

脉冲电流熔化极 气电焊电弧形态的控制及其实际意义

王其隆 殷树言 钱乙余

(哈尔滨工业大学)

摘 要

熔化极脉冲焊具有熔滴过渡和热输入量可控的特点,已是众所周知,本文发现这种方法尚具有电弧形态可控性的特点。脉冲一射流过渡时,即使保持平均电流和电压不变,改变其他参数可以得到三种不同的目视电弧形态:束状、钟状和圆锥状。每种目视电弧形态都有其不同的加热和机械作用性能。用高速摄影观察了脉冲电流作用期间电弧烁亮区尺寸和形状的变化过程。在每一脉冲电流作用过程,如果脉冲时间足够,电弧烁亮区总是从细线状经过束状、钟状变化到圆锥状,以后就不再发生变化。我们将此变化过程的延时称为电弧形态的动态时间($t_{\text{动态}}$)。不同的目视电弧形态都是由 $t_{\text{动态}}$ 与脉冲(脉冲时间)的相互关系所决定的。本文试验了脉冲电流幅值、脉冲电流波形、保护气体种类等因素对 $t_{\text{动态}}$ 的影响,得到了控制目视电弧形态的途径;讨论了不同电弧形态的工艺性能的特点及其原因。掌握这种目视电弧形态的可控性规律可以进一步扩大熔化极脉冲焊的应用范围,可以更成功地进行薄板焊接、单面焊反面自由成形、窄间隙焊接、全位置焊接等工作。

一、前 言

脉冲电流熔化极气电焊具有控制熔滴过渡和热输入量的特殊能力已是众所周知^[1,2]。我们通过试验发现,这种焊接方法除了上述控制能力之外,还具有控制电弧形态的能力,这是脉冲电流熔化极气电焊的又一重要特点。

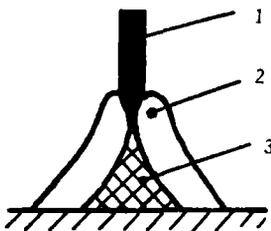
在熔化极气电焊过程中,电弧实质上既是一个热源(加热、熔化焊丝和母材)又是一个力源(过渡熔滴、压迫并搅拌熔池),对焊接质量有直接的影响。实际生产中,为了满足不同的焊接要求,常常需要对电弧的热作用和电弧力进行调节和控制,虽然,人们已掌握了一些控制的规律,但是实现这种控制仍受到很大的限制。我们的试验证明,利用脉冲电流熔化极气电焊的电弧形态的可控性,可以为控制电弧的热作用和电弧力提供

更大的自由,而且可以在不改变电弧平均能量的条件下较容易地对电弧的热作用范围和电弧对熔池的加压作用进行调节与控制。本文目的是提出脉冲焊时电弧形态可控性的实验结果,介绍控制电弧形态的途径和规律,提出了在实际生产中利用这种电弧形态可控性的可能性。

二、脉冲电流熔化极气电焊的不同电弧形态

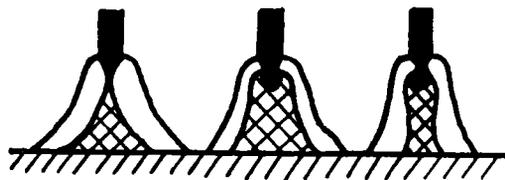
连续电流熔化极气电焊时,射流过渡的电弧形态基本上是不变的,例如利用钢焊丝进行直流反极性焊接时,其射流过渡的电弧形态基本上如图 1 所示。弧芯的烁亮区(以下简称电弧形态)总是呈圆锥状。这种电弧形态所决定的加热作用和对熔池作用力的特点也基本上是不变的,因此只要是射流过渡也就没有多大的调节与控制的余地了。

但是利用脉冲电流进行脉冲-射流过渡的焊接时,平均电流与电压不变,调节其他参数却可得到三种不同的目视电弧形态,如图 2 所示。不同的目视电弧形态具有不同的工艺特点。利用钢焊丝焊接时,三种目视电弧形态皆可得到,而利用铝焊丝焊接时,只有 b、c 两种得不到圆锥形电弧形态。调节有关参数,用肉眼通过面罩即可观察到电弧从一种形态往另一种形态的变化,但是渐变而不是突变。同时伴随不同目视电弧形态所发出的声音也不同,圆锥形和钟形烁亮区的电弧发出的声音较柔和,而束状烁亮区电弧发出的声音较剧烈。



1—焊丝 2—外层暗区
3—烁亮区

图 1 钢焊丝射流过渡的电弧形态



a) 圆锥烁亮区 b) 钟形烁亮区 c) 束状烁亮区

图 2 脉冲电流熔化极气电焊时的不同电弧形态

二、不同目视电弧形态的形成过程

为了探索不同电弧形态是怎样形成的,受哪些因素影响,我们利用高速摄影技术拍摄了脉冲电流熔化极气电焊的电弧燃烧及熔滴过渡过程。试验用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的 08Mn2Si 焊丝,保护气体用富氩混合气体,拍摄速度是 4000 幅/秒,背光用炭弧。图 3 是电弧燃烧及熔滴过渡过程的示意图。

通过高速摄影照片发现,在脉冲焊过程,电弧的瞬时形态有一个动态变化过程。在稳定的脉冲-射流过渡的条件下,如果脉冲电流时间足够时,在每次脉冲电流作用期间,电弧烁亮区都有一个从束状到圆锥状的动态变化过程。如图 3 所示,在脉冲电流作

用之前的维弧电流作用阶段，电弧没有烁亮区。当脉冲电流开始作用时，焊丝与工件之间首先产生细束状烁亮区，随着脉冲电流作用时间的延长，细束状烁亮区逐渐变粗，继而扩展为圆锥状，如果脉冲电流继续作用，电弧烁亮区的形态基本不再发生变化，保持稳定的圆锥状。脉冲电流结束时，电弧烁亮区也随之消失。每次脉冲都重复这一过程。从这个过程可以看到，每次脉冲电流作用过程，电弧烁亮区总有一个从细束状变化到圆锥状的动态过程，当条件一定时，这个动态变化过程的延时($t_{\text{动态}}$)也是一定的，基本不受脉冲延时长短的影响。如果脉冲电流延时 $t_{\text{脉冲}}$ 较长，而 $t_{\text{动态}}$ 较短， $t_{\text{脉冲}} \gg t_{\text{动态}}$ ，则在每次脉冲电流作用期间出现稳定圆锥状烁亮区的时间相对加长，则肉眼观察到的电弧形态具有圆锥状的特点。而当 $t_{\text{脉冲}} \leq t_{\text{动态}}$ 时，电弧来不及完成此动态变化过程，在每次脉冲电流作用期间，电弧烁亮区只发展到粗束状就被强迫停止，稳定的圆锥状烁亮区没有出现的机会，则肉眼观察到的电弧形态具有束状的特点。由此可知电弧的不同目视形态实质上是由 $t_{\text{动态}}$ 和 $t_{\text{脉冲}}$ 的相对关系决定的。通过有关参数的调节改变 $t_{\text{动态}}$ 和 $t_{\text{脉冲}}$ 的相对关系，则可实现对目视电弧形态的控制。

圆锥状电弧形态的熔滴过渡特点是：熔滴都是从焊丝端部产生，将焊丝熔化金属拉出一个较长的细颈，焊丝端部呈铅笔尖形状，第一个较大的熔滴自细颈端部脱离后，继续在细尖端头形成较小熔滴往熔池过渡（图3），过渡同样稳定有力。

束状电弧形态的熔滴过渡特点是：焊丝端部熔化金属拉出的缩颈较短，熔滴一般都是在烁亮区消失时或消失后才脱离焊丝端部而过渡。

钟状目视电弧形态是束状与圆锥状的中间状态，其熔滴过渡的特点是：熔滴缩颈较短较粗，电弧烁亮区虽有足够的时间扩展，但由于弧根较粗形成不了圆锥状电弧，而呈现出钟状。熔滴也是在烁亮区消失时或消失后脱离焊丝端部而过渡。

钟状电弧形态的加热特点与圆锥状电弧相近，而对熔池作用力的特点则介于束状电弧与圆锥状电弧之间。

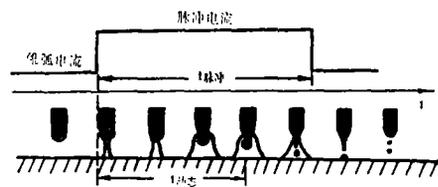


图3 在脉冲电流时间内电弧烁亮区的变化情况示意图

三、影响产生不同电弧形态的几个因素

前面曾指出，不同目视电弧形态实质上取决于 $t_{\text{动态}}$ 与 $t_{\text{脉冲}}$ 的相对关系，因此所有影响 $t_{\text{动态}}$ 和 $t_{\text{脉冲}}$ 的因素均将影响不同目视电弧形态的产生。 $t_{\text{脉冲}}$ 是脉冲参数所决定的，它主要与脉冲频率和脉冲宽度比有关，可以通过这两个参数进行调节，而 $t_{\text{动态}}$ 的影响因素可能较多。我们进行了脉冲电流幅值、脉冲电流波形和保护气体对 $t_{\text{动态}}$ 影响的试验，获得了以下的结果：

1. 脉冲电流幅值

当其他条件固定时，脉冲电流幅值对 $t_{\text{动态}}$ 有显著的影响。脉冲电流幅值增大， $t_{\text{动态}}$ 减小，容易形成圆锥状目视电弧烁亮区。反之，减小脉冲电流幅值，则易获得束状目视电弧

烁亮区。我们的一组试验结果如图 4 所示。当其他因素固定时，由于脉冲电流与平均电流成正比，故平均电流增加时也更容易得到圆锥状目视电弧烁亮区，反之容易得到束状目视烁亮区。

2. 脉冲电流波形

脉冲电流波形对 $t_{动态}$ 的影响也是一个很有趣的问题。我们采用图 5 所示四种不同的脉冲电流波形进行了试验，结果示于表 1。通过试验发现，脉冲电流波形的前沿对 $t_{动态}$ 有一定的影响。电流波形前沿越陡， $t_{动态}$ 越短，容易得到圆锥状目视电弧烁亮区，而电流波形前沿缓升时，易得到束状目视电弧烁亮区。试验表明，电流波形的不同只能

影响 $t_{动态}$ 的长短，而不影响瞬时电弧烁亮区动态变化过程的有无。不管电流波形的的前沿怎样陡，瞬时电弧烁亮区总有一个产生、扩展、形成稳定的锥状（或钟状）的动态过程。

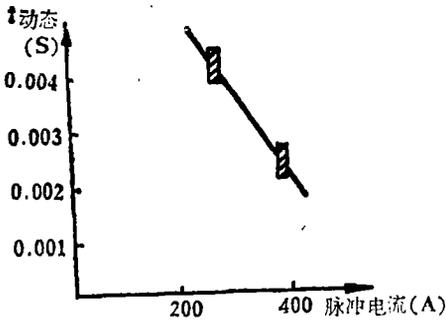


图 4 脉冲电流对 $t_{动态}$ 的影响

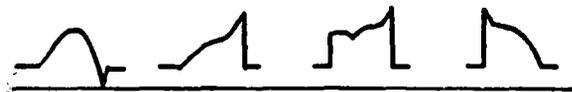


图 5 试验采用的不同脉冲电流波形

3. 保护气体

我们采用三种保护气体试验了不同保护气体对 $t_{动态}$ 的影响。他们是：纯 Ar，Ar + 2% O₂ 和 Ar + 20% CO₂，试验结果示于表 2。由表 2 可见，不同的保护气体， $t_{动态}$ 亦不同。如果其他条件不变，纯 Ar 保护有助于获得束状电弧烁亮区，而 Ar + 20% CO₂ 保护有助于获得圆锥状电弧烁亮区，而 Ar + 2% O₂ 保护气体的影响介于纯 Ar 和 Ar + 20% CO₂ 之间。

表 1 不同电流波形对 $t_{动态}$ 的影响

电 流 波 形	$t_{动态}$ s	工 艺 参 数
	0.0065	平均电流150A 平均电压22V 维弧电流50A 脉冲频率50Hz 脉冲宽度比： 正弦波为43% 其他皆为35% 保护气体Ar+2%O ₂ 焊丝φ1.2,08Mn2Si
	0.005	
	0.0035	
	0.0035	

表 2 不同保护气体对 $t_{\text{动态}}$ 的影响

气 体 种 类	$t_{\text{动态}} \text{ s}$	工 艺 参 数
纯Ar	0.0055	平均电流150A 平均电压22V 维弧电流50A 脉冲频率50Hz 脉冲宽度比35% 电流波形是缓升的 焊丝 $\phi 1.2, 08\text{Mn2Si}$
Ar+2%O ₂	0.004	
Ar+20% CO ₂	0.0025	

四、不同电弧形态的工艺特点

脉冲电流熔化极气电焊时，不同的电弧形态具有显著不同的工艺特点，主要表现在对工件的加热范围和对熔池的加压特点的不同。

电弧烁亮区实质上是由金属蒸汽等离子体构成，该处的密度较大，温度较高。射流过渡时，电弧热能的很大一部分是通过这个烁亮区传递到工件，同时电弧压力也是主要通过烁亮区施加到熔池，因此不同的目视电弧形态必然会有不同的工艺特点。

1. 不同目视电弧形态的不同加热特点

在电弧能量相同的条件下，由于圆锥状烁亮区或钟状烁亮区与工件的接触面较大，而束状烁亮区与工件的接触面较小，故前者在工件上形成的熔化区及热影响区应较宽，而后者应较窄（图6）。我们曾分别用钢和铝焊丝进行了堆焊试验，证明了这点。图7是用铝焊丝进行试验的结果。其他条件不变时，随着脉冲频率的提高，脉冲电流延时缩短，电弧烁亮区由钟状向束状变化，堆焊焊缝宽度也随之变窄。

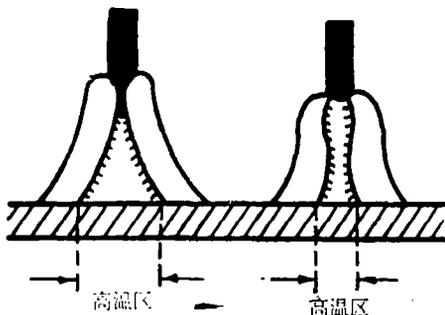
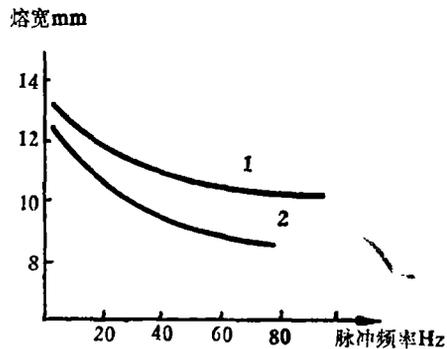


图 6 不同电弧形态的加热特点

图 7 铝焊丝堆焊时熔宽与频率的关系
1—脉宽比50% 2—脉宽比30%

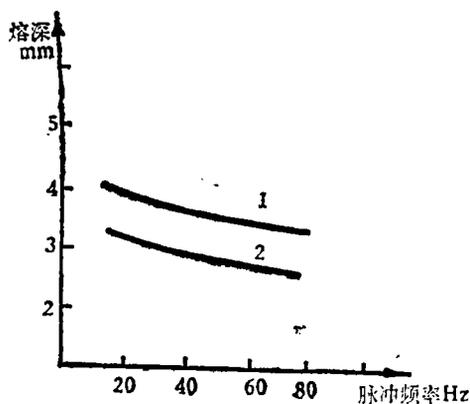
2. 不同电弧形态对熔池加压的不同特点

一般概念认为，当电弧能量相同时，电弧越收缩集中，电弧对熔池的压力越大；电弧越散开，电弧对熔池的压力越小。脉冲电流熔化极气电焊时的束状目视电弧形态看上

去好象比圆锥状电弧形态更收缩了，如果按一般概念推论似乎束状电弧应比圆锥状电弧产生较大的电弧压力，但事实上束状电弧对熔池的压力反而比圆锥状电弧小，与一般概念有矛盾。

根据前文所述，我们已经知道脉冲电流作用下形成的束状电弧，本质上并不是由于圆锥状电弧收缩所致，而是由于电弧亮点区没有来得及扩展，亮点区变化的动态过程没有完成，稳定的圆锥状亮点区没来得及形成的结果。这种束状电弧既然实质上不是收缩，当然也就不会有一般收缩电弧所具有的增大电弧压力的特点。

我们曾用钢和铝焊丝进行了堆焊试验，其他条件不变，当逐渐提高脉冲频率使电弧由圆锥状（或钟状）向束状变化时，熔深反而减小，其一组试验结果示于图 8。这说明电弧由圆锥状向束状变化时，电弧压力反而减小。同时，不同目视电弧形态所得到的母材熔化轮廓也不同（图 9）。这是因为束状电弧时，熔池所承受的压力主要是电弧等离子体电磁收缩效应所造成的“静压力”，此压力在熔池表面较均匀地分布。另外，由于束状电弧高温等离子体形状是圆柱体，不具备产生高速等离子流的条件，故母材熔化线较圆滑，而目视圆锥状电弧时，稳定圆锥状亮点区存在的时间较长，对于不等直径的圆锥状



1—脉宽比50% 2—脉宽比30%
图 8 铝焊丝堆焊时熔深与频率的关系

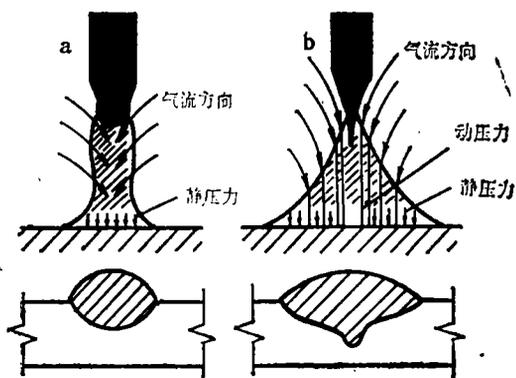


图 9 不同电弧形态对熔池压力的示意图及母材的熔化情况

高温等离子体，电磁收缩效应除了产生上述对熔池的“静压力”外，尚产生较大的轴向推力，具备产生高速等离子流的条件，此高速等离子流将沿焊丝中心轴方向冲向熔池。除上述“静压力”之外，又增加一个“动压力”。结果造成熔池上的压力分布不均匀，并且在焊丝中心轴的方向产生更大的合成压力，故此处的熔池深度显著增大，形成图 9b所示熔化轮廓。

由于不同电弧形态具有不同的加热和加压特点，因此控制目视电弧形态可以改变电弧的工艺性能，以满足不同的焊接要求。

五、电弧形态控制的实际意义

利用脉冲电流熔化极气电焊的目视电弧形态的可控性，可以控制电弧的工艺性能，

在生产中发挥其特殊作用。通过试验我们初步体会到,这种电弧形态的可控性在以下几方面可以成功地发挥作用。

1. 由于圆锥状电弧加热范围较宽,可以改善焊缝成形,降低加强高,使焊缝平滑,焊缝金属与母材润湿良好。用束状电弧进行无横向摆动的焊接时,焊缝较窄较高,焊丝金属与母材润湿较差。

2. 薄板焊接时,利用圆锥状电弧由于焊丝中心轴方向的压力很大,容易焊穿,很难得到质量稳定的焊缝。束状电弧由于电弧压力均匀而且较弱,故焊接薄板不易焊穿,容易操作,质量稳定。

3. 单面焊反面自由成形的焊接,要求工件既熔透又不焊穿,圆锥状电弧由于加在熔池表面的压力很不均匀,一旦工件熔透则在焊丝中心轴方向形成较集中的动压力,将使熔池局部吹穿,不能形成理想的焊缝。如果减小电弧压力使熔池不被吹穿,则工件又不易熔透,不能得到稳定的反面成形。而采用束状电弧进行焊接时,可以较容易地得到单面焊反面自由成形的接头,而且质量较稳定。我们曾用这种控制电弧形态的办法,成功地焊接了2~4mm铝板的单面焊反面自由成形接头。

4. 束状电弧的挺度较好,不易受外界因素(磁偏吹、气流、邻近工件等)的干扰,对角度较小的坡口内焊接或窄间隙焊接非常有利。而圆锥状或钟状电弧易受外界因素干扰而造成电弧过程不稳定,影响焊接质量。

5. 在焊丝横向摆动进行全位置焊接时,由于圆锥状电弧的加热范围大,易形成熔池局部的过热区(图10 a),过热的熔化金属容易流堕而破坏焊缝成形。而采用束状电弧时可以避免产生熔池局部过热区,使熔池金属容易保持在原来的位置上获得较理想的焊缝成形(图10b)。

以上是我们在接触过的几个问题上,领会到的电弧形态可控性的一些实际意义。随着脉冲电流气电焊的推广使用,可能找到电弧形态可控性的更广泛的用途。

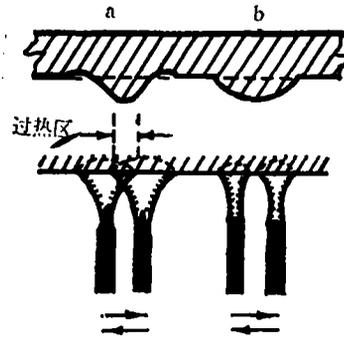


图10 不同电弧形态仰焊时焊丝横向摆动的焊缝成形

六、结 语

1. 电弧形态的可控性是脉冲电流熔化极气电焊的又一重要特点。利用这个特点,可以使这种工艺方法在实际生产中更充分地发挥其特殊作用。

2. 不同的电弧形态是由 $t_{\text{脉冲}}$ 和 $t_{\text{动态}}$ 的相对关系决定的。可以通过调节 $t_{\text{脉冲}}$ 和 $t_{\text{动态}}$ 来控制电弧形态。 $t_{\text{脉冲}}$ 可以通过脉冲频率和脉冲宽度比来调节。我们试验了脉冲电流幅值、脉冲电流波形及几种保护气体对 $t_{\text{动态}}$ 的影响,并得到了这些因素对 $t_{\text{动态}}$ 的影响趋势。

3. 不同目视电弧形态具有不同的工艺特点,通过电弧形态的控制可以满足不同的

焊接要求。电弧形态所产生的不同工艺特点不能用电弧收缩强弱的一般概念来解释。

4. 电弧形态的控制已在实际生产中的一些方面发挥了有效的作用, 应该进一步发挥它的作用。

(一九七九年十月二十日收到)

参 考 文 献

- (1) Needham, T.C., Institute of Welding Symposium physics of the Welding Arc, (1962).
- (2) Патон, Б.Е. и др., Автоматическая сварка, (1964) №1.

STUDY ON THE PHENOMENA OF THE CONTROLLABILITY
OF ARC APPEARANCE IN THE CONSUMABLE ELECTRODE
PULSE CURRENT ARC WELDING PROCESS
AND ITS PRACTICAL APPLICATION

Wang Chilung, Yin Shuyian, Qian Yiyu
(*Harbin Institute of Technology*)

Abstract

It has been well-known that the metal transfer and the heat input can be controlled in consumable electrode pulse current arc welding process. But we have discovered further another controllable characteristic of this process during our experiments. In the case of pulse-spray transfer even though the average arc current and voltage are kept constant, the visible arc appearance can be varied by altering the other operating variables. Keeping the average arc energy unchanged, three different typical visible arc appearances, i.e., the bunch type, bell type and cone type, can be obtained. Each type of these arc appearances offers its special thermal and mechanical features, and so brings about distinct technological characteristics. During the pulse current cycle, the varied process of the size and the shape of the luminous region of the arc has been observed by the high-speed photography. The luminous region of the arc in the duration of the pulse current period grows gradually from a thin linear shape to a bunch shape and finally to a cone shape and remains so continuously if the pulse current time is enough. We call the time necessary for this growing process the dynamic time of the luminous region of the pulse current arc (t_d). The resulting visible appearance of the pulse current arc depends on the relationship between t_d and t_p (pulse current time). The effects of the pulse current magnitude, the pulse current wave form and the shielded gas composition on the t_d have been examined. The dissimilarity of the technological features of these different visible arc appearances as well as its reasons have also been discussed. The controllability of the arc appearances is of help to extend the application field of the consumable electrode shielded gas arc welding process. It can be utilized successfully in several practical applications, such as in the welding of thin plates, one-side welding without backings, narrow gap welding process, positional welding processes and so on.