

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0269-05

船用钢板大功率 CO₂ 激光深熔焊等离子体研究

李国华, 王广伟, 蔡 艳, 高志国, 吴毅雄

(上海交通大学焊接工程研究所激光制造实验室, 上海 200030)

摘要 焊接过程中产生的等离子体是激光深熔焊的固有现象,它通过对激光能量的吸收、折射、反射等降低到达小孔的激光能量密度,影响激光与工件相互作用。使用微距高速摄影系统,研究了大功率 CO₂ 激光焊接不同功率和不同侧吹气体流量下等离子体的形态和尺寸的变化规律。在相同条件下,激光功率越大,等离子体的尺寸越大,而且越不稳定,容易出现激光维持的燃烧(LSC)波,严重影响焊接过程的稳定性。而通过增加侧吹气体的流量,可以有效抑制 LSC 波的产生,并且减小等离子体的尺寸,增加焊缝熔深。

关键词 激光技术; CO₂ 激光焊; 等离子体; 激光维持的燃烧波

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Research on Plasma in High Power CO₂ Laser Welding of Ship Plate

LI Guo-hua, WANG Guang-wei, CAI Yan, GAO Zhi-guo, WU Yi-xiong

(Laser Processing Laboratory, Welding Engineering Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Plasma is produced in deep penetration laser welding. It influences the interaction between laser source and workpiece plate according to laser beam absorption, reflection as well as refraction etc. Based on micro-focus high speed photograph, dynamic behavior and size of plasma were studied in different laser power and different flow rate of side assist gas. It is discovered that the plasma is larger and more unstable with the increase of laser power density. And the whole process is more susceptible to LSC(Laser Supported Combustion), even resulting in welding discontinuity. By increasing the flow rate of side-assist gas, LSC is suppressed and the size of the plasma becomes smaller. Correspondingly, the penetration is slightly deeper with smaller plasma.

Key words laser technique; CO₂ laser welding; plasma; laser supported combustion

1 引言

激光焊接质量好、速度快、变形及残余应力小,加工能力强,随着激光器功率的增大和光束质量的不断改善,越来越受到船舶制造行业的青睐。德国的 Meyer 船厂已安装了多台 12 kW 的 CO₂ 激光器,用于不同长度船体材料的焊接^[1]。

当适当强度的激光照射到工件表面,材料会瞬间气化形成金属蒸气。随着激光的继续照射,金属蒸气被电离,产生激光等离子体。在等离子体产生以后,稀薄的等离子体有利于材料对激光的吸收。但是当等离子体浓度达到一定程度后,就会通过对激光能量的吸收、折射、反射等降低到达小孔的激光能量密度,影响激光与工件相互作用。

在大功率 CO₂ 激光焊接中,等离子体对熔池行为 and 激光功率与工件之间的相互作用的影响更为显著,因此许多研究者在这方面作了研究^[2,3]。本文通过微距高速摄影手段,在不同功率下对 20 mm 厚的船用高强钢板进行了焊接实验,研究了等离子体形态和尺寸的变化规律。通过改变侧吹气体 He 流量,系统地研究 12 kW 大功率 CO₂ 激光焊接下,侧吹气体流量对等离子体动态行为和等离子体尺寸的作用,以及对焊缝熔深的影响。

2 激光焊接实验和方法

采用快速轴流 CO₂ 激光器,激光焦距 357 mm,焊接试板是 20 mm 厚船用高强钢 AH36,采用激光

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(036105001)资助课题。

作者简介: 李国华(1978—),女,山东人,博士研究生,主要从事大功率激光焊接等离子体现象的研究。

E-mail: liguohua@sjtu.edu.cn

导师简介: 吴毅雄(1952—),男,上海人,主要从事现代化焊接技术和装备的研究。

在焊接试板上堆焊,无填充焊丝。试板在焊接前采用机械打磨方式去除表面防锈漆,且焊前经丙酮除去油污。实验装置如图 1 所示。

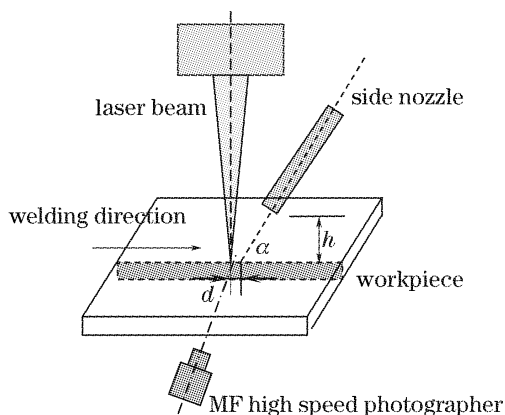


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental installation scheme

实验分为两组,第一组改变激光功率,从 7~15 kW,采用侧吹 30 L/min 纯 He 保护,喷嘴中心延长线与激光在工件上的入射点的间距 d 为 4 mm。第二组改变侧吹纯 He 气体流量,从 10~70 L/min,激光功率 12 kW,喷嘴中心延长线与激光在工件上的入射点的间距 d 为 0 mm。

两组实验的喷嘴中心到工件表面的距离 h 为 12 mm,喷嘴中心线与工件表面之间的夹角 α 为 50° 。侧吹气体方向与焊接方向相反。高速摄影采用 2000 F/s,焊接速度 2 m/min。

3 实验结果与分析

3.1 光致等离子体对入射激光能量的影响

在 CO_2 激光焊接过程时,能量损失主要是等离子体对于入射激光的吸收。假设 z 为激光穿过等离子体的高度(cm),入射激光能量为 E_0 (W),经过等离子体后传输到工件表面的激光能量为 E_z (W),则

$$E_z = E_0 [1 - \exp(-\alpha z)], \quad (1)$$

其中 α 为等离子体吸收系数(cm^{-1}),在 CO_2 激光焊接中可估算^[4]为

$$\alpha = 2.21 \times 10^{-29} N_e^2 / T^{3/2}, \quad (2)$$

其中 N_e 为等离子体电子密度(cm^{-3}); T 为等离子体电子温度(K)。

由(1)式、(2)式可知,随着等离子体高度的增加,其吸收的激光能量越多。

等离子体除了吸收部分激光能量外,还对入射激光产生折射,使聚焦后的激光束的聚焦状态发生变化,特别是高功率激光焊接时,对焊接过程的影响更大。在 CO_2 激光焊接时,等离子体的折射率 ζ

$$\zeta \approx 1 - N_e / N_{ec}, \quad (3)$$

其中 N_{ec} 为临界电子密度,对于 CO_2 激光, $N_{ec} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

当入射激光穿过等离子体时,将引起激光束的传播方向改变,其偏转角 θ_d 与等离子体的电子密度梯度(即折射率梯度 $\Delta\zeta/\zeta$)和等离子体的高度 z 有关^[5,6],

$$\theta_d = \frac{\Delta\zeta}{\zeta} z = \frac{N_e}{2N_{ec}} \frac{z}{r}, \quad (4)$$

其中 r 为等离子体半径。

由(4)式可知, θ_d 与等离子体高度成正比,等离子体高度越高,偏转角度越大。

3.2 激光功率对等离子体的影响

3.2.1 等离子体形态变化

如图 2 所示分别为 7 kW 和 15 kW 下拍摄的等离子体图片(图像方向由左向右,下同)。发现等离子体可以分为两部分,一部分为紧贴工件表面的较亮的等离子体,这部分等离子体电子密度较大,一部分为上方类似火焰的等离子云,该部分等离子体电子密度较小,容易脱离下部的等离子体或者复合。随着激光功率的增加,等离子体的总尺寸增加,且较亮的等离子体部分也增多。

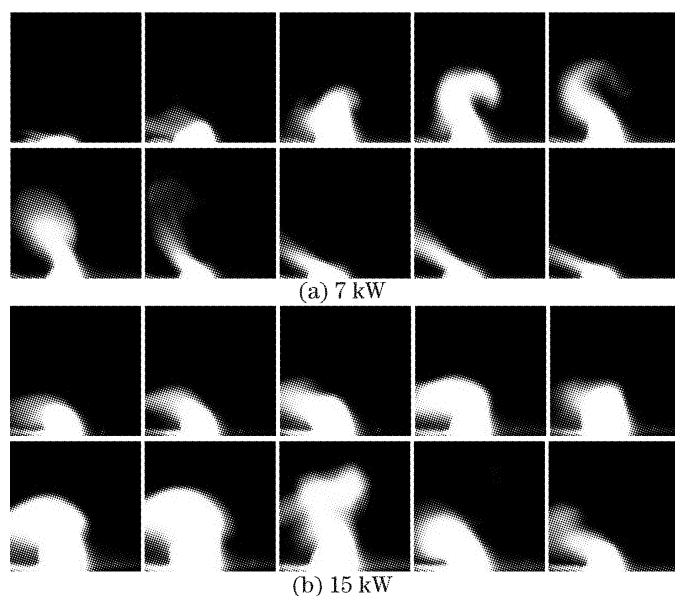


图 2 不同功率下等离子体形态(0.5 ms/frame)

Fig. 2 Dynamic behavior of plasma under different laser power (0.5 ms/frame)

等离子体表现出由小到大再到小的动态变化过程。这种现象是由于等离子体与激光的相互作用造成的。在大功率激光焊时,激光照射工件表面形成小孔,同时产生等离子体。当等离子体较小时,对激光能量的吸收、辐射和折射作用较小,较多的激光能量到达工件,金属蒸气可进一步电离,等离子体变

大。长大的等离子体吸收、辐射和折射更多的激光能量,使得到达工件的激光能量减小,等离子体减小。但是这种变化的周期性是不确定的。一方面与小孔和熔池的瞬态变化有关,一方面与光致等离子体本身的动态行为有关。光致等离子体一方面吸收入射激光的能量使得温度升高,电离度增大,另一方面通过向周围环境的辐射作用以及吸收区的膨胀来释放能量得到冷却,并降低电离度。这三方面共同决定等离子体的动态行为。

3.2.2 等离子体面积和高度的变化

如图 3 所示分别为等离子体面积和高度随激光功率增加的曲线图。从图可知,等离子体的面积和高度随着激光功率的增加而增加,并且具有类似的增加趋势。等离子体面积增加说明随着激光功率增加,单位时间内蒸发的金属增加,有更多的金属蒸气被电离,吸收了更多的激光能量。而等离子体高度的增加,由(1)~(4)式,一方面说明等离子体吸收了更多的激光能量,一方面由于等离子体的折射作用,高度的增加会导致激光束通过等离子体后的偏转角增加。

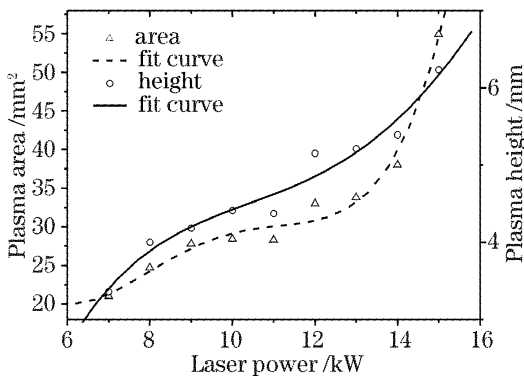


图 3 等离子体面积和高度随激光功率的变化
Fig. 3 Area and height variation of plasma under different laser power

3.2.3 激光维持的燃烧波

当较强的激光束辐照于工件表面,蒸气吸收激光能量的速率超过其各种损耗时,蒸气会发生电子崩,自由电子的数量随时间指数上升,使得蒸气很快被完全电离。当等离子体迅速膨胀以较高的速度(通常为亚声速)沿气化表面喷出时,即产生激光维持的燃烧(LSC)波^[7]。

在本实验条件下,当激光功率大于 12 kW 时,如图 4 所示,开始出现激光维持的燃烧波。其特征是等离子体突然膨胀,并沿工件表面法线方向喷出,基本上约束在光束形成的光通道上。向上喷出的等离子体对激光有很强的散焦作用,阻断了激光能量的传

输,工件表面无等离子体形成。当激光能量再次照射到工件表面时,有亮度相对较低的等离子体从小孔中喷出,同时伴随有大量飞溅从熔池中飞出。二次喷出的等离子体的传播方向不是严格束缚在光通道上,而是随着远离工件表面,沿吹侧吹气体方向偏离,并且二次喷出的等离子体的运动速度低于一次喷出的等离子体。在 LSC 波发生时,工件得到的能量处于剧烈的变化状态,因此小孔和熔池强烈地振荡,导致焊接过程的不稳定,甚至不连续。通过测量,LSC 波焊缝上相近位置的熔深变化剧烈,达到 24.4%。并且焊缝明显变窄,并向内凹陷,呈麻花状。若 LSC 波发生在焊接结束时,焊缝末端留下一个由于金属喷发产生的孔洞,严重影响焊接质量。

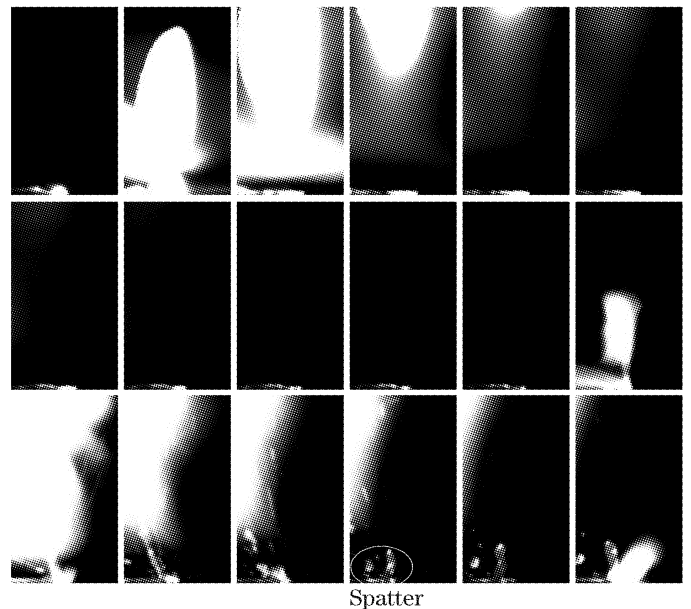


图 4 激光维持的燃烧波(2 ms/frame)
Fig. 4 LSC under 15 kW (2 ms/frame)

随着激光功率的继续增加,一方面 LSC 波发生的频率增加,一方面单个 LSC 波的时间变长,如图 5 所示。从等离子体突然长大到等离子体重新产生算作一个 LSC 波。LSC 波次数和单次 LSC 波持续时

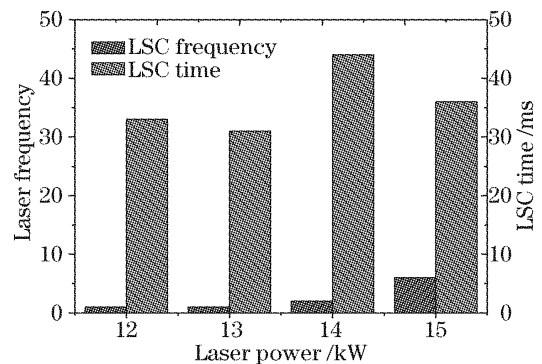


图 5 不同功率下 LSC 波的次数和平均持续时间
Fig. 5 Amount and average lasting time of LSC under different laser power

间的增加,说明在大功率激光焊时,更应该采取有效的措施抑制等离子体,提高激光的加工效率。

3.3 侧吹气体流量对等离子体的影响

在大功率激光焊时,一方面容易产生 LSC 波,一方面过密的等离子体会降低激光对工件的加工效率,因此应该采取有效的措施抑制等离子体。侧吹惰性气体的作用主要有两个方面,一方面主要抑制等离子体;另一方面可以保护熔池,以免空气中的氧气等与熔池接触,提高焊缝质量。由于 He 的第一电离能为 24.587 eV,远高于铁的第一电离能 7.87 eV,而 He 的热传导率为 0.00152 W/(cm·K),可以增加电子与离子复合率。因此 He 气是大功率激光焊接时的首选侧吹气体之一。

在本组实验中,通过调节滤光片,滤去更多的上方等离子云以便于分析。

3.3.1 不同气体流量下等离子体的动态变化

当气流量较小时,如图 6(a)当气体流量 $L=10$ L/min 下等离子体云在某一时刻明显地长大,大于一定程度,就会伴随着上层离喷嘴近的等离子云被测吹气体吹散,从下面的等离子体部分脱离。而随着气体流量增加,等离子体本身的体积相对较小,上述脱离现象逐渐减弱,如图 6(b)当气体流量 $L=70$ L/min。等离子体表现出由小到大再到小的动态变化过程。

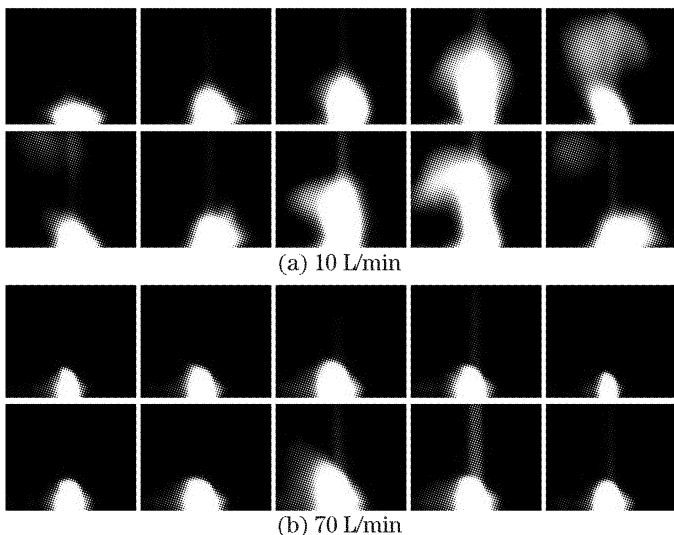


图 6 不同气体流量下等离子体形态(0.5 ms/frame)

Fig. 6 Dynamic behavior of plasma under different laser power (0.5 ms/frame)

3.3.2 等离子体面积和高度的变化

如图 7 分别为不同气体流量时等离子体的平均面积,平均高度变化曲线。可以发现随着侧吹气体流量的增大,等离子体的平均面积,平均高度均随之减小,从 10 L/min 增加到 30 L/min 时,等离子体平

均面积和平均高度减少的较多,从 30 L/min 增加到 60 L/min 时,等离子体平均面积和平均高度变化不大。平均面积的变化范围在 13.794~26.066 mm² 之间,平均高度的变化范围在 2.474~4.545 mm 之间。说明加大气体流量,可以吹散更多的等离子体,并加强了冷却效果,使更多的电子和离子中和。

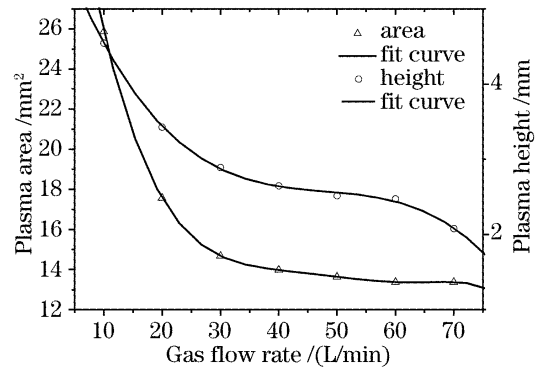


图 7 等离子体面积和高度随气体流量变化

Fig. 7 Area and height variation of plasma under different gas flow rate

对照不同气体流量的熔深,如图 8 所示。同样由于 $L=10$ L/min 时,发生了 LSC 波,其熔深单独考虑。随着气体流量的增加,熔深总体上呈增加的趋势,这是由于侧吹气体流量增加,减小了等离子体的尺寸和高度,由(1)式,(2)式可知,使得到达工件表面的能量增加,熔深增加。其中焊缝熔深在 9.6~10.5 mm 之间变化,在气体流量为 20 L/min 下获得最小熔深,在气体流量为 60 L/min 获得最大熔深,增加量约为 9.4%。但是当气体流量增加到一定程度时,侧吹气体不能十分有效减小等离子体面积和高度方面,反而会增加成本,并且有研究者^[8]认为,气体流量过大,对熔池有搅拌作用,降低熔池的稳定性。因此不能盲目通过提高侧吹气体流量以增加熔深。

当侧吹气体流量为 10 L/min 时,2 s 内出现 4

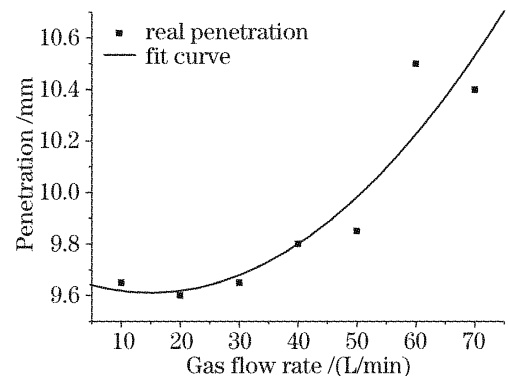


图 8 不同气流量时焊缝熔深

Fig. 8 Weld penetration under different gas flow rate

次 LSC 波。这是因为当侧吹气体流量不足时,一方面速率较小,提高电子、离子等粒子的碰撞率增加电子复合率,降低电子密度的作用较小,冷却作用不够强,另外不足以吹散等离子体,使得等离子体易于击穿,产生对激光有屏蔽作用的激光维持的吸收波。在本实验条件下,当气体流量大于 20 L/min,激光焊接过程中无 LSC 波产生。

4 结 论

在大功率 CO₂ 激光焊接时,随着激光功率的增加,等离子体的尺寸增加。尤其在 10 kW 以上,等离子体面积的增长可达 50% 以上。

大功率激光焊接 AH36 船用钢板中出现的 LSC 波分为两个阶段,第一阶段的等离子体很亮,离开工件表面的速度快,基本上沿光轴入射方向;第二阶段的等离子体呈烟雾状,速度慢,偏离光轴方向,并伴有飞溅产生。

随着激光功率的增加,不仅 LSC 波产生的频率增加,而且单个 LSC 波持续的时间也变长。持续时间量级为 10 ms。

增加侧吹气体 He 的流量不但有效地抑制住了 LSC 波的产生,而且减小了等离子体的尺寸,但减小程度变弱。从 10 L/min 增加到 40 L/min 时,等离子体平均面积减少了将近 50%。从 40 L/min 增

加到 60 L/min 时,等离子体平均面积和平均高度基本上维持不变。

在只改变气体流量的条件下,熔深的改变与等离子体尺寸有关。随着气体流量的增加,由于减小了等离子体的尺寸和高度,熔深总体上呈增加的趋势。在本实验条件下,增加量约为 9.4%。

参 考 文 献

- 1 Hu Yong, Xiang Yong, Liu Guangwu. Application of laser processing technology in shipbuilding [J]. *Marine Technology*, 2005, (1): 33~36
胡 勇,项 勇,刘光武. 激光加工技术在造船中的应用 [J]. *造船技术*, 2005, (1): 33~36
- 2 M. Beck, P. Berger, H. Huegel. The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO₂ lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**(12): 2430~2442
- 3 V V Semak, R J Stelle, P W Fuerschbach *et al.*. Role of beam absorption in plasma during laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, **33**(10): 1179~1185
- 4 I. Miyamoto, K. Mori, H. Maruo. Properties of the plasma plume in CO₂ laser welding of thin sheets: an analytical approach to laser welding (Report 1) [J]. *Welding Int.*, 1995, **9**: 864
- 5 R. Ducharme, P. Kapadia, J. Dowden. A mathematical model for the defocusing of laser light above a workpiece in laser material processing [C]. ICALEO '92, 1992. 187~195
- 6 Eldon D. Brando. Characterization of focusing lenses for CO₂ laser beam welding [J]. *Welding J.*, 1992, **71**(6): 54~62
- 7 Sun Chengwei. Laser Radiation Effect [M]. Beijing. Defence Industry Publisher, 2002. 101
孙乘伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 101
- 8 I. Miyamoto, H. Maruo, Y. Arata. The role of assist gas in CO₂ laser welding [C]. ICALEO, 1984, **44**: 68~75