

锂电池包箱体用 7003 铝合金 FSW 焊接工艺的仿真及其性能分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.04.003

毛成¹ 文朝晖¹ 高平平²
潘云³ 陈磊² 陈爽²
孙小刚² 吴安如²

1. 三一重工股份有限公司
泵送研究院

湖南 长沙 410090

2. 湖南工程学院

湖南省汽车动力与传动系统

重点实验室

湖南 湘潭 411104

3. 广州汽车集团股份有限公司

汽车工程研究院

广东 广州 511434

摘要: 以锂电池包箱体用 7003 铝合金为焊接对象, 采用搅拌摩擦焊 (FSW) 工艺进行接头焊接, 利用有限元软件 SYSWELD 对箱体铝合金板焊接过程进行模拟仿真, 并对比分析了模拟仿真与实际焊接实验的效果。结果表明: 当焊接速度为 3 mm/s 时, 搅拌头转速为 2 100~2 500 r/min 可以满足焊接工艺要求; 实际焊接实验结果与模拟仿真结果吻合, 焊接接头金相组织性能均匀, 固溶 490 °C /3 h 和人工时效 180 °C /12 h 后, 接头抗拉强度为 369.2 MPa, 延伸率为 7.6%。

关键词: 搅拌摩擦焊; 7003 铝合金; SYSWELD; 力学性能

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2020)04-0015-07

引文格式: 毛成, 文朝晖, 高平平, 等. 锂电池包箱体用 7003 铝合金 FSW 焊接工艺的仿真及其性能分析 [J]. 2020, 12(4): 15-21.

1 研究背景

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是一种固相连接工艺^[1], 1991 年由英国焊接研究所创造^[2]。FSW 是铝及铝合金、镁合金、铜合金、锌合金等材料的同种或异种焊接常用工艺, 广泛应用于航天筒体结构件、航空薄壁结构件、船舶宽幅带筋板、高速列车车体结构件、大厚度雷达面板、汽车轮毂、集装箱型材壁板、各种结构散热器及热沉器等^[3-7]。此焊接过程中材料不会发生熔化, 因而可以避免因金属熔化产生的焊接裂纹、气孔等缺陷^[8]。利用高速旋转的焊具与工件之间摩擦产生的热量使被焊的材料局部熔化, 当焊头沿着设定好的焊接路径行进时, 焊头的转

动摩擦力会使被塑性化的材料由焊头的前部流向后面, 并在焊具的挤压下形成致密的固相焊缝。焊接原理图如图 1 所示^[8]。

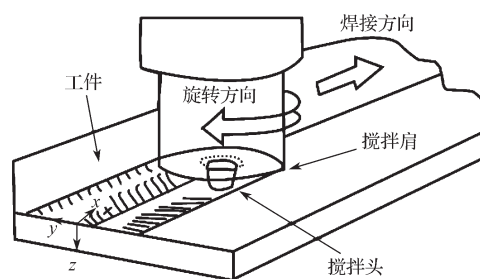


图 1 FSW 焊接原理图

Fig. 1 FSW welding schematic diagram

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ5100), 湖南省教育厅科研基金资助项目 (16B058)

作者简介: 毛成 (1985-), 男, 贵州贞丰人, 三一重工股份有限公司工程师, 博士, 主要研究方向为轻量化材料与设备, E-mail: fengyun_gao@126.com

通信作者: 文朝晖 (1968-), 男, 湖南益阳人, 三一重工股份有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为材料表面改性, E-mail: 65422713@qq.com

20世纪70年代以来,模拟仿真技术在焊接上的应用得到大量的研究,并取得了一系列的成果。例如,日本的熊新雄教授致力于热弹塑性焊接研究,创立了“计算焊接力学”这一新学科,并发表了焊接力学专著。焊接模拟仿真技术主要的研究对象是焊接热循环过程、母材与焊缝的冶金过程、焊后的变形和残余应力。对于焊接热循环的分析主要包括焊坡口形式、焊接热源的种类(即焊接方法)及其结构尺寸、材料的热物理性能变化、焊接工艺的选择和边界条件的确定等。有些学者从事焊接过程的数值分析研究,发现当电流为高斯分布时的电弧压力场分布规律,随后建立了电弧传热传质模型。《焊接热过程与熔池形态》著作的出现,标志着焊接过程数值分析基本完善^[9-11]。

现在,焊接数值模拟技术已有很大的突破,模拟技术基本能展现焊接时的各个方面,如焊接热循环、焊缝与母材的相变、熔池流体力学、焊后变形和残余应力等,为焊接过程的仿真研究奠定了基础。同时,焊接数值模拟软件的集成化、专业化、工程化使软件操作更加简便,仿真结果准确性更高。为降低焊接时的工艺损耗,本课题组拟采用有限元软件 SYSWELD 模拟锂电池包箱体用 7003 铝合金挤压板材的 FSW 焊接工艺,并从仿真准确度和材料性能两个方面对模拟结果与实际焊接结果进行对比,以期为焊接仿真分析提供参考。

2 实验

2.1 材料和仪器

7003 铝合金挤压板材:厚度为 1.5 mm,其具体化学成分如表 1 所示。

表 1 7003 铝合金挤压板材的主要化学成分
Table 1 Chemical composition of the 7003 alloys

成分	Zn	Mg	Cu	Zr	Cr
质量分数 /%	5.00~6.50	0.50~1.00	≤ 0.20	0.05~0.25	≤ 0.20
成分	Mn	Ti	Fe	Si	
质量分数 /%	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.35	≤ 0.30	

光学显微镜,DMI2500M,德国徕卡公司;扫描电子显微镜,JSM 6360-LV型,日本电子株式会社。

2.2 仿真实验

7003 铝合金挤压板材的网格模型如图 2 所示。仿真时,设置室温为 25 °C,7003 铝合金成分见表 1。7003 铝合金 FSW 焊为一条焊缝,因而只需创建焊接

路径的原始曲线和辅助曲线(如图 3 所示),并将焊接路径载入 SYSWELD 软件中。图中 z 轴为焊接方向, y 轴为搅拌头进入工件方向, x 轴为焊缝宽度方向。

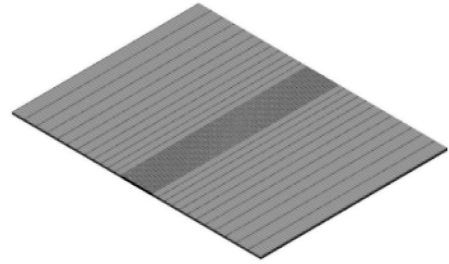


图 2 模型和网格划分

Fig. 2 Establishment and grid division of welding model

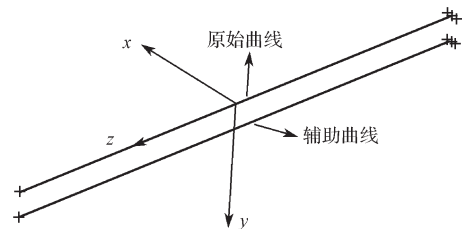


图 3 焊接路径的设置

Fig. 3 Setting of welding path

FSW 的热源是平面热源与体热源的结合,因此本仿真采用 SYSWELD 软件中的 3D 热源模型,如图 4 所示。与一般平面热源模型相比,3D 热源模型在平面热源的基础上还考虑了深度方向上的能量吸收,所以 7003 铝合金挤压板材的 FSW 仿真用 3D 热源模型能够获得更为精准的模拟结果。

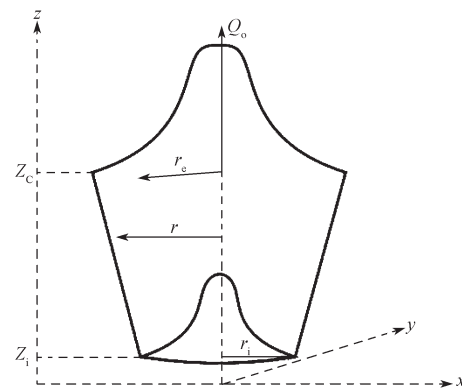


图 4 焊接过程的 3D 热源模型

Fig. 4 3D heat source model for welding process

在 SYSWELD 软件中,先设置焊接轨迹参数,包括焊接线、参考线、起始点、终止点、起始时间、焊接速度,并选择所创建的热源。接着确定环境温度、热交换模型、加载压力函数。最后将装夹点进行刚性

固定, 通过计算得到相关数据 (如温度场、应力场等) 及其相应的结果图 (曲线、动画等)。将应力场和温度场数据导入 Visual-Environment 软件, 截取图像, 进行数值比对分析。

2.3 材料性能测试

根据仿真结果设定焊接工艺。焊接完成后进行固溶 490 °C /3 h 和人工时效 180 °C /12 h 热处理工序。用光学显微镜观察焊接头的金相组织, 用扫描电子显微镜观察断口。拉伸试样尺寸如图 5 所示。经加工后的试样需用 320#、800#、1000#、1500#、2000# 砂纸打磨光滑, 保证试样表面光滑和无明显划痕。

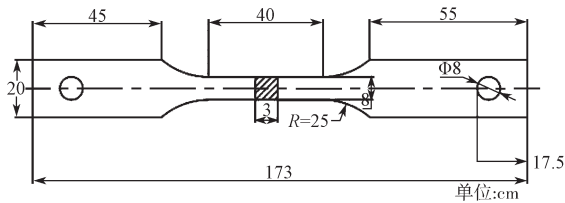


图 5 拉伸试样尺寸图

Fig. 5 The drawing of tensile specimen

3 实验结果与分析

根据调控模拟参数获得理想的焊接工艺。仿真时其他条件不变, 焊接热输入公式为^[11-13]

$$Q = \frac{U \cdot I}{v} \eta,$$

式中: Q 为焊接热输入量, J/mm;

U 为电弧电压, V;

I 为焊接电流, A;

v 为焊接速度, mm/s;

η 为电弧的功率系数。

从上式可知, 焊接速度和热输入量成反比。查阅用于铝合金薄板的 FSW 焊接速度与转速设置的相关资料, 本文将搅拌头转速设为 2 100 r/min, 焊接速度分别设为 2, 3, 4 mm/s。具体参数设置如表 2 所示。

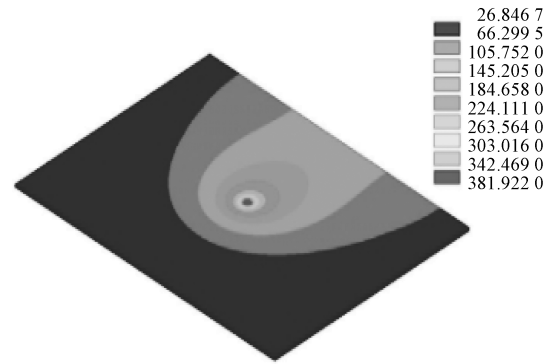
表 2 FSW 焊接前进速度参数设置

Table 2 Selection of FSW welding speed parameters

序号	焊接速度 / (mm·s ⁻¹)	转速 / (r·min ⁻¹)	下压载荷 /kN
1	2	2 100	1.8
2	3	2 100	1.8
3	4	2 100	1.8

模拟结果图均为中间时刻的温度场和应力场。

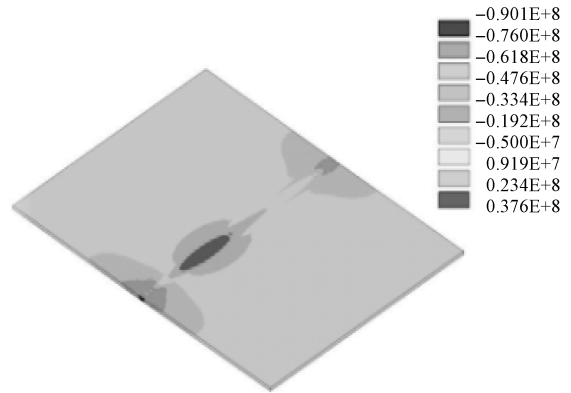
3 组参数下焊缝中心区域的温度分布图和应力图如图 6~8 所示。



a) 温度场



b) 焊缝中心

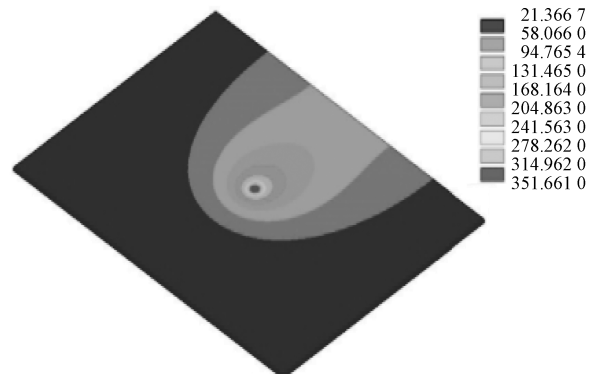


c) 应力场

图 6 第 1 组焊接参数的模拟结果

Fig. 6 Simulation results of welding parameter No. 1

由图 6 可知, 当转速为 2 100 r/min, 焊接速度为 2 mm/s 时, 焊接热输入量过大, 焊缝区域温度在 390 °C 以上, 这易导致焊缝组织晶粒粗大, 焊接接头质量降低。因此, 需进一步优化焊接参数。



a) 温度场

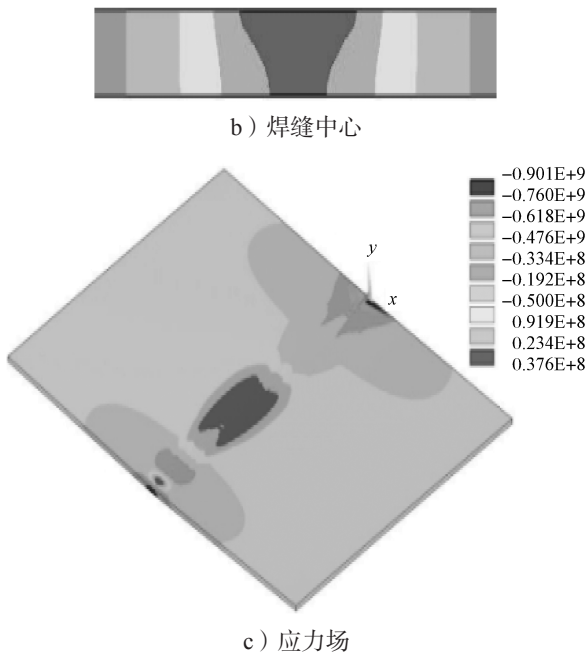


图7 第2组焊接参数的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of welding parameter No. 2

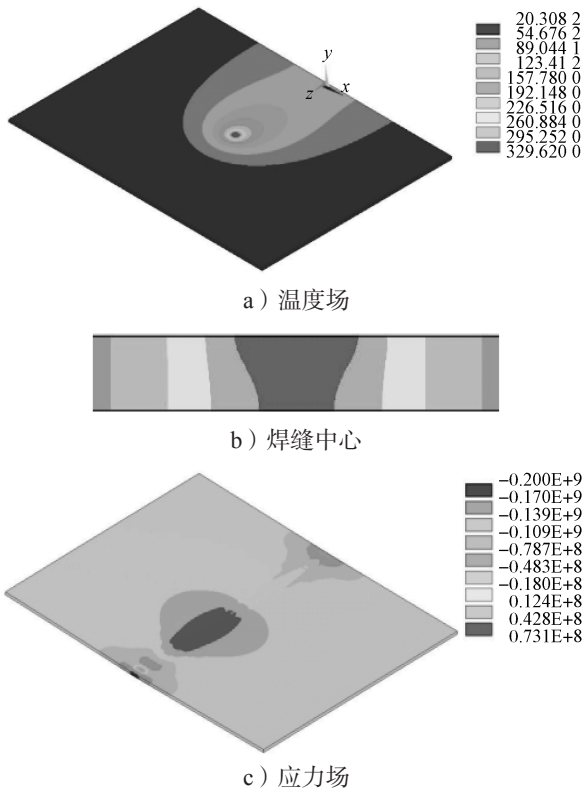


图8 第3组焊接参数的模拟结果

Fig. 8 Simulation results of welding parameter No. 3

由图7可知,当转速为2 100 r/min,焊接速度为3 mm/s时,母材温度场分布稳定,且从焊缝截面图可以看出,焊接深度足够,焊接热影响区小,焊接

残余应力最大区域在装夹点附近,其残余应力较小,但此处应力集中,这是由于刚性约束造成的。从母材整体来看,焊后残余应力很小。故第2组参数能够获得较好组织与性能。

由图8可知,当转速为2 100 r/min,焊接速度为4 mm/s时,焊接速度过快导致热输入量明显不够,焊缝区没有达到母材的热塑性温度,使焊缝区出现未焊透等缺陷,焊接接头质量降低。

进一步分析搅拌头转速对组织的影响。在其他条件不变的情况下,焊接速度为3 mm/s,转速分别为1 600, 2 100, 2 500 r/min。具体参数设置见表3。

表3 FSW 焊接搅拌头转速的选择

Table 3 Selection of rotational speed of FSW welding stirring head

序号	焊接速度 / (mm·s ⁻¹)	转速 / (r·min ⁻¹)	下压载荷 / kN
2	3	2 100	1.8
4	3	1 600	1.8
5	3	2 500	1.8

第4组和第5组参数下焊缝中心区的温度分布图和应力图如图9~10所示。第2组见图7。

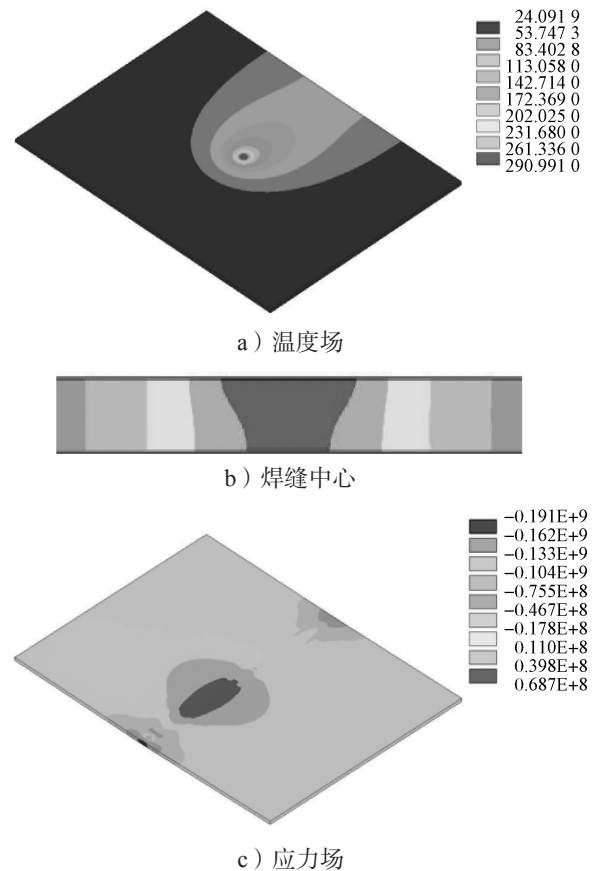


图9 第4组焊接参数的模拟结果

Fig. 9 Simulation results of welding parameter No. 4

由图 9 可知, 转速为 1 600 r/min 时, 在母材的厚度方向, 焊缝中心温度过低, 为 290 °C, 母材的热塑性变形深度不够, 焊缝区热塑性金属流动性变差, 这容易产生未焊透、空隙等焊接缺陷。故焊接速度为 3 mm/s、转速为 1 600 r/min 不符合要求。

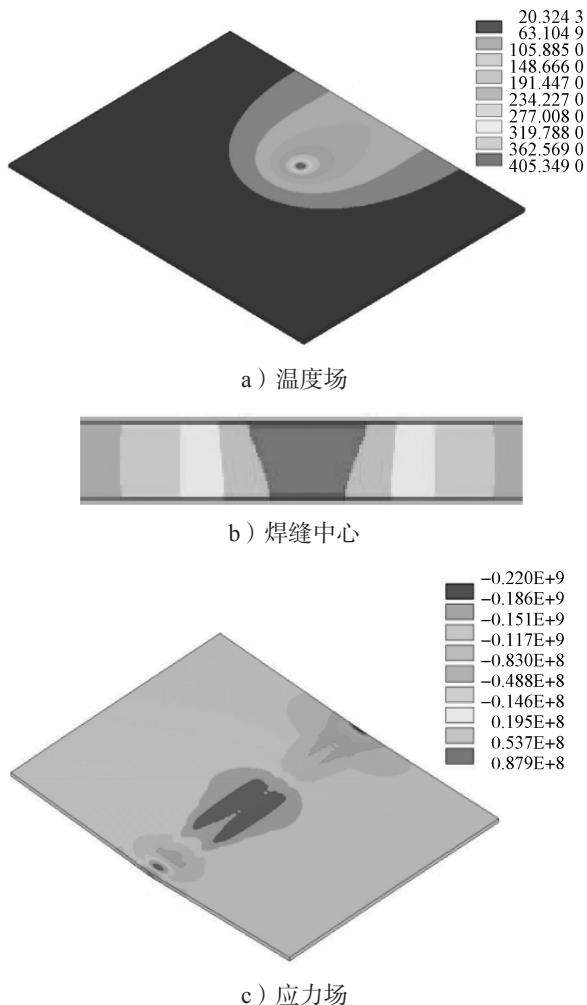


图 10 第 5 组焊接参数的模拟结果

Fig. 10 Simulation results of welding parameter No. 5

由图 10 可知, 当转速为 2 500 r/min 时, 焊接温度场分布稳定, 焊后整体的残余应力值小。从搅拌作用分析, 在转速为 2 500 r/min 下, FSW 对焊缝热塑性区域的搅拌作用比转速为 2 100 r/min 下的强, 因而此情况下更不容易产生焊接缺陷。焊接速度为 3 mm/s、转速为 2 500 r/m 的参数设置虽然符合要求, 但此时能耗较高, 搅拌头的使用寿命会降低。

综上所述, FSW 的第 2 组参数设置最好。因此, 实际焊接时, 搅拌头转速设为 2 100 r/min, 焊接速度设为 3 mm/s。7003 铝合金薄板的接头组织和力学性

能如图 11 所示。由图可知, 焊接接头组织晶粒细小, 经过热处理后的抗拉强度为 369.2 MPa, 屈服强度为 297.5 MPa, 延伸率为 7.6%, 断口是典型的塑性断裂即韧窝断口^[14]。

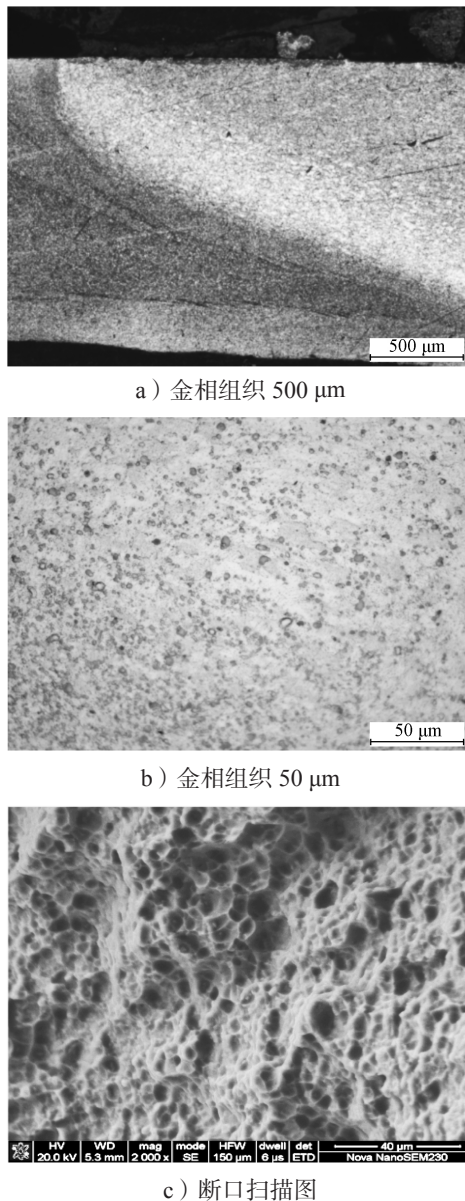


图 11 第 2 组焊接参数下的接头金相组织和断口图

Fig. 11 Microstructure and fracture of joints in welding parameter No. 2

4 结论

本文采用 FSW 焊接锂电池包箱体用 7003 铝合金。仿真结果表明: 1) 搅拌头转速过慢 (1 600 r/min) 时, 焊接接头容易出现焊不透的缺陷。焊接进给速度

过快 (≥ 4 mm/s) 容易出现焊不透、熔池过小等缺陷。焊接速度过慢 (≤ 2 mm/s) 容易出现晶粒粗大, 影响力学性能。可知, 搅拌头转速为 2 100~2 500 r/min, 焊接速度为 3 mm/s 时, 母材可以获得较好的组织形貌。2) 焊接实验时设置搅拌头转速为 2 100 r/min, 焊接速度为 3 mm/s, 经过固溶 490 °C /3 h 和人工时效 180 °C /12 h 热处理后, 材料抗拉强度为 369.2 MPa, 屈服强度为 297.5 MPa, 延伸率为 7.6%, 断口为韧窝断口。因此, 用 SYSWELD 仿真 7003 铝合金 FSW 焊接过程, 可以优化焊接参数, 降低焊接损耗。

参考文献:

- [1] 宋晓村, 朱政强, 陈燕飞. 搅拌摩擦焊的研究现状及前景展望[J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 5-7, 12.
SONG Xiaocun, ZHU Zhengqiang, CHEN Yanfei. Research Status and Prospect of Friction Stir Welding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(13): 5-7, 12.
- [2] 夏罗生, 陈累玉. 搅拌摩擦焊技术在我国的现状及应用现状[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 13-15, 19.
XIA Luosheng, CHEN Leiyu. Development and Application of FSW in China[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(17): 13-15, 19.
- [3] SUN N, APELIAN D. Friction Stir Processing of Aluminum Cast Alloys for High Performance Applications[J]. JOM, 2011, 63: 44-50.
- [4] 郁炎, 张建欣, 李士凯. 国内外异种材料搅拌摩擦焊的研究现状及发展趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(6): 108-113.
YU Yan, ZHANG Jianxin, LI Shikai. Recent Development of Friction Stir Welding for Dissimilar Materials at Home and Abroad[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(6): 108-113.
- [5] 相倩, 吕念春, 薛鹏, 等. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 28-37.
XIANG Qian, LÜ Nianchun, XUE Peng, et al. Research Status and Prospect on Friction Stir Welded Dissimilar Al-Steel Joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 28-37.
- [6] 钮旭晶, 侯振国, 鲁二敬, 等. 标动铝合金底板双轴肩搅拌摩擦焊的数值仿真[J]. 轨道交通装备与技术, 2019(6): 26-30.
NIU Xujing, HOU Zhenguo, LU Erjing, et al. Numerical Simulation of FSW with Double Probes for Base Board of Standard EMU[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2019(6): 26-30.
- [7] ZHANG D K, ZHAO Y, DONG M Y, et al. Effects of Weld Penetration on Tensile Properties of 2219 Aluminum Alloy TIG-Welded Joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(6): 1161-1168.
- [8] 王亚男. 时速 400 km 动车组车体侧墙焊接模拟仿真及变形控制研究[J]. 电焊机, 2018, 48(11): 94-99.
WANG Yanan. Study on Welding Deformation Control and Simulation of EMU Vehicle Side Wall at 400 km/h[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(11): 94-99.
- [9] 鲁艳红, 张茂龙, 唐伟宝. 高温气冷堆大接管装焊工艺仿真及其应用[J]. 压力容器, 2018, 35(7): 67-73.
LU Yanhong, ZHANG Maolong, TANG Weibao. Finite Element Simulation of the Welding Process of Large Nozzle of High Temperature Gas Cooled Reactor and Its Application[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(7): 67-73.
- [10] 李翔, 李积元, 王金辉. 基于热源模型 7075 铝合金搅拌摩擦焊接机理分析与研究[J]. 青海大学学报, 2018, 36(3): 56-63.
LI Xiang, LI Jiyuan, WANG Jinhui. Analysis and Research on the Friction Welding Mechanism of 7075 Aluminum Alloy Based on Heat Source Model[J]. Journal of Qinghai University, 2018, 36(3): 56-63.
- [11] 鱼海东, 崔国华, 张振山, 等. 搅拌摩擦焊双轴肩搅拌针产热模型与温度场研究[J]. 轻工机械, 2019, 37(4): 35-41.
YU Haidong, CUI Guohua, ZHANG Zhenshan, et al. Mathematical Thermal Model and Thermal Filed for Bobbin Tool Friction Stir Welding[J]. Light Industry Machinery, 2019, 37(4): 35-41.
- [12] 赵颖昕. 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷预测方法及组织性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHAO Yingxin. Research on Defect Prediction and Relationship Between Microstructure and Properties of Friction Stir Welding[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [13] 杜文善, 钮旭晶, 郁志凯, 等. 6005A-T6 铝合金型材搅拌摩擦焊与 MIG 焊的数值分析[J]. 焊接技术, 2019, 48(3): 16-20.
DU Wenpu, NIU Xujing, YU Zhikai, et al. Numerical Analysis of Friction Stir Welding and MIG Welding of 6005A-T6 Aluminum Alloy Sections[J]. Welding Technology, 2019, 48(3): 16-20.
- [14] 董吉义, 尹玉环, 封小松, 等. 搅拌摩擦焊流场仿真技术应用现状研究[J]. 电焊机, 2018, 48(12): 113-117, 121.

- DONG Jiyi, YIN Yuhuan, FENG Xiaosong, et al. Overview of Application Status of Flow Field Simulation in Friction Stir Welding[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(12): 113-117, 121.
- [15] 姜军伟, 曾庆文, 易泓宇, 等. 铝合金表面处理对玻璃纤维-铝合金叠层板性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 26-29.
- JIANG Junwei, ZENG Qingwen, YI Hongyu, et al. Effect of Surface Pretreatment of Aluminum Alloys on Mechanical Properties of Glass Fiber-Aluminum Laminates[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(2): 26-29.
- [16] 张静, 杨亮, 左汝林. 固溶时效工艺对 7055 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(4): 956-960.
- ZHANG Jing, YANG Liang, ZUO Rulin. Effects of Solution and Aging Treatments on the Microstructures and Mechanical Properties of 7055 Al Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 956-960.
- [17] 于晶晶. Al-Zn-Mg-Cu 高强铝合金的成分设计与组织性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- YU Jingjing. Study on Compositional Design and Microstructure and Properties of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [18] 高平平, 潘云, 陈爽, 等. 锂电池 PACK 包 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金 CMT 焊接组织与性能研究[J]. 包装学报, 2020, 12(1): 9-16.
- GAO Pingping, PAN Yun, CHEN Shuang, et al. Study on Microstructure and Properties of Lithium Battery Pack of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy Welded by CMT[J]. Packaging Journal, 2020, 12(1): 9-16.

(责任编辑: 邓彬)

Simulation and Performance Study of FSW Welding Process for 7003 Aluminum Alloy

MAO Cheng¹, WEN Zhaohui¹, GAO Pingping², PAN Yun³, CHEN Lei², CHEN Shuang²,
SUN Xiaogang², WU Anru²

(1. Institute of Concrete Pump Truck, Sany Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410090, China; 2. Key Laboratory for Vehicle and Transmission System of Hunan Province, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411104, China; 3. Automobile Engineering Research Institute of Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract: 7003 aluminum alloy was taken as the welding object, FSW process was used for joint welding, and finite element software SYSWELD was used to simulate the welding process of aluminum alloy plate. The effects of simulation and actual welding were compared and analyzed. The results showed that when the welding speed was about 3mm/s in friction stir welding of 7003 aluminum alloy, the rotating speed of stirring head was 2 100~2 500 r/min, the welding process requirements could be met. The actual welding test results were consistent with the simulation results. The welded joints had uniform metallographic structure and properties. With solid solution at 490 °C /3 h and manual aging at 180 °C /12 h, the tensile strength was 369.2 MPa and elongation was 7.6% respectively after heat treatment.

Keywords: FSW; 7003 aluminum alloy; SYSWELD; mechanical property