

# 旁路电源工作模式对 Arcing-wire PAW 电特性与熔滴过渡的影响

张瑞英<sup>1</sup>, 蒋 凡<sup>1,2</sup>, 陈树君<sup>1</sup>, 张 亮<sup>3</sup>, 门广强<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124; 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; 3. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050018)

**摘 要:** 基于电弧可分离性,以焊丝为导引电极建立分体等离子弧,研究不同旁路工作模式下焊接参数对熔滴过渡行为的影响. 结果表明,旁路为恒流模式时,随着旁路电流的增加熔滴稳定快速过渡,随着送丝速度的增加过渡频率增加,但其达到 8.2 m/min 时会使焊丝来不及熔化;在熔滴过渡瞬间,旁路及等离子弧电压均发生明显波动但两者趋势相反,而旁路及等离子弧电流均无波动. 旁路为恒压模式时,随着旁路电压及送丝速度的增加,熔滴稳定而快速地过渡,但旁路电压过大时会出现失稳现象;在熔滴过渡瞬间,旁路及等离子弧电压、旁路电流、甚至等离子电流都出现明显波动.

**关键词:** 分体等离子弧; 旁路; 熔滴过渡; 恒压模式; 恒流模式

**中图分类号:** TG 456.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-360X(2017)02-0041-06

## 0 序 言

现代制造业的快速发展,对实现焊接生产加工的优质高效提出了更高的要求<sup>[1,2]</sup>. 且随着新型焊接材料、焊接结构等的更新,不断催生新的焊接方法. Tandem 焊接、多极氩弧焊(C-TIG)、多丝埋弧焊和 T. I. M. E. 焊接等工艺<sup>[3-6]</sup>以并联电弧或者改变保护气成分的方式实现了高效焊接. 等离子-MIG 复合焊、激光-电弧复合热源焊接技术<sup>[7-9]</sup>等复合焊工艺,将两种或多种热源复合,实现不同热源间的优势互补,达到高效焊接的目的. 但是上述焊接方法均未突破传统的传热、传质和传力特性. 旁路电极熔化极气体保护焊接(DE-GMAW)、新型旁路电弧耦合工艺(arcing wire GTAW)、双丝动态三电弧焊<sup>[10-13]</sup>等焊接方法的相继提出,改变了传统电弧耦合方式. 在此类方法中,不仅建立了焊枪与工件间的自由电弧,而且建立了焊枪与旁路间的自由电弧,打破传统的传热、传质、传力特性.

作为 TIG 焊的进阶技术,等离子弧属于拘束电弧. 在传统等离子弧焊中,当阴极与阳极的轴线偏离电弧等离子体时,电子流将从电弧等离子体中分

离出来,而电弧等离子体的形态基本不发生变化<sup>[14]</sup>. 由于电子流的分离,不仅降低了电弧等离子体具有的能量,而且降低了作用于工件的阳极效应. 在此基础上,将等离子弧焊中的焊丝作为一极,建立分体等离子弧,分离电弧等离子体中的电子流,提出了 Arcing-wire PAW 焊接工艺. 在此工艺中,主弧为等离子弧,电源为恒流特性;旁路电弧类似于熔化极气体保护焊中的电弧,电源选用传统熔化极气体保护焊电源(恒流特性或恒压特性). 为了实现此工艺焊接过程中的稳定控制,旁路电源分别采用恒压模式和恒流模式,对旁路电压、电流和送丝速度变化时的熔滴过渡行为及系统电特性进行了研究,为扩大此工艺的应用范围提供了理论基础.

## 1 试验原理

当以焊丝作为导引电极对电子流进行分离时,焊丝在旁路电弧和等离子弧的共同作用下熔化形成熔滴、过渡,其原理如图 1 所示,分离电源选用恒压源或恒流源. 主回路由等离子焊枪、工件和 PAW 焊接电源构成,流经电流  $I_1$ ;分离回路(旁路)由焊丝、分离电源、等离子焊枪构成,流经分离出的电子流  $I_2$ ,而流经等离子焊枪中钨极的电流为两回路之和,即  $I = I_1 + I_2$ . 通过对两回路电压或电流的调节实现对电弧等离子体中所含电子流的调节,辅以送丝速

收稿日期: 2016-07-27  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51375021); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金资助项目(AWJ-16-M06); 国家科技重大专项资助项目(2014zx04001-171)

度等相关工艺参数的调节,达到对熔滴过渡行为及电弧稳定性的调节. 在 Arcing-wire PAW 工艺中,当旁路采用恒压特性电源时,充分利用旁路的弧长自适应调节作用,保持钨极与焊丝间弧长的稳定及熔滴过渡位置的稳定;当旁路采用恒流特性电源时,两回路电流的稳定保持了系统内对焊丝及母材热输入的基本稳定.

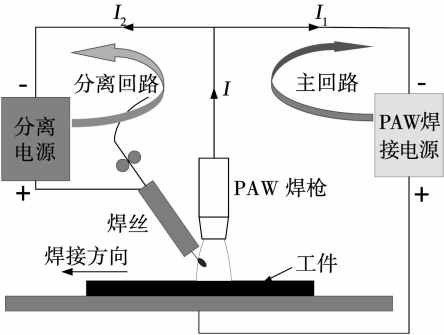


图 1 Arcing-wire PAW 试验原理  
Fig. 1 Basic principle of Arcing-wire PAW

试验中,以  $\phi 1.2\text{ mm}$  的  $\text{CuSi}_3$  焊丝为导引电极对等离子弧中的电流进行分离,母材为低碳钢板 ( $500\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ ),离子气和保护气均为 99.99% 的氩气,离子气流量为  $1.0\text{ L/min}$ ,保护气流量为  $10.0\text{ L/min}$ ,钨极内缩为  $2.0\text{ mm}$ ,喷嘴直径  $3.0\text{ mm}$ ,焊接速度  $1.5\text{ m/min}$ ,其余工艺参数见表 1.

表 1 Arcing-wire PAW 工艺参数  
Table 1 Parameters of Arcing-wire PAW

| 序号  | PAW 电流<br>$I_1/\text{A}$ | PAW 弧高<br>$h_1/\text{mm}$ | 旁路电压<br>$U/\text{V}$ | 旁路电流<br>$I_2/\text{A}$ | 送丝速度<br>$v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ | 焊丝高度<br>$h_2/\text{mm}$ |
|-----|--------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 1 号 | 45                       | 5                         | —                    | 100, 110, 120, 130     | 5.0                                        | 2                       |
| 2 号 | 45                       | 5                         | —                    | 120                    | 3.8, 5.0, 6.6, 8.2                         | 2                       |
| 3 号 | 45                       | 6                         | 20, 22, 24, 26       | —                      | 8.5                                        | 4                       |
| 4 号 | 60                       | 6                         | 24                   | —                      | 8.0, 8.5, 9.0                              | 4                       |

2 试验结果与分析

2.1 旁路恒流模式下工艺参数对熔滴过渡稳定性影响

2.1.1 电流变化时对熔滴过渡稳定性影响

恒流电源与恒压电源最大的区别是其电弧本身

不具备自适应调节作用,但由于主路和旁路均为恒流源使得系统热输入稳定,且根据最小电压原理电弧均会找到一个稳定工作区间. 当其它参数不变而只有旁路电流变化时,其工艺参数如表 1 中 1 号所示,其熔滴过渡图像如图 2 所示. 从图 2 中看出,当只改变旁路电流时,不仅减小了熔滴直径且增加了其过渡频率,并均实现了间歇性的搭桥过渡. 这主要是因为旁路电流增加时,首先增加了旁路电弧对焊丝的热力输出,不仅使焊丝的熔化速度(熔滴的形成速度)增加,而且增加了促进熔滴过渡的驱动力;其次也直接增加了流过等离子焊枪的电流  $I$ ,增加了等离子弧本身的热力输出,其对熔滴的辅助热力输出也相应的增加. 在双重增强作用下,熔滴过渡频率增加的同时减小了其直径. 旁路电流  $120\text{ A}$  时的焊缝成形如图 3 所示,焊缝成形均匀美观.

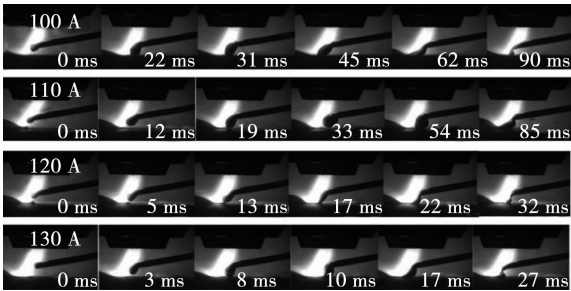


图 2 不同焊接电流对熔滴过渡的影响  
Fig. 2 Effect of welding current on metal transfer

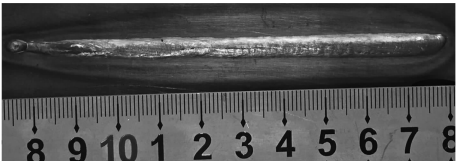


图 3 旁路电流  $120\text{ A}$  时的焊缝成形  
Fig. 3 Weld with AW current  $120\text{ A}$

旁路电流变化时,采集的同步电信号如图 4 所示(图 4 中 AW 指旁路). 在旁路电流增加的同时增加了焊丝的过渡频率和熔化速度,但送丝速度恒定,这就增加了钨极与焊丝间的距离,使得旁路电压基值(不发生熔滴过渡时的旁路电压)增加,增幅在  $2\text{ V}$  左右. 流过等离子焊枪的电流总值也会随之增加,也就增加了 PAW 电压基值(不发生熔滴过渡时的等离子弧电压),增幅在  $1\text{ V}$  左右. 当熔滴因搭桥过渡与工件接触时,焊丝与工件发生短路而使旁路电压等同于形成于钨极与工件之间,弧长的增加使旁路电压突增;焊丝与工件的短路使得焊丝与钨极间的电弧和工件与钨极之间的电弧呈并联状态,使

钨极与工件间的等效电阻低于等离子弧单独存在时的等效电阻,从而使等离子弧电压降低. 因此出现了图 4 中在熔滴过渡瞬间等离子弧电压降低而旁路电压升高的现象,且两回路的电压会随着熔滴过渡规律性波动. 但在电压波动时,旁路及 PAW 电流均未受到各自电压波动的影响而保持恒定.

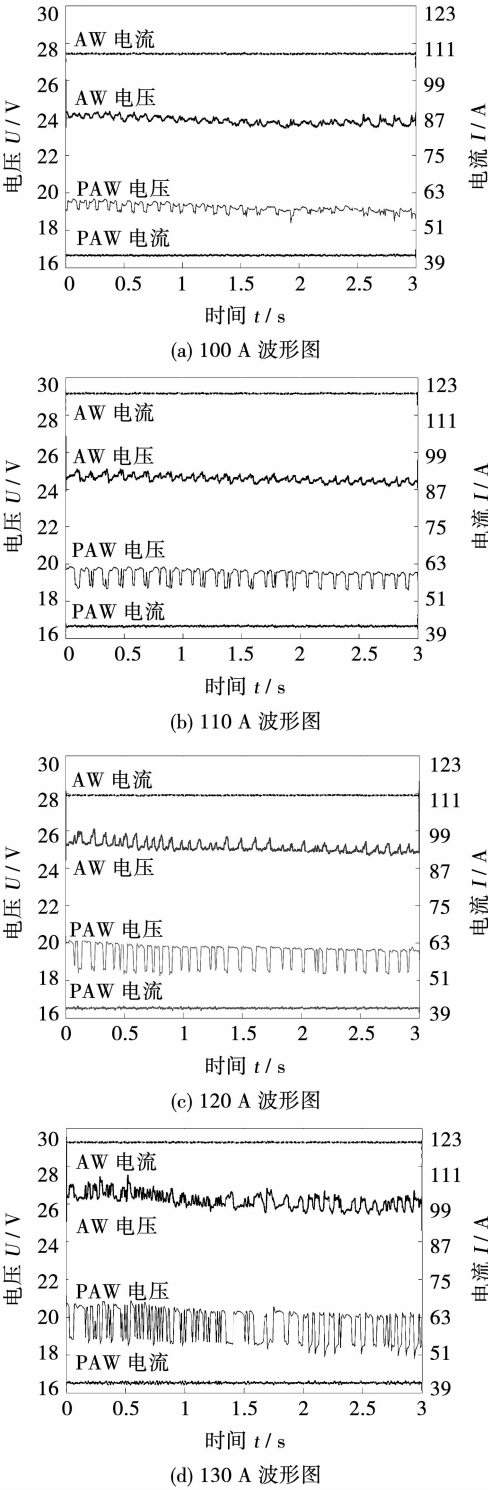


图 4 不同焊接电流下电压电流波形图

Fig. 4 Current and voltage waveforms under different welding currents

2.1.2 送丝速度变化对熔滴过渡稳定性的影响

当仅有送丝速度变化时其参数如表 1 中 2 号所示,熔滴过渡图像如图 5 所示. 旁路电流不变使焊丝熔化速度基本不变,当送丝速度为 3.8 m/min 时,焊丝熔化速度大于其送进速度,使焊丝端头一直处于等离子弧边缘,随着时间的推移焊丝端头与等离子弧边缘间的距离逐渐增加使等离子弧对熔滴的辅助热力输入不是很明显. 虽然也实现了熔滴过渡并保持稳定,但熔滴直径远大于焊丝直径且过渡频率较小. 送丝速度为 8.2 m/min 时,由于送丝速度过快而使焊丝来不及熔化就穿过等离子弧区域而无法实现熔滴过渡,送丝速度在 5.0 ~ 6.6 m/min 之间时,焊丝熔化速度与送丝速度达到较好的匹配使焊丝端头进入等离子弧并接近其中心,等离子弧对熔滴过渡的辅助热力输入较明显,熔滴在接近等离子弧中心的位置稳定快速过渡且过渡位置较稳定.

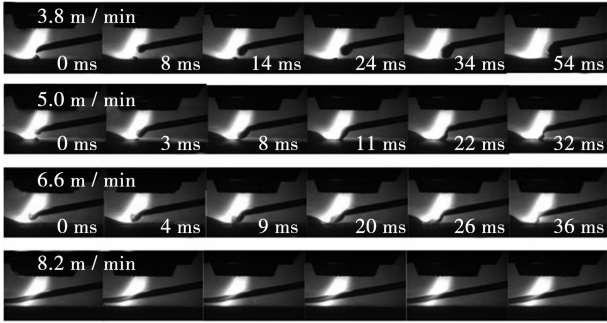
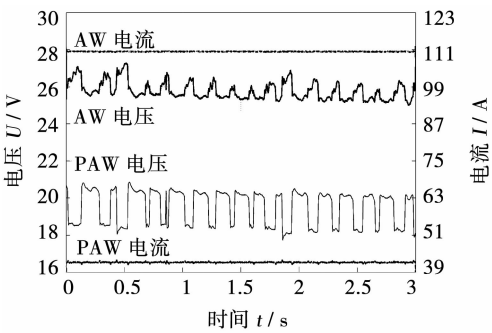


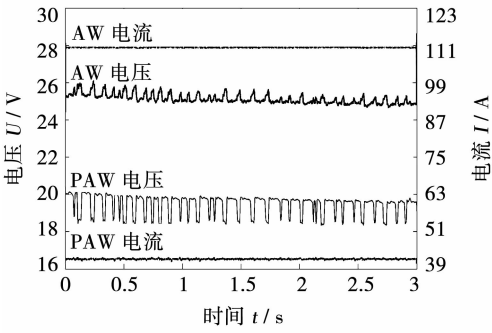
图 5 不同送丝速度对熔滴过渡的影响

Fig. 5 Effect of wire feeding speeds on metal transfer

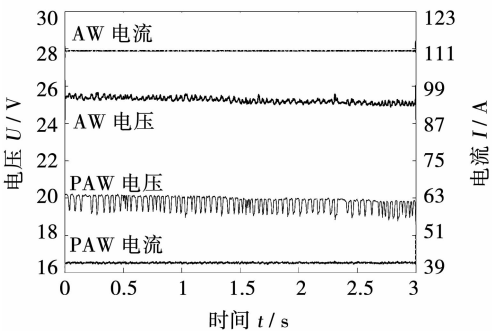
送丝速度变化时,虽然熔滴过渡不能对两回路的电流产生影响但却对两回路的电压产生了影响,如图 6 所示. 随着送丝速度的增加使旁路电压基值有降低趋势,但 PAW 电压基值基本不变,加之等离子弧及旁路电流均保持恒定,使得系统整体的热力输入尤其是通过旁路电弧作用于焊丝的热力输入基本不变. 送丝速度为 3.8 m/min 时,由于送丝速度小于焊丝的熔化速度而使旁路弧长不断增加,使旁路电压基值接近 26 V. 且由于熔滴过渡时与工件发生短路使得旁路弧长进一步增加而等离子弧的等效电阻降低,呈现旁路电压突增而 PAW 电压突降的波动,如图 6a 所示. 送丝速度在 5.0 ~ 6.6 m/min 之间时,由于熔滴快速稳定过渡且焊丝端头在等离子弧中的位置基本不变,焊丝与工件间短路时间明显变短且旁路及 PAW 电压稳定波动,如图 6b, c 所示. 送丝速度为 8.2 m/min 时,未出现熔滴过渡,两回路独立存在且各回路中的电压值均保持稳定未出现明显的波动,如图 6d 所示.



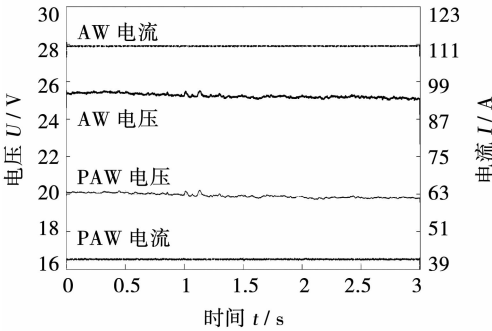
(a) 3.8 m / min 波形图



(b) 5.0 m / min 波形图



(c) 6.6 m / min 波形图



(d) 8.2 m / min 波形图

图 6 不同送丝速度下电压电流波形图

Fig. 6 Current and voltage waveforms under different feeding wire speeds

2.2 旁路恒压模式下参数对熔滴过渡稳定性的影响

2.2.1 电压变化时对熔滴过渡稳定性影响

恒压电源最大的优势在于其电弧具有的自适应调节作用,当仅有旁路电压变化时其工艺参数如表 1 中 3 号所示,其熔滴过渡图像如图 7 所示. 旁路电压为 20 V 时,由于旁路电压较小使旁路弧长较

短,旁路对熔滴的热力输入也较小. 虽然在熔滴形成初期焊丝可以利用等离子弧的辅助热输入促进熔滴形成,但随着时间的推移熔滴向等离子弧后方(焊丝进入等离子弧的一侧为等离子弧前方)偏移,使熔滴过渡过程中并不能充分利用等离子弧的辅助力输入,熔滴直径远大于焊丝直径且过渡频率较慢. 随着旁路电压的增大弧长也在逐渐增加,不仅增加了旁路对焊丝的热力输入同时由于焊丝端头的前移增强了等离子弧的辅助热力输入,使焊丝的熔化速度明显增加且熔滴尺寸逐渐减小,过渡频率加快且其脱落的位置也向等离子弧的前方边缘偏移,旁路电压 24 V 时的焊缝成形如图 8 所示,焊缝成形均匀美观.

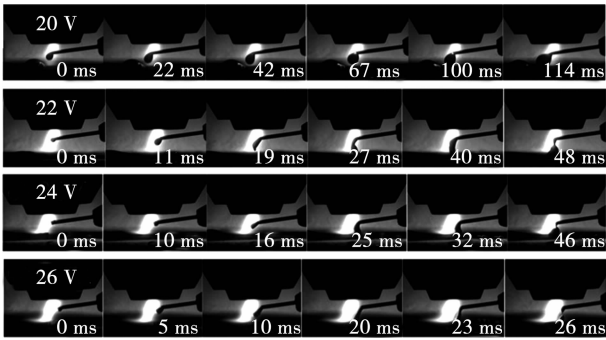


图 7 不同焊接电压对熔滴过渡的影响

Fig. 7 Effect of welding voltages on metal transfer

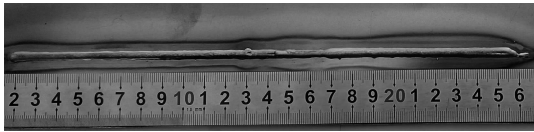


图 8 旁路电压 24 V 时的焊缝成形

Fig. 8 Weld with AW voltage 24 A

不同旁路电压时采集的同步电信号如图 9 所示. 从图 9a 看出,旁路电压为 20 V 时旁路的自适应调节能力较差,在熔滴过渡瞬间旁路电流、旁路及 PAW 电压均出现较大波动. 旁路电压为 22 V 时,从图 9b 中看出,此时的旁路电流增加且其波动性减小,在熔滴过渡时 PAW 及旁路电压的波动幅度都在减小,说明此时旁路的自适应调节能力有所提高,焊丝熔化速度和送丝速度的吻合度增强同时利用对熔滴的综合热力输入实现熔滴较稳定的过渡. 旁路电压为 24 V 时,如图 9c 所示,旁路电流进一步增加但仍有轻微波动出现而旁路电压的波动幅度也在减小,PAW 电压出现了规律性的波动,而 PAW 电流几乎没有出现波动. 说明在该电压时旁路的自适应调节能力强,且此时焊丝熔化速度和送丝速度的匹配

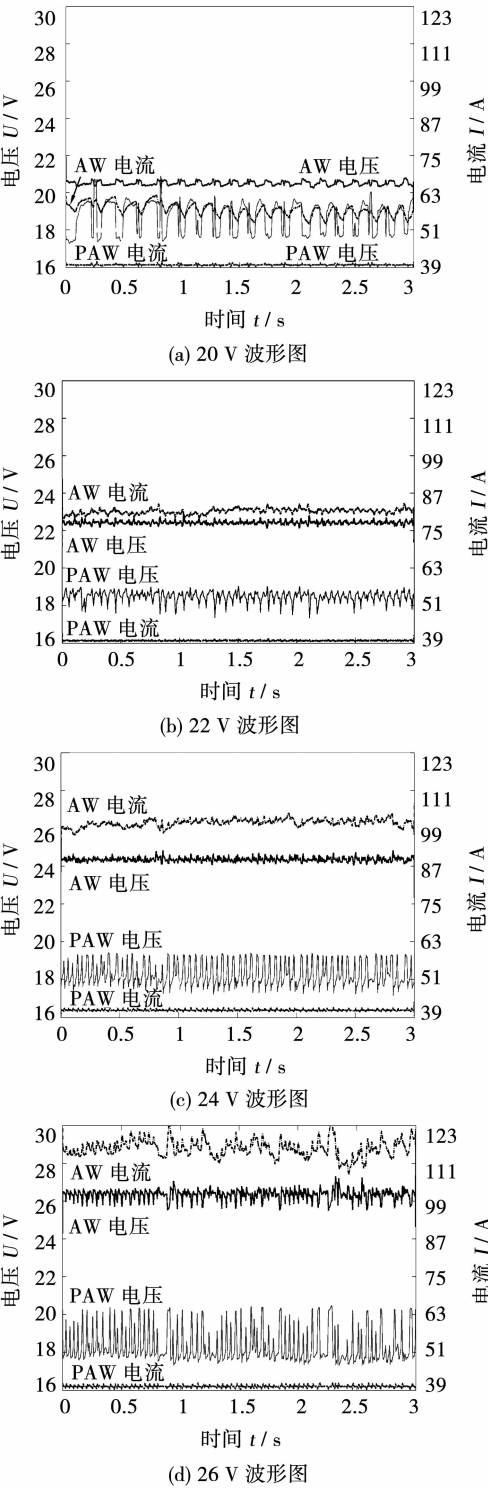


图 9 不同焊接电压下电压电流波形图

Fig. 9 Current and voltage waveforms under different welding voltages

性较好. 旁路电压为 26 V 时,如图 9d 所示,虽然旁路电流进一步增加,但不仅旁路电流出现了较大波动而且旁路及 PAW 电压甚至 PAW 电流都出现了不规律的波动. 说明随着旁路电压的继续增大所需的送丝速度也同时增大,但是由于送丝速度恒定使得送丝速度和焊丝熔化速度没有很好的匹配,引起该

电压下熔滴过渡位置的不断变化和熔滴过渡稳定性的下降,导致各回路中电流和电压的不稳定波动. 上述对比试验说明旁路电压对熔滴过渡的稳定性有很大的影响,过小或者过大的旁路电压都会导致熔滴过渡的不稳定性.

2.2.2 送丝速度变化时对熔滴过渡稳定性的影响

当仅有送丝速度变化时其参数如表 1 中 4 号所示,熔滴过渡图像如图 10 所示. 由于旁路采用恒压源和等速送丝系统,当送丝速度较小时 (8.0 m/min)旁路电流也较小,由于 PAW 电流恒定使得流经钨极的总电流也较小,等离子弧的热力输出相应较小. 同时由于焊丝端头靠近等离子弧边缘使得等离子弧对熔滴的辅助热力输入更小,多重影响下,焊丝熔化速度较慢、熔滴较大且过渡频率较小,当送丝速度为 8.5 m/min 时,送丝速度的增加使旁路电流增加,不仅增加了旁路对焊丝的热力输入同时增加了等离子弧的辅助热力输入,在焊丝熔化速度增加的同时增加了熔滴的过渡频率. 当送丝速度为 9.0 m/min 时,送丝速度的增大不仅使焊丝的前端进入等离子弧内部且增加了旁路电流,不仅增加了旁路对焊丝的热力输入且增加了等离子弧对焊丝的辅助热力输入. 在双重增强作用下,熔滴尺寸变小且其过渡频率增大.

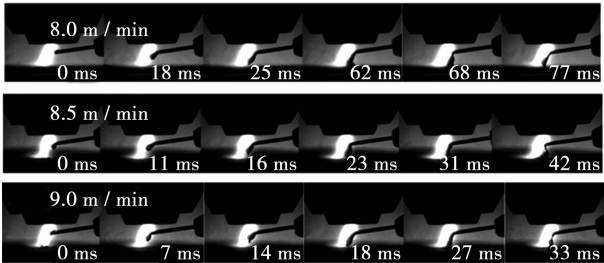


图 10 不同送丝速度对熔滴过渡的影响

Fig. 10 Effect of wire feeding speeds on metal transfer

在不同送丝速度时采集的同步电信号如图 11 所示. 当送丝速度为 8.0 m/min 时,由于送丝速度较小使得旁路电流也较小,而且旁路电流、旁路电压和 PAW 电压均出现了波动,如图 11a 所示. 当送丝速度为 8.5 m/min 时,由于熔滴的过渡频率增加使得 PAW 电压波动频率增加,且由于焊丝与钨极间弧长趋于稳定使得旁路电流和旁路电压的波动幅度减小,如图 11a 所示. 当送丝速度为 9.0 m/min 时,由于送丝速度的增加而增加了旁路电流,此时熔滴的较平稳过渡使得旁路电压的波动性较小而 PAW 电压也出现了较规律的波动,如图 11c 所示.

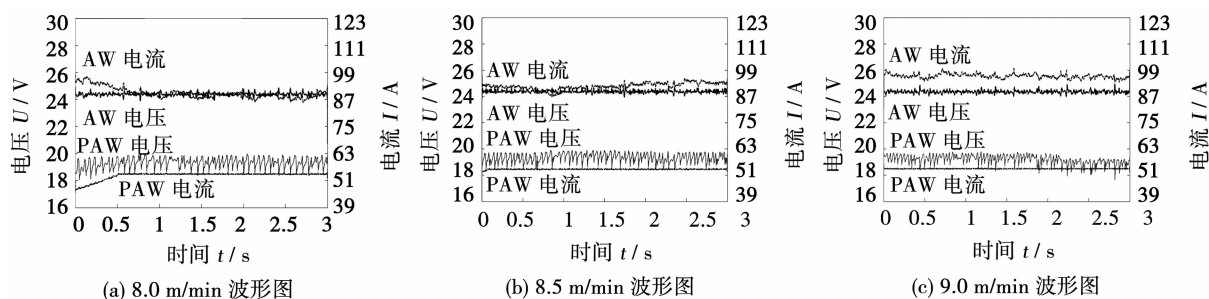


图 11 不同送丝速度下电压电流波形图

Fig. 11 Current and voltage waveforms under different feeding wire speeds

### 3 结 论

(1) 以焊丝作为导引电极建立分体等离子弧,借助电弧同步采集系统,结合焊接电弧电信号和电弧图像完成了对熔滴过渡行为的分析。

(2) 在旁路恒流模式中,随着旁路电流的增加,熔滴实现稳定快速过渡,随着送丝速度的增加,过渡频率增加,但送丝速度过快时会使焊丝来不及熔化就穿过等离子弧;在旁路电流及送丝速度变化时的熔滴过渡瞬间,旁路及等离子弧电压均出现明显规律性波动,在旁路电压升高时等离子电压下降,但是旁路电流和等离子电流均保持稳定未发生波动。

(3) 在旁路恒压模式中,随着旁路电压及送丝速度的增加,熔滴实现稳定而快速的过渡,但是旁路电压过大时会出现失稳现象;在旁路电压及送丝速度变化时,旁路电流随着旁路电压升高而升高,在熔滴过渡瞬间,等离子弧及旁路电压、旁路电流、甚至等离子弧电流均出现明显波动。

### 参考文献:

- [1] 崔旭明, 李刘合, 张彦华. 高效焊接工艺研究现状[J]. 新技术新工艺, 2004, 7: 32-35.
- [2] Cui Xuming, Li Liuhe, Zhang Yanhua. Research situation of high efficiency welding process[J]. New Technology & New Process, 2004, 7: 32-35.
- [3] K Ch, S R. High deposition MAG welding: used for welding bridges and structures[J]. Welding in the World, 1996, 38: 227-343.
- [4] 王 飞, 华学明, 马晓丽, 等. 双丝 GMAW 焊接的电弧干扰和中断分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 109-112.
- [5] Wang Fei, Hua Xueming, Ma Xiaoli, et al. Analysis of arc interference and interruption in double-wire GMAW welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 109-112.
- [6] Tusek J. Submerged arc welding with double and triple wire electrode[J]. The International Journal of Joining of Materials, 1994, 6(3): 105-110.
- [7] 宋永伦. 高性能焊接电弧的研究与应用[J]. 电焊机, 2013, 43(3): 1-5.

Song Yonglun. Research and development of high performance welding arc[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(3): 1-5.

- [6] 徐鲁宁, 殷树言, 卢振洋. TIME 焊工艺与高效 MAG 焊的发展[J]. 电焊机, 2000, 30(5): 3-7.
- [7] Xu Luning, Yin Shuyan, Lu Zhenyang. TIME process and development of high efficiency MAG process[J]. Electric Welding Machine, 2000, 30(5): 3-7.
- [8] Essers W, Liefkens A C. Plasma-MIG welding developed by Philips[J]. Machinery and Production Engineering, 1972, 121(3129): 631-634.
- [9] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 51(11): 5636-5641.
- [10] 韦辉亮, 李 桓, 王旭友, 等. 激光-MIG 电弧的复合作用及对熔滴过渡的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 41-44.
- [11] Wei Huiliang, Li Huan, Wang Xuyou, et al. Hybrid interaction of laser and pulsed MIG arc and its influence on metal transfer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 41-44.
- [12] Zhang Y M, Jiang M, Lu W. Double electrodes improve GMAW heat input control[J]. Welding Journal, 2004, 83(11): 39-41.
- [13] 石 玢, 王桂龙, 朱 明, 等. 保护气体成分对双丝旁路耦合电弧 GMAW 旁路熔滴过渡形式的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 15-18.
- [14] Shi Yu, Wang Guilong, Zhu Ming, et al. Effects of different protective gas on bypass metal transfer in consumable double-electrode gas metal arc welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 15-18.
- [15] Chen J S, Lu Y, Li X R, et al. Gas tungsten arc welding using an arcing wire[J]. Welding Journal, 2012, 91(10): 261-267.
- [16] 耿 正, 魏占静, 韩雪飞, 等. 高熔敷率低热输入的 Tri-Arc 双丝电弧焊接方法[J]. 金属加工(热加工), 2014, 22: 36-42.
- [17] Geng Zheng, Wei Zhanjing, Han Xuefei, et al. Tri-Arc double-wire arc welding with high deposition rate and low heat input[J]. Machinist Metal Forming, 2014, 22: 36-42.
- [18] Chen S J, Jiang F, Lu Y S, et al. Separation of arc plasma and current in electrical arc — an initial study[J]. Welding Journal, 2014, 93(7): 253-261.

**作者简介:** 张瑞英,女,1987 年出生,博士研究生. 主要从事焊接电弧物理、先进焊接方法等方面的研究. Email: happyzhangruiying@163.com

**通讯作者:** 蒋 凡,男,博士,讲师. Email: jiangfan@bjut.edu.cn