

水中交流电弧等离子体特性的测量

周恩平^{1,2}, 杨嘉祥¹, 马凤莲¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国广东核电集团 辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 通过光谱测量系统所测得的工频交流电压下水中电弧等离子体的光谱相对强度, 用双线法得到了等离子体中的电子激发温度, 并依据局部热力学平衡(LTE)条件, 用 Saha 方程求得了等离子体的电子密度和 H 、 H^+ 、 O 、 O^+ 等粒子的密度, 且等离子体密度随着电弧功率的增加而增大. 该实验为水中交、直流电弧特性或交流气体电弧等离子体特性的研究提供了参考.

关键词: 水中放电; 交流电弧; 光谱诊断; 等离子体特性

中图分类号: TM501.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2010)04-0094-04

Characteristics Measurement of AC Arc in Water

ZHOU En-ping^{1,2}, YANG Jia-xiang¹, MA Feng-lian¹

(1. School of Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd, China Guangdong Nuclear Power Group, Dalian 116001, China)

Abstract: According to the spectral lines relative intensity of AC arc plasma in water, which was measured by spectral measurement system, the double-lines method is used to measure the electron excitation temperature. Under local thermal equilibrium (LTE) condition, the concentrations of electrons and the density of H , H^+ , O and O^+ particles are obtained by Saha Equation method, and the concentration of plasma increases with the rising of arc power. This experiment can provide reference for the researching of AC and DC arc in water, or the characteristic of AC arc plasma in gas.

Key words: discharge in water; AC arc; spectral diagnosis; characteristic of plasma

0 引言

电弧放电是固体、液体和气体中的一种高温放电现象, 并伴有多种带电粒子产生, 采用接触法测量一般是不可能的, 见诸报道的有静电探针法, 也称 Langmuir 探针法^[1-3]. 这种方法通过探针系统的伏-安特性, 可获取有关电弧的温度和等离子体密度的信息, 但是, 由于探针必须与等离子体弧相接触, 使其测量精确度受到影响, 且探针易被烧毁. 唯一可采用的非接触式测量方法就是光谱诊断法, 这种技术依

据光谱强度可获得电弧等离子体内部温度和粒子浓度等相关信息, 为研究电弧内部的物理状态及其过程提供了技术支撑. 由于与其他现有的诊断方法相比, 光谱诊断技术具有灵敏度高、无干扰等优点, 已在污水、废气处理^[4-6]、物质检测^[7]、焊接及切割^[8-9]以及航天器推进^[10-13]领域的研究中得到了广泛的应用.

本文通过测量水中交流电弧等离子体的发射光谱相对强度, 利用双线法得到了等离子体的电子激发温度, 并根据局部热力学平衡(LTE)满足的条件, 用 Saha 方程法计算了电子密度和等离子体中 H 、

收稿日期: 2009-07-07

作者简介: 周恩平(1984—), 男, 硕士研究生, E-mail: zhouenping@tom.com;

杨嘉祥(1938—), 男, 教授, 博士生导师.

H^+ 、 O 、 O^+ 等粒子的浓度. 可为研究水中交流电弧特性提供有价值的参数.

1 实验系统

实验系统由水中等离子弧发生器及其光谱检测系统组成,如图1所示.

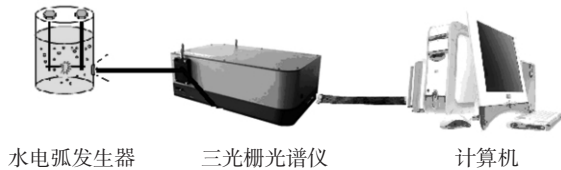


图1 实验系统

图2为水中电弧等离子体发生器,电源输入电压AC为220V,通过调压器控制输出电压,最高电压可达1800V,线路中的电感用于限制瞬间过大的短路电流. 电极由两根直径为5mm、外部包绕聚四氟乙烯的不锈钢棒组成,端部为锥形,极间距离为2mm,电极浸在透明玻璃容器里的自来水中.

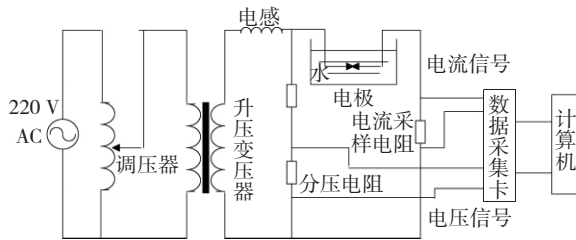


图2 水电弧发生器

图3为光谱采集处理系统. 三光栅光谱仪主要由采光狭缝、光学透镜系统、光电倍增管、有源滤波器、A/D数模转换器和高压电源等组成. 通过光纤采集电极间隙中所产生的电弧的光信号,传入三光栅光谱仪,并由光电倍增管将光信号转换为电信号送入数据采集器,数据采集器再将采集到的数据传入计算机处理和显示. 本实验采用的三光栅扫描光谱仪的波长准确度为 ± 0.2 nm,最小步距0.005 nm,分辨率0.1 nm,适用光谱范围185 nm 远红外.

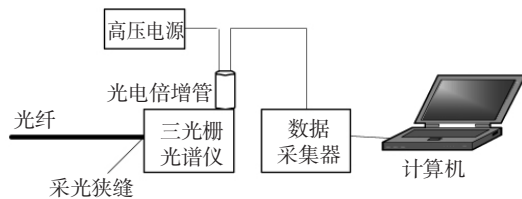


图3 光谱采集处理系统

交流电弧的电流基本呈正弦变化,电弧中的各物理量会相应发生变化,光谱辐射强度也是如此. 本实验所测得的光谱发射数据系在电弧功率瞬时值最大时所得,即采用同条谱线的最大幅值计算.

2 电子激发温度的测量

当等离子体达到热力学平衡或局部热力学平衡(LTE)时,处于同种原子或离子的两个能级 E_m 和 E_n 上的粒子数满足波尔兹曼分布^[4],即

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT}\right) \quad (1)$$

其中 N_m 、 N_n 为上下能级的粒子密度, g_m 、 g_n 、 E_m 、 E_n 分别表示上下能级的统计权重和激发能量, T 为电子激发温度或激发温度, k 为波尔兹曼常数.

同种原子或离子在两个能级之间跃迁发射光子的谱线强度为^[5]

$$I_{nm} = N_n A_{nm} h\nu \quad (2)$$

式中: N_n 为激发能级为 n 的原子密度; A_{nm} 为从能级 n 跃迁到能级 m 的自发跃迁概率; h 为普朗克常量; ν 为光的频率.

具有公共下能级(r 能级)的两条谱线相对强度比值为

$$\frac{I_{mr}}{I_{nr}} = \frac{N_m A_{mr} \nu_{mr}}{N_n A_{nr} \nu_{nr}} \quad (3)$$

联立式(1)、(2)可得

$$\frac{I_{mr}}{I_{nr}} = \frac{A_{mr} g_m \nu_{mr}}{A_{nr} g_n \nu_{nr}} \exp\left[-\frac{E_m - E_n}{kT}\right] \quad (4)$$

$$E_m - E_n = [E_m - E_r] - [E_n - E_r] = h\nu_{mr} - h\nu_{nr} \quad (5)$$

$\nu_{nr} = c/\lambda_{nr}$, c 为光速. 联立式(4)、(5)得

$$\frac{I_{mr}}{I_{nr}} = \frac{A_{mr} g_m \nu_{mr}}{A_{nr} g_n \nu_{nr}} \exp\left[-\frac{h(\nu_{mr} - \nu_{nr})}{kT}\right] \quad (6)$$

对式(5)两边同时取对数得

$$\ln \frac{I_{mr}}{I_{nr}} = \ln \frac{\nu_{mr}}{\nu_{nr}} + \ln \frac{A_{mr} g_m}{A_{nr} g_n} - \frac{h(\nu_{mr} - \nu_{nr})}{kT} \quad (7)$$

选取具有公共下能级(第二能级)的两条谱线 H_α ($m=3, r=2$)和 H_β ($m=4, r=2$). 根据式(7)有

$$\ln \frac{I_{32}}{I_{42}} = \ln \frac{\nu_{32}}{\nu_{42}} + \ln \frac{A_{32} g_3}{A_{42} g_4} - \frac{h(\nu_{32} - \nu_{42})}{kT} \quad (8)$$

只要测得这两条谱线的相对强度就可求得 T 值.

电子在不同能级之间跃迁时,总简并度(统计权重)为 $g = 2n^2$,所以氢原子的第3能级总简并度 $g_3 = 18$,第4能级的总简并度 $g_4 = 32$. 表1示出 H_α 和 H_β 谱线的部分参数.

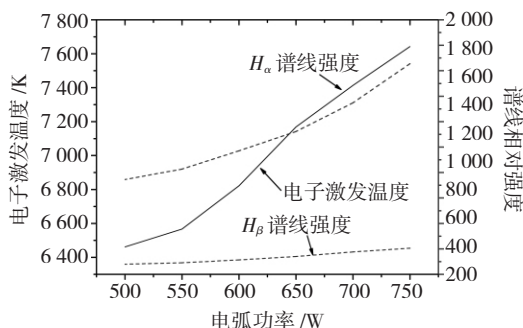
表1 H_α 和 H_β 谱线的部分参数

谱线	波长 λ/nm	频率 ν/Hz	能级跃迁/n	跃迁几率 A	Ref
H_α	656.3	4.568×10^{14}	3-2	4.41×10^7	NIST
H_β	486.1	6.617×10^{14}	4-2	8.42×10^6	NIST

根据表1中的参数可以将式(8)简化为

$$T = \frac{9.83 \times 10^3}{\ln\left(\frac{I_{32}}{I_{42}}\right) - 0.71} \quad (9)$$

根据式(9)和测得的 H_α 、 H_β 谱线相对强度,可得图4所示的不同电弧功率下的电子激发温度,同图还列出了 H_α 、 H_β 谱线相对强度随电弧功率变化的规律。

图4 H_α 、 H_β 谱线强度、电子激发温度与电弧功率的关系

从图4中可以看出,电子的激发温度随着电弧功率的增加而增加。 H_α 、 H_β 的谱线强度也随电弧功率的增加而增强,表征为电子激发温度的增加,但增加的速度不同。这是由于电弧功率的增加使电子能量增加,更多的原子跃迁到激发态,从而使得高能级向低能级跃迁的电子数增加,进而使得谱线强度增加。但是不同能级电子的激发几率是不同的,所以不同谱线随功率的增长速度不同。

3 电子密度的测量

用中性原子和离子谱线的相对强度法来测量未知等离子体的电子密度是非常方便的。在局部热力学平衡条件下,根据式(1),激发态原子密度 N_n 和基态原子密度 N_0 有如下关系

$$\frac{N_n}{N_0} = \frac{g_n}{g_0} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)$$

结合式(2)可得

$$I_{nm} = N_0 \left(\frac{g_n}{g_0}\right) A_{nm} h \nu \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right),$$

或

$$I_{nm} = N \left(\frac{g_n}{Z}\right) A_{nm} h \nu \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \quad (10)$$

其中: N 为中性原子的总密度,即 $N = \sum_i N_i$ 。 Z 为

配分函数,有 $Z = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$ 。由式(10)可得

同一元素的一次电离离子谱线和原子谱线强度比为

$$\frac{I^+}{I^0} = \frac{N^+ g^+ A^+ \nu^+ Z^0}{N^0 g^0 A^0 \nu^0 Z^+} \exp\left(\frac{E^0 - E^+}{kT}\right) \quad (11)$$

其中 E^0 为原子光谱线的激发电位, E^+ 为一次电离离子光谱线激发电位。

设等离子体的电离度为 α ,仅考虑一次电离,在局部热力学平衡的等离子体中,原子的电离满足萨哈方程^[6]

$$\frac{Z^+}{Z^0} N_e = \frac{\alpha}{1-\alpha} N_e = \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2} 2Z^+}{h^3 Z^0} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (12)$$

其中: N_e 为电子密度; m_e 为电子质量; E_i 为某元素的电离能。

结合式(11)、(12)可得

$$N_e = \frac{I g^+ A^+ \nu^+ 2 (2\pi m_e kT)^{3/2}}{I^+ g^0 A^0 \nu^0 h^3} \exp\left(\frac{E^0 - E^+ - E_i}{kT}\right)$$

经过整理可得

$$N_e = 4.83 \times 10^{15} \frac{I^0 (gA)^+ \nu^+}{I^+ (gA)^0 \nu^0} T^{3/2} \exp\left(\frac{E^0 - E^+ - E_i}{kT}\right) \quad (13)$$

在本实验中,因选用不锈钢作电极(含有铁元素),故选取使用较多的 Fe 原子谱线(Fe I)及离子谱线(Fe II),通过测量两谱线的相对强度之比来计算电弧等离子体中的电子密度。表2^[7]给出了 Fe 元素谱线的物理参数。

表2 Fe 元素谱线部分物理参数

元素	谱线	波长 λ/nm	频率 $\gamma \times 10^{-15}$	流气发电位/(cm^{-1})	$E_i/(\text{cm}^{-1})$	$gA/(10^8 \text{S}^{-1})$
Fe	Fe I	252.28	1.188	339 626	63.16×10^{15}	29.125
	Fe II	258.59	1.159	38 660		8.009

在式(13)中,若 T 在(5 000 - 10 000) K 范围内变化时,则

$$\exp\left(\frac{E^0 - E^+ - E_i}{kT}\right) \approx 1, \quad \frac{(gA)^+ \nu^+}{(gA)^0 \nu^0} = 0.319$$

将表2中的参数代入,则式(13)可以简写为

$$N_e = 1.54 \times 10^{15} T^{3/2} \frac{I^0}{I^+} \quad (14)$$

根据式(14)及测量的 FeI、FeII 的谱线相对强度,

结合前面计算得到的电子激发温度,可得到如图5所示的电子密度随电弧功率的变化规律,同图还列出了Fe元素谱线相对强度与电弧功率之间的关系。

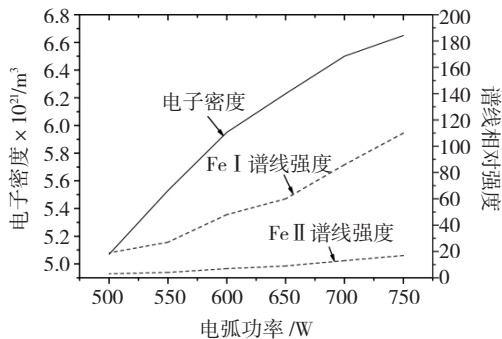


图5 Fe I、Fe II谱线强度、电子密度与电弧功率的关系

如图5所示,电弧功率增加,电子密度也随之增加,这是因为:

- 1) 电极附近的电场强度增加,导致更多的电子脱离电极表面成为自由电子;
- 2) 电弧功率的增加使电子的能量增加,使碰撞电离作用增强;
- 3) 电弧温度的增加使热电离作用增强;
- 4) 电弧发光强度增加,使得光致电离作用增强。

4 H、H⁺、O、O⁺密度的测量

根据氢原子、氧原子的一次电离反应式,得出电离平衡的沙哈方程为^[14]

$$\frac{N_e N_{H^+}}{N_H} = 2 \frac{Z_{H^+}(T)}{Z_H(T)} \times \frac{(2\pi m_e kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_H}{kT}\right) \quad (15)$$

$$\frac{N_{eO^+}}{N_O} = 2 \frac{Z_{O^+}(T)}{Z_O(T)} \times \frac{(2\pi m_e kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \times \exp\left(-\frac{E_O}{kT}\right) \quad (16)$$

其中 N_H 、 N_{H^+} 、 N_O 、 N_{O^+} 分别为氢原子、氢离子、氧原子和一价氧离子密度。水中电弧等离子体的准中性平衡方程式为

$$N_e = N_{H^+} + N_{O^+} \quad (17)$$

水中电弧等离子体的质量平衡方程式为

$$\frac{N_H + N_{H^+}}{N_O + N_{O^+}} = 2 \quad (18)$$

将电子密度 N_e 以及电子激发温度 T 代入式(15)~(18),便可求得氢原子、氢离子、氧原子和一价氧离子浓度。通过计算列出了这几种粒子的浓度随电弧功率变化的规律,如图6所示。

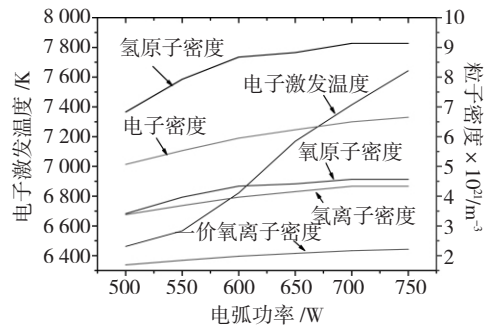


图6 H、H⁺、O、O⁺粒子密度、电子密度、电子激发温度随电弧功率的变化

图6中,水中等离子电弧中H、H⁺、O、O⁺粒子密度、电子密度随着电弧功率的增加而增加,其原因是电弧功率的增加加剧了水分子的解离和电离过程,从而产生更多的原子、离子和自由电子。

5 结 论

利用光谱诊断法测得了水中交流等离子弧光谱特性获得了如下成果:

1) 在局部热力学平衡(LTE)条件下,利用双线法测量了含有氢元素电弧等离子体的电子激发温度。在电弧功率为750 W时,电子激发温度为7 643 K;

2) 利用Saha方程,根据Fe I、Fe II谱线的相对强度,测得电弧功率为750 W时的电子密度为 $6.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$;

3) 水中电弧等离子体中除了存在电子外,还存在大量的氢原子、氢离子、氧原子和一价氧离子,且随着电弧功率的增加而增多。当电弧功率为750 W时,这几种粒子的密度分别为: $9.1350 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、 $4.4333 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、 $4.5675 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、 $2.2167 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 。由于这些粒子具有强氧化性,可对水中溶解的有机物,甚至重金属颗粒产生强烈的氧化性,所以,水中交流电弧在污水处理中有潜在的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] 温培刚, 颜悦, 望咏林, 等. 直流磁控溅射辉光等离子体的Langmuir静电探针诊断[J]. 真空科学与技术学报, 2008, 28(增刊): 79-82.
- [2] 贾瑞金, 童靖宇, 刘业楠. 静电探针法对等离子体参数的测定[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 302.
- [3] 王志刚, 刘文清, 张玉钧, 等. 不同来源水体有机综合污染指标的三维荧光光谱法与传统方法测量的对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12): 2514-2517.

(下转第101页)

(28) 和 (29) 给出. 其中 $f_i \in C^r, i = 1, 2, \dots, 2p$ 满足 (26), (27) 和下述约束

约束 1: 当 $s_i = \bar{s}_j$ 时, $\bar{f}_i = \bar{f}_j$;

约束 2: $\Phi_i f_i = T_i, i = 1, 2, \dots, 2p$.

需要说明的是,本文的控制器有三个方面的约束,第一是基于输出反馈的控制器要存在,其次式 (26) ~ (27) 要满足,最后式 (31) 要满足,这将限制其实际应用,也很难给出具体的数值算例.

4 结 语

本文针对被控对象和参考模型的状态不可得的情况,讨论了二阶动力学系统基于输出反馈的模型跟踪问题. 提出了控制器的形式,推导出了控制器的存在条件,同时将控制器的增益矩阵进行了完全的参数化.

参 考 文 献:

- [1] 杨 涤,冯文剑,吴瑶华. 用前馈加反馈控制实现输出跟踪[J]. 宇航学报,1990(1):84-90.

- [2] DIWEKAR A M, YEDAVALLI R K. Stability of Matrix Second-order Systems: new Conditions and Perspectives [J]. IEEE Trans, Automatic Control, 1999, 44: 1773-1777.
- [3] DATTA B N, Rincon F. Feedback Stabilisation of a Second-order System: A Nonmodal Approach [J]. Linear Algebra Applications, 1993(2):135-161.
- [4] DUAN G R, LIU G P. Complete Parametric Approach for Eigenstructure Assignment in a Class of Second-order Linear Systems [J]. Automatica, 2002, 38: 725-729.
- [5] 王国胜,段广仁,二阶动力学系统输出反馈特征结构配置[J]. 系统工程与电子技术,2004,26:1080-1083,1144.
- [6] DUAN G R, HUANG L. Robust Pole Assignment in Descriptor Second-order Linear Systems Via State Feedback [J]. 自动化学报,2007,33(13):888-892.
- [7] DUAN G R, HUANG L. Robust Model Following Control for a Class of Second-order Dynamical Systems Subject to Parameter Uncertainties [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2008, 30(2):115-142.
- [8] HUANG L, DUAN G R. Asymptotically tracking in matrix second-order dynamical system framework [C] //The Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005(2):1285-1289.

(编辑:王 萍)

(上接第97页)

- [4] 王志刚,刘文清,张玉钧,等. 三维荧光光谱法分类测量水体浮游植物浓度 [J]. 中国环境科学,2008,28(2):136-141.
- [5] 郝瑞霞,曹可心,邓亦文. 三维荧光光谱法表征污水中溶解性有机污染物 [J]. 分析实验室,2007(10):41-44.
- [6] 陈成法. 差分吸收光谱法烟气在线监测技术 [D]. 天津:天津大学,2007.
- [7] 何红蓼,胡明月,巩爱华,等. 碘化物升华分离-电感耦合等离子体光谱法测定土壤和沉积物中砷、锑、铋、镉、锡 [J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(3):663-666.
- [8] 赵华夏,焦向东. 利用电弧光谱对 TIG 焊接电弧弧长的检测 [J]. 上海交通大学学报,2008,42(增刊):119-121.
- [9] 杨晓红,宋永伦,胡坤平. 交流 TIG 电弧过零时段的时间-能量分布特征 [J]. 焊接学报,2009,30(2):21-24.
- [10] 沈 岩. 低功率水电弧加热发动机的实验研究 [D]. 京:清华大学,2004.
- [11] 沈 岩,赵文华,石 泳,等. 发射光谱测量电弧加热发动机

- 羽流温度 [J]. 推进技术,2005,26:23-37.
- [12] RUYTEN W M, BURTNER D, KEEFER D. Spectroscopic Investigation of a low Power Arcjet Plume [J]. Monterey: AIAA,1993.
- [13] STORM P V, CAPPELI M A. High Spectral Resolution Emission Study Of A Low Power Hydrogen Arcjet Plume [R]. San Diego: AIAA,1995.
- [14] 屠 昕,陆胜勇,严建华,等. 大气直流氩等离子体光谱诊断研究 [J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(10):1785-1789.
- [15] 张 锐,黄碧霞,何友昭. 原子光谱分析 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1991.
- [16] 金佑民,樊友三. 低温等离子体物理基础 [M]. 北京:清华大学出版社,1983.
- [17] 辛仁轩. 等离子体发射光谱分析 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.

(编辑:付长缨)