

摆动电弧窄间隙 GMAW 熔滴过渡规律

徐望辉¹, 林三宝², 杨春利², 范成磊²

(1. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院),广州 510651;
2. 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: 研究摆动电弧窄间隙焊接中的熔滴过渡规律是深入理解该焊接方法的重要基础,由于受到电弧摆动、窄间隙坡口的影响,摆动电弧窄间隙焊接熔滴过渡比常规焊接更加复杂. 采用高速摄像系统及焊接电信号采集系统成功地对摆动电弧窄间隙 GMAW 的熔滴过渡过程进行观测研究,揭示了摆动电弧窄间隙 GMAW 的熔滴过渡特性,分析了摆动参数、焊接参数对熔滴过渡的影响. 结果表明,由于焊丝在坡口之间的摆动改变了焊丝与侧壁之间的距离,引起了焊接电弧长度的变化,促使焊接电流发生了波动,从而导致了摆动电弧窄间隙焊接熔滴过渡的规律性变化.

关键词: 摆动电弧; 窄间隙焊; 熔滴过渡; 熔化极气体保护焊
中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)02-0109-06

0 序 言

随着焊接结构向着大型化、复杂化和高参数化方向发展,厚板在舰船制造、核电、压力容器以及管道工程等大型厚壁结构的应用也愈趋广泛^[1]. 近年来大型厚壁金属结构制造行业迅速发展,厚壁结构焊接的应用需求也日益增加,对厚板的焊接效率和焊接质量也提出更高要求. 窄间隙焊是一种高效的焊接技术,由于其采用小间隙 U 形或者 I 形坡口,相比传统的 V 形宽坡口焊接,在焊接厚板时具有生产效率高、焊接热输入低、焊材消耗少、焊接位置适应性好等诸多优势^[2-4]. 窄间隙焊接按照焊接工艺可以分为窄间隙钨极氩弧焊(NG-GTAW)、窄间隙埋弧焊(NG-SAW)、窄间隙熔化极气体保护焊(NG-GMAW),其中 NG-GMAW 由于具有电弧易观察、焊接效率高和焊接位置适用性好等优势而十分适合于大型厚壁结构的焊接^[5]. 然而窄间隙 GMAW 中存在侧壁未熔合的关键性难点,为解决这一技术难题,旋转电弧^[6]、弯曲焊丝、TANDEM 双丝^[7]、摆动电弧^[8,9]等方法被先后提出并应用于窄间隙焊接中. 其中摆动电弧方法有利于解决非平焊位置时的熔池流淌问题,具有很好的应用前景.

熔滴过渡对焊接过程稳定性、熔池行为及接头质量均会产生重要影响,研究摆动电弧窄间隙焊接

中的熔滴过渡规律是深入理解该焊接方法的重要基础. 窄间隙坡口情况下熔滴过渡观测十分困难,因此针对窄间隙 GMAW 熔滴过渡的研究并不多. 国内科研院所采用高速摄像系统对旋转电弧窄间隙 GMAW 熔滴过渡规律进行了研究^[10,6]. 结果表明,熔滴过渡方式会随着焊丝位置的变化而发生改变,且电弧旋转有利于熔滴过渡. 文献[11]在设计摆动电弧窄间隙 GMAW 系统的基础上对其焊接工艺进行了研究,结果显示焊接参数和摆动参数均会对焊缝成形产生重要影响. 文献[12]则对该过程的熔滴过渡过程进行了初步研究,前期的研究结果对于摆动电弧窄间隙熔滴过渡规律的深入研究具有重要的借鉴意义.

文中采用高速摄像系统及焊接电信号采集系统成功地对摆动电弧窄间隙 GMAW 熔滴过渡过程进行观测研究. 揭示摆动电弧窄间隙 GMAW 的熔滴过渡特性,分析摆动参数、焊接参数对熔滴过渡的影响,为摆动电弧窄间隙焊接工艺优化奠定基础.

1 试验方法

采用自制的摆动电弧窄间隙焊炬进行焊接试验,其原理如图 1 所示. 导电杆下端加工成微弯状,导电嘴安装在微弯导电杆的下端,因此导电嘴与导电杆的中轴线形成了一定的角度,当导电杆在电机的驱动下带动齿轮来回旋转使导电杆围绕轴线做来回转动时,导电嘴便进行弧形摆动,从而实现焊丝在

坡口内部摆动,焊丝摆动半径 $r=8\text{ mm}$. 坡口由两块厚度为 25 mm 的 L 形 Q235 钢板对拼而成,坡口宽度为 10 mm ,钝边厚度为 5 mm ,坡口深 20 mm . 试验采用直径为 1.2 mm 的 H08Mn2SiA 焊丝. 保护气体成分为 $\text{CO}_2(8\%) + \text{Ar}(92\%)$,保护气体流量为 15 L/min .

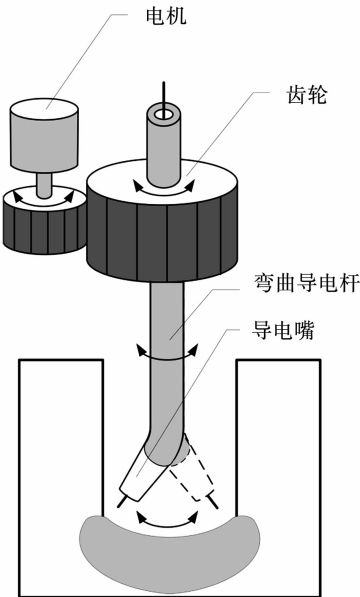


图 1 摆动电弧窄间隙焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of swing arc narrow gap welding

采用高速摄像系统和电信号采集系统对焊接过程的熔滴过渡和焊接电流进行监测,如图 2 所示. 高速摄像系统由高速摄像机、变焦镜头、UV 片、滤光片、激光器、计算机等硬件及配套软件组成. 系统以最大功率为 5.02 kW 的激光器作为主动光源压住焊接时的弧光. 高速摄像机型号为德国 Can Record5000 $\times 2$,采用的分辨率为 $512\text{ 像素} \times 512\text{ 像素}$,观察熔滴采用帧数为 3 000 fps . 焊接电信号采集系

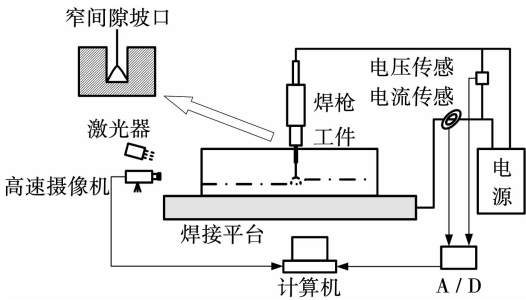


图 2 高速摄像及焊接电信号采集系统

Fig. 2 Diagram of high-speed camera and welding electrical signal collection system

统由电流传感器、电压传感器、采集卡及配套计算机所组成. USB2813A 数据采集卡将电流和电压传感器采集到的信号进行模数转换并传输到计算机中,进行存储所采用的采集频率为 25 kHz .

2 试验结果

2.1 窄间隙焊熔滴过渡过程

采用表 1 所示参数,分别对电弧不摆动和电弧摆动窄间隙焊接过程熔滴过渡进行了观察. 图 3 为电弧不摆动窄间隙焊熔滴过渡高速摄像.

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Parameters of welding condition

送丝速度 v_w ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	焊接速度 v ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	电弧电压 U/V	摆动速度 $\omega_v/(\text{}^\circ \cdot \text{s}^{-1})$	摆动角度 $\alpha/(\text{}^\circ)$	焊丝伸出 长度 d/mm
6	200	26	216	46	20

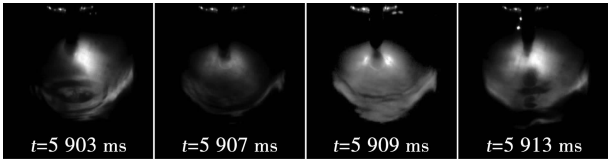


图 3 电弧不摆动窄间隙焊接熔滴过渡过程

Fig. 3 Droplet transfer of non-swing arc narrow gap welding

在窄间隙焊中,两侧壁的拘束作用造成熔池中中间低而两侧高,焊丝距离熔池表面两侧的距离较小,容易在两侧燃烧,使得窄间隙焊中电弧稳定性较差. 当 $t=5\text{ 903 ms}$ 时,由于焊丝端部到熔池右侧的距离最小,电弧在右侧燃烧,随着焊丝的送进,焊丝底部与其正下方的熔池表面距离逐渐减少,在 5 907 ms 时电弧主要在熔池表面中间燃烧,此时形态与平板堆焊相似,呈现钟罩形. 随着焊丝的不断熔化,熔滴体积不断增大,最终在重力作用下,于 5 913 ms 时刻发生滴状过渡. 结果表明,电弧不摆动窄间隙焊熔滴平均直径为 1.5 mm ,过渡频率为 110 Hz .

图 4 给出了摆动电弧窄间隙焊一个摆动周期内,焊丝运动到不同位置的熔滴过渡形貌. 焊丝的运动可以分为四个阶段:(1) 焊丝在左侧停留 300 ms ;(2) 从坡口左侧摆动到右侧;(3) 焊丝在右侧停留 300 ms ;(4) 从右侧摆动到左侧. 由于一个摆动周期经历时间较长,照片数量较多,因此只能选取四个阶段中的部分过程进行描述.

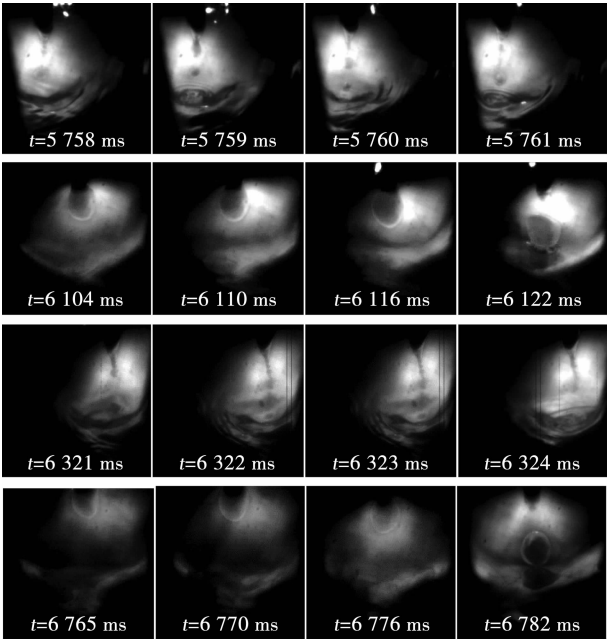


图 4 摆动电弧窄间隙焊熔滴过渡过程
Fig. 4 Droplet transfer of swing arc narrow gap welding

在 5 758 ms 到 5 761 ms 时,焊丝处于第一个阶段,即焊丝在左侧停留,电弧在坡口侧壁与焊丝端部之间燃烧,电弧明亮,形态收敛. 焊丝端部为削铅笔状,熔滴沿着焊丝轴线方向过渡到熔池,过渡形式始终为射流过渡,熔滴直径约为 0.7 mm,过渡频率约为 461 Hz. 此后到 6 122 ms 为第二阶段,焊丝从左侧向右侧运动. 该阶段电弧亮度明显减弱,电弧形态发散. 熔化的液态金属在焊丝底部堆积,由于电弧发散,电弧力较弱,熔滴不易过渡,在 6 122 ms 时大颗粒熔滴过渡到熔池. 在该阶段中,熔滴过渡形式为大滴过渡,熔滴直径显著增大到 1.8 mm,过渡频率显著降低. 此后焊丝在右侧做一短暂停留,此为第三个阶段,6 321 ~ 6 324 ms 的高速照片记录了此阶段的熔滴过渡过程. 与第一阶段相似,焊丝右侧停留时电弧形态收敛,亮度增强,焊丝底部呈现削铅笔状,熔滴过渡方式由焊丝处于坡口中间时的大滴过渡转变为过渡频率高、直径小的射流过渡. 焊丝在右侧停留 300 ms 后继续向左侧摆动,此为第四个阶段. 此阶段熔滴过渡形式为大滴过渡,熔滴尺寸较大,过渡频率低. 从上面的描述可以看出,随着焊丝空间位置的改变,熔滴过渡形式发生规律性的变化.

2.2 摆动电弧窄间隙焊熔滴过渡特征

在摆动电弧窄间隙焊接中,熔滴过渡形式随着焊丝空间位置的不同而变化,且这种变化具有一定的规律性. 下面对摆动电弧窄间隙焊接熔滴过渡特征及其产生原因进行分析. 图 5 给出了一个摆动周

期内,熔滴直径和过渡频率随时间的变化趋势.

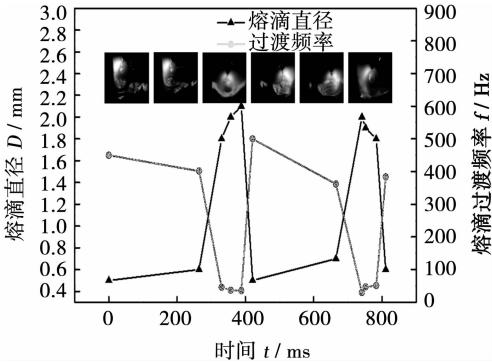


图 5 一个摆动周期内熔滴尺寸及过渡频率
Fig. 5 Droplet diameter and transfer frequency in one swing period

摆动电弧窄间隙焊熔滴过渡特征具体描述如下:焊丝在左侧停留时,焊丝端部距离侧壁距离较小,电弧弧长较短,此时过渡形式为射流过渡,过渡频率很高,熔滴尺寸极小;焊丝由左侧向右运动时熔滴过渡形式转变为大滴过渡,熔滴尺寸增大,过渡频率降低;当焊丝在右侧停留时,熔滴过渡又转变为射流过渡,熔滴尺寸减小,熔滴过渡频率升高;此后焊丝由右侧向左侧运动,电弧弧长变长,过渡形式又变为大滴过渡,熔滴尺寸增大,过渡频率下降,直到焊丝再次在左侧停留,过渡频率又显著升高,过渡形式重新变为射流过渡,至此一个摆动周期结束.

熔滴过渡形式很大程度上决定于焊接电流. 图 6 给出了摆动电弧窄间隙焊接和不摆动窄间隙焊接的电流. 从图 6 中可以看出,摆动电弧窄间隙焊接的电流呈现周期性的波动. 将同步采集到的焊接电流与高速摄像对比分析发现,当焊丝在侧壁停留时,焊接电流出现峰值,随着焊丝距离侧壁的距离越来越远,焊接电流不断下降. 当焊丝处于坡口中间部分时,此时焊丝距离两侧的距离最远,测量得到的焊接电流也是最小的. 焊丝摆动到侧壁附近时焊接

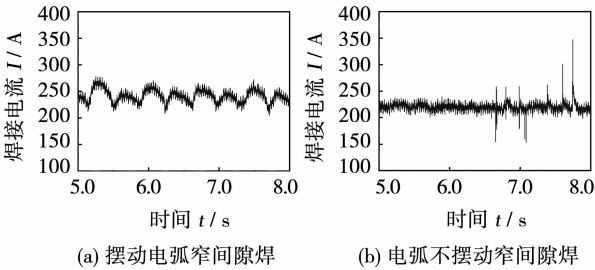


图 6 窄间隙焊接电流
Fig. 6 Welding current in narrow gap welding

电流增加,熔滴过渡频率升高,过渡形式为射流过渡,焊丝远离侧壁并摆动时,焊接电流下降,过渡频率下降,熔滴尺寸增大,过渡形式为大滴过渡. 窄间隙焊中电弧摆动引起焊接电流波动,从而造成熔滴过渡特性的改变,这一点是可以肯定的.

下面对窄间隙焊中摆动电弧引起焊接电流的周期性变化的原因进行分析. 焊丝距离侧壁较近时的电弧形态如图 7a 所示. 随着焊丝向坡口侧壁靠近,焊丝与侧壁的距离越来越小,当焊丝底部与坡口侧壁之间的距离 L 小于临界值 L_c 时,根据最小电压原理,弧柱中的电流会沿着最小路径流入到工件中,故电弧在焊丝端部与坡口侧壁之间产生,此时焊接电弧的弧长为 L_w . 当焊丝距离侧壁越来越远时,焊接电弧弧长 L_w 不断增大,直到 $L > L_c$ 时,电弧在焊丝端部与坡口底部产生,此时焊接电弧弧长即为 L_b ,显然 $L_b > L_w$. 摆动电弧窄间隙焊接电弧长度随着焊丝所处的空间位置而发生变化,如图 7b 所示. 可以看出电弧在侧壁停留时,电弧长度最小. 焊丝由一侧摆动到另一侧时,电弧长度越来越大,焊丝在坡口中间区域时电弧长度最大,此后焊丝逐渐靠近坡口的另一侧,电弧长度逐渐变小,直到焊丝在另一侧停留时焊接电弧长度达到最小值.

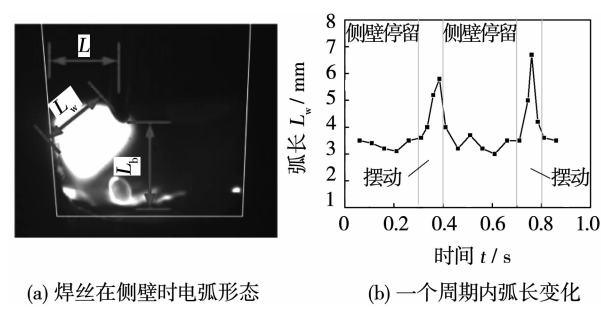


图 7 电弧形态及弧长变化

Fig. 7 Arc shape and arc length in one swing period

在常规的 GMAW 电源中,焊机输出电压为 U_s , 内部电阻和电感分别为 R_s 和 L_s ,焊接电源、电缆、焊丝伸出部分和焊接电弧形成了一个电流回路. 根据 GMAW 电压系统数学模型,焊接电流与时间的关系可表示为^[13]

$$\frac{dl}{dt} = \frac{(U_s - U_a)}{L_s + L_c} - \frac{(R_s + R_c + R_a + R_e)I}{L_s + L_c} - \frac{EL_a}{L_s + L_c} - \frac{bSv_f}{(L_s + L_c)I} \quad (1)$$

式中: R_c 为焊接电缆的电阻; L_c 为焊接电缆的电感; U_a 为阴阳极区压降; R_a 为电弧极区电阻; L_a 为电弧长度; E 为电弧电场强度; I 为焊接电流; b 为焊丝单位

体积的热容量; R_e 为焊丝干伸长电阻; S 为焊丝横截面积; v_f 为送丝速度.

电流流过焊丝产生的焦耳热及电弧传导至焊丝的热量之和使焊丝端部熔化,焊丝熔化速度可用以下经验公式表示^[14] 为

$$v_m = \frac{AI}{1 - B(l_e/v_f)} \quad (2)$$

式中: v_m 为焊丝熔化速度; l_e 为焊丝干伸长; A, B 为常数.

由式(1)和式(2)可知,当焊接系统和焊接工艺参数确定时,电弧长度会对焊接电流产生显著影响. 当焊丝靠近坡口侧壁时,电弧长度变短,焊接电流显著增大,焊丝熔化效率增加,熔滴过渡频率增大;焊丝由一侧向另一侧摆动时,焊丝与侧壁距离不断增大,电弧长度增加,焊接电流降低,因此焊丝熔化效率下降,熔滴过渡频率下降,熔滴过渡形式转为大滴过渡. 正是由于焊丝在坡口之间的摆动改变了焊丝与侧壁之间的距离,导致了焊接电弧长度的变化,从而使焊接电流发生了波动,最终形成了摆动电弧窄间隙焊接中熔滴过渡规律性变化的特征.

通过上述的分析可知,摆动电弧窄间隙焊熔滴过渡的上述特征能够将更多的电弧热量和填充金属分配到坡口侧壁,降低坡口中间区域的能量输入和填充金属量,对于保证侧壁未熔合和抑制非平焊位置熔池流淌具有积极作用.

2.3 焊接参数对熔滴过渡的影响

文中就焊接参数对熔滴过渡的影响规律进行直观阐述,分析送丝速度、摆动速度和摆动角度对熔滴过渡的影响规律.

2.3.1 送丝速度对熔滴过渡的影响

图 8a 是送丝速度为 5 m/min 时的熔滴过渡情况. 电弧在坡口左侧停留时,由于焊接工艺参数较

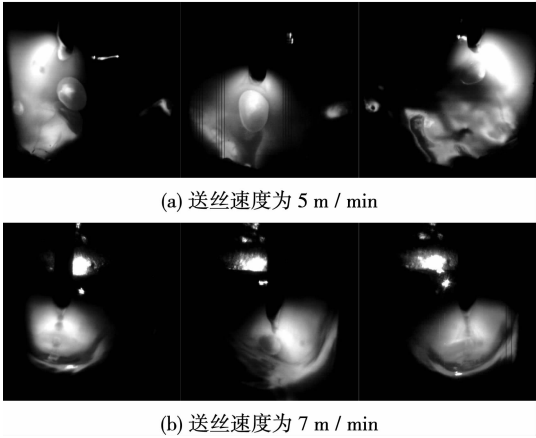


图 8 不同送丝速度下的熔滴过渡

Fig. 8 Droplet transfer at different wire feed rates

小,过渡形式为小滴过渡,在向右运动时,熔滴尺寸增大,过渡频率降低,过渡形式转为大滴过渡,直到电弧在右侧停留时,熔滴过渡频率增加,过渡形式再次转为小滴过渡. 送丝速度增大,焊接电流随之增大,熔滴过渡方式亦会发生改变. 图 8b 为送丝速度增大到 7 m/min 时的熔滴过渡情况. 送丝速度增加,焊接电流增大,电弧在两侧时熔滴过渡频率很高,尺寸很小,过渡形式为射流过渡,当电弧在坡口中间摆动时,熔滴过渡频率下降,过渡形式转变为小滴过渡.

如前所述,电弧在侧壁停留时与电弧在坡口中间摆动时的熔滴过渡存在较大差异,为了更加合理的分析焊接参数对熔滴过渡的影响,分别对电弧在侧壁附近时的熔滴和电弧在坡口中间时的熔滴进行测量. 图 9 为送丝速度对熔滴过渡频率的影响趋势. 从图 9 中可以看出,随着送丝速度的增大,侧壁处和坡口中间的熔滴过渡频率均增大,但是送丝速度的变化并未改变摆动电弧窄间隙焊中侧壁附近处熔滴过渡频率高于坡口中间处熔滴过渡频率这一特性.

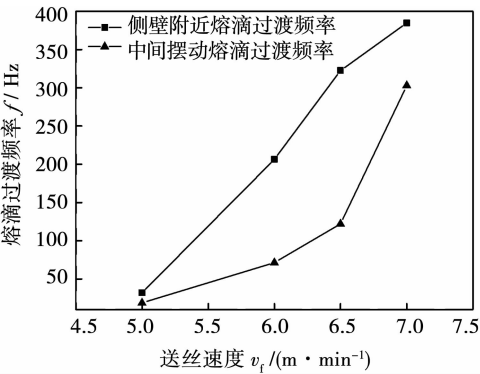


图 9 送丝速度对熔滴过渡频率的影响

Fig. 9 Influence of wire feed rate on droplet transfer frequency ($v_w = 200$ mm/min; $U = 26$ V; $\alpha = 46^\circ$; $\omega_v = 216^\circ/\text{s}$; $d = 13$ mm)

2.3.2 摆动速度对熔滴过渡的影响

摆动速度主要影响坡口中间区域的熔滴过渡过程,而对于侧壁附近处的熔滴过渡则影响较小. 图 10 为不同摆动速度下的熔滴过渡频率. 由统计结果可以看出,随着摆动速度的增加,坡口中间的熔滴过渡频率出现了缓慢的增加,侧壁处的熔滴过渡频率则基本保持不变. 电弧摆动时,熔滴除了受到重力、电磁力、等离子流力作用外,还受到了额外的离心力的作用,离心力能够促进熔滴过渡. 熔滴所受的离心力随着摆动速度的增大而增大. 由于受到机

械结构的限制,焊炬的摆动速度较小,对于熔滴过渡的促进作用十分有限.

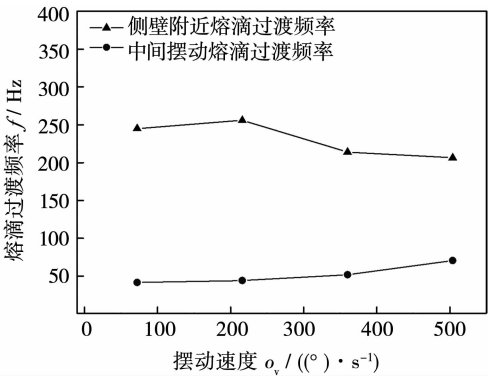


图 10 摆动速度对熔滴过渡频率的影响

Fig. 10 Influence of swing speed on droplet transfer frequency ($v_w = 6$ m/min; $v = 200$ mm/min; $U = 26$ V; $\alpha = 46^\circ$; $d = 13$ mm)

2.3.3 摆动角度对熔滴过渡的影响

图 11 为摆动角度对熔滴过渡频率的影响规律. 从试验结果可以看出,侧壁处熔滴过渡频率随着摆动幅度的增大而增大,但是坡口中间处的熔滴过渡频率则受摆动角度影响较小. 当摆动幅度较小时,比如摆动幅度为 29° ,焊丝到侧壁的距离与焊丝端部到坡口底部的距离相差不大,故焊丝在侧壁停留时电弧主要在坡口底边燃烧,这样造成一个摆动周期内电弧长度的变化并不明显,焊接电流的波动性很小. 随着摆动幅度的增大,焊丝与坡口侧壁的最小距离越来越小,由 2.2 节的分析可知,距离越小焊接电流就会越大,因此周期性波动的焊接电流峰值会随着摆动幅度的增大而增大. 故摆动角度较小时侧壁处的熔滴过渡形式以小滴过渡为主,熔滴过渡频

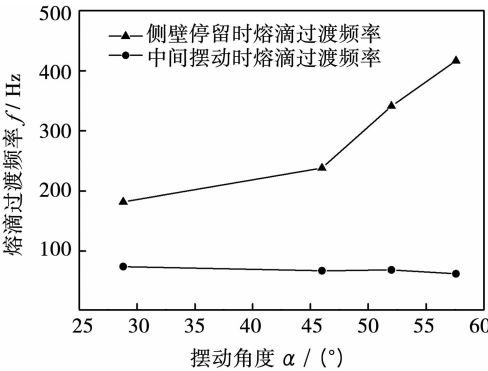


图 11 摆动角度对熔滴过渡频率的影响

Fig. 11 Influence of swing angle on droplet transfer frequency ($v_f = 6$ m/min; $v = 200$ mm/min; $U = 26$ V; $\omega_v = 216^\circ/\text{s}$; $d = 13$ mm)

率较低,随着摆动幅度的增大,电弧在侧壁处的焊接电流增大,熔滴过渡频率增加,过渡形式变为射流过渡.

摆动幅度亦会对电流波动产生影响,图 12 为不同摆动幅度下的焊接电流.

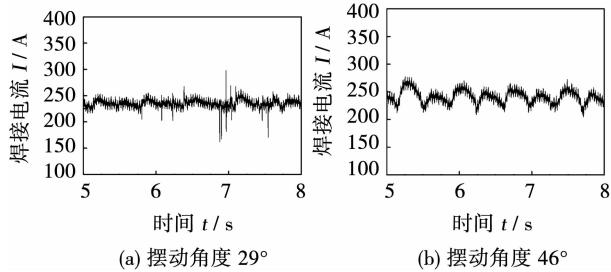


图 12 不同摆动角度下的焊接电流
Fig. 12 Welding current with different swing angles

从图 12 可以看出,随着摆动幅度的增大,电流的波动程度增加. 当摆动角度为 29°,焊接电流的波动很小,焊丝在侧壁停留时的电流值与焊丝在坡口中间时的电流值相差 50 A 左右,而当摆动角度增加到 46°时,焊接电流值波动加剧,焊丝处于坡口侧壁时的电流值与焊丝处于坡口中间处的相差 100 A 左右. 焊接电流的波动导致了熔滴过渡形式的变化.

3 结 论

(1) 由于焊丝在坡口之间的摆动改变了焊丝与侧壁之间的距离,引起了焊接电弧长度的变化,促使焊接电流发生了波动,从而导致了熔滴过渡的规律性变化. 有利于将更多的电弧热量和填充金属分配到坡口侧壁.

(2) 送丝速度增大时,侧壁附近的熔滴过渡形式由滴状过渡向射流过渡转变,而坡口中间的熔滴过渡方式依然为大滴过渡,但是熔滴过渡频率有所增加;坡口中间区域的熔滴过渡频率会随着摆动速度的增大而稍微增大;随着摆动角度的增大,焊丝与侧壁的最小距离不断减少,电流波动峰值增加,坡口侧壁处的熔滴过渡频率随之增大.

参考文献:

[1] 撒世勇. 10CrNi5MoV 钢厚板窄间隙熔化极气保焊研究[J]. 材料开发与应用, 2010(1): 13 – 15.

Sa Shiyong. Narrow gap metal arc gas welding of 10CrNi5MoV steel thick plate[J]. Development and Application of Materials, 2010(1): 13 – 15.

[2] Malin V Y. The state-of-the-art of narrow gap welding[J]. Welding Journal, 1983, 62(6): 22 – 30.

[3] 胡存银,张富巨. 窄间隙焊接的技术与经济特性分析[J]. 焊接技术, 2001(2): 47 – 48.

Hu Cunyin,Zhang Fujun. Analyse on economy and technology of narrow gap welding [J]. Welding Technology, 2001(2): 47 – 48.

[4] 赵 博,范成磊,杨春利,等. 窄间隙 GMAW 的研究进展[J]. 焊接, 2008(2): 11 – 15.

Zhao Bo, Fan Chenglei, Yang Chunli, *et al.* Research process of narrow gap gas metal arc welding[J]. Welding & Joining, 2008(2): 11 – 15.

[5] Nomura H, Sugitani Y, Murayama M. Development and application of automatic high speed rotation arc welding[J]. Welding International, 1991, 5(7): 577 – 583.

[6] 王加友,国宏斌,杨 峰. 新型高速旋转电弧窄间隙 MAG 焊接[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 65 – 67.

Wang Jiayou, Guo Hongbin, Yang Feng. A new rotating arc process for narrow gap MAG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(10): 65 – 67.

[7] Xu W H, Lin S B, Fan C L, *et al.* Feasibility study on tandem narrow gap GMAW of 65 mm thick steel plate[J]. China Welding, 2012, 21(3): 7 – 11.

[8] 王加友,朱 杰,苏荣近,等. 摇动电弧窄间隙熔化极气体保护立向焊接方法: 中国, ZL201110201702. 02[P]. 2011 – 12 – 14.

[9] 徐望辉,林三宝,杨春利,等. 摆动电弧窄间隙立向上 GMAW 焊缝成形[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 56 – 60.

Xu Wanghui, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Weld bead formation in oscillating arc narrow gap vertical up GMAW process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 56 – 60.

[10] Guo N, Lin S B, Zhang L, *et al.* Metal transfer characteristics of rotating arc narrow gap horizontal GMAW[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(8): 760 – 764.

[11] Wang J Y, Zhu J, Fu P, *et al.* A swing arc system for narrow gap GMA welding[J]. ISIJ International, 2012, 52(1): 110 – 114.

[12] Xu W H, Fan C L, Lin S B, *et al.* Research on droplet transfer in oscillating arc narrow gap GMA welding[J]. China Welding, 2014, 23(2): 12 – 16.

[13] 赵 博. 窄间隙 MAG 焊电弧行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[14] Halmoy B E. Wire melting rate, droplet temperature and effective anode melting potential[J]. Hasler Reviv, 1980(1): 49 – 57.

作者简介: 徐望辉,男,1986 年出生,博士,工程师. 主要从事高效化焊接方向科研工作. 发表论文 10 余篇. Email: xuwanghui@126.com