



吴峤,庄虎,肖静淑,等. 烟用醋酸纤维素基超轻气凝胶的构筑及表征[J]. 轻工学报,2026,41(2):126-132.
WU Q,ZHUANG H,XIAO J S,et al. Fabrication and characterization of cigarette butt-derived cellulose acetate-based ultralight aerogels for tobacco applications[J]. Journal of Light Industry,2026,41(2):126-132.
DOI:10.12187/2026.02.012

烟用醋酸纤维素基超轻气凝胶的构筑及表征

吴峤¹,庄虎¹,肖静淑¹,周彬²,郝欣¹,杨俊鹏¹,王昊¹,张敦铁¹

1. 湖北中烟工业有限责任公司 新型烟草制品工程中心,湖北 武汉 430072;
2. 湖北工业大学 生命科学与健康工程学院,湖北 武汉 430068

摘要:【目的】实现烟蒂中醋酸纤维素的资源化利用,将其转化为高附加值材料,并探究其结构与性能特征。【方法】采用溶剂清洗法制备回收醋酸纤维素(R-CA),结合静电纺丝技术将R-CA转化为纳米纤维,并采用冷冻干燥成型工艺进一步加工成气凝胶。采用傅里叶变换红外光谱仪、热重分析仪和差示扫描量热仪等对R-CA纳米纤维膜及其气凝胶的结构与性能进行分析。【结果】R-CA与商用醋酸纤维素具有相似的化学结构,最大热降解温度相近,分别为355.0℃和357.5℃,说明纯化过程不影响R-CA的分子结构与热力学性能。随着R-CA纺丝浓度的增加,纤维形貌由串珠结构转变为均匀光滑的纳米纤维,纺丝浓度为17%时所得纤维直径分布最均匀,平均直径为336.8nm。基于此纺丝浓度制备的纳米纤维经分散、均质化、冷冻干燥后,成功构筑三维网络结构气凝胶,其表观密度为8.59~11.55mg/cm³,孔隙率高于99%,表现出极低密度和高孔隙特性。【结论】本研究可有效回收R-CA并制备高性能气凝胶,为烟蒂资源化利用提供参考。

关键词:烟蒂;醋酸纤维素;静电纺丝;纳米纤维膜;气凝胶

中图分类号:TS49 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)02-0126-07

0 引言

卷烟通常由滤嘴、烟草和卷烟包装等组成,其中约97%的滤嘴是由微纤维束醋酸纤维素制成的^[1]。醋酸纤维素是第二大再生纤维素,具有透明度高、韧性好、热稳定性佳、易成型加工等特点。除卷烟滤嘴外,醋酸纤维素也常被用于制造纺织品和医疗卫生材料等。中国是世界上最大的卷烟生产国和消费国,对醋酸纤维素的年消费量可达 1.6×10^5 t,国内供应不足,需要大量进口^[2]。卷烟吸食后

会产生大量的烟蒂,目前对于这些烟蒂的处理大多采取焚烧或填埋的方式,未能充分挖掘醋酸纤维素的潜在应用价值。

以醋酸纤维素回收再利用为主,开展烟蒂资源化利用,对促进资源高效循环使用具有重要意义。已有文献^[3-5]报道了回收卷烟滤嘴中醋酸纤维素的方法,并将其用于废水处理、气体吸附和油水分离等。然而,这些方法多存在步骤复杂、有机溶剂用量大、能耗较高等问题,成本居高不下。

气凝胶是一种具有低密度、高比表面积和高孔

收稿日期:2024-09-25;修回日期:2024-12-16;出版日期:2026-04-15

基金项目:湖北省自然科学基金面上项目(2022CFB463)

作者简介:吴峤(1991—),男,湖北省红安市人,湖北中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为烟用材料、烟草化学等。
E-mail:1799089471@qq.com

通信作者:张敦铁(1975—),男,湖南省溆浦市人,湖北中烟工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为烟用材料、烟草化学等。
E-mail:17844628053@163.com

隙度的三维多孔网络材料。目前,气凝胶通常采用溶胶-凝胶工艺与特定干燥工艺相结合的方法制备,在污水处理、保温隔热、吸附分离和生物医学等领域应用广泛^[6]。纤维素基气凝胶因具有原料来源广泛、环境友好且可再生等优点,已成为当前研究的热点。但由于纤维素的高结晶性及强氢键作用,其溶解性较差。因此,纤维素基气凝胶的制备通常需要溶剂交换与回收等步骤,过程较为复杂^[7]。

基于此,本研究拟以烟蒂为原料,首先通过一种简单、快速、低成本的方法回收醋酸纤维素,考查回收工艺对醋酸纤维素结构和理化性能的影响。随后,选择合适的溶剂体系,利用静电纺丝技术制得醋酸纤维素纳米纤维,优化纺丝浓度。最后,采用纤维冷冻干燥成型工艺制备具有低密度和高孔隙度的醋酸纤维素纳米纤维气凝胶(Cellulose Acetate Nanofiber Aerogel, CANA),以期为烟蒂中醋酸纤维素的回收及功能材料化提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

烟蒂,湖北中烟工业有限责任公司收集。商用醋酸纤维素(C-CA,黏度为300~500 mPa·s)、无水乙醇(纯度≥99.7%)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF,纯度≥99.5%)和丙酮(纯度≥99.5%),国药集团化学试剂有限公司。所有化学试剂均为分析纯,使用前未经进一步纯化。

1.2 主要仪器与设备

UV-2600型紫外-可见(UV-Vis)分光光度计,日本岛津公司; iS10型傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪,美国赛默飞公司; TGA/DSC 3+型热重(TG)分析仪,瑞士梅特勒托利多公司; DSC 214型差示扫描量热(DSC)仪,德国耐驰公司; JSM-6390LV型扫描电子显微镜(SEM),日本电子公司; T18 digital Ultra-Turrax型高速剪切机,德国艾卡公司; FD-1A-50型真空冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司; UPT-I-5型超纯水机,成都优普生物科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 醋酸纤维素(R-CA)回收 根据化合物溶解

度随极性不同而变的特性,设计一种简单、经济的回收方案,去除燃烧过程中吸附在卷烟滤嘴上的多环芳烃、碳氧化物和氮氧化物等化合物,以获得高纯度的醋酸纤维素。首先,去除烟蒂中未燃烧的烟草和灰烬,将所得卷烟滤嘴外层纸剥离后,置于50℃的超纯水中搅拌洗涤1h。随后,用低温超纯水冲洗3次,以舒展醋酸纤维素纤维;将其用无水乙醇洗涤2次(每1.5g卷烟滤嘴大约需要200mL溶剂),每次15min;通过减压蒸馏回收乙醇溶剂。最后,置于60℃烘箱中干燥1h,即到R-CA。

1.3.2 醋酸纤维素纳米纤维膜制备 纺丝液配制:称取一定量的R-CA溶于DMF/丙酮($V(\text{DMF}) : V(\text{丙酮}) = 1 : 1$)混合溶液中,持续搅拌6h至完全溶解,制得R-CA质量分数分别为10%、13%、15%、17%和20%的纺丝液,静置5h后用于静电纺丝。

醋酸纤维素纳米纤维膜的制备:将纺丝液注入带有22G针头的注射器中,并将其固定在注射泵上,针头连接高压电源正极,接收基底与注射泵接地。纺丝液从注射器中喷出,在电场作用下,沉积到铝箔覆盖的接收基底上,即为醋酸纤维素纳米纤维膜,将其置于80℃烘箱中24h,以去除纤维中残留的有机溶剂。静电纺丝参数设置如下:推进速率为1mL/h,纺丝电压为15kV,针头与接收器之间的距离为15cm。

1.3.3 CANA制备 将制备的醋酸纤维素纳米纤维膜裁剪为约1cm×1cm的碎片。分别称取0.20g、0.25g、0.30g的醋酸纤维素纳米纤维膜碎片分散在30mL超纯水中,使用高速剪切机在10000r/min速度下均质分散15min,以获得均匀的纳米纤维分散液。将分散液置于-20℃冰箱中预冻12h后,移至冷冻干燥机中冷冻干燥48h,制得CANA。

1.3.4 R-CA结构与性能表征 1)UV-Vis光谱:将C-CA、R-CA和未洗涤卷烟滤嘴(U-CA)分别溶解在DMF/丙酮(体积比1:1)混合溶液中得到质量分数为0.5%的不同醋酸纤维素溶液,拍照记录不同样品的状态,并收集不同样品在200~450nm范围内的UV-Vis光谱。

2)FTIR光谱:利用FTIR光谱仪对C-CA和R-

CA 进行官能团分析。采用衰减全反射法(ATR)采集 500~4000 cm^{-1} 范围内的 FTIR 光谱。

3) TG 分析:称取约 3 mg 的 C-CA 和 R-CA,置于 N_2 气氛中,以 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率从室温升高至 600 $^\circ\text{C}$ 。TG 曲线和微商热重(DTG)曲线绘制方法为:横坐标为温度($\theta/^\circ\text{C}$),TG 曲线纵坐标为样品质量变化率($w/\%$),DTG 曲线纵坐标为质量变化率对温度的微商($(dw/d\theta)/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$)。

4) DSC 分析:将 C-CA 和 R-CA 置于 N_2 气氛中,以 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率从环境温度升高至 250 $^\circ\text{C}$,记录该非等温结晶过程的 DSC 曲线,测定 C-CA 和 R-CA 的相转变温度。

1.3.5 醋酸纤维素纳米纤维膜形貌表征 将约 1 $\text{cm} \times 1 \text{ cm}$ 的醋酸纤维素纳米纤维膜样品固定于双面碳导电胶带上,经镀金处理后,采用 SEM 观察醋酸纤维素纳米纤维膜的表面形貌。

1.3.6 CANA 结构表征 1) 表观密度。使用分析天平测量气凝胶的质量,用直尺测量气凝胶的直径和高度,利用如下公式计算气凝胶的表观密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

式中, m 和 v 分别为气凝胶的质量(g)和体积(cm^3)。

2) 孔隙率。利用气凝胶的表观密度计算其孔隙率($P/\%$),计算公式如下:

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{CA}}}\right) \times 100\%$$

式中, ρ_{CA} 为醋酸纤维素的密度,取值为 1.3 g/cm^3 。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,统计结果以(平均值 \pm 标准差)表示。使用 Image J 软件测量纤维直径,采用 Excel 和 Origin 2024b 软件进行数据分析,利用 GraphPad Prism 8 软件进行绘图。

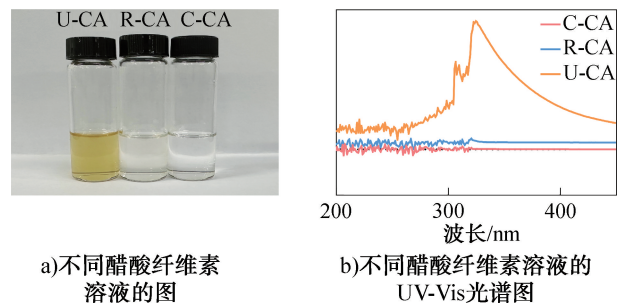
2 结果与讨论

2.1 R-CA 的提取与物性分析

2.1.1 UV-Vis 光谱分析 不同醋酸纤维素溶液的宏观图和 UV-Vis 光谱图如图 1 所示。由图 1 可知,U-CA 溶液呈淡黄色,可能是源于卷烟燃烧过程中产生的多环芳烃和芳香胺等共轭有机物^[8]。3 种醋

酸纤维素溶液存在共有但强度不同的特征波段。C-CA 和 R-CA 的 UV-Vis 光谱曲线非常相似,而 U-CA 的吸收强度较高,这表明洗涤处理可以有效去除大多数杂质。因此,本文设计的清洗方案可有效去除燃烧过程中吸附在卷烟滤嘴上的有机物,获得纯度较高的醋酸纤维素。

2.1.2 FTIR 光谱分析 不同醋酸纤维素的 FTIR 图如图 2 所示。由图 2 可知,3500~3000 cm^{-1} 和 3000~2750 cm^{-1} 之间的宽吸收峰分别是由 O—H 的伸缩振动和— CH_3/CH_2 基团中 C—H 的伸缩振动引起的^[3]。醋酸纤维素的特征基团——羰基的吸收峰显著且特征性强,出现在 1732 cm^{-1} 处^[9-10]。1367 cm^{-1} 处的特征吸收峰对应于— CH_3 基团中 C—H 的弯曲振动^[11];在 1216 cm^{-1} 处的吸收峰与乙酰基的 C—O 键伸缩振动有关;1100 cm^{-1} 处的吸收峰对应于酯基 C—O—C 的非对称伸缩振动;1030 cm^{-1} 处的吸收峰对应于纤维素分子中 C—O 键的振动^[12]。所有样品都存在相似的特征吸收峰,证明纯化方法未影响醋酸纤维素的分子结构。



a)不同醋酸纤维素溶液的图 b)不同醋酸纤维素溶液的 UV-Vis 光谱图

图 1 不同醋酸纤维素溶液的宏观图和 UV-Vis 光谱图

Fig. 1 Macrographs and UV-Vis spectra of different cellulose acetate solutions

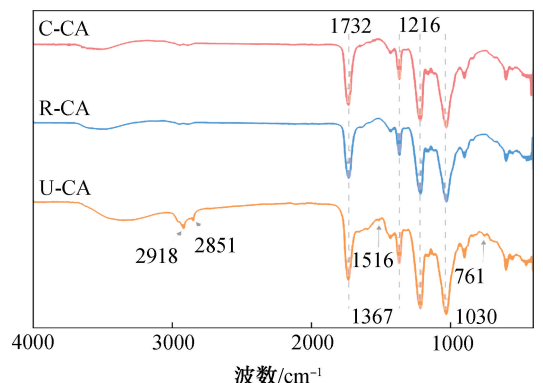


图 2 不同醋酸纤维素的 FTIR 图

Fig. 2 FTIR spectra of different cellulose acetates

U-CA 的光谱除显示与醋酸纤维素相关的特征吸收峰外,还出现与 C-CA 和 R-CA 不同的特征峰。 2926 cm^{-1} 和 2864 cm^{-1} 处的特征峰分别对应芳香族和脂肪族的 C—H 伸缩振动^[13]。另外, 1516 cm^{-1} 处的特征吸收峰对应于 C=C 伸缩振动, 754 cm^{-1} 处的特征吸收峰对应于芳香环的 C—H 面外变形振动^[14]。这些差异可能与燃吸过程卷烟滤嘴吸附的多环芳烃有关。而经过纯化后的 R-CA 光谱与芳香环相关的特征峰消失,表明回收方案除杂的有效性。

2.1.3 热学性能分析 不同醋酸纤维素的 TG 和 DTG 曲线如图 3 所示。由图 3 可知, C-CA 和 R-CA 具有相似的降解行为, 在环境温度至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内约有 2% 的质量损失, 这可能是由样品中吸附的自由水受热蒸发所致^[12], 因为醋酸纤维素有较强的吸湿性^[15]。在 $250\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, C-CA 和 R-CA 均出现主要降解阶段, 质量损失约为 80%。该阶段涉及醋酸纤维素的去乙酰化反应, 最大降解速率对应的温度分别为 $357.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $355.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $400\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 醋酸纤维素的结晶区完全被破坏, 分解为 D-葡萄糖单体^[16]。由此可知, R-CA 与 C-CA

的热稳定性接近, 主要降解温度差异较小。

不同醋酸纤维素的 DSC 曲线如图 4 所示。由图 4 可知, C-CA 和 R-CA 在室温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内均存在吸热行为, 这可归因于聚合物的水分脱附。约在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 可以观察到第二个吸热峰, 这与聚合物的熔融有关, 与前人报道一致^[11]。相比于 C-CA, R-CA 的熔融峰分裂成两个小峰, 这可能是由于清洗时加入的乙醇影响了醋酸纤维素的晶体结构和结晶度^[17]。

综上可知, R-CA 保持了与 C-CA 相似的化学结构及热学性能, 表明本研究采用的回收方案可有效清除燃烧产生的有机杂质, 且该过程没有改变醋酸纤维素的结构及性能。

2.2 醋酸纤维素纳米纤维膜制备溶剂的选择与表征

溶剂选择对醋酸纤维素纳米纤维的形态有显著影响^[18]。根据 Hildebrand 溶解度参数, DMF 的溶解度参数为 24.9, 与醋酸纤维素的溶解度参数 (25.1) 相似, 因此其是醋酸纤维素的良溶剂^[19]。然而, 纳米纤维的形成需要黏弹力、表面张力、电场力及库仑力共同拉伸溶液中的液滴。高比例良溶剂会使纺丝液黏弹性较低, 导致形成光滑纤维所需聚合物的含量升高^[20]。因此, 需要采用另一种溶剂与 DMF 组成混合溶剂来改善醋酸纤维素的纺性。丙酮的溶解度参数为 19.9^[19], 与醋酸纤维素相差较大, 且挥发性强^[21], 用纯丙酮作为溶剂时, 其高挥发性易造成针尖堵塞^[18]。综合考虑溶剂挥发性与溶液黏度的匹配性, 选择 DMF 与丙酮的混合溶液用于醋酸纤维素静电纺丝。

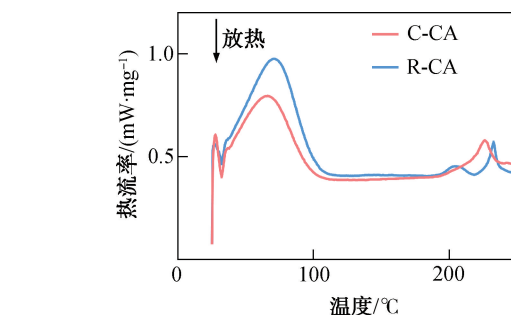


图 4 不同醋酸纤维素的 DSC 曲线
Fig. 4 DSC curves of different cellulose acetates

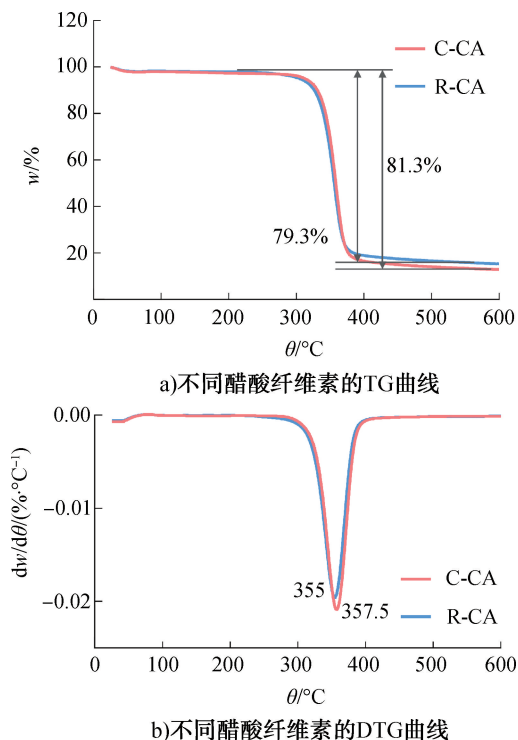
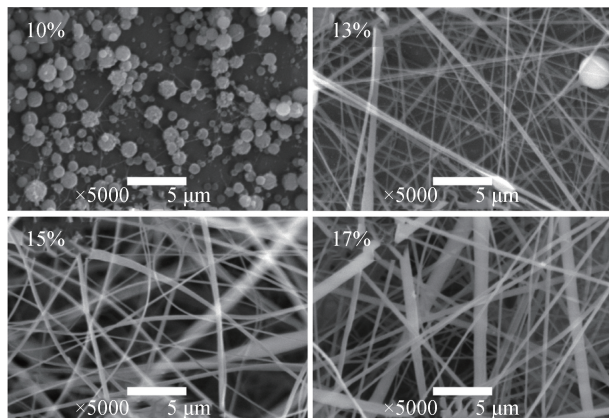
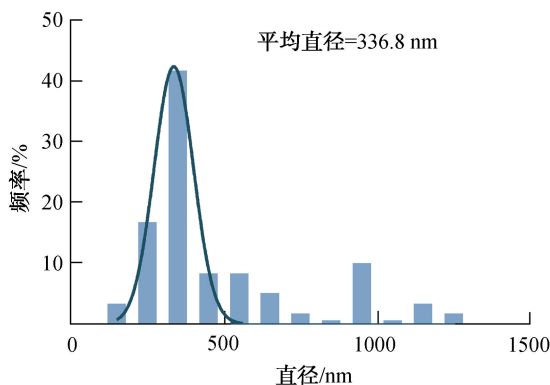


图 3 不同醋酸纤维素的 TG 和 DTG 曲线
Fig. 3 TG and DTG curves of different cellulose acetates

醋酸纤维素膜的微观形貌和纤维直径分布图如图5所示。由图5可知,当纺丝浓度较低时,喷丝过程中射流不稳定,形成的纤维较为稀疏且出现串珠结构。这是因为此时的醋酸纤维素聚合物分子链缠结程度低,溶液黏滞阻力小,电场力不足以充分拉伸射流^[22]。随着纺丝浓度的升高,串珠结构明显减少,纤维均匀性和平整度提高,纤维直径增大。当纺丝浓度增加到15%和17%时,纺丝过程连续、无滴液现象,形成的纤维表面光滑且无串珠结构,说明在此条件下射流受到的各种外力相对平衡,拉伸和延展充分^[23]。其中,纺丝浓度为17%时形成的纤维直径分布更均匀,平均直径为336.8 nm。当纺丝浓度继续增大到20%时,溶液黏度过高,造成针头堵塞从而影响纺丝稳定性。考虑到气凝胶的形成需依靠纳米纤维相互缠结形成三维网络,后续实验采用17%的纺丝浓度进行静电纺丝。



a)不同醋酸纤维素膜的SEM图



b)17%纺丝浓度下醋酸纤维素膜的纤维直径分布

图5 醋酸纤维素膜的微观形貌和纤维直径分布图
Fig. 5 Microscopic morphology and fiber diameter distribution of cellulose acetate films

2.3 CANA的结构表征分析

通过高速剪切机将醋酸纤维素纳米纤维膜均匀地分散在超纯水中,经冷冻干燥后制得CANA。在冷冻过程中,纳米纤维逐渐缠绕在不断生长的冰晶上并发生聚结,纤维间相互缠绕形成三维网络结构^[21]。随后,在干燥过程中,冰晶升华为气体,在材料内部形成孔隙,互连纤维结构中的大部分空间被空气占据,从而使CANA表观密度极低。CANA的宏观形貌如图6所示。由图6可知,CANA因其极低的质量可稳定置于叶片表面而不引起叶片可见形变。

CANA的表观密度可以通过调整复合纳米纤维膜分散液的质量分数进行调控。不同CANA样品的结构参数如表1所示。由表1可知,随着分散相含量的增加,CANA的表观密度增大,CANA-1的表观密度仅为 8.59 mg/cm^3 ,而CANA-2和CANA-3的表观密度分别为 10.43 mg/cm^3 和 11.55 mg/cm^3 。孔隙率随表观密度的增加而略有降低,但仍保持在99%以上,仍属于高孔隙度材料。



图6 CANA的宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of CANA

表1 不同CANA样品的结构参数

Table 1 Structural parameters of different CANA samples

样品	表观密度/ $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙率/%
CANA-1	8.59 ± 0.30	99.34 ± 0.02
CANA-2	10.43 ± 0.61	99.20 ± 0.05
CANA-3	11.55 ± 0.66	99.11 ± 0.05

3 结论

本文以烟蒂为原料,使用不同极性溶剂对其进行纯化提取得到R-CA;采用静电纺丝技术和纤维冷冻干燥成型工艺,将R-CA转化为纳米纤维,并进一步构筑CANA。利用FTIR仪、TG分析仪、DSC仪等对R-CA、醋酸纤维素纳米纤维膜和CANA的结构

与性能进行分析,得出如下结论:R-CA 与 C-CA 具有相似的化学结构和热学性能,说明本文采用的纯化方法不会改变醋酸纤维素的结构与性能;利用质量分数为 17% 的醋酸纤维素纺丝液制备的纳米纤维直径分布更均匀,平均直径为 336.8 nm;可以通过调整醋酸纤维素纳米纤维分散液的浓度调控 CANA 的表观密度和孔隙率,利用这种纤维冷冻干燥成型工艺开发的 CANA 具有超高孔隙率(>99%)和超低表观密度(8.59 mg/cm³)。对烟蒂进行资源化处理是提高烟草制品环境友好性的重要手段,本研究通过简单、绿色的工艺流程,将烟蒂回收的醋酸纤维素转化成高孔隙率、低表观密度的 CANA 材料,可实现资源的有效回收与循环使用。

参考文献:

- [1] DE CESARIS M G, FELLI N, ANTONELLI L, et al. Recovery of cellulose acetate bioplastic from cigarette butts: Realization of a sustainable sorbent for water remediation[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 929: 172677.
- [2] 周慧敏,鲁杰,程意,等. 醋酸纤维素的改性及应用研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2020, 40(4): 1-8.
ZHOU H M, LU J, CHENG Y, et al. Research progress on modification and application of cellulose acetate [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2020, 40(4): 1-8.
- [3] MAHTO A, HALAKARNI M A, MARADDI A, et al. Upcycling cellulose acetate from discarded cigarette butts: Conversion of contaminated microfibers into loose-nanofiltration membranes for selective separation [J]. *Desalination*, 2022, 535: 115807.
- [4] BEHVANDI D, AREFIZADEH M, GHAEMI A, et al. Optimization of hydrochar production from cigarette filters for enhanced CO₂ adsorption[J]. *Results in Engineering*, 2024, 22: 102308.
- [5] LIU W M, CUI M K, SHEN Y Q, et al. Waste cigarette filter as nanofibrous membranes for on-demand immiscible oil/water mixtures and emulsions separation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 549: 114-122.
- [6] 胡彪彪. 醋酸纤维素气凝胶的可控制备及其杂化材料性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
HU Y B. Controllable preparation and properties of diacetate aerogels and their hybrid materials [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [7] 黄兴. 醋酸纤维素气凝胶制备及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
HUANG X. Preparation and characterization of celluloseacetate aerogels [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [8] SOLEIMANI F, DOBARADARAN S, DE-LA-TORRE G E, et al. Content of toxic components of cigarette, cigarette smoke vs cigarette butts: A comprehensive systematic review [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 813: 152667.
- [9] FAHANWI A N, YASIR M, NGUYEN H T, et al. In situ polyaniline polymerization on electrospun cellulose acetate nanofibers derived from recycled waste filter butts of cigarettes for the enhanced removal of methyl orange and rhodamine [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, 201: 18-30.
- [10] KHAN M R, LIAO S Q, FAROOQ A, et al. Regeneration and modification of cellulose acetate from cigarette waste: Biomedical potential by encapsulation of tetracycline hydrochloride [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 250: 126266.
- [11] D'URSO F, IACCARINO P, GIORDANO M, et al. A preliminary study on 3D printing feedstock derived from cellulose recovered from cigarette butts [J]. *Cellulose*, 2024, 31(8): 5097-5114.
- [12] DE FENZO A, GIORDANO M, SANSONE L. A clean process for obtaining high-quality cellulose acetate from cigarette butts [J]. *Materials*, 2020, 13(21): 4710.
- [13] BEHZADI M. Facile fabrication and application of poly (ortho-phenetidine) nanocomposite coating for solid-phase microextraction of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons from wastewaters [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111568.
- [14] MATTIODA A L, HUDGINS D M, BOERSMA C, et al. The NASA ames PAH IR spectroscopic database: The laboratory spectra [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, 251(2): 22.
- [15] BENZAOUZ A, DUDOGNON E, CORREIA N T, et al. Interactions underpinning the plasticization of a polymer matrix: A dynamic and structural analysis of DMP-plasticized cellulose acetate [J]. *Cellulose*, 2017, 24(2): 487-503.
- [16] 高立斌,张素英,史晟,等. 醋酸纤维素的制备及其结构与性能[J]. *应用化工*, 2020, 49(1): 55-59.
GAO L B, ZHANG S Y, SHI S, et al. Synthesis, structure and properties of cellulose acetate [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(1): 55-59.
- [17] 汪超,龙义强,张聘昊,等. 超临界 CO₂/乙醇共溶剂处理对醋酸纤维素结构的影响[J]. *塑料工业*, 2023, 51(1): 74-79.
WANG C, LONG Y Q, ZHANG C C, et al. Effect of supercritical CO₂ and ethanol as a cosolvent treatment on

the structure of cellulose acetate [J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(1): 74-79.

- [18] MAJUMDER S, MATIN M A, SHARIF A, et al. Understanding solubility, spinnability and electrospinning behaviour of cellulose acetate using different solvent systems [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2019, 42(4): 171.
- [19] LEE H, NISHINO M, SOHN D, et al. Control of the morphology of cellulose acetate nanofibers via electrospinning [J]. *Cellulose*, 2018, 25(5): 2829-2837.
- [20] HWANG Y J, CHOI S, KIM H S. Structural deformation of PVDF nanoweb due to electrospinning behavior affected by solvent ratio [J]. *e-Polymers*, 2018, 18(4): 339-345.
- [21] 尹思迪. 原位交联构筑轻质超弹醋酸纤维素气凝胶及其保暖性能 [D]. 上海: 东华大学, 2022.

YIN S D. In-situ crosslinking of lightweight super-elastic cellulose acetate aerogel and its warmth retention property [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.

- [22] 杜浩田, 李姝姝, 周宏伟. 醋酸纤维素纳米纤维薄膜的制备及表征 [J]. *西安工业大学学报*, 2022, 42(5): 460-467.
- DU H T, LI S S, ZHOU H W. Preparation and characterization of cellulose acetate nanofiber films [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2022, 42(5): 460-467.
- [23] 刘慧. 静电纺丝醋酸纤维素复合纳米纤维膜制备及其抗菌性能研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- LIU H. Preparation and antibacterial properties of electrospun cellulose acetate composite nanofiber membrane [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

Fabrication and characterization of cigarette butt-derived cellulose acetate-based ultralight aerogels for tobacco applications

WU Qiao¹, ZHUANG Hu¹, XIAO Jingshu¹, ZHOU Bin², HAO Xin¹, YANG Junpeng¹,
WANG Hao¹, ZHANG Duntie¹

1. *New Tobacco Product Engineering Center, China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan 430072, China;*

2. *School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*

Abstract: [Objective] To achieve the resource valorization of cellulose acetate (CA) from cigarette butts by converting it into high value-added materials, and to investigate its structural and performance characteristics. **[Methods]** Recycled cellulose acetate (R-CA) was prepared via solvent washing. R-CA was then converted into nanofibers by electrospinning, and further fabricated into aerogels in one step through freeze-drying. The structure and properties of the R-CA nanofiber membranes and corresponding aerogels were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), and differential scanning calorimetry (DSC). **[Results]** R-CA exhibited a similar chemical structure to commercial CA, with similar peak thermal degradation temperatures of 355.0 °C and 357.5 °C, respectively. This indicates that the purification process did not alter the molecular structure or thermal properties of R-CA. With increasing R-CA electrospinning concentration, the fiber morphology evolved from beaded structures to uniform and smooth nanofibers. The fibers obtained at 17% concentration showed the most uniform diameter distribution, with an average diameter of 336.8 nm. Nanofibers prepared at this optimal concentration were subjected to dispersion, homogenization, and freeze-drying to successfully form a 3D network aerogel. The aerogel had an apparent density of 8.59~11.55 mg/cm³ and a porosity above 99%, showing ultra-low density and high porosity. **[Conclusion]** This study enables the efficient recovery of R-CA and the preparation of high-performance aerogels, offering a valuable reference for the resource valorization of cigarette butts.

Key words: cigarette butt; cellulose acetate; electrospinning; nanofiber membrane; aerogel

[责任编辑: 王晓波 贾学伟]