

# 不同水下环境介质对水下焊接电弧等离子体成分及温度的影响

郭 伟<sup>1</sup>, 郭 宁<sup>1,2</sup>, 杜永鹏<sup>2</sup>, 王 甫<sup>1</sup>, 冯吉才<sup>1,2</sup>

(1. 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;  
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:** 文中通过对水下焊接电弧光谱的采集和分析, 研究了清水、硼酸溶液、LiOH 溶液、硼酸 + LiOH 混合溶液等不同介质的水环境对水下焊接电弧等离子体成分以及温度的影响, 并对陆上焊接和水下焊接的电弧等离子体成分和温度进行对比分析。结果表明, 不同的水下环境介质对水下焊接电弧等离子体成分以及温度几乎无影响。但水下焊接与陆上焊接相比, 其电弧等离子体成分比陆上焊接明显增加了 H 和 O 元素。此外水下焊接过程中, 由于水环境的影响, 使水下焊接电弧温度低于陆上焊接。

**关键词:** 水下焊接; 电弧光谱; 电弧等离子体

**中图分类号:** TG 456 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)10-0013-04

## 0 序 言

核电设备一旦发生破损、开裂事故, 它导致的核泄漏和强辐照将会产生灾难性后果。对于核电设备尤其是反应堆压力容器内壁、乏燃料水池、给水喷头、蒸汽干燥器等维修通常采取水下焊接的修复方式。一般而言, 反应堆的水环境中存在大量冷却剂和慢化剂, 如硼酸、LiOH 等<sup>[1]</sup>。因此, 为了更好的控制核电水下焊接修复过程, 研究核电的复杂水环境介质对水下焊接过程的影响是十分必要的。水下焊接过程中, 电弧产生强烈的弧光辐射, 其中蕴含着大量不同谱段的光谱信息<sup>[2]</sup>。因此, 通过对电弧光谱的分析可实现对焊接过程的研究和控制<sup>[3,4]</sup>。

对水下焊接而言, 电弧等离子体成分决定电弧内部物理化学过程, 直接影响焊接过程稳定性以及焊接质量<sup>[5]</sup>。此外, 电弧温度是描述电弧等离子体热力学状态的最重要的参数之一, 通过对电弧温度的研究, 可控制电弧中各种反应过程以及提高电弧的电热转换效率、改善焊缝成形。因此焊接电弧等离子体的成分和温度的研究一直是水下焊接中一个重要的问题。

文中利用电弧光谱诊断分析不同介质的水环境

对水下焊接电弧等离子体的成分和电弧温度的影响, 为核电设备水下焊接修复过程中获得良好的焊接质量和稳定性控制提供理论支持。

## 1 试验方法

为了研究不同介质的水环境对水下焊接过程的影响, 设计了陆上、清水、饱和硼酸溶液、氢氧化锂溶液、硼酸 + 氢氧化锂混合溶液的 5 组焊接试验。各组试验均采用尺寸为 250 mm × 70 mm × 10 mm 的 Q235 钢作为母材, 焊材采用自主研发的水下专用药芯焊丝。图 1 为试验选用的搭载 SAF 焊机及配套的自动送丝机构的水下焊接自动控制平台。试验水箱采用深度为 50 厘米的无色透明玻璃水箱, 可减小焊



图 1 水下焊接自动控制平台

Fig. 1 Underwater welding automatic control platform

收稿日期: 2014-11-14

基金项目: 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题基金资助项目(AWJ-M13-12); 哈尔滨工业大学重点创新项目培育计划以及山东省科技攻关资助项目(2014GGX103033)

接电弧辐射的损耗和衰减. 试验采取直流反接且焊接参数为: 焊接电压  $-28\text{ V}$ ; 焊接电流  $180\text{ A}$ ; 焊接速度  $4\text{ cm/min}$ .

试验使用 Avantes 八通道光纤数字光谱仪采集电弧光谱, 该光谱仪体积小且分辨率高, 能覆盖紫外区到近红外区的波长范围. 焊接过程中, 光谱仪探头固定在焊枪上, 随焊枪沿焊缝方向移动. 因此, 光纤探针和焊接电弧间的相对位置保持不变. 水下焊接过程中, 光纤探针采集焊接弧光, 将弧光信号通过光纤传达到光谱仪, 由光谱仪分光, 转换成电信号, 再传输到计算机, 实现对焊接电弧光谱信息的采集、显示和存储等功能. 光谱信号采集原理如图 2 所示.

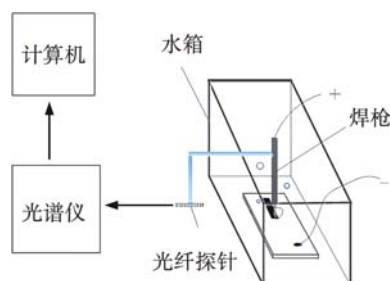


图 2 光谱信号采集原理

Fig. 2 Principle of spectrum signal acquisition

## 2 试验结果和讨论

图 3 为不同介质的水环境下的焊接电弧光谱, 光谱图由线性谱和连续谱组成. 通过比较不同波长范围内的谱线可以发现: 不同介质环境下的焊接电弧光谱的趋势和峰值位置基本相同, 故可认为介质环境对于焊接光谱的影响较小.

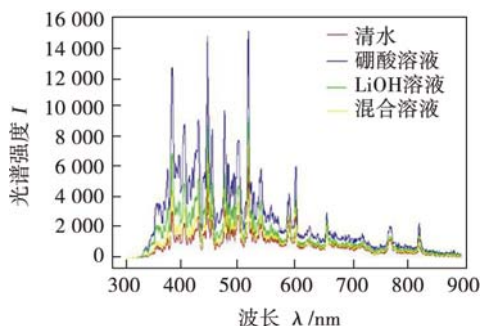


图 3 不同水环境中的电弧光谱图

Fig. 3 Arc spectrum in different water environment

为了更清晰的分析不同介质的水环境对电弧光谱的影响, 分析截取了  $340 \sim 420\text{ nm}$ ,  $510 \sim 550\text{ nm}$

和  $580 \sim 650\text{ nm}$  波长位置的光谱, 如图 4 ~ 图 6 所示. 通过不同波段的光谱图可以进一步证明, 不同介质的水环境下焊接光谱的趋势和峰值位置基本相同, 即水环境中的介质对于焊接光谱几乎无影响. 另一方面, 为了对比陆上焊接和水下焊接的电弧光谱信号, 分别对二者的电弧光谱信号采集分析. 由于水下焊接时弧光通过水、气泡和玻璃水箱时被反射、折射、削弱和吸收. 因此, 水下焊接的电弧光谱强度要明显低于陆上焊接. 为了便于观察, 将陆上焊接的光谱信号数据乘以系数  $0.2$ , 得到如图 7 所示光谱信号图.

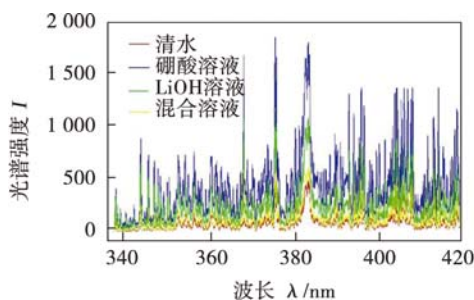


图 4 不同水环境中  $340 \sim 420\text{ nm}$  波段光谱图

Fig. 4 Spectrum of  $340 \sim 420\text{ nm}$  wave band in different water environment

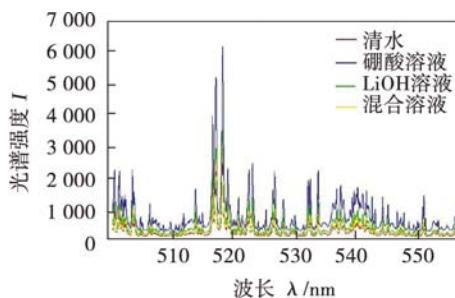


图 5 不同水环境中  $510 \sim 550\text{ nm}$  波段光谱图

Fig. 5 Spectrum of  $510 \sim 550\text{ nm}$  wave band in different water environment

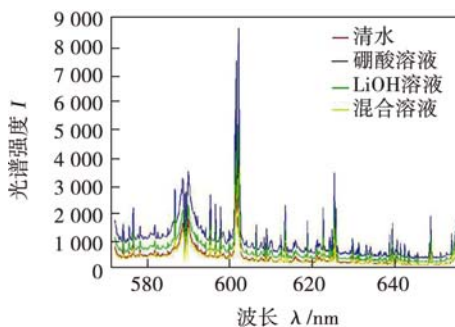


图 6 不同水环境中  $580 \sim 650\text{ nm}$  波段光谱图

Fig. 6 Spectrum of  $580 \sim 650\text{ nm}$  wave band in different water environment

通过图 7 可以发现,虽然焊接环境不同,但陆上焊接和水下焊接所得光谱信号除了极个别光谱峰以外,谱线的峰值位置和趋势基本一致。故水环境对焊接电弧光谱也几乎无影响。通过以上分析可知:水环境以及水环境中的介质对水下焊接电弧光谱和电弧成分几乎无影响。

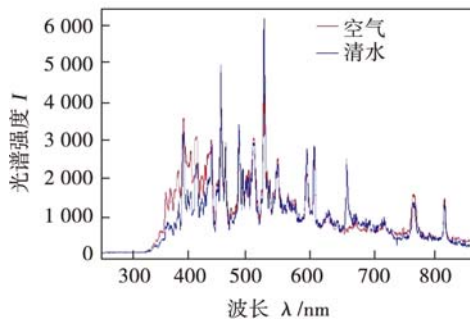


图 7 水下和陆上焊接电弧光谱图

Fig. 7 Arc spectrum of underwater and on-land welding

由于试验使用的焊丝主要成分为金红石,赤铁矿, LiF, Ni, Mn, Fe 等,因此根据焊丝成分,假设电弧等离子体的成分主要包括 C, B, CO, CO<sub>2</sub>, Cr, N, N<sub>2</sub>, Ca, Ti, Fe, Ni, Mo, Cu, Si, P, S (原子、分子或者离子),利用 Plasus Specline 软件来分析试验所得的光谱辐射曲线。

尽管在水下湿法焊接过程中,弧柱区会有大量的金属蒸气,产生密集的谱线,影响峰值结果的确定。但可利用 Plasus Specline 软件数据库和 NIST 网站在线数据库提供的粒子谱线数据信息,对电弧等离子体成分进行快速准确的分析和判别。谱线识别结果表明,陆上焊接以及不同介质的水环境中焊接的电弧中都包含 Fe, Ni, Cr, Si, Mn, Ti, Mo, C, Al 等元素,识别的谱线几乎相同。

值得注意的是,虽然陆上焊接和不同水环境下焊接的电弧等离子体的成分基本一致,但与陆上焊接相比,水下焊接电弧光谱中均出现符合 H 原子和 O 原子特征的谱线。如图 8, 9 所示。对于水下焊接电弧光谱中存在 H 原子特征峰的现象,已有文献提及<sup>[6]</sup>,但对于 O 原子特征峰,属于首次发现,还未有相关研究成果报道。因此,尽管介质对水下焊接电弧等离子体成分无影响,但由于水的存在,使水下焊接电弧成分比陆上焊接多了 H 和 O 原子。

对采集的电弧光谱信号应用多谱线法对水下焊接电弧温度进行分析,可明显减小温度测量的误差。利用多谱线法时最关键的是确定特征谱线,再查找到相应的参数值,代入多谱线法温度计算公式对电

弧温度进行计算。

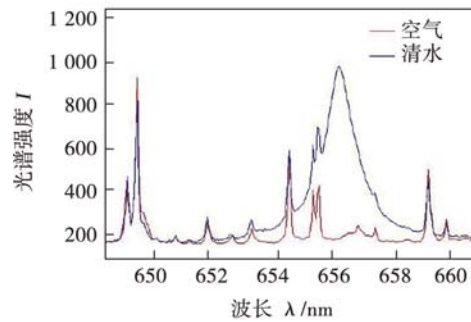


图 8 H 原子特征谱线

Fig. 8 Characteristic spectral line of H

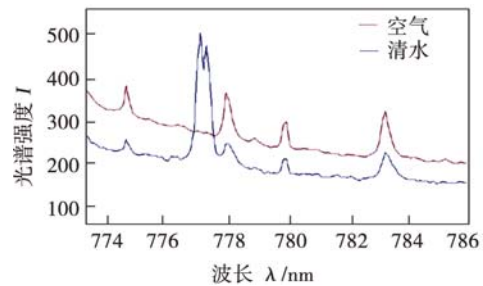


图 9 O 原子特征谱线

Fig. 9 Characteristic spectral line of O

对光谱辐射而言,当波长小于 195 nm 时,会被氧强烈地吸收,因此,只有波长大于 200 nm 的光谱对实际研究和应用才具有真正的意义。此外,由于很难确定波长在 700 ~ 850 nm 区间内的线光谱所对应的元素粒子的对应参数,因此,该波长区间内的光谱都不能用来进行温度诊断。熔化极焊接电弧的工艺性质,决定了这类电弧的光谱辐射与金属材料过渡过程有着密切的联系。由于熔滴过渡时的金属蒸发,金属蒸气充满整个电弧。通过统计,尤其以 FeI 粒子居多,因此采用 FeI 的发射谱线作为特征谱线来计算电弧温度。由相关文献资料可知该方法计算电弧温度的公式为<sup>[7]</sup>

$$\lg \frac{I_{\text{mn}} \lambda_{\text{mn}}}{A_{\text{mn}} g_{\text{mn}}} = -\frac{5040}{T} E_{\text{m}} + \lg C$$

式中:  $E_{\text{m}}$  为激发电位;  $\lambda_{\text{mn}}$  为谱线波长;  $I_{\text{mn}}$  为辐射强度;  $g$  为权重统计;  $A_{\text{mn}}$  为跃迁几率;  $T$  为电弧温度。

该式中  $C$  为常数,因此可看作直线方程:  $\lg(I_{\text{mn}} \lambda_{\text{mn}} / A_{\text{mn}} g_{\text{mn}}) = f(E_{\text{m}})$ , 其斜率为  $k = -5040/T$ , 因此只要测得谱线的相对辐射强度  $I_{\text{mn}}$ , 然后以  $\lg(I_{\text{mn}} \lambda_{\text{mn}} / A_{\text{mn}} g_{\text{mn}})$  为纵坐标,  $E_{\text{m}}$  为横坐标, 即可作出  $\lg(I_{\text{mn}} \lambda_{\text{mn}} / A_{\text{mn}} g_{\text{mn}}) = f(E_{\text{m}})$  的关系直线, 得到斜率  $k$ , 求出电弧温度  $T$ 。表 1 为根据粒子谱线选出来的可



能作为特征谱线的粒子和粒子参数. 把各数据代入上述计算公式中, 利用 MATLAB 软件绘图, 并将散点拟合, 计算出拟合直线的斜率, 进而计算得到电弧温度.

表 1 FeI 粒子谱线参数

Table 1 Spectrum line parameters of FeI

编号	元素粒子	试验波长	跃迁几率 $A_{ki}$ ( $s^{-1}$ )	权重统计 $g$
1	FeI	425.078	1.02	7
2	FeI	431.502	0.776	5
3	FeI	432.592	5.16	5
4	FeI	438.327	5	9
5	FeI	451.790	0.151	3
6	FeI	523.303	1.94	9
7	FeI	534.079	0.0521	5
8	FeI	557.278	2.28	7
9	FeI	558.668	2.19	9
10	FeI	561.573	2.64	11

图 10 为陆上焊接、清水中焊接、饱和硼酸溶液中焊接、LiOH 溶液中焊接和硼酸、LiOH 混合溶液中焊接的电弧温度拟合直线 ( $Y = \lg(I_{mn}\lambda_{mn}/A_{mn}g_{mn})$ ,  $X = E_m$ ), 直线的斜率和计算所得电弧温度如表 2 所示.

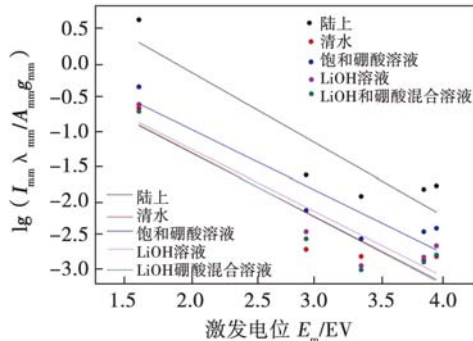


图 10 电弧光谱温度拟合直线

Fig. 10 Temperature fitting line of welding arc spectrum

表 2 不同焊接条件下的电弧温度

Table 2 Temperature of welding arc under different conditions

焊接环境	拟合直线斜率 $k$	电弧温度 $T/K$
陆上焊接	-1.135	4 440.53
清水	-1.169	4 311.11
饱和硼酸溶液	-1.165	4 326.18
LiOH 溶液	-1.172	4 300.00
硼酸和 LiOH 混合液	-1.174	4 292.15

从表 2 中可知, 不同水下环境介质中焊接电弧等离子体温度基本相同, 均为 4 300 K 左右, 而陆上焊接的电弧温度明显高于水下焊接. 因此, 不同介质的水环境对水下焊接电弧温度没有影响. 但由于

水下焊接过程中水对电弧的热传导以及对流散热的作用, 且电弧气泡长大、上浮将带走部分热量, 形成“沸腾型”散热, 这必然使电弧消耗大量的热量, 导致电弧温度的下降, 因而水下焊接电弧温度较陆上焊接明显偏低.

### 3 结 论

(1) 不同介质的水下环境对水下焊接电弧等离子体的成分几乎无影响. 但就水下焊接与陆上焊接相比而言, 电弧光谱中存在符合 H 原子和 O 原子特征的谱线, 即由于水环境的存在, 使得水下焊接电弧等离子体的成分比陆上焊接多了 H 和 O 原子.

(2) 水下环境介质对水下焊接电弧等离子体的温度几乎无影响, 但由于水的存在, 使得电弧的热传导和对流散热的作用明显, 电弧热量更多的消耗, 使水下焊接电弧温度较陆上焊接明显偏低.

### 参考文献:

- [1] 张 野, 王晓放, 介红恩. 压水堆冷却剂中硼酸浓度对核主泵性能影响研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(4): 95-98.  
Zhang Ye, Wang Xiaofang, Jie Hongen. Effect of boric acid concentration on reactor coolant pump performance in PWRs[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(4): 95-98.
- [2] 李志勇, 顾小燕, 李 恒, 等. 电弧光谱信息在焊接质量检测上的应用研究[J]. 光谱学和光谱分析, 2009, 29(3): 711-715.  
Li Zhiyong, Gu Xiaoyan, Li Huan, et al. Study on the arc spectral information for welding quality diagnosis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 711-715.
- [3] 蒋力培, 张甲英, 李鸿辉. 双波长滤光片式红外测量焊接温度场系统[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 1-10.  
Jiang Lipai, Zhang Jiaying, Li Honghui. Areal-time infrared measurement system of welding temperature field with the dual-wavelength type optical filter[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 1-10.
- [4] Sforza P, Blasiis D. On-line optical monitoring system for arc welding[J]. NDT & E International, 2002, 35(1): 37-43.
- [5] 李俊岳, 宋永伦, 李 恒, 等. 焊接电弧光谱信息的基本理论和基本方法[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 5-8.  
Li Junyue, Song Yonglun, Li huan, et al. Basic theory and method of welding arc spectrum information[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 5-8.
- [6] Jia C B, Zhang T, Maksimov S Y, et al. Spectroscopic analysis of the arc plasma of underwater wet flux-cored arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213: 1370-1377.
- [7] 王国荣, 杨乾铭. 光谱法水下焊接电弧温度的研究[J]. 机械工程学报, 1997(2): 93-98.  
Wang Guorong, Yang Qianming. Spectroscopic study in temperature of underwater welding Arc[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997(2): 93-98.

作者简介: 郭 伟, 男, 1990 年出生, 硕士. 主要从事水下焊接方面的研究工作. 发表论文 6 篇. Email: guowei20090525@126.com

通讯作者: 郭 宁, 男, 副教授. Email: gn21c@126.com