

《介质阻挡放电降解六氟化硫废气技术规范》编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1 主要工作过程

起草（草案、调研）阶段：

首先，由贵州电网有限责任公司电力科学研究院查询相关资料、调研，对介质阻挡放电降解六氟化硫废气技术规范确定制订方案，并参考了 GB/T 8905《六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则》和 DL/T 639《六氟化硫电气设备运行、试验及检修人员安全防护细则》等标准，再结合介质阻挡放电降解六氟化硫废气的实际应用情况，提出标准草案，申请 2022 年年度的中国电工技术学会的标准，顺利获得了中国电工技术学会电技学字[2022]第 176 号文下达了制定《介质阻挡放电降解六氟化硫废气技术规范》的团体标准任务。2023 年 1 月，贵州电网有限责任公司电力科学研究院成立了起草工作组，按照此标准要求开展相应的试验研究工作，确定了该介质阻挡放电降解 SF₆ 废气的最佳试验条件。2023 年 5 月由贵州电网有限责任公司电力科学研究院组织，对不同水温、输入功率和氩气与六氟化硫配比设置试验对其进行验证，贵州电网有限责任公司电力科学研究院按照此技术规范开展相应的试验工作，确定了该介质阻挡放电降解 SF₆ 废气的试验条件、功能要求、技术要求、降解处理效率、安全防护等措施。2023 年 8 月由贵州电网有限责任公司电力科学研究院组织，对采用不同水温、输入功率和氩气与六氟化硫配比设置试验对比使用进行验证，在贵州电网有限责任公司电力科学研究院、凯里供电局、都匀供电局共三家单位进行协同试验。通过对协同试验数据的汇总，验证了标准使用降解装置均能达到的六氟化硫废气降解速率和降解率。

征求意见阶段：起草工作组讨论并修改草案，形成标准征求意见稿（按照实际参与的贡献进行组建和排名）。

2 主要参加单位和起草工作组成员及其所做的工作

本标准由贵州电网有限责任公司电力科学研究院（牵头）、湖北工业大学、武汉敢为科技有限公司、贵州电网有限责任公司凯里供电局、贵州电网有限责任公司都匀供电局、广东电网有限责任公司电力科学研究院、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、云南电网有限责任公司电力科学研究院、华能（上海）

电力检修有限责任公司、湖北省超能电力有限责任公司，共同负责起草（按实际贡献进行排名）。

主要成员：张英、王明伟、张晓星、张俊龙、潘云、赵世钦、刘喆、余鹏程、唐念、刘晓波、李亚龙、牧灏、邓云坤、周迅、林磊、蒲曾鑫（按实际贡献进行排名）。

所做的工作：张英，项目总负责人，牵头负责介质阻挡放电降解六氟化硫废气技术规范整体方案编制并统筹相关工作，王明伟、张晓星、张俊龙、余鹏程、刘晓波负责开展相应的试验研究工作，刘喆、潘云、赵世钦负责进行协同试验，唐念、李亚龙、牧灏、邓云坤、周迅、林磊、蒲曾鑫协助查询并收集相关资料、调研标准使用降解装置均能达到技术参数。

二、标准编制原则和主要内容

1、标准编制原则

（一）规范性原则

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

（二）一致性原则

标准内容与现行的国家和自地区相关法律法规、政策保持一致。

（三）可操作性原则

本标准征求意见稿是结合标准和六氟化硫废气降解实际情况，重点验证了介质阻挡放电降解装置降解六氟化硫废气的试验条件，验证了可能影响降解率及降解速率的因素，通过对试验条件的探究，建立了介质阻挡放电降解六氟化硫废气技术规范，规范降解装置作业要求，确保了规范的可操作性。

2、标准主要内容

2.1 标准的适用范围

本文件规定了介质阻挡放电降解六氟化硫过程的技术要求，并规定了介质阻挡放电降解六氟化硫处理的技术指标。

2.2 规范性引用文件

GB/T 8905 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则

GB/T 28534 高压开关设备和控制设备中六氟化硫（SF₆）气体的释放对环境
和健康的影响

DL/T 639 六氟化硫电气设备运行、试验及检修人员安全防护细则

2.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

2.3.1 介质阻挡放电 dielectric barrier discharge

有绝缘介质插入放电空间的一种非平衡态气体放电，属于低温等离子体技术的一种。

2.3.2 六氟化硫降解 sulfur hexafluoride degradation

在热、光、电等外界因素作用下，六氟化硫与活性粒子、催化剂等碰撞发生一系列化学反应生成其它便于进行吸收和吸附的小分子降解产物的过程。

2.3.3 六氟化硫废气 sulfur hexafluoride exhaust gas

不符合于电力设备用新六氟化硫气体要求的气体。

2.3.4 降解率 degradation efficiency

降解前的六氟化硫气体浓度和降解后的六氟化硫气体浓度差与降解前的六氟化硫气体浓度的百分比。

2.3.5 降解速率 degradation rate

单位时间内降解六氟化硫气体的体积，用L/h表示。

2.4 介质阻挡放电降解六氟化硫过程的技术要求

2.4.1 介质阻挡放电降解六氟化硫处理装置功能要求

（1）介质阻挡放电降解六氟化硫处理装置（以下简称为降解装置），其主要功能是对不符合 DL/T 1366 要求的气体进行降解处理。

（2）降解装置中混气装置应包含气体混合室、进气口、出气口、水箱、加

热装置、注水口、排水口、水位观察窗等部分，混气装置具有混合气体和加湿、加温功能，加湿水温范围应满足 20~80° C 的恒温加热功能，混气流速 0~30m/s。

(3) 降解装置中等离子体反应装置包含等离子体主机、等离子反应矩阵和散热装置，反应矩阵由多根反应管并联组成，可以根据处理需求增减反应管数量，如 16 根、25 根、36 根、42 根等。

(4) 为防止放电过程中反应管过热，应配备散热装置。降解装置中尾气处理装置包含尾气的吸收和吸附处理。宜采用碱液吸收和固体吸附剂联合处理的方式，碱液和吸附剂应方便更换。降解装置应具有气体检漏功能，防止装置在工作过程中发生漏气。

2.4.2 降解装置使用前安全要求

(1) 降解装置需完成出厂试验，合格后使用。

(2) 降解装置使用前，确保等离子体主机、等离子反应矩阵接地线全部可靠接地。

(3) 降解装置使用前，确保各路通气管道畅通，输气管无破损无泄漏，尾气排出正常。

2.4.3 降解装置处理前准备

(1) 等离子体主机接电源，输入电压 AC 220 V(±10%)，等离子体主机与等离子反应矩阵连接，主机、等离子反应矩阵均必须可靠接地。

(2) 六氟化硫和作为载气的氩气（浓度 99.99%）通过管道与混气箱连接。

(3) 混气箱内置水箱，加水（自来水或蒸馏水均可）至水箱容积的 80%。

(4) 配置好饱和的氢氧化钙碱液，注入集气箱中的碱液吸收池。

(5) 吸附盒中放入固体吸附剂，用于吸附不能被碱液吸收的降解产物。

2.4.4 降解装置降解处理的步骤

(1) 开启电源。

(2) 再次检查接地线，保证可靠接地。

(3) 开启降解装置后端气体阀门与引风机，保持气路畅通。

(4) 启动混气箱的水箱加热开关，水箱升温至所需温度（50-55°C 之间）。

(5) 等离子体主机电源工作主机功率宜调节到 5.0 kW，确保等离子反应矩阵反应管平均输入功率在 100~120W 范围。

(6) 宜设置氩气流量为 4.5L/min、六氟化硫流量为 1.5L/min，六氟化硫和

氟气与加热水汽混合后进入等离子反应模块进行降解。

(7) 处理装置工作时，确保内置水箱中水位不低于警戒水位，必要时补水。

(8) 降解后的尾气可直接接入六氟化硫气体综合分析仪检测尾气中六氟化硫浓度或使用尾气袋取样检测浓度，用于计算降解率。

(9) 检测到集气箱中碱液吸附池出口尾气中有二氧化硫存在时，此时碱液已饱和，应更换。

(10) 尾气中降解产物氟化硫酰产生量，基于六氟化硫的降解率与处理速率计算，其中氟化硫酰占六氟化硫降解后主要含硫产物总比例的 20~30%，降解处理尾气中产生的氟化硫酰摩尔速率为：

$$N_{\text{SO}_2\text{F}_2} = \frac{F_{\text{SF}_6} \times C_{\text{SF}_6}}{22.4} \times DRE(\text{SF}_6) \times S_{\text{SO}_2\text{F}_2} \text{ (mol/min)}$$

式中：

$N_{\text{SO}_2\text{F}_2}$ —单位时间内产生氟化硫酰的摩尔数 (mol/min)；

F_{SF_6} — SF_6 废气输入流速；

C_{SF_6} —六氟化硫的初始浓度 (%)；

DRE —六氟化硫的降解率 (%)；

$S_{\text{SO}_2\text{F}_2}$ —氟化硫酰占六氟化硫降解后主要含硫产物总比例，宜取 30%。

(11) 固体吸附剂可选用 KDHF-03，满足孔径为 4.0 mm~6.0 mm，粒度 \geq 99.0% 的要求，按照 1kg 吸附剂吸附 0.63 mol 降解尾气残留降解产物氟化硫酰当量计算，吸附饱和后更换。

(12) 降解率低于 96%的尾气宜使用尾气回收装置进行回收，回收尾气循环进入降解装置进行二次降解。

(13) 降解处理完成时，关闭水箱加热电源，关闭气体阀门，关闭等离子体主机电源，关闭等离子反应矩阵中气体阀门与引风机。

(14) 工作结束，应将水从水箱排水阀中排出，碱液吸收池中排出碱液并用水反复清洗三次。

(15) 回收的碱液和更换的吸附剂应按照 GB1859 中第 8 章中 8.1 有关规定暂存，按照 HJ-1276 中第 5 章中 5.2 有关规定进行标识。

3、主要技术差异

目前，国内外均没有已发布实施的介质阻挡放电降解六氟化硫的相关标准，

本标准属于首次制定。本标准制定了新的介质阻挡放电降解六氟化硫技术规范的标准，该标准规范了使用介质阻挡放电技术降解六氟化硫的技术要求，并规定了介质阻挡放电降解六氟化硫处理的技术指标。按照技术要求和安全防护措施进行使用进行规范化操作，并优选了对介质阻挡放电降解六氟化硫的输入功率、水温、氩气（载气）与六氟化硫配比及用于吸收降解后小分子气体的碱液和吸附剂做了装置性试验，保证了使用介质阻挡放电降解装置处理六氟化硫常压下可达到的降解速率和降解率。使用该降解装置试验过程中，降解装置必须可靠接地，试验人员的安全管理参照 DL/T639 规定执行，室内工作应采取强制排风措施，环境保护及人员的安全防护应符合 GB/T 28534 有关规定。

4、解决的主要问题

SF₆电气设备在电力行业应用广泛，其具有强温室效应，GWP 值是 CO₂ 的 23500 倍，排放会严重危害环境，已列入国际强制减排气体。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）统计数据表明，SF₆在大气中的温室效应占据全球的 15%，且在大气中寿命超过 3200 年，电力工业的 SF₆排放是全球最大的 SF₆排放源。从 1990 年以来，电力工业的 SF₆排放量占总排放量的 70%（其中包括气体泄漏、设备维修和退役），紧接着是镁金属冶炼工业、半导体制造工业和 SF₆气体生产行业，各约占 10%。首先，欧洲、美国和日本等发达地区对电力行业的 SF₆气体的回收再利用在 90%，我国电网公司对大型设备检修的 SF₆废气回收率最高可达 95%，然而，很多 GIS 小气室以及 110kV 电压等级设备（均低于 8kg）量少不易回收，存在偷排情况，且故障设备气体产生大量有毒分解物，极难净化，也存在偷排情况，危害环境。目前。因此，介质阻挡放电（DBD）降解六氟化硫废气技术已经用于南网和国网装置，但目前，没有相应的标准对介质阻挡降解六氟化硫废气技术规范进行规范。为了使这项工作能规范化开展，有必要制定统一的规范标准，使运行单位能够依据标准制定相关的作业指导规范。

本标准征求意见稿是结合标准和六氟化硫废气降解实际情况，重点验证了介质阻挡放电降解装置降解六氟化硫废气的试验条件，验证了可能影响降解率及降解速率的因素，通过对试验条件的探究，建立了介质阻挡放电降解六氟化硫废气技术规范，规范降解装置作业要求，并提出降解处理效率的技术指标。

降解速率（常温，0.12 MPa）	降解率
≥86 L/h	≥96%

三、主要试验（或验证）情况

1、 确定降解速率和降解率的优选试验条件参数

本标准采用等离子反应矩阵选用的为 16 根放电矩阵管形成的降解装置开展试验。降解速率和降解率试验，采用控制变量法，对同一台降解装置，试验不同水温、不同输入功率和不同气体流量下对六氟化硫气体的降解率和降解速率的影响；氩气和六氟化硫气体使用流量控制计调节输入六氟化硫降解装置，降解前后的六氟化硫浓度采用六氟化硫气体综合分析仪定量检测，用六氟化硫输入初始浓度与降解后的输出浓度之差与输入初始浓度的比值计算降解率（DRE）。

$$DRE = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

式（1）中：

C_{in} _____六氟化硫的初始浓度（%）；

C_{out} _____六氟化硫降解后的浓度（%）；

DRE _____六氟化硫的降解率（%）。

具体试验如下：首先开展输入功率与流量不变，研究不同水温对降解速率及降解率的影响，试验得出，从室温 25℃开始升温，每 5℃为一个梯度，当水温为 30℃时，降解率最高，紧接着，试验同一水温下，不同输入功率对六氟化硫降解装置降解速率及降解率的影响，以找到最佳降解输入功率。然后在温度和流量不变条件下，研究不同输入功率对六氟化硫降解装置降解速率及降解率的影响，得出最佳降解输入功率为 5kW，随后验证当水温和输入功率确定的条件下，氩气与六氟化硫不同输入比例对降解率和降解速率的影响。得出，介质阻挡放电降解六氟化硫废气最佳条件为：水温 50-55℃（水蒸汽温度 25~30℃），输入功率：5kW，氩气输入量 4.5L/min，六氟化硫输入量 1.5L/min，输入氩气和六氟化硫比例宜为 3:1，此时单位时间降解降解速率达到 50L/h 以上，同步满足降解率达到 96%以上。

2、碱液及固体吸附剂的确定

六氟化硫降解产物主要有 SOF₂、SO₂F₂、SO₂ 等，均可以通过碱液吸收池进行吸收，常用的酸性气体吸收剂有 KOH、NaOH 和 Ca(OH)₂ 等饱和溶液。当六

氟化硫气体综合分析仪检测到尾气中存在 SO₂ 时，需更换碱液；对以上最优降解条件，使用同体积不同饱和碱溶液对 SO₂ 进行吸收，分别统计在综合分析检测到 SO₂ 的时间及生成盐后的理化性质等对比，最终确定碱液吸收剂；碱液吸收后残留的少量 SO₂F₂ 用固体吸附剂如 KDHF-03、F-03 及 4A 等分子筛进行吸附；固体吸附剂确定需从分子筛的吸附量、对 SO₂F₂ 的吸附效果等方面进行综合评价。

得出，在 KOH、NaOH 和 Ca(OH)₂ 三种饱和碱溶液中，KOH 和 NaOH 由于在水中的溶解度较大，强碱，相同体积的饱和碱溶液中吸收的酸性气体 SO₂ 的量也更大，因此分析仪检测到 SO₂ 的时间也更久，KOH 和 NaOH 成本较高且对环境有害，而 Ca(OH)₂ 溶解度较低，碱性偏弱，其成本较低且吸收酸性气体后易产生固体钙盐沉淀，安全性较高，易于处理，宜选 Ca(OH)₂ 碱液作为尾气吸收液。

为获得用于吸附 SO₂ 等酸性气体 Ca(OH)₂ 碱液更换的时间，保证 SO₂ 等酸性气体被充足吸附，用 CaO 配制 100g/L 的氢氧化钙溶液，注入降解装置处理模块中的碱液吸收池。装置处理六氟化硫产生的含二氧化硫酸性尾气，每 10L 氢氧化钙溶液可吸附 3h 酸性尾气，根据碱液吸收池容量确定尾气有效吸收时间，达到处理时间上限，应及时更换碱液，此时六氟化硫气体综合分析仪检测到通过碱液吸收后的尾气中二氧化硫浓度仍小于 35 μL/L 浓度，即 100mg/m³，满足 GB/T 16297 排放标准，此时更换碱液合适。

按照本文件 2.4.4 中，取流量为 4.5L/min、六氟化硫流量为 1.5L/min，以降解率 96% 计算，示例如下：

$$N_{\text{SO}_2\text{F}_2} = 99.99\% \times 1.5 / 22.4 \times 96\% \times 30\%$$

得到单位时间内产生氟化硫酰的摩尔数为 0.0193mol/min，即 1.157mol/h。

为测试不同吸附剂对 SO₂F₂ 的吸附效果，分别对 KDHF-03、Al₂O₃、4A、5A、13X 和 ZSM-5 等 6 种分子筛进行了测试，测试中使用的 SO₂F₂ 的浓度为 2224 μL/L，体积为 1L，6 种吸附剂的质量统一设置为 5g，吸附 10 小时后测试气体中 SO₂F₂ 的剩余浓度，结果得出，宜选 KDHF-03 分子筛和 5A 分子筛做固体吸附剂均表现出了优异的吸附性能，对 SO₂F₂ 吸附率都能达到 99% 以上。

为进一步比较 KDHF-03 分子筛和 5A 分子筛对 SO₂F₂ 的吸附效果，分别对不同吸附时间（2h 和 6h）和不同吸附剂使用量（2g 和 5g）下对 SO₂F₂ 的吸附效果开展实验，以探索两种吸附剂的吸附性能差异，结果得出，KDHF-03 分子筛

和 5A 分子筛对 SO₂F₂ 吸附性能差异不明显。整体表现上 KDHF-03 分子筛的吸附性能略优于 5A 分子筛，吸附量增大到 5g，在降解较长时间段（6h），KDHF-03 分子筛吸附后的 SO₂F₂ 气体剩余量较低。因此，在吸附剂选择上优选 KDHF-03 分子筛。选取 KDHF-03，进一步进行 SO₂F₂ 浓度放大吸附试验，经检测发现，吸附剂 3h 吸附趋于饱和，1kg 吸附剂可吸附 0.63 mol 氟化硫酰，即按照以上试验参数进行降解，每小时降解产生的氟化硫酰需要 1.836 kg 进行吸附。

3、协同试验

3.1 参加协同试验的单位、试验人员

协同试验选定 3 个协同单位，协同试验的单位、人员、名称见表 3-1。

表 3-1 协同试验单位和人员

协同试验仪器编号	协同试验单位名称	协同试验人员
A	贵州电网有限责任公司电力科学研究院	刘喆
B	贵州电网有限责任公司凯里供电局	潘云
C	贵州电网有限责任公司都匀供电局	赵世钦

3.2 协同试验的条件

本协同试验选定 3 个协同单位，均按照技术规范中技术要求对介质阻挡放电降解六氟化硫废气装置对其优选条件进行试验，严格按照技术规范中技术要求进行试验，同步做好安全防护工作，试验结果用于相互验证。

3.3 协同试验结果

各单位六氟化硫降解装置对最优条件平行试验结果表明，采用本标准中降解装置技术要求对六氟化硫气体进行降解，各测试结果均保持一致，降解率达到 96%以上，实现每小时处理六氟化硫废气超过 86 L，可以满足本标准降解要求，保证该标准中对应六氟化硫废气降解率和降解速率，同时保证了试验人员的安全。

四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

六氟化硫（SF₆）具有强温室效应，温室效应值为 CO₂ 的 23500 倍，且在大

气中可存在 3200 年，极难降解，排放会严重危害环境，已列入国际六种强制减排气体之一。电力工业的 SF₆ 排放是全球最大的 SF₆ 排放源。从 1990 年以来，我国电力工业的 SF₆ 排放量占总排放量的 70%（其中包括气体泄漏、设备维修和退役），紧接着是镁金属冶炼工业、半导体制造工业和 SF₆ 气体生产行业，各约占 10%。随着环保要求的提高，新型绝缘气体替代 SF₆ 越来越普及，未来会产生大量 SF₆ 废气。仅针对六氟化硫废气进行收集、提纯和储存，不能解决六氟化硫安全排放等问题。介质阻挡放电（DBD）降解 SF₆ 废气已经广泛用于南网、国网和高校等研究机构，降解 SF₆ 废气可有效减少温室效应。但目前，没有相应的标准对介质阻挡降解六氟化硫废气技术进行规范。为了使这项能减少碳排放的重要工作规范化开展，有必要制定统一的规范标准，使各使用单位能够依据标准制定相关的作业指导规范，有效减少碳排放，助力碳达峰，该项新标准的制定填补了国内外无害化处理 SF₆ 废气技术的空白。

六、与国际、国外对比情况

1、国际、国外标准采用情况

以下标准在本标准内容中被引用，。

GB/T 8905 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则

GB/T 28534 高压开关设备和控制设备中六氟化硫（SF₆）气体的释放对环境健康的影响

DL/T 639 六氟化硫电气设备运行、试验及检修人员安全防护细则

上述标准内容涉及六氟化硫电气设备的运行、维护、检修和气体再使用技术以及排放影响。通过对上述文件引用辅助六氟化硫气体相关背景介绍，但被引用标准中均未涉及 SF₆ 废气降解相关技术内容。

2、与同类国际、国外标准的主要技术对比情况

国内外均无强温室效应 SF₆ 废气降解的标准，为规范介质阻挡放电降解 SF₆ 废气过程和降解后的技术指标，有必要制定统一的规范标准，使运行单位能够依据标准制定相关的作业指导规范，规范作业。

3、是否测试了国外的样品、样机

否。

4、标准水平的结论

国内先进水平。

七、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

国内外均没有降解 SF₆ 废气的相关标准，本标准属首次制定。符合“双碳”战略，本标准不违反国家相关法律法规及强制性标准。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

本标准的性质为团体标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

建议本标准批准发布 2 天后实施。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

无。