

“硫酰氟熏蒸风险评估与应用（上）—硫酰氟熏蒸应用技术” 特约专栏文章之六

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.04.011

张冰, 张蕊, 朱琳, 等. 硫酰氟对臭氧衰减的影响及其尾气处理技术研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(4): 79-84.

ZHANG B, ZHANG R, ZHU L, et al. Study on the effect of sulfuryl fluoride on ozone elimination and technology for tail gas treatment[J].

Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(4): 79-84.

# 硫酰氟对臭氧衰减的影响及其 尾气处理技术研究

张冰, 张蕊, 朱琳, 王松雪, 汪中明, 郭宝元✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 硫酰氟是一种潜在的磷化铝替代熏蒸剂, 在其大规模使用前, 其环境风险的评价及排放处理研究具有重要意义。研究硫酰氟对臭氧的破坏作用和硫酰氟尾气处理方法。向 350 mg/m<sup>3</sup> 臭氧实验箱中分别通入 5、10、20 g/m<sup>3</sup> 的硫酰氟, 检测不同浓度硫酰氟条件下, 臭氧衰减曲线。实验结果表明: 当实验箱温度设定为 25 °C, 无硫酰氟环境臭氧浓度半衰期为 275.2 min, 5、10、20 g/m<sup>3</sup> 三个硫酰氟浓度环境臭氧半衰期分别为 157.4、166.4、161.8 min。经统计分析, 3 个浓度硫酰氟存在环境下臭氧浓度衰减的 3 组半衰期数据没有显著性差异, 硫酰氟对臭氧衰减动力学曲线和半衰期存在显著性影响。通过比较活性炭颗粒、中性氧化铝、氢氧化钙悬浊液和氢氧化钠溶液对硫酰氟降解消减的能力, 确定了氢氧化钠溶液的处理方法。随着温度升高, 处理半衰期缩短, 20、25、30 °C 条件下, 0.25 mol/L 氢氧化钠溶液浓度对硫酰氟处理的半衰期为 592.5、404.2、323.5 min。

**关键词:** 硫酰氟; 臭氧; 环境风险; 熏蒸; 分解; 尾气处理

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)04-0079-06

网络首发时间: 2021-07-02 11:15:15

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210702.1020.003.html>

## Study on the Effect of Sulfuryl Fluoride on Ozone Elimination and Technology for Tail Gas Treatment

ZHANG Bing, ZHANG Rui, ZHU Lin, WANG Song-xue, WANG Zhong-ming, GUO Bao-yuan✉

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

**Abstract:** It is of vital importance to evaluate the environmental risks brought by sulfuryl fluoride before applying it wildly as an alternative to aluminum phosphide in grain storage. Degradation kinetics of 350 mg/m<sup>3</sup> ozone was investigated under sulfuryl fluoride concentrations of 5, 10 and 20 g/m<sup>3</sup>. The results show that ozone degradation was significantly accelerated by sulfuryl fluoride in air. The half-life of ozone concentration in the sulfuryl fluoride-free environment is 275.2 min, while the half-lives of ozone in the 5, 10,

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 中央级公益性基本科研业务费专项 (ZX1923); 国家自然科学基金项目 (31901806)

Supported by: Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No. ZX1923); National Natural Science Foundation of China (No. 31901806)

作者简介: 张冰, 男, 1988 年出生, 助理研究员, 研究方向为农药分析。E-mail: zb@ags.ac.cn.

通讯作者: 郭宝元, 男, 1976 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮油质量安全与风险评价。E-mail: gby@ags.ac.cn.

and 20 g/m<sup>3</sup> sulfuryl fluoride concentration are 157.4, 166.4 and 161.8 min, respectively. In this study, we compared the sulfuryl fluoride elimination of active carbon, neutral aluminum oxide, calcium hydroxide suspension and sodium hydroxide solutions to eliminate sulfuryl fluoride, and sodium hydroxide solution was employed finally. The study found that temperature is a key factor in the process of sulfuryl fluoride elimination. The half-lives of sulfuryl fluoride were 592.5, 404.2, and 323.5 min at 20, 25, and 30 °C, while the sodium hydroxide solution was 0.25 mol/L.

**Key words:** sulfuryl fluoride; ozone; environmental risk; fumigation; elimination; tail gas treatment

硫酰氟是一种无色无味、无腐蚀性的有毒气体<sup>[1]</sup>, 早期用于木材、建筑物、建筑材料等害虫的防治<sup>[2-3]</sup>, 是一种广谱的熏蒸剂, 具有渗透力强、杀虫谱广等优点。在食品加工<sup>[4]</sup>和农业、土壤熏蒸得到扩展应用。相对于磷化氢而言, 硫酰氟对金属没有腐蚀性, 对哺乳动物毒性相对较低, 不易对人体和设备产生较大危害。国内外有关硫酰氟的熏蒸研究主要应用于粮库的熏蒸、生产车间<sup>[5]</sup>、集装箱<sup>[6]</sup>、土壤<sup>[7]</sup>等。

硫酰氟在广泛应用的同时, 环境问题也越来越被重视。有研究表明, 硫酰氟是强温室效应气体, 在大气中的寿命是 36 年, 每分子硫酰氟吸收热量约是二氧化碳的 4 800 倍, 现在的大气分子中每万亿中有 1.5 个硫酰氟分子。自 1978 年以来, 硫酰氟释放的含量以每年 5% 的速度在全球的大气中累积<sup>[8]</sup>。国外对硫酰氟的大气化学研究较多<sup>[9-10]</sup>, Paradimitriou 等<sup>[11]</sup>研究对流层中硫酰氟气相损失过程主要与 OH 自由基反应, 与 O<sub>3</sub> 的反应可以忽略。在 Dillon 等<sup>[12]</sup>研究中也提到硫酰氟与 O<sub>3</sub> 的反应微不足道。国内关于硫酰氟熏蒸的应用、毒理方面内容等研究较多, 对于硫酰氟与臭氧的衰减影响研究较少, 本文通过自制环境风险研究实验箱, 通过实验探索研究硫酰氟对臭氧衰减的影响。

随着硫酰氟的大量使用可能导致的潜在温室效应, 对硫酰氟的绿色处理也是本实验的主要研究内容。当前大气中的硫酰氟的主要来源为农业熏蒸废气和工业冶金废气, 废气处理主要是通风排放, 对大气环境和人身安全产生危害。国内外针对硫酰氟的废气处理主要为填充式介质阻挡放电化学吸收法<sup>[13]</sup>、碱液处理法<sup>[14]</sup>、物理吸附法<sup>[15]</sup>、生物基溶剂吸收法<sup>[16]</sup>等。填充式介质阻挡放电装置复杂, 且硫酰氟经放电分解产生有毒有害气体

体容易造成二次污染; 物理吸附法和生物基溶剂吸收法, 对硫酰氟的吸收为物理吸收, 且吸附浓度和吸附量较小, 不能实现对硫酰氟的大量吸收; 碱液吸收法利用硫酰氟遇碱水解的特性, 可对硫酰氟进行无害化处理, 方法经济有效。本文比较了 4 种不同处理剂对硫酰氟降解消减能力, 研究了实验箱温度和处理剂浓度对硫酰氟处理的影响, 为硫酰氟的尾气处理提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

硫酰氟气体 (99.9%): 山东龙口化工厂; 活性炭颗粒: 天津市大茂化学试剂厂; 氢氧化钙, 分析纯: 福晨 (天津) 化学试剂有限公司; 氢氧化钠, 分析纯: 北京化工厂; 3S-A10 臭氧发生器: 北京同林臭氧有限公司; APEG-B03-3E 泵吸在线式臭氧检测仪 (0~2 000 mg/m<sup>3</sup>, 分辨率 2 mg/m<sup>3</sup>): 深圳安帕尔科技有限公司; SF-ContainIR 硫酰氟气体浓度检测仪 (0~240 g/m<sup>3</sup>, 分辨率 0.16 g/m<sup>3</sup>): 美国 SPETROS 仪器公司; KNF N86KT.18 微型隔膜真空泵: 德国凯恩孚公司。

### 1.2 实验设备

#### 1.2.1 环境风险研究实验箱

自制硫酰氟环境风险研究实验箱, 箱体材质为不锈钢, 规格: 长×宽×高=720 mm×620 mm×1 670 mm, 实验箱体外层包裹 20 mm 聚氨酯保温。箱体内部设由温度控制及温度监测系统 (0~100 °C)、气流扰动系统、臭氧发生及在线监测系统、硫酰氟在线监测系统等, 可实现温度控制、臭氧和硫酰氟浓度的实时监测。

#### 1.2.2 硫酰氟处理装置

硫酰氟处理装置由 A、B 两部分组成, 通过薄膜泵将实验箱中的硫酰氟气体抽到硫酰氟装置

A 中, 薄膜泵抽气速度 5.5 L/min, A 中放置处理剂, B 中放置经 A 处理后再经 B, 对 A 中处理的气体进行除水处理。

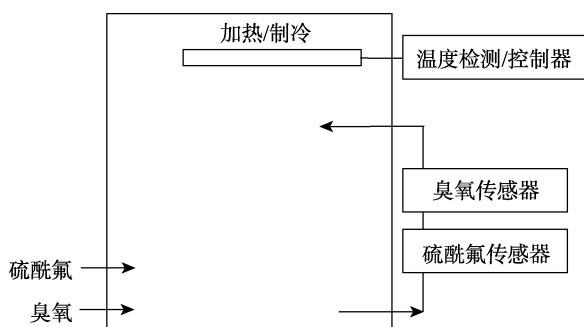


图 1 硫酰氟熏蒸试验箱示意图

Fig.1 Schematic of chamber for sulfuryl fluoride fumigation study

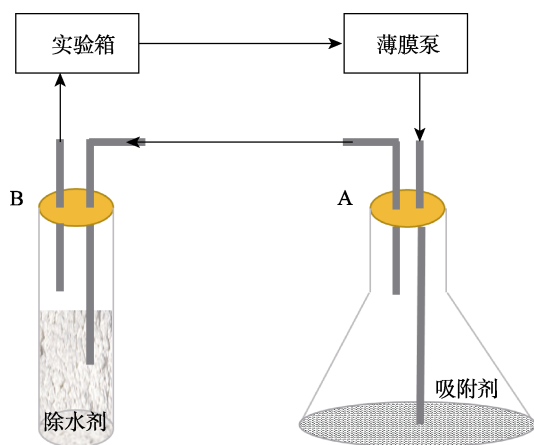


图 2 硫酰氟处理装置

Fig.2 Sulfuryl fluoride treatment device

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 硫酰氟对臭氧稳定性的影响研究

1.3.1.1 不同温度下臭氧的衰减研究 实验箱体设置  $350 \text{ mg/m}^3$  浓度的臭氧气体, 分别在 20、25、30 °C 下考察臭氧浓度到  $100 \text{ mg/m}^3$  的衰减情况, 通过在线臭氧检测仪检测实验箱内臭氧浓度, 每隔 15 min 记录实验箱内臭氧浓度, 绘制 20、25、30 °C 下臭氧分解曲线, 拟合公式, 确定硫酰氟对臭氧稳定性影响的实验温度。

1.3.1.2 不同浓度硫酰氟对臭氧衰减研究 按照 1.3.1.1 方法得出的温度, 研究在此温度下, 在实验箱体设置  $350 \text{ mg/m}^3$  臭氧, 通过硫酰氟气体钢瓶向实验箱分别通入 0、5、10、20  $\text{g/m}^3$  的硫酰氟气体, 考察臭氧浓度到  $100 \text{ mg/m}^3$  的衰减情况。在线臭氧检测仪检测实验箱的臭氧浓度, 每隔

15 min 记录实验箱内臭氧浓度, 每浓度重复监测 5 次。绘制 0、5、10、20  $\text{g/m}^3$  硫酰氟存在下实验箱臭氧衰减曲线, 拟合公式, 对臭氧衰减半衰期统计分析。

#### 1.3.2 氢氧化钠对硫酰氟的吸收处理

1.3.2.1 温度对硫酰氟处理的影响 模拟粮库中熏蒸条件, 实验箱设置硫酰氟浓度  $20 \text{ g/m}^3$ , 实验箱连接图 2 的硫酰氟处理装置, 装置内放置 500 mL 的 1.0 mol/L 的氢氧化钠溶液, 分别设置实验箱温度 20、25、30 °C, 硫酰氟气体浓度检测仪记录 3 个温度下实验箱体内硫酰氟浓度, 每隔 15 min 记录浓度值, 当硫酰氟浓度为  $5 \text{ g/m}^3$  时停止记录, 绘制曲线, 通过拟合指数公式计算半衰期。

1.3.2.2 浓度对硫酰氟处理的影响 模拟粮库中熏蒸条件, 实验箱设置硫酰氟浓度  $20 \text{ g/m}^3$ , 实验箱连接图 2 的硫酰氟处理装置, 分别配制 0.25、0.5、1.0、1.5 mol/L 的氢氧化钠溶液浓度, 以水溶液作为空白对照, 取以上 4 种浓度的氢氧化钠溶液 500 mL 置于硫酰氟处理装置中, 硫酰氟气体浓度检测仪每隔 15 min 记录实验箱体内浓度, 当硫酰氟浓度为  $5 \text{ g/m}^3$  时停止记录, 绘制曲线, 通过拟合指数公式计算半衰期。

#### 1.3.3 硫酰氟尾气处理方法

图 2 实验箱中设置  $20 \text{ g/m}^3$  的硫酰氟, 硫酰氟处理装置按图 2 连入实验箱。A 中分别加入活性炭、中性氧化铝、氢氧化钙悬浊液和 1.0 mol/L 的氢氧化钠溶液。B 中装填除水剂。

### 1.4 数据处理

数据通过 Excel 和 SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago USA) 软件进行分析。数据间的比较采用独立样本 T 检验, 按照 95% 置信概率, 取双侧检验统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同温度下臭氧衰减

按照 1.3.1.1 的实验方法, 实验箱体设置臭氧浓度  $350 \text{ mg/m}^3$ , 分别在 20、25、30 °C 下考察臭氧浓度到  $100 \text{ mg/m}^3$  的衰减情况。三个温度下臭氧浓度衰减符合  $y = A \cdot e^{kx}$  函数, 相关系数良好且均大于 0.99, 公式各参数和半衰期见表 1。

表 1 不同温度条件下臭氧衰减曲线和半衰期  
Table 1 The degradation curve of ozone and half-lives at different temperature

| 实验箱体温度/°C | 臭氧降解曲线                   | R <sup>2</sup> | 半衰期/min |
|-----------|--------------------------|----------------|---------|
| 20        | $y = 357.24e^{-0.001x}$  | 0.996 0        | 469.7   |
|           | $y = 357.25e^{-0.001x}$  | 0.996 3        | 458.9   |
|           | $y = 352.13e^{-0.001x}$  | 0.995 2        | 453.6   |
|           | $y = 349.16e^{-0.001x}$  | 0.991 3        | 440.4   |
|           | $y = 354.55e^{-0.001x}$  | 0.991 6        | 460.5   |
| 25        | $y = 361.86e^{-0.0017x}$ | 0.995 5        | 280.6   |
|           | $y = 358.53e^{-0.0017x}$ | 0.996 0        | 269.5   |
|           | $y = 359.57e^{-0.0017x}$ | 0.994 2        | 272.2   |
|           | $y = 353.76e^{-0.0016x}$ | 0.991 2        | 275.5   |
|           | $y = 360.38e^{-0.0017x}$ | 0.996 3        | 278.4   |
| 30        | $y = 339.37e^{-0.0033x}$ | 0.999 4        | 123.0   |
|           | $y = 334.22e^{-0.0036x}$ | 0.998 9        | 109.7   |
|           | $y = 352.73e^{-0.0040x}$ | 0.999 4        | 110.4   |
|           | $y = 343.94e^{-0.0036x}$ | 0.999 2        | 117.1   |
|           | $y = 347.74e^{-0.0038x}$ | 0.999 6        | 114.9   |

随着实验箱体内部温度的升高, 臭氧降解速率越快, 半衰期越短。20、25、30 °C 温度下, 臭氧在实验箱体内半衰期平均值分别为 456.5、275.2、115.0 min。经统计分析, 3 个温度下臭氧衰减半衰期有显著性差异。臭氧是由氧分子携带一个氧原子构成, 为暂定状态, 随着温度的升高, 臭氧获得的能量越高, 分解的速度越快。由于实验箱体内部温度不同导致臭氧衰减不同, 为避免温度对臭氧衰减产生影响, 本实验选择 25 °C 作为实验温度。

## 2.2 硫酰氟对臭氧稳定性影响

按照 1.3.1.2 方法在实验箱体设置 350 mg/m<sup>3</sup> 臭氧, 实验箱体温度 25 °C, 通过硫酰氟气体钢瓶向实验反应箱内分别通入 5、10、20 g/m<sup>3</sup> 的硫酰氟气体, 对臭氧浓度衰减研究, 每浓度重复监测 5 次。表 2 为不同浓度硫酰氟存在条件下, 臭氧浓度衰减曲线。

通过 SPSS 软件分析, 5、10 和 20 g/m<sup>3</sup> 硫酰氟浓度下臭氧的衰减半衰期呈方差齐性, sig>0.05, 三者没有显著性差异。经统计, 在硫酰氟存在环境下臭氧浓度衰减同没有硫酰氟存在环境下臭氧浓度衰减半衰期, 在 95% 置信水平下存在显著性差异, 表明在当前实验环境, 硫酰氟的存在对臭氧自身衰减存在影响, 不同浓度硫酰氟

表 2 臭氧在硫酰氟影响条件下的衰减曲线和半衰期  
Table 2 The degradation curve of ozone and half-lives at different temperature under the stress of sulfuryl fluoride

| 硫酰氟浓度/(g/m <sup>3</sup> ) | 臭氧降解曲线                   | R <sup>2</sup> | 半衰期/min |
|---------------------------|--------------------------|----------------|---------|
| 5                         | $y = 347.03e^{-0.001x}$  | 0.993 6        | 148.2   |
|                           | $y = 339.36e^{-0.001x}$  | 0.991 8        | 159.2   |
|                           | $y = 358.07e^{-0.001x}$  | 0.996 2        | 163.0   |
|                           | $y = 344.15e^{-0.001x}$  | 0.995 2        | 160.3   |
|                           | $y = 344.07e^{-0.001x}$  | 0.991 5        | 156.1   |
| 10                        | $y = 358.08e^{-0.0017x}$ | 0.993 0        | 182.7   |
|                           | $y = 344.81e^{-0.0017x}$ | 0.992 5        | 162.7   |
|                           | $y = 348.70e^{-0.0017x}$ | 0.994 3        | 161.6   |
|                           | $y = 346.76e^{-0.0016x}$ | 0.993 5        | 157.8   |
|                           | $y = 344.72e^{-0.0017x}$ | 0.996 7        | 167.3   |
| 20                        | $y = 339.48e^{-0.0033x}$ | 0.996 2        | 164.8   |
|                           | $y = 344.25e^{-0.0036x}$ | 0.993 5        | 158.6   |
|                           | $y = 348.70e^{-0.0040x}$ | 0.996 4        | 172.3   |
|                           | $y = 338.38e^{-0.0036x}$ | 0.991 5        | 152.7   |
|                           | $y = 341.50e^{-0.0038x}$ | 0.991 6        | 159.8   |

对臭氧自身浓度衰减影响基本一致。虽然 Dillon 等<sup>[12]</sup>在实验中未监测到硫酰氟和臭氧的反应, 但我们发现硫酰氟可以明显的加速臭氧的分解速率。这个原因可能是我们与 Dillon 等的实验在初始反应物的浓度和反应物浓度的监测方式上区别导致, Dillon 等通过 PLP-LIF 装置的吸收池和单色仪对臭氧监视, 初始反应物量, 如臭氧、硫酰氟以 Torr 设置, 我们采取传感器直接监测反应物浓度, 以此可能造成两者实验结果的不一致。

## 2.3 硫酰氟的处理研究

### 2.3.1 不同处理剂对硫酰氟的处理能力比较

按照 1.3.3 的方法, 对 4 种处理剂活性炭、中性氧化铝、氢氧化钙悬浊液、1 mol/L 氢氧化钠溶液的处理硫酰氟能力进行对比, 结果见图 3。活性炭对硫酰氟的处理能力最弱, 中性氧化铝和氢氧化钙悬浊液对硫酰氟处理相对活性炭较强, 处理速度相似, 但氢氧化钠溶液对硫酰氟处理效果更好, 硫酰氟能更充分地被氢氧化钠溶液吸收。氢氧化钠溶液处理硫酰氟为化学处理, 经济有效, 不会对环境造成二次污染。

### 2.3.2 实验箱温度对硫酰氟处理的影响

按照 1.3.2.1 进行实验, 当处理剂选择 1.0 mol/L 的氢氧化钠溶液, 20、25、30 °C 硫酰氟拟合公式

分别为  $y = 20.08e^{-0.0008x}$ 、 $y = 20.22e^{-0.00119x}$ 、 $y = 20.26e^{-0.00149x}$ ，半衰期为 592.5、404.2、323.5 min，随着温度的升高，氢氧化钠处理硫酰氟的速率增加。因此，在硫酰氟熏蒸尾气处理过程中，处理效率与温度有关，在实际应用中，不同环境温度对处理工艺需要调整。

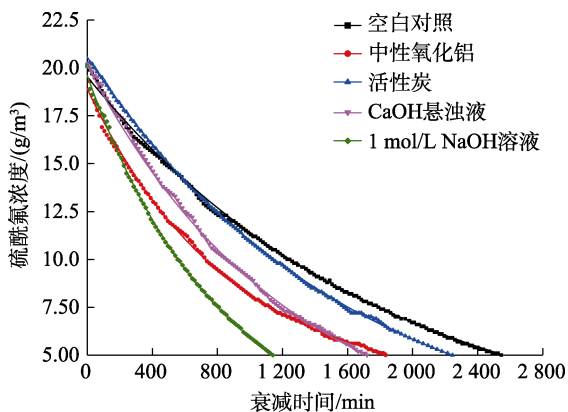


图 3 4 种处理剂下硫酰氟的衰减对比  
Fig.3 Comparison of the attenuation of sulfuryl fluoride under 4 treatment agents

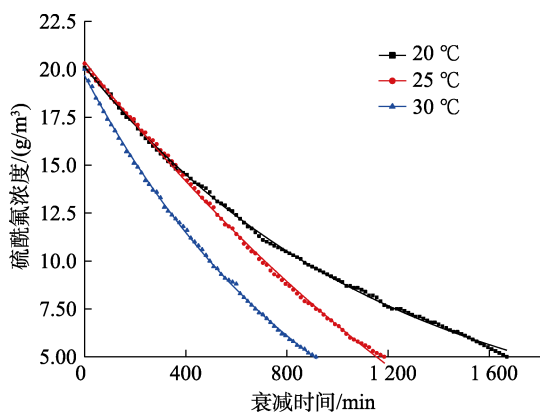


图 4 不同实验箱温度 20、25、30 °C 硫酰氟衰减曲线  
Fig.4 Sulfuryl fluoride decay curve at different experimental chamber temperatures at 20, 25, and 30 °C

### 2.3.3 氢氧化钠浓度对硫酰氟处理的影响

按照 1.3.2.2 进行实验，实验箱温度恒定设置 30 °C，空白对照、0.25、0.5、1.0、1.5 mol/L 氢氧化钠溶液浓度处理硫酰氟半衰期分别为 534.8、317.4、333.3、323.5、369.9 min，由图 5 看出，使用氢氧化钠溶液后，硫酰氟处理的半衰期明显缩短，0.25~1.0 mol/L 随着氢氧化钠溶液浓度的升高，半衰期变化速率不明显。当浓度为 1.5 mol/L 时，硫酰氟处理半衰期变长。随着溶液浓度的提高，溶液黏度提高，硫酰氟在溶液中的扩散系数变小，对硫酰氟去除效率变低，与 NIE YONG<sup>[14]</sup>

等研究的模型基本一致。

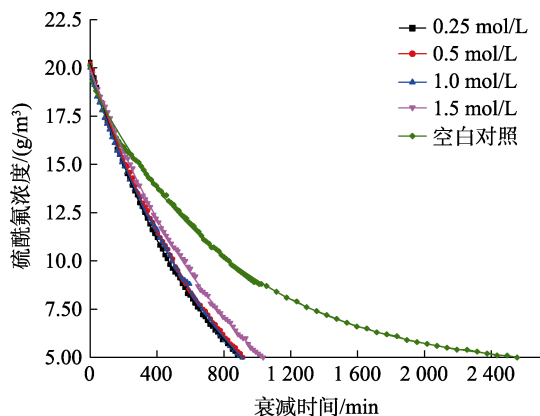


图 5 氢氧化钠溶液浓度处理硫酰氟的影响  
Fig.5 Effect of concentration of sodium hydroxide solution on sulfuryl fluoride

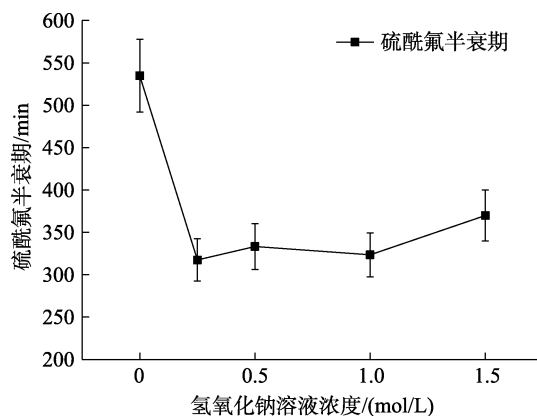



图 6 实验箱中硫酰氟在不同浓度氢氧化钠溶液衰减半衰期  
Fig.6 The attenuation half-life of sulfuryl fluoride in different concentrations of sodium hydroxide solution in the experiment box

## 3 结论

近年来，随着硫酰氟的推广和大量应用，温室气体效应会受到更多的关注，它引起全球变暖的机制及排放处理方法亟需深入研究。在硫酰氟能得到良好应用的同时，保护全球大气的环境。臭氧不同温度下的衰减动力学曲线表明，随着温度升高，臭氧自身衰减速率加快，半衰期变短。在 25 °C 条件下观测 5、10 和 20 g/m<sup>3</sup> 硫酰氟浓度下臭氧浓度衰减的变化，探讨硫酰氟对臭氧浓度衰减的影响，结果表明硫酰氟明显的加速了臭氧的分解，臭氧半衰期明显缩短，其机制还需要进一步深入研究。研究比较了 4 种物理和化学吸附剂：活性炭颗粒、中性氧化铝、氢氧化钙悬浊液和氢氧化钠溶液对硫酰氟处理能力，活性炭颗粒对硫酰氟处理不显著，中性氧化铝和氢氧化钙悬

浊液对硫酰氟处理速度相近，氢氧化钠溶液处理效率最高。氢氧化钠溶液澄清，处理硫酰氟时硫酰氟与其充分接触。温度和氢氧化钠浓度对硫酰氟处理影响研究表明，20、25、30 °C 硫酰氟处理的半衰期分别 592.5、404.2、323.5 min，随着温度的升高，硫酰氟的半衰期缩短。氢氧化钠溶液的浓度选择为 0.25 mol/L，而实际处理过程中，需要根据使用环境温度等条件，确定处理的时间。

### 参考文献：

- [1] LIANG X J, FEI Y R, XIE Q L, et al. Sulfuryl fluoride absorption from fumigation exhaust gas by biobased solvents: Thermodynamic and quantum chemical analysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 50(18): 5018-5029.
- [2] MENDRALA A L, MARKHAM D A, EISENBRANDT D L. Rapid uptake, metabolism, and elimination of inhaled sulfuryl fluoride fumigant by rats[J]. *Toxicological Sciences*, 2005, 86(2): 239-247.
- [3] NIE Y, LIANG X J, LU M Z, et al. Mass transfer and reaction kinetics of sulfuryl fluoride absorption with aqueous sodium hydroxide solutions[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2014, 15(7): 540-547.
- [4] SRIRANJINI V R, RAJENDRAN S. Sorption of sulfuryl fluoride by food commodities[J]. *Pest Management Science*, 2008, 64(8): 873-879.
- [5] 郑妙, 卢木波, 李文辉, 等. 硫酰氟对面粉生产车间关键部位快速杀虫效果研究[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(5): 119-121. ZHENG M, LU M B, LI W H, et al. Study on the quick insecticidal effect of sulfuryl fluoride on the key parts of Flour Production Workshop[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2020, 45(5): 119-121.
- [6] 廖如燕, 何凤侠, 余裕娟, 等. 硫酰氟熏蒸集装箱杀虫灭鼠效果及浓度分布的研究[J]. *中华卫生杀虫药械*, 2015, 21(3): 234-236. LIAO R Y, HE F X, YU Y J, et al. Distribution and effect of sulfuryl fluoride fumigation on killing insects and rats in containers[J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 2015, 21(3): 234-236.
- [7] CAO A C, GUO M X, YAN D D, et al. Evaluation of sulfuryl fluoride as a soil fumigant in China[J]. *Pest Management Science*, 2014, 70(2): 219-227.
- [8] MÜHLE J, HUANG J, WEISS R F, et al. Sulfuryl fluoride in the global atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D5): 1-13.
- [9] SULBAEK ANDERSEN M P, BLAKE D R, ROWLAND F S, et al. Atmospheric chemistry of sulfuryl fluoride: reaction with OH radicals, Cl atoms and O<sub>3</sub>, atmospheric lifetime, IR spectrum, and global warming potential[J]. *Environmental science & technology*, 2009, 43(4): 1067-1070.
- [10] HODNEBROG Ø, ETMINAN M, FUGLESTVEDT J S, et al. Global warming potentials and radiative efficiencies of halocarbons and related compounds[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(2): 300-378.
- [11] PAPADIMITRIOU V C, PORTMANN R W, FAHEY D W, et al. Experimental and theoretical study of the atmospheric chemistry and global warming potential of SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2008, 112(49): 12657-12666.
- [12] DILLON T J, HOROWITZ A, CROWLEY J N. The atmospheric chemistry of sulfuryl fluoride, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(119): 1547-1557.
- [13] 郑其锋, 聂勇, 顾大勇, 等. 填充式介质阻挡放电等离子体脱除硫酰氟的研究[J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1157-1162. ZHENG Q F, NIE Y, GU D Y, et al. Removal of SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> by the packed bed dielectric barrier discharge plasma[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1157-1162.
- [14] NIE Y, LIANG X J, JI J B, et al. Harmless treatment of sulfuryl fluoride by chemical absorption[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2015, 32(9): 789-795.
- [15] 曹国洲, 华正江, 朱晓艳, 等. 一种硫酰氟的消除方法: CN104324704A[P]. 2015.02.04. CAO G Z, HUA Z J, ZHU X Y, et al. A method for eliminating sulfuryl fluoride: CN104324704A[P]. 2015.02.04.
- [16] 张竹娇. 硫酰氟在生物基溶剂中的溶解特性研究[D]. 浙江工业大学, 2020. ZHANG Z J. Study on the dissolution characteristics of sulfuryl fluoride in bio-based solvents[D]. Zhejiang University of Technology, 2020. 

备注：本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。