

# 真空激光焊接焊缝成形及等离子体特征

姜 梦<sup>1</sup> 陶 汪<sup>1,2</sup> 陈彦宾<sup>1</sup> 王树良<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 为减小等离子体对激光焊接过程的干扰, 扩大大功率激光焊接的应用范围, 对真空条件下激光焊接的焊缝成形和等离子体特征进行了研究。结果表明, 真空激光焊接可以改善激光焊接表面成形, 增加熔深。在焊接速度为 0.5 m/min 时, 真空环境下焊缝熔深大约是大气环境下焊缝熔深的 3 倍。对比不同焊接速度下环境气压对熔深的影响规律发现, 在焊接速度较小时, 环境气压对于激光焊接的熔深影响更加明显。在真空条件下, 较大的负离焦可以显著增加熔深, 改善焊缝成形。等离子体图像观测结果表明, 随着环境气压降低, 等离子体逐渐减弱。真空环境对激光焊接等离子体强烈的抑制效应是真空激光焊接熔深增加, 焊缝成形改变的一个原因。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 真空环境; 焊缝成形; 等离子体

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0403010

## Characteristics of Bead Formation and Plasma Plume in Fiber Laser Welding Under Vacuum

Jiang Meng<sup>1</sup> Tao Wang<sup>1,2</sup> Chen Yanbin<sup>1</sup> Wang Shuliang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** In order to reduce the distractions of plasma plume in laser welding and expand the applications of high power laser welding, the characteristics of bead formation and plasma plume in fiber laser welding under vacuum are studied. The results show that the sound bead formations and an increase in penetration depth are obtained. The penetration depth under vacuum is approximately three times as deep as that under atmospheric pressure when the welding speed is 0.5 m/min. The experimental results also show that the penetration depth increases drastically with the pressure decreasing under a low welding speed and a long negative defocused distance is suitable for a deep penetration and a sound weld beam formation under vacuum. The camera observations show that the plasma plume is suppressed under vacuum. The suppression of plasma plume under vacuum is a reason for the increase in penetration depth under vacuum.

**Key words** laser technique; laser welding; vacuum; bead formation; plasma plume

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850; 350.5400

## 1 引 言

激光焊接作为一种先进的高能束加工技术被广泛应用于工业生产的各个领域。一般情况下, 激光焊接在大气环境下进行, 需要侧吹保护气体, 且多用在轻量化构件的薄板焊接。近年来, 随着工业激光器的飞速发展, 大功率、高品质的光纤激光器和碟片激光器的出现, 大功率激光焊接有望在厚板焊接方面得到应用<sup>[1-5]</sup>。但是, 激光焊接等离子体强烈的“屏蔽效应”使得激光焊接无法通过增大激光功率而获得持续的熔深增加,

收稿日期: 2015-12-16; 收到修改稿日期: 2015-12-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2017003)

作者简介: 姜 梦(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事真空激光焊接方面的研究。E-mail: 15B909076@hit.edu.cn

导师简介: 陶 汪(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: taowang81@sina.com(通信联系人)

并且在大功率激光深熔焊过程中,很难获得良好的焊缝成形<sup>[6-8]</sup>。

近年来日本学者<sup>[9-11]</sup>提出了真空激光焊接的方法,真空激光焊接类似于电子束焊接,激光焊接过程在环境气压低于正常大气压的真空室内完成。研究表明:在真空条件下激光焊接的熔深显著增加,得到了类似电子束焊接具有较大深宽比的大熔深焊缝。并且相比于电子束焊接,真空激光焊接不需要电子束焊接所需的极高真空度,大大增加了工作效率,并节约了成本,同时真空激光焊接还不存在射线防护的问题。真空激光焊接为激光焊接的应用提供了一个全新方向。

因真空激光焊接在深熔焊方面具有较大优势,本文以在厚板激光焊接方面应用较多的高强钢作为试验材料,研究环境气压、焊接速度和离焦量等因素对焊缝成形的影响规律,对比分析真空激光焊接与常规激光焊接在焊缝成形方面的区别,并利用 CCD 观测激光焊接等离子体,分析环境气压改变焊缝成形的原因。本研究为真空激光焊接技术在厚板激光焊接方面的实际应用提供技术参考和理论支持。

## 2 试验方法

为实现真空激光焊接的研究,构建了如图 1 所示的试验装置。所用激光器为 YLR-10000 型光纤激光器,该激光器最大输出功率为 10 kW,波长为 1070 nm,光束质量良好。激光通过光纤传输至固定于机器人上的激光加工头,激光加工头的聚焦镜焦长为 300 mm,被聚焦的光斑直径为 0.4 mm。试验所用的真空室为研究真空激光焊接定制的真空装置,真空室顶部设有激光透射窗口,其由石英玻璃制成,并配有水冷设备,对于波长为 1070 nm 的焊接激光可实现的最大透射率为 99.9%。该真空室通过机械泵和分子泵协同工作达到试验所需的真空状态。并且真空室内设有移动平台,其与步进电机相连。真空室侧壁设有便于焊接过程监测的观察窗。试验所用材料为低合金高强钢,其主要化学成分如表 1 所示。试验过程中,试验材料置于真空室内工作台上,激光透过激光加工窗口进入真空室内,实施激光焊接过程。通过机械泵和分子泵的协同作用调节环境气压,通过步进电机调节焊接速度,通过机器人调节激光加工头的高低调节离焦量,以实现焊接参数的变化。在真空激光焊接过程中,利用 CCD 相机透过观察窗在距离激光束 30 cm,且与水平面成 30° 的位置观测激光焊接等离子,其最大采集频率为 60 Hz。

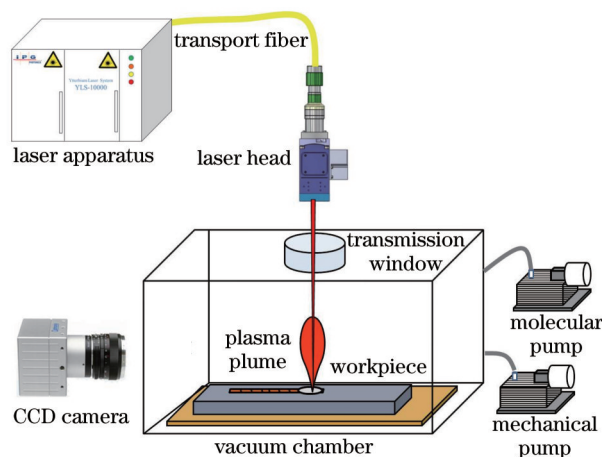


图 1 真空激光焊接装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup for laser welding under vacuum

表 1 10Ni5CrMoV 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 10Ni5CrMoV (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Mo
0.078	0.28	0.60	0.009	0.003	4.66	0.55	0.06	0.38

## 3 试验结果




### 3.1 环境气压对表面成形的影响

表面成形是焊缝成形的最直观反映。在激光功率  $P=5$  kW、焊接速度  $v=0.5$  m/min、离焦量  $f=-2$  mm 时,不

同环境气压下高强钢板单激光堆焊焊缝表面成形如表2所示。环境气压为 $10^5$  Pa(大气环境),无侧吹保护气体的情况下,单激光堆焊焊缝表面成形极差,焊缝不连续,并且形成明显的驼峰焊道,这说明在大气环境下焊接过程稳定性差,由于缺乏焊接保护,焊缝表面氧化比较严重。并且在焊缝附近存在较多焊瘤,这说明大气环境下焊接过程有较大飞溅,CCD拍摄的焊接过程监测结果中同样也发现飞溅现象比较严重。随着环境气压的降低,焊缝表面成形明显改善。当环境气压为 $10^3$  Pa时,焊缝表面成形均匀,连续。当环境气压为 $10^{-1}$  Pa时,焊缝表面极其均匀,表面具有规则连续的鱼鳞纹,并且由于真空环境下不存在环境气体对焊缝的氧化等问题,焊缝表面光亮且具有金属光泽,这说明真空环境对激光焊接焊缝具有良好的保护作用。从表面成形上看,在真空环境下激光焊接获得了一般激光焊接无法获得的表面成形良好的焊缝。据日本学者的报道<sup>[11]</sup>,在环境气压低于 $10^2$  Pa时,激光焊接焊缝易形成驼峰焊缝,但是在本试验中并没有获得类似结果。

表2 不同环境气压下激光焊接焊缝表面成形

Table 2 Surface bead formations under different ambient pressures


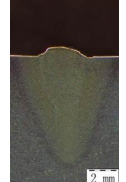
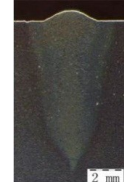

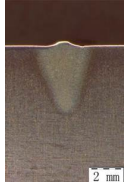
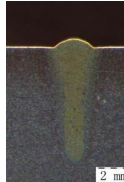
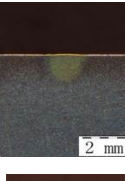
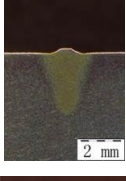
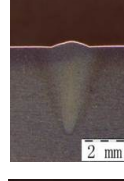
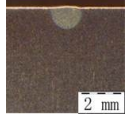
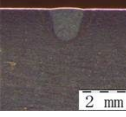
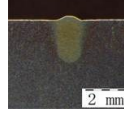
Ambient pressure /Pa	Surface bead formation
$10^5$	
$10^3$	
$10^{-1}$	

### 3.2 焊接速度和环境气压对焊缝熔深的影响

在激光功率 $P=5$  kW和离焦量 $f=-2$  mm时,不同焊接速度和不同环境气压下焊缝如表3所示。在焊接速度 $v=4$  m/min时,在大气环境下形成的焊缝熔深较浅,随着环境气压的降低焊缝熔深有所增加,但是环境气压对焊缝熔深的影响作用并不明显。在焊接速度 $v=2$  m/min时,随着环境气压的降低,焊缝熔深得到了较明显的增加,

表3 不同环境气压和焊接速度下的焊缝

Table 3 Weld seams at various welding speeds and ambient pressures

Welding speed /(m/min)	Ambient pressure /Pa		
	$10^5$	$10^3$	$10^{-1}$
0.5			
1			
2			
4			

真空环境下的熔深大约为大气环境下的2.5倍。当焊接速度 $v=0.5$  m/min时,随着环境气压的降低,焊缝熔深增加效果非常明显,环境气压为 $10^{-1}$  Pa时,熔深达到了9 mm,真空环境下焊缝熔深大约是大气环境下焊缝熔深的3倍。焊接速度和环境气压对熔深的影响规律如图2所示,随着环境气压的降低焊缝熔深明显增加,在焊接速度较小时,环境气压对焊缝熔深增加的效果更加显著。当环境气压降低到某一数值熔深几乎不再增加,可将这一环境气压称为临界真空度,临界真空度与激光功率,焊接速度和母材等多个因素相关。

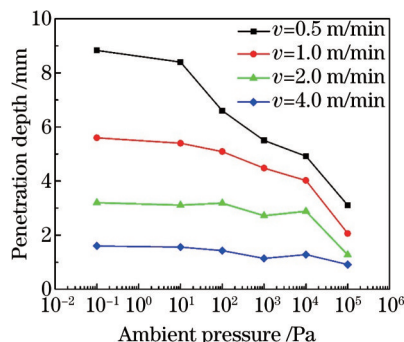


图2 焊接速度和环境气压对熔深的影响

Fig.2 Effects of welding speed and ambient pressure on penetration depth

### 3.3 离焦量和环境气压对焊缝熔深的影响

在激光功率 $P=5$  kW,焊接速度 $v=1$  m/min,环境气压为 $10^5$  Pa和 $10^{-1}$  Pa条件下,离焦量对焊缝熔深的影响规律如图3所示,根据以往激光焊接的经验,在大气环境下,一般认为离焦量比较合适的工艺窗口为-2 mm和0之间。在大气环境下常规激光焊接过程中,虽然合适的离焦量有助于提高熔深和改善成形,但是离焦量的影响作用并不明显。相比于大气环境,在真空环境下离焦量是影响激光焊接焊缝熔深的一个主要变量。真空条件下大的负离焦为比较合适的工艺窗口,并且不同的离焦量无论是对熔深还是对焊缝成形的影响都是十分显著的。

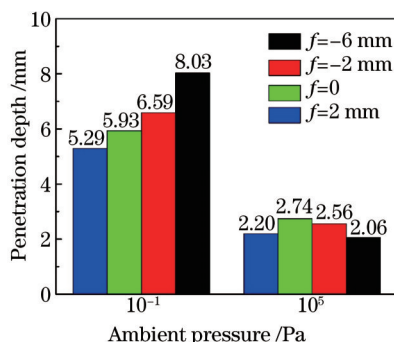


图3 不同环境气压下离焦量对熔深的影响

Fig.3 Effects of defocused distance and ambient pressure on penetration depth

在试验中,激光功率和焊接速度等条件都一致的情况下,在大气环境下离焦量 $f=0$ 时获得最大熔深2.74 mm,而真空条件下离焦量 $f=-6$  mm时获得最大熔深8.03 mm。如图4所示,相同的激光功率只是改变离焦量和环境气压就产生了成形差异巨大的焊缝。这说明环境气压的变化必然对激光的能量传输方式产生影响。就真空激光焊接的实际应用方面看,激光焊接在真空条件下,采用较大的负离焦量可以获得焊缝熔深极深、深宽比极大类似电子束焊缝的平行焊缝接头。

### 3.4 环境气压对激光焊接等离子体的影响

等离子体的存在是激光深熔焊的固有特征,因此等离子体的变化可以反映激光焊接过程的变化。为了探究真空环境给激光焊接过程带来的变化,利用CCD相机对不同环境气压下激光焊接过程等离子体进行了拍摄,并进行对比分析。激光功率 $P=5$  kW、离焦量 $f=-2$  mm和焊接速度 $v=1$  m/min时,不同环境气压下激光焊接等离子体CCD拍摄结果如表4所示。可以看出在大气环境下( $10^5$  Pa)在匙孔上方激光传播路径上存在一团亮度极高的等离子体,高度大约为30 mm。随着环境气压的降低等离子体明显变小,等离子体强度降

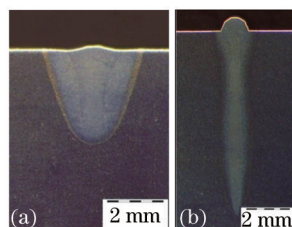


图4 典型焊缝(激光功率  $P=5$  kW, 焊接速度  $v=1$  m/min)。(a) 环境气压为  $10^5$  Pa, 离焦量  $f=0$ ;  
(b) 环境气压为  $10^{-1}$  Pa, 离焦量  $f=-6$  mm

Fig.4 Typical weld seam (laser power  $P=5$  kW, welding speed  $v=1$  m/min). (a) Ambient pressure is  $10^5$  Pa, defocused distance  $f=0$ ; (b) ambient pressure is  $10^{-1}$  Pa, defocused distance  $f=-6$  mm

低,说明真空环境对激光焊接等离子体有所抑制。当环境气压下降到  $10^2$  Pa时等离子体几乎消失,完全被抑制。真空激光焊接熔深增加,焊缝成形改变都应该与等离子体在真空条件下被抑制相关。

表4 不同环境气压下等离子体

Table 4 Plasma plume under different ambient pressures

Ambient pressure /Pa	$10^5$	$5 \times 10^4$	$10^4$	$5 \times 10^3$	$10^3$	$5 \times 10^2$	$10^2$	10
↑ 20 mm ↓								

#### 4 分析与讨论

从上述研究发现,环境气压对熔深和等离子体的影响具有良好的对应关系。随着环境气压的降低,激光焊接熔深逐渐增加,等离子体逐渐被抑制。等离子体在激光焊接过程中对激光存在吸收,散射,折射等效应,进而影响激光能量的传输<sup>[12-14]</sup>。环境气压对激光焊接等离子体的抑制,将会直接影响到激光的能量传输,最终改变激光焊接的焊缝成形。

激光穿过激光焊接光致等离子体的吸收效应可描述为<sup>[15]</sup>

$$I = I_0 \left\{ - \int_0^L \frac{\pi}{4} C_n \left[ \int_0^\infty Q_{\text{abs}} N(a) a^2 da \right] dl \right\}, \quad (1)$$

式中  $I$  为激光穿过等离子体后强度,  $I_0$  为入射激光的初始强度,  $L$  为激光穿过等离子体高度,  $C_n$  为等离子体密度,  $Q_{\text{abs}}$  为等离子体中一个粒子吸收系数,  $N(a)$  为等离子体离子分布函数。

而激光穿过激光焊接光致等离子体的折射效应,可用折射角描述<sup>[16]</sup>:

$$\theta = \frac{\nabla N_e}{N_{ec}} L, \quad (2)$$

式中  $\nabla N_e$  为电子密度的浓度梯度,  $N_{ec}$  为由激光波长决定的临界电子密度 ( $N_{ec} = 10^{21}/\lambda^2$ ),  $L$  为激光穿过等离子的高度。

从(1)式和(2)式可以看出,无论是等离子体对于激光的吸收效应,还是等离子体对于激光的折射效应都与激光穿过等离子的高度  $L$  成正相关。通过环境气压对激光焊接等离子体的影响研究表明,随着环境气压的降低,激光焊接等离子体的高度是下降的,由(1)式和(2)式可以定性地说等离子体对于激光的吸收和折射效应也是下降的。在除环境气压外的其他焊接参数均相同的条件下,相比于大气环境,真空环境下的激光焊接等离子体受到抑制,等离子体对于激光的干扰更小,作用在母材上的激光能量更强,会形成一个更深的匙孔,最终形成一个更大的熔深。

在真空条件下,激光能量传输过程的变化会导致激光与材料相互作用的改变,焊缝的微观组织结构也一定会发生相应变化,但是从激光能量传输的角度很难直接说明焊缝微观组织方面的问题,激光能量传输

过程改变的最直接反映还是熔深的变化,因此从等离子体角度分析了环境气压对熔深的影响。同时还应注意,激光焊接等离子体,匙孔行为和熔池流动行为是一个相互耦合的整体,环境气压也一定对激光焊接的匙孔和熔池流动行为产生影响,这还需后续深入的研究。真空环境对与激光焊接等离子具有强烈的抑制效应是真空激光焊接熔深增加,焊缝成形改变的一个原因。

## 5 结 论

在激光功率 $P=5\text{ kW}$ 的情况下,研究环境气压、焊接速度和离焦量对焊缝成形和等离子体的影响规律,获得结论:

- 1) 真空激光焊接可以改善激光焊接表面成形,增加熔深。
- 2) 在焊接速度较小时,环境气压对于激光焊接的熔深影响更加明显。
- 3) 在真空条件下,较大的负离焦可以显著增加熔深,改善焊缝成形。
- 4) 真空环境对于激光焊接等离子具有强烈的抑制效应是真空激光焊接熔深增加,焊缝成形改变的一个原因。

## 参 考 文 献

- 1 Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. Investigation of high-power fiber laser welding phenomena of stainless steel[J]. Transaction of JWRI, 2007, 36(2): 11-15.
- 2 Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fibre laser[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2009, 14(4): 288-294.
- 3 Grupp M, Klinker K, Cattaneo S. Welding of high thicknesses using a fibre optic laser up to 30 kW[J]. Welding International, 2013, 27(2): 109-112.
- 4 Zhang X, Ashida E, Tarasawa S, *et al.* Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(2): 022002.
- 5 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.  
吴世凯,肖荣诗,陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- 6 Chen Genyu, Xia Hailong, Zhou Cong, *et al.* Study on the mechanism of root humping of laser welding with high power fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203004.  
陈根余,夏海龙,周 聪,等. 高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203004.
- 7 Fabbro R, Slimani S, Douder I, *et al.* Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd-YAG CW laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(2): 394-400.
- 8 Chen Genyu, Zhao Zhi, Zhang Yi, *et al.* Data process method for measurement of plasma plume temperature field in deep penetration laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1778-1782.  
陈根余,赵 智,张 屹,等. 激光焊接等离子体温度场测量及数据处理[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1778-1782.
- 9 Katayama S, Kobayashi Y, Mizutani M, *et al.* Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(5): 187-192.
- 10 Katayama S, Abe Y, Mizutani M, *et al.* Deep penetration welding with high-power laser under vacuum[J]. Transactions of JWRI, 2011, 40(1): 15-19.
- 11 Youhei A, Yousuke K, Hiroshi N, *et al.* Effect of reduced pressure atmosphere on weld geometry in partial penetration laser welding of stainless steel and aluminium alloy with high power and high brightness laser[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2014, 19(4): 324-332.
- 12 Huber S, Glasschroeder J, Zaeh M. Analysis of the metal vapour during laser beam welding[C]. Physics Procedia, 2011, 12: 712-719.
- 13 Greses J, Hilton P, Barlow Y, *et al.* Plume attenuation under high power Nd: yttrium-aluminum-garnet laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(1): 9-15.
- 14 Foster M, Beaulieu R, Blais L, *et al.* Experimental investigation on stainless steel welding with a 15 kW fibre laser[J]. Canadian Journal of Physics, 2013, 92(3): 246-252.
- 15 Shcheglov P Y, Uspenskiy S A, Gumenyuk A V, *et al.* Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(6): 475-480.
- 16 Poueyo-Verwaerde A, Fabbro R, Deshors G, *et al.* Experimental study of laser induced plasma in welding conditions with continuous CO<sub>2</sub> laser[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(9): 5773-5780.