

文章编号: 1001-3806(2006)01-0023-04

非穿透激光焊等离子体光信号与熔深的关系

王春明, 胡伦骥*, 胡席远

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 在一定工艺条件下, 焊缝熔合面积随线能量的增加线性增长, 而在激光功率与焊接速度二者之中, 激光功率对熔深有更为显著的影响, 焊接速度则对熔宽影响较大。400nm~600nm 波段的等离子体光信号可以较好地反映非穿透激光深熔焊熔深的变化, 其均方根值与熔深成严格的二次曲线关系, 另外还分析了等离子体光信号与焊缝熔深之间内在联系。研究结果为非穿透激光深熔焊熔深的实时监测或预测提供了理论与实验依据。

关键词: 激光深熔焊; 等离子体信号; 非穿透; 焊缝熔深

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A

The relationship between plasma optic signal and penetration depth during partial penetration laser welding

WANG Chun-ming, HU Lun-ji, HUXI-yuan

(Department of Materials Science and Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract At some process condition, the weld fusion area increase linearly with heat input and for the two common parameters of laser power and weld speed, laser power has more influence on penetration while weld speed has more influence on weld width. The plasma optic signal at 400nm~600nm corresponds to variation of the weld penetration and the signal's RMS value increases with the penetration in a quadratic curve mode. The inherent relation between plasma optic signal and penetration is also analyzed. The results provide theoretical and practical guidance for real time penetration monitor and prediction in partial penetration laser welding.

Key words laser penetration welding; plasma signal; partial penetration; weld penetration depth

引 言

激光焊接由于具有深宽比大、热影响区小、表面成形好以及生产效率高等优点, 已经被越来越多地应用于工业生产中^[1], 因而, 实现激光焊接质量监测与控制也变得越来越迫切和重要。熔深是激光焊接质量的一项重要指标, 对于非穿透激光深熔焊而言, 对焊缝熔深进行实时的非破坏性监测具有重要的理论意义与实用价值。作者探讨了熔深、熔宽、熔合面积等随工艺参数的变化规律及内在影响机理, 研究了等离子体光信号随熔深的变化规律及其内在机理, 以期建立实时监测激光焊熔深波动的理论与实验依据。

1 实验方法与装置

在快轴流 CO₂ 激光器上对 4.5mm 厚低碳钢板进行堆焊, 在焊接过程中, 整条焊缝都不穿透被焊试板,

固定离焦量, 通过改变激光功率或焊接速度来获得不同焊缝熔深。实验中为了保证数据的可靠性与可重复性, 用每一种工艺参数进行了两次实验。主要设备及工艺条件见表 1。

Table 1 Experimental conditions

rate power of laser	2000W
TEM _{m,n}	TEM ₀₀ + TEM ₀₁
materials	mild steel
thickness of the sample δ	4.5mm
laser power P	1200W ~ 1800W
welding speed v	1.13m/min ~ 3.09m/min
focal length f	125mm
defocusing Δf	0mm

激光致等离子体既是激光深熔焊过程的产物, 同时又对焊接过程有重要的影响, 在本研究中用光电传感器获取等离子体的特征光信号对焊接熔深进行监测, 其信号检测装置如图 1 所示。

激光焊接是一个高速过程, 等离子体亦处于一种高速动荡过程之中, 根据已有的试验与研究^[2~6], 用响应速度快、成本低的光电二极管采集波长范围在 400nm~600nm 的等离子体特征光辐射信号。光电信号经信号调理电路放大滤噪后, 用 40kHz 的采样频率

作者简介: 王春明 (1975-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事激光加工质量实时监测技术及工艺研究。

* 通讯联系人。E-mail: lun.jhu@163.com

收稿日期: 2004-10-19; 收到修改稿日期: 2004-11-04

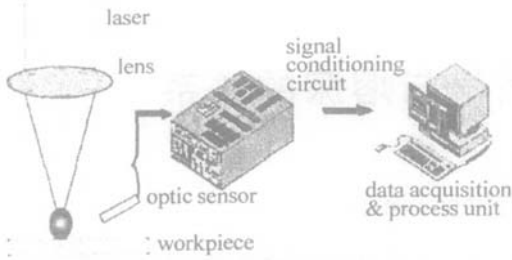


Fig 1 Signal acquisition equipment

进行采集,并将数据存入硬盘。

2 试验结果

测得焊缝的熔深、熔宽、熔合区面积等几何参数,通过数据分析计算出每条焊缝的信号的总体均方根值,将工艺参数、焊缝几何形状测量数据以及信号分析结果汇总表 2。

Table 2 Welding parameters, welding geometric shape and RMS signal

sample No	laser power P/W	speed v / (m·m ⁻¹)	penetration depth H/mm	weld width W/mm	fusion area A/mm ²	RMS signal /V
1 1	1200 00	2.13	1.75	1.24	1.31	0.93
1 2	1200 00	2.13	1.72	1.15	1.24	0.88
2 1	1400 00	2.13	2.09	1.27	1.58	1.02
2 2	1400 00	2.13	2.01	1.25	1.56	0.99
3 1	1600 00	2.13	2.21	1.36	1.84	1.28
3 2	1600 00	2.13	2.15	1.43	1.85	1.43
4 1	1800 00	2.13	2.40	1.50	2.15	1.65
4 2	1800 00	2.13	2.29	1.39	2.04	1.73
5 1	1600 00	1.62	2.20	1.82	2.47	1.68
5 2	1600 00	1.62	2.22	1.85	2.51	1.58
6 1	1800 00	1.62	2.38	1.92	2.87	2.46
6 2	1800 00	1.62	2.43	1.93	3.03	2.24
7 1	1400 00	2.67	1.84	1.18	1.33	1.04
7 2	1400 00	2.67	1.93	1.14	1.40	1.01
8 1	1600 00	1.13	2.49	2.29	3.71	1.91
8 2	1600 00	1.13	2.62	2.33	3.86	2.05
9 1	1600 00	3.09	2.05	1.15	1.50	1.17
9 2	1600 00	3.09	2.03	1.22	1.52	1.16
10 1	1800 00	1.13	2.82	2.58	4.59	2.76
10 2	1800 00	1.13	2.83	2.59	4.64	3.19

2.1 改变激光功率

1~4.2试样是在保持焊接速度为 2.13m/m in 激光功率从 1200W 逐步增加到 1800W (工艺参数见表 2)的工艺条件下进行的,所得焊缝截面如图 2所示。

从图 2可以看到,在焊接速度保持在 2.13m/m in 的情况下,随着激光功率的提高,焊缝的熔深、熔宽和熔合区面积均加大(见图 3、图 4),从图中及拟合曲线可看出,随着激光功率的提高,熔深呈二次曲线的增长趋势,且随着功率的提高,增长速度放慢,熔宽与熔合



Fig 2 Weld cross sections of No. 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 (from left to right)

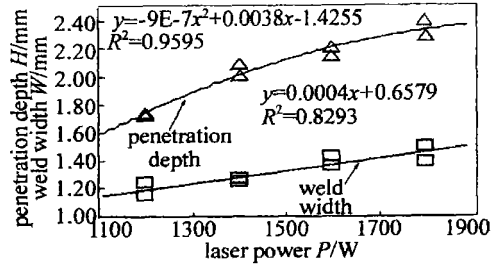


Fig 3 Variation of penetration depth and width with laser power when weld speed fixed at 2.13m/m in (R is correlation coefficient)

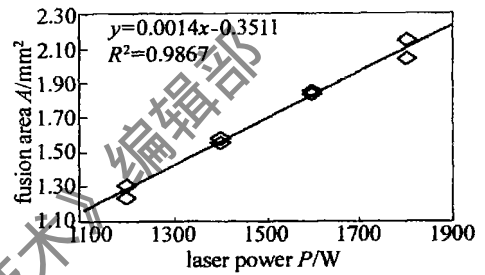


Fig 4 Variation of fusion area with laser power when weld speed fixed at 2.13m/m in

区的面积均呈较严格的线性增长。另从图 3 看出,熔深增长幅值明显高于熔宽,增长较快,熔宽增长的速度很慢,增长幅度很小,即随着激光功率的提高,焊缝的深宽比变大。

随着激光功率的提高,焊缝熔深熔宽增加的同时,等离子体光信号也明显增强,图 5 反映了等离子体光

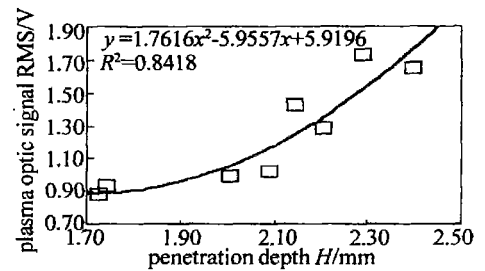


Fig 5 Variation of the RMS signal with penetration depth when weld speed fixed at 2.13m/m in

信号的均方根值随焊缝熔深的变化规律。信号的均方根值反映了信号能量的大小,可见,等离子体光辐射的能量随着焊缝熔深的增长,呈现二次曲线的增长趋势。

2.2 改变焊接速度

保持激光功率 1600W 不变,改变焊接速度以获得不同的熔深,所得焊缝截面如图 6所示。

从图 6可看出,随着焊接速度的升高,熔深、熔宽及熔合面积的变化趋势虽然都是减小,但它们之间又有明显不同。图 7、图 8显示,在固定激光功率 1600W 的情况下,随着焊接速度的降低,熔合面积与焊接速度



Fig 6 Weld cross sections of Na 8, 1, 5, 1, 3, 1, 9, 1

的拟合曲线为 $y = 4.0176x^{-0.9231}$ ，是一种近似反比关系，即熔合面积与焊接线能量成较好的线性关系。随着焊接速度的变化，熔深熔宽与速度之间的拟合曲线形式类似，但随着速度的提高，熔深变化较小，而熔宽迅速减小，熔宽变化的速度显著快于熔深。

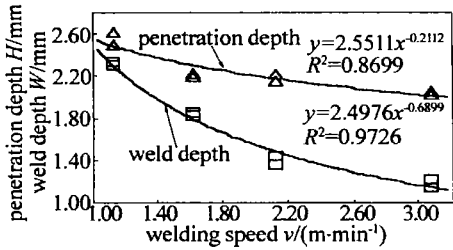


Fig 7 Variation of penetration depth and width with weld speed when laser power fixed at 1600W

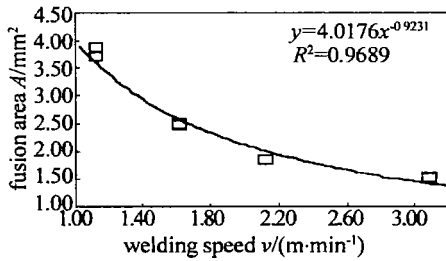


Fig 8 Variation of fusion area with weld speed when laser power fixed at 1600W

图 9 表明了激光功率不变的情况下，等离子体光信号的均方根值随熔深增大而增加的变化规律，其总体变化趋势与图 5 类似，拟合曲线亦为二次曲线，但图 9 与图 5 又有明显不同，两者的二次曲线方向及其所处的区间刚好相反。

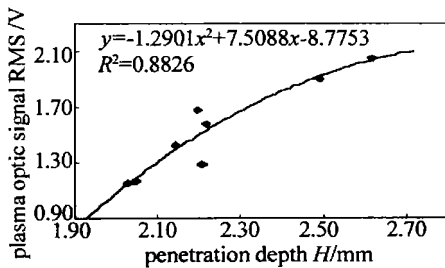


Fig 9 Variation of signal's RMS value with penetration depth when laser power fixed at 1600W

2 3 综合考虑速度与功率的变化

综合考虑分析表 2 中的数据，焊缝的熔深、熔宽及熔合面积随线能量的变化规律如图 10 图 11 所示。由图 10 可知，熔深、熔宽随着线能量的加大呈线性增长趋势，但熔深数据的实测点较为分散，与拟合直线的相关性稍差。图 11 反映熔合面积与线能量之间存在

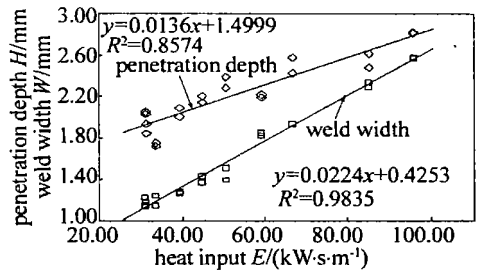


Fig 10 Variation of penetration depth and weld width with heat input

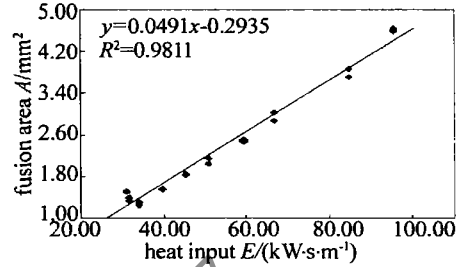


Fig 11 Variation of fusion area with heat input

良好的线性关系，与图 4 图 8 所示结果非常一致。

等离子体光信号强度随熔深的变化规律如图 12 所示，在综合考虑功率与速度均改变的情况下，等离子体光信号均方根值与熔深之间也是呈现的较为严格的二次曲线关系，数据与曲线的相关性非常好。图 12 中

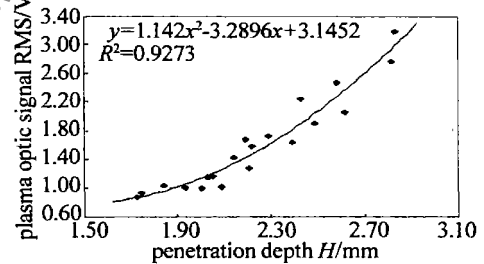


Fig 12 Variation of signal's RMS value with penetration depth

数据组成上添加了并未出现在图 5 图 9 中的不同工艺条件下的数据，拟合曲线并非图 5 和图 9 的简单综合，而更接近图 5 一些，这说明在一般情况下，图 5 所示变化规律比图 9 更具有普遍性。

3 分析

3 1 焊缝熔深熔宽与工艺参数的关系

从图 4 图 8 图 11 可看出，无论是在固定速度改变功率、固定功率改变速度，还是功率与速度均改变的情况下，焊缝的熔合面积都是随着线能量的增加呈较为严格的线性增长趋势，这说明在本研究的所有实验条件下，被工件所吸收利用的能量（包括直接吸收和间接利用的激光能量）亦随线能量的增加呈线性增长。实验所用激光聚焦后直径约为 0.3mm，功率范围为 1200W ~ 1800W，作用于工件的功率密度约为 $1.3 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2 \sim 2.0 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$ ，较低的功率密度不会产生强烈的等离子体云，同时在焊接过程中辅予以侧吹氩气控制，因此，

本研究中的激光致等离子体云对激光能量传输的阻碍作用较小,虽然不同工艺条件下检测到的等离子体光信号强度明显的改变说明等离子体的状态或性能发生了变化,但其并未对激光能量传输的效率产生显著影响,图 4 图 8 图 11 所示规律正说明了这一问题。

熔深、熔宽随线能量的增加大致上呈线性增长趋势(见图 10),但对于不同原因造成的线能量不同,熔深、熔宽变化的规律又有明显差别。虽然增加功率或降低速度都增大了焊接线能量,但还有如下不同:增加功率时还必然使到达小孔的激光功率密度增加,而到达小孔的功率密度是决定小孔内金属蒸气(或等离子体)压力大小的主要因素,对于激光深熔焊而言,小孔内蒸气压力是维持小孔的动力进而决定了焊缝熔深,因此,在速度不变增加功率的情况下,线能量的增加主要用于增大熔深,熔深的增长幅值和速度显著高于熔宽(见图 3);但在仅仅降低焊接速度的情况下,虽然提高了线能量,但由于功率不变即到达小孔的激光能量密度没有发生变化,即决定熔深的主要因素并未发生改变,熔深不随焊接速度改变发生显著变化,引起熔深小幅度的增加是由工件吸收能量增多和母材熔化量和蒸发量增大所造成的,因此固定功率降低速度的情况下,增加的线能量主要用于增加熔宽,熔宽增长幅值显著高于熔深(见图 7)。

3.2 等离子体光信号与熔深的关系

从图 5 图 9 图 12 可看出,无论是在固定速度改变功率、固定功率改变速度,还是功率与速度均改变的情况下,等离子体光信号都随焊缝熔深增加而增加,二者之间是一种近似严格的二次曲线关系,但图 5 和图 9 曲线的方向和区段相反,而综合考虑时的图 12 所示曲线与图 5 更为相似。

在激光深熔焊过程中,小孔深度决定焊缝熔深,而小孔深度又是由小孔内气体(金属蒸气和等离子体)的压力大小所决定,因此,当工艺改变使焊缝熔深提高时,其前提必然是小孔内气体压力提高,而小孔内气体正是熔池上方被监测的等离子体的直接来源,其压力的提高必然导致熔池和小孔上方等离子体体积增大温度升高,从而发出更强烈的光辐射^[2]。上述作用过程正是等离子光信号强度随焊缝熔深增加而增大,并呈现一种较为严格二次曲线关系的内在机理,因此,无疑可利用等离子体光信号实现熔深的实时监测或预测。在本研究的工艺范围内,等离子体光信号与熔深的拟合曲线为: $y = 1.142x^2 - 3.2896x + 3.1452 (R^2 = 0.9273)$ 。从图 12 可看出,拟合曲线与实测数据的相关性非常好,相关系数 R 高达 0.9627,这说明在一定的工艺范

围内,利用等离子体光信号均方根值进行非穿透焊熔深的实时监测或预测在实践中也是完全可行的。

图 5 所示是在固定焊接速度逐步提高激光功率的情况,熔深的增加主要是通过提高功率密度增加小孔内蒸气压力而获得;而图 9 所示是固定激光功率改变焊接速度的情况,焊接熔深的增加主要原因是提高线能量扩大材料的熔化量与蒸发量而使小孔内气压升高。两者熔深增加的主要原因不同,因而等离子体信号随之变化的规律也不尽相同。

从前面的分析可看出,激光功率对熔深的影响较焊接速度效果更为显著;另一方面,熔深是由小孔内压力大小决定的,而小孔内蒸气压力又对熔池上方的等离子体有决定性影响。由于上述原因,相对速度而言,功率变化引起的等离子体信号变化的效果更为明显,二者的相关性更强。因此,与图 9 相较,图 12 与图 5 更为相似的根本原因正是这一内在作用机理。

实验测得的等离子体光信号为何随熔深成二次曲线增长,其内部机理尚需更精确的测量手段与更深入的理论分析去发掘。

4 结 论

(1) 在一定的工艺范围内,激光深熔焊过程中的激光能量耦合的效率基本保持不变,并未受到等离子体的明显影响;(2) 激光功率与焊接速度二者之中,激光功率对熔深有更为显著的影响,而焊接速度对熔宽影响较大;(3) 在一定工艺参数范围内,等离子体光信号可以较好地反映非穿透激光深熔焊熔深的变化,其均方根值与熔深成严格的二次曲线关系。这一结果为非穿透激光深熔焊熔深的实时监测及预测提供了理论指导与实验依据。

参 考 文 献

- [1] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 48~53 (in Chinese).
- [2] LUO H. The principles and technologies of defect diagnosis an laser welding of thin sheets [D]. Wuhar: HU SE, 1998. 29~31 (in Chinese).
- [3] SUN A, Jr KANNATEY-ASIBU E, GARTNER M. Monitoring of laser weld penetration using sensor fusion [J]. Journal of Laser Applications, 2002, 14(2): 114~121.
- [4] FARSON D F, ALIA. Laser weld penetration monitoring with multiple signal measurement [J]. Journal of Laser Applications, 1999, 11(2): 47~52.
- [5] ANCONA A, SPAGNOLO V, LUGARA P M *et al*. Optical sensor for real time monitoring of CO₂ laser welding process [J]. Appl Opt, 2001, 40(33): 6019~6025.
- [6] TANG X H, ZHU H H, ZHU G F. Detection of laser induced plasma for high power laser beam welding [J]. Laser Technology, 1996, 20(5): 312~316 (in Chinese).