

第5卷 第1期
1984年3月

焊接学报
HANJI XUEBAO

Vol. 5 No. 1
March 1984

半周脉动送丝 CO₂ 气体保护焊的特点

曹道钧 徐继达 姬永贵 王忻涛 杨广华 刘明行

(郑州机械研究所)

摘要

本文对半周脉动送丝 CO₂ 气体保护焊接过程进行了研究。叙述了在该条件下金属熔滴过渡的特点。文中提出了焊接过程稳定的条件和焊接规范参数选取的原则。

一、序言

CO₂ 气体保护焊时，通常认为只有在均匀连续送丝的条件下，才能获得稳定的焊接过程和良好的工艺效果。但是，随着脉动技术在焊接领域中的应用，对这一问题有了新的认识。

脉动送丝是一种新型的送丝方式。本文是对脉动送丝 CO₂ 焊接过程的特点以及稳定焊接过程的条件等进行研究的结果。

试验采用新研制的电机驱动式“三钢球”脉动送丝机。除工艺试验外，为排除不稳定因素的干扰，未接入导丝软管。试验采用抽头式电源，焊丝直径为 0.8~1.2mm。本文着重讨论 φ1.2mm 焊丝的焊接过程。

二、送丝机工作原理及送丝特点

1. 送丝机工作原理

送丝机由电机、偏心轮及“三钢球”擒纵机构等组成。电机转动时，带动偏心轮使擒纵机构作往复运动。前半周时，擒纵机构夹持焊丝向前送进，后半周时，擒纵机构与焊丝脱开，焊丝停送。故电机每转动一圈，便完成一次脉动送丝过程。

2. 送丝特点

根据送丝机的结构，可以推导出计算擒纵机构运动规律的理论公式：

$$s = e(1 - \cos \omega t) \quad (1)$$

$$v = \frac{ds}{dt} = e\omega \sin \omega t \quad (2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = e\omega^2 \cos \omega t \quad (3)$$

式中 s —瞬时位移量； v —瞬时位移速度； a —瞬时加速度； e —偏心轮的偏心距； ω —角速度； t —时间。

根据上式可知，理论送丝速度曲线是一条正弦曲线，最大送丝速度在 $\omega t = \frac{\pi}{2}$ 处。在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 区间焊丝处于正加速运动状态， $\frac{\pi}{2} \sim \pi$ 区间焊丝处于减加速运动状态。焊丝的最大理论位移量 $s = 2e$ ，即送丝步距 A 。

由此可见，试验用的脉动送丝机具有以下的送丝特点：

- (1) 以电机的转速为送丝频率，位移量为步距，周期性地定量送丝；
- (2) 半周送丝半周停送；
- (3) 在送丝的半周内，前 $\frac{1}{4}$ 周焊丝作加速运动，后 $\frac{1}{4}$ 周焊丝作减速运动；
- (4) 具有较大的瞬时送丝速度。

实测的送丝速度曲线和理论计算值之间存在一些差别。这是因为擒纵机构为夹紧焊丝需要在焊丝表面产生压痕位移过程，即位移量 s_b 和时间 t_b ，以及导丝系统的阻力变化引起的送丝速度畸变所致。在一个送丝周期中实际的送丝时间为 t_a ，停送时间为 $t_a + t_b$ ，停送时间略超过半周。

借助高速摄影照片测定的焊接过程焊丝的运动规律见图 1。

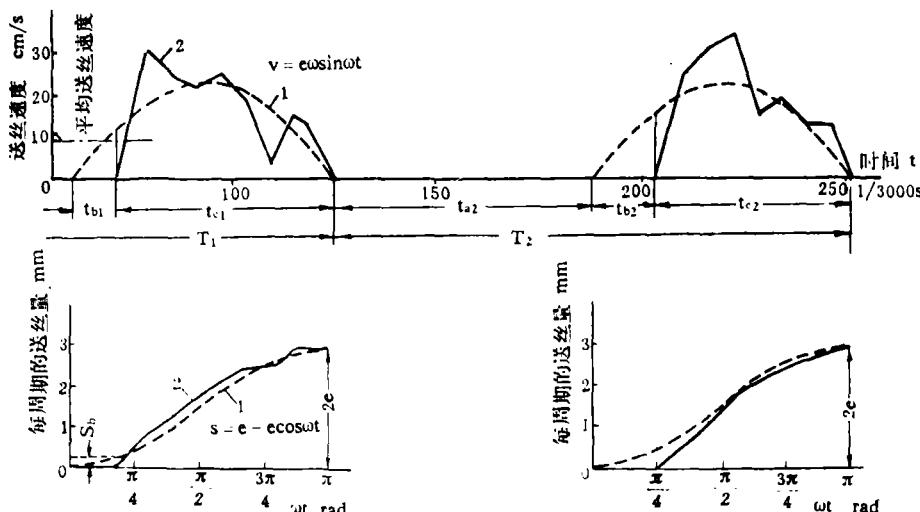


图 1 脉动送丝机的送丝曲线

1. 理论计算的送丝曲线
偏心距 $e = 1.5\text{mm}$

2. 实测的送丝曲线
电机转速 $n = 1440\text{转/分}$

三、脉动送丝CO₂焊接过程的特点

1. 脉动送丝特征

和等速送丝一样，脉动送丝CO₂焊接的整个过程是由无数的明弧—短路—明弧……交替进行的循环过程所组成。

从示波器记录的焊接电流和电弧电压波形图（图2）可以看到，在选择合适的焊接规范情况下，这些波形比较规则，各周期的参数具有很好的再现性。表1列出的数据表明，各周期中参数的波动很小，说明焊接过程稳定而有规律。因此，可以认为脉动送丝用于CO₂焊接，可以获得连续而稳定的焊接过程。

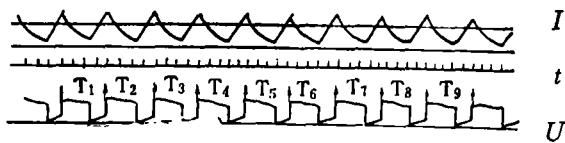


图2 脉动送丝CO₂焊接的电流、电压波形

表1 各周期的参数变化

周期T序号	明弧时间 s	短路时间 s	周期时间 s	短路电流峰值 A
1	0.0279	0.0157	0.0436	312
2	0.0301	0.0169	0.0470	320
3	0.0281	0.0148	0.0429	304
4	0.0302	0.0160	0.0462	296
5	0.0310	0.0136	0.0446	272
6	0.0285	0.0160	0.0445	304
7	0.0301	0.0153	0.0454	304
8	0.0282	0.0170	0.0452	304
9	0.0299	0.0148	0.0447	296

试验条件：电弧电压17V，焊接电流190A

图3表示脉动送丝焊接时的电流和电压波形，以及对应的送丝速度曲线和焊接过程图象。

总的来看，脉动送丝和等速送丝的焊接过程和电流、电压波形大体上是相似的。但是，也存在一些差别，如在短路结束电弧重新引燃后，电弧电压波形有一段略微上升的过程（与焊丝停送时回烧有关），每个熔滴过渡周期的时间要比等速送丝焊接时长等。

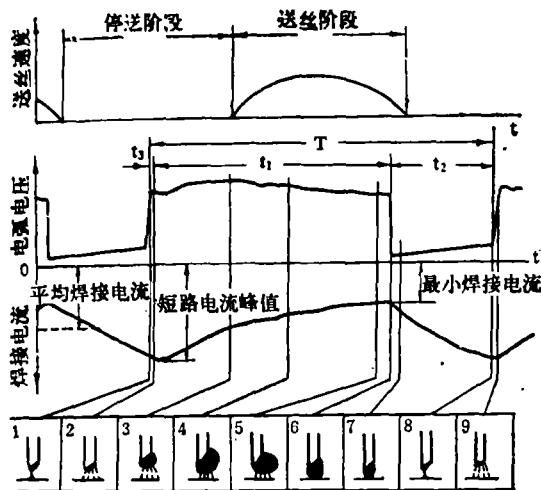


图3 一个周期内，电弧电压、焊接电流波形及其相对应的送丝速度曲线和焊接过程图象

2. 脉动送丝焊接过程的实质

大量的工艺试验和焊接过程记录的电流、电压波形图证明，在焊接规范参数选择合理的条件下，半周脉动送丝短路过渡焊接过程是一个十分有规律的以“明弧—短路”为一个周期的不断重复的连续过程。送丝电机每转动一圈，即完成一个“明弧—短路”周期，也就是说，送丝脉动频率和熔滴短路过渡频率是完全同步的。图4是示波器记录的送丝电机转速讯号和电流、电压波形，证实了这种同步过程。试验结果也同时证明，一旦送丝脉动频率和熔滴短路过渡频率同步的规律被破坏，焊接过程便呈现出不稳定状态。此时，飞溅增大，成形变坏。

因此，可以把脉动送丝CO₂短路过渡焊接过程作如下的描述：即以周期性的定量送丝为前提，通过机械参数和电参数的匹配，使熔滴按照送丝脉动频率实现有规律的短路过渡。本文把它称之为“一步一个熔滴”。

3. 焊接过程特点

脉动送丝CO₂焊接过程的特点是和其送丝特点密切相关的。主要表现在如下几方面：

(1) 熔滴在焊丝回烧时基本形成

电弧引燃时，焊丝正处于停送阶段，焊丝开始回烧，并熔化了一个送丝步距的大部分，余下的小部分在送丝过程中熔化。

以高速摄影照片测量结果为例，当送丝步距为3mm时，回烧过程熔化的焊丝长度为2.52mm，占步距的 $\frac{5}{6}$ ，而焊丝送进时的熔化量仅为0.48mm。说明焊丝送进时，熔滴

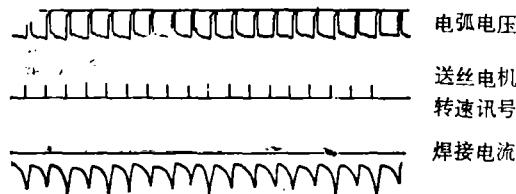


图4 半周脉动送丝CO₂焊接过程的电流—电压
—送丝脉动信号波形图

- 1—短路后期，液桥缩颈迅速变细并即将断裂。
- 2—液桥缩颈断裂后，电弧重新引燃。
- 3—焊丝处于停送阶段，焊丝回烧，熔滴逐渐形成。
- 4—焊丝加速送进，熔滴上抬并逐渐和熔池接近。
- 5—明弧期后期，焊丝以减速送进，熔滴下用。
- 6—熔滴与熔池短路，电弧熄灭。
- 7—熔滴向熔池过渡，焊丝继续减速送进并接近停送。
- 8、9—重复1、2之过程，下一周期开始。

尺寸的增长是很小的。

从开始送丝至熔滴和熔池刚刚短路，送丝长度约为2~2.7mm，短路过程送丝长度为0.3~0.96mm。因熔滴直径约为1.85mm，故熔滴短路过渡后，焊丝端部距熔池表面约0.9~1.55mm。

但是，上述比例关系并不是一成不变的。改变电弧电压和电感量时，焊丝回烧量和送丝熔化量，以及明弧期送丝量和短路期送丝量之间的比例关系会发生改变。这种比例关系的变化会给焊接过程的稳定性带来影响。

(2) 短路过渡频率低

在焊接过程稳定的前提下，脉动送丝焊接的短路过渡频率比等速送丝低得多，仅为20~50Hz。对于φ1.2mm焊丝在选用最佳规范时，短路过渡频率一般在30Hz左右。

从理论上讲，半周脉动送丝焊接的短路过渡频率，可以在很宽的范围内任意变化。因为：

$$v = f \cdot A,$$

所以：

$$f = \frac{v}{A} \quad (4)$$

式中 v —平均送丝速度； f —短路过渡频率； A —送丝步距。

根据上式，只要改变平均送丝速度和步距，便可改变短路过渡频率。而实际选择规范参数时，被焊件厚度和焊丝直径确定后，焊接电流也已基本确定，即平均送丝速度已定。为了改变短路过渡频率，只能通过改变步距来实现。步距的选取并不是任意的，除了要考虑送丝稳定性外，还和焊丝直径及保证焊接过程稳定的规范参数（主要是电弧电压）有关。以φ1.2mm焊丝为例，步距的选取范围为1.7~3.5mm。当焊接电流为180A时，平均送丝速度为72mm/s，短路过渡频率为 $\frac{72}{3.5} \sim \frac{72}{1.7}$ ，即20~42Hz。

(3) 熔滴大而均匀

半周脉动送丝焊接时的平均送丝速度和等速送丝焊接时差不多，但因短路过渡频率较低，所以熔滴尺寸相应较大。又因熔滴尺寸受周期性定量送丝的限制，每个熔滴的尺寸近似等于一个步距的熔化量，故熔滴尺寸比较均匀。

(4) 熔滴具有惯性力

脉动送丝焊接时，熔滴除了受重力、电磁力、表面张力、金属蒸气压力和等离子流压力等力的作用外，还受到有助于克服阻力、促使熔滴由焊丝向熔池过渡的惯性力的作用。

焊丝在作加速运动时，对依附在其端面上的熔滴作功，使熔滴具有动能。焊丝作加速运动送进时，惯性力的方向指向焊丝上方，使熔滴上抬或被压扁（当熔滴的轴线和焊丝一致时），当焊丝作减速运动时，熔滴就会受到方向指向熔池的惯性力的作用，惯性力的计算公式：

$$F = ma$$

熔滴的质量 m 和减速度 a 越大，具有的惯性力也越大。由于半周脉动送丝焊接在开始送丝时，熔滴已基本形成，加上送丝速度很快，所以惯性力对熔滴的作用是不可忽视

的。图5(图版21)是在电弧熄灭的一瞬间高速摄影拍摄到的图象。熔滴此时的压扁和拉长完全可以认为主要是惯性力作用的结果(熔滴周围的小点,是为测定送丝速度而粘上去的铁粉)。

经粗略计算,试验所用的脉动送丝机产生的惯性力,还不能达到使熔滴甩离焊丝的程度。但惯性力的存在显然能增加熔滴与熔池接触的机会,对稳定焊接过程和扩大规范参数适应范围起到有益的作用。

4. “一步一个熔滴”有规律过渡的原因和条件

(1) 为实现熔滴有规律的过渡,送丝方式起着决定性的作用。周期性的定量送丝是使熔滴尺寸均匀,各周期参数变化小的基本条件。

(2) 每个周期内的送丝量和焊丝熔化量基本相等,是实现一步一个熔滴的必要条件,即需满足:

$$Q_M \approx Q_F \quad (5)$$

式中 Q_M —周期内的焊丝熔化量; Q_F —对应的同一周期的焊丝送进量。

不言而喻,任何焊接方法为了获得稳定的焊接过程都必须满足上述条件,但对于脉动送丝CO₂焊接来说,具有与众不同的含义。

等速送丝CO₂焊接时,送丝没有周期性的问题,周期时间是随机的。脉动送丝焊接时,一旦送丝脉动频率确定,周期时间也就随之而定。如果每个周期不能基本上满足公式(5)的要求,送丝频率和短路频率同步的稳定过程就被破坏。

式(5)左边的 Q_M 主要取决于焊接电流和电弧电压,式(5)右边的 Q_F 则取决于送丝步距,改变电弧电压,必须相应地改变送丝步距。所以等式两边的参数是相互制约的,要实现稳定的焊接过程,必须精心地选择焊接规范参数。

(3) 即使在精心选择焊接规范参数的条件下,由于网路电压波动、送丝速度变化及熔池翻动等因素将直接影响焊接过程的稳定性。

试验中发现,半周脉动送丝CO₂焊接时,除了具有一般的自身调节的补偿作用外,还具备和脉动送丝特点密切相关的补偿特性。这种补偿作用首先表现在相邻周期之间。

如果把送丝电机转动一周的时间,近似地视为一个“明弧—短路”过程的标准周期时间,根据表1的数据:

$$\text{平均标准周期时间} = \frac{\sum_{i=1}^9 T_i}{9} = 0.0449s$$

实际的焊接周期时间总是在平均标准周期时间的上下波动,并逐渐接近标准周期时间,焊接过程趋向稳定。当出现另一次不稳定因素时,又会重复这种补偿过程,见图6。

另一种补偿作用是送丝脉动周期对短路时间 t_2 的制约作用。在送丝脉动周期和

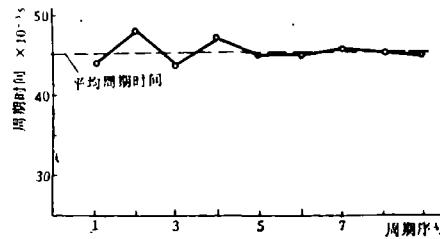


图6 自身调整作用使各周期时间趋向稳定的过程

“明弧一短路”周期完全一致的理想条件下：

$$\text{周期 } T = \frac{1}{n(\text{电机转速})} = t_{\text{明}} + t_{\text{短}}$$

在合理的规范参数范围内，即使改变电弧电压或电感量，使明弧时间发生变化，但因送丝周期的限制，将使短路时间发生相应的变化，最终使 $t_{\text{明}} + t_{\text{短}} \approx T$ 。

(4) 脉动送丝CO₂焊接对于不稳定因素具有较强的适应能力，也是使焊接过程趋于稳定的原因之一。例如当送丝电机发生变化时，由于脉动送丝的半周送丝、半周停送，以及定量送丝等特点依然不变，对“一步一个熔滴”的焊接过程不会产生实质性影响。又如网路电压波动时，对焊丝回烧量和送丝熔化量之间的比例带来影响。但只要每周期焊丝熔化量基本上保持在一个步距左右，仍然能保证熔滴尺寸均匀，对焊接过程也不会有太大的影响。

四、焊接规范参数选取的原则

CO₂焊接时的规范参数较多，现就对焊接过程特点产生显著影响的几项参数，在试验的基础上重点进行讨论：

1. 电弧电压

等速送丝时，电弧电压是一项敏感参数。在对应一定的焊接电流时，要求波动范围不超过1~2V。

半周脉动送丝时，电弧电压同样也是一项极重要的规范参数，不同之处在于它可以在一个较宽的范围内变动。电弧电压在一定范围内波动时，主要是影响焊丝停送时的回烧量，只要熔滴的最终尺寸变化不大，焊接过程依然稳定。当电弧电压的选取超出合适范围时，“一步一个熔滴”的规律就被破坏。例如电弧电压太高时，使焊丝回烧量接近甚至超过一个步距，则送丝的半周送进的一个步距量就不足以保证熔滴和熔池充分接触，此时焊丝脉动送丝一次，熔滴就可能不发生短路过渡，出现“丢步”现象，见图7（图版22）。

反之，如果电弧电压过低，焊丝回烧量太少，一个步距余下的焊丝在送丝过程来不及熔化，造成焊丝插入熔池的现象。

因此，电弧电压的选取从焊接过程稳定性的角度考虑，必须和步距量、焊丝回烧量以及送丝熔化量之间的比例关系相适应。一般步距较大时，选用的电弧电压也应高些。

电弧电压的选取还应兼顾焊缝成形和合金元素烧损等其它因素。

2. 步 距

送丝步距是脉动送丝焊接时特有的参数，也是对焊接过程影响最大的参数之一。

$$\text{焊接电流} \propto \bar{v} = A \cdot F$$

由式可知，焊接电流的调整，主要靠选择步距和送丝脉动频率来实现。理论上对于已选定的某一焊接电流值，可以有无数组A和F的搭配，但因步距A的选择因受下列因素

的限制，只能在一适当的范围内变动。

(1) 电弧电压值在某种程度上可视为焊丝回烧量的衡量尺度（只不过焊丝回烧到最高点时的瞬时电弧电压值比平均值略高），因此送丝步距还必须和电弧电压相适应。焊接电流和电弧电压的乘积代表着电弧输入线能量。为了满足式(5)，步距的选择既受焊接电流，又受电弧电压的牵制。

(2) 步距选取的另一个原则是应该考虑熔滴过渡的特点和焊接效果。当步距偏小时，一个步距焊丝的熔化量形成的熔滴太小，不能具备短路过渡条件。反之，当步距较大时，配合较高的电弧电压虽然也可获得有规律的过渡过程。但此时熔滴直径较大，相对来说焊缝成形较差，飞溅也显著增加。

(3) 步距的选取还和焊丝直径有关，一般焊丝直径较粗时，步距相对应选大些。

根据试验结果，步距选取的原则示于图8。

3. 电感量

脉动送丝焊接时，因熔滴尺寸比较均匀，电感量的选取可以做到和每一个熔滴基本上相适应。

脉动送丝焊接时熔滴尺寸大，短路过渡频率低，必须采用较大的电感量。现以图9予以说明：假设半周脉动送丝的短路过渡频率比等速送丝低一倍，则周期时间就要长一倍。如果电感量不变，短路电流仍按原来的斜率上升，峰值电流 I'_{max} 势必比原先的 I_{max} 要高出许多。为将峰值电流仍限制在 I_{max} 的水准，就必须增大电感量，使电感量按图中曲线3的斜率上升。根据测定，此时的静态电感量为1.45mH，约为等速送丝焊接电感量的2~3倍。

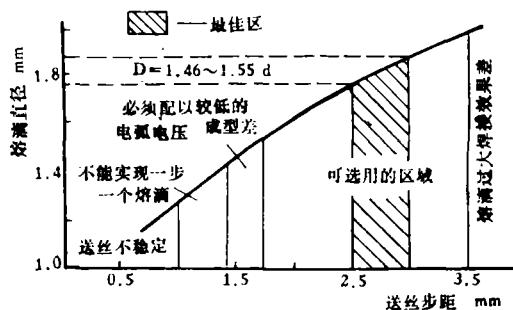


图8 步距的选取原则和范围（焊丝直径1.2mm）

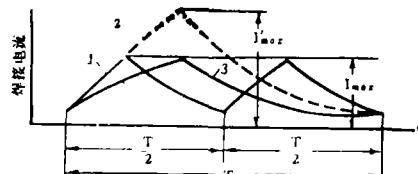


图9 电感量的选取和短路过渡频率的关系

- 1—等速送丝焊接的电流波形
- 2—脉动送丝焊接的电流波形 ($\frac{di}{dt}$ 同1)
- 3—脉动送丝增加电感量后的电流波形

五、结 论

1. 半周脉动送丝用于CO₂短路过渡焊接，可以获得连续而稳定的焊接过程。焊接过程各周期的参数波动小，具有很好的再现性。

2. 脉动送丝CO₂焊接是以周期性定量送丝为前提，通过机械参数和电参数的匹配，实现熔滴短路过渡频率和送丝脉动频率同步，即“一步一个熔滴”。

3. 脉动送丝CO₂焊接过程的相邻周期时间之间以及周期内部的明弧时间和短路时间之间具有自身调整作用，使焊接过程趋于稳定。

4. 脉动送丝CO₂焊接具有短路过渡频率低、熔滴大而均匀，以及熔滴具有惯性力等特点。

5. 送丝步距是脉动送丝CO₂焊的特有参数，它的选择必须和一定的电弧电压相适应，并要满足 $Q_M \approx Q_F$ 。

回路电感量要比等速送丝大2~3倍。

(1982年2月27日收到)

CHARACTERISTICS OF CO₂ SHIELDED ARC WELDING PROCESS WITH SEMIPERIOD PULSE WIRE FEED

Cao Daojun, Xu Jida, Ji Yonggui,
Wang Xintao, Yang Guanghua, Liu Minghang

(Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering)

Abstract

A CO₂ shielded arc welding process with semiperiod pulse wire feed had been studied. The paper states the characteristics of metal transfer in this particular case and presents the conditions of welding process stabilization as a guide to selecting welding parameters.