

PET 薄膜的亲水改性研究

丁蕊蕊, 潘均安, 阳范文, 苏昊桦, 陈志琪, 卓志宁,
丁华畅, 郑哲月, 周馨怡, 冯泳婷

(广州医科大学 基础医学院生物医学工程系, 广州 511436)

摘要: **目的** 探索对聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜亲水改性的制备工艺, 研究其是否能够有效提高 PET 薄膜表面的亲水性。**方法** 将 PET 薄膜裁剪成 1 cm×4 cm 的矩形样条, 样条放入盛有无水乙醇的离心管中超声清洗, 经烘干后再放入叔丁基过氧化氢 (TBHP) 溶液中进行引发反应, 引发完成的 PET 薄膜样条依次用无水乙醇、水超声清洗后放入 PVP 溶液进行改性, 最后超声清洗并烘干放置 24 h 进行接触角测试与红外光谱测试, 分别评价 PET 薄膜的亲水性与表面成分变化。**结果** 使用不同 PVP 进行改性, PVP-K90 对 PET 薄膜的改性效果最佳, 接触角下降最明显, 其接触角为 21.3°。研究不同浓度 TBHP 对接触角的影响, 随着 TBHP 浓度增加, 接触角逐渐减小, TBHP 浓度为 1% 时, 其接触角为 28°。探究不同浓度 PVP-K90 对接触角的影响, 随着 PVP-K90 浓度增加, 接触角呈现先减小后略有增大的变化趋势, PVP-K90 浓度为 5% 时达到最小值 (24.2°)。最佳配方和工艺为: 5%PVP-K90+1%TBHP, 温度 80 °C, 转速 600 r/min, 反应时间 1 h。PET 薄膜的接触角从改性前的 81.7° 下降到改性后的 29.5°, 亲水性显著提高。亲水改性 PET 薄膜超声清洗 20 min 以上, 接触角仍保持不变, 红外光谱在 3 427、1 608 cm⁻¹ 的特征峰明显增强, PVP 以化学键合方式接枝在 PET 表面。**结论** 以 TBHP 作引发剂, PVP-K90 作改性剂, 通过表面接枝方法可有效提高 PET 薄膜的亲水性。

关键词: PET 薄膜; 聚乙烯吡咯烷酮; 亲水改性; 表面接枝; 接触角

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0374-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.033

Hydrophilic Modification of PET Film

DING Rui-rui, PAN Jun-an, YANG Fan-wen, SU Hao-yuan, CHEN Zhi-qi, ZHUO Zhi-ning,
DING Hua-chang, ZHENG Xi-yue, ZHOU Xin-yi, FENG Yong-ting

(Department of Biomedical Engineering, Basic Medical School, Guangzhou
Medical University, Guangzhou 511436, China)

ABSTRACT: It is a hydrophilic modification method with simple process, good effect and cleaning resistance, which can effectively improve the hydrophilicity of the surface of the polyethylene glycol terephthalate (PET) film. Due to the defects of the existing PET hydrophilic modification methods, such as high equipment cost, complicated operation, this paper studies the use of polyvinyl pyrrolidone (PVP) as modifier and tert-butyl hydroperoxide (TBHP) as initiator for the shortcomings of the

收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-04-25

Received: 2022-03-01; Revised: 2022-04-25

基金项目: 2022 年度广东省攀登计划项目 (pdjh2022b0424); 2020 年度广医大-睿康医疗公司联合研究项目 (J20172011)

Fund: Climbing Plan Project of Guangdong Province in 2022 (pdjh2022b0424); Joint Research Project of Guangzhou Medical University and Recon Medical Company in 2020 (J20172011)

通讯作者: 阳范文 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生物医学高分子材料和 3D 打印。

Corresponding author: YANG Fan-wen (1972-), Male, Doctor, Professor, Research focus: biomedical polymer materials and 3D printing.

引文格式: 丁蕊蕊, 潘均安, 阳范文, 等. PET 薄膜的亲水改性研究[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 374-380.

DING Rui-rui, PAN Jun-an, YANG Fan-wen, et al. Hydrophilic Modification of PET Film [J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 374-380.

existing methods, the hydrophilicity of the PET film is significantly improved by grafting.

Cut the PET film into a 1 cm×4 cm rectangle spline, put the spline into a centrifuge tube filled with absolute ethanol, clean it with an ultrasonic cleaner (SB-5200DTDN), and dry it in a vacuum drying oven (DHG-9075A). Put it into TBHP solution to initiate the reaction. The PET film strips that have been initiated are sequentially cleaned with absolute ethanol and water ultrasonically, and then put into PVP solution for modification. Finally, ultrasonically cleaned and dried for 24 hours using a contact angle measuring instrument (JC2000D1) and Fourier transform infrared spectrometer (TENSOR 27) to conduct contact angle test and infrared spectrum test to evaluate the hydrophilicity and surface composition changes of PET films respectively.

First, the PET film is cut and pretreated with ultrasonic cleaning, followed by initiation and modification reactions; Second, during the initiation reaction, different amounts of TBHP (0%, 1%, 2%, 3%, 4%) were added, and the temperature-controlled magnetic stirrer (ZNCL-DB230) was used at 40 °C and the rotation speed was 450 r/min with heating and stirring; Third, after ultrasonic cleaning, change the type of PVP (PVP-K17, PVP-K30, PVP-K90) and dosage (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%), the modification reaction is carried out under the condition of rotating speed 600 r/min, 80 °C, the final sample can be obtained by ultrasonic cleaning and drying and placing for 24 h. During the contact angle test of the sample, drop 2 μL of water droplets on the sample to be tested at least at 5 different positions, read the static contact angle measured by the water droplets at each position, and take the average value; in the infrared spectrum test, after PVP drying in a vacuum drying oven at 50 °C for 24 hours, the samples were prepared and tested by the tableting method. The PET and its hydrophilic modified samples were directly tested after being dried in a vacuum drying oven at 50 °C for 2 hours. The measurement range was 400-4 000 cm⁻¹ and the resolution was 2 cm⁻¹.

PVP-K90 has the best modification effect on PET film, and the contact angle decreases most obviously, which is 21.3°. The effect of different concentrations of TBHP on the contact angle was studied. The contact angle decreased with the increase of TBHP concentration, and the contact angle was 28° when TBHP was 1%. The influence of different concentrations of PVP-K90 on the contact angle was investigated. With the increase of PVP-K90 concentration, the contact angle first decreased and then slightly increased, and reached the minimum value of 24.2° when PVP-K90 was 5%. The optimum formula and process were as follows: PVP-K90 5%, TBHP 1%, temperature 80 °C, rotating speed 600 r/min and reaction time 1h. The contact angle of PET film decreased from 81.7° before modification to 29.5° after modification, and the hydrophilicity was significantly improved. The contact angle of the hydrophilic modified PET film remained unchanged after ultrasonic cleaning for more than 20 min. The characteristic peaks of the infrared spectra at 3 427 cm⁻¹ and 1 608 cm⁻¹ were significantly enhanced. PVP was grafted on the surface of PET in the form of chemical bonding. Therefore, using TBHP as initiator and PVP-K90 as modifier, the hydrophilicity of PET film can be improved by surface grafting.

KEY WORDS: PET film; polyvinylpyrrolidone; hydrophilic modification; surface grafting; contact angle

聚对苯二甲酸乙二酯(PET)是乳白色或浅黄色、高度结晶的高分子材料,表面平滑有光泽。PET分子中间为苯环,两端分别为羟基和羧基,重复单元由—CH₂—CH₂—、苯环和酯基的刚性聚合物。PET分子的刚性结构以及对称性赋予其良好的综合性能,如良好的耐热性、绝缘性能、电学性能和力学性能,因而被广泛应用于包装业、电子电器、医疗卫生、建筑、汽车、服装和环境等领域^[1-6]。但是由于PET分子链段中亲水基团缺乏,表面亲水性差,在医疗和服装领域的使用受到了一定限制^[7-10]。

PET表面亲水改性方法有多种。王孟泽^[11]通过改变截面形状构造出微孔穴结构提高材料吸湿能力,但该方法对设备要求很高。卢声等^[12]将亲水性整理剂涂覆PET表面以此提高材料的亲水性,此法需要复配多种试剂,工艺复杂。朱方剑^[13]利用改造后的*T. fusca*

角质酶水解PET纤维中的酯键产生亲水基团,从而改善其亲水性,但生物酶对试验条件苛刻,且容易失活。许多研究者采用等离子体^[14-18]、激光^[19]、紫外光^[20-23]、电子束^[24]、γ射线^[25-27]等进行表面处理,但会破坏材料的表面形态和结构。

聚乙烯吡咯烷酮(PVP)是一种两性性聚合物,既能溶于水,又能溶于大部分有机溶剂,是一种性能优异的亲水改性剂。王小红^[28]通过紫外灯照射使PVP接枝到成型硅橡胶表面,提高了硅橡胶表面的亲水性。宋国城^[29]采用PVP液沉积法改性纳米纤维复合膜,孟海涛^[30]采用化学交联法改性聚丙烯腈膜,改性后的材料亲水性提高。徐天玉等^[31]利用叔丁基过氧化氢(TBHP)的氧化效应,制备了亲水性优良的聚砜膜。

本文采用PVP为亲水改性剂,以TBHP为引发剂,对PET薄膜表面进行化学接枝改性,研究配方

和工艺对 PET 接触角的影响,为 PET 亲水改性及其应用提供参考。

1 试验

1.1 PET 表面亲水改性方法

所用 PET 薄膜购于东莞微尔科技有限公司, PET 薄膜厚度为 0.1 mm, 无水乙醇购于广州化学试剂厂, 去离子水购于睿希化工水处理厂。PET 薄膜的前处理流程为: 从 PET 薄膜上裁剪为宽 1 cm、长 4 cm 的矩形样条→PET 薄膜样条放入离心管中→加入 20 mL 的无水乙醇→超声清洗 5 min→取出 PET 薄膜样条→在 50 ℃烘箱中烘干备用。

TBHP 购于上海麦克林生物试剂有限公司, 相对分子质量为 90.12, 纯度为 30%。取 10 g TBHP 加入 145 g 无水乙醇、145 g 去离子水配制成 TBHP 质量分数为 1% 的溶液。

聚乙烯吡咯烷酮粉体 (PVP-K17、PVP-K30、PVP-K90) 购于攻碧克新材料科技(上海)有限公司。采用分析天平称取聚乙烯吡咯烷酮粉体, 加入去离子水, 搅拌配制成质量分数为 5% 的溶液。

样品制备步骤如下: (1) 将 PET 薄膜样条放入含有 1% 的 TBHP 溶液中, 在温度为 40 ℃、转速 450 r/min 条件下进行引发反应, 引发时间 2 h; (2) 将引发完成的 PET 薄膜样条放入离心管, 依次用无水乙醇、水超声清洗 5 min; (3) 从离心管中取出 PET 样条放入配方设计的溶液中进行接枝改性, 在温度为 80 ℃、转速为 600 r/min 的条件下反应 1 h; (4) 将改性后的 PET 样条分别用无水乙醇、去离子水超声清洗, 再放入 50 ℃真空干燥箱烘干 15 min 后, 在常温条件下放置 24 h 后进行性能测试。

1.2 性能测试

1) 采用接触角测量仪测试亲水性, 仪器型号为 JC2000D1, 至少在 5 个不同的位置分别滴加 2 μ L 水滴于待测膜样品上, 读取水滴在各位置测得的静态接触角, 取平均值。

2) 采用红外光谱仪测试材料及 PET 薄膜改性前后的红外光谱, 仪器型号为 TENSOR 27 红外光谱仪,

测量范围为 400~4 000 cm^{-1} , 分辨率为 2 cm^{-1} 。将 PVP 放在 50 ℃真空干燥箱中烘烤 24 h 后, 采用压片法制样测试。PET 及其亲水改性样品在 50 ℃真空干燥箱中烘烤 2 h 后直接测试。

2 结果及分析

2.1 改性剂对薄膜表面接触角的影响

固定 PVP 质量分数为 5% 不变, 研究 K 值不同的 PVP 对接触角的影响, 配方设计见表 1, 接触角如图 1 与图 2 所示。

由图 1 可见, 对照组 (配方 1) 接触角为 81.7°, 添加 PVP-K17、PVP-K30、PVP-K90 的接触角分别

表 1 不同 PVP 改性剂的配方设计
Tab.1 Formulation design of different PVP modifiers wt. %

Material	1	2	3	4
Deionized water	75	68	68	68
Anhydrous ethanol	25	25	25	25
Initiator TBHP		2	2	2
PVP-K17		5		
PVP-K30			5	
PVP-K90				5
Sum	100	100	100	100

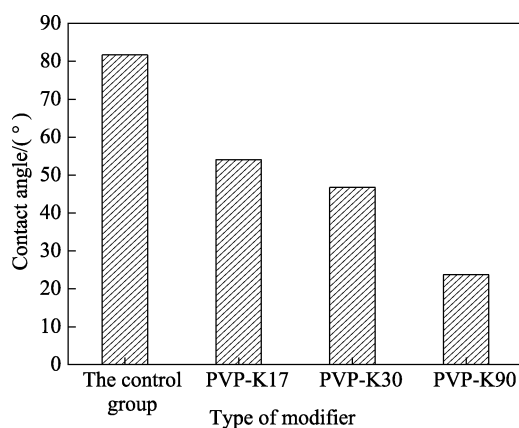


图 1 改性剂种类对接触角的影响
Fig.1 The effect of different modifiers on contact angle

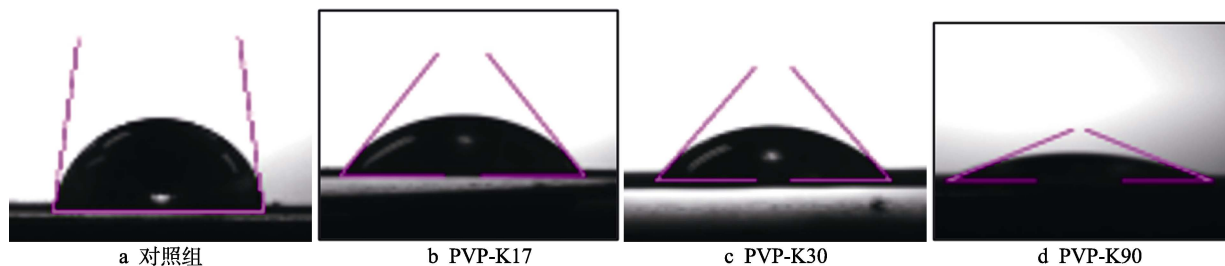


图 2 不同改性剂处理的接触角照片
Fig.2 Photo of contact angle by different modifiers

降低到 52°、47.6°、21.3°。随着 K 值增加, PET 薄膜的接触角减小, 亲水性增加。在图 2d 中, 可以看到水滴与 PET 薄膜表面接近铺展, 表示此时 PET 薄膜的亲水性最好, 即 PVP-K90 改性效果最佳。

产生上述现象的原因与 PVP 相对分子质量不同有关, K 值越大, 相对分子质量越高, 溶液的黏度越大, 成膜性也就越好。由于 PVP-K17 和 PVP-K30 的相对分子质量较小, 溶液黏度较低, 在 PET 薄膜表面成膜性能不理想; 而 PVP-K90 溶液黏度较高, 成膜均匀, 故亲水改性效果最好。

2.2 TBHP 浓度对薄膜表面接触角的影响

确定 PVP-K90 质量分数为 5%, 改变 TBHP 浓度, 配方设计见表 2, 薄膜表面接触角的变化曲线见图 3。

表 2 引发剂浓度不同的配方设计
Tab.2 Formulation design with different initiator concentration

	wt. %				
Material	4	5	6	7	8
Deionized water	70	69	68	67	66
Anhydrous ethanol	25	25	25	25	25
PVP-K90	5	5	5	5	5
Initiator TBHP	0	1	2	3	4
Sum	100	100	100	100	100

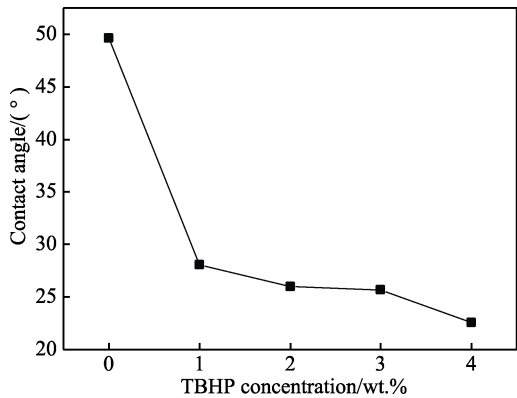


图 3 引发剂浓度对接触角的影响
Fig.3 Influence of initiator concentration on contact angle

从图 3 可知, 随着 TBHP 浓度增加, 接触角呈现先迅速下降后缓慢下降的变化趋势。不添加 TBHP 时的接触角为 50.3°, 添加了 1% 的 TBHP 时, 接触角则下降到 28°, 接触角大幅度降低, 亲水性显著改善。随着 TBHP 浓度继续增大, 接触角缓慢下降, 增加到 4% 时接触角达到最低值 (24°)。

产生上述现象的原因在于引发剂 TBHP 是一种过氧化物, 加热条件下产生自由基, 引发 PVP 在 PET 表面进行接枝反应, PVP 以化学键合的方式链接在 PET 表面。随着 TBHP 浓度增加, 接枝反应过程中自

由基数量增加, 进而在 PET 表面接枝的 PVP 数量增加, 故接触角迅速下降。TBHP 是一种过氧化物, 从成本和安全角度考虑, 在满足亲水改性前提下浓度越低越好, 故 1% 为最佳选择。

2.3 PVP-K90 浓度对薄膜表面接触角的影响

确定 TBHP 质量分数为 1%, 研究 PVP-K90 浓度对薄膜表面接触角的影响, 配方设计见表 3, 接触角变化曲线见图 4。

表 3 PVP-K90 浓度不同的配方设计
Tab.3 Formulation design with different PVP-K90 concentration

	wt. %				
Material	9	10	11	12	13
Deionized water	74	71.5	69	66.5	64
Anhydrous ethanol	25	25	25	25	25
Initiator TBHP	1	1	1	1	1
PVP-K90	0	2.5	5	7.5	10
Sum	100	100	100	100	100

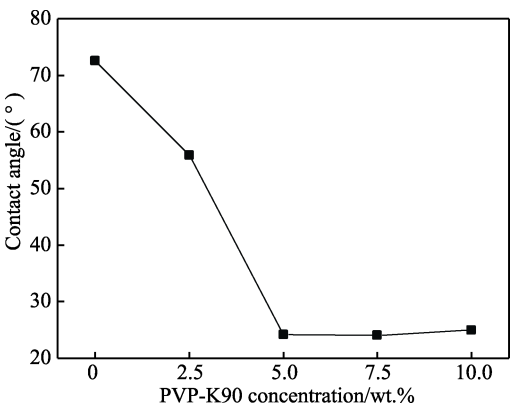


图 4 PVP-K90 浓度对接触角的影响
Fig.4 Effect of PVP-K90 concentration on contact angle

从图 4 可知, 随着 PVP-K90 浓度增加, 接触角呈现先迅速下降后略有上升的变化趋势。当不添加 PVP-K90 时, 薄膜表面接触角为 72.6°; PVP-K90 质量分数增加到 5% 时, 接触角迅速下降并达到最小值 24.2°; PVP-K90 质量分数超过 5% 时, 接触角略有上升。相比于不添加 PVP-K90 的配方, 添加 5% 的 PVP-K90 可显著降低接触角, 对 PET 薄膜表面的亲水改性效果最好。

产生上述现象的原因在于 PVP-K90 浓度较低时, 溶液黏度低, 成膜不理想; 当其质量分数达到 5% 时成膜性能良好, 涂层均匀, 故接触角达到最小值; 继续增加 PVP-K90 浓度, 溶液黏度高, 涂层变厚, 表面均匀性变差, 故接触角反而略有增加。

2.4 超声清洗时间对薄膜表面接触角的影响

为了研究 PVP-K90 是否以化学键合方式接枝到

PET 表面, 使用 PVP-K90 浓度不同的配方, 对比超声清洗时间 5~30 min 的接触角变化, 结果见图 5。

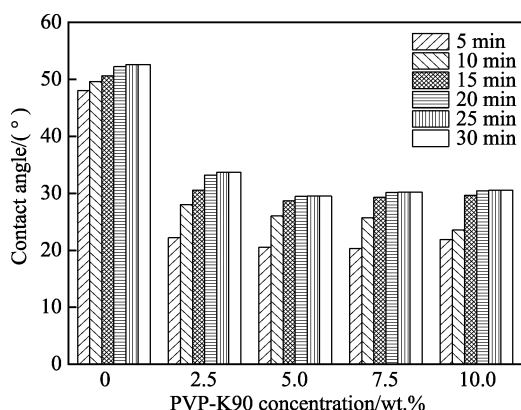


图5 超声清洗时间对接触角的影响
Fig.5 Influence of ultrasonic cleaning time on contact angle

由图 5 可见, 随着超声清洗时间的延长, 所有配方的接触角有所增大, 其原因在于亲水改性后的 PET 表面既有物理吸附的 PVP, 也有化学键合的 PVP, 随着超声清洗时间增加, 物理吸附的 PVP 从 PET 表面逐渐脱附, 故接触角逐步变大。

对于 PVP-K90 质量分数 $\geq 5\%$ 的配方, 当清洗时间 ≥ 20 min 后, 接触角基本不变。原因在于 PET 表面物理吸附的 PVP 完全清洗干净后, 表面仅留下化学键合的 PVP, 因为化学键的作用力大, PVP 在清洗过程中不会脱离, 故接触角保持不变。

综上所述, PVP-K90 质量分数为 5%、引发剂 TBHP 质量分数为 1%、接枝反应时间为 1 h、超声清洗时间为 20 min 时, PET 薄膜的接触角可达 29.5° , 获得了良好的亲水改性效果。

2.5 PET 薄膜改性前后的红外光谱分析

为了验证最佳配方制备的 PET 亲水改性膜表面的 PVP-K90 是否通过化学键合方式存在, 对亲水改性后的样品进行超声清洗 30 min, 真空干燥后进行红外光谱分析。PVP-K90 的红外图谱如图 6 所示, PET 改性前后薄膜的红外图谱如图 7 所示。

由图 6 可见, PVP-K90 在 3427 、 1608 cm^{-1} 处出现明显的特征峰, 分别对应—OH 基团伸缩振动的吸收峰和 $\text{C}=\text{O}$ 基团伸缩振动的吸收峰。从图 7 可知, 与未改性 PET 薄膜相比, 亲水改性 PET 薄膜在 3427 、 1608 cm^{-1} 处的峰高明显增高, 峰面积也相应增大, 说明 PVP-K90 通过化学键合方式结合在 PET 表面。

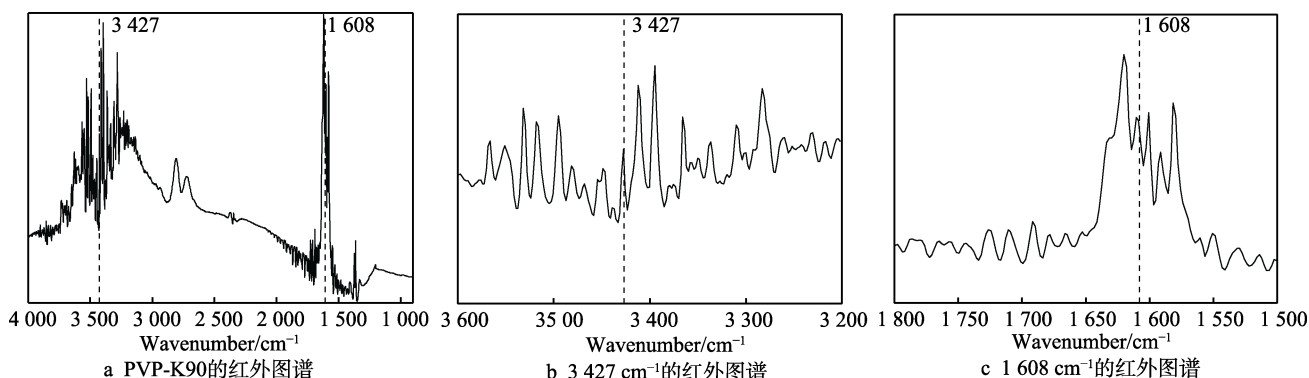


图6 改性剂 PVP-K90 的红外图谱
Fig.6 Infrared spectrum of modifier PVP-K90

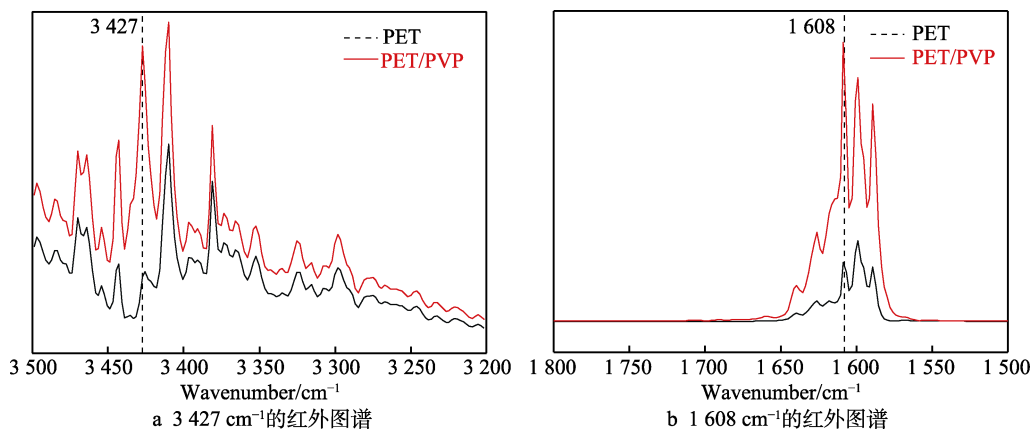


图7 PET 薄膜亲水改性前后的红外图谱
Fig.7 Infrared spectrum of PET film before and after hydrophilic modification

3 结 论

1) 选择 K 值分别为 17、30 和 90 的 PVP 对 PET 薄膜进行亲水改性, 随着 K 值增加, 接触角降低, 亲水改性效果提高, PVP-K90 的改性效果最佳; 随着 TBHP 浓度增加, 接触角呈现先迅速下降后缓慢下降的变化趋势, 从未添加时的 50.3° 下降到 1% 时的 28° ; 随着 PVP-K90 浓度增加, 接触角呈现先迅速下降后缓慢上升的变化趋势, 当其用量为 5% 时达到最小值 (24.2°)。

2) 随着超声清洗时间的延长, 所有配方的接触角有所增大, 说明 PET 薄膜表面有物理吸附的 PVP 被清除。对于 PVP-K90 质量分数 $\geq 5\%$ 的配方, 当清洗时间 ≥ 20 min 后, 接触角基本不变, 说明清洗 20 min 可完全去除物理吸附的 PVP, 剩下的 PVP 以化学键结合在 PET 表面。

3) 亲水改性的最佳配方为 5% PVP-K90+1% TBHP, 最佳工艺为温度 80°C +转速 600 r/min+反应时间 1 h, PET 的接触角从改性前的 81.7° 下降到 29.5° 。

4) 亲水改性后 PET 薄膜在 $3\,427$ 、 $1\,608\text{ cm}^{-1}$ 处的峰高增加、峰面积增大, 证实了 PVP-K90 通过化学键合方式结合在 PET 表面。

参考文献:

- [1] 董莉. PET 的研究、改性及应用进展[J]. 山东化工, 2021, 50(8): 71-72, 75.
DONG Li. The Research, Modification and Application of PET[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(8): 71-72, 75.
- [2] 贾义军, 毕立. 咖啡流量计电磁阀外壳用 GF 增强阻燃 PET 的研制[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(3): 20-24, 29.
JIA Yi-jun, BI Li. Study on GF Reinforced Flame Retardant PET for Housing of Electromagnetic Valve of Coffee Flowmeter[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3): 20-24, 29.
- [3] 张杰, 乔辉, 丁筠, 等. PET 阻燃复合材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(5): 140-144.
ZHANG Jie, QIAO Hui, DING Yun, et al. Research Progress of PET Flame Retardant Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5): 140-144.
- [4] 王宏, 逢增媛, 张金宁, 等. 熔体静电纺丝电场工艺参数对 PET 纤维膜形貌的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(9): 44-48.
WANG Hong, PANG Zeng-yuan, ZHANG Jin-ning, et al. Influences of Electric Field Process Parameters on PET Fiber Film Morphology by Melt-Electrospinning[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(9): 44-48.
- [5] 田桂桂, 王宏涛, 皇甫佳伟, 等. 低 VOC 含量 PET/ADH-AG 复合材料制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 42-47.
TIAN Gui-gui, WANG Hong-tao, HUANGFU Jia-wei, et al. Preparation and Properties of PET/ADH-AG Composites with Low VOC Content[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 42-47.
- [6] 刘海蛟. 聚对苯二甲酸乙二酯的制备及其应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38(3): 77-79.
LIU Hai-jiao. Preparation and Application of PET[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(3): 77-79.
- [7] 王新, 王进美, 周娅楠. 涤纶表面亲水改性研究进展[J]. 合成纤维, 2021, 50(7): 27-30.
WANG Xin, WANG Jin-mei, ZHOU Ya-nan. Research Progress on Hydrophilic Modification of Polyester Surface[J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(7): 27-30.
- [8] 邵灵达, 申晓, 金肖克, 等. 涤纶纤维表面复合改性对其亲水性的影响[J]. 丝绸, 2020, 57(2): 19-24.
SHAO Ling-da, SHEN Xiao, JIN Xiao-ke, et al. Effect of Surface Modification of Polyester Fiber on Its Properties[J]. Journal of Silk, 2020, 57(2): 19-24.
- [9] 解萍萍, 江文斌, 曾晓曼, 等. 氮丙啶交联剂/改性丝胶包覆异形涤纶织物的性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 716-722.
XIE Ping-ping, JIANG Wen-bin, ZENG Xiao-man, et al. Study on the Performance of Profiled Polyester Fabric Coated with Aziridine Crosslinker/Modified Sericin[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2019, 41(6): 716-722.
- [10] 黄书浩, 余晓芬, 郑照县, 等. 高分子材料在医疗器械中的应用现状[J]. 医疗装备, 2019, 32(3): 196-199.
HUANG Shu-hao, YU Xiao-fen, ZHENG Zhao-xian, et al. Application Status of Polymer Materials in Medical Devices[J]. Medical Equipment, 2019, 32(3): 196-199.
- [11] 王孟泽, 张强华, 龙邵, 等. 涤纶针织面料吸湿速干整理工艺实践[J]. 纺织导报, 2018(4): 39-41.
WANG Meng-ze, ZHANG Qiang-hua, LONG Shao, et al. The Moisture-Absorbent & Quick-Drying Finishing of Polyester Knitted Fabrics[J]. China Textile Leader, 2018 (4): 39-41.
- [12] 卢声, 孟辉, 程德红, 等. 丝胶蛋白水解溶液整理涤纶织物的染色性能[J]. 染整技术, 2019, 41(9): 15-17, 22.
LU Sheng, MENG Hui, CHENG De-hong, et al. Dyeing Properties of Polyester Fabrics Finished with Hydrolysis Solution of Sericin Protein[J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2019, 41(9): 15-17, 22.
- [13] 朱方剑. 二硫键理性设计提高 Thermobifida fusca 角质酶热稳定性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
ZHU Fang-jian. Study on Improving the Thermal Stability of Thermobifida Fusca Cutinase by Rational Design of Disulfide Bonds[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [14] MUI T S M, MOTA R P, QUADE A, et al. Uniform Surface Modification of Polyethylene Terephthalate (PET) by Atmospheric Pressure Plasma Jet with a Horn-Like Nozzle[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 352:

- 338-347.
- [15] NEDĚLA O, SLEPIČKA P, ŠVORČÍK V. Surface Modification of Polymer Substrates for Biomedical Applications[J]. *Materials*, 2017, 10(10): 1115.
- [16] 武昊岩, 谢光银. 高强涤纶纤维等离子体改性的研究[J]. *纺织科技进展*, 2020(3): 16-19, 27.
WU Hao-yan, XIE Guang-yin. Study on Plasma Modification of High Strength Polyester Fiber[J]. *Progress in Textile Science & Technology*, 2020(3): 16-19, 27.
- [17] 李宏英, 傅佳佳, 王鸿博, 等. 利用等离子体预处理增强涤纶织物电子束辐照亲水改性的效果[J]. *材料导报*, 2018, 32(4): 626-630, 649.
LI Hong-ying, FU Jia-jia, WANG Hong-bo, et al. Enhancing the Hydrophilic Modification Effect of Electron Beam(EB) Irradiation Upon PET Fabrics by Introducing Plasma Pretreatment[J]. *Materials Review*, 2018, 32(4): 626-630, 649.
- [18] 何俊俊, 杨建忠, 崔双科. PET 纺粘非织造布氩气等离子体处理的时效性[J]. *印染*, 2018, 44(14): 12-16, 20.
HE Jun-jun, YANG Jian-zhong, CUI Shuang-ke. Timeliness of Argon Plasma Treatment for PET Spunbond Nonwoven Material[J]. *Dyeing & Finishing*, 2018, 44(14): 12-16, 20.
- [19] 何杨, 张瑞萍. CO₂激光对涤纶织物的亲水改性研究[J]. *棉纺织技术*, 2021, 49(8): 5-9.
HE Yang, ZHANG Rui-ping. Study on Hydrophilic Modification of Polyester Fabric by CO₂ Laser[J]. *Cotton Textile Technology*, 2021, 49(8): 5-9.
- [20] TAMAI T, WATANABE M, KOBAYASHI Y, et al. Surface Modification of Polyethylene Naphthalate Substrates by Ultraviolet Light-Irradiation and Assembling Multilayers and Their Application in Electroless Deposition: The Chemical and Physical Properties of the Stratified Structure[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 575: 230-236.
- [21] ZDOROVETS M V, KOROLKOV I V, YESZHANOV A B, et al. Functionalization of PET Track-Etched Membranes by UV-Induced Graft (Co)Polymerization for Detection of Heavy Metal Ions in Water[J]. *Polymers*, 2019, 11(11): 1876.
- [22] 周雪蕾. UV 固化亲水涂料用于 PET 非织造布的亲水改性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
ZHOU Xue-lei. Study on Hydrophilic Modification of PET Nonwovens with UV-Curable Hydrophilic Coatings [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [23] 李小佳. UV 光引发 PET 薄膜表面蛋白质接枝改性[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
LI Xiao-jia. Protein Grafting Modification of PET Film Surface Initiated by UV Light[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [24] 丁川, 张建春, 冯新星, 等. 电子束辐照对涤纶染色性能的影响[J]. *纺织学报*, 2014, 35(7): 79-82.
DING Chuan, ZHANG Jian-chun, FENG Xin-xing, et al. Effect of Electron Beam Irradiation on Dyeability of Polyester Fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(7): 79-82.
- [25] RODRÍGUEZ-ALBA E, DIONISIO N, PÉREZ-CALIXTO M, et al. Surface Modification of Polyethyleneterephthalate Film with Primary Amines Using Gamma Radiation and Aminolysis Reaction for Cell Adhesion Studies[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 176: 109070.
- [26] MA Liang, WANG Mo-zhen, GE Xue-wu. Surface Treatment of Poly(Ethylene Terephthalate) by Gamma-Ray Induced Graft Copolymerization of Methyl Acrylate and Its Toughening Effect on Poly(Ethylene Terephthalate)/Elastomer Blend[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, 90: 92-97.
- [27] PING Xiang, WANG Mo-zhen. Surface Modification of Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Film by Gamma-Ray Induced Grafting of Poly(acrylic acid) and Its Application in Antibacterial Hybrid Film[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2011, 80(4): 567-572.
- [28] 王小红. 加成型硅橡胶的制备及表面接枝 NVP 亲水改性研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
WANG Xiao-hong. Preparation of Addition Silicone Rubber and Hydrophilic Modification of Its Surface Grafted with NVP[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [29] 宋国城. 酚酞聚醚砜纳米纤维复合膜的构筑及亲水改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
SONG Guo-cheng. Construction and Hydrophilic Modification of Phenolphthalein Polyethersulfone Nanofiber Composite Membrane[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [30] 孟海涛. 亲水型静电纺丝油水分离膜的构建及性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
MENG Hai-tao. Construction and Properties of Hydrophilic Electrospinning Oil-Water Separation Membrane[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2021.
- [31] 徐天玉, 李希鹏, 张伟, 等. 聚砜膜的表面亲水改性[J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(4): 41-48.
XU Tian-yu, LI Xi-peng, ZHANG Wei, et al. Hydrophilic Modification of Polysulfone Membrane Surface[J]. *Membrane Science and Technology*, 2020, 40(4): 41-48.

责任编辑: 万长清