第 52 卷 第 6 期：2537-2546 高电压技术 Vol.52, No.6: 2537-2546
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250902

γ-Al_2O_3-硅胶双级填充式 DBD 降解 SF_6 实验研究

李亚龙[1]，谭辉宇[1]，傅明利[2]，乐杨晶[2]，张晓星[1]
（1. 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室，武汉 430068;
2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510663）

摘　要：采用介质阻挡放电等离子体手段处理 SF_6 废气被认为是一种可行的方式。然而，由于 SF_6 分子结构稳定，降解过程往往无法同时兼顾高降解率和良好的产物分布。为应对这一难题，该文搭建了双级填充式 DBD 降解 SF_6 实验平台，在第一级反应管填充 γ-Al_2O_3 催化剂，用以提高 SF_6 降解效率，在第二级反应管填充多孔硅胶催化剂，用以实现 SF_6 降解产物调控。实验结果显示：在 110 W 输入功率条件下，体积分数为 4%的 SF_6 降解率可达 85.86%；在降解产物方面，两级反应管中的 SF_6 降解产物种类没有变化，均为 SO_2、SO_2F_2、SOF_2 以及 SOF_4。其中，第一级反应管的降解产物以难以处理的 SO_2F_2 为主，而第二级反应管的降解产物以 SO_2 为主，通过第二级反应管成功实现了降解产物调控。该研究为 SF_6 废气降解提供了实验支撑，为工业化应用提供了研究方向。
关键词：填充式 DBD；SF_6；γ-Al_2O_3；硅胶；降解率；产物调控

Experimental Study on SF_6 Degradation Using a γ-Al_2O_3-Silica Gel Dual-stage Packed DBD System

LI Yalong[1], TAN Huiyu[1], FU Mingli[2], LE Yangjing[2], ZHANG Xiaoxing[1]
(1. Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology,Wuhan 430068, China;
2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract：Dielectric barrier discharge (DBD) plasma has been considered a feasible approach for treating SF_6 waste gas. Nevertheless, due to the high chemical stability of SF_6 molecules, it is often difficult to achieve both a high degradation rate and favorable product distribution during the decomposition process. To address this challenge, a dual-stage packed DBD experimental platform was constructed in this study for SF_6 degradation. The γ-Al_2O_3 catalyst was filled in the first-stage reaction tube to enhance the SF_6 degradation efficiency, while porous silica was packed in the second-stage reaction tube to regulate the distribution of decomposition products. Experimental results show that, under an input power of 110 W and with an SF_6 concentration of 4%, the overall degradation rate reaches 85.86%. As for the degradation products, both reaction stages produce the same types: SO_2, SO_2F_2, SOF_2, and SOF_4. However, the first-stage reaction tube primarily generates SO_2F_2, which is difficult to handle, while the second-stage reaction tube mainly yields SO_2, indicating that effective regulation of degradation products is achieved. This research provides an experimental support for the degradation of SF_6 waste gas and offers a direction for its industrial application.
Key words：packed-bed DBD; SF_6; γ-Al_2O_3; silica gel; degradation rate; product regulation

0　引言

六氟化硫(SF_6)作为一种性能优异的绝缘气体，被广泛应用于气体绝缘设备[1-3]。然而，SF_6 的温室效应潜在值(global warming potential, GWP)是二氧化碳(CO_2)的 23 500 倍，且大气寿命长达 3 200 年，其环境影响日益受到人们关注，因此被列入《京都议定书》规定的 6 种主要温室气体之一[4-5]。随着电力系统规模的扩大和电气设备数量的增加，SF_6 的使用量持续增长，因此，SF_6 废气减排已成为目前亟待解决的问题[6-8]。

研究表明介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)低温等离子体技术[9-11]在 SF_6 降解中具有较高的应用潜力，其能够快速破坏 SF_6 化学键，实现高效降解[12-13]。张晓星等人探究了 γ-Al_2O_3、玻

基金资助项目：特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心开放基金(NERCUT-NEEB-2023-KF-04)。
Project supported by National Engineering Research Center of UHV Technology and Novel Electrical Equipment Basis(NERCUT-NEEB-2023-KF-04).

璃珠等催化剂对DBD降解SF_6的影响，发现γ-Al_2O_3可以有效提高放电体系的等效电容，从而提高SF_6的降解效率，降解产物主要为SOF_2、SOF_4、SO_2以及SO_2F_2，并且随着放电间隙的增大，更倾向于生成难以被碱液吸收的SO_2F_2；而玻璃珠填充体系下发现，其可以促进丝状放电的产生，从而提高放电强度，进而使部分降解中间产物的含量增加[14-15]。可见填充催化剂对提高DBD降解SF_6降解率具有促进作用，然而上述研究在填充催化剂的条件下表现出的产物调控能力仍有所不足，降解产物中难以处理的SO_2F_2含量较高。针对DBD降解SF_6研究存在难以兼顾高降解率和产物定向调控的难题，党小庆以及姜楠等人利用多级式DBD降解挥发性有机物甲苯的新方式，发现相比于单级式反应器，多级式反应器在填充不同催化剂的情况下可进一步分解残余甲苯及其中间产物，同时促进臭氧分解，从而表现出优越的性能[16-17]。Hashim等人利用多级DBD对柴油排放中产生的高浓度NO_x气流进行处理，发现多级DBD模块成功去除了气流中80%以上的一氧化氮，处理效果显著[18]。若将其运用在SF_6降解领域可以实现对SF_6分子的进一步激发与裂解，生成多种中间产物，大幅提升SF_6降解效率，并可灵活调控放电参数以及优化实验条件，实现对难处理副产物的有效抑制。这使得多级式DBD在SF_6高效降解与产物调控方面展现出明显的优势。Lee等人使用多级DBD串联的方式对SF_6进行降解，串联DBD反应器中填充CaO的情况下不仅提高了SF_6降解率，也提高了CaF_2和$CaSO_4$的产物选择性[19]。张晓星等人通过外加H_2O对双级式DBD降解2%SF_6进行了探究，发现随着H_2O气体浓度的增大SF_6降解率呈现先增大后减小的趋势，且实现了SF_6的完全降解，同时产物中SO_2的选择性提高至75.17%[20]。可见通过级联DBD对产物进行定向调控具有很大潜力。与传统单级DBD降解SF_6相比，多级式DBD具有更高的降解效率以及良好的产物调控能力。

为此，本文搭建了双级填充式DBD降解SF_6实验平台，分别对降解效率高和产物调控能力强的两类催化剂进行筛选，第一级反应管的催化剂着重提高SF_6降解率，第二级反应管的催化剂着重提升产物定向调控能力。通过实验平台探究双级填充式DBD降解较高浓度SF_6产生的影响，并为SF_6废气工业化降解提供新的思路。

1 实验平台

双级填充式DBD降解SF_6实验平台如图1所示。在放电过程中由于纯SF_6气体很难发生放电，首先通过配气仪对SF_6气体进行稀释，获得所需浓度的SF_6混合气体，由等离子体电源驱动DBD反应器放电产生等离子体引发降解反应，降解后的气体产物经检测系统检测分析后，最终的尾气通过NaOH溶液吸收处理。

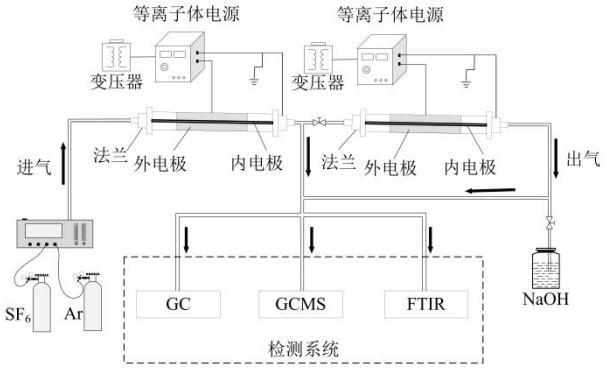


图1 实验平台

Fig.1 Experimental platform

本文实验采用CTP-2000K型交流电源，搭配调压器可实现0~30 kV的交流电压输出，频率的调节范围为1~100 kHz，输出功率为0~500 W。本文实验中使用的频率约为8.5~9.0 kHz，电源的输入功率控制在120 W以内。实验平台的配气系统主要为动态配气仪以及标准气体：动态配气仪为GC500型配气仪，其精度可达到0.2% F.S.(满量程误差)，最大可实现300:1的稀释比。

实验中使用的反应器采用的是双层石英介质同轴圆柱形结构，内电极为铜棒，外电极为缠绕在外层介质管外表面上的不锈钢网，所形成的放电区域长度为20 cm，放电体积约为52 cm^3。检测系统主要包括气相色谱仪(gas chromatograph，GC)、傅里叶红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer，FTIR)以及气相色谱质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometer，GC-MS)。

本文实验中使用的背景气体为Ar和SF_6初始体积分数为4%的流速固定为150 mL/min的混合气体。主要通过降解率(E_{DR})、能量效率(Y_E)以及降解产物浓度这3项数据来对比评估SF_6的降解效果：

降解率E_{DR}计算式为：

$$E_{DR}=\frac{C_{in}-C_{out}}{C_{in}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：C_{in} 和 C_{out} 分别为待降解气体降解前、后的体积分数。

能量效率 Y_E 的计算式为：

$$Y_E = \frac{E_{DR} C_{in} v_g \times 146 \times 3.6 \times 10^6}{22.4 pt} \tag{2}$$

式中：Y_E 为能量效率，g/kWh；C_{in} 为降解前 SF_6 浓度，mol/L；v_g 为气体进样时体积流量，L/h；146 为 SF_6 的摩尔质量；3.6×10^6 为单位换算因子；22.4 为标准摩尔体积；p 为放电功率，利用李萨如图形面积计算所得，W；t 为降解时间，s。

2 实验结果分析

2.1 双级式 DBD 催化剂筛选

为选择适当的催化剂作为第一级反应管和第二级反应管的填充材料，本实验首先探究了玻璃珠、多孔硅胶和 γ-Al_2O_3 3 种催化剂对第一级反应管降解较高浓度 SF_6 所产生的影响。不同催化剂填充情况下 SF_6 降解率随输入功率变化如图 2 所示，可以发现在较高 SF_6 浓度的情况下，玻璃珠、多孔硅胶以及 γ-Al_2O_3 对 SF_6 的降解率均随着输入功率的增大而增加，且 γ-Al_2O_3 的降解率显著优于玻璃珠和多孔硅胶。当输入功率达到 110 W 时，γ-Al_2O_3 对 4%SF_6 的降解率可达 53.2%。为满足双级式 DBD 降解 SF_6 实验中第一级反应管对 SF_6 高降解率的需求，所以选择 γ-Al_2O_3 作为第一级反应管的填充催化剂。

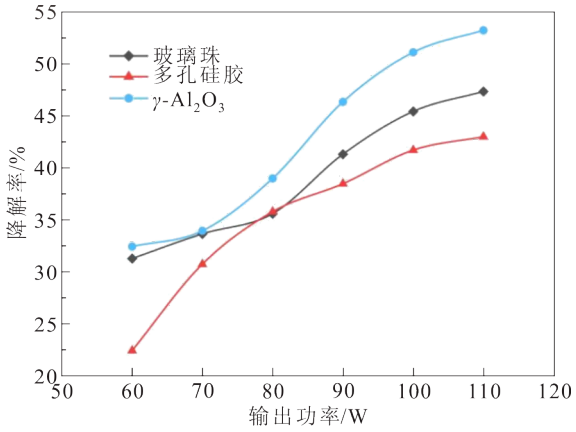


图 2 不同催化剂对 4%SF_6 降解率的影响

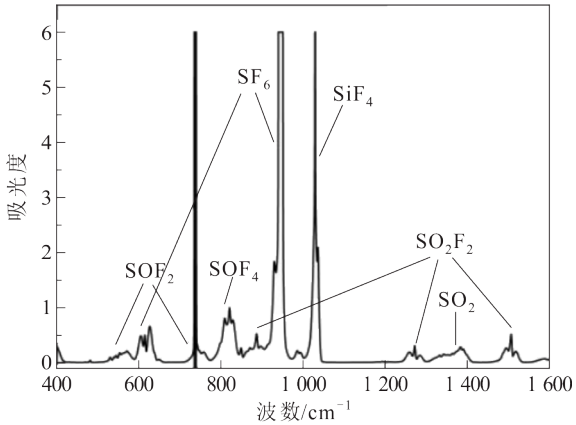
Fig.2 Effect of different catalysts on the degradation rate of 4% SF_6

在双级式 DBD 降解的过程中，应将第一级反应管的输入功率固定在理想参数下，从而实现第二级反应管只存在单一的实验变量，故对第一级反应管的最佳输入功率进行分析。在 SF_6 降解领域，能量效率作为评估 SF_6 降解能耗的重要指标，具有十分重要的意义[21-22]。γ-Al_2O_3 填充情况下，第一级反应管的能量效率随输入功率变化的情况如图 A1 所示。随着输入功率的增大，γ-Al_2O_3 填充的第一级反应管的能量效率在 16.4 g/kWh 至 13.73 g/kWh 之间波动，当输入功率从 60 W 增大到 80 W 时，能量效率从 16.4 g/kWh 减小至 13.73 g/kWh，而当输入功率增大至 100 W 时，能量效率增大到 15.27 g/kWh，当输入功率为 110 W 时，能量效率减小至 15.02 g/kWh。在较高输入功率情况下能量效率提高可能是因为输入功率的增大使得 γ-Al_2O_3 填充体系的放电更加均匀，从而提高了能量利用率，如图 A2 所示，从图片中可以看出，随着输入功率由 60 W 增大至 110 W，DBD 反应器的放电均匀性逐渐改善，表现为放电亮度更亮且分布更加均匀。但是过高的输入功率会使反应的发热效应加剧，使得更多的能量被用于反应器的发热过程。

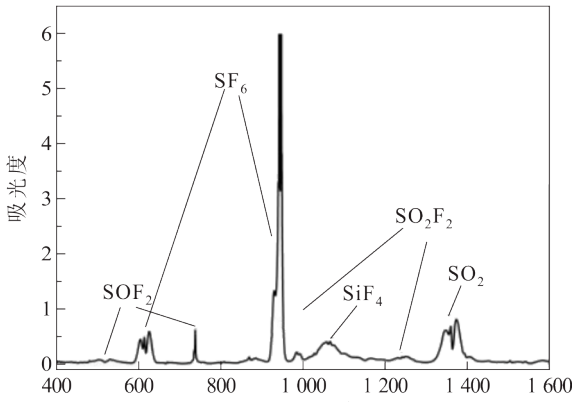
电源功率为 100 W 时，第一级反应管的能量效率比 110 W 时略高，电源功率从 90 W 增长到 100 W 阶段的 SF_6 降解率较 100 W 增长到 110 W 阶段的提升也更显著，且电源功率 100 W 时能耗更低，所以选择 100 W 输入功率为第一级反应管的固定功率。

为进一步分析玻璃珠、多孔硅胶以及 γ-Al_2O_3 3 种催化剂对 SF_6 降解过程的影响，通过 FTIR 对 3 种催化剂降解后的尾气进行了定性分析，结果如图 3 所示，可以发现 3 种催化剂存在时主要的含 S 降解产物类似，都为 SO_2F_2、SO_2、SOF_2 和 SOF_4。

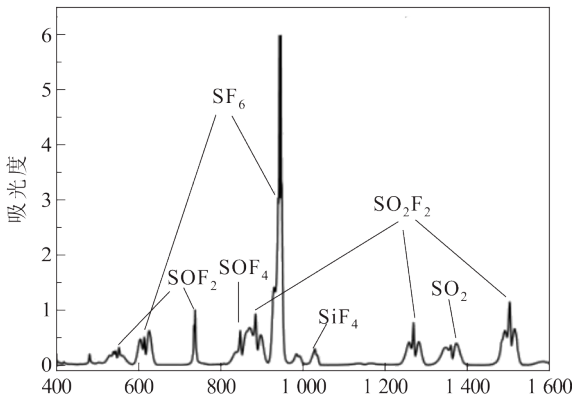
通过 GCMS 对 SO_2F_2、SO_2、SOF_2 和 SOF_4 4 种产物进行定量分析，如图 4 所示，可以发现玻璃珠的降解产物主要为 SOF_4，当输入功率为 110 W 时体积分数为 8 779.26×10^{-6}，而 γ-Al_2O_3 的主要降解产物为 SO_2F_2，最高体积分数可达 14 712.79×10^{-6}，但是在尾气处理过程中，这两种产物难以被碱液吸收处理。值得一提的是，多孔硅胶在降解过程中表现出良好的产物调控能力，对图 4(b)进行分析发现，多孔硅胶的降解产物主要以易于被碱液吸收的 SO_2 为主，随着输入功率从 60 W 增大至 110 W，SO_2 的体积分数从 5 681.24×10^{-6} 增大至 12 367.29×10^{-6}。为满足第二级反应管对 SF_6 降解产物进行调控的要求，故选择多孔硅胶为第二级反应管的填充催化剂。经上述研究，双级式 DBD 降解系统第一级反应管填充 γ-Al_2O_3 催化剂，第二级反应管填充多孔硅胶催化剂。



(a) 100 W 玻璃珠FTIR 图



(b) 100 W 多孔硅胶FTIR 图



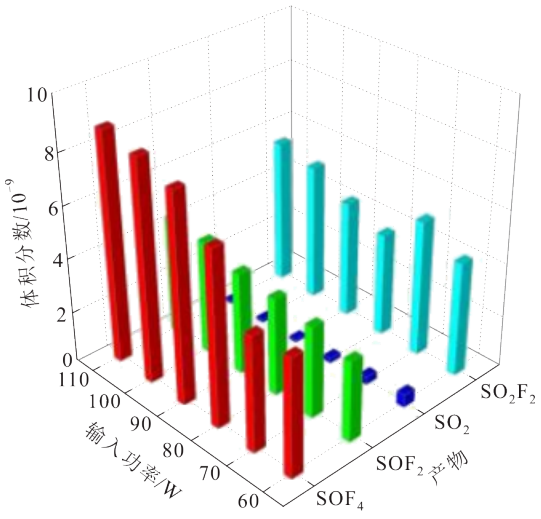
(c) 100 W γ-Al_2O_3FTIR 图

图 3　3 种催化剂 FTIR 图

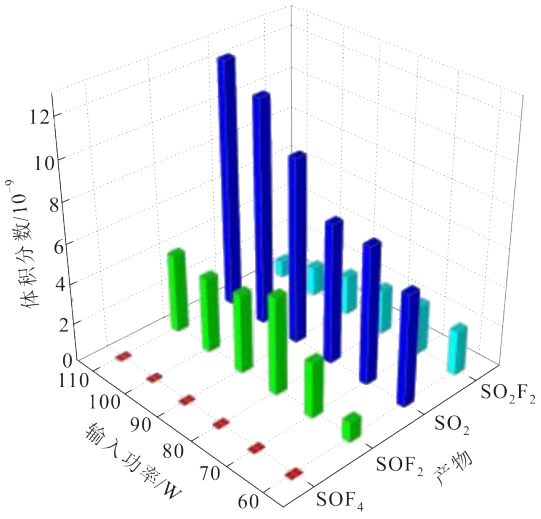
Fig.3　FTIR spectra of the three catalysts

2.2　电学参数分析

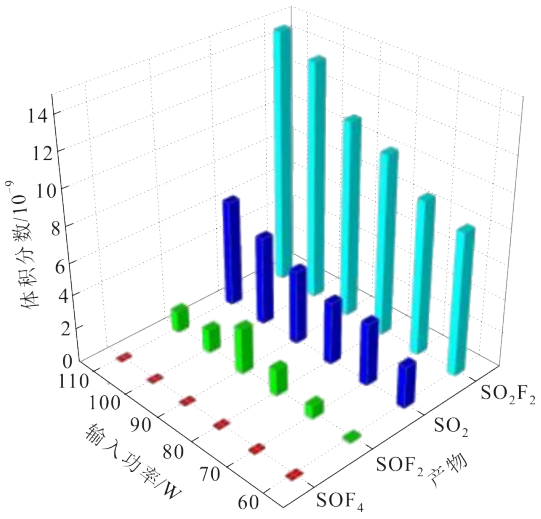
为了分析不同填充材料体系的放电情况，本文对比了双级填充式 DBD 放电体系的李萨如图形，如图 5 所示。其中 DA 与 BC 两条线段代表放电熄灭时，电源向电极间总电容充电，而 AB 与 CD 两条线段代表的则是放电过程。通过对李萨如图形中这 4 条线段的斜率进行计算可以求得总电容以及放电等效电容，其结果如表 1 所示。



(a) 玻璃珠



(b) 多孔硅胶



(c) γ-Al_2O_3

图 4　3 种催化剂产物浓度分布情况

Fig.4　Product concentration distribution of the three catalysts

可以发现，两种填充材料的加入使得放电图形变得更加接近椭圆形，表明放电过程更加稳定。对

第一级反应管和第二级反应管的充电总电容进行对比发现，与第二级反应管相比，第一级反应管的 DA 与 BC 两条边斜率更大，第一级反应管的总电容为 31.86 pF，而第二级反应管的总电容为 17.14 pF，这可能是因为 γ-Al_2O_3 的电介质性能优于多孔硅胶，因而具有更高的总电容；同时，第一级反应管的 AB 与 CD 两条边斜率也较大，表明其放电介质的等效电容也高于第二级反应管，其中第一级反应管的放电等效电容为 65.98 pF，而第二级反应管的放电等效电容为 50.79 pF，造成该现象的主要原因可能在于相比于多孔硅胶，γ-Al_2O_3 具有更高的比表面积和更优异的多孔特性，有利于放电通道形成及电荷积聚，从而提高放电区域的等效电容。

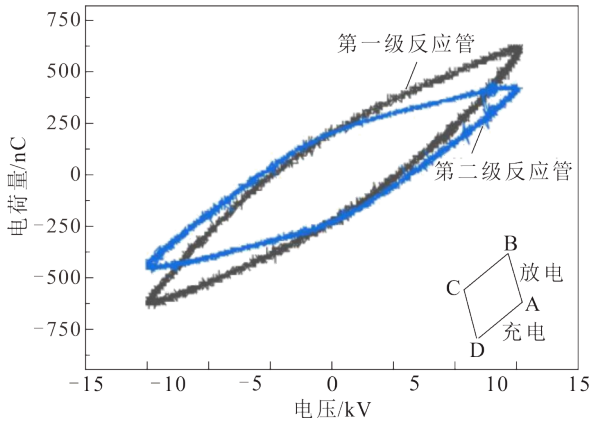


图 5 双级式 DBD 李萨如图形

Fig.5 Lissajous figure of the dual-stage DBD

表 1 第一级反应管和第二级反应管绝缘介质等效电容

Table 1 Equivalent capacitance of the insulating dielectric in the first-stage and second-stage reaction tubes

反应管级数	总电容/pF	放电等效电容/pF
第一级反应管	31.86	65.98
第二级反应管	17.14	50.79

2.3 第二级反应管降解率与能量效率分析

在第一级反应管输入功率保持 100 W 不变的条件下，第二级反应管 SF_6 降解率以及能量效率随输入功率变化的曲线如图 6 所示。可以发现第二级反应管的降解率明显高于第一级反应管，这是因为经过第一级反应管降解之后还有部分的 SF_6 未降解，进入第二级反应管的 SF_6 浓度显著低于进入第一级反应管的 SF_6 浓度，因此，用于降解 SF_6 的能量较为充足，相比于第一级反应管，第二级反应管的 SF_6 降解率更高。但第二级反应管除对第一级反应管处理后少部分未降解的 SF_6 进行二次降解之外，还可以对第一级反应管的降解产物进行二次降解调控。当输入功率为 60 W 时，第二级反应管的降解率为 34.68%，当输入功率逐步增大到 110 W 时，第二级反应管的降解率增长到了 70.11%。

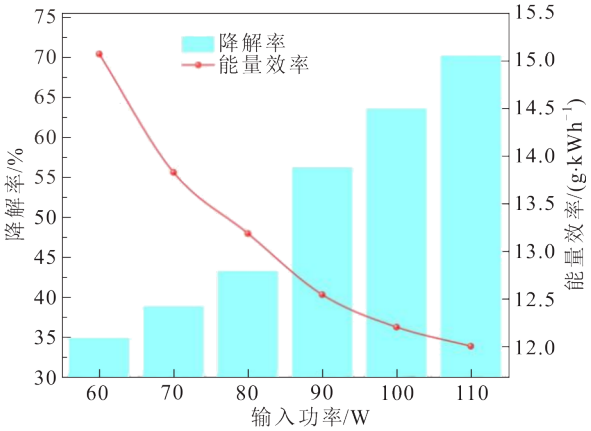


图 6 第二级反应管降解率以及能量效率

Fig.6 Degradation rate and energy yield of the second-stage reaction tube

对比第一级反应管和第二级反应管的能量效率可以发现，第二级反应管的能量效率要略低于第一级反应管，这是因为第一级反应管降解的 SF_6 含量较高，而第二级反应管中的 SF_6 含量较低，造成分解的 SF_6 的量也变低，另外有较多能量用于分解第一级反应的中间分解产物，造成其能量效率较低。第二级反应管的能量效率随着输入功率的增大呈现逐渐减小的趋势，当输入功率从 60 W 逐渐增大至 110 W 时，第二级反应管的能量效率从 15.07 g/kWh 逐渐减小至 12.01 g/kWh。根据相关研究表明[23]，SF_6 热稳定性很好，400 ℃以内 SF_6 分子不会受填充材料的影响而发生热催化分解。在本实验体系中，DBD 降解过程的反应器温度在 90~130 ℃之间，远未达到 SF_6 热分解的起始温度，在随输入功率增加的过程中，部分能量消耗于反应器的发热过程，但对 SF_6 的分解并未起到明显的促进作用，最终导致了降解能效的不断下降。

另外，结合第一级反应管和第二级反应管对 SF_6 进行降解，双管整体 SF_6 降解率随输入功率变化的情况如图 7 所示。在较高 SF_6 浓度的情况下，随着输入功率的增大双管整体降解率逐渐增加，当输入功率为 110 W 时双管整体的 SF_6 降解率可达 85.86%。

2.4 双级填充式 DBD 对降解产物的影响

为进一步探究双级填充式 DBD 对 SF_6 降解产

物的影响，首先对 SF_6 降解的反应路径进行分析，如图 8 所示。SF_6 分子在高能粒子碰撞作用下会发生逐步断键，如反应(1)和反应(2)所示，产生的活性粒子会与其他粒子结合生成含硫或者含氟类产物。

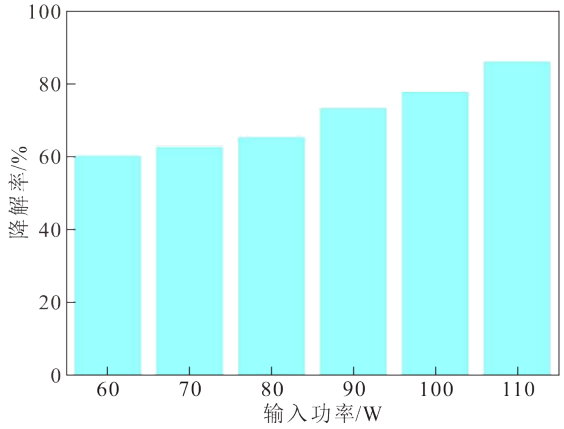


图 7 双管整体降解率

Fig.7 Overall degradation rate of the dual tubes

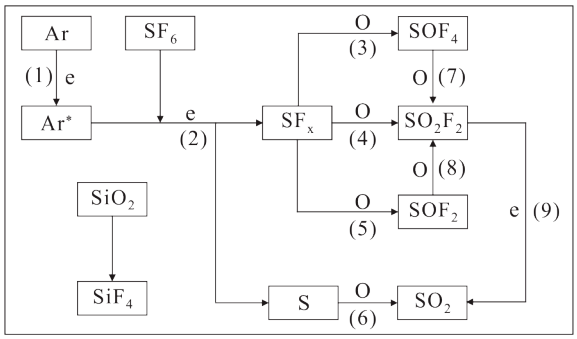


图 8 反应路径

Fig.8 Reaction pathways

通过 GCMS 对 SO_2F_2、SO_2、SOF_2 以及 SOF_4 进行定量分析，其产物分布如图 9 所示。经过对比分析可以发现，双管整体的 SF_6 降解产物主要以易处理的 SO_2 为主，这可能是因为在第二级反应管中主要以反应(6)与反应(9)为主，且 SO_2 体积分数随着输入功率的增大而增加，当输入功率从 60 W 增大至 110 W，SO_2 的体积分数也从 8 196.92×10^{-6} 增大至 22 157.1×10^{-6}，而 SO_2F_2 的体积分数从 14 179.02×10^{-6} 降至 7 269.9×10^{-6}，在功率为 110 W 时，SO_2F_2 含量远低于 SO_2 含量，表明在第二级反应管中 SO_2F_2 的生成受到了有效抑制。其主要原因在于，较多的 SO_2F_2 通过反应(9)进一步发生反应，转化为了更易处理的 SO_2，从而显著降低了 SO_2F_2 的含量，优化了产物分布。SOF_2 的含量随着输入功率的增大也逐渐增加，输入功率为 60 W 时，SOF_2 的体积分数仅为 123.46×10^{-6}，而当输入功率增大至 110 W 时，其体积分数增大到 3 151.9×10^{-6}。而 SOF_4 在 4 种降解产物当中的含量最少，最高体积分数也仅有 0.92×10^{-6}，产物基本检测不到 SOF_4 的存在。相比于其他两种降解产物，SOF_2 与 SOF_4 的含量均较少，这可能是因为反应(7)与反应(8)的发生，使得 SOF_2 与 SOF_4 转化为 SO_2F_2。综合来看，在二级反应管功率大于 70 W 时，γ-Al_2O_3-硅胶双级填充 DBD 体系降解产物中 SO_2 已经超越 SO_2F_2 成为含量最高的产物，增大功率有利于 SO_2 的生成，同时能抑制 SO_2F_2 的产生。γ-Al_2O_3-硅胶双级填充具有较高的降解效率和产物选择性。

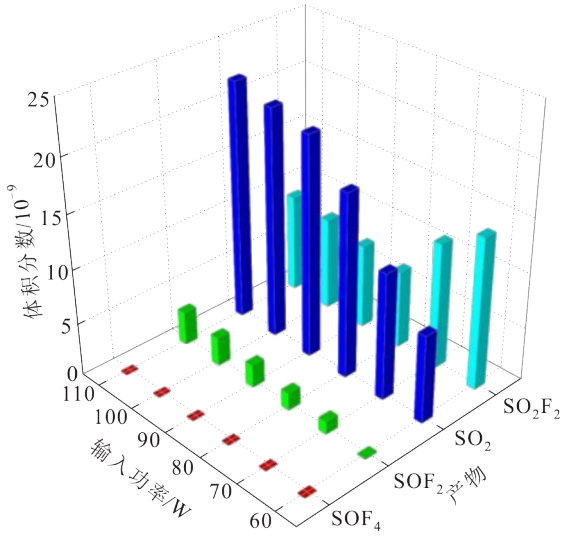


图 9 双管整体产物浓度分布

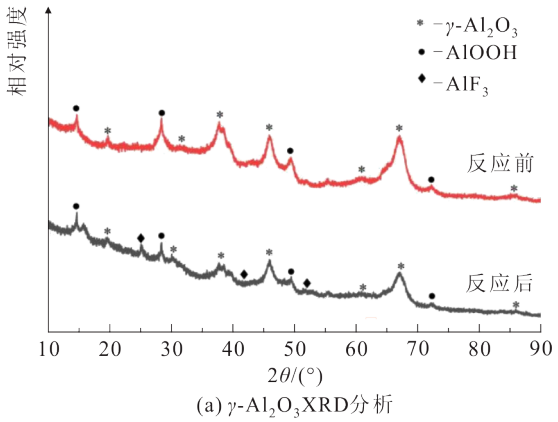
Fig.9 Overall product concentration distribution of the dual tubes

2.5 催化剂使用活性分析

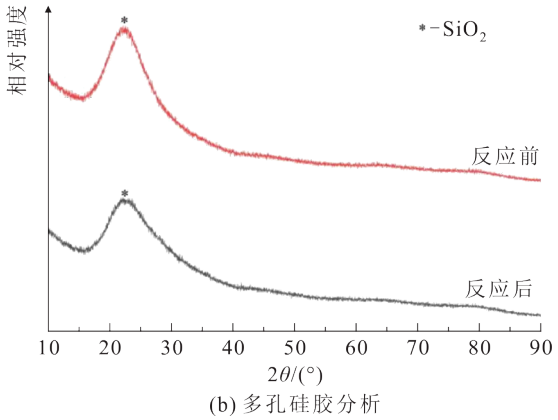
为进一步讨论催化剂使用后的活性衰减以及使用寿命，我们对双级填充式 DBD 系统下 γ-Al_2O_3 和多孔硅胶催化剂在 100 W 输入功率时不同放电时间对催化剂降解率的影响以及反应前后催化剂的 XRD 图谱进行了分析。如图 A3 所示，可以发现随着放电时间的增长，γ-Al_2O_3 以及多孔硅胶催化剂的降解率并无明显变化，从放电 5 h 至放电 70 h，γ-Al_2O_3 催化剂的降解率仅下降 1.34%，而多孔硅胶催化剂降解率也仅下降 1.62%，说明两种催化剂的寿命较长，衰减较为缓慢。

图 10 为 γ-Al_2O_3 以及多孔硅胶催化剂反应前后的 XRD 表征分析，图 10(a)所示为 γ-Al_2O_3 催化剂反应前后的 XRD 图谱。可以看出反应前在 2θ 角为 19.45°、31.936°、37.603°、45.862°、60.897°、67.032°、

85.015°处出现 γ-Al_2O_3 特征峰，与 γ-Al_2O_3 标准卡片(编号 10-0425)相对应，在 2θ 角为 14.468°、28.159°、48.846°、72.135°处出现 γ-Al_2O_3 的前置物 AlOOH 的特征峰，与 AlOOH 标准卡片(编号 83-1506)相对应。在反应后还在 2θ 角为 25.299°、42.639°、51.914°处检测到了微弱的 AlF_3(编号 44-0231)特征峰，这可能是因为在反应过程中 SF_6 被吸附在 γ-Al_2O_3 表面从而生成了 AlF_3。可以发现，实验前后 γ-Al_2O_3 催化剂的特征峰未出现明显的变化，表明 DBD 反应过程中对 γ-Al_2O_3 的晶体结构没有明显的影响，表现出较高的催化活性和寿命。图 10(b)为多孔硅胶催化剂反应前后的 XRD 图谱，在反应前后的 2θ 角为 21.983°处均可检测到 SiO_2(编号 29-0085)特征峰，反应前后并没有明显的特征峰变化，这同样说明了催化剂表现出了较长的使用寿命。



(a) γ-Al_2O_3XRD分析



(b) 多孔硅胶分析

图 10 催化剂反应前后 XRD 分析

Fig.10 XRD analysis of catalyst before and after reaction

2.6 催化剂 XPS 分析

为进一步分析 γ-Al_2O_3 与多孔硅胶催化剂对 DBD 协同催化反应过程的影响，本文对反应前后的两种催化剂进行 XPS 分析，如图 A4 所示。图 A4(a)为反应前后 γ-Al_2O_3 全谱图，反应前检测到了 C、O、Al 3 种元素，反应后 S 元素以及 F 元素特征峰强度均增强。图 A4(b)为反应前后多孔硅胶催化剂的全谱图，反应前检测到了 C、O、Si 3 种元素，而反应后检测到 S、F 两种元素特征峰增强。其中 C 元素在 284.8 eV 的标准峰用于各元素峰校正，而 S 和 F 元素来源于 SF_6 及其含硫分解产物的吸附。为进一步分析各元素状态，使用 Multipak 软件对各元素精细谱进行分峰拟合，并参考美国国家科学技术研究所(National Institute of Science and Technology, NIST)XPS 数据库进行分析。

对第一级反应管各元素精细谱进行分析发现，反应前 Al 元素与 O 元素主要以 Al_2O_3 的形式存在，而反应后由于 SF_6 及其含硫分解产物的吸附作用，在 529.7 eV 处检测到硫酸根的存在。通过图 A4(e)反应前后的 S 2p 精细谱对比发现，在反应前基本检测不到 S 元素的存在，而反应后 S 元素含量升高，且 169.3 eV 处出现的特征峰归属于金属硫酸盐，可能是反应之后在催化剂表面有 $Al_2(SO_4)_3$ 的生成。在图 A4(f)中发现，γ-Al_2O_3 反应之前的精细谱基本检测不到 F 元素，而反应后 F 1s 强度明显升高，且 685.9 eV 处出现的特征峰属于金属氟化物，表明在反应之后催化剂表面可能有 AlF_3 生成。

图 A4(g)至(j)为第二级反应管各元素精细谱，反应前后 O 1s 和 Si 2p 的特征峰无明显变化，而 S 2p 与 F 1s 的特征峰变化与第一级反应管类似，S 2p 精细谱显示在 163.5 eV 处检测到的特征峰属于硫化物，这可能是在 SF_6 降解过程中催化剂表面有少量 H_2S 生成。另外，多孔硅胶催化剂在反应之前基本检测不到 F 1s 特征峰，而反应后 F 1s 特征峰强度升高，并且 688.4 eV 处出现的特征峰属于氟化物，这可能是因为检测到了多孔硅胶催化剂表面吸附的 SF_6 及其含 S 分解产物的存在。

3 结论

1）通过催化剂筛选，发现两级反应管分别填充 γ-Al_2O_3 和多孔硅胶催化剂可实现对较高浓度 SF_6 的降解。110 W 输入功率时双管整体对 4%的 SF_6 降解率可达 85.86%。在处理 SF_6 废气方面表现出了良好的应用潜力，有望为电力行业 SF_6 减排提供高效、可行的技术方案。

2）γ-Al_2O_3 催化剂填充的第一级反应管降解产物主要以难以处理的 SO_2F_2 为主，110 W 输入功率下体积分数可达 14 712.79×10^{-6}。多孔硅胶催化剂

填充的第二级反应管主要以易被碱液吸收的 SO_2 为主，110 W 输入功率下体积分数可达 22 157.1×10^{-6}。未来可以通过外加活性气体与填充材料协同进一步提高 SF_6 废气降解率并改善产物分布特性。

3）γ-Al_2O_3 催化剂和多孔硅胶催化剂在 70 h 内的催化活性衰减均小于 2%，具有较高的催化活性和较长的寿命；在 DBD 催化 SF_6 降解过程中 SF_6 及其解离产生的含 S 分解产物会吸附在催化剂表面，发生催化分解反应，促进 SF_6 的分解。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] ZHOU W H, ZHAO Y, DONG B X, et al. Efficient photocatalytic degradation of potent greenhouse gas SF_6 at liquid-solid interface[J]. Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2025, 363: 124773.

[2] 李亚龙，谭辉宇，万昆，等. DBD 协同 $mSiO_2$@TiO_2 催化 SF_6 高效降解试验研究[J]. 高电压技术，2026，52(1)：235-242.
LI Yalong, TAN Huiyu, WAN Kun, et al. Experimental study on efficient degradation of SF_6 catalyzed by DBD combined with $mSiO_2$@TiO_2[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 235-242.

[3] LI Y L, TAN H Y, GAO P, et al. Effect of ZnO catalyst on the degradation of SF_6 by DBD plasma[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(6): 3454-3461.

[4] 李鹏洋，吴细秀，徐思恩，等. SF_6/N_2 混合气体介质条件下 GIL 管道气室结构多目标优化研究[J]. 高电压技术，2025，51(4)：1944-1957.
LI Pengyang, WU Xixiu, XU Sien, et al. Research on multi-objective optimization of GIL pipeline gas room structure under SF_6/N_2 mixed gas medium[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1944-1957.

[5] 李亚龙，杨照迪，万昆，等. 外加 O_2 和 H_2O 对脉冲 DBD 降解 SF_6 的影响[J]. 高电压技术，2024，50(11)：5219-5227.
LI Yalong, YANG Zhaodi, WAN Kun, et al. Effect of O_2 and H_2O on the degradation of SF_6 by pulsed DBD[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5219-5227.

[6] 孙楚昱，丁未，王海洋，等. 纳秒脉冲下 SF_6 中的气固界面流注特性[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3235-3248.
SUN Chuyu, DING Wei, WANG Haiyang, et al. Characteristics of gas-solid flashover streamers under nanosecond pulses in SF_6[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3235-3248.

[7] CUI H, ZHANG X X, ZHANG J, et al. Nanomaterials-based gas sensors of SF_6 decomposed species for evaluating the operation status of high-voltage insulation devices[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 242-258.

[8] LI Y L, YANG Z D, WAN K, et al. Study on the effect of catalytic degradation of Sulfuryl fluoride in air pollutants by DBD filled with SiO_2 glass beads[J]. Applied Surface Science, 2025, 687: 162222.

[9] ZHOU Q W, TIAN J, XIONG Y, et al. Investigation on the effect of initial flame kernel parameters on the combustion process in nanosecond surface dielectric barrier discharge (nSDBD) multi-channel ignition[J]. Fuel, 2025, 399: 135691.

[10] 王安阳，柯学，颜湘莲，等. 新型环保绝缘介质 CF_3SO_2F 混合气体电弧等离子体输运参数计算与影响因素分析[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4261-4271.
WANG Anyang, KE Xue, YAN Xianglian, et al. Arc plasma transport parameter calculation and related influencing factor analysis for CF_3SO_2F gas mixture as new eco-friendly insulating medium[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4261-4271.

[11] 王凯，张丽阳，吴凯玥，等. 大气压湿空气纳秒脉冲介质阻挡放电研究[J]. 电工技术学报，2025，40(16)：5355-5368.
WANG Kai, ZHANG Liyang, WU Kaiyue, et al. Atmospheric pressure nanosecond pulsed dielectric barrier discharge in humid air[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(16): 5355-5368.

[12] ZHANG X X, CUI Z L, LI Y L, et al. Abatement of SF_6 in the presence of NH_3 by dielectric barrier discharge plasma[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 360: 341-348.

[13] ZHANG X X, LI X H, WANG Y, et al. Experimental study on thermal catalytic degradation of SF_6 waste gas by metal phosphate[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(2): 1251-1262.

[14] CUI Z L, ZHOU C, JAFARZADEH A, et al. SF_6 catalytic degradation in a γ-Al_2O_3 packed bed plasma system: a combined experimental and theoretical study[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1048-1058.

[15] CUI Z L, ZHANG X X, TIAN Y, et al. Effects of glass beads packing on SF_6 abatement by packed bed plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2020, 40(1): 43-59.

[16] YU X, LI S J, DANG X Q, et al. A highly efficient multi-stage dielectric barrier discharge (DBD)-catalytic system for simultaneous toluene degradation and O_3 elimination[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 105: 393-404.

[17] JIANG N, ZHAO Y H, SHANG K F, et al. Degradation of toluene by pulse-modulated multistage DBD plasma: key parameters optimization through response surface methodology (RSM) and degradation pathway analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122365.

[18] HASHIM S A, BINTI SAMSUDIN F N D, SAN WONG C, et al. Non-thermal plasma for air and water remediation[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2016, 605: 34-40.

[19] LEE B, KIM S, SONG J, et al. Conceptual design of a new SF_6 abatement technology using a multi-bed series reactor for the production of valuable chemicals free of toxic wastes[J]. Energy Science & Engineering, 2018, 6(2): 73-82.

[20] ZHANG Y, WANG M W, TAN H Y, et al. Experimental study on the effect of H_2O concentration on the degradation of sulfur hexafluoride by two-stage tandem DBD[J]. ACS Omega, 2024, 9(45): 45232-45239.

[21] LI Y L, WAN K, WANG Y F, et al. Experimental study on the effect of H_2O and O_2 on the degradation of SF_6 by pulsed dielectric barrier discharge[J]. Plasma Science and Technology, 2024, 26(2): 025506.

[22] DENG R Y, YANG D X, CHEN M L, et al. The enhancing energy efficiency of sulfadiazine degradation using a DBD-contact plasma treatment process[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 463: 142491.

[23] MOK Y S. Destruction of fluorinated greenhouse gases by using non-thermal plasma process[M]//CARAYANNIS E. Planet Earth 2011-Global Warming Challenges and Opportunities for Policy and Practice. IntechOpen, 2011.



李亚龙

1989—，男，博士，副教授

主要研究方向为 SF_6 替代气体及放电等离子体应用等

E-mail: liyalong@hbut.edu.cn

LI Yalong

Ph.D.

Associate professor



张晓星(通信作者）

1972—，男，博士，教授

主要研究方向为电气设备在线检测与故障诊断、绝缘状态评估、SF_6 替代气体及放电等离子体等

E-mail: xiaoxing.zhang@outlook.com

ZHANG Xiaoxing

Ph.D., Professor

Corresponding author

收稿日期 2025-06-18 在线出版日期 2025-09-28 编辑 曹昭君

附录 A

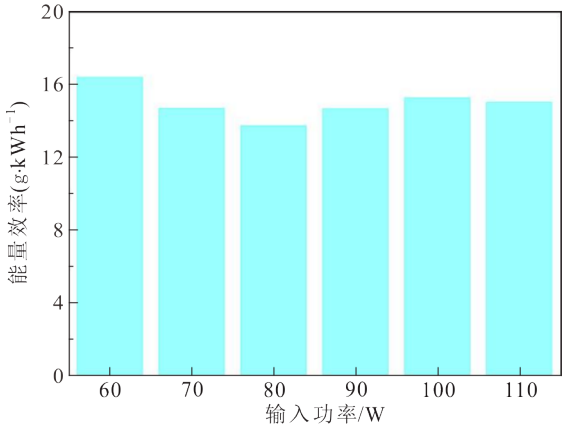


图 A1　γ-Al_2O_3 填充情况下能量效率

Fig.A1　Energy yield with γ-Al_2O_3 packing

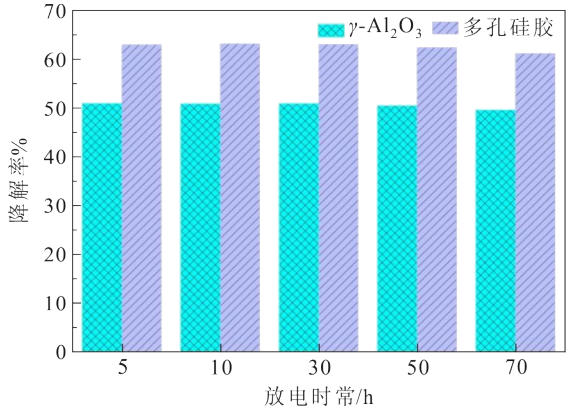


图 A3　不同放电时间下催化剂降解率变化

Fig.A3　Change in catalyst degradation rate under different discharge time

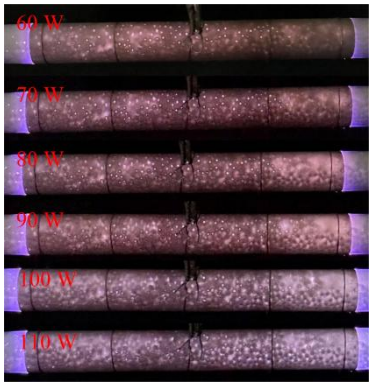
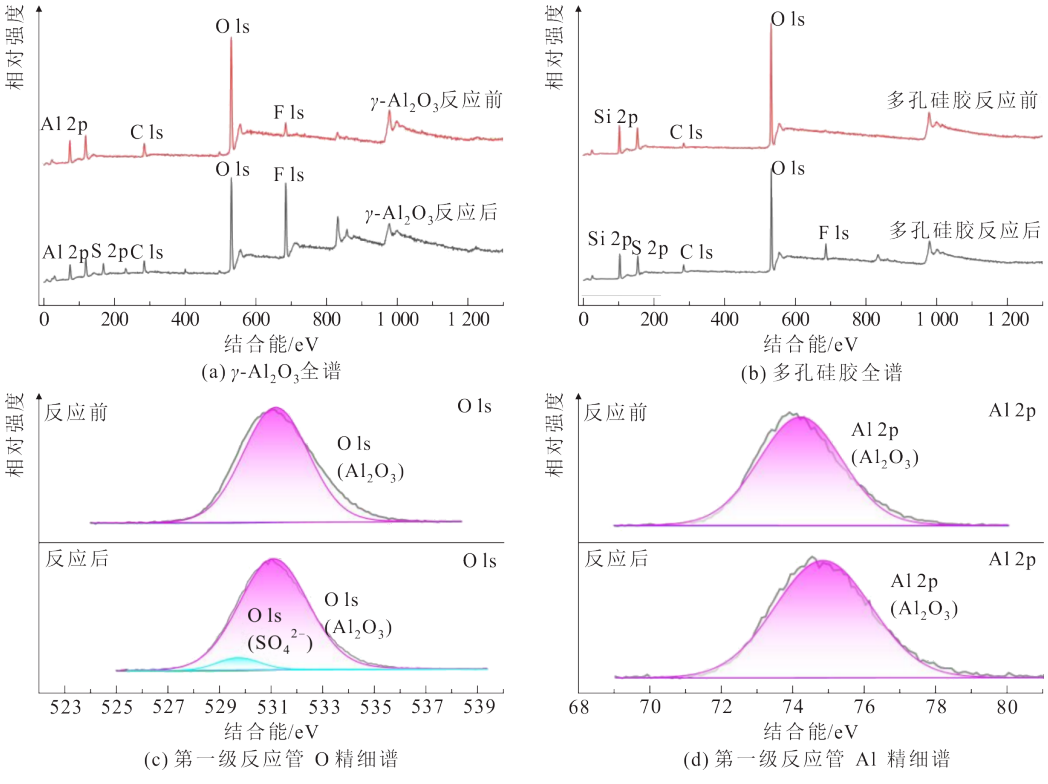
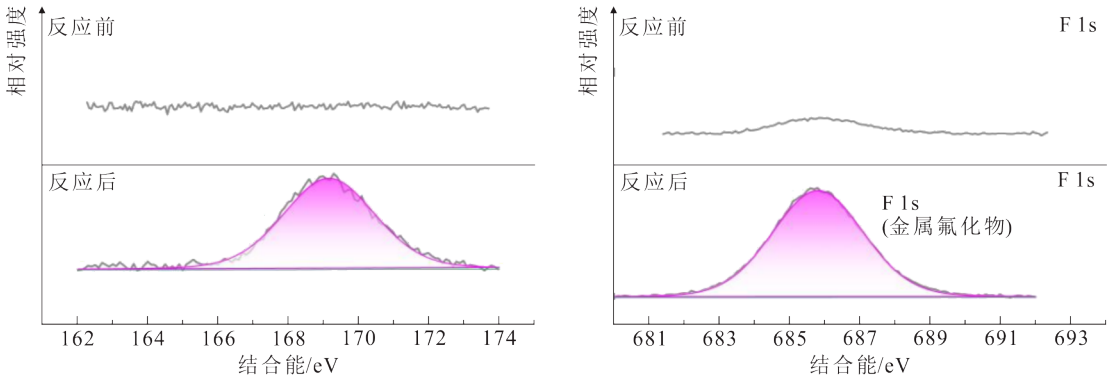


图 A2　γ-Al_2O_3 放电图像

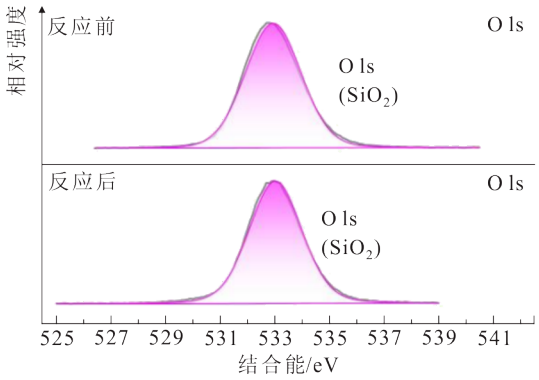
Fig.A2　Discharge image of γ-Al_2O_3



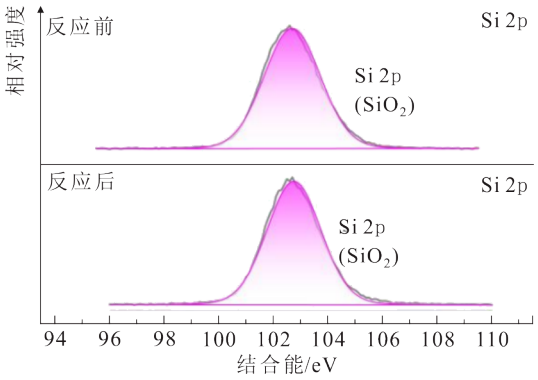


(e) 第一级反应管 S 精细谱

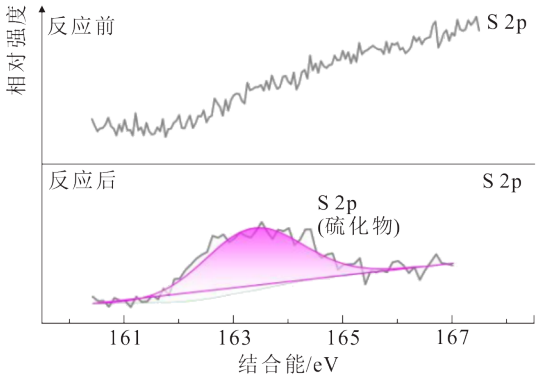
(f) 第一级反应管 F 精细谱



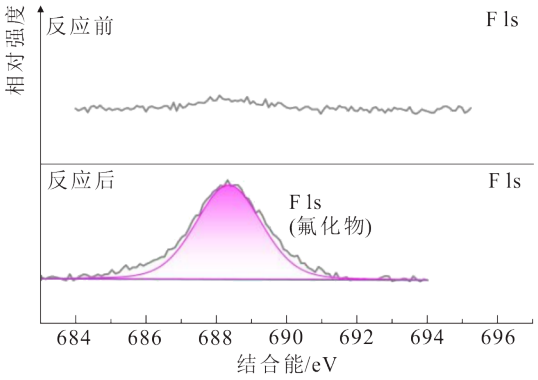
(g) 第二级反应管 O 精细谱



(h) 第二级反应管Si 精细谱



(i) 第二级反应管 S 精细谱



(j) 第二级反应管 F 精细谱

图 A4　催化剂 XPS 分析

Fig.A4　XPS analysis of catalyst