

# 不同能量电子辐照下星用瑞侃导线 性能退化研究

赵春晴<sup>1</sup>, 刘宇明<sup>1</sup>, 沈自才<sup>1</sup>, 盛江<sup>2</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 杨艳斌<sup>1</sup>, 刘宠<sup>1</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094

2. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 研究卫星上外露导线在空间辐射环境下的耐受能力。**方法** 通过分析 GEO 轨道下在轨 10 年航天器外露瑞侃导线的辐照环境, 研究低能和高能电子对导线性能的影响, 地面模拟试验参数选择能量分别为 45 keV 和 1 MeV, 注量率均为  $8.3 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 总注量均为  $2 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。考察瑞侃导线力学性能(断裂伸长率、拉伸强度)和电性能(击穿电压)的退化情况, 并用 XPS 和 SEM 测试分析手段, 对其电子辐照损伤机理进行研究。**结果** 在不同能量电子辐照下, 瑞侃导线的力学性能均略有下降, 没有显著区别, 而电学性能严重退化, 且低能电子较高能电子对其电学性能影响更为严重, 其击穿电压分别下降了 100% 和 50%。**结论** 通过剂量-深度分布计算, 45 keV 入射电子能量全部沉积在样品表层下数微米的深度范围内, 完全被导线外皮吸收, 对样品的损伤较大; 而 1 MeV 入射电子能量绝大部分穿透表皮沉积在样品铜芯中, 因而其性能退化情况相对低能电子较小。进一步的, 通过 SEM 和 XPS 测试和分析发现, 电子辐照造成瑞侃导线分子链降解, 形成自由基以及气体, 自由基的再交联是造成瑞侃导线损伤的重要机理。

**关键词:** 瑞侃导线; 电学性能; 力学性能; 电子辐照

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.002

**中图分类号:** V416 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)03-0008-07

## Degradation of Satellite Rykan Wires Irradiated by Electrons of Different Energies

ZHAO Chun-qing<sup>1</sup>, LIU Yu-ming<sup>1</sup>, SHEN Zi-cai<sup>1</sup>, SHENG Jiang<sup>2</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, YANG Yan-bin<sup>1</sup>, LIU Chong<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing, 100094, China;

2. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch

Vehicle Technology, Beijing, 100076, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the tolerance ability of exposed wires on satellite in the space radiation environment. In this paper, the influence of low energy and high energy electrons on the conductor performance was studied by analyzing the radiation environment of the Rykan wire exposed in orbit for 10 years under GEO orbit. In the ground simulation test, the selected energy was 45 keV and 1 MeV; the fluence rate was  $8.3 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ; and the total dose was  $2 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ . The degradation of mechanical properties (elongation at break, tensile strength) and electrical properties (breakdown voltage) of the Rykan wire were investigated during the test. The mechanism of electron irradiation damage was studied by means of XPS and SEM. The

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2019-11-13

Received: 2019-09-06; Revised: 2019-11-13

基金项目: 国家国防科工局技术基础科研项目 (JSJC2013203C106)

Fund: Basic Technology Research Project of the State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (JSJC2013203C106)

作者简介: 赵春晴 (1981—), 女, 工程师, 主要研究方向为空间辐射环境下材料性能评估。

Biography: ZHAO Chun-qing (1981—), Female, Engineer, Research focus: Material performance evaluation in space radiation environment.

experimental results showed that the mechanical properties of Rykan wire were slightly reduced after irradiation under different energy electron irradiation. But the electrical properties were seriously degraded, and the influence of low-energy electrons was more serious than that of high-energy electrons. The breakdown voltage was reduced by 100% and 50% respectively. According to the calculation of dose-depth distribution, all the incoming electron energy of 45 keV is deposited in the depth range of a few microns below the surface of the sample, which is completely absorbed by the skin of the wire, causing great damage to the sample. However, most of 1MeV incident electron energy penetrates the skin and is deposited in the sample copper core, so its performance degradation is relatively small. Further, through SEM and XPS test and analysis, it is concluded that electron irradiation degrades the molecular chain of the Rykan wire, forms free radicals and gases, and the recrosslinking of free radicals is an important mechanism for the damage of the Rykan wire.

**KEY WORDS:** Rykan wire; electrical properties; mechanical properties; electron irradiation

导线由于具有高热稳定性、电绝缘性和抗老化能力，在卫星上应用广泛。虽然卫星上大部分导线被多层热控材料包裹，仍有少量应用于太阳翼、星敏感器、天线和发动机的导线暴露在太空中，受到空间带电粒子的辐射，从而给材料性能带来严重威胁，造成其光学性能、电学性能和力学性能退化<sup>[1-10]</sup>，进而严重影响航天器的在轨运行的安全和可靠性。研究导线带电粒子辐照效应对研制长寿、高可靠航天器具有重要意义。

对于电绝缘材料，带电粒子辐照引发材料表面发生化学老化，引起高分子网状结构断裂，导致其力学性能和绝缘性能下降。电绝缘材料多为高聚物，辐照引发聚合物网状结构断裂的结果导致其发生交联或降解等化学变化。辐照会使电绝缘材料发生电离效应，其电导率的瞬态增长有明显的延迟分量，可建立空间电荷或发生极化。这会导致周围元器件的表面效应、结漏泄电流、光电流、电感应烧毁和闭锁等后果。

目前国外主要通过 60Co $\gamma$  放射源研究导线材料的辐射裂解行为。电子束辐照降解主要应用在高分子聚合物材料的辐射加工工艺领域，有辐射聚合、辐射交联、辐射降解等。叶剑锋等人<sup>[11]</sup>研究了聚四氟乙烯（PTFE）辐射降解，发现低剂量率辐照下样品品质高于高剂量率，降解效果更明显，且辐射降解主要发生在主链上 C—C 键的断裂，样品由结晶态向非结晶

态转变显著。黄玮等<sup>[9,12]</sup>研究发现，真空辐照后，PTFE 的降解产物有 95% 是单体  $CF_2=C$ ，另有少量的六氟丙烯，此外还少量二氧化碳气体，但没有氟化氢和分子链碎片。样品表面的氧含量在总剂量  $1 \times 10^5 Gy$  的伽马射线辐照后明显增加，表明增大剂量辐照时辐射氧化和辐射裂解这对竞争反应中，氧化反应的速率增长得更快。低剂量率时，样品以辐射交联为主。孙建生<sup>[13]</sup>对核电站电缆材料辐射后的断裂伸长率、抗张强度、体积电阻率性能进行了研究，其中断裂伸长率有明显下降，其余两种性能变化不明显。

文中研究了空间电子辐射环境对瑞侃导线电学及力学性能的影响，试验结果及分析可为航天器材料抗辐射加固设计及性能改进提供参考依据。

## 1 试验

### 1.1 辐照环境分析

文中研究的航天器材料所在轨道为 GEO，其遭受的辐射环境主要为捕获电子和质子，其产生的总剂量效应会引起材料性能的明显退化。工程中常用的辐照模型为 AE-8、AP-8，GEO 轨道下电子和质子的积分通量值如图 1 所示。GEO 轨道中电子能量绝大部分位于 0.04~5 MeV 区间，更高能量的电子在工程

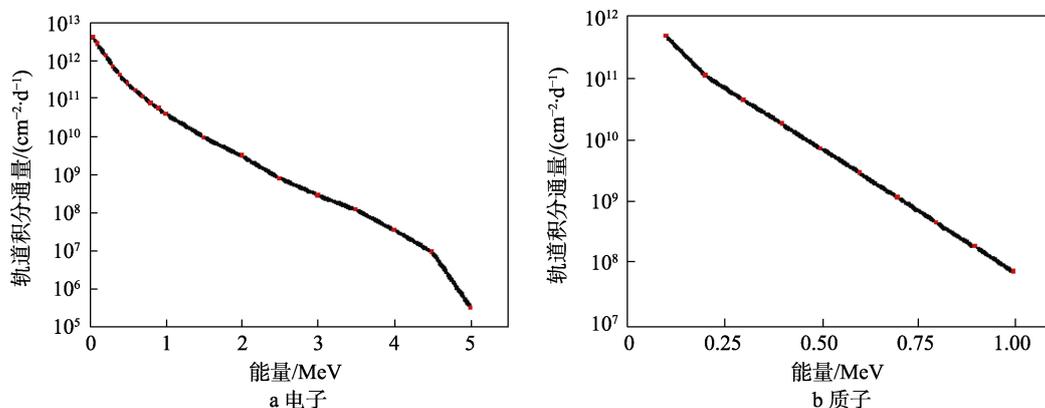


图 1 捕获带电子和质子的 GEO 积分通量

Fig.1 GEO fluence of electrons (a) and protons (b) captured

应用中可以忽略。轨道质子通量相比电子低一个量级，地面模拟试验时首选电子辐照。不同能量的电子

对材料的穿透深度不同,对材料性能的影响程度也有所不同,本研究拟选择两种低能和中能电子进行辐照试验。

### 1.2 试验对象

试验样品选择卫星用瑞侃导线,其主要成分为聚四氟乙烯,材料密度为  $2.17 \text{ g/cm}^3$ ,结构如图 2 所示。

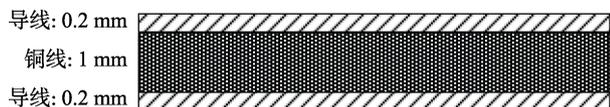


图 2 瑞侃导线结构  
Fig.2 Structure of Rykan wire

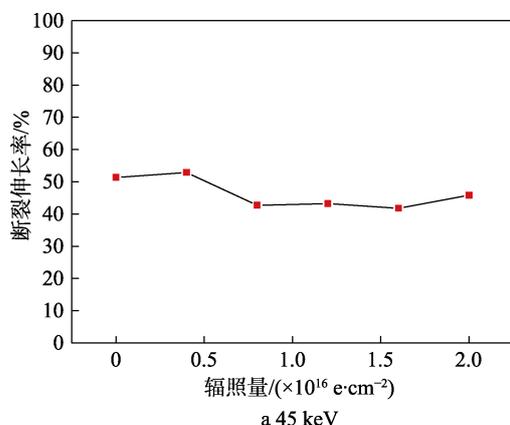
### 1.3 试验参数

针对瑞侃导线在星上使用的实际情况,主要考察其电学及力学性能退化情况。力学性能选择抗拉强度和断裂伸长率,电学性能选择击穿电压。瑞侃导线材料宏观及微观性能测试参数见表 1。

表 1 瑞侃导线性能测试  
Tab.1 Performance test of Rykan wire

| 类别   | 测试项目            |
|------|-----------------|
| 力学性能 | 抗拉强度            |
|      | 断裂伸长率           |
| 电学性能 | 击穿电压            |
| 微观性能 | 表面形貌 (SEM)      |
|      | X 射线光电子能谱 (XPS) |

电子能量选择低能和中高能两种,以考察其不同能量对材料性能退化带来的异同。低能电子能量选择 45 keV,注量率为  $8.3 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,总注量为  $2 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。试验在真空下进行,设备为北京卫星环境工程研究所综合辐照设备。高能电子能量选择 1 MeV,注量率为  $8.3 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,总注量为  $2 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。



试验在大气环境下进行,设备为中科院新疆理化技术研究所高能电子加速器。由于电子辐照时具有一定的热效应,因此高/低能电子辐照试验过程中均对试验样品采取控温措施。

### 1.4 微观测试

本研究主要利用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 两种微观分析手段对导线材料的成分及结构变化进行分析。SEM 主要利用二次电子信号成像观察样品的表面形态,进而获得样品的微观形貌图像。XPS 可用于对物质的成分 (元素) 进行定量及定性分析,同时可根据表面元素的组成,提供材料结构方面的信息。瑞侃导线主要测试的元素成分为 C、F、O。

## 2 结果与分析

### 2.1 力学性能

两种能量电子辐照下样品的断裂伸长率和拉伸强度变化曲线分别如图 3、图 4 所示。可见在低能电子辐照下,断裂伸长率呈显著下降趋势,由 52% 左右下降为 42% 左右,下降幅度约为 20%;高能电子辐照下,样品断裂伸长率没有特别明显的变化。低能电子辐照下,样品拉伸强度由 147 MPa 左右下降为 146 MPa 左右,没明显的变化趋势。高能电子辐照下,拉伸强度下降趋势明显,由 147 MPa 左右下降到 133 MPa 左右,下降幅度 10% 左右。由于做力学性能测试时,导线铜芯的存在会对拉伸强度和断裂伸长率测试有一定的影响,可能会导致结果存在一定的随机性,且由于材料介质的不均匀性,尤其是高聚物的聚集形态非常复杂,材料性能也会呈统计分布。因此,可以认为瑞侃导线力学性能 10% 的退化可以忽略。整体而言,瑞侃导线的力学性能略有下降。

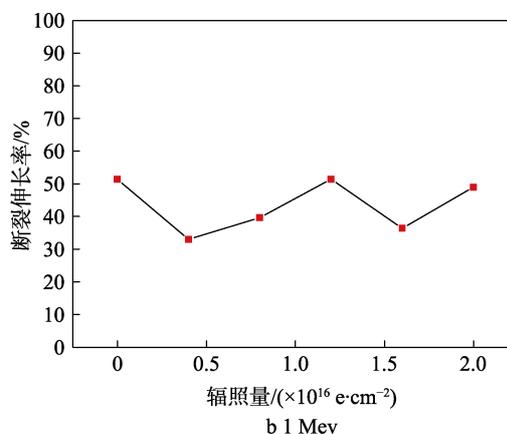


图 3 两种能量电子辐照下瑞侃导线断裂伸长率的变化

Fig.3 The change of the elongation at break of Rykan wire under two kinds of energy electron irradiation

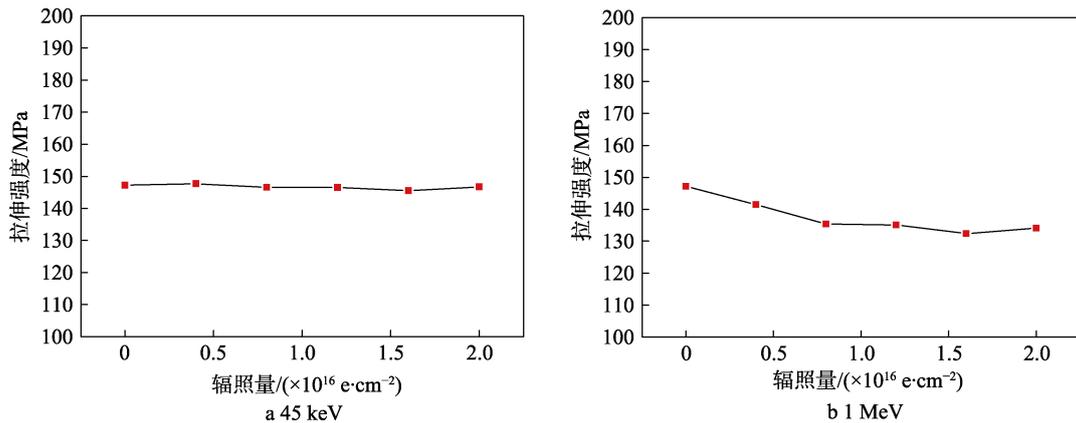


图 4 两种能量电子辐照下瑞侃导线拉伸强度的变化

Fig.4 The change of tensile strength of Rykan wire under two kinds of energy electron irradiation

## 2.2 电学性能

电子辐照下样品击穿电压的变化曲线如图 5 所示。在低能电子辐照下，瑞侃导线的击穿电压急剧下降到接近 0；高能电子辐照下，瑞侃导线的击穿电压急剧下降，呈现前期下降快、后期下降慢的特点，最终由 19 keV 下降到 10 keV 左右，下降幅度接近 50%。综合分析而言，瑞侃导线的电学性能和力学性能都呈下降趋势，电学性能下降更加明显，且低能电子的影响比高能电子的影响更大。

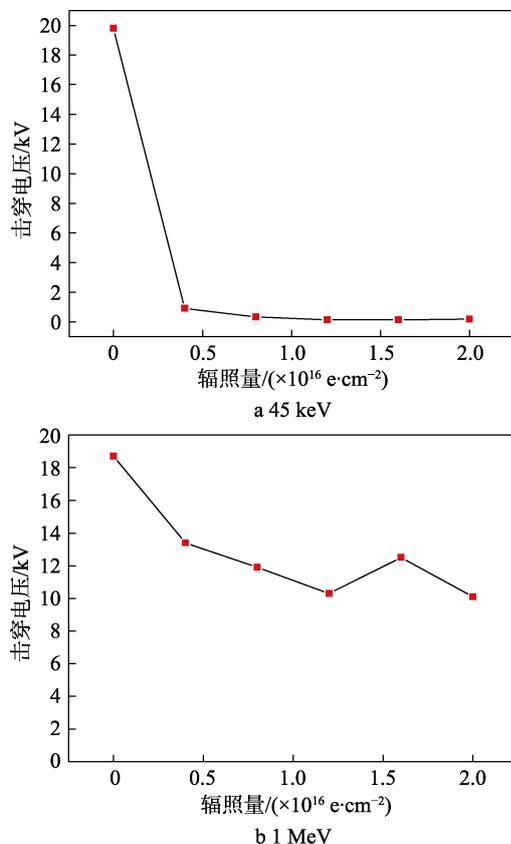


图 5 两种能量电子辐照下瑞侃导线击穿电压的变化

Fig.5 The change of breakdown voltage of Rykan wire under two kinds of energy electron irradiation

## 2.3 能量沉积分析

材料的损伤程度与材料中沉积的能量多少相关，材料的性能退化可根据沉积能量进行分析。利用 ITS 软件对电子入射瑞侃导线后的剂量-深度分布进行分析。该软件是基于蒙特卡罗模拟方法，对粒子在材料中的运输情况进行跟踪。经计算，电子在材料中的能量沉积情况如图 6 所示。

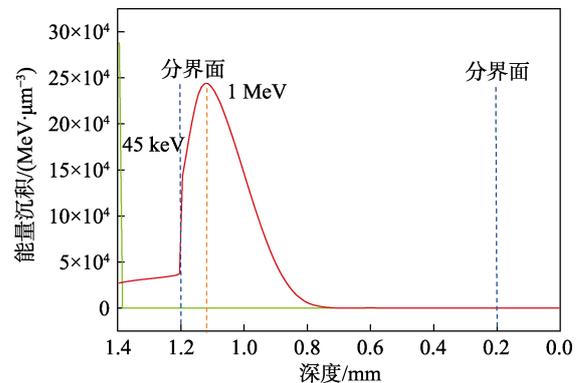


图 6 电子入射瑞侃导线的剂量-深度分布

Fig.6 Dose-depth distribution of Rykan wire with electron incident

由计算数据可知，45 keV 低能电子能量主要沉积在辐照面表皮下约数微米的深度范围内，无法穿透外表皮进入铜芯和未辐照面表皮。1 MeV 高能电子辐照中，仅少量能量沉积在瑞侃导线辐照面表皮中，剩余绝大部分能量穿透表皮，沉积于铜芯中，未辐照面表皮也无能量沉积。

## 2.4 样品外观变化

45 keV 和 1 MeV 电子辐照下样品的外观变化如图 7 所示。可以看出，低能电子辐照下，瑞侃导线辐照面颜色显著变深，但在导线背面（未辐照面）颜色基本没有变化。在高能电子辐照下，相比初始样品，整个导线颜色没有明显的变化。瑞侃导线颜色的变化

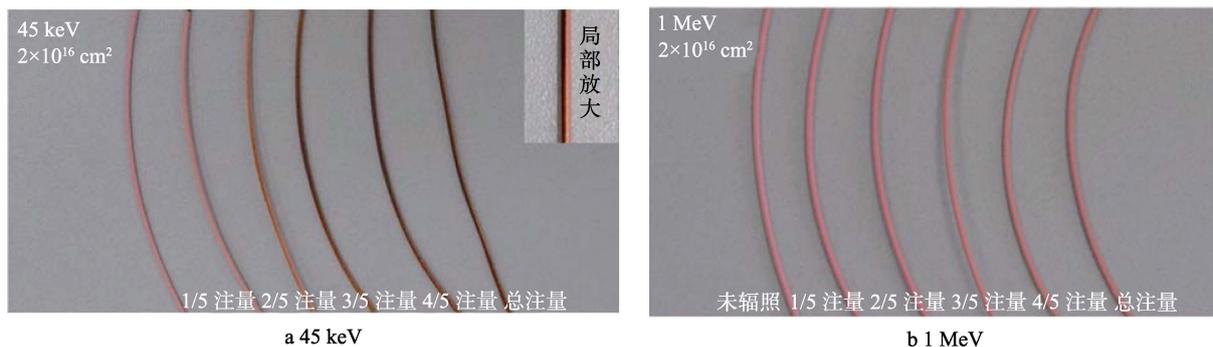


图 7 电子辐照下瑞侃导线外观变化  
Fig.7 The change of appearance of Rykan wire under electron irradiation

与沉积能量的多少相关，颜色变化结果与剂量-深度分布计算结果一致。

### 2.5 微观形貌分析

通过 SEM 分析手段，得到瑞侃导线在低能电子和高能电子辐照前后的表面形貌，如图 8 所示。由图 8 可见，辐照前样品表面比较平滑。低能电子辐照后，

表面出现大量微裂纹。分析认为这是由于低能电子在导线表皮中存在大量能量沉积，因此材料损伤效应显著，样品在人为外力作用下便出现明显裂纹，该结果与力学参数变化结果及外观检测结果一致。高能电子辐照后，表面也受到一定程度的破坏，微观下表面有颗粒物出现。分析认为是高能电子入射造成导线表皮聚合物的分解与交联，进而使得导线表皮成分不再均匀。

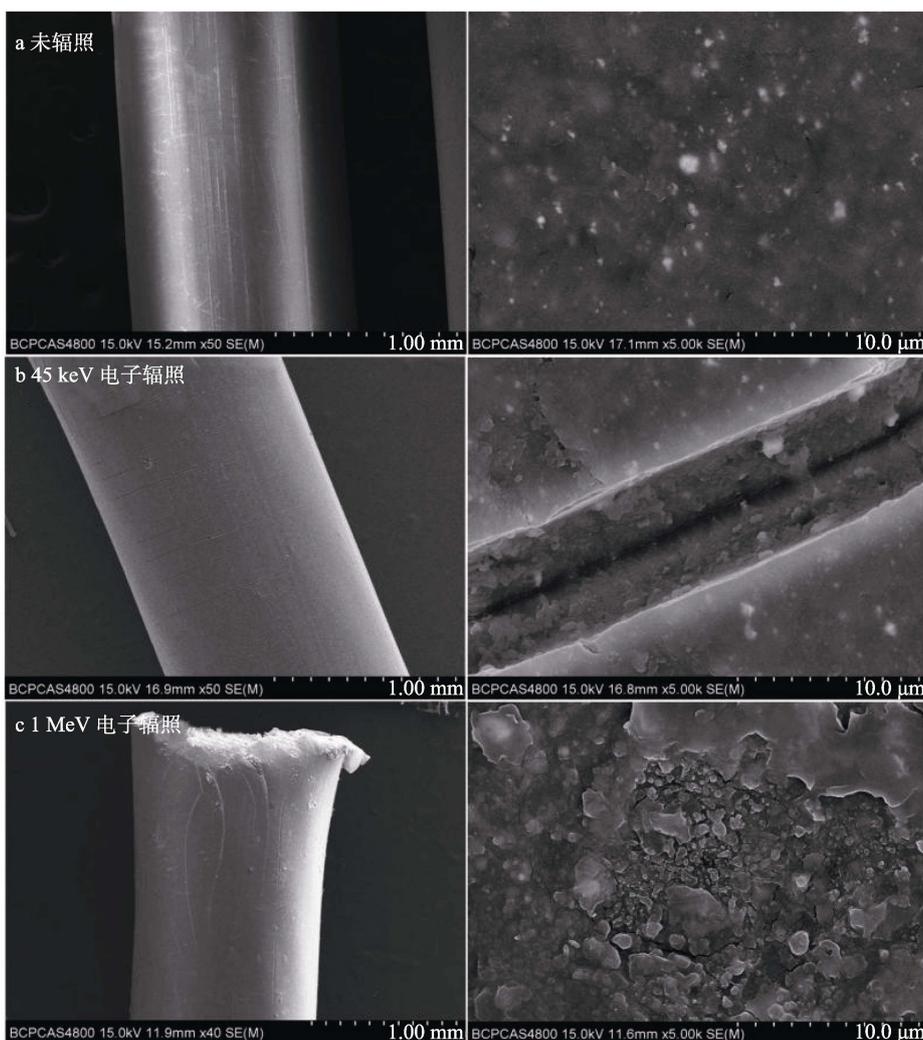


图 8 瑞侃导线辐照前后的 SEM 形貌  
Fig.8 SEM morphology of Rykan wire before and after irradiation: a) no irradiation; b) 45 keV electron irradiation; c) 1 MeV electron irradiation

## 2.6 微观成分分析

瑞侃导线的主要成分为聚四氟乙烯, 主要元素为 C、F。通过 X 射线光电子能谱分析手段检测到样品的成分见表 2。

表 2 辐照前后瑞侃导线材料各元素的含量变化  
Tab.2 Each element content changes of Rykan wire material before and after irradiation

| 元素   | 质量分数/% |        |       |
|------|--------|--------|-------|
|      | 辐照前    | 45 keV | 1 MeV |
| C1s  | 70.38  | 71.06  | 65.18 |
| F1s  | 17.53  | 5.27   | 10.1  |
| O1s  | 9.7    | 17.74  | 18.49 |
| Na1s | 0.32   | 0.38   | 0.8   |
| N1s  | 0.34   | 1.18   | 2.18  |
| S2p  | 0.09   | 1.72   | 2.33  |
| Si2p | 1.62   | 2.65   | 0.66  |

瑞侃导线主要成分是聚四氟乙烯, 元素以 C、F、O 为主, 聚四氟乙烯中存在大量末端—CF<sub>3</sub> 结构。从表 2 中可以看出, 经过低能电子和高能电子辐照后, 瑞侃导线中 F 的含量均有比较明显的下降。这说明—CF<sub>3</sub> 结构大量断裂, 同时提供了 F 自由基与 C 自由基, C 自由基与 F 自由基重新交联, 组成更长链条的 FC—CF。另一方面, 降解作用还提供了 F 原子, 生成氟化物。低能的电子辐照后, F 元素含量下降较多, 说明电子的能量沉积在表层多, 对瑞侃导线表面元素含量改变大。C 元素含量的变化不是很明显, O 元素的含量有所上升。考虑到样品与大气中的污染物等的接触, 故此不对 C、O 详细分析。综合分析认为, 在电子辐照下, 电离损伤造成瑞侃导线分子链降解, 形成自由基以及气体, 自由基的再交联是造成瑞侃导线损伤的重要机理。

## 3 结论

通过分析 GEO 轨道在轨 10 年航天器外露瑞侃导线的辐照环境, 研究了低能和高能电子对导线性能的影响。地面模拟试验参数选择能量分别为 45 keV 和 1 MeV, 通量均为  $8.3 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 注量均为  $2 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ , 得到如下结论。

1) 经不同能量电子辐照后, 样品的力学性能略有下降, 无显著区别。电学性能严重退化, 且低能电子辐照损伤高于高能电子, 击穿电压分别下降了 100% 和 50%。

2) 剂量-深度分布计算表明, 45 keV 入射电子能量全部沉积在样品表层下数微米的深度范围内, 完全被导线外皮吸收, 对样品的损伤较大。1 MeV 入射电子能量绝大部分沉积在样品铜芯中, 表皮吸收的能量较少, 其性能退化情况相对较小。

3) 由表面微观形貌分析可见, 45 keV 电子辐照引起导线微观表面产生大量微裂纹, 1 MeV 电子辐照下, 样品表面也有颗粒物析出, 造成样品表面的损伤。

4) 通过对样品微观成分分析, 认为在电子辐照下, 电离损伤造成瑞侃导线分子链降解, 形成自由基以及气体, 自由基的再交联是造成瑞侃导线损伤的重要机理。

本研究认为, 空间带电粒子辐射环境会对航天器外露绝缘材料性能造成严重损伤, 建议航天器在进行相关材料空间性能退化评估时, 要综合考虑低能带电粒子和高能带电粒子的辐照效应, 以保证试验结果的有效性。

## 参考文献:

- [1] 赵春晴, 丁义刚, 刘宇明, 等. 质子和电子辐照下防静电热控涂层的性能退化[J]. 高电压技术, 2016, 22(5): 1442-1448.  
ZHAO Chun-qing, DING Yi-gang, LIU Yu-ming, et al. Performance Degradation of Antistatic Thermal Control Coatings Under Proton and Electron Irradiation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 22(5): 1442-1448.
- [2] 赵春晴, 刘宇明, 丁义刚, 等. 空间电子辐照下星用热缩套管力学性能退化试验研究[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 184-188.  
ZHAO Chun-qing, LIU Yu-ming, DING Yi-gang, et al. Tests of Electron Irradiation Effects on the Mechanical Properties of Heat-shrinkable Sleeves Used in Satellites[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(2): 184-188.
- [3] 冯伟泉, 丁义刚, 闫德葵, 等. GEO 卫星热控涂层  $\alpha_s$  退化空间综合环境模拟试验[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(1): 27-30.  
FENG Wei-quan, DING Yi-gang, YAN De-kui, et al. Space Combined Environment Simulation Test on  $\alpha_s$  Degradation of GEO Satellite Thermal Control Coatings[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 24(1): 27-30.
- [4] 张丽新, 王承民, 何世禹. 在空间质子辐照下甲基硅橡胶的破坏模型[J]. 材料研究学报, 2005, 19(2): 125-130.  
ZHANG Li-xin, WANG Cheng-min, HE Shi-yu. A Model for Destruction of the Silicone Rubber Net-structure after the Proton Radiation[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005, 19(2): 125-130.
- [5] CRESPIAN A L, MICHAEL S. Modeling the Effects of Electron Radiation in Solar Cells[R]. AIAA 2004-3269, 2004.
- [6] COTA S S, VASCONCELOS V, SENNE J M. Changes in Mechanical Properties due to Gamma Irradiation of High-density Polyethylene (HDPE)[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2007, 24(2): 259-265
- [7] 刘宇明, 丁义刚, 姜利祥, 等. 热缩套管绝缘性能辐照效应研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 59-62.

- LIU Yu-ming, DING Yi-gang, JIANG Li-xiang, et al. Radiation Effects on the Insulation Properties of Heat-shrinkable Sleeves[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(1): 59-62.
- [8] LEACH R D. Spacecraft System Failures and Anomalies Attribute to the Nature Space Environment[R]. AIAA 1995-3564, 1995.
- [9] 黄玮, 熊洁, 高小铃, 等. 聚乙烯线缆材料的辐射稳定性[J]. 核化学与放射化学, 2007, 29(4): 244-247.  
HUANG Wei, XIONG Jie, GAO Xiao-ling, et al. Radiation Stability of Polyethylene Cable[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2007, 29(4): 244-247.
- [10] 金天雄, 黄兴溢, 马之森, 等.  $\gamma$  辐照交联聚乙烯绝缘电缆水树行为的研究[J]. 绝缘材料, 2008, 41(6): 50-53.  
KIM Chon-ung, HUANG Xing-yi, MA Zhi-sen, et al. Experimental Research on Water Treeing Behavior of Gamma Irradiated XLPE Cable Insulation[J]. Insulating Materials, 2008, 41(6): 50-53.
- [11] 叶剑锋, 裴元吉. 聚四氟乙烯电子束辐射降解研究[J]. 核技术, 2015, 38(1): 7-11.  
YE Jian-feng, PEI Yuan-ji. Study on Radiation Degradation Effect of PTFE by Electron Beam[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(1): 7-11.
- [12] 黄玮, 韩军, 徐云书, 等. 聚四氟乙烯密封材料的电子束辐射效应研究[J]. 原子核物理评论, 2006, 23(2): 180-184.  
HUANG Wei, HAN Jun, XU Yun-shu, et al. Radiation Effect of Polytetrafluoroethylene Sealing Material Irradiated by Electron Beam[J]. Nuclear Physics Review, 2006, 23(2): 180-184.
- [13] 孙建生, 陆燕红, 曲文波, 等. 核电站 IE 级电缆材料的辐照老化试验研究[J]. 电线电缆, 2010(1): 26-28.  
SUN Jian-sheng, LU Yan-hong, QU Wen-bo, et al. Study of the Irradiation Ageing Test of the Materials for Class 1E Cables for Nuclear Power Plant[J]. Electric Wire & Cable, 2010(1): 26-28.