

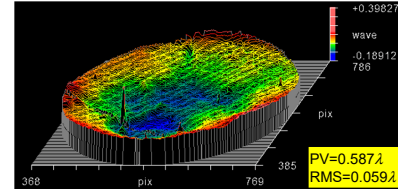


DOI: 10.12086/oe.2021.210150

空间光学成像系统用高尺寸 稳定光学聚酰亚胺薄膜

殷家家*, 毛丹波, 范斌, 边疆, 杜俊峰

中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209



摘要: 空间光学成像系统采用薄膜主镜解决了大口径、轻量化、空间折叠展开等难题, 但大口径光学透镜的成像指标要求高、空间应用环境恶劣, 对透镜基底材料的性能要求严苛, 其中尺寸稳定性、空间环境适应性尤为重要。本文提出在分子结构设计基础上, 通过共聚合成的方法有效改性聚酰亚胺材料, 通过在分子结构中同时引入刚性链和分子链间氢键作用, 在保证传统聚酰亚胺高机械性能、高热稳定性的同时, 改善其热尺寸稳定性、空间环境光学稳定性。所得高尺寸稳定性光学级聚酰亚胺薄膜材料综合性能良好, 是优异的空间光学成像系统薄膜主镜候选材料。

关键词: 光学聚酰亚胺薄膜; 高尺寸稳定性; 空间环境光学稳定性

中图分类号: TQ323.7

文献标志码: A

殷家家, 毛丹波, 范斌, 等. 空间光学成像系统用高尺寸稳定光学聚酰亚胺薄膜[J]. 光电工程, 2021, 48(10): 210150

Yin J J, Mao D B, Fan B, et al. High dimensional stability polyimide membrane material for space optical imaging system[J].

Opto-Electron Eng, 2021, 48(10): 210150

High dimensional stability polyimide membrane material for space optical imaging system

Yin Jiajia*, Mao Danbo, Fan Bin, Bian Jiang, Du Junfeng

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: Polymer membranes are attractive mirror candidate for the space large aperture lightweight optical imaging system. But there are strict requirements for mirror material because of the harsh space application environment and the high optical imaging quality requirement. The dimensional stability is one of the most important properties for optical mirror material. In this research, based on the molecular structure design, rigid molecular chain and hydrogen chain have been introduced to polyimide to improve the thermal dimensional stability. At the same time, the excellent mechanical, optical and thermal properties of the polyimide membrane have been guaranteed. The obtained optical grade polyimide has high dimensional stability, and the optical stability of the space environment and the excellent comprehensive properties are good candidates for the lightweight optical application.

Keywords: optical grade polyimide; high dimensional stability; optical stability of space environment

1 引言

聚酰亚胺有机聚合物薄膜材料由于其优异的热稳

定性、较高的机械强度、抗化学腐蚀性及抗电阻性被广泛应用于航空航天、电子工业、屏幕显示、医疗器

收稿日期: 2021-05-10; 收到修改稿日期: 2021-07-13

基金项目: 国家重点研发计划“地球观测与导航专项-静止轨道高分辨率成像相机系统技术”资助课题(2016YFB0500200)

作者简介: 殷家家(1989-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事光学材料方面的研究。E-mail: yinjj@ioe.ac.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

械等领域^[1-3], 其对国民经济建设和发展具有十分重要的意义。由于聚合物薄膜材料具有面密度轻且易折叠等优点, 在轻量化光学系统中的应用越来越广。为了满足空间光学望远系统大口径、高分辨率和重量轻等应用需求, 研制大口径衍射光学系统成为空间高分辨成像领域的一个重要发展方向。该方向主要是将二元光学原理应用于光学成像系统主镜上, 微结构二元光学元件具有面型公差宽松、重量轻、结构灵活、易于折叠展开等特点, 目前微结构二元光学元件主要包括菲涅尔透镜和光子筛。

传统光学元件一般采用无机材料, 具有更高的尺寸稳定性, 例如具有更低的热膨胀性(通常在 $0\sim 15\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 石英玻璃约为 $0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 并且光学性能稳定, 热环境变化其折射率变化较小。相比之下有机高分子材料, 特别是聚酰亚胺薄膜材料一般具有较大的热膨胀性, 例如商业用 Kapton-H 芳香族聚酰亚胺薄膜 CTE(coefficient of thermal expansion, 热膨胀系数)在 $35\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 左右, 受热膨胀变化材料折射率会发生较大变化, 光学均匀性、稳定性受到影响。但是基于无机材料的光学透镜, 易碎且厚重, 而基于有机光学基底材料面密度轻、强度较高、易折叠且易运输, 在未来光学系统中具有发展潜力, 特别对于空间应用光学系统, 其应用可大大减小对火箭运载能力的要求。因此研制具有高尺寸稳定性的聚酰亚胺薄膜材料对轻量化光学系统的发展至关重要。

美国劳伦斯-立夫莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)于1998年提出“空间衍射光学成像望远镜计划”(Eyeglass Plan)^[4], 其薄膜主镜材料一直是研究重点。眼镜计划在2004年以 $\Phi 5\text{ m}$ 衍射光学地面样机被验收, 光学主镜所用材料为康宁公司1737型薄玻璃板^[5]。该眼镜原计划原目标为 $\Phi 20\text{ m}$ 主镜, 由于材料技术等难题被搁置。2010年美国国防高级研究项目局(DARPA)启动后续“薄膜型光学即时成像器”(MOIRE)项目^[6]后, 第一阶段的主要目标就包括研制满足空间光学应用的薄膜主镜材料^[7-8]。美国 NeXolve 材料公司负责了该项目的聚酰亚胺衍射光学薄膜的研制, 直到现在, MOIRE 项目所用主镜材料均为 NeXolve 公司提供的光学聚酰亚胺薄膜^[9]。

但是, 在空间应用中, 材料会面对复杂的热交变环境。对于光学应用级聚酰亚胺薄膜材料, 这些热应力带来的微小残余应力即可带来光学聚酰亚胺薄膜的形变, 长期应力作用下可能会导致材料的蠕变, 进而对光学系统造成影响。例如具有微结构的菲涅尔薄膜

衍射光学元件, 过高的热膨胀会导致薄膜上微结构刻蚀深度、位置和宽度发生变化, 造成衍射透镜能量利用率下降、鬼像以及衍射杂散光等, 对系统性能产生影响^[10-12]。同时在不同的应用场景环境下, 薄膜内热应力会加速材料的老化和失效过程。因此在材料设计阶段, 研制具有低热膨胀性的高性能光学应用级聚酰亚胺薄膜材料非常重要。

本文以 3,3',4,4'-联苯四甲酸二酐(BPDA)和均苯四甲酸二酐(PMDA)为二酐, 4,4'-二氨基苯醌替苯胺(DABA)为二胺合成了共聚型聚酰亚胺, 通过在分子结构中同时引入刚性链以及氢键作用, 以此在保证传统聚酰亚胺高机械性能、高热稳定性的同时, 改善其在复杂环境下的热尺寸稳定性并保证其较高的光学透过率。通过工艺参数调整实现了大口径聚酰亚胺薄膜的制备, 其具有良好的光学均匀性。所得聚酰亚胺薄膜综合性能良好, 在空间轻量化光学系统中具有潜在的应用价值, 是优异的光学薄膜主镜候选材料。

2 主要研究内容

2.1 实验部分

2.1.1 试剂与仪器

3,3',4,4'-联苯四甲酸二酐(BPDA, 分析纯, 98%, TCI), 均苯四甲酸二酐(PMDA, 分析纯, 98%, TCI), 由于 PMDA 和 BPDA 极易吸潮, 使用前需要将其在真空烘箱中进行烘烤干燥(120°C , 6 h)预处理; 4,4'-二氨基苯醌替苯胺(DABA, 分析纯, 98%, TCI); 无水 *N*-甲基吡咯烷酮溶剂(NMP, 分析纯, 阿拉丁试剂)。

2.1.2 聚酰亚胺薄膜的制备

将氮气通入装备有搅拌器的 500 mL 三口圆底烧瓶中, 加入一定量 DABA 溶解于 *N*-甲基吡咯烷酮中, 然后分别加入一定量 PMDA 和 BPDA, 反应温度保持 0°C , 持续搅拌反应 30 min, 在室温下反应 24 h~48 h, 反应完成后加入封端剂间苯二甲酸, 继续搅拌 30 min, 得到固含量为 10.0%的聚酰胺酸胶液, 将得到的胶液加压过滤, 并将得到的聚酰胺酸胶液真空除泡; 利用旋涂机在石英基板上旋涂一定厚度的聚酰胺酸胶液湿膜, 经过加热板预烘处理, 然后通过程序升温在真空烘箱中以 100°C 烘烤 1 h, 200°C 烘烤 1 h, 350°C 烘烤 1 h, 热亚胺化过程完成后, 脱膜得到厚度为 $25\ \mu\text{m}$ 的均匀薄膜。

2.2 性能测试部分

采用德国耐驰热重分析仪 TG-201F1 对薄膜耐热

性进行了表征。试验条件为:在氮气保护下(40 mL/min)起始温度为室温,终止温度为 750 °C,升温速率为 20 °C/min。采用 Q800(美国 TA 公司)系列热分析仪分析聚酰亚胺薄膜材料玻璃化转变温度(T_g)。测试条件为:在氮气氛围下,频率 1 Hz,升温速率为 5 °C/min,试样尺寸 20 mm×6.5 mm ($L\times W$),测试温度范围为 50 °C到 500 °C。采用 TMA 402 Hyperion(德国耐驰热机械分析仪)对薄膜热膨胀系数进行了测试,热膨胀系数测试试验条件为在氮气氛围(20 mL/min)下,静态牵引力为 50 mN,升温速率为 5 °C/min,温度测试范围为-150 °C~100 °C。采用 PerkinElmer 的 Lambda 1050 紫外可见分光光度计分析薄膜的透过率,测试条件为:波长 200 nm~800 nm。采用激光干涉光学显微镜(德国, Bruker Optics)测定薄膜表面粗糙度。采用 ZYGO 激光干涉仪测定薄膜的透射波前,激光波长为 632.8 nm,除去空腔系统误差。采用 Instron 5900 系列万能试验拉伸机测试薄膜材料的拉伸强度等参数,拉伸速率为 10 mm/min,样条尺寸为 150 mm×20 mm×25 μm ($L\times W\times H$)。采用紫外辐照试验设备(非标)对薄膜耐辐照性进行了试验,样品尺寸为 35 mm×35 mm×25 μm ($L\times W\times H$)正方形,总辐照量为 1.8375 kcal/cm³,近紫外(200 nm~400 nm)试验加速因子为 4,远紫外(115 nm~200 nm)试验加速因子为 10,完成试验前后对样品进行透过率测试。采用综合辐照试验设备(非标)对薄膜耐辐照性进行了试验,样品尺寸为 35 mm×35 mm×25 μm ($L\times W\times H$)正方形,辐照源为 ⁶⁰Co γ ,辐照剂量率为 10 rad/s(Si),总剂量为 6.8×10⁵ rad(Si),完成试

验前后对样品进行透过率测试。

3 结果与讨论

3.1 聚酰亚胺薄膜的光学性能

制备的光学级聚酰亚胺薄膜相比于传统的芳香族聚酰亚胺薄膜具有更良好的光学透过率,特别是紫外可见光区域透过率有显著提高,图 1 为制得聚酰亚胺薄膜材料和传统芳香族聚酰亚胺薄膜(Kapton)透过率测试结果对比(插图新型聚酰亚胺薄膜实物图),根据结果可知,本研究制备聚酰亚胺薄膜 500 nm 到 800 nm,平均透过率为 82.0%,而传统 Kapton 薄膜仅为 71.2%。

同时对新型 PI 薄膜进行了透射波前和表面粗糙度测试。聚酰亚胺薄膜光学均匀性与薄膜厚度均匀性、折射率均匀性等多个因素有关,以透射波前误差表征。薄膜口径越大,其厚度均匀性越难控制,传统聚酰亚胺薄膜的制备通常采用刮涂、流延法进行制备,但其厚度均匀性很难保证,且不能满足光学应用的要求。本研究采用大口径旋涂法制备聚酰亚胺薄膜,通过工艺控制实现了能够满足光学应用的大口径聚酰亚胺薄膜制备。如图 2(a)为本研究制备所得口径为 300 mm 的聚酰亚胺薄膜透射波前测试结果,图 2(b)为商业购买传统刮涂法制备的 Kapton 聚酰亚胺薄膜透射波前测试结果,薄膜厚度均为 25 μm 。通过波峰到波谷(peak to valley, PV)和均方根(root mean square, RMS)值对比可知,本研究中通过旋涂法制备的聚酰亚胺薄膜厚度均匀性(PV=0.587 λ ;RMS=0.059 λ)远远优于商业 Kapton

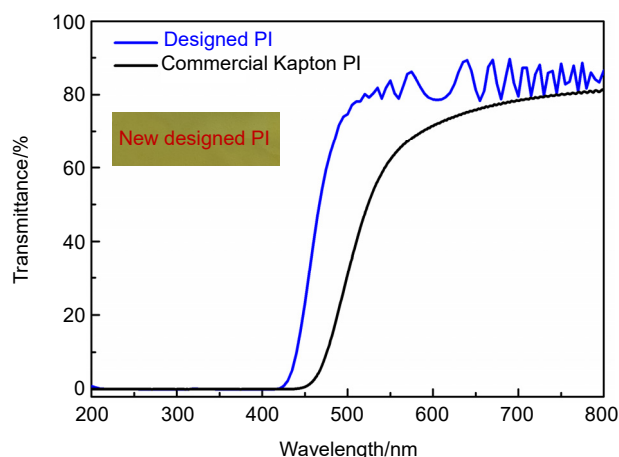


图 1 新型 PI 聚酰亚胺薄膜和传统芳香族 Kapton 聚酰亚胺薄膜透过率对比。

薄膜厚度均为 25 μm , 插图新型 PI 薄膜实物图

Fig. 1 The transmittance spectra of the designed PI membrane (25 μm) and the commercial Kapton membrane(25 μm) (Insert picture: new designed PI membrane)

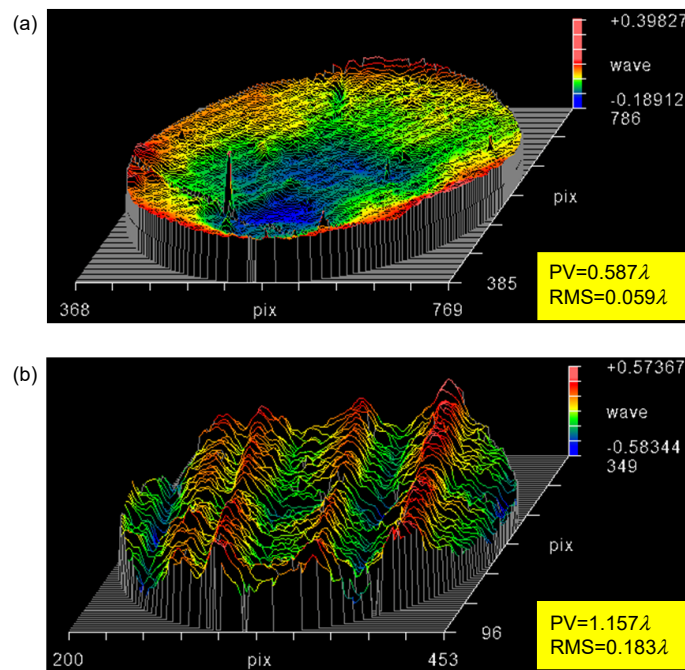


图 2 (a) 本研究制备聚酰亚胺薄膜和
(b) 商业购买 Kapton 聚酰亚胺薄膜透射波前测试结果
(均为纯膜, 口径 300 mm, 厚度 25 μm, 环状固定测试)

Fig. 2 The wave-front error of (a) the new designed PI membrane and (b) the commercial Kapton PI membrane ($D=300\text{ mm}$, $H=25\text{ }\mu\text{m}$)

聚酰亚胺薄膜($PV_k=1.157\lambda$; $RMS_k=0.183\lambda$), 更加适用于对光学均匀性要求较高的光学系统中。

光学应用中对透镜表面粗糙度有严格的要求, 较高的表面粗糙度会造成光的散射, 影响光学成像质量以及工作稳定性。商业购买聚酰亚胺薄膜表面粗糙度

(Sq)为 33.22 nm, 如图 3(a)所示, 本研究中所制备聚酰亚胺薄膜材料通过控制工艺参数以及实验环境, 有效地降低了薄膜材料的表面粗糙度, 如图 3(b)所示, 其表面粗糙度(Sq)可达 3.41 nm。

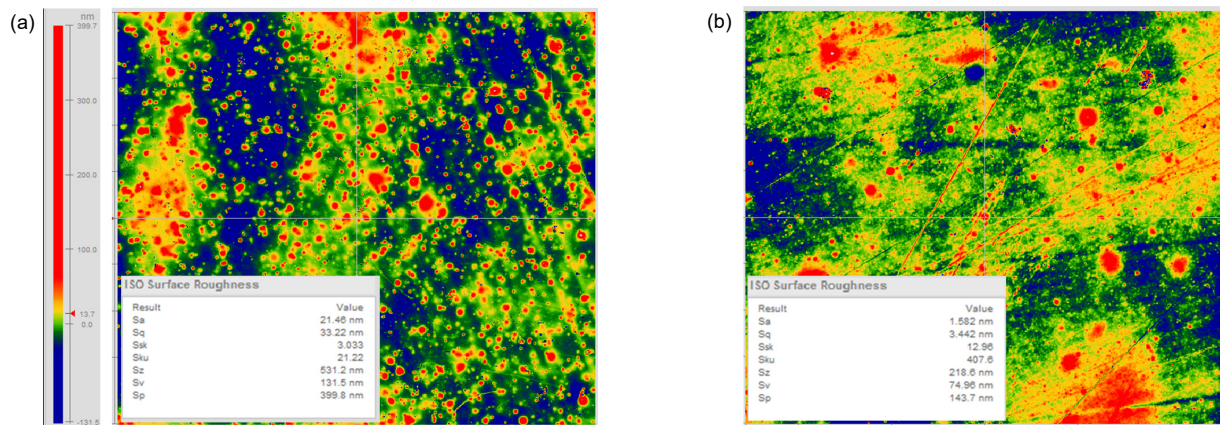


图 3 (a) 商业购买 Kapton 聚酰亚胺薄膜与(b) 本研究制备聚酰亚胺薄膜表面粗糙度测试结果

Fig. 3 Surface roughness test results of (a) the new designed PI membrane and (b) the commercial Kapton PI membrane

3.2 聚酰亚胺薄膜的尺寸稳定性

在一定热交变环境下, 材料由于热膨胀作用会发生尺寸变化, 从而造成薄膜基底上菲涅尔衍射微结构尺寸的改变。以二阶菲涅尔衍射元件为例(如图 4 所示, 刻蚀有菲涅尔环带微结构的薄膜透镜及成像光路), 薄膜面外热膨胀会带来菲涅尔微结构刻蚀深度改变, 薄膜面内均匀热膨胀会导致微结构环带宽度变化和微结构环带的位置变化。

薄膜的波前误差对菲涅尔衍射结构的位置精确度非常敏感。菲涅尔薄膜透镜衍射成像时, 各环带距成像焦点的光程差 δ 为

$$\delta = \sqrt{f^2 + r_m^2} - f \quad (1)$$

薄膜的波前误差与菲涅尔透镜设计 F 数和环带位置膨胀量 Δr 有关, 且正比于膨胀量 Δr 。对于大口径菲涅尔薄膜透镜, 面内热膨胀将引入环带位置膨胀量 Δr , 则环带光程差变化量为

$$\Delta\delta = \frac{1}{\sqrt{4F^2 + 1}} \Delta r \quad (2)$$

透镜 F 数为 f/D , D 为透镜口径。由上式可知, 薄膜材料过高的热膨胀系数会导致在温度变化较大的环境下, 菲涅尔微结构环带位置发生较大变化, 特别对于大口径菲涅尔薄膜透镜, 可能导致薄膜衍射元件能量利用率下降、鬼像以及衍射杂散光等对系统性能产生影响。

根据瑞利判断, 成功成像需保证因环境温度引起的波前差不超过四分之一波长。因此要求环带位置膨胀量 Δr 满足:

$$\Delta r \leq \frac{\lambda}{4} \times \sqrt{4F^2 + 1} \quad (3)$$

对于口径 D 的薄膜衍射透镜的热膨胀系数 η 需要

满足:

$$\eta = \frac{2\Delta r}{D} \leq \frac{\lambda}{2D} \times \sqrt{4F^2 + 1} \quad (4)$$

因此, 考察材料热交变环境下由于材料尺寸稳定性带来的衍射元件性能影响非常有必要, 材料热膨胀系数必须满足光学成像质量的要求, 聚酰亚胺薄膜材料需满足较高的尺寸稳定性。本研究中尝试通过分子结构设计引入刚性链以及分子链间氢键相互作用提高材料的尺寸稳定性。下面对其热膨胀系数进行了测试, 本研究制备聚酰亚胺薄膜具有优异的尺寸稳定性, 测试结果如图 5 所示, 在 $-150\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内其热膨胀系数低至 $-1.71 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 而 Kapton 薄膜热膨胀系数为 $10.62 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

3.3 聚酰亚胺薄膜的热学性能

热稳定性对于空间复杂热循环环境下的聚酰亚胺薄膜材料使用性能非常重要。通过动态力学性能测试法(DMA)对薄膜的玻璃化转变温度(T_g)进行测试, 结果如图 6(a)所示, 本研究制备聚酰亚胺薄膜玻璃化转变温度为 $306.81\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 6(b)为本研究制备聚酰亚胺薄膜的热失重曲线和热失重对温度求导曲线, 薄膜在测试前未进行任何预处理。由图 6(b)可知, 薄膜在 $79.45\text{ }^\circ\text{C}$ 出现微量的热失重, 推测主要由两方面造成, 一方面由于薄膜在存储过程中存在一定的吸湿效应, 另一方面薄膜内存在少量的残余溶剂, 两者随着温度升高脱出带来热失重。薄膜初始分解温度为 $511.07\text{ }^\circ\text{C}$, 失重 5%、10%、15% 的温度分别为 $501.92\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $542.84\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $582.76\text{ }^\circ\text{C}$, $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 时仍有 63% 的残余, 证明本研究制备聚酰亚胺薄膜具有良好的热稳定性。这主要是由于合成聚酰亚胺的原料分子链刚性较强, 从而导致其耐热性能较高。

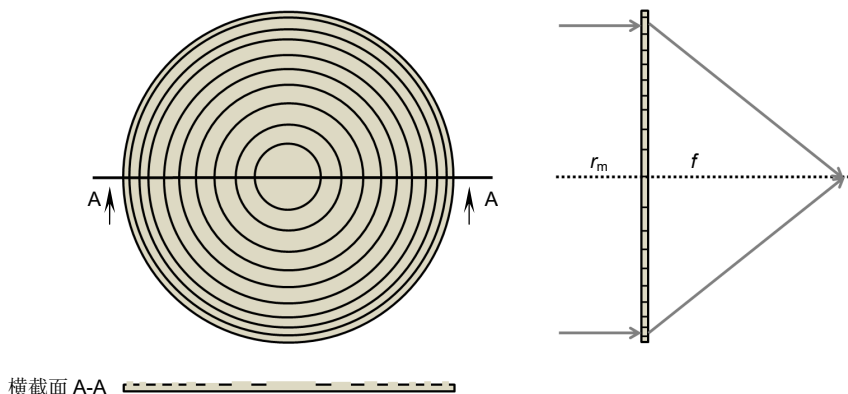


图 4 具有菲涅尔结构的薄膜透镜示意图。 f 为焦距, r_m 为薄膜半径

Fig. 4 The illustrations of the membrane lens with Fresnel structure. f is the focal length and r_m is the radius of the membrane

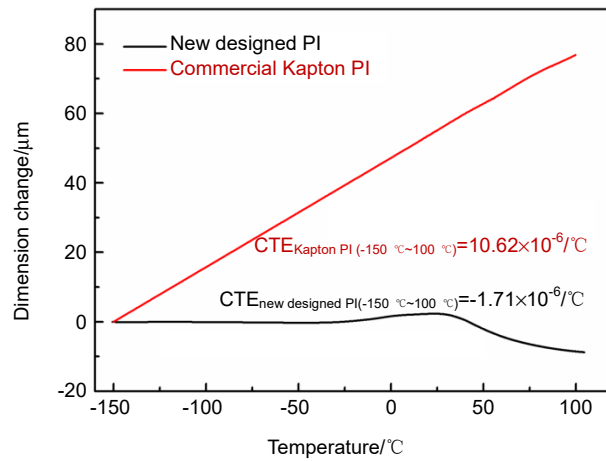


图5 本研究制备聚酰亚胺薄膜(黑线)与商业购买 Kapton 聚酰亚胺薄膜(红线)热膨胀系数(-150 °C~100 °C温度范围内)测试结果
 Fig. 5 The CTE results of the new designed membrane (black line) and the commercial Kapton PI membrane (red line)

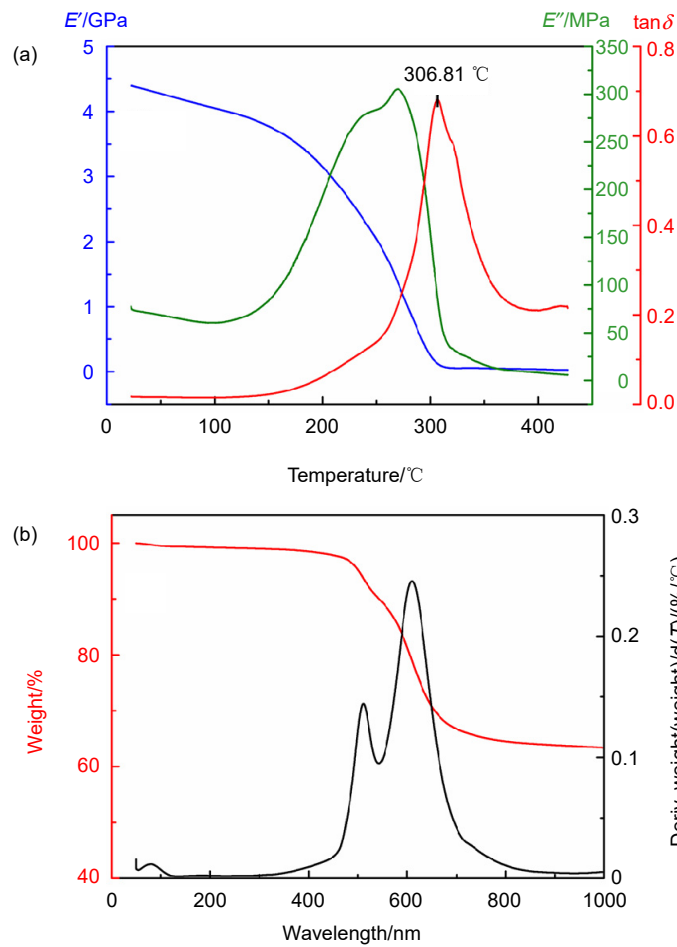


图6 本研究制备聚酰亚胺薄膜 DMA (a)和 T_g (b)分析测试结果
 Fig. 6 The (a) DMA and (b) T_g results of the new designed membrane

3.4 聚酰亚胺薄膜的力学性能

本研究制备聚酰亚胺薄膜的力学性能测试结果如图 7 所示, 在同一聚酰亚胺薄膜上不同位置取三个薄膜样条, 通过万能试验机进行拉伸强度测试。根据测试结果计算出三个样品的平均拉伸强度为 200.6 MPa、平均最大应力为 84.2 N, 平均断裂伸长率为 4.57%。薄膜的力学性能表现优异。

3.5 空间环境光学稳定性

空间环境应用的聚酰亚胺薄膜材料, 通常会暴露在真空紫外线和近紫外线中。真空紫外线在紫外光谱中所占比重较少, 但真空紫外对聚酰亚胺膜的影响较明显, 近紫外辐照下 PI 膜的光学性能近乎不变。为了考察新型聚酰亚胺的空间环境光学稳定性, 对新型聚

酰亚胺薄膜进行了 115 nm~400 nm 波段的太阳真空紫外辐照试验, 图 8 为辐照前后样品透过率曲线。由实验结果可知(表 1), 经过 1.8375 kcal/cm³ 剂量紫外辐照后, 样品光学性能出现了一定程度的下降, 在 500 nm~800 nm 波长范围内其平均透过率下降了 0.36%, 但是下降率较小, 对聚酰亚胺薄膜的光学稳定性影响较小。

为了进一步研究新型聚酰亚胺薄膜的空间环境光学稳定性, 采用 ⁶⁰Co γ 辐照源对新型聚酰亚胺薄膜进行了总剂量辐照试验, 辐照剂量率为 10 rad/s(Si), 总剂量为 6.8 \times 10⁵ rad(Si)。辐照前后透过率变化对比结果如图 9 所示。通过表 1 总结结果可知, 在一定量总剂量辐照后薄膜在 500 nm~800 nm 波长范围内其平均透过率并没有发生很大变化, 光学性能保持稳定。

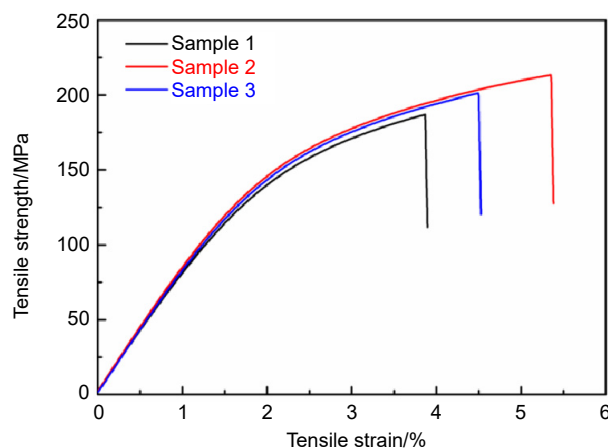


图 7 同一薄膜上三个不同位置薄膜样品的拉伸强度测试结果
Fig. 7 The tensile strength of the new designed film (three samples)

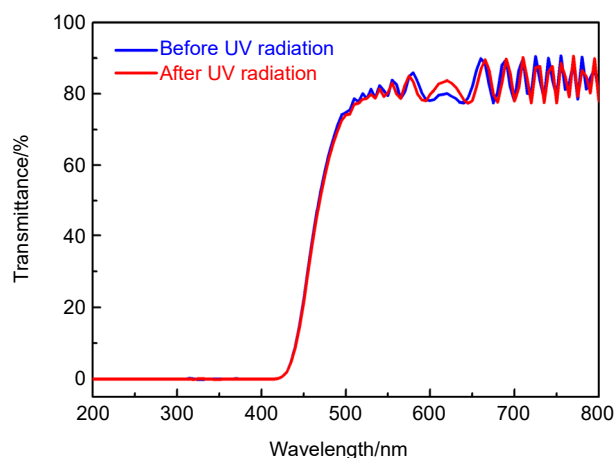


图 8 本研究制备聚酰亚胺薄膜紫外辐照试验前后透过率对比
Fig. 8 The transmittance spectra of the new designed membrane (25 μ m) before and after UV radiation

表 1 本研究制备的聚酰亚胺薄膜经过一定剂量真空紫外辐照和总剂量辐照前后在 500 nm~800 nm 波段范围内的平均透过率变化

Table 1 The average transmittance between 500 nm~800 nm of the new designed PI before and after a certain amount of the UV radiation and the total dose radiation

试验项目	$T_{500\text{ nm} \sim 800\text{ nm}}$ 辐照前	$T_{500\text{ nm} \sim 800\text{ nm}}$ 辐照后
紫外辐照/%	82.1	81.7
总剂量辐照/%	81.9	82.0

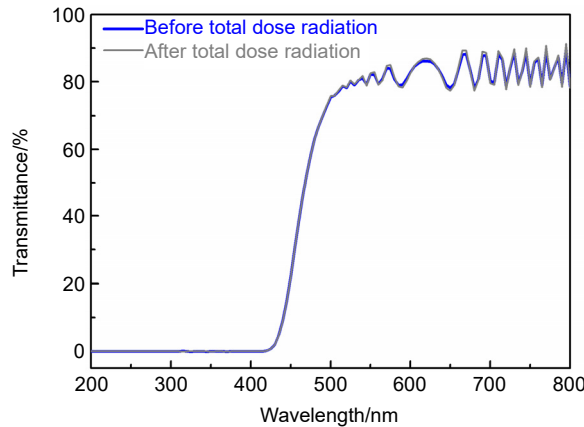


图 9 本研究制备聚酰亚胺薄膜总剂量辐照试验前后透过率对比

Fig. 9 The transmittance spectra of the new designed membrane (25 μm) before and after total dose radiation

4 结论

综上所述, 本文针对基于聚酰亚胺薄膜材料的光学元件空间应用的需求, 以光学级聚酰亚胺薄膜材料的热膨胀性能和光学均匀性调控为主要研究对象, 提出通过分子设计, 制备合成兼具高尺寸稳定性和良好光学均匀性的空间应用光学级聚酰亚胺薄膜材料。合成的聚酰亚胺由于含刚性结构、氢键等结构, 具有更低的 CTE、良好的光学透过率、优异的耐热性能和力学性能。并且通过良好的工艺控制实现了具有良好光学均匀性的较大口径的聚酰亚胺薄膜的制备。为考察新型聚酰亚胺薄膜的空间环境光学稳定性, 对薄膜进行了一定剂量的真空紫外辐照和总剂量辐照试验。结果证明紫外辐照对薄膜可见光区域平均透过率有一定降低, 总剂量辐照对薄膜的可见光区域平均透过率没有太大影响。以上研究结果为以后空间轻量化大口径薄膜衍射透镜材料选择提供参考。

参考文献

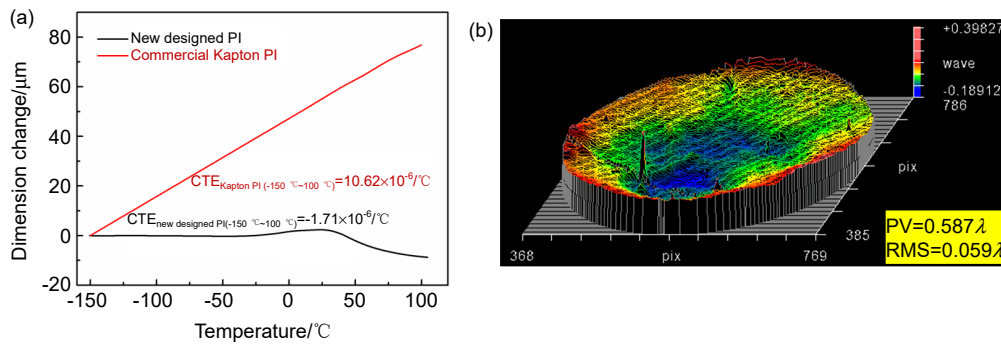
[1] Kreuz J A, Edman J R. Polyimide films[J]. *Adv Mater*, 1998, **10**(15): 1229–1232.
 [2] Min K I, Lee T H, Park C P, et al. Monolithic and flexible polyimide film microreactors for organic microchemical applications

fabricated by laser ablation[J]. *Angew Chem, Int Ed*, 2010, **49**(39): 7063–7067.
 [3] Sekitani T, Zschieschang U, Klauk H, et al. Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability[J]. *Nat Mater*, 2010, **9**(12): 1015–1022.
 [4] Rubenchik A M, Parker J M, Beach R J, et al. Solar power beaming: From space to earth[R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009.
 [5] Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[J]. *Proc SPIE*, 2002, **4849**: 28–39.
 [6] MacEwen H A, Breckinridge J B. Large diffractive/refractive apertures for space and airborne telescopes[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8739**: 873904.
 [7] <http://www.darpa.mil/news-events/2013-12-05>, Membrane Optical Imager for Real Time Exploitation (MOIRE).aspx.
 [8] Liu T, Zhou Y M, Wang J Q, et al. Application of zone plate diffractive imaging technology in earth observation satellites[J]. *Spacecr Eng*, 2012, **21**(3): 88–95.
 刘轶, 周一鸣, 王景泉, 等. 波带片衍射成像技术在对地观测卫星中的应用[J]. *航天器工程*, 2012, **21**(3): 88–95.
 [9] <http://nexolve.com/nexolve-products/low-and-zero-cte-polyimides>
 [10] Rossi M, Hessler T. Stray-light effects of diffractive beam-shaping elements in optical microsystems[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(14): 3068–3076.
 [11] Ando T, Korenaga T, Suzuki M A, et al. Diffraction light analysis method for a diffraction grating imaging lens[J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(11): 2532–2538.
 [12] Zhang H, Liu H, Lu Z W, et al. Modified phase function model for kinoform lenses[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(22): 4055–4060.

High dimensional stability polyimide membrane material for space optical imaging system

Yin Jiajia*, Mao Danbo, Fan Bin, Bian Jiang, Du Junfeng

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



(a) The comparison of the new designed PI membrane (black line) and commercial Kapton PI membrane (red line) CTE results;

(b) The wave-front errors of the new designed PI membrane

Overview: Polyimides are a kind of high performance polymer with excellent chemical resistance, thermal stability, and mechanical properties. It is a good candidate material for building space large aperture lightweight optical imaging system. For example, to provide geosynchronous-orbit Earth observation capabilities the Membrane Optical Imager Real-time Exploitation(MOIRE) program, sponsored by the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) seeks to further the technology development related to ultra light diffractive polyimide membrane-based telescopes. But there are strict requirements for the mirror material because of the harsh space application environment and the high optical imaging quality requirements. Under the space thermal alternation application environment, the temperature change can lead to deformation of the microstructure on the membrane, and then cause image distortion. A membrane optic is an optical system component with a large size, small thickness, and optical precision, so the membrane material and the manufacturing process are nontrivial. The dimensional stability and the optical homogeneity are two essential factors for large aperture optical mirror material. However, it's difficult for traditional aromatic PIs to simultaneously meet the challenging requirements of high dimensional stability, optical transmission, good thermal stability, and mechanical properties. Also it's hard to get large aperture PI films with good optical homogeneity based on the current membrane preparation process. In this research, based on the molecular structure design, rigid molecular chain and hydrogen chain have been introduced to polyimide to improve the dimensional stability and guarantee the excellent mechanical, optical, and thermal properties of the polyimide membrane. At the same time, by optimizing the membrane forming process, the wave-front error of the PI film can meet the requirements of optical use in diffractive imaging system. Compared with commercial Kapton polyimide membrane, the CTE of the new designed PI is ultra-low which is only $-1.71 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ in the temperature range of $-150\text{ }^\circ\text{C} \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$. Also, the tensile strength of the new designed PI is 200.6 MPa. The glass-transition temperature of it is $306.81\text{ }^\circ\text{C}$. And the average transmittance of designed PI at $500\text{ nm} \sim 800\text{ nm}$ is 82.9%. By optimize the membrane fabrication process parameters, the PV and RMS of $\Phi 300\text{ mm}$ membrane can reach to $0.587\lambda / 0.059\lambda$ ($\lambda = 632\text{ nm}$). Also, the designed PI shows a good optical stability of the space environment. The obtained optical grade polyimide with high dimensional stability and good optical homogeneity. The excellent comprehensive properties is a good candidate for diffractive lightweight optical application. Also, it will be a good candidate for the optical system of many other fields like high power lasers and solar cells.

Yin J J, Mao D B, Fan B, *et al.* High dimensional stability polyimide membrane material for space optical imaging system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(10): 210150; DOI: 10.12086/oe.2021.210150

Foundation item: National Key Research and Development Program Fund (2016YFB0500200)

* E-mail: yinjj@ioe.ac.cn