

激光与光电子学进展

激光功率对铝合金激光-MIG 复合焊熔滴过渡行为及飞溅的影响

张羽昊, 陈辉*, 杨策, 黄举近, 赵旭

西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 为研究激光功率对铝合金激光-MIG 复合焊接过程稳定性的影响,采用高速摄像及 NI USB-6251 数据采集卡对复合焊接过程中电弧参数、熔滴过渡行为及飞溅产生行为进行了研究。结果表明:随着激光功率增大,电弧峰值电流减小,而峰值电压增大;在 4 kW 激光功率时,以射滴过渡为主,偶尔发生短路过渡情况,随激光功率小幅增加,短路过渡现象消失;当激光功率增大到 5.5 kW 时,稳定的一脉一滴过渡中出现了两脉一滴的过渡形式,降低了熔滴过渡稳定性。激光功率增大,金属蒸气对匙孔壁上液态金属剪切力也随之增强,导致匙孔壁上方飞溅产生次数增加。当激光功率为 4~4.5 kW 时,匙孔后壁飞溅产生次数明显多于匙孔前壁,但激光功率大于 5 kW 后,匙孔前后壁飞溅次数相当。最后,对匙孔前后壁熔池金属进行了受力分析,并总结了匙孔壁上方飞溅产生的机理。

关键词 激光技术; 激光-MIG 复合焊; 激光功率; 电弧参数; 熔滴过渡; 飞溅

中图分类号 TG465.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714005

Influence of Laser Power on Droplet Transfer Behavior and Spatter in Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum Alloy

Zhang Yuhao, Chen Hui*, Yang Ce, Huang Jujin, Zhao Xu

School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China

Abstract To examine the influence of laser power on the stability of laser-MIG hybrid aluminum alloy welding process, a high-speed camera and NI USB-6251 data acquisition card were used to study the arc parameters, droplet transfer behavior, and spatter generation behavior in the hybrid welding process. The results indicated that as the laser power increased, the peak current of the arc decreased, whereas the peak voltage increased. Under the laser power of 4 kW, the projected droplet transfer was dominant, and short-circuit transition occurred occasionally. When the laser power increased slightly, the short-circuit transition phenomenon disappeared. However, when the laser power increased to 5.5 kW, there was a transition form of one droplet every two pulses in the stable transition of one drop per pulse, reducing the stability of the droplet transition. As the laser power increased, the metal vapor shearing force on the liquid metal on the keyhole wall increased, resulting in an increased number of spatters above the keyhole wall. When the laser power was 4~4.5 kW, the number of spatters on the rear keyhole wall was significantly higher than that on the front keyhole wall. However, when the laser power was more than 5 kW, the number of spatters on the front and back keyhole walls was almost equivalent. In addition, the force of the molten pool metal on the keyhole walls was analyzed, and the mechanism of spatters above the keyhole wall was summarized.

Key words laser technique; laser-MIG hybrid welding; laser power; arc parameters; droplet transfer; spatter

1 引言

铝合金由于其密度低、强度高等特点,在航空航天、汽车制造、轨道交通以及船舶工业领域得到广泛应用^[1-3]。近年来,激光-电弧复合焊作为一种高效率的焊

接技术广泛应用于铝合金中厚板焊接^[4-5],为了获得更大的熔透深度,通常需要更高的激光功率。激光-MIG 复合焊接过程中,由于激光能量密度较高,在匙孔上方产生了大量的光致等离子体及金属蒸气,其可与电弧等离子体发生相互作用,改变熔滴的受力状态,使熔滴

收稿日期: 2021-11-21; 修回日期: 2021-12-24; 录用日期: 2022-01-05

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2019JDR0130)

通信作者: *xnprt@163.com

过渡行为发生变化^[6],焊接过程行为更为复杂。

稳定的焊接过程是获得优良焊缝的前提,国内外学者对激光-电弧复合焊接过程中熔滴过渡行为及飞溅产生行为进行了广泛研究。任闻杰等^[7]对激光非脉冲电弧和激光脉冲电弧复合焊接中的熔滴过渡、焊缝成形和飞溅进行了研究,发现脉冲电弧可改善焊缝成形,减少由熔滴过渡引起的飞溅。韦辉亮等^[8]研究了 1.5 kW 激光的加入对 MIG 电弧形态与熔滴过渡行为的影响,结果表明,激光的加入使得熔滴过渡频率降低,熔滴过渡形式从一脉一滴变为两脉一滴,且熔滴尺寸变大。Cai 等^[9]研究了激光-MIG 复合焊中,激光对短路过渡、射滴过渡、射流过渡行为的影响,结果表明,激光的加入能够提高短路过渡和射滴过渡模式下的过渡频率,但对射流模式熔滴过渡有阻碍作用。Zhang 等^[10]研究了激光功率对激光-GMAW 焊接过程熔滴过渡行为及电信号的影响,随着激光功率的提高,熔滴过渡时间和电流峰值时间延长,电流基值时间缩短,且随着激光功率的提高,熔滴生长周期延长,熔滴尺寸增大。史鹏飞^[11]分析了 5083 铝合金激光-MIG 复合焊接过程中短路过渡、射流过渡两种模式下的电信号,发现随着激光功率从 2 kW 增大到 8 kW,焊接过程稳定性均降低。此外,飞溅是铝合金激光-MIG 复合焊接过程中常见的问题,飞溅的产生会降低焊缝质量,还可能引起焊缝表面塌陷、咬边等缺陷。Zhang 等^[12]研究了高功率激光焊接过程中焊接速度对匙孔壁飞溅形成的影响,发现低速焊飞溅主要产生于匙孔前壁,尺寸较小,运动速度较快,而高速焊飞溅主要产生于匙孔后壁,颗粒较大,飞行速度慢。Wu 等^[13]采用数值模拟与高速摄像观察相结合的方法,研究了铝合金激光焊接过程中匙孔壁上飞溅形成的过程,认为匙孔内金属蒸气剪切力是导致飞溅产生的一个重要因素。

以上研究多集中于激光的加入对铝合金 MIG 焊接过程熔滴过渡行为的影响,以及铝合金激光自熔焊过程中飞溅行为的研究,而激光功率对铝合金激光-MIG 复合焊接过程熔滴过渡及飞溅行为影响研究较少。因此本文采用高速摄像、NI USB-6251 数据采集 (DAQ) 系统研究了激光功率对 A7N01 铝合金激光-脉冲 MIG 复合焊接过程中电弧参数、熔滴过渡行为及飞溅产生行为的影响,为铝合金高功率激光复合焊接技术提供了理论支持。

2 试验设备与方法

2.1 试验材料与设备

本文所选用的试验母材为 A7N01S-T5 铝合金板材,尺寸为 350 mm×150 mm×12 mm。选用的填充材料为 Al-Mg 系 ER5356 焊丝,直径为 1.2 mm。激光-MIG 复合焊接设备主要包括最大激光功率 10 kW 的 TRUMPF LASER TruDisk 10002 碟片激光器、Trans Plus Synergic 4000 福尼斯焊机、ABB 机器人等。其中

激光器输出激光的波长为 1060 nm,激光光斑直径为 530 μm,聚焦透镜焦距为 400 mm。Trans Plus Synergic 4000 福尼斯焊机为一元化调节模式,即焊前通过调节送丝速度,焊接过程中自动匹配相应的焊接电流 I 和焊接电压 U 。

2.2 试验方法

本试验采用激光在前、电弧在后的激光-MIG 复合焊接方式,如图 1 所示,其中激光入射角与试板法线方向呈 10° 夹角, MIG 焊枪入射角度为 72.5°, 光丝间距 $D_{LA}=3$ mm,离焦量 $\Delta=0$ 。采用高纯氩气作为保护气体,气流量为 30 L/min。焊接过程中采用 Photron Fastcam SA4 高速摄像机,观察并记录了不同激光功率下的熔滴过渡过程,如图 2 所示,采集图像的频率为 6000 frame/s,高速摄像机与试板表面平行。焊接过程中通过霍尔传感器及 NI DAQ 系统同步采集焊接过程中电流电压信息。在固定送丝速度为 10 m/min,焊接速度为 15 mm/s 条件下,研究了激光功率 4~5.5 kW 对复合焊接过程行为的影响。

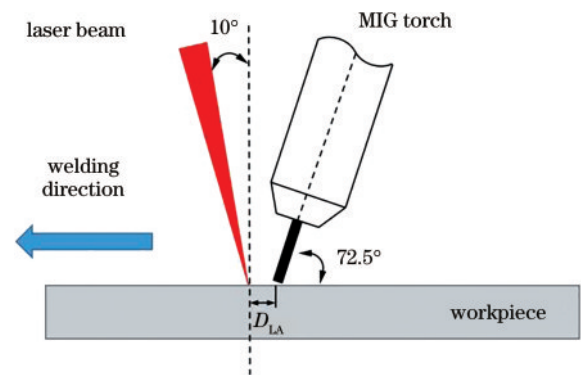


图 1 激光、电弧位置示意图

Fig. 1 Schematic of laser and arc position

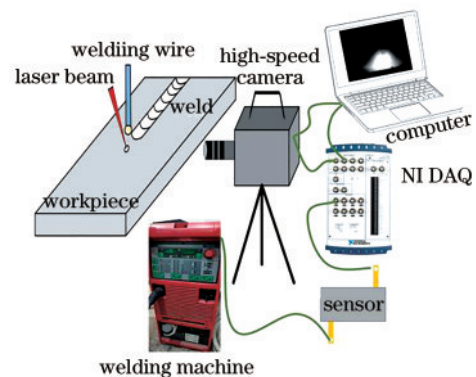


图 2 高速摄像及数据采集系统

Fig. 2 High-speed camera and DAQ system

3 分析与讨论

3.1 激光功率对复合焊接过程电弧参数的影响

图 3 为不同激光功率下,电流、电压随时间变化的曲线。在 4 kW 激光功率下,焊接过程中电流、电压发

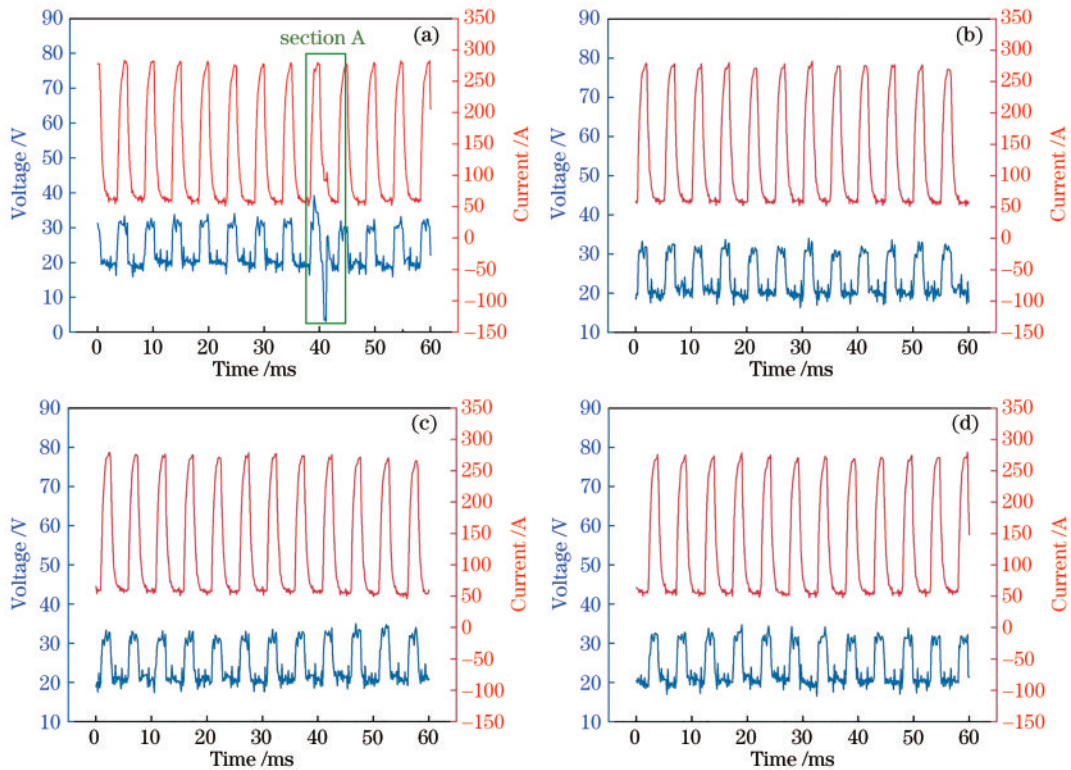


图 3 不同激光功率下电流、电压波形。(a) 4 kW; (b) 4.5 kW; (c) 5 kW; (d) 5.5 kW

Fig. 3 Variations of current and voltage under different laser powers. (a) 4 kW; (b) 4.5 kW; (c) 5 kW; (d) 5.5 kW

生了一次较大波动,如图中 Section A 部分。在 4.5~5.5 kW 激光功率下,焊接电流、电压均较稳定,呈现周期性变化特征。

然后,统计了不同激光功率下电弧电流和电压的概率密度分布,如图 4 所示,随着激光功率的提高,电弧电流概率密度峰值向左移动而电压概率密度峰值向右移动,即随着激光功率的提高,电弧峰值电流减小、峰值电压增大。这是由于在激光-MIG 复合焊接过程

中,激光对电弧具有压缩效应,部分激光能量被电弧等离子体吸收,使得电弧等离子体进一步电离。提高激光功率,将导致电弧的电离度增大,电弧电阻降低,根据最小电压原理,电弧直径缩小,峰值焊接电流减小。此外,随着激光功率的提高,匙孔上方光致等离子体密度也增大,对焊丝端部的加热、熔化作用加剧,导致焊丝端部提前熔化形成熔滴,从而导致弧长变长,峰值电压增大。

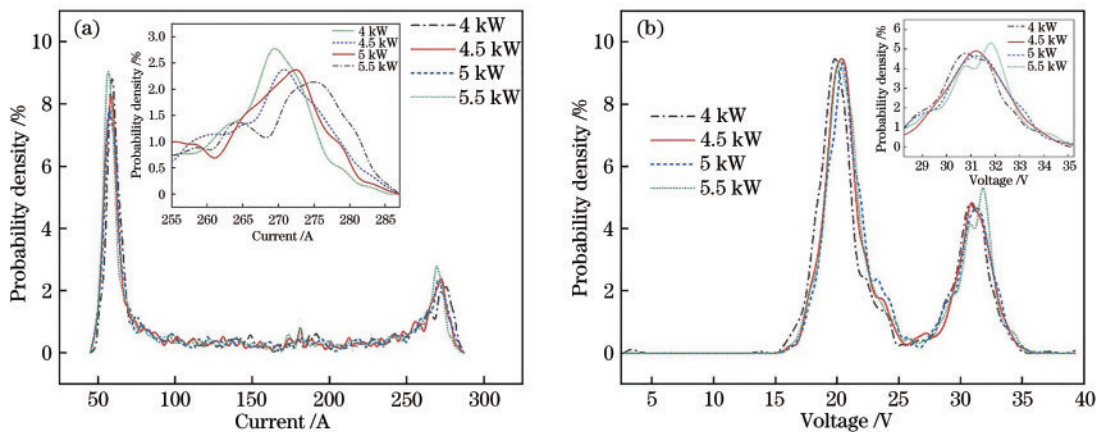


图 4 激光功率对电流、电压概率密度影响。(a) 电流; (b) 电压

Fig. 4 Influence of laser power on the probability density of current and voltage. (a) Current; (b) voltage

3.2 激光-MIG 复合焊接过程熔滴受力行为分析

为了研究激光功率对激光-MIG 复合焊接过程中熔滴过渡行为的影响,首先对复合焊接过程中熔滴受

力进行分析。如图 5 所示,熔滴主要受到了重力 F_g 、电磁力 F_{em} 、表面张力 F_γ 、等离子体流力 F_p 和金属蒸气作用力 F_{RL} 的共同作用,其中 F_g 、 F_{em} 、 F_p 为促进熔滴过渡

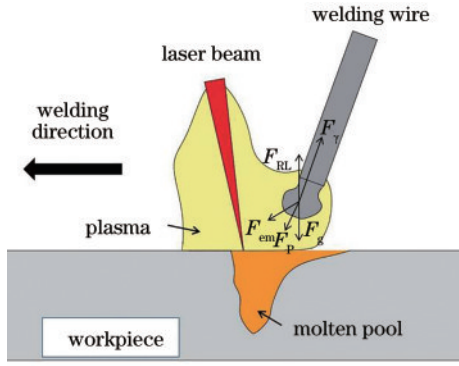


图 5 熔滴受力示意图

Fig. 5 Schematic of droplet stress

的力, F_γ 、 F_{RL} 为阻碍熔滴过渡作用力, F_R 是这些力的合力^[14-15]。各个力的表达式为

$$F_R = F_g + F_{em} + F_{RL} + F_p + F_{\gamma_0} \quad (1)$$

焊丝尖端熔滴可近似看作一个球体, 其所受重力^[14]表示为

$$F_g = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{R_w \sin \theta}{R_D} \right) - \frac{1}{1 - \cos \theta} - \frac{1}{4} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \left(\frac{2}{1 + \cos \theta} \right) \right] \cos \beta, \quad (5)$$

式中: μ_0 为自由空间磁导率; I 为焊接电流; R_D 为焊丝半径; θ 为熔滴端部导电区域角度; β 为熔滴偏离焊丝轴线角度。电弧的形态以及电流的分布形势直接决定了电磁力的大小与方向。

金属蒸气作用力^[18-19]表示为

$$F_{RL} = \frac{1}{2} C_D A \rho_m^2 V_0^2 \frac{N_A K_B T_s^{2/3}}{M_a B_0} \exp(-U/T_s) \times \exp(-D_{LA}^2 / 2R_h^2), \quad (6)$$

式中: A 为垂直于流动平面的投影面积; ρ_m 为等离子密度; V_0 为常数 $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; N_A 为阿伏伽德罗常数 ($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$); K_B 为玻尔兹曼常数; T_s 为熔化金属表面温度; M_a 为气体分子质量; B_0 为熔体蒸发常数; R_h 为金属蒸气分布参数; $U = M_a L_v / (N_A K_B)$, L_v 为熔体

$$F_g = \frac{4}{3} \pi R_w^3 \rho_0 g, \quad (2)$$

式中: R_w 是熔滴的半径; ρ_0 是熔融金属的密度; g 为重力加速度。熔滴所受重力与其半径成正比。

等离子体流^[14]表示为

$$F_p = \frac{C_D A_p \rho_i v_i^2}{2}, \quad (3)$$

式中: C_D 为等离子流动阻力系数; A_p 为垂直于等离子流平面的投影面积; ρ_i 为等离子密度; v_i 为等离子流速。

表面张力^[14]表示为

$$F_\gamma = 2\pi R_w \gamma, \quad (4)$$

式中: γ 为表面张力系数, 与材料成分、保护气种类和温度等因素有关。试验中所采用焊丝材料及保护气不变, 但随激光功率的增大, 产生的光致等离子体增加, 对熔滴产生的热辐射使其温度升高, 表面张力系数 γ 降低, 从而促进熔滴过渡。

电磁力^[16-17]表示为

的蒸发潜热。

3.3 激光功率对熔滴过渡行为的影响

为了分析图 3 中 4 kW 激光功率下电信号中 Section A 部分产生异常的原因, 截取了该时间段内高速摄像拍摄到的熔滴过渡过程图像。如图 6 所示, 在 $t=40.5 \text{ ms}$ 时焊丝尖端熔滴发生缩颈, 在 $t=40.83 \text{ ms}$ 时并未脱离焊丝, 直到 $t=41.17 \text{ ms}$ 熔滴形成较长的液桥与熔池连接发生短路, 此时电压迅速降低, 明显趋向 0 V。在 $t=41.5 \text{ ms}$ 时液桥发生断裂, 液桥前端形成较大熔滴向熔池方向过渡, 焊丝尖端呈锥形, 此时电弧电压迅速升高。在 $t=42.17 \text{ ms}$ 时, 未过渡完的熔滴会以小滴的形式从焊丝尖端脱落, 形成一大滴、一小滴的过渡形式。

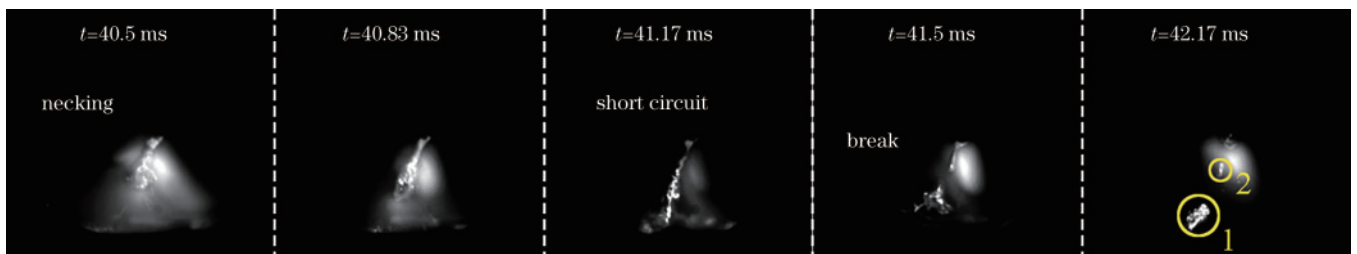


图 6 4 kW 激光功率 Section A 部分短路过渡过程

Fig. 6 Short-circuit droplet transition process of Section A under 4 kW laser power

激光功率为 4.5~5 kW 时, 熔滴过渡均为稳定的一脉一滴形式的射滴过渡, 但当激光功率增大到 5.5 kW 时, 出现了两脉一滴的过渡形式, 如图 7 所示, 在 $t=160 \text{ ms}$ 时, 熔滴在焊丝尖端形成, 随着电弧电流

上升, 熔滴尺寸变大, 但在 $t=161.67 \text{ ms}$ 时, 未见明显缩颈发生。直到 $t=163.67 \text{ ms}$ 电弧电流下降, 此时熔滴仍在焊丝尖端, 未向熔池过渡。当电弧电流降低到基值阶段时, 未过渡的熔滴在表面张力作用下缩回焊

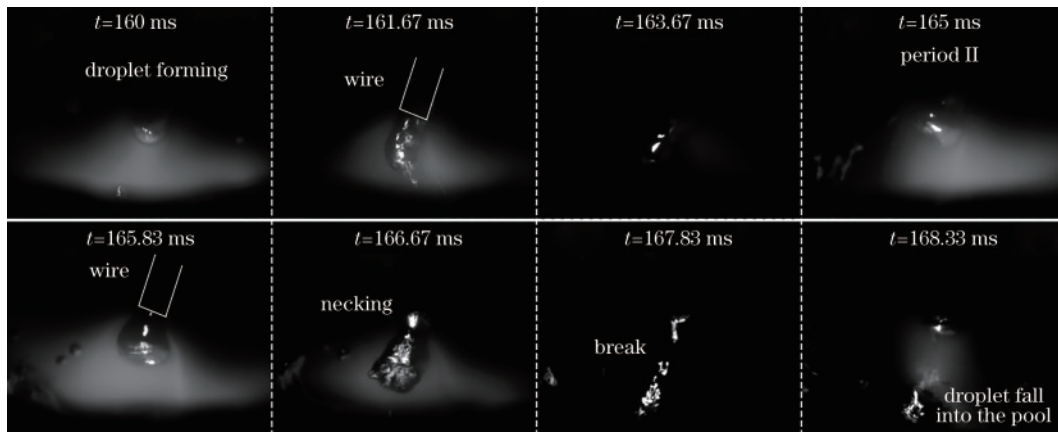


图 7 5.5 kW 激光功率下的两脉一滴过渡过程

Fig. 7 One droplet every two pulses transition process under 5.5 kW laser power

丝尖端。在 $t=165$ ms 时进入下一个熔滴过渡周期,此时焊丝尖端出现较大的熔滴,随着电流的增大,熔滴尺寸进一步增大,在 $t=165.83$ ms 时,焊丝尖端熔滴直径达到 1.83 mm。在 $t=166.67$ ms 时,熔滴在焊丝尖端发生缩颈,并在 1.16 ms 后脱离焊丝,在重力、电磁力、等离子体流力作用下向熔池过渡,直到 $t=168.33$ ms 熔滴完全落入熔池,完成两脉一大滴的过渡过程。

根据熔滴受力分析可知,在激光功率的增大过程中,匙孔喷发的光致等离子体密度也随之增大,对焊丝的热辐射作用增强,温度的升高使得熔滴所受的表面张力减小,促进了熔滴过渡,但同时强烈的金属蒸气作用又会对熔滴过渡产生阻碍作用。当激光功率为 4 kW

时,光致等离子体对焊丝热辐射作用效果较弱,熔滴直径较小,促进熔滴过渡的力也较小,熔滴容易与焊丝尖端形成较长液桥,从而接触熔池发生短路,短路瞬间电弧电流增大,液桥破裂,熔滴落入熔池。当激光功率为 4.5~5 kW 时,光致等离子体对焊丝加热作用增强,熔滴容易在焊丝尖端形成,且熔滴所受表面张力减小,因此能够实现稳定的一脉一滴过渡形式。当激光功率进一步增大到 5.5 kW 时,匙孔喷发的金属蒸气对熔滴过渡的阻碍作用占据主导地位,熔滴生长周期延长,且过渡困难,因此出现了两脉一大滴的过渡形式。

图 8 为四组不同激光功率下熔滴正常过渡周期图,过渡模式均为一脉一滴的射滴过渡。在图 8(a)时

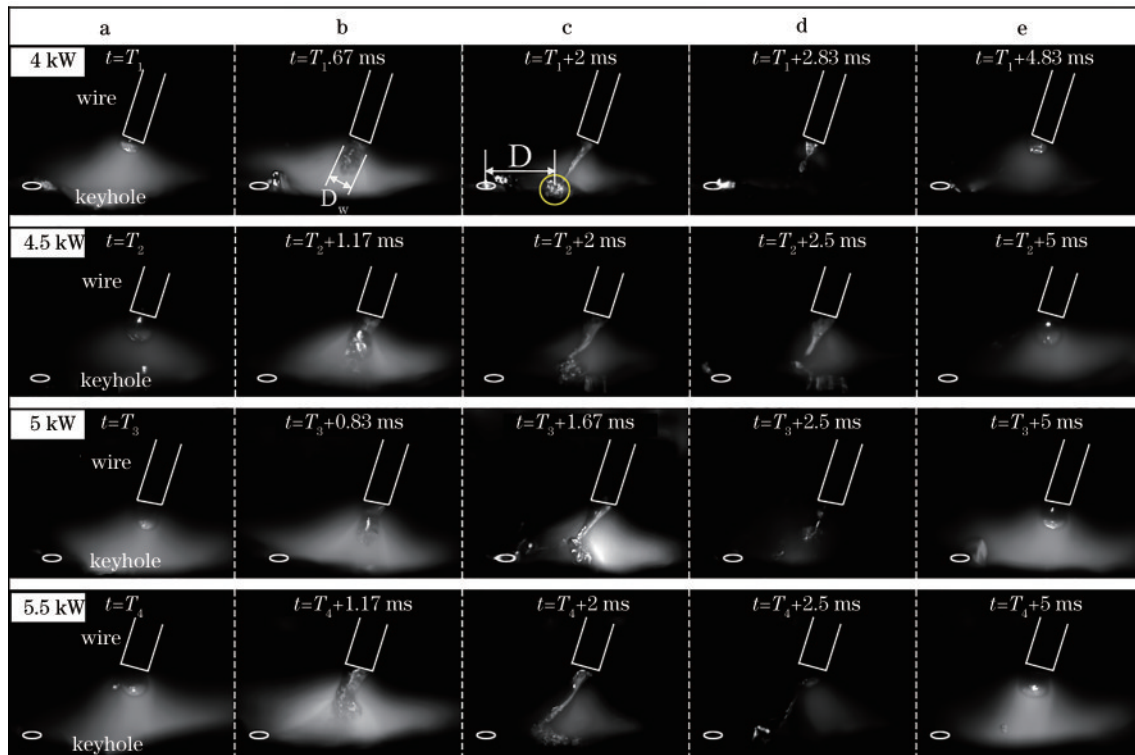


图 8 不同激光功率下的熔滴过渡过程

Fig. 8 Droplet transition processes under different laser powers

刻,熔滴在焊丝尖端形成,随着电弧电流的增大,熔滴尺寸增加,在图 8(b)时刻,熔滴在焊丝端部发生缩颈,直到图 8(c)时刻,熔滴与焊丝发生分离,焊丝端部液态金属呈削铅笔状,偏向激光一侧。在图 8(d)时刻,熔滴完全落入熔池,焊丝尖端的液态金属在表面张力作用下缩回,此时进入电流基值阶段,直到图 8(e)时刻,电弧电流开始上升,下一滴熔滴在焊丝端部形成,进入下一个熔滴过渡周期。

从图 8 可以看出,在熔滴过渡过程中,不同激光功

率下熔滴直径 D_w 不同,而且熔滴落入熔池的位置与激光匙孔开口位置的距离 D 也不相同。本文统计了每组激光功率下 20 个周期内 D_w 和 D 的值,如图 9 所示,随着激光功率的增大,熔滴过渡直径 D_w 增大。当激光功率为 4 kW 时, D_w 为 1.06 mm,小于焊丝直径;当激光功率增大到 5.5 kW 时, D_w 增大到 1.46 mm。熔滴落入熔池的位置与匙孔开口距离 D 均小于光丝间距 (3 mm),且随着激光功率的增大, D 先减小后增大,在激光功率为 5 kW 时, D 达到最小值 (2.29 mm)。

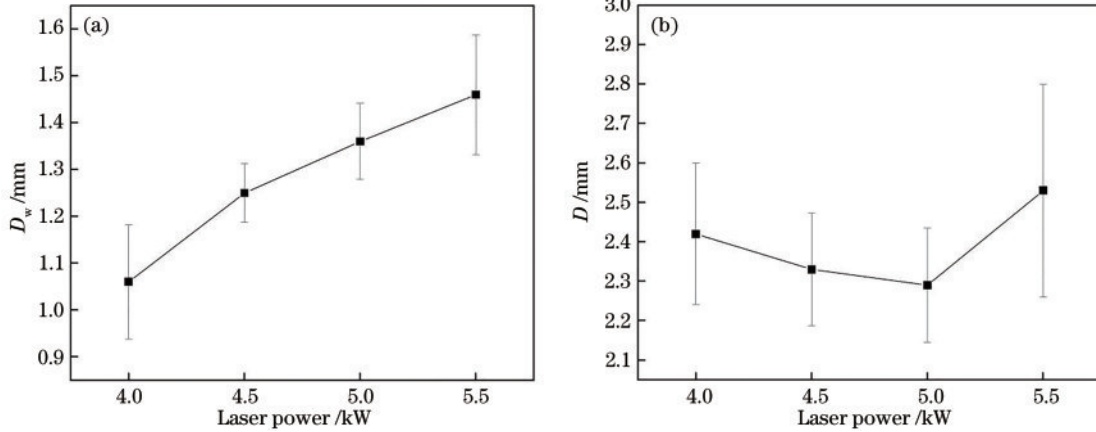


图 9 激光功率对熔滴直径和熔滴落入熔池位置影响。(a) D_w ; (b) D

Fig. 9 Influence of laser power on diameter of droplets and position of droplets falling into the molten pool. (a) D_w ; (b) D

这是由于随着激光功率增大,匙孔喷发的金属蒸气及等离子体对焊丝的加热辐射作用增强,焊丝熔化速度加快,同时金属蒸气对熔滴过渡产生的阻碍作用增强,熔滴形成时间延长,熔滴直径更大。此外,由于激光对电弧的吸引作用,熔滴所受电磁力指向匙孔一侧,使得熔滴落入熔池的位置偏向激光,且随着激光功率增大,电磁力偏向匙孔的现象更加明显,熔滴落入位置距离匙孔更近。但当激光功率为 5.5 kW 时,熔滴直

径增大所导致的重力增加占主导作用,熔滴指向性增强,落入熔池位置与匙孔开口距离 D 随之增大。

3.4 激光功率对复合焊接过程飞溅的影响

图 10(a)为 4 kW 激光功率下,匙孔前壁飞溅产生过程。在 $t=T$ 时刻,匙孔前壁上方产生了呈柱状形态的液态金属凸起;在 $t=T+1.83$ ms 时刻,液态金属柱发生断裂,形成圆球形液滴;在下一次电弧引燃时,液滴加速向焊接方向前方飞出,飞行方向与工件近似平行。

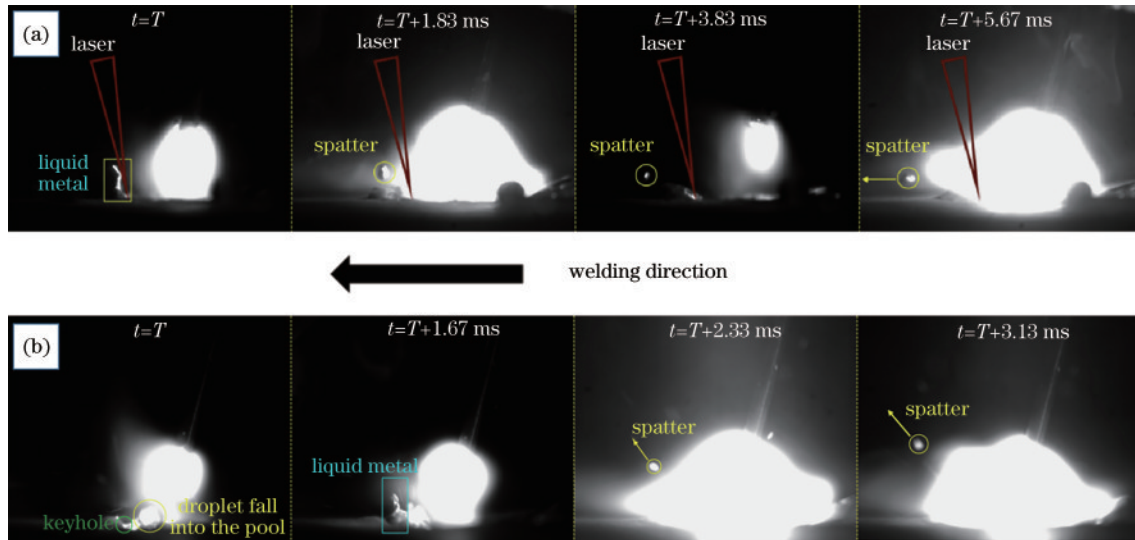


图 10 匙孔前壁飞溅形成过程。(a)激光功率为 4 kW;(b)激光功率为 5.5 kW

Fig. 10 Spatters formation process on the front keyhole wall. (a) Laser power is 4 kW; (b) laser power is 5.5 kW

图 10(b)为 5.5 kW 激光功率下,匙孔前壁飞溅产生过程。在 $t=T$ 时刻,熔滴落入匙孔后方,匙孔保持张开状态;在 $t=T+1.67$ ms 时刻,匙孔前壁上方出现了柱状液态金属凸起;在 $t=T+2.33$ ms 时刻,等离子体上方出现较光亮的液态金属飞溅;在 $t=T+3.13$ ms 时刻,观察到飞溅向匙孔前上方运动,运动方向与工件夹角约为 45° 。通过计算相邻图片内飞溅飞行距离与飞行时间的比值,得到 4 kW 和 5.5 kW 激光功率下飞溅的飞行速度分别为 0.82 m/s 和 2.5 m/s。

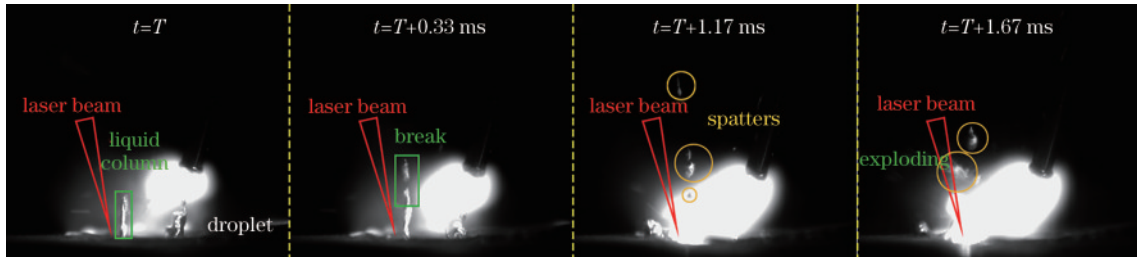


图 11 匙孔后壁上方飞溅形成过程

Fig. 11 Spatters formation process on the rear keyhole wall

图 12 为铝合金激光复合焊接过程中匙孔壁飞溅产生机理模型图。匙孔前壁下部液态金属在金属蒸气反作用力下,产生向下流动趋势,而匙孔前壁上部液态金属在金属蒸气剪切力 τ_v 的作用下向上运动,从而在匙孔前壁上方形成柱状液态金属凸起。如图 12(a) 中放大部分所示,柱状凸起的液态金属同时受到重力 G 、表面张力 γ 、金属蒸气剪切力 τ_v 和电弧作用力 F_a 的作用。其中 G 、 γ 为阻碍飞溅产生的力,而 τ_v 和 F_a 为促进飞溅产生的

图 11 为匙孔后壁飞溅形成过程。在 $t=T$ 时刻,熔滴与熔池接触,孔后壁上方出现液态柱状金属,随着时间的延长,液态金属柱逐渐升高;在 $t=T+0.33$ ms 时刻发生断裂,断裂部分继续向上运动;在 $t=T+1.17$ ms 时刻,熔滴完全落入熔池,液态金属柱上部分形成多滴飞溅向匙孔前上方运动;在 $t=T+1.67$ ms 时刻,其中一滴液态金属飞溅运动到激光束照射路径上,在能量密度激光照射下发生爆破,产生大量小颗粒飞溅。

力。当垂直方向上 $\tau_v > G + \gamma$ 时,凸起的柱状液态金属发生断裂,上部分形成飞溅,下部分在重力和表面张力的作用下缩回匙孔前壁熔池。4 kW 激光功率下匙孔前壁飞溅形成后,由于所受金属蒸气剪切力较小,在电弧作用力下,大多向匙孔前方运动,且运动速度较慢。随着激光功率增大,匙孔内金属蒸气喷发更加剧烈,飞溅所受的金属蒸气剪切力 τ_v 越大,在 τ_v 与电弧作用力的合力作用下向匙孔前上方飞出,运动速度相对较大。

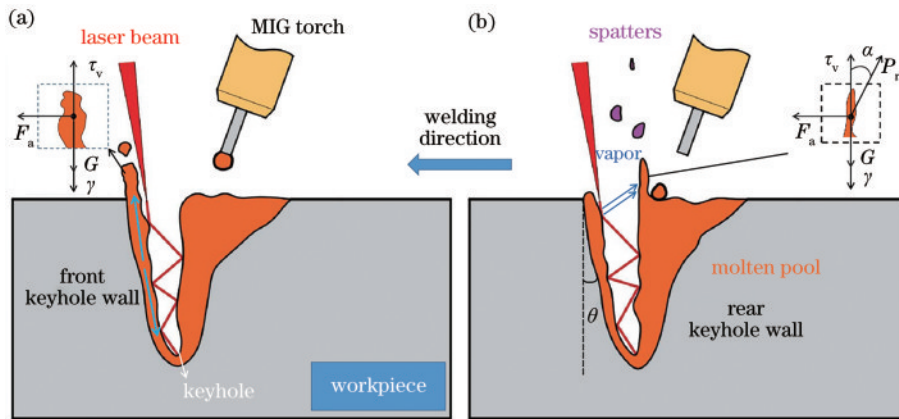


图 12 匙孔壁上方飞溅形成过程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of spatters formation process on the keyhole wall

匙孔后壁飞溅形成机理如图 12(b) 所示。由于匙孔后壁存在 MIG 电弧热源作用,以及液态金属冷却需要一定的时间,匙孔后壁液态金属熔池相对匙孔前壁较大,且熔池表面凹凸不平。匙孔后壁上方产生的液态金属凸起如图 12(b) 中放大部分所示,除了表面张力 γ 、重力 G 、金属蒸气剪切力 τ_v 及电弧作用力 F_a 外,还受到匙孔前壁喷发的金属蒸气作用力 P_r 的作用。垂直方向上,当 $P_r \cdot \cos \alpha + \tau_v > G + \gamma$ 时,凸起的柱状液态金

属发生断裂,上部分形成飞溅。当飞溅运动到激光路径上时,对激光能量产生吸收及散射作用,减少了辐射到母材表面激光能量,容易造成焊接过程不稳定、焊缝成形质量差等问题。

为了进一步研究激光功率对匙孔壁上方飞溅的关系,统计了 1200 张高速摄像图片,即 0.2 s 内匙孔前壁 (FKW) 和匙孔后壁 (RKW) 上方形成液态金属柱并产生飞溅的次数,如图 13 所示,随着激光功率增大,匙孔

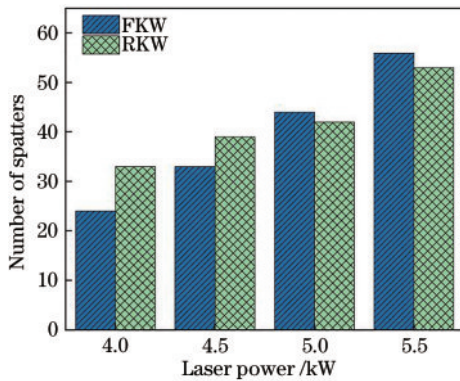


图 13 激光功率对匙孔壁上方飞溅产生次数影响

Fig. 13 Influence of laser power on the number of spatters on the keyhole wall

前壁和匙孔后壁飞溅产生次数均明显增多。当激光功率为 4 kW 和 4.5 kW 时,匙孔后壁产生飞溅的次数大于匙孔前壁上方产生飞溅的次数;当激光功率增大到 5~5.5 kW 时,匙孔前壁和匙孔后壁上方产生飞溅的次数相当。

这是因为随着激光功率的增大,匙孔内喷发的等离子体及金属蒸气显著增强,匙孔壁所受到的金属蒸气剪切力 τ_v 随着激光功率的增大而增大,匙孔壁上的液态金属更容易向上运动,在匙孔壁上方形成液态金属柱,当促进飞溅产生的力大于阻碍飞溅产生的力时,液态金属柱发生断裂,形成飞溅。因此随着激光功率的增大,匙孔前壁和匙孔后壁上产生飞溅次数均增加。

根据 Zhang 等^[20]的研究,匙孔前壁倾斜角度 θ 随着激光功率的提高而降低。由此可知,当激光功率较低时,匙孔前壁倾角较大,激光作用于匙孔前壁造成的剧烈金属蒸气喷发,直接作用于匙孔后壁上方液态金属,金属蒸气作用力在竖直方向上的分量 $P_r \cdot \cos \alpha$ 较大,因此液态金属更容易向上运动,使得匙孔后壁上方产生飞溅次数大于匙孔前壁。当激光功率大于 5 kW 时,匙孔倾斜角度减小,金属蒸气对匙孔后壁上方液态金属作用力 P_r 减小,匙孔前后壁上方产生飞溅的次数相当。

4 结 论

本文研究了激光功率对 A7N01 铝合金激光-脉冲 MIG 复合焊接过程中电弧参数、熔滴过渡行为和飞溅产生行为的影响。在激光-脉冲 MIG 复合焊接过程中,随着激光功率由 4 kW 增大到 5.5 kW,激光对电弧的压缩作用及光致等离子体对焊丝的热辐射作用增强,导致电弧峰值电流减小、峰值电压升高。在本文选定的送丝速度下,激光功率大于 4 kW 可避免熔滴发生短路过渡现象,但当激光功率增大到 5.5 kW 时,金属蒸气作用力对熔滴过渡阻碍占主导作用,使得熔滴过渡困难,出现两脉一大滴的过渡形式,降低了熔滴过渡稳定性,因此合适的激光功率是获得稳定的一脉一滴

过渡形式的关键。金属蒸气对匙孔壁的作用是复合焊接过程中匙孔壁上方飞溅产生的主要原因,激光功率越大,匙孔壁上方飞溅产生次数越多。

参 考 文 献

- [1] Kablov E N, Antipov V V, Oglodkova J S, et al. Development and application prospects of aluminum-lithium alloys in aircraft and space technology[J]. Metallurgist, 2021, 65(1/2): 72-81.
- [2] 管仁国, 姜花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68-75.
Guan R G, Lou H F, Huang H, et al. Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68-75.
- [3] Hong K M, Shin Y C. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 46-69.
- [4] 肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1680-1685.
Xiao R S, Wu S K. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1680-1685.
- [5] Bunaziv I, Akselsen O M, Ren X B, et al. Laser beam and laser-arc hybrid welding of aluminium alloys[J]. Metals, 2021, 11(8): 1150.
- [6] 雷正龙, 黎炳蔚, 周恒, 等. 端接接头激光-MAG 复合熔滴过渡与气孔特征分析[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302007.
Lei Z L, Li B W, Zhou H, et al. Analysis of droplet transfer and porosity characteristics in laser-MAG hybrid welding of edge joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302007.
- [7] 任闻杰, 郑惠锦, 李铸国, 等. 脉冲电弧对激光脉冲电弧复合熔滴过渡与飞溅的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402007.
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.
- [8] 韦辉亮, 李桓, 王旭友, 等. 激光-MIG 电弧的复合作用及对熔滴过渡的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 41-44, 115.
Wei H L, Li H, Wang X Y, et al. Hybrid interaction of laser and pulsed MIG arc and its influence on metal transfer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 41-44, 115.
- [9] Cai C, Feng J C, Li L Q, et al. Influence of laser on the droplet behavior in short-circuiting, globular, and spray modes of hybrid fiber laser-MIG welding[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 83: 108-118.
- [10] Zhang W, Hua X M, Liao W, et al. Behavior of the plasma characteristic and droplet transfer in CO₂ laser-GMAW-P hybrid welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(5/6/7/8): 935-942.
- [11] 史鹏飞. 5083 铝合金激光-MIG 复合焊接过程稳定性与气孔缺陷研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

- Shi P F. Study on the stability and pore defects of 5083 aluminum alloy laser-MIG hybrid welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [12] Zhang G L, Zhu B Q, Zou J L, et al. Correlation between the spatters and evaporation vapor on the front keyhole wall during fiber laser keyhole welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 15143-15152.
- [13] Wu D S, Hua X M, Ye Y X, et al. Experimental and numerical study of spatter formation and composition change in fiber laser welding of aluminum alloy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(18): 185604.
- [14] Kim Y S, Eager T W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1993, 72(6): 269-278.
- [15] 刘万强, 李彦清, 刘凤德, 等. 激光-电弧复合焊熔滴过渡的受力行为研究[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 408-413.
Liu W Q, Li Y Q, Liu F D, et al. Study on force behavior of droplet transfer on laser-arc hybrid welding [J]. Applied Laser, 2016, 36(4): 408-413.
- [16] 刘万强, 李彦清, 刘凤德, 等. 激光-电弧复合焊熔滴过渡的电磁收缩力研究[J]. 应用激光, 2016, 36(2): 188-192.
Liu W Q, Li Y Q, Liu F D, et al. Study on electromagnetic contraction force of droplet transfer on laser-arc hybrid welding[J]. Applied Laser, 2016, 36(2): 188-192.
- [17] Amson J C. Lorentz force in the molten tip of an arc electrode[J]. British Journal of Applied Physics, 1965, 16(8): 1169-1179.
- [18] Liu S Y, Liu F D, Zhang H, et al. Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO₂ laser-MAG hybrid welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 1019-1025.
- [19] 刘达樊. CO₂激光-MIG复合热源焊接熔滴过渡的行为分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 17-20.
Liu D F. Analysis of droplet transfer behavior in CO₂ laser-MIG hybrid welding process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 17-20.
- [20] Zhang D B, Wang M, Shu C S, et al. Dynamic keyhole behavior and keyhole instability in high power fiber laser welding of stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114: 1-9.