

振动条件下硬铝合金 TIG 焊接的工艺优化

苏允海, 艾星宇, 张桂清, 刘继国

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 采用 Al-Si 系焊丝对 Al-Cu-Mg 硬铝合金进行半自动 TIG 焊, 焊接过程中施加机械振动. 采用正交试验方法对工艺参数进行优化, 并对不同工艺参数下硬铝合金的焊接接头进行拉伸性能、硬度、显微组织和物相分析, 分析振动参数和焊接参数对焊接接头组织性能的影响规律和作用机理. 结果表明, 最佳工艺匹配参数为: 焊接电流 $I=110$ A、振动幅度 $D=0.05$ mm、振动频率 $f=50$ Hz, 此时接头的性能为: 抗拉强度 $R_m=289.68$ MPa, 断后伸长率 $A=4.95\%$, 焊缝平均硬度 H 为 108.0 HV; 合适参数的振动可以细化焊缝区显微组织、抑制孔状缺陷, 并使焊缝显微组织为细小的等轴树枝晶和胞状树枝晶为主, 进而提高焊接接头综合力学性能.

关键词: 硬铝合金; 显微组织; 力学性能; 强化机理

中图分类号: TG 406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)05-0112-04

0 序 言

硬铝合金由于具有较高的强度、硬度, 较低的密度, 在航空航天、轨道交通以及新能源汽车中应用非常广泛. 但是由于其特有的物理性能使其焊接性不佳, 传统的熔焊方法在硬铝的焊接过程中使用不多 (高强度专用盘丝无法满足实际需要), 主要采用搅拌摩擦焊之类的固相焊, 但是由于固相焊对焊缝的结构、位置有所局限, 使得硬铝的焊接成为禁锢其发展的一个软肋^[1,2]. 一般情况下, 在硬铝的熔焊过程中采用低强度异质焊丝, 这使得接头强度下降得非常明显. 为了提高硬铝合金焊接接头的强度, 将机械振动引入到硬铝合金的 TIG 焊过程中. 振动焊接技术是在正常的焊接过程中给工件施加周期性的外力 (激振力), 迫使工件在周期性的振动条件下进行焊接的一种新型焊接工艺. 振动焊接工艺具有细化晶粒、减少气孔、减少夹杂和振动时效降低残余应力这几大优点, 使得振动焊接技术能极大的改善焊接接头的组织和性能^[3-5]. 虽然振动具有良好的机械搅拌作用, 但并不是所有振动条件下都能起到预期的效果, 使用时振动参数必须与焊接工艺参数进行配合达到最佳效果, 在参数优化时若采用单因素循环试验, 工作量大且无法体现因素之间的关联性, 因此采用正交试验进行优化, 具体参数包括: 振动幅度 D 、振动频率 f 、焊接电流 I , 而每个因素取 4 个变化水平.

1 试验方法

试验所用的母材为 2A12-T4 铝合金板, 其化学成分 (质量分数) 为: 5.13% Si, 0.12% Fe, 0.1% Cu, 0.1% Mg, 0.1% Ti, 其余为 Al. 试验所用焊丝为 Al-Si 系的 ER4043 和 Al-Cu 系的 ER2319 两种焊丝, 规格均为直径 1.2 mm. 采用琴键式卡具对铝合金试板装卡, 并将卡具固定在振动台上. 振动台能够实现垂直振动. 将焊枪固定在可无极调速的自动行走小车上, 通过手持自动送丝枪, 实现半自动化 TIG 焊接. 焊后需对焊接接头进行通过拉伸、硬度、金相、X 射线衍射等试验, 其中焊接接头横向拉伸试验采用万能拉伸试验机进行拉伸, 硬度采用维氏硬度计来测量. 正交试验选用 L_4^4 模型, 具体参数如表 1 所示.

表 1 试验工艺参数

Table 1 Parameters of orthogonal experiment

试验组别	焊接电流 I /A	振动频率 f /Hz	振动幅度 D /mm
1	105	30	0.03
2	105	40	0.04
3	105	60	0.05
4	105	50	0.06
5	110	30	0.04
6	110	40	0.03
7	110	60	0.06
8	110	50	0.05
9	120	30	0.05

2 试验结果及分析

2.1 工艺参数对力学性能的影响

图 1 为焊接接头抗拉强度和断后伸长率随工艺参数的变化曲线。从图 1 中可以看出,接头抗拉强度随着焊接电流的增加先增加后降低(图 1a),在焊接电流 $I=110\text{ A}$ 时取得最大值;接头抗拉强度均值随振动幅度的增加先降低后增加,在振幅 $D=0.06\text{ mm}$ 时取得最大值;接头抗拉强度均值随振动频率的增加先增加后降低(图 1c),在振动频率 $f=50\text{ Hz}$ 时取得最大值。综合以上结果可知,对于焊接接头抗拉强度而言,最佳工艺参数匹配结果为:焊接电流 $I=110\text{ A}$,振动幅度 $D=0.06\text{ mm}$,振动频率 $f=50\text{ Hz}$ 。

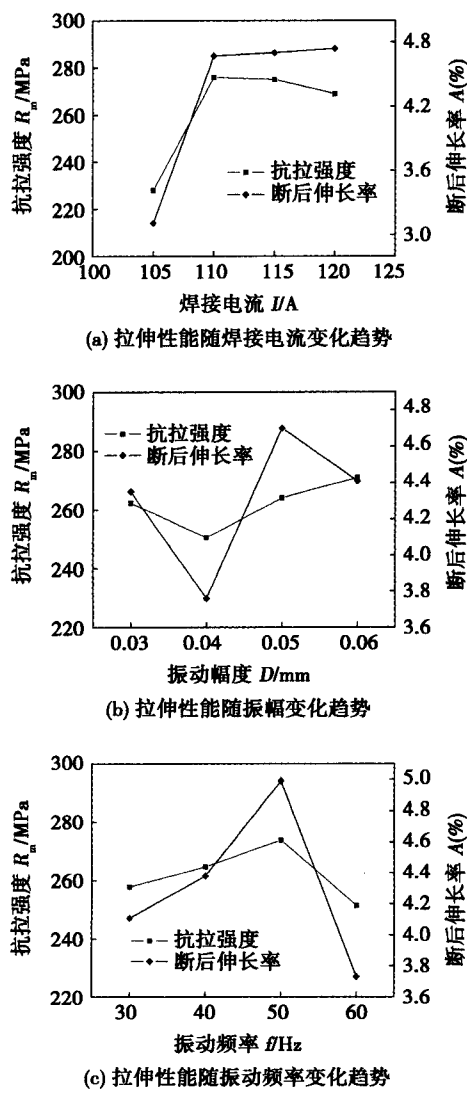


图 1 拉伸性能随工艺参数的变化曲线
Fig. 1 Tensile properties with different process parameters

变化趋势基本相同,都是随着焊接电流、振动频率的增大呈现出先增加后减小,如图 1a 和图 1c 所示;而焊接接头断后伸长率随振动幅度变化趋势则与上述两参数略有不同,呈波浪形,即随着振动幅度的增大,断后伸长率先减小后增大之后又减小,最大值在振幅 $D=0.05\text{ mm}$ 时取得。由此可以得出,对于焊接接头断后伸长率而言,工艺参数优化匹配结果为:焊接电流 $I=120\text{ A}$,振动幅度 $D=0.05\text{ mm}$,振动频率 $f=50\text{ Hz}$ 。

为了全面评定工艺参数对焊接接头力学性能的影响,在焊接接头拉伸性能进行测试以外,对焊接接头的显微硬度进行了测试分析,结果如图 2 所示。

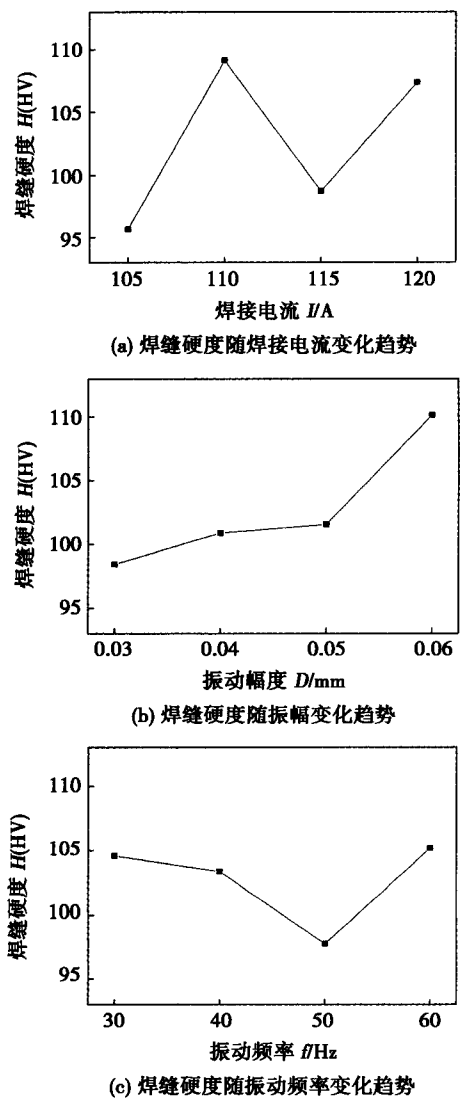


图 2 焊缝硬度随工艺参数的变化曲线
Fig. 2 Hardness of welded joint with different process parameters

从图 2 中可以看出,焊缝的维氏硬度随着焊接电流的增加呈波浪形变化,在焊接电流 $I=110\text{ A}$ 和

$I=120\text{ A}$ 时,焊缝区的硬度均较大,但是综合考虑到焊缝的成形性和焊缝硬度变化幅度(电流越大,焊接接头下塌越明显,影响后期的应用),确认焊接电流 $I=110\text{ A}$ 为最佳电流,如图 2a 所示;焊缝硬度随振动幅度的增加而增加(在振幅 $D=0.06\text{ mm}$ 时,焊缝硬度为 110.13 HV ,如图 2b 所示)。焊缝硬度随振动频率的增加先降低后增加,在振动频率 $f=60\text{ Hz}$ 时,焊缝平均硬度最高,如图 2c 所示。综合以上结果可知焊缝平均硬度的工艺优化匹配结果为:焊接电流 $I=110\text{ A}$,振动幅度 $D=0.06\text{ mm}$,振动频率 $f=60\text{ Hz}$ 。

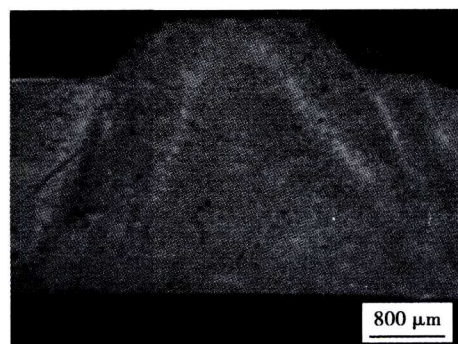
通过拉伸和硬度试验数据可以发现振动参数与焊接工艺优化匹配结果并不完全一致,对于抗拉强度、断后伸长率和硬度而言,最佳工艺参数虽然不是同一个值,但是变化不大,综合材料的具体应用特点,最终以抗拉强度的最佳参数为主,即焊接电流 $I=110\text{ A}$,振动幅度 $D=0.05\text{ mm}$;振动频率 $f=50\text{ Hz}$,此时的力学性能为:抗拉强度 $R_m=289.68\text{ MPa}$,断后伸长率 $A=4.95\%$,焊缝平均硬度为 108.0 HV 。

2.2 工艺参数对显微组织的影响

为了明确上述力学性能变化规律的原因,对接头的显微组织和物相组成进行分析。首先是将优化匹配的接头截面形貌与无振动($I=110\text{ A}$)的接头截面形貌进行对比分析,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,优化匹配的接头截面成形良好,没有根部变形和细微的孔状缺陷存在。说明此参数下的接头焊接工艺稳定,对孔状缺陷的消除能力较强。为了进一步分析焊缝区的显微组织变化特点,对上述两个接头焊缝区的组织进行观测,结果如图 4 所示。图 4a 为优化匹配的接头金相组织,振动方向如图中标注所示, α 固溶体主要由细小的等轴树枝晶(白色圆圈)和由振动产生的细小胞状树枝晶(白色箭头)组成。图 4b 为无振动的接头金相组织, α 固溶体由粗大的等轴树枝晶组成,并且等轴树枝晶的枝晶臂呈无规则生长,个别枝晶臂长得非常粗大(白色箭头)。对比可以看出,振动可以细化晶粒。在优化匹配的焊缝中心组织中没有孔状缺陷存在;在无振动的焊缝中心组织中存在较多的孔状缺陷。因为,氢在铝的固液两态中的溶解度相差 20 余倍,并且铝合金的导热系数大,未及时溢出的氢滞留在焊缝中形成了间隙氢气孔。若是施加合适的振动参数,振动对焊缝金属的结晶形核产生了积极的影响,一方面振动产生激振力能够促进熔池的流动细化晶粒,消除枝晶之间产生封闭孔隙的倾向;另一方面振动能够延缓熔池金属凝固时间,并促进氢气在熔池中快速上浮,从而消除枝晶间隙氢气孔。综上所述,振动能够细化晶粒和消除枝晶间隙氢气孔,从而使施加振动的接头力学性能大幅提升。



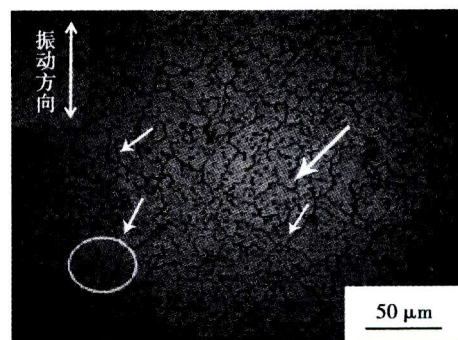
(a) 优化匹配接头



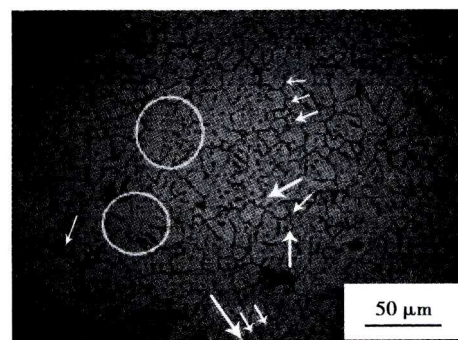
(b) 无振动接头

图 3 不同参数下接头截面形貌

Fig. 3 Cross section morphology of welded joint



(a) 优化匹配接头



(b) 无振动接头

图 4 焊缝金相组织

Fig. 4 Microstructure of weld bead

为了分析组织中晶粒的尺寸随振动参数的变化,采用 XRD 对金相进行检测,结果如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,两种参数下接头的物相组成中均只存在 α 固溶体(α -Al 相). 优化匹配的接头(111)晶面 X 射线衍射峰短而粗,无振动的接头(111)晶面 X 射线衍射峰细而长. 对其(111)晶面对应的衍射峰的半高宽 B 进行测量,结果显示,优化匹配的接头(111)晶面对应的衍射峰半高宽 $B_1 = 0.5^\circ$; 无振动的接头(111)晶面对应的衍射峰半高宽 $B_2 = 0.4^\circ$. 而半高宽与晶粒尺寸之间存在谢乐公式^[7,8],如式(1)所示,即

$$B = \frac{\lambda}{t \cos \theta}, \quad (1)$$

式中: $t = md$; m 为晶面数; d 为晶面间距. 半高宽 B 与晶粒尺寸呈反比关系,半高宽 B 越大,晶粒尺寸越小. 将 B_1, B_2 代入式(1)可知,最优匹配的接头晶粒尺寸要小于无振动的接头晶粒尺寸. 从而验证了振动对焊缝组织的细化作用.

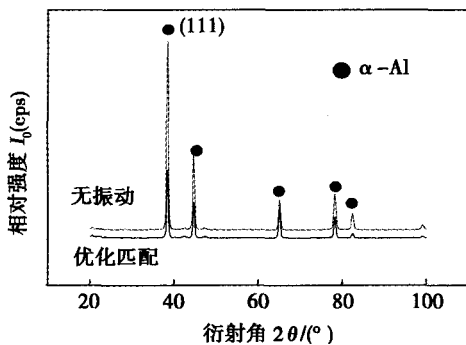


图 5 X 射线衍射试验对比

Fig. 5 X-ray diffraction experiment results

3 结 论

(1) 振动参数与焊接工艺之间的正交试验优化匹配结果为: $I = 110 \text{ A}$, $D = 0.05 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ Hz}$. 优化匹配的接头对应的抗拉强度 $R_m = 289.68 \text{ MPa}$, 断后伸长率 $A = 4.95\%$, 焊缝平均硬度为 108.0 HV .

(2) 合适的振动参数可以细化焊缝区显微组

织、抑制孔状缺陷,并使显微为细小的等轴树枝晶和胞状树枝晶为主,进而提高焊接接头综合力学性能.

参考文献:

- [1] 赵海洋. 铝合金搅拌摩擦焊接接头组织及疲劳断裂行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [2] Fallu J, Izadi H, Gerlich A P. Friction stir welding of co-cast aluminium clad sheet[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(1): 9-14.
- [3] Kuo C W, Yang S M. Study of vibration welding mechanism[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(4): 357-362.
- [4] 张国福, 宋天民, 尹成江, 等. 机械振动焊接对焊缝及热影响区金相组织的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 85-87. Zhang Guofu, Song Tianmin, Yin Chengjiang, et al. The effect of mechanical vibration welding on the microstructure of weld and HAZ[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 85-87.
- [5] 刘政军, 王初微, 苏允海. 低组配振动焊接接头组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 92-95. Liu Zhengjun, Wang Chuao, Su Yunhai. Microstructure and performance of low matched welded joint by vibratory welding technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 92-95.
- [6] 刘政军, 刘继国, 苏允海. Al-Cu-Mg 硬铝合金 TIG 焊接接头的组织与力学性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6): 629-633. Liu Zhengjun, Liu Jiguo, Su Yunhai. Microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of Al-Cu-Mg aluminum alloy[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6): 629-633.
- [7] Preston R V, Shercliff H R. Finite element modeling of tungsten inert gas welding of aluminium alloy 2024[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(1): 81-90.
- [8] Preston R V, Shercliff H R, Synchrotron. X-Ray measurement and finite element analysis of residual strain in tungsten inert gas welded alumina alloy 2024[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(12): 3629-3637.

作者简介: 苏允海,男,1980 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事材料焊接及表面强化技术的科研和教学工作. 发表论文 30 余篇. Email: 289646841@qq.com