

γ 辐射-热耦合老化对 氟橡胶 F2311 力学和辐解释气行为的影响

张祎茜¹ 豆睿扬¹ 刘 强¹ 黄 玮¹ 晏顺坪² 陈洪兵¹

¹(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

²(中国工程物理研究院总体工程研究所 绵阳 621999)

摘要 在国防、航天和核电等领域的装备中,服役用高分子材料的工作环境十分复杂,对材料的耐辐射性能及热稳定性提出了很高的要求。因此,研究高分子材料在辐射-热耦合环境下的老化行为具有十分重要的意义。本工作开展了 F2311 氟橡胶材料在 36~70 °C 温度范围和 20 kGy、100 kGy、200 kGy 的 γ 射线吸收剂量下的辐射-热耦合老化试验,研究了温度和吸收剂量对 F2311 力学性能的影响,通过气体红外揭示了 F2311 材料辐射释放气体的种类,并获得了其动力学规律。实验结果表明: γ 辐射-热耦合导致 F2311 材料力学性能快速损伤退化,并引起材料辐解产气,包括腐蚀性的卤化氢产物。气体红外分析能够快速识别气体产物并进行定量分析,有利于装备可靠性的追踪监测。本研究有望为氟橡胶多因素耦合老化和相容性研究提供认识基础。

关键词 氟橡胶, 辐射-热耦合老化, 力学性能, 释气行为, 老化相容性

中图分类号 O631.3⁺3

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0040

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2024-0040

引用该文:

张祎茜, 豆睿扬, 刘强, 等. γ 辐射-热耦合老化对氟橡胶 F2311 力学和辐解释气行为的影响[J].

辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(1): 010203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0040.

ZHANG Yiqian, DOU Ruiyang, LIU Qiang, *et al.* Effect of γ -radiation-thermal coupling aging on the mechanical and radiolytic gas behavior of F2311 fluoroelastomer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(1): 010203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0040.



Effect of γ -radiation-thermal coupling aging on the mechanical and radiolytic gas behavior of F2311 fluoroelastomer

ZHANG Yiqian¹ DOU Ruiyang¹ LIU Qiang¹ HUANG Wei¹ YAN Shunping² CHEN Hongbing¹

¹(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

²(Institute of General Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

基金资助: 中国工程物理研究院创新发展基金资助项目(CX20210029)、中国工程物理研究院院长基金(YZJJZQ2022005)、国家自然科学基金(52103131)

第一作者: 张祎茜, 女, 2002 年 4 月出生, 中国工程物理研究院硕士研究生在读

通信作者: 刘强, 特聘副研究员, E-mail: forliubinjiang@163.com; 陈洪兵, 研究员, E-mail: hongbing2014@foxmail.com

收稿日期: 初稿 2024-05-05; 修回 2024-05-27

Supported by CAEP Foundation (CX20210029), Presidential Foundation of CAEP (YZJJZQ2022005) and National Natural Science Foundation of China (52103131)

First author: ZHANG Yiqian (female) was born in April, 2002, and now she is a graduate student of Graduate School of China Academy of Engineering Physics

Corresponding author: LIU Qiang, special associate professor, E-mail: forliubinjiang@163.com; CHEN Hongbing, professor, E-mail: hongbing2014@foxmail.com

Received 05 May 2024; accepted 27 May 2024

ABSTRACT In national defense, aerospace, and nuclear power fields, the service environments of polymer materials in equipment are complex and necessitate high requirements for their radiation resistance and thermal stability. Therefore, studying the aging behavior of polymer materials in a coupled radiation-thermal environment is crucial. In this study, F2311 rubber material was subjected to aging tests in the temperature range of 36–70 °C, with an absorbed γ dose of 20 kGy, 100 kGy, 200 kGy. The effects of the coupled temperature and absorbed dose on the mechanical properties of F2311 were investigated. The gaseous products released by the F2311 material and their kinetic laws were determined using gas-phase infrared spectra. The experimental results showed that the mechanical properties of the F2311 elastomer deteriorated rapidly in the radiation-thermal environment. Radiolytic outgassing was inevitable, and the gaseous products included corrosive halogen hydrides. Gas-phase infrared spectroscopy can quickly identify and quantitatively analyze gaseous products to trace and supervise the service reliability of equipment. This study is expected to provide a basis for the study of coupled multifactor aging and compatibility of fluorine rubber.

KEYWORDS Fluoroelastomer, Coupled γ irradiation-heat aging, Mechanical property, Outgassing behavior, Aging and compatibility

CLC O631.3'3

氟橡胶是一种合成高分子弹性体材料, F2311 氟橡胶是偏氟乙烯与三氟氯乙烯按 1:1 物质的量比例合成的共聚物, 是氟橡胶的重要品种之一。F2311 具有一些十分优异的性能, 如弹性、化学稳定性、热稳定性以及绝缘性等, 因而广泛应用于国防、航天和核电等领域的装备中。氟橡胶在服役过程中常常面临长时的辐射-热耦合服役环境, 难以避免地发生老化损伤和力学性能的退化, 并可能释放小分子气体产物。研究表明, 聚三氟氯乙烯中的 C-Cl 键的键能为 326.4 kJ/mol, C-F 键的键能为 447.7 kJ/mol。因此, C-Cl 键比 C-F 键弱得多, 更容易受到辐解产生自由基, 这些自由基的寿命甚至可长达 5 a^[1-2]。研究表明, F2311 中的三氟氯乙烯链段是以辐射降解反应为主, 偏氟乙烯链段发生交联的可能性相对较高^[2-3]。复杂的服役环境和老化机制将使得其损伤退化行为变化多端, 这对材料及其部组件的服役可靠性和材料相容性带来了严峻的挑战。因此, 研究该材料的辐射-热耦合老化具有十分重要的意义^[4]。

氟橡胶通常作为 O 型密封圈、塑胶炸药 (PBX) 黏合剂等, 其力学性能对 O 型密封圈的密封性以及 PBX 爆轰性能等具有十分重要的影响^[5-6]。面对实际应用问题, 氟橡胶的辐射效应已经有了一些研究成果。 γ 辐射对氟橡胶的分子结构和热机械性能具有明显影响^[7]。罗世凯等^[3,8-9]系统研究发现, PBX 黏结剂——F2311 氟橡胶——在真空、空气、氮气中经 γ 射线辐射发生了交联与降解反应, 增加的吸收剂量导致化学结构和微观形貌发生变化, 进而引起氟橡胶的拉伸强度、扯断伸长率迅速减

小, 空气会加速氟橡胶的降解而真空和氮气氛围能抑制其老化。Wang 等^[10]通过低剂量 γ 辐照 (10.2 kGy) 偏氟乙烯-三氟氯乙烯共聚物提高了其断裂强度, 主要原因是辐照引入的不饱和双键降低了链段运动性。李玉等^[6]研究表明, 高温高湿将显著缩短氟橡胶 O 形密封圈的服役寿命; Borbath 等^[11]通过化学发光法监测了核电厂用氟橡胶在高温以及辐射作用下的老化损伤趋势, 发现 γ -热处理老化效应更显著; Hill 等^[12]研究了聚三氟氯乙烯在不同温度下的辐射化学性质, 研究表明, 室温和 423 K 下链端形成的 G 值分别为 1.5 和 2.4, 双键形成的 G 值小于 0.1。在 493 K 的辐照下, 链端、双键和分支点形成的 G 值分别为 3.6、0.2 和 0.5, 此温度下裂变占主导地位, 辐照时不会形成网络。实际工程应用场景中存在辐射与温度耦合场作用, 目前尚缺乏多因素耦合效应的研究。

氟橡胶在 γ 射线的照射下会生成一些气体产物, 可以作为监测氟橡胶老化的指标, 但其可能导致严重的相容性问题。罗世凯等^[9,13]采用气相色谱质谱联用、离子选择性电极法和原子吸收光谱法研究了不同气氛下 F2311 材料的辐射降解, 发现 F2311 材料辐射降解后产生 CO₂、HCl、HF、H₂ 和 SiF₄ 气体, 其中 SiF₄ 气体是由 HF 与玻璃中的 SiO₂ 发生反应产生的。H₂、HF、HCl 和 CO₂ 在真空、空气和氮气中的 G 值范围分别是 0.040~0.058、1.25~1.68、1.38~1.39 和 0~0.15。他们进一步利用气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 分析, 发现了 N₂ 抑制 F2311 的降解, 而 O₂ 促进 F2311 的老化过程。Makuuchi 等^[14]研究证实, 产生的 HF 气体能够抑制

体系交联和脱 HF 反应的速率。Florin 等^[15]研究了聚三氟氯乙烯的 γ 辐射降解行为,研究表明,聚三氟氯乙烯辐解产气的总辐射化学产额(G 值)为 0.11,并且发现空气和真空氛围的影响甚微,但在稀碱溶液中的 F 和 Cl 的 G 值均高达 3.5。此外,他们的研究还发现,偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物的总产气 G 值为 0.86,主要的气体产物 SiF_4 和 H_2 的 G 值分别为 0.29 和 0.27。氟橡胶辐解产生的气体可能导致严重的相容性问题^[16-18];有的气体具有腐蚀性(如 HCl 、 HF),可能腐蚀金属材料器件和光学器件^[19];产气可能导致材料形成气孔而破裂,密封性能下降进而失效;氢气可能加剧金属的氢脆和半导体缺陷的产生;气体的进一步辐解可能传染扩散导致较远空间里的材料发生老化;可燃性气体可能在高压部件下产生电火花,严重时会引起助燃起火;真空部件还因为气体的产生而降低真空度,导致其中的电动机转动阻力剧增而失效。目前氟橡胶的产气行为局限于色谱、质谱等方法,测试速度较慢且定性定量分析较为复杂,迫切需要建立新的快速识别和无损定量分析方法,为装备的可靠性设计和延寿维护提供理论和技术支撑。

本研究开展 F2311 材料的 γ 射线辐射-热耦合老化实验,分析其老化后的力学性能损伤规律和机理,建立新的产气识别方法和定量分析方法,为氟橡胶的多因素耦合老化研究提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究采用 F2311 氟橡胶材料由四川晨光化工研究院生产提供,材料密度为 1.80 g/cm^3 。氟橡胶 F2311 进行真空烘干后,按照国标 GB/T528—1992 将其制成标准哑铃状试样。其形状和尺寸由同种型号裁刀决定,本实验采用 2 型裁刀,总长(最短) L 为 75 mm,端头宽度 W_e 为 $(12.5 \pm 1.0) \text{ mm}$,狭小平行部分长 L_a 为 $(25 \pm 1) \text{ mm}$,狭小平行部分宽 W 为 $(4.0 \pm 0.1) \text{ mm}$,过渡边外径 R_o 为 $(8.0 \pm 0.5) \text{ mm}$,过渡边内径 R_i 为 $(12.5 \pm 0.1) \text{ mm}$,试样厚度为 $(2.0 \pm 0.2) \text{ mm}$ 。

样品封装在高硼硅玻璃管中,具体方法为:首先抽真空至 10^{-2} Pa ,通 N_2 至 40 kPa,维持 15 min;再抽真空至 10^{-2} Pa ,维持 1.5 h,通 N_2 至 40 kPa,维持 15 min;最后抽真空至 10^{-2} Pa ,维持 1.5 h,通 N_2 维持 40 kPa 内压,负压烧结封管。

1.2 方法

1.2.1 多因素耦合老化试验

本研究采用 ^{60}Co 作为 γ 射线源,在设定温度下对 F2311 氟橡胶材料进行 γ 射线辐射,本实验的吸收剂量为 20 kGy、100 kGy 和 200 kGy。试验温度由温控箱控制,研究温度分别为 36 °C、50 °C 和 70 °C,温度波动范围控制在 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内。

1.2.2 力学性能

力学性能测试采用万能试验机(Instron5965),拉伸速度(50 mm/min),采用 1 kN 传感器进行拉伸性能测试。将样品分为 9 组且每组至少 3 个平行样品,测试温度为室温。

1.2.3 辐射降解产生气体的红外光谱表征

在实际应用过程中,材料辐射降解产生的气体会对材料部组件甚至装备等造成十分不利的影响,因此,研究 F2311 氟橡胶材料老化降解产生的气体种类和含量等至关重要。本研究利用傅里叶变换红外(FTIR Nicolet 6700)光谱仪及其气体池附件(100 mL, 2.4 m 光程,PIKE TECHNOLOGIES),通过与 NIST 的光谱标准数据库进行对比识别^[20-21],并建立相应气体在不同温度、压力下一系列浓度的谱图标准曲线,采用课题组自编的 Gas_FTIR_ToolBox 软件对气体光谱数据进行定量分析处理^[21]。

2 结果与讨论

2.1 吸收剂量对拉伸性能的影响

通过对图 1~2 氟橡胶断裂伸长率和拉伸强度的分析发现:断裂伸长率和拉伸强度随着吸收剂量和温度的增加而降低,最大降幅分别为 96.75% 和 55.93%;升高温度显著加速了断裂伸长率和拉伸强度下降速率;断裂伸长率对温度升高和吸收剂量增加均比较敏感,拉伸强度在吸收剂量超过 100 kGy 后不同温度下的下降速率均较低。辐射-热耦合老化条件下 F2311 发生耦合的辐射-热老化,链结构主要以降解为主,因为老化后样品可完全溶于甲苯或丙酮溶液。辐射在引发降解反应阶段具有重要作用,后续的扩散反应和反应路径等受温度影响显著,高温加速了链段运动和老化反应,导致 F2311 材料的断裂伸长率和拉伸强度随着吸收剂量和温度的升高而加速下降。

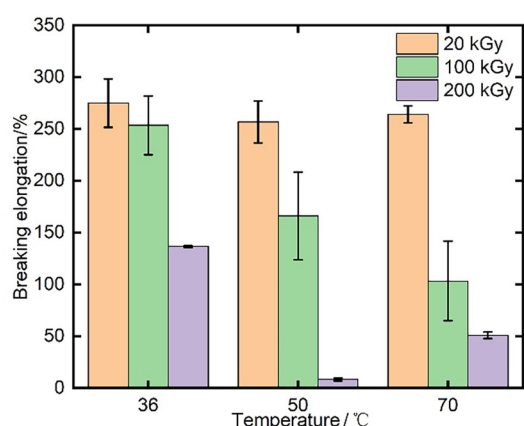


图1 同一温度、不同吸收剂量下的断裂伸长率
Fig.1 Elongation at break at the same temperature and different absorbed doses

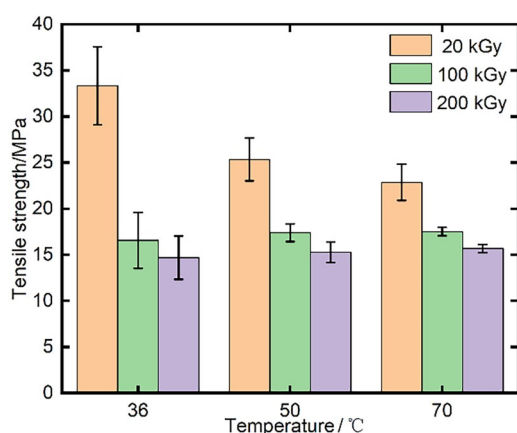


图2 同一温度、不同吸收剂量下的拉伸强度
Fig.2 Tensile strength at the same temperature and different absorbed doses

2.2 辐解气体产物

图3为 SiF_4 、 CO_2 、 HCl 气体的标准谱图。由标准谱图观察可知, SiF_4 气体的特征峰主峰主要在 $1\,070\sim 990\text{ cm}^{-1}$, 在 $1\,194\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,290\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,825\text{ cm}^{-1}$ 处有3个小峰; CO_2 气体的特征峰主峰主要在 $2\,400\sim 2\,250\text{ cm}^{-1}$, 且在 680 cm^{-1} 附近有一个小峰; HCl 气体的特征峰主要在 $3\,100\sim 2\,600\text{ cm}^{-1}$ 。

通过傅里叶变换红外光谱, 研究F2311辐射老化后降解的气体产物, 其中最受关注的为 SiF_4 、 HCl 和 CO_2 气体。图4为F2311材料在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 不同吸收剂量和 20 kGy 不同温度条件下受 γ 射线辐射产生的 SiF_4 、 CO_2 、 HCl 气体的红外光谱图。

图4(a)、(b)显示, 随着吸收剂量和温度的提高, SiF_4 气体光谱信号由于 SiF_4 的增加而逐渐升高。 CO_2 (图4(c)、(d))和 HCl (图4(e)、(f))气体的产生具有类似的吸收剂量和温度依赖特性。由于采用高硼硅玻璃管进行样品封装, 因此 SiF_4 气体可

能是由F2311材料降解产生的 HF 气体与玻璃中的 SiO_2 反应生成^[22], 观察红外图谱可知气体产物没有 HF 气体的特征峰, 这是由于 HF 非常活泼, 能与玻璃迅速的发生反应而消耗。 CO_2 则可能由氟橡胶中的增塑剂、稳定剂的分解产生, 以及由碳骨架辐射损伤形成的自由基与溶解氧的氧化反应形成。 HCl 则由辐射产生的 Cl 自由基和 H 自由基耦合或者夺氢/氯反应形成。 HF 和 HCl 的主要形成机制如图5所示。

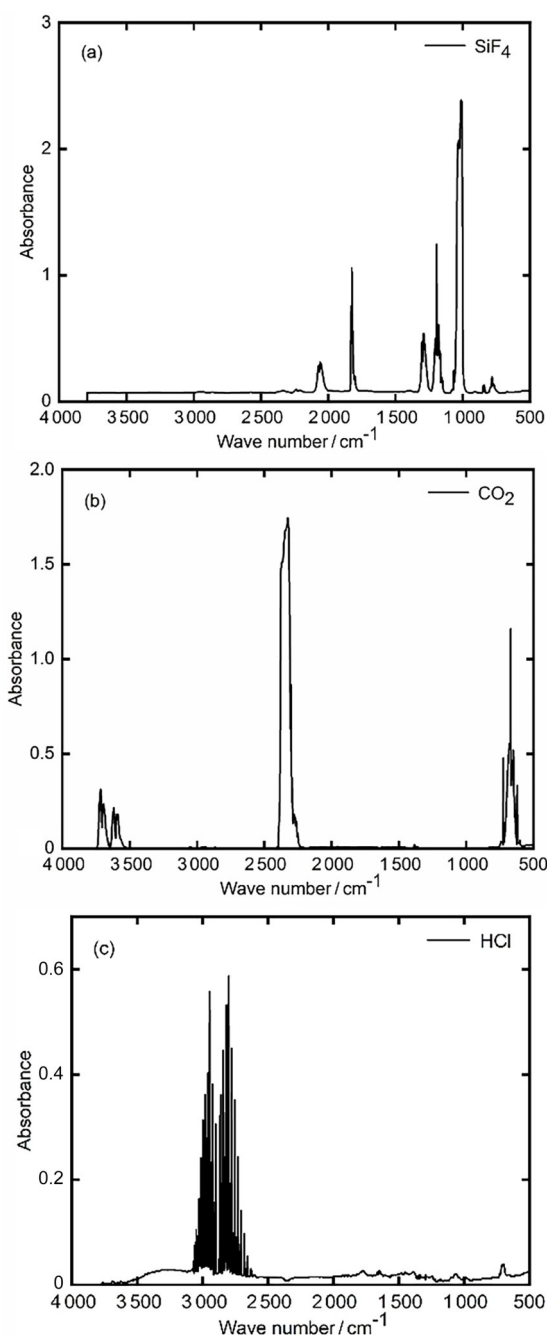


图3 气体的NIST标准谱图:(a) SiF_4 ;(b)为 CO_2 ;(c) HCl
Fig.3 Gas standard spectra obtained from NIST spectra database for: (a) SiF_4 ; (b) CO_2 ; (c) HCl

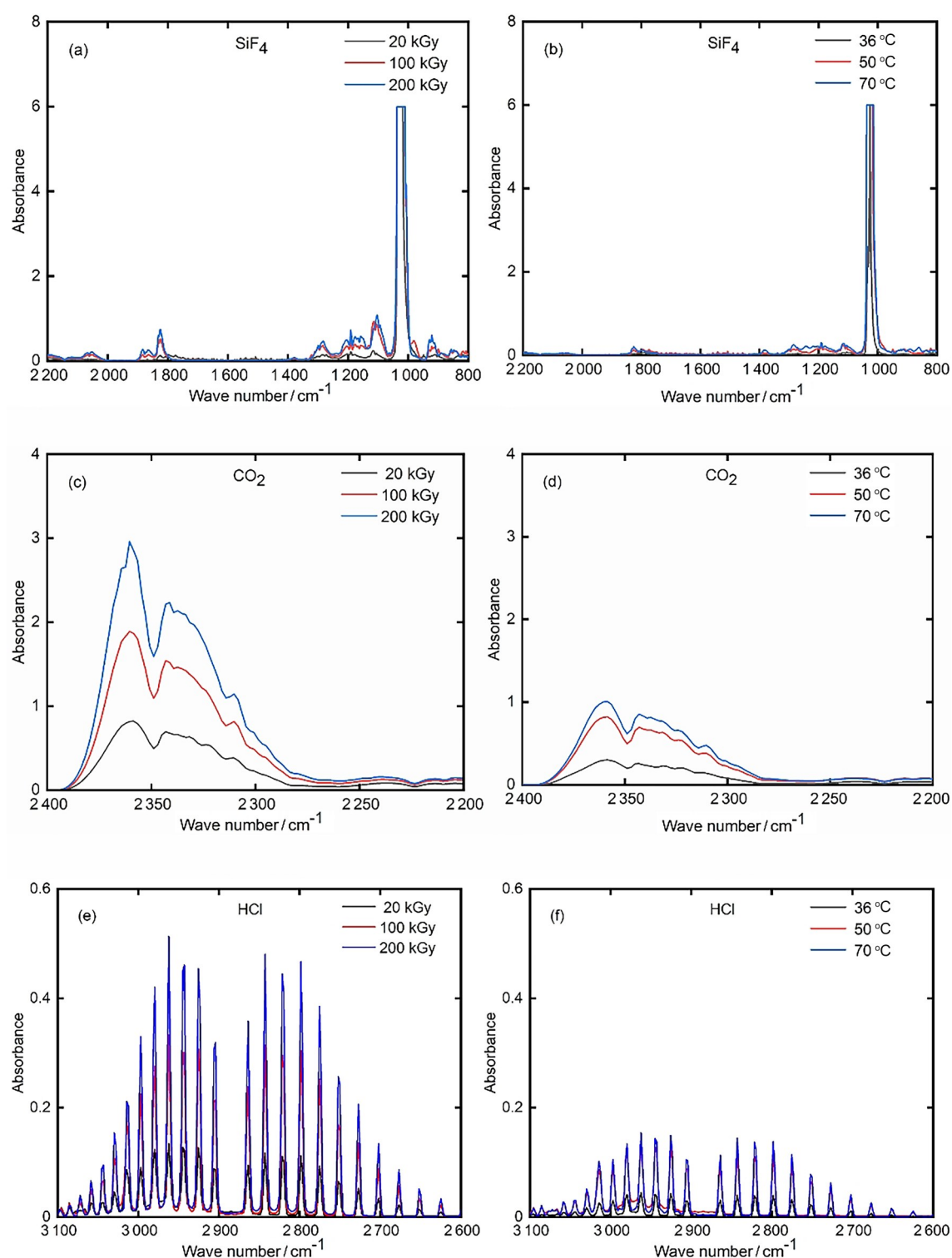


图4 辐照后F2311材料释放出的气体产物的红外谱图:(a)50 °C下不同吸收剂量的 SiF_4 气体;(b)20 kGy下不同温度的 SiF_4 气体;(c)50 °C下不同吸收剂量的 CO_2 气体;(d)20 kGy下不同温度的 CO_2 气体;(e)50 °C下不同吸收剂量的HCl气体;(f)20 kGy下不同温度的HCl气体

Fig.4 Gas-phase infrared spectrum of the gas products from the F2311 elastomer after γ irradiation: (a) SiF_4 with different absorbed dose at 50 °C; (b) SiF_4 at different temperatures with 20 kGy absorbed dose; (c) CO_2 with different absorbed dose at 50 °C; (d) CO_2 at different temperatures with 20 kGy absorbed dose; (e) HCl with different absorbed dose at 50 °C; (f) HCl at different temperatures with 20 kGy absorbed dose

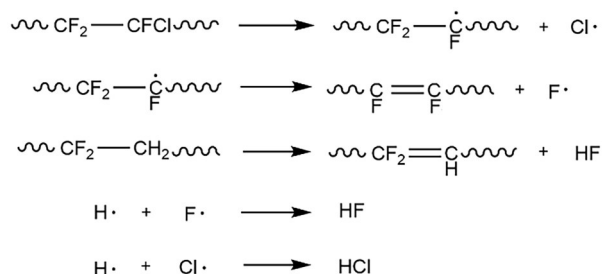


图 5 F2311 材料辐射-热老化时卤化氢形成机理
Fig.5 Formation mechanisms of hydrogen hydride of F2311 material under radiation-thermal environments

在 F2311 材料的实际应用中, 辐射-热条件下老化产生的 HCl 和 HF 气体具有极强的腐蚀性, 会对设备的可靠性造成不可忽视的影响, 如腐蚀光学器件、金属结构件、降低真空度、加速其他材料(如硅橡胶和聚氨酯等)降解等。

考虑到 HF、HCl、SiF₄ 及其水解/水合产物的易吸水性、毒性和对光学器件等的腐蚀性, 建立标准曲线存在实际困难, 工程上通常监测较为稳定的 CO₂ 含量追踪材料的老化进程。此处以 CO₂ 为

例, 进一步对气体产物进行了定量分析, 获得了单位质量样品产生气体的摩尔含量(表 1)。观察表 1 可知, 温度一定时, 随着吸收剂量的和温度的增加, CO₂ 含量稳步累积增多。表 1 显示, 当吸收剂量由 20 kGy 增加到 200 kGy 时, CO₂ 气体的产量增加约为原来的 4 倍, 但 CO₂ 气体的辐射化学产额降低为原来的约 2.35 倍; 吸收剂量一定时(20 kGy), 温度为 70 °C 下产生的 CO₂ 气体产量和辐射化学产额最大; 当温度由 36 °C 增加到 50 °C 时, CO₂ 气体的产量和辐射化学产额增加为原来的约 4 倍, 当温度由 36 °C 增加到 70 °C 时, CO₂ 气体的产量和辐射化学产额增加为原来约 5 倍。本工作计算的辐射化学产额数据比文献[11]略小(0.15 molecules/100 eV), 应该与老化条件和材料组成差异有关。气体产量和辐射化学产额与吸收峰面积呈对应关系, 且温度对 CO₂ 气体产量的影响相较于吸收剂量的影响更显著。辐射-热耦合老化机制较为复杂, 辐射和温度对 F2311 材料的老化均起到了加速的作用。

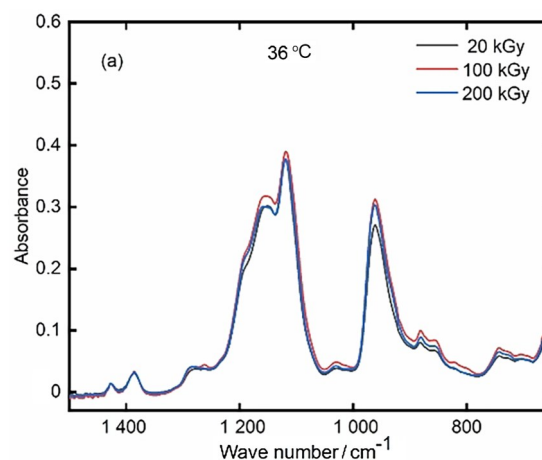
表 1 辐射-热耦合条件下 CO₂ 气体产物的吸收峰面积、产量和辐射化学产额
Table 1 The absorption peak area, yield and radiation chemical yield of CO₂ gas products under radiation-thermal coupling conditions

吸收剂量 / kGy Absorbed dose	温度 / °C Temperature	吸收峰面积 / a.u. Absorption peak areas	产量 / (mol·g ⁻¹) Output	辐射化学产额 / (molecules·100 eV ⁻¹) Radiation chemical yield (G)
20	50	42.32	7.92×10 ⁻⁸	3.82×10 ⁻²
100	50	94.10	2.37×10 ⁻⁷	2.29×10 ⁻²
200	50	138.08	3.36×10 ⁻⁷	1.62×10 ⁻²
20	36	16.31	1.99×10 ⁻⁸	9.57×10 ⁻³
20	50	42.32	7.92×10 ⁻⁸	3.82×10 ⁻²
20	70	51.77	9.50×10 ⁻⁸	4.58×10 ⁻²

2.3 辐照后红外谱图

通过傅里叶变换红外光谱研究 F2311 材料辐射后本体分子结构的变化(图 6)。其中, 1 426 cm⁻¹、1 386 cm⁻¹ 是 CH₂=CF₂ 中 CH₂ 的弯曲振动特征吸收峰; 1 251~1 051 cm⁻¹ 是 C-F 键的特征吸收峰; 1 000~896 cm⁻¹ 是 CF₂=CFCl 的特征吸收峰; 892~780 cm⁻¹ 是 CH₂=CF₂ 的特征吸收峰; 776~680 cm⁻¹ 是 C-Cl 键的特征吸收峰。然而, 观察图 6 发现, 在不同吸收剂量-温度条件下, F2311 材料的各个特征吸收峰变化不大。双键吸收峰几乎没有变化, 这可能与体系存在复杂的生成和消耗反应竞争有关, 也可能是红外光谱表征固体材料有限的灵敏

度导致的^[13-14]。



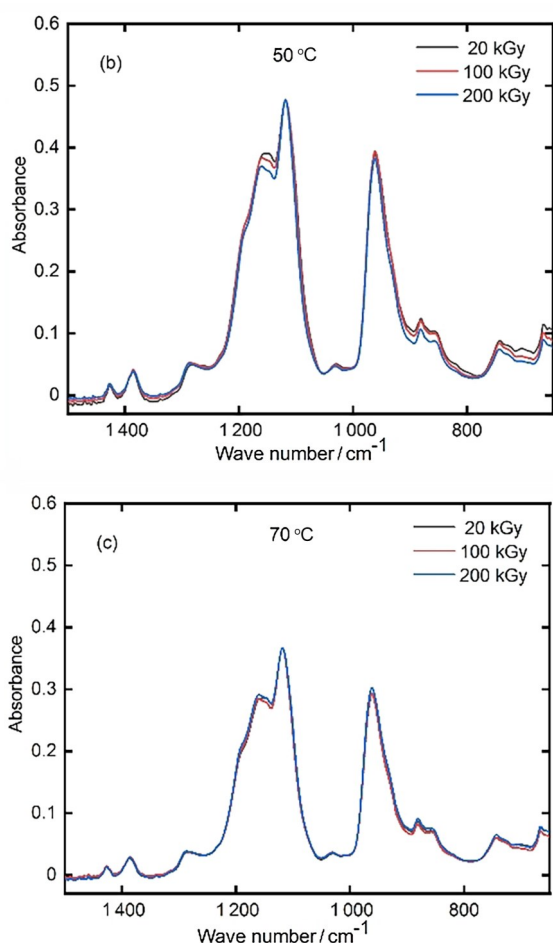


图6 不同温度下F2311氟橡胶辐射后归一化红外光谱图:
(a) 36 °C; (b) 50 °C; (c) 70 °C (彩色见网络版)

Fig.6 Normalized infrared spectra of F2311 fluoroelastomer
after irradiation under different temperatures:
(a) 36 °C; (b) 50 °C; (c) 70 °C (color online)

3 结论

本文主要利用万能实验机和傅里叶变换气体红外光谱仪,对F2311材料辐射-热老化后的力学性能和辐解产气行为进行了研究。发现F2311材料的断裂伸长率和拉伸强度随着吸收剂量和温度的升高而加速下降。F2311材料在经过 γ 射线的辐射后,主要产生了 CO_2 和 HCl 气体,而 HF 气体很快和二氧化硅反应生成了 SiF_4 。研究发现随着温度和吸收剂量的增加 CO_2 浓度逐渐增大,据此建立了F2311辐解气体产物红外谱图的定量分析方法,并以 CO_2 为指标实现了对F2311辐射损伤的监测。定量分析表明温度的变化对 CO_2 气体浓度的影响相对较大。红外光谱并未灵敏地监测到F2311固体材料特征基团在不同辐射-热耦合条件下的明显变化。辐射-热耦合条件对F2311材料的老化降解存在多

种机制的影响,辐射-热耦合老化对F2311材料力学性能退化和辐解产气行为具有重要影响。

作者贡献声明 张祎茜和刘强完成了本工作的数据分析和论文的撰写;刘强和陈洪兵完成论文的实验设计和测试方法建立;刘强、豆睿杨、黄玮完成了老化实验和测试;黄玮和晏顺坪参与了实验数据讨论分析;陈洪兵和刘强指导本研究开展;晏顺坪、陈洪兵和刘强为本研究提供基金支持。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 Zhen Z X. Long lived fluoropolymeric radicals in irradiated fluoropolymer powders at room temperature[J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part C Radiation Physics and Chemistry, 1990, **35**(1/2/3): 194-198. DOI: 10.1016/1359-0197(90)90084-u.
- 2 Forsythe J S, Hill D J T. The radiation chemistry of fluoropolymers[J]. Progress in Polymer Science, 2000, **25** (1): 101-136. DOI: 10.1016/S0079-6700(00)00008-3.
- 3 罗世凯, 傅依备, 罗顺火, 等. γ 射线对氟橡胶F2311的结构和性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2002, **20**(1): 12-18. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-3436. 2002.01.003.
LUO Shikai, FU Yibei, LUO Shunhuo, *et al.* Influence of γ ray irradiation on the structure and properties of fluororubber F2311[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2002, **20**(1): 12-18. DOI: 10.3969/j. issn.1000-3436.2002.01.003.
- 4 岳动华, 靳凡, 韦利明, 等. 热-氧-辐照复合环境下硅泡沫加速老化研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(3): 030101. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2022-0021.
YUE Donghua, JIN Fan, WEI Liming, *et al.* Research progress on accelerated aging of silicon rubber foam under thermo-oxygen-irradiation complex conditions[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(3): 030101. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2022-0021.
- 5 詹春红, 屈延阳, 师鹏翔, 等. 氟橡胶F2311特性黏度对高聚物粘结炸药成型及力学性能的影响[J]. 化工新型材料, 2020, **48**(11): 77-79. DOI: 10.19817/j. cnki. issn1006-3536.2020.11.017.

- ZHAN Chunhong, QU Yanyang, SHI Pengxiang, *et al.* Influence of characteristic viscosity of F2311 fluorine rubber on the forming and mechanical property of PBX [J]. *New Chemical Materials*, 2020, **48**(11): 77-79. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.11.017.
- 6 李玉, 李璐, 徐伟, 等. 基于不同环境的氟橡胶 O 形密封圈失效行为[J]. *合成材料老化与应用*, 2021, **50**(6): 100-101. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2021.06.032.
- LI Yu, LI Lu, XU Wei, *et al.* Failure behavior of fluororubber O-ring seals based on different environments [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2021, **50**(6): 100-101. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381. 2021. 06.032.
- 7 Ol' khov Y A, Allayarov S R, Nikolskii V G, *et al.* Radiothermoluminescence and thermomechanical spectrometry study of gamma-irradiated vinylidene fluoride-chlorotrifluoroethylene copolymer[J]. *High Energy Chemistry*, 2016, **50**(3): 177-183. DOI: 10.1134/S0018143916030115.
- 8 罗世凯, 钟志京, 傅依备, 等. F2311 型氟橡胶辐射作用下的力学性能研究[J]. *橡胶工业*, 2001, **48**(10): 592-595. DOI: 10.3969/j.issn.1000-890X.2001.10.003.
- LUO Shikai, ZHONG Zhijing, FU Yibei, *et al.* Study on mechanical properties of F2311 fluororubber under radiation[J]. *China Rubber Industry*, 2001, **48**(10): 592-595. DOI: 10.3969/j.issn.1000-890X.2001.10.003.
- 9 罗世凯. PBX 氟聚合物粘结剂的辐射效应研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 2002.
- LUO Shikai. Radiation effects of fluoropolymer binders in PBX[D]. Beijing: Beijing Graduate Department of China Academy of Engineering Physics, 2002.
- 10 Wang H Z, Liu Y, Xiao Y X, *et al.* Gamma radiation-induced unsaturated P(VDF-CTFE) membranes with improved mechanical properties[J]. *Australian Journal of Chemistry*, 2020, **74**(5): 327-334. DOI: 10.1071/ch20280.
- 11 Borbath T, Borbath I, Zaharescu T. Thermal and radiation degradation effects on fluoroelastomer destined to gasket applications in nuclear power plants[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, **147**(20): 11139-11145. DOI: 10.1007/s10973-022-11366-9.
- 12 Hill D J T, Thurecht K J, Whittaker A K. New structure formation on γ -irradiation of poly(chlorotrifluoroethylene) [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2003, **67**(6): 729-736. DOI: 10.1016/s0969-806x(03)00004-5.
- 13 罗世凯, 傅依备, 罗顺火, 等. 氟橡胶 F2311 辐射降解气
体产物研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2001, **19**(4): 254-258. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3436.2001.04.003.
- LUO Shikai, FU Yibei, LUO Shunhuo, *et al.* Study on gas products of fluororubber F2311 after radiation degradation[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2001, **19**(4): 254-258. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3436.2001.04.003.
- 14 Makuuchi K, Asano M, Abe T. Effect of evolved hydrogen fluoride on radiation-induced crosslinking and dehydrofluorination of poly(vinylidene fluoride) [J]. *Journal of Polymer Science A Polymer Chemistry*, 1976, **14**(3): 617-625. DOI: 10.1002/pol.1976.170140311.
- 15 Florin R E, Wall L A. Gamma irradiation of fluorocarbon polymers[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A, Physics and Chemistry*, 1961, **65A**(4): 375-387. DOI: 10.6028/jres.065A.038.
- 16 Liu Q, Huang W, Liu B, *et al.* Experimental and theoretical study of gamma radiolysis and dose rate effect of *o*-cresol formaldehyde epoxy composites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(4): 5959-5972. DOI: 10.1021/acsami.1c19609.
- 17 Liu Q, Huang W, Liu B, *et al.* Gamma radiation chemistry of polydimethylsiloxane foam in radiation-thermal environments: experiments and simulations[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13**(34): 41287-41302. DOI: 10.1021/acsami.1c10765.
- 18 罗世凯, 罗顺火, 傅依备, 等. 氟树脂辐射降解产物研究 [J]. *火炸药学报*, 2001, **24**(4): 28-30. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.04.018.
- LUO Shikai, LUO Shunhuo, FU Yibei, *et al.* Characterization of radiolysis products of fluororesin F2314[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, **24**(4): 28-30. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-7812. 2001.04.018.
- 19 王玉玲, 余文力, 肖秀友, 等. 核辐射对 PBX 氟聚合物结构和性能影响的研究进展[J]. *四川兵工学报*, 2014, **35**(7): 107-109.
- WANG Yuling, YU Wenli, XIAO Xiuyou, *et al.* Research progress on influence of irradiation on structure and properties of fluoropolymer in PBX[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, **35**(7): 107-109.
- 20 胡志裕, 张雷, 马维光, 等. 基于 LabVIEW 的激光诱导击穿光谱谱线识别软件研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(3): 602-605. DOI: 10.3964/j. issn. 1000-0593 (2012)03-0602-04.

- HU Zhiyu, ZHANG Lei, MA Weiguang, *et al.* Analysis of software for identifying spectral line of laser-induced breakdown spectroscopy based on LabVIEW[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, **32**(3): 602-605. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0602-04.
- 21 Jiang B L, Dou R Y, Huang Z D, *et al.* Systematic methodologies to surveil and evaluate the early imperceptible thermal degradation of EPDM composite [J]. Polymer, 2024, **299**: 126960. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126960.
- 22 Golden J H. The degradation of polytetrafluoroethylene by ionizing radiation[J]. Journal of Polymer Science, 1960, **45**(146): 534-536. DOI: 10.1002/pol. 1960.1204514627.