

高功率激光对不同模式熔化极气体保护焊熔滴过渡与焊缝成形的影响

郑亚风^{1,2,3}, 王贺超^{1,2,3}, 张毫杰^{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特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 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 通过对 10 mm 厚 Q345 钢进行高功率激光-电弧复合焊接实验,对比研究了 7.5 kW 激光对不同模式电弧焊接熔滴过渡与焊缝成形的影响。结果表明:高功率激光的加入对标准熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)、冷金属过渡弧焊(CMT)和脉冲电弧焊接过程中的熔滴过渡有显著影响。在标准 MAG 焊接过程中,激光会吸引和压缩电弧,导致电弧长度显著缩短,同时匙孔喷出的金属蒸气与等离子体会降低熔滴过渡频率;在 CMT 焊接过程中,激光会延长单次短路过渡周期,同时引起的熔池振荡会降低短路过渡的稳定性;在脉冲电弧焊接时,激光的加入提高了熔滴过渡频率,同时匙孔处的气流对熔滴过渡起阻碍作用,使熔滴向熔池侧面过渡,造成飞溅的产生。与单一电弧焊接相比,激光-标准 MAG 与激光-脉冲电弧复合焊接中的焊缝熔宽增加,而激光-CMT 焊接中的焊缝熔宽的变化不明显;受熔滴直径和过渡频率的影响,激光-标准 MAG 与激光-CMT 焊接中的焊缝余高减小,而激光-脉冲电弧焊接中的焊缝余高略有增加。三种电弧模式下激光与电弧相互作用的熔化能增量值(ψ)不同,其中,激光-脉冲电弧复合焊接的 ψ 值最高(36%),其次为激光-标准 MAG 复合焊接(19%),激光-CMT 复合焊接的 ψ 值最小(-12%)。

关键词 激光技术; 高功率激光-电弧复合焊接; 电弧模式; 熔滴过渡; 焊缝成形

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230766

1 引言

1980 年,Steen^[1]提出了激光-电弧复合焊接技术,它是一种将激光和电弧两种热源相结合,以实现高效、高质量焊接的方法。相比于单一热源的激光焊和电弧焊,激光-电弧复合焊接技术不仅继承了单独激光焊和电弧焊的优点,而且弥补了各自的缺点,是一种极具应用前景的先进焊接工艺方法。随着激光-电弧复合焊接技术的不断发展,目前已被广泛应用于汽车制造、船舶制造、桥梁建设等领域^[2-5]。与单一热源焊接相比,由于激光-电弧复合焊接过程涉及激光和电弧的相互作用、不同热源的耦合以及材料固、液、气三种状态的传热,其焊接过程及相关作用机理更加复杂。随着激光器研发水平的不断提高,目前其功率已突破万瓦级甚至更高。因此,为了使激光器的发展更好地满足实际工业生产需求,近年来高功率激光-电弧复合焊接的相关基础理论研究一直是学术界关注的热点^[6-10]。

熔滴过渡行为能直接反映激光-电弧复合焊接过程的稳定性,其与最终的焊缝成形质量直接关联,而焊接过程中激光束与电弧的相互作用是影响熔滴过渡行为的关键因素^[11]。Liu 等^[12]研究发现,与单一电弧焊接相比,激光(2~6 kW)的加入增加了电弧的稳定性,同时激光的作用导致电弧被吸引并被压缩至激光焦点处,进而增加了激光的穿透能力。Cai 等^[13]研究了激光对 3 kW 光纤激光-熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG)复合焊接过程中熔滴过渡行为的影响,发现激光的加入改变了电弧形态,阻碍了熔滴过渡,其原因是激光作用下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。刘双宇等^[14]采用 5 kW CO₂激光-熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)复合焊接实验平台,研究了电弧能量、激光能量、光丝间距等对熔滴过渡的影响,发现激光能量主要影响熔滴的过渡频率,而电弧能量主要影响熔滴过渡的模式。当电弧能量小于 4 kW 时,熔滴过渡模式为短路过渡和颗粒过渡或二者的混合过渡;当

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-05-24; 录用日期: 2023-07-04; 网络首发日期: 2023-07-15

基金项目: 浙江省“尖兵”研发攻关计划(2023C01054)、浙江省“领雁”研发攻关计划(2022C03021)、国家自然科学基金重点项目(52035014)

通信作者: *laser@zjut.edu.cn

电弧能量大于 4.68 kW 时,熔滴的过渡模式为射滴过渡。Liu 等^[15]研究了激光-电弧复合焊接过程中激光功率对熔滴过渡的影响机理,研究表明,熔滴过渡频率的变化是电磁力和金属蒸气反作用力的相互作用决定的。随着激光功率的增大(0~5 kW),电弧电流和电磁力也会增大,从而对熔滴的过渡起促进作用;当激光功率超过临界值(3 kW)时,金属蒸气的反作用力迅速增大,就会对熔滴过渡产生较大的阻力。何双等^[16]研究了激光功率(1~4 kW)对激光-MAG 电弧复合焊接过程中熔滴过渡行为的影响,发现在短路过渡模式下,当激光功率超过 2 kW 时,熔滴过渡受到阻碍,熔滴与熔池的接触点偏向激光侧,而在射滴过渡和射流过渡模式下,当激光功率达到 3 kW 时,熔滴过渡及电弧电压出现不稳定现象。Han 等^[17]采用 2.4 kW 光纤激光-电弧复合焊接系统,对比研究了电弧模式[MIG 和冷金属过渡弧焊(CMT)]对 AA6082-T6 铝合金激光-电弧复合焊接过程的影响。研究表明:两种电弧模式下的熔滴过渡模式分别为喷射过渡和短路过渡,当电弧为 CMT 模式(短路过渡)时熔池更加稳定,飞溅明显减少甚至消失,接头热影响区小,且接头各区域的显微硬度、抗拉强度均高于脉冲 MIG 模式。Frostevarg^[18]对比研究了激光(6 kW 和 8 kW)与较低电弧功率下的不同模式(标准 MAG、脉冲和 CMT)电弧复合时的焊接效果,结果表明 CMT 模式下的焊接效果最好,焊接过程产生的飞溅最少,且具有较好的焊缝组织和性能。梁晓梅等^[19]研究了万瓦级激光-MAG 复合焊接焊缝成形特性,对比分析了三种不同复合焊接方法中激光功率(5~30 kW)对焊缝成形和等离子体形态的影响。结果表明:随激光功率的增加,等离子体面积和波动都会增加,同时焊缝熔深、熔宽也随之增

加,当激光功率增加到 20 kW 时,相关特征变化幅值的增量有所减小。

综上所述,国内外研究者在激光与电弧相互作用机理方面开展了大量研究,然而所涉及的激光功率多在 5 kW 以下,高功率(大于 5 kW)激光对激光-电弧复合焊接熔滴过渡的影响机理的研究还比较少见。上述研究表明,激光的加入对激光-电弧复合焊接熔滴过渡行为有显著影响,其中激光功率的改变会破坏熔滴的受力平衡,进而影响焊接过程中的熔滴过渡行为,然而由于相关研究中所选的激光功率参数大都小于 5 kW,高激光功率的引入是促进还是抑制熔滴过渡还存在争议,并且相关研究主要聚焦于激光的引入对某一种电弧焊接过程的影响^[14-16]。因此,本文将高功率(7.5 kW)激光分别加入到不同模式(标准 MAG、CMT 和脉冲)电弧焊接过程中,利用高速相机、光学显微镜等设备对比研究了其对不同模式电弧焊接过程中熔滴过渡和焊缝成形的影响。

2 实验材料与方法

本文搭建了高功率激光-电弧复合焊接实验平台,其主要由连续光纤激光器、电弧焊接系统、机械臂和高速摄像系统组成。实验所使用的激光器是 12 kW 连续光纤激光器,输出激光波长为 (1080 ± 10) nm,聚焦光斑直径为 0.2 mm;实验过程中通过将焊炬与激光头固定在机械臂上实现热源与工件的相对移动。在高速相机镜头处添加红外滤光片,可以拍摄更清晰的熔滴过渡图像。试样基板选用 10 mm 厚的热轧态 Q345 钢,焊接试样尺寸为 150 mm×75 mm×10 mm,焊丝为直径为 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。

表 1 母材及焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of base metal and weld wire

Material	Mass fraction / %						
	C	Si	Mn	P	S	V	Fe
Q345	≤0.200	≤0.500	≤1.700	≤0.035	≤0.035	≤0.150	Bal.
ER70S-6	0.060-0.100	0.800-1.600	1.400-1.600	≤0.020	≤0.015	≤0.020	Bal.

焊接实验前用角磨机对待焊表面进行打磨,并用乙醇清洗表面污垢。实验中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^[20-21]。为了研究高功率激光对不同模式电弧焊接过程中的熔滴过渡的影响,实验中将激光与三种不同电弧模式(标准 MAG、CMT 与脉冲)进行了耦合。焊接保护气为体积分数为 90% 的 Ar 和体积分数为 10% 的 CO₂ 的混合气体,流量为 20 L/min,离焦距为 0 mm,焊炬与垂直平面间的夹角为 45°。实验方案的选择是以能确保 10 mm 厚的 Q345 板材完全熔透为标准,用控制变量法探究不同参数对焊接过程的影响,

焊接系统采用内置统一调节方式。在控制变量实验中,采用的激光功率为 7.5 kW,焊接速度为 1.5 m/min,送丝速度为 10 m/min,热源间距为 2.5 mm,具体焊接实验参数如表 2 所示。

焊接过程中使用高速相机对熔滴过渡行为进行跟踪监测,拍摄帧率为 10000 frame/s,为了得到清晰的熔滴过渡图像,实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 内的熔滴过渡次数,以此计算对应 1 s 内的熔滴过渡频率。焊接后利用光学显微镜对焊缝正面和横截面形貌进行观

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Parameters of welding process

Experimental parameter	Laser welding	Arc welding			Laser-arc hybrid welding		
		CMT	Standard MAG	Pulsed arc	CMT	Standard MAG	Pulsed arc
Welding speed v / (m/min)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Wire feeding v_w / (m/min)		10	10	10	10	10	10
Laser power P_L / kW	7.5	0	0	0	7.5	7.5	7.5
Arc current I / A		194	268	294	194	276	298
Arc voltage U / V		17.8	27	32.2	18	26.8	33.7
Arc power P_A / W		3401	7270	9479	3481	7133	9982

察,其中,横截面样品在观察前,先利用金相制备的标准工艺制样,再采用体积分数为4%的硝酸乙醇溶液腐蚀5 s。同时,采用激光共聚焦三维轮廓显微镜对不同条件下的焊缝余高和焊缝宽度等进行统计测量。图1为实验装置示意图,其中 D_{LA} 为激光束与电极尖端的距离。

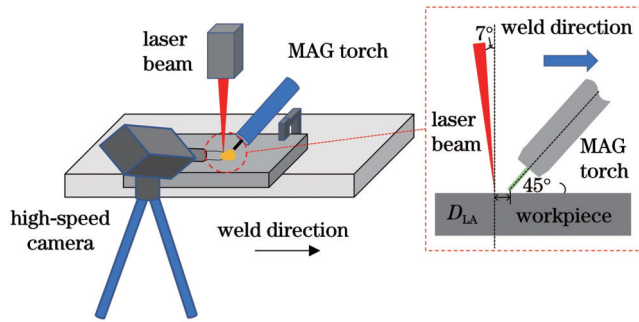


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

3 分析与讨论

3.1 不同模式电弧焊接过程中的熔滴过渡行为分析

图2所示为不同电弧模式下单电弧焊接的熔滴过渡过程,其中, F_{em} 为电磁收缩力。标准MAG电弧焊接的熔滴过渡过程如图2(a)所示,可以看出:在 t_0 时刻,焊接尖端金属受热熔化,在高速等离子体气流的摩擦作用下焊丝尖端形成锥体,同时在径向电磁收缩力作用下,熔滴与焊丝之间发生颈缩,形成熔滴A。在 t_0+10 ms时刻,促进熔滴过渡的力主要为等离子流力,实线为此时高速气流笼罩的区域边界,此时熔滴A在高速等离子体气流的作用下,沿焊丝轴向方向脱离焊丝。在 t_0+20 ms时刻,熔滴A已经与焊丝分离并向熔池过渡,从熔滴脱离焊丝后的运动轨迹可以发现,熔滴在过渡时会偏离焊丝轴线,与轴线成一定角度(α),向熔池过渡(如箭头所示)。根据熔滴过渡的受力模型^[22]可知,熔滴在下落时会受到向上的斑点压力的作用。同时根据徐春鹰等^[23]的研究可知,倾斜的焊丝使等离子体气流的形态发生改变,导致熔滴上下表面产生压力差。二者的共同

作用导致熔滴竖直方向上的速度减小,熔滴以与基材近似平行的方向落入熔池,降低了熔滴对熔池的冲击力,因此整个焊接过程稳定性较好,没有飞溅的产生,此时熔滴过渡模式为典型的射流过渡模式。

图2(b)显示了CMT焊接时一次熔滴过渡过程。在 t_0 时刻,上一次熔滴过渡过程结束,在电弧重新开始起弧的同时焊丝回抽,焊丝随着焊接电流的增大逐渐熔化形成熔滴。在 $t_0+9.5$ ms时刻,焊丝达到最高位置,电弧面积最大,送丝机构开始进给送丝。在 $t_0+28.4$ ms时刻,焊丝接近熔池,焊丝尖端的熔滴与熔池接触形成短路,电弧开始熄灭。在 $t_0+30.8$ ms时刻,电弧完全熄灭,焊丝-熔滴-熔池形成短路液桥,焊丝准备回抽。在 $t_0+37.2$ ms时刻,短路过渡完成,焊丝继续回抽,电弧开始起弧,熔池在短路爆破的冲击力下产生轻微振荡。在 $t_0+40.1$ ms时刻,新的熔滴在焊丝尖端形成,电弧面积逐渐增大,准备下一次过渡。CMT焊接熔滴过渡过程受焊丝的往复机械运动控制,过程较为稳定,当熔池与焊丝接触时,其电信号反馈给电源,使电弧电流迅速下降,同时送丝机构控制焊丝进行回抽,重新起弧进行焊接,表面张力使液桥断开,避免过高热量聚焦在液桥处,这种控制方式能显著减小焊接过程中的飞溅数量^[24]。图2(c)所示为脉冲电弧焊接熔滴过渡过程,设定的峰值电流时间为3 ms,基值电流时间为1 ms,峰值电流为380 A,基值电流为30 A。 t_0 时刻处于脉冲峰值时间段,电弧弧光面积最大,此时促进熔滴过渡的力为轴向电磁收缩力,熔滴B已经与焊丝分离向熔池过渡。在 $t_0+2.5$ ms时刻,电弧面积显著减小,此时处于电流基值时间段。在 $t_0+4.6$ ms时刻,电弧电流增大,电弧面积重新增大,通过观察熔滴B的过渡轨迹可以发现熔滴沿焊接相反方向向熔池过渡。与标准MAG焊接相比,脉冲模式下不会产生锥状的等离子体气流,促进熔滴过渡的主要作用力为电流峰值时刻的电磁收缩力,在该力的作用下形成了一个脉冲一个熔滴过渡的模式,并且由于电弧长度的增加,熔滴距离阳极较远,受斑点压力较小,故熔滴过渡轨迹为沿焊丝轴线方向的直线,此时的熔滴过渡模式为射滴过渡模式^[25]。

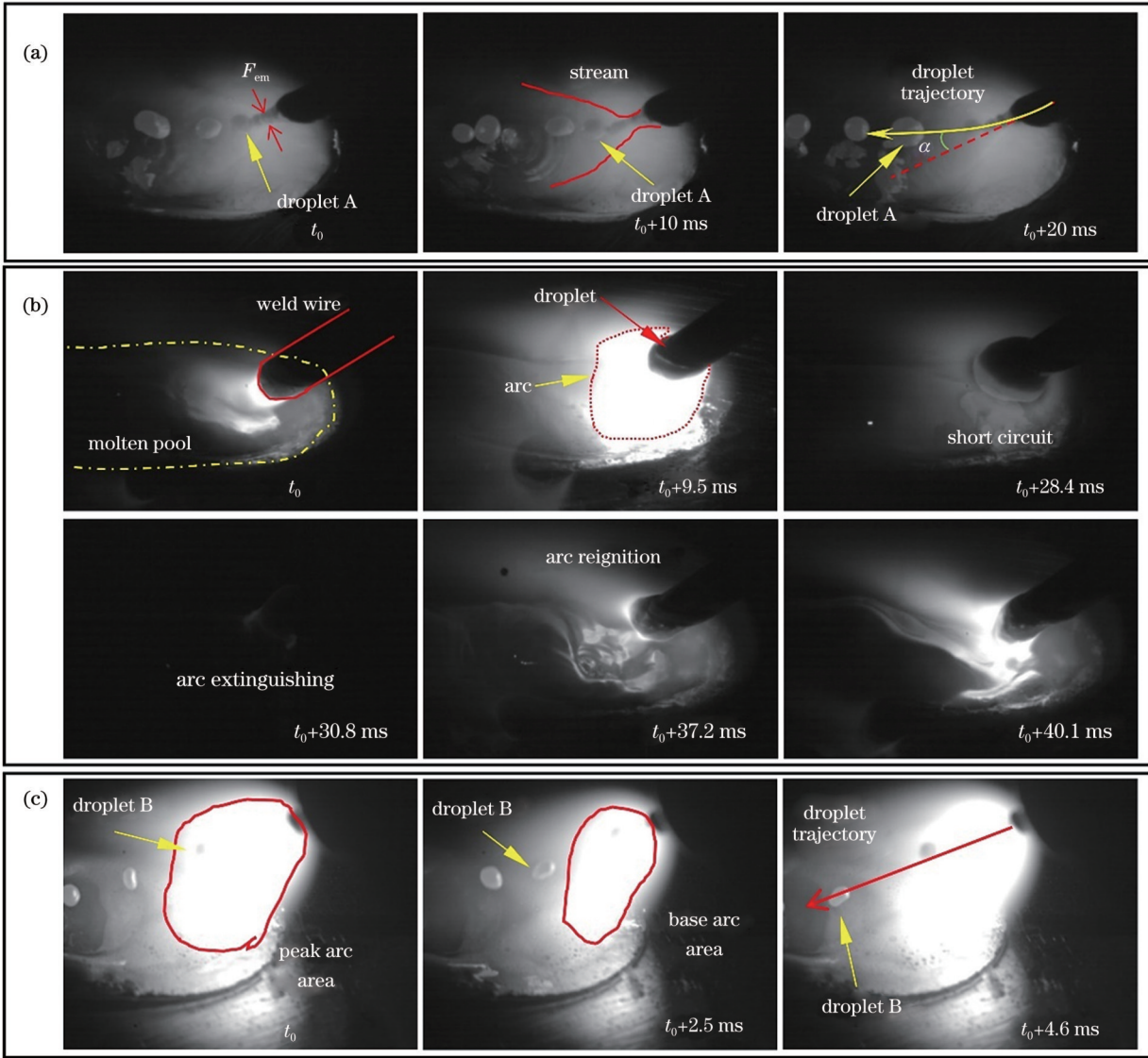


图 2 不同电弧模式下熔滴过渡形态。(a)标准 MAG;(b) CMT;(c)脉冲电弧

Fig. 2 Droplet transfer morphologies under different arc modes. (a) Standard MAG; (b) CMT; (c) pulsed-arc

图 3 所示为三种过渡模式下的熔滴过渡频率与熔滴平均直径,熔滴过渡频率与熔滴直径的大小反映了焊接过程中焊丝对熔池的填充效率。在相同的送丝速

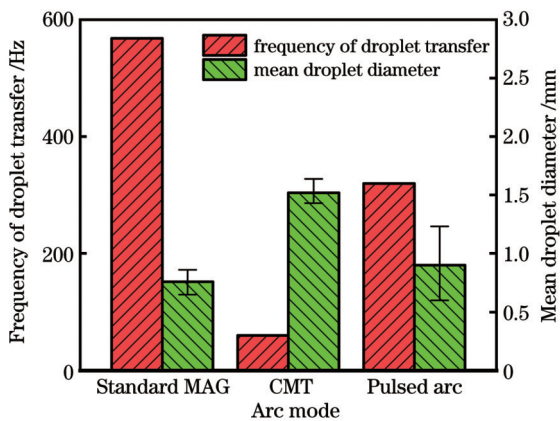


图 3 不同电弧模式下的熔滴过渡频率与熔滴平均直径

Fig. 3 Droplet transfer frequencies and mean droplet diameters under different arc modes

度下,受电弧电流与过渡方式的影响,标准 MAG 焊接时的熔滴过渡频率最高,电弧热持续作用在焊丝尖端,使焊丝熔化效率最高,同时熔滴在持续的等离子流力作用下高速向熔池过渡,熔滴直径小于焊丝直径。脉冲电弧焊接时熔滴受电流脉冲信号的影响,熔滴过渡频率低于标准电弧焊接时的过渡频率,在基值电流时间段焊丝尖端热量较低,熔滴难以形成,随着焊接电流逐渐提升至峰值,焊丝尖端受热熔化形成熔滴,电流峰值时刻焊接尖端热量较高,熔滴表面张力最小,熔滴直径也最小,熔滴形成后受电磁力作用向熔池过渡,熔滴过渡周期与脉冲电流周期接近。CMT 焊接过程中的熔滴过渡频率受焊丝往复运动的影响,熔滴过渡频率最低。由于 CMT 焊接时较低的热输入,焊丝尖端的热量较低,熔滴表面张力最高,同时较低的焊接电流也使焊接过程中熔滴受到的电磁力较小,熔滴直径大于焊丝直径,整个熔滴过渡过程经历燃弧-生长-短路-焊丝回抽四个过程,单次熔滴过渡周期较长,故焊接过程

中的熔滴过渡频率最低。

3.2 高功率激光对不同模式电弧焊接熔滴过渡的影响

为准确地分析高功率激光的加入对不同模式电弧焊接过程中的熔滴过渡行为的影响,必须先对熔滴受力情况进行分析。在激光-电弧复合焊接过程中,熔滴除了受到单一电弧焊接时的电磁力的作用外,还会受到激光致金属蒸气的作用力,熔滴过渡示意图如图 4 所

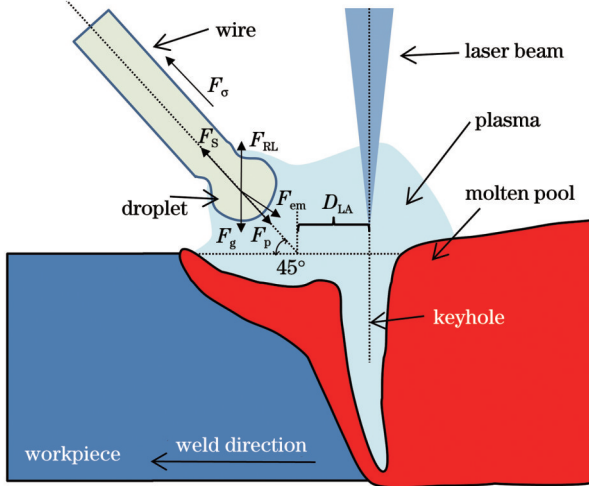


图 4 激光-电弧复合焊接熔滴过渡示意图

Fig. 4 Schematic of droplet transition in laser-arc hybrid welding

示。根据静力学平衡理论,当促进熔滴过渡的合力大于阻碍熔滴过渡的合力时,熔滴能够从焊丝端脱离落入熔池,相关作用力包括重力(F_g)、表面张力(F_σ)、电磁收缩力 F_{em} 、等离子流力(F_p)、金属蒸气反作用力(F_{RL})、斑点压力(F_s)等。重力的方向竖直向下,是促进熔滴过渡的力,在小电流情况下重力是熔滴脱离焊丝的主要作用力。根据熔滴质量变化,重力 F_g 表达式^[26]为

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

式中: r_d 为熔滴半径; ρ_d 为液体金属密度; g 为重力加速度。

表面张力是液体表面分子引力的表现,是熔滴能够维持球状,保持在焊丝尖端的主要作用力,在焊接过程中阻碍熔滴过渡,其表达式^[27]为

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

式中: r_w 为焊丝半径; σ 为液体金属表面张力系数,与材料成分、保护气种类和温度等因素有关。随着焊丝的熔化,表面张力逐渐减小,激光的热辐射能够提高熔滴的温度,使熔滴表面张力降低。

电磁收缩力是大电流条件下熔滴在过渡过程中受到的主要作用力,在射流过渡中,径向的电磁力维持了焊丝液体锥形的形态,轴向电磁力根据熔滴内电流线的分布起到阻碍或者促进熔滴过渡的作用。轴向电磁力(F_{emz})的计算公式^[27]为

$$F_{emz} = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\frac{1}{4} - \ln\left(\frac{r_d \sin \theta}{r_w}\right) + \frac{1}{1 - \cos \theta} - \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln\left(\frac{2}{1 + \cos \theta}\right) \right], \quad (3)$$

式中: μ_0 为真空下的磁导率; I 为电弧焊接电流; θ 为熔滴导电区域角度。

自由电弧具有圆锥外形,电弧各个截面上不同大小的电磁力形成由焊丝指向工件的压力差,使得电弧中的高温等离子体从焊丝端部向工件方向高速流动,对熔滴产生脱离焊丝的推力,始终促进熔滴过渡。若将等离子体气流视为液体,那么其对熔滴的作用力则可以视为曳力,其表达式^[26]为

$$F_p = C_d A_p \left(\frac{\rho_i v_i^2}{2} \right), \quad (4)$$

式中: C_d 为等离子流系数; A_p 、 ρ_i 、 v_i 分别为等离子体作用在熔滴上的面积、等离子体密度和流速。除此之外,在直流正接电弧焊接中焊丝作为阴极,在熔滴上形成阴极斑点时将承受正离子的撞击力 F_s 。

在高能激光束的照射下,工件表面形成匙孔,大量金属蒸气从匙孔处喷出,对熔滴过渡起阻碍作用。与熔滴受到的等离子流力作用原理相同,在气体流体中金属蒸气对熔滴的作用力 F_{RL} 与气体流速、熔滴体积等因素相关,当熔滴在匙孔正上方时,受到最大的金属蒸气阻力,距离匙孔越远,熔滴受到的金属蒸气的作用力越小。

图 5 为激光-标准 MAG 复合焊接的熔滴过渡过程,可以看出电弧预热形成浅而宽的熔池,激光跟随电弧照射在熔池上形成激光匙孔。相比于单一标准 MAG 焊接,复合焊接时激光匙孔处喷发的等离子体为电弧提供了导电通道,使电弧偏向激光匙孔所在位置,对电弧起着引导和压缩的作用,提高了电弧的能量密度,熔滴过渡轨迹也因此指向匙孔。两种焊接方法中的熔滴过渡示意图如图 6 所示。图 7 为标准 MAG 焊接与激光-标准 MAG 电弧复合焊接熔滴过渡频率与电弧长度的对比图。根据 Liu 等^[28]的研究可知,当电弧功率为 3000~5000 W 时,加入 1.5~3.0 kW 激光会增加电弧焊接时的弧长。而本文在电弧功率为 6860 W 左右时加入 7.5 kW 激光束反而使焊接时的弧长缩短。这是由于在低激光功率下,激光产生的等离子体较少,激光对电弧的吸引与压缩作用不明显,而本文中高功率激光诱导产生的光致等离子体给电弧提供了大量的铁蒸气,而铁元素的第一电离电位显著低于氩气与二氧化碳的第一电离电位,故复合焊接过程中电弧的电导率得到提升,电弧电阻下降,此时电弧的放电通道被激光匙孔所吸引,电弧长度缩短^[26]。因此,相比于单一标准 MAG 焊接,高功率激光-标准 MAG 复

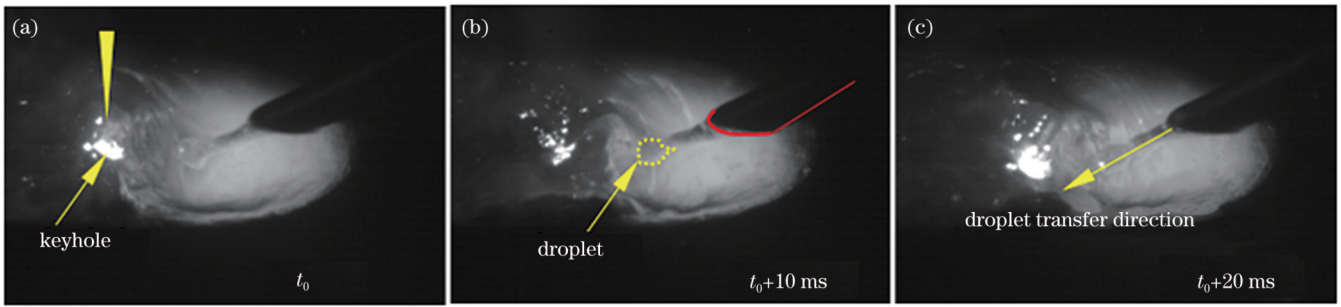


图 5 高功率激光-标准 MAG 复合焊接熔滴过渡形态

Fig. 5 Droplet transfer morphologies in high power laser-standard MAG hybrid welding

合焊接时的电弧长度缩短了 28%，同时受到激光匙孔喷发的金属蒸气与等离子体的影响 [图 6(b)]，复合焊

接时熔滴过渡频率低于单一标准 MAG 焊接时的熔滴过渡频率 (图 7)。

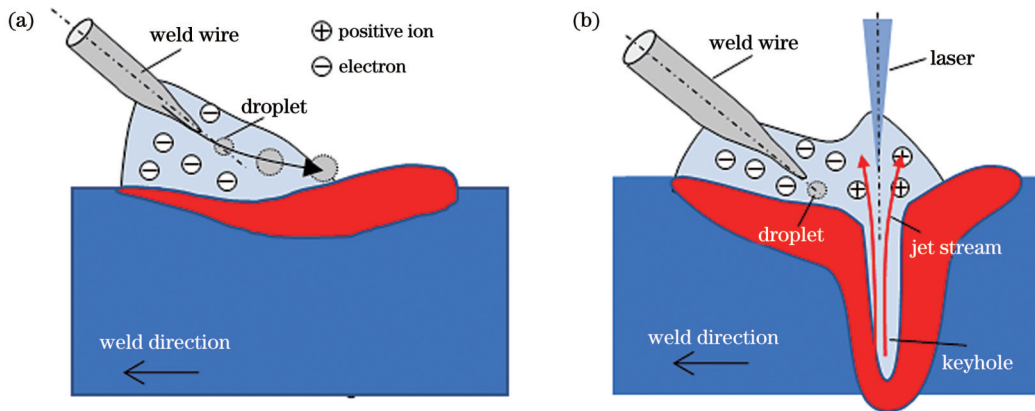


图 6 熔滴过渡示意图。(a)标准 MAG 焊接；(b)激光-标准 MAG 复合焊接

Fig. 6 Droplet transfer diagrams. (a) Standard MAG welding; (b) laser-standard MAG hybrid welding

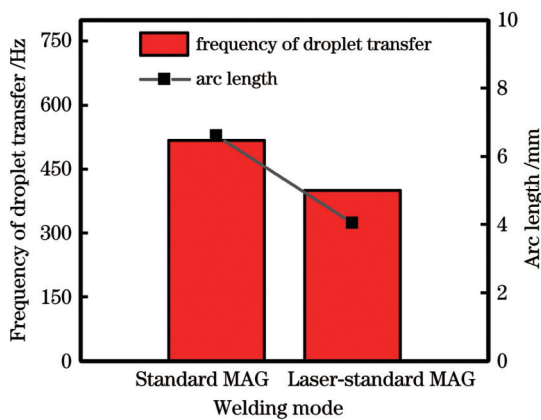


图 7 标准 MAG 焊接与激光-标准 MAG 复合焊接熔滴过渡特征比较

Fig. 7 Comparison of droplet transfer feature between standard MAG welding and laser-standard MAG hybrid welding

图 8 为高功率激光-CMT 复合焊接熔滴过渡过程的高速摄影图片。与单一 CMT 焊接相似，激光-CMT 复合焊接熔滴过渡过程也分为以下几个阶段： t_0 时刻电流增大，开始起弧； $t_0+6.4$ ms 时刻熔滴形成，焊丝向熔池进给；在 t_0+27 ms 至 $t_0+32.9$ ms 时间段内，熔滴与熔池接触，形成短路；在 $t_0+34.1$ ms 时刻，过渡完成，同时焊丝回抽； t_0+35 ms 时刻新的熔滴开始形成，

准备下一次过渡。在整个过渡过程中，由于激光匙孔喷发的金属蒸气与等离子体，过渡过程中熔滴受到向上的作用力而发生变形 ($t_0+34.1$ ms 时刻)，如图 9 所示。在高功率激光-CMT 复合焊接过程中，熔滴过渡模式为短路过渡，熔滴距离熔池较近，电弧面积较小，无法与激光诱导的等离子体相互作用，在熔池阳极斑点处释放的正离子斑点压力 F_s 和金属蒸气作用力 F_{RL} 作用下，熔滴向上偏离焊丝轴线，导致熔滴过渡频率受到影响。图 10 为单一 CMT 焊接与激光-CMT 复合焊接过程中的电弧面积曲线，可以看出，单一 CMT 焊接过程中的熔滴过渡周期不是恒定的，同时受熔池振荡和斑点压力的影响，每次短路过渡的周期变化较大，CMT 焊接过程中的平均熔滴过渡周期为 16.68 ms。Lei 等^[29]研究发现，在低功率 (3 kW) 激光-CMT 复合焊接时，激光的加入能稳定电弧，避免焊丝黏连，提高了 CMT 焊接熔滴过渡的频率。相比之下，在高功率激光-CMT 复合焊接过程中，由于受金属蒸气作用力的影响，熔滴平均过渡周期延长 (21.84 ms)；同时，激光对熔池的搅拌作用使熔池产生振荡，激光对熔池的加热降低了熔池的表面张力，使熔滴与熔池频繁接触，形成短路，电弧断续形成，电弧面积曲线在较短时间内波动较大 [图 10(b) 中 50~55 ms 区间]。因此，高功率

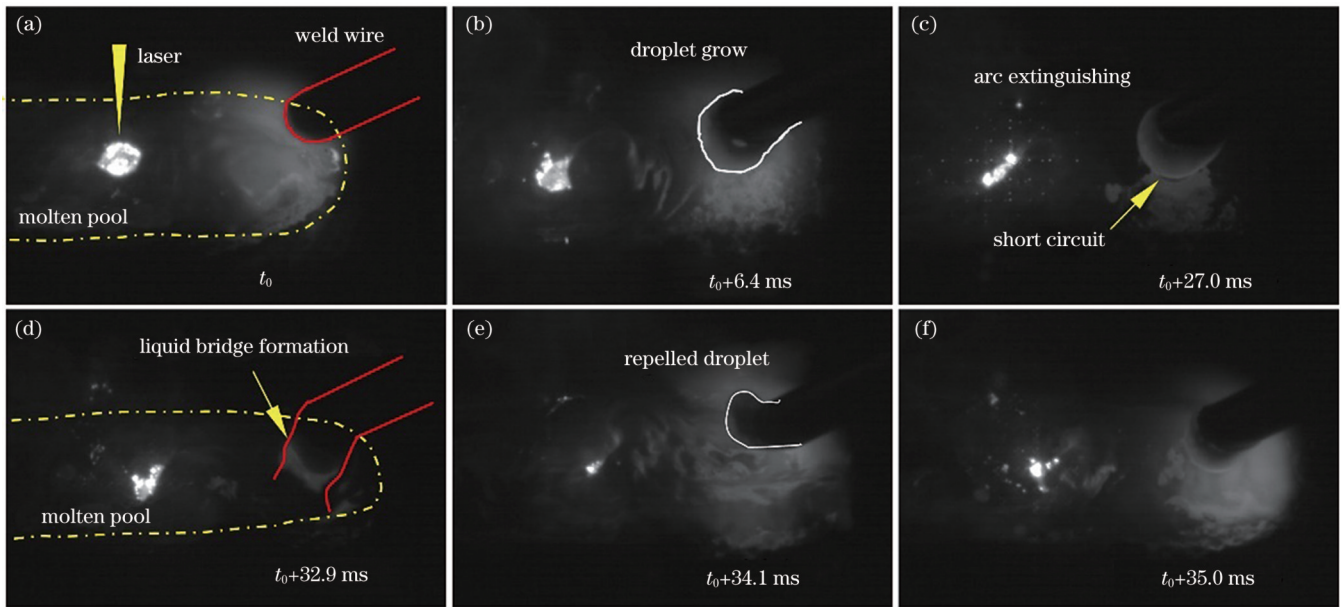


图 8 高功率激光-CMT 复合焊接的熔滴过渡形态

Fig. 8 Droplet transfer morphologies in high power laser-CMT hybrid welding

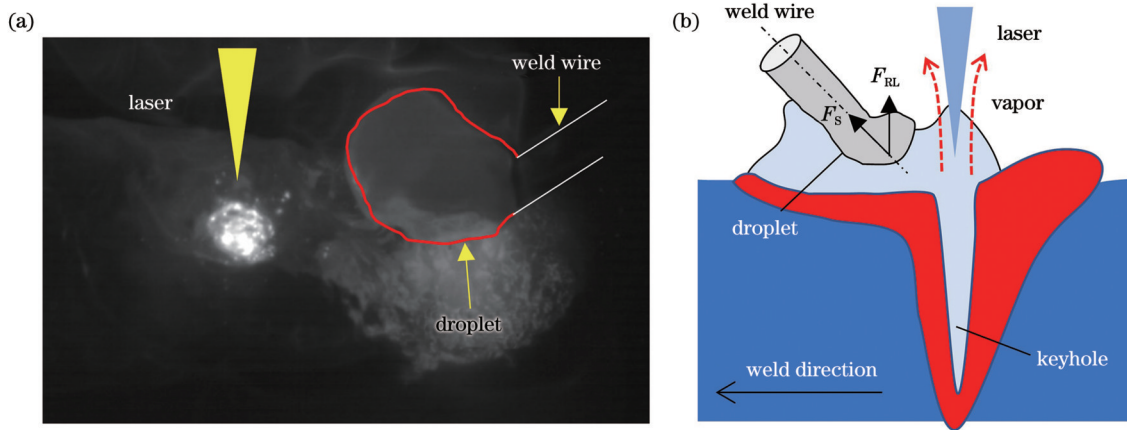


图 9 高功率激光-CMT 复合焊接中激光对熔滴的影响。(a) 高速摄影图片；(b) 示意图

Fig. 9 Effect of laser on droplet in high power laser-CMT hybrid welding. (a) High-speed photography picture; (b) schematic

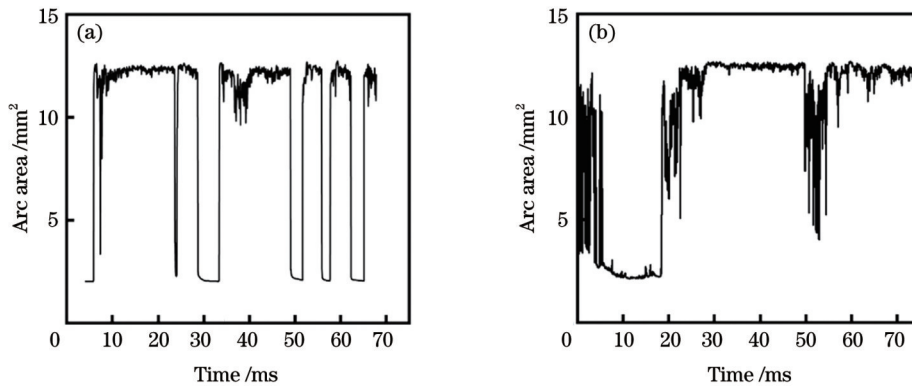


图 10 电弧面积曲线。(a) CMT 焊接；(b) 激光-CMT 焊接过程

Fig. 10 Arc area curves. (a) CMT welding; (b) laser-CMT hybrid welding

激光束的加入降低了 CMT 焊接的熔滴过渡频率，同时也降低了短路过渡时的稳定性。

图 11 所示为高功率激光-脉冲电弧复合焊接熔滴过渡过程。由于电弧长度与面积的增加，激光对电弧

的吸引与压缩能力减弱，激光-脉冲电弧复合焊接熔滴过渡模式也变为射滴过渡模式，此时熔滴受到激光匙孔喷发的金属蒸气与等离子体的阻拦。在 $t_0+2.4$ ms 时刻，熔滴 A 被匙孔处的气流阻拦，随后分裂。在 t_0+

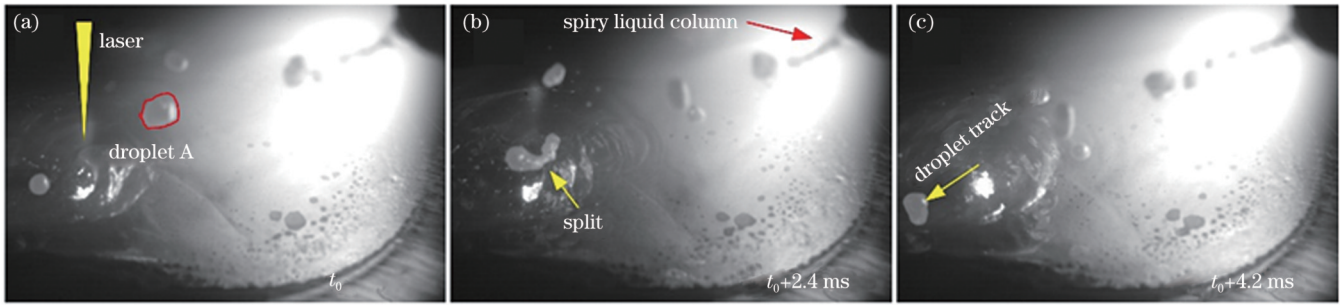


图 11 高功率激光-脉冲电弧复合焊接熔滴过渡形态

Fig. 11 Droplet transfer morphologies in high power laser-pulsed arc hybrid welding

4.2 ms 时刻熔滴偏向熔池侧面进行过渡,造成熔池填充不均匀,并使焊缝表面的飞溅增加。通过统计焊接过程中的平均熔滴过渡周期,可以得到高功率激光-脉冲电弧焊接过程中的熔滴过渡周期为 2.61 ms,对应的熔滴过渡频率为 383 Hz,高于脉冲电弧焊接时的熔滴过渡频率(320 Hz)。熔滴过渡频率的提高一方面是由于电弧过长,金属蒸气对熔滴阻碍的作用力减弱所致,这与 Liu 等^[30]

报道的研究结果一致;另一方面,由于激光对电弧的吸引作用主要表现为焊丝的尖端形成一个细长的液态金属锥,收敛的电流线聚集在焊丝尖端,此时的电弧稳定性差,峰值电弧电流较高,在焊丝尖端熔化的熔滴容易被甩出,当被甩出的熔滴过渡至匙孔上方时,会受到高速气体的冲击,过渡轨迹发生改变,出现熔滴向熔池侧面过渡的现象,该过程的示意图如图 12 所示。

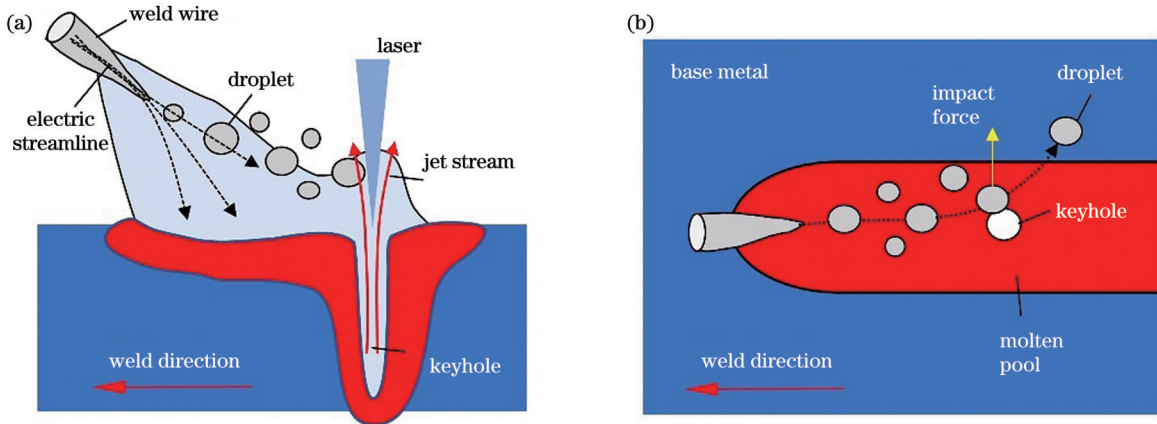


图 12 高功率激光-脉冲电弧焊接过程中激光对熔滴过渡的影响示意图。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 12 Schematics of influence of laser on droplet transfer in high power laser-pulsed arc hybrid welding. (a) Lateral view; (b) top view

3.3 高功率激光-电弧复合焊接成形特征

实验所得的焊缝表面形貌及对应横截面形貌如图 13 所示。与单一标准 MAG 焊接相比,激光-标准 MAG 复合焊接焊缝平整光滑,焊缝焊趾线较为平滑。单一标准 MAG 焊接焊缝熔深较浅,截面呈现团状,而复合焊接过程中激光的加入极大地提高了焊缝熔池的穿透能力,复合焊接焊缝截面分为上部的电弧作用区与下部的激光作用区,整个焊缝截面呈现典型的“高脚杯”状。单一 CMT 焊接焊缝表面也较为光滑,而焊接过程中熔滴过渡周期的不稳定导致焊缝焊趾处出现明显波动;其焊缝截面形貌与标准 MAG 焊接焊缝相似,但是由于焊接时的热输入与填充量较少,CMT 焊接焊缝熔深比标准 MAG 焊接焊缝熔深小。高功率激光的加入使 CMT 焊接过程中的熔池更加稳定,所得的焊缝焊趾较为平滑,焊缝截面呈现“钉子”状。脉冲电弧焊接焊缝与标准 MAG 焊接焊缝相似,焊缝截面都呈现团状,相比之下,激光-脉冲电弧焊接焊缝表面则较

为粗糙,焊缝两侧存在大量飞溅,焊缝截面形状接近“酒杯”状。激光-脉冲电弧复合焊接过程中熔滴的不均匀过渡,导致其易落入熔池一侧,最终导致部分电弧区焊缝分布不均匀,焊缝一侧的填充金属更多。三种复合焊接条件下的焊缝截面轮廓示意图如图 14 所示。

图 15 所示为不同实验条件下得到的焊缝特征数据的分析结果。从熔宽的角度来看,在激光-标准 MAG 与激光-脉冲电弧复合焊接过程中,激光的重熔作用提高了焊接熔池的湿润性与铺展性,进而使焊缝宽度增大,而在激光-CMT 复合焊接过程中,由于 CMT 焊接的热输入量小,电弧较短且电弧压力也较小,形成的熔池浅而窄,即使激光跟随在电弧后也无法增加焊接熔池宽度(图 13 和图 14)。对比不同焊接条件下焊缝的熔深大小可知:单一电弧焊接得到的焊缝熔深都较浅,其中 CMT 焊接熔深最小(0.45 mm);高功率激光的加入显著增加了焊缝熔深,三种复合焊接

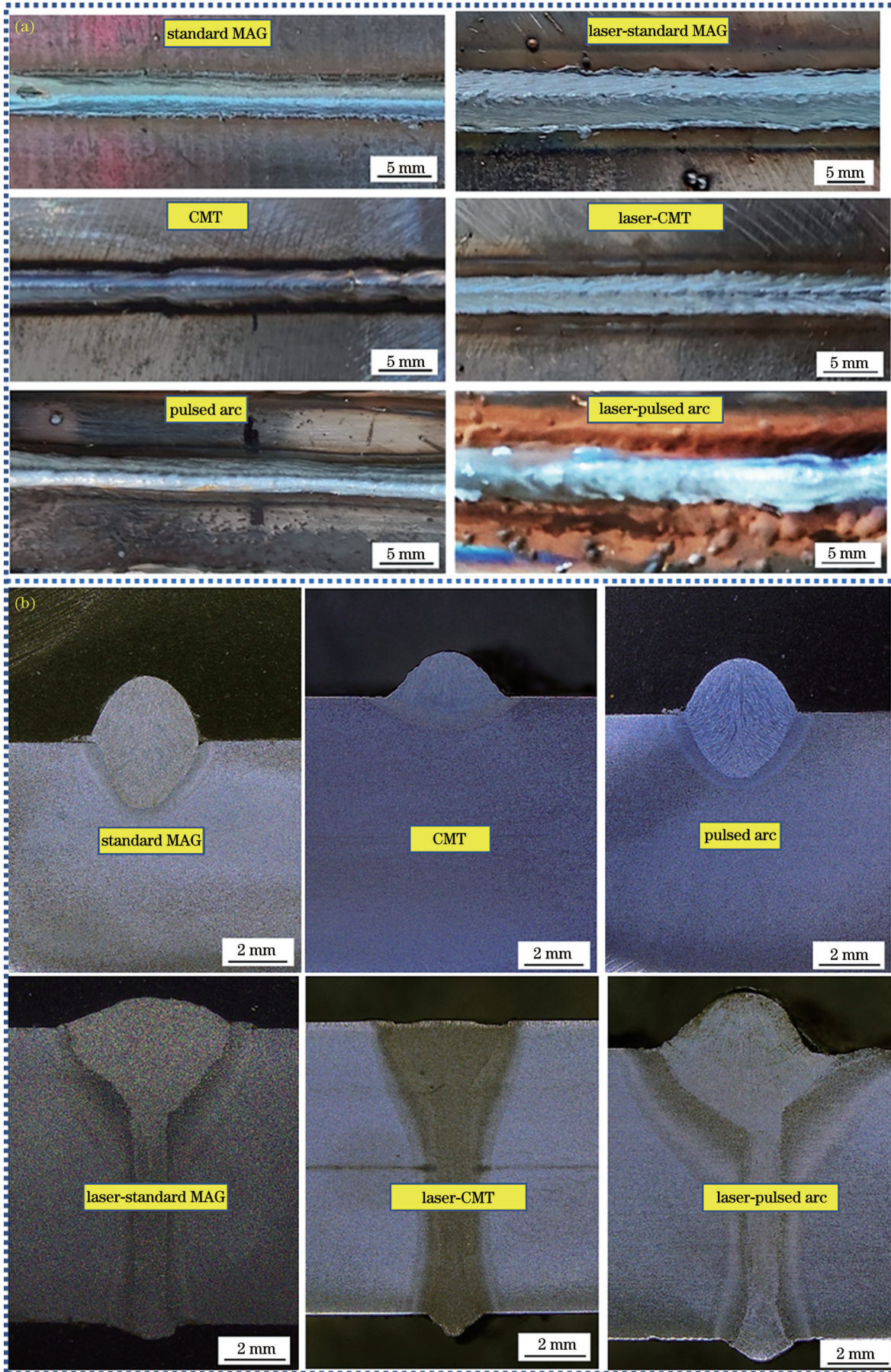


图 13 不同焊接条件下的焊缝形貌。(a)表面;(b)截面

Fig. 13 Weld morphologies under different welding conditions. (a) Surface; (b) cross section

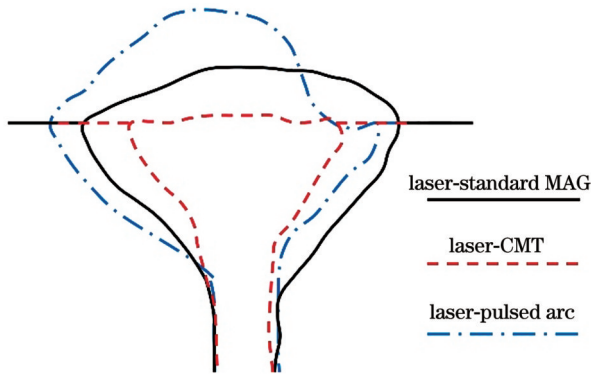


图 14 不同复合焊接条件下焊缝截面轮廓的比较

Fig. 14 Comparison of weld cross-section profiles under different hybrid welding conditions

均达到单面焊双面成形的效果。由于高功率激光的加入,熔滴直径和熔滴过渡频率均受到不同程度的影响,相比于单一电弧焊接,激光-标准 MAG 与激光-CMT 复合焊接焊缝余高减小,而激光-脉冲电弧复合焊接焊缝余高略有增加。当焊接速度相同时,通过对不同条件下的焊缝截面积进行测量,可计算出激光-电弧复合焊接的熔化能增量(ψ),进而定量分析得到复合焊接

热源的相互作用程度^[31]。通常情况下,复合焊接的熔化能增量 ψ 直接取决于热源相互作用的有效影响: ψ 值越大,热源的相互作用越强烈。当焊接速度一定时, ψ 的计算公式^[31]为

$$\psi = \frac{S_H - (S_L + S_A)}{S_L + S_A} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: S_H 、 S_L 、 S_A 分别为复合焊接、激光焊接和电弧焊接的焊缝截面积。

因此,利用单一激光焊接、单一电弧焊接以及复合焊接焊缝截面面积的测量结果(图 15),可以计算得出不同焊接条件下的 ψ 值。三种电弧模式按激光与电弧相互作用的熔化能增量值由高到低排列,依次为激光-脉冲电弧复合焊接(36%)、激光-标准 MAG 复合焊接(19%)、激光-CMT 复合焊接(-12%)。由前文分析可知,在激光-CMT 复合焊接过程中,高功率激光的加入降低了熔滴过渡频率和熔滴过渡的稳定性,导致其 ψ 值降低;激光-标准 MAG 复合焊接时,由于电弧被吸引和压缩,焊接热源效率得到提升;激光-脉冲电弧复合焊接时,由于熔滴过渡频率显著增加,其 ψ 值大幅度提高。

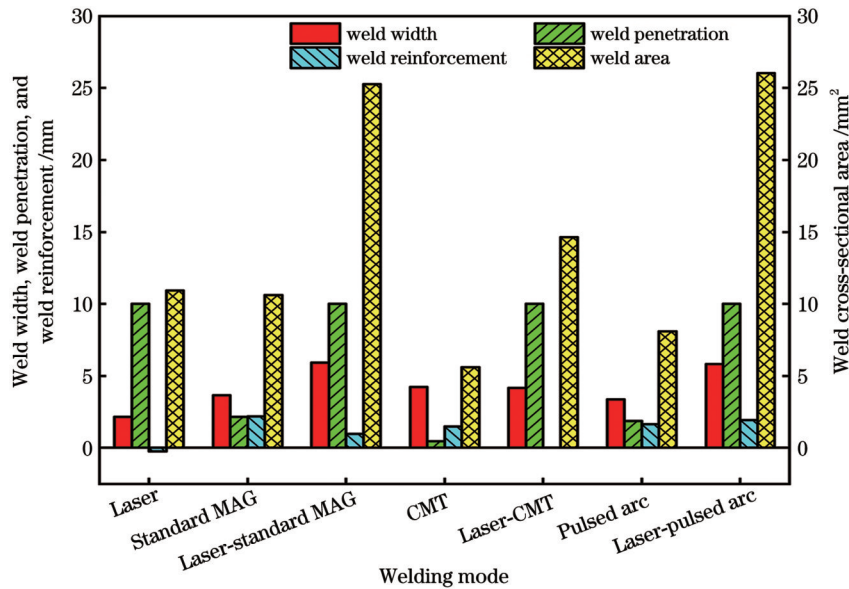


图 15 不同焊接条件下的焊缝成形参数

Fig. 15 Weld forming parameters under different welding conditions

4 结 论

对比研究了 7.5 kW 激光对不同模式电弧(标准 MAG、CMT 和脉冲电弧)焊接中的熔滴过渡与焊缝成形的影响。主要研究结果如下:

1) 高功率激光的加入对熔滴过渡模式有显著影响。在标准 MAG 焊接过程中,高功率激光会吸引和压缩电弧,导致电弧长度显著缩短,同时匙孔喷出的金属蒸气与等离子体降低了熔滴过渡频率;在 CMT 焊接过程中,高功率激光会延长单次短路过渡周期,引起

的熔池振荡会降低短路过渡的稳定性;在脉冲电弧焊接过程中,高功率激光会使熔滴过渡频率增加,同时匙孔处的气流对熔滴过渡起阻碍作用,使熔滴向熔池侧面过渡,导致焊接飞溅的产生。

2) 与单一电弧焊接相比,激光-标准 MAG 与激光-脉冲电弧复合焊接时的焊缝熔宽增加,而激光-CMT 复合焊接时的焊缝熔宽的变化不明显;受熔滴直径和过渡频率的影响,激光-标准 MAG 与激光-CMT 电弧复合焊接的焊缝余高减小,而激光-脉冲电弧复合焊接的焊缝余高略有增加;三种电弧模式按激光与电弧相

互作用的熔化能增量值由高到低排列,依次为激光-脉冲电弧复合焊接(36%)、激光-标准 MAG 复合焊接(19%)、激光-CMT 复合焊接(-12%)。

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] 邹江林, 王利达, 祝宝琦, 等. 光纤激光-TIG 电弧复合焊接等离子体形态的可视化观察[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202007.
Zou J L, Wang L D, Zhu B Q, et al. Visual observation of plasma morphology during fiber laser-TIG arc-hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202007.
- [3] 桂晓燕, 高向东, 孙友松, 等. 激光电弧复合焊变形及残余应力的数值分析[J]. *应用激光*, 2021, 41(3): 651-656.
Gui X Y, Gao X D, Sun Y S, et al. Numerical analysis of deformation and residual stress of laser archybrid welding[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(3): 651-656.
- [4] Aqeel M, Gautam J P, Shariff S M. Comparative study on autogenous diode laser, CO₂ laser-MIG hybrid and multi-pass TIG welding of 10-mm thick Inconel 617 superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 856: 143967.
- [5] Wang D S, Dong Y C, Liu L M, et al. Effect of pulsed laser and laser-arc hybrid on aluminum/steel riveting-welding hybrid bonding technology[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 1043-1053.
- [6] Hao K D, Gao Z Y, Huang J W, et al. Comparisons of laser and laser-arc hybrid welded carbon steel with beam oscillation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108787.
- [7] 王瑜, 舒乐时, 耿韶宁, 等. 汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1202004.
Wang Y, Shu L S, Geng S N, et al. Present situation and development trend of laser welding technology for automobile body [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1202004.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Inose K, Owaki K, Kanbayashi J, et al. Functional assessment of laser arc hybrid welded joints and their application for bridge construction[J]. *Welding in the World*, 2012, 56(7): 118-124.
- [11] 郑亚风, 刘双仁, 张群莉, 等. 电弧功率对高功率激光-电弧复合焊熔滴过渡与飞溅的影响[J]. *中国激光*, 2023, 50(12): 1202107.
Zheng Y F, Liu S R, Zhang Q L, et al. Influence of arc power on droplet transfer and spatter in high power laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(12): 1202107.
- [12] Liu Q Y, Wu D, Wang Q Z, et al. Research status of stability in dynamic process of laser-arc hybrid welding based on droplet transfer behavior: a review[J]. *Coatings*, 2023, 13(1): 205.
- [13] 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.
- [14] 刘双宇, 张宏, 石岩, 等. CO₂激光-MAG 电弧复合焊接工艺参数对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3172-3179.
Liu S Y, Zhang H, Shi Y, et al. Effects of process parameters on droplet transfer and bead shape in CO₂-MAG hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(12): 3172-3179.
- [15] Liu F Y, Yang B, Sun H F, et al. Mechanism investigation for the influence of laser power on droplet transfer behaviors in laser-MIG hybrid welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108750.
- [16] 何双, 陈辉, 陈勇, 等. 激光功率对激光-MAG 复合焊熔滴过渡行为的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021408.
He S, Chen H, Chen Y, et al. Effects of laser power on droplet transfer behavior in laser-MAG hybrid welding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021408.
- [17] Han X H, Yang Z B, Ma Y, et al. Comparative study of laser-arc hybrid welding for AA6082-T6 aluminum alloy with two different arc modes[J]. *Metals*, 2020, 10(3): 407.
- [18] Frostevarg J. Comparison of three different arc modes for laser-arc hybrid welding steel[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022047.
- [19] 梁晓梅, 杨义成, 黄瑞生, 等. 万瓦级激光-电弧复合焊接焊缝成形特性分析[J]. *中国激光*, 2023, 50(8): 0802107.
Liang X M, Yang Y C, Huang R S, et al. Analysis on characteristics of weld formation with 10 kW level high power laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(8): 0802107.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Sun W, Liu S S, Guo F Q, et al. Investigation on droplet transfer behavior during fiber laser-flux cored arc hybrid welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107781.
- [23] 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.
- [24] Srinivasan D, Sevel P, John Solomon I, et al. A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 64: 108-115.
- [25] Tang G, Zhao X, Li R D, et al. The effect of arc position on laser-arc hybrid welding of 12-mm-thick high strength bainitic steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105780.
- [26] Zhang W, Hua X M, Liao W, et al. Study of metal transfer in CO₂ laser+GMAW-P hybrid welding using argon-helium mixtures[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 158-166.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Lei Z L, Li B W, Bi J, et al. Influence of the laser thermal effect on the droplet transfer behavior in laser-CMT welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105728.
- [30] Liu S Y, Zhang F L, Dong S N, et al. Characteristics analysis of droplet transfer in laser-MAG hybrid welding process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121: 805-811.
- [31] 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 process, mechanism and quality control law of CO₂ laser-arc hybrid welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

Effects of High-Power Laser on Droplet Transfer and Weld Formation in Different Types of Gas Metal Arc Welding

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

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

²*Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education and Zhejiang Province, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

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

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

Abstract

Objective Compared with laser welding and arc welding, laser-arc hybrid welding not only inherits the advantages of laser welding and arc welding but also makes up for respective shortcomings. Thus, it is an advanced welding process method with great application prospects. With the continuous development of laser technologies, laser power has exceeded 10 kW or even higher. Therefore, in order to make the development of lasers well meet the need of actual industrial production, the basic theoretical research on high-power laser-arc hybrid welding has been a hot spot in the academic community in recent years. Researchers have carried out a lot of research on the interaction mechanism between laser and arc. However, the laser power involved was mostly below 5 kW. There are few reports on the mechanism regarding the effect of a high-power (higher than 5 kW) laser on the droplet transfer in laser-arc hybrid welding. Therefore, in this study, a high-power (7.5 kW) laser is introduced into the different modes of arc [standard metal active-gas (MAG), cold metal transfer (CMT), and pulsed arc] welding process, and its effects on droplet transition, weld forming and welding efficiency are compared and studied by using high-speed camera, optical microscope, etc.

Methods In this study, a high-power laser-arc hybrid welding platform was built, which mainly consisted of a continuous fiber laser, a welding system, a manipulator arm, and a high-speed camera system. The high-power laser-arc hybrid welding experiments were carried out on 10 mm thick Q345 steel, and the laser used in the test was a fiber laser (maximum output power of 12 kW), with an output laser wavelength of (1080 ± 10) nm and a focused spot diameter of 0.2 mm. Before the welding test, an angle grinder was first used to grind the surface to be welded, and then the ground surface was cleaned with alcohol. The arc-guided laser-arc welding was chosen for obtaining a stable droplet transition process. In order to further understand the influence of a high-power laser on droplet transition in different modes of arc welding, the laser was coupled with three different arc modes (standard MAG, CMT and pulsed arc). The welding shielding gas used in the welding process was the Ar and CO₂ mixture with a flow rate of 20 L/min. During the welding process, a high-speed camera was used to track and monitor the droplet transition behavior with a frame rate of 10000 frame/s. In order to obtain a clear droplet transition image, an infrared filter was added to the camera lens before the experiment began. Image pro plus software was used to process the pictures taken by the high-speed camera, and the droplet transition mode and the number of droplet transitions within 500 ms under each parameter were counted, so as to calculate the droplet transition frequency within 1 s. After welding, the forward and cross-sectional morphologies of the weld were observed by optical microscope.

Results and Discussions The high-power laser has a significant effect on the droplet transition mode of arc welding in different arc modes. During standard MAG welding, the high-power laser attracts and compresses the arc, resulting in a significant reduction in arc length. Meanwhile, metal vapor and plasma ejected from the keyhole reduce the droplet transition frequency (Figs. 6 and 7). In the case of CMT welding, the high-power laser extends the single short-circuit transition period, and the resulting molten pool oscillation reduces the stability of the short-circuit transition (Fig. 8). Regarding the pulsed arc welding process, the high-power laser increases the melting rate of the welding wire. In the meantime, the droplet transition mode changes from the droplet transition to the jet transition, and the droplet transition frequency is significantly increased. The air flow at the key hole hinders the droplet transition, so that the droplet transits to the side of the molten pool (Figs. 11 and 12). Compared with that during arc welding, the weld melting width increases during laser-standard MAG and laser-pulsed arc hybrid welding, while no obvious change in weld width is observed in the case of laser-CMT hybrid welding. The residual height of welds in laser-standard MAG and laser-CMT hybrid welding decreases significantly, while the residual height of welds in laser-pulsed arc hybrid welding increases slightly. This is attributed to different degrees of influence of the laser on the droplet diameter and transition frequency in three different modes of arc welding. Furthermore, the melting energy increment value (ψ) of laser-arc interaction varies under different hybrid welding conditions, among which laser-pulse arc welding has the highest ψ value (36%), followed by laser-standard MAG welding (19%), while laser-CMT welding has the smallest ψ value (-12%).

Conclusions In this study, the effects of laser (7.5 kW power) on droplet transition and weld formation in different modes of arc welding were investigated. The results reveal that the addition of laser has a significant influence on the droplet transition in standard MAG, CMT and pulsed arc welding processes. During standard MAG welding, the high-power laser attracts and compresses the arc, resulting in a significant reduction in arc length, and the metal vapor and plasma ejected from the keyhole reduce the droplet transition frequency. In the CMT welding process, the laser extends the single short-circuit transition cycle, and the melt pool oscillation caused by the high-power laser reduces the stability of the short-circuit transition. Regarding the pulsed arc welding process, the addition of a high-power laser increases the melting rate of welding wires. The droplet transition mode changes from the droplet transition to the jet transition, and the droplet transition frequency increases. Meanwhile, the air flow at the key hole hinders the droplet transition, so that the droplet transits to the side of the molten pool. Compared with arc welding, the weld melting width increases during laser-standard MAG and laser-pulsed arc welding, while no obvious changes in weld width are observed in the case of laser-CMT hybrid welding. The residual height of the welds in laser-standard MAG and laser-CMT hybrid welding decreases significantly, while the residual height of welds in laser-pulsed arc hybrid welding increases slightly. The melting energy increment values of the interaction between laser and arc under three arc modes are: laser-pulsed arc hybrid welding (36%), laser-standard MAG hybrid welding (19%), and laser-CMT hybrid welding (−12%).

Key words laser technique; high-power laser-arc hybrid welding; arc mode; droplet transfer; weld formation