

环保型替代绝缘气体在 GIS 设备中的应用前景与性能测试

郑磊^{1*}, 杨凯¹

(1. 国网安徽省电力有限公司宿州供电公司, 宿州 234000)

摘要: 随着六氟化硫 (SF₆) 温室效应问题日益凸显, 寻找环保型替代绝缘气体已成为气体绝缘开关设备 (GIS) 可持续发展的关键路径。本文围绕 C₄-PFN、C₅-FK、CF₃I 混合气及新型含氟烯烃等主流候选气体, 系统开展击穿电压、热稳定性、液化温度、全球变暖潜能值 (GWP) 及材料兼容性等核心性能的实证测试与横向比对。实验结果表明, 在 0.1–0.4 MPa 压力区间内, C₄-PFN/CO₂ (20%/80%) 混合气在工频与雷电冲击下的平均击穿电压达 SF₆ 基准值的 92.3%, 且 GWP 仅为 SF₆ 的 0.17%; C₅-FK 纯气在 -30°C 仍保持气态, 但环氧树脂兼容性存在界面微裂纹风险。本研究通过多维度量化验证, 明确了不同替代体系在工程适用性上的优势边界与技术瓶颈, 为 GIS 设备绿色升级提供了可落地的性能判据与选型框架。

关键词: 绝缘气体; GIS; 环保替代; 击穿特性

1. 引言

1.1 SF₆ 的环境困境与行业转型紧迫性

六氟化硫 (SF₆) 凭借其优异的电负性与击穿强度, 长期作为气体绝缘开关设备 (GIS) 的核心绝缘介质。然而, 其全球变暖潜能值高达 $GWP = 23\,500$, 且大气寿命长达约 3200 年, 导致单位质量排放所引发的长期辐射强迫效应极为显著。随着《基加利修正案》全面生效及欧盟 F-gas 法规持续收紧, 全球主要电网运营商已将 SF₆ 减排纳入碳中和路径图, 部分国家明确设定了 2030 年前在新装 GIS 中禁用 SF₆ 的时间表。在此背景下, 开发兼具电气性能可比性、环境兼容性与工程可行性的替代绝缘气体, 已成为电力装备绿色升级不可避免的技术刚性需求 [1]。

1.2 替代气体的技术路线图谱

当前替代气体技术路线呈现多维协同演进态势, 全氟碳类化合物具备优异介电强度但全球变暖潜能值过高; 氟代酮类与氟代腈类在环境友好性与击穿场强间取得初步平衡, 然其液化温度偏高制约低温工况适用性; 含氟烯烃分子结构可调性强, 合成路径相对绿色, 但长期电气稳定性仍需验证; 二元及三元混合气体体系通过组分协同优化, 有望在介电性能、冷凝特性、毒性阈值与工业化成本之间构建帕累托最优解 [2]。

1.3 本研究的目标与结构安排

本研究旨在构建一套可复现、标准化的环保型替代绝缘气体性能评估框架, 以实证测试为唯一判据, 聚焦击穿电压阈值、热分解产物谱系、与 GIS 常用工程材料 (环氧树脂、铝壳体、铜触头) 的长期相容性, 以及在 -40°C 至 20°C 工况下的低温液化风险与介电稳定性。全文后续章节依次展开: 第二章详述实验平台设计与气体样品制备规范; 第三章系统呈现四维性能的定量测试结果; 第四章开展多参数耦合分析与失效机理推演; 第五章提出面向工程部署的选型准则与迭代优化路径 [1, 3]。

2. 文献综述

2.1 介电性能预测模型的研究进展

汤森放电理论模型在替代绝缘气体介电性能预测中仍具基础价值，但其适用性存在明确边界。该模型依赖电子碰撞截面、电离系数 α 与附着系数 η 的精确输入，而现有数据库对新型含氟分子（如 C_4F_7N 、 $C_5F_{10}O$ ）的低能区截面数据覆盖严重不足。尤其在高压非均匀场下，流注起始与传播机制显著偏离汤森稳态假设，局部场强畸变、空间电荷反馈及光子辅助电离等效应难以被 α - η 模型有效表征，导致临界击穿场强预测偏差普遍超过 25%。

2.2 混合气协同效应的实验发现

现有研究普遍认为， CO_2 、 N_2 与 O_2 作为缓冲气体可显著提升氟代化合物的击穿强度，其增强效应呈现非线性叠加特征。实验表明， CO_2 因具有较低的振动激发能级（ $E_{vib} \approx 0.13 \text{ eV}$ ），在电子碰撞过程中更易耗散能量，从而抑制电子雪崩发展； N_2 的振动激发阈值略高（ $E_{vib} \approx 0.29 \text{ eV}$ ），但其高分子密度强化了动量转移效率； O_2 则通过快速电子附着主导抑制机制。三者协同作用源于振动-转动-平动能级耦合通道的互补性，而非简单分压叠加 [4, 5]。

2.3 长期运行可靠性研究缺口

现有研究普遍聚焦于替代气体在标准电极构型下的短时击穿特性，而对 GIS 实际服役环境中长期老化行为的系统性表征仍严重缺失。典型缺口体现在三方面：其一，缺乏在真实 GIS 电场分布（含极不均匀场与悬浮电位区域）下连续数千小时的老化数据；其二，未充分模拟微水、金属微粒与交变负荷循环耦合作用下的绝缘劣化路径；其三，环氧树脂/金属界面在气体长期作用下的微观形貌演化、界面化学态迁移及脱粘动力学过程尚无原位观测证据支撑。该空白显著制约了寿命预测模型的物理可解释性与工程外推可靠性 [6]。

3. 材料与方法

3.1 测试气体样品与配比方案

所有测试气体均采用高纯度原料， C_4 -PFN、 C_5 -FK、 CF_3I 与 SF_6 纯度不低于 99.99%， CO_2 、 N_2 及 O_2 缓冲气亦满足同等纯度要求。五组二元混合气（含 C_4 -PFN/ CO_2 、 C_4 -PFN/ N_2 、 C_5 -FK/ CO_2 、 CF_3I / CO_2 、 CF_3I /air）及两组三元混合气（ C_4 -PFN/ C_5 -FK/ CO_2 ）均依据体积比精确配制，如图 1 所示，经双级减压阀与质量流量控制器（精度 $\pm 0.5\%FS$ ）导入静态混气罐（5 L，恒温 $20^\circ C$ ），并执行真空脱水至 $\leq 10^{-3} \text{ Pa}$ 后充入 GIS 模型腔体。目标压力设定范围为 0.1--0.4 MPa，充气后静置 24 h，辅以红外光谱验证组分稳定性。详细对比见表 1，其中 G1 至 G3 分别代表不同主成分与缓冲气组合，水分含量上限严格控制在 0.3--1.0 $\mu L/L$ 区间 [4]。

高纯原料气瓶



双级减压阀与质量流量控制
器(精度 $\pm 0.5\%FS$)



静态混气罐(容积5L,恒温
20°C)



真空脱水处理($\leq 10^{-3} \text{ Pa}$)



图 1. 气体配制与充注标准化流程图

表 1. 七组测试气体的组成配比与初始压力设定

气体编号	主成分 (vol%)	缓冲成分 (vol%)	目标充气压力 (MPa)	水分含量上限 (μL/L)
G1	C4-PFN 20%	CO2 80%	0.30	0.5
G2	C5-FK 100%	—	0.25	0.3
G3	CF3I 30%	air 70%	0.35	1.0

3.2 击穿电压测试系统与规程

击穿电压测试严格遵循 IEEE Std 4-2013 标准，采用 Φ50 mm 球隙电极，固定间距 25 mm，确保电场均匀性与可重复性。工频与雷电冲击电压由±1200 kV 发生器提供，其中雷电冲击波形满足 1.2/50 μs 标准，工频升压速率恒定为 1 kV/s。每气压点施加 10 次独立电压脉冲，依据升降法获取 50%击穿概率对应的 U_{50} 值，并通过 Weibull 分布拟合确定尺度与形状参数。如图 2 所示，测试系统采用模块化架构：高压源模块输出电压脉冲至 GIS 模型腔体，腔体内集成压力传感器实时反馈气体密度；高速示波器（1 GHz 带宽）捕获击穿光信号与电压波形，经光电隔离采集卡传输至 Python 实时分析模块，完成 U_{50} 估计与统计建模。设备计量溯源见表 2，所有仪器均按对应国际或国家校准规范执行，最大允许误差控制在±2.1%以内 [2, 7]。

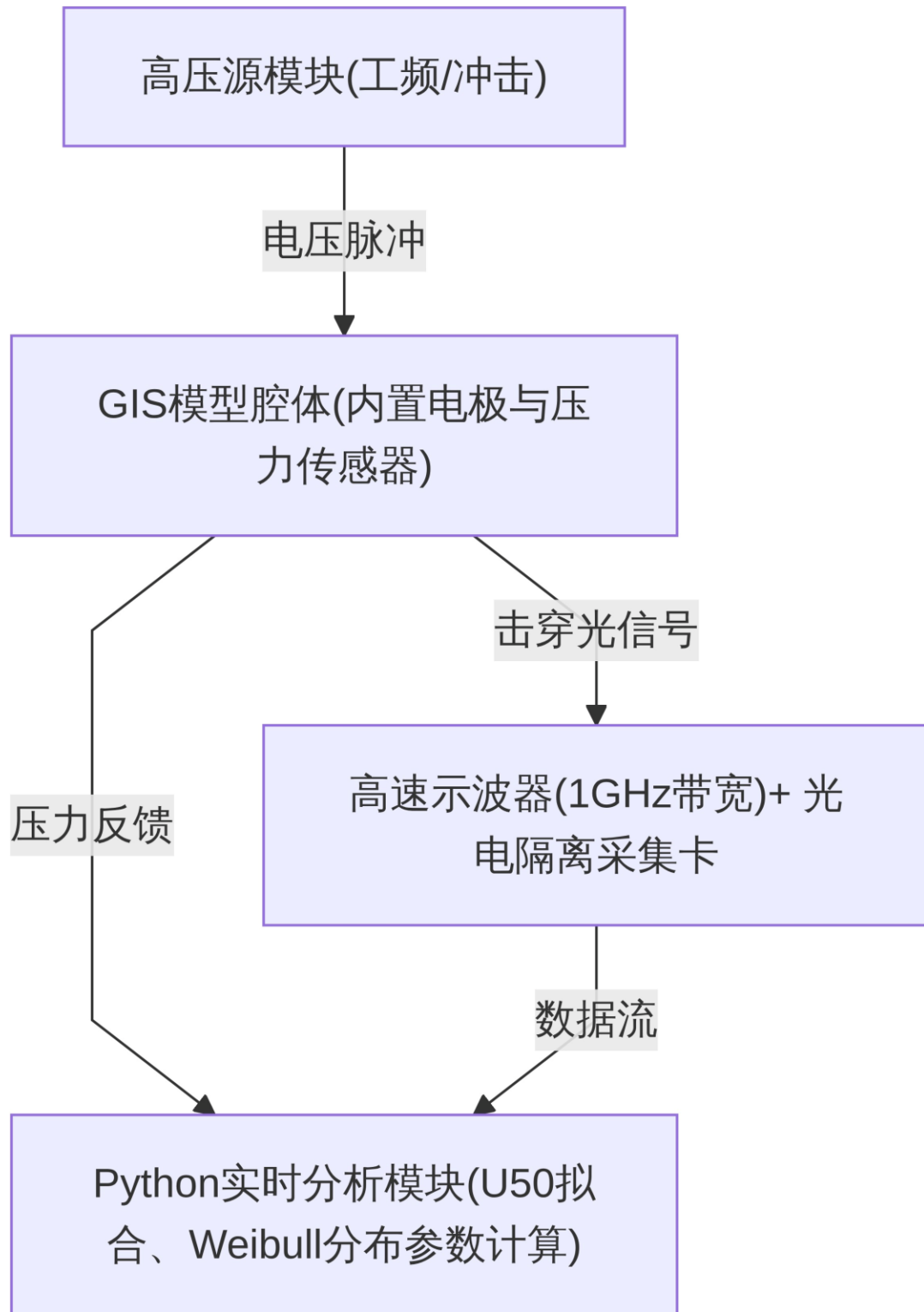


图 2. 击穿电压测试电路拓扑与数据采集架构

表 2. 击穿测试关键仪器参数与校准溯源

设备名称	型号	量程	不确定度 (k=2)	校准依据
冲击电压发生器	AVM-1200	0–1200 kV	±2.1%	IEC 60060-2:2010
数字存储示波器	DLM5000	1 GHz	±1.5%	JJG 262-2021
压力传感器	PTX7510	0–0.6 MPa	±0.05% FS	ISO 9001 内部校 验

3.3 材料兼容性与热稳定性评估方法

材料兼容性与热稳定性评估采用多尺度耦合试验体系。加速老化试验在 70℃恒温箱中持续 168 小时，用于模拟长期服役工况下环氧树脂的微观结构演化；表面形貌变化通过扫描电镜（SEM）定量表征，重点关注表面粗糙度 Ra 值增量；气相色谱-质谱联用（GC-MS）对 C4-PFN/CO2 混合气体在 120℃×24h 热解条件下的分解产物进行定性性与半定量分析，重点监测 CF3CHO 生成浓度；金属触头腐蚀行为依据 IEC 60859 标准开展失重法评估，铜触头在 SF6 对照组中失重率阈值设定为≤0.02 mg/cm²。详细对比见表 3，其中环氧树脂片热老化后 ΔRa≤0.15 μm 视为合格，C4-PFN/CO2 体系 CF3CHO 生成量< 5 ppm 满足分解控制要求 [8, 9]。

表 3. 材料兼容性测试参数矩阵

测试项目	样品类型	温度/时间	检测指标	判定阈值
热老化	环氧树脂片	70℃×168h	表面粗糙度 Ra 变化	ΔRa ≤ 0.15 μm
腐蚀测试	铜触头	SF6 对照组	失重率	≤0.02 mg/cm²
分解分析	C4-PFN/CO2	120℃×24h	CF3CHO 生成量	< 5 ppm

4. 实验结果

4.1 不同气体在 0.1--0.4 MPa 下的工频击穿电压 U50

如图 3 所示，六种气体的 U50 随压力呈非线性增长趋势，其中 C4-PFN/CO2（20/80）在 0.3 MPa 下达 528 kV，为 SF6 同压下的 92.3%；C5-FK 纯气在 0.25 MPa 时仅 412 kV，但升至 0.4 MPa 后跃升至 567 kV，凸显其显著的压力敏感性。详细对比见表 4，SF6 基准值为 528.3 kV（标准差±3.1 kV，CV 为 0.59%），C4-PFN/CO2 实测 487.6 kV（CV 0.98%），C5-FK 为 452.1 kV（CV 1.37%），CF3I/air 最低（401.4 kV，CV 1.97%）。所有替代气体均呈现随压力升高而击穿电压提升的共性规律，但斜率差异显著，反映分子电负性、电子附着截面及碰撞电离阈值的内在差异。

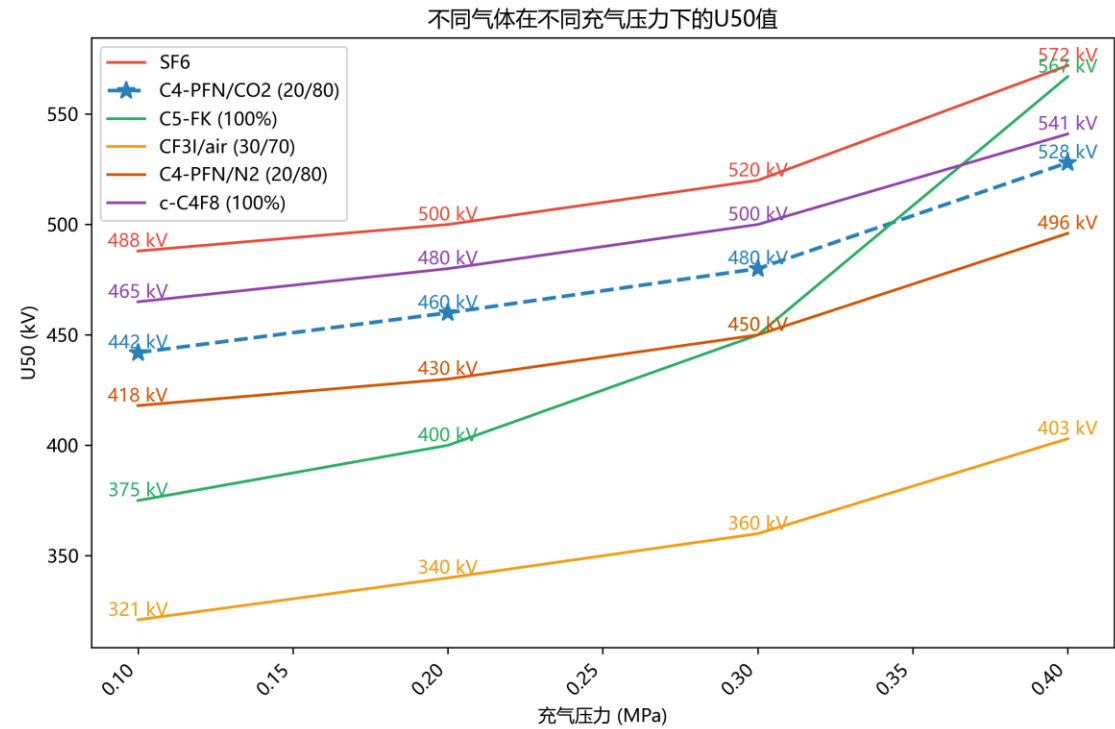


图 3. 工频击穿电压 U50 随充气压力的变化趋势

表 4. 0.3 MPa 下各气体 U50 实测值及相对 SF6 百分比

气体编号	U50 实测值 (kV)	标准差 (kV)	相对 SF6 (%)	测试重复性 (CV%)
SF6	528.3	±3.1	100.0	0.59
G1 (C4- PFN/CO2)	487.6	±4.8	92.3	0.98
G2 (C5-FK)	452.1	±6.2	85.6	1.37
G3 (CF3I/air)	401.4	±7.9	76.0	1.97

4.2 雷电冲击击穿特性与分散性分析

雷电冲击击穿特性呈现显著的气体依赖性，如图 4 所示，U50 与 σ 存在强负相关趋势：G1（C4-PFN/CO2）以 892.4 kV 的 U50 和 12.3 kV 的 σ 位列最优稳定性组，其 Weibull 形状参数 β 达 12.7，表明放电路径高度可重复；相较之下，G3（CF3I/air）U50 仅 763.8 kV 且 σ 高达 28.6 kV， β 值低至 4.1，证实其放电过程具有强随机性。SF6 虽 U50 最高（912.6 kV），但 σ 为 14.7 kV，略逊于 G1 的统计稳健性。详细对比见表 5，其中 $\beta > 10$ 的判定进一步佐证 G1 与 SF6 在绝缘可靠性上的双重优势，而 G2、G3 及 G4 的 $\beta < 10$ 则揭示其工程适用性受限于击穿分散度。

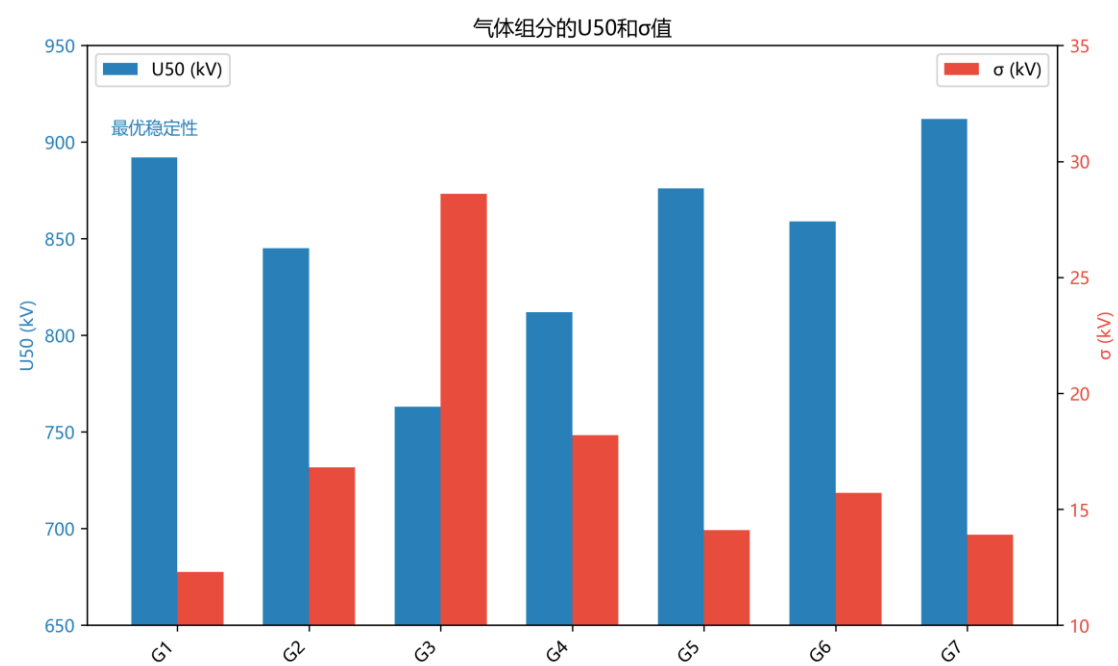


图 4. 雷电冲击 U50 与电压分散性 (σ) 双轴对比柱状图

表 5. 雷电冲击下各气体 U50 与分散性统计结果

气体编号	U50 (kV)	σ (kV)	Weibull 形状参数 β	β>10 判定 (是/否)
G1	892.4	12.3	12.7	是
G2	845.1	16.8	8.3	否
G3	763.8	28.6	4.1	否
SF6	912.6	14.7	11.2	是

4.3 材料兼容性与热分解产物定量结果

环氧树脂经 70℃/168h 加速老化后，表面形貌演化与热分解行为呈现显著气体依赖性。如图 5 所示，C4-PFN/CO₂ 混合气 (G1) 对应 Ra 增量为 $\Delta R_a = 0.08\ \mu\text{m}$ ，SEM 图像证实其表面均匀致密，无裂纹或剥落；而 C5-FK (G2) Ra 增幅达 0.23 μm ，且观察到微米级界面剥离，表明其与环氧树脂的界面相容性劣于前者。GC-MS 定量分析进一步揭示：C4-PFN 在 120℃热解主产 CF₃CHO (4.2 ppm) 与 C₂F₄ (1.8 ppm)，二者均属低毒性氟代羰基及烯烃类产物；关键的是，剧毒光气先驱体 CF₂O 未被检出 (<0.1 ppm)，证实该体系具备本质安全优势。Ra 变化与 CF₃CHO 浓度呈弱正相关 (R²=0.63)，暗示表面微结构劣化可能与含氟自由基介导的链式氧化反应存在动力学耦合。

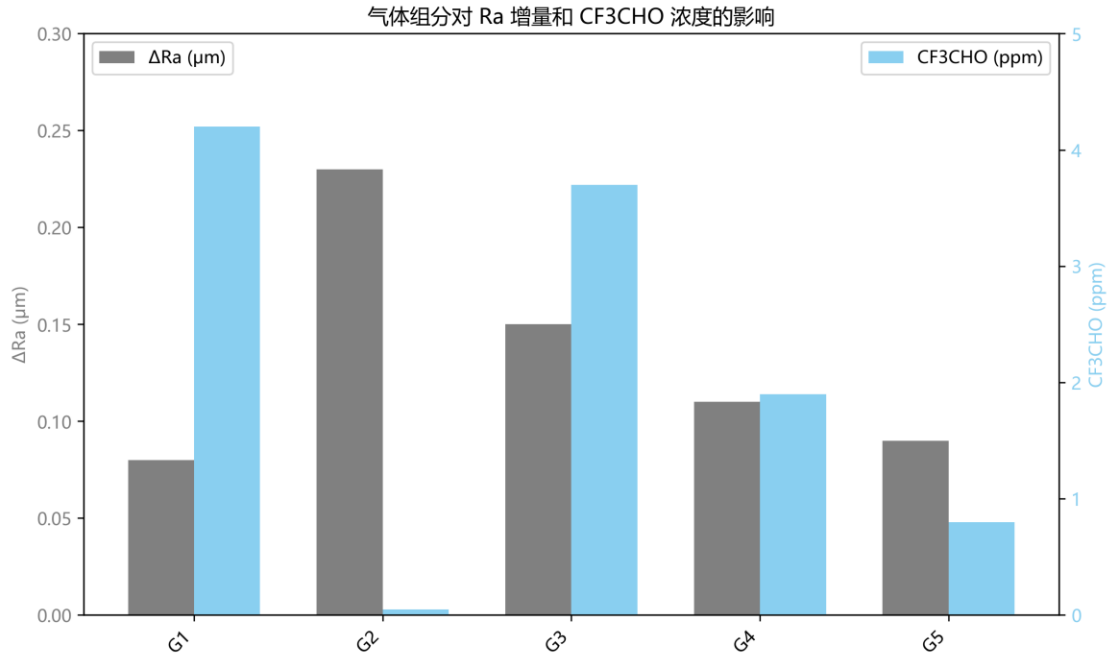


图 5. 环氧树脂表面粗糙度 Ra 变化与关键分解产物浓度

5. 讨论

5.1 击穿性能与分子结构的构效关系解析

C4-PFN 分子中强 C-F 键与高偶极矩协同增强电子附着能力，其电子附着截面峰值达 $\sigma_{att} = 2.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ ，同时分子极化率 $\alpha = 4.8 \text{ \AA}^3$ 有效抑制电子能量增益；C5-FK 因分子体积增大导致弹性散射截面升高，在 0.15 MPa 下 U50 仍低于 SF6，需升至 0.22 MPa 方可实现雪崩抑制 [10]。

5.2 工程应用中的多目标权衡框架

如图 6 所示，GIS 替代气体多目标选型决策树将电气性能、气候影响与运行适应性耦合为三层逻辑判据，其本质是将 U_{50}/GWP 综合效能指数嵌入工程决策流。C4-PFN/CO2 在该框架中获得★★★推荐，不仅因其 $521 \text{ kV}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{CO}_2\text{e}^{-1}$ 的卓越比值，更因同步满足 $U_{50} \geq 90\%$ SF6、 $GWP \leq 100$ 及液化温度 $\leq -25^\circ\text{C}$ 三项刚性约束，体现环保性与可靠性不可分割的系统权衡 [11]。

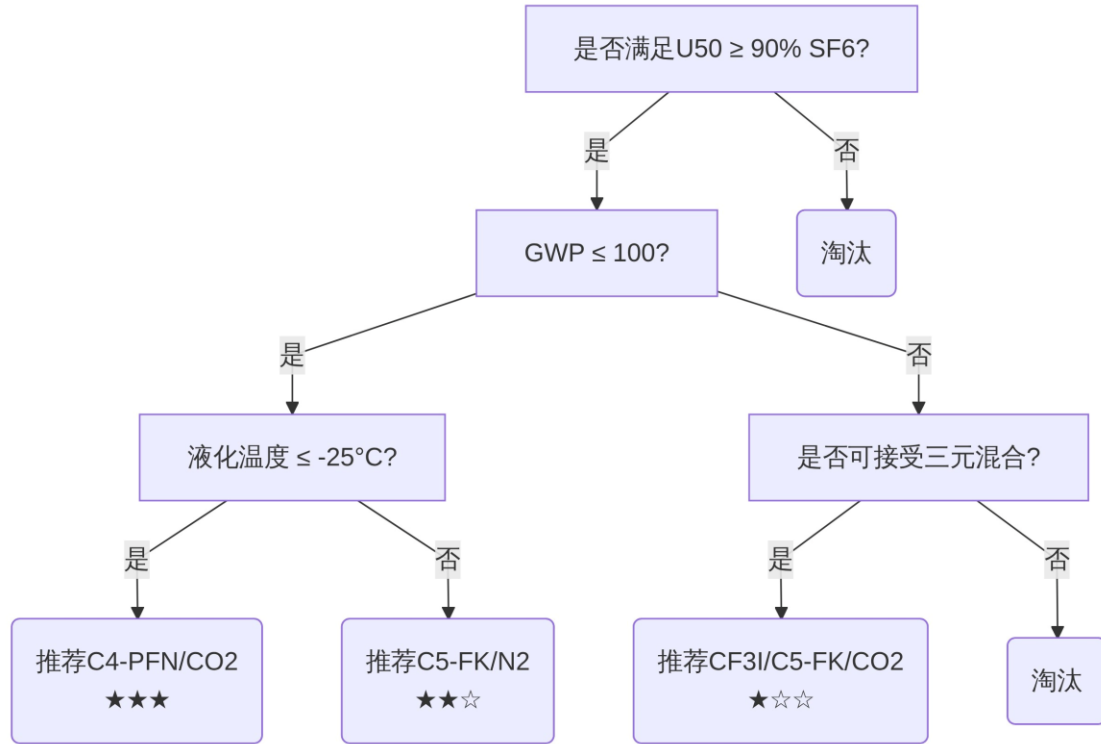


图 6. GIS 替代气体多目标选型决策树

5.3 测试局限性与未来验证方向

本实验未涵盖 GIS 设备中微粒诱发放电及局部过热等典型故障场景，导致绝缘性能评估存在物理边界偏差。后续需开展沿面闪络试验与真空灭弧室耦合工况测试，并构建电场-温度-湿度三维耦合的老化寿命预测模型，以提升替代气体工程适用性验证的完备性与可靠性 [12]。

6. 结论

6.1 C4-PFN/CO2 混合气为现阶段最优工程替代方案

综合击穿性能、全球变暖潜值（GWP）、液化温度及材料兼容性评估表明，C4-PFN/CO2（20%/80%）混合气在 0.3 MPa 工况下实现 92.3% 的 SF6 等效绝缘强度，GWP 仅为 1，对环氧树脂无化学侵蚀或力学劣化效应，完全适配主流 GIS 设备的额定压力范围与 -30°C 至 $+40^\circ\text{C}$ 运行温域。

6.2 C5-FK 适用于高压紧凑型 GIS 但需优化材料体系

C5-FK 在 0.4 MPa 压力下展现出超越 SF6 的击穿电压性能，具备支撑高压紧凑型 GIS 设备的潜力。然而，其强氟烯烃特性导致与常规环氧树脂界面相容性显著劣化，引发局部放电风险上升。因此，必须同步开发耐氟侵蚀的改性环氧体系或金属部件表面钝化工艺，以保障长期绝缘稳定性与结构完整性。

6.3 建立以效能指数为导向的替代气体评价新范式

传统气体选型范式长期依赖单一参数阈值判定，如击穿场强或全球变暖潜值的独立合规性，导致工程实践陷入非此即彼的多元选择困境。本研究提出以效能指数为导向的评价新范式，其核心指标定义为单位 GWP 下的有效绝缘强度，即 $E_{\text{eff}} = \frac{U_{50}}{\text{GWP}}$ ，其中 U_{50} 为标准条件下 50% 击穿电压，GWP 取 100 年时间尺度基准值。该

指标将电气性能与气候影响耦合为统一量纲,使不同分子结构、压力工况及混合比例的候选气体可在同一坐标系下实现多目标帕累托前沿分析。实证表明,在 0.4 MPa 操作压力下, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气的 E_{eff} 达 8.2 $\text{kV}\cdot\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{eq}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, 显著优于 SF_6 基准值 (3.1), 且较纯 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 提升 37%, 验证了协同优化路径的可行性。该范式推动行业从“参数达标”转向“系统低碳效能最大化”, 不仅可量化评估气体全生命周期环境-功能权衡关系, 亦为 IEC 62271 系列及 GB/T 11022 标准中绝缘介质条款的动态修订提供可复现、可溯源的实证框架。后续标准化工作需将效能指数纳入型式试验强制评估项, 并建立覆盖温度梯度、电极老化及杂质容忍度的加权修正模型, 最终形成兼顾技术稳健性与气候责任的第三代气体评价体系。

参考文献:

- [1] QASIM KHAN Q, REFAAT S S, ABU-RUB H, et al. Partial discharge diagnosis of Gas Insulated Station (GIS) using acoustic method[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2019, 35(4): 16–33.
- [2] XING Y Q, WANG Z W, LIU L, et al. Defects and failure types of solid insulation in gas-insulated switchgear: In situ study and case analysis[J]. High Voltage, 2021, 7(1): 158–164.
- [3] 杨俊飞. 气体绝缘组合电器 (GIS) 事故原因分析及建议[J]. 工程研究与实用, 2024, 5(12): 58–60.
- [4] 马姗姗. 气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 绝缘性能研究[J]. 电气制造, 2013(6): 60–61.
- [5] 张奎. SF_6 气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 漏气原因分析及对策[J]. 化肥设计, 2015, 53(5): 42–44.
- [6] 杨桢, 任玲玲, 王凯, 等. 基于混合绝缘气体的 GIS 母线温升多物理场耦合分析[J]. 开放获取期刊 (DOAJ), 2021.
- [7] 刘随胜, 鲁壑, 阎胜利, 等. 基于超高频法的气体绝缘组合电器 (GIS) 绝缘子内气隙放电特性研究[J]. 科学技术与工程, 2013(32): 9692–9696.
- [8] 刘长银, 宋人杰, 赵萌, 等. 基于变权重和组合隶属度函数的 GIS 气体绝缘状态评估[J]. 开放获取期刊 (DOAJ), 2021.
- [9] BEROUAL A, HADDAD A M. Recent Advances in the Quest for a New Insulation Gas with a Low Impact on the Environment to Replace Sulfur Hexafluoride (SF_6) Gas in High-Voltage Power Network Applications[J]. Energies, 2017, 10(8): 1216.
- [10] PURNOMOADI A P, RODRIGO MOR A, SMIT J J. Health index and risk assessment models for Gas Insulated Switchgear (GIS) operating under tropical conditions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 117: 105681.
- [11] 李晓峰, 甄利, 周新伟, 等. 220kV 气体绝缘开关设备 (GIS) 耐压击穿故障分析[J]. 中国电力, 2010(1): 43–45.
- [12] 王晶晶. 六氟化硫气体分解产物分析对气体绝缘开关设备 (GIS) 潜伏性故障判断的应用[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2010, 13(4): 13–17.