

能量对比对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊焊缝的影响

张羽昊¹ 陈 辉¹ 杨 策¹ 裴利程² 郑森木²

(1.西南交通大学材料科学与工程学院; 2.四川航天长征装备制造有限公司)

摘 要 为优化厚板铝合金激光-MIG 复合焊接工艺,提高焊接效率,分别对固定激光功率和固定电弧功率两种模式下,激光和电弧能量配比系数 $\eta(P_L/P_{MIG})$ 对焊缝成形的影响及焊接接头组织进行分析。研究发现,激光功率一定时,随 η 增大,焊缝熔深、熔宽均减小,焊缝深宽比变化不大;在固定电弧功率时,随 η 增大,焊缝熔深、熔宽、深宽比均增大。激光热源对焊缝熔深、熔宽均有一定影响,电弧热源主要影响焊缝熔宽。在固定激光功率时,随 η 增大焊缝气孔率减小,而在固定电弧功率时,焊缝气孔率随着 η 增大而增大。固定电弧功率时,随 η 增大,焊缝激光作用区内 Mg 含量降低,Zn 含量升高。分别采用 $\eta=1.5$ 和 $\eta=0.25$ 的工艺参数进行了 12 mm 厚 A7N01 铝合金板对接打底焊和盖面焊,得到的焊缝成形优良,接头抗拉强度达到母材的 78.95%。

关键词 铝合金;激光-MIG 复合焊;能量配比;气孔率;元素烧损

中图分类号 TG456.7;TG457.14

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Energy Ratio on Welded Joint in Laser-MIG Hybrid Welding of A7N01 Alloy

Zhang Yuhao¹, Chen Hui¹, Yang Ce¹, Pei Licheng², Zheng Senmu²

(1.School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University;

2.Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing)

Abstract: In order to optimize the laser-MIG hybrid welding process of thick aluminum alloy and improve the welding efficiency, the effects of laser and arc energy ratio coefficient $\eta(P_L/P_{MIG})$ on the weld formation and welded joint structure were analyzed under the two modes of fixed laser power and fixed arc power, respectively. The results indicate that in the fixed laser power mode, the weld penetration and penetration width are decreased, and the aspect ratio of the weld has little change with the increase of η . In the fixed arc power mode, the weld penetration, melting width and the aspect ratio are all increased with the increase of η . The laser heat source has a certain influence on the weld penetration depth and width, while the arc heat source mainly affects the weld penetration width. In the fixed laser power mode, the weld porosity is decreased with the increase of η , which is inverse in the fixed arc power mode. In the fixed arc power mode, Mg content in the laser action area of the weld is decreased, while Zn content is increased with the increase of η . The 12 mm thick plate A7N01 aluminum alloy butt bottom welding and cover welding were carried out using the process parameters of $\eta=1.5$ and $\eta=0.25$, and weld joint is well formed, where the tensile strength of the joint reaches 78.95% of the base material.

Key Words: Aluminum Alloy, Laser-MIG Hybrid Welding, Energy Ratio, Porosity, Element Burnout

铝合金由于其密度低、强度高等特点,在航空航天、汽车制造、轨道交通以及船舶工业中已大量应用^[1~3]。目前工业生产中,铝合金厚板焊接通常采用熔化极惰性气体保护焊(MIG)进行多层多道焊接,存在热输入较大,焊接接头软化严重,焊后变形大和焊接效率低等问题^[4,5]。激光-电弧复合焊接是由STEEN WM^[6]首先提出并进行了相关研究,该焊接方法综合了激光焊和电弧焊的优势,能够显著提高焊接效率,降低焊接过程热

输入^[7]。近年来,国内外学者对铝合金的激光-MIG 复合焊接技术进行了广泛的研究。张林等^[8]采用“激光-MIG 复合打底+MIG 盖面”的焊接方式实现了 20 mm 厚 7A52 铝合金对接焊,相比于 MIG 多层多道焊,效率提升了 263%。赵昕等^[9]研究表明,在焊缝全熔透条件下,焊缝内气孔率显著低于未熔透条件,且在全熔透条件下激光功率对焊缝气孔率影响较小。此外,激光和电

收稿日期:2021-10-21;修改稿收到日期:2021-11-16
基金项目:四川省科技计划资助项目(2020YFG0196)
第一作者简介:张羽昊,男,1995 年出生,硕士研究生,成都(610031),E-mail:zhangyuhao0910@163.com
引用格式:张羽昊,陈辉,杨策,等. 能量对比对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊焊缝的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):960-965.
ZHANG Y H, CHEN H, YANG C, et al. Effects of energy ratio on welded joint in laser-MIG hybrid welding of A7N01 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):960-965.

弧作为两个不同的热源,二者能量对比对焊缝成形及焊缝气孔率也有一定的影响。刘婷等^[10]发现,在 6 mm 厚 6061 铝合金激光-MIG 复合焊接过程中,随着激光能量占比提高,焊缝气孔率降低,但气孔直径较大。LEO P 等^[11]在焊接 3 mm 厚 AA5754 铝合金时发现当激光功率 P_L 与电弧功率 P_{MIG} 的比值接近 1 时,焊缝内晶粒尺寸最小,且随激光功率提高,焊缝内气孔率增大、Mg 含量降低。张威等^[12]研究表明,在 4 mm 厚的 6061 铝合金激光-MIG 复合焊接中电弧能量与激光能量的比值在 0.9~1 时,激光与电弧之间的耦合效果最好。陈岩^[13]研究发现,7075-T6 铝合金激光-MIG 复合焊接过程中,在总能量一定的条件下,激光能量为主导时,焊接接头抗拉强度大于以 MIG 电弧能量为主导时的接头抗拉强度。

以上研究多集中于单因素变量对铝合金激光-MIG 复合焊接焊缝成形的影响以及薄板单道焊接过程中激光和电弧能量对比对焊缝成形的影响。根据激光与电弧能量配比系数与焊缝成形关系指导厚板铝合金打底、盖面焊工艺参数研究报道较少。因此,本课题首先采用平板堆焊方式,分别研究固定激光功率和固定电弧功率两种模式下,激光电弧能量对比对焊缝成形、气孔率的影响,再根据堆焊试验结果指导制定 12 mm 厚 A7N01 铝合金板对接焊的打底和盖面工艺参数,实现优质高效焊接,为其应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验母材为 A7N01S-T5 铝合金板材,尺寸为 350 mm×150 mm×12 mm。填充材料为 ER5356 焊丝,直径为 $\phi 1.2$ mm,母材与焊丝的化学成分见表 1。试验前采用机械打磨方法去除试板表面氧化膜,然后用无水乙醇除去待焊试板表面污染物,减少由于试板表面油污对焊缝气孔的影响。

表 1 A7N01 铝合金母材和 ER5356 焊丝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A7N01 aluminum alloy base and ER5356 welding wire %

材料	w_B								%
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	
A7N01	0.57	0.34	0.25	0.09	1.56	0.23	5.6	0.03	余量
ER5356	0.10	0.40	0.10	0.15	4.80	0.10	0.10	0.13	余量

1.2 试验设备

复合焊接设备主要包括 IPG YLS-4000 光纤激光器、KEMPPI Pulse 450 焊机、ABB IRB2600 机器人等。其中激光器输出波长为 1.06 μm ,激光光斑直径为 250 μm 。焊机为“一元化”调节模式,即调节送丝速度自动

匹配焊接电流和焊接电压。

采用 Radioflex-300EGS-2 型 X 射线探伤设备进行探伤,探伤电压为 80 kV,时间为 0.4 min。采用 Image J 软件对焊缝气孔率进行统计,气孔率定义为探伤底片上气孔投影总面积与焊缝投影面积的比值。采用线切割沿垂直焊缝方向截取金相试样,经过打磨、抛光后,用 Keller 试剂(2.5 mL 的 HNO_3 + 1.5 mL 的 HCL + 1 mL 的 HF + 95 mL 的 H_2O)进行腐蚀,采用 Stemi 2000-c 体视显微镜、OLYMPUS BX51 光学显微镜对焊缝宏观形貌进行观察,采用附带有能量色散光谱仪(EDS)的 Gemini 300 型扫描电镜(SEM)对焊缝微观形貌进行观察。采用 CMT4304 电子万能试验机对母材及对接接头进行全厚度拉伸试验,拉伸速率为 3 mm/min,拉伸试样见图 1。

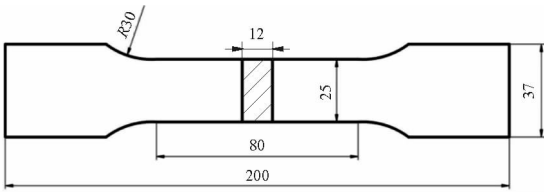


图 1 拉伸试样
Fig.1 Tensile specimen

1.3 试验方法

焊接过程采用激光前置、电弧后置的激光引导模式,激光与试板法线方向呈 10° 夹角,焊枪与试板呈 60° 夹角。固定光丝间距 $D_{LA} = 3$ mm,离焦量 $\Delta = 0$,焊丝干伸长为 15~20 mm。图 2 为激光与电弧相对位置示意图。焊接过程采用高纯氩气(纯度为 99.999%)作为保护气体,气体流量为 30 L/min。焊接工艺参数见表 2,分别采用固定电弧功率(P_{MIG})和固定激光功率(P_L)模式进行单道平板堆焊,在不考虑母材对激光能量和电弧能量吸收率的前提下,通过调整焊接速度 V ,保证焊接线能量 E 恒定, $E = (P_{MIG} + P_L)/V$ 。经过前期研究, E 为 800 J/mm 左右能够获得表面成形良好的焊缝,由此堆焊试验中固定线能量为 800 J/mm。

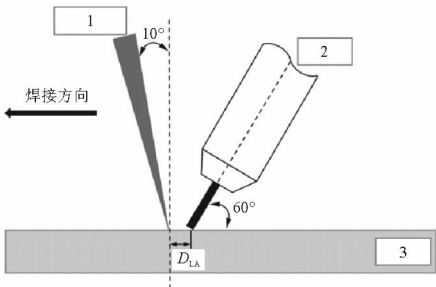
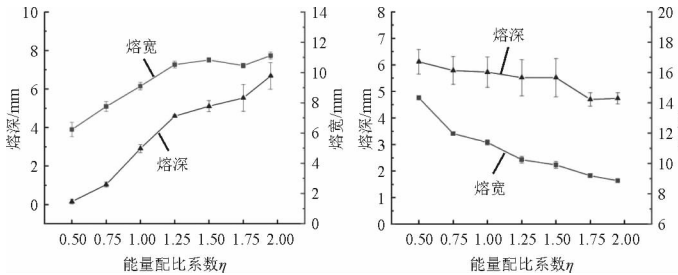


图 2 激光与电弧相对位置示意图
Fig.2 Schematic diagram of the relative position of laser and arc
1.激光束 2.焊枪 3.工件

表 2 激光-MIG 复合焊接工艺参数

Tab.2 Process parameters of laser-MIG hybrid welding									
编 号	激光功率 $P_L=2\ 800\ \text{W}$				编 号	电弧功率 $P_{\text{MIG}}=2\ 110\ \text{W}$ (送丝速度为 $7\ \text{mm/s}$, $I=10^6\ \text{A}$, $U=19.9\ \text{V}$)			
	送丝速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_{MIG}/W	焊接速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	η		P_L/W	焊接速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	η	
1	14	5 606	10.5	0.5	8	1 055	4.0	0.5	
2	10.6	3 735	8.1	0.75	9	1 570	4.6	0.75	
3	8.6	2 800	7.0	1.0	10	2 110	5.3	1.0	
4	7.4	2 240	6.3	1.25	11	2 610	5.9	1.25	
5	6.7	1 867	5.8	1.5	12	3 130	6.6	1.5	
6	6.0	1 600	5.5	1.75	13	3 650	7.2	1.75	
7	5.5	1 437	5.3	1.95	14	4 000	7.6	1.95	



(a) 电弧功率为 2 110 W 时熔深和深宽 (b) 激光功率为 2 800 W 时熔深和深宽 (c) 焊缝横截面示意图

图 3 在固定电弧功率和激光功率一定时,焊缝熔深、熔宽、深宽比与能量配比系数 η 关系

Fig.3 Relationship between weld penetration depth, penetration width, aspect ratio and energy ratio coefficient η under the fixed arc power and laser power

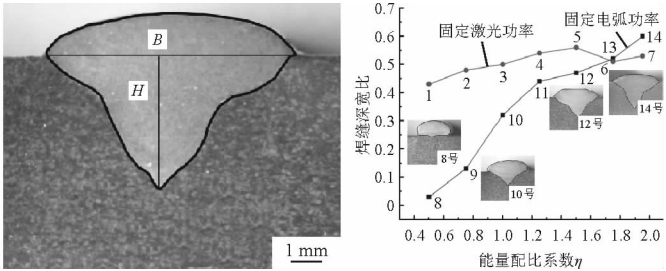
密度的激光束照射下迅速升温至沸点,金属蒸气以一定的速度离开熔池产生反冲压力,从而形成匙孔^[14],复合焊接模式从热导焊模式转变为深熔焊模式,焊缝熔深显著增大。同时由于激光能量提高,匙孔向周围母材热传导增加,因此焊缝熔宽增大。由图 3b 可见,在固定激光功率(2 800 W)下,焊缝熔深随 η 的增大略有减小,而焊缝熔宽显著降低。由于激光-电弧复合焊接过程中,电弧等离子体对激光等离子体的稀释作用,可减少光致等离子体对激光的反射率,提高激光热源利用率^[15]。但随 η 增大,电弧功率减小,对激光等离子体稀释效果降低,使激光热源利用率降低,故焊缝熔深略有减小。此外,电弧热源为面热源,主要以辐射和对流方式向母材传递热量,随电弧功率降低,电弧作用范围变窄,且送丝量减少,共同导致焊缝熔宽显著减小。综上分析,激光热源对焊缝熔深、熔宽均有一定影响,而电弧热源主要影响焊缝熔宽。

由图 3d 可见,在固定电弧功率模式下,焊缝深宽比随能量配比系数 η 增大而显著增大,在 $\eta<1$ 时,复合焊接模式为热导焊,焊缝横截面与 MIG 焊类似(8 号试样),熔深较浅,深宽比较小;当 $\eta\geq 1$ 时,焊缝横截面呈现典型的深熔焊接特征,随 η 增大,深宽比显著增大(10、12 及 14 号试样)。固定激光功率模式下,随 η 增大,焊缝深宽比变化不大。

2 试验结果与分析

2.1 能量配比系数对焊缝横截面形貌影响

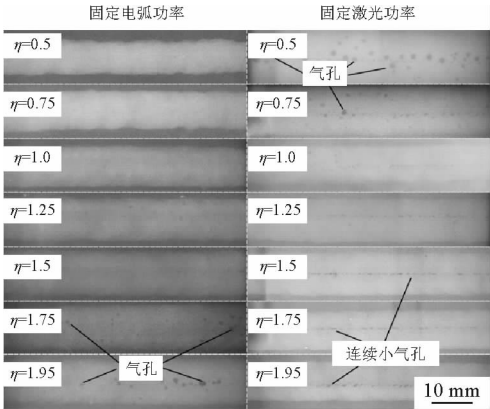
图 3 为电弧功率为 2 100 W 和固定激光功率为 800 W 时,能量配比系数 η 与堆焊焊缝熔深 H 、熔宽 B 和深宽比(H/B)的关系。由图 3a 可见,在固定电弧功率(2 110 W)下,随 η 从 0.5 增大到 1.95,焊缝熔深、熔宽均显著增大。固定电弧功率模式下, η 的增大取决于激光功率的提高,当 η 小于 1 时,由于激光能量低,不足以形成匙孔,此时复合焊接模式为热导焊,焊缝熔深较小。当 $\eta\geq 1$ 时,随激光能量提高,铝合金表面在高能量



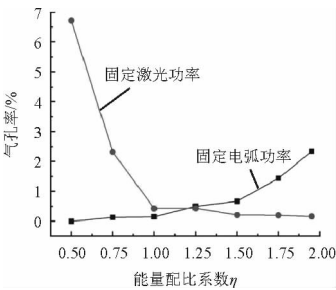
(d) 焊缝深宽比

2.2 能量配比系数对焊缝气孔率的影响

图 4 为固定电弧功率(2110W)和固定激光功率



(a) X 射线探伤底片



(b) 能量配比系数 η 与焊缝气孔率关系

图 4 能量配比系数 η 与焊缝气孔率

Fig.4 Energy ratio coefficient η and weld porosity

(2 800 W)两种模式下能量配比系数 η 与焊缝气孔率的关系。可以看出,在固定电弧功率(2 110 W)下,当 η 小于 1.5 时,焊缝气孔数量较少,气孔率小于 1%。但当 η 大于 1.5 时,在焊缝处可见明显气孔,且随 η 增大,焊缝气孔率显著上升;固定激光功率(2 800 W)下,当 $\eta < 1$ 时,焊缝处可见较多圆形大气孔, $\eta > 1$ 后焊缝内气孔明显减少,均为沿焊缝中心分布的连续小气孔。

研究表明,铝合金激光复合焊缝气孔主要分为氢气孔和工艺性气孔^[16~18],其中工艺性气孔也称匙孔型气孔,其产生机理为焊接过程中匙孔失稳发生坍塌,从而产生气泡,部分气泡可从熔池上方溢出,未能溢出的气泡便被凝固的金属捕获形成气孔,且随匙孔深度增加,匙孔坍塌频率提高,从而产生更多的气孔^[19]。固定电弧模式下, η 的增大取决于激光功率的增大。根据图 3d,在 $\eta < 1$ 时复合焊接模式为热导焊,不产生匙孔,焊缝熔深较浅,因此焊缝内几乎无气孔产生。当 $\eta \geq 1$ 时,激光能量大于深熔焊阈值,形成匙孔,且 η 越大,匙孔深度增加,匙孔稳定性降低,由匙孔坍塌产生的工艺型气孔越多,故焊缝中气孔率增大。

在固定激光功率(2 800 W)下,复合焊接均为深熔焊模式,当 $\eta = 0.5 \sim 0.75$ 时,由于送丝速度较大,导致熔池体积大且反应剧烈,焊接过程中可能卷入惰性保护气体,在焊缝上部形成大气孔,导致焊缝气孔率较高。而当 $\eta \geq 1$ 后,电弧功率降低,此时焊缝冷却速度快,由于激光匙孔失稳产生的匙孔型气孔来不及上浮,多集中且连续分布于焊缝底部,尺寸较小。

2.3 焊缝组织

在电弧功率为 2 110 W 时, $\eta = 1.75$ 下,获得的 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接接头宏观形貌及显微组织及不同位置放大组织见图 5。从图 5a 可见,焊缝横截面呈“图钉”形,焊缝上部主要受电弧热源影响,而焊缝下部主要受激光热源影响,分别称为电弧作用区 AMZ(Arc melting zone)和激光作用区 LMZ(Laser melting zone)。由图 5b 和图 5e 可见,AMZ 和 LMZ 中心均为等轴晶组织,由于 LMZ 主要受激光热源影响,所受热输入小,其晶粒尺寸明显小于 AMZ。熔合区(EQZ)靠近焊缝侧为垂直向内生长的柱状晶,且由于电弧作用区热输入大的缘故,电弧作用区的熔合区宽度大于激光作用区熔合区宽度。热影响区(HAZ)在热循环作用下发生再结晶或不完全再结晶,晶粒形态与母材(BM)类似,仍为轧制态的细长晶粒。

A7N01 铝合金为 Al-Zn-Mg 系高强铝合金,其中 Mg 和 Zn 可形成强化相,但其沸点较低,在复合焊接过程中由于激光能量密度大,Mg、Zn 容易发生蒸发烧损,

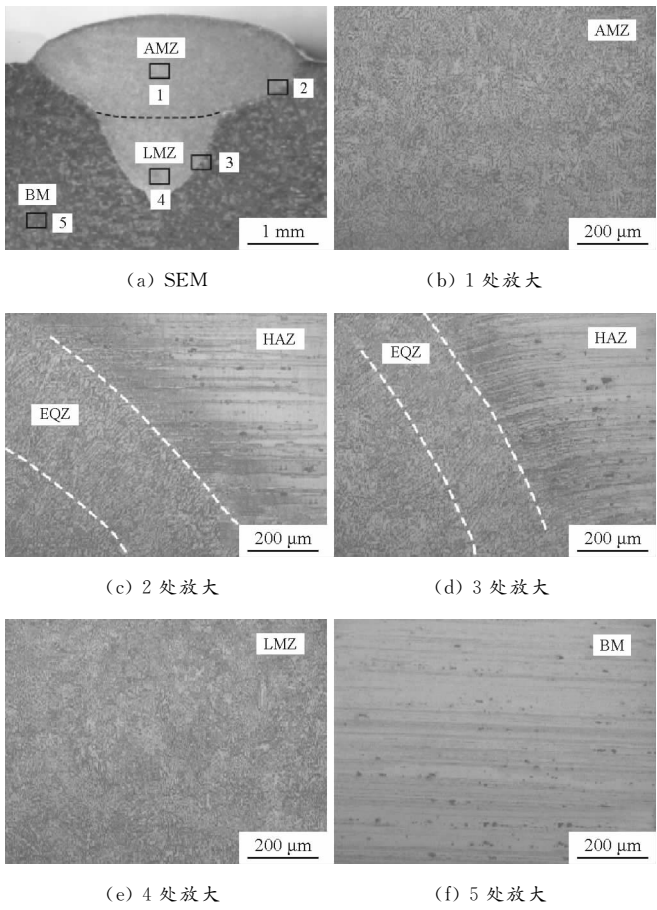


图 5 复合焊接接头及母材显微组织

Fig.5 Microstructure of hybrid welded joints and base metal 导致焊缝强化相数量减少,强度降低。根据图 3,固定激光功率为 2 800 W 下,复合焊接模式均为深熔焊,焊缝熔深变化不大。而在固定电弧能量模式下,当 $\eta > 1$ 后复合焊接模式为深熔焊,随着 η 增大,激光功率提高,焊缝激光作用区深度显著增加,Mg、Zn 烧损程度可能发生变化。因此采用 EDS 对固定电弧能量模式下, $\eta \geq 1$ 的焊接参数所得焊缝成分进行分析。

图 6 为图 5a 中激光作用区到母材的 EDS 线扫描结果。从图 6a~图 6b 可以看出,从激光作用区到母材 Zn 含量波动上升而 Mg 含量下降。根据表 1 可知,焊丝中 Mg 含量约为母材中 Mg 含量的 3 倍,可弥补焊接过程中激光作用区内 Mg 的烧损,使其含量高于母材。但焊丝成分中 Zn 含量较少,激光作用区内由于 Zn 蒸发烧损及焊丝成分的稀释作用,导致其含量低于母材。图 6b 和图 6d 为电弧功率为 2 110 W 时,能量配比系数 η 与激光作用区底部(图 5 中 4 处)Zn、Mg 含量的关系。可见激光作用区底部 Zn 含量均低于母材而 Mg 含量均高于母材,且随 η 增大,激光作用区底部 Zn 含量逐渐上升,而 Mg 含量逐渐降低。这是在复合焊接过程中,由于电弧力和熔滴冲击力的作用,电弧作用区和激光作用区熔融金属发生流动,电弧作用区部分金属流入激光

作用区^[20]。由于焊丝中 Mg 含量高于母材而 Zn 含量低于母材,因此随熔融金属流动,激光作用区内 Mg 得到补充而 Zn 被稀释。根据图 3,随 η 增大,激光作用区

深度增加,与电弧作用区熔融金属流动不充分,Mg 补充和 Zn 稀释作用随之降低,故随 η 增大,激光作用区底部 Mg 含量降低,Zn 含量升高。

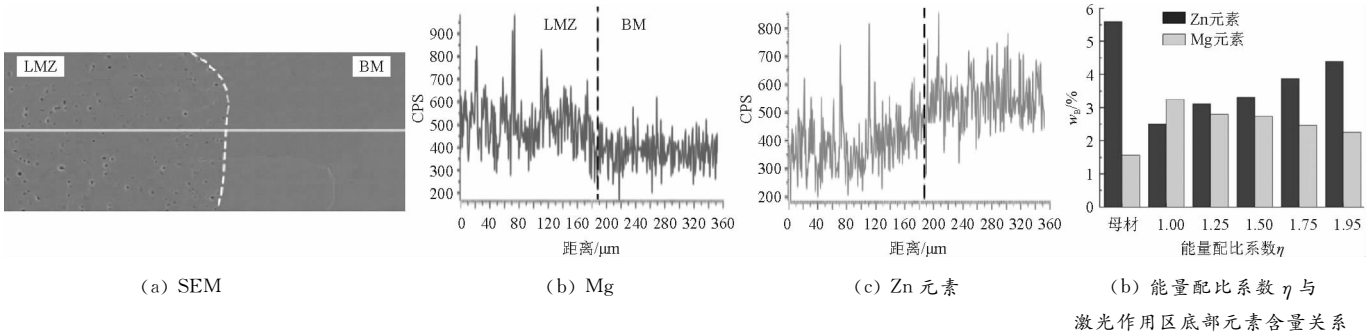


图 6 焊接接头 EDS 测试结果
Fig.6 EDS results of welded joints

2.4 12 mm 厚板对接焊缝成形及接头拉伸性能

分析发现,固定电弧功率模式下, $\eta > 1$ 时可得到较大的焊缝熔深,适用于厚板对接打底焊,但当 $\eta > 1.5$ 后焊缝气孔率较大。因此,采用激光器最大功率为 4 000 W,通过调整送丝速度,使得激光电弧能量配比 $\eta = 1.5$,增大填充量同时避免产生较多气孔。

固定激光功率模式下, $\eta < 1$ 的参数组合可得到较大的焊缝熔宽,但深熔焊模式下匙孔容易失稳产生匙孔型气孔。因此盖面焊降低激光功率至 1 400 W,激光电弧能量配比 $\eta = 0.25$,使得复合焊接模式为热导焊,避免匙孔型气孔产生。综合考虑熔透深度、焊缝填充量以及焊接热输入条件,采用(见图 7)坡口形式及表 3 中的复合焊接工艺参数,获得了焊缝正面鱼鳞纹明显、背面连续的优良焊缝(见图 8),采用 X 射线探伤并统计得到焊缝气孔率为 0.82%,达到 B 类焊缝标准。

分别对母材和对接接头进行拉伸试验,结果见图 9。从图 9a 可以看出,母材抗拉强度为 350 MPa,接头断裂发生在焊缝处,抗拉强度为 276.33 MPa,达到母材的 78.95%。从图 9b 分析发现,焊缝断口上分布着大量

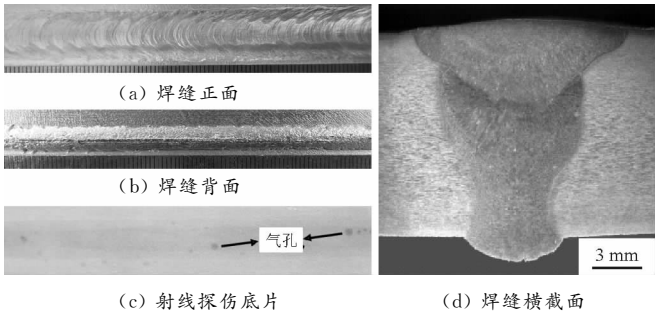
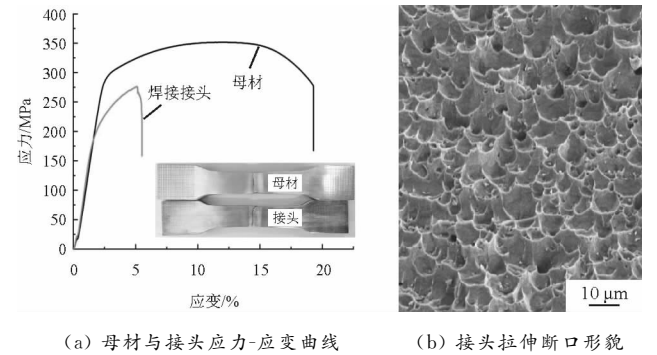


图 8 对接焊缝成形
Fig.8 Weld formation of butt weld



(a) 母材与接头应力-应变曲线 (b) 接头拉伸断口形貌

图 9 拉伸曲线与接头拉伸断口形貌

细小而致密的韧窝,可判断其断裂方式为韧性断裂。

3 结 论

(1)A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接中固定电弧功率模式下,随激光电弧能量配比系数增大,焊缝熔深、熔宽、深宽比、气孔率均增大;在固定激光功率模式下随能量配比系数增大,焊缝熔深、熔宽、气孔率均减小,焊缝深宽比变化不大。

(2)A7N01 铝合金复合焊接接头激光作用区底部 Mg 含量由于得到焊丝成分补充而高于母材,但 Zn 由

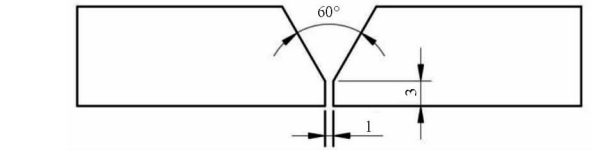


图 7 对接焊坡口尺寸

Fig.7 Groove dimensions for butt welding

表 3 对接焊工艺参数

Tab.3 Process parameters of butt welding							
位置	P_L / W	送丝速度/ (mm · s ⁻¹)	电流/ A	电压/ V	P_{MIG} / W	η	焊接速度/ (m · min ⁻¹)
打底	4 000	8.2	117	22.8	2 667.6	1.5	7
盖面	1 400	14	200	28.1	5 620	0.25	10

于蒸发烧损,其含量低于母材。在固定电弧功率模式下,随能量配比系数增大,激光作用区底部 Mg 含量降低,Zn 含量增加。

(3)分别采用能量配比系数为 1.5 和 0.25 的复合焊接工艺参数进行 12 mm 厚板 A7N01 铝合金打底、盖面焊,得到的焊缝成形良好,接头抗拉强度达到母材的 78.95%。

参 考 文 献

[1] AHN J, CHEN L, HE E, et al. Optimisation of process parameters and weld shape of high power Yb-fibre laser welded 2024-T3 aluminium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 70-85.

[2] 洪腾蛟,董福龙,丁凤娟,等.铝合金在汽车轻量化领域的应用研究[J].热加工工艺,2020,49(4):1-6.

[3] 韩晓辉,张志毅,李刚卿,等.轨道客车轻量化材料及其连接技术的发展与展望[J].焊接,2020(10):34-42,63.

[4] 邓望红,陈顺,廖宁宁,等.6082-T6 铝合金中厚板 MIG 焊与激光-MIG 复合焊工艺和数值模拟对比研究[J].金属加工(热加工),2021(6):51-56.

[5] 许良红,田志凌,彭云,等.高强铝合金的 MIG 以及激光-MIG 焊接工艺对比[J].焊接学报,2007(2):38-42,115.

[6] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of Application Physics, 1980, 51(11): 5 636-5 641.

[7] 刘秀航,高向东,孙友松,等.激光-电弧复合焊接技术研究现状[J].热加工工艺,2022,51(7):7-11.

[8] 张林,冯曰海,刘思余,等.7A52 厚板铝合金激光-MIG 复合焊接组织与性能研究[J].热加工工艺,2019,48(3):19-23.

[9] 赵昕,辛志彬,赵函,等.铝合金激光-MIG 复合焊气孔缺陷影响规律研究[J].热加工工艺,2022,51(5):57-60.

[10] 刘婷,赵艳秋,周旭东,等.能量配比系数对铝合金激光-MIG 复合焊接气孔的影响[J].中国激光,2020,47(11):71-78.

[11] LEO P, RENNA G, CASALINO G, et al. Effect of power distribution on the weld quality during hybrid laser welding of an Al-Mg alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 118-126.

[12] 张威,叶兵,祁小勇,等.6061 铝合金激光-MIG 复合焊中能量比影响的研究[J].激光技术,2018,42(4):500-504.

[13] 陈岩. 铝合金光纤激光-MIG 电弧复合焊热源特性及焊接工艺研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2020.

[14] 汪任凭,雷永平,史耀武.激光深熔焊中匙孔形成过程的动态模拟[J].焊接学报,2010,31(11):38-40.

[15] 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):53-56,115.

[16] ZHAO Y Q, ZHOU X D, LIU T, et al. Investigate on the porosity morphology and formation mechanism in laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy with Y-shaped groove[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 847-856.

[17] 黄立进. 铝合金激光焊及激光-GMAW 复合焊气孔形成机理与抑制方法研究[D].上海:上海交通大学,2018.

[18] 王红阳,孙佳,刘黎明.6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制[J].中国激光,2018,45(3):186-191.

[19] 王长才,胡连海,许昌玲,等.光纤激光焊熔池及匙孔动态行为数值模拟[J].热加工工艺,2019,48(11):134-137.

[20] 赵琳,塚本进,荒金吾郎,等.激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究[J].中国激光,2015,42(4):210-217.

(编辑:栗万仲)

铝基复合材料在问天实验舱上又获成功应用

近日,我国问天实验舱发射任务取得圆满成功。由中国科学院金属研究所马宗义团队研制的新型铝基复合材料成功应用在问天实验舱太阳翼柔性展开机构关键部件和多个实验机柜转接件中。

问天实验舱配备了目前很大的柔性太阳翼,双翼全部展开后可达 55 m。太阳翼可以双自由度跟踪太阳,将为空间站运行提供充足的能源。太阳翼所使用的柔性展开机构某关键部件要求材料兼具轻质、高强、耐磨损、耐疲劳、高尺寸稳定性的特点,并且批量大、批次稳定性要求高。马宗义团队针对这一特殊需求,开发出各向同性碳化硅颗粒增强铝基复合材料中厚板可控塑性变形加工技术,产品批次间性能差异小于 5%,解决了太阳翼展开机构关键部件无材可用的困境。目前,问天实验舱太阳翼已顺利完成展开,运转正常。

据介绍,问天实验舱实验机柜与实验舱内壁结构采用六点式机械连接,连接件在发射过程中在剧烈震动、摩擦工况下服役,承受巨大载荷,是实验机柜载荷结构设计中受力苛刻的零部件。该团队针对该工况研发出碳化硅颗粒增强铝基复合材料锻件,其具有低密度、高强韧性、高耐磨、良好的阻尼性能及耐疲劳等优点,采用该材料替代传统铝、钛等合金,实现的轻量化加工制造,承受住了发射过程中的震动疲劳及磨损等,并使零件减重 20% 以上。

(摘自科技日报)