

铝合金 CO₂ 激光深熔焊接过程中等离子体的热力学行为研究

张盛海¹ 沈以赴¹ 朱作军²

(¹南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

²湖北省监利中学, 湖北 荆州 433300

摘要 结合光学多通道分析仪和高速摄像仪的观测结果,对 6061 铝合金 CO₂ 激光深熔焊接过程中等离子体的热力学行为进行了研究。分析了稳定的激光焊接过程初始阶段和焊接过程中及焊接过程不稳定时的等离子体热力学行为。实验结果表明,激光深熔焊接在初始阶段,等离子体的电子温度和离子温度偏离较大,并逐渐趋于平衡,温度梯度也逐渐变小;在稳定的焊接过程中激光功率的增加对等离子体的温度影响较小,等离子体尺寸变化对焊缝截面有重要的影响;等离子体温度急剧增加时,小孔内气压的剧增会引起等离子体上下起伏,使焊接过程中断或产生气体,而等离子体尺寸大小的波动则会影响焊缝成形。

关键词 激光技术;激光焊接;激光深熔焊;等离子体;铝合金

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s103008

Thermodynamic Study on Laser-Induced Plasma in CO₂ Laser Welding of Aluminum Alloy

Zhang Shenghai¹ Shen Yifu¹ Zhu Zuojun²

(¹College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
²Middle School of Jianli County, Jingzhou, Hubei 433300, China)

Abstract The thermodynamics behaviors of laser-induced plasma have been studied during CO₂ laser welding on 6061 aluminum alloy with an optical multicultural analyzer and a high-speed camera. The plasma induced by laser in the initial stage and all the welding process have been analyzed in a stable welding process as the same as unstable welding process. The experimental results demonstrate that the deviation between electronic temperature and ionization temperature of plasma is very obvious in the initial stage during laser welding, then tends to balance gradually, in the same time, temperature gradient of plasma become smaller. In the stable welding process, there is only a small influence of laser power increase on temperature of the plasma, but the influence of the plasma's size on weld area is important. When the plasma temperature increases sharply with the pressure increasing in the keyhole, the plasma will move up and down, it will induce in the interrupt of welding process or produce blowholes. Moreover, the size fluctuation of plasma will worsen weld shaping.

Key words laser technique; laser welding; deep penetration laser welding; plasma; aluminum alloy

OCIS codes 140.3390; 150.5495; 350.3390; 350.3850; 350.5400

1 引 言

激光焊接技术因为其无可比拟的优越性,已日

益成为材料连接的重要手段^[1]。而铝合金激光焊接的重要意义和其中存在的一些难点包括激光与材料

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-23

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_0205)和国家自然科学基金(51075205)资助课题。

作者简介: 张盛海(1979—),男,博士研究生,主要从事材料激光加工方面的研究。E-mail: zhang5327@163.com

导师简介: 沈以赴(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事先进的材料制造与加工技术等方面的研究。

E-mail: yifushen@nuaa.edu.cn

的能量耦合效率、光致等离子体的稳定性和控制、气孔和接头性能等,一直是国内外研究人员研究的热点^[2~4]。随着激光器转换效率和输出功率的提高,特别是随着高输出功率、高光束质量光纤激光器的出现,能量耦合效率带来的问题有所缓解,但是光致等离子体的稳定性和控制一直是制约铝合金焊接过程稳定性和焊缝成形的关键问题。国内外在这方面进行了广泛的研究^[5~10],结果表明,激光深熔焊接过程中等离子体的稳定性与等离子体和焊接材料、激光的能量耦合及环境气氛的热传导有密切的关系,因此对铝合金激光深熔焊接过程中等离子体的热力学行为研究就尤为重要。

本文采用光学多通道分析仪和高速摄像仪,通

表 1 实验材料及化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %)

Base material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Other
6061	~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.15	0.2

2.2 实验装置及设备

实验装置如图 1 所示:使用的设备是 Rofin-Sinar 公司生产的扩散型(Slab)CO₂ 激光器,光束直径 $\phi=17$ mm,模式为 TEM₀₀,光束质量参数 $K \geq 0.95$, $K_f = 3.7$ mm · mrad,最大输出功率 $P = 3500$ W,采用焦距 $f=300$ mm 的铜抛物镜聚焦,焦斑直径 $D=268.4$ μ m。

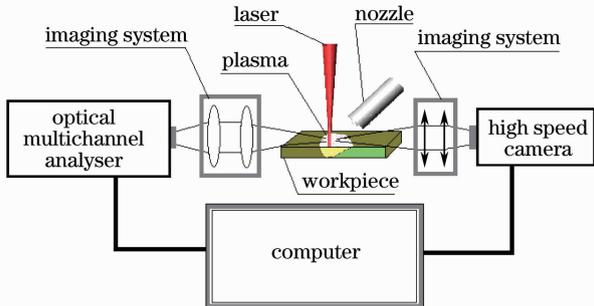


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic plan of experimental equipments

光学多通道分析仪是 EG&G 生产的 OMA III,探头 Model 1420 为带有 1024 pixel 的 CCD 探测器阵列,光谱测量范围为 190~880 nm,延迟精度为 0.1 ns。谱仪 HR-320 配有 300、1200、2400 lp/mm 的 3 种光栅。入射狭缝的宽度可调区间为 0~2 mm,调节精度为 1 μ m。在等离子体与光谱仪间放置一组透镜组,将距一定距离处的光谱等大地成像在光谱仪的狭缝上,经谱仪的光栅色散后被探头接收。

采用 Cooke 公司的 HSFC-PRO 高速摄像仪,相

过对 CO₂ 深熔焊接过程中光致等离子体的主要热物理量进行测量与计算,研究了激光焊接初始阶段与稳定的焊接过程中及焊接过程不稳定时等离子体的热力学行为。

2 实验条件

2.1 实验材料及表面处理

实验采用 6061 铝合金板材,试样尺寸为 100 mm×50 mm×2 mm,实验前试样表面采用化学处理方法除去表面氧化膜。化学处理是 70 °C 时在质量分数 8% 的 NaOH 溶液里浸泡 3 min 后,在质量分数为 30% 的 HNO₃ 溶液中浸泡直到表面恢复金属亮色,然后清水冲洗、晾干。其化学成分如表 1 所示。

机成像由多单元组成,四像增强 CCD(1280 pixel×1024 pixel)相机模块,快速可交换 MCP 像增强管和高分辨率 CCD 影像传感器,分辨率 $\lambda > 60$ lp/mm。曝光区间(3 ns,1000 s),延迟精度为 0.1 ns,极速快门最低 1.5 ns。

焊缝熔宽和截面采用 Olycia. m3 专业金相图像分析系统分析测量。喷嘴的辅助气导管内径 6 mm,最外层保护气导管内径 10 mm。

3 等离子体物理参数的计算

3.1 电子温度的计算

大量研究表明,激光焊接过程中的光致等离子体的自吸收和等离子体的辐射相比,可以忽略,因此一般处理为光学薄的等离子体,文献[11]给出了等离子体局域热力学平衡(LTE)的判据,可以用电子数密度表示为

$$n_e^* \geq 1.6 \times 10^{12} T_e^{1/2} (\Delta E)^3, \quad (1)$$

式中 n_e^* 为临界电子密度, ΔE 为第一激发态与基态的能量差,单位 eV。对于不同材料和激光器,激光焊接时光致等离子体的电子温度大致区间为 4200 °C~17000 °C,电子密度区间约为 $10^{15} \sim 10^{17}$ [8~10]。通过计算比较可知,等离子体的密度 n_e 大于 n_e^* ,故而可以在 LTE 条件下,用多谱线斜线法计算,根据 Boltzmann 分布定理,电子从能级 $p \rightarrow q$ 跃迁时,产生的辐射强度 I_{pq} 可表示为

$$I_{pq} = N_0 \frac{g_p}{g_0} \exp\left(-\frac{E_p}{kT_e}\right) A_{pq} h\nu_{pq}, \quad (2)$$

式中 N_0 为单位体积内基态的原子总数; g_0 、 g_p 为基态和能级 p 的统计权重; E_p 为 p 能级的激发能; A_{pq} 为自发跃迁概率; h 为 Planck 常数; k 为 Boltzmann 常数; ν_{pq} 为 $p \rightarrow q$ 发射谱线的频率。将波长 λ 代替频率代入(2)式并取对数,可得

$$\lg \frac{I_{pq}\lambda}{g_p A_{pq}} = -\frac{5040E_p}{T_e} + C, \quad (3)$$

式中 C 为常数,与谱线种类无关。根据(3)式绘制 $\lg \frac{I_{pq}\lambda}{g_p A_{pq}}$ 与 E_p 的线性图并拟合成直线,其斜率即为 $-\frac{5040}{T_e}$,可求出电子温度 T_e 。

3.2 等离子体名义温度的计算

激光焊接过程中的等离子体是偏离平衡态的,仅靠电子温度在等离子体的热力学分析还显不足,可以补充等离子体名义温度进行深入分析。

激光焊接过程中的等离子体一般沿激光束近似环形分布,可以假设等离子体为环形分布,在单位时间、单位立体角内,某一波长的辐射密度 ϵ_{pq} 可以表示为

$$\epsilon_{pq} = \frac{N_p A_{pq} h \nu_{pq}}{4\pi}, \quad (4)$$

式中 N_p 为激发态 p 的受激粒子数。如前所述,忽略等离子体的自吸收,只考虑自发跃迁,如图 2(a) 任取一单位体积,并假设体积中的等离子体均匀地处于 LTE 状态,温度用名义温度 T_n 表示,则该体积上一条谱线的表面亮度为

$$L_{pq} = \frac{1}{4\pi} N_p A_{pq} h \nu_{pq} \Delta y. \quad (5)$$

根据 Boltzmann 分布定理,由(2)式可得

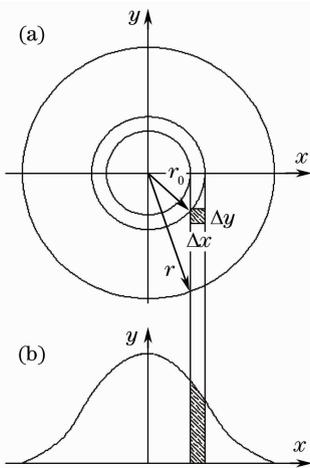


图 2 等离子体的截面及辐射密度的 x 方向分布
Fig. 2 Section of plasma and distribution of radiation density

$$N_p = N_0 \frac{g_p}{Z} \exp\left(-\frac{E_p}{kT_n}\right), \quad (6)$$

式中 Z 为配分函数,则

$$\epsilon_{pq} = \frac{N_0 g_p A_{pq} h \nu_{pq}}{4\pi Z} \exp\left(-\frac{E_p}{kT_n}\right). \quad (7)$$

利用(5)式和(7)式可获得同一电离度下,离子的两条跃迁谱线亮度比与名义温度的关系为

$$\frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2 g_1 A_1}{\lambda_1 g_2 A_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT_n}\right), \quad (8)$$

式中 L_{λ_1} 、 L_{λ_2} 、 A_1 、 A_2 、 g_1 、 g_2 、 E_1 、 E_2 分别为谱线波长 λ_1 、 λ_2 的亮度、自发跃迁概率、能级统计权重和激发态能量^[13], A_1 、 A_2 、 g_1 、 g_2 、 E_1 、 E_2 均可从相关文献查到^[11~13]。等离子体的亮度 L 与高速摄像机采集对应点的像素灰度值 G 满足线性关系^[11]

$$L = \gamma_\lambda G, \quad (9)$$

式中 γ_λ 为波长 λ 的谱线亮度与灰度值的比例系数,可以通过对采集系统的标定获得。将(9)式代入(8)式可得

$$T_n = \frac{(E_2 - E_1)/k}{\ln\left(\frac{\lambda_2 g_1 A_1}{\lambda_1 g_2 A_2}\right) - \ln\left(\frac{\gamma_{\lambda_1} G_1}{\gamma_{\lambda_2} G_2}\right)}. \quad (10)$$

利用 Abel 变换可以将谱线的横向分布能量辐射密度 $\epsilon(x)$ 变换为径向分布 $\beta(r)$ 。图 2(a) 中 y 方向为观测方向,等离子体的辐射亮度在摄像机上的分布与等离子体各横截面对应,如图 2(b) 所示, $\beta(r)$ 定义为在观测方向上,距等离子体中心 r 处的单位体积元、单位时间、单位频率间隔、单位立体角内发射的能量密度,则

$$\epsilon(x) = 2 \int_0^{y_0} \beta(r) dy. \quad (11)$$

令 $y = \sqrt{r^2 - x^2}$, 代入(11)式有

$$\epsilon(x) = 2 \int_x^{r_0} \frac{\beta(r)r}{\sqrt{(r^2 - x^2)}} dr. \quad (12)$$

该方程为 Abel 积分方程,其解可以简便地表示为

$$\beta_i(r) = r_0^{-1} \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} \epsilon_j(x), \quad (13)$$

式中 r_0 为等离子体半径, n 为径向的等分数, a_{ij} 为变换系数^[12]。这样可求出各点等离子体的名义温度;用同样的方法也可以求出各点处的电子温度。

3.3 等离子体离子温度的计算

在 LTE 条件下,根据 Boltzmann-Saha 方程可以计算出电离温度,近似用离子温度 T_{ion} 表示^[14]:

$$\frac{I^+}{I^0} = \frac{2g^+ A^+ \lambda^0}{n_e g^0 A^0 \lambda^+} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} \times$$

$$\exp\left(\frac{E^+ - E^0 - E_{\text{ion}} + \Delta E_{\text{ion}}}{kT}\right), \quad (14)$$

式中带“+”的是与离子谱线有关的物理量,带“0”的是与原子谱线有关的物理量; I 、 g 、 A 、 λ 、 k 与前面意义相同; m_e 为电子质量, E^+ 、 E^0 分别为离子谱线和原子谱线的激发能; E_{ion} 为该元素的电离能; $\Delta E_{\text{ion}} = 0.05 \text{ eV}$ 。

但是激光焊接过程中的等离子体都不处于 LET 状态,式中的温度不应取同一温度,为修正计算结果,可引入等离子体名义温度 T_n 及离子温度 T_{ion} :

$$\frac{I^+}{I^0} = \frac{2g^+ A^+ \lambda^0}{n_e g^0 A^0 \lambda^+} \left(\frac{2\pi m_e k T_{\text{ion}}}{h^2}\right)^{3/2} \times \exp\left(\frac{-E_{\text{ion}} + \Delta E_{\text{ion}}}{k T_{\text{ion}}}\right) \exp\left(\frac{E^+ - E^0}{k T_n}\right). \quad (15)$$

对于电子密度为 $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体,其电子密度 n_e 可用文献[13]介绍的 Stark 展宽法计算,并代入由光谱分析仪测出的一次离子谱线及原子谱线强度,即可计算出离子温度。

4 实验结果与讨论

4.1 初始阶段等离子体

激光功率 3 kW, He 气流量 25 L/min 时,通过优化其他工艺参数,选取稳定的激光焊接过程中的初始阶段分析。图 3(a)是高速摄像仪在间隔 500 μs , 3.5 ms 内采集的等离子体图片,这一阶段

等离子体的名义温度的最大值变化如图 3(b)所示;图 3(c)为等离子体处于初始位置[图 3(a)第 2 张等离子体图],在名义温度最高值点所在的水平截面上沿观测方向的温度分布。由图 3(b)可知,在激光焊接的初始阶段,等离子体的大小和温度有一个逐渐上升的过程,但很快趋于稳定。一般认为^[14,15],激光焊接的功率密度区间为 $(10^6, 10^9) \text{ W/cm}^2$,在这一范围,等离子体的点燃时间为纳秒量级,焊接起始阶段,焊接试件和环境温度较低,二者在等离子体周围的温度场梯度较大,对等离子体的冷压缩效果比较好,所以等离子体截面上的温度梯度较大,特别是在等离子体的外层,由于电子的运动速度远大于离子的速度,易于通过碰撞交换内外层能量,电子温度和离子温度偏离较远,如图 3(c)中等离子体中心位置二者的温度分别为 8643.27 $^\circ\text{C}$ 和 8479.25 $^\circ\text{C}$ 。

4.2 稳定焊接过程中的等离子体

在上述工艺参数下,从稳定焊接时间的中间位置取等离子体图片,如图 4(a)所示,其温度最高点在水平截面沿观测方向的温度分布如图 4(b)所示。与图 3 比较,等离子体大小与初始阶段的末了位置没有太大变化,但与初始位置相比,最外层等离子体的电子温度与离子温度偏离较小,温度梯度变小,整体更趋于热平衡,如图 4(b)中等离子体中心位置二者的温度分别为 12243.27 $^\circ\text{C}$ 和 12129.25 $^\circ\text{C}$ 。

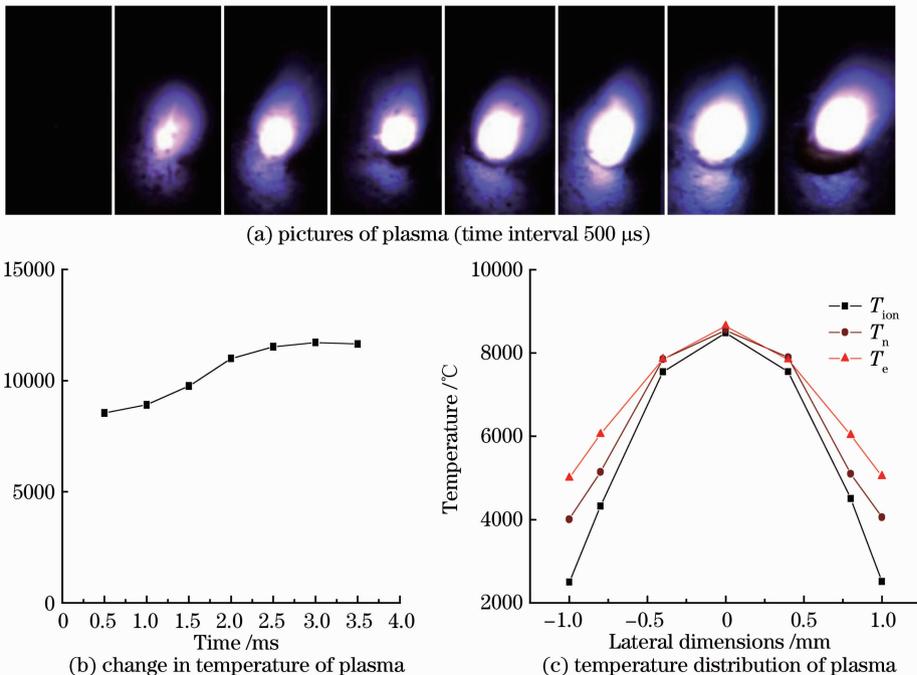


图 3 激光焊接初始阶段的等离子体

Fig. 3 Plasma in the initial stage

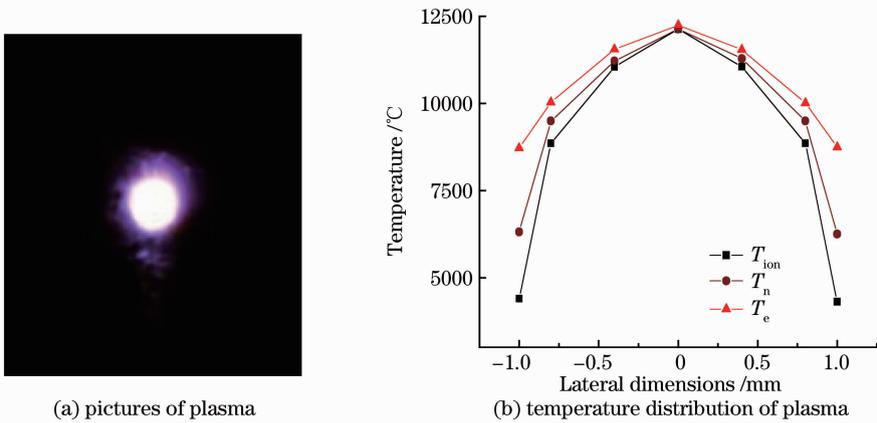


图 4 稳定焊接过程中的等离子体

Fig. 4 Plasma in an stable welding process

在不同功率优化工艺的参数下,统计稳定焊接过程中的数据,舍去最值,取平均值,得到等离子体名义温度的最值和等离子体的面积变化如图 5(a)所示,焊缝截面和输入线能量的变化如图 5(b)所示,在不同的功率 P 和焊接速度 v 下,焊缝截面如图 6 所示。随着焊接功率的变化,等离子体的温度变化并不明显,等离子体的大小和焊缝截面都相应

变大。等离子体大小变化并不是线性的,随着激光功率的提高,需要相应提高焊接速度,以维持激光、熔池和等离子体能量耦合的平衡,从而获得稳定的焊接过程。但是焊接速度过快,环境气氛对等离子体和熔池的扰动会变得严重,获得稳定的焊接过程必须平衡相应的工艺参数。随着功率的提高,功率密度增加,而需相应提高焊接速度,使线能量的输入

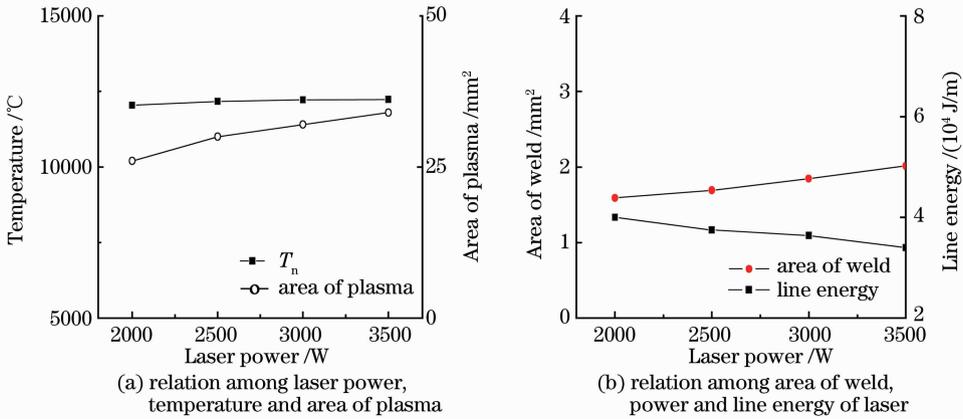


图 5 等离子体与功率线能量和焊缝截面的关系

Fig. 5 Relationship of plasma with weld section and power, line energy of laser

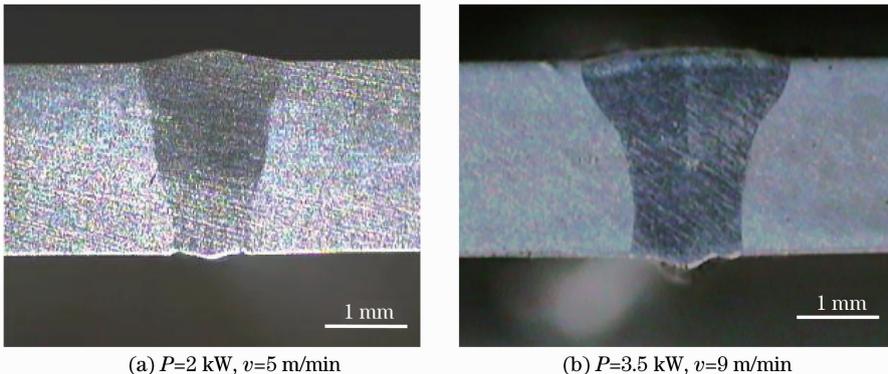


图 6 不同参数下的焊缝截面

Fig. 6 Weld section under different process parameters

有所降低,但是由于等离子体尺寸变大,对焊接材料的作用区域变大,焊缝可以从等离子体获得更多的能量,因而焊缝截面有变大的趋势。

4.3 不稳定焊接过程中的等离子体

激光深熔焊接过程中,等离子体的不稳定性主要表现为位置的上下起伏和尺寸的大小波动,分别如图 7(a)和图 7(b)所示[图片选取方法同图 3(a)]。图 7(a)所示等离子体,在焊接过程中,名义温度会突然急增,随之开始上浮,名义温度最值所在位置也同步上移,并伴随有等离子体的长大,表现

为熔池小孔内的气团急剧喷射,一般是由于小孔内气团压力的突然增加引起的,故而可以从图 7(a)后 4 张图片看到小孔尺寸的增加和气团喷射带出的飞溅物。这种不稳定往往会引起焊接过程的中断,或者在焊缝上留下气孔。而等离子体的上下波动往往不会引起焊接过程中断,计算结果显示,名义温度的最值波动也没有图 7(a)的幅度大,实验中还发现这种尺寸的波动具有一定的周期性,其结果是影响焊缝成形,如图 7(b)最后一张图片所示,焊缝宽度和高度有明显起伏。

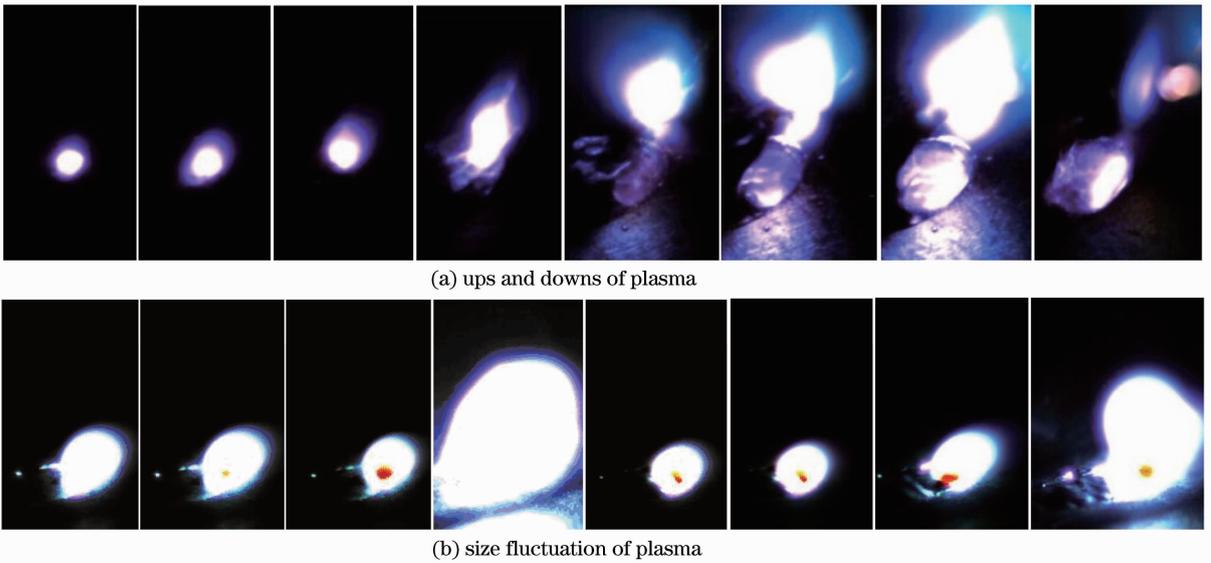


图 7 不同参数下的焊缝截面

Fig.7 Weld section under different process parameters

5 结 论

1) 激光深熔焊接在初始阶段,等离子体的电子温度和离子温度偏离较大,并逐渐趋于平衡,温度梯度也逐渐变小;

2) 在稳定的焊接过程中激光功率的增加对等离子体的温度影响较小,同时等离子体尺寸变大,焊缝截面变大;

3) 等离子体上下起伏,使焊接过程中断或产生气孔,而等离子体尺寸大小的波动则会影响焊缝成形。

参 考 文 献

- 1 Chen Wuzhu. Laser Welding and Cutting Quality Control[M]. Beijing: China Mechine Press, 2010
陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010
- 2 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002

- 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 3 J. L. Daniel. Laser Processing of Aluminum Alloy 5754 and Silicon Using a High Brightness Diode-Pumped Solid-State Nd: YAG Laser[D]. Michigan: The University of Michigan, 2004
- 4 Claus Bagger, Flemming Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *J. Laser Appl.*, 2005, **17**(1): 2351~2354
- 5 S. Katayama, C. D. Lundin. Laser welding of aluminium alloy 5456[J]. *Weld. Int.*, 1992, **6**(6): 425~435
- 6 Y. B. Chen, Y. B. Zhao, Z. L. Lei *et al.*. Effects of laser induced metal vapor on arc plasma during laser arc double sided welding of 5A06 aluminum alloy[J]. *Sci. & Technol. Weld. & Join.*, 2012, **17**(1): 69~76
- 7 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 860~863
张盛海, 陈 铠, 肖荣诗等. 填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 860~863
- 8 Guohua Li, Yan Cai, Yixiong Wu. Stability information in plasma image of high-power CO₂ laser welding [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2009, **47**(9): 990~994
- 9 Sibillano, T. Ancona, A. Rizzi *et al.*. Study on the correlation between plasma electron temperature and penetration depth in laser welding processes [J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**: 429~436

- 10 D. V. Bedenko, O. B. Kovalev, I. V. Krivtsun. Simulation of plasma dynamics in a keyhole during laser welding of metal with deep penetration[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**(10): 105501
- 11 H. R. Griem. Spectral Line Broadening by Plasmas[M]. New York: Academic Press, 1974. 1~12
- 12 K. Bockasten, R. Hllin. The Spectra of Highly Ionized Light Elements in a High-Temperature Plasma[M]. USA: Defense Technical Information Center, 1962
- 13 Mao Huang, Gary M. Hieftje. A new procedure for determination of electron temperatures and electron concentrations by Thomson scattering from analytical plasmas [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1989, **44**(3): 291~305
- 14 Paul J. Galley, Gary M. Hieftje. Tomographically resolved ionization temperatures and electron densities in the inductively coupled plasma determined by the line-to-continuum method[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1993, **48**(14): 1725~1742
- 15 Shalom Eliezer. The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas[M]. USA: Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2002

栏目编辑:宋梅梅