

5083 铝合金真空激光焊缝成形的影响因素

王天鸽^{1,2**}, 唐新华^{1,2*}, 韩潇潇^{1,2}, 芦凤桂^{1,2}, 崔海超^{1,2}

¹上海交通大学材料科学与工程学院上海市激光制造与材料表面改性重点实验室, 上海 200240;

²高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

摘要 采用正交试验法, 在不同参数下对厚度为 30 mm 的 5083 铝合金厚板进行了激光焊接工艺试验研究。结果表明, 激光功率、焊接速度及环境压力对焊缝成形、气孔率均有不同程度的影响, 其中环境压力对气孔率、熔深和深宽比的影响最大。当环境压强降至 5 kPa 时, 熔深达到了常压下的 2 倍, 气孔率仅为 0.057%。研究结果为铝合金激光焊缝成形和气孔率的控制提供了参考。

关键词 激光技术; 铝合金; 环境压力; 正交试验; 焊缝成形; 真空激光焊接

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1102001

Factors Influencing Weld Formation for Laser Welding of 5083 Aluminum Alloy in Vacuum

Wang Tiange^{1,2**}, Tang Xinhua^{1,2*}, Han Xiaoxiao^{1,2}, Lu Fenggui^{1,2}, Cui Haichao^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

Abstract An orthogonal experiment is designed to investigate the laser welding of a 30 mm thick 5083 aluminum alloy plate under different process parameters. The results show that, the laser power, the welding speed and the ambient pressure have different effects on weld formation and porosity, in which the effects of the ambient pressure on the porosity, the penetration depth and the depth-width ratio are the strongest. When the ambient pressure is decreased to 5 kPa, the penetration depth is twice that at normal pressure and the porosity is only 0.057%. This research result provides a reference for the control of weld formation and porosity in the laser welding of aluminum alloys.

Key words laser technique; aluminum alloy; ambient pressure; orthogonal tests; weld formation; laser welding in vacuum

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850; 350.5400; 140.3510

1 引言

5083 铝合金不仅具有优异的比强度和低温力学性能, 还拥有良好的耐腐蚀性和可加工性, 被广泛应用于船舶、汽车、轨道交通、航空航天等领域^[1-5], 其焊接应用是研究热点之一。传统焊接方法在中厚板铝合金的焊接中存在诸多不足, 如焊材填充量大、热影响区较宽、焊接效率低等。高功率激光焊接作为一种新型焊接方法, 为该领域提供了一种全新的解决手

段, 相关的研究和应用逐渐增多^[6-10]。然而, 高功率激光焊接铝合金也存在一些难题, 一方面, 铝合金具有高热性和高反射率的特点, 对激光能量的利用率低, 熔深不够大^[8]; 另一方面, 铝合金在激光焊接中极易产生两类气孔, 一类是氧化膜吸附的水分带来的氢气孔, 另一类是匙孔塌陷形成的气孔^[11-12]。

近年来, 国内外学者提出了包括表面清理、复合焊、优化工艺参数及真空焊在内的多种解决方法^[13-18]。Haboudou 等^[13]对铝合金的钎铝石榴

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-05-18; 录用日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51675336)

* E-mail: xhtang@sjtu.edu.cn; ** E-mail: tiangewang@sjtu.edu.cn

石(YAG)激光焊接进行了研究,认为焊接表面的预处理可以有效减小焊后气孔率。王治宇^[14]研究了YAG激光与熔化极稀有气体保护(MIG)电弧复合焊接对焊缝形貌的影响,发现激光电弧的交互作用可在一定范围内增大熔深,但随着电弧功率的增大先增后减。Sánchez-Amaya等^[15]研究发现,激光焊接速度减慢时,铝合金的焊缝尺寸有一定增大。Katayama等^[16]分别用高功率CO₂激光器和YAG激光器在真空下焊接A5083铝合金,结果显示二者熔深都有所增大,并且负压下气孔数量明显减少,在压力为0.4 kPa时气孔基本消失。Cai等^[17]采用5 kW光纤激光器对10 mm厚的A5083铝合金在不同环境压力下焊接的熔深特点及小孔行为进行了研究对比,结果表明,常压下熔深为4.9 mm;当压力为10 Pa时,熔深可达8.7 mm。目前,学者们对中厚板铝合金的真空激光焊接焊缝成形及缺陷影响因素已有一定研究,但基于正交法分析不同因素的影响程度和影响机理的研究鲜有报道。

为了综合对比不同条件对焊缝熔深及气孔缺陷的影响程度及影响机理,本文基于正交试验,研究了激光功率、焊接速度、环境压力等关键因素对厚度为30 mm的铝合金激光焊缝成形及其焊接质量的影

响规律,分析了其对焊缝中气孔缺陷的影响程度及影响机理,为5083铝合金中厚板激光焊缝成形的控制和气孔缺陷的抑制提供了参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料与装置

试验所用材料为30 mm厚的5083铝合金,焊前使用NaOH和浓HNO₃溶液对铝板试样进行清洗,除去表面氧化膜及油污,并进行烘干处理。试验在一个真空激光焊接试验平台中进行,如图1所示。试验平台包括真空腔、抽气过滤装置、高速摄影系统及10 kW光纤激光器(波长为1.07 μm,焦距为350 mm)。其中,高速摄影系统用于激光焊接过程中金属蒸气羽烟的观察与拍摄。焊接时,激光工作头横卧固定于真空室顶部,激光束通过其顶部的铜镜反射进入真空室,到达试板表面进行焊接。试板置于小车之上,由控制系统控制电机驱动小车匀速移动。焊后观察焊缝表面成形,截取多个焊缝横截面,制备金相试样观察横截面上的焊缝成形及熔深情况;同时沿焊缝纵向截取中部约30 mm长的分段,将其沿焊缝中心线剖开,制备纵截面金相样品用于焊缝气孔的观测和研究。

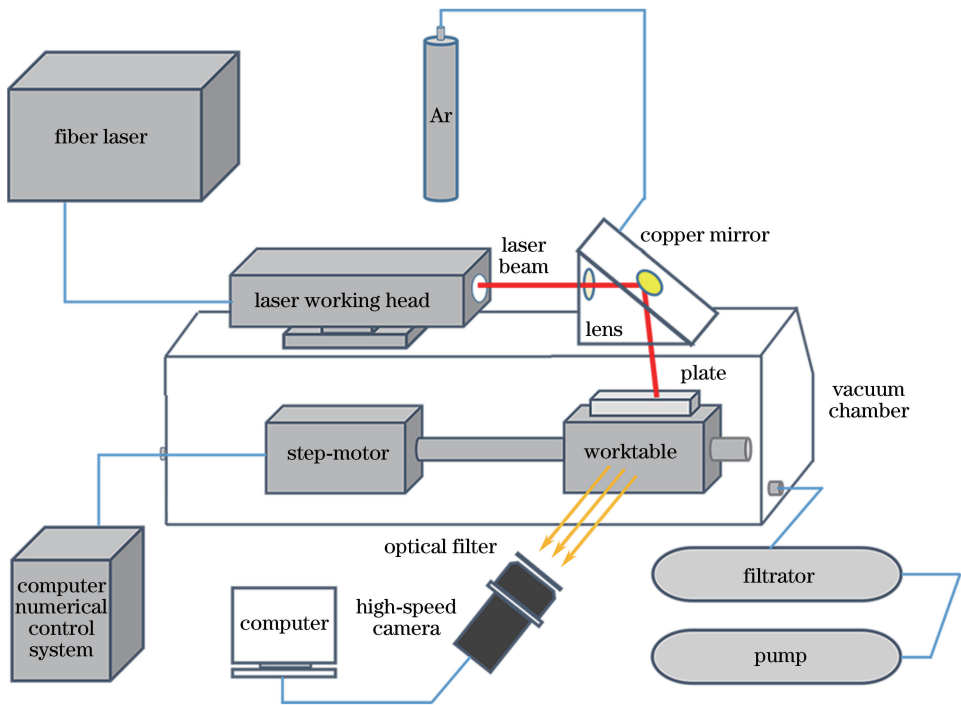


图1 真空激光焊接试验平台的示意图

Fig. 1 Schematic of experimental platform for laser welding in vacuum

2.2 试验与表征方法

为探究不同因素对焊缝成形及气孔的影响程

度,设计三因素四水平正交试验表,如表1所示,三个关键因素分别为激光功率(6.0~7.5 kW)、焊接速

度(1.0~1.6 m/min)、环境压力(5~101 kPa),其他试验参数均保持不变。

表1 正交试验表
Table 1 Orthogonal tests

No.	Laser power /kW	Welding speed / (m · min ⁻¹)	Ambient pressure /kPa
1	6.0	1.0	5
2	6.0	1.2	20
3	6.0	1.4	50
4	6.0	1.6	101
5	6.5	1.0	20
6	6.5	1.2	5
7	6.5	1.4	101
8	6.5	1.6	50
9	7.0	1.0	50
10	7.0	1.2	101
11	7.0	1.4	5
12	7.0	1.6	20
13	7.5	1.0	101
14	7.5	1.2	50
15	7.5	1.4	20
16	7.5	1.6	5

采用如下参数对正交试验结果进行评估:

1) 某因素下某水平的指标均值 K_i , 代表了该因素各水平对指标的影响状况;

2) 极差 R 是 K_i 的极值之差, R 值越大, 表示该因素对指标的影响越大;

3) 各因素 F 值, 是对各因素误差检验时的判断依据, 试验选取 $F_{0.1}(6, 3)$ (F 分布临界值) 进行检验。

正交试验结果评价指标包括气孔率、熔深、深宽比。气孔率 μ 通常用焊缝纵截面中气孔所占的面积百分比来表示, 其具体计算公式为

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n A_j}{A} \times 100\%, \quad (1)$$

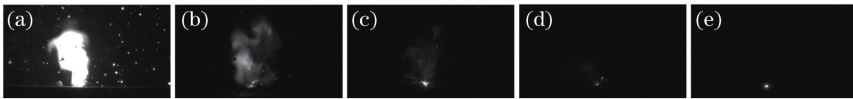


图2 不同压强下金属蒸气羽烟的高速摄影图像。(a) 101 kPa; (b) 80 kPa; (c) 50 kPa; (d) 20 kPa; (e) 5 kPa

Fig. 2 Images of plasma plume captured by high speed camera under different pressures.

(a) 101 kPa; (b) 80 kPa; (c) 50 kPa; (d) 20 kPa; (e) 5 kPa

对图像进一步处理并计算平均灰度和面积像素比, 结果如图3所示。当环境压力由常压降至80 kPa时, 平均灰度由243.51减至65.28, 减小了近73%。当压强降至20 kPa时, 平均灰度仅为常

式中 A_j 为统计区域内第 j 个气孔的面积; n 为气孔个数; A 为焊缝截面的面积。

为了进一步探究环境压力对激光焊接的影响, 通过高速摄影采集焊接过程中的金属蒸气羽烟图像并对其进行图像处理, 引入平均灰度 G 和面积像素比 S 来表征金属蒸气羽烟的平均辐射光强和二维尺度的变化。平均灰度的计算公式为

$$G = \frac{\sum g_k}{N_p}, \quad (2)$$

式中 g_k 为超过阈值的第 k 个像素点的灰度; N_p 为羽烟区域内的像素点个数。

面积像素比的计算公式为

$$S = \frac{N_p}{n'}, \quad (3)$$

式中 n' 为整个图像中的像素点数。

3 试验结果与分析

3.1 不同环境压力下的金属蒸气羽烟特征

在不同条件下进行焊接, 采集焊接过程中的金属蒸气羽烟图像, 其中环境压力对焊接过程的影响最为明显, 不同环境压力下金属蒸气羽烟的高速摄影典型结果如图2所示。可以看出, 常压下飞溅明显, 金属蒸气羽烟的亮度大; 当压强减小为80 kPa时, 飞溅明显减少, 羽烟亮度明显减小。金属蒸气羽烟的光强随着环境压力的减小而减小, 且羽烟呈现出更加稀薄的形态, 羽烟图像面积逐步减小。

激光的折射、散射和吸收与金属蒸气羽烟的高度、密度、温度及吸收系数等有关。图像的亮度可以在一定程度上体现金属蒸气羽烟的密度; 图像面积的大小反映出高温区的大小, 在一定程度上反映了吸收激光能量的多少。对采集到的金属蒸气羽烟图像进行处理, 用平均灰度来表征其平均辐射光强, 用图像面积来表征其二维尺度。

压下的10%, 即金属蒸气羽烟的光强减小了90%, 这在一定程度上反映出其对激光能量吸收的减弱。按照一定阈值对金属蒸气羽烟的图像面积进行统计, 通过对其面积变化的分析可知, 随着

环境压力的减小,金属蒸气羽烟的图像面积呈现明显的减小趋势,但在亮度变化最为急剧的 101~80 kPa 区间,蒸气羽烟图像面积的变化相对较小,而在 80~50 kPa 区间图像面积明显减少。可以认

为,在压强降低的初始阶段,金属蒸气羽烟在小孔外部的喷射高度变化不大,而亮度有一定程度的减小;随着压力进一步降低,亮度和尺寸均有一定程度的减小。

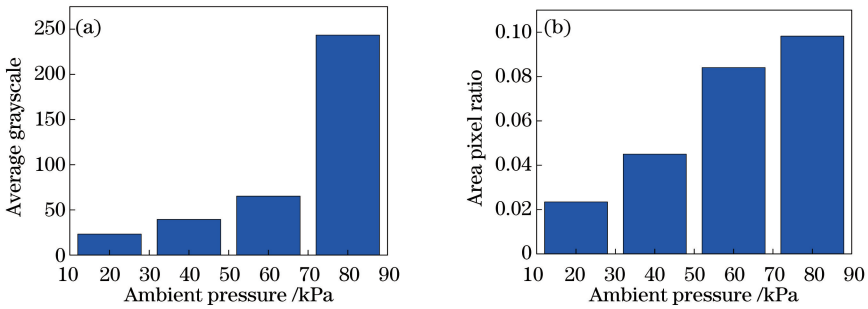


图 3 不同压强下的羽烟平均灰度及羽烟面积像素比。(a)平均灰度;(b)面积像素比

Fig. 3 Average grayscales and area pixel ratios of plasma plume under different pressures.

(a) Average grayscale; (b) area pixel ratio

3.2 正交试验结果

针对正交试验所得的焊缝,利用表征方法对气孔率、熔深、熔宽、深宽比等进行统计,结果如表 2 所示。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal tests

No.	Porosity /%	Penetration depth /mm	Weld bead width /mm	Depth-width ratio
1	0.08	6.99	2.94	2.38
2	0.22	3.28	7.44	0.94
3	0.25	3.33	6.30	1.11
4	1.21	2.73	8.63	0.81
5	0.45	4.69	5.87	1.19
6	0.32	5.25	4.02	1.74
7	0.85	3.59	7.13	0.98
8	1.21	3.51	6.19	1.13
9	0.08	4.53	6.19	1.13
10	2.21	4.32	6.85	1.02
11	0.59	5.34	3.76	1.86
12	1.33	4.49	5.22	1.34
13	2.40	5.16	7.06	0.99
14	0.44	5.12	6.19	1.13
15	1.02	5.39	4.60	1.52
16	0.45	5.77	2.99	2.34

对表 2 中的试验数据进行处理,计算不同焊接条件下的气孔率均值 $K_1 \sim K_4$,结果如图 4 所示。当激光功率从 6.0 kW 增大至 7.5 kW 时,气孔率明显增大;当焊接速度由 1.0 m/min 增大至 1.6 m/min 时,气孔率变化不明显,且在试验范围内有一定波动;当环境压力从 101 kPa 降低至 5 kPa 时,气孔率由 1.67% 减至 0.36%,说明环境压力的降

低对气孔率的抑制效果显著。

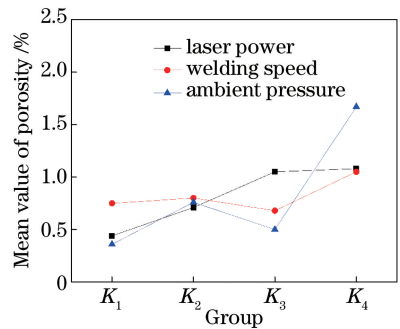


图 4 各因素与气孔率的关系

Fig. 4 Relationship between each factor and porosity

对气孔率而言,均值越小越好。计算结果表明,三个因素中环境压力的 R 值最大。通过查 F 值检验表可知,环境压力因素的 F 值为 4.26,大于 $F_{0.1}(6,3)$ 的值(3.29),说明三个因素中环境压力对气孔率的影响较大。

对表 2 所示的试验数据进行处理,计算不同条件下的熔深、深宽比均值 $K_1 \sim K_4$ 。图 5(a)所示为焊接熔深随各因素的变化趋势。可以看出,当激光功率从 6.0 kW 增大至 7.5 kW 时,熔深明显增大。当焊接速度从 1.0 m/min 增大至 1.6 m/min 时,熔深有一定的减小。当环境压力从 101 kPa 降至 5 kPa 时,焊缝熔深从 3.95 mm 增大至 5.84 mm。熔深随环境压力减小而增大的趋势较为明显。计算各均值的极差 R 可知,环境压力因素的 R 值最大,且 F 值大于 3.29,说明三个因素中环境压力对焊缝熔深的影响最大,为主要影响因素。

图 5(b)所示为焊缝深宽比随各因素的变化趋

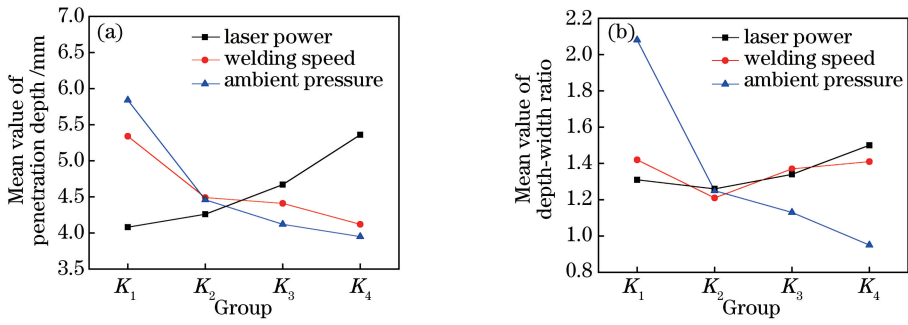


图 5 各因素对熔深与深宽比的影响。(a)熔深;(b)深宽比

Fig. 5 Effects of each factor on penetration depth and depth-width ratio. (a) Penetration depth; (b) depth-width ratio

势。当激光功率从 6.0 kW 增大至 7.5 kW 时,深宽比先略微减小后增大;当焊接速度从 1.0 m/min 增大至 1.6 m/min 时,深宽比的变化曲线与功率改变时的相似,先减小后增大,总体变化趋势不明显,而环境压力对焊缝深宽比有显著影响。计算结果表明,三个因素中环境压力因素的 R 值最大,且环境压力因素的 F 值远大于 3.29,说明环境压力对深宽比的影响很大。即随着环境压力的减小,焊缝横截面的形状更为细长。

3.3 焊缝成形特点及其影响因素分析

3.3.1 环境压力对焊缝成形的影响

正交试验结果表明,环境压力对焊缝熔深、气孔等均有较大影响。保持焊接功率为 7.5 kW、焊接速度为 1.0 m/min 不变,设定环境压力分别为 101, 15, 10, 5 kPa, 进行激光焊接试验。焊后观察焊缝表面成形及横截面形貌,结果如表 3 所示,测量其熔深和熔宽,计算焊缝深宽比。

表 3 不同压强下的焊缝表面成形及横截面形貌

Table 3 Weld surface formations and cross-sectional morphologies under different pressures

Ambient pressure / kPa	Weld bead appearance	Cross section	Penetration depth /mm
101			4.05
15			5.58
10			6.84
5			8.87

从焊缝表面可以看出,随着压强的降低,焊缝表面的飞溅逐渐减少,最后基本消失,焊缝表面更为均匀;焊缝横截面的形貌由大气环境下的倒三角形变为针形,并且这一变化发生于 15 kPa 以下的压强条件;当压强降至 5 kPa 时,熔深约为常压下的 2 倍。

压强降低使熔深增大的原因主要有以下几方面。1) 随着环境压力的降低,金属的熔沸点降低,相同激光能量下小孔内部的金属更容易气化,能量利用率提高,熔深增大^[19]。2) 由图 2 和图 3 中不同环境压力下的金属蒸气羽烟可知,随着压强的降低,熔池匙孔上方金属蒸气羽烟对激光的折射散射作用减弱,激光偏折角减小,激光更易到达小孔深处,且在内壁上的能量分布更为均匀,小孔更为稳定细长。3) 焊接过程中对激光能量的吸收主要有两种形式^[20]。一种是逆韧致辐射吸收,即小孔上方及小孔内部驻留的金属蒸气羽烟通过吸收激光能量加热小孔内壁及熔池上部,这种作用有利于熔池上部熔宽的增大,但对熔深的增大帮助不大。另一种方式为菲涅耳吸收,主要发生于小孔内部,通过小孔内壁多次反射、吸收来提高激光能量的利用率,同时使激光能量向小孔底部传递,这是实现深熔焊的主要能量吸收机制。随着环境压力的降低,小孔上方的金属蒸气羽烟减少,逆韧致辐射吸收作用减弱,更多的能量进入小孔内部,通过菲涅耳吸收进入小孔深处,故小孔更为细长;逆韧致辐射吸收作用的减弱使熔池上部宽度减小,故焊缝深宽比大幅增大。

3.3.2 激光功率对焊缝成形的影响

图 6 所示为相同的焊速和环境压强时两种不同的激光功率下焊缝横截面的形貌,可以看出,激光功率对铝合金的焊缝熔深也有一定的影响。在一定范围内,激光功率增大意味着激光的能量密度增大,激光穿透力增强,熔深增大。但相比于环境压力引起的熔深变化,功率增大引起的熔深变化相对平缓。

这是因为在一定的环境压力下,激光功率增大时,聚集在焊缝熔池表面的能量增大,熔池表面气化产生的金属蒸气羽烟及等离子体增多,对激光产生更强的吸收、折射和散射作用,减缓了熔深的增大。另一方面,随着激光功率的增大,聚集的熔池上方的金属蒸气和等离子体吸收的激光能量增大,对熔池表面的加热作用增强,焊缝表面熔宽增大,故焊缝深宽比的增大趋缓甚至基本不变,焊缝横截面的整体形状变化不大。

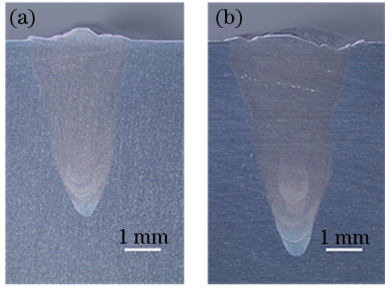


图 6 不同激光功率下的焊缝横截面。(a) 6 kW;(b) 8 kW
Fig. 6 Cross-sections of welds under different laser powers.
(a) 6 kW; (b) 8 kW

3.3.3 焊接速度对焊缝成形的影响

图 7 所示为两种不同焊接速度下的焊缝截面。可以看出,焊接速度对焊缝熔深的影响与激光功率的影响相似,实际上都是通过焊接热输入的变化来改变焊缝熔深。试验结果表明,焊接速度增大时,焊缝熔深减小,但焊缝深宽比总体保持不变。这是因为当焊接速度增大时焊接热输入减小,单位焊缝长度上吸收激光能量而熔化和气化的金属量减少,焊缝表面的熔宽也有所减小;另一方面,焊接热输入减小时激光穿透能力减弱,熔深也有所减小。故焊接速度增大时,焊缝的熔深和熔宽都有一定程度的减小,而焊缝深宽比基本不变。

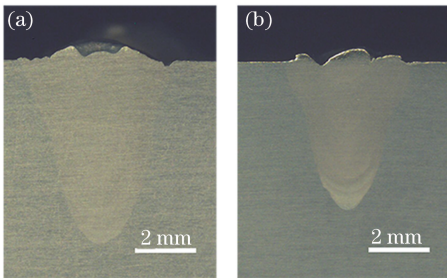


图 7 不同焊速下的焊缝横截面。(a) $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
(b) $1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Fig. 7 Cross-sections of welds under different welding speeds. (a) $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (b) $1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

3.4 气孔形成特点及其影响因素分析

3.4.1 环境压力对气孔形成的影响

在铝合金的激光焊接中常常会出现气孔,这类焊接缺陷会减小焊接接头的有效载荷横截面面积,也会造成应力集中,降低焊接接头的力学性能。在保持其他焊接工艺参数不变的条件下,观察不同环境压力下激光焊接试样的焊缝中心纵截面上的气孔缺陷,并通过图像处理软件对焊缝气孔分布和气孔率等进行分析,结果如图 8 所示。

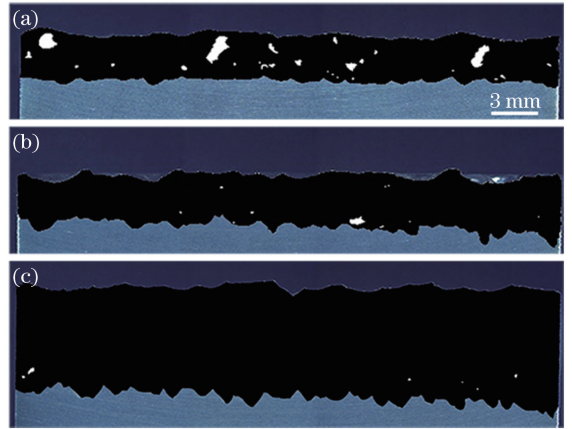


图 8 不同压强下的气孔分布。(a) 101 kPa;
(b) 15 kPa;(c) 5 kPa

Fig. 8 Pore distributions under different pressures.
(a) 101 kPa; (b) 15 kPa; (c) 5 kPa

统计焊缝中心纵截面上的气孔率可知,在 101, 15, 5 kPa 压强下的气孔率分别为 3.740%, 0.304%, 0.057%;压强为 5 kPa 时气孔几乎消失,仅在焊缝底部存有少量尺寸较小的气孔。从气孔形貌来看,气孔基本呈现不规则形状,且成一定角度,该角度与激光的入射倾斜角度近似,呈现出明显的工艺性气孔特点。从气孔的分布来看,在常压下,焊缝的上、中、下各部分均有气孔;当环境压力降至 15 kPa 时,在焊缝的中、下部分有气孔;当环境压力降至 5 kPa 时,仅在焊缝底部有少量气孔。即随着环境压力的降低,焊缝近表面的气孔先消失,而后中、下部的的气孔减少。

选取焊缝中、下部较小的气孔,通过扫描电子显微镜(SEM)观察其形貌,结果如图 9 所示。可以看出,气孔形状并不十分规则,气孔壁呈起伏不定的波纹状,这是焊接过程中小孔波动及坍塌时封闭于气泡内的金属蒸气向四周冲出造成的,为典型的工艺性气孔。进一步放大发现,气孔内壁有一些沉积物,对该物质进行能谱分析(EDS)可知,其主要成分为 Al、Mg、O,质量分数分别为 91.75%, 5.90%,

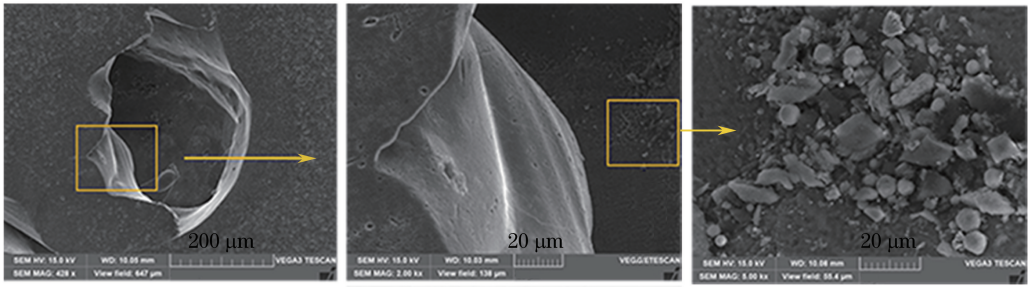


图 9 中、下部气孔的微观特征。(a)气孔形貌;(b)气孔壁褶皱;(c)气孔内堆积物

Fig. 9 Microscopic features of pores in middle-bottom parts.

(a) Pore morphology; (b) fold of pore wall; (c) deposits in pore

2.35%。推测主要物质为 Al 和 Mg 及其氧化物,是小孔塌陷时来不及溢出的金属蒸气被封闭于气泡中沉积所致^[21]。

焊缝中气孔的形成主要取决于焊接过程中气泡的产生和溢出两个阶段。在铝合金深熔焊接过程中,除了材料本身因素造成的冶金型气孔(试验在 Ar 环境下进行,可忽略),还存在小孔坍塌形成的工艺性气孔。常压下,由于金属蒸气羽烟的影响,激光能量难以均匀作用于整个小孔,小孔上部产生能量聚集,大量液态金属聚集于熔池上部,对小孔的稳定性极为不利,同时激光与金属蒸气羽烟的相互作用会使小孔中激光能量的传递产生周期性的波动^[22],造成熔池及小孔的剧烈波动,导致小孔塌陷形成气泡。当环境压力降低时,小孔上方的金属蒸气羽烟受到抑制,小孔中激光能量密度较高且更加均匀,焊接熔池变窄,小孔更细长并趋于稳定,小孔不易发生坍塌,气泡数量和尺寸大大减小。

随着环境压力的降低,熔池中金属的流动方式发生改变^[20],气泡的溢出方式亦发生变化,如图 10 所示。常压下,一部分激光能量被小孔上部吸收后通过热传导传递到熔池后方,熔池后方区域较大,因小孔坍塌而形成的气泡在熔池流体的作用下沿熔池底部向后流动,再向上溢出,气泡流经路径较长,一般难以到达熔池表面,气泡被熔池后方结晶生长前沿捕获,滞留在焊缝中形成气孔;当环境压力降低时,尽管熔深增大,但小孔后方熔池减小,金属液的流动方向接近竖直向上,气泡不再需要流向熔池后方再上浮,减小了被滞留于熔池内部的风险;与此同时,小孔底部较高的激光能量使小孔尽量保持张开,金属蒸气排出顺畅,减小了其坍塌的可能性,仅有少量小孔底部的气泡滞留于焊缝中。因此,随着压强的降低,焊缝中的气孔由上而下逐渐消失。

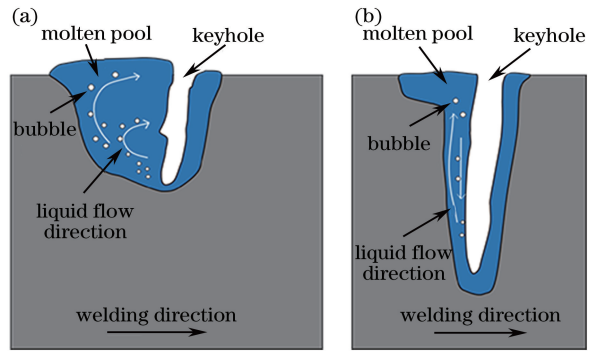


图 10 熔池流动示意图。(a)常压;(b)真空

Fig. 10 Schematic of pool flow patterns. (a) Normal pressure; (b) vacuum

3.4.2 激光功率对气孔形成的影响

图 11 所示为不同激光功率下的焊缝气孔分布情况。可以看出,在相同的环境压力下,随着激光功率的增大,气孔增多。这是因为随着激光功率的增大,熔池表面及小孔中产生的金属蒸气及等离子体增多,对激光的吸收、折射和散射作用增强,到达小孔底部的激光能量减小,故小孔中产生的金属蒸气减少,小孔深度减小,此时激光能量的吸收减少,小孔底部的激光能量又有所增大,如此周而复始,故小孔中产生的金属蒸气和进入小孔中的激光能量都产生周期性的波动。激光功率越大,周期性的波动越大,如焊缝纵截面上焊缝底部的锯齿形轮廓所示。



图 11 不同激光功率下的气孔分布。(a) 6 kW;(b) 8 kW

Fig. 11 Pore distributions under different laser powers.

(a) 6 kW; (b) 8 kW

金属蒸气和激光能量的周期性波动导致小孔的稳定性变差,小孔产生坍塌的几率增大,因此,激光功率越大,产生气孔的可能性越大。另一方面,激光功率的增大使得熔深增大,残留在焊缝中、下部的气泡溢出更困难。因此,随着激光功率的增大,气孔率有了一定程度的增大。

3.4.3 焊接速度对气孔形成的影响

图 12 所示为不同焊接速度下的焊缝气孔分布情况。可以看出,铝合金激光焊接过程中工艺性气孔与焊接速度有一定的关系,但在一定范围内这种关系并不明显。其主要原因在于焊接速度过快或过慢都可能造成小孔的不稳定。当焊接速度过慢时,一方面,焊接热输入大,小孔穿透能力强,但熔池在高温的停留时间也较长,小孔发生失稳的可能性较高,小孔坍塌导致气孔的概率也增大;另一方面,熔池停留时间长有利于气泡的逸出,气孔的增减取决于哪个因素占上风。当焊接速度过快时,小孔向前移动的速度较快,此时其稳定性也较差;一旦小孔坍塌形成气泡,由于熔池的冷却速度也较快,气泡来不及逸出而形成气孔的可能性也较大。只有当焊接速度比较合适时,小孔比较稳定,产生气孔的概率相对较低。故焊接速度的变化并未使熔池行为发生实质性改变,焊缝中的气孔率变化不大。

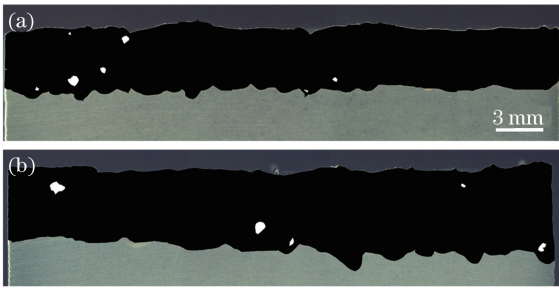


图 12 不同焊速下的气孔分布。(a) $1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
(b) $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 12 Pore distributions under different welding speeds.

(a) $1.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (b) $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

4 结 论

激光功率、焊接速度、环境压力是影响铝合金激光深熔焊接的焊缝质量的重要因素,通过正交试验研究了一定参数范围内三个因素对焊缝熔深、深宽比、气孔率的影响程度与机制,得到如下结论。

1) 激光功率、焊接速度、环境压力均对焊缝成形具有一定影响,正交试验极差 R 的计算及 F 值检验结果表明,环境压力对焊缝成形和气孔的影响最

为显著。

2) 金属蒸气羽烟的光强和图像灰度值在一定程度上表征了其激光的吸收能力,随着环境压力的降低,羽烟的光强、图像面积及灰度均减小,表明羽烟强度减小。当环境压力由常压降至 20 kPa 时,平均灰度仅为常压下的 10%,面积像素比减小至 1/4。

3) 环境压力对焊缝成形有较大影响,随着压强的降低,飞溅消失,焊缝表面更为均匀,焊缝熔深明显增大,焊缝的横截面形貌由常压下的倒三角形变为针形。当压强降至 5 kPa 时,熔深达到常压下的 2 倍。激光功率、焊接速度对焊缝熔深也有一定影响,但对焊缝深宽比及横截面形状的影响较小。

4) 环境压力对焊缝气孔有较大影响,随着压强的减小,焊缝近表面的气孔先消失,而后中、下部气孔减少。当环境压强降至 5 kPa 时,焊缝中的气孔几乎消失。激光功率、焊接速度对气孔也有一定的影响,但影响效果不如环境压力的明显。

参 考 文 献

- [1] Wu Q, Gong J K, Chen G N, *et al.* Research on laser welding of vehicle body [J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(2): 420-426.
- [2] Xu L H, Tian Z L, Peng Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 456-461.
许良红, 田志凌, 彭云, 等. 高强铝合金的激光焊接头组织及力学性能 [J]. 中国激光, 2008, 35(3): 456-461.
- [3] Iqbal S, Gualini M M S, Rehman A U. Dual beam method for laser welding of galvanized steel: Experimentation and prospects [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(1): 93-98.
- [4] Zhao Y Y, Zhang Y S, Hu W, *et al.* Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(9): 1267-1273.
- [5] Mei L F, Chen G Y, Jin X Z, *et al.* Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2091-2097.
梅丽芳, 陈根余, 金湘中, 等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.
- [6] Wang S L, Fang F Z. High power laser and its development [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090005.
王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展 [J]. 激光

- 与光电子学进展, 2017, 54(9): 090005.
- [7] Gapontsev V P, Fomin V, Ount A, *et al.* 100-kW ytterbium fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3613: 49-54.
- [8] Cui L, Zhang Y C, He D Y, *et al.* Research progress of high power fiber laser welding[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 154-159.
崔丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154-159.
- [9] Huang J, Li Z G, Tang X H. High-power laser welding of plate [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(2): 26-29.
黄坚, 李铸国, 唐新华. 中厚板的高功率激光焊接[J]. 航空制造技术, 2010(2): 26-29.
- [10] Wu S K, Xiao R S, Chen K. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
吴世凯, 肖荣诗, 陈铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- [11] Li X T, Zhu B H. Laser welding of aluminum alloy [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(2): 122-126.
李小婷, 朱宝华. 铝合金激光焊接[J]. 电焊机, 2015, 45(2): 122-126.
- [12] Chang B, Allen C, Blackburn J, *et al.* Thermal and fluid flow characteristics and their relationships with porosity in laser welding of AA5083 [J]. Physics Procedia, 2013, 41: 478-487.
- [13] Haboudou A, Peyre P, Vannes A B, *et al.* Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 363(1/2): 40-52.
- [14] Wang Z Y. Fundamental research on laser-MIG hybrid welding and its application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
王治宇. 激光—MIG 电弧复合焊接基础研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [15] Sánchez-Amaya J M, Delgado T, de Damborenea J J, *et al.* Laser welding of AA 5083 samples by high power diode laser [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(1): 78-86.
- [16] Katayama S, Yohei A, Mizutani M, *et al.* Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 75-80.
- [17] Cai C, Peng G C, Li L Q, *et al.* Comparative study on laser welding characteristics of aluminium alloy under atmospheric and subatmospheric pressures[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 547-553.
- [18] Luo Y, Tang X H, Lu F G, *et al.* Effects of welding parameters on bead formation of laser welding under subatmospheric pressures [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0603008.
罗燕, 唐新华, 芦凤桂, 等. 局部负压激光焊缝成形特点及其影响因素 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603008.
- [19] Fabbro R, Hirano K, Pang S Y. Analysis of the physical processes occurring during deep penetration laser welding under reduced pressure[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022427.
- [20] Luo Y. Research on plasma plume and molten pool behavior in fiber laser welding under subatmospheric pressure [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
罗燕. 负压激光焊接过程蒸气羽烟及熔池行为研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [21] Wang J. Study on the technology and plasma behaviour during the fiber laser and laser hybrid welding of aluminum alloy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
王军. 铝合金光纤激光及其复合焊接的等离子体行为与工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [22] Qiu W C, Yang L J, Liu T, *et al.* Optic-electrical signal analysis of plasma fluctuation characteristics in laser deep penetration welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402001.
邱文聪, 杨立军, 刘桐, 等. 激光深熔焊等离子体波动特征光电信号分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402001.