

高压水下湿法焊接电弧等离子体介质击穿机制

李志刚, 魏成法, 刘德俊, 杨翔

(华东交通大学, 载运工具与装备教育部重点实验室, 南昌, 330013)

摘要: 为研究深水湿法焊接电弧等离子体介质击穿机制, 建立了高压水下湿法焊接试验平台, 获取 40 m 水深电弧引弧阶段光谱图, 基于 PIC-MCC 方法建立 40 m 水深湿法焊接电弧击穿放电三维数值模型并对其进行分析, 将光谱诊断电弧等离子体温度、电子数密度和数值模型分析得到的结果进行对比, 验证了模型的合理性与正确性。根据电弧光谱得到的电弧等离子体的主成分, 从微观粒子角度对高压水下湿法焊接电弧等离子体动态演变过程展开研究, 获得等离子体动态分布、粒子数目、电弧等离子体温度及电子数密度变化。结果表明, 电子与背景成分水分子发生电离碰撞主要生成 H^+ , OH^+ 和 O^+ , 且 OH^+ 数目增长速度最快, H^+ 次之, O^+ 最后, 在粒子数目上 OH^+ 远远大于 H^+ 和 O^+ 数目; 电子与背景气体碰撞过程中发生了能量转移, 运动到极板介质层的电子动能减小, 电子与极板介质层电离碰撞反应弱化, 直至达到饱和。

创新点: 从微观粒子角度对高压水下湿法焊接电弧等离子体介质击穿机理展开研究。

关键词: 水下湿法焊接电弧; 微观粒子; 动态演变; 介质击穿机制

中图分类号: TG 456.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220923001

0 序言

海洋工程的建设与维修离不开水下焊接技术, 然而其技术的研究远远不能适应形势发展的需要, 加强水下湿法焊接的研究对提升焊接质量具有重大意义^[1]。在水下湿法药芯焊接中, 大量存在电弧容易断弧、稳定性差的现象, 这些现象出现的主要原因在于湿法焊接电弧是在水中产生, 水介质与气体介质不同, 正常条件下难以发生碰撞电离或场致电离过程, 通常认为水介质的击穿起始过程与高压电极附近的低密度区域密切相关, 包括微气泡、孔隙和空穴等^[2]。水中电弧现象本质上是一种由液体、气体和杂质组成的复合导电介质下的液体击穿现象。

当前液体电击穿理论尚未成熟, 存在 3 种液体击穿理论: 电子理论、气泡击穿理论和杂质击穿理论^[3], 虽然对液体击穿领域的研究进行概括性描述, 但都只能片面解释局部的试验现象。对于水下电弧击穿现象, 目前可找到的文献主要集中在脉冲放电领域。例如 Fujita 等人^[4]发现水中流注放电的起始过程与焦耳加热效应关系密切, 在正极性放电中会

经历水介质扰动、微气泡出现及放电起始等过程; Fan 等人^[5]研究了不同铜蒸气含量对电弧形态、电压、压力、电流密度、轴向温度的影响, 发现随着铜蒸气含量的增加, 电弧的轴向温度逐渐降低, 电弧电压逐渐升高; Li 等人^[6]研究了超长脉冲 (>100 ms) 下水中 (60 $\mu\text{s}/\text{cm}$) 的预分解过程, 结果表明气泡和流光之间巨大的电导率差异导致动态行为不同。针对高压水环境下的焊接电弧击穿现象, 尚需进一步的深入研究。

文中首先基于水下湿法焊接试验平台获取电弧引弧光谱图, 获得水下湿法焊接等离子体成分, 计算不同水深条件下电弧等离子体电导率和介电常数, 然后基于粒子云网格算法 (PIC 法) 与 Monte Carlo 碰撞模型 (MCC 法), 建立 40 m 水深条件下湿法焊接电弧等离子体介质击穿的三维动态模型。从微观粒子角度对高压水下湿法焊接电弧等离子体动态演变过程展开研究, 将所得结果与试验结果进行对比验证与分析, 为以后采取新视角新方法改善水下焊接电弧击穿效果奠定理论基础。

1 试验平台及采集信号数据分析

1.1 光谱信号采集试验

高压水下湿法焊接试验平台主要分为空气加

压系统、焊接系统、信号采集系统 3 个模块。空气加压系统,通过改变不同水深对应压强,模拟不同水深条件;水箱、焊枪、送丝机放置于压力罐中,控制送丝机进行自主焊接运动,选用四通道光纤数字光谱仪,能够有效接收电弧散射的全波段弧光。水下湿法焊接电弧光谱获取试验平台如图 1 所示。

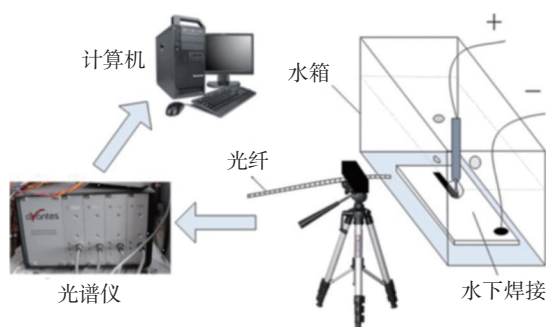


图 1 电弧光谱信号采集系统
Fig. 1 Arc spectral signal acquisition system

1.2 等离子体组分光谱诊断

在电弧燃烧过程中,将光纤放置在焊接电弧主体正中平齐的位置,透过石英玻璃接收透射光。张晓峻等人^[7]研究水的光谱透过率发现在波长 250~900 nm 之间的透射率达到了 95% 以上,由石英玻璃的透射率光谱可知波长在 200~2 000 nm 之间石英玻璃的透射率在 92% 以上。基于光谱透射率的理论可知波长在 250~900 nm 之间时,水和石英玻璃对波长影响可以忽略不计,故光谱信号采集系统采集 40 m 水深条件下的焊接电弧光谱具有真实准确性。试验采集到水下湿法焊接电弧光谱图如图 2 所示,同时对试验采集到水下湿法焊接电弧光谱图结合 NIST 原子光谱数据库及特征谱线的相关数据进行光谱测试诊断,元素粒子的识别结果如

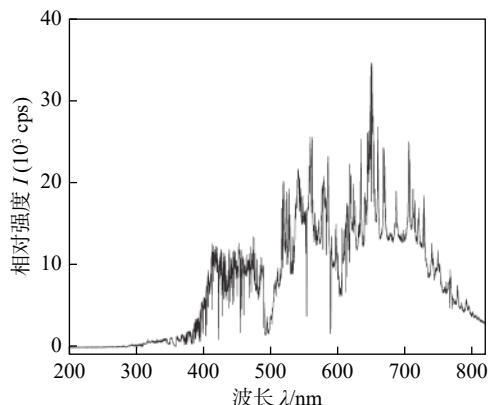


图 2 水下湿法焊接电弧光谱图
Fig. 2 Arc spectral of underwater wet welding

表 1 所示,发现水下湿法焊接等离子体成分包括电子, H, O, C, Fe, H⁺, O⁺, C⁺, Fe⁺, Fe²⁺ 和 H²⁺ 等粒子,其中电子, H, O, H⁺ 和 O⁺ 占总粒子数量的 97% 以上^[8],故选取这几种粒子计算电弧等离子体电导率。

表 1 元素诊断结果
Table 1 Element diagnosis results

元素	识别谱线 L_1/nm	观测谱线 L_2/nm	元素	识别谱线 L_1/nm	观测谱线 L_2/nm
Cl	426.73	426.62	FeII	516.65	516.7
FeI	375.82	375.68	FeII	588.5	588.66
FeI	440.48	440.62	FeII	685.78	685.57
FeI	561.54	516.53	OII	486.48	486.25
OI	777.19	777.23	FeIII	396.87	396.73
H	656.47	656.32	FeIII	571.29	571
CO	751.28	751.2	FeIII	602.08	602.24
CII	513.91	513.94			

1.3 等离子体电导率和介电常数计算

1.3.1 电导率

基于 Z & R 模型修正得到电弧等离子体电导率计算公式^[9]如下。

电子与离子碰撞作用下的电导率为

$$\sigma_{ei} = \gamma_e T^{1.5} / 38Z \ln(1 + 1.4\Lambda_m^2)^{0.5} \quad (1)$$

式中: γ_e 为电子碰撞对电导率的修正系数; T 为温度; Z 为离子的平均电荷数; Λ_m 为修正后昆仑对数。

考虑电子与中性粒子碰撞作用下的电导率为

$$\sigma_{en} = e^2 \pi n_e / 8kT \sum_s n_s \delta_{ms} \quad (2)$$

式中: e 为电子电荷量; n_e 为电子数密度; k 为玻尔兹曼常数; n_s 为 s 粒子的数密度; δ_{ms} 为电子与第 s 种中性粒子的动量传输碰撞截面。

结合式 (1) 和式 (2), 水下湿法焊接电弧等离子体总电导率表示为

$$\sigma = 1 / (1/\sigma_{ei} + 1/\sigma_{en}) \quad (3)$$

将测得的各粒子数密度代入式 (1)~式 (3), 计算得到等离子体电导率, 图 3 和图 4 为电弧等离子体粒子数密度和电导率随温度变化曲线。

由图 4 可知, 当温度低于 5 000 K 时, 温度对等离子体电导率的影响较小, 当温度高于 5 000 K, 温度对于等离子体电导率较大。

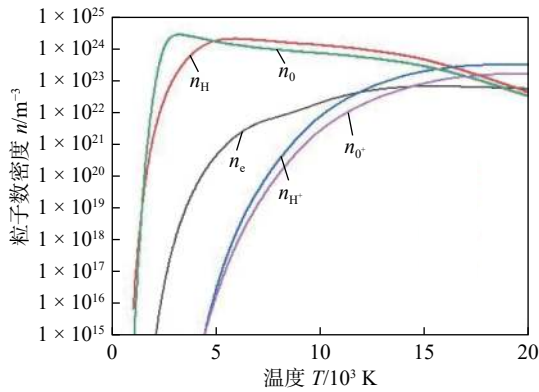


图 3 等离子体粒子数密度随温度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of plasma particle number density with temperature

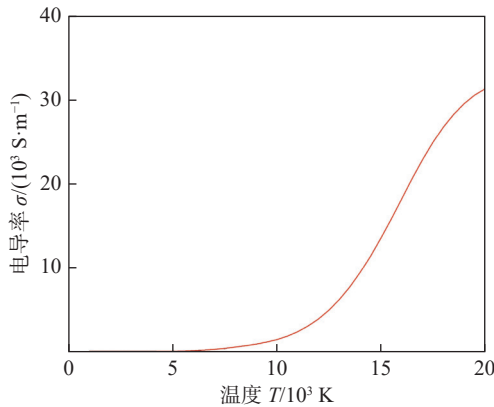


图 4 等离子体电导率随温度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of plasma conductivity with temperature

1.3.2 介电常数

选用水蒸气作为气泡内电弧介质击穿放电的背景气体, 国际水和水蒸气性质协会提供了 IAPWS-IF97 公式, 针对水的不同状态给出各种参数的计算公式. 根据 IAPWS 于 1997 年认可的水蒸气的介电常数方程^[10]为

$$\varepsilon = \frac{1 + A + 5B + (9 + 2A + 18B + A^2 + 10AB + 9B^2)^{0.5}}{4 - 4B} \quad (4)$$

其中, A 和 B 由以下得出

$$A = \frac{10^3 N_A \mu^2 \rho g}{M \varepsilon_0 k T} \quad (5)$$

$$B = \frac{10^3 N_A \alpha \rho}{3 M \varepsilon_0} \quad (6)$$

式中: M 为水的摩尔质量; ε_0 为真空介电常数; k 为波尔兹曼常量; N_A 为阿伏伽德罗常数; μ 为分子偶极矩; α 为平均分子极化率; g 为重力常数; ρ 为水的密度.

水蒸气的可压缩性要远远高于液态水, 其分子间距离随着蒸气压力 (p) 的增大而减小, 蒸气的相对介电常数增加, 且水蒸气的介电常数受温度的影响小于压力对介电常数的影响^[11], 故主要考虑压强对水蒸气介电常数的影响, 其相对介电常数随压强变化表达式为

$$\varepsilon_r = 2.3114 \times 10^{-4} p^3 - 5.42 \times 10^{-4} p^2 + 0.02825p + 0.99836 \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 其相对介电常数随电弧气泡的压强变化而变化, 从而对试验结果产生一定的影响. 从信号处理及统计分析的角度, 发现可以通过听水器检测得到的气泡声信号表现焊接气泡的动态演变^[12]. 在水下 40 m 的环境中获得的电弧从引弧到稳弧阶段的声信号如图 5 所示.

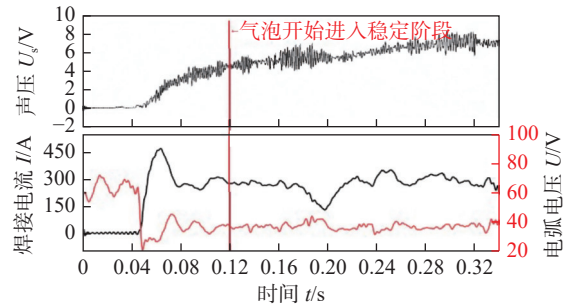


图 5 40 m 水深湿法焊接声信号

Fig. 5 40 m water depth wet welding acoustic signal

由图 5 可知气泡的动态变化在起弧气泡生长阶段电弧是非常不稳定的, 气泡呈爆炸式增长, 声压增长至初始状态的 6 倍; 根据式 (7), 可以计算得到水深 40 m 环境压力下水蒸气的相对介电常数为 1.009 6, 初始状态的相对介电常数约为 1.000 25, 可知其在初始状态和稳定状态的相对介电常数十分接近, 故在第二部分时将相对介电常数设为 1.009 6.

在气泡稳定生长阶段电弧燃烧平稳, 此时的气泡呈现一个相对稳定的阶段, 具有一定的参考价值, 故文中研究的是在气泡相对稳定时的状态.

2 数值分析模型

2.1 模型假设

水下湿法药芯焊丝电弧焊电弧引燃方式为接触引弧, 在电极接触的瞬间形成短路电路, 产生的大电流流过两电极的接触点, 温度急剧升高, 在将电极分开的瞬间, 两电极之间存在电场作用, 同时

阴极以热电子发射方式发射电子,电子在电场中被加速,并且获得能量,电子累积形成电子雪崩,因而形成了电弧。仿真忽略电极接触再迅速分离这一动态过程,以接触引弧电极温度升高后,电极热电子开始发射做为初始时间,电子发射模型采用热电子发射模型,金属热发射电子流密度由 Richardson-Dushman 公式确定,即

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{eU_w}{kT}\right) \quad (8)$$

式中: A 为与金属表面有关的常数,其值为 $120 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$; k 为玻尔兹曼常数,其值为 $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; eU_w 为逸出功。

根据直流电弧等离子体的物理性质,在建立数学模型时做以下简化假设:忽略电弧等离子体重力影响;等离子体处于局部热力学平衡状态 (LTE);等离子体处于局域化学平衡状态;只考虑一次电离;忽略阴、阳极因受热产生的形变;背景空间为水蒸气环境;忽略接触引弧和焊丝分离过程,假定焊丝接触引弧后,并提起 5 mm 时刻为电弧介质击穿放电初始时刻 ($t=0$ 时刻)。

2.2 模型描述

基于 PIC 法与 MCC 法,建立不同水深条件下湿法焊接电弧等离子体介质击穿的三维动态模型。在构建模型时,采用针板模型对焊接系统中的焊丝—极板实体进行简化,模型几何结构设计如图 6 所示。

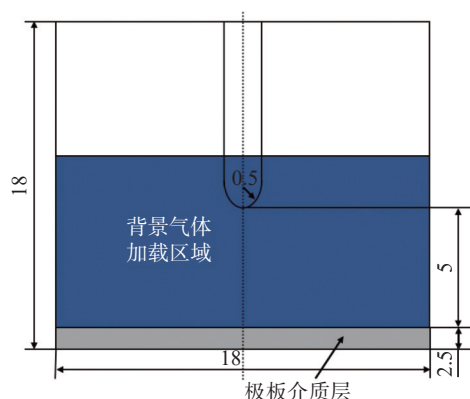


图 6 模型几何结构 (mm)

Fig. 6 Geometric structure of model

2.3 模拟参数设置

阴极焊丝模型直径参考试验选用的药芯焊丝 CHT71T-GS 直径设定为 1 mm , 水下焊接模型的阴极焊丝表面电压设定为 -35 V , 阳极板接地为 0 V ,

阳极板介质层厚度为 2.5 mm , 电弧放电空间长度为 5 mm ^[13], 电极功函数为 3.36 V , 阴极表面初始温度设置为 $1\,800 \text{ K}$ ^[14], 背景气体及极板元素对应分子数密度设置见表 1。

2.4 碰撞反应数据加载

根据试验中光谱诊断得到的电弧粒子元素成分以及 Q235 钢主成分, 分别在模型中背景气体加载区域和极板介质层添加碰撞反应成分、分子数密度、碰撞反应方程组以及碰撞截面数据。

根据理想气体方程可计算不同压强下 (即对应不同水深) 背景气体 H_2O 分子数密度为 $1.609\,638\,6 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

根据焊丝的成分可知, 所含 Fe, C, Mn 和 Si 比重较大, 其它元素的数量级较小, 可以忽略不计, Q235 钢主要成分为 Fe, C, Mn, Si, S 和 P 占比较小, 故选择 Fe, C, Mn 和 Si 作为极板成分, 可根据式 (9) 计算其对应元素原子数密度如表 2 所示。在极板加载 Q235 钢成分时, 主要讨论电子与原子碰撞反应过程, Q235 钢成分状态不对模拟结果造成影响。

表 2 极板成分对应元素原子数密度 (10^{20} m^{-3})

Table 2 Composition of the plate corresponds to the atomic number density of the element

Fe	C	Mn	Si
836.594 3	8.654 401 3	5.593 078 6	5.049 603

$$\rho_i = \frac{N_A \rho_j \alpha_i}{M_i} \quad (9)$$

式中: ρ_j 为 Q235 钢板密度, 其值为 7.85 g/cm^3 ; α_i 为对应元素占比; M_i 为对应元素的摩尔质量。

除了需要计算背景气体 H_2O 、极板介质成分 C, Fe, Mn 和 Si 粒子数密度, 还需要加载碰撞截面数据。根据等离子体反应数据库^[15]以及光子和电子相互作用数据库^[16]进行碰撞反应方程以及碰撞截面数据加载, 电弧等离子体碰撞反应方程组如表 3 所示。

2.5 静电场求解

在静电模拟中, 将模型网格中的宏观粒子所带的电荷经一阶权重化进行电荷累积, 可根据泊松方程求解电势分布, 从而获得电场, 即

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (10)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (11)$$

式中: q 是网格内累积的电荷密度; ∇ 是拉普拉斯算

表 3 电弧等离子体碰撞反应方程组
Table 3 Reaction equations of arc plasma collision

反应方程式	反应类型	能量阈值 $\Delta\varepsilon/\text{eV}$
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{e} + \text{H}_2\text{O}$	弹性碰撞	0
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{e} + \text{H}_2\text{O}^*$	激发碰撞	0.04
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{OH} + 2\text{e}$	电离碰撞	16.9
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{H} + \text{OH}^+ + 2\text{e}$	电离碰撞	18.116
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{O}^+ + 2\text{e}$	电离碰撞	19
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2^+ + \text{O} + 2\text{e}$	电离碰撞	20.7
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2^+ + \text{O}^{2+} + 2\text{e}$	电离碰撞	80
$\text{e} + \text{C} = \text{e} + \text{C}$	弹性碰撞	0
$\text{e} + \text{C} = \text{e} + \text{C}^*$	激发碰撞	0.002
$\text{e} + \text{C} = 2\text{e} + \text{C}^+$	电离碰撞	11.260 29
$\text{e} + \text{C} = 3\text{e} + \text{C}^{2+}$	电离碰撞	24.383 15
$\text{e} + \text{Fe} = \text{e} + \text{Fe}$	弹性碰撞	0
$\text{e} + \text{Fe} = \text{e} + \text{Fe}^*$	激发碰撞	0.486 5
$\text{e} + \text{Fe} = 2\text{e} + \text{Fe}^+$	电离碰撞	7.902 468 1
$\text{e} + \text{Fe} = 3\text{e} + \text{Fe}^{2+}$	电离碰撞	16.199 20
$\text{e} + \text{Mn} = \text{e} + \text{Mn}$	弹性碰撞	0
$\text{e} + \text{Mn} = 2\text{e} + \text{Mn}^+$	电离碰撞	7.434 037 9
$\text{e} + \text{Mn} = 3\text{e} + \text{Mn}^{2+}$	电离碰撞	15.639 99
$\text{e} + \text{Si} = \text{e} + \text{Si}$	弹性碰撞	0
$\text{e} + \text{Si} = \text{e} + \text{Si}^*$	激发碰撞	4.664 7
$\text{e} + \text{Si} = 2\text{e} + \text{Si}^+$	电离碰撞	8.151 68
$\text{e} + \text{Si} = 3\text{e} + \text{Si}^{2+}$	电离碰撞	16.345 85

子; φ 为网格电位; ε_r 为相对介电常数。

2.6 粒子动态推进

在模型中, 可以采用蛙跳算法进行粒子位置和速度的交替演变。在使用蛙跳算法时, 假定已知半格点的速度 $v_{-1/2}$, 根据初始给定的 x_0 得到 x_1 的位置后, 继而得到 $v_{1/2}$, 再将新得到的值带入粒子速度和位置推动方程组, 即

$$x_1 = x_0 + v_{-1/2} \Delta t \quad (12)$$

$$v_{1/2} = v_{-1/2} + \frac{qE_0}{m} \Delta t \quad (13)$$

式中: E_0 为初始时刻电势; m 为粒子质量。

通过循环往复上述的推动方程组可完成对空间内带电粒子每一时刻的动态推进, 从而实现对微观粒子的动态描述。

3 模拟结果对比分析

根据空间电弧粒子动态分布以及电势场的变化, 将一次极板间击穿过程分为 3 个阶段: 电子发射阶段 (0 ~ 24 ns)、极板介质击穿阶段 (24 ~ 120 ns) 以及稳定阶段 (120 ns 以后)。

3.1 等离子体动态分布

在一定的条件下, 稳定而持续的电弧主要取决于电子和离子的运动, 故研究电子和离子的运动对维持电弧稳定具有重要意义。

图 7 和图 8 分别为 2 和 4 ns 时刻电弧粒子动态分布, 在 2 ns 时刻电弧电子逸出数目大大增加, 在经过电场的加速后, 电子与水蒸气粒子开始发生电离碰撞反应, 少量电子的动能达到第一电离阈值 (16.9 eV)、第二电离阈值 (18.116 eV), 空间内出现带正电荷的 H^+ 和 OH^+ 。在 4 ns 时刻, 此时电子自身动能达到第三电离阈值 (19 eV), 空间内出现 O^+ , 此时电子并未击穿阴阳极空间, 空间内粒子成分为电子、水分子、激发态水分子, H , H^+ , H_2 , OH 和 OH^+ 。电子在电场加速中获得了能量, 当能量达到电离能与气体分子发生电离碰撞并产生新的电子, 这些电子又成为了下一次电离碰撞的源粒子。

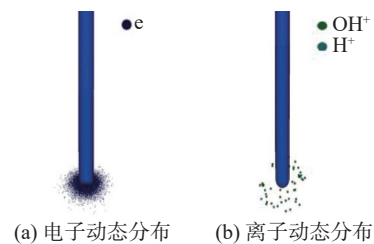


图 7 2 ns 时刻电弧粒子动态分布
Fig. 7 Dynamic distribution of arc particles at 2 ns. (a) electron dynamic distribution; (b) ion dynamic distribution

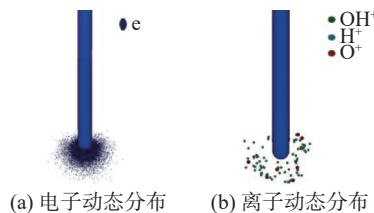


图 8 4 ns 时刻电弧粒子动态分布
Fig. 8 Dynamic distribution of arc particles at 4 ns. (a) electron dynamic distribution; (b) ion dynamic distribution

图 9 为 24 ns 时刻电弧粒子动态分布, 直至 24

ns 时刻, 有少量高速电子到达阳极板表面, 并与极板背景成分粒子发生碰撞, 电弧放电呈初始击穿状态, 阳极板表面出现极少数 Fe^+ 以及 Fe^{2+} 离子。

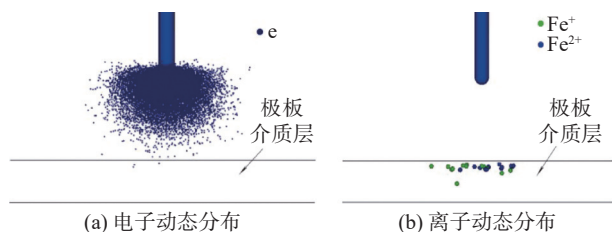


图 9 24 ns 时刻电弧粒子动态分布

Fig. 9 Dynamic distribution of arc particles at 24 ns. (a) electron dynamic distribution; (b) ion dynamic distribution

由图 10 可知此时电子完全击穿阴阳极板, 电弧放电处于瞬态稳定, 除了背景气体层生成大量 H^+ , OH^+ 和 O^+ , 阳极板表面出现 C^+ , Fe^+ , Fe^{2+} 和 Mn^+ 等离子, Fe^+ 和 Fe^{2+} 数目远远大于其它离子数目, 空间内部并未出现 H_2^+ , C^{2+} 和 Fe^{3+} 等高能态离子, 这是由于电子和水蒸气粒子的电离碰撞反应消耗了大部分高速电子的动能, 同时由于远端空间电场的减弱, 经过电离碰撞后的二次电子难以在远端电场加速中重新回归到高能态。

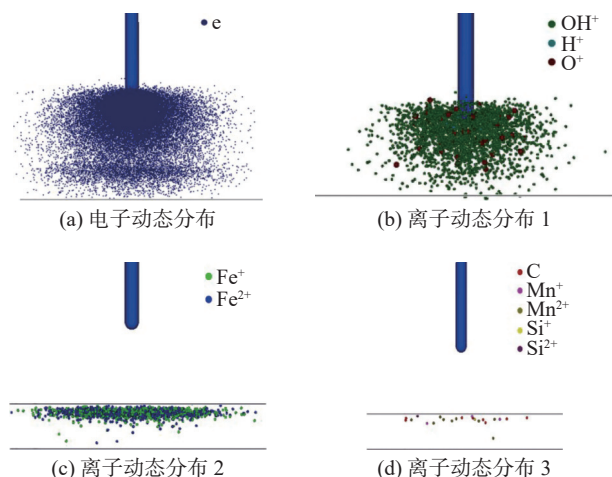


图 10 130 ns 时刻电弧粒子动态分布

Fig. 10 Dynamic distribution of arc particles at 130 ns. (a) electron dynamic distribution; (b) ion dynamic distribution 1; (c) ion dynamic distribution 2; (d) ion dynamic distribution 3

3.2 粒子数目变化

由图 11 可知, 在电子发射阶段 (0 ~ 24 ns), 由于电子雪崩效应, 电子数目急剧增加。在极板介质击穿阶段前期 (24 ~ 60 ns), 大量电子运动到极板底部以及周围边界, 少量被边界吸收, 物理上表示电

子被外界水环境吸收, 故电子在这一阶段出现降低趋势。在 60 ns 以后, 电子速度降低、能量小, 运动到边界被吸收的电子少于阴极发射的电子和电离碰撞产生的新的电子, 故电子数目又重新呈现增加趋势, 且增加速度越来越缓慢直至平缓, 这是因为电子与背景中性粒子电离碰撞反应弱化直至达到饱和, 电离产生新的电子越来越少。

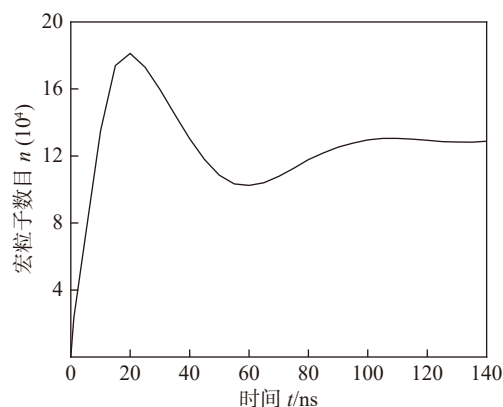


图 11 电子宏粒子数目变化

Fig. 11 Changes in the number of electron macroparticles

由图 12 可知, 空间电离碰撞产生的 Fe^+ 和 Fe^{2+} 数目远远大于 C^+ , Si^+ , Si^{2+} , Mn^+ 和 Mn^{2+} 数目, 由

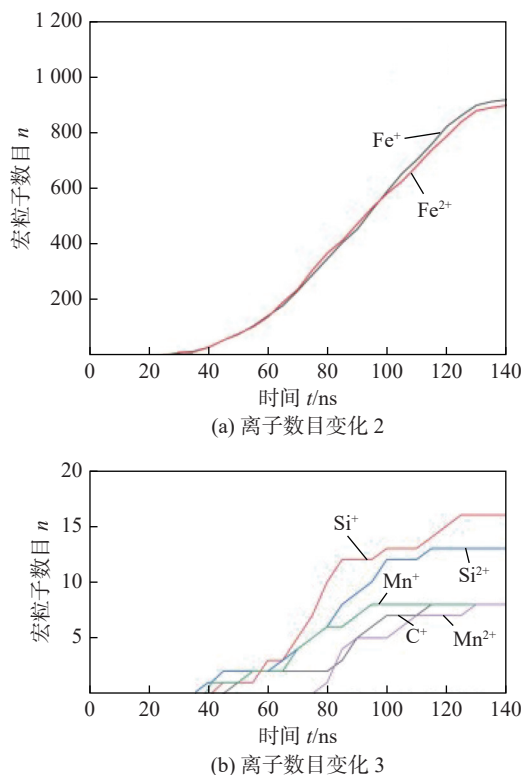


图 12 极板离子数目随时间变化

Fig. 12 Number of plate ions changes with time. (a) change in ion number 2; (b) change in ion number 3

表 3 可知, C^+ , Si^+ , Si^{2+} , Mn^+ 和 Mn^{2+} 电离阈值与 Fe^+ 和 Fe^{2+} 电离阈值差别不大, 其离子数目差别大的原因是文中极板成分参照 Q235 钢成分加载, 其 Fe 元素成分高达 97.935%。除了 Mn^{2+} 产生时间较晚, C^+ , Si^+ , Si^{2+} 和 Mn^+ 在 40 ns 左右开始陆续出现, 并在之后的时间逐渐达到稳定, 离子数目变化不大。

3.3 试验光谱诊断结果对比

试验选取 Fe 元素作为计算电弧温度的特征元素, 通过玻尔兹曼图示法得到玻尔兹曼曲线^[17], 并对选取的 5 组光谱数据进行平均化处理, 以避免单次试验造成的误差, 再将处理后的电弧谱线数据用 MATLAB 软件绘图并进行散点拟合, 得出直线斜率, 计算电弧温度。基于 Stark 展宽法^[18], 根据氢原子的 α 谱线或 β 谱线的展宽计算等离子体电子数密度^[19-20], 得到电弧等离子体温度和电子数密度如图 13 所示。数值分析模型得到电弧等离子体温度和电子数密度如图 14 所示。

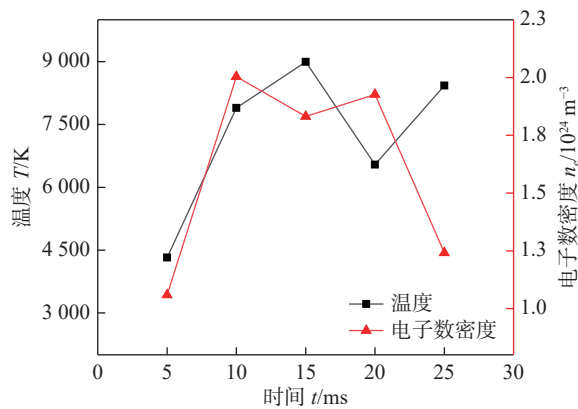


图 13 光谱诊断电弧等离子体温度和电子数密度
Fig. 13 Spectroscopic diagnosis of arc plasma temperature and electron number density

由图 13 和图 14a 电弧温度可知, 电弧等离子体温度随时间增加呈现先增加再减少的变化趋势, 与试验光谱诊断等离子体温度变化趋势相似, 且在温度数值上误差范围较小。由图 13 和图 14b 可知, 稳定时电子数密度为 $1.2129 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 。文献 [21] 从电信号角度定义了引弧过程时间, 试验中发现在 25 ms 时电压信号稳定, 故试验光谱所测算的电弧电子数密度为 $1.2412 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 考虑仿真模型一部分电子被边界吸收以及计算误差, 模型模拟结果与试验结果吻合, 验证了模型的准确性。

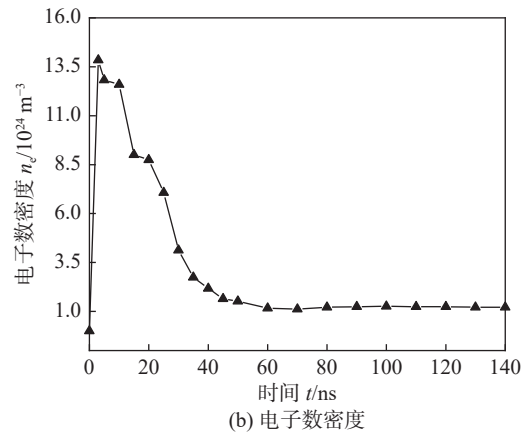
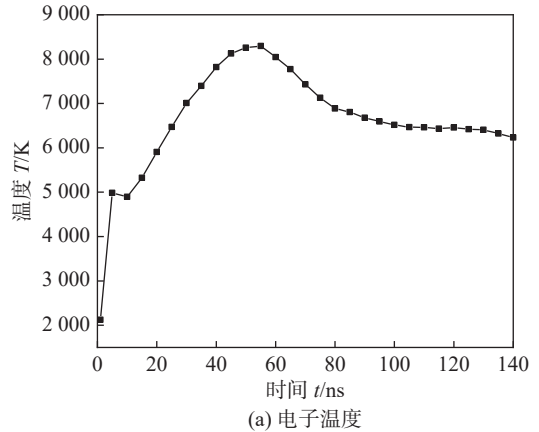


图 14 电弧等离子体电子温度和电子数密度

Fig. 14 Arc plasma electron temperature and number density. (a) electron temperature; (b) electron density

4 结论

(1) 基于 PIC-MCC 方法, 建立了 40 m 水深条件下湿法焊接电弧的模型, 从极板间介质击穿过程中等离子体动态分布、粒子数目的变化为切入点, 对高压水下湿法焊接电弧击穿机制进行深入研究。

(2) 通过采用数值模拟得到的电弧等离子体温度随时间变化的趋势, 以及稳定时电子数密度与对应水深条件下光谱诊断试验结果对比分析, 验证了模型的准确性。

参考文献

- [1] 叶建雄, 彭星玲, 李兵. 水下湿法焊接研究进展 [J]. 电焊机, 2020, 50(9): 111 - 117.
Ye Jianxiong, Peng Xingling, Li Bing. Research development of underwater wet welding[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 111 - 117.

- [2] 李显东. 不均匀电场下水中微秒脉冲放电过程及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Li Xiandong. Study on the process and mechanism of micro-second pulse discharge in water under uneven electric field [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [3] Babaeva N Y, Tereshonok D V, Naidis G V. Initiation of breakdown in bubbles immersed in liquids: pre-existed charges versus bubble size[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2015, 48(35): 355201.
- [4] Fujita H, Kanazawa S, Ohtanik, *et al.* Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(21): 213301.
- [5] Fan Ding, Yao Xinglong, Hou Yingjie, *et al.* The study of arc behavior with different content of copper vapor in GTAW[J]. China Welding, 2022, 31(2): 1 – 14.
- [6] Li X D, He H, Xiao T F, *et al.* Pre-breakdown processes in water under ultra-long pulses: Bubble-streamer dynamics and their transition[J]. Journal of Physics of Fluids, 2021, 33(10): 107102.
- [7] 张晓峻, 董婉佳, 孙露, 等. 水的光学特性实验研究 [J]. 实验技术与管理, 2014(3): 43 – 45,50.
Zhang Xiaojun, Dong Wanjia, Sun Lu, *et al.* Experimental study on the optical properties of water[J]. Experimental Technology and Management, 2014(3): 43 – 45,50.
- [8] Martin, Edward A. Experimental investigation of a high-energy density, high-pressure arc plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31(2): 255 – 267.
- [9] 夏炎, 吴昕翀. 局部热力学平衡态电弧等离子体的电导率计算研究 [J]. 电气开关, 2020, 58(2): 19 – 23.
Xia Yan, Wu Xinchong. Study on conductivity calculation of arc plasma in local thermodynamic equilibrium[J]. Electrical Switch, 2020, 58(2): 19 – 23.
- [10] 徐翔. 水下湿法焊接电弧等离子体温度及其组分研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
Xu Xiang. Research on the temperature and composition of underwater wet welding arc plasma [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [11] Stranathan J D. Dielectric constant of water vapor[J]. Physical Review, 1935, 48(6): 538 – 544.
- [12] 李志刚, 祝林, 黄卫, 等. 水下湿法药芯焊丝焊接气泡动态演变与其声脉冲分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(4): 36 – 41.
Li Zhigang, Zhu Lin, Huang Wei, *et al.* Dynamic evolution of bubbles and analysis of acoustic pulses in underwater wet flux cored wire welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(4): 36 – 41.
- [13] Zhao B, Chen J, Wu C, *et al.* Numerical simulation of bubble and arc dynamics during underwater wet flux-cored arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 167 – 185.
- [14] 邢长健. 水下湿法药芯焊丝焊接熔滴过渡过程的数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
Xing Changjian. Numerical simulation of droplet transfer process in underwater wet flux cored wire welding [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [15] Pancheshnyi S. 等离子数据交换库 [DB/OL]. https://fr.lxcat.net/data/set_type.php, 2020-01-10.
- [16] Dermott E, Cullen J H, Hubbell L K. 光子和电子相互作用数据库 [DB/OL]. <https://www.nds.iaea.org/epd197/>, 2020-04-03.
- [17] 李志刚, 刘德俊, 张世帅, 等. 不同水深下水下湿法焊接电弧引弧温度计算 [J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1586 – 1592.
Li Zhigang, Liu Dejun, Zhang Shishuai, *et al.* Calculation of arc starting temperature of underwater wet welding arc in different water depths[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1586 – 1592.
- [18] 王军毅, 施芸城. 大气压下 Ar/CF₄ 纳秒脉冲放电等离子体特性 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2021, 47(2): 125 – 130.
Wang Junyi, Shi Yuncheng. Characteristics of Ar/CF₄ nano-second pulsed discharge plasma at atmospheric pressure[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2021, 47(2): 125 – 130.
- [19] Venger R, Tmenova T, Valensi F, *et al.* Detailed investigation of the electric discharge plasma between copper electrodes immersed into water[J]. Atoms, 2017, 5(4): 40 – 53.
- [20] Yang L, Tan X, Wan X, *et al.* Stark broadening for diagnostics of the electron density in non-equilibrium plasma utilizing isotope hydrogen alpha lines[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(16): 163106.
- [21] 石里男. 焊接电弧引燃过程的机理分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
Shi Linan. Mechanism analysis of welding arc ignition process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.

第一作者: 李志刚, 博士, 副教授; 主要研究方向为焊接机器人及焊接自动化; Email: gordon7456@163.com.

(编辑: 郑红)