DOI: 10.3901/JME.2015.04.084

单电源三丝 MIG 焊的交替燃弧特性*

向婷¹ 李桓¹ 杨立军¹ 韦辉亮¹ 高莹²

(1. 天津大学天津市现代连接技术重点实验室 天津 300072;

2. 天津职业技术师范大学天津市高速切削与精密加工重点实验室 天津 300222)

摘要: 三丝焊作为一种高效的焊接方法受到重视,而电弧形态及燃弧特性是反映焊接过程稳定性,决定焊缝成形及质量的重要因素。试验中搭建三丝熔化极惰性气体保护(Metal inert-gas, MIG)焊系统,利用 MultDaq 电信号采集系统采集焊接电流和电弧电压波形,借助高速摄像系统同步拍摄电弧形态及熔滴过渡过程,实时监测焊接过程。观察不同电弧电压下的焊丝燃弧情况及熔滴过渡方式,研究短路过渡和大滴过渡形式下的交替燃弧机理,以及电弧电压对单电源三丝 MIG 焊交替燃弧过程的影响。结果表明,当焊接电源供给能量较小时,并联的三根焊丝上的电流分配呈现“此消彼长”的规律而导致电弧在焊丝间交替燃烧,且焊丝在电弧空间中的位置决定了焊丝上的电流分配。随着电弧电压的增加,交替燃弧频率减小。当电弧电压达到 34 V 时,三根焊丝同时燃弧,无交替燃弧现象,交替燃弧频率变为 0 Hz。

关键词: 三丝 MIG 焊; 交替燃弧; 短路过渡; 大滴过渡

中图分类号: TG403

Alternate Arcing Characteristics of the Triple-wire MIG Welding

XIANG Ting¹ LI Huan¹ YANG Lijun¹ WEI Huiliang¹ GAO Ying²

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Machining,
Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222)

Abstract: As a kind of efficient welding method, triple-wire welding is taken seriously, and the arc shape and arcing characteristics are important factors in reflecting the stability of welding process and determining the weld quality and formation. Triple-wire metal inert-gas(MIG) welding system has been established in the test. In the welding process, the waveforms of welding current and arc voltage are acquired through the MultDaq signal acquisition system while the arc behavior and metal transfer process are monitored by high-speed photography system synchronously. Then the whole welding process can be monitored in real time, the mechanism of alternate arcing in different metal transfer modes and the influence of arc voltage on alternate frequency are studied. The results of experiments show that when the welding power source can only supply less energy, the current distribution on three wires connected in parallel presents the rule of “shift”, which results in alternate arcing among wires. Moreover, current distribution on three wires is decided by the location of wires in the arc space. As the increases of the arc voltage, the alternate frequency decreases. When the arc voltage is up to 34V, the three wires start arcing simultaneously, no alternate arcing, and alternate frequency becomes 0 Hz.

Key words: triple-wire MIG welding; alternate arcing; short-circuiting transfer; globular transfer

0 前言

近年来,随着焊接技术机械化、精密化、信息化和自动化的不断深入,高效焊接已经成为焊接新工艺研究的重要内容之一。提高焊接生产效率主要

包括两个方面:一是以提高焊接材料的熔化速度为目的的高熔敷率焊接,二是以提高焊接速度为目的的高速焊接^[1-3]。目前已经开发了较多熔化极气体保护高效焊接方法,如:华爱兵等^[4-5]设计了磁控大电流熔化极活性气体保护(Metal active-gas, MAG)焊工艺,采用所设计的磁场发生装置进行大电流 MAG 焊时,显著提高了焊接速度,且焊接飞溅小,焊缝成形良好;德国克鲁斯公司等开发的串列

* 国家自然科学基金资助项目(51175374)。20140227 收到初稿,20140917 收到修改稿

(TANDEM)双丝焊,焊速最快可达 6 m/min,熔敷速度快、焊接效率高、焊接质量好、飞溅小,用于焊接碳钢、不锈钢、铝合金以及其他金属材料,得到了广泛的应用^[6-7];此外克鲁斯还开发了并列双丝焊同样实现了较高的焊接效率,但电弧抗扰动力较差^[8];李恒课题组开发的激光-熔化极惰性气体保护(Metal inert-gas, MIG)/MAG 复合焊工艺^[9-10],显著增加了熔深,进而提高了焊接效率,由于激光束对电弧的压缩和引导作用,使焊接质量和电弧稳定性得到提高。

三丝熔化极气体保护焊是在单丝焊和双丝焊的基础上研发的一种高效焊接方法,因其熔敷效率高、焊接速度快而具有重要的研究价值。目前,国内外对于三丝焊的研究主要集中在焊接设备与焊接工艺上,对焊接过程中的电弧形态及熔滴过渡研究较少^[11-13]。而电弧形态及熔滴过渡方式是反映焊接过程稳定性,决定焊缝成形及质量的重要因素。试验中搭建了三丝熔化极气体保护焊系统,针对单电源三丝焊接过程中交替燃弧这一特殊现象,利用焊接电流、电弧电压信号采集系统以及高速摄像等设备进行监测,对不同熔滴过渡形式下的交替燃弧机理进行探究分析。

1 试验系统及焊接试验

图 1 为三丝熔化极气体保护焊的示意图,三根焊丝装配在一把特制的焊枪中,焊丝垂直分布于焊枪截面的同一圆周上,相邻两焊丝与圆心连线间的夹角为 120°,焊丝距圆心的径向距离为 12.5 mm。每根焊丝各接一套独立的送丝机构,分别经各自绝缘的导电嘴送出,其送丝速度可分别调节以满足焊接要求。焊枪接一套焊接电源、水冷设备、保护气及三套送丝机构,构成整体电弧-电源系统。

图 1 三丝熔化极气体保护焊示意图

实际焊接时,三台送丝机通过送丝管分别将焊

丝送进焊枪中的独立导电嘴,三根焊丝并联由同一焊接电源(林肯 INVERTEC V350 PRO)供电,为了监测焊接过程中焊丝间交替燃弧现象,在焊接过程中使用高速摄像及电信号采集系统进行同步监测。其中高速摄像的拍摄频率为 1 000 帧/s,信号采集系统由三个电流传感器、一个电压传感器、数据采集卡以及计算机构成,采集卡上各个通道的采样频率为 100 kHz。一般把前导焊丝称为“主”焊丝,后面两个跟随焊丝称为“从”焊丝,三电极的排布与高速摄像机的位置关系如图 2 所示。

图 2 三电极排布与高速摄像机的位置关系

试验采用的焊丝为 H08Mn2SiA,直径为 $\phi 1.2$ mm。焊接试样材料为低碳钢 Q235,其尺寸为 300 mm×150 mm×10 mm。采用 99.99%的 Ar 气作为保护气体,气体流量为 20 L/min。三根焊丝采用相同的送丝速度,预设值为 2 m/min。焊接速度为 3.0 mm/s,预设电压为 26~34 V,焊丝伸出长度为 26 mm。试验采用堆焊的形式,接线方式为直流反接。

2 试验结果与讨论

文中所研究的交替燃弧,是指在单电源直流供电的情况下,双丝或多丝焊接过程中的一种特殊燃弧现象,即开始时仅某几根焊丝燃弧,其余焊丝保持熄弧状态,燃弧一段时间后,熄弧的焊丝开始重新燃烧,原来燃弧的焊丝变为熄弧状态,电弧的重燃在焊丝间交替进行。在不同的焊接参数下,熔滴过渡方式、交替燃弧特性及频率有所不同。主要的熔滴过渡方式为短路过渡和大滴过渡,为了探究两种过渡方式下交替燃弧现象的本质规律,试验分别研究了不同电弧电压下的交替燃弧现象,并以此对三丝间交替燃弧本质进行阐述。

2.1 短路过渡形式下的交替燃弧现象

为了清晰地观察交替燃弧现象,选取电弧电压为 28 V,送丝速度为 2 m/min 时的电信号及高速摄像图片进行分析,如图 3 所示。由于三根焊丝以并联的形式连接在焊机上,因此电压值及变化规律是

相同的。从电信号及高速摄像图片中可以看出,单个电弧在三根焊丝上呈现有规律地交替燃烧,且熔滴过渡方式为短路过渡。开始 $t=2\ 550\text{ ms}$ 时,三根焊丝中仅有焊丝 C 燃弧,焊丝 A、B 上电流均为 0 A 而处于熄弧状态。随着焊丝 A、B 的持续送进,当 $t=2\ 596\text{ ms}$ 时,焊丝 A 先接触熔池,电弧电压急剧下降,短路电流急剧上升,与此同时,焊丝 C 上电流急剧下降至 0 A 而熄弧。当 $t=2\ 602\text{ ms}$ 时,焊丝 A 上短路电流增加约至 510 A ,“小桥”由于过电流而爆断,电弧随即引燃。焊丝 B、C 呈熄弧状态继续送进,当 $t=2\ 651\text{ ms}$ 时,焊丝 B 接触熔池发生短路过渡,在 $t=2\ 655\text{ ms}$ 时,“小桥”爆断,电弧重新引燃。与此类似,单个电弧在三根焊丝间交替燃烧,且短路过渡的瞬间标志着交替燃弧的开始,并伴随焊接电流的陡升。

图3 短路过渡时交替燃弧的电信号及图片

出现上述交替燃弧现象是由于三根焊丝是并联关系,当焊接参数较小时,电源提供的能量不足以维持三个电弧同时燃烧,只能维持其中单个电弧的燃烧,因而出现了三丝间电弧的交替燃烧。起初电弧仅在单个焊丝上燃烧,其余两焊丝呈熄弧状态并不断送进,当其中某一焊丝接触母材时,电路导通,流经该焊丝上的电流急剧增加,当短路电流增大到某一数值后,“小桥”由于过电流而爆断,同时电弧电压很快恢复到空载电压以上,电弧重新引燃。与此同时,根据并联电路的分流原理,流经原来燃弧焊丝上的电流急剧减小,不能产生足够的带电粒子以维持电弧的燃烧,因而该焊丝由燃弧转变为熄

弧。因此,短路过渡的瞬间标志着交替燃弧的开始,且焊丝短路过渡的先后决定了交替燃弧的次序,即某根焊丝接触熔池发生短路过渡后将会替代原来燃弧的焊丝重新燃弧。但当电弧电压低于 26 V 时,电源提供的能量过低,电弧不能稳定燃烧,甚至不能起弧。

2.2 大滴过渡形式下的交替燃弧现象

当使用小电流,配合以短弧时,熔滴的主要过渡方式为短路过渡。随着电弧电压继续增加,弧长会随之增加,此时熔滴过渡的主要方式转变为大滴过渡(或称粗滴过渡)。图4是电弧电压为 32 V ,送丝速度为 2 m/min 时的电信号及高速摄像图片。从图中可以看到,开始 $t=955\text{ ms}$ 时,三根焊丝同时燃弧,电弧 A、C 被电弧 B 吸引,三电弧呈聚拢状。随着焊丝 A 上电流迅速降低,当 $t=966\text{ ms}$ 时,电流降至 0 A 而熄弧,仅焊丝 B、C 燃弧。与此同时,焊丝 C 上电流呈现相反趋势,即迅速上升,电弧亮度及体积明显增加,焊丝 A、C 燃弧呈“此消彼长”的特点。随着焊丝 A 的继续送进,当 $t=979\text{ ms}$ 时,焊丝 A 上电流急剧增加,电弧重燃,此时焊丝 A 距熔池仍有一段距离,并未接触。当 $t=998\text{ ms}$ 时,焊丝 C 上电流急剧下降而熄弧,仅焊丝 A、B 燃弧,随着焊丝 C 的继续送进,当 $t=1\ 009\text{ ms}$ 时,焊丝 C 上电流开始上升而重新燃弧。与此同时,焊丝 A、B 上电流开始下降,电流在三根焊丝上的分配满足并联电路分流原理。

图4 大滴过渡时交替燃弧的电信号及图片

大滴过渡时的交替燃弧现象与短路过渡时的

截然不同,电弧的交替燃烧更为复杂,不是简单的三根焊丝依次交替燃弧,出现了双丝同时燃弧甚至三丝同时燃弧。由于电弧电压的进一步增加,一方面阴极的电场发射作用增强,向电弧空间提供的电子流密度增加。另一方面,电弧空间中气体粒子的电离程度增加,带电粒子的数目增加,电弧的导电性增强。因此,每根焊丝燃弧概率增加,出现双丝或三丝同时燃弧。此外,大滴过渡时焊丝上的平均电流增加,加剧母材蒸发,熔池附近的电弧空间充满 Fe 蒸气,Fe 的电离电压为 7.9 V,比 Ar 的电离电压(15.7 V)低很多,在这种情况下为提供电弧导电所需要的带电粒子要求的外加能量级可以较低^[14-15]。因此,当焊丝送至距熔池一段距离时就可

以重新燃弧,电流增加的最大幅值约为 180 A 左右,远小于短路过渡时的电流瞬时增加值,且距离熔池越近的焊丝越容易重新燃弧。此外,三根焊丝的燃弧呈现“此消彼长”的趋势,即某一焊丝上电流陡升而重新燃弧的瞬间必定导致其余焊丝上电流的急剧下降,电弧变暗甚至熄灭。这也充分印证了并联三丝上的分流原理。

2.3 电弧电压对交替频率的影响

为了了解电弧电压对交替燃弧的影响,选取送丝速度为 2.0 m/min,不同电弧电压下的电信号进行分析。图 5 分别是电弧电压为 26 V、28 V、30 V、32 V 时的电压与电流信号图。

图 5 不同电弧电压下的电信号图

从图 5 中可以看出,随着电弧电压从 26 V 依次增加到 32 V 时,单位时间内焊丝间的交替燃弧次数明显减少,即交替燃弧频率降低,三丝间交替燃弧现象更为显著。这是由于电弧电压的增加导致弧长增加,焊丝到熔池的距离被拉长,这就增加了焊丝与熔池接触所需的时间,因此焊丝从熄弧到重新燃弧的时间变长,交替燃弧的频率降低。当电弧电压达到 32 V 时,三根焊丝开始同时燃弧,仅有较短时间内交替燃弧。

图 6 是电弧电压和交替频率的拟合曲线,当电弧电压在 26 V 至 34 V 范围内时,随着电弧电压的增加,交替频率随之减小。但当电弧电压小于 26 V 时,电弧不能稳定燃烧,甚至不能起弧。当电弧电压达到 32 V 时,电源提供的能量增加,三根焊丝开始同时燃弧,仅有较短时间内交替燃弧。当电弧电压增加到 34 V 时,三根焊丝完全同时燃弧,无交替燃弧现象,此时,交替燃弧频率为 0 Hz。

图 6 电弧电压和交替频率的拟合曲线

3 结论

(1) 目前的试验只研究了电弧电压对单电源三丝 MIG 焊交替燃弧过程的影响,下一步将考虑不同焊接电流下交替燃弧现象的研究。当焊接参数较小时,电源提供的能量较小,仅能维持某一个或某两个电弧的同时燃烧,电弧在三根焊丝间交替燃烧。

(2) 对于短路过渡形式下的交替燃弧,短路过渡的瞬间标志着交替燃弧的开始,焊丝发生短路过渡的先后决定了交替燃弧的次序,且电流在三根焊丝上的分配满足并联电路的分流原理。

(3) 对于大滴过渡形式下的交替燃弧,焊丝距离熔池的远近决定了电弧重燃的难易,距离熔池越近,母材蒸发形成的铁蒸气浓度越大,电弧越容易重燃。反之,距离熔池越远,电弧越不易重燃。此外,焊丝间交替燃弧的瞬时,电弧体积及亮度呈现出“此消彼长”的特点。

(4) 当电弧电压在 26~34 V 范围内时,随着电弧电压的增加,交替燃弧频率减小。当电弧电压达到 34 V 时,三根焊丝同时燃烧,无电弧交替燃烧现象,此时交替燃弧频率为 0 Hz。

参 考 文 献

- [1] 华学明, 马晓丽, 林航, 等. 高速三丝熔化极气体保护焊接工艺[J]. 焊接学报, 2008, 29(12): 109-112.
HUA Xueming, MA Xiaoli, LIN Hang, et al. Three-wire MAG high speed welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(12): 109-112.
- [2] USHIO M, SUGITANI Y, TANAKA M. Recent development of high efficiency arc welding systems in Japan[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(3): 25-31.
- [3] 石珂, 李妍, 黄健康, 等. 高效 MIG/MAG 焊的研究与发展[J]. 电焊机, 2008, 38(12): 6-10.
SHI Yu, LI Yan, HUANG Jiankang, et al. Research and development of high-efficiency MIG/MAG welding[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(12): 6-10.
- [4] 华爱兵, 殷树言, 陈树君, 等. 磁控大电流 MAG 焊的磁头优化及应用研究[J]. 电焊机, 2007, 37(3): 49-51.
HUA Aibing, YIN Shuyan, CHEN Shujun, et al. Optimization and application of magnetically controlled MAG welding process[J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(3): 49-51.
- [5] 黄石生, 蒋晓明, 薛家祥, 等. 双丝高速软开关脉冲 MAG 焊装备[J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 5-8.
HUA Shisheng, JIANG Xiaoming, XUE Jiaxiang, et al. High-speed soft-switching twin-wire pulsed MAG welding equipment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 5-8.
- [6] 魏占静, 周大胜, 李少农, 等. TANDEM 双丝焊在造船拼板焊接中的应用[J]. 电焊机, 2007, 37(6): 45-47.
WEI Zhanjing, ZHOU Dasheng, LI Shaonong, et al. Application of TANDEM twin wire welding in the welding of panel in shipbuilding[J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(6): 45-47.
- [7] FANG Chenfu, MENG Xiaohui, HU Qingxian, et al. TANDEM and GMAW twin wire welding of Q690 steel used in hydraulic support[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2012, 19(5): 79-85.
- [8] 曹梅青, 邹增大, 张顺善, 等. 双丝电弧焊研究现状及进展[J]. 山东科技大学学报, 2008, 27(2): 88-92.

- CAO Meiqing, ZOU Zengda, ZHANG Shunshan, et al. Present situation and development of twin-wire arc welding[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2008, 27(2): 88-92.
- [9] GU Xiaoyan, LI Huan, YANG Lijun, et al. Coupling mechanism of laser and arcs of laser-twin-arc hybrid welding and its effect on welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 246-253.
- [10] 丁雪萍, 李桓, 杨立军, 等. 激光+双丝脉冲 MAG 复合焊的焊接稳定性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 52-56.
- DING Xueping, LI Huan, YANG Lijun, et al. Welding stability in laser+twin-electrode pulsed MAG hybrid welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 52-56.
- [11] ARITA H, MORIMOTO T, NAGAOKA S, et al. Development of advanced 3-electrode MAG high speed horizontal fillet welding process[J]. Welding in the World, 2009, 53(5-6): 35-43.
- [12] YOKOTA Y, SHIMIZU H, NAGAOKA S, et al. Development and application of the 3-electrode MAG high-speed horizontal fillet welding process[J]. Welding in the World, 2012, 56(1-2): 43-47.
- [13] TUSEK J. Mathematical modelling of melting rate in arc welding with a triple-wire electrode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(3): 415-423.
- [14] AMERICO S, VIADIMIR P, WILLIAM L, et al. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding[J]. Journal of Material Processing Technology, 2012, 212(6): 1406-1413.
- [15] 殷树言. 气体保护焊工艺基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- YIN Shuyan. The foundation and application of gas shielded welding[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
-
- 作者简介: 向婷, 女, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高效率焊接理论及工艺。
E-mail: xiangting123@tju.edu.cn
- 杨立军(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为高能束焊接和焊接过程智能控制等。
E-mail: yljabc@163.com