

文章编号: 0258-7025(2004)12-1523-04

# 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金

刘黎明, 王继锋, 宋 刚

(大连理工大学材料工程系, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 采用激光束与电弧复合焊接 AZ31B 镁合金, 研究了这种复合热源对焊接熔深、表面成型的影响, 探索了激光-电弧不同复合方式对焊接过程中电弧稳定性的影响。结果表明, 激光束与焊接电弧共同组成的复合热源在正向焊接镁合金时形成的焊接熔深, 比单独采用钨极氩弧焊(TIG)焊接增加了 1 倍左右, 同时复合热源焊接电弧稳定性也较钨极氩弧焊接提高了 1 倍以上, 是一种理想的镁合金焊接方法; 而当激光-电弧复合热源反向焊接时, 电弧稳定性较正向焊接进一步增大。对复合热源的电弧稳定性和激光吸引电弧的现象以及熔深增加的机理进行了讨论。

**关键词** 激光技术; 复合热源焊接; 镁合金; 稳定电弧

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A

## Hybrid Laser-Arc Welding of AZ31B Mg Alloy

LIU Li-ming, WANG Ji-feng, SONG Gang

(Department of Material Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** Hybrid laser-arc welding was used to join AZ31B Mg alloy. Weld penetration, surface formation were researched, and effect of arc stability was investigated in positive and negative welding directions during hybrid welding. The results showed that the weld penetration was increased by more than about one times and the weld stability increased by more than one times, compared the positive direction hybrid welding with gas tungsten arc welding only. It has been proved that the welding for magnesium is a perfect process. For negative direction hybrid welding, welding stable was further improved, but weld penetration was not increased. In addition, arc stability in hybrid welding and arc root location were discussed.

**Key words** laser technique; hybrid laser-arc welding; Mg alloy; arc stability

## 1 引 言

复合热源最早在 20 世纪 70 年代末提出, 主要因为当时激光器成本高, 且功率不高, 为了节省成本, 又能满足焊接深度, 英国帝国大学 M. Steen 首次提出利用电弧辅助激光进行焊接<sup>[1]</sup>。它的特点就是明显地增加了熔深, 增强了接头的桥接性, 提高了焊接速度, 降低了焊接成本。而钨极氩弧焊(TIG)由于焊接速度低, 热影响区大等问题, 难以实现高效焊接。作为一种新型焊接热源, 单独的激光焊接最大缺点就是对工件定位要求高, 能量利用率低, 这对于高热传导率的材料, 如铝、铜、镁更加明显, 因为表

面吸收率随着材料的热传导率增加而减小。因此最近在铝合金激光焊接领域, 为了改善焊接过程的稳定性和焊缝成型, 对这种复合工艺研究又再次兴起。

随着镁合金在工业应用中的普及, 同样遇到焊接方法的选择问题。根据复合热源的特点以及镁合金的特性, 将复合热源引入镁合金焊接中, 并对镁合金复合热源焊接过程中熔深和表面成型, 以及电弧的稳定性进行了研究。发现复合热源焊接镁合金可明显增加熔深, 增强焊接稳定性, 提高焊接速度, 是一种十分理想的镁合金焊接方法。

收稿日期: 2003-08-04; 收到修改稿日期: 2003-11-17

基金项目: 国家 863 计划(2002AA331160)和教育部优秀青年教师资助计划资助项目。

作者简介: 刘黎明(1967—), 男, 大连理工大学材料工程系工学博士、教授, 主要从事新材料焊接工艺及焊接过程数值模拟等方面的研究。E-mail: liulm@dlut.edu.cn

## 2 试验方法

试验采用尺寸为 300 mm×120 mm×2.5 mm 的 AZ31B 镁合金板材,表 1 为材料的化学成分。使用 LWS-500YAG 激光器和 YE-300WX 的钨极焊机进行激光-电弧复合焊接镁合金试验,焊接装置如图 1 所示。焊接参数如表 2 所列,其中  $D_{1a}$  表示电弧形成熔池中心距激光斑点的距离。进行复合热源正向焊接,利用电弧在前面进行表层熔化工件,以增加工件对激光的吸收率,达到有效的焊接目的。

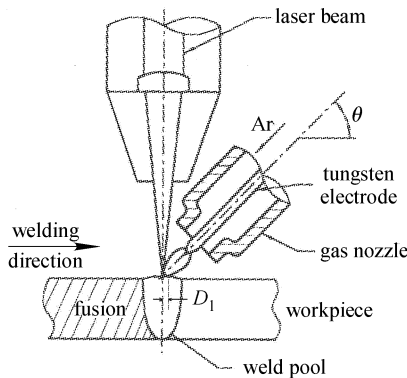


图 1 复合热源原理图

Fig. 1 Hybrid laser-TIG welding

表 1 AZ31B 化学成分 (%)

Table 1 Chemical components of base metal

Al	Zn	Mn	Si	Mg
3.00	0.90	0.31	0.02	Bal.

表 2 复合热源焊接参数

Table 2 Hybrid laser-TIG welding parameters

Laser average output power	400 W
Arc current	100 A
Focal point	2 mm below metal surface
Welding speed	1100 m/min
$\theta$	45°
$D_{1a}$	2 mm

## 3 试验结果与分析

### 3.1 熔深对比

图 2 为采用激光焊、钨极氩弧焊、复合热源三种方法焊接同一镁合金板材所得到的焊缝宏观断面图,其中复合热源中激光束及钨极氩弧焊电弧能量与两种热源单独焊接时相同。由于镁合金对激光的吸收率很低,所以单独使用激光束焊接镁合金时发现熔深很小,仅 0.4 mm 左右;钨极氩弧焊焊接时熔

深较大,约 1~1.5 mm 左右,但电弧的能量比较分散,焊接接头明显宽大;而对于激光-电弧复合热源焊接的焊缝,可以看出熔深明显增大,比两种热源单独焊接时形成的熔深简单相加还要大,是单独电弧的 2 倍左右。这一现象表明两种热源之间存在一定耦合作用,使得在相互作用中提高了整体的有效能量。镁合金对激光吸收率很低,但随着材料表面温度的升高而升高,在熔化状态下更高。当采用复合热源正向焊接时,由于钨极氩弧焊电弧在前,先熔化了金属表层,增加了金属对激光的吸收率,激光的能量得到了充分的利用,显著增加了焊缝熔深。

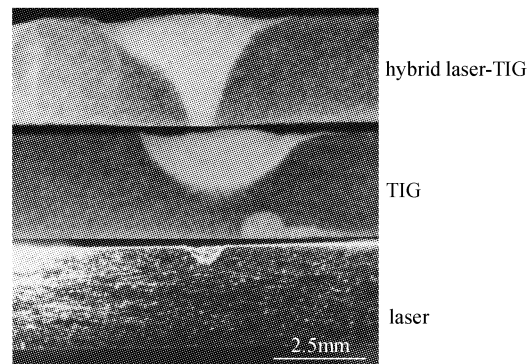


图 2 熔深对比

Fig. 2 Penetration comparison

$P_{\text{laser}} = 400 \text{ W}; I_{\text{arc}} = 100 \text{ A}; V = 1100 \text{ m/min}$

### 3.2 电弧稳定性

采用表 2 的规范进行钨极氩弧焊和复合热源焊接镁合金 AZ31B 的对比实验,焊缝表面形貌见图 3。发现在较高焊接速度(1100 mm/min)下,采用钨极氩弧焊焊接镁合金时电弧不稳定,会发生滞留、跳跃和漂移的现象,造成接头宽窄不均,焊缝不连续等缺陷,并且随着焊接速度的增加,上述现象更加明显,这将明显影响焊接接头的质量和成型。而在镁合金复合热源焊接过程中,由于激光束的作用钨极氩弧焊电弧被紧紧吸引在激光的作用点上,电弧稳定地燃烧,不发生漂移,电弧刚性很好,从图 3 中可以看出此时焊缝成型均匀、连续且比较光滑。复合热源焊接过程中电弧的稳定性变化主要是由于激光光束作用在工件上产生金属蒸气,在焊接电弧的作用下金属蒸气被电离,形成金属等离子体,所产生的带电粒子充当了钨极氩弧焊电弧的载流子,使得电弧的电阻率显著下降,有利于电弧电流的传输,增加了电弧燃烧的稳定性。

图 4 给出了电弧在钨极氩弧焊单独焊接和复合热源焊接时稳定燃烧区间的实测值。同样的电流,

复合热源稳定燃烧的最大速度比单独电弧提高了 1 倍以上。在电流为 60 A 时,钨极氩弧焊电弧单独焊接不稳定速度发生在 1000 mm/min,而复合热源达到了 2500 mm/min。

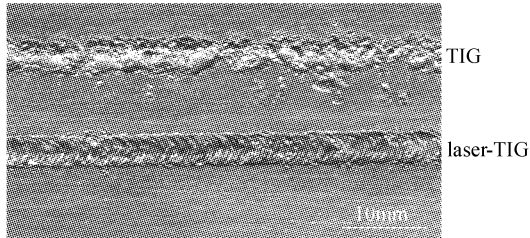


图 3 表面成型对比

Fig. 3 Weld surface comparison

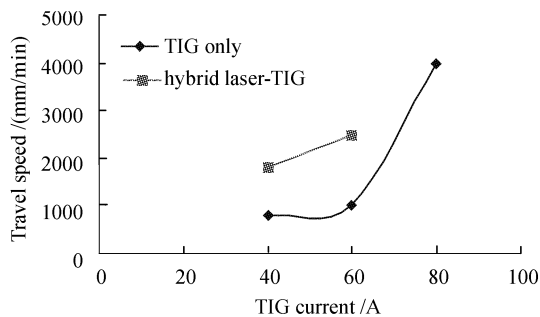


图 4 临界稳定速度

Fig. 4 Critical stable travel speed

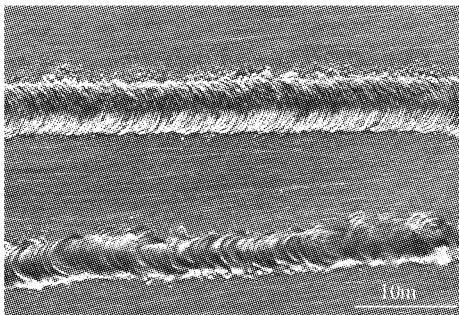


图 5 正反方向表面成型(上:反;下:正)

Fig. 5 Positive and negative direction weld surface  
(top: negative; bottom: positive)

### 3.3 复合热源焊接方向

图 5 示出了复合热源正反方向(沿焊接方向,电弧在前为正,激光在前为反)焊接表面特征。

为了对比,让两个热源的作用点重合进行焊接(而图 3 中复合焊接时两热源作用点距离为 2 mm)。从图 5 可以看出,反向焊接焊缝笔直、光滑、均匀连续、接头较宽,且这样的成型对参数不敏感。而正向焊接中焊缝表面存在一定程度不均匀性。图 6 给出了这两种焊接方法的宏观断面图,正向复合

热源的焊缝完全熔透,而反向焊接时熔深只有正向的 45%。因此在利用复合热源进行深熔焊时,应采用正向焊接以达到最大的熔深。

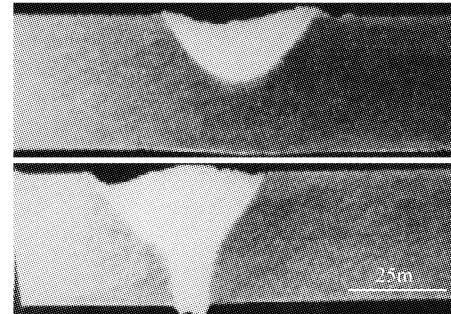


图 6 正反方向熔深(上:反;下:正)

Fig. 6 Positive and negative direction penetration  
(top: negative; bottom: positive)

## 4 讨论

### 4.1 电弧稳定性

M. Steen 采用 CO<sub>2</sub> 激光对低碳钢进行了焊接<sup>[1]</sup>,指出加入激光后电弧电流和电压不再波动,并且当电流较大( $I=100$  A),而焊接速度较小(22.5 mm/s)时,电弧电流增加到了 110 A,同时电压从 15 V 降到 12 V,并在新状态下保持稳定。对于电流的升高,作者认为,YAG 激光器与镁合金相互作用时在激光作用点上方会产生金属蒸气,高温焊接电弧立即将金属蒸气电离,形成了大量等离子体区,从而增加了电弧区域的电导率,使得电流升高,电弧稳定燃烧;对于在新电流值下弧压的降低,作者认为,可能与最小电压原理自发作用有关。本试验采用 YAG 激光焊接镁合金,电流 100 A,焊接速度 1000 mm/min (约 17 mm/s),焊接过程中发现,在加激光后电弧稳定燃烧,但电流保持不变。对于两者的差别,可能与两种激光产生等离子体的多少有关,研究表明 CO<sub>2</sub> 激光产生的等离子体明显多于 YAG 激光<sup>[2]</sup>,等离子体的多少,直接影响了电阻率的大小。

### 4.2 激光吸引电弧

试验发现在复合热源焊接过程中,钨极氩弧焊电弧被吸引到激光在工件的作用点处。这是因为电弧行径遵守最小电压原理,而激光作用于工件上时将产生金属蒸气。金属蒸气电离能较焊接保护气体低,在电弧热的作用下金属蒸气电离形成带电粒子(光致等离子体),增加了激光作用点处的电导率,也就降低了电弧经过该路径时的电压。由 Spitzer 给出了激光致等离子体电阻率公式<sup>[3]</sup>

$$\eta = \frac{\pi e^2 m^{1/2}}{(4\pi \epsilon_0)^2 (k_B T_e)^{3/2}} \ln \Lambda (\Omega \cdot m)$$

其中  $e$  为电子电荷,  $m$  为电子质量,  $k_B$  为玻尔兹曼常数, 而库仑对数  $\ln \Lambda$  对于精度要求不高的计算统一取 10,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ ,  $T_e$  为电子的温度(单位 K)。所以就有如下的比值

$$\frac{\eta_{20\text{ K}}}{\eta_{20000\text{ K}}} = \left(\frac{20000}{300}\right)^{3/2} = 544$$

激光作用点处 20000 K 温度下的电阻率, 远小于室温(300 K)的电阻率, 所以电弧有明显偏转。

### 4.3 熔深增加机理

胡绳荪等<sup>[4]</sup>利用光谱法测定了钕玻璃激光、钨极氩弧焊和复合热源的电弧电子密度, 发现电弧强化激光焊接的机理, 在于电弧有效地稀释了激光等离子体的作用, 明显降低了激光等离子体对激光能量的吸收和反射, 提高了激光加工效率。在大功率 CO<sub>2</sub> 激光器下由于会产生大量等离子体, 这一作用表现得比较明显<sup>[5]</sup>, 而本试验采用的 500 W YAG 激光器, 由于功率小不能产生大量的等离子体, 所以这一作用较小。Steen<sup>[1]</sup>从理论上论证这可能与一部分电弧进入了激光产生内部小孔, 使得电弧由表面加工方式, 转变为深入金属内部的深熔加热方式, 从而增加了熔深。但由于试验条件所限, 上述研究未能证实。在复合热源焊接过程中激光吸收率的变化是非常重要的, 材料对激光吸收率随温度升高而增大, 金属对波长为  $\lambda$  激光的吸收率随温度变化的关系式<sup>[2]</sup>

$$A(\lambda) = A(20^\circ\text{C}) \times [1 + \beta(T - 20^\circ\text{C})]$$

其中  $\beta$  为常数。在室温下一般金属对激光的吸收率小于 10%, 当温度升高到近熔点时吸收率提高到

50%左右, 如果温度接近沸点, 吸收率高达 90%以上。因此, 在本试验条件下正向复合热源焊接时, 电弧在激光前面先行熔化金属表层, 可显著地增加金属对激光的吸收率, 从而有效地增加了熔深。而正向复合热源焊接时焊接熔深增加效果不明显。

## 5 结 论

1) 复合热源焊接镁合金增加焊缝熔深效果显著, 是同等焊接规范下钨极氩弧焊单独焊接熔深的 2 倍左右。

2) 复合热源焊接镁合金电弧的稳定性好, 复合热源电流稳定燃烧的最大速度比单独电弧提高了 1 倍以上。

3) 复合热源正向焊接的熔深大。反向焊接焊缝宽, 表面成型好, 但熔深仅为正向焊接的 45%。

## 参 考 文 献

- 1 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials [J]. *Appl. Phys.*, 1980, **51**(11):5636~5638
- 2 Wang Xuyue. *Advanced Laser Process Technology* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995. 18  
王续跃. 先进激光加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 18
- 3 Chen, F. Francis. *Introduction to Plasma Physics* [R]. New York: Plenum Press, 1974. 160
- 4 Hu Shengsun, Zhang Shaobin, Zhao Jiarui *et al.*. Arc augmented laser welding [J]. *Transactions of Welding*, 1993, **14**(3):159~163  
胡绳荪, 张绍彬, 赵家瑞 等. 电弧强化激光焊[J]. 焊接学报, 1993, **14**(3):159~163
- 5 Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu *et al.*. Study of plasma control in high-power CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2):174~178  
唐霞辉, 朱海红, 朱国富 等. 高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接等离子体控制实验研究[J]. 中国激光, 1997, **A24**(2):174~178