

# 二次回路直流电缆 PVC 绝缘材料热老化特征研究

朱 军<sup>1</sup>, 黎柏城<sup>2</sup>, 朱 琐<sup>2</sup>, 张 鑫<sup>3</sup>, 贾 杨<sup>2</sup>, 柏明辉<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 西南民族大学电气工程学院, 四川 成都 610041; 3. 四川南充恒通电力有限公司, 四川 南充 637000)

**摘要:**二次回路直流电缆老化会严重影响变电站安全运行。对电缆的聚氯乙烯(PVC)绝缘材料进行人工加速老化,经过不同温度和老化时间,采用热失重和傅里叶红外光谱对老化样本进行分析,探究其在不同条件下的老化特性。结果表明在PVC热失重的两个阶段,当老化温度相同时,延长老化时间会使PVC树脂在热失重第一阶段损耗增加、残留物减少,尤其是老化温度为120℃或130℃时这类变化趋势更加明显。傅里叶红外图像证实提高热老化温度和延长热老化时间会导致PVC电缆中甲基、亚甲基、羟基、碳碳双键等官能团增多,特别是当老化温度为120℃及以上时增加趋势更为明显,且随老化时间的延长呈加速趋势。因此当温度达到120℃时,二次回路直流电缆PVC绝缘材料将呈老化加速趋势。

**关键词:**二次回路; PVC电缆; 热失重; 老化

**中图分类号:** TM 852 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)06-0074-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20240611

## Research on Thermal Aging Characteristics of PVC Insulation Material for DC Cables of Secondary Circuit

ZHU Jun<sup>1</sup>, LI Bocheng<sup>2</sup>, ZHU Suo<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>, JIA Yang<sup>2</sup>, BAI Minghui<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Sichuan Nanchong Hengtong Electric Power Co., Ltd., Nanchong 637000, Sichuan, China)

**Abstract:** The aging of secondary circuit DC cable will seriously affect the safe operation of substation. The artificial accelerated aging of PVC insulation material of the cable is carried out, after different temperatures and aging time, the aging samples are analyzed by thermal weightlessness and Fourier infrared spectroscopy to explore its aging characteristics under different conditions. The results show that in two stages of PVC thermal weightlessness, when the aging temperatures are the same, prolonging the aging time will increase the loss of PVC resin in the first stage of thermal weightlessness and reduce the residue, especially when the aging temperature is 120℃ or 130℃, this kind of change trend is more obvious. The images of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) confirm that increasing thermal aging temperature and prolonging thermal aging time will lead to an increase in functional groups such as methyl, methylene, hydroxyl and carbon-carbon double bonds in PVC cables, and the trend of increase is more obvious especially when the aging temperature is 120℃ and above, and the trend is accelerated with the prolongation of aging time. Therefore, when the temperature reaches 120℃, the PVC insulation material of secondary circuit DC cable will be in accelerated aging trend.

**Key words:** secondary circuit; PVC cable; thermal weightlessness; aging

## 0 引 言

电力系统二次直流回路是二次设备按特定要求连接成的回路,用于各类变电站、换流站,对一次系

统起控制和保护的作用<sup>[1-2]</sup>,为变电站(换流站)继电保护装置和断路器等设备提供稳定的直流电源。在二次直流回路中,电缆应具有较高的绝缘性能和使用寿命<sup>[3-4]</sup>,大量研究表明<sup>[5-8]</sup>聚氯乙烯(polyvinyl chloride,PVC)因其卓越的电绝缘性能、良好的耐化

学腐蚀性、阻燃性和较高的成本优势,成为二次直流回路电缆使用最为广泛的绝缘材料之一。

在运行过程中,电缆绝缘材料长期受到线芯导体载流发热以及周围运行环境的影响,不可避免地逐渐老化、变硬、变脆、龟裂以及绝缘性能下降<sup>[9]</sup>。直流电缆绝缘性能下降引起短路、信号传输失真、设备误动作,严重的甚至会导致直流失电使站内继电保护失效乃至引起火灾事故。仅 2019 年,中国有记录的火灾事故共计 23.3 万起,其中电气火灾占 52%,且大部分电气火灾是由电缆老化而引起的<sup>[10-11]</sup>。文献[12]利用傅里叶变换红外光谱仪对铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套软电缆(RVV 电缆)绝缘层内部结构与绝缘失效机理进行研究,发现 RVV 电缆料的热老化表现为其内部增塑剂、稳定剂、填充剂等添加剂以及 PVC 树脂自身的热分解过程。文献[13]利用热重分析仪、差示扫描量热法和氧指数法对 PVC 电缆绝缘材料的使用寿命进行研究,发现氧体积分数的增加会使 PVC 热解更容易,说明氧气参与了 PVC 的氧化。文献[14]利用热重分析法对阻燃型聚氯乙烯绝缘软电线(ZR-BVR 电线)绝缘材料加速老化后的热解特性进行研究,发现老化时间不超过 40 天时,随着老化时间的延长,绝缘材料热解残余量逐渐增加。文献[15]对多种阻燃 PVC 电缆的热解行为进行研究,发现都呈现出两步热解反应的现象。文献[16]利用热重分析法、红外光谱法和热裂解气相色谱质谱联用技术对 PVC 电缆热解产物进行研究,分析表明 PVC 快速热解过程主要为分解脱氯及形成氯化氢(HCl)。

综上所述,国内外在 PVC 电缆老化方面进行了大量研究,但是大部分研究都只考虑了时间或者温度的单一变量,并未考虑两者同时作用对 PVC 电缆老化的影响。因此,下面对 PVC 电缆在不同时间和温度下的老化特性进行研究,可为变电站二次直流系统的安全运行提供重要的理论依据。

## 1 样品的老化及检测

### 1.1 PVC 直流电缆样品

实验所采用的二次回路直流电缆型号为 ZA-KVVP2-22 4×4,其结构如图 1 所示。依次剥开电缆的外护套、钢铠、内衬和铜屏蔽层,去除填充物,取出带有 PVC 绝缘的缆芯作为老化样品。每根

样品长度为 1 m,共计 15 根,PVC 绝缘材料的厚度为 2 mm。

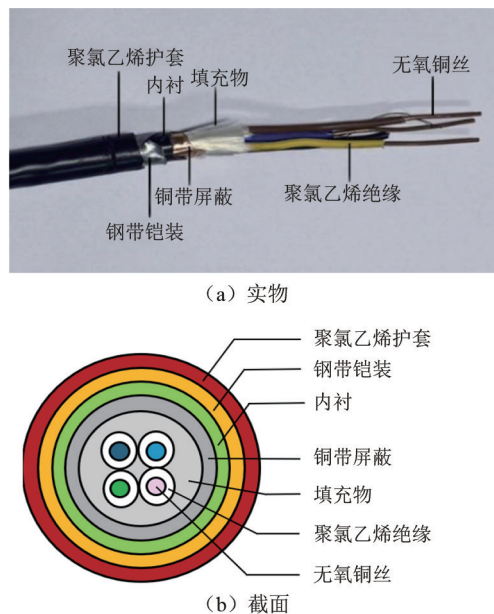


图 1 PVC 直流电缆结构

PVC 直流电缆绝缘材料主要由 PVC 树脂和增塑剂(邻苯二甲酸酯)、稳定剂(三盐基性硫酸铅、二盐基性亚磷酸铅)、填充剂(碳酸钙)等各种添加剂组成,其中 PVC 树脂比例最大,约为 50%~60%。

PVC 分子式为  $(C_2H_3Cl)_n$ ,结构式如图 2 所示。

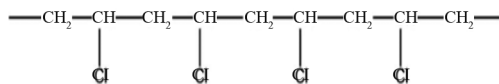


图 2 PVC 分子结构式

### 1.2 老化实验流程

将 15 根电缆样品等分成为 A、B、C 3 组,分别对应老化温度 110 ℃、120 ℃、130 ℃,每组设置 5 根电缆。每隔 5 天取出一根样品并按照取出时间顺序进行编号,如 A 组的 A1 表示在 110 ℃下老化满 5 天取出,具体样品编号与老化温度和老化时间的对应关系如表 1 所示。

表 1 样品与对应实验条件

取出时间/d	样品编号		
	110 ℃	120 ℃	130 ℃
5	A1	B1	C1
10	A2	B2	C2
15	A3	B3	C3
20	A4	B4	C4
25	A5	B5	C5

选用型号为 ATS-DZG-6090SA 的真空干燥箱进行老化实验,老化过程中不进行空气交换,样品测

试在室温中进行。干燥箱的温度控制精度为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),波动度为  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3 热失重和傅里叶红外光谱测试

所用瑞士梅特勒公司 TGA/SD-TA851e 热重分析仪的升温速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,温度范围为  $50\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热失重分析测试严格按照 GB/T 2951.32—2008<sup>[17]</sup> 的实验标准执行。每次测试截取  $3\text{ mg}$  老化 PVC 样品放入陶瓷坩埚,在正式测试之前先开机预热  $3\text{ h}$  左右,并将同一老化时间和老化温度的样品进行 3 次独立测试,取平均值以减小实验误差。

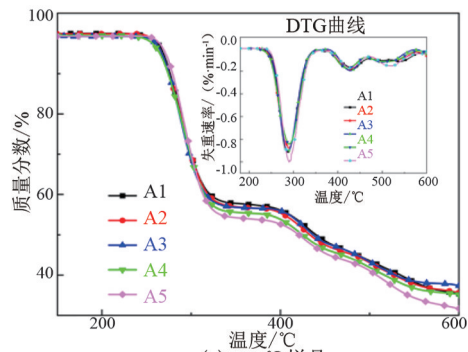
所用美国热电 Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪的光谱范围为  $1500\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为  $0.4\text{ cm}^{-1}$ 。傅里叶红外光谱测试严格按照 GB/T 6040—2019<sup>[18]</sup> 的标准进行。将老化后的每根 PVC 样品截取 3 份,每份约  $2\text{ cm}$ ,然后利用傅里叶红外光谱仪对环境进行采样,对样品的一个点位进行采样。通过对系统进行设置,自动将两份采样数据进行相减,得到样品的一组数据,将一份样品进行 3 次不同点位采集,最终得到其平均值。

## 2 结果与讨论

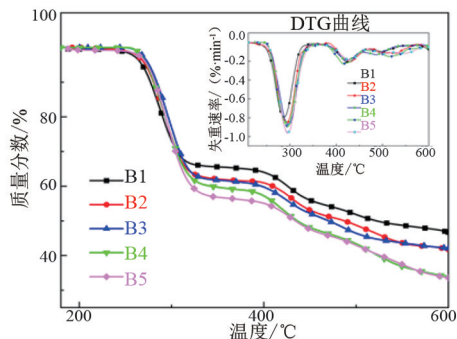
### 2.1 PVC 的热解失重

PVC 的热解失重测试结果如图 3 所示。图 3 (a)、(b)、(c) 分别为 A、B、C 3 组电缆在空气氛围中的热重分析(thermogravimetric, TG) 曲线和微分热重分析(differential thermogravimetric, DTG) 曲线,其中 DTG 曲线是由 TG 曲线求导所得。脱氯反应发生在  $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, $300\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间发生了碳化反应。由图 3(a)、(b)、(c) 可知,PVC 在空气中的热失重过程按照温度可划分为 2 个阶段: $200\sim 335\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $335\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。受测试条件影响,热失重温度只达到  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图中的 DTG 图像可知,热失重速率存在 2 个明显的峰值,正对应上述 2 个热失重阶段,其中第一阶段的热失重速率最高,主要是发生脱氯反应。

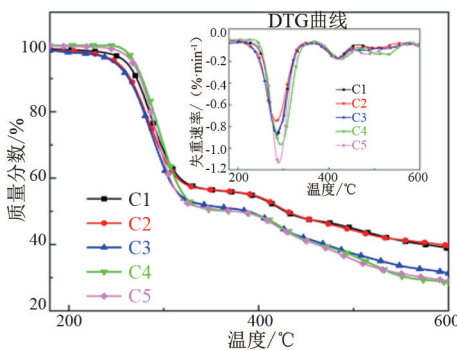
由图 3(a)、(b)、(c) 明显可以看出,A 组 5 个样品各阶段热失重曲线相对集中且重合度较高,热失重速率变化趋势相对一致,而温度较高的 B、C 两组样品的热失重曲线在第二阶段的差异性则比较明显,曲线也比较分散,相应阶段的热失重速率变化趋势较大。第一、二阶段质量损失分别等于  $200\sim 335\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $335\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  区间的质量变化百分比。



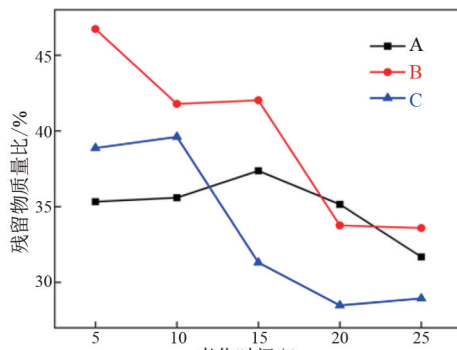
(a)  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  样品



(b)  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  样品



(c)  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  样品



(d) 残留物质量比

图 3 样品的热重曲线图像

第一阶段( $200\sim 335\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的热解过程最为剧烈,这一阶段主要为 PVC 中水分、表面挥发性成分的去除,以及氯原子与相邻的氢原子发生交换,生成了大量的 HCl 气体和氯代烃,同时也有少量碳骨架链分解形成共轭烯烃<sup>[19-20]</sup>。在这一温度区间内,失重速率以及质量损失均最大,这是因为 PVC 绝缘材料在

长时间的高温受热过程中发生了脱氯反应,氯元素的减少使电缆的阻燃性下降,导致 PVC 电缆在热失重过程中的分解速度加快。

第二个阶段(335~600 °C)主要是添加剂发生分解。PVC 以及各种增塑剂、阻燃剂、稳定剂等添加剂发生反应,部分结构发生变化<sup>[10]</sup>,并有少量的 HCl 生成。随着温度的进一步升高,脱氯的同时,PVC 分子链的主链开始断裂,产生大量的自由基和碳氢化合物。这些自由基和碳氢化合物会发生交叉反应,形成热稳定的碳化产物,包括芳香烃和芳香酮等<sup>[21]</sup>。

A、B、C 3 组电缆热失重实验后的残留物质量比如图 3(d) 所示。在相同条件下,随着老化时间的增加,残留物占总体质量的比例减少。从整体来看,B、C 组电缆中残留物质量比的减少趋势比 A 组电缆更为显著。残留物质量比越少,则 PVC 电缆绝缘在加热过程中热解得越充分。因此当老化温度为 110 °C 时,电缆在各个热失重阶段质量损失随老化时间延长而变化的趋势不明显,而当老化温度超过 110 °C 以后,PVC 在第一阶段的质量损失呈现出明显的上升趋势,说明温度对电缆老化起到关键作用。TG 测试结果证实了老化时间对电缆中的成分影响较大,测试过程中形成的残留物质量比随老化时间的增加快速减少,老化时间越长,电缆脱氯反应时间更久,电缆性能更差。

### 2.2 PVC 热解机理

一般认为,PVC 受热分解是由分子在受热过程中产生的不稳定结构,或者氧化产生的自由基攻击亚甲基引起的,可用图 4 中 4 个过程及其反应方程式描述<sup>[22]</sup>。

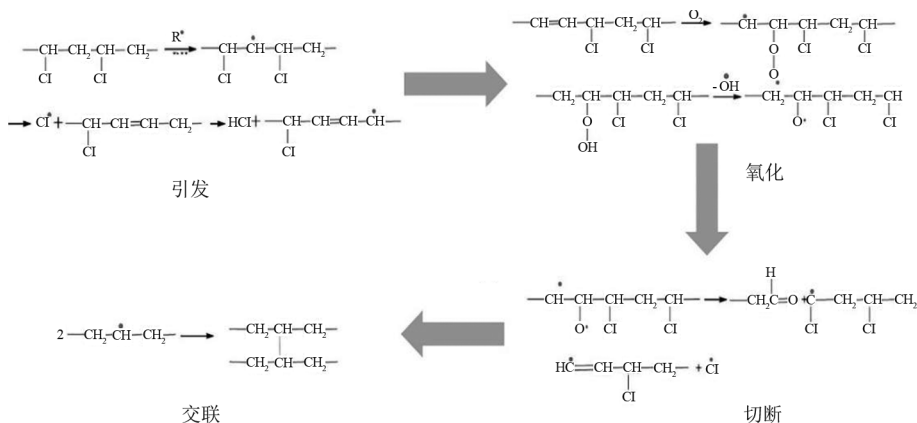


图 4 PVC 受热反应趋势

由图 4 可知:1)热解过程中 PVC 的分子链开始受热并振动。在一定温度下,PVC 开始失去其吸附水分并逐渐脱除表面的挥发性成分。2)在继续升温的过程中,PVC 分子链中的氯原子开始与相邻的氢原子发生交换,生成 HCl 气体。3)随着温度的进一步升高,脱氯的同时,PVC 分子链的主链开始断裂,产生大量的自由基和碳氢化合物。这些自由基和碳氢化合物会发生交叉反应,形成热稳定的碳化产物,包括芳香烃和芳香酮等。4)在较高温度下,PVC 分子链完全碳化,生成坚固的残留焦,不再产生可挥发性的气体。

总的来说,PVC 的热解过程涉及到脱氯、碳化等多个阶段,其产物主要包括 HCl 气体和各种碳化物。这些反应产物在不同的温度下会产出,具体反应路径和产物也会受到温度、压力、反应时间和反应条件等因素的影响。

### 2.3 PVC 的傅里叶红外光谱分析

为研究老化过程中 PVC 分子结构的变化,通过傅里叶红外光谱图像对不同老化时间和温度下的样品进行分析,分析测试结果如图 5 所示。表 2 为老化后 PVC 官能团的振动吸收频率。

表 2 老化后 PVC 的振动吸收频率

基团(官能团)	振动方式	振动频率/cm <sup>-1</sup>
甲基(-CH <sub>3</sub> )	对称伸缩振动	2870
甲基(-CH <sub>3</sub> )	反对称伸缩振动	2962
亚甲基(-CH <sub>2</sub> -)	对称伸缩振动	2850
亚甲基(-CH <sub>2</sub> -)	反对称伸缩振动	2910
碳碳双键(C=C)	伸缩振动	1600
羟基(-OH)	伸缩振动	3430

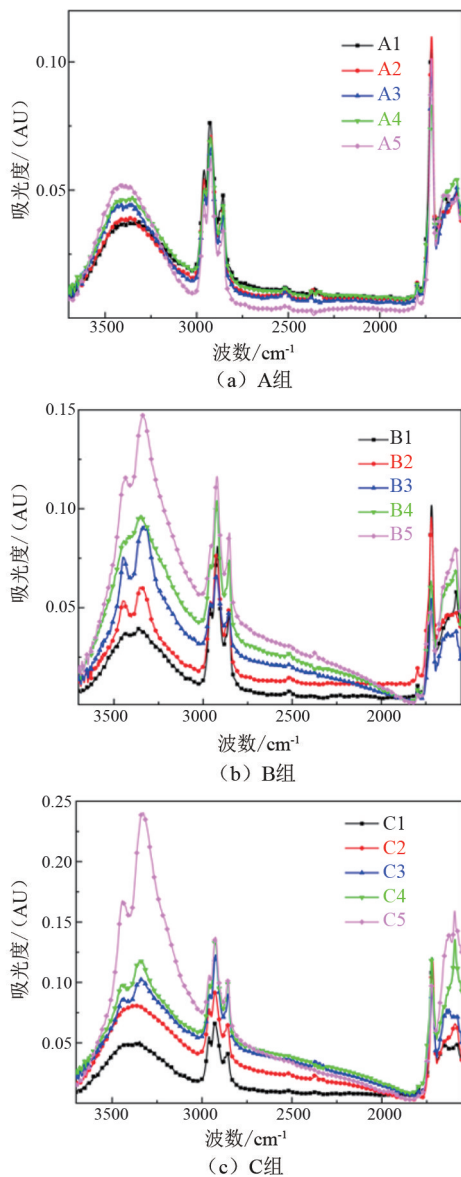
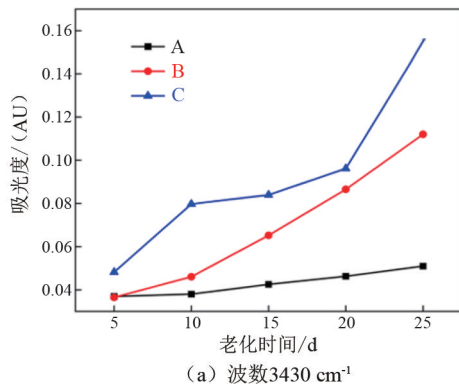


图 5 样品在不同老化温度和时间下  
电缆材料对应的红外光谱

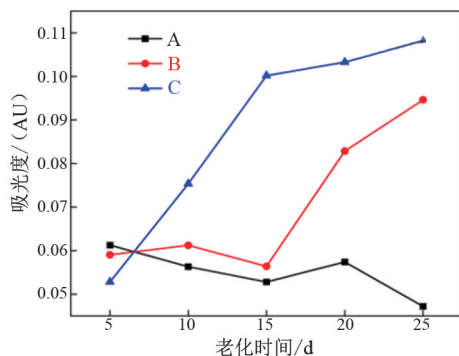
由图 5 可以算出,3 个比较明显的吸收峰分别出现在波数  $2870\text{ cm}^{-1}$ 、 $2910\text{ cm}^{-1}$ 、 $3430\text{ cm}^{-1}$  处,在波数  $1600\text{ cm}^{-1}$  处,也有一个小的吸收峰。3 组样品在不同波数下的峰值如图 6 所示。由表 2 可知,上述吸收峰分别对应的官能团依次为  $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$ 、 $-\text{OH}$  以及  $\text{C}=\text{C}$  双键。吸收峰的数值大小反映了对应官能团在 PVC 中含量的高低,甲基基团的减少说明了在老化过程中  $\text{C}-\text{H}$  键断裂。在波数  $2850\sim 3000\text{ cm}^{-1}$  范围内,官能团有甲基 ( $2870\text{ cm}^{-1}$ 、 $2962\text{ cm}^{-1}$ ) 和亚甲基 ( $2850\text{ cm}^{-1}$ 、 $2910\text{ cm}^{-1}$ ) 两种。这两种官能团对应的峰值随老化时间的变化分别如图 6 (b)、(c) 所示。

由于 PVC 在热降解过程中会产生大量的氢自

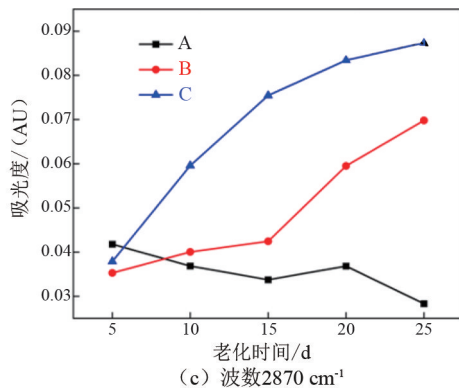
由基 ( $\text{H}\cdot$ ),且这些  $\text{H}\cdot$  会参与共轭烯烃的热降解,从而有助于形成小分子碳氢化合物,导致甲基和亚甲基增多。由此造成了图 6 (b)、(c) 中, B、C 两组样品甲基、亚甲基吸收峰随老化时间而增大的现象,尤其在老化时间达到 15 天以后,上升趋势变得更加明显。A、B、C 3 组样品的甲基、亚甲基吸收峰曲线由下到上依次排列,表明温度越高,生成的甲基和亚甲基越多。而当老化温度为  $110\text{ }^\circ\text{C}$  时,两种官能团峰值随老化时间变化趋势不明显,说明即便是在较大的时间尺度下发生反应,仍需要一定的温度 ( $120\text{ }^\circ\text{C}$  及以上) 才会发生由  $\text{H}\cdot$  引起的甲基、亚甲基增多的反应。但  $120\text{ }^\circ\text{C}$  和  $130\text{ }^\circ\text{C}$  的实验温度仍明显低于  $250\text{ }^\circ\text{C}$  以上的  $\text{H}\cdot$  适宜反应温度,说明样品中存在不稳定结构促进了 PVC 的分解,这些结构可能在长期加热的过程中氧化生成。通过图 6 (b)、(c)



(a) 波数  $3430\text{ cm}^{-1}$



(b) 波数  $2910\text{ cm}^{-1}$



(c) 波数  $2870\text{ cm}^{-1}$

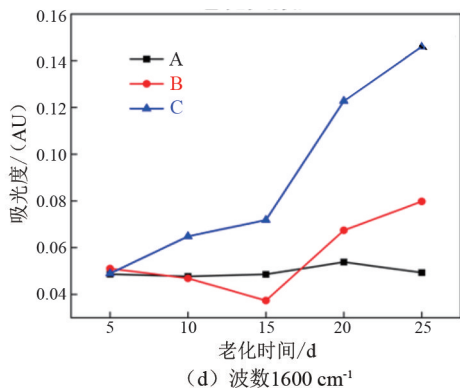


图6 样品在不同波数下的峰值

的数据对比可知,亚甲基对应波峰高于甲基,说明亚甲基的含量多于甲基。这是因为C-H键键能比C-C键键能小,因此C-H键更容易断裂,在热作用下,PVC分子末端或支链末端甲基上的C-H键最先断裂,导致亚甲基数量增多。

图6中,羟基含量的变化最为明显,特别是老化25天以后,在相同温度下,随着老化时间的增加,吸收峰峰值在相应地增大;在相同老化时间下,随着老化温度的升高,其吸收峰峰值也在逐渐增加,说明随着老化时间和老化温度的增加,PVC分子的断裂现象加剧,断裂处所形成的自由基在特定条件下与空气发生氧化反应<sup>[23]</sup>,导致羟基含量的增多。A、B、C 3组电缆样本在 $3430\text{ cm}^{-1}$ 和 $1600\text{ cm}^{-1}$ 处的红外光谱吸收峰峰值分别如图6(a)、(d)所示。

图6(a)中B、C组电缆样品中羟基含量随老化时间增加而上升的趋势比A组电缆更为显著,且老化15天以后明显呈现加速态势。A、B、C 3组样品在相同老化时间下的波峰数值对比则说明老化温度对羟基生成量有明显影响,老化温度越高,羟基生成量越大,随老化时间增大得越快。羟基的生成与氧化反应有关,可导致PVC大分子的断链和碳碳双键的生成,因此其数量的增长反映了PVC的老化程度。图6(d)表明,随着老化温度和老化时间的增加,波峰峰值均呈现出不同程度的上升,特别是老化15天以后,B、C组样品的碳碳双键波峰随老化时间呈迅速增长趋势,而A组样品的则未见上升。这是由于温度和时间的增加,PVC分子链段的破坏,以及PVC聚合时的残留微量引发剂或氧化作用生成自由基攻击亚甲基,发生了脱氢、脱氯反应,导致了碳碳双键的增加。

PVC中较高的氯元素含量是其具有良好阻燃

性的根本原因,而碳碳双键的数量增长表明氯元素含量的降低和材料阻燃性的下降,是PVC绝缘材料老化的重要指征。因此,可在变电站内安装气体浓度检测仪,对空气中的氯元素含量进行监测,从而大致判断PVC电缆的老化状态。图6(d)的碳碳双键吸收峰幅值变化趋势,印证了热失重分析过程中所表现出的质量损失和残留物变化规律,即热老化温度越高,老化时间越长,样品热解性能越差。

### 3 结论

上面对二次回路直流电缆样品分别进行 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最长达25天的热老化实验,并对不同老化温度、老化时间下得到的样品进行热失重分析和傅里叶红外光谱分析,结合PVC热降解的化学反应过程,得到如下结论:

1) 老化温度越高、时间越长,脱氯反应就越剧烈。氯元素的大量减少使得电缆的阻燃性降低,导致电缆在热失重过程中第一、二阶段的质量损失相对越大,热失重后的残留物越少。而老化温度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热失重过程各阶段的质量损失和残留物随老化时间的变化不大。

2) PVC电缆绝缘中甲基、亚甲基、羟基和碳碳双键的含量随老化温度和老化时间的增加而增大,且老化温度在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上、老化时间超过15天的情况下,增大的趋势更为明显,当老化温度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时官能团的变化趋势不明显。

3) 在5~25天时间范围,相对密闭的环境下, $110\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这样较低的温度即可使PVC绝缘降解。当温度达 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上时,可见PVC绝缘快速老化,表现为甲基、亚甲基、羟基和碳碳双键等基团的增多和热解性能的下降,且随着老化时间的延长,老化呈加速趋势。

#### 参考文献

- [1] 高磊,卜强生,袁宇波,等.基于二次回路比对的智能变电站调试及安全措施[J].电力系统自动化,2015,39(20):130-134.
- [2] 黄新民.电力系统中继电保护二次回路的维护与检修[J].工程技术研究,2017(10):248-249.
- [3] 霍瑞美,刘飞,江平开.交联聚乙烯TG快速热寿命评

估方法的研究[J].绝缘材料, 2013, 46(6):19-24.

[4] 申娴,杨韬,高铭晶,等.控制电缆用阻燃 PVC 体积电阻率检验周期探析[J].光纤与电缆及其应用技术, 2023(1):31-34.

[5] 李在辉,胡源,宋磊,等.聚氯乙烯电缆料老化前后的火灾危险性研究[J].火灾科学, 2011, 20(1):56-61.

[6] 崔刘芳.低倍过载聚氯乙烯电线的火灾危险性研究[J].绝缘材料, 2013, 46(3):24-27.

[7] 付诗禧,陈志辉,彭玉培,等.软质聚氯乙烯电缆材料的抗老化与耐腐蚀性能研究[J].塑料科技, 2023, 51(5):62-65.

[8] 宋海硕,魏涛,慈书亭,等.聚氯乙烯材料老化性能研究进展[J].塑料工业, 2015, 43(9):1-4.

[9] 单威威,王健.电线电缆绝缘材料燃烧及热老化研究进展[J].塑料, 2020, 49(3):151-155.

[10] 李明珠,单黎明,孙浩.B1 级阻燃电缆与其所用护层材料的热释放相关性分析[J].电线电缆, 2020(6):12-16.

[11] 罗夏,黄成家,毕昆,等.开放和封闭空间内不同间隙的竖向电缆燃烧试验研究[J].安全与环境学报, 2017, 17(3):975-979.

[12] 王勇.热老化对 RVV 电缆绝缘层内部结构与绝缘失效机理的研究[J].中国塑料, 2014, 28(12):67-72.

[13] 赵艳萍,刘申友,张和平,等.聚氯乙烯电缆绝缘材料热解机理与动力学参数研究[J].消防科学与技术, 2012,31(4):329-332.

[14] 王健,单威威,张雪月,等.临界温度下 ZR-BVR 绝缘材料老化热解特性研究[J].绝缘材料, 2018, 51(9):15-20.

[15] MUN S Y, HWANG C H. Experimental and numerical studies on major pyrolysis properties of flame retardant

PVC cables composed of multiple materials[J]. Materials, 2020, 13(7):1712.

[16] ZHOU J J, LIU G J, WANG S B, et al. TG-FTIR and Py-GC/MS study of the pyrolysis mechanism and composition of volatiles from flash pyrolysis of PVC[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(6):2362-2370.

[17] 全国电线电缆标准化技术委员会.电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 32 部分:聚氯乙烯混料专用试验方法 失重试验 热稳定性试验:GB/T 2951.32—2008[S].北京:中国标准出版社, 2008.

[18] 全国化学标准化技术委员会有机化工分技术委员会.红外光谱分析方法通则:GB/T 6040—2019[S].北京:中国标准化出版化, 2019.

[19] 南玮,吴爱军.阻燃电缆的热解动力学及反应机理研究[J].消防科学与技术, 2022, 41(1):123-127.

[20] 高亚萍.阻燃电缆绝缘材料聚氯乙烯热解特性研究[J].工程塑料应用, 2007(3):44-47.

[21] 罗希韬,王志奇,武景丽,等.基于热重红外联用分析的 PE、PS、PVC 热解机理研究[J].燃料化学学报, 2012, 40(9):1147-1152.

[22] YU J, SUN L S, MA C, et al. Thermal degradation of PVC: A review[J]. Waste management, 2016, 48:300-314.

[23] 武鹏,李齐方,康鹏,等.PVC 型材耐候性能研究进展[J].塑料工业, 2017, 45(5):1-5.

作者简介:

朱 军(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电网防灾减灾、输电线路运维及检修技术;

黎柏城(1999),男,硕士研究生,研究方向为电力电缆绝缘材料。

(收稿日期:2024-05-11)

(上接第 34 页)

[23] TUCCI M, RIVERSO S, VASQUEZ J C, et al. Voltage control of DC islanded microgrids: A decentralized scalable approach[C]//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), December 15-18, 2015, Osaka, Japan. IEEE, 2015:3149-3154.

[24] KHALIL H K. Nonlinear Systems [M]. 3rd ed. Upper Saddle River; Prentice-Hall, 2002.

[25] KONSTANTOPOULOS G C, ALEXANDRIDIS A T. Stability and convergence analysis for a class of nonlinear passive systems [C]// 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), December 12-15, 2011, Orlando, FL,

USA. IEEE, 2011:1753-1758.

[26] KONSTANTOPOULOS G C, ALEXANDRIDIS A T. Generalized nonlinear stabilizing controllers for Hamiltonian passive systems with switching devices[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4):1479-1488.

作者简介:

寇志豪(1994),男,硕士,工程师,研究方向为新能源并网稳定性;

曹建旗(1994),男,硕士,工程师,研究方向为新能源并网稳定性。

(收稿日期:2024-07-31)