

基于 ANSYS 的空气电弧放电等离子体温度数值模拟

胡 辉¹, 杨 旗¹, 包 斌¹, 何俊佳², 李 劲²

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北武汉 430074;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 吸入一氧化氮(NO) 疗法因其具有疗效快、非创伤性及高选择性等优点, 在临床救治新生儿急性肺损伤和持续肺动脉高压等相关疾病方面逐步得到广泛应用。电弧放电是产生 NO 的一种新方法。因此, 研究控制空气电弧放电合成 NO 的等离子体参数, 对实现电弧放电合成医用 NO 在临床上的应用具有重要意义。本文根据磁流体动力学理论, 建立了脉冲电弧放电等离子体轴对称数学模型, 运用 ANSYS 软件, 对电弧放电等离子体温度场分布和电流密度进行了数值模拟。结果表明, 当电流增大时, 阳极附近温度增大, 阳极电流密度增大; 当弧长增加时, 阳极附近温度增大, 阳极表面电流密度增大, 阴极电流密度略变小。温度的升高, 有利于 NO 的合成及抑制 NO₂ 的生成。

关键词: 电弧放电; 等离子体; 温度; 模拟

中图分类号: TM836

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2009)02-0020-04

引言

一氧化氮(NO) 是生物体内血管内皮衍生的舒张因子^[1], 因其具有选择性松弛血管内皮平滑肌等功能, 在临床救治新生儿急性肺损伤和持续肺动脉高压和高原性肺水肿等相关疾病方面逐步得到广泛应用^[2,3]。电弧放电是产生 NO 的一种新方法^[4-6], 因其能随时随地产生医疗救治所需要的 NO, 解决了化学方法产生的需要先贮存在高压钢瓶, 使用时再将高浓度(一般为 400~800ppm) 的 NO 减压稀释到低浓度(NO: 3~20ppm, 且 NO₂/NO < 5%) 和价格昂贵^[7]等问题而受到重视, 但空气放电过程中总有少量的 NO₂ 有毒气体生成。因此, 如果能在放电过程中, 通过控制电弧放电等离子体的某些参数, 抑制或减少生成 NO₂ 的等离子体化学反应途径, 对于实现电弧放电合成医用可吸入性 NO 具有重要意义。研究放电等离子体参数的方法有包括光谱法、探针法、动态热偶法和微波、激光法等多种方法^[8-10], 这几种方法都是通过实验测量和分析, 获得某个参数或几个参数量的大小, 而不能给出放电过程相关参数局部或整个的变化过程。事实上, 数学物理解析方法不仅能够间接的获得放电过程中的某个参数或几

个参数量的大小, 而且还能够给出放电过程相关参数局部或整个变化过程, 有利于揭示等离子体发生器内部物理化学过程^[11,12]。为此, 本文利用 ANSYS 软件, 对不同电流和弧长的电弧等离子体温度分布进行模拟, 希望从微观角度对电弧等离子体的温度分布和电流密度等参数进行理论分析, 找出空气电弧放电 NO₂ 产生的原因, 为抑制 NO₂ 的产生提供科学依据。

1 实验装置和实验方法

图 1 是脉冲电弧放电生成 NO 的实验装置简图, 主要由洁净空气产生装置、脉冲电压发生装置、

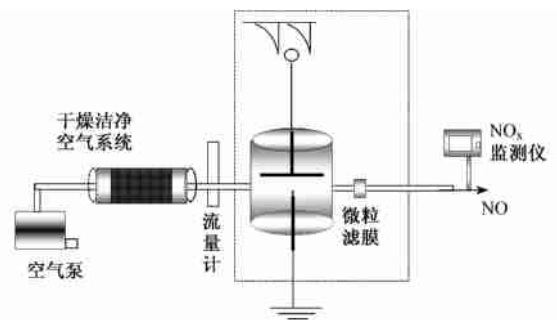


图 1 脉冲电弧放电产生 NO 的装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of trial NO generator

收稿日期: 2008 11 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50677026); 华中科技大校基金资助项目 (J2007M036B)

作者简介: 胡 辉 (1963-), 男, 湖北籍, 教授, 博士, 主要从事气体放电与等离子体技术应用方面的研究。

等离子体反应器、微粒滤膜和氮氧化物检测仪组成。针-板电极放在一个耐热、耐腐蚀的特氟龙材料制作的盒中。用 Tektronix TDS754D(美国)示波器测量放电电压和电流波形;在放电达到稳态(5分钟)后,用 Q-RAE PGM-2000 复合式气体检测仪(美国 RAE)测量放电处理后气体中的 NO 和 NO₂ 气体的浓度。本次实验条件:针-板电极分别是不锈钢和钼材料制成,放电频率 22Hz,电极间距 1~7mm,气体流量 3l/min,常温常压。

2 电弧等离子体模型

2.1 电弧等离子体基本模型

空气电弧放电产生少量 NO₂ 的原因可能涉及到局域热平衡等离子体温度分布不均和热平衡等离子体中存在着非热平衡等离子体现象^[13]。为此,本文将从局域热平衡等离子体温度分布方面,探寻电弧放电中产生 NO₂ 浓度高低问题。并对电弧等离子体数值模型作了如下基本假设:

- 1) 假定电弧是处于局部热动态平衡(LTE)的;
- 2) 电弧是稳定、连续和对称的,流动处于层流状态;
- 3) 电弧是光学薄的,即辐射的重新吸收和总的辐射损失相比可以忽略不计,流动处于层流状态;
- 4) 由于粘性效应导致的热损失忽略不计。

据此设 $u = u(r, z)$ 和 $v = v(r, z)$ 分别表示弧柱 z 和 r 方向的流体速度分量,那么在柱坐标下 (r, θ, z) 建立的电弧数值守恒方程(包括质量守恒方程、动量方程、能量方程和电流连续方程)分别为^[14]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量方程径向表达式:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right] = R - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

动量方程轴向表达式:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right] = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

能量方程为

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

$$= \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[kr \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q \quad (4)$$

电流连续方程:

$$\frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[x \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] = 0 \quad (5)$$

欧姆定律:

$$j_x = -\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad j_z = -\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (6)$$

安培环流定律:

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{x} \int_0^x j_z dx \quad (7)$$

其中: ρ 是密度; u, v 分别表示轴向和径向的速度分量; μ 是粘度; c_p 是比热, k 是导热系数, P 是压力; T 是温度。 σ 为电导率, Φ 为电势, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率。

2.2 计算区域和边界条件

电弧数值计算模型如图 2 所示,图中 AFB 区域代表阴极区, BCDEF 区域代表阳极区,电弧参量(温度、电弧压力等)的计算区域是 BCDEF。采用变步长映射方法划分六面体型网格,因在电弧中心区域存在较大的温度变化,为得到较精确的数值解,该区采用较大的网格密度。

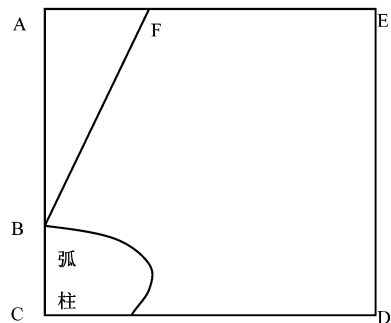


图 2 电弧数值计算模型

Fig. 2 Model of arc numerical calculation

电流边界条件:在电极断面处,由于电极材料导电性的各向同性,且附近的电弧温度较低,其电导率远远低于电极的电导率,可以认为电流在此处是沿 Z 方向分布的,则由下式给定电流边界条件:

$$J_z = \frac{I}{\pi R_1^2} \quad J_x = J_y = 0 \quad (8)$$

式中: I 是电流, R_1 是电极半径

温度边界条件:取电极壁面和阴极面温度为 5000K,对称面为绝热边界;其他面的温度为 1000K。

3 模拟计算结果与分析

3.1 不同电流条件下等离子体温度场分布

电极间距为 3.5mm(或弧长取 3.5mm), 电流分别取 1200A、1000A 和 700A 时, ANSYS 模拟的电弧放电等离子体温度场分布如图 3~ 7 所示。

从图 3~ 5 可知, 电流为 1200A、1000A 和 700A 三种电流条件下, 电弧温度场分布特征相似, 最大温度都在弧柱中心靠近电极的位置, 温度随着离轴向距离的增加而降低, 随着电流的增加温度也随之增加, 即温度与电流成正比, 而且随电流的增加, 阳极附近的温度增加。三种电流对应的电弧最高温度分别为 30015K、23011K 和 17008K。同时, 模拟结果也显示, 随着电流的增加电流密度增大, 最大电流密度在电极附近。对应的电流密度最大值分别为 $1.41 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 、 $1.17 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 和 $8.22 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。

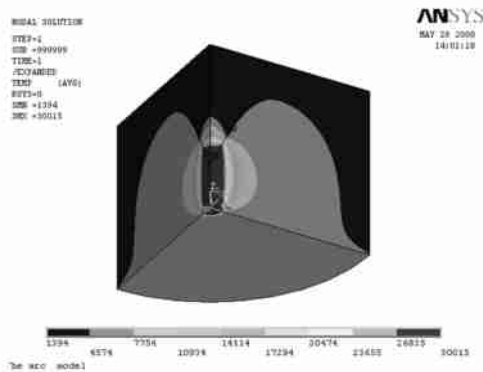


图 3 1200A 时电弧的温度分布

Fig. 3 Distribution of arc temperature with current of 1200A

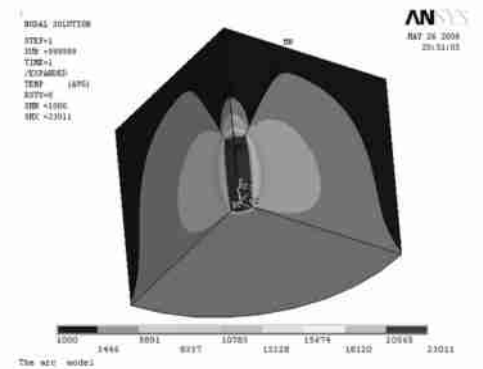


图 4 1000A 时电弧的温度分布

Fig. 4 Distribution of arc temperature with current of 1000A

从图 5 的电弧温度分布可知, 当电流= 1200A 时, 电弧温度分布范围为 1394~ 30015K, 按照文献

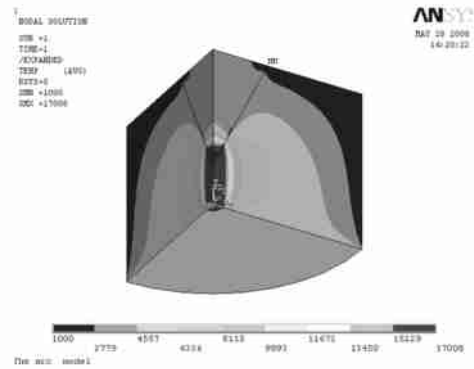


图 5 700A 时电弧的温度分布

Fig. 5 Distribution of arc temperature with current of 700A

[15], 洁净的 N_2 和 O_2 合成 NO 的热力学平衡中, 当温度约在 1700~ 3800K 范围内, 将产生 NO_2 , 当温度在 2000K 左右时 NO_2 产生量最大。因此, 电流= 1200A 时的电弧放电过程中必然会有 NO_2 生成。同理, 电流为 1000A 和 700A 时的电弧放电过程中也有 NO_2 的生成。因此, 要想抑制放电过程中 NO_2 的生成, 可以通过提高电弧放电电流的方法, 使弧柱边界的最低温度控制在某个适当的数值。

3.2 不同弧长条件下的等离子体温度场分布

图 6~ 8 为电流= 1000A, 弧长分别取 1mm、3.5mm 和 7mm, 其它条件不变时, ANSYS 模拟的电弧等离子体温度场分布。

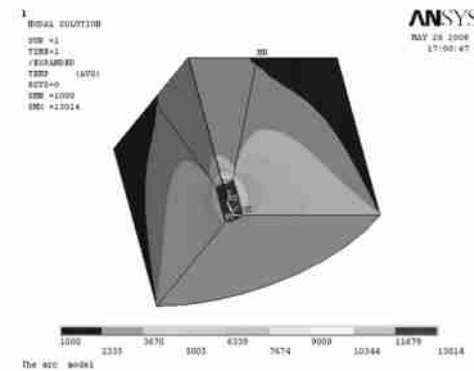


图 6 弧长 1mm 时电弧温度分布

Fig. 6 Distribution of arc temperature with arc length of 1mm

从图 6~ 8 可知, 弧长越长, 弧柱最高温度越高。当弧长从 1mm 增加到 7mm 时, 电弧的最高温度由 13014K 增加到 23011K 和 32003K。而且随着弧长的增加, 电弧温度场分布的差异逐渐明显, 同时弧柱边界温度越来越高, 这有利于抑制 NO_2 的生成。模拟结果显示, 阳极电流密度随着弧长的增加而增加, 阴

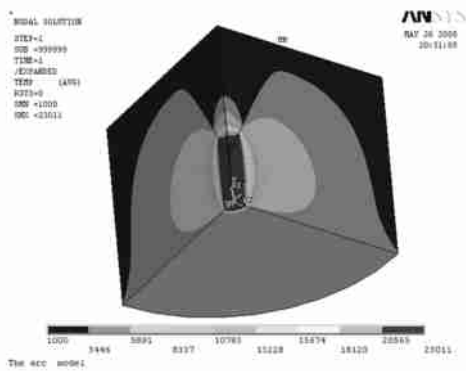


图7 弧长 3.5mm 时电弧温度分布

Fig.7 Distribution of arc temperature with arc length of 3.5mm

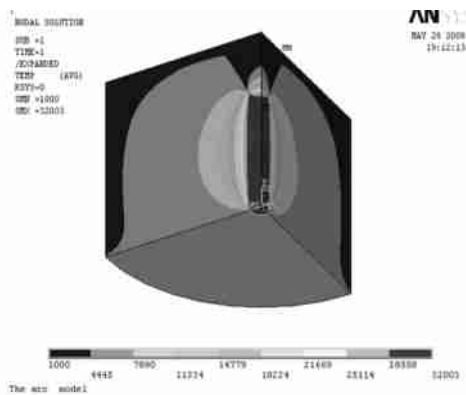


图8 弧长 7mm 时电弧温度分布

Fig.8 Distribution of arc temperature with arc length of 7mm

极电流密度随弧长的增大而略有减少。对应的电流密度最大值分别为 $9.95 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 、 $1.17 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 和 $2.54 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 。

4 结束语

电弧放电的 ANSYS 数值模拟显示,在一定的实验条件下,当电流增大时,阳极附近温度增大,阳极电流密度增大;当弧长增加时,阳极附近温度增大,阳极表面电流密度增大,阴极电流密度略变小。脉冲电弧放电形成的局域热平衡等离子体温度分布存在差异,这种差异是导致空气电弧放电产生 NO_2 气体的原因之一。可以通过提高放电电流的方法,控制等离子体化学反应所需要适当温度,达到抑制放电过程中 NO_2 的产生。

参考文献 (References):

[1] R Palmer, A C Fergie, S Moncada. Nitric oxide release accounts for the biological activity of endothelium derived relaxing factor [J]. Nature, 1987, 327: 524-556.

[2] American Academy of Pediatrics Committee on Fetus and Newborn. Use of inhaled nitric oxide [J]. Pediatrics, 2000, 106: 344-345.

[3] Neil N Finer, Johnny W Sun, Wade Rich, et al. Randomized, prospective study of low dose versus high dose inhaled nitric oxide in the neonate with hypoxic respiratory failure [J]. Pediatrics, 2001, 108(4): 949-956.

[4] H Akiyama, T Namihira, D Wang, et al. Nitric oxide inhalation system using pulsed discharge [A]. ElectroMed99 [C]. Virginia, USA, 1999. 111.

[5] Takao Namihira, Sunao Katsuki, Reuben Hackam, et al. Production of nitric monoxide using pulsed arc discharge [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2002, 30(5): 1993-1997.

[6] Hu Hui, Liang Haiyan, Li Jin, et al. Study on production of inhaled nitric oxide for medical applications by pulsed discharge [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2007, 35(3): 619-625.

[7] Pierce CM, Peters MJ, Coghen G, et al. Cost of nitric oxide is exorbitant [J]. BMJ, 2002, 325: 336.

[8] 郝艳捧, 关志成, 王黎明 (Hao Yanpeng, Guan Zhicheng, Wang Liming). 大气压空气辉光放电 (Review of glow discharge in air gap at atmospheric pressure) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2005, 24(2): 69-72.

[9] 聂勇, 汪晶毅, 钟侃 (Nie Yong, Wang Jingyi, Zhong Kan). 等离子体辅助催化还原 NO_x 的协同特性 (Synergy study for plasma facilitated catalytic reduction of NO_x) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2007, 26(3): 47-51.

[10] 金佑民, 樊友三 (Jin Youmin, Fan Yousan). 低温等离子体物理基础 (Basic of low temperature plasma physics) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: TUP), 1983.

[11] 吕博, 王新新, 罗海云 (Lv Bo, Wang Xinxin, Luo Haiyun). 大气压氦气介质阻挡辉光放电的数值仿真计算 (Numerical modeling of dielectric barrier atmospheric pressure glow discharge in helium) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2008, 27(3): 63-67.

[12] 司文荣, 李军浩, 郭弘 (Si Wenrong, Li Junhao, Guo Hong). 直流下局部放电重复率的数学物理模型 (Study on mathematical physics model of DC PD repetition rate) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2008, 27(4): 27-31.

[13] Giannaris RJ, Incropera F P. Nonequilibrium effects in an atmospheric argon arc plasma [J]. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1971, 11(2): 291-307.

[14] K C Hsu, E Pfender. Two temperature modeling of the free burning, high intensity arc [J]. J. Appl. Phys., 1983, 54(8): 4359-4366.

[15] P R Ammann, R S Timmins. Chemical reactions during rapid quenching of oxygen nitrogen mixture from very high temperatures [J]. A. I. Ch. E., 1966, 12(5): 956-963.

(下转第 28 页, cont. on p. 28)

Pulse shortening phenomena in RBWO filled with neutral gas

GE Xing jun, QIAN Bao liang, ZHONG Hui-huang, LIU Jir-liang, XU Qi-fu, ZHANG Jun

(College of Opto-electric Science and Eng., National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Pulse shortening is a common phenomenon in high-power microwave tubes, which hinders the improvement of microwave output energy. So far, it is also an unresolved problem in the field of high power microwave devices. In this paper, a gigawatt compact relativistic backward wave oscillator (RBWO) with coaxial extractor is investigated using the KARAT 2.5 D particle simulation code. Detail physical interaction pictures and the pulse shortening phenomena of the oscillator filled with neutral gas are presented. Typical simulation results reveal the production process of the plasma due to the collision of the relativistic electron beam with the neutral gas injected previously into the BWO tube and verify that the collision produced plasma may efficiently neutralize the space charge effect of the relativistic electron beam and enhance the production rate of the high power microwave. The simulation results show that, with over-high density plasma, there would be serious pulse shortening of microwave pulses, even the device can not work normally. Therefore, in order to improve the performance of RBWO, a suitable plasma density should be selected.

Key words: pulse shortening; plasma; filled with neutral gas; RBWO; collision ionization

(上接第 23 页, cont. from p. 23)

Numerical simulation of arc plasma temperature based on ANSYS

HU Hui¹, YANG Qi¹, BAO Bin¹, HE Junjia², LI Jin²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Inhaled NO has good curative effect, non-traumatic and high selectivity, and is gradually widely used in clinical treatment of neonatal with acute lung injury and persistent pulmonary hypertension. Arc discharge is a new method of producing NO. So research on control of plasma parameters is of great significance in the clinical application of NO generated by arc discharge. Based on the theory of magnetic fluid dynamics, this paper established an axial symmetry mathematical model of pulsed arc plasma, and simulated the plasma temperature distribution and current density of arc discharge by using ANSYS. The results show that, when the current increases, temperature near the anode and anode current density increase; when the arc length increases, temperature near the anode and anode current density increase, and cathode current density decreases slightly. The increase on temperature is beneficial to the formation of NO but goes against the generation of NO₂.

Key words: arc discharge; plasma; temperature; simulation

书 讯 (New Book Info.)

宋涛, 霍小林, 吴石增. 生物电磁特性及其应用. 北京: 北京工业大学出版社, 2008. 8.
16 开, 435 千字, 55 元。