

窄间隙焊接钨极动态运动轨迹多自由度控制

刘立君^{1,3}, 占小红¹, 韩玉杰², 李冬青³, 吴 林³

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院 哈尔滨 150080; 2. 东北林业大学 机电学院 哈尔滨 150040;
3. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要: 在厚壁管、压力容器及电站锅炉的窄间隙全位置焊接中, 钨极运动轨迹是动态的。根据窄间隙全位置焊接工艺要求, 从钨极运动轨迹角度, 提出了钨极运动轨迹综合控制方案, 通过对钨极柔性接触引弧轨迹上的各参数作用机理研究, 提出钨极柔性接触引弧控制方法; 根据钨极摆动轨迹分析, 提出基值电压控制弧长和基、峰值电压值分别控制弧长两种方案; 为避免在窄间隙 U 形坡口两侧壁出现“爬弧现象”, 设计了焊缝横向运动轨迹计算机控制自动跟踪系统; 根据全位置焊接重力对钨极纵向运动轨迹影响特点, 设计了基于单片机控制的弧压传感可变增益 PID 弧长控制器。

关键词: 可变增益 PID 控制器; 引弧轨迹; 摆动轨迹; 多自由度控制; 窄间隙全位置焊接
中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)05-17-06



刘立君

0 序 言

随着国民经济的飞速发展, 一些大、厚件窄间隙全位置焊接越来越普遍^[1], 主要在各种电站、太空飞船、锅炉等压力容器、石油化工、输油管线、医药业、饮食业等都有着普遍的应用^[2]。作者对窄间隙全位置焊接钨极动态运行轨迹进行研究, 可为相应专用设备制造提供理论依据, 并对厚大件焊接工艺制定具有一定指导意义。文中主要对钨极接触引弧运行轨迹、钨极摆动轨迹和钨极纵向运动轨迹进行研究, 从而提出相应控制方案。采用单片机控制的柔性引弧系统, 解决了传统的人工操作或简单机械式接触引弧的接触时间长短不易控制、易引起电极烧损和夹钨现象、电极尖端的几何形状和参数不易保持等问题^[3]。采用脉动送丝和钨极摆动 TIG 焊工艺技术, 同时配以焊缝横向跟踪完成 U 形坡口两侧壁熔透^[4]。考虑到全位置焊接时, 重力对弧长影响非常突出, 在研究焊缝纵向钨极实际运行轨迹基础上, 设计了基于单片机控制的弧压传感可变增益 PID 弧长控制器, 在实际产品焊接中取得了较好的控制效果。

1 钨极柔性接触引弧轨迹

根据焊接电源和弧长调节机构的性能, 钨极柔

性接触引弧过程如图 1 所示。其步骤可以简述为: 焊机空载→钨极下降→接触短路→短路电流→短路延时→钨极提升→输出热引弧电流→电流切换→焊接电流。

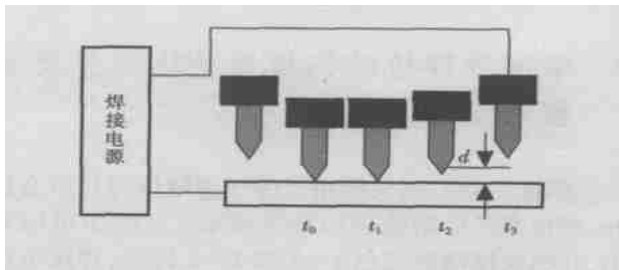


图 1 钨极提升引弧示意图

Fig. 1 Tungsten striking arc sketch map

在 t_0 时刻钨极与工件可靠短路, t_1 时刻钨极脱离工件, 其间短路电流 I_s 和 $t_0 \sim t_1$ 的短路时间 t_s 可控, 引弧成功率随着短路电流的增大而提高, 通过试验确定, 在研究系统中, 采用 5 A 的短路电流, 短路时间为 300 ms 达到预热的目的。在 t_2 时刻钨极与工件的距离为 d , d 是场致发射可维持电弧稳定的最大距离。 t_2 之后, 钨极必须达到一定的温度 T_0 , 以保证产生足够的热发射电子, 否则电弧熄灭。设钨极的提升速度为 v_f , 则从 $t_1 \sim t_2$ 的热引弧电流 I_r 的有效作用时间 $t_r \leq d/v_f$, 考虑系统热引弧电流切换至焊接电流采用缓降的方式, 有利于电弧的稳定燃烧, 热引弧电流值和持续时间可以适当

减小,通过热引弧电流、热引弧时间与引弧成功率试验确定热引弧时间为 50 ms,热引弧电流为 40 A 即可。

短路和燃弧状态的识别是通过采样电源电压变化分辨引弧过程中短路和燃弧状态实现。考虑到判断的可靠性,设定由空载到短路过程,采样值 $< 50\text{ V}$ 认为钨极与工件短路,开始计时短路时间;由短路到燃弧过程,采样值 $> 8\text{ V}$ 认为钨极已提离工件,开始输出热引弧电流。实现直接接触式小电流提升引弧过程的电流、电压控制波形如图 2 所示。

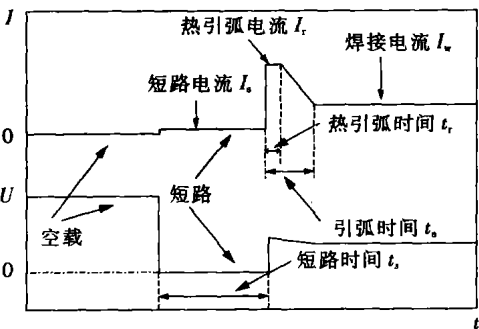


图 2 接触引弧过程电流、电压控制波形

Fig. 2 Controlling waveform of current and voltage on striking arc process

2 窄间隙焊接时钨极摆动轨迹分析及控制

钨极摆动控制机构用以保证焊缝均匀及熔合良好,焊枪实际运动轨迹如图 3 所示。从图中可以看出,在钨极摆动到端点 5~4 和 3~2 区间,焊接电流为峰值 I_p ;而在钨极摆动过程中 4~3 和 2~1 区间,焊接电流为基值 I_b 。峰值电流 I_p 与基值电流 I_b 分别对应了两个弧压 U_p 和 U_b 。不难分析,仅取电压作为控制参量,如果只设定一个电压值,对应基值、峰值电流会有两个电弧长度,影响电弧稳定性。所以设计可以设定两个电压值,分别对应基值、峰值电流,只要两个电压值设定合理,两个电流会有一个电弧长度。

在窄间隙 U 形坡口全位置焊中。由于导轨安装精度和坡口机加精度的限制,导轨与环缝不可能处处平行,焊接过程中钨极的摆动中心常偏离焊缝中心,使钨极摆动中有一端点离焊道侧壁过近,按照弧压最小原理,将在钨极尖端和侧壁之间建立电弧,弧压下降,此时若以峰值时弧压参量控制弧长,焊枪将上提,但由于上提中钨极尖端与焊道侧壁间的距

离几乎不变,使焊枪持续上提直至钨极回摆。上述现象(爬弧)的后果表现为无法实现正常窄间隙焊接,弧长的大范围变化使焊丝不能送入熔池,熔池难以保持。焊枪的上下剧烈运动,使熔滴易飞溅到钨极尖端,钨极失去尖端放电的特性,弧长控制紊乱。通过分析发现,如果钨极摆动在两端停留时间短,如图 3,钨极在两端沿焊道的移动距离 L_2 很小,弧长几乎不会变化,则峰值电流不调节弧长,即可防止电弧爬壁现象,这样在钨极摆动过程中,弧长将保持一致,但如果 L_2 太小,可能影响焊缝侧壁熔透,所以 L_2 选择要综合考虑。根据厚壁管窄间隙焊接工艺要求,焊机弧长控制模式有如下两个选择:(1)仅在基值电压控制弧长;(2)依据基、峰值电压值来分别控制弧长。在不考虑钨极横向运动轨迹控制情况下,第一种方式应用于坡口内,可避免电弧爬壁现象。第二种方式用于窄间隙盖面焊接。

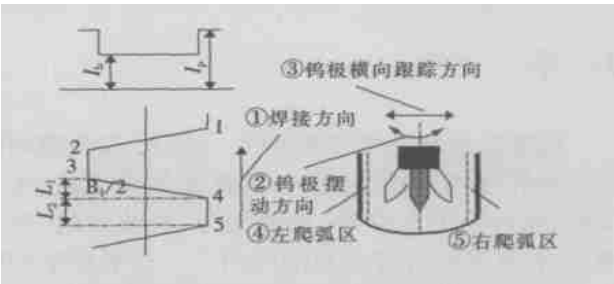
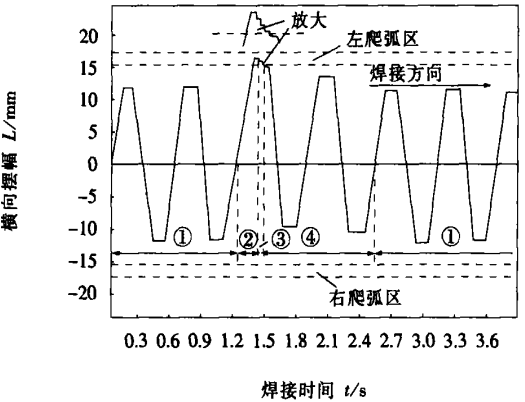


图 3 钨极摆动脉冲 TIG 焊钨极的运动轨迹

Fig. 3 Moving track of tungsten swaying pulse TIG welding

为克服弧长调节在 U 形坡口两侧壁出现“爬弧现象”。除在弧长调节采取相应控制模式外,又设计了摆动电弧焊缝横向运动轨迹跟踪系统,完成焊缝横向运动轨迹自动跟踪。该跟踪系统首先统计正常焊接时焊接电弧在图 3 的 2~3 段和 4~5 段电弧电压,再统计爬弧时焊接电弧在图 3 的 2~3 段和 4~5 段电弧电压,通过对两组数据进行分析,找出电弧电压突变带,并形成小型爬弧电压数据库。在焊接过程中,系统采集图 3 的 2~3 段和 4~5 段电弧电压,并与爬弧电压数据库电弧电压比较,在特定时间(小于 1/3 峰值电流时间)内电弧电压如果是爬弧电压,则钨极做相应横向调节,使得钨极摆动轨迹在焊缝横向做一次平移(0.25 mm),平移后再采电弧电压,判断钨极摆动轨迹是否移出爬弧区(图 3 中④⑤),如果一次平移未移出爬弧区,再继续向同一方向平移,直到钨极摆动轨迹移出爬弧区为止(见图 4)。这样在钨极横向运动轨迹控制配合下,可以用基、峰

值电压值来分别控制弧长, 使得在窄间隙全位置焊接中, 钨极运动轨迹控制更加灵活, 提高焊接自动化程度和焊缝质量。作者做了”爬弧”现象扰动试验, 在焊接过程中, 手动调节横向位移, 使钨极左端点摆动进入”爬弧”区, 其调节过程见图 4, 当出现”爬弧”现象时, 能灵敏进行调节。



①正常焊接; ②干扰; ③在爬弧区快速调整; ④在焊接区调整

图 4 横向跟踪调整过程

Fig. 4 Tracing and adjusting transversely process

3 窄间隙全位置焊接时钨极纵向运动轨迹控制

在窄间隙全位置焊接时, 钨极纵向运动轨迹是由摆杆带动焊枪沿无间隙导轨往复运动实现的。如图 5 所示。

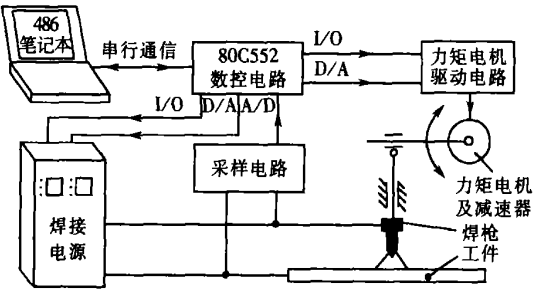


图 5 钨极纵向运动控制系统结构图

Fig. 5 Controlling system of tungsten moving along welding torch axes

在电弧长度与弧压之间的线性关系基础上, 可以用线性数字 PID 控制来实现弧长的自动调节, 其整定过程和钨极运动状态见参考文献[5], 采用扩充临界比例度法整定出 PID 算式

$$\Delta u(k) = K_p [3.43e(k) - 5.44e(k-1) + 2.22e(k-2)]$$

(1)

通过微机编程实现以上算式, 即能实现 PID 控

制功能。在 PID 控制弧长调节开始或停止工作的瞬间或者大幅度地给定量时, 由于偏差较大, 故在积分项的作用下, 将会产生一个很大的超调, 如图 6 中曲线 2 所示。

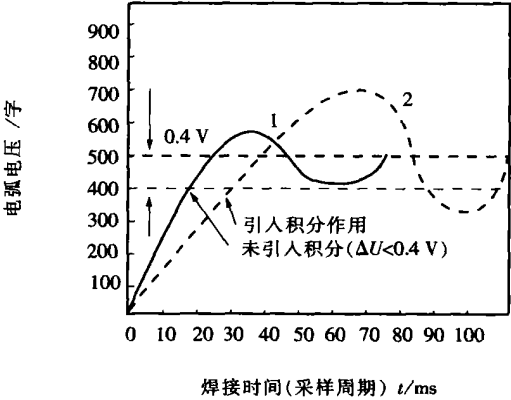


图 6 积分分离作用曲线比较

Fig. 6 Comparing integral separating curve

为此, 可以采用积分分离手段, 即在被控制量开始跟踪时, 取消积分作用, 直到被控制量接近新的给定值时, 才可以在 PID 算式中进行, 为改善系统的控制, 作者对 PID 积分分离控制方法做了进一步改进, 引入如下的算法逻辑功能。

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) =$$
$$K_p \{ [e(k) - e(k-1)] + K_i \frac{T_s}{T_i} e(k) +$$
$$\frac{T_D}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \}, \quad (2)$$

式中: $e(k)$ 为 k 时刻控制器输入信号; $u(k)$ 为 k 时刻控制器输出信号; K_p 为控制器放大系数; T_i 为控制器积分时间常数; T_D 为控制器微分时间常数; T_s 为采样周期; K_i 为引入的逻辑系数。

$$K_i = \begin{cases} 1 & e(k) \leq 0.4 \text{ V} \\ 0 & e(k) > 0.4 \text{ V} \end{cases} \quad (3)$$

图 6 中曲线 1 为采用了积分分离手段后的控制过程。比较曲线 1 和 2 可见, 应用积分分离方法后, 显著降低了被控制弧长在开始时的超调量, 并缩短了调节时间。

为补偿钨极纵向运动过程的非线性因素, 采用可变增益 PID 算法

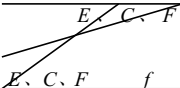
$$u(t) = f(e) \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

$f(e)$ 通过模糊决策确定, 设计中以电弧电压的偏差 e 及其偏差变化率 $\dot{e}$ 作为输入语言变量 E 和 C , 输出控制量 $f(e)$ 作为语言变量 F , 分别对应三个模糊集 E, C 和 F 。为了减少超调量和避免振荡现象, 保证系统的稳定性, 将系统输出的偏差及偏差变化率同时作为反馈信息。 E, C, F 的变化范围(即论域)均设定为 $[-6, +6]$ 。将 E, C, F 分别划分为

7 档, 形成 7 个模糊子集, 分别为 $NL, NM, NS, 0, PS, PM, PL$ 。每个模糊子集的论域为 $[-6, -5, \dots, 0, \dots, +5, +6]$ 。语言变量的隶属函数取为正态分布函数, 即 $\mu(x)=\exp\left[-(\frac{x-a}{b})^2\right]$, 则 E, C, F 从属于每个模糊子集的隶属函数, 如表 1 所示。

模糊控制规则的选择是模糊控制器的核心, 主

表 1 E, C, F 的隶属度表
Table 1 E, C, F distribution table of fuzzy

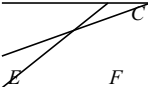
 E, C, F f		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
$E_1C_1U_1$	NL	1.00	0.80	0.60	0.30	0.10	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$E_2C_2U_2$	NM	0.60	0.80	1.00	0.80	0.60	0.30	0.10	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
$E_3C_3U_3$	NS	0.10	0.30	0.60	0.80	1.00	0.80	0.60	0.30	0.10	0.05	0.01	0.00	0.00
$E_4C_4U_4$	0	0.01	0.05	0.10	0.30	0.60	0.80	1.00	0.80	0.60	0.30	0.10	0.05	0.01
$E_5C_5U_5$	PS	0.00	0.00	0.01	0.05	0.10	0.30	0.60	0.80	1.00	0.80	0.60	0.30	0.10
$E_6C_6U_6$	PM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.10	0.30	0.60	0.80	1.00	0.80	0.60
$E_7C_7U_7$	PL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.10	0.30	0.60	0.80	1.00

要以人的经验为依据。系统采用控制规则为: 若弧压高于给定值, 则使焊枪向下运动, 差值越大, $f(e)$ 缓慢变大, 避免焊枪向下调整量过大, 产生钨极烧损; 若弧压低于给定值, 则使焊枪向上运动, 差值越大, $f(e)$ 快速变大, 避免由于焊枪向上调整缓慢, 造成钨极与工件接触, 影响焊接过程正常运行。根据这些语言推理规则, 经过模糊数学的运算, 便可获得

相应的控制策略, 即对于每一对输入量 E 和 C , 可得到一个相应的输出量 F 。系统采用 Zadeh's 推理合成规则来获取控制策略 F 。

模糊算法器的输出是一个模糊量 F , 在控制过程中必须将该模糊量经过模糊判决转换成相应的精确控制量 F 。系统采用加权平均法得到 13×13 总控制表(如表2所示)。这样在模糊控制过程中, 由

表 2 模糊总控制表
Table 2 Chief rule table of fuzzy

 E C		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6		1.26	1.23	1.26	1.23	1.12	0.95	0.86	0.79	0.62	0.43	0.29	0.10	0
-5		1.23	1.01	1.01	1.01	0.89	0.72	0.64	0.57	0.42	0.28	0.14	0	0.06
-4		1.26	1.01	0.85	0.83	0.72	0.58	0.52	0.42	0.30	0.14	0	0.08	0.19
-3		1.23	1.01	0.83	0.73	0.61	0.49	0.40	0.29	0.17	0	0.06	0.18	0.33
-2		1.12	0.89	0.72	0.61	0.45	0.33	0.23	0.12	0	0.09	0.20	0.32	0.52
-1		0.95	0.72	0.58	0.49	0.33	0.20	0.10	0	0.08	0.19	0.32	0.47	0.69
0		0.86	0.64	0.52	0.40	0.23	0.10	0	0.07	0.23	0.30	0.42	0.54	0.76
+1		0.79	0.57	0.42	0.29	0.12	0	0.07	0.13	0.23	0.39	0.48	0.52	0.85
+2		0.62	0.42	0.30	0.17	0	0.08	0.17	0.23	0.35	0.51	0.62	0.69	0.88
+3		0.43	0.28	0.14	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.51	0.63	0.73	0.90	1.00
+4		0.29	0.14	0	0.10	0.20	0.32	0.42	0.48	0.62	0.73	0.75	0.91	1.10
+5		0.10	0	0.10	0.18	0.32	0.47	0.54	0.62	0.79	0.91	0.91	0.91	1.00
+6		0	0.10	0.20	0.33	0.42	0.59	0.66	0.75	0.90	1.00	1.10	1.00	1.10

输入量 E 和 C 便可得出一个控制量 F 。

由于总控制表的计算工作量较大,故采用离线计算方法完成,并将其事先写入微机的存储器中,在实时控制中,只需通过查表的形式,便可获得实时的控制量 F ,焊枪运动方向由 $e(t)$ 正负决定,所以表 2 中无正负号。

4 结 论

(1) 通过对钨极接触引弧轨迹分析及其轨迹上的各参数作用机理研究,提出钨极柔性接触引弧法,采用该引弧法,钨极烧损和焊缝夹钨远小于普通的接触引弧方式;在不同的空间位置都有很高的引弧成功率。

(2) 根据钨极摆动轨迹分析,提出基值电压控制弧长和基、峰值电压值分别控制弧长两种方案。采取基、峰值电压值分别控制弧长与钨极横向运动轨迹控制相配合,避免了窄间隙焊接“爬弧现象”,使窄间隙焊接两侧壁充分熔透,经超声波探伤及接头力学性能、金相检验,符合焊接工艺要求。

(3) 由于全位置焊过程中,重力等因素的影响,弧长调节的阻力是不断变化的,因而设计了可变增益PID控制器,并针对不同的偏差范围分离积分和

变增益改善其控制品质,取得了较好的控制效果。

参考文献:

- [1] 徐绪炯. 国外全位置自动 TIG 管焊机中的一种新型弧长自动控制系统[J]. 电焊机, 1997, 27(1): 45—47.
- [2] Vikulik. Orbital arc welding pipelines[J]. Welding International, 1993 7(11): 901—904.
- [3] 都 东, 韩赞东, 张人豪. TIG 焊提升引弧方法的研究与应用[J]. 焊接技术, 1997, 4(1): 21—23.
- [4] Alistair Greig. Automatic inspection of complex geometry welds [A]. 5th international conference on advanced robotics[C]. 1991. 1788—1791.
- [5] Liu Lijun, Han Yongkui, Lu Yunlong. Design of changeable gain arc length PID controller for all-position welding of thick-wall pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution 2001, 22(2): 59—61. 刘立君, 韩永馥, 遯云龙. 厚壁管窄间隙全位置焊接可变增益弧长调节PID控制器的设计[J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 59—61.

作者简介: 刘立君,男,1968年出生,副教授,博士研究生,硕士研究生导师。主要研究焊接过程自动控制,主持和参加国家、省部级项目 10 余项,发表论文 20 篇。

Email: 888LiuLijun@163.com

[上接第 16 页]

会[C]. 2002.

- [3] Nakayama Quen, Liang Chenghao, Akashi Masatsune. Repassivation method for determining the critical potential for initiation of stress-corrosion cracking[J]. Corrosion Engineering, 1996, 45(5): 298—304.
- [4] Parkins R N. Conceptual understanding and life prediction for SCC of pipeline[A]. Proceeding of corrosion/96 research topical symposia[C]. NACE publication, Houston, Texas, USA, 1996. 1—49.
- [5] Pilkey A K, Lambert S B, Plumtree A. Stress corrosion cracking of X—60 line pipeline steel in a carbonate-bicarbonate solution[J]. Corrosion, 1995, 51(1): 91—99.
- [6] 米运卿, 周光祺. 管线钢焊缝的应力腐蚀破裂研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(8): 64—69.
- [7] 向井喜彦, 村田雅人. オーステナイト系ステンレス鋼ならびにその溶接継手における応力腐食割れ伝播特性の破壊力学的評価にする研究(第1報)——応力腐食割れの形

態と破壊力学の適用性について[J]. 溶接学会誌, 1979, 48(2): 64—69.

- [8] 左景伊. 应力腐蚀破裂[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [9] Parkins R N. The theory of stress corrosion cracking in alloys[C]. Ed J C Scully. NATO. 1971. 167—185.

作者简介: 杜则裕,男,1939年2月出生,教授、博士生导师。现从事材料加工工程专业的教学及科研工作。主要研究方向为焊接冶金学、金属材料焊接性、焊接材料、表面工程学等。多年来,主持及作为主要研究人员参加并完成国家教委博士点基金、国家自然科学基金、冶金部、中国石油天然气集团公司、天津市科委等省部级科研项目 10 项。获省部级以上科技进步奖 7 项。主编及参编机械工业出版社、电子工业出版社等出版的著作、全国高校统编教材等 10 部。发表论文 90 余篇。

Email: duzey@sohu.com