

脉冲激光与脉冲 GMAW 复合焊接的动态交互行为

张旺^{1*}, 孟威², 郭彦兵¹, 陆斌锋¹, 华学明³, 李芳³

¹上海电机学院材料学院, 上海 201306;

²安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

³上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘要 将连续激光、脉冲激光分别与脉冲 GMAW(熔化极气体保护焊)进行复合,研究了不同复合焊接模式下激光离子体与电弧等离子体的动态交互行为。研究表明:与连续激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式相比,脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式可以在激光平均功率较小的情况下获得更大的熔深;在复合过程中,当激光脉冲峰值出现的时刻错开电流峰值的上升期时,这一瞬态时刻等离子体的急剧膨胀现象可以得到抑制,激光能量的传输可以得到改善。

关键词 激光技术; 激光电弧复合焊接; 焊接等离子体; 脉冲激光; 熔滴过渡; 脉冲 GMAW

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402002

Dynamic Interaction Behavior of Pulse GMAW + Pulse Laser Hybrid Welding

Zhang Wang^{1*}, Meng Wei², Guo Yanbing¹, Lu Bin Feng¹, Hua Xueming³, Li Fang³

¹College of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

²School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China;

³Shanghai Key Laboratory of Material Laser Processing and Modification (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China

Abstract Continue laser or pulse laser is combined with the pulse gas metal arc welding (GMAW) to study the dynamic interaction behavior of laser plasma and arc plasma at different hybrid welding modes. The study results show that the pulse laser + pulse GMAW hybrid welding mode can achieve a higher penetration than continuum laser + pulse GMAW hybrid welding under a low average power condition. It is found that if the peak time of the laser pulse has a phase shift with the arc current pulse rise period, the phenomenon of rapid expansion of the plasma at this transient moment can be suppressed, thus improve the transmission of laser energy.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; welding plasma; pulse laser; metal transfer; pulse gas metal arc welding

OCIS codes 140.3470; 140.3390; 160.3900

1 引言

材料连接制造方法——激光+脉冲熔化极气体保护焊(GMAW)复合焊接可以获得比激光焊接更大的熔宽,以及比脉冲 GMAW 更大的熔深,已成为航空、造船、能源制造等行业的关键技术之一。目前,工程中常规的激光+脉冲 GMAW 复合焊接通常都采用连续激光,考虑到激光焊接本身并不是一种经济的焊接技术^[1]以及焊接过程热输入量的控

制,除了采用连续激光对工件进行焊接外,脉冲激光越来越多地被运用到现代焊接过程中^[2-6]。Assuncao 等^[7]通过比较相同条件(相同的功率密度、作用时间及光束直径)下连续激光与脉冲激光焊接的结果发现:脉冲焊接可以获得更大的熔深,在相对比较低平均输出功率下可以获得更大的熔深。所以,本文尝试将脉冲激光与脉冲 GMAW 进行复合,研究其复合过程中的动态耦合行为。

关于耦合行为,国内外学者通过多种测量手段

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-12-11; 录用日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51505271)、上海工程技术研究中心(18DZ2253400)

* E-mail: zhangwang@shdju.edu.cn

对激光+GMAW 复合焊接的等离子耦合机理及熔滴的过渡行为进行了研究^[8-17],但是这一过程涉及传质与传热,并且发生在一个很小的微区内,且该微区内多相(包括固体、等离子体、液体及金属蒸气)共存。微区内的各种分子、原子、电子、离子等微观粒子之间存在各种耦合作用,各种微观粒子的数量和空间运动轨迹又随着外加电弧的峰值电流、基值电流、峰值时间及脉冲周期等过程参数的变化而变化。一方面,这种变化会影响焊接过程的稳定性;另一方面,这些物理现象的动态变化又会直接影响激光能量的传输机制、焊接熔深及焊缝形貌,所以需要针对这些过程的行为进行进一步的细致研究。

本文将连续激光、脉冲激光分别与脉冲GMAW(电弧引导)进行复合,以研究不同复合模式和脉冲模式、不同相位情况下激光等离子体与电弧等离子体的交互耦合行为,期望能获取二者的协同控制模型,为设计制造用于复合焊接的专用电源及优化复合模式提供理论支撑及指导。

2 实验方法与设备

本研究所采用的实验装置如图 1 所示,主要包括一台 10 kW 的大功率光纤激光发生器(IPG)、一台脉冲 GMAW 焊机(TPS500, Fronius, 奥地利)、一台添加了窄带滤波片的高速摄影机、一台电信号同步采集及触发装置。

在焊接过程中,激光与电弧的热源间距为 2 mm,送丝速率为 4 m/min。选用热轧态 E36 船用钢作为焊接板材,板厚为 8 mm,焊接前对工件进行抛光处理,然后用丙酮清理其表面的油污和杂质。选用的焊丝型号为 CHW-50C6。采用连续激光+脉冲GMAW以及脉冲激光+GMAW两种模式进行

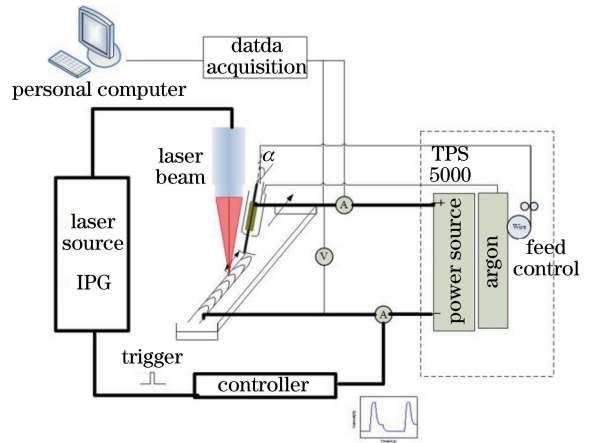


图 1 脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接实验平台示意图
Fig. 1 Schematic of experimental set-up for pulse laser+pulsed GMAW hybrid welding

焊接。采用恒定功率(6 kW)输出连续激光;脉冲激光的主要参数如下:峰值输出功率为 6 kW,基值输出功率为 1.5 kW,脉冲宽度为 1 ms,频率为 500 Hz,脉冲的占空比为 50%,脉冲激光的平均输出功率为 3.75 kW。

为了对复合焊接过程中等离子体的动态行为进行监控,采用一部彩色(Fastcam-Super10KC, Photron, 日本)高速摄影机进行拍摄,在镜头前添加一片 ND8 和一片 ND4 减光片,用以抑制等离子弧光的强度,得到清晰的等离子形态轮廓。

此外,为了得到焊接过程熔滴的过渡行为,采用一种基于偏振光原理的高速投影系统^[18]拍摄熔滴的过渡形态,该系统的结构原理如图 2 所示。该系统包括:650 nm 红光激光源、扩束镜、组合偏振镜、滤波片(650 nm±1.5 nm)及高速摄影机(Fastcam-Super10KC, Photron, 日本)。系统在外触发模式下工作,采样频率为 3000 frame/s。

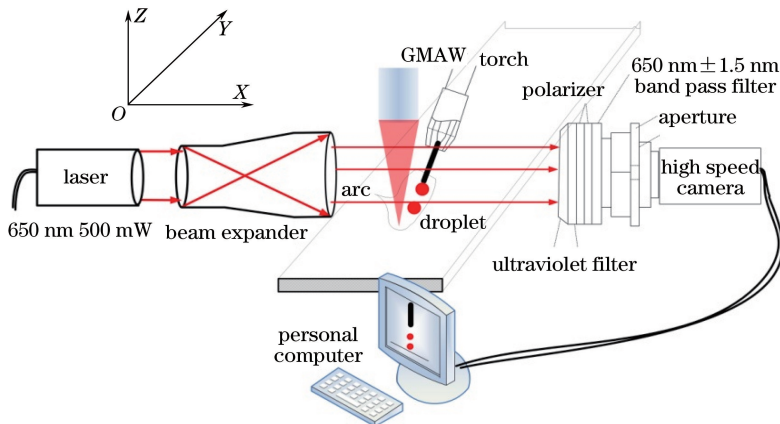


图 2 熔滴拍摄光学系统原理图

Fig. 2 Schematic of optical system for metal transfer

采用霍尔电流传感器 (CS600E2/4V, Chieful, 中国)测量电流,采用霍尔电压传感器 (VSM025A, Chieful, 中国)测量电压,传感器采集到的信号通过多路模拟数字输入输出采集板卡 (6023E, NI, 美国) 进行调理,采样频率为 20 kHz。采集得到的电信号通过 LabVIEW 软件在计算机上记录并显示;为了实现高速摄影与电信号采集的同步触发,实验过程中采用 Real-System-Integration(RTSI)总线技术。

3 实验结果

3.1 复合模式对等离子体形态的影响

图 3 给出了脉冲激光与脉冲 GMAW 的波形输出匹配图,可见:脉冲 GMAW 整个过程被分为峰值

阶段、熔滴脱落阶段和基值阶段。依据高速摄影的帧频以及连续激光与脉冲 GMAW 的动态变化规律可知,实际过程中的电流脉冲与激光脉冲存在相位差 φ , 二者的相位差分为两种情况:1) $-1 \text{ ms} < \varphi < 0 \text{ ms}$, 即电流峰值爬升时期对应于激光脉冲的峰值时刻; 2) $0 \text{ ms} < \varphi < 1 \text{ ms}$, 即电流峰值对应于激光脉冲峰值。

图 4 给出了不同复合模式下的等离子体动态结果图,图中所示的是从电流、电压波形的脉冲上升时刻每隔 1 ms 拍摄的等离子形态图,其中等离子形态图依据时间顺序共有 8 幅,照片 1 对应于峰值电流的上升阶段,2 对应于峰值阶段,3 对应于峰值电流的下降阶段,4 对应于过渡电流状态,5~8 对应于基值电流阶段。

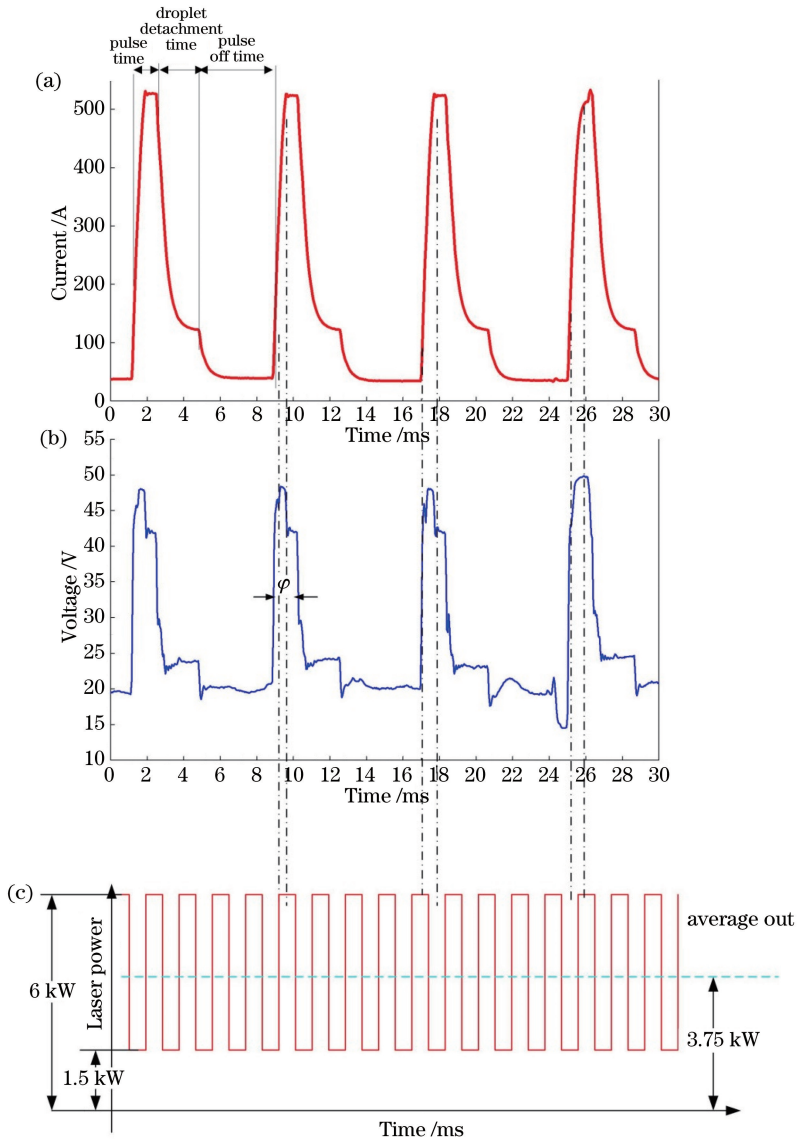


图 3 脉冲 GMAW 与脉冲激光的波形输出匹配图。(a)脉冲 GMAW 电流波形;(b)脉冲 GMAW 电压波形;(c)脉冲激光输出波形
Fig. 3 Schematics of output waveforms matching for pulse GMAW and pulse laser. (a) Waveform of current for pulse GMAW; (b) waveform of voltage for pulse GMAW; (c) output waveform of pulse laser

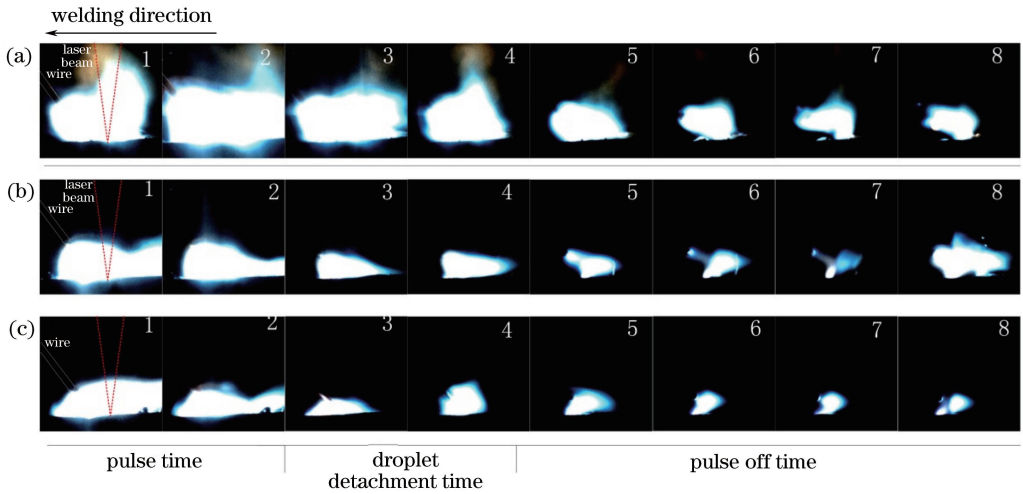


图 4 不同复合焊接模式下的离子体形态。(a) 6 kW 连续激光+脉冲 GMAW; (b) 500 Hz 脉冲激光+脉冲 GMAW, $-1\text{ ms} < \varphi < 0\text{ ms}$; (c) 500 Hz 脉冲激光+脉冲 GMAW, $0\text{ ms} < \varphi < 1\text{ ms}$

Fig. 4 Plasma forms at different hybrid welding modes. (a) 6 kW continue laser+pulse GMAW; (b) 500 Hz pulse laser+pulse GMAW, $-1\text{ ms} < \varphi < 0\text{ ms}$; (c) 500 Hz pulse laser+pulse GMAW, $0\text{ ms} < \varphi < 1\text{ ms}$

从上述结果可以看出,在脉冲电流输出的不同时刻,等离子体的形态存在明显差异,下面将就这一现象分别进行陈述。

当电流处于峰值上升阶段时,激光等离子体出现明显的膨胀,其高度升高。虽然焊机输出的电流并未处于最高峰,但整个激光等离子体的高度处于整个周期的最高处,如图 4 中的照片 1 所示。

在脉冲上升至峰值时刻,部分电弧形态开始呈现稳定的“钟罩形”。峰值阶段的电流密度最大,所以“钟罩形”面积达到最大,其宽度已至图边沿,但在这一状态下的激光等离子体的高度却处于最低,同时激光等离子体向远离焊丝的一端扩展,如图 4 中的照片 2 所示。

从峰值阶段开始向过渡阶段转化的等离子体形态图像如图 4 中的照片 3 所示。由于电流开始减小,部分电弧出现收缩,但电弧导电通道依然建立在焊丝与工件之间,部分激光等离子体依然比较低。

在电流进入过渡状态的时刻,熔滴从焊丝端部脱落,电弧等离子体完全偏转向激光等离子体,电弧相对比较明亮,此时激光等离子体的高度又重新升高,同时存在偏向电弧等离子体的倾向,如图 4 中的照片 3~4 所示。

基值阶段的电弧形态如图 4 中的照片 5~8 所示。由于使用了减光片,所以在焊丝端部几乎观察不到电弧亮区,激光等离子体相对比较稳定,能够从激光等离子体左侧看出焊丝端部和激光等离子体之间存在导电通道。

与采用连续激光相比,采用脉冲激光后,等离子体的整体区域明显变小,激光等离子体的膨胀现象减弱。根据激光脉冲与电弧脉冲的相位差异性,整个焊接过程又分为两种不同的趋势:当 $-1\text{ ms} < \varphi < 0\text{ ms}$,激光等离子体出现明显的膨胀,其高度升高;当 $0\text{ ms} < \varphi < 1\text{ ms}$ 时,激光等离子体的高度基本与电弧等离子体齐平,膨胀现象减弱。如果激光脉冲的峰值错开电流峰值的上升时期,就可以抑制这一瞬态时刻等离子体的急剧膨胀。

3.2 不同复合焊接模式下的熔滴过渡行为

图 5 和图 6 给出了两种复合焊接模式下的熔滴过渡形态图。可见:二者的弧长变化不是很明显;在连续激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式下,熔滴为一脉一滴过渡,而当采用脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式时,整体上依然为一脉一滴的趋势(如图 5 所示),但是后者相较前者更容易过渡(如图 5 中的框图所示)。此外,在某些情况下,采用脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式时,会出现少量的一脉两滴的过渡情况(如图 6 所示)。

3.3 复合焊接模式对焊缝熔深和截面形貌的影响

图 7 给出了不同焊接模式下的焊缝截面形貌。可见:脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式下的焊缝熔宽略小于连续激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式下的焊缝熔宽,但差别并不明显;虽然脉冲激光的平均功率只有 3.75 kW,但完全可以实现 8 mm 板的穿透焊接,脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式下的焊缝熔深要比 6 kW 连续激光+脉冲 GMAW 复合焊接模式下的大 2.5 mm 左右。

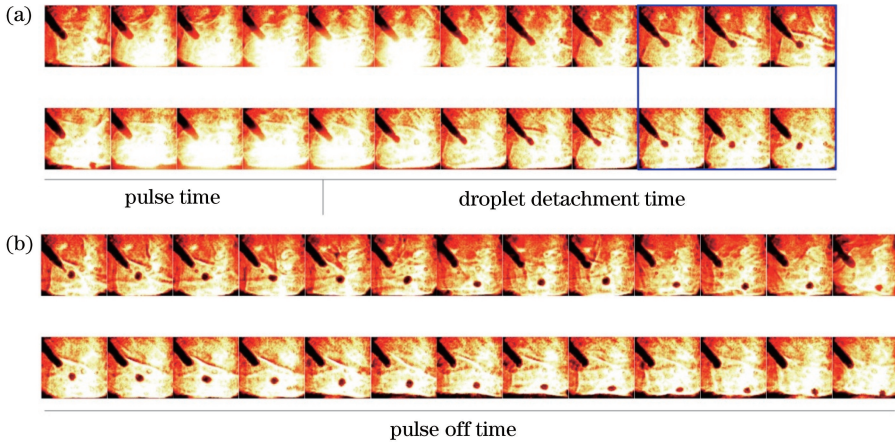


图 5 不同复合焊接模式下的熔滴过渡形态。(a) 6 kW 连续激光+脉冲 GMAW; (b) 500 Hz 脉冲激光+脉冲 GMAW
Fig. 5 Photographs of droplet transfer at different hybrid welding modes. (a) 6 kW continue laser+ pulse GMAW; (b) 500 Hz pulse laser+ pulse GMAW

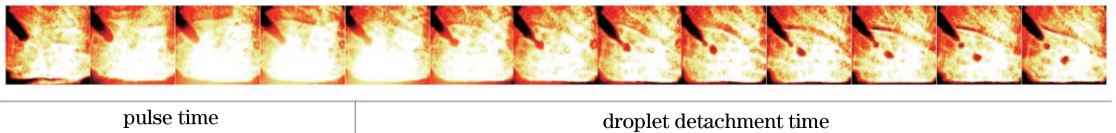


图 6 脉冲激光+脉冲 GMAW 复合焊接过程中一脉两滴的过渡形态

Fig. 6 One plus two droplet transfer phenomenon in case of pulse laser+ pulse GMAW hybrid welding

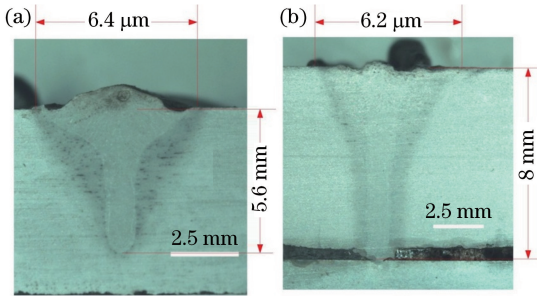


图 7 不同复合焊接模式下的焊缝截面图。(a) 连续激光+脉冲 GMAW; (b) 脉冲激光+脉冲 GMAW

Fig. 7 Cross-section of weld seam obtained at different hybrid welding modes. (a) Continue laser + pulse GMAW; (b) pulse laser+ pulse GMAW

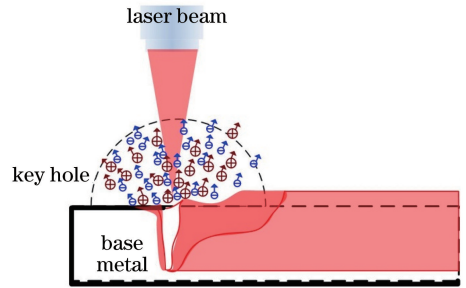


图 8 激光作用于工件时粒子的初始运动状态
Fig. 8 Initial diffusion state of particles when the laser acts on workpiece

4 分 析

4.1 等离子体的动态差异分析

等离子体的动态行为依赖于等离子内部粒子的电离及扩散程度,而粒子的扩散又与粒子的受力相关。

对于单一的激光焊接,如图 8 所示,当进行激光深熔焊时,高温下等离子体内的粒子(电子、离子及原子)处于高速无序的运动状态。由于高速运动,部分离子会飞出匙孔口,形成激光等离子体。

激光在等离子体中传播时,等离子体会吸收一

部分激光能量,使得等离子体的密度和体积增大,从而导致激光的传输效率降低,工件吸收的激光能量下降,最终,匙孔产生的金属蒸气量变少,匙孔喷射的等离子体量减少。这时,激光在等离子体传播过程中的损耗减少,工件对激光的吸收率上升,匙孔内重新喷出大量的金属蒸气,等离子体强度再一次逐渐增大,对入射激光产生屏蔽作用。因此,在没有外加电弧的干扰下,等离子体对激光能量的吸收呈周期性变化,等离子体的形态在宏观上也呈周期性变化。

在激光+脉冲 GMAW 复合焊接过程中,焊接电源输出的动态时变电压在焊丝端部与工件之间形成了一个时变的外加电场与磁场。在外加电场力和

磁场力的作用下,激光等离子体内部粒子运动的驱动力发生变化,导致粒子的运动速度与轨迹发生变化,原有的平衡态被打破。粒子驱动力的大小又与电流的大小相关,所以形成了图 5 所示的不同时刻激光等离子体形态的差异。

由于电流从焊丝端部流向工件,所以在工件上方存在从焊丝端部指向工件的电场强度。同时,根据右手法则可知会产生如图 9 所示的电磁场。等离子体中被电离的正离子将受到图示的洛伦兹力 f_B 以及指向工件的电场力 f_E ,等离子体中电子的受力方向与正离子的受力方向相反。

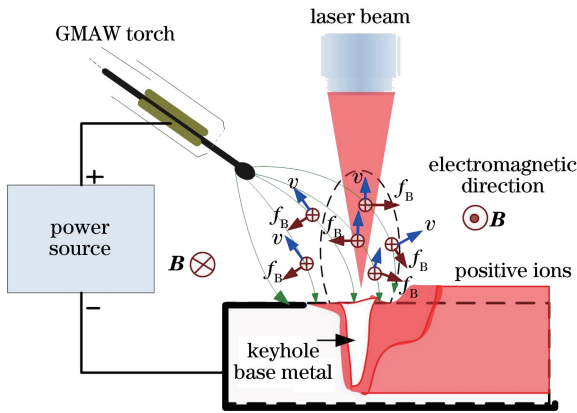


图 9 电源输出产生的电磁场方向及正离子所受电磁力方向示意图

Fig. 9 Schematic of electromagnetic field generated by the power output and the direction of the electromagnetic force of positive ions

电荷总的受力为

$$F = f_E + f_B = q(E + v \times B) \quad (1)$$

式中: q 为电荷数; v 为离子的速率; B 为磁场强度的大小; E 为电场强度的大小。

在电磁力的作用下,电离的粒子将会产生加速度,会对原粒子的自由运动产生一个速度增量 Δv ^[19]:

$$\Delta v = \int_0^{t_i} \frac{F}{m} dt = \frac{q}{m} \int_0^{t_i} (E + v \times B) dt \quad (2)$$

式中: m 为被电离的粒子的质量; t_i 为成功连续碰撞的时间间隔; t 为时间。由上面的分析可知,在外加合适的电磁场力的作用下,匙孔上方被电离的粒子会被推离匙孔。

在脉冲峰值电流的上升时刻,电流逐渐增大,但电磁力和电场力还尚未足够大,此时焊丝端部的金属熔化,部分气化金属进入等离子体,等离子体的粒子数密度急剧升高,在逆韧致吸收作用下,等离子体吸

收激光能量的能力增大,等离子体吸收大量激光能量后加剧了金属蒸气的进一步电离及运动,导致激光等离子体发生急剧膨胀,激光等离子体的高度在脉冲周期内最高,如图 4 的照片 1 所示。

在峰值时刻,电流将增加至最大,同时电场力和电磁力也将增加至最大,等离子体中电离的粒子的运动方向发生变化,正离子由于受到阴极的吸引而聚向匙孔表面,同时在电磁力的作用下推离电弧。由于匙孔喷射的正离子的质量远大于电子的质量,所以在相同的电磁力作用下,正离子的运动速率远小于电子。因此,电磁力并不能有效降低粒子的数密度。与此相反,匙孔喷射的电子会受到焊丝端部阳极的吸引和电磁力的作用,在这种情况下,电子更容易脱离匙孔进入电弧,受电弧的影响加剧,导致这一时刻等离子体的宽度在一个脉冲周期内达到最大,如图 4 的照片 2 所示。

采用脉冲激光后,在脉冲上升时期,焊丝端部的金属蒸气急剧扩散到激光作用区域,但激光的输出为脉冲输出模式,激光所受的逆韧致吸收作用减弱,等离子体吸收的激光能量不及连续激光,所以在整个周期内电离及运动减弱。高速摄影的结果整体上表现为等离子体的区域明显变小,激光等离子体的膨胀现象减弱,扩散范围明显收缩。

进一步看脉冲激光与脉冲 GMAW 的相位关系,在复合过程中,如果脉冲激光的峰值错开电流峰值的上升期,此时金属蒸气虽然急剧扩散,但此时的激光能量最小,所以这一时刻金属蒸气与激光耦合的程度较弱,可以抑制这一瞬态时刻等离子体的急剧膨胀。

4.2 熔滴过渡行为的差异性分析

复合焊接过程中熔滴的受力如图 10 所示,主要包括重力 F_g 、表面张力 F_γ 、等离子流力 F_d 、动量力 F_m 、电磁收缩力 F_{em} ,以及来自匙孔内金属蒸气的反作用力 F_{RL} 。根据 Kim 等^[20]的计算结果可知,对于脉冲 GMAW 焊接,其峰值电流约为 500 A,在 0~500 mA 的电流范围内,电磁力要比等离子流力及重力高出两个数量级以上,所以电磁力是决定熔滴能否从焊丝端部脱落的主要作用力。故而,在相同的激光功率及焊接速率下,在分析熔滴受力时,需要优先分析电磁力的变化。

等离子体的形貌反映了电流的流向。在激光复合焊接过程中,熔滴内的电流会出现流向匙孔的现象。当采用连续大功率激光时,电弧等离子体偏向激光匙孔区域的现象更加明显,此时在熔滴下部出

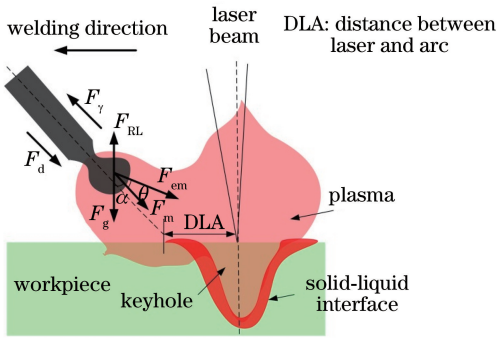


图 10 复合焊接过程熔滴的受力示意图

Fig. 10 Schematic of forces affecting droplet in hybrid welding

现的电磁力的向上和向内的分量较大,促使焊丝端部的金属粘附在焊丝端部,阻碍熔滴的过渡。当采用脉冲激光时,电弧等离子体偏向激光匙孔区域的现象减弱,此时在熔滴下部出现的电磁力的向上和向内的分量变小,阻碍熔滴过渡的力变小,从而会出现少量的一脉两滴的过渡情况。

4.3 激光能量传输的差异性分析

Beer-Lambert 吸收定律^[21]为

$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z), \quad (3)$$

$$A = \frac{P(z)}{P_0} \times 100\% = \exp(-\alpha z) \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $P(z)$ 为激光功率在高度为 z (m)时的传输功率; P_0 为激光的初始功率; α 为吸收系数,单位为 m^{-1} 。

激光传输的损耗主要由逆韧致吸收产生,而逆韧致辐射系数 α_{IB} 又是电子数密度、粒子数密度、温度以及波长的函数:

$$\alpha_{IB} = \sigma_{IB} N_e = \frac{4}{3} \left(\frac{2\pi}{3kT_e} \right)^{1/2} \left(\frac{N_e N_i Z^2 e^6}{hcm_e^{2/3} f^3} \right) \left[1 - \exp\left(\frac{-hf}{kT_e} \right) \right]. \quad (5)$$

式中: σ_{IB} 为逆韧致辐射横截面; N_e 和 N_i 分别为电子和粒子的数密度; f 为激光频率; m_e 为电子的密度; e 为电荷常数; Z 为离子电荷; h 、 k 分别为 Planck 常量和 Boltzmann 常数。

由能量吸收定律可知,电弧等离子体对激光束会产生吸收、折射和散射作用,电弧等离子体的存在也会导致激光穿过等离子体时的逆韧致吸收和光致吸收增强,降低工件对激光能量的吸收,等离子体内的粒子数量增大和等离子体高度增加都会减弱工件对激光能量的吸收。从高速摄影的结果看,采用脉冲激光后,等离子体的高度明显下降,虽然此时激光的平均功率有所下降,但是此时的能量吸收率明显增

加,所以脉冲激光在平均功率较小的情况下实现了更大的熔深。

5 结 论

本课题组提出了脉冲 GMAW 与脉冲激光波形的协同控制技术,通过将脉冲激光与脉冲 GMAW 焊接过程进行复合,研究不同复合焊接模式下激光等离子体与电弧等离子体的交互耦合行为,通过减小激光传输通道中粒子数密度的方法实现了激光能量的最大利用,在相同的平均激光输出功率下和能够获得稳定过渡的模式下建立了实现最大焊接熔深的控制措施与焊接方法,找到了一种在最优熔滴控制模式下降低电弧等离子体能量吸收的稳控方法。

本研究从等离子体内部粒子受热电离、粒子数密度变化和电弧为粒子提供的电磁力、电场力方面出发,诠释了等离子体形态变化的规律,给出了不同相位下电弧稳定性差异的原因以及稳定的协同控制策略。

通过研究相控式脉冲激光与脉冲 GMAW 复合提高焊缝熔深和焊缝形貌变化的机制,可以建立等效激光功率输出下获得更大熔深的控制方法。本研究对于设计制造适用于复合焊接的专用装备与技术具有理论与指导意义。

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] Li Y, Hu S S, Shen J Q. The effect of peak power and pulse duration for dissimilar welding of brass to stainless steel [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(8): 922-927.
- [3] Vegelj D, Zajec B, Gregorčič P, et al. Adaptive pulsed-laser welding of electrical laminations [J]. Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering, 2014, 60(2): 106-114
- [4] Li H Y, Tan C W, Zhang Q, et al. Effect of heat source order on coupling mechanism and mechanical properties of joints in laser-arc hybrid welding of HG785D high-strength steels [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502006.
李昊岳, 檀财旺, 张强, 等. 热源顺序对 HG785D 高强钢激光-电弧复合焊耦合机理与接头性能的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502006.
- [5] Liu J, Li Z, Shi Y, et al. Effect of laser-arc distance on surface flow of laser-GMAW hybrid welding molten pool [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45

- (10): 1002004.
- 刘佳, 李忠, 石岩, 等. 光丝距对激光-电弧复合焊接熔池表面流动的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1002004.
- [6] Lei Z L, Li B W, Zhu P G, *et al.* Effect of wavelength on Droplet transition behaviors in laser-CMT hybrid welding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1002006.
- 雷正龙, 黎炳蔚, 朱平国, 等. 波长对激光-CMT复合焊熔滴过渡行为的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1002006.
- [7] Assuncao E, Williams S. Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(6): 674-680.
- [8] Wang J, Wang C M, Meng X X, *et al.* Interaction between laser-induced plasma/vapor and arc plasma during fiber laser-MIG hybrid welding[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(6): 1529-1533.
- [9] Stute U, Kling R, Hermsdorf J. Interaction between electrical arc and Nd:YAG laser radiation[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 197-200.
- [10] Li Z, Wang Y, Wang W, *et al.* Analysis on the interaction between laser and MIG plasma [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(1/2): 527-532.
- [11] Hao X F, Song G. Spectral analysis of the plasma in low-power laser/arc hybrid welding of magnesium alloy [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1): 76-82.
- [12] Chen Y B, Lei Z L, Li L Q, *et al.* Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(4): 403-411.
- [13] Chen B, Zhao B, Lei L, *et al.* Effects of laser induced metal vapour on arc plasma during laser arc double sided welding of 5A06 aluminium alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(1): 69-76.
- [14] Kim Y P, Alam N, Bang H S, *et al.* Observation of hybrid (cw Nd : YAG laser + MIG) welding phenomenon in AA 5083 butt joints with different gap condition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(3): 295-307.
- [15] Katayama S, Naito Y, Uchiumi S, *et al.* Physical phenomena and porosity prevention mechanism in laser-arc hybrid welding [J]. Transactions of JWRI, 2006, 35 (1): 13-18.
- [16] Naito Y, Katayama S, Matsunawa A. Keyhole behavior and liquid flow in molten pool during laser-arc hybrid welding [C] // First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, 3 March 2003, 2003: 357-363.
- [17] Cho J H, Na S J. Three-dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding [J]. Welding Journal, 2009, 88(2): 35-43.
- [18] Tan X W, Hua X M, Li M X, *et al.* High speed video photography system based on principle of optical polarization[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(1): 101-104.
- 谭秀文, 华学明, 李梦醒, 等. 基于光偏振原理的高速摄像光学系统 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(1): 101-104.
- [19] Peng Y, Chen W Z, Wang C, *et al.* Controlling the plasma of deep penetration laser welding to increase power efficiency[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(21): 3145-3149.
- [20] Kim Y S, Eagar T W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1993, 72: 269.
- [21] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5636-5641.