

文章编号: 0258-7025(2010)12-3172-08

# CO<sub>2</sub> 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

刘双宇 张宏石 岩\* 刘凤德 刘佳 徐春鹰

(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 以 7.0 mm 厚高强度钢板为试验材料,采用 CO<sub>2</sub> 激光-熔化极活性气体保护焊(MAG)电弧复合焊接方法,研究了电弧能量、激光能量、光丝间距等参数对复合焊接熔滴过渡特征、工艺稳定性和焊缝形貌的影响。结果表明,CO<sub>2</sub> 激光-MAG 电弧复合焊接过程中,激光的加入,降低了激光匙孔附近等离子体通道的电阻,使电弧被吸引并压缩至激光匙孔处,从而使电弧阴极斑点更加稳定。电弧能量决定熔滴过渡的模式,激光能量主要影响熔滴的过渡频率。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是二者的混合过渡;当电弧能量大于 4.68 kW 时,熔滴的过渡模式为射滴过渡。熔滴的过渡模式对获得稳定的可重复焊接工艺至关重要,射滴过渡比短路过渡更有利于焊接过程的稳定。热源间距保持在 2~4 mm 的范围内,避免熔滴干扰激光匙孔和熔池产生紊流。

**关键词** 激光技术;CO<sub>2</sub> 激光-MAG 电弧复合焊接;射滴过渡;等离子体形貌;焊缝形状;熔滴过渡

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.3172

## Effects of Process Parameters on Droplet Transfer and Bead Shape in CO<sub>2</sub>-MAG Hybrid Welding

Liu Shuangyu Zhang Hong Shi Yan Liu Fengde Liu Jia Xu Chunying

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** A CO<sub>2</sub> laser-metal active gas welding (MAG) hybrid welding technology is used to weld the high strength steel of 7.0 mm thick. The effect of the arc energy, laser energy and distance between laser and MAG arc on the droplet transfer character, process stable and weld geometry are investigated. Results indicate that inputting of laser decreases the resistance of plasma channels of locate laser keyhole. In this way, arc is attracted and constricted, which stabilizes the arc cathode spots. The arc energy determines the mode of droplet transfer, and the laser energy affects the frequency of droplet transfer. When the laser energy is less than 4 kW, the transfer mode is short circuit transfer, or globular transfer or transfer mode between short circuit and globular. When laser energy exceeds 4.68 kW, the transfer mode is spray transfer. The droplet transfer mode is very important for achieving a stable and repeatable process: projected/spray transfer should be preferred to short/globular transfer. Distance between laser and arc sources must be at a 2~4 mm in order to avoid turbulence in the weld pool and disturbance of the keyhole formation and to achieve synergy between the processes.

**Key words** laser technique; CO<sub>2</sub> laser-MAG hybrid welding; spray transfer; plasma shape; weld geometry; droplet transfer

收稿日期: 2010-04-12; 收到修改稿日期: 2010-06-21

作者简介: 刘双宇(1978—),男,博士,讲师,主要从事激光-电弧复合焊接、激光与材料相互作用、激光加工新工艺、新方法等方面的研究。E-mail: lshy\_2006@hotmail.com

\* 通信联系人。E-mail: shiyan@cust.edu.cn

## 1 引言

激光-电弧复合焊接技术与单独的激光、电弧焊相比,具有提高焊接速度、桥接性能、增大焊接熔深、降低装配精度和成本等优势,因此被广泛地研究和应用<sup>[1~3]</sup>。近几年来,为了实现对铝合金、不锈钢等中厚板的焊接,研究人员更多地注意到采用激光-熔化极惰性气体保护焊/熔化极活性气体保护焊(MIG/MAG)复合焊接方法<sup>[4,5]</sup>。但是,由于激光-MIG/MAG 复合焊接可调参数多,并且其中一个参数的微小波动都会影响熔滴过渡及其熔滴与熔池的相互作用,因此其焊接过程控制比较复杂。目前对激光-MIG/MAG 复合焊接的研究主要集中在以下几个方面:首先是保护气体成分和流量<sup>[4~6]</sup>对工艺稳定性和焊缝形貌的影响;其次是激光能量、电弧能量和热源间距<sup>[7~9]</sup>对焊接工艺稳定性、焊缝形貌和微观组织的影响;再次是熔滴和熔池金属的相互作用机制以及保护气体的保护效果的计算机模拟<sup>[5,6,10]</sup>等。而熔滴过渡问题是激光-MIG/MAG 焊接质量优劣的关键。雷正龙等<sup>[11]</sup>采用激光前置的 CO<sub>2</sub> 激光-MIG 复合方法焊接铝合金,研究了射滴过渡的熔滴特性,并指出激光加快了熔滴的过渡频率,改变了熔滴的过渡形式,提高了焊接熔深和表面质量。而 CO<sub>2</sub> 激光-MAG 复合焊接方法多用于碳钢、高强钢的焊接中,由于 CO<sub>2</sub> 在高温下发生分解生成 O 原子,它有利于改善熔池表面金属的流动性,使熔池由四周向内部流动,从而使热量便于向下传递,实现深熔焊和焊丝成分的均匀化。同时,CO<sub>2</sub> 在高温下吸热分解,避免热电离形成等离子体,同样能够有效抑制等离子体的膨胀,提高激光能量的传输,实现深熔焊接,并且降低生产成本。此外,适量的 CO<sub>2</sub> 气体有利于保持焊缝硬度的稳定。因此,本文以 7 mm 厚高强钢板为试验材料,研究了 CO<sub>2</sub> 激光-MAG 复合焊接过程中,复合电弧的形态特征, MAG 电弧能量和激光能量以及两热源间距对熔滴过渡特性和焊缝成形的影响规律。

## 2 试验方法

试验中采用 Rofin DC050 5kW 板条 CO<sub>2</sub> 激光器和最大焊接电流为 350A 的 Panasonic YD-350AG2HGE 型 MIG/MAG 焊机,通过自行研制的复合焊接装置进行旁轴复合,激光光束模式为 TEM<sub>00</sub>, 反射聚焦

镜的焦距为 352 mm, 光斑直径为 0.3 mm。采用 CMOS-CR5000×2 型高速相机观测并采集熔滴过渡模式和等离子体形态的变化,其采样频率为 2000 frame/s。复合焊接装置如图 1 所示,沿焊接方向电弧在前,激光在后,图 2 给出复合焊接参数配置及装置分布示意图。



图 1 CO<sub>2</sub> 激光-电弧复合焊接试验装置

Fig. 1 Setup of CO<sub>2</sub> laser-MAG hybrid welding

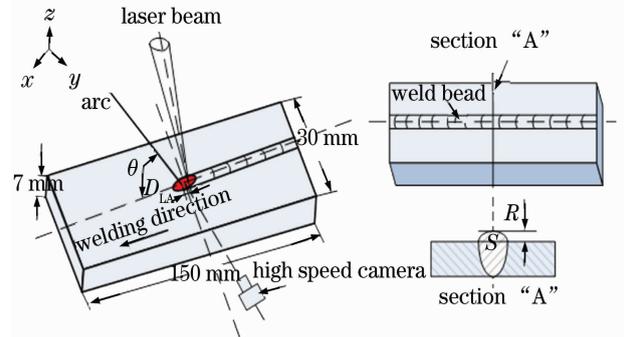


图 2 复合焊接参数配置及装置分布示意图

Fig. 2 Schematic drawing of welding parameters and setup of hybrid welding

试验材料为高强度钢板,尺寸为 150 mm × 30 mm × 7 mm。采用牌号为 H09Cr21Ni9MnMo, 直径为 1.2 mm 的不锈钢焊丝。MAG 焊枪保护气体直接从焊枪喷嘴流出,为体积分数为 20% 的 CO<sub>2</sub> 和体积分数为 80% 的 Ar 混合气体,流量为 16 L/min,激光同轴保护气体采用流量为 25 L/min 的体积分数为 30% 的 He 和体积分数为 70% Ar 的混合气体。焊接采用平板堆焊。焊接完成后,将试样沿着横截面切开,采用标准金相试样制备工序制成试样,用王水腐蚀焊缝,采用 OLYMPUS OSL3000 型激光共聚焦显微镜拍摄焊缝形貌并测量焊缝余高(R)和余高部分的面积(S)。试验过程中采用的主要焊接工艺参数见表 1。

表 1 焊接参数  
Table 1 Welding parameters

Welding parameters	Values
Welding speed $v$ / (m/min)	1.2
Angle of welding torch $\theta$ / ( $^{\circ}$ )	60
Defocusing amount $\Delta f$ / mm	0
Extension length $L$ / mm	12
Wire diameter $d$ / mm	1.2
Laser powder $P$ / kW	1.5~4.0
MAG current $I$ / A	140~220
MAG voltage $U$ / V	24~28
Laser-arc distance $D_{LA}$ / mm	0~6

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 激光-MAG 电弧复合焊的等离子体特征

图 3 为单独 CO<sub>2</sub> 激光焊, MAG 电弧焊和激

光-MAG 电弧复合焊 7.0 mm 厚高强钢板的焊缝截面。与 MAG 焊相比, 复合焊接极大地提高了焊缝熔深, 其熔深为单独电弧焊的 3 倍, 并且改善了焊缝成形。对比图 4(b) 和 (c) 可以看出两热源复合后 MAG 电弧根部及临近区域 (A 点附近) 被吸引到激光与材料的作用点上; 在远离激光作用点处的电弧 (B 点附近) 被强烈压缩导致横截面明显减小, 从而使电弧能量更加集中。从图 4(c) 可以看出一方面由于激光吸引并压缩电弧, 提高了电弧的稳定性; 另一方面由于 MAG 电弧的加入, 使被焊接材料表面熔化, 增加了对激光能量的吸收, 同时因激光等离子体被稀释而减少了激光因等离子体散射和折射而造成的能量损失, 增加了激光能量的吸收<sup>[12~14]</sup>。以上两方面说明在复合焊过程中交互作用的等离子体的形态对工艺稳定性和焊缝成形有着重要的影响。

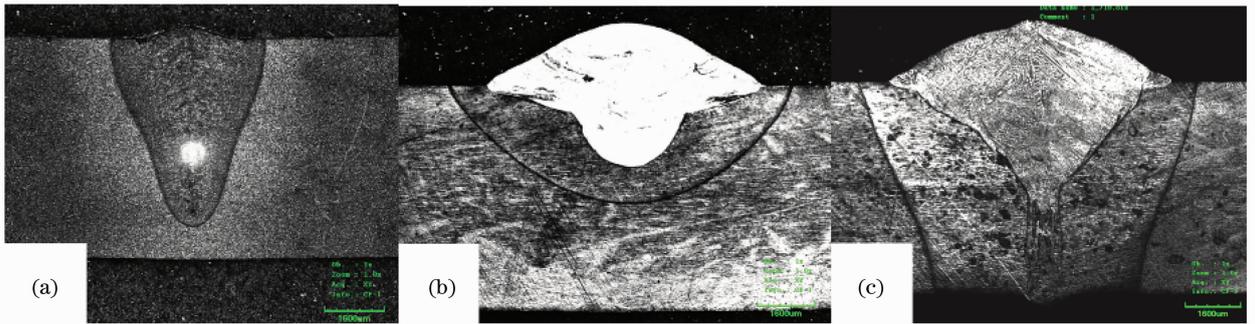


图 3 不同焊接方法下的焊缝形貌。(a) 激光焊, (b) 电弧焊, (c) 复合焊接

Fig. 3 Cross-section morphology of different welding methods. (a) laser welding, (b) MAG welding, (c) hybrid welding

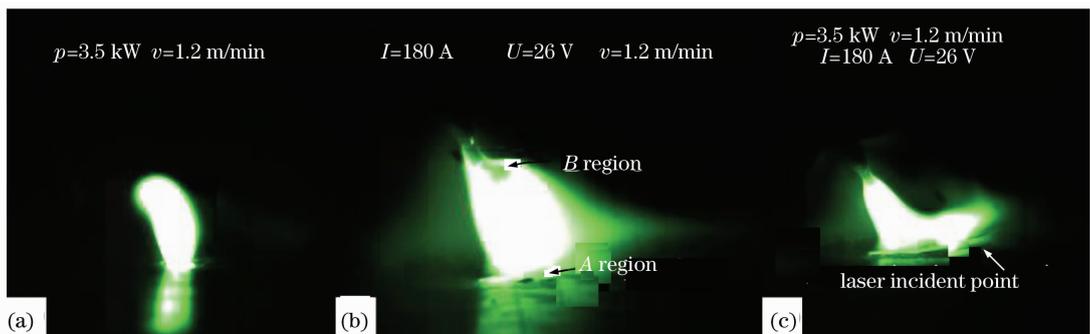


图 4 不同焊接方法下的等离子体形貌。(a) 激光焊, (b) 电弧焊, (c) 复合焊接

Fig. 4 Plasma shape of different welding methods. (a) laser welding, (b) MAG welding, (c) hybrid welding

在单独 MAG 焊接过程中, 由于熔池表面阴极区电弧温度受到被焊接材料的沸点温度 (约 3000 K) 的限制, 其电弧温度略高于被焊接材料的沸点温度 (4000 K)<sup>[15]</sup>。而在 CO<sub>2</sub> 激光焊接过程中, 由于激光等离子体的波长在 190~400 nm, 根据维恩位移定律<sup>[16]</sup>

$$\lambda_{\max} T = 2897.77 (\mu\text{m} \cdot \text{K}), \quad (1)$$

式中  $\lambda_{\max}$  为辐射的峰值波长,  $T$  为黑体的绝对温度。计算激光匙孔中喷射出来的等离子体羽辉温度可达 7244~15251 K。在 CO<sub>2</sub> 激光-MAG 复合焊接过程中, 由于匙孔强烈吸收激光能量, 形成的高温高压等离子体羽辉从匙孔中不断喷出, 高温等离子体羽辉

的存在改变了电弧阴极特性,使该区域的电弧温度急剧升高。F. F. Chen<sup>[17]</sup> 给出了等离子体电阻率公式

$$\eta = \frac{\pi e^2 m_e^{1/2}}{(4\pi\epsilon_0)^2 (\kappa T_e)^{3/2}} \ln \Lambda, \quad (2)$$

式中  $e$  为电子电荷,  $m_e$  为电子质量,  $\kappa$  为玻尔兹曼常数,  $T_e$  为电子温度,  $\epsilon_0$  为介电常数,  $\ln \Lambda$  为库伦对数。通过(2)式可以计算激光和 MAG 电弧的等离子体通道电阻率的比值为:  $\eta_{\text{hybrid}}/\eta_{\text{MAG}} = T_{e-\text{MAG}}/T_{e-\text{hybrid}} = (4000/7244)^{3/2} = 0.41$ 。计算结果说明激光加入后,降低了激光匙孔附近的等离子体通道的电阻,从而增加了电弧通过该路径的电导率。同时,从匙孔喷射出来的等离子体羽辉,因其内部含有大量的自由电子,从而改变了电弧阴极电子的发射方式,进而改变了电弧弧根特性,使电弧阴极斑点更加稳定,同样促使电弧偏向匙孔。从图 4(c) 可以看出激光光致等离子体和电弧等离子体之间存在一个导电通道。通过此导电通道,电弧被吸引至激光光致等离子体处。由于该导电通道狭窄,所以电弧被压缩到匙孔附近,电弧体积减小,最终导致电弧被强烈吸引

及压缩。

### 3.2 激光功率和电弧功率对复合焊接熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响

图 5 为电弧电流为 180 A,电压为 26 V 时,不同激光功率下的熔滴过渡形式。从图中可以看出随着激光功率的增加,熔滴的过渡形式由射滴过渡转变为颗粒过渡,并且熔滴的尺寸逐渐增大,熔滴表面出现波形线,如图 5(e)和(f)所示。这表明,当激光功率较小时,由于激光与电弧的相互作用,此时激光主要起到稳定和压缩电弧的作用,有助于熔滴的形成和加速熔滴的过渡。当激光功率达到某一临界值时,激光匙孔形成,此时在熔滴的形成和长大过程中,由于激光等离子体对电弧的吸引以及激光匙孔内产生的大量金属蒸气对熔滴的向上反冲力,导致熔滴向激光束方向移动并向上漂移。随着激光功率的增加,激光匙孔产生的等离子体对熔滴的吸引力和金属蒸气对熔滴的上推力都增加,从而使熔滴的下表面产生波形线,使熔滴长大时间增加,直径增大,发生颗粒过渡,从而降低了熔滴过渡频率。

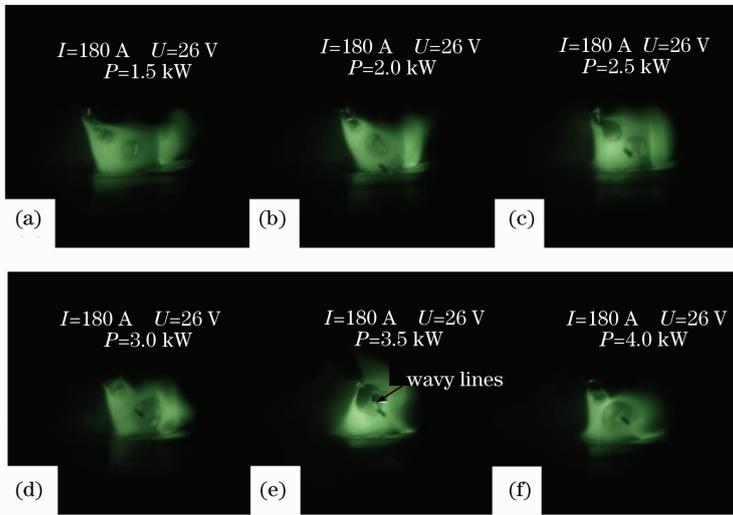


图 5 激光功率对熔滴过渡特征的影响

Fig. 5 Effects of the laser power on transfer mode of droplet

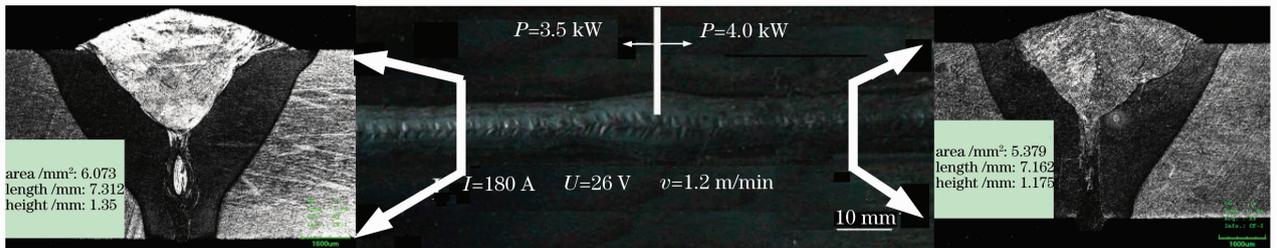


图 6 不同激光功率下复合焊接焊缝的表面和截面照片

Fig. 6 Surface and cross-section morphology of weld bead at different laser powers

图 6 给出不同激光功率下的复合焊缝的表面和截面形貌。从图中可以看出随着激光功率的增加,焊缝余高及余高部分的面积都减小,且焊缝的纹理变得模糊。这是由于激光功率的增加有利于激光匙孔的稳定,因此激光深熔焊的特征更加明显,更有利于熔池金属向下流动,从而使焊缝上部余高减小,下部余高增加。

图 7 为不同电弧功率下熔滴的过渡形式和等离子体形貌,可以看出随着电弧功率的增加熔滴的过渡形式由短路过渡转变为射流过渡。对于给定的激光能量( $P=3\text{ kW}$ ),从图 7(a),(b)可以看出,当电弧功率小于  $4\text{ kW}$  时,由于激光匙孔产生的大量金属蒸气对熔滴向上的推力和激光等离子体对熔滴的吸引力,使熔滴的下表面和右侧表面产生波形线,导致熔滴过渡困难,并且偏向激光束,此时熔滴的过渡形式为短路过渡或是颗粒过渡,这种过渡形式容易引起熔池对流紊乱,使维持小孔平衡的液态金属静压力发生很大的波动,一旦维持平衡的静压力发生改变,匙孔将发生坍塌,此时匙孔内部的金属蒸气受热将向上喷出,产生飞溅。同时大颗粒的熔滴加大

了对熔池的冲击,导致焊缝边缘出现锯齿状,如图 8(a)所示。当电弧功率大于  $4.68\text{ kW}$  时,等离子体流力增加,电弧温度明显提高,熔滴的表面张力急剧减小,熔滴过渡形式转变为射滴过渡,从图 7(d),(e)中可明显观察到焊丝端部被拉长的液态金属和其端部的细小熔滴,细小的熔滴从焊丝端部沿焊丝轴线以较高的速度射出。这种过渡形式使复合焊接过程变得稳定,能够获得均匀、边缘平直的焊缝。对比图 8(a)和(b)的截面可以看出,随着电弧能量的增加,焊缝电弧作用区的面积、焊缝宽度、余高和余高部分的面积均增加。这主要是因为电弧能量增加,使熔滴过渡形式转变为射流过渡,加大了熔滴对熔池冲击力,熔滴冲击力的增加造成熔池表面下凹,使得热量能够传向熔池底部,因而焊缝上部电弧作用区的熔深增加。在熔滴的冲击力、电弧压力和焊丝高速熔化的综合作用下,熔池后排金属的量增加,致使焊缝宽度、余高和余高部分的面积增加。

图 9 为不同激光和电弧能量下的熔滴过渡模式。从图中可以看出对于同一激光能量,随着电弧

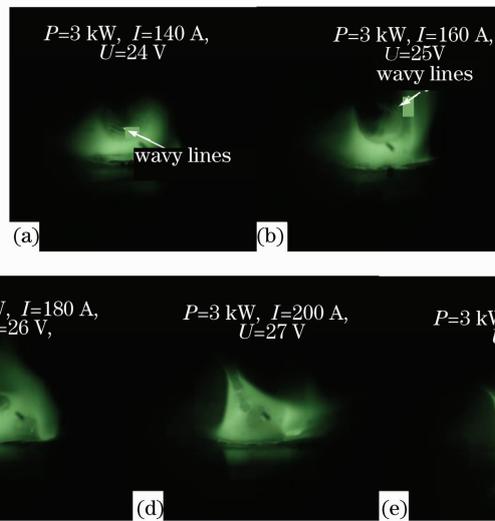


图 7 不同电流下的熔滴过渡模式

Fig. 7 Droplet transfer mode of different arc currents

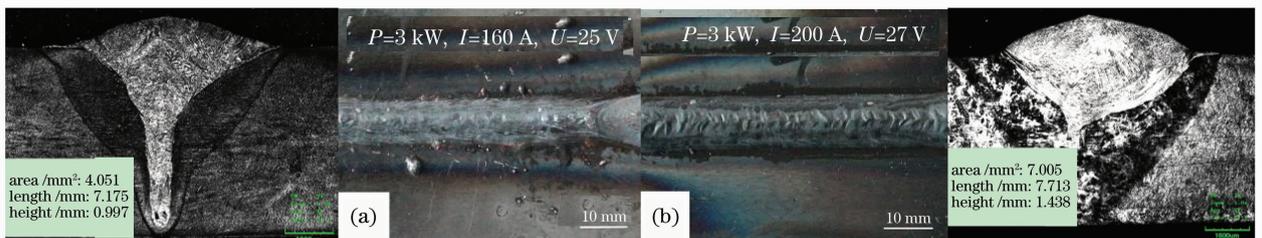


图 8 不同电弧能量下的焊缝形貌

Fig. 8 Surface and cross-section morphology of weld bead at different arc powers

能量的增加,熔滴都经历由短路过渡向喷射过渡的转变。而对于同一电弧能量,激光功率对熔滴的过渡形式改变有限,但是激光功率的增加,使熔滴直径增加,导致熔滴的过渡频率降低。由此得出复合焊接的熔滴过渡模式主要取决于电弧的能量,激光能量会改变熔滴的过渡频率。

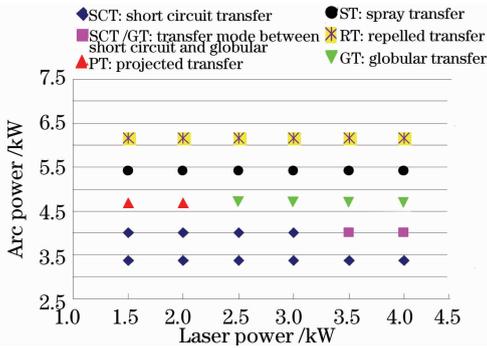


图 9 不同激光和电弧能量下的熔滴过渡模式

Fig. 9 Droplet transfer mode map for different powers of the laser and MAG arc

### 3.3 光丝间距对复合焊接等离子体形貌和熔滴过渡特征的影响

在试验中,光丝距离是指激光光斑中心到焊丝端头与焊件接触点的距离。图 10, 11 分别是电流为 180 A 和 160 A 时,不同光丝距离的复合等离子体形貌和熔滴过渡特征。从中可以看出光丝间距  $D_{LA}$  能够改变激光和电弧等离子体的相互作用程度。光丝间距越小,带电粒子的传输距离越短,作用越强烈,复合等离子体空间尺寸越小,致使电弧能量更加集中,增强其对工件的预热作用。但是当  $D_{LA} \geq 4$  mm 后,两等离子体

相互作用程度逐渐减弱,并在激光等离子体和电弧等离子体之间开始出现明显的导电通道,使复合等离子体空间尺寸增大,导致热源能量通过此通道时消耗于环境空间,导致能量的利用率降低。从图 10 中可以看出,当电流为 180 A 时,熔滴的过渡形式大多为颗粒过渡。同时,随着光丝距离的增加,熔滴偏离焊丝轴线的角度增加,当光丝距离为 6 mm 时偏离角达到 18.04°,这主要是由于激光等离子体对熔滴的吸引所导致的。从图 11 中可以看出,当电流为 160 A 时,熔滴的过渡形式为短路过渡和颗粒过渡。同时可以看出随着光丝距离的增加,熔滴的形状变化不大,且稍向激光束偏移。

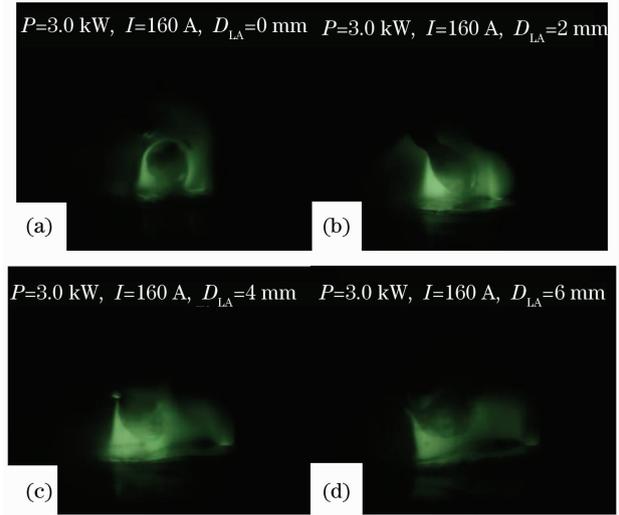


图 11 电流为 160 A 时不同的光丝距离的等离子体形态和熔滴过渡特征

Fig. 11 Plasma shape and characteristics of droplet transfer at different  $D_{LA}$  values when the current is 160 A

图 12 为复合焊接过程中光丝间距  $D_{LA}$  对熔滴过渡频率的影响。从图中可以看出,当焊接电流为 180 A,电压为 26 V 时,随着光丝间距的增加,复合焊接熔滴过渡频率先减小后增加,在  $D_{LA} = 2$  mm 时,熔滴过渡频率最低。这是因为当激光束入射在熔池下凹处时,激光匙孔产生的金属蒸气的反冲力阻碍熔滴的过渡。当光丝间距较大时,金属蒸气对熔滴的阻力减小,因而熔滴的过渡频率增加,如图 10(c) 和 (d) 所示。同时,图 12 给出当  $D_{LA} = 6.0$  mm 时熔滴的过渡频率是  $D_{LA} = 0$  mm 时的 1.6 倍,这也说明在复合焊中激光的加入在一定程度上降低了熔滴的过渡频率。当焊接电流为 160 A,电压为 25 V 时,随着光丝距离的增加,熔滴过渡频率减小,并逐渐趋于稳定。这是因为  $D_{LA}$  越小激光匙孔产生的金属蒸气对焊丝的热辐射作用越强,导致熔滴过渡频率增加。当  $D_{LA} \geq 2$  mm 时,熔滴过渡频率趋于稳定,这是因为激光匙孔产生的金属蒸气对

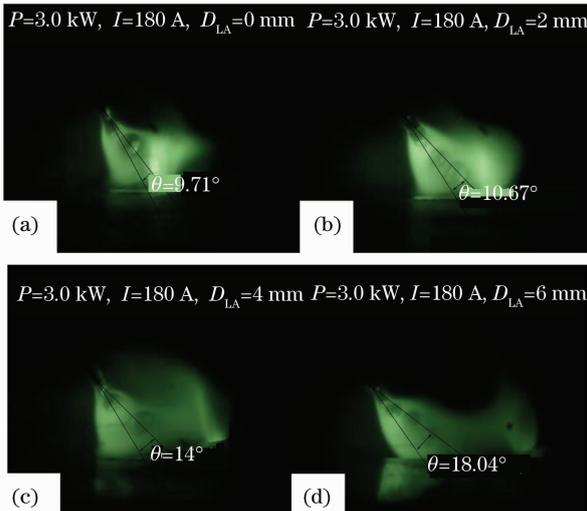


图 10 电流为 180 A 时不同的光丝距离  $D_{LA}$  的等离子体形态和熔滴过渡特征

Fig. 10 Plasma shape and characteristics of droplet transfer at different  $D_{LA}$  values when the current is 180 A

熔滴的辐射作用以及反冲力逐渐减弱,同时在给定的电弧能量作用下,熔滴以短路过渡或是颗粒过渡的形式进入熔池,此时熔滴所受的分力远大于阻力,因此熔滴过渡频率趋于稳定,如图 11(c)和(d)所示。

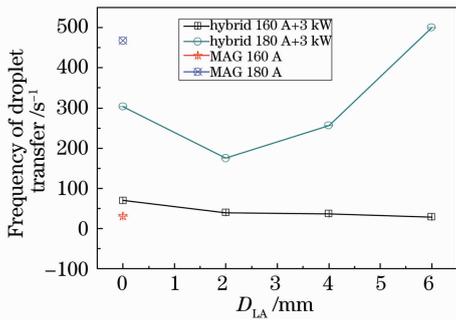


图 12 光丝间距对熔滴过渡频率的影响

Fig. 12 Effects of the  $D_{LA}$  on the frequency of droplet transfer

图 13 给出了不同光丝距离下的焊缝表面和截面形貌。当  $D_{LA}=0$  mm 时,焊缝表面存在大量的飞溅,焊道纹理清晰。这是因为光丝距离近时,熔滴填充激光匙孔,此时匙孔内的金属蒸气处于向上喷射状态,填充匙孔的金属液滴在金属蒸气的反冲力作用下向上喷出产生飞溅。此时,激光束作用于电弧熔池的下凹处,它对在电弧力作用下熔池流动的特征改变有限,因此焊缝纹理比较清晰。当光丝距离增加时,焊缝表面光滑,但焊道纹理混乱。这是由于光丝距离较远时熔滴对匙孔的干扰作用减弱,同时激光匙孔产生的金属流动干扰了在电弧力作用下熔池金属的流动。当  $D_{LA}=6$  mm 时,焊道不均匀,这是因为光丝距离太大,激光对电弧的引导和压缩作用减弱,导致电弧不稳定。

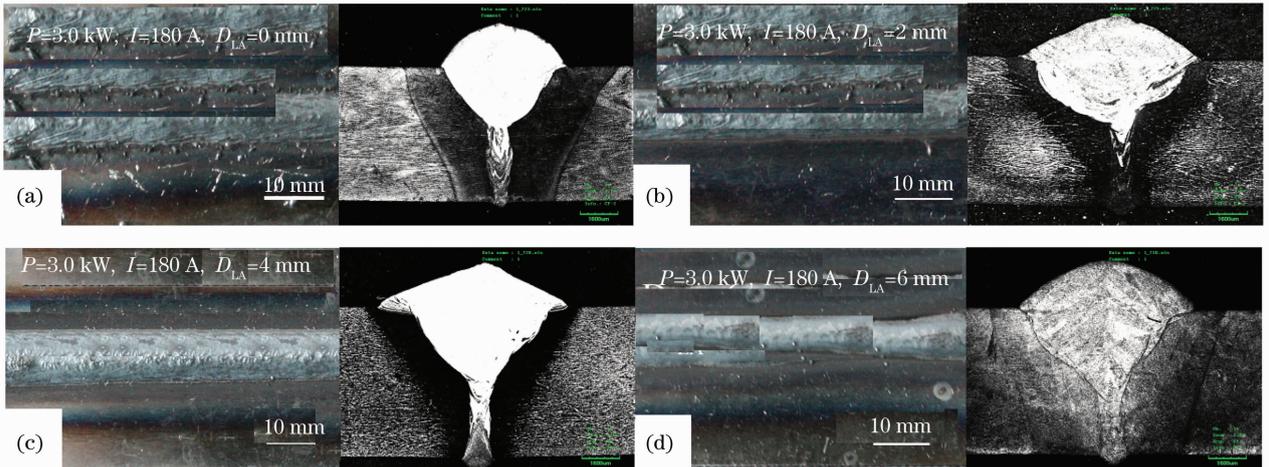


图 13 光丝距离对焊缝表面和截面形貌的影响

Fig. 13 Cross-section and surface morphology at different  $D_{LA}$  values

## 4 结 论

1) 在  $CO_2$  激光-MAG 电弧复合焊中,激光的加入,降低了激光匙孔附近的等离子体通道的电阻,从而增加了电弧通过该路径的电导率。同时,改变了电弧阴极电子的发射方式,使电弧阴极斑点更加稳定,促使电弧偏向匙孔,致使电弧被吸引和压缩在激光匙孔处。

2) 在复合焊接过程中,电弧能量决定熔滴的过渡模式,激光能量主要影响熔滴的过渡频率。熔滴的过渡模式对获得稳定的焊接工艺至关重要,射滴过渡比短路过渡更有利于焊接过程的稳定。

3) 热源间距保持在 2~4 mm 范围内,保证两热源有效耦合,避免熔池产生紊流和熔滴干扰匙孔。

## 参 考 文 献

- 1 Cui Li, Kutusna Muneharua, Simizu Takao *et al.*. Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium [J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(1): 109~114
- 2 Ming Gao, Xiaoyan Zeng, Qianwu Hu *et al.*. Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(2): 785~791
- 3 Daquan Zhang, Jin Li, Hyung Goun Joo *et al.*. Corrosion properties of Nd:YAG laser-GMA hybrid welded AA6061 Al alloy and its microstructure [J]. *Corrosion Science*, 2009, **51**(6): 1399~1404
- 4 G. Campana, A. Ascari, A. Fortunato *et al.*. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(10): 5588~5590
- 5 Giovanni Tani, Giampaolo Campana, Alessandro Fortunato *et al.*. The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8050~8053
- 6 Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Liqun Li *et al.*. Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in  $CO_2$  laser-MIG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 33~35

- 7 Ming Gao, Xiaoyan Zeng, Jun Yan *et al.*. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**(18): 5715~5721
- 8 B. Hu, I. M. Richardson. Microstructure and mechanical properties of AA7075 (T6) hybrid laser /GMA welds [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **459**(1-2): 94~100
- 9 Ruisheng Huang, Liming Liu, Fan Zhang. Influences of laser in low power YAG laser-MAG hybrid welding process[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 47~50
- 10 J. Zhou, H. L. Tsai. Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**(17-18): 4353~4366
- 11 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liqun *et al.*. Characteristics of droplet transfer in CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding with projected mode [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 361~364  
雷正龙, 陈彦宾, 李俐群 等. CO<sub>2</sub>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
- 12 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685  
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1680~1685
- 13 G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari *et al.*. The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **191**(1-3): 111~113
- 14 Li Zhiyong, Wang Wei, Wang Xuyou *et al.*. Analysis of laser-MAG hybrid welding plasma radiation [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(3): 21~28  
李志勇, 王 威, 王旭友 等. 激光-MAG 复合焊等离子体辐射分析[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(3): 21~28
- 15 Liu Liming, Huang Ruisheng, Cao Yunming. Behavior analysis of low power YAG laser-gas metal arc welding hybrid welding arc plasma [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3167~3173  
刘黎明, 黄瑞生, 曹运明. 低功率 YAG 激光-熔化极气体弧焊复合焊接电弧等离子体行为研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3167~3173
- 16 Hyunsung Park, Sehun Rhee. Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO<sub>2</sub> laser welding of galvanized steel [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(2): 119~126
- 17 F. F. Chen. Introduction to Plasma Physics [M]. New York: Plenum Press, 1974. 160, 279~318