

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

李敏^{1,2}, 张旺^{1,3*}, 华学明², 李芳²

¹上海电力学院能源与机械工程学院, 上海 200090;

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;

³液化空气(中国)研发有限公司, 上海 200233

摘要 研究了高功率光纤激光与脉冲气体保护焊(GMAW-P)复合焊接中的等离子体动态行为、熔滴过渡模式以及电信号特征。结果表明,光纤激光焊接可以采用纯 Ar 气作为保护气体,GMAW-P 电弧与光纤激光复合后会导致激光等离子体膨胀增大,电弧的弧长变短。比较电压概率密度可以看出,激光引导模式相较于电弧引导模式时的负载动态波动更为剧烈。

关键词 激光技术; 光纤激光; 复合焊接; 焊接等离子体; 熔滴过渡模式

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402008

Investigation of Plasma and Metal Transfer Dynamic Behavior During Fiber Laser GMAW-P Hybrid Welding

Li Min^{1,2}, Zhang Wang^{1,3}, Hua Xueming², Li Fang²

¹College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

²Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

³Air Liquide (China) Research and Development Co., Ltd, Shanghai 200233, China

Abstract The dynamic behavior, metal transfer mode, as well as the characteristics of electrical signals during the fiber laser with high power and the pulsed gas metal arc welding (GMAW-P) hybrid welding process are studied. The results show that the pure Ar gas can be used as the shielding gas in the fiber laser welding. The mixing of the GMAW-P arc with the fiber laser leads to the expansion of laser plasma and the shortening of arc length. The comparison results of the voltage probability density show that the dynamic load fluctuation of the laser-leading mode is much more violent than that of the arc-leading mode.

Key words laser technique; fiber laser; hybrid welding; welding plasma; metal transfer mode

OCIS codes 140.3510; 140.3470; 140.3390; 160.3900

1 引言

光纤激光器已经可以达到 50 kW 的输出功率,在焊接的速度和熔透方面都表现出前所未有的优势。此外,光纤激光器波长为 1.07 μm ,与 CO₂ 激光(波长为 10.6 μm)相比其激光能量更容易被金属材料吸收。相较于传统的激光源,光纤激光具有能量效率高、结构设计紧凑、光束发散低、光束质量良好、安装容易、光束传输灵活、运行和维护成本低以及体积小等特点,已经开始慢慢替代传统 CO₂ 和 Nd:YAG 激光作为新一代主流激光加工模式光源^[1]。复合焊接在 1979 年^[2]被报道。复合焊接过程中,受激光匙孔喷射等离子体的影

收稿日期: 2016-09-08; 收到修改稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51505271)

作者简介: 李敏(1982—),女,博士,讲师,主要从事激光焊接与熔覆方面的研究。E-mail: zylimin@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: billy.zhang@airliquide.com

响,熔滴所受力的种类、大小及方向都会发生变化^[3],导致焊接过程中等离子体燃烧的稳定性和焊丝熔化及熔滴过渡模式发生变化^[4-8],进而导致更难获得良好的焊缝成型和最优的焊接速度^[9-10]。使用光纤激光作为复合焊接激光源,受激光波长和保护气体成分的影响,脉冲熔化极气体保护焊(GMAW-P)的熔滴过渡形式和电弧形态都将发生明显变化。学者们对光纤激光与 GMAW-P 复合后的熔深、熔合区面积及组织形貌进行了比较及优化^[11],但对其电弧耦合及焊丝熔化的研究相对较少^[10]。本文对光纤激光与 GMAW-P 复合过程中的等离子体及熔滴过渡动态行为进行研究,为优化控制这一焊接模式、扩大其使用范围和适用性提供理论参考。

2 实验条件

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,一台 GMAW-P 焊机,一台添加了窄带滤波片的高速摄影机,以及一台电信号同步采集及触发装置。

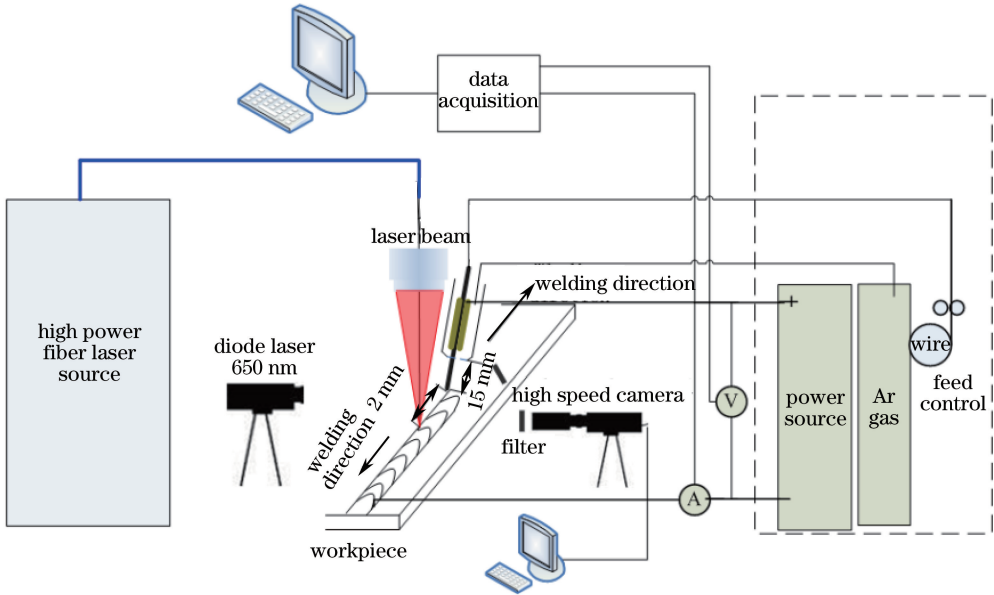


图 1 激光与 GMAW-P 复合焊接实验平台

Fig. 1 Experimental platform of laser GMAW-P hybrid welding

为了对焊接过程中熔滴过渡行为进行监控,采用一种基于偏振光原理的高速投影系统。系统包括:650 nm 红光激光源、扩束镜、组合偏振镜、滤波片 $[(650 \pm 1.5) \text{ nm}]$ 及高速摄影机(Fastcam-Super10KC, Photron 公司)。系统在外触发模式下工作,采样频率为 3000 frame/s。

通过霍尔电流传感器(CS600E2/4V, Chieful 公司)测量电流,采用霍尔电压传感器(VSM025A, Chieful 公司)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 公司)进行调理,采样频率为 20 kHz。采集得到的电信号通过 LabVIEW 软件在电脑上记录并显示;为了实现高速摄影与电信号采集的同步触发,实验过程中采用了实时系统集成总线技术。同时,采用 LabVIEW 软件对采集到的电信号进行统计分析,计算分析电压概率密度、平均电压及脉冲周期等信息。

3 实验结果及分析

3.1 等离子体动态特征

当光纤激光与 GMAW-P 电弧相互作用后,激光与电弧等离子体内部粒子的扩散及运动行为发生改变,直接影响作用过程的稳定性及能量的传输。其直观表现为复合之后的等离子体形态特征发生显著变化,从侧面反映了热源的相互耦合过程与结果。采用高速摄像方法,比较一个脉冲周期内不同焊接模式及不同时刻的等离子体形态特征变化以说明二者的耦合机理。实验采用体积分数为 99.999% 纯 Ar 气作为保护气

体,焊接过程使用的参数为:激光功率 4 kW,热源间距 2 mm,送丝速度 4 m/min;选用热轧态 E36 船用钢作为焊接板材,板厚为 15 mm,焊接前对工件进行磨床抛光处理,用丙酮清理表面油污和杂质;选用的焊丝型号为 CHW-50C6。

表 1 是采用 1ND8 减光片拍摄的等离子体形态。可以看出,单一的光纤激光焊接与 CO₂ 激光焊接存在很大的差异^[12];对于 CO₂ 激光焊接,如果采用纯 Ar 气作为保护气体,激光等离子体羽辉很高而且很不稳定;而对于光纤激光焊接,即使使用纯 Ar 气作为保护气体,激光等离子体羽辉也很弱,仅在匙孔上方约 2 mm 位置有激光致等离子体。因此,对于光纤激光焊接,纯 Ar 气可以起到抑制激光等离子体羽辉的效果。

当将光纤激光与 GMAW-P 电弧复合以后,从表 1 可以看出,无论是哪种模式或哪种状态,受电弧等离子体耦合的影响,匙孔上方的等离子体亮度和体积都比单一激光焊接时的强。此外可以看到,在峰值阶段(0~1 ms)等离子体的面积要大于基值时刻(4~7 ms)的。造成这一现象的原因在于:等离子体的动态行为依赖于等离子体内部粒子的电离及扩散程度;单一激光情况下,光纤激光焊接的逆韧致辐射吸收较弱,Ar 的电离程度小,金属蒸气少,激光等离子体羽辉较小;复合焊接过程中,焊丝端部熔化,大量金属蒸气进入激光传输通道,与 CO₂ 激光相比,虽然光纤激光减少了波长因素的影响,但熔化的焊丝端部提供了大量的电子和离子,进一步提高了电子-离子的碰撞频率,导致等离子体进一步膨胀。同时,不同焊接模式等离子体形态存在差异,激光引导模式时的等离子体形态区域要大于电弧引导模式时的。造成该现象的原因是:电弧引导模式下电弧在先,且电弧的能量密度比激光的能量密度小,工件表面熔化的金属有限,产生的金属蒸气较少,电离程度比激光引导模式时的电离程度弱,但激光匙孔提供了大量的电子,导电通道偏向匙孔,因此宏观上表现出电弧等离子体更加收缩,偏向匙孔的趋势更加明显。在激光引导模式下,激光在电弧前作用于工件,高能量密度的激光束会预先在焊接方向前方形成一个深熔的匙孔,在电弧等离子体下方产生先熔化熔池,高温下的熔池上方会产生大量金属蒸气,为电弧导电提供了大量的自由电子,因此电弧表现得更加发散。此外,电弧中金属蒸气和自由电子的增加也使得电弧等离子体进一步膨胀增大,电弧等离子体中大量的自由电子又进入激光等离子体,导致激光传输的逆韧致辐射现象增强,激光等离子体也出现了增强和扩展现象,因此观察到其导电通道更加宽阔。

表 1 光纤激光及复合焊接过程中的等离子体形态
Table 1 Forms of plasma generated in fiber laser and hybrid welding process

Time /ms	0	1	2	3	4	5	6	7
Welding mode								
Laser								
Arc-leading								
Laser-leading								

3.2 熔滴过渡动态特征

如前所述,激光的引入会改变等离子体的形态、空间粒子的电离程度和粒子的空间运动轨迹。等离子体形态的改变会导致熔滴端部电流分布形式发生变化,而等离子体形态又会对熔滴受到的电磁力的大小和方向产生影响。为了得到稳定的焊接过程,给出优化控制策略,就必须了解激光加入后熔滴过渡模式的改变趋势。

表 2 所示为加入激光以后的焊丝熔化及熔滴过渡模式,其中 t 为一个周期内距离起始时刻的时间。可以看出,与传统 CO₂ 激光加入 GMAW-P 时熔滴过渡变为多脉一滴不同,光纤激光的加入对熔滴过渡影响

并不是很大,熔滴过渡仍然近似为一脉一滴,仅在激光引导模式偶尔有一滴之后跟随小滴出现的现象。但是加入激光对弧长产生了明显的影响,图 2 所示为三种不同焊接模式的弧长比较结果。可以看出,激光加入后电弧的弧长 L 变短,且 $L_{\text{GMAW-P}} > L_{\text{arc-leading}} > L_{\text{laser-leading}}$ 。造成上述现象的主要原因是不同的焊接模式下熔滴所受电磁力的大小和方向存在差异:电弧引导模式下电弧在前,工件为电弧提供的自由电子有限,电弧等离子体会偏向激光匙孔,电磁力沿焊丝轴向的分量增大,促进熔滴过渡的力变小;与此相反,在激光引导模式下,激光在前,激光匙孔喷射的大量金属蒸气在电弧下方提供了足够的自由电子,电弧比较发散,电磁力沿焊丝轴向的分量减小,促进熔滴过渡的力变大,因此在相同脉冲参数情况下会偶尔出现一脉多滴的现象。

表 2 GMAW-P 及复合焊接过程熔滴过渡模式

Table 2 Metal transfer mode in GMAW-P and hybrid welding process

Welding mode	t / ms											
	0	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97	6.6	
GMAW-P												
Arc-leading												
Laser-leading												

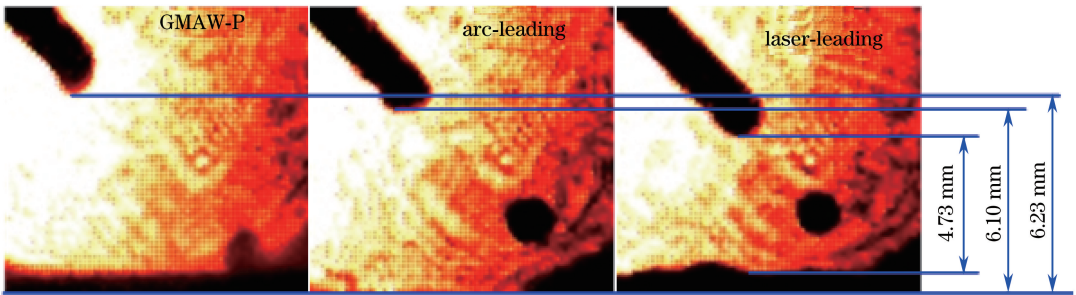


图 2 GMAW-P 及复合焊接过程的弧长比较

Fig. 2 Arc length comparison in GMAW-P and hybrid welding process

3.3 负载动态特征

电弧是弧焊电源的负载,因此电弧特性的变化将直接影响到电源的特性。对于加入激光以后的 GMAW-P 焊接过程,电弧等离子体的形态、尺寸、电离程度及物理特性都发生了变化,这些改变必将造成电弧负载特性的变化。现代弧焊电源可以进行更加细微的控制,但前提必须先要了解激光加入后的负载变化规律,然后才能根据需求优化电源的输出。针对本文所使用的焊接工艺参数,对单一 GMAW-P,激光引导及电弧引导模式的电流电压特性进行了比较分析。由于电源采用了内环恒流外环恒压的控制模式,因此焊接过程中电压的波动表征了焊接过程的动态变化和不稳定性。

图 3、4 是不同光纤激光复合模式下采集到的电信号及概率密度统计分析。从图 3 中可以看出, GMAW-P 弧焊过程的电信号采用的是系统优化的专家数据库参数,电信号比较稳定,电弧引导模式下电弧与激光相互作用比较弱,电源负载动态特性更多表现出 GMAW-P 时的负载特性,而激光引导模式下激光对电弧产生了重要的影响,电信号在很大范围内出现了波动,其负载动态性发生了明显的变化。对于电弧引导模式,其对电压输出的影响是使得峰值电压略有升高,而基值电压略有降低,其影响趋势与 CO_2 激光的一样,但是对电压幅值的影响相较 CO_2 激光的小很多。对于激光引导模式,其结果与 CO_2 激光的存在明显的差别, CO_2 激光源与 GMAW-P 复合后使电信号变得稳定,但是当光纤激光与 GMAW-P 复合后,在激光引导模式下电压的波动更为剧烈,这点可以通过图 3、4 看出。比较图 3 可以看出,受激光等离子体影响,熔滴无法在一个周期内脱落,在熔滴过渡阶段和基值阶段,电弧引导模式下的电压均存在很大的波动。比较图 4

也可以看出,单一 GMAW-P 和电弧引导模式的电压信号存在明显的三个峰,对应于脉冲的三个状态,但是激光引导模式的电压分布特征不明显,电信号波动更剧烈。此外,从图 3 可以看出,电信号频率之间的关系为 $T_{\text{GMAW-P}} < T_{\text{arc-leading}} < T_{\text{laser-leading}}$ 。根据实验数据对各种焊接模式下的平均电流、平均电压、熔滴大小、脉冲周期及电弧长度进行了比较,结果见表 3。因为整体控制为恒压,所以电压差异性不是很明显,但是平均电流存在 $I_{\text{GMAW-P}} > I_{\text{arc-leading}} > I_{\text{laser-leading}}$ 关系。

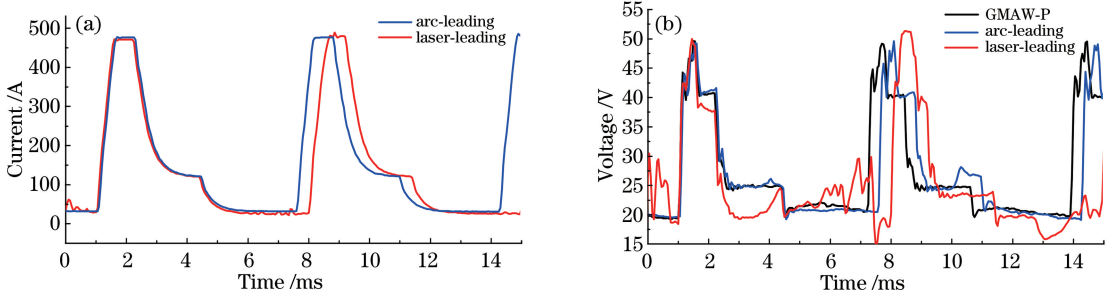


图 3 光纤激光复合焊接的(a)电流和(b)电压特性比较

Fig. 3 Characteristic comparison of (a) current and (b) voltage in fiber laser hybrid welding process

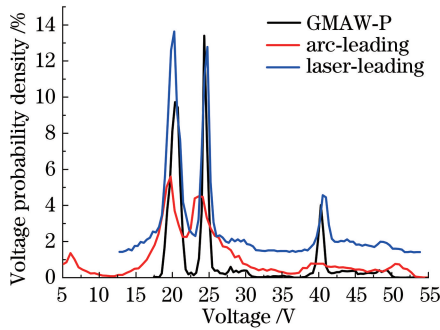


图 4 光纤复合焊接电压概率密度分布

Fig. 4 Voltage probability density distributions in fiber laser hybrid welding process

表 3 不同光纤激光复合焊接模式参数

Table 3 Parameters under different fiber laser hybrid welding modes

Welding mode	Average voltage /V	Average current /A	Droplet size /mm	Pulse period /ms	Arc length /mm
Laser-leading	25.46	141.86	1.20	7.10	4.73
Arc-leading	25.91	153.81	1.50	6.60	6.10
GMAW-P	26.08	161.34	1.13	6.25	6.23

不同焊接模式下弧长的差异性可以从焊丝受热熔化及电弧负载特性变化的角度来分析。对于单一 GMAW-P 焊接而言,焊丝熔化热主要来自两部分:电弧产热及电阻产热。在复合焊接过程中,由于激光的加入,焊丝熔化热的来源变为三个部分,表示为

$$P_m = P_A + P_R + P_L = I_a(U_m + I_a R_s) + P_L, \quad (1)$$

式中 P_m 为焊丝加热和熔化产生的总热量; P_A 为焊丝端部电弧产热; P_R 为电阻热; P_L 为激光致等离子体对焊丝的加热; I_a 为焊接电流; U_m 为焊丝熔化电压; $R_s = \rho L_s / S$ 是焊丝伸长部分的电阻, ρ 为焊丝的电阻率, L_s 为焊丝干伸长, S 为焊丝截面积。

焊丝的熔化速度等于送丝速度,即 $V_m = V_f$,且焊接过程中的送丝速度保持不变。激光的加入导致焊丝熔化过程中加入了新的热源 P_L ,原来单一 GMAW-P 的平衡状态被打破。为了保证焊接过程的稳定性, GMAW-P 焊机必须调节输出以重新获取平衡,控制系统通过降低平均电流的方式重新获得了平衡。激光引导模式下等离子体膨胀更加剧烈,提供给焊丝的 P_L 更大,最终导致了 $T_{\text{GMAW-P}} < T_{\text{arc-leading}} < T_{\text{laser-leading}}$ 及 $I_{\text{GMAW-P}} > I_{\text{arc-leading}} > I_{\text{laser-leading}}$ 的关系。

4 结 论

采用高速摄影对光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体形态和熔滴过渡行为在一个周期内的动态变化进行了实验观测,并采用电信号分析系统分析了复合前后的电信号特征规律,实验结果如下。

1) 加入 GMAW-P 电弧后,焊丝熔化为激光等离子体提供了大量的金属蒸气,导致等离子体内粒子数量急剧增大,激光等离子体的体积和亮度急剧增强。激光引导模式下,已经熔化的熔池导致熔池上方的金属蒸气浓度高于电弧引导模式下的浓度,电弧中金属蒸气和自由电子的增加也使得电弧等离子体进一步膨胀,等离子体的体积和亮度也更强。

2) 加入大功率光纤激光后,GMAW-P 焊接中熔滴的受力模式与大小发生变化,导致熔滴过渡模式发生改变。电弧引导模式受影响较小,但是激光引导模式会由原来的一脉一滴变为一脉两滴或一脉多滴。此外,激光加入后电弧的弧长变短,并且满足 $L_{\text{GMAW-P}} > L_{\text{arc-leading}} > L_{\text{laser-leading}}$ 的规律。

3) 激光的加入影响电信号的波动规律,但从电压概率密度分布来看,电弧引导模式下的电信号仍存在峰值电压、过渡电压及基值电压三个主特征峰。激光引导模式下激光对电弧产生了更为剧烈的影响,等离子体和熔滴过渡模式发生了更大变化,电信号在很大范围内出现了波动,其电压的波动相较电弧引导时也更为剧烈。

参 考 文 献

- [1] Quintino L, Costa A, Miranda R, *et al.* Welding with high power fiber lasers—a preliminary study[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(4): 1231-1237.
- [2] Steen W M, Eboo M. Arc augmented laser welding[J]. *Metal Construction*, 1979, 3(7): 332-336.
- [3] Lei Zhenglong, Li Liqun, Chen Yanbin. Study on droplet transfer mechanical behavior in laser-MIG hybrid welding process[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(s1): 259-263.
雷正龙, 李俐群, 陈彦宾. 激光-MIG 复合热源焊接熔滴过渡力学行为分析[J]. *中国激光*, 2007, 34(s1): 259-263.
- [4] Tani G, Campana G, Fortunato A, *et al.* The influence of shielding gas in hybrid LASER-MIG welding[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8050-8053.
- [5] Kutsuna M, Chen L. Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel[C]. *SPIE*, 2003, 4831: 341-346.
- [6] Campana G, Fortunato A, Ascari A, *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.
- [7] Hu Lianhai, Huang Jian, Wu Yixiong, *et al.* Study on coupling mechanism and metal transfer in laser double-wire MIG arc hybrid welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0602005.
胡连海, 黄 坚, 吴毅雄, 等. 激光双 MIG 电弧复合焊耦合机制及熔滴过渡研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602005.
- [8] Qiao Junnan, Wang Qiming, Zou Jianglin, *et al.* Microstructure and mechanical property of A7N01 aluminum alloy joints by fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding with filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0902001.
乔俊楠, 王启明, 邹江林, 等. 光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 A7N01 铝合金接头的组织与力学性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0902001.
- [9] Liu S, Liu F, Zhang H, *et al.* Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO₂ laser-MAG hybrid welding process[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 44(4): 1019-1025.
- [10] Roepke C, Liu S, Kelly S, *et al.* Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel[J]. *Welding Research*, 2010, 89(7): 140-149.
- [11] Cao X, Wanjara P, Huang J, *et al.* Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(6): 3399-3413.
- [12] Zhang Wang. An investigation of dynamical metal transfer and plasma interaction during laser-GMAW-P hybrid welding [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
张 旺. CO₂ 激光+脉冲 GMAW 焊接等离子体及熔滴过渡控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.