

引用格式: 宫茂林, 陈克选, 栗银鹏. 激光功率对小电流激光-MIG复合焊接过程的影响[J]. 热加工工艺, 2026, 55(7): 219-224+231. GONG Maolin, CHEN Kexuan, LI Yinpeng. Effect of Laser Power on Welding Process of Low-current Laser-MIG Hybrid Welding [J]. Hot Working Technology, 2026, 55(7): 219-224+231. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20233030

激光功率对小电流激光-MIG复合焊接过程的影响

宫茂林¹, 陈克选^{1,2}, 栗银鹏¹

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: MIG焊用于铝合金薄板焊接时, 大电流焊接存在烧穿、焊接变形严重等问题, 而小电流焊接存在焊不透问题。在MIG焊接时引入小功率激光, 研究不同激光功率对铝合金薄板小电流MIG焊的影响。搭建了激光-MIG复合焊系统, 通过数据采集卡采集复合焊过程中的焊接电压、电流信号, 借助高速摄像记录不同激光功率下熔滴过渡的图像信息, 并进行分析。研究表明: 当激光功率为300 W时, 熔滴过渡和焊接过程稳定, 焊缝成形效果好, 焊接质量明显提高。

关键词: 激光-MIG复合焊; 小功率激光; 电弧参数; 熔滴过渡

中图分类号: TG456.7; TG444.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)07-0219-06

Effect of Laser Power on Welding Process of Low-current Laser-MIG Hybrid Welding

GONG Maolin¹, CHEN Kexuan^{1,2}, LI Yinpeng¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: When MIG welding is used for aluminum alloy thin plate, high current leads to burn-through and serious deformation, while low current has the problem of not being able to melt through the base material, etc. A low-power laser was added to the MIG welding, and the effect of different laser power on the low-current MIG welding of aluminum alloy thin plate was studied. A laser-MIG hybrid welding system was built, the welding voltage, current signals during hybrid welding process were collected through the data acquisition card, and the molten droplet transfer image information under different laser powers were captured with a high-speed camera for analysis. The study shows that when the laser power is 300 W, the molten droplet transfer and welding process are stable, the weld is well formed, and the welding quality is significantly improved.

Key words: laser-MIG hybrid welding; low power laser; arc parameters; droplet transfer

铝合金因具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能好、无磁性、低温性能好等优点, 在国内外制造业获得广泛应用。铝合金采用MIG焊接时存在生产效率偏低、焊接接头强度较低等问题。因为铝合金具有大的线膨胀系数、低的弹性模量和较小的刚度, 所以当MIG焊接铝合金薄板时, 在大电流条件下热输入较大, 易

导致焊接变形和烧穿等问题; 当焊接电流较小时, 出现焊不透、焊缝余高较高、焊缝成形差等问题。

激光-MIG复合焊接可以改善单激光焊接与传统MIG焊接工艺, 在一定程度上减少焊接缺陷、提高焊接效率、增大焊接熔深, 有效改善焊缝的综合力学性能^[1]。在激光-MIG复合焊接的过程中, 焊接过程的稳定性不仅受电弧参数的影响, 还受到激光参数更大程度的影响。高能量密度的激光作用于工件表面, 会在匙孔上方产生光致等离子体及金属蒸汽, 从而导致激光发生反射、折射等现象。另外, 产生的光致等离子体和金属蒸汽会与电弧等离子体发生相互作用, 影响电弧形态进而影响熔滴过渡, 改变熔滴

收稿日期: 2023-12-21 修回日期: 2025-12-19

作者简介: 宫茂林, 男, 硕士, 主要研究方向: 复合焊设备与工艺;

E-mail: gggml1998@163.com

通讯作者: 陈克选, 男, 教授, 主要从事新型弧焊电源及智能控制, 焊接过程控制、计算机应用以及电弧增材制造设备及工艺的研究; E-mail: ckcs@sina.com

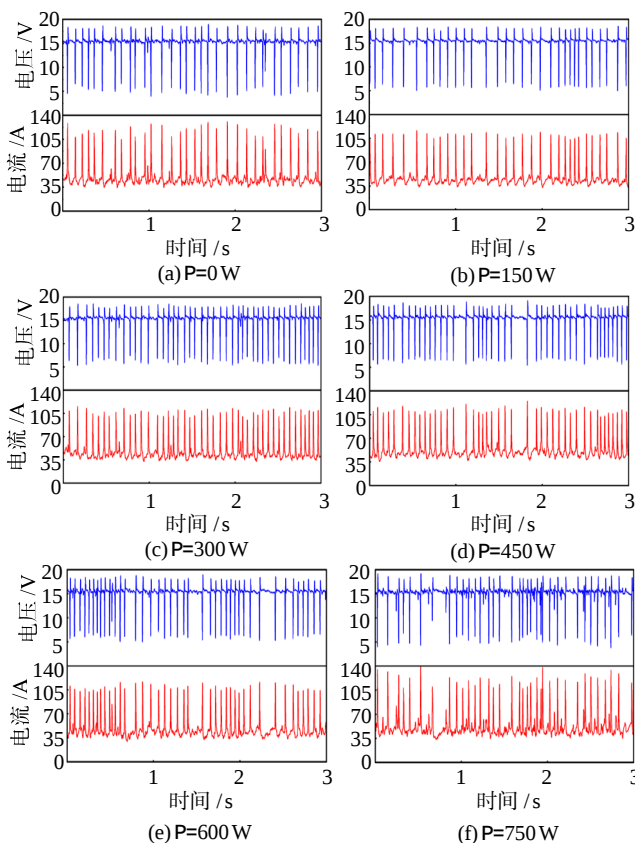


图3 不同激光功率下电流、电压电信号波形图
Fig.3 Current, voltage electrical signal waveforms under different laser powers

的波形状态呈不均匀状态,波形波动较大,焊接过程不稳定;当加入功率 150W 的激光后,焊接波形几乎呈均匀分布状态,且波形波动幅度减小;当激光功率为 300W 时,电流、电压波形更加细密,且波形均匀,此时焊接过程稳定。随着激光功率的增大,熔滴过渡的形式发生了变化,当激光功率为 450W 时,出现大滴接触短路过渡,此时大滴接触短路过渡出现频率较低,波形较均匀,熔滴过渡比较稳定;当激光功率为 600W 时,大滴接触短路过渡的频率增大,波形状态呈不均匀状态,波动较大;当激光功率为 750W 时,此时短路过渡频率不均匀,即熔滴过渡呈现出时快时慢的现象。焊接过程中电弧参数的变化,尤其是电弧电压的变化与熔滴过渡过程相互对应,可反映焊接过程的稳定性。由此可得,适当功率激光的加入提高了焊接过程的稳定性。

熔滴过渡过程包括燃弧阶段与短路阶段,各阶段电流、电压值不同。图 4 为熔滴过渡周期中各阶段电流、电压变化示意图。图中 A 段为燃弧阶段电流、电压,AB 段为燃弧阶段到短路阶段电流上升过

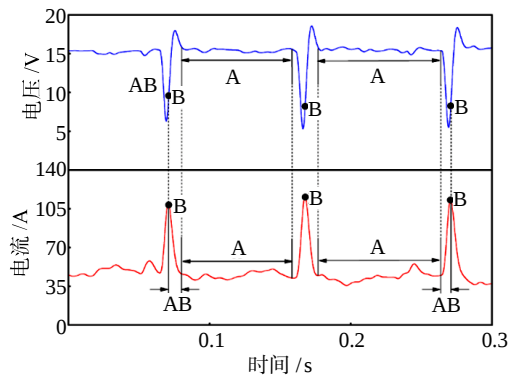


图4 熔滴过渡周期电流、电压变化示意图
Fig.4 Schematic diagram of current and voltage changes in the droplet transfer cycle

程,B 点为短路时的电流峰值,BA 段为短路阶段到燃弧阶段的电流下降过程。由 A 至 AB 至 B 至 BA 为一个完整过渡周期。

图 5 为不同激光功率焊接的 U-I 相图。图中 A 区域与 B 区域分别为图 4 中 A 段与 B 点的集合,由 A 至 B 与图 4 中 AB 段对应,B 至 A 与图 4 中 BA 段对应。当 AB 与 BA 段线簇分布集中说明焊接过程稳定,线簇杂乱则对应焊接过程不稳定。当激光功率为 150~300W 时,线簇分布集中,几乎没有杂线出现,说明此时焊接过程稳定;当激光功率由 450~

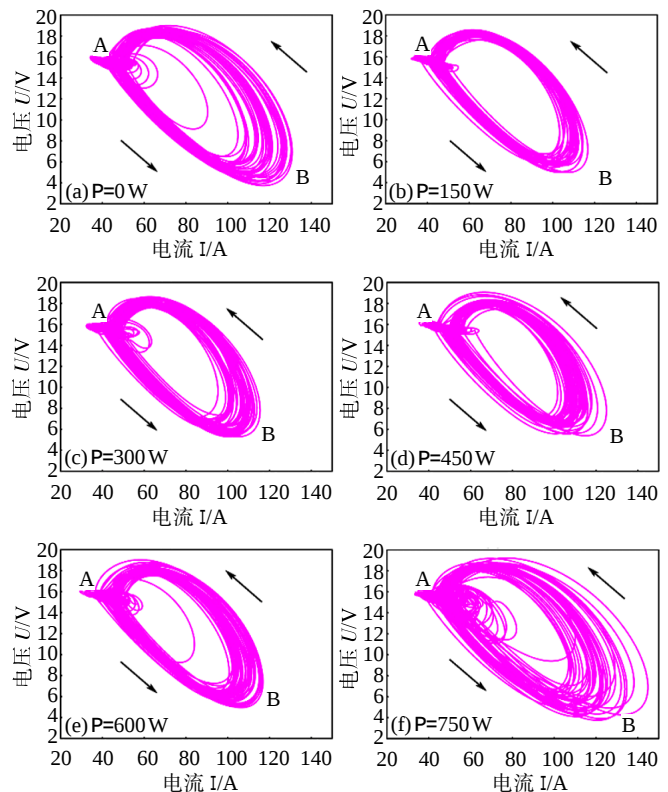


图5 不同激光功率焊接的 U-I 相图
Fig.5 U-I phase diagram welded with different laser powers

750W 时,逐渐出现杂线,且 BA 段较分散,750W 时杂线最多且 BA 段最分散,焊接稳定性下降。

2.2 激光功率对熔滴过渡的影响

熔滴过渡为一种周期性过程,它由电弧热和焊丝本身的电阻热共同作用,焊丝端部开始熔化,然后因为电磁收缩力的存在熔融部分被压缩,在表面张力的作用下焊丝末端的熔融金属以球状存在。在电磁收缩力的作用下,熔滴与焊丝分离,并进入熔池,从而完成过渡。熔融金属持续不断地流入熔池,在这样的循环过程中,熔滴的受力情况对熔滴过渡稳定性和过渡形式有显著影响,并且对焊接的稳定性和焊接质量具有重要影响。如图 1 所示,熔滴主要受电磁收缩力(F_{em})、等离子流力(F_p)、表面张力(F_γ)、重力(F_g)、金属蒸气反冲力(F_{RL})的影响^[7]。

图 6 为 MIG 焊的一个熔滴过渡过程。从图中可

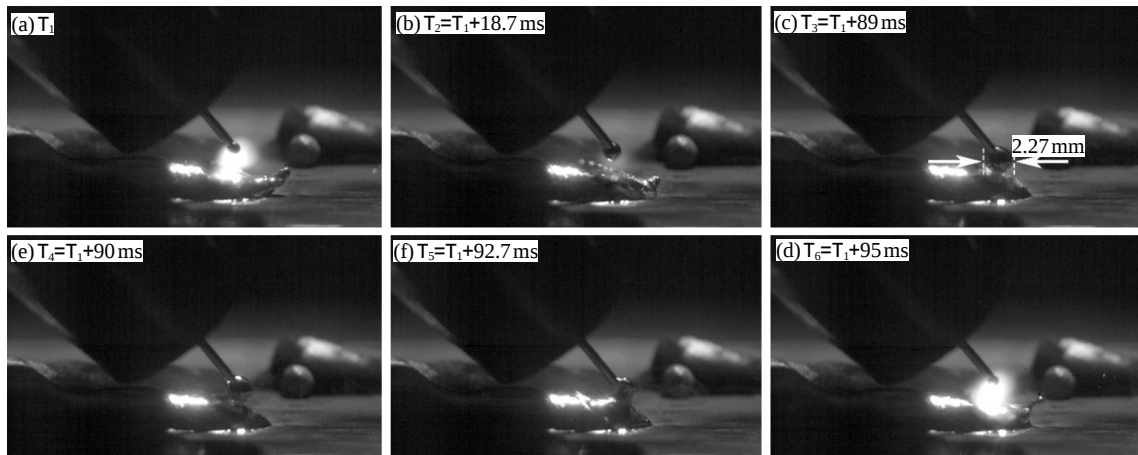


图 6 MIG 焊的一个熔滴过渡过程
Fig.6 A droplet transfer process of MIG welding

当激光作用于金属材料时,金属会被气化并形成匙孔,而在这些匙孔上方会产生一种包含着许多带电粒子的光致等离子体,从而为电弧的放电创造有利的条件^[8-9]。依据最小电压原理^[10],电弧根部稳定于金属蒸气密度较高的位置,并在电弧与金属蒸气之间形成一个稳定的离子通道。在激光加入之后,因为电弧受到激光吸引,并在激光的指引下实现了阴极的雾化,通过这两种热源的耦合作用,可以提高电弧的挺度,从而使焊接过程变得更加稳定^[11]。

当激光功率为 150~450W 时,过渡频率加快且非常稳定。图 7 为激光功率为 300W 时的一个熔滴过渡过程。由图可知,在 T_1 时刻熔滴形成; $T_1 \sim T_2$ 时,焊丝尖端的熔滴逐渐长大形成大熔滴,其直径明显大于焊丝; $T_2 \sim T_3$ 时,熔滴逐渐长大,由于受到金

以看出,焊缝起始处余高较高, T_1 时刻,熔滴形成; $T_2 \sim T_3$ 时,熔滴逐渐长大, T_3 时,熔滴长到最大; T_4 时,熔滴未与焊丝脱离直接与熔池接触; T_5 时,熔滴与熔池接触形成液桥; T_6 时,液相桥发生破断,熔滴完全进入熔池。

试验结果表明,传统 MIG 焊接铝合金时,熔滴在母材表面难以均匀地铺展开来,从而导致焊缝余高过高,此外,熔滴在电磁收缩力和等离子流力的共同作用下会发生振荡,在振荡过程中形成“波浪”,有时会因为波峰太大而与焊丝末端发生接触,熔滴还未长大时就向熔池过渡,这种现象加速了熔滴的短路过渡。尽管这种过渡方式对铝合金的短路过渡有益,然而在焊接过程中,并非一直出现该过渡方式,而是同时存在正常的熔滴长大接触熔池的短路过渡,这就是熔滴过渡频率变化的原因。

属蒸汽反冲力,熔滴在焊丝端部震荡;在 T_4 时,熔滴长到最大,并未脱离焊丝; $T_4 \sim T_5$ 时,在重力、电磁力、等离子体流力作用下向熔池过渡,熔滴还未与焊丝尖端分离就与熔池接触,形成较长的液桥与熔池连接发生短路; $T_5 \sim T_6$ 时,液桥破断,液桥前方熔融金属向熔池过渡;在 T_6 时,熔滴完全进入熔池。

当激光功率增大到 600W 和 750W 时,熔滴震荡程度变大,熔滴过渡不稳定。如图 8 所示,在 T_1 时,熔滴在焊丝尖端形成; $T_1 \sim T_2$ 时,熔滴逐渐变大; $T_2 \sim T_3$ 时,由于激光功率增大,熔滴受到金属蒸汽反冲力变大,熔滴震荡明显,当熔滴与熔池接触时,出现排斥现象,此时熔滴仍在焊丝尖端,未向熔池过渡; $T_3 \sim T_4$ 时,熔滴被熔池排斥以后,震荡幅度变大,但仍在焊丝尖端持续长大; $T_4 \sim T_5$ 时,此时焊丝尖端

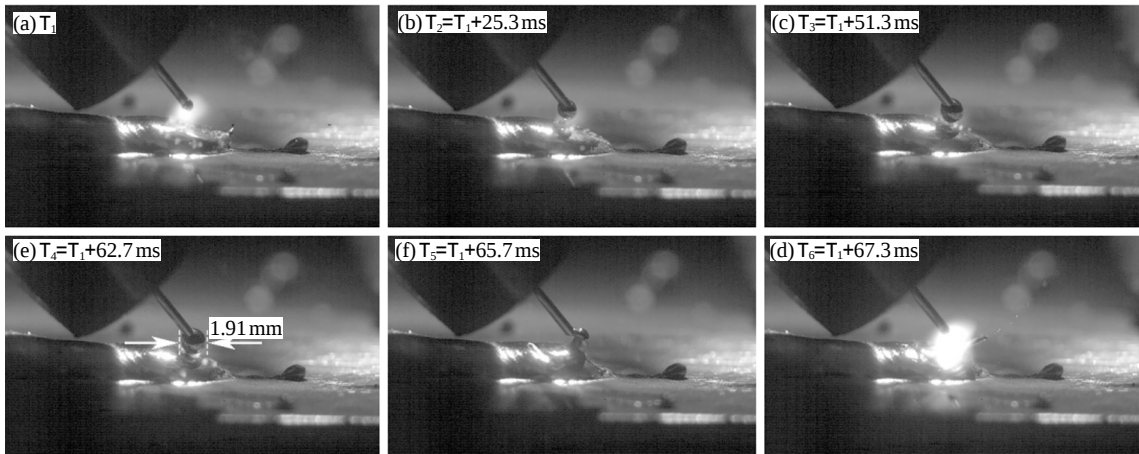


图7 激光功率为 300 W 时的一个熔滴过渡过程
Fig.7 A droplet transfer process at a laser power of 300 W

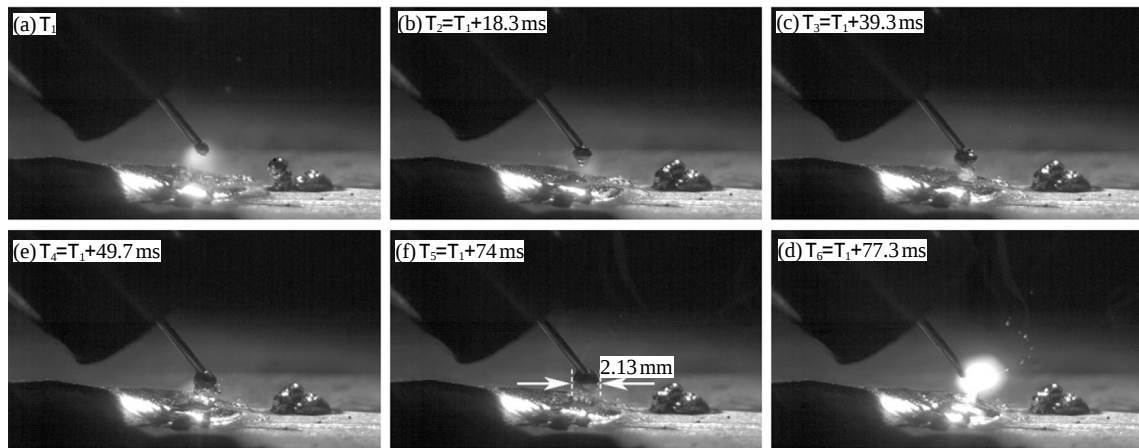


图8 激光功率为 750 W 时的一个熔滴过渡过程
Fig.8 A droplet transfer process at a laser power of 750 W

的熔滴在震荡的同时,尺寸进一步增大; T_5 时,熔滴长到最大; $T_5 \sim T_6$ 时,熔滴与熔池再次接触,向熔池过渡;在 T_6 时熔滴完全落入熔池,完成过渡。在整个焊接过程中,熔滴震荡现象明显,熔池与熔滴出现排斥现象。产生这种现象主要原因在于:当激光功率增加时,金属蒸汽的生成增多,对熔滴的向上排斥力增加,导致熔滴的平稳过渡受到阻碍,使熔滴与熔池相互排斥,导致熔滴过渡不稳定。

由图 6~8 可知,当激光功率由 0W 增加到 300 W 时,熔滴直径从 2.27mm 减小到 1.91mm;当激光功率由 300W 增加到 750W 时,熔滴直径从 1.91mm 增大到 2.13mm。由式(1)可知,平均熔滴过渡频率 f_a 与熔滴直径最大值平均值 D_a 存在如下关系:当送丝速度一定时,熔滴直径越小,熔滴过渡频率越高^[12]。

$$f_a = \frac{3v_f D_w^2}{2D_a^3} \quad (1)$$

式中: v_f 为送丝速度(mm/s); D_w 为焊丝直径(mm)。

图 9 为不同激光功率下的熔滴过渡频率。可以看出,未加入激光时单独 MIG 焊的熔滴过渡频率最低。加入激光后,激光-MIG 复合焊时熔滴过渡频率先增加后降低,0~300W 时,熔滴过渡频率逐渐增大,激光功率为 300W 时熔滴过渡频率最大;300~750W 时,熔滴过渡频率逐渐降低,但仍高于未加入激光的 MIG 焊时的频率。此变化趋势与熔滴直径变

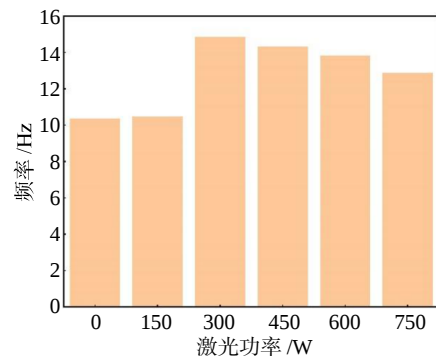


图9 不同激光功率下的熔滴过渡频率
Fig.9 Droplet transfer frequency at different laser powers

化趋势相对应。

2.3 激光功率对焊缝成形的影响

焊缝表面成形如图 10 所示。单独 MIG 焊时焊缝余高过高,尤其在焊缝起始处及起弧部分,通过焊缝背面可以看出,开始时并未熔透母材;当激光功率为 150 W 时,焊缝整体余高变小,焊缝起始处的余高明显变小并且熔透母材,焊缝整体出现鱼鳞纹;当激光功率为 300 W 时,焊缝表面成形得到明显改善,整体焊道余高降低、熔宽增加、焊道笔直,并且焊缝表面光亮,鱼鳞纹均匀分布,此时达到最佳的焊缝成形。当激光功率为 450 W 时,其焊缝波纹断断续

续,即鱼鳞纹不均匀,这是由于熔滴过渡形式变化造成的;当激光功率为 600、750 W 时,焊道余高更低,焊缝熔宽不均匀且存在咬边缺陷。随激光功率增大,热输入量增大,熔融金属也会随之增多。此时,熔池的底部金属表面张力不够大,无法完全托住上方的熔池,母材熔透程度较高,从而导致焊缝余高降低。又因为熔滴过渡表现出大滴排斥过渡,所以焊缝表面不均匀。结果表明,加入一定功率的激光可以使熔滴过渡更稳定,能够有效改善熔滴过渡,使焊缝表面鱼鳞纹更为均匀,使焊缝成形更美观。

另外,加入激光后,焊缝表面的铺展性明显优于

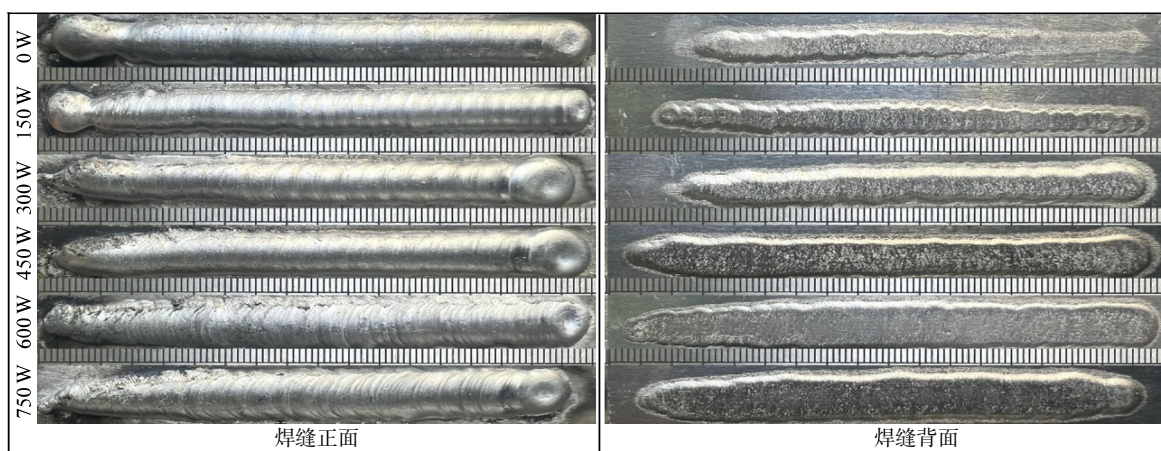


图 10 不同激光功率下激光-MIG 复合焊缝形貌

Fig.10 Morphologies of laser-MIG composite weld seams under different laser powers

加入激光之前,焊缝成形更好,焊缝熔宽变宽,同时也提高了焊接质量。焊缝的铺展情况改善的原因是,在复合焊接中,激光在前,作为热源,利用其高能量密度,先在母材上形成一定尺度的熔池,并通过激光的“匙孔”效应,将熔融的金属持续地向后排出;而激光的加入使温度升高,而温度越高液态金属的表面张力越小,液态金属的铺展性越好,有利于金属充分铺展。

3 结论

使用自主搭建的激光-MIG 复合焊系统对 5A06 铝合金薄板进行焊接试验。研究在小电流 MIG 焊时,不同小功率激光的加入以及不同功率激光对激光-MIG 复合焊的影响。

(1) 激光-MIG 复合焊系统稳定性较高,可以实现铝合金薄板的焊接,且焊接效果较为理想。

(2) 当 MIG 焊单独进行焊接时,未熔透母材,熔池不易铺展,焊缝余高较高,且熔滴过渡不稳定。在加入激光以后,焊缝成形得到了改善,余高降低,熔滴过渡情况亦发生改变。

(3) 不同激光功率对焊接效果的影响不同,当功率在 300 W 以下时,熔滴的过渡频率逐渐升高,过渡平稳,焊缝成形较好,并能获得良好的焊接质量;当功率在 300 W 以上时,由于激光功率增大,金属蒸气增多,熔滴过渡阻力增大,熔滴与熔池之间产生了排斥现象,导致熔滴过渡不稳定,焊缝成形较差,焊接质量下降。

参考文献:

- [1] 张国滨,彭锐茜. 激光-MIG 复合焊先进技术研究现状[J]. 热加工工艺,2025,54(1):1-6.
- [2] 雷正龙,黎炳蔚,周恒,等. 端接接头激光-MAG 复合焊熔滴过渡与气孔特征分析[J]. 中国激光,2019,46(3):72-79.
- [3] 王秋影,邱培琨,陈辉. 激光的加入对激光-MIG 复合焊熔滴过渡的影响研究[J]. 电焊机,2020,50(3):126-130.
- [4] 何双,陈辉,陈勇,等. 激光功率对激光-MAG 复合焊熔滴过渡行为的影响[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(2):315-321.
- [5] 邵明皓,张华,刘德博,等. 6082 铝合金激光-MIG 复合焊工艺组织及性能研究[J]. 应用激光,2022,42(2):1-7.

(下转第 231 页)

分析,发现热处理对应力峰值区域有明显的应力消减效果。如果不考虑构件边缘位置,那么x方向残余应力的消减效果是最明显的,应力下降幅度为75%~90%。y方向残余应力在大部分区域应力水平低于x方向,应力消减幅度为55%~68%。

4 结论

(1) 基于热弹塑性法,模拟了平板T形焊接过程。通过残余应力检测分析,有限元结果与实测结果平均误差约为16%,验证了有限元模型的有效性。

(2) 平板T形焊接残余应力场中,x方向残余应力比y方向残余应力更为明显,且集中分布在横向焊缝中部,并表现为中部受拉,两端受压,中间部分的拉应力基本在450MPa水平。

(3) 经过热处理,三种焊接残余应力场原先应力突出的区域都会出现有效的应力消减。等效残余应力下降幅度基本在80%,x方向残余应力消减效果最为明显,应力下降幅度为75%~90%。

参考文献:

- [1] 逯世杰,王虎,戴培元,等. 蠕变对焊后热处理残余应力预测精度和计算效率的影响[J]. 金属学报,2019,55(12):1581-1592.
- [2] Gao L S. Residual Stress Simulation in multi-pass weld of stainless steel pipes [J]. Advanced Materials Research, 2012,578:82-86.
- [3] 上田幸雄,村川英一,麻宁绪. 焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序[M]. 成都:四川大学出版社,2008.
- [4] 贾坤荣,刘军,岳珠峰. 厚板焊接温度场和残余应力场的数值模拟[J]. 热加工工艺,2009,38(17):102-105.
- [5] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京:中国石化出版社,2010.
- [6] 张建勋,刘川. 焊接应力变形有限元计算及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [7] 火力发电厂焊接热处理技术规程:DL/T 819-2019[S].
- [8] 黄继武. 多晶材料X射线衍射:实验原理、方法与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
- [9] Yaghi A H, Hyde T H, Becker A A, et al. Finite element simulation of welding and residual stresses in a P91 steel pipe incorporating solid-state phase transformation and post-weld heat treatment [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design,2008,43(5):275-293.
- [10] 金成. 焊接过程的数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2017.
- [11] Song S, Dong P, Kim M H. Residual stresses in narrow-groove girth welds and applications for fitness-for-service assessment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2020,188:104238.
- [12] Goldak J A, Akhlaghi M. Computational welding mechanics [M]. Springer,2010.
- [13] Brickstad B, Josefson B L. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,1998,75(1):11-25.
- [14] Hadadian A, Sedaghati R. Investigation on thermal relaxation of residual stresses induced in deep cold rolling of Ti-6Al-4V alloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,100(1/4):877-893.
- [15] Dong P, Song S, Zhang J. Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2014,122:6-14.
- [16] Marchattiwar A, Sarkar A, Chakravarty J K, et al. Dynamic recrystallization during hot deformation of 304 austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2013,22(8):2168-2175.
- [17] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2022.
- [18] Gaffard V, Besson J, Gourgues-Lorenzon A F. Creep failure model of a 9Cr1Mo-NbV (P91) steel integrating multiple deformation and damage mechanisms [C]//Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety Assessments-ECF. Stockholm, Sweden,2004:00165064.
- [19] 李兴文. P91钢的变载荷蠕变性能研究[D]. 北京:华北电力大学,2021. [H]
- [9] 陈明华,李陈宾,刘黎明. 激光-电弧复合焊接过程中等离子体的耦合行为[J]. 焊接学报,2014,35(10):53-56.
- [10] Gao M, Zeng X Y, Hu Q W. Effects of welding parameters on melting energy of CO₂ laser-GMA hybrid welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2006,11(5):517-522.
- [11] 叶广文,刘倩雯,范西岸,等. 激光-MIG复合焊接熔滴过渡对焊缝表面成形的影响[J]. 中国激光,2022,49(8):121-133.
- [12] Jorge V L, Scotti F M, Reis R P, et al. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in gas metal arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021,62:655-669. [H]

(上接第224页)

- [6] 曾浩林,陈东高,戴宇,等. 国产ER5356焊丝激光-MIG复合熔滴过渡特征与焊缝组织分析[J/OL]. 热加工工艺,1-6 [2023-05-28]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814>. 2022 2097.
- [7] Kim Y S, Eagar T W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding [J]. Welding Journal-New York,1993,72(6):269-278.
- [8] Liu L, Chen M, Li C. Effect of electric arc on laser keyhole behavior based on direct observation during low power pulsed laser-arc hybrid welding process [J]. Optics and Lasers in Engineering,2013,51(10):1153-1160.