

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.012

偶氮苯基马来酰亚胺含氟聚合物制备及涂覆织物对HF的刺激响应

王树伦¹, 赵莹¹, 范文涛¹, 刘玉珍¹, 岳明彦¹, 颜伟¹, 翟丛丛²

(1. 陆军装备部驻济南地区军代室, 济南 250021; 2. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 氟化氢(HF)是氟化工行业重要的基础原料,但HF泄露会造成接触者严重灼伤及骨质侵蚀等危害事故。为保障氟化工行业的安全生产,提出一种具有HF刺激响应的偶氮苯基马来酰亚胺(MAB)含氟聚合物[P(MAB-co-HFBMA)]智能织物涂层。首先,使用MAB和甲基丙烯酸六氟丁酯(HFBMA)进行溶液聚合制备P(MAB-co-HFBMA),并通过傅里叶变换红外光谱、凝胶渗透色谱表征确定聚合物的结构、分子量。结果表明,P(MAB-co-HFBMA)成功合成且分子量达到32 040 g/mol。进一步利用超声浸染技术在无纺布表面制备P(MAB-co-HFBMA)涂层,接触角测试及涂层耐久性测试结果表明,得到的织物涂层呈现优异的疏水性能并且与无纺布结合牢固。涂层接触气体HF后,P(MAB-co-HFBMA)结构中的偶氮苯官能团与HF发生质子化反应,进而迅速产生由黄色到橙红色的颜色变化。表明该涂层对HF危险气体具有快速可视显色响应,在高性能智能传感器领域具备有较好的应用潜力。

关键词: 氢氟酸;含氟聚合物;马来酰亚胺;刺激响应;传感器

中图分类号: TQ322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0105-06

Preparation of Azobenzene Maleimide Fluoropolymer and the Stimulus Response of HF to Coated Fabric

WANG Shulun¹, ZHAO Ying¹, FAN Wentao¹, LIU Yuzhen¹, YUE Mingyan¹, YAN Wei¹, ZHAI Congcong²

(1. Jinan Military Representative Office of Army Equipment Department, Jinan 250021, China;

2. Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: Hydrogen fluoride (HF) is an important raw material in the fluorine chemical industry. However, the leakage of HF can cause severe burns and bone erosion for those exposed. To ensure the safe production in the fluorine chemical industry, a smart fabric coating composed of a fluorine-containing polymer [P(MAB-co-HFBMA)] with a HF stimulus response based on azobenzene-phenyl maleimide was proposed. Firstly, P(MAB-co-HFBMA) was prepared by solution polymerization using MAB and methyl methacrylate hexafluorobutyl ester (HFBMA), and its structure and molecular weight were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and gel permeation chromatography. The results show that synthesized P(MAB-co-HFBMA) has a molecular weight of 32 040 g/mol. Further, the P(MAB-co-HFBMA) coating was prepared on the surface of non-woven fabric by ultrasonic immersion technology. The contact angle test and coating durability test results indicate that the obtained fabric coating exhibits excellent hydrophobic properties and is firmly bonded to the non-woven fabric. After the coating is exposed to the gas HF, the azobenzene functional groups in the P(MAB-co-HFBMA) undergo protonation reactions with HF, resulting in a rapid color change from yellow to orange-red. This indicates that the coating has a rapid visual color response to the hazardous gas HF and has good application potential in the field of high-performance intelligent sensors.

Keywords: hydrofluoric acid; fluorine-containing polymer; maleimide; stimuli-responsive; sensor

氟化氢(HF)是氟化工领域不可或缺的关键基础原料,在合成氟烯烃、氟碳化合物、氟化钠、氟化铝、

六氟化铀及冰晶石等众多有机与无机氟化物的制备过程中发挥着不可替代的重要作用^[1]。然而,液

通信作者: 赵莹,硕士研究生,高级工程师,研究方向为合同监督管理

收稿日期: 2026-03-23

引用格式: 王树伦,赵莹,范文涛,等.偶氮苯基马来酰亚胺含氟聚合物制备及涂覆织物对HF的刺激响应[J].工程塑料应用,2026,54(6):105-110.

WANG Shulun, ZHAO Ying, FAN Wentao, et al. Preparation of Azobenzene Maleimide Fluoropolymer and the Stimulus Response of HF to Coated Fabric[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 105-110.

态HF具有极强的挥发性、剧毒和强腐蚀特性,其生产与储运过程一旦发生泄漏,不仅可能导致人员严重化学灼伤及骨质侵蚀,甚至可能引发致命性中毒事故^[2]。值得关注的是,在氟化工日常工业生产中,泄漏于空气氛围中的HF气体是危害作业人员身体健康的重要污染源。因此,开发具有快速响应、便携集成特性的新型检测装备已成为迫切需求。

刺激响应材料作为智能器件构建的核心基元,能够在外界温度、湿度、pH、光、电等单一或多重刺激作用下产生可观测的物理/化学响应信号,近年来在智能传感领域展现出广阔应用前景^[3-4]。特别是基于此类材料开发的可视化传感器,凭借其直观的信号输出特性,在生物分子检测^[5]、信息安全存储^[6]、环境危害预警^[7-8]等领域取得重要突破。当前研究聚焦于通过分子结构设计与器件工程策略的协同优化,旨在实现传感器响应速度、检测灵敏度、工作稳定性以及系统集成度的全面提升。尽管已有研究在分子工程调控方面取得系列进展,但如何通过精准的分子设计实现材料聚集态结构的可控构筑,进而调控其刺激响应特性,并最终推动其在可视化信息识别、高危环境实时监测等领域的实际应用,仍是该领域亟待突破的关键科学问题。

目前,面向HF的可视化传感器构筑及应用仍处于起步阶段。已有研究利用氧化硅/水/丙烯酸羟乙酯构筑水凝胶光子晶体(PC)作为HF检测传感器,利用HF刻蚀二氧化硅导致PC水凝胶溶胀,进而引发PC反射波长和结构色变化的特性,实现HF可视化和光谱检测^[9]。此外,通过设计合成含二聚马来腈衍生物的希夫碱,也可简便构建HF可视化传感器^[10]。然而,现有方法在实际应用中仍存在突出问题,无机材料体系成膜性不佳,有机小分子体系与基体黏附性弱且易脱落,有机/无机复合体系相容性较差等。相比之下,结构中具有发色基团的有机聚合物或超高分子材料不仅呈现较好的发色功能和循环稳定性,同时表现出良好的加工性能,且相应的分子结构易于设计与调控^[11-12]。例如,将具有光/酸刺激响应的螺吡喃小分子共价键接至聚合物基体并静电纺丝成纳米纤维,可显著提高螺吡喃基团的响应速率、抗疲劳性、灵敏度和稳定性^[13]。因此,设计新型刺激响应聚合物或超分子体系将为高性能传感器的构筑及推广应用奠定坚实的材料基础。

智能织物是一种可进行多表面功能修饰的低

成本三维框架材料,在油水分离、生物传感、电子功能设备及人工智能等诸多领域得到了广泛应用^[14-15]。与此同时,含氟材料因氟原子极低的表面能特性,能够显著降低材料的表面能,有效提升其疏水性能^[16-17]。基于上述思路,本文制备了以偶氮苯基马来酰亚胺(MAB)为功能单元的含氟聚合物,并将其均匀浸染于织物表面,成功制备了具有自清洁功能的HF刺激响应智能织物,在检测HF等危险源方面展现出良好的应用前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

MAB:分析纯,山东润涵新材料有限公司;

丙酮、氯仿:分析纯,烟台远东精细化工有限公司;

偶氮二异丁腈(AIBN)、四氢呋喃(THF)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF):分析级,国药集团化学试剂有限公司;

HF:工业级,山东非金属材料研究所;

甲基丙烯酸六氟丁酯(HFBMA)、溴化钾、三氟乙酸(TFA):分析纯,麦克林化学试剂有限公司;

无纺布:工业级纤维,广州创皇服装有限公司。

1.2 主要仪器及设备

超声波清洗仪:KQ3200,昆山超声仪器有限公司;

旋转蒸发仪(乙醇浴):RE52C,上海亚荣生化仪器厂;

离心机:TG16-WS,长沙维尔康湘鹰离心机有限公司;

电子分析天平:AG285,梅特勒有限公司(瑞士);

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet IS 50,美国赛默飞世尔有限公司;

凝胶渗透色谱(GPC)测试仪:PL-220,英国普立泰科公司;

接触角(CA)测试设备:OCA40,德国克吕士有限公司。

1.3 智能织物涂层的制备

1.3.1 AIBN的重结晶

按照1 g AIBN对应无水乙醇20 mL的比例,用电子天平称取16 g AIBN并溶解在装有320 mL无水乙醇溶液的烧杯中,将溶液加热至50 °C后过滤。将滤液收集在烧杯中,并放置于冰箱5 °C恒温中保

持6 h,有大量白色晶体产生。抽滤收集白色晶体,将晶体置于25 °C真空烘箱中恒温干燥8 h,干燥结束得到14 g白色晶体,即重结晶AIBN,产率为87.5%。

1.3.2 偶氮苯基马来酰亚胺含氟聚合物[P(MAB-co-HFBMA)]的制备

在500 mL单口烧瓶中依次加入MAB(0.5 mol)、HFBMA(1.5 mol)、引发剂AIBN(占两单体MAB、HFBMA总质量的1.2%)及溶剂DMF(占反应体系总质量的55.0%),经磁力搅拌后呈现黄色透明液体。对烧瓶进行真空处理,首先利用真空泵对烧瓶进行脱泡处理三次,最后将整个烧瓶放入水浴加热锅中,在搅拌条件下将烧瓶从室温升到75 °C,将烧瓶用保鲜膜覆盖保温。反应24 h后结束实验,取出单口烧瓶,烧瓶内的液体由反应前的透明变为不透明的深棕色,此时烧瓶中的溶液流动性变小,且黏度变大,说明MAB和HFBMA发生了溶液聚合反应。将烧瓶中含有反应产物的液体逐渐冷却至室温,用滴管逐滴滴入水/乙醇混合溶液(水和乙醇的体积比为2:5)中,液体在滴入水/乙醇混合溶液的过程中,溶剂会立即溶解在混合溶液中,而反应产物沉淀在烧杯底部,通过抽滤获得黄色固体粉末。将所得黄色固体粉末用DMF溶解后继续沉淀在水/乙醇混合溶液中,如此重复3次,将聚合物中的小分子、杂质除去,最后将获得的产物在75 °C烘箱中真空干燥15 h,得到P(MAB-co-HFBMA),称重后计算产率,产率为85%。

1.3.3 智能织物的制备

通过超声浸染技术将制备的聚合物P(MAB-co-HFBMA)应用到织物表面实现其刺激响应功能。将无纺布裁剪成规则的长方形(10 cm×15 cm),依次浸泡在丙酮、乙醇、水溶液中超声20 min,然后取出置于烘箱中干燥处理。将干燥过的无纺布浸入质量浓度为3%、5%、7%、10%、12%的P(MAB-co-HFBMA)/THF溶液中超声浸染10 min,取出沥干,将所有样品在80 °C真空烘箱中干燥48 h得到黄色的智能织物。

1.4 测试与表征

FTIR表征:将产物P(MAB-co-HFBMA)/溴化钾按照1:30的质量比用研钵制成均匀的黄色粉末,将粉末进行压片得到较透明的圆片后采用FTIR仪在波长范围400~4 000 cm⁻¹进行结构表征。

P(MAB-co-HFBMA)分子量表征:将P(MAB-co-HFBMA)溶解配制为1 mg/mL的THF溶液,在流速为1.0 mL/min的流动相中进行聚合物P(MAB-co-HFBMA)分子量的表征。

智能织物CA测试:将改性前后的织物表面进行CA测试,采取手动方式设置液滴体积为2 μL,滴在改性前后织物涂层表面,操作3次,测试涂层的润湿性能。

智能织物耐久性测试:将改性后的织物进行折叠、拉伸、弯曲、黏结,观察织物表面是否有聚合物脱落。

织物HF刺激响应测试:将织物经过HF刺激,观察织物表面颜色变化。

2 结果与讨论

2.1 P(MAB-co-HFBMA)含氟聚合物结构表征

P(MAB-co-HFBMA)的制备采用溶液聚合的方式,具体合成路线示意图如图1所示,其FTIR谱图如图2所示。图2中,2 978 cm⁻¹处的吸收峰为结构中甲基、亚甲基等C—H键的伸缩振动峰,1 731 cm⁻¹处的双重峰为MAB五元杂环结构中的羰基(C=O)及HFBMA中的羰基伸缩振动吸收峰,偶氮苯结构的吸收峰出现在1 580 cm⁻¹左右。1 100 cm⁻¹处出现的强峰为碳氟键(C—F)的吸收峰,该峰的出现也说明HFBMA与MAB发生了聚合反应,表明P(MAB-co-HFBMA)的成功合成。

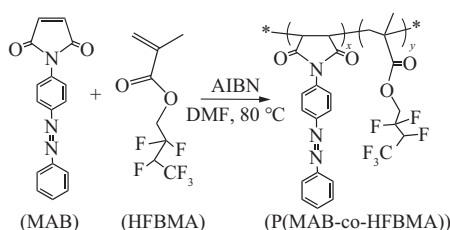


图1 P(MAB-co-HFBMA)的合成路线

Fig. 1 Synthetic route of P(MAB-co-HFBMA)

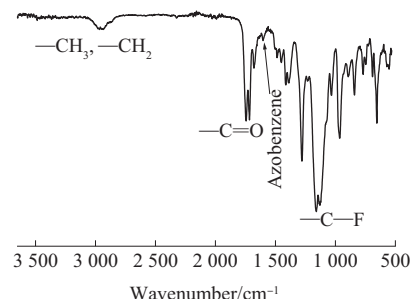


图2 P(MAB-co-HFBMA)的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectrum of P(MAB-co-HFBMA)

GPC是测试聚合物分子量的必要手段,为了进一步验证单体MAB与HFBMA发生了溶液聚合反应,对产物进行GPC测试。图3是在流动相下得到的聚合物P(MAB-co-HFBMA)的GPC曲线图。如图3所示,P(MAB-co-HFBMA)的GPC曲线呈单峰,出峰时间较早,在19 min左右。证明该聚合物为一种物质且分子量较大。经过积分得到聚合物的分子量为32 040 g/mol,远大于两单体的分子量,说明MAB与HFBMA发生共聚反应。

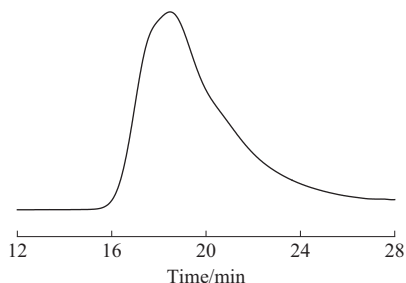


图3 P(MAB-co-HFBMA)的GPC分析

Fig. 3 GPC analysis of P(MAB-co-HFBMA)

2.2 智能织物涂层的物理性能

通过超声浸染技术将制备的聚合物P(MAB-co-HFBMA)材料应用到织物表面实现其刺激响应功能,其中P(MAB-co-HFBMA)材料在织物表面的黏结牢度是验证智能织物使用性能的一个重要指标,决定了智能织物的应用价值。图4为改性织物的机械耐久性能实验。将聚合物P(MAB-co-HFBMA)改性的织物进行多次对折、卷曲、拉伸机械处理(图4a至图4c),20次实验之后验证实验效果,经实验之后在改性织物表面未发现P(MAB-co-HFBMA)材料

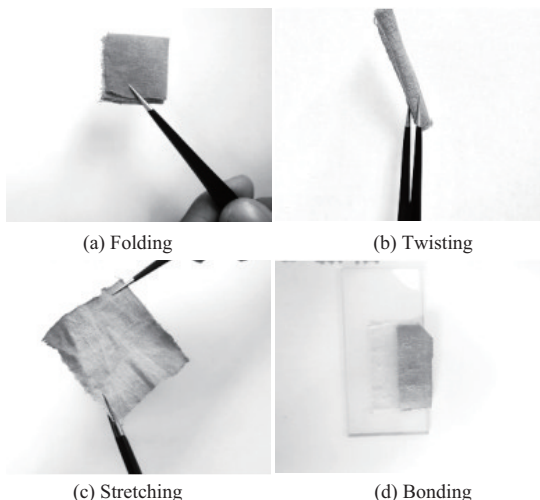


图4 智能织物机械耐久性和黏结强度测试方法

Fig. 4 Test methods for mechanical durability and bonding strength of smart fabrics

脱落等现象发生,说明聚合物P(MAB-co-HFBMA)已牢牢固定在织物表面,这主要是由于织物表面含有大量的羟基等极性基团,而制备的聚合物P(MAB-co-HFBMA)结构中含有强电负性的O、N、F等元素,在进行P(MAB-co-HFBMA)超声浸染改性织物实验时,O、N、F等强电负性元素会和织物表面的大量羟基形成化学氢键,牢牢地将P(MAB-co-HFBMA)与织物黏结在一起。此外,在智能织物表面黏结一层双面胶(图4d),并压上50 g的砝码静置5 min,取下砝码,将织物从双面胶表面剥离后发现双面胶表面未见有黄色颗粒,进一步证明织物与聚合物呈现牢固的黏附性能。耐久性和黏结强度测试结果表明P(MAB-co-HFBMA)已牢牢固定在织物表面,可进行刺激响应性能的验证实验。

前面已经提到,织物表面含有大量的羟基,说明织物表面是亲水材料,实际使用过程中如果不进行改性易导致织物表面的污染,基于此选择低表面能的含氟材料作为改性单元进行亲水改性。图5为织物改性前后的CA测试结果,如图5a所示,改性前织物亲水性极强,当水滴滴入织物表面立即被润湿,易导致实际生产使用过程中被污染。对织物进行超声浸染使织物表面黏结一层含氟聚合物材料,降低织物表面的化学能,当液滴滴在织物表面形成一个立体的小水珠,接触角为145.9°(图5b),呈现出极好的疏水性能,这是因为一方面含氟材料的低表面能降低了织物表面的亲水性,另一方面由于织物是网状结构,正是这种协同作用赋予改性织物表面较强的疏水性。

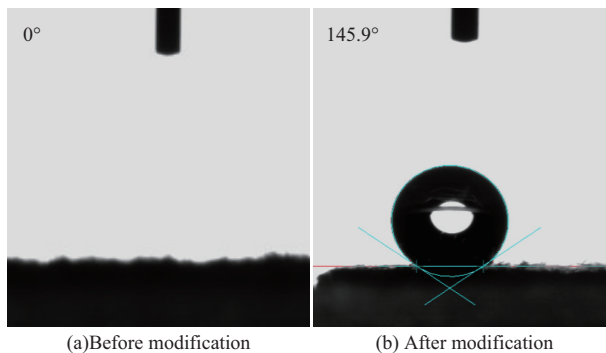


图5 织物改性前后的润湿性能

Fig. 5 Wetting properties of fabrics

此外,由于改性过的织物表面有一定的羟基,所以对水滴也呈现出一定的附着力,如图6所示。

2.3 智能织物涂层的刺激响应性研究

由于HF具有较强的腐蚀性,为确保实验安全,

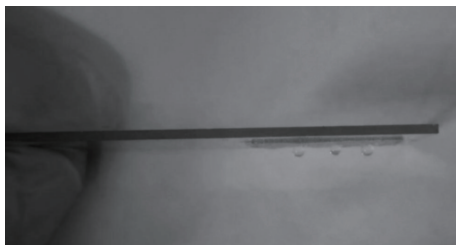


图6 聚合物改性织物表面水滴照片

Fig. 6 Photos of water droplets on the surface of polymer-modified fabric

在验证其对HF的刺激响应性之前,需先对聚合物的刺激响应机制进行研究。如图7所示,将改性织物置于挥发性较强的三氟乙酸(TFA)上方,并使用“熊猫”形状的掩膜覆盖织物表面。当织物被选择性地暴露在TFA挥发蒸气中时,暴露部分的P(MAB-co-HFBMA)在3 s内与蒸气中的TFA分子快速发生质子化反应,暴露部分织物的颜色也会由黄色变成橘红色,而未暴露部分的智能织物颜色保持不变(图7a)。这一现象源于聚合物结构中的偶氮苯与含氮五元杂环(具有供电子效应)相连接,该五元杂环与偶氮苯形成离域 π 键,该键将偶氮苯中

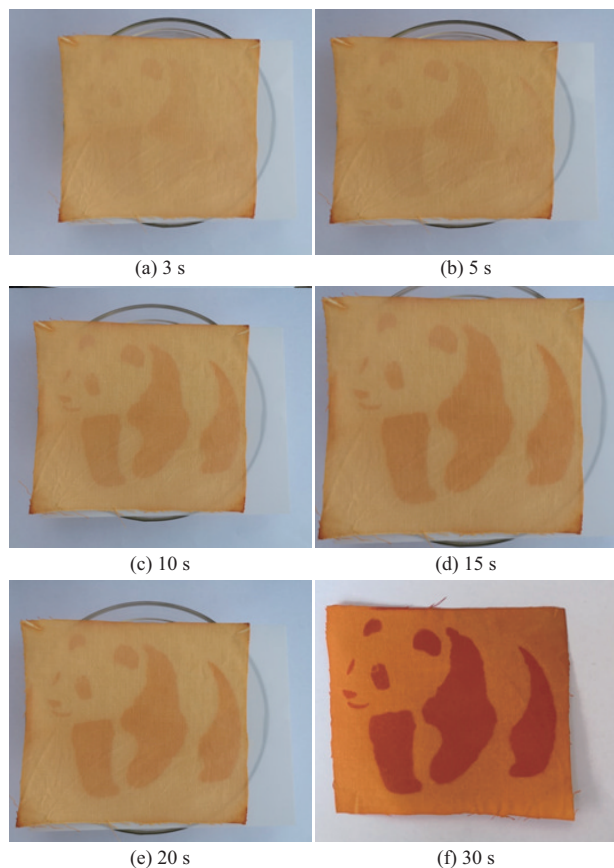


图7 智能织物对TFA的刺激响应

Fig. 7 Stimulus response of smart fabric to TFA

β 位N元素的电子云密度大大增加,随着电子云密度的增加其酸性会显著下降,即偶氮苯中N元素的碱性增强。随着智能织物中TFA刺激时间的逐渐增加,TFA与碱性增强的氮原子发生质子化反应的速率增加,并发生电子重排得到较稳定的醌式结构^[18-19],导致织物颜色发生变化。随时间延长,清晰的“熊猫”图案逐渐显现,整个刺激响应过程在30秒内完成,表明该智能织物具有良好的刺激响应性能。

对于危险气体刺激响应型传感器体系而言,必须保证待测危险气体对织物的快速响应,快速的刺激响应能够显著降低时间成本。在基于聚合物P(MAB-co-HFBMA)改性的智能织物体系中,图7已证实该聚合物在固体织物表面具备快速刺激响应能力,接下来将验证危险气体对织物的刺激响应。如图8所示,织物在接触HF后颜色由初始黄色转变为橙红色(清晰的英文字母),这一变化源于聚合物侧链中偶氮苯官能团的质子化/去质子化过程:当HF与偶氮苯官能团接触时,发生质子化反应,在微观上形成清晰化的质子化结构,在宏观上显示织物颜色的转变,这说明由P(MAB-co-HFBMA)改性的织物呈现出迅速且较灵敏的HF刺激响应特性。此外,织物的多孔结构大幅增加了P(MAB-co-HFBMA)与HF蒸气接触的面积,借助织物多孔结构的优势,从储存罐泄露的HF蒸气会运动到织物内部与P(MAB-co-HFBMA)发生质子化作用,大大缩短了HF分子与偶氮苯结构质子化反应的时间。

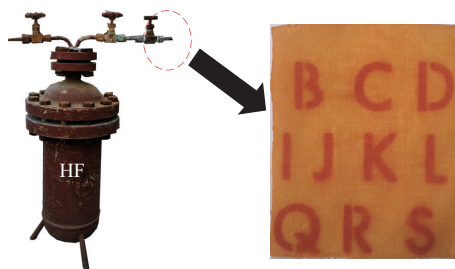


图8 智能织物的HF刺激响应性

Fig. 8 HF stimuli-responsive properties of smart fabrics

3 结论

(1)通过溶液聚合技术得到了具有刺激响应的MAB含氟聚合物P(MAB-co-HFBMA),利用红外光谱、GPC测试对聚合物的结构、分子量进行表征,确定了聚合物的结构。

(2)将得到的聚合物P(MAB-co-HFBMA)通过超声浸染技术对织物进行改性,在织物表面形成一

层均匀的聚合物,改性后的织物进行机械性能及润湿性能测试确定聚合物牢牢地黏结在织物表面,且织物从润湿状态变为超疏水结构,有较好的清洁性能。

(3)对改性后的织物进行刺激响应研究,确定聚合物在HF刺激下发生偶氮苯的质子化反应,织物颜色由黄色快速变为橙红色,后续在研究HF等危险气体传感器等方面有较好的应用前景。

参考文献

- [1] YANG H C, LI S J, YU H H, et al. Production of anhydrous hydrogen fluoride from fluorosilicic acid: A review[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2024, 12. DOI:10.3389/fchem.2024.1372981.
- [2] HU G Z, SHU Z Q, LI Y, et al. A rare case of extensive hydrofluoric acid burn[J]. *Journal of Burn Care & Research*, 2024, 45(5): 1 321–1 324.
- [3] FU M, YUAN Y W, LIU X B, et al. A thermosensitive ionic hydrogel for thermotropic smart windows with integrated thermoelectric energy harvesting capability[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(1). DOI:10.1002/adfm.202412081.
- [4] HE X L, SHAO Y Y, PANG Y L, et al. Penta-methine cyanine IRTs: Enabling NIR or visible photoinduced polymerization of acrylate and thiol – ene for preparation of polychromatic and color-changing polymers[J]. *Macromolecules*, 2024, 57(7):3 148–3 159.
- [5] HE F, CHEN S T, ZHOU R L, et al. Bioinspired passive tactile sensors enabled by reversible polarization of conjugated polymers[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 17(1). DOI: 10.1007/s40820-024-01532-z.
- [6] WANG B, ZHOU X C, GUO Z G, et al. Recent advances in atmosphere water harvesting: Design principle, materials, devices, and applications[J]. *Nano Today*, 2021, 40. DOI: 10.1016/j.nantod.2021.101283.
- [7] YANG L Y, LIU Y P, LI X F, et al. Large-scale, stretchable, self-protective, and multifunctional perovskite luminescent filament with ultra-high stability[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(25). DOI: 10.1002/adma.202400919.
- [8] ZHANG T Z, LOU X Y, LI X Y, et al. Tunable photochromism of spirooxazine in the solid state: A new design strategy based on the hypochromic effect[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(11). DOI: 10.1002/adma.202210551.
- [9] ZHANG Z K, WEI B R, YANG D P, et al. Precisely sensing hydrofluoric acid by photonic crystal hydrogels[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 634:314–322.
- [10] ULLAH Z, SUBRAMANIAN S, LIM H, et al. Highly selective and scalable molecular fluoride sensor for naked-eye detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(12):17 767–17 774.
- [11] DAS N, SAMANTA T, PATRA D, et al. A unique stimuli-responsive reversible hierarchical spherical to twisted-rod-shape organization from fluorescein-derived polynorbornene copolymers[J]. *Macromolecules*, 2024, 57(3):976–984.
- [12] GAO K, FENG Q, ZHANG Z Y, et al. Emissive metallacage-cored polyurethanes with self-healing and shape memory properties[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(39). DOI:10.1002/anie.202209958.
- [13] KEYVAN RAD J, GHOMI A R, KARIMPOUR K, et al. Progressive readout platform based on photoswitchable polyacrylic nanofibers containing spiropyran in photopatterning with instant responsivity to acid – base vapors[J]. *Macromolecules*, 2020, 53(5):1 613–1 622.
- [14] JIANG Y, HADJICHRISTIDIS N. Diels – alder polymer networks with temperature-reversible cross-linking-induced emission[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(1): 331–337.
- [15] MA K K, IDREES K B, SON F A, et al. Fiber composites of metal – organic frameworks[J]. *Chemistry of Materials*, 2020, 32(17):7 120–7 140.
- [16] NAWAZ H, UMAR M, NAWAZ I, et al. Hybrid PVDF/PANI membrane for removal of dyes from textile wastewater[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(5). DOI: 10.1002/adem.202100719.
- [17] CHEN D L, ZHU M, KANG P B, et al. Self-enhancing gel polymer electrolyte by *in situ* construction for enabling safe lithium metal battery[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(4). DOI: 10.1002/advs.202103663.
- [18] 徐琳. 含氟光响应性材料的制备及应用[D]. 济南: 济南大学, 2020.
XU Lin. Preparation and application of fluorine-containing photo-responsive materials[D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [19] ZHAI C C, FANG G X, LIU W Q, et al. Robust scalable-manufactured smart fabric surfaces based on azobenzene-containing maleimide copolymers for rewritable information storage and hydrogen fluoride visual sensor[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(35):42 024–42 034.