

# 废弃棉织物高阻氧性再生纤维素膜的制备及性能研究

唐亚丽<sup>1,2</sup>, 蒋宝强<sup>1</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>, 潘嘹<sup>1,2</sup>, 丘晓琳<sup>1,2</sup>

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 目的 为提高废弃棉织物的利用价值和利用率, 将回收的废弃棉织物溶解于 LiCl/DMAc 溶液中, 随后以水、体积分数为 50% 的乙醇水溶液、甲醇、乙醇、丙酮为凝固浴, 通过溶胶-凝胶法成功制备高阻氧性再生纤维素 (RC) 薄膜。**方法** 采用氧气透过测试仪、水蒸气透过测试仪、拉伸测试仪、红外光谱和热重对 RC 膜的结构和性能进行探究。**结果** 不同的凝固浴条件下制备出的 RC 膜均具有极高的氧气阻隔性和较高的拉伸强度。其中丙酮为凝固浴的条件下制备出的 RC 膜的氧气阻隔性能最佳, 其透氧系数可低至  $2.093 \times 10^{-17} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ , 远低于相同测试条件下的普通塑料薄膜透氧系数 2~4 个数量级。此外, 该薄膜还具有很高的力学性能, 拉伸强度可达 98 MPa, 远高于普通聚乙烯薄膜的拉伸强度。**结论** 该工作制备了一种具有高阻氧性和高强度的可降解 RC 膜, 这为废弃棉织物的回收和二次利用提供了一种新的途径。

**关键词:** 再生纤维素膜; 废弃棉织物; 凝固浴; 氧气阻隔性; 溶胶-凝胶

**中图分类号:** TB484; TS102.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3563(2022)23-0018-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.003

## Preparation and Performance of High Oxygen Barrier Regenerated Cellulose Film from Waste Cotton Fabric

TANG Ya-li<sup>1,2</sup>, JIANG Bao-qiang<sup>1</sup>, LU Li-xin<sup>1,2</sup>, PAN Liao<sup>1,2</sup>, QIU Xiao-lin<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advance Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare high oxygen barrier recycled cellulose (RC) films through sol-gel method by dissolving the recycled waste cotton fabrics in LiCl/DMAc solution with water, methanol, ethanol, 50% ethanol solution and acetone as coagulation baths, respectively, so as to improve the value and utilization of waste cotton fabrics. The structure and properties of RC films were investigated with oxygen permeation tester, water vapor transmission tester, tensile tester, infrared spectroscopy and thermogravimetry. The RC films prepared under different coagulation bath conditions all exhibited extremely high oxygen barrier and high tensile strength. Among them, the RC films prepared in acetone coagulation bath had the best oxygen barrier performance, with the oxygen permeability coefficient as low as  $2.093 \times 10^{-17} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ , which was 2-4 orders of magnitude lower than the oxygen permeability coefficient of ordinary plastic films under the same test conditions. In addition, the films also had high mechanical properties up to 98 MPa, which was much higher than that of ordinary polyethylene films. This work prepares a degradable RC film with high oxygen barrier and high strength, which provides a new way for recycling and secondary use of waste cotton fabrics.

**KEY WORDS:** regenerated cellulose film; waste cotton fabric; coagulation bath; oxygen barrier properties; sol-gel

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金 (1671909)

作者简介: 唐亚丽 (1982—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品包装与安全技术。

近年来, 随着人们生活质量的提高和快速时尚消费模式的转变, 服装产业进入快速时尚的商业模式以及大规模生产的时期<sup>[1]</sup>。随着服装产量的不断增加, 每年都会产生大量的废旧棉织物垃圾<sup>[2]</sup>, 这将带来巨大的环境和资源的压力<sup>[3]</sup>。根据调查和研究, 每年都会产生大量的纺织品废弃物, 除极少的部分会被回收并且再利用, 通常会被丢弃、掩埋以及焚烧处理, 这会引起环境污染问题<sup>[4-5]</sup>, 例如温室气体的排放、地下水的污染, 有害气体的排放<sup>[6]</sup>。此外, 国际回收局通过研究得出了一个结论: 当人们每使用 1 kg 废弃纺织产品时, 不仅可以使 CO<sub>2</sub> 少排放 3.6 kg 和节省 6 000 L 的水, 还可以使化肥和农药分别少使用 0.3 kg 和 0.2 kg<sup>[7]</sup>。废弃纺织品的有效回收与利用, 不仅可以减少废旧纺织品带来的污染, 还可以减少占用耕地、化肥以及农药的使用, 有利于环境保护, 因此, 废旧纺织品的回收与再利用受到了广泛的关注与研究。

目前, 废弃纺织物的回收再利用技术主要集中在物理法、化学法和热能法<sup>[8]</sup>。物理法主要采用机械切碎和拉伸的方式处理废旧纺织品, 已具有较为成熟的工艺和较低的设备要求。但物理法回收得到的再生纤维素产品质量普遍较差, 只能应用于汽车内饰、绝缘纺织品等附加值低的产品, 难以实现循环经济。热能法主要是将回收的废弃纺织物通过焚烧产生大量的热量, 应用于火力发电等方面, 实现能量的回收。热能法虽然能解决废弃棉织物存放问题以及能量的回收利用, 但是焚烧的方式容易产生有害气体和环境污染问题, 因此焚烧处理的方式引起了人们的反对。化学法主要是将纤维中的高分子材料转化为单体以及低聚物, 然后将其制备成新的化学纤维材料。由于化学方法实现了高聚物的循环利用, 人们对其关注度越来越高。Yousef 等<sup>[9]</sup>从纺织废料中回收棉花和聚酯纤维, 达到了很高的经济效益和 96% 的回收率。Huang 等<sup>[10]</sup>将从纺织废料中提取的 CNC 用于增强剂大豆分离蛋白膜。Zhou 等<sup>[11]</sup>将家庭废旧回收棉织物分别溶于 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液、NaOH/urea 溶液以及 LiCl/DMAc 溶液并制备出的纤维素薄膜强度可达 76 MPa。

棉纤维在纺织行业中占了很大的比例, 而且棉花中的纤维素含量超过了 90%<sup>[12]</sup>, 因此, 废弃棉织物可以作为一种非常理想的纤维素来料。当纤维素被溶解后经过不同的成型工艺可再生制成纺织纤维、薄膜、水/气凝胶、海绵、片材等各种类型的材料。其中薄膜类材料内部具有大量的氢键以及紧密的结晶结构, 赋予膜材料足以媲美塑料薄膜的强度、透明性、抗油、耐热、阻氧等性能, 有望在包装、医药、智能材料上得到重用<sup>[13]</sup>, 因此, 将废旧棉织物的纤维素回收再利用, 既赋予了废弃物新的价值, 又能减少废旧棉织物垃圾对环境的污染, 是一件对社会和环境积极影响的事情<sup>[3]</sup>。基于此, 文中尝试对废弃棉织物中的纤维素进行活化之后, 高速搅拌并溶解于 LiCl/DMAc 溶剂

中。待离心处理后, 基于溶胶-凝胶法制备出 RC 膜。随后研究不同凝固浴对 RC 膜的阻氧性和拉伸强度等性能的影响。同时, 采用傅里叶变换红外光谱( FTIR )、扫描电镜 ( SEM ) 等手段来表征 RC 膜的微观结构。

## 1 实验

### 1.1 原料与设备

主要材料: 废弃棉织物 ( WCF ) 来自家庭回收; 无水 LiCl, 分析纯, 麦克林生化科技有限公司; 无水甲醇 ( 99.7% )、丙酮、无水乙醇 ( 99.7% )、N,N-二甲基乙酰胺 ( DMAc ) 均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司; 去离子水, 实验室自制。

主要仪器: HS4 磁力搅拌器, 德国 IKA 公司; SHZ-D 循环水式真空泵, 上海贝伦仪器设备有限公司; KTHA-015TBS 恒温恒湿箱, 昆山博思通仪器有限公司; 蔡司 Sigma300 扫描电子显微镜(SEM), 日本日立公司; Nicols10 傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 德国 Bruker 公司; LRXPLUS 万能材料试验机, 美斯特工业系统有限公司; VAC-V2 氧气透过测试仪, W3/060 水蒸气透过测试仪, 济南兰光机电技术有限公司; Q500 热重仪, 美国 TA 仪器公司; WGT-S 透光率/雾度测试仪, 上海精科有限公司。

### 1.2 方法

RC 膜的制备: 将 WCF 的脱色处理参考薛菁雯等<sup>[14]</sup>的方法, 其中 84 消毒液按照质量比 1:1 与去离子水混合。将 3 g 处理后的 WCF 分别于去离子水、无水乙醇、DMAc 中搅拌浸渍各 1 h 以制备去离子水-乙醇-DMAc 活化纤维素。将活化后的 WCF 加入到 DMAc ( 100 g ) /LiCl ( 8 g ) 溶液中, 80 °C 搅拌 2 h 即可制得透明的纤维素溶液。经过 5 000 r/min 离心后, 取上清液流延在玻璃板上, 在室温下放置 2 h 形成凝胶, 随后将其放入凝固浴中 12 h 得到纤维素水凝胶, 然后使用去离子水将纤维素水凝胶反复清洗, 最后用磁钉固定凝胶的四角, 在 23 °C 恒温恒湿箱中干燥 24 h 后, 即可得到再生纤维素膜。由去离子水溶液、50% 乙醇水溶液、甲醇溶液、乙醇溶液、丙酮溶液作为凝固浴制备的再生纤维素薄膜分别命名为 RC1、RC2、RC3、RC4、RC5。

### 1.3 测试与表征

#### 1.3.1 扫描电子显微镜

利用扫描电子显微镜对 RC 膜微观形态进行观察。将试样裁切成长度为 2 mm、宽度为 2 mm 的 SEM 样品, 加速电压为 5 kV, 然后表面喷上一层薄薄的金。

#### 1.3.2 傅里叶变换红外

利用红外光谱表征了 RC 膜的价键结构。FT-IR

光谱扫描范围为 $400\sim4000\text{ cm}^{-1}$ ,以 $4\text{ cm}^{-1}$ 的分辨率,每批样品至少测3次。

### 1.3.3 XRD分析

晶型结构在X射线衍射仪上进行测试:扫描角度为 $10^\circ\sim50^\circ$ ,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$ ,步长为 $0.02^\circ$ ,结晶度指数( $C_{rl}$ )采用Segal公式进行计算:

$$C_{rl} = \frac{I_{(200)} - I_{am}}{I_{(200)}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_{rl}$ 为结晶度指数,%; $I_{(200)}$ 为纤维素(200)晶面强度; $I_{am}$ 纤维素非晶区强度。

### 1.3.4 热重分析

使用热重分析仪Q500对WCF和RC膜进行测试。试样裁切成 $2\text{ mm}\times2\text{ mm}$ 的小正方形。WCF和RC膜样品在 $\text{N}_2$ 气氛下以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,从 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 升温到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 1.3.5 力学性能测定

按照GB/T 13022—1991测试标准,使用万能材料试验机测量样品的力学性能。制备的样品裁切为宽 $15\text{ mm}$ 、长 $200\text{ mm}$ ,测试速率为 $50\text{ mm}/\text{min}$ 。

### 1.3.6 阻隔性测定

氧气阻隔性是在气体渗透仪上进行测试。在样品经过干燥器中处理 $12\text{ h}$ 后,切割成直径为10厘米的圆形纸样进行测试。RC膜的试验条件:温度为 $23\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $50\%$ 。采用水蒸气透过测试仪上测试样品的水蒸气阻隔性。在样品经过干燥器中平衡处理 $12\text{ h}$

后,使用专用取样器将其切割成一定大小的圆形试样进行测试。RC膜的试验条件:温度为 $38\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $90\%$ 。

### 1.3.7 光学性能测试

透光率和雾度是在透光率/雾度仪上进行测试。试样裁切成宽为 $15\text{ mm}$ 、长为 $50\text{ mm}$ ,以空气为对照组测量 $800\text{ nm}$ 透光率,每组测3个平行样。

## 2 结果与分析

### 2.1 SEM分析

RC膜的表面形貌和断面见图1,所有RC膜样品的表面均非常均匀、平整且致密,未出现明显的孔洞和缺陷。这可能是由于RC膜经过 $2\text{ h}$ 的凝胶化过程,其表面的溶剂部分挥发已经形成了皮层,因此,凝固浴对RC膜表面影响不大。由断面图可以看出,RC1内部存在一些较为明显的缺陷,RC2、RC3和RC4横截面有较小的孔洞存在,RC5的断面则更为密实和完整。这可能是因为水、甲醇和乙醇与纤维素分子相互缔合形成氢键的强度依次减弱,丙酮则不与纤维素形成氢键。不同的凝固浴和溶剂之间不同交换速率可能导致其内部的微观差异<sup>[15]</sup>。当凝固浴为去离子水时,水分子进入膜内的速度快于甲醇、乙醇和丙酮等有机溶剂,纤维素分子链取向还不完全,待其固化后容易形成内部的缺陷<sup>[16]</sup>,因此,宏观上表现为阻氧化能以及力学性能的差异。

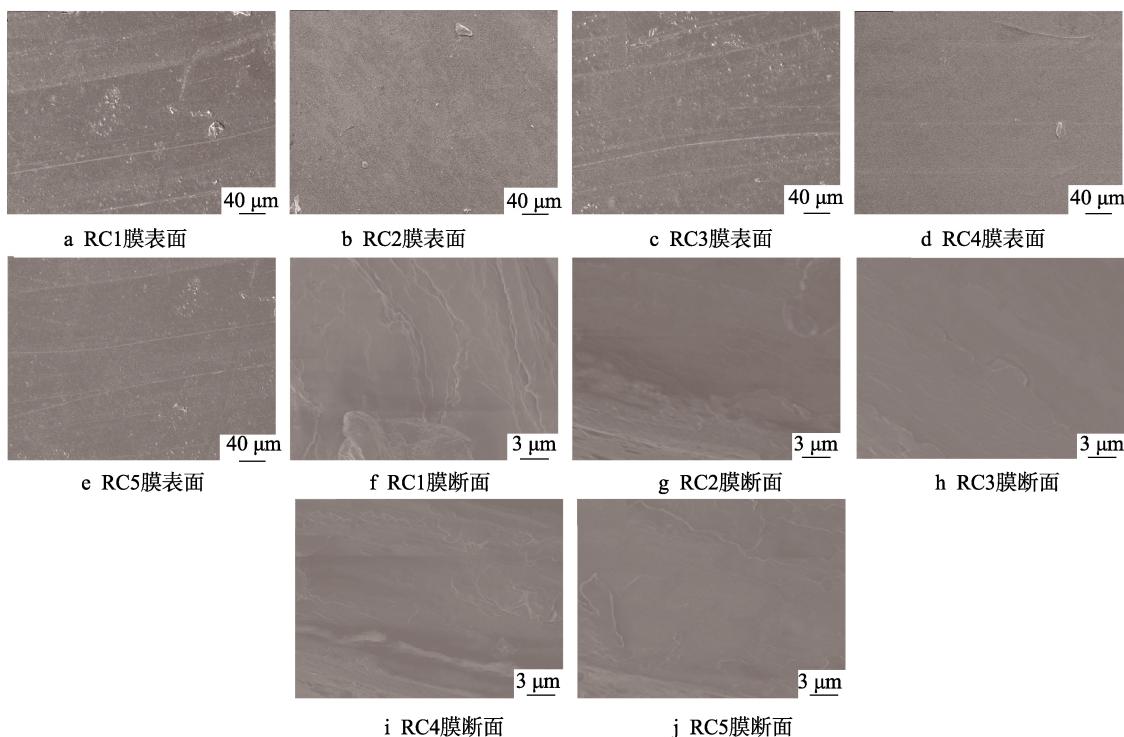


图1 RC膜的SEM

Fig.1 SEM of RC film

## 2.2 XRD 分析

废弃棉织物原料与 RC 膜的结晶性见图 2 和表 1。由图 2 可知, 废弃棉织物经 LiCl/DMAc 溶剂溶解且再生后, 纤维素 I 型结构晶面完全消失, 这说明废弃棉织物已经充分溶解且再生的过程中纤维素分子发生重排, 纤维素 I 型结构转变为纤维素 II 型结构<sup>[17]</sup>。由表 1 可知, 废弃棉织物原料和 RC 膜的结晶度分别为 64.36% 和 32.61%, 结晶度大幅度下降。这可能是由于溶解和再生的过程中, 结晶区遭到破坏、无定形区增加导致的<sup>[18]</sup>。

## 2.3 傅里叶红外光谱分析

为了研究废弃棉织物纤维素再生前后的结构变化, 采集了 FT-IR 光谱。由图 3 可以看出所有的样品显示出的特征峰基本相同且未出现新的吸收峰, 这说明废弃棉织物的溶解和再生仅仅是物理过程<sup>[11]</sup>。与原料相比, 制备的 RC 膜的所有吸收峰均有所增强。其中  $3500\text{~}3000\text{ cm}^{-1}$  处的-OH 伸缩振动峰明显变宽, 这说明了 RC 膜主要是由纤维素分子内和分子间的强氢键构建而成的<sup>[19]</sup>。 $2900\text{ cm}^{-1}$  和  $1370\text{ cm}^{-1}$  和  $1156\text{ cm}^{-1}$  处则分别为-CH 伸缩振动峰、-CH 弯曲振动峰和 C—O—C 不对称振动峰<sup>[20]</sup>。 $1028$ 、 $897\text{ cm}^{-1}$  处吸收峰分别由 C<sub>6</sub>—O—H 和 β-糖苷键产生, 其中  $897\text{ cm}^{-1}$  处的峰用来代表纤维素材料的非结晶区<sup>[21]</sup>,  $1653\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰则为亲水性纤维素所吸附的水分所致<sup>[22]</sup>。

## 2.4 TG 分析

废弃棉织物和 RC 膜的热重分析结果见图 4, 常温至  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  的已经出现第 1 阶段失重过程。这可能是由于样品中残留的水分的蒸发。废旧棉织物和 RC 在第 2 阶段质量损失出现差异, 初始分解温度 ( $335.6\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow280.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和分解温度峰值 ( $362.6\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow325.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 均有所降低。这可能是由于废旧棉织物经溶解和再生过程导致结晶度的降低, 从而导致 RC 膜耐热性下降。另外, 废旧棉织物在分解后的剩余质量仅有 10%, 温度继续提高只轻微降低, 而 RC 膜在快速分解后剩余质量为 40%, 并且随着温度提高进一步降低最后稳定在 30% 左右。这可能是

由于溶解和再生过程大量的纤维素 I 型结构转变为更稳定的纤维素 II 型结构, 因此 RC 膜的剩余质量较高<sup>[23]</sup>。

## 2.5 RC 膜的力学性能分析

以废弃棉织物制备的 RC 薄膜的力学性能见图 5, 5 种薄膜的强度远高于常见的塑料薄膜如 PE 的强度 (10 MPa), 而断裂伸长率均在 25% 左右。多羟基的废旧棉织物纤维素成膜时, 纤维素分子间会通过羟基产生大量的氢键<sup>[24]</sup>。强氢键作用会使膜形成致密的纤维素网络结构从而使 RC 膜有较高的强度, 同时这也会一定程度上限制纤维素分子的滑移和转动造成 RC 膜的断裂伸长率较低。此外, 不同的凝固浴对薄膜的抗拉强度具有一定的影响。其中丙酮为凝固浴时制备的 RC5 的强度可达 98 MPa。这可能是由于经过 2 h 的凝胶, 纤维素溶液由于溶剂的挥发表面已经形成皮层。水、体积分数为 50% 的乙醇水溶液作为凝固浴时与溶剂的相互扩散过程较快, 纤维素的析出速率较快, 容易出现缺陷结构导致了拉伸强度略有降低<sup>[25]</sup>; 当以甲醇、乙醇和丙酮等有机溶剂为凝固浴时, 再生的过程中的双扩散的过程显著减慢, 这使膜的结构更加致密, 从而提高了膜的拉伸强度。

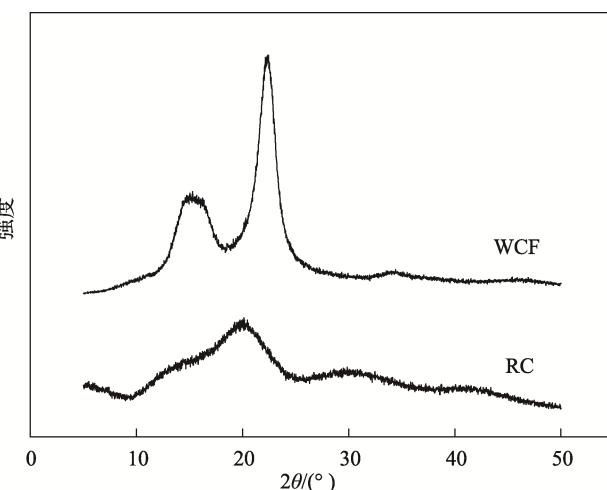


图 2 WCF 和 RC 膜的 XRD 图  
Fig.2 XRD plots of WCF and RC film

表 1 WCF 和 RCs 的特征峰位置及结晶度指数  
Tab.1 Peak positions and crystallinity of WCF and RC

膜	特征峰位置 $2\theta/(^{\circ})$					结晶度指数/%
	(110)	(110)	(200)/(020)	(004)	无定形区	
WCF	15.03	16.36	22.31	34.14	18.37	64.36
RC	12.21	20.12	20.12	—	15.53	32.61

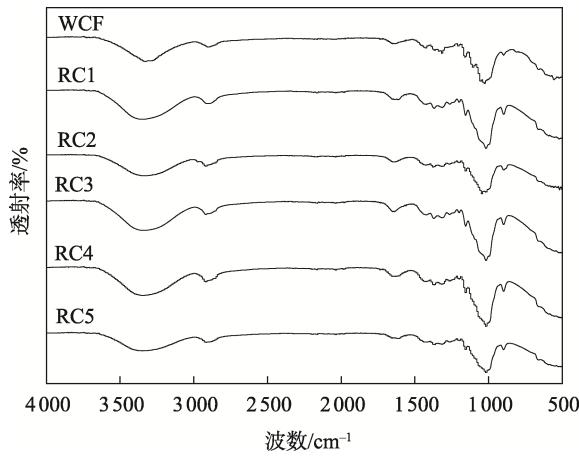


图3 WCF 和 RC 膜的 FT-IR 图  
Fig.3 FT-IR plots of WCF and RC film

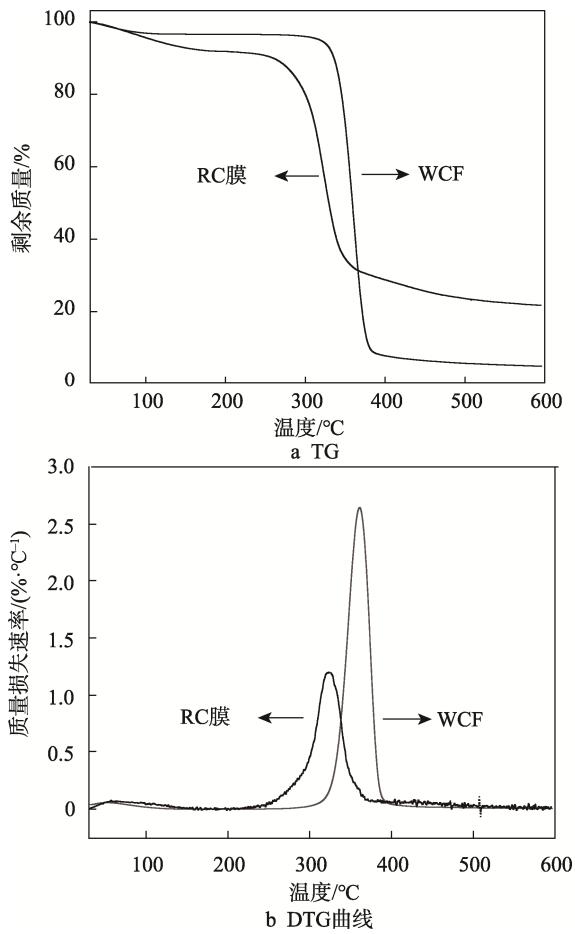


图4 WCF 和 RC 膜的热稳定性  
Fig.4 Thermal stability of WCF and RC film

## 2.6 RC 膜的氧气阻隔性能分析

如图6可以看出,以废弃棉织物制备的5种薄膜均具有优异的氧气阻隔性,这与高阻氧EVOH复合薄膜( $1.926 \times 10^{-17} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ )相当。凝固

浴种类对薄膜的阻隔性能有较为重要的影响,其中丙酮为凝固浴时,氧气透过系数和水蒸气透过系数可低至 $2.0935 \times 10^{-17} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $5.454 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。以水为凝固浴时,较快的溶剂交换速率可能会使未充分凝胶的内部的纤维素溶液较快析出并出现明显的缺陷结构以及孔洞,氧气和水蒸气对缺陷较为敏感,造成阻氧性和阻湿性能下降。结合图1,以水、体积分数为50%的乙醇水溶液、甲醇、乙醇和丙酮为凝固浴时,薄膜截面结构越来越致密有序,膜内的孔洞缺陷和自由体积越来越少,因此氧气和水蒸气阻隔性能依次升高<sup>[26]</sup>。

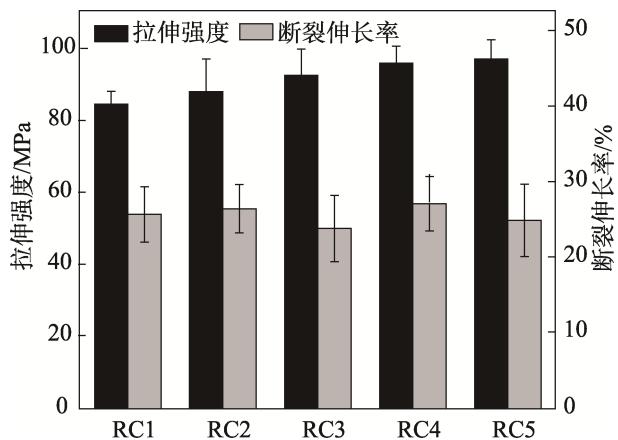


图5 不同凝固浴 RC 膜的力学性能  
Fig.5 Mechanical properties of RC film with different solidification baths

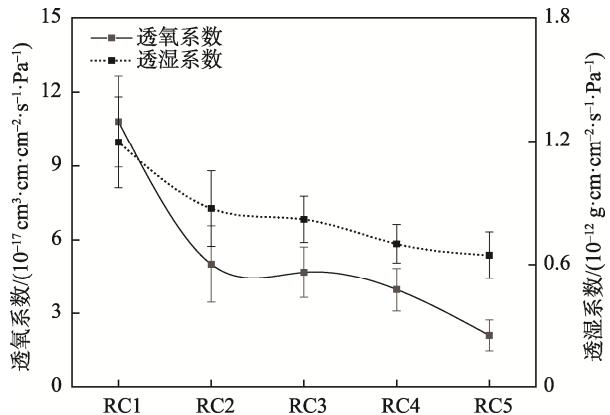


图6 不同凝固浴 RC 膜的阻隔性能  
Fig.6 Barrier properties of RC film with different solidification baths

## 2.7 RC 膜光学性能分析

如图7所示,以废弃棉织物制备的5种薄膜均具有优异的光学性能。其中丙酮为凝固浴时制备的RC5膜的透光率最高可达92.4%。这可能是由于RC膜材料致密以及较少的孔隙,光线通过薄膜时的散射低、透光率较高。不同的凝固浴制备的RC膜均具有较高的透光率及较低的雾度,完全可以满足工业要求。

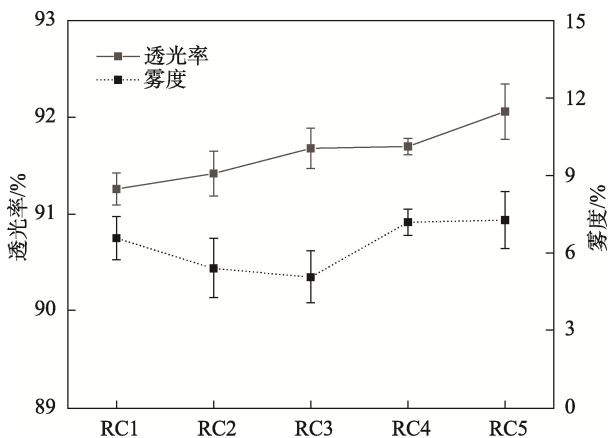


图7 不同凝固浴 RC 膜的光学性能  
Fig.7 Optical properties of RC film with different solidification baths

### 3 结语

文中以废旧棉织布料为原料并基于溶胶-凝胶法成功制备出了再生纤维素薄膜。深入研究了凝固时, RC 浴种类对再生纤维素薄膜的结构和性能的影响。由 SEM 可知, 以水为凝固浴膜内部具的孔洞与缺陷较多。以丙酮为凝固浴时, RC 膜内部较为致密。FT-IR 和 XRD 结果表明纤维素溶解再生过程发生了氢键和晶型变化, LiCl/DMAc 溶剂是纤维素的非衍生化溶剂。

不同的凝固浴对 RC 膜的力学性能、氧气阻隔性等具有较大的影响。以丙酮为凝固浴时, RC 膜的透光率可达 92.4%, 拉伸强度可达 98 MPa 和断裂伸长率为 24.8%, 具有较好的综合性能。另外, RC 膜氧气阻隔性能极佳, 其透氧系数可低至  $2.093 \times 10^{-17} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。

文中研究使用废弃棉织物成功制备出了高性能 RC 膜, 实现了棉纤维的高价值化再利用。另外, RC 膜的拉伸强度、氧气阻隔性和热稳定性均高于聚乙烯 (20.1 MPa)、聚丙烯 (30.3 MPa) 等普通塑料薄膜材料。该薄膜未来在可降解包装、化工以及膜材料等领域有着较好的应用潜力。

### 参考文献:

- [1] NAVONE L, MOFFITT K, HANSEN K A, et al. Closing the Textile Loop: Enzymatic Fibre Separation and Recycling of Wool/Polyester Fabric Blends[J]. Waste Management, 2020, 102: 149-160.
- [2] DAMAYANTI D, WULANDARI L A, BAGASKORO A, et al. Possibility Routes for Textile Recycling Technology[J]. Polymers, 2021, 13(21): 3834.
- [3] FRANCO M A. Circular Economy at the Micro Level: A Dynamic View of Incumbents' Struggles and Challenges in the Textile Industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 833-845.
- [4] LEAL FILHO W, . A Review of the Socio-Economic Advantages of Textile Recycling[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 218: 10-20.
- [5] SHIRVANIMOGHADDAM K, et al. Death by Waste: Fashion and Textile Circular Economy Case[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137317.
- [6] DISSANAYAKE D G K. An Environmentally Friendly Sound Insulation Material from Post-Industrial Textile Waste and Natural Rubber[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101606.
- [7] VATS S, RISSANEN M. Parameters Affecting the Up-cycling of Waste Cotton and PES/CO Textiles[J]. Recycling, 2016, 1(1): 166-177.
- [8] 史晟, 戴晋明, 牛梅, 等. 废旧纺织品的再利用[J]. 纺织学报, 2011, 32(11): 147-152.
- [9] SHI Sheng, DAI Jin-ming, NIU Mei, et al. Renewability of Waste Textile[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(11): 147-152.
- [10] YOUSEF S, . Sustainable Green Technology for Recovery of Cotton Fibers and Polyester from Textile Waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 120078.
- [11] HUANG Shu-ting, TAO Ran, ISMAIL A, et al. Cellulose Nanocrystals Derived from Textile Waste through Acid Hydrolysis and Oxidation as Reinforcing Agent of Soy Protein Film[J]. Polymers, 2020, 12(4): 958.
- [12] ZHOU Chu-fan, WANG Yi-xiang. Recycling of Waste Cotton Fabrics into Regenerated Cellulose Films through Three Solvent Systems: A Comparison Study[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(48): 51255.
- [13] MEDRONHO B, et al. Brief Overview on Cellulose Dissolution/Regeneration Interactions and Mechanisms[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 222: 502-508.
- [14] CAO Jing, WEI Wei, GOU Guang-jun, et al. Cellulose Films from the Aqueous DMSO/TBAH-System[J]. Cellulose, 2018, 25(3): 1975-1986.
- [15] 薛菁雯, 王婕, 周绮雯, 等. 废旧涤棉再生纤维素膜的制备及其结构与性能研究[J]. 合成纤维, 2021, 50(9): 20-25.
- [16] XUE Jing-wen, WANG Jie, ZHOU Qi-wen, et al. Study on the Preparation, Structure and Characterization of Regenerated Cellulose Films Derived from Waste Polyester-Cotton Blended Textile[J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(9): 20-25.

- [15] LI Ran, et al. Novel Regenerated Cellulose Films Prepared by Coagulating with Water: Structure and Properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 95-100.
- [16] MOHAMED M A, SALLEH W N W, JAAFAR J, et al. Feasibility of Recycled Newspaper as Cellulose Source for Regenerated Cellulose Membrane Fabrication[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(43): 42684.
- [17] CEBI N, et al. An Evaluation of Fourier Transforms Infrared Spectroscopy Method for the Classification and Discrimination of Bovine, Porcine and Fish Gelatins[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 1109-1115.
- [18] 王漸洁, 李怡, 李丹, 等. 非衍生化溶剂体系制备再生纤维素膜及其性能研究[J]. 中国造纸学报, 2019, 34(2): 20-24.  
WANG Si-jie, LI Yi, LI Dan, et al. Preparation of Cellulose Membrane in Non-Derivative Solvents and Its Properties[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2019, 34(2): 20-24.
- [19] TAN Xiao-yan, et al. Effect of Anti-Solvents on the Characteristics of Regenerated Cellulose from 1-Ethyl-3-Methylimidazolium Acetate Ionic Liquid[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 314-320.
- [20] 闫然, 谢开彬, 刘蒙蒙, 等. 纤维素纳米晶结构色薄膜的制备及其性能研究[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 186-194.  
YAN Ran, XIE Kai-bin, LIU Meng-meng, et al. Preparation and Properties of Cellulose Nanocrystalline Structural Color Film[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(15): 186-194.
- [21] GEA S, ANDITA D, RAHAYU S, et al. Preliminary Study on the Fabrication of Cellulose Nanocomposite Film from Oil Palm Empty Fruit Bunches Partially Solved into LiCl/Dmac with the Variation of Dissolution Time[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1116: 042012.
- [22] 张静贤, 陆俊, 陈杰, 等. APTES 改性微晶纤维素对淀粉复合薄膜性能影响[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 95-102.  
ZHANG Jing-xian, LU Jun, CHEN Jie, et al. Effects of APTES Modified Microcrystalline Cellulose on Properties of Starch Composite Film[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 95-102.
- [23] JIANG Feng, et al. Chemically and Mechanically Isolated Nanocellulose and Their Self-Assembled Structures[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 95(1): 32-40.
- [24] 鲍文毅, 徐晨, 宋飞, 等. 纤维素/壳聚糖共混透明膜的制备及阻隔抗菌性能研究[J]. 高分子学报, 2015(1): 49-56.  
BAO Wen-yi, XU Chen, SONG Fei, et al. Preparation and Properties of Cellulose/Chitosan Transparent Films[J]. Acta Polymerica Sinica, 2015(1): 49-56.
- [25] 哈丽丹·买买提, 库尔班江·肉孜, 阿不利米提, 等. 纤维素 LiCl/DMAc 溶液法制备纤维素薄膜[J]. 纺织学报, 2011, 32(4): 33-38.  
HALIDAN Maimaiti, KUERBANJIANG Rouzi, ABULI Miti, et al. Preparation of Cellulosic Film by LiCl/DMAc Process[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(4): 33-38.
- [26] 周可可, 唐亚丽, 卢立新, 等. 氧化纳米纤维素增强再生纤维素全纤维素复合薄膜的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1657-1666.  
ZHOU Ke-ke, TANG Ya-li, LU Li-xin, et al. Preparation and Properties of All-Cellulose Composite Films with Oxidized Cellulose Nanofibrils Reinforcing Regenerated Cellulose[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1657-1666.

责任编辑: 曾钰婵