

文章编号: 0258-7025(2004)03-0359-04

# 电流强化铝合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接

肖荣诗<sup>1</sup>, 左铁钊<sup>1</sup>, Günter Ambrosy<sup>2</sup>, Helmut Hügel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100022

<sup>2</sup> Institut für Strahlwerkzeuge, University of Stuttgart, 70569 Stuttgart, Germany

**摘要** 介绍了一种利用电流的磁流体动力学效应强化铝合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接的方法及初步试验结果。在激光焊接过程中,通过一个布置于熔池前方的附加电极向熔池提供电流,该电流在熔池中产生磁场和电磁力,致使熔池运动状态及相应的热交换条件发生改变,从而提高激光能量的有效利用率和加工效率、控制焊缝成型。利用该方法,焊缝深度最高增加约 32%,面积增加约 20%,而焊缝宽度减小约 28%。

**关键词** 激光技术;激光焊接;电流强化;磁流体动力学效应

中图分类号 TG 456.7 文献标识码 A

## Investigation on Current Enhanced CO<sub>2</sub> Laser Welding of Aluminum

XIAO Rong-shi<sup>1</sup>, ZUO Tie-chuan<sup>1</sup>, Günter Ambrosy<sup>2</sup>, Helmut Hügel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

<sup>2</sup> Institut für Strahlwerkzeuge, University of Stuttgart, 70569 Stuttgart, Germany

**Abstract** By using of the magnetohydrodynamic effect of electrical current, a new aspect of CO<sub>2</sub> laser beam welding of aluminum with an electrical current technique was reported. A DC power source was used to supply current to the weld pool. One pole of the source was connected with a tungsten electrode which was set in front of the weld pool and the other with the work piece in the rear of the weld pool. In so doing a closed electrical circuit was built. When the electrical current flows in the weld pool, a magnetic field is induced and electromagnetic forces are generated in it, which change the fluid flow and the heat exchange condition of the weld pool. So far the experimental results have shown that the weld depth and area increase and the weld seam becomes more slender when the current is up to a certain value, e. g. 200 A. In the experimental conditions, the weld depth increases maximum nearly by 32% and the weld area nearly by 20%, but the weld width decreases maximum nearly by 28%.

**Key words** laser technique; laser welding; current enhanced; magnetohydrodynamic effect

## 1 引 言

由于激光焊接所具有的技术和经济上的优势,早在 20 世纪 80 年代,铝合金激光焊接的研究就引起了关注<sup>[1~3]</sup>。但是与钢铁材料相比,铝合金激光焊接的广泛应用还有许多问题需要解决。铝合金激光焊接的困难主要表现在以下几个方面<sup>[3~6]</sup>: 1) 由于铝合金对激光的高反射和自身的高导热性,铝合

金激光焊接要求很高的激光功率密度,因此对激光器输出功率和光束质量要求很高; 2) 铝的电离能低,激光焊接过程中光致等离子体易于过热和扩展,焊接过程稳定性差; 3) 铝合金属于典型的共晶型合金,在激光焊接快速凝固条件下更容易产生热裂纹; 4) 激光焊接熔池深宽比大,熔池冷却凝固速度快,气泡不易上浮析出,容易产生气孔; 5) 铝合金熔点低,熔化和气化温度区间大,铝合金激光焊接熔池较

收稿日期: 2002-08-30; 收到修改稿日期: 2003-02-13

基金项目: 国家 863 计划(2001AA337030)、北京市自然科学基金(3022002)和德国教研部德中科技合作(CHN00/391)资助项目。

作者简介: 肖荣诗(1965—),男,北京工业大学教授,主要从事激光与材料相互作用、激光加工新技术、新方法、新工艺的研究。E-mail: xiaorongs@bjut.edu.cn

钢铁材料大得多,而液态铝合金流动性良好、表面张力小,激光焊接过程中熔池剧烈振荡,容易形成咬边、焊缝成型不连续等缺陷,严重时造成小孔突然闭合而在焊缝中形成尺寸较大的孔洞(形态类似于缩孔),或者在小孔闭合前向外喷发的等离子体将液态金属吹出熔池而在焊缝表面形成空洞,等等。

大功率  $\text{CO}_2$  激光器光束质量的改善和短波长 YAG 激光器输出功率的提高大大改善了铝合金的激光焊接性<sup>[3,6]</sup>;填充材料的采用有效地防止了焊接热裂纹,提高了接头强度<sup>[3,6,7]</sup>;双光束激光焊接技术通过扩大激光焊接小孔的开口,提高了焊接过程的稳定性,改善了焊缝成型<sup>[8]</sup>。

最近有人发现在  $\text{CO}_2$  激光焊接熔池中存在幅度为几安培的固有电流,在焊接区施加一定的外磁场可以影响熔池的流动状态。因此,采用某种形式的外磁场有可能改善铝合金激光焊接过程的稳定性和焊缝质量<sup>[9,10]</sup>。

## 2 实验方法与条件

实验装置如图 1 所示。在激光焊接过程中通过一个附加的钨电极向焊接熔池提供电流。通过一个弹簧机构使钨电极在熔池的前方始终与工件保持滑动接触,其与焊接熔池的相对位置由到激光束轴线的距离“ $D$ ”表示。直流电源为具有陡降外特性的焊接电源,最大输出电流为 250 A,电源的一极与钨极相连,另一极在熔池的后方与工件相连,由此形成电流回路。实验所用钨极直径为 2.4 mm,前端磨成半球形,钨极与工件的夹角为  $30^\circ$ 。实验所用设备为德国通快(Trumpf)公司生产的 TLF5000 快速轴流  $\text{CO}_2$  激光器和 TLC100 五轴联动激光加工机,聚集系统的聚集数为 3.7,聚焦光斑直径 0.3 mm,

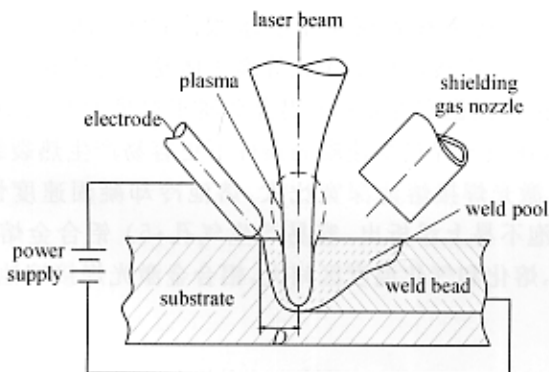


图 1 电流强化激光焊接示意图

Fig. 1 Schema of the experimental setup for laser beam

with an external current

聚焦光斑直径采用 Prometec UFF100 光束光斑质量诊断仪测量。实验时激光功率固定为 3.7 kW,焦点位于工件表面上方 1 mm。为了控制光致等离子体及保护焊接熔池,采用一个内径 6 mm 并与钨电极相对布置的铜管供应氦气,氦气流量为 25 L/min。

实验材料为 99.5% 的工业纯铝,试样尺寸为 50 mm×200 mm×5 mm。实验前采用丙酮对试样表面进行清洗,采用在平板上扫描焊接的方式进行。焊后对试样进行切片、研磨、抛光,并采用 4% 的 NaOH 水溶液浸蚀。然后采用 Olimpase 光学显微镜和 CCD 相机拍摄焊缝截面形貌,焊缝的宽度、深度和面积采用 Optimas 软件测量。

## 3 实验结果

### 3.1 焊缝成型

当钨电极接电源的正极,钨电极相对于激光束轴线的距离  $D=3$  mm,焊接速度分别 2 m/min 和 3 m/min 时,采用外加电流与无外加电流时焊缝成型的比较如图 2 和图 3 所示。可见,采用外加电流对  $\text{CO}_2$  激光焊接焊缝成型具有明显的影响——焊缝宽度变窄、深度趋于增加、焊缝横截面成型趋于均匀一致,特别是在焊速较低时,外加电流的影响更加显著。例如,在本文实验条件下,当焊接速度  $V=2$

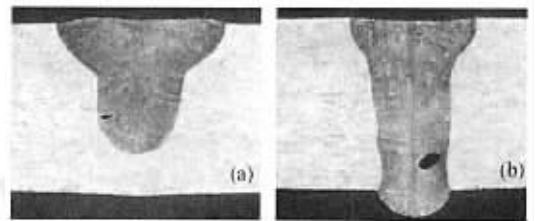


图 2 焊速为 2 m/min,  $D=3$  mm 时焊缝成型对比

(a) 无外加电流;(b) 采用 200 A 电流

Fig. 2 Comparison of the weld bead formation at a

weld speed of 2 m/min and  $D=3$  mm

(a) without current; (b) with a current of 200 A

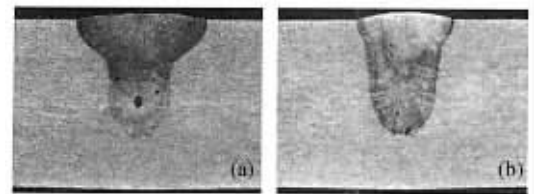


图 3 焊速为 3 m/min,  $D=3$  mm 时焊缝成型对比

(a) 无外加电流;(b) 采用 250 A 电流

Fig. 3 Comparison of the weld bead formation at a

weld speed of 3 m/min and  $D=3$  mm

(a) without current; (b) with a current of 250 A

m/min 时, 没有外加电流的常规激光焊接焊缝深度约为 3.8 mm, 宽度约为 4.7 mm; 采用 200 A 的辅助电流后, 5 mm 厚试板完全焊透, 焊缝宽度则减小至 3.4 mm 左右, 相当于焊接深度增加约 32%, 宽度减小约 28%, 深宽比增加 84%。

### 3.2 电流大小与电极位置的影响

当钨电极接电源的正极, 焊接速度为 2 m/min 时, 焊缝深度、宽度和面积随外加电流大小的变化如图 4 所示, 从中发现以下现象:

1) 焊缝宽度随着电流的增加而减小, 而焊缝深度和面积在电流较小时并无明显变化, 然而一旦电

流增加到某一值后, 焊缝深度和面积明显增大。当试板完全焊透后, 焊缝面积先随着电流的进一步增加而有所增加, 然后逐渐减小。这种趋势在  $D = 2$  mm 时表现得非常明显, 在本实验条件下, 当  $D = 2$  mm 时, 试板完全焊透的临界电流为 100 A, 焊缝面积在电流为 150 A 时达到最大值, 然后随着电流的进一步增大, 焊缝面积逐渐减小。当  $D = 3$  mm 时, 由于试板完全焊透的临界电流增加至 200 A, 而本实验所用的直流电源的最大输出电流只能达到 250 A, 焊缝面积随电流进一步增大而减小的趋势在本实验中不能验证。

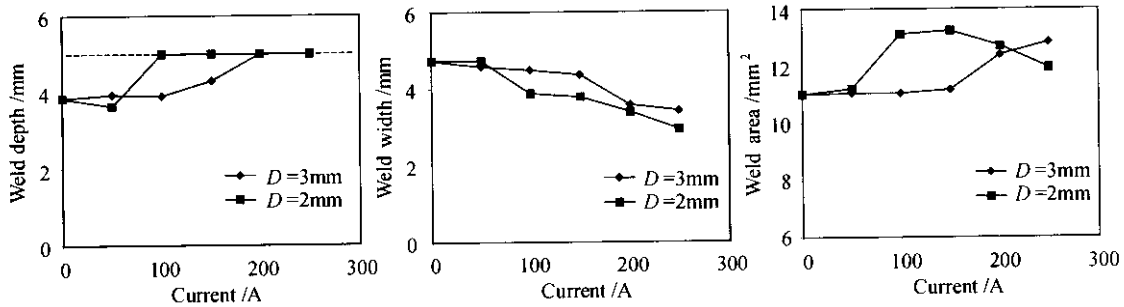


图 4 外加电流对焊缝形貌的影响 ( $V = 2$  m/min)

Fig. 4 Influence of the electric current on the weld bead profiles ( $V = 2$  m/min)

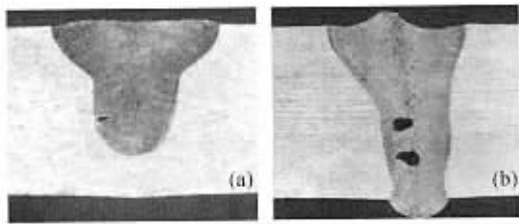


图 5 焊速为 2 m/min,  $D = 2$  mm 时焊缝成型对比

(a) 无外加电流; (b) 采用 100 A 电流

Fig. 5 Comparison of the weld bead formation at a weld speed of 2 m/min and  $D = 2$  mm

(a) without current; (b) with a current of 100 A

2) 电极的位置对实验结果有明显的影 响。电极距焊接熔池越近, 电流的影响越明显, 试板完全焊透所需施加的电流值减小。如前所述, 在本实验条件下, 当  $D = 3$  mm 时, 试板完全焊透的临界电流为 200 A, 而当  $D = 2$  mm 时, 临界电流降低至 100 A。当  $D = 3$  mm 时, 没有采用外加电流和采用 200 A 临界外加电流时焊缝成型对比如图 2 所示。当  $D = 2$  mm 时, 没有采用外加电流和采用 100 A 临界外加电流时焊缝成型对比如图 5 所示。

### 3.3 极性的影响

在焊接速度为 2 m/min,  $D = 3$  mm 时, 改变钨

电极的极性, 实验结果如图 6 所示。可见, 极性的改变对焊接结果没有影响。

## 4 分析与讨论

上述结果显示, 采用辅助电流对铝合金的激光焊接具有非常明显的影响。附加电流通过焊接熔池将产生电阻热, 我们可能自然而然地认为电流的影响是由于其热效应。然而, 本文实验所用铝合金为工业纯铝, 其导电性能良好, 在长度极为有限的焊接熔池内的电压降微乎其微, 因此附加电流的引入所带来的附加热输入完全可以忽略不计。此外, 从焊缝的成型来判断, 即使附加电流带来电阻热, 这种附加电阻热也只能使焊缝加宽, 不可能使其变窄。

我们认为附加电流对焊接结果的影响是由电流的磁流体动力学效应引起的。由电磁学的基本原理可知, 在两根平行的导线中, 通过同方向的电流时, 则产生相互吸引力。当电流在一个导体中流过时, 整个电流可以看成由许多平行的电流线组成, 这些电流线间也将产生相互吸引力。如果该导体是流体, 电磁吸引力的作用将使流体的截面收缩并在流体内产生压力。由于单位体积内的电磁力与电流密

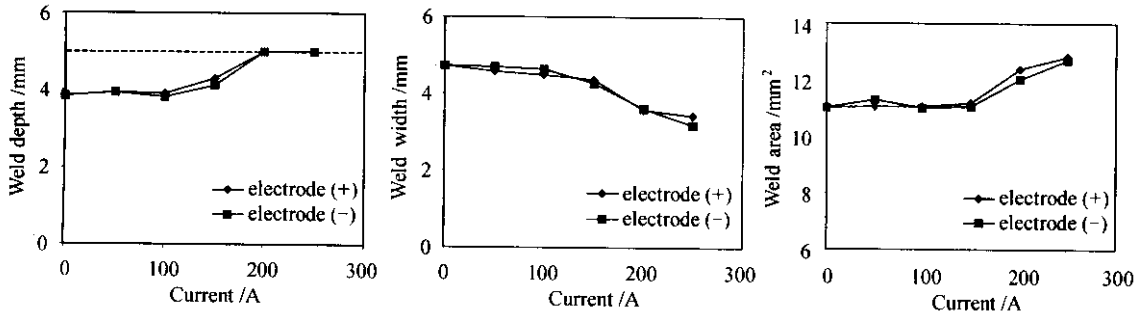


图6 钨电极极性的改变对焊缝形貌的影响 ( $V=2$  m/min,  $D=3$  mm)

Fig. 6 Influence of the polarity ( $V=2$  m/min,  $D=3$  mm)

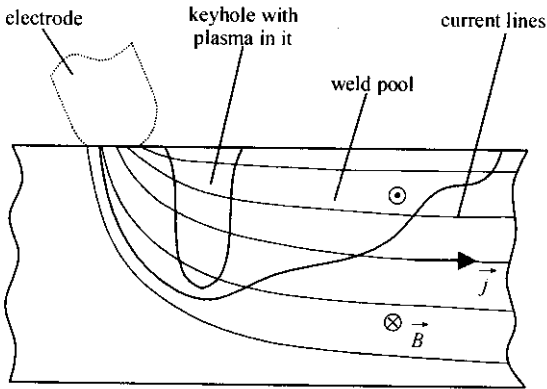


图7 熔池中电流密度分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the current density distribution in the weld pool

度的平方成正比,如果流体内的电流密度分布不均匀,那么将在流体内部产生压力差,驱使流体由高电流密度区向低电流密度区流动。例如,在电弧焊接时,无论极性如何,总是产生由焊条指向工件的电弧推力和等离子流,就是电流的磁流体动力学效应的一种具体表现。因此,当如图1所示向激光焊接熔池提供辅助电流时,由于电极与被焊工件(母材)体积的巨大差异,电流线从电极端部进入工件时将迅速发散,熔池内电流密度的分布极不均匀,即接近电极区域的电流密度远远高于熔池底部和后部,如图7所示。熔池内这种极不均匀的电流密度分布驱使小孔前沿熔化的高温金属快速向熔池底部流动,从而使焊缝宽度变窄,而深度增加,直到试板被完全焊透。当焊接深度增加时,由于小孔效应将有更多的激光能量被吸收,因此焊缝的面积随之增大。试板焊透后焊缝面积随电流的增加先升后降与试板被焊透的情况有关。在临界电流时,深熔小孔并未贯穿试板,依靠热传导将试板完全焊透。因此,当电流进一步增加时,小孔深度和焊缝面积还会进一步增加,

直至小孔完全贯穿试板。当深熔小孔完全贯穿试板后,部分激光能量将从试板背面的小孔开口处透出,焊缝面积随着电流的继续增加而减小。由于电流在熔池内产生的电磁力的分布及其大小只与熔池内电流密度的分布有关,而与电流的流向无关,因此当电极位置改变时,熔池内电流密度的分布也将随之改变,从而对焊接结果产生明显的影响,而电极极性的改变则没有影响。

### 参 考 文 献

- 1 G. Sepold, T. C. Zuo, Ch. Binroth. CO<sub>2</sub>-laser beam welding of aluminum alloys for transport systems [R]. IIW DOC. IV-539-90, June 1990
- 2 G. H. Chen, G. Roth, F. Maisenholder. Laser welding of aluminium-magnesium alloys [J]. *Laser-Materialbearbeitung*, 1993, 25(3):96~103 (in Germany)
- 3 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys [M]. Beijing: The Press of Defense Industry, 2002  
左铁钊等著. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社, 2002
- 4 Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Development of laser beam welding of high strength aluminum alloys [J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2):206~208  
肖荣诗,陈 铠,左铁钊. 高强度铝合金激光焊接新进展[J]. *应用激光*, 2002, 22(2):206~208
- 5 M. Vicanek, T. J. Colla, G. Simon. Hydrogen enrichment in laser beam welding of aluminium [J]. *J. Physics D: Appl. Phys.*, 1994, 27:2284~2290
- 6 F. Dausinger. Laser welding of aluminum alloys: from fundamental investigation to industrial application [C]. *SPIE*, 2000, 3888:367~379
- 7 Chen Kai, Wang Zhiyong, Xiao Rongshi *et al.*. Powder welding technique of Al alloy with high power slab CO<sub>2</sub> 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CO<sub>2</sub>激光粉末焊接技术[J]. *激光杂志*, 2000, 21(5):45~48
- 8 Takakumi Iwase, Hiroki Sakamoto, Kimihiro Shibata *et al.*. Dual focus technique for high-power Nd:YAG laser welding of aluminum alloys [C]. *SPIE*, 2000, 3888:348~358
- 9 M. Kern. Gas- und magnetofluidynamische Massnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualitaet beim Laserstrahlschweissen [D]. University of Stuttgart, Germany, 1999 (in Germany)
- 10 M. Kern, P. Berger, H. Hugel. Magneto-fluid dynamic control of seam quality in CO<sub>2</sub> laser beam welding [J]. *Welding Journal*, 2000, (3):72