

交流 MAG 焊接电弧稳定性及其控制^{*}

焦向东

潘际銮 张 骥

(北京 石油化工学院)

(北京 清华大学)

摘要 介绍了一种新型交流 MAG 焊接电弧稳定性及其控制的研究成果。提出了一种崭新的双凹电流波形, 解决了 MAG 焊交流电弧稳定这个一直很难解决的问题。对交流脉冲 MAG 焊接电弧稳定性进行了较为系统的研究表明, 脉冲参数是影响电弧稳定和实现合理熔滴过渡的最主要因素, 保护气体成分和流量、稳弧剂也是重要的影响因素。经过精心配置焊接参数的交流脉冲 MAG 焊接法能实现电弧稳定并具有较合理的熔滴过渡形式, 是一种具有重要应用前景的焊接方法。

关键词: 交流焊接 脉冲 MAG 电弧稳定性

0 序 言

近一百年来, MAG 焊一直采用 DCRP 接法, 原因是交流 MAG 焊接电弧很难稳定, 实际上交流 MAG 焊接法在工艺上有许多优点, 比如交流焊可从根本上克服磁偏吹的危害^[1]。交流 MAG 焊接的主要关键是电弧在交流过零时的熄灭问题及合理的熔滴过渡问题。国内外关于这种方法的研究报导极少。日本学者 Mutsuo Nakanishi 等进行了工频正弦波电源的交流 MAG 焊^[2], 该法很难控制熔滴过渡, 焊接规范调节范围窄, 表面有残渣。另一位日本学者凡山德治等研究了焊接铝合金用的交流 MAG 焊机^[3], 该焊机的极性比率调节范围小, 受焊接电流大小的限制, 加 300V 高压也是个不安全因素, 同时对周围设备有较强的电磁干扰。

本文叙述在交流 MAG 焊的稳定性及其控制方面的研究结果。研究成果表明, 用双凹电流波形进行交流 MAG 焊的方法实现了电弧的稳定燃烧, 通过设置合理的脉冲参数实现了合理的熔滴过渡, 增加了交流 MAG 焊的实用性并拓宽了它的应用范围。

1 试验研究方法

利用自行研制的双凹波形脉冲氩弧焊的焊接电源^[4], 配以如图 1 所示的方框外特性, 研究 4 种典型交流脉冲 MAG 焊接电流波形(图 2)对交流 MAG 焊接电弧稳定性的影响, 在焊接电弧连续燃烧的基础上, 借助高速摄影观察、飞溅测定和焊工肉眼观察等手段研究脉冲参数和保护气体等对焊接工艺性能的影响。

把脉冲电流的概念引入到交流 MAG 焊接方法中主要是为了提高交流电弧的稳定性和扩大焊接电流的调节范围, 以利于交流 MAG 焊实现薄板焊接和厚板坡口打底焊。其设计思想如下: 图 2(a)中, 无论是从反接(RP)变为正接(SP)还是从 SP 变为 RP, 熔滴都已在变极性之前过渡完毕且已经过一段时间调整电弧稳定了下来, 焊丝端头的液态金属很少, 不会因电流的剧烈变化而引发飞溅, 换相后电流立即变为脉冲大电流, 再引弧的条件较好; 换相前后的电压和电流与焊丝直径及送

* 北京市自然科学基金资助项目(编号 C015)。

丝速度大小关系不大。图 2(b)中, 熔滴基本上在 RP 阶段过渡, 因为 RP 焊时熔滴在脉冲期间过渡, 由 RP 变为 SP 时熔滴已过渡完毕, 而 SP 焊时熔滴在维弧期间过渡, SP 的脉冲电流只使熔滴长大, 只有到了 RP 后才发生过渡; 交流换相前电弧处于大电流强电弧状态, 热惯性大, 再引弧的基础好, 再引弧电流为维弧小电流。图 2(c)中, 电弧的大部分时间和脉冲电流都处在 RP, 这个方案的熔滴过渡为喷射过渡, 短暂的 SP 保持了交流的特点, 虽然 RP 和 SP 的熔化率不同, 但小电流的 SP 阶段使整体交流焊的熔化率的增高是很有限的, 因而 SP 的时间可在较大范围内变化, 也即正反极性比率的调节范围大; 交流换相前后的电弧电流都是小电流。图 2(d)中, 不论是极性从 RP 变为 SP, 还是从 SP 变为 RP, 其电流过零前后的电流均为脉冲大电流, 换相前是强电弧状态, 换相后迅速加上的也是高电压大电流, 我们称这种电流波形为双凹焊接电流波形。

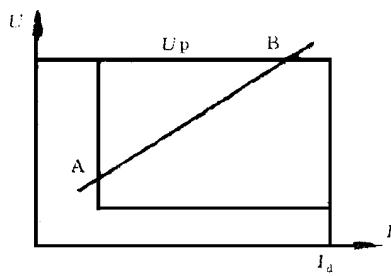


图 1 外特性

Fig. 1 Output characteristic

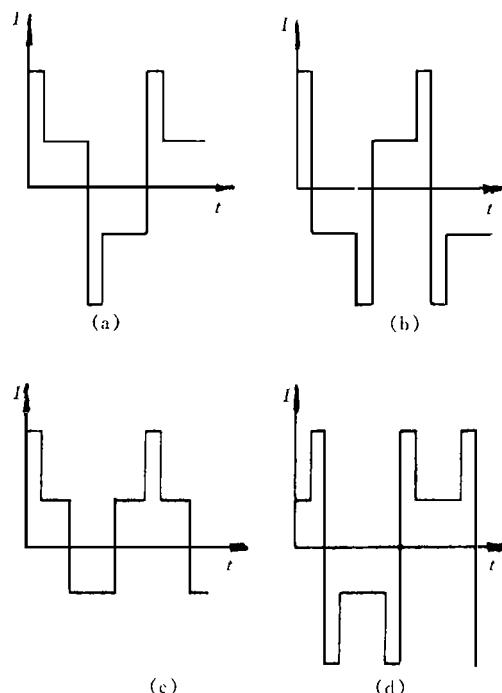


图 2 电流波形方案

Fig. 2 Welding current waveform

2 试验结果

2.1 电弧行态及熔滴过渡研究

分别用 4 种电流波形进行了平板堆焊试验, 试验条件为电源空载电压 55V, Ar+15%CO₂ 保护, φ1.0mm H08Mn2SiA 焊丝, 不加任何稳弧措施。结果是前 3 种电流波形的电弧根本无法建立, 其过程为噼噼啪啪的频繁短路再引弧过程, 大段焊丝爆断, 从电流波形上看, 焊接电流频繁地长时间为零。只有双凹电流波形可以实现电弧的连续稳定燃烧。另外还用双凹电流波形进行了板厚 12mm 的 120° 坡口的对接打底交流 MAG 焊, 结果电弧燃烧平稳, 没有出现电弧磁偏吹现象。利用高速摄影手段研究了交流脉冲 MAG 焊接电弧形态及其变化过程, 图 3 所示为电源电压变换极性时的高速摄影照片, 图 4 为整周期电弧形态示意图。

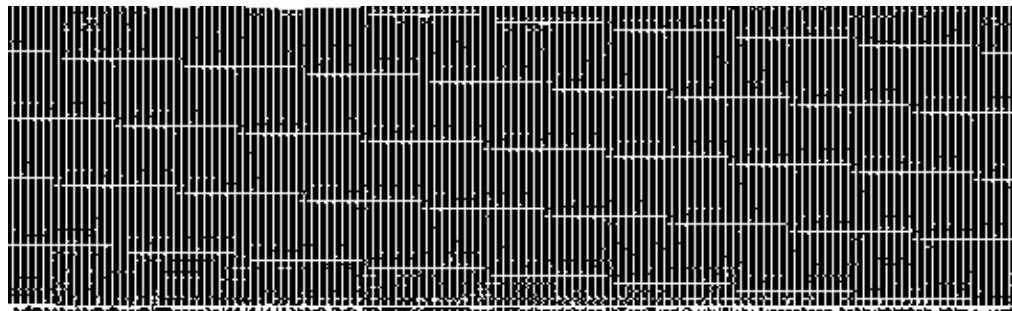


图 3 电压换向时的电弧高速摄影照片

Fig. 3 High speed film of arc when power polarity reverse

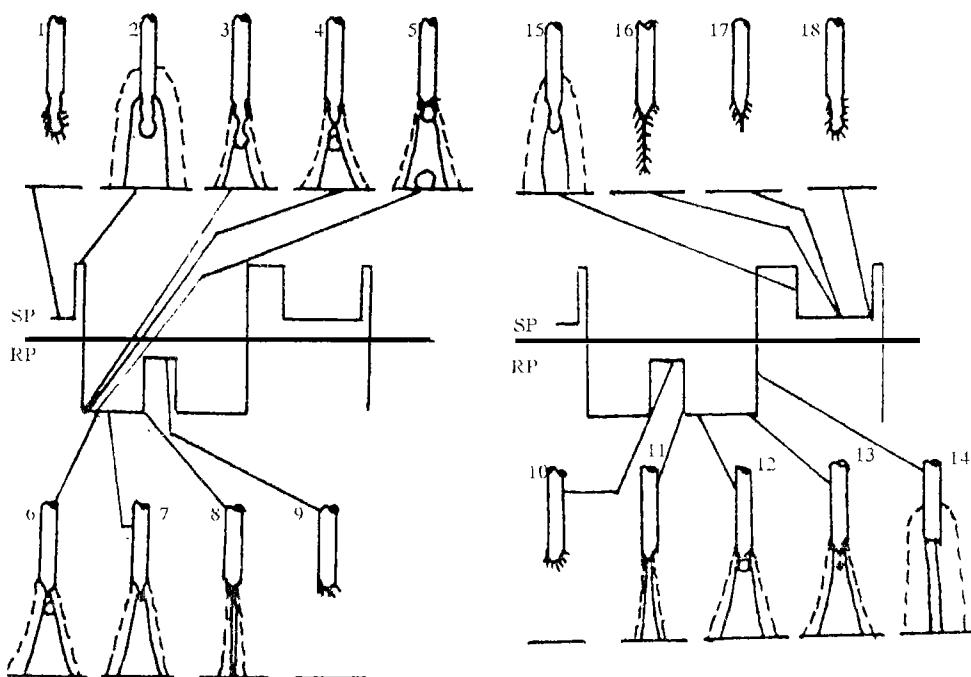


图 4 交流脉冲 MAG 焊接电弧形态示意图

Fig. 4 Welding arc phenomenon

将焊接电流氛围分为二个阶段对电弧形态及熔滴过渡进行描述和分析：

第一阶段，电流从正接脉冲变为反接脉冲。在正接维弧阶段，电弧很弱，也较散，在焊丝端部下部区域有一个小亮环包围着葫芦形的熔化金属，在固态金属焊丝上基本无电弧亮点。随着正接脉

冲电流的出现,电弧上爬,焊丝侧壁上也出现了烁亮区,下部有个柱状烁亮区,时间越长,亮区变大,上爬增多,并能见到阴极斑点漂摆,熔滴极少过渡。极性由 SP 变为 RP 后,电弧烁亮区迅速移到焊丝下顶端,中心烁亮区由柱状变为锥状,并开始缩颈过渡第一滴金属,由于前面的热量积累,这滴熔滴尺寸稍大,约为 1.5 倍焊丝直径,时间比正常纯 DCRP 焊接提前 1ms 左右。反接的脉冲电流,继续使熔滴喷射过渡。紧接着的维弧电流仅维持电弧燃烧,强度很弱,再后又是脉冲电流,电弧再次变强。

第二阶段,电流从反接变成正接。在前一阶段电弧已变强,会有几个细小熔滴过渡,焊丝端部基本上是固态,反接电流出现后,电弧突然上爬,阴极斑点在焊丝端头和焊丝侧面迅速游动,电弧整体呈柱状。如果脉冲参数控制不当造成前一阶段遗留熔化金属较多,熔滴会长大过多,形成大颗粒过渡和飞溅。第一滴熔化金属过渡完毕,焊丝变成像扒了皮的细针状,形成小颗粒过渡。正接维弧电流仅维持电弧燃烧。

2.2 交流脉冲参数对 MAG 焊接电弧稳定性的影响

用直接法进行了交流 MAG 焊的飞溅率测定,即直接用容器收集飞溅的金属颗粒,用焊接前后母材质量之差(除去飞溅)作为熔敷金属质量,二者之比为飞溅率。脉冲电流信号波形参数意义如图 5 所示。当 $t_{pr1}=t_{pr2}=t_{ps1}=t_{ps2}=1.5\text{ms}$ 时的测量结果示于图 6。

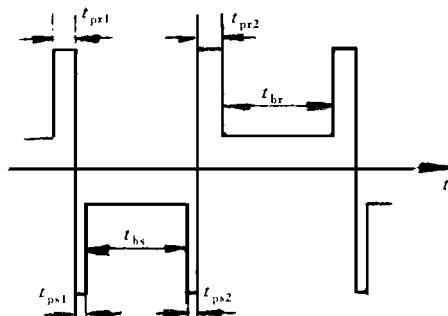


图 5 交流脉冲 MAG 焊的脉冲参数

Fig. 5 Pulse parameters of welding arc

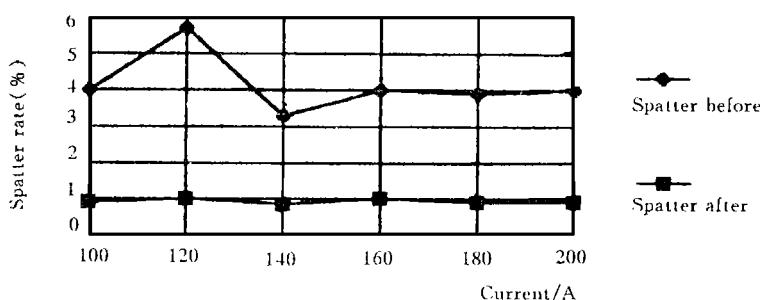


图 6 交流 MAG 焊飞溅率测定

Fig. 6 Spatter rate of AC MAG welding

可见这种参数下的交流脉冲 MAG 焊的飞溅率很大,快赶上 CO_2 焊接水平了。之所以有如此之高的飞溅,做如下解释:

(1) 电流变化幅度大

为了保证交流 MAG 电弧的稳定, 采用了脉冲电流 I_p 期间交流换相, 对 $\phi 1.0\text{mm}$ 焊丝 I_p 值为 280A 以上, 从正向变到反向的电流变化幅度为 560A, 电弧力和热的变化是相当大的, 正接阶段形成的熔滴在反接阶段受到迅速加速, 撞击熔池而形成飞溅, 从高速摄影中可看到有一部分飞溅是大致垂直向上的, 喷嘴里残留了许多飞溅颗粒也可证明这一点。另一方面, 正接时的熔滴较大, 温度较高(在焊丝端部停留时间长), 电流过零时要冷却一部分, 反向后的大电流又使熔滴迅速受热, 其中的冶金反应生成的气体要膨胀, 因此形成飞溅。

(2) 交流脉冲 MAG 焊的个别熔滴体积较大

相对直流反接(DCRP)的脉冲 MAG 焊, 交流脉冲 MAG 焊的熔滴中有些熔滴的体积较大, 大个熔滴下落到熔池中引起飞溅。从高速摄影结果中, 有时可看到焊丝一大个熔滴—母材间形成串联电弧, 熔滴受两个方面的电弧力的作用, 其合力使熔滴脱离其正常轨道而形成飞溅。

(3) 电弧在电流从 RP 变为 SP 时飘动剧烈

在电流从 RP 变为 SP 的时刻, 焊丝突然变为阴极, 电弧会在焊丝端头飘动并上爬, 反接脉冲电流持续时间仍为 2ms, 熔滴已经长成但未过渡, SP 阶段的强电弧会使这个熔滴迅速长大并左右摇摆, 从而形成飞溅。

(4) 飞溅多发生在电流由 RP 变为 SP 时刻

由高速摄影结果得知, 电弧在电流由 RP 变为 SP 时的变化明显, 电弧轮廓和电弧氛围的剧烈变化会造成飞溅和颗粒爆炸, 而电流从 SP 变为 RP 时的变化非常平稳。

针对以上的观察和分析, 对 t_{pr1} , t_{pr2} 和 t_{ps1} , t_{ps2} 作了调整, 使 $t_{pr1} = t_{pr2} = 2.5\text{ms}$, $t_{ps1} = t_{ps2} = 1\text{ms}$, 再作飞溅率测定, 示于图 6 中。

调整了延迟时间, 使飞溅率大幅度下降, 主要原因为:

第一、由于 $t_{pr1}=2.5\text{ms}$, 在电流由 RP 变为 SP 之前, 熔滴在 RP 阶段形成长大并脱离, 在熔滴刚刚脱离焊丝的很短时间内, 焊丝端面基本上没有液态金属, 而是固体焊丝。此时电流换向起码有两个好处, 一是熔滴在 RP 阶段喷射过渡到熔池, 平稳无飞溅, 电流换相后没有现成的熔化金属因而不会在 SP 脉冲电流阶段形成太大熔滴过渡; 二是固态焊丝表面有氧化皮(熔化金属表面没有), 变为阴极时阴极斑点稳定, 不会形成剧烈飘动。

第二、正接阶段的熔滴尺寸不会超过 1.5 倍焊丝直径, 因为这段时间短熔滴来不及长得很大极性就已经变为反接了, 正接阶段形成的熔滴也可能在反接阶段过渡, 因而交流脉冲 MAG 焊时的正接阶段 t_{ps1} 时间内的过渡也不会形成很大飞溅, 可进一步改善过渡形式。当然, t_{pr1} 并非可以任意增大, 而 t_{ps1} 并非可以任意小, 否则电弧会变得不连续。

所以, 在交流脉冲 MAG 焊中, 各参数的设置须遵循一定的规则, 脉冲电流值和维弧电流值与直流脉冲 MAG 焊之值简化为同样的数值, $t_{pr1} + t_{ps1} = t_{ps2} + t_{pr2}$, 其数值比直流脉冲焊的脉冲电流时间长, 这主要是因为电流换向的作用, t_{bs} 和 t_{br} 根据送丝速度大小而变化。 $t_{pr1} \geq 2.5\text{ms}$, 以便电流从 RP 变为 SP 前形成熔滴过渡, 利于这个时刻的电弧稳定, 如果这个参数不合适, 会造成换向时或换向后的大滴过渡和造成电弧严重不稳, 飞溅增加, 当熔滴过大时还可能断弧; t_{ps1} 也不能太小(常为 1ms 左右), 过小了焊接电流不能在进入维弧阶段之前达到最大值, 电弧不能在经过换向变弱后于强弧状态维持足够的时间而变得不稳定。 t_{ps2} 的作用是使强电弧的时间足够长, 为交流换向打下良好的气氛电离的基础, 利于再引弧。从熔滴过渡的角度讲, t_{ps2} 不能太长, 若 t_{ps2} 太长, 有可能出现特大熔滴过渡, 即使这个熔滴会维持到 RP 脉冲电流, 也会在 RP 阶段形成特大熔滴过渡(超过 1.5 倍焊丝直径), 只有这个时间控制得合适(约 1ms 左右), 才可能在焊丝端头在反向之前不形成过多的熔化金属, 待到 RP 阶段顺利实现射流过渡。在 t_{ps2} 固定以后, t_{pr2} 就是个基本不变的量了,

由于正接阶段热量积累的效应,在该段不是很长的时间内会有3~4个依次变小的熔滴过渡。两个维弧电流时间 t_{br} 和 t_{bs} 是两个随送丝速度变化的量,对电弧稳定性影响不大。

2.3 其他因素的影响

保护气体成分对交流脉冲MAG焊的影响是很显著的。 CO_2 气体高温受热后要分解,产生对电弧的冷却作用,从这个意义上讲,交流脉冲MAG焊的保护气体以选用Ar为好,试验证明此时的焊缝成形极不好,堆高很大,接合部过渡呈尖角,此时的电弧也不是最稳的。适当加大 CO_2 流量,可增加电弧气氛的氧化性,在焊丝和母材上生成氧化膜,使两种极性下的阴极斑点均能稳定在逸出功较低的氧化膜上。但当 CO_2 流量增加到5L/min时,电弧变得反而不稳了,这是因为由于 CO_2 的增加使得过渡形式有所变化,同时 CO_2 分解时的冷却作用占了主导地位(所用氩气流量20L/min)。过多的 CO_2 含量还造成焊缝表面的氧化皮增多,既浪费金属又不利于下道工序工作。还可以看到当 CO_2 含量太多时飞溅加剧,这是因为当氧化性加强时会加剧冶金反应,反应生成的气体爆炸引起飞溅。考虑到焊缝成形和其他工艺性, CO_2 气体流量以不超过3L/min为宜。

稳弧剂对交流脉冲MAG焊电弧稳定性的提高也有益处。曾进行这样的试验,在母材表面均匀撒一层 K_2CO_3 ,然后在其上施焊,发现电弧明显比无稳弧剂时安稳,飞溅进一步减少,但此时的焊丝熔化率有所下降。

3 结 论

利用自行研制成功的交流脉冲MAG焊接电源,配以本文提出的所谓“双凹形电流波形”,形成了一种新型交流MAG焊接方法,不必加任何稳弧措施,实现了电弧的稳定燃烧,并具有较好的工艺性能,彻底解决了电弧磁偏吹。脉冲参数存在合理的组合范围,经过合理配置脉冲参数,并使用适宜比例的保护气体,此种焊接方法可以实现认为合理的熔滴过渡,飞溅率也比较小。是一种很有发展前景的焊接方法。

(1997—07—21 收到初稿, 1997—11—12 收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 安藤弘平. 焊接电弧现象. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- 2 Mutsuo Nakanishi et al. Development of AC MAG Welding. Welding Research A broad, 1985, (8/9): 36~41
- 3 丸山德治. アルミニウム合金薄板用溶深制御パルスミグ溶接機‘センサークAL350’について. 軽金属溶接, 1992, 30(5): 210~216
- 4 焦向东. 双凹波形脉冲氩弧焊的焊接电源. 焊接学报, 1996, 17(1): 56~61

A. C. MAG Welding Arc Stability and Its Control

Jiao Xiangdong

(*Beijing Institute of Petro-chemical Technology*)

Pan Jiluan, Zhang Hua

(*Tsinghua University*)

Abstract A new A. C. pulsed MAG welding process was introduced in this paper. A brand-new welding current waveform for stabilizing the A. C. MAG welding arc has been put forward, and the welding test has been performed with satisfactory results. A set of reasonable pulse parameters was proposed on the welding testing results. Other factors influencing the arc stability have also been studied.

Key words A. C. welding, pulse MAG, arc stability