

## 纳米纤维素的结构性能及其在食品领域中的应用

周文博<sup>1,2,3</sup>, 李宇<sup>1,2</sup>, 韩昱<sup>1,2</sup>, 石爱玲<sup>1,2</sup>, 王永丽<sup>1,2</sup>, 李冠楠<sup>1,2\*</sup>, 李锋<sup>1,2\*</sup>

1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018

2. 山东省高校食品营养与人类健康重点实验室, 山东 泰安 271018

3. 山东农业大学化学与材料科学学院, 山东 泰安 271018

**摘要:** 纳米纤维素作为一种绿色可再生的纳米级材料,在化工、医药和生物制剂等领域受到广泛关注。其卓越的材料性能,包括优异的拉伸强度、阻隔性能、乳化和胶凝特性,使其在食品加工和包装领域展现出广阔的应用前景。然而,纳米纤维素在实际应用中仍面临诸多挑战,例如原料来源及制备工艺对其性能的影响。因此系统梳理纳米纤维素的特性及应用具有重要意义。本综述总结了纳米纤维素的结构特征、制备方法、以及其在食品加工和包装领域的应用潜力。研究表明,纳米纤维素具有可降解性、高生物相容性和可持续性等优点,可作为食品添加剂和食品包装材料,显著改善食品的质构特性和贮藏稳定性。纳米纤维素的大规模应用有望成为推动现代食品绿色化与可持续发展的重要助力。

**关键词:** 纳米纤维素结构与性能; 纳米纤维素制备; 食品包装材料; 食品工业

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)05-0761-13

## Structure Properties of Nanocellulose and Its Applications in Food Field

ZHOU Wen-bo<sup>1,2,3</sup>, LI Yu<sup>1,2</sup>, HAN Yu<sup>1,2</sup>, SHI Ai-ling<sup>1,2</sup>, WANG Yong-li<sup>1,2</sup>,  
LI Guan-nan<sup>1,2\*</sup>, LI Feng<sup>1,2\*</sup>

1. College of Food Science and Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Key Laboratory of Food Nutrition and Healthy in Universities of Shandong, Tai'an 271018, China

3. College of Chemistry and Material Science/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

**Abstract:** As a green and renewable nanomaterial, nanocellulose has garnered widespread attention in fields such as chemical industry, pharmaceuticals, and bioreagents. Its outstanding material properties, including excellent tensile strength, barrier properties, emulsifying and gelling characteristics, guarantee broad application prospects in food processing and packaging fields. However, nanocellulose still faces challenges in practical applications, such as the impact of raw material sources and preparation processes on its properties. Therefore, it is of great significance to systematically review the characteristics and applications of nanocellulose. This review summarizes the structural features, preparation methods, and application potential of nanocellulose in food processing and packaging. Research indicates that nanocellulose possesses advantages such as degradability, high biocompatibility, and sustainability. It can be used as a food additive and food packaging material, significantly improving the texture characteristics and storage stability of food. The large-scale application of nanocellulose is expected to become an important driving force for promoting the greening and sustainable development of modern food industry.

**Keywords:** Nanocellulose structure and properties; nanocellulose preparation; food packaging materials; food industry

纤维素是地球上最丰富的可再生生物资源之一,人类对于纤维素资源的利用可以追溯到人类文明的原始时期,随着人类文明的进步和科技的发展,纤维素逐渐被应用于造纸、纺织、制药和食品工业。近期研究发现,纤维素经过水解后可以获得尺寸均一的晶态纳米纤维素,展现出原纤

纤维素所不具备的多种优异性能,如高杨氏模量、优异的阻隔性、乳化性、胶凝性以及液晶自组装等特性<sup>[1]</sup>。纳米纤维的优异特性来源于其结晶结构与形貌特征。高结晶度与长径比赋予其强韧的机械性能与优异的阻隔性,能够有效增强食品包装材料的机械性能,提高对空气和水蒸气的

收稿日期: 2024-07-07

修回日期: 2025-08-21

基金项目: 山东省重点研发计划(基金编号:2023TZXD070)

第1作者简介: 周文博(2002-),男,硕士研究生,研究方向:纳米纤维素的食品应用。E-mail: ZhouWBSdau@163.com

\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: lgnan2005@163.com; fengli@sdau.edu.cn

阻隔能力。作为一种可生物降解性材料,纳米纤维素在独特的润湿性与流变特性使其能够作为食品增稠剂、乳化剂以及脂肪替代品,具有应用于新型功能食品的潜力。本文介绍了纳米纤维素的结构与形貌特征及其功能特性,总结了制备纳米纤维素的常用方法,并系统介绍了纳米纤维素在食品包装领域与食品加工领域的应用进展。

## 1 纳米纤维素的结构与性质

### 1.1 纤维素的结构组成

纤维素通常是高刚性且不溶于水的直链高分子聚合物,在植物的细胞壁与被囊类动物外层的被囊中提供机械支撑。纤维素是由D-吡喃葡萄糖单体通过 $\beta$ -1,4糖苷键连接而成的直链高分子均聚物,其基本结构葡萄糖单元在空间上呈现 $180^\circ$ 旋转的模式,形成重复的二聚体结构。纤维素的结构可从分子级、微观级到纳米级进行分

析。在分子级别,纤维素表现出明显的化学不对称性,其分子链一端含有还原性半缩醛基团,另一端为非还原端(图1)<sup>[2]</sup>。其结构单元全部为椅式构象,羟基位于葡萄糖环的平行位置,而氢原子则垂直于葡萄糖环平面,位于其轴向位置。该构象通过纤维素链分子内和分子间氢键稳定。微观结构方面,纤维素由高度有序的结晶区域和较为无序的非结晶区域组成,这种分布决定了其力学性能、热稳定性及溶解性。此外,纤维素表面的羟基基团使其具有良好的亲水性和化学反应性,这为其表面改性提供了多种可能,有助于提升其在材料科学、药物递送等领域的应用性能<sup>[3]</sup>。虽然来源不同的纤维素分子链具有相似的结构与构象,但其分子聚合度各不相同。例如,木浆中的纤维素聚合度约为600-1 200,天然棉花中纤维素的聚合度可高达 $1.2 \times 10^4$ ,海洋中被囊类动物中的纤维素聚合度则在 $3 \times 10^4$ 以上<sup>[4]</sup>。

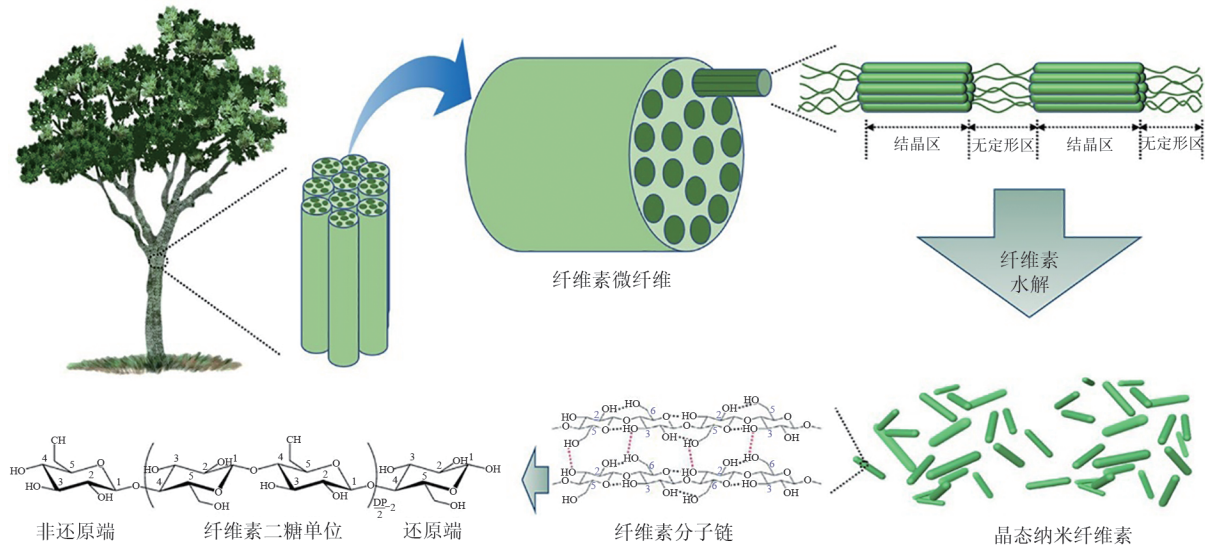


图 1 纳米纤维素的结构组装流程  
Fig. 1 Structural assembly process of nanocellulose

### 1.2 纳米纤维素的晶型特征

在自然界中,纤维素通常以多分子组装形式存在,而非以单体形式存在。这种组装特性源于纤维素在生物合成中的多级纺丝与组装过程。通常,约36条纤维素分子链通过氢键和范德华力组装形成原纤维(protofibrils),原纤维进一步聚集形成尺度更大的微纤维(microfibrils),最终构成纤维素纤维<sup>[5]</sup>。在纤维素的生物组装过程中,纤维

素链规则排列形成有序的结晶区域,然而,由于纤维的内应力等因素,部分区域的纤维素分子链可能发生错位与扭曲,形成无定型结构。纤维素由于其来源、提取或加工方法不同,会导致其分子排列方式及结晶结构的差异。目前已知的纤维素结构主要包括 I、II、III、III<sub>II</sub>、IV<sub>I</sub>与IV<sub>II</sub>六种类型。天然来源纤维素通常为 I 型晶体结构,根据成键网络的差异, I 型结构又可细分 I $\alpha$ 与 I $\beta$ 两种晶相

结构。不同来源的纤维素中,这两种晶相的存在比例存在显著差异。例如,在藻类中 I  $\alpha$  型占比更高,而在高等植物中, I  $\alpha$  与 I  $\beta$  晶相均有分布。在 I  $\alpha$  与 I  $\beta$  的结构中,纤维素链都呈相互平行的排列,但是由于它们氢键结构的不同,使其具有不同的晶体结构。I  $\alpha$  型晶相属于三斜晶系(P1),其晶格常数为: $a=6.717 \text{ \AA}$ ,  $b=5.962 \text{ \AA}$ ,  $c=10.400 \text{ \AA}$ ;

$\alpha=118.08^\circ$ ,  $\beta=114.80^\circ$ ,  $\gamma=80.37^\circ$ ,每个晶胞中仅包含一个纤维素链。I  $\beta$  型晶相属于单斜晶系(P2<sub>1</sub>),每个晶胞包含两个纤维素链,晶格常数为: $a=7.784 \text{ \AA}$ ,  $b=8.201 \text{ \AA}$ ,  $c=10.38 \text{ \AA}$ ;  $\alpha=\beta=90^\circ$ ,  $\gamma=96.5^\circ$ 。I  $\alpha$  晶相为亚稳相,容易通过高温退火处理转化为热力学更稳定的 I  $\beta$  晶相。这一转化特性为纤维素在功能领域的开发提供了理论依据。

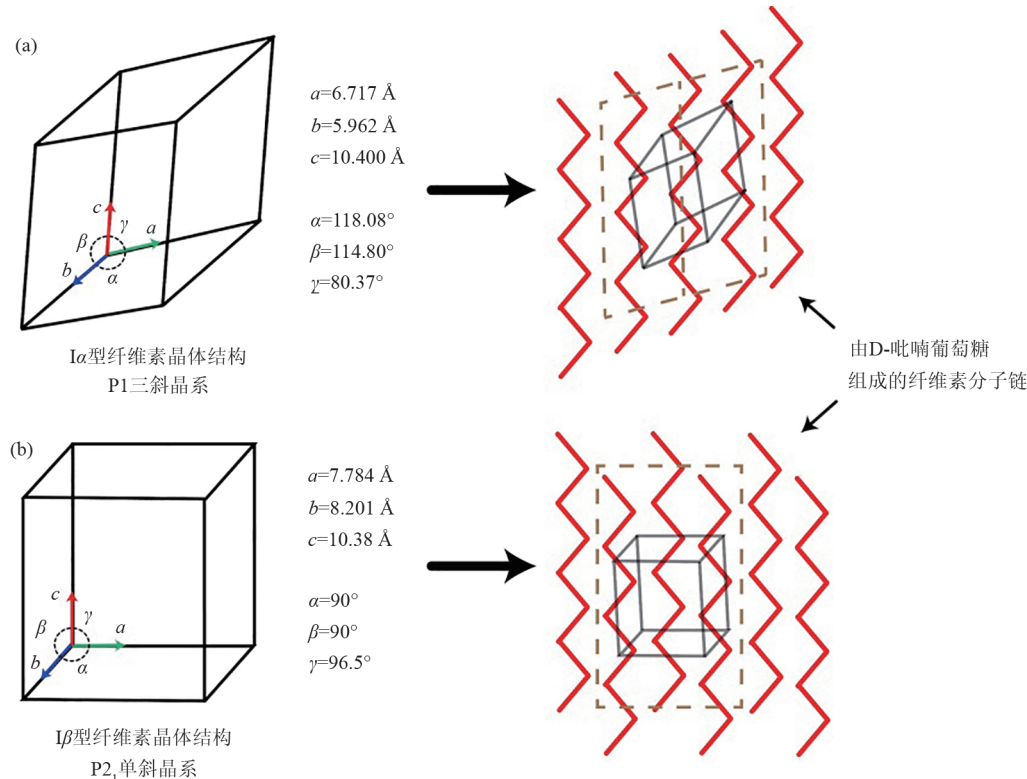


图2 I  $\alpha$ 型(a)与 I  $\beta$ 型(b)纳米纤维素的晶相结构

Fig. 2 The crystalline structure of I  $\alpha$  (a) and I  $\beta$  (b) nanocellulose

### 1.3 纳米纤维素的形貌与尺寸

纳米纤维素通常呈棒状或纤维状,具有高的长径比(约10-100)。其尺寸大小受到纤维素来源及制备方法的显著影响。表1中总结了不同来源与制备方法得到的纳米纤维素的几何尺寸特征。木浆来源的纳米纤维素宽度通常为3-5 nm、长度约为100-200 nm,棉花纳米纤维素的宽度为5-10 nm、长度约为100-300 nm,海洋被囊类动物来源的纳米纤维素尺寸较大,宽度约为10-20 nm、长度则可达500-2 000 nm<sup>[7,8]</sup>。特别是被囊类动物的囊鞘纤维素,由于其具有极高的长径比(可达70),相应的纳米纤维素展现出更为优异的机械增强性能。

不同来源的纳米纤维素在纤维的横截面结

构和沿长轴方向的形态上存在显著差异。基于透射电镜(TEM)表征,Revol等发现法囊藻的纳米纤维素横截面形态近似正方形,平均边长约为18 nm,而被囊类动物来源的纳米纤维素横截面则呈长方形,尺寸为8.8 nm $\times$ 18.2 nm<sup>[3]</sup>。此外,纳米纤维素在沿长轴方向的形态因来源不同也存在显著差异。被囊类动物来源的纳米纤维素呈长的带状纤维结构,且沿纤维长轴方向每隔600-800 nm出现一次半螺旋的扭曲。相较之下,细菌来源的纳米纤维素,其扭曲结点的间隔更大,约为1.2-1.6  $\mu\text{m}$ 。植物来源的纤维素也被报道存在类似的扭曲结构,但是由于其纤维长度相对较短,其扭转的间隔长度尚不明确<sup>[20]</sup>。

表 1 不同来源纳米纤维素的尺寸  
Table 1 Size of nanocellulose from different sources

来源 Origin	长度/nm Length	宽度/nm Width	表征技术 Characterization	参考文献 Reference
棉花	100~150	5-10	TEM	[9]
	70~170	~7	TEM	[3]
	200~300	8	TEM	[10]
	255	15	DDL	[11]
	150~210	5~11	AFM	[12]
软木材	100~200	3~4	TEM	[13]
	100~150	4~5	AFM	[14]
苧麻	150~250	6~8	TEM	[15, 16]
	50~150	5~10	TEM	[17]
剑麻	100~500	3~5	TEM	[18]
	150~280	3~7	TEM	[5]
细菌	100~1 000	10~50	TEM	[19]
被囊类动物	1 000~3 000	15~30	TEM	[3]
	1 160	16	DDL	[11]
法囊藻	>1 000	10~20	TEM	[3]

#### 1.4 纳米纤维素的功能性质

纳米纤维素在保留普通纤维素结晶结构与基本性质的基础上,其特殊的纳米级形貌特征赋予了新的性质。例如纳米纤维素具有出色的力学性能、优异的透光性能、良好的阻隔性以及各向异性的润湿特性。这些性质不仅为纳米纤维素开发了新的功能,还极大地拓展了纳米纤维素的应用前景。与未经处理的纤维素相比,纳米纤维素具有更加优异的强度和刚性,其杨氏模量可达 143 GPa,拉伸强度可达 3 GPa,强度性能堪比钢铁和碳纤维,此外,纳米纤维素的密度较低,仅为 1.5 kg/m<sup>3</sup>,使其成为非常理想的结构增强材料<sup>[2,4]</sup>。纳米纤维素卓越的机械性能和稳定性主要归因于其高聚合度与高结晶度。纤维素分子自身具有显著的刚性,其分子链中的葡萄糖吡喃环由于结构稳定,难以自由旋转。纤维素分子的直链特性决定了聚合度越高,其分子链越长,链间的范德华力越强。而结晶度的提高能够显著增加分子链的排列规整度,形成更多氢键,显著增强纳米纤维素的强度与模量。

纳米纤维素相比普通纤维素在增强气体阻隔性方面展现出卓越性能<sup>[21]</sup>。基于纳米纤维素的膜材料中由于其较高的结晶度与均一的尺寸,在成膜过程中倾向于形成更加紧密的堆积排列。此外,纳米纤维素表面的羟基在膜干燥后会形成

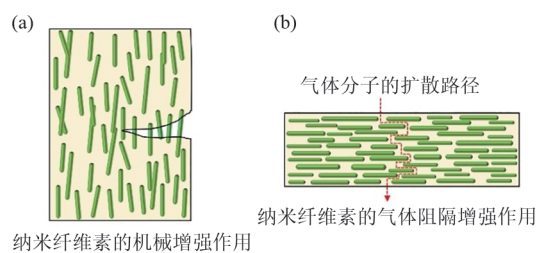


图 3 (a) 纳米纤维素增强材料机械性能;(b) 纳米纤维素增强材料气体阻隔

Fig. 3 (a) Mechanical properties of nanocellulose-reinforced materials; (b) Gas barrier properties of nanocellulose-reinforced materials

致密的氢键网络,从而显著提升包装材料对气体渗透的阻隔能力<sup>[22]</sup>。包装材料的氧气和水蒸气阻隔性是评价其性能的重要指标,纳米纤维素的优异气体阻隔性使其成为食品包装材料的理想选择。传统纤维素材料(如麻布、棉布等)通常不具备透明性。然而,当纤维素的尺寸减小至纳米尺度,其尺寸低于可见光波长,能够显著降低光波的散射作用。因此,以纳米纤维素为基质制备的膜材料通常表现出良好的透明性,这一特性拓展了纳米纤维素在食品包装中的应用<sup>[23, 24]</sup>。

此外,纳米纤维素在乳化性能方面展现出优于普通纤维素的趋势<sup>[25]</sup>。纤维素分子链单元葡萄糖环上的 C2、C3 与 C6 位均带有羟基,这使得纤维素具有良好的亲水性。而纳米纤维素由于结晶度更高,其晶体结构具有显著的各向异性的

表面润湿性。这种润湿性的差异源于不同晶面的官能团暴露情况。例如, I 型纳米纤维素的晶面 (1-10) I  $\beta$ /(100) I  $\alpha$ 、(110) I  $\beta$ /(010)  $\alpha$  与 (010) I  $\beta$ /(110) I  $\alpha$  均裸露有羟基, 因此具备良好的亲水性; 而晶面 (200) I  $\beta$ /(220) I  $\alpha$  则暴露有葡萄糖吡喃环的 C-H 基团, 表现出较强的疏水性<sup>[26]</sup>。纳米纤维素的这种两亲性, 使其在稳定 Pickering 乳液方面表现出独特优势。

## 2 纳米纤维素的制备方法

### 2.1 酸水解法制备纳米纤维素

纳米纤维素的研究最早可追溯至 20 世纪 50 年代, 当时 Rånby 报道了通过硫酸水解纤维素, 制得稳定的纳米纤维素胶体悬浮液<sup>[3]</sup>。随后, Nickerson 等人发现, 通过酸性溶液热处理, 纤维素的降解程度会趋于极限, 并首次通过透射电镜观察到晶态纳米纤维素的棒状结构。电子衍射分析进一步表明, 这些纤维素棒具有与原始纤维素相同的结晶结构<sup>[6]</sup>。直至今日, 酸水解仍然是制备纳米纤维素的重要方法。酸处理能够断裂纤维素葡萄糖结构单元之间的糖苷键, 由于纤维素中结晶区域相较于无定形区域具有更强的酸抗性, 可以利用两者在水解动力学上的差异, 选择性去除纤维素的无定形部分, 保留结晶部分, 从而得到晶态纳米纤维素。在酸水解的初始阶段, 纤维素的聚合度通常会迅速降低, 随着水解时间延长, 聚合度的降低速率逐渐放缓, 最终趋于稳定, 这种稳定聚合度 (level-off polymerization, LODP) 被认为与纤维素纳米晶的尺寸和来源密切相关。例如, 木材中纤维素的 LODP 值通常为 140-200, 棉纤维为 250, 而苧麻纤维可高达 300<sup>[3]</sup>。部分原料中的纤维素聚合度分布较宽, 由此制备的纳米纤维素通常呈现出更大的尺寸差异。

用于制备晶态纳米纤维素的酸种类多样, 其中应用最广的是硫酸和盐酸, 尽管磷酸、氢溴酸以及有机酸(如甲酸、乙酸和草酸)制备纳米纤维素的研究相对较少, 但仍有报道。通过硫酸水解制备得到的纳米纤维素在水溶液中表现出良好的分散性, 这是由于硫酸水解的同时会与纤维素表面的羟基发生酯化反应, 生成带负电荷的硫酸酯基团。由于颗粒间的静电排斥作用, 硫酸制备

的纳米纤维素具有更高的悬浊液稳定性。相比之下, 盐酸水解制得的纳米纤维素表面不带电荷, 因而分散性较差, 在水溶液中更易发生絮凝。而对盐酸水解得到的纳米纤维素进行硫酸处理则不会影响其尺寸, 但可以调节纤维素表面的硫酸基团的数量, 从而实现对其表面电荷密度的调控<sup>[27]</sup>。硫酸制得纳米纤维素的热稳定性往往低于盐酸水解所得。此外, 两者在流变性能上同样表现出差异, 盐酸水解得到的纳米纤维素具有明显的触变特征, 而硫酸水解得到的纳米纤维素的黏度则相对稳定, 并不随时间变化<sup>[28]</sup>。

### 2.2 酶水解法制备纳米纤维素

尽管酸水解能够制备出具有均一尺度、高结晶度与高产率的纳米纤维素, 但是其工业生产会产生大量酸性废水, 容易造成环境污染。酶水解法避免了酸性溶液的使用, 降低了设备对抗腐蚀性的要求, 被认为是一种更加绿色环保的纳米纤维素生产技术。用水解纤维素的酶主要有外切纤维素酶、内切葡聚糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶与木聚糖酶等<sup>[29]</sup>。例如, Costa 等采用纤维素酶和  $\beta$ -葡聚糖酶水解小麦秸秆, 成功制得稳定的纳米纤维素悬浮液<sup>[30]</sup>。Tibolla 等以香蕉皮为原料, 经 KOH 溶液处理后, 再应用木聚糖酶解纤维素, 制得具有高长径比的纳米纤维素<sup>[31]</sup>。

通过酶法水解得到的纳米纤维素通常都具有较高的长径比, 因此表现出优异的胶凝性和机械增强性, 更适用于作为增稠剂或材料增强剂。然而, 酶法的制备成本较高, 且对酶的使用剂量与处理条件的控制要求更为严格, 否则容易导致所得纳米纤维素尺寸不均匀<sup>[32]</sup>。为降低酶法制备成本, 研究者通常采用酶固定化技术, 以实现酶的重复利用。例如, Yassin 等应用戊二醛将纤维素酶共价固定在凝胶聚合物上, 显著提高了纤维素酶的热稳定性和回收率。实验表明, 该固定化酶重复使用六次后仍能保留初始活性的 85%<sup>[33]</sup>。虽然酶法制备纳米纤维素更为环保, 但酶解所获的纳米纤维素尺寸均匀性较差, 品质难以稳定控制, 因此当前酶水解制备纳米纤维素仍未实现大规模商业化生产。

### 2.3 机械法制备纳米纤维素

机械法制备纳米纤维素的方法繁多, 包括超声、高压均质、精细研磨与高压微流射等, 这些技

术的作用方式虽各不相同,但核心机制均是通过纤维素的相互作用,从而实现纤维素的破碎与纳米化<sup>[32]</sup>。超声破碎通过高频率机械震荡引发纤维素分散液的空化效应,利用气泡闭合时产生的强大冲击力破碎纤维素。这一方法操作简便,但是容易引发液体急剧升温,且难以实现连续的大规模生产。高压均质则通过泵对纤维素悬浊液加压,使液体通过限流缝隙后瞬间失压,流体获得极高的速率而产生空穴效应,同时通过剪切力破坏纤维素结构。高压均质适用于工业化连续生产,但能耗较高,且由于均质腔体几何构造较为复杂,设备易发生堵塞和损坏。精细研磨使用如球磨机、圆盘磨浆机等设备,通过磨盘或者研磨介质对纤维素进行挤压和剪切,实现破碎目的。该方法加工成本较低,且设备不易发生损坏,但常因研磨不充分导致纤维素尺寸均一度和质量较差。高压微射流的原理与高压均质相似,通过加压使纤维素悬浊液通过微孔模块后压力骤降,引发高速冲击、空化和剪切作用,从而实现纤维素破碎<sup>[6, 34]</sup>。

单一使用机械法制备纳米纤维素通常存在能耗高、尺寸均一度差、形貌不规则,结晶度低等问题。为降低能耗并提升纳米纤维素的品质,机械破碎常与化学处理联合应用。例如,Janardhan等通过酶水解结合精细研磨法处理木浆液,制得高品质纳米纤维素<sup>[35]</sup>。Yang等对银杏壳纤维素进行酸水解后,进行高压均质处理,不同的均质压力可以精准调控所得纳米纤维素的尺寸<sup>[36]</sup>。Jonoobi等为制备纳米尺度的洋麻纤维素,采用碱溶液高温蒸煮与高压均质相结合的方式进行处理<sup>[32]</sup>。机械破碎与化学处理相结合,不仅显著降低了机械法的能耗,还有效提升了纳米纤维素的产率与品质,这一经典组合方法也是当前工业界制备纳米纤维素的常用方法。

### 3 纳米纤维素在食品领域中的应用

#### 3.1 纳米纤维素在食品包装领域中的应用

食品包装在食品工业中具有重要应用,理想的食品包装材料需要具备稳定的物理和化学性质,能够避免与食品和环境发生不良反应;同时,包装材料需有效保护食品在流通和储存的过

程中避免外界损害,阻隔微生物的污染,保持食品的气体环境与湿度平衡;同时为降低环境影响,理想的包装材料还需具备可回收利用或可生物降解的特性,以减少环境污染<sup>[2, 37]</sup>。

以纤维素为基质的纸张是一种历史悠久的包装材料,在食品工业出现之前便已广泛应用于食品包装。随着石油化工的发展,纸张逐渐被有机塑料包装所取代,然而,近年来由于石油资源的过度消耗、能源枯竭与环境污染的问题日益突出,开发兼具可再生性、可降解并能满足各种食品包装需求的新型包装材料已成为亟需解决的现实问题<sup>[38]</sup>。纳米纤维素不仅继承了纤维素可再生、可生物降解的优势,还凭借其高强度、高阻隔性与高透光性等特性,在开发新型的食品包装材料方面展现出巨大的潜力。

#### 3.1.1 纳米纤维素对食品包装材料的机械性能的提升

食品在运输过程中由于颠簸、外部的挤压或刮擦,容易产生物理损伤,因而食品包装需具备足够的机械性能以保护食品免受外力影响。纳米纤维素凭借其高结晶度,展现出优异的机械性能,Henriksson等首次以纳米纤维素为原料,得到了具有优异力学性能的纳米纤维素纸,其杨氏模量高达 14.7 GPa,拉伸强度为 214 MPa,断裂能高达 15 MJ/m<sup>3</sup><sup>[39]</sup>。这一发现促使纳米纤维素被广泛应用于各类食品包装材料中,作为纳米增强剂显著提升其机械性能。

Ahmed等通过酸水解法从短棉绒中提取纳米纤维素,并将其作为增强剂添加到羧甲基纤维素膜中。研究发现,加入 5 wt%的纳米纤维素后,复合膜的拉伸强度与弹性模量分别提高了 23%和 27%,该复合膜作为包装材料能够显著延长果蔬的保质期<sup>[40]</sup>。Azelia等将纳米纤维素加入醋酸纤维素溶液中,通过浇筑法制备的复合膜,其拉伸强度与弹性模量相较于纯醋酸纤维素膜分别提高了 38%与 65%<sup>[41]</sup>。Ilyas等以棕榈糖的加工废弃物棕榈纤维为原料,采用高压均质法制得棕榈纳米纤维素,并将其应用于改善棕榈淀粉膜的机械性能。实验表明,随着纳米纤维素添加量从 0.1 wt%增加到 1.0 wt%,复合膜的拉伸强度和拉伸模量逐渐提升<sup>[42]</sup>。此外,Chou等以可生物降解聚乙烯醇为基质,与纳米纤维素复合制备食品密封膜。该复合膜的拉伸模量与拉伸强度分别高达 2.5 GPa 与 80 MPa,断裂应变可

表2 纳米纤维素在食品包装材料中的应用  
Table 2 Application of nanocellulose in food packaging materials

原材料 Materials	应用途径 Applications	参考文献 References
含有木质素的纳米纤维素	纳米纤维素复合膜	[22]
纳米纤维素	纳米纤维素纸	[39]
短棉绒纳米纤维素与羧甲基纤维素	羧甲基纤维素复合膜	[40]
纳米纤维素与醋酸纤维素	醋酸纤维素复合膜	[41]
棕榈纳米纤维素与淀粉	淀粉复合膜	[42]
纳米纤维素与聚乙烯醇	食品密封膜	[43]
纳米纤维素、聚丙烯薄膜与纳米几丁质	透氧透水膜	[45]
纳米纤维素与瓜尔胶	抗油复合膜	[46]
乙酰化纳米纤维素、聚乳酸与纳米氧化锌	具有隔氧隔水性能的复合膜	[49]
玉米淀粉与纳米纤维素	生物可降解的复合膜	[50]
木质素纳米颗粒与纳米纤维素	生物可降解的隔紫外线地膜	[51]
椰子壳纳米纤维素与聚乙烯醇	生物可降解的聚乙烯复合膜	[52]

达233%,力学性能显著优于与常规商业ES密封膜,显示出替代市售不可生物降解密封膜的潜力<sup>[43]</sup>。

3.1.2 纳米纤维素对食品包装膜阻隔性的提升  
包装材料的阻隔性能对保持食品的新鲜性与保质期具有关键作用,因此氧气与水蒸气的阻隔性是评估食品包装材料的重要指标<sup>[44]</sup>。Nguyen等采用多次浸涂法,将纳米纤维素与纳米几丁质负载到聚丙烯薄膜表面,所制得的复合膜对氧气和水蒸气的透过率接近于铝塑膜的水平<sup>[45]</sup>。Dai等以表面带负电的纳米纤维素与表面带正电的瓜尔胶为原料,利用层层组合法构建致密的复合膜,其对水蒸气与氧气的透过率分别低至 $68.52 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{atm})$ 与 $5.56 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{atm})$ ,同时表现出优异的抗油性能,且易于大规模生产,能够有效地减缓食品的氧化变质,是理想的食品包装材料<sup>[46]</sup>。

由于纳米纤维素表面大量分布的羟基具有较强的亲水性,在高湿环境中因水合作用可能会降低阻隔性,因此,通常通过疏水改性或与其他疏水材料复合来增强包装材料在潮湿环境下的阻隔性能<sup>[47, 48]</sup>。Trifol等为改善纳米纤维素对水蒸气的阻隔性,采用含木质素(16%)的纳米纤维素改性,通过木质素提高复合膜的疏水性并增加纤维素之间的界面粘附力,从而降低复合膜的孔隙率。与单一纳米纤维素膜相比,复合膜的水蒸气透过率降低了16%,氧气透过率降低了53%<sup>[22]</sup>。此外,Yu等对纳米纤维素进行乙酰化

修饰,并与聚乳酸和纳米氧化锌复合制备复合膜,显著增强了材料对氧气与水蒸气的阻隔性能<sup>[49]</sup>。纳米纤维素表面丰富的羟基为其化学改性或者与其他物质复合提供了良好的可塑性,加之其优异的机械与阻隔特性,纳米纤维素凭借其优异性能,近年来已成为食品包装领域的重要研究方向。

3.1.3 纳米纤维素食品包装材料的生物降解性  
采用可降解生物材料替代传统石油基塑料包装是解决全球白色污染的有效途径。纤维素作为储量最丰富的生物高分子材料,一直被视为开发可降解包装的重要原料。Malekzadeh等以玉米淀粉与纳米纤维素为原料,通过浇铸法制备出一种能够生物降解的复合膜,在土壤暴露30 d后,该膜有效降解了79.5%<sup>[50]</sup>。Bian等采用马来酸水解制得的木质素纳米颗粒与纳米纤维素复合,制备的复合膜表现出优异的机械性质(抗拉强度为164 MPa,杨氏模量为8.0 GPa)与卓越的紫外阻隔能力(阻隔率高达95.2%)。此外,该复合膜在土壤与海水中能够被快速降解,有望替代塑料材料应用于农业地膜与食品包装领域<sup>[51]</sup>。Arun等以椰子壳为原料,采用机械球磨与酸水解相结合的方式制备纳米纤维素,并将其添加到聚乙烯醇聚合物基底中,结果表明,复合膜的机械性能与热稳定性显著提升,同时具备优异的生物降解性能,经45 d生物降解,其降解量可达 $87.34 \pm 0.91\%$ <sup>[52]</sup>。纳米纤维素凭借其优异的生物降解性能,能够在满足食品包装所需的机械强度

与阻隔能力的基础上实现生物降解,在当今全球资源危机与环境污染日益严重的背景下,进一步探索纳米纤维素在食品包装领域的应用潜力具有重要的现实意义。

### 3.2 纳米纤维素在食品加工领域中的应用

**3.2.1 纳米纤维素用于 Pickering 乳液的制备** 乳液是将两种不相混溶的液体通过微小液滴的形式将其中一相分散到另一相的混合液体,乳液体系广泛应用于食品工业的加工过程中,包括奶油、蘸酱、调味酱、甜点以及其他食品佐料,乳液制备技术的进步为改善食品的品质与功能提供了有力的技术支撑<sup>[26]</sup>。Pickering 乳液不同于传统乳液,其稳定性来源于固体纳米颗粒而非表面活性剂。相比传统乳液, Pickering 乳液具有更强的稳定性、更灵活的渗透性与更优异的弹性响应等优势,因此在食品工业中展现出更佳的性能<sup>[53]</sup>。近年来,纳米纤维素因其两亲性和纳米颗粒特性,在 Pickering 乳液制备中得到了广泛应用<sup>[54]</sup>。Yan 等采用从向日葵茎中分离的纳米纤维素作为乳化剂,成功制备刺激水包油 Pickering 乳液<sup>[55]</sup>。Yang 等以白果壳为原料,采用酸水解

与机械破碎相结合的方式,通过精准调整高压均质的压力制备出不同尺寸的纳米纤维素,同时发现长度为 527 nm 的纳米纤维素对乳液具有最佳的稳定效果<sup>[36]</sup>。

对 Pickering 乳液的稳定效果与固体颗粒的润湿性密切相关。依据毛细力吸附理论,当纳米粒子在油-水界面的接触角接近 90 度时,颗粒在油水界面具有最大的解析能,表现出最优的界面稳定效果。宏观尺寸的纤维素不同,纳米纤维素表面的润湿性具有各向异性。具有 I 型晶体结构的纳米纤维素(200) I β/(220) I α 晶面表现出较强的疏水性,而其他晶面则更亲水,这种特性使得纳米纤维素能够不可逆地吸附在油水界面上,从而形成高度稳定的 Pickering 乳液<sup>[56]</sup>。Kalashnikova 等研究了纳米纤维素在油水界面的吸附特性,发现较小长径比的纳米纤维素在油水界面的覆盖率可达 80% 以上,而具有高长径比的纳米纤维素由于空间位阻效应覆盖率较低(约为 40%)。不过高长径比的纳米纤维素更容易在乳液滴之间形成交联的网络结构,从而进一步增强乳液的稳定性<sup>[57]</sup>。

表 3 纳米纤维素在食品加工领域的应用  
Table 3 Applications of nanocellulose in food processing

制备原材料 Materials	应用途径 Applications	参考文献 Reference
纳米纤维素	代替饼干中的脂肪	[34]
纳米纤维素	代替巧克力中的脂肪	[34]
纳米纤维素	代替沙拉酱中的脂肪	[34]
白果壳纳米纤维素	皮克林乳液稳定剂	[36]
向日葵茎纳米纤维素	皮克林乳液乳化剂	[55]
纳米纤维素与纳米银颗粒	具有机械性能的抗菌水凝胶	[48]
木醋杆菌发酵所得纳米纤维素	椰果替代物	[58]
纳米纤维素与海藻酸钠	用于负载姜黄素的水凝胶	[59]

**3.2.2 纳米纤维素用于水凝胶的制备** 纳米纤维素在溶液中容易通过分子间的氢键交联,能够形成具有三维空间网络结构的水凝胶,成为食品工业中制备水凝胶的理想材料。通过木醋杆菌生物发酵得到的纳米细菌源纤维素具有交联的网络结构,展现出与椰果相似的质构性能,当前已作为椰果替代品被广泛应用于果冻、饮料和罐头等食品的加工中<sup>[58]</sup>。此外,由单分散纳米纤维制备的纤维素水凝胶具有强度高、比表面积大、孔隙率高与热膨胀系数低等优点,通过与其他成分

复合,在功能食品加工领域中展现出较好的应用潜力。例如,Wang 等利用纳米纤维素为基质,负载纳米银颗粒制得具有良好机械性能和抗菌特性的水凝胶<sup>[48]</sup>。Juste 等以纳米纤维素与海藻酸钠复合物为原料,采用 3D 打印技术制备水凝胶,并将其作为载体负载姜黄素。研究发现,纳米纤维素的添加量对姜黄素的稳定性与释放效率有显著影响<sup>[59]</sup>。纳米纤维素凝胶因其无毒和良好的生物相容性,在通过自身链相互交联或其他材料复合时,易实现对其质构性能的精准调控,这

一特性为其在食品加工领域的多样化应用提供了可能性。

**3.2.3 纳米纤维素在食品加工中的其余应用** 纳米纤维素具有稳定的化学性质,展现出对热、碱与酸的良好耐受性,且不易与食品中的其他成分发生反应化学反应,因而适宜作为食品配料或添加剂用于食品加工<sup>[60,61]</sup>。其高比表面积和表面丰富的羟基能够通过氢键与水结合,能够显著提高溶液的黏度,因此常被作为增稠剂应用于食品配方中<sup>[62]</sup>。

作为一种不溶性膳食纤维,纳米纤维素通常不会直接被人体消化吸收,具有低热量值和高饱腹感的优势,同时能够有效调节肠道微生物群落组成,适合用于为肥胖、糖尿病或心血管疾病患者开发的特殊食品。例如,Kleinschmidt等在饼干中采用纳米纤维素等无脂成分代替油脂,在成功降低馅料15-20%热量的同时保持了饼干的酥脆口感<sup>[34]</sup>。

纳米纤维素独特的高长径比结构赋予其触变性与剪切变稀等流变特性。当剪切速率增加时,纳米纤维素分散液的黏度逐渐降低,这是由于高流速下纳米纤维素倾向于沿流动方向排列,长轴方向的取向性增强。这种流变特性使纳米纤维素在食品中能够提供类似脂肪的滑腻感,成为脂肪替代品的重要选择<sup>[28]</sup>。例如,Turbak等设计了一种基于纳米纤维素的低热量低脂沙拉酱。Robson等发现,纳米纤维素可以部分代替巧克力中的油脂,从而降低食品的能量密度<sup>[34]</sup>。这表明纳米纤维素在开发低脂健康食品及功能性食品方面具有重要应用潜力。

**3.2.4 纳米纤维在食品领域中的创新性展望** 近年来,纳米纤维素凭借其卓越的物理化学特性,在食品领域展现出广阔的应用前景。随着研究的深入和产业需求的变化,其应用范围不断拓展(图4)。在植物基肉制品和细胞培养肉领域,纳米纤维素可分别作为脂肪替代品和细胞生长支架,通过模拟肌肉纤维的微观结构,优化新型肉制品的质地和咀嚼感,使其更接近天然肉类<sup>[63]</sup>。此外,Liu等研究发现,纳米纤维素可通过交联与吸附作用调控肠道中淀粉和葡萄糖的消化速率,从而稳定血糖生成指数,为高饱腹感食品和控糖食品的研发提供新的策略<sup>[64]</sup>。在食品智能制造方面,纳米纤维素因其对温度、湿度、pH值等外

部刺激的良好响应性,在3D打印食品中展现出独特优势,有助于实现对食品形态与内部结构的精准调控<sup>[65]</sup>。在食品风味方面,纳米纤维素作为风味成分固定化载体,通过提升挥发性风味物质的稳定性和缓释效果,增强食品风味的持久性和品质稳定性<sup>[66]</sup>。同时,纳米纤维素可改善食品的质构和流变特性,增强醇厚感并延长货架期,展现出作为天然增稠剂的潜力。在食品精准递送领域,如上文所述,纳米纤维素可作为油水界面稳定剂和水凝胶基质,通过维持载体的稳定性,实现食品活性成分和益生菌的精准递送。在食品安全与包装领域,纳米纤维素可用于智能食品标签,凭借其优异的兼容性和响应特性,可与花青素等指示成分复合制备食品包装,实现对食品新鲜度、农药残留及微生物污染的实时监测<sup>[67]</sup>。此外,由纳米纤维素制成的食品气调包装膜因其良好的气体交换性和水蒸气渗透性,可有效提升食品保鲜效果,延长农产品存储时间<sup>[68]</sup>。综上所述,纳米纤维素在食品领域的多维创新应用对于推动食品产业智能化、健康化及可持续发展提供了可靠的解决方案。

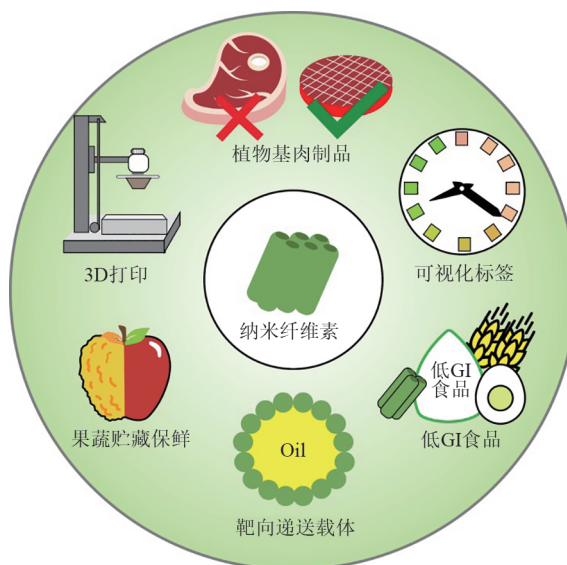


图4 纳米纤维素在食品包装与加工中的应用

Fig. 4 Applications of nanocellulose in food packaging and processing

## 4 纳米纤维素应用面临的挑战

纳米纤维素因其可再生、来源天然、易降解、生物相容性好、环境友好等特性而备受关注。然而,现有的制备方法仍依赖酸水解等化学方法,

不仅原料利用率低,还需消耗大量化学品,易造成环境污染<sup>[69]</sup>。其他生产方法对工艺流程和设备要求较高,例如机械法多需高压剪切处理,酶解法的生产成本较高、而微生物法则需维持细菌生长所需的适宜温度<sup>[70]</sup>。因此开发更加方便、经济和适用于大规模生产的方法仍然是当前研究的重点。

尽管微米尺度的纤维素已被美国食品药品监督管理局(FDA)和普遍认为安全(GRAS)认证为合格的食物添加剂,但纳米尺度的物料在体内的代谢途径和毒理性质相较微米尺度物料存在显著差异,需要通过毒理实验和临床实验以验证其安全性,并通过建立规范标准来明确其应用途径和安全剂量<sup>[71,72]</sup>。例如,非纳米尺度二氧化钛被广泛应用为食物添加剂,但纳米尺度二氧化钛却被证实具有损害人体健康的遗传毒性<sup>[73]</sup>。同时,为了提升纳米纤维素的应用性能常需化学改性。然而改性纳米纤维素的加工方法及新增修饰基团往往会影响其安全性,可能引起生物体的不良反应,仍需更多研究进一步阐明<sup>[74]</sup>。

## 5 结论

纳米纤维素是一种绿色、可再生的纳米级材料,具有优异的机械性能、良好的透光性、气体阻隔性以及生物降解性。这些特性使得纳米纤维素在食品加工和包装领域中展现出广阔的应用潜力。在食品包装中,纳米纤维素的添加不仅显著提升了包装材料的拉伸强度和阻隔性,还有效增强了食品的贮藏稳定性。此外,作为食物添加剂,纳米纤维素能够改善食品的质地和存储稳定性,展现出其在食品乳化剂和增稠剂方面的重要潜力。未来,纳米纤维素的广泛应用有望成为推动食品工业高质量发展的重要力量。

## 参考文献

- [1] Etale A, Onyianta AJ, Turner SR, et al. Cellulose: A review of water interactions, applications in composites, and water treatment[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(5): 2016-2048.
- [2] Wang YX, Liu K, Zhang M, et al. Sustainable polysaccharide-based materials for intelligent packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120851.
- [3] Youssef H, Lucian, A, Orlando JR, et al. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2010, 57: 178-186.
- [4] Chen XX, Yang J, Shen MY, et al. Structure, function and advance application of microwave-treated polysaccharide: A review[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2022, 123: 198-209.
- [5] Siqueira G, Bras, Dufresne A. Cellulose whiskers versus microfibrils: Influence of the nature of the nanoparticle and its surface functionalization on the thermal and mechanical properties of nanocomposites[J]. *Biomacromolecules*, 2009, 10(2): 425-432.
- [6] Rana AK, Frollini E, Thakur VK. Cellulose nanocrystals: Pretreatments, preparation strategies, and surface functionalization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182: 1554-1581.
- [7] Eichhorn SJ, Etale A, Wang J, et al. Current international research into cellulose as a functional nanomaterial for advanced applications[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(10): 5697-5767.
- [8] Noremylia MB, Hassan MZ, Ismail Z. Recent advancement in isolation, processing, characterization and applications of emerging nanocellulose: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 206: 954-976.
- [9] Araki J, Wada M, Kuga S. Steric stabilization of a cellulose microcrystal suspension by poly(ethylene glycol) grafting[J]. *Langmuir*, 2001, 17(1): 21-27.
- [10] Heux L, Chauve G, Bonini C. Nonflocculating and chiral-nematic self-ordering of cellulose microcrystals suspensions in nonpolar solvents[J]. *Langmuir*, 2000, 16(21): 8210-8212.
- [11] De Souza Lima MM, Wong JT, Paillet M, et al. Translational and rotational dynamics of rodlike cellulose whiskers[J]. *Langmuir*, 2003, 19(1): 24-29.
- [12] Miller AF, Donald AM. Imaging of anisotropic cellulose suspensions using environmental scanning electron microscopy[J]. *Biomacromolecules*, 2003, 4(3): 510-517.
- [13] Vanderfleet OM, Cranston ED. Production routes to tailor the performance of cellulose nanocrystals[J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6(2): 124-144.
- [14] Beck-Candanedo S, Roman M, Gray DG. Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions[J]. *Biomacromolecules*, 2005, 6(2): 1048-1054.

- [15] Habibi Y, Dufresne A. Highly filled bionanocomposites from functionalized polysaccharide nanocrystals[J]. *Biomacromolecules*, 2008, 9(7): 1974-1980.
- [16] Habibi Y, Goffin AL, Schiltz N, et al. Bionanocomposites based on poly( $\epsilon$ -caprolactone)-grafted cellulose nanocrystals by ring-opening polymerization[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(41): 5002-5010.
- [17] Curvelo AAS, Menezes AJD, Dufresne A, et al. Extrusion and characterization of functionalized cellulose whisker reinforced polyethylene nanocomposites [J]. *Polymer*, 2009, 50(19): 4552-4563.
- [18] Rodriguez NLGD, Thielemans W, Dufresne A. Sisal cellulose whiskers reinforced polyvinyl acetate nanocomposites[J]. *Cellulose*, 2006, 13(3): 261-270.
- [19] Araki J, Kuga S. Effect of trace electrolyte on liquid crystal type of cellulose microcrystals[J]. *Langmuir*, 2001, 17(15): 4493-4496.
- [20] Terech P, Chazeau L, Cavaille JY. A small-angle scattering study of cellulose whiskers in aqueous suspensions[J]. *Macromolecules*, 1999, 32(6): 1872-1875.
- [21] Trinh BM, Chang BP, Mekonnen TH. The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 133: 101071.
- [22] Trifol J, Moriana R. Barrier packaging solutions from residual biomass: Synergetic properties of CNF and LCNF in films[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 177: 114493.
- [23] Tran A, Boott CE, MacLachlan MJ. Understanding the self-assembly of cellulose nanocrystals-toward chiral photonic materials[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(41): 1905876.
- [24] Pei Y, Wang L, Tang KY, et al. Biopolymer nanoscale assemblies as building blocks for new materials: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(15): 2008552.
- [25] Cui FZ, Zhao SL, Guan X, et al. Polysaccharide-based Pickering emulsions: Formation, stabilization and applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106812.
- [26] Dai H, Wu J, Zhang H, et al. Recent advances on cellulose nanocrystals for Pickering emulsions: Development and challenge[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2020, 102: 16-29.
- [27] Wang N, Ding E, Cheng R. Preparation and Liquid crystalline properties of spherical cellulose nanocrystals[J]. *Langmuir*, 2008, 24(1): 5-8.
- [28] Li MC, Wu QL, Moon RJ, et al. Rheological aspects of cellulose nanomaterials: Governing factors and emerging applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(21): 2006052.
- [29] Turon X, Rojas OJ, Deinhammer RS. Enzymatic kinetics of cellulose hydrolysis: a QCM-D study[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2008, 24(8): 3880-3887.
- [30] Costa ALR., Gomes A, Tibolla H, et al. Cellulose nanofibers from banana peels as a Pickering emulsifier: High-energy emulsification processes[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 194: 122-131.
- [31] Tibolla H, Pelissari FM, Menegalli FC. Cellulose nanofibers produced from banana peel by chemical and enzymatic treatment[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 59(2): 1311-1318.
- [32] Jonoobi M, Oladi R, Davoudpour Y, et al. Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: a review[J]. *Cellulose*, 2015, 22(2): 935-969.
- [33] Yassin MAG, Abdul Aziz M, Ghanem, Ahmed F, et al. Green synthesis of cellulose nanofibers using immobilized cellulase[J]. *Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*, 2019, 205: 255-260.
- [34] Gómez H C, Serpa A, Velásquez-Cock J, et al. Vegetable nanocellulose in food science: A review [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57: 178-186.
- [35] Janardhnan S, Sain MM. Isolation of cellulose microfibrils - An enzymatic approach[J]. *Bioresources*, 2006, 1(2): 176-188.
- [36] Ni Y, Fan L, Sun Y. Interfacial properties of cellulose nanoparticles with different lengths from ginkgo seed shells[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106121.
- [37] Yang XP, Biswas SK, Han JQ, et al. Surface and interface engineering for nanocellulosic advanced materials[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(28): 2002264.
- [38] Panda PK, Sadeghi K, Seo J. Recent advances in poly (vinyl alcohol)/natural polymer based films for food packaging applications: A review[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100904.
- [39] Henriksson M, Berglund LA, Isaksson P, et al. Cellulose nanopaper structures of high toughness[J].

- Biomacromolecules, 2008, 9(6): 1579-1585.
- [40] Oun AA, Rhim JW. Preparation and characterization of sodium carboxymethyl cellulose/cotton linter cellulose nanofibril composite films[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 127: 101-109.
- [41] Cindradewi AW, Bandi R, Park CW, et al. Preparation and characterization of cellulose acetate film reinforced with cellulose nanofibril[J]. Polymers, 2021, 13(17): 2990.
- [42] Ra I, Sapuan S, Ibrahim R, et al. Effect of sugar palm nanofibrillated cellulose concentrations on morphological, mechanical and physical properties of biodegradable films based on agro-waste sugar palm starch[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4819-4830.
- [43] Chou CT, Shi SC, Chen TH, et al. Nanocellulose-reinforced, multilayered poly(vinyl alcohol)-based hydrophobic composites as an alternative sealing film [J]. Science Progress, 2023, 106(1): 1-15.
- [44] Jali S, Mohan TP, Mwangi FM, et al. A review on barrier properties of cellulose/clay nanocomposite polymers for packaging applications[J]. Polymers, 2024, 16(1): 51.
- [45] Nguyen HL, Tran TH, Hao LT, et al. Biorenewable, transparent, and oxygen/moisture barrier nanocellulose/nanochitin-based coating on polypropylene for food packaging applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 271(1): 118421.
- [46] Dai L, Long Z, Chen J, et al. Robust guar gum/cellulose nanofibrils multilayer films with good barrier properties[J]. Acs Applied Materials and Interfaces, 2017, 9(6): 5477-5485.
- [47] Qin Q, Li W, Zhang X, et al. Feasibility of bionanocomposite films fabricated using capsicum leaf protein and cellulose nanofibers[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132769.
- [48] Bangar SP, Esua OJ, Nickhil C, et al. Microcrystalline cellulose for active food packaging applications: A review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 36: 101048.
- [49] You F, Fei X, He Y, et al. Poly(lactic acid)-based composite film reinforced with acetylated cellulose nanocrystals and ZnO nanoparticles for active food packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 770-779.
- [50] Malekzadeh E, Tatari A, Firouzabadi MD. Preparation, characteristics, and soil-biodegradable analysis of corn starch/nanofibrillated cellulose (CS/NFC) and corn starch/nanofibrillated lignocellulose (CS/NFLC) films[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 309: 120699.
- [51] Bian H, Shu X, Su W, et al. Biodegradable, flexible and ultraviolet blocking nanocellulose composite film incorporated with lignin nanoparticles[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 14863.
- [52] Arun R, Shruthy R, Preetha R, et al. Biodegradable nano composite reinforced with cellulose nano fiber from coconut industry waste for replacing synthetic plastic food packaging[J]. Chemosphere, 2022, 291(1): 132786.
- [53] Du Le H, Loveday SM, Singh H, et al. Pickering emulsions stabilised by hydrophobically modified cellulose nanocrystals: Responsiveness to pH and ionic strength[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105344.
- [54] Solhi L, Guccini V, Heise K, et al. Understanding nanocellulose-water interactions: Turning a detriment into an asset[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(5): 1925-2015.
- [55] Yan C, Yin Y, Zhang S, et al. Fabrication and characterization of sunflower oil-in-water emulsions stabilized with sunflower stem pith cellulose nanofibril[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 224: 919-926.
- [56] Kalashnikova I, Bizot H, Cathala B, et al. Modulation of cellulose nanocrystals Amphiphilic properties to stabilize oil/water interface[J]. Biomacromolecules, 2012, 13(1): 267-275.
- [57] Kalashnikova I, Bizot H, Bertoncini P, et al. Cellulosic nanorods of various aspect ratios for oil in water Pickering emulsions[J]. Soft Matter, 2013, 9(3): 952-959.
- [58] Girard VD, Chaussé J, Vermette P. Bacterial cellulose: A comprehensive review[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(15): 55163.
- [59] Olmos-Juste R, Alonso-Lerma B, Pérez-Jiménez R, et al. 3D printed alginate-cellulose nanofibers based patches for local curcumin administration[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 264: 118026.
- [60] Mu RJ, Hong X, Ni YS, et al. Recent trends and applications of cellulose nanocrystals in food industry[J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 93: 136-144.

- [61] Hernández-Varela JD, Chanona-Pérez JJ, Bárcenas GL, et al. Rheological, physicochemical, thermal, and mechanical properties of biopolymeric films incorporated with micro-holocellulose from coffee residues[J]. *Chemistryselect*, 2024, 9(3): e202304199.
- [62] Meftahi A, Samyn P, Geravand SA, et al. Nanocelluloses as skin biocompatible materials for skincare, cosmetics, and healthcare: Formulations, regulations, and emerging applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278: 118956.
- [63] Marchetti, L, Andrés, SC. Use of nanocellulose in meat products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 38: 96-101.
- [64] Liu L, Kerr WL, Kong F, et al. Influence of nanofibrillated cellulose (NFC) on starch digestion and glucose absorption[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 196: 146-153.
- [65] Zhang F, Shen R, Li N, et al. Nanocellulose: An amazing nanomaterial with diverse applications in food science[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 304: 120497.
- [66] Zhang Z, Wang X, Gao M et al. Sustained release of an essential oil by a hybrid cellulose nanofiber foam system[J]. *Cellulose*, 2020, 27: 2709-2721.
- [67] Shayan, M, Gwon, J, Koo, MS et al. pH-responsive cellulose nanomaterial films containing anthocyanins for intelligent and active food packaging[J]. *Cellulose*, 2022, 29: 9731-9751.
- [68] Perumal AB, Nambiar RB, Moses JA, et al. Nanocellulose: Recent trends and applications in the food industry[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107484.
- [69] 任海伟,徐志航,邢雪晔,等. 纳米纤维素的制备、结构性质及应用研究进展 [J]. *食品科学*, 2023, 44(17): 215-224.
- [70] 贾丽佳,王汉琛,黄彪,等. 纳米纤维素的制备及功能应用[J]. *生物质化学工程*, 2024, 58(04): 43-56.
- [71] 徐博,马涛,户昕娜,等. 植物基纳米纤维素在食品3D打印中的应用[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(02): 327-343.
- [72] 温靖,张炜,徐玉娟,等. 基于植物基纳米纤维素 Pickering 乳液在递送体系中的应用研究进展[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(02): 564-574.
- [73] Chen T, Yan J, Li Y. Genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles[J]. *Food Drug Anal*, 2014, 22, 95-104.
- [74] 苑蕾,陈红,李娜. 纳米纤维素在药物传递系统中的应用与挑战[J]. *中国造纸*, 2023, 42(11): 152-159.