焊接工艺参数对A356/6061 搅拌摩擦工艺的影响

姜晗¹,应志平²,刘建平³,胡成博³

(1.浙江理工大学,杭州 310018;

2. 新昌浙江理工大学技术创新研究院有限公司,浙江 绍兴 312599;

3. 浙江万丰摩轮有限公司,浙江 绍兴 312500)

摘要:【目的】旨在探究焊接工艺参数对 A356/6061 异种铝合金搅拌摩擦焊接工艺的影响。【方法】文中通过对 5 mm 厚的 A356/6061 异种铝合金板搅拌摩擦焊工艺试验研究,分析了转速、焊接速度对接头组织和性能的影响。【结果】研究结果表明, 当转速在 1000~1150 r/min 范围内时,接头横截面均出现未焊透缺陷;随着转速的增大,缺陷程度先减小后增大,而抗拉强度、 屈服强度、断后伸长率先增大后减小。当焊接速度在 150~200 mm/min 范围内时,接头横截面也均出现未焊透缺陷;随着焊接 速度的增大,缺陷程度逐渐增大;抗拉强度先减小后增大,但总体呈下降状态;屈服强度先略微减小后增大;断后伸长率逐渐减 小。金相组织中观察到的 Mg₂Si 强化相会受到转速和焊接速度的影响而会分布不均。【结论】焊接工艺参数会对焊缝组织的 强化相、焊缝根部缺陷和焊接接头的力学性能等产生影响。

关键词:搅拌摩擦工艺;A356/6061 异种铝合金;焊接工艺参数;焊接缺陷;力学性能

中图分类号: TG457 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20240907002

Effect of welding parameters on friction stir process of A356/6061

JIANG Han¹, YING Zhiping², LIU Jianping³, HU Chengbo³

(1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Xinchang Research Institute, Zhejiang Sci-Tech University, Shaoxing 312599, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Wanfeng Motorcycle Wheel Co., Ltd., Shaoxing 312500, Zhejiang, China)

Abstract: [**Objective**] The purpose was to study effect of welding parameters on friction stir process of A356/6061 dissimilar aluminum alloy. [**Methods**] In the paper, experimental research on friction stir welding process of 5 mm thick A356/6061 dissimilar aluminum alloy was conducted to analyze effect of rotational speed and welding speed on microstructure and properties of welded joints. [**Results**] The research results showed that when rotational speed was within the range of 1 000 ~ 1 150 r/min, incomplete penetration defects appeared on the cross sections of welded joints. As rotational speed increased, degree of defects first decreased and then increased, while tensile strength, yield strength and elongation first increased and then decreased. When welding speed was within the range of 150 ~ 200 mm/min, incomplete penetration defects also appeared on the cross sections of welded joints. As welding speed increased, degree of defects gradually increased, tensile strength first decreased and then increased, but overall showing a decreasing state, yield strength first slightly decreased and then increased. (**Conclusion**] Welding parameters would have effect on reinforcement phase of weld's microstructure, weld's root defects and mechanical properties of welded joints.

Key words: friction stir process, A356/6061 dissimilar aluminum alloy, welding parameters, welding defects, mechanical properties

收稿日期: 2024-09-07

基金项目:高性能轻量化合金材料与成型技术研发及产业化-大尺寸高强韧铝合金轮毂的复合成型制造关键技术研究及应用项目(2022C01203)

0 前言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是英国焊 接所于 1991 年发明的一种固相连接技术^[1]。作为一 种新型的固相焊接方法,搅拌摩擦焊具有焊接接头 中不产生热裂纹、气孔等焊接缺陷的优点^[2]。A356 铸造铝合金是一种具有优秀综合性能的铸造铝合金, 具有优良的热处理性能、加工性能、良好的强度和韧 性、良好的导热导电等性能^[3]。6061 变形铝合金具有 优良的焊接性、耐腐蚀性和中等强度,广泛应用于各 行的制造业中^[4]。随着航空、汽车等制造业的迅速发 展,单一铝合金的性能不能满足要求,而搅拌摩擦焊 接可以进行不同性能的铝合金焊接。LEE等学者^[5] 发现:焊缝的材料主要由置于后退侧的材料组成。 GHOSH 等学者^[6] 发现低转速和低焊接速度会有更强的结合强度。孙甲尧等学者^[7] 通过对 A356/6061 的研究发现:母材的放置位置会对接头的性能产生影响。宋东福等学者^[8] 发现:当搅拌针在 6061 侧偏移时,有利于焊核区面积、接头强度及断后伸长率的增加。然而,国内少有人研究焊接工艺参数对 A356/6061 异种铝合金搅拌摩擦工艺的影响,刀具转速及焊接速度等是生产高强度接头所涉及的主要参数,所以该文将从这 2 个参数入手研究其工艺。

1 试验制备与方法

试验铝合金材料为 A356 和 6061 铝合金材料,其 材料化学成分见表 1。材料的尺寸为 200 mm×150 mm× 5 mm,搅拌加工深度 4 mm。

表1 材料的化学成分(质量分数,%) Tab. 1 Chemical composition of materials (wt.%)

材料	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	其他	Al
A356	7.22	0.39	0.23	0.004 3	0.008 6	0.016	0.025	0.030	≤0.15	余量
6061	0.55	0.92	0.40	0.200 0	0.006 1	0.210	0.007	0.014	≤0.15	余量

根据 GB/T 5185—2005《焊接及相关工艺方法 代号》标准,利用线切割对焊接板材沿垂直于焊缝方 向切出金相组织和拉伸试样,如图 1 所示。拉伸试样 尺寸如图 2 所示。金相组织首先按照顺序从 400 号、 800 号、1 500 号和 3 000 号砂纸进行机械打磨,使用 金刚石抛光膏进行抛光,再使用 0.5%HF 酸溶液对试 样进行腐蚀,最后使用 DMM-490C 金相显微镜观察 组织。SEM 将通过金相组织的试样利用 JSM-7600F 电子显微镜进行扫描。拉伸试验在 C45.105EY 力学 性能测试机上进行。



图 1 切割试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cutting samples







2 试验结果与分析

2.1 金相组织及 SEM 组织

图 3 为母材及不同焊接工艺参数下焊缝金相组 织。可知图中出现许多细小的黑点,这是 A356 和 6061 的主要强化相 Mg₂Si。由图 3 可知,母材的强化 相的分布相比于焊缝,更加均匀和密集,根据铝合 金材料搅拌摩擦焊接的工艺特性,取焊接速度为 200 mm/min、转速为1000~1150 r/min。当搅拌头 的焊接速度不变时,随着搅拌头转速的增大,焊缝强 化相分布更加密集,但是过大的转速导致其均匀分布 的现象出现减弱的趋势。增大搅拌头的转速可以有

·好 扬 试验研究 Research Paper

效地增加搅拌头对强化相的挤压、搅拌和剪切的概率, 但是当搅拌头的转速过大时,加工区的温度因摩擦产 热量过大而升高,这导致其温度大于强化沉淀相的熔 解温度,强化相部分熔解于基体中,从而使强化相密 集程度减小^[9]。当转速恒定不变时,随着焊接速度的 增大,其强化相的均匀分布程度减弱。搅拌头的行进 速度增大也导致搅拌头对单位体积内第二相颗粒的 挤压、搅拌和剪切的概率大大降低,从而不利于增强 相的均匀弥散^[10]。

由图 3 可以看到不同焊接工艺参数下焊缝的根部均出现裂纹,这是一种"吻接"的未焊透缺陷^[11]。利用电子显微镜对焊缝根部进行扫描,结果如图 4 所示。周平等学者^[12]通过对 6062-T6 铝合金的研究发现:随着焊接速度的增大,其根部缺陷越严重,进而影响抗拉强度。同样,根据铝合金材料搅拌摩擦焊接的工艺特性,取转速为 1 150 r/min、焊接速度为



(e) 1 150 r/min-150 mm/min (f) 1 100 r/min-200 mm/min (g) 1 000 r/min-200 mm/min

图 3 母材及不同焊接工艺参数下焊缝金相组织

Fig. 3 Metallographic microstructure of base metal and weld under different welding parameters. (a) A356; (b) 6061; (c) 1 150 r/min-200 mm/min; (d) 1 150 r/min-175 mm/min; (e) 1 150 r/min-150 mm/min; (f) 1 100 r/min-200 mm/min; (g) 1 000 r/min-200 mm/min



(d) 1 100 r/min-200 mm/min (e) 1 000 r/min-200 mm/min

图 4 不同焊接工艺参数下焊缝根部裂纹

Fig. 4 Cracks at the root of weld under different welding parameters. (a) 1 150 r/min-200 mm/min; (b) 1 150 r/min-175 mm/min; (c) 1 150 r/min-150 mm/min; (d) 1 100 r/min-200 mm/min; (e) 1 000 r/min-200 mm/min

150~200 mm/min。由图 4 可以看出,当转速保持不 变的情况下,随着焊接速度的增大,其焊接缺陷越来 越明显,且150 mm/min焊接速度下缺陷呈断续状。 原因是当焊接速度较低时,其热输入高,温度高,搅 拌头顶端到焊缝根部材料热塑性好,在搅拌头的作 用下材料能较好的填充被带走的材料空隙,焊接速 度增加,热输入减小,热塑性降低,材料不易流动,导 致缺陷越明显。而在保持焊接速度不变的情况下, 随着转速的增大,其焊接缺陷程度先降低再升高。 原因是转速过低或过高对焊缝根部的抽吸挤压效应 均减弱,根部塑性材料没有足够的驱动力在纵向上 迁移,只有在转速适中时,焊缝根部塑性金属才能充 分流动迁移^[13]。

2.2 拉伸试验

图 5 为母材试样的应力-应变曲线图,其具体数 值整理结果见表 2。图 6 为焊接接头的应力-应变图, 其数值同样整理结果见表 3。



图 5 母材应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of base metal

表2 母材力学性能



	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率
马 初	$R_{\rm eH}/{ m MPa}$	$R_{\rm m}/{ m MPa}$	A(%)
A356	277.84	313.88	13.843
6061	273.55	307.52	12.923

结合图 5、图 6 和表 2、表 3 可知,焊缝的力学性 能均低于母材,主要原因是热影响区受热输入影响, 平均晶粒尺寸随热输入增大而增大,且热力影响区 存在较高的残余应力,这些都会造成接头力学性能 下降^[14]。其中焊缝的断后伸长率明显低于母材,LIM 等学者^[15]通过对比 A356/6061 异种铝合金和 A356



图 6 焊接接头应力-应变曲线



表3 焊接接头力学性能

Tab. 3	Mechanica	l properties c	t welded	i jointe
--------	-----------	----------------	----------	----------

编号	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	焊接系数
	$R_{\rm eH}/{ m MPa}$	<i>R</i> _m /MPa	A(%)	$\eta(\%)$
1	185.42	249.85	2.215	81.24
2	180.81	244.24	2.326	79.42
3	181.32	253.83	2.654	82.54
4	185.55	255.95	2.526	83.23
5	179.53	245.19	2.298	79.73

单种铝合金发现:异种铝合金异常低的延展性可能 与其相中存在的针状 Si 颗粒有关。

在转速不变的情况下,在焊接速度为150~200 mm/min时,接头抗拉强度呈现出先减小后增大、但 整体上随焊接速度的增大而降低的现象。接头断后 伸长率随焊接速度的增大逐渐减小。由SEM图分析 可知,当焊接速度增大时,焊接缺陷越明显,进而导 致抗拉强度和断后伸长率越低;焊接速度越大,热输 入越小,增强相熔解的越少,材料的软化程度越轻, 导致接头的屈服强度和抗拉强度在焊接速度175~ 200 mm/min范围内会有所提升。

焊接速度保持不变,转速为1000 r/min时,抗拉 强度为245.19 MPa;转速为1100 r/min时,抗拉强度 为255.95 MPa;转速在1150 r/min时,抗拉强度为 249.85 MPa。屈服强度、断后伸长率随转速的增大先 增大后减小。原因是转速增大,热输入变大,材料热 塑性好,焊缝缺陷越小,而由上节分析可知,过大的 转速又会使缺陷明显,戴启雷等学者^[16]在对6062 铝 合金的研究中也同样出现此现象。可知转速在1000~ 1150 r/min范围内出现最优的焊接转速参数,其焊接 系数达母材的 83.23%。

3 结论

(1)转速和焊接速度会对强化相的分布产生影响, 转速增大会有利于其分布更加均匀,但转速过大却 会使温度超过强化相的熔点,从而减少强化相。焊 接速度增大却会减弱强化相的均匀分布程度。

(2)焊接缺陷程度随转速增大呈现先减小后增大的趋势,而随焊接速度的增大越来越明显。

(3)焊缝的抗拉强度、断后伸长率等力学性能在 焊接速度不变的情况下,会出现最优的转速;在转速 不变的情况下,随焊接速度增加,抗拉强度、断后伸 长率总体呈下降状态。

参考文献

- JIN Yuhua, CHEN Yongsheng, MA Yueming, et al. Fatigue crack propagation of 7050 aluminum alloy FSW joints after surface peening[J]. China Welding, 2023, 32(1): 18 – 26.
- [2] 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(6): 35-42.

GAO Shikang, ZHOU Li, ZHANG Xinmeng, 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(6): 35-42.

- [3] 金文福, 沈其明, 魏鹏尧, 等. 6061-T6/A356-T6 铝合金焊 接工艺研究 [J]. 有色金属加工, 2019, 48(6): 24 - 26.
 JIN Wenfu, SHEN Qiming, WEI Pengyao, et al. Research on welding process of 6061-T6/A356-T6 aluminum alloy[J]. Nonferrous Metal Processing, 2019, 48(6): 24 - 26.
- [4] NIE Fuheng, DONG Honggang, CHEN Su, et al. Microstructure and mechanical properties of pulse MIG welded 6061/A356 aluminum alloy dissimilar butt joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(3): 551 560.
- [5] LEE W B, YEON Y M, JUNG S B. The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(5): 423 – 428.
- [6] GHOSH M, KUMAR K, KAILAS S V, et al. Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys[J]. Materials and Design, 2010, 31(6): 3033 – 3037.
- [7] 孙甲尧,刘让贤,胡良君,等. A356-T6/6061-T6 异种铝合

金搅拌摩擦焊的工艺研究 [J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(2): 60-66.

SUN Jiayao, LIU Rangxian, HU Liangjun, et al. Study on the FSW process of A356-T6/6061-T6 dissimilar aluminum alloy[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(2): 60 – 66.

[8] 宋东福,周楠,孙甲尧,等. 搅拌针偏移量对 A356/6061 铝 合金搅拌摩擦焊的影响 [J]. 材料导报, 2016, 30(S2): 597-601.

SONG Dongfu, ZHOU Nan, SUN Jiayao, et al. Effect of stir pin offset on the FSW of A356-T6&6061-T6 dissimilar aluminum alloy[J]. Materials Review, 2016, 30(S2): 597 – 601.

[9] 郑小茂,张大童,张文,等.焊接参数对 7A04 铝合金搅拌 摩擦焊接头组织与力学性能的影响 [J].焊接学报,2016, 37(1):76-80.

ZHENG Xiaomao, ZHANG Datong, ZHANG Wen, et al. Effect of processing parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7A04 aluminum alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 76 – 80.

- [10] 汤精明. 第二相颗粒在搅拌摩擦作用下的流动及演化机制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
 TANG Jingming. Flow and evolution mechanism of the second phase particles during friction stir welding/processing [D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [11] 张光伟, 王晓东. 搅拌摩擦焊常见缺陷及其无损检测技术
 [J]. 中国高新技术企业, 2012(Z2): 27 29.
 ZHANG Guangwei, WANG Xiaodong. Common defects and nondestructive testing techniques in friction stir welding[J]. China High-Tech Enterprises, 2012(Z2): 27 29. (in Chinese)
- [12] 周平,戴启雷,张元杰.根部缺陷对搅拌摩擦焊接头拉伸 性能影响 [J].焊接, 2021(4): 52 - 56, 64.
 ZHOU Ping, DAI Qilei, ZHANG Yuanjie. Effect of root defect on tensile properties of friction stir welded joints[J].
 Welding & Joining, 2021(4): 52 - 56, 64.
- [13] 王道,黄春平,李建萍,等.不同旋转速度下铝合金搅拌摩 擦焊根部塑性流动特征研究 [C]//南昌:中国机械工程 学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议, 2013.
 WANG Dao, HUANG Chunping, LI Jianping, et al. The effect of rotational speed on the root flow by friction stir weld of 2219 Aluminum alloy [C]//Nanchang, China: The 18th National Welding Academic Conference of Chinese Welding Society of CMES, 2013.

(下转第43页)

of special drain cover[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(3): 112 – 116.

- [13] 姚杞, 罗震, 李洋, 等. 不锈钢水下激光焊接焊缝成形与力 学性能 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 333 - 336.
 YAO Q, LUO Z, LI Y, et al. Weld Forming and mechanical property of stainless steel underwater laser welding[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(3): 333 -336.
- [14] HUANG Z Y, LUO Z, AO S S, et al. Underwater laser weld bowing distortion behavior and mechanism of thin 304 stainless steel plates[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 106: 123 – 135.
- [15] 王建峰, 孙清洁, 张顺, 等. 基于电弧气泡调控的水下湿法 焊接稳定性研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 50 -57.

WANG J F, SUN Q J, ZHANG S, et al. Investigation on underwater wet welding process stability based on the arc bubble control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 50 - 57.

- [16] 郝雨. 铝合金摆动激光焊熔池热场与流场研究 [D]. 哈尔 滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
 HAO Y. Study on temperature field and flow field of aluminum alloy oscillating laser welding molten pool [D].
 Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [17] 李军兆. 316L 不锈钢窄间隙激光焊接熔池动态行为及电磁调控特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
 LI J Z. Study on dynamic molten pool behaviour and electromagnetic manipulation characteristics in narrow gap laser welding of 316L stainless steel[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.
- **第一作者:** 田义丰,硕士,助理工程师;主要从事金属焊接 方面的研究;tianyifeng@cgnpc.com.cn。
- 通信作者: 孙清洁,博士,教授,博士研究生导师;主要从事 高效焊接方法、设备及焊接机理方面的研究;已 发表论文 60 余篇;qjsun@hit.edu.cn。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

田义丰,张清华,陈英杰,等. 核电厂关键部件局部干法水下激光修复工艺[J]. 焊接, 2025(5): 37-43. TIAN Yifeng, ZHANG Qinghua, CHEN Yingjie, et al. Local dry underwater laser repair process of key components in nuclear power plant[J]. Welding & Joining, 2025(5): 37-43.

(上接第36页)

[14] 吕建刚,陈曦,张磊.工艺参数对 Mg-3Zn-0.5Y 合金搅拌 摩擦焊接接头组织与性能的影响 [J]. 电焊机, 2020, 50(10): 22 - 28.
LV Jiangang, CHEN Xi, ZHANG Lei. Effect of welding parameters on microstructures and properties of Mg-3Zn-0.5Y alloy joint by FSW[J]. Electric Welding Machine,

2020, 50(10): 22 - 28.

- LIM S, KIM S, LEE C G, et al. Tensile behavior of frictionstir-welded A356-T6/Al 6061-T651 bi-alloy plate[J].
 Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(9): 2837 – 2843.
- [16] 戴启雷, 王秀义, 侯振国, 等. 焊接速度对 AA6082 搅拌摩

擦焊接头根部缺陷及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2015, 36(8): 27-30.

DAI Qilei, WANG Xiuyi, HOU Zhenguo, et al. Effect of travel speed on the root-defects and mechanical properties of friction stir welded A6082 alloy joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(8): 27 - 30.

- **第一作者:** 姜晗,硕士研究生;主要从事搅拌摩擦焊工艺的 研究;2111838496@qq.com。
- 通信作者: 应志平,博士;主要从事搅拌摩擦焊工艺的研究;
 Zstuyingzp@163.com。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

姜晗,应志平,刘建平,等.焊接工艺参数对 A356/6061 搅拌摩擦工艺的影响[J].焊接,2025(5):32-36,43.

JIANG Han, YING Zhiping, LIU Jianping, et al. Effect of welding parameters on friction stir process of A356/6061[J]. Welding & Joining, 2025(5): 32 – 36, 43.