

脉冲 TIG 焊参数对铝合金焊缝组织与性能的影响

潘 攀, 刘俊杰, 马 吉

(上海空间推进研究所 上海 201112)

摘 要: 通过采用脉冲变极性 TIG 焊接方法对 1.5 mm 厚的 5A06 铝合金和 L3 纯铝以及 3 mm 厚的 5A06 铝合金和 5A06 铝合金试板进行焊接试验, 研究了在其它两个条件不变的情况下脉冲频率、基值电流和占空比分别对焊缝组织与力学性能的影响规律。研究表明: 当脉冲频率为 100 Hz, 基值电流为峰值电流的 10%~33%, 占空比为 50%~66% 时, 焊缝具有良好的组织和力学性能。

关键词: 脉冲变极性 TIG 焊; 脉冲频率; 基值电流; 占空比

中图分类号: V463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0052-06

Influence of welding parameters of pulse TIG on weld microstructure and mechanical property of aluminum alloys

PAN Pan, LIU Jun-jie, MA Ji

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: Two welding tests of 1.5 mm 5A06 aluminum alloy plate welded with 1.5 mm L3 aluminum plate and 3 mm 5A06 aluminum alloy-plate with 3 mm 5A06 aluminum alloy plate were conducted by welding method of pulse changing polarity TIG. The influence rule of pulse frequency, basic value current and duty ratio on weld microstructure and mechanical property was researched when other two conditions were unchanged. The research indicates when pulse frequency is 100 Hz, basic value current is 10%~33% of peak value current and duty ratio is 50%~66%, the welded joint possesses good microstructure and mechanical property.

Keywords: pulse changing polarity TIG; pulse frequency; basic value current; duty ratio

收稿日期: 2012-07-12; 修回日期: 2012-12-19

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目 (2007JY06)

作者简介: 潘攀 (1983—), 男, 工程师, 研究领域为氩弧焊、电子束焊

0 引言

5A06 铝合金是 Al-Mg 系非热处理强化铝合金, 它具有较高的比强度、优良的抗腐蚀性能和较好的可焊性。L3 纯铝具有优异的塑性变形能力、较好的可焊性且不易产生裂纹。因此这两种材料被应用于空间飞行器推进分系统的推进剂金属膜片贮箱的壳体 and 膜片。由于铝和铝合金在空气中容易被氧化, 在其表面形成一层致密难熔、体积质量大的氧化膜, 焊接过程中该氧化膜阻碍基体金属的熔合, 容易造成焊接缺陷, 特别是金属膜片贮箱的焊缝较薄, 使这两种材料焊接时容易产生烧穿等缺陷^[1]。因此国内采用了较为先进的脉冲变极性 TIG 焊接方法进行铝合金的焊接, 该方法可以分别设置正向焊接电流、反向清理电流、清理密度以及脉冲参数, 能按照实际需要的阴极清理强度和密度进行铝合金焊接, 从而在保证最佳焊接质量的同时, 提高焊接效率, 降低焊接变形^[2-3]。本文主要研究脉冲频率、基值电流和占空比 3 个脉冲特性对 5A06+L3 铝合金焊缝组织

影响规律以及对 5A06+5A06 铝合金焊缝抗拉强度的变化趋势。

1 试验条件

焊接工艺试验采用 CWL-3000-XM 环缝自动焊接系统, 焊接电源采用美国 Miller 公司的 AroWave300 变极性焊接电源, 焊接电源、焊接速度以及送丝系统均由线性控制系统 XM 控制。该电源可提供脉冲方波电流, 脉冲频率、基值电流 (用脉冲电流的百分比表示) 和占空比由 DSP 控制器进行调节。焊接用焊枪喷嘴直径为 10 mm, 钨极直径为 3.2 mm。焊接试板有 3 种, 分别为 390 mm×90 mm×1.5 mm 5A06 铝合金试板、390 mm×90 mm×1.5 mm L3 纯铝试板和 390 mm×90 mm×3 mm 5A06 铝合金试板。焊前对焊接区正、反、端面刮削去除氧化膜, 所用焊丝牌号为 5B06, 直径为 2.0 mm, 母材和焊丝的化学成分见表 1。焊接时用氩氦混合气保护, 氩气和氦气的比例为 7: 3, 采用平板对接背面用开槽碳钢衬板强制成型。

表 1 L3, 5A06 母材和 5B06 焊丝的化学成分 (重量%)
Tab. 1 Chemic composition weight of L3 testing plate, 5A06 testing plate and 5B06 welding rod

材料	成 分								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	其他	Al
L3	≤0.35	≤0.6	≤0.1	≤0.05	≤0.05	≤0.1	≤0.03	≤0.03	余量
5A06	≤0.4	≤0.4	≤0.1	0.5~0.8	5.8~6.8	≤0.2	0.02~0.1	≤0.1	余量
5B06	≤0.4	≤0.4	≤0.1	0.5~0.8	5.8~6.8	≤0.2	0.1~0.3	≤0.1	余量

在其他两个条件不变的情况下, 分别采用不同脉冲频率、基值电流、占空比对 14 对 1.5 mm 厚 5A06 和 L3 试板分别进行焊接, 焊接参数见表 2。焊接后将 1#~14# 试板沿垂直焊缝方向切取金相试样, 使用试剂 (HF 酸 10%+硝酸 10%) 浸蚀抛光试样, 在 Olympus D11 型光学显微镜下观察焊缝的显微组织。由于纯铝较软, 1.5 mm 厚

5A06 和 L3 试板焊缝的抗拉强度不能代表真实焊缝的拉伸性能, 为了研究脉冲特性对焊缝真实力学性能的影响, 采用上述相应的脉冲参数对 14 对 3 mm 厚 5A06 和 5A06 试板分别进行焊接, 焊接参数见表 3。焊态条件下, 将 1-1#~1-14# 试板加工成标准拉伸试样在 Instron 5569 万能试验机上进行拉伸试验, 拉伸速度为 2 mm/min。

表 2 1.5 mm 厚 5A06 和 L3 试板焊接参数表

Tab. 2 Welding parameters of 1.5 mm 5A06 and L3 testing pieces

试样号	脉冲频率/Hz	基值电流/%	占空比/%	焊接电流/A	送丝量/(mm·min ⁻¹)
1#	0	33	66	50~56	500
2#	1	33	66	60~65	500
3#	20	33	66	53~60	500
4#	100	33	66	50~56	500
5#	100	10	66	55~60	500
6#	100	30	66	53~58	500
7#	100	50	66	52~57	500
8#	100	70	66	51~55	500
9#	100	90	66	50~54	500
10#	100	33	10	57~62	500
11#	100	33	30	56~61	500
12#	100	33	50	54~60	500
13#	100	33	70	52~58	500
14#	100	33	90	51~55	500

表 3 3 mm 厚 5A06 和 5A06 试板焊接参数表

Tab. 3 Welding parameters of 3 mm 5A06 and 5A06 testing piece

试样号	脉冲频率/Hz	基值电流/%	占空比/%	焊接电流/A	送丝量/(mm·min ⁻¹)
1-1#	0	33	66	90~98	900
1-2#	1	33	66	110~120	900
1-3#	20	33	66	100~107	900
1-4#	100	33	66	90~100	900
1-5#	100	10	66	95~103	900
1-6#	100	30	66	93~101	900
1-7#	100	50	66	90~99	900
1-8#	100	70	66	88~98	900
1-9#	100	90	66	85~99	900
1-10#	100	33	10	100~108	900
1-11#	100	33	30	97~105	900
1-12#	100	33	50	95~104	900
1-13#	100	33	70	92~100	900
1-14#	100	33	90	90~96	900

2 试验结果与分析

2.1 脉冲频率对接头显微组织的影响

图 1 是在基值电流和占空比均不变而脉冲频率不同条件下 1.5 mm 厚 5A06 和 L3 焊接接头的焊缝中心区显微组织。从图 1 中可以看出未加入

脉冲电流作用时焊缝组织以较粗大的树枝晶为主；加入脉冲电流后，当脉冲频率较低为 1 Hz 时，焊缝组织以等轴树枝晶为主；当脉冲频率增加到 20 Hz 以上时，焊缝中出现了细小的等轴非枝晶组织，并与焊缝等轴树枝晶交替分布。而且随着脉冲频率的提高，Al 基 α 固溶体基体中析出的 β (Al_3Mg_2) 相增多，呈弥散分布。

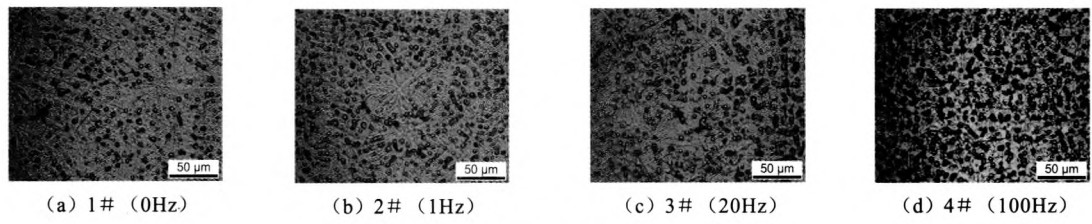


图 1 不同脉冲频率下焊缝显微组织照片

Fig. 1 Pictures of welding seam microstructure at different pulse frequencies

根据电磁场理论^[4-7], 随着脉冲频率的增加, 在焊接熔池内部就会感应产生一个高频脉动电磁场, 使得熔池内部液态金属晶核粒子受高频脉动电磁力等的综合作用而呈复杂规律性的循环和涡旋运动, 并对临近焊缝熔合区区域产生强烈的冲刷作用。一方面强烈的冲刷可有效破碎刚结晶形成的晶粒组织, 在抑制晶粒长大的同时, 破碎的晶粒成为新晶粒的形核核心; 另一方面还可以将熔合区部分未熔的高熔点粒子如 Al_3Ti 等带入焊缝中心, 成为高效的异质形核质点, 使得熔池中非均匀形核数量明显增加^[8-10]。

另外, 从金属结晶热力学角度分析, 熔池液态金属的规律性的流动有利于促进熔池液体金属温度的均匀性, 有效降低熔池金属固-液相界面前沿的液相温度梯度, 使得成分过冷范围增大, 促进了焊缝组织中细小等轴晶的形成, 明显细化了焊缝组织^[11-12]。

2.2 脉冲频率对接头力学性能的影响

表 4 是在基值电流和占空比均不变而脉冲频率不同条件下 3 mm 厚 5A06 和 5A06 铝板焊接接头的力学性能试验数据。

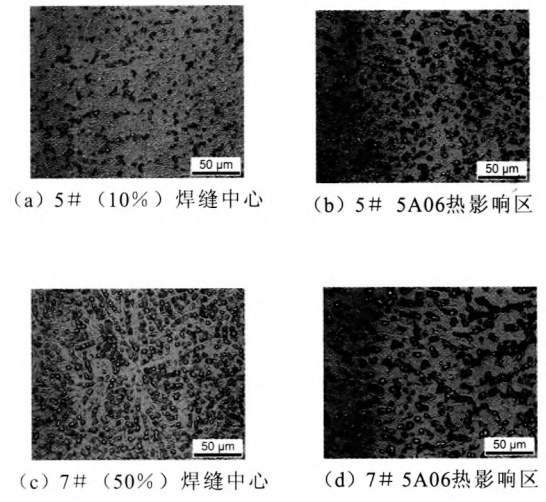
表 4 在不同脉冲频率下焊接接头力学性能
Tab. 4 Mechanic properties of welding joints at different pulse frequencies

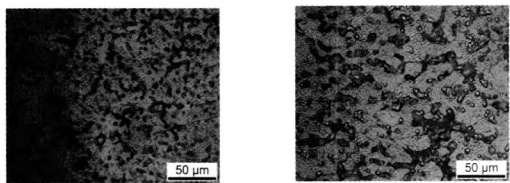
试样号	抗拉强度/MPa	延伸率/%
母材	353	22.3
1-1#(0 Hz)	285	12.5
1-2#(1 Hz)	298	12.7
1-3#(20 Hz)	327	20.6
1-4#(100 Hz)	334	19.3

从表 4 可看出, 随着脉冲频率的增加, 焊接接头的抗拉强度和延伸率均提高, 100 Hz 的抗拉强度为 334 MPa, 延伸率为 19.3%。主要原因是随着脉冲频率的增加, 熔池的振荡作用增加, 焊接接头组织更加细密, 弥散分布的第二相增多, 使焊接接头抗拉强度和延伸率提高。当频率提高到一定程度时, 高频电弧的电磁收缩效应增加, 电弧刚性增大, 轴向指向性增强, 熔透性增强。

2.3 基值电流对接头显微组织的影响

图 2 是在脉冲频率和占空比均相同而基值电流不同条件下 1.5 mm 厚 5A06 和 L3 焊接接头的焊缝及热影响区显微组织, 从图 2 中可以看出, 随着基值电流的增加, 焊缝中心区域组织有不同程度的细化, 析出第二相增多, 由于枝晶偏析的影响, 焊缝中都有少量的气泡产生。相反 5A06 热影响区组织和析出的第二相都有明显变大的趋势, 主要因为随着基值电流增大, 试板预热增强, 熔池冷却速度减小, 导致试板上热积累增加, 焊缝热影响区组织增大。





(e) 9# (90%) 焊缝中心 (f) 9# 5A06热影响区

图 2 不同基值电流条件下焊缝及热影响区显微组织照片

Fig. 2 Microstructure pictures of welding seam and heat infection area at different basic value currents

2.4 基值电流对接头力学性能的影响

表 5 是在脉冲频率和占空比均相同而基值电流不同条件下 3 mm 厚 5A06 和 5A06 焊接接头的力学性能试验数据。

表 5 在不同基值电流下焊接接头力学性能

Tab. 5 Mechanic properties of welding joint at different base value current

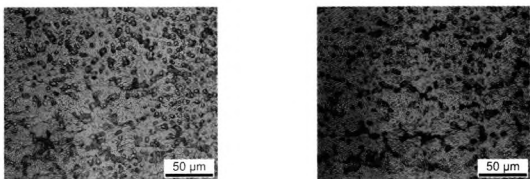
试样号	抗拉强度/MPa	延伸率/%
1-5#(10%)	340	20.9
1-6#(30%)	338	19.7
1-7#(50%)	334	19.5
1-8#(70%)	311	13.8
1-9#(90%)	308	13.4

从表 5 中可以发现，随着基值电流的增加，焊接接头的力学性能是降低的。当基值电流为 10%时抗拉强度为 340 MPa，延伸率为 20.9%；当基值电流为 50%时力学性能基本与基值电流为 10%时相当；当基值电流为 90%时力学性能明显下降。主要是由于基值电流增加，试板热积累效应增加，焊缝热影响区组织粗大，焊缝力学性能有下降趋势。

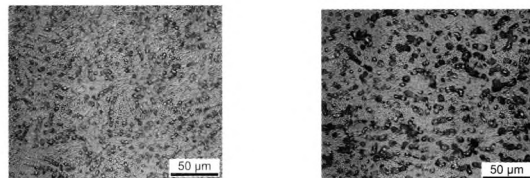
2.5 占空比对接头显微组织的影响

图 3 是在脉冲频率和基值电流均相同而占空比不同条件下 1.5 mm 厚 5A06 和 L3 焊接接头的焊缝及热影响区显微组织。从图 3 可以得出，占空比为 50%时焊缝中心区组织最为细小，且第二相粒子析出增多。随着占空比增加，焊缝热影响区组织和析出相有变大趋势，这是由于随着占空

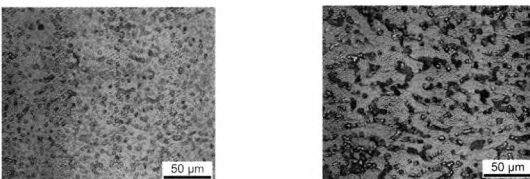
比增加，焊缝熔透增强，占空比继续增加时，热影响区组织粗大，第二相不断长大。



(a) 10# (10%) 焊缝中心 (b) 10# 5A06热影响区



(c) 12# (50%) 焊缝中心 (d) 12# 5A06热影响区



(e) 14# (90%) 焊缝中心 (f) 14# 5A06热影响区

图 3 不同占空比条件下焊缝及热影响区显微组织照片

Fig 3 Microstructure pictures of welding seam and heat infection area at different duty ratios

2.6 占空比对接头力学性能的影响

表 6 是在脉冲频率和基值电流均相同而占空比不同的条件下 3 mm 厚 5A06 和 5A06 焊接接头的力学性能试验数据。

表 6 在不同占空比下焊接接头力学性能

Tab. 6 Mechanic properties of welding joint at different duty ratio

试样号	抗拉强度/MPa	延伸率/%
1-10#(10%)	334	19.1
1-11#(30%)	339	20.3
1-12#(50%)	344	21.5
1-13#(70%)	315	15.7
1-14#(90%)	298	10.7

从表6可看出,随着占空比增加,焊缝力学性能先增加后降低,在占空比为50%时最大抗拉强度为344 MPa,延伸率为21.5%。主要由于随着占空比增加,焊缝熔透增加,焊缝力学性能上升。占空比继续增加时,焊缝热影响区增加,晶粒粗大,焊缝力学性能下降。

3 结论

1) 用脉冲变极性TIG焊接5A06与L3试板时,脉冲频率大小对接头组织和力学性能产生了重要影响。适当选择脉冲频率可达到细化焊缝组织,提高焊缝力学性能的目的。在基值电流为33%,占空比为66%的条件下,随着脉冲频率在一定范围内增加,焊缝区组织由粗大的树枝晶逐渐转变为细小的等轴晶。焊缝力学性能不断得到改善,在100 Hz时抗拉强度达到最大334 MPa,延伸率为19.3%。

2) 在脉冲频率为100 Hz,占空比为66%的条件下,随着基值电流在一定范围内增加,5A06与L3焊缝区组织有不同程度的细化,而焊缝热影响区组织和析出相都有变大的趋势。这在一定程度上影响焊缝的力学性能,当基值电流在10%~50%变化时焊缝力学性能基本相当,当基值电流大于50%时力学性能明显下降。基值电流为10%时,接头抗拉强度最大为340 MPa,延伸率为20.9%。

3) 在脉冲频率为100 Hz,基值电流为33%的条件下,随着占空比在一定范围内增加,5A06与L3焊缝区组织先细化后粗化,但焊缝热影响区组织和析出相都有不断增大趋势,导致接头力学性能先上升后下降,在占空比为50%时,抗拉强度最大为344 MPa,延伸率为21.5%。

参考文献:

- [1] 姚君山,周万盛.铝及铝合金的焊接[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 陈树君,张宝良,殷树言,等.双脉冲变极性波形对铝合金TIG焊接质量的影响[J].电焊机,2006,26(2): 16-18.
- [3] 廖希亮.脉冲电流对金属凝固组织的影响[D].上海:上海大学,2007.
- [4] HUANG C, KOU S. Partially melted zone in aluminium welds solute segregation and mechanical behaviour [J]. Welding Journal, 2001, 80(1): 9-16.
- [5] 廖平,陈书杰.薄板铝合金脉冲交流TIG焊工艺[J].焊接学报,2003,24(4): 65-67.
- [6] NORRISH J. 先进焊接方法与技术[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [7] 周振丰,张文钺.焊接冶金与金属焊接性[M].北京:机械工业出版社,1986.
- [8] 胡汉起.金属凝固原理[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [9] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic [J]. Materials Science and Engineering(A), 1984, 65(1): 75-83.
- [10] 李来平,冯林平,黄霞,等.脉冲TIG焊工艺参数对2A14铝合金接头力学性能影响的研究[C].中国机械工程学会.第十五次全国焊接学术会议论文集,2010.
- [11] 潘红斌.铝合金LF6交流脉冲TIG焊的工艺研究[J].太原科技,2002,2(1): 24-27.
- [12] 杨春利,林三宝.电弧焊基础[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.
- [13] 乔及森,余江瑞,苟宁年,等.微观组织对2A12铝合金熔焊接头力学性能的影响[J].焊接学报,2011,32(9): 5-8.
- [14] 汪洪峰,左敦稳,王宏宇,等.5554铝合金TIG焊缝组织与性能[J].南京航空航天大学学报,2010,42(6): 753-757.
- [15] 杜旭初,洪润洲,罗传彪,等.ZL205A高强铸造铝合金焊接接头的组织与性能研究[J].轻合金加工技术,2010,38(4): 44-47, 57.
- [16] 张亮,王少刚,马寅.焊接工艺对2024铝合金接头组织与性能的影响[J].电焊机,2009,39(7): 52-55, 80.
- [17] 陈树海,马柯,黄继华,等.钢/铝异种金属双熔池TIG熔钎焊接头的显微组织与力学性能[J].中国有色金属学报,2011,21(12): 3076-3081.
- [18] 从保强,齐铂金,李伟,等.脉冲电流频率对2219铝合金焊缝组织性能的影响[J].焊接学报,2010,31(9): 37-40.

(编辑:张永秀)