

引文格式: 张宇辉, 王常建, 熊然, 等. 航天超高强钢激光-CMT复合焊接成形控制及过程稳定性机制[J]. 航空制造技术, 2026, 69(4): 25010043.

ZHANG Yuhui, WANG Changjian, XIONG Ran, et al. Process stability and formation quality analysis of laser-CMT hybrid welding for aerospace ultra-high strength steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(4): 25010043.

航天超高强钢激光-CMT复合焊接成形控制及过程稳定性机制

张宇辉¹, 王常建², 熊然², 张轲¹

(1. 上海交通大学, 上海 200240;

2. 西安航天动力机械有限公司, 西安 710038)

[摘要] 激光-CMT (冷金属过渡) 复合焊接可以增加熔深、提高效率并改善焊缝成形, 但激光功率对于焊缝成形和过程稳定性至关重要。通过高速摄像及电信号方法, 对航天超高强钢 6 mm 中厚板的焊缝成形及过程稳定性展开了研究。研究发现, 激光的加入缩短了熔滴短路过程, 延长了其上升阶段和等待阶段时间, 熔滴直径随激光功率略微增大, 但过渡频率基本保持在 97 Hz。随着激光功率的增加, 电流失稳频次增加, 影响了焊接过程的稳定性。分析表明, 在脱离及上升阶段, 液滴冲击力和电弧压力冲击并挤压匙孔, 是导致匙孔不稳定的主要原因。当激光功率为 5000 W 时, 匙孔被充分穿透, 维持匙孔稳定的金属蒸气喷射力与液滴冲击力和电弧压力保持动态平衡, 焊缝成形最好, 气孔率仅为 0.14%; 而当功率升高或者降低时, 焊缝成形变差, 气孔缺陷增加。

关键词: 超高强钢; 激光-CMT 复合焊; 熔滴过渡; 过程稳定性; 气孔率

中图分类号: V261.8; TG4

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010043



张宇辉

博士研究生, 研究方向为激光-CMT 复合焊。

在现代工业制造中, 超高强钢凭借其出色的力学性能和优良的加工特性, 广泛应用于航空航天、国防军工等尖端领域的部件生产^[1]。然而, 这些部件的高质量焊接是确保产品安全性和可靠性的关键环节。传统的焊接方法, 如电弧焊和激光焊, 在焊接航天超高强钢时面临诸多的挑战。电弧焊成本较低, 但焊接效率低、热输入过大, 易导致残余应力和焊接变形^[2]。激光焊虽然热输入小, 但缺乏成分调控作用, 且对装配精度要求较高。近年来, 激光-CMT (冷金属过渡) 复合焊接技术应运而生。这种复合焊接技术结合了激光焊接

能量密度高、焊接速度快、热影响区小的优点, 以及 CMT 焊接低热输入、低飞溅, 间隙适应强等优势^[3], 同时焊丝的添加还可以改善焊缝成形, 调控焊接接头性能^[4]。

然而, 焊接工艺参数的变化对激光-CMT 复合焊接的过程稳定及缺陷的产生有较大的影响。Chen 等^[5]采用激光-CMT 复合焊接技术对铝合金和不锈钢进行了异种材料的焊接, 研究了焊接速度、送丝速度及激光功率对焊缝成形的影响; 结果表明, 随着焊接速度、送丝速度及激光功率的增加, 焊缝成形均为先变好后变差。马煜斌等^[6]采用高速摄像观察方法,

收稿日期: 2025-03-31; 退修日期: 2025-04-12; 录用日期: 2025-05-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51875354)

通信作者: 张轲, 教授, 博士, 研究方向为先进激光加工方法、机器人智能焊接。

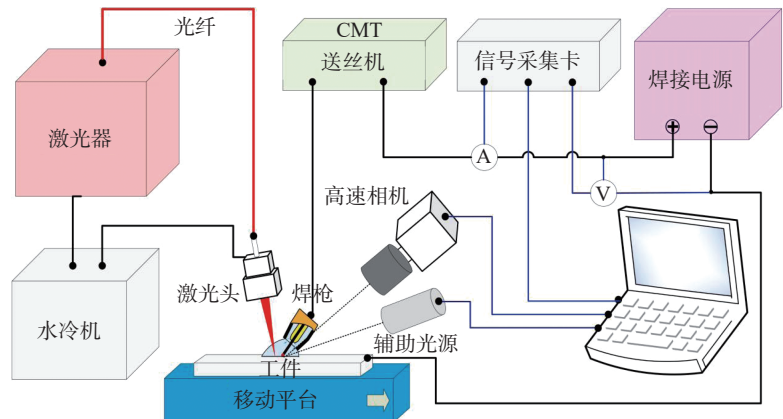
发现在激光-CMT复合焊铝合金时,随着激光功率由800 W增大到1500 W, CMT熔滴过渡受到扰动,焊缝成形由好转坏。Lei等^[7]通过高速摄像系统观测了低功率激光-CMT复合焊接时液滴传输过程的特征,结果发现激光功率的增加加速了焊丝的熔化并扩大了熔池,熔滴逐渐长大并改善了焊缝成形。Han等^[8]对比了激光-CMT复合焊和激光-脉冲MIG复合焊的焊缝成形,发现在激光-CMT复合焊时,熔滴对匙孔的影响大大减弱,从而减少甚至消除了焊接过程中的飞溅。李靖逸^[9]应用激光-CMT复合焊技术对2.8 mm的D406A超高强钢进行了工艺研究,结果表明激光功率增大,焊接速度减小及送丝速度增加均可降低焊缝气孔率,但热输入的增大会导致接头变形加剧,因此需要合理控制焊接工艺参数。此外,本课题组前期对激光-CMT复合焊的研究表明^[10],保护气体中适当比例的CO₂可以改善D406A超高强钢的焊接过程稳定性,减少焊接缺陷的产生。然而,尽管对激光-CMT复合焊接的成形与熔滴过渡行为展开了一些研究,但针对航天超高强钢6 mm以上中厚板的焊接成形及过程稳定性机制的研究仍然非常欠缺,限制了激光-CMT复合焊接技术在航天领域的推广应用。

针对上述问题,本文将基于电信号及高速摄像观察对全熔透时超高强钢激光-CMT复合焊接在不同激光功率下的过程稳定性、匙孔动态演变、熔滴过渡及熔池流动行为展开研究。通过分析不同功率下的焊缝成形及气孔等缺陷,以及相应的电信号特征,对一周期内的匙孔动态演变和CMT过渡行为进行分析,从动力学的角度对匙孔-熔池流动的动态演变机制进行探讨。本文的研究成果将为激光-CMT复合焊接新技术在航天超高强钢焊接中的应用奠定基础 and 提供理论支撑。

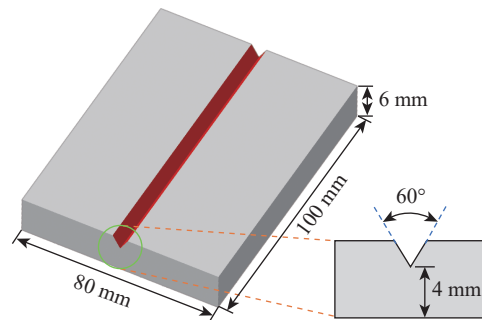
1 试验及方法

图1所示为激光-CMT复合焊接试验系统及试板规格。激光器为波长1070 nm的IPG光纤激光(YLS-10000),其传输光纤芯径为300 μm,光斑直径为0.6 mm,光束质量为12 mm·mrad。弧焊电源为Fronius TPS5000-CMT(冷金属过渡)电源。激光头和CMT焊枪通过可调节机械装置集成。试验材料为退火态D406A超高强钢,并使用直径1.2 mm的H10专用焊丝,其化学成分如表1所示。试板的尺寸为100 mm×80 mm×6 mm,坡口角度为60°

V型坡口,钝边为4 mm。Zhang等^[11]的研究表明,激光功率对焊接过程稳定性的影响至关重要。为保证过程稳定性的研究与对接焊基本一致,本文主要讨论在完全熔透下不同激光功率(4000 W、4500 W、5000 W和5500 W)对过程稳定性的影响。结合前期研究结果,设定以下工艺参数并在整个试验过程中保持不变:激光头和焊枪与水平面的倾角分别为86°和45°,离焦量为0 mm,光丝间距为3 mm,焊接速度为1.08 m/min,送丝速度为6 m/min,焊丝干伸长为14 mm,保护气成分为80% Ar+20% CO₂(体积分数),气体流量为20 L/min。此



(a) 焊接系统示意图



(b) 试板尺寸及坡口形状

图1 激光-CMT复合焊接系统及试板规格

Fig.1 Laser-CMT hybrid welding system and specification of samples

表1 母材和填充焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of base metal and filler wire (mass fraction) %

材料	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Fe
母材	0.28~0.33	0.7~1.0	1.4~1.7	0.25	1.0~1.3	0.4~0.55	0.08~0.15	余量
焊丝	0.08~0.12	0.9~1.1	1.1~1.3	1.8~2.0	1.4~1.6	0.4~0.6	0.05~0.15	余量

外,试验过程中,为避免试验结果的随机性,对每组功率参数分别进行了3次重复试验。

焊接过程中,高速相机 Photron Fastcam SA4 以 5000 帧/秒,从 45° 倾角拍摄匙孔、熔池及熔滴过渡。基于霍尔传感器实时采集焊接电流和电压,采样频率为 20 kHz。焊后,首先对试板进行 X 射线探伤检测;然后,在垂直于焊缝方向切取金相试样,经研磨、抛光并用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀后,采用光学显微镜对其进行形貌观察和尺寸统计;接着,采用 ImageJ 软件统计气孔率及熔滴的平均等效直径(10 个周期),并结合电信号和高速摄像数据计算 2 s 内的熔滴过渡频率;最后,采用 MATLAB 软件对匙孔进行二值化处理,统计其在稳定阶段 2 s 内的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 焊缝成形

图 2 为不同激光功率下焊缝表面形貌及 X 射线探伤结果。可以发现,当激光功率为 4000 W 时,焊缝上表面成形不均,局部有明显凹陷, X 射线底片发现焊缝背部有较大焊瘤;当激光功率 4500 W 时,背部焊瘤减小,但表面形貌由整体长距离凹陷转变为周期性短距离凹陷;激光功率继续增大至 5000 W 时,焊缝表面光滑饱满,背部无凹陷、无焊瘤;而当功率进一步增大至 5500 W 后,虽然焊缝成形饱满,但其表面飞溅增加;此外,从探伤底片和图 3 可知,焊缝内气孔率随着功率的增大先减小后增大,在功率为 5000 W 时,气孔率最低,仅 0.14%。由此可见,在激光功率 5000 W 时,焊接过程最为稳定。

图 4 所示为不同激光功率下焊缝截面形貌。图 5 为接头不同位置宽度及整个面积变化。可以看出,纯 CMT 焊时,在坡口内部有未熔合缺陷,随着激光功率增加,焊接接头的上、中、下各个位置的宽度及焊缝面

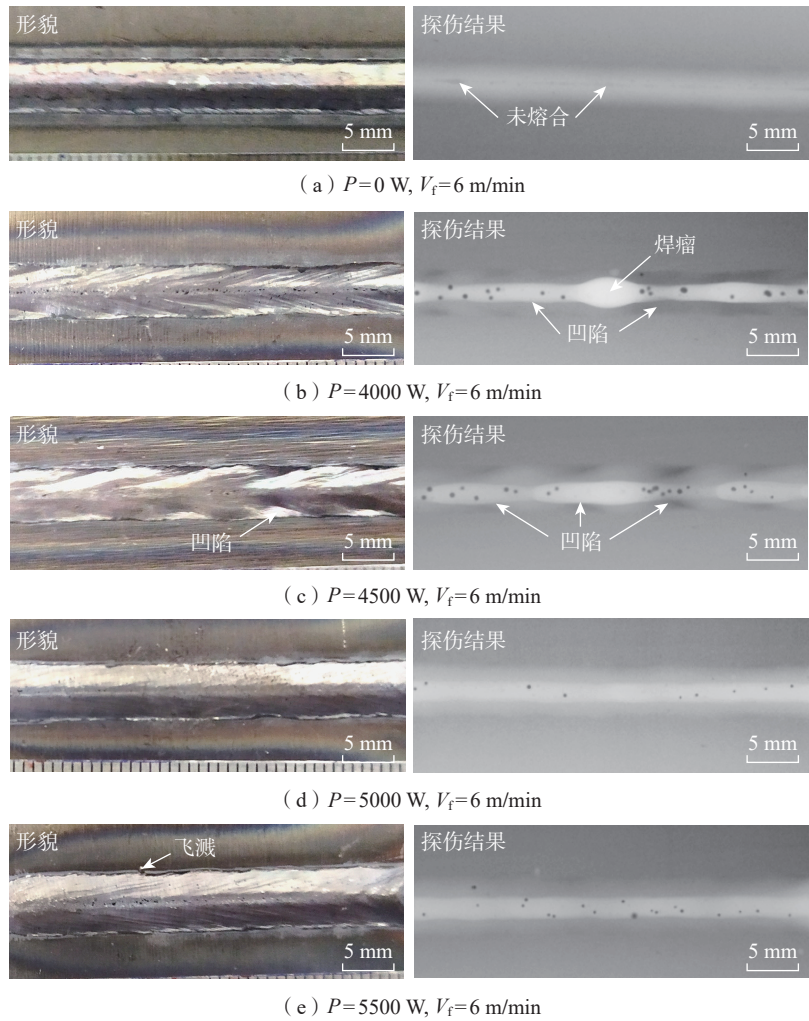


图 2 不同激光功率下焊缝外观形貌及气孔分布
Fig.2 Appearance and porosity distribution of weld seam under different laser powers

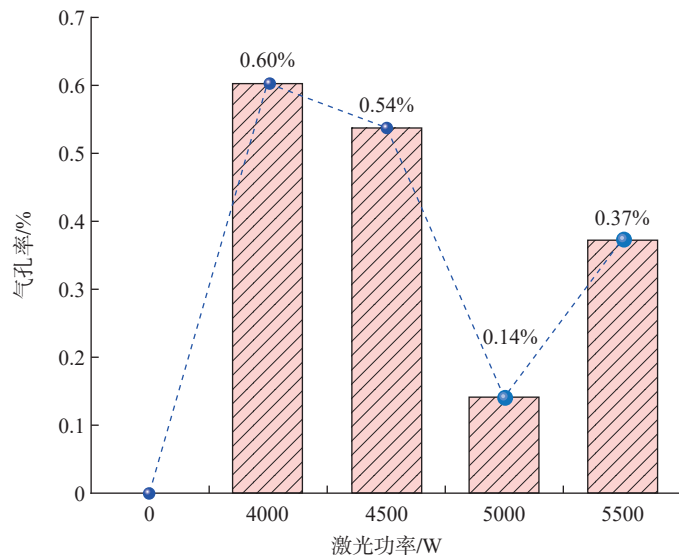


图 3 不同激光功率下的气孔率
Fig.3 Porosity under different laser powers

积都逐渐增加。这说明,激光的加入可以显著增加焊缝的熔深,改善焊缝成形,但同时不适当的激光功率也可能导致焊接过程失稳,产生气孔等缺陷。

2.2 CMT 熔滴过渡的电信号特征

图6为不同激光功率下CMT的电压和电流信号特征。图7为电弧失稳信号特征及电流失稳次数统计。纯CMT焊接时,如图6(a)所示,不同周期的电流和电压信号疏密均匀,变化范围高低一致,焊接过程非常稳定;而加入较高功率激光

后发现,液桥断裂后期为防止爆裂产生飞溅,最低电流失稳产生瞬时下降尖峰(图7(a)呈现了清晰的失稳瞬时下降尖峰特征)。随着功率增加,这种失稳瞬时最低电流尖峰逐渐增多,而电压信号逐渐变得稀疏,且峰值和基值疏密不均,尤其在激光功率4000 W和4500 W时,疏密最不均匀,熔滴过渡最不稳定,波动程度最大,这与对应参数下气孔率最大一致。由此可以看出,高功率激光的引入对CMT的熔滴过渡会产生一定的扰动,随着功率增加,电信号的波

动也呈增大趋势。

为进一步分析熔滴过渡电信号的瞬态行为,取一个周期内不同功率下的电信号变化,如图6(f)所示。依据CMT过渡特征及文献[12],熔滴过渡可以分为上升阶段、等待阶段、颈缩阶段和脱离阶段4个阶段。从图6(f)可知,激光的加入对熔滴过渡产生了显著的影响,尽管过渡周期基本不变,且不同激光功率下CMT各阶段的电流值近似相同,但在一个周期内,随激光功率增大,熔滴长大的等待时间延长且熔池短路接触时间滞后,导致熔滴脱离液桥断裂时间提前且液桥在较高电流时拉断,这加剧了局部液态金属的波动,易出现飞溅和气孔等缺陷。

由图7(a)中焊接过程失稳时的电信号特征(从图6(e)所得)可知,激光引入后,CMT熔滴过渡电流失稳发生在液桥断裂后,电弧重新形成早期。在较高电流时液桥断裂,电弧重新形成,但CMT的控制特性驱使电流继续降低,电流和电压出现错配失稳现象,电弧表现为弧长逐渐变长;当电流继续降低,电弧亮度反而变暗,直至电流上升后,电弧才又逐渐变亮。在发生失稳时,焊接过程处于短路阶段,此时颈缩阶段的时间明显减少。液桥过早断裂,对熔池的冲击较为显著。由于熔滴过渡周期基本不变,失稳后电流和电压上升阶段时间延长,熔滴长大动力增加,造成下一周期(恢复周期)的等待阶段时间缩短。因此,一次失稳会引起下一周期的波动,进而影响焊接过程的稳定性。对图6的失稳电流频次进行统计(焊接时间2 s内),结果如图7(b)所示。结果表明,随着激光功率的增加,电流失稳的次数增加,特别是在大于5000 W后,失稳次数急剧增多。这进一步说明,在激光功率5000 W时,激光-CMT复合焊接过程最稳定,而超过临界值后,电弧不稳定趋势呈指数级上升。

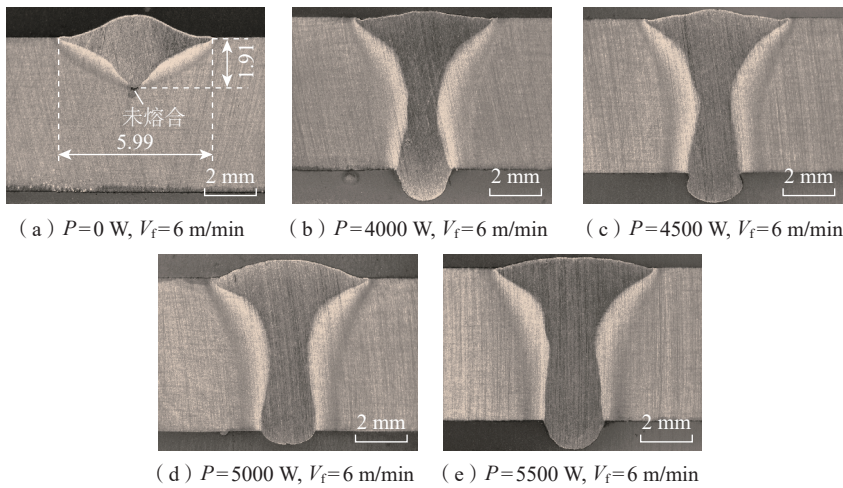


图4 不同激光功率下焊缝截面形貌

Fig.4 Cross sectional morphology of weld seam under different laser powers

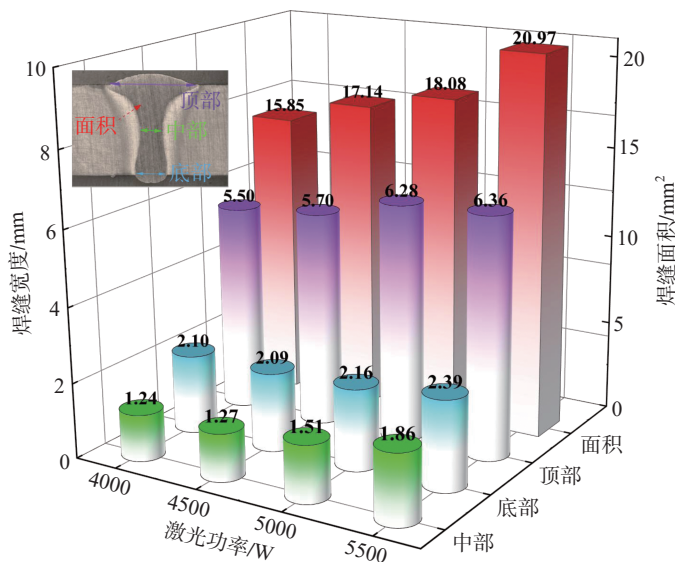


图5 不同激光功率下焊缝各位置宽度和面积

Fig.5 Width and area of each position of the weld seam under different laser powers

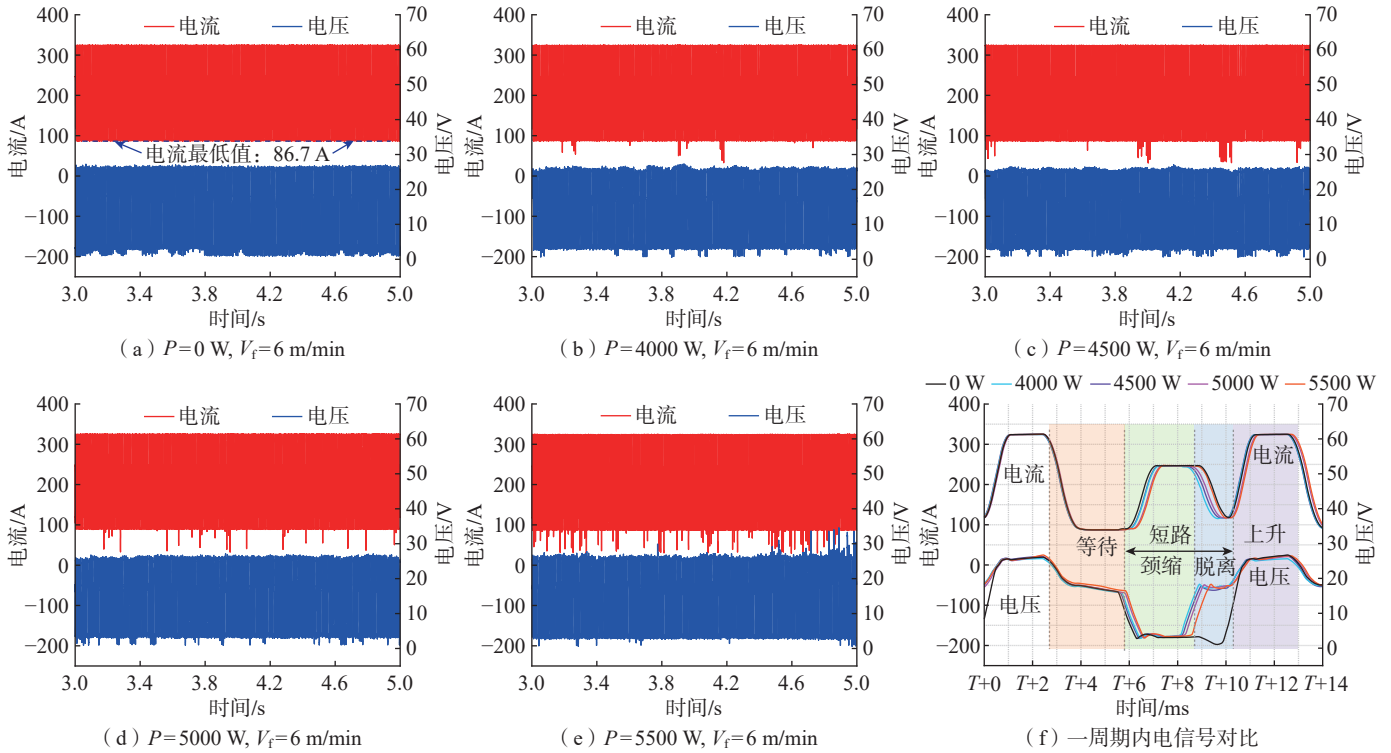


图6 不同激光功率下CMT焊接电信号特征

Fig.6 Characteristics of CMT welding electrical signals under different laser powers

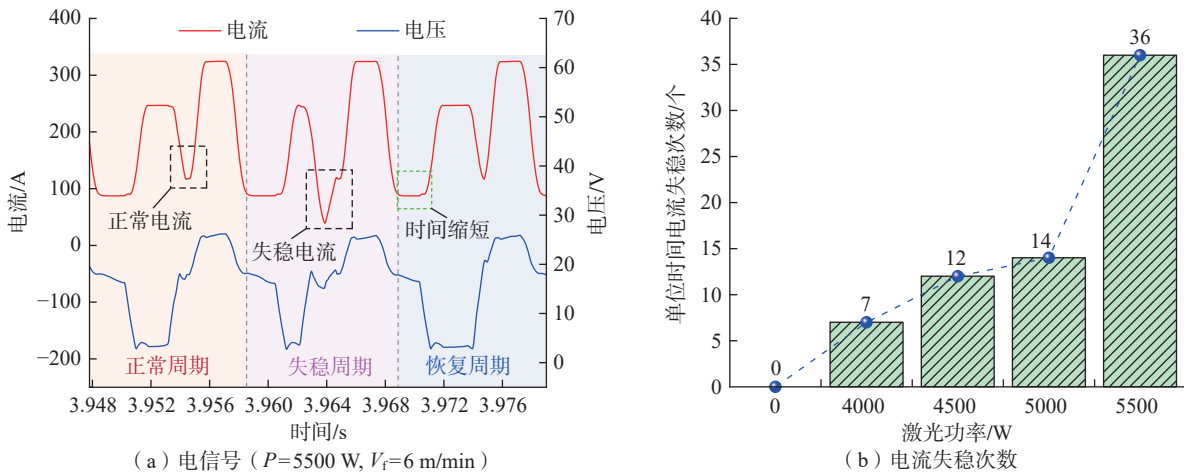


图7 电弧失稳信号特征及电流失稳次数统计

Fig.7 Characteristics of arc destabilization signals and statistics of current destabilization counts

2.3 匙孔动态演变及CMT熔滴过渡行为

采用高速摄像进一步观察不同功率激光作用下熔滴过渡各阶段的瞬态行为,以及匙孔开度的动态演变行为,如图8所示。

(1) 颈缩阶段。焊丝向前送进,熔滴开始接触熔池,同时电流适当

升高(熔滴长大和电磁力增加)以促进熔滴过渡。此时,熔滴受到熔池表面张力、熔滴重力、焊丝继续送进的推动力,以及抵抗熔滴脱离的熔滴自身表面张力共同作用。在熔池表面张力、熔滴重力及焊丝送进推动力作用下,熔滴逐渐融入液态熔池。由于焊枪后倾,焊丝前端及延伸线指向匙

孔,熔滴的重力、表面张力、焊丝推进力的水平分量推动熔池金属向匙孔流动并挤压匙孔。然而,此时焊丝并未回抽,熔滴并未脱离焊丝末端,受力处于一种相对平衡的状态。因此,在该阶段,熔滴对熔池、匙孔的冲击和挤压作用较小,匙孔在蒸气反冲压力的作用下,仍然维持相对较大

的开度,焊接过程稳定。但随着激光功率的增加,熔滴直径增加(图9),激光和熔滴的作用使得熔池体积显著增大,匙孔周围的液态金属也相应增加。

(2)脱离阶段。随着焊接电流下降,焊丝由正向送进变成反向机械回抽,液桥逐渐变细,在向上的机械回抽作用力及向下的熔滴重力、表面张力的作用下,液桥最终被拉断,使

熔滴脱离焊丝末端而进入熔池。在脱离时,由于力瞬间失衡,在熔池表面张力、熔滴重力及电磁力的作用下,熔滴对熔池形成一个较大的熔滴冲击力,尤其在激光加入后,液桥在

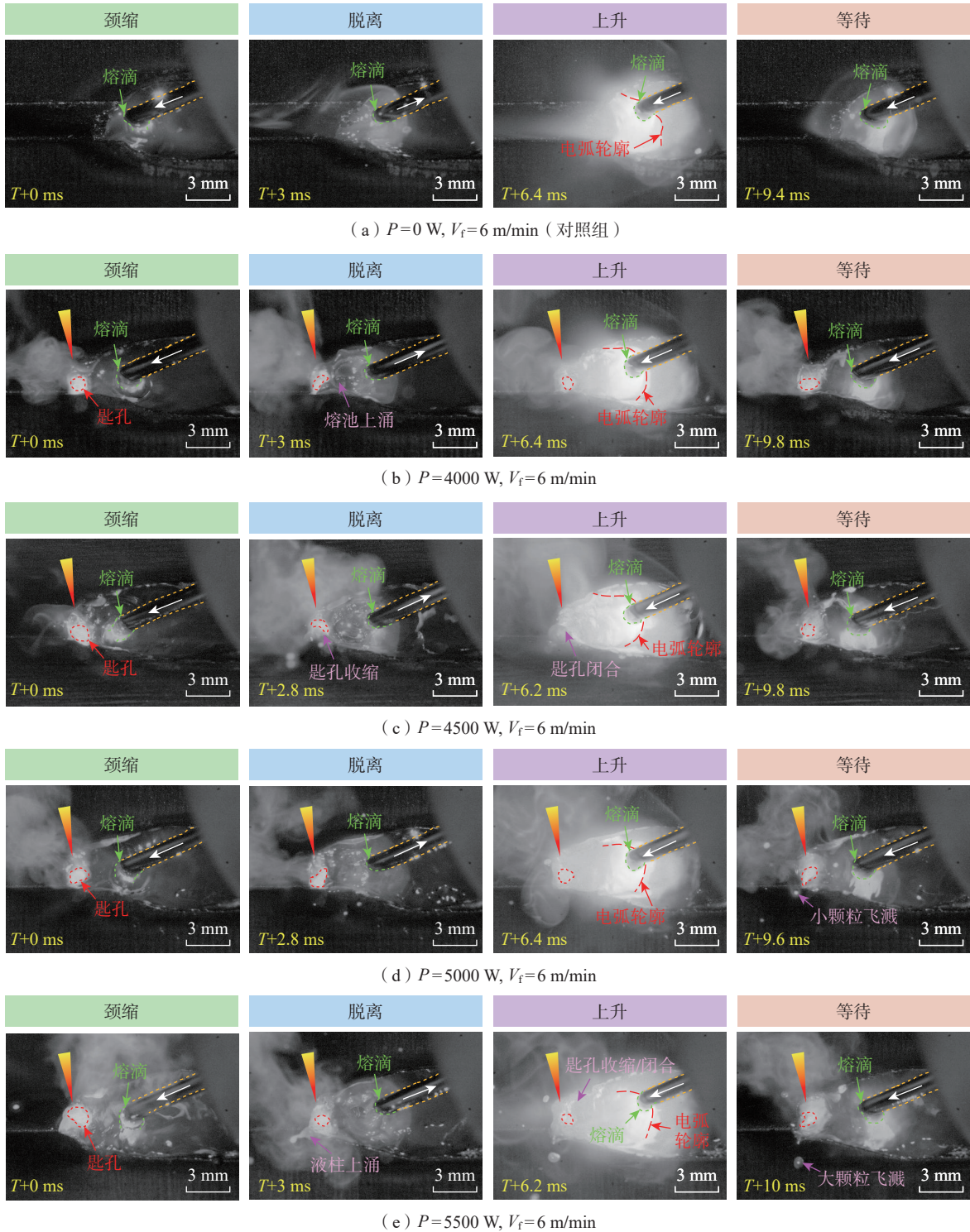


图8 不同激光功率下CMT熔滴过渡及匙孔演变

Fig.8 Droplet transfer and keyhole evolution of CMT under different laser powers

电流较高时即被机械回抽拉断。局部熔池金属以焊丝轴线为中心被迫推动熔池金属向四周(匙孔的方向)运动,熔池表面出现凹陷,匙孔受液态金属冲击而变形收缩。当激光功率为 4000 W 或 4500 W 时,熔池金属冲击匙孔后壁,易造成匙孔闭合;当激光功率为 5000 W 时(图 8(d)),匙孔虽有所变形收缩,但整体相对平稳,开口面积变化不大;当激光功率增至 5500 W 后,匙孔周围的金属在外力作用下严重上涌,导致匙孔开口变形及面积减小。

(3) 上升阶段。熔滴脱离后,电流、电压迅速升高,电弧重新形成,此时等离子体流力和电磁力均增大^[13],促进熔滴的形成并长大。随着电弧压力的升高,进一步对熔池液面形成压力,促使液态金属向匙孔方向流动,进一步挤压匙孔。随着激光功率升高,CMT 电弧的轮廓宽度逐渐减小(图 8 中红色虚线所示),表明电弧被激光压缩,这与已有的研究结果一致^[14-15]。这一阶段的匙孔在脱离阶段基础上进一步收缩,在 4500 W 时,匙孔大部分情况下完全闭合,而在 5000 W 时收缩趋势较小,在 5500 W 时,匙孔闭合趋势又略有增加。

(4) 等待阶段。熔滴继续长大,焊丝持续送进,弧长缩短,电弧压力降低,电流迅速减小,熔滴逐渐接近熔池。而此时,随着等离子体流力、电磁力和电弧压力的减弱,以及在匙孔金属蒸气的作用下,液态金属逐渐向熔池尾部流动,匙孔逐渐张开,焊接过程稳定。

从图 6 所示的熔滴过渡的电信号特征,可以非常准确地得到不同激光功率下的激光-CMT 复合焊接的熔滴过渡频率;采用 MATLAB 软件对熔池的高速摄像图像进行处理,可以得到熔滴的等效直径及焊接过程中匙孔开口的平均值统计结果,分别如图 9 和图 10 所示。可知,激光的引入改变了熔滴过渡行为,但过渡频

率基本保持在 97 Hz,熔滴等效直径则随激光功率增加从 1.04 mm 增至 1.23 mm;而随着激光功率的增大,匙孔开口面积先增大后减小,在激光功率为 5000 W 时,平均匙孔面积最大且稳定,这与 5000 W 下焊接气孔率最小相吻合。

2.4 匙孔-熔池动态行为机理

从电信号特征(图 6)和熔池高速摄像(图 8)可知,激光的加入显著改变了熔滴过渡、匙孔-熔池动态行为,其本质是驱动力发生了变化。在脱离和上升阶段,液桥断裂及电流增大,使熔池内的流动更加复杂,且更

容易出现问题。对匙孔和熔池流动行为的影响,主要发生在熔滴与液面接触至液桥断裂、熔滴完全脱离焊丝末端进入熔池的阶段。因此,本文主要分析这一阶段下匙孔-熔池的受力变化,从而揭示激光-CMT 复合作用下,匙孔-熔池流动的动态演变机理。

根据文献[16],激光-电弧复合焊时,熔池金属主要受金属蒸气喷发力 F_v 、液滴冲击力 F_l 、电弧压力 F_a 、电磁力 F_e 和马兰戈尼流 F_M 等的作用。当激光与材料相互作用时,在反冲压力的作用下材料内部产生匙孔,

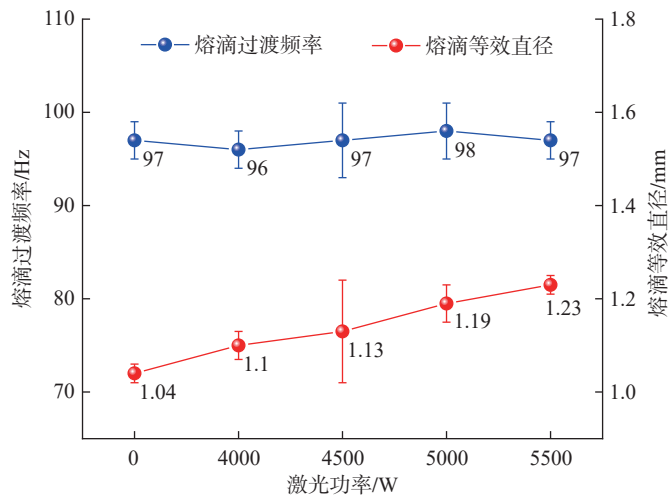


图 9 不同激光功率下激光-CMT 复合焊接的熔滴过渡频率和等效直径
Fig.9 Droplet transfer frequency and equivalent diameter of laser-CMT hybrid welding under different laser powers

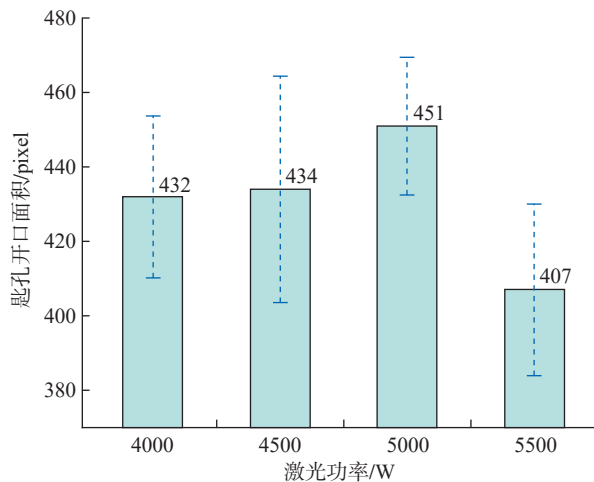


图 10 不同激光功率下激光-CMT 复合焊接的匙孔开口面积变化
Fig.10 Variation of keyhole opening area in laser-CMT hybrid welding under different laser powers

匙孔内部喷发出的金属蒸气驱动其周围的金属向外流动,起扩充和稳定匙孔的作用,其计算如式(1)所示^[17]。激光功率增加,熔化和气化的金属越多,金属蒸气向外喷发的作用力就越大,但当激光功率超过一定值时,背面过渡熔透,有相当一部分金属蒸气从匙孔背面喷出,正面的蒸气喷发力反而可能略有降低。

$$F_v = C_D A_p \left(\frac{\rho_v v_v^2}{2} \right) \quad (1)$$

式中, C_D 为匙孔金属蒸气阻力系数; A_p 为垂直于等离子流平面的投影面积; ρ_v 为等离子体密度; v_v 为金属蒸气流速。

当熔滴接触熔池后,在焊丝回抽的机械力作用下,液桥断裂,熔池表面张力(当保护气体为体积分数 80% Ar+20% CO₂ 的混合气体时,熔池表面张力温度梯度系数为正^[18],表面张力随温度的升高而增大)、熔滴重力、电磁力及由回抽引起的反作用力下,对熔池造成冲击,驱动熔池金属向匙孔流动,当液滴冲击力大于从匙孔中溢出的金属蒸气喷发力 F_v 时,匙孔将被挤压变形甚至闭合坍塌,其计算公式^[16]为

$$F_l = \frac{4}{3} \pi \rho_l g_d R_d^3 \quad (2)$$

式中, ρ_l 为液滴密度; g_d 为液滴的冲击加速度; R_d 为液滴半径。

由式(2)可知,熔滴直径 R_d 越大,冲击加速度 g_d 越大,对匙孔的冲击就越大。

液桥被机械回抽拉断后,电弧被重新引燃,随着焊接电流的升高,电弧压力随之增加;而激光功率增加,会压缩电弧,使其有效半径减小,导致电弧压力增加。电弧压力的增加迫使液态金属向匙孔方向流动,从而挤压匙孔,促使匙孔闭合,其计算公式^[16]为

$$F_a = \frac{\mu_m I^2}{8\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{r_a^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中, I 为焊接电流; μ_m 为真空磁导率; r_a 为水平方向距离电弧中心的距离; σ 为电弧有效半径。

在熔滴短路后期,焊丝回抽,在回抽的机械力作用下,液桥被拉断。当有激光加入时,液桥在较高电流时断裂(图 6 (f)),对熔池和匙孔有一定的冲击作用,在焊接方向的电磁力^[16]为

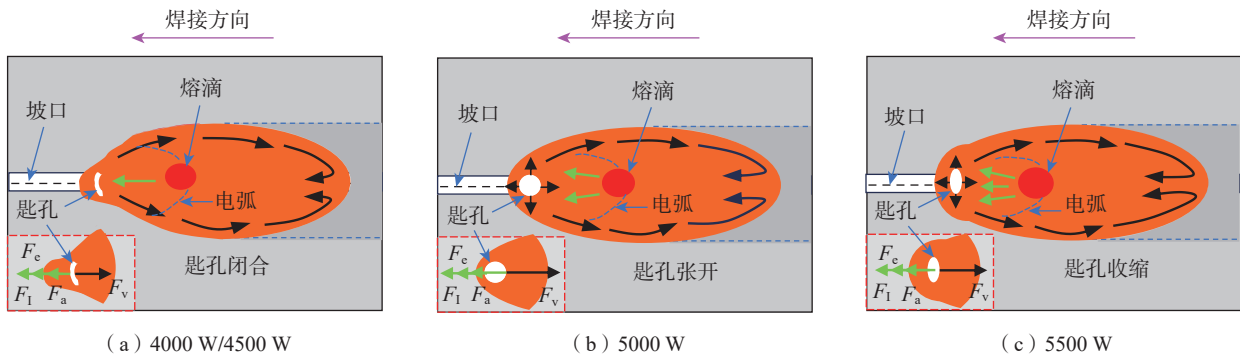
$$F_e = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 \sigma^2 r_a^2} \exp\left(-\frac{r_a^2}{2\sigma^2}\right) \times \left[1 - \exp\left(\frac{r_a^2}{2\sigma^2}\right) \right] \left(1 - \frac{z}{c_m} \right)^2 \frac{x}{r_a} \quad (4)$$

式中, c_m 为试板厚度; z 和 x 分别为沿电弧轴向的垂直距离和沿电弧径向的径向距离。

马兰戈尼流是由表面张力梯度产生,匙孔附近温度较高,表面张

力大,驱动了液态金属向熔池内部流动,其对焊缝成形有一定的作用,但对匙孔的冲击较小^[19]。

根据式(1)~(4)的不同力的作用描述,可以充分揭示激光-CMT 复合焊接不同激光功率作用下,匙孔-熔池动态行为作用机理,如图 11 所示。如图 11 (a)所示,在激光功率 4000 W/4500 W 时,由于激光功率较低,致使熔滴直径较小、熔池温度低且面积小、熔池前端尖锐。一方面,激光未能完全稳定穿透试板,造成金属蒸气喷发波动变化,匙孔开口波动程度较大;另一方面,较低的蒸气喷发力无法抵消电磁力、电弧压力和液滴冲击力对匙孔的挤压。因此,在该参数下,焊接过程波动程度较大,焊缝成形易形成凹陷及背部焊瘤等缺陷,匙孔易闭合,导致气泡无法有效溢出而易形成气孔。如图 11 (b)所示,当激光功率增加到 5000 W 时,由于激光功率较高,致使熔滴直径较大、熔池温度高且面积较大、熔池前端趋于圆滑。在此功率下,金属蒸气喷发力完全可以抵消与电磁力、电弧压力和液滴冲击力对匙孔的挤压,匙孔保持稳定,焊缝成形均匀,气泡充分溢出,气孔缺陷较少。如图 11 (c)所示,当激光功率继续增大至 5500 W 时,熔滴直径增加,熔池体积进一步增大,匙孔周围的液态金属较多,熔



注: 绿色箭头表示液滴冲击力 F_l 、电磁力 F_e 和电弧压力 F_a 驱动液态金属向匙孔流动并挤压匙孔的方向; 黑色箭头表示蒸气喷发力 F_v 和马兰戈尼流 F_m 驱动的熔池流动的方向。

图 11 不同激光功率下匙孔-熔池动态行为机理

Fig.11 Dynamic behavior mechanism of keyhole-melt pool under different laser powers

池前端尺寸进一步扩大;但过度熔透使背面匙孔加大,有相当一部分金属蒸气从反面溢出,使正面的金属蒸气喷发力可能反而略有降低。同时激光功率的增加也使液滴冲击力、电弧压力增加,熔滴和液态金属对匙孔的挤压作用更加明显。此时,正面的金属蒸气喷发力可能不足以抵消液滴冲击力、电弧压力等对匙孔的冲击和挤压,导致匙孔稳定性显著下降,进而发生收缩甚至闭合,最终可能引发气孔缺陷的产生。

3 结论

(1) 激光的引入可显著增加焊接熔深,提升焊接效率。当功率提升至 5000 W 时,熔池稳定性增强,焊缝成形饱满无缺陷,气孔率降至 0.14%。功率进一步提高至 5500 W 后,匙孔振荡加剧引发熔池飞溅,气孔率随之升高。

(2) 激光的引入显著改变了 CMT 熔滴过渡行为。在本研究参数下,随着激光功率的增大,熔滴过渡频率基本保持在 97 Hz,但熔滴长大时间延长、直径增大。同时,熔滴短路与脱离阶段缩短,并在较高电流下液桥被拉断,从而增强了熔滴冲击力,干扰了匙孔的稳定性。

(3) 激光功率对匙孔稳定性有显著影响。高速摄像观察表明,熔滴脱离进入熔池后会对匙孔产生挤压与冲击;随后,上升阶段的电弧压力进一步推动熔池金属向匙孔方向流动,二者共同作用持续冲击并挤压匙孔。这一动态过程破坏了焊接稳定性,导致成形质量下降和气孔率增加等缺陷。

(4) 揭示了激光-CMT 复合焊接中匙孔与熔池的动态演变机理。熔滴脱离及上升阶段产生的冲击力与电弧压力共同挤压匙孔,是导致匙孔失稳的主因。当金属蒸气喷发力足以抵消上述作用力时,匙孔可维持稳定开度,进而提升焊接稳定性、改

善成形并减少气孔。在 5000 W 激光功率下,匙孔充分穿透,喷发力与冲击力、电弧压力达到动态平衡,此时成形最佳、气孔率最低;功率偏离该值,则匙孔稳定性下降,缺陷增多。

参考文献

[1] LI J H, ZHAN D P, JIANG Z H, et al. Progress on improving strength-toughness of ultra-high strength martensitic steels for aerospace applications: A review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 172–190.

[2] NING J, ZHANG L J, YANG J N, et al. Characteristics of multi-pass narrow-gap laser welding of D406A ultra-high strength steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 270: 168–181.

[3] ZHANG S F, ZHU Y H, ZHANG F X, et al. Novel flat-top laser-aided cold metal transfer additive manufacturing for titanium alloy: Arc characteristics, microstructure, and tensile properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 327: 118379.

[4] LI G, ZHANG C, GAO M, et al. Role of arc mode in laser-metal active gas arc hybrid welding of mild steel[J]. *Materials & Design*, 2014, 61: 239–250.

[5] CHEN Y X, YANG Z B, SHI C Y, et al. Laser-CMT hybrid welding-brazing of Al/steel butt joint: Weld formation, intermetallic compounds, and mechanical properties[J]. *Materials*, 2019, 12(22): 3651.

[6] 马煜斌, 梁瑛, 慈鹏宇, 等. 铝合金激光-CMT复合焊接熔滴特性研究[J]. *上海工程技术大学学报*, 2023, 37(4): 368–371.

MA Yubin, LIANG Ying, CI Pengyu, et al. Study on droplet characteristics of laser-CMT hybrid welding of aluminum alloy[J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2023, 37(4): 368–371.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 李靖逸. D406A超高强度钢激光-CMT复合焊接工艺研究[D]. 西安: 航天动力技术研究院, 2023.

LI Jingyi. Study on laser-CMT hybrid welding technology of D406A ultra-high strength steel[D]. Xi'an: Aerospace Solid Propulsion Technology Institute, 2023.

[10] ZHANG Y H, CHEN C, WANG C J, et al. Effect of shielding gas on keyhole stability and pores in laser-CMT hybrid welding of ultra-high strength steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 132: 948–962.

[11] 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.

[12] CHEN M A, ZHANG D, WU C S. Current waveform effects on CMT welding of mild steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 243: 395–404.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 张臣, 胡佩佩. 电弧状态对铝合金激光-电弧复合焊接工艺过程稳定性的影响[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(13): 53–59.

ZHANG Chen, HU Peipei. Effect of arc on process stability of laser-arc hybrid welding of aluminum alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(13): 53–59.

[16] LIAO W, LIU Y X, MA M M, et al. Dynamic behaviors and homogenization mechanism of molten pool in laser-arc hybrid welding with beam oscillation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 178: 111260.

[17] 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.

[18] ZHANG S W, SUN J H, ZHU M H, et al. Effects of shielding gases on process stability of 10CrNi₃MoV steel in hybrid laser-arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 270: 37–46.

[19] LEE J Y, KO S H, FARSON D F, et al. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(13): 1570.

Process Stability and Formation Quality Analysis of Laser–CMT Hybrid Welding for Aerospace Ultra-High Strength Steel

ZHANG Yuhui¹, WANG Changjian², XIONG Ran², ZHANG Ke¹

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710038, China)

[ABSTRACT] Laser–CMT (cold metal transfer) hybrid welding can increase penetration depth, enhance efficiency, and improve weld formation, yet the laser power is crucial for weld formation and process stability. In this study, high-speed imaging and electrical signal method were employed to investigate the weld formation and process stability during laser–CMT hybrid welding of a 6 mm medium-thick aerospace ultra-high-strength steel plate. The results show that the addition of laser shortens the droplet short-circuiting process, prolongs the boost and waiting times, and the droplet diameter slightly increases with laser power, yet the transition frequency remains essentially unchanged at 97 Hz. As laser power increases, the frequency of current instability increases, affecting the stability of the welding process. Analysis indicates that during the detachment and boost phases, the impact force of the droplet and the arc pressure impact and squeeze the keyhole, which is the main cause of keyhole instability. When the laser power is at 5000 W, the keyhole is fully penetrated, and the metal vapor force maintaining keyhole stability maintains a dynamic balance with the droplet impact force and arc pressure, resulting in the best formation with a porosity rate only 0.14%. However, when the power is increased or decreased, the formation deteriorates and porosity defects increase.

Keywords: Ultra-high strength steel; Laser–CMT hybrid welding; Droplet transfer; Process stability; Porosity

(责编 阳光)