

双丝三电弧焊中熔滴过渡及焊缝成形机理

郑 佳, 李亮玉, 钟 蒲, 王天琪

(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室 天津 300387)

摘 要: 为了验证双丝三电弧焊接过程中 M 弧不同的电流、脉冲频率对其熔滴过渡行为的影响; 试验搭建了双丝三电弧焊的焊接系统以及高速摄像与波形同步采集系统. 结果表明, 熔滴过渡行为变化的主要原因是在 M 弧作用下熔滴的受力变化. 其次, 熔滴过渡行为和 M 弧电流的变化存在着对应关系: 随着 M 弧电流增大, 熔滴过渡行为依次为焊缝成形最佳的短路过渡 + 射流过渡、以及成形依次变差的大滴过渡、射滴过渡、射流过渡. 随着 M 弧脉冲频率增加, 熔滴过渡行为依次为一脉多滴、一脉一滴、多脉一滴三个阶段; 其中焊接成形最理想的为一脉一滴的熔滴过渡阶段.

关键词: 双丝三电弧焊; 熔滴过渡; 焊缝成形; 焊接电流; 脉冲频率

中图分类号: TG 455 **文献标识码:** A **doi:** 10. 12073/j. hjxb. 2019400177

0 序 言

对于常规的 GMAW, 通过提高焊接电流来提高焊接效率, 使焊接热输入变大, 进而会导致变形量增加, 因此, 高熔敷率与低热输入之间存在一定的矛盾. 为解决该矛盾, 哈尔滨工业大学的耿正等人开发了一种新的焊接方法—双丝三电弧焊. 目前国内一些高校已经采用此方法进行了一些研究, 佳木斯大学马振等人^[1]使用药芯焊丝通过试验观察得到了双丝三电弧焊过程中 M 弧电流对 Tri-arc DE 熔滴过渡形态的影响规律; 沈阳工业大学刘丹等人^[2]对 5356 铝合金 Tri-arc DE 工艺进行了研究; 该方法通过调整 M 弧电流进而改变流入工件电流, 即可以提高焊接熔敷率、又可以降低母材的热输入.

熔滴过渡在实际焊接过程中, 不仅影响电弧的稳定性, 还与焊缝质量有密切关系. 国内外学者已经对 GMAW 的熔滴过渡进行了大量的研究. 德国开姆尼茨工业大学 Neyka 等人^[3]利用高速摄像系统对 Tandam 的熔滴过渡进行了研究; 山东大学的曹梅青等人^[4]通过观察得出双丝间接电弧氩弧焊熔滴过渡形式; 兰州理工大学的樊丁等人^[5-6]研究了在纯氩的保护气体成分中加入 CO₂ 对双丝旁路

耦合电弧熔化极气体保护焊熔滴过渡形式的影响; 天津大学的向婷等人^[7]通过高速摄像方法观察到的熔滴过渡及焊缝成形情况对双电弧集成冷丝复合焊进行了研究, 但国内外对双丝三电弧焊的熔滴过渡以及焊缝成形机理鲜有研究. 文中针对双丝三电弧焊接过程中 M 弧不同的电流、脉冲频率对其熔滴过渡行为的影响, 搭建了基于双丝三电弧焊接方法的 Tri-arc DE 试验系统, 利用静力平衡理论分析了熔滴受力情况, 并试验研究了焊接过程中熔滴过渡行为以及对应的焊缝成形. 通过对熔滴过渡及焊缝成形机理研究为完善双丝三电弧焊焊接方法提供理论基础.

1 试验方法

试验采用配备了深圳瑞凌公司生产的 Tri-ArcTM¹ 型双丝三电弧焊接系统的焊机以及带有自动焊接机床控制器的控制平台. 如图 1 所示, 该系统内部配有进行协调控制的双电源. 采用氙光灯作为背景光; 所用高速摄像拍摄相机为德国产的 Optronis 相机; 高速摄像机镜头、焊接位置和氙光灯在一条直线. 利用 LABVIEW 二次开发的高速摄像与电流电压波形采集同步分析软件进行电信号波形分析, 焊接过程中将波形采集系统与高速摄像系统同步. 试验采用平板堆焊, 所用焊接参数如表 1.

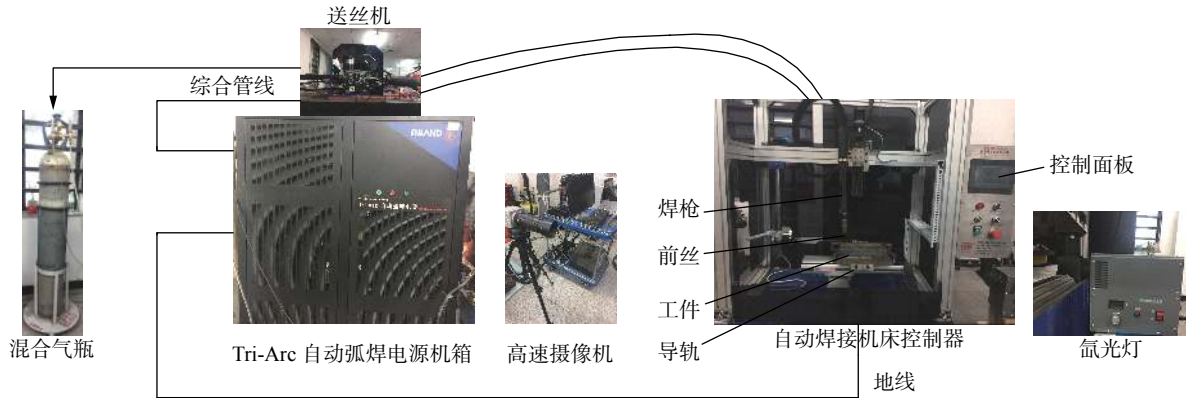


图 1 双丝三电弧焊焊接系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Tri-arc DE welding system

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

焊丝直径 <i>d</i> /mm	焊丝材料	母材材料	保护气成分	保护气流量 <i>q</i> /(L·min ⁻¹)	焊接速度 <i>v</i> /(mm·s ⁻¹)	送丝速度 <i>v_s</i> /(m·min ⁻¹)	焊丝伸出长度 <i>H</i> /mm
1.2	ER50-6	Q235	80%Ar+20%CO ₂	15+15	14	7+7	20

2 双丝三电弧焊熔滴受力分析

与普通单丝焊类似, 双丝三电弧焊熔滴所受主要作用力包括重力 F_g 、表面张力 F_σ 以及电弧力, 如电磁收缩力 (F_{em})、等离子流力 (F_a) 和斑点压力 (F_v)^[8-9]. 以前丝熔滴受力情况为例, 如图 2 所示.

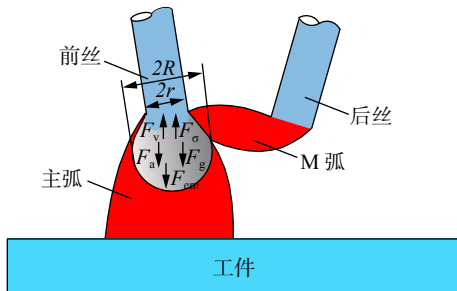


图 2 双丝三电弧焊前丝熔滴上的作用力

Fig. 2 Forces on the droplets of Tri-arc DE welding front wire

重力 F_g 的方向始终向下, 促进熔滴过渡, 其表达式为

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

式中: m 是熔滴质量; g 是重力加速度; R 是熔滴半径; ρ 是熔滴密度.

表面张力 F_σ 是阻碍熔滴过渡的主要作用力. 其表达式为

$$F_\sigma = 2\pi r\sigma \quad (2)$$

式中: r 是焊丝半径; σ 是表面张力系数.

表面张力 F_σ 在轴向和径向上都有分力, 其表达式为

$$F_{\sigma k} = 2\pi r\sigma \cos\varphi \quad (3)$$

$$F_{\sigma j} = 2\pi r\sigma \sin\varphi \quad (4)$$

式中: φ 是焊丝半径平方与熔滴半径之比反余弦值.

电磁收缩力 F_{em} 包括主弧对熔滴电磁力 F_{em1} 与 M 弧对熔滴的电磁 F_{emm} , 其合力促进熔滴过渡. 在 M 弧和主弧共同作用下, 双丝三电弧电磁力为

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I_m^2}{4\pi} \left[\ln \frac{R \sin\theta}{r} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos\theta} + \frac{2}{(1 - \cos\theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos\theta} \right] \quad (5)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I_m 为主弧焊接电流; θ 为弧根角度. 主弧电流和 M 弧电流产生的电磁力可以分解为两个方向的力, 垂直于焊丝轴线方向和沿焊丝轴线方向的电磁力. 其中沿焊丝轴线方向的电磁力和表面张力的大小相抵消, 促进了熔滴进行颈缩^[10].

等离子流力 F_a 的方向向下, 促进熔滴过渡, 其表达式为

$$F_a = \frac{1}{2}\pi v_f^2 \rho_f R^2 C_d \quad (6)$$

式中: v_f 为等离子流体速度; ρ_f 为等离子流体密度; C_d 为阻力系数.

斑点压力 F_v 与 M 弧电流的大小以及金属蒸气密度的大小成正比. 其表达式为

$$F_v = \frac{m_0}{d_f} ij \quad (7)$$

式中: m_0 为蒸发质量; i 为 M 弧焊接电流; j 为金属蒸气密度.

根据静力平衡理论, 静力平衡方程为

$$F_g + F_a + F_{em} = F_\sigma + F_v \quad (8)$$

式 (8) 等号左侧促进熔滴过渡; 右侧阻碍熔滴过渡.

M 弧对前丝熔滴过渡的作用主要表现在电磁力方面: 首先因为 M 弧的吸引导致弧根面积的扩展进而使得弧根的角度 θ 增大, 电磁力也逐渐增大, 促进熔滴过渡; 另外, 电磁力还会促进熔滴的颈缩. 综上所述, M 弧对熔滴过渡起促进作用^[11-12].

3 试验结果与分析

3.1 四种熔滴过渡行为

试验过程中, 不同的 M 弧电流值对应四种不同的熔滴过渡行为, 依次为短路过渡 + 射流过渡阶段、大滴过渡阶段、射滴过渡阶段和射流过渡阶段. 通过试验得出的四种熔滴过渡行为变化的 M 弧临界电流值为 20, 55, 90, 125 A. 当 M 弧电流为 20 A 时, 将会出现短路过渡 + 射流过渡的过渡形式, 图 3 为其高速摄像和电信号结果, 由于 M 弧的电流很小, 因此弧长很短, 整个过渡过程飞溅较少.

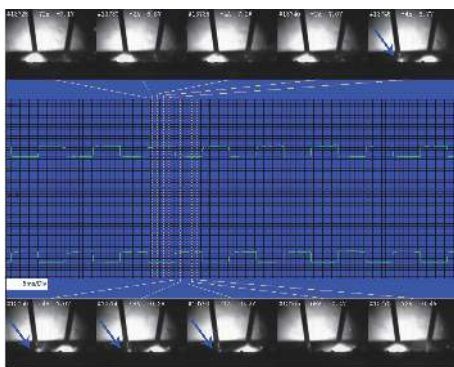


图 3 短路过渡 + 射流过渡的高速摄像及电信号

Fig. 3 High-speed video and electrical signals during short-circuit transition + jet transition

由图 3 可知, 在脉冲峰值阶段, 随着送丝机的不断送丝, 焊丝端部会受到很大的热量进行熔化. 随着重力 F_g 的不断增大, 熔滴克服和焊丝之间的表面张力 F_σ 进入熔池, 由于电弧在前丝和后丝之

间切换, M 弧电流方向发生改变, 焊丝的端部离熔池很近, 此时电弧空间很小, 弧长很短, 熔滴很大, 在没完成脱落时便与熔池相接触, 发生短路, 此时为短路过渡. 随着时间的增加, 电磁收缩力 F_{em} 也随之增大, 在其作用下形成缩颈, 电流处在峰值阶段的电弧依然存在, 焊丝和工件之间会出现一条小于焊丝直径的铅笔尖状金属流; 由于此时脉冲峰值的电流大于射流过渡得临界电流值; 因此, 此时熔滴过渡以短路过渡 + 射流过渡的混合过渡形式存在.

当 M 弧电流为 55 A 时, 熔滴过渡行为从短路过渡 + 射流过渡变为大滴过渡, 其高速摄像和电信号结果如图 4 所示. 此时熔滴在电弧空间内受到加速作用较低, 焊接过程开始变得不稳定, 飞溅增大.

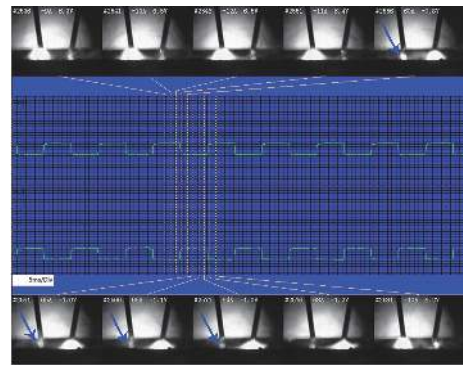


图 4 大滴过渡时的高速摄像及电信号

Fig. 4 High-speed video and electrical signals during globular transfer

由图 4 可知, 随着 M 弧电流增加, 电磁力 F_{em} 的大小也随之增大; 此时, 还有重力 F_g 和表面张力 F_σ 作用在熔滴上; 根据图 4, 熔滴仍悬挂于焊丝末端, 没有完成过渡, 这是因为熔滴所受重力 F_g 仍小于电弧阻力与表面张力 F_σ 的大小之和; 熔滴继续生长, 当表面张力 F_σ 及蒸气作用力小于重力、等离子流力和电磁收缩力之和时, 熔滴完成过渡.

随着 M 弧电流的增加, 当 M 弧电流为 90 A 时, 此时熔滴的直径和焊丝直径大致相等, 熔滴过渡行为进一步发生改变, 从大滴过渡向射滴过渡进行转变, 过渡频率加快, 其高速摄像和电信号结果如图 5 所示. 随着弧长变长, 熔滴每完成一次过渡, 焊丝端部又会形成新的熔滴, 焊接过程稳定, 但飞溅大.

由图 5 可知, 熔滴从焊丝末端脱落时的加速度大于 g , 重力 F_g 已不再起主导作用, 等离子流力 F_a 和电磁收缩力 F_{em} 随着斑点压力 F_v 方向的改变, 又转变为促进熔滴过渡的压缩力, 而表面张力

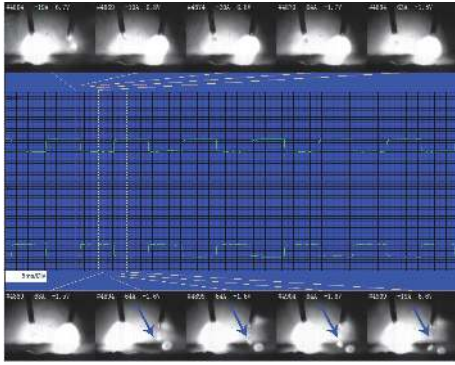


图 5 射滴过渡时的高速摄像及电信号

Fig. 5 High-speed video and electrical signals during shot-drop transition

F_{σ} 阻碍熔滴过渡. 每完成一次过渡, 焊丝端部会形成直径约等于焊丝直径的熔滴, 进行射滴过渡.

随着 M 弧电流进一步增加, 当 M 弧电流为 125 A 时, 熔滴过渡行为从射滴过渡变为射流过渡, 其高速摄像和电信号结果如图 6 所示. 电弧被拉长, 过渡尺寸变小, 液态金属流变细, 焊接飞溅变大.

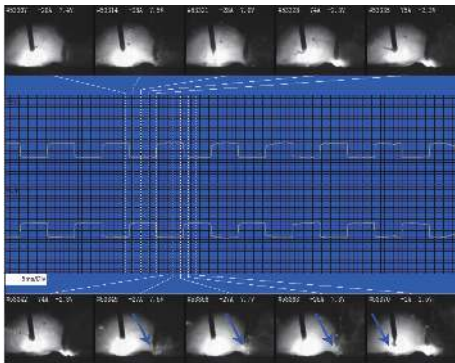


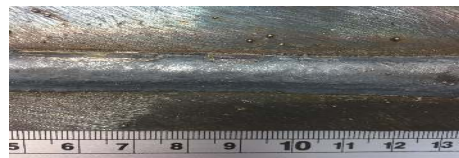
图 6 射流过渡时的高速摄像及电信号

Fig. 6 High-speed camera and electrical signals during jet transition

由图 6 可知, 表面张力 F_{σ} 阻碍熔滴进行过渡, 此时, 张力系数 σ 很低, 因此表面张力 F_{σ} 很小. 在焊丝端部产生较大的斑点压力 F_v , 此时熔滴直径小于焊丝的直径, 熔滴受到电弧力和电弧热的共同作用, 会以极高的速度从焊丝端部射向熔池. 随着时间的增加, 熔滴直径变得非常小, 两个熔滴之间的时间间隔变得非常短, 仅从肉眼看上去就像是一条金属流. 在斑点压力 F_v 和等离子流力 F_a 的共同作用下, 熔滴沿着轴线方向进行射流过渡. 综上所述, 熔滴过渡行为变化的主要原因是在 M 弧作用下熔滴受力的变化.

3.2 四种熔滴过渡下的焊缝成形

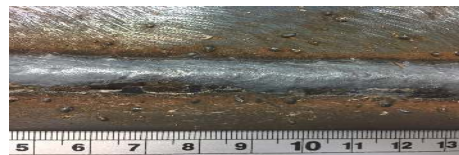
图 7 为短路过渡 + 射流过渡阶段、大滴过渡阶段、射滴过渡阶段以及射流过渡阶段焊缝宏观形貌. 三种焊缝成形最大的不同在于飞溅大小及焊缝的形貌的不同. 其中短路过渡 + 射流过渡的飞溅最少, 从图 3 的熔滴过渡过程和图 7a 的焊缝形貌看出飞溅很少, 焊缝成形良好, 大滴过渡、射滴过渡、射流过渡的飞溅依次增大. 这是因为随 M 弧电流增加, 烟雾增大, 金属蒸气作用力对熔滴过渡阻碍作用加剧, 使得熔滴不能顺利过渡, 在电磁力 F_{em} 和斑点压力 F_v 的共同作用下, 没有完成过渡的液态金属被水平吹出, 变成了飞溅.



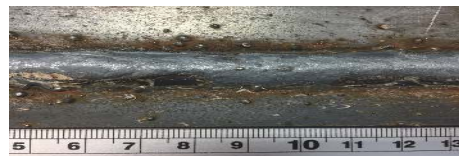
(a) 20 A



(b) 55 A



(c) 90 A



(d) 125 A

图 7 四种熔滴过渡对应的焊缝的宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic appearance of welds corresponding to four material transitions

随着 M 弧电流逐渐增大, 焊缝成形变差, 焊缝形貌出现咬边和驼峰现象. 这是因为提高 M 弧电流, 必然增加电弧力, 电弧对熔池内金属起到压迫作用, 没有足量金属进入焊趾, 产生咬边现象. 由于 M 弧电流增加, 焊接过程中熔池里液态熔化金属不足, 此外, 这些熔融金属流进入凹坑道路不顺畅或凝固时, 不能正常形成焊缝, 产生隆起, 出现驼峰现象.

3.3 熔滴过渡与 M 弧脉冲频率之间的关系

图 8 是脉冲频率为 120, 180 Hz 和 240 Hz 时的熔滴过渡图像, 随着 M 弧脉冲频率的增加, 过渡频率呈逐渐减小的趋势, 主要因为脉冲频率的不同, 导致脉冲峰值时间的不同. 当脉冲频率为 120 Hz 时, 熔滴过渡为一脉多滴形式, 在一个脉冲周期内焊丝端部持续形成熔滴, 过渡到熔池. 当脉冲频率为 180 Hz 时, 熔滴过渡为一脉一滴形式, 此时焊丝在一个峰值阶段只形成一个熔滴进入熔池, 一根焊丝的一个熔滴过渡完成之后, 脉冲进入基值阶

段, 另一根焊丝进行同样的过渡, 以此达到一脉一滴的理想焊接过渡形式. 当脉冲频率为 240 Hz 时, 熔滴过渡为多脉一滴形式, 这是由于在一个电流脉冲峰值时间内, 焊丝端部无法形成熔滴完成过渡, 此时电弧发挥自我调节作用, 弧长缩短, 使得焊丝端部在短时间内形成熔滴完成过渡; 如果缩短弧长仍无法达到燃弧所需要的热量, 就会发生多脉一滴形式的熔滴过渡. 因此, 随着 M 弧脉冲频率的不断增大, 熔滴过渡频率从一脉多滴向一脉一滴进行转变, 最终以多脉一滴过渡形式过渡.

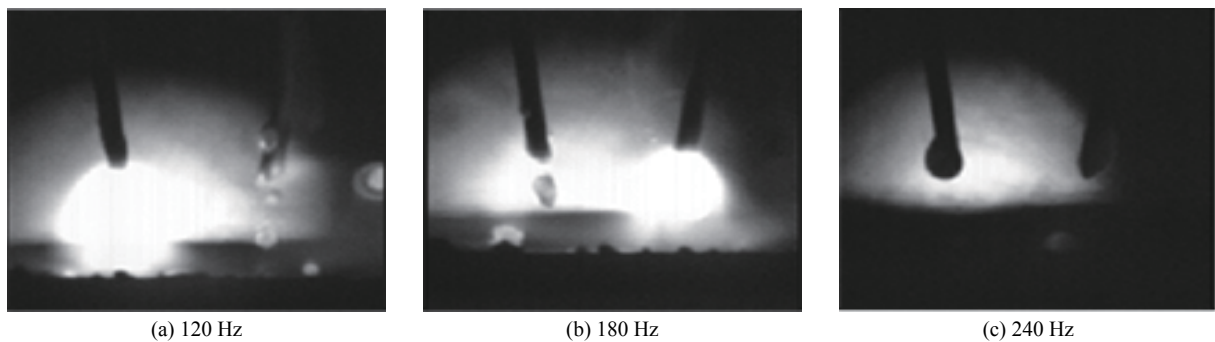


图 8 不同脉冲频率下熔滴过渡高速摄像图片

Fig. 8 High speed camera images of material transfer at different pulse frequencies

4 结 论

(1) 采用静力平衡理论对双丝三电弧焊熔滴所受作用力分析可知, 熔滴所受的主要作用力包括促进熔滴过渡的重力 F_g 、等离子流力 F_a 、电磁力 F_{em} 和阻碍熔滴过渡的表面张力 F_σ 、斑点压力 F_v . 此外, M 弧对前丝熔滴过渡作用主要表现在电磁力方面. 熔滴过渡行为变化的主要原因是在 M 弧作用下熔滴受力的变化.

(2) 随着 M 弧电流的增加, 双丝三电弧焊的熔滴过渡行为依次为短路过渡 + 射流过渡、短路过渡、射滴过渡以及射流过渡四个阶段. 其中短路过渡 + 射流过渡行为下的焊缝成形最佳; 大滴过渡、射滴过渡、以及射流过渡成形依次变差, 飞溅依次增加. 此外, 焊缝还会出现咬边和驼峰现象.

(3) 随着 M 弧脉冲频率的不断增大, 熔滴过渡形式依次为一脉多滴、一脉一滴和多脉一滴. 其中一脉一滴的过渡形式最理想. 随着 M 弧脉冲频率的不断增大, 峰值电流时间逐渐减小, 过渡频率呈逐渐减小的趋势.

参考文献:

- [1] 马 振, 庄明辉, 牟立婷, 等. M 弧电流对 Tri-Arc 双丝电弧焊熔滴过渡形态影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(11): 57 - 60.
Ma Zhen, Zhuang Minghui, Mou Liting, *et al.* Effects of M Arc current on Tri-Arc double wire welding droplet transfer modes[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(11): 57 - 60.
- [2] 刘 丹. 5356 铝合金 Tri-arc DE 双丝三电弧焊接工艺研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [3] Neyka S, Kusch M, Mayr P, *et al.* Progress in high performance hard-facing processes tandem-gas-metal-arc-welding and plasma-MIG hybrid welding[C]//Proceedings of the 9th International Conference. USA Chicago: Chemnitz University of Technology, 2013: 784-790.
- [4] 曹梅青, 邹增大, 曲仕尧. 双丝间接电弧氩气保护焊的熔滴过渡与电弧形态 [J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 47 - 50.
Cao Meiqing, Zou Zengda, Qu Shiyao. Droplet transfer and arc shape in twin wire indirect arc argon shielded arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 47 - 50.
- [5] 石 玟, 王桂龙, 朱 明, 等. 保护气体成分对双丝旁路耦合电弧 GMAW 旁路熔滴过渡形式的影响 [J]. 焊接学报, 2014,

- 35(3): 15 – 18.
- Shi Yu, Wang Guilong, Zhu Ming, *et al.* Effects of different protective gas on bypass metal transfer in consumable double-electrode gas metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 15 – 18.
- [6] 朱 明, 石 玟, 王桂龙, 等. 双丝旁路耦合电弧 GMAW 熔滴过渡特性分析 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 50 – 54.
- Zhu Ming, Shi Yu, Wang Guilong, *et al.* Metal transfer behaviors in consumable double-electrode GMAW process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 50 – 54.
- [7] 向 婷, 李 桓, 韦辉亮, 等. 双电弧集成冷丝复合焊中熔滴过渡及焊缝成形机理 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 66 – 70.
- Xiang Ting, Li Huan, Wei Huiliang, *et al.* The metal transfer and weld formation of twin-arc integrated cold wire hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 66 – 70.
- [8] 王雪宙, 朱 明, 石 玟, 等. 双丝旁路耦合电弧熔化极气体保护焊旁路熔滴过渡行为的模拟与分析 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 54 – 58.
- Wang Xuzhou, Zhu Ming, Shi Yu, *et al.* Simulation and analysis of bypass metal transfer behaviors in consumable double electrode GMAW process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 54 – 58.
- [9] 何 伟. 窄间隙 GMAW 电弧形态和熔滴过渡行为的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [10] Cai X, Lin S, Fan C, *et al.* Metal transfer characteristics of tandem narrow gap GMAW for flat welding position[J]. China Welding, 2015, 24(3): 64 – 72.
- [11] Huang Y, Shao Y, Zhang Y M. Nonlinear modeling of dynamic metal transfer in laser-enhanced GMAW[J]. Welding Journal, 2012, 91(5): 140 – 148.
- [12] Fang C F, Meng X H, Hu Q X, *et al.* TANDEM and GMAW twin wire welding of Q690 steel used in hydraulic support[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(5): 79 – 85.
-
- 第一作者简介:** 郑佳, 男, 1993 年出生, 硕士研究生. 主要从事双丝三电弧工艺方面研究. Email: 1757595861@qq.com
- 通信作者简介:** 李亮玉, 男, 博士, 博士研究生导师. Email: llye106@163.com