DOI: 10.3901/JME.2014.04.085

焊接电流波形对波控短路过渡过程及焊缝形状尺寸的影响*

陈茂爱 蒋元宁 武传松

(山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061)

摘要: 利用电参数与熔滴过渡图像同步检测系统研究波控短路过渡 CO_2 焊峰值燃弧电流 I_{ap} 、基值燃弧电流 I_{ab} 以及拖尾时间 t_w (由峰值燃弧电流切换到基值燃弧电流所用的时间) 等电流波形参数对过渡过程和焊缝成形尺寸的影响。结果表明, 燃弧时间随着峰值燃弧电流和拖尾时间的增大而增大; 短路时间随着峰值燃弧电流的增大而缩短, 不随拖尾时间的变化而变化。基值燃弧电流对短路时间和燃弧时间的影响不大。平均燃弧电流随着峰值燃弧电流的增大而减小, 随着基值燃弧电流和尾拖时间的增大而增大。随着峰值燃弧电流的增大, 熔宽增大, 余高减小; 而熔深则先减小后增大。基值燃弧电流和拖尾时间的增大均会使熔深和熔宽增大, 余高减小。

关键词: 波控短路过渡; 焊缝形状尺寸; 电流波形

中图分类号: TG115

Effect of Welding Current Waveforms on Metal Transfer and Weld Geometry in Controlled Short Circuiting Transfer GMAW

CHEN Maoai JIANG Yuanning WU Chuansong

(Key Laboratory for Liquid-solid Structural Evolution and Materials Processing of Materials of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: The effect of waveform parameters of welding current (peak arcing current, basic arcing current and tail-out time, etc.) on metal transfer stability and weld geometry is investigated with a computer-based simultaneously sensing and visualizing system for images of droplet/wire and the transient data of welding current and arc voltage. The results shows that the arcing time increases and the short circuit time decreases with increasing the preset peak arcing current or tail-out time. The background arcing current has little effect on the arcing time and short circuit time. The mean arcing current decreases with increasing the peak arcing current and increases with increasing the background arcing current or tail-out time. With increasing the peak arcing current, the weld width increase, while the reinforcement decrease and the penetration first decreases then increases. An increase in background arcing current or tail-out time causes increases in weld wide and penetration and a decrease in reinforcement.

Key words: short circuiting transfer; weld bead geometry; current waveform

0 前言

短路过渡熔化极气体保护焊 (Gas metal arc welding, GMAW) 是低碳钢和低合金钢结构件的主要焊接工艺方法。它具有生产成本低、焊接变形小、

焊缝含氢量低、抗裂性能好等优点, 但其飞溅率大, 表面成形差制约着焊接质量的进一步提高, 因此, 近年来, 国内外学者对短路过渡的飞溅抑制方法进行了大量的研究。在提出的众多方法中, 波形控制法是最有效也是应用最广泛的方法。朱志明等^[1]根据燃弧电流对熔滴形状的影响规律, 提出了采用前期大、后期小的燃弧电流控制原则, 在燃弧的不同阶段获得不同的熔滴形状, 有效地控制了飞溅。朱

* 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2010EZ005)。20130312 收到初稿, 20130617 收到修改稿

志明等^[2]还根据短路阶段电源输出回路电阻的变化曲线来确定短路过渡焊接控制电流波形,有效地消除了瞬时短路,降低了飞溅率。NACEY^[3]开发了一种具有人工智能的波形预置控制系统,通过试验优化的焊接电流和电弧电压波形来抑制飞溅。但上述几种方法均为开环控制,容易受到外界因素的干扰,控制效果不是很理想。基于小桥状态反馈的电流波形控制法是闭环控制,很好地解决了外界干扰问题。TAKAAKI 等^[4]利用小桥状态反馈控制法使短路初始时刻和小桥达到临界缩颈时刻的电流切换为一很小的值,将飞溅率降低了 90%。TSUNEO^[5-6]通过微处理器实时控制焊接电流波形和电弧电压波形,将喷嘴和工件上的飞溅颗粒降低为传统 CO₂ 焊的 1/5 和 1/50,并发现燃弧后期的电流大小对熔深影响较大。ZHU 等^[7]研究了波控短路过渡 CO₂ 焊峰值燃弧电流对熔滴尺寸的影响,通过控制熔滴尺寸进一步降低了飞溅并改善了焊缝成形。DERUNTZ^[8]基于波控技术开发了 STT 焊机,在较宽广的焊接工艺范围内显著地抑制了飞溅,在同样熔深能力下降低了热输入。ERA 等^[9]用波控短路过渡氩弧焊焊接不锈钢,通过弧长监控措施可靠地抑制了飞溅。控制电流波形参数不仅影响飞溅大小,对焊缝成形和焊接过程稳定性也具有重要的影响。目前,这方面的研究还鲜见详细报道。本文利用板上堆焊试验研究一定送丝速度下,控制电流波形参数对短路过程及焊缝形状尺寸(熔深、熔宽及余高)的影响,为波控短路过渡 CO₂ 焊焊接参数优化提供基础数据。

1 试验方法及步骤

图 1 为采用的试验系统之硬件组成框图,系统由主控计算机、电参数采集单元(包括数据采集卡和电流、电压传感器等)、熔滴过渡图像采集单元(由高速摄像机、图像采集卡、氙灯等组成)和焊接系统(包括弧焊电源、工作台及控制装置)等四部分构成。该系统采用 PCI8622 数据采集卡,通过 A/D 转换将焊接过程中的电弧电压、焊接电流信号转换为数字量并存储到计算机中,供离线分析用。使用的采集频率为 200 kHz。通过数据采集卡的开关量输出端口控制弧焊电源、焊接工作台及高速摄像机的启动。电弧电压(导电嘴端部与工件夹具间的电压)和焊接电流分别采用电压传感器和霍尔电流传感器进行测量。熔滴过渡图像采用 FastCam Super-10000C 型高速摄像机采集,其最高拍摄速度可达 10 000 帧/s。使用的拍摄帧率为 5 000 帧/s。该系统通过软件延时弥补电参数采集系统与图像采集系统的启动延迟时

间差,实现了两者的同步。

图 1 系统硬件组成框图

试验所用的弧焊电源为 DC500III STT,其控制电流波形及对应的熔滴过渡图像如图 2 所示^[10]。在电弧即将短路时将焊接回路的电流切换为 30 A 左右(t_0 时刻),以防止刚刚短路时熔滴与熔池之间因流过异向电流而相互排斥致使短路不稳定,短路稳定后(t_1 时刻),短路电流逐渐增大,该增大过程通常用一个固定的电感来控制。在短路小桥达到临界状态并即将破断时也将焊接回路的电流切换为 30 A 左右(t_2 时刻),以防止破断时能量过大,使小桥主要在表面张力和重力的作用下过渡^[8, 10]。燃弧期间($t_3 \sim t_7$)通常采用脉冲电流,电弧刚刚燃烧时,电流较小,在极短的时间($t_3 \sim t_4$)内切换为峰值燃弧电流 I_{ap} ,经 1.0 ms 左右的时间($t_4 \sim t_5$)后切换为基值燃弧电流 I_{ab} 。图 2 中,峰值燃弧电流 I_{ap} 、基值燃弧电流 I_{ab} 以及拖尾时间 t_w (由峰值燃弧电流切换到基值燃弧电流所用的时间 $t_5 \sim t_6$)是可调的。

(a) 焊接电流及电弧电压波形

(b) 熔滴过渡图像

图 2 波控短路过渡焊接电流波形及对应的熔滴过渡图像

在尺寸为 200 mm×70 mm×4 mm 的 Q235 钢板上进行堆焊试验。根据试焊情况,确定了焊接参数的大体范围,峰值燃弧电流为 280~480 A,基值燃弧电流为 10~60 A,拖尾时间为 0.6~3.5 ms。其他焊接参数见表 1。对于每组焊接参数,焊接长度大

于 150 mm 的焊缝, 从焊缝中间段截取三个焊缝横截面试样, 进行打磨、抛光、腐蚀, 测量其焊缝成形尺寸, 取平均值作为测量值, 研究不同峰值燃弧电流、基值燃弧电流、尾拖时间对焊缝成形的影响。

表 1 焊接工艺参数

参数	数值
焊丝直径/mm	1.2
CO ₂ 保护气体流量/(L·min ⁻¹)	12
送丝速度/(m·min ⁻¹)	3.2~4.0
焊接速度/(m·min ⁻¹)	0.3
焊丝干伸长/mm	12

2 试验结果与分析

2.1 电流波形参数对短路过渡过程的影响

图 3 为采用 3.6 m/min 的送丝速度 v_f 、30 A 的

基值燃弧电流 I_{ab} 、0.6 ms 的拖尾时间 t_w 时不同峰值燃弧电流下的电流电压波形及熔滴过渡图像。对照两种条件下的电流电压波形图和熔滴过渡图像均可看出, 峰值燃弧电流的增加使每个短路过渡周期中的燃弧时间增长、短路时间缩短。峰值燃弧电流持续阶段, 电弧弧光强、宽度大。而且峰值燃弧电流的增加使其作用时间内的电弧电压增大, 即电弧长度增大, 从而增大了熔滴末端与熔池上表面的间距, 而焊丝的送进速度保持不变, 导致燃弧时间的增长。

图 4 示出了三种不同送丝速度(基值燃弧电流为 30 A、拖尾时间为 0.6 ms)下, 短路过渡平均周期 T_m 、平均燃弧时间 t_{am} 和平均短路时间 t_{sm} 等参数随峰值燃弧电流的变化趋势。随着峰值燃弧电流的增大, t_{am} 明显增长大, 而 t_{sm} 则明显减小, 前者的变化幅度均较大。可见, 峰值燃弧电流的变化对短路过渡过程各阶段的时间分配影响较大。 T_m 为 t_{am} 与 t_{sm} 之和, 虽然 t_{am} 与 t_{sm} 随着峰值燃弧电流的变化趋势相反, 但相同送丝速度下, T_m 仍保持与 t_{am} 相同的变化趋势。还可看出, 随着送丝速度的增大, 平均短路时间增长、平均燃弧时间和短路周期缩短。

图 5 示出了三种不同送丝速度(基值燃弧电流为 30 A、峰值燃弧电流为 400 A)下, 短路过渡平均周期 T_m 、平均燃弧时间 t_{am} 和平均短路时间 t_{sm} 等参数随着拖尾时间的变化趋势。可见, 相同送丝速度下, 随着尾拖时间的增大, T_m 与 t_a 的变化趋势相同, 均呈直线上升, 且两者的增长幅度较大; 而 t_{sm} 的变化则很小。

图 5 拖尾时间对短路过渡各时间参数的影响

图 6 给出了三种不同送丝速度(峰值燃弧电流为 400 A、拖尾时间为 0.6 ms)下, 平均燃弧时间 t_{am} 、平均短路时间 t_{sm} 和短路过渡平均周期 T_m 等参数随着基值燃弧电流的变化趋势。可以看出, 相同送丝速度下, T_m 与 t_{am} 和 t_{sm} 随着基值燃弧电流的变化趋势相同。3.2 m/min 送丝速度下, 三者均随着基值燃弧电流的增加而有所降低; 3.6 m/min 和 4.0 m/min 送丝速度下, 则随着基值燃弧电流的增加先降低后升高。然而不同送丝速度下的 t_{am} 、 t_{sm} 和 T_m 随基值燃弧电流而变化的幅度都很小, 可以认为, 随着基值燃弧电流的变化, t_{am} 、 t_{sm} 、 T_m 基本保持不变。

图 6 基值燃弧电流对短路过渡各时间参数的影响

2.2 电流波形参数对平均燃弧电流的影响

短路期间, 电弧处于熄灭状态, 此时有效热量为焊丝伸出长和液态小桥上的电阻热, 该部分热量主要用于预热焊丝。燃弧期间的电弧热才是加热和熔化母材的主要热量, 因此焊缝形状尺寸主要取决于平均燃弧电流。利用检测出的焊接电流波形, 可通过式(1)计算每个周期内的平均燃弧电流

$$I_a = \frac{1}{t_a} \int_{t_a} i(t) dt \quad (1)$$

式中, t_a 为燃弧时间, $i(t)$ 为瞬时电流。每种规范下计算 50 个周期, 再取其平均值, 得出了的电流波形参数对平均燃弧电流 I_{am} 的影响, 如图 7 所示。可见, 一定基值燃弧电流和拖尾时间下, 平均燃弧电流随着峰值燃弧电流增大而下降, 见图 7a。这主要是因为峰值燃弧电流增大时, 燃弧时间增长(见图 3 及图 4a), 而峰值燃弧电流的维持时间却是固定的(为 1.0 ms); 燃弧时间的增大主要是由基值燃弧电

流维持时间增大引起的, 因此平均燃弧电流减小。平均燃弧电流随着基值电流的增加而增大, 见图 7b。这是由于基值电流增加时, 燃弧时间稍微有所下降(图 6b), 而峰值燃弧电流及维持时间不变, 从而使平均燃弧电流增大。而拖尾时间的增长, 延长了大电流存续时间, 也会是平均燃弧电流增大, 如图 7c 所示。

(a) 峰值燃弧电流的影响 ($t_w=0.6$ ms, $I_{ab}=30$ A)

(b) 基值燃弧电流的影响 ($t_w=0.6$ ms, $I_{ap}=400$ A)

(c) 拖尾时间的影响 ($I_{ap}=400$ A, $I_{ab}=30$ A)

图 7 电流波形参数对平均燃弧电流 I_{am} 的影响

2.3 电流波形参数对焊缝形状尺寸的影响

在 3.6 m/min 的送丝速度下研究了电流波形参数对焊缝形貌及形状尺寸的影响。图 8 示出了一定基值燃弧电流和拖尾时间($I_{ab}=30$ A, $t_w=0.6$ ms)下不同峰值燃弧电流对焊缝形貌及尺寸的影响。可看出, 熔宽随着峰值燃弧电流的增大而增大, 这是因为脉冲电流的增大使电弧断面面积增大, 增大了工件上加热斑点的半径, 从而使熔宽增大。峰值燃弧电流增大到 400 A 后, 由于电弧的电磁收缩力的增大, 电弧加热斑点半径不再随峰值燃弧电流增大而

(a) 实际焊缝形貌

(b) 熔宽

(c) 熔深

(d) 余高

图 8 不同峰值电流下的实际焊缝形貌及形状尺寸

增大, 因此, 熔宽也不再继续增大。余高随着脉冲电流的增大而明显减小, 这是由于焊丝熔化速度一定, 单位时间内熔化的焊丝数量一定, 熔宽的增大必然使得余高减小。而熔深随着脉冲电流的变化趋势较复杂, 当峰值燃弧电流小于 400 A 时, 随着峰值燃弧电流的增加, 熔深稍微有所减小, 从 280 A 下的 2.71 mm 下降到 400 A 下的 2.37 mm; 峰值燃弧电流大于 400 A 时, 熔深开始随着峰值燃弧电流的增加稍微有所增大。熔深的变化由平均燃弧电流和峰值燃弧电流共同决定的。当峰值燃弧电流较低时, 平均燃弧电流对熔深的影响较大, 而平均燃弧电流随峰值燃弧电流的增加而减小, 使熔深也随峰值燃弧电流的增加不断减小; 当峰值燃弧电流较高时, 峰值燃弧电流大小对熔深的影响变大, 使熔深随峰值燃弧电流的增加而增大。

图 9 示出了一定峰值燃弧电流和拖尾时间($I_{ap}=400$ A, $t_w=0.6$ ms)下基值燃弧电流对焊缝形貌及尺寸的影响。当基值电流大于 20 A 时, 基值电流的增加使焊缝熔宽和熔深都增大(图 9a~9c), 这可能是由于平均燃弧电流随着基值电流增大引起的。基值电流的增大会使作用于母材的能量增大, 母材熔化量增加, 熔深、熔宽增大。由于熔宽增大, 而送丝速度不变, 因此余高减小(图 9d)。

基值电流为 10 A 时的焊缝成形尺寸出现异常。此时的熔深、熔宽较大, 余高较小。这种参数下焊缝表面成形粗糙、不均匀, 飞溅颗粒大, 焊接过程不稳定, 且电弧频繁熄灭-引燃。这种异常现象的出现可能是因为所测量的位置是电弧重燃时的起弧位置。重新起弧时电流很大, 电弧的瞬间大功率导致了较大熔深和熔宽。

图 10 示出了一定峰值燃弧电流和基值燃弧电流($I_{ap}=400$ A, $I_{ab}=30$ A)下不同拖尾时间对焊缝形状尺寸的影响。可看出, 由于拖尾时间的增大使平均燃弧电流增大(图 7a), 母材熔化量增加, 而峰值电流固定不变, 因此焊缝熔深和熔宽增大(图 10b、10c), 余高则明显减小(图 10c)。

3 结论

(1) 峰值电流和拖尾时间的增大均使燃弧时间增长, 并导致短路过渡周期增大。短路时间随着峰值电流的增大而缩短, 不随着拖尾时间的变化而变。基值电流对短路过渡各阶段的时间分布影响不大。

(2) 平均燃弧电流随着峰值燃弧电流的增大而减小, 随着基值电流和尾拖时间的增大而增大。

(a) 实际焊缝形貌

(b) 熔宽

(c) 熔深

(d) 余高

图 9 不同基值电流下的实际焊缝形貌及形状尺寸

图 10 不同拖尾时间下的实际焊缝、形状尺寸

(3) 峰值燃弧电流增大时熔宽增大, 余高减小; 由于平均燃弧电流随峰值燃弧电流的增大而减小, 使得熔深随峰值燃弧电流的增大先减小后增大。在峰值燃弧电流不变的情况下, 基值电流、拖尾时间的增大使熔深和熔宽增大、余高减小。

参 考 文 献

- [1] 朱志明, 吴文楷, 陈强. 短路过渡 CO_2 焊接熔滴形状数值模拟与控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 164-169.
- [2] 朱志明, 吴文楷, 罗小锋. 波控短路过渡 CO_2 焊接恒频自适应控制系统[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 81-84.

- ZHU Zhiming, WU Wenkai, LUO Xiaofeng. Adaptive control system with constant frequency of droplet transfer for waveform controlled short-circuiting CO_2 arc welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 81-84.
- [3] NACEY T J. Fourth-generation inverters and artificial intelligence to the control of GMA welding[J]. Welding Journal, 1993, 72(1): 31-34.
- [4] TAKAOKI O, TOKUJI M, MASA HARU S, et al. Current control in short-circuit welding[J]. Research and Development Kobe Steel Engineering Reports, 1985, 35(3): 22-26.
- [5] TSUNEO M. Waveform control method in CO_2 gas shielded arc welding-study for reducing spatter in CO_2 gas shielded arc welding[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1988, 6(2): 13-18.
- [6] TSUNEO M. Relationship between spatter and welding operativeness - study for reducing spatter in CO_2 gas shielded arc welding[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1988, 6(2): 18-23.
- [7] ZHU M, WU W K, CHEN Q. Effective control approach on molten droplet size in waveform controlled short circuit CO_2 arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(1): 55-62.
- [8] DERUNTZ D. Assessing the benefits of surface tension transfer welding to industry[J]. Journal of Industrial Technology, 2003, 19(4): 1-8.
- [9] ERA T, UEYAMA T, HIRATA Y. Spatter reduction in gas metal arc welding of stainless steel sheets using controlled bridge transfer process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 14(8): 708-716.
- [10] CHEN Maoai, JIANG Yuanning, WU Chuansong. Bridge-state controlled short circuit transfer in CO_2 welding[C]//The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurement and Simulation. Osaka: Osaka University, 2012: 268-269.

作者简介: 陈茂爱, 男, 1966 年出生, 博士, 教授。主要从事焊接过程控制、焊接过程数值模拟及扩散焊方面的研究和教学工作。

E-mail: chenmaoai@sdu.edu.cn