



·粒子束及加速器技术·

真空紫外辐照对交联乙烯-四氟 乙烯线缆的影响*

张海明¹, 张义¹, 贾晓¹, 王凯², 陶兆增², 沈世钊², 王海玉²

(1. 中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100029; 2. 中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 201900)

摘要: 以航天器舱外用交联乙烯-四氟乙烯共聚物 (X-ETFE) 线缆为试验对象, 采用 5 倍加速因子对 X-ETFE 线缆累计进行了 8000 等效太阳小时 (ESH) 真空紫外 (VUV) 辐照, 并通过极限耐电压、绝缘材料电阻测试分析 X-ETFE 线缆电性能, 采用 FTIR 和 SEM 表征 X-ETFE 材料分子结构和微观形貌, 以此研究不同 VUV 辐照时间对 X-ETFE 线缆的影响。试验结果表明, 随着 VUV 辐照时间的增加, 材料表面累积了碳而发生暗化, 线缆外观颜色逐渐变为深棕色; X-ETFE 线缆的极限耐压和绝缘电阻呈总体下降趋势, 但整体电性能水平未发生本质变化; X-ETFE 材料在 1628 cm^{-1} 处的吸收峰逐步增大, 说明 X-ETFE 材料分子链中的 —C=C— 自由基随辐照时间而增多, 致使材料表面出现了微裂纹现象。

关键词: 交联乙烯-四氟乙烯线缆; 真空紫外辐照; 极限耐电压; 绝缘电阻; 微观结构

中图分类号: TM215.3

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220021

Effect of vacuum ultraviolet radiation on X-ETFE cable

Zhang Haiming¹, Zhang Yi¹, Jia Xiao¹, Wang Kai², Tao Zhaozeng²,
Shen Shizhao², Wang Haiyu²

(1. Components Engineering Center, China Aerospace, Beijing 100029, China;

2. The 23rd Research Institute, CETC, Shanghai 201900, China)

Abstract: Taking the cross-linked ethylene tetrafluoroethylene copolymer (X-ETFE) cable used outside the spacecraft as the test object, the X-ETFE cable was irradiated with 8000 equivalent solar hours (ESH) vacuum ultraviolet (VUV) with a 5-fold acceleration factor. The electrical properties of the X-ETFE cable were analyzed through the limit voltage resistance and insulation material resistance tests. The molecular structure and micro morphology of the X-ETFE material were characterized by FTIR and SEM. The effects of different VUV irradiation time on X-ETFE cable have been studied. The experimental results show that with the increase of VUV irradiation time, carbon accumulates on the material surface and darkens, and the appearance color of the cable gradually changes to dark brown; The ultimate withstand voltage and insulation resistance of X-ETFE cable show an overall downward trend, but the overall electrical performance level has no substantial change; The absorption peak of X-ETFE material at 1628 cm^{-1} gradually increases, indicating that the —C=C— free group in the molecular chain of X-ETFE material increases with irradiation time, resulting in microcracks on the surface of the material.

Key words: X-ETFE cable, VUV radiation, ultimate withstand voltage, insulation resistance, micro structure

交联乙烯-四氟乙烯共聚物 (X-ETFE) 是一种经过电子辐照交联后的乙烯-四氟乙烯共聚物。辐照交联是利用电子辐射加速器的高能电子束流对高分子材料进行照射, 其原理是电子束打在碳氢键上, 发生电离反应, 将氢原子去除, 形成具有极性的碳原子自由基, 相邻较近的两个去除了氢原子的碳基团就会相互吸合, 无数个这样的碳原子自由基之间的相互结合成键, 使原来具有塑性特性的相对独立链式结构的聚合物分子变成了空间网状结构的分子形式。研究和实践证明, 网状结构的 X-ETFE 分子相对链状分子对成型产品的耐高温、耐电子辐射、抗开裂等能

* 收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-05-27

基金项目: 国家质量工程项目 (2019WR0008)

联系方式: 张海明, zy_pb@163.com。

力明显增强^[1-4]。已知试验数据表明, X-ETFE 挤塑成型后的线缆耐电子辐照能力达 5×10^8 rad, 满足了不同轨道高度航天器耐电子辐照的技术指标要求。从材料空间环境效应来讲, 空间紫外辐射将导致材料内的分子产生光致电离和光致分解效应, 尤其会破坏航天器舱外用元器件选用的高分子有机材料的化学键, 进而诱发聚合物发生断键、交联、产生新化学键等过程, 这些过程的出现会对聚合物的宏观特性产生非常重要的影响, 使聚合物的物理、化学特性, 如介电性能等发生不可逆的变化^[5-10]。随着对空间环境领域的探知以及航天任务深入发展的需要, 需要获取在轨舱外 X-ETFE 线缆耐 VUV 辐照能力, 以满足不同轨道高度航天器服役寿命要求。

目前有不少学者研究紫外辐照对材料的影响, 李琳^[11]等人研究了不同紫外辐照时间对聚醚酰亚胺 (PEI) 薄膜介电性能的影响, 对薄膜的分子结构、微观形貌、介电常数、介电损耗以及电阻率进行研究; 黄睿^[12]等人研究紫外辐照对偏光片聚乙烯醇膜的性能影响, 对碘染色取向后的 PVA 膜进行紫外辐照, 测试紫外辐照后的 PVA 膜光学性能、结晶性能; 顾页妮^[13]等人研究真空紫外辐照对 Lumogen 薄膜损伤及光学性能的影响, 使用真空紫外荧光光谱仪、原子力显微镜 (AFM)、扫描电子显微镜 (SEM)、紫外-可见分光光度计等仪器分别对薄膜的光致发光特性、荧光强度衰减变化、表面形貌、透过率等进行测试与表征。本文基于航天器舱外空间 VUV 辐照环境要求, 对 X-ETFE 线缆进行 VUV 辐照试验, 对不同 VUV 辐照环境下 X-ETFE 线缆外观、极限耐电压、绝缘电阻、红外光谱 (FTIR)、微观形貌等方面的退变规律进行了分析研究。

1 VUV 辐照试验方案及表征

1.1 试验样品

为了有效验证 X-ETFE 绝缘材料耐 VUV 辐照能力, 试验样品抽取某国产宇航级 C55/0112-22-9 线缆, 如表 1 所示。

1.2 VUV 辐照试验设备

目前, 近紫外源常用的有汞灯、汞氙灯、氙灯等, 远紫外源国际上一般均采用氙灯。由于汞灯虽然能够提供较大的功率, 但其为线谱, 而氙灯光谱则与太阳光谱比较接近。因此, 在紫外模拟中, 近紫外模拟采用氙灯, 远紫外模拟采用氙灯^[14]。VUV 辐照试验使用的设备主要包括近紫外模拟源、远紫外源、真空容器、真空、热沉、样品台、测控系统等部分。设备如图 1 所示, 设备主要参数指标如表 2 所示。

表 1 实验样品表
Table 1 Test samples

No.	VUV irradiation time/h	length of sample/m
1#	0	2
2#	100	2
3#	500	2
4#	1000	2
5#	2000	2
6#	4000	2
7#	8000	2



Fig. 1 VUV radiating test equipment

图 1 VUV 辐照试验设备

1.3 VUV 辐照试验方法

试验中近紫外辐照度不大于 6765 W/m^2 , 远紫外辐照度不大于 27060 W/m^2 , 等效辐照时间为 8000 h。试验时, 设备真空度优于 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 样品温度控制在 $+10 \text{ }^\circ\text{C} \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 有污染控制措施。当紫外辐照时间分别达到 100 h、500 h、1000 h、2000 h、4000 h、8000 h 后 48 h 内进行性能测试。

1.4 耐 VUV 辐照能力表征

极限耐电压由耐压测试仪 (深圳美瑞克电子科技有限公司, RK2674B) 测试, 按 GJB17.2-84 进行, 试验电压按 1.5 kV、2 kV、2.5 kV、3 kV……的等级逐次进行, 直到击穿为止; 绝缘电阻由绝缘电阻测量仪 (上海双旭电子有限公司, ZC-90F) 测量, 按 GB/T 3048.5-2007 进行, 试验电压 500V DC; 红外光谱 (FTIR) 采用 Thermo Nicolet iS10 傅里叶变换红外光谱仪测试, 对线缆表面进行全反射测试表征, 波数测试范围 $600 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$; 微观形貌分析在 FEI Nova Nano SEM 场发射扫描电子显微镜上进行, 线缆表面进行喷金处理。

表 2 VUV 辐照设备参数指标
Table 2 VUV radiating test equipment parameter

project	main indicators	parameter
near UV	light source	xenon lamp
	spectrum	200 nm~400 nm
	irradiation area	maximum $\Phi 150$ mm
	irradiance	1353 W/m ² ~6765 W/m ²
	inhomogeneous irradiation	better than $\pm 5\%$
	irradiation stability	$\pm 3\%$
far UV	light source	deuterium lamp (150 W)
	spectrum	115 nm~200 nm
	irradiation area	not less than $\Phi 150$ mm
	irradiance	maximum 27060 W/m ²
other	temperature control range of sample	+10 °C ~ +50 °C
	temperature of heat sink	not higher than -25 °C
	vessel vacuum	no load at room temperature is better than 3×10^{-3} Pa

2 结果与讨论

2.1 VUV 辐照对 X-ETFE 线缆外观颜色的影响

不同 VUV 辐照时间后的 X-ETFE 线缆 (直径 1 mm) 外观颜色如图 2 所示。随着紫外辐照时间的增加, X-ETFE 线缆表面颜色逐渐变深, 由白色变为深黄色, 最后变为深棕色。在 VUV 辐照作用下 X-ETFE 材料发生不完全裂解, 裂解产物中含有分子量较低碳不饱和键的焦炭类物质, 并且随着 VUV 辐照时间增加, 裂解逐步强烈, 试样表面累积了碳而发生暗化^[15]。

2.2 VUV 辐照对 X-ETFE 线缆极限耐电压的影响

通过极限耐电压能力可以检查出 X-ETFE 线缆的局部缺陷, 从而判断线缆性能优劣。X-ETFE 线缆在不同 VUV 辐照时间后极限耐电压曲线如图 3 所示, 数据见表 3 所示。从数据中可以看出, 随着紫外辐照时间增加, X-ETFE 线缆极限耐电压能力减弱。

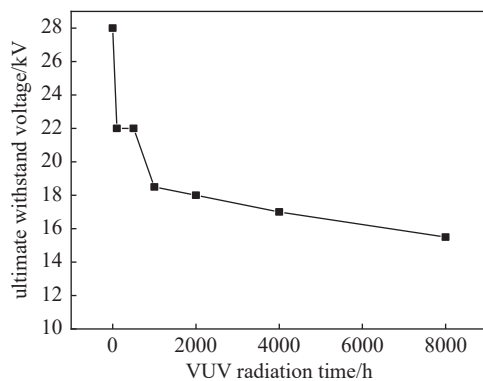


Fig. 3 Relationship between X-ETFE cable VUV radiation time and ultimate withstand voltage

图 3 X-ETFE 线缆 VUV 辐照时间与极限耐电压关系曲线

线缆耐电压计算公式为

$$U = 0.081Ed \lg(D/d) \quad (1)$$



Fig. 2 VUV radiation time on appearance color of X-ETFE cable
图 2 VUV 辐照时间对外观颜色的影响

表 3 不同 VUV 辐照时间后 X-ETFE 线缆极限电压值
Table 3 Limiting voltage of X-ETFE cable after different VUV radiation time

VUV radiation time/h	withstand limit voltage/kV	test result
0	28	no breakdown
100	22	breakdown
500	22	breakdown
1000	18.5	breakdown
2000	18	breakdown
4000	17	breakdown
8000	15.5	breakdown

式中: E 为材料介电击穿强度, d 为导体外径, D 为线缆外径。

由式(1)可知, 线缆耐电压能力同绝缘厚度和绝缘材料介电击穿强度正相关, 随着紫外辐照剂量增加, X-ETFE 裂解程度也逐步增加, 线缆表面逐渐形成坑洞和裂纹 (SEM 结果佐证), 绝缘有效厚度逐步减小, 在紫外线作用下含氟聚合物的体电阻和表面电阻显著降低^[16], 绝缘材料介电击穿强度也因材料裂解老化而下降, 使得极限耐电压能力减弱。经不同 VUV 辐照之后的 X-ETFE 线缆耐电压均满足 2.5kV 的技术要求。

2.3 VUV 辐照对 X-ETFE 线缆绝缘电阻的影响

绝缘电阻是线缆最基本的电气性能, 它反映产品在正常工作状态下所具有的电气绝缘性能。X-ETFE 线缆在不同 VUV 辐照时间与绝缘电阻数据关系图见图 4, 数据见表 4, 可以看出, 辐照前 X-ETFE 线缆绝缘电阻约为 12000 MΩ·km; 辐照 100 h 后其绝缘电阻下降到 9900 MΩ·km, 之后随着辐照时间增加, 绝缘电阻逐步下降至 7840 MΩ·km。随着辐照时间的增加, 绝缘电阻呈下降趋势, 基本维持在 10000 MΩ·km 左右变化, 经不同 VUV 辐照之后绝缘电阻均满足 1500 MΩ·km 的技术要求。紫外线属于波长短于 400 nm 的电磁波, 由许多光子组成, 辐照时间越长, 入射到 X-ETFE 材料内的光子数量越多, 而这个数量将决定处于激发态分子链的数量。处于激发态的高分子链越多, 则发生共价键断裂的高分子链越多, 产生的极性自由基也就越多, 当有外部电场存在时, 这些自由基将成为传输电流的载流子而导致其绝缘性能下降^[17-18]。

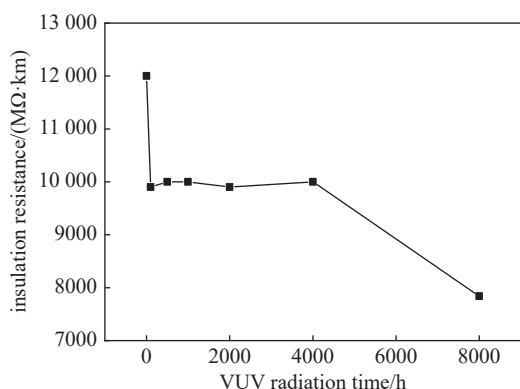


Fig. 4 Influence of VUV radiation time on insulation resistance

图 4 VUV 辐照时间对绝缘电阻的影响

2.4 VUV 辐照后 X-ETFE 线缆的 FTIR 分析

不同 VUV 辐照时间处理的 X-ETFE 线缆红外光谱如图 5 所示。未经过 VUV 辐照的 X-ETFE 线缆绝缘材料在 2927 cm⁻¹ 处的吸收峰为 -CH₂- 的反对称伸缩振动吸收峰; 1037 cm⁻¹ 处的强度吸收峰为 -C-C- 的振动吸收峰, 1168 cm⁻¹ 处的吸收峰为 -CF₂- 的对称伸缩振动吸收峰; 1725 cm⁻¹ 处强度较弱的吸收峰为 -C=O 的振动吸收峰。表明 X-ETFE 材料作为乙烯与四氟乙烯共聚物, 主要的碳链结构为 -CH₂-CH₂-CF₂-CF₂-。此外 X-ETFE 材料中含有少量的 -C=O 结构, 这是由于为了提升 X-ETFE 交联度, 保证线缆具有良好的机械性能, 会对线缆绝缘进行适当的电子辐照。线缆在空气中接受电子辐照后产生的碳自由基可能会与空气中的氧气反应生成 -C=O 结构, 从而使得材料中含有少量 -C=O 结构。

高分子材料在辐照后分子结构变化机理比较复杂, 主要化学反应分为两类: 高分子链交联和高分子链断裂^[19]。对于 X-ETFE 材料, 因存在 α-H, 紫外辐照过程中会伴随 C-C 键交联, 在不同辐照时间下, 在 2927 cm⁻¹ 处 -CH₂- 吸收峰逐渐减小平滑, 说明发生了分子交联。在经过不同 VUV 辐照时间后, 随着时间的增大 X-ETFE 材料在 1725 cm⁻¹ 处的吸收峰为 -C=O 的振动吸收峰逐渐由尖峰变为包头峰, 并且在 1628 cm⁻¹ 处出现 -C=C- 的振动吸收峰。这是由于在过大的辐照时间下, -C=O- 结构易被电子破坏, 同时主碳链的部分 -C-C- 结构也发生断

表 4 不同 VUV 辐照时间后 X-ETFE 线缆绝缘电阻值

Table 4 Insulation resistance of X-ETFE cable after VUV radiation of different time

VUV radiation time/h	insulation resistance/(MΩ·km)
0	12000
100	9900
500	10000
1000	10000
2000	9900
4000	10000
8000	7840

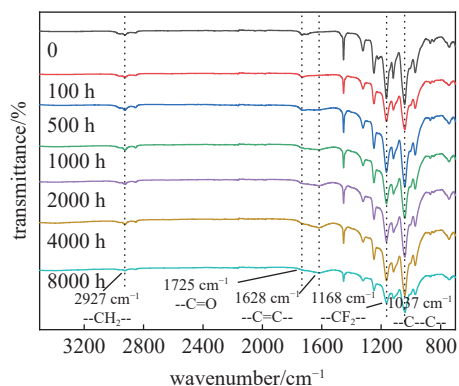


Fig. 5 FTIR of X-ETFE cable insulation materials with different VUV radiation time

图 5 不同 VUV 辐照时间 X-ETFE 线缆绝缘材料红外光谱

裂,导致 $-C=O$ 结构部分转变为 $-C=C-$ 结构。上述分析表明,VUV辐照会使得X-ETFE材料分子结构发生裂解,大分子裂解成为小分子,大量的自由基在X-ETFE表面产生和淬灭,使得相应的官能团数量有所增减^[18,20]。

2.5 VUV辐照后X-ETFE线缆的微观形貌分析

图6为X-ETFE线缆在不同VUV辐照时间的微观形貌照片。图6(a)为未经VUV辐照的X-ETFE线缆,其表面光滑平整,无缺陷。图6(b)~图6(d)为样品分别经受100 h、500 h和1000 h的VUV辐照,通过SEM图片并未发现材料表面出现缺陷痕迹,只是部分区域有少量微凸起,说明1000 h的VUV辐照时间未对X-ETFE线缆微观组织结构产生损伤。图6(e)和图6(f)为样品经历了2000 h和4000 h的VUV辐照,从SEM图中能够发现X-ETFE线缆表面出现了微孔和微小裂纹现象,这是由于一定累积时间后的VUV辐照使X-ETFE材料同时发生分子交联和降解反应,在VUV辐照累积时间初期,交联效应发挥了主要作用,材料表面微观形貌上无明显变化。后期,随着VUV辐照时间的增加,降解效应发挥了主要作用,导致聚合物材料化学键断裂、分解,造成材料的剥蚀和性能退化,如图6(g)所示,样品在经历8000 h的紫外线照射后X-ETFE材料表面剥蚀和退化现象较为严重,出现了较为明显的裂纹痕迹^[11]。

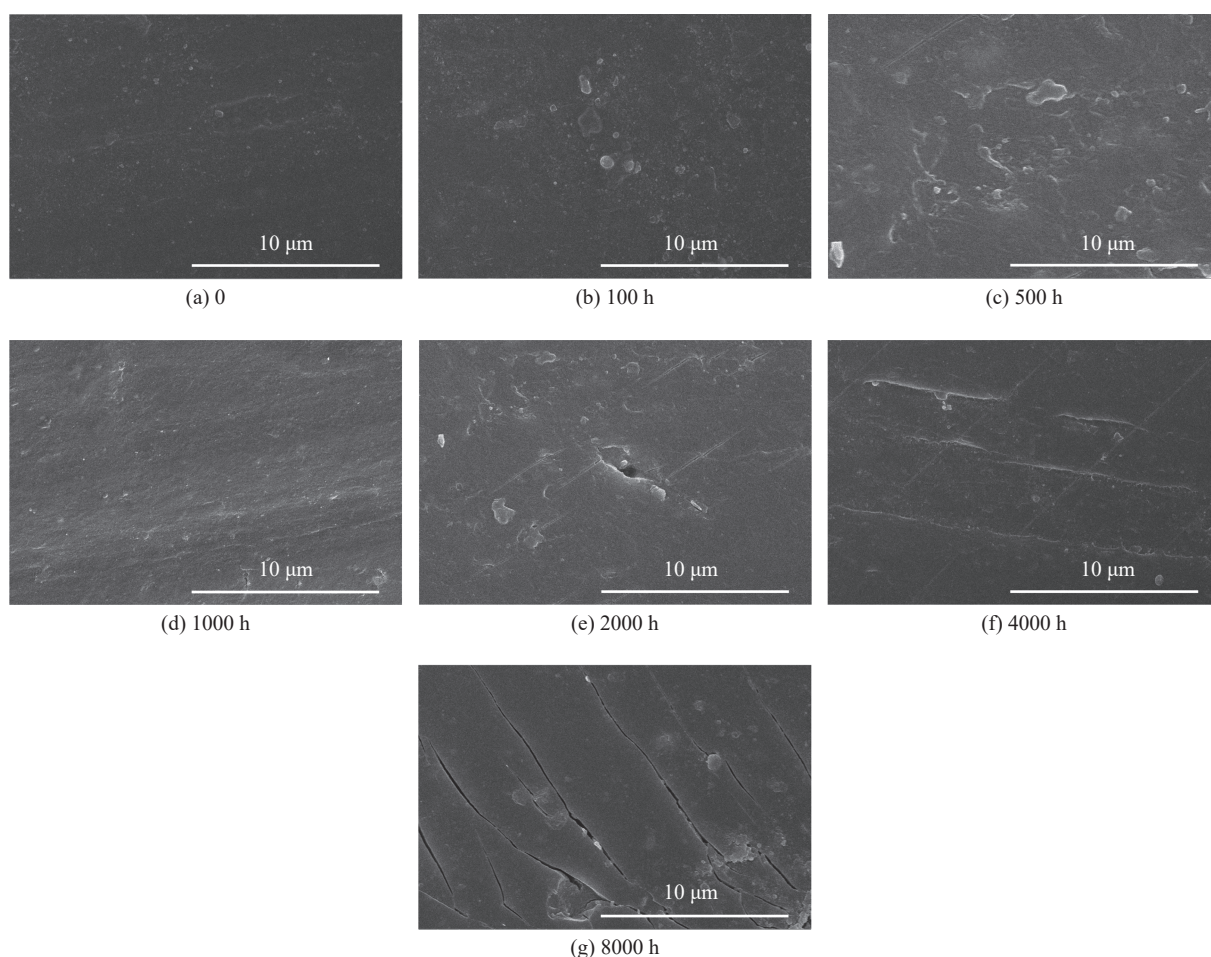


Fig. 6 Surface morphology of the X-ETFE cable with different VUV radiation time

图6 不同VUV辐照时间X-ETFE线缆表面的形貌

3 结论

本文基于空间环境紫外辐照要求,对X-ETFE线缆分别开展了100 h、500 h、1000 h、2000 h、4000 h、8000 h的VUV辐照试验,对VUV辐照环境下X-ETFE线缆外观、极限耐电压、绝缘电阻、FTIR以及微观形貌等方面的退变规律进行了分析研究。得出以下结果:(1)随着VUV辐照时间增加,X-ETFE线缆表面颜色逐渐由白色变为深棕色,极限耐电压能力下降,但能够达到15 kV以上,是产品标准耐电压要求的6倍以上;(2)随着VUV辐照时间增加,X-ETFE线缆绝缘电阻总体趋势为下降,基本维持在10000 M Ω ·km左右变化,经不同VUV辐照之后绝缘电阻均满足1500 M Ω ·km的技术要求;(3)FTIR分析表明,X-ETFE线缆在1628 cm^{-1} 处的吸收峰出现增大,说明X-ETFE分子链中的 $-C=C-$ 自由基团随辐照时间而增多,材料分子结构发生裂解;(4)VUV辐照过程中,X-ETFE材

料同时发生交联和降解效应,降解效应使得 X-ETFE 材料表面的分子链被破坏而产生裂纹缺陷,且随着 VUV 辐照时间的增加裂纹深度和裂纹面积呈现增大趋势。

参考文献:

- [1] 张永明,李虹,张恒. 含氟功能材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. (Zhang Yongming, Li Hong, Zhang Heng. Fluorine containing functional materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008)
- [2] Drobny J G. Technology of fluoropolymers[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [3] 陈晓勇. 乙烯-四氟乙烯共聚物的辐照交联及辐照敏化剂研究[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2011, 9(3): 19-24. (Chen Xiaoyong. Studies on irradiation crosslinking of ethylene-tetrafluoroethylene copolymer and irradiation promoter[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2011, 9(3): 19-24)
- [4] 王征, 张义, 焦美荣, 等. 空间站用线缆氟化物析出的影响因素研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2018, 36(1): 8-13. (Wang Zheng, Zhang Yi, Jiao Meirong, et al. Research on the influencing factors of fluoride precipitation in cable for space station[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2018, 36(1): 8-13)
- [5] Dever J A, Bruckner E J, Rodriguez E. Synergistic effects of ultraviolet radiation, thermal cycling and atomic oxygen on altered and coated Kapton surfaces[C]//Proceedings of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1992.
- [6] Stigman A E, Brinza D E, Anderson M S, et al. An investigation of the degradation of fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer thermal blanketing materials aboard LDEF and in the laboratory[R]. N93-25078, 1993: 1-18.
- [7] Quiña P L D, Herrera L, Irurzun I M, et al. A capacitive model for dielectric breakdown in polymer materials[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 44(2): 330-338.
- [8] Ferreira G F L, De Figueiredo M T. Currents and charge profiles in electron beam irradiated samples under an applied voltage: exact numerical calculation and Sessler's conductivity approximation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(1): 137-147.
- [9] Shiyama K, Fujita S. Dielectric and thermal properties of irradiated polyetheretherketone[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2001, 8(3): 538-542.
- [10] Milyavskii V V. Radiation protection properties of dielectrics with space charge[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, 6(4): 507-511.
- [11] 李琳, 程敏, 刘文元, 等. 紫外辐照对聚醚酰亚胺薄膜介电性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 064134. (Li Lin, Cheng Min, Liu Wenyuan, et al. Influence of ultraviolet irradiation on dielectric properties of polyetherimide film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 064134)
- [12] 黄睿, 叶焕英, 冯修敏, 等. 紫外辐照对偏光片聚乙烯醇膜的性能影响[J]. *合成材料老化与应用*, 2018, 47(1): 7-10. (Huang Rui, Ye Huanying, Feng Xiumin, et al. Performance influence of UV-exposure on polyvinyl alcohol polarizing film[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2018, 47(1): 7-10)
- [13] 顾页妮, 钱晓晨, 吕燕磊, 等. 真空紫外辐照对Lumogen薄膜损伤及光学性能的影响[J]. *光学仪器*, 2021, 43(1): 82-87. (Gu Yeni, Qian Xiaochen, Lyu Yanlei, et al. Effect of vacuum UV radiation on Lumogen film damage and optical properties[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(1): 82-87)
- [14] 沈自才, 李竑松, 张鹏嵩, 等. 空间紫外辐射高加速地面模拟技术[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(2): 57-61. (Shen Zicai, Li Hongsong, Zhang Pengsong, et al. Highly accelerated ground simulation technology of space ultraviolet radiation[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(2): 57-61)
- [15] Zhao Xiaohu, Shen Zhigang, Xing Yushan, et al. Experimental study of vacuum ultraviolet radiation effects and its synergistic effects with atomic oxygen on a spacecraft material-polytetrafluoroethylene[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2004, 17(3): 181-186.
- [16] 彭桂荣, 甄良, 杨德庄, 等. 真空紫外线辐射对聚合物材料的作用[J]. *宇航材料工艺*, 2001, 31(5): 12-18. (Peng Guirong, Zhen Liang, Yang Dezhuang, et al. Effects of vacuum ultraviolet on polymers[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2001, 31(5): 12-18)
- [17] Bower D I. An introduction to polymer physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [18] 李建喜, 单永东, 张聪, 等. 电子束辐照乙烯-四氟乙烯共聚物的化学稳定性[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2015, 33: 060301. (Li Jianxi, Shan Yongdong, Zhang Cong, et al. Chemical stability of ethylene-tetra-fluoro-ethylene irradiated by electron beam[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2015, 33: 060301)
- [19] 徐坚, 杨斌, 杨猛, 等. 空间紫外辐照对高分子材料破坏机理研究综述[J]. *航天器环境工程*, 2011, 28(1): 25-30. (Xu Jian, Yang Bin, Yang Meng, et al. Mechanism of polymer property degradation in space UV radiation environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(1): 25-30)
- [20] 曹丹, 王长进, 史丛丛, 等. 辐照乙烯-四氟乙烯共聚物的热老化性能[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2020, 38(4): 33-38. (Cao Dan, Wang Changjin, Shi Congcong, et al. Thermal aging properties of irradiated ethylene-tetrafluoroethylene copolymers[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2020, 38(4): 33-38)