

文章编号: 1001-3806(2012)04-0453-06

## 铝合金连续-脉冲激光焊接工艺对比实验研究

张大文 张宏\* 刘佳石 岩  
(长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 为了研究 5052 铝合金激光焊接工艺, 采用脉冲激光和连续激光分别对 1.5mm 厚的 5052 铝合金板进行了焊接, 并对工艺参量进行了优化。通过对两种不同类型激光焊接试样的焊缝形貌的对比、微观组织的分析、抗拉强度和显微硬度测试, 可知脉冲激光焊接对焊接接头气孔的控制更为理想, 使得脉冲激光焊接所获得的焊接质量更加优异, 与连续激光焊接相比, 其接头的抗拉强度增加了 10%。结果表明, 脉冲激光焊接和连续激光焊接均可以使焊接试样得到较为理想的焊缝形貌和较高的抗拉强度。

**关键词:** 激光技术; 铝合金; 激光焊接; 脉冲激光焊接; 连续激光焊接

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.006

## Experiment study of aluminum alloy continuous-pulsed laser welding process

ZHANG Da-wen, ZHANG Hong, LIU Jia, SHI Yan

(School of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to study the welding process of 5052 aluminum alloy, 5052 aluminum alloy plates in 1.5mm thick were welded with pulsed and continuous laser respectively, then the process parameters were improved. After comparing their microstructures, tensile strength and micro hardness, it can be seen that pulsed laser welding is more ideal for control the porosity of welding joint, its welding quality is more excellent, and that the tensile strength of the welding joint is increased by 10%. The results show that both pulsed laser welding and continuous laser welding can make welded samples obtain ideal welds morphology and high tensile strength.

**Key words:** laser technique; aluminum alloy; laser welding; pulsed laser welding; continuous laser welding

## 引言

铝合金具有良好的物理、化学和机械性能, 被广泛应用于航空航天、造船和汽车制造等诸多行业, 是工业生产中一种重要的轻金属材料<sup>[1-2]</sup>。

惰性气体钨极保护 (tungsten inert gas, TIG) 焊接和熔化极惰性气体保护电弧焊 (metal inert gas welding, MIG) 是铝合金的传统焊接工艺。这两种焊接工艺焊接速度慢、生产效率低, 而且焊接热输入大, 使得铝合金焊接变形和焊接接头的热影响区均较大, 导致产品质量较差。而激光作为一种高能量密度热源, 使得激光具有较快的焊接速度和较小的热输入, 进而焊接变形小, 产品质量较为优异<sup>[1-9]</sup>。

作者主要研究了铝合金的脉冲激光焊接工艺和连续激光焊接工艺, 并对两种焊接工艺所获得的微观组织和力学性能进行了对比分析。

作者简介: 张大文 (1986-), 男, 硕士研究生, 现主要从事铝合金激光焊接工艺的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: superflanker0007@163.com

收稿日期: 2011-12-02; 收到修改稿日期: 2011-12-17

## 1 实验材料、设备及方法

### 1.1 实验材料

本实验中采用的焊接材料为 5052 铝合金板, 其成分如表 1 所示。铝合金板的尺寸为 75mm × 50mm × 1.5mm 的焊接试样。焊接前使用丙酮溶液超声波清洗器 25min, 以清除试样表面的油污等杂质。

Table 1 Chemical composition of 5052 aluminum alloy (mass fraction)

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Al
≤0.0025	≤0.0010	0.022 ~ 0.028	≤0.0010	≤0.0010	0.0015 ~ 0.0035	0 ~ 0.0040	balance

### 1.2 实验设备及方法

实验中所使用的焊接设备为德国 Trumpf 公司生产的 HL4006D 型 Nd:YAG 激光器和 KUKA 公司生产的机器人系统。实验的焊接方式为拼焊, 将焊接试样的两长边拼接, 采用连续激光和脉冲激光对试样分别进行焊接, 如图 1 所示。将激光焊接后的试件沿焊接方向横向切开, 经研磨、抛光后制备成分析用试样, 腐蚀剂采用 Keller 试剂。利用 Mshot MD20 体式显微镜观测焊缝形貌。焊接接头的抗拉强度是在室温下利用

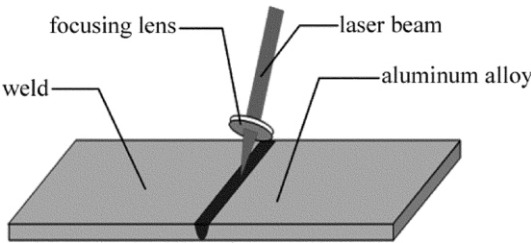


Fig. 1 Welding mode

MTS. 810.22M 电、液伺服材料测试系统以 1mm/min 的加载速率进行测试的。接头拉伸试样块从整个焊接试样块的中部进行截取,其尺寸为 100mm×20mm,如图 2 所示。采用 JEOL 公司生产的 JSM-6701F 型冷场发射扫描电子显微镜对激光焊接接头断口进行观察。采用 HMT-3 型显微硬度计对焊接接头进行显微硬度测试。

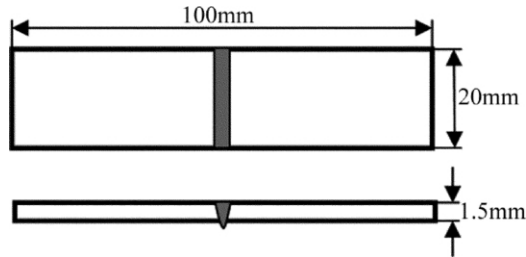


Fig. 2 Test specimens of welding joint tensile strength

1.3 实验参量

由于铝合金对激光具有高反射性,为防止激光器的透镜被反射的激光烧毁,两种焊接的焊接角度均为-5°。在连续激光进行焊接时,分别对离焦量、激光器输出功率和焊接速度 3 个工艺参量进行优化,以获得连续激光焊最佳的工艺参量;同时,在脉冲激光进行焊接时,脉冲波形为方波,对脉冲能量进行了优化,以获得脉冲激光焊最佳的工艺参量。所有工艺参量如表 2 和表 3 所示。

Table 2 Process parameters of continuous laser welding

serial number	power /kW	welding speed /( m • s <sup>-1</sup> )	defocus amount/mm	gas type	gas flow /( L • min <sup>-1</sup> )
Cf <sub>1</sub>	3	0.10	-4	Ar	30
Cf <sub>2</sub>	3	0.10	-2	Ar	30
Cf <sub>3</sub>	3	0.10	0	Ar	30
Cf <sub>4</sub>	3	0.10	2	Ar	30
Cf <sub>5</sub>	3	0.10	4	Ar	30
CP <sub>1</sub>	2.5	0.10	0	Ar	30
CP <sub>2</sub>	2.75	0.10	0	Ar	30
CP <sub>3</sub>	3	0.10	0	Ar	30
CP <sub>4</sub>	3.25	0.10	0	Ar	30
CP <sub>5</sub>	3.5	0.10	0	Ar	30
CV <sub>1</sub>	3	0.06	0	Ar	30

continue

serial number	power /kW	welding speed /( m • s <sup>-1</sup> )	defocus amount/mm	gas type	gas flow /( L • min <sup>-1</sup> )
CV <sub>2</sub>	3	0.08	0	Ar	30
CV <sub>3</sub>	3	0.10	0	Ar	30
CV <sub>4</sub>	3	0.12	0	Ar	30
CV <sub>5</sub>	3	0.14	0	Ar	30

Table 3 Process parameters of pulsed continuous laser welding

serial number	pulsed power/J	defocus amount /mm	welding amount /( m • s <sup>-1</sup> )	pulse width/ms	duty ratio	gas type	gas flow /( L • min <sup>-1</sup> )
PP <sub>1</sub>	60	0	0.03	30	50%	Ar	30
PP <sub>2</sub>	75	0	0.03	30	50%	Ar	30
PP <sub>3</sub>	90	0	0.03	30	50%	Ar	30
PP <sub>4</sub>	105	0	0.03	30	50%	Ar	30
PP <sub>5</sub>	120	0	0.03	30	50%	Ar	30

2 结果与讨论

2.1 工艺参量优化

2.1.1 连续激光焊接工艺参量优化 采用连续激光焊接,对离焦量进行调节,当离焦量由-4mm 向 4mm 变化时,焊缝宽度变化不大,试样 Cf<sub>5</sub> 未焊透,而且出现了裂纹和气孔等缺陷。试样 Cf<sub>1</sub>、Cf<sub>2</sub> 和 Cf<sub>3</sub> 也不同程度地出现了咬边和塌陷等缺陷。试样 Cf<sub>3</sub> 的焊缝质量最好,如图 3 所示。所以,选择 0mm 作为下一组实验的离焦量。

对激光器输出功率进行调节,当激光器输出功率逐渐增大时,焊缝宽度变化不大,所有试样均被焊透,但是,当激光器功率密度过大时,咬边和塌陷缺陷十分明显。试样 CP<sub>3</sub> 的焊缝质量最优,如图 4 所示。所以,选择 3kW 作为下一组实验的激光器输出功率。

对焊接速度进行调节,当焊接速率逐渐增大时,焊缝宽度逐渐变大,所有试样均被焊透,当焊接速率过小时,试样的塌陷缺陷较为明显,当焊接速度过大时,试样的咬边缺陷较为明显,试样 CV<sub>5</sub> 还出现了明显的气孔缺陷。试样 CV<sub>3</sub> 焊缝质量最优,如图 5 所示。所以,0.10m/s 是比较理想的焊接速率。

2.1.2 脉冲激光焊接工艺参量优化 采用脉冲激光焊接时,对脉冲能量进行调节,当脉冲能量逐渐增大时,焊缝宽度逐渐增大。功率密度过小时,焊缝表面成性较差,如试样 PP<sub>1</sub> 和 PP<sub>2</sub>,而且试样 PP<sub>1</sub> 未焊透且开裂,试样 PP<sub>2</sub> 虽然被焊透,但是出现了严重的裂纹和气孔缺陷,当功率密度过大时,试样的咬边和塌陷缺陷较为明显。试样 PP<sub>4</sub> 的焊缝质量最优,如图 6 所示。所以,105J 是较为理想的脉冲能量。

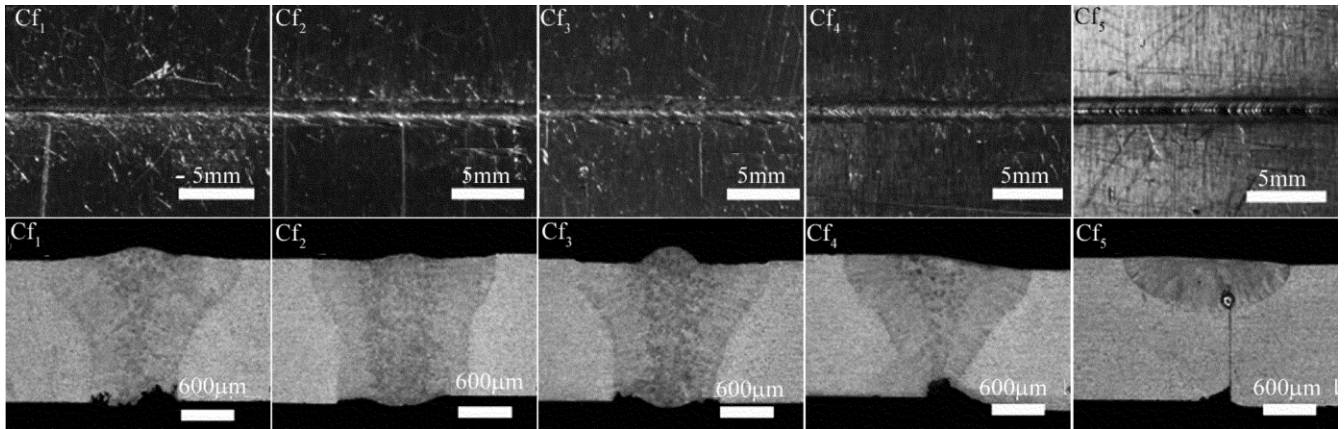


Fig. 3 Welding face &amp; cross-section with 0mm defocus amount

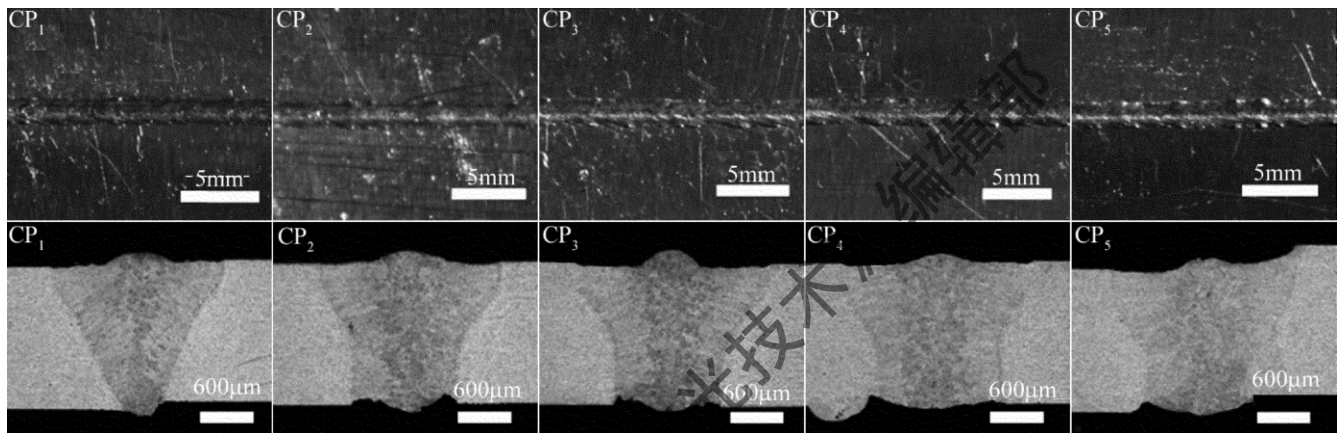


Fig. 4 Welding face &amp; cross-section with 3kW power

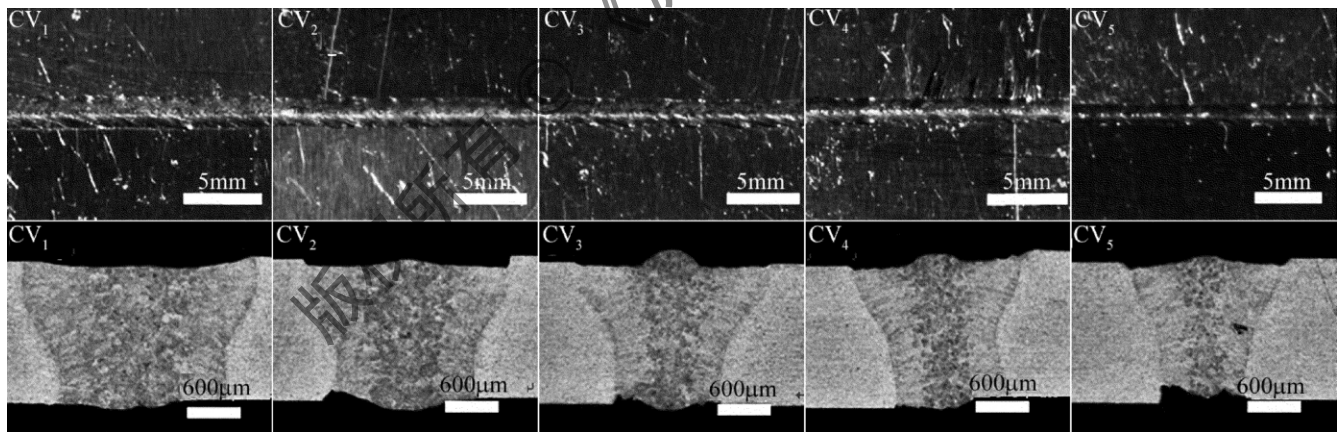


Fig. 5 Welding face &amp; cross-section with 0.10m/s speed

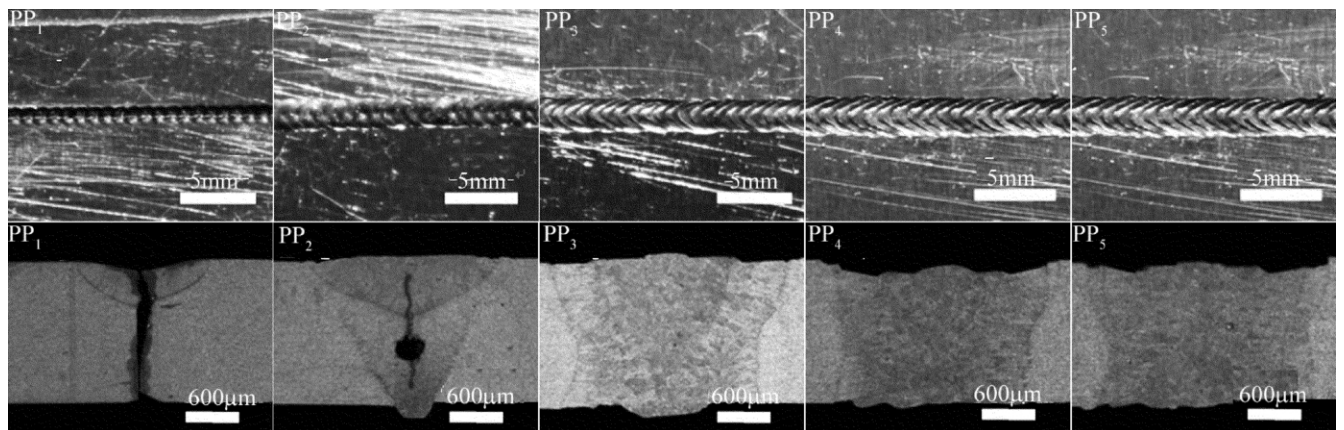


Fig. 6 Welding face &amp; cross-section with 105J pulse power

当采用连续激光焊接时,最佳的焊接工艺参量是离焦量为 0mm,激光器输出功率为 3kW,焊接速率为 0.10m/s,对应此工艺参量的试样为 CV<sub>3</sub>。当采用脉冲激光焊接时,最佳的焊接工艺参量是离焦量为 0mm,脉冲能量为 105J,焊接速率为 0.03m/s,对应此工艺参量的试样为 PP<sub>4</sub>。

## 2.2 两种焊接工艺对比

通过对焊接工艺参量的优化,两种激光焊接均获得了良好的焊缝形貌,下面选取典型试样 CV<sub>3</sub> 和 PP<sub>4</sub> 进行对比分析。

2.2.1 焊缝质量的对比 采用连续激光对铝合金进行焊接时,典型试样 CV<sub>3</sub> 的焊缝正面和背面成型均良好。但是焊缝背面某些位置有发灰发暗的现象,如图 7a 所示。这是由于采用焊缝背面自由成型工艺时,熔池与氧和氮反应生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 AlN<sup>[3]</sup>。另外,焊缝出现明显的咬边和塌陷现象,如图 5 所示。这是由于采用连续激光焊接时,激光器长时间产生激光,持续提供能量,使得热输入量过大,液态铝表面张力较小,熔化的铝过多而使液态铝向焊缝背面塌落,成形后焊缝背面突起,正面下塌,形成塌陷。同样,由于热输入量过大,液态铝表面张力较小,形成咬边。热裂纹和气孔等缺陷较少,焊接质量相对稳定。

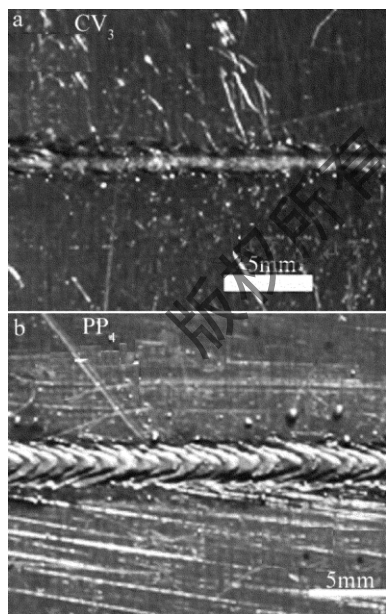


Fig. 7 a—back of sample CV<sub>3</sub> b—back of sample PP<sub>4</sub>

采用脉冲激光对铝合金进行焊接时,典型试样 PP<sub>4</sub> 的焊缝正面鱼鳞纹形貌较为突出,成形良好。焊缝背面鱼鳞纹形貌亦较为突出,几乎无 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 AlN 生成,成形良好,见图 7b。另外,焊缝的咬边、塌陷、热裂纹和气孔等缺陷较少,如图 6 所示。这是由于采用脉冲激光对铝合金进行焊接时,激光器是以脉冲的形式输出激光,能量输出有间歇性,焊接熔池的搅拌更加

剧烈,同时匹配以较优的焊接速度等工艺参量,使得焊接熔池中产生的氢气泡有足够的时间上浮,又不会增加焊接熔池的吸氢量,较好地抑制了气孔的产生。另外,焊接熔池的剧烈搅拌还使得其中各元素的分布更加均匀,较好地抑制了裂纹的产生。所以,脉冲激光焊接铝合金的焊接质量更为稳定。

由此可见,在采用最佳匹配的工艺参量进行焊接时,两种焊接方式均获得了较优的焊接质量。但是,采用脉冲激光焊接方式焊接的铝合金时,焊缝正面鱼鳞纹形貌较为突出,成形良好。焊缝背面鱼鳞纹形貌亦较为突出,焊缝的咬边、塌陷、热裂纹和气孔等缺陷较少。焊接质量稳定,优于连续激光焊接方式焊接的铝合金。

2.2.2 拉伸性能的对比 经测试,母材的抗拉强度为 243.63MPa。采用连续激光对铝合金进行焊接时,典型试样 CV<sub>3</sub> 的焊接接头抗拉强度为 203.77MPa。采用脉冲激光对铝合金进行焊接时,典型试样 PP<sub>4</sub> 的焊接接头抗拉强度为 224.32MPa。上述各抗拉强度的数值如图 8 所示。

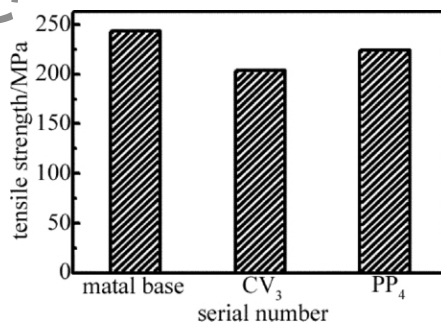


Fig. 8 Tensile strength of metal base & typical samples

所有试样经过拉伸实验之后,均在焊接热影响区发生韧性断裂,因此,焊缝位置的抗拉强度比焊接热影响区的抗拉强度要大。采用连续激光对铝合金进行焊接时,典型试样 CV<sub>3</sub> 的焊接接头抗拉强度可达到母材抗拉强度的 83.64%。采用脉冲激光对铝合金进行焊接时,典型试样 PP<sub>4</sub> 的焊接接头抗拉强度可达到母材抗拉强度的 92.07%。由此可见,在采用最佳匹配的工艺参量进行焊接时,连续激光焊接和脉冲激光焊接均使得焊接接头拥有良好的抗拉强度。但是,脉冲激光焊接得到的焊接接头抗拉强度比连续激光焊接得到的焊接接头抗拉强度略大。

通过观察试样 CV<sub>3</sub> 和 PP<sub>4</sub> 的断口形貌图可知,两典型试样的断口形貌均为韧窝状,两典型试样断口形貌如图 9a 和图 9b 所示。典型试样 CV<sub>3</sub> 断口处的韧窝比典型试样 PP<sub>4</sub> 断口处的韧窝密集,典型试样 CV<sub>3</sub> 断口处有较多的气孔和裂纹生成,如图 9c 所示。而典型试样 PP<sub>4</sub> 断口处气孔和裂纹则较少。这是由于采用脉

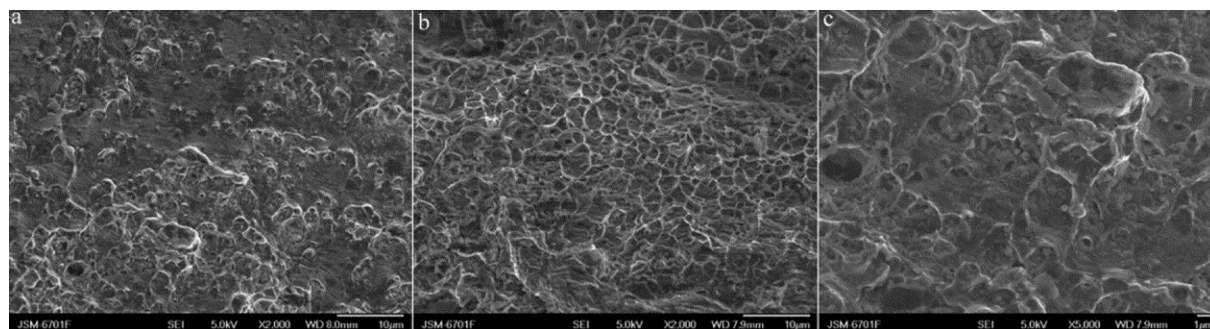


Fig. 9 a—fracture morphology of CV<sub>3</sub> (2000 $\times$ ) b—fracture morphology of PP<sub>4</sub> (2000 $\times$ ) c—fracture morphology of CV<sub>3</sub> (5000 $\times$ )

冲激光对铝合金进行焊接时,激光器是以脉冲的形式输出激光,能量输出有间歇性,焊接熔池的搅拌更加剧烈,同时匹配以较优的焊接速度等工艺参量,使得焊接熔池中产生的氢气泡有足够的时间上浮,又不会增加焊接熔池的吸氢量,较好地抑制了气孔的产生。另外,焊接熔池的剧烈搅拌还使得其中各元素的分布更加均匀,较好地抑制了裂纹的产生。气孔和裂纹的生成影响了典型试样 CV<sub>3</sub> 的抗拉强度,使得典型试样 CV<sub>3</sub> 的抗拉强度比典型试样 PP<sub>4</sub> 的抗拉强度低。

2.2.3 焊接接头显微硬度的对比 以焊缝中心为基准,向左右两侧每隔 0.1mm 取一点,测试其显微硬度,母材及两典型试样焊缝组织的显微硬度如图 10 所示。

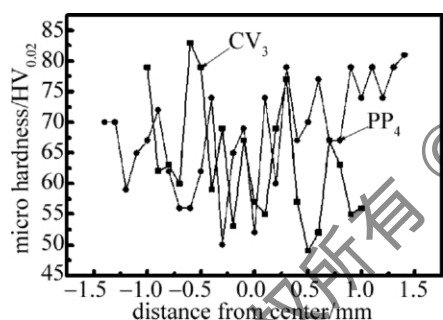


Fig. 10 Microhardness of typical samples

由焊缝中心向左右两侧延伸时,显微硬度数值呈现增大的趋势,当延伸至焊缝区与热影响区交界区域时,显微硬度数值达到最大值。而后,显微硬度数值开始下降,且下降速度非常快,在母材区域达到最小值。另外,典型试样 PP<sub>4</sub> 的显微硬度数值的最大值大于典型试样 CV<sub>3</sub> 的显微硬度数值的最大值。

母材的平均显微硬度 (HV) 为 69.30,典型试样 CV<sub>3</sub> 焊缝的平均显微硬度 (HV) 为 63.38,达到母材平均显微硬度的 91.46%。典型试样 PP<sub>4</sub> 焊缝的平均显微硬度 (HV) 为 66.21,达到母材平均显微硬度的 95.54%。上述平均显微硬度数值如图 11 所示。

由此可见,在采用最佳匹配的工艺参量进行焊接时,典型试样 PP<sub>4</sub> 的焊缝组织的平均显微硬度略高于典型试样 CV<sub>3</sub> 的焊缝组织的显微硬度。可能是由于采用脉冲激光焊接时,激光器是以脉冲的形式输出激

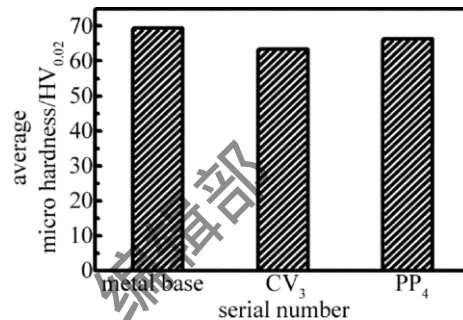


Fig. 11 Average microhardness of metal base & typical samples

光,能量输出有间断性,热输入量均匀,这样得到焊缝组织的晶粒更为细化,组织更致密,位错密度更高。

### 3 结 论

首先采用连续激光对试样进行焊接,分别对离焦量、激光器输出功率和焊接速度 3 个工艺参量进行调节。经过合理优化可知,最佳的焊接工艺参量离焦量为 0mm,激光器输出功率为 3kW,焊接速率为 0.10m/s。然后采用脉冲激光对试样进行焊接,对脉冲能量进行调节。经过合理优化可知,最佳的焊接工艺参量离焦量为 0mm,脉冲能量为 105J,焊接速率为 0.03m/s。将典型试样 CV<sub>3</sub> 和 PP<sub>4</sub> 进行对比分析,得出结论如下:

(1) 在采用最佳的焊接工艺参量进行焊接时,两种焊接均获得了较优的焊接质量。但是,采用脉冲激光焊接的铝合金时,其焊缝正面鱼鳞纹形貌较为突出,成形良好。焊缝背面鱼鳞纹形貌亦较为突出,焊缝的咬边、塌陷、热裂纹和气孔等缺陷较少。焊接质量稳定,优于连续激光焊接的铝合金。

(2) 所有试样经过拉伸实验之后,均在焊接热影响区发生脆性断裂,由此可知,焊缝位置的抗拉强度比焊接热影响区的抗拉强度要大。在采用最佳匹配的工艺参量进行焊接时,两种焊接均使得焊接接头拥有良好的抗拉强度。采用连续激光对铝合金进行焊接时,典型试样 CV<sub>3</sub> 的焊接接头抗拉强度可达到母材抗拉强度的 83.64%。采用脉冲激光对铝合金进行焊接时,典型试样 PP<sub>4</sub> 的焊接接头抗拉强度可达到母材抗拉强度的 92.07%。脉冲激光焊接得到的焊接接头抗

拉强度比连续激光焊接得到的焊接接头抗拉强度略大。

(3) 由焊缝中心向左右两侧延伸时,显微硬度数值呈现增大的趋势,当延伸至焊缝区与热影响区交界区域时,显微硬度数值达到最大值。而后,显微硬度数值开始下降,且下降速度非常快,在母材区域达到最小值。另外,脉冲激光焊接得到典型试样 PP<sub>4</sub> 的焊缝组织显微硬度数值的最大值大于连续激光焊接得到典型试样 CV<sub>3</sub> 的焊缝组织显微硬度数值的最大值。在采用最佳的焊接工艺参量进行焊接时,脉冲激光焊接得到的焊缝组织的平均显微硬度略高于连续激光焊接得到的焊缝组织的显微硬度。

#### 参考文献

- [1] XIAO R Sh, ZUO T Ch, GÜNTHER A, *et al.* Investigation on current enhanced CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum [J]. Chinese Journal of Lasers 2004, 31(3): 359-362 (in Chinese).
- [2] SONG D F, HU Sh S, MA L. Development of laser-based welding of aluminum alloy [J]. Electric Welding Machine 2004, 34(9): 1-3.
- [3] ZUO T Ch. Laser materials processing of high strength aluminum alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-2 (in Chinese).
- [4] ANCOA A, SIBILLANO T, TRICARICO L, *et al.* Comparison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164/165: 971-977.
- [5] CIACLA E, DUFFET G, ANDRZEJEWSKI H, *et al.* Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding—operating parameters and their effects [J]. Materials Science and Engineering 2005, A395(1/2): 1-9.
- [6] SANCHEZ-AMAYA J M, DELGADO T, GONZALEZ-ROVIRA L, *et al.* Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(23): 9512-9521.
- [7] 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, 2003, A363(1/2): 40-52.
- [8] LUO H, HU L J, HUANG Sh H, *et al.* Laser welding of aluminum alloys [J]. Laser Technology, 1998, 22(1): 94-97 (in Chinese).
- [9] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. Laser Technology 2001, 25(1): 48-53 (in Chinese).