

天然气管道仿生有机涂层研制及防腐机理研究

王黎明^{1*}, 朱 前¹, 吕 涛²

(1. 陕西燃气集团工程有限公司, 陕西 西安 710016;

2. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:针对天然气管道多重腐蚀威胁与传统涂层自修复缺陷, 受生物启发设计并制备了一种仿生有机自增强型聚酯材料 (PM)。通过 2,5-呋喃二甲酸二甲酯与黄豆苷元的缩聚反应, 利用其在湿热/电场下发生 [2+2] 环加成形成交联网络, 实现老化环境下的性能提升。结果表明, PM-10 拉伸强度达 60.2 MPa, 断裂伸长率 400%; 涂层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 40 d 后电阻维持 $3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。系统阐明了其电化学防腐机制与自修复动力学, 为智能长效防护材料开发提供了理论依据。

关键词:天然气管道; 仿生有机涂层; 防腐机理; 自修复; 多功能

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0120-08

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.022

Research on development and anticorrosion mechanism of biomimetic organic coatings for natural gas pipelines

WANG Li-ming^{1*}, ZHU Qian¹, LV Tao²

(1. Shaanxi Gas Group Engineering Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: To address the multiple corrosion threats faced by natural gas pipelines and the lack of self-healing capability in conventional coatings, a biomimetic organic self-reinforcing polyester material (PM) was designed and synthesized. Through the polycondensation of dimethyl 2,5-furandicarboxylate and daidzein, the material leverages [2+2] cycloaddition reactions triggered by hydrothermal conditions or electric fields to form cross-linked networks, thereby enhancing its performance under aging environments. Results indicate that PM-10 exhibits a tensile strength of 60.2 MPa and an elongation at break of 400%. Furthermore, the coating maintained a coating resistance on the order of $3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ after 40 days of immersion in a 3.5% NaCl solution. This study systematically elucidates the electrochemical anti-corrosion mechanism and self-healing kinetics of the material, providing a theoretical foundation for the development of intelligent, long-lasting protective materials.

Key words: natural gas pipelines; biomimetic organic coating; anticorrosion mechanism; self-healing; multifunctionality

天然气输送管道作为国家能源动脉, 其外防腐涂层长期埋设于土壤电解质环境, 承受阴极保护电场、杂散电流及微生物腐蚀的多重耦合作用; 内壁则面临含硫化合物、CO₂、水汽等腐蚀介质的协同侵蚀, 易导致涂层剥离、阴极剥离及局部腐蚀等失效, 严重威胁管道安全与服役寿命^[1-3]。高温高压工况下, 管壁温升加速电化学反应, 加剧涂层老化与基体腐蚀, 可引发泄漏、爆管等灾难性事故^[4]。应力腐蚀开裂与腐蚀疲劳的协同作用进一步形成失效恶性循环。因此, 亟需开发集耐高温、高压、长效防腐于一体的先进涂层体系。传统环氧、聚乙烯等涂层材料存在耐冲击性能不足、界面附着力薄弱、损伤后自

修复能力缺失等固有缺陷, 难以满足极端服役环境下的长效防腐需求^[5-8]。尽管添加紫外线吸收剂、抗氧剂等助剂可提升聚合物耐久性, 但往往牺牲机械强度, 且助剂迁移渗出会引发健康与环境风险^[9-12]。更为严峻的是, 老化材料缺乏高效绿色的生命周期末端处理方案, 导致资源浪费与二次污染^[13-15]。如何在保障材料服役性能的同时, 实现聚合物及其在关键基础设施 (如天然气管道防腐涂层) 应用中的全生命周期可持续性, 仍是亟待突破的重大挑战^[16-17]。

人体为应对老化问题提供了极具启发性的模型。尽管衰老是一切生物体不可逆的生命过程, 但

收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-05-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51534007)

作者简介: 王黎明 (1990-), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向为油气田开发与天然气工程建设, 通讯联系人, sliverydawn123@126.com。

人体生物系统通过精妙的自我调节机制修复并更新细胞组织——规律的使用会触发代谢进程,促使组织重建与强化,使其愈用愈强,从而抵消衰老效应^[18]。正因如此,生物系统的抗衰老能力长期以来引人入胜。模仿生物系统的策略,为实现兼具自增强与抗老化特性的可持续材料开发提供了可行路径^[19]。借鉴生物系统中细胞代谢机制的灵感,可设计出通过内部键合断裂与重构实现自我修复、抵抗老化的材料,恰如人体自身对磨损作出的应答^[20]。

1 实验部分

1.1 试剂

2,5-呋喃二甲酸二甲酯(DMFD,纯度>99%)购自 ChemTarget 有限公司(中国)。氢氧化钠(NaOH,纯度≥96%)、碘化钾(KI,纯度≥99%)、碳酸亚乙酯(EC,GC 法纯度≥99%)和 1,3-丙二醇(1,3-butanediol,纯度≥99.0%)购自阿拉丁试剂(上海)有限公司。钛酸四正丁酯(TBT,纯度 99%)和黄豆苷元(DD,纯度≥97%)由 Adamas 有限公司(中国)提供。*N,N*-二甲基乙酰胺(DMA,纯度 98%)、盐酸(HCl)和乙醇(EtOH,纯度 99%)购自科隆化学厂(中国成都)。

1.2 实验仪器

NETZSCH TG 209 F1 型热重分析仪,德国 NETZSCH 耐驰公司;Bruker AC-P 400 MHz 型核磁共振仪,德国布鲁克公司;MesoMR23-060H-1 型核磁共振仪,上海纽迈电子科技有限公司;Nicolet 6700 型傅里叶变换红外光谱仪,美国赛默飞世尔科技公司;Metrohm Autolab M204 型电化学工作站,瑞士万通公司;乌氏粘度计,上海密通机电科技有限公司;Panalytical X'Pert MPD Pro 型衍射仪,荷兰帕纳科公司;NETZSCH DSC 214 型差示扫描量热仪,德国 NETZSCH 耐驰公司。

2 材料的合成

2.1 7-(2-羟基乙氧基)-3-[4-(2-羟基乙氧基)苯基]-4H-色烯-4-酮(DDOH)的制备

DDOH 的合成方法如图 1(a)所示。在 100 mL 三颈瓶中加入 0.02 mol 黄豆苷元(DD)、0.10 mol 碳酸亚乙酯(EC)、1.0 g 碘化钾(KI)和 30 mL *N,N*-二甲基乙酰胺(DMA)。在氮气保护下,将混合物加热至 130℃,反应 12 h。反应结束后经氢氧化钠处理得到黄色固体产物 DDOH。

2.2 聚酯(PM)的合成

通过酯交换反应和缩聚反应的两步法合成 4 种具有不同 2,5-呋喃二甲酸二甲酯(DMFD)/DDOH 摩尔比(100/2、100/5、100/10 和 100/20)的共聚酯(PM-2、PM-5、PM-10 和 PM-20)。PM-10 具体合成步骤[图 1(b)]如下:向配备搅拌器、分水器和氮气导入管的 100 mL 三颈瓶中,加入 0.20 mol DMFD、0.40 mol 1,3-丙二醇、0.02 mol DDOH 和 0.01 g 钛酸四正丁酯(TBT)。在氮气氛围下,185℃ 反应 4 h。随后,在 235℃、80~125 Pa 的真空条件下进行缩聚反应 3 h,得到聚酯产物,记为 PM。

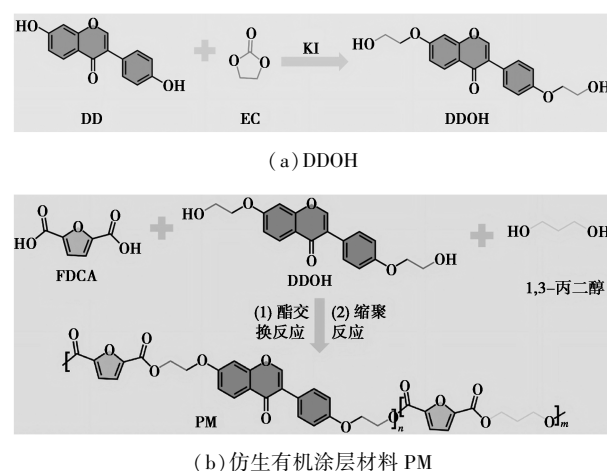


图 1 合成示意图

2.3 电化学阻抗谱与塔菲尔测试

采用电化学工作站(Metrohm Autolab M204)评估不同类型涂层的长期耐腐蚀性能。测试体系以 Ag/AgCl 电极为参比电极,样品为工作电极,测试面积为 1.0 cm²。腐蚀介质为质量分数 3.5% NaCl 溶液,每次测试前需重新配制新鲜 NaCl 溶液。周期性腐蚀观测持续 40 d。测试前必须确保体系达到稳定的开路电位,随后在扫描电压范围 -800~800 mV (相对于开路电位)内以 3.0 mV/s 的扫描速率进行塔菲尔曲线测试。测试完成后,利用电化学拟合计算腐蚀电位和腐蚀电流密度。随后使用 ZsimpWin 软件进行拟合处理,并结合等效电路模型进一步评估涂层的防护性能和缺陷程度。

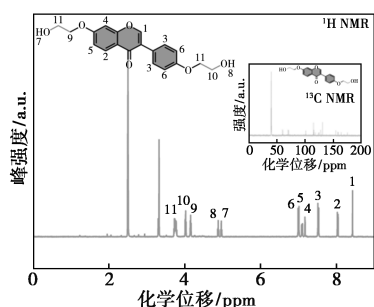
3 结果与讨论

3.1 仿生有机涂层材料的结构表征

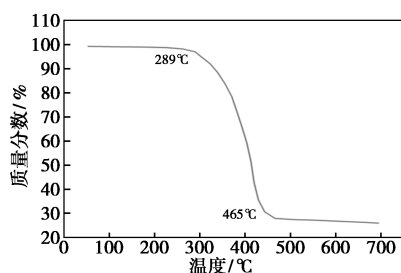
生物系统展现出非凡的自我强化的合成机制,使它们能够抵御衰老并保持功能状态,这一过程包括组织损伤与重建的循环过程。这些机制为设计和制备具有相似特性的生物质衍生可持续材料提供了

灵感。为了模仿这一过程,设计了一种生物质衍生材料,该材料通过[2+2]环加成反应实现自我增强,这种反应由DDOH中的芳香性 π 共轭乙烯基结构促进。随后,利用丰富的生物质原料DDOH、DMFD和1,3-丙二醇,通过简单的熔融聚合过程来合成这些材料(PM-X 其中X表示DDOH含量2、5、10和20)。

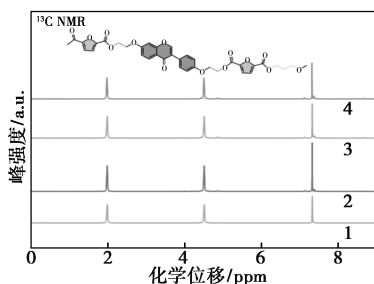
所制备的PM-X材料模拟了生物系统的自我增强机制。如图1所示,DDOH中的双键通过[2+2]-



(a) DDOH在DMSO- d_6 中的 ^1H 核磁共振和 ^{13}C 核磁共振谱

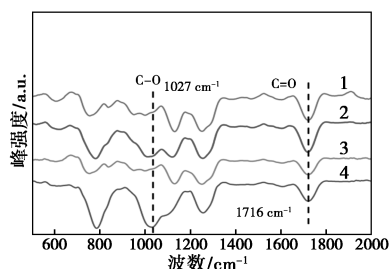


(b) TGA曲线和DDOH的差示扫描量热曲线



1—PM-2; 2—PM-5; 3—PM-10; 4—PM-20

(c) PM-X在DMSO- d_6 中的 ^{13}C 核磁共振谱



1—PM-2; 2—PM-5; 3—PM-10; 4—PM-20

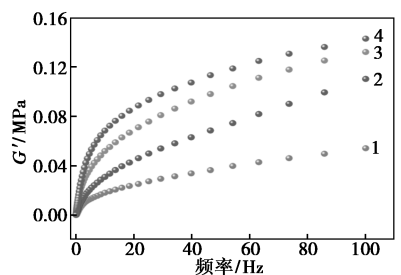
(d) PM-X的衰减全反射-傅里叶变换红外光谱(ATR-FTIR)

图2 材料的结构表征

环加成反应形成交联结构,同时刚性芳环诱导 π - π 堆积,协同模拟了组织“损伤与重建”过程,从而提升材料性能。首先对关键中间体DDOH进行结构表征。核磁共振氢谱[图2(a)]中, δ 7.10~8.39 ppm的多重峰归属于苯环及共轭体系质子, δ 4.7 ppm和4.9 ppm为羟基质子, δ 3.8~4.2 ppm为亚甲基质子。碳谱中 δ 100.56~164.0 ppm为苯环及共轭碳, δ 70.12 ppm和60.12 ppm为亚甲基碳。热重分析[图2(b)]显示,DDOH的5%热失重温度为289°C,700°C残炭率25%,归因其刚性芳环与共轭双键结构。进一步对聚酯PM-X进行结构解析。氢谱[图2(c)]中, δ 8.70 ppm的特征峰归属于DDOH双键上的 H_a 质子, δ 7.4 ppm为咪唑环 H_b 质子, δ 4.5~4.9 ppm为亚甲基质子。随着DDOH投料比增加, H_a 信号逐渐增强,通过 H_a 与 H_b 积分比计算所得共聚组成与投料比一致。红外光谱[图2(d)]中,1716 cm^{-1} 处为C=O伸缩振动,1027 cm^{-1} 处为C—O面内变形振动,证实咪唑环结构存在。上述结果证明DDOH单元已成功引入聚酯主链,为后续 π - π 堆积与环加成交联提供了结构基础。

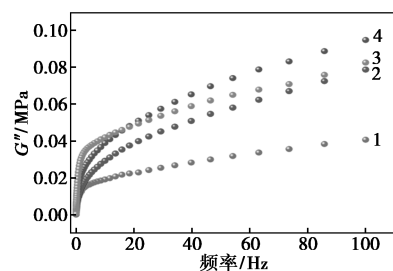
如图3(a)所示,储能模量(G')随频率增加而升高,表现出典型的“剪切变硬”或类固体行为。这是由于在高频区,分子链松弛时间不足,链段运动受限,材料刚性增强,从而导致 G' 上升。随着DDOH含量从PM-2增加至PM-20, G' 显著提高,这直接印证了DDOH引入的 π - π 堆积相互作用。该物理交联网络有效增强了材料的弹性响应,使其在动态振荡下能够储存更多能量。特别是PM-20在50 Hz后 G' 的突增,可能归因于此时形成了更为完善的网络结构。相应地,复粘度(η)随频率升高而降低,表现出剪切变稀行为[图3(c)]。在高频下,分子链缠结被破坏,链段沿流动方向取向,流动阻力减小,因此粘度下降。PM-2在低频区表现出极高的粘度,可能源于其较高的分子量或较强的链缠结程度,但其网络结构较弱(G' 较低)。随着DDOH含量增加(PM-5、PM-10), η 先下降,这可能是由于刚性链段的引入破坏了部分链缠结。值得注意的是,PM-20的粘度随频率升高下降最为平缓,且在高频区维持较高值。这表明DDOH诱导的 π - π 堆积物理交联网络具有优异的耐剪切能力;即使在高速剪切下,物理交联点依然存在,有效限制了分子链的完全解离与滑移,从而延缓了粘度衰减。如图3(b)所示,损耗模量(G'')亦随DDOH含量增加而逐

渐升高。这一方面归因于 π - π 堆积作用增强了分子链间的物理交联密度,另一方面,DDOH 的刚性芳环结构增加了链段运动时的内摩擦。这种受限的链段运动导致动态剪切过程中的能量耗散增加,从而使 G'' 上升。结合正电子湮没寿命谱(PALS)分析,可进一步理解微观结构与宏观性能之间的关联。如图 3(d)所示,随着 DDOH 含量增加,o-Ps 强度与自由体积分数(FVV)分别由 10.6%降至 9.8%、0.90%



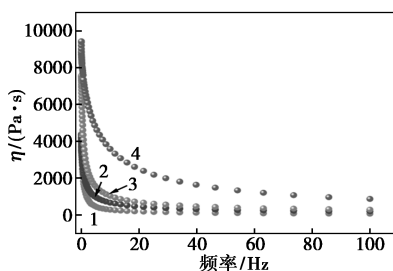
1—PM-2;2—PM-5;3—PM-10;4—PM-20

(a) 储存模量(G')的频率依赖曲线



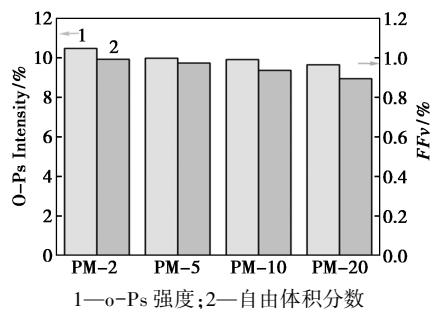
1—PM-2;2—PM-5;3—PM-10;4—PM-20

(b) 损耗模量(G'')的频率依赖曲线



1—PM-2;2—PM-5;3—PM-10;4—PM-20

(c) 复粘度(η)的频率依赖曲线



1—o-Ps 强度;2—自由体积分数

(d) PM-X 的正电子寿命分析

降至 0.86%。这一微观结构的致密化(FVV 降低)与宏观刚性的提升(E' 、 G' 升高)形成了清晰的构效关系。自由体积的减少限制了链段的热运动,增加了分子链解缠结的难度,这与零剪切粘度(η_0)随 DDOH 含量显著升高的趋势[图 3(d)]高度吻合。以上结果证实,通过刚性单体构建受限链段环境是实现材料高性能化的有效策略。

3.2 PM-X 的多功能性

由刚性 DDOH 单元形成的 π - π 堆积相互作用,与由此产生的小自由体积相结合,赋予 PM-X 在热稳定性、结晶行为与力学性能方面卓越的多功能性。通过热重分析(TGA)、X 射线衍射(XRD)及应力-应变测试系统研究了其结构与性能的构效关系。热重分析[图 4(a)]表明,所得聚合物 PM 具有优异的热稳定性,其 5%热失重温度($T_{d,5\%}$)为 350~360℃,最大分解温度(T_{max})达 390~395℃,700℃残炭率(R_{700})为 17%~35%。这一性能归因于 π - π 堆积形成的物理交联网络有效增强了链缠结与分子链刚性。通过 XRD 分析了 PM-X 的聚集态结构[图 4(b)]。所有样品均呈现宽弥散峰,无明显尖锐结晶峰,表明材料主要为无定形态。随着 DDOH 含量增加,衍射强度轻微下降,结晶度从~32%逐渐降至~23%[图 4(c)]。这表明尽管 DDOH 的刚性骨架促进了局域 π - π 堆积,但过高的链刚性限制了分子链的长程有序排列,导致结晶度下降。值得注意的是,结晶度的降低并未削弱宏观性能——相反,流变数据显示材料的模量与粘度显著提升。这证实了 PM 的增强机制主要源于高密度物理交联网络(π - π 堆积),而非传统结晶区的贡献。XRD 揭示的短程有序结构与 PALS 观测到的自由体积减少相互印证,共同构成了材料高性能化的微观基础。应力-应变分析[图 4(d)~(f)]表明,所有样品均呈现典型的应变硬化行为。随着 DDOH 含量从 PM-2 增加至 PM-20,抗拉强度从~52 MPa 显著提升至 70 MPa。其中 PM-10 在实现 60.2 MPa 强度的同时,断裂伸长率保持在 400%,展现出优异的强韧性平衡。这一力学行为与微观结构分析结果高度一致:适度引入 DDOH 可在保持链段运动能力的同时,通过 π - π 堆积形成有效物理交联,从而兼顾强度与韧性。PM 的综合性能与商业聚酰亚胺相当,且优于聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚碳酸酯(PC)等传统工程塑料(表 1),使其在绿色能源系统及恶劣环境工程应用中展现出广阔前景。

图 3 频率依赖曲线和正电子寿命分析

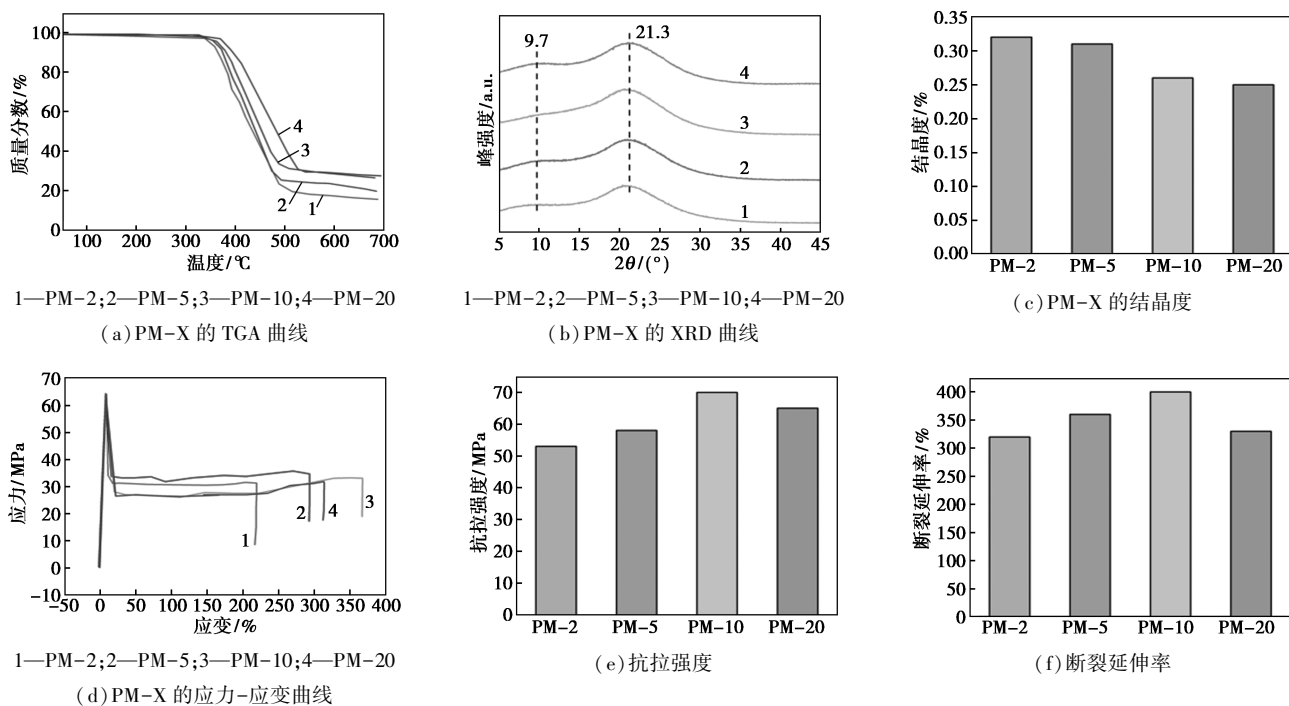


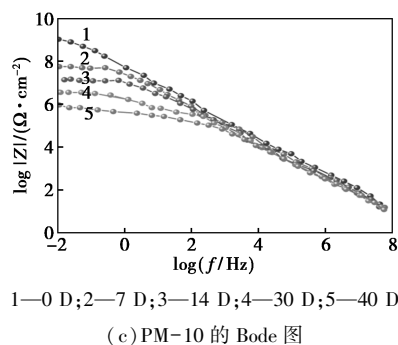
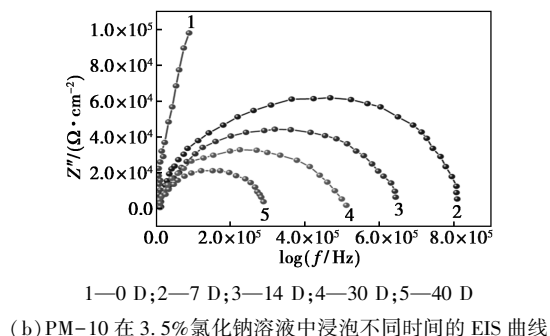
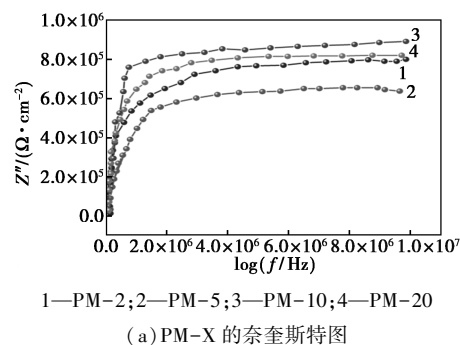
图 4 PM-X 的多功能性分析

表 1 PM 及多种生物质基与工程 305 塑料的力学性能

样品	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%	参考文献
PA	85.3	25.5	[21]
PC	68.5	9.8	[22]
POM	68.7	40.2	[23]
PET	55.5	100.3	[24]
PPO	60.1	30.5	[25]
PTFE	25.4	300.8	[26]
ABS	45.2	20.5	[27]
PM	70.0	400.0	本文

3.3 PM 的防腐蚀机理研究

采用电化学阻抗谱(EIS)评估 PM 涂层的腐蚀行为。图 5 分别展示了 PM-X 涂层的奈奎斯特图、波特图和相位角图。如图 5(a)所示,在 3.5% NaCl 溶液中,PM-10 表现出较大的半圆直径。如图 5(b)所示,随着浸泡时间延长,高频区半圆直径逐渐减小。通常,半圆阻抗半径越小,表明涂层电阻越低,其阻挡腐蚀介质的能力也越弱。由此可推断,PM-10 是比例最优的,其涂层的防护性能随浸泡时间逐渐下降。值得注意的是,在初始阶段(0 D),PM-10 涂层表现出卓越的防腐性能,其阻抗值高达 $8 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$,显著高于其他 3 种涂层,并比 PM-2、PM-5 和 PM-20 高出 1 个数量级。即使浸泡 40 d 后,其阻抗值在 $3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的高水平,这凸显了 PM-10 涂层优异且持久的耐腐蚀性能。



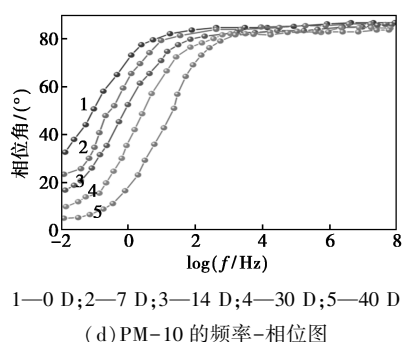


图 5 PM 的防腐蚀机理

在 Bode 图中, 0.01 Hz 处的阻抗模值 ($|Z|$) 越高, 表明涂层对腐蚀介质的抵抗能力越强, 防护性能越好。如图 5(c) 所示, 在 0~40 d 的测试期间, PM-10 的阻抗模值呈现更稳定、平缓的下降趋势, 表明其在严苛腐蚀环境中具有更好的稳定性。这些观察结果与奈奎斯特图中呈现的趋势高度吻合。实际上, 相位角接近 90° 的频率范围越宽, 涂层的耐腐蚀性能越好。如图 5(d) 所示, PM-10 展现出更宽的近 90° 频率跨度, 相位角均匀且逐渐上升, 反映了其在频率变化下优异的电化学稳定性。

为深入探究涂层的电化学行为与腐蚀机制, 对不同 PM 涂层的 EIS 数据进行了等效电路 (EC) 拟合 (图 6)。涂层电阻 (R_c) 是关键指标, 其值越高, 表明涂层越致密、缺陷越少, 阻挡腐蚀介质渗透的屏障性能越强。具体而言, PM 涂层的 R_c 值逐渐降低, 相比 PM-10 涂层降低了 1 个数量级。这一性能

差异源于 PM-10 涂层的独特结构: PM 层相互连通的孔网络显著延长了腐蚀介质的扩散路径, 有效阻止其与基体接触。此外, 在电化学过程中, 包裹在管道表面的 PM 与腐蚀介质发生氧化还原反应, 形成均匀致密的保护膜, 将金属与腐蚀环境隔离并减缓腐蚀速率。电荷转移电阻 (R_{ct}) 主要与电极/电解质界面处的电化学反应动力学相关, 其在初始浸泡期间达到最大值。这表明电荷转移过程遇到的阻力最大, 电子转移最为困难, 电化学反应速率最慢, 共同证明了 PM-10 涂层出色的耐腐蚀性能。

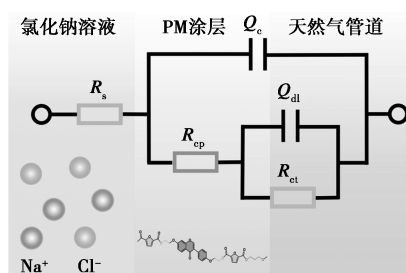


图 6 PM 涂层腐蚀过程的等效电路图

如图 7(a) 所示。随着浸泡时间的延长, PM-10 涂层的 $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$ 值随着浸泡时间的延长, $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$ 的下降幅度最为缓慢。这一结果表明, PM-10 涂层试样不仅具备良好的初始耐腐蚀性能, 还展现出了优异的长期防腐能力。腐蚀电位是评估涂层完整性和基体腐蚀敏感性的关键参数。如图 7(b) 所示, PM-10 的涂层表现出更高的腐蚀电位, 表明其平衡电位升高, 使得腐蚀更难以发生。相比之下, 完整性受损

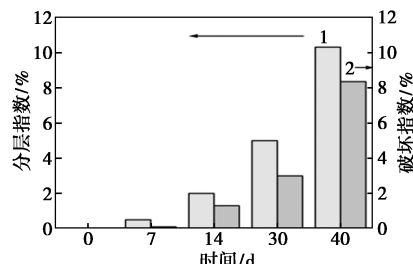
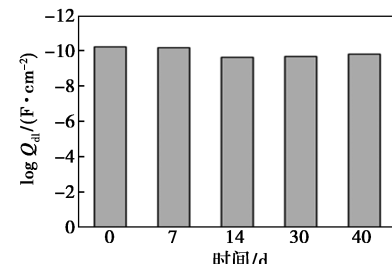
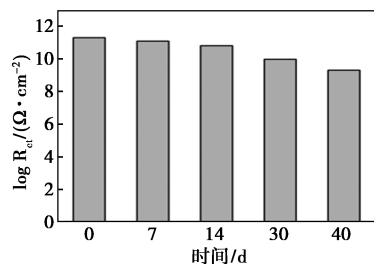
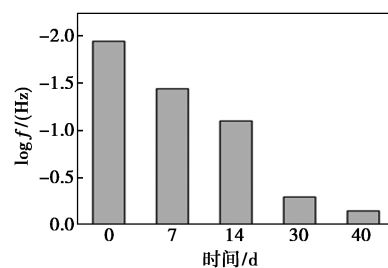
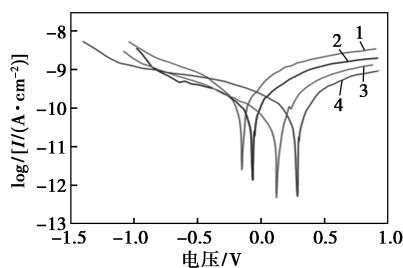
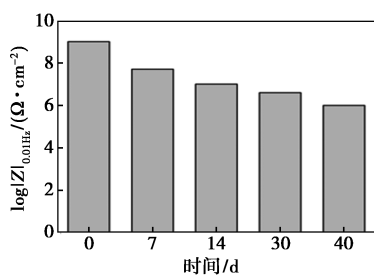


图 7 耐腐蚀性能分析

或耐腐蚀性较弱的涂层腐蚀电位负移,预示着腐蚀风险增加。值得注意的是,在PM-X中,PM-10的腐蚀电位最正,这与EIS结果一致,证实了其优异的防护性能。腐蚀电流密度可直接反映涂层降解速率。PM-10表现出极低的腐蚀电流密度,反映出涂层完整、电阻高,能有效抑制腐蚀介质渗透,PM-10在涂层防护方面具有明显优势。在电化学阻抗谱分析过程中,断点频率代表了电极表面或涂层与电解液之间电化学反应的特征频率,因此可以用于揭示系统中不同的电化学过程。当腐蚀介质穿透涂层后,会在涂层与金属基体界面间产生腐蚀产物,使得金属表面涂层的附着力降低甚至完全脱落,进而导致涂层防腐性能的下降。

从图7(c)中可以看出,随着浸泡时间的延长,PM-10涂层的断点频率向更高频率移动,这表明在电解质环境浸泡过程中,涂层对于腐蚀介质的阻隔能力逐渐下降。腐蚀电化学过程通常包括多个机制,如电荷转移、扩散、双电层效应、腐蚀产物膜的形成与损坏等。通过对电化学阻抗谱数据的拟合,可以将这些复杂的过程简化为电化学电路模型,随后对电路元件如电荷转移电阻和双电层电容进行拟合,可以对涂层的耐腐蚀性能进行对比评估。电荷转移电阻反映了金属基体与电解质之间的电荷转移速率。高电荷转移电阻值意味着涂层可以有效阻止电解质与基材之间的电子和离子交换,从而更好地保护金属基材。从图7(d)中可以明显观察到,PM-10浸泡40 d后,电荷转移电阻值出现略微的下降,表明涂层完整性受到破坏,耐腐蚀性能有所降低。双电层电容表示在金属基材和电解质界面由于电荷积累形成的电容。在腐蚀初期,金属基体与腐蚀介质接触很少,电解质离子不易接近金属表面,双电层电容值较小。从图7(e)中可以看出,随着浸泡时间的不断延长,电解质与金属接触面积增大,PM-10涂层试样的双电层电容值呈现出缓慢的上升趋势,表明PM-10涂层具有优异的耐腐蚀性能。由图7(f)可以看出,随着浸泡时间的延长,PM-10涂层样品的分层指数均逐渐升高。这表明涂层随着在腐蚀环境中的暴露时间增加,其完整性逐渐降低,从而导致分层现象的加剧。这一趋势突显了在长期暴露过程中,涂层维持与金属基材之间牢固结合的能力逐渐退化。浸泡40 d后,PM-10涂层样品仍表现出最低的损伤指数10.67%。这些结果进一步证实,PM-10涂层样品表现出优越的耐腐蚀性能,表明其在腐蚀环境中长期暴露后,分层和整体损伤的降解程度

最小。这突显了PM-10涂层试样在耐腐蚀性能方面的卓越表现。

4 结论

本研究受生物体自我修复与抗衰老机制的启发,成功设计并制备了一种仿生有机自增强型可回收聚酯材料(PM),并系统研究了其作为天然气管道防腐涂层的应用性能与防护机理。通过系统的结构表征、性能测试与电化学分析,得出以下结论。

(1)成功构建了仿生自增强聚酯材料(PM)。以DMFD和DDOH为原料,利用[2+2]-环加成反应形成交联网络,验证了仿生策略在分子材料设计中的可行性。

(2)材料具有优异力学性能与热稳定性。PM-10拉伸强度达60.2 MPa、断裂伸长率400%,性能优于PET、PC等传统工程塑料。

(3)PM-10涂层具备卓越长效防腐能力。在3.5% NaCl溶液中浸泡40 d后,阻抗模量保持 $3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,损伤指数仅10.67%,显著优于传统环氧涂层。

(4)揭示了“屏障主导-缓慢衰减”的防腐机制。 $\pi-\pi$ 堆积网络延长腐蚀介质扩散路径,阻断了界面电荷转移。相比微胶囊型涂层,本体系无需外加修复剂,稳定性更优。

(5)为智能绿色防腐材料提供了新思路。材料以生物质为原料,兼具自增强与可回收特性,实现了“用中愈强”的仿生行为。

参考文献

- [1] Wei B, Xu J, Sun C, *et al.* Internal microbiologically influenced corrosion of natural gas pipelines: A critical review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 102: 104581.
- [2] Wu K, Mosleh A. Effect of temporal variability of operating parameters in corrosion modelling for natural gas pipelines subject to uniform corrosion[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 69: 102930.
- [3] Zhu L, Tang Y, Cao S, *et al.* Enhanced anti-microbial corrosion of nano-CuO-loaded Ni coatings on pipeline steels in simulation environment of natural gas transportation pipeline[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(3): 5543-5549.
- [4] Zhu L, Tang Y, Jiang J, *et al.* Microbial corrosion behavior of pipeline steels in simulation environment of natural gas transportation pipeline[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(51): 36168-36180.
- [5] Maaskant E, van Es D S. Unexpected susceptibility of poly(ethylene furanoate) to UV irradiation: A warning light for furandicarboxylic acid? [J]. *ACS Macro Letters*, 2021, 10(12): 1616-1621.
- [6] Christmann J, Gardette J L, Pichon G, *et al.* Photostabilization of polyethylene by a hindered amine light stabilizer in blooming condi-

- tions and impact of MDO processing[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, 191: 109683.
- [7] Yang K, Dai J, Zhao W, *et al.* Bio-based epoxy resin demonstrating high breakdown strength and low dielectric loss via intrinsic molecular charge traps construction[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 284: 111728.
- [8] Tang Q, Ji C, Wei G, *et al.* Microfluidic electrospinning core-shell nanofibers for anti-corrosion coatings with efficient self-healing properties[J]. *Advanced Science*, 2024, 12(6): 2409751.
- [9] Fan L X, Chen L, Zhang H Y, *et al.* Dual photo-responsive diphenylacetylene enables PET in-situ upcycling with reverse enhanced UV-resistance and strength[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(52): e202314448.
- [10] Hornak J, Kadlec P, Kopriva J, *et al.* Dielectric, structural and mechanical properties of thermally aged biaxially oriented polymeric substrates for flexible electronics[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, 199: 109906.
- [11] Li W, Ni X, Zhang X, *et al.* UV-NIR dual-responsive nanocomposite coatings with healable, superhydrophobic, and contaminant-resistant properties[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12(42): 48101–48108.
- [12] Lu Y, Xu X, Li L, *et al.* Interweaved filler network in epoxy resin with reduced interface thermal resistance via in-situ high-temperature “welding” for significantly improved thermal conductivity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 494: 153160.
- [13] Qian B, Zheng Z, Michailidis M, *et al.* Mussel-inspired self-healing coatings based on polydopamine-coated nanocontainers for corrosion protection[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2019, 11(10): 10283–10291.
- [14] Wang Q, Wang W, Ji X, *et al.* Self-healing coatings containing core-shell nanofibers with pH-responsive performance[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, 13(2): 3139–3152.
- [15] Xin H, Xu Y, Chen Y, *et al.* Development of fluorosilicon bivalve isocyanate microcapsules for multifunctional coatings with excellent self-repairing properties, enhanced hydrophobicity, and corrosion protection properties[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 191: 108462.
- [16] Zeng F, He Y, Xu S, *et al.* Accelerated degradation of PET-based photovoltaic backsheets under UV and acetic acid exposure[J]. *Polymer*, 2024, 312: 127671.
- [17] Zhang J, Cao D, Yin X, *et al.* Investigation on the effect of accumulated charge-induced degradation on multilayer photovoltaic insulating backsheets based on atomic force microscopy[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(9): 8946–8952.
- [18] Miao Y, Pourquié O. Modeling human trunk development[J]. *Nature Biotechnology*, 2023, 42(8): 1185–1186.
- [19] Tidball J G. Regulation of muscle growth and regeneration by the immune system[J]. *Nature Reviews Immunology*, 2017, 17(3): 165–178.
- [20] Ma S, Ji Z, Zhang B, *et al.* Spatial transcriptomic landscape unveils immunoglobulin-associated senescence as a hallmark of aging[J]. *Cell*, 2024, 187(24): 7025–7044.
- [21] Ishida T, Kitagaki R, Hagihara H, *et al.* Role of moisture in photo-ageing-macromolecular architecture evolution of acrylic-urethane network[J]. *Polymer Testing*, 2021, 96: 107123.
- [22] Mane P, Keché A J, Chopra S, *et al.* Effect of polycarbonate (PC) content on the mechanical properties, morphology and transesterification mechanism of PBT/PC immiscible blends[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(36): e55902.
- [23] Wu Y, Xing W, Meng M, *et al.* Multiple-functional molecularly imprinted nanocomposite membranes for high-efficiency selective separation applications: An imitated core-shell TiO₂ @ PDA-based MIMs design[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108123.
- [24] Liang Y, Xu D, Feng P, *et al.* Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126456.
- [25] Sit S, Chakraborty G, Das N C. Superior EMI shielding effectiveness with enhanced electrical conductivity at low percolation threshold of flexible novel ethylene methyl acrylate/single-walled carbon nanotube nanocomposites[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2022, 62(6): 2047–2060.
- [26] Nikbakht N M, Sedaghat D A, Mezzenga R. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106789.
- [27] Wang S, Huang Y, Zhao C, *et al.* Theoretical modeling and experimental verification of percolation threshold with MWCNTs’ rotation and translation around a growing bubble in conductive polymer composite foams[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 199: 108345. ■
- (上接第 119 页)
- [20] Chen M, Zhao L, Huang Y, *et al.* Review on K-Feldspar mineral processing for extracting metallic potassium as a fertilizer resource[J]. *Minerals*, 2024, 14(2): 1–14.
- [21] Chi R, Xue Y, Xiao C, *et al.* Screening of high-efficiency potassium-dissolving strains and optimization of the potassium-dissolving process[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2021, 57(2): 1–13.
- [22] 崔永亮, 李艳梅, 李利军, 等. 钕钛磁铁矿尾矿土壤解钾细菌的多样性及镉对其解钾能力的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 76–82.
- [23] Gao F, Chen T, Li L. Influence of addition of calcium salts on extraction of potassium from phosphorus-potassium associated mineral[J]. *Main Group Chemistry*, 2021, 20(2): 219–229.
- [24] Zhou J F, Liu C C, Ma J Y, *et al.* Intensification of potassium leaching from phosphorus-potassium associated ore with lauryl alcohol[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 191: 1–7.
- [25] Liu C, Liu S, Qin Y, *et al.* The intensified leaching behavior of potassium from phosphorus-potassium associated ore in HCl-CaF₂ system with surfactant; Part I kinetics and modelling[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 212: 89–100.
- [26] Liu C, Wang W, Yang F, *et al.* The intensified leaching mechanism of phosphorus-potassium associated ore in HCl-CaF₂ system with sodium dodecyl sulfate[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 149: 1–8.
- [27] Luo Q, Chen G, Sun Y, *et al.* Dissolution kinetics of aluminum, calcium, and iron from circulating fluidized bed combustion fly ash with hydrochloric acid[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(51): 18184–18191.
- [28] Su S, Ma H, Chuan X. Hydrothermal decomposition of K-feldspar in KOH-NaOH-H₂O medium[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 156: 47–52.
- [29] Zhang R L, Zhang X F, Tang S Z, *et al.* Ultrasound-assisted HCl-NaCl leaching of lead-rich and antimony-rich oxidizing slag[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 187–191. ■