

镀锌钢激光焊接的等离子体温度与工艺参数的关系

张屹, 张海荣, 李时春, 史如坤

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 光致等离子体是激光焊接过程中的一个重要物理现象, 本文采用光谱仪配备 CCD, 对镀锌钢激光焊接产生的等离子体光谱进行了测量, 分析得到了 300nm~580nm 范围内的 Zn 特征谱线, 选取了波长在 334.5nm 和 481.0nm 谱线与激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体流量等工艺参数进行分析, 结果表明: 工艺参数对等离子体温度有一定影响, 并且保护气体流量对等离子体温度影响比较明显, 随保护气体流量增大而减少; 焊接速度对等离子体温度影响最小, 上下偏差为 1323K。

关键词: 激光焊接; 车身用镀锌钢板; 等离子体温度; 工艺参数

中图分类号: TG456.7

The Relationship between Plasma Temperature and Technological Parameter On Laser Welding of Galvanized Steel

Zhang Yi, Zhang Hairong, Li Shichun, Shi Rukun

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: Laser induced plasma is an important physical phenomenon during laser welding. In this paper, by using spectrograph, equipped With CCD, it takes a measurement on Zinc plasma spectrum produced from laser welding of galvanized steel. Zinc characteristic spectral line from 300nm to 580nm was observed from this analysis. Selecting two of the spectral lines with the wavelength of a 334.5 nm and 481.0 nm, this paper has analyzed these spectral lines and the technological parameter such as, laser power, speed of welding, defocused distance, shielding gas flow, it has been shown that technological parameter have certain effect on plasma temperature. Shielding gas flow have obvious impact on the plasma temperature. It decreases with the increasing of shielding gas flow. In addition, the influence of speed of welding on plasma temperature is least, whose deviation is 1323K.

Key words: laser welding; galvanized steel sheets to vehicle body; plasma temperature; technological parameter

0 引言

锌的熔点约为 420 °C, 气化温度为 906 °C, 非常不利于焊接, 激光等高强度热源刚一接触到镀锌板, 镀锌层就很容易挥发^[1-3]。锌的挥发会导致气孔、未熔合及裂纹等诸多缺陷, 而且大量锌的挥发会使母材的防腐蚀能力下降, 同时气孔的产生容易使焊缝的机械强度下降, 这样就限制了镀锌钢板的激光焊接应用^[4]。黄海军等人^[5]以 Nb:YA G 激光器对汽车用镀锌钢板进行了焊接工艺研究, 通过预留板间间隙的激光焊工艺试验, 对不同工艺条件下焊接试样的焊缝成形、微观组织及结合强度进行了分析与评价。试验结果表明: 预留间隙法可以有效地降低镀锌层在加热过程中的气化影响, 从而获得高质量的激光焊接质量。但是一旦缝隙太

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805045); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070532003); 湖南省自然科学基金资助项目(08JJ4017)

作者简介: 张屹, 男(1976-), 博士, 副教授。主要从事激光焊接、切割方面的科研和教学工作。E-mail: zy2100_hn@yahoo.com.cn

大, 锌蒸气会在熔池的两边迅速地形成一个缓冲层阻隔它们的熔合, 从而产生假焊。Weichiat Chen等人^[6]采用脉冲YAG激光预先在搭接板的下层板上打出合适的排气小孔, 再用1500W连续CO₂激光焊接双层搭接镀锌钢板, 能减少锌蒸气的影响, 减少焊接气孔, 得到的焊缝因熔融金属填满了所开的排气小孔形成类似于铆接的结构而增强了抗拉强度。但是, 当焊接速度过高时, 因排气小孔无法被熔融金属填满得到的焊缝抗拉强度反而下降, 并且需要额外开排气孔, 增加了工序。

等离子体是激光焊接过程中产生的一个基本特征。一定情况下, 光致等离子体可以提高能量耦合, 在另外一种情况下等离子体的作用是相反的, 它把激光束与工件屏蔽开来, 除对光束的吸收外, 蒸气等离子体也可以使激光束发生散射^[7]。光致等离子体的光谱分析法作为一种实用且高可靠性的研究方法, 为镀锌钢激光焊接提供新的天地。王春明等人^[8]通过试验研究, 发现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, 同时发现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, 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。张屹等人^[9]通过观测小孔内等离子体光反射实验发现小孔孔内的孔内等离子体对激光与工件材料的能量耦合有着重要的影响, 具体表现为焊接深度和焊接宽度的变化, 并且得到了等离子体温度和工艺参数有一定关联。本文利用光谱仪对镀锌钢激光焊接进行在线监测, 通过观测分析孔外等离子体, 分析得到了各工艺参数与等离子体温度的关系。

1 等离子体温度的谱线相对强度计算方法

Griem根据单位时间内电子碰撞引起的在第一激发态与基态的跃迁数应该十倍于自发辐射而引起的在第一激发态与基态之间的跃迁数, 给出了局部热力学平衡的一个简单的判据, 得到临界电子数密度 n_e 与电子温度 T_e 和第一激发态与基态之间的能级差 ΔE 的计算公式:

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} \sqrt{T_e} (\Delta E)^3 \quad (1)$$

当等离子体的电子数密度 n 大于临界电子数密度 N_e 时, 就可认为此等离子体出于局部热力学平衡状态。一般情况下, 激光焊接等离子体的电子密度为 $10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 远远小于激光焊接光致等离子体的电子密度, 满足(1)式的判据, 等离子体出于局部热力学平衡状态。另外有研究表明, 激光焊接过程中的光致等离子体只有自发发射与辐射复合过程在整个辐射过程中占据重要的位置, 自吸收对辐射能量的损失可以忽略, 从而可以认为激光深熔焊接等离子体处于局部热力学平衡状态。

在局部热力学平衡状态下, 测量等离子体温度的方法主要有谱线绝对强度法、谱线相对强度法、波尔兹曼图法、谱线轮廓法。谱线绝对强度法需要知道配分函数, 而锌的配分函数不容易得知, 故本文采用谱线相对强度法测量等离子体温度。发射系数之比可以用等离子体发射光谱的强度, 则同种粒子任何两条谱线的发射系数比值为

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{v_1 A_1 g_1}{v_2 A_2 g_2} \exp\left(-\frac{E_{u_1} - E_{u_2}}{kT}\right) \quad (2)$$

将式(2)进行变换得到

$$T = \frac{0.6247(E_1 - E_2)}{\lg \frac{g_1 A_1}{g_2 A_2} - \lg \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \lg \frac{I_1}{I_2}} \quad (3)$$

一般情况下, 为了减少误差, 尽可能选择能级差较大的两根谱线, 本文选择Zn的波长位于334.5nm和481.0nm处的两根谱线, 选用的锌谱线参数如表1所示。

表 1 锌谱线参数
Table 1 Parameter of zinc spectral line

波长 λ (nm)	激发能 E (cm^{-1})	统计权重 g	跃迁几率 A (s^{-1})	波尔兹曼常数 k
481.0	53672.24	5	$7\text{e}7$	1.380662e-23
334.5	62776.95	5	1.5e8	

2 实验条件及方法

2.1 实验材料

实验用试样尺寸100mm×30mm×1.2mm的DC56D+ZF镀锌钢板材, 实验前试样表面采用丙酮和酒精清洗焊接部位以除去材料表面氧化膜, 材料化学成分及力学性能如表2所示。

表 2 镀锌钢板的化学成分及力学性能
Table 2 Chemical composition and mechanical property of zinc-coated steel sheet

牌号	化学成分 %					力学性能 MPa	
	C	Si	Mn	P	S	抗拉强度	屈服强度
DC56D+ZF	0.014	0.008	0.118	0.014	0.030	300.68	155.29

2.2 实验设备及仪器

实验装置示意图如图1所示。采用DC025型板条式CO₂激光器及五轴联动激光加工设备, 激光器最大输出功率2500W, 连续输出的激光模式为TEM₀₀, 输出能量近似高斯分布。光束发散半角 $\alpha < 0.15$ mrad, 抛物面反射聚焦镜焦距为200mm, 焦斑直径为0.4mm。等离子体光谱采集设备是SpectraPro—2356型光谱仪, 配备1340×400像素: 400F高性能面阵CCD探测器, 1200g/mm光栅其光谱测量中心波长300nm, 单次测量宽度为65nm, 光学分辨率0.05nm。

2.3 实验方法

本次实验将两块镀锌钢组合后用夹具夹紧进行激光搭接焊试验, 图2为试验现场图。激光光束垂直入射到镀锌钢上板表面, 镀锌钢板随着随着工作台的移动在搭接部位形成连续的激光焊缝。焊接过程中, 采用氩气作为焊接保护气体和等离子体控制气, 产生的等离子体光信号通过凸透镜传入光纤, 光纤把接收到的等离子体信号通过光纤耦合端传输到光谱仪。利用光谱采集软件WinSpec/32对焊接过程中产生的锌等离子体光谱强度信号进行观测分析, 分析不同工艺参数对焊接过程中产生的等离子体温度的影响。

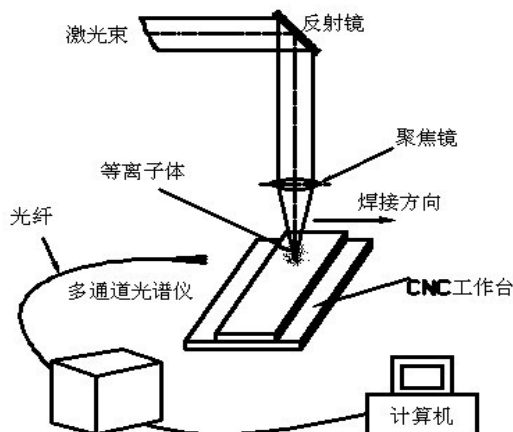


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic plan of experimental equipments



图2 实验现场图
Fig. 2 Local experience

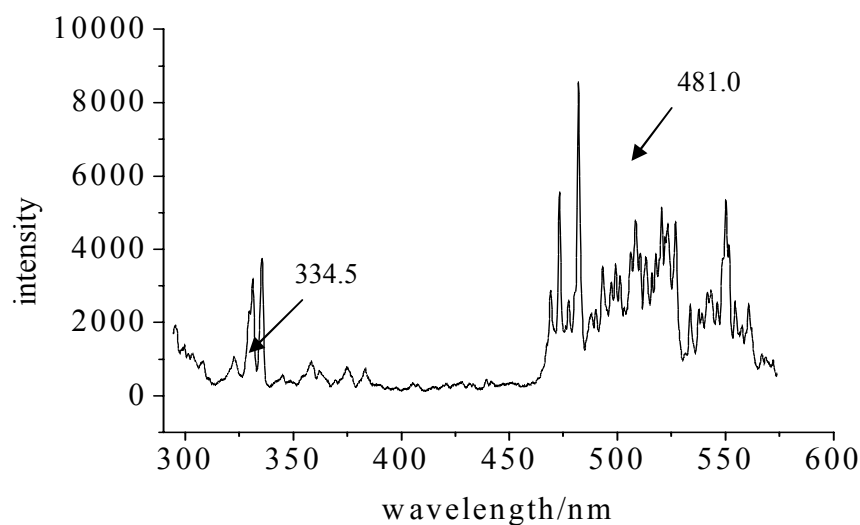


图3 等离子光谱图
Fig. 3 Spectrums of plasma

3 实验结果及分析

本次实验采用四因子四水平的正交实验。正交实验的特点是：①完成实验要求所需的实验次数少；②数据点的分布很均匀；③可用极差分析方法、方差分析方法、回归分析方法等对实验结果进行分析，引出有价值的结论。如果全面实验需要做 $4^4=256$ 次实验，采用正交实验只需做L16次试验。选取的四个因素为激光功率、焊接速度、离焦量和保护气体流量，目标因素为等离子体温度。采用连续激光对镀锌钢激光焊接进行了正交实验研究，实验采集了锌等离子体谱线，图3所示为第六组实验等离子体光谱图。单光纤通道对应检测孔外0~3.5mm的等离子体，并且将实验测出的波长在334.5nm和481.0nm处的谱线强度值取出，然后利用式（3）计算出每组实验得到的等离子体温度，工艺参数和等离子体温度值如表3所示。

表 3 正交实验设计表
Table 3 The table of orthogonal experimental design

No.	laser power (KW)	speed of welding (mm/min)	defocused distance (mm)	shielding gas flow rate (L/min)	temperature of plasma (K)
1	1.6	900	+1	5	8860.3
2	1.6	1000	0	10	11642.0
3	1.6	1100	-1	15	8568.3
4	1.6	1200	-2	20	9272.0
5	1.8	900	0	15	8039.0
6	1.8	1000	-1	20	7204.3
7	1.8	1100	-2	5	9363.5
8	1.8	1200	+1	10	7224.9
9	2.0	900	-1	5	11642
10	2.0	1000	-2	10	6519.1
11	2.0	1100	+1	15	7092.6
12	2.0	1200	0	20	6428.6
13	2.2	900	-2	15	9126.5
14	2.2	1000	+1	20	7011.7
15	2.2	1100	0	5	10535.0
16	2.2	1200	-1	10	9980.7

3.1 激光功率与等离子体温度的关系

图4表明：随着激光功率的增加，等离子体温度呈现一种“U”形规律，等离子体温度变化范围为7958K~9586K。当激光功率由1.6KW增加到2KW时，等离子体温度从9586K降低到7921K，这是由于此功率范围内焊接过程不是很稳定，虽然光致等离子体处于局部热力学平衡状态，但是由于激光焊接过程中产生的等离子体的光谱强度是周期震荡的，并且实验采集的帧数不是完全相同，使得功率从1.6KW到2.0KW时，等离子体温度变化不是很稳定。激光功率从1.6KW到1.8KW时，等离子体温度降低幅度很大，降低了1665K。而功率在1.8KW到2.0KW范围内，等离子体温度降低幅度很小，只降低了37K。当激光功率继续增加到2.2KW，等离子体温度开始回升，而且幅度很大，等离子体温度从7921K上升到了9163K，这是因为：此功率范围焊接过程中，随着功率的增加，作用在镀锌钢板上的激光能量增加，造成锌蒸气急剧挥发，随着能量的增加，锌蒸气电离形成锌等离子体，锌谱线强度得到提高，从而等离子体温度升高。

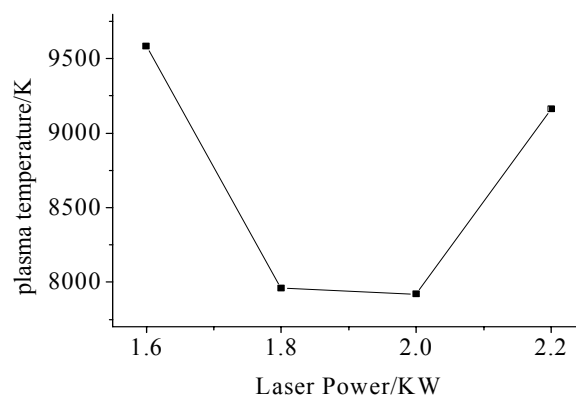


图 4 激光功率对等离子体温度的影响

Fig. 4 Influence of laser power on plasma temperature

3.2 焊接速度与等离子体温度的关系

图5表明：随着焊接速度的增加，等离子体温度总体上呈现下降趋势，变化幅值为

8094K~9417K。分析产生的原因有：（1）当焊接速度较低时，激光能量和镀锌钢板能量耦合的时间延长，线能量较大，部分金属熔化形成熔池，致使等离子体的密度增加，锌谱线强度随着等离子体密度的增加而增强，从而等离子体温度比较高；（2）当焊接速度继续增加时，镀锌钢板对激光的吸收系数减少，穿透等离子体的激光功率密度变小，此时锌谱线强度减弱，导致等离子体温度呈现下降趋势。焊接速度为1000mm/min时，等离子体温度为8094K，未介于8890K~9417K之间，产生突变的可能原因是孔内等离子体压力大于孔外等离子体压力，使得孔外等离子体激发出来的谱线能量较小，等离子体体积下降很大，等离子体温度很低。

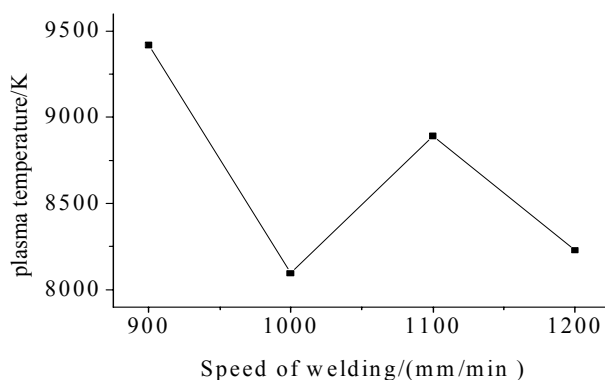


图5 焊接速度对等离子体温度的影响

Fig. 5 Influence of speed of welding on plasma temperature

3.3 离焦量与等离子体温度的关系

离焦方式有两种：正离焦与负离焦。焦平面位于工件上方为正离焦，反之为负离焦。由图6可见，在负离焦情况下，等离子体温度变化比较剧烈，等离子体温度从9161K上升到9349K，然后下降到8570K；在正离焦情况下，即离焦量由+1下降到0时，等离子体温度从7547K上升到9161K。这是因为：镀锌钢表层的镀锌层在激光束的照射下容易气化进而形成锌等离子体。（1）正离焦时，位于镀锌钢板上方的激光束焦斑处的锌等离子体更易产生且严重时屏蔽激光束的继续向下传输。此时，焊接过程不稳定，等离子体温度出现下降趋势；（2）反之，负离焦时焦点位于镀锌钢板表面以下，深熔焊接时焊接小孔内的的锌蒸气吸收激光能，膨胀形成锌等离子体，使得孔外锌谱线强度增强，等离子体体积增大，从而等离子体温度上升。进一步增加负离焦量，光斑焦点位置继续向下移动，使得熔池底部变宽，锌等离子体可能从熔池底部逃逸，造成等离子体体积减少，从而等离子体温度呈现一定的下降趋势。

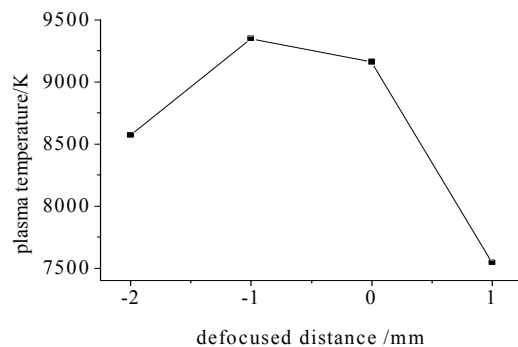


图6 离焦量对等离子体温度的影响

Fig. 6 Influence of defocused distance on plasma temperature

3.4 保护气体流量与等离子体温度的关系

保护气体的作用主要有：（1）避免工件在焊接过程中氧化或其他化学反应；（2）保护聚焦镜免受金属蒸气污染和液体溶滴的溅射；（3）驱散焊接时的光致等离子体。另外，保护气体会对焊接熔池具有一定的冷却作用。图7表明：保护气体流量由5L/min增加到20L/min时，等离子体温度呈现下降趋势，等离子体温度变化幅值为7480K~10100K。这是由于等离子体受熔池上方保护气体及熔池表面张力的影响的结果。随着保护气体流量的增加，深熔焊接小孔上方的等离子体更加容易被驱散，这样有效地抑制等离子体对入射激光束的吸收，改善激光能量的耦合和传输过程，这样使得等离子体体积变少，另外，保护气体还具有冷却熔池温度的作用，降低了焊接线能量，使得等离子体体积减少，从而等离子体温度下降。

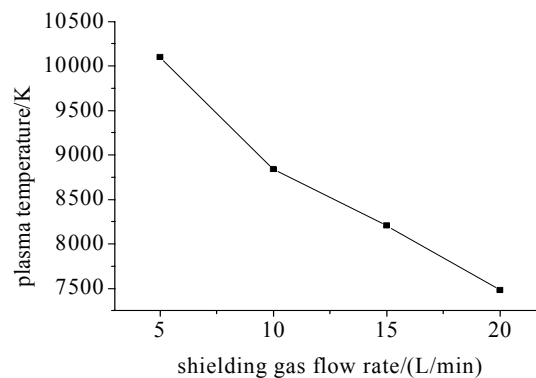


图7 保护气体流量对等离子体温度的影响

Fig. 7 Influence of shielding gas flow rate on plasma temperature

4 结论

1)利用光谱相对强度法测出了十六组实验的等离子体温度，实验结果发现：等离子体温度随着焊接工艺参数的变化而变化，并且它们之间有一定的关联，实验测出的最高的等离子体温度为11642K。

2)在激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体流量的四个工艺参数中，保护气体流量对等离子体温度的影响最为明显，等离子体温度随着保护气体流量的增加而降低。

3)在一定工艺参数范围下，等离子体温度的变化可以为激光深熔焊接的实时监测及预测提供一定的理论指导。

[参考文献] (References)

- [1] 封小松, 陈彦宾, 李俐群等. 镀锌板激光填丝钎焊[J]. 应用激光, 2004, 24(6):357-360.
- [2] 黄治军, 胡伦骥, 刘建华, 等. 镀锌板激光焊接接头锌的分布及耐蚀性试验[J]. 焊接, 2004(5):17-20
- [3] S. Iqbal, M.M.S. Gualini, F. Grassi. Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: Analysis and comparison[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(3):12-18.
- [4] M.Schmidt, A.Otto, C.Kageler. Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets[J]. Cirp Annals - Manufacturing Technology, 2008, 57(1):213-216.
- [5] 黄海军, 席升印, 丁健君. 降低镀锌层影响的汽车用镀锌钢板激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2005, 25(5):306-309.
- [6] Weichiat Chen, Paul Ackerson, Pal Molian. CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes[J]. Materials and Design, 2009, 30:245-251.
- [7] Reinhart Poprawe. 激光制造工艺[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [8] 王春明, 胡伦骥, 胡席远. 非穿透激光焊等离子体光信号与熔深的关系[J]. 激光技术, 2006, 30(1):23-26.
- [9] 张屹, 李力钧, 谢小柱, 等. 激光深熔焊接小孔孔内等离子体的实验研究[J]. 应用激光, 2004, 24(6):387-389.