

# 熔化极脉冲氩弧焊熔滴滴落过程的分析

吕小青<sup>1,2</sup>, 沈俊<sup>1,2</sup>, 李桓<sup>1,2</sup>, 刘永强<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**采用数字图像处理技术,对熔化极脉冲氩弧焊熔滴滴落过程的高速摄像图片进行了处理,提取了熔滴的边缘轮廓并获得了熔滴质心的变化坐标,得到了熔滴滴落过程中速度变化曲线。结果表明,熔滴在弧柱区的滴落过程为匀加速,而在近阴极区和近阳极区却是减速的,且近阴极区减速幅度较大;并对熔滴在弧柱区的受力过程进行了定量分析,其主要受到等离子体流拉力和重力的作用,以及对近阴极区进行了相关的定性分析,其速度的减小主要是因为金属熔池蒸气反力的阻碍作用和等离子体流拉力的减小,理论分析与试验结果较为吻合。

**关键词:**熔化极脉冲氩弧焊; 熔滴滴落; 图像处理; 速度变化曲线

中图分类号: TG 444+.74 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)12-0039-04

## 0 序 言

熔化极脉冲氩弧焊是使用焊丝作为熔化电极,采用氩气作为保护气体,利用脉冲电流控制熔滴过渡的弧焊方法。因其可有效的控制热输入而被广泛的应用在薄板件焊接,空间位置焊接以及热敏感材料。在实际焊接过程中,焊丝被高温电弧加热熔化形成熔滴过渡到熔池中,向熔池传输热量,动量和质量。1984年Lancaster提出可把熔滴的过渡过程分为3个阶段:分离、滴落转移和坠入熔池<sup>[1]</sup>。在分离阶段,基于静力平衡理论和箍缩不稳定的理论,获得了一系列研究成果<sup>[2-4]</sup>。而同时针对熔滴在坠入熔池后,对其温度、液体流动等的影响,也取得了一系列的进展<sup>[5-7]</sup>。但对于熔滴在整个电弧氛围中的运动状况研究不够深入,且都认为熔滴在脱离焊丝后只做单一的加速运动<sup>[3,8]</sup>。因该过程决定了熔滴坠入熔池时的动量,进而就影响着熔池的凝固过程,以及关联着焊缝的成形。因此文中借助图像处理技术,探究熔滴在脱离焊丝后速度变化情况,对增进熔滴过渡过程的理解具有较大的意义,并为提高熔池凝固成形的认识奠定相关理论基础。

## 1 试验方法

试验装置系统如图1所示,它主要由高速摄像系统和焊接系统构成。摄像系统采用日本的高速摄

像机 FASTCAM-Super10KC 以及背光源氩灯<sup>[9]</sup>,采样频率为 2 kHz, 分辨率为  $256 \times 120$  像素。焊接系统主要采用美国 Lincoln 公司的 V350 型焊机,以及配套的送丝机。焊丝为 H08Mn2SiA, 直径为 1.2 mm。采用一脉一滴的焊接工艺,在厚度为 10 mm 的低碳钢板进行堆焊,导电嘴到工件的距离为 20 mm,具体的焊接工艺参数如表 1 所示,实际焊接中弧长约为 8 mm。

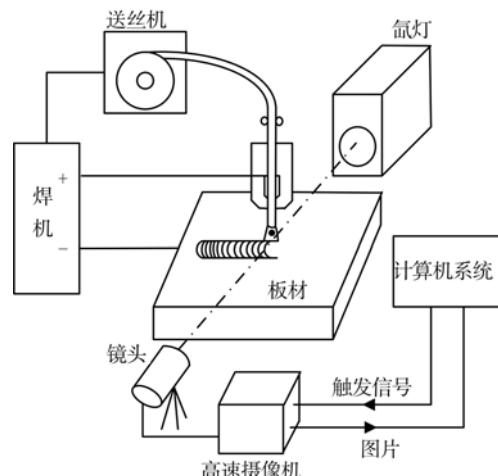


图 1 焊接试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of welding experimental system

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

峰值电流 $I_p/A$	基值电流 $I_b/A$	脉冲频率 $f/Hz$	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $v_w/(mm \cdot s^{-1})$
410	60	75	3.3	3

## 2 熔滴速度的测量

### 2.1 图像处理

焊接过程伴随着高亮度弧光的干扰,直接得到的高速摄像图片并无实际意义,需要借助滤光片和背光光源滤去弧光的干扰,但经过滤光后的图片往往较暗并不清晰。完整清晰的熔滴轮廓却是精确计算熔滴大小和熔滴运动速度的前提条件。

首先对原始图片(图2a)进行灰度变换,用中值滤波器进行平滑去噪处理(图2b)。图片整体太暗,对比度不强,采用直方图规定化方法来增强图片的对比度(图2c)。接着采用Log函数对图片进行边缘提取(图2d),删除小面积对象,即滤去图中的噪点(图2e)。针对提取熔滴边缘时出现的断点,采用最小二乘法进行边缘拟合,即可以得到熔滴的质心(图2f),图2中的圆点即为熔滴的质心。

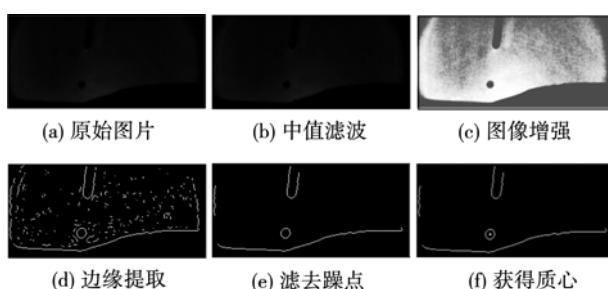


图2 图像处理过程

Fig. 2 Digital image processing

### 2.2 测量方法

在实际焊接中焊枪不动,待焊工件低碳钢板进行相对运动,故而可把高速摄像中图像左上角作为

坐标原点建立像素坐标系。 $x$ 轴设定为焊接运动方向, $y$ 轴设定为竖直向下,那么每张图片的熔滴质心像素坐标便可确定。依据焊丝直径所对应的像素数目,就可推得单个像素点对应的实际大小。假设相邻两幅图片上的熔滴质心坐标分别 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 。则熔滴在这段时间的速度 $v$ 可近似认为

$$v = \frac{l \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{t_d} \quad (1)$$

式中: $l$ 为单个像素点对应的实际大小; $t_d$ 为相邻图片的时间间隔(由拍摄频率确定)。把每相邻两张之间所得到的速度连接起来,就可获得熔滴在刚脱落焊丝时到坠入熔池前整体速度的变化曲线,也就是熔滴在整个电弧气氛中滴落速度的变化情况。那么基于此可获得熔滴的加速度。结合图像中熔滴半径信息,当假设熔滴为球时,即可推算得熔滴相应受力的变化情况。

## 3 试验结果与分析

图3为熔滴在一个脉冲下脱离焊丝后,在电弧气氛中整个滴落过程的高速摄像图片。图3a为原始图片,图3b为与之对应处理后的图片,图4为图3所示熔滴的过渡速度曲线。由图4可知,熔滴在整个电弧氛围中并不是一直做加速运动。在刚脱离焊丝阳极时,熔滴先做减速运动,进入弧柱区后再做加速运动,在快到达阴极钢板时,熔滴转而做减速运动。为了便于后续的说明分析,将速度曲线分为弧柱区、近阴极区和近阳极区3个部分。需要说明的是近阴极区和近阳极区并不是指电极的阴阳极区,真正的阴阳极区很短( $10^{-3} \sim 10^{-6}$  cm)。另外图4中所示曲线存在一定的波动性,主要是由两方面原因

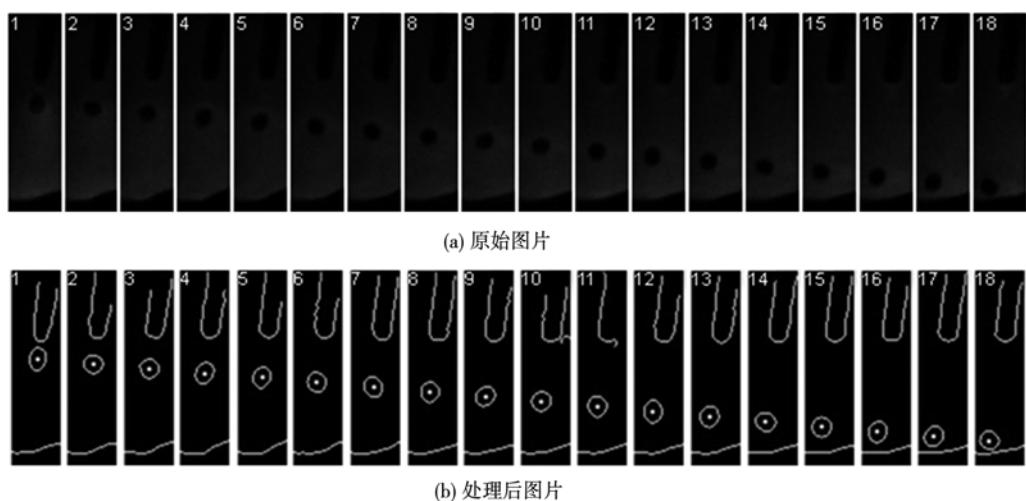


图3 熔滴完整滴落过程

Fig. 3 Droplet transition process

引起的, 其一, 高速摄像的分辨率低带来的误差; 其二, 滴落过程中的熔滴在表面张力作用下为了维持球形而产生的震荡(图3). 显然该波动性的曲线并不影响速度总体变化趋势.

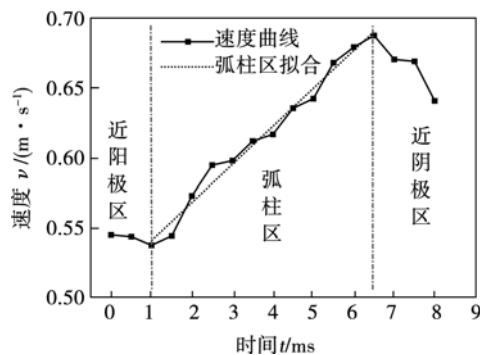


图 4 熔滴过渡速度曲线

Fig. 4 Droplet transition velocity

### 3.1 弧柱区

通过对弧柱区速度曲线进行最小二乘法拟合(图4弧柱区中虚线), 得到弧柱区的加速度 $a_c$ , 进而熔滴在弧柱中受合力 $F_c$ 为

$$F_c = \rho_d \frac{4}{3} \pi r^3 a_c \quad (2)$$

式中: $\rho_d$  为熔滴密度;  $r$  为熔滴半径.

熔滴在弧柱区主要受重力 $F_g$ , 以及等离子流拉力 $F_d$ 作用<sup>[7]</sup>, 它们的计算公式为

$$F_g = \rho_d \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (3)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \pi r^2 C_d \rho_g v_g^2 \quad (4)$$

式中: $g$  为重力加速度常数;  $C_d$  为电弧等离子体的阻力系数;  $\rho_g$  为等离子体密度;  $v_g$  为等离子体流速, 相关物理参量取值如表2所示.

表 2 物理参数

Table 2 Physical parameters values

熔滴密度 $\rho_d / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	等离子体密度 $\rho_g / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	等离子体阻力系数 $C_d$	等离子体流速 $v_g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
7 860	0.06	0.44	100
铁分子量 $M$	方向分布系数 $K_1$	熔池表面温度 $T_s / \text{K}$	气体常数 $R / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
56	2/3	2 870	8.314

由图4得加速度 $a_c$ 为 $28.5 \text{ mm/s}^2$ , 再由图3获得熔滴半径为 $0.6 \text{ mm}$ , 结合式(2)可知试验中熔滴在弧柱受合力为 $2.03 \times 10^{-4} \text{ N}$ . 通过式(3)和式(4)可知熔滴承受的重力为 $6.97 \times 10^{-5} \text{ N}$ , 等离

子流拉力为 $1.49 \times 10^{-4} \text{ N}$ . 因重力和等离子流拉力作用于熔滴方向一致, 故而理论上可推得弧柱中熔滴受向下的合力为 $2.19 \times 10^{-4} \text{ N}$ . 与试验计算的结果相比差值较小, 表明弧柱区理论上的分析与实际较为吻合.

### 3.2 近阴极区

如上所述近阴极区熔滴是减速的, 而由匀加速的弧柱区进入减速的近阴极区, 其加速度必定由正向下逐渐减小为零, 接着反向增大. 但图4中对加速度这一渐变过程没有得到完全展现, 只是由弧柱区匀加速突然变成减速, 这主要是由于拍摄频率不高造成. 另外因加速度渐变以及拍摄频率较低的客观事实, 表明对近阴极区的受力难以定量分析.

同弧柱区一样, 在近阴极区熔滴会受到重力、等离子流拉力两种促进过渡的力, 但同时需注意熔滴还会受蒸气反力 $F_r$ . 这是由于阴极低碳钢母材在高温电弧的加热下熔化形成熔池, 随着电弧能量不断输入会引起熔池表面金属强烈的蒸发, 其蒸气对熔滴向熔池的过渡形成了阻碍. 根据气体动力学理论, 该蒸气反力为<sup>[10]</sup>

$$F_r = \frac{S_1}{S_2} K_1 \sqrt{\frac{8RT_s}{\pi M}} w \quad (5)$$

式中: $K_1$  为方向分布系数, 一般取值为 $2/3$ ;  $M$  为金属的分子量, 这里为铁蒸气;  $T_s$  为金属熔池表面的温度;  $R$  为气体常数;  $S_1, S_2$  分别为熔滴的横截面积和熔池的表面积;  $w$  为金属的蒸发率, 高温低碳钢母材熔池表面的金属蒸发率为

$$\lg w = 2.52 + \left( 6.121 - \frac{18.836}{T_s} \right) - 0.5 \lg T_s \quad (6)$$

式(5)和式(6)相关参数取值如表2所示, 依据式(6)可知金属蒸发率为 $2.23 \text{ g/s}$ . 熔池的表面积可由高速摄像确定约为 $2 \text{ cm}^2$ , 熔滴的横截面积可通过熔滴半径求得约为 $1.13 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ , 进而由式(5)可得蒸气反力为 $2.77 \times 10^{-4} \text{ N}$ . 这比重力和等离子流拉力合力( $2.19 \times 10^{-4} \text{ N}$ )要大得多, 但需注意的是该结果表示紧邻熔池表面的蒸气反力. 很显然离熔池表面距离越远, 蒸气反力就越小; 而且另一方面, 因母材钢板阻挡作用使得等离子体的流速在靠近熔池时, 速度将减小, 进而其等离子流拉力也会相应逐渐减小. 故而熔滴在由弧柱区进入近阴极区时, 加速度由正向下逐渐转变为正向上, 速度逐渐变小.

### 3.3 近阳极区

熔滴近阳极区的行为是发生在熔滴刚脱离焊丝之后, 而熔滴在临近于脱离时主要受重力、等离子流拉力、电磁收缩力、表面张力的作用<sup>[7]</sup>. 重力、等离

子流拉力以及电磁收缩力是促使熔滴过渡的,表面张力是阻碍过渡的。在发生脱离之后,熔滴受的重力和等离子流拉力几乎不变;电磁收缩力因脱离于焊丝而变得很小;表面张力此时主要作用是促使熔滴保持球形,对熔滴速度、加速度的影响很小。但是由图4可知熔滴的速度是减速的,其幅值较小,故可推断促使熔滴过渡力应略小于阻碍过渡力。重力、等离子流拉力及变小的电磁收缩力都是促进熔滴过渡的,而相关存在的阻碍过渡力还不得而知,该方面有待于更进一步的研究。

## 4 结 论

(1) 提出了对高速摄像图片进行图像处理,考察熔滴质心坐标来探究熔滴在滴落过程中速度变化的新思路。

(2) 发现了熔滴在弧柱区是匀加速的,而在近阳极区以及近阴极区都是减速的,且近阴极区减速幅度较大。

(3) 对弧柱区进行了定量的受力分析,表明熔滴在该区主要受重力和等离子流拉力,理论与试验结果较为吻合;对近阴极区进行了定性受力分析,表明熔滴滴落速度减小主要是由熔池蒸气反力以及等离子流拉力减小所造成。

## 参考文献:

- [1] Lancaster J F. The physics of welding[J]. Physics in Technology, 1984, 15(2): 73–79.
- [2] Jones L A, Eagar T W, Lang J H. Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding[J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 1998, 31(1): 93–106.
- [3] Jones L A, Eagar T W, Lang J H. A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode[J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 1998, 31(1): 107–123.
- [4] 鲍爱莲,耿正,刘万辉. GMAW 熔滴过渡过程稳定性相关分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(1): 77–80.  
Bao Ailian, Geng Zheng, Liu Wanhai. Analysis of stability in droplet transfer process of GMAW based on self-correlation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(1): 77–80.
- [5] 华爱兵,殷树言,陈树君,等. 细丝大电流 MAG 焊的熔滴过渡机制[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 93–96.  
Hua Aibing, Yin Shuyan, Chen Shujun, et al. Mechanics of drop transfer for high-current density MAG welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 93–96.
- [6] Park H, Rhee S. Analysis of weld geometry considering the transferring droplets in gas metal arc welding[J]. JSME International Journal, 2001, 44(3): 856–862.
- [7] Xu G, Hu J, Tsai H L. Three-dimensional modeling of arc plasma and metaltransfer in gas metal arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(7): 1709–1733.
- [8] Ghosh P K, Dorn L, Hubner M, et al. Arc characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194(3): 163–175.
- [9] 杨运强,李桓,李俊岳,等. 熔化极电弧焊多信息同步高速摄影[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 29–32.  
Yang Yunqiang, Li Huan, Li Junyue, et al. High-speed photography with multi-information synchronizer for GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 29–32.
- [10] Scheffel B, Goedicke K. In situ-force measurement for the determination of the evaporation rate with high-rate electron beam evaporation[J]. Surface and Coating Technology, 1998, 98(1): 944–947.

**作者简介:** 呂小青,男,1978年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要从事弧焊工艺、焊接逆变电源及自动化、弧焊混沌理论等方面的研究。发表论文10余篇。Email: xiaocqingly77@163.com