

文章编号: 1001-1609(2007)01-0011-03

# 气体流向和流量对电弧放电产生医用 NO 浓度的影响

胡 辉, 梁海艳, 赵全中, 李 劲, 何俊佳, 何正浩

(华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

Influences of Magnitude and Direction of Air Flow on Concentration of Nitric Oxide by Arc Discharge for Medical Applications

HU Hui, LIANG Hai-yan, ZHAO Quan-zhong, LI Jin, HE Jun-jia, HE Zheng-hao

(The College of Environmental Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 实验研究了不同气体流向和流量情况下,干燥空气中的脉冲电弧放电产物 NO 的变化特点和规律。结果发现:气体流向和流量对脉冲电弧放电产物 NO 浓度的稳定性有显著影响,可以通过改变气体流向和流量的方法,使电弧放电提供稳定的可吸入性 NO 供临床救治使用;脉冲电弧放电过程中产生的少量 NO<sub>2</sub> 有害气体,可以通过一个装有催化剂的 NO<sub>2</sub>-NO 转换器而被有效地去除。

关键词: 电弧放电; 流向; 流量; 一氧化氮;

急性呼吸衰竭综合征

中图分类号: TM836

文献标识码: A

Abstract: Nitric monoxide(NO)is receiving great attention as a new cure for acute respiratory distress syndrome. In this experimental study, the variation characteristic of Nitric monoxide (produced by pulsed arc discharge), under the conditions of various magnitude and direction of the air flow rate, has been confirmed. The results show that the concentration of NO depends significantly on magnitude and direction of the air flow rate. Inhaled nitric oxide for clinical applications can be adjusted by changing magnitude and direction of the air flow rate. In all cases, NO<sub>2</sub> can be effectively removed using the NO<sub>2</sub>-NO catalyst.

Key words: arc discharge; magnitude; direction; nitric oxide; acute respiratory distress syndrome(ARDS)

## 0 引言

一氧化氮(NO)气体已经作为医学临床救治急性呼吸系统衰竭综合征、高血压和一些与肺相关疾病的新方法而得到广泛应用<sup>[1]</sup>。文[2-5]的实验研究表明,可以用一种新的方法作为临床救治用 NO 的

供气源,以取代目前使用不便和存在潜在危害的传统瓶装高浓度 NO 钢瓶供气方式。空气中电弧放电产生的热平衡等离子体,可以作为用来合成医用可吸入性 NO 气体的新方法。据文[6]报道,反应器的结构对放电产生等离子体有很大影响,等离子体反应装置的结构型式不同,其电位分布不同,生成的离子能量也不同,因此必然会对气体的解离和合成产生影响。文[7-9]还报道了气体流量对气液混合两相体电流体的影响,以及气体流量和气体沿放电线方向进入和垂直放电线方向进入时,线管式电除尘器中臭氧产生量和电晕伏安特性的变化情况。但还没有关于气体流量和气体沿与针-板电极成某一角度方向进入反应器时,针-板式脉冲电弧放电对产生医用可吸入性 NO 浓度和 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值的影响报道。

文[9]报道了大气压下的针-板电极、负脉冲电弧放电产生临床治疗所需要的 NO,与 Namihira T 等的报道相比,其放电过程中 NO<sub>2</sub> 的产生得到了有效抑制,但放电产生的 NO 浓度随反应器工作时间的延长呈下降趋势。由于临床救治中需要较稳定的 NO 气体浓度,因此在文[5]的基础上,通过改变气体流向与针-板电极的角度,研究了干燥空气中电弧放电产生 NO 气体的稳定性变化特性、气体流量和流向对 NO 浓度以及 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值的影响,目的是想解决脉冲放电中 NO 浓度稳定性的问题,为脉冲放电一氧化氮呼吸衰竭救治仪的研制提供一个较理想的反应器结构。

## 1 实验装置和实验方法

图 1 为 NO 气体生成实验装置示意图,其中脉

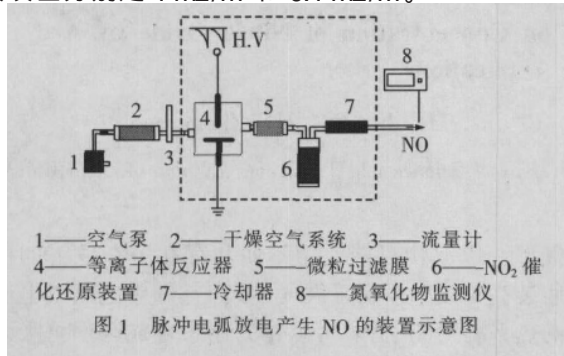
收稿日期: 2006-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(救治呼吸衰竭新方法及脉冲放电治疗仪的研制项目 50347009);

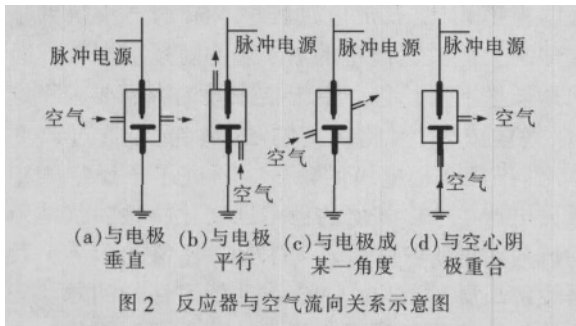
国家科技攻关项目(脉冲放电一氧化氮呼吸衰竭救治仪的研制项目 2003A12)。

作者简介: 胡 辉(1963-),男,副教授,主要从事高电压新技术及应用研究。

冲形成回路、等离子体反应器、微粒过滤膜、气体冷却器以及 NO<sub>2</sub>-NO 转换装置被放置在一个防电磁干扰的箱体中。气体流量在 1~6 L/min 范围内的变化, 由质量流量计 (MFC) 控制。用 Tektronix TDS754D 示波器(美国) 测量放电电压和电流波形, 在放电达到稳态(5 分钟)后, 采用电化学法分析的 Q-RAE PGM-2000 复合式气体检测仪 (美国 RAE) 测量放电处理后混合气体中的 NO 和 NO<sub>2</sub> 的浓度, 其误差分别是 1 mL/m<sup>3</sup> 和 0.1 mL/m<sup>3</sup>。



实验时采用如图 2 所示的气体流向, 即进出口方向分别与针-板电极垂直(图 2(a))、平行(图 2(b))、成某一角度(图 2(c), 分别为 30° 和 45°)以及干燥空气从空心阴极接地端进入, 从空心阴极一侧流出(图 2(d))的反应器。4 个反应器的尺寸完全一致。具体实验方法是: 每个反应器在气体流向相同的情况下, 通过改变干燥空气流量(1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6) (L/min) 来观测脉冲电弧放电对 NO, NO<sub>2</sub> 的浓度和 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值的影响。总共完成了 4 组不同的实验。实验中的针、板电极材料分别为不锈钢和钨, 电极间距为 3.5 mm, 脉冲放电频率为 30 Hz, 它们在 4 组实验中是公用的。NO 和 NO<sub>2</sub> 的浓度是反应器工作时间的平均值, NO<sub>x</sub>=NO+NO<sub>2</sub>。

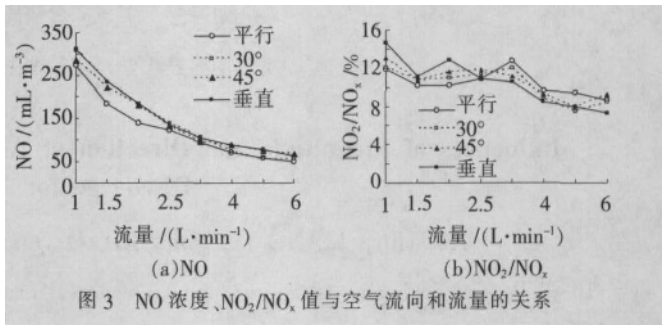


## 2 实验结果和讨论

### 2.1 气体流向和流量对 NO 浓度和 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值的影响

图 3(a), 3(b) 分别为气体流量和气体沿与针-板电极成某一角度方向进入反应器时, 脉冲电弧放电产物 NO 浓度和 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值的变化结果。从图可知: 随着气体流量的增加, NO 浓度均逐渐降低; 相同流量情况下, NO 浓度随气体流向与针-板电

极间角度的增加而增加; 当流量 < 2.5 L/min 时, NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值随气体与针-板电极间的角度增加而增加, 而气体流量 > 2.5 L/min 时情况正好相反。因此, 若考虑 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值, 在选择气体流量时, 应同时考虑气体流向对放电产物 NO 浓度或 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比值的影响, 选择合适的流量。



相同气体流量下, NO 浓度随气体流向与针-板电极间夹角的增大而上升的原因可能是: 进气方向不同, 在反应器中形成的气体流场可能存在差异, 而造成气体在反应器中停留的时间, 尤其是在等离子体区的停留时间不同。停留时间越短, 生成的 NO 和 NO<sub>2</sub> 被重新电离成 N, O 自由基或其它物质的机会越少, 或者 NO 被氧化为 NO<sub>2</sub> 的机会越少, 因此 NO 浓度就越高。当气体流向与针-板电极垂直时, 只有气体分子通过弧柱径向的那段时间为停留时间, 这是因为弧柱的弧径与电弧的长度相比其厚度可以忽略, 气体直接进入电弧区并较快离开电弧区, 在电弧区停留的时间最短, 避免了被重新电离或与其它自由基的结合, 因此, 放电产生的 NO 浓度也最高; 当气体流向与针-板电极平行时, 气体给弧柱造成的弧压小于气体垂直进入时的弧压, 气体在反应器中的流速相对缓慢, 电离气体有可能沿弧柱的轴向方向穿过整个电离区, 因此那些参与产生 NO 和 NO<sub>2</sub> 的等离子体化学反应的 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 分子, 在电弧区停留的时间相对最长, 放电产生的 NO 浓度也最低。

### 2.2 气体流向对电弧放电产物 NO 浓度稳定性的影响

图 4 为气体流量在 3 L/min 时, 4 种气体流向下 NO 浓度与反应器工作时间的关系。从图可知, 无论是哪种气体流向, 随着反应器工作时间的延长, NO 浓度均呈下降趋势。其中, 在放电最初阶段, 进出口气体方向与电极垂直时, NO 浓度变化最大, 也最不稳定。大约 30 min 后, 无论哪种气体流向, 随着反应器工作时间的延长, NO 浓度均呈逐渐稳定的趋势, 其中气体流向与放电电极成 30° 和 45° 夹角时, NO 浓度的稳定性最好。由此可见, 气体流向与电极间夹角的大小, 对 NO 浓度的稳定性有一定影响。

产生这一现象的原因可能是电弧放电过程中电极被逐渐加热, 导致放电产生的 N 和 O 自由基的数量减少, 或者是生成的 NO 和 O 自由基与 O<sub>3</sub> 结合生

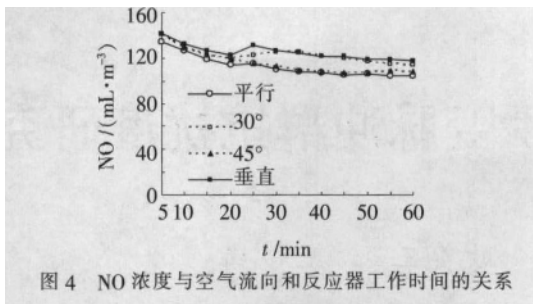


图4 NO浓度与空气流向和反应器工作时间的关系

成了NO<sub>2</sub>,使NO浓度逐渐下降,NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值上升。当气体流向与电极成某一角度进入反应器时,反应器中气体流场发生了变化,整个反应器中气体的温度一直保持在一个相对稳定的范围内,N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>发生热电离产生的N和O自由基的数量也相对稳定,使得生成的NO浓度趋于稳定。

### 2.3 电极结构对NO浓度和NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值的影响

从图4可知,虽然气体流向与电极成某一夹角时,NO浓度的稳定性比气体流向与电极平行或垂直时的要好,但达到相对稳定的时间需要30min左右,这对医疗救治需要抓紧时间是不利的。因此,既然流场能改变NO浓度的稳定性,就可以通过改变流场的方法,来较快地获得稳定的NO浓度。

为此,采用如图2(d)所示的反应器结构,干燥空气流量为3L/min,其它实验条件不变,仅改变气体流向。干燥空气从空心阴极流入,从阴极内部的一侧流出,这种进气方式形成的流场比气体流向与电极成某一夹角时的更紊乱,使流入的气体在反应器中停留的时间更长。实验结果如图6中的1号曲线所示,反应器工作时间大于3h。为了便于比较,将图5中气体流向与电极垂直和成45°时的电弧放电产物NO浓度变化趋势绘于同一张图上,分别记为2号和3号,其反应器工作时间为1h。

从图5(a)可以看出,由1号空心阴极构成的等离子体反应器,在脉冲电弧放电中产生的NO浓度在经过10min以内基本保持稳定,而且在长达3个多小时的时间内,NO浓度一直基本维持稳定,并保持较高的浓度;而2号和3号针-板电极构成的反应器,在脉冲电弧放电中产生的NO浓度随反应器工作时间的延长而下降,2号反应器大约在经过30min左右后才呈现出稳定的趋势,3号的NO浓度达到稳定似乎需要更长的时间。由此可见,影响脉冲电弧放电产物NO浓度稳定性的因素,可

能就是气体流场。

图5(b)出了1号空心阴极、气体流向与电极垂直和成45°的2号和3号反应器,在空气中脉冲电弧放电形成的NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值随反应器工作时间的延长而变化的情况。从该图可知,3种气体流向下的NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值变化趋势相一致,但NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值大小不同:气体流向与电极垂直时的比值最小,空心阴极构造的电极放电产生的比值最大,而且随放电时间的延长趋于一个稳定值,该值约为0.13。这个稳定值比国外类似研究得到的混合气体中NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值常数0.25要小得多。这正是医疗救治过程中所期望的。

比较图5(a),5(b)可知,NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值和NO浓度之间基本上是按一一对应的关系变化。1号空心阴极轴向进气时,NO的浓度高于2号和3号的,其NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值也是如此,总体上大约相差4%。若仅从医疗救治对混合气体中NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值的要求考虑,空心阴极构造的电极放电产生较高的NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值,是医疗救治过程中不希望的,但完全可以通过如图1所示的NO<sub>2</sub>-NO转化装置将NO<sub>2</sub>转化为N<sub>2</sub>或NO气体,将混合气体中的NO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值降低到医疗NO呼吸救治所要求的范围内。

## 3 结论

(1) 气体流向对电弧放电产物NO浓度的稳定性有一定的影响,NO浓度的稳定性随气体流向与电极之间夹角的增加而降低。

(2) 气体流量<2.5L/min时,NO浓度和NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值随气体与针-板电极间夹角的增加而增加;而气体流量>2.5L/min时,NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值的情况正好相反。因此,选择气体流量时,应考虑气体流向对脉冲电弧放电产物NO浓度或NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>比值的影响。

(3) 气体流场越紊乱,电弧放电产物NO浓度的稳定性越好,因此可通过改变反应器内部流场的方法,达到改善电弧放电产物NO浓度的稳定性状况。

## 参考文献:

- [1] Puybasset L, Rouby JJ, Mourgeon E, et al. Inhaled Nitric Oxide in Acute Respiratory Failure: Dose-response Curves[J]. Intensive Care Med, 1994(20): 319-327.
- [2] Namihira T, Tsukamoto S, Wang D, et al. Production of Nitric Monoxide Using Pulsed Discharge for a Medical Application [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2000, 28(1): 109-113.
- [3] 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.
- [4] 胡辉,李劲,何俊佳,等.用脉冲放电产生救治呼吸衰竭用一氧化氮的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(2): 98-102.
- [5] 胡辉,王贺礼,李劲,等.脉冲电弧放电产生医用一氧化氮的放电条件研究[J].高压电器, (下转第17页)

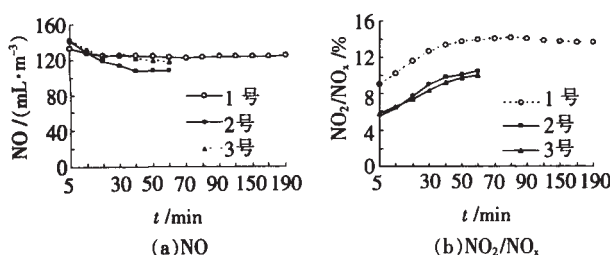


图5 NO浓度、NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>值与反应器工作时间的关系

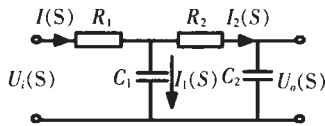


图 10 两级 RC 滤波器的拓扑结构

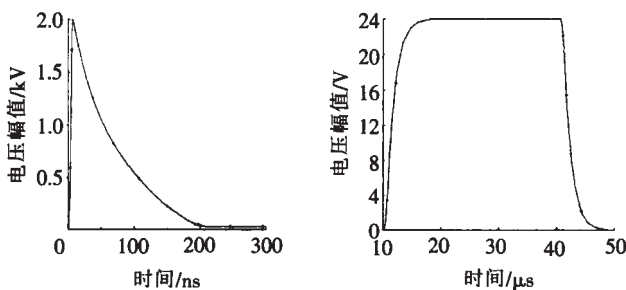
滤波网络传递函数为式(2):

$$A(S) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) S + 1} \quad (2)$$

若增大后级的 RC 阻抗, 对前级造成的负载效应忽略不计, 则形成两个独立的网络串连, 后级阻抗为式(3):

$$Z_{in} = \sqrt{m^2 R^2 + \frac{m^2}{2C^2}} = m \sqrt{R^2 + \frac{1}{2C^2}} \quad (3)$$

当满足后级的电阻是前级的 m 倍, 电容为前级的 1/m 时, 滤波器衰减 40 dB/10 倍频程。通过仿真可以选择 R, C 的值, 使得干扰信号尽量衰减的同时有用信号不失真。通过这种方法选择的滤波网络可以有效地滤除叠加在有用信号上的干扰信号, 波形见图 11, 图中干扰信号衰减到很小的幅度, 而有用信号基本没有失真。最后通过 4 级 EFT/B 试验验证了设计的可行性。



(a) 单个干扰脉冲 (b) 开关量信号  
图 11 单个干扰脉冲及开关量信号通过滤波网络的波形

### 3.4 功能接地与通信端口

在接地方面, 监控单元采用了浮地-屏蔽接地方式, 即模拟信号和数字信号的工作地悬浮, 装置外壳机箱屏蔽接地。浮地方式可使监测装置的微机系统不受大地电流的影响, 提高了装置的抗干扰性能。装置外壳机箱采用屏蔽接地, 无论从电磁感应干扰的角度, 还是从人身设备安全的角度, 都是十

分有效的措施<sup>[9]</sup>。

网络化是智能电器监控单元的发展趋势, 远方工作站对其覆盖范围内的网络节点和现场设备进行监控和管理, 为了防止监测装置上产生的电磁干扰通过通信网络传到 PC 机上, 装置可采用光纤收发器等实现对网络的光电隔离, 目前市场上光纤收发器的价格已可以满足成本要求。

## 4 结语

智能电器监控单元与所监控的电器设备处于同一电磁空间, 很容易受到电器设备开断时所产生的电磁干扰的影响, 因此对智能电器监控单元的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究有着重要的意义。在监控单元中通过采取上述的相应措施, 解决了瞬变脉冲群干扰的问题。实践证明, 运用这些方法设计的监控单元已通过国家标准 4 级 EFT/B 抗扰度试验, 为今后的监控单元的抗干扰设计提供了参考依据。

## 参考文献:

- [1] 梁志成, 傅静波, 李富同, 等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 65-68.
- [2] 程利军, 邓慧琼. 微机保护抗电快速瞬变脉冲群干扰研究[J]. 电力系统自动化设备, 2002, 22(6): 5-8.
- [3] 何彬. 电力系统二次设备的电磁兼容性问题[J]. 中国电力, 1998, 31(4): 233-235.
- [4] GB/T 17626. 4-1998. 电磁兼容 试验与测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验[S]. 1998.
- [5] IEC 1000-4-4. Electromagnetic Compatibility Part 4: Testing and Measurement Technique Section 4: Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test[S]. Switzerland: 1995.
- [6] IEC 60255-26. Measuring Relays and Protection Equipment-part26: Electromagnetic Compatibility Requirements for Measuring Relays and Protection Equipment[S].
- [7] 郭银景, 吕文红, 唐富华, 等. 电磁兼容原理及应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] ZHOU Zhongyuan, JIANG Quanxing. A Nalysis of the Effectiveness of Ferrite Core for Improving EFT Immunity[C]// IEEE 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing, 2002.
- [9] 陈迁, 徐国政, 关永刚, 等. 高压开关设备就地监测装置的电磁兼容设计和试验[J]. 高压电器, 2003, 38(3): 21-23.

(上接第 13 页)

- [6] 茹科夫 M, 科罗捷耶夫 A C, 乌柳科夫 A. 电弧等离子发生器的物理过程[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [7] 叶齐政, 万辉, 李劲, 等. 流量对气液混合两相体电流体放电的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(9): 42-43.
- [8] Ohkubo T, Hamisaki S, Nomoto Y, et al. The Effect of Corona Wire Heating on the Downstream Ozone Concentration

- Profiles in an Air-cleaning Wire-duct Electrostatic Precipitators[J]. IEEE Trans. On IA, 1990, 26(3): 542-549.
- [9] Yehia A, Mizuno A, Takashima K. Corona Characteristics as Influenced by Magnitude and Direction of the Air Flow Rate in Wire-duce Reactor [C]// Industry Application Conference, 2000. Conference Record of the 2000, IEEE, 2000(2): 714-718.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!