

5083铝合金摆动激光电弧复合焊工艺研究

祁小勇^{1,2}, 周京³, 刘硕夫^{1,2}, 叶兵^{1,2}, 王爱华^{1,2}

- (1. 激光先进制造技术湖北省重点实验室, 武汉 430223;
2. 武汉华工激光工程有限责任公司, 武汉 430223;
3. 上汽大众汽车有限公司, 上海 201800)

[摘要] 为了减少铝合金激光焊接内部气孔, 提升焊缝质量, 采用摆动的光纤激光对 6mm-5083 铝合金锁底对接接头进行摆动激光-MIG 复合焊接。研究了摆动激光束的频率、振幅对焊缝内部气孔数量和熔深的影响, 并采用正交试验研究了激光功率、焊接速度、焊接电流、摆动频率对焊缝内部质量的影响, 获取了最优参数, 进而分析了最优参数下焊缝的微观组织及力学性能。试验结果表明, 激光束摆动频率及振幅的提升均有助于消除气孔缺陷, 各因素对气孔率的影响大小依次为光束摆动频率、焊接电流、焊接速度、激光功率, 当采用功率 6400W、焊接电流 136A、焊接速度 28mm/s、摆动频率 240Hz、摆动振幅 1.5mm 的参数焊接 6mm-5083 铝合金时, 焊缝内部无明显气孔, 接头平均硬度为 70.4HV, 焊缝强度 278MPa, 达到母材 91.9%。

关键词: 激光技术; 摆动激光-MIG 复合焊; 5083 铝合金; 摆动频率; 摆动振幅; 气孔

Research on Wobbling Laser-Arc Hybrid Welding of 5083 Aluminum Alloy

QI Xiaoyong^{1,2}, ZHOU Jing³, LIU Shuofu^{1,2}, YE Bing^{1,2}, WANG Aihua^{1,2}

- (1. Hubei Key Laboratory of Laser Advanced Manufacture Technology, Wuhan 430223, China;
2. Wuhan Huagong Laser Engineering Co., Ltd., Wuhan 430223, China;
3. SAIC Volkswagen Automotive Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

[ABSTRACT] In order to reduce the internal porosity and improve the quality of aluminum alloy weld seam, the wobbling fiber laser is performed on the 8mm 5083 aluminum alloy locked bottom butt joint in laser-MIG hybrid welding. The influence of the weaving frequency and amplitude of the laser beam on the porosity and the penetration was studied. Orthogonal experiments were carried out to investigate the primary and secondary relations between the influence of laser power, welding speed, welding current and weaving frequency on the formation of weld porosity. The optimal parameters were obtained and the microstructure and mechanical properties of the weld joint under the optimal parameters were analyzed. The result shows that the laser beam swing frequency and amplitude are helpful to eliminate stomatal imperfections. The effect of the factors on the porosity is following by the laser weaving frequency, welding current, welding speed, laser power. To weld 6mm 5083 aluminum alloy by using the parameters, power 6800W, welding current 136A, welding speed 28mm/s, weaving frequency 240Hz, wobble amplitude 1.5mm, we can get joint with no obvious pores, which average hardness is 70.4HV, and the tensile strength of welded joints can reach 278MPa, reaching 91.9% of the base metal.

Keywords: Laser technology; Wobbling laser-MIG hybrid welding; 5083 aluminum alloy; Wobbling frequency; Wobbling amplitude; Porosity

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.071

激光电弧复合焊工艺是将激光与电弧焊接结合起来形成新的焊接方法^[1]。这种焊接方法吸收了激光和电弧焊接两方面的优点, 既有激光的高能量密度又存在电弧的高热输入量。此外, 通过两者的相互作用, 来改善激光能量的耦合特性和电弧的稳定性以获得一种综

合效果^[2]。激光电弧复合焊集激光与电弧的优点于一身, 具有焊速快、焊件形变小、熔深大、焊缝成分可调等优点^[3]。

激光摆动焊接是近几年激光焊接领域衍生出的一种新型焊接方法, 主要利用伺服电机控制激光焊接头镜

片做高速运动,使得激光束在原有焊接路径上呈一定图形进行摆动,通过改变摆动的频率、幅度来改善焊缝质量,可明显提升焊缝宽度,特别是搭接接头焊接时可有效提升熔合面宽度,增加焊接强度。而激光电弧复合焊接与激光摆动焊接均在铝合金焊接领域有着其独特的优势。

近年来,激光行业的国内外学者及相关从业人员对激光复合焊接及激光摆动焊接开展了大量的研究。Zhou 等^[4]开展了 5083 和 3A21 两种铝合金激光-电弧复合焊接大量的工艺试验研究,研究结果表明其能够获得良好的焊缝表面成形,但是综合力学性能还有待提高。王治宇等^[5-7]分别开展了中高强铝合金 CO₂ 激光-MIG、YAG 激光-MIG、光纤激光-MIG 复合焊接工艺试验研究及数值模拟研究,并取得了一定的研究成果。Ono 等^[8]研究了镀锌钢激光-电弧复合焊接相比于激光焊接和电弧焊接的独特优势。Campana 等^[9]研究了保护气体参数对铝合金激光-MIG 复合焊接过程的影响。Choi 等^[10-11]为了提高铝合金的激光焊接接头性能,尝试使用激光摆动焊接的方法对铝合金进行了焊接;包刚等^[12-13]针对低碳钢和超细晶粒钢的激光摆动焊接。赵琳等^[14]提出了利用激光-GMAW 电弧复合摆动焊接的方法来焊接厚板,依靠电弧摆动从而解决焊缝侧壁和层间未熔合、夹渣和气孔等缺陷。余世文等^[15]采用单激光摆动焊接工艺进行了铝合金焊接,焊后焊缝抗拉强度可达母材 88%。

目前无论是激光电弧复合焊,还是单激光摆动焊

接,在铝合金材料焊接领域均取得了一定成果,但在铝合金厚板焊接领域,采用激光电弧复合焊虽能获得良好的焊缝质量,但工艺窗口较窄,很难实现产业化应用,而采用单激光摆动焊接厚板铝合金时,焊缝成形难以有效保障,且对激光能量的损失过大。而对于采用摆动激光-电弧复合焊接方法进行铝合金焊接,相关的工艺报道较少。

针对上述问题,本文采用摆动的激光束与电弧进行复合,对 6mm-5083 铝合金进行焊接,研究了摆动激光束参数对焊缝内部气孔数量和熔深的影响,并采用正交试验进行参数优化,以综合两者优势,获取优良的铝合金焊缝。

1 试验材料、设备与方法

1.1 试验设备

试验采用多功能激光焊接平台,如图 1 所示,平台配备 10000w 阿帕奇(IPG)光纤激光器(波长 1080nm)、光纤芯径 200 μ m;焊接头为阿帕奇(IPG)D50 型焊接头,聚焦光斑 0.5mm;送丝机构采用奥地利伏能士(Fronius)推拉丝送丝机,TPS4000 焊接电源;运动机构为 KUKA 60HA 机器人。

1.2 试验材料

试验材料依据铝合金厚板焊接常见接头形式,采用 8mm-5083 铝合金加工 2mm 锁底,与 6mm-5083 铝合金组对形成锁底对接接头,如图 2 所示,焊接时采用 ER5183 铝合金焊丝,试板及焊丝成分如表 1 所示。

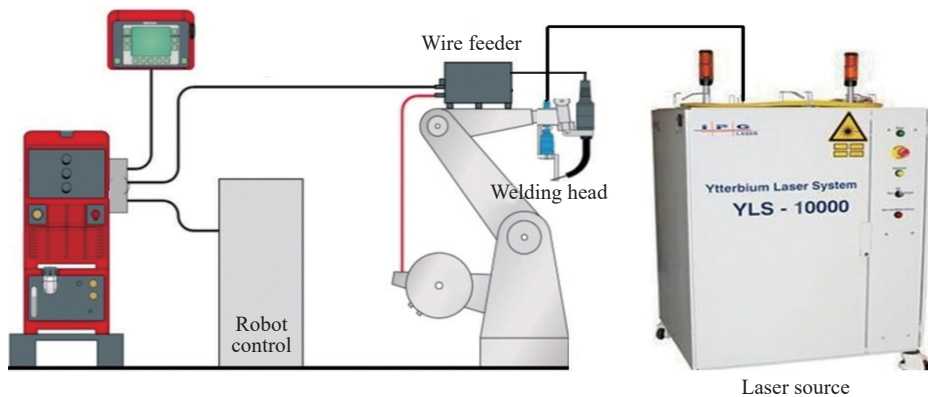


图1 试验设备

Fig.1 Experimental installation

表1 材料化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical component

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083	0.4	0.4	0.1	0.4~1.0	0.80~1.2	0.05~0.25	0.25	0.15	均衡
ER5183	0.4	0.4	0.1	0.5~1.0	4.3~5.2	0.05~0.25	0.25	0.15	均衡

1.3 研究方法

1.3.1 试验方法

(1) 单因素试验。

通过固定激光功率 P 、焊接速度 V 、焊接电流 I 等参数,摆动形式选取直线型摆动,改变摆动激光-MIG 复合焊中激光摆动频率 F 和激光摆动的振幅 A ,尝试建立起摆动频率、振幅与焊接质量的关系,得出复合焊中 F 、 A 的变化对焊缝外观、熔深和气孔率的影响规律,分析获得其合适的参数范围。表 2~3 为单因素试验参数表。

(2) 正交试验。

摆动形式选取直线型摆动,并固定摆动振幅 $A=1.5\text{mm}$,设计四因素三水平正交试验,因素水平表如表 4 所示。通过正交试验,研究激光功率 P 、焊接电流 I 、焊接速度 V 、摆动频率 F 对焊缝熔深及气孔率的影响程度,并优化出最佳参数组合。

(3) 最优参数验证试验及分析。

对正交试验分析所得的最佳参数进行验证焊接试验,焊后进行气孔、焊缝截面形貌、微观组织、显微硬度、焊缝强度的检测。

1.3.2 分析检测方法

(1) 单因素试验检测方法。

焊后采用 X 射线探伤检测焊缝内部气孔数量,在焊缝中间稳定区域取金相试样,采用 Dino-lite 电子显微镜观察焊缝截面形貌并测量焊缝熔深。

(2) 正交试验检测方法。

焊后按图 3 所示方法取样,再去除焊缝起弧端和收弧端 20mm 后两段各取 1 个金相试样,测定并取平均值记为焊缝熔深 h 。取焊缝中心 60mm 长度焊接试样沿焊缝纵向采用线切割偏向一侧切开,磨抛至焊缝截面中心,对中心截面拍照,使用 ImageJ 软件对照片进行处理并计算焊缝截面气孔率 δ ,定义气孔率 δ 为焊缝截面气

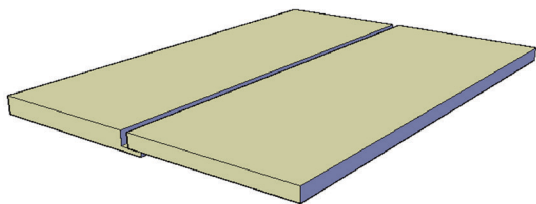


图2 锁底对接试板组对示意图

Fig.2 Locking plate butt welding schematic

孔面积与截面总面积的比值, ImageJ 软件处理效果如图 4 所示。

(3) 最优参数焊缝检测方法。

采用 Dino-lite 电子显微镜观察焊缝形貌, X 射线探伤检测焊缝内部气孔数量, XJL-03 金相显微镜观察焊缝组织, WDW-200E 微机控制电子万能试验机对其进行力学性能测试,显微硬度计进行焊缝硬度测试,拉伸试样尺寸如图 5 所示。

2 试验结果与分析

2.1 摆动频率对焊缝质量的影响

2.1.1 摆动频率对焊缝外观的影响

表 3 各参数焊缝外观成形如图 6 所示,由图可以看出,当 F 从 50 增大到 200Hz 时,表面气孔逐渐减少,焊缝表面纹路逐渐趋于均匀一致,焊缝表面成形质量逐渐改善;当 F 大于 200Hz 时,焊缝表面成形趋于稳定,不再随频率变化发生明显改变。

表3 摆动振幅单因素试验表

Table 3 Single factor experiment of A

参数	P/W	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	I/A	A/mm
值	5000	30	104	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0

表4 正交试验因素水平表

Table 4 Orthogonal factor level table

因素水平	P/W	I/A	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	F/Hz
1	6200	104	26	200
2	6400	120	28	220
3	6600	136	30	240

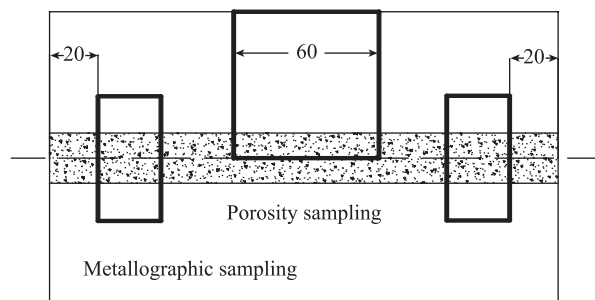


图3 焊缝取样示意图

Fig.3 Weld seam sampling method

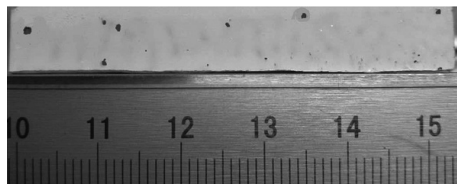
表2 摆动频率单因素试验表

Table 2 Single factor experiment of F

参数	P/W	A/mm	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	I/A	F/Hz
值	5000	1.5	30	103	50、100、150、200、250、300

2.1.2 摆动频率对焊缝内部气孔的影响

表3各参数焊缝内部的气孔状态如图7所示。可以看出,当 F 从50增大到200Hz时,焊缝中气孔尺寸与数量逐渐减小;当 F 高于200Hz时,气孔数量明显减少直至消失。这是由于激光束的摆动在焊接时对熔池有搅拌作用,随着 F 的增加,对熔池的搅拌作用越剧烈,可以打碎熔池中的气孔,使得气孔尺寸变小,并且该搅拌作用会促使气泡从熔池中溢出,使得焊缝中气孔数量逐渐减少,直至气孔基本消除。



(a) 图片处理前



(b) 图片处理后

图4 ImageJ软件处理效果对比图

Fig.4 Effect comparison of ImageJ software

少直至消失。这是由于激光束的摆动在焊接时对熔池有搅拌作用,随着 F 的增加,对熔池的搅拌作用越剧烈,可以打碎熔池中的气孔,使得气孔尺寸变小,并且该搅拌作用会促使气泡从熔池中溢出,使得焊缝中气孔数量逐渐减少,直至气孔基本消除。

2.1.3 摆动频率对焊缝熔深的影响

表3各参数焊缝熔深结果如图8所示,随着 F 的逐渐增大,焊缝熔深逐渐降低。因为激光摆动焊接时,焊接线速度为激光束摆动速度与运动机构进给速度的合

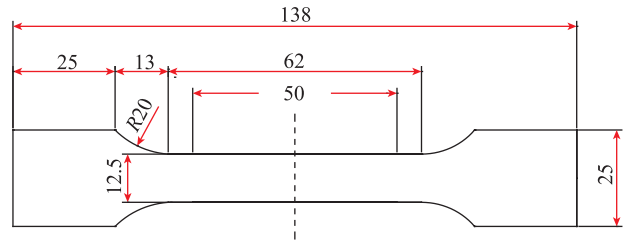
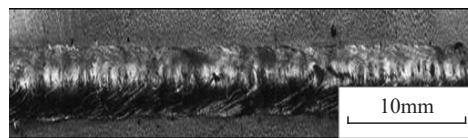


图5 拉伸试样示意图

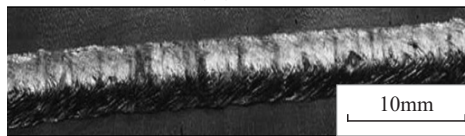
Fig.5 Tensile specimen schematic



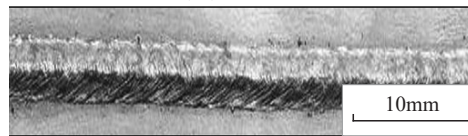
(a) 50Hz



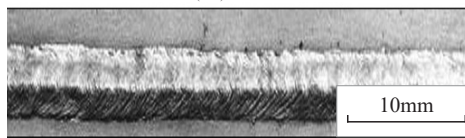
(b) 100Hz



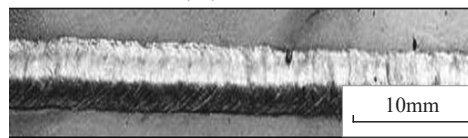
(c) 150Hz



(d) 200Hz



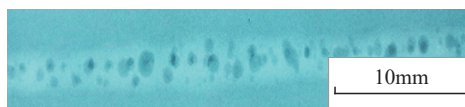
(e) 250Hz



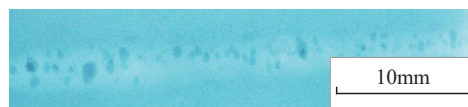
(f) 300Hz

图6 不同摆动频率下焊缝外观成形

Fig.6 Weld appearance under different vibration frequency



(a) 50Hz



(b) 100Hz



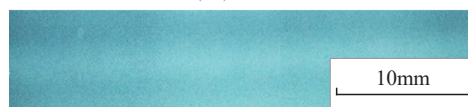
(c) 150Hz



(d) 200Hz



(e) 250Hz



(f) 300Hz

图7 不同摆动频率下焊缝气孔状态

Fig.7 Weld porosity states under different vibration frequencies

成速度,如图9所示(焊接线速度记为 V_L ,激光束摆动速度记为 V_w ,运动机构进给速度记为 V),激光束摆动频率 F 越大, V_w 越大,合成后 V_L 越大,当激光与电弧输入功率一定时,摆动激光复合焊线能量 Q/V_L 越低,从而导致熔深减小。

随着摆动频率的增大,焊缝内部气孔逐渐减少,但焊缝熔深逐渐降低,为获取良好的焊缝内部质量,激光摆动频率在200~250Hz较为适宜。

2.2 摆动振幅对焊缝质量的影响

2.2.1 摆动振幅对焊缝外观的影响

表4各参数焊缝外观成形如图10所示。可以看出,当 A 从0.5mm增大到1.5mm时,焊缝表面成形质量逐渐改善;当 $A>1.5$ mm时,焊缝表面成形趋于稳定,不再随振幅变化发生明显改变。

2.2.2 摆动振幅对焊缝内部气孔的影响

表4各参数焊缝内部气孔状态如图11所示,可以看出,当 A 从0.5mm增大到1.5mm时,焊缝中气孔尺寸与数量逐渐减小直至消失;当 A 高于1.5mm时,焊缝内部基本不再出现气孔,这是由于激光束的摆动在焊接时对熔池有搅拌作用,可以促使气孔溢出,而随着 A 的增加,激光深熔焊的通道变宽,即焊缝内部气泡溢出的通道也变宽了,更加有利于焊缝内部气泡的溢出,使得焊缝内部气孔减少直至消除。

2.2.3 摆动振幅对焊缝熔深的影响

表4各组参数下焊缝熔深如图12所示,可以看出,随着摆动振幅的增大,焊缝熔深逐渐降低。其原因与摆动频率增大时熔深减小基本一致。但由于摆动振幅

增加将导致激光对材料的作用面积增大,若将摆动的激光束拟合为一个线性光斑,则光斑面积增大,作用于材料的能量密度降低,因此摆动振幅对焊缝熔深的影响更为明显,从图12可以看出,当摆动振幅 >1 mm时,焊缝熔深突然降低很多。因此综合考虑摆动振幅对焊缝内部气孔的影响,在实际焊接时优选激光摆动振幅为1.5mm。

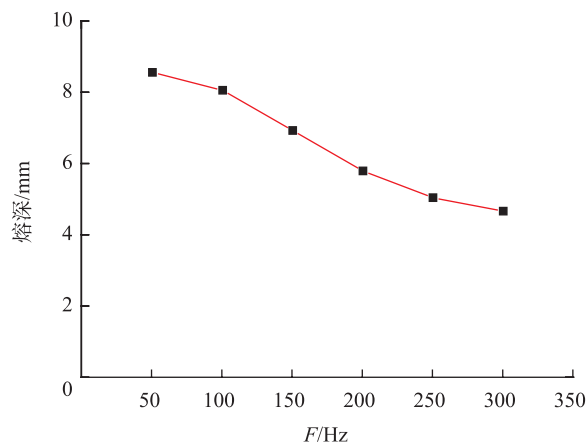


图8 激光摆动频率与熔深关系曲线

Fig.8 Curve of laser vibration frequency and weld penetration

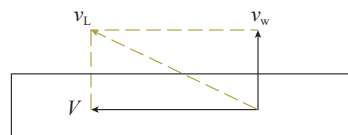


图9 焊接线速度合成示意图

Fig.9 Synthesis scheme of line speed

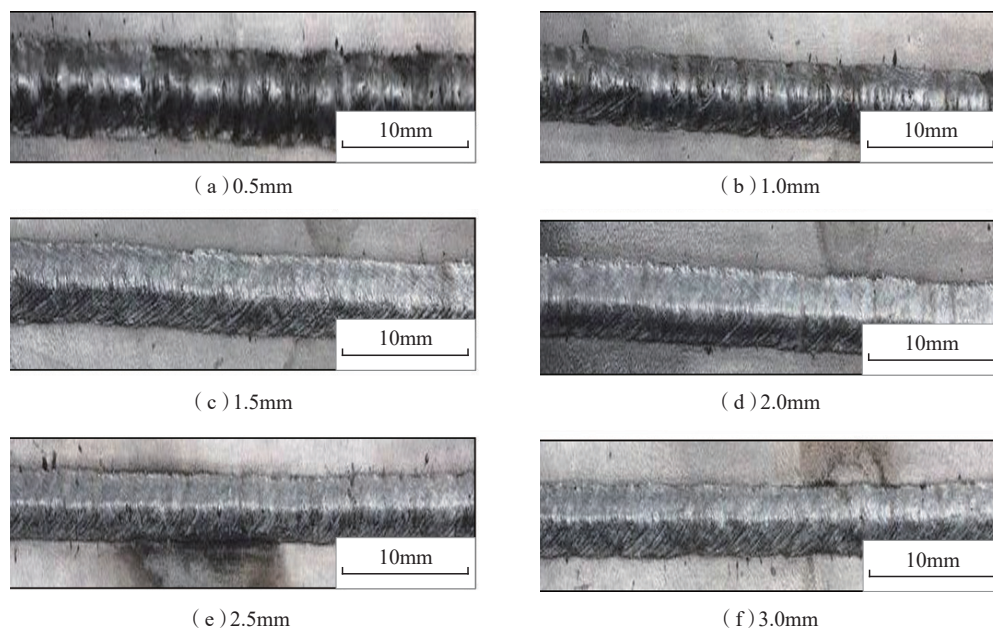


图10 不同激光光斑振幅下焊缝外观成形

Fig.10 Weld appearances under different laser spot amplitudes

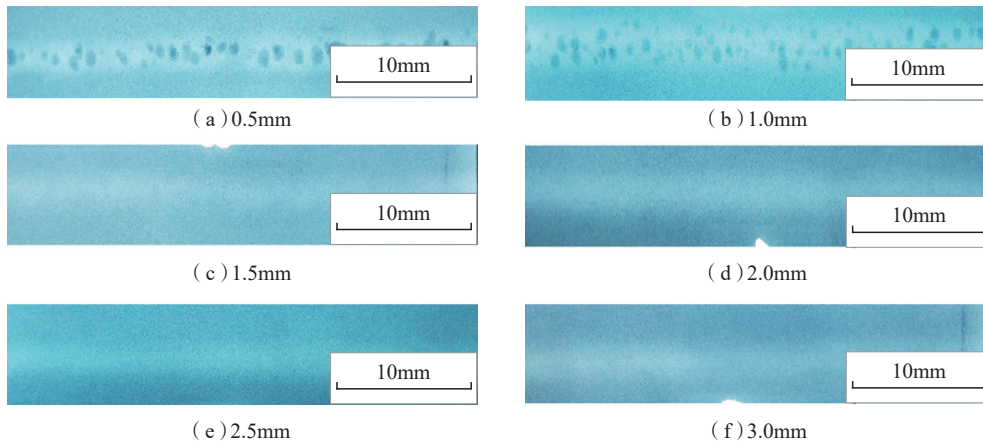


图 11 不同摆动振幅下焊缝气孔状态
Fig.11 Weld porosity states under different vibration amplitudes

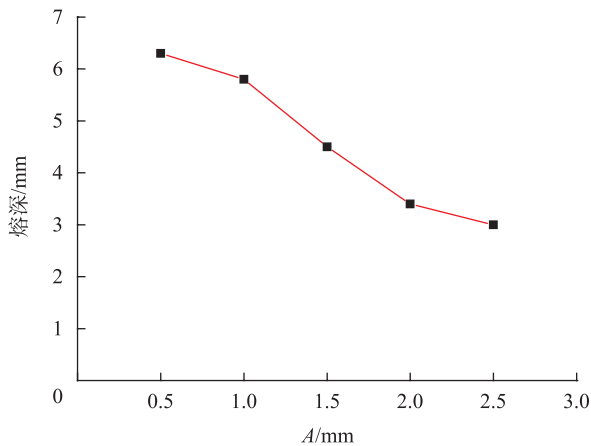


图 12 激光光斑振幅与熔深关系曲线
Fig.12 Curve of laser spot amplitude and penetration

2.3 正交试验结果及分析

根据表 5 结果,当目标函数为熔深时,因素 F 影响最大,因素 P 次之,因素 I 、 V 影响较小;当目标函数为气孔率时,因素 F 影响最大,因素 I 、 V 次之,因素 P 影响较小。此结果与单因素试验结果相结合,可以发现,在摆动激光电弧复合焊时,频率与振幅的增加能大幅减少气孔率,但其也会大幅削弱焊缝熔深。

从表 5 的熔深结果可以看出,各参数下熔深均 $>6\text{mm}$,即接头焊透,在此条件下,焊缝气孔数量决定了焊缝质量。因此按气孔率评定最优参数为: $F_3I_3V_2P_2$,即 $P=6400\text{W}$, $I=136\text{A}$, $V=28\text{mm/s}$, $F=240\text{Hz}$ 。

3 最优参数验证结果与分析

按正交试验优化的最优参数进行验证试验,焊后焊缝外观形貌如图 13 所示,可以看出焊缝表面均匀一致,成形美观。

对焊缝进行 X 射线检测,结果如图 14 所示,从底片

表 5 正交试验结果
Table 5 Orthogonal test results

编号	因素				结果	
	P/W	I/A	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$F(\text{Hz})$	h/mm	$\delta/\%$
1	1 (6200)	1(104)	1(26)	1(200)	7.95	1.10
2	1	2(120)	2(28)	2(220)	6.65	0.47
3	1	3(136)	3(30)	3(240)	6.8	0
4	2 (6400)	1	2	3	6.55	0.11
5	2	2	3	1	7.2	1.27
6	2	3	1	2	7.5	0.11
7	3 (6600)	1	3	2	7.45	1.20
8	3	2	1	3	7.25	0.63
9	3	3	2	1	8.2	0.46
h	K_1	21.4	21.95	22.7	23.35	—
	K_2	21.25	21.1	21.4	21.6	
	K_3	22.9	22.5	21.45	20.6	
	R	1.65	1.4	1.3	2.75	
δ	K_1	1.57	2.41	1.84	2.83	—
	K_2	1.49	2.37	1.04	1.78	
	K_3	2.29	0.57	2.47	0.74	
	R	0.8	1.84	1.43	2.09	



图 13 6mm厚铝合金锁底板焊缝外观
Fig.13 Weld appearance of 6mm thick aluminum alloy locked plate

可以看出,除起弧段存在两个气孔外,整条焊缝仅出现一个明显气孔,焊缝内部质量优。采用 ImageJ 软件处理,计算气孔率为 0.1%

对焊缝截面进行观察,分析各区域金相组织,如图 15 和 16 所示,焊缝区域组织整体比较均匀,在焊缝上部分布着白色雪花状的组织,焊缝中部和底部区域无明显该组织出现。该白色雪花状的组织主要是由于偏析导致无 Mg₂Si 沿晶界区域分布。对各区域进行显微硬度测试,结果如图 17 和表 6 所示,各区域硬度相当,接头无明显软化现象。

按图 5 取拉伸试样,依据 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》对试样进行拉伸试验。拉伸试样在焊缝处断裂,如图 18 所示,抗拉强度为 278.6MPa,达到母材抗拉强度 91.9%,试验力与时间曲线如图 19 所示。

4 结论

(1)采用摆动激光电弧复合焊接 5083 铝合金,激光摆动频率和振幅对焊缝气孔率和熔深影响显著。随着摆动频率与振幅的增加,气孔率降低,但焊缝熔深会减小。因此光斑摆动频率优选 200~250Hz,振幅优选 1.5mm。

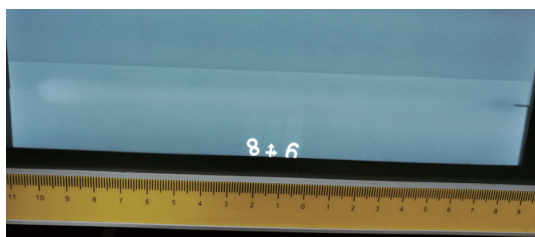


图 14 焊缝X射线检测

Fig.14 X-ray inspection of welded joint

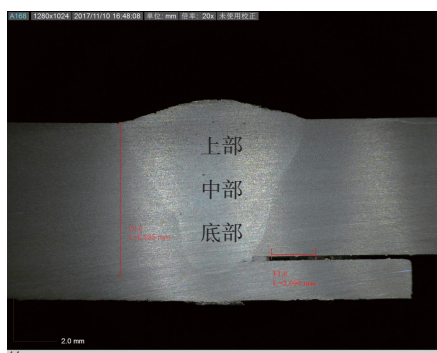
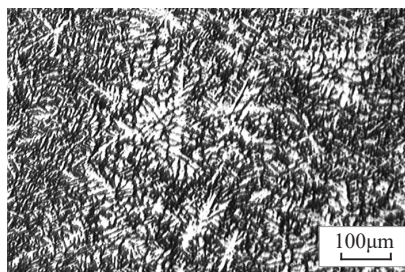
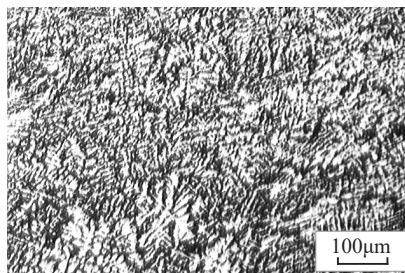


图 15 焊缝截面形貌

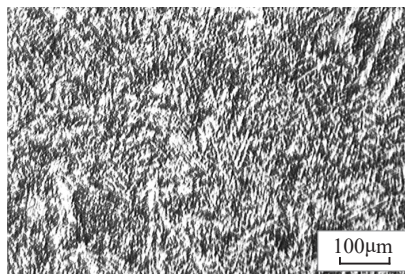
Fig.15 Weld section morphology



(a) 上部



(b) 中部



(c) 底部

图 16 各区显微组织

Fig.16 Metallographic organization

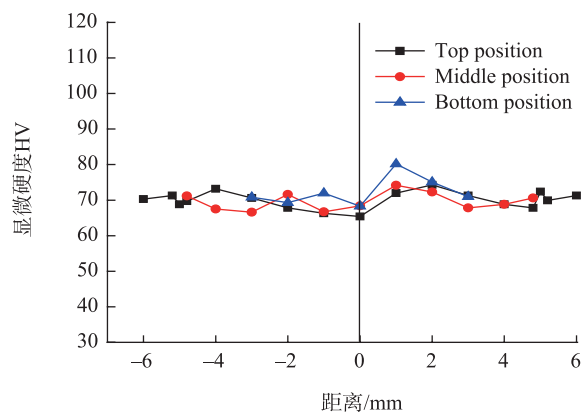


图 17 各区显微硬度曲线

Fig.17 Hardness of respective regions

表 6 各区显微硬度平均值

Table 6 Average hardness of various regions

区域	焊缝区域			HAZ			母材
	上部	中部	底部	上部	中部	底部	
硬度平均值(HV)	71.0	67.3	70.5	70.4	67.0	69.8	70.8



图18 试样拉伸断裂照片

Fig.18 Photos of sample tensile

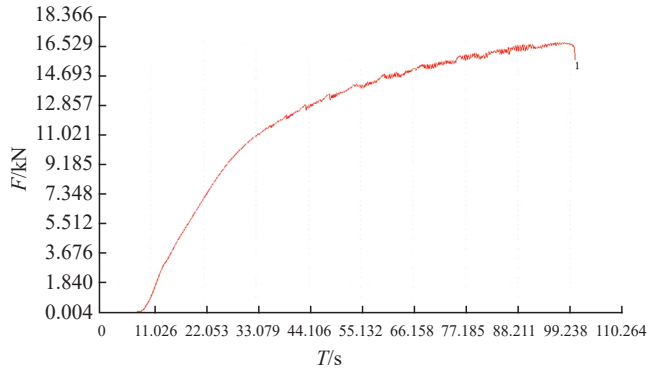


图19 拉伸试样试验力-时间曲线

Fig.19 Curve of tensile force-time

(2) 在选取摆动振幅为 1.5mm 时,对于焊缝熔深,摆动频率影响最大,激光功率次之,焊接电流与焊接速度影响较小。

(3) 在选取摆动振幅为 1.5mm 时,对于焊缝内部气孔率,摆动频率影响最大,焊接电流、焊接速度次之,功率影响不明显。

(4) 采用摆动激光电弧复合焊焊接 6mm-5083 铝合金,选取工艺参数为激光功率 6400W、焊接电流 136A、焊接速度 28mm/s、摆动频率 240Hz、摆动振幅 1.5mm 进行焊接,可获得外观良好,内部气孔率为 0.1% 的优质焊缝。焊缝金相组织均匀,显微硬度 HV70 左右,与母材相当,焊接接头的抗拉强度达 278MPa,达到母材 91.9%。

参考文献

[1] 雷振,秦国梁,林尚扬. 激光与 MIG/MAG 复合热源焊接工艺发展概况[J]. 焊接, 2005(9): 9-13.

LEI Zhen, QIN Guoliang, LIN Shangyang. Development of YAG laser-MIG/MAG arc hybrid welding technology[J]. Welding & Joining, 2005(9): 9-13.

[2] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

CHEN Yanbin. Modern laser welding technology[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[3] 李亚江, 李嘉宁. 激光焊接/切割/熔覆技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

LI Yajiang, LI Jianing. Laser welding/cutting/cladding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.

[4] ZHOU C Z, YANG X Q, LUAN G H. Effect of kissing bond on fatigue behavior of friction stir welds on Al 5083 alloy[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(10): 2771-2777.

[5] 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.

WANG Zhiyu. Fundamental research on laser-MIG hybrid welding and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

[6] 黎硕, 王军, 王春明. 铝合金激光 MIG 复合焊接气孔缺陷研究[J]. 应用激光, 2013, 33(6): 595-599.

LI Shuo, WANG Jun, WANG Chunming. Study of porosity defects of aluminum alloy in laser-MIG hybrid welding[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 595-599.

[7] 严军. 光纤激光-电弧复合焊接高强铝合金工艺-缺陷产生于质量控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

YAN Jun. Study on technology, defects and joint quality by fiber laser-arc hybrid welding high strength aluminum alloys[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[8] ONO M, SHINBO Y, YOSHITAKE A, et al. Development of laser-arc hybrid welding[J]. NKK Technical Review, 2002, 86: 8-12.

[9] CAMPANA G, ASCARI A, FORTUNATO A, et al. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: the influence of shielding gases[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5588-5590.

[10] CHOI K D, AHN Y N, KIM C. Weld strength improvement for Al alloy by using laser weaving method[J]. Journal of Laser Applications, 2010, 22(3): 116-119.

[11] KIM C, KANG M, KANG N. Solidification crack and morphology for laser weave welding of Al5J32 alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(1): 57-62.

[12] 包刚, 彭云, 陈武柱, 等. 超细晶粒钢光束摆动激光焊接的研究[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 203-207.

BAO Gang, PENG Yun, CHEN Wuzhu, et al. Study on laser welding of ultrafine grained steel with weaving beam[J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 203-207.

[13] 哈尔滨工业大学. 利用激光-GMA 电弧复合装置实现摆动焊接的方法: 200910311165.X[P]. 2010-06-02.

Harbin Institute of Technology. The method of swing welding using laser-GMA arc compound device: 200910311165.X[P]. 2010-06-02.

[14] 赵琳, 张旭东, 陈武柱, 等. 光束摆动法减小激光焊接气孔倾向[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 29-33.

ZHAO Lin, ZHANG Xudong, CHEN Wuzhu, et al. Repression of porosity with beam weaving laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 29-33.

[15] 余世文, 周昆, 叶兵, 等. 6.0mm 厚 5183 铝合金激光摆动焊接工艺研究[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 254-258.

YU Shiwen, ZHOU Kun, YE Bing, et al. Laser-weaving welding of 5183 aluminum alloy plate with 6.0mm thickness[J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 254-258.

通讯作者: 祁小勇, 工程师, 主要研究方向为激光加工工艺及其工程应用, 包括激光打孔、激光切割、激光焊接、激光增材制造等, E-mail: qxy52160@126.com.

(责编 古京)