

激光功率对激光-MAG 复合焊熔滴过渡行为的影响

何双, 陈辉, 陈勇, 徐力栋, 车小莉

西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 通过 SUS301L 不锈钢材料的激光-MAG(熔化极活性气体保护电弧焊)复合焊试验,研究了激光功率对不同过渡模式下熔滴及焊缝尺寸的影响。结果表明,随着激光功率的增大,金属蒸气的反作用力增大,电磁力方向发生改变并影响熔滴的过渡。在短路过渡模式下,当激光功率超过 2000 W 后,熔滴过渡困难,熔滴与熔池的接触点偏向激光侧。在射滴过渡和射流过渡模式下,当激光功率达到 3000 W 后,熔滴过渡及焊接电压出现不稳定现象。在不同过渡模式下,焊缝的熔深、熔宽均随激光功率的增大而增大;当激光功率达到 2000 W 后,熔深与激光功率呈线性递增关系,而熔宽基本保持不变。

关键词 激光技术; 激光-MAG 复合焊; 熔滴行为; 激光功率; 焊缝形貌

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021408

Effects of Laser Power on Droplet Transfer Behaviour in Laser-MAG Hybrid Welding

He Shuang, Chen Hui, Chen Yong, Xu Lidong, Che Xiaoli

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

Abstract The effects of laser power on droplets and weld sizes under different transfer modes are investigated by using the experiment of laser-MAG (metal active gas arc welding) hybrid welding of SUS301L stainless steels. The results indicate that, with the increase of laser power, the metal vapor recoil force increases, the resultant electromagnetic force direction changes, and the droplet transfer is affected. In the short-circuiting mode, the droplets transfer difficultly and are deviated from the wire to laser spot when laser power exceeds 2000 W. In the globule and spray transfer modes, there exist an unstable phenomena in the droplet transfer and welding voltage when laser power is beyond 3000 W. In different transfer modes, the weld penetration and width increase with laser power. After the laser power approaches 2000 W, the weld penetration changes linearly with laser power, while the weld width remains constant.

Key words laser technique; laser-MAG hybrid welding; droplet behaviour; laser power; weld morphology

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

激光-电弧复合焊综合了激光焊接和电弧焊接的优点,是一种全新、高效、经济的焊接技术,具有提高激光能量利用率、改善表面成形、抑制缺陷产生等优势^[1-4]。

我国下一代地铁车辆逐渐采用奥氏体不锈钢 SUS 301L 材料,其焊接结构的安全可靠性对列车运行至关重要。采用激光-MAG(熔化极活性气体

保护电弧焊)复合焊技术可以减少接头缺陷,改善结构力学性能,提高生产效率。稳定的熔滴过渡是保证焊接质量的根本^[5-6],影响熔滴过渡的参数有电弧电压^[7]、焊接电流^[8-9]、光丝间距^[10]、焊接位置^[11]、保护气体^[12]、激光功率^[13]等。有关激光对熔滴的影响已有较多的研究,但缺乏统一的认识。Ono 等^[14]认为,在复合焊接时,激光作用斑点约 1 mm 范围内的电弧被压缩,激光能量集中,熔滴的形成速度更快、体积更小。Lei 等^[15]发现,当激光功率大于

收稿日期: 2017-08-29 收到修改稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100202)

作者简介: 何双(1991—),女,硕士研究生,主要从事激光焊接技术方面的研究。E-mail: heshuang4863@163.com

导师简介: 陈辉(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造及表面工程技术方面的研究。

E-mail: xnrpt@swjtu.edu.cn(通信联系人)

800 W时,激光光致等离子体对电弧的吸引和金属蒸发的反作用力阻碍了熔滴短路过渡。Liu等^[9]在CO₂激光-MAG复合焊中观察到,随着激光功率的增加,熔滴直径增大,过渡频率减小。秦国梁等^[16]认为,当电流较小时,激光的加入有利于电弧的稳定;而当电流较大时,激光会减小熔滴的过渡频率。

本文借助高速摄像机和数据采集系统,研究分析了激光功率对不同焊接电流电压下熔滴行为及焊缝形貌特征的影响。

2 试验方法

利用德国 TRUMPF 公司生产的 TruDisk10002 碟片激光器的连续激光模式进行试验,最大功率为 10 kW;聚焦透镜焦距为 300 mm,输出波长为 1030 nm,光束聚焦直径为 0.4 mm。采用德国 Fronius 公司生产的 Transpuls Synergic

4000 焊机在直流反接模式下进行焊接。在焊接过程中,使用日本 Photron 公司生产的 Fastcam SA4 高速摄像机进行图像采集,采集频率为 5000 frame·s⁻¹,曝光时间为 0.2 ms,同时结合数据采集系统同步获取电参数。试验中采用了波长为 808 nm 的激光照明源,相机镜头叠加使用波长为 808 nm 的滤光片及 ND4、ND8 中性减光片。高速摄像机与焊接方向垂直,与试件表面成 30°倾角,如图 1 所示。采用激光在前、电弧在后的复合热源形式进行平焊堆焊。焊枪与激光束成 30°夹角,保护气体采用体积分数为 95%的 Ar 和体积分数为 5%的 CO₂ 的混合气体,流量为 25 L·min⁻¹。试验材料为 SUS 301L 不锈钢,板厚分别取 6 mm 和 8 mm,焊接前机械打磨试件表面;填充焊丝选用直径为 1.0 mm 的 ER 308L,母材及焊丝成分见表 1。焊丝伸出长度为 15 mm,焊接工艺参数见表 2。

表 1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and wire (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
Base metal	0.0228	0.538	1.31	0.0268	<0.001	17.27	7.33	0.0518	0.201	Bal.
Wire	0.06	0.455	1.82	0.03	0.03	19.5	10.0	≤0.75	≤0.75	Bal.

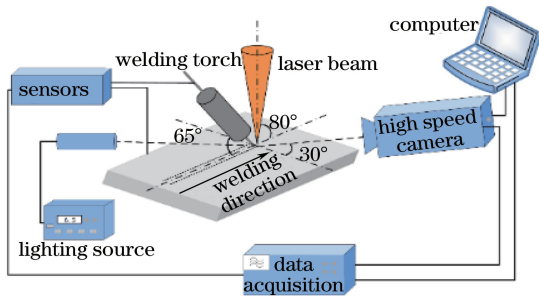


图 1 焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic of welding equipments

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Process parameters in welding experiment

Welding parameter	Value
Welding speed / (m·min ⁻¹)	1.0
Laser power / kW	1, 2, 3, 4
Arc voltage / V	24, 27, 32
Defocusing / mm	0
Laser-arc distance / mm	2
Extension length / mm	15

3 试验结果及分析

3.1 熔滴受力分析

MAG 焊和激光-MAG 复合焊熔滴的受力情况如图 2 所示。熔滴受到了促进作用和阻碍作用

力。促进作用包括重力 F_g 、电磁力 F_{em} 、等离子流力 F_p , 其中 F_{em} 与 y 轴方向的夹角为 α ; 阻碍作用力包括表面张力 F_σ 、蒸汽作用力 F_{RL} 。

熔滴自身重力 F_g 为

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho_w g, \quad (1)$$

式中 r_d 为熔滴半径, ρ_w 为熔融金属密度, g 为重力加速度。当焊丝选定后, 熔滴的密度不变, 重力随熔滴直径的增大而增大。

表面张力 F_σ ^[17] 为

$$F_\sigma = 2\pi r_w \gamma f, \quad (2)$$

式中 γ 为液体表面张力, r_w 为焊丝直径, f 为修正系数。表面张力随温度的增大而减小, 会促进熔滴从焊丝端部脱离。

由洛伦兹定律可知:

$$\mathbf{F}_{em} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{B} 为磁通量。假设熔滴上电流密度均匀分布, 则电磁力 F_{em} ^[18] 可表示为

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} f_z, \quad (4)$$

$$f_z = \ln\left(\frac{r_d \sin \theta}{r_w}\right) - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln\left(\frac{2}{1 + \cos \theta}\right) - \frac{1}{4}, \quad (5)$$

式中 μ_0 为自由空间磁导率, I 为焊接电流, θ 为熔滴导电角, f_z 为熔滴形状系数。 f_z 与 θ 之间的函数关系如图 3 所示。当 θ 较小时, 熔滴上电流

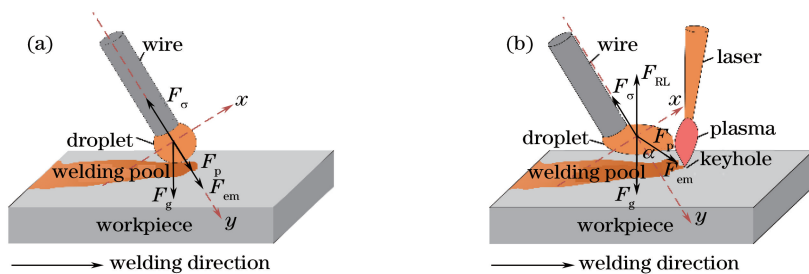


图 2 熔滴受力示意图。(a) MAG 焊; (b) 激光-MAG 复合焊

Fig. 2 Schematic of force acting on droplets. (a) MAG welding; (b) laser-MAG hybrid welding

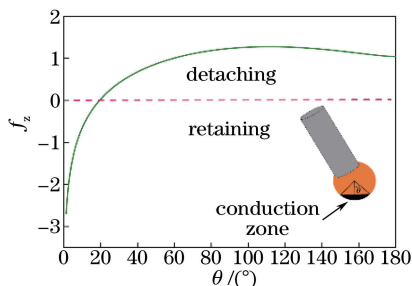


图 3 f_z 与 θ 之间的关系

Fig. 3 f_z versus θ

等离子流力 F_p [19] 为

$$F_p = C_0 A_p \left(\frac{\rho_f v_f^2}{2} \right), \quad (6)$$

式中 C_0 为等离子流力系数, A_p 为垂直于等离子流平面的投影面积, ρ_f 为等离子密度, v_f 为等离子流速。 A_p 随熔滴直径和等离子体流速的增大而增大, 进而等离子流力增大。

蒸汽作用力是匙孔金属蒸气浮力和熔滴底部蒸发反作用的合力, 研究表明, 蒸汽作用力对熔滴过渡有明显的阻碍作用 [20], 其表达式 [21] 为

$$\begin{cases} F_{RL} = \frac{1}{4\pi R_h^2} C_D A_p \rho_m^2 V_0^2 \frac{N_a k_B T_s^{3/2}}{M_a B_0} \times \\ \exp(-U/T_s) \times \\ \exp(-D_{LA}^2/2R_h^2), D_{LA} \leq R_h \\ F_{RL} = 0, D_{LA} > R_h \end{cases}, \quad (7)$$

式中 R_h 为金属蒸气分布系数, C_D 为流阻系数, A 为垂直于流动平面的投影面积, ρ_m 为等离子密度, U 为电弧电压, V_0 为常数 $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, N_a 为阿伏伽德罗常数, k_B 为玻尔兹曼常数, T_s 为熔化温度, D_{LA} 为试样表面激光作用点与焊丝间的距离。蒸汽作用力与 D_{LA} 及 R_h 相关, R_h 则与焊接激光能量、焊接速度等有关。

3.2 短路过渡模式下的熔滴特征

在短路过渡中, MAG 焊与激光-MAG 复合焊

线收缩, f_z 为负, 电磁力阻碍熔滴的分离; 当 θ 较大时, 电流线发散分布, f_z 为正, 电磁力促进熔滴过渡。

的电压为 24 V, 电流为 145 A。激光加入后, 电流、电压平均值未发生明显的变化, 短路过渡过程中的熔滴图像如图 4 所示, 其中 P 为激光功率。MAG 电弧主要通过发射热电子来维持电弧燃烧, 而熔池表面阴极斑点的漂移造成电弧不稳定、能量分散; x 轴上熔滴的合力为重力的分力, 如图 2(a) 所示。从图 4(a) 中可以观察到, MAG 焊熔滴尺寸较大, 重力与表面张力作用明显, $-x$ 轴方向的力使熔滴与熔池短路接触点偏离 y 轴方向, 并与 y 轴形成一个负夹角 θ 。高速摄像图片的统计结果表明, MAG 焊熔滴过渡周期约为 35 ms。

在激光-MAG 复合焊的过程中, 激光辐射产生的金属蒸气电离能低于保护气体分子的, 在匙孔上方易形成高浓度的电子和阳离子; 激光辐射区域热量集中且易发射热电子, 这导致电弧被吸引至激光辐射点处并被压缩形成狭小的导电通道, 激光光致等离子体大量进入弧柱区, 维持电弧放电 [22]。因此, 电弧热量更加集中, 焊丝的熔化速度加快。同时, 复合电磁力与等离子流力的方向与 y 轴形成夹角 α , 从而 y 轴方向的分力减小, $+x$ 轴方向的分力增大。此外, 匙孔内激光能量吸收率的增大导致金属蒸发剧烈 [23-24], 熔滴底部金属蒸发产生的反作用力与匙孔蒸汽产生的浮力形成合力 F_{RL} , 该合力对熔滴过渡起阻碍作用。因此, $+x$ 轴方向的合力增大, $+y$ 轴方向的合力减小, 激光对熔滴的吸引使得熔滴与焊丝的脱离较困难。由图 4(b)~(e) 可知, 随着激光功率的增大, θ 由负变正并逐渐增大。当激光功率增大至 3000 W 后, 熔滴体积明显增大并被吸引至激光作用方向上, F_{RL} 对熔滴过渡的阻碍作用愈加明显。从图 4 中也可观察到, 熔滴逐渐漂浮在激光作用侧的熔池上方且体积较大, 短路后爆破, 发生较剧烈的飞溅现象。

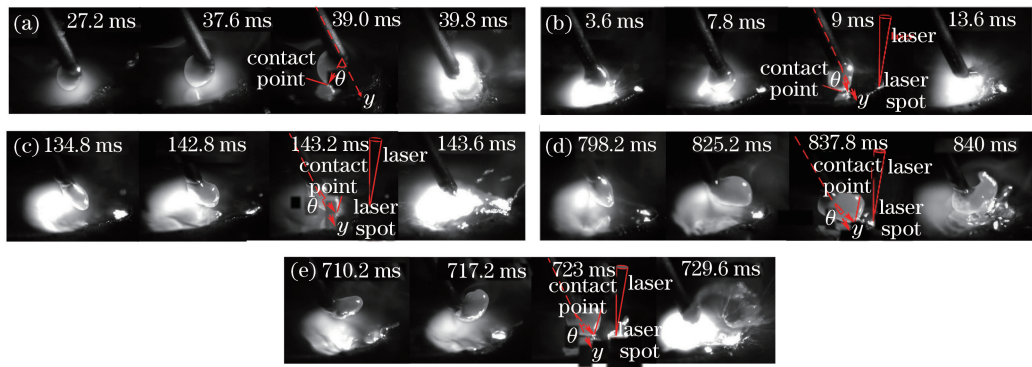


图4 短路过渡模式下的熔滴图像。(a) MAG焊;(b)激光-MAG复合焊, $P=1000\text{ W}$;(c)激光-MAG复合焊, $P=2000\text{ W}$;
(d)激光-MAG复合焊, $P=3000\text{ W}$;(e)激光-MAG复合焊, $P=4000\text{ W}$

Fig. 4 Droplet images in short-circuiting transfer mode. (a) MAG welding; (b) laser-MAG hybrid welding, $P=1000\text{ W}$;
(c) laser-MAG hybrid welding, $P=2000\text{ W}$; (d) laser-MAG hybrid welding, $P=3000\text{ W}$;
(e) laser-MAG hybrid welding, $P=4000\text{ W}$

短路过渡和射滴过渡模式下的熔滴过渡周期与激光功率的关系如图5所示。当激光功率为1000 W和2000 W时,激光热辐射起主导作用,熔滴的过渡周期与MAG焊接相比略有缩短。但激光功率继续增大后,形成了新的热、力平衡状态,蒸汽的阻碍作用更强,导致过渡周期延长。

当激光功率不同时,MAG焊和激光-MAG复合焊在不同过渡模式下的电压波形如图6所示,可以看出,激光功率较低时,短路过渡较稳定;当激光功率为4000 W时,电压较紊乱并伴随熔滴的爆破。

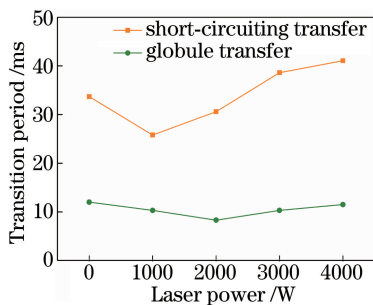


图5 激光功率与熔滴过渡周期之间的关系

Fig. 5 Transition period of droplets versus laser power

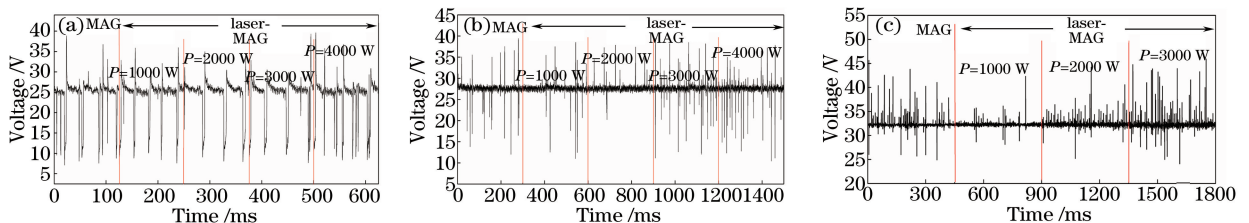


图6 不同激光功率下的电压波形图。(a)短路过渡;(b)射滴过渡;(c)射流过渡

Fig. 6 Voltage waveforms under different laser powers. (a) Short-circuiting transfer; (b) globule transfer; (c) spray transfer

3.3 射滴过渡模式下的熔滴特征

图7(a)所示为射滴过渡模式下MAG焊的熔滴图像,电压为27 V,电流为164 A。由图可知,MAG焊下的射滴过渡的电压大于短路过渡的电压,即焊丝与熔池间的电弧距离增大,熔滴有足够的距离和时间脱离焊丝。同时,电磁力和等离子流力的增大促进了熔滴与焊丝的分,形成射滴过渡。然而,在MAG焊过程中,偶尔会出现短路现象。

当激光功率不同时,射滴过渡模式下激光-MAG复合焊的熔滴图像如图7(b)~(e)所示。当激光功率为1000 W时,熔滴过渡及电压波形的稳定性比MAG焊过程的好。当激光功率为2000 W时,熔滴的过渡频率最大,电压波形较稳定,如图7(b)所示。当激光功率继续增大到3000 W时,在完成一个较大的熔滴过渡后,迅速形成多个小液滴并连接成串,与熔池形成瞬间短路后又形成一个较大的熔滴。瞬间短路产生飞溅,并且电压波形出现较大的波动。在激光功率为4000 W的激光-MAG复合焊过程中,形成小颗粒熔滴的频率增大,因此,电压波形的波动较大。从图5可以看出,在射滴过渡过程中,激光功率对过渡周期的影响较小,熔滴的过渡周期基本保持在10 ms左右。

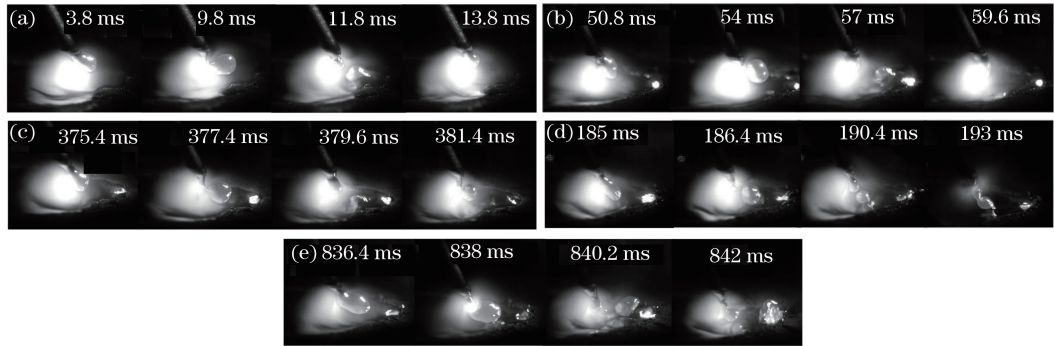


图7 射滴过渡模式下的熔滴图像。(a) MAG焊;(b)激光-MAG复合焊, $P=1000\text{ W}$;(c)激光-MAG复合焊, $P=2000\text{ W}$;
(d)激光-MAG复合焊, $P=3000\text{ W}$;(e)激光-MAG复合焊, $P=4000\text{ W}$

Fig. 7 Droplet images in globule transfer mode. (a) MAG welding; (b) laser-MAG hybrid welding, $P=1000\text{ W}$;
(c) laser-MAG hybrid welding, $P=2000\text{ W}$; (d) laser-MAG hybrid welding, $P=3000\text{ W}$;
(e) laser-MAG hybrid welding, $P=4000\text{ W}$

3.4 射流过渡模式下的熔滴特征

当电弧电压为 32 V , 电流为 208 A 时, 射流过渡模式下 MAG 焊和激光-MAG 复合焊的熔滴图像如图 8 所示。焊接电参数的变大使熔滴形成的速度增大, 熔滴过渡模式下的电磁力和等离子流力增大^[25], 重力和表面张力的作用效果减弱, 焊丝尖端呈铅笔状, 熔滴颗粒小, 喷射速度快, 几乎连成一条线。适量的激光光致等离子体有利于提高电弧燃烧的稳定性, 但电弧空间内大量离子的运动对电磁力的方向造成影响, 导致熔滴束的摆动、振荡。当激光

功率为 1000 W 和 2000 W 时, 焊接过程稳定; 当激光功率为 3000 W 时, 电压波动频率变大, 过渡的稳定性与 MAG 焊相比更差, 如图 6(c) 所示。

试验结果表明, 激光功率对短路过渡模式下的熔滴行为以及过渡周期的影响较大。电流密度较小时, 激光辐射可减小电弧电阻, 增加电弧内的电子数量, 从而改变熔滴特性, 但这种作用随电流密度的增大而逐渐减弱^[13]; 在射滴及射流过渡模式下, 激光功率的影响较小, 而熔滴的过渡形式主要由焊接电流、电压决定, 受激光作用的影响较小。

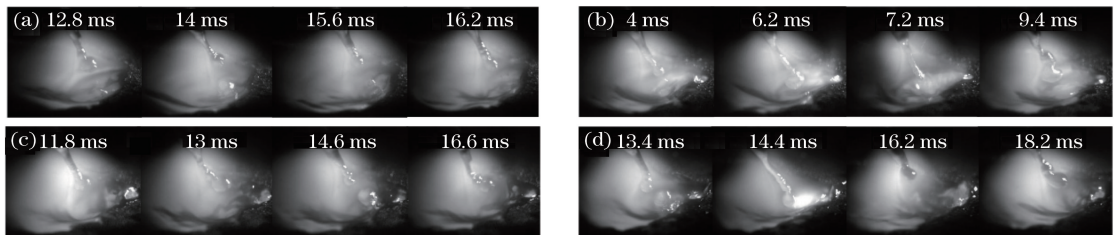


图8 射流过渡模式下的熔滴图像。(a) MAG焊;(b)激光-MAG复合焊, $P=1000\text{ W}$;
(c)激光-MAG复合焊, $P=2000\text{ W}$;(d)激光-MAG复合焊, $P=3000\text{ W}$

Fig. 8 Droplet images in spray transfer mode. (a) MAG welding; (b) laser-MAG hybrid welding, $P=1000\text{ W}$;
(c) laser-MAG hybrid welding, $P=2000\text{ W}$; (d) laser-MAG hybrid welding, $P=3000\text{ W}$

3.5 焊缝截面尺寸的变化规律

在不同过渡模式下, 激光功率对焊缝熔宽、熔深的影响如图 9 所示, 各点焊缝截面如图 10 所示。从图 9 可以看出, 在不同过渡模式下, 随着激光功率的增大, 焊缝的熔深、熔宽增大。

图 9(a) 表明, 在 MAG 焊时, 随焊接电流、电压的增大, 焊缝熔深略有增大。当激光功率为 1000 W 时, 激光-MAG 复合焊的焊缝熔深与 MAG 焊的相近; 当激光功率达到 2000 W 后, 激光-MAG 复合焊的焊缝熔深与激光功率呈线性递增关系,

且在相同激光功率的条件下, 短路过渡模式下的焊缝熔深大于射滴、射流过渡的。这是因为电流增大, 电弧等离子体对激光能量的吸收、散射作用增强, 进而匙孔内的能量密度减小。图 9(b) 表明, 焊缝熔宽随着激光功率的增大而略有增大。但在激光功率达到 2000 W 后, 焊缝熔宽基本保持稳定。焊缝熔宽主要由电弧参数决定, 随着焊接电流、电压的增大, 电弧作用面积增加, 促进了液态金属的铺展, 焊缝熔宽增大。因此, 射流过渡模式下的焊缝熔宽最大。

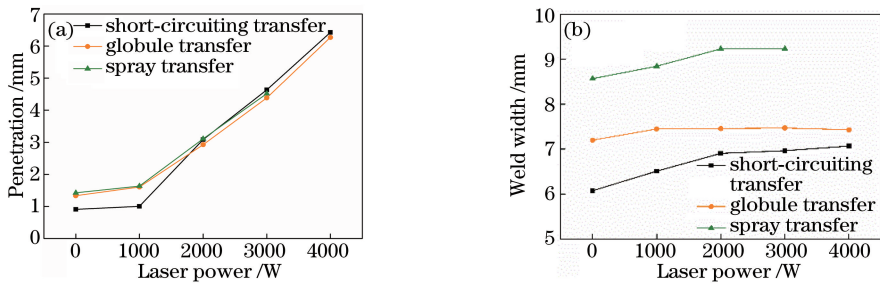


图 9 (a)焊缝熔深与激光功率间的关系;(b)焊缝熔宽与激光功率间的关系

Fig. 9 (a) Relationship between weld penetration and laser power; (b) relationship between weld width and laser power

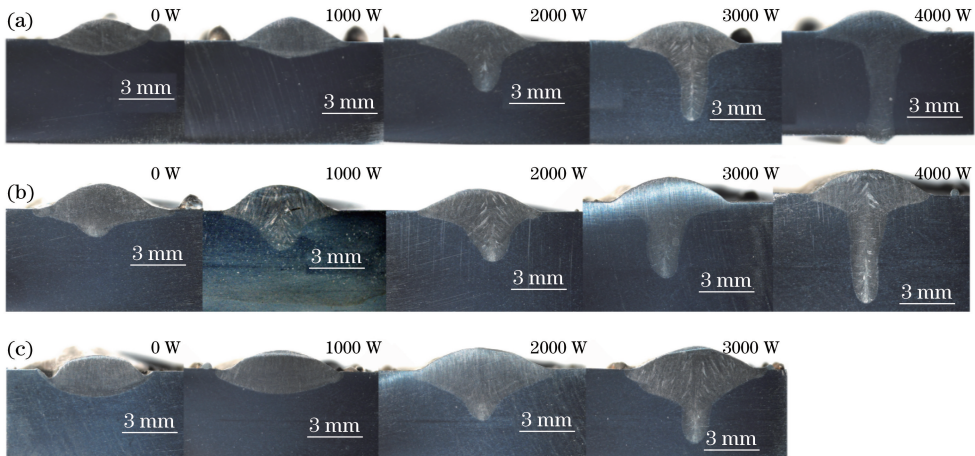


图 10 不同激光功率下的焊缝截面。(a)短路过渡;(b)射滴过渡;(c)射流过渡

Fig. 10 Weld cross sections under different laser powers.

(a) Short-circuiting transfer; (b) globule transfer; (c) spray transfer

4 结 论

通过激光-MAG 复合焊的方法,研究了激光功率对 SUS 301L 不锈钢不同熔滴过渡行为的影响,得到以下结论。

1) 激光的加入使熔滴的受力状态发生变化,当激光功率达到 2000 W 后,熔滴明显地受到向上的阻力而悬浮于熔池上方,最终与熔池接触,短路时偏向激光侧。

2) 在射滴和射流过渡模式下,当激光功率为 1000 W 和 2000 W 时,焊接过程稳定;当激光功率增大至 3000 W 后,焊接参数及熔滴过渡的稳定性变差。

3) 在不同的过渡模式下,焊缝熔深、熔宽均随着激光功率的增大而增大。当激光功率达到 2000 W 后,焊缝熔深与激光功率呈线性递增,焊缝熔宽基本保持不变。

参 考 文 献

[1] Bagger C, Olsen F O. Review of laser hybrid welding

[J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.

[2] Casalino G, Dal Maso U, Angelastro A, *et al.* Hybrid laser welding: A review [M]. Austria: DAAAM International Scientific Book, 2010.

[3] Xiao R S, Wu S K. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1680-1685.

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.

[4] Ribic B, Palmer T A, DebRoy T. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. International Materials Reviews, 2009, 54(4): 223-244.

[5] Leo P, Renna G, Casalino G, *et al.* Effect of power distribution on the weld quality during hybrid laser welding of an Al-Mg alloy [J]. Optics and Laser Technology, 2015, 73: 118-126.

[6] Zhou J, Tsai H L. Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(17/18): 4353-4366.

- [7] Moradi M, Ghoreishi M, Frostevarg J, *et al.* An investigation on stability of laser hybrid arc welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(4): 481-487.
- [8] Węglowski M S, Huang Y, Zhang Y M. Effect of welding current on metal transfer in GMAW [J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2008, 33(1): 49-56.
- [9] Liu S Y, Liu F D, Xu C Y, *et al.* Experimental investigation on arc characteristic and droplet transfer in CO₂ laser-metal arc gas (MAG) hybrid welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 62: 604-611.
- [10] 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 and Laser Technology*, 2012, 44(4): 1019-1025.
- [11] Chen Y B, Feng J C, Li L Q, *et al.* Effects of welding positions on droplet transfer in CO₂ laser-MAG hybrid welding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5/6/7/8): 1351-1359.
- [12] Li M, Zhang W, Hua X M, *et al.* Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402008.
李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402008.
- [13] Liu F D, Zhang H, Du S F, *et al.* Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO₂ laser-MAG arc hybrid welding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 75-82.
刘凤德, 张宏, 杜劭峰, 等. 激光功率对 CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊电弧与熔滴过渡行为的影响 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 75-82.
- [14] Ono M, Shinbo Y, Yoshitake A, *et al.* Welding properties of thin steel sheets by laser-arc hybrid welding: Laser focused arc welding [C]. *SPIE*, 2003, 4831: 369-374.
- [15] Lei Z L, Chen Y B, Li L Q, *et al.* Characteristics of droplet transfer in CO₂ laser-MIG hybrid welding with short-circuiting mode [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 19(2): 172-175.
- [16] Qin G L, Lin S Y. Effect of laser on frequency of metal transfer and welding current in Nd:YAG laser + P-GMA hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7): 1908-1913.
秦国梁, 林尚阳. Nd:YAG 激光 + P-GMA 复合热源焊接过程中激光对熔滴过渡频率和电流的影响 [J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1908-1913.
- [17] Harkins W D, Brown F E. The determination of surface tension (free surface energy), and the weight of falling drops: The surface tension of water and benzene by the capillary height method [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1919, 41: 499-524.
- [18] Amson J C. Lorentz force in molten tip of an arc electrode [J]. *British Journal of Applied Physics*, 1965, 16(8): 1169-1179.
- [19] Kim Y S, Eagar T W. Analysis of metal transfer in gas metal arc-welding [J]. *Welding Journal*, 1993, 72(6): S269-S275.
- [20] Wu C S, Chen M A, Li S K. Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer [J]. *Computational Materials Science*, 2004, 31(1/2): 147-154.
- [21] Liu D F. Analysis of droplet transfer behavior in CO₂ laser-MIG hybrid welding process [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
刘达樊. CO₂ 激光-MIG 复合热源焊接熔滴过渡的行为分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [22] Liu L M, Chen M H. Interactions between laser and arc plasma during laser-arc hybrid welding of magnesium alloy [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(9/10): 1224-1231.
- [23] Liu L M, Huang R S, Song G, *et al.* Behavior and spectrum analysis of welding arc in low-power YAG-laser-MAG hybrid-welding process [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1937-1943.
- [24] Kawahito Y, Matsumoto N, Mizutani M, *et al.* Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 744-748.
- [25] Lowke J J. Physical basis for the transition from globular to spray modes in gas metal arc welding [J]. *Applied Physics*, 2009, 42(13): 135204.