

# 激光介入不锈钢自保护药芯焊丝 MAG 电弧堆焊熔滴受力分析

刘西洋<sup>1,2</sup>, 杨淼森<sup>2</sup>, 徐 错<sup>1</sup>, 霍树斌<sup>1,3</sup>, 刘满雨<sup>1,3</sup>

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 上海电机学院, 上海 201306;  
3. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 哈尔滨 150028)

**摘要:** 以不锈钢自保护药芯焊丝为研究对象, 借助高速摄像采集了激光介入 MAG 电弧堆焊的熔滴和电弧图像, 研究了激光介入不锈钢自保护药芯焊丝 MAG 电弧堆焊的熔滴受力。结果表明, 激光的介入改变了焊丝端头熔化状态, 焊丝端头发生局部熔化、半熔熔化、全熔熔化三种状态; 增大了电磁收缩力、等离子流力在焊丝轴线上的分力, 有利于熔滴过渡; 减小了表面张力, 有利于细化熔滴; 增加了气体动力, 在合适的激光参数下促进熔滴过渡, 熔滴过渡轨迹出现了右偏轴过渡、左偏轴过渡、沿轴过渡三种模式。

**关键词:** 激光技术; 熔滴受力; 自保护药芯焊丝

中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400237

## 0 序 言

堆焊过程中, 焊丝的熔化形式和熔滴受力状态对熔滴过渡稳定性具有重要影响。目前学者利用高速摄像技术, 对激光-电弧复合热源焊接的熔滴受力开展了大量研究。Guo 等人<sup>[1]</sup>认为自保护药芯焊丝在水下焊接时, 爆炸飞溅主要是由不稳定的排斥力和气体动力引起。Wu 等人<sup>[2]</sup>认为外加磁场辅助焊接时, 熔池内金属流动方向与速度发生改变, 进而对焊缝余高产生影响。陈彦宾等人<sup>[3]</sup>认为激光-GMAW (gas metal arc welding) 电弧复合双面同步横焊时, 选择合适的光丝间距, 熔滴在电磁力和等离子流力的作用下, 可以控制熔滴落点, 实现熔滴过渡稳定性的控制。刘万强等人<sup>[4]</sup>认为激光功率对熔滴半径、弧根角度和电磁收缩力方向与焊丝轴线所成夹角影响较大, 激光的加入使电弧轴线偏离焊丝轴线一个角度。何双等人<sup>[5]</sup>认为激光-GMAW 复合焊时, 激光加入产生的金属蒸汽反作用力改变了电磁力方向, 进而影响熔滴过渡。徐春鹰等人<sup>[6]</sup>认为激光的加入改变熔滴上下表面的压力差, 导致熔滴在接近熔池表面发生合并、过渡的频率减慢。李敏等人<sup>[7]</sup>在

分析 GMAW-P 电弧与光纤激光复合热源焊接熔滴过渡形态时, 首次引入了熔滴质心偏移量和临界轴向加速度两个特征量, 来定量描述熔滴过渡过程的稳定性及熔滴过渡的频率。韩丽梅等人<sup>[8]</sup>认为光-丝间距影响激光热源和电弧热源之间的协同效应及熔滴过渡的稳定性, 当光-丝间距为 1 mm 时, 熔滴过渡稳定。张晓峰和韦辉亮等人<sup>[9-10]</sup>认为熔滴过渡尺寸增加、过渡频率减小的主要原因是等离子流力竖直向下的分力减小。

上述研究主要集中在激光介入实芯焊丝电弧堆焊熔滴受力领域, 而关于激光介入不锈钢自保护药芯焊丝 MAG 电弧堆焊熔滴受力研究的报道很少。文中通过高速摄像采集激光介入自保药芯焊丝 MAG 电弧堆焊的熔滴和电弧图像, 分析了激光的介入对熔滴受力的影响规律, 对熔滴过渡稳定性的控制具有重要的参考价值。

## 1 激光介入 MAG 电弧堆焊熔滴受力模型

光-丝间距  $D_{LA}$  用激光束和焊丝端头分别与试板表面接触点之间的距离表示, 定义激光束作用在试板上时  $D_{LA}$  为正值, 激光束作用在焊丝上时  $D_{LA}$  负值。 $D_{LA}$  示意图见图 1 所示。

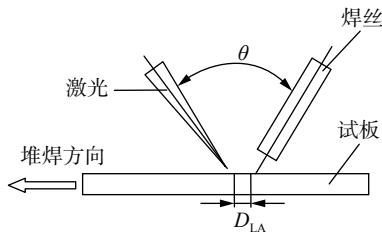


图 1  $D_{LA}$  示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of  $D_{LA}$

激光介入 MAG 电弧堆焊熔滴受力主要包括重力  $F_g$ 、表面张力  $F_\sigma$ 、电磁收缩力  $F_e$ 、等离子流力  $F_p$ 、气体动力  $F_q$ 。熔滴受力与激光作用位置有关，熔滴受力模型如图 2 和图 3 所示。

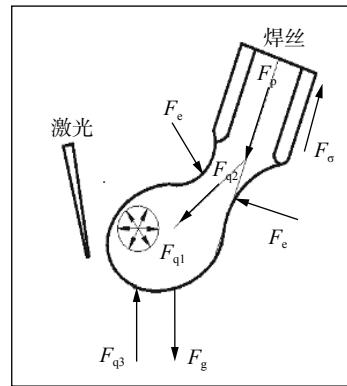


图 2  $D_{LA} = +2 \text{ mm}$  熔滴受力示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of droplet stress when  $D_{LA}$  is  $+2 \text{ mm}$

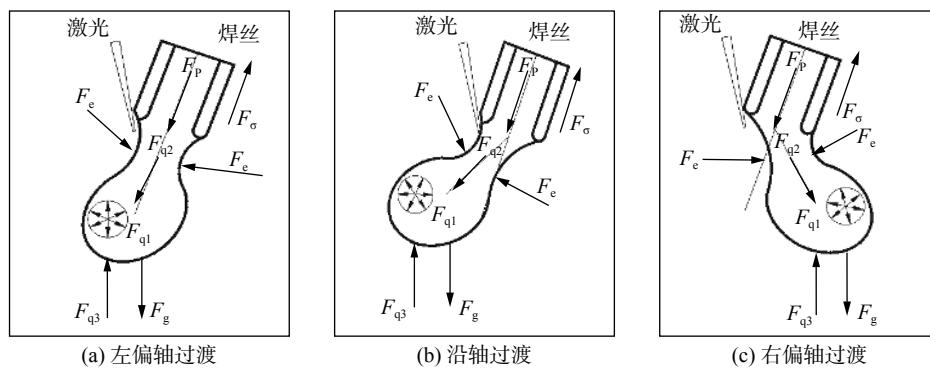


图 3  $D_{LA} = 0, -2 \text{ mm}$  熔滴受力示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of droplet stress when  $D_{LA}$  is  $0 \text{ mm}$  and  $-2 \text{ mm}$

重力  $F_g$  在平面堆焊时对熔滴过渡起促进作用。表面张力  $F_\sigma$  促使熔化金属吸附在焊丝端部，对熔滴过渡起阻碍作用。电磁收缩力  $F_e$  根据电弧弧根位置的不同，对熔滴过渡起到促进或阻碍作用，电弧弧根面积小于熔滴的最大横截面积时，阻碍熔滴过渡；电弧弧根面积大于熔滴的最大横截面积时，促进熔滴过渡，如图 4 所示。

动力  $F_{q1}$ 、来自熔滴或焊丝端头的气体动力  $F_{q2}$  及来自母材的气体动力  $F_{q3}$ ，可以促进或阻碍熔滴过渡。

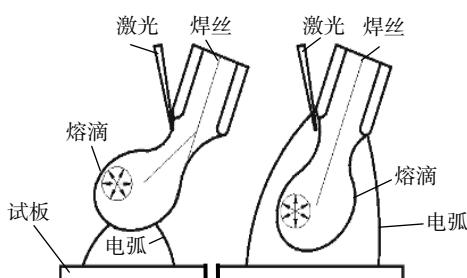


图 4 熔滴受力示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of droplet stress

等离子流力  $F_p$  在熔滴过渡中起促进作用。气体动力  $F_q$  是指焊接时材料气化所产生的反作用力，根据材料气化位置的不同，包括来自药芯内部的气体

## 2 激光介入 MAG 电弧堆焊熔滴受力分析

自保护药芯焊丝因其焊丝横截面的不对称及药芯中含有一定量的矿物质，导致药芯与钢皮的导电性差异较大，形成药芯滞熔，其熔滴过渡有自己的特性。熔滴过渡直径较大（约为焊丝直径的 1.5~3 倍），多为左偏轴形式过渡；电弧和熔滴围绕滞熔渣柱旋转，电弧作用点易偏向熔敷金属。即熔滴质心偏离焊丝轴线<sup>[9]</sup>，与焊丝轴线夹角为  $\alpha$ ；电弧中心线偏离焊丝轴线，与焊丝轴线夹角为  $\beta$ 。熔滴质心、电弧中心线、焊丝轴线位置示意图见图 5 所示。

图 5 中可知， $\alpha$  和  $\beta$  的大小和方向发生变化将对电磁收缩力、表面张力、等离子流力、气体动力产生影响。

当假定电流密度在熔滴内部均匀分布时，激光-MAG 复合焊接实芯焊丝时的电磁力可用下式进行表示<sup>[4]</sup>，即

$$F_e = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[ \ln \frac{R_d \sin \varphi}{R_h} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \varphi} + \frac{1}{(1 - \cos \varphi)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \varphi} \right] \cos \alpha \quad (1)$$

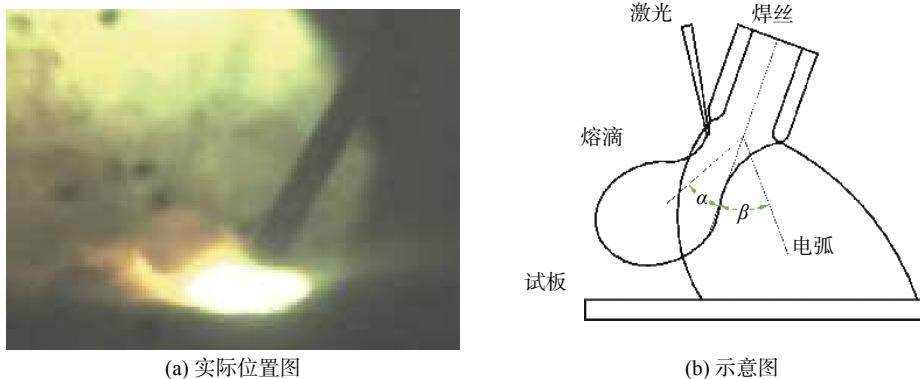


图5 熔滴质心、焊丝轴线和电弧中心线位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of droplet center of mass, axis of wire and center line of arc

式中: $I$ 为焊接电流; $\mu_0$ 为真空磁导率( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m);  
 $R_d$ 为熔滴半径; $R_h$ 为焊丝半径; $\alpha$ 为熔滴质心与焊丝轴线成夹角; $\varphi$ 为弧垂角(指熔滴最大横截面中心与电弧弧根横截面半径处连线偏离竖直方向的夹角。电弧弧根面积小于熔滴的最大横截面积时,

$$F_e = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \left[ \ln \frac{R_d \sin \varphi}{R_h} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \varphi} + \frac{1}{(1 - \cos \varphi)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \varphi} \right] \cos \alpha \cos \beta \quad (2)$$

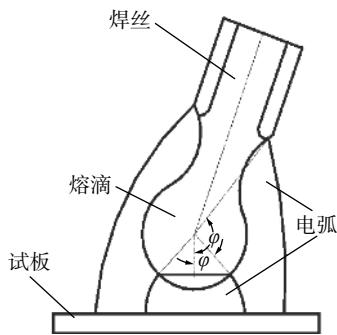


图6 弧垂角示意图

Fig. 6 Schematic diagram of arc vertical angle

自保护药芯焊丝与实芯焊丝因焊丝结构和气体保护方式不同,激光的介入对不锈钢自保护药芯焊丝MAG电弧堆焊熔滴受力影响显著,主要以下几方面改变了熔滴受力,进而对熔滴过渡产生影响。

(1) 激光的加入改变了 $\alpha$ 和 $\beta$ 的大小,采用合适的工艺参数(激光功率1.5 kW,光丝间距0 mm,堆焊电压26 V,送丝速度3.6 m/min,堆焊速度0.6 m/min),可以实现自保护药芯焊丝熔滴质心和电弧轴线回归到焊丝轴线上,熔滴过渡同实芯焊丝一样,形成沿轴过渡。即 $\alpha=0$ , $\beta=0$ , $\varphi=90^\circ$ ,根据公式(2),可得

$$F_e = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \left[ \ln \frac{R_d}{R_h} + \frac{8\ln 2 - 5}{4} \right] \quad (3)$$

试验中 $R_h$ 固定,通过公式(3)可以看出激光介入不锈钢自保护药芯焊丝MAG电弧堆焊时电磁力 $F_e$ 是熔滴直径 $R_d$ 的函数,自保护药芯焊丝 $R_d >$

弧垂角小于 $90^\circ$ ;电弧弧根面积大于熔滴的最大横截面积时,弧垂角大于 $90^\circ$ ,其示意图如图6所示。

自保护药芯焊丝激光-MAG复合堆焊时,出现了电弧轴线偏离角 $\beta$ ,对公式(1)进行了完善,如公式(2)所示。

$R_h$ ,因此电磁力 $F_e$ 随着熔滴直径 $R_d$ 的增加而增大。

(2) 激光通过高能量密度及改变 $\alpha$ 和 $\beta$ ,使得熔滴受热温度不同,进而改变了熔滴的表面张力。激光作用点处温度约为电弧作用区的2倍,提升了熔滴的温度,使得熔滴表面张力降低,表面张力随温度的变化的经验公式为

$$\sigma_t = \sigma_0 \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^n \quad (4)$$

式中: $\sigma_t$ 为绝对温度 $T$ 时熔滴的表面张力; $T$ 为绝对温度; $\sigma_0$ 为绝对 $0^\circ$ 时熔滴的表面张力; $T_c$ 为临界温度;液态金属 $n=1$ 。

表面张力降低促使熔滴半径 $R_d$ 减小(如图7所示激光-MAG堆焊的熔滴过渡尺寸小于MAG堆焊的),使得熔滴所受 $F_e$ 变小,表面张力达到某一数值时,自保护药芯焊丝 $R_d \approx R_h$ ,根据公式(3),可得

$$F_e = 0.385 \times \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \quad (5)$$

(3) 激光加入产生的金属蒸汽,为电弧的稳定燃烧提供了大量带电粒子(光致等离子体),降低了电弧经过该路径时的电阻,为了维持电弧电压值稳定,电弧形态发生了扁圆柱形向圆锥形的变化。电弧面积增加了69%,电弧纵截面长度增加了一倍,宽度增加了8%。电弧空间的变化,一方面增加了等离子流对熔滴的作用面积;另一方面为熔滴充分长大提供了足够空间,进而促进了熔滴过渡,降低了

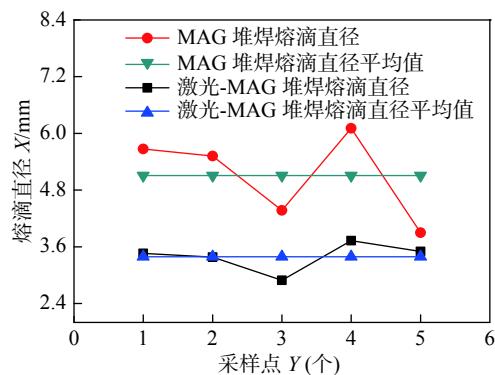


图 7 激光-MAG 复合堆焊和 MAG 堆焊的熔滴过渡尺寸  
Fig. 7 Size of droplet transfer in laser-MAG hybrid surfacing and MAG surfacing



(a) MAG 电弧

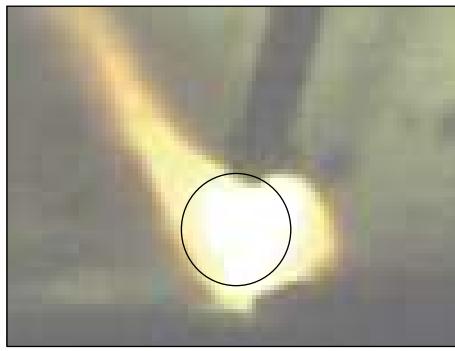


(b) 激光介入 MAG 电弧

图 8 两种堆焊电弧形态  
Fig. 8 Arc Shapes of the two surfacing methods



(a) 药芯滞熔



(b) 全熔熔化



(c) 半熔熔化



(d) 局部熔化

图 9 焊丝端头熔化状态  
Fig. 9 Melting state of the wire end

熔滴发生短路过渡的概率。两种堆焊电弧形态如图 8 所示。

(4) 激光介入自保护药芯焊丝 MAG 电弧堆焊时, 激光的加热方式与焊丝导电性无关, 使焊丝端头发生了全熔熔化、半熔熔化和局部熔化三种熔化状态 (图 9), 其中焊丝端头发生全熔熔化时消除了自保护药芯焊丝因外皮和药芯导电性能差异较大引起的滞熔现象, 如图 9b 所示。

(5) 激光通过增加气体动力点 (焊丝端头或熔滴、母材), 增大气体动力在熔滴过渡中作用。来自母材的金属蒸汽反作用力阻碍熔滴过渡, 来自焊丝

端头或熔滴的金属和非金属蒸汽阻碍或促进熔滴过渡。熔滴发生左偏轴过渡,激光束在熔滴上方时,激光主要作用在熔滴和焊丝端头促进熔滴过渡;激

光束在熔滴下方时,激光作用在母材上阻碍熔滴过渡。熔滴发生右偏轴过渡时激光作用在焊丝端头或母材上阻碍熔滴过渡。高速摄像如图10所示。

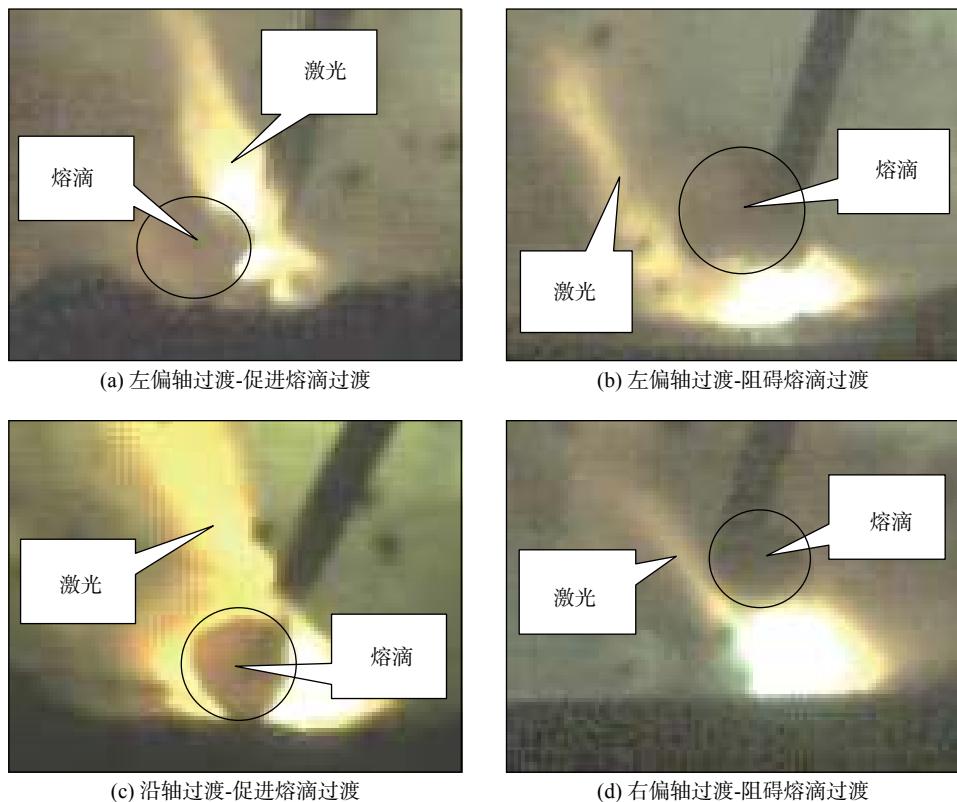


图10 激光-MAG 堆焊熔滴过渡

Fig. 10 Droplet transfer of laser -MAG surfacing

### 3 结 论

(1)建立了激光介入不锈钢自保护药芯焊丝MAG电弧堆焊熔滴受力模型。根据光-丝间距的不同,熔滴过渡可分为右偏轴过渡、左偏轴过渡和沿轴过渡。发生沿轴过渡时,激光-MAG复合堆焊的电磁力 $F_e$ 是熔滴直径 $R_d$ 的函数,电磁力 $F_e$ 随着熔滴直径 $R_d$ 的增加而增大。

(2)激光通过改变电磁收缩力方向(电弧轴线方向)与焊丝轴线的夹角、熔滴质心与焊丝轴线的夹角及熔滴的受热温度,控制电磁收缩力、表面张力、气体动力的大小和方向,进而对熔滴过渡产生影响。

(3)激光的介入不锈钢自保护药芯焊丝堆焊过程,通过合适的激光参数熔滴可以实现沿轴过渡。优化工艺参数为激光功率1.5 kW,光丝间距0 mm,堆焊电压26 V,送丝速度3.6 m/min,堆焊速度0.6 m/min。

(4)激光的加入改变了自保护药芯焊丝端头的熔化状态。焊丝端头发生全熔熔化时,改善了药芯焊丝因自身钢皮和药芯导电性能差异较大引起的药芯滞熔。

### 参考文献:

- [1] Guo N, Fu Y, Feng J, et al. Classification of metal transfer mode in underwater wet welding[J]. Welding Journal, 2016, 95(4): 133S–140S.
- [2] Wu C S, Yang F, Gao J, et al. Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(1): 188 – 193.
- [3] 陈彦宾, 冯杰才, 李俐群. 高强钢厚板激光-GMAW复合双面同步横焊特性研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 47 – 55.  
Chen Yanbin, Feng Jiecai, Li Liqun. Research on the characteristics of double-sided hybrid laser-gmaw synchronous horizontal welding of high-strength thick steel plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 47 – 55.

- [4] 刘万强, 李彦清, 刘凤德, 等. 激光-电弧复合焊熔滴过渡的电磁收缩力研究 [J]. 应用激光, 2016(2): 188 – 192.  
Liu Wanqiang, Li Yanqing, Liu Fengde, et al. Study on force behavior of droplet transfer on laser-arc hybrid welding[J]. Applied Laser, 2016(2): 188 – 192.
- [5] 何 双, 陈 辉, 陈 勇, 等. 激光功率对激光-MAG 复合焊熔滴行为的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(02): 021408.  
He Shuang, Chen Hui, Chen Yong, et al. Effect of laser power to droplet transfer of laser-MAG hybrid welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(02): 021408.
- [6] 徐春鹰, 刘双宇, 张 宏, 等. 激光-电弧复合焊过程的熔滴过渡特征与受力分析 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 154 – 161.  
Xu Chunying, Liu Shuangyu, Zhang Hong, et al. Study on the characteristics and mechanics of droplet transfer in laser arc hybrid welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6): 154 – 161.
- [7] 李 敏, 张 旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402008.  
Li Min, Zhang Wang, Hua Xueming, et al. Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hubrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402008.
- [8] 韩丽梅, 蔡得涛, 张宇鹏, 等. 光丝间距对 304 不锈钢激光-MIG 复合焊接接头影响的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061407.  
Han Limei, Cai Detao, Zhang Yupeng, et al. Influence of laser-arc distance on joint of 304 stainless steel by laser-MIG hybrid welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061407.
- [9] 张晓枫, 李 桓, 杨立军, 等. 激光功率对激光-双丝脉冲 MIG 复合焊接电弧形态及熔滴过渡的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 23 – 26.  
Zhang Xiaofeng, Li Huan, Yang Lijun, et al. Effect of laser power on arc behavior and metal transfer in laser-twin-wire pulsed MIG hybrid welding process[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 23 – 26.
- [10] 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.  
Wei Huiliang, Li Huan, Wang Xuyou, et al. Hybrid interaction of laser and pulsed MIG arc and its influence on metal transfer[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 41 – 44.

**第一作者简介:**刘西洋,男,1980年出生,博士,高级工程师。主要研究方向为激光-电弧复合热源堆焊技术。发表学术论文11篇。Email:[2004liuxiyang@163.com](mailto:2004liuxiyang@163.com)

**通信作者简介:**杨森森,男,1981年出生,博士,教授。Email:[yangmiaosen@163.com](mailto:yangmiaosen@163.com)