

真空紫外线辐射对聚合物材料的作用

彭桂荣 甄良 杨德庄 何世禹

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

文 摘 针对空间环境条件综述了真空紫外线辐射对材料物理、化学等性能的影响及机理。聚合物材料在真空紫外线作用下,表面粗糙度上升,结构发生明显变化,拉伸强度下降。同时透光率,耐热性等均发生变化。真空紫外线与原子氧等其它空间环境因素有一定程度的协同效应。不同材料对各因素的敏感程度稍有差异。

关键词 空间环境,真空紫外线,聚合物,物理性能,化学性能

Effects of Vacuum Ultraviolet on Polymers

Peng Guirong Zhen Liang Yang Dezhuang He Shiyu

(School of Materials Science and Technology, Harbin Institute of Technology Harbin 150001)

Abstracts The influence of vacuum Ultraviolet (VUV) irradiation on physical and mechanical properties of polymers is reviewed. VUV irradiation can result in increase of surface roughness of polymers, changeable microstructure of their surface, and decrease of tensile strength, as well as deterioration of optical transmissivity and thermal stability. Effects of combination of VUV with other space environment factors such as atom oxygen (AO) are also discussed. Sensitivity to each space environment factor is little different for various polymer materials.

Key words Space environment, Vacuum ultraviolet (VUV), Polymer, Physical property, Chemical property

1 前言

聚合物基复合材料具有轻质、高强度、高刚度和性能可设计性等特点,逐渐取代高强铝合金作为航天结构材料而得到越来越广的应用。聚合物基复合材料与常规金属材料相比,可减轻构件质量 20% ~ 60%^[1]。热固性树脂基体以环氧占绝对优势,近几年,围绕改善环氧树脂的韧性、耐湿热性能和提高耐热温度开展了大量的研究^[2]。由于航天器飞行速度提高,目前国外热固性树脂研究重点已由环氧树脂向聚酰亚胺等高温树脂转移^[3~9]。近年来,聚醚醚酮、聚砜和聚醚酮等热塑性树脂以其较高的断裂韧性、抗冲击、损伤容限大、吸湿率低、贮存期长、耐高温(与环氧比)、可修复和再成形性好等优点,在航天

领域获得越来越多的应用^[3,4,6]。

聚合物材料也应用在热控系统中,如聚氨酯类用于和平号空间站热控系统。还有大量的聚合物材料如硅橡胶、氟硅橡胶及泰氟隆(Teflon)等应用在密封材料中^[1]。另外,在太阳电池阵结构,太阳电池基板及抛物面天线结构等器件中都有聚合物材料的应用^[10]。航天飞机表面防护材料也大量采用聚合物材料。

但与金属材料比较起来,聚合物材料对空间环境尤其是紫外线辐射、原子氧侵蚀、电子及质子辐射的作用较为敏感^[11,12]。在高真空条件下,聚合物材料内部的小分子添加剂等易于溢出,在光学表面造成污染^[11~13]。同时聚合物材料内部的小分子添加

收稿日期:2000-07-29;修回日期:2000-10-26

彭桂荣,1973年出生,博士研究生,主要从事空间环境下材料性能演化及表征的研究工作

成分溢出还会造成材料的老化,塑性材料的脆化。一些抗氧化成分、光稳定剂等失去,还可能造成材料迅速破坏。

太阳辐射和原子氧对聚合物性能有着明显的影响。在太阳辐射下,聚合物发生复杂的反应,如光老化、热老化、光氧化和热氧化等,导致材料的结构、光学性能、热学性能及机械性能等发生变化。航天器进出地球阴影形成的交变温度场还会对材料的结晶行为产生影响。

2 紫外线与聚合物材料的交互作用

太阳辐射在经过大气层时,波长小于 297 nm 部分在经过空气时被吸收,因此在这以下波长范围内的太阳辐射对聚合物材料作用方面的研究比较少。尤其是 200 nm 以下的短波连续光谱的研究相对更少。太阳辐射对聚合物产生影响的波长一般都在紫外线特别是真空紫外线部分,可见光及以上波长的太阳辐射对聚合物的影响一般认为不大。

2.1 紫外线与聚合物作用机理

化学键的键能如表 1 所示,紫外线的光子能量足以切断聚合物中大多数类型的化学键^[14]。

表 1 化学键的键能

Tab.1 Chemical bond energy

| 化学键 | 键能/ kJ mol ⁻¹ (25 °C) | 相应波长/ nm |
|--------|----------------------------------|----------|
| C—C | 345.43 | 346.25 |
| C=C | 609.74 | 196.16 |
| C—C | 834.73 | 143.29 |
| C—N | 304.45 | 392.86 |
| C=N | 614.75 | 194.56 |
| C—N | 889.09 | 134.52 |
| C—O | 357.56 | 334.50 |
| C=O(醛) | 736.03 | 162.5 |
| C=O(酮) | 748.58 | 159.78 |
| C—S | 271.83 | 440.0 |
| N—N | 163.10 | 733.33 |
| N=N | 418.20 | 286.00 |

物质的基态吸收光子形成激发态,随后由激发态发生一系列光物理过程和光化学反应。光化学过程包括自由基形成、光致电离、环化、分子内重排及分子碎裂等;光物理过程则是通过一些辐射和非辐射方式消散吸收能。光稳定剂的作用机理也是在光物理过程中消散能量。聚合物材料在紫外线作用下一般不会发生灾难性的破坏,原因在于:(1)聚合物

对太阳辐射的吸收速度低;(2)量子产率(即每吸收一个光子所引起反应的分子数)低,但含有重键,尤其是含有羰基(C=O)的聚合物可通过直接吸收光引发裂解。除聚合物本体单元可能含有 C=O 键外,多数重键是加工中基体与环境物质反应生成的氢过氧化物等,或在聚合物加工中所添加的添加剂等含光活性基团的物质。因此环境气氛,尤其是氧气的存在对紫外线条件下聚合物材料的性能变化有很大影响。

不同的聚合物,对紫外线有不同的响应,敏感度也有差异,而且紫外光的波长、剂量和通量对聚合物的降解都有影响。

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA,又称有机玻璃)光降解过程可归纳为主链断裂和由侧链断裂引发的主链断裂,主链断裂发生在连接侧甲基的主链碳上,侧链断裂主要是从主链上脱去侧链 COOCH₃,余下的大分子活性自由基发生脱氢或主链断裂形成双键;侧链断裂也可能是 COOCH₃ 的分解,结果形成小分子的甲醇或甲基和大分子活性自由基^[15]。有些聚合物在适当的光照条件下,交联大于链断裂,可用于加工和改性^[16,17]。

PMMA 的光降解对波长有明显的依赖关系^[15],主链断裂多发生在 320 nm 以下波长紫外线辐射下,且主链断裂直接与羰基吸收光子相关。在辐射量相同的条件下,低强度长时间的照射比短时间高强度照射产生更多的主链断裂。

环氧树脂的光降解在不同波长段机理有所不同^[18]。短波(发生在 254 nm 波段附近)诱发降解的主要标志是紫外线的吸收和相伴发生的光物理和光化学过程及变色作用。长波(≥295 nm)诱发降解与短波诱发的降解稍有不同,在氧气参与下,环氧树脂中的杂质在长波诱发的降解中起了重要的作用。Zhang 等人^[18]还发现获得最大羰基强度需要的时间与光源光谱范围有关,光源的波长越短得到最大羰基强度的时间越短;他们还给出与环氧环对应的 914 cm⁻¹ 处的峰随光照时间延长而下降,由此可推断发生了开环;对 1 296 cm⁻¹ 及 1 233 cm⁻¹ 峰的观察得出 C—N 键也发生了断裂。

另外,加工工艺和环境气氛对聚合物材料的降解也有影响。Zhang 等人^[18]指出,交联后的 2 410 和 2 184 环氧树脂的红外光谱中在 1 721 cm⁻¹ 和 1 676

cm^{-1} 处出现两个新的吸收峰。 1721 cm^{-1} 对应于脂肪族醛、共轭脂或烷基酮的伸缩吸收,而 1676 cm^{-1} 则是由共轭酮或醌或准醌基团吸收形成的,未交联前的环氧环则没有这类物质形成。文献[19]发现在紫外线辐射下($9.1\text{ mW}/\text{cm}^2$, 240 nm)聚酰亚胺于空气中和真空中形成不同的电子顺磁共振谱(所形成的自由基有区别),并指出空气中 Kapton 在紫外线辐射下形成的自由基位于材料的表面,或者距离表面很近,而真空中形成的则多位于材料表面以下较深的深度上。在有氧气存在下含氟聚酰亚胺薄膜的降解速率明显比没有氧气时的速率高^[20]。

综上所述,聚合物材料的降解与材料结构、加工工艺、环境气氛、紫外线辐射的波长范围、通量及剂量均有关系。

2.2 紫外线对聚合物薄膜材料性能的影响

2.2.1 表面形态及成分变化

紫外线辐射导致材料的结构变化,同时也导致材料表面形态及质量的变化。一般随着表面降解产物和低分子添加剂的挥发,表面粗糙度上升,质量下降,但对不同结构的材料变化程度不一。例如文献[21]对 FEP 在真空紫外线(30 W 氙灯, MgF_2 窗过滤)作用下表面形态及质量变化的研究表明,在真空紫外线作用下,表面粗糙程度由原来的 8 nm 上升到 14 nm 。质损测量结果则表明,真空紫外线只对 C—H 键缺乏的聚合物造成质损[试验是在聚乙烯(PE)、聚氟乙烯(Tedlar)、乙烯—四氟乙烯共聚物(Tefzel)和氟化乙丙烯(FEP)中作的对比]。Brinza^[22]等人对 LDEF(长期曝露飞行器)试验后的 FEP 试样进行 SEM 观察,结果发现表面发生脆化。文献[23]研究了在 300 nm 的光作用下,几种不同结构的聚酰亚胺的对比研究表明含氟基团有助于加速聚酰亚胺薄膜的光分解,质损和红外光谱分析结果均表明含氟基团是光活性的。同时作者还认为,此种聚酰亚胺膜在试验条件下没有发生交联,且在中压汞灯照射 4 h 之后,即迅速降解。

另外剂量对材料变化也有影响,研究表明^[24],在真空度为 0.133 Pa 、 147 nm 紫外线,剂量率为 4×10^{13} 光子数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 的环境中, $135\text{ }\mu\text{m}$ 的 FEP 薄膜表面产生新的双键(红外光谱中出现新的峰, 1730 cm^{-1} 、 1719 cm^{-1} 、 1690 cm^{-1} 对应于 $-\text{CF}=\text{CF}_2$ 、 $-\text{C}(=\text{CF}_2)-$ 和 $-\text{CF}=\text{CF}-$),并且碳碳双键含量

随剂量先升后降;而羰基含量迅速达到平衡后,就不再随剂量变化,如图 1 所示。动力学曲线开始部分的质损随时间增加,强烈侵蚀点正对应于双键累积的最大值处。当剂量达到 10^{18} 光子数/ cm^2 时,侵蚀速率与双键含量一样达到恒定值。聚四氟乙烯在 147 nm 的光照下发生了相同的现象(2×10^{18} 光子数/ cm^2)。文献[25]研究结果则表明,真空紫外线照射后 FEP 膜表面 CF_2 的摩尔分数下降,而 CF 、 CF_3 和碳氧双键的比例则上升。

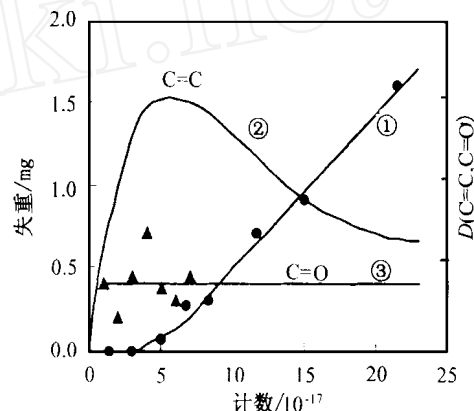


图 1 Xe 灯照射后的剂量依赖关系

Fig. 1 Dose dependency after irradiation with Xe lamp
质损; 双键含量; 羰基含量。

2.2.2 机械性能变化

紫外线对材料机械性能的影响与光源的波谱范围及波长有关。在真空中分别用单色紫外线(123.6 nm 、 147.0 nm 、 184.9 nm 、 253.7 nm),波长大于 177 nm 复色真空紫外线,或波长大于 115 nm 的连续波长等光源照射结果表明,波长大于 115 nm 的复色光源引起 Teflon($12.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、 $75\text{ }\mu\text{m}$)和镀银的 Teflon 热控材料($125\text{ }\mu\text{m}$ 厚)的机械性能变化最大^[26]。对聚酰亚胺等几种材料的研究也给出在紫外线及紫外线与质子、电子的复合作用下强度和应变下降的结论^[27]。

文献[24]的研究结果表明,波长分别为 147 nm 、 123.6 nm 、大于 115 nm 和大于 177 nm 的光源的紫外线辐射均使 Teflon 及聚四氟乙烯薄膜的机械强度下降;波长大于 115 nm 的光源比大于 177 nm 光源的作用更显著。连续光谱的紫外线辐射还降低 Teflon 及聚四氟乙烯薄膜的相对断裂伸长率,而在 123.6 nm 光照射下断裂伸长率增加(光照时间在 10 h 以内)。

在紫外线作用下聚四氟乙烯机械性能变化的研究表明^[28],不加载的聚四氟乙烯(膜厚 30 μm)在单色光 123.6 nm 辐射条件下[波长:123.6 nm (85%)、116.5 nm(10%)、147 nm(5%)],剂量率:2.5 × 10¹³ ~ 2.5 × 10¹⁵ photos/cm²·s、0.1 Pa]辐射 6 h 后拉伸强度降低不超过 30%,即聚四氟乙烯的机械性能仍保留了大约原始强度的 70%。而加载下辐射的聚四氟乙烯(膜厚 30 μm、105 μm),拉伸时仅 1 min 就破坏(在原始强度的 50%时断裂)。而且,由紫外线引起材料破坏的临界剂量,加载试样比未加载试样小三个数量级。另外,聚四氟乙烯在 123.6 nm 光照射下蠕变速率上升 30 倍,光照停止,蠕变速率就回复到原始的无光照射时的值。

2.2.3 透光率等性质的变化

对一些透明材料,紫外线辐射还可引起透光率的变化。Slomp^[14]研究了不同结构的聚酰亚胺薄膜经紫外线辐射 300 esh(太阳小时)后的透光率变化,发现多数材料的透光率变化显著。

Connell 等人^[29]用一系列低染色,透光率良好的聚酰亚胺暴露在紫外线和电子辐照下以考察其作为第二表面镜面热控涂层的潜力。结果表明在 300 esh 紫外线[Xe 灯,1.5 太阳常数(suns)]的通量辐射及 1.0 × 10⁹ Rads、1 MeV 电子辐射下,含氧的和含六氟异丙烯基团的聚酰亚胺,在 500 nm 下的光学透明性能几乎没有变化。

紫外线的作用还可导致材料表面的充电效应以及电学性质的变化。聚合物材料在不同光照条件下的表面电荷密度、表面电势等电物理性质的研究表明紫外线作用下材料表面充电很快,在几十秒内迅速达到稳定值^[28,30],在紫外线作用下 Teflon 的体电阻和表面电阻显著降低^[30],未经过过滤的中压汞灯照射下含六氟异丙烯基团的聚酰亚胺的玻璃化温度明显下降^[20]。

2.3 紫外线与其它空间环境因素的共同作用

紫外线与原子氧有协同作用,但不同材料之间有些差异。一般含氟塑料对紫外线反应敏感,相对来说聚酰亚胺结构对紫外线并不敏感,对原子氧却很敏感。但是,多数情况下,由于材料结构,成型工艺等的差异,材料的变化很复杂。

文献[31,32]研究了在地面模拟真空紫外线、原子氧分别和共同作用条件下含氟聚酰亚胺膜表面上

发生的变化,结果表明表面发生了氧化,紫外线单独作用效果并不明显,而原子氧单独作用效果明显;原子氧和紫外线有协同作用,但原子氧单独作用与原子氧、紫外线共同作用的表面生成物不同,原子氧单独作用时生成碳氧单键;原子氧、紫外线共同作用的表面生成物为碳氧双键。

文献[33]研究了原子氧(7.7 × 10¹² atoms/cm²·s)与紫外线(0.4 × 10⁶勒克斯,200 nm ~ 800 nm)分别作用及共同作用下聚酰亚胺膜的变化。结果表明原子氧单独作用导致试样质量增加,这与太空中的试验结果不同。紫外线和原子氧同时作用时,反应速率增大,观察到质量损失,其反应效率为 3.4 × 10⁻²⁴ cm³/atoms,这与低地球轨道上的试验结果很相近。但单独太阳辐射下并未观察到质损。作者认为太阳紫外线辐射并未改变原子氧的反应途径,只是促进了原子氧的反应,而有利于聚酰亚胺结构的气化或断键。

原子氧与紫外线共同作用下试样的表面粗糙度(8 nm ~ 25 nm)明显比紫外线单独作用下的表面粗糙度(8 nm ~ 14 nm)高(对于 PE、Tedlar、Tefzel、FEP 的研究结果)^[21],也给出在紫外和原子氧共同作用下 FEP 膜表面变粗糙(像沙丘状)^[25]发现。对于真空紫外线作用下的 Teflon(12.5 μm、25 μm、75 μm)和镀银的 Teflon 膜,原子氧的轰击对侵蚀速率并不产生明显的影响,如图 2 所示^[26],所测量到的质量损失绝大部分由 147.0 nm 的光作用产生,并且质量损失与光剂量不成比例。

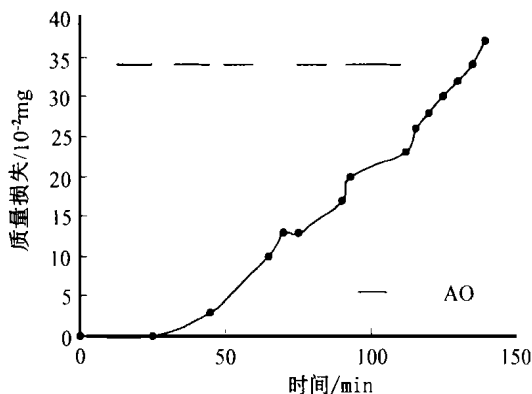


图 2 FEP 质损与 147 nm 光照及原子氧轰击的关系
Fig. 2 Teflon FEP mass losses dependence with 147nm light illumination and fast atomic oxygen bombardment
在 LDEF 上对 FEP 的试验结果表明^[34],真空紫

紫外线作用下,表面硬化、脆化,而原子氧作用下试样表面则无此现象。原子氧与真空紫外线共同作用下表面深度侵蚀,呈典型的轧制形貌。而只有真空紫外线作用下的试样表面形貌则呈密集起伏的峰,表面侵蚀较轻。

Steven Kootnz 及其合作者^[35]研究了真空紫外线(Kr 灯, MgF₂ 窗)和热原子氧的协同作用对 Kapton—H、Teflon、镀银 Teflon 和聚氯三氟乙烯(Kel—F)的侵蚀速率,结果示于表 2。由表可见,在没有真空紫外线辐射时,以上材料的反应速率很小,而加上与低地球轨道通量相近的真空紫外线后, Teflon、镀银 Teflon 和 Kel—F 的侵蚀速率均上升,真空紫外线辐射也使 Kapton—H 的热原子氧反应速率明显上升。Teflon 和聚脂在地面模拟设备上模拟不同通量原子氧和氙灯光源下的侵蚀试验也得出了相同的结论^[36]。

表 2 不同剂量真空紫外线下热原子氧与材料的反应速率

Tab. 2 Reaction rates of materials with thermal energy oxygen atoms and with different VUV irradiation doses

| 材料 | mg/cm ² s | | |
|---------------|------------------------------|------------------------|----------------------|
| | 0 UV suns | 0.5 UV suns | 4 UV suns |
| Kapton H | (3 ± 0.5) × 10 ⁻³ | - | 4 × 10 ⁻³ |
| FEP Teflon | (5 ± 7) × 10 ⁻⁵ | 1.3 × 10 ⁻³ | 3 × 10 ⁻³ |
| Silver Teflon | (6 ± 7) × 10 ⁻⁵ | 6 × 10 ⁻⁴ | 3 × 10 ⁻³ |
| Kel - F | (2 ± 4) × 10 ⁻⁴ | 2 × 10 ⁻⁴ | 1 × 10 ⁻³ |

Strganac 等人^[37]研究了在原子氧正向撞击较少的条件下,原子氧与紫外线辐射对聚乙烯物理性质、化学性质的影响。聚乙烯在此条件下结晶度、熔点下降,而支化度、交联度上升,粘弹性也发生一定的变化。

在低地球轨道上对含氟和含硅的聚合物膜的研究结果发现含氟聚合物的侵蚀严重,透光率严重下降,而含硅的膜的侵蚀速率最小,透光率无明显变化^[38]。

另外,紫外线与热循环等因素也有协同作用。Dever 等人研究了真空热循环和真空紫外线(115 nm ~ 200 nm, 5 UV suns, 200 nm ~ 400 nm, 0.5 UV suns)对热原子氧与聚硅氧烷—聚酰亚胺薄膜相互作用的影响^[39]。他们的试验是针对杜邦公司溶液成膜技术生产的两种不同牌号(93—1 和 AOR)的聚硅氧烷

—聚酰亚胺薄膜进行的。试验分 2 组,一组直接加原子氧,另一组在真空热循环和真空紫外线辐射后,再进行原子氧侵蚀,他们发现两种品牌的试样表现出完全不同的行为。牌号为 93—1 的薄膜在真空热循环和真空紫外线预作用后,与原子氧的反应呈现加速的趋势,质损上升,其表面的裂纹分枝严重,且在次表面有明显的扩展趋势。对比之下,在预先的真空热循环和真空紫外线作用后,牌号为 AOR 的薄膜抗原子氧侵蚀的能力明显提高了。表面观察到的“水点”,可能是加工中所用介质残留部分或添加剂溢出留下的,这个现象在牌号为 93—1 的薄膜中却未观察到^[39]。

文献[30]给出了 FEP 在紫外线(123.6 nm, 147 nm, 2.5 × 10¹³ ~ 2.5 × 10¹⁵ photos/cm² · s, 1.33 × 10⁻¹ Pa ~ 1.33 × 10⁻³ Pa)和热循环作用下的蠕变结果及拉伸强度变化。125 μm 的 FEP 膜在首次循环中温度升到 373 K 时瞬时变形以相当大的速率急剧上升。在 200 ~ 250 次循环后,蠕变速率下降达到一个很低的常数值。对比发现,热循环导致的形变比 373 K 恒定温度(等于循环温度的最高点)下的形变高 4 倍,373 K 下载荷为材料拉伸强度的 50% ~ 60% 的加载 125 μm 膜,在 3 100 次热循环后并没有破坏。而与紫外线单独作用下的数据对比,在紫外线与热循环共同作用下,加载薄膜的延伸率增加 2 倍,其寿命降低了 3 倍。此文献还给出在紫外线作用下压强对 FEP 蠕变和寿命的影响。在 1.33 × 10¹ Pa ~ 1.33 × 10⁻² Pa 范围内,断裂伸长率和寿命随压强的下降而增加。

3 尚待深入的工作

国外对真空紫外线与聚合物材料的交互作用已有相当的研究,国内相关的研究则不多。在这些研究工作基础上,以后的研究重点应放在以下几方面。

(1) 新型材料及潜在的空间材料抗真空紫外线辐射性能的研究。现在针对耐热性的要求开发新型材料的研究很多,但关于这些材料在空间环境下稳定性的研究不足,许多数据不全。

(2) 真空紫外线辐射对聚合物材料性能影响的预测。在太阳真空紫外线辐射及其与其它空间环境因素复合作用下性能的演化规律,建立损伤机理模型,为实际应用提供预测模型。

(3) 抗真空紫外线辐射的对策。地面耐紫外线宇航材料工艺 2001 年 第 5 期

辐射的对策,如光稳定剂的研究很多,但是对于应用于空间环境的,抗真空紫外线辐射的对策的研究却很少见报道,而且,通常的添加剂在真空中挥发,严重污染航天器,尤其是对光学器件,常常严重影响其功能。因此,抗真空紫外线辐射,同时还要求尽可能小的污染。这方面的研究有一些零星的探索性的研究数据,直接相关的报道并不多见,很值得对此进行研究。

参考文献

- 1 江辉. 国外航天结构新材料发展简述. 宇航材料工艺, 1998; 28(4): 1~8
- 2 陈宝祥. 先进树脂基复合材料的进展. 先进制造与材料应用技术, 1998; (3): 18~22
- 3 Silverman E M, Jones R J. Property and processing performance of graphite/ PEEK prepreg tapes and fabrics. SEMPE Journal, 1988; 24(4): 132~139
- 4 Silverman E M, Giese R A, Forbes W C. Property performance of thermoplastic composites for spacecraft systems. SEMPE Journal, 1989; 25(6): 38~42
- 5 Hergenrother P M, Havens S J. Adhesive properties of LARC-CP1, A new semi-crystalline polyimide. SEMPE Journal, 1988; 24(4): 13~18
- 6 陈铮. 聚醚醚酮复合材料的研制近况. 宇航材料工艺, 1991; (4): 48~52
- 7 Goodwin A A, Hay J N. Dielectric and dynamic mechanical relaxation studies on poly(acyl ether ketone)s. Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics, 1998; 36: 851~859
- 8 Bowles K J. Adjusting the measured weight loss of aged graphite fabric/ PMR-15 composites. Journal of Advanced Materials, 1998; 29(3): 21~31
- 9 Lijima T, Yuasa N, Tomoi M. Modification of two-component bismaleimide resin by blending (Meth)Ally compounds as third components. Polymer International, 1999; 48: 587~592
- 10 Gerow P A, Paxton J P, Cost T L, Hawk C W. Materials property effects on a thin-film solar concentrator. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995; 32(2): 317~322
- 11 张建可, 冀勇夫, 李智华, 王珍良. 粒子辐照对碳纤维复合材料力学性能影响. 中国空间科学技术, 1998; (1): 56~59
- 12 陈国珍, 林国成. 低地球轨道带电粒子辐射环境对航天器的影响. 中国空间科学技术, 1994; (6): 43~48
- 13 Yokota R, Ohinishi A, Hashimoto Y, Toki K. A study on polyimide MLI of the ten months flown space flyer unit. In: Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Guyenne T D ed. Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1997: 293~299

宇航材料工艺 2001年 第5期

environment, Guyenne T D ed. Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1997: 293~299

- 14 Slomp W S. Ultraviolet radiation effects. NASA/SDID space environment effects on materials workshop, part 2, NASA-CP-3035-Pt-2, NASA Langley Research center: Teichman L A et al ed., 1989: 425~446
- 15 Torikai A, Ohno M, Fueki K. Photodegradation of PMMA by monochromatic light: quantum yield, effects of wavelengths and light intensity. Journal of Applied Polymer Science, 1990; 41: 1023~1032
- 16 肇研, 陆再平, 郝建伟. 聚合物的辐射固化. 航空制造工程, 1997; (6): 18~21
- 17 吴国庭. 密封材料空间环境失效行为. 中国空间科学技术, 1997; 17(6): 40~44
- 18 Zhang G, Pitt W G, Gates S R, Owen N L. Studies on oxidative photo degradation of epoxy resins by IR-ATR spectroscopy. Journal of Applied Polymer Science, 1994; 54: 419~427
- 19 Hill D J T, Rasoul F A, Forsythe J S, O'Donnell J H, Pomery P J, George G A, Young R P, Connell J W. Effect of simulated LEO radiation on polyimides (UV degradation study). Journal of Applied Polymer Science, 1995; 58: 1847~1856
- 20 Hoyle C E, Anzures E F. Photo degradation of polyimides. Thermal property changes of polyimides based on hexafluorinated dianhydride. Journal of Applied Polymer Science, 1991; 43: 11~18
- 21 Grossman E, Neter Y, Lifshitz Y. Oxygen and VUV irradiation of polymers: atomic force microscopy and complimentary studies. In: Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Guyenne T D ed. Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1997: 217~223
- 22 Brinza D E, Stiegman A E, Staszak P R etc.. VUV radiation-induced degradation of fluorinated ethylene propylene (FEP) teflon aboard the long duration exposure facility (LDEF). LDEF: 69 months in space, first post-retrieval symposium, part 2. NASA-CP-3134-Pt-2, NASA Langley research center, Levine A S ed., 1992: 817~829
- 23 Hoyle C E, Anzures E T. Photo degradation of Polyimides. A spectral, viscometric, chromatographic, and weight loss investigation of polyimides based on hexafluorinated dianhydride. Journal of Applied Polymer Science, 1991; 43: 1~10
- 24 Eesbeek M V, Levadou F, Skurat V E, Dorofeev Yu I,

Vasile V N, Barbashev E A. Degradation of Teflon FEP due to VUV and AO exposure. In: Proceedings of the 6th international symposium on materials in space environment. Proceedings of the 6th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1994: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1994: 165 ~ 173

25 George G A, Hill D J, O'Donnell J H, Pomery P J, Rasoul F A. A study of the UV and VUV degradation of FEP. LDEF: 69 months in space. Part 3: second post-retrieval symposium, NASA - CP - 3194 - Pt - 3, NASA Langley research center: Levine A S ed., 1993: 867 ~ 876

26 Skurat V E, Barbashev E A, Budashov I A, Dorofeev Yu I, Nikiforov A P, Ternovoy A I, Eesbeek M V, Levadou F. The separate and combined effects of VUV radiation and fast AO on Teflon FEP and silicon carbide. In: Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Guyenne T D ed. Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1997: 267 ~ 279

27 Russell D A, Fogdall L B, Bohnhoff-Hlavacek G. Simulated space environmental testing on thin films. NASA/CR - 2000 - 210101, Langley Technical Monitor: John W. Connell, 2000: 1 ~ 94

28 Eesbeek M V, Levadou F, Tupikov V I, Cherniavsky A I, Khatipov S A, Milinchuk V K, Stepanov V F, Stepanov A V. Degradation of Teflon PTFE and FEP exposed to far UV radiation. In: Proceedings of the 6th international symposium on materials in space environment. Proceedings of the 6th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1994: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1994: 149 ~ 164

29 Connell J W. Simulated environmental effects on some experimental high performance polymers. In: Proceedings of the 5th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1991: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1991: 241 ~ 253

30 Tupikov V I, Khatipov S A, Cherniavsky A I, Stepanov V F. Degradation of mechanical and electro physical properties of Teflon FEP film under combined action of far ultraviolet and thermal cycling. In: Proceedings of the 7th international symposium on materials in space environment, Guyenne T D ed. Proceedings of

the 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1997: 77 ~ 85

31 Rasoul F A, Hill D J, Forsythe J S, O'Donnell J H, George G A, Pomery P J, Young P R, Connell J W. Surface properties of fluorinated PIs exposed to VUV and AO. Journal of Applied Polymer Science, 1995; 58: 1 857 ~ 1 864

32 Forsythe J S, George G A, Hill D J T et al. The surface properties of fluorinated polyimides exposed to VUV and atomic oxygen. LDEF: 69 months in space. Third post-retrieval symposium, part 2, NASA Langley Research Center, 1995: 657 ~ 665

33 Tagawa M, Matsushita M, Umeno M, Ohmae N. Laboratory studies of atom oxygen reactions on spin-coated polyimide film. In: Proceedings of the 6th international symposium on materials in space environment. Proceedings of the 6th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1994: ESTEC, Noordwijk, the Netherlands: ESA publications division, 1994: 189 ~ 194

34 Stiegman A E, Brinza D E, Anderson M S, Minton T K, Laue E G, Liang R H. An investigation of the degradation of fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer thermal blanketing materials aboard LDEF in the laboratory. NASA - CR - 192824. Jet Propulsion Lab., 1991: 1 ~ 25

35 Koontz S, Jeger L, Albyn K, Cross J. VUV radiation / AO synergism in materials reacting. Journal of Spacecraft, 1990; 27 (3): 346 ~ 348

36 Tennyson R C. AO effects on polymer-based materials. Canada Journal Physics, 1991; 69: 1 190 ~ 1 207

37 Straganac T W, Letton A, Rock N I, Williams K D, Farrow D A. Characterization of polymer films retrieved from NASA long duration exposure facility. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995; 32(3): 502 ~ 506

38 Connell J W, Young P R, Kalil C G, Chang A C, Siochi E J. The effects of low earth orbit exposure on some experimental fluorine and silicon-containing polymer. NASA goddard space flight center, eighteenth space simulation conference: Space mission success through testing, 1994: 157 ~ 175

39 Dever J A, Degroh K K, Stidham C R, Dever T M, Terlep J A. Simulation of the synergistic low earth orbit effects of vacuum thermal cycling, VUV radiation and atom oxygen. The seventeenth space simulation conference: terrestrial test for space success, Stecher J L ed, NASA - CP - 3181, NASA, 1992: 19 ~ 36