

电弧功率对高功率激光-电弧复合焊接熔滴过渡与飞溅的影响

郑亚风^{1,2,3}, 刘双仁^{1,2,3}, 张群莉^{1,2,3}, 王梁^{1,2,3}, 张华夏⁴, 吴让大⁴, 姚建华^{1,2,3*}

¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;

²高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310023;

³浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023;

⁴奔腾激光(浙江)股份有限公司, 浙江 温州 325000

摘要 对 10 mm 厚 Q345 钢进行高功率激光-MAG 复合焊接试验, 研究电弧功率对焊接过程熔滴过渡行为与飞溅的影响。结果表明: 电弧功率会显著影响焊缝形貌与熔滴过渡行为, 电弧功率过高或过低均会导致焊缝表面塌陷; 当电弧功率为 6860 W 时, 可获得平整光滑的焊缝形貌, 且无咬边塌陷等缺陷; 随着电弧功率增大, 熔滴过渡模式逐渐由含短路过渡的混合过渡模式向单一射流过渡模式转变, 前者主要包括大滴过渡、射滴过渡、射流过渡分别与短路过渡组成的混合过渡模式; 混合过渡模式下的短路过渡是产生飞溅的主要原因, 在单一射流过渡模式下匙孔处的羽辉气流会促进飞溅的产生。

关键词 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 熔滴过渡; 电弧功率; 飞溅

中图分类号 TG456.7 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL221191

1 引言

激光-电弧复合焊接技术是 20 世纪 70 年代末由 Steen^[1]提出并逐渐发展成熟起来的一种优质、高效的新型焊接技术, 这项技术分别继承了单独激光焊和电弧焊的优点, 同时又弥补了它们各自的缺点, 是一种极具应用前景的先进焊接工艺。千瓦及万瓦级激光-熔化极电弧复合焊接技术是目前该技术领域的发展趋势, 而且该技术已在汽车制造、造船、轨道交通等领域获得广泛应用^[2-3]。

激光与电弧两种热源具有不同的物理性质与能量传输机理, 工艺参数的改变会对焊接过程产生诸多影响^[4]。熔滴过渡行为反映了激光-电弧复合焊接过程的稳定性, 对焊缝质量起着至关重要的作用, 国内外学者对此开展了大量研究^[5-14]。Li 等^[5]通过研究发现在电弧峰值期间加入激光会延长熔滴的形成和分离时间, 导致熔滴偏离焊丝轴线, 熔滴更容易被激光束击中, 焊接稳定性下降。Zhu 等^[6]研究了不同引导方式与能量比对激光-电弧复合焊接稳定性的影响, 结果表明: 激光会推动熔池向后流动, 导致熔池中部受到挤压, 使熔池高度不断变化, 促进了短路过渡的产生, 飞溅数量也因此增多; 采用电弧引导模式能有效缓解熔

池的波动, 并能实现完整的熔滴过渡过程, 减少飞溅数量。Zhang 等^[7]采用光谱法研究了激光-电弧复合焊接过程中的等离子体温度与电子密度, 结果显示, 激光的加入能降低电弧电阻从而稳定电弧、缩短弧长, 最终导致焊接过程中的飞溅数量增加。Li 等^[8]研究了超高功率激光-电弧复合焊接时热源配置对复合焊接成形质量的影响, 结果显示: 熔滴会冲击激光匙孔从而导致飞溅产生, 采用电弧引导能改变熔滴冲击力的方向, 使激光匙孔更稳定, 焊缝成形也更加美观。Gao 等^[9]对激光-电弧复合焊接过程的稳定性和焊接质量进行了时域和频域分析, 结果显示: 熔滴过渡周期越长, 焊接过程越不稳定, 同时短路过渡中的熔滴爆炸也会影响最终的焊缝质量。刘双宇课题组^[10-12]对激光-电弧复合焊接过程中的电弧特征以及熔滴过渡行为进行了研究, 研究结果表明激光的加入会降低电弧等离子体的电阻, 从而吸引和压缩电弧, 改变电弧的形态, 使熔滴的形状改变和过渡频率减慢。叶广文等^[13]采用图像信号处理方法分析了熔滴过渡特征与焊缝成形质量之间的关联性, 发现稳定的熔滴过渡能提高焊缝成形的均匀性, 而激光束产生的金属蒸气能在一定程度上稳定和压缩电弧从而促进熔滴过渡, 但是也会增大金属蒸气的反冲力, 从而阻碍熔滴过渡。Cai 等^[14]研究了激光的

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-09-28; 录用日期: 2022-10-18; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2022C03021)、国家自然科学基金重点项目(52035014)

通信作者: *laser@zjut.edu.cn

加入对 MIG 焊接熔滴过渡的影响,发现激光作用产生的低电离电位等离子体会改变焊接电流的分布,从而改变电磁力与等离子流力的大小和方向。

综上所述,激光的加入会对熔滴过渡过程产生一定影响,甚至阻碍熔滴过渡过程,对焊接过程的稳定性造成不良影响。因此,在激光-电弧复合焊接时,选择合适的工艺参数对于实现稳定的焊接过程十分重要。近年来,随着高功率激光器的发展,激光-电弧复合焊接技术越来越多地被应用于中厚板焊接领域^[15]。因此,对高功率激光-电弧复合焊接过程中的相关机理进行研究尤为重要。

本课题组基于高功率激光-MAG 复合焊接,通过改变电弧功率来实现不同熔滴过渡模式下中厚板的单面焊双面成形,同时利用高速相机对熔滴过渡过程以及飞溅产生过程进行观察,分析了不同电弧功率对焊缝形貌、熔滴过渡行为和焊接飞溅的影响,并阐明了不同过渡模式下飞溅缺陷的产生机理。

2 试验方法

激光-电弧复合焊接试验系统主要包括光纤激光器、SKS 焊接系统、KUKA 机械臂和高速相机。试验使用的激光器为深圳市杰普特光电股份有限公司生产的连续光纤激光器,其最大输出功率为 12000 W,输出激光波长为 (1080 ± 10) nm,聚焦光斑直径为 0.2 mm;

电弧焊接设备使用 SKS 焊接系统,该系统的配套软件 Q8Tool 能记录焊接过程中的电流、电压与功率值并将其传输至计算机中。将电弧焊炬与激光头固定在 KUKA 机械臂上,通过机械臂的运动实现热源与工件的相对移动。

基板选用 10 mm 厚热轧态 Q345 钢,焊接试样的尺寸为 150 mm \times 75 mm \times 10 mm,焊丝选用直径为 1.2 mm 的 ER70S-6 型实芯焊丝。母材与焊丝的化学成分如表 1 所示。焊接前用角磨机对待焊表面进行打磨,并用乙醇清洗表面的污垢。采用的焊接方式为平板堆焊。为了获得稳定的熔滴过渡过程,采用电弧引导的方式进行焊接^[6,8]。电弧焊接极性选用直流正接,以获得较大的熔深。焊接保护气为氩气和 CO₂ 的混合气体,混合气体中氩气与 CO₂ 的体积比为 9:1,保护气流量为 20 L/min。焊接离焦量为 0 mm,激光束垂直入射,焊炬与垂直平面间的夹角为 45°。试验方案的选择以确保 10 mm 钢板全熔透为标准,用控制变量法探究不同参数对焊接过程的影响。SKS 焊接系统采用内置统一调节方式;电弧功率选用 4096、4915、5735、6860、7986 W,以便能够实现涵盖三种过渡模式(滴状过渡、喷射过渡与接触过渡)的焊接过程^[16]。在控制变量试验中,根据预试验结果选择的参数为:激光功率 7500 W,焊接速度 1.5 m/min,送丝速度 8 m/min,热源间距 2.5 mm。具体变化的参数如表 2 所示。

表 1 母材及焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal and wire

Material	Mass fraction / %						
	C	Si	Mn	P	S	V	Fe
Q345	≤ 0.20	≤ 0.50	≤ 1.70	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.15	Bal.
ER70S-6	0.06-0.10	0.80-1.60	1.40-1.60	≤ 0.020	≤ 0.015	≤ 0.02	Bal.

表 2 复合焊接工艺参数

Table 2 Hybrid welding process parameters

Experiment No.	Laser power P_L / kW	Welding speed V_s / (m \cdot min ⁻¹)	Wire feed rate V_w / (m \cdot min ⁻¹)	Arc power P_A / W	Distance between laser and arc D_{LA} / mm	Welding current / A	Welding voltage / V
1#	7.5	1.5	5	4096	2.5	194	21.4
2#	7.5	1.5	6	4915	2.5	216	22.8
3#	7.5	1.5	7	5735	2.5	242	24.0
4#	7.5	1.5	8	6860	2.5	268	25.8
5#	7.5	1.5	10	7986	2.5	272	29.3

使用高速相机(Phantom[®] v2640)对焊接过程中的熔滴过渡行为进行观察,拍摄帧率为 10000 frame/s。为了得到清晰的熔滴过渡图像,试验开始前在相机镜头处添加红外滤光片。使用 Image-Pro Plus 软件对高速相机拍摄的图片进行处理,统计每个参数下 500 ms 内的熔滴过渡模式与熔滴过渡次数,以此计算对应 1 s 内的熔滴过渡频率。通过对图像进行特征提取来实现焊接过程中飞溅直径与数量的统

计^[9],即:首先对图像进行二值化处理,然后进行高斯滤波处理,以获得清晰的飞溅轮廓,进而统计每个参数下 100 ms 内稳定过渡过程中飞溅的直径与数量。具体过程如图 1 所示。焊接结束后对焊缝的正面和背面形貌进行拍照,再根据标准制备工艺制备金相试样。用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀金相试样待观察表面 5 s,然后采用体式显微镜观察焊缝的截面形貌。

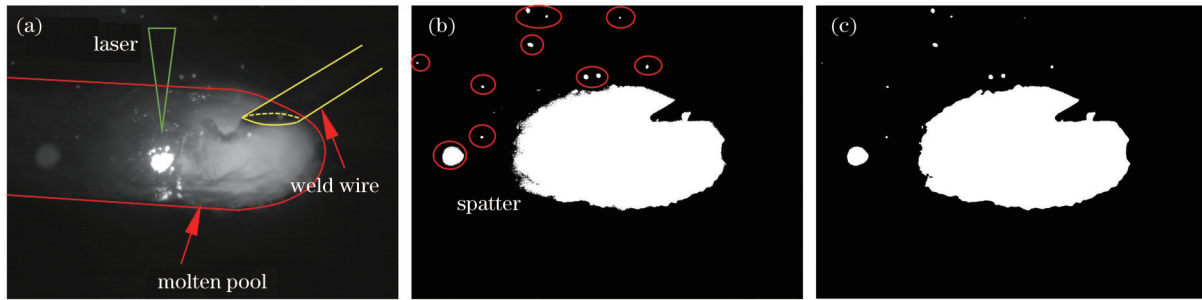


图 1 焊接飞溅的提取过程。(a)原始图像;(b)二值化图像;(c)滤波后的图像

Fig. 1 Extraction process of welding spatter. (a) Original image; (b) binary image; (c) filtered image

3 分析与讨论


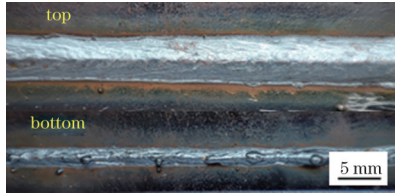
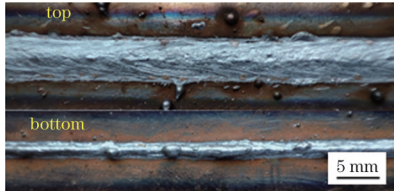

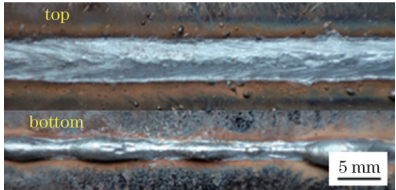
3.1 焊缝的形貌特征

表 3 与图 2 分别为不同焊接工艺参数下激光-电弧复合焊接接头的宏观形貌与横截面形貌。结果显示:在不同的电弧功率下,焊缝呈现出不同的形貌特征。如表 3 所示,在不同的电弧功率下,焊缝表面均存在一定的飞溅。在较低的电弧功率(1#, $P_A=4096\text{ W}$)下,焊缝表面出现明显的塌陷,焊缝背面出现呈周期性分布的驼峰。当电弧功率较低时,电弧的预热作用较弱,不足以维持激光匙孔的连续穿透,随着焊接过程中热量的增加,焊缝底部熔池不断积累,最终导致焊缝底部产生周期性分布的驼峰^[17]。随着送丝速度提升,电弧的预热效果增强,激光能形成连续穿透的焊缝。当电弧功率为 4915 W (2#)时,获得了全熔透焊缝,焊缝表面平直,余高较少,焊缝两侧存在少量飞溅颗粒,焊缝截面由上部的电弧区与下部的激光区组成,呈现典型的鸡尾酒杯状特征。当电弧功率增大到

5735 W (3#)时,焊丝填充量增加,焊缝表面的余高相应增加,焊缝背面的下塌较大且有形成驼峰的趋势,表明此时的焊接稳定性较差。当进一步增大电弧功率到 6860 W (4#)时,获得了平整光滑的焊缝,焊趾轨迹近似为一条直线,母材表面无明显的大飞溅颗粒,且无咬边塌陷等缺陷,说明此参数下电弧与激光的耦合效果良好,焊接过程稳定。随着送丝速度继续提高,电弧功率增大到 7986 W (5#),焊缝表面再次出现塌陷。这是因为此时过高的电弧能量导致电弧压力增大,熔池向下的流动性增强,同时热源能量增加,熔池温度升高,液相区表面张力减小,加剧了熔融液体向熔池底部的流动,最终导致焊缝表面产生凹陷。表 4 所示为不同工艺参数下得到的焊缝宽度和焊缝截面积。由表 4 数据可知不同电弧功率下的焊缝宽度变化较小,而且随着送丝速度增加,在焊缝塌陷之前焊缝的截面积呈现上升的趋势(如图 2 所示),这表明适当增加送丝速度有利于获得较好的焊缝成形质量^[18]。

表 3 1#~5#试验条件下焊缝的宏观形貌

Table 3 Macro appearances of welding seams under 1#-5# experiment conditions

Experiment No.	Image	Experiment No.	Image
1# ($P_A=4096\text{ W}$)		4# ($P_A=6860\text{ W}$)	
2# ($P_A=4915\text{ W}$)		5# ($P_A=7986\text{ W}$)	
3# ($P_A=5735\text{ W}$)			

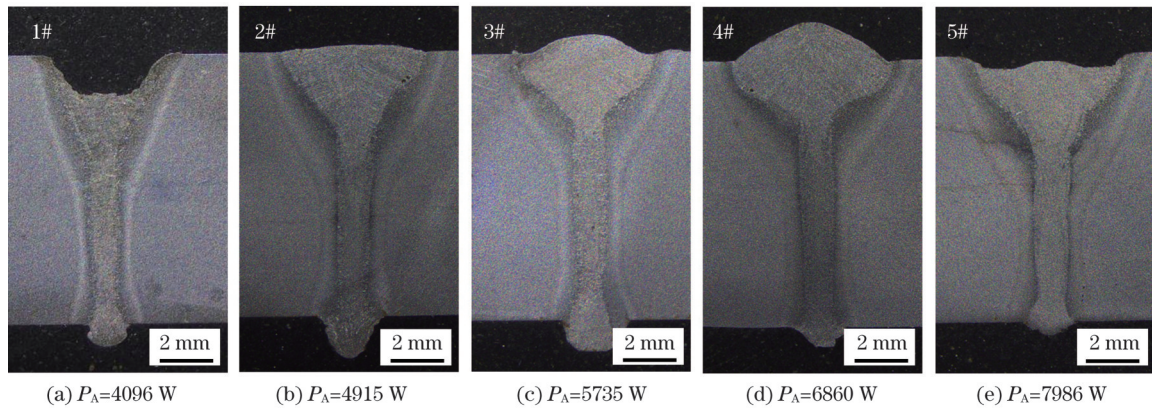


图 2 不同电弧功率下焊缝的横截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional morphologies of welding seam under different arc power values

表 4 1#~5#试验条件下焊缝截面数据

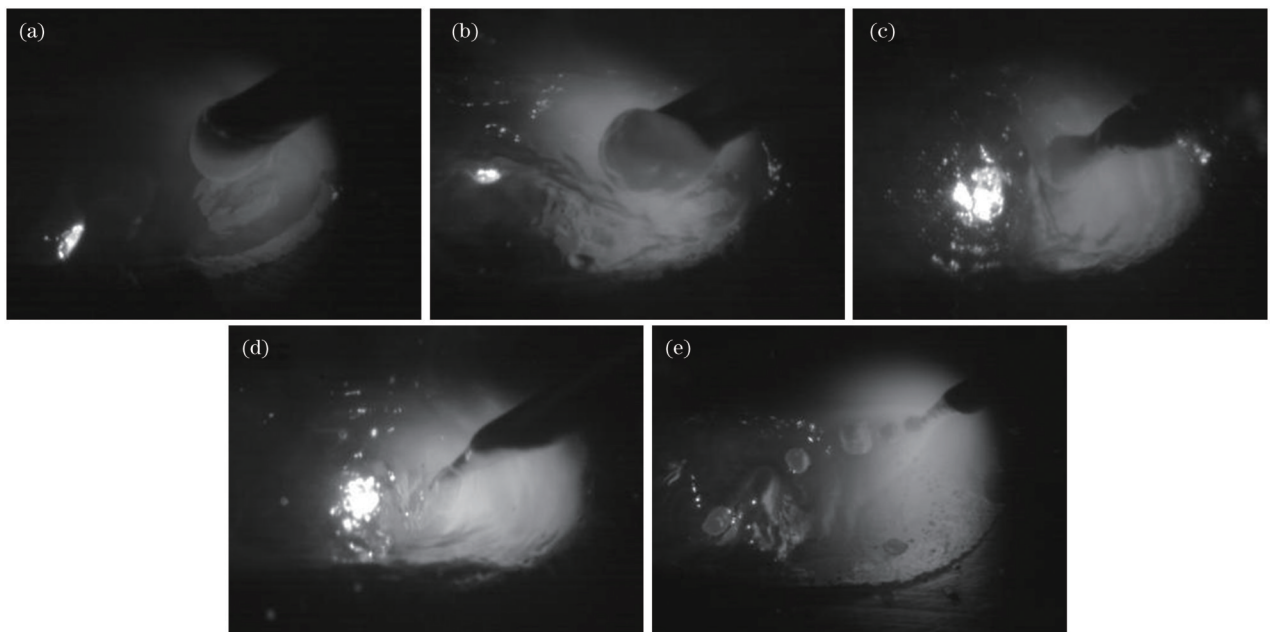
Table 4 Welding cross-section data under 1#-5# experiment conditions

Experiment No.	Weld width /mm	Cross-sectional area /mm ²
1#	5.24	15.72
2#	5.29	22.95
3#	5.16	23.35
4#	5.86	27.15
5#	5.64	21.66

3.2 熔滴过渡分析

焊丝尖端在电阻热和电弧热的共同作用下熔化形成熔滴,随后熔滴在重力、表面张力、电磁收缩力、等离子流力、金属蒸气反作用力、斑点压力等^[19]作用下与焊

丝分离并以一定形式落入熔池中。在此过程中,熔滴过渡行为与熔滴受力情况密切相关,且会对复合焊接的焊缝成形质量具有直接影响。图 3 所示为不同电弧功率下激光电弧复合焊接熔滴过渡形态的静态图片。对每组参数焊接过程中 500 ms 内的 5000 张高速摄像照片进行分析,得到了焊接过程中熔滴过渡模式的统计结果,如图 4(a) 所示。结果显示,当电弧功率为 4096、4915、5735、6860 W 时,熔滴过渡模式均为包含短路过渡的混合过渡模式。在较低的电弧功率($P_A=4096, 4915$ W)下,熔滴过渡模式为大滴过渡和短路过渡,熔滴以接近球体的形状向熔池过渡,熔滴直径大于焊丝直径,如图 3(a) 和图 3(b) 所示;随着电弧功率增大到 5735 W,熔滴过渡模式为射滴过渡和短路过渡,熔滴直径接近焊丝直径,如图 3(c) 所示;当电弧功率

图 3 不同电弧功率下激光-电弧复合焊接的熔滴过渡形态。(a) 1#, $P_A=4096$ W; (b) 2#, $P_A=4915$ W; (c) 3#, $P_A=5735$ W;(d) 4#, $P_A=6860$ W; (e) 5#, $P_A=7986$ WFig. 3 Droplet transfer form of laser-arc hybrid welding with different arc power values. (a) 1#, $P_A=4096$ W; (b) 2#, $P_A=4915$ W;(c) 3#, $P_A=5735$ W; (d) 4#, $P_A=6860$ W; (e) 5#, $P_A=7986$ W

继续增大至 6860 W 时,熔滴过渡模式介于短路过渡与射流过渡之间,呈现为亚射流过渡特征,如图 3(d)所示;当激光功率增加至 7986 W 时,熔滴在焊丝尖端的液体区域以稳定的颗粒状向熔池过渡,此时的熔滴过渡模式为单一的射流过渡,如图 3(e)所示。熔滴过渡频率与熔滴平均直径的统计结果如图 4(b)所示,可见:随着电弧功率增大,熔滴过渡频率显著增大,熔滴平均直径逐渐减小。当熔滴过渡模式为大滴过渡和短路过渡时,电弧电流较小,电磁收缩力不能使焊丝与熔

滴分离,熔滴自身重力与表面张力达到平衡,熔滴过渡一次的周期较长,熔滴过渡频率低于 100 Hz;当熔滴过渡模式为射滴过渡和短路过渡时,熔滴过渡频率上升至 147 Hz,电弧功率的增大提高了焊丝尖端的热量,熔滴的表面张力降低,熔滴逐渐细化,此时的熔滴直径接近焊丝直径;当熔滴过渡模式为射流过渡时,熔滴过渡频率可达 400 Hz 以上,此时电弧笼罩着整个焊丝尖端,在等离子气流作用下,熔滴高速向熔池过渡,熔滴直径小于焊丝直径。

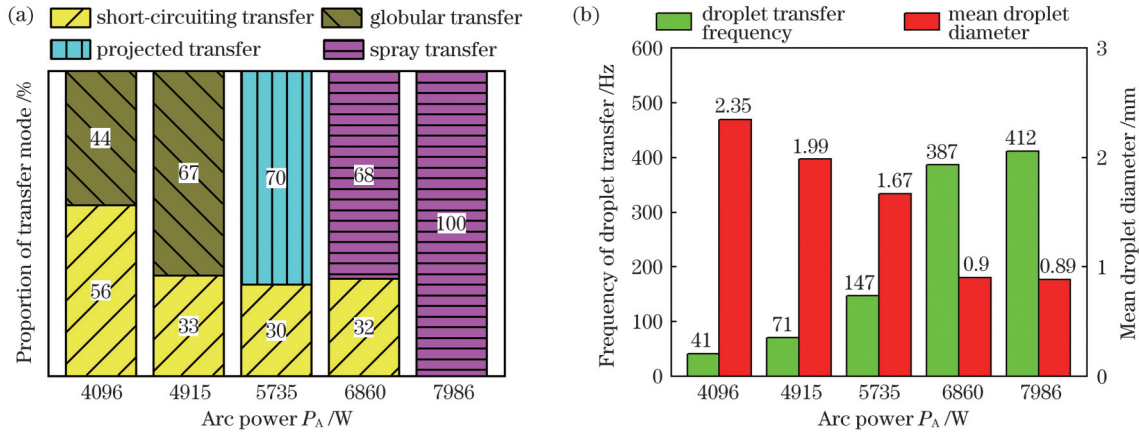


图 4 电弧功率对熔滴过渡特征的影响。(a)对熔滴过渡模式的影响;(b)对熔滴过渡频率与熔滴平均直径的影响

Fig. 4 Effects of arc power on droplet transition features. (a) Effect on droplet mode; (b) effect on droplet transfer frequency and mean droplet diameter

3.3 电弧功率对焊接飞溅的影响

由前文分析可知电弧功率的改变会导致熔滴过渡模式发生改变。为了研究不同电弧功率下飞溅的产生机理,需要对 4 种不同熔滴过渡模式下的熔滴过渡行为作进一步分析。当电弧功率为 4096 W 与 4916 W 时,熔滴过渡模式为大滴过渡和短路过渡。图 5 所示

为 1# 试验条件下焊接过程中一次短路过渡的高速摄像照片。 t_0 时刻焊丝尖端的熔滴开始生长,如图 5(a)所示。由于此时的电弧电流过小,电磁收缩力使焊丝与熔滴之间形成了颈缩,熔滴未能与焊丝分离,此时熔滴所受合力达到动态平衡,熔滴持续生长,如图 5(b)所示;熔滴生长的过程一直持续到 $t_0 + 28.5$ ms 时刻,

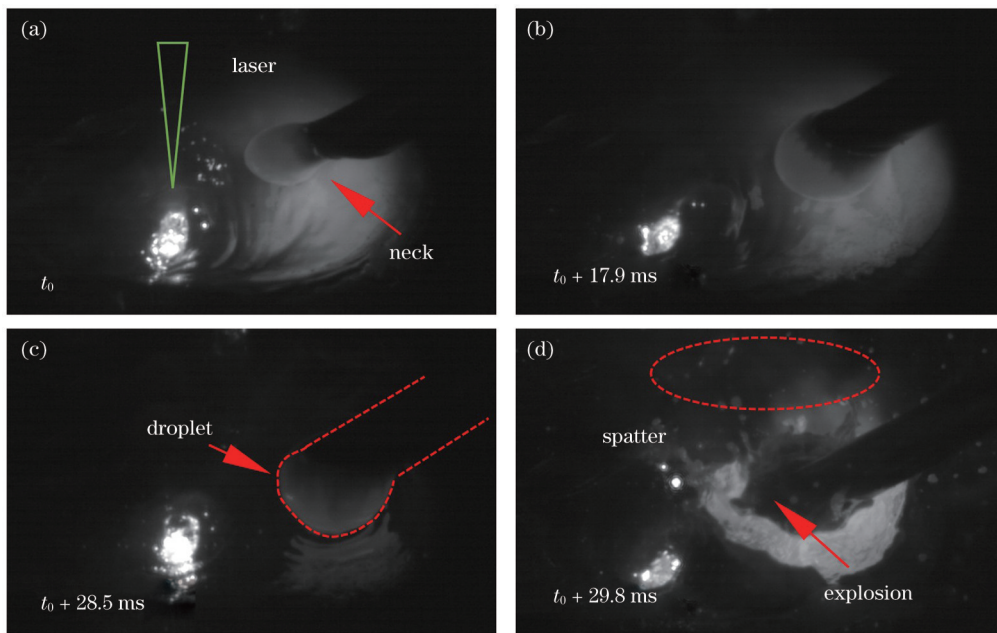


图 5 焊接过程中短路过渡的高速摄像照片(1#试验)

Fig. 5 High-speed photos of short-circuiting transfer in welding process (1# experiment group)

此时悬挂在焊丝末端的熔滴与熔池发生接触,焊丝-熔滴-熔池之间形成短路,电弧熄灭,如图 5(c)所示;直到 $t_0+29.8$ ms 时刻,过高的热量聚集在颈缩处,导致该处金属汽化发生短路爆断,爆炸的冲击力使熔滴分裂,产生大量飞溅,如图 5(d)所示,同时由于此时熔滴与焊丝之间未能形成颈缩,短路爆炸发生在熔滴与熔池连接处,爆炸产生的冲击力使熔池产生巨大振荡,对激光匙孔的稳定性产生显著影响^[20]。

1#试验过程中大滴过渡过程如图 6 所示。由于熔滴受到的电磁收缩力较小,熔滴与焊丝之间无法形成颈缩,激光匙孔处喷发的铁离子为电弧提供了导电通道,电弧形态发生改变,熔滴受到激光匙孔的吸引而被拉长[如图 6(a)所示],此时球状熔滴被吸引至激光匙

孔处,熔滴形态变为扁平状。在 $t_0+4.9$ ms 时刻,扁平状熔滴与激光匙孔周围的熔池发生接触,如图 6(b)所示;在 $t_0+5.6$ ms 时刻,熔滴在电磁收缩力作用下与焊丝分离,如图 6(c)所示;在 $t_0+5.9$ ms 时刻,匙孔内迅速蒸发的金属蒸气与光致等离子体从匙孔内高速喷发形成羽辉气流^[21],阻碍熔滴落入熔池,导致熔滴在匙孔周围形成一道液柱,如图 6(d)所示。由此可见,在激光-电弧复合焊接的大滴过渡模式下,较短的电弧长度使得熔滴过渡距离缩短,熔滴难以通过自身重力实现自由过渡,而高功率激光束造成的匙孔对熔滴的吸引作用促进了大滴过渡时熔滴与焊丝的分,减小了焊接过程中短路过渡的频率,提高了大滴过渡时的稳定性。

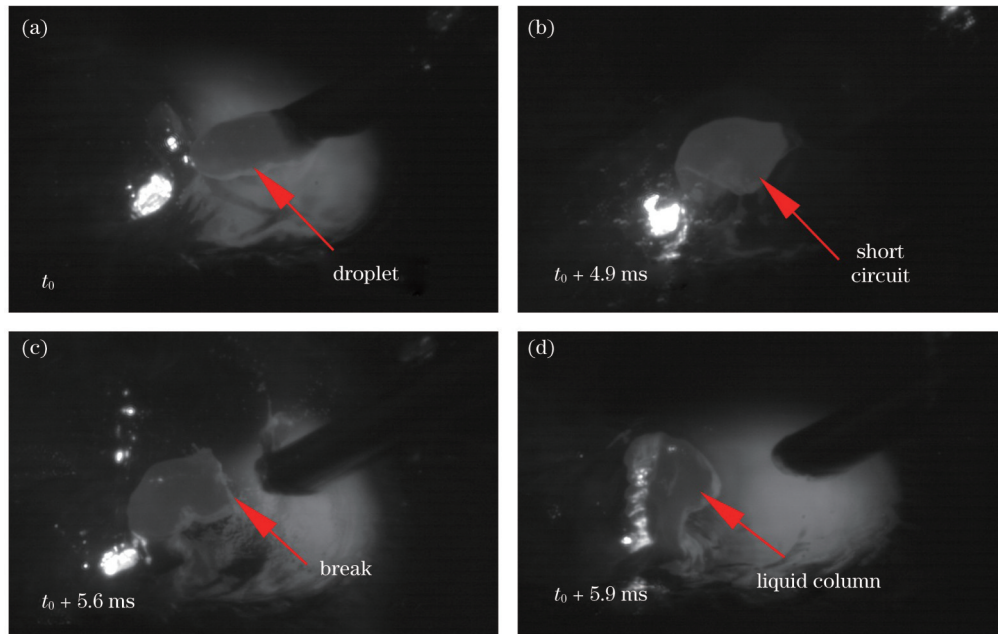


图 6 焊接过程大滴过渡的高速摄像照片(1#试验)

Fig. 6 High-speed images of globular transfer in welding process (1# experiment group)

图 7 所示为 1#试验($P_A=4096$ W)过程中 100 ms 内飞溅的统计结果。由图 7(a)可知飞溅颗粒的直径分布在 0.1~0.9 mm 范围内。这是由于短路爆炸通常发生在大直径熔滴与熔池的连接处,爆炸产生的冲击使得大直径熔滴分裂成大小不一的飞溅颗粒,如图 5(c)~(d)所示。在 $t=0$ ms 时刻,飞溅数量为 0,表明此时没有飞溅产生;随着焊接的进行,在 $t=15\sim 20$ ms 与 $t=55\sim 60$ ms 内飞溅数量急剧增加,这意味着该时间内发生了短路爆炸,随后准备过渡的熔滴将重新经历一个生长周期。因此,相邻爆炸之间的时间间隔较长,即使此参数下的短路过渡占比较大,单位时间内产生的飞溅数量仍较少。

当电弧功率增大至 5735 W 时,焊接过程中的熔滴过渡模式由 70% 的射滴过渡与 30% 的短路过渡组成,如图 4(a)所示。图 8 所示为 3#试验过程中的高速摄像照片。在 t_0 时刻,焊丝尖端的熔滴在电磁收缩力作

用下发生颈缩,熔滴即将与焊丝分离,如图 8(a)所示;在 $t_0+2.2$ ms 时刻,熔滴与焊丝分离后受等离子流力作用,向激光匙孔上方飞行[如图 8(b)所示],此时焊丝尖端在等离子流力和电磁收缩力的共同作用下形成柱状液体区域;在 $t_0+2.8$ ms 时刻,熔池上方飞行的熔滴与激光匙孔处的羽辉气流发生碰撞,与此同时,熔滴与匙孔周围熔池短暂地结合为一道液柱,如图 8(c)所示;在 $t_0+4.2$ ms 时刻,焊丝尖端的液体与熔滴形成的液柱接触发生短路爆炸,如图 8(d)所示;在 $t_0+7.0$ ms 时刻,准备过渡的熔滴因受到短路爆炸冲击力作用而有向上运动的趋势,如图 8(e)所示;在 $t_0+12.4$ ms 时刻,被爆炸甩开的熔滴在底部斑点压力与金属蒸气压力的作用力下向熔池外飞去形成飞溅,同时新的熔滴在焊丝尖端形成,如图 8(f)所示。图 8 显示了 3#试验焊接过程中射滴过渡向短路过渡的转变过程。在射滴过渡模式下,熔滴在电磁力、等离子流力与重力的作用

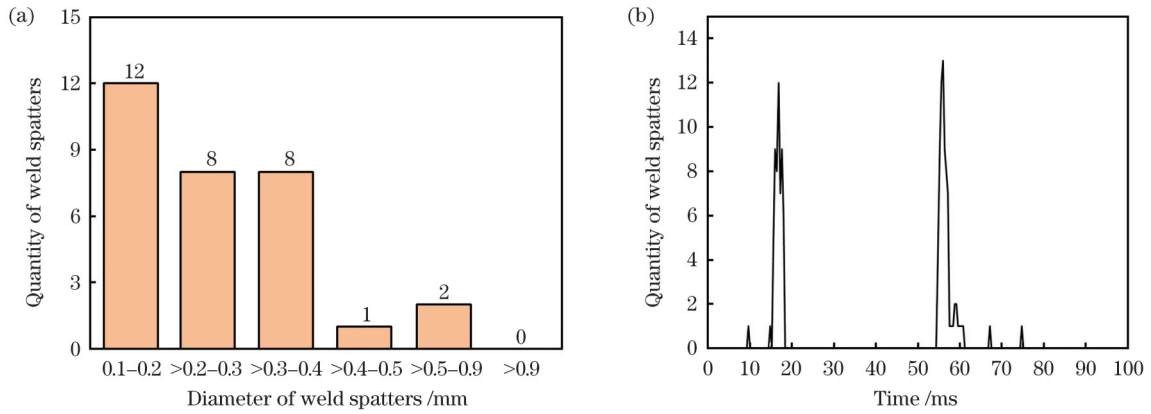


图 7 焊接过程飞溅的统计结果(1#试验)。(a)飞溅直径;(b)飞溅量的时域特征

Fig. 7 Statistics of spatter in welding process (1# experimen). (a) Diameter of spatter ; (b) time-domain feature of spatter quantity

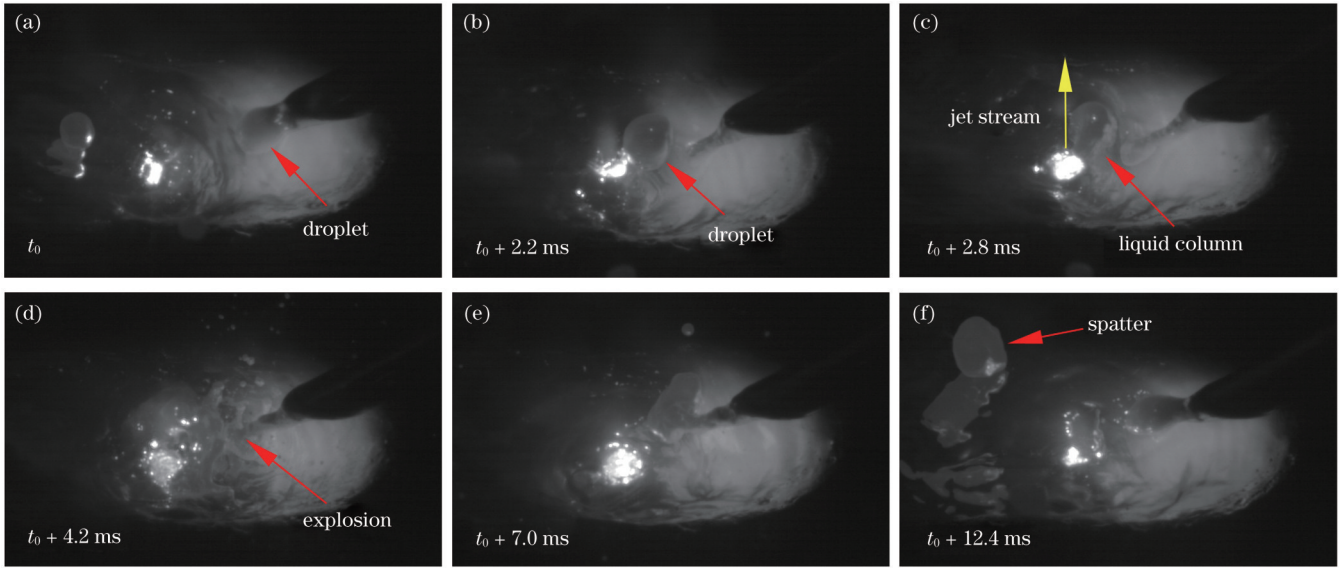


图 8 焊接过程中的高速摄像照片(3#试验)

Fig. 8 High-speed photos during welding process (3# experiment)

下向熔池过渡,熔滴与熔池之间不会发生短路,而在高功率激光-电弧复合焊接过程中匙孔处高速喷发的羽辉气流导致匙孔前壁形成液柱^[8],为射滴过渡向短路过渡转变提供了条件。

图 9 所示为 3# 试验过程中射滴过渡向短路过渡转变的示意图。由于电弧焊炬倾斜,电弧压力将熔池向后推,电弧区熔池形成凹坑,同时激光匙孔处的高温金属蒸气与等离子体向外喷发形成羽辉气流,焊丝尖端形成熔滴,如图 9(a) 所示;由于激光匙孔处羽辉气流的阻挡,向熔池过渡的熔滴无法越过匙孔上方,如图 9(b) 所示;被阻挡的熔滴在自身重力作用下自由下落,此时熔滴在前侧电弧压力(p_A)与后侧激光致反冲压力(p_V)的作用下被挤压,与熔池结合形成一道液柱;该液柱位于激光匙孔前侧,与焊丝的距离较近,从而促使下一个未与焊丝分离的熔滴同液柱接触形成短路过渡,完成一次射滴过渡向短路过渡的转变,如图 9(c) 所示。

3# 试验($P_A=4915\text{ W}$)过程中 100 ms 内飞溅的统

计结果如图 10 所示。由于 3# 试验中的熔滴过渡频率显著高于 1# 试验中的过渡频率[如图 4(b) 所示],因此,即使是 3# 试验中的短路过渡频率低于 1# 试验中的短路过渡频率,单位时间内 3# 试验产生的飞溅数量仍多于 1# 试验产生的飞溅数量,如图 10(a) 所示。同时,由图 10(b) 可知,此参数下的飞溅产生频率显著高于 1# 试验中的飞溅产生频率,说明熔滴过渡频率对飞溅产生频率具有较大影响。

当电弧功率增大到 6860 W 时,复合焊接熔滴过渡模式为射流过渡和短路过渡。图 11 所示为 4# 试验过程中的高速摄像照片。随着电弧能量增加,焊丝尖端的热量使熔滴的表面张力减小,熔滴细化,同时焊丝端部的液态金属在电磁收缩力和等离子流力的作用下呈铅笔尖状,熔滴在焊丝尖端的液态区域形成并以较高的速度冲向熔池,熔滴受激光匙孔吸引而落入匙孔前侧,如图 11(a) 所示;在 $t_0+12.4\text{ ms}$ 时刻,焊丝-熔滴-熔池之间发生短路爆炸,液桥在爆破冲击力下产生大量飞溅颗粒。

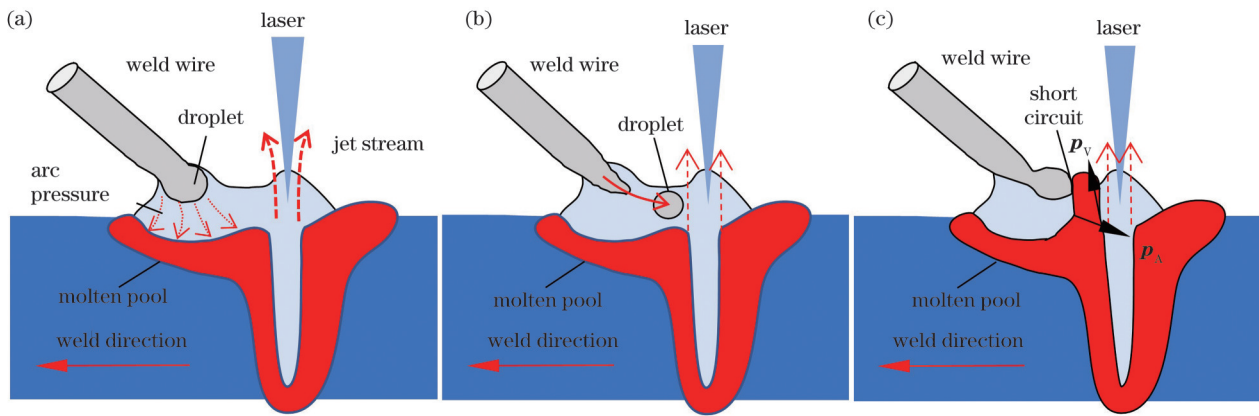


图 9 3#试验参数下的熔滴过渡示意图

Fig. 9 Schematic illustration of droplet transfer under 3# experiment parameter

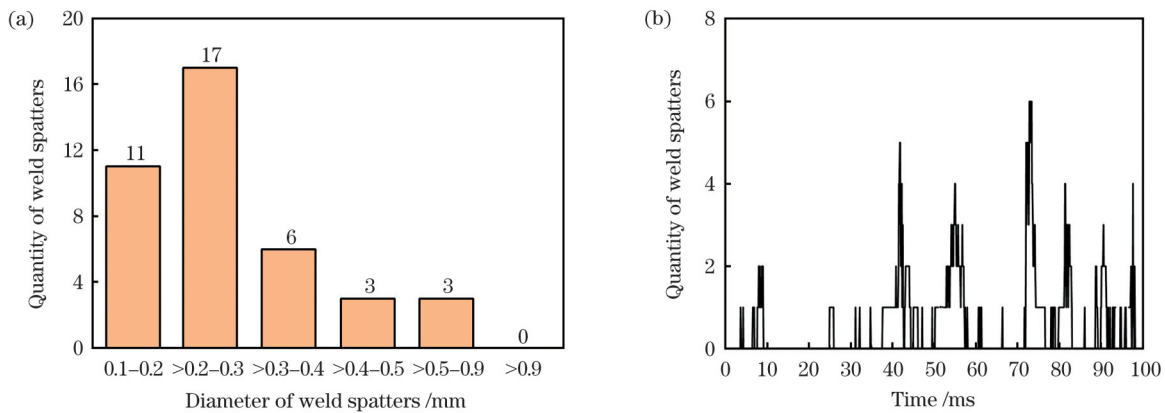


图 10 焊接过程飞溅的统计结果(3#试验)。(a)飞溅直径;(b)飞溅量的时域特征

Fig. 10 Statistics of spatter in welding process (3# experiment group). (a) Diameter of spatter; (b) time-domain feature of spatter quantity

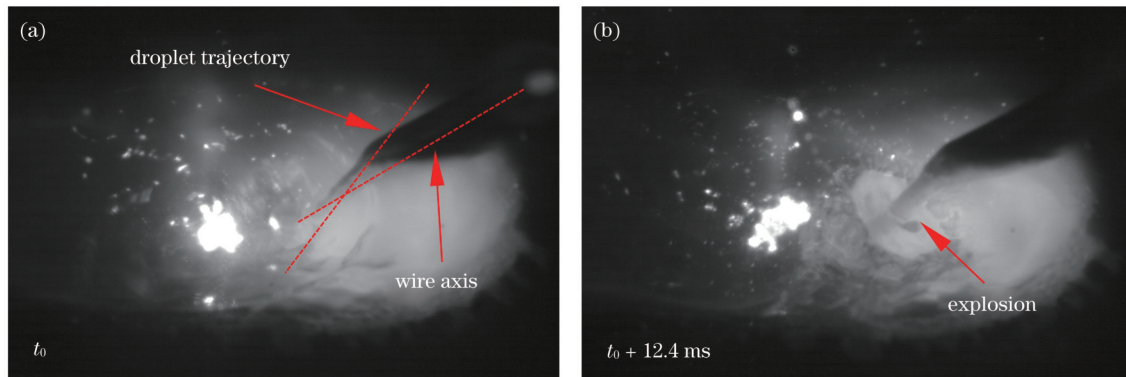


图 11 焊接过程中的高速摄像照片(4#试验)

Fig. 11 High-speed photos during welding process (4# experiment)

4#试验过程($P_A=6860\text{ W}$)中100 ms内飞溅的统计结果如图12所示。由图12(a)可知,此参数下单位时间内飞溅颗粒的直径分布集中在0.1~0.3 mm范围内,同时焊缝周围无明显的大颗粒飞溅(如表3所示)。试验中短路过渡发生的液桥爆断多位于熔滴与焊丝连接处,熔滴的体积较小,产生的飞溅颗粒相对细小,如图11(b)所示。图12(b)给出了试验过程中的飞溅产生频率。随着熔滴过渡频率的进一步提高,在100 ms

内的焊接过程中发生了多次短路爆炸,在时域特征图中出现了多个波峰,单位时间内焊接产生的飞溅数量也显著增加。

当电弧功率增大至7986 W时,熔滴过渡模式变为单一的射流过渡,此时焊接过程的高速摄像照片如图13所示。在 t_0 时刻,细小的球状熔滴A、B、C在等离子流力作用下以较快的速度向熔池过渡,金属蒸气作用力使熔滴向下运动的速度减小,熔滴在落入熔

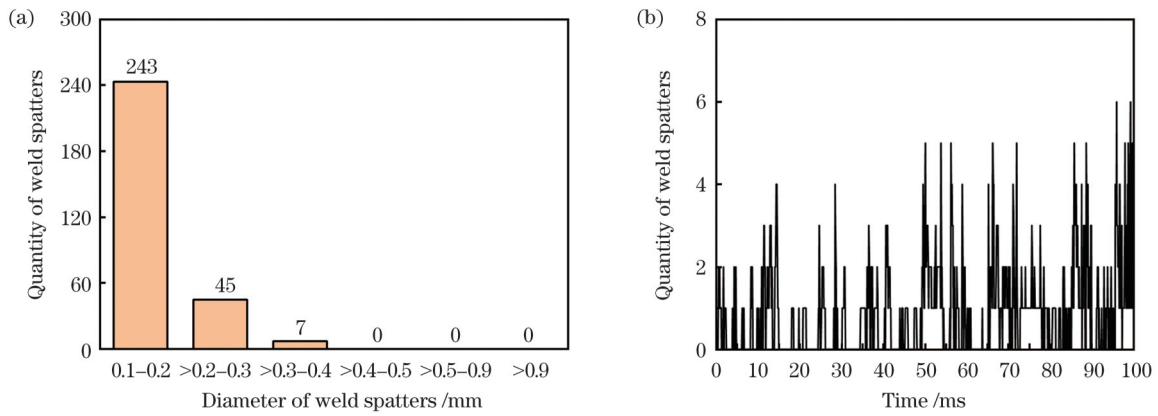


图 12 焊接过程中飞溅的统计结果(4#试验)。(a)飞溅直径;(b)飞溅量的时域特征

Fig. 12 Statistics of spatter during welding process (4# experiment group). (a) Diameter of spatter; (b) time-domain feature of spatter quantity

池前将飞行较长时间,如图 13(a)所示;在 $t_0+1.2$ ms 时刻,熔滴 A(d_A)与激光匙孔处的羽辉气流发生碰撞,飞行轨迹发生改变,如图 13(b)所示;在 $t_0+6.4$ ms 时刻,熔滴 A 与 B(d_B)向熔池侧面飞去,同时熔滴 C(d_C)在内部气体膨胀作用下开始破裂,如图 13(c)所示(图中箭头显示了熔滴的飞行轨迹);在 $t_0+8.2$ ms 时刻,熔滴 A 最终落在焊道侧面形成大颗粒飞

溅,同时熔滴 C 的膨胀破裂产生了细小的飞溅,如图 13(d)所示。图 14 为 5# 试验下激光匙孔处羽辉气流对熔滴过渡影响的示意图。在长电弧射流过渡条件下,熔滴与熔池的距离较远,熔滴有充足的时间飞行至激光匙孔上方,激光产生的羽辉气流会改变熔滴的飞行轨迹,从而导致了直径接近熔滴直径的大颗粒飞溅的产生。

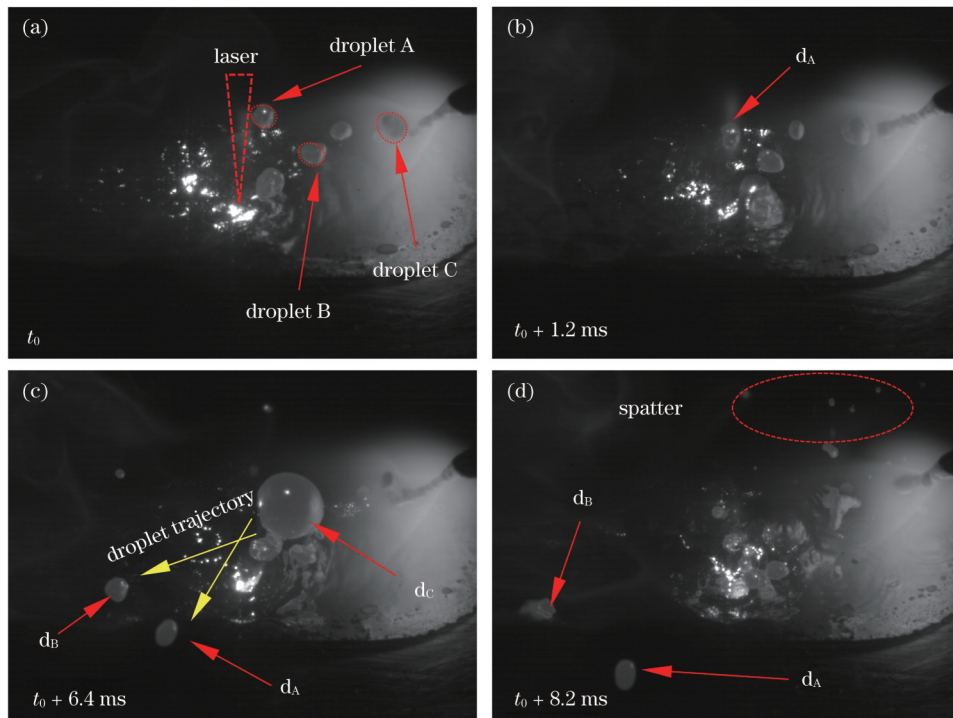


图 13 焊接过程高速摄像照片(5# 试验)

Fig. 13 High-speed photos during welding process(5# experiment)

5# 试验过程($P_A=7986$ W)中 100 ms 内飞溅的统计结果如图 15 所示。由上述分析可知,熔滴掉落在焊缝周围形成了直径接近熔滴直径(0.5~0.9 mm)的大颗粒飞溅,熔滴膨胀破裂后产生了细小的飞溅,图 15(b)飞溅的时域特征显示飞溅多为单个,偶有熔滴膨胀爆破产生了多个飞溅。如图 13 所示,熔滴 B 受其飞行高

度的影响,向熔池侧面过渡后依然落入熔池内,说明在射流过渡模式下,熔滴除了会与羽辉气流发生碰撞外,其飞行高度等因素也会影响焊接飞溅的产生。因此,即使此参数下的熔滴过渡频率最快[如图 4(b)所示],此时的飞溅数量在 4 种不同过渡模式下的飞溅统计结果中也是最少的。

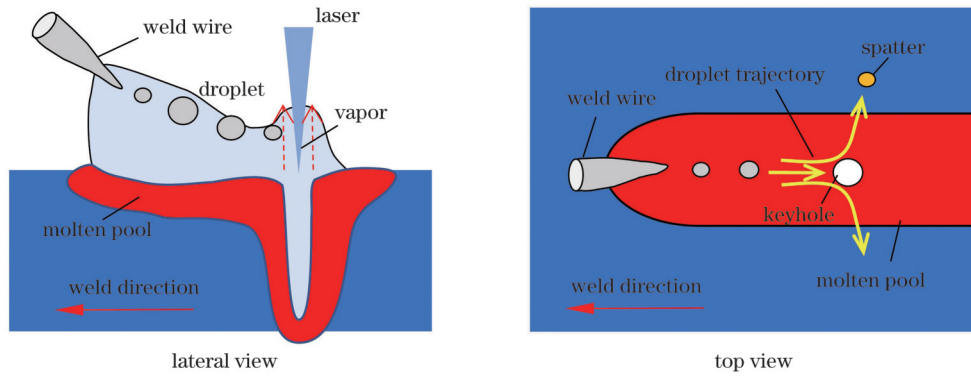


图 14 5#试验条件下的熔滴过渡示意图

Fig. 14 Schematic illustration of droplet transfer under 5# experimental condition

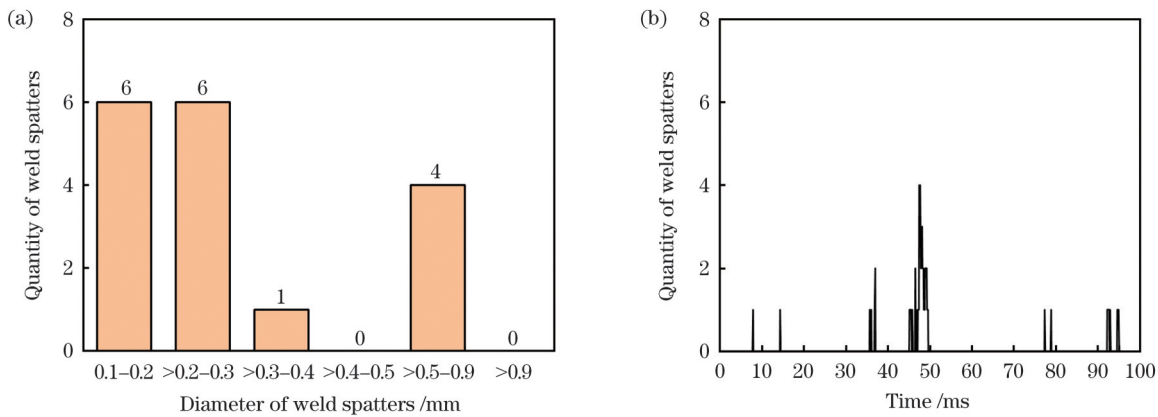


图 15 焊接过程中飞溅的统计结果(5#试验)。(a)飞溅直径;(b)飞溅量的时域特征

Fig. 15 Statistics of spatter during welding process (5# experiment). (a) Diameter of spatter; (b) time-domain feature of spatter quantity

4 结 论

本文主要研究了高功率激光-MAG 复合焊接过程中的熔滴过渡行为,在不同的电弧功率下实现了 10 mm 厚 Q345 钢板材的全熔透焊接,分析了电弧功率对焊缝形貌、熔滴过渡行为和飞溅缺陷的影响,阐明了复合焊接过程中电弧功率对熔滴过渡行为与飞溅的影响机理。结果表明,电弧功率会显著影响焊缝形貌:在较低的电弧功率($P_A=4096$ W)下,焊缝表面塌陷严重;随着电弧功率增大,焊缝表面逐渐变得光滑平整,在 $P_A=6860$ W 时获得了无塌陷咬边的良好焊缝,焊缝截面呈鸡尾酒杯状特征;过高的电弧功率($P_A=7986$ W)会再次导致焊缝表面产生塌陷。在所选试验条件下,焊缝周边均有飞溅颗粒存在。随着电弧功率增大,高功率激光-电弧复合焊接过程中的熔滴过渡模式逐渐由含短路过渡的混合过渡模式向单一射流过渡模式转变,前者主要包括大滴过渡、射滴过渡、射流过渡分别与短路过渡组成的混合过渡模式,后者是在长电弧作用下产生的。熔滴过渡频率随着电弧功率的增加而逐渐增大,熔滴平均直径则随着电弧功率的增加而减小。电弧功率对飞溅的产生具有显著影响:当电弧功率小于 6860 W 时,飞溅由短路过渡引起;随着电弧功率增大,熔滴过渡频率提高,单位时间内发生的短路过渡次

数增加,飞溅数量显著增加;当电弧功率增至 6860 W 时,焊接过程中产生的飞溅数量最多,但飞溅颗粒的直径较小(0.1~0.3 mm);当电弧功率为 7986 W 时,匙孔处的羽辉气流促进了飞溅的产生,此时飞溅数量最少,掉落在焊缝周围的熔滴形成了直径为 0.5~0.9 mm 的大颗粒飞溅。

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] 黄强军. 激光焊接技术在汽车制造中的应用现状及发展[J]. 内燃机与配件, 2021(1): 176-177.
Huang Q J. Application status and development of laser welding technology in automobile manufacturing[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(1): 176-177.
- [3] 王凯, 朱加雷, 焦向东, 等. 激光焊接技术在船舶制造中的发展及应用现状[J]. 电焊机, 2017, 47(2): 58-64.
Wang K, Zhu J L, Jiao X D, et al. Development and application status of laser welding technology in shipbuilding[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(2): 58-64.
- [4] 高明. CO₂激光-电弧复合焊接工艺、机理及质量控制规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Gao M. Study on technology, mechanism and quality controlling of CO₂ laser-arc hybrid welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [5] Li F K, Tao W, Peng G C, et al. Behavior and stability of droplet transfer under laser-MIG hybrid welding with synchronized pulse modulations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 70-79.

- [6] Zhu Y A, Cai Y, Dong H, et al. Tailoring droplet transfer and molten pool flow during hybrid laser arc welding of nickel base alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 147: 107620.
- [7] Zhang W, Hua X M, Liao W, et al. The effect of the welding direction on the plasma and metal transfer behavior of CO₂ laser+GMAW-P hybrid welding processes[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58: 102-108.
- [8] Li Y, Geng S N, Zhu Z W, et al. Effects of heat source configuration on the welding process and joint formation in ultra-high power laser-MAG hybrid welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 77: 40-53.
- [9] Gao X D, Wang Y, Chen Z Q, et al. Analysis of welding process stability and weld quality by droplet transfer and explosion in MAG-laser hybrid welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 522-529.
- [10] 徐春鹰, 刘双宇, 张宏, 等. 激光-电弧复合焊过程的熔滴过渡特征与受力分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 154-161.
Xu C Y, Liu S Y, Zhang H, et al. Study on the characteristics and mechanics of droplet transfer in laser arc hybrid welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6): 154-161.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 叶广文, 刘倩雯, 范西岸, 等. 激光-MIG 复合焊接熔滴过渡对焊缝表面成形的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802012.
Ye G W, Liu Q W, Fan X A, et al. Effect of droplet transition on weld surface formation of laser-MIG hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802012.
- [14] 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.
- [15] 雷振, 徐良, 徐富家, 等. 激光-电弧复合焊接技术国内研究现状及典型应用[J]. 焊接, 2018(12): 1-6, 65.
Lei Z, Xu L, Xu F J, et al. Typical applications and research status of laser-arc hybrid welding technology[J]. Welding & Joining, 2018(12): 1-6, 65.
- [16] 李科, 齐志龙, 吴志生, 等. MIG 焊熔滴过渡与电弧形态的观察与分析[J]. 焊接, 2016(1): 19-22, 69.
Li K, Qi Z L, Wu Z S, et al. Observation and analysis of metal transfer and arc shape in MIG welding[J]. Welding & Joining, 2016(1): 19-22, 69.
- [17] Zhang M J, Tang K, Zhang J, et al. Effects of processing parameters on underfill defects in deep penetration laser welding of thick plates[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1): 491-501.
- [18] 冯雷, 陈树君, 殷树言. 高速焊接时焊缝咬边的形成机理[J]. 焊接学报, 1999, 20(1): 16-21.
Feng L, Chen S J, Yin S Y. Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(1): 16-21.
- [19] Planckaert J P, Djermoune E H, Brie D, et al. Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(4): 1004-1020.
- [20] Zhang S W, Wang Y D, Zhu M H, et al. Effects of heat source arrangements on laser-MAG hybrid welding characteristics and defect formation mechanism of 10CrNi3MoV steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 563-573.
- [21] 韩雪, 赵宇, 邹江林, 等. 基于可视化观察的光纤激光深熔焊接羽辉形成原因分析[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602004.
Han X, Zhao Y, Zou J L, et al. Analysis of plume formation reasons in laser deep penetration welding based on visual observation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602004.

Influence of Arc Power on Droplet Transfer and Spatter in High Power Laser-Arc Hybrid Welding

Zheng Yafeng^{1,2,3}, Liu Shuangren^{1,2,3}, Zhang Qunli^{1,2,3}, Wang Liang^{1,2,3}, Zhang Huaxia⁴,
Wu Rangda⁴, Yao Jianhua^{1,2,3*}

¹Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;

²Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment Co-Sponsored by Ministry and Province, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;

³College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;

⁴Penta Laser (Zhejiang) Co., Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China

Abstract

Objective With the development of high-power fiber lasers, laser energy has increased from 100 W a few years ago to 10000 W or even 100000 W. Bottlenecks such as high cost, low efficiency, and limited penetration that previously restricted the development of laser-arc hybrid welding are expected to be overcome. Compared with traditional welding, laser-arc hybrid welding has the advantages of high efficiency, good weld quality, high degree of digitization, and environmental friendliness. However, the welding mechanism associated with thick plates is relatively complex, and welds are prone to defects such as splashes, pits, and pores, which degrade the welding quality significantly. Therefore, research on the suppression of defects during the welding process is particularly important. In this study, laser-arc hybrid welding experiments under different arc powers were conducted to clarify the mechanism(s) causing welding spatter, and the effect of arc power on the droplet transfer behavior and welding spatter was studied using high-speed camera technology.

Methods Laser-arc hybrid welding was performed on a 10 mm Q345 steel plate using a welding system consisting of a 12 kW fiber laser and SKS welding systems equipment. A high-speed camera was used to observe the welding process. The laser wavelength was

(1080 ± 10) nm with a nominal focusing spot of 0.2 mm. The angle between the laser beam and the electrode axis was 45° , and the arc torch was applied in a tilted leading position. The laser power and defocus distance were 7.5 kW and 0 mm, respectively. The shielding gas was 90% Ar+10% CO₂, which was injected at a flow rate of 20 L/min. The droplet transfer mode and number of droplet transfers within 500 ms under each parameter were counted to calculate the corresponding droplet transition frequency within 1 s. The images were binarized and filtered to obtain statistics regarding the diameter and number of splashes within 100 ms for each experimental condition. The metallographic samples were prepared by cutting, grinding, polishing, and etching the Q345 plate with 4% nitric acid alcohol. Finally, a visual microscope was used to observe the cross-sectional morphology of each weld.

Results and Discussions Arc power significantly affects the weld morphology and droplet transfer behavior in laser-arc hybrid welding (Table 3). When the arc power was 4096 W and 7986 W, a deep depression was apparent on the weld surface (Fig. 2), whereas the weld surfaces were sound and smooth without undercut or underfill defects when the arc power was 6860 W. The form of the droplet transfer mode changes as the arc power increased (Fig. 3). With an increase in arc power, the droplet transfer mode gradually changed from the hybrid transfer mode with short-circuiting transfer to the single spray transfer mode. The former includes a hybrid transfer mode consisting of globular transfer, projected transfer, spray transfer, and short-circuiting transfer (Fig. 4). When the arc power is low, the droplet is separated from the welding wire by gravity, and the transfer frequency of the droplet is low. With an increase in arc power, the heat at the tip of the welding wire increases, the surface tension of the droplet decreases, and the droplet is gradually refined. Moreover, the electromagnetic and plasma flow forces promote droplet transfer, and the droplet transfer frequency increases significantly. Furthermore, the short-circuiting transfer in the overall hybrid transfer process is the main cause of spatter, and the amount of spatter during the welding process increases with an increase in the droplet transfer frequency. At low arc power, the attraction of the droplet by the laser can promote globular transfer (Fig. 6). In the projected transfer mode, the vapor plume at the keyhole promotes the occurrence of a short-circuit transition (Fig. 9). In the spray transfer mode, the vapor plume at the keyhole changes the flight trajectory of the droplet, resulting in the generation of large particle splashes with diameters close to the droplet diameter (Fig. 14).

Conclusions In this study, the effect of arc power on weld morphology, droplet transfer behavior, and welding spatter in high-power laser-metal active gas (MAG) hybrid welding was investigated. The results revealed that oversized or undersized arc power could lead to a deep depression on the weld surface, whereas the weld surfaces were sound and smooth without undercut and underfill defects when the arc power was 6860 W. When the arc power was lower than 6860 W, the droplet transfer mode was a hybrid transfer mode, and the corresponding short-circuiting transfer caused the generation of spatter. With an increase in arc power, the droplet transfer frequency increased, leading to a larger number of spatters. In the single spray transfer mode, the vapor plume that erupted at the keyhole may promote the generation of spatter.

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