

氟醚橡胶在不同介质下的热老化行为 与机理研究

刘俊邦¹, 张少锋¹, 李璞², 张洪彬¹, 陈荻云¹, 唐庆云^{1*}

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610;

2.中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412000)

摘要: **目的** 对氟醚橡胶 FM-2D 在空气与飞马 II 号润滑油中的热老化行为与机理进行研究。**方法** 开展氟醚橡胶高温贮存试验, 在热氧、热油的介质环境下, 研究氟醚橡胶的力学性能退化规律。试验后对样品的拉伸性能、压缩性能以及硬度进行检测, 并且利用傅里叶红外光谱仪、扫描电子显微镜以及 X 射线电子能谱对试验后样品进行检测。**结果** 通过热老化试验, 发现氟醚橡胶在 200 ℃ 以下能够长期维持较好的力学性能。试验温度在 200 ℃ 以上, 氟醚橡胶的力学性能出现明显退化趋势, 并且在热空气与热油中的老化趋势不同。在 220 ℃ 的热空气老化 31 d 后, 氟醚橡胶的拉伸强度下降 27.0%, 断裂伸长率增大 89.8%, 压缩应力松弛率为 34.6%, 硬度下降 8.7%。在 220 ℃ 的热油老化 31 d 后, 氟醚橡胶的拉伸强度下降 85.9%, 断裂伸长率下降 83.9%, 压缩应力松弛率为 -17.5%, 硬度上升 4.2%。**结论** 在热空气老化过程中, 橡胶分子链受热氧影响发生断裂, 使其强度下降; 在热油老化过程中, 油介质和高温的耦合作用使橡胶的交联网络失效, 橡胶发硬变脆。

关键词: 氟醚橡胶; 热老化; 力学性能; X 射线光电子能谱

中图分类号: TN06

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0070-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.12.009

Thermal Aging Behavior and Mechanism of Fluoroether Rubber under Different Media

LIU Jun-bang¹, ZHANG Shao-feng¹, LI Pu², ZHANG Hong-bin¹, CHEN Di-yun¹, TANG Qing-yun^{1*}

(1. Electronic Fifth Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China;

2. China Aerospace Hunan Power Machinery Research Institute, Hunan Zhuzhou 412000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the thermal aging behavior and mechanism of fluoroether rubber FM-2D in air and Pegasus II lubricating oil. The storage test of fluoroether rubber at high temperature was carried out, and the degradation law of mechanical properties of fluoroether rubber was investigated in air and oil. The tensile properties, compressive properties and hardness of the samples were tested after the aging test. A Fourier infrared spectrometer, a scanning electron microscope and an X-ray electron spectroscopy were used to detect and analyze the samples after the test to explore the aging mechanism. The result showed that fluoroether rubber could maintain good mechanical properties for a long time at 200 ℃. While when the temperature was above 200 ℃, the mechanical properties of fluoroether rubber degraded obviously. After 31 days of aging in hot air

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2023-12-11

Received: 2023-10-31; Revised: 2023-12-11

引文格式: 刘俊邦, 张少锋, 李璞, 等. 氟醚橡胶在不同介质下的热老化行为与机理研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 70-77.

LIU Jun-bang, ZHANG Shao-feng, LI Pu, et al. Thermal Aging Behavior and Mechanism of Fluoroether Rubber under Different Media[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 70-77.

*通信作者 (Corresponding author)

at 220 °C, the tensile strength of fluoroether rubber decreased by 27.0%, the elongation at break increased by 89.8%, the relaxation rate of compressive stress was 34.6%, and the hardness decreased by 8.7%. After 31 days of hot oil aging at 220 °C, the tensile strength of fluoroether rubber decreased by 85.9%, the elongation at break decreased by 83.9%, the relaxation rate of compressive stress was -17.5%, and the hardness increased by 4.2%. Through analysis and characterization, it is founded that the molecular chain of rubber is broken under the influence of hot oxygen during the aging process of hot air, and the strength of rubber decreases. In hot oil aging, the coupling effect of oil medium and high temperature makes the crosslinking network of rubber fail, and the rubber becomes hard and brittle.

KEY WORDS: fluoroether rubber; FM-2D; thermal aging; mechanical properties; X-ray photoelectron spectroscopy

橡胶以 O 形圈、垫片的形式被应用于液体和气体的密封, 广泛应用在机械、化工、航空航天、汽车等领域^[1-4]。氟橡胶作为一种高性能的高分子弹性体, 通过在橡胶分子链上引入氟原子, 提高橡胶的性能, 使其具有耐高温、耐溶剂、耐强化剂等优异性能, 主要应用于航空密封系统^[5-9]。由于 C—F 键的键能高, 键长短, 且氟原子电负性强, 使其电子云相比氢原子的紧密, 因此具有良好的热稳定性以及化学惰性, 对橡胶分子主链的碳碳键具有屏蔽作用, 增强了氟橡胶的性能^[10]。为适应装备的不同环境需求, 氟橡胶通过在侧链引入醚类单体, 在不降低原有性能前提下, 增强其柔韧性与耐低温性能^[11-14]。

含氟橡胶作为高分子材料, 在密封件的使用环境下对温度、有机介质敏感, 其老化机理较为复杂^[15]。国内外学者对橡胶在不同介质下的老化行为进行了研究, 探索橡胶密封件的失效模式以及老化机理。商旭静等^[16]设计了 5 种橡胶密封件的模拟工作状态, 模拟 FX-4 氟橡胶在不同介质以及不同温度(55~120 °C)下的老化行为。在 9 000 h 的老化试验过程中, FX-4 氟橡胶的压缩永久变形率随时间和温度的增加而增加, 其化学结构未发生本质变化。Zhuo 等^[17]以全氟弹性体为研究对象, 在 90~150 °C 下进行了热氧老化试验。研究表明, 在高温下, 全氟弹性体交联网络结构的后固化与破坏是同时发生的, 老化前期倾向于后固化, 老化后期破坏作用占主导。Liu 等^[18]采用了红外光谱 (FTIR-ATR)、X 射线光谱 (XPS)、核磁共振碳谱 (¹³CNMR)、热重 (TG) 等分析技术对热老化试验后的含氟弹性体进行了检测, 揭示了其热降解与热氧降解行为。

为探究氟醚橡胶在不同介质下的老化性能规律, 本文选取 FM-2D 氟醚橡胶作为研究对象, 以温度作为加速老化因子, 在空气与飞马 II 号润滑油中分别进行加速老化试验。由于氟醚橡胶的耐热性能优异, 以及参考氟醚橡胶实际使用状态, 因而在前人研究基础上提高了试验老化温度, 延长了试验时长。热老化试验后, 通过对其力学性能进行检测, 以及微观形貌与化学结构的分析表征, 研究氟醚橡胶的性能退化演变行为以及老化失效机理, 为航天航空装备的设计制备提供数据参考, 为提高装备的可靠性做支撑。

1 试验

1.1 材料与仪器

试验主要材料: 飞马 II 号润滑油, 由北京中航航特润滑科技有限公司提供; 氟醚橡胶 FM-2D, 由成都盛邦密封件股份有限公司提供, 试验样品包括哑铃型拉伸试验件、压缩试验件 A、压缩试验件 B。其中, 拉伸试验件的尺寸规格: 长度为(25.0±0.5) mm, 狭窄部分厚度为(2.0±0.2) mm; 压缩试验件 A 的尺寸规格: 圆柱形, 直径为(10.0±0.2) mm, 高度为(10.0±0.2) mm; 压缩试验件 B 的尺寸规格: 圆柱形, 直径为(29.0±0.5) mm, 高度为(12.5±0.5) mm。

试验主要仪器: 高温试验箱, 由广州五所环境仪器有限公司提供; 万能材料试验机, 用于橡胶拉伸与压缩性能测试; 邵氏硬度计 A, 用于测定橡胶的表面硬度; 傅里叶红外光谱仪, 用于橡胶化学结构分析, 利用红外光谱仪进行全反射扫描; 扫描电子显微镜, 用于橡胶微观形貌观测; X 射线光电子能谱 (XPS), 用于橡胶的元素价态分析。

1.2 老化试验方法

热空气老化试验是将拉伸试验件、压缩试验件 A 与压缩试验件 B 在无应力载荷下放置于高温试验箱, 在不同温度下开展试验。热油老化试验是将拉伸试验件、压缩试验件 A 与压缩试验件 B 在无应力载荷下完全浸泡于装有飞马 II 号润滑油的容器中, 容器置于高温试验箱, 在不同温度下开展试验。在不同试验节点下, 将试验件从油介质中取出, 并用酒精清洗表面残余润滑油。具体试验条件见表 1。考虑到试验的不确定性偏差, 对于上述的拉伸试验件, 不同试验环境下布置 5 个平行样件; 对于压缩试验件, 不同试验环境下布置 3 个平行样件。

1.3 检测与分析表征方法

拉伸强度和断裂伸长率的检测依据 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》进行。将拉伸试验件在万能材料试验机上以 500 mm/min 的拉伸速度使其断裂, 记录拉伸强度与断裂伸长率。每组为 5 个样品, 以平均值作为试验结果。

表 1 老化试验条件
Tab.1 Aging test conditions

介质	试验温度/℃	老化时间/d
空气	170、190、200	3、7、11、21、27、31
	210、220	3、5、7、11、16、21、27、31
飞马Ⅱ号润滑油	170、190、200	3、7、11、21、27、31
	210、220	3、5、7、11、16、21、27、31

压缩应力松弛的检测依据 GB/T 1685—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶 在常温和高温下压缩应力松弛的测定》进行。其中, 压缩试验件 A 根据 GB/T 1685—2008 的方法 A 进行检测, 压缩至规定形变的 $25\% \pm 2\%$, 压缩 (30 ± 1) min, 记录压缩所需作用力的大小。在规定的试验时间后, 压缩应力松弛率 R 以初始作用力的百分数表示, 计算公式如式 (1)。每组检测为 3 个样品, 以中值作为试验结果。

$$R = \frac{F_0 - F_t}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: F_0 为初始压缩作用力; F_t 为规定时间后的压缩作用力。

硬度的检测依据 GB/T 531.1—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶 压入硬度试验方法 第 1 部分: 邵氏硬度计法 (邵尔硬度)》进行。利用邵氏硬度计 A 对压缩试验件 B 进行检测, 每个样品取 3 个不同位置, 取

平均值作为该样品硬度, 每组检测为 3 个样品, 以平均值作为试验结果。

利用全反射-傅里叶红外光谱 (ATR-FTIR) 评价不同拉伸试验件老化前后的化学结构变化。利用扫描电子显微镜 (SEM) 对拉伸试验件的断口微观形貌进行观察。利用 X 射线光电子能谱 (XPS) 对压缩试验件 B 进行分析表征, 对 C、F、O 的元素化学价态进行分析。

2 试验结果

2.1 拉伸性能

氟醚橡胶 FM-2D 拉伸试验件分别在热空气和飞马Ⅱ号润滑油介质中不同温度下老化后的拉伸性能随老化时间的变化规律如图 1 所示。从图 1 中可以看

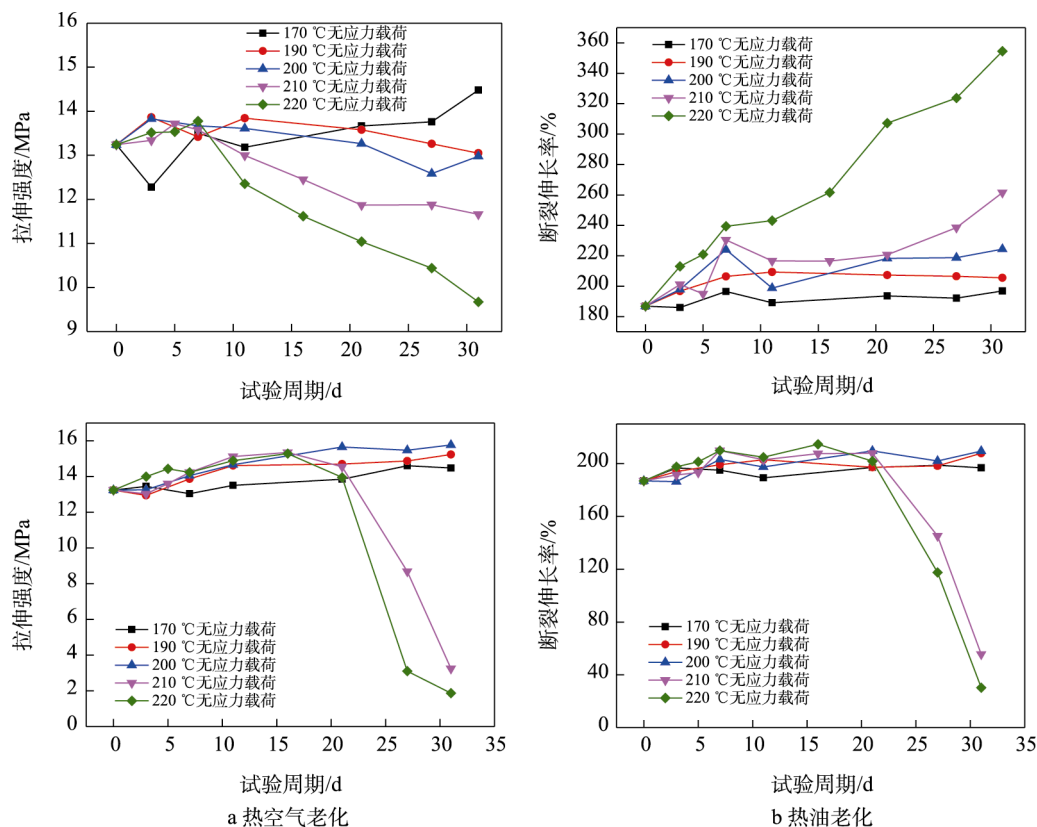


图 1 氟醚橡胶不同老化时间后的拉伸性能

Fig.1 Tensile properties of fluoroether rubber after aging for different time: a) hot air aging; b) hot oil aging

出, 橡胶在不同介质中的老化规律有明显差异。在热空气老化试验中, 试验温度在 200 °C 以下时, 其拉伸强度变化不明显, 断裂伸长率略有上升; 在 200 °C 以上时, 橡胶拉伸试验件的拉伸强度出现明显的下降趋势, 断裂伸长率也出现明显上升。在 220 °C 下试验 31 d 后, 其拉伸强度从 13.24 MPa 下降至 9.67 MPa, 断裂伸长率从 186.82% 上升至 354.51%。在热油老化试验中, 试验温度在 200 °C 以下时, 其拉伸强度与断裂伸长率略有上升; 在 200 °C 以上试验至 27 d 时, 其拉伸强度与断裂伸长率出现断崖式下降。在 220 °C 下试验 31 d 后, 其拉伸强度从 13.24 MPa 下降至 1.87 MPa, 断裂伸长率从 186.82% 下降至 30.17%。FM-2D 氟醚橡胶的拉伸性能与 FM-1D 对比, 在油介质中, 二者在温度超过 200 °C 后, 老化后性能急剧下降^[19]。

2.2 压缩应力松弛率

氟醚橡胶 FM-2D 压缩试验件 A 分别在热空气和飞马 II 号润滑油介质中不同温度下老化后的压缩应力松弛率随老化时间的变化规律如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 与拉伸性能老化规律相似, 橡胶在不同

介质下的老化行为出现不同趋势。在热空气老化试验中, 在 170、190 °C 时, 压缩试验件的压缩应力松弛率随试验时间的延长变化不明显。试验 31 d 后, 其压缩应力松弛率分别为 1.6% 和 4.0%。随着试验温度的上升, 试验件的压缩应力松弛率随温度的上升和试验时间的延长而增大。在 200、210、220 °C 下试验 31 d 后, 其压缩应力松弛率分别为 10.5%、21.3%、34.6%。在热油老化试验中, 压缩试验件的压缩应力松弛在不同温度下均呈现先上升、后下降的趋势, 并且随试验温度的上升, 其下降幅度增大。

2.3 硬度

氟醚橡胶 FM-2D 压缩试验件 B 分别在热空气和飞马 II 号润滑油介质中不同温度下老化后的硬度随老化时间的变化规律如图 3 所示。在热空气老化试验中, 在 200 °C 以下时, 压缩试验件的硬度随试验时间的延长无显著变化。试验温度为 210、220 °C 时, 其硬度随试验时间的延长而下降, 从 66.5HA 分别下降至试验 31 d 后的 63.8HA 和 60.7HA。在热油老化试验中, 试验件的硬度在不同温度下呈现先下降、后上升的趋势。

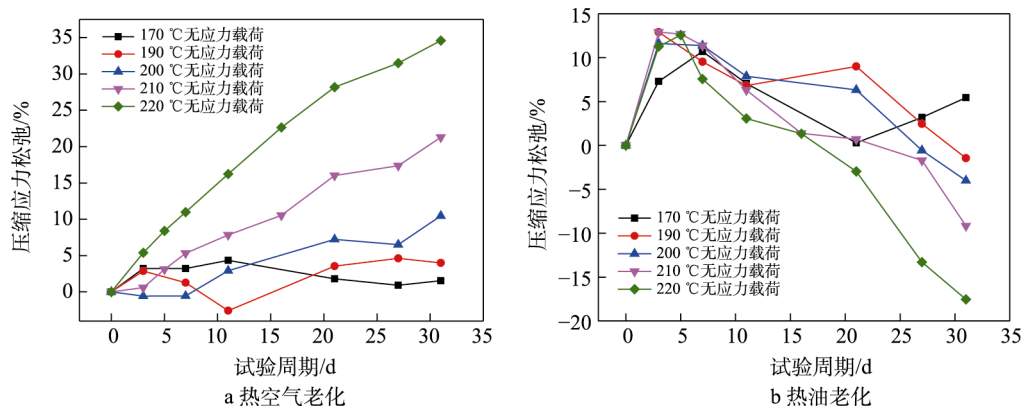


图 2 氟醚橡胶不同老化时间后的压缩应力松弛率

Fig.2 Compression stress relaxation rate of fluoroether rubber after aging for different time: a) hot air ageing; b) hot oil ageing

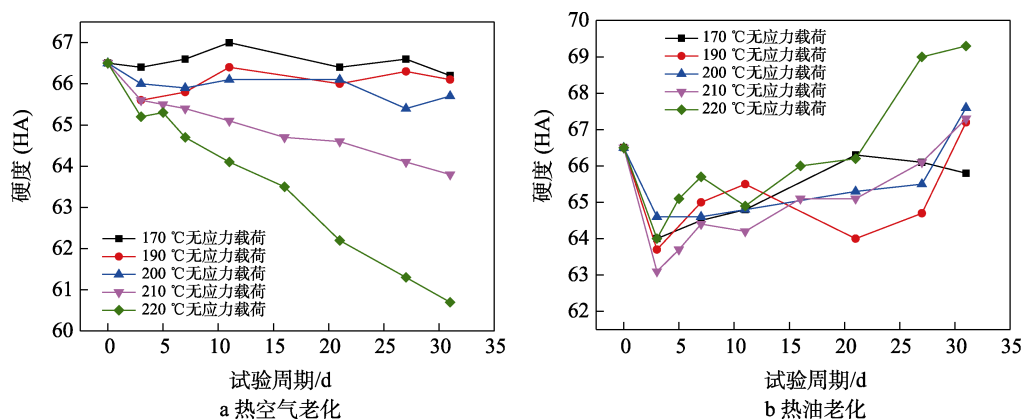


图 3 氟醚橡胶老化不同时间后的硬度

Fig.3 Hardness of fluoroether rubber after aging for different time: a) hot air ageing; b) hot oil ageing

3 分析与讨论

3.1 微观形貌分析

氟醚橡胶拉伸试验件初始样、热空气老化试验和热油老化试验 31 d 后的表面与拉伸断裂截面的微观形貌如图 4 所示。观察图 4 可得, 初始试验件的表面光滑, 经过老化试验后, 试验件的表面出现细小裂纹以及碎片堆积。初始试验件的断裂截面上填料颗粒均匀分布在基体上, 出现明显台阶撕裂层以及线状条纹; 在热空气老化试验 31 d 后, 试验件的断裂截面较初始试验件光滑, 填料颗粒较少; 在热油老化试验 31 d 后, 试验件的断裂截面较为光滑, 出现明显凹坑和细孔。氟醚橡胶表面与断裂截面的变化说明, 在老化过程, 氟醚橡胶表面发生化学降解, 使其表面粗糙, 内部填料的迁移导致其拉伸性能下降。

3.2 红外光谱分析

氟醚橡胶拉伸试验件在不同介质下老化后的红外光谱图如图 5 所示。从谱图中可见, 在 $2\ 845$ 、 $2\ 924\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应的是亚甲基的对称伸缩振动峰与反对称伸缩振动峰; $1\ 743\text{ cm}^{-1}$ 处为 —C=O 的特征吸收峰; $1\ 685\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为碳碳双键 —C=C— 的特征峰; $1\ 460\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为亚甲基的弯曲振动峰; $1\ 389$ 、 $1\ 104$ 、 878 cm^{-1} 处的吸收峰分别为 C—F 、 $\text{—CF}_2\text{—}$ 、 —CF_3 的特征峰^[20-22]。从图 5a 中可以看出, 氟醚橡胶在热空气老化过程中, 碳氟键的特征峰强度变化较小, 而在 $1\ 685\text{ cm}^{-1}$ 处的 —C=C— 特征峰则有明显变化过程, 在试验前期特征峰强度变化小, 后期特征峰明显变宽变平。这是由于高温导致的脱氟化氢反应与 —C=C— 热降解反应的相互竞争, 脱氟化氢反应使分子链上产生更多

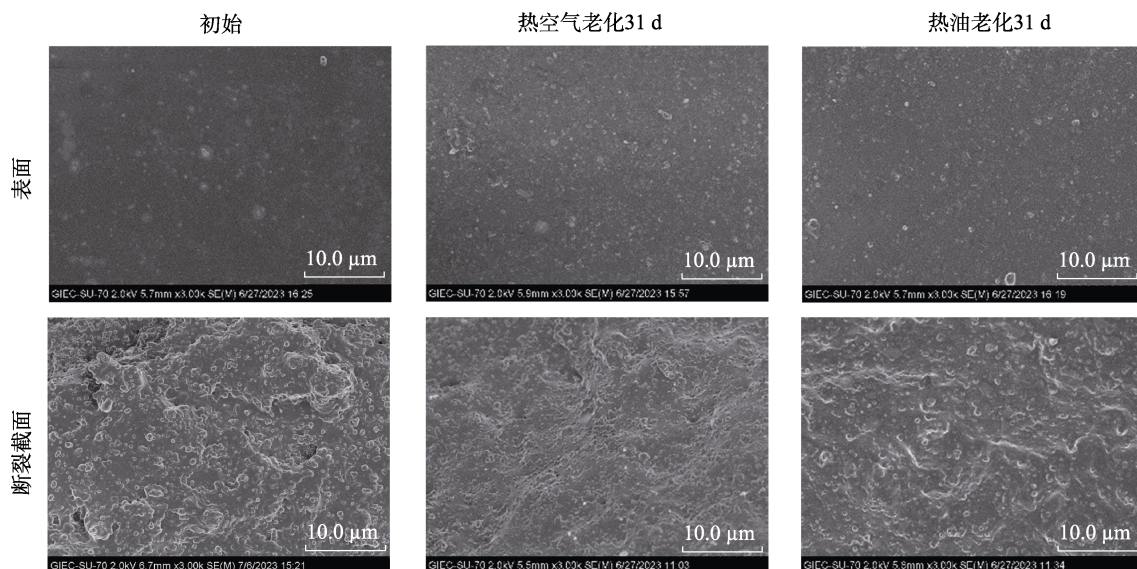


图 4 氟醚橡胶拉伸试验件不同老化时间后的微观形貌

Fig.4 Micromorphology of fluoroether rubber tensile samples after aging for different time

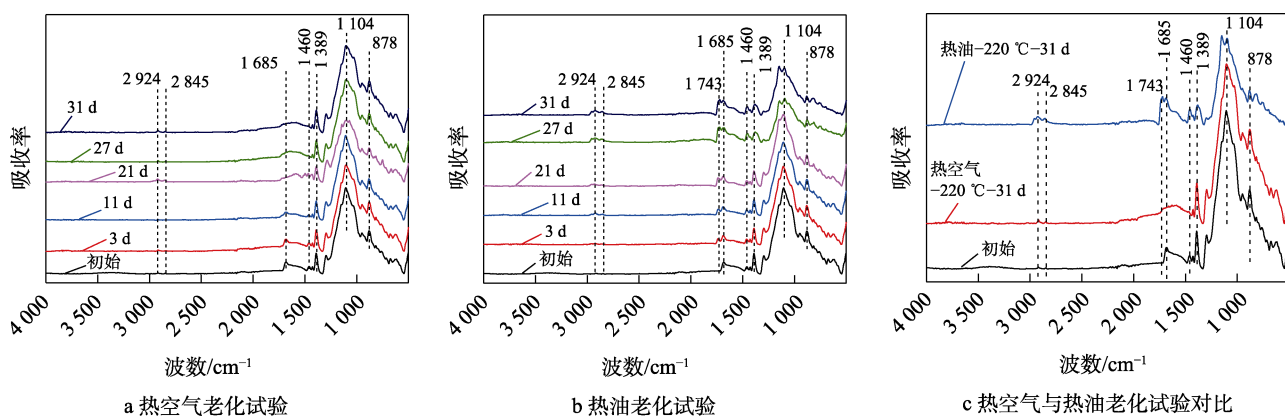


图 5 氟醚橡胶不同老化时间后的红外光谱

Fig.5 FT-IR of fluoroether rubber after aging for different time: a) hot air aging test; b) hot oil aging test; c) contract of hot air and hot oil aging tests

—C=C—, 而缺少氟元素对主链的保护作用, 高温使得碳链更容易被攻击而降解。从图 5b 中可以看出, 氟醚橡胶在热油老化过程中, 由于油介质的浸入, 在试验早期, $1\,743\text{ cm}^{-1}$ 处就出现了—C=O 的特征吸收峰, 并且在 $2\,845$ 、 $2\,924\text{ cm}^{-1}$ 处出现了明显的亚甲基的吸收峰, 碳氟键的特征峰强度明显下降。这是由于高温与油介质的耦合作用加快了橡胶的脱氟化氢反应, 使得碳碳双键断裂, 形成自由基, 自由基之间相互反应交联, 形成不同分子量的分子片段。从图 5c 中可以看出, 对比 2 种不同介质下的老化行为, 氟醚橡胶在空气和油介质中均发生了脱氟化氢反应, 油介质导致的橡胶溶胀效应使得橡胶交联网络破裂, 加速了橡胶分子链的断裂, 使其性能受损^[23]。

3.3 X 射线光电子能谱分析

通过 X 射线光电子能谱仪, 对氟醚橡胶拉伸试验件进行分析表征。由表 2 可以看出, 在热空气老化过程中, C/F 的原子百分比比值下降, O/C 与和 O/F 的比值上升。这说明在热空气老化试验中, 氟醚橡胶脱氟化氢后, 暴露的分子主链发生热氧降解, 碳原子的含量下降速度快于氟原子, 并且由于热氧反应导致橡胶中氧原子含量上升。在热油老化试验中, 油介质

与高温的耦合作用, 使得氟醚橡胶的老化速度加快, 大量氟原子随脱氟化氢反应逸出, 导致氟原子的含量下降。在缺少氟原子的屏蔽作用后, 分子主链暴露在氧气环境下, 发生热氧降解, 使其交联网络被破坏。因而在热油老化试验后, C/F、O/C 以及 O/F 的原子百分比比值均有明显增大。

对氟醚橡胶的碳原子高分辨 XPS 能谱进行分析, 从图 6a 中看出, 初始试验件在 284.60 、 286.20 、 291.3 、 295.0 eV 的谱峰, 分别对应了 C—C 键、C—O 键、 CF_2 键、 CF_3 键^[24-26]。在 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 热空气老化试验后, 氟醚橡胶的基本化学结构完好, 在 288.5 eV 出现新的谱峰对应 C=O, 并且 C—O 键、 CF_2 键、 CF_3 键的结合能出现高能偏移。说明橡胶分子发生脱氟化氢反应后, 由于氟原子的屏蔽作用下降, 电子云密度降低, 导致结合能上升。C=O 的产生是由于脱氟化氢后产生的碳碳双键受到热氧攻击发生氧化。从图 6b 中可以看出, 油介质加速了橡胶的老化过程, 热油老化试验后, 氟醚橡胶的化学结构发生明显变化, C—O 键、 CF_2 键、 CF_3 键的谱峰强度明显下降。说明在高温与油介质的耦合作用下, 氟原子随脱氟化氢反应大量流失, 导致橡胶分子的交联网络受热氧影响发生断裂重组, 分子化学结构发生改变。

表 2 氟醚橡胶表面原子百分比的比值
Tab.2 Ratio of atomic percentage on surface of fluoroether rubber

试验时间/d	C/F		O/F		O/C	
	热空气	热油	热空气	热油	热空气	热油
初始	0.899	0.899	0.184	0.184	0.205	0.205
21	0.907	2.367	0.217	0.838	0.240	0.381
31	0.751	15.91	0.199	7.656	0.265	0.481

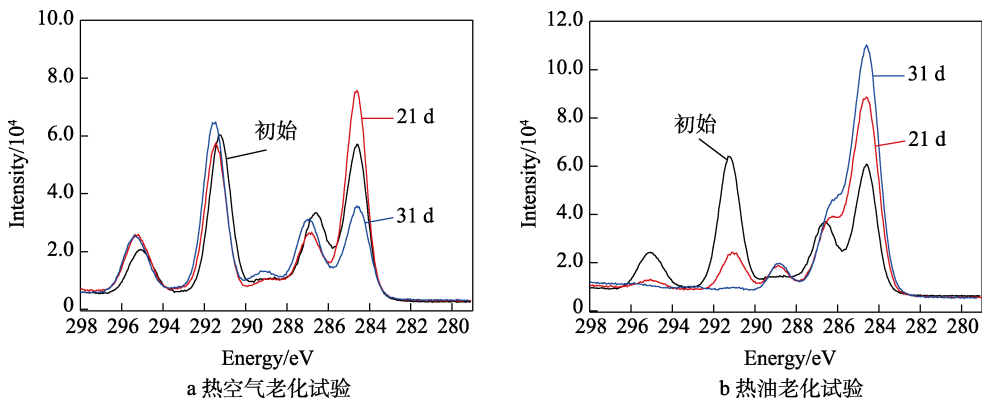


图 6 氟醚橡胶不同老化时间后的 XPS 的 $\text{C}1\text{s}$ 谱
Fig.6 $\text{C}1\text{s}$ spectrum of fluoroether rubber after aging for different time: a) hot air aging test; b) hot oil aging test

3.4 老化机理

从氟醚橡胶的力学性能老化行为与分析表征中可以看出, 在热空气老化过程中, 氟醚橡胶的强度、硬度在一定温度下能够维持较高的性能水平, 说明其

在空气环境下的耐热性能优异。在 210 、 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在高温作用下, 氟醚橡胶发生脱氟化氢反应^[18], 橡胶主链的氟含量下降, 对主链的保护屏蔽作用减弱, 使其强度下降, 与前人的研究结果相似。在热油老化试验中, 氟醚橡胶的强度下降与多方面因素相关, 在油

介质吸收扩散、交联网络破坏、填料迁移和聚集的共同作用下,使其性能下降。与FX-4氟橡胶在较低温度下的热油试验中化学结构变化不明显的结果相比^[16],引入XPS分析表征手段以及提高试验温度,发现在220℃的热油环境下,氟醚橡胶受到氧化降解反应影响,其化学结构变化明显。在试验前期,氟醚橡胶的油介质吸收膨胀与交联网络收缩形成平衡,该平衡时期的长度具有温度依赖性,温度越高,该平衡越容易被打破。在试验后期,交联网络的破坏加深导致油介质的扩散增强,交联网络的破碎重组,使其发硬变脆。

4 结论

1) 在热老化试验中,温度的提高与油介质的耦合作用对氟醚橡胶的老化有明显加速作用,高温与油介质对氟醚橡胶的化学结构造成破坏,导致其力学性能下降。

2) 氟醚橡胶在热油老化试验中,C=C键更容易断裂,导致原有交联网络损坏,形成的自由基碎片反应重组的交联网络结构使橡胶发硬变脆。

3) 氟醚橡胶在热氧老化和热油老化过程中的力学性能退化行为对其在实际服役状态下的寿命预测提供了数据基础,为装备维修保养策略作支撑。

参考文献:

- [1] ZHANG Y F, YANG X F, WANG S R, et al. Research Status and Prospect of Wear and Aging on Hydraulic Rubber Sealing Materials[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2023, 52(5): 249-266.
- [2] SUN H C, HAO Y Y, WANG L N. Macroscopical Contact Pressure and Microscopic Leakage Performance Analysis of Rubber Seal Considering Thermal Oxygen Aging Effect[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 236(15): 3129-3140.
- [3] HOLLAND M. Applications of Nanotechnology within High-Performance Sealing Materials[J]. *Sealing Technology*, 2005, 2005(8): 8-11.
- [4] AHMED S, SALEHI S, EZEAKACHA C, et al. Experimental Investigation of Elastomers in Downhole Seal Elements: Implications for Safety[J]. *Polymer Testing*, 2019, 76: 350-364.
- [5] AMÉDURI B, BOUTEVIN B, KOSTOV G. Fluoroelastomers: Synthesis, Properties and Applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2001, 26(1): 105-187.
- [6] HE Q, WANG G F, ZHANG F Y, et al. Study on Mechanical and Friction Properties of Nano- Al_2O_3 as Fluororubber Additive[J]. *Vacuum*, 2022, 206: 111550.
- [7] 王婧, 韩秀峰, 廉一龙, 等. 含氟橡胶的研究进展及在航空发动机中的应用[J]. *合成橡胶工业*, 2021, 44(2): 150-157.
- [8] 董雅卓, 冀克俭, 侯倩倩, 等. 氟醚橡胶研究及应用进展[J]. *合成橡胶工业*, 2021, 44(3): 240-244.
- [9] DONG Y Z, JI K J, HOU Q Q, et al. Research and Application Development of Fluoroether Rubber[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2021, 44(3): 240-244.
- [10] 杨晓勇. 中国特种氟橡胶研究进展[J]. *高分子通报*, 2014(5): 10-14.
- [11] YANG X Y. The Development of Specific Fluoroelastomers in China[J]. *Polymer Bulletin*, 2014(5): 10-14.
- [12] SEURER B, COUGHLIN E B. Fluoroelastomer Copolymers Incorporating Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2008, 209(19): 2040-2048.
- [13] 逢见光, 李聘, 殷浩. 不同牌号耐低温氟橡胶的性能研究[J]. *橡胶工业*, 2022, 69(8): 586-591.
- [14] PANG J G, LI D, YIN H. Study on Properties of Different Brands of Low Temperature Resistant Fluororubber[J]. *China Rubber Industry*, 2022, 69(8): 586-591.
- [15] 欧阳飞, 黄雪萍, 吴涛, 等. 航空发动机常用橡胶的热空气老化研究[J]. *橡胶科技*, 2022, 20(7): 322-325.
- [16] OUYANG F, HUANG X P, WU T, et al. Study on Hot Air Aging of Rubber Commonly Used in Aeroengine[J]. *Rubber Science and Technology*, 2022, 20(7): 322-325.
- [17] 马伟超, 杜华太, 杜明欣, 等. 氟橡胶低温性能改进研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2016, 46(3): 7-12.
- [18] MA W C, DU H T, DU M X, et al. Recent Development on Low-Temperature Modification of Fluorine Rubber[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(3): 7-12.
- [19] 冯洪福, 苏有学, 孙超超, 等. 耐高温全氟醚橡胶复合材料研究进展与展望[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(7): 185-190.
- [20] FENG H F, SU Y X, SUN C C, et al. Progress and Prospect of High Temperature Resistant Perfluoroether Rubber Composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(7): 185-190.
- [21] MOFIDI M, KASSFELDT E, PRAKASH B. Tribological Behaviour of an Elastomer Aged in Different Oils[J]. *Tribology International*, 2008, 41(9/10): 860-866.
- [22] 商旭静, 党恒耀, 薛志博, 等. FX-4氟橡胶的老化行为研究[J]. *装备环境工程*, 2023, 20(8): 1-8.
- [23] SHANG X J, DANG H Y, XUE Z B, et al. Aging Behavior of FX-4 Fluororubber[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(8): 1-8.
- [24] ZHUO W Y, WANG Q L, LI G, et al. Detection of the Destruction Mechanism of Perfluorinated Elastomer (FFKM) Network under Thermo-Oxidative Aging Conditions[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2022, 40(5): 504-514.
- [25] LIU Q K, LI J, CONG C B, et al. Thermal and Thermo-

- Oxidative Degradation of Tetrafluoroethylene-Propylene Elastomer above 300 °C [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 177: 109180.
- [19] 余成明, 彭旭东, 江锦波, 等. 宽温域下氟醚橡胶的加速老化行为和机理研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(6): 3399-3410.
- YU C M, PENG X D, JIANG J B, et al. Investigation on Accelerated Aging Behavior and Mechanism of Fluoroether Rubber under Wide Temperature Range[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(6): 3399-3410.
- [20] AKHLAGHI S, POURRAHIMI A M, SJÖSTEDT C, et al. Degradation of Fluoroelastomers in Rapeseed Biodiesel at Different Oxygen Concentrations[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 136: 10-19.
- [21] WANG Y M, LIU L, LUO Y F, et al. Aging Behavior and Thermal Degradation of Fluoroelastomer Reactive Blends with Poly-Phenol Hydroxy EPDM[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(3): 443-449.
- [22] BANIK I, BHOWMICK A K, RAGHAVAN S V, et al. Thermal Degradation Studies of Electron Beam Cured Terpolymeric Fluorocarbon Rubber[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1999, 63(3): 413-421.
- [23] WANG S Q, WANG C G, HE A H. Insights into the Effects of High-Temperature Lubricating Oils on the Aging Behavior and Degradation Mechanism of Fluoroelastomers[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2023, 63(8): 2371-2384.
- [24] MITRA S, GHANBARI-SIAHKALI A, KINGSHOTT P, et al. Chemical Degradation of an Uncrosslinked Pure Fluororubber in an Alkaline Environment[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2004, 42(24): 6216-6229.
- [25] MITRA S, GHANBARI-SIAHKALI A, KINGSHOTT P, et al. Chemical Degradation of Fluoroelastomer in an Alkaline Environment[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 83(2): 195-206.
- [26] SUGAMA T. Surface Analyses of Fluoroelastomer Bearings Exposed to Geothermal Environments[J]. *Materials Letters*, 2001, 50(2/3): 66-72.

责任编辑: 刘世忠