

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.006

新型含氟聚酰胺酰亚胺的合成与性能

杨成强^{1,2}, 李光照^{1,2}, 张帅^{1,2}, 王秋宏^{1,2}, 陆乾^{1,2}, 陈红林^{1,2}, 曹家璇^{1,2}, 周晟戎^{1,2}, 刘根^{1,2}, 韩锐^{1,2}

(1. 西华大学材料科学与工程学院, 成都 610039; 2. 西华大学材料与表面技术教育部重点实验室, 成都 610039)

摘要: 由于芳香族聚酰胺酰亚胺(PAI)的溶解性较低,限制了其在溶液加工方法中的应用。为了提高PAI的溶液加工性、降低溶剂使用成本并提高热性能,研究了三苯环结构和氟取代对PAI的性能影响,以苯甲醛和对三氟甲基苯甲醛与2,6-二甲基苯胺为原料,合成了新的二胺化合物4-[(4-氨基-3,5-二甲基苯基)苯基甲基]-2,6-二甲基苯胺(ADPD)、4-[(4-氨基-3,5-二甲基苯基)[4-(三氟甲基)苯基]甲基]-2,6-二甲基苯胺(ADFPD),再与偏苯三酸酐酰氯合成了含新结构的PAI。通过傅里叶变换红外光谱、核磁共振氢谱等对单体和聚合物进行表征,通过分析证明成功合成新型PAI;采用差示扫描量热分析、热重分析、水接触角、溶解性能测试对PAI性能进行了表征。结果表明,制备的聚合物均具有良好的热稳定性和溶解性,玻璃化转变温度大于300℃,在氮气的环境下5%热失重温度在430℃及以上,最大热失重温度在600℃以上;在类似化学结构上,对比未引入—CF₃的PAI-1和引入—CF₃的PAI-2的测试结果,发现PAI-2在溶解性和热性能上均优于PAI-1,并且能够明显降低聚合物的表面能,表明—CF₃能够有效提高PAI的部分性能。

关键词: 聚酰胺酰亚胺;含氟基团;热性能;溶解性

中图分类号: TQ322 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2024)10-0034-06

Synthesis and properties of novel fluorinated poly(amide-imide)s

YANG Chengqiang^{1,2}, LI Guangzhao^{1,2}, ZHANG Shuai^{1,2}, WANG QiuHong^{1,2}, LU Qian^{1,2}, CHEN Honglin^{1,2}, CAO Jiaxuan^{1,2}, ZHOU Shengrong^{1,2}, LIU Gen^{1,2}, HAN Rui^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Key Laboratory of Materials and Surface Technology, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract : Due to the low solubility of aromatic polyamide imide (PAI), its application in solution processing methods is limited. In order to improve the solution processability of PAI, reduce the cost of solvent usage and improve its thermal properties, the effects of the triphenyl ring structure and fluorine substitution on the properties of PAI were investigated. and new diamine compounds 4-[(4-amino-3, 5-dimethylphenyl)]-2, 6-dimethylaniline (ADPD) and 4-[(4-amino-3, 5-dimethylphenyl) [4-(trifluoromethyl)phenyl]methyl]-2, 6-dimethylaniline (ADFPD) were synthesized by using benzaldehyde and p-trifluoromethyl benzaldehyde with 2, 6-dimethylaniline as the raw materials. Then with trimellitic anhydride chloride to synthesize PAI containing the new structure. The monomers and polymers were characterized by fourier transform infrared spectroscopy, nuclear magnetic resonance hydrogen spectroscopy and other characterization methods, which proved the successful synthesis of the new PAI. The properties of PAI were characterized by differential scanning calorimetry, thermogravimetry analysis, water contact angle, and solvency property test. The results show that these polymers all possess good thermal stability properties as well as good solubility, with glass transition temperatures greater than 300 °C, 5% heat loss temperatures at 430 °C and above in nitrogen environment. Maximum heat loss temperatures above 600 °C under nitrogen. On the basis of the similar chemical structure, comparing the test results of PAI-1 without —CF₃ and PAI-2 introduced —CF₃, it is found that PAI-2 is better than PAI-1 in solubility and thermal properties, and it can significantly reduce the surface energy of the polymer, which indicates that —CF₃ group can effectively improve some of the properties of PAI.

Keywords : poly (amide-imide) ; fluorine containing group ; thermal property ; solubility

基金项目: 中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心开放基金项目(20190102), 高分子材料工程国家重点实验室开放课题(sklpme2018-4-22), 自然资源部离子型稀土资源与环境重点实验室开放基金项目(2022IRERE402), 西华大学重点科研基金项目(Z1620118)

通信作者: 李光照, 博士, 副研究员, 博士生导师, 研究方向为高分子复合材料高性能化及功能化

收稿日期: 2024-08-22

引用格式: 杨成强, 李光照, 张帅, 等. 新型含氟聚酰胺酰亚胺的合成与性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10): 34-39.

YANG Chengqiang, LI Guangzhao, ZHANG Shuai, et al. Synthesis and properties of novel fluorinated poly(amide-imide)s[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10): 34-39.

聚酰胺酰亚胺(PAI)是一类分子链上含有酰胺键的聚酰亚胺,其主链由酰亚胺环和酰胺基团交替排列,是一种热塑性聚酰亚胺。PAI分子链中的芳杂环亚胺基团具有耐高温性,酰胺基团具有柔韧性,因此,它不仅继承了聚酰亚胺的卓越耐热性、介电性能、力学特性、抗蠕变能力、抗辐射和化学稳定性,还融合了聚酰胺的出色力学性能与加工便利性,是一种综合性能优异的工程塑料,在航空、航天、运输、化工设备以及电子技术等多个领域都得到广泛应用^[1-8]。

通过合理设计聚合物结构来达到改善PAI的各项性能是目前的研究热点之一,通过在PAI分子链上引入一些特殊基团,如含氟基团^[9-10]、柔性基团(如醚键、硅氧键)^[11-12]、大体积侧基^[13-14]等,可以对PAI进行功能化改性,得到满足需求的产品。含氟基团是一种具有独特物化性能的基团,具有较强的电负性、较大的基团体积,极性的含氟基团有利于增强PAI的极性,使其具有较好的热力学稳定性、溶解性、介电性能和光学性能^[15-18]。

为降低PAI的结构对称性,提高其溶解性能以及热性能,扩大其在各方面的使用范围,笔者向PAI同时引入了多种基团形成新结构的PAI(多甲基的结构能够在一定程度上加强PAI分子链的空间位阻,苯环形成的大悬垂基团有利于破坏PAI分子链规整性的同时可以与其他两个苯环形成三苯环非公平面结构进一步提高溶液加工性能),并且进一步研究了在该结构下引入含氟基团—CF₃对PAI性能的影响。笔者合成了两种二胺单体,并将二胺单体与氯化偏苯三酸酐(PMDA)反应制备出新结构的两种PAI(PAI-1与PAI-2),在相同的结构下,研究了两种PAI的耐热性能和溶解加工性能并初步探索了表面性能。

1 实验部分

1.1 主要原材料

2,6-二甲基苯胺,苯甲醛,对三氟甲基苯甲醛,吡啶,氢氧化钠,*N*-甲基吡咯烷酮(NMP),二氯甲烷(CH₂Cl₂),*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF),*N,N*-二甲基乙酰胺(DMAC),丙酮(Acetone),三氯甲烷(CHCl₃),四氢呋喃(THF),氘代二甲基亚砜(DMSO-d₆),无水乙醇,氯化钠,甲苯,PMDA:分析纯,上海泰坦科技股份有限公司;

盐酸(质量分数37%):分析纯,成都市科隆化学

品有限公司;

PAI Torlon® 4000TF:超细粉,30-40μm,美国索尔维集团;

甲醇:分析纯,成都市科隆化学有限公司;

乙酸酐:分析纯,成都市科隆化学有限公司。

1.2 主要仪器及设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IS50,美国赛默飞世尔科技公司;

核磁共振(NMR)波谱仪:AVANCE NEO400,德国Bruker公司;

差示扫描量热(DSC)分析仪:DSC25,美国TA Instruments公司;

热重(TG)分析仪:DTG-60,日本岛津公司;

接触角测试仪:JH-901A,中国金华仪(北京)科技有限公司。

1.3 单体制备

1.3.1 4-[(4-氨基-3,5-二甲基苯基)苯基甲基]-2,6-二甲基苯胺(ADPD)的合成

在装有冷凝管、氮气入口的500 mL三口烧瓶中,加入苯甲醛(10.6 g, 0.1 mol)、2,6-二甲基苯胺(84.83 g, 0.7 mol),在氮气的保护下持续反应。将原料在室温下搅拌15 min充分混匀,升温至80 °C,将4 mL HCl(质量分数37%)在1 h内缓慢加入到溶液中,反应体系颜色由淡黄色转变为深黄色,升温150 °C下反应24 h,反应体系的颜色随着反应时间的变化由黄色变为深绿色最后变成黑紫色。反应完成后冷却到室温,加入25 mL氢氧化钠水溶液(质量分数10%),中和未反应完的酸和副产物。再用20 mL的CH₂Cl₂萃取3次有机相,继续用水和饱和NaCl溶液清洗三次,用旋转蒸发仪蒸发多余的溶剂,最后倒入甲醇中沉淀,静置分层后用漏斗过滤分离得到产物,加入去离子水清洗两次,在80 °C下烘干2 h,得到新型含氟二胺化合物,产率为78%。

1.3.2 4-[(4-氨基-3,5-二甲基苯基)[4-(三氟甲基)苯基]甲基]-2,6-二甲基苯胺(ADFPD)的合成

在三口烧瓶中加入对三氟甲基苯甲醛(17.4 g, 0.1 mol)和2,6-二甲基苯胺(84.83 g, 0.7 mol),在氮气保护下持续反应。其反应步骤和产物提取方法与ADPD的合成步骤相同,最终得到新型二胺化合物,产率为73%。

两种单体的合成路线如图1所示。

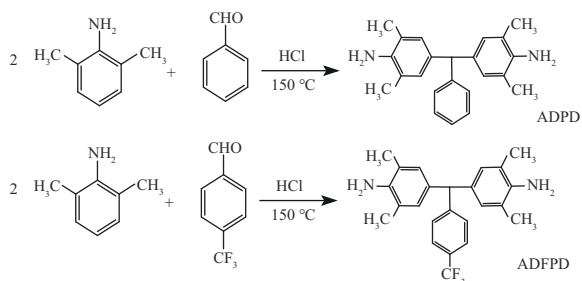


图1 ADPD和ADFPD单体合成路线

Fig. 1 Synthesis process of ADPD and ADFPD monomer

1.4 PAI的制备

在严格无水的夹套烧瓶中加入 ADPD (0.01mol, 3.3 g), DMF (12 mL) 和三乙胺 (1.4 mL), 夹套中通入 2 °C 的乙醇水混合冷却液, 在氮气保护下, 采用磁力搅拌将 ADPD 在 DMF 中完全溶解, 分多次

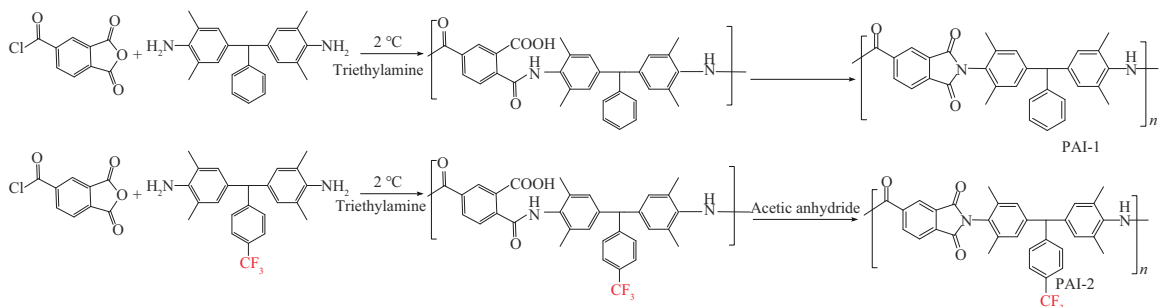


图2 PAI-1与PAI-2合成路线

Fig. 2 Synthesis process of PAI-1 and PAI-2

1.5 测试与表征

1.5.1 单体与聚合物结构表征

(1) FTIR 测试: 红外扫描波数范围为 4 000~400 cm^{-1} , 扫描次数为 32 次, 扫描方式采用衰减全反射 (ATR) 模式, 对单体和聚合物结构进行表征。

(2) 核磁共振氢谱 (^1H NMR) 测试: 以 $\text{DMSO}-d_6$ 作为溶剂, 通过 ^1H NMR 谱图中化学位移、耦合常数、吸收峰面积来判定样品中氢原子信息, 从而确定所合成单体的化学结构。

1.5.2 聚合物性能测试

(1) 玻璃化转变温度 (T_g) 测试: 取 4~6 mg 聚合物, 在氮气气氛中, 以 10 °C/min 的升温速率从室温升温至 400 °C, 保温 10 min, 再降至室温保温 10 min 后再次升温至 400 °C, 以第 2 次升温曲线中热突变台阶的半高中间点温度作为 T_g 。

(2) 热稳定性测试: 取聚合物样品 3~5 mg, 氮气气体流量为 40 mL/min, 测试温度范围 100 °C 到 1 000 °C, 升温速率 10 °C/min。

(3) 溶解性测试: 将 100 mg 的 PAI 样品分别置于

加入 PMDA 粉末 (0.01mol, 2.1 g), 持续反应 3 h, 反应完成后得到蓝绿色黏稠状的聚酰胺酸混合溶液, 将聚酰胺酸在高速搅拌的纯水中进行析出沉淀, 将沉淀物进行抽滤清洗后转入烘箱中 80 °C 烘干 12 h, 得到聚酰胺酸粉末 PAA-1。PAA-2 的制备方法同样按照上述方法制备。

称取 5.9 g 的 PAA-1 与 5.2 g 的 PAA-2, 分别加入到 20 mL DMAC 中, 得到聚酰胺酸溶液, 向溶液中各加入 1.6 g 吡啶、1.1 g 乙酸酐和 5 g 无水氯化钙持续搅拌 2 h, 待聚酰胺酸反应完成后倒入持续搅拌的无水甲醇中, 得到丝条状的树脂, 将树脂过滤清洗收集, 80 °C 真空干燥 12 h, 得到 PAI-1 和 PAI-2。PAI-1 与 PAI-2 合成路线如图 2 所示, 两者主链结构一致, PAI-2 在 PAI-1 的侧基上引入了一 CF_3 。

1 mL 的不同溶剂中, 在室温 (25 °C) 和加热状态下放置 2 h, 观察聚合物的溶解情况, 测试 PAI 在不同溶剂中的溶解性能。

(4) 水接触角测试: 采用接触角测试仪对树脂膜进行表面特性的表征, 测试方法为悬滴法, 每张涂膜任取 5 个点的数值取平均值。

2 结果与讨论

2.1 二胺单体结构表征

二胺单体的 FTIR 分析结果如图 3 所示。从图 3 的两条曲线可以看出, 在 3 200~3 500 cm^{-1} 范围中有

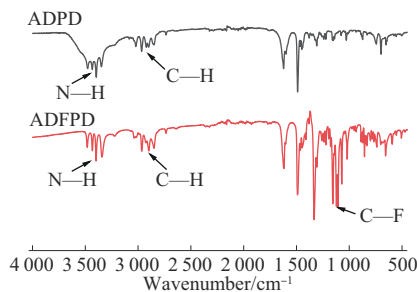


图3 ADPD和ADFPD的FTIR谱图

Fig. 3 Infrared spectra of ADPD and ADFPD

一个明显的特征吸收峰,这是胺基上N—H的伸缩振动峰,而苯环上的C—H的特征峰位于 $2\ 815\sim 3\ 085\text{ cm}^{-1}$ 处,连接三个苯环的碳的C—H键特征峰在 $2\ 360\text{ cm}^{-1}$ 处。在含氟二胺单体曲线上,可在 $1\ 106\text{ cm}^{-1}$ 处观察到C—F的多氟特征峰。

对二胺单体的结构进行分析,发现ADPD的化学结构上有7种不同的 ^1H ,分别用a,b,c,d,e,f,g表示不同质子;ADFPD的化学结构上有6种不同的 ^1H ,分别用a,b,d,e,f,g表示不同质子^[19]。二胺单体的 ^1H NMR如图4所示。ADPD的 ^1H NMR(DMSO- d_6 , 400 MHz): 7.23 (t, 2H), 7.13 (t, 1H), 7.06 (d, 2H), 6.52 (s, 4H), 5.10 (s, 1H), 4.35 (s, 4H), 2.03 (t, 12H); ADFPD的 ^1H NMR(DMSO- d_6 , 400 MHz): 7.59 (d, 2H), 7.27 (d, 2H), 6.54 (s, 4H), 5.22 (d, 1H), 4.41 (s, 4H), 2.01 (t, 12H)。对ADPD和ADFPD的各质子峰的化学位移和积分进行分析,与设计的二胺单体化学结构一致,表明二胺单体ADPD和ADFPD已经成功合成。

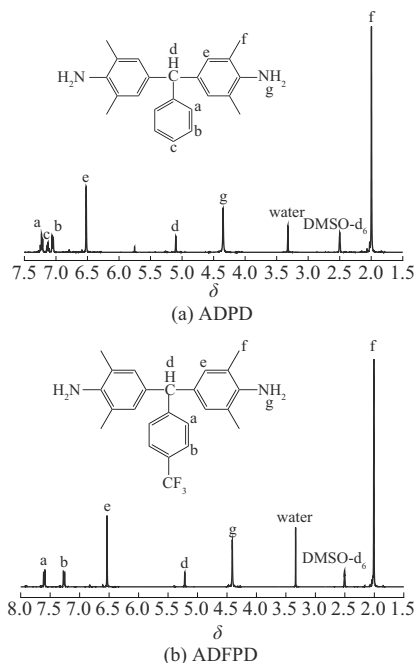


图4 ADPD和ADFPD的 ^1H NMR谱图

Fig. 4 ^1H NMR spectra of ADPD and ADFPD

2.2 聚合物结构表征

PAI-1与PAI-2的FTIR图谱如图5所示。从图5可以明显观察到分别位于 $1\ 780\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 720\text{ cm}^{-1}$ 处的酰亚胺环上羰基的不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰,以及 $1\ 376\text{ cm}^{-1}$ 处的酰亚胺环C—N键的红外特征吸收峰。酰胺键上的N—H键特征吸收

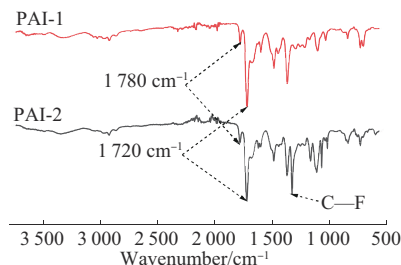


图5 PAI的FTIR谱图

Fig. 5 FTIR spectra of PAI

峰位于 $3\ 350\text{ cm}^{-1}$ 左右,C=O位于 $1\ 681\text{ cm}^{-1}$ 处,表明成功制备出所设计结构的PAI。对于PAI-2,三氟甲基($-\text{CF}_3$)上的C—F的特征吸收峰出现在了 $1\ 317\text{ cm}^{-1}$ 处。此外,图5没有观察到明显的聚酰胺酸的羧酸红外特征峰,表明聚酰胺酸的亚胺化比较完全^[12]。

2.3 聚合物的热性能

利用DSC对PAI-1, PAI-2和PAI Torlon® 4000TF(以下简称PAI-4000)进行 T_g 测试,并对PAI-1和PAI-2热稳定性进行了TG测试分析。表1为PAI-1, PAI-2的热性能测试结果,从表1可以看出,PAI-1, PAI-2的 T_g 都在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,在氮气中5%热失重温度(T_{ds})均在 $430\text{ }^\circ\text{C}$ 及以上,最大热失重温度均在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

表1 PAI的热性能测试结果

Tab. 1 Thermal performance test results of PAI

Sample	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_{ds}/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$R_w/\%$
PAI-1	310	430	635	4.08
PAI-2	344	465	671	6.76

Notes: T_g is glass transition temperature; T_{ds} is 5% weight loss temperature; T_p is Maximum thermal weight loss temperature; R_w is residual mass retention at $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$.

图6为PAI的DSC曲线。由图6可以观察到,PAI-4000在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右、PAI-1在 $310\text{ }^\circ\text{C}$ 左右、PAI-2在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 左右有较为明显的热焓变化,这是PAI发生玻璃化转变所产生的,通过对比可以得知三种PAI的 T_g 由高到低为:PAI-2>PAI-1>PAI-4000,这说明本次合成的两种PAI都有较高的 T_g ,均高于PAI-4000,并且对比PAI-1和PAI-2可以得出 $-\text{CF}_3$ 的引入能够有效地提高PAI的 T_g 。

将PAI的热稳定性进行TG表征,图7为PAI的TG-DTG曲线。从图7可以看出,在氮气的环境下PAI-1的 T_{ds} 为 $428\text{ }^\circ\text{C}$,失重10%热分解温度(T_{d10})为 $485\text{ }^\circ\text{C}$; PAI-2的 T_{ds} 为 $465\text{ }^\circ\text{C}$, T_{d10} 为 $502\text{ }^\circ\text{C}$,引入—

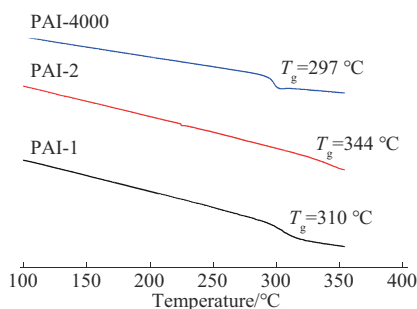
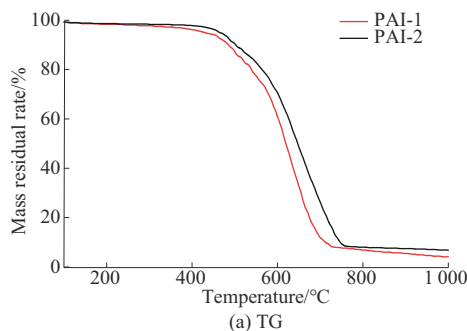
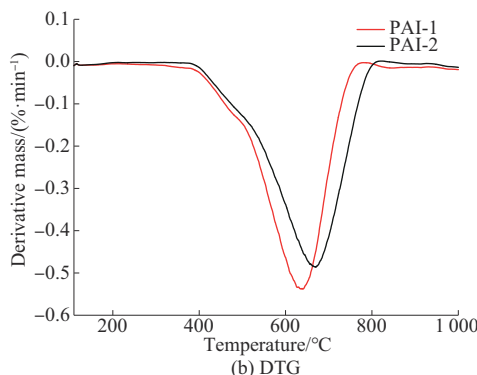


图6 PAI的DSC曲线

Fig. 6 DSC curves of PAI



(a) TG



(b) DTG

图7 PAI的TG和DTG曲线

Fig. 7 TG and DTG curves of PAI

CF₃后的PAI热稳定性有所提高。从100 °C持续升温至400 °C过程中,PAI-2的TG曲线平缓,聚合物基本没有失重,PAI-1从300 °C开始有缓慢的失重过程。超过400 °C时,聚合物质量发生显著减少,PAI的热分解反应剧烈,这可能是因为主链中的C=O等结构发生断裂,侧链上的甲基等基团脱除,形成CO₂,H₂O等小分子导致的。750 °C之后曲线变得平缓,这时候聚合物断链失重已经基本结束,剩下的元素发生炭化,形成类石墨稠环结构。从以上数据可知合成的PAI的分解温度较高,有优异的热稳定性,并且可以看出PAI-2的热分解温度和最大热分解温度均高于PAI-1,说明在PAI中引入—CF₃后,可以有效改善PAI的热稳定性。

2.4 聚合物的表面水接触角

对PAI-1与PAI-2进行水接触角测试,以对比两种PAI的亲疏水性,水接触角测试结果如图8所示。从图8可以看出,PAI-1和PAI-2的水接触角有较大的区别,PAI-1的水接触角为66°,而引入—CF₃后的PAI-2水接触角增加到95.92°,处于聚合物外层的一CF₃在气/固界面表现出明显的含氟聚合物特点,可以明显增加PAI的疏水性,可以降低在加工过程中和成型后水对其带来的不良影响。

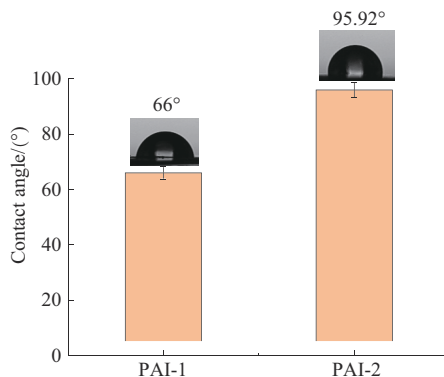


图8 PAI的水接触角

Fig. 8 Water contact angle of PAI

2.5 聚合物的溶解性

表2为PAI的溶解性测试结果。由表2可知,PAI-1,PAI-2有较好的溶解性,在DMF,DMAC,NMP和二甲基亚砜(DMSO)等高沸点溶剂中有良好溶解性,即使在低沸点溶剂如CH₂Cl₂,CHCl₃,THF中也有较好的溶解性能,这是由于PAI-1,PAI-2中引入了苯环等体积较大的结构,增加了聚合物主链的自由体积,同时三苯环的结构使分子链形成非共平面的刚性扭曲结构,进一步减弱PAI分子链的规整性,有利于溶剂进入到分子链之间。正是由于PAI良好的溶解性能,所以可以更便利地利用聚合物溶液进行加工。相对于PAI-4000,PAI-1和PAI-2

表2 不同PAI的溶解性

Tab. 2 Solubility of different PAI

Solvent	PAI-1	PAI-2	PAI-4000
DMF	++	++	++
DMAC	++	++	++
NMP	++	++	++
DMSO	+	++	++
Acetone	+	++	—
THF	++	++	—
CHCl ₃	+	++	—
CH ₂ Cl ₂	+	++	—

Notes: “++” is soluble at room temperature; “+” is soluble upon heating; “—” is insoluble upon heating.

有更好的溶液加工性能,对比PAI-1和PAI-2的溶解性可以观察到,PAI-2在DMSO, Acetone, CH_2Cl_2 和 CHCl_3 中的溶解性都好于PAI-1,这可能是因为PAI-2中的一 CF_3 基团体积较大,更有利于溶剂小分子的扩散,并且— CF_3 属于强极性基团,能够提高PAI在极性溶解中的溶解度。

3 结论

以苯甲醛、对三氟甲基苯甲醛和2,6-二甲基苯胺为原料,合成了新的二胺化合物ADPD,ADFPD。通过FTIR分析等方法进行了表征,表明成功合成目标产物。将ADPD,ADFPD与偏苯三酸酐酰氯合成了含新结构的PAI,对其进行了结构表征和性能测试。结果表明,相较于一般传统的PAI-4000,本实验所制备的PAI-1和PAI-2具有较为优秀的热性能和溶解性能;在PAI-1分子结构下,引入— CF_3 能够进一步提高PAI的热性能和溶解性,并且增加PAI的疏水性,降低表面能。

参考文献

- [1] 于丹.二元聚酰胺酰亚胺聚合工艺研究[D].上海:上海师范大学,2015.
YU Dan. Research on the polymerisation process of binary polyamide-imide[D]. Shanghai:Shanghai Normal University,2015.
- [2] 王玉珠.无色透明聚酰胺-酰亚胺薄膜的制备及其性能研究[D].上海:东华大学,2022.
WANG Yuzhu. Preparation and properties of colorless and transparent polyamide-imide film[D]. Shanghai:Donghua University,2022.
- [3] DUTCZAK S, CUPERUS F, WESSLING M, et al. New crosslinking method of polyamide-imide membranes for potential application in harsh polar aprotic solvents[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 102:142–146.
- [4] HSIAO S H, PENG S C, KUNG Y R, et al. Synthesis and electro-optical properties of aromatic polyamides and polyimides bearing pendant 3, 6-dimethoxycarbazole units[J]. European Polymer Journal, 2015, 73:50–64.
- [5] 高宇.二异氰酸酯法制备聚酰胺酰亚胺工艺研究[D].上海:上海师范大学,2015.
GAO Yu. Research on the process of preparing polyamide imide by diisocyanate method[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.
- [6] ZABEGAEVA O N, KOSOLAPOV A F, SEMJONOV S L, et al. Polyamide-imides as novel high performance primary protective coatings of silica optical fibers: Influence of the structure and molecular weight[J]. Reactive and Functional Polymers, 2024, 194. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105775.
- [7] ZHOU F, ZHAO Z, JING D, et al. Significantly improving mechanical properties of CF/PAI composites: The influence of interfacial modification coupled with post heat treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24:5 514–5 525.
- [8] 赵春玲,贾静焕,王强,等.聚酰胺-酰亚胺材料腐蚀及老化特性研究[J].失效分析与预防,2023,18(2):88–92.
ZHAO Chunling, JIA Jinghuan, WANG Qiang, et al. Corrosion and aging characteristics of polyamide-imide materials[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(2):88–92.
- [9] KIM S D, LEE B, BYUN T, et al. Poly(amide-imide) materials for transparent and flexible displays[J]. Science Advances, 2018, 4 (10). DOI:10.1126/sciadv.aau1956.
- [10] MUSHTAQ N, WANG Q, CHEN G, et al. Synthesis of polyamide-imides with different monomer sequence and effect on transparency and thermal properties[J]. Polymer, 2020, 190. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122218.
- [11] DODDA J M, BĚLSKÝ P. Progress in designing poly(amide imide)s (PAI) in terms of chemical structure, preparation methods and processability[J]. European Polymer Journal, 2016, 84: 514–537.
- [12] 杨海洋.高性能聚酰胺酰亚胺材料设计、合成及其性能研究[D].长沙:中南大学,2023.
YANG Haiyang. Design, synthesis and properties study of high performance polyamide imide materials[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [13] MALLAKPOUR S, ZAREI M. Novel, thermally stable and chiral poly(amide-imide)s derived from a new diamine containing pyridine ring and various amino acid-based diacids: Fabrication and characterization[J]. High Performance Polymers, 2013, 25(3): 245–253.
- [14] 蒋彩荣,汪称意,余彬,等.一类含双叔丁基苯结构聚酰亚胺的合成与性能[J].高分子材料科学与工程,2021,37(4):26–33.
JIANG Cairong, WANG Chenyi, YU Bin, et al. Synthesis and properties of polyimides containing di-tert-butylbenzene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(4):26–33.
- [15] ZUO H T, GAN F, DONG J, et al. Highly transparent and colorless polyimide film with low dielectric constant by introducing meta-substituted structure and trifluoromethyl groups[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2021, 39(4):455–464.
- [16] 李彬,夏瑶,安洪利,等.含氟聚酰亚胺的设计、合成及应用性能研究进展[J].精细化工,2021,38(7):1 314–1 324.
LI Bin, XIA Yao, AN Hongli, et al. Research progress in the design, synthesis and application properties of fluorine-containing polyimides[J]. Fine Chemicals, 2021, 38(7):1 314–1 324.
- [17] 陈颖,黄杰,张文祥,等.新型无色透明聚酰胺酰亚胺薄膜的制备与性能研究[J].绝缘材料,2018,51(8):1–5.
CHEN Ying, HUANG Jie, ZHANG Wenxiang, et al. Preparation and properties of novel colorless and transparent polyimide films [J]. Insulating Materials, 2018, 51(8):1–5.
- [18] 王泽群,柏至伟,邵宁宁,等.含氟基团对聚酰胺酰亚胺非等温结晶动力学的影响[J].工程塑料应用,2016,44(3):90–95.
WANG Zequn, BAI Zhiwei, SHAO Ningning, et al. Influence of fluorinated group on nonisothermal crystallization kinetics of poly (amide imide)s[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3): 90–95.
- [19] WU Q, MA X, ZHENG F, et al. Synthesis of highly transparent and heat-resistant polyimides containing bulky pendant moieties [J]. Polymer International, 2019, 68(6):1 186–1 193.