

# J312L结构胶空间辐射环境适应性研究

张静静<sup>1</sup> 朱旭斌<sup>2</sup> 李岩<sup>1</sup> 高鸿<sup>1</sup> 邢焰<sup>1</sup>

(1 中国空间技术研究院, 北京 100094)

(2 中国航天标准化与产品保证研究院, 北京 100071)

**文 摘** 为考察空间辐射环境对J312L结构胶性能的影响,通过电子扫描电镜(SEM)、傅里叶红外光谱(FT-IR)、X射线光电子能谱(XPS)、热重分析仪(TGA)、差示扫描量热仪(DSC)、真空出气和力学性能测试,研究了辐射对J312L结构胶的微观形貌、分子结构、耐热特性、污染特性和力学性能的影响,并对材料辐射老化机制进行了分析。结果表明总剂量辐射对J312L结构胶耐热、真空污染和力学特性影响显著。1.5×10<sup>9</sup> rad(Si)<sup>60</sup>Co γ射线辐射后胶黏剂拉伸剪切强度为4.8 MPa,真空总质量损失(TML)为2.36%。与初始相比,玻璃化转变温度和5%热分解温度分别降低了31和84 °C,表明高剂量作用下胶黏剂以辐射降解为主。

**关键词** 航天器,结构胶,辐射,环境适应性

中图分类号:V45

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.022

## Research on Space Irradiation Environment Adaptability of J312L Structural Adhesive

ZHANG Jingjing<sup>1</sup> ZHU Xubin<sup>2</sup> LI Yan<sup>1</sup> GAO Hong<sup>1</sup> XING Yan<sup>1</sup>

(1 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(2 China Academy of Aerospace Standardization and Product Assurance, Beijing 100071)

**Abstract** To investigate the influence of space irradiation on the properties of J312L structural adhesive, micromorphology, molecular structure, heat resistance, vacuum pollution and mechanical properties of J312L were analyzed by SEM, FT-IR, XPS, TGA, DSC, vacuum outgassing and mechanical test. The irradiation aging mechanism of material was investigated. The results show that the total dose irradiation has a significant effect on the thermal stability, vacuum outgassing and mechanical properties of J312L adhesive. After 1.5×10<sup>9</sup> rad(Si) γ-ray irradiation from <sup>60</sup>Co, the tensile shear strength is 4.8 MPa, and the total vacuum mass loss (TML) is 2.36%. Compared to that of the initial, the glass transition temperature and the thermal decomposition temperature ( $T_d$  5%) are reduced by 31 °C and 84 °C, respectively, indicating that the J312L adhesive is dominated by the degradation reactions within high-dose radiation.

**Key words** Spacecraft, Structural adhesives, Irradiation, Environmental adaptability

### 0 引言

胶黏剂作为航天器型号产品重要的粘接材料,是航天器填充、承力、连接、密封以及防热等五大结构产品中使用最为广泛的一类关键材料<sup>[1]</sup>。在航天器研制生产过程中一些受力部件之间的粘接要求强度高、耐久性好,需要胶接接头所能承受的应力与被粘基材本身的强度相当。科研人员通常将用于此类受力结构件胶接的胶黏剂称之为结构胶黏剂<sup>[2-3]</sup>,并且针对其温度、湿热、盐雾等地面装备环境耐受性开展了大量的研究

工作<sup>[4-7]</sup>,但对其辐射环境耐受性研究相对较少,目前辐射耐受性研究主要集中在环氧、硅橡胶等树脂基体,以及树脂基复合材料上<sup>[8-10]</sup>。

J312L结构胶因其优异的胶接强度和耐温特性可作为航天器太阳翼基板蜂窝夹层结构的粘接材料使用,其主要作用是通过胶粘实现蜂窝与网格板间的有效连接,为太阳电池片和电路提供具有规定刚度和强度的安装平面和支撑结构,确保电池片能在轨正常发电供电<sup>[11-12]</sup>。太阳翼作为舱外产品,其在轨服役过程中会

收稿日期:2022-09-05

第一作者简介:张静静,1982年出生,博士,高级工程师,主要从事航天器用非金属材料质量保证和服役可靠性研究工作。E-mail: naokojj@126.com

通信作者:李岩,1980年出生,博士,高级工程师,主要从事航天器用材料质量保证和服役可靠性研究工作。E-mail: liyan1123@126.com

经历更为严苛的辐射环境,而辐射通常会引起胶黏剂粘接特性的变化,可能会出现板-芯脱粘等损伤,进而产生面板凸起、鼓包等问题,造成电池片的鼓起弯折甚至碎裂,影响航天器电源系统的可靠性及在轨寿命,因此太阳翼基板用结构胶的环境适应性研究对其应用尤为重要<sup>[13]</sup>。本文对不同剂量辐射后 J312L 结构胶黏剂的力学、热学、真空污染特性进行系统测试,研究辐射对结构胶黏剂功能特性、耐热特性和污染特性影响规律和程度,考察 J312L 结构胶黏剂辐射耐受性,并通过化学结构和微观形貌等表征方式探索辐射对结构胶黏剂的损伤机理。

## 1 实验

### 1.1 原材料

2A12 铝合金,西南铝业(集团)有限责任公司,表面磷酸阳极化处理<sup>[14]</sup>;J312L 结构胶黏剂。

### 1.2 试样制备

#### 1.2.1 拉伸剪切强度试样

拉伸剪切强度试样采用铝-铝粘接形式,单个铝合金试片尺寸为 70 mm×20 mm×3 mm,控制搭接长度为 (15±0.5) mm,固化制度为 125 °C/90 min。

#### 1.2.2 胶黏剂浇注体

将 J312L 结构胶黏剂置于不锈钢的模具中,在 125 °C 下固化 90 min,获取浇注体用于辐射前后结构胶 IR、TGA、DSC 以及真空出气性能测试。

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 拉伸剪切强度及形貌

J312L 结构胶黏剂拉伸剪切强度采用 INSTRON 5967 万能试验机进行测试,测试采用应力控制,拉伸速率为 9.8 MPa/min。拉伸剪切强度测试后破断面形貌采用 Merlin 扫描电镜进行测试。

#### 1.3.2 化学结构

J312L 结构胶黏剂红外光谱采用 Vertex 70 V 傅里叶变换红外光谱仪进行测试,测试采用 ATR 模式,光谱范围为 400~4 000 cm<sup>-1</sup>。表面元素状态采用 Kratos Axis Ultra-DLD 型 X 射线光电子能谱仪进行测试。

#### 1.3.3 耐热特性

结构胶黏剂玻璃化转变温度( $T_g$ )采用 DSC 214 Polyma 差示扫描量热仪进行,测试采用氮气气氛,气体流量 40 mL/min,温度范围 0~200 °C,升温速率 20 °C/min。结构胶黏剂热失重温度采用 STA449 同步热分析仪进行,测试采用氮气气氛,气体流量 20 mL/min,温度范围 30~700 °C,升温速率 10 °C/min。

#### 1.3.4 真空挥发性能

胶黏剂真空总质量损失、可凝挥发物、水汽回吸量采用真空出气设备进行,具体方法按照 QJ 1558B—2016 中的规定进行,样品测试前置于温度为 (23±2) °C,相对

湿度为 50%±5% 的恒温恒湿箱中平衡处理 24 h,测试时设备真空度优于 7 mPa,测试温度为 (125±1) °C,冷凝板温度为 (25±1) °C,测试时间为 24 h。

### 1.3.5 钴源辐射试验

胶黏剂空间辐射服役可靠性采用 <sup>60</sup>Co- $\gamma$  射线放射源,辐射过程中辐射源场的不均匀性控制在 10% 以内。共计设置六个辐射剂量检验点,分别为: 5×10<sup>7</sup>、1×10<sup>8</sup>、6×10<sup>8</sup>、8×10<sup>8</sup>、1.0×10<sup>9</sup>、1.5×10<sup>9</sup> rad(Si),其中 1.5×10<sup>9</sup> rad(Si)可覆盖航天器高轨 15 a 最大辐照剂量。为排除氧效应,真实模拟太阳翼基板用结构胶在轨运行时的无氧辐射环境,采取真空封管方式对结构胶黏剂浇注体和拉伸剪切试样进行隔绝氧气处理。当辐射总剂量达到规定的检验点时,按照前述方法进行拉伸剪切强度、破坏形貌、化学结构、耐热、真空污染特性测试。

## 2 结果及讨论

### 2.1 辐射对结构胶黏剂力学特性的影响

不同剂量辐射后 J312L 结构胶黏剂力学性能测试结果详见表 1,误差图见图 1。

表 1 辐射前后 J312L 结构胶黏剂力学性能测试结果  
Tab. 1 Mechanical properties of J312L structural adhesive before and after irradiation

辐射剂量/10 <sup>8</sup> rad(Si)	拉伸剪切强度/MPa	离散系数/%
0	34.8	2.2
0.5	34.9	3.2
1	32.7	5.9
6	11.3	9.7
8	9.35	25.7
10	9.10	35.3
15	4.80	25.1

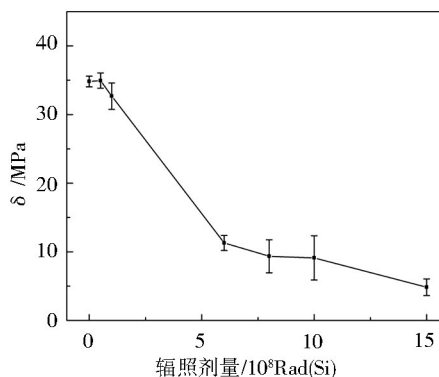


图 1 辐射前后 J312L 结构胶拉伸剪切强度测试误差图  
Fig. 1 Error graph of tensile-shear strength of J312L structural adhesive before and after irradiation

可见与辐射前相比,虽然 5×10<sup>7</sup> rad(Si)的总剂量辐射后结构胶拉伸剪切强度有 0.1 MPa 的轻微升高,但其离散系数变大,从图 1 可以看出结构胶辐射前强度数值



均落在辐射后强度数值的误差棒内,可认为  $5 \times 10^7$  rad(Si) 总剂量辐射前后结构胶黏剂拉伸剪切强度无变化,推测可能的原因为  $5 \times 10^7$  rad(Si) 辐射过程中结构胶内部辐射交联与辐射裂解作用相抵消,未能引起胶黏剂力学性能的退化。当剂量增加至  $1 \times 10^8$  rad(Si) 时,胶黏剂拉伸剪切强度出现轻微降低,为 32.7 MPa,但仍然在 30 MPa 以上,具有优异的胶接强度。随着辐射剂量的进一步增加,胶黏剂拉伸剪切强度呈现逐渐降低的趋势,当辐射剂量增大至  $6 \times 10^8$  rad(Si) 时,力学性能出现了急剧的下降,由初始的 34.8 MPa 下降至 11.3 MPa,强度保持率为 32.5%,随着辐射剂量的增加,拉伸剪切

强度进一步降低,  $1.5 \times 10^9$  rad(Si) 时,拉伸剪切强度仅为 4.8 MPa。表明辐射剂量达到  $6 \times 10^8$  rad(Si) 及以上时,结构胶辐射裂解占主导,无论是胶黏剂本体的内聚强度还是与铝合金间的界面结合强度均出现了急剧的降低,使得胶接强度大幅下降,实际使用时应关注不同剂量辐射后结构胶力学性能的退化程度,并根据结构对载荷的需求评估结构胶的服役寿命,确保其安全性。

## 2.2 辐射对结构胶黏剂拉伸剪切断口形貌的影响

辐射前后 J312L 结构胶拉剪测试破断面 SEM 形貌如图 2 所示。

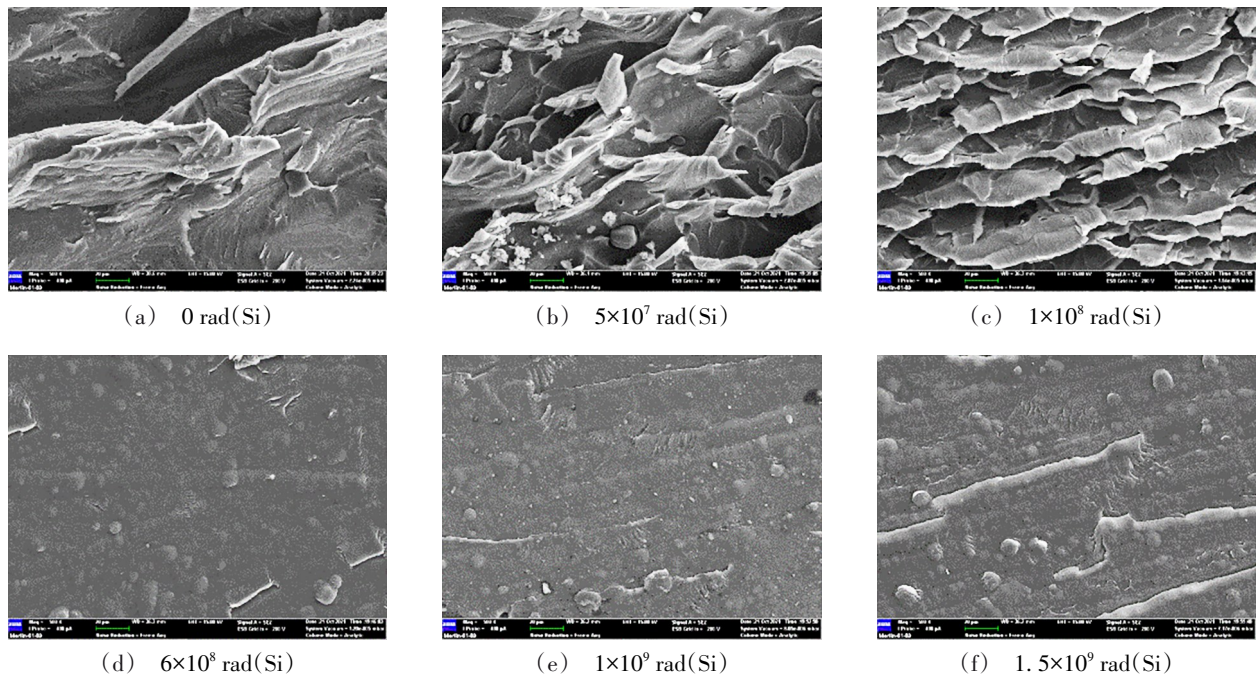


图 2 辐射前后 J312L 结构胶拉伸剪切断口试样断面 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of J312L structural adhesive before and after irradiation

可见辐射前、 $5 \times 10^7$  和  $1 \times 10^8$  rad(Si) 辐射后胶黏剂拉剪测试均为内聚破坏,当辐射剂量达到  $6 \times 10^8$  rad(Si) 及以上时均为界面脱粘,与  $6 \times 10^8$  rad(Si) 辐射试验后拉伸剪切强度迅速降低结果相一致。且从拉伸剪切断口试样破断面胶层形貌可以进一步观察到剂量  $\leq 1 \times 10^8$  rad(Si) 时断面粗糙,小裂纹的弯曲变形十分明显,表现出明显的韧性断裂特征,说明 J312L 结构胶黏剂本体韧性较好,低剂量辐射未引起材料显著的脆化。

## 2.3 辐射对结构胶黏剂化学结构的影响

辐射前后 J312L 结构胶红外谱如图 3 所示,  $3035 \text{ cm}^{-1}$  处为苯环上不饱和碳氢( $\text{C}=\text{C}-\text{H}$ )伸缩振动特征峰,  $2850 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2918 \text{ cm}^{-1}$  和  $2963 \text{ cm}^{-1}$  为甲基( $\text{CH}_3$ )和亚甲基( $\text{CH}_2$ )对称和反对称伸缩振动特征峰,  $1504 \text{ cm}^{-1}$  和  $1604 \text{ cm}^{-1}$  为苯环骨架碳碳双键( $\text{C}=\text{C}$ )的伸缩振

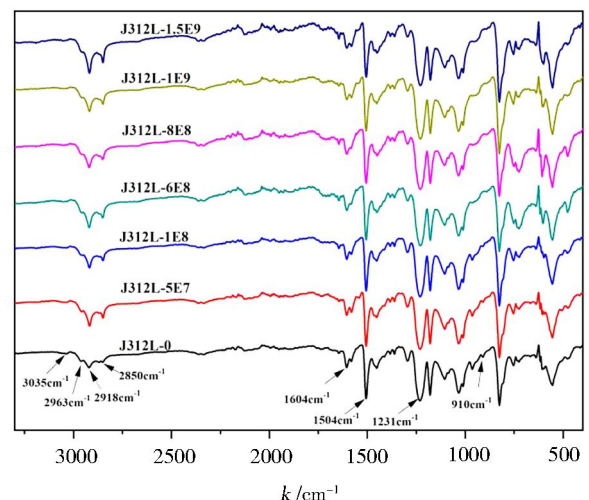


图 3 辐射前后 J312L 结构胶辐射前后红外光谱

Fig. 3 The FT-IR spectra of J312L structural adhesive before and after irradiation

动特征峰,  $1\ 231\ \text{cm}^{-1}$  为醚键(C—O—C)反对称伸缩振动特征峰,  $910\ \text{cm}^{-1}$  为环氧基团对称伸缩振动特征峰。由图3可见辐射后结构胶的环氧基团特征峰进一步减弱,说明辐射引起了胶黏剂的深度固化,但不同剂量辐射后碳氢键、醚键以及苯环骨架碳碳双键特征峰均无明显变化,也无新的特征峰出现,即辐射过程中未产生

新类型的特征官能团。

为进一步探讨辐射对J312L结构胶化学结构的影响,采用XPS对辐射前后的样品进行了表面元素检测,对C1s谱进行分峰拟合呈3个次峰,具体情况见图4。

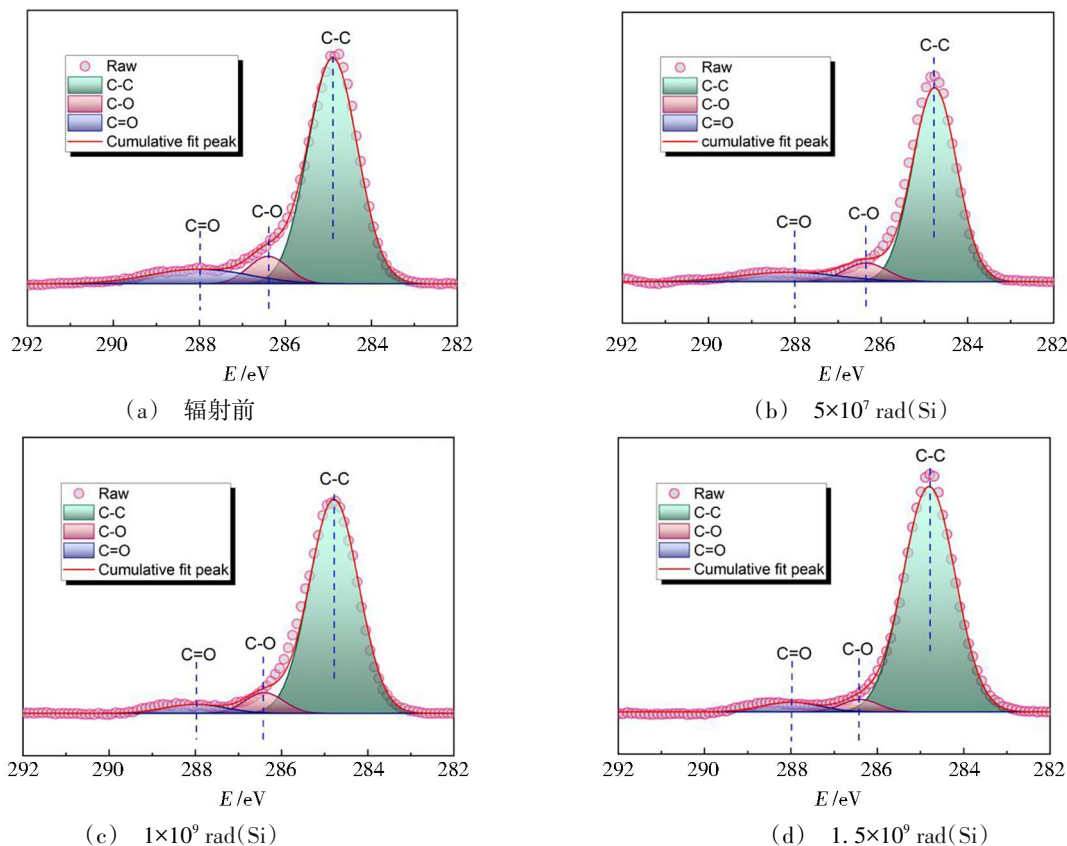


图4 辐射前后J312L结构胶XPS C1s谱图

Fig. 4 XPS C1s spectra of J312L structural adhesive before and after irradiation

在284.9 eV附近出现了C—C的特征峰,该处也包含C—H,在286.4 eV附近出现了C—O的特征峰,在288.1 eV附近出现了C=O的特征峰。

从表2中给出的半峰宽和面积比的数据可以发现,随着辐射剂量的增加,C—C的占比呈现逐渐升高的趋势,C—O和C=O的占比呈现逐渐降低的趋势,说明辐射引起了胶黏剂表面碳的富集<sup>[15]</sup>。分析其主要原因为高能 $\gamma$ 射线作用下结构胶内部结合能较低的碳氧、碳碳键发生断裂,形成活性自由基,自由基一方面产生CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等辐射气体,另一方面通过相互碰撞发生辐射交联,即J312L辐射过程中交联和降解反应同时发生。当辐射剂量为 $5 \times 10^7\ \text{rad}(\text{Si})$ 时,C—O和C=O的占比降低幅度较小,即交联反应可以抵消降解反应对胶黏剂的影响,当辐射剂量进一步增大时,辐射降解占据优势,大分子结构

发生降解,并以小分子形式逸出<sup>[16-17]</sup>。

## 2.4 辐射对结构胶黏剂热稳定性的影响

辐射前后J312L结构胶DSC曲线如图5所示,可见随着辐射剂量的增加胶黏剂 $T_g$ 整体呈下降趋势,但降低程度略有不同。当总剂量低于等于 $1 \times 10^8\ \text{rad}(\text{Si})$ 时, $T_g$ 呈现缓慢的降低趋势,与辐射前相比最多降低了7℃,说明辐射初期胶黏剂辐射产生的自由基通过相互碰撞发生交联反应,缓解了辐射裂解对胶黏剂的损伤<sup>[18]</sup>。当辐射剂量达到 $6 \times 10^8\ \text{rad}(\text{Si})$ 时, $T_g$ 出现了25℃的急剧下降,说明辐射作用下胶黏剂内部发生了明显的降解,随着辐射剂量的进一步增大 $T_g$ 降低程度趋于缓和, $1.5 \times 10^9\ \text{rad}(\text{Si})$ 辐射作用后胶黏剂 $T_g$ 较 $6 \times 10^8\ \text{rad}(\text{Si})$ 辐射样品低6℃,说明结构胶的主体结构随着辐射剂量的进一步增加变化不剧烈,这主要归因于胶黏剂内部苯环的存在,相比于烷基链苯环的共轭结构比较稳定,能吸收 $\gamma$ 射线辐射能,在辐射场中能较稳定地存在<sup>[19-20]</sup>。



表2 辐射前后 J312L 结构胶 XPS 分峰结果

Tab. 2 Results of the separated peaks in XPS spectra of J312L structural adhesive before and after irradiation

辐射剂量 /rad(Si)	化学键	结合能 /eV	半峰宽 /eV	占比 /%
0	C—C	284.9	1.36	81.6
	C—O	286.4	1.08	7.9
	C=O	288.0	2.71	10.5
5×10 <sup>7</sup>	C—C	284.9	1.20	83.2
	C—O	286.4	1.18	7.7
	C=O	288.1	2.71	9.0
1.0×10 <sup>9</sup>	C—C	284.8	1.35	88.8
	C—O	286.4	1.05	6.7
	C=O	288.0	1.67	4.6
1.5×10 <sup>9</sup>	C—C	284.8	1.72	92.0
	C—O	286.4	1.01	3.6
	C=O	288.0	1.57	4.3

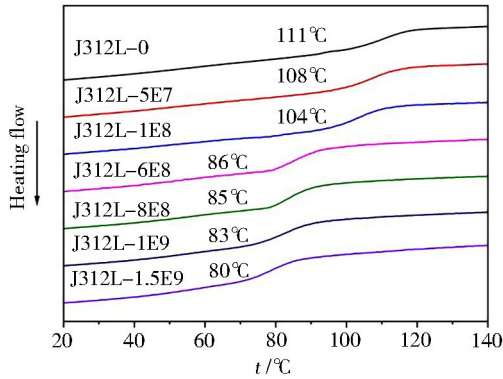


图5 辐射前后 J312L 结构胶黏剂 DSC 曲线

Fig. 5 The DSC spectra of J312L structural adhesive before and after irradiation

图6和图7分别为J312L结构胶辐射前后TGA和DTG曲线,其1%、5%热失重温度和最大失重速率温度见表3,可见随着辐射剂量的增加1%和5%热失重温度均呈现先缓慢后快速降低的趋势。辐射初期[1×10<sup>8</sup> rad(Si)]5%热失重温度相较于辐射前仅降低4℃,且从DTG曲线中也未发现低温段热失重速率的明显变化,表明辐射初期未引起结构胶热稳定性的显著降低。当辐射剂量进一步增加,5%热失重温度开始持续地快速降低,6×10<sup>8</sup>、8×10<sup>8</sup>、1×10<sup>9</sup>和1.5×10<sup>9</sup> rad(Si)辐射后胶黏剂5%热失重温度与辐射前相比分别降低了50、57、63和84℃,说明高剂量的辐射对胶黏剂的耐热特性影响较大。对DTG曲线进一步分析可知,辐射后胶黏剂主要的热失重峰仍在410℃附近,变化不明显,但随着辐射剂量的增高,低温段热失重速率变化逐渐增大,当剂量达到1.5×10<sup>9</sup> rad(Si)时,在150℃附近已经出现了明显的失重峰,这是由

于γ射线作用下胶黏剂发生了明显的辐射裂解,生成了大量的小分子低聚物,在升温过程中这部分低聚物优先发生热裂解<sup>[16]</sup>。

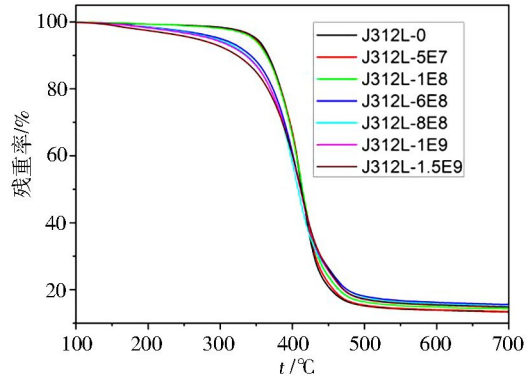


图6 辐射前后 J312L 结构胶 TGA 曲线

Fig. 6 The TGA spectra of J312L structural adhesive before and after irradiation

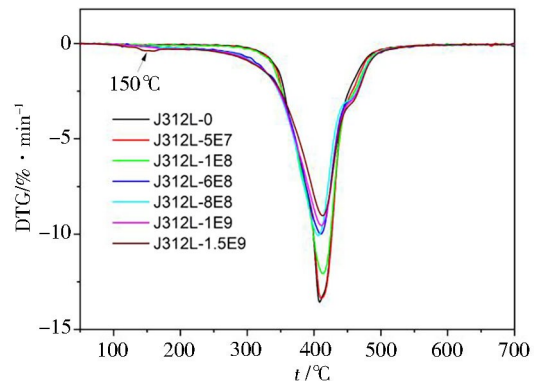


图7 辐射前后 J312L 结构胶 DTG 曲线

Fig. 7 The DTG spectra of J312L structural adhesive before and after irradiation

表3 辐射前后 J312L 结构胶耐热特性

Tab. 3 Heat-resistant properties of J312L structural adhesive before and after irradiation

辐射剂量 /10 <sup>8</sup> rad(Si)	1% 热失重 温度/°C	5% 热失重 温度/°C	最大失重速率 温度/°C
0	250	350	408
0.5	242	348	411
1	239	346	413
6	175	300	410
8	172	293	406
10	170	287	411
15	149	266	413

## 2.5 辐射对结构胶黏剂真空污染特性的影响

辐射前后 J312L 结构胶真空总质量损失(TML)、可凝挥发物(CVCM)和水汽回吸量(WVR)真空出气测试结果详见表4,辐射前结构胶黏剂TML、CVCM分别为0.91%和0.03%,满足宇航要求的TML≤1%、CVCM≤0.1%的指标要求。辐射后结构胶黏剂TML

随着辐射剂量的增加,呈现先升高,然后趋于平稳,最后显著增加的趋势,当达到 $1.5 \times 10^9$  rad(Si)时TML达到2.36%,其变化趋势与辐射后结构胶黏剂1%热失重温度变化趋势相一致,表明真空总质量损失除受胶黏剂自身小分子助剂含量的影响外,还与辐射裂解产生的低分子量物质的含量有关。但辐射对结构胶黏剂CVCM的影响不显著,说明辐射后的胶黏剂挥发物主要以 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下不可凝结的小分子物质为主,对 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的敏感表面无污染危害,但实际使用时也应关注小分子物质的产生是否对周围单机产生次生危害。

表4 辐射前后J312L结构胶真空出气特性

Tab. 4 Outgassing properties of J312L structural adhesive before and after irradiation

辐射剂量 / $10^8$ rad(Si)	before and after irradiation		
	总质量损失 /%	可凝挥发物 /%	水汽回吸量 /%
0	0.91	0.03	0.45
1	1.25	0.01	0.36
6	1.86	<0.01	0.29
8	1.84	<0.01	0.28
10	1.83	<0.01	0.21
15	2.36	0.01	0.32

### 3 结论

(1)辐射初期胶黏剂内部辐射交联和辐射降解同时存在,且辐射交联可在一定程度上抵消掉部分的辐射降解作用,粘接性能退化缓慢, $1 \times 10^8$  rad(Si)辐射后,拉伸剪切强度为32.7 MPa,强度保持率高达94%,辐射后期胶黏剂内部以辐射降解为主, $1.5 \times 10^9$  rad(Si)辐射后,拉伸剪切强度降至4.8 MPa,辐射过程中胶黏剂拉伸剪切强度呈现先缓慢降低然后急剧退化的趋势,实际使用时,可根据不同剂量辐照后结构胶拉伸剪切强度退化程度进行力学性能的设计校核,为航天器产品的合理选材提供支撑数据。

(2)辐射后J312L结构胶 $T_g$ 和热失重温度均呈现了明显的降低趋势,与初始相比, $1.5 \times 10^9$  rad(Si)辐射后胶黏剂 $T_g$ 降低了 $31\text{ }^\circ\text{C}$ ,5%热失重温度降低了 $84\text{ }^\circ\text{C}$ ,耐温特性显著降低,在轨使用时应关注耐热特性降低对单机产品的影响,避免胶黏剂遭遇极端的高温环境。

(3)辐射对J312L结构胶真空总质量损失影响显著, $1.5 \times 10^9$  rad(Si)辐射后TML为2.36%,较辐射前明显升高,但其CVCM仅为0.01%,对 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的敏感表面无污染危害。

(4)XPS数据表明J312L辐射过程中交联和降解反应同时发生,当辐射剂量较大时,辐射裂解占主导,大分子结构发生降解,并以小分子形式从体系内

逸出。

### 参考文献

[1] 邢焰,王向轲. 航天器材料[M]. 北京:北京理工大学出版社,2018:238.

XING Yan, WANG Xiangke. Spacecraft materials [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018:238.

[2] 李皓鹏,赵贺一,殷永霞,等. 耐 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 太阳翼基板结构胶黏剂性能研究[J]. 宇航材料工艺,2021,51(5):99-102.

LI Haopeng, ZHAO Heyi, YIN Yongxia, et al. Properties research of  $150\text{ }^\circ\text{C}$  -resistant structural adhesive on solar wing substrate [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(5): 99-102.

[3] 张玉龙. 环氧胶黏剂[M]. 北京:化学工业出版社,2017:1-6.

[4] MORGADO M A, CARBAS R J C, SANTOS D G D, et al. Strength of CFRP joints reinforced with adhesive layers [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 97: 102475.

[5] PARK Y B, SONG M G, KIM J J, et al. Strength of carbon/epoxy composite single-lap bonded joints in various environmental conditions [J]. Composite Structures, 2010, 92(9):2173-2180.

[6] 张静静,高鸿,刘泊天,等. 在轨温度环境对J-47C胶黏剂粘接性能的影响[J]. 宇航材料工艺,2015,45(1):37-39.

ZAHANG Jingjing, GAO Hong, LIU Botian, et al. Effects of thermal environment in orbit on adhesive properties of J-47C adhesive [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(1): 37-39.

[7] 贾彩霞,梁禄忠,王琦,等. 环境升温过程对常温固化环氧树脂热力学性能的影响[J]. 装备环境工程,2018,15(2):19-23.

JIA Caixia, LIANG Luzhong, WANG Qi, et al. Effects of environment temperature rising process on thermodynamic performance of normal temperature curing epoxy resin [J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 19-23.

[8] 李岩,刘泊天,张静静,等. MD-130胶黏剂固化工艺及空间适用性研究[J]. 宇航材料工艺,2015,45(1):40-42.

LI Yan, LIU Botian, ZHANG Jingjing, et al. Solidification and space adaptability of MD-130 adhesive [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(1):40-42.

[9] 陈洪兵,秦梓铭,王浦澄,等. 硅橡胶辐射老化的研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2020,38(3):1-9.

CHEN Hongbing, QIN Ziming, WANG Pucheng, et al. Recent progress in irradiation-induced aging of silicones [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, 38(3):1-9.

[10] 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]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(5): 49-51, 67.

- [11] 商红军,任守志,盛聪,等. 高分多模卫星高刚度太阳翼机构设计与验证[J]. 航天器工程, 2021, 30(3): 156-163.
- SHANG Hongjun, REN Shouzhi, SHENG Chong, et al. Mechanical design and verification of GFDM-1 satellite high-stiffness solar arrays[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(3): 156-163.
- [12] 张帆,陈绍广,王佳禹,等. 聚酰亚胺薄膜与太阳翼基板粘贴技术研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(3): 60-63.
- ZHANG Fan, CHEN Shaoguang, WANG Jiayu, et al. Study on bonding technology of polyimide film and solar wing substrate[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(3): 60-63.
- [13] 李炳蔚,牛智玲,张子骏,等. 装备环境适应性闭环管控方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 24-28.
- LI Bingwei, NIU Zhiling, ZHANG Zijun, et al. Research on the closed-loop control method of equipment environmental adaptability[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(8): 24-28.
- [14] 彭坚,陈翠,杨永忠,等. 磷酸阳极化工艺在航空铝合金胶接领域应用进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 49-55.
- PENG Jian, CHEN Cui, YANG Yongzhong, et al. Application progress of phosphoric acid anodization for aluminum alloy bonding in aviation industry[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 49-55.
- [15] WATTS J F, ABEL M L, PERRUCHOT C, et al. Segregation and crosslinking in urea formaldehyde/epoxy resins: a study by high-resolution XPS [J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2001, 121: 233-247.
- [16] 陈可平,刘文,赵秀丽,等. 环氧树脂辐射老化研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, 40(1): 1-12.
- CHEN Keping, LIU Wen, ZHAO Xiuli, et al. Progress in radiation aging of epoxy resins [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, 40(1): 1-12.
- [17] DEVANNE T, BRY A, AUDOUIN L, et al. Radiochemical ageing of an amine cured epoxy network. Part I : Change of physical properties [J]. Polymer, 2005, 46(1) : 229-236.
- [18] NOWICKI A, PRZYBYTNIAK G, LEGOCKA I, et al. Radiation-induced degradation of an epoxy thermoset supported by hydrogen peroxide [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, 94:22-25.
- [19] HOU L Y, WU Y Y, XIAO J D, et al. Degeneration and damage mechanism of epoxy-based shape memory polymer under 170 keV vacuum proton irradiation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2019, 166:8-16.
- [20] DIAO F Y, ZHANG Y, LIU Y J, et al.  $\gamma$ -Ray irradiation stability and damage mechanism of glycidyl amine epoxy resin [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, 383: 227-233.