特别关注

面向低轨经济应用需求的透明聚酰亚胺薄膜研究与应用进展

王振中[1]，王睿轩[1]，刘金刚[1,2*]
（1. 中国地质大学（北京）材料科学与工程学院，北京 100083；
2. 笛斯安新材料研发（三河）有限公司，河北 廊坊 065200）

摘　要：综述了面向低轨经济应用需求的透明聚酰亚胺（PI）薄膜材料的研究与应用进展状况。从低地球轨道（LEO）对人类空间活动的重要性、LEO 典型空间环境及其对材料的性能影响、透明 PI 薄膜在 LEO 航天器中的典型应用及面临的挑战以及当前针对 LEO 航天器应用所开展的 PI 薄膜的研究与开发状况等角度进行了阐述。重点综述了抗原子氧（AO）侵蚀型透明 PI 薄膜的研究与开发状况，并对可满足 LEO 航天器应用需求的 PI 薄膜材料的未来发展趋势进行了展望。

关键词：聚酰亚胺；低地球轨道；低轨经济；原子氧；光学性能
中图分类号：X93；TQ324.8　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1008-1100（2026）06-0001-10
DOI：10.19482/j.cn11-3237.2026.06.01

Progress on the research and application of optically transparent polyimide films for low earth orbit economies

WANG Zhen-zhong[1]，*WANG Rui-xuan*[1]，*LIU Jin-gang*[1,2*]
（1. School of Materials Science and Technology，China University of Geosciences，Beijing 100083，China；
2. Disan New Materials Research & Development（Sanhe）Co.，Ltd.，Langfang 065200，China）

Abstract：The current research and application progress of optically transparent polyimide（PI）films for the low earth orbit（LEO）economy fields have been reviewed. The importance of the LEO for the human space explorations，the typical space environments in LEO，the typical applications and challenges of optically transparent PI films for LEO spacecraft，and the research and development（R&D）status of the PI films for the LEO applications were mainly introduced. Emphatically，the R&D of atomic oxygen（AO）resistant and transparent PI films were presented. The future developing trends of PIs for LEO spacecraft applications were prospected.

Key words：polyimide；low earth orbit；LEO economy；atomic oxygen；optical property

近年来，随着人类太空探索步伐的不断加快以及人类社会自身科技化与信息化程度的不断深入，空间探测技术得到了迅猛的发展[1]。低地球轨道（LEO）由于具有地球观测分辨率高、航天器发射成本低、天地通讯信号优良等特征，因此成为人类空间探测科技活动的主要场所和“黄金地段”，近年来更是得到了世界各国的高度关注[2]。以美欧为主导的国际空间站（ISS）、哈勃望远镜以及美国太空探索技术公司（Space X）“星链”卫星等飞行器均运行于 LEO 空间。近年来，我国独立自主开发的天宫空间站以及正在实施的多个星座计划也均在 LEO 空间实施开展。LEO 轨道通常是指海拔高度在 160～2000km 的轨道区域[3]，该区域是人类开展超级通讯、资源勘探、气象预报、灾难预警、环

收稿日期：2026-02-26
基金项目：深圳市科技计划项目（技术攻关重点项目）（JSGG20210629144539012）
作者简介：王振中（1985-），在读博士研究生，主要从事空间领域用聚酰亚胺薄膜的基础与应用研究工作。
通讯作者：刘金刚（1973-），博士，教授，主要从事高技术领域用聚酰亚胺材料的基础与应用研究。

境保护、导航定位、航天育种、空间实验以及深空中转等空间活动的理想区域，因此具有巨大的战略与商业价值[4~5]。从战略层面而言，LEO 资源直接关乎国家安全，只有打造自主全球卫星互联网系统才能提升我国在全球通信领域的话语权，保障信息传输不被“卡脖子”，更能牢牢保障国家信息安全。同时可提升太空态势感知、军事通信等核心能力，进而掌握未来太空竞争的主动权。从商业层面而言，“低轨经济（LEO economy）”已经悄然来临，LEO 资源的高效利用可提供高速网络传输、承载物联网、应急通信等增值服务、保障无人驾驶、远程医疗以及智慧城市的健康运行。因此，近年来低轨经济得到了快速的发展，并与“低空经济（low-altitude economy）”、“深空经济（space economy）”等共同成为“太空经济（aerospace economy）”的重要组成部分[6]。目前，全球对 LEO 资源的竞争已进入白热化阶段，各国均力争在低轨经济这个万亿级市场竞争中占得先机[7]。

LEO 资源产业链通常由“上游—中游—下游”3 个环节构成完整闭环。该产业链覆盖材料、制造、通信、终端和运营等多个产业，其中上游制造端的材料产业是整个产业链条中的重要环节[8]。LEO 的太空环境非常复杂，涉及原子氧（atomic oxygen，AO）、紫外（UV）、真空紫外（VUV）、带电粒子和温度冲击等，因此对飞行器材料的性能提出了极为严苛的要求[9~11]。在所有材料品种中，高分子材料以其轻质、高比强度、高比模量、高绝缘以及相对较低的制造成本等而在 LEO 飞行器制造中得到了广泛的应用[12]。尤其是具有较高耐温等级的高分子材料，如聚酰亚胺（PI）等更是 LEO 飞行器不可或缺的核心制造材料之一[13~15]。

PI 材料具有优异的耐高低温（－196～400℃）、耐高能射线辐照、高绝缘、高力学柔韧性等特点，因此从上世纪 60 年代实现商业化以来一直是航天飞行器制造的关键材料，为人类 Apollo 月球探测任务、太阳系行星探测等活动的成功实施提供了关键的材料保障[16~18]。但近年来，基于地面模拟实验以及真实在轨环境测试的研究结果均显示常规的 PI 材料在 LEO 空间原子氧环境中易于发生降解，进而引发材料性能的劣化，无法为飞行器提供长久可靠的防护[19]。这促使人们重新审视这类在地面以及深空环境中均具有优良稳定性的航天级材料。研制开发具有优良抗 AO 侵蚀特性的透明 PI 材料已经成为高性能航天级高分子光学材料基础与应用研究领域中的热点方向之一[20]。

本文基于国内外近年来在耐 LEO 空间环境，尤其是耐 AO 侵蚀型透明 PI 薄膜研究领域内的最新进展，对该领域的研究与发展状况进行综述。

1 低地球轨道空间环境及对高分子材料的性能影响

以距离地球表面约 80～100km 的卡门线和距离地球约 36000km 的地球同步轨道（GEO）为边界的区域通常被定义为环绕地球的轨道空间[21]。地球轨道按照轨道高度的不同一般可划分为 LEO、中地球轨道（MEO）和高地球轨道（HEO）等[22]。大多数人为的太空活动均发生在上述海拔 160～36000km 之间。LEO 通常指的是海拔 160～2000km 的区域，许多人造太空物体均在该轨道高度运行。LEO 传统上以科学、地球观测和军事任务为主，也包含一些通信系统。MEO 的高度约为 2000～36000km，是全球导航卫星系统的所在地，例如美国的全球定位系统（GPS）、俄罗斯的全球导航卫星系统（GLONASS）、欧洲的伽利略系统以及我国的北斗系统等。HEO 位于平均海平面以上约 36000km 以上的高度，其轨道周期与地球自转周期相匹配，通信卫星就部署在这一轨道上。GEO 长期以来一直处于过度拥挤的状态，国际法规对其使用进行了限制。近年来，随着大型星座计划的出现，LEO 也正朝着类似的过度拥挤趋势发展。

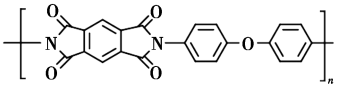
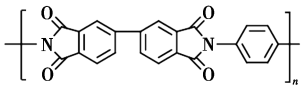
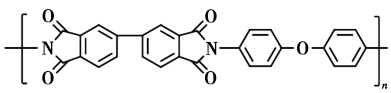
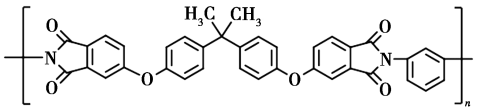
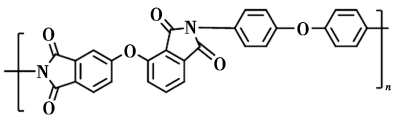
不同地球轨道所具有的空间环境因素也不尽相同。这些空间环境因素，如太阳耀斑、银河宇宙射线、AO、范艾伦辐射带、空间碎片等对飞行器相关材料会产生化学、力学、光学以及电学等诸多方面的影响[23~24]。对于 LEO 空间而言，AO 是对空间任务威胁最大的空间环境因素。AO 是 LEO 空间的 O_2 在受到太阳光谱中波长小于 243nm 的紫外线辐照后产生的原子态氧（O）[25]。AO 本身处于高度不稳定的游离态，具有极强的氧化性。其浓度会受到太阳活动周期、地球磁场强度、轨道高度、季节和昼夜等因素的影响。整体而言，LEO 空间中 AO 的含量高达 80% 以上，密度约 10^6～10^9atoms/cm^3。因此，当 LEO 空间飞行器以～8km/s 的第一宇宙速度飞行时会与 AO 产生 10^{12}～10^{16}次/（cm^2 · s）碰撞，此时会在航天器表面产生 4～5eV 的能量[26]。该能量已经超过了众多化学键的离解能，因此可引发航天器表面含 C、H、O、

N 等元素的高分子材料分子键的断裂，进而产生 CO、CO_2、水蒸气等气相挥发物，造成高分子材料质量与厚度的损失以及物理和化学性质的变化[27]。常见高分子材料在 AO 环境中的降解速率通常在 10^{-24} cm^3/atom 左右。该降解速率下，厚度为微米级的高分子材料最短会在数月内被 AO 完全剥蚀，进而对航天器的可靠性产生致命的影响[28]。此外，LEO 的其它空间环境因素，包括微重力（10^{-6}G）、温度冲击（−150～200℃）、高真空（10^{-5} ～ 10^{-8} torr）以及太阳辐照（UV、VUV、X-射线）等也会对高分子材料的性能产生影响。

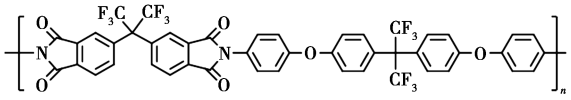
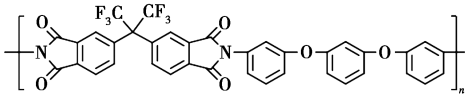
AO 撞击 LEO 航天器表面的高分子材料时会发生多种物理化学过程。根据高分子材料化学组成的不同，其 AO 侵蚀机理及对 AO 侵蚀的抵抗能力也不同。AO 撞击 LEO 飞行器表面产生的 4～5eV 的能量超过了烃类高分子（含 C—H、C—C 键的聚乙烯、聚丙烯等）、酮类高分子（含 C═O 与苯环单元的聚芳醚酮、聚醚醚酮等）、含氟高分子（含 C—F 键的特氟龙、聚偏氟乙烯等）、芳杂环高分子（含 C—N、C═O 以及苯环的 PI 等）等材料的化学键离解能，因此长期 AO 辐照可能会引发上述材料的降解反应。以 PI 材料为例，AO 辐照引发其分子链 C—N 键、C═O 的断裂反应，进而引发材料的质量与厚度损失、力学与光学性能劣化以及降解物引发的航天器组件二次污染等问题[29]。

表 1 总结了目前商业化航天级 PI 薄膜的典型结构与应用特性。标准型 PI 薄膜在空间飞行器中广泛用作热控毯、多层隔热材料、遮阳板以及柔性加热器等部件，含氟型 PI 薄膜则可应用于大型空间可展开机构以及柔性太阳电池基板材料，同时在太阳帆帆体材料中也得到了应用，而含醚型 PI 薄膜，如 ISAS-TPI® 也已成功应用于太阳帆组件中[30～32]。但上述商业化 PI 薄膜由于其结构特性使其无法直接应用于 LEO 空间飞行器中。由于标准型 PI 薄膜，如美国杜邦公司商业化的 Kapton® H 薄膜（见表 1，＃1）在 AO 辐照环境中表现出了线性的侵蚀现象（AO 侵蚀速率 $E_y = 3.0 \times 10^{-24}$ atoms/cm^2），因此目前国际上通常以其作为标样计算 AO 辐照通量，并依此计算出某种高分子样品的 E_y 值。常见的商业化 PI 薄膜，包括日本宇部公司商业化的联苯型 Upilex®-S 薄膜（见表 1，＃2；

表 1　商业化航天级 PI 薄膜的典型化学结构及应用特性

序号	分类	典型结构及牌号	应用特性
＃1	标准型	 （Kapton® H、Apical®…）	优势：耐高温、耐低温、耐辐照、高力学柔韧性、高绝缘、高阻燃等 劣势：固化温度高、颜色深、光学透明性差、不耐 AO 侵蚀
＃2		 （Upilex®-S）	
＃3		 （Upilex®-R）	
＃4	含醚型（PEI）	 （Ultem® 1000）	优势：具有溶液加工特性、光学透明性好、热塑性良好等 劣势：T_g 相对较低、力学性能较标准型薄膜差、不耐 AO 侵蚀
＃5		 （ISAS-TPI®）	

续表 1

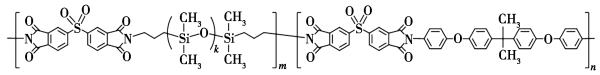
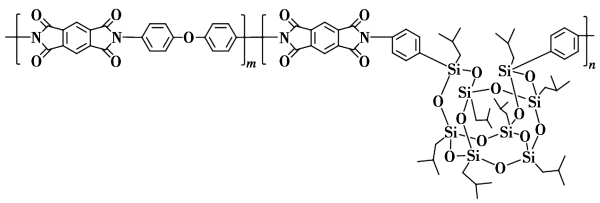
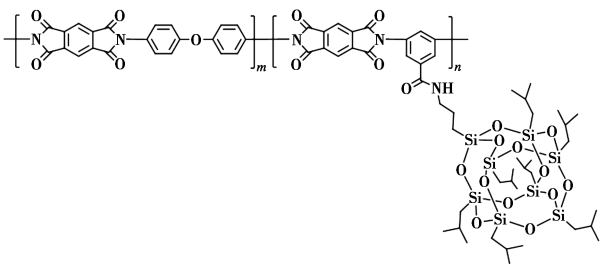
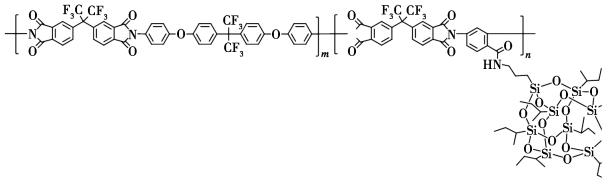
序号	分类	典型结构及牌号	应用特性
＃6	含氟型	 (LaRC-CP1®)	优势：具有溶液加工特性、光学透明性优良、抗紫外线与带电粒子辐照等 劣势：T_g 相对较低、力学性能较标准型薄膜差、不耐 AO 侵蚀
＃7		 (LaRC-CP2®)	

E_y：9.22×10^{-25} cm^3/atom)、沙特沙伯基础公司商业化的聚醚酰亚胺薄膜 Ultem® 1000（见表 1，＃4；$E_y>3.31\times10^{-24}$ cm^3/atom）以及美国 Nexolve 公司商业化的含氟型 LaRC-CP1® 薄膜（见表 1，＃6；E_y：1.91×10^{-24} cm^3/atom）等均表现出了较高的 AO 侵蚀特性。鉴于此，近年来抗 AO 侵蚀型 PI 薄膜的研究得到了国内外学术界与工业界的广泛关注。

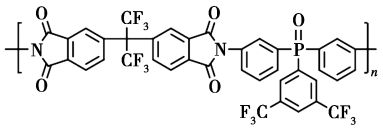
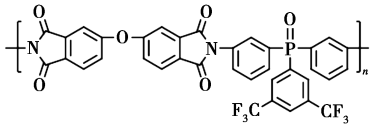
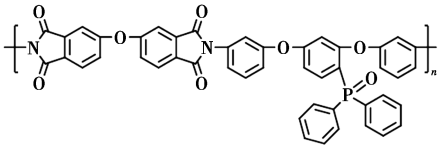
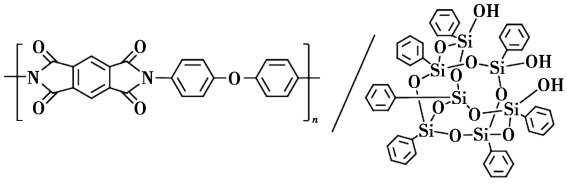
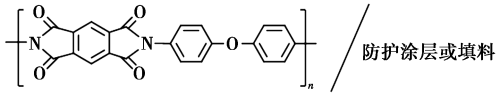
2 抗原子氧 PI 薄膜的研究与发展

标准型 PI 薄膜在 LEO 空间 AO 环境中易于降解，这与其结构组成密切相关。五员含氮杂环与六员苯环构成的酰亚胺环虽然具有较强的共轭作用以及强烈的分子内及分子间相互作用力，但却无法抵挡 AO 撞击产生的高能量。针对日益加剧的 LEO 空间资源竞争，研制开发具有长寿命抗 LEO 空间环境，尤其是抗 AO 能力的 PI 薄膜已经成为高性能空间材料研究与开发领域中的热门课题之一。经过多年的研究积累，目前形成的提升 PI 薄膜抗 AO 能力的改性手段主要包括本体结构改性、组成改性以及上述手段的双重复合改性等几类措施[33]。依据上述改性措施，目前研制开发的抗 AO 侵蚀型 PI 薄膜（Atomic-oxygen Resistant PI，AOR-PI）的化学结构及其应用特性见表 2。

表 2 AOR-PI 薄膜的典型化学结构及应用特性

序号	分类	典型结构及牌号	应用特性
＃a	含 Si 型		优势：优异的长时抗 AO 侵蚀能力；CORIN® 薄膜兼具良好的光学透明性 劣势：T_g 与力学性能低于标准型 PI 薄膜、CTE 显著高于标准型 PI 薄膜
＃b			
＃c			
＃d			

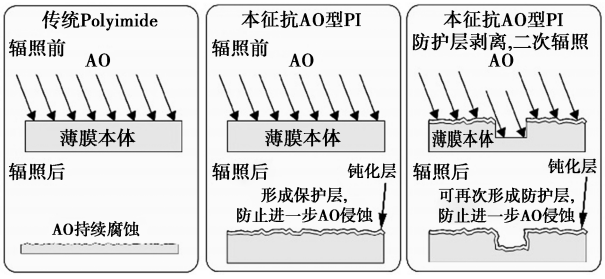
续表 2

序号	分类	典型结构及牌号	应用特性
＃e	含 P 型		优势：良好的抗 AO 侵蚀能力、良好的光学透明性 劣势：T_g 与力学性能低于标准型 PI 薄膜、CTE 显著高于标准型 PI 薄膜
＃f			
＃g			
＃h	复合型		优势：良好的抗 AO 侵蚀能力、良好的耐热与力学性能等 劣势：存在 AO 钻蚀风险、薄膜光学性能显著劣化等
＃i			

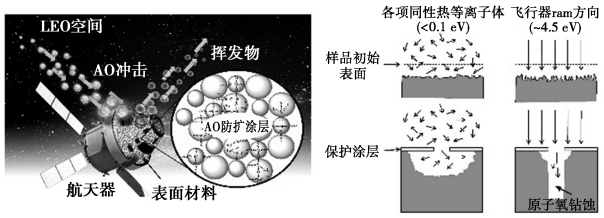
本体结构改性，又称“主动防护”，其设计思路是基于 AO 可与某些特定元素（Si、Al、Ge、P、Zr 等）作用，原位生成具有优良抗 AO 能力防护层的特性，将上述特定元素引入 PI 薄膜分子结构中，从而赋予其在 AO 环境中良好的“自愈合”或“自钝化”能力[34]。基于该改性思路开发的 PI 薄膜通常被称为“本征型”AOR-PI 薄膜，包括表 2 中所列含 Si 型薄膜（＃a～＃d）以及含磷型薄膜（＃e～＃g）等。

PI 薄膜的抗 AO 防护见图 1。

图 1（a）描述了这类 PI 薄膜抗 AO 侵蚀的机理。一般而言，标准型 PI 薄膜在 AO 环境中的质量损失随着 AO 辐照剂量的增加而呈现出线性增加的关系，但对于本征 AOR-PI 薄膜而言，初始 AO 辐照会使得 PI 薄膜表面成分与 AO 作用原位生成硅氧化物或硅酸盐（对于含 Si 型 PI 薄膜而言）钝化层或者磷氧化物或磷酸盐（对于含 P 型 PI 薄膜而言）钝化层。虽然代价是使 PI 薄膜发生一定厚度的减薄，但换来的是可以防止 AO 对下层材料的进一步侵蚀。这种钝化层与 PI 薄膜本体间的结合力可能并不高，在空间碎片撞击或太阳风等外力作用下可能会发生脱落。但 AO 辐照后又会生成新的



（a）结构防护



（b）组成与复合防护

图 1　PI 薄膜的抗 AO 防护

钝化层。周而复始，这类 PI 薄膜始终可保持一定的抗 AO 侵蚀能力，其质量损失随着 AO 辐照剂量的增加呈现出非线性关系。

Goto 等[35]考察了 BSF-30® 薄膜（见表 2，＃a）的 AO 侵蚀行为。该薄膜是由日本新日铁化学与日本宇宙开发机构（JAXA）共同开发的。研究结果显示，BSF-30® 薄膜在受到通量为 1.0×

10^{21} atoms/cm^2 的 AO 辐照后，其 E_y 值低于 2.0×10^{-26} cm^3/atom，仅为标准型 Kapton® H 薄膜的 0.6%左右。经 AO 侵蚀后的薄膜表面光滑（均方粗糙度≤1nm），且主要由 SiO_x（$x\approx2$）构成。在经 AO 侵蚀后的薄膜表面上进行了分子束-表面散射实验，散射动力学研究表明，非弹性散射的 O 原子以准镜面散射为主，能量传递极少。这些结果表明，BSF-30® 薄膜对 AO 侵蚀具有优异的抵抗性，同时能保持光滑表面，从而产生低阻力的散射动力学，这意味着其在 LEO 卫星外表面具有巨大的应用潜力。

美国空军研究实验室（AFRL）首次将笼型聚倍半硅氧烷（POSS）应用于抗 AO 型 PI 薄膜的研制与开发中，开发了 MC-POSS-Kapton®（见表 2，#b）和 SC-POSS-Kapton®（见表 2，#c）等薄膜[36]。美国航空航天局（NASA）针对 LEO 空间飞行器对兼具优良抗 AO 以及光学透明性的 PI 薄膜的应用需求开发了 CORIN®（见表 2，#d）以及 Thermalbright® 等薄膜[37]。这些薄膜的抗 AO 机理都是利用 POSS 基团与 AO 原位作用生成 SiO_2 钝化层来实现抗 AO 的目的。Minton 等[38]报道了含 POSS 型 PI 薄膜的 AO 侵蚀特性。对于 MC-POSS-Kapton® 而言，当 POSS 分别为 10%（质量分数，下同）与 20%时，其 E_y 仅分别为 Kapton® H 参比薄膜的 3.70%与 0.98%（AO 通量：8.47×10^{20} atoms/cm^2）。原子力显微镜（AFM）测试结果表明，含 20% POSS 的 PI 薄膜经 AO 辐照后，其表面略变粗糙，但粗糙程度明显低于含有 10% POSS 的 PI 薄膜以及 Kapton® H 薄膜。XPS 测试结果表明，在 PI 薄膜表面形成了 SiO_2 防护层。对于 SC-POSS-Kapton® 薄膜而言，含 20% POSS（7.0% Si_8O_{12}）与 25% POSS（8.8% Si_8O_{12}）的 SC-POSS-Kapton® 薄膜在受到通量为 1.97×10^{21} atoms/cm^2 的 AO 辐照后，其腐蚀深度分别为 1.37μm 与 0.44μm，分别相当于 Kapton® H 参比薄膜的 2.32%与 0.74%。

Connell 等[39]系统研究了含磷 PI 薄膜在 AO 环境中的侵蚀行为，综合考虑薄膜的耐热性能、力学性能以及光学性能后，将重点放在含二苯基氧化膦（DPPO）基团的 PI 薄膜上，先后开发了主链含有苯基氧化膦的含氟 PI 薄膜 TOR-RC-ODPA®（见表 2，#f）以及侧链含有 DPPO 基团的间位取代 PI 薄膜 TOR-NC®（见表 2，#g）等[40]。研究发现，只需要 5%左右的含磷量即可赋予 PI 薄膜良好的抗 AO 能力，而且 DPPO 基团的引入不会显著降低 PI 的 T_g 及模量。TOR-NC® 薄膜经通量为 2.13×10^{20} atoms/cm^2 的 AO 辐照后，其 E_y 值为 4.8×10^{-25} cm^3/atom，较 Kapton® H 薄膜降低了近 1 个数量级。

虽然主动防护可以为 PI 薄膜提供优良的抗 AO 侵蚀能力，但这种改性手段存在的问题是 PI 薄膜的耐热性能，包括玻璃化转变温度（T_g）、线性热膨胀系数（CTE）以及力学性能，包括拉伸强度、断裂伸长率等较标准型 PI 薄膜会有较大幅度下降。表 3 对比了标准型 Kapton® H 薄膜与几种含硅型本征抗 AOR-PI 薄膜的性能。

表 3 AOR-PI 薄膜与参比 PI 薄膜主要性能参数对比

性能	参比薄膜		抗 AO 型薄膜		
	Kapton® H	LaRC-CP1®	BSF-30®	CORIN XLS®	Thermalbright®
T_g/℃	360～410	263	187	266	263
CTE/(×10^{-6}/K)	20	51(125～175℃)	100	68(125～175℃)	40(125～175℃)
拉伸强度/MPa	231	97	53	74	50
断裂伸长率/%	72	16	15	8	2
拉伸模量/GPa	2.5	2.0	1.4	2.1	6.5
E_y/(cm^3/atom)	3.0×10^{-24}	1.91×10^{-24}	1.20×10^{-26}	3.05×10^{-26}	2.77×10^{-25}
太阳吸收率(厚度 25μm)	—	0.08	—	0.08	0.35
透光率(25μm;450nm)/%	<30	88	—	88	不透明

由表 3 可以看出，含 Si 等特定基团的引入在较大程度上或造成薄膜热性能与力学性能的劣化，包括 T_g 降低、CTE 升高、拉伸强度与断裂伸长率下降等。

相比之下，组成改性手段在保持 PI 薄膜固有优良力学、介电等性能方面具有本体改性薄膜所无法比拟的优势。组成改性，又称“被动防护”，其是在不改变标准型 PI 薄膜分子链结构的前提下，通过表面涂覆、物理掺杂等手段将具有优良抗 AO 侵蚀能力的组成成分，如 SiO_2、TiO_2、Al_2O_3 等与 PI 基体进行复合，进而开发出具有优良抗 AO 能力的 PI 复合薄膜[41]。这种改性手段的优势在于可最大程度上保持 PI 薄膜基体固有的优良特性，同时在短期 LEO 空间任务中抗 AO 侵蚀能力较为显著。但缺陷在于无论是涂层还是填充均无法保障 AO 防护成分可以 100%地对 PI 薄膜进行保护，涂层中的任何缺陷，即使是针孔状缺陷就可能引发 PI 复合薄膜的 AO“钻蚀”现象［见图 1（b）］。这种钻蚀有时候仅从 PI 复合薄膜表面是难以观察到的，但下层的 PI 薄膜本体可能已经被 AO 掏蚀殆尽。此外，这种改性手段还可能会对 PI 薄膜的光学性能产生劣化。施加涂层或者填充填料后，PI 复合薄膜的透光率常发生显著下降，这对于开发可满足 LEO 航天器应用需求的透明 PI 薄膜是十分不利的。

近年来，第 3 种改性手段得到了广泛的重视，即将上述 2 种改性手段加以复合，实现对 PI 薄膜的“双重防护”效果[42]。该手段将“主动防护”与“被动防护”设计思路加以结合，以本征抗 AO 型 PI 为基体，通过涂层法或者掺混法将 SiO_2、TiO_2、Al_2O_3 等抗 AO 组成与 PI 基体进行复合，从而最大限度地提升薄膜的抗 AO 侵蚀能力。Wu 等[43]以含磷型本征抗原子氧 PI 薄膜为基体，结合三硅醇型 TSP-POSS 添加剂，制备了一系列具有优异抗 AO 性能的新型有机/无机纳米复合薄膜，其中的含磷 PI 基膜由 2,2′-双（3,4-二羧基苯基）六氟丙烷二酐（6FDA）和 2,5-双［（4-胺基苯氧基）苯基］二苯基氧化膦（BADPO）制得。通过 Si-P 协同效应，TSP-POSS 的加入进一步增强了含磷 PI 基体的抗 AO 性能，同时保持了原始薄膜的热稳定性。在 PI 基体中添加 25% TSP-POSS 的复合薄膜样品在受到通量为 4.0×10^{20} atoms/cm^2 的 AO 侵蚀后，其 E_y 值为 3.1×10^{-26} cm^3/atom，分别仅为原始 PI 基体薄膜（6FDA-BADPO）和参考 PI 薄膜（PMDA-ODA）的 5.8%和 1.0%。X-射线光电子能谱（XPS）测试结果显示，在 AO 暴露过程中，薄膜表面形成了惰性的含磷和含硅钝化层。Zhang 等[44]制备了一系列新型抗 AO 侵蚀型 PI 复合薄膜，其基体和填料中均含有 POSS 成分。含 POSS 的 PI 薄膜基体是通过两步热亚胺化工艺制备的，所使用的原料包括含 POSS 单元芳香族二胺、常规芳香族二胺 ODA 以及芳香族二酐 PMDA。含 POSS 的填料为 TSP-POSS，其在最终薄膜中的添加比例固定为 20%（重量百分比）。测试结果显示，TSP-POSS 的加入明显提高了 PI 复合薄膜的热稳定性，但降低了其高温尺寸稳定性。含有 20% DABA-POSS 的 POSS-PI-20 薄膜，其 5%质量损失温度（$T_{5\%}$）为 564℃，CTE 为 81.0×10^{-6}/K。POSS 成分赋予了 PI 复合薄膜优异的抗 AO 侵蚀特性。在受到通量为 2.51×10^{21} atoms/cm^2 的 AO 侵蚀后，含有 30% DABA-POSS 的 POSS-PI-30 表现出最低的 E_y 值，仅为 1.64×10^{-26} cm^3/atom，较参考 PMDA-ODA 型 PI 薄膜低 2 个数量级以上。XPS 测试结果显示，在暴露于 AO 环境中后，在 PI 复合薄膜表面检测到了惰性 SiO_2 或硅酸盐钝化层。Zhang 等[45]针对 LEO 航天器天线基板对兼具良好介电性能和优良抗 AO 特性光学 PI 薄膜的应用需求，开发了一种具有低介电常数（low-D_k）、低介电损耗因子（low-D_f）和良好抗 AO 特性的 PI 基板。该项研究中采用基于含氟二酐 6FDA 与含氟二胺 2,2-双［4-（4-胺基苯氧基）苯基］六氟丙烷的 6FPI 作为基体，采用 TSP-POSS 作为添加剂。测试结果显示，制备的新型有机-无机纳米复合薄膜在 1MHz 频率下的 D_k 和 D_f 值分别低至 2.52 和 0.006。同时，该复合薄膜表现出良好的抗 AO 性能，在 4.02×10^{20} atom/cm^2 的暴露通量下，其 E_y 值低至 4.0×10^{-25} cm^3/atom，与标准 Kapton® 薄膜相比降低了近 1 个数量级。

3　抗原子氧透明 PI 薄膜的研究与发展

无色透明型 PI（CPI）薄膜在 LEO 航天器中具有重要的应用，是柔性太阳电池翼太阳能电池阵列板、柔性天线等部件中不可或缺的衬底与支撑材料[46]。为了实现 LEO 航天器光学部件的高可靠性，应用于上述领域的 PI 薄膜需要同时具备抗 AO 侵蚀与高透明等特性。这对于 PI 薄膜的开发提出了近乎苛刻的要求。对比表 3 中的航天级 PI 薄膜的特性可以看出，目前开发的 AOR-PI 薄膜除 CORIN® 外，均显示出相对较差的光学透明性和较高的 CTE 值。对于表面涂覆型以及掺混型 AOR-PI 薄膜而言，其往往表现出更差的光学透明性[47]。

综合而言，目前提升 PI 薄膜抗 AO 能力的改性手段很多是以牺牲薄膜的光学透明性以及高温尺寸稳定性为代价的。因此，研制开发兼具优良抗 AO 特性、高光学透明性以及高尺寸稳定性的 PI 薄膜已经成为近年来 LEO 航天器材料研发领域中最为重要的发展方向之一。

在过去的几十年发展过程中，文献中已经建立了相对较为完善的改善标准型 PI 薄膜光学性能的改性手段，包括在 PI 分子链中引入高电负性基团（—CF_3、砜基等）、引入脂肪或脂环结构单元、引入庞大取代基、引入异构化结构单元等[48]。这些改性手段或是通过电子效应，或是通过立体效应，核心思想均是围绕如何降低 PI 分子链内部电荷转移（CT）作用而展开的。对于航天级 PI 薄膜而言，采用上述改性手段，人们也成功开发出了一些 CPI 薄膜品种。例如，采用引入高电负性含氟基团思想开发的 LaRC-CP1® 型商业化 PI 薄膜已经在地球同步轨道（GEO）航天器上稳步运行 10 年以上[49]。采用引入大取代侧基思想开发的 TOR-NC® 型 PI 薄膜也具有良好的光学透明性。通过引入不对称结构开发的 ISAS-TPI® 薄膜具有浅黄色外观，已经成功应用于日本的 IKAROS 太阳帆计划中[50]。而采用共聚手段研制开发的 CORIN® 型 PI 薄膜被认为是目前最成功的无色透明航天级 PI 薄膜，其兼具优良的抗 AO 特性和光学透明性等。

3.1 抗 AO 侵蚀含氟 CPI 薄膜

基于含氟单体的 LaRC-CP1®（见表 1，＃6）以及在此结构上引入 POSS 单元的 CORIN®（见表 2，＃d）型 PI 薄膜是目前航天级 CPI 薄膜的主要品种，这 2 种 PI 薄膜具体的性能对比总结见表 3。由表 3 可以看出，LaRC-CP1® 薄膜的结构主要是基于六氟异丙基（＞C（CF_3）$_2$）相对较高的化学键能、良好的柔顺性、较高的电负性、较大的摩尔体积以及耐 UV 和带电粒子辐照等特性而设计的。实际应用也证明了该薄膜可长期应用于 GEO 轨道航天器中。但由于＞C（CF_3）$_2$ 耐受 AO 侵蚀的能力相对较低，因此该薄膜无法长期应用于 LEO 空间 AO 环境中。同时，柔性＞C（CF_3）$_2$ 的引入虽然赋予了该薄膜在可见光区良好的光学透明性，但也使得该薄膜的 CTE 高至 51×10^{-6}/K。为了赋予 LaRC-CP1® 薄膜抗 AO 能力，研究人员将 POSS 结构单元引入 LaRC-CP1® 分子结构中，研制开发了 CORIN® 型 PI 薄膜。“CORIN”是“Colorless Organic/Inorganic Nanocomposite”首字母缩写，即无色有机/无机纳米复合薄膜[37]。该薄膜弥补了 LaRC-CP1® 薄膜抗 AO 能力差的缺陷，同时保持了 LaRC-CP1® 薄膜固有的优良特性，包括良好的光学透明性、低太阳吸收率等。Li 等[24]系统对比考察了不同商业化 PI 薄膜的 AO 侵蚀特性。研究工作选用 4 种 PI 薄膜，分别包括：（1）商业化聚酰胺酸（PAA）（PyreML® RC5019，IST 公司，美国）制备的 PI（PMDA-ODA）薄膜；（2）由商业化 PMDA-ODA 型 PAA 溶液与 10％的三硅醇苯基 POSS（TSP-POSS）复合而成的 PM1215 薄膜；（3）Thermalbright® PI 薄膜，其由 5％的 TSP-POSS 与 50％的 TiO_2 填料与 LaRC-CP1® 树脂复合构成；（4）CORIN XLS® PI 薄膜。通过对比 AO 辐照（通量为 7.77×10^{20} atoms/cm^2）前后样品损失量以及外观的变化可以看出，POSS 的引入显著提高了 PI 薄膜的抗 AO 特性。添加 POSS 的 PM1215 薄膜在 AO 辐照前后的力学性能未见显著变化。而对于 CORIN XLS® PI 薄膜而言，测试结果显示 AO 辐照后，PI 薄膜的表面较纯 PI 薄膜显得更为平滑。POSS 的引入赋予了 PI 薄膜良好的“自愈合”特征。AO 辐照诱发 POSS 在薄膜表面形成了薄玻璃钝化层。分子动力学模拟结果与实验结果吻合，均验证了 POSS 改性 PI 复合薄膜随着 AO 辐照的进行其质量损失、缺陷扩散以及腐蚀速率均显著降低。虽然 CORIN XLS® PI 薄膜具有优良的抗 AO 特性，但通过对比 LaRC-CP1® 薄膜与 CORIN® 型 PI 薄膜的性能会发现，POSS 改性进一步升高了 PI 薄膜的 CTE 值，同时薄膜的力学性能进一步劣化（拉伸强度降至 74MPa，断裂伸长率降至 8.0％）。尤其是 CTE 的升高使得这类薄膜在用作柔性太阳电池翼太阳能电池基板时面临着由于与电池组件材料 CTE 的不匹配而在高低温冲击时发生脱层的风险。

3.2 抗 AO 侵蚀含磷 CPI 薄膜

除了含 Si 透明型抗 AO 侵蚀 PI 薄膜外，含磷型 CPI 薄膜近年来也得到了广泛关注。Shu 等[47]报道了一种含侧基二苯基氧化膦（DPPO）和—CF_3 基团的抗 AO 型 CPI 薄膜。该薄膜经通量为 1.3×10^{20} atoms/cm^2 的 AO 辐照后，其 E_y 值为 0.56×10^{-24} cm^3/atom，仅为相同条件下 Kapton® 薄膜的 18.7％。此外，AO 辐照后该 PI 薄膜在可见光区的透光率由 92％降低到 82％，而力学性能则得到了保持。通过系统研究经 AO 辐照的 PI 薄膜的表面和本体性能，结果表明，经 AO 辐照的

PI 薄膜表面形成了厚度约为 200nm 的磷酸盐钝化层，且 PO_3^- 的含量在其垂直方向上逐渐降低，这有效减轻了 AO 对 PI 薄膜的进一步侵蚀。Li 等[51]制备了侧链含有 DPPO 基团的芳香族二胺单体，[3,5-双（3-氨基苯氧基）苯基] 二苯基氧化膦（*m*-BADPO），然后与芳香族二酐单体通过化学亚胺化工艺制备了一系列可溶性 PI 树脂。由该 PI 树脂溶液涂覆制备的 PI 薄膜兼具优良的光学透明性和抗 AO 特性。间位取代结构使得 PI 薄膜在 400nm 波长处的透光率高达 87%。经通量为 8.13×10^{20} atoms/cm^2 的 AO 辐照后，该 PI 薄膜的 E_y 最低为 6.59×10^{-25} cm^3/atom，较 Kapton 薄膜降低了近 1 个数量级。XPS 测试显示，AO 辐照后在薄膜表面形成了磷酸盐钝化层。Li 等[52]还合成了基于新型含磷二胺单体 [2,5-双（4-氨基苯氧基）苯基] 二苯基氧化膦（BADPO）以及 [2,5-双（4-氨基-2-三氟甲基苯氧基）苯基] 二苯基氧化膦（BATFDPO）的 PI 薄膜。上述 PI 薄膜也具有优良的抗 AO 特性。

4　结语

低轨经济的快速崛起极大地推动了 LEO 航天材料的商业化进程。作为一类重要的 LEO 航天级材料，具有抗 AO 侵蚀特性的 CPI 薄膜的研制与开发得到了广泛的关注。这类 CPI 薄膜不仅在 LEO 航天器柔性太阳电池阵列中具有广泛的应用，而且在 LEO 大型空间展开机构中也具有重要的应用前景。这类薄膜研制与开发的技术难度在于需要同时兼容薄膜的长时抗 AO 能力以及如何在 AO 辐照前后均保持固有的优良透明特性，同时需要具有优良的高温尺寸稳定性。目前商业化的 LEO 航天级 CPI 薄膜仍或多或少地存在性能上的缺陷。如何通过结构或组成设计来弥补这些性能缺陷，以便更好地服务于 LEO 航天器的应用需求是未来该领域的重要研究课题之一。

参考文献

[1] 丁新宇，李湘黔，李思远，等.美国 Space X“星链”计划产业创新生态构建及对我国商业航天发展的启示[J].中国科技论坛，2026(1)：172-180.

[2] Crisp N H，Roberts P C E，Livadiotti S，*et al*.The benefits of very low earth orbit for earth observation missions[J].Progress in Aerospace Sciences，2020，117：100619.

[3] Yue P，An J，Zhang J，*et al*.Low earth orbit satellite security and reliability：Issues，solutions，and the road ahead[J].IEEE Communication Surveys & Tutorials，2023，25(3)：1604-1652.

[4] Juan E，Lauridsen M，Wigard J，*et al*.Handover solutions for 5G low-earth orbit satellite networks[J].IEEE Access，2022，10：93309-93325.

[5] Sharma A，Clemens R A，Garcia O，*et al*.Biomanufacturing in low earth orbit for regenerative medicine[J].Stem Cell Reports，2022，17(1)：1-13.

[6] 黄志澄.太空经济新动力与我国商业航天[J].张江科技评论，2022(3)：20-23.

[7] 黄朝峰，张超，李金格，等.我国商业航天发展面临的形势与挑战[J].中国科学院院刊，2025，40(11)：1891-1901.

[8] Weerasinghe J，Prasad K，Mathew J，*et al*.Carbon nanocomposites in aerospace technology：A way to protect low-orbit satellites[J].Nanomaterials，2023，13(11)：1763.

[9] Han Z，Song Y，Wang J，*et al*.Research progress of thermal insulation materials used in spacesuits[J].ES Energy and Environment，2023，21：947.

[10] Tachikawa S，Nagano H，Ohnishi A，*et al*.Advanced passive thermal control materials and devices for spacecraft：A review[J].International Journal of Thermophysics，2022，43(6)：91.

[11] Kimoto Y，Tsuchiya Y，Miyazaki E，*et al*.Analysis of upper atmospheric effects on material per onboard atomic oxygen monitor system of SLATS[J].Frontiers in Space Technologies，2022，3：891753.

[12] Chang K M，Das D，Salvati Ⅲ L，*et al*.Durable and impact-resistant thermoset polymers for extreme environment of low earth orbit[J].Extreme Mechanics Letters，2023，64：102089.

[13] Chen Y，Lei J，Jiang H，*et al*.Space-grade polyimide composites：A state-of-the-art review on radiation degradation mechanisms and advanced shielding strategies for orbital sustainability[J].ES Materials and Manufacturing，2025，29：1684.

[14] Malakooti S，Vivod S L，DeGroh K K，*et al*.Space environment exposure effects on polyimide aerogels[J].Polymer Degradation and Stability，2025，239：111398.

[15] Barra G，Guadagno L，Raimondo M，*et al*.A comprehensive review on the thermal stability assessment of polymers and composites for aeronautics and space applications[J].Polymers，2023，15(18)：3786.

[16] Li W R，Yang X，Sun G Y，*et al*.Porous lightweight polyimide films with ultra-high surface insulation strength and thermal insulation for space solar arrays[J].ACS Applied Materials & Interfaces，2025，17(40)：56553-56562.

[17] Gouzman I，Grossman E，Verker R，*et al*.Advances in polyimide-based materials for space applications[J].Advanced Materials，2019，31(18)：1807738.

[18] Zhang Y，Dai S，Yin Z，*et al*.Integration fabrication of polyimide composite films for aerospace applications[J].Smart Mat，2024，5(3)：1225.

[19] Shuvalov V A，Gorev N B，Kuchugurnyi Y P.Polyimide degradation under atomic oxygen attack[J].Acta Astronautica，2023，207：118-128.

[20] Huang C，Liu J，Zhao L，*et al*.Advances in atomic oxygen resistant polyimide composite films[J].Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，2023，168：107459.

[21] Santos L B T，Prado A F B A，Santos T F A，*et al*.Selecting orbits for earth observations[J].The European Physical Journal Special Topics，2023，232：3037-3047.

[22] Oluropo O E, Ukomi U, Udoh R A. Comparative, coverage and horizon plane analysis for LEO, MEO, GEO and HEO satellites[J]. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Research, 2022, 1(2): 54-66.

[23] Zhao W, Li W, Liu H, *et al*. Erosion of a polyimide material exposed to simulated atomic oxygen environment[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2): 268-273.

[24] Li X, Al-Ostaz A, Jaradat M, *et al*. Substantially enhanced durability of polyhedral oligomeric silsequioxane-polyimide nanocomposites against atomic oxygen erosion[J]. European Polymer Journal, 2017, 92: 233-249.

[25] Rea S, Guida M. Computational degradation analysis of low earth orbit and very low earth orbit spacecraft structures due to interaction with atomic oxygen[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34: 28661-28667.

[26] Verker R, Keren E, Refaeli N, *et al*. Measurements of material erosion in space by atomic oxygen using the on-orbit material degradation detector[J]. Acta Astronautica, 2023, 211: 818-826.

[27] Wei D, Zeng F, Cui J. Damage and degradation of mechanical properties of polyimide-based materials under atomic oxygen attack: A molecular dynamics simulation study[J]. Computational Materials Science, 2024, 243: 113110.

[28] Zhou S, Zhang Y, Zou L, *et al*. Mechanism analysis and potential applications of atomic oxygen erosion protection for Kapton-type polyimide based on molecular dynamics simulations[J]. Polymers, 2024, 16(12): 1687.

[29] Zhou S, Zhang L, Zou L, *et al*. Mechanistic study of atomic oxygen erosion on polyimide under electric fields: A molecular dynamics and density functional theory approach[J]. Molecules, 2024, 29(22): 5353.

[30] Pernigoni L, Grande A M. Advantages and challenges of novel materials for future space applications[J]. Frontiers in Space Technologies, 2023, 4: 1253419.

[31] Ince J C, Peerzada M, Mathews L D, *et al*. Overview of emerging hybrid and composite materials for space applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6: 130.

[32] Prakash P, Weerasinghe J, Levchenko I, *et al*. Polyimide nanocomposites for next generation spacesuits[J]. Materials Horizons, 2025, 12: 3633-3666.

[33] Rimdusit S, Yokota R. Atomic oxygen protections in polymeric systems: A review[J]. The Journal of Space Technology and Science, 2002, 18(1): 34-48.

[34] Wu Z, Liu F, Yang S, *et al*. Long-term atomic oxygen resistant polyimide films containing carborane nanocage structure in the main chains[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 210: 110280.

[35] Goto A, Jorge P D C, Xu C, *et al*. Atomic-oxygen effects on a siloxane-polyimide block-chian copolymer (BSF-30)[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7: 13125-13138.

[36] Tomczak S J, Wright M E, Guenthner A J, *et al*. Space survivability of main-chain and side-chain POSS-Kapton polyimides[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1087: 505.

[37] Wright J S, Jones A, Farmer B, *et al*. POSS-enhanced colorless organic/inorganic nanocomposite (CORIN®) for atomic oxygen resistance in low earth orbit[J]. CEAS Space Journal, 2021, 13: 399-413.

[38] Minton T K, Wright M E, Tomczak S J, *et al*. Atomic oxygen effects on POSS polyimides in low earth orbit[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(2): 492-502.

[39] Connell J W. The effect of low earth orbit atomic oxygen exposure on phenylphosphine oxide-containing polymers[J]. High Performance Polymers, 2000, 12(1): 43-52.

[40] Connell J W, Watson K A. Space environmentally stable polyimides and copolyimides derived from bis(3-aminophenyl)-3,5-di(trifluoromethyl) phenylphosphine oxide[J]. High Performance Polymers, 2001, 13(1): 23-34.

[41] Serenko O A, Andropova U S, Aysin R R, *et al*. Stabilization mechanisms of polyimide-metallosiloxane nanocomposites against atomic oxygen impact[J]. Applied Surface Science, 2025, 685: 161992.

[42] 吴昊, 王振中, 张燕, 等. 具有双重 POSS 保护的抗原子氧聚酰亚胺薄膜的制备及性能[J]. 航天器环境工程, 2025, 42(3): 331-339.

[43] Wu B, Zhang Y, Yang D, *et al*. Self-healing anti-atomic oxygen phosphorus-containing polyimide film via molecular level incorporation of nanocage trisilanolphenyl POSS: Preparation and characterization[J]. Polymers, 2019, 11(6): 1013.

[44] Zhang Y, Wu H, Guo Y D, *et al*. Atomic oxygen-resistant polyimide composite films containing nanocaged polyhedral oligomeric silsesquioxane components in matrix and fillers[J]. Nanomaterials, 2021, 11(1): 141.

[45] Zhang Y, Wu B, Wang H, *et al*. Preparation and characterization of transparent polyimide nanocomposite films with potential applications as spacecraft antenna substrates with low dielectric features and good sustainability in atomic-oxygen environments[J]. Nanomaterials, 2021, 11(8): 1886.

[46] Wu M, Liu Q, Qian M, *et al*. Fabrication and experimental investigation of flexible thin film solar module with ultra-high voltage for the space power satellites[J]. Advances in Astronautics Science and Technology, 2022, 5: 59-63.

[47] Shu C, Wu X, Zhong M, *et al*. The atomic oxygen resistant study of a transparent polyimide film containing phosphorus and fluorine[J]. Applied Surface Science, 2023, 631: 157562.

[48] Liu Y Y, Wang Y K, Wu D Y. Synthetic strategies for highly transparent and colorless polyimide film[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(28): 52604.

[49] Fay C C, Stoakley D M, St Clair A K. Molecularly oriented films for space applications[J]. High Performance Polymers, 1999, 11(1): 145-156.

[50] 刘金刚, 倪洪江, 周伟峰, 等. 无色透明耐高温聚合物光学薄膜研究与应用[J]. 新材料产业, 2014(11): 57-65.

[51] Li Z, Song H, He M, *et al*. Atomic oxygen-resistant and transparent polyimide coatings from [3,5-bis(3-aminophenoxy)phenyl]diphenylphosphine oxide and aromatic dianhydrides: Preparation and characterization[J]. Progress Organic Coatings, 2012, 75(1/2): 49-58.

[52] Li Z, Liu J, Gao Z, *et al*. Organo-soluble and transparent polyimides containing phenylphosphine oxide and trifluoromethyl moiety: Synthesis and characterization[J]. European Polymer Journal, 2009, 45(4): 1139-1148.