

低温等离子体技术降解 SF₆ 的最新进展

袁鹏飞,董润泽,张 泽,张怡愉,付 东,张 盼*

(华北电力大学(保定)环境科学与工程系,河北 保定 071003)

摘要:综述了低温等离子体技术降解 SF₆ 的最新研究进展,重点探讨了介质阻挡放电、微波等离子体、射频等离子体及电子束放电 4 种低温等离子体技术对 SF₆ 的降解性能与机理。综合分析表明,低温等离子体技术在该领域呈现出高降解效率与良好的选择性,为 SF₆ 的绿色高效处理提供了一条极具前景的技术途径。

关键词: SF₆; 温室气体; 降解; 低温等离子体; 介质阻挡放电

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)10-0028-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.006

Recent advances in SF₆ degradation by low-temperature plasma technology

YUAN Peng-fei, DONG Run-ze, ZHANG Ze, ZHANG Yi-yu, FU Dong, ZHANG Pan*

(Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, China)

Abstract: This article reviews recent advances in SF₆ degradation by low-temperature plasma technology, with a focus on the degradation performance and mechanisms of four low-temperature plasma technologies: dielectric barrier discharge, microwave plasma, radio-frequency plasma, and electron beam discharge. Comprehensive analysis indicates that low-temperature plasma technology offers high degradation efficiency and good selectivity, presenting a promising pathway for the green and effective treatment of SF₆.

Key words: SF₆; greenhouse gas; degradation; low-temperature plasma; dielectric barrier discharge

六氟化硫(SF₆)因优异的灭弧和绝缘性能,在电力设备、金属冶炼及电子制造等行业中发挥着不可替代的作用^[1]。然而,SF₆是一种极强的温室气体,据 IPCC 的最新评估报告,其全球变暖潜能值(GWP)约是 CO₂ 的 23 900 倍^[2],且在大气中的寿命可超过 3 200 a,即便其浓度仅占温室气体总量的约 0.1%,其对气候变化的长期影响仍不容忽视^[3]。国际社会已通过《京都议定书》及《基加利修正案》等公约对其使用和排放实施严格管控^[1,3]。近年来,随着中国电力消费规模和电网电压等级的不断提升,SF₆ 的使用量持续增长^[4]。如何有效控制其排放对实现温室气体减排具有重要意义^[1]。

解决 SF₆ 温室效应的根本途径在于研发环保替代气体或推广无 SF₆ 电力设备^[2]。然而,这些新材料与技术的成熟应用需要较长时间,短期内难以实现大规模替代。因此,在过渡阶段需重点关注运行设备的密封管理以减少泄漏,并对退役的 SF₆ 进行规范、高效的处理。目前主要处理技术包括低温等离子体、热降解、光催化和电化学^[1]。其中,热降解

虽然处理能力强,但能耗高。使用羟基磷灰石^[5]和不锈钢渣^[6]等催化剂可降低反应温度,却普遍面临成本高、高温易失活等问题。光催化和电化学技术则存在处理能力不足的局限。光催化降解技术的第一种方式是借助光敏分子产生强还原性自由基,以此攻击并断裂 S—F 键,例如利用烯丙醇^[7]。二是利用金属复合物催化剂的光生电子和空穴对的氧化还原能力降解 SF₆,如富氧空位的二维 ZnO^[8]。电化学降解借助外加电场诱导 SF₆ 定向断键,有学者研发出膜分隔双介质电催化系统,实现了 SF₆ 的高效连续降解^[9]。目前,该技术主要仍处于实验室研究阶段,有关电化学降解技术的研究相对较少。

低温等离子体技术借助产生高能电子与活性自由基,为降解强温室气体 SF₆ 提供了高效途径。鉴于该技术具备高效率与灵活性的特点,成为传统方法极具潜力的替代方案。低温等离子体涵盖微波等离子体技术、电子束放电等离子体技术、射频等离子体技术和介质阻挡放电(DBD)技术。本文中聚焦于这 4 种典型的低温等离子体技术,系统地阐述各

收稿日期: 2025-12-15; 修回日期: 2026-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776072)

作者简介: 袁鹏飞(2000-),女,硕士,研究方向为 SF₆ 降解,2080405987@qq.com; 张盼(1986-),男,博士,副教授,研究方向为大气污染控制工程,通讯联系人,zhangpan01@ncepu.edu.cn。

类技术的反应机理、降解效率、能耗、经济成本以及降解产物特性,总结不同降解方法的优缺点,旨在通过综合评估各技术路线的优势与局限,探寻一种高效、清洁且经济可行的 SF₆ 处理方案,为电力等行业中退役 SF₆ 气体的资源化利用或无害化处置提供参考,并对该领域未来技术的发展方向予以展望。

1 低温等离子体降解 SF₆ 主要技术途径

低温等离子体(NTP)是一种非平衡态等离子体,电子能量远高于接近常温的重粒子。该特性使其能在接近室温条件下高效诱发物理化学反应,兼具放电可控、安全性好等优势,在有害气体降解和能源转化等领域展现出替代传统热催化技术的潜力。根据放电方式不同,NTP 主要包括微波放电、射频放电、电子束放电以及介质阻挡放电^[1,10]。

1.1 微波放电等离子体技术

微波等离子体利用微波电磁场能量耦合产生并维持放电。其基本原理在于微波电场周期性加速自由电子,使其能量超过气体分子电离能,进而通过非弹性碰撞引发气体电离、激发与解离,引发雪崩效应,最终在特定位置形成高密度的稳态等离子体。由于电离度高,微波等离子体反应活性强,密度通常可超过 $10^{-14}/\text{cm}^3$ 。Wu 等^[11]利用 2.45 GHz 频率微波等离子体炬降解 SF₆,以 SF₆ 浓度为 1%,总流量 15 SLM 为例,降解率随微波功率升高而上升。在相同降解率(99%)下,氧气作为载气所需功率(1 400 W)低于氮气(1 800 W)。结果表明,在其他条件相同的情况下,氧气等离子体中的气体温度高于氮气等离子体,更有利于 SF₆ 分解。其中,激发态的活性氧物种能够与 SF₆ 碎片反应,生成 SO₂、SOF₂、SO₂F₂ 等更为稳定的副产物,从而抑制 SF₆ 的再生成,提升降解率。Kim 等^[12]开发了一种高效降解的 NF₃ 和 SF₆ 集成反向涡流反应器的 2.45 GHz 微波等离子体炬。在 6 kW 功率下,两者降解率均超 99%。该设计通过避免废气流经放电管保障了系统稳定性,并显著降低了销毁能量密度,能效远优于传统反应器。

1.2 射频放电等离子体技术

射频等离子体技术利用射频电源在电极间建立高频电场,通过电子碰撞引发电离和气体击穿,形成需持续供能维持的等离子体。该技术主要包含电容耦合(CCP)与电感耦合(ICP)2类能量耦合方式。Shih 等^[13]发现输入功率低于 40 W 时,在 SF₆/Ar 和 SF₆/O₂/Ar 气氛中均能检测到 SiF₄、SO₂、F₂、SO₂F₂

等多种中间产物,且提高 O₂/SF₆ 的进气比会促进 SO₂F₂ 等物质生成。功率达到 40 W 时,无论是否添加氧气,SF₆ 的降解率均超过 99%,且降解更为彻底,主要为 SO₂、SiF₄ 等稳定产物。Mochalov 等^[14]发现在 350 W、13.56 MHz 的射频放电诱导,H₂/SF₆ 摩尔比为 6、SF₆ 的流量为 8 mL/min、总流量为 56 ssm³/min、能量输入为 137 kJ/mol 的条件下,能够获得高纯度硫单质的最大沉积速率为 0.24 g/h。

1.3 电子束放电等离子体技术

电子束等离子体降解 SF₆ 的原理是通过高能电子束轰击气体分子,使其电离和解离,产生大量活性自由基。这些活性粒子与 SF₆ 发生反应,高效断裂 S—F 键,将其转化为单质硫、氟化氢及其他可回收硫化物。Petrov 等^[15]研究发现,在低压电子束降解 SF₆ 过程中,低浓度 SF₆ 的降解主要由氟原子贡献,而高浓度时则以 SF_x 为主要贡献源。电子束电流的增加能线性提升氟原子浓度,但黏附系数增大则会抑制氟原子生成,促进 SF_x 与 F₂ 产生,揭示了表面对物种分布的关键调控作用。Son 等^[16]采用 0.6 MeV 移动式电子束加速器降解 SF₆,降解率随辐照强度和 H₂ 添加量的增加而提高,随 SF₆ 初始浓度的升高而降低。研究发现,H₂ 可提高去除效率并促进 HF 生成。Park 等^[17]发现镍基合金反应器薄膜可提升电子束利用效率与耐久性,H₂ 通过还原机制显著促进 SF₆ 降解,降低流速和增多反应接触时间,对降解率有十分重要的影响。在初始浓度 1% 的 SF₆、电流 15 mA 和 H₂ 流速 10 L/min 条件下,3.5 h 的运行测试,SF₆ 的去除效率稳定在 80% 附近。若将流速降低为 5 L/min,则稳定在 90% 附近。

1.4 介质阻挡放电等离子体技术

在介质阻挡放电(DBD)中,于电极间施加高压可使气体击穿,同时介质层能有效抑制放电电流,产生大量高能电子与活性粒子(如自由基、激发态物种),从而在接近室温的条件下实现 SF₆ 的高效分解。这一自限制机制使得整个降解过程可在低温、低能耗下进行。此外,在 DBD 系统中引入活性剂有助于增加活性粒子浓度,进一步促进 SF₆ 的降解。李亚龙等^[18]发现未加 NH₃ 与 NH₃/SF₆ 为 1:1 的降解率分别为 60% 和 97.5%,系统放电后 NH₃ 解离会产生大量活性粒子促进 S—F 键断裂并抑制 SF₆ 重新生成,产物主要为 S 单质、SiF₄、SiH₄、铵盐及硫氧化物等产物。

除了添加助活性剂能够提升 SF₆ 的去除率之

外,在 DBD 系统中引入催化剂同样可以提升 SF_6 的降解率。Li 等^[19]采用摩尔比为 1:1 的铜铝双金属催化剂降解 SF_6 ,发现 550℃ 煅烧所得无定形催化剂性能优于 750℃ 钙钛矿型,这可能与高温煅烧提高材料结晶度,氧空位数量减少有关。Deng 等^[20]以 ZSM-5 为催化剂,在 60 W 输入功率、100 mL/min 总流量的条件下,对 1.5% SF_6 的降解率为 98.05%。这归因于 ZSM-5 的 Lewis 酸性位点和表面氧空位共同作用,吸附活化降解 SF_6 分子。Dong 等^[21-22]以掺杂 Ni 的 CeO_2 为催化剂降解 SF_6 ,发现 Ni/Ce 摩尔比 10:100、50 W 输入功率下对 2% 的 SF_6 的降解率达 93.47%,优于 DBD 单独作用。这归因于 Ni 掺杂不仅增加了催化剂比表面积促进吸附,而且氧空位与自由基促进 SF_6 降解。降解产物为 SOF_2 、 SOF_4 、 SO_2F_2 、 SO_2 等。

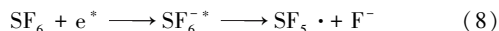
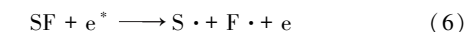
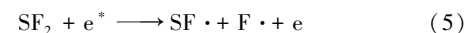
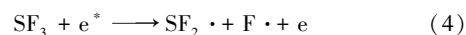
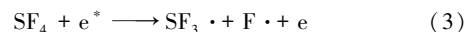
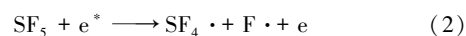
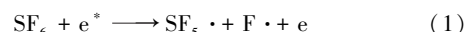
利用 DBD 放电产生的紫外光协同光催化,可以提升能量效率。李亚龙等^[23]在硅胶表面负载 TiO_2 薄膜,在体积分数 3% SF_6 、 SF_6/Ar 混合总流量为 150 mL/min、输入功率 90 W 的条件下,该体系降解率为 91.65%,比空管时降解率提升了 2.35 倍。Wu 等^[24]采用 DBD 联合光催化降解 SF_6 ,在 Ar 气背景、2% SF_6 、150 mL/min 气体流量、90 W 输入功率下,降解率达 99.99%,优于单独紫外光照射 27.22% 的降解率。若添加 1% 浓度的 H_2O ,70 W 功率下便可获得同等降解效果。这归因于 UV 增强的 TiO_2 (101) 晶面能高效分解 SF_6 ,表面吸附水通过降低 S—F 键断裂能垒并稳定中间产物,显著提高了 SO_2 的选择性。

2 SF_6 的低温等离子体降解机理

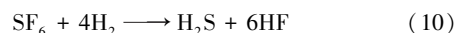
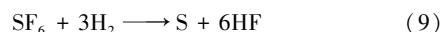
在等离子体降解 SF_6 过程中,主要有 2 种分解途径:一是 SF_6 及其低氟化物逐步失去 F 原子^[25],如式(1)~(6)所示。二是 SF_6 先吸附电子形成高能中间态,随后发生分解,如式(7)、(8)所示。其中路径(7)所需能量为 211.42 kJ/mol,路径(8)为 364.27 kJ/mol^[25],两者均低于 SF_6 与电子直接碰撞解离所需能量。式(1)~(8)中生成的这些硫氟化物一般不能稳定存在,立刻与参与的试剂反应生成其他较为稳定的物种。单纯依靠低温等离子体技术降解 SF_6 ,降解率较低,当加入适宜量的助活性剂时可提升降解率。 O_2 、 H_2 、 H_2O 、 NH_3 常作为助活性剂提高 SF_6 的降解率。当只以强还原性的 H_2 作为助活性剂时产物有单质 S、HF、 H_2S ,降解产物种类少且反应更彻底^[16],如式(9)、(10)所示;当使用含氧

助活性剂(如 H_2O 、 O_2)时, SF_6 降解产物呈现多样性^[13],如反应式(11)~(23)所示。这主要由于 SF_6 碎片与 O 自由基结合,形成 SOF 、 SOF_2 、 SO_2F_2 等多种硫氧氟化物,这些中间物可进一步与 O 或 F 自由基反应,推动降解进行,但也导致产物种类较多^[13,24]。此外,反应中生成的 HF 可能蚀刻含 SiO_2 的反应器壁,产生 SiF_4 ^[26]。若以 NH_3 作为助活性剂,则会引入含氮产物,如 NH_4F 、 NO_2 等^[18],如反应式(24)~(38)所示。

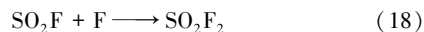
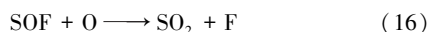
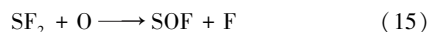
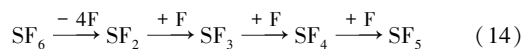
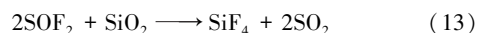
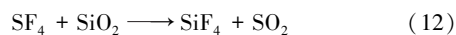
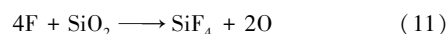
SF_6 逐级打开和吸附电子时的反应^[25]:



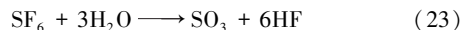
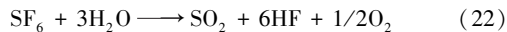
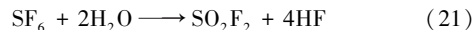
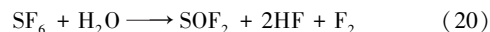
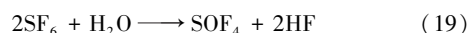
加 H_2 气时的反应^[16]:



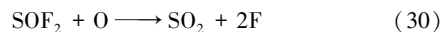
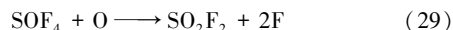
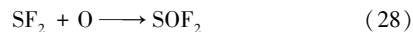
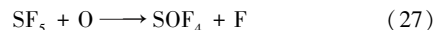
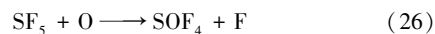
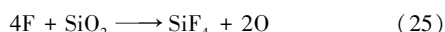
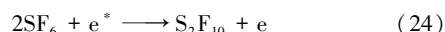
加 O_2 时的化学反应^[13]:

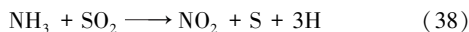
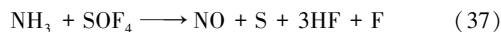
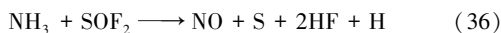
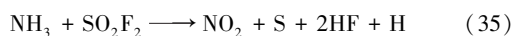


加 H_2O 时的化学反应^[24]:

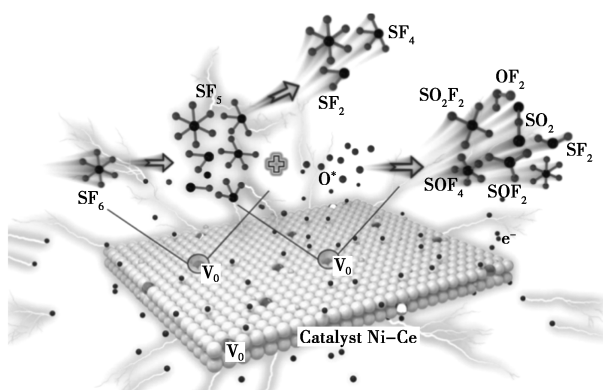


加 NH_3 时的化学反应^[18]:

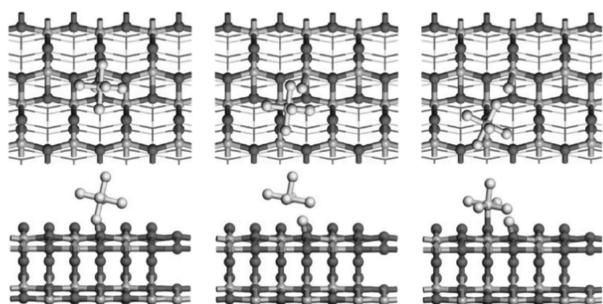




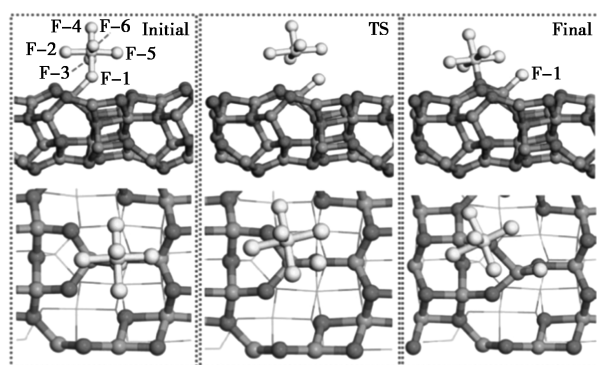
吸附、活化和降解是特定气体催化降解过程中不可避免的步骤^[20]。催化降解的机理主要如图 1 所示。缺陷位点作用,含有氧空位缺陷的 CeO₂ 具有电子转移与促进含氧活性物种生成能力。当适量 Ni 取代掺杂后增加了 Ce-O 八面体的畸变程度,从而提高 CeO₂ 的氧空位含量和表面氧活性,使其具有更高的催化活性和气体吸附能力,提高 SF₆ 的降解能力^[21-22]。光催化和物理吸附作用,TiO₂ 催化剂可以为 SF₆ 分子提供附着位点,因吸附能相对较低,主要发生物理吸附。TiO₂ 能被等离子体产生过程中发出的紫外光激发,产生电子-空穴对,能够与吸附在催化剂表面的 SF₆ 分子发生反应,进一步促进 SF₆ 的降解^[23-24]。Lewis 酸性位点机理,SF₆ 与 γ-Al₂O₃ 催化剂表面的 Lewis 酸性位点能发生弱化学键,因此能有效提高对 SF₆ 的降解能力^[27]。机制联用机理,ZSM-5 催化剂的 Lewis 酸性位点和表面的缺陷位点(氧空位)共同作用,吸附活化降解 SF₆ 分子^[20]。



(a) Ni-Ce/DBD 体系中 SF₆ 的降解机理图

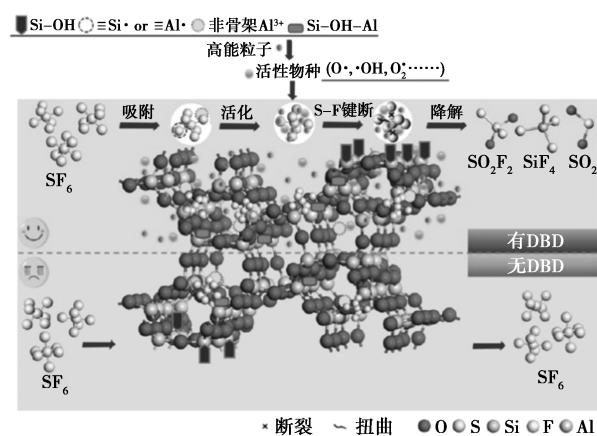


(b) SF₆ 在干燥 TiO₂ 表面的过渡态



(c) SF₆ 在完美 γ-Al₂O₃ 表面的初始键断裂的

2 种过渡态(TS)过程



(d) 根据实验和表征结果推测催化剂 ZSM-5 的 SF₆ 降解过程

图 1 催化降解的主要机理

3 SF₆ 降解产物的分析与处理

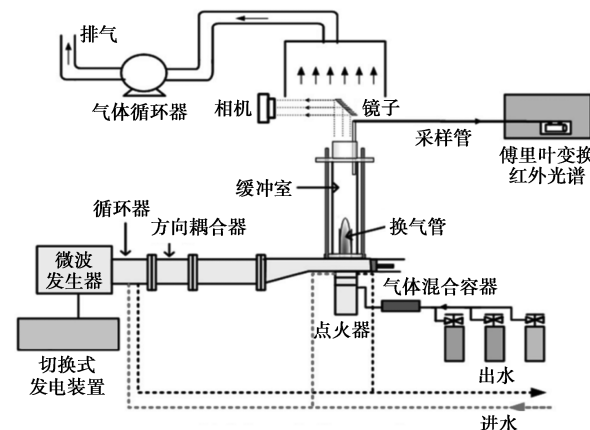
SF₆ 的降解产物种类受助活性剂的影响大,降解产物多为有毒、腐蚀性气体,需要进行严格处理。表 1 为 O₂、H₂、H₂O、NH₃ 作为助活性剂时,对降解产物种类的总结。从表 1 可知,大部分气体,如 SO₂、SOF₂、SOF₄、HF、OF₂、SiF₄、NO₂,都为水溶性的酸性物质^[26],可以用含 NaOH、Ca(OH)₂ 等物质的碱液进行吸收,最终生成低毒或无害等环境友好型物质。其中,NO 可先被 O₃、NaClO₃ 氧化为 NO₂,再进行碱液吸收。钠、钙、镁的碱基物质可以与酸性气体反应生成固体物质,但干法吸收的效率比较低,因此在工程上常采用干湿联用的方法去除这些降解产物^[26]。S₂F₁₀、SO₂F₂、NF₃、SiH₄ 等产物,既不与碱性物质反应,又不与酸性物质反应,需要特殊处理。S₂F₁₀、SO₂F₂、NF₃ 都可借助高温分解或特殊工艺进行降解。SiH₄ 作为浓度低副反应产物^[18],易燃易爆,遇到 O₂ 转化为 SiO₂、H₂O,需注意设备运行安全性。

表1 常见助活性剂和降解产物汇总

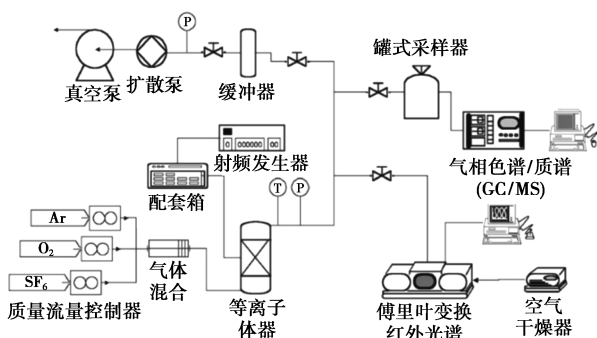
活性剂	降解产物
O_2 [13]	SO_2 、 F_2 、 SO_2F_2 、 SOF_2 、 SOF_2 、 SOF_4 、 OF_2
H_2 [16]	F_2 、单质S、HF
H_2O [24]	F_2 、单质S、 SO_2 、 SO_2F_2 、HF、 SOF_2 、 SOF_4
NH_3 [18]	SO_2 、 SO_2F_2 、 SOF_4 、 SOF_2 、HF、 NF_3 、 SiF_4 、 SiH_4 、 S_2F_{10} 、 NO_x

4 不同低温等离子体技术的综合比较

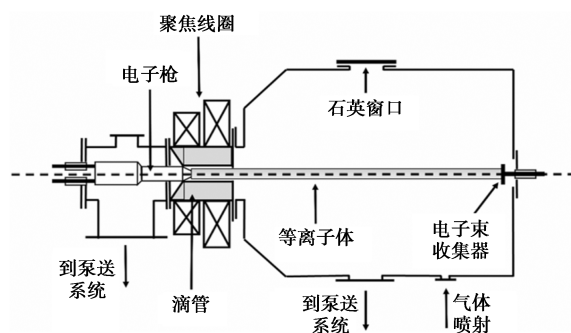
降解设备的对比分析如图2所示。从图中可以看出,微波等离子体的装置一般由微波源(如磁控管)等组成,装置相对复杂、零部件较多,对安全性要求高。该技术降解效率显著但设备运行一般需要0.8~6 kW的放电功率,能量消耗大、成本高^[11]。射频等离子体设备主要由射频发生器、配套箱等组成,装置较为复杂。输入功率通常低于50 W,具有节能特点,但需要在近乎真空的条件下工作。在处理电力行业的高浓度 SF_6 时能力有限,通常要求废气预先稀释,导致系统能耗与运营成本显著增加^[13-14]。电子束等离子体技术具有响应快、能量定向性好的优点,对 SF_6 的去除能力 $\geq 90\%$,但电子束



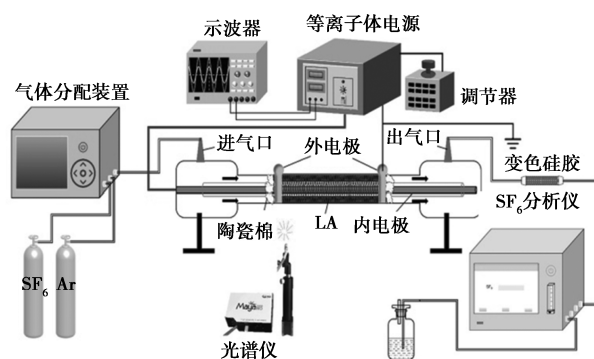
(a) 微波等离子体装置



(b) 射频等离子体装置



(c) 电子束等离子体装置



(d) 介质阻挡等离子体装置

图2 不同低温等离子体装置

发生器电压很大通常为千伏或万伏,导致成本高且存在辐射安全隐患^[15-17]。介质阻挡放电设备主要由放电装置、等离子体反应器等组成,装置也较为复杂。放电功率一般在50~90 W,在助活性剂或催化剂的作用下,降解率能达到90%以上,能量产率一般在5~15 g/kWh之间^[19-22]。因此,在降解设备复杂程度相同的情况下,与其他技术相比,介质阻挡放电技术具备设备工作功率低、反应条件要求不高、无明显安全隐患等优势。

表2对比分析了4种降解技术对 SF_6 的处理能力。4种降解技术的降解率都可以达到99%以上,但是处理的 SF_6 浓度和放电功率有很大差距。微波放电技术降解1%的 SF_6 却需要1 600 W的输入功率^[11]。射频放电技术降解的 SF_6 浓度为0.5%,处理能力低^[26,28]。电子束放电技术处理浓度2%~10% SF_6 ,辐照强度为1 mA时,通常为千伏或万伏电压^[16]。介质阻挡放电技术在50 W的输入功率下,对2%的 SF_6 降解率90%以上^[22]。可见,介质阻挡放电的处理能力最好。

5 结论与展望

低温等离子体技术为 SF_6 的高效降解提供了一条具有显著潜力的技术路径。其中,介质阻挡放电

表 2 不同降解技术降解效果比较

降解技术	发生装置参数	气体参数	降解率/%	能量效率
微波 ^[11]	2.45 GHz, 输入功率 1600 W	SF ₆ 浓度 1%, N ₂ /O ₂ 为载气, 总流量 15 ~ 30 SLM	N ₂ 为载气 95 ~ 99, O ₂ 为载气 82 ~ 99	能量密度 0.4 ~ 0.9 kJ/cm ³
射频 ^[13]	13.56 MHz, 输入功率 5W ~ 50 W	0.5% 的 SF ₆ , 不加 O ₂ 或 O ₂ /SF ₆ 比 2, Ar 为载气, 总流量 100 sccm	不加 O ₂ 37.79 ~ 99, O ₂ /SF ₆ 比为 2 时 28.61 ~ 99	—
电子束 ^[16]	13.56 MHz, 辐照强度为 1 mA	2% ~ 10% SF ₆ , 6% H ₂ , 92% N ₂ , 停留时间 4.8 min	58.0 ~ 99.4	SF ₆ /H ₂ 为 1 : 4 时的吸收剂量 211 kGy
DBD	输入功率 90 W ^[18]	2% SF ₆ , 2% NH ₃ , 96% Ar, 总流量为 50 mL/min	97.50	能量产率由折线图得, 约 4.1 g/kWh
	输入功率 50 W ^[21-22]	2% SF ₆ , 98% Ar, 总流量为 100 mL/min, 10Ni-Ce 催化剂	93.47	能量产率 14.4 g/kWh
	输入功率 60 W ^[19]	1.5% SF ₆ , 98% Ar, 总流量为 100 mL/min, La-Al 双金属催化剂	98.30	能量产率 9.6 g/kWh
	输入功率 60 W ^[20]	1.5% SF ₆ , 98% Ar, 总流量为 100 mL/min, ZSM-5 催化剂	98.05	能量产率 9.7 g/kWh

技术以反应条件温和、能耗较低、系统适应性强的特点,在实验与初步工程应用中表现出良好的综合性能。通过引入 O₂、H₂、H₂O、NH₃ 等活性剂或结合催化剂,可进一步优化反应路径,提高降解效率与能量利用率。然而,该技术目前仍面临降解产物组成复杂、副产物处理成本高、催化剂价格昂贵且稳定性不足等挑战,制约规模化工业应用。与其他等离子体技术相比,介质阻挡放电在能效、安全性和系统集成方面具有较明显优势,但仍需在反应控制和产物定向转化方面持续优化。

未来的研究应重点围绕以下几个方面展开。一是深入开展等离子体-催化协同机制研究,厘清活性物种与 SF₆ 分子之间的反应路径,实现反应过程与产物的精准调控。二是开发低成本、高稳定性、易再生的多功能催化剂,提升降解效率并延长使用寿命。三是推进低温等离子体与其他技术的系统集成与工艺耦合,构建高效、低耗、低二次污染的 SF₆ 处理体系。四是加强中试放大与工程示范,推动标准化与模块化设备开发,提升技术的工程可行性与经济性。通过以上方向的持续突破,低温等离子体技术有望在 SF₆ 减排与资源化处理领域实现规模化应用,为达成“双碳”目标提供技术支撑。

参考文献

[1] Shi S, Li Y, Cui Z, *et al.* Recent advances in degradation of the most potent industrial greenhouse gas sulfur hexafluoride [J]. Chemical

Engineering Journal, 2023, 470: 144166.
[2] Jiang T, Meng X, Wei Q, *et al.* The development of SF₆ green substitute gas [J]. Sustainability, 2021, 13(16): 9063.
[3] Sovacool B K, Griffiths S, Kim J, *et al.* Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110759.
[4] An M, Prinn R G, Western L M, *et al.* Sustained growth of sulfur hexafluoride emissions in China inferred from atmospheric observations [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 1997.
[5] 王放放, 张杰, 马京香, 等. 羟基磷灰石降解温室气体 SF₆ 实验与机理分析 [J]. 化学工程, 2024, 52(11): 9-14.
[6] 张杰. 六氟化硫废气热降解实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
[7] Mcteague T A, Jamison T F. Photoredox activation of SF₆ for fluorination [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(1): 1-5.
[8] Zhu S, Zhao Y, Ma F, *et al.* SF₆ Photoconversion triggered by oxygen-deficient ZnO atomic layers under mild conditions [J]. Catalysis Letters, 2024, 154(12): 6300-6306.
[9] Govindan M, Adam Gopal R, Moon I S. Electrochemical sequential reduction and oxidation facilitates the continual ambient temperature degradation of SF₆ to nontoxic gaseous compounds [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122881.
[10] Vadikkeetil Y, Subramaniam Y, Murugan R, *et al.* Plasma assisted decomposition and reforming of greenhouse gases: A review of current status and emerging trends [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112343.
[11] Wu Y, Li S Z, Liu J L, *et al.* Experimental study of abatement of SF₆

- gas using an atmospheric-pressure oxygen microwave plasma torch [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127 (22) : 223302.
- [12] Kim J H, Cho C H, Shin D H, *et al.* Abatement of fluorinated compounds using a 2.45 GHz microwave plasma torch with a reverse vortex plasma reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 294: 41–46.
- [13] Shih M, Lee W J, Tsai C H, *et al.* Decomposition of SF₆ in an RF plasma environment [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2011, 52 (11) : 1274–1280.
- [14] Mochalov L A, Kornev R A, Churbanov M F, *et al.* Investigation of the process of hydrogen reduction of ³²S from ³²SF₆ via RF capacitive plasma discharge [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2014, 160: 48–51.
- [15] Petrov G M, Petrova T B, Boris D R, *et al.* Parametric study of low-pressure electron beam generated Ar-SF₆ plasma and implications for processing [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 26 (9) : 095006.
- [16] Son Y S, Lee S J, Choi C Y, *et al.* Decomposition of high concentration SF₆ using an electron beam [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, 124: 220–224.
- [17] Park J H, Shin I H, Seo S H, *et al.* The optimization of SF₆ decomposition process using an electron beam [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, 151: 192–197.
- [18] 李亚龙, 张晓星, 崔兆仑, 等. NH₃ 对 DBD 降解 SF₆ 影响的试验研究 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34 (24) : 5263–5269.
- [19] Li J, Deng D, Dong R, *et al.* Performance evaluation of La-Al bimetallic catalyst-assisted dielectric barrier discharge plasma degradation of sulfur hexafluoride [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13 (4) : 117307.
- [20] Deng D, Li J, Dong R, *et al.* Efficiency and mechanism of SF₆ degradation by dielectric barrier discharge coupled with the ZSM-5 catalyst [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, 64 (18) : 9024–9035.
- [21] Dong R, Yu Q, Li W, *et al.* Efficient degradation of high concentration sulfur hexafluoride by Ni doped ceria combined with dielectric barrier discharge [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2025, 221: 213–224.
- [22] Dong R, Li W, Yang Q, *et al.* Dielectric barrier discharge coupled with oxygen-vacancy-rich NiO-CeO₂ for efficient and low-energy degradation of SF₆ [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2025, 82: 256–269.
- [23] 李亚龙, 谭辉宇, 万昆, 等. DBD 协同 mSiO₂@TiO₂ 催化 SF₆ 高效降解试验研究 [J]. *高电压技术*, 2026, 52 (1) : 235–242.
- [24] Wu Y, Gao P, Li Y, *et al.* Degradation of SF₆ by dielectric barrier discharge cooperating with TiO₂ photocatalysis: Insights into the reaction mechanism [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 660: 159957.
- [25] Xiao H, Zhang X, Hu X, *et al.* Experimental and simulation analysis on by-products of treatment of SF₆ using dielectric barrier discharge [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24 (3) : 1617–1624.
- [26] 马京香, 夏忠林, 王放放, 等. 废弃电气绝缘气六氟化硫的降解技术研究综述 [J]. *环境化学*, 2025, 45 (2) : 1–19.
- [27] Cui Z, Zhou C, Jafarzadeh A, *et al.* SF₆ catalytic degradation in a γ-Al₂O₃ packed bed plasma system: A combined experimental and theoretical study [J]. *High Voltage*, 2022, 7 (6) : 1048–1058.
- [28] Parthiban A, Gopal A A R, Siwayanan P, *et al.* Disposal methods, health effects and emission regulations for sulfur hexafluoride and its by-products [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417: 126107. ■
-
- (上接第27页)
- [19] 赵用明, 李顺平, 张飞跃, 等. 一种高产能浆态床费托合成反应器、费托合成系统及方法: CN 120132718A [P]. 2023–12–11.
- [20] Rahimpour M, Jokar S, Jamshidnejad Z, *et al.* A novel slurry bubble column membrane reactor concept for Fischer-Tropsch Synthesis in GTL technology [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, 90: 383–396.
- [21] Chen J F, Liu Y, Zhang Y. Control of product distribution of Fischer-Tropsch Synthesis with a novel rotating packed-bed reactor: From diesel to light olefin [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51 (25) : 8700–8703.
- [22] 佟瑞利, 卜亿峰, 杜冰, 等. 一种适于稳定生产的费托合成反应器、反应系统及方法: CN 202211474515.6 [P]. 2022–11–23.
- [23] Martinelli M, Gnanamani M K, LeViness S, *et al.* An overview of Fischer-Tropsch Synthesis: XTL processes, catalysts and reactors [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2020, 608: 117740.
- [24] Gu P, Zhang Y M, Wang Y J, *et al.* A new method for continuous classification of fine catalyst particles from a slurry bed Fischer-Tropsch Reactor [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62 (7) : 3116–3127.
- [25] 刘向雷, 范佳宁, 姚海沉. 基于分叉渐变导热结构的颗粒费托反应器: CN 121288679A [P]. 2025–09–12.
- [26] 张建军, 杜宝胜, 时振振, 等. 一种料腿料位测量装置及高温费托合成反应系统: CN 215655083U [P]. 2021–07–30.
- [27] 姚强, 赵铁剑, 刘琰, 等. 费托工艺流程的开工方法: CN 121930859A [P]. 2025–12–18.
- [28] 孙启文, 杨正伟, 刘继森, 等. 一种高温费托合成油中分离提纯1-庚烯的方法与系统: CN 120383504A [P]. 2025–04–24.
- [29] 孙启文, 孙燕, 张宗森, 等. 一种费托合成油直接合成中粘度润滑油基础油的制备方法: CN 116333778A [P]. 2023–05–06.
- [30] 苏朔, 徐冰, 成欣, 等. 一种制备聚α-烯烃的方法: CN 116554921A [P]. 2022–01–28. ■