

Tri-Arc 与 Tandem 双丝电弧焊的工作原理对比分析

耿正¹, 李少农², 魏占静², 王巍², 邱光²

(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. 深圳市瑞凌实业股份有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: **目的** 介绍一种称为 Tri-Arc 的新型双丝电弧焊接方法。**方法** 将 Tri-Arc 双丝电弧焊与应用较广的 Tandem 双丝电弧焊的系统构成和焊接电流波形进行对比分析。**结果** Tri-Arc 和 Tandem 两种双丝电弧焊接方法所使用的双丝焊枪相近, 双电源相位同步控制和 U/I 脉冲控制方式类似。Tri-Arc 和 Tandem 两种双丝电弧焊接方法的差异在于: Tandem 双丝电弧焊的 2 个电弧是相对独立的, 而 Tri-Arc 双丝电弧焊的 2 个电弧是相互耦合的, 因此 Tri-Arc 双丝电弧焊又具有旁路耦合电弧的某些特点。**结论** 这种新型的 Tri-Arc 双丝电弧焊不仅具有与 Tandem 双丝电弧焊一样的高焊丝熔敷率, 而且具有比 Tandem 双丝电弧焊更低的焊接热输入。

关键词: Tri-Arc 双丝焊; Tandem 双丝焊; 高焊丝熔敷率; 低焊接热输入

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.012

中图分类号: TG444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0107-05

Comparative Analysis on Principle of Tri-Arc and Tandem Dual Wire Arc Welding

GENG Zheng¹, LI Shao-nong², WEI Zhan-jing², WANG Wei², QIU Guang²

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding & Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Shenzhen Riland Industrial Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

ABSTRACT: The paper aims to introduce a novel dual wire arc welding method called Tri-Arc. By comparison and analysis of the system composition and welding current waveform between the Tri-Arc dual wire arc welding and the widely used Tandem dual wire arc welding, it was found that the commonness of the two double wire welding methods was using similar dual wire welding torch, similar double power phase synchronous control and U/I pulse control mode, etc. The difference between the two dual wire arc welding methods was that the two arcs of the Tandem dual wire arc welding were relatively independent, while the two arcs of the Tri-Arc dual wire arc welding were coupled with each other. As a result Tri-Arc dual-wire arc welding had some characteristics of bypass coupling arc. The results show that this new Tri-Arc dual wire arc welding not only has the same high wire deposition rate as Tandem dual wire arc welding, but also has lower welding heat input than Tandem dual wire arc welding.

KEY WORDS: Tri-Arc dual wire welding; Tandem dual wire welding; high wiredeposition rate; low welding heat input

提高焊丝熔敷率是提高焊接效率的主要技术手段。在提高焊丝熔敷率方面, Tandem 双丝电弧焊较单丝电弧有着明显的技术优势^[1-5], 而且较多丝电弧

焊有着更高的灵活性, 尤其是结构紧凑的 Tandem 双丝焊枪能够与焊接机器人配套使用。Tri-Arc 双丝电弧焊是近年来出现的一种新型低焊接热输入的高效

收稿日期: 2020-05-11

基金项目: 深圳市科技计划 (JSGG20180504165617788)

作者简介: 耿正 (1954—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为焊接电弧物理和高效电弧焊接方法及设备。

电弧焊方法。Tri-Arc 双丝电弧焊最初是一项基于旁路电弧原理的研究工作,其目的是开发一种高焊丝熔敷率、低焊接热输入的电弧焊接方法。在解决双熔化极旁路电弧固有的电弧稳定性问题的过程中^[6-7],提出了一种“双旁路电弧切换技术”的新方法。由于采用了这种双旁路电弧切换技术,不但解决了电弧稳定性问题,而且不再要求使用特制的大夹角双丝焊枪,转为使用与 Tandem 双丝电弧焊通用的双丝枪。这样一来, Tri-Arc 双丝焊技术^[8-15]完全摆脱了旁路电弧耦合技术的制约,与广泛使用的 Tandem 双丝电弧焊有很多共性技术以及使用方面的兼容性。随着 Tri-Arc 双丝电弧焊方法研究的不断深入,在应用技术方面也不断成熟,已经达到可以与 Tandem 双丝电弧焊同台竞技的水平,因此有必要对两者进行系统地比较和分析,从而为需要高效且低热输入焊接方法的应用者提供有益的参考。

1 系统构成的对比

双直流脉冲电源 Tandem 双丝电弧焊系统构成与过程分解示意图见图 1。如图 1a 所示, Tandem 双丝电弧焊系统由两台 U/I 模式的直流脉冲电源 (PS1 和 PS2)、两个送丝机 (WFS1 和 WFS2) 及一把 Tandem 双丝焊枪 (虚线框) 构成。Tandem 双丝焊枪在一个保护气喷嘴中集成了两个相互绝缘的导电嘴,两根焊丝可以分别供电。 E_1 、 E_2 两根焊丝端部的距离很近 (5~10 mm), 这样可充分利用 A_1 、 A_2 两个电弧的相互加热作用,提高单位电流的焊丝熔敷率,因此在相同的焊丝熔敷率条件下, Tandem 双丝焊具有相对单丝电弧焊较低的焊接热输入,但是两个相互接近的电弧会因电磁力产生相互干扰。为了解决电弧相互干扰问题,采用了 2 根焊丝的峰值电压与基值电流交错供电方式,如图 1b 和图 1c 所示的 2 个工作周期。在图 1b 所示的工作周期中, PS1 工作在脉冲峰值电压 U_p 模式, 流经 A_1 的电流 I_p 会随弧长变化而波动, 对 A_1 弧长有自身调节作用; PS2 工作在基值电流 I_b 模式,

I_b 恒定且很低 (仅做维弧), 这样就降低了 A_1 与 A_2 两个电弧之间的相互电磁力作用。在图 1c 所示的工作周期中, PS2 工作在脉冲峰值电压 U_p 模式, 流经 A_2 的电流 I_p 会随弧长变化而波动, 对 A_2 弧长有自身调节作用; PS1 工作在基值电流 I_b 模式, I_b 恒定且很低 (仅做维弧), 这样就降低了 A_1 与 A_2 两个电弧之间的相互电磁力作用。Tandem 双丝焊就是在图 1b 和图 1c 所示的 2 个状态之间反复切换。

Tri-Arc 双丝电弧焊有多种实现方式, 其中与 Tandem 双丝焊在原理结构上最相近的是图 2 所示的双可变极性电源方式^[8]。对比图 1 与图 2 可见, 两者在系统构成上几乎没有差别, 不同的仅仅是其中的电源特性。图 1 中 PS1 和 PS2 两台直流脉冲电源被图 2 中的 VS1 和 VS2 两台可变极性脉冲电源所替换, 与 Tandem 双丝电弧焊不同的是, 原来的峰值电流与基值电流交错供电方式变为正极性峰值电压与负极性旁路电流交错供电, 如图 2b 和图 1c 所示的 2 个工作周期。在图 2b 所示的工作周期中, PS1 极性为正, 工作在脉冲峰值电压 U_p 模式, 流经 A_1 的电流 I_p 会随弧长变化而波动, 对 A_1 弧长有自身调节作用; PS2 极性为负, 工作在 I_M 恒流模式, 由于 E_1 、 E_2 两根焊丝之间的电位差大于 E_2 与工件之间的电位差, 于是电弧不是建立在焊丝与工件之间, 而是转移到两根焊丝之间, 即出现了第三电弧 A_M , A_M 的电流方向是由 E_1 指向 E_2 。在图 2c 所示工作周期中, PS2 极性为正, 工作在脉冲峰值电压 U_p 模式, 流经 A_2 的电流 I_p 会随弧长变化而波动, 对 A_2 弧长有自身调节作用; PS1 极性为负, 工作在 I_M 恒流模式, 由于 E_2 和 E_1 两根焊丝之间的电位差大于 E_1 与工件之间的电位差, 于是电弧不是建立在焊丝 E_1 与工件之间, 而是转移到两根焊丝之间, 即出现了第三电弧 A_M , A_M 的电流方向是由 E_2 指向 E_1 。

图 3 是另一种 Tri-Arc 双丝电弧焊的实现方式, 采用了双直流脉冲电源加单变极性电源方式^[9], 这种方式也可以看作是在图 1 所示的双直流脉冲电源 Tandem 双丝电弧焊结构的基础上增加了一个变极性

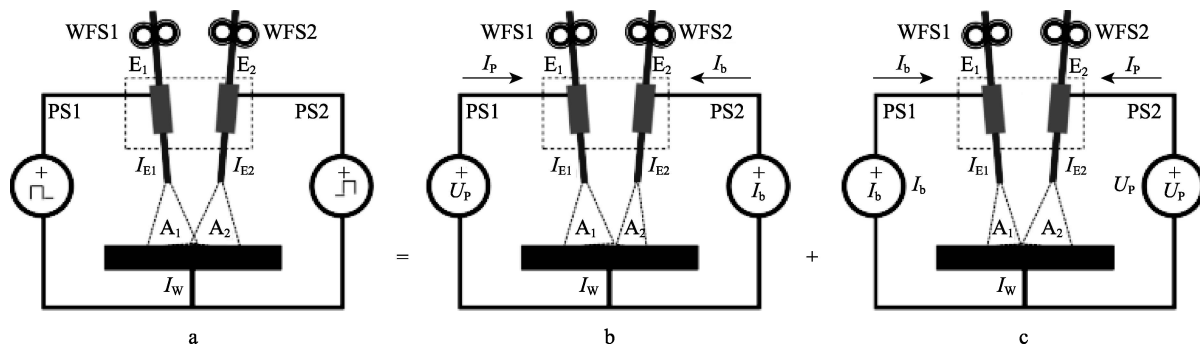


图 1 双直流脉冲电源 Tandem 双丝电弧焊系统构成与过程分解示意图

Fig.1 Schematic diagram of composition and process decomposition of Tandem dual wire arc welding system with dual DC pulse power supply

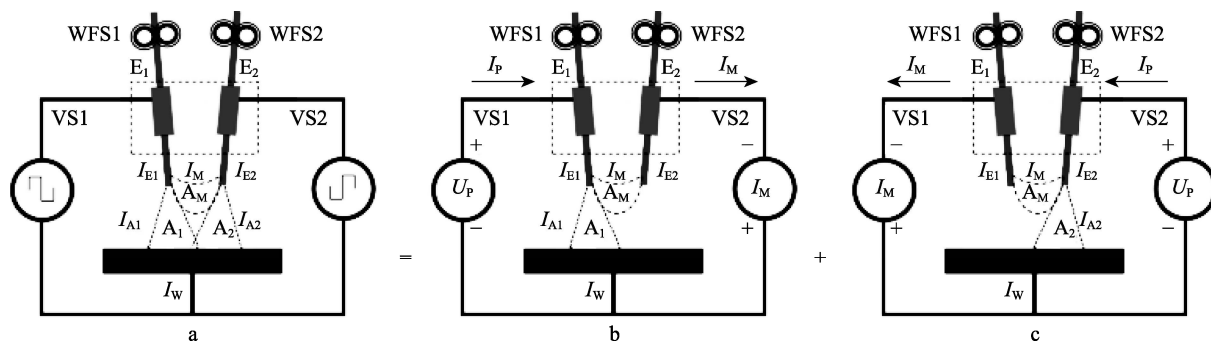


图 2 双变极性脉冲电源 Tri-Arc 双丝电弧焊系统构成与过程分解示意图

Fig.2 Schematic diagram of composition and process decomposition of Tri-Arc dual wire arc welding system with dual variable polarity pulsed power supply

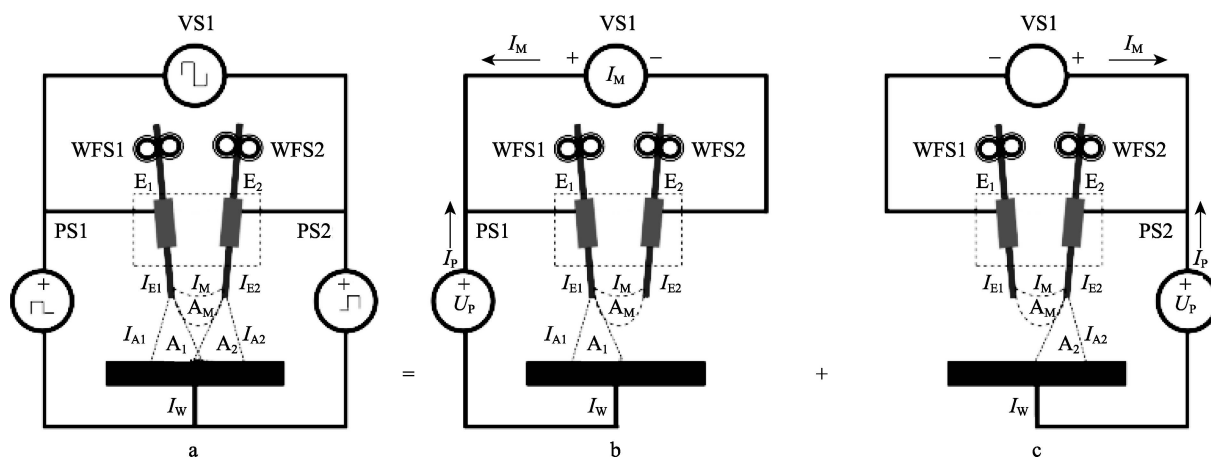


图 3 双直流脉冲电源加单变极性电源 Tri-Arc 双丝电弧焊系统构成与过程分解示意图

Fig.3 Schematic diagram of composition and process decomposition of Tri-Arc dual wire arc welding system with dual-DC pulse power supply and single variable polarity power supply

电源 VPS。图 3 所示的双直流脉冲电源加单变极性电源 Tri-Arc 双丝电弧焊系统采用的是直流脉冲峰值电压与可变极性电流源相组合的交错供电方式,如图 3b 和图 1c 所示的 2 个工作周期。在图 3b 所示工作周期中,PS1 极性为正,工作在脉冲峰值电压 U_p 模式,流经 A_1 的电流 I_p 会随弧长变化而波动,对 A_1 弧长有自身调节作用;PS2 关闭, A_2 电弧熄灭;VPS 工作在 I_M 恒流模式,正极接 E_1 ,负极接 E_2 ,于是两根焊丝之间建立了第三电弧 A_M , A_M 的电流方向是由 E_1 指向 E_2 。在图 3c 所示的工作周期中,PS1 关闭, A_1 电弧熄灭;PS2 极性为正,工作在脉冲峰值电压 U_p 模式,流经 A_2 的电流 I_p 会随弧长变化而波动,对 A_2 弧长有自身调节作用;VPS 工作在 I_M 恒流模式,正极接 E_2 ,负极接 E_1 ,于是两根焊丝之间建立了第三电弧 A_M , A_M 的电流方向是由 E_2 指向 E_1 。

2 电流波形的比较

图 4 是 Tandem 双丝电弧焊电流波形及电弧形态,周期 T_1 对应于图 1b 所示的工作状态,周期 T_2 对应于图 1c 所示的工作状态。对于 Tri-Arc 双丝电弧焊,无论采用哪种技术方案,最终反映到焊丝与工件

的电流波形上是相同的。图 5 是 Tri-Arc 双丝电弧焊电流波形及电弧形态,周期 T_1 对应于图 2b 或图 3b 所示的工作状态,周期 T_2 对应于图 2c 或 3c 所示的工作状态。

在图 4 的 T_1 周期内,流经焊丝 E_1 的电流 $I_{E1}=I_p$,流经焊丝 E_2 的电流 $I_{E2}=I_b$;在图 4 的 T_2 周期内,流经焊丝 E_1 的电流 $I_{E1}=I_b$,流经焊丝 E_2 的电流 $I_{E2}=I_p$;在图 5 的 T_1 周期内,流经焊丝 E_1 的电流 $I_{E1}=I_p$,流经焊丝 E_2 的电流 $I_{E2}=-I_M$;在图 5 的 T_2 周期内,流经焊丝 E_1 的电流 $I_{E1}=-I_M$,流经焊丝 E_2 的电流 $I_{E2}=I_p$ 。

对比图 4 与图 5,最直观的差别是:流过 Tandem 双丝电弧焊焊丝的电流波形是直流脉冲,流过 Tri-Arc 双丝电弧焊焊丝的电流波形是交流脉冲。直流与交流的差别最终表现在用于熔化焊丝的电流与流入焊接工件的电流不相同。

3 焊接热输入的比较

焊接热输入通常用焊接线能量做衡量标准,但实际影响因素主要是焊接电流,因此在实践中控制焊接热输入也主要是控制焊接电流。为此通过图 4、图 5 的电流波形得到 Tandem 双丝电弧焊与 Tri-Arc 双丝

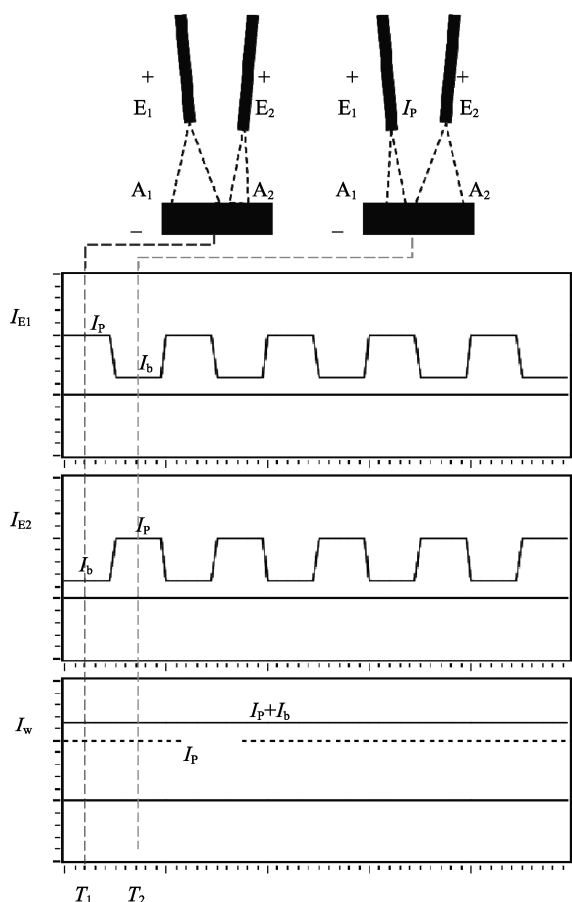


图 4 Tandem 双丝电弧焊电流波形及电弧形态
Fig.4 Current waveform and arc shape of Tandem dual wire arc welding

电弧焊的电流计算公式如式 (1—4)。

对于 Tandem 双丝电弧焊, 用于熔化焊丝的电流为:

$$I_E = I_p + I_b \quad (1)$$

对于 Tri-Arc 双丝电弧焊, 用于熔化焊丝的电流为:

$$I_E = I_p + I_M \quad (2)$$

对于 Tandem 双丝电弧焊流入焊接工件的电流为:

$$I_W = I_p + I_b \quad (3)$$

对于 Tri-Arc 双丝电弧焊流入焊接工件的电流为:

$$I_W = I_p - I_M \quad (4)$$

在送丝速度相同的情况下, Tandem 双丝电弧焊与 Tri-Arc 双丝电弧焊用于熔化焊丝的电流应该基本相等 (Tri-Arc 双丝电弧焊会稍低一些, 因为电流 I_M 的极性是 DCEN, 有更高的单位电流熔敷系数)。Tandem 双丝电弧焊与 Tri-Arc 双丝电弧焊最大的差别在于流入焊接工件的电流不同, 如式 (3—4) 所示。对于 Tandem 双丝电弧焊是在 I_p 的基础增加 I_b ; 对于 Tri-Arc 双丝电弧焊是在 I_p 的基础降低 I_M , 因此在相同的焊丝熔敷率下, 对与焊接工件, Tri-Arc 双丝电弧焊具有比 Tandem 双丝电弧焊更低的焊接热输入。对于 Tandem 双丝电弧焊由式 (1) 和式 (3) 的关系可见, 用于熔化焊丝的电流和流入焊接工件的电流是

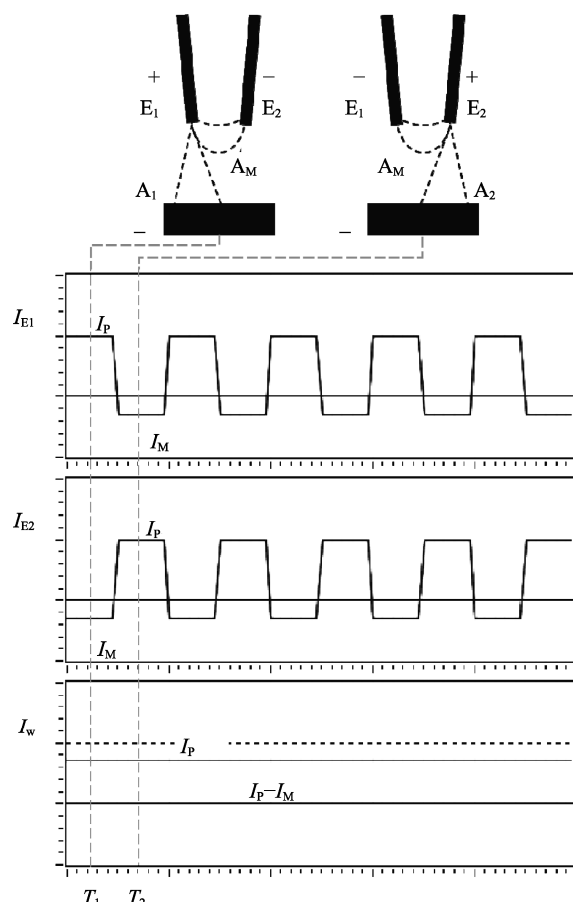


图 5 Tri-Arc 双丝电弧焊电流波形及电弧形态
Fig.5 Current waveform and arc shape of Tri-Arc dual wire arc welding

相同的, 因此在通过焊接电流增加焊丝熔敷率的同时必定增加焊接工件的热输入。对于 Tandem 双丝电弧焊由式 (2) 和式 (4) 的关系可见, 用于熔化焊丝的电流和流入焊接工件的电流是不同的, 因此在通过 I_M 增加焊丝熔敷率的同时还可以降低焊接工件的热输入。这就是 Tri-Arc 双丝电弧焊相对 Tandem 双丝电弧焊的技术优势所在。这种技术优势无疑为 Tri-Arc 双丝电弧焊开拓了更广泛的使用范围, 尤其是在要求高焊丝熔敷率与低焊接热输入的场所, 例如堆焊等领域具有显著优势, 焊缝熔合比可低至 10% 以下^[15]。

4 结论

1) Tri-Arc 双丝电弧焊具有 Tandem 双丝电弧焊的全部功能和特性。

2) Tri-Arc 双丝电弧焊相对 Tandem 双丝电弧焊具有更高一些的焊丝熔敷率。

3) 在相同的焊丝熔敷率条件下, Tri-Arc 双丝电弧焊具有与 Tandem 双丝电弧焊更低的焊接热输入。

4) Tri-Arc 双丝电弧焊具有比 Tandem 双丝电弧焊更广泛的应用范围, 尤其适合于堆焊领域, 可获得极低的熔合比。

参考文献:

- [1] MICHIE Ken, BLACKMAN Stephen. Twin-Wire GMAW: Process Characteristics and Applications[J]. Welding Journal, 1999(15): 31—34.
- [2] 魏占静. Tandem 高速、高效 MIG/MAG 双丝焊技术[J]. 机械工人, 2002(12): 32—33.
WEI Zhan-jing. Tandem High Speed and High Efficiency MIG/MAG Double Wire Welding Technology[J]. Machinist, 2002(12): 32—33.
- [3] 吉俊文. Tandem 双丝焊接电源的系统设计与调试[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
JI Jun-wen. System Design and Debugging of Tandem Double Wire Welding Power Supply[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- [4] NEYKA S, KUSCH M, MAYR P. 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, 2012.
- [5] FANG C F, MENG X H, HU Q X. 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.
- [6] ZHANG Y M, JIANG M, LU W. Double Electrodes GMAW Improve Heat Input Control[J]. Welding Journal, 2004, 83(11): 39—41.
- [7] 西村弘, 宫原野夫. 自动アーク熔接法: JP, 52091752 A [P]. 1977-08-02.
NISHIMURA Hiroshi, HARANO Yoshio. Automatic Arc Welding Method: JP, 52091752 A [P]. 1977-08-02.
- [8] 耿正. 双丝动态三电弧焊接方法: 中国, 102069265B[P]. 2012-08-22.
GENG Zheng. Double Wire Dynamic Three Arc Welding Method: China, 102069265B[P]. 2012-08-22.
- [9] 耿正. 多态双丝电弧焊接装置及焊接方法: 中国, 103341681B[P]. 2015-05-06.
GENG Zheng. Polymorphic Double Wire Arc Welding Device and Welding Method: China, 103341681B[P]. 2015-05-06.
- [10] 耿正, 魏占静, 韩雪飞, 等. 高熔敷率低热输入的 Tri-Arc 双丝电弧焊接方法[J]. 金属加工(热加工), 2014(22): 37—42.
GENG Zheng, WEI Zhan-jing, HAN Xue-fei, et al. Method with High Deposition Rate and Low Heat Input[J]. MW Metal Forming, 2014(22): 37—42.
- [11] 刘丹, 常云龙. 双丝三电弧铝合金熔丝电弧行为[J]. 焊接, 2018(5): 15—20.
LIU Dan, CHANG Yun-long. Arc Behavior of Aluminum Alloy Fusion of Tri-Arc Double Wires[J]. Welding & Joining, 2018(5): 15—20.
- [12] ZHENG Jia, WANG Tian-qi, ZHONG Pu. Effect of Pulse M-Arc Frequency on Tri-Arc DE Droplet Transfer and Weld Forming[J]. China Welding, 2019, 28(1): 1—5.
- [13] 郑佳, 李亮玉, 钟蒲, 等. 双丝三电弧焊中熔滴过渡及焊缝成形机理[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 31—36.
ZHENG Jia, LI Liang-yu, ZHONG Pu, et al. Droplet Transfer and Weld Forming of Tri-arc DE Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 31—36.
- [14] 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 Ming-hui, MOU Li-ting, 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.
- [15] 张杰, 王军, 牟立婷, 等. Tri-Arc 双丝电弧焊堆焊工艺研究[J]. 电焊机, 2017, 47(7): 61—64.
ZHANG Jie, WANG Jun, MOU Li-ting, et al. Study on the Tri-Arc Double Wire Arc Surface Technology[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(7): 61—64.