

文章编号: 1001-3806(2002)02-0081-03

激光焊接过程中电磁场控制等离子体的研究*

包刚 王成 彭云 陈武柱

田志凌

(清华大学机械工程系, 北京, 100084)

(钢铁研究总院, 北京, 100081)

摘要: 高功率 CO₂ 激光焊接过程中, 小孔上方的等离子体会影响激光和工件之间的耦合效率。从分析外加电磁场对等离子体的作用出发, 探讨了采用外加电磁场控制激光等离子体的可能性。实验结果表明, 选择合适的外加电磁场参数, 可以降低等离子体对激光的屏蔽效果, 增大熔深。

关键词: 激光焊接; 等离子体控制; 电磁场

中图分类号: TG664 **文献标识码:** A

Effect of EM field on the plasma control during CO₂ laser beam welding

Bao Gang, Wang Cheng, Peng Yun, Chen Wuzhu

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Tian Zhiling

(Central Iron & Steel Research Institute, Beijing, 100081)

Abstract: During high-power CO₂ laser beam welding, the plasma above the keyhole will influence the absorption ratio of the laser energy absorbed by the workpiece. In the paper, the feasibility to use assisting electric and magnetic (EM) field as a measure for plasma control is discussed in theory. Experimental results indicate that applicable assisting EM field can reduce the shielding effect of the plasma and increase the penetration depth.

Key words: laser beam welding; plasma control; electric and magnetic (EM) field

引言

较高功率 CO₂ 激光焊接时, 在高能量密度作用下, 金属会很快蒸发并产生蓝色等离子体。这样, 浮于金属表面的高温、高密度等离子体, 将会对激光能量产生吸收、散射、反射作用, 降低激光束与工件的耦合效率, 从而影响焊缝熔深、成形等多方面。因此, 针对焊接过程中如何消除、抑制等离子体进行了很多的工作。其中最常用的是真空激光焊接和采用辅助气体侧吹的方法。

然而, 在真空中进行焊接, 就失去了激光可以在大气中直接焊接的优点。采用侧向辅助气体则可以同时起到控制等离子体和保护熔池两种作用, 这种方法比较有效, 所以, 在实际中也应用最广泛。但是, 它的缺点是对侧吹气体的位置、角度、压力要求都比较严格, 不易于实现控制, 而且还可能恶化焊缝

成形。

电磁场控制激光等离子体是一种全新的方法。由于等离子体是电离的气体, 它是由电子、离子和中性粒子 3 种成分组成的。那么, 在外加电磁场的作用下, 就可能对激光等离子体的形态和空间分布产生影响。

我们将从分析外加电磁场对等离子体的作用出发, 探讨采用外加电磁场控制激光等离子体的可能性。

1 实验原理分析

1.1 自由状态下激光等离子体的分布及运动特征

激光深熔焊过程中, 焊接小孔产生大量金属蒸气, 这些金属蒸气在激光照射作用下由于温度迅速升高而大量电离, 形成等离子体。由于小孔出口处的带电粒子与周围有浓度差, 因而带电粒子会向四周扩散, 如图 1 所示。

在带电粒子扩散的初始阶段, 电子和正离子在小孔附近的浓度相同, 浓度梯度也相同。考虑带电粒子的扩散速度与其平均热运动速度和浓度梯度有

* 国家重点基础研究发展规划及清华大学 985 基金资助项目。

作者简介: 包刚, 男, 1975 年 9 月出生。硕士研究生。主要从事激光焊接方面的研究。

关,则激光等离子体中带电粒子的扩散速度差别仅仅决定于它们的热运动速度。因为电子的质量远小于正离子的质量,根据动能与速度的关系,电子的平均热运动速度就远远高于正离子体,所以,电子的扩散速度远远高于正离子的扩散速度。

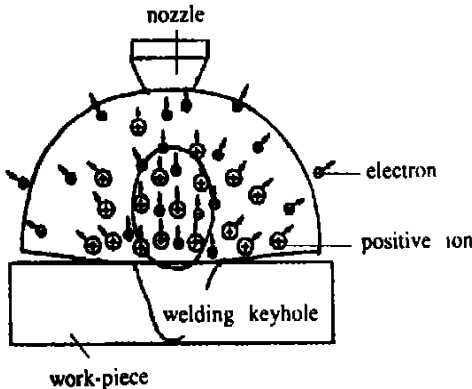


Fig. 1 The diffuse of plasma in free state

子体电流产生力的作用,从而对等离子体中带电粒子的运动、分布产生相应的影响。加入如图 3 中所示的磁场,根据电磁场理论,等离子体电流在磁场中将受到安培力的作用,则只要通过控制电磁场的大小、方向等规范,就可以对等离子体电流施加不同的力的作用,从而改变等离子体的分布和运动,达到控制等离子体的目的。

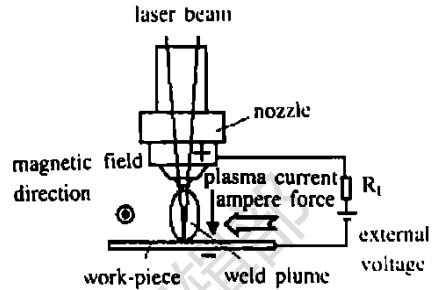


Fig. 3 Analysis of the force applied on plasma under the effect of assisting electric and magnetic fields

2 实验设备及方案

工件采用 2.5mm 低碳钢板。实验中使用 3k W 快轴流 CO₂ 激光器和 CNC 数控机床,光束模式为 TEM₀₁+ TEM₀₀,采用 Ar 气做同轴保护气体,聚焦元件为焦距 127mm 的 ZnSe 透镜。焊接工艺参数包括激光功率 $P(W)$,焊接速度 $v_s(m/min)$ 等。在喷嘴和工件之间外加方向大小可调节的电场,同时加入大小方向均可调节的横向磁场。

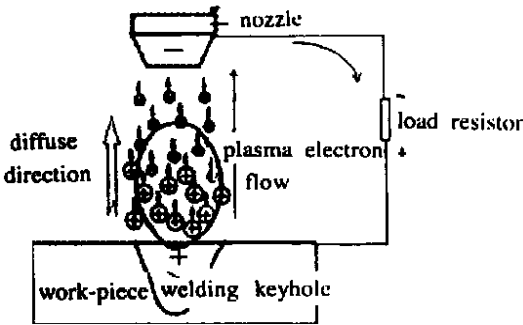


Fig. 2 The diffuse of plasma in nozzle direction and the formation of plasma current

考虑沿激光焊接喷嘴方向(z 轴)带电粒子的扩散。由于电子的扩散速度高,因此在靠近工件附近正离子比较多,而在喷嘴附近电子则比较多,这样就形成了工件到焊接喷嘴的电场,如图 2 所示。如果在喷嘴和工件之间外加负载,就会有电流流过外加负载,形成等离子体电流。但是由于等离子体的扩散是向四周的,所以,等离子体电流较小^[1]。

1.2 外加电磁场作用下的激光等离子体分布及运动特征

由于在无电场存在的情况下,等离子体向四周扩散,形成的等离子体电流也非常小。鉴于此,我们采取外加电场的方法,使等离子体中的带电粒子发生定向运动,即电子和正离子沿相反的方向运动,加大等离子体电流。如图 3 所示,在工件和喷嘴之间加入方向适当的电场,并外加负载,即可以得到较大的等离子体电流。

另一方面,因为电流在磁场中会受到电磁力的作用,那么,引入方向、大小适合的磁场就会对等离

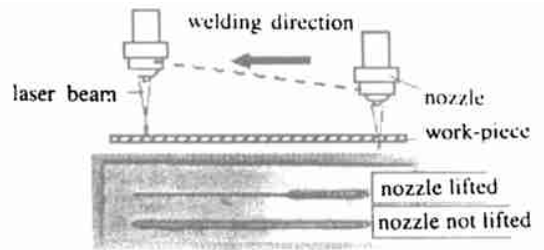


Fig. 4 Diagram of experiment scheme

Tse 等人^[2]在电磁场控制等离子体方面做了一些研究,他们采用的方案是激光平板堆焊,观测熔深变化。考虑到这种方法对熔深的测量存在一定的误差,而且结果不直观,因此本实验设计了以下实验方案。我们知道,大功率激光焊接时,随着焦点位置的变化,激光焊接会在稳定深熔焊和热导焊之间变化,同时焊缝熔深和熔宽也发生相应的变化^[3]。根据以上原理,设计在焊接过程中提升喷嘴的方案,选择合适的初始位置,从深熔焊开始焊接,喷嘴提升过程中,由于焦点位置的变化,焊缝将会从深熔焊逐渐过渡到热导焊(如图 4)。在此过程中,深熔焊缝长

度的变化即是焊缝熔深变化的反映。则我们就可以通过对比外加电磁场作用下与不施加电磁场情况下深熔焊缝长度的变化, 研究外加电磁场对等离子体的影响。

3 实验结果及讨论

首先研究了外加电磁场作用下, 磁场大小和方向对于焊缝熔深的影响, 即在不外加电磁场与外加电磁场条件下提升喷嘴深熔焊缝长度变化。图 5 显示的即是有无外加电磁场条件下提升喷嘴深熔焊缝长度对比。A 焊缝较长, 是采用外加电磁场进行焊接, B 焊缝则较短, 是不外加电磁场直接焊接得到的。很明显可以看出, 外加电磁场可以通过对等离子体的分布和运动的影响, 控制焊缝熔深。



Fig. 5 Experiment for the comparison of welding with (A) and without (B) assisting electric and magnetic fields

图 6 显示的则是不同磁场强度(励磁电流)条件下, 深熔焊缝长度的变化。可以发现: 采用外加电磁场辅助激光焊接, 在其它条件不变的情况下, 随着励磁电流(磁场强度)的增大, 电磁力增大, 外加电磁场对激光等离子体的作用加强, 故深熔焊缝长度增大。

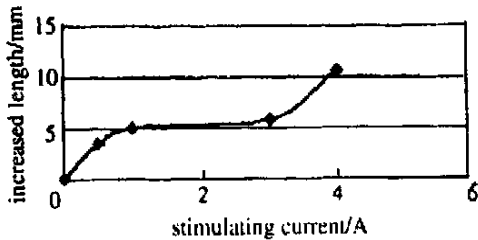


Fig. 6 Relationship between the length of deep penetration welding and magnetism stimulating current, laser power $P = 1800W$, welding speed $v_s = 1m/min$, external voltage $V = 26V$

对磁场极性(磁场方向)的影响也进行了研究, 如图 7 所示。可以发现: 在电场一定的情况下, 与其配合的磁场存在优化的方向, 即在某一方向(我们定义电磁力使等离子体偏移方向与焊接方向相反的磁场极性为负极性)上, 电磁场对等离子体作用较大, 同与其相反的磁场方向作用对比, 深熔焊缝长度略有增加。原因是当电磁力作用使等离子体偏移方向与焊接方向相同(磁场正极性)时, 等离子体相对于激光束偏移较小, 对其屏蔽较大; 而当电磁力作用使等离子体偏移方向与焊接方向相反(磁场负极性)

时, 等离子体相对于激光束偏移较大, 对其屏蔽较小, 所以, 在这种情况下, 深熔焊缝的长度比正极性磁场作用下略有增加。

另一方面, 在磁场及其它参数不变的情况下, 通过改变电场的大小和方向, 研究了电场强度和方向对于激光深熔焊缝长度(熔深)的影响。图 8 显示了不同电场规范下深熔焊缝长度的变化情况。

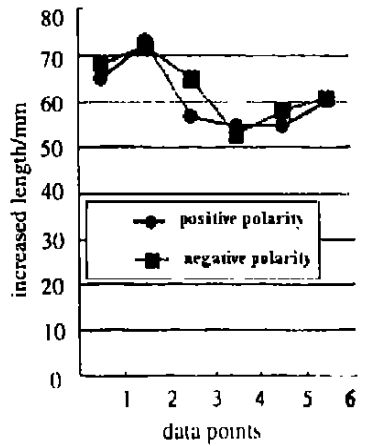


Fig. 7 Influence of magnetic field direction on the length of deep penetration weld

由图 8 中的

曲线不难发现, 在其它条件不变的情况下, 采用辅助电磁场进行激光焊接时, 加在激光喷嘴和工件之间的电场存在一个最佳值, 在该最佳值处, 电磁场对于等离子体的作用最强, 激光深熔焊缝长度最长, 而且, 不同磁场规范下对应电场最佳值不同。电场电压存在最佳值, 可能是出于以下原因。电场电压对于等离子体具有两方面的影响: 一方面, 电场电压较大, 等离子体电流也比较大, 电磁作用力大, 有利于等离子体偏转, 降低其屏蔽效果; 另一方面, 电场电压过大, 会造成电子在喷嘴附近密度过大, 从而对激光束屏蔽增大。这两方面综合作用的结果, 是存在某一最佳电压值, 此时电磁场对等离子体作用最显著, 深熔焊缝最长。

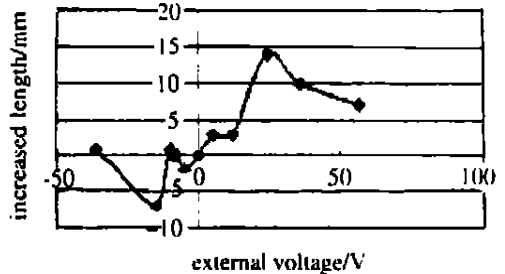


Fig. 8 Relationship between external voltage and the length of deep penetration weld, laser power $P = 1800W$, welding speed $v_s = 1m/min$, magnetism stimulating current $I = 3.5A$

同时, 从图 8 的实验结果分析还可以发现, 外加电场采用正向电压(喷嘴接正)时, 可以增加深熔焊缝的长度, 但是如果外加电场采用反向电压(喷嘴

机及采样周期来解决的。

1.4.1 选择合适的采样时机 从图 5 可以看出,当同步信号的上升沿到来时, a, b 两图所示的电压信号正处在上升段。如果此时采样,则由于电压值不能正确地反映光信号的大小,因而会引入较大的误差。但只要经过适当延时,电压波形即到达“平顶”。在到达“平顶”后再启动 A/D 转换并仅在“平顶”上采样,即可消除信号的上升段不能正确地反映信号的大小这一问题对采样精度的影响。

对单个波形而言,采用什么样的采样方法最为合适?我们曾研究了以下 4 种方法:

(1) 把经过 T 延时后的第 1 次 A/D 转换值作为该单个波形的特征值;(2) 先经 T 延时,再在单个波形的“平顶”上等间隔采集 M 个点,取 M 个点的平均值作为该单个波形的特征值;(3) 经过 T 延时后,先在单个波形的“平顶”上等间隔采集 M 个点,再将其排序,取其极大值作为该单个波形的特征值;(4) 将经过选频放大后的电压信号进行脉宽压缩(压缩至原来的 $1/20$),取信号波形与时间轴围成的面积作为该单个波形的特征值,这是本系统最初拟选用的方法。经分析与比较,本系统最终选择上述第 3 种方法作为其采样方法。

M 等于多少? 由于系统选用的 A/D 转换器件

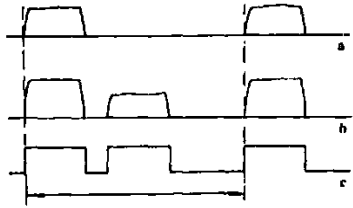


Fig. 5 Schematic diagram of the reasonable voltage waves from
a—monitoring photoelectrical system b—
measurement photoelectrical system c—
synchronous photoelectrical system

(AD574) 的转换时间约 $25\mu\text{s}$, 平顶的宽度约 0.8ms , 故在单个波形的“平顶”上最多可采集到 32 个点。又由于在所采集到的点中只有通过排序才能找到次极大值,因此,若采集到的点数过多,则必然会使排序时间过长,从而导致系统的响应速度降低。经分析与比较,仅取 $M = 6$ 。

1.4.2 选择合适的采样时机 每测一次温度,参与平均的信号波形取多少个? 由调制盘的旋转速度 ($1200\text{r}/\text{min}$)^[1], 容易算出 P_1, P_2 及 P_3 信号的周期均为 50ms 。由于电网 50Hz 工频及其 100Hz 倍频的干扰周期分别为 20ms 和 10ms , 分别是信号周期的 $2/5$ 倍和 $1/5$ 倍。因此,只需连续采集 $2N$ ($N = 1, 2, 3, \dots$) 个波形累加求和取平均,即可减弱电网带来的干扰问题。

从信号平均的角度看, N 值越大,系统的抗干扰能力就越强。但 N 值过大,也即每测一次温度需要采集的波形个数越多,系统的响应速度也就越慢;另外,系统软件最后要将采集到的 A/D 值累加求和,因此,还要考虑系统的分辨力问题。综合考虑这些因素后,本系统仅取 $N = 5$ 。

2 结 论

影响这一实时测温系统测温精度的因素除上面讨论的外,还有激光器入射待测面的能量、仪器的工作波长、A/D 转换器件的转换精度以及放大电路的线性程度,等等。限于篇幅,不再一一论及。

参 考 文 献

- [1] 施德恒,刘玉芳,陈玉科. 光学技术, 2000, 26(2): 145~ 149.
- [2] 施德恒,刘新建,许启富 *et al.* 光学技术, 2000, 26(6): 508~ 512.

(上接第 83 页)

接负)时,对于深熔焊缝的长度几乎没有影响,甚至产生负面影响。这从我们对等离子体的自由扩散分析很容易理解,反向电压抑制电子和正离子的扩散,而正向电压有利于电子和正离子的扩散,形成等离子体电流,因而电磁场对等离子体的影响就更强,反映到焊缝形态上,即为深熔焊缝长度在正向电压作用下较长。

4 结 论

(1) 在高功率激光焊接中,采用外加电磁场的方法可以影响激光等离子体的屏蔽效果。可采用外加

电磁场驱除熔池上方的激光等离子体,达到增大焊缝熔深的目的。(2) 在合适的外加电磁场参数条件下,可以获得最大激光焊接熔深。其它条件一定,磁场强度越大,焊缝熔深越大。其它条件不变,电场存在最佳电压值,此时焊缝熔深最大。

参 考 文 献

- [1] 王 勇. 激光深熔焊控制技术及其原理研究. 清华大学博士学位论文, 1996.
- [2] Tse H C, Man H C, Yue T M. Optics & Lasers in Engng, 1999, 32: 55~ 63.
- [3] 陈武柱,张旭东,任家烈 *et al.* 中国激光, 1996, A23(7): 657~ 661.