

# 液滴触发气体放电反应去除二硫化碳实验研究

金林毅<sup>1</sup>, 袁嘉乐<sup>1</sup>, 徐 昕<sup>2</sup>, 曹宇杰<sup>1</sup>, 黄立维<sup>1,\*</sup>, 宋成智<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310014; 2. 中煤科工集团杭州研究院有限公司, 浙江 杭州 311201)

**摘要:** 论文提出和设计了一种新型放电反应器, 利用液滴瞬时通过电极对之间的空间来触发气体放电。该反应器用于实验研究降解二硫化碳( $\text{CS}_2$ )废气的效果, 并考察了输入能量、液滴滴加频率、气体流量、氧气浓度和液体组分等参数对降解效果的影响。研究表明, 采用液滴触发气体放电反应器能够有效去除和降解气流中的  $\text{CS}_2$  气体, 在气体放电的同时, 液滴还能吸收气相反应产物, 从而促进了  $\text{CS}_2$  的降解。液滴滴加频率在 0.5~1 滴/s 时,  $\text{CS}_2$  的去除效果最佳, 过慢时去除率降低, 过快则能耗加大。在其他相同条件下, 采用去离子水作为吸收液液滴时,  $\text{CS}_2$  去除率最低; 其次是采用 5% 硫酸钠水溶液, 采用 5% 氢氧化钠溶液的去除率最高。 $\text{CS}_2$  降解反应后的气相产物主要有  $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}_2$  和少量中间产物  $\text{COS}$ , 液相产物为硫酸根离子。同时, 对降解机理进行了分析。

**关键词:** 气体放电反应器; 二硫化碳; 氧硫化碳

中图分类号: X51

文献标识码: A

## Removal of carbon disulfide by droplet-triggered gas discharge reaction

JIN Linyi<sup>1</sup>, YUAN Jiale<sup>1</sup>, XU Xin<sup>2</sup>, CAO Yujie<sup>1</sup>, HUANG Liwei<sup>1,\*</sup>, SONG Chengzhi<sup>1</sup>

(1. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. CCTEG Hangzhou Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311201, China)

**Abstract:** A novel discharge reactor was designed, utilizing the transient passage of liquid droplets between the electrode pairs to trigger a gas discharge. The reactor was employed to investigate the degradation of carbon disulfide ( $\text{CS}_2$ ) exhaust gas, and the study examined the effects of various parameters including input energy, droplet dropping frequency, gas flow rate, oxygen concentration, and solution composition on the degradation process. The results demonstrated the effective removal and degradation of  $\text{CS}_2$  gas from the gas stream using the droplet-triggered gas discharge reactor. During the gas discharges, the droplets absorbed the gas-phase reaction products, thereby promoting the degradation of  $\text{CS}_2$ . Optimal  $\text{CS}_2$  removal was achieved with a droplet dropping frequency of 0.5~1 drop/s. The removal rate decreased with slower frequencies, while higher frequencies led to increased energy consumption. Among the same conditions, the lowest  $\text{CS}_2$  removal rate was observed when deionized water was used as the absorbent droplet, followed by a 5% aqueous sodium sulfate solution. The highest removal rate was achieved with a 5% sodium hydroxide solution. The gas-phase products of the  $\text{CS}_2$  degradation reaction mainly consisted of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , and a small amount of intermediate product  $\text{COS}$ , while the liquid-phase products were sulfate ions. Furthermore, the degradation mechanism was analyzed.

**Keywords:** Gas discharge; Carbon disulfide; Carbon oxysulfide

## 0 引 言

二硫化碳( $\text{CS}_2$ )作为一种化工原料和有机溶

剂,广泛应用于粘胶纤维、农药、四氯化碳和橡胶等产品的生产工艺,在生产过程中不可避免的排放含  $\text{CS}_2$  的废气。 $\text{CS}_2$  是列入我国恶臭污染物排放

收稿日期: 2023-08-09

DOI: 10.20078/j.eep.20231007

基金项目: 浙江省科技厅重点研发项目(No. 2017C03007); 浙江工业大学大学生创新创业计划(2019)

作者简介: 金林毅(1998—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 研究方向为大气污染控制。E-mail: 303105308@qq.com

通讯作者: 黄立维(1964—), 男, 浙江慈溪人, 教授, 研究方向为大气污染控制技术。E-mail: hlw@zjut.edu.cn

标准(GB 14554—93)的八种代表性恶臭污染物之一,对其排放浓度有严格的要求<sup>[1]</sup>。

这些生产工艺过程排放的废气大都具有气量大、CS<sub>2</sub>浓度低(一般几十毫克每立方米至几百毫克每立方米)的特点,且CS<sub>2</sub>分子结构和物性较稳定、水溶性差、易燃易爆,给环保治理带来了很大的难度。传统的处理方法主要有溶液吸收法、活性炭吸附法、燃烧法和生物净化法等<sup>[2-7]</sup>,其中,溶液吸收法去除效率一般较低,需要通过化学手段强化吸收处理<sup>[5]</sup>;吸附法效果较好,但吸附剂需要进行再生处理,处置系统复杂,投资和运行费用大,还存在安全性问题<sup>[6]</sup>;生物法降解周期长,设施庞大<sup>[7]</sup>;燃烧法(含催化燃烧),虽然具有去除效率高、操作简单等优点,但大气量处理的运行费用往往难以承受。

气体放电等离子体技术是一种新发展的废气治理技术(具体有脉冲气体放电和介质放电等类型),由于可以在常温下对污染物进行降解,与燃烧法相比,具有能耗低、操作简单的特点,受到了广泛关注<sup>[8-20]</sup>。研究表明该技术对二硫化碳等有机废气都能达到较好的去除效果<sup>[11-19]</sup>。在氮气氛围中CS<sub>2</sub>去除率可达97%;有氧气存在时,CS<sub>2</sub>的最终降解产物为CO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>(中间产物为CO和COS);当添加氢气时,反应产物主要为H<sub>2</sub>S和CH<sub>4</sub><sup>[16]</sup>。然而在工业实际应用时,由于气体成分和操作条件等发生了很大的变化,如采用脉冲气体放电时,对处理大气量得大功率脉冲电源性能要求高,因而实际效果与实验室研究结果相比往

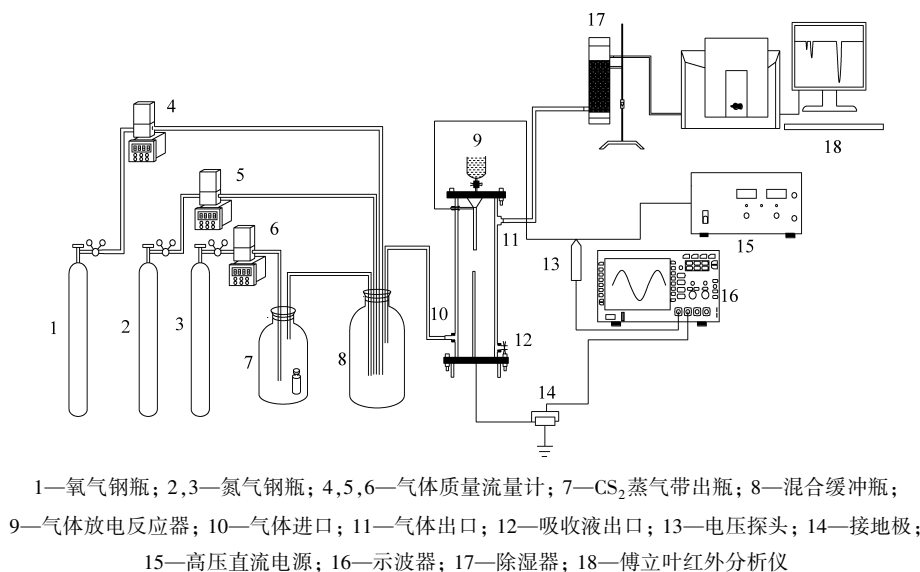
往有很大的差距<sup>[17]</sup>。同时,如何去除反应过程产生的二次污染物也是需要考虑的问题。

本论文设计了一种液滴触发的气体放电反应器,研究其对二硫化碳(CS<sub>2</sub>)废气的降解效果,实验采用直流高压电源,建立固定电极对(加压电极和接地电极)之间的静电场,然后使吸收喷淋液滴通过固定电极对之间的空间,使电极对之间的空间距离突然缩短,从而触发气体放电,电极周边空间气体电离后激发化学反应,降解气相污染物。同时,吸收液作为吸收剂,吸收去除气相放电降解过程产生的水溶性产物或中间产物<sup>[21]</sup>,从而达到降解去除CS<sub>2</sub>的目的。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

实验装置流程如图1所示,由配气系统、气体放电反应器、高压直流电源和产物分析单元组成。气体放电反应器采用石英玻璃管(长350 mm、外径50 mm和壁厚2 mm),反应器两端侧面分别有气体出口和气体进口,底部有吸收液排水口。管内沿轴向中心线方向设置一对电极,其中上端电极为内直径3 mm的钢管,与反应器顶部的储水器9连通,阀门调节液滴下滴速度(类似医用吊瓶滴液管),触发气体放电。在无电场下液滴下滴时大小与滴管内径大体相当,在电场作用下有所伸长;下端电极为直径3 mm钢棒,两电极端点间空间距离约为2 cm。上端电极通过高压绝缘导线与高压直流电源输出端相连,下端电极接地。



1—氧气钢瓶; 2,3—氮气钢瓶; 4,5,6—气体质量流量计; 7—CS<sub>2</sub>蒸气带出瓶; 8—混合缓冲瓶;  
9—气体放电反应器; 10—气体进口; 11—气体出口; 12—吸收液出口; 13—电压探头; 14—接地极;  
15—高压直流电源; 16—示波器; 17—除湿器; 18—傅立叶红外分析仪

图1 实验装置流程图

Fig.1 Flowchart of experimental system

模拟气体采用氮气气流鼓吹 CS<sub>2</sub> 液体带出蒸气, 再与氮气和氧气气流在缓冲罐稀释混合均匀后, 形成一定 CS<sub>2</sub> 浓度的气体导入气体放电反应器。高压电源的放电特性采用示波器 (DS1104Z, Rigol Tech. ) 监测。

## 1.2 分析方法

采用傅里叶红外光谱仪 (AVATAR370) 对模拟废气在反应器气体出口 (图 1 中标号 11) 排出的气体中的组分进行检测。采用离子色谱仪 (CIC-D120, 离子色谱柱型号为 SH-AC18) 对排水口排出的液体进行检测。

CS<sub>2</sub> 的去除率按式(1)计算:

$$\eta = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:  $\eta$  为 CS<sub>2</sub> 的去除率, %;  $C_{in}$  和  $C_{out}$  分别为反应前 (反应器不工作) 和反应后反应器出口测得的气流中 CS<sub>2</sub> 的浓度, mg/m<sup>3</sup>。

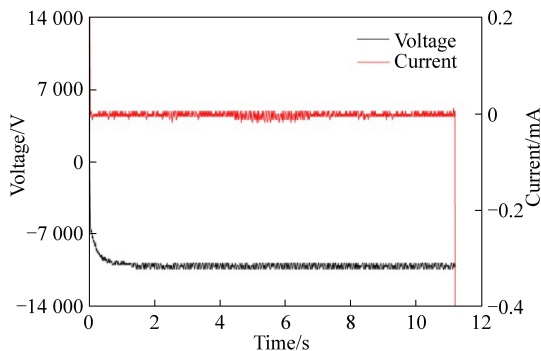
电路中瞬时电流按式(2)计算:

$$I = \frac{dV_D}{R} \quad (2)$$

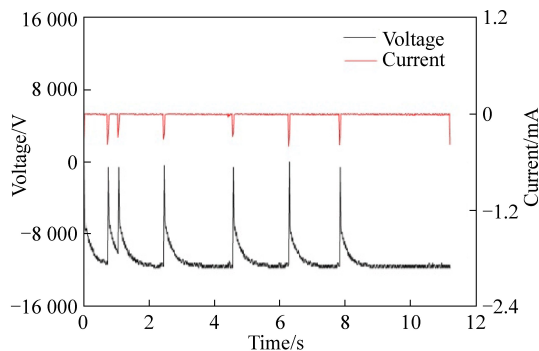
式(2)中:  $I$  为回路中的电流, A;  $V_D$  是接地线上串联电阻两端电压, V;  $R$  为外加串联电阻阻值,  $\Omega$ 。

放电功率  $P$  按式(3)计算:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_C I dt \quad (3)$$



(a) 无液滴通过



(b) 有液滴通过

图 2 反应器的放电特性

Fig. 2 Characteristics of electric discharge of the reactor

## 2.2 二硫化碳去除效果

图 3(a) 和图 3(b) 分别为不同初始浓度和不同气体流量下 CS<sub>2</sub> 的去除效果, 其中左 Y 轴为去除率, 右 Y 轴为单位时间内绝对去除量。配气组成均为 79% 氮气和 21% 氧气 (模拟空气), 液滴下落速度约为 0.5 滴/s, 经过约 30 min 通气后反应器前后浓度基本稳定后开始实验 (气流中 CS<sub>2</sub> 浓度波动在 1% 以内, 下同)。其中图 3(a) 为气体中

式(3)中:  $P$  为放电功率, W;  $T$  为一个完整放电周期, s;  $V_C$  为高压端输出电压, V。

单位能耗去除量 (Removal Per Energy Consumption, RPEC) 按式(4)计算:

$$RPEC = \frac{c_{in} \times V \times \eta \times 60}{P \times 10^6} \quad (4)$$

式(4)中: RPEC 为单位能耗去除量, g · (kW · h)<sup>-1</sup>;  $C_{in}$  为气体进口 CS<sub>2</sub> 浓度, mg · m<sup>-3</sup>;  $V$  为气体流速, mL · min<sup>-1</sup>。  $\eta$  为污染物去除率, %;  $P$  为放电功率, W。

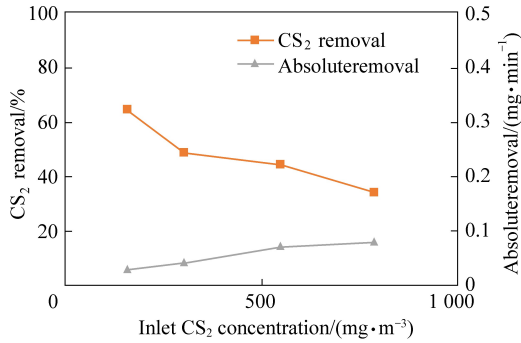
## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器的放电特性

图 2 为反应器的放电特性, 电极间施加电压约为 10.5 kV, 液滴采用 5% 硫酸钠水溶液 (电导率为 4.1 S/m)。其中图 2(a) 为没有液滴时电极间的电压和电流波形, 可以看到电压基本不变, 电流基本为零, 表明反应器不放电; 图 2(b) 为有液滴通过电极间空间的情况, 可以看到液滴通过时电压和电流呈现窄脉冲波形, 表明液滴通过起到了缩短电极间空间距离的作用, 从而触发了气体放电, 测定脉冲宽度在 50 ns 以下。随着液滴下落频率的增加, 脉冲个数增加, 注入反应器的能量也相应增加。

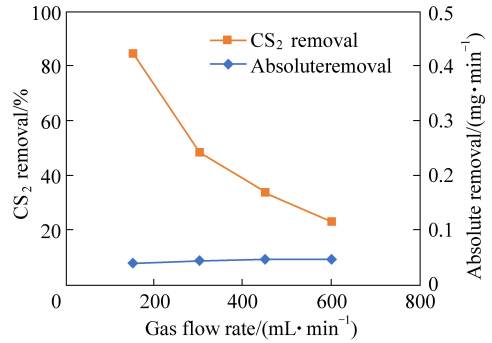
CS<sub>2</sub> 浓度从 156 mg/m<sup>3</sup> 增加的 785 mg/m<sup>3</sup> 的去除率和单位时间去除量, 气体流量为 300 mL/min; 图 3(b) 气流中 CS<sub>2</sub> 初始浓度约为 300 mg/m<sup>3</sup>, 气量流量从 150 mL/min 增加到 600 mL/min 的去除率和单位时间去除量, 实验条件电压约 11 kV (下同)。从图 3 可知, CS<sub>2</sub> 去除率随着浓度增加而降低, 但单位时间去除量有所增加, 表明在实验浓度范围内单位能耗去除量与浓度成正比。从图 3(b) 可

知,气体流量为 150 mL/min 时,CS<sub>2</sub> 去除率约为 85%,当气体流量增大到 600 mL/min 时,去除率下降到约 23%,但单位时间去除量基本不变,表明



(a) 不同CS<sub>2</sub>初始浓度的去除效果

在实验气体流量范围内单位能耗去除量与气量变化关系不大。



(b) 不同气体流量下的CS<sub>2</sub>去除效果

图 3 在不同初始浓度和气量流量下的二硫化碳的去除效果

Fig. 3 The removal of CS<sub>2</sub> under different inlet concentration and gas flow rate

### 2.3 液滴滴加频率对二硫化碳去除效果的影响

通过改变液滴下滴速度控制气体放电频率和输入反应器能量。图 4 为不同液滴下滴速度的 CS<sub>2</sub> 去除率和单位能耗去除量 (RPEC), 图中液滴下滴速度从 0.25 滴/s 增加到 2 滴/s, 气体流量为 300 mL/min, 气流中初始 CS<sub>2</sub> 浓度约为 300 mg/m<sup>3</sup>, 其他实验条件同前。

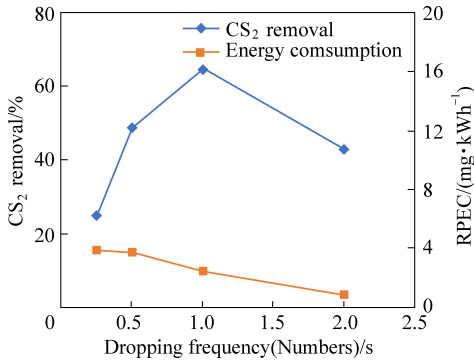


图 4 液滴滴加频率对二硫化碳去除效果和能耗的影响

Fig. 4 The influence of dropping frequency of solution drops on CS<sub>2</sub> removal

从图 4 可知,随着液滴滴加速度增加,CS<sub>2</sub> 去除率呈现先增加后减少的趋势,同时,单位能耗去除量 (RPEC) 在液滴下滴速度 < 0.5 滴/s 时基本不变,而当液滴下滴频率继续增加时 (1 滴/s 以上) 单位能耗去除量显著减少。这是由于液滴下滴速度导致脉冲放电频率和输入反应器能量增加,去除率增加,但液滴下滴间隔过短时,反应器内气体放电形成的脉冲波形有粘连和放电电压降低的现象,从而引起去除率下降和能耗增加,极端情况下会在电极间形成导通短路,从而导致去除率大幅降低和能耗大幅增加。

### 2.4 氧气浓度对二硫化碳去除效果的影响

图 5 为气流中氧气浓度对二硫化碳去除效果的影响,氧气浓度分别设定为 0%、5%、10%、20% 和 25%,实验条件气体流量 300 mL/min,初始浓度 300 mg/m<sup>3</sup>,液滴速度约为 0.5 滴/s,其他实验条件同前。从图中可知氧气浓度为零时,去除率较低,随着氧气含量的增加,CS<sub>2</sub> 的去除率提高,但氧气浓度进一步增加到 10%,CS<sub>2</sub> 的去除率达到最高后,CS<sub>2</sub> 的去除率出现下降。这是因为氧气的存在有以下两方面的影响:一是在气体放电作用下,氧气提供 CS<sub>2</sub> 氧化所需的氧原子,所以存在氧气对 CS<sub>2</sub> 的去除率有促进的作用;但另一方面,氧气是电负性气体,在同样输入功率条件下,过多的氧气存在不利于气体放电,导致放电效率下降<sup>[21-22]</sup>。在这两方面的作用下,CS<sub>2</sub> 去除率呈现先上升后下降的趋势。也有文献报道了在氧气含量约 0.5% 时全氟烃的降解效果最好和 2%~3% 时二氯甲烷的降解效果最好<sup>[23-24]</sup>。

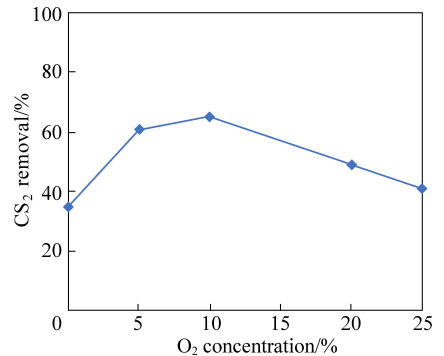


图 5 氧气浓度对二硫化碳去除效果的影响

Fig. 5 The influence of oxygen concentration on CS<sub>2</sub> removal

## 2.5 液滴组分对二硫化碳去除效果的影响

图6为分别采用去离子水(电导率为0.05 S/m)、5%硫酸钠水溶液(电导率为4.1 S/m)和5%氢氧化钠溶液(电导率为21.5 S/m)作为吸收液对二硫化碳的去除效果。实验条件气体流量300 mL/min, CS<sub>2</sub>初始浓度300 mg/m<sup>3</sup>, 氧气浓度为20%, 液滴速度约为0.5 滴/s。采用去离子水作为吸收液的CS<sub>2</sub>去除率最低(约为31%), 5%硫酸钠水溶液其次(约为52%), 采用5%氢氧化钠溶液作为吸收液的去除率最高(约为65%)。这是因为液滴的电导率对气体放电有一定的影响。水是极性分子, 采用去离子水时, 液滴离开电极时在电场力作用下, 脱离电极表面向阴极(或接地极)运动, 有雾化的现象, 同时去离子水电导率低, 导致放电效果不好, 因而去除率低; 采用5%硫酸钠水溶液则大大提高了液滴的电导率, 液滴不易雾化, 放电效果得到明显改善; 而采用5%氢氧化钠溶液后, 进一步提高了液滴的电导率, 更重要的是碱液液滴能吸收CS<sub>2</sub>降解的气相产物SO<sub>2</sub>, 从而大大提高了CS<sub>2</sub>的去除率。

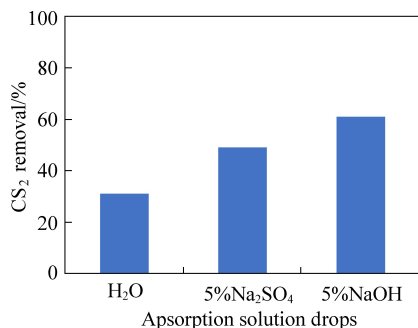


图6 液滴组分对二硫化碳去除效果的影响  
(CS<sub>2</sub>初始浓度为300 mg/m<sup>3</sup>, 氧气浓度为20%)

Fig. 6 The influence of solution composition on CS<sub>2</sub> removal (Inlet CS<sub>2</sub> concentration: 300 mg/m<sup>3</sup>, oxygen concentration: 20%)

## 2.6 二硫化碳去除机理分析

图7为分别以20%氧气80%氮气为载气和以氮气为载气的反应后气体红外光谱图(实验条件同2.4节), 图8为反应后的吸收液的离子色谱图。从图7中可知, 反应后气体中监测到的主要产物是CO<sub>2</sub>和COS, 还有微量的CO, 其中光谱为20%氧气80%氮气载气实际气相的最终产物应该还有SO<sub>2</sub>(COS只是中间产物), 但在气相没有检测到。通过对吸收液的离子检测, 则发现有硫酸根(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)存在, 表明气相产物SO<sub>2</sub>已被吸收液吸收, 并进一步被氧化为硫酸根离子。

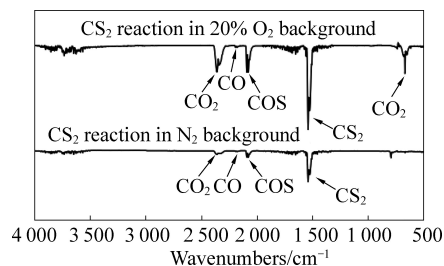


图7 CS<sub>2</sub>降解反应后的气相产物红外谱图

Fig. 7 FTIR pattern of gaseous products after CS<sub>2</sub> decomposition

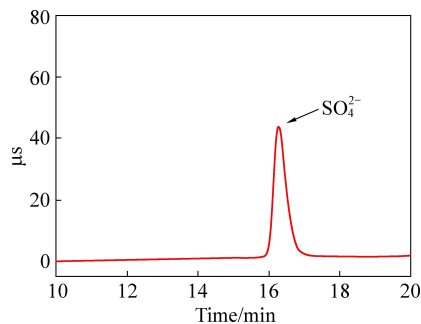
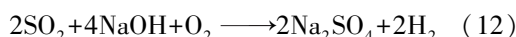
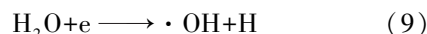
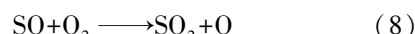
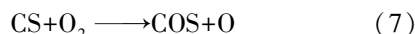
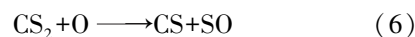


图8 CS<sub>2</sub>降解反应后的液相产物的离子色谱

Fig. 8 Ion pattern of the products in liquid phase after CS<sub>2</sub> decomposition

在气体放电作用下, 将产生氧原子(O)和羟基自由基(·OH)等化学反应高度活跃的活性物质, 同时CS<sub>2</sub>也被高能电子撞击下激发, 从而激发CS<sub>2</sub>与所产生的氧原子或羟基自由基等活性粒子间发生复杂的链式反应, 最终被氧化为CO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>, 主要的反应有<sup>[25-29]</sup>:



在有氧气存在下, CS<sub>2</sub>降解过程最初的链式反应主要为活性氧原子参与的反应(5~8), 而在无氧气有水汽(因液滴存在), 主要为羟基自由基参与的反应(9~11), 然后再进一步生成气相最终CO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>。而气相反应的产物SO<sub>2</sub>进一步被液滴(碱液)吸收和氧化(12), 从而促进了降解反应的进行。

## 3 结论

采用液滴触发气体放电反应器能有效去除和



降解气流中的 CS<sub>2</sub> 气体,在气体放电的同时,结合吸收在实验范围内 CS<sub>2</sub> 的去除率随着初始浓度或气流流量的增加而降低,但绝对去除量变化不大,液滴滴加速度对 CS<sub>2</sub> 去除率和能耗有较大影响,滴加频率过慢去除率低,滴加频率过快可导致脉冲波形粘连和放电电压降低,从而大幅降低去除率和增加能耗。实验还发现气流中氧气浓度在 5%~15% 范围对二硫化碳去除效果较好;采用 5% 氢氧化钠溶液的液滴能吸收 CS<sub>2</sub> 降解的气相产物 SO<sub>2</sub>,从而提高了 CS<sub>2</sub> 的去除率。CS<sub>2</sub> 降解的气相产物主要有 SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和少量中间产物 COS,液相产物为硫酸根离子。

#### 参考文献 (References):

[1] 国家生态环境部. 恶臭污染物排放标准[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrwpfbz/index\\_2.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrwpfbz/index_2.shtml).

[2] 田昀,刘庆岭,纪娜,等. 挥发性污染物二硫化碳处理技术[J]. 环境工程, 2018, 36(7):87-92.  
TIAN Yun, LIU Qingling, JI Na, et al. Treatment technology of carbon disulfide from volatile pollutants[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(7): 87-92.

[3] ENNEKING J C. Control of carbon disulfide emissions from viscose processes[J]. Environmental Progress, 2002, 21(3): 169-174.

[4] 李长英,陈明功,盛楠,等. 挥发性有机物处理技术的特点与发展[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 917-925.  
LI Changying, CHEN Minggong, SHENG Nan, et al. The characteristics and development of volatile organic compounds treatment technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(3): 917-925.

[5] 王丽,李福林,吴迪楠,等. 催化水解-氧化耦合一步法脱除二硫化碳的研究[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(4): 466-470.  
WANG Li, LI Fulin, WU Didong, et al. A novel desulfuring agent for CS<sub>2</sub> removal by couple processing[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, 32(4): 466-470.

[6] 马佳凯,刘慧娟,杨新玉,等. 活性炭吸附黏胶纤维生产废气中的 CS<sub>2</sub>[J]. 化工环保, 2018, 38(5): 593-598.  
MA Jiakai, LIU Huijuan, YANG Xinyu, et al. Adsorption-desorption of CS<sub>2</sub> from viscose fiber production waste gas on activated carbon[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2018, 38(5): 593-598.

[7] ROJO N, GALLASTEGI, G, BARONA A, et al. Biotechnology as an alternative for carbon disulfide treatment in air pollution control[J]. Environmental Review, 2010, 18: 321-332.

[8] 吴祖良,谢德援,陆豪,等. 非热平衡等离子体协同催化脱除挥发性有机化合物的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(4): 63-67+74.  
WU Zuliang, XIE Deyuan, LU Hao, et al. Progress on the re-

moval of VOCs using non-thermal plasma catalysis system[J]. Environmental Pollution & Control, 2012, 34(4): 63-67+74.

[9] XIAO G, XU W, WU R, et al. Non-thermal plasmas for VOCs abatement[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processes, 2014, 34(5): 1033-1065.

[10] DOBSLAW C, GLOCKER B. Plasma technology and its relevance in waste air and waste gas treatment[J]. Sustainability 2020, 12(21): 8981.

[11] YAN X, SUN Y, ZHU T, et al. Conversion of carbon disulfide in air by non-thermal plasma[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 261(15): 669-674.

[12] KUZNETSOV D L, FILATOV I E, UVARIN V V. Processes of carbon disulfide degradation under the action of a pulsed corona discharge[J]. Technical Physics Letters, 2016, 42(8): 822-825.

[13] NOVOSELOV Y N, SUSLOV A I. Mechanisms of conversion of carbon disulfide in air under the action of pulsed electron beams[J]. Doklady Physical Chemistry, 2002, 384(4-6): 123-125.

[14] DENG C, LU S, BAO T, et al. Decomposition of carbon disulfide using dielectric barrier discharge plasma coupled with limonite and siderite supported bismuth vanadate catalysts[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019, 19(10): 2352-2365.

[15] 宁平,徐可,王学谦,等. 低温等离子体技术处理含硫恶臭气体的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(21): 62-67.  
NING Ping, XU Ke, WANG Xueqian, et al. Research progress of removal sulfide odors by the non-thermal plasma[J]. Materials Reports, 2015, 29(21): 62-67.

[16] 金圣,黄立维,李国平. 在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 21-25.  
JIN Sheng, HUANG Liwei, LI Guoping. Decomposition of carbon disulfide by pulse corona under oxidizing and reducing atmosphere[J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 21-25.

[17] KUZNETSOV D L, FILATOV I E, UVARIN V V. Processes of carbon disulfide degradation under the action of a pulsed corona discharge[J]. Technical Physics Letters, 2016, 42(8): 822-825.

[18] KUZNETSOV D L, FILATOV I E, UVARIN. Conversion of carbon disulfide in pulsed corona discharge plasma[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2019, 47(3): 1572-1582.

[19] YAN X, SUN, Y F, ZHU T L. Conversion of carbon disulfide in air by non-thermal plasma[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 261: 669-674.

[20] BRUGGEMAN P J, KUSHNER M J, LOCKE B R, et al. Plasma - liquid interactions; A review and roadmap[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016, 25(5): 053002.

[21] 吴锴,秦楷,孙常浩,等. 电负性气体对局部放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(6):1372-1378.  
WU Kai, QIN Kai, SUN Changhao, et al. Effect of electronegative gas on partial discharge characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1372-1378.

[22] KUZNETSOV D L, FILATOV I E, UVARIN V V. Effect of e-

- lectronegative additives on physical properties and chemical activity of gas discharge plasma[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 946: 012169.
- [23] MOK Y S, DEMIDYUK V, WHITEHEAD J C. Decomposition of hydrofluorocarbons in a dielectric-packed plasma reactor [J]. *Journal of Physics Chemistry A*, 2008, 112(29):6586-6591.
- [24] ALLAH Z A, WHITEHEAD J C, MARTIN P. Remediation of dichloromethane ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) using non-thermal, atmospheric pressure plasma generated in a packed-bed reactor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(1): 558-565.
- [25] NOVOSELOV Y N, DENISOV G V, SUSLOV A I. Pulses electron beams for removal of  $\text{CS}_2$  from air[C]// *Proceedings of 12th International Conference High-Power Particle Beams (BEAMS'98)*, 1998: 1016-1019.
- [26] 刘万波, 孙鑫, 张然, 等. 放电条件对电晕放电等离子体脱除羰基硫的影响研究[J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33(1): 245-252.
- LIU Wanbo, SUN Xin, ZHANG Ran, et al. Effects of discharge conditions on COS conversion by corona discharge plasma[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33(1): 245-252.
- [27] 王学谦, 程晨, 马懿星, 等. 直流电晕放电净化羰基硫及其产物分析[J]. *材料导报*, 2017, 31(1):149-154. WANG Xueqin, CHENG Chen, MA Yixing, et al. Removal of carbonyl sulfide by DC corona discharge and analysis of the product[J]. *Material Reports*, 2017, 31(1): 149-154.
- [28] KUZNETSOV D L, UVARIN V V, FILATOV I E. Features of  $\text{CS}_2$  conversion in nonequilibrium gas-discharge plasma of multicomponent atmospheric-pressure mixtures[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1147: 012121.
- [29] LI S R, TIMOSHKIN I V, MACLCAN M, et al. Steady-state corona discharges in atmospheric air for cleaning and decontamination[J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2871-2878.