

# 激光深熔焊等离子体电信号振荡特征与焊缝熔深的特征关系

许赛<sup>1</sup>, 杨立军<sup>1,2</sup>, 徐书峰<sup>3\*</sup>, 黄一鸣<sup>1\*\*</sup>, 赵圣斌<sup>1</sup>, 李珊珊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;

<sup>2</sup>天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350;

<sup>3</sup>山西太钢不锈钢股份有限公司不锈钢冷轧厂, 山西 太原 030003

**摘要** 针对激光深熔焊接过程的监控问题, 基于小孔内部压力平衡条件分析了小孔振荡和小孔深度的关系。在此基础上基于小孔行为与等离子体行为的耦合性, 以及等离子体振荡特征与等离子体电信号波动特征的一致性, 利用短时自相关分析方法分析了 A304 不锈钢和 Q235 碳钢在激光深熔焊接过程中等离子体电信号振荡周期与焊缝熔深之间的关系。结果表明, 等离子体电信号振荡周期随焊缝熔深的增加而增大, 并且不同焊接材料的等离子体电信号振荡周期与焊缝熔深之间的关系不同。最后, 在可变热输入连续焊接验证实验中, 在焊接过程稳定的条件下, 等离子体电信号的短时自相关分析结果与焊缝熔深之间有比较好的对应关系, 与所分析的小孔振荡特征方程具有一致性。

**关键词** 激光光学; 激光深熔焊; 焊缝熔深预测; 短时自相关分析; 等离子体电信号

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0102006

## Relation between Plasma Electrical Signal Oscillation and Weld Depth in Laser Deep Penetration Welding

Xu Sai<sup>1</sup>, Yang Lijun<sup>1,2</sup>, Xu Shufeng<sup>3\*\*</sup>, Huang Yiming<sup>1\*</sup>, Zhao Shengbin<sup>1</sup>, Li Shanshan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

<sup>3</sup>Stainless Cold Rolling Mill, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030003, China

**Abstract** In this study, the relation between keyhole oscillation and depth is analyzed based on the internal pressure balance conditions of the keyhole to allow real-time monitoring of the laser penetration welding process. Then, based on the coupling of keyhole behavior with plasma behavior and consistency of plasma oscillation characteristics with plasma electrical signal fluctuation characteristics, we use a short-time autocorrelation analysis method to analyze the relation between the oscillation period of a plasma electrical signal and weld depth during laser penetration welding of A304 stainless steel and Q235 carbon steel. Results show that the plasma electrical signal's oscillation period increases with an increase in the weld depth, and the relations between the plasma electrical signal's oscillation period and weld depth differ when the welding materials are different. Finally, in a variable heat input continuous welding verification test, we obtain a good correspondence between the short-time autocorrelation analysis results of plasma electrical signals and weld penetration when the welding process is stable, which is consistent with the keyhole oscillation characteristic equation we analyzed.

**Key words** laser optics; laser penetration welding; weld depth prediction; short-time autocorrelation analysis; plasma electrical signal

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 140.3380

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-09-17; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(51875403)

\* E-mail: xusf@tisco.com.cn; \*\* E-mail: ymhuang26@tju.edu.cn

# 1 引 言

与传统焊接方法相比,激光焊接由于具有生产效率高、自动化程度高、焊缝热影响区小、焊缝质量优良等优点,已被广泛应用于汽车制造、船舶生产、航空航天等工业领域<sup>[1-3]</sup>。通常,激光焊接有两种焊接模式:热导焊和深熔焊,深熔焊得到了较广泛的关注和应用。在深熔焊模式下液态金属快速蒸发,大量金属蒸气冲击液态熔池,导致熔池中有小孔形成<sup>[4-5]</sup>。小孔对焊接参数和外界条件的变化十分敏感,焊缝熔深和焊缝质量又都主要取决于小孔的动态行为<sup>[6]</sup>,因此有必要加强对小孔行为的监测<sup>[7]</sup>。然而,由于小孔位于工件内部,小孔上方又受到等离子体的屏蔽,小孔的动态行为几乎不能被直接监测。近年来,有研究表明等离子体行为与小孔行为有着密切联系,加深了对等离子体与小孔之间关系的认识。Tenner等<sup>[8]</sup>利用两台不同角度放置的高速摄像机发现了小孔行为和等离子体羽流之间的相关性并研究了焊接参数对小孔几何形状的影响。Seto等<sup>[9]</sup>利用高速摄像机和X射线透射观测系统揭示了等离子体与焊缝中气孔的关系。Mrna等<sup>[10]</sup>通过研究等离子体的光发射强度得出了等离子体喷发周期与焊缝深度之间的线性关系。Sibillano等<sup>[11]</sup>通过分析等离子体发射光谱得出了电子温度与焊缝熔深之间的定量关系。相关研究加深了对等离子体特征和小孔行为的认识,但是对于焊缝深度的监测,等离子体喷发周期与焊缝熔深之间的简单线性关系难以解释小孔内复杂的动态行为,文献[11]中对电子温度的测量受到传感器位置和角度的影响较大,因此难以得出电子温度与焊缝熔深之间的确切关系。此外,以上的检测手段在实时性方面也存在不足。近年来,检测实时性较高的激光等离子体电信号检测方法为等离子体研究开辟了新的路径。

以往的电信号检测研究也发现了激光等离子体与小孔行为之间密切的关联。杨瑞霞等<sup>[12]</sup>通过分析等离子体电信号在特定谱段内的谱强度可以判别激光焊接模式。Zhao等<sup>[13]</sup>使用无源电信号检测装置检测等离子体电信号,发现小孔形成与否是造成不同焊接模式下等离子体电信号特征不同的决定性因素。Qiu等<sup>[14]</sup>通过等离子体电信号和高速摄像机同步检测方法,发现等离子体高度变化特征与等离子体电信号振荡特征之间具有良好的对应关系。本文在此基础上进一步研究在深熔焊条件下,激光等离子体振荡特征与小孔振荡特征和焊缝熔深的关系。

# 2 理论基础与分析方法

## 2.1 小孔振荡的理论基础

在激光深熔焊接过程中,决定小孔性能的主要因素是小孔的内部压力。如图1所示,小孔稳定存在的前提是小孔内部压力满足<sup>[15]</sup>

$$p_v + p_l + p_h = p_\sigma + p_g, \quad (1)$$

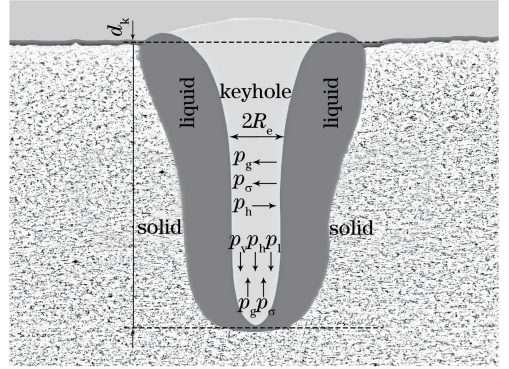


图1 小孔内部压力示意图

Fig. 1 Diagram of internal pressure of keyhole

式中: $p_g$ 为重力引起的液体静压力; $p_\sigma$ 为液态金属的表面张力; $p_v$ 为小孔底部高于大气压的蒸气反作用力; $p_h$ 为气体流动所产生的流体动压力; $p_l$ 为辐射压力。 $p_v$ 、 $p_h$ 和 $p_l$ 是促使小孔扩张的力,与小孔内部的蒸发、流动等过程有关; $p_\sigma$ 和 $p_g$ 是促使小孔闭合的力, $p_v$ 与液体的流体力学性质有关。 $p_g$ 、 $p_\sigma$ 、 $p_v$ 和 $p_h$ 可表示为

$$p_g = \rho g d_k, \quad (2)$$

$$p_v = m n_g u_g^2, \quad (3)$$

$$p_\sigma = \frac{\gamma}{R}, \quad (4)$$

$$p_h = \frac{1}{3} p_v \left( \frac{d_k}{R} \right)^2, \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为液态金属密度; $g$ 为重力加速度; $d_k$ 为小孔深度; $m$ 为气体原子质量; $n_g$ 为Knudsen层的表层密度; $u_g$ 为Knudsen层的气体速度; $\gamma$ 为材料表面张力系数; $R$ 为小孔半径。当小孔壁面表面温度 $T_s$ 已知时,可估算出 $p_v$ 。与其他压力相比, $p_l$ 的数值比较小,一般可以忽略不计。根据文献[16],小孔内部压力平衡偏移量 $\Delta p$ 可表示为

$$\Delta p = p_v \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{d}{R} \right)^2 \right] - \frac{\gamma}{R} - \rho g d_k. \quad (6)$$

当 $\Delta p = 0$ 即小孔内各项压力保持平衡时,(6)式可以转化为

$$p_v = \frac{3\gamma R_c + 3\rho g R_c^2 d_k}{3R_c^2 + d_k^2}, \quad (7)$$

式中: $R_e$  为平衡状态下小孔的半径。(7)式表明平衡状态下小孔的几何形状和尺寸与蒸气反作用力有一定关系。实际上,液态金属会根据工艺条件(激光功率、焊接速度、材料性能)自行调整小孔的几何形状和尺寸<sup>[17-18]</sup>。小孔形状和尺寸的任何微小变化都会打破小孔内部的压力平衡,这将导致小孔不可避免地发生振荡。Klein 等<sup>[19]</sup>的研究表明,小孔将在一个频率范围内被激发出不同方位角和轴向的模式,其中最基本的是模态数 $(n, l) = (0, 0)$ 时的径向振荡,这种振荡也必然会对小孔内等离子体向外喷发产生影响,使得等离子体喷发具有振荡特征, $n, l$  分别为方位角模态数和轴向模态数。此振荡的本征频率  $\omega_0$  可表示为

$$\omega_0^2 = \frac{\frac{\partial}{\partial R} (p_o - p_v - p_h) |_{R=R_e}}{\ln 3 \times \delta R_e}, \quad (8)$$

式中: $\delta$  为液相平均质量密度。进一步对(7)式和(8)式进行推导,发现小孔的本征振荡频率  $\omega_0$  可通过小孔振荡特征方程表示:

$$\omega_0^2 = \frac{\gamma d_k^2 + 2\rho g R_e d_k^3 - 3\gamma R_e^2}{\ln 3 \times \delta (3R_e^3 + d_k^3 R_e^3)}. \quad (9)$$

(9)式表明,小孔振荡是一个复杂的过程,本征振荡频率  $\omega_0$  与表面张力系数  $\gamma$ 、液相平均质量密度  $\delta$ 、小孔平衡半径  $R_e$  和小孔深度  $d_k$  等参数有关。当确定焊接材料时,可以得到小孔的本征振荡频率  $\omega_0$ 、小孔平衡半径  $R_e$  和小孔深度  $d_k$  之间的关系。

## 2.2 等离子体电信号分析方法

上述小孔振荡特征方程表明,虽然可以通过分

析小孔振荡特征来推断小孔的几何形状和尺寸,但在实际焊接过程中实时监测小孔振荡行为却十分困难。有相关研究指出,等离子体的振荡行为与小孔的振荡行为具有良好的一致性<sup>[9]</sup>,等离子体振荡特征可以通过将无源电探针插入到等离子体羽流中检测到的电信号来反映<sup>[13]</sup>。无源电探针对等离子体电信号的检测遵循等离子体鞘层效应,即当温度低于等离子体温度的导体进入等离子体羽流时,电子的扩散速度大于离子的扩散速度,使导体前端产生负电位。等离子体鞘层电压  $E_w$  的计算式<sup>[20]</sup>为

$$E_w = -\frac{kT}{e} \ln \sqrt{\frac{m_i}{4\pi m_e}}, \quad (10)$$

式中: $k$  为玻尔兹曼常数; $T$  为温度; $e$  为电子电荷; $m_i$  和  $m_e$  分别为离子质量和电子质量。因此,电信号实际上反映的是等离子体内部温度特征。如图 2 所示,在激光深熔焊接过程中,采用高速摄像机和电信号检测装置同步采集等离子体图像和电信号波形。可以看出:等离子体图像收缩对应等离子体电信号的上升阶段;等离子体图像膨胀对应等离子体电信号的下降阶段。这与文献<sup>[14]</sup>的研究结果一致。这表明等离子体的体积与同步获得的等离子体电信号有良好的对应关系,等离子体收缩或膨胀的变化过程与等离子体电信号增大或减小变化过程对应一致。因此,使用合适的方法分析等离子体电信号,研究等离子体的振荡特征以揭示小孔的振荡特征是研究小孔行为的可行方案。

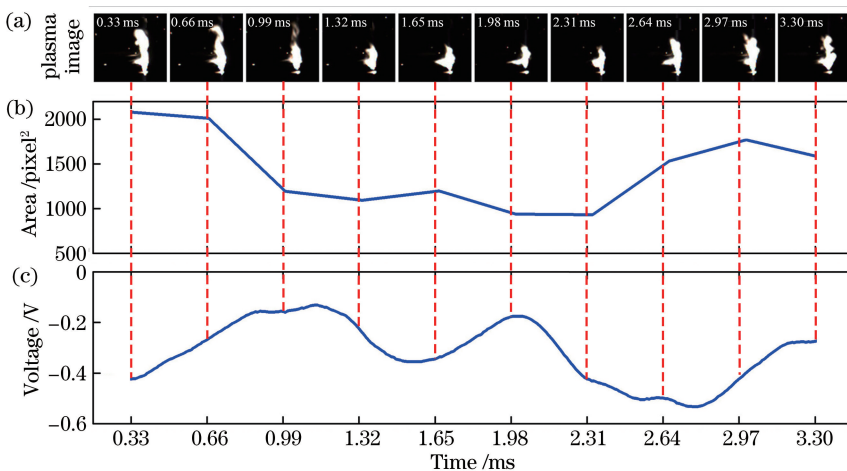


图 2 电信号检测装置和高速摄像机采集的图像。(a) 等离子体图像;(b) 等离子体面积;(c) 电信号电压

Fig. 2 Collected images by electrical signal detector and high-speed camera.

(a) Plasma images; (b) plasma area; (c) electrical signal voltage

本文采用自相关分析方法分析等离子体电信号,对于一段均值为  $\mu$  的模拟电信号  $I(t)$ ,其离散

归一化自相关函数  $R(\tau)$  与时滞  $\tau$  的定义式可表示为



$$R(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^{t_0} \{ [I(t) - \mu][I(t - \tau) - \mu] \}}{\sum_{t=0}^{t_0} [I(t) - \mu]^2} \quad (11)$$

与短时傅里叶变换方法类似,每 5 ms 从原始信号中提取时间长度为 25 ms、重叠长度为 20 ms 的信号,通过自相关分析方法得到一系列自相关函数,然后沿时间轴绘制成自相关函数谱,可以得到不同时刻的信号波动周期。本文将这种信号处理方法称为短时自相关分析(STAA)。每对原始信号  $I(t)$  进行一次自相关分析可得到其自相关函数  $R(\tau)$ ,将  $R(\tau)$  的第一个局部极大值点对应的时滞  $\tau$  定义为  $\tau_{\max}$ 。时滞  $\tau_{\max}$  可以被解释为原始信号  $I(t)$  的波动周期。原始信号  $I(t)$  的波动周期越大,时滞  $\tau_{\max}$  的值越大。

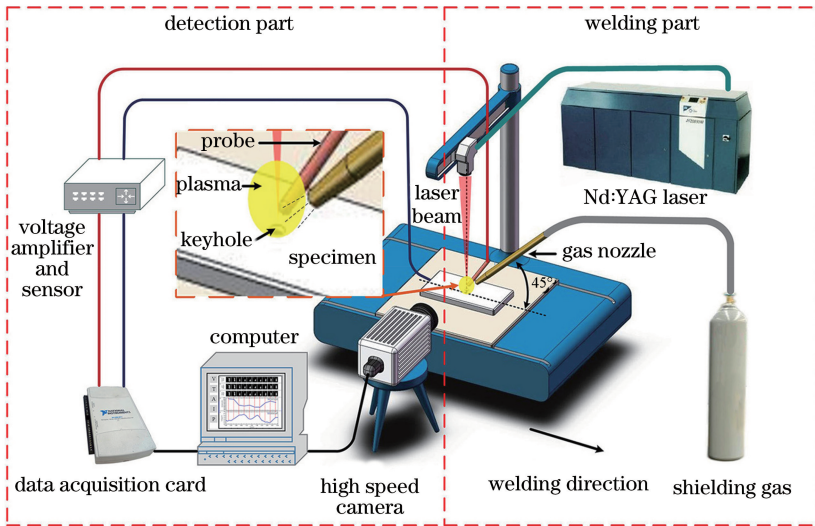


图 3 焊接实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of welding test system

### 3 结果与讨论

#### 3.1 等离子体电信号振荡特征与焊缝形貌的关系分析

在保护气体为氩气,气体流量为 25 L/min,激光的光斑直径为 0.6 mm,激光离焦量为 -1 mm 的焊接条件下,采用短时自相关分析方法分析焊接热输入对 A304 不锈钢和 Q235 碳钢焊缝形貌和等离子体振荡特征的影响。不同条件下两种材料对应的焊缝熔深、电信号、自相关函数如图 4 所示。从图 4 可以看出,材料热物理性能差异很大的两种材料 A304 不锈钢和 Q235 碳钢表现出一致的规律性。随着焊接热输入的增加,等离子体电信号振荡周期

#### 2.3 实验方法

如图 3 所示,整个实验系统分为焊接子系统和检测子系统。检测子系统由高速摄像机、无源电探针、数据采集卡、调理电路和计算机组成。高速摄像机拍摄速度为 3000 frame/s,拍摄方向与焊接方向和激光照射方向垂直,并与采样频率为 100 kHz 的电信号检测装置同步采集。焊接子系统由 Nd:YAG 激光器(JK2003SM 型)、三维行走工作台和保护气装置组成,激光器镜头焦距为 160 mm,输出激光波长为 1064 nm,光斑直径为 0.6 mm。实验材料为 A304 不锈钢和 Q235 碳钢,工件尺寸为 200 mm×60 mm×4 mm,焊接保护气体类型为氩气。表 1 给出了恒定热输入连续焊接过程的详细实验参数,表 2 给出了可变热输入连续焊接过程的详细实验参数。

$\tau_{\max}$ 、焊缝熔深  $d$  和焊缝宽度  $R_p$  均增大,并且等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$ 、焊缝熔深  $d$  和焊缝宽度  $R_p$  三个参数之间存在一定关系。

由于在深熔焊接过程中,等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  与小孔振荡周期  $T_c$  具有很好的一致性 ( $\tau_{\max} = T_c$ )<sup>[14]</sup>,焊缝熔深  $d$  近似等于小孔深度  $d_k$  ( $d \approx d_k$ ),焊缝宽度  $R_p$  与小孔平衡半径  $R_e$  成正比<sup>[21]</sup>,因此等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$ 、焊缝熔深  $d$  和焊缝宽度  $R_p$  三个参数之间的关系实际上反映的是小孔振荡周期  $T_c$ 、小孔深度  $d_k$  和小孔平衡半径  $R_e$  三个参数之间的关系。此外,由于焊缝熔深  $d$  与焊缝宽度  $R_p$  成正比,可以假设小孔深度  $d_k$  与小孔平衡半径  $R_e$  成正比 ( $d_k/R_e = C$ )。因此可



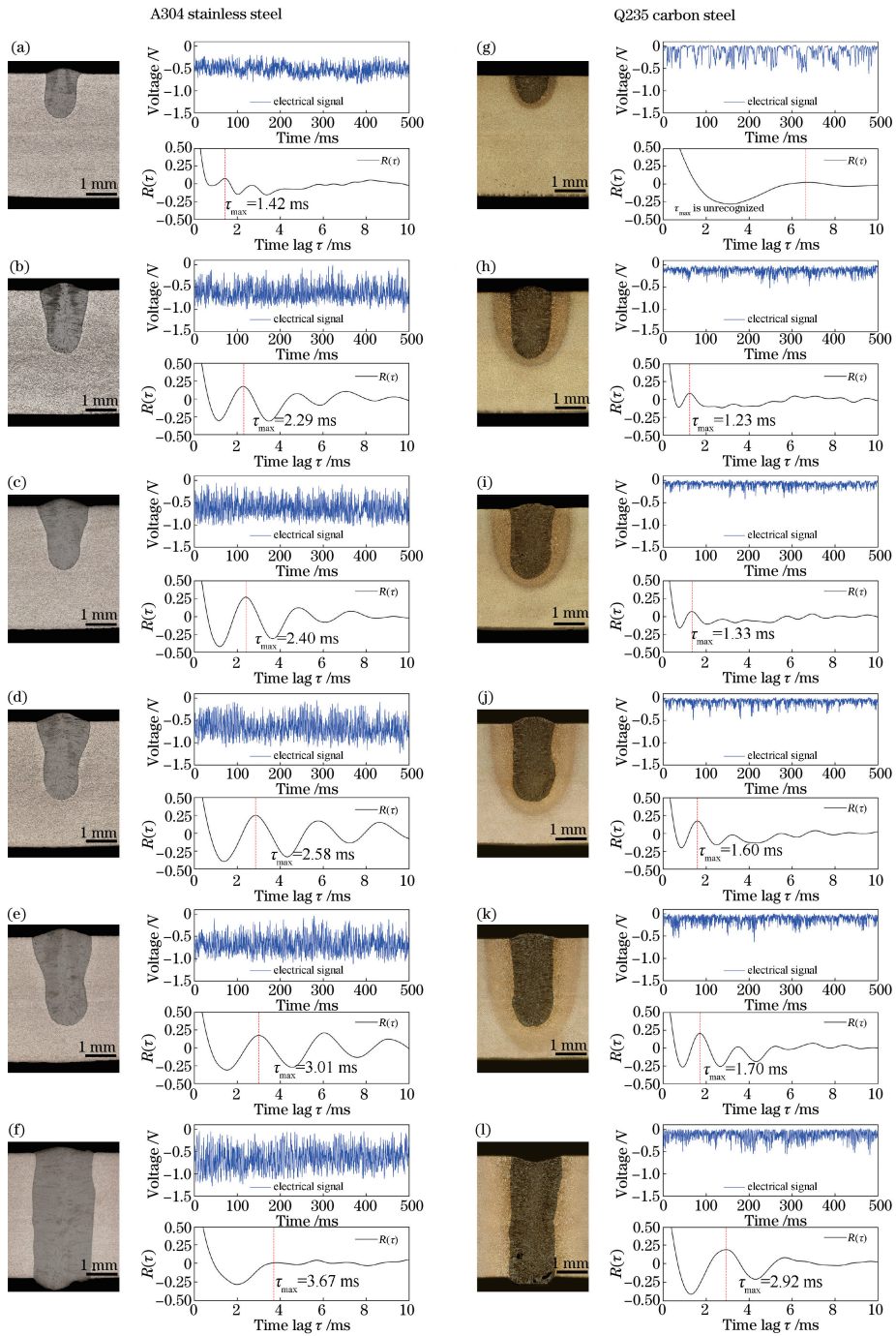


图 4 不同热输入条件下 A304 不锈钢与 Q235 碳钢的焊缝截面、电信号及自相关函数。(a)  $P=1000\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (b)  $P=1100\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (c)  $P=1200\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (d)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (e)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (f)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=4\text{ mm/s}$ ; (g)  $P=1000\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (h)  $P=1100\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (i)  $P=1200\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (j)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (k)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=6\text{ mm/s}$ ; (l)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=4\text{ mm/s}$

Fig. 4 Weld cross section, electrical signal, and autocorrelation function of A304 stainless steel and Q235 carbon steel under different heat input processes. (a)  $P=1000\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (b)  $P=1100\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (c)  $P=1200\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (d)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=12\text{ mm/s}$ ; (e)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (f)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=4\text{ mm/s}$ ; (g)  $P=1000\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (h)  $P=1100\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (i)  $P=1200\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (j)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=8\text{ mm/s}$ ; (k)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=6\text{ mm/s}$ ; (l)  $P=1300\text{ W}$ ,  $v=4\text{ mm/s}$

表 1 恒定热输入条件下的焊接参数

Table 1 Welding parameters for constant heat input process

Experimental material	Laser power $P / W$	Welding speed $v /$ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Argon gas flow $Q /$ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
A304 stainless steel	1300	4	25
A304 stainless steel	1300	6	25
A304 stainless steel	1300	8	25
A304 stainless steel	1300	10	25
A304 stainless steel	1300	12	25
Q235 carbon steel	1300	4	25
Q235 carbon steel	1300	6	25
Q235 carbon steel	1300	8	25
Q235 carbon steel	1300	10	25
Q235 carbon steel	1300	12	25
A304 stainless steel	1000	12	25
A304 stainless steel	1100	12	25
A304 stainless steel	1200	12	25
A304 stainless steel	1300	12	25
A304 stainless steel	1400	12	25
Q235 carbon steel	1000	8	25
Q235 carbon steel	1100	8	25
Q235 carbon steel	1200	8	25
Q235 carbon steel	1300	8	25
Q235 carbon steel	1400	8	25

表 2 可变热输入条件下的焊接参数

Table 2 Welding parameters for varying heat input processes

Experimental material	Laser power $P / W$	Welding speed $v /$ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Argon gas flow $Q /$ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
A304 stainless steel	1100→1400→1100	8	25
Q235 carbon steel	1100→1400→1100	6	25

可以根据小孔振荡特征方程(9)式得到小孔振荡周期  $T_c$  与小孔深度  $d_k$  之间的特征关系:

$$T_c = \sqrt{\frac{\ln 3 \times (3 + C^2) \delta d_k^3}{2C^4 \rho g d_k^2 + (C^5 - 3C^3) \gamma}} \quad (12)$$

在实际焊接过程中,  $C$  值在不同的焊接材料和焊接条件下可能会有所不同。在等离子体电信号振荡周期等于小孔振荡周期 ( $\tau_{\max} = T_c$ ), 焊缝深度约等于小孔深度 ( $d \approx d_k$ ) 的条件下, 根据特征关系(12)式对实验结果进行非线性曲线拟合, 获得不同焊接材料的  $C$  值以及等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  与焊缝熔深  $d$  的特征关系, 如图 5 所示。等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  与焊缝熔深  $d$  之间的特征关系可以由特征公式(13)式[A304 不锈钢, 决定系数  $R^2 = 0.7829$ ]和特征公式(14)式[Q235 碳钢,  $R^2 = 0.9478$ ]表示:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\frac{d^3}{0.115d^2 + 1.564}}, \quad (13)$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\frac{d^3}{0.164d^2 + 5.689}} \quad (14)$$

特征公式表明等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  随焊缝熔深  $d$  的增大而增大。此外, Q235 碳钢的小孔深度  $d_k$  与小孔半径  $R$  的比值 ( $C = 3.39843$ ) 大于 A304 不锈钢 ( $C = 2.94296$ ), 并且在焊缝熔深  $d$  相同的情况下, Q235 碳钢的等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  比 A304 不锈钢的更短。此外, 在焊缝熔深  $d$  较小的热导焊条件下, 等离子体电信号振荡不像深熔焊条件下等离子体电信号振荡那样明显有规律, 热导焊条件下等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  与焊缝熔深  $d$  的特征关系的适用性受到一定限制。文献[19]表明这是因为在热导焊的焊接过程中未形成小孔, 等离子体电信号没有明显的振荡周期。

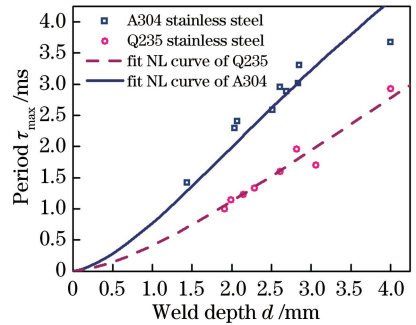


图 5 等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  与焊缝熔深  $d$  的特征关系

Fig. 5 Relationship between plasma electrical signal oscillation period  $\tau_{\max}$  and weld depth  $d$

综上所述, 基于小孔振荡特征方程分析的等离子体电信号振荡周期  $\tau_{\max}$  和焊缝熔深  $d$  之间的特征关系与实际焊接结果具有良好的对应关系。

### 3.2 等离子体突变与小孔稳定性的关系分析

3.1 节的实验分析表明, 在相对稳定的焊接条件下, 电信号自相关分析结果与特征公式(13)、(14)式具有良好的一致性。在本节中, 对可变热输入条件下的实验结果进行分析, 以获得电信号自相关分析结果与小孔振荡特征之间的关系。图 6 所示为在 A304 不锈钢焊接过程中激光功率变化时等离子体电信号和焊缝熔深的变化情况。图 7 所示为在 Q235 碳钢焊接过程中激光功率变化时等离子体电信号和焊缝熔深的变化情况。图 6(d)和图 7(d)给出了焊接过程中采集的等离子体电信号, 图 6(e)和图 7(e)给出了对等离子体电信号进行短时自相关分析后得到的自相关函数谱图, 黑色虚线表示时滞

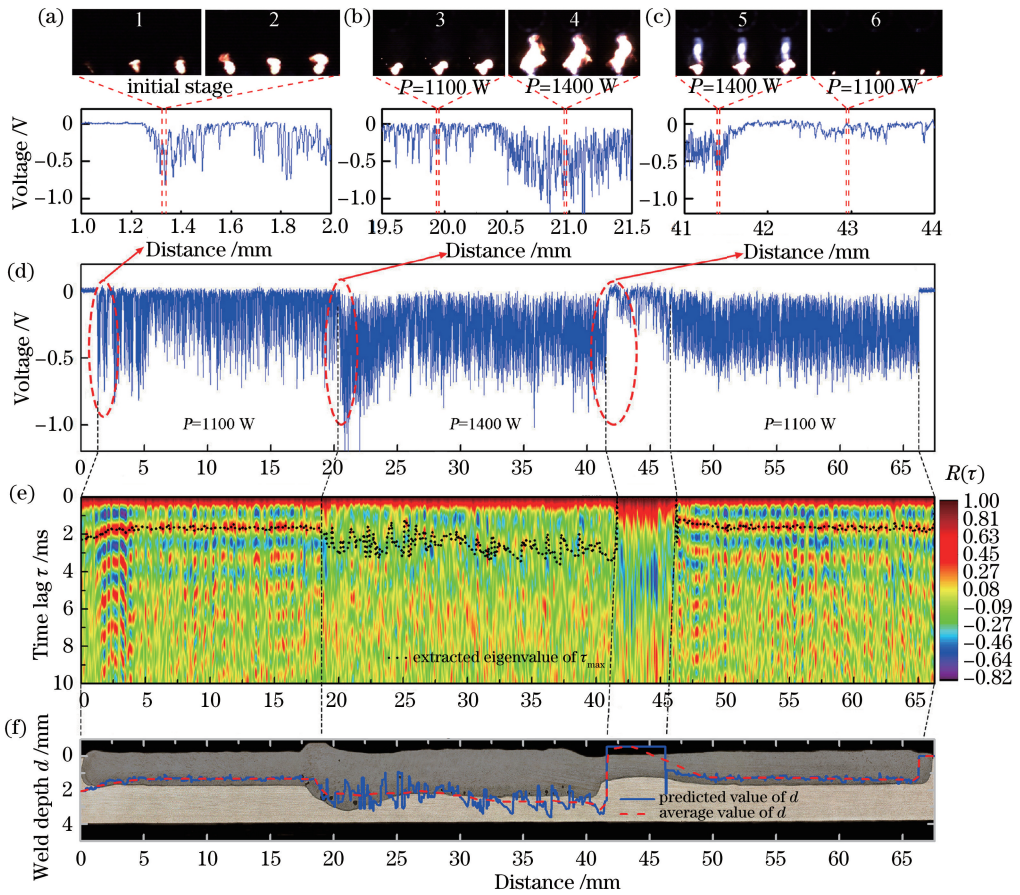


图6 A304 不锈钢连续焊接过程的结果。(a)初始阶段电信号;(b)功率增加时的电信号;

(c)功率下降时的电信号;(d)整个焊接过程的电信号;(e)自相关函数谱;(f)实际焊缝熔深及预测值

Fig. 6 Results of A304 stainless steel continuous welding process. (a) Electrical signal at initial stage; (b) electrical signal changes with increasing power; (c) electrical signal changes with decreasing power; (d) electrical signal throughout welding process; (e) autocorrelation function spectrum; (f) actual weld depth and predicted value

$\tau_{max}$  的特征值,即等离子电信号的振荡周期。在图 6(f)和图 7(f)中,实线表示基于(13)、(14)式推导得到的焊缝熔深的原始预测值,虚线表示原始预测值经过移动平均滤波器处理后得到的焊缝熔深的平均值。从图 6(d)和图 7(d)可以看出,当激光功率发生变化时,经过一段短暂的调整时间后焊接过程才会达到稳定状态。在稳定状态下,短时自相关分析结果与特征公式(13)、(14)式具有良好的一致性。然而,在施加激光的初始阶段[图 6(a)和图 7(a)]和激光功率从 1100 W 变为 1400 W 的初始阶段[图 6(b)和图 7(b)],以及激光功率从 1400 W 变为 1100 W 的初始阶段[图 6(c)和图 7(c)],自相关分析结果与特征公式(13)、(14)式不一致。根据高速摄像机同步采集的图像推测其可能与小孔内部压力再平衡以及从小孔喷发的等离子体的数量有关。Sabbaghzadeh 等<sup>[22]</sup>指出喷发的等离子体的逆韧致辐射吸收效应、瑞利散射作用及等离子体对激光的

折射作用使得激光能量衰减,光斑散焦。由图 6(a)~(c)、图 7(a)~(c)中部分阶段的高速摄像机采集图像可知:在 1400 W 焊接条件下喷发的等离子体数量大于 1100 W 焊接条件下喷发的等离子体数量(对比阶段 4、阶段 3);在增大功率的初始阶段,喷发的等离子体数量大于在增大功率后稳定状态下喷发的等离子体数量(对比阶段 2、阶段 3、阶段 4、阶段 5);在减小功率的初始阶段,喷发的等离子体数量最小(参见阶段 6)。在激光功率从 0 W 增加到 1100 W 的前一阶段和从 1100 W 增加到 1400 W 的前一阶段,喷发的等离子体数量相对增大功率后喷发的等离子体数量少,激光衰减效应较小。增大功率后,更多的激光能量到达工件和小孔,这增大了小孔深度(焊缝熔深),继而使等离子体喷发更加强烈,从而使激光能量衰减效应增加,这反过来使到达工件和小孔的激光能量减少,直到重新达到稳定状态。反之,激光功率由大变小时,激光能量及小孔深



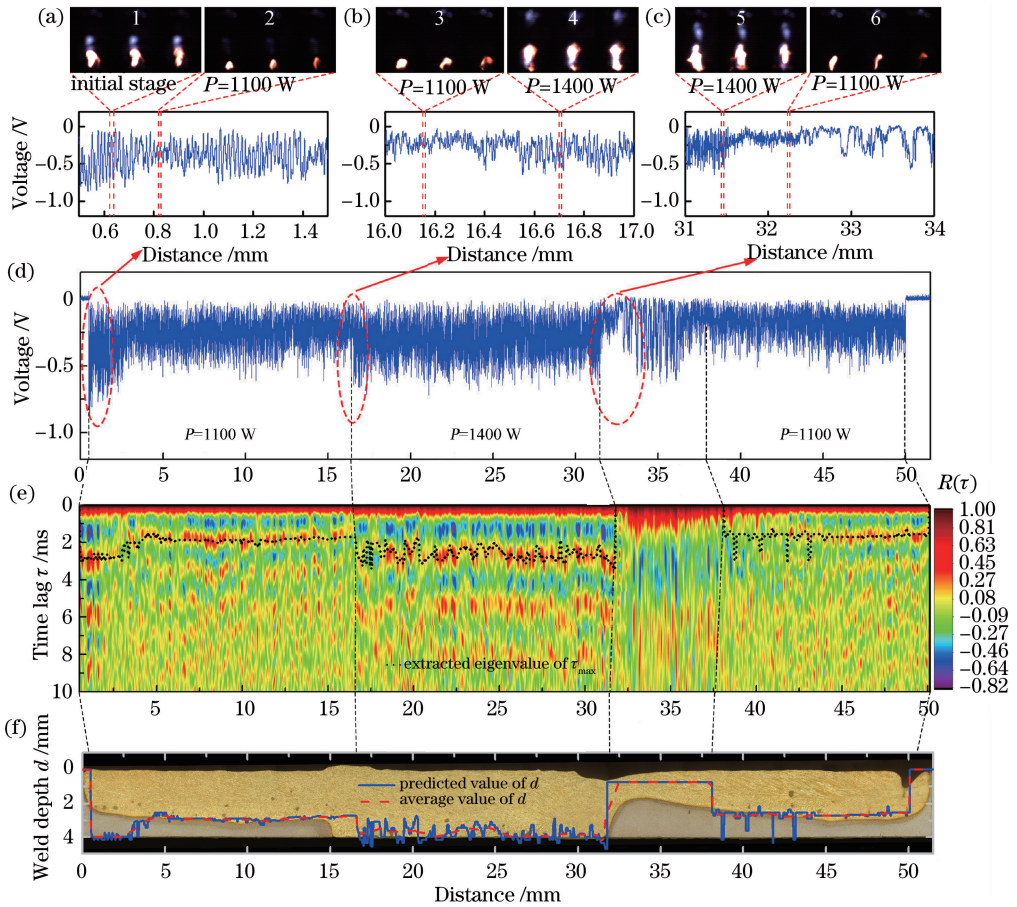


图 7 Q235 碳钢连续焊接过程的结果。(a) 初始阶段电信号;(b) 功率增加时的电信号;

(c) 功率下降时的电信号;(d) 整个焊接过程的电信号;(e) 自相关函数谱;(f) 实际焊缝熔深及预测值

Fig. 7 Results of Q235 carbon steel continuous welding process. (a) Electrical signal at initial stage; (b) electrical signal changes with increasing power; (c) electrical signal changes with decreasing power; (d) electrical signal throughout welding process; (e) autocorrelation function spectrum; (f) actual weld depth and predicted value

度(焊缝熔深)的变化结果与激光功率由小变大的结果相反,但其变化规律相同。总之,在功率转变期间,小孔处于不稳定状态,因此电信号自相关分析结果偏离特征公式(13)、(14)式,当重新达到稳定状态后,偏差很小。

### 3 结 论

在 A304 不锈钢和 Q235 碳钢的激光自熔焊接过程中,基于小孔内部压力平衡条件分析了小孔振荡周期和小孔深度的关系,在此基础上利用等离子体电信号的短时自相关分析方法分析了等离子体电信号振荡周期和焊缝熔深之间的特征关系。结果表明:随着焊缝熔深的增加,等离子体电信号的振荡周期变长,并且由于材料的化学成分和热物理性质不同,在相同的焊缝熔深条件下,A304 不锈钢的等离子体振荡周期比 Q235 碳钢的等离子体振荡周期更长;无论是在恒定热输入焊接过程还是可变热输入

连续焊接过程,在焊接过程稳定的情况下,激光焊接实验的等离子体电信号的短时自相关分析结果与焊缝熔深之间有比较好的对应关系,与所分析的小孔振荡特征方程具有一致性。

### 参 考 文 献

[1] Peng J, Hu S M, Wang X X, et al. Effect of filler metal on three-dimensional transient behavior of keyholes and molten pools in laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102003. 彭进, 胡素梦, 王星星, 等. 填充对激光焊接匙孔与熔池三维瞬态行为的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102003.

[2] Yang W X, Xin J J, Fang C, et al. Microstructures and mechanical properties of hundred-millimeter-grade 304 stainless steel joints by ultra-narrow gap laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702005. 杨武雄, 信纪军, 方超, 等. 百毫米级 304 不锈钢超

- 窄间隙激光焊接头的组织及性能[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702005.
- [3] Huang Y M, Xu S, Yang L J, et al. Defect detection during laser welding using electrical signals and high-speed photography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 394-403.
- [4] Qiu W C, Yang L J, Liu T, et al. Optic-electrical signal analysis of plasma fluctuation characteristics in laser deep penetration welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402001.  
邱文聪, 杨立军, 刘桐, 等. 激光深熔焊等离子体波动特征光电信号分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402001.
- [5] Buvanashakaran G, Shanmugam S N, Sankaranarayanan K, et al. A study of laser welding modes with varying beam energy levels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(5): 1141-1156.
- [6] 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 and Joining, 2009, 14(4): 288-294.
- [7] Blecher J J, Galbraith C M, van Vlack C, et al. Real time monitoring of laser beam welding keyhole depth by laser interferometry [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 560-564.
- [8] Tenner F, Brock C, Klämpfl F, et al. Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 64: 32-41.
- [9] Seto N, Katayama S, Matsunawa A. High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO<sub>2</sub> laser welding: effect of shielding gas on porosity formation[J]. Journal of Laser Applications, 2000, 12(6): 245-250.
- [10] Mrna L, Sarbort M, Rerucha S, et al. Autocorrelation analysis of plasma plume light emissions in deep penetration laser welding of steel [J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(1): 012009.
- [11] Sibillano T, Rizzi D, Ancona A, et al. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO<sub>2</sub> Nd:YAG and fiber laser welding processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 910-916.
- [12] Yang R X, Yang L J, Liu T, et al. Spectral analysis of laser induced plasma electrical signals from Nd:YAG laser welding of A304 stainless steels [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802008.  
杨瑞霞, 杨立军, 刘桐, 等. A304 不锈钢 Nd:YAG 激光焊光致等离子体电信号频谱分析 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802008.
- [13] Zhao S B, Yang L J, Liu T, et al. Analysis of plasma oscillations by electrical detection in Nd:YAG laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 479-489.
- [14] Qiu W C, Yang L J, Zhao S B, et al. A study on plasma plume fluctuation characteristic during A304 stainless steel laser welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 1-9.
- [15] Yu G, Yu H J. Laser manufacturing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 205-209.  
虞钢, 虞和济. 激光制造工艺力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 205-209.
- [16] Klein T, Vicane M, Kroos J, et al. Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(10): 2023-2030.
- [17] Trappe J, Kroos J, Tix C, et al. On the shape and location of the keyhole in penetration laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(10): 2152-2154.
- [18] Kroos J, Gratzke U, Vicane M, et al. Dynamic behaviour of the keyhole in laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(3): 481-486.
- [19] Klein T, Vicane M, Simon G. Forced oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(2): 322-332.
- [20] Zhao S B, Yang L J, Liu T, et al. Electrical signal characteristics of plasma in YAG laser welding of A304 stainless steels under different modes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202005.  
赵圣斌, 杨立军, 刘桐, 等. 不同焊接模式下的 A304 不锈钢 YAG 激光焊等离子体的电信号特征 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202005.
- [21] Dowden J, Davis M, Kapadia P. Some aspects of the fluid dynamics of laser welding [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 126: 123-146.
- [22] Sabbaghzadeh J, Dadras S, Torkamany J. Comparison of pulsed Nd:YAG laser welding qualitative features with plasma plume thermal characteristics [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(4): 1047-1051.