

能量配比系数对铝合金激光-MIG 复合焊接气孔的影响

刘婷, 赵艳秋, 周旭东, 王磊磊, 占小红*

南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106

摘要 为研究能量配比系数(激光功率与电弧功率的比值)对铝合金激光-MIG 复合焊接气孔的影响,采用 X 射线无损检测与金相显微组织观察法对 6 mm 厚 6061 铝合金激光-MIG 复合焊接接头在能量配比系数为 4.0、3.5、3.1 下的气孔进行了分析。结果发现:激光功率对焊缝横截面底部熔宽的影响显著,增大电弧功率能有效增大复合作用区域的深度;在较高的能量配比系数下,焊缝内部气孔的直径较大,但其数量较少,气孔率较低;在焊缝横截面上,气孔主要分布在焊缝上部,下部较少;但是当能量配比系数降低至 3.1 时,气孔的分布趋于均匀,下部气孔数量增加显著,且工艺气孔的数量也有所增加。结果表明,提高激光功率的能量占比有利于降低气孔率。

关键词 激光技术; 复合焊接; 气孔; 能量配比系数; 6061 铝合金

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1102004

Effect of Energy Ratio Coefficient on Pore During Aluminum Alloy Laser-MIG Hybrid Welding

Liu Ting, Zhao Yanqiu, Zhou Xudong, Wang Leilei, Zhan Xiaohong*

College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

Abstract To study the effect of energy ratio coefficient (the ratio of laser power to arc power) on pores during the aluminum alloy laser-MIG hybrid welding process, 6 mm thick 6061 aluminum alloy laser-MIG hybrid welded joints were measured using X-ray nondestructive testing and metallographic microstructure observation. Pores under the energy ratio coefficient of 4.0, 3.5, and 3.1 were analyzed. It was observed that the laser power has a significant effect on the bottom weld width in the cross-section of the weld and increasing the arc power can effectively deepen the hybrid zone. Under the higher-energy ratio coefficient, the diameter of the pores inside the weld is larger, but the number of pores is smaller, contributing to low porosity. The pores in the weld cross-section are mainly distributed in the upper part of the weld and less in the lower part. However, when the energy ratio coefficient is reduced to 3.1, the distribution of pores tends to be uniform, the number of pores in the lower part significantly increases, and the number of process pores increases. These results show that increasing the energy ratio of laser power during laser-MIG is beneficial to reduce the porosity.

Key words laser technology; hybrid welding; pore; energy ratio coefficient; 6061 aluminum alloy

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390

1 引言

6061 铝合金是可热处理的 Al-Mg-Si 锻造铝合金,具有良好的耐腐蚀性能、高韧性、良好的焊接性,且无晶间腐蚀倾向,已被广泛应用于飞机蒙皮、机身

框架和桁条上^[1-2]。传统的电弧焊接存在焊接不稳定、焊后变形大等缺点,而近几年发展起来的激光焊接对中厚板而言也存在装配要求高、桥接能力差等问题^[3]。激光-电弧复合焊接能够结合传统电弧焊和激光焊接的优点,既保留了激光焊接能量密度高、

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-06-22; 录用日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点实验室开放课题(DMETKF2019010)

* E-mail: zhanxiaohong@126.com

焊接热影响区窄的优点,又能够改善焊缝的桥接性,提高焊接热源的热效率^[4-5]。

铝合金高反射率和高热导率的固有特性使其在激光-熔化极惰性气体保护(MIG)复合焊过程会不可避免地产生气孔^[6]。Casalino 等^[7]对 3 mm 厚 AA5754 铝合金进行了激光-MIG 复合焊接试验,结果发现,当激光功率与 MIG 电弧功率的比值较大时,气孔率较低,这主要是因为较高的激光热输入导致小孔不易坍塌,从而抑制了气孔的生成。王红阳等^[8]对 1.5 mm 厚 6061 铝合金进行了高速激光-MIG 复合焊接,结果发现,焊接速度的提高有利于细化晶粒组织,但熔池的快速冷却易导致小孔坍塌,产生气孔。吴向阳等^[9]基于激光-MIG 复合焊接过程的温度场和流场模拟结果,分析了小孔行为在动态演变过程中的特点,结果发现,小孔的稳定性主要由熔池的流动行为决定:熔池中的流体向后流动,会增加熔池体积,而逆时针环流冲击小孔后壁会导致小孔的稳定性降低。Bunaziv 等^[10]发现:在 5083 铝合金激光-MIG 复合焊接过程中,激光在前模式下的小孔更加稳定;在一定范围内,增加光丝间距和电弧功率、降低焊接速度有利于小孔的稳定,气孔率有所下降。

表 1 6061 铝合金和 ER4047 焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy and ER4047 welding wire

Material	Mass fraction / %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	
6061	0.56	0.70	0.30	0.89	0.93	0.25	0.15	0.04	Bal.	
ER4047	12	0.8	0.03	0.15	0.1	0.2	—	—	Bal.	

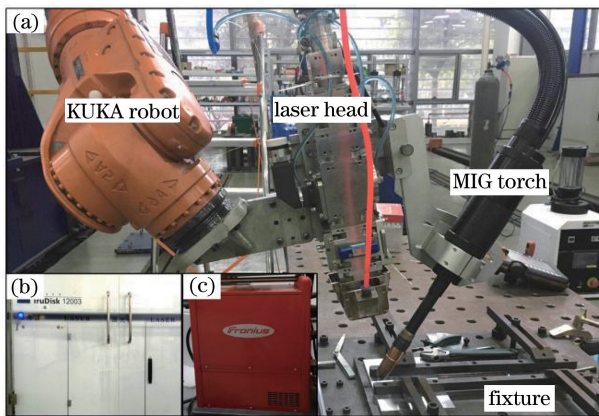


图 1 激光-MIG 复合焊接试验设备。(a) KR60HA 机器人; (b) TruDisk-12003 碟片激光器; (c) TPS 5000 型福尼斯焊机

Fig. 1 Experimental setup for laser-MIG hybrid welding.

(a) KR60HA robot; (b) TruDisk-12003 disk laser; (c) TPS 5000 Fronius welding machine

2.2 试验方法

本试验采用激光在前、电弧在后的激光-MIG 复

合焊接方式,其中激光入射角为 80°,MIG 焊枪入射角为 42°。焊接过程中采用高纯氩气作为保护气体,气体流量为 15 L/min。6061 铝合金的激光-MIG 复合焊接示意图如图 2 所示,选用 3 mm 光丝间距,焊接参数见表 2。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料与设备

本试验中使用的母材金属是 6061-T6 铝合金,填充材料为 ER4047 铝焊丝,它们的化学成分如表 1 所示。母板的尺寸为 150 mm×30 mm×6 mm,开 Y 型坡口。激光-MIG 复合焊接设备采用的是最大激光输出功率为 12000 W 的 TruDisk-12003 碟片激光器、KR60HA 机器人、TPS 5000 型福尼斯焊机以及自行设计的安装夹具。实验设备如图 1 所示。

采用 X 射线无损检测方法对焊缝内部的气孔率进行表征,采用金相观察方法对焊缝横截面的气孔分布进行表征。

3 结果与分析

3.1 能量配比系数对焊缝宏观形貌的影响

图 3(a)~(c)给出了能量配比系数分别为 4.0、3.5 和 3.1 时的焊缝成形,可以看到焊缝表面平整,显示出较为美观的鱼鳞纹。选取成形较好的焊缝区域制备金相试样,观察焊缝的横截面,结果如图 3(d)~(f)所示。可以看到,焊缝横截面大致呈酒杯形,熔宽随着深度的增加而逐渐减小,过渡区的熔宽

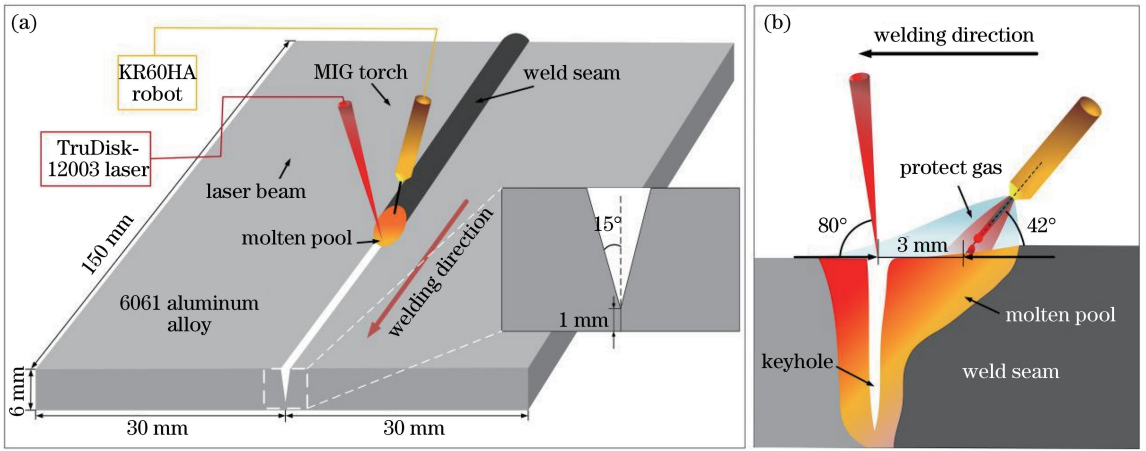


图 2 6061 铝合金激光-MIG 复合焊接示意图。(a) 三维焊接示意图；(b) 焊接过程中的纵截面示意图

Fig. 2 Schematic of 6061 aluminum alloy laser-MIG hybrid welding. (a) Schematic of three-dimensional welding; (b) longitudinal section in the welding process

表 2 激光-MIG 复合焊接参数

Table 2 Process parameters of laser-MIG hybrid welding

Case	Laser power /kW	Welding speed / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Arc current /A	Arc voltage /V	Defocusing amount /mm	Filling speed / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	4.5	1.2	90	12.6	0	5.3
2	4	1.2	90	12.6	0	5.3
3	4	1.2	100	12.9	0	5.7

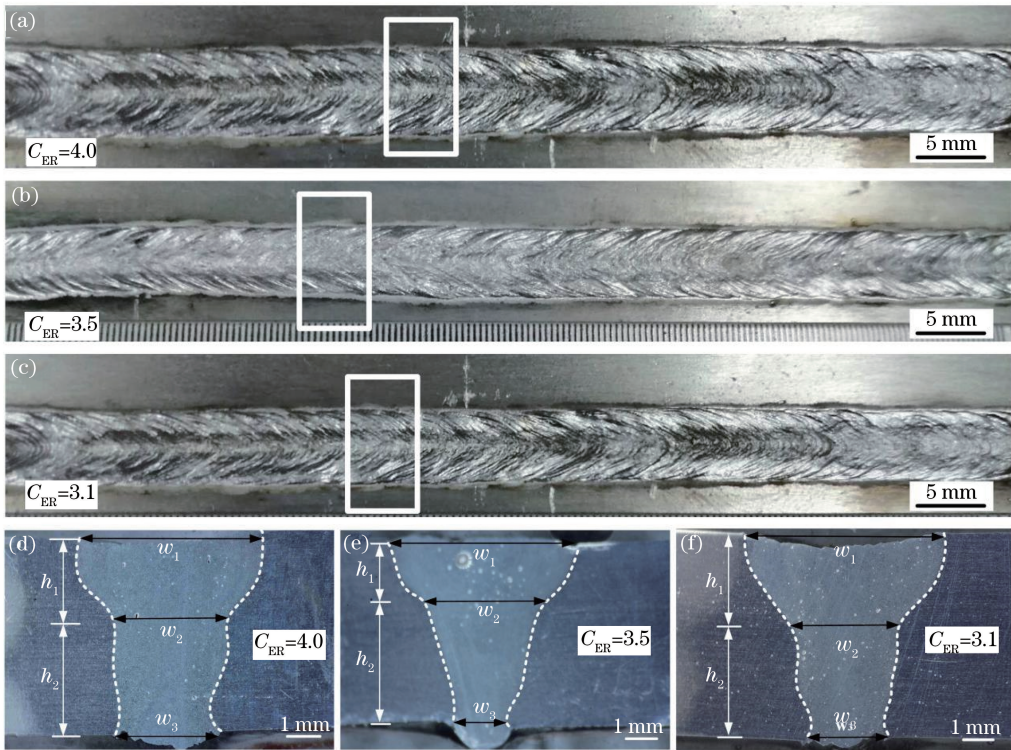


图 3 不同能量配比系数下的焊缝成形和焊缝横截面形貌。(a)(b)(c) 焊缝成形；(d)(e)(f) 焊缝横截面形貌

Fig. 3 Weld formation and cross-section of weld at different energy ratio coefficients.

(a)(b)(c) Weld forming; (d)(e)(f) cross-section of weld

发生了较大变化。分别用 w_1 、 w_2 和 w_3 代表焊缝横截面的上熔宽、过渡区熔宽和下熔宽,对三组能量配比系数下焊缝不同位置处的熔宽与焊缝深度测量三次,取三次测量的平均值作为测量结果,结果如图 4 所示。根据图 4(a)对比三组试样的上熔宽和下熔宽可以发现,激光功率和电弧功率共同

影响焊缝的上熔宽,激光功率对焊缝横截面下熔宽的影响较大。将上熔合线到焊缝熔宽发生急剧下降的区域定义为复合作用区域,由图 4(b)可以看出,增加电弧功率能够有效增加复合作用区域的深度,而仅减小激光功率,复合作用区域的深度将会减小。

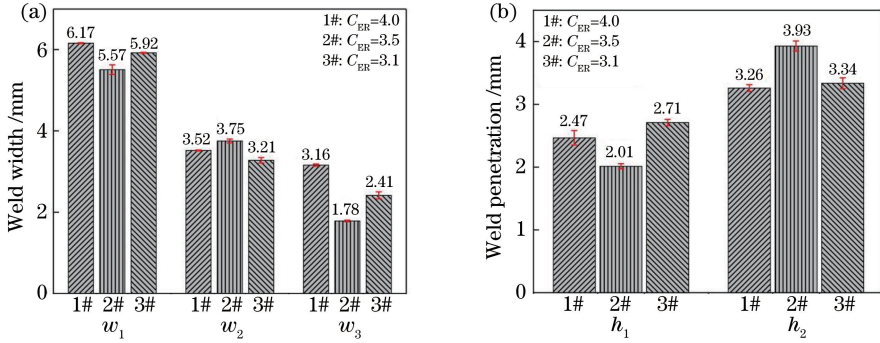


图 4 焊缝不同位置处的熔宽与熔深。(a)熔宽;(b)熔深

Fig. 4 Weld width and penetration of weld in different locations. (a) Weld width; (b) weld penetration

3.2 能量配比系数对气孔分布的影响

对焊缝内部的气孔进行标注,结果如图 5(a)~(c)所示;对焊缝横截面中的气孔进行标注,结果如图 5(d)~(f)所示。可见:当 $C_{ER}=4.0$ 时,横截面

上的气孔数量极少;当 $C_{ER}=3.5$ 时,气孔数量显著增加,且主要分布在焊缝的上部区域;当 $C_{ER}=3.1$ 时,气孔在横截面上的分布较为均匀,下部区域气孔的数量显著增加。

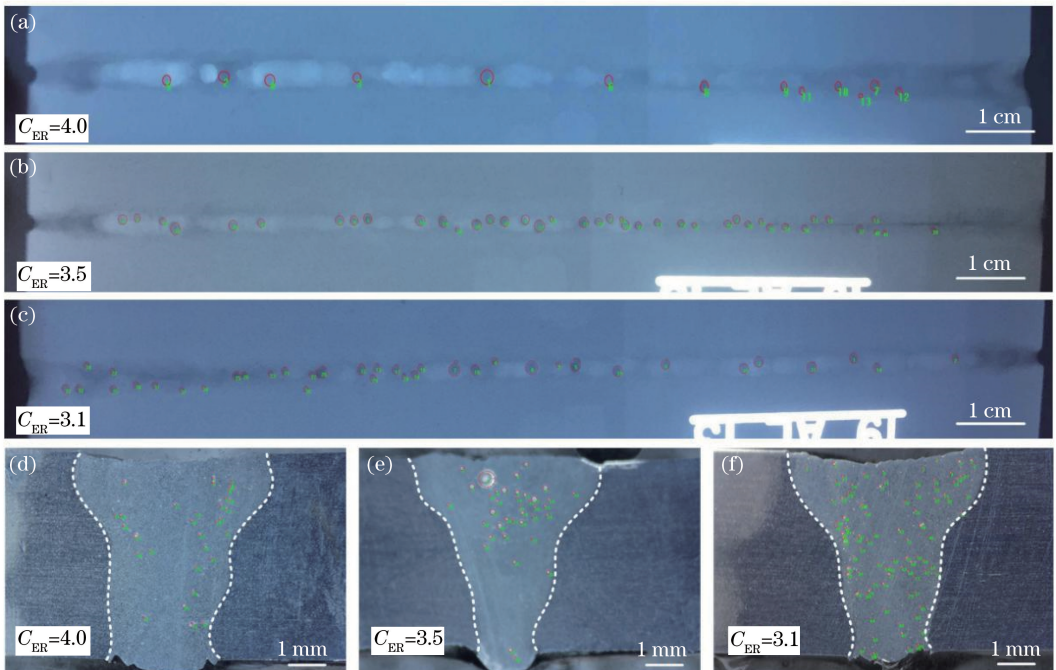


图 5 焊缝内部与横截面上的气孔分布。(a)(b)(c)内部;(d)(e)(f)横截面

Fig. 5 Pore distribution in interior and cross-section of weld. (a)(b)(c) Interior; (d)(e)(f) cross-section

经图像处理和统计后分别得到了不同能量配比系数下焊缝内部和横截面上的气孔分布情况,如图 6 所示。由图 6(a)可以看到:当 $C_{ER}=4.0$ 时,焊缝内部气孔的最大直径和平均直径均较大,最大气孔

直径达到了 1.905 mm,为焊缝上熔宽的 30.8%;当 $C_{ER}=3.5$ 时,焊缝内部气孔的最大直径和平均直径均显著减小,最大直径为上熔宽的 30.0%;但是当 $C_{ER}=3.1$ 时,焊缝内部气孔的最大直径与平均直径

反而有所增大,最大直径为上熔宽的 31.8%。综合比较后可知,三组参数下焊缝内部气孔的最大直径与上熔宽的比值基本相当。当 $C_{ER} = 3.5$ 时,焊缝横截面上气孔的最大直径和平均直径均最小。由图

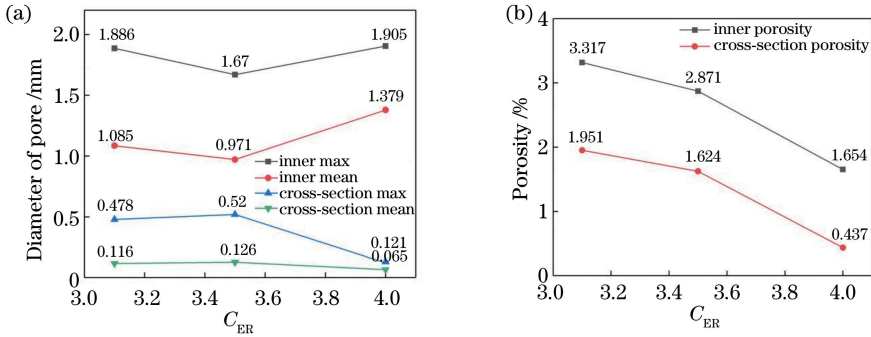
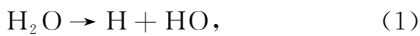


图 6 不同能量配比系数下的气孔分布。(a)气孔的最大直径和平均直径;(b)气孔率

Fig. 6 Pore distribution in different energy ratio coefficients. (a) Maximum and mean diameters of pores; (b) porosity

在激光-MIG 复合焊接过程中,铝合金表面在高能量密度激光束的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,从而形成了小孔。激光直照小孔底部,增大了铝合金对激光的吸收,不断增多的金属蒸气压迫熔池中的液态金属,使小孔进一步加深;同时,蒸气将熔化的金属挤向熔池四周,导致小孔不断延伸,直至小孔内的蒸气压力与液态金属的表面张力、重力平衡为止^[11]。

焊接过程中的焊接参数与受力变化导致了小孔的不稳定,使小孔产生塌陷和闭合,因此气孔会留在熔池内部,形成形状不规则的工艺气孔^[12]。氢气孔是铝合金熔化焊中常见的冶金气孔,由氢元素聚集而成。一方面水蒸气在极高的温度下直接分解生成氢元素,另一方面水蒸气与熔融铝液发生如下反应:



氢在熔池中的溶解度与熔池上方的氢气分压成正比,即

$$[H] = K \sqrt{P_{H_2}}, \quad (3)$$

式中: K 为常数; P_{H_2} 为熔池上方的氢气压^[13]。

综合焊缝内部气孔的直径(即气孔率)可以判断,当能量配比系数为 4.0($C_{ER} = 4.0$)时,较大的激光功率导致熔池的热输入较高,金属蒸气不断产生的反冲压力有利于维持小孔的张开状态,便于熔池内气体的逸出。同时,激光产生的冲击力与金属蒸气的反冲压力加剧了熔池内流体的流动,气体在激光的充分搅拌下更容易逸出。电弧的加入在一定程度上能够消除激光产生的羽辉,有利于提高焊接过

程的稳定性。同时,热输入的增加导致焊缝体积与横截面积均有所增加,上述这些原因导致气孔率较低。当能量配比系数继续减小到 3.1 时,电弧功率的增大促使熔池流动得更加充分,所以气孔分布得更加均匀。由于电弧中的高速等离子流力和熔滴过渡过程中的熔滴冲击力不稳定^[14],因此气孔的直径和数量反而略有增加,最终导致气孔率增大。

综合以上分析可知,随着能量配比系数增大,焊缝内部的气孔率有所下降,因此,提高激光功率的能量占比有利于降低气孔率。

3.3 能量配比系数对气孔微观形貌的影响

采用金相观察法对三组不同工艺参数下焊缝横截面微观组织中的气孔形貌及气孔分布特征进行观察和分析,选取焊缝靠近中轴线的上部区域、过渡区域和下部区域进行金相观察,结果如图 7 所示。可以发现,焊缝上部区域为细小的等轴晶,气孔数量较多,气孔周围的枝晶形态相似。焊缝上部区域为激光和电弧共同作用的区域,主要为细小的 $\alpha + \beta$ 共晶组织^[15]。激光形成的小孔对熔池具有搅拌作用,加剧了小孔周围液态金属与上部熔池的对流,起到了细化晶粒的作用,因此焊缝上部的晶粒较为细小,如图 7(d)~(f)所示。在过渡区域,出现了细小枝晶与较粗大等轴晶的混合微观组织,气孔数量较上部区域有所减少,气孔尺寸较上部区域有所减小,较小的气孔被细小的枝晶包围,较大的气孔出现在细小枝晶和粗大等轴晶的交界处,如图 7(g)~(i)所示。在焊缝下部区域,气孔数量显著减少,气孔尺寸显著减小,晶粒为粗大的等轴晶或柱状晶。由于焊缝下部熔池的形成主要依靠激光能量和热传导,熔池流

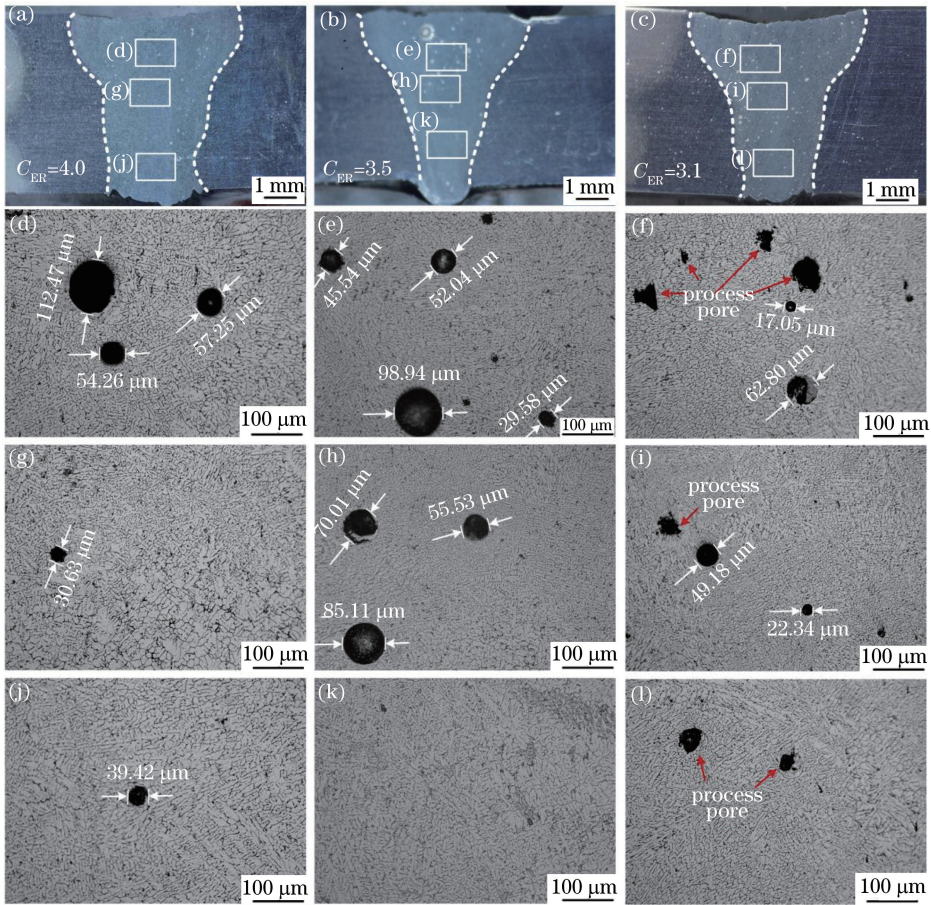


图 7 焊缝的横截面形貌以及焊缝横截面不同区域中气孔的微观形貌。(a)(b)(c)焊缝横截面宏观形貌；(d)(e)(f)焊缝横截面上部气孔的微观形貌；(g)(h)(i)焊缝横截面过渡区气孔的微观形貌；(j)(k)(l)焊缝横截面下部气孔的微观形貌

Fig. 7 Cross-section images of weld and morphology of pores in different areas of weld cross-section. (a)(b)(c) Macro appearance of weld cross-section; (d)(e)(f) morphology of pores in the upper of weld cross-section; (g)(h)(i) morphology of pores in the transition region of weld cross-section; (j)(k)(l) morphology of pores in the bottom of weld cross-section

动无法起到良好的细化效果，且温度梯度较大，凝固速度减小，因此有利于柱状晶和粗大等轴晶的形成和生长^[16]，如图 7(j)~(l)所示。

对比可知，能量配比系数为 3.1 的焊缝横截面上的工艺气孔数量相对较多。随着电弧功率增加，激光光致等离子体对电弧等离子体的热辐射作用相对减弱，由于填丝速度增加，熔滴过渡的细化作用被削弱，这些综合原因使得电弧稳定度下降，并对激光深熔焊的小孔稳定性产生影响，小孔波动时发生的底部闭合导致形成了形状不规则的工艺气孔^[17]。

为定量分析焊缝横截面不同区域内气孔分布的特点，对横截面不同区域内氢气孔的平均直径进行统计，统计结果如图 8 所示。可见，随着能量配比系数减小，上部区域氢气孔的平均直径有减小的趋势（能量配比系数为 4.0 时气孔的平均直径最大，为 74.66 μm ），而中部区域氢气孔的平均直径与能量

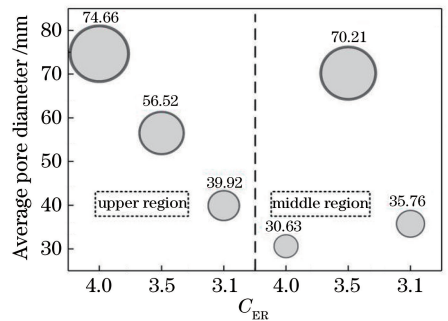


图 8 焊缝横截面不同区域内气孔的平均直径
Fig. 8 Average pore diameter of different regions of cross-section

配比系数非线性关系。

4 结 论

在较大的能量配比系数下，铝合金激光-MIG 复合焊接过程中激光与电弧的耦合作用对焊缝宏观

形貌与气孔分布产生了重要影响,通过调整激光能量与电弧能量的比值,可以控制激光深熔焊中小孔的稳定性,达到减小气孔率的目的。在较大的能量配比系数下,焊缝内部气孔的平均直径较大,但气孔数量较少,导致气孔率较小;当能量配比系数降低时,气孔率有增大的趋势。能量配比系数较大时,气孔主要分布于焊缝横截面的上部,下部气孔极少;仅增加电弧功率,将会降低小孔的稳定性,小孔型气孔数量会有所增加,且气孔分布得更加均匀。

综上,适当增大能量配比系数有利于增大下熔宽,且能显著降低气孔率。

参 考 文 献

- [1] Wang Y. Experimental study on laser welding technology of 6061 aluminum alloy plate[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2019, 47(8): 44-47.
王毅. 6061 铝合金板激光焊接工艺试验研究[J]. *轻合金加工技术*, 2019, 47(8): 44-47.
- [2] Ning C Y, Huang Y H, Zhang G Y, et al. Wear resistance and electrochemical properties of 6061 aluminum alloys treated by laser shock peening[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061403.
宁成义, 黄亿辉, 张广义, 等. 激光冲击强化 6061 铝合金的耐磨性能及电化学性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061403.
- [3] Huang Y, Huang J, Nie P L. Microstructures and textures of 6016 and 5182 aluminum laser welded joints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402003.
黄毅, 黄坚, 聂璞林. 6016 和 5182 铝合金激光焊接接头的组织与织构[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402003.
- [4] Liu Z J, Gu S Y, Zhang P L, et al. Welding seam forming mechanism of high-strength steel laser-metal inert gas hybrid welding with butt gap[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902006.
刘政君, 顾思远, 张培磊, 等. 高强钢激光-MIG 复合焊对接间隙下的焊缝成形机理[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902006.
- [5] He S, Chen H, Cai C, et al. Influence of He-Ar mixed shielding gas on laser-MIG hybrid welding characteristic of aluminum alloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1202005.
何双, 陈辉, 蔡创, 等. 氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG 复合焊接特性的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1202005.
- [6] Panwar N, Chauhan A. Parametric behaviour optimisation of macro and micro hardness for heat treated Al6061 -red mud composite[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(1): 660-669.
- [7] Casalino G, Mortello M, Leo P, et al. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 61: 191-198.
- [8] Wang H Y, Sun J, Liu L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at high speed[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302001.
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): 0302001.
- [9] Wu X Y, Xu J X, Gao X S, et al. Numerical simulation of thermal process and fluid flow field in laser-MIG hybrid weld pools[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902003.
吴向阳, 徐剑侠, 高学松, 等. 激光-MIG 复合焊接热过程与熔池流场的数值分析[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902003.
- [10] Bunaziv I, Akselsen O M, Salminen A, et al. Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233: 107-114.
- [11] Pan J C. Research on molten pool behavior and mechanism during laser deep penetration welding of dissimilar metals of steel/aluminum[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
潘井春. 钢/铝异种金属激光深熔焊过程中熔池行为及机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [12] Zhang D. Study on multiphase coupling flow field behavior of Invar alloy laser-MIG hybrid welding process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
张聃. Invar 合金激光-MIG 复合焊接过程多相耦合流场行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [13] Zhan X H, Zhao Y Q, Liu Z M, et al. Microstructure and porosity characteristics of 5A06 aluminum alloy joints using laser-MIG hybrid welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35: 437-445.
- [14] Zhu Y L. Study on arc behavior and droplet transition of laser-MIG double-wire hybrid welding [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
朱艳丽. 激光-MIG 双丝复合焊电弧行为及熔滴过渡研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [15] Tan B, Ma B, Zhang L J, et al. Microstructure and properties of welding joints of aluminium alloy with medium thickness by the laser-MIG hybrid welding [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, 33(5): 17-20.

- 谭兵, 马冰, 张立君, 等. 中厚度铝合金激光-MIG复合焊接组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(5): 17-20.
- [16] Yan S H, Zhu Z T, Nie Y, et al. Process of 7N01 aluminum alloy welding by hybrid laser-MIG welding method[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(3): 37-39, 43.
- 闫少华, 朱宗涛, 聂媛, 等. 7N01 铝合金激光-MIG复合焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(3): 37-39, 43.
- [17] Hu B, den Ouden G. Laser induced stabilisation of the welding arc [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(1): 76-81.