

文章编号: 0258-7025(2007)12-1716-05

# 铝合金激光-钨极氩弧双面焊的焊接特性

陈彦宾, 苗玉刚\*, 李俐群, 吴林

(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** 以4 mm和10 mm厚5A06铝合金为实验材料,对激光-钨极氩弧(TIG)双面焊(LTDSW)的焊接特性进行了研究。该工艺充分利用了激光和钨极氩弧两种热源相互作用的优势,不仅可以获得稳定可靠的焊接过程与美观的焊缝成形,还具有显著增加接头熔深、减少焊接缺陷、提高焊接生产率和降低焊接成本等优势,实现了在小功率(1.0 kW)激光条件下4 mm厚铝合金板的可靠连接。与激光焊相比,激光-钨极氩弧双面焊的气孔数量有所下降,气孔分布位置主要受激光和电弧能量匹配关系的影响,气孔数量和大小主要取决于焊接热输入的大小。激光-钨极氩弧双面焊的接头抗拉强度为310 MPa,约为母材强度的88%。

**关键词** 激光技术;激光-钨极氩弧双面焊;焊缝成形;能量利用率;气孔;抗拉强度

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A

## Characteristics of Laser-TIG Double-Side Welding for Aluminum Alloys

CHEN Yan-bin, MIAO Yu-gang, LI Li-qun, WU Lin

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

**Abstract** Laser-TIG double-side welding (LTDSW) for aluminum alloys was explored. The double-side welding for 4 mm and 10 mm thick 5A06 aluminum alloys was implemented, and the characteristics of LTDSW were investigated. The results show that the technology combines the advantages of laser and TIG. Stable process and good welding appearance were obtained. Other remarkable advantages, such as increasing joint penetration, decreasing welding defects, enhancing productive efficiency, reducing welding cost, were also achieved. The reliable join for 4 mm thick aluminum alloys was realized with 1.0 kW laser power. Compared with laser welding, the pore amount of LTDSW is decreased. The pore distribution is mainly determined by the energy ratio of laser and arc. The amount and size of pore are mainly determined by the welding heat input. The average tensile strength of joints is 310 MPa, about 88% of base metal.

**Key words** laser technique; laser-TIG double-side welding; seam appearance; energy utilizing efficiency; pore; tensile strength

## 1 引言

激光焊由于具有功率密度高、同等热输入量时熔深大、热影响区窄、焊接变形小、焊接速度快和易于实现自动化等优点,在焊接生产中具有很大的应用潜力。但是利用激光束焊接铝合金时,由于铝对激光的反射率高、导热快等特性,常需要采用较大功率的激光器进行焊接,造成焊接成本过高,且在激光焊铝合金厚板时也易出现稳定性差、气孔、裂纹、下

塌等焊接缺陷<sup>[1~3]</sup>。

为改善铝合金结构件的焊接质量,提高焊接生产率,降低焊接成本,国内外许多学者对双热源技术进行了研究,常见的如激光-电弧复合热源、双面电弧焊技术等。

S. Fujinaga等<sup>[4,5]</sup>发现采用激光-钨极氩弧焊(TIG)复合热源技术焊接铝合金,可以提高焊接过程的稳定性,增加接头熔深,减少焊接缺陷等。张裕明等<sup>[6,7]</sup>对铝合金双面电弧焊技术进行研究,结果

收稿日期:2007-04-02;收到修改稿日期:2007-06-08

作者简介:陈彦宾(1962—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事激光加工技术基础研究与应用开发。

E-mail:chenyb@hit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail:miao0701@163.com

发现该工艺能显著增加熔深,但焊接参数的区间较窄,一旦形成穿孔焊后,电弧不能产生有效的阴极清理作用,钨极也将产生严重烧损,凝固后焊缝表面就会产生黑色的氧化物和钨的夹渣。

在国内外学者研究工作的基础上,本文探索一种新的铝合金焊接工艺——激光-钨极氩弧双面焊(LTDSW)工艺,对焊缝成形、能量利用率、气孔和力学性能等问题进行了研究。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

实验材料为 4 mm 和 10 mm 厚 5A06 铝合金板,其化学成分见表 1。

表 1 5A06 的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 5A06 (mass fraction)

Element	Mg	Mn	Fe	Si	Al
Content	6~6.8	0.5~0.8	≤0.4	≤0.4	Bal.

### 2.2 实验方法

实验利用 3 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器和逆变氩弧焊机共同组成双面焊的热源,在自制的立焊行走机构上进行铝合金激光-钨极氩弧双面焊工艺实验。双面焊过程中,两热源同时对称加热工件,由立焊行走机构带动工件运动,如图 1 所示。

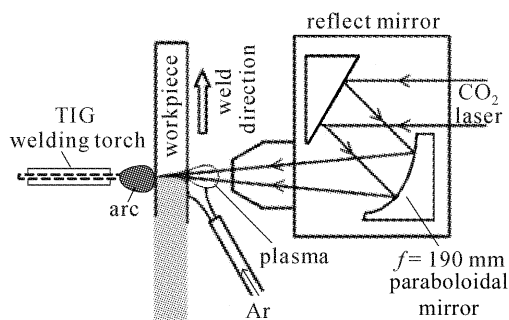


图 1 激光-钨极氩弧双面焊实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LTDSW

## 3 结果和讨论

### 3.1 焊缝成形和接头熔深

图 2 为相同条件下,激光焊、钨极氩弧焊、激光-钨极氩弧双面焊的焊缝成形和接头形貌。

焊速为 1.0 m/min 时,1.2 kW 激光焊的表面成形较好,但焊缝的熔深较浅;100 A 电流钨极氩弧焊时,工件基本没有熔化或只形成少量的熔化,其表面主要为电弧形成的阴极清理区。而 1.2 kW 激光

和 100 A 电弧构成双面焊时,激光和电弧两侧的成形都得到明显改善,接头熔深显著增加,实现了 4 mm 厚 5A06 铝合金的完全熔透焊接。

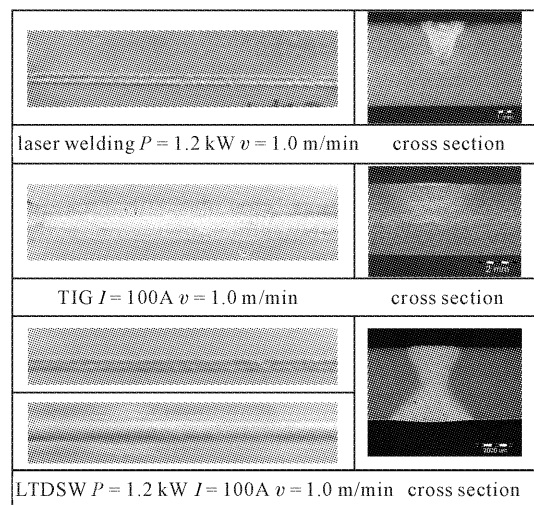


图 2 三种焊接方式的焊缝成形

Fig. 2 Appearance of welding seam by three welding methods

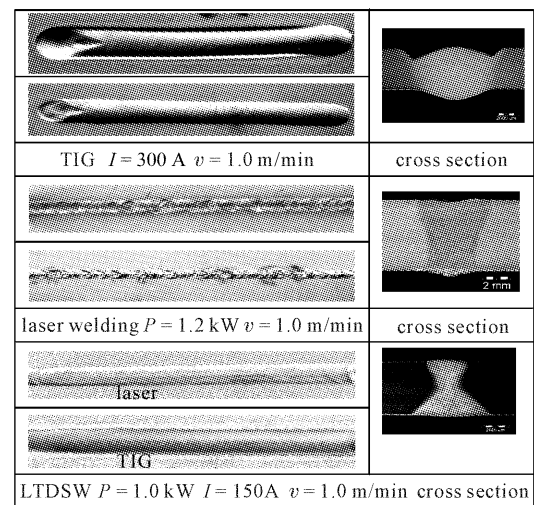


图 3 三种焊接方式的焊缝成形(熔透时)

Fig. 3 Appearance of welding seam by three welding methods (melted)

为研究双面焊是否能够节约激光功率和改善焊缝成形,进行了全熔透的钨极氩弧焊、激光焊和激光-钨极氩弧双面焊实验,结果如图 3 所示。

可以看出,焊速为 1.0 m/min,完全熔透 4 mm 厚 5A06 铝合金,钨极氩弧焊所需的焊接电流约为 300 A;激光焊所需的功率为 2.0 kW;而在 150 A 的钨极氩弧焊电弧辅助下的双面焊仅需要 1.0 kW 的激光功率,实现了小功率激光器代替大功率激光器的功能,降低了焊接成本。此外,在钨极氩弧焊时易出现下塌、咬边等缺陷;激光焊时焊缝表面成形也粗

糙不平;而采用激光-钨极氩弧双面焊时两侧的焊缝成形明显改善,优于任何一种单热源的焊缝。

### 3.2 能量利用率

从能量的角度看,焊接效率的提高无疑是激光-钨极氩弧双面焊最显著的特点。事实上,双面焊热源的能量利用率远远大于两种热源的简单叠加。为方便研究激光与电弧同时作用下两热源的相互作用效果,使用10 mm厚的5A06铝合金进行非熔透焊接实验。图4为钨极氩弧焊、激光焊和激光-钨极氩弧双面焊三种焊接方式的接头形貌。

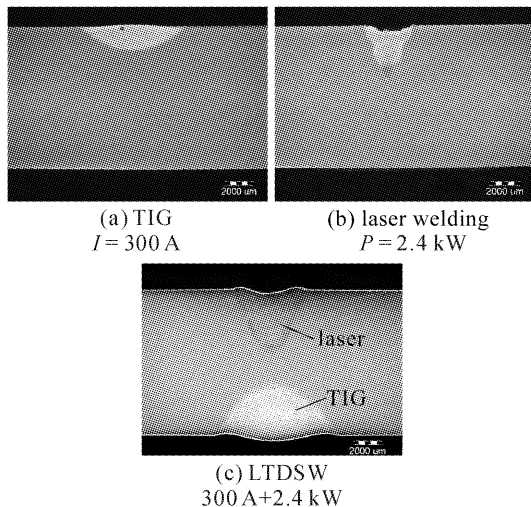


图4 三种焊接方式的接头形貌

Fig. 4 Joint appearance of three welding methods

激光-钨极氩弧双面焊时,激光和钨极氩弧焊两侧的焊缝尺寸(熔宽和熔深)都得到了明显提高。这也说明了双面焊时激光与电弧同时作为焊接热源存在很强的能量相互作用。

为定量评估激光-钨极氩弧双面焊热源的相互作用程度,引入热源熔化效率<sup>[8]</sup>的概念。熔化效率指的是用于熔化焊接金属所消耗的热功率与热源的实际输出功率的比值,其计算公式为

$$\eta_m = \frac{v \times A_m \times \rho \times [c \times (T_m - T_0) + \Delta H_m]}{P}$$

式中  $v$  为焊接速度(mm/s),  $A_m$  为熔化面积( $\text{mm}^2$ ),  $\rho$  为金属或合金密度( $\text{g}/\text{mm}^3$ ),  $c$  为比热容( $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ),  $T_m$  为金属或合金熔点(K),  $T_0$  为室温(K),  $\Delta H_m$  为金属或合金的熔化潜热( $\text{J}/\text{g}$ ),  $P$  为热源的实际输出功率(J)。  $P$  为激光功率和电弧功率(电弧功率=焊接电流×电弧电压)之和。表2为三种焊接方式的热效率特征。

激光-钨极氩弧双面焊的熔透面积和熔化效率是单独激光或单独钨极氩弧两热源简单相加的两

表2 不同焊接热源的热效率特征

Table 2 Characteristics of the thermal effects of various heat sources on metal

Type of heat sources	$A_m / \text{mm}^2$	$\eta_m$
TIG	9.49	0.15
Laser welding	7.25	0.14
LTDSW	33.67	0.29

倍,能量利用率明显提高。

激光-钨极氩弧双面焊时,热源能量利用率提高的原因,初步分析有以下几种:1) 由于激光的预热作用使电弧的不稳定燃烧变得更加稳定,电弧特征(电弧稳定和电弧收缩)发生改变,从而导致电弧能量利用率的增加;2) 由于电弧对金属的加热使得试件对激光能量的吸收率增加;3) 双面焊时,工件同时从上下两个热源获得热量,两个熔池的底部中间区域存在一个热聚集区,热量的散失较少,使能量的利用率得到了提高。

### 3.3 焊缝气孔

气孔问题是铝合金激光焊接中亟待解决的问题之一。为优化焊接工艺、消除焊接气孔,对激光-钨极氩弧双面焊的气孔分布位置、大小和数量进行了研究。针对实验得到的焊缝,截取长度约为50 mm的焊缝,沿焊缝纵截面切开、打磨,记录和观察气孔的分布位置和数量。为了便于观察和分析,只统计了尺寸大于200  $\mu\text{m}$ 的气孔数量。为便于对比分析,也对激光焊的气孔进行了统计。图5为激光-钨极氩弧双面焊与激光焊典型的焊缝纵截面。图6反映了两种方式气孔数量的差异。

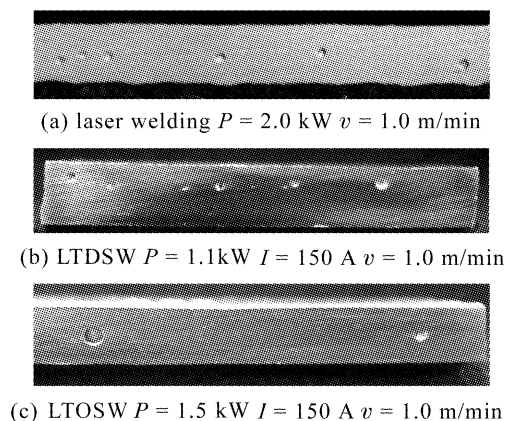


图5 焊缝纵截面照片

Fig. 5 Section of welding seams

可见双面焊的气孔数量相对激光焊的有所减少。随着焊接热输入的增大,气孔的数量明显减小,

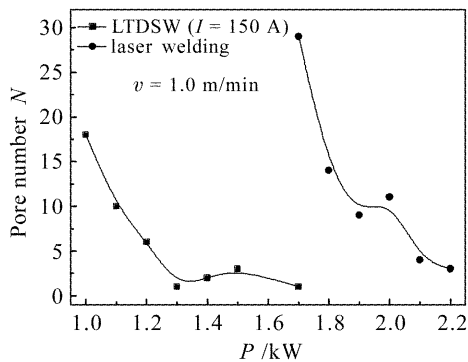


图 6 激光焊和双面焊气孔数量与激光功率关系  
Fig. 6 Relation of pore amount and laser power in laser welding and LTDSW

单个气孔的尺寸增大。随激光功率的增加,双面焊的气孔分布位置从焊缝的上部变为中部;随着焊接电流的增大,气孔的位置从焊缝的中部变为上部。由于双面焊过程中气孔的形成机制较为复杂,对其产生原因及影响规律还有待进一步深入研究。

### 3.4 力学性能

为了验证激光-钨极氩弧双面焊接头的使用性能,选取完全熔透且成形较好的双面焊和激光焊接头进行拉伸实验。利用型号为 INSTRON-5569 的万能拉伸试验机进行抗拉强度实验。拉伸试样采用标准光滑试样,实验结果取 3 个试样的平均值,如图 7 所示。图 8 为拉伸试样的断裂位置。

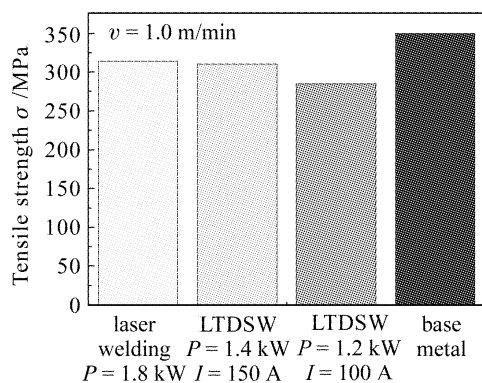


图 7 接头抗拉强度的比较  
Fig. 7 Tensile strength of different samples

激光-钨极氩弧双面焊的抗拉强度达到了 310 MPa,与激光焊的强度相当,约为母材强度的 88%。

从拉伸试样的宏观断口可以看出,激光-钨极氩弧双面焊和激光焊接头断裂多发生在焊缝中部,断口表面粗糙不平,颜色灰暗;母材拉伸断口与受力方向约为  $45^\circ$ ,呈剪切型韧性断裂。

为了更好地认识激光-钨极氩弧双面焊的断裂机制,对断口形貌进行了扫描电镜(SEM)分析,如图 9 所示。可以看出,双面焊的断口具有部分脆性断裂的形貌特征(图 9(a)),它们是解理和塑坑组成的混合断口;而母材的断口有大量的塑坑组成(图 9(b)),呈塑性断裂的形貌特征。

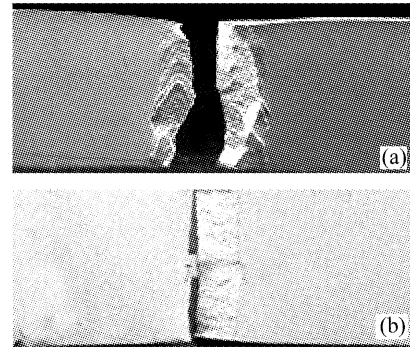


图 8 拉伸试样的宏观断口形貌  
(a) 接头试样的宏观断口形貌;(b) 母材试样的宏观断口形貌  
Fig. 8 Macro fracture appearance of tensile samples  
(a) tensile fracture of welding joint;  
(b) tensile fracture of base metal

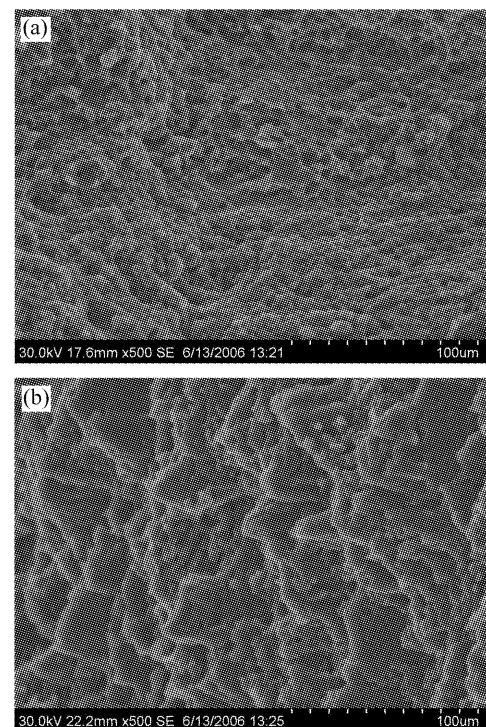


图 9 拉伸断口的扫描电镜形貌  
(a) 焊接接头典型断口形貌;(b) 母材断口形貌  
Fig. 9 Tensile fracture morphology of SEM

(a) fracture of welding joint; (b) fracture of base metal

## 4 结 论

通过对铝合金激光-钨极氩弧双面焊工艺特性

的探索,得出如下结论:

1) 采用激光-钨极氩弧双面焊工艺进行中厚铝合金板的焊接,可以显著增加接头熔深、改善焊缝成形,其接头抗拉强度为310 MPa,约母材强度的88%。

2) 激光-钨极氩弧双面焊的能量利用率得到了显著提高,其接头横截面积和熔化效率是单独激光或单独钨极氩弧两热源相加的两倍,实现了小功率激光器进行中厚板铝合金深熔焊的功能,是一种很有发展潜力的铝合金焊接工艺。

3) 与激光焊相比,激光-钨极氩弧双面焊的气孔数量有所下降。气孔分布位置主要受激光和电弧能量匹配关系的影响,气孔数量和大小主要取决于焊接热输入的大小,消除双面焊的气孔应从这两个方面考虑。

#### 参 考 文 献

- Xiao Rongshi, Zuo Tiechuan, Günter Ambrosy *et al.*. Investigation on current enhanced CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):359~362  
肖荣诗,左铁钊,Günter Ambrosy 等. 电流强化铝合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接[J]. 中国激光, 2004, **31**(3):359~362
- Zhang Zhaolin, Cheng Zhaogu, Luo Jiangtao *et al.*. Study of laser welding of aluminum alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(5):477~480  
张赵林,程兆谷,雒江涛 等. 激光焊接铝合金的研究[J]. 中国激光, 1998, **A25**(5):477~480
- Xu Guoliang, Cheng Zhaogu, Xia Jin'an *et al.*. Study of processing parameters of CO<sub>2</sub> laser welding on aluminum alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(2):183~186  
许国良,程兆谷,夏金安 等. CO<sub>2</sub> 激光焊接铝合金工艺的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(2):183~186
- Shigeki Fujinaga, Ryoji Ohashi, Seiji Katayama *et al.*. Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system [C]. *SPIE*, 2003, **4831**:301~306
- Toshihiko Ooie, Akihiro Utsuiki, Tetsuo Yano. Nd:YAG laser welding of aluminum alloy assisted by high-peak pulsed lasers [C]. *SPIE*, 2003, **4831**:336~340
- Y. M. Zhang, S. B. Zhang. Doubles-sided arc welding increases weld joint penetration [J]. *Welding Journal*, 1998, **77**(6):57~61
- Dong Honggang. Experimental research and numerical simulation of heat transfer and fluid flow during the PA-GTA double-sides arc welding process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004  
董红刚. PA-GTA 双面电弧焊接工艺研究及热过程数值模拟 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2004
- D. Radaj. Xiong Dijing, Zheng Zhaoyun, Shi Yaowu translated. Heat Effects of Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1997. 7  
D. 拉达伊 著,熊第京,郑朝云,史耀武 译. 焊接热效应[M]. 北京:机械工业出版社, 1997. 7