

基于 DBD 的高产量臭氧发生管的特性研究

陈 飞, 朱天宇, 李 显

(河海大学 机电工程学院 江苏 常州 213022)

摘 要:根据臭氧发生技术的现状和发展趋势,对介质阻挡放电技术进行了介绍。基于该技术分析了高产量臭氧发生管的结构,并对影响其产率的参数进行了分析,讨论放电间隙大小对臭氧产量以及其他电性能参数的影响,从而选取优化的结构参数和工作条件。通过理论研究分析得出,设计的臭氧发生管可以达到臭氧产量 108 g/h,相应高压脉冲电源的最佳参数是电压峰值 25 kV,电源频率 1 000 Hz。

关键词:臭氧发生管;介质阻挡放电;高产量;结构参数;电性能参数;放电间隙

中图分类号:TM 835;TQ 123.2

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2009)11-152-03

Research on Characteristics of Ozone Cell Based on DBD

CHEN Fei, ZHU Tianyu, LI Xian

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, 213022, China)

Abstract: The technology of dielectric barrier discharge is introduced according to the current situation and development of ozone technology. The structure of ozone cell with high output and the parameter influencing its production rate are analyzed, especially the effects of discharge gap on ozone output and some other electrical property parameter, to choose optimized configuration parameter and work condition accordingly. Through the academic analysis, the designed tubular ozone cell can produce ozone by 108 g/h, and the best parameter of corresponding high voltage pulse power is that the peak value of voltage is 25 kV, the frequency of power is 1 000 Hz.

Keywords ozone cell; dielectric barrier discharge; high output; configuration parameter; electrical property parameter; discharge gap

0 引言

臭氧作为一种强氧化剂,具有消毒、杀菌、除臭、脱色等作用。利用臭氧对污水或饮用水进行处理,不仅具有很强的消毒杀菌作用,还可以氧化去除水中的微污染物,较少产生副产物,综合效果非常好。目前,臭氧已广泛应用于水处理、化工、医疗卫生等许多领域^[1]。随着人们对环境质量要求的提高,臭氧被认为从微公害时代走向环境时代的理想绿色环保剂,并在众多领域得到了广泛的应用^[2]。目前,介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)方法已经成为工业上获取臭氧气体的主要方式^[3]。本文根据当前国内外臭氧产业的现状以及发展趋势^[4],对采用 DBD 放电的管式臭氧发生元件的结构特性进行了分析,重点讨论了单放电间隙臭氧发生管的气隙大小对其电性能参数的影响。

1 介质阻挡放电合成臭氧技术

介质阻挡放电法。也称无声放电法,通过交变高压电场在气体中产生电晕,电晕中的自由高能电子离解氧

气分子,经碰撞聚合为臭氧分子。介质阻挡放电法具有能耗相对较低,单机臭氧产量大,可用干燥空气、氧气或含氧浓度较高的富氧气体气源等优点,因此工业上合成臭氧大多采用此法。

1.1 介质阻挡气体放电技术介绍

介质阻挡放电是在放电空间插入固体绝缘介质的一种气体放电。当在放电电极上施加足够高的交流或脉冲电压时,电极间的空气被击穿而形成介质阻挡放电。这种放电由大量细微的快脉冲放电通道(微放电)构成。微放电电流通道的直径大约在 0.1 mm,寿命不到 10 ns。由于介质阻挡放电不像空气中的火花那样,会发出巨大的击穿响声,故又称为无声放电。目前,常用的工作条件是:气压为 $10^4 \sim 10^6$ Pa,频率在 $50 \sim 1 \times 10^6$ Hz。在大气压强(1×10^5 Pa)下,气体放电间隙的电流由大量的快脉冲电流细丝组成。这些电流细丝在放电时间和空间上是无规则分布的,一般称电流细丝为微放电^[5]。微放电的特征是:放电时间短(小于 10 ns),电流密度高($0.1 \sim 1$ kA/cm²),放电表面呈现亮斑。当在电极上施加正弦波电压(电流)时,介质阻挡放电产生的微放电电流简图如图 1 所示,图中未标出正

弦电压在放电单元内产生的传导电流分量。典型介质阻挡放电间隙结构如图 2 所示。

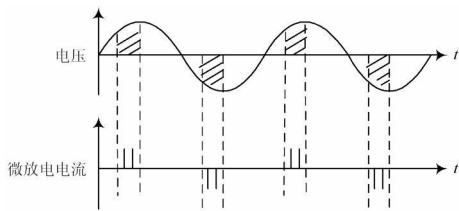


图 1 介质阻挡放电外界电压和微放电电流简图

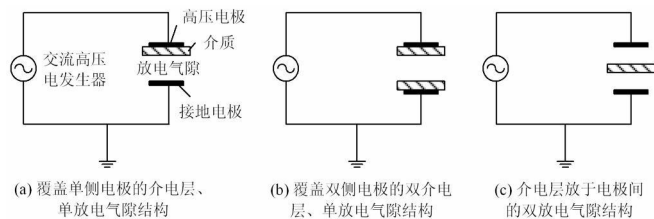


图 2 介质阻挡放电间隙结构示意图

图 2(a) 为覆盖单侧电极的介电层、单放电气隙结构。其优点是结构简单, 放电气隙狭窄, 起晕电压低, 而且可以通过金属电极把放电产生的部分热量散发掉。缺点是能耗较大, 加工精度要求高, 介电层制作加工技术难度大, 单管臭氧产量不是非常高。

图 2(b) 为覆盖双侧电极的双介电层、单放电气隙结构。该结构采用两层玻璃介电体, 在两介电体的相对外表面分别镀金属层, 作为管子的接地极和高压极, 其放电发生在两层介质之间, 可以防止放电等离子体直接与金属电极接触。对于具有腐蚀性气体或是高纯度等离子体的结构具有独特的特点。其缺点是起晕电压高, 能耗较大, 单管产量也不高。因为用到两层玻璃介电体, 所以加工精度不好把握。

图 2(c) 为介电层放于电极间的双放电气隙结构。其优点是玻璃介电体比较容易加工, 只要玻璃厚度均匀即可, 同时可以采用双路冷却, 冷却效果好, 所以产量比较大。此外可以在介质两边生成两种成分不同的等离子体^[6]。缺点是气晕电压高, 能耗大, 结构复杂。

1.2 DBD 技术的独特性质

DBD 的广泛应用来源于这种放电形式所具有的独特性质:

(1) 电介质的存在有效地限制了放电电流的无限增长, 避免了在高气压下形成电弧放电或火花放电, 因此能够在很大的气压范围内工作。目前常用的工作气压是 $10^4 \sim 10^6$ Pa;

(2) 介质阻挡放电能够在很宽的频率范围内工作。目前的工作频率为 50 Hz~ 1 MHz;

(3) 电介质的存在对放电起到了镇流的作用, 从而使放电均匀地分布在整个放电空间, 有利于产生稳定的

大体积大气压等离子体, 是目前等离子体制备的最有效且较方便的技术;

(4) 电介质的存在防止放电等离子体直接与金属电极相接触, 这样避免了腐蚀性气体腐蚀电极, 也避免了高纯度等离子体因阴极溅射而被污染;

(5) 介质阻挡放电的一些物理参数, 例如电子温度, 可以通过对放电电压、放电间隙、气体压力等参数的调节而改变, 并且在实验室中可以优化的参数直接放大到较大装置中应用, 有利于研究成果的工业化;

(6) 介质阻挡放电的放电室结构简单, 有易维护, 易操作, 成本低等优点。

2 高产量臭氧发生管的结构

目前, 工业中常使用管式臭氧发生元件作为大型臭氧发生器的基本单元和关键部件。臭氧发生管的结构按使用的介电体主要分为两种形式:

(1) 在作为介电层的薄壁玻璃管内表面或外表面镀导电层形成高压电极;

(2) 在作为高压极的圆柱形金属管表面烧结陶瓷介电层。

两种形式均为单气路单放电气隙结构如图 3 所示, 前者技术成熟, 工艺简单, 国内应用最广; 后者技术先进, 工艺复杂, 尚属国内外较少制造商掌握的专有技术。

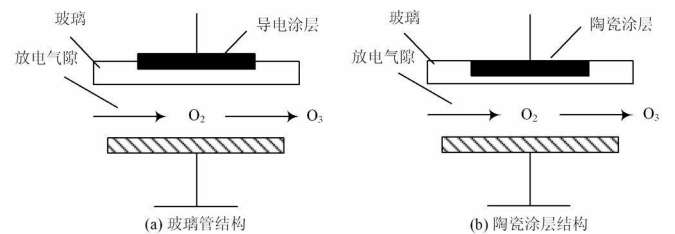


图 3 两种典型的臭氧发生管结构示意图

本文采用图 3(a) 的玻璃管结构形式, 属于单气隙放电结构, 在作为介电体的玻璃管外表面用热喷涂工艺形成一层铝质导电层作为高压电极, 在玻璃管内套入同心不锈钢或铝合金管作为接地极, 干燥空气或含氧的气体通过内管和介电体之间的放电气隙。这种结构的臭氧发生管可以采用油水双路冷却, 因此可以有效控制放电气隙内的温升, 大大提高臭氧的产率。

3 臭氧发生管的特性研究

影响臭氧产生的因素很多^[7], 其中放电间隙是一个非常重要的影响因素。一般情况下, 放电间隙越小, 产生放电的电源电压越小; 耗电量越小, 臭氧浓度和产量越高。但放电间隙越小, 气流通过放电区的阻力越大, 加工精度的要求也越高。因此, 工频和中频(400~ 800 Hz)臭氧发生器一般采用 2~ 3 mm 的放电间隙, 高频(大于

1 kHz)时,放电间隙小于 2 mm^[8]。在此,根据该文的设计要求,研究了不同放电间隙下臭氧发生管的电特性。作为介电体的玻璃管,其长度为 1 000 mm,外表面导电涂层长度为 900 mm,玻璃材质为高硼硅 3.3,其相对介电常数为 4.6,玻璃管的内径为 60 mm,壁厚为 2.5 mm。设计工作电压为 25 kV。通过设计不同外径的接地极金属管(内管)控制放电气隙的大小。

3.1 臭氧发生管的等效电容

臭氧发生管负载可以看作是一种电容性负载。对于本文采用的同心管式结构,电极之间的介电层和气隙层相当于两个串联的电容器。介电体和放电气隙的电容计算公式为:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(D_2/D_1)} \quad (1)$$

式中: ϵ 为介质的相对介电常数(空气的相对介电常数为 1.000 59); ϵ_0 为绝对介电常数(8.854×10^{-12} F/m); l 为管的有效放电长度(m); D_1, D_2 分别为介电层或气隙层的外径和内径(m)。由式(1)可以计算出不同放电气隙结构时的介质电容 C_d 、气隙电容 C_g 和两者串联时的等效电容 C_{dg} 。分析可知,气隙厚度越小,臭氧发生管的电容就越大;管的电容越大,可加载的电晕放电功率也就越大。

3.2 臭氧发生管的打火电压和起晕电压

在正常工况下的臭氧发生管,工作气体为干燥空气,空气的打火电压公式为^[9]:

$$U_s = 29.64pd_g + 1\ 350 \quad (2)$$

式中: p 为气体绝对压力(kPa),本实验中气体的绝对压力为 200 kPa; d_g 为气隙厚度(mm)。

利用电容分压计算,可得出臭氧发生管的电晕起始电压 U_{cs} 与打火电压 U_s 间的关系式,即:

$$U_{cs} = \frac{C_d + C_g}{C_d} U_s \quad (3)$$

由式(3)可计算出不同放电气隙时打火电压及电晕起始电压的值。分析其不难得到,放电间隙越大,需要的打火电压和起晕电压值就越高。

3.3 臭氧发生管的电晕功率

由于气隙与介电体是串联的,通过它们的电流是相等的,因此臭氧发生管的瞬时电晕功率为:

$$P_i = U_s I_d = \omega C_d U_s U_0 \cos(\alpha) \quad (4)$$

通过对瞬时功率在电晕整个持续时间的积分,并以每秒电晕放电次数($2f$)计算,可得电晕平均功率^[3]:

$$P = 4C_d U_s f (U_0 - U_{cs}) \quad (5)$$

式中: P 为电晕元件放电功率; f 为外加驱动电压的频率(Hz); U_0 为外加驱动电压的峰值(V)。这就是柯宾公式,已经被雷诺用实验证明过。从柯宾公式也可以看

出,提高工作电压(峰值) U_0 和频率 f 对提高电晕功率最有效。

3.4 气隙厚度对电晕功率的影响

给定电压 $U_0 = 25$ kV,取工作电压频率 $f = 400 \sim 1\ 200$ Hz间取不同的值,气隙厚度取 1~ 2.5 mm 间不同的值,则可以用式(5)计算出臭氧发生管的电晕功率随工作电压频率 f 和放电气隙厚度 δ 的变化规律,计算结果如图 4 所示。

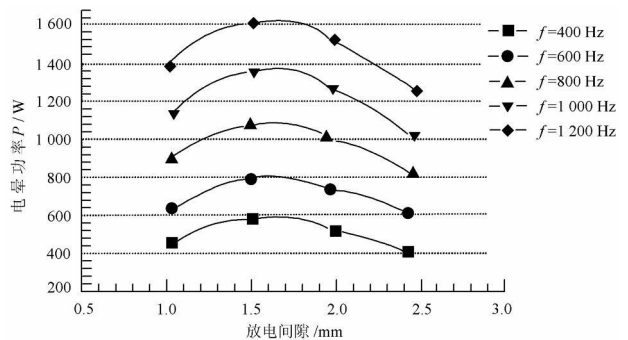


图 4 $U_0 = 25$ kV,不同频率时,电晕功率随放电间隙变化的关系曲线

从图 4 可以看出,电源频率对介质阻挡放电也存在着影响^[9]。不同工作电压频率下,在 $\delta = 1.5 \sim 1.7$ mm 之间,电晕功率存在一个最大值。当工作电压峰值 $U_0 = 25$ kV,工作频率 $f \geq 1.1$ kHz,电晕功率可达 1 500 W 以上。

大量实验表明,以空气为气源的 DBD 型臭氧发生器,其电耗一般为 16~ 18 kW/kg O_3 ^[10]。文献[8]中采用易于加工成型的聚碳酸酯(PC)为介电体,当工作电压和频率分别达到有效值 10 kV 和 850 Hz 左右时,电晕功率为 556 W,臭氧产率出现最大值,约为 276 g/($m^2 \cdot h$)。根据本文设计的臭氧发生管,其结构尺寸取 $\delta = 1.5$ mm,则放电面积 A 为 0.165 3 m^2 ;当电源电压 $U_0 = 25$ kV,工作频率 $f = 1\ 000$ Hz 时,由式(5)可计算出该型臭氧发生管的电晕功率为 1 323 W。在满足一定的冷却条件下,臭氧产率与电晕功率成正比例关系,预计该型臭氧发生管的臭氧产量为:

$$Q_{O_3} = C_{O_3} \beta \frac{P_g}{P_{PC}} A = 276 \times 1 \times \frac{1\ 323}{556} \times 0.165\ 3 \triangleq 108.6 \text{ g/h}$$

式中: C_{O_3} 为臭氧产率($g/(m^2 \cdot h)$); P_g 和 P_{PC} 分别为使用硼硅玻璃介电体和 PC 介电体时管的电晕功率(W); β 为修正系数(设计时取 1.0)。

4 结 语

这里的臭氧发生管结构采用单放电气隙结构,以硼

(下转第 157 页)

工作方式界面和自动工作方式界面。

参 考 文 献

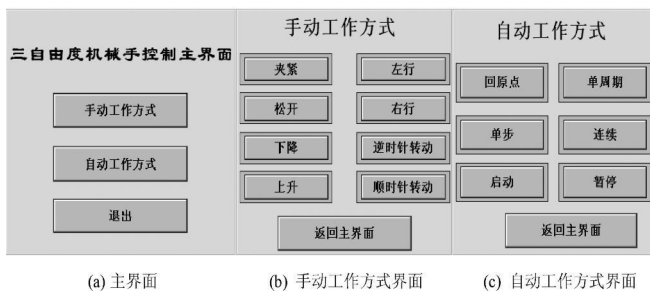


图 4 机械手控制系统的 MCGS 界面

4 结 语

经调试, 步进电机的运转无抖动和失步现象发生, 机械手系统处于良好的运行状态。三自由度机械手系统实现的只是三个自由度方向上的运动, 根据工业生产的实际需要, 可以对其进一步改进, 在夹紧装置肘部添加腕回转控制装置, 就能使之成为四自由度机械手控制系统。在条件允许的情况下, 也可以采用触摸屏代替 MCGS 组态环境对机械手系统进行控制, 这样占用空间小, 人机交互界面直观, 操作更方便。

- 作者简介 喻伟 男, 1982 年出生, 湖北随州人, 硕士研究生。主要研究方向为电路与系统、电气自动化控制。
罗晓曙 男, 1961 年出生, 湖北应城人, 教授。主要研究方向为非线性系统的稳定控制与同步、电气自动化控制。
陈 赤 男, 1957 年出生, 广西陆川人, 高级工程师。主要研究方向为电气自动化控制。
杨春慧 男, 1984 年出生, 湖南张家界人, 硕士研究生。主要研究方向为电路与系统、电气自动化控制。

(上接第 154 页)

硅玻璃作为介电体, 以玻璃管外表面热喷涂金属层作为导电层。这种结构的臭氧发生管虽然在加工制作时稍微困难一些, 但相对于同样尺寸大小的 PC 介电体管, 其等效电容值和电晕功率均比较大, 相应的臭氧产率较高。理论计算与已有试验结果的分析对比表明, 当臭氧发生管的放电气隙厚度为 1.5 mm, 工作电压峰值为 25 kV, 电源频率为 1 000 Hz 时, 以空气为工作气体的单管臭氧产量预期能够达到设计要求。

参 考 文 献

- [1] [美] R G 赖斯, A 涅泽尔. 臭氧技术及应用手册[M]. 朱光, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
[2] 宗旭, 杨波, 白希尧, 等. 臭氧的应用与进展[J]. 化工时刊, 2002(12): 11-13.
[3] 储金宇, 吴春笃, 陈万金, 等. 臭氧技术及应用[M]. 北京: 化

- [1] 王小玲. 工业机械手的 PLC 控制[J]. 机电工程, 2004, 33(9): 32-36.
[2] 李勇成. 基于 PLC 的步进电机控制在工业机械手中的应用[J]. 科技信息, 2008(18): 30-31.
[3] 韩志强, 刘晓婷. 步进电机 PLC 控制的研究设计[J]. 轻工机械, 2006, 24(4): 114-115.
[4] 佚名. 机械手[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/81615.htm>, 2008.
[5] 廖常初. FX 系列 PLC 编程及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
[6] 刘守操. 可编程控制器技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
[7] 求是科技. PLC 应用开发技术与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
[8] 郑凤翼, 郑丹丹, 赵春江. PLC 控制系统梯形图和语句表[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
[9] 贾德胜. PLC 应用开发实用子程序[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
[10] 宋伯生. PLC 编程实用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

学工业出版社, 2002.

- [4] 王跃球, 唐杰. 臭氧发生技术的现状和发展趋势[J]. 邵阳学院学报, 2006, 3(1): 48-51.
[5] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
[6] 陈艳梅. 介质阻挡放电合成臭氧的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
[7] 朱天宇, 周宏伟, 卞新高, 等. 有机高分子臭氧发生管的特性研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 38-41.
[8] 李永梅. 100 g/h 臭氧发生管的设计和研制[D]. 南京: 河海大学, 2006.
[9] 孙岩洲, 邱毓昌, 丁卫东. 电源频率对介质阻挡放电的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 43-53.
[10] 王振绪. 提高大型高频臭氧发生器电能利用率的研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

- 作者简介 陈 飞 男, 1983 年出生, 福建福州人, 在读硕士。主要从事臭氧发生管的研究。
朱天宇 男, 1961 年出生, 江苏靖江人, 硕士, 教授。主要从事大型高频臭氧发生器的研究。