北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

层状双金属氢氧化物（LDHs）增强低长径比纳米纤维素复合膜：低成本高性能食品包装材料

马铭君 于浩楠 李晓蒙 王一凡 王泽伟 常亮 杜兰星

Layered double hydroxides (LDHs) reinforced low aspect ratio nanocellulose composite films: a low-cost, high-performance material for food packaging

Ma Mingjun, Yu Haonan, Li Xiaomeng, Wang Yifan, Wang Zewei, Chang Liang, Du Lanxing

引用本文:
马铭君, 于浩楠, 李晓蒙, 王一凡, 王泽伟, 常亮, 杜兰星. 层状双金属氢氧化物（LDHs）增强低长径比纳米纤维素复合膜：低成本高性能食品包装材料[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):15–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250224
Ma Mingjun, Yu Haonan, Li Xiaomeng, Wang Yifan, Wang Zewei, Chang Liang, Du Lanxing. Layered double hydroxides (LDHs) reinforced low aspect ratio nanocellulose composite films: a low–cost, high–performance material for food packaging[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):15–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250224

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250224

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

桉木表面构建层状双氢氧化物仿紫光檀颜色

Construction and characterization of layered double hydroxides on eucalyptus wood surface to imitate violet sandalwood color

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 126–135. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240028

Janus氧化纤维素壳聚糖功能膜的制备及其性能

Preparation and performance of Janus oxidized cellulose–chitosan functional films

北京林业大学学报, 2025, 47(8): 173–181. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250169

纤维素电纺纳米纤维柔性表皮电极制备与性能

Preparation and property of cellulose electrospun nanofibers–based flexible epidermal electrodes

北京林业大学学报, 2024, 46(9): 132–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240161

低共熔溶剂预处理麦草制备含木质素纳米纤维素和薄膜

Fabrication of lignin containing nanocellulose and films from wheat straw pretreated by deep eutectic solvent

北京林业大学学报, 2024, 46(11): 141–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240260

具有多刺激响应行为和自修复能力的纤维素纳米晶增强聚乙烯醇水凝胶

Cellulose nanocrystal reinforced polyvinyl alcohol hydrogels with multi–stimulus responsive behavior and self–healing properties

北京林业大学学报, 2025, 47(6): 152–161. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250104

季铵化纳米纤维素增强预油漆纸性能

Properties of finish foil enhanced by quaternized nanocellulose

北京林业大学学报, 2024, 46(3): 145–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230281

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250224

层状双金属氢氧化物（LDHs）增强低长径比纳米纤维素复合膜:低成本高性能食品包装材料

马铭君[1] 于浩楠[1] 李晓蒙[1] 王一凡[1] 王泽伟[2] 常 亮[2] 杜兰星[1]
（1. 河北农业大学林学院，河北 保定 071000；2. 永清霍尔茨门业有限公司，河北 廊坊 065000）

摘要:【目的】纳米纤维素作为绿色可再生的石油基食品包装替代材料，其单一组分薄膜的力学强度与气体阻隔性能尚未达到商业化要求，且现有研究多依赖高长径比纤维素原料，面临制备工艺复杂、成本高昂、实验室到工业化放大困难等瓶颈。本研究以商品化低长径比纳米纤维素为起点，旨在通过层状双金属氢氧化物（LDHs）增强其力学与阻隔性能，并借助丙三醇改善 LDHs 分散性，构建兼具高强度与高阻隔特性的低长径比纳米纤维素复合材料，为低成本、可降解食品包装膜的规模化制备提供新思路。**【方法】**本研究选用纤维素纳米晶体（CNCs）作为研究对象。采用硫酸水解法制备 CNCs，水热合成法构建 Mg-Al-LDHs 纳米片层，通过单一变量法系统调控 LDHs 添加量（0%～50%）与丙三醇添加量（0%～10%），经简单共混与室温（23 ℃）自然干燥工艺成膜，制备 LDHs/CNCs 复合膜。利用紫外−可见光谱、拉伸试验、氧气透过率测试、扫描电镜（SEM）及 X 射线衍射（XRD）等手段，系统表征复合膜的透光率、力学性能及氧气阻隔性能，阐明组成−结构−性能之间的内在关联。**【结果】**LDHs 片层均匀嵌入 CNCs 三维网络，复合膜结构致密无缺陷。未添加丙三醇时，随着 LDHs 添加量增加，复合膜材料的透光率逐渐降低，拉伸强度呈先升后降趋势，断裂伸长率始终低于 2.5%；当 LDHs 添加量为 1% 时，拉伸强度达到峰值（29.6 MPa），过量添加则会导致片层团聚，所形成的团聚体成为应力集中点，反而引起强度下降。引入丙三醇后，LDHs 分散性显著提高，复合膜材料在保持较高拉伸强度的同时，断裂伸长率提升，且氧气透过率降至最低 0.03 $cm^3/(m^2 \cdot d \cdot 0.1\ MPa)$（LDHs 25%，丙三醇 5%），实现了强度与韧性的有效平衡及氧气阻隔性能的极大改善。**【结论】**低长径比 CNCs 在少量 LDHs（1%）协同作用下即可实现高强和高阻隔性能，丙三醇则通过“塑化−分散”双重机制进一步平衡强度与韧性，并显著抑制氧气渗透。该低温、水相、无有机溶剂的工艺路线可直接对接现有造纸/涂布装备，为低成本、高性能、可降解食品包装膜的规模化生产提供了可行方案，亦对同类纳米纤维素体系的性能设计提供参考。

关键词：层状双金属氢氧化物（LDHs）；纤维素纳米晶体（CNCs）；纳米复合膜；氧气阻隔性能；透光率；拉伸性能；食品包装

中图分类号：O636.2；TQ352 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)02−0015−11

引文格式：马铭君，于浩楠，李晓蒙，等. 层状双金属氢氧化物（LDHs）增强低长径比纳米纤维素复合膜：低成本高性能食品包装材料［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：15−25. Ma Mingjun, Yu Haonan, Li Xiaomeng, et al. Layered double hydroxides (LDHs) reinforced low aspect ratio nanocellulose composite films: a low-cost, high-performance material for food packaging［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 15−25.

Layered double hydroxides (LDHs) reinforced low aspect ratio nanocellulose composite films: a low-cost, high-performance material for food packaging

Ma Mingjun[1] Yu Haonan[1] Li Xiaomeng[1] Wang Yifan[1] Wang Zewei[2]
Chang Liang[2] Du Lanxing[1]
(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;
2. Yongqing Holtz Door Industry Co., Ltd. Langfang 065000, Hebei, China)

收稿日期：2025−02−20 **修回日期：**2026−01−08

基金项目：国家自然科学基金项目（32201636）。

第一作者：马铭君。主要研究方向：纤维素基功能材料。Email：1991621598@qq.com 地址：071000 河北省保定市莲池区 2596 号河北农业大学林学院。

责任作者：杜兰星，副教授。主要研究方向：纤维素基功能材料。Email：lxydlx@hebau.edu.cn 地址：同上。

本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Nanocellulose are renewable, green alternatives to petroleum-based food packaging materials. However, their single-component films often lack sufficient mechanical strength and gas barrier properties for commercial applications. Moreover, most existing studies rely on high aspect ratio cellulose, which involves complex preparation processes, high costs, and challenges in scaling up from laboratory to industrial production. This study starts with commercially available low aspect ratio nanocellulose and aims to enhance their mechanical and barrier properties through incorporation of layered double hydroxides (LDHs). Glycerol is introduced to improve LDHs dispersion, enabling the construction of high-strength, high-barrier composite films from low aspect ratio nanocellulose. This work seeks to provide a novel strategy for the scalable production of low-cost, biodegradable food packaging materials. [**Method**] Cellulose nanocrystals (CNCs) were selected as the research object in this study. CNCs were prepared via sulfuric acid hydrolysis, and Mg-Al-LDHs nanosheets were synthesized hydrothermally. LDHs content was systematically varied from 0% to 50%, and glycerol content from 0% to 10%, using a single-variable approach. Composite films were fabricated through simple solution blending followed by ambient (23 ℃) drying. The resulting LDHs/CNCs films were characterized using UV-visible spectroscopy, tensile testing, oxygen transmission measurements, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD) to evaluate optical transparency, mechanical performance, and oxygen barrier properties, thereby elucidating the intrinsic relationships among composition, structure, and performance. [**Result**] The LDHs nanosheets were uniformly embedded within the 3D CNCs network, forming dense, defect-free composite structures. When glycerol was not added, with increasing LDHs content, composite film transparency gradually decreased, while tensile strength initially increased and then declined. The elongation at break remained below 2.5% in all cases. A maximum tensile strength of 29.6 MPa was achieved at 1% LDHs loading; further increases led to nanoplatelet aggregation, creating stress concentration points and reducing strength. Upon glycerol addition, LDHs dispersion was significantly improved. The composite films maintained high tensile strength while realizing an improvement in elongation at break, and the oxygen transmission was reduced to a minimum of 0.03 $cm^3/(m^2 \cdot d \cdot 0.1MPa)$ (at 25% LDHs and 5% glycerol), demonstrating effective balance between strength and toughness, along with dramatically enhanced barrier performance. [**Conclusion**] Low aspect ratio nanocellulose can achieve high mechanical strength and excellent oxygen barrier properties with only a small amount of LDHs (1%). Glycerol plays a dual role in plasticization and dispersion, further optimizing the strength−toughness balance and significantly suppressing oxygen transmission. The proposed fabrication process operates under mild, aqueous conditions without organic solvents, making it compatible with existing papermaking and coating equipment. This approach offers a feasible pathway for the large-scale production of low-cost, high-performance, biodegradable food packaging films and provides reference for performance design in similar nanocellulose-based systems.

Key words: layered double hydroxides (LDHs); cellulose nanocrystals (CNCs); nanocomposite films; oxygen barrier properties; light transmittance; tensile properties; food packaging

纤维素作为自然界最丰富的天然多糖，广泛存在于木本、草本植物的细胞壁中，由葡萄糖单体通过 β-(1,4)糖苷键聚合而成[1]。将其尺寸降至纳米级后可获得纳米纤维素，其独特的长径比与线性结构赋予了优异的机械性能和阻隔性能，使其成为新一代绿色环保食品包装材料的理想候选[2]。然而，单一纳米纤维素薄膜的力学强度与气体阻隔性能尚无法满足商业化食品包装材料的严苛标准[3]。为突破此瓶颈，当前研究多聚焦于以高长径比纳米纤维素为基底，通过与功能材料复合、涂布或层积等策略提升性能[4−5]。但高长径比纳米纤维素的制备工艺繁琐、能耗高，从实验室规模放大至工业化生产仍面临诸多挑战[6]。因此，如何基于低长径比纳米纤维素构建兼具高强与高阻隔性能的复合材料，已成为该领域亟待探索的科学问题。

层状双金属氢氧化物(layered double hydroxides，LDHs)是由两种或两种以上金属元素组成，具有可调控层板电荷与层间距的二维层状材料[7−8]。其独特

的片层结构作为纳米填料可有效延长气体小分子在包装基质中的渗透路径，降低透过率[9]；同时，LDHs 表面正电荷与纳米纤维素的负电荷可形成静电相互作用，增强界面结合。水热合成法制备 LDHs 工艺简便、绿色环保，极具应用潜力。然而，LDHs 在基体中易因高表面能而团聚，当添加量超过阈值时，团聚体将成为应力集中点，削弱复合材料性能[10]。因此，改善 LDHs 的分散稳定性，是充分发挥其增强与阻隔功能的关键所在。

针对上述问题，本研究拟以商品化低长径比微晶纤维素为起点，采用硫酸水解法制备纤维素纳米晶体（cellulose nanocrystals，CNCs），水热合成法制备尺寸均一的 Mg-Al-LDHs。通过单一变量法精准调控 LDHs 与丙三醇添加量，经物理共混与室温自然干燥工艺构筑 LDHs/CNCs 复合膜，系统表征其透光率、力学性能及氧气阻隔性能，深入解析 LDHs 和丙三醇的影响作用。预期通过 LDHs 与丙三醇的协同效应，在低长径比 CNCs 基体中实现强度与韧性的平衡，并获得优异的气体阻隔性能，从而建立一条低温、水相、无有机溶剂的绿色工艺路线，为低成本、可降解食品包装膜的工业化生产提供理论支撑与技术方案。

1　材料与方法

1.1　材　料

微晶纤维素（microcrystalline cellulose，MCC），粒径 65 μm，上海麦克林生化科技有限公司；H_2SO_4、丙三醇（$C_3H_8O_3$），天津科密欧化学试剂有限公司；NaOH、九水合硝酸铝 $Al(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$、六水合硝酸镁 $Mg(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$，国药集团化学试剂有限公司。

1.2　材料制备

1.2.1　纳米纤维素

为制备低长径比的纳米纤维素，采用微晶纤维素（g）与 64% 浓硫酸（mL）按 1∶10 的比例混合，44 ℃ 水浴条件下反应 1 h 并充分搅拌，反应完成后加入去离子水稀释至 10 倍体积，转移至−20 ℃ 冰箱冷冻 24 h。解冻后，以 8 000 r/min 的速度离心 3 min，除去上层清液，再次加入去离子水，重复上述离心 3 ~ 5 次，透析 7 d 后，经超声（JY99-ⅡDN 超声波细胞破碎仪，宁波新芝生物科技有限公司）获得 CNCs 悬浮液。

1.2.2　LDHs

为获取尺寸较平均的 LDHs，采用水热合成法一步制备，称取 5.12 g 六水合硝酸镁和 3.75 g 九水合硝酸铝，与 100 mL 去离子水搅拌均匀，逐滴加入 0.15 mol/L 的 NaOH 溶液中并剧烈搅拌，转移至微型反应釜（YZPR-500M，上海岩征实验仪器有限公司）中反应 27 h，反应温度 120 ℃，转速 150 r/min。反应结束降至室温（23℃）后，以 8 000 r/min 的速度离心 3 min，除去上清液，加入去离子水搅拌均匀，重复离心至上清液呈中性，经超声得到 LDHs 悬浮液。

1.2.3　LDHs/CNCs 复合膜

将 CNCs 与 LDHs 悬浮液按固体质量比 100∶1、100∶5、100∶10、100∶25 及 100∶50 混合，配制 CNCs 浓度（本文中浓度代表质量分数）为 1% 的混合悬浮液，超声处理至分散均匀。称取 40 g 混合液倒入直径为 100 mm 的聚四氟乙烯模具中室温自然干燥成膜。其复合膜材料记作 LDHs/CNCs-*n*（*n* 代表 LDHs 的 1、5、10、25、50）。

在 LDHs/CNCs-25 的基础上，分别按 CNCs 固体质量的 1%、2%、3%、5%、7%、10% 加入丙三醇配制混合液并超声均匀，其中 CNCs 的浓度为 1%。称取 40 g 倒入模具中室温自然干燥成膜。其复合膜材料记作 LDHs/CNCs-25-G*n*（*n* 代表丙三醇的 1、2、3、5、7、10）。

1.3　纳米纤维素及其复合材料的性能表征

1.3.1　尺寸形貌

形貌是本研究的基础，较低长径比的纳米纤维素与尺寸均一的 LDHs 在材料表征时可以更明显观察到相应变化。因此，为观察 LDHs 与 CNCs 尺寸形貌是否符合试验要求，利用透射电镜（TEM，FEI-F20，美国 FEI）在 200 kV 加速电压下观察 CNCs 和 LDHs 的微观形貌特征。分别配制质量浓度为 0.01% 的 CNCs 和 LDHs 的悬浮液，超声分散均匀后滴在 100 目铜网上，待快干时滴加 1 μL 1% 磷钨酸负染，置于日光灯下干燥至水分完全蒸发，再进样测试。

LDHs 与 CNCs 间的界面结合是复合材料力学性能和气体阻隔性的关键因素，为观察 LDHs 在 CNCs 间的分布状态以及丙三醇在纳米纤维素复合材料中的作用效果，将冷冻干燥后的 CNCs 和 LDHs、LDHs/CNCs 复合膜材料粘贴于导电胶表面，固定于样品台上，喷金。采用扫描电镜（SEM，FEI NOVA，美国 FEI）在高真空模式，加速电压为 5 kV 条件下观测 CNCs、LDHs 尺寸形貌、复合膜材料的表面及断面微观形貌。

1.3.2　表面化学结构

为明确 LDHs 与 CNCs 间的结合方式，通过傅里叶红外光谱（FTIR，Nicolet Is10，赛默飞世尔科技（中国）有限公司）的特征峰表征样品的主要化学基团。将 CNCs、LDHs 及 LDHs/CNCs 复合膜材料的粉末在 60 ℃ 下烘干 24 h 至质量不变，按 1∶50 的质量比将样品与 KBr 粉末混合于玛瑙研钵中，并研磨、

压片、测试，扫描范围为 400 ~ 4 000 cm^{-1}。

为观察 LDHs 与 CNCs 的界面结合方式以及 LDHs 对复合材料阻隔网络构建所产生的影响，做以下表征。

采用 Zeta 电位分析仪（Malvern 3000 Zetasizer Nano ZS，英国马尔文帕纳科公司）测定 25 ℃ 时 633 nm 处的 Zeta 电位值，其中 CNCs 均为 0.2%。

通过 X 射线衍射仪（SmartLab 9 kW，日本−理学株式会社）表征 CNCs、LDHs 及 LDHs/CNCs 复合膜材料的结晶度，衍射角范围为 10° ~ 50°，扫描速度 5 (°)/min。结晶度的计算公式为

$$C_r = \frac{I_{max} - I_{fm}}{I_{max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：C_r 为相对结晶度；I_{max} 为衍射峰最大值；I_{fm} 为纤维素非结晶区的衍射强度。

1.3.3 透光率

采用紫外分光光度计（TU-1901，北京普析通用仪器有限责任公司）测定 CNCs、LDHs 及 LDHs/CNCs 混合液及膜材料的透光率，测试扫描时间 60 mm/min，波长范围 400 ~ 800 mm，扫描间隔 1 mm，光路模式为双光路，以空气作为背景对照组，取 660 mm 处数值作为样品透光率值。

1.3.4 分散性

分散性决定干燥过程中 LDHs 的分布状态，因此将 CNCs、LDHs 悬浮液及 LDHs/CNCs 混合液超声后静置 7 d，观测悬浮液及混合液的分散情况。

1.3.5 拉伸强度与断裂伸长率

拉伸强度与断裂伸长率的强弱是 LDHs 与 CNCs 结合是否良好的直观体现，也可以侧面评价丙三醇对于复合材料的作用机制。依据 GB/T 1040.3—2006《塑料拉伸性能的测定 第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件》将纯 CNCs 膜以及 LDHs/CNCs 复合膜裁切为宽 2 cm 的 II 型长条试样，薄膜拉伸试验机夹具初始距离为 50 mm，拉伸速率为 5 mm/min，薄膜测试前置于（23 ± 3）℃、相对湿度 50% 条件下两周。拉伸强度与断裂伸长率分别按照公式计算。

$$H = \frac{F}{a \times b} \quad (2)$$

$$l = \frac{d - c}{c} \times 100\% \quad (3)$$

式中：H 为薄膜拉伸强度，MPa；F 为试样断裂时的最大拉伸载荷，N；a 为试样宽度，mm；b 为试样厚度，mm；l 为断裂伸长率，%；c 为夹具初始距离，mm；d 为试样断裂时的标线长度，mm。

1.3.6 氧气透过率

气体阻隔性是 LDHs/CNCs 复合材料在食品包装材料方向最重要的指标，良好的气体阻隔性才是其成为食品包装的基础。同时，气体阻隔性也反映着复合材料本身的结合状态。因此依据 GB/T 19789—2021《包装材料塑料薄膜和薄片氧气透过性试验库仑计检测法》的相关要求，将所测膜材料置于盛有无水氯化钙或其他合适干燥剂的干燥器中进行 48 h 以上，实验室条件为（23 ± 2）℃，相对湿度为 50%，利用 MOCON OX-TRAN 2/21 对材料的氧气透过率进行测定。

$$R_{OT} = \frac{k(U - U_0)}{A} \times \frac{P_a}{P_0} \quad (4)$$

式中：R_{OT} 为氧气透过率，$cm^3/(m^2 \cdot d \cdot 0.1MPa)$；$U$ 为试样的电压，V；U_0 为零点电压，V；k 为仪器的校准系数；P_a 为环境大气压，Pa；P_0 为试验气体中的氧气分压，Pa；A 为有效透过面积，m^2。

2 结果与分析

2.1 尺寸形貌

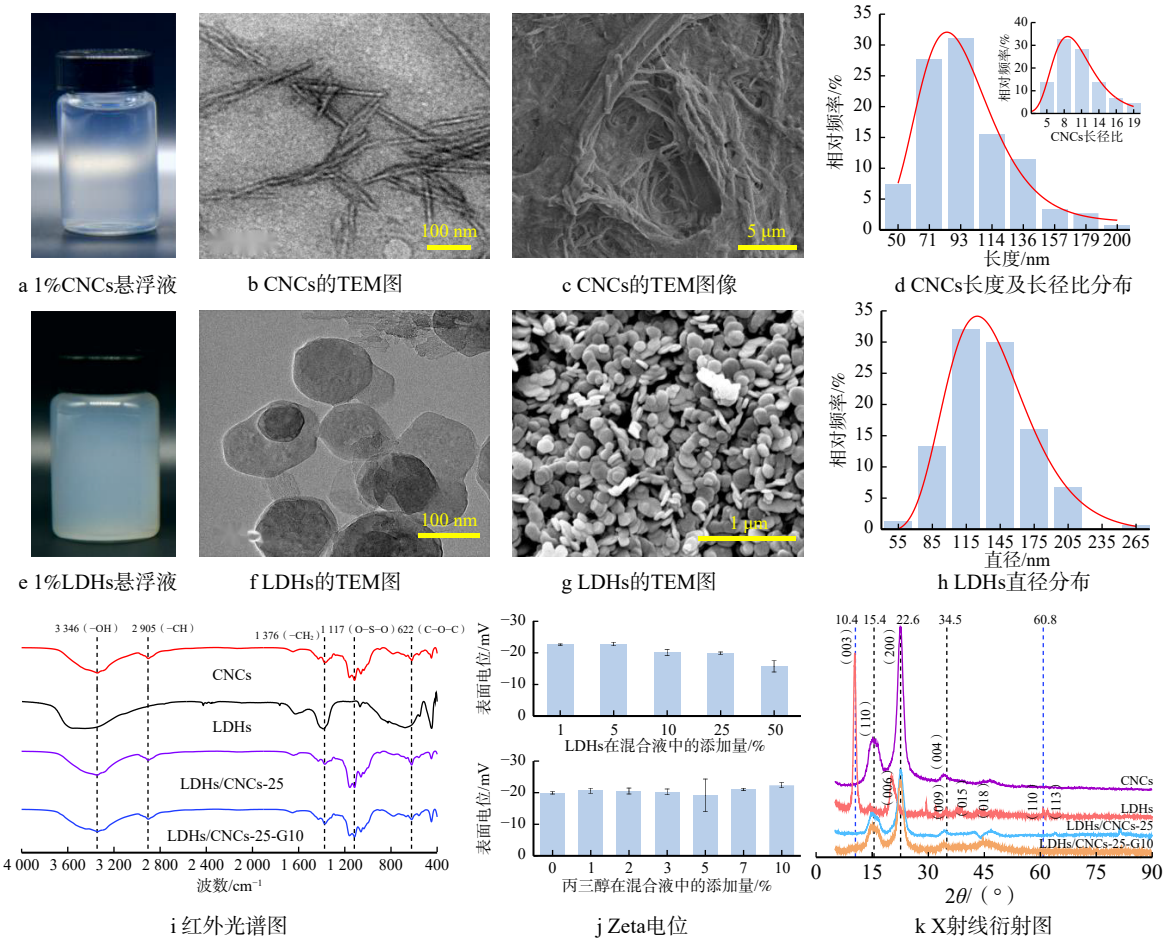
CNCs 水解后平均长度（100.8 ± 54.6）nm；平均直径（9.6 ± 3.8）nm；长径比为 11.98 ± 7.67。在所测量的纤维素中有 70% 长度处于 50 ~ 110 nm 区间内；72% 的纤维素直径在 2.5 ~ 12.5 nm 范围内；88% 的纤维素长径比在 5 ~ 17，均呈左倾对数正态分布曲线，形貌呈短棒状或纺锤状晶体结构（图 1a ~ d）。主要是硫酸水解破坏了纤维素分子链的结构，苷键在酸性环境下缓慢断裂，非结晶区水解，保留了结构较稳定的结晶区。LDHs 平均直径为（135.8 ± 34.4）nm，直径主要分布区间为（50 ~ 130）nm，占比 74.7%（图 1e ~ h），直径呈左倾对数正态分布，形貌呈片层六边形晶体结构，在水热作用下 LDHs 片层晶体尺寸较为均匀，且片层表面光滑，片层厚度为（12.22 ± 3.48）nm，本研究制备出来的 LDHs 与传统水热合成法[11]制备的并无差异。

冻干 CNCs 在 SEM 图像中无序排列，粒径相对较小，冷冻干燥时，距离较近的纤维在水液体转化为固体，体积膨胀，导致临近的纤维相互靠近，但基本保留了悬浮液中的固液空间结构。因低浓度 CNCs 悬浮液的冰晶生长呈柱状，最终 CNCs 冷冻干燥形成了 0.2 ~ 11.0 μm 不等的纤维束，且纤维之间纤维角度相对较小。

2.2 表面化学结构

2.2.1 官能团

由红外光谱图（图 1i）可知，CNCs 在 3 346、2 905、1 376、1 117、622 cm^{-1} 处分别出现醇类 O—H 的伸缩振动、—CH 的伸缩振动、—CH_2 的弯曲振动、O—S—O 基团的不对称伸缩振动和 C—O—C 的伸



a 1%CNCs悬浮液　b CNCs的TEM图　c CNCs的TEM图像　d CNCs长度及长径比分布

e 1%LDHs悬浮液　f LDHs的TEM图　g LDHs的TEM图　h LDHs直径分布

i 红外光谱图　j Zeta电位　k X射线衍射图

图 1　CNCs、LDHs 和 LDHs/CNCs 复合膜表面化学结构

Fig. 1　Surface chemical structure of CNCs, LDHs, and LDHs/CNCs composite films

缩振动等纳米纤维素葡萄糖分子链的特征峰。LDHs 在 3 346、1 376、622、449 cm^{-1} 处分别出现 O—H 伸缩振动、—CH_2 的弯曲振动、C—O—C 的伸缩振动、R—O 金属与原子振动特征峰，其中 3 346 cm^{-1} 处的衍射峰可归属于 LDHs 中阳离子层板间水分子的 O—H 伸缩振动吸收峰。LDHs/CNCs-25 复合膜材料在 3 346、2 905、1 376、1 117、622 cm^{-1} 处存在衍射峰，与 CNCs、LDHs 的红外衍射峰位置基本一致，表明 LDHs 与 CNCs 间未发生化学键改变。且复合材料的特征峰并未发生显著偏移，同时由于 CNCs 和 LDHs 表面均含有大量的羟基（3 346 cm^{-1}），其复合膜材料主要通过羟基形成非化学氢键作用。与未添加丙三醇的样品相比，加入丙三醇后复合材料的红外光谱中特征吸收峰位置基本不变，表明丙三醇的引入未改变材料的化学键结构。

2.2.2　表面电位

CNCs 与 LDHs 的表面电位分别为−18.6 和 9.3 mV。硫酸与纤维素表面发生酯化反应生成硫酸半酯基，后者在水中离解为硫酸根离子，使 CNCs 表面带负电，粒子间静电排斥作用使其在水中形成分散稳定的悬浮液（图 1a）。LDHs 是由带正电的主体层板与层间阴离子通过非共价作用组装而成，其表面固有正电荷使 LDHs 悬浮液带正电，但其稳定性低于 CNCs 悬浮液。当 CNCs 与 LDHs 混合时，二者的相互作用主要体现在两方面：其一，CNCs 的表面电荷有助于维持 LDHs 悬浮液的稳定；其二，CNCs 可通过静电吸附作用进一步增强 LDHs 的分散稳定性。随着 LDHs 添加量的增加，混合体系的表面电位逐渐降低。当 LDHs 添加量为 1% 时，表面电位绝对值最大（−23.8 mV），表明此时体系稳定性最高；而当 LDHs 添加量超过 5% 后，表面电位显著下降，稳定性也随之降低。此外，丙三醇可通过其表面羟基在 CNCs 与 LDHs 之间形成连接，进一步提升体系的稳定性。当丙三醇添加量为 10% 时，混合体系的表面电位达到最大值（图 1j）。

2.2.3　结晶度

CNCs 在 2θ = 15.4°、22.6°和 34.5°处呈现（110）、（200）、（004）晶面[12]特征衍射峰（图 1k），符合 I 晶型纤维素特征，结晶度达 81%，表明硫酸水解法在保留纤维素结晶区的同时，降解了部分非结晶区。LDHs 在 2θ=10.4°、20.2°、29.4°、34.5°、38.9°、60.8°和 61.8°处显示出特征衍射峰，分别对应其（003）、

(006)、(009)、(015)、(018)、(110)、(113)晶面，结晶度为 42.8%。(003)晶面作为层间阴离子的衍射基面，表明水热合成的 LDHs 晶粒发育较为完整。因 LDHs 添加量为 CNCs 质量的 25%，LDHs/CNCs 复合膜材料的 XRD 图谱仍以 CNCs 的特征峰为主，且未发生明显位移，结晶度为 76%，表明室温自然成膜不会导致晶型改变且相互影响。同时，添加丙三醇对复合膜材料的结晶性能影响不大。

2.2.4 稳定性

CNCs 悬浮液静置 7 d 后仍保持良好分散性与稳定性(图 2a)，这主要归因于其较大的长径比、较小的尺寸以及硫酸酯基所赋予的负电性。CNCs 的直径仅为(9.6 ± 3.8)nm，长径比为 5 ~ 17，较大的比表面积可降低表面张力，促进其在水中的分散[13]。表面负电荷也抑制了纳米颗粒间的团聚，使其以纳米尺度稳定分散于水中。CNCs 悬浮液中存在 CNCs 纤维个体、固着水以及自由水[13]。水分子与 CNCs 表面游离羟基基于氧的电负性形成氢键作用，固定了 CNCs 周围的水分。当 CNCs 浓度较小时，纤维间距离较大，其间存在一定的自由水；随着 CNCs 浓度升高，自由水减少，CNCs 与固着水形成了网络交织的凝胶结构，赋予体系一定的稳定性。当悬浮液受外力流动或重力沉降时，需克服这一物理交联网络，从而产生内应力并增加水分子层间的流动阻力，表现为体系具有稳态黏性。这一黏性行为进一步增强了 CNCs 在水中的稳定分散能力。

LDHs 悬浮液静置 7 d 后出现明显分层，但仍保持部分分散状态，未发生完全沉降(图 2b)。LDHs 的直径为(135.8 ± 34.4)nm，厚度为(12.22 ± 3.48)nm。尽管其比表面积较大，且表面正电荷在片层间产生排斥作用，有利于其在悬浮液中初步分散，但超声提供的初始布朗运动仅能暂时抵抗重力。由于 LDHs 由 Mg、Al 等金属离子构成，其板层密度较大，在长期静置过程中，表面双电层逐渐被压缩，布朗运动减弱，重力作用最终打破沉降平衡，导致分层发生。随着沉降进行，LDHs 个体间距减小，颗粒间可能形成弱结合，但表面电荷仍使其保持一定分散性，因而未完全沉降。

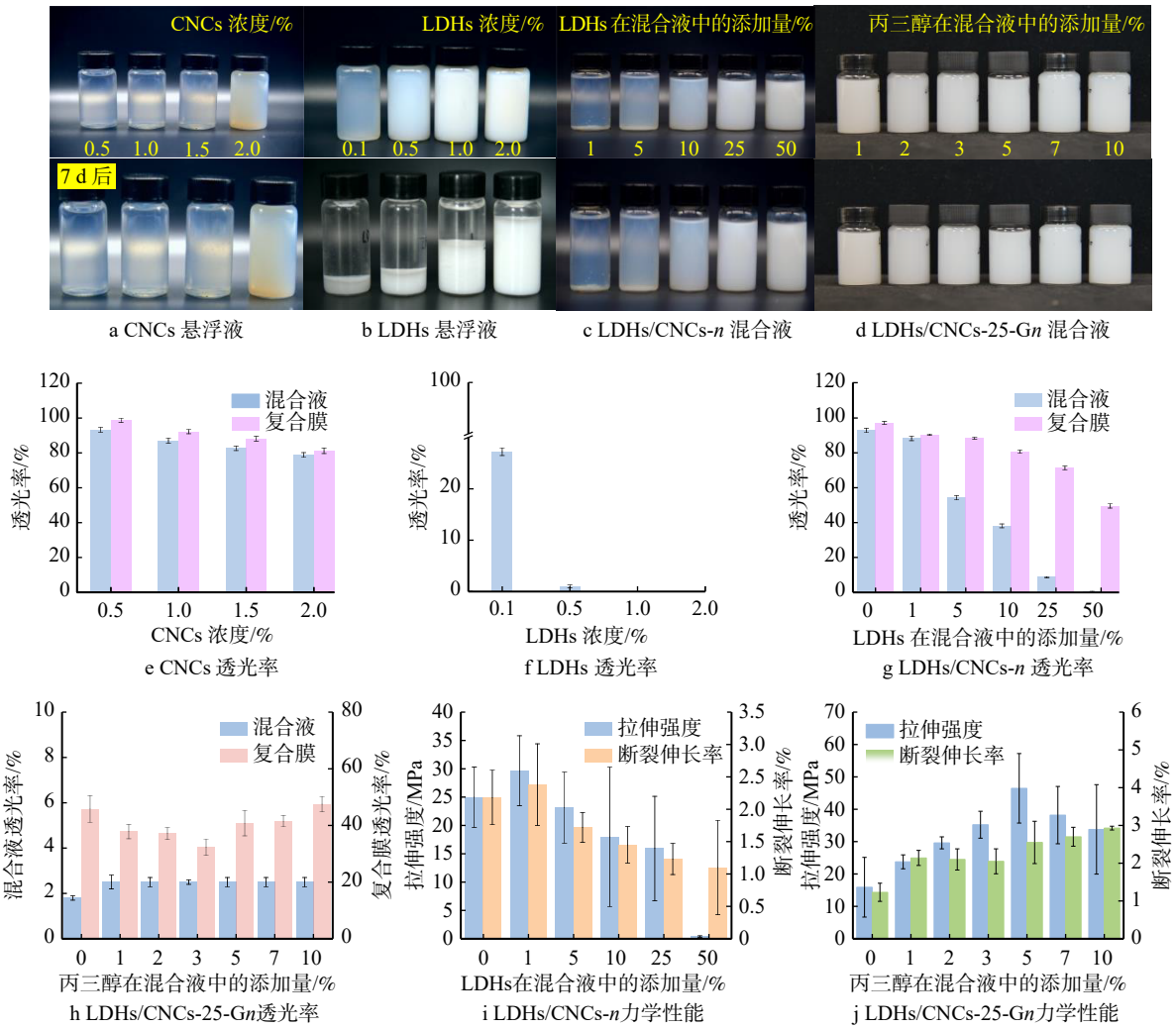


图 2 LDHs/CNCs 复合膜性能表征

Fig. 2 Performance characterization of the LDHs/CNCs composite films

LDHs/CNCs 混合液表现出较高的稳定性，LDHs 添加量与丙三醇添加量对其稳定性均无显著影响（图 2c，d）。这可能是由于两种材料在水中分别带有正、负电荷，发生静电相互吸引，使 LDHs 吸附在 CNCs 表面，从而增强了体系的抗沉降能力；同时，丙三醇的加入提高了混合液内部的黏度，进一步维持了其分散性和稳定性。

2.2.5　透光率

对于 CNCs 悬浮液，当 CNCs 尺寸小于可见光波长（380 ~ 780 nm）的十分之一（其直径仅为（9.6 ± 3.8）nm）时，体系主要发生瑞利散射。瑞利散射强度与入射波长的四次方成反比，因此短波蓝光散射占主导，导致悬浮液呈现偏蓝色的透明状态，在低浓度（0.5%）时尤为明显（图 2a）。1.0%、1.5%、2.0% 的 CNCs 悬浮液透光率分别为 93.2%、87.0%、78.8%（图 2e）。当浓度增至 2.0% 时，CNCs 数量增多并形成交织网络，光波难以完全绕过该结构，同时经历多次散射，体系逐渐转变为半透明乳白色。

与纤维状 CNCs 不同，片层状 LDHs 具有更大的比表面积，其片层直径达（135.8 ± 34.4）nm。在 LDHs 悬浮液中，LDHs 在水中三维空间自由分布，光波无法绕过所有片层结构，仅在极低浓度下可能发生瑞利散射。因此，当 LDHs 浓度为 0.1% 时，LDHs 悬浮液呈蓝色半透明状态，透光率为 27.2%；当浓度达到 0.5% 时，LDHs 悬浮液呈乳白色，透光率骤降至 1%；随着浓度升高，悬浮液逐渐变为高度不透明的白色，透光率趋近于 0（图 2b，f）。

在 LDHs/CNCs 混合液中，LDHs 添加量为 1% ~ 50% 时，随着 LDHs 添加量的增加，混合液的透光率显著降低。当 LDHs 添加量为 25% 时，LDHs/CNCs 混合液的透光率仅为 8.7%（图 2c，g）。对比 1.0%CNCs、0.5%LDHs 和 LDHs/CNCs-50 混合液的透明度，LDHs/CNCs-50 混合液远低于两种原料的悬浮液，这主要归因于两种材料在高浓度混合液中形成的交织网络结构，光波难以散射。随着丙三醇添加量的增加，LDHs/CNCs-25-G*n* 混合液的透光率基本无变化（图 2d、h）。其原因在于：丙三醇自身透明度较高，分子量较小，在混合液中起到增塑和交联作用，对透光率影响较小。

对于复合膜材料，CNCs 悬浮液及 LDHs/CNCs 混合液经水分蒸发后自然成膜（图 3a），CNCs 之间及 CNCs 与 LDHs 之间的距离缩短，形成致密薄膜（图 3c）。成膜过程分为两个阶段：水分蒸发阶段和自组装成膜阶段。由于 CNCs 具有一定的尺寸分布，在自组装成膜阶段，较大尺寸和较大比表面积的 CNCs 保留了悬浮液中的网络结构，而较小尺寸和比

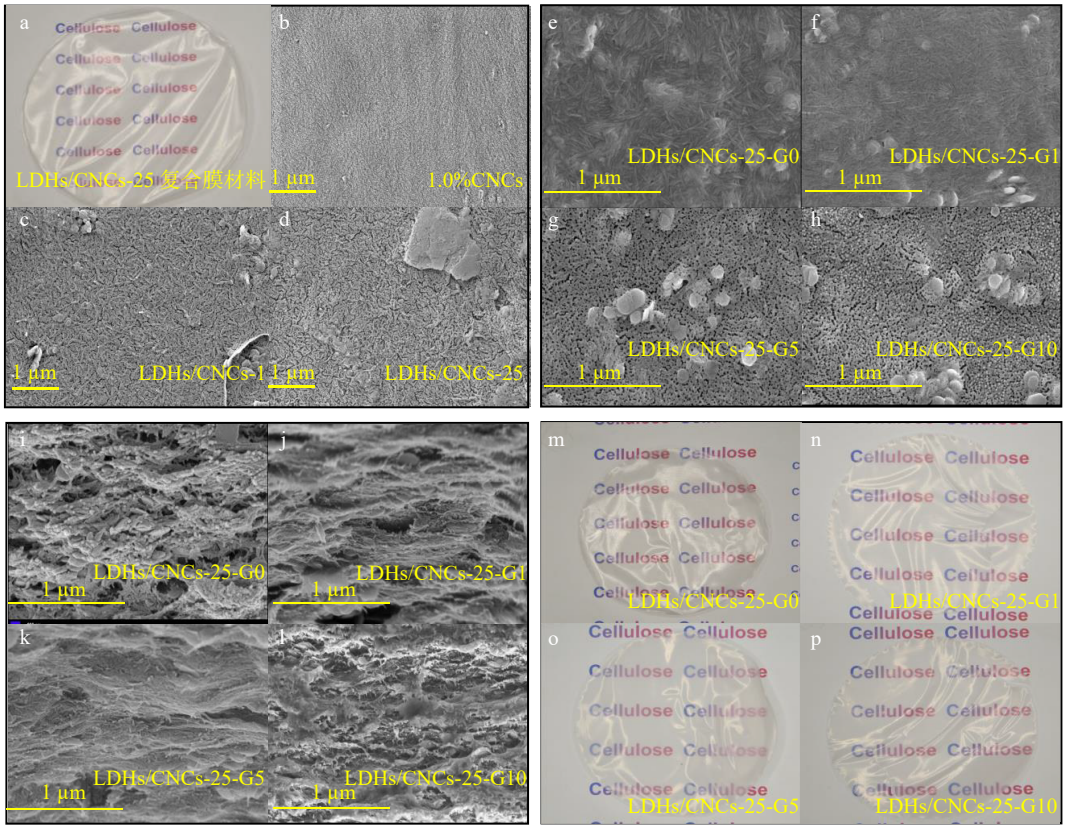


图 3　LDHs/CNCs 复合膜的 SEM 图以及照片

Fig. 3　SEM photographs and pictures of LDHs/CNCs composite films

表面积较小的 CNCs 在氢键作用下与邻近 CNCs 靠近，形成平行结构，从而呈现网络结构与平行结构并存的微观表面形貌。CNCs 成膜后排列更加有序，孔隙度较小，且具有较高的结晶度，表面平整度较高，降低了光波通过时的散射。光穿过 CNCs 薄膜主要以透射为主。空气介质的折射率为 1.000，CNCs 具有双折射特性，其径向与轴向折射率分别为 1.586 和 1.524[14]，均接近玻璃（～1.5）和聚酯薄膜（～1.6）等常见透明材料，因此形成的 CNCs 薄膜透光率较高，均＞80%（图 2e）。

LDHs 的片层结构使其在三维尺寸中二维尺寸接近光波波长，水分蒸发后片层堆叠形成光屏障，因此 LDHs 的添加降低了 LDHs/CNCs 复合膜材料的透光率。随着 LDHs 添加量的增加，LDHs 容易发生聚集，导致复合膜材料的透光率显著降低。当 LDHs 添加量达到 25% 时，其透光率降至 4.2%（图 2g）。此外，LDHs 与 CNCs 折射率的差异，以及 LDHs 在体系内的三维分布，也是降低复合膜材料透光率的原因之一。丙三醇表面的羟基能够与 CNCs 和 LDHs 形成氢键结合，在成膜时填充于两种材料之间，增加了 CNCs 之间及 CNCs 与 LDHs 之间的距离（图 3j～l）。但由于丙三醇用量较少，其折射率为 1.474，接近 CNCs，且未导致 CNCs 与 LDHs 之间团聚等问题，因此对 LDHs/CNCs-25-G*n* 复合膜材料的透光率影响较小，透光率在 32.3%～47.5% 之间。

悬浮液体系与膜材料的透光率变化规律基本一致，但复合膜材料的透光率更高。这主要归因于光波通过方式的不同：在悬浮液中，CNCs 与 LDHs 在水中均匀分散，介质为液态水，光波主要以散射方式绕过纳米颗粒，即使通过 CNCs 发生折射，其含量也不超过水的 2%；而固体膜材料中 CNCs 占主导，光波主要以透射方式穿过膜材料，且因致密结构减少了散射，导致膜材料的透光率更高。

2.3 拉伸强度及断裂伸长率

随着 LDHs 添加量的升高，LDHs/CNCs 复合膜材料的拉伸强度呈现先升高后下降的趋势（图 2i）。CNCs 具有较高的结晶度，相互交织或平行排列产生强度。从 LDHs/CNCs 复合材料断裂面观察（图 3i），断裂表面崎岖不平，沿纤维方向发生撕裂。CNCs 经层层自组装形成薄膜，当测试时薄膜内部超过极限应力或屈服应力时，从 CNCs 薄膜孔隙处开始沿纤维方向滑移，最终断裂。当 LDHs 添加量为 1% 时，拉伸强度达到最大值 29.6 MPa。此时，少量 LDHs 片层自由分布于 CNCs 的网状结构中，CNCs 保留了自组装结构，LDHs 与 CNCs 通过氢键作用相互连接，片层晶体 LDHs 作为增强材料为 CNCs 连续相基体提供强度，使复合膜材料的拉伸强度升高。然而，随着 LDHs 添加量的增加，LDHs 在成膜过程中容易发生团聚且分布不均匀（图 3b～d），甚至在部分位置形成尺寸较大的团聚体，其尺寸远大于 CNCs 形成的孔隙结构，在拉力作用下造成薄膜内部应力集中，沿 LDHs/CNCs 复合膜材料弱界面结合位置开始断裂（图 3i～l），导致拉伸强度逐渐降低。LDHs/CNCs 复合膜材料的断裂伸长率较低，均＜2.5%，在 LDHs 含量为 1% 时出现峰值，随着 LDHs 添加量的增加，断裂伸长率逐渐减小（图 2i）。由于 CNCs 和 LDHs 的刚性较大，塑性较小，断裂伸长率数值偏低。少量 LDHs 为 CNCs 分子链的滑移提供一定的空间位阻，但当 LDHs 含量过高发生团聚时，降低了复合材料的塑性形变能力，导致断裂伸长率降低。

丙三醇的加入对复合膜材料的拉伸强度变化影响显著。当丙三醇添加量为 5% 时，复合材料的拉伸强度达到最大值 46.5 MPa。此时，丙三醇包裹 LDHs 片层，既提升了 LDHs 的分散性，又改善了 LDHs 与 CNCs 间的界面结合，使纳米纤维素复合材料的拉伸强度提高。随着丙三醇的继续添加，丙三醇在分散 LDHs 的同时，还会削弱 CNCs 的网状结构[15]，导致复合材料的拉伸强度降低。当丙三醇添加量为 10% 时，复合材料的拉伸强度下降至 33.8 MPa。

由于 CNCs 分子间以氢键结合，其分子间大量氢键是高强度和刚性的来源。丙三醇自身的羟基与 CNCs 分子的羟基结合形成氢键，与其他 CNCs 分子形成竞争，导致 CNCs 分子间的氢键结合减少，CNCs 的氢键网络被破坏，从而降低复合材料的强度和刚性[15]。当丙三醇添加量＞5% 时，CNCs 网络仍有部分交联，同时丙三醇发挥增塑作用，在分子链间形成润滑层（图 3k，l），既维持部分力学承载能力，又赋予链段适度流动性，与聚醇类增塑剂在纤维素材料中的作用规律[16]一致。这导致复合材料的拉伸强度在丙三醇添加量大于 5% 时出现下降趋势（图 2j）。丙三醇的增塑效应主导了断裂伸长率的提升：小分子渗透使聚合物链发生滑移，丙三醇通过增塑作用削弱分子链间相互作用，使链段更易在外力下滑移和伸展，提升 LDHs/CNCs 复合材料的塑性形变，使断裂伸长率随丙三醇添加量的增加而增大[16]。

此外，丙三醇虽对 LDHs 具有分散效果，但并非 LDHs 的理想分散剂，仍会出现 LDHs 团聚现象，导致复合材料拉伸强度出现较大误差，也间接表明 LDHs 团聚现象未完全改善。

2.4 氧气透过率

随着 LDHs 添加量的增加，LDHs/CNCs 复合材料的氧气透过率呈现降低趋势（图 4a）。随着 LDHs

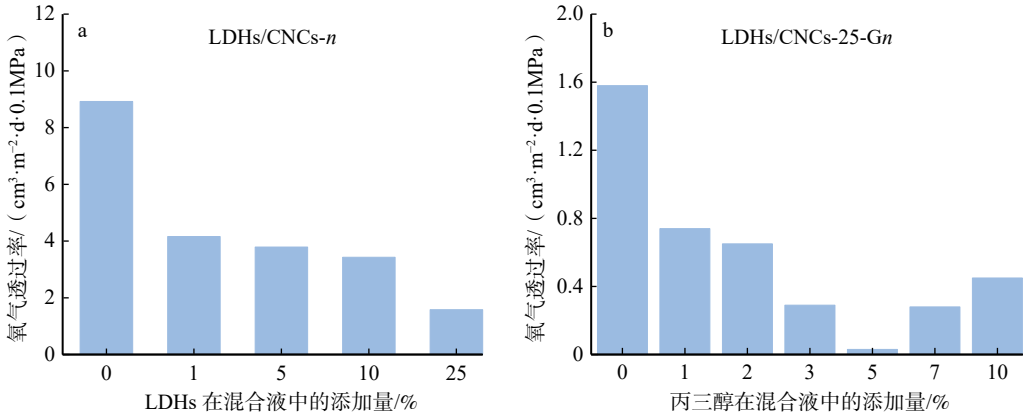


图 4　LDHs/CNCs 复合膜的氧气透过率

Fig. 4　Oxygen transmittance rates of LDHs/CNCs composite films

的添加，LDHs 片层不规则镶嵌于 CNCs 组成的网状结构中，一方面 LDHs 覆盖在 CNCs 表面减小了气体通过的孔径尺寸，另一方面 LDHs 在复合材料体系中延长了氧气通过路径，使纳米纤维素复合材料的氧气阻隔性能逐渐提高[17]。

当 LDHs 添加量为 1% 时，LDHs 在 CNCs 结构中自由分布，CNCs 保留了自组装结构，LDHs 与 CNCs 以氢键结合，减小了 CNCs 结构间的尺寸。与纯纤维素膜相比，氧气渗透 CNCs 时还需沿 LDHs 的片层方向进行渗透，气体运动路径变长，阻隔性有所提高[17]。当 LDHs 添加量 > 10% 后会出现团聚现象，但具有较大尺寸的团聚 LDHs 仍能与 CNCs 通过氢键形成良好界面结合；当 LDHs 添加量为 25% 时，复合材料的氧气透过率达到最低值 1.58 $cm^3/(m^2·d·0.1\ MPa)$。

LDHs/CNCs 复合材料的氧气阻隔性能随丙三醇添加量的增加呈现先提升后下降的趋势。当丙三醇添加量为 5% 时，氧气透过率达到最低值 0.03 $cm^3/(m^2·d·0.1MPa)$。此时，LDHs 与 CNCs 的结合效果最佳（图 1k）。通过 SEM 观察发现，丙三醇在分散 LDHs 分子的同时，还对 CNCs 网状结构产生影响（图 3g），虽增加了 CNCs 间距，但产生的孔隙及与 LDHs 分子形成的新体系仍延长了氧气通过路径，提升了纳米纤维素复合材料的氧气阻隔性。当丙三醇添加量 > 5% 时，由于丙三醇自身携带的羟基与 CNCs 分子间的羟基结合形成氢键，抢占了其他 CNCs 结合的位置，使 CNCs 网状结构间的孔隙继续增大，导致气体运动路径变短，复合材料氧气阻隔性降低（图 3l）。

2.5　增强机制

片层晶体 LDHs 与线性 CNCs 均具有较高的强度。由于少量 LDHs 的加入未破坏 CNCs 的交织网络结构，因此复合膜材料的拉伸强度升高；LDHs 片层镶嵌在 CNCs 基体中，构建的致密两相材料结构延长了气体在纵向二维平面方向的渗透路径，导致渗透速率下降，从而提升了氧气阻隔性能。虽然永久带正电荷的 LDHs 与酯化后带负电的 CNCs 既可以通过静电作用力相互吸引，也可以通过两者表面丰富的羟基基团形成氢键结合，然而刚性较大的 LDHs 与 CNCs 复合形成的膜材料脆性较大，将适量的丙三醇小分子加入其中，能够提供丰富的羟基分别与 LDHs 和 CNCs 形成氢键连接，为两相材料提供“拐点”，提高复合膜材料的塑性。同时，丙三醇与 LDHs 的结合，避免了 LDHs 单体之间的团聚，促进了 LDHs 在 CNC 中的分散与结合，实现了“塑化–分散”双重功能。然而，过量丙三醇会增大 CNCs 的层间间距，产生明显的增塑效应，导致致密的微观阻隔结构松散变形。这不仅降低了复合膜的力学强度，还扩宽了氧气渗透通道，增大了自由体积，最终导致氧气阻隔性能下降（图 5）。因此，少量 LDHs（1%）赋予复合膜更优异的气体阻隔性能；借助丙三醇“塑化–分散”双重机制的调控，材料在保持高强度的同时改善了韧性，成功制备了性能增强的低长径比纳米纤维素复合膜。

3　结　　论

本研究通过低长径比的纳米纤维素与片层结构的双金属氢氧化物（LDHs）复合，探究了 LDHs 添加对纤维素纳米晶体（CNCs）网络结构的影响机制。在此基础上，制备了 LDHs/CNCs/丙三醇复合材料，通过对比不同丙三醇添加量复合材料的相关性能表征结果，分析并阐述了丙三醇对复合材料整体的作用机制。具体结论有以下 3 点。

（1）随着 LDHs 含量的增加，LDHs/CNCs 复合材料的表面电位、透光率、氧气透过率逐渐下降，拉伸强度呈现先上升后下降的趋势。随着丙三醇含量的增加，LDHs/CNCs 复合材料的表面电位、透光率、氧气透过率先下降后上升，拉伸强度呈现先上升后

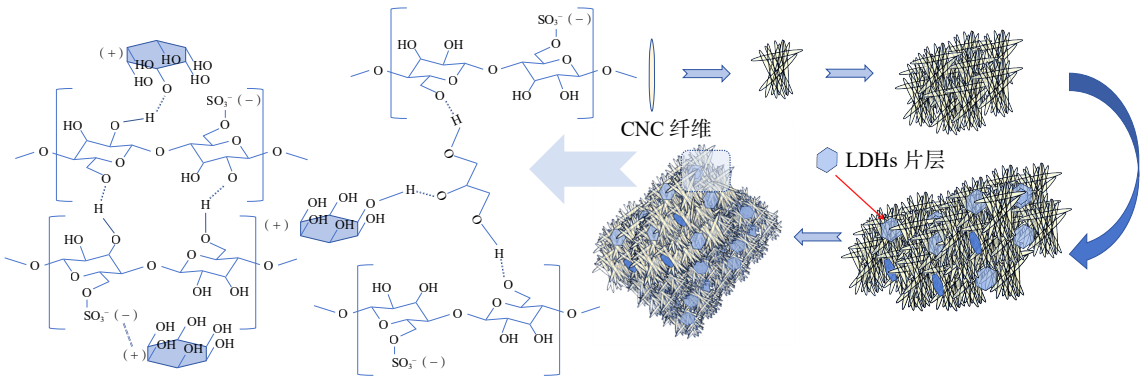


图 5 LDHs 与丙三醇协同增强纳米纤维素复合材料的作用机制

Fig. 5 Proposed mechanism for synergistic reinforcement of nanocellulose composites by LDHs and glycerol

下降的趋势。

（2）低长径比的 CNCs 与少量 LDHs 复合（1% LDHs）即可实现高强度和高阻隔性能。当 LDHs 添加量为 1% 时，复合膜材料的拉伸强度可达 29.6 MPa；随着 LDHs 添加量的增加，LDHs 逐渐发生团聚，纳米纤维素复合膜材料的拉伸强度逐渐下降。

（3）少量 LDHs 的加入减小了 CNCs 结构间的空隙尺寸，增强了结合位置的强度，并延长了氧气在膜材料中渗透的路径，提高了 LDHs/CNCs 复合材料的力学强度和气体阻隔性能。丙三醇的加入提高了 LDHs 的分散性，有效改善了其团聚现象，但同时丙三醇与 CNCs 结合削弱了 CNCs 的网络结构。当 LDHs 添加量为 25%，丙三醇添加量为 5% 时，LDHs/CNCs 复合材料的氧气透过率降至最低值 0.03 $cm^3/(m^2 \cdot d \cdot 0.1\ MPa)$，具有最优的氧气阻隔性能。

综上所述，本研究以商品化的低长径比微晶纤维素为起点，系统解析了 LDHs 对阻隔网络构建及丙三醇对界面增塑的作用机制。该低温、水相、无有机溶剂的工艺路线可直接对接现有造纸/涂布装备，为低成本、高性能、可降解食品包装膜的规模化生产提供了可行方案，对同类纳米纤维素体系的性能设计具有参考价值，为可工业化的纳米纤维素复合包装膜提供了技术路线与理论依据。

参 考 文 献

[1] 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.
Ren H W, Xu Z H, Xing X Y, et al. Research progress on preparation, structural properties and applications of nanocellulose [J]. Food Science, 2023, 44(17): 215−224.

[2] 陈婷, 张萌, 邓博研, 等. 纳米纤维素在食品领域的研究进展 [J]. 中国造纸学报, 2025, 40(2): 48−57.
Chen T, Zhang M, Deng B Y, et al. Research progress of nanocellulose in the food field [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2025, 40(2): 48−57.

[3] 徐玉洁, 梁旭茹, 黄文艺, 等. 植物纤维素基阻隔性改性材料在食品包装上的应用研究进展 [J]. 食品科学, 2024, 45(17): 306−315.
Xu Y J, Liang X R, Huang W Y, et al. Research progress on application of plant cellulose-based barrier modified materials in food packaging [J]. Food Science, 2024, 45(17): 306−315.

[4] 杜兰星. 纳米纤维素/水性丙烯酸树脂复合材料的制备与性能 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Du L X. Preparation and properties of nanocellulose/waterborne acrylic resin composites[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[5] 许晓光, 杨毓洁, 刘杨, 等. 疏水改性纳米纤维素/聚乳酸复合材料改善纸张透湿性能的研究 [J]. 包装工程, 2025, 46(9): 19−26.
Xu X G, Yang Y J, Liu Y, et al. Study on improving water vapor permeability of paper with hydrophobic modified nanocellulose/polylactic acid composites [J]. Packaging Engineering, 2025, 46(9): 19−26.

[6] 许慧敏, 茹凯星, 慈晓雷, 等. 低共熔溶剂预处理麦草制备含木质素纳米纤维素和薄膜 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 141−147.
Xu H M, Ru K X, Ci X L, et al. Preparation of lignin-containing nanocellulose and films from wheat straw pretreated with deep eutectic solvents [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 141−147.

[7] Nalawade P, Aware B, Kadam V J, et al. Layered double hydroxides: a review[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2009, 68(4): 267−272.

[8] 段雪, 张法智. 插层组装与功能材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Duan X, Zhang F Z. Intercalation assembly and functional materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[9] Liu Y , Wang N , Caro J. In situ formation of LDH membranes of different microstructures with molecular sieve gas selectivity [J]. Journal of Materials Chemistry A (Materials for Energy and Sustainability), 2014, 2(16): 5716−5723.

[10] Zhou Y, Sun X, Zhong K, et al. Control of surface defects and agglomeration mechanism of layered double hydroxide nanoparticles [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,

2012, 51(11): 4215−4221.

［11］ Wang J, Xu H, Zhang Y, et al. Morphology structure and property of high consistency mechano-enzymatic fibrillated cellulose: effect of treatment consistency of bamboo pulp fibers [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 188: 115731.

［12］ 齐英科, 栗琰, 马名杰, 等. 镁铝水滑石的结构调控以及对甲基橙阴离子染料的吸附性能 [J]. 河南化工, 2022, 39(3): 21−27.
Qi Y K, Li Y, Ma M J, et al. Structural regulation of magnesium-aluminum layered double hydroxides and their adsorption performance for methyl orange Anionic dye [J]. Henan Chemical Industry, 2022, 39(3): 21−27.

［13］ Habibi Y, Lucia L A, Rojas O J. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications [J]. Chemical Reviews, 2010, 110(6): 3479−3500.

［14］ 屈丹. 晶态纳米纤维素的手性光学性质及应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Qu D. Research on the chiral optical properties and applications of crystalline nanocellulose[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

［15］ 曾凤彩, 武军. 增塑剂对纤维素膜表面结构和性能的影响 [J]. 包装工程, 2006, 27(1): 16−17.
Zeng C F, Wu J. Influence of plasticizers on surface structure and properties of cellulose films [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 16−17.

［16］ 赵力超, 彭志妮, 游曼洁, 等. 增塑剂对改性纤维素膜性能的影响及其机理研究 [J]. 食品科学, 2010, 31(1): 105−109.
Zhao L C, Peng Z N, You M J, et al. Study on the effects and mechanism of plasticizers on the properties of modified cellulose films [J]. Food Science, 2010, 31(1): 105−109.

［17］ 张伟华, 吴平伟, 姜义军. 高强度高阻隔性再生纤维素/蒙脱土复合膜及其应用 [J]. 化工新型材料, 2018, 46(3): 215−218.
Zhang W H, Wu P W, Jiang Y J. High-strength and high-barrier regenerated cellulose/montmorillonite composite films and their applications [J]. New Chemical Materials, 2018, 46(3): 215−218.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　于志明）