

# 聚乙醇酸的表面改性及其生物降解性能优化研究

张晓帅, 陈 腾, 王翊琳, 赵茹涵

(许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 研究以聚乙醇酸(PGA)为对象,采用多巴胺(DA)自聚表面改性方法,系统考察其对力学性能、表面性能、动态力学行为及降解特性的影响。结果表明:聚多巴胺(PDA)改性显著改善了PGA的综合性能,且呈浓度依赖性。在力学性能方面,DA缓冲溶液质量浓度为2.0 g/L的PDA-2.0抗拉强度提高至74.3 MPa,冲击强度提升至4.10 kJ/m<sup>2</sup>,较对照组分别增加约18%和32%。在表面性能方面,水接触角由82.5°降至61.2°,总表面能提高至58.5 mJ/m<sup>2</sup>,其中极性分量显著增加。降解实验表明,PDA-2.0在聚丁二酸丁二醇酯(PBS)条件下30 d的质量损失率为21.3%,数均分子量保留率为62.1%,均明显优于对照组,在酶解条件下同样保持较高的力学性能和分子量。PDA涂层在PGA力学增强、表面优化与降解调控方面实现了平衡,为可降解聚酯材料的性能优化与应用拓展提供了有效策略。

**关键词:** 聚乙醇酸;聚多巴胺修饰;力学性能;表面能;动态力学分析;水解和酶降解

中图分类号: TQ323.4; TQ327.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0138-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.026

## Study on Surface Modification of Polyglycolic Acid and Optimization of Its Biodegradability

ZHANG Xiaoshuai, CHEN Teng, WANG Yilin, ZHAO Ruhan

(Xuchang Electrical Vocational College, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Polyglycolic acid (PGA) was modified using a dopamine (DA) self-polymerization strategy, and the effects on its mechanical, surface, dynamic mechanical, and degradation properties were systematically investigated. The results showed that polydopamine (PDA) modification significantly enhanced the overall performance of PGA in a concentration-dependent manner. In terms of mechanical properties, the PDA-2.0 with the mass concentration of DA buffer solution of 2.0 g/L exhibited a tensile strength of 74.3 MPa and an impact strength of 4.10 kJ/m<sup>2</sup>, which were increased by about 18% and 32% compared with the control. Regarding surface characteristics, the water contact angle decreased from 82.5° to 61.2°, while the total surface free energy rose to 58.5 mJ/m<sup>2</sup>, mainly due to the increase of the polar component. Degradation experiments revealed that after 30 days in poly(butylene succinate) (PBS), the PDA-2.0 showed a mass loss of only 21.3% and retained 62.1% of its initial number-average molecular weight, both much higher than the control. Similar improvements were observed under enzymatic degradation. PDA coating provides a simple yet effective strategy to achieve balanced improvements in mechanical reinforcement, surface optimization, and degradation control of PGA. It provides an effective strategy for the performance optimization and application expansion of degradable polyester materials.

**Keywords:** Polyglycolic acid; Polydopamine modification; Mechanical properties; Surface energy; Dynamic mechanical analysis; Hydrolytic and enzymatic degradation

聚乙醇酸(PGA)作为一种典型的可降解脂肪族聚酯,因其具有较高的结晶度、良好的力学性能及完全可生物降解性,已广泛应用于医用缝合线、骨固定材料以及可降解包装等领域<sup>[1-3]</sup>。然而,PGA也存在一定的局限性,如脆性

较大、表面润湿性差以及在水解过程中分子量迅速下降,导致其力学性能衰减过快,从而限制其应用范围<sup>[4-5]</sup>。同时,相对于市场上主流的聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)、聚乳酸(PLA)等可降解塑料来说,PGA材料目前

收稿日期 Submitted date 2025-04-26; 修回日期 Revised date 2025-06-18; 录用日期 Accepted date 2025-08-29

联系人, xiaoshuai1773963@163.com

引用本文: 张晓帅, 陈腾, 王翊琳, 等. 聚乙醇酸的表面改性及其生物降解性能优化研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 138-143.

Citation: ZHANG X S, CHEN T, WANG Y L, et al. Study on surface modification of polyglycolic acid and optimization of its biodegradability [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 138-143.

价格比较高,市场供应量也较小。因此,如何在保持PGA基体优良性能的同时改善其表面特性并调控降解行为,成为该类材料研究的重要方向。

目前,改善PGA性能的主要途径包括共聚改性<sup>[6]</sup>、共混改性<sup>[7]</sup>、填料增强<sup>[8]</sup>以及表面改性<sup>[9]</sup>等,这些方法各有特点和应用范围,但在实际应用中也存在一些局限性。其中,体相改性虽然能在一定程度上延缓降解速率或改善力学性能,但往往会破坏PGA的结晶性,或引入复杂的合成工艺;相比之下,表面改性因操作简便、适用性广泛而逐渐受到关注。近年来,仿生来源的聚多巴胺(PDA)涂层因其“贻贝黏附”特性而被广泛应用于多种材料的表面改性<sup>[10-12]</sup>。PDA涂层富含邻苯二酚和胺基等极性基团,能够显著提高基材表面的润湿性与表面能,并可进一步增强界面结合与热稳定性。已有研究表明,PDA修饰不仅能改善PLA等聚酯类材料的亲水性和生物相容性,还可通过界面作用调节材料的降解行为<sup>[13-14]</sup>。然而,尽管PDA涂层在其他材料表面改性中取得了显著进展,但针对PGA的PDA改性研究仍然相对有限。特别是对于PDA涂层对PGA力学性能、表面能以及在水解和酶解条件下降解行为的系统性影响,目前尚缺乏深入的报道。

因此,本研究采用多巴胺(DA)自聚合涂层技术对PGA进行表面改性,系统考察其对力学性能、表面能、动态力学性能以及聚丁二酸丁二醇酯(PBS)水解和酶解条件下降解行为的影响。通过对比不同PDA浓度下的性能变化,揭示PDA涂层在实现“力学增强-表面优化-降解调控”综合平衡方面的作用机制,以期可为降解聚酯材料的性能优化与应用拓展提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PGA颗粒,质量分数 $\geq 99\%$ , $1.5 \times 10^5$  g/mol,深圳市金瑞新材料科技有限公司;多巴胺盐酸盐(DA·HCl),质量分数 $\geq 98\%$ ,麦克林试剂有限公司;羟甲基氨基甲烷(Tris)、丙

酮、无水乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;盐酸,分析纯,天津大茂化学试剂厂;去离子水,实验室超纯水系统( $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ )。

### 1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机,SHJ-20,螺杆直径20 mm,长径比为40,南京科亚化工成套装备有限公司;平板热压机,XH-406A,上海科仪机械设备有限公司;电子万能材料试验机,Instron 5967,美国英斯特朗公司;简支梁冲击试验机,XJU-22,济南一诺世纪试验仪器有限公司;三点弯曲试验夹具(配套Instron系统),美国Instron公司;接触角测量仪,OCA 20,德国Dataphysics公司;动态力学分析仪(DMA),Q800,美国TA仪器公司;凝胶渗透色谱(GPC),Waters 1515,配差示折光检测器,美国Waters公司;pH计,SevenCompact,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;真空干燥箱,DZF-6050,上海一恒科学仪器有限公司;电子天平,精度0.1 mg,瑞士梅特勒-托利多公司。

### 1.3 样品制备

表1为PGA表面改性配方。PGA颗粒在80 °C条件下真空干燥8 h,采用双螺杆挤出机(料温120~150 °C,螺杆转速100 r/min)水冷造粒,再于200 °C、8 MPa热压3 min,成型为片材。所得片材依次在丙酮、无水乙醇及去离子水中超声清洗各5 min,60 °C真空干燥2 h,备用。以未进行表面处理的片材为对照组(CK)。其余样品通过DA自聚方法构建表面引发层,采用不同浓度的DA溶液进行单变量梯度处理。具体方法为:配制10 mmol/L Tris缓冲液(pH值8.5,溶质为Tris,溶剂为去离子水,盐酸用于调节pH值),作为反应溶剂。在上述Tris缓冲液中分别溶解不同量的DA·HCl,配制成1.0、1.5、2.0、2.5 g/L的DA缓冲溶液(以Tris缓冲液体积为溶剂体积计算浓度)。将PGA片材置于上述DA缓冲溶液中(室温,80 r/min摇床),浸渍2 h后取出,用去离子水充分冲洗至中性,再于37~60 °C真空干燥过夜。

表1 PGA表面改性配方

Tab.1 Formula of PGA surface modification

样品	$m_{\text{PGA颗粒}}/\text{g}$	$V_{\text{丙酮}}/\text{mL}$	$V_{\text{无水乙醇}}/\text{mL}$	$V_{\text{去离子水}}/\text{mL}$	$m_{\text{Tris}}/\text{g}$	$V_{\text{盐酸}}/\text{mL}$	$\rho_{\text{DA缓冲溶液}}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
CK	10	50	50	100	0.121	0.1	0.0
PDA-1.0	10	50	50	100	0.121	0.1	1.0
PDA-1.5	10	50	50	100	0.121	0.1	1.5
PDA-2.0	10	50	50	100	0.121	0.1	2.0
PDA-2.5	10	50	50	100	0.121	0.1	2.5

### 1.4 性能测试与表征

力学性能测试:拉伸性能采用电子万能试验机,按照GB/T 1040.2—2022进行测试,测试速度设定为5 mm/min,取5次平行样品的平均值。冲击强度采用简支梁冲击试验机,按照GB/T 1043.1—2008进行测试。弯曲强度按照GB/T 9341—2008进行三点弯曲测试,跨距为64 mm,加载

速度2 mm/min。

表面性能测试:采用接触角测量仪测定静态水接触角,以去离子水和二碘甲烷为探针液,采用静滴法测定,每组至少测试5个点,取平均值。表面能的测定参照Owens-Wendt方法,由水和二碘甲烷接触角计算总表面能、色散分量与极性分量。

动态力学性能测试:采用动态力学分析仪,在双悬臂模式下进行测试,样品尺寸为35 mm×10 mm×2 mm。测试温度范围25~120 °C,升温速率3 °C/min,振动频率1 Hz,得到储能模量( $E'$ )、损耗模量( $E''$ )及损耗因子( $\tan \delta$ )。

降解性能测试:将样品浸泡于PBS溶液(pH值7.4, 37 °C)中,按设定时间间隔(0、7、14、21、30 d)取出,去离子水冲洗后滤纸吸干,在60 °C条件下真空干燥至恒重,计算质量损失率。数均分子量( $M_n$ )采用凝胶渗透色谱测定,流动相为六氟异丙醇(HFIP),进样质量浓度2 g/L,以聚甲基丙烯酸甲酯标准品建立对数线性校准曲线,计算 $M_n$ 及 $M_w$ 保留率。降解液pH值采用pH计测定,每次更换PBS时即时读取。拉伸强度保持率的测定是降解至不同时间点取样,按GB/T 1040.2—2022进行拉伸试验,拉伸强度保持率为残余强度与初始强度的比值。为模拟生物环境中的酶促作用,部分样品在蛋白酶K溶液(10 U/mL, PBS缓冲液, 37 °C, 含1 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ 稳定酶活)中平行处理,培养条件与PBS相同,每隔48 h更换新鲜酶溶液。所有降解实验均测定3组平行样品。

基本断裂功(EWF)测定:采用薄片多重缺口拉伸法,通过比断裂功与结点宽度的线性拟合得到本征断裂功和塑性耗散功。

吸水扩散系数的测定:将样品在37 °C PBS中进行吸水实验,并根据Fick模型对吸水率与时间平方根的关系进行线性拟合计算扩散系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 力学性能分析

表2为力学性能结果。从表2可以看出,PDA表面改性整体上有助于提升PGA片材的强度与刚度,呈先升后降的趋势。具体来说,PDA-2.0所有力学参数(拉伸强度、弹性模量、冲击强度和弯曲强度)均达到最高,相比CK分别提升约18%、9%、32%和13%;而PDA-1.5则在断裂伸长率上表现最好,相比CK提升约37%,体现了更好的韧性。在添加2.5 g/L DA·HCl时,部分指标出现略微回落,表明过厚或过密的PDA涂层可能导致界面应力集中,从而削弱延展性或略微降低强度。出现这一趋势的原因在于PDA涂层通过自聚形成含邻苯二酚、喹诺酮和胺基等功能性的附着层,可在载荷界面形成氢键、 $\pi$ - $\pi$ 相互作用,甚至经过Michael加成或Schiff碱反应与基材链段发生共价/非共价耦合,从而明显增强界面结合和载荷传递<sup>[15-16]</sup>。但当涂层过厚时,交联结构过度密集反而可能限制链段的自由运动,引起局部脆化或应力集中<sup>[17]</sup>。此外,PDA涂层的厚度或粗糙度受浓度、时间、pH值与温度显著影响;随着沉积的推进,涂层更厚,更粗糙,交联度更高,利于强界面,但也可能引入残余应力与微裂纹萌生位点,从而在高浓度端出现强度/模量趋稳甚至回落、韧性下降的现象<sup>[18]</sup>,本研究中,PDA-2.5出现的回落与此一致。因此,力学性能的结果指出,2.0 g/L为综合性能的最优质量浓度,而1.5 g/L更适用于优先提升韧性的场景。

表2 力学性能结果

Tab.2 Mechanical property results

样品	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> )	弯曲强度/MPa
CK	62.8±3.1	6.25±0.28	15.0±1.2	3.10±0.40	96.5±4.8
PDA-1.0	68.4±2.7	6.52±0.24	18.0±1.4	3.70±0.50	102.7±5.1
PDA-1.5	72.1±2.4	6.74±0.21	20.6±1.5	4.00±0.50	107.9±4.4
PDA-2.0	74.3±3.0	6.79±0.26	19.8±1.6	4.10±0.60	109.1±4.9
PDA-2.5	70.2±3.5	6.60±0.31	16.8±1.3	3.50±0.50	103.5±5.2

### 2.2 EWF分析

为进一步揭示PDA改性对PGA韧性行为的影响,本研究引入EWF方法对样品的断裂机理进行表征。表3为EWF结果。从表3可以看出,CK的本征断裂功和塑性耗散功分别为1.05 kJ/m<sup>2</sup>和0.42 kJ/m<sup>3</sup>,整体表现出较低的断裂能量,说明纯PGA片材在缺口应力作用下极易发生脆性断裂。经PDA表面改性后,本征断裂功和塑性耗散功均显著提高,其中PDA-2.0的本征断裂功和塑性耗散功分别达到1.68 kJ/m<sup>2</sup>和0.63 kJ/m<sup>3</sup>,相较CK提升约60%和50%,表明裂纹起裂所需能量和裂纹扩展过程中耗散的塑性功均得到有效增强。这一结果与拉伸断裂伸长率的提升趋势一致,进一步验证了PDA涂层在界面层提供了氢键和 $\pi$ - $\pi$ 作用位点,从而提高裂纹扩展阻力和能量耗散能力。值得注意的是,PDA-2.5本征断裂功和塑性耗散功均

出现一定程度的回落,推测可能与涂层过厚或局部应力集中导致裂纹偏向界面快速扩展有关。

### 2.3 接触角分析

图1为静态水接触角结果。从图1可以看出,CK的静态水接触角为82.5°,表面呈明显疏水性;经PDA改性后,静态水接触角随浓度增加逐渐降低,PDA-2.0的静态水接触角达到最低值61.2°,较CK下降约25.8%,表明表面亲水性显著增强。该趋势与多种聚合物基底上的实证一致。PDA涂层在共聚(酞嗪酮酰胺)(PPBES)、聚己内酯(PCL)、聚丙烯(PP)膜等体系中均能显著降低水接触角,提高亲水性,源于涂层引入的极性官能团提升了表面自由能并促进水分子润湿<sup>[19-21]</sup>。从机制角度出发,PDA自聚后表面富集邻苯二酚/喹诺酮与胺基位点,可与基体或引入的含胺/硫基分子发生Michael加成与Schiff碱反应,同时提供多点氢

键/ $\pi$ - $\pi$ 相互作用,从而稳定极性表面并持续降低接触角<sup>[22-23]</sup>。接触角在高浓度端出现小幅回升,可能与涂层进

一步增厚、粗糙度上升导致的有效极性位点暴露比例下降与局部润湿受限有关<sup>[24]</sup>。

表3 EWF结果

Tab.3 EWF results

样品	总断裂功/(kJ·m <sup>-2</sup> )	本征断裂功/(kJ·m <sup>-2</sup> )	塑性耗散功/(kJ·m <sup>-3</sup> )	拟合优度(R <sup>2</sup> )
CK	2.15±0.12	1.05±0.08	0.42±0.05	0.982
PDA-1.0	2.65±0.15	1.34±0.07	0.51±0.04	0.985
PDA-1.5	3.05±0.13	1.52±0.09	0.58±0.05	0.987
PDA-2.0	3.32±0.14	1.68±0.08	0.63±0.04	0.991
PDA-2.5	2.90±0.16	1.40±0.10	0.55±0.05	0.983

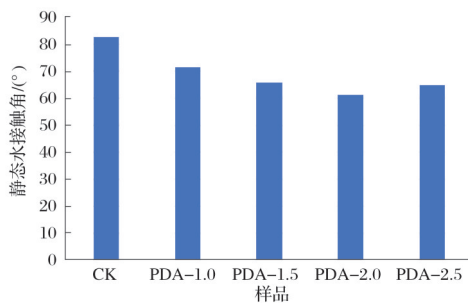


图1 静态水接触角结果

Fig.1 Static water contact angle results

## 2.4 吸水扩散系数分析

为揭示PDA涂层对PGA降解过程的影响机制,本研究进一步对样品在PBS溶液中的吸水行为进行Fickian模型拟合。表4为吸水扩散系数结果。从表4可以看出,CK的平衡吸水率达到1.82%。经PDA改性后,该值整体呈下降趋势,其中PDA-2.0的平衡吸水率最低,仅为1.47%,较CK下降约19.2%。这一结果表明,PDA涂层在一定程度上抑制了水分向内部扩散,从而延缓了材料的吸水饱和过程。扩散系数的变化趋势与平衡吸水率一致。CK的平衡吸水率为 $6.25 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,而PDA-2.0降低至 $4.31 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,下降约31.0%,表明PDA表面层有效构建了扩散屏障,显著降低了水分子在材料中的迁移速率。值得注意的是,在PDA-2.5的平衡吸水率和扩散系数均出现小幅回升,推测可能与过厚涂层导致表面形貌粗糙化或局部缺陷增加,从而为水分扩散提供了传输通道有关。

表4 吸水扩散系数结果

Tab.4 Water absorption diffusion coefficient results

样品	平衡吸水率/ %	扩散系数/ ( $10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>
CK	1.82±0.08	6.25±0.30	0.985
PDA-1.0	1.65±0.07	5.42±0.25	0.987
PDA-1.5	1.52±0.06	4.88±0.22	0.989
PDA-2.0	1.47±0.05	4.31±0.20	0.991
PDA-2.5	1.59±0.07	4.95±0.23	0.986

## 2.5 表面能分析

图2为表面能结果。从图2可以看出,CK的总表面能为 $42.3 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,其中极性分量仅 $5.8 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ;PDA-2.0总表面能升至 $58.5 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,极性分量增加至 $23.1 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,而色散分量保持在约 $35 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,表明表面功率提高主要是由极性相互作用增强导致。这一现象在改性聚偏二氟乙烯(PVDF)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰亚胺(PI)等疏水聚合物上已有验证,即PDA涂层可显著提升表面自由能,增强亲水性和表面活性,且这一效应对底物种类影响不大<sup>[25]</sup>。进一步地,PDA表面极化的形成过程与沉积温度和反应动力学密切相关—较高温度有助于形成更均匀、极性更强的涂层,从而提升极性组分<sup>[26]</sup>。PDA-2.5表面能与极性分量略有回落(总表面能 $56.1 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ,极性分量 $21.0 \text{ mJ}/\text{m}^2$ ),表明当PDA涂层过厚或形貌粗糙度增加时,极性基团的有效暴露或表面均匀性下降,导致增效不再明显。这与在多种聚合物上观察到的“薄型PDA涂层改善亲水,过厚反而降低效果”的规律相符<sup>[20]</sup>。

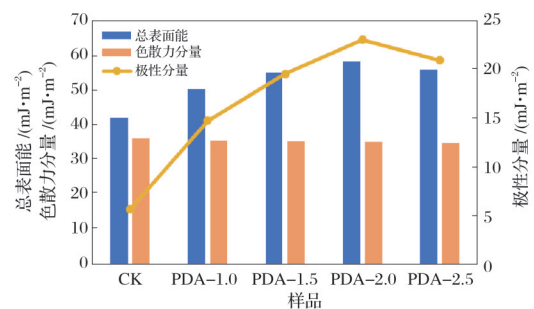


图2 表面能结果

Fig.2 Surface energy results

## 2.6 动态力学性能分析

表5为动态力学性能结果。从表5可以看出, $E'$ 由CK的 $1780 \text{ MPa}$ 提升至PDA-2.0的 $2158 \text{ MPa}$ ,提高约21%,表明PDA涂层通过界面极性作用限制了链段松弛,增强了刚性能力。玻璃化转变温度( $T_g$ )从CK的 $61.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升至PDA-2.0的 $65.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,伴随 $\tan \delta$ 峰值下降,说明链段运动受限,界面黏结和热稳定性得到提升。这一结论与BASHIR<sup>[27]</sup>的研究结果一致,即在交织型PLA复合材料

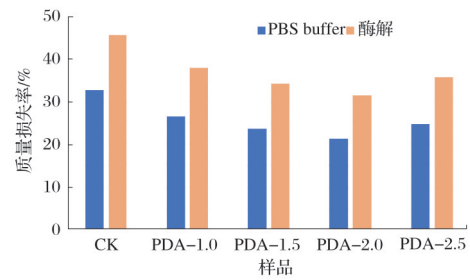
中的发现相符-PDA改性提高了 $E'$ 并提升了 $t_g$ ,赋予材料更优的动态力学性能。类似地,DU等<sup>[28]</sup>在PDA修饰氧化铝/聚氨酯复合材料中也观察到动态力学性能显著改善,包括 $E'$ 的增强和 $t_g$ 向高温移动,表明PDA涂层可强化界面传力并提升耐热性。PDA-2.5 $E'$ 和 $t_g$ 均略有回落,可能是由于涂层过厚引入应力集中或微裂纹,降低了界面增强效果,此现象也被DU等<sup>[28]</sup>在类似研究中报道,如铝/聚氨酯体系中过多填料反而导致动态力学性能下降。

表5 动态力学性能结果  
Tab.5 Dynamic mechanical properties results

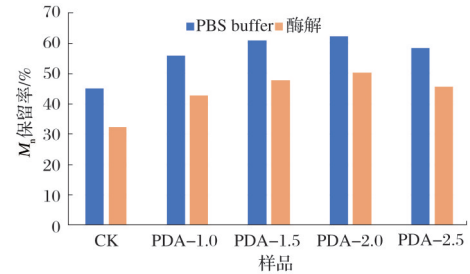
样品	$E'$ /MPa	$t_g$ /°C	$\tan \delta$ 峰值	$E'$ 保持率/%
CK	1 780±65	61.5±0.8	0.152±0.010	42.3
PDA-1.0	1 955±72	63.2±0.6	0.138±0.008	48.6
PDA-1.5	2 072±68	64.0±0.7	0.131±0.007	51.8
PDA-2.0	2 158±74	65.1±0.6	0.125±0.006	54.9
PDA-2.5	2 040±79	64.5±0.9	0.133±0.009	50.7

### 2.7 降解性能分析

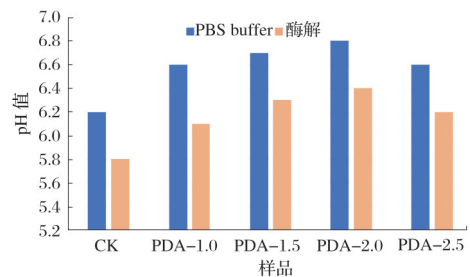
图3为酶解与水解降解性能对比。从图3可以看出,30 d时,所有样品在酶解条件下的质量损失率均显著高于PBS对照组,例如CK由32.7%升至45.6%,拉伸强度保持率由41.2%降至28.7%,表明酶的参与显著加速了聚酯链的断裂。这一现象与已有研究一致,即脂肪族聚酯在PBS条件下主要经历非酶催化的水解,而在蛋白酶或脂肪酶存在时,由于酯键更易被特异性识别与切割,降解速率显著提高<sup>[29-30]</sup>。值得注意的是,PDA改性在酶解条件下仍表现出一定的抑制作用,其中PDA-2.0的质量损失率最低(31.5%), $M_n$ 保留率最高(50.2%),拉伸强度保持率最高(46.5%),表明其在抑制水解与酶解方面均实现了较优平衡。这可能源于PDA涂层一方面改善了表面亲水性,促进了酶的初始吸附,另一方面其形成的致密交联层在一定程度上构成扩散屏障,从而延缓了酶对内部酯键的持续攻击。类似的机制在PLA与PCL基体的研究中也有所报道,表面PDA饰一方面增强了细胞/蛋白吸附,另一方面却能够通过调节界面结构影响酶对材料的渗透与降解速率<sup>[31-32]</sup>。但当PDA质量浓度进一步提高到2.5 g/L时,各指标略有回落,表明过厚/形貌粗糙的PDA层可能引入局部缺陷或形成非均一传质通道,导致酸性产物的局部滞留-外排受限并伴随应力集中,使抑制效果趋于平台或部分削弱,这与膜领域关于PDA层厚度-形貌-通量的权衡关系相一致<sup>[33]</sup>。进一步地,拉伸强度保持率与 $M_n$ 保留率呈正相关,主要是由于随着 $M_n$ 下降,储能/强度随之劣化;而当界面层延缓 $M_n$ 减少时,宏观力学亦能更长时间维持<sup>[34]</sup>。综合来看,PDA-2.0不仅在PBS水解中表现出最佳性能,在酶解条件下亦实现了力学性能与分子量的最佳保持,说明其在应对不同降解环境时均具备较强的稳定性。



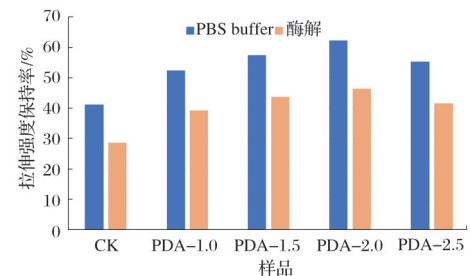
(a) 质量损失率



(b)  $M_n$ 保留率



(c) pH值



(d) 拉伸强度保持率

图3 酶解与水解降解性能对比

Fig.3 Comparison of enzymatic and hydrolytic degradation performance

### 3 结论

本研究以PGA为基体,采用DA自聚表面改性方法,系统考察了其力学性能、表面性能、动态力学行为及降解特性。结果表明:适量PDA涂层显著改善了PGA的综合性能,其中PDA-2.0表现最优,拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均较CK均显著提升,储能模量显著提高, $t_g$ 向高温移动,静态水接触角降低至约61.2°,表面能提高至58.5 mJ/m<sup>2</sup>,表现出优良的界面极性与力学稳定性。同时,PDA-2.0在PBS及酶解条件下均有效延缓了质量损失和分子量下降,保持较高的拉伸强度与溶液pH值,表明其能够减缓自催化水解和酶促降解。

## 参考文献

- [1] 黄利平, 周际永, 孙林, 等. 聚乙醇酸的制备及其高温水解生酸性性能研究[J]. 热固性树脂, 2025(3): 21-26.
- [2] 李超, 郭鹏, 吕明福, 等. 高性能聚乙醇酸物理改性研究及应用进展[J]. 合成树脂及塑料, 2024(6): 43-48.
- [3] 赵家乐. 聚乙醇酸中间体乙交酯的合成研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [4] GRIZZI I, GARREAU H, LI S, et al. Hydrolytic degradation of devices based on poly(DL-lactic acid) size-dependence[J]. *Biomaterials*, 1995, 16(4): 305-311.
- [5] LOW Y J, ANDRIYANA A, ANG B C, et al. Bioresorbable and degradable behaviors of PGA: Current state and future prospects[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(11): 2657-2675.
- [6] 吴晗. 基于聚乙醇酸的共聚共混材料的结构调控与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [7] 孙苗苗, 孙小杰, 王荣, 等. PBS增韧改性PGA共混物的制备及性能[J]. 塑料科技, 2022, 50(3): 5-8.
- [8] 程嘉伟, 江国华. 聚乙醇酸/脂肪族聚酯复合材料的制备及其性能分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2024(3): 280-291.
- [9] 崔爱军, 辛健, 蔡煜明, 等. 有机改性金红石型纳米TiO<sub>2</sub>对聚乙醇酸抗光老化性能的研究[J]. 化工进展, 2018(1): 195-200.
- [10] YANG S J, ZOU L Y, LIU C, et al. Codeposition of levodopa and polyethyleneimine: Reaction mechanism and coating construction[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(48): 54094-54103.
- [11] 饶佳艳, 朱曜峰. 多巴胺改性片状羧基铁吸波涂层的制备及性能[J/OL]. 现代纺织技术, 2025: 1-11. [2025-06-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1249.TS.20250621.1430.008.html>.
- [12] 吴清霖, 赖颖真, 黄艳玲, 等. 经多巴胺或硅烷化修饰的氧化石墨烯钛表面涂层的体外成骨性能研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2025(3): 336-345.
- [13] 周鑫龙, 惠心悦, 杜昊轩, 等. 贻贝仿生聚乳酸基复合涂层的构筑及其在木材表面的创新应用[J/OL]. 林产工业, 1-10[2025-08-24]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1874.S.20250805.1747.002>.
- [14] 冀浩博, 郝艳红. 聚乳酸在食品包装领域的应用及共混改性研究进展[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2025(1): 104-109.
- [15] QIN Z Q, LI D P, OU Y P, et al. Recent advances in polydopamine for surface modification and enhancement of energetic materials: A mini-review[J]. *Crystals*, 2023, 13(6): 976.
- [16] LEE H, DELLATORE M S, MILLER M W, et al. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings[J]. *Science*, 2007, 318(5849): 426-430.
- [17] PENG L, LIANG Y F, YUE J L, et al. Dramatic improvement in the mechanical properties of polydopamine/polyacrylamide hydrogel mediated human amniotic membrane[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(6): 3635-3642.
- [18] RYU J H, MESSERSMITH P B, LEE H. Polydopamine surface chemistry: A decade of discovery[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(9): 7523-7540.
- [19] WARDANI A K, ARIONO D, SUBAGJO, et al. Hydrophilic modification of polypropylene ultrafiltration membrane by air-assisted polydopamine coating[J]. *Polymers Advanced Technologies*, 2019, 30(4): 1148-1155.
- [20] GIOVANNIMARIA M, NATHALIE B, HUAN Z, et al. Effects of polydopamine coatings on nucleation modes of surface mineralization from simulated body fluid[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14982.
- [21] LIU C D, LI Y Z, WANG J Y, et al. Improving hydrophilicity and inducing bone-like apatite formation on PPBES by polydopamine coating for biomedical application[J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1643.
- [22] TAN X, GAO P, LI Y L, et al. Poly-dopamine, poly-levodopa, and poly-norepinephrine coatings: Comparison of physico-chemical and biological properties with focus on the application for blood-contacting devices[J]. *Bioactive Materials*, 2021, 6(1): 285-296.
- [23] DAVIDSEN M B, TEIXEIRA J F L, DEHLI J, et al. Post-treatments of polydopamine coatings influence cellular response[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 207: 111972.
- [24] DASHTDAR A, YAZADANI-AHMADABADI H, REZVANI-MOGHADDAM A, et al. Scalable polydopamine coatings with increased thickness and stability using polyamidoamine dendrimers[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 665: 160286.
- [25] JIANG J H, ZHU L P, ZHU L J, et al. Surface characteristics of a self-polymerized dopamine coating deposited on hydrophobic polymer films [J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2011, 27(23): 14180-14187.
- [26] GAO S P, ZHANG D, PEDRERO M, et al. Advances and opportunities of polydopamine coating in biosensing: Preparation, functionality, and applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 501: 215564.
- [27] BASHIR M A. Use of dynamic mechanical analysis (DMA) for characterizing interfacial interactions in filled polymers[J]. *Solids*, 2021, 2(1): 108-120.
- [28] DU R K, HE L, LI P, et al. Polydopamine-modified Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polyurethane composites with largely improved thermal and mechanical properties [J]. *Materials*, 2020, 13(7): 1772.
- [29] LI S M, GARREAU H, VERT M. Structure-property relationships in the case of the degradation of massive aliphatic poly-( $\alpha$ -hydroxy acids) in aqueous media[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 1990, 1(3): 123-130.
- [30] TOKIWA Y, CALABIA B P. Biodegradability and biodegradation of poly(lactide)[J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2006, 72(2): 244-251.
- [31] BATTAGLINI M, EMANET M, CARMIGNANI A, et al. Polydopamine-based nanostructures: A new generation of versatile, multi-tasking, and smart theranostic tools[J]. *Nano Today*, 2024, 55: 102151.
- [32] WANG F, LIU X X, YUAN J, et al. Synthesis and characterization of poly(lactic acid-co-glycolic acid) complex microspheres as drug carriers [J]. *Journal of Biomaterials Applications*, 2016, 31(4): 544-552.
- [33] OYMACI P, NIJMEIJER K, BORNEMAN Z. Development of polydopamine forward osmosis membranes with low reverse salt flux [J]. *Membranes*, 2020, 10(5): 94.
- [34] VIEIRA A C, VIEIRA J C, FERRA J M, et al. Mechanical study of PLA-PCL fibers during *in vitro* degradation[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2011, 4(3): 451-460.