

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.13

5083/6005A 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能

贾志芳, 田董扩, 白云龙

承德应用技术职业学院, 河北 承德 067000

摘要: 采用不同的工艺参数对 5083-OT 与 6005A-T6 铝合金进行搅拌摩擦焊焊接。通过金相分析、XRD 分析、拉伸性能等方法, 研究焊接速度、轴肩直径及搅拌头偏移量等参数对 5083/6005A 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响。结果表明: 5083/6005A 异种铝合金搅拌摩擦焊界面无明显脆性金属间化合物生成; 焊核区组织发生动态再结晶, 形成细小的等轴晶组织; 前进侧热机影响区受到的机械搅拌作用力大于后退侧, 晶粒变形大于后退侧热机影响区; 热影响区组织仅受到热循环的作用, 晶粒有粗化现象; 随着偏移量的增加, 使得焊核区和后退侧热机影响区硬度值降低, 最低值出现在 6005A 侧热影响区, 其抗拉强度、屈服强度、延伸率均逐渐减小, 当焊接速度为 600 mm/min、轴肩直径为 12 mm、偏移量为 0 mm 时接头性能最好; 抗拉强度为 245 MPa, 屈服强度为 165 MPa, 延伸率为 5.67%。

关键词: 异种铝合金; 搅拌摩擦焊; XRD 分析; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG453.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2023)11-0084-06

Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Joints for 5083/6005A Dissimilar Aluminum Alloy

JIA Zhifang, TIAN Dongkuo, BAI Yunlong

Chengde Vocational College of Applied Technology, Chengde 06700, China

Abstract: 5083-OT and 6005A-T6 aluminum alloys was carried out with different welding process parameters by Friction stir welding. The effects of welding parameters such as welding speed, shoulder diameter and stir head offset on the microstructure and properties of 5083/6005A dissimilar aluminum alloy friction stir welded joints were studied by means of metallographic analysis, XRD analysis and tensile properties. The results show that there is no brittle intermetallic compound at the interface of friction stir welding of 5083/6005A dissimilar aluminum alloy; The microstructure of nugget zone undergoes dynamic recrystallization, forming fine equiaxed crystal structure; TMAZ influences of the heat engine on the forward side is greater than that on the backward side, and the grain deformation is greater than that in the zone of influence of the heat engine on the backward side; The microstructure of heat affected zone is only affected by thermal cycle, and the grains are coarsened; With the increase of the offset, it makes the hardness value of the weld core area and the heat machine affected area on the backward side decrease, and the lowest value appears in the heat affected area on the 6005A side, and its tensile strength, yield strength and elongation gradually decrease, and the joint performance is the best when the weld speed is 600 mm/min, the diameter of the shaft shoulder is 12 mm, and the offset is 0mm The tensile strength is 245 MPa, yield strength is 165 MPa, and elongation is 5.67%.

Keywords: dissimilar Al alloy; friction stir welding; XRD analysis; microstructure; mechanical property

引用格式: 贾志芳, 田董扩, 白云龙. 5083/6005A 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. 电焊机, 2023, 53(11): 84-89.

Citation: JIA Zhifang, TIAN Dongkuo, BAI Yunlong. Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Joints for 5083/6005A Dissimilar Aluminum Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 84-89.

收稿日期: 2022-12-17 修回日期: 2023-02-01

基金项目: 河北省高校科学研究计划项目(ZC2022105); 承德市智能装备产业研究院建设(202205B087)

作者简介: 贾志芳(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事智能焊接技术的研究工作。E-mail: 862360922@qq.com。

0 引言

铝合金被广泛应用于高速列车、地铁列车、双层列车和汽车车体中,成为实现运输工具轻量化的主要材料^[1]。作为结构材料,根据实际工况的性能需求、制造工艺和成本因素,需要针对不同部位选用适当的材料。例如,飞机制造中采用 7xxx 系铝合金纵梁与 2xxx 系铝合金机身蒙皮连接,5xxx 系和 6xxx 系铝合金分别作为汽车车身内板和外板的材料进行连接。在实际应用中,不可避免地会遭遇异种铝合金的连接问题^[2-4]。

目前,异种铝合金焊接技术主要有搅拌摩擦焊、激光焊和氩弧焊等^[5]。传统熔化焊方法容易产生脆性相、凝固裂纹和孔洞等缺陷,而搅拌摩擦焊则能有效避免这些问题^[6-8]。随着对材料的要求越来越高,对异种铝合金搅拌摩擦焊焊接接头性能和耐腐蚀性研究也越来越多,主要有 2024/7075、6063/3A21、5083/7075、2024/5083 等^[9-11]。

本文对 5083-OT 与 6005A-T6 在不同焊接工艺参数下进行搅拌摩擦焊接,研究不同参数下的 5083-OT/6005A-T6 异种铝合金 FSW 接头微观结构和力学性能,分析焊接参数对其微观组织和力学性能的影响规律,为进一步扩大异种合金搅拌摩擦焊在各领域的应用提供理论依据与技术支持。

1 试验材料和方法

试验材料为尺寸 300 mm×150 mm×3 mm 的 5083-OT 与 6005A-T6 铝合金轧制板材,其化学成分如表 1 所示。采用对接方式,焊接方向平行于轧制方向,6005A 板材置于前进侧(Advancing side, AS),5083-OT 板材置于后退侧(Retreating side, RS),采用 FSW-LM-BM16-2D 龙门式搅拌摩擦焊设备,搅拌针长 2.8 mm,搅拌头倾角为 5°。具体各组焊接参数如表 2 所示。

焊接完成后,沿垂直于焊缝方向上截取金相试件,经砂纸粗磨、机械抛光,采用 Keller's 试剂进行化学腐蚀后在蔡司 Axiovert.A1 金相光学显微镜上观察试样的微观组织;通过 XRD 分析焊接接头交界

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal(wt. %)

材料	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
5083-OT	≤0.1	≤0.4	≤0.4	0.4 ~ 1.0	4.0 ~ 4.9	≤ 0.25	0.05 ~ 0.25	≤ 0.15	余量
6005A-T6	0.17	0.63	0.24	0.2	0.36	< 0.01	—	0.02	余量

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

组号	转速 /(r·min ⁻¹)	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	偏移量 /mm	搅拌头轴 肩直径/mm
1	1 400	600	0	10
2	1 400	600	偏向 6005 A (0.3 mm)	10
3	1 400	600	偏向 6005 A (0.5 mm)	10
4	1 400	800	0	10
5	1 400	800	0	12
6	1 400	800	0	14

处金属间化合物的生成,按 GB/T228—2002 要求在 5982 电子万能材料试验机上检验焊接接头力学性能。显微硬度测试在 TMVS-1 型显微硬度计上进行,加载载荷 200 g,停留时间 10 s,测试位置是沿横截面厚度中心方向,间隔为 0.5 mm。

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌

不同焊接参数下的接头横截面宏观形貌如图 1 所示,其焊接参数与表 2 对应。可以看出焊缝中间出现明显的分界线,焊核区材料由前进侧向后退侧流动,且前进侧材料占主要部分。

焊核区上部材料的流动模式主要取决于轴肩与工件之间的摩擦,使后退侧 5083 铝合金流动条纹延伸到了前进侧;而在焊缝底部,材料的流动由搅拌针的旋转挤压控制,造成底部主要由 6005A 铝合金组成。如图 1b、1c、1d 所示,在焊缝下部出现了微孔缺陷,图 1b 是由于搅拌针轴肩相对较小,使得搅拌头与工件摩擦产生的摩擦热较低,焊缝金属塑性较差,流动能力不足以使其充分填充搅拌头留下的空腔,从而形成微孔^[13];图 1c、1d 产生的微孔是由于搅拌针的偏置使得材料受热不均匀未能充分流动,造成结合区域出现空腔;如图 1a、1e、1f 所示,焊接接头无明显缺陷,但图 1a 和图 1e 焊缝区金属存在明

显的分界线,而图 1f 中焊缝金属充分混合。这是由于焊接热输入量降低,焊缝金属的塑性较差,不能在搅拌头的作用下将大块铝合金打碎,导致形成明

显的分界线。说明只有在焊速、转速等工艺参数相匹配的情况下,才能得到成形良好、组织致密的 5083/6005A 异种材料搅拌摩擦焊对接接头。

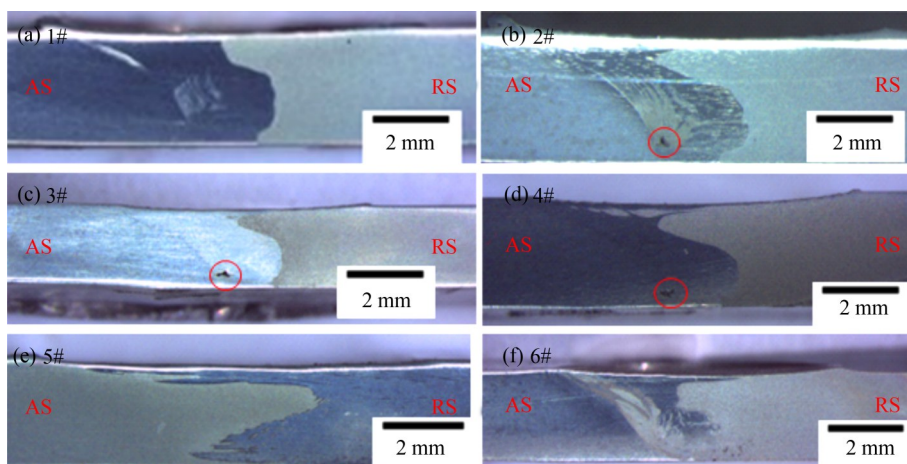


图 1 焊接接头宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of welding joint

2.2 金相组织

由图 1f 可知,在焊接速度 800 mm/min、偏移量 0 mm、搅拌头轴肩直径 14 mm 条件下所获 FSW 接头处两种材料混合更充分,接头性能较好。对其进行金相组织观察,如图 2 所示。

图 2a 和图 2b 分别为 5083、6005A 母材的微观组织形貌,母材晶粒粗大,有明显的拉长痕迹。图 2c

和图 2d 分别为 5083/6005A 搅拌摩擦焊接头热机影响区组织形貌,晶粒取向与轧制方向成一定角度,在焊接过程中同时受到焊接热循环和搅拌针的机械搅拌作用,晶粒发生了弯曲和拉长,并发生回复。但由于热机影响区距离搅拌针较远,受到的搅拌针搅拌作用远小于焊核区组织的,且温度低,没有发生再结晶。因为前进侧受到的机械搅拌作用力大

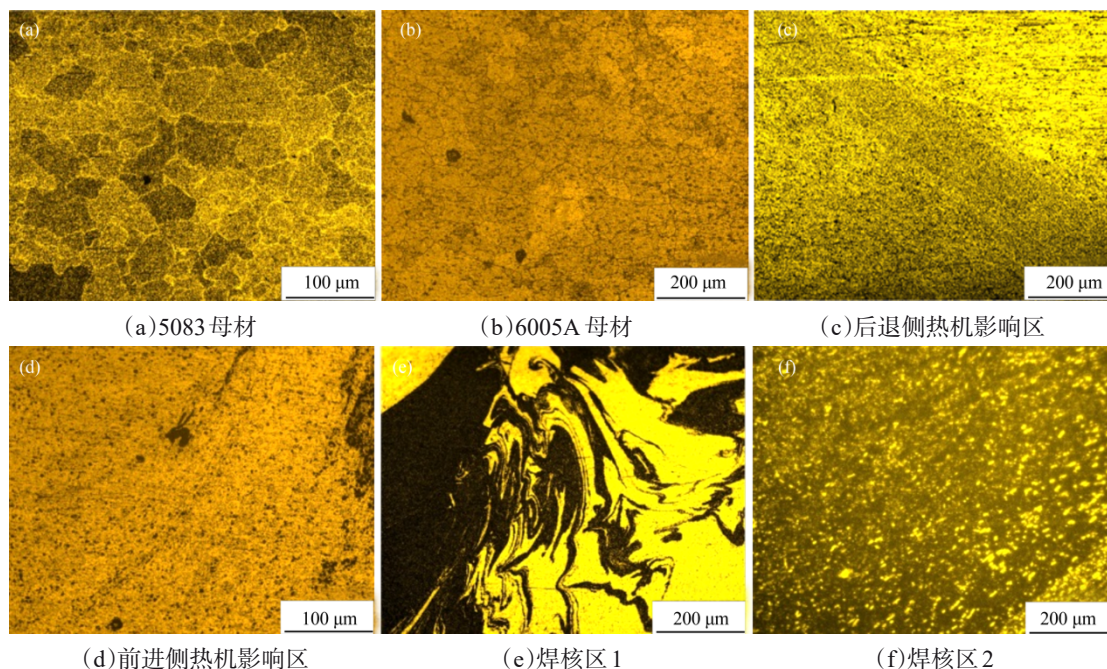


图 2 焊接接头组织形态

Fig. 2 Microstructure of welding joint

于后退侧,塑性变形较大而且流动性也相对较好,所以前进侧热机影响区晶粒变形大于后退侧热机影响区^[13]。图 2e、图 2f 分别为 5083/6005A 接头焊核区的低倍和高倍组织,晶粒细小、等轴、无方向性并且分布均匀,并且焊核区的两种金属呈现河流状与漩涡状花样。焊接过程中,搅拌针不仅旋转产热,使母材达到塑性状态,而且沿焊接方向有相对运动,使焊缝金属产生塑性流动,并随搅拌头的旋转而流动,在搅拌头的驱动下从焊缝的一侧移到另一侧,并且在焊接热循环作用下发生动态再结晶。由于焊核区是受搅拌针机械作用最大的区域,发生再结晶的晶粒来不及长大就在搅拌针的作用下发生破碎,形成等轴、细小的晶粒。

2.3 焊接接头 XRD 分析

针对表 2 中 6# 接头焊核区交界处进行 XRD 分析,其结果如图 3 所示,界面主要元素为 Al,含有少量的 Mg 元素及 Mg_2Si 强化相,无明显脆性金属间化合物生成。搅拌摩擦焊是固相焊接,热输入量较低,焊接过程中金属未达到熔点,从而避免了冶金反应,减少了金属间化合物的生成。脆性金属间化合物是导致接头性能降低的不利因素,阻碍铝镁界面的结合,而且中间化合物层的厚度会降低焊缝物理性能,所以异种金属的搅拌摩擦焊接需要注意控制金属间化合物的生成。

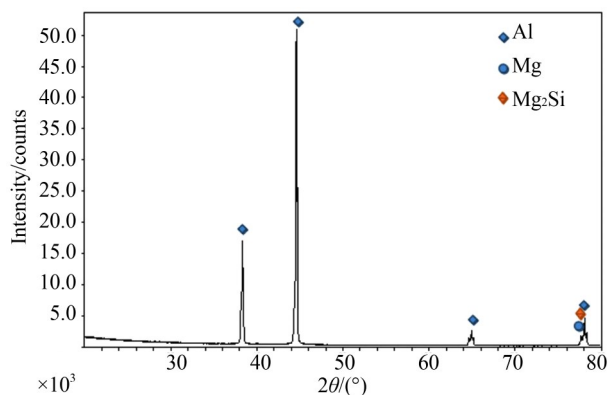


图 3 接头交界处 X 射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of joint junction

2.4 偏移量对接头硬度分布的影响分析

针对表 2 中 1#、2# 和 3# 三组不同偏移量的试样进行硬度分析,硬度分布曲线如图 4 所示。焊接接头的热影响区硬度值较低,最低值出现在 6005A 侧热影响区,主要是因为热影响区位错密度的减少和

晶粒尺寸的增加而变成了薄弱环节,导致硬度值降低。焊核区的硬度值稍高的原因是该部分材料在搅拌头的强烈作用下,产生较大的塑性变形,组织发生动态再结晶,形成等轴晶粒;热机影响区受到搅拌头和热循环的双重作用,发生塑性变形和再结晶,促进二相粒子的聚集长大,导致硬度值低于焊核区硬度^[14]。随着偏移量的增加,由于 6005A 系铝合金在焊接接头占比增多,二相粒子增长,使得焊核区和后退侧热机影响区硬度值降低。

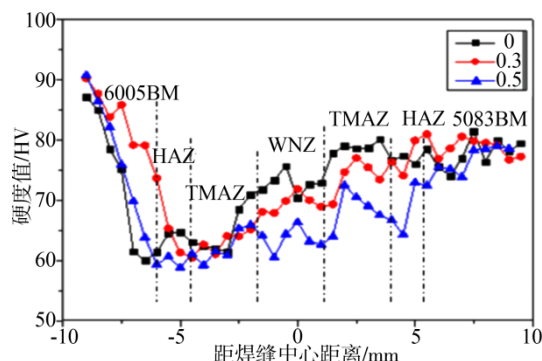


图 4 不同偏移量下焊接接头硬度分布曲线

Fig. 4 Hardness distribution curve of welding joint under different offsets

2.5 工艺参数对拉伸性能的影响

不同焊接参数下的焊接接头力学性能如图 5 所示。当保持其他参数不变、搅拌头轴肩直径的增大时,搅拌头与工件摩擦接触面积增大,焊接热输入量增加,促进了焊缝区塑性金属流动,导致其抗拉强度增大,但是过大的轴肩直径使焊接接头发生软化,降低了抗拉强度,所以其抗拉强度随着轴肩直径的增大呈现先增大后减小的趋势。但是搅拌

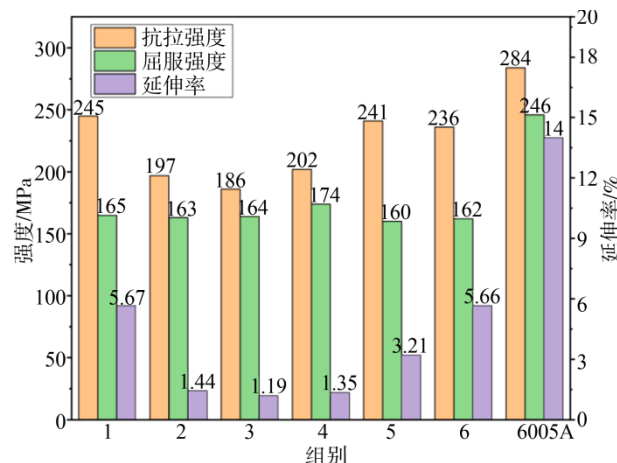


图 5 不同焊接参数下的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties under different welding parameters

针直径的增加,又使得热影响区增大发生了晶粒细化,从而使得屈服强度降低,延伸率增加。随着搅拌针偏移量的增加,其抗拉强度、屈服强度、延伸率均逐渐减小,主要是其改变了异种铝合金的对接位置,降低了其流动性,最终影响接头组织,使力学性能降低。当焊接速度为 600 mm/min、轴肩直径为 12 mm、偏移量为 0 mm 时接头性能最好,抗拉强度为 245 MPa,为 6005A 母材的 86%,屈服强度为 165 MPa,为 6005A 母材的 67%,延伸率为 5.67%,为 6005A 母材的 40.5%。

3 结论

(1) 针对 5083/6005A 异种铝合金进行搅拌摩擦焊对接焊,接头表面成形良好;焊缝中间出现明显的分界线,焊核区材料由前进侧向后退侧流动,焊缝中间出现明显的分界线,由于轴肩与工件之间的摩擦,使得后退侧 5083 铝合金流动条纹延伸到了前进侧;由搅拌针的旋转挤压控制,造成底部主要由 6005A 铝合金组成。

(2) 焊核区两种金属呈现河流状与漩涡状花样,发生动态再结晶形成细小的等轴晶组织。热影响区组织仅受到热循环的作用,晶粒略有粗大。前进侧受到的机械搅拌作用力大于后退侧,塑性变形较大而且流动性也相对较好,所以前进侧热机影响区晶粒变形大于后退侧热机影响区。接头交界处含有少量的 Mg 元素及 Mg_2Si 强化相,无明显脆性金属间化合物生成。

(3) 随着偏移量的增加,6005A 系铝合金在焊接接头占比增加,二相粒子增长,使得焊核区和后退侧热机影响区硬度值降低,最低值出现在 6005A 侧热影响区为 58 HV,其抗拉强度、屈服强度、延伸率均逐渐减小,当焊接速度为 600 mm/min、轴肩直径为 12 mm、偏移量为 0 mm 时接头性能最好;抗拉强度为 245 MPa,屈服强度 165 MPa,延伸率 5.67%。

参考文献:

- [1] 吴庆祝,许鸿吉,邱劲松,等. 6005A-T6 厚板铝合金 FSW 焊接接头力学性能与疲劳性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(04): 100-106.
- [2] 董吉义,汤化伟,尹玉环,等. 搅拌摩擦焊接过程闭环控制方法研究[J]. 电焊机, 2019, 49(9): 99-102. DONG J Y, TANG H W, YIN Y H, et al. Study on closed-loop control method in friction stir welding process[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(9): 99-102.
- [3] 侯建英,杜建强,王海生,等. 搅拌摩擦焊在高速动车组车辆上的应用[J]. 电焊机, 2018, 48(3): 337-340. HOU J Y, DU J Q, WANG H S, et al. Application of FSW technology in the manufacture of the high speed train[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 337-340.
- [4] 姜艳,马国龙,马寅,等. 高速列车铝合金车体典型接头激光-MIG 复合焊接特性研究[J]. 电焊机, 2022, 52(10): 1-8. JIANG Y, MA G L, MA Y, et al. Study on Laser-MIG Hybrid Welding Characteristics of Typical Joints of Aluminum Alloy Carbody for High Speed Train n [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10): 1-8.
- [5] 陆雷俊,吉莉红,闵少松,等. 国内铝合金焊缝 PAUT 技术应用现状[J]. 造船技术, 2023, 51(05): 88-92. LU L J, JI L H, MIN S S, et al. Application Status of Domestic PAUT Technology in Aluminum Alloy Welds [J]. Marine Technology, 2023, 51(05): 88-92.
- [6] 周春东,周琦,孙宏宇. 铝-镁异种金属对接搅拌摩擦焊断裂行为分析[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(06): 55-58. ZHOU C D, ZHOU Q, SUN H Y. Fracture Behavior Analysis of Friction Stir Welding of Dissimilar Metals Between Aluminum and Magnesium[J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(06): 55-58.
- [7] 潘文驰. 异种铝合金激光-MIG 复合焊接接头微弧氧化膜层的制备与耐腐蚀性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019. PAN W C. Preparation and Corrosion Resistance of Micro Arc Oxidation Coating on Laser MIG Composite Welding Joint of Different Aluminum Alloys[D]. Jilin: Jilin University, 2019.
- [8] YAN Shaohua, XING Bobin, ZHOU Haiyang, et al. Effect of filling materials on the microstructure and properties of hybrid laser welded Al-Mg-Si alloys joints [J]. Materials Characterization, 2018, 144: 205-218.
- [9] Niu P L, Li W Y, Chen D L. Strain hardening behav-

- ior and mechanisms of friction stir welded dissimilar joints of aluminum alloys[J]. *Materials Letters*, 2018, 231: 68–71.
- [10] 高士康, 周利, 张欣盟, 等. 6061-T6/7075-T6 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2022, 43(06): 35–42.
- GAN S K, ZHOU L, ZHANG X M, et al. Microstructure and properties of friction stir welded joints for 6061-T6/7075-T6 dissimilar aluminum alloy[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2022, 43(06): 35–42.
- [11] Hirsch J. Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design[J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(5): 818–824.
- [12] 汤化伟, 张聃, 封小松, 等. 7055 铝合金搅拌摩擦焊工艺[J]. *电焊机*, 2017, 47(09): 46–49.
- TANG H W, ZHANG D, FENG X S, et al. Friction stir welding process parameters of 7055 aluminum alloy [J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(09): 46–49.
- [13] 仇一卿, 范祝男, 黄春平, 等. 厚板 Cu-Cr-Zr 合金搅拌摩擦焊接接头沿厚度方向组织和力学性能的变化[J]. *材料导报*, 2020, 34(10): 10162–10165.
- CHOU Y Q, FAN Z N, HUANG C P, et al. Variations of the Microstructure and Mechanical Properties for the Thick Plate Cu-Cr-Zr Alloy Friction Stir Welding Joint Along the Thickness Direction[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(10): 10162–10165.
- [14] Liu J X, Shen J. Li X W. Effect of Welding Speed on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 6005A-T5 Aluminum Alloy FSW Joints [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(12): 3797–3805.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接 43 页

- ence of Hardening Models on the Estimation of Residual Stresses by Finite Element Modeling in Type 316LN Stainless Steel Weld Joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(9): 6988–6997.
- [19] 薛忠明, 杨广臣, 张彦华. 焊接温度场与力学场模拟的研究进展[J]. *中国机械工程*, 2002(11): 83–86+95.
- XUE Z M, YANG G C, ZHANG Y H. The state-of-the-art-of Research on of Temperature Field Simulation and Mechanics Field in Welding Process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002(11): 83–86+95.
- [20] 曾志, 王立君. 数值模拟技术在焊接中的应用[J]. *航空制造技术*, 2008(08): 44–47.
- ZENG Z, WANG L J. Application of Numerical Simulation Technology in Welding [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(08): 44–47.
- [21] Huang Y, Wang B, Guo J, et al. Investigation of the Mechanism of Powder Pool Coupled Activating TIG Welding[J]. *Metals*, 2023, 13(5): 830.
- [22] 王伯洋. 铝合金 PPCA-TIG 焊机理研究[D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2023.
- WANG B Y. Investigation on PPCA-TIG welding mechanism of aluminum alloy [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2023.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>