

有机可溶性高折射率聚酰胺酰亚胺的合成与性能^{*}

李 卓 刘金刚^{**} 高志琪 陈建升 杨士勇^{**}

(中国科学院化学研究所高技术材料实验室 北京 100190)

摘 要 采用含硫二胺 1,4-双(4-氨基苯硫基)苯(2SPDA)与偏苯三酸酐反应制备了一种含硫二酸化合物 1,4-双(4-三甲酰亚胺基苯硫基)苯(BTPB). 以此二酸为原料与两种高硫含量二胺单体,4,4'-双(4-氨基苯硫基)二苯硫醚(3SDA)以及 2,7-双(4-氨基苯硫基)噻蒎(APTT)通过高温缩聚法制备了两种聚酰胺酰亚胺(PAI). 制备的 PAI 在室温下可溶解于 *N*-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)中. PAI 薄膜的起始热分解温度($T_{5\%}$)超过 440℃,玻璃化转变温度(T_g)大于 190℃. PAI 薄膜在波长大于 500 nm 的可见光区具有良好的透明性. 此外,PAI 薄膜的折射率大于 1.73,双折射小于 0.04.

关键词 聚酰胺酰亚胺, 高折射率, 溶解性, 热性能

近年来,高折射率(high-*n*)聚合物材料在先进光学领域中的应用得到了广泛的重视. 例如,在发光二极管(LED)器件的制作中广泛使用到无机芯片材料与有机聚合物封装材料. 无机材料,如铟镓氮化物(InGaN)的折射率为 2.48,而聚合物封装材料,如聚硅氧烷、环氧树脂的折射率通常在 1.5~1.6 之间. 这样光信号会在无机材料与有机材料界面间产生显著的内反射. 这主要是由于无机材料与有机材料间折射率的不匹配而造成的. 而且两类材料间折射率的差异越大,光信号的反射问题就越严重. 上述反射问题直接导致了 LED 的光输出效率仅为理论值的 30% 左右,因此 LED 技术的发展迫切要求开发高折射率聚合物封装材料^[1~3]. 再如,在先进 CMOS 图像传感器(CIS)的制作中需要使用微透镜来改善其光学敏感度. 所使用的微透镜材料的折射率要求大于 1.70,同时还要求具有优良的热稳定性以及光学透明性^[4]. 传统聚合物材料的折射率通常在 1.3~1.7 之间^[5],难以满足先进光学领域发展的要求.

根据 Lorentz-Lorenz 方程^[6],在材料分子结构中引入具有高摩尔折射率数值的基团,如硫元素、除氟以外的卤素(溴、碘)、芳环以及金属元素有利于提高材料的折射率. 然而作为光学材料,还必须考虑到材料的透明性以及加工性能. 因此,引入硫元素以及芳杂环是提高聚合物光学材料折射率最为理想的途径. 我们在前期的研究工作中系统研

究了硫元素对聚酰亚胺(PI)折射率、双折射、耐热稳定性以及光学透明性的影响规律^[7~11]. PI 的芳杂环结构赋予了其固有的高折射率以及优良的耐热稳定性. 例如,标准型 PI [聚(均苯四甲酸二酐-4,4'-二氨基二苯醚)](PMDA-ODA)的折射率为 1.6950(632.8 nm),远大于常见的光学聚合物,如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA, 1.49)、聚碳酸酯(PC, 1.58)等^[12]. 但 PMDA-ODA PI 薄膜的双折射较高(0.078),这主要是由于其分子链具有较大的刚性,因此分子链易于在薄膜平面方向取向,造成薄膜平面方向的折射率 n_{TE} 明显大于垂直方向上的折射率 n_{TM} ,从而造成薄膜的双折射 $\Delta n (n_{TE} - n_{TM})$ 较大,这在一定程度上限制了其应用^[13]. 我们的研究表明,在 PI 分子结构中引入柔性含硫链节,如线形硫醚、环状噻酮与噻蒎等基团,可以显著降低 PI 分子链的刚性,进而可在显著提高 PI 折射率的同时降低其双折射. 例如,基于 1,4-双(4-氨基苯硫基)苯的含硫 PI 的折射率大于 1.70,而双折射则低于 0.01^[8].

本研究中,拟对一类具有特殊结构的 PI——聚酰胺酰亚胺(PAI)结构与性能的关系进行研究. PI 是一类分子结构中同时含有酰胺键以及酰亚胺环的芳杂环聚合物材料^[14,15]. 酰胺键通常会赋予 PAI 良好的力学性能与加工性能,而酰亚胺环则可以赋予 PAI 优良的耐热稳定性. 同时,两种化

^{*} 2008-03-13 收稿,2008-04-11 修稿. 中国科学院分子科学中心青年人才领域前沿创新项目(项目号 CMS-Y200716)资助;^{**} 通讯联系人, E-mail: liujg@iccas.ac.cn; shiyang@iccas.ac.cn

学键均有助于提高聚合物的折射率. PAI 不仅在高性能工程塑料中有着广泛的应用,而且在先进光电领域也得到了广泛应用^[16]. 本研究通过在 PAI 分子结构中引入含硫基团,希望利用酰亚胺环、酰胺键以及含硫基团的协同作用,赋予 PAI 高折射率、低双折射以及良好的溶解性能、耐热性能和力学性能.

1 实验部分

1.1 原料与试剂

1,4-双(4-氨基苯硫基)苯(2SPDA)^[8],4,4'-双(4-氨基苯硫基)二苯硫醚(3SDA)^[9]以及2,7-双(4-氨基苯硫基)噻蒽(APTT)分别按照文献^[10]合成. 偏苯三酸酐(TMA),北京化学试剂公司,直接使用. *N*-甲基-2-吡咯烷酮(NMP),北京化学试剂公司, P_2O_5 回流,减压蒸馏. *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF),北京化学试剂公司, CaH_2 回流,减压蒸馏. 乙酸酐、吡啶, γ -丁内酯(γ -BL), 环己酮(CHA), 亚磷酸三苯酯(TPP), 无水 $CaCl_2$, 北京化学试剂公司, 直接使用.

1.2 测试

比浓对数黏度采用 Ubbelohde 黏度计测试,测试温度为 30℃,样品为 0.5 g/dL NMP 溶液. 傅立叶红外光谱(FT-IR)采用 Perkin-Elmer 782 型红外光谱仪测定,试样为 3 μ m 的薄膜,量程为 4000 ~ 500 cm^{-1} . ^1H -NMR 采用 Varian XL-200 核磁共振仪,核磁试剂为 $DMSO-d_6$. 紫外-可见光谱(UV-Vis)采用 Hitachi U-3210 光谱仪测定,扫描范围为 250 ~ 800 nm. 示差扫描量热分析(DSC)与热重分析(TGA)分别采用 Seiko DSC6300 与 TG/DTA 6300 热分析仪测定,升温速度 10 K/min,测试环境为氮气或空气. 动态机械分析(DMA)采用 Seiko DMS 6300 分析仪,升温速度 2 K/min,频率 1 Hz,测试环境为空气. 玻璃化转变温度(T_g)定义为损耗模量 E'' 峰值温度. 折射率采用 SaironTech Model SPA-4000 型棱镜耦合仪测试,测试波长为 632.8 nm. n_{TE} 为面内折射率, n_{TM} 为面外折射率, n_{av} 为平均折射率, $n_{av} = [(2n_{TE}^2 + n_{TM}^2)/3]^{1/2}$. 双折射 $\Delta n = n_{TE} - n_{TM}$. 介电常数(ϵ)按照 Maxwell 方程由折射率估算, $\epsilon = 1.1n_{av}^2$ ^[17].

1.3 1,4-双(4-三甲酰亚胺基苯硫基)苯(BTPB)合成

在一个配有机械搅拌、氮气入口以及温度计

的 500 mL 三口瓶中加入 2SPDA(32.4 g, 0.1 mol), TMA(40.3 g, 0.21 mol)以及 DMF(200 mL). 通入氮气,室温搅拌反应 5 h. 加入乙酸酐(125 g, 1.23 mol)与吡啶(70 g, 0.88 mol),升温至 100℃,维持恒温反应 4 h. 降温至室温,将反应混合物倾入去离子水中(600 mL). 将生成的黄色固体过滤收集,反复水洗,甲醇洗涤. 80℃ 真空干燥 24 h,得到灰白色粉末 BTPB 49.7 g, 收率 73.9%. 熔点 303 ~ 305℃. $C_{36}H_{20}N_2O_8S_2$ 元素分析, 计算值: C 64.28%, H 3.00%, N 4.16%; 实测值: C 64.42%, H 3.21%, N 3.97%. ^1H -NMR (300 MHz, $DMSO-d_6$) δ : 7.42 (d, 4H), 7.49 (m, 8H), 8.05 ~ 8.07 (d, 2H), 8.29 (s, 2H), 8.39 ~ 8.42 (d, 2H).

1.4 PAI 树脂合成与薄膜制备

在一个配有机械搅拌、氮气入口以及温度计的 250 mL 四口烧瓶中加入 BTPB (3.3634 g, 5 mmol), 2SPDA (1.6223 g, 5 mmol), $CaCl_2$ (1.36 g), 亚磷酸三苯酯(TPP, 3.11 g), 吡啶(5.83 mL)以及 NMP (25 mL). 反应混合物于氮气保护下加热至 100℃,维持恒温反应 3 h. 降温至室温,将得到的浅黄色黏稠溶液缓慢倾入 200 mL 无水甲醇中. 将得到的黄色丝状树脂过滤,收集,于 80℃ 真空干燥过夜得到黄色丝状树脂 PAI-1.

PAI-2 树脂按照类似的工艺合成.

将 PAI 树脂溶解于 NMP 中,配制成 15 wt% 溶液. 加压通过 0.45 μ m Teflon 过滤器过滤,滤液于干燥环境中静置 30 min 后,真空脱泡. 将 PAI 溶液均匀涂布于干净的硅片上(直径为 7.62 cm),置于匀胶机上进行涂膜. 薄膜的厚度通过控制匀胶速度进行调节. 例如,用于 FT-IR 与 UV-Vis 测试的薄膜样品,控制其厚度为 3 ~ 10 μ m. 而用于热性能与力学性能测试的薄膜,其厚度则控制在 30 ~ 50 μ m. 将硅片置于干燥箱中,于氮气保护下进行固化. 固化程序为 80℃/3 h; 120℃/1 h; 180℃/1 h 以及 250℃/1 h. 固化完成后自然降温至室温,将硅片置于去离子水中,剥离得到 PAI 薄膜.

2 结果与讨论

2.1 单体合成

BTPB 的合成路线如图 1 所示. 该方法是合成含酰亚胺环二酸单体的常见路线^[18]. TMA 与 2SPDA 反应首先生成酰胺酸化合物 I, I 不经分离直接在乙酸酐和吡啶作用下脱水环化得到 BTPB. 图 2 给出了 BTPB 的红外谱图,从中可以准确判

定酰亚胺环羰基位于 1782 cm^{-1} 以及 1720 cm^{-1} 波数处的不对称以及对称伸缩振动吸收峰以及酰亚胺环 C—N 键位于 1377 cm^{-1} 波数处的特征吸收峰. 此外, 还可以观察到羧基位于 3483 cm^{-1} 以及硫醚键位于 1219 cm^{-1} 波数处的吸收峰. 图 3 给出了 BTPB 的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图, 可以看出, 偏苯三酸酐

残余部分苯环上的 H 质子(a,b,c)的吸收位于谱图的最低场, 而 2SPDA 残余苯环的 H 质子(d,e,f)的吸收位于谱图的最高场, 这与 BTPB 的结构特征是一致的. BTPB 的结构还可以从元素分析结果加以验证, 其中 C、H、N 的元素组成与理论值基本一致, 表明我们已制得预期结构的二酸化合物.

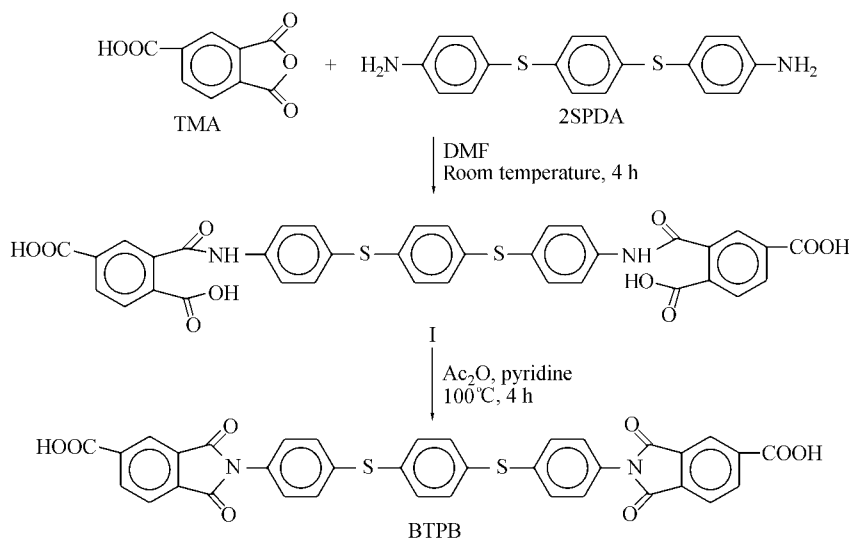


Fig. 1 Synthesis of diimide-diacid BTPB

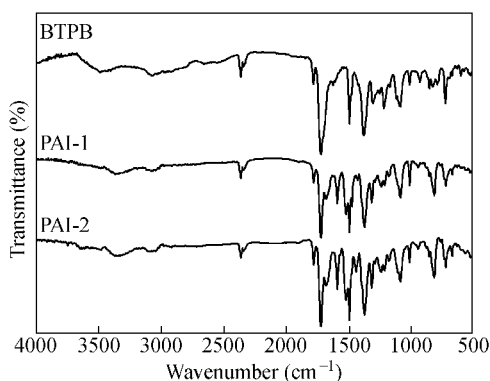


Fig. 2 FT-IR spectra of BTPB and PAIs

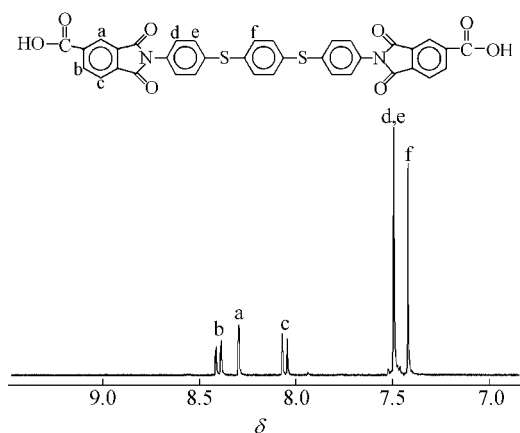


Fig. 3 $^1\text{H-NMR}$ spectrum of BTPB

2.2 PAI 合成

PAI 的合成路线如图 4 所示. BTPB 分别与芳香族二胺单体 3SDA 以及 APTT 经 Yamazaki 反应^[19]制备了两种可溶性 PAI 树脂. PAI 树脂的比浓对数黏度超过 1.0 dL/g (表 1), 表明其具有较高的分子量. 我们通过红外光谱确认了 PAI 的化学结构. 如图 2 所示, 在 PAI-1 以及 PAI-2 的红外谱图中可以明显观察到酰亚胺环羰基分别位于 1778 cm^{-1} 与 1720 cm^{-1} 处的不对称和对称伸缩振动吸收峰以及酰亚胺环 C—N 键位于 1376 cm^{-1} 波数处的特征吸收峰. 酰胺键的特征吸收峰则位

于 3363 cm^{-1} (N—H) 以及 1681 cm^{-1} (C=O). 此外, 还可以观察到硫醚键位于 1208 cm^{-1} 波数处的吸收峰. 上述结果表明我们已制得预期结构的 PAI.

2.3 溶解性能

耐溶剂稳定性是芳香环聚合物材料固有的优良特性之一, 但在有机溶剂中较差的溶解性同时也是影响芳香环聚合物广泛应用的瓶颈之一. 如何提高芳香环聚合物材料在某些溶剂中的溶解性, 但同时又保持其固有的耐溶剂特性是一项颇

具挑战性的研究课题. 极性非质子性溶剂, 如 NMP、DMF 等通常是芳杂环聚合物的良溶剂. 我们考察了 PAI 树脂在常用溶剂中的溶解性能, 结果如表 1 所示. 从中可以看出, PAI 分子结构中由于存在大量柔性硫醚链节, 因此树脂可以在室温下溶解于极性非质子性溶剂, 如 NMP 中. PAI-2 分子结构中含有庞大的噻蒽环, 因此分子链间的自由

体积较大, 有利于溶剂的渗透, 可以溶解于 DMF 中. 相比之下, PAI-1 则部分溶解于 DMF. 此外, PAI-2 树脂在 γ -丁内酯 (γ -BL) 以及环己酮 (CHA) 中也具有一定的溶解度. 而在常见有机溶剂, 如甲苯以及甲醇中则不溶解, 表明 PAI 树脂具有良好的耐溶剂特性.

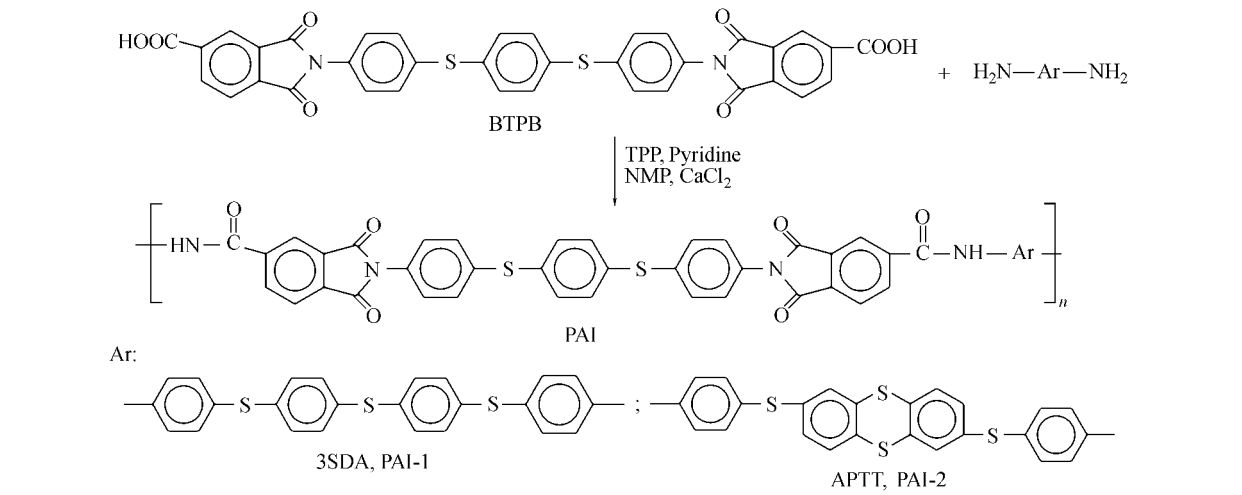


Fig. 4 Synthesis of PAIs

PAI	$[\eta]_{inh}^a$ (dL/g)	Solubility ^b					
		NMP	DMF	γ -BL	CHA	Toluene	Methanol
PAI-1	1.06	++	+-	+-	-	-	-
PAI-2	1.17	++	++	+-	+-	-	-

^a Inherent viscosities measured with PAI solution at a concentration of 0.5 g/dL in NMP at 30 °C; ^b ++ Soluble at room temperature, +- Partially soluble at room temperature, - Insoluble

2.4 热性能

随着光电集成电路 (OEIC) 系统集成度的不断提高以及器件尺寸的不断减小, 器件内部的热问题也越来越突出^[20]. 除了采取某些特殊工艺增加系统的散热性外, 对相关材料的耐热稳定性也提出了更高的要求. 我们通过 TGA、DSC 以及 DMA 手段考察了 PAI 的热稳定性. 图 5 与图 6 分别给出了 PAI 的 TGA 与 DSC 曲线, 相应的热性能数据如表 2 所示. 从中可以看出, PAI 树脂无论是在空气中还是在氮气中均表现出了良好的热稳定性, 氮气中 5% 失重温度 ($T_{5\%}$) 超过 440 °C, 700 °C 时的残余重量百分数超过 67%. 我们分别通过 DSC 以及 DMA 测试了 PAI 的玻璃化转变温度 (T_g). 如图 6 所示, PAI 的 T_g 均大于 190 °C, PAI-2 由于分子结构中含有庞大的噻蒽环, 因此 T_g 略高

于 PAI-1. DMA 测试 (图 7) 得到了类似的结果. 此外, 由图 7 还可以看出, 酰胺键的引入赋予了 PAI 优良的机械性能. 以 PAI-1 为例, 其室温下 (30 °C) 的存储模量 E' 以及损耗模量 E'' 分别为 0.69 GPa 以及 33.5 MPa, 温度升高到 T_g 时 (185 °C), E' 以及 E'' 分别为 0.1 GPa 以及 18.8 MPa, 随着温度进一步升高, PAI 的模量快速下降.

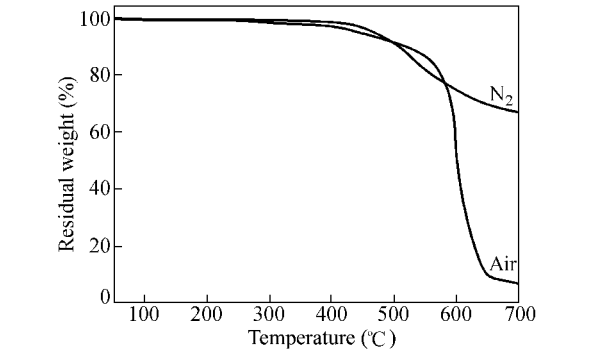


Fig. 5 TGA curves of PAI-1

PAI	T_g (°C) ^a		$T_{5\%}^a$	$T_{10\%}^a$	R_{w700}^a
	DSC	DMA	(°C)	(°C)	(%)
PAI-1	191	185	466	507	67
PAI-2	193	209	440	498	72

^a T_g : glass transition temperature; $T_{5\%}$, $T_{10\%}$: temperatures at 5% and 10% weight loss, respectively; R_{w700} : residual weight ratio at 700 °C in nitrogen

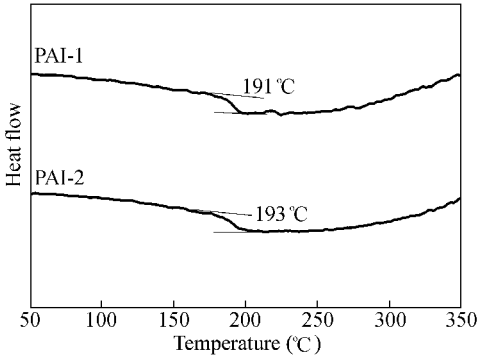


Fig. 6 DSC curves of PAIs

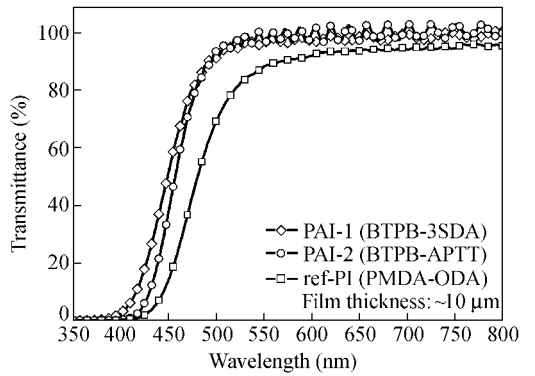


Fig. 8 UV-Vis curves of PAIs

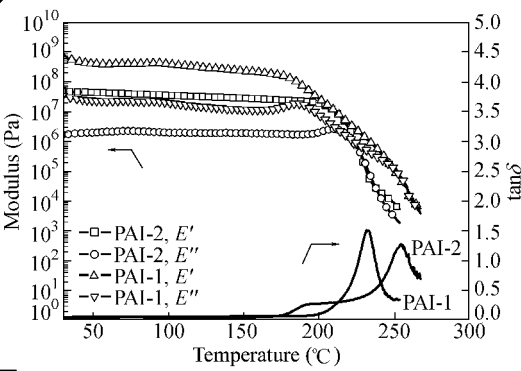


Fig. 7 DMA curves of PAIs

由上述结果可以看出,PAI 分子结构中的酰亚胺环以及酰胺键赋予了其良好的热稳定性.但大量柔性硫醚链节在一定程度上降低了 PAI 的 T_g .即便如此,高于 190℃ 的 T_g 值仍然可以保证 PAI 在先进光电装配中的应用.

2.5 光学性能

图 8 给出了 PAI 薄膜的 UV-Vis 谱图,表 3 给出了相应的光学性能数据.从中可以看出,PAI 薄膜在 500 nm 处的透光率超过 90%,明显高于标准

型 PI (PMDA-ODA) (69%). PAI-1 薄膜的紫外截止波长 λ_{cutoff} 为 382 nm,较 PAI-2 低 24 nm,表明噻蒎环的引入会在一定程度上降低 PAI 在紫外-可见光区的透明性.然而,噻蒎环的引入可以显著增加 PAI 的折射率,例如 PAI-2 的折射率 n_{av} 为 1.7421,较 PAI-1 约高 0.01,较 PMDA-ODA PI 高 0.045. PAI-2 薄膜的高折射率主要是由于其分子结构中较高的含硫量所造成的 (17.50%). PAI 薄膜的双折射 (Δn) 分别为 0.0214 (PAI-1) 与 0.0353 (PAI-2),显著低于 PMDA-ODA PI (0.0780),但略高于含硫 2SPDA-PI^[8]. 这种相对较高的折射率是由于 PAI 分子结构中存在刚性的酰胺键,因此分子链有沿着薄膜平面方向取向的趋势,造成 n_{TE} 值相对较高,从而增大了 Δn 值.即便如此,PAI 薄膜的双折射还是相对较低的.

根据 Maxwell 方程,我们可以由折射率估算 PAI 的光学介电常数.如表 3 所示,PAI 树脂的介电常数大于 3.30,与标准型 PI 相当.

Table 3 Sulfur contents and optical properties of PIs

PI	S_C^a (%)	λ_{cutoff}^b (nm)	T_{500}^c (nm)	Refractive indices and birefringence				
				n_{TE}^d	n_{TM}^d	n_{av}^d	Δn^d	ϵ^e
PAI-1	14.99	382	93	1.7392	1.7178	1.7321	0.0214	3.30
PAI-2	17.50	406	91	1.7536	1.7183	1.7419	0.0353	3.34
Ref. PI ^f	0	415	69	—	—	1.6950	0.0780	—

^a Sulfur content ; ^b Cutoff wavelength ; ^c Transmittance at 500 nm ; ^d see 1.2 Measurements ; ^e Dielectric constant estimated from n_{av} according to $\epsilon = 1.10n_{av}^2$; ^f PMDA-ODA with the structure shown in Ref. [12]

3 结论

系统研究了含硫基团,包括硫醚以及噻蒎对 PAI 热性能以及光学性能的影响规律.研究结果表明,含硫 PAI 是一类具有良好耐热稳定性、力学性能、光学透明性以及高折射率、低双折射的光学

材料.良好的综合性能使其有望在先进光学领域得到应用,相关研究正在进行中.

致谢 作者刘金刚感谢日本东京工业大学的上田充教授与安藤慎治教授对本研究工作的指导.

REFERENCES

- 1 Nakamura T, Fujii H, Juni N, Tsutsumi N. *Opt Rev*, 2006, 13: 104 ~ 110
- 2 Chau J L H, Lin Y M, Li A K, Su W F, Chang K S, Hsu S L C, Li T L. *Mater Lett*, 2007, 61: 2908 ~ 2910
- 3 Ju Y G, Almuneau G, Kim T H, Lee B W. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45: 2546 ~ 2549
- 4 Suwa M, Niwa H. *J Photopolym Sci Tech*, 2006, 19: 275 ~ 276
- 5 Brandrup J, Immergut E H, Grulke E A, Abe A, Bloch D R. *Polymer Handbook*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2005
- 6 Matsuda T, Funae Y, Yoshida M, Tsuguo T. *J Macromol Sci, Pure Appl Chem*, 1999, A36: 1271 ~ 1288
- 7 Liu Jingang(刘金刚), Li Zhuo(李卓), Yang Haixia(杨海霞), Yang Shiyong(杨士勇). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2008, (5): 460 ~ 465
- 8 Liu J G, Nakamura Y, Shibasaki Y, Ando S, Ueda M. *Polym J*, 2007, 39: 543 ~ 550
- 9 Liu J G, Nakamura Y, Shibasaki Y, Ando S, Ueda M. *J Polym Sci, Part A: Polym Chem*, 2007, 45: 5606 ~ 5617
- 10 Liu J G, Nakamura Y, Shibasaki Y, Ando S, Ueda M. *Macromolecules*, 2007, 40: 4614 ~ 4620
- 11 Liu J G, Nakamura Y, Shibasaki Y, Ando S, Ueda M. *Macromolecules*, 2007, 40: 7902 ~ 7909
- 12 Russel T P, Guggen H, Swalen J D. *J Polym Sci, Polym Phys Ed*, 1983, 21: 1745 ~ 1756
- 13 Badara C, Wang Z Y. *Macromolecules*, 2004, 37: 147 ~ 153
- 14 Zhu Xiuling(朱秀玲), Jian Xigao(蹇锡高), Wang Ruiling(王瑞玲). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2002, (4): 544 ~ 547
- 15 Wu G L, Liu J G, Li Z B, Ge Z Y, Fan L, Yang S Y. *Chinese J Polym Sci*, 2005, 23(1): 55 ~ 62
- 16 Bryce R M, Nguyen H T, Nakeeran P, Clement T, Haugen C J, Kykwinski R R, Decorby R G, McMullin J N. *Thin Solid Films*, 2004, 458: 233 ~ 236
- 17 Matsumoto T. *J Photopolym Sci Tech*, 2001, 14: 725 ~ 730
- 18 Tullios G L, Mathias L J, Langsam M. *J Polym Sci, Part A: Polym Chem*, 1999, 37: 1183 ~ 1188
- 19 Yamazaki N, Matsumoto M, Higashi F. *J Polym Sci: Polym Chem Ed*, 1975, 13: 1373 ~ 1380
- 20 Maier G. *Prog Polym Sci*, 2001, 26: 3 ~ 65

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF ORGANO-SOLUBLE POLY(AMIDE IMIDE)S WITH HIGH REFRACTIVE INDICES

LI Zhuo, LIU Jingang, GAO Zhiqi, CHEN Jiansheng, YANG Shiyong

(Laboratory of Advanced Polymer Materials, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract A series of novel poly(amide-imide)s (PAIs) containing sulfur elements were synthesized and characterized. The flexible sulfur-containing groups, either the linear thioether linkage or cyclic thianthrene group were introduced into the PAIs in order to increase the refractive indices and decrease birefringences of the polymers. Thus, an aromatic diacid compound 1,4-bis(4-trimellitimidophenylenesulfanyl) benzene (BTPB) was first synthesized from a sulfur-containing diamine 1,4-bis(4-aminophenylenesulfanyl) benzene (2SPDA) and trimellitic anhydride (TMA). Then, BTPB was polymerized with two aromatic diamines with high sulfur contents, 4,4'-thiobis[(*p*-phenylenesulfanyl) aniline] (3SDA) and 2,7-bis(4-aminophenylenesulfanyl)-thianthrene (APTT), respectively to afford two PAIs. The obtained high-molecular-weight PAIs with the inherent viscosities of 1.06 ~ 1.17 dL/g are soluble in *N*-methyl-2-pyrrolidinone (NMP) at room temperature. The PAI films exhibit good thermal stability up to 440°C and glass transition temperatures higher than 190°C. In addition, the PAI films show good optical transparency in the visible light region with the cutoff wavelengths around 400 nm and optical transmittances higher than 90% at 500 nm. The high sulfur contents and the flexible thioether linkages endow the PAI films with refractive indices higher than 1.73 and birefringences lower than 0.04 at 632.8 nm.

Keywords Poly(amide imide), High refractive index, Solubility, Thermal property