

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.014

机械拉伸对聚酰亚胺薄膜取向结构及导热性能的影响

赵焱焱¹, 阿布都合里力·亚克甫², 罗琛², 李栋¹, 朱宏达¹, 钟红梅³, 孟婷¹, 赵旻^{1,4,5}

(1. 中国科学技术大学工程科学学院, 合肥 230026; 2. 中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 102200;
3. 深圳职业技术大学机电工程学院, 广东深圳 518055; 4. 中国科学技术大学安徽省高等学校精密科学仪器重点实验室, 合肥 230027;
5. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 聚酰亚胺(PI)薄膜因本征热导率低[0.1~0.3 W/(m·K)], 难以满足高功率密度电子器件的散热需求, 因此, 高导热PI薄膜的制备对于半导体产业, 特别是柔性电子器件领域至关重要。采用化学亚胺化工艺制备了高延展性PI先驱体薄膜, 并通过单轴机械拉伸调控分子链取向结构, 系统研究了拉伸比对薄膜各向异性热导率、力学性能及热稳定性的影响。实验结果表明, 随着拉伸比由1.0增至2.5, 沿拉伸方向的面内热导率从0.34 W/(m·K)显著提升至1.11 W/(m·K), 而垂直于拉伸方向的面内及面外热导率分别降至0.11 W/(m·K)和0.14 W/(m·K), 呈现出明显的各向异性导热特征。二维广角X射线散射分析表明, 拉伸诱导分子链沿外力方向高度取向(Herman取向因子由0.08提高至0.79), 并促进局部链段有序堆积, 从而在拉伸方向构建了连续的声子传输通道。研究同时表明, 拉伸比为2.5时, 薄膜的拉伸强度与拉伸模量分别达到423.4 MPa和2.48 GPa, 玻璃化转变温度提升至373 °C。本研究为在不引入高导热填料的条件实现PI薄膜沿特定方向的高效热输运提供了可行策略, 在柔性电子热管理领域具有应用潜力。

关键词: 聚酰亚胺薄膜; 机械拉伸; 取向结构; 热导率; 热稳定性

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0128-07

Effects of mechanical stretching on orientation structure and thermal conductivity of polyimide films

ZHAO Hanhan¹, Abudouhelili·Yakefu², LUO Chen², LI Dong¹, ZHU Hongda¹, ZHONG Hongmei³, MENG Ting¹, ZHAO Yang^{1,4,5}

(1. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Petrochemical Research Institute, PetroChina Company Limited, Beijing 102200, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China; 4. Anhui Provincial Key Laboratory of Precision Scientific Instrumentation for Higher Education Institutions, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
5. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Polyimide (PI) films are difficult to meet the heat dissipation requirements of high power density electronic devices due to their low intrinsic thermal conductivity [0.1–0.3 W/(m·K)]. Therefore, the preparation of high thermal conductivity PI films is crucial for the semiconductor industry, especially in the field of flexible electronics. In this study, high extensible PI precursor films were prepared by a chemical imidization process, and the molecular chain orientation structure was regulated by uniaxial mechanical stretching. The effects of the draw ratio on the anisotropic thermal conductivity, mechanical properties and thermal stability of the films were systematically investigated. The experimental results show that as the draw ratio increases from 1.0 to 2.5, the in-plane thermal conductivity along the stretching direction significantly increases from 0.34 W/(m·K) to 1.11 W/(m·K), while the in-plane thermal conductivity and the out-of-plane thermal conductivity perpendicular to the stretching direction decreases to 0.11 W/(m·K) and 0.14 W/(m·K), respectively, exhibiting obvious anisotropic heat conduction characteristics. Two-dimensional wide-angle X-ray

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFA1203604), 国家自然科学基金项目(12241202, 12302251, 52406265), 深圳职业技术学院科研经费项目(6026310058K), 中国科学技术大学2025年度创新创业教育研究课题(SCJY2025003), 中国科学技术大学校级质量工程项目(2025xjyxm018, 2025xkcszkc03)

通信作者: 赵旻, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纳米结构传热、微超透镜阵列等; 孟婷, 博士, 实验师, 研究方向为微纳尺度热测量

收稿日期: 2026-07-13

引用格式: 赵焱焱, 阿布都合里力·亚克甫, 罗琛, 等. 机械拉伸对聚酰亚胺薄膜取向结构及导热性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 128–134.

ZHAO Hanhan, Abudouhelili·Yakefu, LUO Chen, et al. Effects of mechanical stretching on orientation structure and thermal conductivity of polyimide films[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 128–134.

scattering analysis indicates that stretching induces a high degree of molecular chain orientation along the direction of the external force (Herman orientation factor increases from 0.08 to 0.79) and promotes the ordered packing of local chain segments, thereby constructing continuous phonon transmission channels in the stretching direction. The research also shows that at a draw ratio of 2.5, the tensile strength and tensile modulus of the film reach 423.4 MPa and 2.48 GPa, respectively, and the glass transition temperature increases to 373 °C. This study provides a feasible strategy for achieving efficient thermal transport along specific directions in PI films without introducing highly thermally conductive fillers, showing application potential in the field of flexible electronic thermal management.

Keywords: polyimide film; mechanical stretching; orientation structure; thermal conductivity; thermal stability

聚酰亚胺(PI)薄膜因耐热性、化学稳定性、力学性能和电绝缘性能优异,被广泛用于柔性电路板、电子封装、5G通信器件和高频绝缘薄膜等领域^[1-2]。随着电子器件向小型化、高集成度和高功率密度方向发展,局部热积累已成为影响器件可靠性的重要因素。然而,普通PI薄膜本征热导率较低,通常仅为0.1~0.3 W/(m·K)^[3],难以满足高效散热需求。因此开发兼具导热、柔韧和耐热性能的PI薄膜具有实际意义^[4-5]。

目前,提高PI导热性能的常用方法是加入氮化硼^[6]、氧化铝^[7]、氧化铝^[8]等高导热填料,构建填料网络以降低热阻。然而,对于柔性封装和绝缘散热材料,高填充量往往会引起界面缺陷、团聚和基体连续性破坏,导致薄膜柔韧性和力学性能下降^[9],仅依赖填料改性难以同时满足高导热、高强度和加工适应性的要求。因此,寻找一种在不牺牲基体连续性和柔韧性的前提下提高PI的本征导热性能的方法,对促进微电子封装与5G通信领域的发展具有重要意义。

与填料复合不同,调控聚合物自身链结构是提高本征热导率的重要途径^[10]。分子链沿特定方向取向后,声子可优先沿共价主链传输,散射损失减少,热导率随之提高。静电纺丝、湿法纺丝等方法可以诱导链取向^[11-12],但工艺效率和大面积制膜能力有限。机械拉伸工艺简单、适合连续化加工,是调控薄膜取向结构的有效方法。传统热亚胺化PI薄膜脆性较大,难以承受高倍率拉伸;化学亚胺化可在较温和条件下获得具有一定延展性的前驱体膜,为拉伸诱导取向提供了条件。

单轴拉伸使PI薄膜表现出方向性热传输特征,可使热量优先沿拉伸方向传递,因此有望用于柔性电子器件中的定向热引导绝缘层。已有研究表明^[13],面内热导率具有方向差异的聚合物薄膜可用于热流引导及薄型电子器件的热管理。由于本文

尚未开展器件条件下的散热测试,其实际应用效果仍有待进一步验证。

本文采用化学亚胺化结合单轴机械拉伸制备PI薄膜,探究了拉伸比对分子链取向、有序结构、各向异性热导率、热稳定性和力学性能的影响机制,为无填料PI导热薄膜的制备及其在柔性热管理领域的应用提供了重要的实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

二胺单体[4,4'-二氨基二苯醚(ODA)]、二酐单体[均苯四甲酸二酐(PMDA)]:纯度98%,天津天缘电工有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAc):纯度99%,浙江日出化学试剂公司;

乙酸酐:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

异喹啉:纯度≥97%,上海阿达玛斯试剂有限公司。

1.2 仪器及设备

薄膜拉伸设备:WLS300-Plus,合肥中科优材科技有限公司;

马弗炉:Nabertherm GmbH,德国纳博热工业炉有限公司;

动态热分析仪:DMA Q800,美国TA仪器公司;

电子万能拉伸机:i-STRENTTEK1510,济南兰光机电技术有限公司;

小角X射线散射仪:SAXSpoint 2.0,奥地利安东帕有限公司;

热导率测试系统(基于3 ω 法):自搭建系统。

1.3 试样制备

在三口烧瓶中加入3.8958 g ODA和45.0 g DMAc,在室温下以300 r/min的转速搅拌至ODA完全溶解。聚合温度为20 °C,采用油浴加热。待反应体系温度稳定后,缓慢加入4.243 7 g PMDA,加入过程中尽量避免体系温度发生明显波动。随后使

用 5.0 g DMAc 冲洗加料容器及瓶壁,将残留的 PMDA 转移至反应体系中。加料结束后,将搅拌速度降至 100 r/min,继续反应 3 h,得到聚酰胺酸(PAA)溶液,并取样测试其分子量和黏度。该反应在空气环境下进行,ODA 与 PMDA 的物质的量比为 1:1,所得 PAA 溶液的固含量为 14%。

将异喹啉和乙酸酐溶解于 10 g DMAc 中,配制稀溶液后加入 PAA 溶液。其中,异喹啉和乙酸酐的用量分别为 PMDA 物质的量的 2 倍和 3 倍。添加完成后,以 350 r/min 的转速搅拌 5 min,使催化剂和脱水剂在体系中均匀分散。

在常温下将所得溶液流延成膜,经低温干燥后得到可自支撑的前驱体膜。采用薄膜拉伸设备对前驱体膜进行单轴拉伸,拉伸前在 150 °C 预热 5 min,使薄膜保持良好形变能力并完成初步定型。拉伸后的样品用夹具固定,置于马弗炉中以 15 °C/min 升温至 350 °C 并保温 5 min,使薄膜完全

亚胺化,随后随炉冷却,获得不同拉伸比 PI 薄膜。由于薄膜在拉伸完成后会发生一定程度的回缩,最终拉伸比与设备设定值存在差异,因此本文采用拉伸后实测并标定的拉伸比,各组数值未呈等间隔分布。不同 PI 薄膜的实际拉伸比分别测得记为 1.4、1.8 和 2.5,未拉伸样品记为 1.0。其中,拉伸比 1.4、1.8 和 2.5 分别对应较低、中等和较高的拉伸程度。在当前制备与拉伸条件下,继续提高拉伸比容易引起局部颈缩、缺陷或断裂,因此将 2.5 设为最高考察拉伸比。

化学亚胺化流程可避免热亚胺化中高温脱溶剂和体积收缩引起的较大残余应力,同时使未完全固化薄膜在具备自支撑强度的基础上仍保留一定链段活动能力^[14]。因此,薄膜在拉伸过程中更易发生分子链取向,而不易产生开裂或脆性断裂。该流程兼顾了薄膜可拉伸性和最终耐热性,是实现高取向 PI 自支撑薄膜的基础。

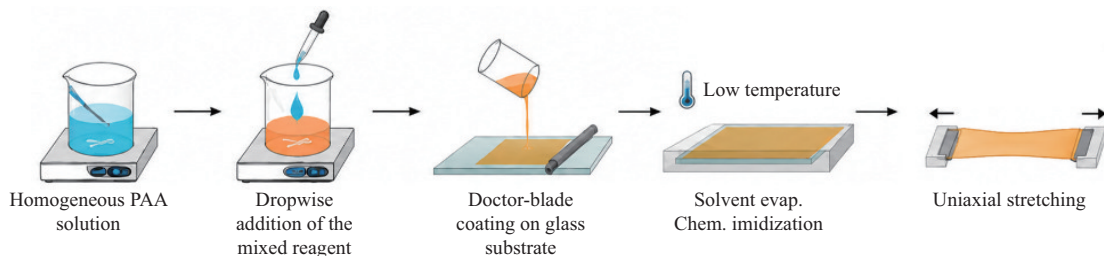


图1 PI薄膜制备工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of preparation process for PI films

1.4 测试与表征

1.4.1 热导率测试

基于 3ω 法^[15]测试薄膜沿拉伸方向、垂直拉伸方向及面外方向的热导率,测试原理如图 2a 所示。金属条带同时作为交流加热器和温度传感器,施加频率为 ω 的交流电后产生 2ω 周期热流,并通过 3ω 电压信号反演温升。如图 2b 所示,低频条件下热波在薄膜面内扩散充分,可提取面内热导率^[16];高频条件下热扩散深度减小,温度响应同时受面内和面外传热影响,结合各向异性热传导模型^[17]进行拟合,可获得面外热导率。为保证数据可比性,所有样品均采用相同热处理程序和测试环境。热导率测试时,分别使金属加热条与拉伸方向平行或垂直,以获得不同方向的面内热导率;面外热导率则通过高频段温升响应拟合得到。

1.4.2 玻璃化转变温度测试

采用动态力学分析仪测试 PI 薄膜的玻璃化转

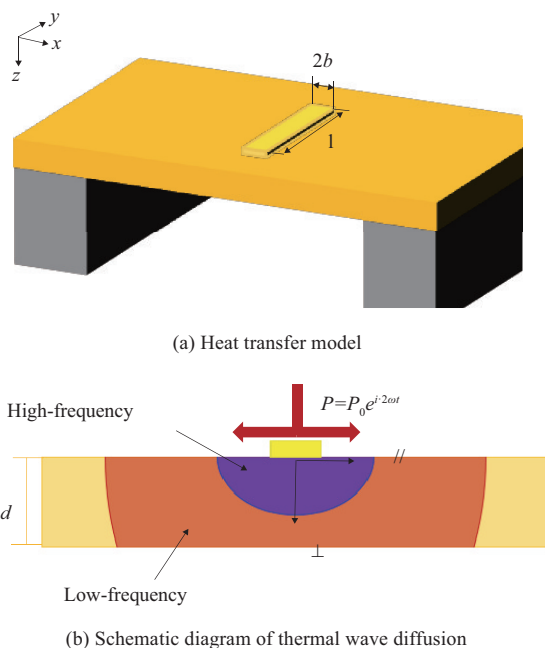


图2 3ω 法测试原理图

Fig. 2 Schematic diagram of 3ω method test

变温度(T_g)。测试依据 GB/T 33061.11-2022,测试时,结合仪器夹具尺寸,将薄膜裁剪为尺寸为40 mm×5.5 mm的长条形样品。测试过程中记录储能模量、损耗模量和损耗因子随温度的变化,并以损耗因子峰值对应的温度作为 T_g 。设置程序控制升温速率为5 °C/min,测试频率为1 Hz,动态应变控制在0.01%~0.1%。

1.4.3 力学性能测试

采用万能材料试验机测试不同拉伸比PI薄膜的力学性能,包括拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率,测试依据 GB/T 1040.3-2006。由于拉伸取向工艺的需求,试样未采用标准规定的类型,而是将薄膜裁剪为长条形试样,试样长度为15 cm,宽度为1.5 cm。力学测试方向与薄膜拉伸方向保持一致,以评价取向结构对薄膜承载能力的影响。测试过程中,记录应力-应变曲线,并根据曲线计算拉伸强度、拉伸模量和断裂伸长率。设置拉伸速率为10 mm/min,夹具间距为10 cm,测试温度为23~23.7 °C,相对湿度为33%~37%。

1.4.4 微观结构表征

采用二维广角X射线散射(2D-WAXS)表征PI薄膜的分子链取向结构和局部有序堆积状态。测试时,将薄膜样品固定于样品台上,使X射线垂直入射薄膜表面,并保持薄膜拉伸方向与探测器参考方向一致。X射线波长为1.541 8 nm,样品到探测器距离为113 mm。

2 结果与讨论

2.1 聚酰亚胺薄膜各向异性热导率表征

热导率的3 ω 测试结果如图3所示,机械拉伸后,PI薄膜的热导率呈现出方向依赖性。图3a至图3c的热导率测试结果表明,未拉伸样品沿不同方向的热导率较为接近,面内热输运呈现各向同性。随着拉伸比由1.0增加至2.5,沿拉伸方向的面内热导率 k_x 由0.34 W/(m·K)提高至1.11 W/(m·K)。相比之下,垂直拉伸方向的面内热导率 k_y 由0.34 W/(m·K)降低至0.11 W/(m·K),面外热导率 k_z 由0.35 W/(m·K)降低至0.14 W/(m·K)。结果表明,拉伸处理并没有使薄膜各方向热导率同时提高,而是使热传输能力更多地集中在拉伸方向。

当拉伸比为2.5时, k_x/k_y 接近10,表明PI薄膜的面内热输运由初始的近似各向同性逐渐转变为各向异性。这种沿拉伸方向热导率的提高,垂直拉伸

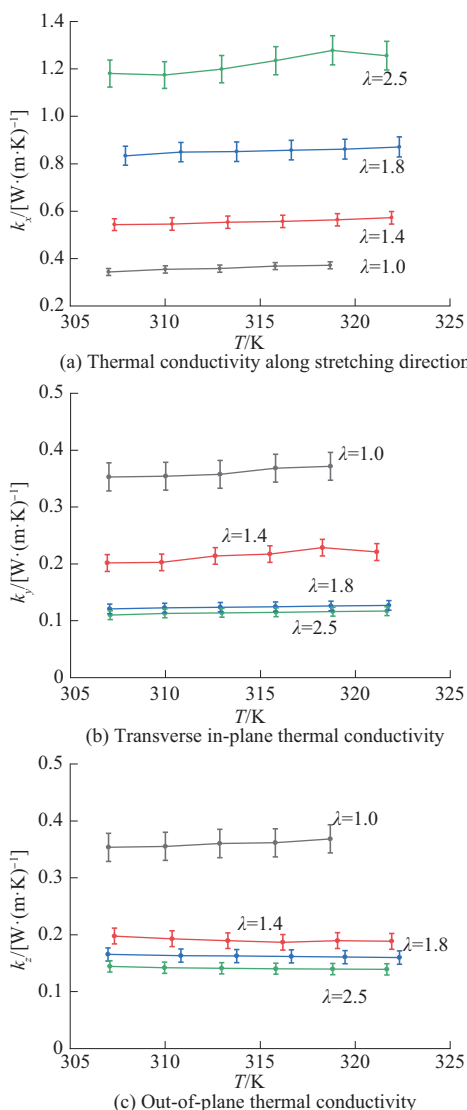


图3 不同拉伸比(λ)的PI薄膜的各向异性热导率

Fig. 3 Anisotropic thermal conductivities of PI films at different draw ratios(λ)

方向以及面外方向热导率降低的实验现象表明,单轴拉伸改变了薄膜内部热量传递的方向分布。

2.2 热稳定性分析

图4为DMA的测试结果,由图4a可知,各样品的损耗因子曲线在高温区出现与主链段协同运动有关的 α 松弛峰,其峰值温度用于确定 T_g 。在本测试温度和频率范围内,曲线主要表现出一个明显的 α 松弛峰,未观察到可明确分辨的多个高温松弛峰。拉伸处理后PI薄膜的 T_g 保持在较高水平。未拉伸、1.4、1.8、2.5拉伸比样品的 T_g 分别为314、366、371、373 °C。单轴拉伸促进了PI分子链沿拉伸方向取向排列,降低了体系自由体积,并增强了链间相互作用,从而提高了链段发生协同运动所需的能量。机

械拉伸不仅改善了PI薄膜的热导率,也在一定程度上提升了其热稳定性。因此,本文提出的化学亚胺化与机械拉伸相结合的工艺可以显著提高PI薄膜的导热性能和热稳定性。

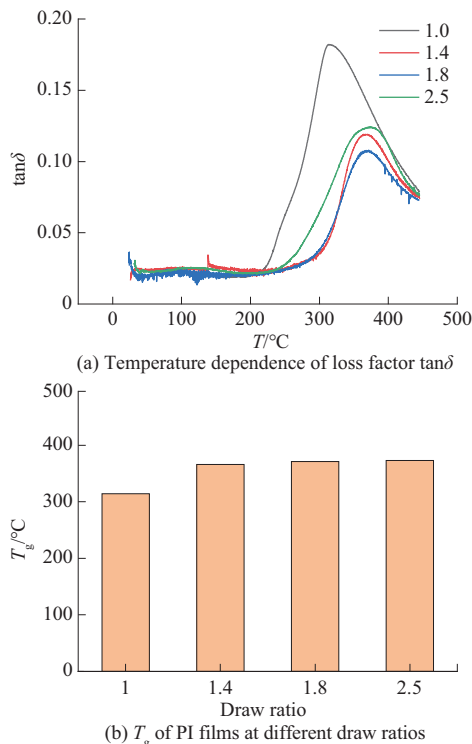


图4 不同拉伸比PI薄膜的DMA结果

Fig. 4 DMA results of PI films with different draw ratios

2.3 力学性能

图5为PI薄膜在不同拉伸比下的应力-应变关系曲线,单轴拉伸后,PI薄膜的力学性能整体得到提升。如图5所示,拉伸比为2.5的样品表现出最优综合力学性能,其拉伸强度和拉伸模量分别达到423.4 MPa和2.48 GPa,较未拉伸样品分别提高174.8%和211.6%。需要注意的是,拉伸比为1.8倍

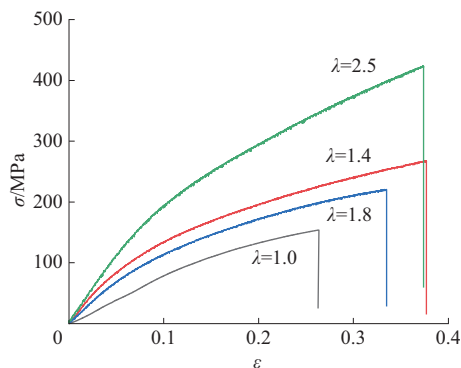


图5 不同拉伸比PI的应力(σ)与应变(ϵ)关系图

Fig. 5 Stress(σ) versus strain(ϵ) curves for PI films with various draw ratios

样品性能出现一定波动,说明实际拉伸过程中样品均匀性和局部缺陷仍会影响力学测试结果。

表1为不同拉伸比PI薄膜的力学性能测试结果。结果表明PI薄膜强度和模量提高的同时,断裂伸长率仍保持在较高水平,说明该拉伸过程并未导致薄膜明显脆化,材料仍具有较好的变形能力。力学性能的改善主要与分子链取向有关,拉伸作用使部分链段沿外力方向重新排列,提高了载荷传递效率,从而实现了拉伸强度和拉伸模量的增强。

表1 不同拉伸比PI薄膜的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of PI films with different draw ratios

λ	σ_t/MPa	E_t/GPa	$\epsilon_b/\%$
1.0	154.1	0.796	26.3
1.4	267.5	1.81	37.7
1.8	220.5	1.59	33.5
2.5	423.4	2.48	37.4

Notes: λ represents stretch ratio; σ_t represents tensile strength; E_t represents tensile modulus; ϵ_b represents elongation at break.

2.4 分子结构分析

考虑到聚合物热传导与链段排列状态密切相关,这种各向异性变化可能与拉伸诱导的分子链取向和局部结构调整有关。为分析PI薄膜热导率各向异性变化的结构来源,对不同拉伸比样品进行了2D-WAXS表征,结果如图6所示。如图6a所示,未拉伸样品呈均匀弥散环,说明分子链主要处于无规缠结状态,整体结构近似各向同性。如图6b至图6d所示,随着拉伸比增加,衍射环逐渐向弧形衍射斑转变,表明外力使分子链沿拉伸方向解缠结并重新排列,薄膜内部形成明显取向结构。

二维WAXS图像首先采用FIT2D软件进行几何校正、背景扣除和强度归一化。对选定散射矢量范围内的特征散射峰进行方位角积分,获得散射强度随方位角的变化曲线如图6e所示;同时对二维散射图进行环向积分,获得散射强度随散射矢量 q 变化的径向积分曲线,如图6f所示。

结构的取向性一般可以由Herman取向因子表示。Herman取向因子可以通过图6e的方位角积分曲线计算得到,结果见表2。随着拉伸比的提高,Herman取向因子从0.08提高到0.79,表明分子链沿拉伸方向的取向程度不断增强。通过图6f径向积分强度曲线^[18]可以得到分子结构的特征参数,结果见表2。

散射矢量 q 约4 nm⁻¹处的有序峰随拉伸比提高而逐渐增强,并呈现变窄趋势,表明拉伸促进了局

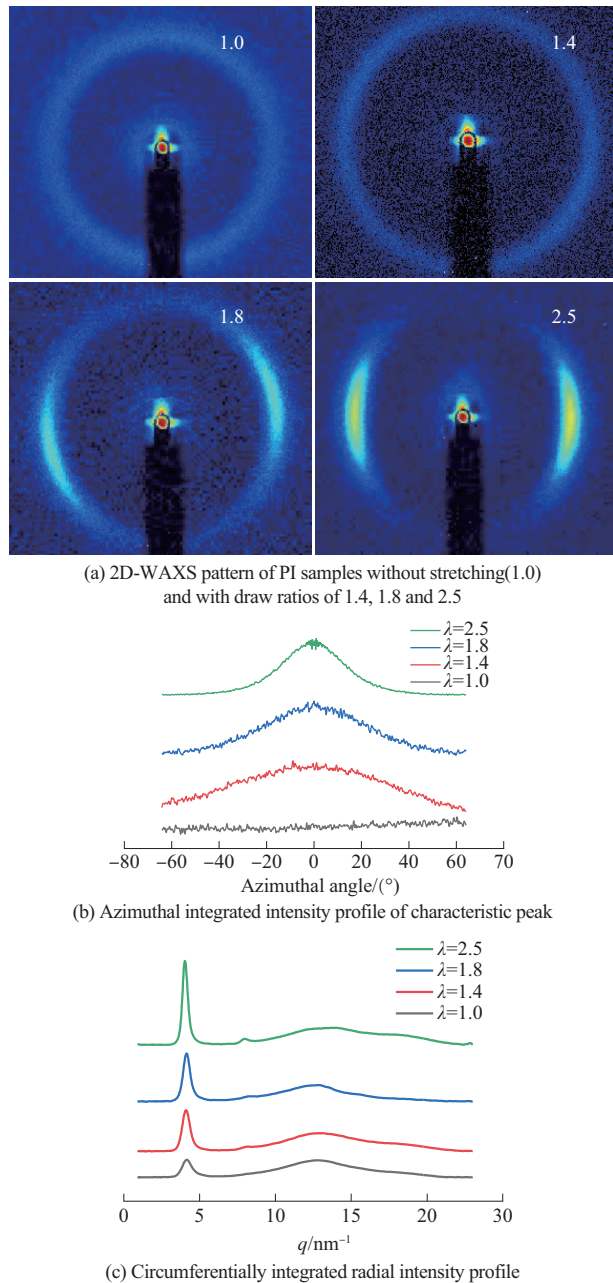
图6 不同拉伸比(λ)PI薄膜的2D-WAXS表征Fig. 6 2D-WAXS characterization for PI films with various draw ratios(λ)

表2 PI薄膜的WAXS特征参数

Tab. 2 WAXS parameters of PI films

λ	q_0/nm^{-1}	$\Delta q_0/\text{nm}^{-1}$	q_d/nm^{-1}	$\Delta q_d/\text{nm}^{-1}$	X	f
1.0	4.18	0.616	12.79	5.395	0.211	0.08
1.4	4.12	0.589	12.94	5.550	0.318	0.44
1.8	4.11	0.546	13.05	5.928	0.339	0.61
2.5	4.04	0.417	13.38	6.120	0.416	0.79

Notes: λ as shown in table 1; q_0 represents ordered peak position; Δq_0 represents full width at half maximum of the ordered peak; q_d represents diffuse peak position; Δq_d represents full width at half maximum of the diffuse peak; X represents relative degree of order; f represents orientation factor.

部链段的规整堆积。由表2可知,低 q 区特征峰位置由 4.18 nm^{-1} 移至 4.04 nm^{-1} ,半高宽由 0.616 nm^{-1} 降至 0.417 nm^{-1} 。根据特征间距公式 $d=2\pi/q$ 可知^[19],这对应于高分子链内重复单元的周期长度在轴向拉伸作用下发生了机械延展,且沿拉伸方向的排布规整度大幅提升。同时,高 q 区弥散峰由 12.79 nm^{-1} 移至 13.38 nm^{-1} ,表明链间距离减小,体系在横向方向趋于致密。定义有序峰与无定形峰面积(通过软件分峰拟合得到峰面积)之比为相对有序度 X ,随拉伸比的提高, X 由未拉伸时的0.211大幅提升至拉伸比2.5时的0.416。

这些结构特征参数的变化都说明机械拉伸有效促进了薄膜内部无规非晶区向高度取向的有序相转化。分子链取向度的提高说明PI主链沿拉伸方向定向排列。链内共价键的相互作用远强于链间范德华作用,声子沿分子链方向的传播效率明显高于链间跃迁过程。随着拉伸比提高,局部有序度提高,链段扭曲和无序堆积减少,高度取向的分子链在面内分子链延展方向构建了低散射的热传导通道,有效降低了声子传输过程中受到的结构散射,并有利于延长声子平均自由程,促进了PI薄膜沿拉伸方向的热传输。

与上述结构变化相对应,薄膜沿拉伸方向的面内热导率由 $0.34 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高至 $1.11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,表明沿拉伸方向热导率提升与取向度及有序度增加具有一致性。垂直于拉伸方向的两个方向热导率降低,主要与拉伸取向后有效传热路径的重新分布有关。单轴拉伸使分子链更多地沿拉伸方向排列,原本分布在垂直方向上的链段取向分量减少,使该方向上的连续传热路径受到削弱。虽然链间距的减小可能增强链间相互作用,并在一定程度上有利于链间热传递,但相较于沿分子主链方向的热输运贡献,这种改善作用较为有限。因此,在链取向效应占主导的情况下,垂直拉伸方向及面外方向的热导率整体呈下降趋势。

3 结论

(1)采用化学亚胺化结合单轴机械拉伸方法制备了PI薄膜,系统研究了不同拉伸比对薄膜分子链取向结构、各向异性热导率、热稳定性及力学性能的影响。

(2)单轴机械拉伸可有效调控PI薄膜的分子链取向与有序结构。随着拉伸比从1.0提高至2.5,

Herman取向因子由0.08增至0.79,相对有序度由0.211提升至0.416。2D-WAXS结果表明,拉伸诱导分子链沿外力方向解缠结并规整排列,同时促进局部链段的有序堆积。

(3)拉伸处理使PI薄膜呈现显著的各向异性导热特性。沿拉伸方向的面内热导率从0.34 W/(m·K)提升至1.11 W/(m·K),增幅超过3倍;垂直拉伸方向的面内热导率及面外热导率则分别由0.34 W/(m·K)及0.35 W/(m·K)降至0.11 W/(m·K)和0.14 W/(m·K)。各向异性热导率的变化与分子链取向及有序度增强密切相关,高度取向的链结构沿拉伸方向构建了连续的声音传输路径,有效降低了结构散射。

(4)力学性能和热稳定性随着薄膜的拉伸呈现同步改善。拉伸比为2.5时,薄膜的拉伸强度和拉伸模量分别达到423.4 MPa和2.48 GPa,较未拉伸样品分别提高约174.8%和211.6%,同时断裂伸长率保持在37.4%。 T_g 由314 °C升至373 °C,表明取向结构增强了链间相互作用和抗热软化能力。

(5)化学亚胺化结合单轴机械拉伸在不引入高导热填料的前提下,实现了PI薄膜沿特定方向的高效热输运,并兼顾了优异的力学与热稳定性能。该策略为各向异性导热PI薄膜的可控制备及其在柔性电子热管理中的应用提供了新的技术路径与实验依据。

参考文献

- [1] CHOI M, CHOI J, CHOI S, et al. Fluorine-free, low-dielectric photosensitive polyimides based on methyl methacrylate-functionalized bulky diamines for high-fidelity UV patterning[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2026, 8(2):1 346–1 357.
- [2] GAO H, YAN W Y, ZHANG D, et al. Heterogeneous integration technology drives the evolution of co-packaged optics[J]. Micromachines, 2025, 16(9). DOI:10.3390/mi16091037.
- [3] CHEN X, FU X, CHEN Z S, et al. Multifunctional polyimide for packaging and thermal management of electronics: Design, synthesis, molecular structure, and composite engineering[J]. Nanomaterials, 2025, 15(15). DOI:10.3390/nano15151148.
- [4] 查俊伟,王帆. 高导热聚酰亚胺电介质薄膜研究进展[J]. 物理学报, 2022, 71(23):184–201.
ZHA Junwei, WANG Fan. Research progress of high thermal conductivity polyimide dielectric films[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(23):184–201.
- [5] 王艳艳,张献,肖超,等. 聚酰亚胺基导热绝缘复合薄膜的研究进展[J]. 高分子通报, 2023, 36(8):1 015–1 026.
WANG Yanyan, ZHANG Xian, XIAO Chao, et al. Research progress of polyimide based thermally conductive insulating composite film[J]. Polymer Bulletin, 2023, 36(8):1 015–1 026.
- [6] LI T L, HSU S L. Enhanced thermal conductivity of polyimide films via a hybrid of micro- and nano-sized boron nitride[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(20):6 825–6 829.
- [7] XIAO J J, SHAN Q J, XU Z L, et al. Fabrication of polyimide/aluminum nitride composites and wafer channel filling via direct ink writing[J]. Nanomaterials, 2026, 16(11). DOI: 10.3390/nano16110681.
- [8] WANG J Q, HU L, LI W H, et al. Development and perspectives of thermal conductive polymer composites[J]. Nanomaterials, 2022, 12(20). DOI:10.3390/nano12203574.
- [9] LU X W, WU Z J, ZHAO Y, et al. Advances in intrinsically high thermal conductive liquid crystal epoxy resins[J]. Polymer Reviews, 2026, 66(2):674–720.
- [10] ZHANG T, LUO T F. Role of chain morphology and stiffness in thermal conductivity of amorphous polymers[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2016, 120(4):803–812.
- [11] XIANG L P, FANG Y T, XU K, et al. Molecular alignment induced high thermal conductivity in amorphous/low crystalline polyimide fibers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 193. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122959.
- [12] YOON D, LEE H, KIM T, et al. Enhancing the thermal conductivity of amorphous polyimide by molecular-scale manipulation[J]. European Polymer Journal, 2023, 184. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111775.
- [13] UETANI K, OKADA T, OYAMA H T. In-plane anisotropic thermally conductive nanopapers by drawing bacterial cellulose hydrogels[J]. ACS Macro Letters, 2017, 6(4):345–349.
- [14] WANG Z H, CHEN X, YANG H X, et al. The in-plane orientation and thermal mechanical properties of the chemically imidized polyimide films[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2019, 37(3):268–278.
- [15] CAHILL D G, POHL R O. Thermal conductivity of amorphous solids above the plateau[J]. Physical Review B, 1987, 35(8): 4 067–4 073.
- [16] KOMMANDUR S, YEE S. A suspended 3-omega technique to measure the anisotropic thermal conductivity of semiconducting polymers[J]. The Review of Scientific Instruments, 2018, 89(11). DOI:10.1063/1.5045077.
- [17] BORCA-TASCIUC T, KUMAR A R, CHEN G. Data reduction in 3ω method for thin-film thermal conductivity determination[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(4):2 139–2 147.
- [18] CULLITY B D, STOCK S R. Elements of X-ray diffraction[M]. 3rd ed. Prentice Hall, 2001.
- [19] ISHIGE R, MASUDA T, KOZAKI Y, et al. Precise analysis of thermal volume expansion of crystal lattice for fully aromatic crystalline polyimides by X-ray diffraction method: Relationship between molecular structure and linear/volumetric thermal expansion[J]. Macromolecules, 2017, 50(5):2 112–2 123.