

## 脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱信息的研究

李俊岳, 杨立军, 胡胜钢, 李 桓, 柳 刚

(天津大学材料学院, 天津市 300072)

**[摘要]** 采用焊接电弧光谱检测装置, 对脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱信息进行了研究, 结果表明, 电弧光谱信息可以很好地反映脉冲 MIG 焊的熔滴过渡; 发现了多种熔滴过渡的光谱信息模式, 这些模式可反映 1 峰 0 基、1 峰 1 基等各种形式的熔滴过渡, 特别是可以对脉冲峰值期间的多滴喷射过渡作出清晰的反映; 信号波形的脉动幅值大, 脉宽较宽, 抗干扰能力强, 容易识别, 信号品质优越。这些结果为脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱实时控制奠定了良好基础, 为脉冲 MIG 焊的控制开辟了一条新途径。

**[关键词]** 电弧光谱信息; 脉冲 MIG 焊; 熔滴过渡; 过渡模式

脉冲 MIG 焊是一种工业上广泛应用的先进焊接工艺。与连续 MIG 焊相比, 其重要特征是焊接电流和熔滴过渡是脉动可控的。这一特征使它具有宽广的电流调节范围, 可控的热输入, 改善焊接接头性能, 焊缝成形好, 焊接质量高, 工艺适应性宽等优点。它的应用范围已越来越广, 特别是在焊接热敏感性材料、全位置、窄间隙、单面焊双面成形等方面的应用更引人注目。但是, 目前脉冲 MIG 焊自动控制的传感信号大都是电信号, 存在着不能真实反映熔滴过渡的物理过程问题<sup>[1]</sup>, 对熔滴过渡过程也就不能实行准确的控制。然而, 熔化极气体保护焊是通过熔滴过渡实现焊接的, 熔滴过渡控制的好坏直接影响到焊接过程的稳定, 焊缝的成形, 焊接冶金, 飞溅多少等等。随着科技的发展, 许多尖端产品、新材料不断涌现, 对焊接质量的要求越来越高。因此, 近年来出现了一种新的控制信号——弧光信号<sup>[2]</sup>, 以改进对熔滴过渡的控制。电弧光是各色光混合在一起的多维信息, 它在特定场合可以反映熔滴过渡过程, 但信号强度、信号品质、工艺适应性等方面都受到较大限制<sup>[1,2]</sup>。因此, 亟待寻求新的控制信号。

根据电弧等离子体光谱产生的物理机制, 电弧光谱信息能真实反映电弧等离子体的物理过程<sup>[1,3,4]</sup>。利用光谱技术可对弧光信号进行降维和选频, 从而分立出品质优越的并能反映熔滴过渡过程的光谱信息。与现有的其他电弧信息传感方法相比, 光谱信息技术具有信息丰富、灵敏度高、选择性好、响应速度快、实时性好、抗干扰能力强等突出优点。目前, 对 TIG 焊、连续 MIG 焊、CO<sub>2</sub> 焊光谱信息的研究已有报道<sup>[1,3,5,6]</sup>, 但脉冲 MIG 焊的光谱信息仍处于空白。因此, 我们开展了脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱信息的研究, 寻找有关的光谱信息, 为下一步脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱实时控制提供基础, 为脉冲 MIG 焊的控制开辟一条新途径。同时可为电弧光谱信息的实际应用起到良好的推动作用。

### 1 焊接熔滴过渡光谱检测装置

根据焊接电弧等离子体的光谱辐射理论, 要进行脉冲 MIG 焊的熔滴过渡光谱信息的实验研究, 必须要一套功能完善的传感系统的支持。图 1 为自行研究配置的脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱检测系统

**[收稿日期]** 2000-03-03; **修回日期** 2000-05-12

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目 (59575059)

**[作者简介]** 李俊岳 (1932-), 男, 广东兴宁市人, 天津大学材料学院教授, 博士生导师

的结构框图。它由四个功能模块组成，即光学成像模块、光栅色散模块、光电倍增模块和模数转换模

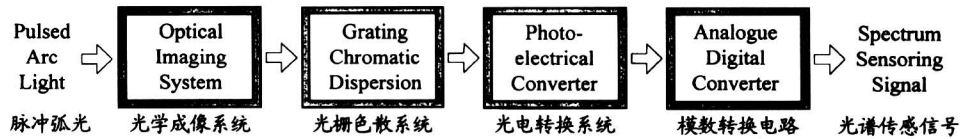


图1 脉冲MIG焊熔滴过渡光谱传感系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of droplet transfer spectrum sensing system

待测脉冲电弧光首先经光学成像系统的聚焦成像后，进入光栅光谱仪的色散系统，分离成一根根分立的光谱谱线。根据所选择的最能反映熔滴过渡规律的光谱特征谱线，经由光电转换器获得响应速度、幅度均满足要求的电信号。最后，该电信号由模数转换电路前向通道的滤波、隔离、放大、去噪后，输出0~5V的光谱传感信号，以便于进行信息采集、分析和进一步控制。

## 2 脉冲MIG焊熔滴过渡光谱信息的研究

目的是找出脉冲MIG焊时光谱信息模式与熔

滴过渡型式及与焊接参数间的关系，以便为脉冲MIG焊熔滴过渡的光谱实时控制提供实验和理论上的依据。

我们采用上述的光谱检测系统，以及自行研制的IGBT脉冲逆变电源，自动控制系统和通用送丝系统作为基本设备进行实验。表1为脉冲MIG焊熔滴过渡光谱信息实验的工艺参数一览表。其中基值电流 $I_b$ 的取值在适当范围内比通常脉冲焊中所用的略高一些，这是为了在基值期间也能产生熔滴过渡，也能得到基值期间熔滴过渡的光谱信息，以便与峰值期间熔滴过渡的光谱信息比较，观察它们之间的区别和相关规律。

表1 脉冲MIG焊熔滴过渡光谱信息实验工艺参数一览表

Table 1 Welding parameters of droplet transfer spectrum information experiment in pulsed MIG welding

序号	代号	索引图号	$I_p/A$	$I_b/A$	$T_p/ms$	$T_b/ms$	$U_p/V$	$V_f/m \cdot min^{-1}$	$f/Hz$	$Q/L \cdot (min)^{-1}$	$L_0/mm$	$\Phi/mm$
1	M01	图2(a)	295	100	1.20	10.80	30	4.3	83	Ar: 20	16	1.2
2	M02	图2(b)	295	105	1.20	10.80	31	4.7	83	Ar: 20	16	1.2
3	M03	图2(c)	295	108	1.20	10.80	30	4.8	83	Ar: 20	16	1.2
4	M04	图2(d)	295	95	2.35	9.65	28	5.2	83	Ar: 20	16	1.2
5	M05	图2(e)	295	95	2.55	9.45	28	5.2	83	Ar: 20	16	1.2
6	M06	图2(f)	295	95	2.75	9.25	29	5.4	83	Ar: 20	16	1.2
7	M07	图2(g)	295	95	2.95	9.05	30	5.6	83	Ar: 20	16	1.2
8	M08	图2(h)	295	95	3.15	8.85	29	5.6	83	Ar: 20	16	1.2
9	M09	图2(i)	280	105	3.50	8.50	27	6.0	83	Ar: 20	16	1.2
10	M10	图2(j)	295	105	3.50	8.50	30	6.1	83	Ar: 20	16	1.2

$I_p$ —峰值电流， $I_b$ —基值电流， $T_p$ —峰值时间， $T_b$ —基值时间， $U_p$ —峰值弧压， $V_f$ —送丝速度， $f$ —脉冲频率， $Q$ —保护气流量， $L_0$ —干伸长， $\Phi$ —焊丝直径；焊丝和母材为H08 Mn2 Si和Q235

图2为实验所得的焊接电流控制信号与脉冲电弧熔滴过渡光谱信息的波形图，其中，图2(a)~(c)、图2(d)~(h)、图2(i)~(j)分别

是其它脉冲参数不变，而改变基值电流 $I_b$ 、峰值时间 $T_p$ 、峰值电流 $I_p$ 时的实验波形。

表 2 脉冲 MIG 焊熔滴过渡实验数据处理结果一览表

Table 2 Processing result of experimental data of droplet transfer in pulsed MIG welding

序号	代号	占空比	峰值安秒数	基值安秒数	脉冲单元安秒数	安秒数比	平均电流	过渡光谱模式
		$K_p/\%$	$I_p T_p/A \cdot ms$	$I_b T_b/A \cdot ms$	$(I_p T_p + I_b T_b) / A \cdot ms$	$R_p/\%$	$I/A$	DTSM
1	M01	10.00	354.00	1 080.00	1 434.00	24.69	119.5	1+0
2	M02	10.00	354.00	1 134.00	1 488.00	23.79	124.0	1+1
3	M03	10.00	354.00	1 166.40	1 520.40	23.29	126.7	1+2
4	M04	19.58	693.25	916.75	1 610.00	43.06	134.2	2+0
5	M05	21.25	752.25	897.75	1 650.00	45.59	137.5	2+0/1
6	M06	22.92	811.25	878.75	1 690.00	48.00	140.8	2+1
7	M07	24.58	870.25	859.75	1 730.00	50.30	144.2	2+0/1/2
8	M08	26.25	929.25	840.75	1 770.00	52.50	147.5	2+2
9	M09	29.17	980.00	892.50	1 872.50	52.34	156.0	3+0
10	M10	29.17	1 032.50	892.50	1 925.00	53.64	160.4	3+1

从图 2 的每个分图中可见到，随着脉冲电流控制波形的进行，光谱信息波形均产生了明显的脉动。如果不看那些幅值小、时间短的跳动，只看幅值较大、时间较长（如分别  $>0.5 V$  和  $>1 ms$ ）的脉动，则光谱信息波形的这种脉动是熔滴过渡的反映，每个脉动均对应着一个熔滴过渡，这已为以前所做的同步高速摄影所证实<sup>[1,7]</sup>。光谱波形的脉动有的产生在电流峰值期间，有的产生在基值期间，但基值期间的脉动幅值要小于峰值期间的，这可能是基值期间过渡的熔滴较小和电弧温度较低的缘故。每个脉动的幅值均较大，抗干扰能力强，脉宽较宽，清晰，容易识别。随焊接参数的变化，峰值和基值期间过渡的熔滴数自然发生变化，反映在光谱波形上，峰值和基值期间出现的脉动数也就不等，如有的 1 个，有的 2 个，有的 3 个，这在图 2 中可明显看出。光谱波形分布的这些特征是与脉冲 MIG 焊电弧和熔滴过渡的脉动特征是相一致的。下面还将对这些实验结果作进一步的分析。

表 2 为表 1 和图 2 所示的 10 组实验数据处理结果。其中安秒数比  $R_p$  定义为：

$$R_p = \frac{I_p T_p}{I_p T_p + I_b T_b} = \left( 1 + \frac{I_b T_b}{I_p T_p} \right)^{-1} \quad (1)$$

而脉冲单元安秒数  $E_p$  定义为：

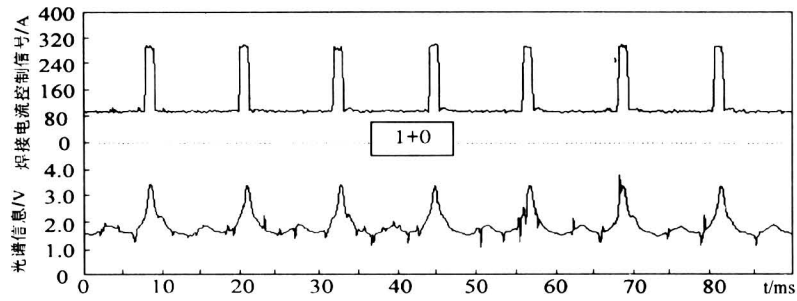
$$E_p = I_p T_p + I_b T_b \quad (2)$$

表 2 中的熔滴过渡光谱波形模式 DTSM (Droplet Transfer Spectrum Waveform Mode) 的表示方法为： $a+b$  或  $a+b/c/d$ 。其中， $a$  表示在脉冲

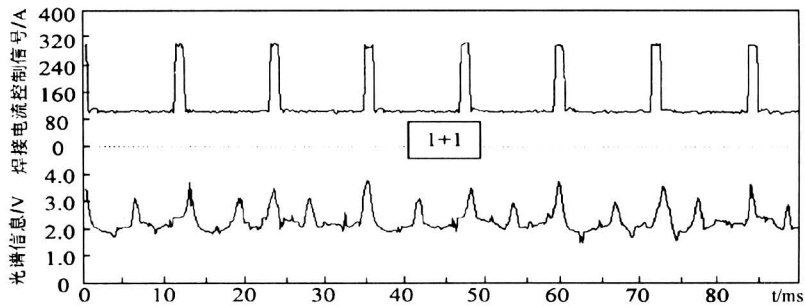
峰值期间过渡的熔滴个数， $b$  表示在基值期间过渡的熔滴个数， $b/c/d$  表示在基值期间发生熔滴过渡的可能熔滴个数。为便于称呼起见， $a+b$  命名为  $a$  峰  $b$  基。这样，若脉冲峰值期间发生 1 个熔滴过渡，而基值期间无熔滴过渡，则此 1 脉 1 滴可表示为  $1+0$  或 1 峰 0 基。若峰值期间无过渡，而基值期间过渡 1 滴，则此种一脉一滴应表示为  $0+1$  或 0 峰 1 基。余类推。

考察图 2 (a) — (c) 可看到，在脉冲峰值电流和峰值时间不变的情况下（即峰值安秒数  $I_p T_p$  和占空比  $K_p$  恒定），随基值电流  $I_b$  的增大，光谱波形在峰值期间均出现 1 个脉动，基值期间从没有脉动增加到出现 1 个和 2 个脉动，这反映熔滴在峰值期间均过渡 1 滴，基值期间从没有过渡增加到过渡 1 滴、2 滴，熔滴过渡光谱波形模式由  $1+0$  (1 峰 0 基) 变为  $1+1$  (1 峰 1 基)、 $1+2$  (1 峰 2 基)。当基值电流增大时，基值安秒数  $I_b T_b$  增大，使得在基值期间发生了熔滴过渡。由于处于该工艺规范范围内的峰值时间很小，占空比  $K_p$  仅为 10%，峰值安秒数  $I_p T_p$  在所有的工艺实验中是最小的（参见表 2），所以在脉冲峰值期间没有发生两滴或多滴过渡。这一实验结果表明，电弧光谱信息波形的变化与焊接中物理过程变化的分析是一致的；电弧光谱信息对峰值期间和基值期间的熔滴过渡都能作出清晰的反映。下面还可看到更复杂的反映。

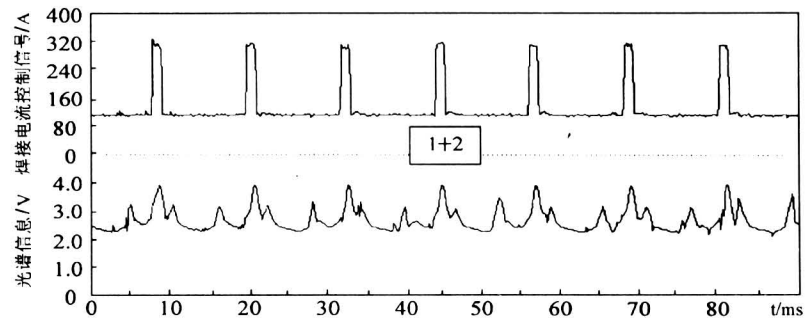
分析图 2 (d) ~ (h) 及表 2 可知，在基值电



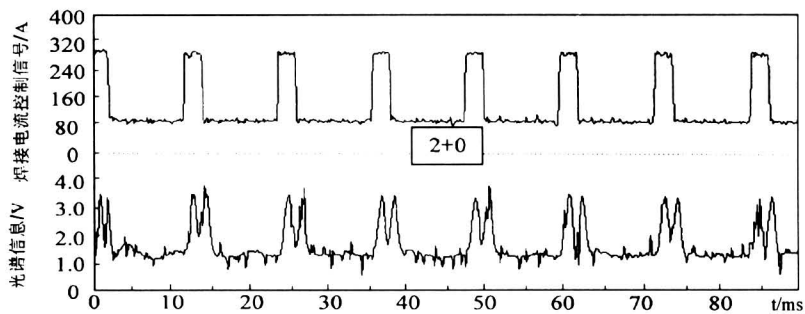
(a) M01:  $I_p=295A$ ,  $I_b=100A$ ,  $T_p=1.20ms$



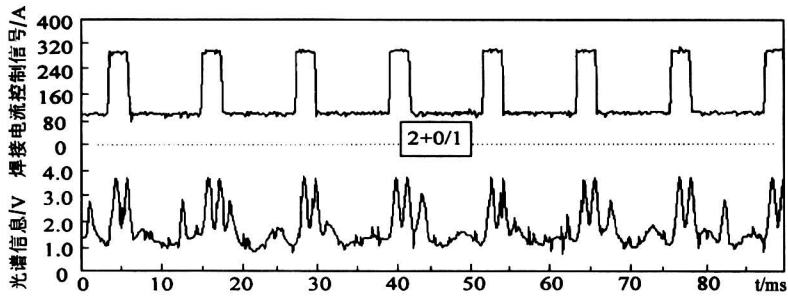
(b) M02:  $I_p=295A$ ,  $I_b=105A$ ,  $T_p=1.20ms$



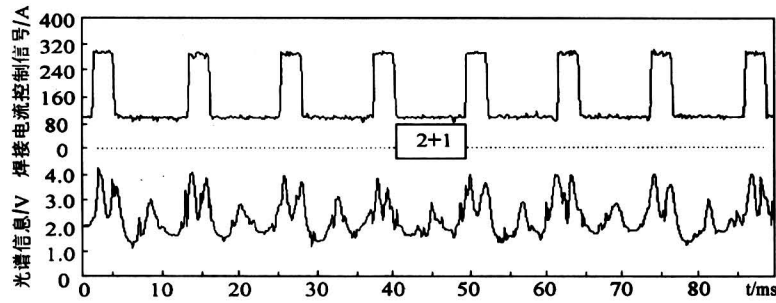
(c) M03:  $I_p=295A$ ,  $I_b=108A$ ,  $T_p=1.20ms$



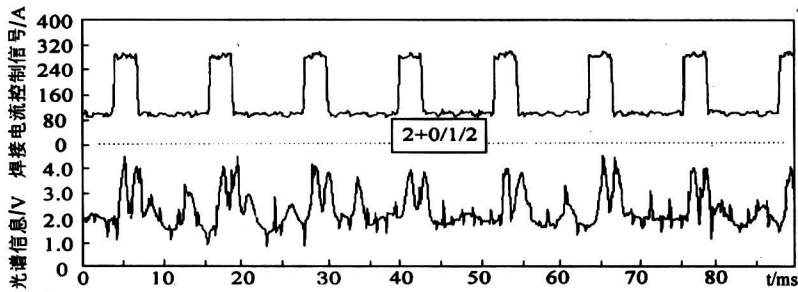
(d) M04:  $I_p=295A$ ,  $I_b=95A$ ,  $T_p=2.35ms$



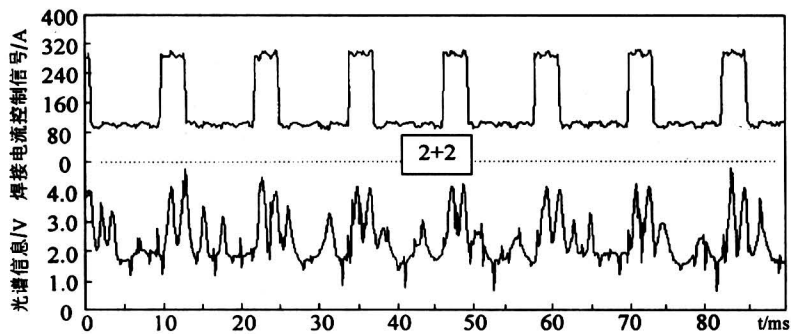
(e) M05:  $I_p=295A$ ,  $I_b=95A$ ,  $T_p=2.55ms$



(f) M06:  $I_p=295A$ ,  $I_b=95A$ ,  $T_p=2.75ms$



(g) M07:  $I_p=295A$ ,  $I_b=95A$ ,  $T_p=2.95ms$



(h) M08:  $I_p=295A$ ,  $I_b=95A$ ,  $T_p=3.15ms$

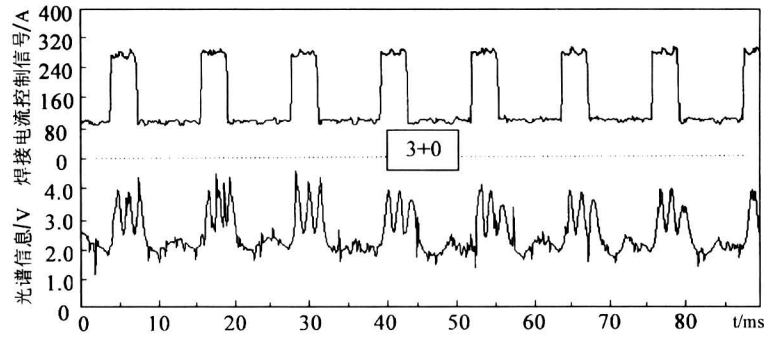
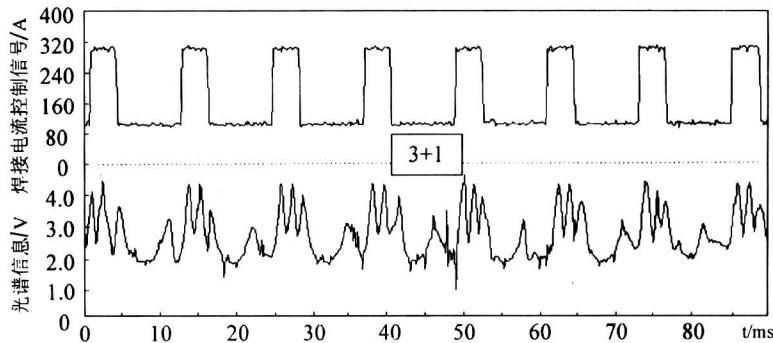
(i) M09:  $I_p = 280A$ ,  $I_b = 105A$ ,  $T_p = 3.50ms$ (j) M10:  $I_p = 295A$ ,  $I_b = 105A$ ,  $T_p = 3.50ms$ 

图2 脉冲MIG焊焊接电流控制信号与熔滴过渡光谱信息的波形图

Fig. 2 Waveforms of control signal of welding current and droplet transfer spectrum information in pulsed MIG welding

流和峰值电流恒定不变的情况下,随着峰值时间的增大,可看出光谱模式由2峰0基逐步变为2峰1基、2峰2基。峰值安秒数急剧增大,基值安秒数略微降低,其综合作用使脉冲单元安秒数增大。这不仅使峰值期间过渡的熔滴数增加到两滴,而且由于脉冲峰值期间能量的积累和峰值时间较小,积累的能量在随后的基值期间被释放出来,造成了基值期间也发生了熔滴过渡。这是在峰值期间过渡主滴后,在基值期间拖带过渡若干小滴的一种典型的过渡情况。

分析图2(i)~(j)可知,由于脉冲时间较长(比前两组实验均长,见表1),在峰值期间产生了3个熔滴过渡。说明在峰值期间,过渡3个熔滴所需的时间较长。在 $I_b$ 和 $T_p$ 不变的情况下,随着 $I_p$ 的增大,峰值安秒数增大,与上组实验相似,极易积累能量导致随后基值期间的熔滴过渡,光谱和熔滴过渡模式由3峰0基变为3峰1基。其峰值

安秒数和脉冲单元安秒数在表2的所有DTSM中是最高的,平均电流也是最大的。在这种情况下,脉冲峰值期间的熔滴过渡模式类似于连续MIG焊的喷射过渡模式。由图2(i)~(j)可见,光谱信息对脉冲峰值期间的高频喷射过渡能作出清晰的反映。其灵敏度和分辨率是很高的。

根据上述的分析,脉冲MIG焊时,随脉冲基值电流、峰值时间、峰值电流的变化,光谱信息与相应的熔滴过渡的模式发生明显变化。在实验的条件下,峰值时间 $T_p$ 是决定熔滴过渡模式的很重要的因素。随着过渡模式的逐渐复杂化,脉冲单元安秒数和平均焊接电流均逐渐增大。由表2的实验数据,可归纳出脉冲MIG焊熔滴过渡光谱波形模式DTSM与焊接平均电流值 $I$ 的关系,此关系如图3所示。从图3可见,随平均电流增加到一定数值后,脉冲峰值期间过渡的熔滴数有一突变,由1滴变到2滴,再变到3滴;在峰值期间过渡相同滴数

的区间内，增加平均电流，可使基值过渡滴数增多，但每次平均电流的增加值较小。即增加基值过渡滴数所需平均电流的增量较小，增加峰值者较大。对脉冲单元安秒数与 DTSM 间也可得出类似关系。这可能是由于增加峰值期间过渡的熔滴数所

需的能量要大于增加基值期间过渡熔滴数所需的能量。这一结果表明，脉冲 MIG 焊时焊接规范波动容易引起峰值期间过渡主滴后在基值期间拖带过渡 1、2 小滴或若干小滴，从而影响焊接过程的稳定。应予避免。

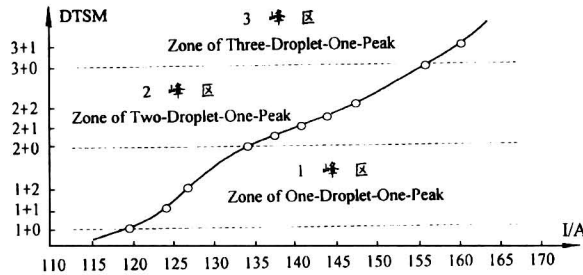


图 3 脉冲 MIG 焊的熔滴过渡光谱波形模式与平均电流的关系

Fig. 3 Relationship between average welding current and DTSM in pulsed MIG welding

由图 3 可见，对于表 1 所示的焊接工艺条件下，可得出如下电流区间：

- 1 峰区  $I_{av} \in (119A, 127A)$
- 2 峰区  $I_{av} \in (134A, 148A)$
- 3 峰区  $I_{av} > 156A$

由图 3 可见，纵使同样是一个脉冲过渡相同的熔滴数，而其 DTSM 可不同。例如，同是 1 脉 2 滴，可为 1 峰 1 基 (1+1) 或 2 峰 0 基 (2+0)。

的波形特征，就可制定不同的控制策略，得到不同的理想的熔滴过渡。例如，不仅可以得到精确的一脉一滴 (1+0) 控制，也可得到精确的一脉两滴 (2+0) 或三滴 (3+0) 的控制等。为脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱实时控制奠定了良好基础，为脉冲 MIG 焊的控制打开一个新局面。

### 3 结 论

(1) 电弧光谱信息可很好地反映脉冲 MIG 焊的各种熔滴过渡模式，特别是可以对峰值期间多滴喷射过渡作出清晰的反映。脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱信号波形的脉动幅值大，抗干扰能力强、脉宽较宽，容易识别，信号品质优越。

(2) 脉冲 MIG 焊中存在多种熔滴过渡的光谱波形模式。这些模式可分为一脉一滴、一脉二滴、一脉三滴等。同样是一个脉冲过渡相同的熔滴数，但其光谱波形模式还可不同，还可进一步划分。按照本文建议的命名方式和本实验中已发现的模式，可将其分类，如本文图 4 所示。这些光谱模式的发现，对以后熔滴过渡的光谱实时控制有很大意义，可用于指导控制策略的制定。

(3) 在一定的工艺条件下，脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱波形模式与焊接平均电流值关系密切。在一定的脉冲频率下，随着平均电流的增大，起先是基值期间的过渡熔滴数增多，平均电流达到一定值时，峰值期间的过渡熔滴数增多。即增加基值期间过渡熔滴数所需平均电流的增量较小，而增加峰值

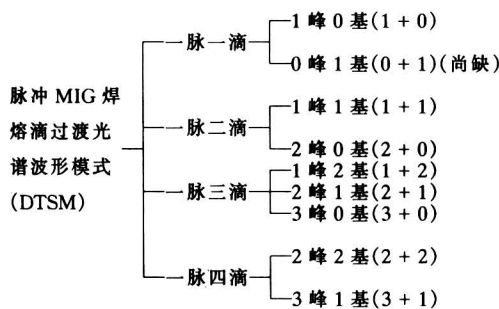


图 4 脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱波形模式 (DTSM) 分类图

Fig. 4 Classification of DTSM in pulsed MIG welding

根据本实验中已发现的模式 (见表 2 或图 3)，可将脉冲 MIG 焊的 DTSM 分类成如图 4 所示。

从上所述可见，电弧光谱信息可以很好地反映脉冲 MIG 焊的各种熔滴过渡模式，信号品质优越。

上述那些熔滴过渡光谱模式的发现，对以后熔滴过渡的光谱实时控制有很大意义。分析这些模式

者较大。这表明脉冲 MIG 焊时容易产生基值期间拖带过渡一、二小滴或若干小滴的不稳定现象, 应予以避免。

(4) 对脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱信息的研究, 为今后脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱实时控制提供了理论和实验上的依据, 为它奠定了良好基础。

(5) 本光谱检测系统和焊接设备系统工作可靠, 检测灵敏度高, 对电弧无干扰。

#### 参考文献

- [1] 柳刚. 熔化极气体保护焊熔滴过渡的光谱信息及其检测的研究. 天津大学博士学位论文, 1998
- [2] 张龙. 脉冲 MIG (MAG) 焊熔滴过渡的弧光传感及其实时控制. 哈尔滨工业大学博士论文, 1992
- [3] Li Junyue, Song Yonglun, Spectral information of arc and welding automation [J]. *Welding in the World*, 1994, (9): 317~324
- [4] Li Junyue, Song Yonglun, Measurement of hydrogen in a welding arc [J]. *Welding International*, 1988, (12): 2~6, and *Welding Research Abroad*, 1989, 35 (6): 2~6
- [5] 宋永伦, 李俊岳, 吴仁育等. 弧焊区图像信息的光谱传感技术 [J]. *焊接学报*, 1992, 13 (2): 127~132
- [6] 柳刚, 李俊岳, 李桓. MIG 焊电弧光谱的动态特征 [C]. 第九次全国焊接会议论文集, 第二册, 1999, 342~345
- [7] 柳刚, 李俊岳, 杨立军等. 熔化极气体保护焊电弧光谱信号脉冲特征的本质 [J]. *焊接学报*, 2000, 21 (1): 34~36

## Research on Droplet Transfer Spectral Information in Pulsed MIG Welding

Li Junyue, Yang Lijun, Hu Shenggang, Li Huan, Liu Gang

(Faculty of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**[Abstract]** By the aid of the spectrum detecting device of welding arc, the droplet transfer spectral information of pulsed MIG welding has been researched experimentally. Results show that the arc spectral information can reflect well droplet transfer process in pulsed MIG welding. Many kinds of spectral information modes of droplet transfer have been found, which can reflect various droplet transfer types, such as one-peak-zero-base, one-peak-one-base, one-peak-two-base, two-peak-zero-base, two-peak-one-base, two-peak-two-base, three-peak-zero-base and so on. Especially, they can sharply and clearly reflect multiple drops spray transfer in the period of pulse peak. These spectral information have excellent character and therefore the spectral real-time and precise control of droplet transfer in pulsed MIG welding will be realized.

**[Key words]** arc spectral information; pulsed MIG welding; droplet transfer; transfer mode

## 本刊通告

亲爱的广大读者、作者朋友:

由于我们工作的疏忽, 致使本刊 2000 年第 2 卷第 4 期版权页刊出的本刊电子信箱有误, 给您们带来了诸多的不便, 对此, 我们深感歉疚。

我刊正确的电子信箱为——E-mail: bees@public3. bta. net. cn

《中国工程科学》编辑部