

空间多位置摆动激光填丝焊接熔池 动态行为及焊缝成形

李军兆^{1,2,3}, 孙清洁^{1,2}, 张清华³, 刘一搏^{1,3}, 甄祖阳³, 康克新^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 湖南湘投金天新材料有限公司, 益阳, 413000;
3. 哈尔滨工业大学(威海), 特种焊接技术省重点实验室, 威海, 264209)

摘要: 以 316L 奥氏体不锈钢管道为研究对象, 在摆动激光焊接研究基础上, 对管道多位置激光填丝焊接熔滴过渡和焊缝成形展开研究, 分析焊接熔池动态特征, 优化各位置区间工艺参数, 进而实现管道全位置激光焊接。结果表明, 摆动激光束周期性的作用于填充焊丝, 产生的反冲压力能够促进熔滴过渡, 使得焊丝始终以“液桥”形式向熔池过渡; 同时摆动激光增强了熔融金属侧向流趋势, 提高熔池界面表面张力, 削弱空间多位置下重力对熔池形貌的影响, 保证各空间位置熔池均能稳定存在, 焊缝成形连续均匀。

创新点: (1) 开展了管道上多角度位置的摆动激光填丝焊接工艺研究。
(2) 结合熔池受力状态, 分析了不同角度位置的焊缝成形特征。

关键词: 空间多位置焊接; 激光焊接; 熔池动态行为; 焊缝成形

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20210416001

0 序言

在核电站、石油化工厂建设过程中, 不可避免的会涉及到固定管道的焊接, 这就对管道全位置焊接技术提出了迫切需求^[1]。特别是对于大型厚壁构件, 通常采用传统电弧窄间隙形式进行多层多道焊接, 坡口尺寸大, 焊接速度慢, 焊接过程热积累严重, 增加了全位置焊接熔池控制难度^[2]。而激光焊接具有高速焊接的优势, 热源能量集中, 可采用超窄间隙坡口形式提高焊接效率, 是一种具有广泛应用前景的全位置焊接技术。

传统全位置电弧焊接时, 为了抑制窄间隙坡口侧壁熔合不良和熔池失稳下淌缺陷, 哈尔滨工业大学徐望辉等人^[3]采用窄间隙摆动 MAG 焊接方法发现摆动电弧能够增加对侧壁热输入、有效控制熔池形成过程, 在非平焊位置下能够一定程度抵消重力影响, 提高熔池稳定性。山东大学 Jia 等人^[4]提出旋转 TIG 电弧立焊技术, 电弧循环旋转对熔池具有搅

拌作用, 提高焊缝表面成形质量。相比于电弧焊接, 常规激光焊接主要受到熔池表面张力和重力的影响, 缺少电弧对熔池的作用力。但是激光焊接速度快、热输入小, 熔池凝固速率快, 熔池表面张力和保护气体压力能够影响熔池流动, 改善焊接稳定性^[5-6]。华中科技大学余阳春^[7]发现焊丝以液桥形式过渡时对熔池冲击小, 是最稳定的激光填丝焊接模式。日本大阪大学 Fujinaga 等人^[8]发现矩形调制激光作用于填充焊丝产生的金属反冲压力能够对非平焊位置熔滴过渡提供驱动力。北京工业大学贾亚洲等人^[9]同样发现激光作用下蒸气反冲力能够提高熔滴过渡频率。

针对于管道空间多位置激光填丝焊接, 开展不同空间位置下熔滴过渡、熔池动态过程、焊缝成形的研究, 为实现全位置高效激光焊接具有重要意义。

1 试验方法

试验材料为 316L 不锈钢, 焊丝 ER316 奥氏体不锈钢, 直径为 1.0 mm。试验采用最大输出功率为 6 kW 的连续激光器和定制激光头, 可实现最大横向摆动幅值和频率分别为 10.0 mm 和 300 Hz。

高速摄像系统主要由 Olympus i-SPEED3 高速摄影机、FC 光纤耦合激光系统和滤光片组成。采用波长 808 nm、功率 40 W 的辅助激光光源为焊接熔池采集提供足够亮度。焊接运行机构为 FANUC 六轴机器人和变位机,能够方便进行各空间位置下的焊接。固定管道全位置激光填丝焊接示意图如图 1 所示,全位置焊接采用机器人控制激光运动轨迹,通过编程能够设定不同位置下的焊接工艺参数。焊接过程采用前置送丝方式,送丝角度为 45° ,激光头倾斜角度为 8° ,单侧激光摆动幅度为 2.0 mm,摆动频率为 75 Hz,光丝间距为 0 mm,采用多通道纯氩气体保护焊接高温熔池,同时对熔池表面提供一定的压力。

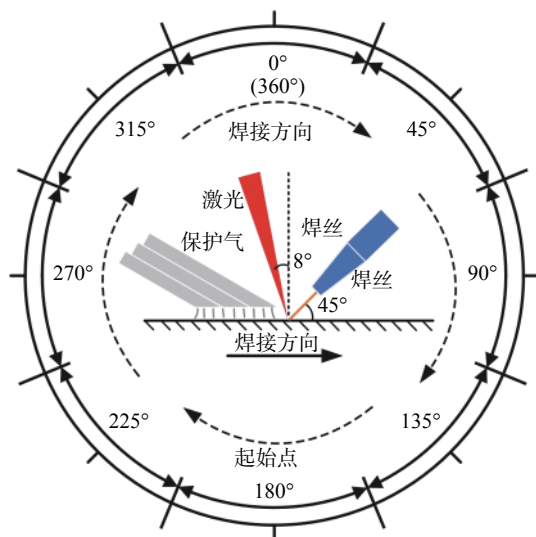


图 1 空间的多位置激光填丝焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser wire feeding welding process for various positions in space

2 试验结果

2.1 焊丝熔化过程

图 2 为横向摆动激光填丝焊接过程中的焊丝动态熔化与熔池形成过程。当单侧激光摆动幅度为 2.0 mm 时,激光束的作用范围大于焊丝直径,激光束在垂直于焊接方向摆动时,间接性作用于填充焊丝。当激光束直接照射于焊丝时,如图 2b、2c,此时焊丝熔化主要依赖激光能量,使其能够充分熔化并以“液桥”形式向熔池过渡,而当激光束离开焊丝时,此时焊丝的熔化能量主要是熔池热传导,不足以使焊丝完全熔化,随着焊丝送进,未熔化的焊丝将插入到焊接熔池内部,由于摆动激光频率较快,随后在激光能量和熔池热传导的综合作用下充分熔化,仍然以“液桥”形式过渡到焊接熔池中,并铺展凝固形成焊缝,并且发现焊接等离子体随着激光束运动也呈现周期性横向摆动,主要是因为焊丝属于一维散热模式,熔化阈值较低^[10]。当激光束作用于填充焊丝会产生较强的金属蒸气,如图 2b 所示,蒸气反冲压力作用于熔滴,能够促进其过渡,同时摆动激光增加了熔池面积,有利于促进熔融填充金属向熔池两侧流动。而常规激光填丝焊接时,激光持续照射于填充焊丝,在激光能量和熔池热传导的作用下焊丝能够充分熔化,此时熔融金属聚集在激光入射位置,流动性较差,降低焊缝表面成形质量。

由图 3 可以看出,相比于常规激光填丝焊,横

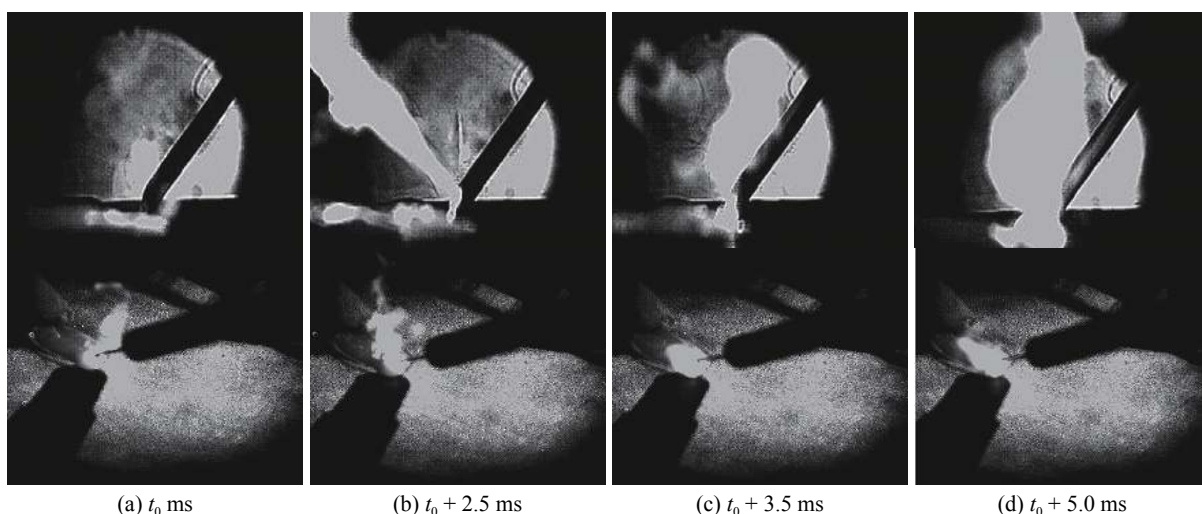


图 2 摆动激光填丝焊接焊丝熔化与熔池形成动态过程

Fig. 2 Dynamic melting of filler wire and formation of molten pool with beam wobble welding. (a) t_0 ms; (b) $t_0 + 2.5$ ms; (c) $t_0 + 3.5$ ms; (d) $t_0 + 5.0$ ms;

向摆动激光焊缝表面光滑连续, 焊缝成形均匀性增加, 且焊缝金属与母材之间的润湿铺展性得到显著提高. 焊缝熔宽由 4.4 mm 增加至 6.3 mm.

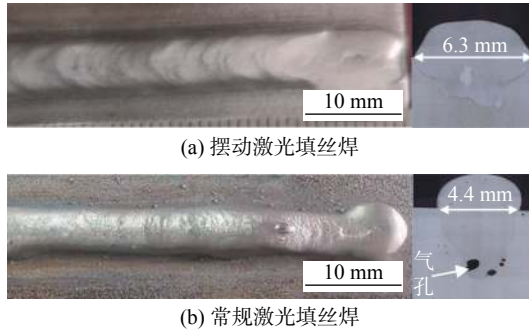


图 3 焊缝表面成形

Fig. 3 Weld surface forming. (a) transverse oscillating laser welding; (b) conventional laser wire feeding welding

2.2 典型空间多位置下焊接熔池特征

不同空间位置下重力方向的影响使得焊接熔池呈现出不同的特征, 空间多位置激光填丝焊接熔池主要受到重力 G 、熔池界面表面张力 F_σ 、已凝固金属的支撑力 N 、蒸气反冲压力 F_r 、保护气压力 F_g 的作用. 其中重力分量、熔池界面张力分量是导致熔池失稳破坏的主要作用力. 保持空间位置激光填丝焊接熔池稳定存在的前提为: N , F_σ , F_r 和 F_g 的

垂直向上分量要大于 G 的垂直向下分量.

根据焊接熔池受力状况将空间位置分为 8 段区域, 如图 1 所示, 典型位置下的熔池形貌如图 4 和图 5 所示, 焊接参数保持激光功率 4.8 kW, 焊接速度 25 cm/min, 送丝速度 3.5 cm/min, 离焦量 +20 mm, 扫描频率 75 Hz, 扫描幅度 4.0 mm 不变. 可见在不同位置下焊接熔池均稳定存在, 未发生严重的失稳下淌现象. 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 焊接区间, 熔池固/液界面张力和保护气压力是维持熔池稳定存在的主要作用力. 重力对焊接熔池的影响随着焊接角度而增加, 导致焊接熔池拖尾长度呈现增加趋势. 熔池金属后向流动趋势减小, 使得熔融金属在熔池前侧聚集, 增加了熔池下淌倾向. 但是横向摆动激光增加了熔池液态金属侧向流趋势, 增加了熔池边缘的表面张力, 并且抑制了熔池液态金属在激光入射位置聚集, 使得熔池质量能够均匀分布, 有效缓解了熔池下淌.

在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 区间内, 已凝固金属对熔池的支撑力和保护气压力增加, 熔池重力的影响逐渐减小. 但是在 $270^\circ \sim 360^\circ$ 区间内, 由图 5b, 5c 可见, 熔池前侧液态金属在重力作用下高速向后侧流动, 激光直接作用位置下的液态金属得不到及时补充, 使得熔池拖尾长度增加. 当熔化金属重力较大时, 熔

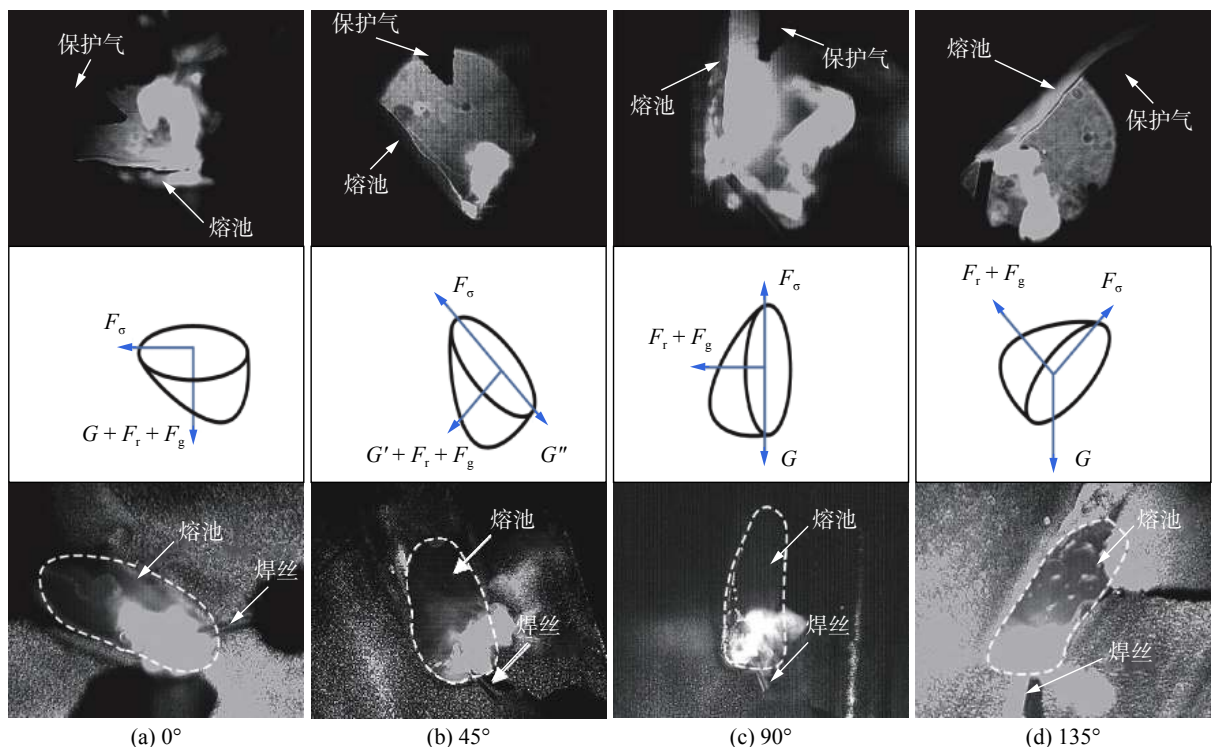


图 4 典型向下位置激光焊熔池行为

Fig. 4 Melting pool characteristics of laser welding in downward positions. (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135°

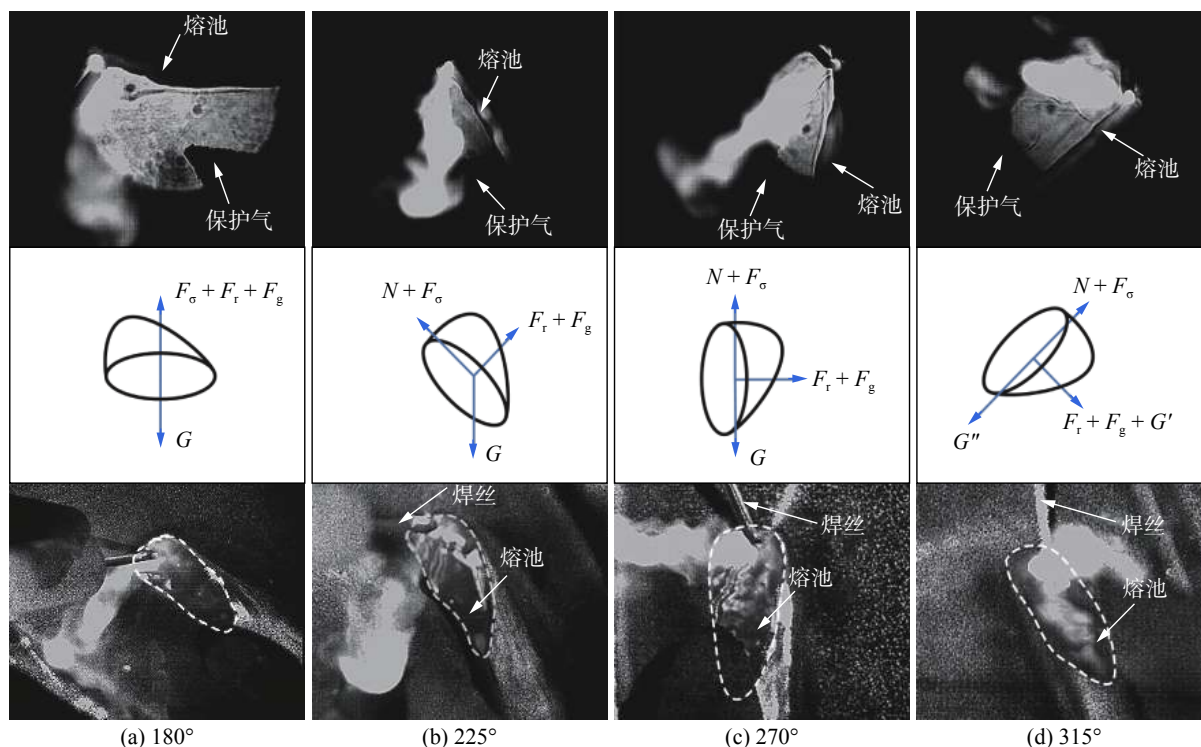


图 5 典型向上位置激光焊熔池行为

Fig. 5 Melting pool characteristics of laser welding in upward positions. (a) 180°; (b) 225°; (c) 270°; (d) 315°

池后向流动量较大, 会对熔池产生较大冲击, 会导致在熔池中后部区域产生液态金属间接性聚集。

不同空间位置下的焊缝表面成形及横截面形貌如图 6 和图 7 所示。可见在 0°~180°区间内的焊缝表面成形良好且比较均匀, 并未出现熔池失稳破坏现象; 而在 180°~360°区间内, 随着空间位置的

增加, 特别是在 270°和 315°位置, 焊缝出现不连续现象, 这主要是因为此时熔池表面张力难以抵消焊接熔池重力的影响, 熔池向下流动趋势增加。

由图 7 焊缝横截面形状参数可以看出, 在 45°焊接位置具有最大焊缝熔宽为 8.6 mm, 主要是因为一方面在重力分量的作用下熔池流速增加, 同

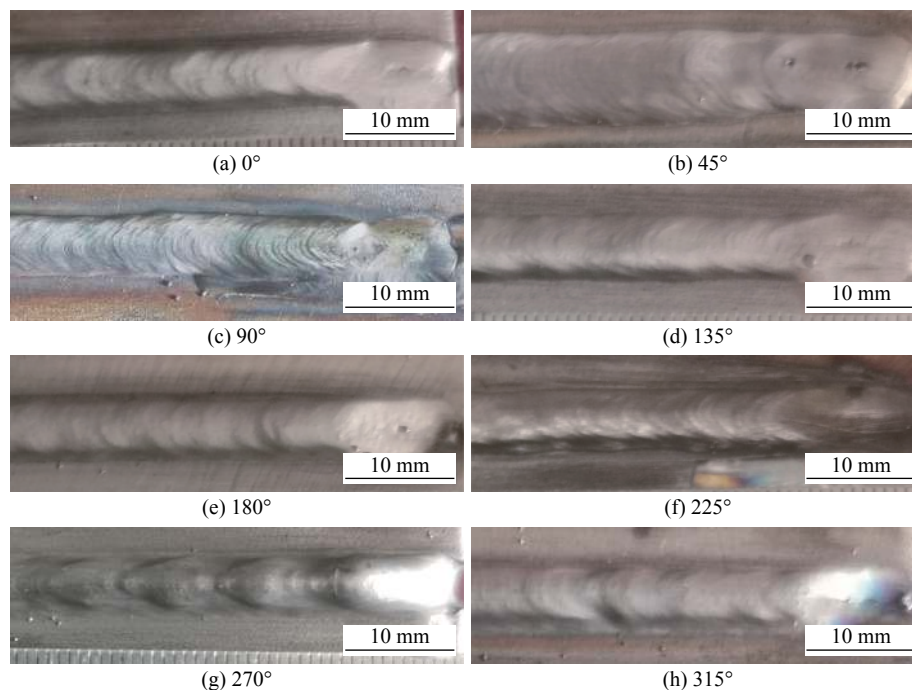


图 6 不同空间位置下的焊缝表面成形

Fig. 6 Weld surface forming at various positions. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°; (e) 180°; (f) 225°; (g) 270°; (h) 315°

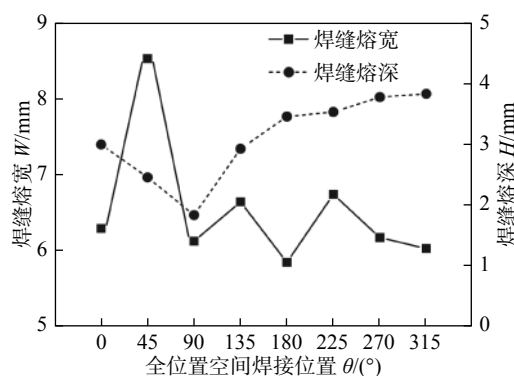


图 7 典型位置下的焊缝横截面形状参数

Fig. 7 Weld cross section morphology at various positions

时在摆动激光和保护气压力作用下使其横向流动分量增加. 而在 180° 仰焊位置时, 重力对熔池影响最为严重, 抑制熔池在表面张力作用下的横向扩展, 使得焊缝熔宽减小为 5.8 mm. 其余位置下的焊缝熔宽基本维持在 6.0 mm.

焊缝熔深随着焊接角度的增加呈现先减小后增加的趋势, 这主要是因为, 在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内, 熔池在重力的作用下向激光入射位置流淌, 影响激光能量向工件内部传输; 而随着焊接角度增加, 重力方向与焊接方向相反, 熔池液态金属不能及时补充匙孔空腔^[1], 使得焊接匙孔易于长大, 更多的激光能量向匙孔内部传输, 增加焊缝熔深.

3 结论

(1) 激光束周期性横向摆动使得填充焊丝呈现间歇熔化模式, 当激光束直接作用于焊丝时能够充分熔化, 而当激光束离开焊丝时, 焊丝插入熔池; 由于激光横向摆动频率较快, 保证焊丝在熔池热传导和激光能量综合作用下充分熔化, 并以液桥形式向熔池过渡.

(2) 激光作用于填充焊丝产生的等离子体反冲压力是促进熔滴过渡的驱动力. 结合熔池表面张力、保护气体压力和已凝固金属支撑力, 能够改善空间位置焊接熔池稳定性, 抑制熔池金属下淌现象.

(3) 典型位置下的焊缝成形可见, 在 45° 焊接位置具有最大熔宽为 8.6 mm, 而在 180° 仰焊位置时, 熔池重力削弱了表面张力作用, 熔宽减小为 5.8 mm. 焊缝熔深随着焊接角度的增加呈现先减小后增加的趋势.

参考文献

- [1] 岳建锋, 李亮玉, 姜旭东, 等. 全位置 MAG 焊缝成形控制技术及研究进展 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1256 – 1259.
Yue Jianfeng, Li Liangyu, Jiang Xudong, *et al.* All position MAG welding formation control technology and research review[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(10): 1256 – 1259.
- [2] 雷正龙, 杨雨禾, 李福泉, 等. X70 钢管道全位置激光-MAG 电弧复合根焊焊缝成形试验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 51 – 57.
Lei Zhenglong, Yang Yuhe, Li Fuquan, *et al.* Research on weld appearance of X70 steel joints prepared by laser-MAG hybrid welding process for all-position root welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 51 – 57.
- [3] 徐望辉, 林三宝, 杨春利, 等. 摆动电弧窄间隙 GMAW 熔滴过渡规律 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 109 – 114.
Xu Wanghui, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Study on droplet transfer of swing arc narrow gap GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 109 – 114.
- [4] Jia C B, Yan Q Q, Wei B, *et al.* Rotating-tungsten narrow-groove GTAW for thick plates[J]. Welding Journal, 2018, 97(10): 273 – 285.
- [5] Koga S, Inuzuka M, Nagatani T. Relationship between welding position and proper welding parameters in all position electron beam welding. Study on all position electron beam welding of large diameter pipeline joints[J]. Welding International, 2001, 15(2): 92 – 99.
- [6] Keskitalo M, Hietala M, Mantjarvi K. The influence of shielding gas configurations on formability of the ferritic stainless steel laser weld[J]. Physics Procedia, 2017, 89: 80 – 88.
- [7] 余阳春. 激光填丝焊的焊丝熔入行为及工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
Yu Yangchun. Study on the technology and filler wire melting dynamics during the laser welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010.
- [8] Fujinaga S, Ohashi R, Urakami T, *et al.* Development of an all-position YAG laser butt welding process with addition of filler wire[J]. Welding International, 2005, 19(6): 441 – 446.
- [9] 贾亚洲, 陈树君, 肖珺, 等. 脉冲激光与电弧布置方式对铝合金焊接熔滴过渡与焊缝形貌的影响 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 23 – 30.
Jia Yazhou, Chen Shujun, Xiao Jun, *et al.* Effect of pulse laser-arc arrangement on metal transfer and bead formation characteristics of aluminum alloy welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 23 – 30.