

文章编号: 0258-7025(2005)06-0860-04

填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响

张盛海, 陈 铠, 肖荣诗, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 通过采用和不采用填充合金粉末的比较试验,研究了填充合金粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接功率阈值、焊缝成形和焊接过程稳定性的影响。实验表明,合金粉末的加入可以提高焊接过程中激光能量的有效利用率;激光深熔焊接时的临界功率密度明显降低,合金粉末还可以减弱等离子体在高度方向上的膨胀跳动,使等离子体在工件表面能维持跳动幅度的相对稳定,有利于获得较为稳定的焊接过程和理想的焊缝成形,并通过试验,获得了焊缝饱满,有一定余高和鱼鳞纹光滑的焊缝。

关键词 激光技术; 铝合金; 合金粉末; CO₂ 激光焊接; 光致等离子体; 功率密度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Influence of Metal Powder on High Power CO₂ Laser Welding of Aluminum Alloy

ZHANG Sheng-hai, CHEN Kai, XIAO Rong-shi, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract The influences of the filler metal powder on the intensity threshold, weld formation and process stability have been studied during high power CO₂ laser welding of aluminum alloy through the comparison between welding with and without metal powder. The experiment results demonstrate that the addition of the metal powder enhances the energy coupling efficiency during laser welding and reduces the power density threshold which has been validated by the testing data of Laserscope UFF 100. The power density threshold of A2219 can be reduce to about 50%. Meanwhile, the pictures collected by the high speed camera indicate that the addition of the metal powder weakens the fluctuation of the laser-induced plasma and keeps the plasma stabilizing above the workpiece. So a stable welding process and well-formed weld can be obtained in a relatively easy way.

Key words laser technique; aluminum alloy; metal powder; CO₂ laser welding; laser-induced plasma; power density

1 引 言

由于铝合金激光焊接的重要意义和其中存在的一些难点,它一直是国内外研究者竞相研究的一个热点^[1,2]。填充材料能改善焊缝的冶金性能,控制焊接裂纹,提高焊接接头的质量,国内外对填充焊丝的激光焊接技术进行了大量研究,并实现了生产应用,如德国的“空中客车”飞机的机翼和隔板 T 型接头的激光焊接^[3~6]。填充粉末材料的激光焊接技术不仅利用了填充材料的优点,还可以突破填充焊丝的诸如顶丝、对送丝机构精度要求高等一些局限,已经成为激光焊接技术的一个新的发展方向^[7,8]。但

是,合金粉末的加入影响激光与材料的相互作用,这方面的研究还鲜有报道。本文结合铝合金的高功率 CO₂ 激光粉末焊接过程就填充粉末对高功率 CO₂ 激光焊接铝合金的影响进行了实验研究。

2 实验条件

2.1 实验材料及表面处理

实验采用 A2219 铝合金板材,试样尺寸为 100 mm×50 mm×2 mm,实验前试样表面采用化学处理方法除去表面氧化膜。化学处理是在 70 ℃ 的 8% NaOH 溶液里浸泡 3 min 后,在 30% 的

收稿日期: 2004-09-20; 收到修改稿日期: 2004-11-02

基金项目: 国家 863 计划(2001AA337030)、北京市自然科学基金(3032008)和北京市教育科技发展计划(KM200410005014)资助项目。

作者简介: 张盛海(1979—),男,北京工业大学硕士研究生,主要从事激光材料加工方面的研究。

E-mail: zhang5327@163.com

HNO₃ 溶液中浸泡直到表面恢复金属亮色,然后清水冲洗、晾干。合金粉末材料是 M52C-NS (AlSi12),颗粒尺寸为 40~150 μm。材料化学成分(质量分数)如表 1 所示。

表 1 实验材料及化学成分
Table 1 Chemical composition

	Base material A2219	Filler powder AlSi12
Si	0.2	12
Fe	0.3	—
Cu	5.8~6.8	—
Mn	0.2~0.4	—
Mg	0.02	—
Zn	0.10	—
V	0.25	—
Ti	0.15	—
Al	Bal	Bal

2.2 实验装置及设备

实验装置如图 1 所示。使用的设备是 RofinSinar 公司生产的扩散型(Slab)CO₂ 激光器,光束直径 ϕ 为 17 mm,模式为 TEM₀₀,光束质量参量 $K \geq 0.95$, $K_f = 3.7$ (mm · mrad),最大输出功率 P 为 3500 W,采用焦距 f 为 300 mm 的铜抛物镜聚焦,焦斑直径 D 为 268.4 μm。实验时配合使用北京工业大学激光工程研究院研制的 PFL-1A 型激光加工送粉器和新型双层送粉喷嘴;光束质量采用德国 Laserscope UFF 100 光束诊断仪测量;等离子体的观察采用日本 Ultima 1024 16kc 型高速摄像机,分辨率为 1024×512,速率为 16000 f/s;焊缝熔宽和截面积采用 Olycia. m3 专业金相图像分析系统分析测量。喷嘴的出粉头内径 1.2 mm,拘束辅助气导管内径 6 mm,最外层保护气导管内径 10 mm,合金粉末的载气、喷嘴粉末汇聚气及外层保护气均采用氦气。

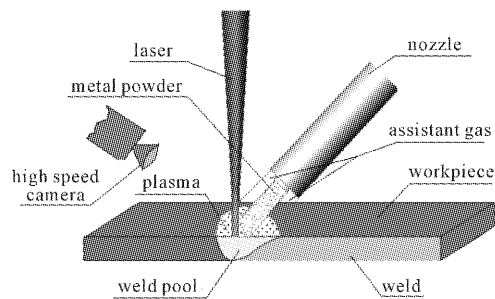


图 1 激光焊接实验示意图

Fig. 1 Experimental setup of laser welding

3 实验结果及分析

3.1 合金粉末对激光焊接功率阈值的影响

在激光功率 $P = 2500$ W,焊接速度 $V = 7$ m/min,采用或不采用填充合金粉末时,熔深与离焦量的关系如图 2 所示,采用填充粉末时的送粉量 $Q = 7$ g/min。

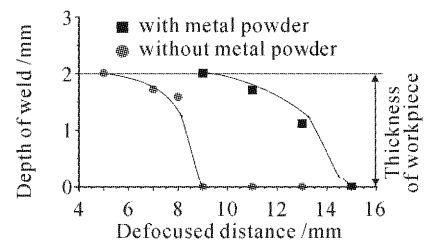


图 2 离焦量和熔深的关系

Fig. 2 Relation of defocused distance and the depth of weld

从图 2 可以看出,随着离焦量的变大,未填粉时焊接过程很快变成热导焊。而在相同的条件下,填充合金粉末后,焊接过程转变为热导焊的离焦量明显增大,即激光功率密度降低。通过光束诊断仪分别测得在实验条件下焊接过程由深熔焊变成热导焊这一阈值点的光斑半径和功率密度如表 2 所示。

表 2 填粉对激光焊接功率阈值的影响

Table 2 Effect of filler metal powder on power density threshold

Item	Without metal powder	With metal powder	Reduction percentage
Defocused distance	+8 mm	+13 mm	—
Spot radius	0.253 mm	0.364 mm	—
Max. power density	2.89×10^6 W/cm ²	1.49×10^6 W/cm ²	48.9%
Mean power density	1.17×10^6 W/cm ²	5.19×10^5 W/cm ²	55.8%

由表 2 可以看出,CO₂ 激光焊接铝合金时填充合金粉末可以明显降低临界激光功率密度。这一方面是在焊接过程中,激光与粉末质点状态作用的传

导情况和激光与板材作用的二维甚至三维热传导相比,能量的损失要小得多,另一方面是因为合金粉末颗粒状与板材的表面形态差异,它对激光能量的

吸收率又要高得多^[9]。因此,在激光作用下,粉末材料更容易气化和离化,形成金属蒸气和等离子体,而等离子体可以改善激光与工件的能量耦合^[10],对工件和粉末材料还有预热作用,使工件表面对激光的吸收增强,这样更有利于气化界面的形成,从而使激光深熔焊接的临界功率密度降低。实验数据表明填充合金粉末时的激光深熔焊接的功率阈值比不填粉末时降低了 50%左右。

3.2 合金粉末对焊缝成形的影响

在焊接速度 $V = 7.5 \text{ m/min}$, 离焦量 $\Delta f = +5 \text{ mm}$, 送粉量 $Q = 7 \text{ g/min}$ 时,在完全焊透的情况下,采用和不采用填充合金粉末时焊缝熔宽和截面积随激光功率变化如图 3(a), (b) 所示。

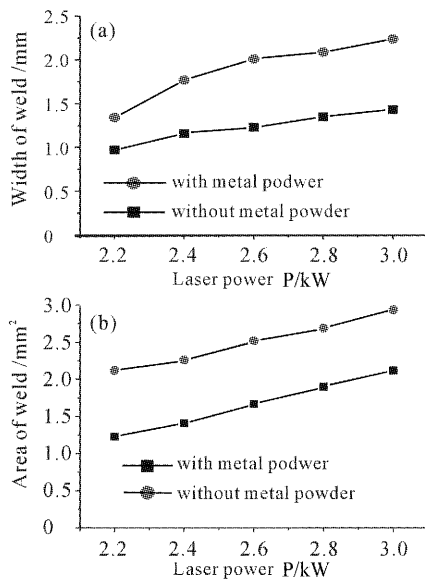


图 3 填充粉末对焊缝熔宽(a)和截面(b)的影响

Fig. 3 Effect of filler metal powder on the width (a) and area (b) of weld

在功率 $P = 2800 \text{ W}$, $V = 7.5 \text{ m/min}$, 离焦量 $\Delta f = +5 \text{ mm}$ 时,分别取填粉时和不填粉时的焊接过程稳定区域的焊缝截面比较,如图 4 所示。其中,送粉量 $Q = 7 \text{ g/min}$ 。

由图 3 可知,填充合金粉末之后,并没有因合金粉末的加入消耗激光能量,使焊缝熔宽和焊缝横截

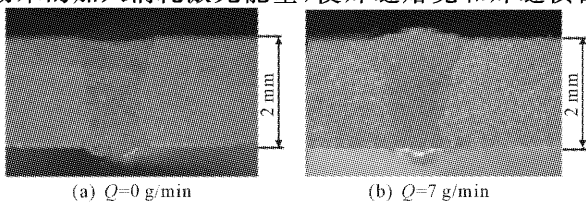


图 4 不采用(a)和采用(b)填充粉末时焊缝横截面的比较
Fig. 4 Section of weld without and with metal powder

面积减小,二者反而都相应增加,可见熔池获得的能量增加了。这是因为合金粉末的加入改变了对激光能量的吸收方式。在激光的作用下,合金粉末不仅可以吸收激光的能量,同时,经材料表面反射的激光进入粉末束后还会被粉末颗粒之间相互反射吸收,或是反射回材料表面。因此粉末束像一个能量陷阱俘获激光和等离子体的能量,使激光能量的有效利用率大大提高。

从图 3(a) 还可以看出,随着激光功率的上升,不填粉时熔宽增加的趋势平坦;而填粉时,熔宽的增加趋势明显,从图 4 可以看到,填粉后的焊缝饱满,有一定的余高,无明显裂纹和气孔,且焊缝截面形状更加理想。

3.3 合金粉末对焊接过程稳定性的影响

比较在激光功率 $P = 2800 \text{ W}$, 焊接速度 $V = 7.5 \text{ m/min}$, 离焦量 $\Delta f = +5 \text{ mm}$, 填粉和不填粉时的焊接过程。发现在该参量下,不填充合金粉末时的焊缝鱼鳞纹起伏较大,还容易出现不稳定性孔洞,如图 5(b) 所示。而填充合金粉末后 ($Q = 7 \text{ g/min}$), 焊缝鱼鳞纹致密均匀,表面过渡光滑,如图 5(a) 所示。

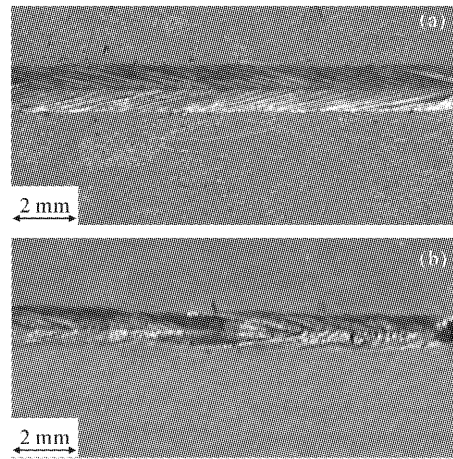


图 5 采用(a)和未采用(b)填充粉末时焊缝表面的比较
Fig. 5 Surface of weld with (a) and without (b) metal powder

在功率 $P = 2800 \text{ W}$, 焊接速度 $V = 8 \text{ m/min}$, 离焦量 $\Delta f = +5 \text{ mm}$, 送粉量 $Q = 7 \text{ g/min}$, 保护气体流量 $q = 18 \text{ L/min}$ 的试验参量下,通过高速摄像观察光致等离子体现象,如图 6 所示。图 6 是分别在相同的试验条件下,填粉和没填粉时的焊接过程中最稳定的 0.1 s 内拍摄的 200 张图片中等时间间隔取出的 8 张等离子体图片。通过两组图片比较,可

以发现,填充合金粉末时的等离子体在高度方向上的起伏波动较不填充粉末时明显减小。

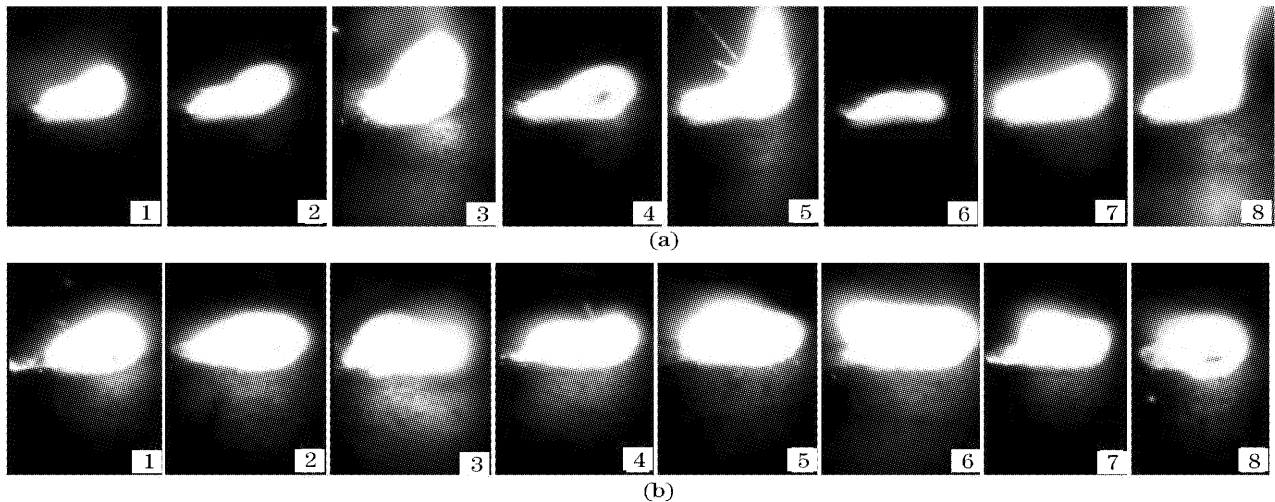


图 6 等离子体的稳定性。未填粉(a)和填粉(b)焊接时的等离子体照片(时间间隔 $\Delta t=0.004$ s),

Fig. 6 Stability of plasma. Pictures of plasma during welding without (a) and with (b) metal powder (time interval $\Delta t=0.004$ s)

在焊接过程中,合金粉末对等离子体的作用和填充焊丝时一样^[3],合金粉末的加热和熔化都需要能量,这些能量部分是从等离子体中获得的,而等离子体维持的条件是其吸收激光的能量足以补偿因为热传导、热辐射和对流引起的能量损失。等离子体形成吸收波传播的距离是由这个条件决定的。在激光功率密度不变的情况下,为了补偿合金粉末吸收等离子体的部分能量,等离子体要继续维持就只有降低其吸收波的传播距离,这也是图 6(b)中等离子体在高度方向的跳动比图 6(a)中小的原因。因此,填充合金粉末比不填充粉末时更容易使等离子体在工件表面获得跳动幅度的相对稳定性。

可见,通过填充合金粉末,可以提高等离子体的稳定性,使焊接过程更趋稳定。

4 结 论

合金粉末的加入可降低激光焊接对激光能量和功率密度的要求,对于 A2219 铝合金可以使其功率密度阈值降低 50% 左右;使等离子体变得更加容易控制,有利于获得较为稳定的焊接过程。合金粉末的加入可以提高焊接时对激光能量的吸收和有效利用率,改善焊缝成形。通过试验,获得焊缝饱满,鱼鳞纹光滑,有一定余高,无明显裂纹和气孔的焊缝。

参 考 文 献

- 1 H. Sakamoto, K. Shibata, F. Dausinger *et al.*. Laser welding of different aluminum alloys[C]. *Laser Institute of America*, 1993, **75**: 523~528
- 2 Yao Jianhua, Chen Zhijun, Sun Dongyue *et al.*. Technique and performance of laser welding diamond core drill bit [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 657~660
姚建华, 陈智君, 孙东跃等. 激光焊接金刚石薄壁钻工艺与性能 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 657~660
- 3 Zuo Tie-chuan *et al.*. *Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002
左铁钊等. *高强铝合金的激光加工* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 4 C. A. Binroth, T. C. Zuo, G. Sepold. CO₂-laser welding with filler materials of high strength aluminium alloy[C]. *Proc. 2nd Int. Power beam Technology Conference*, 1990. 119~127
- 5 M. Kutsuna, J. Suzuki, S. Kimura *et al.*. CO₂ laser welding of A2219, A5083 and A6063 aluminium alloys[J]. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*, 1993, **31**(2): 126~135
- 6 T. Starzer, R. Ebner, W. Glatz *et al.*. Laser welding of aluminium alloys with continuous powder and wire feed[C]. *Laser Applications in the Automotive Industries*, 1993. 131
- 7 Chen Kai, Wang Zhiyong, Xiao Rongshi *et al.*. Powder welding technique of Al alloy with high power slab CO₂ laser[J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(5): 45~48
陈 铠, 王智勇, 肖荣诗等. 铝合金的大功率扩散型 CO₂ 激光粉末焊接技术[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(5): 45~48
- 8 J. Arnold, R. Volz. Laser powder technology for cladding and welding[J]. *J. Thermal Spray Technol.*, 1999, **8**(2): 243~248
- 9 J. A. Folkes. Developments in laser surface modification and coating[J]. *Surface and Coating Technol.*, 1994, **63**(2): 65~71
- 10 Phiroze Kapadia, Robert Ducharme, John Dowden. The theory of radiative transfer in the plasma of the keyhole in penetration laser welding[C]. *Laser Institute of America*, 1992, **74**: 53~63