

高压干法 GMAW 电弧特性 对焊接电源控制算法的影响

李 凯^{1,2}, 高洪明², 李海超²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130000;
2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用高压环境模拟舱对高压干法熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)进行了试验研究. 焊接电源采用数字增量型 PID 算法, 在常压下进行控制器系数整定. 通过试验获得了环境压力为 0.4, 0.8, 2 MPa 时焊接电弧弧柱区的电场强度, 理论推导了压力环境电弧特性的改变对焊接电源控制品质的影响规律, 并将环境压力作为变量引入到控制器算法中. 采用常压下整定的控制器系数, 在环境压力为 0.8 MPa 时, 对算法改进前后进行了试验验证. 结果表明, 改进后的焊接电源控制算法能够有效减少焊接电流的波动, 从而提高了焊接过程稳定性, 使焊接过程产生的飞溅尺寸和数量有所改善.

关键词: 高压干法 GMAW; 电弧特性; 焊接电源

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20151109001

0 序 言

随着国内对海洋资源开发力度的加大, 船舶、采油平台、海底管道等结构件的安装与维修工作日益增多, 而水下焊接作为水下连接方法的重要技术之一, 也受到国内外诸多学者的广泛关注^[1-3]. 随着环境压力的增加, 高压干法焊接电弧弧柱区电场强度增加, 电弧静特性曲线上移. 对于高压干法 GMAW 焊接过程, 国外学者^[4-5]指出, 由于压力环境中电弧静特性曲线、电弧形态均发生改变, 导致焊接电弧不稳定, 熔滴过渡受到阻碍, 甚至难以过渡, 从而产生大量的飞溅; 为改善熔滴过渡稳定性, 英国学者^[6]采用脉冲电流配合短弧长的方式, 取得了一定的成效, 但由于电弧较短(小于 1 mm), 在实际焊接应用中也受到一定局限; 国内学者^[7]尝试采用辅助纵向磁场的方式改善飞溅情况, 但效果并不明显.

文献[8]也针对高压干法 GMAW 电弧特性进行了研究, 分析了环境压力等对焊接电弧特性的影响规律, 并给出了相应的电弧电压数学模型.

采用高压环境模拟舱和开放式的焊接电源对高压干法 GMAW 进行了焊接试验研究, 通过对比不同环境压力时电弧弧柱区电场强度的变化, 得出环境压力对焊接电源弧压反馈控制的影响规律, 从常压

下整定的控制参数得出高压环境中合适的控制参数, 并进行了试验验证.

1 试验方法

高压干法焊接是借助高压环境焊接试验系统完成的, 如图 1 所示, 其主要包括高压环境模拟舱、自动焊接控制系统、压力介质增压器等. GMAW 焊接过程在高压环境模拟舱中进行的, 如图 1a 所示, 该模拟舱能够模拟最大 5 MPa 气体或液体介质的压力环境, 舱内容积 0.6 m³, 介质压力可控精度为 0.01 MPa.

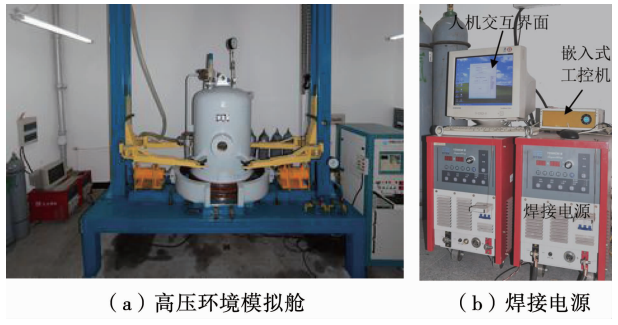


图 1 高压环境焊接试验系统
Fig. 1 Hyperbaric welding experimental system

试验用焊丝为 H08Mn2SiA, 直径为 1.0 mm; 母材为 Q235 低碳钢板, 厚度 8 mm, 压力介质与焊接保

护气体均为氩气,试验时先将舱内压力减至 0.02 MPa,然后再填充氩气至试验压力. 试验中采用直流反接,焊接速度为 0.36 m/min,保护气体流量 15 L/min,导电嘴与工件距离 20 mm.

Nixon^[9]在其著作《Underwater repair technology》中给出经验公式(1),描述了电弧电压、电弧长度和环境压力之间的关系.

$$U_{Arc} = U_0 + EL \sqrt{10P}$$

(1)

式中: U_{Arc} 为电弧电压(V); U_0 为常压时电极压降和(V); E 为常压时弧柱区电场强度(V/m); L 为电弧长度(m); P 为绝对环境压力(MPa).

图 1b 为焊接电源照片,采用可编程控制的开放

式焊机,其原理如图 2 所示,焊接电源内置输出电压闭环反馈,数据采集卡将测得的焊接电压信号传入嵌入式工控机,工控机根据一定的软件算法,通过计数器输出 40 kHz 的 PWM 信号,对焊接电源的 IGBT 进行控制,使输出特性可根据需要编程进行调整,其最大输出能力为 450 A/55 V.

为了使焊接电源实现恒压输出特性,文中所采用的控制算法为数字增量 PID 算法. 第 k 步输出的控制量 $u(k)$ 、控制量偏差 $\Delta u(k)$ 可分别表示为

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

(1)

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

(2)

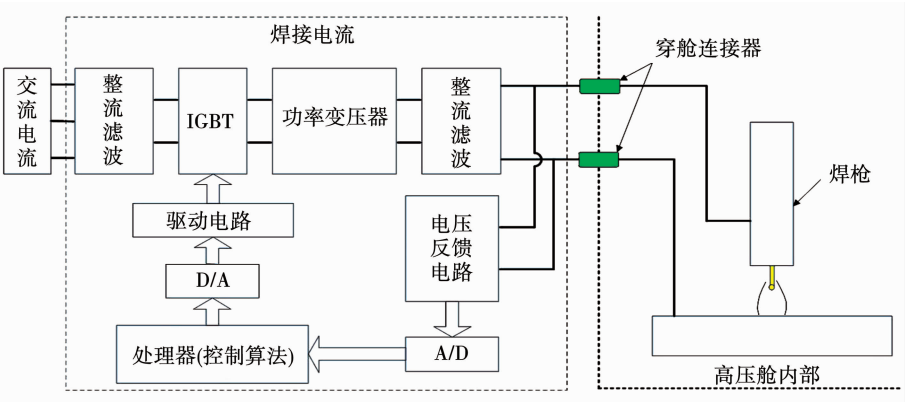


图 2 焊接电源控制系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of welding power source control system

式中: $e(k)$ 为第 k 步的系统偏差量; K_p 为比例系数; K_I 为积分系数; K_D 为微分系数.

文中采用了常压下试凑法进行 PID 参数的整定,首先通过电阻箱给予阶跃信号,记录控制器的响应曲线;当大致确定了控制参数的范围后,通过燃弧焊接试验,不断修改控制器参数,当得到稳定的焊接过程后,最终确定控制参数. 根据上述方法,先确定了较好的比例系数取值范围为 0.003 ~ 0.005. 再根据大量的试凑试验,发现积分系数 K_I 大于 0.001 后控制品质下降,而小于 0.001 的积分系数作用不明显,且需要占用一定的 CPU 时间,故文中不添加积分控制环节. 而微分系数 K_D 加入后,存在外部扰动时系统的鲁棒性下降,故最终确定采用纯比例控制. 根据常压下的燃弧焊接试验,比例系数 K_p 选取为 0.003.

2 高压干法 GMAW 电弧特性

常压下电弧弧长与焊接电压之间的关系可近似采用式(3)表示为

$$U = U_{AC} + E \cdot L$$

(3)

式中: U_{AC} 为阴极压降、阳极压降之和(V); E 为弧柱区电场强度(V/mm); L 为电弧弧柱区长度(mm).

由于阴极区与阳极区长度较短,故一般近似的认为弧柱区长度即为电弧长度,直线的斜率即为弧柱区的电场强度.

在环境压力分别为 0.4,0.8,2 MPa 进行了电弧特性研究,设定送丝速度为 8 m/min 不变,进行高压干法 GMAW 试验,可以得出如图 3 所示焊接电压与电弧长度之间的关系,电弧长度随焊接电压的增加逐渐增加,该规律与常压时一致;且弧长与电压之间仍具有较好的线性关系. 其斜率与环境压力有关,当环境压力增加时,直线斜率随之增加. 根据式(3)对图 3 中的试验数据进行线性拟合,得出 0.4,0.8,2 MPa 时的弧柱区电场强度 E 分别为 2.59,4.44,6.09 V/mm,阴极压降、阳极压降之和 U_{AC} 在 20.2 ~ 21.7 V 之间;拟合相关系数 R^2 分别为 0.994,0.979,0.968,其均接近 1,表明具有很好的线性关系.

将式(3)与式(1)对比可知,高压环境中弧柱区

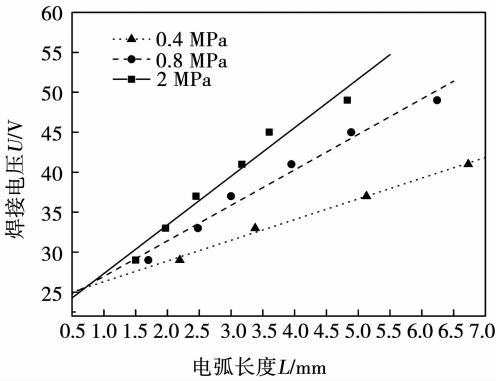


图 3 焊接电压与电弧长度试验数据拟合结果
Fig. 3 Arc length by different welding voltage

电场强度的修正值可通过如下经验公式表示为

$$E_p = E \sqrt{10P} \quad (4)$$

式中: E_p 为环境压力 P 时弧柱区电场强度(V/mm).

文献[10]中给出了常压下氩弧电场强度约为 1.47 V/mm,代入式(4)中并将其结果与试验结果对比,如图 4 所示,可见试验结果与通过经验公式计算的修正值有较好的一致性.由此可见,随着环境压力的增加,电弧弧柱区电场强度逐渐增加.

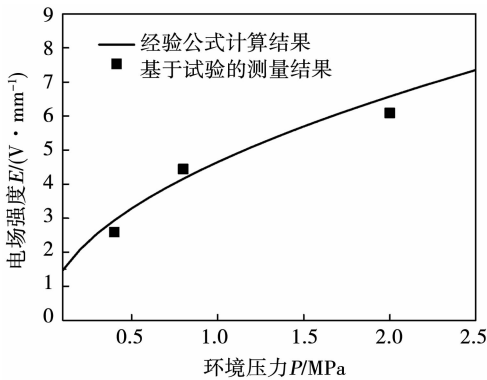


图 4 弧柱区电场强度的经验公式计算值与试验值对比
Fig. 4 Electric field intensity of welding arc column between calculation and experiment

3 环境压力对焊接电源控制特性的影响

焊接过程的稳定性不但受外界环境压力改变的影响,还与焊接电源控制品质有关.恒压焊接电源主要是通过弧压反馈来调整输出的焊接电流,保证复杂的焊接过程中弧长的稳定.由于环境压力的增加改变了焊接电弧弧柱区的电场强度,使弧压反馈过程的灵敏度发生了改变,从而影响电源的控制品质.

设熔滴长大过程中时,电弧稳定燃烧时电弧电压与设定电压保持一致为 U ,稳定燃烧时的弧长为 L_0 .当熔滴脱离焊丝端部或受到其它干扰时,弧长随之变化,设其变化量为 ΔL ,则在某一环境压力 P 时,电弧电压波动大小可以表示为

$$\Delta U = E_p \Delta L \quad (5)$$

由前面的介绍可知,文中所使用的焊接电源控制算法为数字增量型 PID,采用纯比例控制,其控制量偏差 $\Delta u(k)$ 的算法简化为

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] \quad (6)$$

若在第 k 步时,弧长发生突变,焊接电源反馈信号为当前的焊接电压,即发生了 ΔU 的变化;而在上一时刻,第 $k-1$ 步时,由于电弧处于稳定燃烧时,反馈的电压信号与设定值保持一致,则两步的系统偏差量分别为

$$e(k) = \Delta U \quad (7)$$

$$e(k-1) = 0 \quad (8)$$

将式(5),式(7),式(8)带入到式(6)中,则焊接电源当前第 k 步的控制量偏差 $\Delta u(k)$ 为

$$\Delta u(k) = K_p \cdot E_p \cdot \Delta L \quad (9)$$

根据经验公式(4)可得

$$\Delta u(k) = \sqrt{10P} \cdot K_p \cdot E \cdot \Delta L \quad (10)$$

若环境压力分别为 P_1 和 P_2 时,且 $P_1 < P_2$,当前步的控制量偏差分别为 $\Delta u_1(k)$, $\Delta u_2(k)$.当弧长变化量 ΔL 相同时,则有 $\Delta u_1(k) < \Delta u_2(k)$.由此可见,不同环境压力时,同样大小的弧长改变量,在焊接电源控制系统中将输出不同的控制量,且环境压力越高,焊接电源输出的控制量的变化越大,而焊接电源的控制量为输出电流,故在高压环境中,采用与常压相同的比例系数容易产生超调现象,影响控制品质.故需要根据环境压力值修正焊接电源控制系统中的比例系数,则有

$$K_p = K'_p / \sqrt{10P} \quad (11)$$

式中: K'_p 为常压下整定的控制器比例系数.

将上述修正后的比例系数写入到控制器中,在 0.8 MPa 压力环境中进行了试验验证.试验中保持焊接电压为 37 V 不变,分别进行了送丝速度为 6, 8, 10 m/min 时的焊接试验,试验获得的焊缝成形如图 5 所示,其中送丝速度为 6 m/min 时,电源控制参数修改前后所采集的电流、电压波形如图 6 所示.

由于压力环境中焊接电弧的形态发生变化,从而对熔滴过渡受力产生影响,相比常压下的焊接过程其飞溅量明显增加,从图 5 中可以看出,改变电源控制特性后焊接过程的稳定性稍有增加,飞溅尺寸、飞溅数量有所改善;对比电流电压波形图可以看出,

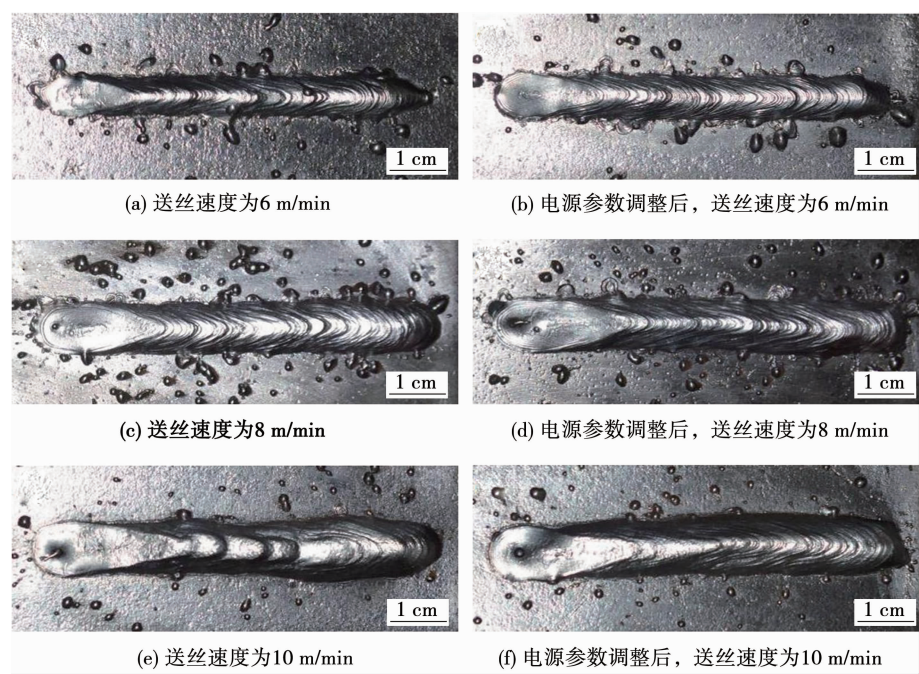


图 5 焊接电源控制参数调整前后获得的焊缝形貌
Fig. 5 Weld appearances by different power source control value

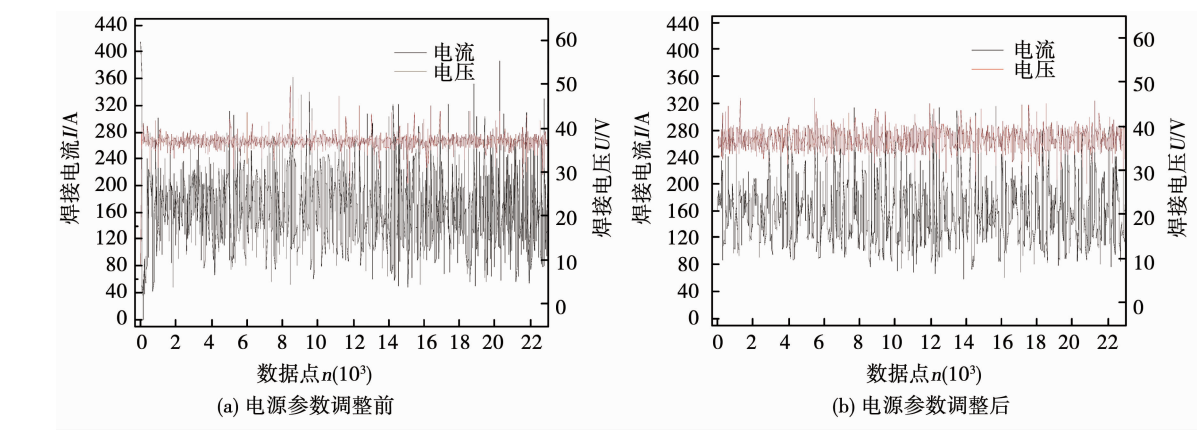


图 6 焊接电源控制参数调整前后的电流、电压波形图
Fig. 6 Welding voltage and current by different power source control value

调整电源控制特性后焊接电流的波动范围明显减小,焊接电压波动范围有所增加. 将各组试验结果进行统计,如表 1 所示.

表 1 试验结果统计

Table 1 Experiment statistical results						
序 号	送丝速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	比例 系数	平均电 流 I/A	平均电 压 U/V	电流 方差	电压 方差
1	6	调整前	160	37.0	2 581	1.87
2	6	调整后	154	36.9	2 146	4.70
3	8	调整前	202	37.0	2 355	2.55
4	8	调整后	207	37.2	1 739	4.91
5	10	调整前	251	37.0	1 722	2.45
6	10	调整后	254	37.5	1 703	3.63

从试验结果中可以看出,在压力环境中调整焊接电源的比例系数后,不同送丝速度时电压方差均增大,且在送丝速度为 6,8 m/min 时,焊接电流的方差下降明显,即焊接电流的稳定性有所提高. 这主要是由于采用改进后的比例系数降低了焊接电源对反馈电压偏差的响应速度,改善了控制器的控制品质. 从电信号的统计结果来看,调整比例系数后虽然使焊接电压的稳定性降低了,但由于高压环境中焊接电压与弧长之间关系的敏感性降低,通过公式计算得出的比例系数能够有效保证弧长的稳定性,从而表现为焊接过程电流的稳定性得到了提高.

4 结 论

(1) 在高压干法 GMAW 中, 环境压力从 0.4 MPa 增加至 2 MPa 时, 电弧弧柱区电场强度由 2.59 V/mm 增加至 6.09 V/mm. 试验结果表明, 随着环境压力的增加, 焊接电弧弧柱区电场强度逐渐增加.

(2) 不同压力环境下电弧弧柱区电场强度的不同, 改变了焊接电源的控制品质. 通过理论推导得出环境压力增加后, 若保持焊接电源控制算法中常压下整定的比例系数不变, 则会产生超调现象.

(3) 基于经验公式的推导, 对 PID 控制器中比例系数进行修正并在环境压力为 0.8 MPa 时进行验证试验, 结果表明, 调整后的比例系数使焊接过程的电流方差下降, 提高了焊接电流的稳定性.

参考文献:

- [1] 李国进, 王国荣, 钟继光. 水下焊缝自动跟踪路径的识别[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 58-62.
Li Guojin, Wang Guorong, Zhong Jiguang. An recognition algorithm on underwater welding seam tracking route[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(3): 58-62.
- [2] 叶建雄, 张 华. 旋转电弧水下药芯焊丝电弧焊的智能化焊接系统[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 141-144.
Ye Jianxiong, Zhang Hua. Automatic underwater arc welding seam tracking system based on flux core wire and rotating arc sensor[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(3): 141-144.
- [3] 高 辉, 焦向东, 周灿丰, 等. 水下高压局部干式自动焊接试验装置控制系统[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 65-68.

Gao Hui, Jiao Xiangdong, Zhou Canfeng, *et al.* Control system of underwater high-pressure local dry automatic welding testing apparatus[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 65-68.

- [4] Perlman M, Pense A W, Stout R D. Ambient pressure effects on gas metal arc welding of mild steel[J]. Welding Journal, 1969, 48(6): 231s-238s.
- [5] Nishiguchi K, Matsunawa A. Gas metal arc welding in high pressure atmospheres-arc characteristics and bead formation mechanism[C]//Proceedings of the Second International Symposium of the Japan Welding Society on Advanced welding technology, Osaka, Japan, 1975: 72-82.
- [6] Richardson I M, Nixon J H. Open arc pulsed current GMAW: application to hyperbaric welding operations[C]//Proceedings of ASM International Welding Conference, 1985: 8513-8522.
- [7] 赵华夏. 高压环境焊接电弧特性及熔滴过渡行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [8] 黄继强, 薛 龙, 吕 涛, 等. 水下高压空气环境下 GMAW 电弧特性试验[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 17-20.
Huang Jiqiang, Xue Long, Lü Tao, *et al.* Experiment on characteristics of GMAW arc in underwater hyperbaric air condition [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(12): 17-20.
- [9] Nixon J H. Underwater repair technology[M]. Britain: Cambridge England, 2004.
- [10] 杨春利, 林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.

作者简介: 李 凯, 男, 1986 年出生, 博士. 主要从事自动化焊接、水下焊接方面研究. 已发表论文 12 篇. Email: likai. a@ cccar.com.cn

通讯作者: 高洪明, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: gaohm@hit.edu.cn