

# 高压干法 GMAW 熔滴排斥过渡形成机理

李 凯<sup>1,2</sup>, 高洪明<sup>2</sup>, 李海超<sup>2</sup>, 巩 杉<sup>2</sup>, 谢 昊<sup>2</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 工程规划发展部, 长春 130001;

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:** 采用红外激光作为背光源, 应用高速摄像系统对高压干法 GMAW 熔滴过渡进行了研究。以三种不同送丝速度, 分别进行了 0.1 ~ 2 MPa 的氩气环境 GMAW 试验。结果表明, 随着环境压力的增加, 熔滴过渡形式均转变为排斥过渡。在排斥过渡熔滴长大过程中, 始终伴随着电弧弧根沿一侧上爬至熔滴的近焊丝端现象, 从而对熔滴产生了不对称的侧向力作用, 加之高压环境中弧根面积减小导致熔滴所受的电磁力为熔滴过渡的阻力, 两者共同作用最终形成了高压干法 GMAW 的排斥过渡。通过对比不同环境压力下的弧根位置照片发现, 这种弧根上爬现象也同时存在于常压和环境压力较低时。并采用理论模型推导了电弧弧根上爬的条件及影响因素。

**关键词:** 高压干法; 熔化极焊接; 熔滴过渡

**中图分类号:** TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)07-0035-04

## 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。水下高压干法焊接过程中, 气体氛围压力的增加对焊接电弧、熔滴过渡产生了明显的影响<sup>[1]</sup>, 高压环境中电弧弧柱、弧根均收缩<sup>[2]</sup>, 电弧静特性曲线随环境压力的增加而上移<sup>[3]</sup>。熔滴过渡形式也与常压环境时明显不同, 主要表现为熔滴过渡不稳定, 甚至难以过渡<sup>[4]</sup>, 焊接过程中产生较多的飞溅, 直接影响了焊缝成形和质量。

国外学者<sup>[5]</sup>认为, 产生大量飞溅原因是存在来自熔池的“反向等离子流”的作用, 这种反向等离子流在电弧空间内对熔滴过渡产生了阻力作用, 从而阻碍了熔滴过渡。为了减少这一因素的影响, 英国学者<sup>[6]</sup>采用脉冲电流配合短弧长的方式, 使焊接过程在短路过渡形式下完成, 在一定程度上改善了焊接过程的稳定性。但目前国内外未对高压干法 GMAW 熔滴过渡进行广泛而深入的研究。

文中采用高速摄像对 0.1 ~ 2 MPa 环境压力的高压干法 GMAW 熔滴过渡进行研究, 针对排斥过渡形成过程中的电弧上爬现象进行了理论分析。

## 1 试验方法

高压干法焊接是在高压环境焊接试验系统中进行的, 如图 1 所示, 该试验系统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。该高压环境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 m<sup>3</sup>, 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

图 2 是 GMAW 焊接试验平台的示意图, 该平台主要包含电参数采集系统、高速摄像系统、舱内焊接试验系统、焊接电源。舱内焊接试验系统的控制信号与焊接功率通过穿舱连接器传入舱内; 高速摄像系统布置在舱外, 通过高压环境模拟舱的窗口拍摄舱内的熔滴过渡过程; 为了减小弧光对拍摄熔滴过

渡的影响,采用最大功率 20 W 的光纤激光器作为背光辅助光源,配合中心波长为 1 064 nm 的窄带滤光片进行拍摄;高速摄像机为 Camrecord 5 000 × 2,拍摄帧速 2000 幅/s,分辨率 512 像素 × 512 像素。

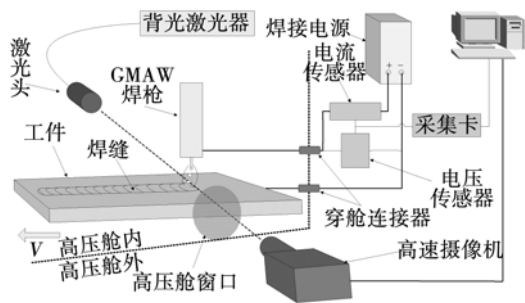


图2 高压干法 GMAW 试验平台  
Fig. 2 Experimental platform of hyperbaric GMAW

试验用焊丝为 H08Mn2SiA, 直径 1.0 mm; 母材为 Q235 低碳钢板, 厚度 8 mm, 试验前用砂轮清理试板表面的氧化层, 并采用丙酮清除工件表面的油污。压力介质与焊接保护气均为氩气, 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。

试验中焊接速度为 0.36 m/min, 保护气流量 15 L/min, 喷嘴与工件距离 10 mm, 采用直流反接, 选取三种送丝速度: 6, 8, 10 m/min, 两种焊接电压 29, 33 V, 分别在环境压力 0.1, 0.4, 0.8, 1.2 和 2 MPa 进行试验, 分析不同环境压力、不同焊接参数时的熔滴过渡形态, 为进一步分析排斥过渡形成机理提供试验基础。

2 试验结果分析

改变送丝速度、环境压力、焊接电压, 将焊接试验分为 28 组进行, 根据高压环境中熔滴过渡分类情况<sup>[7]</sup>, 各组试验结果如表 1 所示。

从上述试验结果中可以看出, 随着环境压力的增加, 熔滴过渡形式均转变为排斥过渡, 图 3 为典型的排斥过渡熔滴过渡形态, 其焊接参数为环境压力为 0.4 MPa、电弧电压 33 V, 送丝速度 6 m/min。在熔滴长大的过程中, 电弧弧根沿一侧上爬至熔滴的近焊丝端(图 3 中 219.75 ms)后, 熔滴偏离焊丝轴线方向长大, 直至脱离, 从而形成排斥过渡。在不同的环境压力时, 这种电弧弧根上爬现象总是存在的。

图 4 为不同环境压力时拍摄的弧根上爬最高位置, 可以看出, 这种爬升现象在常压时也存在, 只是电弧弧根铺展情况随环境压力的增加产生了明显的变化。由于常压下电弧弧根铺展较好, 电弧包裹在

表 1 高压干法 GMAW 焊接试验结果  
Table 1 Experiment results of hyperbaric GMAW

序号	送丝速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	电弧 电压 $U/V$	环境 压力 $p/MPa$	熔滴过渡 方式	过渡 频率 $f/Hz$
1	6	29	0.1	大滴过渡	8.9
2	6	29	0.4	大滴排斥过渡	12.1
3	6	29	0.8	大滴排斥过渡	10.3
4	6	29	1.2	大滴排斥过渡	13.3
5	6	29	2	大滴排斥过渡	28.3
6	6	33	0.4	大滴排斥过渡	18.9
7	6	33	0.8	大滴排斥过渡	19.1
8	6	33	1.2	大滴排斥过渡	24.8
9	6	33	2	混合过渡	33.2
10	8	29	0.1	射流过渡	—
11	8	29	0.4	大滴排斥过渡	17.5
12	8	29	0.8	大滴排斥过渡	36.7
13	8	29	1.2	大滴排斥过渡	37.2
14	8	29	2	大滴排斥过渡	41.3
15	8	33	0.4	混合过渡	191.6
16	8	33	0.8	大滴排斥过渡	61.1
17	8	33	1.2	大滴排斥过渡	61.5
18	8	33	2	大滴排斥过渡	58.1
19	10	29	0.1	混合过渡	—
20	10	29	0.4	混合过渡	—
21	10	29	0.8	大滴排斥过渡	53.2
22	10	29	1.2	大滴排斥过渡	58.4
23	10	29	2	大滴排斥过渡	66.5
24	10	33	0.1	射流过渡	—
25	10	33	0.4	射流过渡	—
26	10	33	0.8	射滴排斥过渡	142.1
27	10	33	1.2	大滴排斥过渡	111.8
28	10	33	2	大滴排斥过渡	94.2

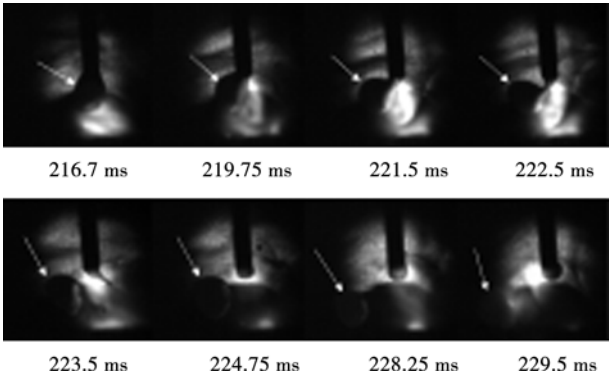


图3 典型排斥过渡高速摄像形貌  
Fig. 3 High-speed images of repelled transfer mode

熔滴周围燃烧, 未对熔滴产生非轴对称的侧向力作用。而压力环境中则不同, 环境压力增高后, 弧根面积收缩, 电弧无法均匀的铺展在熔滴四周, 取而代之的是收缩至熔滴的一侧表面燃烧, 伴随弧根上爬, 从而产生了使熔滴发生偏转的非轴对称的侧向力。

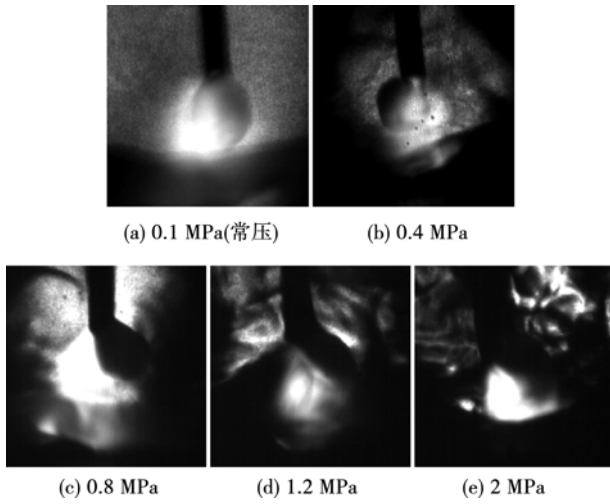


图 4 直流反接时不同环境压力下弧根位置(送丝速度 6 m/min)

Fig. 4 Arc root location with DCEP at different ambient pressure (wire feed speed: 6 m/min)

这种阳极弧根上爬现象与弧柱电场强度和熔滴温度有关。焊丝端部的熔滴温度高,由于碳钢材料的电阻率随温度的增加而升高<sup>[8,9]</sup>,其内部电阻也高于熔滴与焊丝交界面处。若电弧弧根在固液交界面处燃烧,因此而增加的弧柱区压降小于弧根在熔滴底部燃烧时熔滴内部电阻产生的压降,根据最小电压原理,则存在电弧弧根爬升至固液交界面处。

不同环境压力时,阳极弧根上爬现象可用如图 5 所示的模型来描述,假设分别存在两路电流  $i_1$ ,  $i_2$  经由熔滴表面的  $P_1$ ,  $P_2$  点进入电弧。其中,  $P_1$  点为固液交界面处,  $P_2$  点为熔滴底部,  $P_1$ ,  $P_2$  点距母材的高度分别为  $L_1$ ,  $L_2$ , 假设熔滴部分温度均匀且为  $T_e$ 。

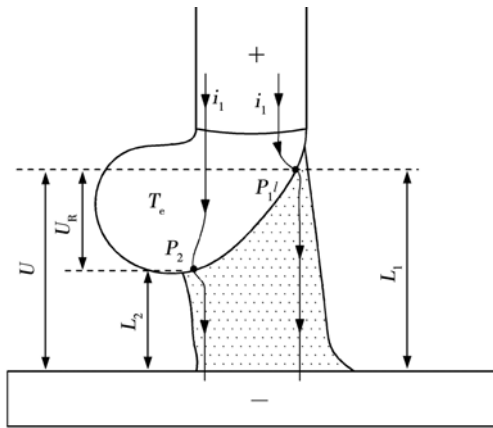


图 5 电弧弧根上爬现象计算模型

Fig. 5 Calculating model of arc root rising phenomenon

则  $i_1$ ,  $i_2$  两路电流总压降可以分别表示为

$$U_1 = U_{arc1} \quad (1)$$

$$U_2 = U_{arc2} + U_R \quad (2)$$

式中:  $U_1$  为电流流经路径 1 的总电压降;  $U_2$  为电流流经路径 2 的总电压降;  $U_{arc1}$  为路径 1 的电弧电压;  $U_{arc2}$  为路径 2 的电弧电压;  $U_R$  为路径 2 中熔滴电阻引起的电压降。

其中, 电弧电压由电极区压降、弧柱压降组成, 可以表示为

$$U_{arc} = U_{ac} + U_L \quad (3)$$

式中:  $U_{arc}$  电弧电压;  $U_{ac}$  电极区压降;  $U_L$  弧柱区压降。

当环境压力不同时, 弧柱区电场强度随之改变, 故电场强度是环境压力的函数, 进而弧柱区压降可由下式描述, 即

$$U_L = E(P) \cdot L \quad (4)$$

式中:  $E(P)$  为环境压力为  $P$  时的弧柱区电场强度;  $L$  为弧柱区长度。

若假设电流密度在熔滴内均匀分布, 熔滴截面积变化忽略不计, 则由于熔滴内电阻引起的电压降可以表示为

$$U_R = I \cdot R \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho(T_e)(L_1 - L_2)}{S} \quad (6)$$

式中:  $I$  为流经熔滴的电流;  $R$  为熔滴内部电阻;  $\rho(T_e)$  温度为  $T_e$  时熔滴内的电阻率;  $S$  为熔滴截面积。

故两路电流压降之差为

$$\Delta U = U_1 - U_2 = [E(P) - \frac{I}{S}\rho(T_e)] \cdot (L_1 - L_2) \quad (7)$$

根据最小电压原理, 当  $\Delta U < 0$  时, 电流优先选择流经  $P_1$  的路径, 即电弧弧根上爬至  $P_1$  点, 此时有

$$E(P) < \frac{I}{S}\rho(T_e) \quad (8)$$

由此可见, 焊接工艺确定后, 电弧阳极斑点向上爬升主要受环境压力、熔滴温度的影响。电弧弧根沿一侧上爬后, 熔滴才能受到不对称的侧向分力作用; 同时, 弧根面积减小导致熔滴所受的电磁力为熔滴过渡的阻力。两者共同作用最终形成了高压干法 GMAW 的排斥过渡。

### 3 结 论

(1) 通过 0.1 ~ 2 MPa 的高压干法 GMAW 焊接试验研究, 发现在不同的送丝速度时, 随着环境压力的增加, 熔滴过渡形式均转变为排斥过渡。

(2) 排斥过渡时, 始终伴随着电弧弧根沿一侧

上爬至熔滴的近焊丝端现象。弧根上爬现象也同时存在于常压和环境压力较低时,只是常压下电弧弧根铺展较好,电弧包裹在熔滴周围燃烧,而压力环境中由于弧根收缩至熔滴的一侧表面燃烧,从而产生了使熔滴发生偏转的非轴对称的侧向力。

(3) 采用简化后的模型从理论上推导了弧根上爬现象产生的条件,得出当焊接工艺参数不变时,电弧阳极斑点向上爬升主要受环境压力、熔滴温度的影响。

#### 参考文献:

- [1] Nixon JH. Underwater repair technology[M]. Britain: Cambridge England, 2004.
  - [2] Richardson I M, Nixon J H, Nosal P, *et al.* Hyperbaric GMA welding to 2500 m water depth [C] // Proc. Joint International Conf. New Orleans: ETC/OMAE, 2000, 2000 - 2160.
  - [3] 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, 1975.
  - [4] Richardson I, Nixon J. Open arc pulsed current GMAW: application to hyperbaric welding operations [C] // Proc. ASM International Welding Conference, 1985, 8513 - 8009.
  - [5] Richardson I, Nixon J, Nosal P, *et al.* Hyperbaric GMA welding to 2 500 m water depth [C] // Proceedings of the Joint International Conference ETC/OMAE, 2000, 927 - 936.
  - [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] Li Kai, Gao Hongming, Li Haichao, *et al.* Characteristic of hyperbaric GMAW metal transfer at 1 ~ 12 bar argon environment [J]. Advanced Materials Research, 2014, 900: 565 - 569.
  - [8] ASM. Metals Handbook - Vol I: Physical properties of carbon and low-alloy steel [M]. 9th Edition, American Society for Metals, 1978.
  - [9] ASM. Guide to engineered materials [M]. Advanced Materials & Processes, 1999.
- 
- 作者简介:** 李 凯,男,1986 年出生,博士研究生. 主要从事自动化焊接、水下焊接方面研究. 发表论文 8 篇. Email: likai. a@ cccar.com.cn
- 通讯作者:** 李海超,男,副教授. Email: lihaichao@ hit. edu. cn
- 

#### [上接第 34 页]

- [7] Lee C, Chang K. Numerical analysis of residual stresses in welds of similar or dissimilar steel weldments under superimposed tensile loads [J]. Computational Materials Science, 2007 (40): 548 - 556.
- [8] 叶延洪, 孙加民, 蔡建鹏, 等. 焊缝屈服强度对 SM490A 钢焊缝残余应力预测精度的影响 [J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 1 - 4. Ye Yanhong, Sun Jiamin, Cai Jianpeng, *et al.* Influence of yield

strength of weld metal on prediction accuracy of welding residual stress in SM490A steel joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 1 - 4.

---

**作者简介:** 孙加民,男,1989 年出生. 博士研究生. 主要从事焊接数值模拟方面的研究. Email: jiaminsun@ cqu. edu. cn.

**通讯作者:** 邓德安,男,教授,博士研究生导师. Email: deandeng@cqu.edu.cn.