

# Exploration of nanocellulose applications in improving paper strength

Daijie Sun Chaoting Li

Zhejiang Xiawang Paper Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324022, China

## Abstract

With the enhancement of environmental awareness and the limitation of resources, the development of new efficient and environmentally friendly materials has become an important research direction of paper industry. This paper aims to explore the application of nanocellulose in improving paper strength. By systematically introducing the preparation methods of nanocellulose, characterization techniques, and their effects on paper strength reveal the potential of nanocellulose as an enhancer. Studies have shown that nanocellulose can significantly improve the mechanical properties of paper while maintaining its optical properties and procability.

## Keywords

nanocellulose; paper strength; application

# 纳米纤维素在提高纸张强度中的应用探索

孙代杰 李朝廷

浙江夏王纸业有限公司, 中国·浙江衢州 324022

## 摘要

随着环保意识的增强和资源的有限性, 开发新型高效且环境友好的材料成为造纸工业的重要研究方向。本文旨在探讨纳米纤维素在提高纸张强度中的应用。通过系统地介绍纳米纤维素的制备方法、表征技术及其对纸张强度的影响, 本文揭示了纳米纤维素作为增强剂的潜力。研究表明, 纳米纤维素能够显著提升纸张的力学性能, 同时保持其光学特性和可加工性。

## 关键词

纳米纤维素; 纸张强度; 应用

## 1 引言

纳米纤维素作为一种具有高比表面积、优异机械性能和良好生物相容性的天然聚合物, 逐渐引起广泛关注。纳米纤维素不仅来源于丰富的植物资源, 而且可以通过多种途径制备, 展现出巨大的应用前景。本研究聚焦于纳米纤维素在提高纸张强度方面的应用, 探讨其制备、表征及增强机理, 旨在为造纸行业的可持续发展提供新的思路和技术支持。

## 2 纳米纤维素的制备与表征

### 2.1 纳米纤维素的分类

纳米纤维素主要分为两类: 纤维素纳米晶体 (CNC) 和纤维素纳米纤丝 (CNF)。这两类纳米纤维素虽然都源自植物细胞壁中的纤维素, 但由于制备方法的不同, 在形态、结晶度和表面特性等方面存在显著差异, 因此适用于不同的应用场景。

纤维素纳米晶体 (CNC) 通常通过酸水解法制备, 该过程利用强酸如硫酸或盐酸将天然纤维素部分水解, 去除无定形区域, 保留高度结晶的纳米纤维素片段<sup>[1]</sup>。由于其高结晶度和规则的棒状形态, CNC 表现出优异的力学性能和热稳定性, 适用于增强复合材料、涂料和粘合剂等领域。CNC 的表面富含负电荷基团, 这使得其在溶液中具有良好的分散性和流变性能, 进一步扩展了其应用范围。

纤维素纳米纤丝 (CNF) 主要通过机械法或酶处理法制备。机械法包括高压均质、超声波处理和磨浆等手段, 通过物理剪切力将天然纤维素分解为纳米级纤丝。酶处理法则利用特定的纤维素酶降解纤维素, 生成具有高长径比的纳米纤丝。CNF 具有较高的柔韧性和较大的比表面积, 能够形成三维网络结构, 赋予材料优异的力学性能和尺寸稳定性。因此, CNF 在造纸工业、包装材料、食品添加剂以及生物医学领域中显示出巨大的潜力。

### 2.2 纳米纤维素的制备方法

纳米纤维素的制备方法多样, 涵盖了机械法、化学法和生物法等多种途径。每种方法都有其独特的优势和局限性, 适用于不同的应用场景。机械法是其中一种常用的方法,

【作者简介】孙代杰 (1981-), 男, 中国四川达州人, 工程师, 从事特种纸的生产和研发研究。

主要包括高压均质、超声波处理等技术。通过这些手段，天然纤维素被物理剪切力分解为纳米级纤丝，这种方法适合大规模生产，因为其操作相对简单且成本较低。高压均质利用高压将纤维素悬浮液通过微小孔径的喷嘴，产生强烈的剪切力，从而实现纤维素的纳米化。超声波处理则利用高频振动产生的空化效应，使纤维素断裂成纳米尺度。尽管机械法能够有效制备 CNF，但其能耗较高，并且在某些情况下需要多次循环才能达到理想的纤维素尺寸。

化学法则主要以酸水解为代表，广泛用于制备纤维素纳米晶体（CNC）。该方法利用强酸如硫酸或盐酸将天然纤维素部分水解，去除无定形区域，保留高度结晶的纳米纤维素片段。酸水解过程不仅能够生成高结晶度的 CNC，还能赋予其表面负电荷，使其在溶液中具有较好的分散性和流变性能<sup>[2]</sup>。

生物法则采用酶降解的方式，利用特定的纤维素酶来分解纤维素分子链，生成纳米纤维素。酶处理法能够在较为温和的条件下进行，有助于保持纤维素的原始结构和功能特性。然而，生物法的效率相对较低，通常需要较长的反应时间，并且酶的成本较高，限制了其大规模应用。

### 2.3 纳米纤维素的表征技术

纳米纤维素的表征对于评估其物理化学性质至关重要，这直接影响到其在实际应用中的性能表现。常用的表征技术包括扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）、X 射线衍射（XRD）和动态光散射（DLS）。这些技术各具特色，能够提供纳米纤维素的形貌、尺寸分布、结晶度和表面电荷等多方面的信息。SEM 通过电子束扫描样品表面，生成高分辨率的二维图像，直观展示纳米纤维素的微观形貌。这种技术特别适合观察纤维素的聚集状态和表面特征，但对于纳米尺度的精细结构解析能力有限。相比之下，TEM 能够提供更高的分辨率，适合观察纳米纤维素的内部结构和形态细节。TEM 通过透射电子束穿透样品，形成放大后的投影图像，能够清晰显示纳米纤维素的长度、直径及其分布情况。XRD 是一种用于分析材料晶相结构的技术，通过测量 X 射线在晶体中的衍射图案，可以确定纳米纤维素的结晶度和晶格参数。动态光散射（DLS）则是评估纳米纤维素尺寸分布和表面电荷的有效工具，通过检测颗粒在溶液中的布朗运动，计算出粒径分布曲线和 zeta 电位，帮助预测纳米纤维素在不同介质中的行为。结合多种表征技术，研究人员可以获得全面的纳米纤维素信息，优化其制备工艺并指导实际应用。

## 3 纳米纤维素增强纸张强度的研究

### 3.1 实验设计与材料选择

在探讨纳米纤维素对纸张强度的影响时，选择了几种典型的纳米纤维素样品进行实验。这些样品包括通过酸水解法制备的纤维素纳米晶体（CNC）和采用机械法获得的纤

维素纳米纤丝（CNF）。为了确保实验结果的准确性和可重复性，所有纳米纤维素样品均经过严格的纯度检测和表征分析。在此基础上，设计了一系列实验方案，旨在优化纳米纤维素的添加量、分散方式和混合工艺，使其均匀分布在纸浆中。具体的通过调整纳米纤维素的浓度，探索不同添加比例对纸张力学性能的影响；采用超声波处理或高压均质等方法提高纳米纤维素在水中的分散性，避免团聚现象；在混合过程中，采用搅拌器或高速剪切设备，确保纳米纤维素与纸浆纤维充分接触并均匀分布。

为了全面评估纳米纤维素增强纸张的效果，采用了国际标准测试方法，如 ISO 1924-2 测定抗张强度，ISO 1974 测定撕裂强度，以及 ISO 2758 测定耐破强度。这些标准方法不仅能够提供可靠的力学性能数据，还便于与其他研究结果进行对比分析，具体数值见表 1。

表 1 纳米纤维素添加量对纸张力学性能的影响

纳米纤维素添加量 (wt%)	抗张强度 (kN/m)	撕裂强度 (mN)	耐破强度 (kPa)
0	3.5 ± 0.2	650 ± 30	300 ± 15
0.5	4.0 ± 0.3	720 ± 25	350 ± 10
1.0	4.5 ± 0.2	780 ± 20	400 ± 12
2.0	5.0 ± 0.3	850 ± 30	450 ± 15
3.0	4.8 ± 0.4	820 ± 25	430 ± 14
5.0	4.2 ± 0.3	750 ± 30	380 ± 16

### 3.2 结果与讨论

实验结果显示，纳米纤维素的添加量对纸张的力学性能有显著影响，适量添加纳米纤维素（如 1.0 wt% 至 2.0 wt%）能够显著提升纸张的抗张强度、撕裂强度和耐破强度。一方面，纳米纤维素具有高比表面积和优异的机械性能，能够在纸张内部形成三维网络结构，增加纤维间的结合点，从而提高整体强度。另一方面，纳米纤维素表面富含羟基等活性官能团，能够与纸浆纤维表面的官能团形成氢键，进一步增强界面粘接力。过量添加纳米纤维素可能导致负面效应，如使纸张变脆，影响其柔韧性和可加工性。这是因为过多的纳米纤维素会占据纤维之间的空隙，减少纤维间的相对滑动空间，导致纸张在受到外力时更容易断裂。因此，找到最佳的添加量至关重要。此外，纳米纤维素的分散状态也直接影响其增强效果。如果纳米纤维素未能均匀分散，容易形成局部团聚，反而会削弱纸张的力学性能。因此，优化分散工艺和混合条件是实现最佳增强效果的关键。

深入分析发现，纳米纤维素不仅能增强纸张的内部结合力，还能改善其微观结构。通过扫描电子显微镜（SEM）观察发现，纳米纤维素能够在纸张基体中形成连续且均匀的网络结构，使得纤维间的相互作用更加紧密。这种结构不仅提高了纸张的整体强度，还赋予其更好的尺寸稳定性和抗变形能力。综上所述，纳米纤维素作为一种新型高效增强剂，在提高纸张强度方面展现出巨大潜力，但其应用仍需根据具

体需求进行优化,以充分发挥其优势并避免潜在问题。

## 4 纳米纤维素增强纸张的机理分析

### 4.1 微观结构分析

通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等先进表征技术,可以清晰地观察到纳米纤维素在纸张基体中的分布及其形成的三维网络结构。纳米纤维素具有高比表面积和优异的机械性能,能够在纸张内部形成密集且均匀的网络结构,显著增加了纤维之间的接触点和结合力<sup>[1]</sup>。这种结构不仅提高了纸张的整体强度,还赋予其更好的尺寸稳定性和抗变形能力。

在没有添加纳米纤维素的情况下,传统纸张主要依赖于纤维间的物理交织和少量化学键合来维持其结构稳定性。然而,由于天然纤维本身的缺陷和不均匀性,这种结合方式往往无法提供足够的力学强度。相比之下,纳米纤维素具有更高的长径比和更小的直径,能够填充纤维间的空隙,形成更加紧密的三维网络结构。SEM图像显示,纳米纤维素均匀分布在纸浆纤维之间,并形成了连续的网络状结构,极大地增加了纤维间的接触面积。这种结构不仅增强了纤维间的相互作用,还提高了纸张的整体刚性和韧性。进一步通过TEM观察发现,纳米纤维素与纸浆纤维之间的界面结合非常紧密,几乎没有明显的分离或间隙。这种紧密的结合有助于提高纸张的内聚力和抗拉伸性能。纳米纤维素的加入还能改善纸张的微观结构,使其更加均匀和致密。同样,在耐破测试中,纳米纤维素的三维网络结构能够有效分散外力,避免局部应力集中,进而提升纸张的耐破强度。

### 4.2 分子间作用力分析

分子间作用力在纳米纤维素增强纸张的过程中也发挥着至关重要的作用。纳米纤维素表面富含羟基(-OH),这些官能团能够与纸浆纤维表面的官能团形成强氢键,从而显著提升界面粘结力。氢键是一种常见的分子间作用力,尤其在纤维素材料中表现得尤为突出。纤维素分子链由葡萄糖单元组成,每个葡萄糖单元含有多个羟基,这些羟基不仅存在

于纤维素纳米纤丝表面,也广泛分布于纸浆纤维表面。当纳米纤维素与纸浆纤维混合时,羟基之间能够形成大量的氢键,使得两者紧密结合。范德华力也作用在纳米纤维素与纸浆纤维之间的结合中。范德华力是一种弱吸引力,但当大量分子间距离较小时,其累积效应会变得显著。纳米纤维素与纸浆纤维之间的紧密接触使得范德华力得以充分发挥作用,进一步增强了两者的结合强度。特别是对于高度结晶的纤维素纳米晶体(CNC),其表面负电荷基团的存在还会产生静电相互作用,这为纳米纤维素与纸浆纤维之间的结合提供了额外的支持。静电相互作用通常表现为正负电荷之间的吸引,纤维素纳米晶体表面的负电荷基团能够与纸浆纤维表面的正电荷基团形成稳定的静电吸引,从而增加界面粘结力。这些分子间作用力共同作用,促进了纳米纤维素与纸浆纤维之间的紧密结合,显著提升了纸张的力学性能。

分子间作用力的增强还能够改善纸张的尺寸稳定性和抗变形能力。由于纳米纤维素与纸浆纤维之间的结合更加牢固,纸张在受潮或干燥过程中不易发生形变。这种稳定性不仅提高了纸张的质量,还延长了其使用寿命。

## 5 结语

纳米纤维素作为一种可持续且多功能的材料,将在造纸工业及其他领域展现出更广泛的应用前景。随着制备技术和表征手段的不断进步,有望开发出更加高效和环保的纳米纤维素制备方法,进一步降低成本并提高生产效率。深入理解纳米纤维素与纸浆纤维之间的界面粘结机制,将有助于设计出更具针对性的增强方案,推动造纸行业的绿色转型和技术革新。

### 参考文献

- [1] 董剑. 纳米纤维素在老旧纸质档案脱酸加固中的应用[J]. 粘接, 2023, 50(02): 121-124+128.
- [2] 马晓春. 纳米纤维素材料对纸质文献脱酸增强的研究[D]. 华南理工大学, 2022.
- [3] 杨冉, 吴玉乐, 关莹, 等. TEMPO氧化纳米纤维素的制备及其对纸张性能的影响[J]. 生物质化学工程, 2022, 56(02): 27-32.