

# 旋转电弧双丝串列焊焊缝跟踪

高延峰, 黄志冰

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室,南昌 330063)

**摘要:**从时域波形、统计特征、自相关特性以及互相关特性等方面分析了旋转电弧双丝串列焊焊接电流的变化规律。结果表明,当空载电流增大时,前置焊丝上的焊接电流成正弦波动,并具有明显的自相关特性,表明空载电流的增大有助于提高电弧传感的灵敏度,但同时前后焊丝上的焊接电流互相关系数变大,说明二者相互影响增加。当空载电压增大时,电弧的挺度增加,前置焊丝上的焊接电流正弦波动变小,电弧传感的灵敏度变差。设计了软阈值小波滤波算法和分段参数自调整模糊控制算法,实现了双丝串列焊水平弯曲角焊缝跟踪,焊接速度达到90 cm/min。

**关键词:**串列双丝焊;电弧传感;自相关;互相关;焊缝跟踪

中图分类号: TG 409 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)11-0084-05

## 0 序 言

电弧传感的基本原理是根据焊枪电极高度变化引起的焊接电流变化来探测焊枪偏差,电极高度与焊接电流之间的动态关系是旋转电弧传感器实现焊枪偏差检测的基础。目前,在研究这一动态关系时一般采用Lesnewich给出的焊丝熔化模型,该模型认为导致焊丝熔化的能量主要来自于电弧热和焊丝自身的电阻热。潘际銮、Halmoy 和 Kim 等人<sup>[1-3]</sup>分别利用该模型研究了电弧的传感特性,发现当焊接电源为恒压输出时,在一定的范围内,焊接电流和电极高度之间成近似线性关系。

双丝串列电弧 MAG/MIG 焊的两根焊丝在同一个熔池上燃烧,电弧之间会产生相互作用,改变了电弧形态和温度场分布。孟庆国等人<sup>[4]</sup>研究发现利用经典的双椭球热源模型进行双丝焊温度场计算时,模拟结果和测量结果之间存在很大误差。通过对电弧形态和熔滴过渡路径分析,发现双丝焊时前丝和后丝的电弧均向两丝的中间偏转。D. Sc<sup>[5]</sup>建立了双丝焊焊丝熔化数学模型,主要考虑了焊接电流密度、焊丝直径、焊丝伸出长度、焊丝之间的距离等参数,发现另一根焊丝产生的电弧热对当前焊丝的熔化速度有较大影响。还有许多学者对双丝焊的温度场分布、熔滴过渡、熔化模型等进行了研究。然而,关于双丝串列焊条件下,旋转电弧传感特性的研究则未见报道。

文中主要研究了旋转电弧引导的共熔池双丝串列焊焊接电流的变化规律和旋转电弧的传感特性,讨论了焊接电流的自相关特性,前后焊丝上焊接电流的互相关特性。在此基础上,设计了焊缝跟踪控制算法,进行了角焊缝跟踪试验,实现了在90 cm/min速度下的角焊缝自动跟踪焊接。

## 1 焊接电流特征分析

### 1.1 焊接电流的时域波形

试验中采用的是平板堆焊方法,前置电弧的旋转频率为40~42 Hz,焊接电流的采样频率为32 500 Hz。对前置焊丝和尾随焊丝的焊接电流进行同步采样。图1为前丝和后丝的空载焊接电流电压均设置为190 A,24 V时,采集到的焊接电流变化波形。

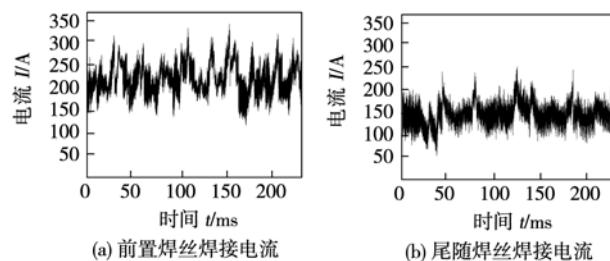


图1 焊接电流的时域波形

Fig. 1 Time domain feature of welding currents

从图1可见,前置焊丝上的焊接电流呈近似的正弦波动,而尾随焊丝上的电流则较为均匀。这主要是由于前置焊丝旋转时引起导电嘴到焊缝的距离

成正弦规律变化, 从而导致焊接电流波动。而尾随焊丝不旋转, 所以波动不大, 但是受到前置焊丝的影响, 在电弧每旋转一周时会产生一次电流的突变。此外, 前置焊丝的平均电流值明显大于尾随焊丝的平均电流值, 这主要是由于尾随焊丝与工件之间成大约 30°的倾角, 焊丝的伸出长度较大所致。

## 1.2 焊接电流的统计特征

为了分析不同焊接参数下焊接电流的特征, 计算了前后两根焊丝的焊接电流分布规律。图 2 是空载电压为 24 V, 空载电流分别为 170 A 和 190 A 时的焊接电流分布情况。

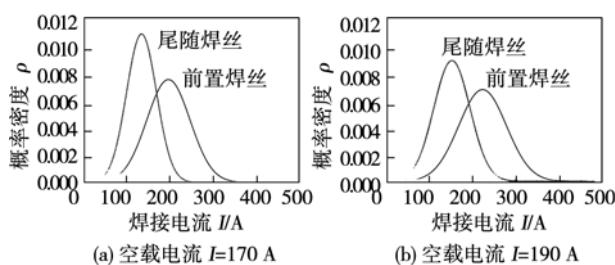


图 2 不同空载电流时的焊接电流分布

Fig. 2 Weld current distribution under different unload currents

从图 2 可见, 当焊接空载电流为 170 A 和 190 A 时, 前置焊丝的平均电流值均大于尾随焊丝, 同时前置焊丝焊接电流的统计方差也大于尾随焊丝。尾随焊丝焊接电流的集中度要大于前置焊丝。且空载电流的增大对前置焊丝上焊接电流的方差没有显著的影响, 但尾随焊丝焊接电流的方差略有增大。这说明空载电流增大时, 并不能显著增加电弧的挺度, 前置电弧的旋转仍然引起较大的焊接电流变化, 但是当电流增大时, 两个电弧之间的影响增大, 所以尾随焊丝上的焊接电流方差略有增大。

图 3 为不同空载焊接电压时前置焊丝和尾随焊丝上的焊接电流分布情况。焊接空载电流设置为 190 A, 空载焊接电压分别为 24 V 和 27 V。

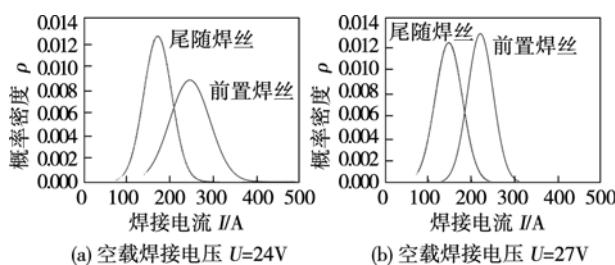


图 3 不同空载焊接电压时的焊接电流分布

Fig. 3 Weld current distribution under different unload voltage

从图 3 可见, 当焊接的空载电压为 24 V 时, 前置焊丝的电流方差较大, 而当空载电压为 27 V 时, 前置焊丝的电流方差明显减小。这说明, 焊接电压的增大使电弧的挺度变大, 当电弧旋转时, 由于电弧挺度变大, 不会引起焊接电流的明显变化。尾随焊丝上的焊接电流方差则没有明显的变化。这说明在不同的空载电压下, 前置旋转电弧对尾随电弧的影响没有明显的变化。

## 2 焊接电流自相关特性分析

### 2.1 不同空载电流时的自相关特性

试验中, 空载电压设置为 24 V, 空载电流分别为 170 A 和 210 A。前后两根焊丝的焊接电流自相关特性如图 4 所示。

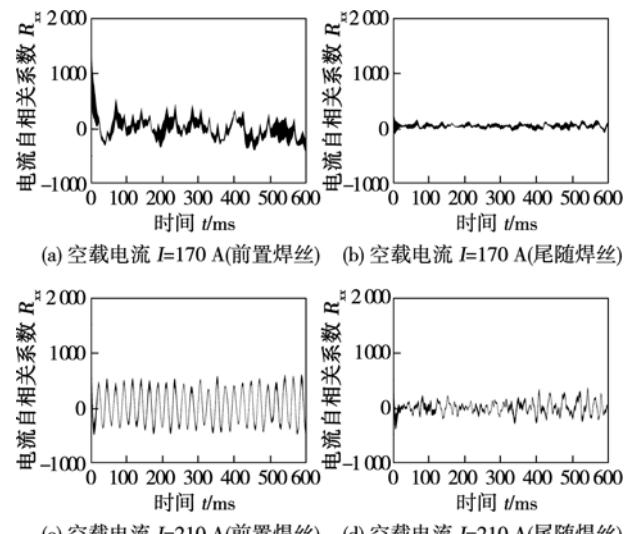


图 4 不同空载电流时焊接电流的自相关特性

Fig. 4 Weld current self-correlation in different unload currents

从图 4 可见, 当焊接电流为 170 A 时, 前置焊丝焊接电流的自相关系数呈现出一定的波动, 但是并没有明显的规律。而当空载电流增大到 210 A 时, 前置焊丝焊接电流的自相关系数呈现出明显的正弦变化, 反映了电弧在焊缝上扫描时电极高度的变化规律。这主要是由于在 170 A 时, 焊接过程基本上处于短路过渡状态, 此时焊接电流的变化不仅受到电极高度的影响, 还受到了短路过渡的影响。因此, 自相关性没有明显的规律。而当空载电流为 210 A 时, 焊接过程基本上处于射滴过渡状态, 此时对电极高度的变化较为敏感, 因此呈现出明显的正弦波动。而尾随焊丝上的焊接电流在 170 A 时自相关系数几

乎为零,当空载电流增大到210 A时,出现了一定的波动,这主要由于焊接电流越大,两根焊丝之间的影响越大。

## 2.2 不同空载电压时的自相关特性

试验中,设置空载电流为190 A,空载电压分别为24 V和27 V。前后两根焊丝的焊接电流自相关特性如图5所示。从图5可见,当焊接电压为24 V时,前置焊丝上的焊接电流自相关系数呈现出明显的正弦变化规律,当焊接电压增大到27 V时,前置焊丝的焊接电流自相关系数波动减少,不再有正弦变化的特点。这说明焊接电压的增大使电弧的挺度变大,前置电弧旋转时导电嘴到焊缝的距离变化难以引起焊接电流的较大变化。尾随焊丝焊接电流在不同的空载焊接电压下,其自相关系数变化不大,这说明其受到前置电弧的影响没有明显的变化。

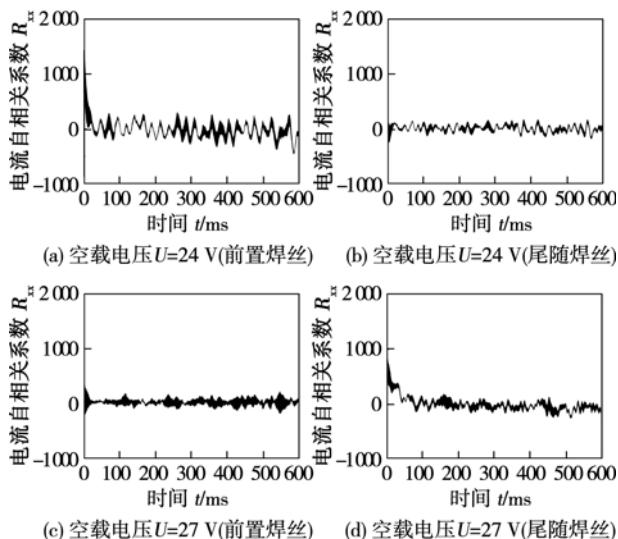


图5 不同空载电压时焊接电流的自相关特性

Fig. 5 Weld current self-correlation under different unload voltages

## 3 焊接电流互相关特性分析

### 3.1 不同空载电流时的互相关特性

为了研究前置电弧旋转时对尾随焊丝焊接电流的影响,对两根焊丝之间的互相关性进行了研究。试验中,空载电压设为24 V,空载电流分别为170 A和210 A。前后焊丝的焊接电流互相关特性如图6所示。

从图6可见,当焊接的空载电流为210 A时,前后两根焊丝上焊接电流的互相关系数呈现出近似的正弦规律变化,变化频率与图4中前置焊丝的自相关系数变化频率接近。这说明尾随焊丝和前置焊丝

的焊接电流明显相关。而当空载电流为170 A时,其互相关系数则没有明显的周期变化规律。

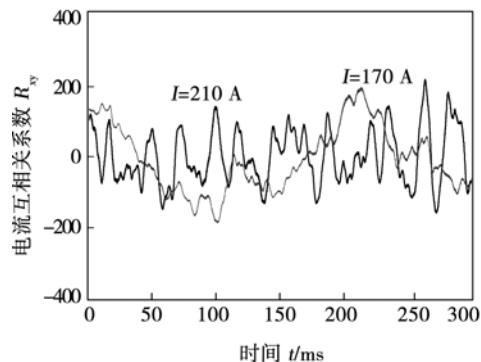


图6 不同空载电流时焊接电流的互相关特性

Fig. 6 Weld current cross-correlation in different unload currents

### 3.2 不同空载电压时的互相关特性

设置空载电流为190 A,空载电压分别为24 V和27 V。前后焊丝的焊接电流互相关特性如图7所示。

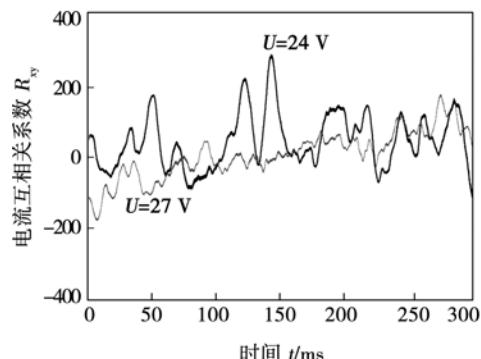


图7 不同空载电压时焊接电流的互相关特性

Fig. 7 Weld current cross-correlation in different voltages

从图7可见,当焊接电压为24 V时,前后两根焊丝的互相关系数出现较为明显的波动,但是波动周期没有确定的规律性。当焊接电压为27 V时,两根焊丝之间的互相关系数基本在零附近波动,且无规律性。

## 4 焊缝跟踪试验

### 4.1 试验系统

所用的移动机器人如图8所示,该机器人由移动平台和十字滑块组成,移动平台采用中间两轮驱动,前后对称布置万向轮结构,通过两驱动轮的差速可实现转弯运动。在移动平台上安装了十字滑块,

用以调节焊枪在水平和垂直方向上的运动。试验中, 被跟踪的焊缝为角焊缝, 其弯曲程度较小, 所以在焊接过程中使移动平台按照固定的速度直线移动, 根据实时采集的偏差信号调节水平滑块移动, 实现焊缝跟踪。

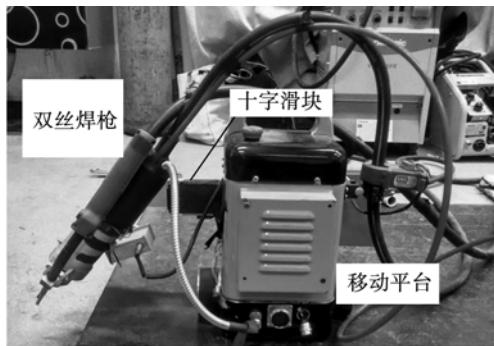


图 8 移动机器人结构  
Fig. 8 Welding mobile robot

#### 4.2 焊接电流的滤波

根据上述分析可知, 焊接电流越大对焊枪高度变化越敏感, 但是两根焊丝之间的影响越大。焊接电压越大, 电弧挺度越大, 电弧传感的敏感性越差。为此设置焊接电流为 190 A, 电压为 24 V, 焊接速度为 90 cm/min。由于前置的旋转电弧在角焊缝上进行扫描, 因此导电嘴到焊缝之间的距离呈正弦规律变化, 其变化幅度远大于在平板上扫描时的幅度。为了研究前置焊丝电流在较大变化幅度下的自相关特性以及对尾随焊丝焊接电流的影响, 进行了自相关和互相关特性分析, 结果如图 9 所示。

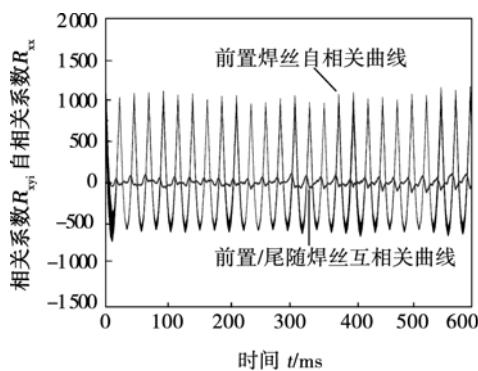


图 9 角焊缝焊接时电流的相关性

Fig. 9 Weld current correlation during fillet seam welding

从图 9 可见, 前置焊丝焊接电流的自相关系数呈现明显的正弦变化规律, 而两根焊丝的互相关系数虽然也呈现了相同的变化规律, 但其值远远小于前置焊丝的自相关系数。可以认为两根焊丝之间的

相互影响很小。由于焊接过程中焊接电流信号受外界噪声干扰较大, 在进行偏差识别之前必须对其进行滤波处理, 文中采用了软阈值小波滤波算法, 其具体实现过程见作者之前的研究<sup>[6]</sup>。图 10 为前置焊丝的原始电流信号及滤波后的信号。

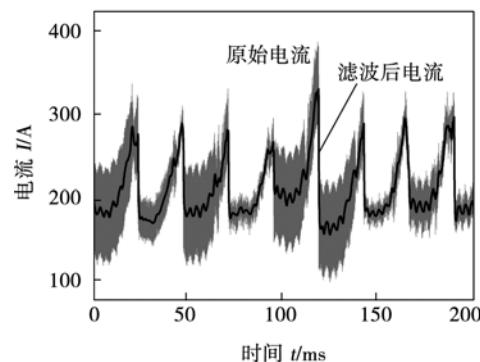


图 10 焊接电流滤波曲线  
Fig. 10 Weld current filtering curve

从图 10 可见, 原始电流受噪声干扰较大, 而滤波后电流变得平滑, 这有助于实现较为精确的焊缝偏差检测。

#### 4.3 控制器的设计及试验结果

采用分段控制的方法设计控制器对水平滑块进行控制。控制器在大偏差时采用比例控制, 在小偏差时采用参数自调整模糊控制, 并利用免疫反馈规律对比例因子进行修正。图 11 是试验结果, 从左侧向右侧进行焊接, 焊接速度 90 cm/min。可见, 在焊接起始阶段焊枪与焊缝之间有一定的偏差, 随着焊接的进行, 偏差逐渐减小, 实现了较好的焊缝跟踪。



图 11 焊缝跟踪结果  
Fig. 11 Result of welding

## 5 结 论

(1) 随着焊接电流增大, 电弧传感的灵敏度增加, 但是前后两个电弧之间的影响增大。随着焊接电压增大, 电弧的挺度越大, 电弧传感的灵敏性变差。

(2) 设计的软阈值小波滤波方法、分段参数自调整模糊控制算法可以较好的实现双丝串列焊焊缝

跟踪,焊接速度可达到90 cm/min.

### 参考文献:

- [1] 潘际銮. 现代弧焊控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] Halmoy E. Simulation of rotational arc sensing in gas metal arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 1999, 4(6): 347-351.
- [3] Kim C H, Yoo W S, Na S J. Development of an arc sensor with mechanized rotation of electrode[J]. Materials Science Forum, 2003, 426-432(5): 4135-4140.
- [4] 孟庆国, 方洪渊, 徐文立, 等. 双丝焊热源模型[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 110-113.
- Meng Qingguo, Fang Hongyuan, Xu Wenli, et al. Heat source model for twin wire welding[J]. Chinese Journal of Mechanical
- Engineering, 2005, 41(4): 110-113.
- [5] Janez T D S. Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(s1-3): 250-256.
- [6] 高延峰, 肖建华, 张华. 旋转电弧MAG强迫短路过渡电流信号滤波[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 24-27.
- Gao Yanfeng, Xiao Jianhua, Zhang Hua. Welding currents filtering of compulsively short circuiting transfer in rotational arc MAG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 24-27.

### [上接第83页]

- [7] Subhash Kamal, Jayaganthan R, Prakash S. High temperature oxidation studies of detonation-gun-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating on Fe and Ni based superalloys in air under cyclic condition at 900 °C[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472: 378-389.
- [8] Zhou Shengfeng, Dai Xiaoqin, Zheng Haizhong. Microstructure and wear resistance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 190-197.
- [9] Ozkan Sarikaya. Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 190: 388-393.
- [10] Monticelli C, Balbo A, Zucchi F. Corrosion and tribocorrosion behavior of thermally sprayed ceramic coatings on steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 3683-3691.
- [11] Yilmaz R, Kurt A O, Demir A. Effects of TiO<sub>2</sub> on the mechanical properties of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> plasma sprayed coating[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(2): 1319-1323.
- [12] Zhang X C, Xu B S, Tu S T, et al. Fatigue resistance and failure mechanisms of plasma-sprayed CrC-NiCr cermet coatings in rolling contact[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(5): 906-915.
- [13] Piao Zhongyu, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Influence of surface nitriding treatment on rolling contact behavior of Fe-based plasma sprayed coating[J]. Applied Surface Science, 2013, 266(1): 420-425.
- [14] Ajdelsztajn L, Picas J A, Kim G E, et al. Oxidation behavior of HVOF sprayed nanocrystalline NiCrAlY powder[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 338: 33-43.
- [15] 刘培生. 钴基合金铝化物涂层的高温氧化行为[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.

**作者简介:** 李惠,女,1979年出生,博士,副教授. 主要从事镁基、铜基、铝基复合材料的制备、及其相关等离子弧焊、等离子喷涂涂层制备等方面的科研工作. 发表论文15篇. Email: lihuiwind@163.com