

## 激光-MIG 复合焊接熔滴过渡对焊缝表面成形的影响

叶广文, 刘倩雯, 范西岸, 张艳喜, 高向东\*

广东工业大学机电工程学院广东省焊接工程技术研究中心, 广东 广州 510006

**摘要** 熔滴过渡特性对于保证激光-电弧复合焊接成形质量十分重要。利用高速摄像机采集激光-熔化极惰性气体保护焊(MIG)复合焊接过程中的熔滴过渡图像,通过图像信号处理方法提取电弧感兴趣区域(ROI 区域)面积、熔滴速度、熔滴过渡周期等特征,分析熔滴过渡特征与焊缝成形的关联;利用短时傅里叶变换和谱熵对电弧 ROI 面积进行时频分析,研究功率谱谱熵与熔滴过渡稳定性之间的规律。结果表明:熔滴过渡频率与熔滴速度有一致的变化趋势,稳定的熔滴过渡能提高焊缝成形的均匀性;功率谱谱熵能表征焊接过程的稳定性,当熔滴过渡失稳时,短时对数功率谱变得紊乱,瞬时谱熵增大,焊缝熔宽减小,表面铺展性降低。

**关键词** 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 熔滴速度; 熔滴过渡频率; 稳定性; 短时傅里叶变换; 谱熵

中图分类号 TG409

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0802012

### 1 引言

激光-电弧复合焊接将激光和电弧两种热源共同作用于工件实现工件的连接,并通过填充焊丝增加焊缝的桥接能力;激光与电弧可分别增加熔深与熔宽,两者协同作用可以有效提高焊接效率和焊接质量,使得该工艺在恶劣环境下具有更强的适应性<sup>[1]</sup>。基于企业对更高质量产出以及产品可追溯性的需求,激光-电弧复合焊接过程检测的研究越来越多。目前,激光焊接过程检测技术已较为成熟,光信号、声信号、热信号、视觉信号是常用的检测信号,其中,基于光电信号的激光焊接缺陷检测已被广泛应用于信息家电(3C)、新能源、汽车工业等领域。

熔池的形态学特征与焊缝成形具有直接联系<sup>[2]</sup>,熔池的几何特征参数,如面积、宽度、长度、后拖角等,是评价焊缝成形质量和熔透状态的最有效参数。利用熔池背面的图像信息可以实现对复合对接焊熔透状态的闭环控制,从而获得背面熔宽均匀的焊缝<sup>[3]</sup>。在激光焊接过程中,激光作用于工件表面,材料剧烈气化膨胀产生的压力将熔融金属抛出形成匙孔并产生大量飞溅,匙孔上方的金属蒸气会对激光产生反射、折射、散射等作用,匙孔、羽辉、飞

溅等特征的瞬态变化与焊接过程稳定性、焊缝成形有着密切联系<sup>[4]</sup>。融合可见光、紫外光、红外光信号以及熔池、匙孔的视觉特征,可以实现激光焊接过程中的焊缝缺陷监测与识别<sup>[5]</sup>。对于熔化极气体保护焊,焊丝在电弧的热作用下熔化形成熔滴,熔滴在各种力的作用下脱离焊丝端部并过渡到熔池。电弧的形态会影响熔滴的受力与受热情况,稳定的电弧形态能提高熔滴过渡的稳定性。电弧的形态特征和熔滴过渡特征能有效反映焊接过程的稳定性和焊缝成形质量,融合电弧的光谱、声音和电压信号,可以实现电弧焊接质量的实时监测和缺陷检测<sup>[6]</sup>。在激光-电弧复合焊接过程中,由于弧光以及熔滴的干扰,焊件正面的熔池、匙孔、飞溅、金属蒸气的特征不易提取。基于焊接过程中的条纹图像,观察熔池边界的变化,可以分析产生咬边的原因<sup>[7]</sup>,还能观察熔滴过渡模式的周期性变化<sup>[8]</sup>。激光的加入会影响电弧形态进而影响熔滴过渡,统计电弧电流、电压信号的特征参数<sup>[9-10]</sup>(燃弧时间、电弧中断和短路次数、变异系数、多尺度熵等),或对电弧烁亮面积、金属蒸气变化曲线进行频谱分析,统计熔滴过渡的周期性分布<sup>[11]</sup>,能有效表征复合焊接过程的稳定性。

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-09-12; 录用日期: 2021-10-12

基金项目: 广州市科技计划资助项目(202002020068, 202002030147)

通信作者: \*gaoxd666@126.com

本文通过提取熔滴质心<sup>[12]</sup>,分析了滴状过渡下激光功率变化对熔滴速度和轨迹的影响,以及电弧失稳时熔滴轨迹的变化及其对焊缝表面成形的影响。对电弧面积进行时频分析后,本课题组提出了一种基于短时功率谱瞬时谱熵的焊接过程稳定性的检测方法,该方法能对焊接过程的稳定性进行连续性分析。本研究可为激光-电弧复合焊接过程中的光电传感检测提供理论与试验依据。

## 2 试验方法

### 2.1 试验装置及参数设置

激光-熔化极惰性气体保护焊(激光-MIG)复合焊接试验装置如图 1 所示。采用 IPG 连续光纤激光器 YLS-4000-S2T 进行焊接试验,该激光器的最大输出功率为 4 kW,激光波长为 1.07  $\mu\text{m}$ ,焦距为

300 mm,焦点直径为 0.462 mm。弧焊机型号为 YD-500GL4,高速摄像机型号为 VW-9000E。为了研究熔滴过渡、电弧、飞溅的动态特性,将高速摄像机水平放置在焊件侧面,在镜头前放置 950 nm 窄带滤波片,摄像机采集图像的分辨率为 640 pixel  $\times$  480 pixel,采集帧率为 2000 frame/s。

试验材料选用表面经拉丝处理的 304 不锈钢,焊件尺寸为 200 mm  $\times$  60 mm  $\times$  4 mm,焊丝型号为 ER308,直径为 1 mm,保护气体为 98% Ar + 2% CO<sub>2</sub>(体积分数),流量为 30 L/min。采用平板堆焊的焊接方式进行焊接试验,电弧在前,激光在后,激光垂直于焊件表面入射,离焦量为 0,焊枪倾斜角  $\alpha$  为 45°,导电嘴离焊接表面的距离  $D_{\text{CW}}$  为 7.5 mm,光丝间距  $D_{\text{LA}}$  为 2 mm。激光功率、电弧电流、电弧电压的设置如表 1 所示。

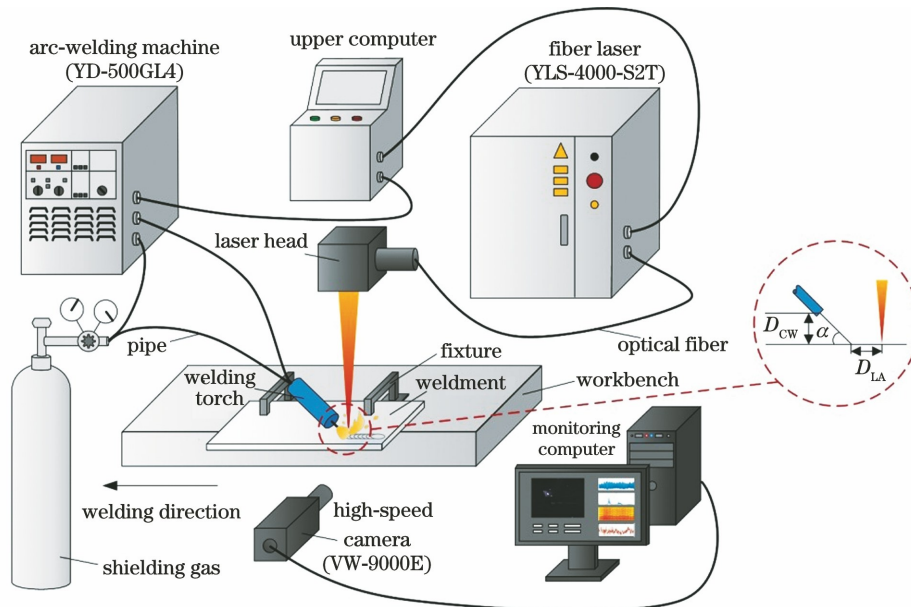


图 1 激光-MIG 复合焊接试验装置

Fig. 1 Laser-MIG hybrid welding experimental system

表 1 激光-MIG 复合焊接试验参数

Table 1 Experimental parameters of laser-MIG hybrid welding

No.	Laser power /kW	Arc current /A	Arc voltage /V	No.	Laser power /kW	Arc current /A	Arc voltage /V
1 #	2.5	100	20	9 #	2.5	130	24
2 #	2.5	120	20	10 #	1.5	130	20
3 #	2.5	150	20	11 #	2	130	20
4 #	2.5	180	20	12 #	2.5	130	20
5 #	2.5	130	16	13 #	3	130	20
6 #	2.5	130	18	14 #	3.5	130	20
7 #	2.5	130	20	15 #	0	130	20
8 #	2.5	130	22				

## 2.2 熔滴过渡图像的处理

图像的处理流程如图 2 所示。首先把原始图像转化成灰度图,进行  $5 \times 5$  的高斯滤波,截取电弧感兴趣区域(ROI 区域),通过阈值分割提取电

弧、熔滴、飞溅等明亮对象。采用 Canny 边缘检测算法提取电弧 ROI 图像的边缘轮廓信息,删除面积过小以及非闭合的轮廓,最终提取到熔滴的轮廓。

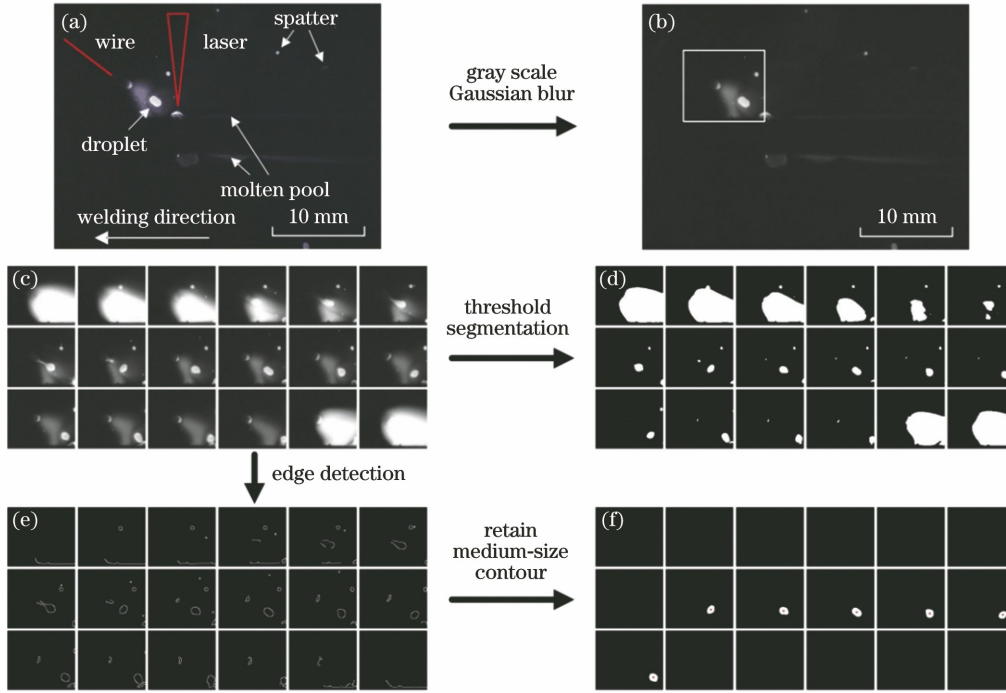


图 2 熔滴过渡特征提取流程图。(a)原始图像;(b)预处理图像;(c)电弧 ROI 图像;(d)二值化图像;(e)边缘提取图像;(f)熔滴图像

Fig. 2 Flow chart of droplet transition feature extraction. (a) Original image; (b) preprocessed image; (c) arc ROI images; (d) binary images; (e) edge extraction images; (f) droplet images

图 2(d)中电弧 ROI 区域面积  $A$  的计算公式为

$$A = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{\text{arc}}(i, j), \quad (1)$$

其中,

$$f_{\text{arc}}(i, j) = \begin{cases} 0, & g(i, j) < t_{\text{gray}} \\ 1, & g(i, j) \geq t_{\text{gray}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $M$  为图像像素行数; $N$  为图像像素列数; $g(i, j)$  为电弧 ROI 图像的灰度值; $t_{\text{gray}}$  为二值化阈值; $f_{\text{arc}}(i, j)$  为电弧 ROI 二值图像的灰度值。

熔滴质心  $(X_{\text{droplet}}, Y_{\text{droplet}})$  的表达式为

$$(X_{\text{droplet}}, Y_{\text{droplet}}) = \left( \frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right), \quad (3)$$

其中,

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i^p j^q f_{\text{droplet}}(i, j), \quad (4)$$

式中: $p+q$  为图像几何矩的阶数; $f_{\text{droplet}}(i, j)$  为熔滴二值图像的灰度值。

如图 3 所示,基于熔滴质心坐标,采用帧间差法计算熔滴经过图像某一水平线时的速度  $v_d$  和横坐

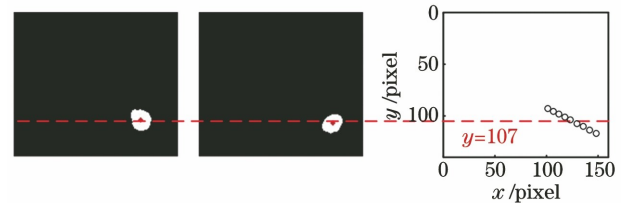


图 3 熔滴特征提取示意图

Fig. 3 Schematic of droplet feature extraction

标  $x$ 。横坐标用来衡量熔滴轨迹的偏移程度:横坐标较大,表示熔滴轨迹右偏;横坐标较小,表示熔滴轨迹左偏。

## 3 熔滴过渡图像特征分析

熔滴过渡是周期性行为。电弧引燃产生的热量以及焊丝自身的电阻热促使焊丝末端熔化,焊丝熔融部分被电磁收缩力压缩,焊丝末端熔融金属在表面张力的作用下保持球状,形成缩颈,电流在缩颈处汇集,熔滴受到的电磁收缩力指向熔池区域,促使熔滴脱离焊丝向熔池过渡,周而复始,不断地向熔池中填充熔融金属。熔滴的受力情况与熔滴过渡稳定



性、熔滴过渡形式直接相关<sup>[13]</sup>,影响着焊接过程的稳定性及焊缝成形。如图 4 所示,熔滴主要受电磁

收缩力( $F_{em}$ )、等离子流力( $F_p$ )、表面张力( $F_\gamma$ )、重力( $F_g$ )、金属蒸气反冲力( $F_{RL}$ )的影响。

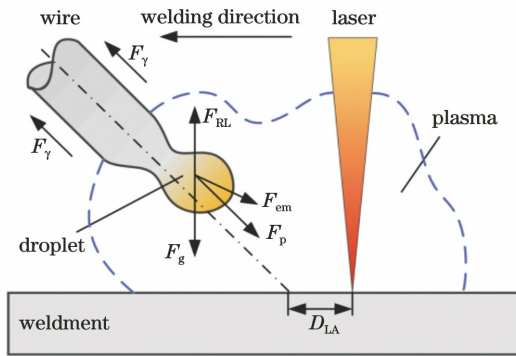


图 4 熔滴受力示意图

Fig. 4 Schematic of forces affecting droplet

为了分析激光功率对熔滴动态特性的影响,在滴状过渡的实验参数下提取熔滴轮廓和质心坐标,计算熔滴过图像某水平线时的速度  $v_d$  和横坐标  $x$ ,然后对  $v_d$  和  $x$  进行保形插值拟合,并对电弧 ROI 面积  $A$  进行短时傅里叶变换,截取 50~200 Hz 频带得到熔滴过渡频率  $f_{DT}$ 。从图 5 中可以看出:当电弧失稳时,弧长拉长,电弧面积曲线出现增幅较大的波峰,熔滴过渡频率急剧下降,呈现局部下凹,熔滴运动轨迹也发生偏移;随着激光功率增大,熔滴轨迹和速度愈加平稳。在激光作用下,金属材料剧烈气化,形成匙孔,匙孔上方形成光致等离子体,光致

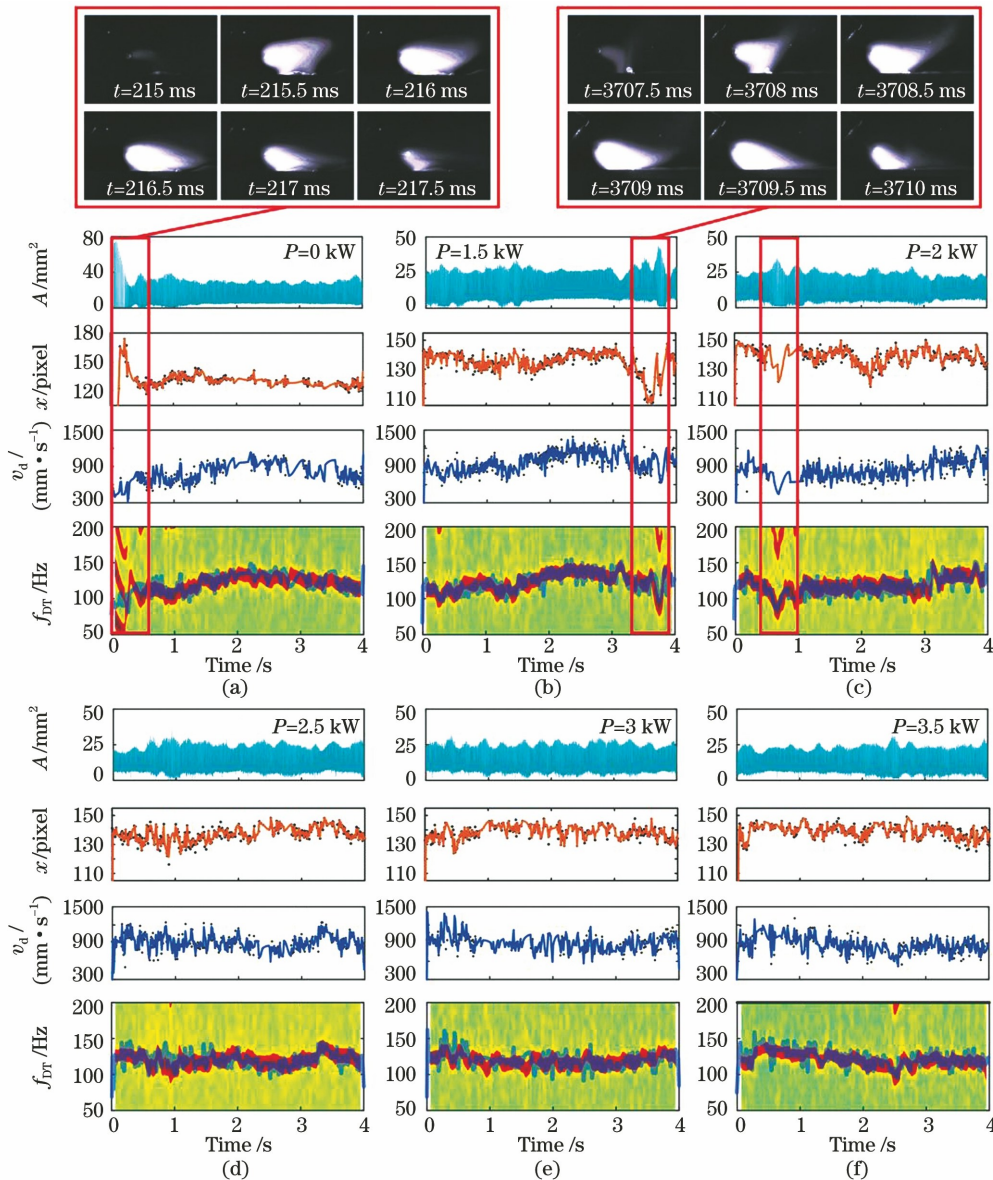


图 5 熔滴过渡特征分析。(a)15 号试验;(b)10 号试验;(c)11 号试验;(d)12 号试验;(e)13 号试验;(f)14 号试验  
Fig. 5 Analysis of droplet transition features. (a) Experiment 15 #; (b) experiment 10 #; (c) experiment 11 #; (d) experiment 12 #; (e) experiment 13 #; (f) experiment 14 #

等离子体内含有大量带电粒子,为电弧提供良好的放电环境<sup>[14]</sup>。根据最小电压原理<sup>[15]</sup>,电弧根部稳定在金属蒸气密集处,沿电弧、金属蒸气形成稳定的电离通道。从图 5(a)~(c)中可以看出:在无激光的试验组中,电弧失稳时,弧长变长且弧根位置漂移,电弧极度不稳定,熔滴轨迹出现大幅偏移;加入激光后,在两个热源相互耦合的作用下,电弧的挺度得到了提升,即使电弧失稳,其根部依然稳定在匙孔附近,熔滴偏移幅度减小。

将熔滴速度拟合曲线移至熔滴过渡频带中可以发现,熔滴速度和熔滴过渡频率有一致的变化趋势。焊接电流是影响复合焊接熔滴过渡频率的主要因素<sup>[16]</sup>,随着电流增大,焊丝末端产生的热量增多,焊丝熔化并形成熔滴的速度加快,熔滴过渡频率增大。促进熔滴过渡的电磁收缩力和等离子流力同样主要受电流影响<sup>[17]</sup>。熔滴速度和熔滴过渡频率有着密切联系,熔滴过渡频率越高,其对应的时间点附近的平均熔滴速度越大。熔滴过渡频率能有效反映电弧等离子流与熔滴对熔池的冲击。

图 6 为 10 号试验组下的熔滴质心分布。熔滴过渡处于稳态时,激光与电弧耦合良好,电弧得到压

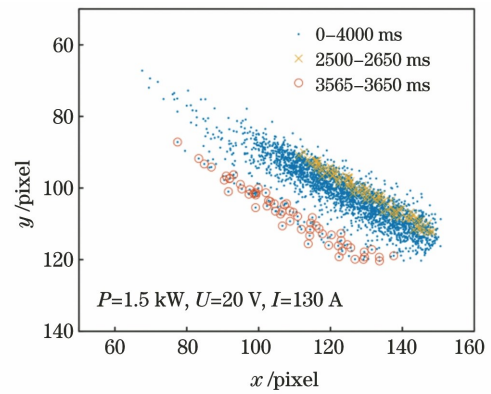


图 6 熔滴质心分布 (10 号试验)

缩,根部稳定在匙孔上方。如图 7(a)所示,由于受到光致等离子体的吸引作用以及金属蒸气的反冲力,熔滴在未脱离焊丝末端时会向右偏移,作用在熔滴上的电磁收缩力从小截面指向大截面,电磁收缩力与焊丝轴线形成一个偏角  $\theta$ 。如图 7(b)所示,在熔滴过渡失稳时,电弧电流减小降低了熔滴受到的电磁收缩力,同时弧长的增大会减小熔滴受到的金属蒸气反冲力,熔滴右偏的分力减小,导致熔滴受到的电磁收缩力的偏角  $\theta$  减小,熔滴过渡轨迹向左偏移。

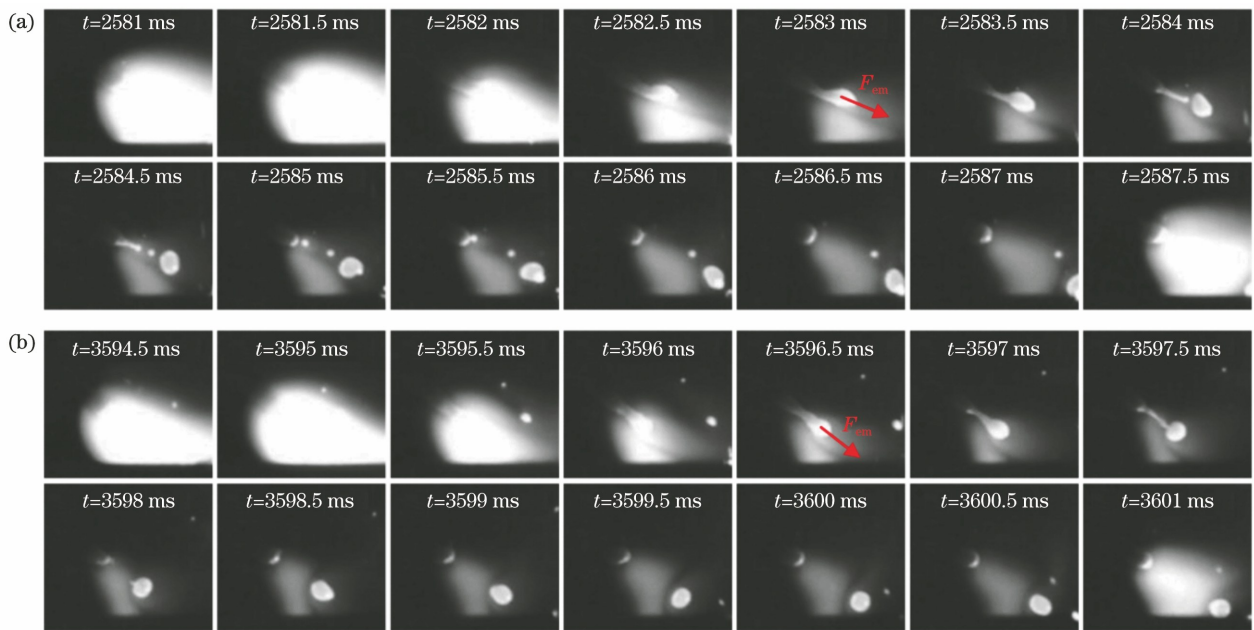


图 7 熔滴过渡高速摄影图 (10 号试验)。(a) 稳态;(b) 失稳

Fig. 7 High-speed photographs of droplet transition (experiment 10 #). (a) Steady state; (b) destabilization

从图 8 可以看到,随着激光功率增大,熔滴轨迹右偏幅度增大,电弧面积减小。匙孔上方金属蒸气浓度的提高有利于稳定压缩电弧以及增强对熔滴的吸引作用。弧长的减小会增大电磁收缩力的偏角  $\theta$ ,同时金属蒸气反冲力的增大会导致熔滴轨迹

右偏幅度增加。当激光功率达到 2.5 kW,由于匙孔穿透至底部,匙孔内的高压金属蒸气从底部喷出,降低了匙孔上方金属蒸气的浓度,使得电弧弧长增大、熔滴右偏幅度减小。

在焊件未熔透(0~2 kW)时,随着激光功率增



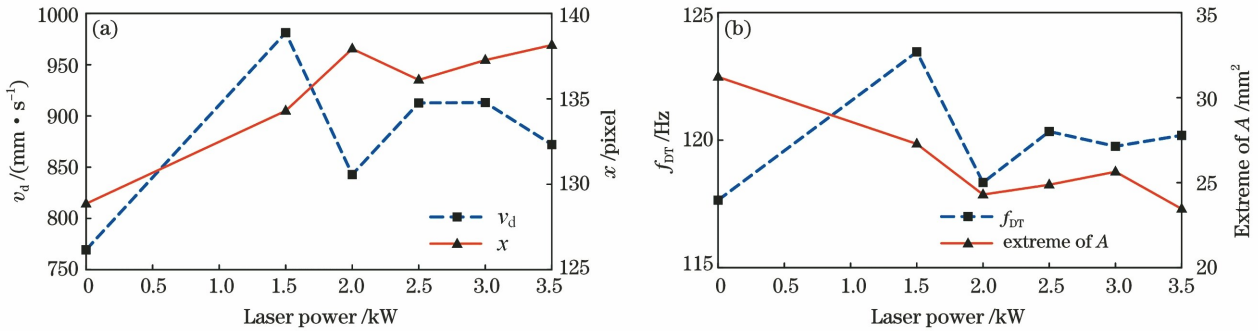


图 8 激光功率对熔滴过渡特征的影响。(a) 对熔滴速度与位置的影响；(b) 对熔滴过渡频率与电弧 ROI 面积积极值的影响  
Fig. 8 Effect of laser power on droplet transition features. (a) Effect on droplet velocity and position; (b) effect on droplet transition frequency and extreme of arc ROI area

大,熔滴速度和熔滴过渡频率先增大后减小。金属蒸气浓度的提高在一定程度上能稳定压缩电弧从而促进熔滴过渡,但是也会增大金属蒸气反冲力,从而阻碍熔滴过渡。在激光功率达到 2.5 kW 时,焊件全熔透,匙孔底部频繁打开,金属蒸气浓度减小,导致其压缩电弧的作用削弱,熔滴受到的金属蒸气反冲力减小,熔滴过渡频率和熔滴速度增加。随着激光功率继续增大,匙孔效应增强,熔滴速度呈下降趋势。由于匙孔底部开孔变大且打开时间变长,匙孔上方金属蒸气的浓度趋于稳定,熔滴过渡频率也趋

于稳定,金属蒸气压缩电弧的作用成为影响熔滴过渡频率的主要因素,平均弧长的减小会导致平均熔滴过渡频率增大。

熔滴过渡对熔池流动的影响较大,并影响维持匙孔张开的驱动力<sup>[18]</sup>;熔滴尺寸也会对匙孔前壁液态金属的流动产生影响,从而间接影响整个熔池的流动<sup>[19]</sup>。熔滴过渡稳定性与焊接过程稳定性、焊缝成形密切相关<sup>[20-21]</sup>,在熔滴过渡失稳时,焊缝表面易出现熔宽不均匀或余高不均匀等问题,如图 9 所示。

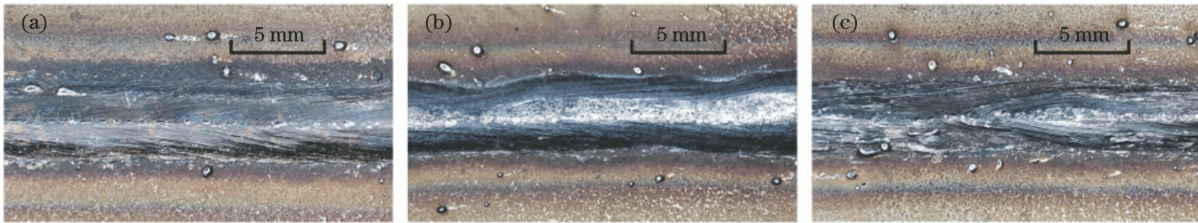


图 9 焊缝表面成形。(a) 良好焊缝；(b) 熔宽不均匀；(c) 余高不均匀

Fig. 9 Weld surface formation. (a) Sound weld; (b) uneven width; (c) uneven height

图 10 为焊缝表面成形分析,可以看到熔滴速度  $v_d$  与焊缝熔宽  $B$ 、余高  $a$  有相似的变化趋势。在熔滴过渡处于稳态时,电弧与激光的耦合作用增强,电弧在得到更大程度压缩的同时对工件的预热作用增强,提高了工件对激光能量的吸收效率。此时,随着熔滴过渡频率增大,等离子流和熔滴对熔池产生的冲击也相应增强,熔池的下凹深度和隆起高度增加,同时向熔池填充的熔融金属增多,熔池的热量与动量增加,所以焊缝熔宽和余高增大。

熔滴过渡失稳时,弧长增大,熔滴轨迹向左偏移,导致焊缝局部填丝量减少。另外,弧长增大会增加电弧等离子体和光致等离子体的传输距离<sup>[22]</sup>,削弱激光和电弧的耦合作用,使得电弧能量变得分散,电弧对工件的预热作用减弱,同时还会降低工件对激光的吸收效率,最终导致焊缝正面、背面熔宽减

小。此外,熔滴过渡失稳还会导致熔滴过渡周期  $P_{DT}$  增大,熔滴轨迹左偏,前方焊缝金属填充量增多,从而使得焊缝余高与熔宽之比增大,焊缝表面铺展性<sup>[23]</sup>降低。

## 4 熔滴过渡时频特征分析

### 4.1 短时傅里叶变换与谱熵

短时傅里叶变换 (STFT) 通过时间窗内的信号来表示某一时刻的频率特征<sup>[24]</sup>,其频谱计算公式为

$$S(t, f) = \int x(\tau) h(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau, \quad (5)$$

式中:  $\tau$  为  $t$  时刻时间窗内信号的对应时刻;  $f$  为傅里叶变换频率;  $h(\cdot)$  为窗函数,这里使用 Hamming 窗。Hamming 窗函数表达式为

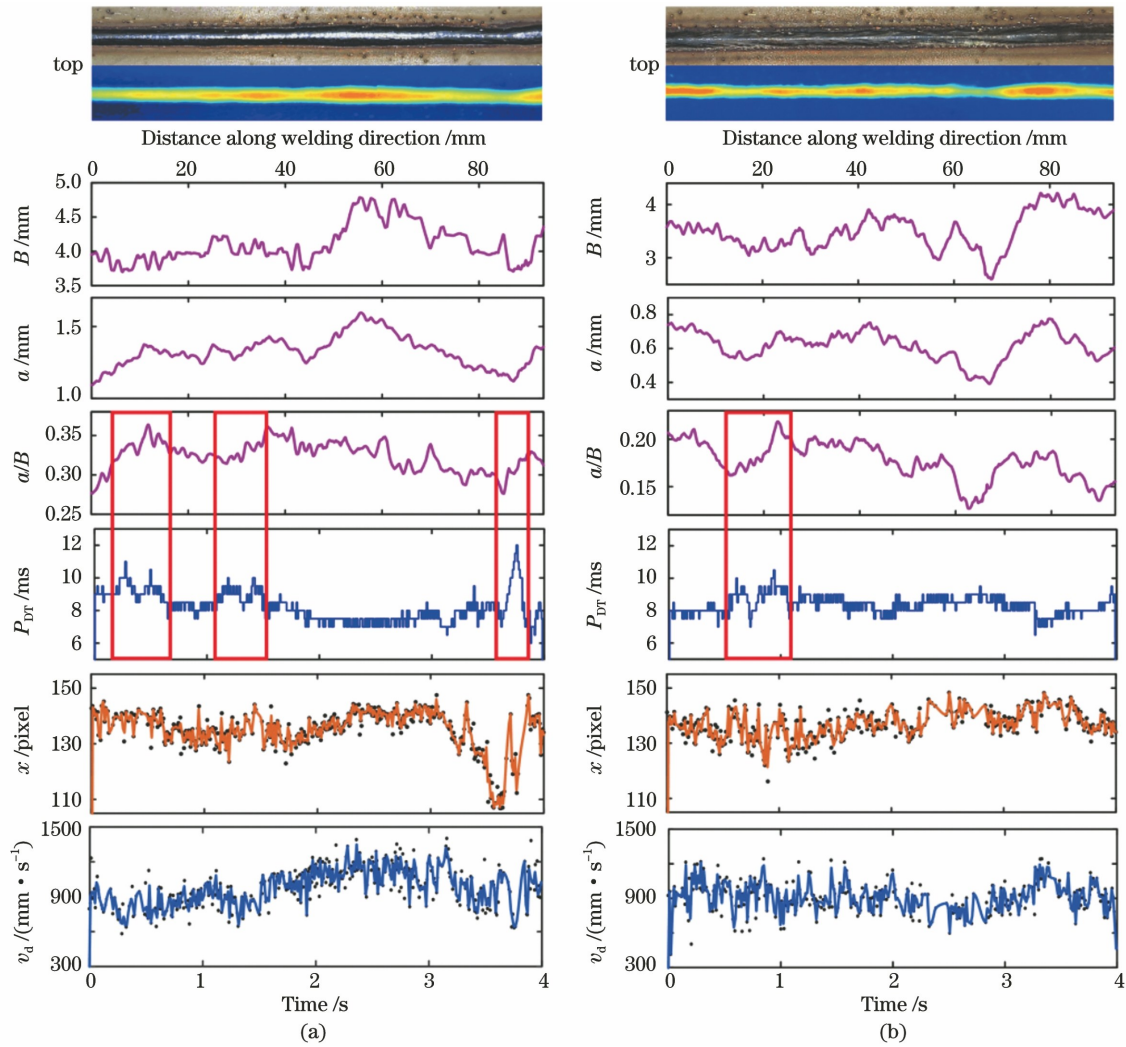


图 10 焊缝表面成形分析。(a)10 号试验;(b)12 号试验

Fig. 10 Analysis of weld surface formation. (a) Experiment 10#; (b) experiment 12#

$$h(n) = 0.54 + 0.46\cos(2\pi n/N), \quad -N/2 \leq n \leq N/2 \quad (6)$$

式中:  $n$  表示与时间窗中心的时刻差;  $N+1$  为窗口长度。

$t$  时刻短时功率谱计算公式为

$$P(t, f) = k |S(t, f)|^2, \quad (7)$$

其中,

$$k = \frac{2}{F \sum_{n=-N/2}^{N/2} |h(n)|^2}, \quad (8)$$

式中:  $F$  为信号采集频率。

对 10 号试验组电弧 ROI 面积进行短时傅里叶变换, 计算其功率谱, 然后采用式 (9) 运算后作对数运算, 得到图 11 所示的时频图。可以看到: 在熔滴过渡失稳时, 对数功率谱在高频区域变得紊乱, 出现密集而不连续的小波峰; 在熔滴过渡处于稳态时, 由于稳态信号用少量的谐波就能逼近, 所以在 400~

1000 Hz 区间稳态信号出现间断凸起, 呈连续有序的山脉状。

$$P_{th}(t, f) = \begin{cases} 0, & 10 \cdot \lg [P(t, f)] < T \\ P(t, f), & 10 \cdot \lg [P(t, f)] \geq T \end{cases}, \quad (9)$$

式中:  $P_{th}(t, f)$  为阈值处理后的短时功率谱;  $T$  为短时功率谱置零的阈值。

熵是对随机事件不确定程度的一种度量, 谱熵 (SPE) 描述了功率谱与熵率之间的关系。通过谱熵可以判断功率谱的有序性, 功率谱越复杂无序, 谱熵的值越大。这一属性可用于故障检测和诊断中的特征提取。对于给定频的功率谱, 谱熵<sup>[25]</sup>计算公式为

$$H = - \sum_m p(m) \log_2 p(m), \quad (10)$$

式中:  $m$  的取值范围为  $1 \sim M$ ,  $M$  为总频率点数;  $p(m)$  为  $m$  频率分量的概率分布, 其表达式为

$$p(m) = \frac{\sum_t P(t, m)}{\sum_f \sum_t P(t, f)}. \quad (11)$$

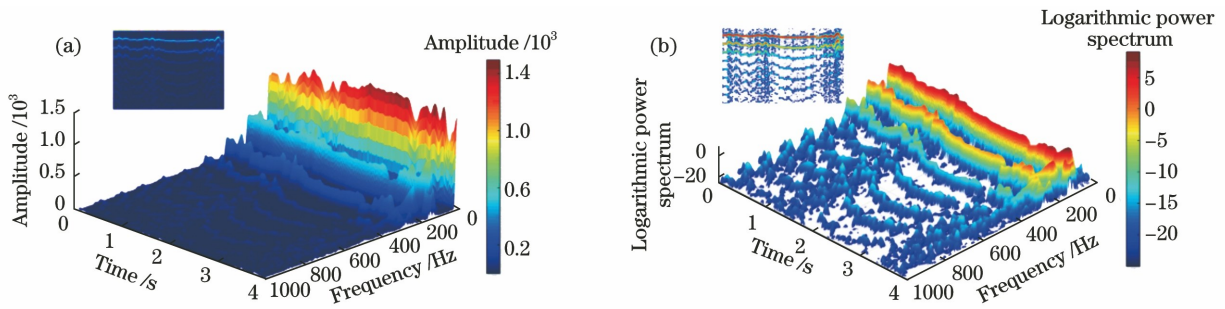


图 11 三维时频图及俯视图。(a)短时傅里叶变换频谱;(b)处理后的对数功率谱

Fig. 11 Three-dimensional time-frequency spectrum and top view. (a) Short-time Fourier transformation frequency spectrum; (b) logarithmic power spectrum after processing

若求的是瞬时谱熵,则  $t$  时刻谱熵的计算公式为

$$H(t) = - \sum_m p(t, m) \log_2 p(t, m), \quad (12)$$

式中:  $p(t, m)$  为  $t$  时刻  $m$  频率分量的概率分布,其表达式为

$$p(t, m) = \frac{P(t, m)}{\sum_f P(t, f)}. \quad (13)$$

#### 4.2 基于短时功率谱谱熵的稳定性分析

图 12 为焊接参数变化对熔滴过渡周期  $P_{DT}$ 、

$P_{DT}$  标准差、功率谱谱熵 SPE 的影响。可以看到,随着电弧电流  $I$  和电弧电压  $U$  增大,电弧能量增加,导致焊丝熔化速度加快,熔滴过渡周期减小。在激光功率为  $0 \sim 2$  kW 时,随着激光功率增大,焊接环境温度升高,降低了熔滴的表面张力,同时,激光的加入带来大量带电粒子,有利于压缩电弧、提高熔滴过渡的稳定性。但是,随着激光功率增大,匙孔效应增强,从匙孔喷发出来的金属蒸气阻碍熔滴过渡,且随着弧长减小,金属蒸气对熔滴过渡的阻碍

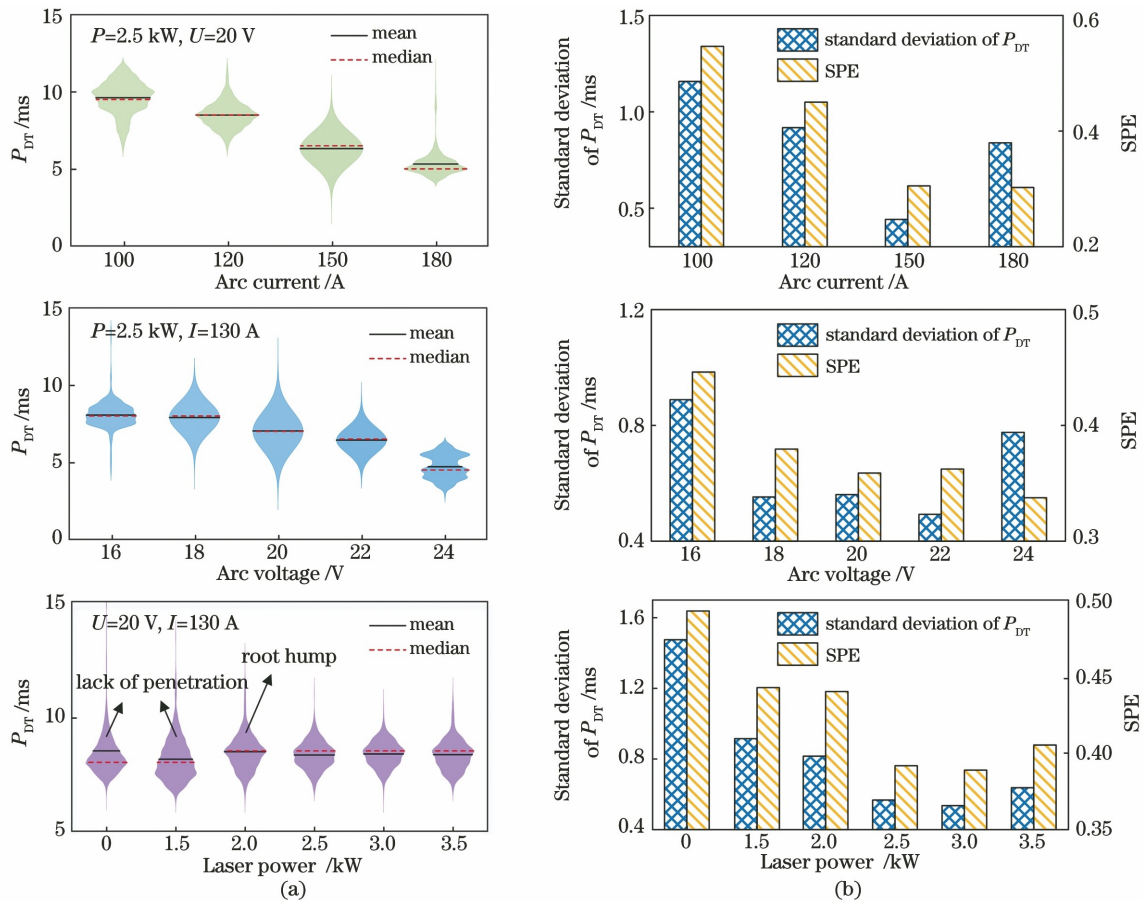


图 12 焊接参数变化对熔滴过渡的影响。(a)对熔滴过渡周期的影响;(b)对熔滴过渡周期标准差与功率谱谱熵的影响  
Fig. 12 Effect of welding parameters on droplet transition. (a) Effect on droplet transition period; (b) effect on standard deviation of droplet transition period and spectral entropy of power spectrum



作用更加明显。当激光功率增大到 2.5 kW 时, 焊件全熔透。随着激光功率继续增大, 匙孔底部开孔变大, 匙孔的打开频率愈加频繁, 从匙孔底部喷出的熔融金属和金属蒸气迅速消散, 在激光的冲击下, 金属蒸气从匙孔底部喷出的占比增多, 匙孔上方金属蒸气的浓度增加缓慢, 对熔滴过渡的阻碍作用趋于平缓, 熔滴过渡周期趋于稳定。

随着电弧电流和电压增大,  $P_{DT}$  标准差先减小后增大, 电弧过长或过短都会导致熔滴过渡稳定性下降。当电弧弧长过长时, 电弧与光致等离子体之间的导电通道变长, 激光与电弧的耦合关系减弱, 熔滴过渡稳定性下降。当电弧弧长过短时, 熔滴的过渡方式转变成短路过渡, 焊丝端部形成细长的液桥与熔池直接相连, 液桥处的电流急剧增加, 使得电磁收缩力骤然增大, 在过高的热量和动量下, 液桥发生剧烈膨胀和汽化, 焊丝熔化量迅速增加, 熔滴过渡有可能会进入滴状过渡与短路过渡交替进行的状态, 从而大大降低了熔滴过渡的稳定性。随着激光功率

增大, 激光与电弧的耦合作用增强, 熔滴过渡稳定性增加,  $P_{DT}$  标准差和功率谱的谱熵逐渐减小并趋于平缓, 在激光功率为 3.5 kW 时出现小幅回升(由于熔滴过渡出现局部失稳, 所以  $P_{DT}$  的标准差和功率谱的谱熵增加)。在电弧参数一定的情况下, 随着  $P_{DT}$  标准差减小, 功率谱的谱熵相应减小, 两者有相同的变化趋势。谱熵能有效评价及反映熔滴过渡的稳定性。对于电弧参数变化的试验组, 由于熔滴过渡模式存在差异, 不能用整段信号功率谱的谱熵对熔滴过渡的稳定性进行评价, 需要用瞬时谱熵进行分析。

图 13 为功率谱的瞬时谱熵, 短时功率谱的时间窗口长度为 100 ms, 计算不同频带的瞬时谱熵  $SPE_1$  (0~1000 Hz)、 $SPE_2$  (0~100 Hz)、 $SPE_3$  (50~300 Hz)、 $SPE_4$  (250~600 Hz)、 $SPE_5$  (500~1000 Hz)。当熔滴过渡处于稳态时, 稳定的激光-电弧耦合为电弧提供了良好的电离环境, 电弧周期性引燃, 熔滴过渡以稳定的频率进行。此时电弧 ROI 面积曲线近

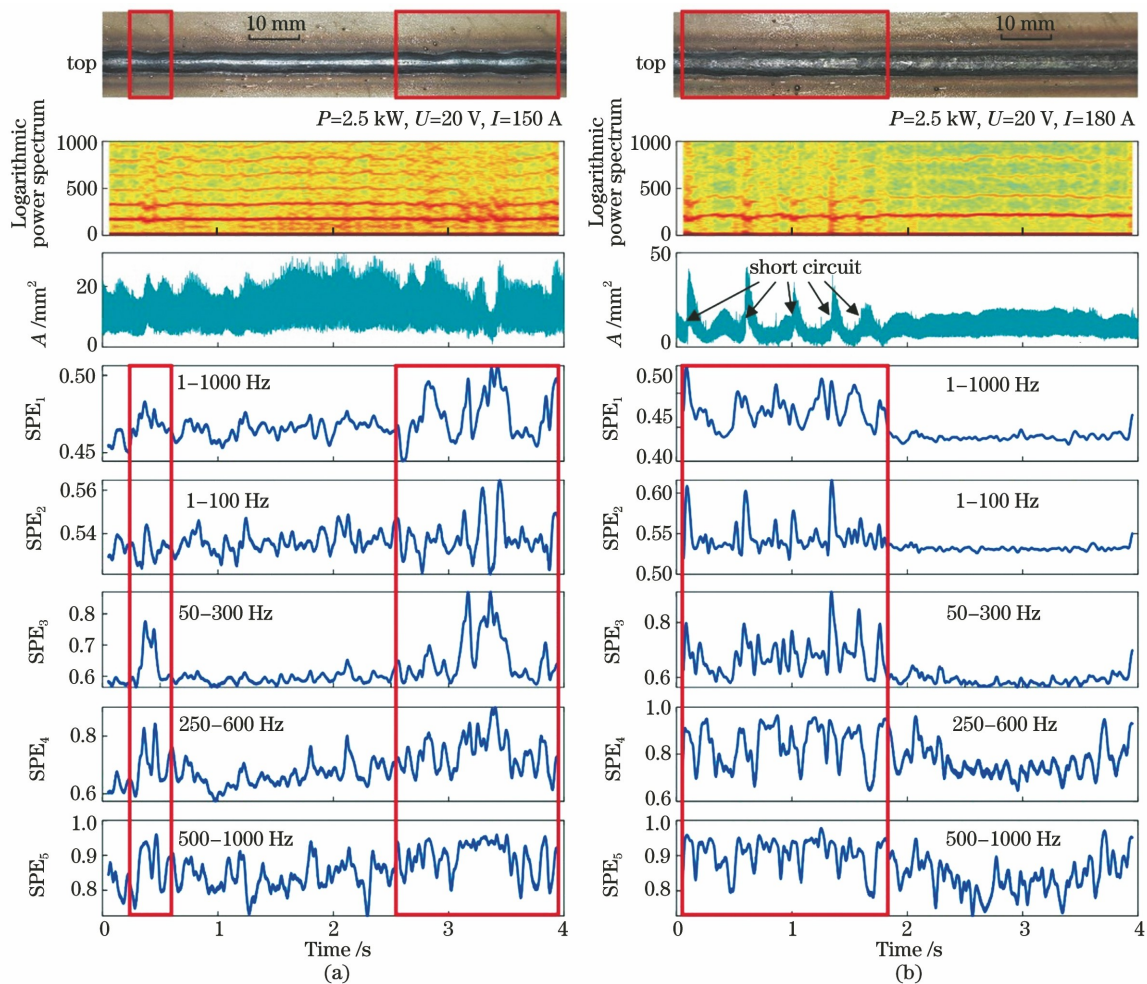


图 13 功率谱的瞬时谱熵。(a)3 号试验;(b)4 号试验

Fig. 13 PSD instantaneous spectral entropy. (a) Experiment 3 # ; (b) experiment 4 #

似为周期信号,可用熔滴过渡频率及其整数倍的谐波拟合,所以稳态信号的短时对数功率谱会出现多条间距相近的频带。在熔滴过渡失稳时,熔滴过渡频带会出现小幅波动,甚至会发生不连续的情况,这个波动在高频频带会被放大,导致频带变得模糊,短时对数功率谱杂波增多,有序性降低,瞬时谱熵增大。从图 13 中可以看到,4 号试验组电弧 5 次短路,电流急剧上升,使得焊丝熔化量瞬间增大,焊丝末端剧烈甩动至脱落,电弧弧长也大幅增加。在电弧失稳时,失稳信号需要更多的谐波分量去逼近,其短时对数功率谱变得紊乱,各频带的瞬时谱熵出现不同程度的增大。电弧 ROI 面积曲线振荡剧烈、电弧能量变得分散以及熔滴轨迹偏移都会导致焊缝熔宽减小,表面铺展性降低,随着失稳时间延长,焊缝熔宽持续出现大幅波动,表面成形均匀性下降。变化窗口长度并结合多个频带的功率谱谱熵组成特征向量,将特征向量输入到分类器中进行稳态判别,可用于监测熔滴过渡状态以及预测焊缝表面成形质量,从而实现激光-MIG 复合焊接过程的检测。

## 5 结 论

本课题组对激光-MIG 复合焊接过程中的熔滴过渡图像特征和时频特征进行研究,结合焊缝表面成形对熔滴过渡稳定性进行了分析,提出了一种基于功率谱谱熵的激光-电弧复合焊接过程稳定性的检测方法。稳定的熔滴速度及轨迹能提高焊缝成形的均匀性,电弧失稳会降低电弧对焊件的预热效果并降低焊件对激光的吸收效率。弧长的增大不仅会导致熔滴速度减小,熔滴轨迹偏移,焊缝局部填充量减少,还会导致焊缝熔宽减小,表面铺展性降低。熔滴速度与熔滴过渡频率有一致的变化趋势,熔滴过渡频率能有效反映电弧等离子体与熔滴对熔池的冲击。电弧 ROI 面积的短时功率谱及功率谱谱熵能有效反映焊接过程整体及局部的稳定性,当熔滴过渡失稳时,对数功率谱频带变得紊乱,功率谱瞬时谱熵增加,焊缝成形质量下降。本课题组对焊接过程中的弧光特征加以利用,采用功率谱瞬时谱熵反映了激光-MIG 复合焊接过程的稳定性,可为激光-电弧复合焊接过程中的光电传感检测提供理论与试验依据。

## 参 考 文 献

- [1] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(11): 5636-5641.
- [2] Gao X D, Zhang Y, You D Y, et al. Analysis of molten pool configuration and welding stability during high-power fiber laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(9): 13-16, 113. 高向东, 张勇, 游德勇, 等. 大功率光纤激光焊熔池形态及焊接稳定性分析[J]. *焊接学报*, 2011, 32(9): 13-16, 113.
- [3] Shuang Y Q, Chen W Z, Wang K J, et al. Vision system for closed-loop control of the penetration in laser-MIG hybrid welding[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(11): 1891-1894. 双元卿, 陈武柱, 王康建, 等. 基于视觉传感的激光-MIG 复合焊熔透闭环控制[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(11): 1891-1894.
- [4] Gao X D, Wen Q, Katayama S. Analysis of high-power disk laser welding stability based on classification of plume and spatter characteristics[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(12): 3748-3757.
- [5] You D Y, Gao X D, Katayama S. Multisensor fusion system for monitoring high-power disk laser welding using support vector machine[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2): 1285-1295.
- [6] Zhang Z F, Chen H B, Xu Y L, et al. Multisensor-based real-time quality monitoring by means of feature extraction, selection and modeling for Al alloy in arc welding[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60/61: 151-165.
- [7] Frostevarg J, Kaplan A F H, Lamas J. Comparison of CMT with other arc modes for laser-arc hybrid welding of steel[J]. *Welding in the World*, 2014, 58(5): 649-660.
- [8] Bunaziv I, Frostevarg J, Akselsen O M, et al. Process stability during fiber laser-arc hybrid welding of thick steel plates[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 34-44.
- [9] Meng Y F, Gao M, Zeng X Y. Quantitative analysis of synergic effects during laser-arc hybrid welding of AZ31 magnesium alloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111: 183-192.
- [10] Wang L, Li X W, Gao M, et al. Stabilization mechanism and weld morphological features of fiber laser-arc hybrid welding of pure copper[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27: 207-213.
- [11] Gao X D, Wang L, Chen Z Q, et al. Process stability analysis and weld formation evaluation during disk laser-mag hybrid welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105835.
- [12] Lü X Q, Shen J, Li H, et al. Droplet transfer

- analysis in pulsed gas metal arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 39-42, 115.
- 吕小青, 沈俊, 李桓, 等. 熔化极脉冲氩弧焊熔滴落过程的分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 39-42, 115.
- [13] Ren W J, Zheng H J, Li Z G, et al. Effects of pulse arc on droplet transfer and spatter of laser pulsed-arc hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402007.
- 任闻杰, 郑惠锦, 李铸国, 等. 脉冲电弧对激光脉冲电弧复合焊熔滴过渡与飞溅的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402007.
- [14] Chen M H, Li C B, Liu L M. Coupling behavior of plasmas during laser-arc hybrid welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(10): 53-56, 115.
- 陈明华, 李陈宾, 刘黎明. 激光-电弧复合焊接过程中等离子体的耦合行为[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 53-56, 115.
- [15] Gao M, Zeng X Y, Hu Q W. Effects of welding parameters on melting energy of CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(5): 517-522.
- [16] Liu F D, Zhang H, Du S F, et al. Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO<sub>2</sub> laser-MAG arc hybrid welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 75-82.
- 刘凤德, 张宏, 杜劲峰, 等. 激光功率对 CO<sub>2</sub> 激光-MAG 电弧复合焊电弧与熔滴行为的影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 75-82.
- [17] Liu S Y, Liu F D, Zhang H, et al. Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO<sub>2</sub> laser-MAG hybrid welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 1019-1025.
- [18] Peng J, Xu H Q, Wang X X, et al. Numerical simulation of influence of welding speed on dynamic behavior of laser welding molten pool with filler metal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302005.
- 彭进, 许红巧, 王星星, 等. 焊接速度对填材填充激光焊接熔池动态行为影响的数值模拟[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302005.
- [19] Peng J, Xu H Q, Wang X X, et al. Numerical simulation of influence of droplet on keyhole and molten pool of laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0702004.
- 彭进, 许红巧, 王星星, 等. 熔滴对激光焊接匙孔与熔池影响的数值模拟[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0702004.
- [20] Zhang W, Tang B, Guo Y B, et al. Investigation on surface forming and stability of laser + pulse melting gas metal arc hybrid welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171401.
- 张旺, 唐彬, 郭彦兵, 等. 激光+脉冲熔化极气体保护复合焊接表面成形及稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171401.
- [21] Ma B, Huang Y J, Zhang Y X, et al. Side-surface-form analysis of arc additive manufacturing based on laser vision sensing system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102005.
- 马波, 黄怡洁, 张艳喜, 等. 激光视觉传感系统的电弧增材制造侧表面成形分析[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102005.
- [22] Gao M, Zeng X Y, Yan J, et al. Heat sources interaction of laser-arc hybrid welding[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 465-468.
- 高明, 曾晓雁, 严军, 等. 激光-电弧复合焊接的热源相互作用[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 465-468.
- [23] Zhang D F, Wang T J, Yang Y, et al. Influence of fiber laser + MIG arc hybrid welding parameters on welding morphology of 6009 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(9): 213-215.
- 张德芬, 王同举, 杨阳, 等. 光纤激光+MIG 电弧复合热源焊接参数对 6009 铝合金焊缝表面成形的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 213-215.
- [24] Yao P, Zhou K, Zhu Q. Quantitative evaluation method of arc sound spectrum based on sample entropy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 92: 379-390.
- [25] Liu L X, Liu B, Huang H, et al. No-reference image quality assessment based on spatial and spectral entropies[J]. Signal Processing: Image Communication, 2014, 29(8): 856-863.



# Effect of Droplet Transition on Weld Surface Formation of Laser-MIG Hybrid Welding

Ye Guangwen, Liu Qianwen, Fan Xi'an, Zhang Yanxi, Gao Xiangdong\*

*Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center, School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*

## Abstract

**Objective** Several studies have been conducted on laser-MIG welding process monitoring technology because of the requirements of enterprises for higher quality output and traceability of products. Optical, acoustic, thermal, and visual signals were used to monitor the laser welding process. Moreover, optical sensors have been widely used to monitor various signals emitted by the laser as it interacts with the material, including visible light, ultraviolet light, infrared light, and laser reflection, which can effectively reflect the welding process state. Laser welding process monitoring based on optical signal has been widely used in 3C, new energy, automobile industry, and other fields. For laser-MIG hybrid welding, visual objects, such as keyhole, molten pool, vapor, and spatter, were not easy to extract due to the interference of the arc light. However, we observed a clear periodicity in the area of arc light that coincides with a droplet transition cycle. It was useful information to evaluate the state of droplet transition and welding process. The droplet transition features were analyzed in the time and frequency domains to investigate their influence on the process stability and weld formation.

**Methods** Welding parameters, such as laser power, arc current, and voltage, were investigated using a single variable method. A high-speed camera was positioned horizontally on the side to capture the droplet transition image. The arc area was extracted by threshold segmentation, and the droplet contour was extracted using the Canny edge extraction algorithm. The barycenter of the droplet was calculated from the droplet contour. The velocity and position of the droplet that passed through a horizontal line were calculated from the barycenter of the droplet. The width and height of the weld were extracted using three-dimensional point cloud processing. Combined with the laser-arc interaction mechanism, the influence of laser power on the droplet velocity and trajectory, and the change in droplet trajectory during arc instability and its influence on the weld formation were analyzed. The short-time Fourier transform (STFT) was applied to the arc area to analyze the process stability of laser-MIG hybrid welding. The spectral entropy (SPE) of power spectrum was used to evaluate the droplet transition stability and weld formation during laser-MIG hybrid welding.

**Results and Discussions** The laser-arc interaction weakens when welding is unstable; thereby, resulting in an increase in arc length and deviation of droplet trajectory. Additionally, the decrease in the welding current sharply decreases the droplet transition frequency and velocity (Fig. 5). The arc is compressed as the laser power increases. Under the stabilizing effect of photoinduced plasma, the arc root stabilizes near the keyhole and the droplet trajectory and velocity become more stable. The increase in the metal vapor concentration compresses the arc; thereby, increasing the recoil force from the metal vapor on the droplet and the deflection angle of the electromagnetic contraction force. It also increases the right deviation amplitude of the droplet. The welding current mainly affects the droplet velocity and transition frequency; they have the same changing trend (Fig. 5). The droplet transition frequency reflects the impact of droplet and arc plasma on the molten pool. The weld surface is prone to defects, such as uneven width or uneven height, when the droplet transition is unstable. Moreover, the weld width, height, and droplet velocity have a similar changing trend. As the droplet transition frequency increases, the droplet velocity increases; the molten metal filled into the pool increases; the heat and the momentum of the pool increase; the concave depth and the hump height of the pool increase. Thus, increasing the weld width and height. When the droplet transfer is unstable, the droplet trajectory deviation decreases the local wire filling in the weld. Additionally, the arc energy disperses as the arc length increases. The preheating effect of the arc on the weldment also weakens; thereby, decreasing the weld width, increasing the ratio of weld height to width, and decreasing solder spreadability (Fig. 10). The droplet transition period decreases with the increase in the arc current and voltage. Meanwhile, the arc tends to be stable as the laser power increases. The vapor recoil pressure also increases, which hinders the droplet transition. As the keyhole penetrates, metal vapor ejects from the bottom; thus, stabilizing the vapor recoil

pressure. This indicates that the more stable the welding process, the smaller the standard deviation of the droplet transition period. Under the same arc parameters, the SPE of the arc area can reflect the welding process stability (Fig. 12). Furthermore, more harmonic components are required to approximate the arc area curve when the arc is unstable. This phenomenon will lead to the chaos of short-time logarithmic power spectrum and an increase in SPE. The weld width also fluctuates, leading to the instability of weld formation (Fig. 13).

**Conclusions** In this paper, the features and the stability of droplet transition during laser-MIG hybrid welding are analyzed, and a method for monitoring welding process stability based on SPE is proposed. Stable droplet trajectory and velocity can improve the uniformity of weld formation. When the welding is unstable, there is a disordered short-time logarithmic power spectrum, increasing SPE, and decreasing weld width and spreadability. The power spectrum of STFT and its SPE of arc area can effectively reflect the stability of the welding process. This method utilizes the arc light features and provides a new idea for monitoring the laser-MIG hybrid welding process.

**Key words** laser technique; laser-arc hybrid welding; droplet velocity; droplet transition frequency; stability; short-time Fourier transform; spectral entropy