

基于 X 射线高速摄像水下焊接熔滴过渡分析

杜永鹏^{1,2,3}, 郭 宁^{1,2}, 冯吉才^{1,2}

(1. 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;
2. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209;
3. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 青岛 266001)

摘 要: 水下湿法焊接技术是一种重要的水下施工工艺, 研究水下湿法熔滴过渡过程, 有助于深入分析焊接过程本质, 制定焊接工艺, 进而提高焊接质量. 但由于焊接过程中存在气泡, 难以借助传统研究手段研究水下焊接熔滴过渡过程. 为克服这一不利影响, 利用 X 射线不易发生反射、折射的特点, 搭建试验系统, 同步采集水下湿法焊接过程熔滴过渡图像与电信号并进行分析. 结果表明, 水下湿法药芯焊丝常见过渡形式有排斥过渡、固体短路过渡和表面张力过渡, 其中排斥过渡和固体短路过渡对焊接过程稳定性影响较大, 应加以抑制.

关键词: 水下湿法焊接; 高速摄像; 熔滴过渡

中图分类号: TG 456.5 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151204001

0 序 言

作为一种重要的水下施工工艺, 水下湿法焊接技术广泛应用于海底管线的铺设维修、沉船救助打捞、采油平台的建造维护、跨海大桥的修筑保养等工程当中, 为交通运输、海洋资源开发以及抢险救灾等领域提供技术保障^[1]. 研究水下湿法焊接的熔滴过渡过程, 进而掌握熔滴过渡的类型、频次和均匀性, 有助于研究电弧特征及焊接过程的稳定性.

常用的研究熔滴过渡的方法大致包括声信号分析^[2]、光谱分析^[3]、电信号分析^[4]和视觉分析^[5-6]四种方法. 其中, 视觉分析法直接观察熔滴过渡的图像, 是检测熔滴过渡最直观的途径. 由于电弧电压和电流信号、熔滴过渡直接相关, 且易于采集, 因此, 在视觉分析熔滴过渡特征时, 同步采集、分析电信号, 获取更为丰富的信息, 有助于焊接过程中电弧和熔滴行为的研究工作.

传统的视觉分析法借助配备滤光片的高速摄像装置对电弧区域进行观测, 为抑制弧光的影响, 通过背光技术, 提高拍摄清晰度. 李桓等人^[6]在熔化极电弧焊熔滴过渡过程高速摄像技术方面取得了丰硕的成果, 通过清晰的照片详细描述了熔滴过渡过程. 上述方法已成为陆上焊接过程熔滴过渡研究过程中常用的测试分析方法. 但在水下湿法焊接过程中,

气囊的存在是影响熔滴过渡过程拍摄的主要影响因素. 刘桑^[7]在研究水下药芯焊丝时, 采用水下 CCD 摄像系统对电弧进行观测, 通过试验发现受气囊的影响, 清晰度较差; 陈奕^[8]在研究湿法熔滴过渡过程时, 也认为由于高速摄像不能拍到清晰的熔滴过渡图像, 主要通过对电信号进行分析, 而高速摄像拍摄的图像作为定性分析的辅助手段.

为克服水环境在水下湿法焊接熔滴过渡过程检测过程中带来的不利影响, 文中介绍了一种 X 射线高速摄像系统. 借助该系统, 通过开展相关试验, 分析了水下湿法焊接熔滴过程, 总结了水下湿法药芯焊丝熔滴过渡类型, 为深入研究水下湿法焊接工艺提供了详实的试验依据和坚实的技术保障.

1 水下湿法焊接熔滴过渡分析系统

在水下湿法焊接过程中会产生大量的气泡. 受气泡产生与破灭的影响, 电弧周围的水会不规则扰动, 对传统成像系统的背光光路产生折射与发射, 降低了成像清晰度, 有时甚至无法观测到熔滴图像.

与可见光不同, X 射线波长短, 穿透性强, 且在透射过程中不易反射, 因此, 将 X 射线替代传统的背光光源, 用于水下熔滴过渡过程的观测, 能够克服水中气泡导致的不利影响, 通过不同密度的物质对射线的吸收程度不同, 获取熔滴、气泡、飞溅等物体的影像. X 射线不属于可见光, 在观测过程中, 配合 X 射线影像增强器, 将衰减程度不等的 X 射线转化成

光学摄像机可识别的图像,从而获得水下焊接熔滴过渡过程的清晰图像. 基于上述原理,开发了水下湿法焊接电弧图像波形同步采集分析系统,如图 1 所示. 该系统主要由影像采集系统、电信号采集系统和同步分析处理系统三部分构成.

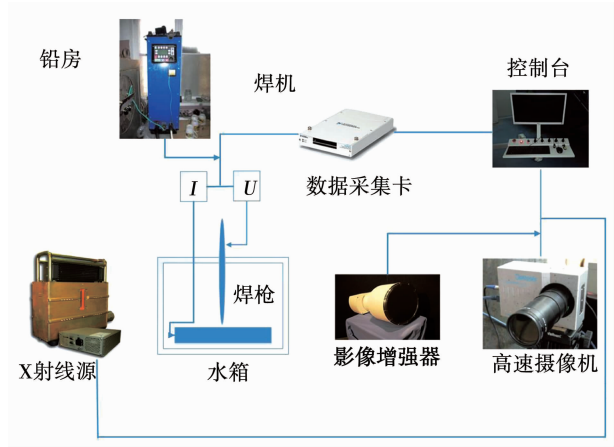


图 1 X 射线图像信息采集系统

Fig. 1 Schematic of X-ray imaging system

试验中焊接工艺参数如表 1 所示. 焊接过程中,电弧的图像采集采用高速摄像系统,由 X 射线源、高速摄像机和影像增强器组成,X 射线源发射出的射线穿过水下环境后,通过影像增强器将不可见的 X 射线图像转成可见光图像,X 射线源与图像增强器的距离为 0.3 m,高速相机帧率 2 000 fps,曝光时间 $1/2\ 000\text{ s}$. 借助专用软件,控制 X 射线源的通断以及 X 射线的强弱,以调节不同环境下图像的清晰度. 通过试验发现,当射线源管电压 120 kV、管电流 1 mA 时,能获得较为清晰的影像. 另外,为保证操作人员的人身安全,需将整套系统放置于铅房内,通过设计自动控制装置,试板固定后,焊枪移动、焊接启停控制等动作均在铅房外进行.

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding essential variables

导电嘴到 工件距离 d/mm	电弧电压 U/V	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	焊接 位置	水质
直流反接	20	32	5	1.5	平焊 淡水

获得清晰的熔滴过渡图像只是开展熔滴过渡分析的一项必要条件,除此之外,为深入分析熔滴过渡过程,获取更为丰富的信息,需要在高速摄像的同时,同步采集电弧电压、焊接电流等电信号,建立起

焊接工艺参数与熔滴过渡影像的对应关系.

电信号采集系统由数据采集卡、霍尔电压传感器和霍尔电流传感器等部分构成. 为实现同步采集,首先将高速摄像机设置为外部触发模式,带有高速输出 IO 端口功能的数据采集卡为摄像机提供触发信号. 当控制器向数据采集卡发出指令,开始采集电信号时,数据采集卡输出端口同时发出触发信号,高速相机同步开始工作.

2 水下湿法熔滴过渡类型

通过对在不同焊接工艺参数下焊接过程中同步采集的熔滴过渡图像以及电流电压波形图进行分析,在水下药芯焊丝湿法焊接中共发现三种基本过渡形式,分别为排斥过渡、短路过渡以及表面张力过渡. 为便于数据分析工作,编写程序,实现同步播放焊接过程熔滴过渡影像和电信号参数,通过该软件,建立电弧长度与焊接电流、电弧电压等参数之间的联系,获得如图 2 所示的电信号与高速摄影对应图.

2.1 排斥过渡

排斥过渡是水下湿法药芯焊丝焊接的基本过渡形式之一. 在水下湿法药芯焊丝焊接中,由于水环境的冷却作用使焊接电弧收缩,电场强度增大,单位电弧长度的电压降较大,又由于熔滴尺寸较大,当熔滴脱离焊丝时,弧长迅速增加,从而使电弧电压突然增大,焊接电流急剧减小,甚至会产生断弧现象. 由于水下焊接过程中水环境对电弧的影响以及气囊干扰作用,熔滴受力不稳定,其承受的排斥力较大. 当熔滴脱离焊丝时,熔滴偏离焊丝的角度越大越容易形成大颗粒飞溅,使得电弧燃烧稳定性变差.

排斥过渡的电弧电压—焊接电流波形如图 2a 所示,在排斥过渡的熔滴过渡周期内,由于熔滴不断绕焊丝端部摆动,电弧不稳,弧长不断发生变化,但由于选用的焊机为恒压外特性,所以焊接电流在一定范围内波动:当熔滴受排斥力作用上升时,瞬时弧长变大,电流变小;在重力作用下,当熔滴回到起始位置后,焊接电流恢复到原有水平.

2.2 短路过渡

短路过渡是指当焊丝的送丝速度大于其熔化速度时,随着焊丝的快速送进,在电弧燃烧一段时间后,熔滴便迅速与熔池接触并进入熔池内部,使焊丝与熔池短路,熔滴脱离焊丝的整个过程均在熔池内发生的过渡形式. 其典型过渡过程如图 2b 所示.

在短路过渡过程开始阶段,焊丝端部深入熔池,电弧熄灭,热输入量因此减少,熔化速度变小. 由于送丝速度恒定,此时的送丝速度远大于当前的熔化

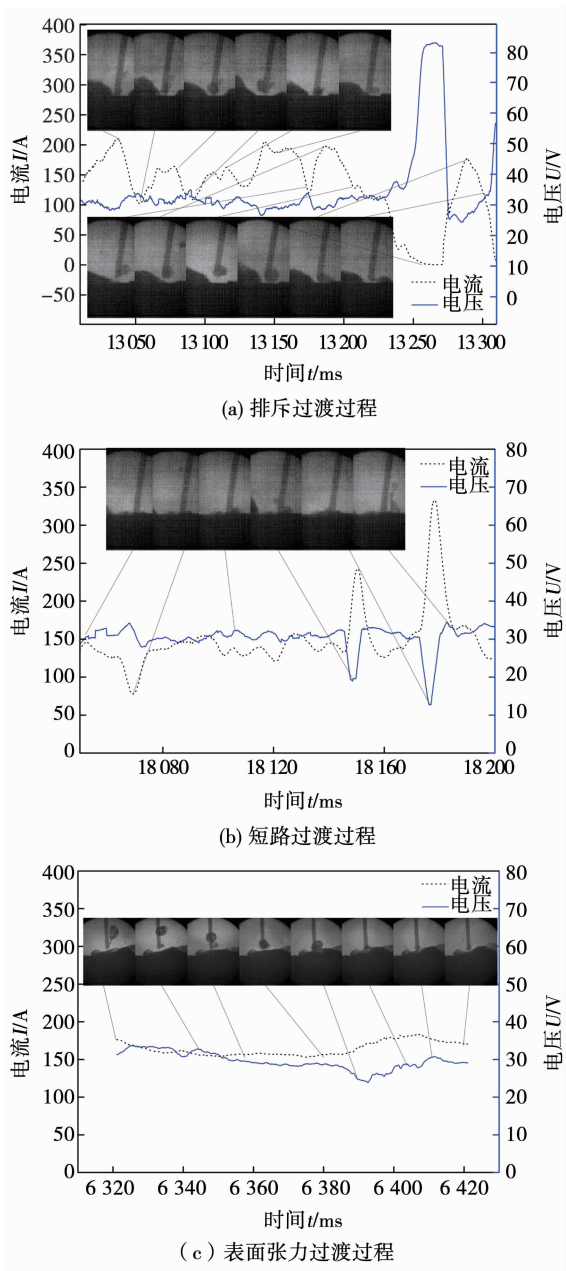


图2 电信号与熔滴过渡过程高速摄影的对应

Fig. 2 Relation between the electric waveform and photographs of metal transfer process

速度. 短路阶段电流值较高,受其影响,焦耳热大幅增加. 焦耳热主要作用于接触电阻较大的焊丝端部,一旦此时重新引弧,会在焊丝端部产生爆炸现象,产生飞溅,影响焊接过程稳定性. 发生短路过渡时,容易造成电弧熄弧,焊接过程不稳定;处于过热状态的药芯容易发生爆炸,导致焊接时熔池不稳定,细颗粒飞溅较多,焊缝成形较差.

在 X 摄像高速摄像过程中,由于电弧弧长较短,熔池周围的金属会影响熔滴过渡过程的视觉观测,即使短路过渡过程尚未发生,从获得的影像资料中也会发现焊丝端部全部深入熔池,因此,需要借助电

信号对短路过渡过程进行判断. 当焊丝与熔池短路时,电弧电压迅速降低,焊接电流急剧增大. 因此,可以借助电压陡降、焊接电流迅速上升这一显著特征区别短路过程与短弧焊接过程.

2.3 表面张力过渡

如图 2c 所示,表面张力过程通常包含熔滴排斥阶段和表面张力过渡阶段,与排斥过渡相比,表面张力过渡的典型特征是熔滴借助于表面张力,直接过渡到熔池. 过渡过程中没有短路电压和短路电流.

形成于焊丝端部的熔滴,由于受到排斥力的作用,在长大过程中被排斥至偏离焊丝轴线的位置并不断绕焊丝端部摆动,但由于弧长较短,随着焊丝送进,钢带熔化,熔滴不断长大,熔滴在未脱离焊丝之前便与熔池接触形成液桥并产生促进熔滴过渡的表面张力,在该表面张力以及径向电磁收缩力的作用下,液桥产生缩颈并最终断裂,使熔滴克服阻碍过渡力的作用脱离焊丝,向熔池过渡,熔滴过渡平稳,不易产生飞溅,有利于焊缝成形. 提高表面张力过渡所占的比例,可以有效地提高水下湿法焊接熔滴过渡的稳定性,改善水下焊接的工艺性.

3 电弧电压对熔滴过渡类型的影响

为探索焊接工艺参数对熔滴过渡的影响,设计相关试验,在如表 1 所示焊接工艺参数的基础上,单独改变焊接电弧电压和送丝速度,并随机选取时长 10 s 左右熔滴过渡过程影像,考察不同熔滴过渡类型所占比例. 从上一次熔滴过渡完成时刻开始,到熔滴完全过渡到熔池时刻为止,期间持续的时间即为一次熔滴过渡持续的时间. 各类过渡过程持续的时间与采样时间的比值即为该过渡类型所占比例.

如图 3a 所示,随着电压的增加,排斥过渡过程所占的比例逐渐增加,电压达到 38 V 时,排斥过渡的比例已经高于 50%;焊接电压对短路过渡过程的影响也较大,当电压低于 30 V 时,短路过渡的比例较高,达到 60%,随着电压的增加,短路过渡的比例逐渐下降. 表面张力过渡是一种较为平稳的过渡方式,需大幅提高表面张力过渡所占的比例,通过试验发现,电弧电压在 32 ~ 34 V 区域时,表面张力过渡过程接近 60%,因此,当送丝速度为 5 m/min 时,最优的电弧电压范围为 32 ~ 34 V.

送丝速度提高后,电压也需要随之增加,因此,将考察电压范围提高至 30 ~ 46 V. 图 3b 为 7 m/min 时电压对熔滴过渡类型的影响. 与较低送丝速度条件下类似,随着电弧电压的增加,短路过渡的比例逐渐降低,排斥过渡的比例逐渐增加. 但由于送丝速

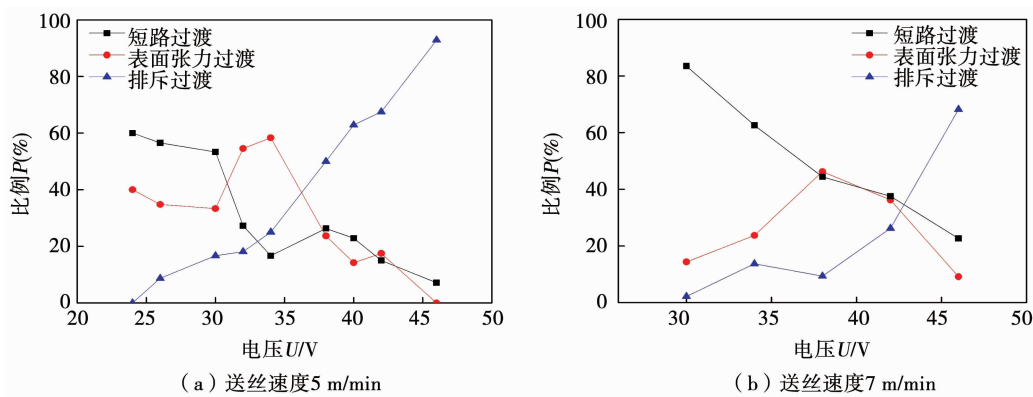


图 3 电弧电压对熔滴过渡类型的影响

Fig. 3 Effect of voltage on metal transfer mode

度的增加,电压低于 34 V 时,短路过渡的比例高于 60%, 5 m/min 时则低于 30%。对于排斥过渡,不同送丝速度条件下均呈现排斥过渡比例随电压的增加而增加的趋势,但是当送丝速度 7 m/min,电压 42 V 条件下,排斥过渡的比例仍低于 30%。与之相对应的是,当送丝速度为 5 m/min,电压 38 V 时,排斥过渡比例则高于 50%。由此可见,随着送丝速度的提高,若要将短路过渡和排斥过渡控制在适当范围之内,需适当提高电压,对于 7 m/min 的送丝速度, 38 ~ 42 V 的电压条件下可以实现较低比例的排斥过渡和短路过渡,获得良好的焊接质量。

4 结 论

(1) X 射线高速摄像技术可以克服水中气泡的不利影响,当射线源管电压 120 kV、管电流 1 mA 时,能获得清晰的水下湿法焊接熔滴过渡影像。

(2) 水下湿法药芯焊丝焊接过程常见过渡类型有:排斥过渡、固体短路过渡和表面张力过渡。

(3) 电压对熔滴过渡类型影响较大,为提高焊接质量,需优化焊接工艺参数,限制水下湿法药芯焊丝焊接过程中排斥过渡和固体短路过渡的比例。

参考文献:

- [1] 郭 宁,王美荣,郭 伟,等. 水下湿法自保护药芯焊丝[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 13-16.
Guo Ning, Wang Meirong, Guo Wei, *et al.* Flux-cored wire for underwater wet welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 13-16.

- [2] 石 玦,黄健康,聂 晶,等. 电弧声与铝合金脉冲 MIG 焊熔滴过渡的相关性[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 29-32.
Shi Yu, Huang Jiankang, Nie Jing, *et al.* Correlation of arc acoustic signals and droplet transfer in aluminum pulsed MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 29-32.
- [3] Jia C, Zhang T, Maksimov S, *et al.* Spectroscopic analysis of the arc plasma of underwater wet flux-cored arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1370-1377.
- [4] 谢煌生,傅智河,王悦新,等. 基于电流样本熵的脉冲 MIG 焊稳定性评定[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 95-99.
Xie Huangsheng, Fu Zhihe, Wang Yuexin, *et al.* Pulsed MIG welding stability evaluation based on current sample entropy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 95-99.
- [5] Guo N, Wang M, Du Y, *et al.* Metal transfer in underwater flux-cored wire wet welding at shallow water depth[J]. Materials Letters, 2015, 144: 90-92.
- [6] 李 恒,李国华,李俊岳,等. 熔化极电弧焊熔滴过渡过程的高速摄影[J]. 中国机械工程, 2002, 13(9): 796-798.
Li Huan, Li Guohua, Li Junyue, *et al.* High-speed photography of metal transfer of arc welding[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(9): 796-798.
- [7] 刘 桑. 药芯焊丝水下焊接电弧信息的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2000.
- [8] 陈 奕. 外加纵向磁场对水下湿法 FCAW 电弧特性及熔滴过渡的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

作者简介: 杜永鹏,男,1982 年出生,博士研究生. 主要从事焊接设备与水下焊接技术研究工作. 发表论文 10 余篇. Email: duyppg@163.com

通讯作者: 郭 宁,男,副教授,博士研究生导师. Email: gn21c@126.com