

# 典型有机绝缘材料电痕化过程气体释放规律研究

张黎

云南电网有限责任公司瑞丽供电局, 云南 瑞丽

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月6日

## 摘要

为更好的实现气体组分分析法在中高压开关柜绝缘状态预测评估这一领域的应用, 本文对典型有机绝缘材料(环氧树脂、硅橡胶、SMC)电痕化过程气体释放规律进行研究。选取非甲烷总烃、氢气、一氧化碳作为监测目标物, 重点研究典型有机绝缘材料经过不同温、湿度处理后, 在电痕化过程中目标气体浓度变化规律。典型有机绝缘材料环氧树脂、硅橡胶、SMC电痕化过程会产生非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳气体, 且在电痕化过程中生成气体浓度为氢气 > 非甲烷总烃(NMHC) > 一氧化碳; 典型有机绝缘材料环氧树脂、硅橡胶、SMC在预处理条件温度(25°C~150°C)、湿度(50%~98%)变化范围内, 电痕化过程中气体释放量与样条预处理的温度和湿度呈正相关的关系, 即预处理温度越高、湿度越大, 电痕化过程中气体释放量越大; 在预处理条件温度(25°C~150°C)、湿度(50%~98%)变化范围内, 典型有机绝缘材料环氧树脂、硅橡胶、SMC的耐电痕性能与温、湿度不构成简单的正相关或负相关关系, 需要进一步进行重点研究。

## 关键词

有机绝缘材料, 电痕化, 气体分析

# Study on Gas Release during Electric Tracking Process of Typical Organic Insulating Materials

Li Zhang

Yunnan Power Grid Co., Ltd., Ruili Power Supply Bureau, Ruili Yunnan

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: May 29<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to better realize the application of gas component analysis method in the field of insulation state prediction and evaluation of medium and high voltage switchgear, this paper studies the gas release law of typical organic insulating materials (epoxy resin, silicone rubber, SMC) during electrical tracking process. Non-methane total hydrocarbon, hydrogen and carbon monoxide were selected as monitoring targets, focusing on the study of the concentration changes of target gas in the process of electrical tracking after typical organic insulating materials were treated with different temperature and humidity. Typical organic insulating materials such as epoxy resin, silicone rubber and SMC electrical tracking process will produce non-methane total hydrocarbon (NMHC), hydrogen and carbon monoxide gas, and the gas concentration is hydrogen > non-methane total hydrocarbon (NMHC) > carbon monoxide. In the range of temperature (25°C~150°C) and humidity (50%~98%) of the pretreatment conditions, the gas release in the process of electric tracking is positively correlated with the temperature and humidity of the spline pretreatment, that is, the higher the temperature and humidity of the pretreatment, the greater the gas release in the process of electric tracking. In the range of temperature (25°C~150°C) and humidity (50%~98%) under pretreatment conditions, the electric tracking resistance of typical organic insulating materials such as epoxy resin, silicone rubber and SMC does not form a simple positive or negative correlation with temperature and humidity, which requires further focus research.

## Keywords

Organic Insulating Materials, Electric Tracking, Gas Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高压开关柜因其占地面积小、设计紧凑、维护量小等优点被大量应用于变电站低压侧和城区配网。开关柜内高温高湿的运行环境，易使其中的高分子绝缘材料(环氧树脂、硅橡胶、SMC 等)内部的环氧链发生不可逆的断裂和阻燃剂吸湿形成腐蚀性磷酸化合物等过程，使其材料内部形成孔洞、裂纹等劣化缺陷，易导致老化样品的阻燃性能和绝缘性能下降而发生击穿着火等事故[1] [2]。

在电力电子技术高速发展的同时，有机绝缘材料的使用环境也趋于多样化，不仅在普通环境下，还在低气压，室外全天候，海岸等沿海地区，放射线辐射等环境下大量使用。在这些环境下使用的有机绝缘材料有着无机绝缘所没有的特殊现象，即发生在材料表面的电痕破坏现象[3]。空气中灰尘、工业粉尘等污秽累积在固体电介质表面，在雨、露、霜、雾等作用下处于湿润状态，电导迅速增加，导致材料表面的泄漏电流增大，产生较大的热量，使湿润污秽带中的水分蒸发。但是由于热量的分布不均匀，水分蒸发也是不均匀的。因此，在绝缘材料表面产生了不均匀的干燥带。当干燥带上的电场强度超过空气击穿场强时引发表面火花放电，生成大量热量。当热量累积超过了聚合物绝缘材料分子链的键能时，就会打破分子链，析出碳元素同时生成有机与无机气体。使绝缘材料表面生成很多小坑，造成材料机械强度下降。也有可能积累在材料表面，直接形成碳化导电通路，使放电更加剧烈，最终使绝缘材料表面发生电痕破坏[4]。近年来，国内 12~40.5 kV 中高压开关柜由于绝缘缺陷而导致的绝缘事故时有发生[5] [6] [7]。

有机高分子绝缘材料在柜内湿度大、凝露严重的情况下会产生绝缘缺陷, 绝缘缺陷在 12~40.5 kV 中高压开关柜的运行过程中容易引起电场畸变, 从而发生局部放电(PD) [8]。现有的局部放电检测手段主要有: 脉冲电流法、特高频法、暂态地电压法、超声波检测法、光学检测法、气体组分分析法[9] [10]。其中气体组分分析法由于是检测气体, 不存在电磁干扰问题。当开关柜发生局部放电时, 绝缘部件在电子碰撞和高温的作用下发生复杂的化学反应, 产生一些特定的气体成份[11] [12]。通过检测绝缘部件分解后气体浓度、产气速率等分解特性, 从而可判断设备内部绝缘状态。

为更好的实现气体组分分析法在中高压开关柜绝缘状态预测评估这一领域的应用, 本文对典型有机绝缘材料(环氧树脂、硅橡胶、SMC)电痕化过程气体释放规律进行研究。选取非甲烷总烃、氢气、一氧化碳作为监测目标物, 重点研究典型有机绝缘材料经过不同温、湿度处理后, 在电痕化过程中目标气体浓度变化规律。研究结论可为气体组分分析法在中高压开关柜绝缘状态预测评估这一领域的应用提供理论依据与应用基础。

## 2. 实验物料与装置

### 2.1. 实验物料

选用某厂生产的二氧化硅填料双酚 A 缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)样条进行实验, 样条基本性能参数如表 1 所示。对实验样条进行红外光谱测试, 测试结果如图 1 所示。由图可见, 有如下特征峰:  $3026.77\text{ cm}^{-1}$  处的宽峰是饱和 C-H 伸缩振动,  $2965.46\text{ cm}^{-1}$  和  $2874.30\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 O-H 伸缩振动,  $1738.69\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 R-CHO, 为支链部分的端醛基。  $1607.50\text{ cm}^{-1}$  和  $1509.86\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是单核芳烃上的 C=C 伸缩振动。  $1178.70\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 HO-C-OH 基团伸缩振动,  $1085.4\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 Si-O 键伸缩振动和 C-OH 键伸缩振动。  $797.82\text{ cm}^{-1}$  和  $778.70\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 C-Cl 键伸缩振动,  $693.57\text{ cm}^{-1}$ 、 $555.55\text{ cm}^{-1}$  和  $512.02\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 C-Br 键伸缩振动。由以上结果可知, 该谱图特征吸收峰符合双酚 A 环氧树脂红外谱图相关特征, 并可推断出该样条中含有卤族阻燃剂。

Table 1. Basic performance parameters of epoxy resin spline

表 1. 环氧树脂样条基本性能参数

抗拉 (Mpa)	弹性模量 (Mpa)	断裂伸长率 (%)	抗弯 (Mpa)	弯曲弹性模量 (Mpa)	抗冲击 ( $\text{kJ/m}^2$ )	耐压 (kV/mm)	阻燃等级
84.05	14189.79	0.68	145.80	12983.00	7.26	21.05	V0

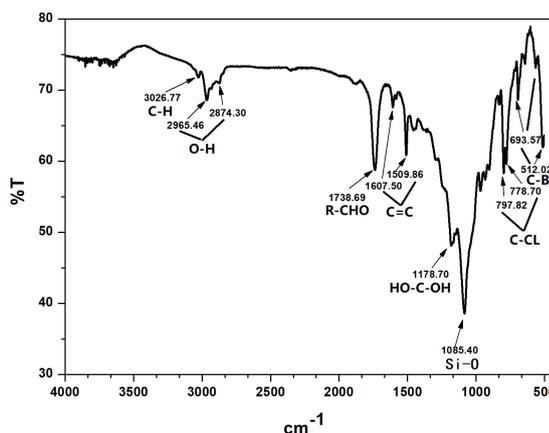


Figure 1. Infrared spectrum of experimental spline of epoxy resin

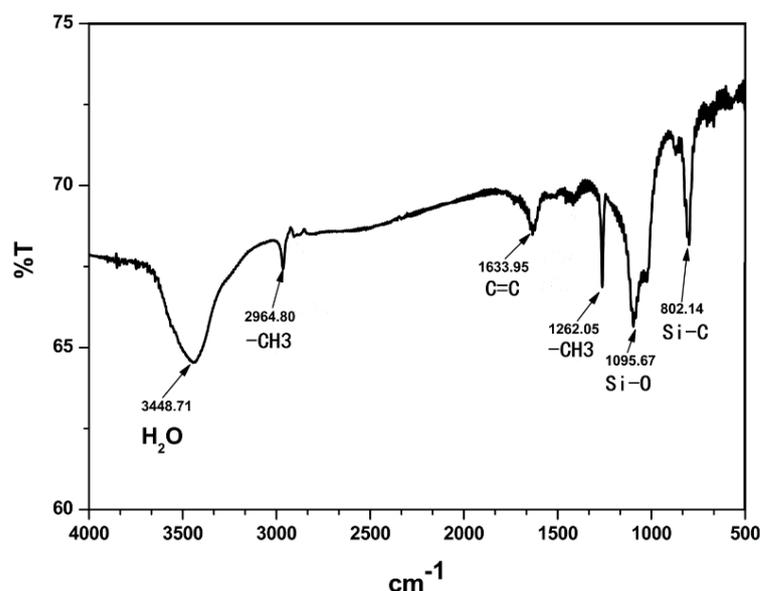
图 1. 环氧树脂实验样条红外光谱谱图

选用某厂生产的改性甲基乙烯基硅橡胶进行实验,材料基本性能参数如表2所示。由表2可知,该厂生产的硅橡胶具有优良的电性能参数,其中介电常数在2.90左右,介电损耗为0,体积电阻率及表面电阻率保持在10的16~17次方左右,击穿电压高于21 kV。对实验样条进行红外光谱测试,测试结果如图2所示。由图可见,有如下特征峰:3448.71  $\text{cm}^{-1}$ 处是 $\text{H}_2\text{O}$ 的伸缩振动峰,说明样品中具有吸附水。2964.80  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰为 $-\text{CH}_3$ 的伸缩振动,1633.95  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 $\text{C}=\text{C}$ 键伸缩振动。1262.05  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 $-\text{CH}_3$ 的摇摆振动。1095.67  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 $\text{Si}-\text{O}$ 键伸缩振动,802.14  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 $\text{Si}-\text{C}$ 键伸缩振动。由以上红外光谱测试结果可知,该谱图特征吸收峰符合甲基乙烯基硅橡胶分子结构特征。

**Table 2.** Basic performance parameters of silicone rubber spline

**表 2.** 硅橡胶样条基本性能参数

$R_3$ ( $\Omega$ )	介电损耗 C4 ( $\mu\text{F}$ )	$C_x$ (pF)	介电常 数 $\epsilon_r$	$R_v$ ( $\Omega$ )	$\rho_v$ ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\rho_s$	击穿电压 (Kv)
5874.80	0.00	54.19	2.88	2.39E+15	5.07E+17	4.38E+15	3.57E+17	23.60



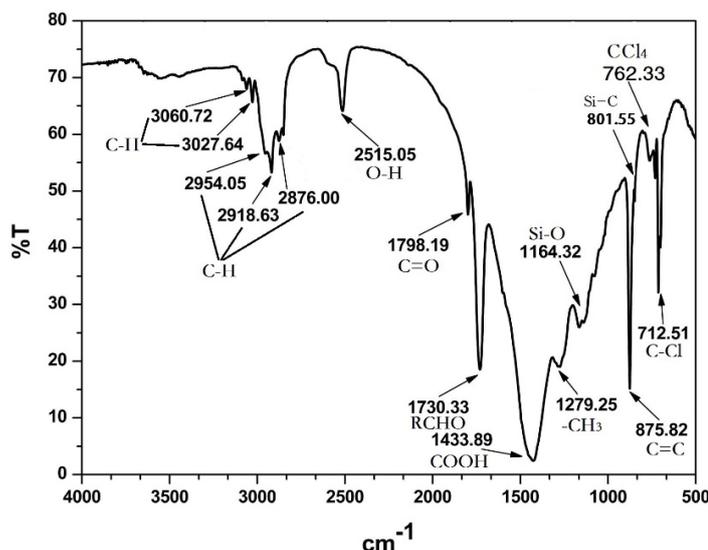
**Figure 2.** Infrared spectrum of experimental spline of silicone rubber

**图 2.** 硅橡胶实验样条红外光谱谱图

选用某厂生产的 SMC 样条进行实验,样条的物理及化学性能典型值如表3所示。对实验样条进行红外光谱测试,测试结果如图3所示。由图可见,有如下特征峰:3060.72  $\text{cm}^{-1}$ 和3027.64  $\text{cm}^{-1}$ 是不饱和碳上的 $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动吸收峰,2954.05  $\text{cm}^{-1}$ 、2918.63  $\text{cm}^{-1}$ 和2876.00  $\text{cm}^{-1}$ 是饱和碳上的 $\text{C}-\text{H}$ 键伸缩振动(包括醛基上的 $\text{C}-\text{H}$ )吸收峰,2515.05  $\text{cm}^{-1}$ 是羟基 $\text{O}-\text{H}$ 键伸缩振动吸收峰,1798.19  $\text{cm}^{-1}$ 是羰基 $\text{C}=\text{O}$ 键伸缩振动吸收峰,1730.33  $\text{cm}^{-1}$ 是醛基 $\text{RCHO}$ 伸缩振动吸收峰,1433.89  $\text{cm}^{-1}$ 是羧基 $\text{COOH}$ 伸缩振动吸收峰,1279.25  $\text{cm}^{-1}$ 是 $-\text{CH}_3$ 摇摆震动吸收峰,1164.32  $\text{cm}^{-1}$ 是 $\text{Si}-\text{O}$ 键伸缩震动吸收峰,875.82  $\text{cm}^{-1}$ 是 $\text{C}=\text{C}$ 键伸缩震动吸收峰,801.55  $\text{cm}^{-1}$ 是 $\text{Si}-\text{C}$ 键伸缩震动吸收峰,762.33  $\text{cm}^{-1}$ 是 $\text{CCl}_4$ 吸收峰,712.51  $\text{cm}^{-1}$ 是 $\text{C}-\text{Cl}$ 键伸缩震动吸收峰。由以上结果可知,该谱图特征吸收峰符合玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂片状模塑料(SMC)红外谱图相关特征。

**Table 3.** Typical values of physical and chemical properties of SMC splines  
**表 3.** SMC 样条的物理及化学性能典型值

吸水率(%)	热变形温度(°C)	燃烧性/级	表面电阻率/ $\Omega$	体积电阻率/ $(\Omega \cdot M)$	介电强度/(MV/m)	耐电弧性/s	耐漏电起痕指数/V
$\leq 0.2$	200	(UL-94)V-0	$10^{13}$	$\geq 10^{12}$	$\geq 14$	$\geq 180$	$\geq 600$



**Figure 3.** Infrared spectrum of experimental spline of SMC

**图 3.** SMC 实验样条红外光谱图

## 2.2. 实验装置

可程式恒温恒湿试验箱(LRHS-1000D,上海先准仪器科技有限公司); 高压起痕试验仪(KS-335D, 上海今森检测设备有限公司); 气体检测仪(JCXT-02, 融研(上海)电气技术有限公司)。电痕化过程气体检测装置如图 4 所示, 装置由高压起痕试验仪和气体检测仪组成。气体检测仪置于高压起痕试验仪内部后上方, 内部集成非甲烷总烃传感器、氢气传感器、一氧化碳传感器, 可同时在线检测高压起痕试验仪内部以上种类气体的浓度。



**Figure 4.** Electric tracking process gas detection device

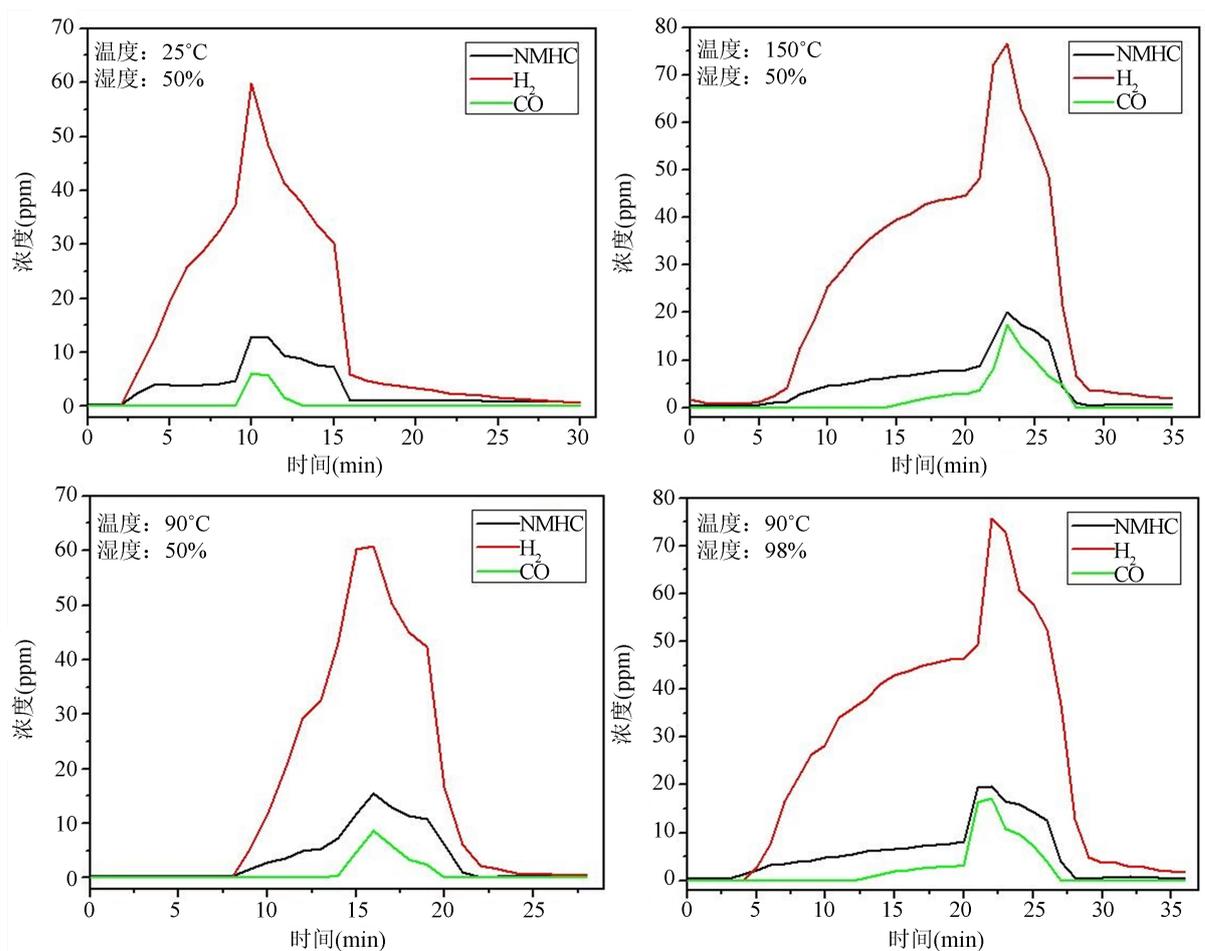
**图 4.** 电痕化过程气体检测装置

参照标准要求将样条(环氧树脂、硅橡胶、SMC)处理成标准尺寸[13],将样条放入可程式恒温恒湿试验箱内在不同温、湿度下进行样品预处理。按照材料种类以及预处理条件对样条进行分组并进行电痕化实验,同时检测电痕化实验过程中非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳浓度变化趋势。电痕化实验步骤与方法参照严酷环境条件下使用的电气绝缘材料评定耐电痕化和蚀损的试验方法(GB/T 6553-2014)执行。电痕化实验仪器参数为试验电压:4.5 kV、腐蚀液流速:0.6 mL/min。

### 3. 结果与讨论

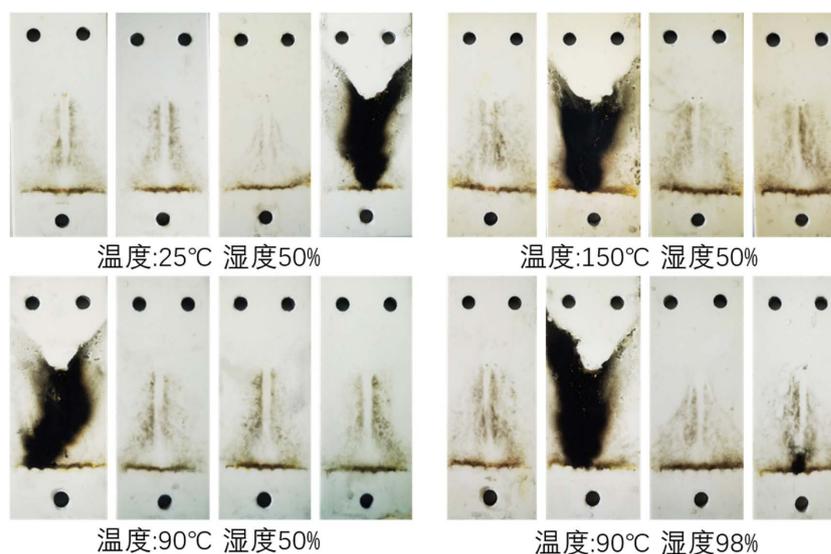
#### 3.1. 环氧树脂电痕化过程气体释放规律

将标准尺寸的环氧树脂样条分别在 25°C (湿度 50%)、150°C (湿度 50%)、90°C (湿度 50%)、90°C (湿度 98%)条件下,加热 5 小时进行样品预处理。处理后的样品参照严酷环境条件下使用的电气绝缘材料评定耐电痕化和蚀损的试验方法(GB/T 6553-2014)进行电痕化实验,电痕化实验仪器参数为试验电压:4.5 kV、腐蚀液流速:0.6 mL/min,同时采用气体检测仪对电痕化过程中非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳浓度进行监测,当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源。不同预处理条件下环氧树脂样条电痕化过程目标气体浓度变化规律如图 5 所示,实验结束后环氧树脂样条电痕化状态如图 6 所示。



**Figure 5.** Variation of target gas concentration in epoxy resin spline electric tracking process under different pretreatment conditions

**图 5.** 不同预处理条件下环氧树脂样条电痕化过程目标气体浓度变化规律



**Figure 6.** Electric tracking state of epoxy resin spline under different pretreatment conditions

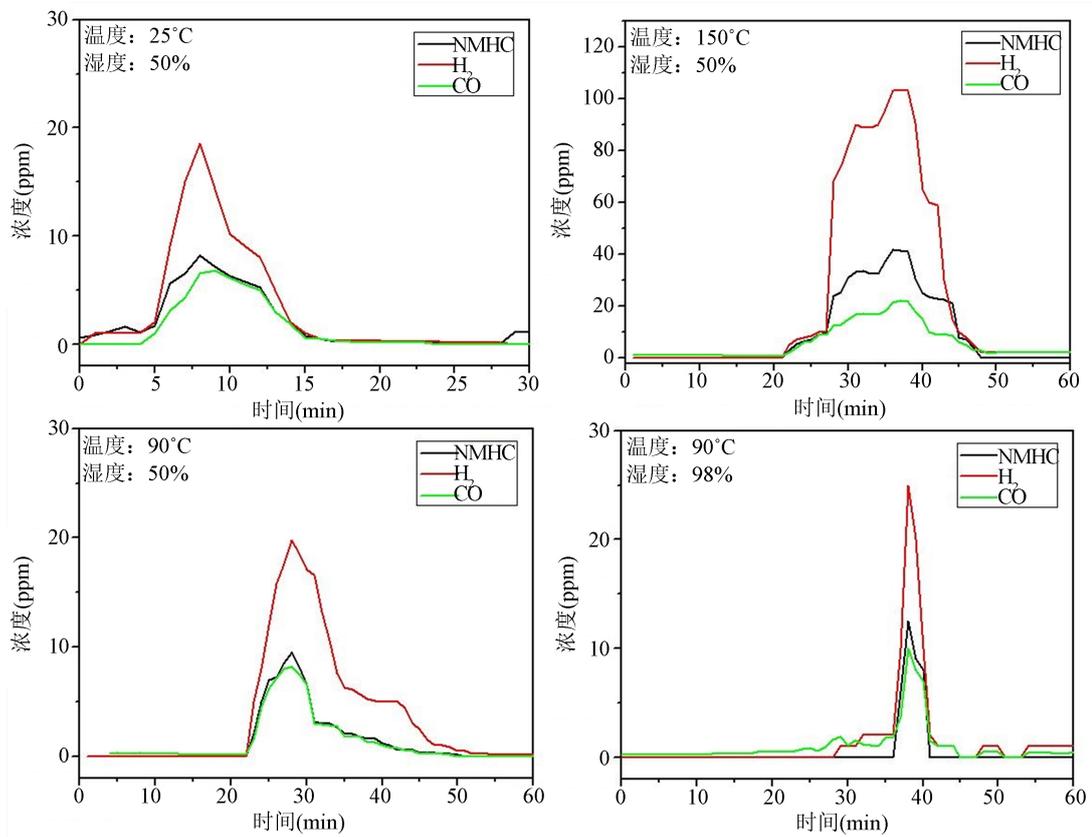
**图 6.** 不同预处理条件下环氧树脂样条电痕化状态

当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源, 此时样品电痕化过程结束。环氧树脂样条在 25℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 6 分钟; 在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 15 分钟; 在 90℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 8 分钟; 在 90℃ (湿度 98%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 17 分钟, 说明环氧树脂不同预处理条件下耐电痕性能: 90℃ (湿度 98%) > 150℃ (湿度 50%) > 90℃ (湿度 50%) > 25℃ (湿度 50%)。由图 5 可知, 整体上不同预处理条件下环氧树脂样条电痕化过程非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳气体浓度变化趋势呈先增加后减小的趋势, 且氢气浓度 > 非甲烷总烃(NMHC)浓度 > 一氧化碳浓度。虽然当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源, 但此时环氧树脂样条会在电流作用下出现明火, 因此在电痕化结束后短时间内三种气体的浓度会急剧增加。不同预处理条件下环氧树脂样条电痕化过程中气体最大浓度有所差异, 在 25℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 13.0 ppm、氢气最大浓度为: 59.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 6.1 ppm; 在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 20.2 ppm、氢气最大浓度为: 76.6 ppm、一氧化碳最大浓度为: 17.5 ppm; 在 90℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 15.5 ppm、氢气最大浓度为: 60.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 8.6 ppm; 在 90℃ (湿度 98%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 19.6 ppm、氢气最大浓度为: 75.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 17.1 ppm。环氧树脂不同预处理条件下耐电痕过程非甲烷总烃(NMHC)最大浓度、氢气最大浓度、一氧化碳最大浓度均为: 150℃ (湿度 50%) > 90℃ (湿度 98%) > 90℃ (湿度 50%) > 25℃ (湿度 50%)。说明环氧树脂样条在预处理条件温、湿度变化范围内, 电痕化过程中气体释放量与样条预处理的温度和湿度呈正相关的关系。由图 6 可知, 不同预处理条件下环氧树脂样条电痕化结束后, 样品表面的烧蚀痕迹差别不大, 每个预处理条件下均为其中一个样品表面烧蚀较为严重。

### 3.2. 硅橡胶电痕化过程气体释放规律

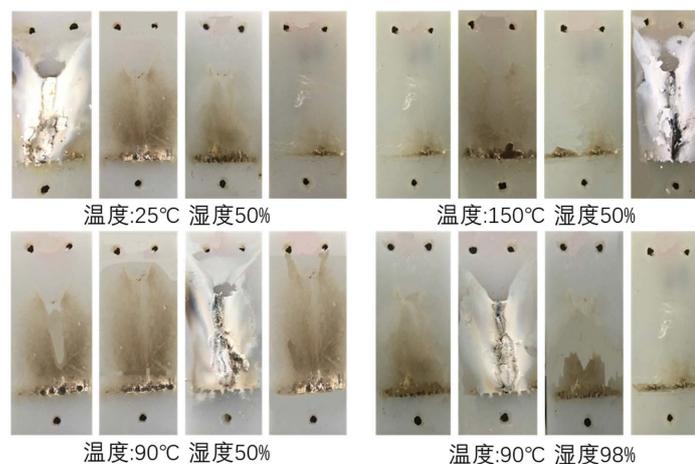
将标准尺寸的硅橡胶样条分别在 25℃ (湿度 50%)、150℃ (湿度 50%)、90℃ (湿度 50%)、90℃ (湿度 98%) 条件下, 加热 5 小时进行样品预处理。处理后的样品参照严酷环境条件下使用的电气绝缘材料评定耐电痕化和蚀损的试验方法(GBT 6553-2014)进行电痕化实验, 电痕化实验仪器参数为试验电压: 4.5

kV、腐蚀液流速：0.6 mL/min，同时采用气体检测仪对电痕化过程中非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳浓度进行监测，当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源。不同预处理条件下硅橡胶样条电痕化过程目标气体浓度变化规律如图 7 所示，实验结束后硅橡胶样条电痕化状态如图 8 所示。



**Figure 7.** Variation of target gas concentration in silicone rubber spline electric tracking process under different pretreatment conditions

**图 7.** 不同预处理条件下硅橡胶样条电痕化过程目标气体浓度变化规律



**Figure 8.** Electric tracking state of silicone rubber spline under different pretreatment conditions

**图 8.** 不同预处理条件下硅橡胶样条电痕化状态

当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源, 此时样品电痕化过程结束。硅橡胶样条在 25℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 5 分钟; 在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 27 分钟; 在 90℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 20 分钟; 在 90℃ (湿度 98%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 35 分钟, 说明硅橡胶不同预处理条件下耐电痕性能: 90℃ (湿度 98%) > 150℃ (湿度 50%) > 90℃ (湿度 50%) > 25℃ (湿度 50%)。由图 7 可知, 整体上不同预处理条件下硅橡胶样条电痕化过程非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳气体浓度变化趋势呈先增加后减小的趋势, 且氢气浓度 > 非甲烷总烃(NMHC)浓度 > 一氧化碳浓度。虽然当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源, 但此时硅橡胶样条会在电流作用下出现明火, 因此在电痕化结束后短时间内三种气体的浓度会急剧增加。不同预处理条件下硅橡胶样条电痕化过程中气体最大浓度有所差异, 在 25℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 8.2 ppm、氢气最大浓度为: 18.6 ppm、一氧化碳最大浓度为: 6.5 ppm; 在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 22.0 ppm、氢气最大浓度为: 103.0 ppm、一氧化碳最大浓度为: 41.7 ppm; 在 90℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 9.5 ppm、氢气最大浓度为: 19.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 8.2 ppm; 在 90℃ (湿度 98%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 12.5 ppm、氢气最大浓度为: 25.0 ppm、一氧化碳最大浓度为: 10.0 ppm。硅橡胶不同预处理条件下耐电痕过程非甲烷总烃(NMHC)最大浓度、氢气最大浓度、一氧化碳最大浓度均为: 150℃ (湿度 50%) > 90℃ (湿度 98%) > 90℃ (湿度 50%) > 25℃ (湿度 50%)。说明硅橡胶样条在预处理条件温、湿度变化范围内, 电痕化过程中气体释放量与样条预处理的温度和湿度呈正相关的关系。由图 8 可知, 不同预处理条件下硅橡胶样条电痕化结束后, 每个预处理条件下均为其中一个样品表面烧蚀较为严重, 样品表面烧蚀痕迹在预处理条件为 90℃ (湿度 98%) 时烧蚀面积较大, 其它条件下样品表面烧蚀痕迹差别不大。

### 3.3. SMC 电痕化过程气体释放规律

SMC 绝缘材料常作为绝缘隔板应用于高压开关柜[14], 其耐电痕性能以及耐高温性能优于环氧树脂以及硅橡胶, 因此对 SMC 材料的加热时间进行调整。将标准尺寸的 SMC 样条分别在 25℃ (湿度 50%)、150℃ (湿度 50%)、90℃ (湿度 50%)、90℃ (湿度 98%) 条件下, 加热 5 天进行样品预处理。处理后的样品参照严酷环境条件下使用的电气绝缘材料评定耐电痕化和蚀损的试验方法(GBT 6553-2014)进行电痕化实验, 电痕化实验仪器参数为试验电压: 4.5 kV、腐蚀液流速: 0.6 mL/min, 同时采用气体检测仪对电痕化过程中非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳浓度进行监测, 当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源。不同预处理条件下 SMC 样条电痕化过程目标气体浓度变化规律如图 9 所示, 实验结束后 SMC 样条电痕化状态如图 10 所示。

当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源, 此时样品电痕化过程结束。SMC 样条在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 5 分钟; 在 25℃ (湿度 50%)、90℃ (湿度 50%) 以及 90℃ (湿度 98%) 预处理条件下, 电痕化过程持续 30 分钟泄露电流未超过 60 mA, 手动关闭高压起痕试验仪高压电源。说明 SMC 在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下耐电痕性能最差。由图 9 可知, 整体上不同预处理条件下 SMC 样条电痕化过程非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳气体浓度变化趋势呈先增加后减小的趋势, 且氢气浓度 > 非甲烷总烃(NMHC)浓度 > 一氧化碳浓度。虽然当泄露电流超过 60 mA 时会触发电流装置切断高压电源, 但此时 SMC 样条会在电流作用下出现明火, 因此预处理条件为 150℃ (湿度 50%) 的样条在电痕化结束后短时间内三种气体的浓度急剧增加。不同预处理条件下 SMC 样条电痕化过程中气体最大浓度有所差异, 在 25℃ (湿度 50%) 预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 5.6 ppm、氢气最大浓度为: 27.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 3.1 ppm; 在 150℃ (湿度 50%) 预处理条件下,

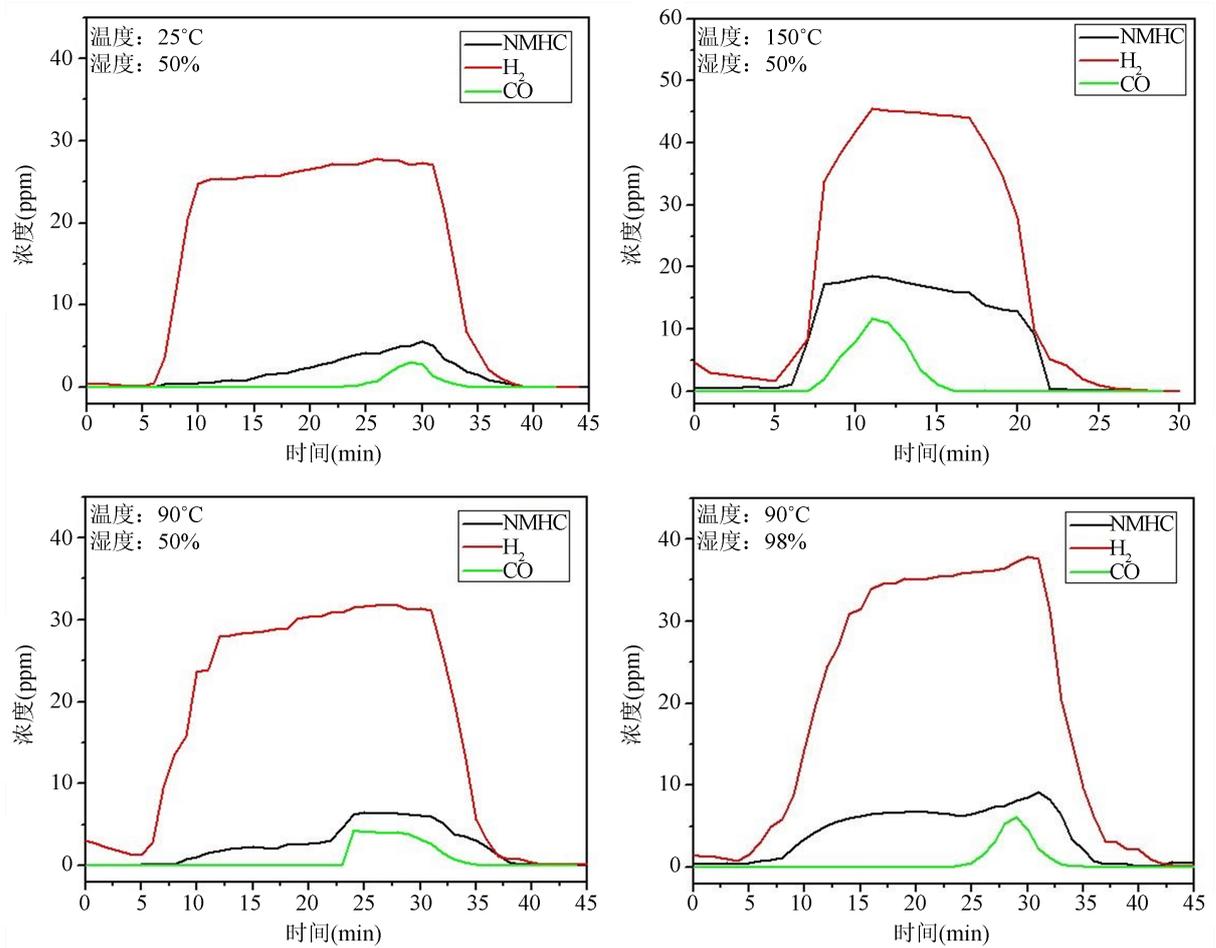


Figure 9. Variation of target gas concentration in SMC spline electric tracking process under different pretreatment conditions

图 9. 不同预处理条件下 SMC 样条电痕化过程目标气体浓度变化规律

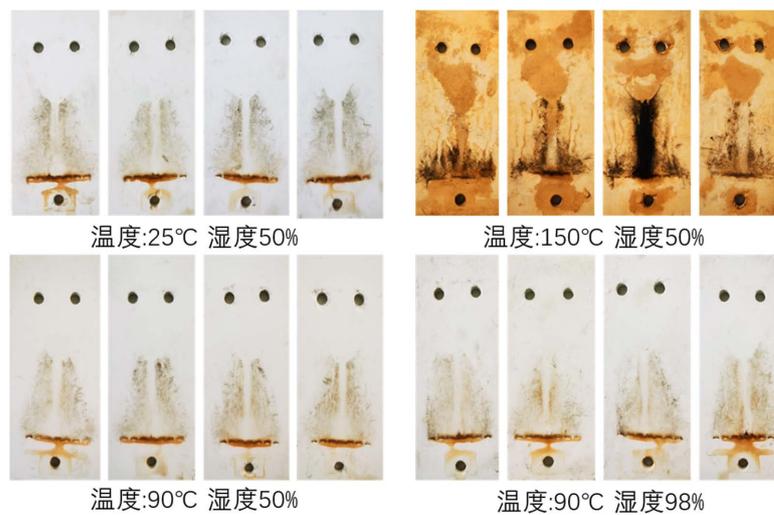


Figure 10. Electric tracking state of SMC spline under different pretreatment conditions

图 10. 不同预处理条件下 SMC 样条电痕化状态

非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 18.6 ppm、氢气最大浓度为: 45.5 ppm、一氧化碳最大浓度为: 11.7 ppm; 在 90℃ (湿度 50%)预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 6.5 ppm、氢气最大浓度为: 31.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 4.3 ppm; 在 90℃ (湿度 98%)预处理条件下, 非甲烷总烃(NMHC)最大浓度为: 9.2 ppm、氢气最大浓度为: 37.8 ppm、一氧化碳最大浓度为: 6.1 ppm。SMC 不同预处理条件下耐电痕过程非甲烷总烃(NMHC)最大浓度、氢气最大浓度、一氧化碳最大浓度均为: 150℃ (湿度 50%) > 90℃ (湿度 98%) > 90℃ (湿度 50%) > 25℃ (湿度 50%)。说明 SMC 样条在预处理条件温、湿度变化范围内, 电痕化过程中气体释放量与样条预处理的温度和湿度呈正相关的关系。由图 10 可知, 不同预处理条件下 SMC 样条电痕化结束后, 样品表面烧蚀痕迹在预处理条件为 150℃ (湿度 50%)时烧蚀面积较大, 且在此预处理条件下样条表面已经老化为黄色, 其它条件下样品表面烧蚀痕迹差别不大。

#### 4. 结论

典型有机绝缘材料环氧树脂、硅橡胶、SMC 电痕化过程会产生非甲烷总烃(NMHC)、氢气、一氧化碳气体, 且在电痕化过程中生成气体浓度为氢气 > 非甲烷总烃(NMHC) > 一氧化碳; 典型有机绝缘材料环氧树脂、硅橡胶、SMC 在预处理条件温度(25℃~150℃)、湿度(50%~98%)变化范围内, 电痕化过程中气体释放量与样条预处理的温度和湿度呈正相关的关系, 即预处理温度越高、湿度越大, 电痕化过程中气体释放量越大; 在预处理条件温度(25℃~150℃)、湿度(50%~98%)变化范围内, 典型有机绝缘材料环氧树脂、硅橡胶、SMC 的耐电痕性能与温、湿度不构成简单的正相关或负相关关系, 需要进一步进行重点研究。

#### 参考文献

- [1] 张雷. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 通信电源技术, 2019, 6(36): 151-153.
- [2] 任美杰, 谢启源, 宋思齐. 高压开关柜阻燃绝缘件在役老化诱发着火事故的综合分析[J]. 火灾科学, 2022, 2(31): 120-128.
- [3] 杜伯学. 有机绝缘耐电痕性的评定与发展[J]. 高电压技术, 2005, 5(31): 10-13.
- [4] 田付强, 彭潇. 耐电晕耐电痕化绝缘材料研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 16(32): 3-13.
- [5] 宋思齐, 任美杰, 李成钢, 等. 高压击穿电弧作用下 SMC 绝缘隔板引燃特性[J]. 消防理论研究, 2022, 41(7): 888-894.
- [6] 冯春涛. SMC 不饱和聚酯玻璃纤维绝缘隔板的研制和在高压电器开关上的应用[J]. 绝缘材料通讯, 1993(1): 11-14.
- [7] 景皓, 庞先海, 张智远, 等. 高压开关柜内绝缘隔板放电原因分析及防范措施[J]. 河北电力技术, 2018, 37(5): 42-45.
- [8] 董兴海. 金属封闭柜内带电运行设备局部放电检测研究[J]. 云南电力技术, 2006, 34(4): 25-26.
- [9] 邱昌容, 王乃庆, 等. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [10] 彭超, 雷清泉. 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 348-353.
- [11] 韩盈芝, 韦筱香. 气相色谱法测定气体中一氧化碳、二氧化碳和甲烷含量测量不确定度的评定[J]. 杭氧科技, 2013(3): 21-25.
- [12] 张晓星, 任江波, 李毅, 等. SF<sub>6</sub> 分解组分的红外光谱定量测定[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 584-589.
- [13] 王先锋, 刘志远, 孙裕, 等. 严酷环境条件下使用的电气绝缘材料 评定耐电痕化和蚀损的试验方法. GBT 6553-2014 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2014.
- [14] 刘衍, 尹桂来, 龙国华, 等. 应用理化分析探索 40.5 kV 开关柜绝缘隔板放电原因[J]. 高压电气, 2019, 55(9): 222-229.