

焊接方法对 5A06 铝合金厚板焊缝接头性能的影响

李宝华 唐众民 鄢江武 魏宝华 陈莹

(湖北三江航天科工集团红阳机械厂, 孝感 432100)



摘要: 分别采用搅拌摩擦焊 (FSW) 和熔化极氩弧焊 (MIG) 对 20mm 厚的 5A06 铝合金进行了焊接试验, 对两种焊接方式的焊缝接头进行了机械性能测试、显微组织的观察以及表面残余应力的检测。结果表明, 搅拌摩擦焊缝接头的抗拉强度比熔化极氩弧焊缝接头的高, 搅拌摩擦焊缝接头往往断裂于前进侧的熔合过渡区, 熔化极氩弧焊缝接头断裂于热影响区; 相比熔化极氩弧焊, 搅拌摩擦焊缝接头晶粒明显细化, 焊缝中 Mg、Mn 等合金元素烧损明显减少, 焊缝表面的残余应力水平也较低。

关键词: 搅拌摩擦焊; 熔化极氩弧焊; 5A06 铝合金; 表面残余应力

Research on Effects of Welding Ways on Joint Properties of Thick 5A06 Aluminum Alloy

Li Baohua Tang Zhongmin Yan Jiangwu Wei Baohua Chen Ying

(China Sanjiang Aerospace Group Hongyang Machinery Plant, Xiaogan 432100)

Abstract: The experiments of 20mm thick 5A06 aluminum alloy welding by FSW and MIG are conducted. The mechanical properties of two kinds of joints and weld surface residual stress are tested, and the microstructure of the weld is also observed. The results show that the tensile strength of FSW joint is higher than that of MIG joint, and the fracture of FSW joint occurs along the fusing transition zone at the advancing side of the weld, however, the joint of MIG breaks at the heat affected zone in the weld; compared to the MIG joint, the grain of FSW joint is relatively small, and the degree of burning loss for alloy elements such as Mg and Mn and the level of the surface residual stress in the weld is low.

Key words: FSW; MIG; 5A06 aluminum alloy; surface residual stress

1 引言

5A06 铝合金 Al-Mg 系非热处理强化变形铝合金, 具有比重小, 疲劳强度高特点。广泛应用于船舶、建筑、化工和车辆等方面, 更是航空、航天产品不可或缺的重要材料^[1]。

对于厚板 5A06 铝合金的焊接, 传统的熔焊工艺中以熔化极氩弧焊的应用最为普遍, 该方法应用灵活, 简单产品不使用工装夹具就可以施焊, 是目前国内航天领域广泛采用的一种焊接方法。搅拌摩擦焊是 TWI 于 1991 年发明的一种新型固态焊接方法, 特别适合于铝合金产品的焊接, 自它问世以来, 得到了迅

速发展和推广应用, 尤其在航空、航天领域^[2~4]。本文主要对比研究了搅拌摩擦焊和熔化极氩弧焊焊接厚板铝合金接头的组织与性能、表面的残余应力。

2 试验材料与方法

试验材料是厚度为 20mm 的 5A06 铝合金, 焊接试板的尺寸为 350mm×100mm, 分别采用搅拌摩擦 (FSW) 和熔化极氩弧焊 (MIG) 进行焊接, 见图 1 所示。搅拌摩擦焊的试板由两板对接拼焊而成, 采用 FSW-3LM-006 搅拌摩擦焊设备进行焊接, 焊接参数为旋转速度 300r/min, 焊接速度为 120mm/min, 搅拌

作者简介: 李宝华 (1982-), 工程师, 焊接专业; 研究方向: 搅拌摩擦焊和熔焊工艺。

收稿日期: 2010-12-11

头倾角为 2° ；熔焊试板采用单 V 型坡口形式，坡口夹角为 90° ；钝边高度为 3mm，间隙为 2mm，采用型号为 PRO4200 肯倍熔化极氩弧焊进行多层焊接，焊丝为 ER5356- $\phi 1.2$ ，采用较小的电流打底，保证焊透，焊接电流为 225A，电压为 21.5V，送丝速度为 12m/min，气体流量为 22L/min；然后采用大电流盖面，焊接电流为 290A，电压为 24V，送丝速度为 14m/min，气体流量为 25L/min。

焊接完毕后，将焊缝制成拉伸试样，进行机械性能的测试；通过光学显微镜观察焊缝的金相组织；利用电感耦合等离子发射光谱仪（ICP）对焊缝的成分进行对比分析；采用 X 射线衍射法对焊缝表面的残余应力进行检测。

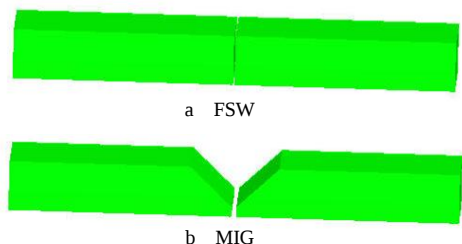


图 1 焊接试板接头形式

3 实验结果与分析

3.1 焊缝显微组织

图 2 是搅拌摩擦焊的焊缝组织，图 2a 是焊缝横截面宏观组织形貌，焊缝中存在明显的明暗差异，焊缝两侧可观察到明显的分界线，根据焊缝的形貌特征，可分为焊核区、前进侧熔合区和返回侧熔合区。图 2b 是焊核组织形貌，该区晶粒细小且分布均匀，由于受到搅拌头的机械搅拌作用以及由摩擦热产生的局部高温作用，焊核区的金属发生了动态再结晶，形成无方向性的细小等轴晶粒。图 2c 和图 2d 分别为前进侧和返回侧的熔合过渡区，相对返回侧熔合区，前进侧的熔合界面线明显，可观察到母材与焊核区之间的急剧过渡，这是由于焊缝两侧受搅拌针的作用方式不同，前进侧焊核金属主要受到剪切作用，而返回侧的金属主要受到挤压作用，在搅拌针行进过程中，在靠近前进侧位置会形成一个瞬时空腔，在焊缝金属填充瞬时空腔时，返回侧的金属受挤压，使得返回侧熔合过渡区的界面变化缓慢；在下一时刻，前进侧的金属开始受到剪切作用，同时，在搅拌针的作用下，返回侧的金属流向前进侧，在焊缝金属填充瞬时空腔时又受到挤压作用，两者的综合作用使得前进侧熔合

区的界面明显。

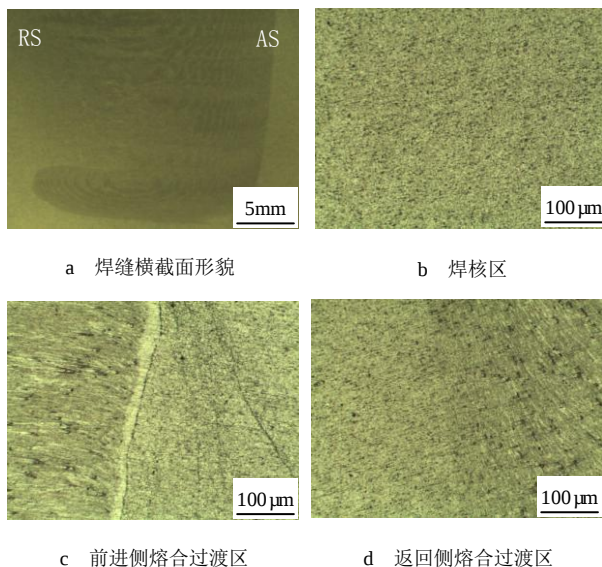


图 2 FSW 焊缝组织

图 3 是熔化极氩弧焊的焊缝组织，图 3a 是焊缝横截面宏观组织形貌，焊缝区较暗。图 3b 是焊核组织形貌，相比搅拌摩擦焊缝的焊核区的晶粒，此区的晶粒相对较大，经评定，FSW 焊核晶粒度为 8 级，MIG 焊缝晶粒度为 4~5 级。

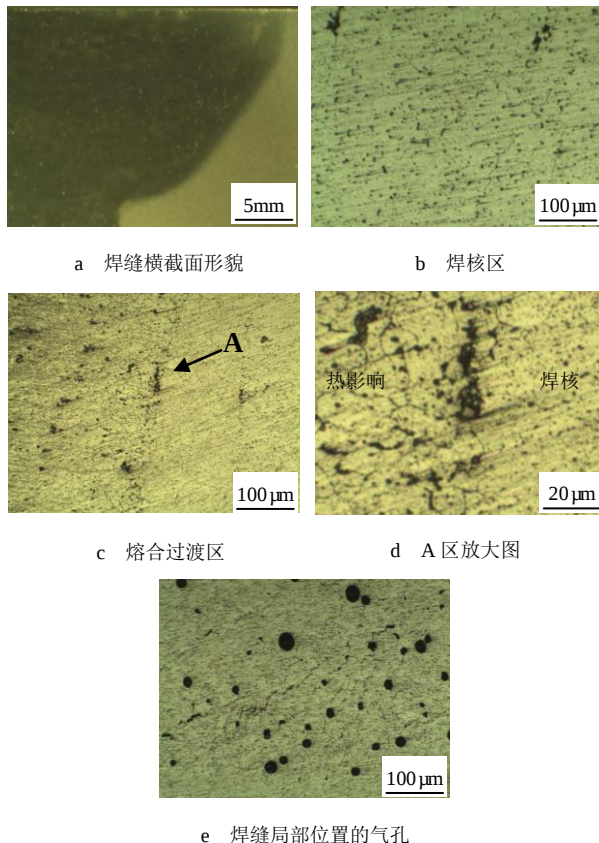


图 3 MIG 焊缝组织

图 3c 是熔合过渡区，图 3d 是图 3c 中 A 区的放大图，从图中可以观察到熔合区存在微小气孔和裂纹，热影响区的晶粒相对焊核区大，这是因为焊接过程中的快速加热和冷却使得焊核区组织相对细化；而热影响区中都呈现比基体粗大的柱状枝晶形态分布，这是因为紧靠熔合区的热影响区部位受到的热循环作用较强，局部区域的峰值温度达到液相线温度以上，以致出现部分熔化，晶粒有足够多的能量进行长大，所以这个区域的晶粒粗化较为明显。图 3e 是焊缝局部位置的气孔，这也是熔焊很难避免的缺陷。

3.2 焊缝力学性能及成分分析

表 1 分别为 MIG 和 FSW 焊缝力学性能的测试结果。从表中可以看出：FSW 焊缝接头的抗拉强度、屈服强度、延伸率均高于熔焊接头，FSW 焊缝接头的抗拉强度约为 355MPa，MIG 焊缝接头的抗拉强度约为 275MPa，是 FSW 焊缝接头强度的 77.5%。此外，从拉伸试样的断裂形貌观察，FSW 拉伸试样大多断裂于前进侧的熔合过渡区，呈 45° 剪切断裂，断裂形式为韧性断裂，这是由于此处的金属过渡激烈，容易造成起裂；而 MIG 焊缝接头大多断裂于热影响区，此处的晶粒粗大，晶粒与晶粒之间的界面处存在微小裂纹。

表 1 焊缝力学性能对比分析

序号	MIG 焊缝			FSW 焊缝		
	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%
1	285	180	10.5	365.5	190	22
2	270	175	9.5	360	185	20
3	270	174	9.0	355	180	19
4	275	175.5	9.5	356	181.7	19.7
5	275.6	173.6	9.7	355.5	183.3	18.3
6	278	170	8.6	350	180.6	18

针对 MIG 和 FSW 两种焊接方法所得焊缝进行了化学成分分析，结果见表 2。由表 2 可以发现，MIG 接头中 Mg、Mn 元素烧损较严重，而 FSW 焊缝成分与母材基本一致。Mn 在合金中的作用是使含 Mg 相

沉淀均匀，提高合金的抗腐蚀性及强度，且确保合金的稳定性；Mg 可在显著提高合金强度的同时保证材料塑性不过分降低。

表 2 焊缝接头主要合金元素含量 %

序号	合金元素	MIG 焊缝	母材	FSW 焊缝	母材
1	Si	0.075	0.106	0.078	0.080
2	Fe	0.17	0.222	0.214	0.203
3	Cu	0.095	0.026	0.028	0.023
4	Mn	0.329	0.59	0.56	0.56
5	Mg	5.30	6.28	6.30	6.10
6	Ti	0.058	0.031	0.041	0.038
7	Al	94.0	92.7	92.8	93.0

3.3 焊缝残余应力

为了对比两种焊接方法焊缝表面的残余应力，采用 X 射线衍射法对焊缝表面的残余应力进行检测^[5]，所采用的参数为：Φ3 光斑，Al（222）晶面；弹性模量使用 71GPa，泊松比为 0.32，其测试结果参见表 3。从表 3 中可以发现，FSW 焊缝表面的残余应力为压应

力，而 MIG 焊缝表面的残余应力为拉应力，且 FSW 焊缝表面的残余应力水平比 MIG 小，这是由于搅拌摩擦焊缝的表面受到锻压作用而且晶粒子细小，从而表现为压应力，而熔焊的焊缝表面由于受到热胀冷缩的影响，其表面呈现拉应力。因而，搅拌摩擦焊接试板的变形小，而熔化极氩弧焊的试板容易翘曲变形。

表 3 焊缝表面残余应力

试样号	焊接方向/MPa	垂直于焊接方向/MPa
FSW-1	-21.2±3.0	-20.7±7.0
FSW-2	-25.8±3.8	-8.1±1.5
FSW-3	-16.5±2.3	-15.7±5.1
MIG-1	66.3±0.9	77.1±3.1
MIG-2	107.2±3.2	107.0±3.4
MIG-3	130.9±2.9	82.2±2.4

注：“+”——拉应力，“-”——压应力。

4 结束语

- a. 对于焊接性能好的 5A06 厚板铝合金，采用搅拌摩擦焊比熔化极氩弧焊的接头性能优良，但对工装要求较高。
- b. 搅拌摩擦焊缝两侧存在熔合过渡区，其中前进侧的熔合过渡区的界面变化急剧，而返回侧的界面变化缓和，因此焊缝断裂往往发生于前进侧的熔合过渡区；熔化极氩弧焊缝的拉伸试样往往断裂于热影响区。
- c. 搅拌摩擦焊接头晶粒明显细化，Mg、Mn 等合金元素烧损少，接头力学性能高，焊缝表面的残余应

力水平也较低。

参考文献

1 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006

2 周永杰,孙德超,邢丽,等. 5A06 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和应力腐蚀行为分析[J]. 国外金属加工, 2004, 25(3): 45~49

3 刘雪梅,张彦华,邹增大,等. 先进摩擦焊接技术的开发与应用[J]. 热加工工艺, 2006, 35(7): 49~52

4 彭杏娜,曲文卿,张国华. 焊接方法对 2219 铝合金性能及组织的影响[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 57~60

5 张定铨,何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999

(上接第 24 页)

5 结束语

- 利用 2kW YAG 激光器,当激光功率为 1kW 时成功拼焊了 $\varnothing$ 93mm 细晶 TC4 板,在 880℃和应变速率 $10^{-3}s^{-1}$ 下进行了 TC4 激光拼焊板超塑成形研究。TC4 激光拼焊板的超塑成形极限与母材相当。将激光拼焊板焊缝和扩散连接 (DB) 区域错开,TC4 激光拼焊板可以作为 SPF/DB 毛坯,整体成形大型/特大型钛合金零部件。
- a. 在较佳激光焊接工艺参数下,熔池区未出现裂纹或大的气孔,热影响区尺寸约为 0.3~0.4mm。熔池区出现大量针状 α' 马氏体。TC4 激光拼焊板室温拉伸结果表明焊缝强度高于母材。
- b. 在 880℃和应变速率 $10^{-3}s^{-1}$ 下,对比研究了 TC4 激光拼焊板和其母材的超塑成形极限。破裂时,二者的厚向真应变均约为-2.13。
- c. 在超塑成形初期,激光拼焊过程中产生的针状 α' 马氏体,逐渐转变为板条马氏体;随着超塑变形量

增大,在马氏体中过饱和元素扩散协调下的动态再结晶使板条马氏体破碎, $\alpha+\beta$ 组织分数逐渐增多。

参考文献

1 付刚,胡刚. TC4 钛合金超塑成形/扩散连接后电子束焊接技术[J]. 航空制造技术, 2004(12): 72~74

2 田锦,刘金合. 钛合金激光焊接接头质量控制工艺的研究现状[J]. 热加工工艺, 2008, 37(7): 93~98

3 朱秀君,熊建刚,等. 钛合金 TC4 的激光焊接[J]. 激光焊接技术, 2004, 34(9): 13~16

4 Cao X, Jahazi M. Effect of welding speed on butt joint quality of Ti6Al4V alloy welded using a high-power Nd: YAG laser [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009(47): 1231~1241

5 程东海,黄继华,林海凡. 钛合金激光焊缝的超塑性变形行为及显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2010(20): 67~71

6 Wang Gang, Zhang Wencong. Superplastic formability of Ti-6Al-4V butt-welded plate by laser beam welding [J]. Transaction of Nonferrous Met. Soc. China, 2009, 19: 429~433

7 林兆荣. 金属超塑性成形原理及应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990

8 蔡云. TC4 高温拉伸力学性能研究和组织演变[D]. 南京: 南京航空航天大学硕士论文, 2009

