

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.010

马来酰亚胺基含氟聚合物制备及在海洋防污涂料中的潜在应用

翟丛丛¹, 张江浩¹, 韩吉庆¹, 张凤青², 杜成章³, 林帅¹, 蔡晨¹, 王威¹, 刘霞¹, 张坤¹, 汤振娟⁴

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 中国北方发动机研究所, 天津 300000; 3. 国营四达机械制造有限公司, 陕西咸阳 712200; 4. 山东交通学院汽车工程学院, 济南 250023)

摘要: 涂覆在潜艇、舰船等基体表面的三丁基锡(TBT)基涂层是抑制海洋生物生长、聚集的重要材料, 但该物质对水环境有持久毒性已被禁用。为有效替代TBT对涂层材料的使用, 保障船舶的正常运行, 提出一种具有良好抑菌效果且绿色环保的N-(2,4,6-三氯苯基)马来酰亚胺(TCPM)基含氟聚合物的制备方法。首先通过两步法得到具有良好防污效果的功能单体TCPM, 利用“硫-烯”点击技术得到含双羟基的马来酰亚胺基功能单体, 进一步利用逐步聚合在溶液中反应得到侧链含有杀菌基团的三氯苯基马来酰亚胺基含氟聚合物, 利用核磁共振、傅里叶变换红外光谱等分析技术对每一步产物进行详细分析, 确定产物的结构, 结构表征证明得到了具有杀菌基团的马来酰亚胺基含氟功能聚合物。通过旋涂技术得到的聚合物涂层呈现较好的疏水性、低吸水率以及良好的力学性能, 聚合物结构中氟元素的自迁移能力赋予涂层较低的表面能, 可抑制细菌等物质黏附在涂层表面, 该聚合物的制备是抑制海洋细菌的有效手段, 为解决海洋防污问题提供了有效的技术支撑, 具有较好的应用潜力。

关键词: 海洋防污; 低表面能; 点击化学; 马来酰亚胺; 含氟材料

中图分类号: TQ322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0072-06

Synthesis of maleimide-functionalized fluoropolymers for potential marine antifouling coatings

ZHAI Congcong¹, ZHANG Jianghao¹, HAN Jiqing¹, ZHANG Fengqing², DU Chengzhang³, LIN Shuai¹, CAI Chen¹, WANG Wei¹, LIU Xia¹, ZHANG Kun¹, TANG Zhenjuan⁴

(1. Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China; 2. China North Engine Research Institute, Tianjin 300000, China; 3. NO.5702 Factory of the Chinese People's Liberation Army, Xianyang 712200, China; 4. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China)

Abstract : The butyltin (TBT)-based coatings applied on substrates such as submarines and ships are critical materials for inhibiting the growth and aggregation of marine organisms. However, due to their persistent toxicity to aquatic environments, TBT has been banned. To effectively replace TBT in coating materials and ensure normal vessel operation, a green and environmentally friendly N-(2,4,6-trichlorophenyl)maleimide (TCPM)-based fluorinated polymer with excellent antibacterial properties was developed. The functional monomer TCPM, which exhibits antifouling performance, was first synthesized via a two-step method. A dihydroxy-containing maleimide-based functional monomer was then obtained using thiol-ene click chemistry. Subsequently, step-wise polymerization in solution was employed to prepare a fluorinated polymer with trichlorophenyl maleimide side chains bearing antibacterial groups. Structural characterization techniques, including nuclear magnetic resonance, Fourier-transform infrared spectroscopy, etc, confirmed the successful synthesis of the target fluorine-containing functional maleimide-polymer with antibacterial group. The polymer coating, fabricated via spin-coating, demonstrates excellent hydrophobicity, low water absorption, and robust mechanical properties. The self-migrating capability of fluorine elements in the polymer structure endows the coating with low surface energy, effectively inhibiting the adhesion of substances such as bacteria. This polymer synthesis strategy provides an efficient approach to suppress marine bacteria and offers significant technical support for addressing marine antifouling challenges, demonstrating promising application potential.

Keywords : marine anti-fouling ; low surface energy ; click chemistry ; maleimide ; fluorinated material

基金项目: 装发项目(JZX7J202502JL002500)

通信作者: 汤振娟, 博士研究生, 讲师, 研究方向为高分子合成及在车辆工程中的应用

收稿日期: 2025-07-15

引用格式: 翟丛丛, 张江浩, 韩吉庆, 等. 马来酰亚胺基含氟聚合物制备及在海洋防污涂料中的潜在应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 72-77.

ZHAI Congcong, ZHANG Jianghao, HAN Jiqing, et al. Synthesis of maleimide-functionalized fluoropolymers for potential marine antifouling coatings[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 72-77.

中国作为一个海洋大国,目前对海洋的探索正在逐步前进,但是海洋生物污染的存在却大大阻碍了探索海洋和发展海上贸易的步伐^[1-3]。海洋生物污染是指海洋生物(如藻类、细菌、藤壶等)附着在船舶、海洋工程结构等表面,造成结构性能下降、船舶阻力增大等问题^[4-5]。传统上,通过将三丁基锡(TBT)等杀菌剂与涂层一起涂覆在船舶壳体表面达到杀菌效果,但由于TBT等化合物对水有持久性毒性,2008年已被禁止使用^[6-8]。海洋防污涂料的种类多种多样,但是各有利弊,制备一种既高效又环保且经济成本低的海洋防污涂料是目前亟待解决的难题。

近年来,两性离子聚合物、微结构表面和低表面能的环保材料在抗菌涂层领域被广泛应用^[9-11],通过材料的低表面能与海洋生物的弱相互作用,使得积累在船舶等表面的海洋生物污垢可以通过机械清洗或海水冲刷清除,该类材料的抗污能力主要依赖于表面能低及弹性模量低,但该聚合物通常力学强度较差,与基材的附着力弱,阻止生物淤积的能力有限,尤其是在静态时,各种细菌极易形成泥层,增大船舶的阻力^[12-14]。为提高材料的力学性能,采用环氧树脂或聚脲等方式进行化学改性,但该方法导致材料表面能及弹性模量增加,防污效果降低^[15-16]。采取两性离子基团或季铵盐掺入有机硅中以提高其防污性能,亲水性基团的引入会使聚合物在海洋环境中膨胀,从而降低其力学强度^[17-18]。

含氟材料由于氟原子较低的表面能可以有效抑制海洋生物在基体表面的附着,具有较好的防污效果,目前市场上也出现了可以应用的氟涂料,但还存在很多弊端,比如氟原子在极性液体中不稳定,难以发挥其最大作用等^[19-21]。基于此,笔者制备了以含氟材料为体系,*N*-(2,4,6-三氯苯基)马来酰亚胺(TCPM)为侧链基团的马来酰亚胺基含氟聚合物。TCPM结构中氯原子是一种低毒性的环保型有机海洋防污元素,附着在聚合物侧链有望杀死接触的海洋生物,而低表面能有助于黏附的生物污垢的脱离,由于防污基团固定在聚合物链上,预计聚合物表面具有持久的防污能力,而且防污剂不会释放到海洋中,对环境的影响很小。通过低表面能含氟聚合物体系的构筑以及杀菌基团的协同作用,解决海洋生物防污的

难题,实现船舶等行业未来在海洋领域的快速发展。

1 实验部分

1.1 主要原材料

三氯苯胺:分析纯,威海美亚化学有限公司;

丙酮、氘代氯仿(CDCl_3):分析纯,烟台远东精细化工有限公司;

马来酸酐、无水乙酸钠:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

对苯二酚、3-巯基-1,2-丙二醇(TG)、二丁基二月桂锡酸(DBTL):分析纯,上海阿拉丁试剂有限公司;

乙酸酐:分析纯,成都金山化学试剂有限公司;

2,2-二甲氧基-苯基苯乙酮(DMPA):分析纯,安耐吉化学技术(上海)有限公司;

四氢呋喃(THF)、无水乙醚:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI):分析纯,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;

六氟双酚A(BPAF):分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

二甲基亚砜(DMSO):分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 主要仪器设备

超声波清洗器:KQ-300E,昆山超声仪器有限公司;

旋转蒸发仪:RE52CS,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:FA2004N,上海精科仪器有限公司;

核磁共振谱(NMR)仪:Avance III 400 MHz,瑞士布鲁克拜厄斯宾公司;

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)仪:Waters 1525,溶剂为THF,美国Waters公司;

接触角(CA)测试仪:OCA40,德国Dataphysics公司;

万能拉力机:WDW-05L,济南斯派机电科技有限公司。

1.3 功能马来酰亚胺单体及聚合物的制备

1.3.1 TCPM的合成

在250 mL四口烧瓶中加入三氯苯胺(9.841 0 g, 50.1 mmol),丙酮(35.5 mL),室温搅拌溶解后,冷却至5~10℃。然后将马来酸酐(5.150 2 g, 52.52 mmol)溶解在13 mL丙酮中,使用恒压滴液漏斗逐滴加入烧瓶中,升温至25℃,搅拌反应2 h,溶液颜色由无色逐渐变为黄色。待反应结束后冷却,旋蒸,乙醇洗涤抽滤,得到浅黄色固体,然后在40℃下真空干燥12 h,得到固体产物13.516 2 g (45.9 mmol),产率为90.16%。

将上一步产物(7.302 1 g, 26.4 mmol)、无水乙酸酐(1.102 5 g, 13.4 mmol)、对苯二酚(0.151 2 g, 1.4 mmol)、乙酸酐(作脱水剂)10 mL分别加入含磁子的50 mL四口烧瓶中,在磁力搅拌下得到黄绿色液体。加热烧瓶至55℃下搅拌回流反应65 min,反应过程中会发现反应体系逐渐由黄色变为白色不透明,停止搅拌静置后会发现烧瓶底部有白色沉淀产生,将其倒入500 mL的蒸馏水中快速搅拌,有大量白色固体产生,抽滤得到白色固体,并在乙醇中重结晶两次后抽滤,60℃真空干燥过夜后称重得到白色固体^[22-23],称重得到TCPM产物7.631 8 g,产率为89.2%。

1.3.2 TCPM(OH)₂的合成

TCPM(OH)₂是通过硫-烯点击反应来合成的^[24-25]。首先将TG(6.916 0 g, 63.9 mmol), TCPM(4.433 2 g, 16 mmol), DMPA(0.100 9 g, 0.67 mmol)和THF 20 mL置于150 mL的单口瓶中。放入磁子搅拌,用氮气保护10 min,通过紫外灯(波长350 nm, 光强度100%, 100 mW/cm²)照射烧瓶40 min反应结束。利用旋蒸将烧瓶中大部分的THF除去,再将反应产物用滴管滴在300 mL去离子水中,边滴加边搅拌,将溶剂溶解在水中,在去离子水底部有黄色油状产物产生,将黄色产物在60℃下真空干燥24 h,得到TCPM(OH)₂黄色油状液体10.326 5 g,产率为90.1%。

1.3.3 马来酰亚胺基功能共聚物的合成

在250 mL三口烧瓶中依次加入磁子, TCPM(OH)₂, IPDI、无水THF(60 mL),搅拌溶解;称量BPAF, DBTL(作催化剂),用THF(40 mL)溶解后加入滴液漏斗中,将滴液漏斗旋紧与三口烧瓶连接,先抽真空,再用氮气保护,然后打开滴液漏斗旋塞,将BPAF溶液加入三口烧瓶中,在60℃滴加反应6 h,反应结束。将反应溶液倒入茄型烧瓶中,旋蒸至产物

呈现黄色黏稠状态,将产物逐滴滴入水中,进行水洗后用4~5 mL无水THF将其溶解,滴入无水乙醚中洗涤,结束后静置沉淀,抽滤后得白色粉末状产物,放入烘箱烘干,称量、计算产率^[26]。

1.3.4 马来酰亚胺基含氟聚合物涂层的制备

将聚合物配成8%的THF溶液通过旋涂工艺在载玻片上形成一层均匀的聚合物涂层,旋涂完成后将载玻片置于60℃烘箱中烘干(约6 h),取出载玻片进行润湿性能测试。

1.4 性能测试与表征

化学结构:将每步产物配成氘代溶液,通过NMR (¹H NMR 和 ¹⁹F NMR)进行分析,采用衰减全反射模式进行红外(波长范围500~4 000 cm⁻¹)分析。

分子量测试:采用GPC仪,将聚合物配成1 mg/mL的THF溶液,以聚苯乙烯(PS)为标样,流速为1.0 mL/min进行测试。

接触角测试:将涂层置于接触角测试仪放置样品处,操作仪器取2 μL液滴滴在涂层表面,重复6次,测试其润湿性。

力学性能测试:采用万能拉力机,拉伸强度、附着力及断裂伸长率等按GB/T 8642-2002进行测试。

2 结果与讨论

2.1 功能马来酰亚胺单体结构表征

图1a为TCPM的合成示意图,分为两步,首先是马来酸酐的开环反应形成三氯苯基马来酰亚胺酸,第2步在催化剂条件下闭环制备TCPM,步骤比

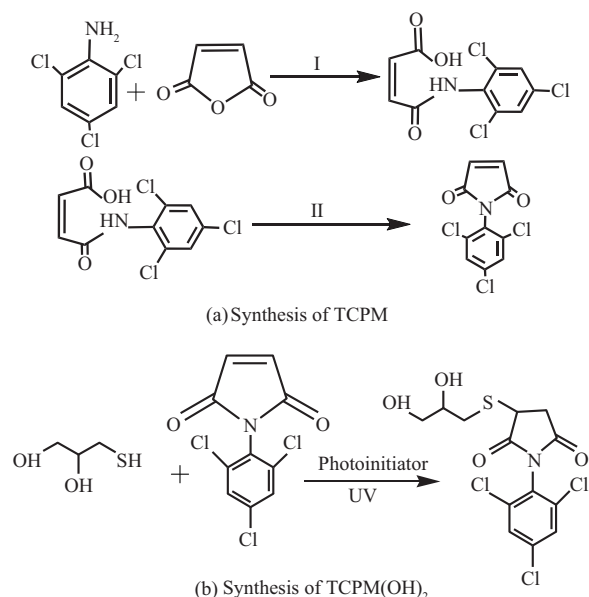
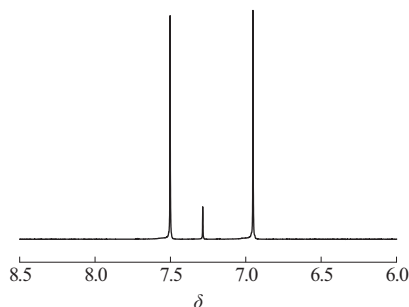


图1 TCPM及TCPM(OH)₂的合成

Fig. 1 Synthesis of TCPM and TCPM(OH)₂

较简单。图2是以 CDCl_3 为溶剂,对TCPM进行 ^1H NMR核磁表征。从图中可以看出, δ 在7.26处的吸收峰为溶剂峰, δ 在6.95的位置是马来酰亚胺五元环双键上的质子H的化学位移,在7.50的位置是苯环上的H化学位移。

图2 TCPM单体的 ^1H NMR谱图Fig. 2 ^1H NMR spectra of TCPM

TCPM(OH) $_2$ 的合成采用“硫-烯”点击反应,合成机理如图1b所示。将得到的TCPM(OH) $_2$ 以氘代氯仿为溶剂,进行结构表征^[24-25]。如图3所示, δ 在4.17处的特征峰对应 $-\text{HOCH}_2\text{CH}-$ 基团的H质子化学位移, δ 在3.76处特征峰对应的H质子为 $-\text{CHOHCH}_2\text{S}-$,2.82的位置对应的是 $-\text{CHOHCH}_2\text{S}-$ 基团的化学位移, δ 在4.25处的H质子峰为 $-\text{CH}_2\text{SCHCON}-$ 基团,在3.4处对应的是 $-\text{SCHCH}_2\text{CON}-$ 基团, δ 在7.48对应的是苯环基团上的质子H。

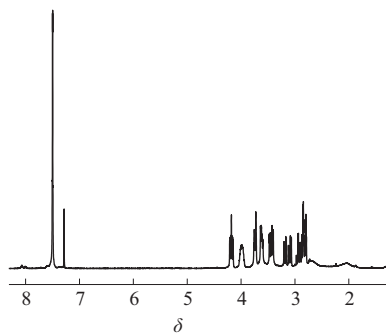
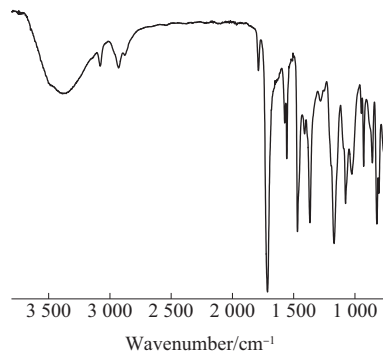
图3 TCPM(OH) $_2$ 的 ^1H NMR谱图Fig. 3 ^1H NMR spectra of TCPM(OH) $_2$

图4为TCPM(OH) $_2$ 的红外谱图,从图中分析可知,在 3383 cm^{-1} 处有个大峰,该峰为羟基的红外吸收峰,说明巯基乙醇成功与TCPM发生点击反应得到了含羟基的功能马来酰亚胺单体,在 2920 cm^{-1} 处的尖峰为甲基、亚甲基的红外吸收峰,在 1730 cm^{-1} 处的吸收峰为羰基的红外吸收峰。结合图3核磁氢谱和图4红外光谱分析,说明成功得到了具有杀菌元素的马来酰亚胺功能单体。

图4 单体TCPM(OH) $_2$ 的FTIR谱图Fig. 4 FTIR spectra of monomer TCPM(OH) $_2$

2.2 马来酰亚胺基含氟功能聚合物的结构表征

将制备的双羟基单体TCPM(OH) $_2$ 进行聚合,利用羟基与异氰酸酯基进行逐步加成聚合反应得到马来酰亚胺基含氟功能聚合物,具体的合成机理如图5所示,含不同比例的单体配方见表1。

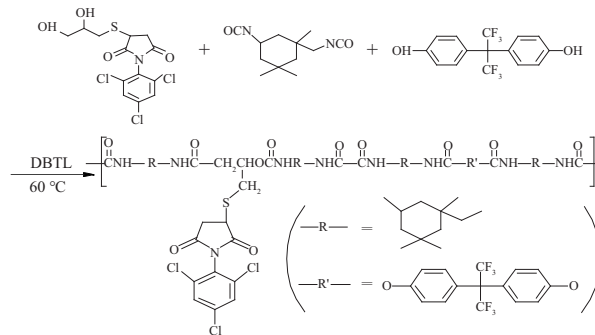


图5 马来酰亚胺基含氟聚合物的合成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of synthesis of maleimide-based fluoropolymer

表1 含不同比例单体共聚物的分子量分析

Tab. 1 Molecular weight analysis of copolymers containing monomers of different proportions

Sample	Molar ratio of		$M_n/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	$M_w/(\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$	PDI
	IDPI/TCPM(OH) $_2$ /	BPAF			
P1	10/3/7		23 445	50 482	2.15
P2	10/5/5		26 626	59 423	1.88
P3	10/7/3		31 624	51 970	1.95
P4	10/10/0		35 338	51 746	2.04

Notes: M_n is number average molecular weight; M_w is weight average molecular weight; PDI is molecular weight distribution index.

将得到的聚合物P2进行结构表征。图6为马来酰亚胺基聚合物的核磁氢谱图,以DMSO为溶剂,进行了 ^1H NMR核磁表征。具体分析为,在聚合物核磁氢谱图中 δ 在7.48~6.64为聚合物结构中BPAF苯环、苯基马来酰亚胺结构中苯环 $-\text{CH}-$ 峰位置, δ 在7.97左右位置的峰属于聚合反应发生后产生的一NH的峰位置,而 δ 在1.16~0.49, 3.49, 4.03,

1.67~1.21等位置对应异佛尔酮二异氰酸酯中环乙烷以及与其相连的 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$ 及 $-\text{CH}$ 基团的吸收峰。此外,P2聚合物的 ^{19}F NMR分析如图7所示^[27],从图中看出,聚合物的氟谱为单峰,说明聚合物中只有一种氟原子,为聚合物的三氟甲基吸收峰。经结构核磁氢谱、氟谱分析得知,确定得到了马来酰亚胺基的含氟功能聚合物。

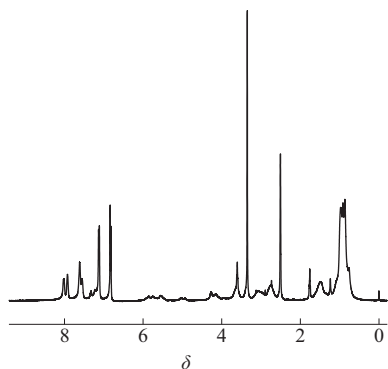


图6 马来酰亚胺基聚合物(P2)的 ^1H NMR谱图

Fig. 6 ^1H NMR spectra of maleimide-based polymer(P2)

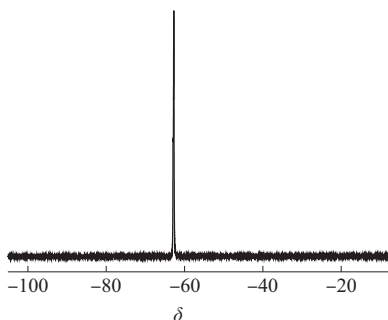


图7 马来酰亚胺基聚合物(P2)的 ^{19}F NMR谱图

Fig. 7 ^{19}F NMR spectra of maleimide-based polymer(P2)

将聚合物配成1 mg/mL的THF溶液进行测试,通过系统积分得到分子量,GPC数据分析如图8所示。从图8可以看出,聚合物的分子量越大,在GPC谱图中出峰时间越早,得到的聚合物P1~P4在GPC谱图中为单峰,说明逐步聚合得到的聚合物是一种单一聚合物,四种聚合物的分子量大小分别为 $\text{P1} < \text{P2} < \text{P3} < \text{P4}$ (表1),这是由于在聚合过程中,BPSF为大体积单体,有较大的空间位阻,随着BPSF聚合体系中量增加使得聚合体系受空间位阻的影响,聚合物分子量逐渐变小^[26-27]。四种聚合物的分子量分布在2左右,不同分子量的聚合物出峰时间也不同。通过GPC表征分析,说明聚合物有较大的分子量,未来可用于制备具有海洋防污功能的马来酰亚胺基聚合物涂层,有较大的应用前景。

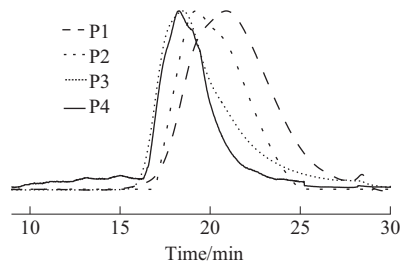
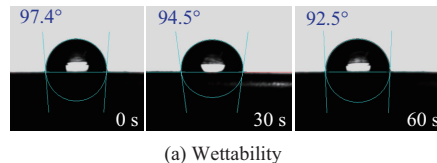


图8 马来酰亚胺基聚合物的GPC分析

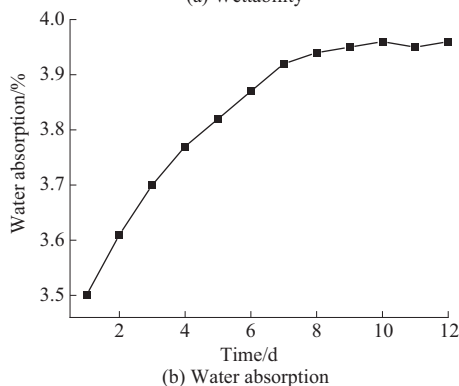
Fig. 8 GPC analysis of maleimide-based polymers

2.3 马来酰亚胺基含氟功能涂层的性能测试

马来酰亚胺基含氟功能涂层润湿性及吸水率如图9所示。在图9中,聚合物膜显示出较好的疏水性(图9a),在60 s时间内基本不变化,膜的吸水率在前8天时间内呈现升高的趋势,在第9天后吸水率增加的趋势变缓,随后不再变化,维持在3.95%左右(图9b),说明聚合物膜有较好的抗吸水性,膜呈现较好的疏水性及吸水率是由于聚合物结构中氟原子的存在,有较低的表面能。此外,对膜的力学性能进行测试(表2),结果说明膜有较好的拉伸强度和断裂伸长率,呈现出优异的成膜加工性能,附着力约为3.0 MPa,可实现与基体较好的黏附。



(a) Wettability



(b) Water absorption

图9 聚合物膜润湿性及吸水率

Fig. 9 Wettability and water absorption of polymer film

表2 马来酰亚胺基聚合物的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of maleimide-based polymer

Tensile strength/MPa	Adhesive strength/MPa	Elongation/%
10.2±0.3	3.0±0.2	270±12

3 结论

(1)通过马来酸酐与胺基化合物的开-闭环反应得到了具有杀菌元素(氯元素)的马来酰亚胺基功能

单体,利用硫-烯点击技术得到具有双羟基的功能单体,利用核磁、红外表征,分别对两种单体结构进行了详细分析,确定化合物的结构。

(2)将双羟基马来酰亚胺功能单体与异氰酸酯、含氟单体进行逐步加成聚合反应,得到马来酰亚胺基含氟功能聚合物,通过核磁、红外、GPC对聚合物进行了详细表征,得到的聚合物涂层呈现较好的疏水性、低吸水率以及良好的力学性能,聚合物结构中氟元素的自迁移能力赋予涂层较低的表面能,可抑制细菌等物质黏附在涂层表面,该涂层将来在海洋防污方面具有重要的应用前景,后续可进一步研究功能涂层在抗菌方面的应用。

参考文献

- [1] 解欣斐,傅昶玮,唐月燕,等.基于CiteSpace的海洋生物修复研究知识图谱分析[J].环境与发展,2023,35(1):25–32.
XIE Xinfei, FU Changwei, TANG Yueyan, et al. Analysis of the knowledge map of marine bio-remediation research based on CiteSpace[J]. Environment and Development, 2023, 35(1):25–32.
- [2] LI S, FENG K, LI J Y, et al. Marine antifouling strategies: Emerging opportunities for seawater resource utilization[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486. DOI:10.1016/j.cej.2024.149859.
- [3] 宋金明,戴佳佳.新污染物的海洋行为与最终归宿[J].科学通报, 2024, 69(6):655–658.
SONG Jinming, DAI Jiajia. Ocean behaviors and final destination of emerging contaminants[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69 (6):655–658.
- [4] XU H, WANG Y J, NI C H, et al. Degradable polylactic acid-reinforced acrylate polymer coating for marine antifouling[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 197. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108824.
- [5] DO J, KANG S M. Effect of surface charges in polymer coatings on antifouling performance in marine environments with sediment [J]. Langmuir, 2024, 40(37):19 644–19 653.
- [6] 郭瑞颖.三丁基锡对斑马鱼(Danio rerio)昼夜节律的影响及机制研究[D].海口:海南师范大学,2023.
GUO Ruiying. Effect of tributyltin on circadian rhythm of zebrafish (Danio rerio) and its mechanism[D]. Haikou: Hainan Normal University, 2023.
- [7] JIANG M W, ZHANG Z H, HAN Q X, et al. Embryonic exposure to environmentally relevant levels of tributyltin affects embryonic tributyltin bioaccumulation and the physiological responses of juveniles in cuttlefish (Sepia pharaonis)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 256. DOI:10.1016/j.ecoenv.2023.114894.
- [8] 邓立新.三丁基锡防污涂料的替代产品——海洋9号[J].化学教学, 2004(6):23–24.
DENG Lixin. Alternative product of tributyltin antifouling paint-Haiyang No.9[J]. Education in Chemistry, 2004(6):23–24.
- [9] SONG B Y, ZHANG E S, SHI Y J, et al. Zwitterionic hydrogel coating with antisediment properties for marine antifouling applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(21):27 908–27 916.
- [10] SHI X H, WEI H, ZHOU W J, et al. Advanced strategies for marine antifouling based on nanomaterial-enhanced functional PDMS coatings[J]. Nano Materials Science, 2024, 6(4):375–395.
- [11] CHEN Q, ZHANG L Y, ZHANG J L, et al. Bio-based polybenzoxazines coatings for efficient marine antifouling[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 174. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107298.
- [12] AN X W, CHENG J N, LI Q, et al. Development of a mechanically robust silicon-based cross-linking polymer for the sustainable marine antifouling coatings[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 41. DOI:10.1016/j.susmat.2024.e01015.
- [13] WANG C, LIU W B, CHEN R R, et al. Macrophage-Inspired marine antifouling coating with dynamic surfaces based on regulation of dynamic covalent bonds[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 670:223–233.
- [14] XIONG Y K, FANG Z Q, TANG P P, et al. MXene and cellulose nanofibers reinforced hydrogel with high strength and photothermal self-healing performances for marine antifouling[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348. DOI:10.1016/j.carbpol.2024.122879.
- [15] CAO M, XIAO Q Y, WU B, et al. Synthesis and characterization of waterborne polyurethane-based marine antifouling coating modified via glycerol laurate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(5). DOI:10.1002/app.56455.
- [16] CHEN J P, BAI W B, JIAN R K, et al. Molecular structure design of polybenzoxazines with low surface energy and low modulus for marine antifouling application[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 187. DOI:10.1016/j.porgcoat.2023.108165.
- [17] LEJARS M, MARGAILLAN A, BRESSY C. Fouling release coatings: A nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings [J]. Chemical Reviews, 2012, 112(8):4 347–4 390.
- [18] 陆刚,余红伟,晏欣,等.船舶防污涂料的研究现状及展望[J].弹性体, 2016, 26(4):74–77.
LU Gang, YU Hongwei, YAN Xin, et al. Advance on shipping antifouling coatings[J]. China Elastomerics, 2016, 26(4):74–77.
- [19] YU Z Q, SUN W, WANG L D, et al. Bioinspired sulfobetaine borneol fluorinated amphiphilic polymers for marine antifouling and fouling release applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(35):46 690–46 702.
- [20] KIM I, KANG S M. Formation of amphiphilic zwitterionic thin poly(SBMA-co-TFEMA) brushes on solid surfaces for marine antifouling applications[J]. Langmuir, 2024, 40(6):3 213–3 221.
- [21] WANG B X, YE H X, CHEN B Y, et al. A rationally designed polymer brush/lubricant coating system for effective static and dynamic marine antifouling[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495. DOI:10.1016/j.cej.2024.153568.

(下转第 104 页)