

激光-TIG 复合填丝焊接工艺对 6061 铝合金焊缝组织与硬度的影响*

卢 帅^① 晁艳普^① 张楚翔^② 岑 辉^① 曹福来^① 陈良斌^①

(^①许昌学院电气与机械工程学院, 河南 许昌 461000;

^②中国电气装备许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘 要:采用激光-TIG 复合热源填丝焊接 5 mm 厚 T651 态 6061 铝合金, 研究电弧电流对复合填丝焊接焊缝成形的影响, 分析了优化工艺参数下的焊缝显微组织及显微硬度特征, 并与单独 TIG 填丝焊接进行综合对比。结果表明:采用激光-TIG 复合热源填丝焊接 T651 态 6061 铝合金, 能够有效改善焊缝成形, 当 TIG 电弧电流为 140 A 时焊接过程稳定, 焊缝成形效果良好; 复合填丝焊接焊缝中心区域的显微组织为等轴晶, 熔合区组织由大量枝状晶组成; 复合填丝焊接显微硬度高于单独 TIG 填丝焊接, 焊缝区均存在软化现象, 在选择的测试点范围内, 复合填丝焊接焊缝中心区域的平均硬度为 66.91 HV, 约为母材硬度的 62.0%, 比单独 TIG 填丝焊接提高约 13.1%。

关键词:6061-T651 铝合金; 激光-TIG 复合填丝焊接; 焊缝成形; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG406 文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.12.019

Effect of laser-TIG composite wire filling welding process on microstructure and hardness of 6061 aluminum alloy

LU Shuai^①, CHAO Yanpu^①, ZHANG Chuxiang^②, CEN Hui^①, CAO Fulai^①, CHEN Liangbin^①

(^①School of Electrical and Mechanical Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, CHN;

^②China Electric Equipment Xu Ji Group Co., Ltd., Xuchang 461000, CHN)

Abstract: Welding 5 mm thick 6061-T651 aluminum alloy with laser-TIG composite heat source filler wire, investigate the influence of arc current on weld formation of composite filler wire welding, analyzed the weld microstructure and microhardness characteristics under the optimized process parameters, and compared with single TIG filament welding. The results show that the use of laser-TIG arc composite heat source filler wire welding of 6061-T651 aluminum alloy can effectively improve the weld formation; when the TIG arc current is 140 A, the welding process is stable and the welding seam forming effect is good; the microstructure in the center area of the composite filler wire weld is equiaxed, and the fusion zone is composed of a large number of dendrites; the microhardness of composite filler wire welding is higher than that of single TIG filler wire welding, there is a softening phenomenon in the weld area, within the range of selected test points, the average hardness of the weld center of the composite filler wire welding is 66.91 HV, which is about 62.0% of the hardness of the base material, which is about 13.1% higher than the microhardness of the TIG filler wire welding alone.

Keywords: 6061-T651 aluminum alloy; laser-TIG composite filler wire welding; weld formation; microstructure; microhardness

铝合金焊接技术已广泛应用于航空航天、电力设备和高铁装备等领域, 其在工业设备轻量化、高强度、耐腐蚀和高效节能中的作用和地位日益凸显,

从而对焊接的效率和质量也提出了越来越高的要求^[1-2]。传统的电弧焊接方式由于热输入较大、效率低, 且焊接过程飞溅大, 会导致焊缝成形有大滴

* 国家自然科学基金项目(51905463); 河南省科技攻关重点项目(192102210055)

过渡、不连续的现象，焊后组织粗大、热影响区宽，影响焊缝性能；激光焊接虽然焊接速度快能实现深熔焊，但是由于铝合金对激光束有强烈的反射效应，激光利用率较低，且激光焊在焊接深而窄的焊缝中往往存在较多气孔缺陷，难以获得良好的焊缝；将电弧焊与激光焊结合起来的激光电弧复合焊接充分利用两种热源的优势，避免了单一热源焊接的缺陷，提高了焊接的加工效率，但电弧与激光聚焦光斑的相互位置对焊接过程稳定性有一定影响^[3-7]；而通过额外添加焊丝的激光-电弧复合填丝焊接，在不增加热输入的前提下，增加了焊缝的熔覆量，有效降低焊缝表面的粗糙度，焊丝的加入可以调节焊缝的成分及组织，有助于进一步提高焊接接头的稳定性和可靠性。

目前，国内外已有诸多学者针对铝合金复合焊接技术进行研究。Khoshroyan A 等^[8]研究了铝合金 Al6061-T6 加筋板在激光-MIG 焊接过程中的温度分布、残余应力和变形。Narsingachary D 等^[9]通过激光焊接工艺焊接了 6061-T6 铝合金，并研究了温度分布对接头显微组织和机械性能的影响。Zhang C 等^[10]使用 5~6 kW 的激光-电弧复合热源焊接 AA6082 铝合金，结果表明复合焊接与单独激光或纯电弧焊接的接头相比具有优势，比如更低的孔隙率、晶粒细化等。王伟^[11]、侯艳喜^[12]和常云峰^[13]等分别研究了焊接速率对 6N01S-T5 铝合金、A7N01 铝合金和 2A14 铝合金的激光-MIG 复合焊接工艺与性能的影响，结果表明合理的工艺参数能够有效提高焊缝成形质量与组织性能。李飞^[14]、乔俊楠^[15]和杨大伟^[16]等分别对 5083 铝合金、A7N01 铝合金、6005A 铝合金进行了激光-TIG 复合焊接工艺的研究，并分析了接头的组织性能。作为一种可热处理合金，T651 态 6061 铝合金在轻质结构的制造中得到了广泛的应用，与其他高强度铝合金相比，具有优异的可焊性。然而，关于 T651 态 6061 铝合金激光-TIG 复合热源填丝焊接的研究现阶段鲜有报道，开展 6061-T651 铝合金的复合填丝焊接工艺的研究具有重要意义。

为此，本文以 5 mm 厚 6061-T651 铝合金为研究对象，开展填充焊丝的激光-TIG 复合焊接工艺研究。众所周知，影响复合焊接焊缝成形的工艺参数主要有激光功率 P 、焊接电流 I 、激光离焦量 z 、热源间距 D_{la} 和焊接速度 v_s 等，通过前期大量试验研究及综合比较发现，电弧电流对焊接热输入起主要

作用，对焊缝成形影响较大。因此，本文主要研究电弧电流对复合填丝焊接焊缝成形的影响，并与单 TIG 填丝焊接进行对比，探究两种焊接方式的焊缝成形特点，并对焊缝显微组织及显微硬度进行检测分析。通过工艺参数优化，获得良好的焊缝成型，为中厚板 6061-T651 铝合金激光-TIG 复合填丝焊接的应用提供实验指导。

1 试验条件和试验方法

试验采用平板堆焊，试验材料为 6061-T651 铝合金板材，试验板材规格为 5 mm×100 mm×200 mm，填充焊丝为直径 1.2 mm 的 ER4043。表 1 所示为铝合金母材与 ER4043 焊丝的主要化学成分。实验平台主要设备包括 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器、Dynasty200 DX 型电弧焊机、CNC 工作台 LMT-5040 精密数控加工机床、HF-06B 型自动送丝机以及自行设计的焊接调节装置和夹具等。试验装置示意图如图 1 所示。

表 1 母材和 ER4043 焊丝化学成分 %

材料	Cu	Si	Mn	Zn	Fe	Mg	Cr	Al
Al6061	0.22	0.62	0.15	0.25	0.7	1.06	0.04~0.35	余量
ER4043	0.3	4.5~6	0.05	0.1	0.8	0.05	—	余量

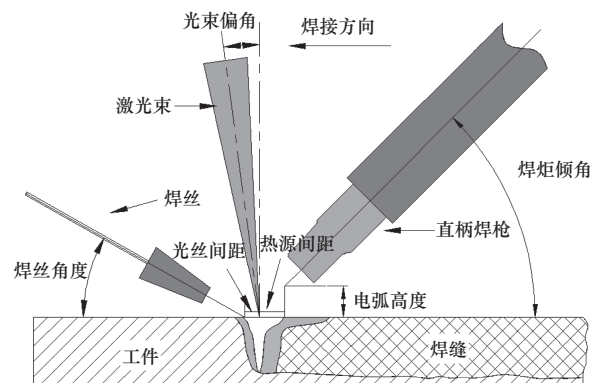


图 1 复合填丝焊接试验装置示意图

焊前对焊件表面进行磨削处理，用丙酮清洗焊件，在 10% 氢氧化钠溶液中浸洗（温度 50~60 °C，时间 3~5 min），再用去离子水冲洗 1 min，用 30% 稀硝酸溶液进行中和与光化处理，待表面出现金属亮色后，用热去离子水冲洗 1 min，最后用干燥箱进行干燥处理（温度 100~150 °C）。实验中 YAG 脉冲激光器与 TIG 电弧焊机以旁轴形式复合，激光在前电弧在后，本试验选取激光功率为 350 W，离焦量-1 mm，激光焦点在工件表面之下。试验时使

工作台移动,焊枪与激光器固定不动,保持激光束的光束偏角为 5° ,以防止光路传输系统自动关闭,焊枪角度为 50° ,此时激光束与焊枪的夹角为 45° 。采用前送丝方式连续供给,送丝角度为 20° ,光丝间距 0.5 mm ,送丝速度 600 mm/min 。本试验中热源间距为 1.5 mm ,焊接速度 300 mm/min ,钨极高度 1.5 mm ,采用高纯氩气作为焊缝保护气体,氩气流量 12 L/min 。通过正交法多次试验后,本试验最终筛选电弧电流 120 A 、 130 A 、 140 A 和 150 A 这4组参数进行焊缝特征对比分析。

焊接完成后,沿垂直焊缝方向截取试样,对焊接接头截面逐次使用 $240\#$ 、 $400\#$ 和 $600\#$ 砂纸进行逐级磨光,然后把试样浸入 30% 的氢氧化钠溶液中进行宏观腐蚀(时间 1 min),出现焊缝轮廓后使用数码相机和图像测量软件对焊缝横截面的熔宽、熔深和余高等参数进行拍摄测量。用Keller试剂对试样横截面进行腐蚀(配比为 $1\text{ mL HF}+1.5\text{ mL HCL}+2.5\text{ mL HNO}_3+95\text{ mL H}_2\text{O}$,腐蚀时间 25 s),使用Olympus MX40F型金相显微镜对焊缝显微组织进行观察分析。使用HXD-1000TM型数字式显微硬度计对焊缝显微硬度进行检测,选择 25 g 加载力,加载时间为 15 s 。

2 试验结果与分析

2.1 电弧电流对焊缝形貌特征的影响

电弧电流的变化直接决定焊接的热输入,进而改变电弧和激光两热源间的耦合作用。表2表示单TIG填丝与复合填丝两种焊接方式下电弧电流对焊缝成形的影响,图2和图3为随电弧电流变化,两

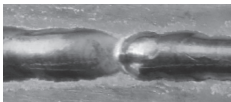
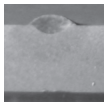
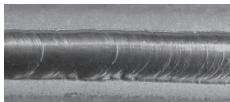
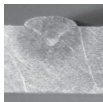
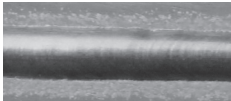
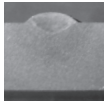
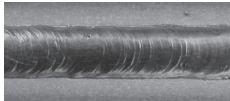
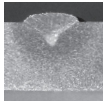
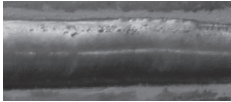
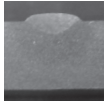
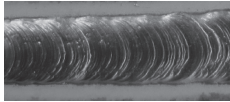
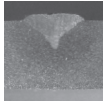
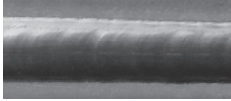
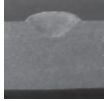
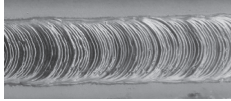
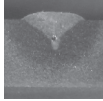
种焊接方式下的焊缝熔深、熔宽和余高变化曲线。

从表2中可以看出,在电弧电流为 120 A 时,单电弧填丝焊接会出现不连续、大滴过渡的现象,激光加入后电弧稳定性增强,对单电弧填丝焊接出现的成型缺陷有明显改善。实验过程中,复合填丝焊接成形过程稳定,焊缝成形过程的不连续和大滴过渡现象基本消失。当电弧电流增加至 140 A 时,复合填丝焊接焊缝表面即有均匀的鱼鳞状波纹,当电流继续增加时,鱼鳞纹形貌也更加明显,焊缝呈复合深熔焊形貌。

分析认为,当焊接热输入较小时,电弧燃烧不充分,单电弧填丝焊接热量不够集中,铝合金表面不能充分熔化,导致焊接成型过程不稳定,出现未熔合的现象。加入激光后,由于激光与电弧的耦合作用,使电弧能量密度增大,焊接表面受热升温,体积发生膨胀,而由于周围较冷区域基体的阻碍,使焊接区域形成压应力,造成被焊铝合金板材发生轻微的向下弯曲变形;另外,随复合热源能量增大,铝合金板材的屈服极限随温度升高而下降,当电弧电流增加至 140 A 时,其屈服极限小于焊缝周围的压应力数值,造成熔池表面材料发生屈服变形,并产生堆积变形。在复合热源逐渐移动到下一焊接区域后,先前发生堆积的区域温度迅速下降,经过冷凝后的表面保持了原有的弯曲堆积形貌,从而呈现出典型的鱼鳞纹形貌。

从图2中可以看出,随着电弧电流的增加,两种焊接方式下焊缝的熔深和熔宽都呈增加趋势,并且复合填丝焊接的增加幅度更快,复合填丝焊接焊缝的熔深和熔宽都要大于单TIG填丝焊接;从图3

表2 电弧电流对焊缝成形的影响

电弧电流 /A	单独TIG填丝焊接 2 mm		激光-TIG复合填丝焊接 2 mm	
	焊缝形貌	焊缝横截面	焊缝形貌	焊缝横截面
120				
130				
140				
150				

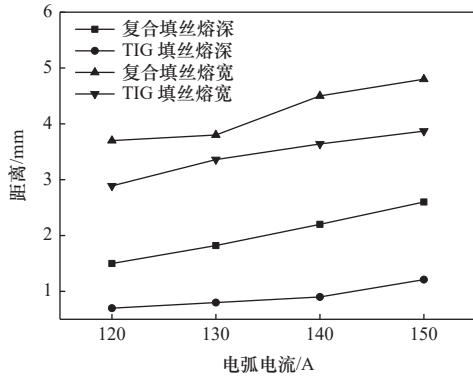


图2 熔深、熔宽的变化曲线

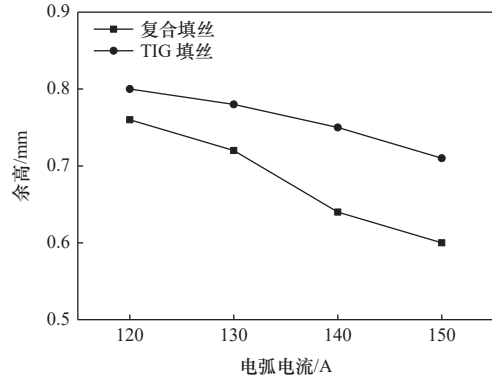


图3 余高的变化曲线

中可以看出，两种焊接方式下的焊缝余高均随电弧电流增加呈逐渐减小趋势，同一参数下，复合填丝焊接余高更小。此外，实验中发现，当电弧电流增加至 170 A 以后，复合填丝焊的熔深趋于稳定，变化幅度降低。

分析认为，电弧和激光的能量匹配共同决定了熔池的深度和宽度，电弧电流的变化不仅直接影响热源能量的输入，还影响电弧与激光两热源之间的复合作用。电弧的预热有利于增加激光能量的利用率，电弧等离子体和光致等离子体的协同作用使得复合填丝焊接焊缝的熔深和熔宽增加。但当电流增大到一定程度时，随着热输入持续增加，会造成电弧等离子体过度膨胀，进而影响激光能量的吸收，使两热源的复合效果削弱。另外，焊丝熔化后熔池液面的高低会改变激光的实际离焦量大小，进而影

响作用于工件表面的激光功率密度。当电弧电流较小时，热输入能量较小，焊丝熔化后铺展性不强，造成熔池液面增高，使激光的实际作用功率密度下降，焊缝熔深较小；当电弧电流较大时，热输入较大，焊丝熔化后铺展均匀，使熔池液面降低，激光的实际作用功率密度增大，焊缝熔深较大。

结合以上试验及分析，当电弧电流 $I=140$ A 时，焊接过程稳定，复合填丝焊接所获得的焊缝成型较好。综合考虑大电流的经济性及焊缝成形的稳定性，本文以电弧电流 $I=140$ A 作为优化的焊接工艺参数进行焊缝微观组织特征性能分析。

2.2 焊缝显微组织

6061-T651 铝合金以 Mg_2Si 为强化相，其基材组织为完全再结晶组织。图 4 为单独 TIG 填丝焊接与复合填丝焊接焊缝中心及熔合区微观组织。

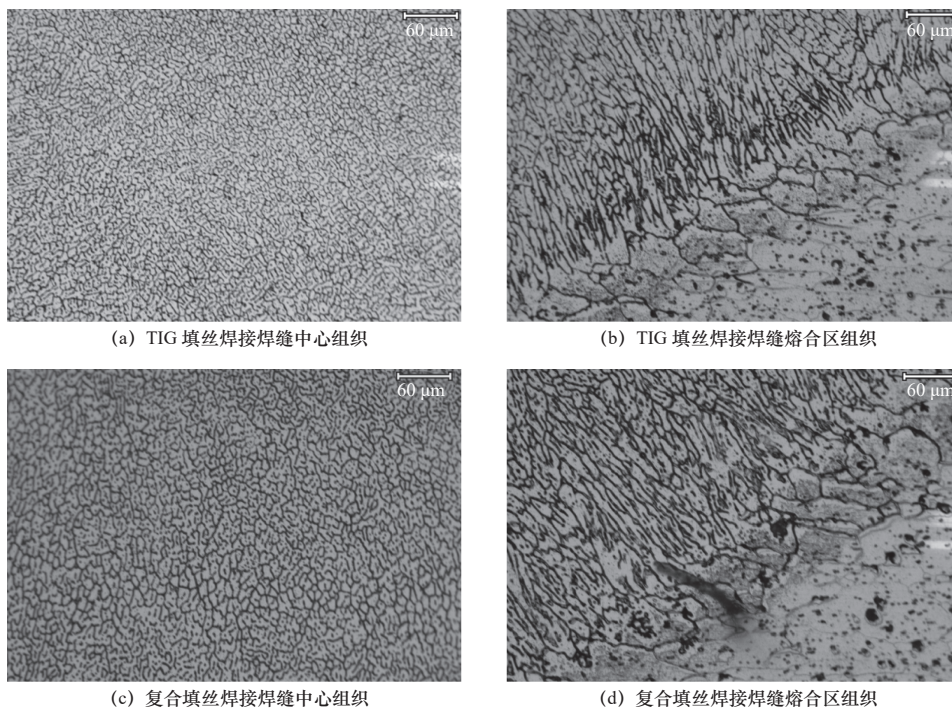


图4 TIG 填丝焊接与复合填丝焊接焊缝中心及熔合区微观组织

从图 4a、c 可以看出, 两种焊接方式下的焊缝中心都主要由网状等轴晶组成, 与单 TIG 填丝焊接相比, 复合填丝焊接内部有大量析出相, 晶粒尺寸有长大趋势。分析认为, 熔池中心区域的温度梯度较小, 成分过冷区域宽, 熔池中存在未熔化的固态质点, 从而为结晶提供形核表面, 使得中心区域自由生长为等轴晶。另外, 两种焊接方式的焊缝受热及冷却条件存在差异, 加入激光后, 复合焊接热输入变大, 熔池温度梯度增大, 冷却速度变慢, 导致等轴晶晶粒尺寸变大。

TIG 填丝焊接焊缝熔合区组织主要由细长的柱状晶与胞状晶组成, 柱状晶沿散热方向排列, 具有较强的方向性, 基本垂直于熔合线方向生长, 如图 4b 示。分析认为, 在晶粒逐渐长大的过程中, 随着溶质浓度升高, 导致结晶速率逐渐变大, 而熔池边缘界面的温度梯度较大, 会形成较小的成分过冷, 使结晶界面形成束状芽孢, 并伸入到过冷的液相界面中, 形成胞状亚晶; 焊缝边缘受母材的冷却作用使得垂直于熔合线具有最大的温度梯度, 当晶粒生长方向与最大温度梯度方向一致时, 有利于晶粒优先形成柱状晶。

复合填丝焊接熔合区组织由大量枝状晶组成, 胞状晶数量减少, 如图 4d 所示。枝状晶基本垂直于熔池壁方向分布, 并向中心生长的粗大带状组织, 晶间较多分布连续的网状低熔点共晶物。分析认为, 激光加入后, 热源分布以及熔池大小的变化使温度梯度增大, 大量溶质元素向熔池中心聚集, 导致熔池成分过冷度增加, 使得柱状晶生长受到抑制, 促进柱状晶转变为枝状晶, 由于与焊接边界熔池壁垂直的方向具有最大的温度梯度, 使枝状晶向更有利于散热的垂直于熔池壁方向成长分布^[15]。

2.3 焊缝显微硬度

硬度是金属材料的一项重要力学性能指标, 与强度及塑性均有一定关系, 也能侧面反映焊缝显微组织的变化。分别对单 TIG 填丝焊接与激光-TIG 复合填丝焊接两种方式下的焊缝显微硬度进行测量, 测量位置为板材表面下横向 0.6 mm 处, 以焊缝中心为坐标原点, 加载间距为 0.4 mm。两种焊接方式下的焊缝测试点显微硬度分布如图 5 所示。

从整个焊缝的硬度分布来看, 复合填丝焊接显

微硬度要高于单独 TIG 填丝焊接; 两种焊接方式下焊缝中心区域的硬度均为最低, 在熔合线附近硬度陡然增大, 至熔合线以后又呈波浪式下降趋势。焊缝区均存在软化现象, 在选择的测试点范围内, 经测算, 单独 TIG 填丝焊接焊缝中心显微硬度平均值为 59.16 HV, 约为母材硬度的 54.8%; 复合填丝焊接焊缝中心的平均硬度为 66.91 HV, 约为母材硬度的 62.0%, 比单独 TIG 填丝焊接显微硬度提高约 13.1%。分析认为, 焊缝区的软化现象主要是由于焊接热循环的作用下造成强化相颗粒发生烧损、变异, 通过观察焊缝中心的显微组织发现主要强化相元素 Mg_2Si 基本消失, 导致焊缝中心软化。此外, 激光的加入促进了电弧收缩, 使电弧能量密度增大, 同时激光束对焊接熔池的搅拌作用, 有利于凝固组织的晶粒生长更均匀, 阻碍位错运动的能力增强, 增大了抵抗局部塑形变形的能力, 导致复合焊接焊缝中心显微硬度增加。

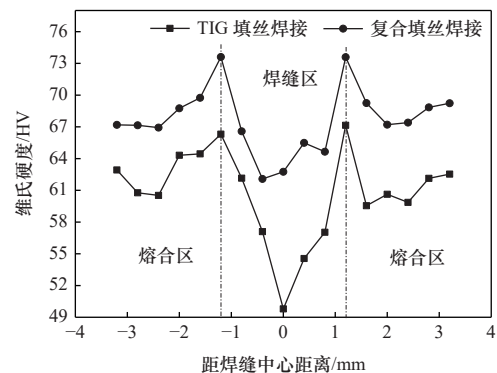


图 5 焊缝硬度变化曲线

3 结语

(1) 得到了 5 mm 厚 6061-T651 铝合金进行激光-TIG 复合热源填丝焊接的一组优化工艺参数: 电弧电流 140 A, 激光功率 350 W, 热源间距 1.5 mm, 送丝速度 600 mm/min, 焊接速度 300 mm/min, 激光离焦量 -1 mm。与单 TIG 填丝焊相比, 复合填丝焊焊缝成形更加稳定, 焊缝表面的鱼鳞纹形貌更加均匀, 能获得更优的焊缝成型。

(2) 复合填丝焊接焊缝中心区域的显微组织为等轴晶, 熔合区组织由大量枝状晶组成, 与单独 TIG 填丝焊接相比, 复合填丝焊接焊缝中心晶粒尺寸有长大趋势。复合填丝焊接显微硬度要高

于单独 TIG 填丝焊接, 在选择测试点范围内, 复合填丝焊接焊缝中心的平均硬度为 66.91 HV, 约为母材硬度的 62.0%, 比单独 TIG 填丝焊接显微硬度提高约 13.1%。焊缝区均存在软化现象, 分析认为焊接热循环导致强化相消失是焊缝区软化的主要原因。

参 考 文 献

[1] 邹江林, 王利达, 祝宝琦, 等. 光纤激光-TIG电弧复合焊接等离子体形态的可视化观察[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202007.

[2] 姜亦帅, 杨尚磊, 王妍, 等. 6061铝合金激光填丝焊接接头的组织与力学性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(3): 52-56.

[3] Tang G, Chen H, Yang X Y, et al. Effects of different welding process on the electronic temperature of plasma and weld shape during laser-MIG hybrid welding of A7N01P-T4 aluminum alloy[J]. Journal of Laser Applications, 2018, 30(2): 022002.

[4] Bunaziv I, Akselsen O M, Salminen A, et al. Fiber laser-MIG hybrid welding of 5mm 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 107-114.

[5] Luo Y, Tang X Y, Lu F G, et al. Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 219-224.

[6] 张习羽, 王晓帅, 叶昕, 等. 6061铝合金CMT焊接气孔影响因素研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 43-47.

[7] 康泽军, 李先芬, 许新猴, 等. 铝合金激光-TIG复合焊接工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2016(7): 106-109.

[8] Khoshroyan A, Darvazi A R. Effects of welding parameters and welding sequence on residual stress and distortion in Al6061-T6 aluminum alloy for T-shaped welded joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 76-89.

[9] Narsimhachary D, Bathe R N, Padmanabham G, et al. Influence of temperature profile during laser welding of aluminum alloy 6061 T6 on microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 29: 948-953.

[10] Zhang C, Gao M, Zeng X Y, et al. Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 479-487.

[11] 王伟, 王浩, 陈辉, 等. 6N01S-T5铝合金高速激光-MIG复合焊接工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 55-60,66.

[12] 侯艳喜, 罗子艺, 易耀勇, 等. A7N01铝合金激光-MIG复合焊接焊缝成形与组织性能研究[J]. 激光技术, 2020, 44(3): 304-309.

[13] 常云峰, 雷振, 王旭友, 等. 铝合金激光-MIG复合填丝焊稳定性分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 119-123.

[14] 李飞, 孔晓芳, 吴世凯, 等. 5083铝合金光纤激光-TIG复合焊接工艺研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 312-316.

[15] 乔俊楠, 王启明, 邹江林, 等. 光纤激光-变极性TIG复合填丝焊接 A7N01铝合金接头的组织与力学性能[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902001.

[16] 杨大伟, 陈树海, 黄继华, 等. 6005A铝合金激光-TIG复合热源填丝焊接技术[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 55-58,135.

第一作者: 卢帅, 男, 1989年生, 讲师, 主要研究方向为增量成型与焊接。E-mail: zdlu996@126.com

通信作者: 晁艳普, 男, 1983年生, 副教授, 主要研究方向为液态金属增材制造。E-mail: chaoyanpu@163.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2022-09-08)

文章编号: 20221220

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

(上接第 120 页)

[23] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, WA, 1995.

[24] 潘峰, 安启超, 刁奇, 等. 基于粒子群算法的多尺度反卷积特征融合的道路提取[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(6): 640-647.

[25] 徐中, 肖帮东, 黄浩, 等. SVR-PSO算法在慢走丝线切割参数优化中的应用[J]. 机床与液压, 2016, 44(7): 26-32.

[26] Khan S, Kamran M, Rehman O U, et al. A modified PSO algorithm with dynamic parameters for solving complex engineering design problem[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2018, 95(11): 2308-2329.

[27] 文大鹏, 梁西银, 苏茂根, 等. 激光诱导击穿光谱技术结合PCA-PSO-SVM对矿石分类识别[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 191-199.

[28] Lins I D, Moura M C, Zio E, et al. A particle swarm optimized support vector machine for reliability prediction[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2012, 28(2): 141-158.

[29] 卿启湘, 陈哲吾, 文桂林. 基于Kriging插值的汽车行李箱盖冲压成形参数的优化设计[J]. 中国机械工程, 2011, 22(17): 2122-2126, 2135.

[30] 郭威佐. 基于机器学习的双层曲线梁桥地震易损性分析[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究所, 2020.

第一作者: 蒋磊, 男, 1987年生, 工学学士, 主要研究方向为汽车覆盖件先进成形工艺及装备开发。E-mail: 648213973@qq.com

通信作者: 贾倩茹, 女, 1996年生, 硕士研究生, 主要研究方向为基于优化算法的车辆成形工艺优化。E-mail: hester927@126.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2022-07-20)

文章编号: 20221219

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。