中固溶碳测定 [J]. 上海交通大学学报,2010,44(5):683-686. 