

焊接电弧熔滴过渡特征光谱窗口的选择

杨运强^{1*}, 张晓琪¹, 李俊岳², 李 桓²

(1. 株洲工学院, 湖南 株洲 412006; 2. 天津大学, 天津 300072)

摘 要: 焊接电弧光谱是一个丰富的信息源, 电弧中各种变化都能在电弧光谱中得到体现, 不同波段不同谱线的电弧光谱所包含的信息各不相同。熔滴过渡过程直接导致电弧空间粒子浓度和分布的变化, 检测相应的电弧光谱就能检测喷射过渡电弧的熔滴过渡。文中介绍了熔化极电弧光谱分布特征, 分析了窗口光谱辐射理论, 提出了焊接电弧熔滴过渡特征光谱窗口的选择原则, 并在此原则指导下选取了特征光谱窗口, 对熔滴过渡过程进行检测和控制。试验证明, 这种特征窗口光谱信息能够像光谱仪谱线信息一样很灵敏地反映熔滴喷射过渡过程, 可以利用该信号进行熔滴过渡闭环精确控制。文中的熔滴过渡信息的检测和控制都取得了非常好的效果。

关键词: 焊接电弧; 光谱窗口; 熔滴过渡; 检测与控制; 熔化极气体保护焊

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2003)01-14-05



杨运强

0 序 言

不用光谱仪进行电弧光谱研究, 必须用到光谱窗口。目前电弧光谱窗口技术在许多方面都能得到应用, 如焊缝跟踪^[1], 焊接过程监控, 电弧中有害气体的检测^[2]等等, 因此, 有必要专门对光谱窗口进行研究。

研究发现, 电弧光谱信息对于检测焊接电弧喷射过渡过程有着独特的优越性, 信号灵敏而且信号品质高。文献[3]和文献[4]利用光谱仪成功地实现了焊接电弧熔滴过渡的检测和反馈控制, 为电弧光谱信息开拓了新的应用领域, 但是这种基于光谱仪的测试和控制系统不能应用于实际生产中, 要实现电弧光谱信息对熔滴过渡的实时在线检测与控制, 必须甩掉笨重的光谱仪, 用光谱窗口代替谱线进行熔滴过渡的检测与控制。理论和实践都证明, 选择光谱窗口与选择单一谱线存在明显的差异。单一谱线测试要求选择信号稳定, 强度较大, 周围谱线少, 邻线干扰小的谱线; 而光谱窗口不可避免地存在多根谱线, 因此不能照搬谱线选择原则, 选择光谱窗口时应考虑窗口中各光谱的强度积分效应。

作者开展了对焊接电弧熔滴过渡光谱窗口的研究, 提出了熔滴过渡光谱窗口选择原则, 并实际选取了光谱窗口, 成功地进行了熔滴过渡的在线检测与控制。

1 特征光谱检测熔滴过渡的理论基础

研究表明, 焊接电弧在稳定工作时虽不能整体满足完全热力学平衡条件, 但能满足局部热力学平衡的要求^[2], 局部热力学平衡除普朗克定律不满足外, 满足完全热力学平衡其它所有定律, 即粒子的速度分布服从麦克斯韦分布, 激发粒子数服从波尔茨曼分布, 分子、原子、粒子和电子按质量作用定律(包括歌尔培克-瓦格方程和沙哈方程)分布。

当系统处于热力学平衡态时, 若某种粒子(如某种元素的原子)从高能级 p 跃迁到低能级 q 时, 相应于某一波长的光谱发射系数(或称辐射密度) ϵ_{pq} 为

$$\epsilon_{pq} = \frac{1}{4\pi} A_{pq} \nu_{pq} n_p = \frac{1}{4\pi} A_{pq} h \nu_{pq} g_p \frac{N_A}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_p}{KT}\right), \quad (1)$$

式中: A_{pq} 为从高能级 p 向低能级 q 的跃迁几率; g_p 为 p 能级上的统计权重; $Z(T)$ 为发射该谱线的原子的配分函数; E_p 为高能级 p 的激发能; n_p 为处于 p 能级激发态的原子数密度; N_A 为发射该谱线的原子数密度; K 为玻尔兹曼常数; T 为温度; h 为普朗克常数; ν_{pq} 为谱线频率。其中, A_{pq} 、 g_p 、 E_p 对确定的原子谱线有一定的数值, $Z(T)$ 可通过有关式子计算得到^[3]。

由此可见, 光谱发射率 ϵ_{pq} 不仅与温度 T 和原子数密度 N_A 相联系, 而且通过上述各个定律与其它各种粒子数密度及压力 P 相联系, 光谱强度与电弧

这一热力学系统内的全部基本状态参量有关,是它们的函数。因此,电弧内的各种状态变化都可通过电弧光谱强度这一信息得到反映^[3]。电弧中的熔滴过渡所引起的电弧中粒子温度和浓度的变化,必然会在电弧光谱信息中得到反映。这就是电弧光谱信息检测熔滴过渡的理论基础。

试验结果表明,熔滴过渡时,电弧中焊丝金属元素光谱与熔滴过渡有较好的对应关系,电弧中保护气体元素光谱也能在一定程度上间接地反映熔滴过渡,但信号品质明显不如金属元素光谱。因此,可以通过检测电弧中金属元素谱线强度变化检测熔滴过渡。

图 1 为文献[3]利用光谱仪检测到的电弧熔滴过渡特征光谱谱线强度信息,对应焊接规范为电弧电压 29 V,焊接电流 165 A,送丝速度 9.1 m/min。图中信号脉动通过高速摄影已经证实确实反映了熔滴过渡过程^[3]。

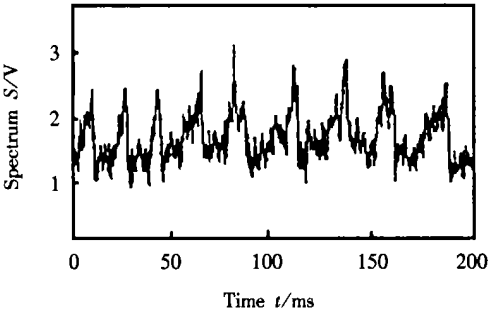


图 1 用光谱仪采集到的熔滴过渡特征光谱

Fig. 1 Special spectrum waveform of droplet transfer from spectral apparatus

2 电弧光谱分布特征和光谱窗口 辐射理论

2.1 电弧光谱的分布特征

在电弧辐射的传播过程中,当光谱的波长小于 195 nm 时,会被大气中的氧(O₂)强烈地吸收,所以,

实际研究的焊接电弧光谱都是波长大于 200 nm 的光谱。

表 1 给出了不同气氛下 TIG 电弧在温度 $T=12\,000\text{ K}$ 时 200~800 nm 线光谱和辐射功率分布谱线分布情况^[2]。由表可见,纯氩电弧、90%氩+10%铁蒸气和 90%氩+10%铝蒸气电弧线光谱辐射功率分布存在明显差异。图 2 给出了纯氩电弧和含 10%铁的电弧光谱辐射功率频域特征对比。

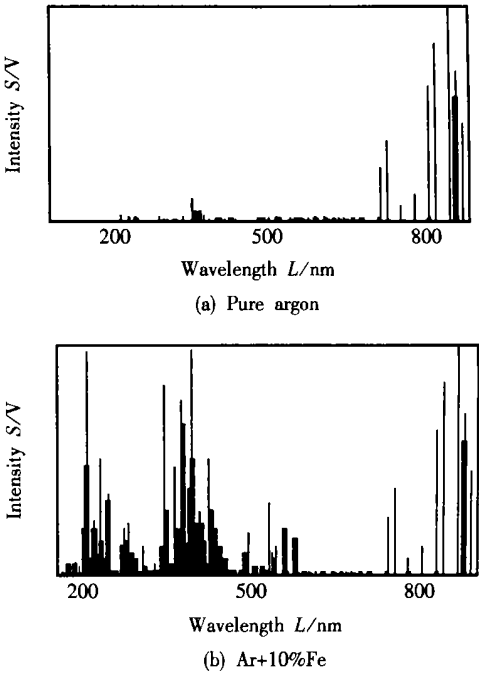


图 2 焊接电弧中纯氩及氩加 10%铁的线光谱在频域上的辐射功率分布

Fig. 2 Line spectral power distribution of pure argon & argon added 10% iron in welding arc

由表 1 和图 2 可知,当在纯氩电弧中加入少量的金属蒸气时,电弧的辐射强度及光谱谱线分布就会发生很大变化,其中以 200~400 nm 的紫外区域最为明显。在 200~400 nm 紫外波段,对于加铁 10%的电弧,其辐射功率从纯氩的 0.16 上升到

表 1 焊接电弧线光谱辐射功率 ($T=12\,000\text{ K}$)

Tabel 1 Radiation power of line spectrum of welding arc ($T=12\,000\text{ K}$)

Shielded gas	200 ~ 400 nm		400 ~ 600 nm		600 ~ 800 nm	
	Number of lines	Radiant intensity	Number of lines	Radiant intensity	Number of lines	Radiant intensity
Argon (100%)	11	0.16	43	0.72	61	12
Ar(90%)+Fe(10%)	11/405	14 000	43/149	80.7	61/34	12.6
Ar(90%)+Al(10%)	11/33	600	43/2	0.74	61/11	14.3

14 000; 对于加 10%铝的电弧其辐射功率从纯氩的 0.16 上升到 600。在 400~600 nm 的可见光波段,对于加 10%铁的电弧,也能看到电弧弧光辐射的明显变化,其辐射功率从纯氩的 0.72 上升到 80.7。

而 600~800 nm 的可见光及近红外波段,无论加铝或是加铁,对电弧辐射功率影响都不大。对于纯氩气氛电弧,电弧谱线和辐射功率密度的分布均趋于长波方向,而当电弧中含有金属蒸气时,电弧谱线和

辐射功率密度的分布则出现相反的情况, 辐射光谱在紫外长波段的功率大大增加, 谱线也密集于该区。这说明电弧光谱辐射中金属元素对频域分布有很大的影响。

因此, 惰性气体保护焊焊接电弧谱线分布特征是, 氩元素谱线主要分布在较长的光谱波段, 金属元素谱线主要分布在紫外和可见光的短波波段。尽管金属蒸气在电弧中含量不大, 但它主导了电弧弧光辐射, 其含量的变化将直接影响电弧弧光的辐射。

2.2 电弧光谱窗口理论分析

采用色散元件(光谱仪)检测电弧光谱信息, 检测精确度高, 获取的信息量大, 但是体积大, 构造复杂, 不方便使用。因此, 它只适于在实验室中研究用。进行在线实时检测焊接电弧熔滴过渡, 一般只能采用小型简便的窄带滤光片进行检测。由于通过干涉滤光片获取的是某一光谱区间的光谱信息, 即光谱窗口信息, 因此研究光谱窗口光谱辐射理论较研究线光谱的辐射对于在线实时检测熔滴过渡来说, 更有现实意义。

熔化极焊接电弧光谱是在很强的连续谱背景上叠加一条条线光谱, 线光谱辐射主要由保护气体元素线光谱和焊丝金属元素线光谱组成。对于钢的 MIG 焊电弧, 保护气体原子线光谱主要是氩原子谱线, 金属原子线光谱则包括铁原子谱线和锰等合金元素原子谱线。由于电弧温度较低, 保护气体和金属蒸气离子含量较少, 这些离子谱线一般非常弱, 对电弧光的贡献不大, 因此, 可以只考虑原子线光谱和连续谱的作用。

对于特定的光谱波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ (λ_1 和 λ_2 表示波长), 光谱辐射总强度 (P_{window}) 由其中各谱线的强度和连续谱强度共同决定。

$$P_{\text{window}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_1(\lambda) + I_c(\lambda)) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_1(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_c(\lambda) d\lambda = P_{\text{line}} + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_c(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中: $I(\lambda)$ 为波长 λ 处光谱强度, 它包括波长 λ 处线光谱强度 $I_1(\lambda)$ 和波长 λ 处连续谱强度 $I_c(\lambda)$ 两部分。

不同频域的各谱线辐射功率 P_{line} 可以用对式(1)求和得到式(3), 即

$$P_{\text{line}} = \sum_{pq} \frac{1}{4\pi} A_{pq} h \nu_{pq} g_p \frac{N_A}{Z(T)} \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]. \quad (3)$$

波长 λ 处连续谱强度 $I_c(\lambda)$ (或称辐射密度 ϵ_λ) 的计算可根据 Kramers-unsold 公式, 在单位频率间

隔内, 波长为 λ 处连续谱强度^[2] 为

$$I_c(\lambda) = \epsilon_\lambda = C N_A^+ N_e T_e^{1/2} Z_{\text{eff}}^2 G(\lambda, T_e), \quad (4)$$

式中: $C = 16\pi e^6 / (3c^3 \sqrt{6\pi m^3 k}) = 5.443 \times 10^{-39}$ (CGS 单位); N_e 、 N_A^+ 分别为电子、离子数密度; T_e 为电子温度; Z_{eff} 为有效核电荷, $G(\lambda, T_e)$ 为 Gaunt 修正因子。在焊接电弧的光谱频率范围内及温度范围内, $G(\lambda, T_e) = 2^{[3]}$ 。

因此, 总的光谱强度 P_{window} 应由下式表示

$$P_{\text{window}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_c(\lambda) d\lambda + P_{\text{line}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C N_A^+ N_e T_e^{1/2} Z_{\text{eff}}^2 G(\lambda, T_e) d\lambda + \sum_{pq} \frac{1}{4\pi} A_{pq} h \nu_{pq} g_p \frac{N_A}{Z(T)} \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]. \quad (5)$$

上述分析推导假定光谱透射率在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 区间相等并为最大透射率, 在窗口以外的区间透射率为零, 实际光谱窗口光谱透射率呈正态分布, 需对上述公式进行修正。

对于中心波长为 λ_0 , 半宽为 $\Delta\lambda$ 的光谱窗口(即 $\lambda_1 = \lambda_0 - \Delta\lambda$, $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 的光谱波段)的光谱辐射强度 P_W 为

$$P_W = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} I_1(\lambda) \cdot W(\lambda) d\lambda + C(\lambda) \cdot W(\lambda) = \sum_{i=1}^m I_1(\lambda_i) \cdot W(\lambda_i) + I_c \cdot W(\lambda), \quad (6)$$

式中: $I_1(\lambda_i)$ 表示各线光谱的光强; $C(\lambda)$ 是该波长范围内的连续谱强度; m 为该窗口中包含的谱线数目。在较小的频域内可近似作为常数, $C(\lambda) = I_c$ 。

$W(\lambda)$ 为所在频域的窗函数, 即

$$W(\lambda) = \begin{cases} W_m e^{-C_s (\lambda - \lambda_0)^2} & |\lambda - \lambda_0| \leq \Delta\lambda \\ 0 & \text{其余} \end{cases},$$

式中: W_m 为最大透过率; C_s 为窗的形状参数。

由此可见, 电弧光谱窗口光谱总强度是窗口内各光谱(线光谱和连续谱)强度与相应位置窗口的透射率的乘积沿波长的积分, 而不能仅考虑某一根谱线强度。

3 焊接电弧熔滴过渡光谱窗口选择原则

由于光谱辐射总强度是由其中各谱线的强度所共同决定, 研究某一窗口的总的光谱辐射不但要考虑线光谱强度, 还要考虑连续谱强度, 应在强度积分基础上进行综合考虑后选择光谱窗口。元素的内部能级决定线光谱的频域分布, 某一元素线谱可能在

某一频域密集分布,并且强度较大,而在其它频域,则分布很少或线谱强度较弱。因而在电弧光谱的局部频域,电弧光在该频域强度变化特征就可能表现出与其它频域强度特征明显不同甚至完全相反的情况。因此为了更好地提取熔滴过渡特征信息,必须详细研究电弧光谱辐射情况,从纷繁复杂的电弧光信息中选取特征光谱窗口。

电弧弧光辐射分布在从红外到紫外这么宽的光谱区间,选择什么样的窗口,主要考虑如下几点。首先,信号区间有比较明显的光谱特征,信噪比高,达到频域降维的目的,不能把眼光仅停留在某些线光谱上,而要考虑周边谱线及连续谱对总的光强信号的贡献。其次,光电检测器件在此区间要有一定的光谱响应。最后,选择熔滴过渡光谱窗口中心波长应和半带宽选择相结合。

选择光谱窗口时,不能仅依靠某根强谱线作用而忽略其它光谱的作用,不但要考虑某一线光谱的强度,同时还要考虑同类型谱线的扎堆效应,考虑连续谱的积分效应。要选取那些铁等金属谱线密集的区间同时保护气体谱线和连续谱又尽可能少和弱的波段作为光谱窗口,避开那些保护气体谱线密集的区间。因为其它种类谱线的作用可能与所选谱线发光情况相反,抵消了特征谱线的作用,或者信号变化不如特征谱线灵敏,降低了所获取信号的信噪比。例如:对于铁谱线的测试,文献[3]在利用光谱仪进行电弧光谱测试和控制时选取 602.4 nm 的谱线作为测试线^[3~5],由于其邻线少,因此很容易测试。但如果利用 602.4 nm 作为中心波长,通过光谱窗口进行测试,由于窗口的其它部分全是连续谱,光谱窗口又不能选得太窄(一般 10 nm 左右),尽管连续谱强度较线光谱弱,但它在比线光谱宽得多的频率空间进行积分,其结果是连续谱信号强度远远超过线光谱,淹没线光谱在此区间的作用,使信号信噪比变得很小。因此不能选用这样的区间。

另外,选取光谱窗口还应与光电检测器件的响应区间相适应,光谱窗口必须在光电检测器件光谱响应区间,并且达到一定的响应强度。焊接电弧中金属谱线的分布从图 2 中可以看得很清楚,纯氩气氛中谱线的分布主要在 600~800 nm 的红光和红外区域。检测熔滴过渡一般通过检测电弧中金属蒸气元素光谱进行,而铁等的金属谱线则主要集中在紫外和靠近紫外的蓝紫可见光区域,寻找金属谱线最好的办法是在短波区域(500 nm 以下波段)寻找。但考虑光电器件的响应范围,又不能波长太短,以免器件没有响应或响应太小,难以检测信号。

上述情况在选择光谱窗口时都必须考虑。

4 特征光谱窗口信息对熔滴过渡的在线检测与控制

有了上述熔滴过渡光谱窗口选择原则,作者进行了熔滴过渡光谱窗口选择并设计了相应的光谱传感器,进行了熔滴过渡特征光谱信息在线检测与控制,然后分别通过高速摄影和高速摄像验证了这一检测和控制的准确性^[6,7](限于篇幅,在此不做详细介绍)。作者利用汉诺威测试仪的电压和电流传感器以及文中所设计的光谱传感器同时采集了大量的信号波形,都能获得很好的熔滴过渡特征光谱信息,下面给出两例。

图 3 为连续电流焊接时焊接电流、电弧电压、电弧特征光谱信号波形。焊接规范为焊接电流 207 A,电弧电压 34 V,保护气体 Ar+2%O₂,焊丝直径 $\phi 1.0$ mm,送丝速度 14.5 m/min。虽然特征光谱信号和焊接电流都存在脉动,但通过高速摄影和高速摄像试验,都证明这种焊接电流信号的脉动与熔滴过渡没有对应关系,是由电源输出纹波所造成的,只有特征光谱信号的波动与电弧中熔滴过渡信号才真正反映了熔滴过渡,特征光谱信号波形与熔滴过渡有一一对应的关系^[6,7]。图 3 中可以计算出窗口光谱信号脉动频率为 200 Hz 左右,反映此时焊接电弧熔滴过渡频率亦为 200 Hz 左右。仔细观察图 3 中电压波形还可看到,每一个特征光谱信号下降开始瞬间电弧电压信号都对应地出现一个尖峰,说明此时刚发生熔滴过渡。西方许多研究者就是根据电弧

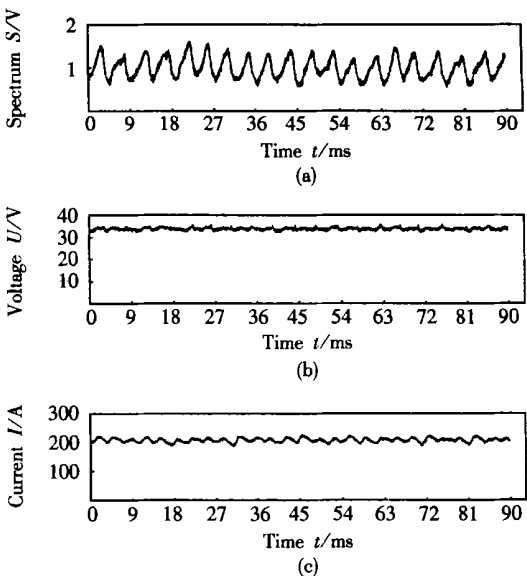


图 3 连续电流下电弧熔滴过渡特征光谱信息与电信息
Fig. 3 Special arc spectrum, voltage and current waveform under continues current welding

电压信号波形的信号波峰判断焊接熔滴过渡的^[8], 这样, 即使不用高速摄影也能证明这种光谱信号与熔滴过渡存在对应关系。图 3 中电压尖峰是经过精心设计的汉诺威测试仪的电压传感器并配合特定的接线方法才检测到的, 一般传感器只能偶尔检测到, 因此在控制中一般不能利用电压尖峰信号在线实时传感熔滴过渡。图 3 的试验结果表明, 特征光谱信号波形不但能准确反映熔滴过渡, 而且信号品质很好, 完全能够作为喷射过渡信息源进行熔滴过渡在线实时控制。

既然这种光谱信号能非常准确地反映熔滴过渡, 就能利用它进行熔滴过渡的检测和控制。简单地说, 就是利用光谱传感器实时检测焊接电弧熔滴过渡信息, 送单片机系统进行软件识别和决策, 最后给出控制信号。文中采用斜率法识别信号, 判断信号峰值发生的时间及数量, 当所需的光谱脉冲数目与所要求的熔滴过渡相等时, 做出决策, 使焊接电流由峰值切换到基值, 当下一个周期到来时, 再由基值返回峰值。通过这种控制方式就可以实现每一个脉冲过渡相同的熔滴数目, 实现熔滴过渡的精确控制^[6,7]。图 4 给出了利用特征光谱窗口信息检测与控制的 1 脉 1 滴脉冲焊过程焊接电流、电弧电压、电弧特征光谱的信号波形。具体焊接规范为脉冲频率 40 Hz, 脉冲峰值电流 220 A, 脉冲基值电流 40 A, 峰值电压 34 V, 基值电压 22 V, 保护气体为氩气, 焊丝直径 $\phi 1.0$ mm, 送丝速度 4.0 m/min。由图可见, 利用特征光谱信息很好地实现了脉冲焊 1 脉 1 滴

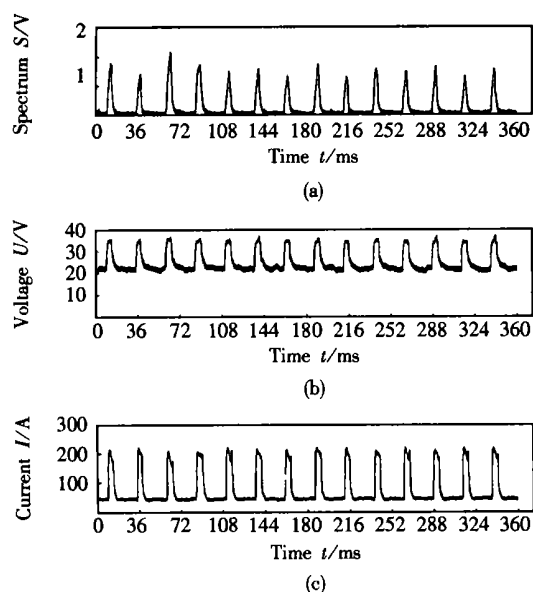


图 4 特征光谱窗口信息控制的脉冲焊 1 脉 1 滴熔滴过渡信号波形

Fig 4 Waveform of one droplet per pulse of GMAW-P controlled by special window spectrum

熔滴过渡闭环控制。大量这样的试验结果参见文献[6], 在文献[6]中还实现了 1 脉 2 滴和 1 脉 3 滴的熔滴过渡精确控制, 并得到了高速摄影和高速摄像的试验验证。

5 结 论

(1) 焊接电弧熔滴过渡过程会引起电弧中粒子浓度和温度的变化, 这些变化直接导致电弧特征光谱信号强度的变化, 检测电弧特征光谱信息就能实现对熔滴过渡过程的检测。

(2) 焊接电弧谱线分布特征是, 氩元素谱线主要分布在较长的光谱波段, 金属元素谱线主要分布在紫外和可见光的短波波段。尽管金属蒸气在电弧中含量不大, 但它主导了电弧弧光辐射, 其含量的变化将直接影响电弧弧光的辐射。

(3) 选择光谱窗口时应选择光谱信号区间有比较明显的光谱特征并结合光谱窗口的半带宽和光电检测器件的光谱响应进行选择。应在强度积分基础上进行综合考虑然后选择光谱窗口。

(4) 试验表明利用上述光谱窗口选择原则选取的光谱窗口获得了成功, 所获取的特征光谱信息能非常准确地检测和反馈控制焊接过程中的熔滴过渡。

参考文献:

- [1] 杨运强. 弧焊区特征光谱及其在弧焊视觉传感法上的应用 [D]. 天津: 天津大学, 1990.
- [2] 宋永伦. 焊接电弧等离子体的光谱诊断法及其应用的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1990.
- [3] 柳 刚. 熔化极气体保护焊的光谱信息及检测的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1998.
- [4] 胡胜钢. 脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱控制法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1999.
- [5] 李俊岳, 杨运强, 李 桓, 等. 焊接电弧光谱信息测控技术及其应用 [J]. 中国工程科学, 2001, 3(7): 21~29.
- [6] 杨运强. 熔化极脉冲焊熔滴过渡的光谱在线传感与控制的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [7] 杨运强, 李 桓, 李俊岳, 等. 熔化极电弧焊多信息同步高速摄影 [J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 29~32.
- [8] Rajasekaran S, Mallya U D. Droplet detachment and plate fusion characteristic in pulsed current gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1998, 77(6): 254s~268s.

作者简介: 杨运强, 男, 1966 年 5 月出生, 工学博士, 教授。主要从事焊接过程控制与行为检测、智能仪器等的研究。获湖南省科技进步二等奖 1 项, 天津市自然科学三等奖 1 项, 发表论文 30 篇。

Email: meyyq@bjpu.edu.cn