

# 通过一步法在甲酸与过氧化氢溶液体系 高效提取糠醛渣中微晶纤维素的研究

安 昊, 陈俊铭, 张雅静, 王康军, 张光伟\*  
(沈阳化工大学化学工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

**摘要:**突破传统纤维素制备需酸解-漂白两步法的技术路线, 创新性地开发了一步法提取微晶纤维素工艺。通过构建甲酸-过氧化氢(FA-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)协同体系, 实现糠醛残渣中残余纤维素的高效提取。利用扫描电子显微镜(SEM)、激光粒度分析仪(LPSA)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X射线衍射(XRD)及固态<sup>13</sup>C核磁共振(<sup>13</sup>CNMR)等技术对提取产物进行结构表征, 并与商业微晶纤维素进行对比分析。实验结果表明, 在70℃反应条件下, 以5 g糠醛残渣为原料, 采用40 mL甲酸并分7次添加总量为35 mL的过氧化氢进行一步法处理, 最终可实现86.07%的纤维素回收率, 且残余木质素质量分数仅为0.03%。

**关键词:**糠醛残渣; 微晶纤维素; 生物质利用; 废弃物处理

**中图分类号:** TQ3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2026)01-0153-06

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.026

## Efficient extraction of microcrystalline cellulose from furfural residue through one-step formic acid and hydrogen peroxide solution

AN Hao, CHEN Jun-ming, ZHANG Ya-jing, WANG Kang-jun, ZHANG Guang-wei\*

(College of Chemical Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** Inspired by the traditional two-step process for cellulose preparation, this study introduces an innovative one-step cellulose extraction method. The method employs a formic acid-hydrogen peroxide (FA-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) system to efficiently extract residual cellulose from furfural residue. The microcrystalline cellulose obtained from furfural residue was structurally characterized using SEM, LPSA, FT-IR, XRD and <sup>13</sup>CNMR and compared with commercial microcrystalline cellulose. The results indicate that under one-step conditions at 70°C, using 40 mL of formic acid and a total of 35 mL of hydrogen peroxide added in seven portions to 5 g of furfural residue, a high cellulose recovery of 86.07% and only 0.03% lignin can be achieved.

**Key words:** furfural residue; microcrystalline cellulose; biomass utilization; waste disposal

糠醛作为一种多用途平台化学品, 在有机合成、溶剂制备、石油精炼及制药等领域的市场需求持续增长<sup>[1-5]</sup>。随着全球糠醛产业规模的扩大, 中国已成为该领域的核心生产国。目前国内拥有约200家糠醛生产企业, 年产量超50万t, 占全球总产量的近70%<sup>[6]</sup>。值得注意的是, 每生产1t糠醛将伴随产生12~13t糠醛残渣<sup>[7]</sup>, 由此推算中国年糠醛残渣产量预计高达2300万t<sup>[8]</sup>。糠醛残渣的有效治理与安全处置问题, 已成为制约糠醛产业可持续发展的关键瓶颈。

糠醛工业生产主要采用玉米芯、玉米秸秆等生物质原料, 通过强酸水解工艺将其中的半纤维素组分转化为糠醛<sup>[9]</sup>。该过程产生的大量糠醛残渣具有强酸性及高盐分特征<sup>[10]</sup>, 作为工业废弃物, 不仅会导致土壤与水体酸化, 更存在重金属污染风险及

有害物质释放隐患, 对生态环境与人体健康构成潜在威胁<sup>[11-13]</sup>。在糠醛生产过程中, 生物质原料中的半纤维素组分经催化转化为目标产物, 而大部分纤维素与木质素组分则以残渣形式留存。当前, 糠醛残渣的综合利用主要集中于燃烧供热、土壤改良等初级领域<sup>[14]</sup>, 对其化学转化的深入研究仍显不足。因此, 探索糠醛残渣的高值化化学转化路径, 对实现糠醛产业清洁化、可持续化生产具有重要战略意义。

糠醛残渣(FR)富含木质素(约40%)与纤维素(约38%), 凸显其高值化利用潜力。研究表明, 糠醛残渣中的木质素可用于制备单酚类化合物、生物基硬质聚氨酯泡沫等高附加值产品, 而其中的纤维素亦具有显著开发价值。现有研究已提出多种高效提取方法: 如Yuan等<sup>[15]</sup>采用Milox法获得纤维素质量分数达85.09%; Chang等<sup>[10]</sup>通过两阶段工艺

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-10-19

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2021-NLTS-12-01); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1907029); 辽宁省教育厅基金项目(LJKZ0466)

作者简介: 安昊(1998-), 男, 硕士, 研究方向为生物质资源化利用, 1499831435@qq.com; 张光伟(1988-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为生物质高值利用及绿色催化工艺, 通讯联系人, zhangguangwei@syuct.edu.cn。

提取出质量分数为 88.0% 的纤维素;Chen 等<sup>[16]</sup>利用 Milox 三步法成功提取高纯度纤维素。这些成果为生物质资源综合利用开辟了新路径。本研究创新性开发基于甲酸-过氧化氢溶液体系的一步法制备糠醛残渣微晶纤维素(MCC)工艺,并与传统两步法进行对比;通过扫描电子显微镜(SEM)、激光粒度分析(LPSA)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X 射线衍射(XRD)及碳 13 核磁共振(<sup>13</sup>CNMR)等多维表征手段,系统对比自制样品与商业 MCC 的结构性能,评估新工艺的效率与可行性。实验结果表明,一步法不仅简化传统两步法的复杂操作,同时显著提升纤维素纯度与得率,为糠醛残渣高效增值化利用提供了创新技术方案。

## 1 材料与试剂

### 1.1 材料

糠醛残渣:取自沈阳市校企合作糠醛厂。采用范索斯特分析法测定其化学组分(干基质量分数):纤维素 42.87%、半纤维素 2.91%、木质素 34.71%。实验前,糠醛残渣经过水洗、干燥与粉碎等预处理,过 40 目筛确保粒径均一,随后置于 80℃ 烘箱去除残余水分。

### 1.2 仪器及试剂

BSA224S-CW 电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司生产;WB100-1 水浴锅,宁波市鄞州群安实验仪器有限公司生产;真空干燥箱,北京市永光明医疗仪器有限公司生产;电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司生产;KAL-1200X 马弗炉,合肥科晶材料技术有限公司生产;IRracer-100 傅里叶变换红外光谱仪,日本岛津生产;型号 D8 Advance Cu-K $\alpha$  辐射 X 射线衍射仪,德国布鲁克公司生产;扫描电子显微镜;型号 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪,英国马尔文仪器公司生产;C13 固态核磁;50 mL 量筒、250 mL 高筒烧杯、容量瓶。

98%甲酸、99.5%乙酸、98%硫酸、30%过氧化氢、十六烷基三甲基溴化铵、乙二胺四乙酸二钠、无水亚硫酸钠、四硼酸钠、十二烷基硫酸钠、乙二醇单乙醚、98%十氢萘和微晶纤维素标准样品,所有试剂均直接使用,未经额外纯化。

## 2 实验方法

### 2.1 两步法提取微晶纤维素

为阐明从糠醛残渣(FR)中提取纤维素的两步

法工艺,实验第一阶段取 5 g 糠醛残渣浸渍于 40 mL 甲酸与 16 mL 30%过氧化氢混合液中,充分搅拌后于 80℃ 加热反应 4 h。反应结束后,过滤所得固体残渣转移至新溶剂中,于 90℃ 继续加热 2 h。经过第二次过滤获得白色固体产物,用去离子水多次洗涤抽滤并在 80℃ 干燥 12 h,最终制得微晶纤维素样品(两步法 FR-MCC)。采用 Van Soest 分析法测定样品得率,并依据以下公式计算:

$$\text{FR-MCC 的得率} = [(M_1 \times x_1) / (M_2 \times x_2)] \times 100\%$$

式中, $M_1$  为反应后得到的固体残渣质量; $M_2$  为糠醛残渣的初始量;采用 Van Soest 分析法测定纤维素含量,其中  $x_1$  为糠醛残渣的纤维素含量; $x_2$  为反应后得到的固体残渣的纤维素含量。

### 2.2 一步法提取微晶纤维素

基于两步法工艺的研究结果,本研究确立了过氧化氢与甲酸的最佳添加量,从而开发出一步法制备微晶纤维素(MCC)的新工艺。具体步骤如下:将 40 mL 甲酸(FA)与 5 mL 30%过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )溶液混合,加入 5 g 糠醛残渣(FR),于 70℃ 反应 30 min。随后,分 7 次等量补加总量为 35 mL 的 30%过氧化氢溶液以确保反应完全。过滤所得白色固体产物经去离子水多次漂洗后,于 75℃ 干燥 12 h,最终获得高纯度微晶纤维素(一步法 FR-MCC)。经范索斯特分析法测定,其纤维素质量分数达 86.07%,木质素残质量分数仅 0.03%,表明相较于两步法工艺,纤维素提取效率显著提升。

## 3 结果与分析

### 3.1 单因素结果分析

#### 3.1.1 不同溶剂对实验结果的影响

短链羧酸已被确定为有效的脱木质素剂,特别是当与 Milox 工艺和过氧化氢结合使用时,表现出优越的脱木质素能力<sup>[17]</sup>。在本研究中,选择甲酸和乙酸进行脱木质素实验,采用以下 5 种处理组合:①40 mL 甲酸+16 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;②40 mL 乙酸+16 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;③40 mL 甲酸+16 mL  $\text{H}_2\text{O}$ ;④40 mL 乙酸+16 mL  $\text{H}_2\text{O}$ ;⑤40 mL  $\text{H}_2\text{O}$ +16 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。实验条件设置为两步处理:第一步在 80℃ 下加热 4 h,第二步在 90℃ 下加热 2 h。

如表 1 所示,组合①和组合②均表现出有效的脱木质素作用,组合①的效果更为明显。分析表明,与乙酸相比,甲酸是一种更强的有机酸,提供了一个更酸性的环境,有利的效果更为明显。有利于破坏木质素结构,使其更容易氧化降解。此外,过氧化氢

作为一种强氧化剂,在酸性条件下会产生羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),有效地攻击和切割木质素分子内的化学键。此外,甲酸与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 反应生成过氧甲酸,是一种强氧化剂,能够更有效地氧化木质素分子。相比之下,乙酸与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 反应生成的过氧乙酸,虽然具有一定的氧化能力,但氧化强度相对较弱。木质素是一种由 $\text{C}-\text{C}$ 和 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 键连接的苯丙烷单元组成的复合聚合物,对甲酸的强酸性和亲电性特别敏感,甲酸可以更有效地破坏这些键,特别是易受酸性条件影响的 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 键。因此,甲酸与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 组合表现出优越的脱木质素性能。综上所述,甲酸与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 组合在实验设置中表现出更高的效率和更好的脱木质素效果,将会成为实验所用溶剂。

表1 在不同溶剂中微晶纤维素和木质素的质量分数

组合序号	MCC质量分数/%	木质素质量分数/%
①	82.24	0.86
②	74.22	3.07
③	39.15	40.85
④	40.38	41.52
⑤	36.18	14.45

### 3.1.2 过氧化氢浓度对实验结果的影响

为了研究过氧化氢浓度对实验结果的影响,使用40 mL甲酸和16 mL不同体积分数(0%、6%、12%、18%、24%和30%)的过氧化氢,以及5 g糠醛渣进行了两步法实验过程,如图1所示。随着过氧化氢体积分数的增加,实验产品的颜色逐渐变浅,最终在30%时呈现干净的白色。

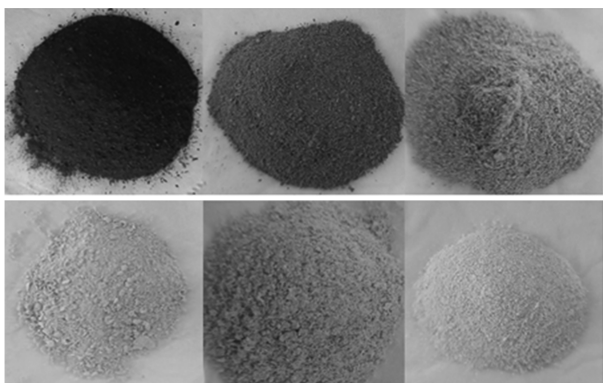
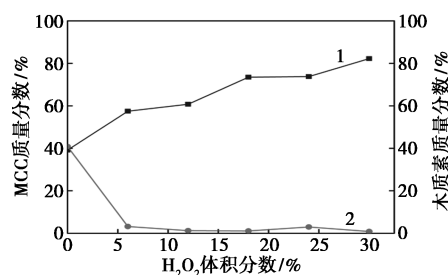


图1 在体积分数为0%、6%、12%、18%、24%及30%过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )条件获得的产物

图2显示,纤维素质量分数随 $\text{H}_2\text{O}_2$ 体积分数的增加而逐渐增加,在体积分数为30%时纤维素质量分数为82.3%。分析表明,在酸性条件下,过氧

化氢分解产生具有强大氧化特性的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),能够有效地进攻和切割木质素分子内的化学键。随着过氧化氢体积分数的提高,产生的羟基自由基数量相应增加,从而增强了整体的氧化功效。这种增强的氧化能力促进了更有效的木质素降解。体积分数为30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 在实现最大木质素氧化和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 在工业环境中的实际应用之间取得平衡,确保有效地脱木质素而不会因过氧化氢浓度过高而产生过多的副反应。

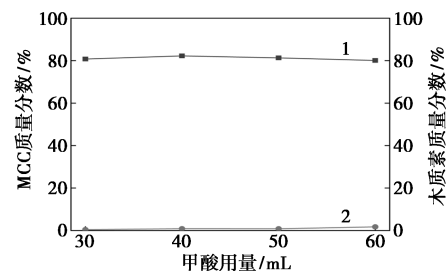


1—MCC质量分数;2—木质素质量分数

图2 在不同体积分数过氧化氢下微晶纤维素和木质素的质量分数

### 3.1.3 甲酸用量对实验结果的影响

为了研究甲酸浓度对实验结果的影响,将不同体积的FA(30、40、50、60 mL)与16 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 和5 g糠醛残渣混合,进行两步法反应,如图3所示。随着甲酸用量的增加,纤维素质量分数呈现先升高后降低的趋势,当甲酸体积为40 mL时,纤维素质量分数达到82.24%。分析表明,甲酸的用量直接影响反应体系的酸度。最佳用量的甲酸提供足够的氢离子,有效地破坏木质素结构,使其更容易受到 $\text{H}_2\text{O}_2$ 氧化。此外,甲酸不仅建立酸性环境,还可以催化 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的分解,产生高氧化性的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )从而提高氧化效率。然而,当甲酸用量过高时(如50、60 mL),催化作用变得过强,可能导致 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和产生过量的羟基自由基。过量的羟基自由



1—MCC质量分数;2—木质素质量分数

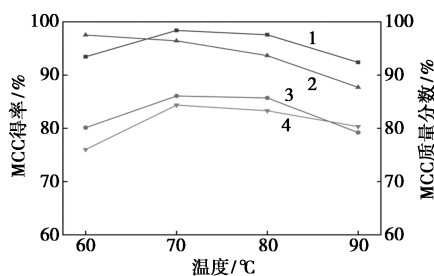
图3 在不同甲酸用量下微晶纤维素和木质素的含量

基会引发副反应,进而降低整体氧化效率,导致微晶纤维素质量分数减少。

### 3.1.4 一步法提取 FR-MCC

一步法是对传统两步工艺的优化,旨在通过将糠醛残渣中的纤维素提取优化为一步工艺来简化操作程序并提高生产效率,从而减少与多步工艺相关的材料损失和能耗。

在本研究中,将 40 mL 甲酸或乙酸与 5 mL 30%  $H_2O_2$  混合,并与 5 g 糠醛渣彻底混合。初始反应在 60、70、80、90℃ 的不同温度下进行,各持续 30 min。随后每隔 30 min 向系统中加入 5 mL 的 30%  $H_2O_2$ ,重复 6 次,共使用 35 mL 的 30%  $H_2O_2$ 。如图 4 所示,微晶纤维素质量分数随着温度的升高而增加,在下降之前达到峰值。其中 70℃ 时,纤维素质量分数最高,甲酸体系纤维素得率为 86.07%,乙酸体系纤维素得率为 84.36%。这些结果与两步法的结果相当,但一步法已经实现了工作流程的显著简化。

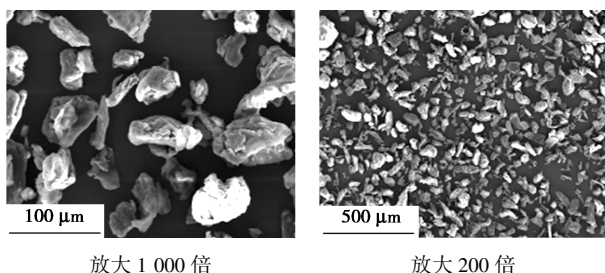


1—MCC 得率(甲酸);2—MCC 得率(乙酸);  
3—MCC 质量分数(甲酸);4—MCC 质量分数(乙酸)

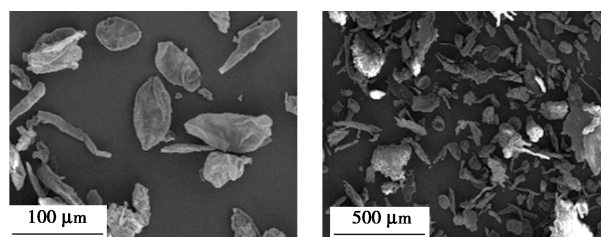
图 4 一步法工艺在不同温度下微晶纤维素和木质素的含量

### 3.2 扫描电子显微镜分析

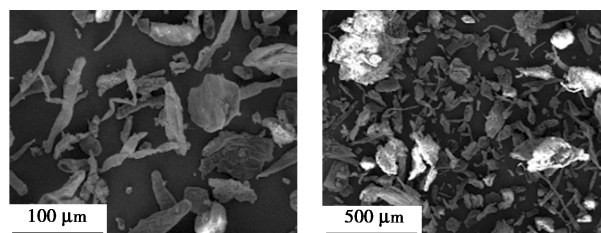
如图 5(a) 所示,微晶纤维素(MCC)颗粒具有不规则形状和均匀粒径的多孔结构的特征。观察发现,两步法[图 5(b)]和一步法[图 5(c)]制备的糠醛残基微晶纤维素(FR-MCC)的宏观外观与 MCC 相似。然而,对 FR-MCC 样品的显微检查表明,颗粒表现出不同尺寸的纤维形态。值得注意的是,在去除半纤维素和木质素后,纤维素的原始形态在很



(a)MCC



放大 1 000 倍 放大 200 倍(两步法)  
(b)FR-MCC(两步法)



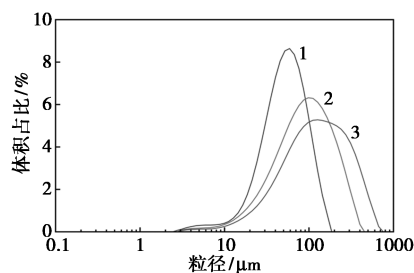
放大 1 000 倍 放大 200 倍  
(c)FR-MCC(一步法)

图 5 MCC 的扫描电子显微镜图片

大程度上得到了保存。

### 3.3 激光粒度分析仪(LPSA)

图 6 为 MCC、FR-MCC(一步法)和 FR-MCC(两步法)的粒径分布曲线。如表 2 所示,MCC 悬浮液呈现单峰尺寸分布。一步法制备的 FR-MCC 初晶粒径范围为 29.382~238.628  $\mu\text{m}$ ,峰值位于 90~100  $\mu\text{m}$ (体积占比 6.32%);两步法制备的 FR-MCC 初晶粒径范围为 35.525~349.724  $\mu\text{m}$ ,峰值位于 120~130  $\mu\text{m}$ (体积占比 5.28%)。相比之下,商用 MCC 主要分布在 23.470~110.768  $\mu\text{m}$  之间,峰值在 50~60  $\mu\text{m}$ (体积占比 8.64%)。FR-MCC 的粒径虽略大于 MCC,但直接从糠醛渣中分离得到的纤维素已达到微米级,表明可直接从糠醛渣中提取 MCC,无需强酸水解。与表 3 中文献[18-21]报道的 MCC 相比,FR-MCC 具有更大的粒径。原料性质的差异可能是 FR-MCC 中观察到的较大粒径的原因。



1—MCC;2—FR-MCC(一步法);3—FR-MCC(两步法)

图 6 MCC、FR-MCC(一步法)和 FR-MCC(两步法)的粒径分布曲线

表2 粒径分布数据

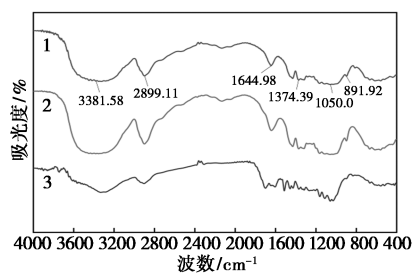
样品	粒径 $d_{10}$	粒径 $d_{50}$	粒径 $d_{90}$
MCC	23.470	55.798	110.768
FR-MCC(一步法)	29.382	95.215	238.628
FR-MCC(两步法)	35.525	124.161	349.724

表3 多种 MCC 粒径数据

	中值粒径/ $\mu\text{m}$	处理方法
FR-MCC(本工作)	95.215	甲酸-过氧化氢(一步法工艺)
CC-MCC <sup>[18]</sup>	83.340	盐酸(1 N)/亚氯酸钠
棉条 MCC <sup>[19]</sup>	4.740	硫酸(55%)水解
稻壳 MCC <sup>[20]</sup>	26.500	硫酸(64%~68%)水解
玉米壳 MCC <sup>[21]</sup>	40.000	盐酸(2.5 N)水解

### 3.4 傅里叶变换红外光谱分析

利用傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析了 MCC、糠醛渣和 FR-MCC(一步法)的化学成分。如图7所示, MCC的 FT-IR 光谱显示纤维素典型的特征吸收峰。具体来说,在  $890$ 、 $2900$ 、 $3400\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰分别是由  $\beta$ -糖苷键、C—H 不对称和对称拉伸振动以及—OH 拉伸振动引起的,  $1640\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰对应于 C—C 拉伸振动<sup>[22]</sup>,  $1375\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰对应于纤维素中的 C—H 弯曲振动<sup>[23]</sup>。 $1050\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为 C—O 拉伸振动。此外,在  $1520\sim 1510\text{ cm}^{-1}$ 处没有特征木质素吸收峰,表明木质素被有效去除<sup>[24]</sup>。与商用 MCC 相比,一步法制备的 FR-MCC 表现出基本相同的结构特征,表明本文中研究制备的样品基本上不含其他杂质。



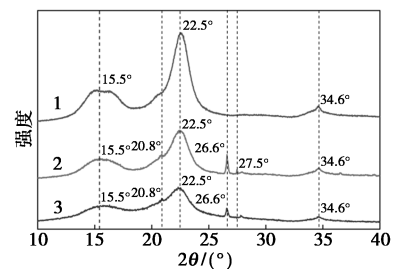
1—MCC;2—FR-MCC(一步法);3—FR-MCC(两步法)

图7 MCC、FR-MCC(一步法)、FR-MCC(两步法)的傅里叶变换红外光谱分析

### 3.5 X 射线衍射分析

自然界中的纤维素表现出明显的结晶区和无定形区,而半纤维素和木质素则以无定形区为主<sup>[25]</sup>。MCC、FR-MCC 和糠醛渣的 XRD 谱图如图8所示。这些图在  $15.5^\circ$ 、 $22.5^\circ$  和  $34.6^\circ$  处显示出3个突出的峰,分别对应于纤维素 I 的 (110)、(200) 和 (040) 晶面。这些发现表明,FR-MCC 在化学处理过程中保

持了纤维素 I 的结构,显示了结构的稳定性。糠醛渣、FR-MCC 和 MCC 的结晶度指数 (Cr I) 分别为  $53.98\%$ 、 $75.24\%$  和  $80.50\%$ 。样品在  $20.8^\circ$ 、 $26.6^\circ$  和  $27.5^\circ$  处表现出3个特征峰,对应于二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 的 (101)、(110) 和 (111) 晶面,表明存在残余  $\text{SiO}_2$ 。值得注意的是,FR-MCC 的 Cr I 略低于强酸水解产生的 MCC 的  $78.00\%$ 。这种差异可能是由于在糠醛残渣中保留了无定形纤维素,导致在 FR-MCC 中观察到较低的 Cr I。较低的结晶度表明更高程度的可及性,潜在地增强了纤维素对化学改性的反应性。

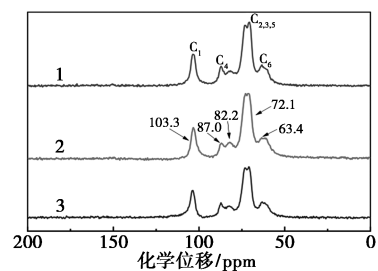


1—MCC;2—FR-MCC(一步法);3—FR-MCC(两步法)

图8 MCC、FR-MCC(一步法)、FR-MCC(两步法)的 X 射线衍射图谱

### 3.6 固态 $^{13}\text{C}$ NMR 分析

图9为 MCC、FR-MCC(两步)和 FR-MCC(一步)的固态  $^{13}\text{C}$  NMR 谱。 $110\times 10^{-6}\sim 60\times 10^{-6}$ 范围内的峰对应纤维素骨架的碳信号。具体来说,  $63.4\times 10^{-6}$ 处的峰与伯羟基中的  $\text{C}_6$  碳有关。 $70\times 10^{-6}\sim 80\times 10^{-6}$ 之间的峰归属于纤维素中的  $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$  或  $\text{C}_5$ , 而  $87.0\times 10^{-6}$ 的峰对应于纤维素中的  $\text{C}_4$ 。 $103.3\times 10^{-6}$ 的信号被分配给纤维素主链中的  $\text{C}_1$  碳。相比之下,FR-MCC 中与纤维素相关的信号峰与 MCC 的信号峰非常接近,表明糠醛残渣经过甲酸和过氧化氢的协同处理有效地去除了糠醛残渣中的木质素和残余半纤维素,同时保留了纤维素。



1—MCC;2—FR-MCC(一步法);3—FR-MCC(两步法)

图9 MCC、FR-MCC(一步法)和 FR-MCC(两步法)的固态  $^{13}\text{C}$  NMR 光谱

## 4 结论

本研究成功开发了一种从糠醛残渣中高效提取微晶纤维素(MCC)的一步法工艺。通过构建甲酸-过氧化氢(FA-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)协同体系,实现了MCC的快速分离与纯化。具体而言,在70℃反应条件下,以5g糠醛残渣(FR)为原料,采用40mL甲酸(FA)并分7次等量添加总量为40mL的过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>),最终获得86.07%的纤维素回收率。该方法相较于传统两步法工艺,不仅简化操作流程,同时显著提升纤维素提取效率与产物纯度,且有效降低生产成本与环境负荷。

为进一步探究提取所得MCC的性能,通过扫描电子显微镜(SEM)、激光粒度分析仪(LPSA)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X射线衍射(XRD)及固态<sup>13</sup>C核磁共振(<sup>13</sup>CNMR)等多维表征手段,系统解析了产物的微观结构与化学组成。此外,研究还系统分析了不同因素对纤维素提取效率的影响规律,为工艺优化提供了实验数据与理论支撑。

## 参考文献

- [1] Bernal H G, Bernazzani L, Galletti A M R. Furfural from corn stover hemicelluloses. A mineral acid-free approach[J]. *Green Chemistry*, 2014, 16(8): 3734-3740.
- [2] Zhang T, Wei H, Gao J, et al. Synthesis of sulfonated hierarchical carbons and their application on the production of furfural from wheat straw[J]. *Molecular Catalysis*, 2022, 517: 112034.
- [3] Yan X, Zhang G, Zhu Q, et al. CuZn@N-doped graphene layer for upgrading of furfural to furfuryl alcohol[J]. *Molecular Catalysis*, 2022, 517: 112066.
- [4] Wang A, Balsara N P, Bell A T. Pervaporation-assisted catalytic conversion of xylose to furfural[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(14): 4073-4085.
- [5] Li R, Wang X, Lin Q, et al. Structural features of lignin fractionated from industrial furfural residue using alkaline cooking technology and its antioxidant performance[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 83.
- [6] Bi S, Liu W, Wang C, et al. A versatile approach to the synthesis of biomass derived from furfural residues as a potential adsorbent[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(4): 5049-5052.
- [7] Mao L, Zhang L, Gao N, et al. FeCl<sub>3</sub> and acetic acid co-catalyzed hydrolysis of corncob for improving furfural production and lignin removal from residue[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 324-331.
- [8] Sun Y D, Sun R, Jiang J X, et al. Study on conversion process for furfural residue manufacture to ethanol by simultaneous saccharification and fermentation[J]. *Modern Chemical Industry*, 2008, 28(12): 48-52.
- [9] Sun Y, Wang Z, Liu Y, et al. A review on the transformation of furfural residue for value-added products[J]. *Energies*, 2019, 13(1): 21.
- [10] Chang M, Wang X, Lin Q, et al. Formic acid-hydrogen peroxide treatment of furfural residue for production of nanocellulose, lignin, and nano-scale lignin[J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(16): 6232-6240.
- [11] Liu Y, Song Y, Ran C, et al. Pyrolysis of furfural residue in a bubbling fluidized bed reactor: Biochar characterization and analysis[J]. *Energy*, 2020, 211: 118966.
- [12] Ao W, Fu J, Mao X, et al. Characterization and analysis of activated carbons prepared from furfural residues by microwave-assisted pyrolysis and activation[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 213: 106640.
- [13] Xing Y, Bu L, Sun D, et al. High glucose recovery from direct enzymatic hydrolysis of bisulfite-pretreatment on non-detoxified furfural residues[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 193: 401-407.
- [14] Wang Q, Liu Y, Liu S, et al. Comprehensive thermochemical utilization of biomass residues from furfural plants and ELW technology[J]. *Fuel*, 2019, 252: 116-124.
- [15] Yuan Y, Zhu C, Zhang X. Extraction of cellulose from furfural residue[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(2): 466.
- [16] Chen C Z, Li M F, Wu Y Y, et al. Integration of ambient formic acid process and alkaline hydrogen peroxide post-treatment of furfural residue to enhance enzymatic hydrolysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(33): 12935-12942.
- [17] Ligerio P, Villaverde J J, Vega A, et al. Pulping cardoon (Cynara cardunculus) with peroxyformic acid (MILOX) in one single stage[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(13): 5687-5693.
- [18] Shao X, Wang J, Liu Z, et al. Preparation and characterization of porous microcrystalline cellulose from corncob[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 151: 112457.
- [19] Kale R D, Bansal P S, Gorade V G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26: 355-364.
- [20] Sim B, Bae D H, Choi H J, et al. Fabrication and stimuli response of rice husk-based microcrystalline cellulose particle suspension under electric fields[J]. *Cellulose*, 2016, 23: 185-197.
- [21] Kambli N D, Mageshwaran V, Patil P G, et al. Synthesis and characterization of microcrystalline cellulose powder from corn husk fibres using bio-chemical route[J]. *Cellulose*, 2017, 24: 5355-5369.
- [22] Segal L, Creely J J, Martin Jr A E, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. *Textile Research Journal*, 1959, 29(10): 786-794.
- [23] Azubuike C P, Okhamafe A O. Physicochemical, spectroscopic and thermal properties of microcrystalline cellulose derived from corn cobs[J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2012, 1: 1-7.
- [24] Liu Y, Liu A, Ibrahim S A, et al. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from pomelo peel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111: 717-721.
- [25] Ramli R, Junadi N, Beg M D H, et al. Microcrystalline cellulose (MCC) from oil palm empty fruit bunch (EFB) fiber via simultaneous ultrasonic and alkali treatment[J]. *Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2015, 9(1): 8-11.