

不同铝合金在激光焊接时的熔化和蒸发特性

王希靖 片山圣二 松绳朗

(兰州 甘肃工业大学) (日本大阪大学)

摘要 本文研究了铝合金 A5052 和 A5083 在不同焊接条件下的激光焊接特性，并对主要合金元素 Mg 的蒸发以及由金属蒸气引起的高温等离子体反作用力对熔深的影响进行了试验研究。试验结果表明：适当的工件表面粗糙度可提高母材对激光光束能量的吸收；适当增大保护气流量和改变激光入射角度，可有效地提高熔化效果及增大熔深。

关键词 蒸发；铝合金；激光焊；熔化性

0 序言

在铝合金的激光焊接过程中，一些低沸点合金元素如 Mg、Zn、Li 等被过量蒸发损失，导致焊接接头力学性能降低。由于铝合金中所含合金元素的不同，其蒸发损失也不同，由蒸发引起的其它一些性能也将不同。本文通过两种铝合金（A5052，A5083）在各种工艺规范参数下的激光焊接，对主要合金元素 Mg 的蒸发以及由金属蒸气引起的高温等离子体对熔池的反作用力导致的熔深进行了比较研究，以图得到每种铝合金在激光焊接时因其合金元素不同而所适应的焊接规范也不同的相互关系。

1 试验方法

1.1 试验材料

铝合金 A5052 和 A5083，其化学成分见表 1。

表 1 铝合金 A5083 和 A5052 的化学成分

Table 1 Composition of aluminum alloy A5083 and A5052 (wt%)

Element	Mn	Mg	Zn	Cu	Si
A5083	0.5	4.5	0.25	0.1	0.4
A5052	0.1	2.5	0.25	0.1	0.45

试板尺寸：100mm × 100mm × 6mm

1.2 试验设备

Nd: YAG 激光器，SL117，额定输出功率 1.6kW(连续)，最大峰值功率 3.5kW(脉冲)。

1.3 焊接方法

使用连续焊接方法,其焊接规范为:输出功率 $P_0=0.9 \sim 1.6\text{kW}$,焊接速度 $v=0.3 \sim 3.0\text{m/min}$,焦距 $f=75 \sim 100\text{mm}$,焦点位置(离焦量) $f_0=+2 \sim -2\text{mm}$,保护气使用 Ar 气,其流量 $R_g=15 \sim 50\text{ L/min}$ 。

2 试验结果及讨论

2.1 合金元素 Mg 的蒸发

2.1.1 Mg 的蒸发损失量

在铝合金的激光焊接过程中,由于 Mg 的沸点(1380K)低于 Al(2723K),且 Mg 的沸点与 Al 的熔点(933K)仅差 447K,所以在高温熔池中,Mg 将有一部分成为金属蒸气并逸出熔池,造成 Mg 在焊缝金属中的缺少。表 2、表 3 分别表示了 A5052 和 A5083 合金焊缝中和焊缝边缘母材中的 Mg 含量分布(在相同焊接规范下得到),表中数据是不同 Mg 含量所占的相应面积比(相对于整个画面)。

表 2 激光焊缝中 Mg 分布 EPMA 结果(A5052)

Table 2 EPMA result of Mg concentration and area ratio in laser weld metal (A5052)

Mass (%)	Area (%)
3.5 —	0.45
3 — 3.5	6.39
2.5 — 3	31.34
2 — 2.5	34.69
0 — 2	12.97

表 3 激光焊缝中 Mg 分布 EPMA 结果(A5083)

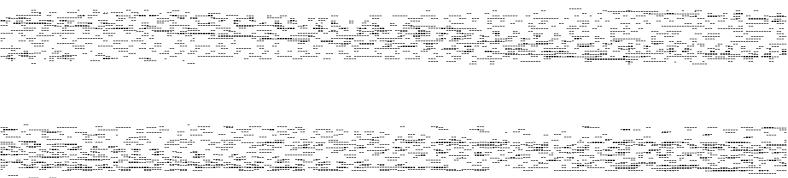
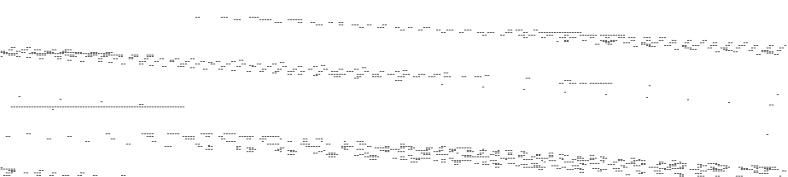
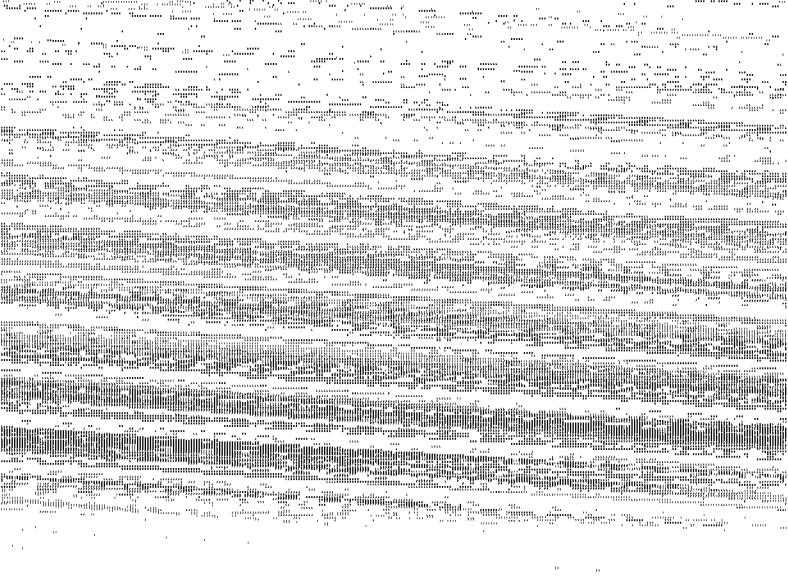
Table 3 EPMA result of Mg concentration and area ratio in laser weld metal (A5083)

Mass (%)	Area (%)
6 —	0.63
5.5 —(6)	0.65
5 —(5.5)	3.08
4.5 —(5)	16.61
4.25 —(4.5)	11.27
4 —(4.25)	13.37
3.5 —(4)	20.76
3 —(3.5)	11.52
0 —(3)	21.3

由表 2 知,在 A5052 焊缝熔化区,Mg 含量小于 2.5% 即 Mg 的蒸发损失在整个焊缝熔化区都发生,而且在熔化区的中间及最上部,Mg 的蒸发损失最多。由表 3 知,在 A5083 的焊缝熔化区,Mg 的含量小于 4.25%,在焊缝最上部,其含量更小,如果用平均 Mg 含量来衡量 Mg 的损失程度,A5052 的熔化区平均 Mg 含量为 2.02% A5083 为 3.76%,即 A5052 的损失量为 0.48%,A5083 的损失量为 0.74%。于是得到,在相同焊接规范下,A5083 的 Mg 损失量为 0.74%。于是得到,在相同焊接规范下,A5083 的 Mg 损失量大于 A5052,即 Mg 的损失量与合金本身性质有关,即与合金初始 Mg 含量有关,高 Mg 含量合金的蒸发损失量大于低 Mg 含量合金。

2.1.2 合金 Mg 含量与焊缝表面形状的关系

在铝合金激光焊接过程中合金元素 Mg 被蒸发的同时,Al 的蒸发也是存在的。焊缝合金被过多蒸发,就会造成焊缝金属不足,焊缝表面下凹。图 1 表示了在保护气流量变化时两种合金表面最大下凹量的变化趋势。无论是在何种流量时,A5083 的最大下凹量大于 A5052,说明



2.3 焊缝熔化形状与合金Mg含量的关系

2.3.1 不同气流量时的熔化区形状

图3表示了焊缝熔深、熔宽随气流量不同而变化的趋势。当气流量在30 L/min以下时,随气流量增加,A5083的熔深、熔宽均增加,当气流量为30L/min时,熔深达最大值;而气流量大于30m L/min时,熔深反而下降。

由上述知,金属蒸气的产生及等离子体的出现对深焊缝的获得既有利又有弊,有利的是反作用力使熔深增加,不利的是等离子体吸收激光能量,降低焊缝输入能量。只有将等离子体消除或部分消除,才能使不利因素转化为有利因素。保护气体的流量增加,相应气体挺度增大,与等离子体的能量交换发生在工件表面上较短的范围内,从而激光光束的能量较少地被等离子体吸收和较多地被工件接受,得到较大熔深。当气流量大于30 L/min时,气体的流动状态由层流变为紊流,挺度下降,不能较多地消除等离子体,故熔深较小。

由于A5052Mg含量较少,等离子体产生量不是太多,所以保护气的消除等离子体的作用就不明显。

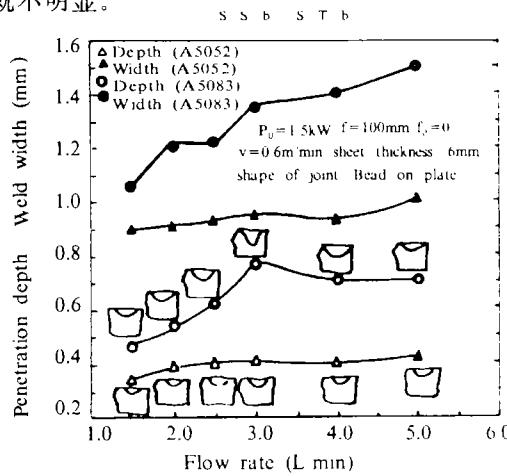


图3 气流量对熔深熔宽的影响

Fig.3 Influence of Ar gas flow rate on penetration and weld width

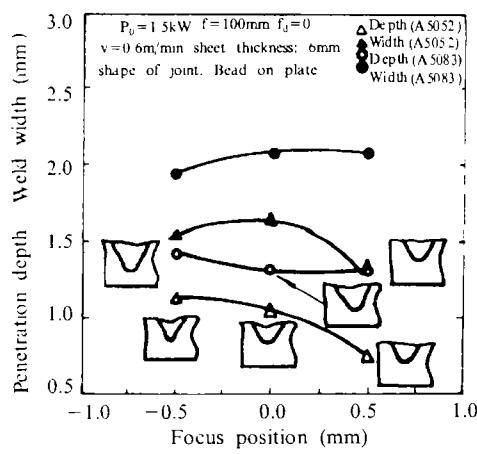


图4 焦点位置对熔深熔宽的影响

Fig.4 Influence of focus position on penetration and weld width

2.3.2 不同焦点位置时的熔化区形状

焦点位置不同,即焦点距工件表面的距离不同时,工件接受的激光能量不同。当焦点位置由正变负时,焊缝熔深逐渐增大,而熔化区形状由半圆形向钉头型转变,图4表示了这种趋势。两种合金的变化趋势基本相同,但A5052的熔深总是小于A5083,这只能归因于铝合金本身的物理化学性能,这些性能包括热传导率、表面张力、粘度等。

2.3.3 不同表面处理状态时的熔化性

由于铝合金对激光的吸收率很低,如在室温时,对Nd:YAG激光(波长 $\lambda=1.06\mu\text{m}$)的吸收率为20%,对CO₂激光($\lambda=10.6\mu\text{m}$)的吸收率为4%,即大部分激光能量被反射损失^[2]。为了增加吸收率,人们已经采取很多办法,比如喷砂粗化法,不锈钢钢丝刷法,金钢砂砂纸法,表面涂敷石墨及氧化铝法等,都不同程度地取得了很好的效果。但对于砂纸粗化法,究竟何种粗糙度的表面吸收激光较多?用三种规格80#、320#、400#金钢砂纸研磨表面的激光焊接结果表明,无论是A5052,还是A5083,在用400#砂纸进行表面处理后所得到的熔深最大,也就是说,利

于吸收激光的表面不一定是最大粗糙度的表面。粗糙度越大，反射可能减小，但散射可能增大^[3]。当然，如采用对接接头，其接头间隙内将发生激光的多重反射，激光最终被工件吸收，即所谓的墙壁聚焦反应，这使得吸收率明显增加，熔深比任何一种平板焊接都大。

2.3.4 两种铝合金的物理性能差别

在表4中列出了A5052与A5083的表面张力、粘度及热传导率^[4]。由于A5052的表面张力、粘度及热传导率均大于A5083，造成了在激光焊接时的不同熔化性能。当液体金属粘度较低时，熔池内的液体金属搅动相对剧烈，液体金属的搅动将增加熔池中心高温区向熔池边缘固态金属的热对流，使熔化区不断增大。当表面张力较小时，熔池内金属蒸气及等离子体在逸出熔池时排开周围液体金属就更为容易，只要较多的金属蒸气产生并逸出，其反作用力产生的加大熔深的效果就更明显；同时存在一个不利的方面，当表面张力降低时，液体金属在剧烈运动中易于溅出熔池，造成焊缝表面下凹。铝合金热传导率与合金中合金元素含量有关系，Mg含量越多，热传导率越小。随热传导率减小，熔池高温停留时间相对延长，这有利于金属蒸气的形成并逸出，有利于液体金属的运动，同时使熔深加大。

表4 A5052和A5083有关物理性能

Table 4 Surface tension, viscosity and thermal conductivity of A5052 and A5083

	Surface tension (10^{-5} N/cm) (700 °C)	Viscosity (10^{-2} Pa) (700 °C)	Thermal conductivity (W/m·°C)
A5052	630	1.1	146.5
A5083	605	1.07	117.2

综合以上三方面及Mg含量不同所造成的A5052和A5083合金的熔化性能和蒸发性能的差异，其激光焊接性能的不同在于合金物理、化学性能，而且这些性能是通过液体金属运动、金属蒸气及等离子体产生并逸出这一途径影响了合金的熔化和蒸发性能。

2.4 焊接位置对熔化性能的影响

等离子体从熔池中喷出后存在于激光光束通向工件表面的空间中，由此而吸收激光能量以维持自身能量消耗，造成工件对激光吸收率的降低，当将工件倾斜放置，倾斜角度为5°，焊缝熔深比不倾斜时大。由于激光入射方向与板面法线存在一定夹角，激光的反射光和等离子体的逸出。上升方向一致并与激光入射光分居于法线两侧，等离子体对激光的吸收虽然还存在，但与激光在同一通道上相遇的距离缩短，使工件对激光吸收率增加。同时也说明，改变等离子体喷出方向和前述的增大气流量消除等离子体都是增加熔深、提高焊接效率的有效方法。

3 结论

(1) 铝合金中合金元素Mg的蒸发发生于激光焊缝熔化区的每个地方，但是在熔化区最上部和中心区的蒸发损失最严重。

(2) 激光焊缝中合金元素Mg的蒸发损失随合金中Mg含量不同而不同，Mg含量越高，蒸发损失越多。

(3) 铝合金激光焊接时熔化特性不同的根本原因在于合金本身物理化学性质的差异。

A5083Mg 含量高于 A5052, 其熔池中产生的金属蒸气及等离子体数量较多, 金属蒸气和等离子体喷出熔池时产生的反作用力导致的熔深越深。

(4) 适当增加保护气流量和改变激光光束入射角度, 可有效地消除或减轻等离子体吸收激光能量, 减少工件对激光吸收率的不利影响。

(1994年12月14日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Moliaki Ono. Effect of ambient pressure and gas on penetration depth and laser-induced plasma behaviour. Essais of Jpn welding sociaty, 1992, 10(2) 9 ~ 14
- 2 Seiji Katayama. Leser welding of commercial aluminum alloys. Journal of linght metal & construction, 1991, 29(8):8 ~ 10
- 3 Seiji Katayama, Akira matusnawa. Laser welding of aluminum alloys 5456. Joural of light metal & construction, 1991
- 4 Kent R. Van Horn. Aluminum. American society for metals, 1978: 167 ~ 177

Character of melting and evaporation in laser welding for different aluminum alloys

Wang Xijing

Seiji Katayama, Akira Matsunawa

(Gansu University of Technology, Lanzhou)

(Osaka University)

Abstract In this investigation, through welding aluminum alloys 5052, 5083 by laser in different welding condition, the character of melting was compared and analyzed. The following two problems were studied: the evaporation of main alloying element Mg and the influence of the reaction force induced from metal evapor and thermal plasma on penetration. The experiment result confirmed that the increment of the shield gas flow rate in some extent and the change of entrance angle of laser beam would improve the meltability and increase the penetration depth, the suitable granularity of workpiece surface would improve the absorptivity of laser beam.

Key words evaporation; aluminum; laser welding; meltability