

M 弧电流对 Tri-Arc 双丝电弧焊熔滴过渡形态影响

马 振¹, 庄明辉¹, 牟立婷¹, 李少农², 耿 正³, 李慕勤¹

(1. 佳木斯大学 材料科学与工程学院, 佳木斯 154007; 2. 深圳瑞凌实业股份有限公司, 深圳 163000; 3. 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)

摘 要:采用高速摄影技术对三电弧双丝电弧焊的熔滴过渡和焊接飞溅进行观察,分析金属型药芯焊丝在 M 弧电流变化时熔滴过渡的类型及飞溅产生的原因. 结果表明,M 弧电流为 170 A 时熔滴过渡形式有排斥过渡、颗粒过渡及细颗粒过渡,熔滴过渡不稳定. M 弧电流为 210 A 时前丝和后丝熔滴过渡为大熔滴排斥过渡,三电弧同时出现,熔滴过渡稳定. M 弧电流为 260 A 时前丝熔滴过渡为细颗粒过渡,后丝熔滴过渡为颗粒过渡,熔滴过渡较稳定. 焊接飞溅产生的原因主要是脉冲切换改变了电弧力、斑点力及等离子流,打破了原来的力系平衡.

关键词:三电弧双丝电弧焊; 熔滴过渡; 焊接飞溅; 高速摄影

中图分类号: TG 422.3 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160701003

0 序 言

三电弧(tri-arc)双丝电弧焊是一种全新的、高效的双丝电弧焊接方法^[1]. 三电弧双丝电弧焊的新特性主要是由 M 电弧的作用决定的,由于 M 弧的引入,可使流经工件的电流远低于流经焊丝的电流,从根本上解决提高焊丝熔敷率与降低工件热输入之间的矛盾,既可实现低稀释率的堆焊、薄板焊接,也可焊接厚板结构.

在焊接过程中,熔滴过渡对电弧稳定性、熔池形态、焊缝成形、飞溅以及接头的性能有着重要的影响^[2]. 改善焊接过程中熔滴过渡的稳定性是提高焊接质量的重要途径^[3]. 目前,国内外对电弧的熔滴过渡行为开展了大量的分析^[4-9]. 但关于三电弧双丝电弧焊的熔滴过渡研究鲜有报道,存在许多理论和应用问题. 利用高速摄影技术观察分析不同 M 弧电流作用下,三电弧双丝电弧焊的熔滴过渡和焊接飞溅,从而进一步了解三电弧双丝焊的熔滴过渡本质,为焊接设备的优化、焊接过程的控制和工艺的改进提供试验参考.

1 试验方法

试验用焊机为 Tri-Arc 双丝焊机,由深圳瑞凌实

业股份有限公司开发提供. 采用德国 CUBE 高速摄像机对熔滴过渡和焊接飞溅进行拍摄观察分析,最高拍摄速度为 10 000 帧/s.

试验材料的焊丝为威海三盾公司生产的金属型药芯 Fe-Cr-C-B 系焊丝,焊丝直径 1.6 mm,堆焊试验在 Q235 钢板上进行,尺寸 275 mm×150 mm×10 mm. 试验参数为(80% Ar+20% CO₂)气体保护,气体流量 15 L/min,脉冲占空比 50%,其它焊接工艺参数见表 1.

表 1 焊接试验工艺参数
Table 1 Parameters of welding test

M 弧电流 <i>I</i> /A	电压 <i>U</i> /V	送丝速度 <i>v</i> ₁ /(m·min ⁻¹)	小车速度 <i>v</i> ₂ /(cm·min ⁻¹)	脉冲频率 <i>f</i> /Hz
170	35	10	60	70
210	35	10	60	70
260	35	10	60	70

2 M 弧电流对熔滴过渡行为的影响

2.1 M 弧电流为 170 A

M 弧电流为 170 A 时熔滴过渡形式有排斥过渡、颗粒过渡及细颗粒过渡,熔滴过渡不稳定,飞溅较大. 图 1 为 M 弧电流 170 A 时高速摄影图像.

如图 1 所示,前(左)丝熔滴在 M 弧和前丝电弧共同作用下熔化,并在焊丝端部形成、长大. 由于 M 弧的存在,增加了斑点压力、表面张力及电场强度,使熔滴被排斥到偏离焊丝径向轴线,并不停的漂移

收稿日期: 2016-07-01
基金项目: 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UN-PYSCT-2016203); 佳木斯大学与深圳瑞凌实业股份有限公司合作项目(RI-RYF-15012701)

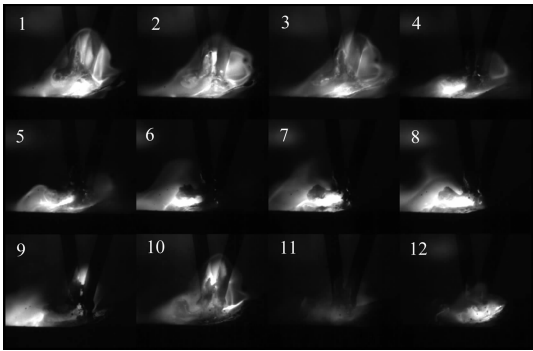


图 1 M 弧电流为 170 A 时的高速摄影图像
Fig. 1 High-speed video photographs at 170 A

旋转,没有迅速向熔池过渡,熔滴过渡过程中电弧表现并不稳定. M 电弧呈钟罩形,包围前丝与后丝,在熔滴过渡过程中 M 电弧时强时弱,影响熔滴过渡. 后(右)丝被形成的 M 弧包围,后丝金属熔化,药芯熔化滞后于钢芯,形成滞熔现象,滞熔的药芯和滞熔药芯端部的熔融药芯存在于电弧轴线位置,可明显观察到在焊丝端部与熔池之间形成一座桥梁^[9]. M 弧电流小,滞熔程度较轻,过渡较稳定,形成细颗粒过渡,滞熔并没有影响熔池金属的流动性. 前丝熔滴继续长大,并有拖尾现象,熔滴漂浮、旋转,电弧形状变化较大,后丝在 M 弧的作用下熔化维持滞熔,继续向熔池过渡. 图 1 中 9 为前后焊丝脉冲切换时刻(即前丝脉冲峰值作用结束,后丝脉冲峰值开始)前丝电弧消失,但在 M 弧的作用下前后丝继续熔化,前丝偏离径向轴线方向的底部形成的熔滴脱落,向熔池过渡. 由于前丝与后丝处在脉冲切换,脉冲电流波动较大, M 弧方向的改变,以及送丝速度不适,焊丝端部距熔池较近,易发生短路,电弧熄灭, M 弧消失. 后丝的脉冲电流使得后丝再次引弧燃烧,电弧呈较大椭圆状,电弧包围了前后焊丝,引弧产生巨大的电弧力,极易把过渡的熔滴吹出,熔池波动较大,易产生飞溅.

2.2 M 弧电流为 210 A

M 弧电流为 210 A 时前丝与后丝熔滴过渡以排斥过渡为主,熔滴过渡稳定,飞溅较小. 图 2 为 M 弧电流 210 A 时高速摄影图像.

如图 2 所示,当 M 弧电流为 210 A 时,可观察到三个电弧,即前丝与工件之间形成第一弧,后丝与工件之间形成第二弧,前丝与后丝之间形成第三弧. 前丝与后丝的熔滴偏离焊丝径向轴线的周边形成,并向下漂移,不规则的旋转长大,长时间停留在焊丝端部,整个过渡过程中电弧基本稳定. 熔滴过渡过程中仍保持着旋转的状态,与熔池接触的瞬间,急速旋转的熔滴不易被熔池表面的张力拉入熔池,因而

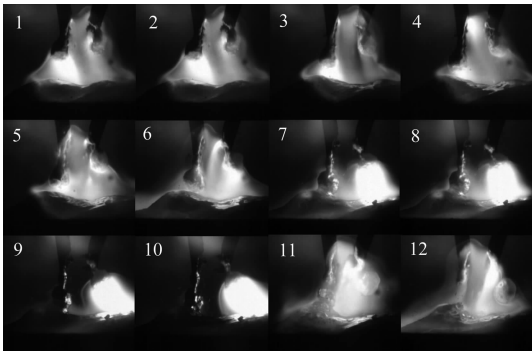


图 2 M 弧电流为 210 A 时的高速摄影图像
Fig. 2 High-speed video photographs at 210 A

会出现熔滴在熔池表面隆起翻滚^[10]. 前丝在偏离焊丝径向轴线的端部形成熔滴,熔滴直径大于焊丝,维弧稳定且电弧呈锥状,较明亮;后丝虽然没有脉冲峰值电流的作用,但 M 弧把后丝熔化,在焊丝端部形成熔滴、长大,熔滴直径略大于焊丝,电弧吹力较弱,有明显的方向性; M 弧为较大的钟罩形,包围了后丝整个熔滴和部分前丝. 图 2 中 4 为前丝脉冲峰值作用结束时刻,后丝脉冲峰值开始,前丝电弧吹力、表面张力及斑点力变小,但在 M 弧电流作用下,前丝继续燃烧,熔滴继续长大,熔滴和焊丝之间形成颈缩,电流密度变大,收缩效应增加,阻碍熔滴过渡的表面张力减小,促使熔滴向熔池过渡. 作用于后丝的脉冲电流使得后丝再次引弧燃烧,电弧吹力变大,方向性较强,引弧产生巨大的电弧力没有破坏电弧平衡,电弧稳定性好,熔池波动小,不易产生焊接飞溅.

2.3 M 弧电流为 260 A

M 弧电流为 260 A 时前丝为滞熔现象的熔滴过渡,后丝为颗粒过渡,图 3 为 M 弧电流 210 A 时高速摄影图像.

如图 3 所示,三个电弧形态发生很大改变. M 弧电流的增加,主电弧长度增长. 前丝电弧形状为较大的半圆形且焊丝轴线处于电弧的边缘出,前丝

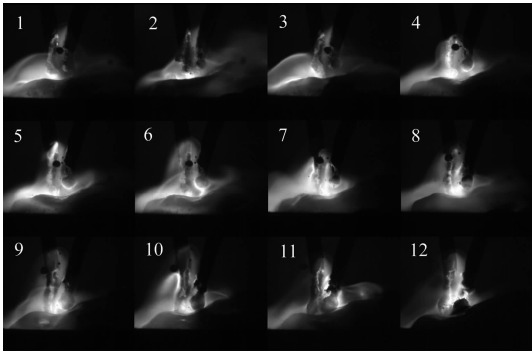


图 3 M 弧电流为 260 A 时的高速摄影图像
Fig. 3 High-speed video photographs at 260 A

端头与熔池之间始终有半熔化状态的渣柱存在,熔滴粘着于渣柱之上,熔滴与熔池接触,并迅速向熔池以附渣的状态进行过渡. 后丝在 M 弧的作用,在焊丝端部逐渐形成熔滴、长大,熔滴直径与焊丝相当,斑点压力小,熔滴沿焊丝轴线方向过渡. 图 3 中 4 是前丝脉冲峰值电流结束,后丝脉冲峰值电流开始时,前丝半圆形的电弧变为不规则的斜锥形,电弧不稳定,M 弧包围前丝,较大的 M 弧电流使前丝继续熔化以附渣的状态进行过渡. 后丝燃弧使熔滴的斑点力和表面张力的增加,使熔滴有长大,发生颈缩,形成颗粒过渡. 前丝在 M 弧的作用下继续以附渣的状态向熔池过渡,后丝熔滴则不断长大,当熔滴达到一定尺寸后,在重力的作用下过渡到熔池中.

2.4 焊接飞溅

图 4 为不同 M 弧电流时的焊接飞溅高速摄影图像,明显看到有黑色细小熔滴或大颗粒熔滴,在过渡到熔池里的某个阶段会受到一个很强的横向作用力,使处在过渡阶段的液体金属流会被横向吹出,形成焊接飞溅. 金属型药芯焊丝三电弧双丝电弧焊,焊接飞溅的产生主要是由两个电弧与 M 弧之间的电磁力干扰所引起. 电弧之间会产生电磁力,两个电弧相互吸引或相互排斥.

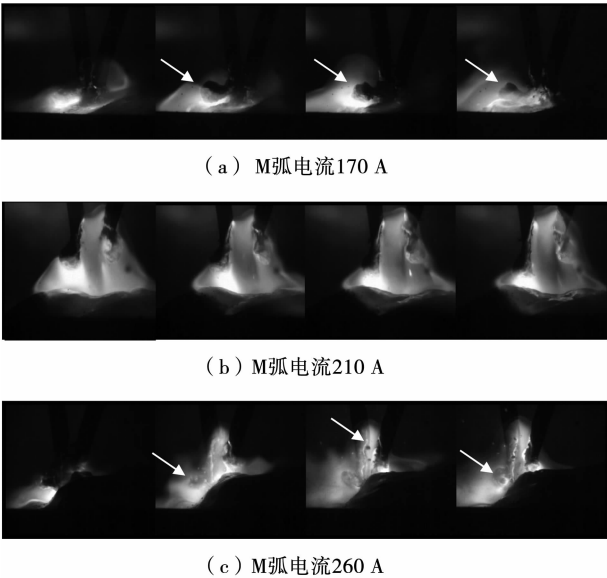


图 4 不同 M 弧电流的飞溅高速摄影图像
Fig. 4 High-speed video photographs of spatter created by M arc current

观察图 4a,M 弧电流为 170 A 时,焊接飞溅的产生主要由于两个电弧与 M 弧之间的电磁力干扰所引起使电弧之间产生相互吸引或相互排斥,同时脉冲切换时,M 弧在过电流零点时电弧经历了息弧和

重新燃弧,会对两极产生强大的斑点压力,以及产生向上的电弧力. 同时 M 弧方向的变化,斑点力的改变以及电弧力的向上推动作用,将偏离前丝直径端部的熔滴边旋转边飞散出去,有的熔滴被电弧横向吹出,排斥到电弧空间外,形成大颗粒飞溅;观察图 4b,M 弧电流为 210 A 时,熔滴过渡及电弧形态比较稳定,焊接过程中飞溅较小. 观察图 4c,M 弧电流为 260 A 时,熔滴过渡结束后电弧从熔滴向焊丝端部移动的瞬间,由于电弧力和 M 弧的作用也会使残留在焊丝侧面的熔液或熔芯被吹散成小颗粒飞溅;电弧呈现一种斜向的圆锥状或束状,电弧的挺度变的不好,将会影响到电弧本身的电磁收缩力和等离子流,造成两个电弧的形态都会发生变化,如果这种变化程度比较大,就可能造成熔滴过渡不规则,焊接过程不稳定,尤其是在前丝与后丝电弧交替时,电弧不稳定体现较为明显. 随着 M 弧电流的增加,三个电弧形成的电弧吹力更为明显,脉冲切换瞬间,形成焊接飞溅的可能性会变大.

3 结 论

- (1) M 弧电流为 170 A 时熔滴过渡形式有排斥过渡、颗粒过渡及细颗粒过渡;M 弧电流为 210 A 前丝和后丝熔滴过渡都以排斥过渡为主,伴有颗粒过渡;M 弧电流为 260 A 时前丝熔滴过渡为滞熔现象的熔滴过渡,后丝熔滴过渡为颗粒过渡.
- (2) M 弧电流变化对熔滴过渡影响较大, M 弧电流为 210 A 时,熔滴过渡稳定,焊接飞溅较小; M 弧电流达到某一临界值,三电弧同时出现.
- (3) 焊接飞溅的产生原因主要是由于脉冲切换时改变了电弧力、斑点力及等离子流,从而打破了原来的力系平衡.

参考文献:

[1] Kim Y S, Eagar T W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding[J]. Welding Research Supplement, 1993 (6): 269 - 278.

[2] 解生冕, 吴开源, 文元美, 等. 脉冲频率对 TCGMAW 熔滴过渡行为的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 69 - 72.

Xie Shengmian, Wu Kuaiyuan, Wen Yuanmei, et al. Pulse frequency affect droplet transition behavior of TCGMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(3): 69 - 72.

[3] 李 桓, 曹文山, 孙小兵, 等. 气保护药芯焊丝熔滴过渡的形式及特点[J]. 焊接学报, 2000, 21(1): 13 - 16.

Li Huan, Cao Wenshan, Sun Xiaobing, et al. Form and characteristics of the droplet transition of the Gas flux cored wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(1): 13 - 16.

- [4] 朱志明, 吴文楷, 陈 强. 基于高速 CCD 摄像的短路过渡焊接熔滴检测与分析[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 19-22.
Zhu Zhiming, Wu Wenkai, Chen Qiang. Detect and analysis of molten droplet in short-circuit arc welding based on high-speed charge coupled device camera [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 19-22.
- [5] Li Kehai, Chen Jinsong, Zhang Yuming. Double electrode GMAW process and control[J]. Welding Journal, 2007, 86(8): 231-237.
- [6] 王 皇, 刘海云, 王 宝, 等. 金属粉芯型药芯焊丝熔滴过渡及飞溅观察分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 83-85.
Wang Huang, Liu Haiyun, Wang Bao, et al. Observation and analysis of droplet transfer and spatter of metal powder type of flux-cored wire welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(10): 83-85.
- [7] Motta M F, Dutra J C, Gohr R J, et al. A study on out-of-phase current pulses of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on coating applications; Part I[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2007, 29(2): 202-206.
- [8] 赵 丽, 张富巨. 药芯焊丝电弧的熔滴过渡与相关技术特性[J]. 焊接技术, 2002, 31(1): 36-39.
Zhao Li, Zhang Fujun. The flux-cored wire arc melting drop transition and related technical characteristics[J]. Welding Technology, 2002, 31(1): 36-39.
- [9] 王 宝, 杨 林, 王 勇. 药芯焊丝 CO₂ 焊熔滴过渡现象的观察与分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 77-80.
Wang Bao, Yang Lin, Wang Yong. Observation and analysis of metal transfer phenomena for flux-cored electrodes in CO₂ arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(7): 77-80.

作者简介: 马 振,男,1983 年出生,博士研究生,讲师. 主要从事焊接工艺及材料表面改性. 已发表论文 5 余篇. Email: jmsdxmz@163.com

通讯作者: 李慕勤,女,教授. Email: jmsdxlimuqin@163.com



《CHINA WELDING(中国焊接)》征稿启事

《CHINA WELDING(中国焊接)》(ISSN 1004-5341, CN23-1332/TG)1992 年创刊,是由中国机械工业联合会主管,中国焊接协会、中国机械工程学会焊接分会、机械科学研究院哈尔滨焊接研究所主办的国内外公开发行的英文版学术期刊。作为中国焊接界唯一的英文版学术期刊,《CHINA WELDING(中国焊接)》已成为国际焊接界跟踪和了解中国焊接技术最新进步与发展的重要窗口,为宣传我国优秀的焊接技术成果,引进和吸收先进的国际焊接技术发挥着不可替代的作用。先后被国内外知名的检索机构包括 CA, AJ, CSA, JST, Scopus 收录。欢迎广大焊接及相关专业学者踊跃投稿。

《CHINA WELDING(中国焊接)》主要刊载焊接各专业学科领域及与焊接有密切关系领域最新理论研究和实际应用方面的高水平论文,涉及的内容包括:焊接基础理论、焊接材料、焊接工艺、焊接设备、检测及控制、切割与喷涂等焊接新理论、新技术、新方法方面具有一定学术价值和应用价值的科研成果。

投稿须知

1. 国内作者可通过网站<http://magazines.hwi.com.cn> 投稿,首次投稿的作者需要注册之后登录投稿,根据相关提示进行操作,首次投稿时所填作者信息尽可能详细、准确。完成投稿获得稿件编号后,可实时在线跟踪查询稿件状态。

2. 国外作者可通过 E-mail: chinawelding2016@163.com 投稿

3. 来稿是否刊登,经审查予以答复(2 个月内)。未通过审查而不能刊登的稿件,作者可自行处理。

4. 论文发表周期(自收到稿件到见刊)不超过 8 个月。

投稿网址:<http://magazines.hwi.com.cn>

编辑部电话: 0451-84091132

传 真: 0451-86325919

E-mail: chinawelding2016@163.com

通信地址: 哈尔滨市松北区创新路 2077 号哈尔滨焊接研究所 716 室

中国焊接编辑部 邮编 150028