

# 微秒脉冲电源对臭氧发生的影响特性

## Influence Characteristics of Microsecond Pulse Power Supply on Ozone Generation

李敏 杨春振 范晓静

Min Li Chunzhen Yang Xiaojing Fan

国能(山东)能源环境有限公司 中国·山东 济南 250014

Guoneng (Shandong) Energy & Environment Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250014, China

**摘要:** 论文搭建了 50g/h 的氧气源型臭氧发生试验装置, 考察了高压交流电源和高压脉冲电源、脉冲频率等对臭氧发生的影响, 利用能效比定量分析了各影响因素的影响大小。实验结果表明, 脉冲频率对臭氧发生的影响较弱, 负极性脉冲电源相比正极性脉冲电源能够产生更高浓度的臭氧, 微秒脉冲电源能效比高于传统高压交流电源。

**Abstract:** In this paper, a 50g/h oxygen source ozone generation test device is built, the effects of high-voltage AC power supply, high-voltage pulse power supply and pulse frequency on ozone generation are investigated, and the influence of each influencing factor is quantitatively analyzed by using energy efficiency ratio. The experimental results show that the impact of pulse frequency on ozone generation is weak. Compared with positive pulse power supply, negative pulse power supply can produce higher concentration of ozone, and the energy efficiency ratio of microsecond pulse power supply is higher than that of traditional high-voltage AC power supply.

**关键词:** 臭氧微秒脉冲电源; 臭氧发生器; 能效比

**Keywords:** ozone microsecond pulse power supply; ozone generator; energy efficiency ratio

**DOI:** 10.12346/etr.v4i2.5502

## 1 引言

高压脉冲能产生均匀的大体积的低温等离子体, 产生的电子密度和平均电子能量更高, 活性氧原子产生效率更高, 电源放电工作时功率小, 发热量低, 可有效减少温升导致的臭氧分解, 促进臭氧的产生。

## 2 研究背景

目前工业制备臭氧的方法主要是 DBD, 臭氧发生器的电源采用成本较低、结构紧凑的中高频交流电源, 电源输出电压在 5kV 左右, 为了防止臭氧发生器工作时发热加速臭氧分解, 需要提供冷却水对设备进行冷却。高频交流电源驱动臭氧发生器存在臭氧产量低、能耗高(约 90% 能量用于发热)、冷却装置复杂等问题, 成本高, 经济性差, 节能效果不明显<sup>[1]</sup>。

高压脉冲放电有利于等离子体化学反应, 这是因为高压

脉冲电源的输出电压波形上升沿陡峭, 电压峰值高(高于交流下的击穿电压), 脉宽窄, 在脉冲出现时反应器中电场强度瞬间增大, 发生流注放电, 产生均匀的大体积的低温等离子体, 产生的电子密度和平均电子能量更高, 活性氧原子产生效率更高, 促进臭氧的产生。此外, 脉冲间隔时间短, 能量被用于加速电子, 离子在放电期间几乎不运动, 而且电压电流波形为非连续的, 占空比较低, 区别于传统高频交流 DBD 放电因加速离子运动而产生大量的无效热量, 所以脉冲放电工作时功率较小, 发热量低, 降低温升导致的臭氧分解。目前, 高压脉冲放电已经在等离子、废气处理等领域取得了较好的研究成果。

## 3 实验设备

### 3.1 臭氧发生器

论文搭建了 50g/h 的小型氧气源型臭氧发生实验装置,

【作者简介】李敏(1987-), 女, 中国山东济南人, 本科, 工程师, 从事大气污染控制等研究。

研究了微秒脉冲电源和传统高频交流电源对臭氧发生的影响因素及规律。放电管为陶瓷材质,并设有电源电压表、电流表、转子流量计、电化学臭氧浓度检测仪。臭氧发生器包括2个并联的放电单元,2个交流电源额定功率均为600W,输出高压为4kV,外部供电电压220V,电流显示3A。冷却水量约1m<sup>3</sup>/h。臭氧产量0.5Nm<sup>3</sup>/h,浓度100mg/L。

### 3.1.1 高压放电产生臭氧的过程

高压介质阻挡放电产生臭氧的过程中,电源、放电电极结构和材料及气体状态决定放电空间中电场强度和电子的能量,进而决定臭氧的产量。在高压介质阻挡放电臭氧产生的电化学反应中,电子能量在2~8.4eV时,通常会引起臭氧的分解反应,只有大于8.4eV能量的电子能有利于氧原子生成反应<sup>[2]</sup>。为提高臭氧产率,应在放电区间提高电子的能量<sup>[3]</sup>。脉冲放电脉宽窄、脉冲上升沿短,脉冲峰值电压远高于传统高频交流电压,而大幅度提高电压可以增加放电空间的电子密度和电子能量,从而产生更多携带5~20eV的高能量电子,减少低能电子的比例,进而促发氧原子生成过程,并抑制臭氧分解过程,脉冲放电不仅有利于提高臭氧产量,而且能减少臭氧分解<sup>[4]</sup>。

### 3.1.2 臭氧的理论产量

臭氧的理论产量可以采用热平衡法计算。臭氧发生过程中吸收热量值为 $\Delta H=+144.8\text{kJ/mol}$ ,具体计算如下:

$$\frac{3600s \times 1000W}{144.8 \times 1000J/mol} \times g/mol \approx 1.2kg \quad (1)$$

如果电能全部用于臭氧发生,则臭氧发生的理论效率为1200g/(kW·h),但实际应用中远达不到理论值,这是因为输入电能绝大部分转化成了热能,只有约4%~12%的能量用于臭氧发生。

## 3.2 微秒脉冲电源

作者与清华大学合作开发了一款基于脉冲变压器的微秒级脉冲电源,其工作原理是直流电源为储能电容器充电,通过触发绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)半导体开关,使储能电容器对脉冲变压器原边放电,在原边产生低压脉冲,升压后在副边输出高压脉冲。在空载条件下经过测试,该电源可以稳定输出峰值电压最高达40kV,脉冲宽度为数微秒至数十微秒,重复频率可达到1000Hz,正负极性均可输出的正弦波脉冲高压,并且峰值电压、脉冲宽度、重复频率均可连续调节。

### 3.2.1 电路原理

微秒脉冲电源的电路拓扑结构主要包括高压直流电源DC、限流电阻 $R$ 、限流电感 $L$ 、IGBT及驱动器、与IGBT反并联的续流二极管 $D_f$ 、用于产生触发信号的FPGA、缓冲吸收电路( $R_d$ 、 $C_d$ 、 $D_d$ )、储能电容器 $C_s$ 、充电二极管 $D_c$ 以及脉冲变压器 $T_p$ 。

### 3.2.2 电源输出特性

由于臭氧发生器放电单元的等效电容较大,导致微秒脉

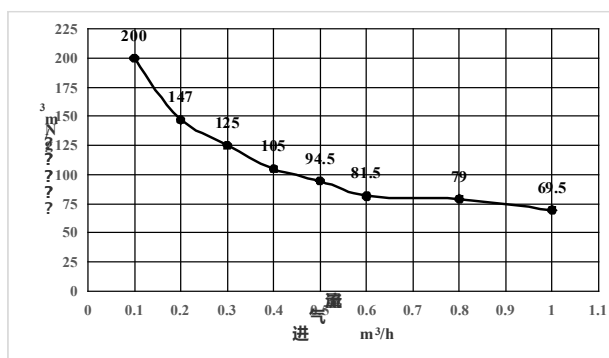
冲电源与臭氧发生器负载并不匹配<sup>[5]</sup>,实际的输出脉冲峰值电压较小,实验过程中电流较小。微秒脉冲电源作用下负载端的电压波形,脉冲宽度约为50 $\mu\text{s}$ ,脉冲峰值电压为-3.6kV,近似半正弦波。

## 4 结果分析

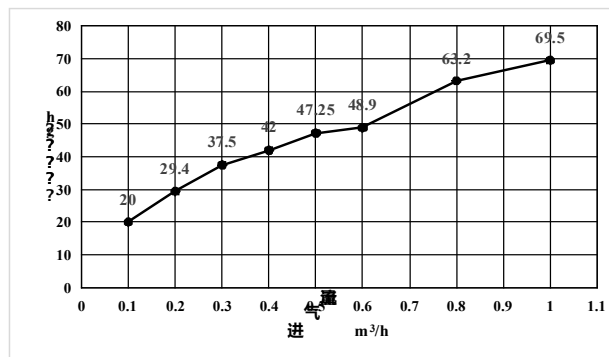
### 4.1 高压电流电源对臭氧发生的影响

首先测试了传统高压交流电源下臭氧发生器的工作曲线,输入电压220V,输出电压4kV,电流稳定在3A。实验期间,环境温度为18 $^{\circ}\text{C}$ ,采用自来水冷却,冷却水升温约10 $^{\circ}\text{C}$ 。

图1(a)为臭氧浓度与氧气进气流量的关系:①臭氧浓度随着氧气的进气量的增大而降低;②进气流量为81.5~200m<sup>3</sup>/h时,臭氧浓度下降比较明显,但随着进气量的进一步增加,臭氧浓度下降趋势趋于平缓。图1(b)为臭氧产率与氧气进气流量的关系,可以看出臭氧的产率随着氧气流量的增加逐渐升高。



(a) 进气流量与臭氧浓度曲线



(b) 进气流量与臭氧产率曲线

图1 交流电源下的发生器工作曲线

### 4.2 高压脉冲电源对臭氧发生的影响

实验期间环境温度22 $^{\circ}\text{C}$ ,采用自来水冷却,冷却水升温不超过3 $^{\circ}\text{C}$ 。氧气进气量保持0.2m<sup>3</sup>/h。

#### 4.2.1 不同频率下的臭氧浓度

将臭氧发生器的高压交流电源更换为自行开发的微秒脉冲电源(负极性电源),研究了同一输出电压、不同频率下的臭氧发生情况。脉冲频率由100Hz增加到333Hz时,臭

氧浓度由  $3.13\text{g}/\text{Nm}^3$  上升至  $3.7\text{g}/\text{Nm}^3$ ；频率增加至  $500\text{Hz}$  时，臭氧浓度降低，这主要是由于微秒脉冲电源自身特性（一次直流充电电源电压下降）导致脉冲峰值电压有所下降。

#### 4.2.2 电源极性对臭氧发生浓度的影响

微秒脉冲电源的频率固定为  $100\text{Hz}$ ，将微秒脉冲电源的极性由负极性调整为正极性，通过调整输出脉冲峰值电压测定臭氧浓度变化情况。

①随着脉冲峰值电压的升高，两种极性电源产生的臭氧浓度都增加；对于负极性电源，当脉冲峰值电压由  $-3.6\text{kV}$  增加至  $-4.3\text{kV}$  时，臭氧浓度由  $3.13\text{g}/\text{Nm}^3$  增加至  $8.5\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

②对于正极性电源，脉冲峰值电压从  $3.6\text{kV}$  增至  $4.4\text{kV}$  时，臭氧浓度由  $0.26\text{g}/\text{Nm}^3$  增加至  $4.74\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

③相同脉冲峰值电压下，负极性电源更有利于产生更多的臭氧。

#### 4.3 电源的能效比

论文实验中，脉冲电源相应参数（例如电容）与臭氧发生器并非完全匹配，导致脉冲峰值电压值较低，不能为臭氧发生器提供大的电流，不能充分体现微秒脉冲电源高电压的优势。为了更好地比较传统高压交流电源和高压脉冲电源对臭氧发生的影响，本文采用臭氧生产速率  $p$  ( $\text{g}/\text{h}$ ) 与电源消耗功率  $S$  ( $\text{kW}$ ) 的比值，即能效比  $E$ ,  $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，进行分析，以无功功率表示电源的功耗  $S(S=U_1 \times I_1/1000$ ,  $U_1$  为一次电压,  $I_1$  为一次电流)；臭氧产生速率  $p$  = 臭氧浓度  $c$  ( $\text{g}/\text{Nm}^3$ )  $\times$  进气流量  $f$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )。能效比  $E$  则采用式 2 进行表示：

$$E = p/S = \frac{1000 \cdot cf}{U_1 I_1} \quad (2)$$

从上式中可以得出能效比越大，单位电耗量下的臭氧产量越高。

表 1 列出了进气量为  $0.2\text{m}^3/\text{h}$  时两种电源的能效比。

电源峰值电压为  $-4\text{kV}$  时，高频交流电源的臭氧浓度达到  $140\text{g}/\text{Nm}^3$ ，微秒脉冲电源的臭氧浓度为  $5.3\text{g}/\text{Nm}^3$ ，其差异较大。但对比两种电源的能效比可以发现交流电源高约  $12.90\%$ ，即消耗相同的电量时微秒脉冲电源可以产生更多

的臭氧。当微秒脉冲输出峰值电压为  $-4.3\text{kV}$  时，能效比为  $54.305\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，能效比相比交流电源高  $33.82\%$ ，节能效果显著。

表 1 两种电源的能效比

电源类型	环境温度 度 $^{\circ}\text{C}$	进气量 $\text{m}^3/\text{h}$	输出峰 值电压 $\text{kV}$	一次 电压 $\text{V}$	一次电 流 $\text{A}$	臭氧浓 度 $\text{g}/\text{Nm}^3$	能效比 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$
交流电源	22	0.2	4	230	3	140	40.580
微秒脉冲 (100Hz)	22	0.2	-4	241	0.096	5.3	45.816
微秒脉冲 (100Hz)	22	0.2	-4.3	274.6	0.114	8.5	54.305

## 5 结论

论文在自行搭建的臭氧发生试验装置上，考察了高压交流电源和高压脉冲电源对臭氧发生的影响，得到以下结论：

①提高微秒脉冲频率对臭氧的产量的增加不明显。

②脉冲峰值电压的大小对臭氧的产生速率有显著影响，在不发生放电击穿前提下，应提高微秒脉冲的峰值电压以提高臭氧发生效率。

③负极性微秒脉冲的臭氧生产浓度大于正极性脉冲电源。

④微秒脉冲电源相比交流电源能效比更高，节能效果显著。

## 参考文献

- [1] 王保伟,姚淑美,彭叶平.介质阻挡等离子体制备臭氧研究进展[J].现代化工,2018,38(7):31-35.
- [2] 陈刚.高频窄脉冲臭氧发生电源的研究[D].镇江:江苏大学,2002.
- [3] 岳朝松,陈万金,储金宇.电晕放电法臭氧发生器电极的研究[J].高电压技术,2002,28(6):3.
- [4] 魏林生.等离子体臭氧产生的实验与理论研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [5] 王跃球,唐杰,罗庆跃,等.介质阻挡放电型臭氧发生器等效电路研究[J].中国电机工程学报,2007,27(12):109-114.