

电子辐照 Kapton/Al 薄膜力学性能退化规律 与机理研究

沈自才¹, 牟永强¹, 吴宜勇²

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: **目的** 为航天器用 Kapton/Al 薄膜材料的选用提供数据支撑和高性能 Kapton/Al 薄膜材料的研制提供理论支持。**方法** 用综合辐照试验装置对 Kapton/Al 薄膜材料进行电子辐照, 用拉力试验机对 Kapton/Al 薄膜材料开展力学性能拉伸试验, 用 XPS 对其成分和微观结构进行测试分析。**结果** Kapton/Al 薄膜材料的抗拉强度和断裂伸长率随着拉伸速度的增加而降低, 随着电子辐照剂量的增加呈指数减小, 在电子辐照下, 薄膜材料分子键发生断裂和交联, C—CO 和 C—N 键断裂发生脱氧和脱氮反应, C—H 基团相对含量增大。**结论** 电子辐照将造成 Kapton/Al 薄膜材料力学性能降低, 薄膜材料分子键的断裂和交联是薄膜力学性能降低的主要原因。

关键词: 薄膜材料; 力学性能; 电子辐照

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.007

中图分类号: TJ04; V41 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0042-03

Study on the Mechanical Property Degradation Pattern and Mechanism of the Mechanical Property of Kapton/Al Film by Electron Radiation

SHEN Zi-cai¹, MU Yong-qiang¹, WU Yi-yong²

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;
2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: Objective To provide data support for selection of Kapton/Al film used in spacecraft and theoretical support for preparation of high performance Kapton/Al material. **Methods** The Kapton/Al film was radiated by electron from the combined space radiation environment simulator, and tested by the tensile testing machine, and its component and microstructure was analyzed by XPS. **Results** The tensile strength and the rupture elongation of the Kapton/Al film decreased with the increase of tensile ratio and electron dosage. The rupture and cross linkage of molecular bonds in the film, the deoxidation of C—CO, the denitrification of C—N and the increase of C—H percentage were caused induced by electron radiation. **Conclusion** Electron radiation on of Kapton/Al film results in the decrease of its mechanical property of it, and the rupture and cross linkage of molecular bonds are is the main cause of its property degradation.

KEY WORDS: thin film material; mechanical property; electron radiation

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2015-01-27

Received: 2015-01-15; Revised: 2015-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174166, 51273052)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(41174166, 51273052)

作者简介: 沈自才(1980—), 男, 山东人, 博士, 高级工程师, 主要从事航天器空间环境效应研究。

Biography: SHEN Zi-cai(1980—), Male, from Shandong, Doctor, Senior engineer, Research focus: spacecraft environment effects.

随着航天科技的发展和航天活动的增多,航天器的体积和质量呈现越来越大的趋势。受运载工具有效空间以及运载质量等的限制,传统结构在研制和发射等方面均遇到了巨大困难。轻型展开结构,由于其具有成本低、体积小、质量轻及可靠性高等优点,能够实现传统结构较难实现的性能或功能,因此成为航天器研究和开发的热点,也是今后航天技术应用与发展的必然趋势。

航天器展开结构,尤其是薄膜展开式结构,可应用于大型天线、大型太阳能电池帆板、遮光罩以及太阳帆等大型航天器上^[1-8]。在超大型航天器或空间基础设施如空间太阳能电站,薄膜材料将是其结构的重要组成部分。空间环境是由电子、质子、紫外、原子氧、空间碎片、真空、高低温等组成的复杂环境。由于长期暴露在航天器表面,薄膜材料将直接受到多种空间环境因素的作用,造成其脆化或者开裂,引起其力学性能退化甚至失效,严重影响航天器的在轨安全和任务完成。在诸多空间环境因素中,空间辐射环境是导致其力学性能退化的重要因素之一,需要对其空间辐照力学性能退化规律及机理进行研究。

以美国和日本为代表的航天材料强国对航天用薄膜材料的力学性能退化规律和机理进行了大量研究^[9-10],而我国对此研究相对较少^[11]。因此,亟需加强航天器用薄膜材料在空间环境下的力学性能退化规律与退化机理研究,为航天器的设计和高性能材料的研制提供理论基础和数据支持。文中以航天器常用薄膜材料Kapton/Al薄膜为研究对象,以电子辐射环境为典型环境代表,研究其在电子辐射环境下的力学性能退化规律,分析其性能退化机理,探讨其在空间环境下的力学性能退化评价方法。

1 样品制备与试验

根据GB 13022—91《塑料 薄膜拉伸性能试验方法》,使用薄膜专用切刀,将厚度为25 μm的Kapton/Al薄膜裁制成宽为15 mm,长为150 mm,有效长度为100 mm的长条形。利用光学照明放大镜检查,去除边缘有缺陷的样品。每组试验样品数量为5个。

在电子辐照试验研究中,电子能量选取40 keV,通量为 $1 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,注量分别为 $0, 2 \times 10^{15}, 6 \times 10^{15}, 1.0 \times 10^{16}, 1.4 \times 10^{16}, 1.7 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。利用电子拉力试验机对Kapton/Al薄膜进行拉伸试验。对原样品,分别选取50, 100, 150 mm/min的拉伸速度进行拉伸试验,以研究拉伸速度对样品抗拉性能的影响。对

电子辐照后的样品,选取100 mm/min的拉伸速度,分析其拉伸强度和断裂伸长率随辐照注量的变化关系。对辐照前后的试验样品,利用XPS分析测试,研究Kapton/Al薄膜材料在电子辐照环境中的力学性能退化机理。

2 结果分析

1) 拉伸速率对力学性能的影响。在拉伸速度为50, 100, 150 mm/min下, Kapton/Al薄膜原始样品的断裂伸长率分别为32.07%, 31.29%, 23.86%。由此可知, Kapton/Al薄膜材料原始样品的断裂伸长率随着拉伸速度增加而减小。

2) 电子辐照注量对力学性能的影响。在电子辐照注量为 $0, 2.0 \times 10^{15}, 6.0 \times 10^{15}, 1.0 \times 10^{16}, 1.4 \times 10^{16} \text{ e}/\text{cm}^2$ 下, Kapton/Al薄膜材料的断裂伸长率分别为31.29%, 25.67%, 24.84%, 20.7%, 19.31%;抗拉强度分别为105.813, 103.439, 101.35, 97.14, 95.39 MPa。其拟合图如图1所示。

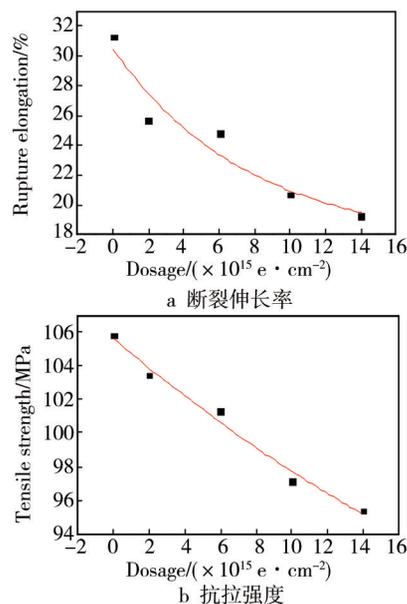


图1 不同电子辐照注量对Kapton/Al薄膜力学性能的影响
Fig.1 Influence of different electron irradiation amounts fluence on the mechanical properties property of Kapton/Al film

对电子辐照环境下薄膜材料的断裂伸长率与辐照注量的关系进行拟合分析可知,其变化规律为:

$$y=17.41+13.05\exp(-x/7.69) \quad (1)$$

式中: y 为断裂伸长率, %; x 为辐照注量, $10^{15} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。

由式(1)可知, Kapton/Al薄膜的断裂伸长率随电子辐照注量的增加而指数减小。

对电子辐照环境下薄膜材料的抗拉强度与辐照注量的关系进行拟合分析可知,其变化规律如下:

$$y=75.05+30.61\exp(-x/33.44) \quad (2)$$

式中:y为指抗拉强度,MPa。

由式(2)可知,Kapton/Al薄膜的抗拉强度随电子辐照注量的增加而指数减小。

3 退化机理分析

Kapton薄膜是有机高分子聚合物,其分子式为 $[(C_{22}H_{10}O_3N_2)_n]$,其理论原子分数为:C 75.9%,O 17.2%,N 6.9%。

对电子辐照注量为 $0, 2 \times 10^{15}, 6 \times 10^{15}, 1.0 \times 10^{16} e/cm^2$ 的Kapton样品进行XPS分析,其组分百分比变化见表1。

由表1分析可知,Kapton/Al薄膜原始样品表面的成分主要为C和O。在电子辐照初期,O和N的含量急剧增大。这说明在电子辐照作用下,O和N原子获得电

表1 不同电子辐射注量下Kapton的组分含量

Table 1 Component percentage of Kapton in under different electron radiations

注量/($e \cdot cm^{-2}$)	C _{1s}	O _{1s}	N _{1s}	%
0	88.3	11.7	0	
2×10^{15}	77.01	16.55	6.44	
6×10^{15}	79.45	14.92	5.62	
1×10^{16}	83.04	13.3	3.66	

子,变为激活态。随着电子辐照注量的增加,C元素的含量逐渐增加,而O元素和N元素的含量逐渐减小。这说明随着电子辐照注量的增加,样品表面结构发生了变化,C元素在样品表面开始富集,而O元素和N元素则存在释放出去的可能。C元素的富集可造成薄膜样品硬度的增加,进而导致其断裂伸长率和抗拉强度下降。

利用XPS测试分析,对不同电子辐照注量下的C元素进一步分析,不同化学结合能的C元素成分及其百分比见表2和图2。

表2 不同电子辐照注量下Kapton薄膜的C元素结合能和面积比

Table 2 Building energy and area percentage ratio of C element in Kapton in under different electron radiations

辐照注量/ ($e \cdot cm^{-2}$)	C—H		C—CO, C—N		C—O		C=O	
	结合能/eV	面积比/%	结合能/eV	面积比/%	结合能/eV	面积比/%	结合能/eV	面积比/%
0	284.65	66.98			284.84	26.16	288.2	6.86
2×10^{15}	284.5	18.90	285.5	35.80	288.5	45.30		
6×10^{15}	284.58	62.62	285.69	25.31	288.5	12.07		
1×10^{16}	284.55	75	285.6	18.96	288.42	6.03		

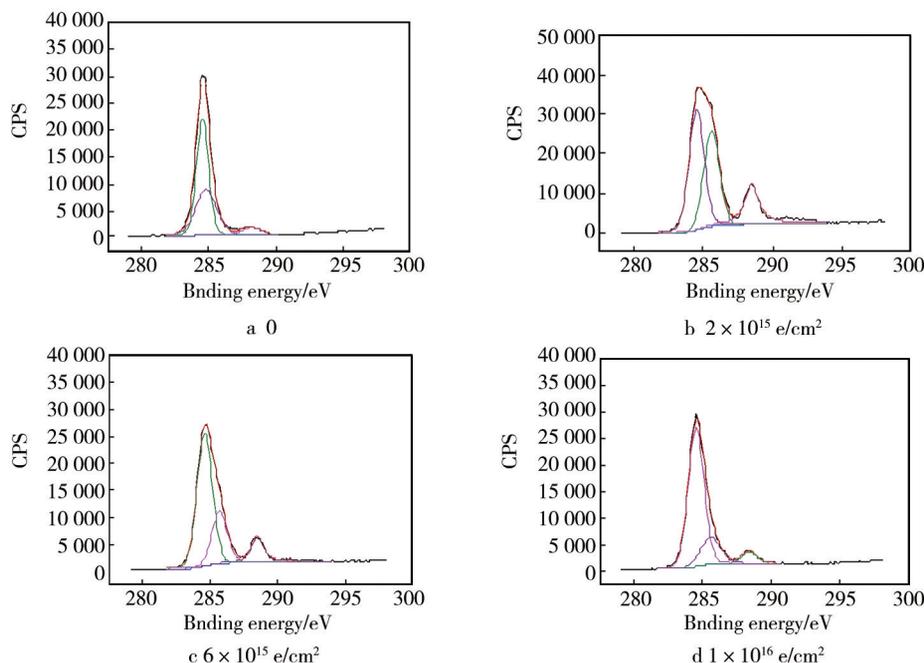


图2 不同电子辐照注量下Kapton C_{1s}分析

Fig.2 XPS of C_{1s} in Kapton after under different electron radiations

(下转第69页)

- ing, 2006, 3(3): 19—24.
- [9] DOOLING D, FINCKENOR M M. Material Selection Guidelines to Limit Atomic Oxygen Effects on Spacecraft Surfaces [R]. NASA/TP-1999-209260, Marshall Space Flight Center, 1999.
- [10] EDWARD M Silverman. Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide[R]. NASA CR-4661, Langley Research Center, 1995.
- [11] BOURASSA R J, GILLIS J R. Atomic Oxygen Exposure of LDEF Experiment Trays, Long Duration Exposure Facility Materials Special Investigation Group-LDEF Supporting Data [R]. NASA CR-19247, Boeing Defense and Space Group, 1992.
- [12] Bourassa R J, Gillis J R, Roussiang K W. Atomic Oxygen and Ultraviolet Radiation Mission Total Exposure for LDEF Experiments[C]// LDEF 1st Post-Retrieval Symposium. NASA CP-3134, 1991: 643—661.
- [13] SLEMP W S, YOUNG P R, WITTE W G, et al. Effects of LDEF Flight Exposure on Selected Polymer Matrix Resin Composite Materials[C]// LDEF 1st Post-Retrieval Symposium. NASA CP-3134, 1991: 1149—1162.

(上接第44页)

由图2和表2分析可知,随着电子辐照注量的增加,C=O先转变为C—O,而后C—O含量逐渐减小;样品表面C—N和C—CO先由无到有,而后随电子辐照注量的增加而减小;C—H含量则随电子辐照注量的增加而逐渐增加。由以上分析可知,在电子辐照下,Kapton/Al薄膜材料发生了分子键断裂和交联,电子辐照使C—CO和C—N键断裂发生脱氧和脱氮。同时,电子辐照引起C—H基团的含量增大。

4 结论

1) 在未辐照作用下,Kapton/Al薄膜的抗拉强度和断裂伸长率随着拉伸速度增加而减小。

2) Kapton/Al薄膜的断裂伸长率和抗拉强度随着电子辐照注量的增加而呈指数减小。

3) Kapton/Al薄膜在电子辐照作用下产生分子键断裂和交联。

4) 电子辐照环境下,C—CO和C—N键的断裂及脱氧和脱氮、C—H基团含量增大是Kapton/Al薄膜力学性能降低的主要原因。

参考文献:

- [1] JOYCE A D, KIM K G, JACQUELINE A T, et al. Mechanical Properties Degradation of Teflon FEP Returned from the Hubble Space Telescope[R]. AIAA-98-0895, 1998: 1—5.
- [2] MICHAEL L A, HARRY L C, DAVID M K, et al. Design and Flight Testing of an Inflatable Sunshield for the NGST[R]. AIAA-2000-1797, 2000: 1—6.
- [3] GRAHNE M S, CADOGAN D P, SANDY C R. Development of the Inflatable Shield in Space (ISIS) Structure for the NGST Program[R]. IAF-00-I.1.04, 2000: 1—12.
- [4] CHARLES G AND HUMPHREY P. Developments and Activities in Solar Sail Propulsion[R]. AIAA-2001-3234, 2001: 1—7.
- [5] NATHAN W G AND JAMES I C. Deployment Modeling of an Inflatable Solar Sail Spacecraft[R]. AIAA-2006-6336, 2006: 1—4.
- [6] LICHODZIEJEWSKI D AND CASSAPAKIS C. Inflatable Power Antenna Technology[R]. AIAA-1999-0895, 1999: 1—5.
- [7] LARRY L, HAMID H, MICHAEL L T. Dynamic Characterization of an Inflatable Concentrator for Solar Thermal Propulsion[R]. AIAA-2001-1406, 2001: 1—4.
- [8] DENNIS A R, JOHN W C, LAWRENCE B F, et al. Electron, Proton, and Ultraviolet Radiation Effects on Thermophysical Properties of Polymeric Films[R]. AIAA-2001-1414, 2001: 1—6.
- [9] DAVID E, MARY H, WHITNEY H, et al. Characterization of Candidate Solar Sail Material Exposed to Space Environmental Effects[R]. AIAA-2004-1085, 2004: 1—5.
- [10] DAVID E, WHITNEY H, TESIA S, et al. Characterization of Space Environmental Effects on Candidate Solar Sail Material [J]. SPIE, 2002(4823): 67—74.
- [11] 沈自才, 郑慧奇, 赵雪, 等. 远紫外辐射下Kapton/Al薄膜材料的力学性能研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(5): 600—604.
- SHEN Zi-cai, ZHENG Hui-qi, ZHAO Xue, et al. Effects of Far Ultraviolet Irradiation on Mechanical Properties of Kapton/Al Film[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(5): 600—604.