

锦纶材料空间环境适应性研究

隋 蓉 蒋 伟 张 文 博

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

文 摘 为研究锦纶材料在长寿命在轨航天器中的环境适应性,提出了锦纶材料在空间环境使用的空间环境适应性评价指标,设计并实施了空间环境适应性评价试验。试验结果表明,锦纶材料在燃烧性能、逸出有害气体、真空质损和可凝挥发物、抗菌防霉、耐受交变温度、电离辐射中表现出友好的环境适应性。锦纶材料在受到空间环境中原子氧、紫外辐射作用时断裂强力明显下降,且原子氧与紫外辐照协同效果对锦纶材料的力学性能破坏具有加强效果。锦纶材料可作为空间舱内环境长期使用材料,在舱外环境使用时,需要特别考虑其力学特性受到原子氧、紫外辐照的影响。

关键词 锦纶,航天器,空间环境,适应性

中图分类号:V45

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.06.017

Space Environment Adaptability of Nylon Materials

SUI Rong JIANG Wei ZHANG Wenbo

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094)

Abstract In order to study the environmental adaptability of nylon in long-life in-orbit spacecraft, space environmental adaptability evaluation indexes of nylon in space environment were proposed, and space environmental adaptability evaluation tests were designed and implemented. The test results show that the nylon shows friendly environmental adaptability in combustion heat, escaping harmful gases, vacuum mass loss and condensable volatiles, antibacterial and mildew resistance, tolerance to alternating temperature, and ionizing radiation. The fracture strength of nylon decreases significantly when subjected to atomic oxygen and ultraviolet radiation in space environment, and the synergistic effect of atomic oxygen and ultraviolet irradiation has a strengthening effect on the mechanical property damage of nylon. The nylon could be used as a material for long-term use in the space cabin environment, When used in the extravestrated environment, special consideration should be given to its mechanical properties under the influence of atomic oxygen and ultraviolet radiation.

Key words Nylon, Space environment, Spacecraft, Adaptability

0 引言

随着航天技术的发展,越来越多的柔性非金属材料应用到航天器上,柔性结构具有可折叠,质量小,展开面积、体积大,可以实现传统刚性结构无法企及的某些功能^[1]。织物材料作为典型的柔性结构材料,在空间柔性可展开结构中有着广泛的应用。锦纶作为常用的合成纤维柔性材料其具有成本低、工艺性能稳定、应用范围广的特点在宇航任务中多次使用^[2],随着航天活动范围的拓展,锦纶材料的应用范围逐渐拓展至环境条件更为苛刻的空间环境领域^[3],且面临长期在轨的任务需求。本文介绍了锦纶材料在空间环境使用的空间环境适应性评价指标,

针对空间环境应用特点,规划并实施了空间环境适应性评价试验。

1 空间环境评价指标

航天器材料的空间环境适应性是其区别于其他材料的一项重要特性^[4-6]。对于在空间环境使用的各种宇航材料及元器件,针对其使用环境开展空间环境适应性研究是必要的^[7-8]。锦纶材料在空间中的应用环境可分为航天器舱内密闭空间环境、舱外环境^[9]。舱内环境的特点为密闭、非真空及无原子氧、紫外辐照。随着载人航天技术的不断发展,舱内环境还需要考虑人员生命安全的问题。出于航天器在轨运行安全性考虑,航天器需要所用材料具有阻

收稿日期:2020-09-29

第一作者简介:隋蓉,1993年出生,硕士,研究方向为航天返回与着陆。E-mail:suirong2011@qq.com

燃性能;为了使航天器的安全防火设计和实施提供依据,需要考察材料燃烧后产物种类和数量、产烟特性。此外,为了对航天器的有害气体控制和实施提供依据,需要对逸出有害气体情况进行评价,对于长寿命航天器在轨使用材料,则需要考虑材料寿命因素对逸出有害气体的影响。在舱内环境使用时,织物材料的抗菌防霉特性也是材料在空间环境应用的一个重要评价指标。对于舱外环境,其环境特点为真空、高低温交变、电离辐射、紫外辐照与原子氧等共存^[10-14]。为了综合评价锦纶材料在空间环境中的应用,针对舱门、舱外环境的特点及航天任务的需求,从燃烧性能、逸出有害气体、真空质损、真空可凝挥发物、抗菌防霉、原子氧、紫外辐照、交变温度、电离辐射9个方面通过试验的方式评价锦纶材料在空间环境中的使用性能。

2 空间环境适应性评价研究

本文所选的材料为K59321锦丝绸,是一种在航空、航天领域广泛使用的锦纶材料,该材料制造原丝为锦纶66。由北京邦维公司生产,执行技术标准Q/WFWF—005—1995。在锦纶材料中具有代表性,试验结果可作为其他锦纶材料应用的参考。

2.1 地面状态阻燃试验

地面状态阻燃试验依据HB5470—2014测试要求和HB5469—2014实验方法进行,试验设备为HVFAA燃烧箱,火焰温度为850℃,试件预处理温度为20~21℃,湿度为48%~52%,预处理时间为24h,分别进行了12s垂直燃烧试验和15s水平燃烧试验。试验结果见表1表2。

表1 K59321锦丝绸12s垂直燃烧试验数据情况

Tab. 1 12 second ignition vertical test of K59321

编号	续燃时间/s	燃烧长度/mm	滴落物燃烧时间/s
1	0	100	0(有)
2	0	100	0(有)
3	0	90	0(有)
均值	0	97	0
标准	15	203	5

表2 K59321锦丝绸15s水平燃烧试验数据情况

Tab. 2 15 seconds horizontal ignition test of K59321

编号	燃烧速率/mm·min ⁻¹
1	0
2	0
3	0
均值	0
标准	64

试验结果表明,K59321锦丝绸的阻燃性能良好,可满足空间环境的使用高要求。

2.2 地面状态燃烧产物试验

地面状态燃烧产物试验,试验依据HB/Z277—1995测试要求和HB7066—1994实验法方法进行试验,试验设备为SD-1-C-X型烟密度箱,试验温度为20~21℃,湿度为48%~52%,预处理时间为24h,热流量为2.5W/cm²,箱体温度为35℃。试验结果如表3所示,燃烧产物远低于HB/Z277—1995标准要求,可满足空间环境的使用。

表3 K59321锦丝绸燃烧产物试验

Tab. 3 Combustion products test of K59321

编号	CO /10 ⁻⁶	HCN /10 ⁻⁶	HF /10 ⁻⁶	HCl /10 ⁻⁶	SO ₂ /10 ⁻⁶	NO _x /10 ⁻⁶
1	33	1	<1.5	<1	1	16
2	37	1	<1.5	<1	1	14
3	40	1	<1.5	<1	1	14
均值	37	1	<1.5	<1	1	15
HB/Z277—1995要求	3500	150	100	150	100	100

2.3 逸出有害气体试验

关于逸出有害气体试验的实验内容包含逸出有害气体检测试验、气味评价试验和脱出一氧化碳试验。气味评价试验时封入60%的氮气,加热50℃,加热时间72h。并在室温条件下进行了气味评价试验,试验通过在1L容器内放置50mL蒸馏水,在23℃条件下放置24h,通过嗅辨原进行气味测试。脱出一氧化碳试验时封入3L的氮气容量至5L的采样袋中,加热至50℃,加热时间为72h,将CO测试仪器的探头伸入被加热好的气体容器中直接测出其浓度。

K59321锦丝绸逸出有害气体试验脱出总有机物检测结果如表4所示。对于空间在轨长期使用的锦纶材料,考虑采用两种不同生产日期的材料进行试验,试验时间为2018年11月,两种材料在试验时的储存时长寿命分别为3个月、6年,结果可知,材料脱出总有机物均满足总体指标要求,新材料的逸出有害气体表现更优。两种生产日期的材料均未见有CO气体脱出。气味评价满足≤1.5级的要求。试验结果充分证明在逸出有害气体指标方面,K59321材料空间环境适应良好。

2.4 真空中材料质量损失及可凝挥发物试验

真空中材料质量损失试验依据《真空中材料挥发性能测试方法》(QJ1558)进行,样品恒温恒湿24h,温度23℃,相对湿度50%;样品真空放气24h,试验温度为75℃,真空度为7mPa,收集板凝结温度为25℃。将锦纶材料制备成试样,在恒温恒湿箱中存放24h后,放入样品舟中。在真空中均匀加热放有

表 4 两个生产日期的 K59321 逸出有害气体试验结果

Tab. 4 Hazardous gas test results of K59321 from 2 production dates

试验项目	检测项目	K59321 锦丝绸检测结果 ¹⁾	
		2012年7月生产	2018年8月生产
逸出有害气体产物检测	苯	0.001 μg/g	0.001 μg/g
	甲苯	0.003 μg/g	0.002 μg/g
	乙苯	N.D.	0.001 μg/g
	二甲苯	N.D.	0.001 μg/g
	其他挥发性有机物 (C6-C16)	0.082 μg/g	0.053 μg/g
	甲醛	N.D.	N.D.
	乙醛	0.005 μg/g	0.007 μg/g
	丙烯醛	N.D.	N.D.
	丙酮	0.012 μg/g	0.007 μg/g
	戊二醛	N.D.	N.D.
	甲醇	N.D.	N.D.
	三氯乙烯	N.D.	N.D.
	乙酸	N.D.	0.001 μg/g
	乙醇	N.D.	N.D.
	二甲甲烷	N.D.	0.002 μg/g
	丁醇	N.D.	N.D.
	二氯乙烷	N.D.	N.D.
	异戊二烯	0.001 μg/g	0.002 μg/g
	氯仿	N.D.	N.D.
	氯乙烯	N.D.	N.D.
甲胺	N.D.	N.D.	
可吸入颗粒物	N.D.	N.D.	
脱出有机物总值		0.104 μg/g	0.077 μg/g
气味评价	嗅辨员 A	1级	1级
	嗅辨员 B	1.5级	1级
	嗅辨员 C	1.5级	1级
	嗅辨员 D	1.5级	1级
	嗅辨员 E	1.5级	1级
脱出 CO 试验	脱出 CO 量	N.D.	N.D.

注:1)N. D. 为未检出

试样的样品舟,使试样出气,出气分子沉积到维持恒定温度的收集板上,通过称量此过程前后放有试样的样品舟的质量变化,经过计算获得总质量损失(TML),并通过称量测试前后收集板质量的变化,经过计算获得收集的可凝挥发物(CVCM)。本方法还可将测试后的试样重新经恒温恒湿存放后,再次称量试样质量,得到水汽回吸量(WVR)。真空中材料质量损失试验结果如表 5 所示。考虑到可凝挥发物是对航天器产品污染的主要因素,就 K59321 锦丝绸

材料而言,由于收集的可凝挥发物实测结果很小,因此可认为 K59321 锦丝绸不会对外界设备造成危害,真空污染性极低。

表 5 K59321 真空质损和可凝挥发物试验结果

Tab. 5 Vacuum mass loss and condensable volatiles of K59321

总质量损失 (TML)	收集的可凝挥发物 (CVCM)	水汽回吸量 (WVR)	%
2.25	0.01	1.97	

K59321 可补偿质量损失(RML)为 0.28%,K59321 锦丝绸总质量损失中大部分是水汽,约占总质量损失部分的 87.6%,其余部分仅约占 12.4%。由于 K59321 锦丝绸由聚酰胺纤维经过整径-织造-染色-定型等一系列工艺过程加工而成。织物材料吸湿性是其普遍特性,锦纶材料的公定回潮率约为 4.5%。织物材料一旦放置在真空环境中,水份会被释放掉,因此,不同于金属材料和其他固体类非金属材料,织物材料因含湿量大,依据可能挥发物测量结果,可认为锦纶材料有极低的真空污染特性。

2.5 抗菌防霉材料试验

锦丝绸抗菌性能测试依据《纺织品抗菌性能的评价》第 3 部分:振荡法进行;防霉性能依据《军用装备实验室环境试验方法》第 10 部分:霉菌试验(GJB150.10A-2019)进行。选用金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌菌种作为试验菌种。

K59321 锦丝绸的抗菌性能试验结果如表 6 所示,防霉性能试验结果如表 7 所示,在舱内环境使用的航天产品,直接暴露在舱内的纺织品材料对金黄色葡萄球菌及大肠杆菌的抑菌率需大于等于 70%,或对白色念珠菌的抑菌率需大于等于 60%。试验结果表明,锦纶材料对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的抑菌率达到 90% 以上,长霉等级优于或等于 1 级,抗菌防霉性能表现出友好的空间环境适应性。

表 6 抗菌性能试验结果

Tab. 6 Antimicrobial performance test results

项目	接种菌液浓度 /10 ⁵ CFU·mL ⁻¹	对照样菌数 均值/CFU·样 ⁻¹		抗菌样	
		0h /10 ⁴	18h 后 /10 ⁷	18h 后菌数均值/10 ⁵ CFU·样 ⁻¹	抑菌率/%
大肠杆菌	3.7	3.5	2.9	9.7	97
金黄色葡萄球菌	4.0	3.7	2.2	16	93
白色念珠菌	3.4	3.3	2.1	2.0	4.8

表7 防霉性能试验结果

Tab. 7 Anti-fungal performance test results

样品名称	长霉等级	长霉程度/%	备注
阴性控制(7d)	4	100	长满
送检样(28d)	0	0	-

2.6 原子氧、紫外辐照试验

原子氧和紫外辐照是空间环境中对材料性能影响显著的两个因素。在200~700 km低地球轨道上同时存在原子氧环境和紫外辐照环境,大量飞行试验和地面模拟试验结果表明,原子氧和紫外环境是造成低地球轨道航天器用表面材料退化的主要原因^[15-16]。

原子氧、紫外辐照试验实施中,分别设计不同试验指标进行对比试验。试验指标以低轨道空间站在轨运行为背景,空间站在轨飞行15 d原子氧注量为 $2.06 \times 10^{24} / \text{m}^2$ 、在轨飞行24 d原子氧注量 $3.29 \times 10^{24} / \text{m}^2$;紫外辐照度为 $81.3 \text{ W} / \text{m}^2$ 。

本次试验将按上述两种试验指标分别进行独立原子氧、独立紫外辐照、原子氧与紫外辐照协同试验。试验全程采取控温措施,将温度控制在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,以消除热效应的附加影响。子样设置方面,按每组试验设置4个子样,考虑到试验后便于协同试验与独立试验的对比分析及对材料强力的影响趋势分析,并设置空白对照组(不进行原子氧和紫外辐照)。试验共分为7组,具体试验工况见表8。

表8 试验组工况介绍

Tab. 8 Working conditions of the test group

试验名称	试验类型	试验指标
原子氧1	原子氧	$2.06 \times 10^{24} / \text{m}^2$
原子氧2	原子氧	$3.29 \times 10^{24} / \text{m}^2$
紫外辐照1	紫外辐照	辐照度 $81.3 \text{ W} / \text{m}^2$,辐照时长15 d
紫外辐照2	紫外辐照	辐照度 $81.3 \text{ W} / \text{m}^2$,辐照时长24 d
协同1	原子氧+紫外辐照	原子氧 $2.06 \times 10^{24} / \text{m}^2$ 叠加紫外辐照辐照度 $81.3 \text{ W} / \text{m}^2$,15 d
协同2	原子氧+紫外辐照	原子氧 $3.29 \times 10^{24} / \text{m}^2$,叠加紫外辐照辐照度 $81.3 \text{ W} / \text{m}^2$,24 d
空白对照	空白对照	-

试验件力学性能通过特纺材料拉力试验机测试。试验件经过原子氧紫外辐照后强度均有所下降,按均值分析,以空白对照组作为参考,计算试验件在环境试验后断裂强力的下降比例,见表9。试验结果表明,在经历单一紫外辐照与单一原子氧环境

表9 试验件断裂强力下降比例

Tab. 9 Percentage decrease of test piece breaking strength %

原子氧1	原子氧2	紫外辐照1	紫外辐照2	协同1	协同2
19.74	37.21	23.41	27.05	60.51	71.17

后,锦纶材料的断裂强力均有明显的下降。而原子氧与紫外辐照的协同作用对锦纶材料力学性能的破坏效果大于单因素作用效果,分析造成这一现象的原因是紫外辐照破坏材料化学键,而化学键的断裂为原子氧的侵蚀提供了通道,加速了原子氧与锦纶材料的氧化反应^[15]。

2.7 交变温度

航天器在轨运行期间其表面温度会呈现交替变化的特点,为了研究锦纶材料在高低温交变环境下的力学特性,开展锦纶材料交变温度循环试验。温度循环试验工况定为 $-70 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温箱的升/降温速度为 $3 \text{ }^\circ\text{C} / \text{min}$ 。试验参考《航天器热控涂层试验方法 第8部分:热循环试验》(GJB 2502.8—2015)进行,热循环次数300次。每40 min经历一次高低温循环。试验设置空白对照组。温循试验后与空白对照组对比,从断裂强力随温循次数的变化曲线来看(图1),断裂强力受温循次数影响小,几乎无变化。

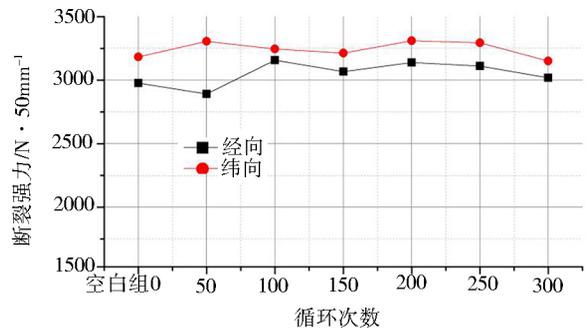


图1 断裂强力平均值随温循次数变化曲线

Fig. 1 Variation of average breaking strength with temperature cycle number

2.8 电离辐射

空间中的带电粒子辐射主要成分由质子、电子和各种离子,可能会对航天器材料造成辐射损伤,为了考察锦纶材料的抗电离辐射性能,开展锦纶材料的电离辐射试验。锦纶在经过最大剂量为9 666 rad的辐射后测量其力学性能(断裂强力和断裂伸长率)的损失情况见图2。

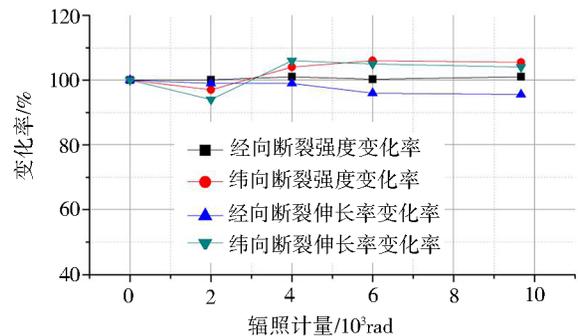


图2 断裂强力、断裂伸长率随电离辐射剂量变化曲线

Fig. 2 Variation of fracture strength and elongation with dose of ionizing radiation

分析试验结果,考虑到织物材料本身力学性能具有一定的离散性,可认为试验件经Co-60 γ 射线辐射源照射,总吸收剂量为9 666 rad时,断裂强力与断裂伸长率均未发生明显变化。锦纶材料表现出优异的电离辐射性能。

3 结论

本文介绍了锦纶材料在空间环境使用的空间环境适应性评价指标,针对空间环境应用特点,规划并实施了空间环境适应性评价试验,并介绍了相关试验的试验过程及如下结论:

(1)锦纶材料在燃烧性能、逸出有害气体、真空质损和可凝挥发物、抗菌防霉、耐受交变温度、电离辐射中表现出友好的环境适应性;

(2)在遭受原子氧、紫外辐射时材料的力学性能会有明显下降,且原子氧与紫外辐射协同效果对锦纶材料的力学性能破坏具有加强效果;

(3)锦纶材料可作为空间舱内环境长期使用的材料,在舱外环境使用时,需要特别考虑其力学特性受到原子氧、紫外辐射的影响。

本文提供了详细的试验数据,可以作为航天产品设计工作的参考。

参考文献

[1] 王长国,卫剑征,刘宇艳,等. 航天柔性展开结构技术及其应用研究进展[J]. 宇航学报,2020,41(6):761-769.

WANG Changguo, WEI Jianzheng, LIU Yuyan, et al. Some advances in technologies of aerospace flexible deployable structure and their applications [J]. Journal of Astronautics, 2020,41(6):761-769.

[2] 付新卫,孟少华,周印佳,等. 柔性可展开太空舱研究进展[J]. 航天返回与遥感,2020,41(3):37-46.

FU Xinwei, MENG Shaohua, ZHOU Yinjia, et al. Investigation development on space inflatable capsule [J]. Space Recovery & Remote Sensing, 2020,41(3):37-46.

[3] 蔡光明,于伟东. 空间环境下柔性材料的老化性能研究现状[J]. 纺织学报,2008,29(12):131-136.

CAI Guangming, YU Weidong. Current status of research on flexible materials aging properties in space environment [J]. Journal of Textile Research, 2008,29(12):131-136.

[4] 冯伟泉. 航天器材料空间环境适应性评价与认定准则研究[J]. 航天器环境工程,2010,27(2):139-143.

FENG Weiquan. Evaluation and validation of space environmental applicability of spacecraft materials [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010,27(2):139-143.

[5] 李涛,易忠,高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. 装备环境工程,2012,9(3):37-40.

LI Tao, YI Zhong, GAO Hong. Summarization space environmental worthiness evaluation technology for spacecraft material [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012,9(3):37-40.

[6] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2013.

SHEN Zicai. Space radiation environment engineering [M]. Beijing:China Aerospace Publishing House,2013.

[7] 雷尧飞,韩妙玲,艾素芬,等. 低密度气凝胶复合材料的火星环境适应性研究[J]. 宇航材料工艺,2019,49(06):86-90.

LEI Yaofei, HAN Miaoling, AI Sufen F, et. al. The adaptability of low-density aerogel composites to mars environment [J]. Areospace Matirials and Technology, 2019,49(06):86-90.

[8] 张静静,孙明,汪洋,等. 5229D/T700导电环氧复合材料空间环境适应性研究[J]. 宇航材料工艺,2018,48(5):49-51,67.

ZHANG Jingjing, SUN Ming, WANG Yang, et. al. Space environmental suitability of 5229d/t700 conductive epoxy composites [J]. Areospace Matirials and Technology, 2018,48(5):49-51,67.

[9] 沈自才,高鸿,欧阳晓平. 航天材料工程学内涵及其体系构建[J]. 宇航材料工艺,2018,48(2):1-6.

SHEN Zicai, GAO Hong, OUYANG Xiaoping. Connotation and system construction of aerospace material engineering [J]. Areospace Matirials and Technology, 2018,48(2):1-6.

[10] HNCKENOR M M. The Materials on international spacestation experiment (MISSE): first results from msfe investigations[R]. AIAA,2006:1-9.

[11] 沈自才,邱家稳,丁义刚,等. 航天器空间多因素环境协同效应研究[J]. 中国空间科学技术,2012(5):54-60.

SHEN Z C, QIU J W, DING Y G, et al. Study on synergistic effect of space environments on spacecraft [J]. Chinese Space Science and Technology, 2012(5):54-60.

[12] 翟睿琼,任国华,田东波,等. 低轨道紫外、带电粒子、热循环与原子氧协同效应研究进展[J]. 真空,2019,56(1):72-76.

ZHAI Ruiqiong, REN Guohua, TIAN Ddongbo, et al. Advances in research on low-orbit ultraviolet, charged particles, thermal cycling and atomic oxygen synergistic effects [J]. VACUUM, 2019,56(1):72-76.

[13] 王正义,尹钊,杨金禄,等. 载人空间站工程航天技术试验领域项目遴选程序初探[J]. 航天器环境工程,2020,37(5):452-457.

WANG Zengyi, YIN Zhao, YANG Jinlu, et. al. Procedures of project selection of aerospace technology experiment for manned space station [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020,37(5):452-457.

[14] 沈自才,姜海富,徐坤博,等. 航天材料空间环境效应损伤机制及关联性研究[J]. 宇航材料工艺,2016,46(2):1-8.

SHEN Zicai, JIANG Haifu, XU Kunbo. Damage mechanisms and their correlations of spacecraft materials in space environments [J]. Areospace Matirials and Technology, 2016,46(2):1-8.

[15] KOONTZ S, LEGER L, ALLBYN K, et al. VUV radiation/AO synergism in materials reacting [J]. Journal of Spacecraft, 1990,27(3):346-348.

[16] DEVER J A, BRUCKNER E J, RODRIGUEZ E. Synergistic effects of ultraviolet radiation, thermal cycling and atomic oxygen on altered and coated Kapton surface [C]. 30th Aerospace Sciences Meeting&Exnibit, 1992:0794.