

铝合金激光-电弧双面焊接特性

赵耀邦 雷正龙* 苗玉刚 陈彦宾

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 对 5A06 铝合金激光-电弧双面焊接(LADSW)特性进行研究,通过光谱诊断、电弧电压测量和基于斯塔克展宽法的电弧电子密度估算,对激光作用下的电弧物理特性进行分析。结果表明,借助电弧的辅助加热作用,可以明显地改善铝合金激光焊缝表面成形,显著降低甚至消除铝合金激光焊气孔。通过调整激光和电弧能量的匹配,可实现对接头形貌的控制,其中对称“X”型接头内部缺陷较少,具有最佳的力学性能,抗拉强度可达到母材的 90% 以上。与常规的钨惰性气体(TIG)电弧相比,典型的 LADSW 电弧形态具有明显的收缩;LADSW 电弧具有更多的金属原子,而 Ar 原子则减少;LADSW 电压下降,且更加稳定;LADSW 电弧电子密度明显增加。与相同条件下的常规激光焊相比,LADSW 激光焊等离子体面积略有增加。

关键词 激光技术;焊接特性;激光-电弧双面焊;电弧物理特性;激光等离子体

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603007

Welding Characteristics of Laser-Arc Double-Sided Welding for Aluminum Alloy

Zhao Yaobang Lei Zhenglong Miao Yugang Chen Yanbin

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Welding characteristics of laser-arc double-sided welding (LADSW) for aluminum alloy are studied. Arc physical characteristics are investigated by spectroscopic diagnosis, arc voltage measurement and estimation of electron density by Stark broadening method. With the preheating of tungsten inert gas (TIG) arc, the results show that the weld appearance of laser welding in LADSW is improved, and porosity in weld can be drastically reduced and even eliminated. The shape of weld cross-section can be controlled. Due to the symmetrical weld cross-section and less weld defect inside, the joint of the symmetrical "X" cross-section has the best mechanical properties. The tensile strength is more than 90% of the base metal. Compared with conventional TIG arc, the typical arc shape of LADSW is compressed. There are more metal atoms and less Ar atoms in LADSW arc than those of conventional TIG arc, and the arc voltage is decreased and more stable. The electron density of LADSW is higher than that of conventional TIG arc. The plasma area of laser welding is increased in LADSW compared with conventional laser welding under the same condition.

Key words laser technique; welding characteristics; laser-arc double-sided welding; physical characteristics of arc; laser welding plasma

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

利用多个热源的协同作用来实现高效、低成本焊接是一个非常有效的技术创新^[1~3],而激光-电弧复合焊接是其中最具有前途的方法之一。激光-电弧

协同作用能够充分发挥激光焊与电弧焊各自的优势,又弥补了各自的不足,很好地解决了激光焊成本高、间隙适应性差的问题,因此吸引了各国学者的深入研究^[4,5]。激光-电弧复合焊过程中激光对电弧的

收稿日期: 2011-03-23; 收到修改稿日期: 2011-03-29

作者简介: 赵耀邦(1982—),男,博士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: zhaoyaobang@gmail.com

导师简介: 陈彦宾(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

压缩与吸引作用导致电弧电流密度增加,从而大幅度地增加了焊接熔深和提高了焊接过程的稳定性^[3,6]。但是在激光-电弧同侧复合焊中,不可避免的事实是激光束需穿过电弧,电弧等离子体对激光能量的吸收和散焦作用造成激光能量的损耗^[7],尤其是对于 CO₂ 激光,吸收率可高达 40%^[8]。并且研究发现当电弧电流较大时,电弧等离子体对激光束的能量损耗更为严重,导致激光对电弧的压缩与吸引作用不复存在,复合焊也从匙孔焊转向热导焊^[9]。Ribic 等^[10]也发现大电流时电弧对激光能量的损耗导致激光-电弧复合焊的熔深小于相同条件下的单激光焊。

为了避免激光-电弧复合焊电弧对激光能量的损耗作用,哈尔滨工业大学开展了激光-电弧双面焊(LADSW)的研究工作^[11~13]。为了进一步地认识和研究 LADSW 这一全新方法,加快该方法应用到实际生产中的步伐,还需对其焊接规律和热源相互

作用机制进行更加深入的探索。

本文在铝合金 LADSW 实验的基础上,对铝合金 LADSW 特性进行了研究,并着重分析和探讨了激光作用下的电弧物理特性以及电弧对激光等离子体的影响。首先分析了 LADSW 焊缝表面成形特征,然后通过调整激光和电弧能量的匹配来实现对接头形貌的控制,并对具有典型接头形貌的焊接接头气孔含量和力学性能进行测试,最后采用光谱诊断、电弧电压测量和基于斯塔克展宽法的电弧电子密度估算对 LADSW 电弧物理进行了深入探讨,同时对电弧作用下的激光等离子体特性进行了分析。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

实验材料为 4 mm 厚的 5A06 铝合金板,其材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 5A06 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical components of 5A06 aluminum alloy (mass fraction, %)

Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cu	Ti	Al
5.8~6.8	0.5~0.8	0.4	0.4	0.2	0.10	0.02~0.10	balance

2.2 实验方法

图 1 为 LADSW 实验和信号检测系统示意图^[11]。LADSW 热源由 CO₂ 激光器(ROFIN-SINAR)和松下逆变钨惰性气体(TIG)电弧焊机(WX-300)组成。在焊接过程中,激光束与电弧从工件两侧同时加热,保持激光束和电弧焊枪的轴线与工件垂直,由行走结构带动工件垂直运动。TIG 电

弧采用直流正接,氩保护气流量为 13 L/min,激光焦距 190 mm,光斑直径 0.15 mm,离焦量 0,焊接方向为立向上焊。采用 6482PD 型 CCD 摄像机对焊接过程中的电弧以及激光等离子体形态进行采集。利用 LEM 公司生产的 LT300-T 型电流传感器和 LV28-P 型电压传感器对电弧电流、电压信号进行实时采集,频率为 1 kHz。

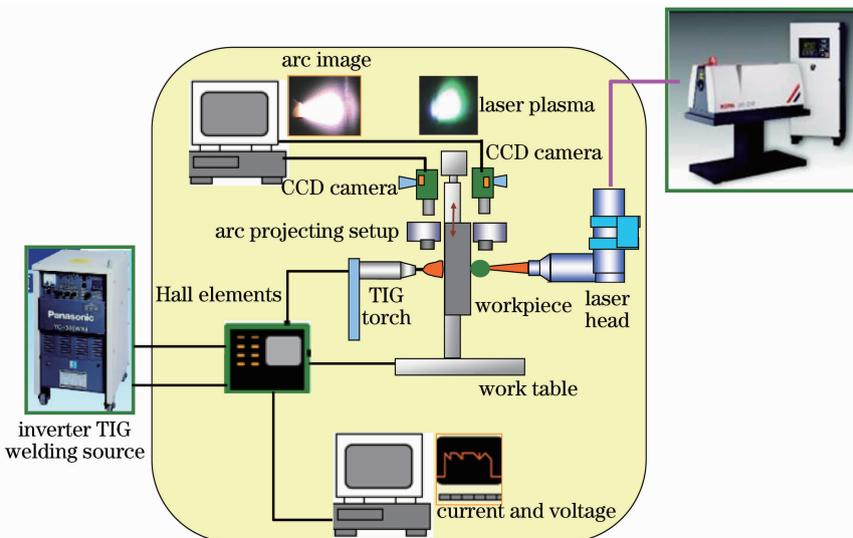


图 1 LADSW 实验及信号采集示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LADSW experiment and signal picking system

电弧等离子体光谱采集系统如图 2 所示。电弧等离子体辐射的弧光首先通过双胶合透镜成 2:1 放大倒立实像,再通过狭缝对入射光限制以获得足够的空间分辨率。入射光经过光纤传输至 SP556 型光谱仪进行分光处理,光纤探头固定在二维电动平移结构上,可以实现电弧空间二维采集。TE/CCD-

1100PF 型 CCD 把光信号转换成电信号,ST133 型控制器对电信号进行处理,最后通过计算机和采集软件 WinSpec32 处理成光谱强度与波长之间的曲线。实验中光谱仪采用 300 line/mm (闪耀波长 500 nm)光栅,分辨率为 0.156 nm,一次采集范围约为 160 nm。

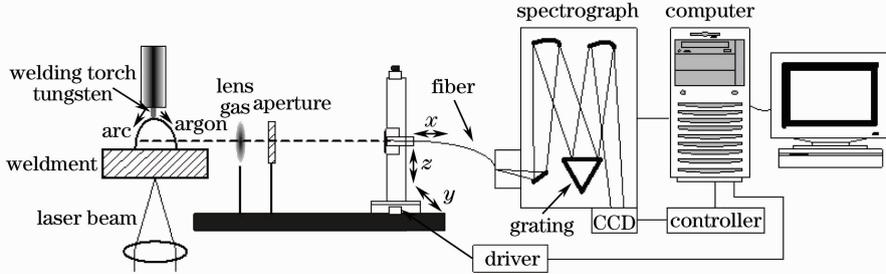


图 2 光谱诊断实验系统示意图

Fig. 2 Experimental system of spectroscopic diagnosis

3 结果与讨论

3.1 焊缝表面成形

图 3 为相同激光参数条件下(v 为焊接速率, P_1 为激光功率, P_a 为电弧功率)的 5A06 铝合金激光焊和 LADSW 焊缝成形。可以看出由于铝合金表面张力小、合金元素易挥发等因素,激光焊表面成形较差,出现明显的下凹缺陷。而 LADSW 激光侧焊缝成形美观,分析可能是电弧加热作用使得激光焊等离子体更加稳定,同时电弧力对激光焊熔池存在一个“支撑”作用,因而避免了单激光焊下凹的缺陷。

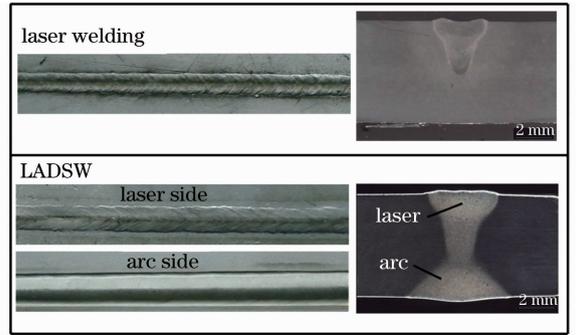


图 3 激光焊和 LADSW 焊缝成形($v=1.0$ m/min)。激光焊($P_1=1.8$ kW), LADSW ($P_1=1.8$ kW, $P_a=2.7$ kW)

Fig. 3 Weld appearance by laser welding and LADSW ($v=1.0$ m/min), laser welding ($P_1=1.8$ kW), LADSW ($P_1=1.8$ kW, $P_a=2.7$ kW)

3.2 能量匹配对接头形貌的影响

图 4 为不同激光和电弧能量匹配下的接头形貌。由于激光和电弧从工件两侧同时对称加热,LADSW 焊缝横截面呈现出两侧宽、中间窄的形貌。通过调节激光与电弧能量,可以实现对接头形貌的控制,获得三种典型接头形貌:非对称“X”型[图 4(a)]、对称“X”型

型[图 4(b)]和近“H”型[图 4(c)]。

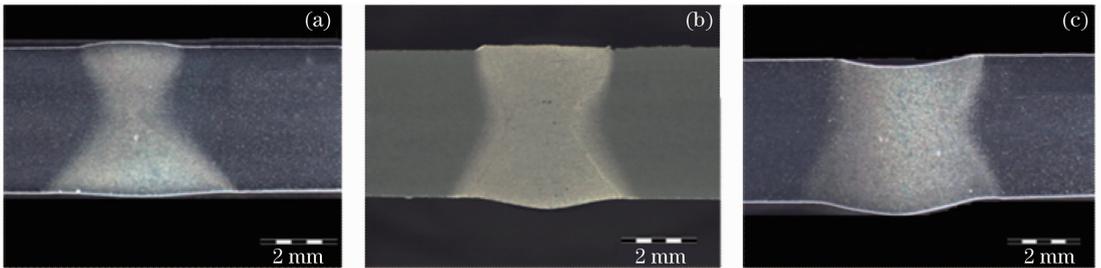


图 4 激光-电弧能量匹配下的接头形状($v=1$ m/min)。(a)非对称“X”型接头($P_1=1.0$ kW, $P_a=0.8$ kW), (b)对称“X”型接头($P_1=1.2$ kW, $P_a=1.2$ kW), (c)近“H”型接头($P_1=1.2$ kW, $P_a=1.5$ kW)

Fig. 4 Weld cross-sections of different heat inputs ($v=1$ m/min). (a) dissymmetrical "X" cross-section ($P_1=1.0$ kW, $P_a=0.8$ kW), (b) symmetrical "X" cross-section ($P_1=1.2$ kW, $P_a=1.2$ kW), (c) consistent "H" cross-section ($P_1=1.2$ kW, $P_a=1.5$ kW)

3.3 焊缝气孔分析

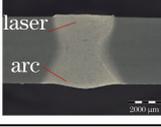
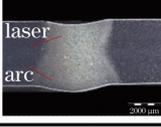
气孔问题是铝合金激光焊接中亟待解决的问题之一,为此对上述三种能量匹配下典型的 LADSW 接头的气孔含量进行对比分析。采用 X 射线获得的结果进行图像处理,计算气孔总面积占焊缝面积的百分比 f ,其计算方法为

$$f = \frac{\sum S_n}{S_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中 S_n 为气孔面积, S_w 为焊缝面积。

表 2 焊缝气孔含量的 X 射线和图像处理

Table 2 X-ray inspection and image analysis of weld beads porosity content

Heat input	Weld cross-section	X-ray inspection and image processing	Volume fraction /%
$P_l=1.0 \text{ kW}$ $P_a=0.8 \text{ kW}$			> 5
$P_l=1.2 \text{ kW}$ $P_a=1.2 \text{ kW}$			< 2
$P_l=1.2 \text{ kW}$ $P_a=1.5 \text{ kW}$			0

3.4 LADSW 接头力学特征

对非对称“X”型、对称“X”型和近“H”型这三种接头形式的抗拉强度和延伸率进行了测试。非对称“X”型接头抗拉强度和延伸率分别为 325 MPa 和

7.5%;近“H”型接头的拉伸强度和延伸率很低,分别为 304 MPa 和 5.46%;对称“X”型接头的抗拉强度和延伸率较高,分别为 362 MPa 和 9.4%,接头强度达到母材强度的 90%以上。

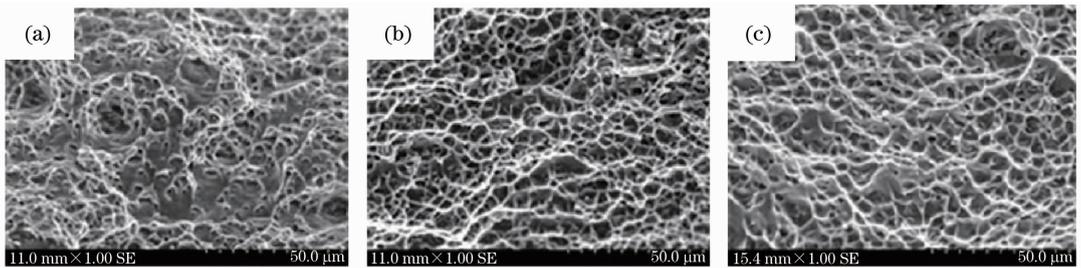


图 5 拉伸断口的 SEM 形貌。(a)非对称“X”型接头,(b)对称“X”型接头,(c)近“H”型接头

Fig. 5 Fracture morphologies of tensile samples by SEM. (a) dissymmetrical "X" cross-section, (b) symmetrical "X" cross-section, (c) consistent "H" cross-section

为了更好地对 LADSW 接头力学性能进行分析,对三种接头的断口进行了扫描电镜 (SEM) 分析,如图 5 所示。可以看出,非对称“X”型接头断口韧窝尺寸差异大、分布不均匀,并且焊缝存在着大量的气孔,力学性能比较差;近“H”型接头断口韧窝较浅,虽然焊缝基本没有气孔,但是存在下榻缺陷(见图 4),力学性能也不好;而对称“X”型接头断口

韧窝较深、分布均匀,接头对称,内部缺陷少,因而具有更加优良的力学性能。

3.5 激光对电弧等离子体特性的作用机制分析

为了讨论激光作用下 TIG 电弧能量利用率的提高机制,对比分析了常规 TIG 焊电弧和 LADSW 电弧的电弧等离子体特性。

图 6 为典型的常规 TIG 焊电弧和 LADSW 电

弧形态(I 为焊接电流),可以看出,常规的 TIG 焊电弧发散,呈钟罩型,而 LADSW 电弧弧根扎根于激光形成的热斑点处,电弧形态有明显的收缩^[13]。由此可见,LADSW 存在与激光-电弧复合焊类似的激光对电弧的压缩与吸引作用^[5,8]。

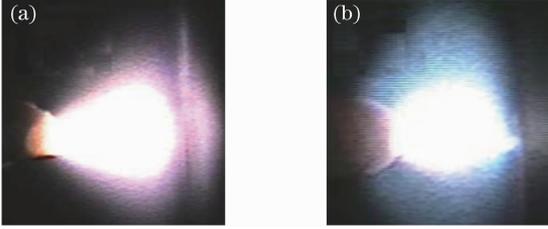


图 6 激光对 TIG 电弧形态的作用。(a)TIG 电弧($I=60$ A), (b)LADSW 电弧($I=60$ A, $P_1=2$ kW)

Fig. 6 Effect of laser on the TIG arc shape. (a) TIG arc ($I=60$ A), (b) LADSW arc ($I=60$ A, $P_1=2$ kW)

一些研究者认为激光对 TIG 电弧的收缩作用可能会导致电弧能量密度的提高,从而增加焊接熔深^[5,8,13]。对于这一问题,分析激光作用前后电弧等离子体的电子密度变化有着非常重要的意义。在此采用广泛使用的发射光谱诊断法来估算 TIG 电弧等离子体的电子密度^[14]。

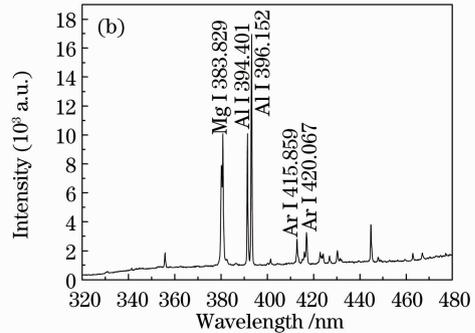
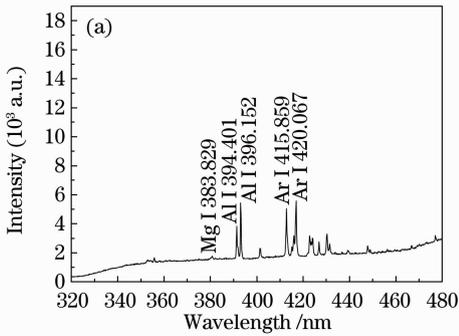


图 7 TIG 电弧和 LADSW 电弧等离子体光谱特征。(a)TIG 电弧($I=60$ A), (b)LADSW 电弧($I=60$ A, $P_1=2$ kW)

Fig. 7 Arc plasma spectra of TIG welding and LADSW. (a) TIG arc ($I=60$ A), (b) LADSW arc ($I=60$ A, $P_1=2$ kW)

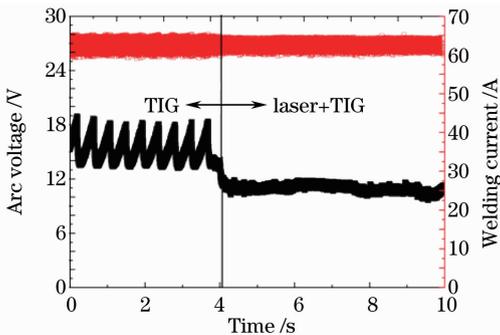


图 8 激光对 TIG 焊电弧电压的作用

Fig. 8 Effect of laser on the arc voltage of TIG welding

电弧等离子体光谱谱线的宽度和轮廓取决于等离子体本身的状态和所处的环境,而谱线的展宽主

图 7 为典型的 TIG 焊电弧和 LADSW 电弧光谱特征对比,二者都主要包括 Ar I、A II 和 Mg I 谱线,但是它们的强度存在很大的差异。LADSW 电弧金属谱线(A II 和 Mg I 谱线)要远远大于 TIG 电弧,而 Ar I 谱线则要比 TIG 电弧弱。例如, LADSW 电弧 Mg I 383.829 和 A II 396.152 谱线的强度分别是 TIG 电弧的 3.1 和 5.7 倍,而 Ar I 415.859 和 Ar I 420.067 谱线的强度则分别只有 TIG 电弧的 41.3% 和 57.5%。分析认为,常规 TIG 焊熔池温度远远低于沸点,只有少量的金属蒸发进入到 TIG 电弧中, TIG 电弧主要通过 Ar 保护气电离维持放电,而在 LADSW 过程中,激光焊匙孔加热作用使得电弧侧熔池蒸发加剧,甚至当激光功率达到一定程度时,激光焊的金属等离子体直接进入电弧中,因而通过电弧光谱可以看到 LADSW 电弧的金属谱线比 TIG 要强,而 Ar 谱线要弱。而这种电弧成分带来的变化会直接影响电弧放电机理,金属成分越多,由于其较低的电离能,维持电弧放电的电压会更低,如图 8 所示, LADSW 的电弧电压要比 TIG 焊电弧电压低,且更加稳定。

要是由斯塔克展宽机制决定的。根据斯塔克展宽效应的原理,等离子体电子密度 N_e 与谱线的半峰全宽 $\Delta\lambda_{1/2}^S$ 存在关系^[14]

$$N_e = \frac{\Delta\lambda_{1/2}^S}{2\omega} \times 10^{16}, \quad (2)$$

式中 ω 是电子碰撞展宽系数,可以参考美国国家标准与技术研究所原子光谱数据库,半峰全宽可以通过洛伦兹函数对谱线拟合获得。通过 Mg I 383.829 谱线估算了距离阳极 0.5 mm 处 TIG 电弧等离子体和 LADSW 电弧等离子体轴线上的电子密度,分别为 $2.95 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $7.12 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,后者是前者的 2.4 倍。在激光作用下,电弧电子密度增大,

导致电弧能量密度提高,从而大幅提高 TIG 电弧的能量密度。

3.6 电弧作用下激光等离子体特征

LADSW 条件下的激光焊熔深远远大于相同功率下的单激光焊熔深,这表明电弧作用下的激光焊不同于相同条件下的单激光焊。在此通过激光等离子体的形态来分析电弧对激光焊的作用。

采用图像处理方法对激光等离子体横截面进行提取,并进行图像定标实验,以获得实际的等离子体面积值。图 9 为激光焊与 LADSW 的激光焊接等离子体面积比较。可以看出,TIG 电弧的作用使得激光等离子体面积变大。在双面焊过程中,TIG 电弧的预热作用使得材料对激光的吸收率大大提高,激光对材料的作用更加剧烈,同时电弧的加热作用使得激光匙孔蒸发加剧,因而双面焊激光等离子体更加膨胀。

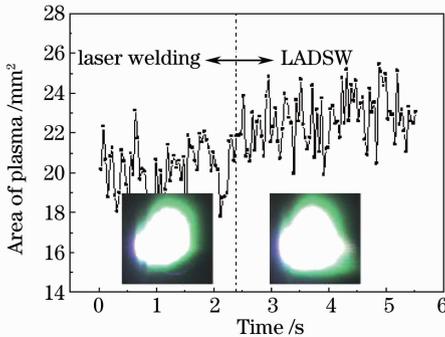


图 9 TIG 电弧对激光等离子体横截面积的影响
($P=1.5\text{ kW}$, $v=1.0\text{ m/min}$, $I=100\text{ A}$)

Fig.9 Effect of TIG arc on the plasma area of laser welding ($P=1.5\text{ kW}$, $v=1.0\text{ m/min}$, $I=100\text{ A}$)

图 10 为不同激光功率条件下激光等离子体面积的比较,可以看出激光功率越大,激光对材料的作用也更加剧烈,因而等离子体面积也越大。在 LADSW 过程中,由于 TIG 电弧的预热作用,等离子体面积变大,这种作用相当于增加了单激光焊条件下的激光功率,因而双面焊中激光的能量利用率要比相同条件下单激光大得多。

4 结 论

通过对铝合金 LADSW 特性的研究,得出以下结论:1) LADSW 明显地改善了铝合金激光焊表面焊缝成形,通过优化工艺可以明显降低甚至消除气孔。可以实现对接头形貌的控制,包括非对称“X”型、对称“X”型和近“H”型。对称“X”型接头形貌对称、熔透适中并且内部缺陷少,因而具有最佳的抗拉

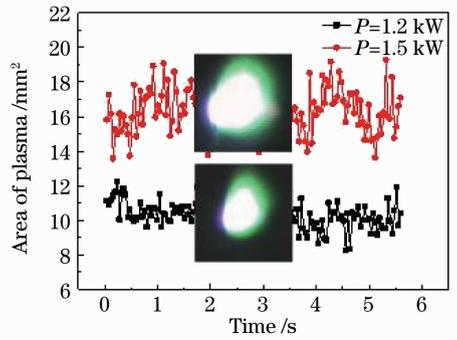


图 10 激光功率对激光焊等离子体横截面积的影响($v=1.0\text{ m/min}$)

Fig.10 Effect of laser power on the plasma area of laser welding ($v=1.0\text{ m/min}$)

强度和延伸率,抗拉强度达到母材的 90% 以上。2) 与常规 TIG 电弧相比,LADSW 电弧成分改变,具有更多的 Mg、Al 金属原子,而 Ar 原子则减少,LADSW 电弧具有更高的电子密度。在 LADSW 过程中,激光焊等离子体面积略有增加。

参 考 文 献

- 1 Y. M. Zhang, S. B. Zhang. Double-sided arc welding increases weld joint penetration [J]. *Welding Journal*, 1998, **77** (6): 57~61
- 2 Zhang Xin'ge, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Study on characteristics of laser-resistance hybrid welding for aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1404~1408
张新戈, 李俐群, 陈彦宾 等. 铝合金激光-电阻复合焊接特性研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1404~1408
- 3 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 4 B. Ribic, T. A. Palmer, T. Debroy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. *Int. Mater. Rev.*, 2009, **54**(4): 223~244
- 5 F. O. Olsen. Hybrid Laser Arc Welding [M]. London: Taylor and Francis, 2009
- 6 B. Hu, G. den Ouden. Laser induced stabilisation of the welding arc [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(1): 76~81
- 7 Chen Yanbin, Li Liqun, Wu Lin. Quantitative measurement of absorption and defocusing of laser beam by electric arc [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2003, **24**(3): 56~58
陈彦宾, 李俐群, 吴林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量 [J]. *焊接学报*, 2003, **24**(3): 56~58
- 8 U. Stute, R. Kling, J. Hermsdorf. Interaction between electrical arc and Nd: YAG laser radiation [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2007, **56**(1): 197~200
- 9 Y. B. Chen, Z. L. Lei, L. Q. Li *et al.*. Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, **11**(4): 403~411
- 10 B. Ribic, R. Rai, T. Debroy. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in GTA/laser hybrid welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, **13** (8): 683~693
- 11 Y. B. Chen, Y. G. Miao, L. Q. Li. Arc characteristics of

laser-TIG double-side welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, **13**(5): 438~444

12 Chen Yanbin, Miao Yugang, Li Liqun *et al.*. Characteristics of laser-TIG double-side welding for aluminum alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1716~1720

陈彦宾, 苗玉刚, 李俐群 等. 铝合金激光-钨极氩弧双面焊的焊

接特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1716~1720

13 Miao Yugang, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Study on heat efficiency of laser-TIG double-side welding[J]. *China Welding*, 2008, **17**(1): 64~70

14 H. R. Griem. *Plasma Spectroscopy*[M]. New York: McGraw-Hill, 1964

480 mJ, 2 μm 高能室温运转电光调 Q Cr,Tm,Ho:YAG 激光器

Cr,Tm,Ho:YAG 激光器输出的 2 μm 激光对人眼安全,多种气体在此波段有明显的特征吸收谱,目前已广泛用于大气探测等领域。研究 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器的电光调 Q 技术,获得高能量、窄脉宽的 2 μm 激光输出,对于扩大 2 μm 激光的应用领域和提升探测的距离与精度十分重要。本课题组利用合适的 2 μm 波段的电光晶体,对 Cr,Tm,Ho:YAG 热退偏进行了补偿,获得了较高的激光脉冲能量输出。

实验中 Cr,Tm,Ho:YAG 晶体由重复频率为 3 Hz 的高能氙灯抽运,去离子水冷却。选择 LGS, LN 等晶体做对比实验,发现掺杂合适浓度 MgO 的 LN 晶体抗损伤阈值高达 200 MW/cm²,对 2 μm 激光透射率为 98.9%,是较为合适的 2 μm 波段的电光晶体。

采用 λ/4 波片对 2 μm 电光调 Q Cr,Tm,Ho:YAG 激光热退偏进行补偿,激光能量增加比例大于

24%,当抽运脉冲能量为 200 J 时,获得最大 480 mJ 的电光调 Q 脉冲能量输出。补偿前后激光器输出能量如图 1 所示。激光脉冲波形如图 2 所示。当冷却水温为 295 K 时,脉冲宽度为 80 ns。将冷却水温降至 277 K 时,脉冲宽度减小到 50 ns。

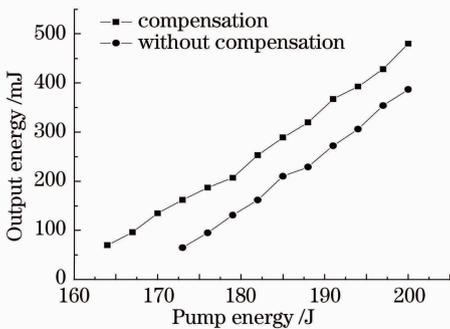


图 1 热退偏补偿前后激光器输出电光调 Q 脉冲能量
Fig. 1 Electro-optical Q-switch energy output with and without compensation

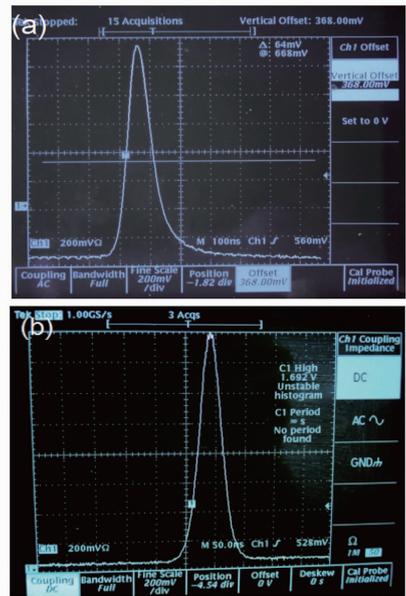


图 2 冷却水温为(a)295 K 和(b)277 K 时输出脉冲波形
Fig. 2 Pulse wave form of laser at a temperature of (a) 295 K and (b) 277 K

李 哲 王 礼 杨经纬 吴先友 江海河
(中国科学院安徽光学精密机械研究所,
安徽 合肥 230031)

(收稿日期: 2011-04-25; 收到修改稿日期: 2011-04-28)