

文章编号: 1002-025X(2012)07-0022-05

高强铝合金激光辅助TIG电弧复合焊接工艺及接头性能

王 波¹, 冉国伟², 薛国玉³

(1.扬州工业职业技术学院, 江苏 扬州 225127; 2.农业部规划设计研究院, 北京 100125; 3.潍坊东方钢管有限公司, 山东 潍坊 261011)

摘要:采用填丝TIG电弧焊、激光辅助TIG电弧复合焊2种焊接工艺进行了2014铝合金焊接试验,研究了焊接工艺与接头组织和性能的相关性。试验结果表明:与填丝TIG焊相比,激光辅助TIG电弧复合焊可以显著降低TIG电弧功率,减少热输入,细化焊缝组织,减少晶界共晶组织宽度,可有效减少甚至消除焊缝熔合区气孔缺陷,其焊接接头的力学性能、接头强度和塑性均得到增强。断口的SEM形态显示:2014铝合金激光辅助TIG电弧复合焊接头断口有大量初窝存在,呈韧性断裂。

关键词:激光;复合焊接;高强铝合金

中图分类号: TG444 **文献标志码:** B

0 前言

高强铝合金质量轻、加工性好、耐腐蚀性好、比强度高、比刚度高,在各工业部门特别是在航空、航天、新型汽车、高铁、国防及兵器工业上获得了越来越多的应用^[1-2]。对于高强铝合金材料,目前工业上普遍采用了填丝TIG氩弧焊工艺,但在焊接生

产中却容易产生气孔、裂纹等焊接缺陷,接头强度和焊接效率也较低。因此,需要探索新的焊接工艺,减少焊接过程产生的缺陷,提升焊接接头的力学性能^[3-4]。

激光-电弧复合焊接技术是英国伦敦帝国大学学者W Steen在20世纪70年代末期首次提出的^[5],根据激光、电弧能量配比和热源主导地位的不同,通常将激光-电弧复合焊接分为两类。一类为电弧辅助激光焊,即通常意义上的激光-电弧复合焊接方式。

收稿日期: 2012-02-22

基金项目: 国防基础科研资助项目 (K0300020402)

滤波后的分析,可以看出使用的滤波方法能有效去除焊接时的噪声、短路过渡和断弧等信号干扰,得到更直观的焊接电流信号波形。试验结果表明,原始电流信号经过改进的最小值滤波后,在进行自适应中值滤波比直接进行中值滤波效果要好得多,最后进行加权平均滤波和均值滤波,几乎完全去除了噪声的干扰,使得最终的电流波形成为一条光滑的曲线,有利于偏差信号的提取,为实现焊缝的自动跟踪提供了实时性和有效性。

参考文献:

- [1] 熊震宇, 张 华, 贾剑平, 等. 旋转电弧传感器的研制[J]. 传感器技术, 2003(7): 5-9.
- [2] 屈岳波, 洪 波, 潘际奎, 等. 低频旋转电弧传感器焊缝跟踪技

术[J]. 电焊机, 2005, 35(4): 52-55.

- [3] 潘际奎. 现代弧焊控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] TUKEY J W. Nonlinear (Nonsuperposable) methods for smoothing data [C]// Proceedings of the IEEE Electronics and Aerospace Systems Conference, New York, IEEE, 1974: 673-681.
- [5] 张旭明, 徐滨士, 董世运, 等. 自适应中值-加权均值混合滤波器[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 652-659.
- [6] 孙庆生. 改进的中值滤波算法在图像处理中的应用[J]. 长江大学学报, 2008, 5(4): 302-303.
- [7] 秦 虹, 王耀南, 朱 江, 等. 一种改进的极值均值自适应滤波算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(32): 180-182.

作者简介: 曾智英 (1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为信息系统及应用。

在这种方式中,激光占据主导地位。另一类为激光辅助电弧焊,在这种方式中,电弧能量占据主要地位,一般采用不足以形成深熔“小孔”的小功率激光辅助电弧进行焊接^[6-8]。2001年,美国的 C E AL-BRIGHT 等人首先对这种低功率激光辅助电弧焊接方法进行了研究,研究发现能量很低的激光束就能够引燃、引导和压缩电弧^[9]。

近年来,高强铝合金的激光-TIG 电弧复合焊接工艺试验表明:与填丝 TIG 电弧焊相比,激光-TIG 电弧复合焊可以显著提高焊接速度,减小热输入,细化焊缝组织,减小晶界共晶组织宽度,减小熔合区和热影响区的宽度,但由于温度梯度大,熔池冷却速度快,焊缝区晶粒与方位不均匀,焊接接头中易出现微气孔,致使焊接接头的力学性能和抗应力腐蚀性能均偏低^[10]。

基于以上背景,本文建立了一套小功率激光辅助 TIG 电弧复合焊接试验系统。以高强铝合金为试验材料分别进行了填丝 TIG 电弧焊和激光辅助 TIG 电弧复合焊的对接焊试验,焊接过程中实时监测电流、电压波形,焊后对 2 种焊接工艺的接头表面形貌、接头微观组织、力学性能进行了测试分析,探讨了高强铝合金焊接接头组织、性能与焊接工艺之间的相关性。

1 试验设备与方法

1.1 试验设备

激光辅助 TIG 电弧复合焊接试验系统如图 1 所示,系统采用了北京工业大学激光工程研究院研制的 1 kW 半导体激光器和 EWM 的 TETRIX521 交流 TIG 电焊机搭建而成。试验中激光的离焦量为 0,激光输出功率为 500 W,激光束与水平面夹角 75°,钨极距离工件 4 mm,距离激光束 4 mm,焊枪与水平面夹角 60°。

焊接过程采用美国 Tektronix 公司生产的 TDS3052B 数字式示波器对焊接电流、电压信号进行同步采集。

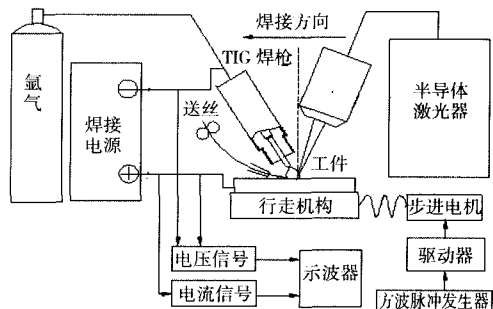


图 1 激光辅助 TIG 电弧焊接示意图

1.2 试验方法

试验所用的高强铝合金为 2014 铝合金,焊接试件的尺寸为 300 mm×150 mm,厚度为 6 mm,考虑到开坡口可以有效地引导焊丝进入熔池,因此对试件开坡口,坡口采用如图 2 所示的 Y 形坡口,钝边约为 3 mm。焊缝填充焊丝选用的是 $\phi 1.6$ mm 的 BJ380A 焊丝。合金含量高于母材的焊丝作为填充材料,通常可以防止焊缝产生裂纹。2014 铝合金及焊丝的化学成分见表 1、表 2。

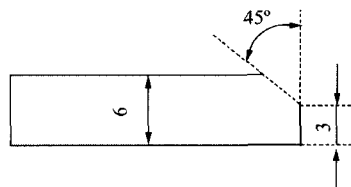


图 2 坡口尺寸图

表 1 2014 铝合金化学成分 (质量分数) (%)

Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Ti	Zr	V	Al
4.2	0.8	0.5	0.75	0.7	0.15	—	—	余量

表 2 BJ380A 焊丝化学成分 (质量分数) (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Al
4.7	0.30	2.3	≤0.05	0.25	余量

焊前对焊接试件和填充焊丝采用钢丝刷清洁表面,去除氧化膜。填丝 TIG 电弧焊保护气体为氩气,流量为 12 L/min。采用电流波形如图 3 所示的特殊交流 (脉冲峰值阶段为直流,脉冲基值阶段为方波交流) TIG 电弧进行焊接,有利于减小热输入和去除焊接过程中的氧化膜。激光辅助 TIG 电弧复合焊接试验采用 500 W 激光与 TIG 电弧复合后对试件进行焊接,其余焊接工艺参数与填丝 TIG 焊接工艺参数

完全相同,表3为填丝TIG电弧焊接工艺参数。

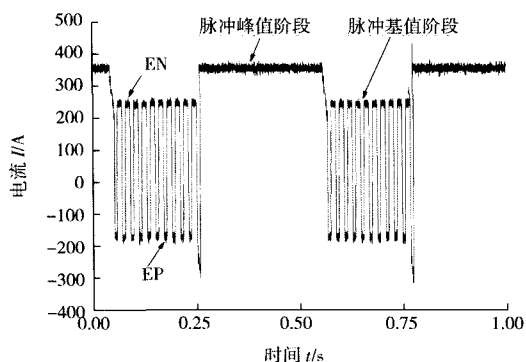


图3 特殊交流波形

表3 TIG电弧焊接工艺参数

焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	0.2
氩气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	12
脉冲峰值时间 t/s	0.3
脉冲峰值电流 I_H/A	350
脉冲基值时间 t/s	0.2
脉冲基值 EN 段电流 I_{EN}/A	240
脉冲基值 EP 段电流 I_{EP}/A	170
脉冲基值交流频率 f/Hz	50

焊接完成后,将试样沿横截面剖开,经过标准的金相制备工序制成试样进行观测,采用 OLYMPUS 激光共聚焦扫描显微镜进行微观组织的观察分析。接头拉伸试验是在 TH-8110S 伺服式电子万能试验机上进行的,加载速率为 0.1 m/min,最大载荷为 100 kN。拉伸试验按 GB/T 2654—2008《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》标准有关规定进行。

2 试验结果

2.1 TIG 电弧功率的对比

填丝 TIG 电弧焊和激光辅助 TIG 电弧复合焊焊接过程均进行了电流和电压信号的采集,发现 2 种焊接工艺中 TIG 电弧的脉冲峰值电流和脉冲基值电流都维持在同一数值,而电压却有了较大变化。激光辅助 TIG 电弧复合焊 TIG 电弧两极间的电压出现了明显的下降特征,在脉冲峰值阶段电压从 14 V 左右降低到了 8 V 左右,在脉冲基值阶段的 EN 时段电压从 12 V 降低到 5 V 左右,在 EP 时段电压没有明显的变化,为 17 V 左右。从填丝 TIG 电弧焊 TIG 电

弧功率图(图4)和激光辅助 TIG 电弧复合焊 TIG 电弧图(图5)可以看出:相对于填丝 TIG 电弧焊,激光辅助 TIG 电弧复合焊的 TIG 电弧的功率-时间图有较大变化,脉冲峰值阶段电弧的功率从 4.9 kW 下降到了 2.8 kW,脉冲基值阶段的 EN 时段电弧的功率从 2.9 kW 下降到 1.2 kW 左右,在脉冲基值阶段的 EP 时段电弧功率维持不变,为 2.9 kW。

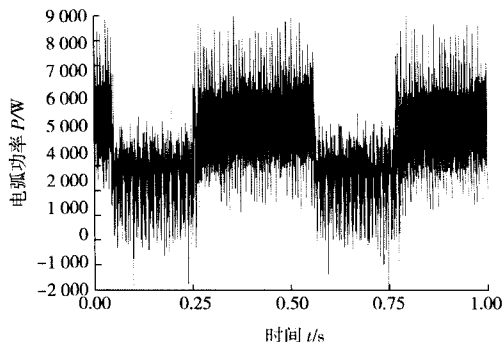


图4 TIG 焊电弧功率

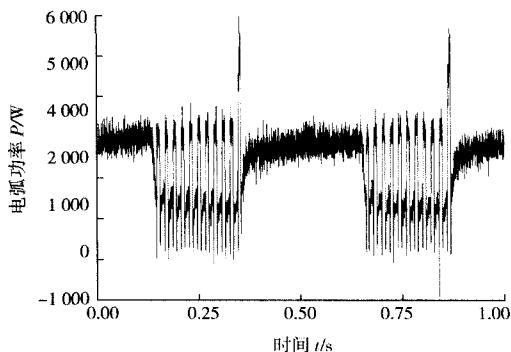


图5 激光辅助 TIG 焊电弧功率

2.2 焊缝成形比较

激光辅助 TIG 电弧复合焊焊缝表面形貌如图6所示,焊缝表面光亮、白净、熔透均匀,未见明显的表面缺陷,而且有美观的“鱼鳞纹”出现,“鱼鳞纹”较均匀说明焊接过程十分稳定,经过 X 射线探伤,未发现较大气孔、夹杂现象。与填丝 TIG 电弧焊接工艺相比,焊缝的正面熔宽有所降低,而且“鱼鳞纹”更均匀平整,这主要是由于电弧功率的改变造成的,激光加入电弧后,电弧的功率在脉冲峰值阶段下降了 2.1 kW,虽然脉冲基值阶段的 EN 时段也下降了 1.7 kW,但是在脉冲基值的 EP 时段,电弧的功率并没有减少,由于 EP 时段不光有清理氧

化膜的作用,而且也有向熔池输送热量的作用,其热量的输入并不亚于EN时段,所以造成了脉冲峰值阶段和脉冲基值阶段热输入量差值减小,反映在焊缝形貌上就是激光辅助TIG电弧复合焊焊缝的熔宽变小,鱼鳞纹均匀平整。



(a) 填丝 TIG 电弧焊

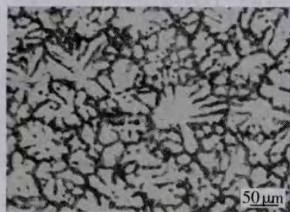


(b) 激光辅助 TIG 电弧复合焊

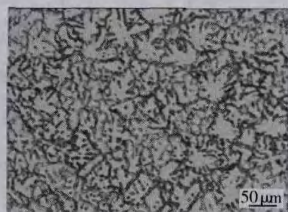
图6 2种焊接工艺焊缝表面形貌

2.3 接头微观特征分析

如图7所示,2014 高强铝合金2种焊接工艺所得的焊接接头焊缝中心区的晶体形态均为等轴晶,以 $\alpha(\text{Al})$ 为基体,大量 θ 相(CuAl_2)脱溶析出聚集在晶界附近。



(a) 填丝 TIG 电弧焊焊缝中心区



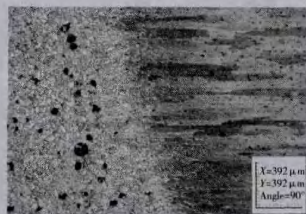
(b) 激光辅助 TIG 电弧焊焊缝中心区

图7 焊缝中心区微观组织

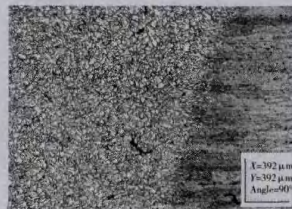
从图7可见,填丝TIG电弧焊焊缝中心组织晶粒比较粗大,晶界共晶相宽度大,晶内溶质元素含量相对较少。激光辅助TIG复合焊焊缝中心区组织晶粒比TIG焊晶粒细小,而且晶界共晶相宽度明显减少,晶内溶质元素含量明显变大。这是由于不同焊接工艺的热输入量不同,根据焊缝中溶质元素的偏析公式^[11]: $C_s = K_0 C_0 (1-g) K^{g-1}$, (C_s 为溶质元素在凝固物中的含量; K_0 为Cu元素的平衡分配系数; C_0 为合金的起始溶质元素含量; g 为已凝固金属所占的百分比),在焊接过程中,溶质元素的含量是随着过

冷度的增加而提高的。激光辅助TIG电弧焊热输入小,熔池金属高温停留时间较短,冷却速度大,枝晶前沿的过冷度大,液态物质中的溶质元素含量 C_0 较高,因此,与TIG焊相比,复合焊等轴晶基体中的溶质元素含量较高,晶界中的共晶相宽度较小。

图8为焊缝熔合区微观组织特征,可看出熔合区内的组织形态是不均匀的,填丝TIG电弧焊和激光辅助TIG电弧复合焊2种工艺熔合区微观组织为柱状树枝晶和胞状晶,填丝TIG焊焊缝熔合区出现了结晶层气孔,尺寸在 $50\sim 100\mu\text{m}$ 之间,激光辅助TIG电弧复合焊的焊缝熔合区未发现明显的气孔。据此推断,采用这种复合热源焊接工艺可有效减少甚至消除焊缝气孔缺陷。在单独TIG焊接时,电弧主要是依靠低频调制脉冲的振动排出气孔,熔池边缘的气孔由于得不到充分振动而难以排出,在加入激光能量后,电弧挺度增强,冲击力变大,熔池内的液体金属产生有规则的循环流动,将熔池边缘的气孔带出,有效地促进熔池边缘的气孔逸出。



(a) 填丝 TIG 电弧焊焊缝熔合区



(b) 激光辅助 TIG 电弧焊焊缝熔合区

图8 焊缝熔合区微观组织

2.4 接头的拉伸力学性能及断口SEM形貌

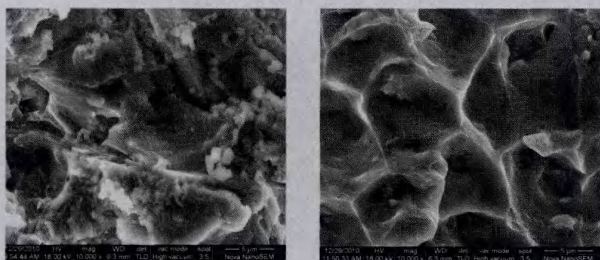
由于2种工艺焊接接头断裂的位置均在靠近熔合线的焊缝区,所以这一区域是整个焊接接头最薄弱的部位,2种工艺焊接接头拉伸力学性能见表4,激光辅助TIG电弧复合焊接接头性能相对填丝TIG焊接接头,抗拉强度提高了11.2%,断后伸长率提

高了14.3%。与填丝TIG焊相比,激光辅助TIG电弧复合焊接头中晶内溶质元素含量增加,晶界共晶组织宽度减少,因此焊缝的强度随之增大。

表4 焊接接头的力学性能

焊接工艺	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)
填丝 TIG 焊	284	3.5
激光辅助 TIG 焊	316	4

填丝TIG焊接头拉伸断口形态如图9a所示,断口主要由粗大的穿晶解理平面组成,韧窝不多,表现为脆性断裂为主的韧性+脆性混合型断裂。激光辅助TIG复合焊接头拉伸断口形态如图9b所示,断口上有大量韧窝,呈微孔聚集型断裂,属于韧性断裂,而且在韧窝边缘类似尖棱亮度较大,底部平坦亮度较暗有第二相粒子存在,这是由于试样在拉伸变形时,基体界面与第二相粒子首先裂开形成裂纹(韧窝)源。随着应力增大,变形量增大韧窝逐渐撕开,韧窝周边形成较大突起撕裂棱。



(a) 填丝 TIG 电弧焊

(b) 激光辅助 TIG 电弧焊

图9 断口SEM形态

断口特征的分析与拉伸试验结果一致,2014铝合金的激光辅助TIG电弧复合焊接接头较填丝TIG焊接头有更好的力学性能。

3 结论

(1) 采用填丝TIG电弧焊和激光辅助TIG电弧复合焊进行2014铝合金焊接,与填丝TIG焊相比,激光辅助TIG电弧复合焊的TIG电弧功率-时间图有较大变化,脉冲峰值阶段电弧的功率从4.9 kW下降到了2.8 kW,脉冲基值阶段的EN时段电弧的功率从2.9 kW下降到了1.2 kW左右,在脉冲基值阶段

的EP时段电弧功率维持不变,为2.9 kW。

(2) 激光辅助TIG电弧复合焊可以减小焊缝的正面熔宽,减小热输入,细化焊缝组织,减小晶界共晶组织宽度,有效地减少甚至消除焊缝熔合区气孔缺陷。

(3) 激光辅助TIG电弧复合焊可以提高2014铝合金焊接接头的力学性能,与填丝TIG焊相比,抗拉强度提高了11.2%,断后伸长率提高了14.3%。断口SEM形貌显示激光辅助TIG电弧复合焊接接头断口上有大量韧窝,属于韧性断裂。

参考文献:

- [1] 周万盛,姚君山. 铝及其合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 36-37.
- [2] 吴圣川,唐涛,李正. 高强铝合金焊接的研究进展[J]. 现代焊接, 2011, 2(2): 5-8.
- [3] 冉国伟,肖天骄,杨晓红,等. 铝合金焊接工艺与接头组织相关性的研究[J]. 焊接, 2010, 54(5): 48-51.
- [4] 刘志华,赵兵,赵青. 21世纪航天工业铝合金焊接工艺技术展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2002, 31(5): 63-68.
- [5] Steen W M, Ebo M. Arc augmented laser welding [J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-333.
- [6] 高明. CO₂激光-电弧复合焊接工艺、机理及质量控制规律研究[D]. 湖北 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [7] Katayama S, Naito Y, Uchiumi S, et al. Physical phenomena and porosity prevention mechanism in laser-arc hybrid welding[J]. Transactions of JWRI, 2006, 35(1): 13-18.
- [8] Shinn B W, Farson D F and Denney P E. Laser stabilization of arc cathode spots in titanium welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 475-481.
- [9] Albright C B, Bastman J and Lempert W. Low-power lasers assist arc welding[J]. Welding Journal, 2001, 80(4): 55-58.
- [10] 冉国伟,宋永伦,闫思博,等. 2219铝合金复合热源焊接工艺及接头性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 25-29.
- [11] Ding R G, Ojo O A and Chaturvedi M C. Fusion zone microstructure of laser beam welded directionally solidified Ni₃Al-base alloy IC6[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(5): 859-864.

作者简介: 王波(1979—),男,山东蓬莱人,扬州工业职业技术学院,讲师,研究方向:机械设计与制造。