

# 空气氛围中双酚A环氧树脂热解气态产物释放规律研究

董继能, 张黎, 罗军

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1月5日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

## 摘要

为更好的实现气体组分分析法在中压开关柜局部放电检测这一领域的应用, 文章对二氧化硅填料双酚A缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)进行热解气态产物释放规律研究。得出以下结论: 二氧化硅填料双酚A缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)在空气氛围中200°C~800°C热解温度下仅有一个失重阶段为300°C~500°C, 最大失重率为33.93%, 生成的气态产物种类较多, 主要包括氢气、一氧化碳、二氧化碳、烷烃、烯烃、炔烃、酮、醇、脂、醛、卤代烃、苯系物、杂环芳烃、链状及环状硅氧化物, 且各物质浓度变化规律较为复杂, 整体上总烃和非甲烷总烃浓度呈先增大后趋于饱和的趋势。在200°C~300°C时, 总烃浓度为11543.35~16544.13 ppm, 非甲烷总烃浓度为11539.42~16526.97 ppm。

## 关键词

双酚A环氧树脂, 热解, 产物分析

# Pyrolysis Gaseous Product Release of Bisphenol A Epoxy Resin in Air Atmosphere

Jineng Dong, Li Zhang, Jun Luo

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

Received: Jan. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

In this study, the pyrolysis gaseous product release of silica filler bisphenol A glycidyl ether/ethylene diamine epoxy (DGEBA/EDA) were investigated. The following conclusions are drawn: DGEBA/EDA with silica filler bisphenol-a glycidyl ether/ethylenediamine epoxy resin (DGEBA/EDA)

were pyrolyzed at 200°C to 800°C in air, and only one weight loss stage was 300°C to 500°C, with the maximum weight loss rate of 33.93%, and various gaseous products were generated. It mainly includes hydrogen, carbon monoxide, carbon dioxide, alkanes, alkenes, alkynes, ketones, alcohols, aldehydes, halogenated hydrocarbons, benzene series, heterocyclic aromatic hydrocarbons, chain and cyclic siloxanes, and the variation rule of the concentration of each substance is relatively complex. On the whole, the concentration of total hydrocarbons and non-methane total hydrocarbons increases first and then tends to saturation. At 200°C to 300°C, the total hydrocarbon concentration is 11543.35 ppm to 16544.13 ppm, and the total non-methane hydrocarbon concentration is 11539.42 ppm to 16526.97 ppm.

## Keywords

Bisphenol A Epoxy Resin, Pyrolysis, Product 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

环氧树脂是泛指含有两个或两个以上环氧基,以脂肪族、脂环族或芳香族等有机化合物为骨架,并能通过环氧基团反应形成有用的热固性产物的高分子环氧低聚物。当其与固化剂反应便可形成三维网络状的热固性塑料[1]。环氧树脂是一类具有良好粘接、耐腐蚀、电气绝缘、高强度等性能的热固性高分子合成材料。它已被广泛地应用于多种金属与非金属的粘接、耐腐蚀涂料、电气绝缘材料、玻璃钢/复合材料等的制造。电绝缘材料是电气产品的关键材料,电气产品的发展促进了绝缘材料的发展。环氧树脂的出现促进了绝缘材料的更新换代,质量进一步提高,进而使电气产品得到进一步的发展。

环氧树脂种类很多且还在不断开发新品种。环氧树脂分类方法很多,按化学结构和环氧基结合方式大体可分为六大类。分别为缩水甘油醚类、缩水甘油脂类、缩水甘油胺类、脂肪族环氧化合物、脂环族环氧化合物、混合型环氧树脂。用双酚 A 与环氧氯丙烷制得双酚 A 缩水甘油醚型环氧树脂,因原料来源方便,成本低,故应用最广,产量最大,占全部环氧树脂的 90% [2]。中压开关柜中主要绝缘部件,多数采用双酚 A 环氧树脂为原料制成。近年来,国内中压开关柜由于绝缘缺陷而导致的绝缘事故时有发生[3]。绝缘缺陷在中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) [4]。近年来中压开关柜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[5] [6]。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。当中压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分[7] [8]。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压开关柜局部放电检测这一领域的应用,本文对空气氛围中双酚 A 环氧树脂热解失重及气态产物释放规律进行研究。研究结论可为气体组分分析法在中压开关柜局部放电检测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

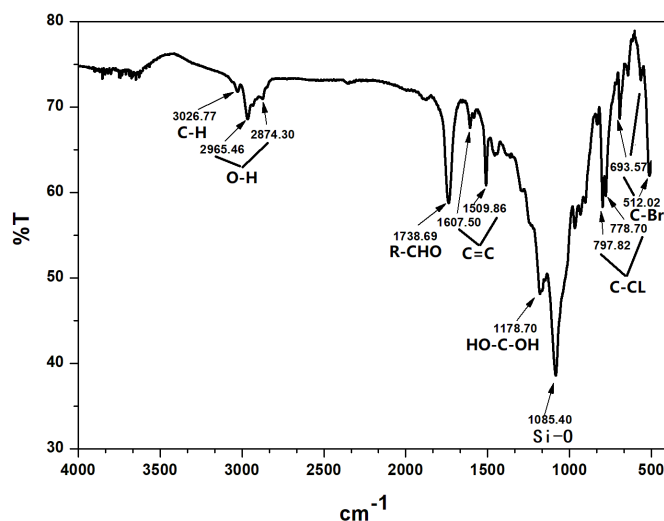
选用某厂生产的二氧化硅填料双酚 A 缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)样条进行实验,样

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，1085.40  $\text{cm}^{-1}$  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 samples

**表 1.** 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(kj/m <sup>2</sup> )	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 spectra of samples

**图 1.** 实验样条红外光谱谱图

## 2.2. 实验设置

气相色谱仪(GC-2014C, 日本岛津); 气相色谱质谱连用仪(7890A-5975C, 美国安捷伦); 傅立叶变换红外光谱仪(IRAffinity-1S, 日本岛津); 管式炉(SK-G05163, 中国中环电炉); 分析天平(FA3204B, 上海天美天平仪器有限公司)。

热解实验装置如图 2 所示，装置由高纯空气钢瓶(空气纯度 99.999%)、减压阀、浮子流量计、管式电炉、石英管、气体样品收集袋(4 L)组成。高纯空气通过减压阀与浮子流量计，使气体以恒定的流速通过石英管进入样品收集袋。

将双酚 A 环氧树脂样条剪断，使每份为大小形状相似的均匀等份。称量样品质量后，将样品放入小瓷舟内，将小瓷舟放入管式炉石英管内。设置管式炉温度，待温度到达设定温度并保持稳定后打开气瓶阀门并调节流量为 100 ml/min，同时接入气体样品收集袋收集热解气体产物。恒温热解 30 min 时关闭气体阀门，同时取下气体样品收集袋。待炉温冷却至 200  $^{\circ}\text{C}$  以下时取出小瓷舟，称量热解后样品质量。实

热解温度分别为 200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃，气体样品收集袋内的气体产物，分别采用气相色谱及气相色谱质谱联用仪进行测试分析。热解反应前后样品失重率计算公式如下：

$$\eta = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\eta$  为热解反应前后样品失重率，%； $a$  为热解反应前样品质量，g； $b$  为热解反应后样品质量，g。

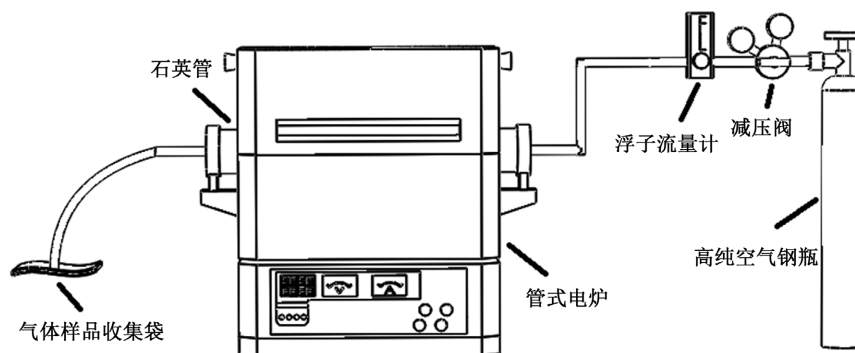


Figure 2. Pyrolysis experimental facility  
图 2. 热解实验装置

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 双酚 A 环氧树脂热解失重规律

将形状相似质量相近的双酚 A 环氧树脂样块，按照上文实验方法所述分别在 200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃ 条件下进行热解，称量热解前后质量，计算出双酚 A 环氧树脂在不同温度下的热解失重率，实验结果如图 3 所示。

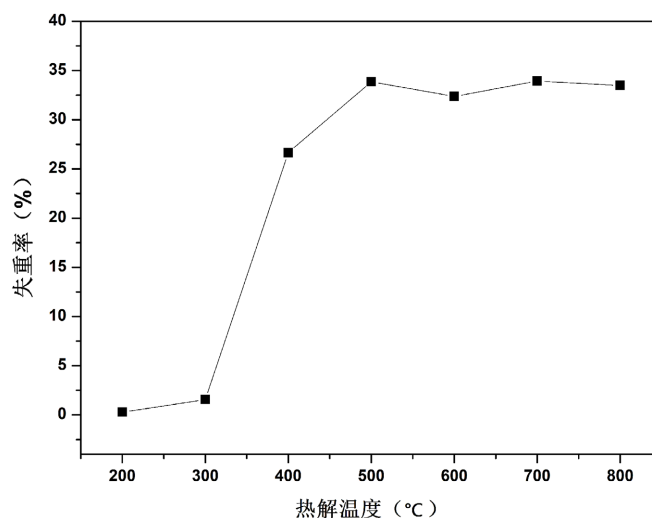


Figure 3. Pyrolysis weight loss rate of bisphenol A epoxy resin at different temperatures  
图 3. 不同温度下双酚 A 环氧树脂热解失重率

由图 3 可知，随着热解温度的升高双酚 A 环氧树脂失重率呈先增大后趋于稳定的趋势。热解温度为 200℃ 时，失重率仅为 0.28% 考虑到表面水分的挥发可以认为双酚 A 环氧树脂没有发生明显分解。从 300℃

到 500℃, 失重率从 1.56% 上升至 33.86%。500℃ 后样品失重率趋于稳定, 最大失重率为 33.93%。随着温度的增加样品整个失重过程仅有一个失重阶段, 为 300℃~500℃。此规律符合相关论文对于双酚 A 环氧树脂热解失重规律的相关表述[9]。

### 3.2. 热解气态产物释放规律

#### 3.2.1. 低碳气态产物释放规律定量分析

将形状相似质量相近的双酚 A 环氧树脂样块, 按照上文实验方法所述分别在 200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃ 条件下进行热解, 用气体样品收集袋(4 L)收集热解气体, 采用气相色谱仪(GC-2014C, 日本岛津)对气体样品进行定性定量分析, 不同热解温度下低碳烃类产物释放规律如图 4 所示; 不同热解温度下 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub> 释放规律如图 5 所示。

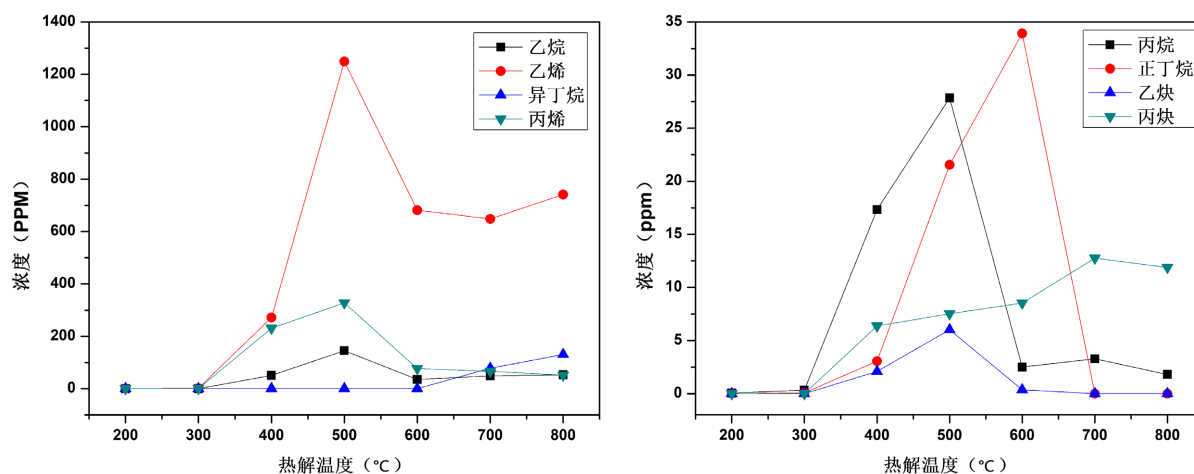


Figure 4. Release law of low carbon hydrocarbon products at different pyrolysis temperatures

图 4. 不同热解温度下低碳烃类产物释放规律

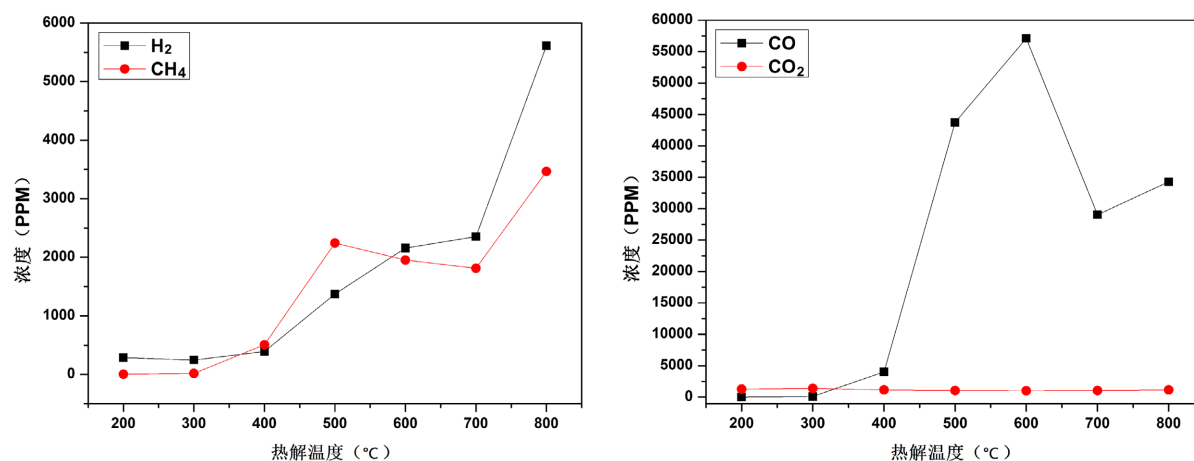


Figure 5. Release of H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO and CO<sub>2</sub> at different pyrolysis temperatures

图 5. 不同热解温度下 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub> 释放规律

由图 4 和图 5 可知, 在 200℃~800℃ 热解温度下双酚 A 环氧树脂热解产生的低碳烃类产物主要包括甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、丙烷、丙烯、丙炔、异丁烷、正丁烷, 无机类小分子气体主要包括氢气、一氧化碳、二氧化碳。在 200℃~800℃ 热解温度下, 热解气体产物中一氧化碳平均浓度远大于其他气体,

可能的原因为热解过程中有机碳氧化不充分所致；在 200℃~800℃热解温度下，氢气、甲烷、二氧化碳的平均浓度大于其他低碳烃类产物的平均浓度，说明在有氧热解的条件下双酚 A 环氧树脂分解产物更趋向于生成结构相对稳定的小分子物质。在 200℃~300℃热解温度下，低碳烃类产物乙烷、乙烯、乙炔、丙烷、丙烯、丙炔、异丁烷、正丁烷浓度非常小低于仪器检出限而甲烷浓度变化为 3.93~17.16 ppm、氢气浓度变化为 245.09~285.94 ppm、一氧化碳浓度变化为 4.46~118.97 ppm、二氧化碳浓度变化为 1277.24~1390.06 ppm。在 300℃~500℃热解温度下，低碳气态产物浓度除异丁烷以外均随温度的升高而增大。在 500℃~800℃热解温度下，一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、丙烷、丙烯浓度总体呈下降趋势，异丁烷、丙炔、氢气、正丁烷、甲烷浓度总体呈上升趋势，在此阶段热解气体产物之间会发生相互转化。整体上看低碳烃类产物乙烷、乙烯、乙炔、丙烷、丙烯、丙炔、异丁烷、正丁烷在热解温度高于 300℃时才产生，初始生成温度高于氢气、一氧化碳、二氧化碳。

### 3.2.2. 其它气态产物释放规律定性及半定量分析

气体样品收集袋(4 L)收集的热解气体产物，采用气相色谱质谱连用仪(7890A-5975C，美国安捷伦)对气体样品进行定性及半定量分析，200℃与 800℃热解气体产物总离子流(TIC)图如图 6 所示，图 6 中物质峰所对应的产物信息及其在 200℃~800℃对应物质的响应值如表 2 所示。

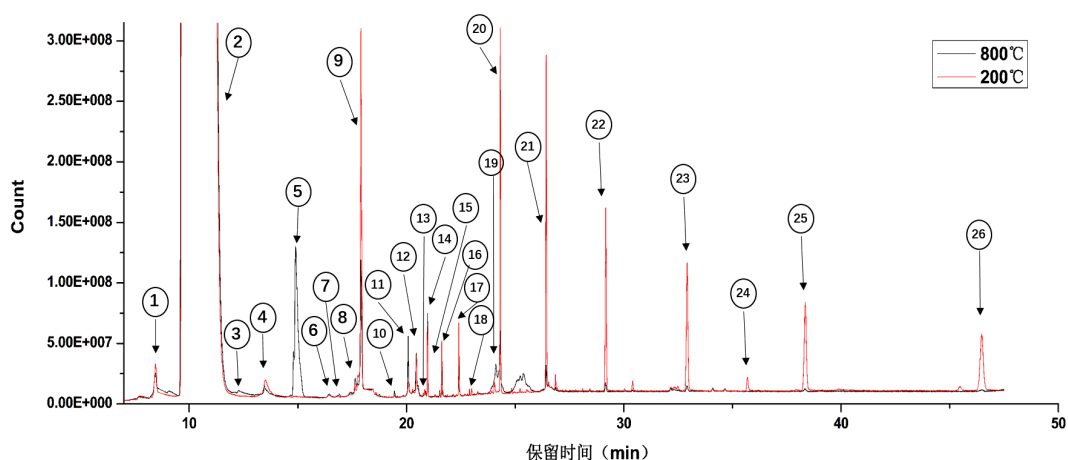
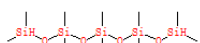

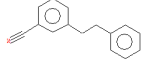





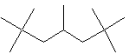


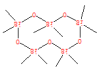
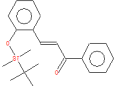
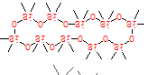
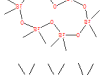
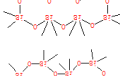
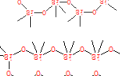
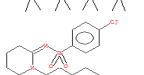
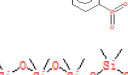
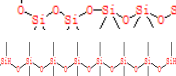



Figure 6. Total ion currents (TIC) of gas products from pyrolysis at 800°C  
图 6. 800℃热解气体产物总离子流(TIC)图

Table 2. Total ion current (TIC) graph corresponding material information and material response value  
表 2. 兴总离子流(TIC)图对应物质信息及物质响应值

序号	分子式	结构式	物质响应峰面积(count*min)						
			200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃
1	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O		2.57E+6	2.44E+6	4.91E+6	5.54E+6	4.24E+6	3.24E+6	2.40E+6
2	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>		4.84E+9	5.67E+9	4.88E+9	5.16E+9	2.30E+9	5.30E+9	5.25E+9
3	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O		ND	ND	ND	ND	ND	6.05E+5	3.39E+5
4	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>		3.04E+6	1.93E+6	1.05E+6	1.23E+6	4.25E+5	1.33E+6	1.19E+6
5	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>		1.53E+5	1.45E+5	2.56E+5	1.96E+6	1.34E+6	8.09E+6	2.27E+7

## Continued

6	$C_{10}H_{32}O_4Si_5$		3.31E+5	4.61E+5	4.42E+5	4.28E+5	1.44E+5	3.58E+5	3.44E+5
7	$C_7H_8$		8.61E+4	1.07E+5	1.20E+5	1.34E+5	1.54E+5	1.74E+5	1.58E+5
8	$C_{15}H_{13}N$		3.63E+5	4.77E+5	5.17E+5	7.34E+5	3.42E+5	1.09E+6	7.89E+5
9	$C_6H_{18}O_3Si_3$		1.95E+7	1.47E+7	9.76E+6	1.19E+7	2.87E+6	9.36E+6	7.93E+6
10	$C_8H_{10}$		5.35E+4	2.44E+5	2.45E+5	3.23E+5	1.05E+5	1.64E+5	2.16E+5
11	$C_8H_8$		6.16E+5	2.13E+6	2.19E+6	2.32E+6	8.24E+5	1.91E+6	2.19E+6
12	$C_8H_{24}O_4Si_4$		9.57E+4	1.13E+5	1.24E+5	1.44E+5	5.65E+4	9.12E+3	1.38E+4
13	$C_9H_{12}$		8.38E+4	2.13E+5	2.17E+5	2.50E+5	1.36E+5	1.46E+5	1.32E+5
14	$C_{12}H_{26}$		1.87E+6	1.85E+6	2.01E+6	2.53E+6	7.63E+5	1.78E+6	2.16E+6
15	$C_{12}H_{26}$		1.22E+5	1.47E+5	1.67E+5	1.74E+5	6.05E+4	1.23E+5	1.37E+5
16	$C_7H_6O$		1.44E+6	1.93E+6	1.65E+6	1.99E+6	1.07E+6	7.74E+5	6.56E+5
17	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$		2.09E+6	1.47E+6	2.41E+6	3.18E+6	2.60E+6	1.07E+6	9.16E+5
18	$C_{21}H_{26}O_2Si$		1.66E+5	2.53E+5	2.60E+5	2.79E+5	1.73E+5	1.49E+5	1.67E+5
19	$C_{20}H_{60}O_{10}Si_{10}$		3.80E+5	4.54E+5	9.29E+5	7.08E+5	6.11E+6	2.32E+6	3.26E+6
20	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$		9.93E+6	3.91E+6	4.05E+6	1.59E+7	2.74E+7	4.46E+6	3.88E+6
21	$C_{14}H_{42}O_7Si_7$		1.09E+7	3.78E+6	4.45E+6	1.63E+7	3.84E+7	9.17E+5	7.73E+5
22	$C_{16}H_{48}O_8Si_8$		8.88E+6	2.95E+6	5.58E+6	1.17E+7	2.00E+7	6.63E+5	4.45E+5
23	$C_{18}H_{54}O_9Si_9$		8.71E+6	3.31E+6	5.86E+6	1.06E+7	1.63E+7	7.15E+5	3.12E+5
24	$C_{19}H_{20}ClN_3O_4S$		9.03E+5	1.68E+5	1.26E+5	8.82E+5	7.42E+5	6.05E+4	ND
25	$C_{20}H_{60}O_{10}Si_{10}$		8.37E+6	3.11E+6	4.65E+6	1.01E+7	1.33E+7	5.48E+5	2.42E+5
26	$C_{16}H_{50}O_7Si_8$		7.93E+6	2.90E+6	4.35E+6	9.31E+6	1.08E+7	4.91E+5	1.89E+5



由图 6 和表 2 可知, 双酚 A 环氧树脂在 200℃~800℃热解温度下, 生成的气态产物除上文所述的物质以外还主要包含酮、醇、脂、醛、卤代烃、苯系物、烷烃、杂环芳烃、链状及环状硅氧化合物。其中酮、醛、杂环芳烃和链状及环状硅氧化合物响应值随热解温度的升高, 整体呈现先增加后减小的趋势, 其分界点为 500℃。说明在 200℃~500℃热解温度下双酚 A 环氧树脂分子主体结构化学键发生断裂, 分解生成酮、醛、杂环芳烃和链状及环状硅氧化合物。在 500℃~800℃热解温度下酮、醛、杂环芳烃和链状及环状硅氧化合物化学键开始断裂及结构重组生成其它小分子物质。在 200℃~800℃热解温度下, 苯系物响应值随温度的增加而增大。说明在此温度范围内苯环从双酚 A 环氧树脂分子主体结构脱离后没有发生开环反应。在 200℃~800℃热解温度下, 醇类物质 700℃开始产生 800℃响应降低; 脂类物质响应整体呈先降低后增大的趋势, 临界点为 600℃; 卤代烃和烷烃的响应除在 600℃响应较低以外整体变化较小。说明在此温度范围内醇、脂、卤代烃和烷烃物质会发生复杂的氧化还原反应。

### 3.2.3. 热解产物总烃(THC)与非甲烷总烃(NMHC)定量分析

气体样品收集袋(4 L)收集的热解气体产物, 采用气相色谱仪(GC-2014C, 日本岛津)对气体样品进行总烃(THC)与非甲烷总烃(NMHC)定量分析, 不同热解温度下总烃(THC)与非甲烷总烃(NMHC)释放规律如图 7 所示。

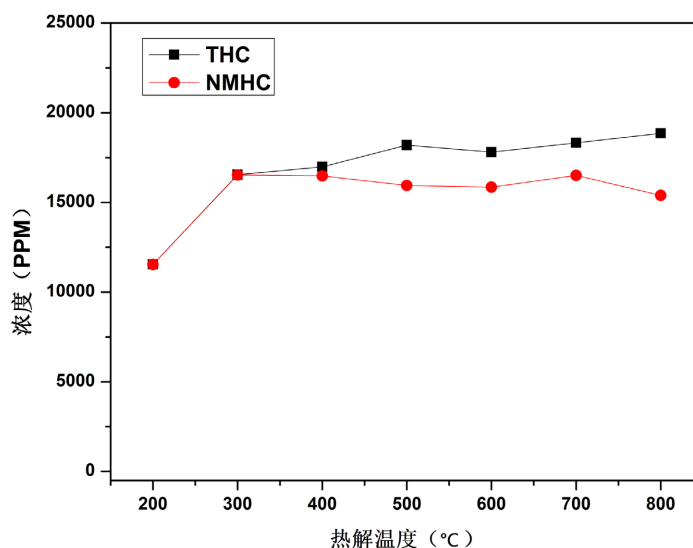


Figure 7. Release law of total hydrocarbon (THC) and non-methane total hydrocarbon (NMHC) at different pyrolysis temperatures

图 7. 不同热解温度下总烃(THC)与非甲烷总烃(NMHC)释放规律

总烃(THC)定义为氢火焰离子化检测器上有响应的气态有机化合物的总和(除另有说明, 结果以碳计), 非甲烷总烃(NMHC)定义为氢火焰离子化检测器上有响应的除甲烷外的其他气态有机化合物的总和(除另有说明, 结果以碳计) [10]。由图 7 可知, 在 200℃~800℃热解温度下, 整体上总烃和非甲烷总烃浓度呈先增大后趋于饱和的趋势。在 200℃~300℃时, 总烃浓度为 11543.35~16544.13 ppm, 非甲烷总烃浓度为 11539.42~16526.97 ppm。根据前文在此温度段图 4、图 5 中所示的低碳烃类产物含量很低, 但表 2 中二氯甲烷响应很高以及也有其它挥发性有机物产生, 因此在此温度段内总烃及非甲烷总烃数值相对较高。在 300℃~800℃时, 高碳有机物发生断键重组生成低碳有机物, 低碳有机物之间发生相互转化[11], 因此在此温度段总烃及非甲烷总烃数值虽整体趋于饱和但相邻温度之间数值会发生上下波动。



## 4. 结论

二氧化硅填料双酚 A 缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)样条在空气氛围中 200℃~800℃热解温度下仅有一个失重阶段为 300℃~500℃, 最大失重率为 33.93%。

二氧化硅填料双酚 A 缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)样条在空气氛围中 200℃~800℃热解温度下, 生成的气态产物种类较多, 主要包括氢气、一氧化碳、二氧化碳、烷烃、烯烃、炔烃、酮、醇、脂、醛、卤代烃、苯系物、杂环芳烃、链状及环状硅氧化合物, 且各物质浓度变化规律较为复杂。

二氧化硅填料双酚 A 缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂(DGEBA/EDA)样条在空气氛围中 200℃~800℃热解温度下, 整体上总烃和非甲烷总烃浓度呈先增大后趋于饱和的趋势。在 200℃~300℃时, 总烃浓度为 11543.35~16544.13 ppm, 非甲烷总烃浓度为 11539.42~16526.97 ppm。

## 参考文献

- [1] 孙曼灵. 环氧树脂应用原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 俞翔霄, 俞赞琪, 陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 黄诗敏. 10kV 开关柜局部放电带电检测技术应用与仿真分析研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 丁宏博, 张剑秋, 蔡培. 双酚 A 缩水甘油醚/乙二胺环氧树脂的热分解行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(2): 83-89.
- [10] 生态环境部. 环境空气和废气总烃、甲烷和非甲烷总烃便携式监测仪技术要求及检测方法: HJ 1012-2018 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [11] Lin, J.F., Ho, C.F. and Huang, S.K. (2000) Thermal Characterization of the Phosphorus-Containing Sulfone-Modified Epoxy Resins by Thermogravimetric Analysis and Direct Pyrolysis-GC/MS Measurement on the Thermally Degradative Volatiles. *Polymer Degradation and Stability*, **67**, 137-147. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00103-2)