

激光-双 MIG 电弧复合焊耦合机制及熔滴过渡研究

胡连海¹ 黄 坚² 吴毅雄² 许昌玲¹

¹石家庄铁道大学材料科学与工程学院河北省交通工程材料重点实验室, 河北 石家庄 050043

²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 激光-双 MIG(熔化极稀有气体保护)电弧复合焊具有熔深大、熔敷效率高、焊接质量好等特点,然而由于其耦合机理复杂,给应用带来了一定的困难。基于电磁场理论提出了激光与双电弧耦合机制,当激光光致等离子体中间部位的电子受到两个电弧产生的洛伦兹力和电场力相差较大时,等离子体两端的电子分布不均匀,这使得一端电弧发生弯曲,沿焊丝轴向的促进力减小,熔滴过渡困难。当激光光致等离子体中间部位的电子受到两个电弧产生的洛伦兹力和电场力大致平衡时,电子能够比较均匀地分布在等离子体的两端,吸引稳定电弧,利于熔滴过渡。采用高速摄影系统和电信号采集系统研究激光-双 MIG 电弧复合焊接过程,结果表明:当工艺参数不合适时,电弧发生弯曲,导致不稳定的大颗粒过渡和短路过渡;当工艺参数合适时,两个电弧根部被固定在激光光致等离子体的下部,形成稳定的射流过渡。

关键词 激光技术;激光-双熔化极稀有气体保护电弧复合焊;耦合机制;激光光致等离子体;电弧;熔滴过渡

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0602005

Study on Coupling Mechanism and Metal Transfer in Laser Double-Wire MIG Arc Hybrid Welding

Hu Lianhai¹ Huang Jian² Wu Yixiong² Xu Changling¹

¹Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China

²Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract Laser double-wire MIG arc hybrid welding has the characteristics of large weld penetration, high metal deposition rate and good welding quality, however, the underlying interaction is so complicated that it brings some difficulties in the practical applications. A coupling mechanism between two arcs and laser-induced plasma is proposed based on the electromagnetic field theory. When the difference between the Lorentz force and electric field force generated by the two arcs acting on the electrons in the middle part of the laser-induced plasma is significant, the electron distributions at two ends of plasma are not uniform, which causes one arc bend, the driving force to be reduced along the wire axis, and the droplet transfer become more difficult. When the two force are balanced, the electron distributions at two ends are relatively uniform, and the plasma can attract and stabilize the two arcs, which results in a smooth droplet transfer. Laser double-wire MIG arc hybrid welding process is experimentally studied by using the high speed photography system and signal acquisition system, and the results show that when the welding process parameters are not suitable, the arc severely deviates from the wire axis so that unstable globular transfer and short circuiting transfer occur. In contrast, when the welding process parameters are suitable, the roots of the two arcs are fixed to the bottom of laser-induced plasma and a smooth and directional spray metal transfer with low spatter loss is achieved.

Key words laser technique; laser double-wire MIG arc hybrid welding; coupling mechanism; laser induced plasma; arc; metal transfer

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.5400; 350.3850

收稿日期: 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-02

基金项目: 河北省自然科学基金(E2013210030)、河北省高等学校科学技术研究指导项目(Z2012010)

作者简介: 胡连海(1975-),男,博士,副教授,主要从事激光复合焊工艺及电弧物理等方面的研究。

E-mail: lianhai_hu@stdu.edu.cn

1 引 言

近十年来,激光电弧复合焊接技术发展迅速,广泛应用于船舶、石油管道、汽车、航空等工业领域中^[1-4]。该技术所采用的复合形式主要是激光与单一电弧耦合,如 CO₂/YAG 激光与钨极稀有气体保护电弧、CO₂/YAG激光与熔化极稀有气体保护/熔化极活性气体保护(MIG/MAG)电弧、YAG 激光与等离子弧耦合等^[5-6]。目前,国内外学者对激光-单电弧复合焊接原理和技术进行了大量研究,极大地促进了激光复合焊接的应用^[7-12]。研究发现,当激光与单电弧进行耦合时,一方面,激光作用点产生的等离子体为电弧提供了一个非常稳定的阴极斑点,能引导压缩电弧;另一方面,激光提高了电弧的电离度和电弧温度,有助于电弧稳定性的提高^[13-14]。2001 年德国亚琛大学焊接研究所的研究人员在激光+MIG 电弧复合焊与双丝焊的基础上,开发了一种激光与双 MIG 电弧的复合焊设备^[15-16],国内 Gu 等^[17]采用高速摄像机等设备对 YAG 激光-脉冲双电弧复合焊进行了研究。研究发现激光-双电弧复合焊在大厚板焊接上具有明显的优势,能够增加熔深、提高熔覆效率、改善焊接质量。

然而,由于激光-直流双电弧复合焊的两个电弧之间有复杂的交互作用,使得耦合机理非常复杂,涉及焊接过程的热场、力场、电场、流场、磁场等多方面的耦合。焊接工艺参数众多,为了获得稳定的熔滴过渡过程和良好的焊缝成形,往往需要进行大量试验,这给应用带来了一定的困难^[18-19]。

对激光-双电弧复合焊接机理的研究,利于推动激光-双电弧复合焊接在生产中的应用。本文主要研究激光光致等离子体与双电弧的微观相互作用,进而分析电弧形态的变化对熔滴过渡和焊接过程稳定性的影响。

2 试验材料与方法

试验材料为上海宝山钢铁公司生产的船用钢 CCS-B,板厚 14 mm,焊丝型号为 JM56,焊丝直径为 1.2 mm。试验设备采用德国 TRUMPF 公司生产的 TLF15000 turbo 快速轴流型 CO₂ 激光器,使用的电焊机分别为芬兰 KEMPPI 公司生产的 Pro5200 型焊机和奥地利 FRONIUS 公司生产的 TPS4000 型焊机。采用焊枪分别位于两侧,激光头居中的激光-双电弧复合焊接方式,右侧焊枪为产生引导电弧的焊枪,与水平面成 30°,左侧焊枪为产生跟随电弧的焊枪,与水平面成 45°,采用直流反接形式,如图 1 所示。高速摄影系统以 1000 frame/s 的速度对激光光致等离子体和两个电弧进行拍摄,以 3000 frame/s 的速度对熔滴过渡进行跟踪拍摄,其中摄影镜头与钢板在同一水平面上,并且与焊接方向垂直。

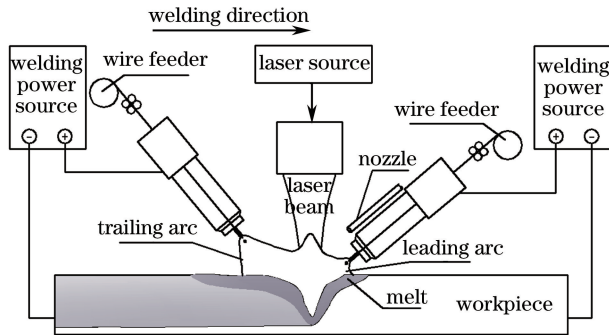


图 1 激光-双 MIG 电弧复合焊接装置

Fig. 1 Experimental setup of laser double-wire MIG hybrid welding

采用电信号采集系统进行实时监测,采样频率为 20 kHz。恒定的焊接工艺参数主要有:激光功率 L_p 为 8 kW,离焦量为 -2 mm,焊接速度 V_w 为 1.38 m/min;MIG 保护气体体积配比为 75%He+25%Ar,流量为 30 L/min;焊丝伸出长度为 16 mm。

3 激光-双 MIG 电弧复合焊接耦合机理

3.1 激光光致等离子体与电弧的微观相互作用

激光光致等离子体和电弧耦合后,由于存在电弧电压和焊接电流产生的磁场,激光光致等离子体内的电子和离子的运动和分布在电场力和洛伦兹力作用下发生改变^[20-21]。带电粒子总的受力表示为

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_E + \mathbf{f}_B = q\mathbf{E} + q\mathbf{V} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{F} 为电荷受到的合力, \mathbf{f}_E 为电场力, \mathbf{f}_B 为洛伦兹力, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 为磁感应强度, \mathbf{V} 为粒子速度, q 为电荷。

激光-双电弧复合焊接工艺参数众多, 其中影响激光光致等离子体中电子受力的主要工艺参数包括电弧电压、焊接电流、焊枪的倾角、电弧与激光作用点的距离等。如图 2(a) 所示, 如果两个电弧电压、焊接电流、焊枪的倾角及电弧到激光作用点距离相等, 则两个电弧在光致等离子体中间部位产生磁场的磁感应强度矢量和为零。因此, 中间部位的离子和电子受到的洛伦兹力为零, 而偏离光致等离子体中间部位的电子在电场力和洛伦兹力的共同作用下向距离近的电弧一端运动, 距离电弧越近, 洛伦兹力越大。电子到达等离子体两端后, 向各自电弧提供电子, 从而克服两个电弧之间的相互吸引作用, 稳定电弧, 铁离子则在电场力和洛伦兹力的共同作用下被推向等离子体中间部位和工件表面, 此时, 两个电弧和激光光致等离子体耦合良好。

如图 2(b) 所示, 如果两个电弧电压、焊枪的倾角及电弧到激光作用点距离相等, 而焊接电流相差较大, 右端电流大于左端电流, 则在等离子体中间部位的磁感应强度为垂直纸面向里。这导致大量电子向电流大的一端即右侧电弧运动, 而离子向电流小的一端偏移, 进而使得等离子体左右两端的离子和电子的密度分布不均匀。通过两个电弧的电流差别越大, 产生的磁感应强度差别越大, 带电粒子的分布越不均匀, 在电子密度大的一端更容易提供电子, 形成导电通道, 使得电弧更稳定。而在电子密度小的一端, 不易提供电子, 不利于电弧在该端形成导电通道。另一方面, 两个电弧之间彼此产生电磁吸引力, 会导致电弧偏离焊丝的轴向。如果等离子体的一端电子密度大, 能够提供稳定的阴极斑点, 则会克服电弧之间的干扰而使得电弧稳定在等离子体的下方燃烧, 电弧不偏移, 焊接过程稳定。反之, 则造成电弧不稳定, 阴极斑点漂移。而在等离子体的上部, 除了由小孔运动过来的电子外, 金属蒸气以及保护气体受到激光的作用会电离产生新的带电粒子, 但由于距离焊丝的轴向较远, 因此受到洛伦兹力和电场力的作用较小, 电荷的分布相对均匀。因此, 该部位也具备了形成阴极斑点的条件, 即该点具有可能发射电子的条件; 其次是电弧通过该点时路径较短, 弧柱能量消耗较小。这样电弧在等离子体上部引燃, 必然导致电弧沿着焊丝轴向弯曲, 造成熔滴过渡困难, 形成不稳定的焊接过程。

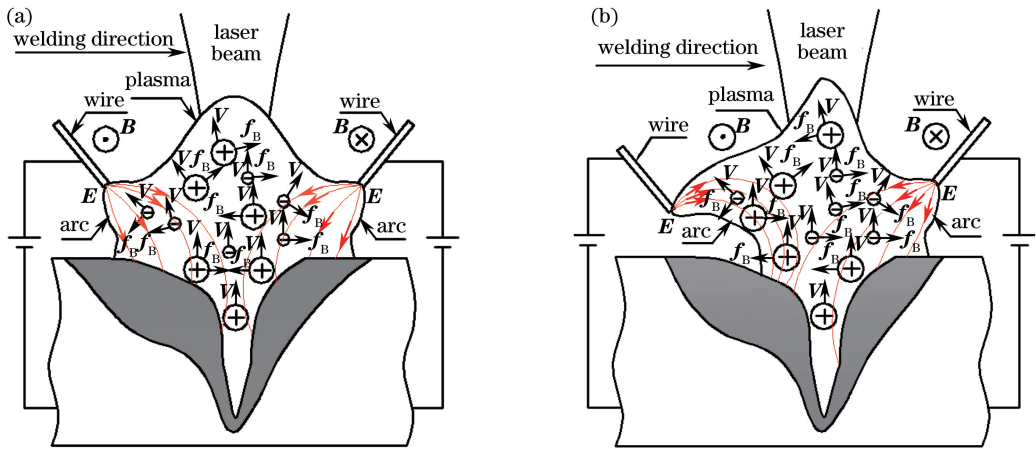


图 2 激光-激光-双 MIG 电弧复合焊等离子体内带电粒子的运动与分布。(a) 稳定状态; (b) 不稳定状态

Fig. 2 Movement and distribution of charged particles in laser-induced plasma for laser double-wire MIG hybrid welding.

(a) Stable state; (b) unstable state

3.2 熔滴过渡稳定性分析

采用激光电弧复合焊时, 焊丝的末端在电弧的高温 and 激光的辐射作用下加热熔化, 熔化的液体金属在各种力的作用下脱离焊丝进入熔池, 形成熔滴过渡, 如图 3 所示。熔滴过渡的形式以及过渡过程的稳定性取决于作用在焊丝末端熔滴上的各种力的综合影响^[22-23]。为了使熔滴沿着焊丝轴向脱落, 则在平行于焊丝方向促进熔滴过渡的合力大于阻碍熔滴过渡的合力, 即

$$F_g \cos \beta + F_a \cos \alpha + F_{em} \cos \alpha > F_\sigma + F_k \cos \beta, \quad (2)$$

式中 F_σ 为表面张力, F_g 为重力, F_a 为等离子流力, F_k 为金属蒸气反作用力, F_{em} 为电磁力, α 为电弧轴线与

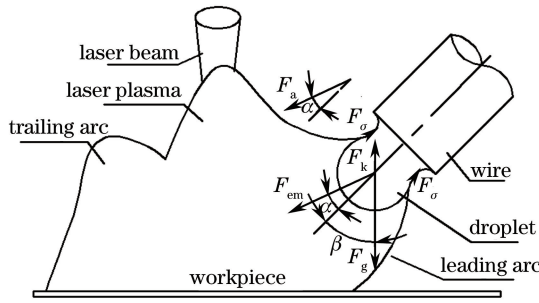


图 3 激光-双 MIG 电弧复合焊接的熔滴受力

Fig. 3 Forces acting on the droplet in laser double-wire MIG hybrid welding

焊丝轴线的夹角, β 为焊丝轴线与重力方向的夹角。

对于激光-双电弧复合焊接, 采用不合适的焊接参数时, 由于两个电弧和激光光致等离子体之间的相互吸引作用, 电弧会在等离子体上部引燃, 导致电弧弯曲, 形成电弧轴线与焊丝轴线的夹角 α 。夹角的大小主要取决于激光与电弧之间的距离、电弧与电弧之间的距离、激光功率、焊接电流、电弧电压和焊枪倾角等。因此, 由(2)式可知, 如果夹角 α 太大, 沿着焊丝方向促进熔滴过渡的合力会显著减小, 进而使得熔滴过渡困难, 熔滴长大, 形成大颗粒过渡或短路过渡, 飞溅大, 焊接过程不稳定。

4 结果与讨论

4.1 激光光致等离子体与电弧的稳定耦合

当引导电弧的送丝速度 W_{R1} 为 11 m/min, 跟随电弧送丝速度 W_{R2} 为 11 m/min, 引导电弧与激光作用点的距离 D_{LP} 为 4 mm, 跟随电弧与激光作用点的距离 D_{TP} 为 6 mm 时, 两个电弧和激光光致等离子体耦合图像如图 4(a) 所示, t_0 为按照时间顺序选取的第一张高速摄影图片所对应的时刻。可以看到, 两个电弧和激光光致等离子体的形态和大小基本都保持不变。尽管引导电弧和跟随电弧之间存在较大的电磁引力, 但是它们的根部被牢牢地固定在激光光致等离子体下部, 电弧基本没有弯曲, 耦合良好。从微观角度分析, 由于跟随焊枪的倾角大, 要使激光光致等离子体中部的电子所受到的洛伦兹力和电场力相等, 要满足 $D_{TP} > D_{LP}$, 这最终导致电子比较均匀地分布在等离子体的两端, 为两个电弧提供了足够的自由电子, 形成了导电通道, 吸引稳定电弧。图 4(b) 为引导电弧和跟随电弧的熔滴过渡情况, 在焊丝末端形成了液柱, 液体金属直径很细, 形成稳定的具有低飞溅率的射流过渡。引导电弧、跟随电弧的电流和电压波形如图 5 所示, 可以看到电流和电压波动非常小, 基本保持恒定, 证明了焊接过程稳定。

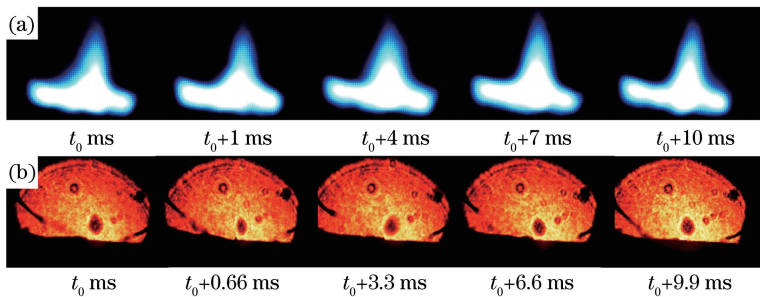


图 4 双电弧稳定的激光-双 MIG 电弧复合焊接的高速摄影图像 ($t_0 = 1000$ ms)。

(a) 两个电弧和激光光致等离子体相互作用; (b) 熔滴过渡

Fig. 4 High-speed photographs of laser double-wire MIG hybrid welding with two stable arcs ($t_0 = 1000$ ms).

(a) Interaction between two arcs and laser-induced plasma; (b) metal transfer

4.2 激光光致等离子体与电弧的不稳定耦合

引导电弧的送丝速度 W_{R1} 变为 9 m/min, W_{R2} , D_{LP} , D_{TP} , t_0 与 4.1 节相同, 则两个电弧和激光光致等离子体的耦合图像如图 6(a) 所示, 跟随电弧的根部牢牢地固定在激光光致等离子体左下部, 而引导电弧则时

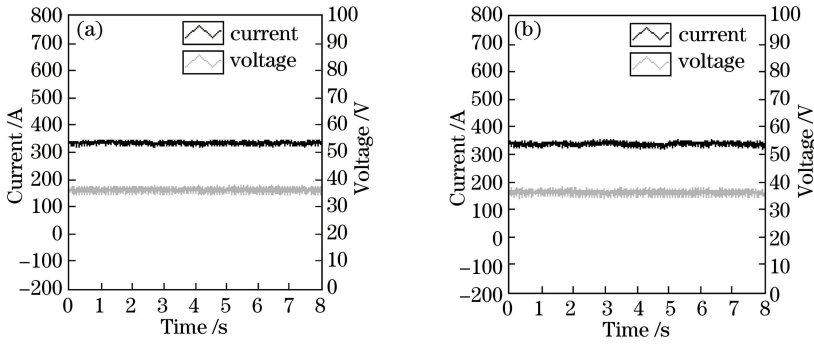


图 5 双电弧稳定的激光-双 MIG 电弧复合焊接电流和电压波形。(a) 引导电弧；(b) 跟随电弧
Fig. 5 Current and voltage waveforms of laser double-wire MIG hybrid welding with two stable arcs.

(a) Leading arc; (b) trailing arc

而在等离子体的上部燃烧,时而熄灭,很不稳定。从微观角度分析可知,由于激光光致等离子体中部的电子受到的洛伦兹力和电场力不相等,电子移向并跟随电弧受力大的一端,使得激光光致等离子体两端电子分布不均,靠近引导电弧的一端电子密度小,不能提供足够的自由电子,无法吸引稳定电弧,同时引导电弧在跟随电弧的电磁力作用下偏向等离子体的上端,造成电弧的弯曲。图 6(b)所示引导电弧和跟随电弧的熔滴过渡影像中,跟随电弧射流过渡比较稳定;而对于引导电弧,由于电弧弯曲比较严重,沿着焊丝轴向的促进力减小,使得熔滴不断长大,熔滴被电弧力推向左上方,形成大滴排斥过渡,或者与熔池接触,形成短路过渡,两种不稳定的过渡形式都造成较大的飞溅。引导电弧、跟随电弧的电压和电流波形如图 7 所示,可以看到跟随电弧的电压波动范围较小,大约为 5 V,焊接电流基本恒定,而引导电弧的电流和电压波动范围非常大,从电压波形看,存在较多的短路过渡,相应的焊接电流也迅速增加,达到 500 A 以上,反映了焊接过程非常不稳定。

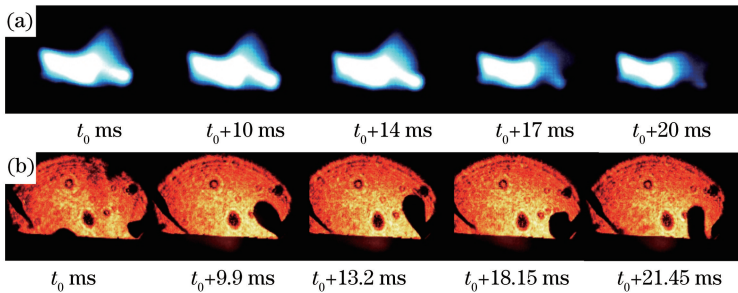


图 6 引导电弧不稳定的激光-双 MIG 电弧复合焊接的高速摄影图像($t_0 = 1000$ ms)。

(a) 两个电弧和激光光致等离子体相互作用；(b) 熔滴过渡

Fig. 6 High-speed photographs of laser double-wire MIG hybrid welding with an unstable leading arc ($t_0 = 1000$ ms).

(a) Interaction between two arcs and laser-induced plasma; (b) metal transfer

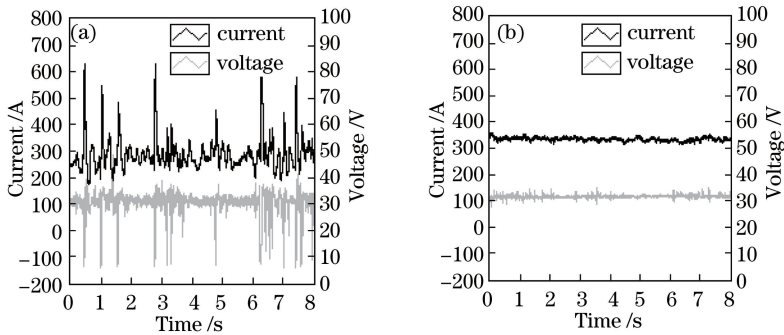


图 7 引导电弧不稳定的激光-双 MIG 电弧复合焊接电流和电压波形。(a) 引导电弧；(b) 跟随电弧

Fig. 7 Current and voltage waveforms of laser double-wire MIG hybrid welding with an unstable leading arc.

(a) Leading arc; (b) trailing arc

引导电弧与激光作用点的距离 D_{LP} 减小为 2 mm, $W_{R1}, W_{R2}, D_{TP}, t_0$ 与 4.1 节相同, 两个电弧和激光光致等离子体的耦合图像如图 8(a) 所示, 引导电弧的根部被激光光致等离子体固定在下方, 而跟随电弧则向等离子体上方弯曲。这是由于尽管两个电弧的送丝速度相等, 但是跟随电弧距离激光光致等离子体较远, 等离子体中部的自由电子在洛伦兹力和电场力的作用下, 向引导电弧方向运动, 使得等离子体左端的自由电子大量减少, 跟随电弧在引导电弧电磁力的作用下发生弯曲。图 8(b) 为引导电弧和跟随电弧的熔滴过渡影像, 可以看到跟随焊丝的末端形成的铅笔尖状液柱向右侧弯曲, 基本呈水平状态, 形成的熔滴过渡方向严重偏离焊丝轴向, 进而形成短路过渡, 造成较大地飞溅。引导电弧内的熔滴基本上沿焊丝轴向过渡, 可形成稳定的射流过渡。

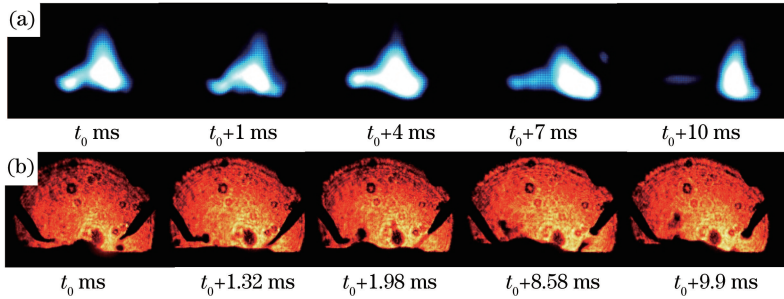


图 8 跟随电弧不稳定的激光-双 MIG 电弧复合焊接的高速摄影图像 ($t_0 = 1000$ ms)。

(a) 两个电弧和激光光致等离子体相互作用; (b) 熔滴过渡

Fig. 8 High-speed photographs of laser double-wire MIG hybrid welding with an unstable trailing arc ($t_0 = 1000$ ms).

(a) Interaction between two arcs and laser-induced plasma; (b) metal transfer

引导电弧、跟随电弧的电压和电流波形如图 9 所示, 跟随电弧的电压和焊接电流波动范围非常大, 存在大量的短路过渡, 引导电弧的电压和电流存在轻微的波动, 但是基本恒定。

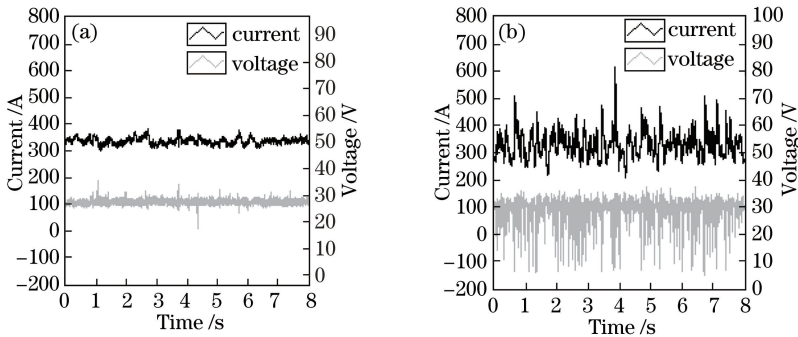


图 9 跟随电弧不稳定的激光-双 MIG 电弧复合焊接电流和电压波形。(a) 引导电弧; (b) 跟随电弧

Fig. 9 Current and voltage waveforms of laser double-wire MIG hybrid welding with an unstable trailing arc.

(a) Leading arc; (b) trailing arc

4.3 激光-双 MIG 电弧复合焊的焊缝成形

图 10(a)、(b) 分别对应上述试验在双电弧稳定和引导电弧不稳定状态下的焊缝表面成形及横截面, 图 10(a) 显示焊缝熔宽均匀一致, 表面光洁, 没有飞溅, 图 10(b) 显示焊缝熔宽极不均匀, 表面存在大量飞溅, 两

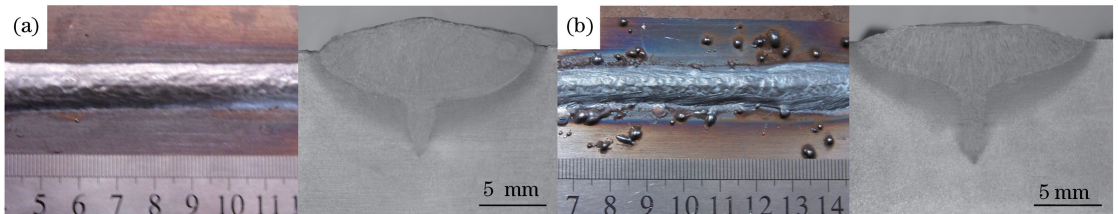


图 10 激光-双 MIG 电弧复合焊缝及横截面。(a) 双电弧稳定; (b) 引导电弧不稳定

Fig. 10 Welds and cross sections of laser double-wire MIG hybrid welding. (a) Two stable arcs; (b) unstable leading arc

种情况下焊缝熔深都较大,呈现了激光复合焊缝所具有的典型 Y 形。

5 结 论

1) 当激光-双 MIG 电弧复合焊接工艺参数合适时,即两个电弧对激光光致等离子体中部电子的作用力大致平衡,电子能够比较均匀地分布在等离子体的两端,对电弧有引导和稳定作用,形成射流过渡,焊缝成形美观,焊接过程稳定;

2) 当激光-双 MIG 电弧复合焊接工艺参数不合适时,即两个电弧对激光光致等离子体中部电子的作用力相差较大,电子在等离子体的两端分布不均匀,导致一端电弧发生弯曲,形成大颗粒过渡、短路过渡等,飞溅较大,焊缝成形差,焊接过程不稳定。

参 考 文 献

- 1 Moore P L, Howse D S, Wallach E R. Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(4): 314-322.
- 2 Atabaki M M, Ma J, Yang G, *et al.*. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations[J]. Materials and Design, 2014, 64: 573-587.
- 3 Webster S, Kristensen J K, Petring D. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2008, 35(7): 496-504.
- 4 Liu Ting, Yan Fei, Liu Sang, *et al.*. Study of narrow gap laser-metal inert gas hybrid welding GH909 alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903008.
刘 婷, 闫 飞, 柳 桑, 等. GH909 的窄间隙激光-熔化极气体保护焊复合焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903008.
- 5 Bagger C, Olsen F O. Review of laser hybrid welding[J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- 6 Zou J L, Wu S K, Xiao R S, *et al.*. Effects of a paraxial TIG arc on high-power fiber laser welding[J]. Materials and Design, 2015, 86: 321-327.
- 7 Chen Genyu, Xia Hailong, Zhou Cong, *et al.*. Study on the mechanism of root humping of laser welding with high power fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203004.
陈根余, 夏海龙, 周 聪, 等. 高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203004.
- 8 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Distribution of wire feeding elements in laser-arc hybrid welds[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0406006.
赵 琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406006.
- 9 Jiao Jiao, Yang Lijun, Liu Tong, *et al.*. Electrical detection of the plasma and analysis of welding modes in YAG laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903005.
焦 娇, 杨立军, 刘 桐, 等. YAG 激光焊接等离子体电信号检测与焊接模式分析[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903005.
- 10 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 and Design, 2014, 61: 239-250.
- 11 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.
- 12 Zeng Xiaoyan, Gao Ming, Yan Jun. Effects of shielding gas in laser-arc hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601005.
曾晓雁, 高 明, 严 军. 保护气体对激光-电弧复合焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601005.
- 13 Hu B, Den Ouden G. Laser induced stabilisation of the welding arc[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(1): 76-81.
- 14 Liu L M, Chen M H. Interactions between laser and arc plasma during laser-arc hybrid welding of magnesium alloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(9-10): 1224-1231.
- 15 Dilthey U, Keller H. Prospects in laser GMA hybrid welding of steel [C]// Proceedings of 1st International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, 2001: 453-465.
- 16 Wieschemann A, Kelle H, Dilthey D. Hybrid-welding and the HyDRA MAG + LASER processes in shipbuilding[J]. Welding International, 2003, 17(10): 761-766.

- 17 Gu X Y, Li H, Yang L J, *et al.*. Coupling mechanism of laser and arcs of laser-twin-arc hybrid welding and its effect on welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 246-253.
- 18 Ueyama T, Ohnawa T, Tanaka M, *et al.*. Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(6): 523-529.
- 19 Hu Lianhai. A Study on laser welding stability, joint microstructures and properties of 10Ni3CrMoV thick steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 28-32.
胡连海. 10Ni3CrMoV 钢厚板激光焊接稳定性与接头组织及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 28-32.
- 20 Zhang X D, Chen W Z, Jiang P, *et al.*. Modeling and application of plasma charge current in deep penetration laser welding[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(11): 8842-8847.
- 21 Tse H C, Man H C, Yue T M. Effect of electric and magnetic fields on plasma control during CO₂ laser welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 32(1): 55-63.
- 22 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.
- 23 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liqun, *et al.*. Characteristics of droplet transfer in CO₂ laser-MIG hybrid welding with projected mode[J]. Applied Laser, 2004, 24(6): 361-64.
雷正龙, 陈彦宾, 李俐群, 等. CO₂ 激光-MIG 复合焊接射滴过渡的熔滴特性[J]. 应用激光, 2004, 24(6): 361-364.