

研究简报

微波无极光降解甲硫醚

张婷婷, 祁蕾, 于洋, 余江

(北京化工大学化工学院环境催化与分离过程研究组, 北京 100029)

摘要: 采用微波无极灯(MEDL)光解甲硫醚气体, 结果表明, 随着进气浓度的增加, 甲硫醚去除率相应降低, 但其绝对处理量却相应增加; 停留时间越长, 去除率越大, 停留时间为 10 s 时, 降解率高达 94.3%。微波无极光化学反应系统中主要产生直接光解、光诱导产生的激发态氧原子 $O(^1D)$ 和羟基自由基的氧化作用, 可将甲硫醚降解转化为硫酸盐、二氧化碳和水等无机化合物, 其中激发态氧原子 $O(^1D)$ 的含量是影响甲硫醚降解的关键因素。

关键词: 甲硫醚; 微波无极灯; 降解; 氧化; 激发态氧原子

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.11.052

中图分类号: X 511

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 11—4579—07

Photolysis of dimethyl sulfide by microwave electrodeless discharge lamp

ZHANG Tingting, QI Lei, YU Yang, YU Jiang

(Research Group of Environmental Catalysis and Separation Process, School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Photolysis of dimethyl sulfide (DMS) by microwave electrodeless discharge lamp (MEDL) was conducted in this study. Removal efficiency decreased with increasing inlet concentration of DMS, but could be increased to 94.3% while residence time of DMS in the photo-reactor was kept at 10 s. Direct photolysis and indirect photo-oxidation by excited states of atomic oxygen $O(^1D)$ and radical $\cdot OH$ were regarded as the contribution to DMS degradation in MEDL, especially, $O(^1D)$ played the key role of oxidative species in mineralizing DMS to inorganic chemicals, such as SO_4^{2-} , CO_2 and H_2O .

Key words: dimethyl sulfide; microwave electrodeless discharge lamp; degradation; oxidation; excited states of atomic oxygen

引 言

甲硫醚(dimethyl sulfide, DMS)是八大恶臭物质之一,对人体中枢神经和血液循环系统损害极大,广泛存在于污水处理厂、垃圾填埋场、造纸厂、畜禽养殖场等场所的生物厌氧发酵过程^[1-2]。当甲硫醚气体进入对流层后,易与臭氧、羟基等自由基发生

反应,生成 SO_2 和甲磺酸, SO_2 继续氧化生成 $NSS-SO_4^{2-}$ (非海盐硫酸盐),对雨水的天然酸性有重要贡献^[3]。

近年来,紫外光降解技术在处理气相污染物方面得到广泛关注^[4-5],该技术具有简便和广谱等特点。紫外光源是紫外光降解技术的核心之一,传统紫外光源主要采用激光(193~252 nm)、氙灯

2014-04-15收到初稿,2014-07-08收到修改稿。

联系人:余江。第一作者:张婷婷(1983—),女,讲师。

基金项目:国家自然科学基金项目(21076019);中央高校科研业务费(YS1401);首都蓝天行动培育专项(Z141100001014016)。

Received date: 2014-04-15.

Corresponding author: Prof. YU Jiang, yujiang@mail.buct.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21076019), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (YS1401) and the Capital Development Project for Blue Sky(Z141100001014016).

(190~400 nm)、黑光灯(330~400 nm)^[6]。然而激光仅是单波长辐射,且价格不菲。汞灯、高压氙灯等紫外线成分多集中于 254 nm,缺少高能量的真空紫外 185 nm 的辐射(低压汞灯发出的 185 nm 的真空紫外辐射一般仅占总辐射的 7%^[7])。微波无极灯是利用微波发生器产生的高频电磁波激发灯内填充气体产生紫外线,其中不仅含有传统紫外灯的 254 nm 的谱线,同时具有高辐射能量的 185 nm 波长的紫外光线,可直接光解污染物,处理污染物的效率高,已应用于紫外杀菌^[8]及水相有机污染物降解^[8-9]。尽管微波无极灯处理无机气体如 H_2S ^[6]、 CS_2 ^[10]以及有机气体乙酸丁酯^[11]取得了较好的实验效果,但仍需深入实验研究,尤其是微波无极光解机理方面的探究仍十分欠缺,亟需拓展并积累相应的科学数据。

本文选取典型恶臭气源的组分甲硫醚为实验对象,采用外置式微波无极反应装置,在系统考察不同工艺参数对甲硫醚光解效率的影响的基础上,通过对甲硫醚光解产物的分析,揭示微波无极光降解甲硫醚的机理,为优化微波无极光降解工艺、拓展大气污染控制新途径和新技术提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验药品

甲硫醚标准气(15 MPa, 2040 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 北京华能特种气体有限公司);纯氮(15 MPa, 北京华能特种气体有限公司);标准空气(15 MPa, 北京华能特种气体有限公司)。

1.2 微波无极灯

微波无极灯(JYM)由微波发生器和无极灯两部分组成,四川成都巨源光电公司生产。无极灯泡为内部填充一定气压的惰性气体 Ar 和 Hg 的石英管, $L=400 \text{ mm}$, $\phi_{\text{管}}=10 \text{ mm}$ 。

1.3 光反应器和实验装置

本实验所用装置由光降解反应器、微波无极紫外灯发生装置和配气系统 3 部分组成(图 1)。配气系统中, DMS 标准气体及载气(纯氮/空气)在进入光降解反应器前先混合均匀。使用鼓泡加湿器和温湿度计(台湾群特, CENTER 313)调节和检测模拟气体相对湿度。通过转子流量计调节气体流量以调控光解停留时间(4.5~45s)、初始浓度(10.2~265.2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)、相对湿度(RH, 0~80%)。开始光降解实验前,模拟气体进入反应器($\phi 50 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$)稳定 30 min,当进出口 DMS 浓度达到一致时

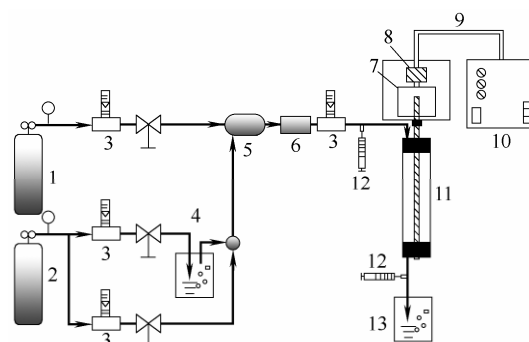


图 1 微波无极灯光降解 DMS 工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of microwave electrodeless discharge lamp for DMS photolysis

1—DMS; 2—air / N_2 ; 3—rotor flow meter; 4—humidifier; 5—mix chamber; 6—thermo-hygrometer; 7—resonant cavity; 8—magnetron; 9—electric cable; 10—high voltage power; 11—electrodeless lamp; 12—glass syringe; 13—alkaline trap

开启微波无极灯,光照 15 min 待反应体系稳定后分别测定进气和出气的甲硫醚浓度。实验过程中通过调节微波发生器的工作电压以改变实际输入功率(600~1100 W)。整个实验在室温(20±5)℃下进行。

1.4 分析方法

1.4.1 甲硫醚定量分析 使用微量硫分析仪(WDL-94, 西南研究院),分析条件为 TCP 柱,柱温 60℃,氮气 0.2 MPa、氢气 0.4 MPa、氧气 0.2 MPa;测量方式是“04”即单柱单次形态硫分析方式;周期为 5 min。

1.4.2 臭氧含量测定 参考国标 GB/T 15437—1995,采用靛蓝二磺酸钠(IDS)分光光度法(紫外-可见分光光度计, TU-1901, 北京普析通用仪器有限责任公司)。配制标准 IDS 的磷酸缓冲吸收液,分别装入 3 个串联的吸收瓶(100 ml·个⁻¹)。吸收一定体积的光解后气体,于 610 nm 处测定其吸光度^[4]。

1.4.3 光解产物中小分子酸的测定 将少量高纯水倒入反应器内,密封振荡 1 h,过滤。将滤液用聚丙烯无菌注射器注入离子色谱(Dionex ICS900, 美国戴安公司)中。色谱柱为 Ionpac AS-23 型分离柱,梯度淋洗液为 4.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 / 0.8 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 ,检测器为数字式电导检测器,流速 1.00 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$,进样量 10 μl 。

1.4.4 其他中间产物的测定 以异丙醇为吸收液吸收一定体积的光解气,过滤后取 1 μl ,注入 GC-MS 气质联用仪(Trace 1300GC-ISQ, 美国赛默飞世尔),

色谱柱为 TR-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm); 载气为氦气, 流速 1 ml·min⁻¹; 程序升温 (40℃起温, 保留 1 min, 5℃·min⁻¹ 升温至 120℃, 再以 15℃·min⁻¹ 升温至 220℃, 保留 5 min); 进样口 200℃, 检测口 220℃, 离子源 230℃, 单四级杆 150℃, 倍增电压 1800 V; 溶液延迟 3 min, 扫描范围 45~300 amu。化合物的鉴定通过比对仪器数据库中质谱结构来完成。

1.5 甲硫醚降解效果的评价指标

甲硫醚的光降解效果以去除效率 η 和绝对处理量 ARA 表示

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$ARA = C_0 \eta Q \quad (2)$$

2 实验结果与讨论

2.1 微波无极灯及其辐射光谱

微波无极灯所发射的紫外谱线主要由主峰波长为 253.7 nm (共振辐射 6²P₁-6²S₀) 和 185 nm [汞原子辐射 6s6p(¹P₁)-6s6p(¹S₀)] 组成, 其中 185 nm 占总辐射量的 21%, 为传统低压汞灯 (7%) 的 3 倍左右; 紫外输出功率最高达 1000 W·m⁻¹, 约为传统低压汞灯 (30 W·m⁻¹) 的 30 倍, 可见微波无极放电能显著提高汞原子的 185 nm 辐射效率和强度^[12]。

2.2 工艺参数对去除效率的影响

2.2.1 光强的影响 通过改变电源输入功率来调节无极灯的光照强度。图 2 为不同输入功率对 DMS 降解效率的影响。由图 2 可知, 随着输入功率的增加, DMS 的光降解效率从 600 W 的 40% 增加到 1100 W 的 76%。DMS 分子结构中具有 C—S、H—C、C—H 3 种化学键, 其键能分别为 339、348、414 kJ·mol⁻¹, 均低于波长为 185 nm 的紫外线能量 (647.23 kJ·mol⁻¹)^[13], 因此, 185 nm 紫外线能量足以断裂甲硫醚分子中的化学键发生降解反应, 说明紫外线是反应体系中诱导甲硫醚发生光化学反应的动力。而且, 185 nm 紫外线又称真空紫外, 其具有的高能量可以激发 O₂ 和 H₂O 分子产生臭氧 O₃^[14]、激发态氧原子 O(¹D)^[15]、羟基自由基·OH^[16] 等强氧化性的活性物质, 进一步氧化去除 DMS。光的照射强度越大, 提供的紫外光照辐射能量越多, 就会产生更多的强氧化性活性物质参与光降解反应, 所以光降解效率也随之提高。

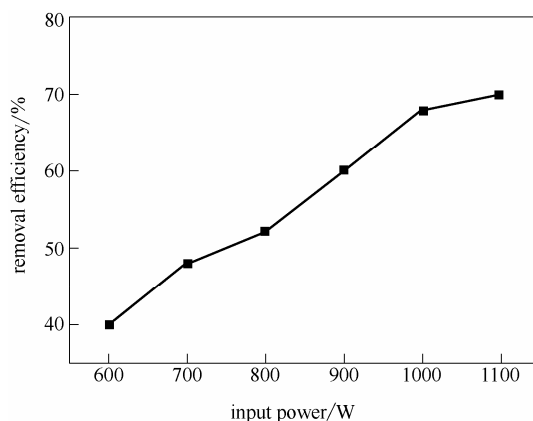


图 2 电源输入功率对去除率的影响

Fig. 2 Effect of input power on removal efficiency of DMS (DMS inlet concentration: 40.8 mg·m⁻³, RH: 20%, residence time: 4.5 s)

2.2.2 停留时间的变化 改变气体流量调节 DMS 在光反应器中的停留时间以考察停留时间对去除率的影响。如图 3 所示, 随着停留时间的增加, 去除率相应增加。当停留时间从 4.5 s 增加到 10 s, 相应的去除率从 65.8% 上升到 94.3%。增加停留时间即延长 DMS 气体在反应器中的停留时间, 增加了 DMS 分子吸收紫外线的量, 以及与反应体系中 O₃、O(¹D)、·OH 等强氧化活性物质的碰撞概率, 提高了 DMS 光解去除率。

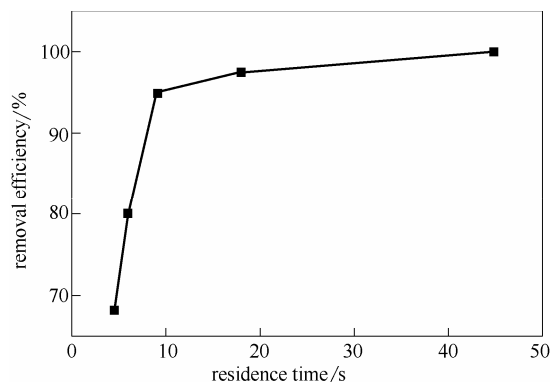


图 3 停留时间对 DMS 去除率的影响

Fig. 3 Effect of residence time on removal efficiency of DMS (DMS inlet concentration: 40.8 mg·m⁻³, RH: 20%, input power: 1000 W)

2.2.3 进气浓度的影响 图 4 考察了 DMS 进气浓度对 DMS 去除率和绝对去除量的影响。随着进气浓度增加, DMS 去除率呈现下降趋势。在停留时间固定为 4.5 s 时, DMS 进口浓度超过 40.8 mg·m⁻³ 时, 光解 DMS 去除效率已经降低到 70% 以下。但是, DMS 进口浓度从 10.2 mg·m⁻³ 增加到 265.2 mg·m⁻³, 其绝对去除量却从 0.6 μg·s⁻¹ 提高到 5.2

$\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光解条件相同时，体系中光子数及产生的活性物种含量基本一致。当 DMS 浓度较低时，DMS 分子与体系中光子及自由基等活性物种反应的概率较大，去除率较高；而当 DMS 初始浓度增大，DMS 分子数目增加，在有限的停留时间里，DMS 分子与体系中光子及自由基等活性物种相互作用概率下降，导致 DMS 去除率下降。但是初始浓度逐渐增大意味着光解反应体系中 DMS 分子数量逐渐增多，相应的绝对处理量也随之增加。因此，延长无极紫外灯所产生的光子和其他活性物质与 DMS 分子的作用时间可以获得最大的处理效率，即增加停留时间非常重要。

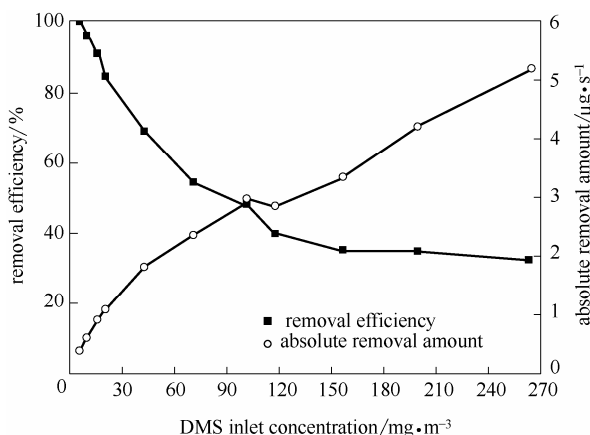


图 4 进气浓度对去除率和绝对去除量的影响

Fig. 4 Effect of inlet concentration on removal efficiency and absolute removal amount of DMS(RH: 20%, residence time: 4.5 s, input power: 1000 W)

2.3 反应过程及机理分析

以高纯氮气作为反应介质，当体系湿度由 0 增加到 80% 时，DMS 去除率从 0.5% 变为 4.2% (图 5)，表明干燥的高纯氮体系在无极紫外光照下几乎没有自由基等活性物种产生，这是因为氮气分子在小于 125 nm 的紫外线下才能发生解离。当体系有水分子存在湿度增加时， H_2O 分子被 185 nm 紫外线光解发生解离产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基 [式 (3)]，导致 DMS 分子的氧化降解，去除率随湿度增加而提高，但十分有限。



前人研究表明微波无极灯发出 185nm 波长的光子可以光解氧气分子产生基态氧原子 $\text{O}(\text{^3P})$ [式 (4)]， $\text{O}(\text{^3P})$ 又可与 O_2 分子快速结合从而生成 O_3 [式 (5)]，而臭氧在 185 nm 紫外线的作用下又快速被光解生成激发态氧原子 $\text{O}(\text{^1D})$ [式 (6)]，同时一部分 $\text{O}(\text{^1D})$ 与水分子反应，生成 $\cdot\text{OH}$ [式 (7)] [17-18]。

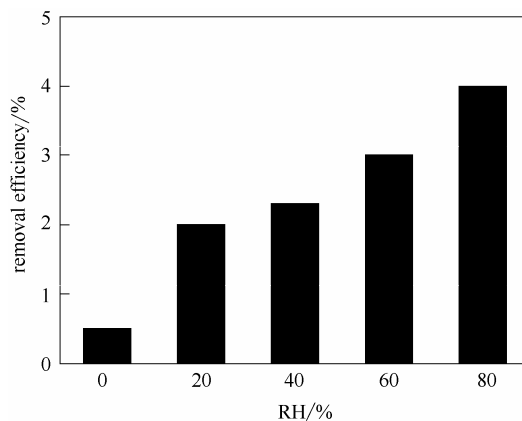
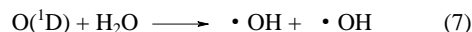
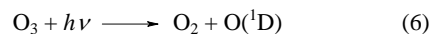
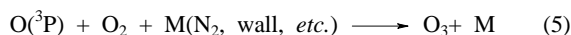
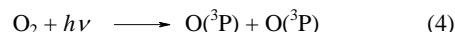


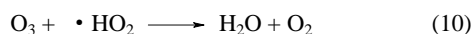
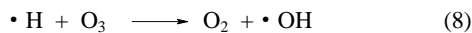
图 5 氮气气氛中相对湿度对 DMS 去除率的影响

Fig. 5 Effect of RH on removal efficiency of DMS in N_2 (DMS inlet concentration: $40.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, residence time: 4.5 s, input power: 1000 W)



实验过程中以靛蓝二磺酸钠 IDS 吸收法来测定以空气为介质的反应体系中产生的臭氧浓度 [4]。图 6 为空气经光照后的臭氧含量随湿度变化情况 [图 6(a)] 及其对 DMS 去除率 [图 6(b)] 的影响。从图 6(a) 可知，干燥纯空气体系中臭氧浓度可达 $34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随着体系湿度的增加，臭氧浓度有所降低，将 DMS 引入反应体系中经光解后排放的尾气中臭氧浓度先降低然后又增加，DMS 的去除率却随湿度的增加持续下降 [图 6(b)]。

Jeong 等 [16] 研究发现过量水分子具有抑制紫外线产生臭氧的作用，不仅紫外线光解水分子所产生的 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{H}$ [式 (3)] 与 O_3 反应生成 O_2 和 H_2O [式 (8)]。从式 (4) ~ 式 (7) 知体系中产生的激发态 $\text{O}(\text{^1D})$ 与水分子反应将转化为羟基自由基，其进一步又与 O_3 反应生成水和氧气 [式 (9) ~ 式 (10)] [19] 而削弱光解效率。



已有报道给出 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}(\text{^1D})$ 原子、 O_3 各自与 DMS 的反应速率常数分别为 6.3×10^{-12} 、 50×10^{-12} 以及 $1 \times 10^{-30} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，显然 $\text{O}(\text{^1D})$ 原子是反应体系中能引发 DMS 氧化的反应活性最高的物种，而 O_3 对甲硫醚的作用效果最差 [17]。因此，虽然湿度增大可使 $\cdot\text{OH}$ 的含量增大，但是减少了 $\text{O}(\text{^1D})$ 原子的生成量，因而光解去除率呈一定下降

趋势。

表 1 是不同反应介质中 DMS 光解分析结果，

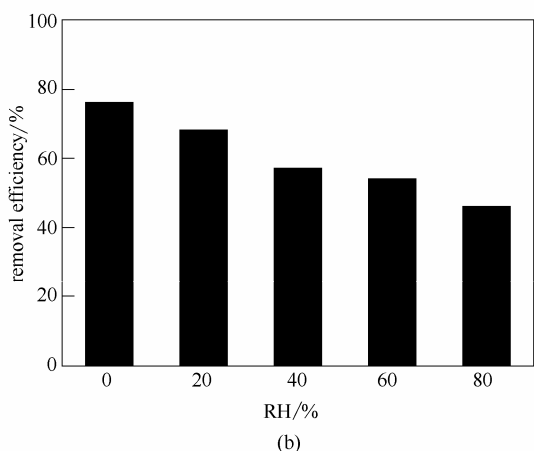
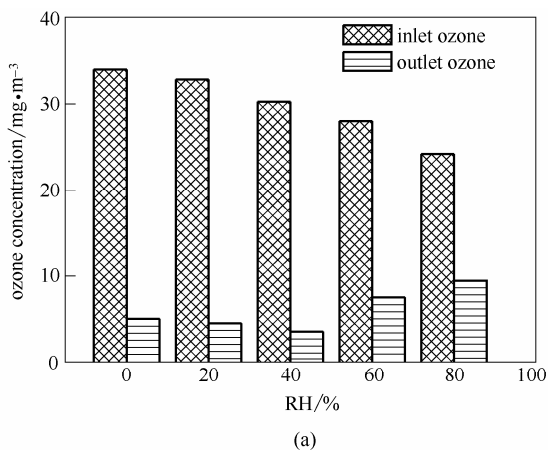


图 6 空气气氛中相对湿度对臭氧产量及 DMS 去除率的影响

Fig. 6 Effect of RH on ozone-generation (a) and removal efficiency of DMS (b) in N₂ (DMS inlet concentration: 40.8 mg · m⁻³, residence time: 4.5 s, input power: 1000 W)

采用干燥空气作为反应介质，此时主要发生光解和 O(¹D)氧化作用，其去除率为 76%，远高于干燥氮气介质中 0.5% 的去除率，说明 O(¹D)诱导氧化作用大大优于直接光解；相对湿度为 20% N₂ 气氛中光解与 ·OH 氧化作用的去除率也仅有 2%，而相对湿度为 20% 的空气体系中同时发生光解、O(¹D)和 ·OH 氧化，DMS 的去除率并没有超过干燥空气中由光解与 O(¹D)氧化共同作用的 76%，却降至 68%，说明增加湿度会消耗部分 O(¹D)，降低了 O(¹D)的诱导氧化在 DMS 的去除过程中的主导作用。

表 1 不同反应介质中 DMS 光解分析
Table 1 DMS photodegradation in different reaction media

Reaction media	Reaction mechanism	Removal efficiency, η / %
N ₂ , RH 0%	①	0.5
N ₂ , RH 20%	①+②	2
air, RH 0%	①+③	76
air, RH 20%	①+②+③	68

Note: ①—direct photolysis; ②—·OH oxidation; ③—O(¹D) oxidation.

2.4 光解中间产物分析

前文述及，空气气氛下微波无极光降解体系中主要存在 3 种氧化机制：直接光解、O(¹D)氧化和 ·OH 氧化，因此甲硫醚的光降解产物和光解途径十分复杂。表 2 列出了甲硫醚光解中间产物。

由表 2 可推测 DMS 的光降解可能途径如图 7 所示。一方面，DMS 分子与 O(¹D)或 ·OH 自由基反应发生硫键的氧化，生成二甲亚砷(DMSO)并进一步氧化生成二甲基砷(DMSO₂)、甲基亚磺酸(MSIA)、甲磺酸(MSA)，最终被氧化为硫酸；另一

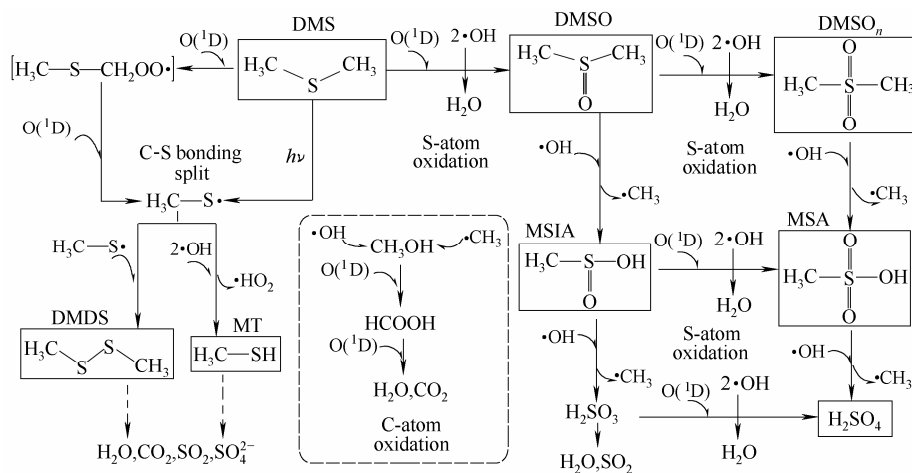


图 7 甲硫醚光降解可能的反应途径

Fig. 7 Proposed reaction pathways for DMS photodegradation

表 2 甲硫醚光降解产物
Table 2 Overview of reaction products of DMS photodegradation

Formula	Reaction product	Analytical method	Reference
gas phase			
CH ₄ O	methyl alcohol	GC-FID	[20]
CH ₃ SH	methanethoil (MT)	GC-MS	[21]
(CH ₃) ₂ S ₂	dimethyl disulfide (DMDS)	GC-MS	this work
(CH ₃) ₂ SO	dimethyl sulfoxide (DMSO)	GC-MS	[22]
(CH ₃) ₂ SO ₂	dimethyl sulfone (DMSO ₂)	GC-MS	[22]
SO ₂	sulfur dioxide	WDL-94	this work
CO ₂	carbon dioxide	GC-TCD	
surface			
(CH ₃)SOOH	methane sulphinic acid (MSIA)	IC-CD	[23]
(CH ₃)S(O) ₂ OH	methane sulfonic acid (MSA)	IC-CD	this work
CH ₂ O ₂	formic acid	IC-CD	this work
SO ₄ ²⁻	sulfate	IC-CD	this work

方面, O(¹D)与 DMS 分子上的甲基发生 H 摘除反应, 形成自由基 H₃C—S—CH₂OO·, 之后活性基团攻击 C—S 键, 使其断裂, 生成 CH₃S·; 或是 185 nm 紫外线直接作用甲硫醚, C—S 键断裂生成 CH₃S·。当然, 185 nm 紫外线直接作用于 DMS 也可以导致 C—S 键断裂生成 CH₃S·。CH₃S·之间结合生成二甲基二硫 (DMDS), 或与激发态的氢原子结合生成甲硫醚 (MT), 最终氧化产物为 H₂O、CO₂、SO₂、SO₄²⁻。而反应中释放的甲基和羟基自由基或离子会生成甲酸^[21], 并彻底矿化为 H₂O、CO₂。

3 结 论

以微波无极灯为紫外光源构建外置式微波无极光氧化反应装置, 在甲硫醚进口浓度为 40.8 mg·m⁻³, 相对湿度 20%、微波输入功率 1000 W 和停留时间 10 s 情况下, 甲硫醚的去除率可达到 94.3%; 紫外线直接光解、紫外线光解水分子产生的羟基自由基氧化和紫外线光解氧气产生的 O(¹D)诱导氧化是微波无极光化学降解甲硫醚的主要因素, 其中 O(¹D)诱导氧化占主导作用; 甲硫醚光降解过程十分复杂, 生成多种中间产物, 最终可彻底矿化为无污染的二氧化碳、硫酸根、水等无机物。

符 号 说 明

ARA ——绝对处理量, μg·s⁻¹

C₀, C ——分别为 DMS 进口、反应平衡后出口的浓度, mg·m⁻³

Q ——体积流速, m³·s⁻¹

η ——去除效率, %

References

- [1] Luvsanjamba M, Sercu B, Peteghem J V, Langenhove H V. Long-term operation of a thermophilic biotrickling filter for removal of dimethyl sulfide [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, **142**: 248-255
- [2] Kim Khyun, Choi Y J, Jeon E C, Sunwoo Y. Characterization of malodorous sulfur compounds in landfill gas [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 1103-1112
- [3] Wang Haitao(汪海涛), Zhu Hongxia(朱红霞), Zeng Ming(曾鸣), Mou Yujing(牟玉静). Rate constants for the reactions of ozone with dimethyl sulfide and ethene [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2007, **27**(5):775-778
- [4] Zhang Lili(张丽丽), Cheng Zhuowei(成卓伟), Wei Yingying(魏莹莹), Jiang Yifeng(蒋轶锋), Chen Jianmeng(陈建孟). Removal characteristics and intermediates analysis of α-pinene photodegradation by vacuum ultraviolet [J]. *CIESC Journal(化工学报)*, 2010, **61**(10): 2679-2687
- [5] Yang Liping(杨莉萍), Liu Zhenyan(刘震炎), Shi Jianwei(施建伟), Shangguan Wenfeng(上官文峰), Hu Hai(胡海). Experiment research on degradation of indoor formaldehyde by vacuum ultraviolet-photocatalysis [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology(化学反应工程与工艺)*, 2006, **22**(3): 246-250
- [6] Xia L Y, Gu D H, Tan J, Dong W B, Hou H Q. Photolysis of low concentration H₂S under UV/VUV irradiation emitted from microwave discharge electrodeless lamps [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**: 1774-1780
- [7] Zhang J Y, Boyd I W. Multi-wavelength excimer ultraviolet sources from a mixture of krypton and iodine in a dielectric barrier discharge [J]. *Applied Physics B*, 2000, **71**:177-179
- [8] Lou Chaogang(楼朝刚), Xia Dongsheng(夏东升), Zhao Fan(赵帆), Lü Jiliang(吕继良), Zeng Qingfu(曾庆福). Inactivation of microbe in running water using microwave electrodeless ultraviolet light [J]. *Environmental Engineering(环境工程)*, 2008, **26**(3): 18-20
- [9] Zhang Dan(张丹), Guo Weinan(郭伟楠), Yu Jiang(余江). New photocatalytic reactor for treatment of organic wastewater[J]. *CIESC Journal(化工学报)*, 2011, **62**(4):1077-1083
- [10] Shao Chunlei(邵春雷), Xia Lanyan(夏兰艳), Gu Dinghong(顾丁红), Zhang Renxi(张仁熙), Hou Huiqi(侯惠奇). Photolysis of simulating CS₂ malodorous gas using microwave electrodeless lamps [J]. *Environmental Science(环境科学)*, 2007, **28**(7): 1627-1631
- [11] Zhao Y, Chen Q, Hou H, He J. Photolysis of gaseous butyl acetate using built-in microwave discharge electrodeless lamps [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**: 430-435
- [12] Ai Zhihui(艾智慧), Jiang Junqing(姜军清), Yang Peng(杨鹏), Zhou Tao(周涛), Lu Xiaohua(陆晓华). Microwave assisted UV electrodeless discharge lamp photochemical degradation of 4-chlorophenol in aquatic solutions [J]. *Environmental Science(环境科学)*, 2004, **25**(4): 100-104
- [13] Wang Jianfeng(汪剑锋). Study on photolysis of hydrogen sulfide from malodorous gas using electrodeless UV lamp[D]. Harbin:

- Harbin Institute of Technology, 2010
- [14] Feiyan C, Pehkonen S O, Ray M B. Kinetics and mechanisms of UV-photodegradation of chlorinated organics in the gas phase [J]. *Water Research*, 2002, **36**: 4203-4214
- [15] Qiao L P, Chen J M, Yang X. Potential particulate pollution derived from UV-induced degradation of odorous dimethyl sulfide [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23** (1): 51-59
- [16] Jeong J, Sekiguchi K, Lee W, Sakamoto K. Photodegradation of gaseous volatile organic compounds (VOCs) using TiO₂ photo irradiated by an ozone-producing UV lamp: decomposition characteristics, identification of by-products and water-soluble organic intermediates [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2005, **169**: 279-287
- [17] Warneck P. Chemistry of the Natural Atmosphere[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2000
- [18] Obee T N, Brown R T. TiO₂ photocatalysis for indoor air applications: effects of humidity and trace contaminant levels on the oxidation rates of formaldehyde, toluene, and 1,3-butadiene [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(5): 1223-1231
- [19] Wang J H, Ray M B. Application of ultraviolet photooxidation to remove organic pollutants in the gas phase [J]. *Separation and Purification Technology*, 2000, **19**(1/2): 11-20
- [20] Ian B, Jens H, Nikos M. Dimethyl sulfide and dimethyl sulfoxide and their oxidation in the atmosphere [J]. *Chemical Reviews*, 2006, **106**(3): 940-975
- [21] Wang Z M, Liu J, Dai Y C, Dong W Y, Zhang S C, Chen J M. Dimethyl sulfide photocatalytic degradation in a light-emitting-diode continuous reactor: kinetic and mechanistic study [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, **50**: 7977-7984
- [22] Venu G D, Endalkachew S. Catalytic oxidation of dimethyl sulfide with ozone: effects of promoter and physico-chemical properties of metal oxide catalysts [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2008, **348**: 86-93
- [23] Endalkachew S D, Venu G D. Environmental vapor phase oxidation of dimethyl sulfide with ozone over V₂O₅/TiO₂ catalyst [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, **84**: 408-419