

CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊接过程中熔滴受力及过渡特征研究

宗士帅 刘双宇 薛菲 张宏

(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 以 5.0 mm 高强钢板为试验材料,进行了 CO₂ 激光与金属活性气体(MAG)电弧复合焊接试验。通过高速摄像和熔滴的受力分析研究了激光能量、电弧能量、光丝间距对复合焊接过程中熔滴过渡特征的影响。结果表明,激光的加入稳定了电弧,降低了射滴过渡的临界焊接电流值,由于激光对电弧的引导和压缩作用,改变了熔滴内电流线分布及电磁收缩力的大小及方向,进而影响了熔滴过渡特征。同时激光匙孔中喷射出大量的金属蒸气产生反作用力,改变了熔滴原来的受力状态,使熔滴过渡模式发生改变。随着焊接电流的增加,电弧变得更加稳定,能量更加集中,等离子体流成为熔滴过渡的主导力。光丝间距的大小影响了熔滴过渡的频率,在光丝间距为 4 mm 时熔滴频率最大。

关键词 激光技术;激光-电弧复合焊接;熔滴过渡;熔滴受力;光丝间距

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.091401

Research on Force State and Transfer Characteristics of Droplets in CO₂-MAG Hybrid Welding Process

Zong Shishuai Liu Shuangyu Xue Fei Zhang Hong

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

Abstract A CO₂ laser-metal active gas (MAG) hybrid welding is used to weld the high strength steel of 5.0 mm thickness. Droplet transfer is observed with high speed camera and the forces on droplet are investigated in detail. The droplet transfer is strongly affected by laser power, arc power and the distance between laser and arc. The results indicate that laser could make arc plasma more stable and decrease the critical current of spray transfer for its leading and constricting functions on the arc by the laser. There are changes in the current distribution within droplet and the magnitude and direction of electromagnetic force. At the same time, a large number of metal gas from the keyhole makes a metal steam reaction, changing the force state of the droplet so that the droplet transfer mode is changed. With the increase of the welding current, the arc becomes more stable and the power of arc is more concentrated, making the plasma drag force decisive. The distance between laser and arc has an effect on the frequency of the droplet transfer. When the distance is 4 mm, the frequency of the droplet transfer is the maximum.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; droplet transfer; droplet stress; distance between laser and arc

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 160.3900

1 引言

近年来,人们将激光与金属惰性气体(MIG)/金属活性气体(MAG)复合焊接应用到了铝合金、不锈钢、

收稿日期: 2012-05-02; **收到修改稿日期**: 2012-05-17; **网络出版日期**: 2012-06-26

基金项目: 中国博士后科学基金(2011M500586)、吉林省自然科学基金(201215140)和教育部新世纪优秀人才支持计划(XSJ2008-1)资助课题。

作者简介: 宗士帅(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光-电弧复合焊接方面的研究。E-mail: zongshuai37@126.com

导师简介: 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、激光加工新工艺及新方法等方面的研究。E-mail: liushuangyu@cust.edu.cn(通信联系人)

高强钢等中厚板的焊接中^[1,2],而焊接过程中的熔滴过渡直接影响着焊缝整体成形、表面形貌和微观组织等。在激光-电弧复合焊接中由于激光的加入,与单独气体金属电弧焊接(GMAW)相比较,其熔滴过渡更加复杂,因而影响熔滴过渡的因素很多。刘双宇等^[3]指出在 CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊中,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。胡连海等^[4]指出在不同的激光与电弧间距下,激光光致等离子体对电弧的吸引作用及对电弧等离子体和熔滴的热辐射作用不同,导致在不同电流下存在一个焊接过程稳定时的最佳光丝间距。此时激光与电弧耦合作用最好,熔滴过渡形式为单一的射流过渡,焊接过程最稳定。以上主要从两热源的相互作用机理方面阐述了复合焊接中相关参数对熔滴过渡的影响。

熔滴的受力是影响熔滴过渡的主要因素。雷正龙等^[5]指出在激光-电弧复合焊接中,激光会对电弧产生吸引力反冲力从而阻碍熔滴的过渡,另外激光锁孔效应产生的金属等离子体对熔滴的热辐射作用提高了熔滴过渡的稳定性和熔滴的过渡频率。Gao 等^[6]指出在激光与电弧的相互作用下,熔滴内部电流线的分布被改变,使得电磁收缩力方向变为向下,从而避免了熔滴的过热,并完成了从焊丝向熔池的平稳过渡。韦辉亮等^[7]指出在激光-电弧复合焊接中,激光加入后由于激光对电弧的吸引作用,导致电弧向激光偏移,使得等离子体流流向激光方向偏移,因而等离子体流力竖直向下的分力减小,从而减小了促进熔滴过渡的力。吴艳明等^[8]对复合焊接过程中熔滴的受力进行了研究,并指出激光的加入改变了电磁力的大小和方向,产生了金属蒸气反作用力,因而改变了熔滴的受力状态。

本文采用 5 mm 厚高强钢板,通过高速摄像观察 CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊接中熔滴的过渡模式及电弧形态,结合复合焊接过程中的熔滴受力状态,研究了不同激光能量、电弧能量、光丝间距对熔滴过渡模式的影响。

2 试验方法

激光器为 Rofin DC050 板条 CO₂ 激光器,最大输出功率为 5 kW,激光光束模式为 TEM₀₀,反射聚焦镜的焦距为 352 mm,光斑直径为 0.3 mm。焊机为 Panasonic YD-350AG2HGE 型 MIG/MAG 焊机。采用型号为 CMOS-CR5000×2,采样频率为 5000 frame/s 的高速摄像机采集焊接过程中的电弧形态和熔滴过渡特征。通过自行研制的复合焊接装置进行旁轴复合。复合焊接试验装置如图 1 所示。

试样材料为高强钢板,其尺寸为 150 mm×30 mm×5 mm,采用直径为 1.2 mm 的不锈钢焊丝。MAG 焊枪保护气体为体积分数为 20% 的 CO₂ 和体积分数为 80% 的 Ar 组成的混合气体,直接从焊枪嘴流出,流量为 16 L/min;激光同轴保护气体为体积分数为 30% 的 He 和体积分数为 70% 的 Ar 组成的混合气体,气体流量为 25 L/min。试验的具体参数如表 1 所示。

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameter

Welding parameter	Value
Welding speed v / (m/min)	1.2
Defocusing amount Δf / 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

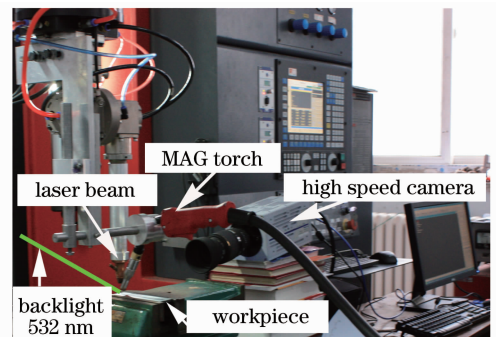


图 1 CO₂ 激光-电弧复合焊接试验装置

Fig. 1 Setup of CO₂ laser-MAG hybrid welding

3 试验结果及分析

3.1 熔滴的受力分析

熔滴受力状态是影响熔滴过渡特征的主要因素。图 2 给出了单独 MAG 电弧焊接和激光-电弧复合焊接时熔滴的受力示意图。熔滴的受力总体可分为两种,即分离力和阻力。其中重力和等离子体流力为分离力,表面张力和金属蒸气反作用力为阻力,而电磁收缩力由焊接电流的大小及相关参数决定其为分离力还是

阻力。

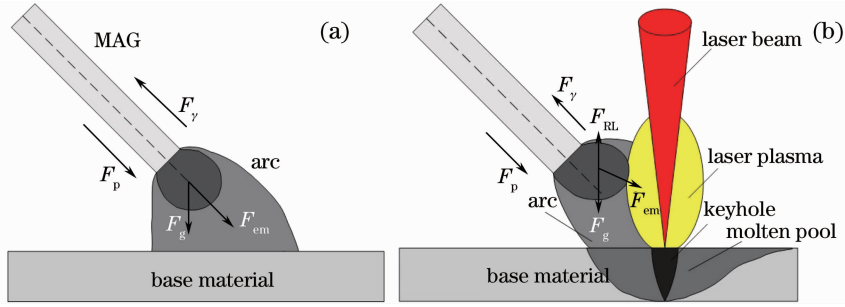


图 2 熔滴的受力示意图。(a)MAG 焊接熔滴受力图;(b)复合焊接熔滴受力图

Fig. 2 Force diagram of droplets. (a) MAG welding; (b) hybrid welding

F_g 为熔滴受到的重力,其大小为^[9]

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

式中 R 为熔滴半径, ρ 为熔滴密度, g 为重力加速度。可以看出熔滴重力的大小和熔滴的质量有关,熔滴的尺寸越大其质量越大,则重力在熔滴过渡过程中所起的作用也就越大,当熔滴过渡为射滴过渡时其作用甚微。

F_p 为等离子体流力,它在熔滴过渡中起着重要的作用,电弧中的等离子体由焊丝端部向熔池作高速运动,从而熔滴受到等离子体流的作用,这对熔滴的分离以及分离后的运动有重要的影响。其大小可表示为^[10]

$$F_p = \frac{C_d A_p \rho_f v_f^2}{2}, \quad (2)$$

式中 C_d 为等离子体流系数取 0.45, A_p 为等离子体流的作用面积, v_f 为等离子体流的流速, ρ_f 为等离子体流的密度。

F_γ 为熔滴的表面张力,是由于熔滴表面层分子引力不平衡而产生的沿表面作用界线上的张力,其在熔滴表面的合力表现为阻碍熔滴过渡。其大小可表示为^[11]

$$F_\gamma = 2\pi R\sigma, \quad (3)$$

式中 σ 为表面张力系数,其大小与熔滴的成分、温度等有关,温度越高表面张力系数越小。

F_{RL} 为金属蒸气反作用力,当激光加入并产生匙孔效应时,会从匙孔中喷发出大量的金属蒸气,从而阻碍熔滴过渡。其大小可表示为^[12]

$$F_{RL} = C_d A \frac{\rho_g v_g^2}{2}, \quad (4)$$

式中 A 为垂直于流动方向上的熔滴投影面积, ρ_g 为金属蒸气密度, v_g 为金属蒸气喷发速度。

F_{em} 为电磁收缩力,也是影响熔滴过渡的一个重要的力,它是熔滴内电流受到所在磁场洛伦兹力的宏观体现。当熔滴中的电流分散时,洛伦兹力表现为分离力;当熔滴内的电流会聚时,洛伦兹力阻碍熔滴的分离,如图 3 所示。

电磁收缩力可表示为^[11]

$$\mathbf{F}_{em} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{J} 为电流强度, \mathbf{B} 为磁场强度。电磁收缩力也可以通过熔滴内电流大小等参数来表示,即^[13]

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} F_{emz}, \quad (6)$$

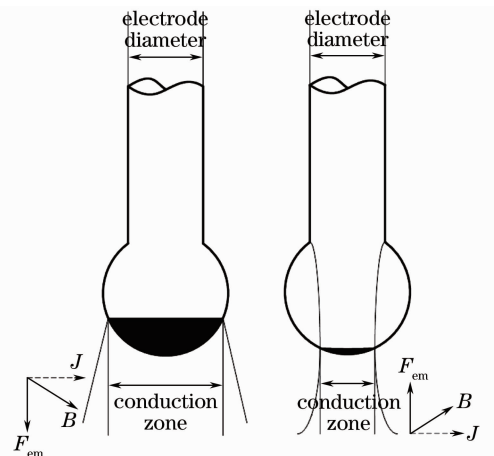


图 3 熔滴导电区及其受力

Fig. 3 Conduction zone and force of the droplet

式中

$$F_{\text{emz}} = - \left[\frac{1}{4} - \ln \frac{r_d \sin \theta}{r_w} + \frac{1}{1 - \cos \theta} - \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right], \quad (7)$$

μ_0 为导磁系数 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$), I 为焊接电流, 如图 4 所示, θ 为弧垂角, r_d 为熔滴半径, r_w 为焊丝半径。从图 5 可以看到, 当焊接电流小于 200 A 时, 随 θ 的增大电磁收缩力由阻力变为分离力, 当焊接电流大于 200 A 时, 随 θ 的增大电磁收缩力逐渐减小, 但始终表现为阻力。

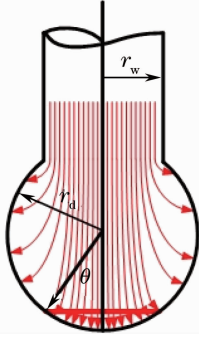


图 4 熔滴内部电流线分布图

Fig. 4 Internal current distribution of droplets

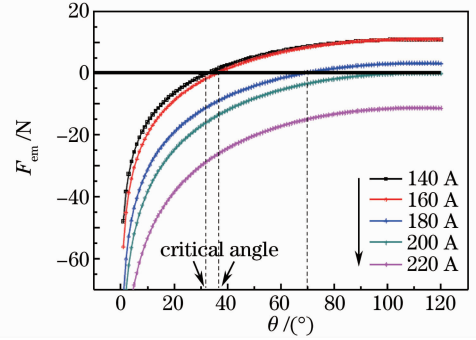


图 5 不同电流下电磁收缩力随 θ 的变化

Fig. 5 Variation of electromagnetic force with the arc changing angle θ for different welding currents

3.2 激光功率对复合焊接熔滴过渡的影响

图 6 给出了当焊接电流/电弧电压为 180 A/26 V 时, 单独 MAG 电弧焊接的熔滴过渡模式。图 6(a) 为短路过渡, 图 6(b) 为颗粒过渡, 图 6(c) 为射滴过渡。当过渡模式为短路过渡和颗粒过渡时容易形成飞溅, 且焊缝形成不良, 不易实现稳定的焊接。对于单独 MAG 电弧焊接, 在电流较小时熔滴过渡以短路过渡为主, 而平均电流略高于短路过渡电流时, 则会出现大滴过渡。当电流再增大时, 熔滴过渡模式转变为射滴过渡, 由大滴向小滴转变的电流称为临界电流。

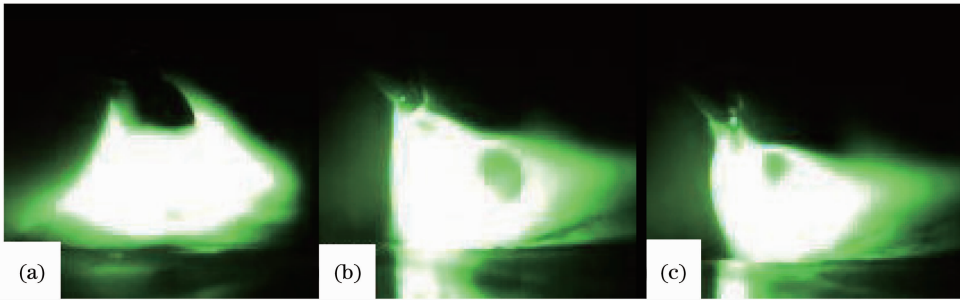


图 6 单独 MAG 电弧焊接下熔滴过渡。(a) 短路过渡; (b) 颗粒过渡; (c) 射滴过渡

Fig. 6 Droplet transfer of MAG. (a) Short-circuit transfer; (b) globular transfer; (c) spray transfer

图 7 为焊接电流/电弧电压为 180 A/26 V, 光丝间距为 $D_{LA} = 2 \text{ mm}$ 时不同激光功率下的熔滴过渡模式。从图 7(a) 和 (b) 可以看到, 激光功率为 1.5 kW 和 2.0 kW 时, 复合焊接与单独 MAG 电弧焊接相比较, 熔滴过渡形式由多种复杂不稳定的熔滴过渡转变为单一的射滴过渡。这是由于激光的加入改变了电弧的放电模式, 进而改变了电弧形态和熔滴的受力状态。

图 8 展示了激光加入前后电弧的物理放电原理。可以看到单独 MAG 电弧焊接时, 由工件提供电子来维持电弧, 此时电弧能量比较分散, 会损失掉一部分电弧能量, 所以电弧不稳定, 且当焊接速度较大时, 电弧变得飘忽不定, 严重影响了焊接的稳定性。激光加入以后, 当激光光致等离子体形成时, 其光致等离子体中的电子密度较大, 可达到 $10^{17} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [14], 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。从图 7(a) 也可以看到, 激光光致等离子体和电弧等离子体之间产生了一条导电通道, 通过这个导电通道可以给阴极的热电子发射提供更多的电子, 使电弧更加稳定。同时可以看出, 电弧被吸引到激光匙孔附近, 由于激光匙孔很窄, 仅 1 mm 宽, 因此电弧弧柱被压缩, 致使电弧能量更加集中。另外, 由于激光光致等

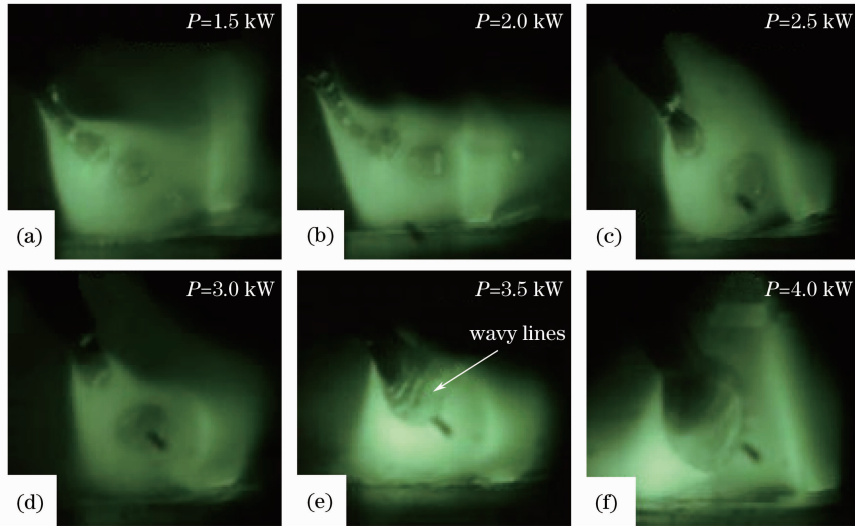


图 7 焊接电流为 180 A 时不同激光功率下复合焊接的熔滴过渡

Fig. 7 Droplet transfer of hybrid welding with different laser powers when the arc current is 180 A

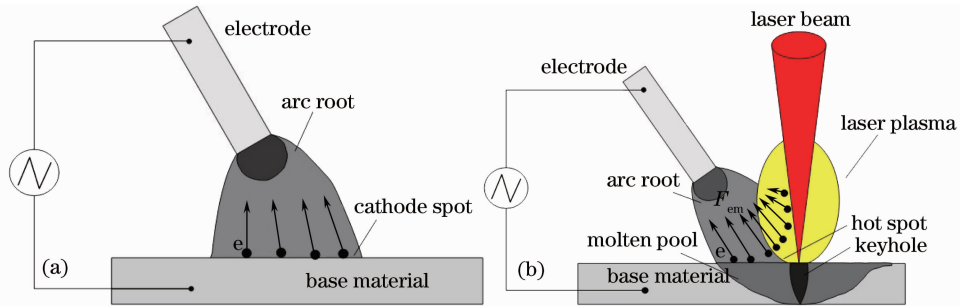


图 8 电弧的放电机理。(a)单独 MAG 电弧放电原理；(b)复合焊接电弧放电原理

Fig. 8 Arc discharge mechanism. (a) MAG arc discharge mechanism; (b) arc discharge mechanism of hybrid welding

离子体的热辐射作用^[15],使得熔滴的表面张力系数减小,由(3)式可知表面张力减小,从而更加有利于熔滴的细化,促进了熔滴的过渡。

如图 7(c)、(d)所示,激光功率为 2.5 kW 和 3.0 kW 时复合焊接的熔滴过渡的主要形式为颗粒过渡,且激光功率越大熔滴颗粒越大。这是由于激光的加入改变了电磁场、电弧力场、熔滴表面张力场等的强度,而且随着激光功率的增加这些场强的改变也更加明显,因而熔滴的受力状态也发生了明显的改变。由于激光对电弧的吸引及压缩作用,使得电弧形态及能量发生了改变,从而改变了电磁收缩力的大小及方向。由于激光光致等离子体对电弧吸引,使得电磁收缩力方向由原来沿着焊丝的方向变为与焊丝有一定的夹角,导致促进熔滴过渡的等离子体流力在沿着焊丝方向的分力变小,熔滴过渡变得困难。另外,当激光功率达到 2.5 kW 时,熔池内就会产生匙孔,从而产生金属蒸气反作用力,其方向为竖直向上,阻碍了熔滴的细化,且使得熔滴过渡频率变小。随着激光功率的增大,金属蒸气密度 ρ_g 和金属蒸气喷发速度 v_g 均增大,由(4)式可知金属蒸气反作用力增大。正是由于金属蒸气反作用力的加入和电磁收缩力的改变,改变了熔滴原来的受力状态,熔滴的过渡形式变为颗粒过渡。

当激光功率大于 3 kW 时,复合焊接的熔滴过渡则主要有颗粒过渡和短路过渡两种形式,且电弧的阴极斑点漂移不定,焊接过程不稳定。如图 7(e)所示,在熔滴表面产生了波纹,这是由于随着激光功率的增加, ρ_g 和 v_g 继续增大,金属蒸气反作用力明显增大,从而致使熔滴表面形成波纹。尽管随着激光能量的增加,表面张力变小、等离子体流力和重力变大,但此时金属蒸气反作用力变为熔滴过渡的主导力,因而使熔滴过渡变得困难。

3.3 焊接电流对复合焊接熔滴过渡的影响

图 9 给出了激光功率 $P=2.5$ kW, 光纤间距 $D_{LA}=2$ mm 时不同电弧能量下的熔滴过渡模式。从图 9

可以看出,在给定的激光能量作用下,随着电弧能量的增加,熔滴的过渡模式由短路过渡变为颗粒过渡,进而转变为射滴过渡。在此过程中,激光能量恒定,因而金属蒸气反作用力大小基本不变。

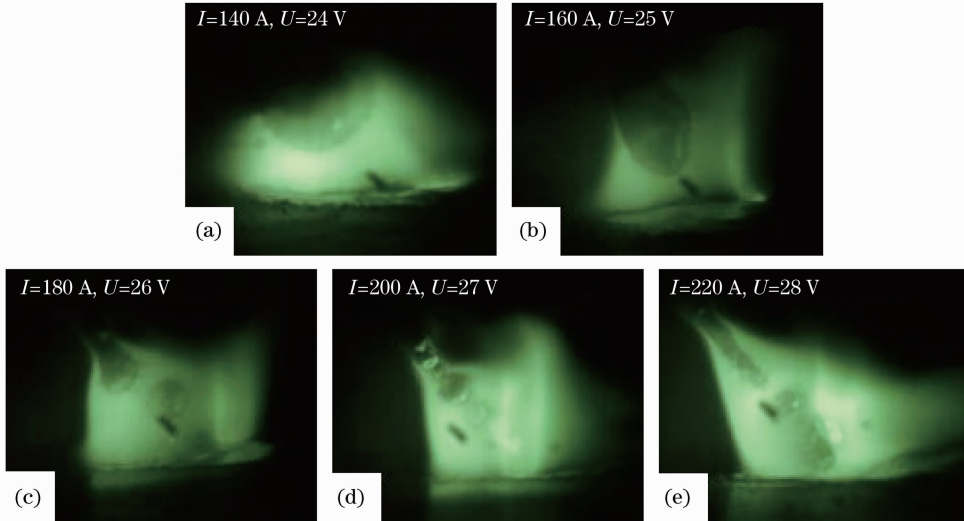


图9 激光功率 $P=2.5$ kW 时不同焊接电流下复合焊接的熔滴过渡模式

Fig. 9 Droplet transfer modes of various welding arc currents with the laser power of 2.5 kW

图10给出了不同焊接电流时的电弧特征和熔滴内部电流线的分布,从图中可以看到,当焊接电流为140 A时,电弧长度较小,且电弧不能完全覆盖熔滴。熔滴内部电流线分布如图10(b)所示,在熔滴上端电流线发散,而在熔滴底部电流线收缩,大部分电流从熔滴底部流出。由洛伦兹定律可知,作用在熔滴上的径向电磁力方向向内,促使熔滴收缩;而对熔滴轴向的洛伦兹力,由于电流线在熔滴的上部是分离的,熔滴上部电磁力方向向下,有助于熔滴过渡;电流线在熔滴的下部会聚,熔滴下部的轴向电磁力向上,阻碍熔滴过渡。从图5可知,当焊接电流为140,160,180 A时,存在临界 θ 值,使得熔滴上部的电磁收缩力为分离力,下部的电磁收缩力为阻力。图10(d)给出了焊接电流为180 A时的电流线分布。从图10(c),(d)可以看到,电弧能完全覆盖熔滴,在熔滴上端电流收缩,在熔滴底端电流发散,且相对于焊接电流 $I=140$ A时有较大的阳极斑点。从图5可知,当焊接电流 $I=180$ A时, $\theta > 70^\circ$ 才保证 F_{emz} 为正值,而从图10(c)可以看出熔滴明显收缩,这是由于熔滴上部的向内和向下的电磁力推动液态金属朝中心流动。随着焊接电流的增大,电流密度增加,

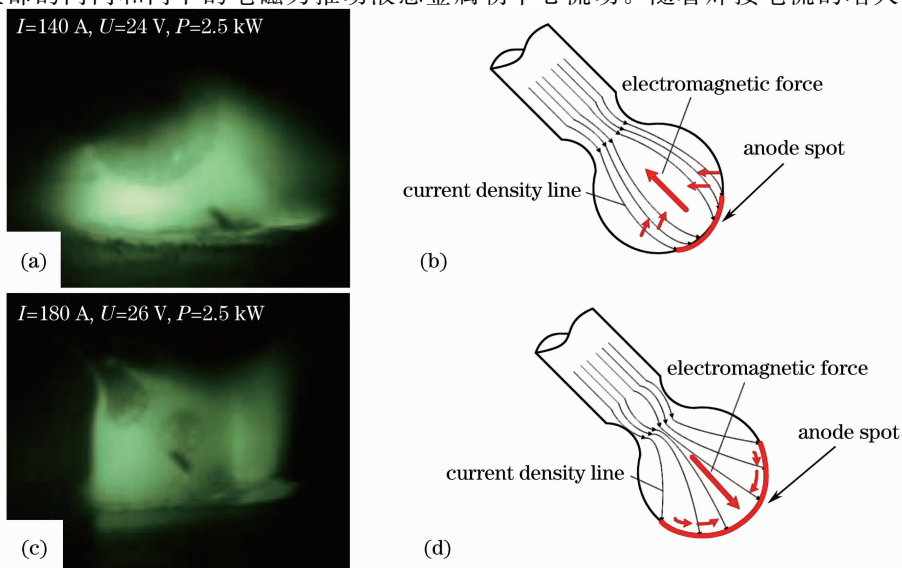


图10 电弧特征及电流线的分布。(a),(b)短路过渡模式;(c),(d)颗粒过渡模式

Fig. 10 Arc characteristics and schemes of the current line distributions. (a), (b) Short-circuit transfer mode; (c), (d) globular transfer mode

径向电磁力增加,使熔滴变细,从而改变熔滴过渡模式;同时等离子体流的流速 v_f 和等离子体流的密度 ρ_f 均增大,由(2)式可得等离子体流力增大,从图 9(d)可以看到,这时熔滴分离后沿着焊丝轴向运动,表明激光对熔滴的吸引作用及金属蒸气反作用力相对减小,因而等离子体流力变为熔滴过渡的主导力。另一方面,电弧能量的增加也使得电弧内部温度增高,再加之激光等离子体的热辐射作用,使熔滴的表面张力变小,也促进了熔滴的过渡。

3.4 光丝间距对复合焊接熔滴过渡的影响

图 11 给出了焊接电流/电弧电压为 180 A/26 V,激光功率为 3.5 kW 时,不同光丝间距下复合焊接熔滴过渡的高速摄像图片。可以看到随着光丝间距 D_{LA} 的增大,熔滴过渡模式由颗粒过渡转变为射滴过渡。当光丝间距 $D_{LA}=0$ 时熔滴过渡模式为颗粒过渡而且熔滴尺寸最大。这是因为此时激光束直接照射在熔滴上面,反射了一部分激光能量,而且熔滴也吸收了激光束的一部分能量,从而使得激光光致等离子体对熔滴的热辐射作用减小。另外,熔滴位于激光与工件作用点的正上方,此处受到的金属蒸气反作用力比较大,这两方面原因导致了熔滴的过渡困难,从而形成了颗粒过渡。因为金属蒸气反作用力主要位于激光匙孔上方,随着光丝间距的增加,熔滴逐渐远离激光匙孔区域,因而金属蒸气反作用力随之减小。由于光丝间距的增加,激光不再直接照射在熔滴上面,激光能量更集中,热辐射增强,熔滴表面张力减小,从而熔滴过渡形式变为射滴过渡。

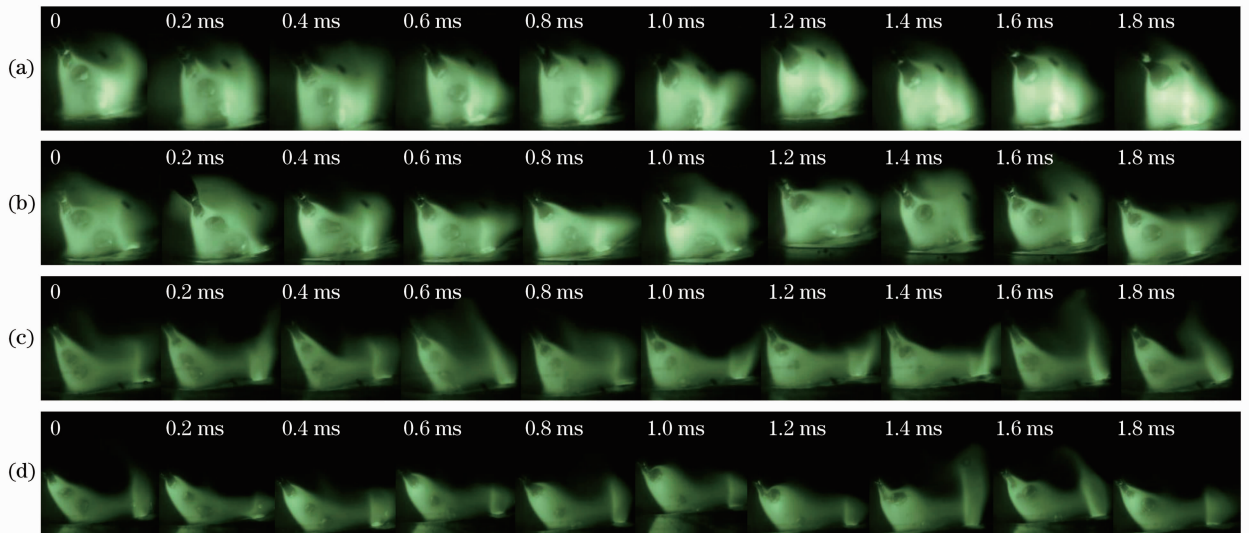


图 11 不同光丝间距时复合焊接的熔滴过渡。(a) $D_{LA}=0$; (b) $D_{LA}=2$ mm; (c) $D_{LA}=4$ mm; (d) $D_{LA}=6$ mm

Fig. 11 Droplet transfer of hybrid welding for various distances between laser and arc. (a) $D_{LA}=0$; (b) $D_{LA}=2$ mm; (c) $D_{LA}=4$ mm; (d) $D_{LA}=6$ mm

图 12 给出了不同光丝距离下的熔滴过渡频率。可以看出随着光丝间距的增加熔滴过渡频率先增加后减小,当光丝间距 $D_{LA}=0$ 时,由于激光等离子体热辐射作用减小以及金属蒸气反作用力的存在,熔滴的过渡受到阻碍,所以熔滴过渡频率较小。随着光丝间距的增加,熔滴逐渐远离激光匙孔区域,金属蒸气反作用力减小,另外激光光致等离子体的热辐射作用也减小,在二者的相互作用下,当 $D_{LA}=4$ mm 时复合焊接的熔滴过渡频率达到最大值。 $D_{LA}>4$ mm 时激光与电弧的相互作用程度减小,复合焊接的熔滴过渡频率接近单独 MAG 电弧焊接的熔滴过渡频率。

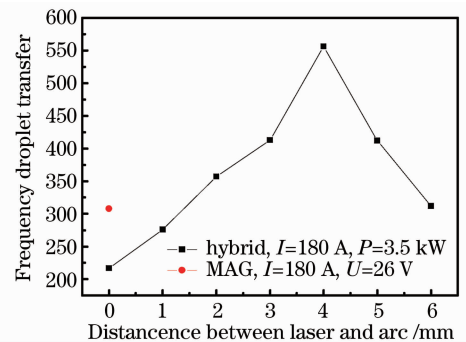


图 12 不同光丝间距下的熔滴过渡频率

Fig. 12 Frequency of droplet transfer versus distance between laser and arc

4 结 论

1) 激光的加入改变了电弧的放电机理,使得电弧能量更加集中,得到了稳定单一的射滴过渡。但是随

着激光功率的增大,由于从激光匙孔中喷发出大量的金属蒸气,改变了熔滴的受力状态,使得熔滴的过渡模式由射滴过渡转变为颗粒过渡。

2) 当焊接电流小于 160 A 时,电弧不能完全覆盖熔滴,熔滴内的导电区较小,其电磁收缩力在熔滴底部起阻力作用,由于此时金属蒸气反作用力相对较大,熔滴过渡模式为短路过渡或颗粒过渡。当焊接电流增大时,电磁收缩力起分离作用,且此时等离子体流变为主导力,促进了熔滴的过渡,熔滴过渡模式变为射滴过渡。

3) 随着光丝间距的增加,熔滴过渡频率先增大后减小,并在光丝间距 $D_{LA} = 4$ mm 时达到最大,最终接近单独 MAG 焊接时的熔滴过渡频率。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 Liu Shuangyu, Zhang Hong, Shi Yan *et al.*. Effects of process parameters on droplet transfer and bead shape in CO₂-MAG hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3172~3179
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
- 4 Hu Lianhai, Huang Jian, Zhuang Kai *et al.*. Effects of the distance between laser and arc on the droplet transfer[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(2): 49~52
胡连海, 黄坚, 庄凯等. 激光与电弧间距对激光复合焊熔滴过渡的影响[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(2): 49~52
- 5 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): 361~364
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
- 6 Ming Gao, Shuwen Mei, Zemin Wang *et al.*. Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, **212**(6): 1338~1346
- 7 Wei Huiliang, Li Huan, Wang Xuyou *et al.*. Hybrid interaction of laser and pulsed MIG arc and its influence on metal transfer[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, **32**(11): 41~44
韦辉亮, 李桓, 王旭友等. 激光-MIG 电弧的复合作用及对熔滴过渡的影响[J]. *焊接学报*, 2011, **32**(11): 41~44
- 8 Wu Yanming, Wang Wei, Lin Shangyang *et al.*. Analysis of droplet behavior in Nd:YAG laser-pulsed MAG hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, **32**(7): 83~86
吴艳明, 王威, 林尚扬等. Nd:YAG 激光-脉冲 MAG 复合热源焊熔滴过渡分析[J]. *焊接学报*, 2011, **32**(7): 83~86
- 9 Jean-Pierre Planckaert, El-Hadi Djermoune, David Brie *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
- 10 Y. S. Kim, T. W. Eagar. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding[J]. *Welding Journal*, 1993, **72**(6): 269~272
- 11 I. Pires, L. Quintino, R. M. Miranda. Analysis of the influence of shielding gas mixture on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate[J]. *Materials and Design*, 2007, **28**(5): 1623~1631
- 12 Zhao Xiaobao, Zhou Xin. Engineering Fluid Mechanics[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004. 57~65
赵孝保, 周欣. 工程流体力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004. 57~65
- 13 Shuangyu Liu, Fengde Liu, Hong Zhang *et al.*. Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO₂ laser-MAG hybrid welding process[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**(4): 1019~1025
- 14 Moriaki Ono, Yukio Shinbo, Akihide Yoshitake *et al.*. Development of laser-arc hybrid welding[J]. *NKK Technical Review*, 2002, **86**(7): 8~12
- 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. Laser*, 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