

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023112201

CSTR:32061.14.hjhx.2023112201

赵跃, 朱珊, 马凤翔, 等. 电化学条件下三苯基膦对温室气体六氟化硫的降解反应[J]. 环境化学, 2025, 44(4): 1417-1423.

ZHAO Yue, ZHU Shan, MA Fengxiang, et al. The degradation of greenhouse gas sulfur hexafluoride by triphenylphosphine under electrochemical conditions[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (4): 1417-1423.

## 电化学条件下三苯基膦对温室气体六氟化硫的降解反应<sup>\*</sup>

赵 跃<sup>1</sup> 朱 珊<sup>1</sup> 马凤翔<sup>1</sup> 朱 峰<sup>1</sup> 曹 骏<sup>1</sup> 杭 忱<sup>1</sup>  
张丽娇<sup>2</sup> 陈一锋<sup>2</sup> 谢兰贵<sup>2</sup> \*\*

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥, 230601; 2. 南京师范大学化学与材料科学学院, 南京, 210023)

**摘 要** 六氟化硫( $\text{SF}_6$ )是一种优秀的绝缘气体, 在电力行业中使用广泛, 但同时也是一种温室气体, 且在大气层中非常稳定, 几乎无法自然降解. 目前已开发工业降解  $\text{SF}_6$  的方式, 通常需要在高温高压下进行, 成本较高, 且降解产物常含有有毒和腐蚀性气体. 本文发现在常温常压下, 利用电化学条件, 可以使三苯基膦与六氟化硫气体以较高的转化率进行反应, 实现其高效降解. 通过对反应体系的研究和产物的分离, 确定了其降解终产物为有机合成常用的基本原料三苯基氧化磷和三苯基膦硫.

**关键词** 六氟化硫, 电化学, 降解.

**中图分类号** X-1; O6 **文献标识码** A

## The degradation of greenhouse gas sulfur hexafluoride by triphenylphosphine under electrochemical conditions

ZHAO Yue<sup>1</sup> ZHU Shan<sup>1</sup> MA Fengxiang<sup>1</sup> ZHU Feng<sup>1</sup> CAO Jun<sup>1</sup> HANG Chen<sup>1</sup>  
ZHANG Lijiao<sup>2</sup> CHEN Yifeng<sup>2</sup> XIE Langui<sup>2</sup> \*\*

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei, 230601, China; 2. School of Chemistry and Materials Science, Nanjing Normal University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract** Sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) is one of the greenhouse gases, and is highly stable, almost impossible to be degraded naturally. Developed processes for the degradation of  $\text{SF}_6$  generally require extremely high temperature and pressure, which result in high cost, and the products of degradation contain toxic and corrosive gases. This investigation shows that utilizing electrochemical conditions,  $\text{SF}_6$  could react with triphenylphosphine ( $\text{Ph}_3\text{P}$ ) efficiently under atmospheric pressure and ambient temperature, thus achieving its degradation. By detailed studies on the electrochemical reaction system and the isolated products, final products of the reaction have been confirmed as triphenylphosphine oxide ( $\text{Ph}_3\text{P}=\text{O}$ ) and triphenylphosphine sulfide ( $\text{PPh}_3=\text{S}$ ), which are raw materials in organic synthesis.

**Keywords** sulfur hexafluoride, electrochemistry, degradation.

六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体电负性强, 能够通过吸附自由电子降低气体分子的碰撞电离, 其绝缘强度是空气的 2.5 倍, 灭弧能力达到空气的 100 倍, 因而在电力行业中, 被广泛应用于高压断路器的灭弧介质.

2023 年 11 月 22 日收稿(Received: November 22, 2023).

<sup>\*</sup> 国家电网有限公司总部管理科技项目-电网温室气体( $\text{SF}_6$ )资源化利用技术研究(5200-202320132A-1-1-ZN)资助.

**Supported by** Project of State Grid for the Technology of Utilization of Greenhouse Gas  $\text{SF}_6$  (5200-202320132A-1-1-ZN).

<sup>\*\*</sup> 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: xielg@njnu.edu.cn

同时,  $\text{SF}_6$  分子呈正八面体构型, 且硫—氟键键能高, 是一种性质稳定、难以自然降解的温室气体<sup>[1]</sup>, 其全球升温潜能值(Global Warming Potential, GWP)高达 24300<sup>[2]</sup>, 在大气中的寿命可达 3200 年<sup>[3]</sup>, 泄漏到大气中的 1 kg  $\text{SF}_6$  相当于约 24.3 t  $\text{CO}_2$ . 全球大气中  $\text{SF}_6$  正在不断累积, 其浓度已经从 1994 年的  $3.67 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  上升到 2020 年的  $10.5 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而且这个数值还在不停地上升<sup>[2,4]</sup>. 相关调查研究表明, 电力行业是  $\text{SF}_6$  气体的主要使用主体和主要排放源. 世界上许多国家和地区已经深刻认识到  $\text{SF}_6$  温室效应问题的严重性, 并提出了控制  $\text{SF}_6$  产生的当量碳排放量的要求<sup>[5-8]</sup>. 自 2011 年以来,  $\text{SF}_6$  的允许排放限值已经被限制为气体绝缘设备容量的 10%, 并且该限制值每年减少 1%<sup>[4]</sup>. 此外, 许多政府已经开始对  $\text{SF}_6$  征收附加税, 以敦促企业减少排放<sup>[9]</sup>. 因此, 加强  $\text{SF}_6$  废气处理, 减少  $\text{SF}_6$  气体排放, 对于世界各国实现温室气体减排目标具有重要意义. 随着绿色环保的可持续发展理念的逐渐深入,  $\text{SF}_6$  气体的安全减排已迫在眉睫<sup>[10]</sup>. 面对这一问题, 科学家们展开了对  $\text{SF}_6$  气体减排的相关研究.

其中, 降解转化技术的提出为  $\text{SF}_6$  废气的无害化处理提供了可行的思路. 目前, 降解  $\text{SF}_6$  的方法有气体回收循环利用法、吸附法、热解法、光降解法、催化降解法、等离子体法<sup>[2,11-18]</sup>, 大多数方法在实际应用过程中都具有一定的限制, 如气体回收循环利用法, 一般使用气体回收装置将设备中的  $\text{SF}_6$  气体抽取并压缩至储气罐中密封保存. 但是一套回收的设备大约需要 50 万人民币<sup>[19]</sup>, 价格高昂, 且通过回收装置回收的  $\text{SF}_6$  气体暂不能直接使用, 需要进行一系列的净化处理后方可再利用; 吸附法通常利用柱撑粘土、硅质岩、沸石、活性炭或碳纳米管等比表面积较大的材料来吸附  $\text{SF}_6$  气体, 但只能作用于小量  $\text{SF}_6$  气体, 对高浓度、大量的  $\text{SF}_6$  无计可施; 热解法需要极高的温度,  $\text{SF}_6$  在 1100 °C 以上的高温条件才能发生热分解, 操作困难, 对设备的要求极高; 光降解法消耗  $\text{SF}_6$  的时间较长, 且目前已开发的方法主要是用于特定有机化合物的固定转化, 如德国的 Wagenknecht 课题组<sup>[6]</sup>报道了在 365 nm 紫外和 520 nm 绿光的共同作用下, 以 *N*-苯基吩噻嗪作为光催化剂和铜作为稳定自由基的催化剂, 实现了六氟化硫对烯烃的五氟磺酰化反应, 反应时长为 21 h, 产率较低(30%—40%), 且仅限于  $\alpha$ -甲基苯乙烯型底物, 应用有限. 美国的 Jaminson 等<sup>[13]</sup>以烯丙基醇为底物, 蓝色 LED 灯为光源, (4,4'-二叔丁基-2,2'-联吡啶)双[(2-吡啶基)苯基]铱(III)六氟磷酸盐配合物为光催化剂, 室温下反应 14 h 进行  $\text{SF}_6$  降解, 并实现了降解产物对烯丙醇的脱氧氟化; 催化降解法的催化剂需要在高温环境下才表现出较高的活性, 其过程能耗较大, 且只能对低浓度的  $\text{SF}_6$  作用, 如 Xu 等研究了电镀污泥在高温下(600—700 °C)对  $\text{SF}_6$  的降解作用, 其中  $\text{SF}_6$  的使用浓度为 29—174  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[20]</sup>; 等离子体法是目前降解  $\text{SF}_6$  较好的方法, 但是等离子体处理装置需要添加额外的设备, 这样显著增加了应用成本.

目前, 通过电化学方法降解  $\text{SF}_6$  的研究报道尚很少见<sup>[21-22]</sup>. 本文采用电化学方法, 在常温常压下, 以三苯基膦为反应物对  $\text{SF}_6$  进行降解, 试剂成本大大降低; 可在电化学条件下以短时间、高转化率对六氟化硫气体进行降解. 本方法不需要使用有毒的金属催化剂, 且降解后的产物为化工原料, 无有害气体产生, 具有环境友好的特点, 相比于其他降解方法, 优势明显. 本文对影响转化率的因素以及反应的可能机理进行了一系列研究.

## 1 实验部分(Experimental section)

### 1.1 材料

道冠实验室专用高纯锌棒, 直径 2.5 mm; 友邦高纯度无铅焊锡棒, 直径 1.2 mm; 8 mL 透明玻璃螺口顶空瓶, 磁力搅拌子.

### 1.2 电化学装置

伊莱科直流电流表指针式 85C1-A 直接式直流 20 mA, 优利德(UNI-T)数显高精度可直流稳压电源三通道 UTP3303 [0—32 V, 0—3 A].

### 1.3 分析测试仪器

使用 Bruker Avance 400 spectrometer 仪器(400 MHz)对  $^1\text{H}$  NMR、 $^{13}\text{C}$  NMR、 $^{31}\text{P}$  NMR 和  $^{19}\text{F}$  NMR 进行测定. 测试温度为室温, 溶剂为氘代氯仿( $\text{CDCl}_3$ ), 化学位移参考值:  $^1\text{H}$  NMR,  $\text{CHCl}_3$  为 7.26 ppm;  $^{13}\text{C}$  NMR,  $\text{CHCl}_3$  为 77.0 ppm. 使用 Agilent 8860-5977B 型气相色谱质谱联用仪(GC-MS)对相对分子质

量进行测定,测试温度为 300 ℃,溶剂为 HPLC 级甲醇.

1.4 实验方法

在装有磁力搅拌子的 8 mL 样品瓶中加入 131.1 mg (0.5 mmol)三苯基膦( $\text{PPh}_3$ )、329.3 mg (1.0 mmol)电解质四丁基四氟硼酸铵( $^n\text{Bu}_4\text{NBF}_4$ )和 5 mL 四氢呋喃(THF),混合后形成三苯基膦和四丁基四氟硼酸铵的溶液,盖上样品瓶盖,将长度约为 12 cm 的锡棒和锌棒通过瓶盖垫片处插入样品瓶.用充有  $\text{SF}_6$  气体的气球对溶液进行鼓泡,持续 5 min 后,以锡棒为正极,锌棒为负极接入电源,用电流表控制电流大小,在室温下进行电解反应,反应过程中用薄层色谱(TLC)进行监测.在紫外灯照射下(365 nm),可以观察到 TLC 色谱板上反应物三苯基膦的荧光点消失,并在极性较大的区域出现产物的荧光点.反应完成后关掉电源,向反应液中加入 5 mL 饱和碳酸钠溶液并继续搅拌水解 2 h,用 30 mL 饱和氯化铵溶液稀释反应混合液,乙酸乙酯(3 mL $\times$  15 mL)萃取,有机层经过无水  $\text{NaSO}_4$  干燥,过滤,减压除去溶剂后进行柱层析(硅胶柱,石油醚和乙酸乙酯混合液做洗脱剂)得到产物,分别用 0.5 mL 氘代氯仿溶解约 10 mg 产物,并转移至核磁管,设置核磁共振仪条件及参数,对样品进行扫描并采集数据.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 产物的表征

2.1.1 三苯基氧化膦

反应的分离产物由两部分组成,如图 1 所示,一部分产物是三苯基膦与  $\text{SF}_6$  中的氟元素结合的产物:二氟三苯基膦( $\text{Ph}_3\text{PF}_2$ ),易发生水解转化为稳定的三苯基氧化膦( $\text{PPh}_3=\text{O}$ )产物.

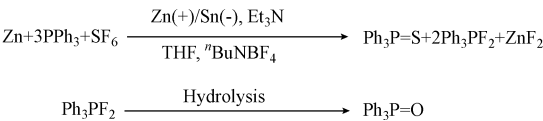
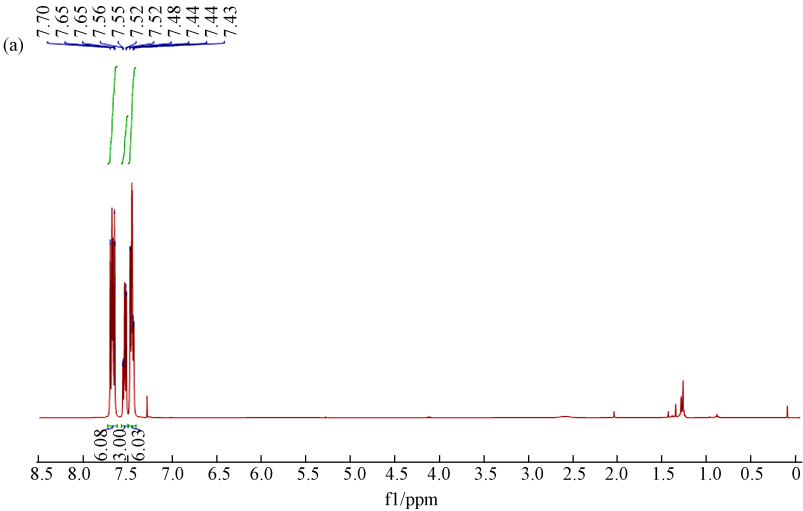


图 1 电化学降解  $\text{SF}_6$  及其产物  
Fig.1 Electrochemical degradation of  $\text{SF}_6$  and the products

图 2 分别是产物三苯基氧化磷的核磁共振氢、碳、磷谱.  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  7.70–7.60 (m, 6H), 7.54–7.48 (m, 3H), 7.47–7.40 (m, 6H) ppm.  $^{13}\text{C}$  NMR (101 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  132.9, 132.0 (d,  $J_{\text{C-P}}$  = 11.1 Hz), 131.8 (d,  $J_{\text{C-P}}$  = 4.0 Hz), 128.4 (d,  $J_{\text{C-P}}$  = 12.1 Hz) ppm.  $^{31}\text{P}$  NMR (162 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  29.2 ppm.

利用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)对三苯基氧化膦产物样品分析,检测到其相对分子量为 278.1  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,与理论值相符.



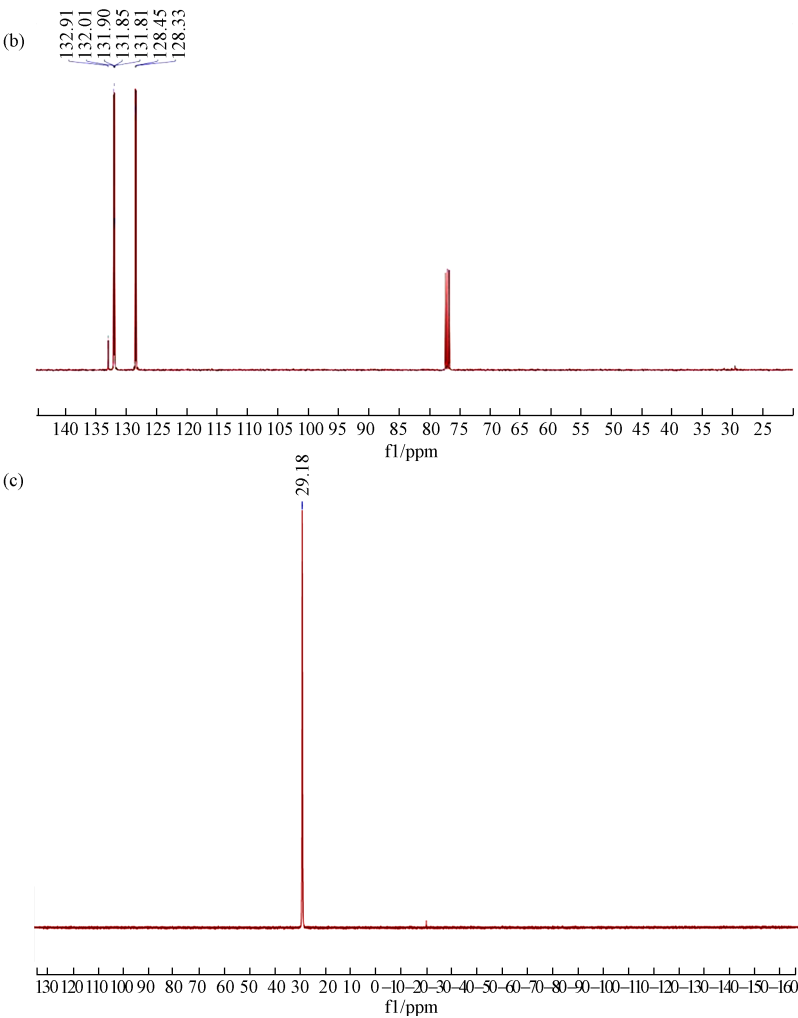
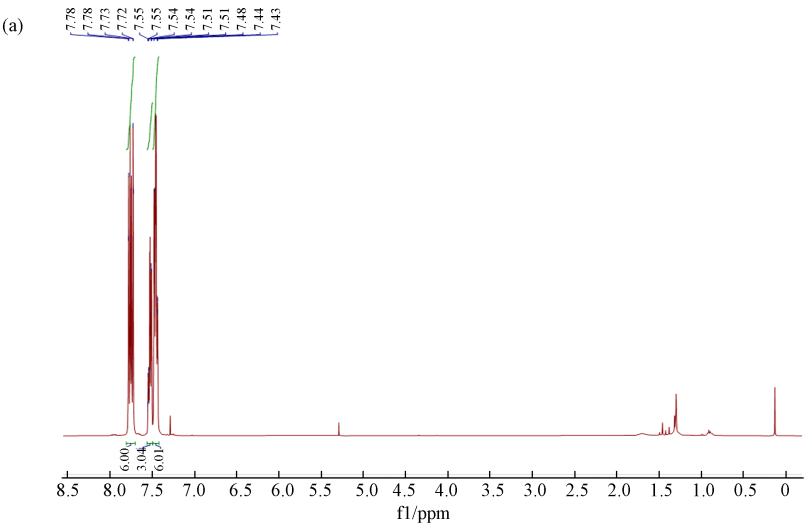


图 2 三苯基氧化磷的核磁共振氢谱(a)、碳谱(b)、磷谱(c)

Fig.2 <sup>1</sup>H NMR (a), <sup>13</sup>C NMR (b), <sup>31</sup>P NMR (c) of triphenylphosphine oxide

2.1.2 三苯基磷硫

反应的另一部分产物是三苯基磷与 SF<sub>6</sub> 中的硫元素结合的产物: 三苯基磷硫 (PPh<sub>3</sub>=S). 图 3 分别是产物三苯基磷硫的核磁共振氢、碳、磷谱. <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>) δ 7.78–7.67 (m, 6H), 7.55–7.46 (m, 3H), 7.46–7.38 (m, 6H) ppm. <sup>13</sup>C NMR (101 MHz, CDCl<sub>3</sub>) δ 132.7 (d, J<sub>C-P</sub> = 84.8 Hz), 132.1 (d, J<sub>C-P</sub> = 11.1 Hz), 131.4 (d, J<sub>C-P</sub> = 3.0 Hz), 128.4 (d, J<sub>C-P</sub> = 11.1 Hz) ppm. <sup>31</sup>P NMR (162 MHz, CDCl<sub>3</sub>) δ 43.3 ppm.



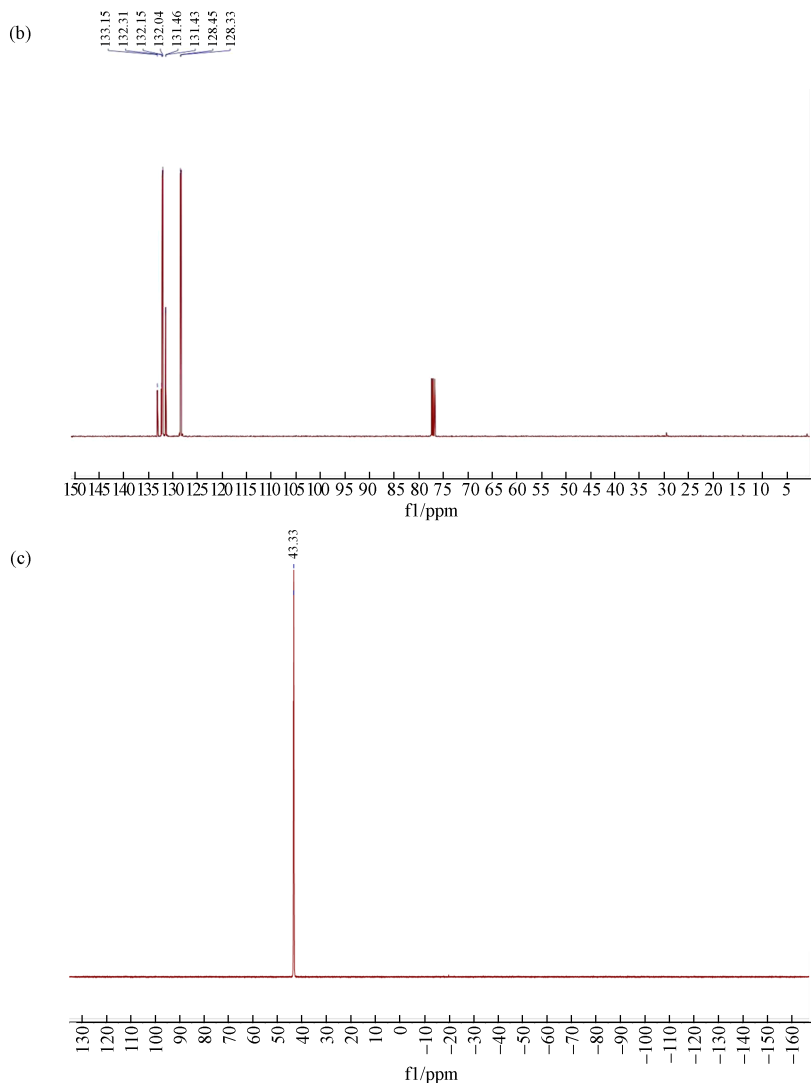


图 3 三苯基膦硫的核磁共振氢谱(a)、碳谱(b)、磷谱(c)

Fig.3 <sup>1</sup>H NMR (a), <sup>13</sup>C NMR (b), <sup>31</sup>P NMR (c) of triphenylphosphine sulfide

利用 GC-MS 对三苯基膦硫产物样品进行分析, 检测到其相对分子质量为 294.1 g·mol<sup>-1</sup>, 与理论值相符.

2.2 转化效率的优化

针对三苯基膦的转化率进行研究: 转化产物为三苯基膦硫和三苯基氧化膦(最终产物), 将二者产率相加得到三苯基膦的综合转化率. 实验结果表明, 电解质的种类和浓度、反应介质, 以及反应时间等对反应的效率都有着重要的影响. 优化过程如表 1 所示, 其他电解质如四丁基溴化铵("Bu<sub>4</sub>NBr)或四丁基氟化铵("Bu<sub>4</sub>NF)都不能使三苯基膦发生转化. 四氢呋喃(THF)是较为合适的溶剂促进该电化学反应; 电流为 10 mA 时, 反应可达到令人满意的效率.

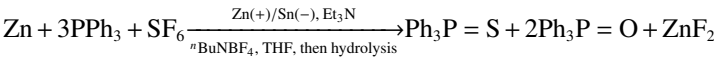


表 1 反应优化

| Table 1 Optimization of the conditions |                                   |               |              |                   |                                                           |                                                           |                         |
|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------|-------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 条目<br>Entry                            | 电解质<br>Electrolyte                | 溶剂<br>Solvent | 时间/h<br>Time | 电流/ mA<br>Current | P(S)Ph <sub>3</sub> 产率/ %<br>Yield of PPh <sub>3</sub> =S | P(O)Ph <sub>3</sub> 产率/ %<br>Yield of PPh <sub>3</sub> =O | 总产率/ %<br>Overall yield |
| 1                                      | "Bu <sub>4</sub> NBr              | THF           | 8            | 10                | 0                                                         | 0                                                         | 0                       |
| 2                                      | "Bu <sub>4</sub> NF               | THF           | 8            | 10                | 0                                                         | 0                                                         | 0                       |
| 3                                      | "Bu <sub>4</sub> NPF <sub>6</sub> | THF           | 8            | 10                | 23                                                        | 45                                                        | 68                      |

续表 1

| 条目<br>Entry | 电解质<br>Electrolyte                            | 溶剂<br>Solvent | 时间/h<br>Time | 电流/ mA<br>Current | P(S)Ph <sub>3</sub> 产率/ %<br>Yield of PPh <sub>3</sub> =S | P(O)Ph <sub>3</sub> 产率/ %<br>Yield of PPh <sub>3</sub> =O | 总产率/ %<br>Overall yield |
|-------------|-----------------------------------------------|---------------|--------------|-------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| 4           | <sup>n</sup> Bu <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> | THF           | 8            | 10                | 15                                                        | 66                                                        | 81                      |
| 5           | <sup>n</sup> Bu <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> | DCM           | 8            | 10                | 0                                                         | 0                                                         | 0                       |
| 6           | <sup>n</sup> Bu <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> | THF           | 10           | 5                 | 15                                                        | 45                                                        | 60                      |
| 7           | <sup>n</sup> Bu <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> | THF           | 4            | 15                | 18                                                        | 60                                                        | 78                      |
| 8           | <sup>n</sup> Bu <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> | THF           | 8            | 10                | 20                                                        | 49                                                        | 69                      |
| 9           | <sup>n</sup> Bu <sub>4</sub> NBF <sub>4</sub> | THF           | 8            | 10                | 15                                                        | 55                                                        | 70                      |

2.3 反应机理推测

根据以上实验结果,我们对反应机理进行推测.首先,六氟化硫与三苯基膦反应后,通过 TLC 监测发现反应物三苯基膦被完全消耗;在电化学反应过程中,溶液里出现了一些白色浑浊,且正极锌电极被消耗(最优条件下锌电极质量变化:反应前 2.5630 g,反应后 2.5520 g),推测该反应可能是牺牲阳极的电解反应.使用柱层析方法分离极性不同的两种产物,核磁谱图确认其结构分别为三苯基氧化膦和三苯基膦硫.结合已有关于六氟化硫在光、电化学条件下发生转化的可能机制<sup>[10,13,22]</sup>,对该反应的可能历程进行了推导:电极正极锌与六氟化硫发生反应,正极锌失去电子产生二价锌离子,六氟化硫得到电子转化为四氟化硫和氟负离子,二价锌离子与氟负离子结合生成氟化锌无机盐,随后四氟化硫与三苯基膦反应,并将其转化为三苯基膦硫和二氟三苯基膦(水解前反应液核磁显示其氟谱化学位移为<sup>19</sup>F NMR (376 MHz, CD<sub>3</sub>CN)  $\delta$  -38.10 (d,  $J$  = 655.6 Hz) ppm,与文献报道一致<sup>[11,21]</sup>),其中,二氟三苯基膦不稳定经水解转化为终产物三苯基氧化膦.

3 结论(Conclusion)

(1)综合核磁共振图谱、GC-MS 测试分析显示,三苯基膦硫和二氟三苯基膦为电化学反应的产物,其中二氟三苯基膦可经过水解转化为最终产物三苯基氧化膦.

(2)最优化条件下,三苯基膦发生转化,生成三苯基膦硫和三苯基氧化膦的综合效率可达 81%,实现了电化学条件下高浓度六氟化硫的有效降解.

(3)电解质的种类、电流大小、电解时长等都对转化率有十分重要的影响,在电解质为<sup>n</sup>Bu<sub>4</sub>NBF<sub>4</sub>、溶剂为 THF、电流为 10 mA,三苯基膦的转化率最高,六氟化硫的降解效果最好.

该方法能够在电化学条件下短时间、高转化率地对高浓度六氟化硫气体进行降解,从工业化角度来说,大大降低了废气处理的时间成本.同时,电化学方法可以通过进一步原位反应,将其降解中间产物转化为可分离的基础化工原料,相比于其他降解方法,具有明显的优势.

参考文献 (References)

[ 1 ] WEITKAMP R F, NEUMANN B, STAMMLER H G, et al. Non-coordinated and hydrogen bonded phenolate anions as one-electron reducing agents[J]. Chemistry-A European Journal, 2021, 27(21): 6465-6478.

[ 2 ] SHI S Y, LI Y, CUI Z L, et al. Recent advances in degradation of the most potent industrial greenhouse gas sulfur hexafluoride[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 470: 144166.

[ 3 ] SHELDON D J, CRIMMIN M R. Complete deconstruction of SF<sub>6</sub> by an aluminium(I) compound[J]. Chemical Communications, 2021, 57(58): 7096-7099.

[ 4 ] WIGLEY T M L, SMITH S J, PRATHER M J. Radiative forcing due to reactive gas emissions[J]. Journal of Climate, 2002, 15(18): 2690-2696.

[ 5 ] WEITKAMP R F, NEUMANN B, STAMMLER H G, et al. Non-coordinated phenolate anions and their application in SF<sub>6</sub> activation[J]. Chemistry-A European Journal, 2021, 27(21): 6460-6464.

[ 6 ] ROMBACH D, WAGENKNECHT H A. Photoredox catalytic  $\alpha$ -alkoxy-pentafluorosulfanylation of  $\alpha$ -methyl- and  $\alpha$ -phenylstyrene using SF<sub>6</sub>[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(1): 300-303.

[ 7 ] SATO Y, NISHIMURA M, KAWAGUCHI S I, et al. Reductive rearrangement of tetraphenyldiphosphine disulfide to trigger the

- bisthiophosphinylation of alkenes and alkynes[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2019, 25(27): 6797-6806.
- [ 8 ] MATSUMOTO K, HARUKI Y, SAWADA S, et al. Stabilization of  $\text{SF}_5^-$  with glyme-coordinated alkali metal cations[J]. *Inorganic Chemistry*, 2018, 57(23): 14882-14889.
- [ 9 ] HANOTEAU J, TALBOT D. Impacts of the Québec carbon emissions trading scheme on plant-level performance and employment[J]. *Carbon Management*, 2019, 10(3): 287-298.
- [10] KIM S, KHOMUTNYK Y, BANNYKH A, et al. Synthesis of glycosyl fluorides by photochemical fluorination with sulfur(VI) hexafluoride[J]. *Organic Letters*, 2021, 23(1): 190-194.
- [11] BUB F, MÜCK-LICHTENFELD C, MEHLMANN P, et al. Nucleophilic activation of sulfur hexafluoride: Metal-free, selective degradation by phosphines[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(18): 4951-4955.
- [12] FISCHBACH U, TRINCADO M, GRÜTZMACHER H. Oxidative formation of phosphinyl radicals from a trigonal pyramidal terminal phosphide Rh(i) complex, with an unusually long Rh-P bond[J]. *Dalton Transactions*, 2017, 46(11): 3443-3448.
- [13] McTEAGUE T A, JAMISON T F. Photoredox activation of  $\text{SF}_6$  for fluorination[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(48): 15072-15075.
- [14] RUEPING M, NIKOLAIENKO P, LEBEDEV Y, et al. Metal-free reduction of the greenhouse gas sulfur hexafluoride, formation of  $\text{SF}_5^-$  containing ion pairs and the application in fluorinations[J]. *Green Chemistry*, 2017, 19(11): 2571-2575.
- [15] YOGENDRA S, CHITNIS S S, HENNERSDORF F, et al. Condensation reactions of chlorophosphanes with chalcogenides[J]. *Inorganic Chemistry*, 2016, 55(4): 1854-1860.
- [16] ZÁMOSTNÁ L, BRAUN T. Catalytic degradation of sulfur hexafluoride by rhodium complexes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(36): 10652-10656.
- [17] 胡雄雄. 介质阻挡放电等离子体降解六氟化硫气体的实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
HU X X. Experimental study on degradation of sulfur hexafluoride gas by dielectric barrier discharge plasma[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).
- [18] 沈燕, 黄丽, 张仁熙, 等. 介质阻挡放电降解  $\text{SF}_6$  的研究 [J]. *环境化学*, 2007, 26(3): 275-279.  
SHEN Y, HUANG L, ZHANG R X, et al. Decomposition of  $\text{sf}_6$  by dielectric barriers discharge[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(3): 275-279 (in Chinese).
- [19] 李路, 王为民, 杨惠民, 等.  $\text{SF}_6$  的回收与再生 [J]. *有机氟工业*, 1997(3): 23-26.  
LI L, WANG W M, YANG H M, et al. Recovery and regeneration of  $\text{SF}_6$ [J]. *Organo-Fluorine Industry*, 1997(3): 23-26 (in Chinese).
- [20] ZHANG J, ZHOU J Z, LIU Q, et al. Efficient removal of sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) through reacting with recycled electroplating sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6493-6499.
- [21] ROTERING P, MÜCK-LICHTENFELD C, DIELMANN F. Solvent-free photochemical decomposition of sulfur hexafluoride by phosphines: Formation of difluorophosphoranes as versatile fluorination reagents[J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(20): 8054-8061.
- [22] KIM S, NAGORNY P. Electrochemical synthesis of glycosyl fluorides using sulfur(VI) hexafluoride as the fluorinating agent[J]. *Organic Letters*, 2022, 24(12): 2294-2298.