

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.022

有机荧光材料对光敏聚酰亚胺性能的影响

张明水, 肖沁瑶, 付蕾, 丁镠, 杨旭凯

(陕西理工大学材料科学与工程学院, 陕西汉中 723000)

摘要:以2,2-二(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷、5-氨基-2-(4-氨基苯基)苯并咪唑、3,3',4,4'-二苯酮四酸二酐为主要原料合成了光敏聚酰亚胺(PSPI)预聚物,再将预聚物与自制的含有二硫代水杨酸的4种不同荧光材料充分混合涂膜并紫外光固化,得到加上对照组共5组的PSPI薄膜样品。利用傅里叶变换红外光谱仪、万能拉力试验机、差示扫描量热仪、接触角测量仪等对各组PSPI薄膜进行性能表征,并对PSPI薄膜的水接触角和吸水率进行了研究。结果表明,虽成功合成出含有聚酰亚胺特征官能团的PSPI薄膜,但加入荧光材料的PSPI薄膜相较于未加入荧光材料的PSPI薄膜,拉伸强度略有降低,玻璃化转变温度升高,说明荧光剂的加入,会使PSPI分子侧基体积增大并改变其对称性,降低分子柔性;荧光材料会增大PSPI分子的结构空隙,从而表现出更好的亲水性和吸水性。

关键词:光敏聚酰亚胺;有机荧光材料;紫外固化;拉伸强度;玻璃化转变温度

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0153-06

Influence of organic fluorescent materials on properties of photosensitive polyimide

ZHANG Mingshui, XIAO Qinyao, FU Lei, DING Liu, YANG Xukai

(School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: A photosensitive polyimide (PSPI) prepolymer was synthesized using 2,2-bis(3-amino-4-hydroxyphenyl)hexafluoropropane, 5-amino-2-(4-aminophenyl)benzimidazole, and 3,3',4,4'-benzophenone tetracarboxylic dianhydride as the main raw materials. The prepolymer was then mixed with four different fluorescent materials containing dithiocarboxylic acid, which were self-prepared, coated into films, and UV-curing to obtain five groups of PSPI film samples, including a control group. The performance of each group of PSPI films was characterized using fourier transform infrared spectrometer, universal tensile testing machine, differential scanning calorimeter, contact angle measuring instrument, etc, and the water contact angle and water absorption of PSPI films were studied. The results show that although PSPI films containing characteristic functional groups of polyimide are successfully synthesized, the tensile strength of the PSPI films with added fluorescent materials is slightly lower than that of those without, while glass transition temperature increases. This suggests that the addition of fluorescent agents increases the side-chain volume of the PSPI molecules and alters its symmetry, reducing molecular flexibility. Furthermore, the fluorescent materials increase the structural voids in the PSPI molecules, resulting in better hydrophilicity and water absorption.

Keywords: photosensitive polyimide; organic fluorescent material; UV curing; tensile strength; glass transition temperature

聚酰亚胺(PI)是一类分子链中含有环状酰亚胺环的聚合物。相较于其他无机非金属材料,PI拥有极好的耐高温性和阻燃性,分解温度在500~600℃,长期使用温度在200~380℃,力学性能优异,具有高强度、高模量,也拥有较好的抗蠕变性、尺寸稳定性、耐候性和耐腐蚀性^[1-3]。但PI通常需要较高的热

固化温度,成型条件苛刻。光敏聚酰亚胺(PSPI)分子链中的光敏单元,在特定能量的光照下,可以通过光交联反应实现聚合;PSPI不但可以降低PI的聚合温度,还可满足多种加工工艺^[4-6]。

在实际应用中发现,PSPI在涂膜后进行紫外光固化时,因为溶液本身为棕色,会阻碍部分紫外光

基金项目: 2024年陕西省大学生创新创业计划项目(202410720124)

通信作者: 付蕾,高级实验师,主要研究方向为高分子功能材料的制备及性能表征

收稿日期: 2024-10-15

引用格式: 张明水,肖沁瑶,付蕾,等.有机荧光材料对光敏聚酰亚胺性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(1):153-158.

ZHANG Mingshui, XIAO Qinyao, FU Lei, et al. Influence of organic fluorescent materials on properties of photosensitive polyimide[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 153-158.

穿透,造成固化速度慢等问题。周萌萌^[7]分别以4-羟基查耳酮和肉桂醇为功能性单体合成了两种PSPI树脂,探讨含查耳酮结构的PSPI与含肉桂基结构的PSPI最佳曝光时间的差异。另有文献表明^[8],PSPI在紫外光谱测试中的吸收强度随着光照时间减弱,可见PSPI自身感光性能比较有限。上海交通大学的一项研究也表明^[9],在大多数PSPI体系中,为了能得到设计的图形需要加入一些对紫外光敏感小分子,如光引发剂;实际上,只有部分光引发剂在曝光的过程中被消耗,造成大量小分子残留在体系中,这些小分子会影响膜的电、热和力学性能。为了解决PSPI固化时利用紫外光能力有限的问题,笔者尝试在PSPI预聚物中加入荧光材料以改善其对紫外光的吸收能力。

荧光是物质吸收光照或者其他电磁辐射后发出的光。当吸收强度较大时,可能发生双光子吸收现象,导致辐射波长短于吸收波长的情况发生^[10]。荧光材料就是一种能够吸收特定波长的光并在另一波长下发射光的物质。利用荧光材料的这一特性,选择合适的二酐和二胺,并添加带有光敏活性基团的物质,在一定的条件下得到PSPI预聚物^[11],再将实验室自制的四种有机荧光材料^[12]分别均匀分散于PSPI的预聚物中,涂膜后紫外固化,探究有机荧光材料对PSPI固化的影响,并进一步探究加入有机荧光材料后的PSPI的物化性能,为PSPI的快速固化提供新的研究思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

N-甲基吡咯烷酮(NMP)、2,2-二(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷(6FAP)、5-氨基-2-(4-氨基苯基)苯并咪唑(BIA)、3,3',4,4'-二苯酮四酸二酐(BTDA)、三乙胺、甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)、对苯二酚、光引发剂 Irgacure 819、聚乙二醇二丙烯酸酯(PEG400DA)、1-乙烯基-2-吡咯烷酮(NVP):分析纯,上海阿拉丁生化科技有限公司;

荧光材料:实验室自制。

1.2 主要仪器及设备

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet6700,美国 Nicolet公司;

电子拉力试验机:AI-7000-MU2,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC1,瑞士梅特勒-托

利多公司;

接触角测量仪:JC2000CS,上海中晨数字技术设备有限公司;

紫外线光固化成型机:UV-030A,深圳市大业激光成型技术有限公司;

集热式恒温磁力搅拌器:DF-101D,巩义市予华仪器有限责任公司。

1.3 试样制备

1.3.1 PI-GMA 的制备

将6FAP充分溶解于NMP中,加入定量BIA,在N₂氛围中搅拌2 h使两种单体分散均匀。在冰水浴条件下向锥形瓶中加入定量BTDA,N₂氛围中持续反应5 h,通N₂后加塞,放入冰箱,持续反应16 h以上。将反应物移入水热反应釜,充氮后密封。将反应釜放入烘箱,升高反应体系温度,具体温度程序为120 °C/1 h,160 °C/1 h,200 °C/4 h,得棕红色黏稠液体。待冷却至室温后,将反应物倒入锥形瓶,边搅拌边加入定量三乙胺,再加入定量GMA,最后加入定量对苯二酚,升高体系温度,在100 °C反应5 h。待溶液冷却至室温后,置于乙醇中沉析、过滤,真空烘箱中干燥24 h,得到淡黄色PI-GMA粉末,具体配方见表1。

表1 PI-GMA原料配方

Tab. 1 Raw material formula of PI-GMA

g						
NMP	6FAP	BIA	BTDA	Triethylamine	GMA	Hydroquinone
123.6	8.79	5.38	15.79	0.04	5.12	0.36

1.3.2 荧光材料的制备

将尿素和水杨酸按物质的量比为1:1.5的比例充分混合,并将混合物在70 °C的温度下持续加热48 h,得到蓝色碳点荧光材料;将尿素和硫代水杨酸以物质的量比1:0.25的比例充分混合,并将混合物在180 °C的温度下持续加热10 h,得到绿色碳点荧光材料;将尿素和硫代水杨酸以物质的量比为1:1的比例充分混合,并将混合物在180 °C的温度下持续加热10 h,得到黄色荧光材料;将尿素和二硫代二苯甲酸以物质的量比为1:0.25的比例充分混合,并将混合物在180 °C的温度下持续加热10 h,得到红色荧光材料^[12]。

1.3.3 PSPI 薄膜的制备

棕色锥形瓶中加入定量NVP,依次加入PI-GMA粉末和PEG400DA并搅拌均匀,最后加入光引发剂Irgacure 819,避光搅拌2~3 h至混合均匀,得

到均相黏稠透明溶液(PSPI 预聚物)。在 PSPI 预聚物中加入定量有机荧光材料,避光搅拌 30 min,得到荧光材料/PSPI 黏稠透明混合物,每种配比的混合物总量均为 20 g,将混合物涂膜干燥后,紫外灯下光照固化 2 h,得到 PSPI 薄膜(配方见表 2),此时的薄膜表面光滑、没有黏性,与固化 3 h 以上的薄膜表现没有区别(如图 1 所示)。

表 2 PSPI 薄膜原料配比
Tab. 2 Raw material ratio of PSPI film

Samples	PI-GMA	NVP	PEG400DA	Irgacure 819	Fluorescent materials
1 [#]	25	17.5	50	7.5	0
2 [#]	24	16	48	7	5(blue)
3 [#]	24	16	48	7	5(green)
4 [#]	24	16	48	7	5(yellow)
5 [#]	24	16	48	7	5(red)

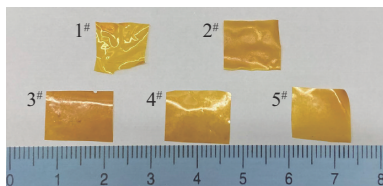


图 1 PSPI 薄膜的外观

Fig. 1 Appearance of PSPI film

1.4 测试与表征

1.4.1 结构分析

将试样裁剪成 2 cm × 2 cm 的薄膜,将其固定在 FTIR 光谱仪的指定区域上,使红外光透过薄膜,在电子设备上成像出红外光谱后导出截取波段进行分析。

1.4.2 力学性能分析

采用电子拉力试验机来测试试样的拉伸强度和断裂伸长率。将试样裁剪成 5 cm × 1 cm 的样条,测量各样条两端及中间部位厚度取平均值并记录数据,固定在计算机控制拉力试验机的夹具上,测量上下夹具距离并记录数据,以 5 mm/min 的速度对样条进行拉伸测试,在计算机计算出拉伸强度和断裂伸长率后对比数据进行拉伸性能分析。

1.4.3 热性能分析

采用 DSC 仪测定试样的玻璃化转变温度(T_g),取 3~6 mg 试样,升温速度为 20 °C/min,温度范围 25~300 °C。

1.4.4 水的浸润性分析

采用接触角测量仪测量分析试样的水的浸润性。将试样以水平方式固定在设备平台上,滴加蒸

馏水在试样表面,停留 20 s 后通过设备自带相机对试样上蒸馏水的形态进行瞬间拍摄截取,利用分析软件处理截取图片得到各试样和蒸馏水的接触角数据进行分析。

1.4.5 吸水性分析

根据 GB/T 1033.1-2008 进行测试。将试样裁剪成 6 cm × 2 cm 的样条称重记录数据,随后将各样条完全沉浸在蒸馏水中放置 6 h,擦去表面水分后晾干再次进行称重后记录数据,通过样条在吸水前后的质量计算出各试样吸水率进行分析。吸水率 = $(m_2 - m_1) / m_1 \times 100\%$, m_1 为浸泡前固化膜的质量, m_2 为吸水后固化膜的质量。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 结构分析

根据资料可知^[13-14],PSPI 的特征官能团在 718 cm⁻¹ (酰亚胺—C=O 变形振动)附近、1 370 cm⁻¹ (酰亚胺 C—N—C 伸缩振动)附近和 1 780 cm⁻¹ (酰亚胺—C=O 不对称伸缩振动)附近,如果在三处振动带附近出现 PSPI 的特征官能团,便足以证明试样亚胺化的成功。

图 2 为 PSPI 薄膜的 FTIR 图谱。如图 2 所示,未加入荧光材料的 PSPI 薄膜,分别在 1 760, 1 350 cm⁻¹ 和 790 cm⁻¹ 处有明显的振动峰;1[#] 薄膜分别在 1 750, 1 330 cm⁻¹ 和 781 cm⁻¹ 处有明显的振动峰;2[#] 薄膜分别在 1 750, 1 340 cm⁻¹ 和 787 cm⁻¹ 处有明显的振动峰;3[#] 薄膜分别在 1 750, 1 330 cm⁻¹ 和 785 cm⁻¹ 处有明显的振动峰;4[#] 薄膜分别在 1 756, 1 340 cm⁻¹ 和 781 cm⁻¹ 处有明显的振动峰。以上振动峰皆处于 PSPI 特征官能团的振动带上,表明以上试样薄膜均已亚胺化。从图 2 还可以看到,810 cm⁻¹ 和 1 635 cm⁻¹ 处有明显的吸收峰,900 cm⁻¹ 为—C=C—的面外弯曲吸收峰,1 559 cm⁻¹ 为—C=C—的伸缩振动峰,表明光敏单元已成功接枝于 PSPI 的长链上。

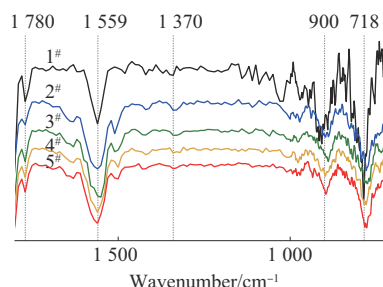


图 2 不同配比 PSPI 薄膜的 FTIR 图谱

Fig. 2 FTIR spectra of PSPI films with different ratios

2.2 拉伸性能分析

图3为不同配比PSPI薄膜的平均断裂伸长率和拉伸强度对比,图4为不同配比PSPI薄膜样品的断裂伸长率与拉伸强度曲线。对比图3中5组数据可以发现,加入荧光材料的PSPI薄膜相较于未加入荧光材料的PSPI薄膜,拉伸强度反而略微降低。可见有机荧光材料会降低PSPI的结晶度和取向性,从而降低了PSPI分子链的柔顺性,最终呈现出拉伸强度降低的现象。同时观察5种试样的断裂伸长率可以发现,加入有机荧光材料的PSPI薄膜相较于未加入荧光材料的PSPI薄膜,断裂伸长率也降低很多。再次证实荧光材料的加入会使PSPI分子链间缠结增大,导致分子链变刚变硬。由于PSPI各个结构单元的活性较低,不容易光固化成型,所以加入了较多(7%)的光引发剂,但光引发剂过多,在反应时就会生成过多的自由基,影响大分子链的形成,由拉伸强度可知,PSPI薄膜最终呈现出拉伸强度降低的现象。要解决这个矛盾,还需进一步探究,找出最佳的配比。

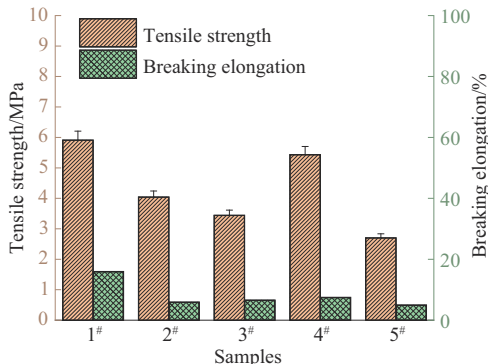


图3 不同配比PSPI薄膜的断裂伸长率与拉伸强度对比

Fig. 3 Comparison of elongation at break and tensile strength of PSPI films with different ratios

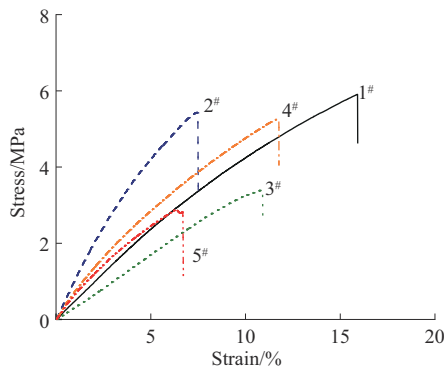


图4 不同配比PSPI薄膜的拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Curves of tensile stress-strain of PSPI films with different ratios

2.3 T_g 测试分析

5种PSPI薄膜的 T_g 见表3。图5为5种PSPI薄膜的DSC曲线。PI分子结构中含有芳杂环,这赋予了PI强大的热稳定性^[15-16],由表3和图5可知,无论是否加入荧光材料, T_g 都达到了200℃。其次,通过对比5组试样的 T_g 可以发现,加入了荧光材料的PSPI薄膜的 T_g 比未加荧光材料的PSPI薄膜的 T_g 高出30~50℃不等。由于荧光材料为有机小分子物质,荧光材料会和PSPI分子的侧基发生反应,从而使得侧基体积增大或改变其对称性,从而降低分子柔性,分子量增加,导致 T_g 升高。

表3 5种PSPI薄膜的 T_g 对比

Tab. 3 T_g comparison of five PSPI films

Samples	1#	2#	3#	4#	5#
$T_g/^\circ\text{C}$	206.60	252.39	246.76	234.38	237.81

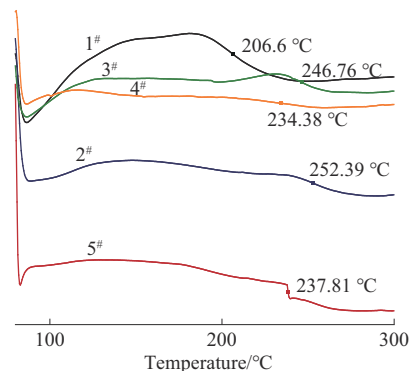


图5 5种PSPI薄膜的DSC曲线

Fig. 5 DSC curves of five PSPI films

2.4 水的浸润性分析

接触角测量仪的工作原理是将液体滴在固体表面上,通过观察液滴与固体表面的接触形态来测量接触角。仪器配备有高分辨率的摄像头和专门的软件,可以精确地测量接触角,并提供相应的数据分析功能。图6为5种PSPI薄膜接触角比较。由图6可知,5个试样的接触角均小于90°,皆表现出较

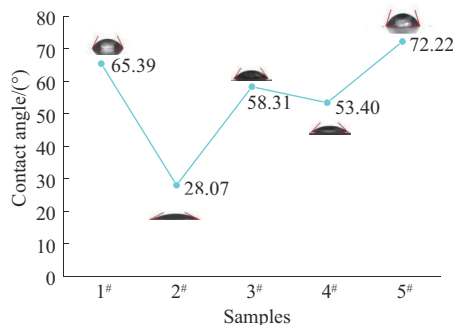


图6 5种PSPI薄膜接触角比较

Fig. 6 Comparison of five PSPI films contact angles

好的亲水性和润湿性;PSPI分子结构中酰亚胺环上羰基为亲水基团,此外,侧链交联网络结构中含有醚键单元—O—,会影响薄膜的润湿性和吸水性。加入荧光剂后,薄膜的接触角并不是有规律地上升或下降,在PSPI中引入的荧光材料不同,会对PSPI有不同的影响;荧光材料的分子体积小,会提高PSPI的亲水性;分子体积大,会降低PSPI的亲水性。

2.5 吸水性分析

图7为5种PSPI薄膜的吸水率比较。由图6和图7可以得到如下结论:5种样品中水的接触角越小,薄膜亲水性越好,吸水性越好;反之,水的接触角越大,薄膜亲水性越差,吸水性也越差。其中2[#]和4[#]相比于未加入荧光材料的PSPI而言,吸水性略高一些,是因为2[#]和4[#]中加入的荧光材料中含有二硫代水杨酸,而二硫代水杨酸具有较高的吸水性,并且在加入后会和PSPI的侧基发生反应,导致结晶度降低,结构间空隙增大,有更多容纳水分的空间。而另外两种试样中加入的荧光材料中含有微溶于水的硫代水杨酸,但3[#]中加入的荧光材料中含有一定亲水性的甲酰胺,而5[#]中没有任何亲水基团,因此5[#]表现出最低吸水率。

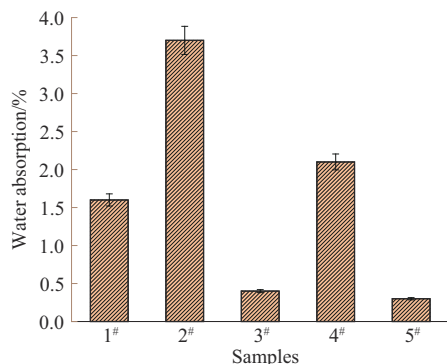


图7 5种PSPI薄膜的吸水率比较

Fig. 7 Comparison of water absorption rate of five PSPI films

3 结论

(1)合成了4种不同颜色的有机荧光材料,并将其加入到自主合成的PSPI预聚物中,这些树脂在紫外光的照射下能够固化形成PSPI薄膜,通过FTIR分析,5种PSPI薄膜均显示出PSPI的特征峰。加入有机荧光材料会影响PSPI分子的结晶度、取向性以及分子链的柔顺性,导致薄膜的拉伸强度和断裂伸长率都有所降低。荧光剂的加入,会使PSPI分子侧基体积增大并改变其对称性,降低其分子柔性,从而比未加入荧光材料的PSPI薄膜的 T_g 均有所增加。通过亲水性和吸水性测试发现,含有二硫代水杨酸

的荧光材料会使PSPI分子的结晶度降低,增大结构空隙,从而表现出更好的亲水性和吸水性。

(2)尽管使用了含氟单体,但为了提高预聚物的光固化性,在制备PSPI薄膜时,使用的溶剂为NVP,使得固化后的PSPI薄膜为棕色,本身就有强吸光性,5种PSPI薄膜在紫外光照射后,均未出现出荧光效果。由于加入的荧光材料为小分子有机物,会使PSPI的韧性降低,并改变薄膜的吸水性;对于荧光材料改性PSPI的研究,有待进一步用实验验证。

参考文献

- [1] 刘仪,莫松,许晓洲,等.耐高温有机/无机杂化聚酰亚胺基体树脂[J].复合材料学报,2023,40(1):62-71.
LIU Yi, MO Song, XU Xiaozhou, et al. Organic/inorganic hybrid polyimide matrix resins with high temperature resistance[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(1):62-71.
- [2] GU J W, LV Z Y, WU Y L, et al. Dielectric thermally conductive boron nitride/polyimide composites with outstanding thermal stabilities via in-situ polymerization-electrospinning-hot press method[J]. Composites Part A, 2017, 94:209-216.
- [3] 陶君.聚酰亚胺薄膜湿热老化性能研究[J].工程塑料应用,2023,51(1):98-103.
TAO Jun. Study on hygrothermal aging properties of polyimide films[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1):98-103.
- [4] 赵蕊,方玉婷,董杰,等.可紫外光固化聚酰亚胺的设计制备及性能研究[J].高分子学报,2021,52(4):371-380.
ZHAO Rui, FANG Yuting, DONG Jie, et al. Chemical structure design, preparation and properties of UV curable polyimide[J]. Acta Polymerica Sinica, 2021, 52(4):371-380.
- [5] 高鹏,薛向欣. UV固化环氧丙烯酸酯/聚酰亚胺树脂粉复合涂层的制备及性能研究[J].材料导报,2010,24(16):25-28.
GAO Peng, XUE Xiangxin. Preparation and performance of UV curable epoxy acrylate/polyimide resin powder composite coating[J]. Materials Reports, 2010, 24(16):25-28.
- [6] 朱丹阳,金锐,吴作林,等.化学亚胺化程度对正性光敏聚酰亚胺影响[J].应用化学,2017,34(3):276-281.
ZHU Danyang, JIN Rui, WU Zuolin, et al. Effect of the degree of chemical imidization on the positive photosensitive polyimide[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2017, 34(3):276-281.
- [7] 周萌萌.自增感型光敏聚酰亚胺的制备与表征[D].石家庄:河北科技大学,2015.
ZHOU mengmeng. Preparation and characterization of self sensitization photosensitive polyimide[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.
- [8] 丁丽琴,张爱清.新型可溶性光敏聚酰亚胺的合成与表征[D].武汉:中南民族大学,2006.
DING Liqin, ZHANG Aiqing. Synthesis and characterization of a new soluble photosensitive polyimide[D]. Wuhan: College of Chem-

- istry and Material Science, 2006.
- [9] 姜学松,李浩,王宏宇,等.新型自增感负性光敏聚酰亚胺[D].上海:上海交通大学,2006.
- JIANG Xuesong, LI Hao, WANG Hongyu, et al. A novel negative photoinitiator-free photosensitive polyimide[D]. Shanghai : Shanghai Jiao Tong University, 2006.
- [10] 丛冰,王大明,赵晓刚,等.含三苯胺结构聚酰(亚)胺电致变色/电控荧光双功能材料的研究进展[J].高分子通报,2023,36(8):914-928.
- CONG Bing, WANG Daming, ZHAO Xiaogang, et al. Research progress of electrochromic/electro fluorochromic materials based on polyamide/polyimide[J]Polymer bulletin, 2023, 36(8):914-928.
- [11] 卓效逵,申杰,艾霞,等.光敏活性剂含量对PSPI薄膜性能的影响[J].工程塑料应用,2024,52(3):153-157.
- ZHUO Xiaokui, SHEN Jie, AI Xia, et al. Effect of photosensitizer content on the properties of PSPI thin films[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3):153-157.
- [12] DING Liu, JIN Xilang, GAO Yuchong, et al. Novel strategy of multidimensional information encryption via multi-color carbon dots aggregation-induced emission[J]. Nano Research, 2024. DOI: 10.1007/s12274-024-6519-3.
- [13] 封俊俊,张浩杰,付玉鑫,等.迈克尔加成高效制备丙烯酸酯化光敏性聚酰亚胺[J].涂料工业,2024,54(4):23-30.
- FENG Junjun, ZHANG Haojie, FU Yuxin, et al. Highly efficient preparation of acrylate photosensitive polyimide by michael addition[J]. Paint & Coatings industry, 2024, 54(4):23-30.
- [14] 陈思扬,陈志豪,陈广泽,等.含咪唑基团的聚酰亚胺薄膜的制备及性能[J].高分子材料科学与工程,2023,39(8):26-31.
- CHEN Siyang, CHEN Zhihao, CHEN Guangze, et al. Properties and characterization of polyimide films containing imidazole group[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2023, 39(8):26-31.
- [15] 罗伟,李琇廷,杨雨箫,等.基于刚性脂环四羧酸二酐的无色透明聚酰亚胺薄膜的制备与性能[J].高分子学报,2023,54(7):1 084-1 094.
- LUO Wei, LI Xiuting, YANG Yuxiao, et al. Preparation and properties of colorless transparent polyimide films based on rigid alicyclic tetracarboxylic anhydride[J]. Acta Polymerica Sinica, 2023, 54(7):1 084-1 094.
- [16] 卢春燕,王刚,刘帅,等.冰浴法制备浅色透明聚酰亚胺薄膜[J].塑料工业,2022,50(3):95-98,115.
- LU Chunyan, WANG Gang, LIU Shuai, et al. Preparation of light-colored and transparent polyimide films by ice bath method[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(3):95-98, 115.