

水下湿法焊接等离子成分计算

李志刚， 张 华， 贾剑平

(南昌大学 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 南昌 330031)

摘 要: 水下湿法焊接所产生的电弧是在带电离子气体的气泡中形成的, 结合前人对水下湿法焊接气泡成分的测定, 分析了水下湿法焊接气泡中气体的主要解离和电离过程, 对局部热力学平衡态下的不同水压、不同温度的水下电弧成分采用 potapov 模型进行了计算, 其主要理论依据为 Dalton 分压定律、质量作用定律、电荷准中性条件和化学计量平衡条件. 结果表明, 随着水压由 0. 101 3 MPa 变化到 1. 013 MPa 再到 10. 13 MPa, 离子体内 H^+ , O , C , O^+ , C^+ 的数密度呈现逐渐增加的趋势, 同时电子数密度和离子体密度也跟随增加. 而离子体总体平均电离度不受水压的影响. 为进一步计算水下湿法焊接电弧的输运系数和水下电弧的仿真打下了基础.

关键词: 水下湿法焊接; 电弧; 成分计算

中图分类号: TG115 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2009)04-0013-04



李志刚

0 序 言

很早以前人们已经知道在水、油等液体介质中可以得到稳定的电弧放电. 此时电弧是在气泡里燃烧, 这些气泡是由于电弧放电的热作用, 使周围液体蒸发及分解而产生的.

迄今为止国内外尚无人对水下湿法焊接的组成进行理论分析计算. 文中先对不同温度和水压的电弧成分的气体粒子数密度进行了计算, 然后计算了整体电弧的密度和总体平均电离度, 为以后进一步计算水下湿法焊接电弧的输运系数和水下电弧的仿真打下了基础.

1 反应过程

水下电弧的燃烧一般情况如图 1 所示, 电弧造成过剩的气体成为很多小气泡浮在水面上, 上端油烟主要是被电弧分散成极细的氧化铁而构成的胶体^[1]. 而电弧气泡中的主要成分是水在电弧高温下分解而形成的, 这一过程生成大量的氢气和氧气, 大部分的氧立即与焊条涂料和焊接金属中的某些元素发生反应而生成 CO, CO₂ 等气体. 根据测定, 在焊条

电弧焊条件下, 电弧气泡内按体积分数 H₂ 占 62%~82%, CO 占 11%~24%, CO₂ 占 4%~6%, 其余为水蒸气和金属蒸气等. 而在波罗的海进行的湿法水下焊接试验, 由质谱仪分析了气泡的气体组成, 其结果见表 1^[2].

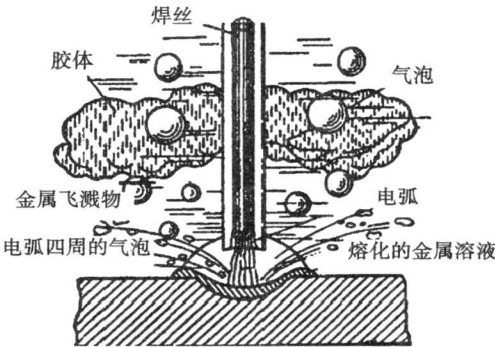


图 1 水下湿法焊接电弧燃烧示意图
Fig 1 Schematic of underwater wet welding plasma

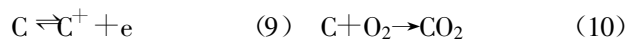
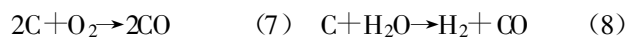
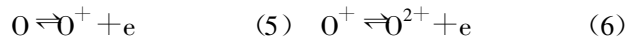
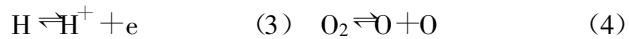
表 1 波罗的海湿法水下焊接试验的气泡气体组成(体积分数, %)

焊条类型	H ₂	CO	CO ₂	其它
金红石铁粉型(E7014)	45	43	8	4
钛型	30	55	10	5

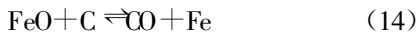
在湿法焊接气泡中,CO 和 CO₂ 都是以分子形式呈现的.可以判定,这些气泡大部分不参与电离,因为在高温下(约 6 000 K)它们将分解为 C 原子和 O 原子,若它们参与了电离就与质谱仪分析得到的气泡成分不符.实际上这些 CO 和 CO₂ 气泡主要都从电弧旁流失了.因此这个气泡成分应该主要指的是电弧旁边生成的大量气体,而不能看作是电弧的气泡成分比.同时由于电弧是在水中燃烧的,水在高温时早就分解成了 H₂ 和 O₂,H₂ 和 O₂ 又分解成了原子,因此可以断定水下湿法焊接的电弧成分主要由 H,O,C 原子及其离子构成.

根据以上的分析,结合气体电离的知识,可以判断在高温高压水下电弧中,主要存在 H,H⁺,C,C⁺,O,O⁺,O²⁺,CO,CO⁺,CO₂,CO₂⁺和 e,Fe⁺等组元.

为了说明水下焊接电弧平衡成分的计算方法,在弧柱主体区域和 3 000~30 000 K 温度范围内,选择最主要的解离和电离过程如下.



不考虑硅、锰等金属的影响,在熔敷金属中进行反应的有



考虑到 H₂O 和 CO,CO₂ 在温度 6 000 K 时都已经分解为原子,因而在电弧气泡成分中将 H₂O,CO,CO₂ 分子和分子的离子忽略.铁蒸气的电离电位为 7.83 eV,该值与作为气体介质的 H₂,CO 比要低的多,因此电离电位低的铁原子将比气体粒子先电离,但在温度 6 000 K 以上的区域,铁原子已被氧化而不存在,另外其所占比重较小,因而也将其忽略.二次电离的离子只在特高温时少量存在,所以也将其省略.由前面已经分析知道 H,O 和 C 为电弧的主要成分,因此只考虑在给定的压力和温度下,经过足够长的时间,以至于上述式(2),式(3),式(4),式(5),式(9)反应的正向和逆向反应速度相等,达到化学平衡.这时各组元有各自确定的数量,显然各组分数量是水压和电弧温度的函数.最后再根据得到的 H,H⁺,O,O⁺,C 和 C⁺ 的数量算出不同水压和温度条件下电弧的密度和平均电离度.

2 粒子平衡态求解

水下电弧作为一种热等离子体,接近于局域热力学平衡状态,在热力学平衡态中,同一位场不同能态的粒子数之间服从 Boltzmann 分布,但对不同种粒子和离子之间,以及它们和电子间的平衡,则必须从涉及原子、离子和电子等多种粒子总体系的平衡态出发,用量子统计的方法求出它们之间的平衡关系.为了确定平衡等离子体的多种成分,采用 potapov 模型,有诸多方程^[3].

2.1 电荷准中性条件

等离子体宏观上呈现准中性,即电离后的正离子、电子、负离子的电荷应平衡为零.

2.2 气体分压定律

道尔顿氏气体分压定律指不同成分的气体各自表现其压力,是该气体总压力的分压.在一定容积中,各气体的分压,并不因其它气体的同时存在而受到影响.如果荷电粒子的密度高,库仑作用可以产生相当的影响,因此必须加上德拜-许克尔修正项.

2.3 质量平衡方程

根据质量守恒定律,解离和电离反应前后各元素的摩尔数之比为一常数.

2.4 saha 方程

设有电离反应

$$A_r \rightleftharpoons A_{r+1} + e - E_{lr}, \quad r = 0, 1, 2 \quad (16)$$

则各种粒子数满足如下关系^[4]

$$\frac{n_{r+1}n_e}{n_r} = \frac{2Z_{r+1}}{Z_r} \cdot \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_l - \Delta E_l}{kT}\right) \quad (17)$$

式中:A_r 是中性气体粒子或 r 级电离离子;A_{r+1} 是 r+1 级电离离子;e 为电子电荷;E_{lr} 和 E_l 为电离能;ΔE_l 为粒子相互作用引起的电离能降低值;m_e 是电子质量;h 是普朗克(Plank)常数;k 是 Boltzmann 常数;T 是温度;Z_{r+1},Z_r 为各原子和离子分配函数;n_r 为中性气体粒子数密度或 r 级电离离子数密度;n_{r+1} 为 r+1 级电离离子数密度;n_e 为电子数密度.

3 成分计算

根据以上方程,水下电弧有以下关系式,即

$$p = (n_H + 2n_{H^+} + n_C + 2n_{C^+} + n_O + 2n_{O^+}) \quad (18)$$
$$kT - \frac{kT}{24\pi \lambda_D^3} \quad (18)$$

$$p_e = (n_{H^+} + n_{O^+} + n_{C^+})kT \quad (19)$$

$$\frac{n_H + n_{H^+}}{n_O + n_{O^+}} = c \quad (20)$$

$$n_0+n_0^+=n_C+n_C^+$$

(21)

$$\frac{n_{H^+}}{n_H}=\frac{S_H(T)}{p_e}$$

(22)

$$\frac{n_{O^+}}{n_O}=\frac{S_O(T)}{p_e}$$

(23)

$$\frac{n_{C^+}}{n_C}=\frac{S_C(T)}{p_e}$$

(24)

$$S_H(T)=2\frac{Z_{H^+}}{Z_H}\frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3}(kT)^{5/2}e^{\frac{-(E_{H1}-\Delta E_{H1})}{kT}}$$

(25)

$$S_O(T)=2\frac{Z_{O^+}}{Z_O}\frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3}(kT)^{5/2}e^{\frac{-(E_{O1}-\Delta E_{O1})}{kT}}$$

(26)

$$S_C(T)=2\frac{Z_{C^+}}{Z_C}\frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3}(kT)^{5/2}e^{\frac{-(E_{C1}-\Delta E_{C1})}{kT}}$$

(27)

式中: S_H, S_O, S_C 为 H, O, C 的 saha 函数; p 为总压; p_e 为电子分压; $n_H, n_{H^+}, n_O, n_{O^+}, n_C, n_{C^+}$ 分别为各原子和离子数密度; λ_D 为德拜半径; E_{H1}, E_{O1}, E_{C1} 分别是氢、氧和碳的一级电离能; $\Delta E_{H1}, \Delta E_{O1}, \Delta E_{C1}$ 表示 Debye-Huckle 修正; $Z_H, Z_{H^+}, Z_O, Z_{O^+}, Z_C, Z_{C^+}$ 为各原子和离子配分函数. 对式(20), 如果只考虑水分解产生的氧与碳的结合, 则常数 c 为 2, 但实际焊接过程中很多 O 与 Fe 结合生成 FeO 存在于熔敷金属中, 此时, 常数 c 应该大于 2.

4 计算结果及分析

计算采用迭代法进行, 运算结果如图 2~图 8, 其中图 2~图 6 为不同水压及电弧温度时的 H, H^+ , O 和 C, O^+ 和 C^+ , e 的数密度, 图 7 是根据成分数密度代入原子量得到的离子体密度, 计算忽略电子质量. 图 8 为离子体总体平均电离度, 其计算公式为

$$\frac{(n_{H^+}+n_{O^+}+n_{C^+})}{(n_H+n_O+n_C+n_{H^+}+n_{O^+}+n_{C^+})}$$

(28)

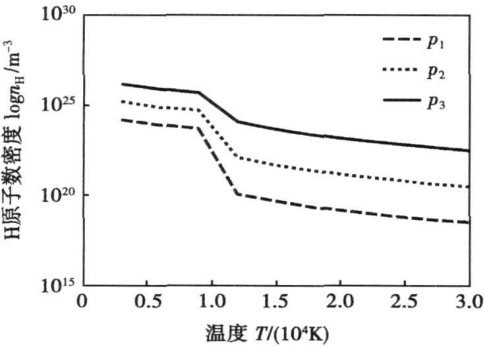


图 2 不同压力及温度时的 H 原子数密度
Fig. 2 H atom number density at different water pressure and different plasma temperature

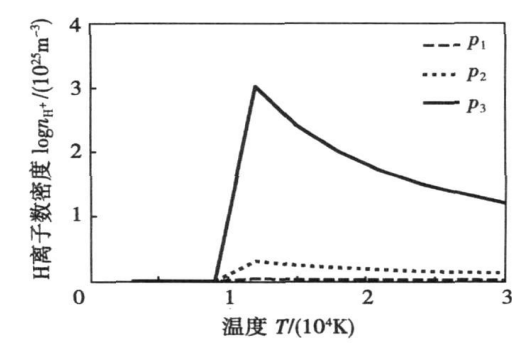


图 3 不同压力及温度时的 H 离子数密度
Fig. 3 H ion number density at different water pressure and different plasma temperature

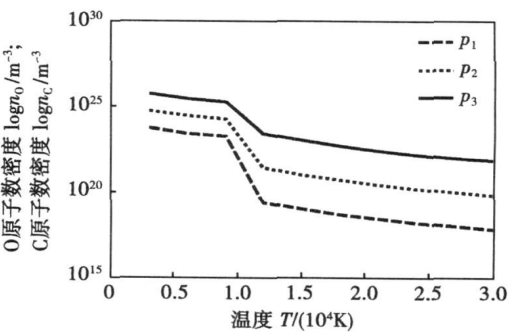


图 4 不同压力及温度时的 O 原子和 C 原子数密度
Fig. 4 O atom and C atom number density at different water pressure and different plasma temperature

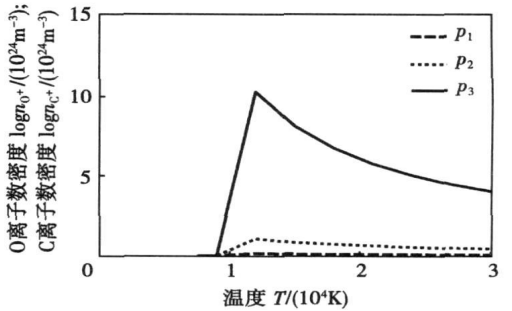


图 5 不同压力及温度时的 O 离子和 C 离子数密度
Fig. 5 O ion and C ion number density at different water pressure and different plasma temperature

图 2 和图 5 采用了对数坐标, 所有图中的 p_1, p_2, p_3 对应的水压分别为 0.101 3 MPa, 1.013 MPa, 10.13 MPa.

从图 2~图 8 可以发现, H, O 和 C 原子的数密度在温度 3 000~12 000 K 范围内迅速下降, 而 H^+, O^+ 和 C^+ 离子的数密度在 9 000~13 000 K 范围内迅速上升, 这是 H, O 和 C 原子电离作用而导致的, 而

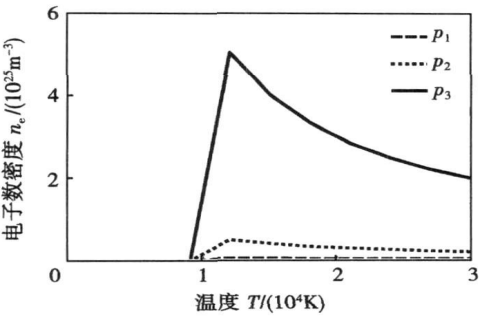


图 6 不同压力及温度时的电子数密度
Fig. 6 Electron number density at different water pressure and different plasma temperature

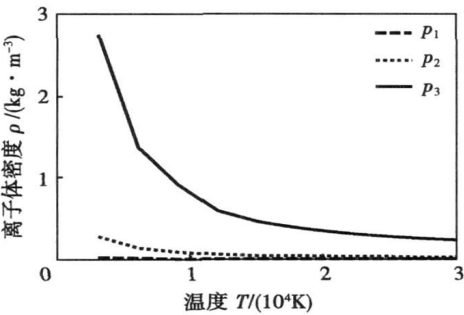


图 7 不同压力及温度时的离子体密度
Fig. 7 Ion density at different water pressure and different plasma temperature

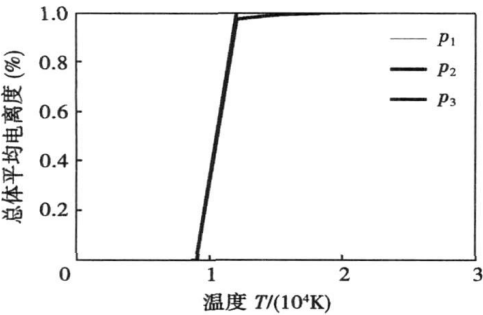


图 8 不同压力及温度时的总体平均电离度
Fig. 8 Total average ionization degree at different water pressure and different plasma temperature

继续随着温度的升高, 电离不可能无限制增加, 此时温度导致单位体积内 H^+ , O^+ 和 C^+ 离子的数密度缓慢下降. 之所以三种气体成分变化的温度范围大致相同, 是因为其电离电压非常接近, 导致其开始电离和电离饱和时间都比较接近.

由于离子体总体表现出来的电中性, 其电子数密度也具有在 $9\,000 \sim 13\,000\text{ K}$ 范围内迅速上升而

后缓慢下降的性质. 离子体密度在温度为 $3\,000 \sim 15\,000\text{ K}$ 范围内迅速下降, 而后缓慢下降. 等离子体总体平均电离度在 $9\,000 \sim 12\,000\text{ K}$ 范围迅速上升, 接近 $20\,000\text{ K}$ 时达到完全电离. 图中 $9\,000\text{ K}$ 以下平均电离度很小, 是因为忽略了其它粒子的缘故, 如果考虑 Fe^+ , 这个值就不会为 0.

随着水压由 0.1013 MPa 变化到 1.013 MPa 再到 10.13 MPa , 离子体内 H , H^+ , O , C , O^+ 和 C^+ 的数密度呈现逐渐增加的趋势, 同时电子数密度和离子体密度也跟随增加. 而离子体总体平均电离度不受水压的影响, 三条线几乎重合.

从数量级上来看, 0.1013 MPa 时, 在 $3\,000 \sim 12\,000\text{ K}$ 范围内, H 和 O , C 数密度由 10^{25} 降至 10^{20} 左右, 而在 $9\,000 \sim 30\,000\text{ K}$ 范围内, 生成的 H^+ 数密度维持在 10^{25} 以上, O^+ 和 C^+ 数密度维持在 4×10^{24} 以上, 体现了等离子体由弱电离到强电离的过程. 另外两个压力时也有这样一个过程.

5 结 论

(1) 电弧内气泡成分主要存在 H , H^+ , C , C^+ , O , O^+ , O^{2+} , CO , CO^+ , CO_2 , CO_2^+ 和 e , Fe^+ 等组元. 对于气泡成分的计算可以把它们都包含进来, 但是会导致计算非常复杂, 其中 H , H^+ , O , O^+ , C 和 C^+ 占总体控制地位.

(2) 对气泡成分采用 potapov 模型进行了计算, 其主要理论依据为 Dalton 分压定律、质量作用定律、电荷准中性条件和化学计量平衡条件, 得出了各原子和离子及电子成分在不同水压和电弧温度下的数密度和等离子体的总体密度, 为计算水下湿法焊接电弧的输运系数和电弧的仿真打下了基础.

参考文献:

- [1] 赫列诺夫. 金属焊接、切割与钎焊[M]. 骆鼎昌, 陈定华, 周振丰, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1958.
- [2] 史耀武, 张新平, 雷永平. 严酷条件下的焊接技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 臧春艳. 航天继电器稳态电弧等离子体电离过程与电弧特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [4] Gross B, Grycz B, Miklosy K. 等离子体技术[M]. 过增元, 傅维标, 译. 北京: 科学出版社, 1980.

作者简介: 李志刚, 男, 1971 年出生, 博士研究生, 高级工程师. 主要从事焊接机器人及焊接自动化研究. 发表论文 6 篇.

Email: gordon7456@163.com

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Study on microstructure of the coatings sprayed in low pressure condition and its post treatment technology

LI Deyuan,

SONG Dan, ZHANG Zhongli, ZHAO Lingyan (School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China). p1-4

Abstract: In order to make clear the effect of the spraying technology on the coatings microstructure formation in the low pressure spraying, the wires of 4Cr13, Al and Ti were adopted to prepare the spraying coatings in air and low pressure condition, respectively. The microstructure, the amount of the compounds and their distribution pattern in both coatings were compared by the microanalysis and micro-area chemical analysis. Static press test was used to investigate the closing possibility of the porosities. After the press test, the coatings were heated to certain temperature to analyze the effect of the recrystallization heat treatment on the coatings microstructure. As a result, the amount of the oxide in 4Cr13 and Al coatings has been reduced obviously in the low pressure condition, and metallurgy combination between the splat particles can be formed by pressing and heating. However the low pressure condition can not provide sufficient protection for the Ti coatings, the following recrystallization heat treatment can not get metallurgy combination between the particles.

Key words: arc spraying; coatings; spraying particle; oxide; recrystallization

Full digital control of I/I mode pulsed MIG welding based on triple closed loop control

SHA Deshang, Liao Xiaozhong

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China). p5-7, 12

Abstract: This paper presents a full digital control strategy for pulsed MIG/MAG welding based on digital signal processor (DSP) control. One droplet per one pulse (ODPP) is maintained with the proposed control strategy which is characterized by I/I mode with adaptive voltage compensation (AVC). Welding database with different materials and diameters is established according to wire feed speed. Arc length is detected during each pulse period and the melting rate is changed. Moreover, real time compensation for the volt drop across the wire stickout is made to ensure the arc length constant while stickout changing. Operation principles are analyzed and control block diagram composed of triple closed loop is also presented. Experimental results show that the proposed method is feasible and universal. Constant arc length is realized when wire stickout changes. The welding process is stable and the welding bead is also good with the proposed method.

Key words: pulsed MIG welding; full digital control; arc length

Stereovision-based detection of 3-D weld seam using epipolar line constraint and laser stripe indication

LI Hexi^{1,2}, WANG

Guorong¹, SHI Yonghua¹, ZHANG Weimin¹ (1. College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. College of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong, China). p8-12

Abstract: An epipolar line constraint equation is established for a binocular stereovision system mounted at the end-effector of welding robot. The stereovision correspondence technique based on the combination of epipolar line constraint with laser stripe indication is applied to detect the position of a three-dimensional (3-D) saddle-shaped weld seam which is produced by the intersection of two circular pipes. The experimental results show that the smooth segments of laser stripe in the weld seam image can be obtained using thinning and deburring arithmetics, and the stereovision correspondences between pairs of points at the left and the right images can be dependably realized by detecting both the singular points of laser stripe curvature and the intersecting points of laser stripe with epipolar line, thus the detection accuracy to the 3-D weld seam and its adjacent area can be improved. The geometrical shape of the 3-D weld seam is reconstructed from the 3-D data acquired by stereovision-based detection with less errors compared with its actual dimension, therefore the proposed method can satisfy the detection requirement of 3-D weld seam in automatic robot welding system.

Key words: stereovision; epipolar line constraint; laser stripe indication; correspondence; weld seam detection

Plasma component calculation in underwater wet welding

LI

Zhigang, ZHANG Hua, JIA Jianping (Institute of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China). p13-16

Abstract: The electric arc is formed in the ionized gas bubble in the underwater wet welding. Combined with the previous bubbles components determination, the main ionization and dissociation process in the bubble are analyzed. The calculation based on the potapov model was done for the underwater arc components at different water pressures and temperatures under the local thermodynamics equilibrium state. Its main theoretical bases are the Dalton law of partial pressure, the law of mass action, the electric charge quasi-neutrality condition and the chemistry measurement equilibrium condition. The results show that with the pressure increasing from 0.1013 MPa to 1.013 MPa and then to 10.13 MPa, the density of H, H⁺, O, C, O⁺, C⁺ is increased, but the average ionization degree is not influenced by the water pressure.

Key words: underwater wet welding; electric arc; components calculation

Recognition and positioning of start welding position for arc welding robot

CHEN Xizhang¹, CHEN Shanben²

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang