

# 辐射法制备聚乙烯醇 (PVA) 改性的 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜及其防雾性能

汪文睿<sup>1,2</sup> 刘崎<sup>1</sup> 何伟荣<sup>1,3</sup> 韩斐<sup>1,2</sup> 李吉豪<sup>1,4</sup> 李林繁<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

<sup>2</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>3</sup>(上海长沪新材料有限公司 上海 201800)

<sup>4</sup>(中科武威新能源研究所 武威 733000)

**摘要** 利用 $\gamma$ 射线辐射交联制备聚乙烯醇 (PVA) 改性的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜, PVA 分子在 $\gamma$ 射线辐照后形成交联网络并负载在 PET 薄膜表面。傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对样品的分析, 证明了 PVA 成功地固定在 PET 表面。透光率测试表明, 改性薄膜保持了良好的光学性能, 透光率为 89%。高温高湿和低温冷冻测试表明, 样品在两种极端条件下能均保持良好的防雾性能。饱和吸水性测试表明, 改性 PET 薄膜防雾化性能来源于 PVA 交联网络的吸水性, 负载率 12.43% 的 PET 薄膜饱和吸水率达到 50%。

**关键词** 辐射交联, 聚乙烯醇, 防雾化, 聚对苯二甲酸乙二醇酯

**中图分类号** TL13

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2022-0127

**引用该文:**

汪文睿, 刘崎, 何伟荣, 等. 辐射法制备聚乙烯醇(PVA)改性的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜及其防雾性能[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(4): 040203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0127.

WANG Wenrui, LIU Qi, HE Weirong, *et al.* Radiation preparation of polyvinyl alcohol (PVA)-modified polyethylene glycol terephthalate (PET) films and their anti-fogging properties[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(4): 040203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0127.



## Radiation preparation of polyvinyl alcohol (PVA)-modified polyethylene glycol terephthalate (PET) films and their anti-fogging properties

WANG Wenrui<sup>1,2</sup> LIU Qi<sup>1</sup> HE Weirong<sup>1,3</sup> HAN Fei<sup>1,2</sup> LI Jihao<sup>1,4</sup> LI Linfan<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

<sup>2</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

基金资助: 甘肃省自然科学基金(20JR10RA778、20JR10RA777)资助

第一作者: 汪文睿, 男, 1996年3月出生, 2014年于海南大学获学士学位, 现为中国科学院上海应用物理研究所读博士研究生, 无机化学专业

通信作者: 李林繁, 研究员, E-mail: lilinfan@sinap.ac.cn

收稿日期: 初稿 2022-11-18; 修回 2023-03-13

Supported by Gansu Natural Science Foundation Project (20JR10RA778, 20JR10RA777)

First author: WANG Wenrui (male) was born in March 1996, and obtained his bachelor's degree from Hainan University in 2014. Now he is a doctoral student at Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, majoring in inorganic chemistry

Corresponding author: LI Linfan, professor, E-mail: lilinfan@sinap.ac.cn

Received 18 November 2022; accepted 13 March 2023

<sup>3</sup>(Shanghai Changhu New Material Co., LTD., Shanghai 201800, China)

<sup>4</sup>(Wuwei Institute of New Energy, Wuwei 733000, China)

**ABSTRACT** In this study, polyvinyl alcohol (PVA)-modified polyethylene glycol terephthalate (PET) films were prepared using  $\gamma$ -radiation crosslinking. The PVA molecules formed a crosslinking network after  $\gamma$ -irradiation and were loaded onto the surfaces of the PET films. The samples were analyzed by Fourier-transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy to demonstrate that the PVA was successfully anchored to the PET film surfaces. Light transmission tests revealed that the modified films maintained good optical properties with a light transmission of 89%. Whether under high-temperature, high-humidity, or low-temperature freezing conditions, the tests revealed that the samples exhibited good anti-fogging performance. Saturated water absorption tests revealed that the anti-fogging properties of the modified PET films were derived from the water absorption of the PVA crosslinking network, where the PET film under 12.43% loading showed a saturated water absorption of 50%.

**KEYWORDS** Radiation crosslinking, Polyvinyl alcohol, Anti-fogging, Polyethylene glycol terephthalate (PET)

**CLC** TL13

聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜是一种性能优异的高分子薄膜, 与一般薄膜相比, 它具有良好的机械性能、透明性、气密性和尺寸稳定性<sup>[1]</sup>, 因而被广泛应用于食品包装<sup>[2]</sup>、光电产业<sup>[3]</sup>、医疗事业<sup>[4]</sup> 以及农业生产<sup>[5]</sup> 等领域。然而, PET 薄膜在高温高湿度或者低温环境中极易雾化, 给生产生活带来诸多困扰。

雾化是日常生活中最常见的一种自然现象。当固体表面温度 ( $T$ ) 低于周围空气与水蒸气混合物的露点  $T_d$  时, 水蒸气会在固体表面凝结形成液滴<sup>[6-7]</sup>, 液滴在表面接触角越大, 凝结现象就越严重<sup>[8]</sup>。由于水滴与空气界面处曲率半径较小, 因而对入射光的散射作用较强<sup>[9]</sup>, 导致材料透光率下降, 透明材料变模糊。表面雾化会对很多领域产生很大的负面影响, 例如反射镜、透镜和棱镜等光学器件表面雾化会降低显微镜和色谱仪的精度<sup>[10]</sup>; 在汽车和航空工业中, 挡风玻璃表面雾化会大大增加驾驶风险, 进而引发安全事故<sup>[11]</sup>; 表面雾化还会降低外科手术中内窥镜的视野<sup>[12]</sup> 以及太阳能电池的能量转化效率<sup>[13]</sup> 等。

当前常用的防雾方法可以分为物理法和化学法。物理法主要是通过改变环境参数, 进而控制水滴在表面成核来防止雾化现象的发生, 例如控制温度和相对湿度, 增加界面处空气流动等<sup>[14]</sup>。化学法目前主要分为两类: 一类是提高表面亲水性, 使水蒸气凝结时可以在表面铺展成水膜<sup>[15-16]</sup>; 另一类则是赋予表面优异的吸湿性能。Patel 等<sup>[17-18]</sup> 在氧气气氛下使用低压等离子体处理 PET

薄膜, 随着表面羰基官能团数量增加, 薄膜变得超亲水, 表现出优异的防雾化性能。Mansoor 等<sup>[19]</sup> 以壳聚糖和 SDS 改性的纳米二氧化硅作为功能化组分, 制备具有吸湿性能的防雾化涂层。

由于 PET 薄膜分子链规整, 结晶度高, 因而具有良好的耐化学药品性, 传统化学法难以对 PET 薄膜进行改性。PET 分子结构中的苯环赋予薄膜较好的辐射稳定性, 本工作尝试在室温条件下, 利用  $\gamma$  射线辐照制备聚乙烯醇 (PVA) 改性的 PET 薄膜。通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、扫描电子显微镜 (SEM) 分析、紫外分光光度计、接触角分析仪等对改性 PET 薄膜的结构和性能进行表征, 同时对其防雾化性能进行测试。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

PET 薄膜 (市售, 厚度为 300  $\mu\text{m}$ )。PVA, (1788 型, 醇解度为 87.0%~89.0%), 购自上海阿拉丁生化科技有限公司。去离子水, 自制。

### 1.2 仪器和设备

傅里叶变换红外光谱仪, Bruker VERTEX 70V, 布鲁克公司; 扫描电子显微镜, JSM-6700F JEOL, 蔡司公司; 接触角分析仪, Attention Theta, KSV 仪器有限公司; 紫外可见光谱仪, U-3900, 梅特勒·托利多国际公司; 真空干燥箱, DZF-6020, 上海佐科工业设备有限公司。

### 1.3 PVA水溶液的制备

将装有去离子水的试剂瓶置于60℃水浴锅中预热,称取一定质量的PVA粉体置于试剂瓶中,磁力搅拌12h,配制质量分数分别为1%、2.5%、5%和7.5%的PVA水溶液。

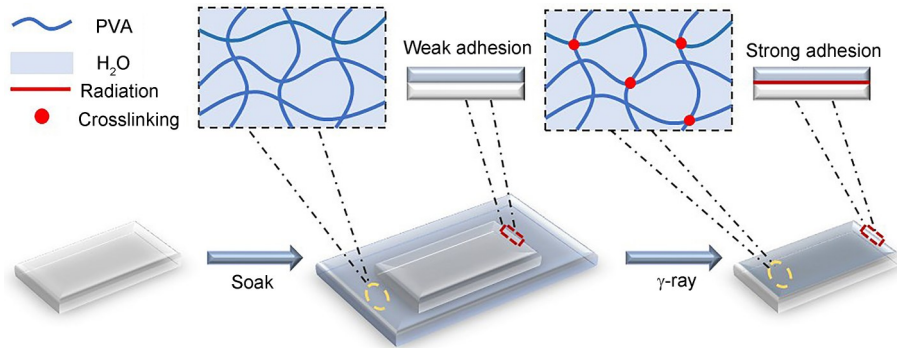


图1 防雾化薄膜制备流程图  
Fig.1 Flow chart of anti-fogging films preparation

将商用PET薄膜裁剪成一定尺寸,在丙酮中超声清洗1h后再用去离子水清洗,置于60℃真空烘箱中干燥12h备用。

PET薄膜称重记录质量 $m_0$ (g),将PET薄膜置于上述PVA水溶液中浸泡12h,取出后置于聚乙烯真空袋中抽真空密封,在室温条件下用 $^{60}\text{Co}$ 源进行辐照,吸收剂量分别为5 kGy、20 kGy、50 kGy、70 kGy、100 kGy、150 kGy和200 kGy。为了去除未反应的PVA,将改性PET薄膜置于80℃热水中浸泡48h,每4h换一次水<sup>[20]</sup>,然后放入60℃真空烘箱中干燥12h,称重记录质量 $m_1$ (g)。

### 1.5 表征与分析方法

#### 1.5.1 PVA负载率的测定

使用公式(1)计算PVA在PET薄膜上的负载率:

$$L = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $L$ 是PVA在PET薄膜上的负载率,%; $m_0$ 是原始PET薄膜质量,g; $m_1$ 是PVA改性薄膜质量,g。

根据负载率的不同,将改性PET薄膜命名为PET-PVA( $L\%$ )。

#### 1.5.2 FTIR分析

将PVA改性的PET薄膜在真空烘箱中烘干12h后,采用衰减全反射模式(ATR)进行测试,

### 1.4 PVA改性PET薄膜的制备

改性薄膜制备过程如图1所示。PET薄膜浸泡在PVA溶液中,当PVA溶液充分浸润薄膜后取出,通过 $\gamma$ 射线辐照使PVA分子形成交联网络,同时牢固地将PVA负载在PET表面。

测试范围:4 000~600  $\text{cm}^{-1}$ ;分辨率:4  $\text{cm}^{-1}$ ;扫描次数:32次。

#### 1.5.3 紫外可见光谱分析

测量改性薄膜的可见光吸收时,首先利用样品池对仪器进行背景扫描,扫描范围:800~300 nm,扫描速度:600 nm/min,然后将样品裁剪成合适大小,置于样品池壁上扫描。

#### 1.5.4 扫描电子显微镜分析

真空烘箱中烘干12h后,样品裁剪成合适大小并用导电胶粘在样品台上,测试前对样品进行喷金处理,时间为120 s,测试所用的加速电压为5 kV。

#### 1.5.5 接触角分析

将样品置于载玻片上,在Attention Theta系统下进行测试。测试时使用移液枪吸取5  $\mu\text{L}$ 的去离子水滴在样品表面,进行接触角测试。

#### 1.5.6 饱和吸水率测试

将样品置于装有40 mL去离子水的离心管中,每间隔1h将样品取出,擦拭掉表面水分后进行称重,直至3次称重的质量没有变化,即认为样品达到饱和吸水量,记录质量 $m_2$ 。

使用公式(2)计算薄膜饱和吸水率。

$$S = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $S$ 是薄膜的饱和吸水率,%; $m_1$ 是薄膜完全烘干后质量,g; $m_2$ 是薄膜达到饱和吸水量时质量,g。



### 1.5.7 防雾化性能测试

高温高湿度防雾测试：改性薄膜以及原始PET薄膜置于90℃水浴锅上方，观察表面的雾化情况。

低温冷冻防雾测试：改性薄膜以及原始PET薄膜放在零下25℃的冰箱中冷冻1h，取出后置于环境中观察表面雾化情况，测试时环境温度为16℃，相对湿度为50%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 改性薄膜的结构分析

#### 2.1.1 PVA负载率的影响因素分析

本实验采用辐射交联的方法，在室温条件下利用 $\gamma$ 射线一步制备PVA改性的PET薄膜，图2反映了吸收剂量、PVA水溶液浓度与PVA负载率的关系。当PVA质量分数为1%时，在各种吸收剂量下PVA均无法实现在PET薄膜上的有效负载；当PVA质量分数为2.5%时，仅有吸收剂量为70 kGy的样品有少量负载。以上结果表明，PVA通过辐射交联负载在PET薄膜表面时，其浓度存在最小值，当PVA浓度低于最小值时， $\gamma$ 射线辐照难以在PET薄膜表面形成PVA交联网络；当PVA质量分数达到5%和7.5%时，当前实验所对应的所有吸收剂量均可实现辐射交联PVA的负载，相同吸收剂量下，PVA质量分数越大，负载率越高，综上所述表明 $\gamma$ 射线引发的辐射交联反应具有常规化学反应类似的规律，即产物浓度与反应物浓度成正比。

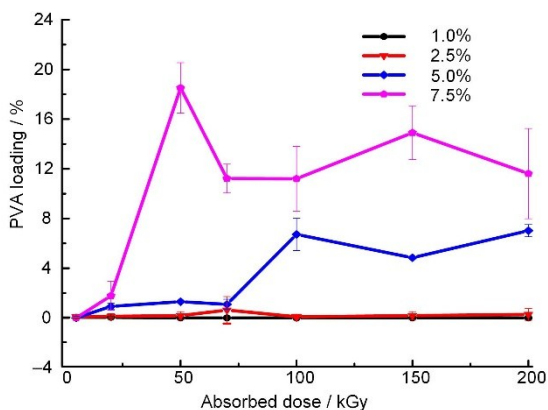


图2 吸收剂量、PVA浓度与PVA负载率的关系  
Fig.2 Relationship between absorbed dose, PVA concentration, and PVA loading rate

#### 2.1.2 化学结构分析

对不同负载率的PET薄膜进行FTIR表征，结果如图3所示。原始PET薄膜在1720 cm<sup>-1</sup>处的尖

峰为C=O伸缩振动峰，1500~750 cm<sup>-1</sup>之间的宽峰为苯环振动吸收峰以及其对位取代吸收峰，其中1250~1000 cm<sup>-1</sup>是C-O-C振动吸收峰；当PVA负载到PET薄膜上时，3300 cm<sup>-1</sup>附近出现的新吸收峰对应着PVA中羟基(-OH)的振动吸收，随着负载率提高，其信号峰强度逐渐增强，而PET在1720 cm<sup>-1</sup>以及1500~750 cm<sup>-1</sup>之间信号峰的强度则逐渐减弱，由于ATR模式测量的样品深度一般在1~2 μm，随着PVA负载率的提高，负载层厚度在逐渐提高，因此显现出PVA特征峰强度增加而PET特征峰强度减弱的变化规律。

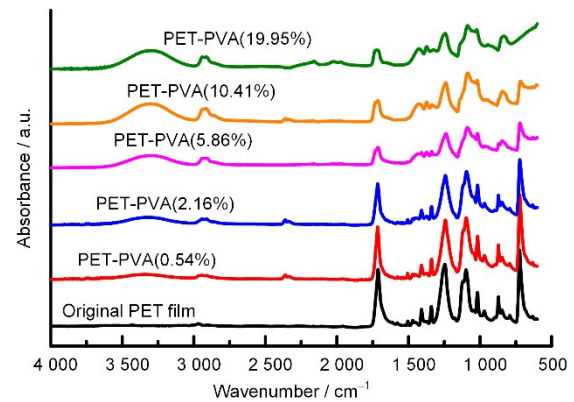


图3 原始PET薄膜和PET-PVA薄膜的红外谱图  
Fig.3 FTIR spectra of original PET films and PET-PVA films

#### 2.1.3 改性薄膜微观形貌

图4是改性薄膜表面的SEM图。PVA的负载率分别为2.16%、5.86%、10.41%、12.43%和19.95%。当负载率为2.16%时，其表面形貌与原始PET薄膜相比变化较小；当负载率达到5.86%时，改性薄膜表面开始变粗糙。随着负载率的提高，改性薄膜表面的粗糙度逐渐增大，PVA逐渐趋于聚集，并且聚集程度越来越大。

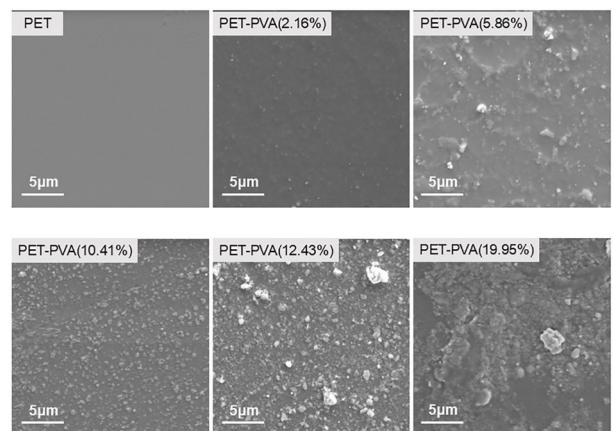


图4 不同负载率下PET-PVA薄膜的表面SEM图  
Fig.4 Surface SEM images of PET-PVA films with different loading rates

## 2.2 光学性能测试

图5是原始PET薄膜与PET-PVA (12.43%) 薄膜的紫外可见光光谱, 插图是改性薄膜的光学照片。原始PET薄膜的透光率为90%, PET-PVA (12.43%) 薄膜的透光率保持在89%, 光学照片的背景字母清晰可见。以上结果表明改性薄膜与原始PET薄膜相比, 仍然保持着良好的光学性能。

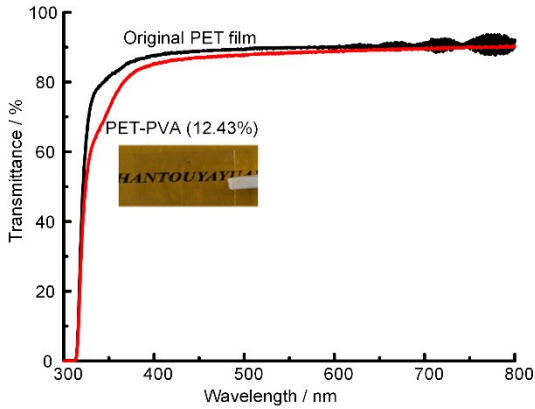


图5 原始PET薄膜与PET-PVA (12.43%)薄膜的紫外可见光光谱(插图为PET-PVA(12.43%)薄膜的照片)

Fig.5 UV-vis spectra of original PET film and PET-PVA (12.43%) film (The illustration shows the photograph of PET-PVA (12.43%) film)

## 2.3 防雾化性能测试

图6 (a) 是高温高湿条件下的防雾化性能测试, 原始PET薄膜表面已经雾化, 而PET-PVA (12.43%) 薄膜仍然保持着良好的光学性能; 图6 (b) 是低温冷冻条件下的防雾化性能测试, 在图中可以观察到原始PET薄膜背后的字母已经模糊不清, 而PET-PVA (12.43%) 薄膜背后的字母仍然清晰可见。高温高湿以及低温冷冻测试证明PVA负载的PET薄膜具有良好的防雾化性能。

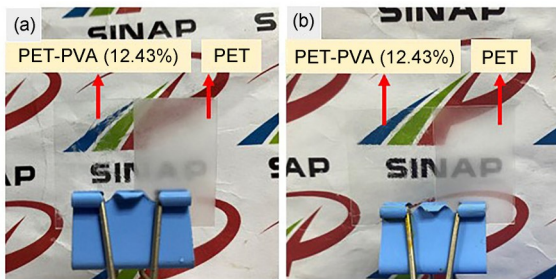


图6 原始PET薄膜与PET-PVA (12.43%)薄膜的防雾化性能测试:(a)高温高湿度;(b)低温冷冻

Fig.6 Anti-fogging performance tests on original PET film and PET-PVA (12.43%) film: (a) high temperature and high humidity condition; (b) low temperature freezing condition

## 2.4 防雾机理探究

### 2.4.1 接触角测试

基于对界面润湿状态的研究, Durán等<sup>[14]</sup>总结了3种防雾化机理:(1)基于亲水/超亲水性表面的扩散原理,即水蒸气凝结成的水滴通过在表面铺展成水膜降低光散射的影响;(2)基于超疏水性表面的滚动原理,即水蒸气凝结成的水滴从表面滚落;(3)基于渗透表面的扩散原理,即水蒸气凝结成的水滴渗透到功能化层内部并且铺展成水膜。

对原始PET以及PET-PVA薄膜进行接触角测试,结果如图7所示,表面粗糙度和羟基含量的相互作用导致接触角呈现出先增大再减小再增大的变化趋势。对比原始PET与低负载率样品的SEM图像,可以观察到随着负载率的增加,PVA在表面逐渐聚集并且形成很多小突起,致使薄膜表面粗糙度增大,此变化过程中粗糙度对接触角的影响大于羟基,因此,接触角在极低负载率下呈现出逐渐增大的变化趋势;随着负载率继续增加,羟基含量逐渐增大,当羟基对接触角的影响超过粗糙度时,样品接触角开始逐渐减小;当羟基含量过大时,羟基之间的氢键作用致使表面羟基的相对含量减少,因此接触角又开始逐渐增大<sup>[20]</sup>。

综合所得结果,以上测试的PET-PVA薄膜均未达到基于亲水性表面的扩散原理要求,即接触角低于 $40^\circ$ 。所有改性薄膜的接触角均小于 $82^\circ$ ,亦无法满足基于超疏水性表面的滚动原理要求。综上推测,PET-PVA薄膜的防雾化性能应来源于PVA交联网络的吸水性,进一步测试PET-PVA薄膜的饱和吸水率。

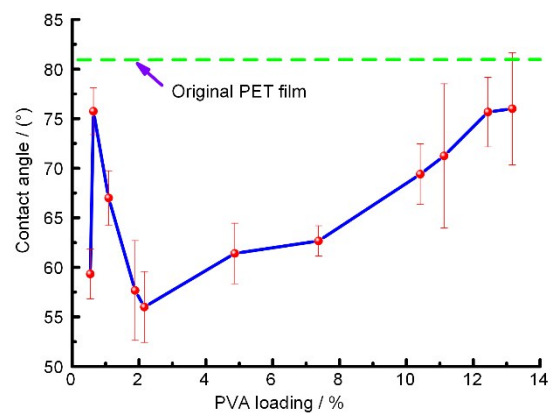


图7 不同负载率下PET-PVA薄膜的接触角  
Fig.7 Contact angles of PET-PVA films with different loading rates

### 2.4.2 饱和吸水性测试

图8是PET-PVA薄膜饱和吸水性测试的结果，随着PVA负载率增加，样品的饱和吸水率不断增大。当PVA负载率为12.43%时，样品的饱和吸水率为50%；当PVA负载率为19.95%时，样品的饱和吸水率达到88%。

由此可以得出结论：PVA负载的PET薄膜，其防雾化性能来源于PVA交联网络的吸水性（图9）。当水蒸气在改性薄膜表面凝结成水滴时，水滴可以被PVA吸附到交联网络内部，由于交联网络中含有大量的羟基，因此被吸附的水滴可以在交联PVA层中快速铺展成水膜，从而极大地降低了光散射对于材料透光率的影响，继而赋予材料优异的防雾化性能。

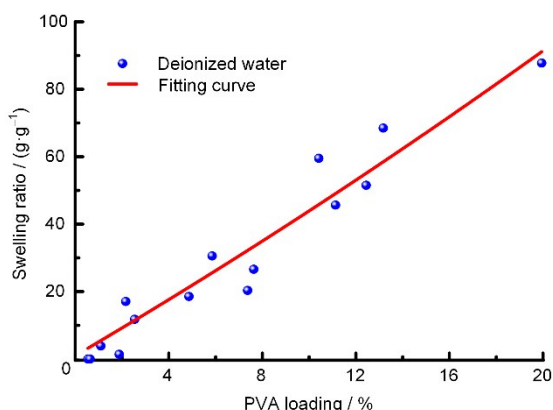


图8 不同负载率下PET-PVA薄膜的饱和吸水率  
Fig.8 Saturated water absorption of PET-PVA films with different loading rates

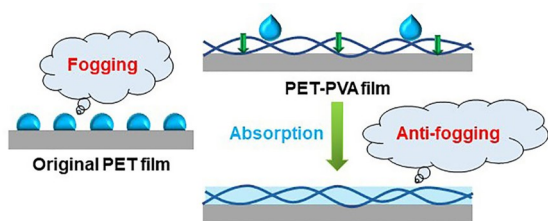


图9 防雾化原理图  
Fig.9 Schematic diagram of anti-fogging

## 3 总结

辐射交联法成功制备了交联PVA改性的PET薄膜。PVA分子在 $\gamma$ 射线辐照后形成交联网络并且固定在PET薄膜表面。从FTIR分析结果可知，PVA成功地负载到了PET薄膜表面。SEM以及接触角分析表明，粗糙度与羟基含量是影响接触角变化的重要因素。改性薄膜不仅保持了原始PET

薄膜良好的光学性能，其在高温高湿以及低温冷冻条件下均具有良好的防雾化性能。PVA负载的PET薄膜，其防雾化性能来源于PVA交联网络的吸水性，PVA负载率越高，改性薄膜饱和吸水率越大。

**作者贡献声明** 汪文睿完成了辐射交联法制备防雾型PET薄膜的实验，并测试改性薄膜的负载率、化学结构、透光率、防雾化性能、接触角和饱和吸水率，以及文章的初稿撰写工作；刘崎对实验以及文章撰写提供了指导；何伟荣对实验样品的辐照提供了技术支持；韩斐对样品表面形貌的表征作出了贡献；李吉豪对文章撰写提供了指导；李林繁提出了本文的研究思路和实验方案，并对文章进行过修改。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

## 参考文献

- 冯树铭. PET薄膜的性能及其改性[J]. 聚酯工业, 2009, 22(1): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8261.2009.01.004.  
FENG Shuming. Performance and modification of PET film[J]. Polyester Industry, 2009, 22(1): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8261.2009.01.004.
- Franco P, Incarnato L, De Marco I. Supercritical CO<sub>2</sub> impregnation of  $\alpha$ -tocopherol into PET/PP films for active packaging applications[J]. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2019, 34: 266-273. DOI: 10.1016/j.jcou.2019.06.012.
- Oh C S, Lee S M, Kim E H, *et al.* Electro-optical properties of index matched ITO-PET film for touch panel application[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2012, 568(1): 32-37. DOI: 10.1080/15421406.2012.708842.
- Pandiyaraj K N, Deshmukh R R, Mahendiran R, *et al.* Influence of operating parameters on surface properties of RF glow discharge oxygen plasma treated TiO<sub>2</sub>/PET film for biomedical application[J]. Materials Science & Engineering C, Materials for Biological Applications, 2014, 36: 309-319. DOI: 10.1016/j.msec.2013.12.018.
- Pon Kumar R, Wadgaonkar K, Mehta L, *et al.* Enhancement of mechanical and barrier properties of LLDPE composite film via PET fiber incorporation for agricultural application[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2019, 30(5): 1251-1258. DOI: 10.1002/pat.



- 4558.
- 6 Beysens D. The formation of dew[J]. *Atmospheric Research*, 1995, **39**(1/2/3): 215-237. DOI: 10.1016/0169-8095(95)00015-J.
- 7 Agam N, Berliner P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments—a review[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **65**(4): 572-590. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2005.09.004.
- 8 Pieters J G, Deltour J M, Debruyckere M J. Light transmission through condensation on glass and polyethylene[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **85**(1/2): 51-62. DOI: 10.1016/s0168-1923(96)02393-3.
- 9 Briscoe B J, Galvin K P. The effect of surface fog on the transmittance of light[J]. *Solar Energy*, 1991, **46**(4): 191-197.
- 10 Oguri K, Iwataka N, Tonegawa A, *et al.* Misting-free diamond surface created by sheet electron beam irradiation[J]. *Journal of Materials Research*, 2001, **16**(2): 553-557. DOI: 10.1557/JMR.2001.0079.
- 11 San-Juan M, Martín Ó, Mirones B J, *et al.* Assessment of efficiency of windscreen demisting systems in electrical vehicles by using IR thermography[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **104**: 479-485. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.05.093.
- 12 Bessell J R, Flemming E, Kunert W, *et al.* Maintenance of clear vision during laparoscopic surgery[J]. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 2009, **5**(5): 450-455. DOI: 10.3109/13645709609153708.
- 13 Park J T, Kim J H, Lee D. Excellent anti-fogging dye-sensitized solar cells based on superhydrophilic nanoparticle coatings[J]. *Nanoscale*, 2014, **6**(13): 7362-7368. DOI: 10.1039/c4nr00919c.
- 14 Durán I R, Laroche G. Water drop-surface interactions as the basis for the design of anti-fogging surfaces: theory, practice, and applications trends[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, **263**: 68-94. DOI: 10.1016/j.cis.2018.11.005.
- 15 姚程健, 邹尾容, 范追追, 等. UV 聚合制备 PSBMA 超亲水涂层及其防雾、自清洁性能表征[J]. *产业用纺织品*, 2021, **39**(8): 44-53. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2021.08.008.
- YAO Chengjian, ZOU Weirong, FAN Zhuizhui, *et al.* Preparation of PSBMA super-hydrophilic coating by UV polymerization and characterization of its anti-fog and self-cleaning performance[J]. *Technical Textiles*, 2021, **39**(8): 44-53. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2021.08.008.
- 16 王崧合. 超亲水表面的构筑及应用进展[J]. *石油化工*, 2022, **51**(4): 492-497. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2022.04.017.
- WANG Songhe. Progress in preparation and application of superhydrophilic surfaces[J]. *Petrochemical Technology*, 2022, **51**(4): 492-497. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2022.04.017.
- 17 Patel P, Choi C K, Meng D D. Superhydrophilic surfaces for antifogging and antifouling microfluidic devices[J]. *Journal of the Association for Laboratory Automation*, 2010, **15**(2): 114-119. DOI: 10.1016/j.jala.2009.10.012.
- 18 Nie M, Patel P, Sun K, *et al.* Superhydrophilic anti-fog polyester film by oxygen plasma treatment[C]//IEEE. The 4th IEEE international conference on nano/micro engineered and molecular systems. New York: IEEE, 2009: 1017-1020. DOI: 10.1109/NEMS.2009.5068746.
- 19 Mansoor B, Li S S, Chen W. Highly efficient antifogging/antimicrobial dual-functional chitosan based coating for optical devices[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, **296**: 119928. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119928.
- 20 Gu Y, Zhang B W, Fu Z A, *et al.* Poly(vinyl alcohol) modification of poly(vinylidene fluoride) microfiltration membranes for oil/water emulsion separation via an unconventional radiation method[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, **619**: 118792. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118792.