

负载姜黄素-氧化锌纳米颗粒的水凝胶膜的制备及其对冷鲜鸡肉的保鲜效果

杨宇恒，宋子伟，郑宇航，都龙，徐为民，孙芝兰

Preparation of Hydrogel Films Loaded with Curcumin-Zinc Oxide Nanoparticles and Its Preservation Effect on Low-temperature Chilled Chicken Meat

YANG Yuheng, SONG Ziwei, ZHENG Yuhang, DU Long, XU Weimin, and SUN Zhilan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024090112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

负载姜黄素的玉米醇溶蛋白-茶皂素复合纳米颗粒的抗氧化特性及其环境稳定性

Antioxidant Properties and Environmental Stability of Curcumin-Loaded Zein-Tea Saponin Nanoparticles

食品工业科技. 2025, 46(5): 26-34 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010360>

乳铁蛋白基姜黄素纳米载体颗粒的制备及其对大鼠抗疲劳能力的影响

Preparation of Lactoferrin-Curcumin Nanoparticles and Its Effect on Antifatigue Ability in Rats

食品工业科技. 2021, 42(13): 26-32 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110272>

燕麦 β -葡聚糖与原花青素基负载姜黄素乳液凝胶的稳定性及消化特性

Stability and Digestion Properties of Curcumin-loaded Emulsion Gels Fabricated by Oat β -Glucan and Proanthocyanidins

食品工业科技. 2025, 46(10): 65-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050283>

姜黄素在食品保鲜中应用的研究进展

Research Progress of Curcumin in Food Preservation Application

食品工业科技. 2020, 41(7): 320-324,331 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.053>

玉米醇溶蛋白/聚环氧乙烷同轴静电纺丝负载姜黄素及其释放特性

Release Characteristics of Curcumin Loaded on Zein/Poly (Ethylene Oxide) by Coaxial Electrospinning

食品工业科技. 2021, 42(14): 61-69 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110056>

姜黄素乳液的研究进展

Recent Advances in Research of Curcumin Emulsion

食品工业科技. 2020, 41(1): 341-348 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.01.056>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨宇恒, 宋子伟, 郑宇航, 等. 负载姜黄素-氧化锌纳米颗粒的水凝胶膜的制备及其对冷鲜鸡肉的保鲜效果 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 327–335. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090112

YANG Yuheng, SONG Ziwei, ZHENG Yuhang, et al. Preparation of Hydrogel Films Loaded with Curcumin-Zinc Oxide Nanoparticles and Its Preservation Effect on Low-temperature Chilled Chicken Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 327–335. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090112

· 贮运保鲜 ·

负载姜黄素-氧化锌纳米颗粒的水凝胶膜的制备及其对冷鲜鸡肉的保鲜效果

杨宇恒^{1,2}, 宋子伟^{1,3}, 郑宇航^{1,2}, 都龙^{1,2}, 徐为民², 孙芝兰^{2,*}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013;

2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014;

3. 淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 江苏淮安 223003)

摘要: 为制备水凝胶膜延长冷鲜鸡肉的货架期, 本文首先利用姜黄素(Curcumin)与氧化锌(ZnO)制备了姜黄素-氧化锌纳米颗粒(CUR-ZnO NPs), 随后通过优化氧化透明质酸(OHA)与壳寡糖(CO)比例, 并负载CUR-ZnO NPs, 制备水凝胶膜OHA/CO/CUR-ZnO NPs, 并分析其对冷鲜鸡肉的保鲜效果。结果表明, 随着CO的增加, OHA/CO水凝胶膜的机械性能增加, 但亲水性也同时增加, 因此, 选取OHA/CO(1:1.5)作为负载CUR-ZnO NPs的最佳比例。傅里叶红外光谱分析证实氧化OHA和CO通过席夫碱反应形成交联网络, X射线衍射分析结果表明OHA/CO/CUR-ZnO NPs水凝胶膜是一种无序的非晶体结构。此外, OHA/CO/CUR-ZnO NPs水凝胶膜对产气荚膜梭菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌表现出良好抑菌性能。将该水凝胶膜包裹冷鲜鸡肉, 4℃条件下冷鲜鸡肉货架期延长了4d。因此, 制备的OHA/CO/CUR-ZnO NPs水凝胶膜具有良好的机械性能和水蒸气透过性, 并保持低水分渗透, 同时对冷鲜鸡肉具有较好的保鲜效果, 在冷鲜肉保鲜领域中有潜在的应用前景。

关键词: 姜黄素, 水凝胶, 活性包装, 抗菌性能, 货架期

中图分类号: TS206.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0327-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090112

本文网刊:



Preparation of Hydrogel Films Loaded with Curcumin-Zinc Oxide Nanoparticles and Its Preservation Effect on Low-temperature Chilled Chicken Meat

YANG Yuheng^{1,2}, SONG Ziwei^{1,3}, ZHENG Yuhang^{1,2}, DU Long^{1,2}, XU Weimin², SUN Zhilan^{2,*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

3. School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract: This study aimed to extend the shelf-life of chilled chicken meat by preparing curcumin-zinc oxide nanoparticles (CUR-ZnO NPs) using curcumin and zinc oxide. Subsequently, the ratio of oxidised hyaluronic acid (OHA) to chitosan (CO) was optimized, and CUR-ZnO NPs were incorporated into the hydrogel membranes. The preservation effect of the OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel membranes on chilled chicken meat was then analysed. The results indicated that the mechanical properties of the OHA/CO hydrogel membrane improved with an increase in the CO content, although the hydrophilicity also increased. Consequently, the OHA/CO ratio of 1:1.5 was selected as the optimal ratio for loading CUR-ZnO NPs. Fourier infrared spectroscopy (FTIR) analysis confirmed that OHA and CO formed a crosslinked network

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 江苏省农业自主创新资金(CX(22)3063); 国家自然科学基金面上项目(31972140); 国家肉鸡产业技术体系专项资金(CARS-41)。

作者简介: 杨宇恒(1999-)(ORCID: 0009-0002-2320-7912), 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜禽产品质量安全, E-mail: 1669438945@qq.com。

* 通信作者: 孙芝兰(1984-)(ORCID: 0000-0001-9648-4115), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 畜禽产品质量安全, E-mail: zhilan408@163.com。

through the Schiff base reaction. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that the OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel film exhibited a disordered amorphous structure. Furthermore, the OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel membrane demonstrated excellent bacteriostatic properties against *Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus*, and *Escherichia coli*. The shelf life of chilled chicken was extended by 4 days at 4 °C by wrapping the hydrogel film around the chicken. Therefore, the prepared OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel membrane exhibited good mechanical properties, water vapour permeability, and low water permeability. Furthermore, it demonstrates an excellent preservation effect on chilled chicken meat, making it a promising candidate for applications in chilled meat preservation.

Key words: curcumin; hydrogel; active packaging; antimicrobial properties; shelf life

鸡肉因其高蛋白质、低脂肪的特性,深受消费者喜爱^[1]。然而,鸡肉制品中的丰富营养成分和水分微生物的快速繁殖提供了有利条件,导致其在加工、贮藏和销售过程中极易腐败变质^[2]。食品包装作为延长食品货架期和保证食品质量的关键技术,正逐渐从传统包装向活性包装转变。活性包装通过在包装材料中掺入特定活性物质,如抗菌剂和抗氧化剂,调节包装内部环境,从而改善食品的感官品质并延长其货架期^[3-4]。然而,现有的活性包装材料在抗菌效果和稳定性方面仍存在不足,特别是在处理易腐食品如鱼皮、鸡肉等冷鲜肉制品^[5-7],现有技术的应用效果有限,因此,开发新型的抗菌食品包装材料具有重要的研究必要性。

在开发活性包装材料时,选择合适的活性成分和载体材料是至关重要的。姜黄素因其抗菌、抗癌和抗炎特性被视为潜在的活性成分^[8-9]。然而,姜黄素的水溶性差、稳定性低以及对光热敏感的特性限制了其直接应用^[10]。为克服这些缺点,研究者们提出了多种改良方法,如将姜黄素与金属纳米颗粒(如 Au NPs、Ag NPs、ZnO NPs 等)结合,以增强其抗菌能力和稳定性^[11]。特别是氧化锌纳米颗粒(ZnO NPs),因其低毒性、高生物相容性和优良的抗菌性能,被广泛应用于多个领域^[12-13]。此外,天然多糖透明质酸(HA)很容易通过其表面羟基的化学氧化来引入醛基而被官能化,这种官能化的二糖单元中的羧基结构,能够增加姜黄素金属络合物的水溶性,提高姜黄素的生物利用度^[14-15]。壳寡糖(CO)是目前发现的唯一一种带正电荷的天然多糖,由于其出色的生物降解性、生物相容性和无毒害性被广泛应用于医疗、农业、食品等领域^[16]。基于此,氧化透明质酸(OHA)与壳寡糖(CO)通过席夫碱反应快速交联形成的水凝胶,具有优异的安全性、生物相容性和可降解性,是负载姜黄素氧化锌纳米颗粒的理想材料^[17]。这些研究进展为开发新型抗菌包装材料提供了理论基础,但现有研究在材料的综合性能和实际应用效果上仍存在不足,特别是在储藏易腐食品方面。

本研究旨在开发一种新型的抗菌食品包装材料,以提高冷鲜鸡肉运输和储存过程中的安全性并延长货架寿命。为此,采用姜黄素与氧化锌纳米颗粒合成了 CUR-ZnO NPs,并以氧化透明质酸和壳寡糖为基材,通过席夫碱交联法成功制备了抗菌水凝胶薄

膜。通过对薄膜的结构和热稳定性进行表征,并在低温储藏条件下对鲜鸡肉进行抗菌性和保鲜性评估,结果显示该材料具有良好的结构稳定性和应用潜力。未来的研究将进一步探索该材料的实际应用效果,优化其制备工艺,制备出具有优异抗菌性能和水凝胶特性的薄膜材料,以期为食品安全和延长货架期提供更有效的解决方案。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

姜黄素(纯度>95%) 上海麦克林生化科技股份有限公司;硝酸锌、氢氧化钠、透明质酸(Mn=200000~400000 Da)、二氯甲烷、壳寡糖、无水氯化钙、高碘酸钠、乙二醇 山东海博生物科技有限公司;无水乙醇 国药集团化学试剂有限公司;产气荚膜梭菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌 中国工业微生物菌种保藏管理中心;LIVE/DEAD BacLightTM 试剂盒 兰州励合生物科技有限公司。

GI100T 高压灭菌锅 厦门致微仪器有限公司;B1-150A 生化培养箱 施都凯仪器设备(上海)有限公司;Alpha 1-2 LDplus 真空冷冻干燥机 德采实仪器设备(北京)有限公司;GZX-9070MBE 电热鼓风干燥箱 博讯实业(上海)有限公司;HJ-6 多头磁力加热搅拌器 焯庄仪器(上海)有限公司;美国 FTC TMS-TOUCH 质构仪 盈盛恒泰科技(北京)有限责任公司;Nicolet iS50 红外光谱仪 赛默飞世尔科技(上海)有限公司;Bruker D8 Advance X 射线衍射分析仪、TGA Q50 热重分析仪 上海尔迪仪器科技有限公司;UltraView VoX 转盘激光共聚焦显微镜 美国 PerkinElmer 公司;EVO LS 10 扫描电子显微镜 卡尔·蔡司公司(德国)股份公司;FEI Tecnai F20 透射电子显微镜 美国 FEI 公司;KQ-300DE 型数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 负载姜黄素-氧化锌纳米颗粒的水凝胶膜的制备

1.2.1.1 姜黄素-氧化锌纳米颗粒(CUR-ZnO NPs)的制备 参考 Matei 等^[18]的方法制备 CUR-ZnO NPs。将 2 mol/L 的 NaOH 溶液缓慢滴加到 20 mL 浓度为 1 mol/L 硝酸锌溶液中将 pH 调节至 1, 使用磁力搅拌器连续搅拌混合物 3 h, 形成白色沉淀, 用蒸馏

水洗涤三次后放入 60 ℃ 的烘箱中干燥过夜, 然后在 300 ℃ 下煅烧 3 h, 得到 ZnO 纳米颗粒。将 10 mg 姜黄素溶解在 10 mL 二氯甲烷中, 10 mg ZnO 纳米颗粒悬浮在 10 mL 水中, 二者混合, 在 30 ℃ 下不断搅拌 24 h 直至溶液从黄色变为橙色后停止搅拌。将样品洗涤数次, 并在 60 ℃ 下干燥, 得到 CUR-ZnO NPs。

1.2.1.2 氧化透明质酸(OHA)的制备 参考 Weis 等^[19]的方法制备 OHA。将 2 g 透明质酸(HA)溶解在 100 mL 水中 70 ℃ 下连续搅拌 2 h 以获得 HA 溶液, 往 HA 溶液中滴加高碘酸钠使其终浓度为 0.5 mol/L, 在避光条件下搅拌 1 h, 将 1 mL 乙二醇添加到溶液中 800 r/min 搅拌 1 h 灭活, 将所得溶液装入透析袋(Mw: 3500)中, 透析袋放入纯水中旋转透析以除去未反应的物质, 每 24 h 更换纯水, 透析 3 d 后将透析袋中的液体冷冻干燥获得氧化透明质酸(OHA)。

1.2.1.3 OHA/CO 水凝胶膜的制备 为了制备最佳的 OHA/CO 水凝胶膜, 参考 Bao 等^[20]的方法并做改进, 本实验设计了不同 OHA/CO 摩尔比(1:1、1:1.5、1:2)的水凝胶膜。通过比较水凝胶膜机械性能、水蒸气透过性和水接触角确定最佳的 OHA/CO 比例。将 OHA 和 CO 分别溶解在 5 g 去离子水中, 制备 OHA 溶液和 CO 溶液。将两种溶液根据不同的摩尔比(1:1、1:1.5、1:2)混匀, 吸取 5 mL 混合液放入干净的一次性培养皿中获得光滑均匀的水凝胶, 最后将水凝胶在 37 ℃ 下烘干 24 h 得到水凝胶膜。

1.2.1.4 负载 CUR-ZnO NPs 水凝胶膜(OHA/CO/CUR-ZnO NPs)的制备 综合考虑水凝胶膜的机械性能和吸水性能, 随后选择 OHA/CO 摩尔比 1:1.5 的水凝胶膜进行 CUR-ZnO NPs 的负载实验。将制备的 CUR-ZnO NPs 溶解在 OHA/CO 溶液(摩尔比 1:1.5)中, 使其终浓度为 200 μmol/L, 充分搅拌 1 h 后, 吸取 5 mL 混合液放入干净的一次性培养皿中获得光滑均匀的水凝胶, 最后将水凝胶在 37 ℃ 下烘干 24 h 得到负载姜黄素-氧化锌纳米颗粒的水凝胶膜。

1.2.2 TEM 观察 CUR-ZnO NPs 形态 为了研究 ZnO NPs 与 CUR-ZnO NPs 的形貌和粒径分布, 采用透射电子显微镜(TEM)进行分析。首先, 将 ZnO NPs、CUR-ZnO NPs 样品分散在乙醇中, 通过超声处理 5 min 以确保颗粒的均匀分散。随后, 使用乙醇洗涤三次去除表面杂质, 在室温下自然干燥 2 h 后使用 TEM 对样品进行观察。

1.2.3 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的机械性能、水蒸气透过性及表面湿润特性的优化分析

1.2.3.1 OHA/CO 和 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜机械性能的测定 参考 Mai 等^[21]的方法, 使用质构仪测试两种水凝胶的机械性能。将水凝胶膜切

割成长为 4 cm、宽度为 1 cm 的矩形, 使用游标卡尺选取随机 5 个位置测量水凝胶膜的厚度, 计算水凝胶膜的平均厚度。质构仪初始间隙距离为 15 mm, 测试速度为 60 mm/min, 将样品放置在仪器检测区域进行机械性能测试, 每组实验重复五次, 取平均值作为测试结果。水凝胶的拉伸强度(tensile strength, TS)和断裂伸长率(elongation at break, EB)计算公式如下:

$$TS(\text{MPa}) = \frac{F_{\max}}{A}$$

$$EB(\%) = \frac{X_{\max} - X_0}{X_0} \times 100$$

式中: TS 为水凝胶膜的拉伸强度(MPa), EB 为水凝胶膜的断裂伸长率(%), F_{\max} 为水凝胶膜的最大断裂张力(N), A 为水凝胶薄膜的横截面积(m^2), X_{\max} 为水凝胶膜的最大延伸长度(cm), X_0 为水凝胶膜的初始长度(cm)。

1.2.3.2 OHA/CO 和 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜水蒸气透过性的测定 将足量的无水氯化钙放入 20 mL 的小烧杯中, 用不同的水凝胶膜样品将烧杯密封并置于 25 ℃ 和 75% 湿度下。在静置过程中, 干燥剂通过水凝胶膜吸收水蒸气, 从而改变杯子的重量, 在 24 h 内每隔 4 h 记录杯子的质量。通过以下公式测定样品的水蒸气透过性(water vapor permeability, WVP):

$$WVT = \frac{24 \times \Delta m}{A \times t}$$

$$WVP = 1.157 \times 10^{-9} \times \frac{WVT \times d}{\Delta P} = \frac{\Delta m \times d}{A \times t \times \Delta P}$$

式中: WVT 为水蒸气透过量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$), WVP 为水凝胶膜的水蒸气透过性($\text{g} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$), Δm 是重量变化值(g), A 为水凝胶薄膜的表面积(m^2), t 为测试的时间差(h), d 表示平均样品厚度(cm), ΔP 为水凝胶膜的水蒸气分压差(Pa)。

1.2.3.3 OHA/CO 和 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜水接触角的测定 OHA/CO 和 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的水接触角(water contact angle, WCA)通过座滴法测定, 将水凝胶膜固定在载玻片上, 将液体直接滴在水凝胶膜表面, 液滴的平衡时间为 3 秒, 液面稳定后拍照, 测量其水接触角。

1.2.4 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的红外和 X 射线衍射分析 参考 Mai 等^[21]的方法, 使用 FTIR 光谱仪对 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜进行红外光谱测定和分析。分析条件如下: 波数范围为 4000~500 cm^{-1} , 间隔为 1 cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} 。采用 X 射线衍射分析仪, 对不同的抗菌膜进行物相分析。分析参数为: 电压 20 kV, 电流 5 mA, $K\alpha(\lambda=1.5418 \text{ \AA})$, 扫描速率 4°/min, 波长 0.02°, 扫描范围 5°~40°。同时, 使用热重分析仪测定各样品的 TGA

参数。具体参数设置为: 10 mg 样品以 10 °C/min 的加热速率升温至 800 °C。

1.2.5 OHA/CO 和 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜热稳定性测定 参考 Mai 等^[21]的方法, 使用热重分析仪测定各样品的 TGA 参数。具体参数设置为: 10 mg 样品以 10 °C/min 的加热速率升温至 800 °C。

1.2.6 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的体外杀菌作用 参考 Mai 等^[21]的方法, 通过平板计数评估 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜体外杀菌效果。产气荚膜梭菌(*Clostridium perfringens*)在液体硫乙醇酸盐培养基中培养至对数生长期, 金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和大肠杆菌(*Escherichia coli*)在 Luria-Bertani(LB)培养基中培养至对数生长期。将切割面积为 1×1 cm² 的 CUR-ZnO NPs 水凝胶膜置于培养皿的中心, 将 200 μL 的菌液滴在水凝胶膜中心, 并暴露于波长为 465~475 nm 的蓝光下 30 min, 对照组未放置水凝胶膜, 同时使用 OHA/CO 与 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜采用同样的方式处理 30 min。最后, 回收菌液, 十倍梯度稀释后涂板计数。

扫描电子显微镜观察, 用 2.5% 戊二醛固定上述处理过的细菌悬浮液并使用乙醇梯度洗脱。最后, 将细菌悬浮液置于扫描电子显微镜下观察体表结构。

使用激光共聚焦观察 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的体外杀菌效果, 取对数期产气荚膜梭菌菌液 1 mL 以 8000 r/min 离心 5 min, 去上清液后用浓度为 0.85% 的无菌生理盐水洗涤三次, 最终将产气荚膜梭菌悬浮于 1 mL 灭菌的生理盐水中, 细菌悬浮液中加入 50 mg 水凝胶膜, 对照组中加入 50 mg 的水, 振荡摇匀, 室温下处理 2 h。将处理好的菌悬液 8000 r/min 离心 5 min, 去掉上清液。添加 1 mL 浓度为 0.01 mol/L 的 PBS 到经过处理的细菌沉淀中并振荡使其悬浮, 加入 LIVE/DEAD BacLightTM 试剂盒中 SYTO-9 与 PI 的混合液各 3 μL, 悬浮液在 37 °C、室温下反应 30 min, 避光, 然后置于激光共聚焦扫描显微镜下 60 倍观察细菌的形态。

1.2.7 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜在鸡肉保鲜中的应用 将购买的新鲜鸡肉分成 5 g 每份, 并使用水凝胶膜包装该鸡肉。用 465~475 nm 的蓝光照射所有包装好的鸡肉 30 min, 然后将其放入 4 °C 的冰箱中储存。在 10 d 的储存期内, 每 2 d 取样一次。分别根据国家标准 GB 5009.237-2016、GB 4789.2-2022 和 GB 5009.228-2016, 测定样品中 pH、菌落总数(TVC)和挥发性盐基氮(TVB-N)的含量。

1.3 数据处理

所有结果均以“平均值±标准差”表示, 使用 SPSS 软件进行数据统计分析, 所有分析均使用最小显著性差异(LSD)方法检验, 显著性水平为 0.05, 使

用 Origin 2021 进行 PCA 统计、分析和作图。

2 结果与分析

2.1 TEM 观察 CUR-ZnO NPs 形态

采用 TEM 显微镜分析 ZnO 颗粒的形貌和粒径, 分析 CUR 对 ZnO 颗粒的影响。如图 1 所示, ZnO 颗粒呈现不规则球状, 形成初级颗粒的聚集体, 尺寸在 20~100 nm 之间变化, 这表明 ZnO 颗粒在热处理过程中发生了烧结, 这可以由相邻初级颗粒之间的联结证明。合成 CUR-ZnO NPs 后, 发现颗粒之间更加容易区分、更加均匀、团聚程度下降, 结果表明通过将 CUR 结合到 ZnO 上, ZnO 颗粒的形貌不受影响, 尺寸在 20~100 nm 之间变化。根据图 1 可以观察到 ZnO NPs 的合成过程中发生了颗粒团聚, 这是因为氧化锌纳米颗粒具有高表体积比因此有着非常高的表面能, 表面能越高, 晶体表面越容易吸附其他物质, 从而发生了颗粒团聚, 这在后续的应用中可能会导致分散性降低, 表面活性位点减少, 从而影响到水凝胶膜的稳定性及杀菌效率^[18]。因此, 通过使用 CUR 附着在 ZnO NPs 表面形成结构稳定的 CUR-ZnO NPs 可以使颗粒的表面能最小化, 从而减少颗粒团聚, 使得 CUR-ZnO NPs 复合材料分散更加均匀、功能更加稳定^[22]。

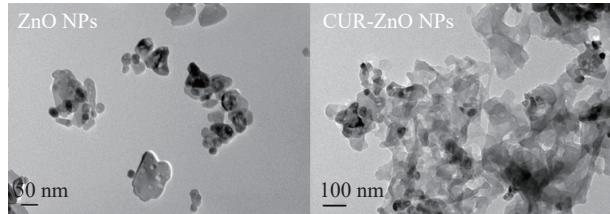


图 1 ZnO NPs 和 CUR-ZnO NPs 的微观形态

Fig.1 Microscopic morphology of ZnO NPs and CUR ZnO NPs

2.2 OHA/CO 水凝胶膜的制备及优化

2.2.1 OHA/CO 水凝胶膜的机械性能 在食品运输和储存过程中, 必须加强水凝胶薄膜的保护作用, 避免损坏。因此, 理想的机械性能对食品包装薄膜的应用至关重要^[23]。图 2A 和图 2B 显示了水凝胶膜的拉伸强度和断裂伸长率。OHA/CO(1:1)的拉伸强度(TS)为 0.51±0.02 MPa, 断裂伸长率(EB)为 48.76%±1.43%; OHA/CO(1:1.5)的 TS 为 1.04±0.3 MPa, EB 为 72.62%±2.31%; OHA/CO(1:2)的 TS 为 1.88±0.2 MPa, EB 为 97.35%±1.89%。通过增加 CO 在材料中的比例可以显著提升薄膜的机械性能, 这可能是因为 CO 与 OHA 形成更多的共价键, 增加了交联度, 当外力施加到水凝胶上时, 共价键可以耗散能量并抵抗外部压力。这与目前报道的水凝胶非常相似, Li 等^[24]实验表明, PL-Cat/ODex 水凝胶的双重交联网络可以显著提高水凝胶的力学性能。

2.2.2 OHA/CO 水凝胶膜的水蒸气透过性和水接触角分析 如图 2C 水凝胶膜的水蒸气透过性和

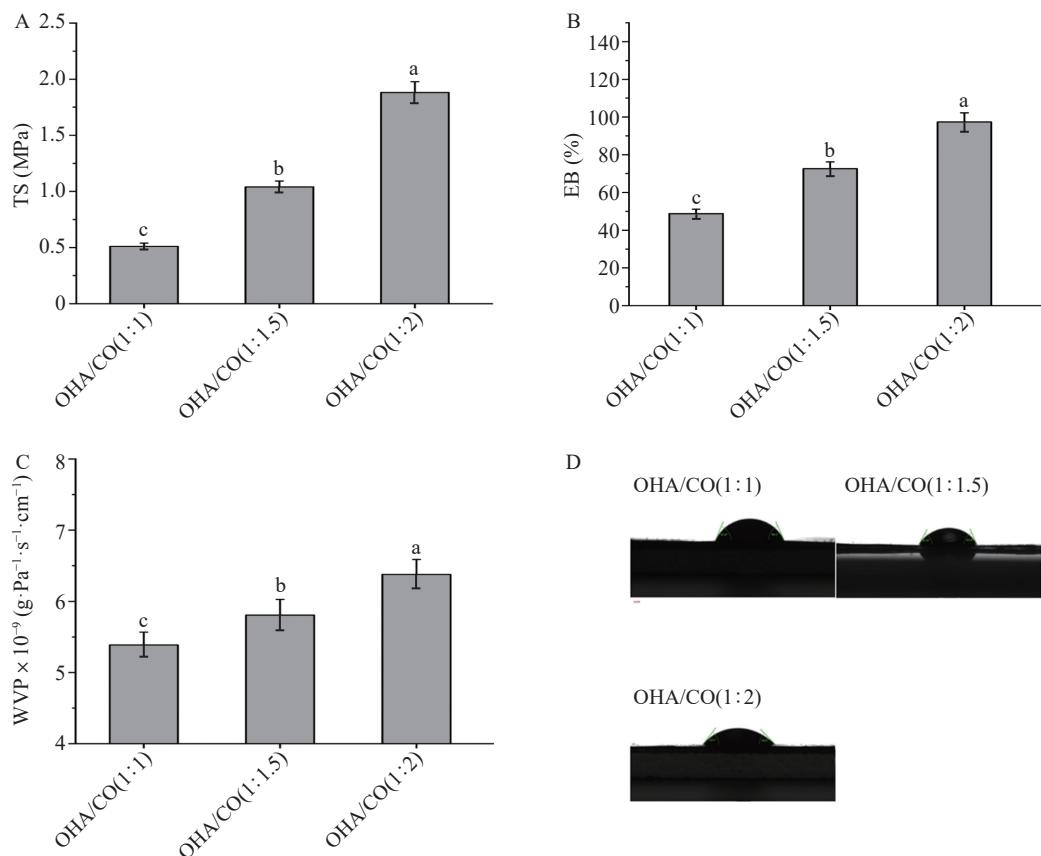


图 2 OHA/CO 水凝胶膜的机械性能、水蒸气透过性(WVP)及水接触角(WCA)

Fig.2 Mechanical properties, water vapour permeability (WVP) and water contact angle (WCA) of OHA/CO hydrogel membranes
注: 不同字母代表具有显著差异($P<0.05$), 图 5、图 8 同。

图 2D 水凝胶膜的水接触角所示, OHA/CO(1:1) 的 WVP 值为 $(5.43\pm0.18)\times10^{-9} \text{ g}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, WCA 值为 $63.4^\circ\pm2.1^\circ$; OHA/CO(1:1.5) WVP 值为 $(5.79\pm0.22)\times10^{-9} \text{ g}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, WCA 值为 $54.1^\circ\pm2.8^\circ$; OHA/CO(1:2) WVP 值为 $(6.33\pm0.21)\times10^{-9} \text{ g}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, WCA 值为 $45.6^\circ\pm1.8^\circ$ 。结果表明, 随着水凝胶膜中 CO 的比值增加, WVP 增加而 WCA 降低, 这可能是因为壳寡糖极易溶于水, 其中丰富的氢键使膜的亲水性增加^[25]。

水凝胶膜的制备不仅需要良好的机械性能, 同时需要兼顾膜的疏水性能。疏水性包装材料可以防止外界的水分和其他液体渗透, 较低的水蒸气透过性能有效防止水分进入或渗出, 减少肉制品在储存和运输过程中的水分损失, 帮助保持肉制品的湿度, 防止干燥和失重。虽然 CO 的增加能够提高水凝胶膜的机械性能, 但同时水凝胶膜的亲水性也在增加, 综合考虑, 后期选用 OHA/CO 为 1:1.5 的水凝胶膜负载 CUR-ZnO NPs。

2.3 负载 CUR-ZnONPs 后水凝胶膜 (OHA/CO/CUR-ZnO NPs) 的性能变化

OHA/CO 为 1:1.5 的水凝胶膜有着良好的综合性能, 向 OHA/CO(1:1.5) 水凝胶膜中添加 CUR-ZnO NPs 对水凝胶膜的机械性能和疏水性能都没有显著影响(表 1), 说明 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝

胶膜的性质主要与 OHA 和 CO 的比例有关, CUR-ZnO NPs 的加入未与 OHA 与 CO 形成新的共价键, 对水凝胶膜的性质未造成显著影响。

表 1 CUR-ZnO NPs 的负载对 OHA/CO 水凝胶膜性能的影响

Table 1 Effect of CUR-ZnO NPs loading on the properties of OHA/CO hydrogel films

性能指标	OHA/CO(1:1.5)	OHA/CUR-ZnO NPs(1:1.5)
TS(MPa)	$1.04\pm0.3^{\text{a}}$	$1.22\pm0.22^{\text{a}}$
EB(%)	$72.62\pm2.31^{\text{a}}$	$75.33\pm3.8665^{\text{a}}$
WVP($\text{g}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$(5.79\pm0.22)\times10^{-9}$	$(5.64\pm0.17)\times10^{-9}$
WCA(°)	$54.1\pm2.8^{\text{a}}$	$57.1\pm3.01^{\text{a}}$

注: 同行相同字母表示无显著性差异($P>0.05$)。

2.4 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的 FTIR 和 XRD 分析

如图 3A 所示, 样品 OHA 在 1665 cm^{-1} 处的特征峰是由于醛基中的-C=O 键拉伸引起的, OHA 中的醛基与 CO 中的氨基通过席夫碱反应形成亚胺键(-C=N-), 样品 OHA/CO 与 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 中 1665 cm^{-1} 处的特征峰消失, 反映出膜的-C=O 含量降低同时在 1733 cm^{-1} 处的特征峰是由于新的共价亚胺键(-C=N-)的形成, 这进一步证实了席夫碱反应成功形成了亚胺键。此外, OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜在 3290 cm^{-1} 处的特征峰值与 O-H 拉

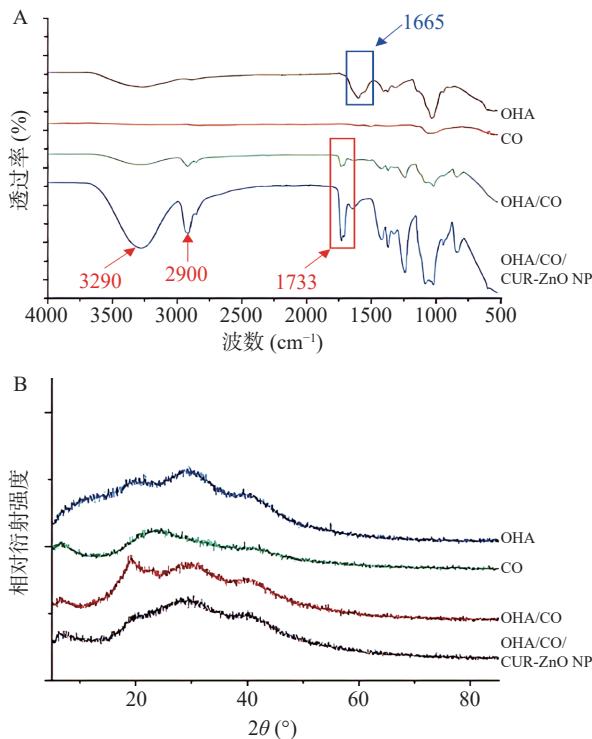


图3 OHA/CO、OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的FTIR(A)和XRD(B)

Fig.3 FTIR (A) and XRD (B) of OHA/CO and OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel films

伸振动有关。在 2900 cm^{-1} 处观察到的典型特征峰可归因于 C—H 的对称拉伸振动^[26]。

通过 X 射线衍射确定样品是否具有晶体结构, 根据 X 射线衍射图(图 3B)中的宽峰(特别是在 $2\theta=20^\circ$ 和 $2\theta=30^\circ$ 处), OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜显示几乎没有晶体结构, 表明样品主要由非晶态组成。由于缺乏明显的晶体峰, 计算出的相对结晶度为 4.51%, 属于较低的水平。这种低结晶度通常与水凝胶的非晶态结构和聚合物网络的特性相符。这进一步证实了 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜主要由非晶态结构组成, 几乎没有有序的晶体结构。聚合物通过交联形成新的互穿网络结构, 从而破坏了固有的晶体结构, 导致整体样品表现为非晶态^[27]。

通过对 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的 FTIR 和 XRD 分析, 证实了 OHA 与 CO 通过席夫碱反应成功形成了亚胺键(-C=N-), 表明聚合物网络的交联过程有效进行。XRD 分析进一步揭示水凝胶膜主要由非晶态结构构成, 表现出较低的结晶度(4.51%), 这与水凝胶的高弹性和柔韧性相符, 且通过交联形成的互穿网络结构增强了其机械性能和功能性。综合这些表征结果, 表明制备的 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜具有良好的化学交联结构和非晶态特性, 为其在食品包装等领域的应用提供了科学支持。

2.5 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的热稳定性分析

使用热重分析(TGA)薄膜的热稳定性, 以分析

复合水凝胶在食品包装中的应用潜力。如图 4 所示, 第一阶段的分解发生在 $30\sim200^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 可能是由物质中水分的蒸发引起的。第二阶段热分解发生在 200°C 至 450°C 之间, 此时薄膜的质量迅速下降, 水凝胶迅速分解, 重量显著减轻。该阶段重量损失的主要原因是聚合物主链的降解以及分子内和分子间氢键的断裂。第三阶段是在 450°C 之后, 由于水的蒸发和大分子的完全分解, 样品的质量不再在很大程度上降低。这一阶段的重量损失归因于聚合物副产物的分解。与 OHA/CO 相比, 掺杂 CUR-ZnO NPs 的薄膜的热稳定性略有下降, 这可能是因为凝胶成型过程中 CUR-ZnO NPs 引起聚合物链的重排和结晶。

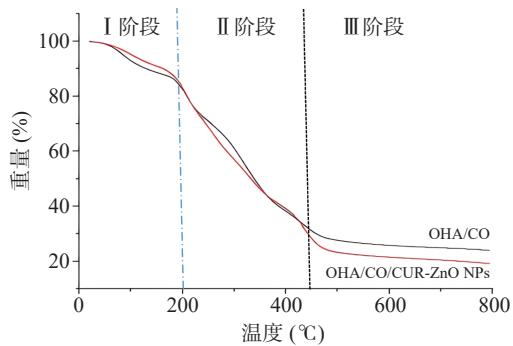


图4 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的TGA
Fig.4 TGA of OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel film

2.6 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜的杀菌性能分析

2.6.1 计数观察 微生物污染可能会导致各种食品安全问题, 因此抗菌活性是评估食品包装薄膜性能的重要指标。采用平板计数法测试了 OHA/CO、OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜对 *C. perfringens*、*S. aureus* 和 *E. coli* 的杀菌性能。如图 5 所示, OHA/CO 膜对 *C. perfringens*、*S. aureus* 和 *E. coli* 几乎不具备杀菌效果, OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜将 *C. perfringens*、*S. aureus* 和 *E. coli* 的活菌数分别降低到 5.23、6.89、6.65 lg CFU/g。结果表明, 通过将 CUR-ZnO NPs 掺入薄膜中, 可以提高薄膜的杀菌性能, 因为 CUR-ZnO NPs 中 CUR 被激发形成具有细胞毒性的 ROS, 同时 ZnO 纳米颗粒本身具有抗菌性^[28]。

2.6.2 SEM 观察 使用 SEM 进一步探索水凝胶膜的抗菌效果, 观察使用不同膜处理后 *S. aureus*、*E. coli* 和 *C. perfringens* 的形态变化。如图 6 所示, 未使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜处理的对照组细菌形态完整, 无明显收缩变形, 呈规则形状。由于 OHA 和 CO 抗菌活性较弱, OHA/CO 膜处理后的细菌没有表现出明显的变形。经 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜处理后, 细菌变得粗糙, 发生明显的变形, 菌体已经完全粘连在一起(红色箭头), 内容物溶出。

2.6.3 激光共聚焦显微镜观察 通过活/死荧光染色评估了不同膜处理后细菌的存活率, OHA/CO/CUR

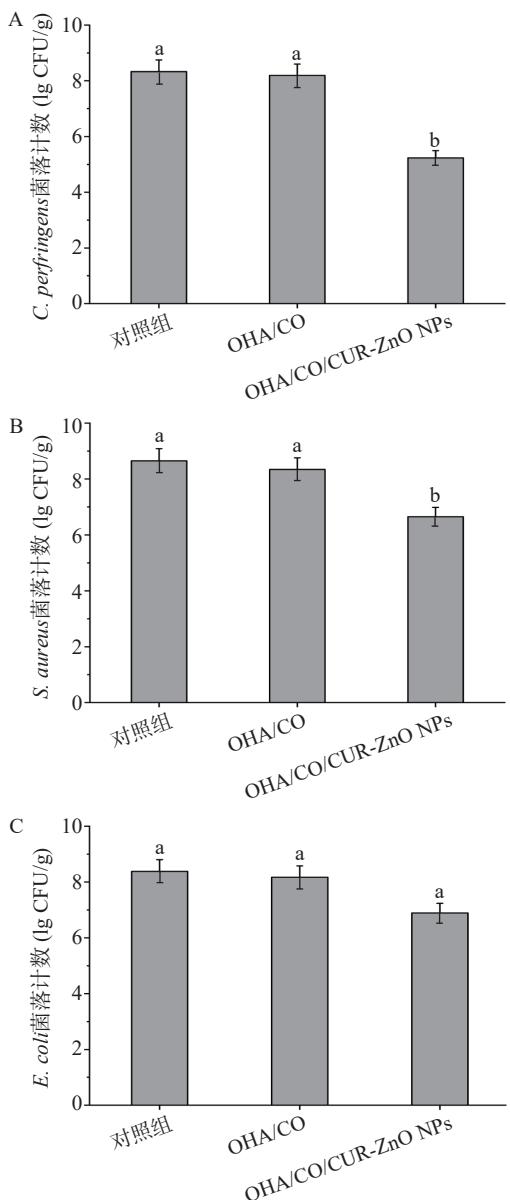


图 5 OHA/CO/CUR ZnO NPs 水凝胶膜对 *C. perfringens*(A)、*S. aureus*(B) 和 *E. coli*(C) 的菌落数的影响

Fig.5 Effect of OHA/CO/CUR ZnO NPs hydrogel film on colony counts of *C. perfringens* (A), *S. aureus* (B) and *E. coli* (C)

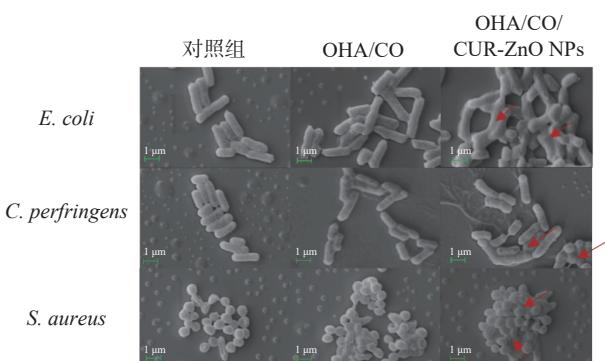


图 6 OHA/CO/CUR ZnO NPs 水凝胶膜对 *E. coli*、*S. aureus* 和 *C. perfringens* 杀菌效果的 SEM 分析

Fig.6 SEM analysis of the bactericidal effect of OHA/CO/CUR ZnO NPs hydrogel film on *E. coli*, *S. aureus*, and *C. perfringens*

ZnO NPs 水凝胶膜的抗菌效果结果如图 7 所示。未使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜处理的对照组显现出清晰的绿色荧光, 表明其中细菌有着良好的存活率。OHA/CO 处理组中有少数红色荧光出现。OHA/CO/CUR-ZnO NPs 处理组中红色荧光占比远高于未使用水凝胶膜处理的对照组, 表明其中活菌数量大幅减少, 说明该膜对 *S. aureus*、*E. coli* 和 *C. perfringens* 有着较好的杀菌效果。

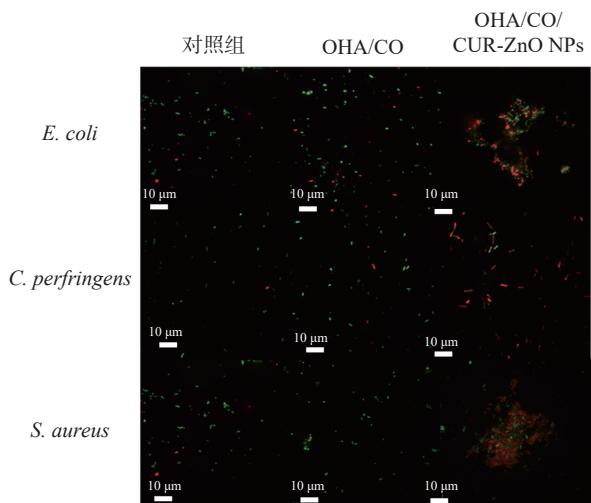


图 7 OHA/CO/CUR ZnO NPs 水凝胶膜对 *E. coli*、*S. aureus* 和 *C. perfringens* 杀菌效果的激光共聚焦分析

Fig.7 Laser confocal analysis of the bactericidal effect of OHA/CO/CUR ZnO NPs hydrogel film on *E. coli*, *S. aureus*, and *C. perfringens*

2.7 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜在冷鲜鸡肉中的应用

2.7.1 pH 分析 使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜包裹的鸡肉与未使用水凝胶膜包裹的鸡肉在 4 ℃ 储存期间的 pH 变化如图 8A 所示。通过对 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜处理组与对照组在不同储藏天数下的 pH 进行分析, 结果显示, 处理组的 pH 从第 2 d 开始显著低于对照组($P < 0.05$)。具体而言, 处理组的 pH 从初始的 5.95 逐渐降至 5.46(第 2 d), 随后缓慢上升至 6.03(第 10 d), 而对照组的 pH 则在第 6 d 到达 6.17 开始变为次级新鲜肉, 在第 10 d 时达到 6.75 超过 6.7 失去食用价值。这一显著差异表明, OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜能够有效延缓 pH 的上升, 从而减缓鸡肉的腐败, 其保质期由 6 d 延长至 10 d。储存期间能导致 pH 发生变化的因素有很多, 例如糖酵解、蛋白质分解、微生物作用等^[29]。储存初期样品 pH 降低可能是由于鸡被屠宰后鸡肉中的糖发生无氧糖酵解产生乳酸等酸性物质, 储存后期由于微生物作用鸡肉中的蛋白质被分解成含碱性含氮物使鸡肉的 pH 升高, pH 的升高有助于微生物的生长繁殖加速样品蛋白质的分解导致鸡肉的快速腐败^[30]。

2.7.2 菌落总数分析 冷鲜肉在储存过程中极易受到微生物污染和变质, 因此菌落总数的测定与肉制品

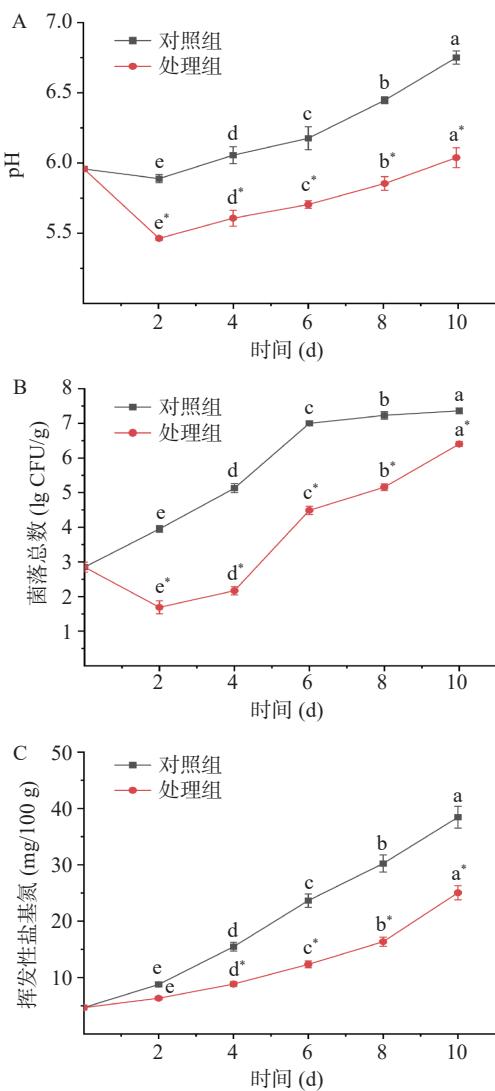


图8 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜对冷鲜鸡肉 pH(A)、TVC(B)和TVB-N(C)的影响

Fig.8 Effects of OHA/CO/CUR-ZnO NPs hydrogel film on pH (A), TVC (B) and TVB-N (C) of chilled chicken meat

注: *表示 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜组与对照组在 4 ℃ 储存期间的 pH、TVB-N、TVC 的差异显著性($P<0.05$)。

的安全性密切相关。图 8B 展示了冷鲜鸡肉在贮藏 10 d 期间菌落总数的变化, 处理组的菌落总数从第 2 d 开始显著低于对照组($P<0.05$)。所有样品的菌落总数初始值为 2.84 lg CFU/g , 在第 2 d 对照组的菌落总数增长到 4.07 lg CFU/g 而处理组的菌落总数为 1.86 lg CFU/g 低于初始值, 这体现了 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜在细菌含量较少时具有良好的杀菌作用。对照组在第 6 d 菌落总数超过 6 lg CFU/g 失去食用价值, 同时 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜处理后的样品保持新鲜。到第 10 d, 用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜处理的样品超过了冷鲜肉 TVC 的安全限值(6 lg CFU/g), 因此, 使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜处理可以延长冷鲜鸡肉的保质期约 4 d。这一显著差异结果表明 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜具有显著的抗菌性能, 可以有效抑制微生物的生长和增殖, 能够延长冷鲜鸡肉的保质

期。目前已有研究使用含有抗菌物质的纳米颗粒和水凝胶膜应用于肉制品的保存。Roy 等^[31]制备的 ZnO NPs/蜂胶/功能支链淀粉/壳聚糖基复合薄膜能够抑制五花肉表面细菌生长延长五花肉的保质期。

2.7.3 挥发性盐基氮分析 TVB-N 含量的增加与细菌的生长和内源性酶活性的增加密切相关。因此, TVB-N 可用于确定冷鲜鸡肉是否符合食品标准。如图 8C 所示, 冷鲜鸡肉中 TVB-N 的含量随着储存时间的增加而增加, 处理组从第 4 d 开始显著低于对照组($P<0.05$)。第 0 d 的 TVB-N 含量相对较低, 为 4.67 mg/100 g , 在储存的第 4 d, 对照组的 TVB-N 含量达到 15.47 mg/100 g , 已经超过了鲜(冻)畜、禽肉类及其制品的限量标准(15 mg/100 g), 失去食用价值。经 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 膜处理的样品在第 8 d TVB-N 含量达到 15.36 mg/100 g , 因此使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜处理的冷鲜鸡肉的保质期延长了约 4 d。此外, 处理组与对照组之间存在显著差异, 这一显著差异表明, OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜能够有效抑制微生物的生长和减少腐败产物的生成, 从而延长冷鲜鸡肉的保质期。表明 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜可以显著减缓储存过程中的 TVB-N 的生成, 延缓冷鲜鸡肉的变质。

综上所述, 基于菌落总数($\text{TVC} \leq 6 \text{ lg CFU/g}$)和挥发性盐基氮($\text{TVB-N} \leq 15 \text{ mg/100 g}$)的食品安全限值, 实验结果表明, 在 4 ℃ 贮藏条件下, 使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜包裹可将冷鲜鸡肉的保质期从 4~6 d 延长至 8~10 d。

3 结论

本文制备了姜黄素-氧化锌纳米颗粒, 并以透明质酸和壳寡糖为基材成功制备了具有抗菌性能的 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜。通过测试物理性能和水蒸气透过性和水接触角确定 OHA/CO (1:1.5) 为最佳比例。傅里叶红外光谱(FTIR)和 X 射线衍射(XRD)分析证实, OHA 与 CO 通过席夫碱反应交联形成交联网络, 该水凝胶是一种无序非晶体结构。CUR-ZnO NPs 的加入会在一定程度上降低水凝胶膜的热稳定性和亲水性。此外, OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜对 *S. aureus*、*E. coli* 和 *C. perfringens* 表现出良好的体外杀菌效果。在冷鲜鸡肉的 4 ℃ 贮藏应用中, 使用 OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜包裹的冷鲜鸡肉保鲜期延长了 4 d。因此, OHA/CO/CUR-ZnO NPs 水凝胶膜是一种结构稳定性好、应用前景广阔的抗菌食品包装材料。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 黄柳娟, 冯博, 刘海燕, 等. 冷鲜鸡肉表面及内部细菌菌群的多样性分析[J]. 上海农业学报, 2021, 37(1): 104~109. [HUANG

- L J, FENG B, LIU H Y, et al. Diversity analysis of bacterial flora on the surface and inside of chilled chicken[J]. *Journal of Shanghai Agriculture*, 2021, 37(1): 104–109.]
- [2] 贾珊珊. 变温模式下乳酸菌对鸡肉制品的生物保护作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 5–20. [JIA S S. Research on the biological protection of lactic acid bacteria on chicken products under variable temperature conditions[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 5–20.]
- [3] SHUBHAM S, SANDRA B, K A J, et al. Essential oils as additives in active food packaging[J]. *Food Chemistry*, 2020, 343: 128403.
- [4] FABIOLA E, CITLALI C, JUAN J V, et al. Control mango decay using antifungal sachets containing thyme oil/modified starch/agave fructans microcapsules[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100008.
- [5] RANI B S J, VENKATACHALAM S. Biomass-derived nanoparticles reinforced chitosan films: As high barrier active packaging for extending the shelf life of highly perishable food[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2023, 61(5): 990–1002.
- [6] TKACZEWSKA J, KULAWIK P, JAMROZ E, et al. One- and double-layered furcellaran/carp skin gelatin hydrolysate film system with antioxidant peptide as an innovative packaging for perishable foods products[J]. *Food Chemistry*, 2021, 351: 129347.
- [7] AHMADI A, AHMADI P, EHSANI A. Development of an active packaging system containing zinc oxide nanoparticles for the extension of chicken fillet shelf life[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(10): 5461–5473.
- [8] PERERA W, DISSANAYAKE R K, RANATUNGA U I, et al. Curcumin loaded zinc oxide nanoparticles for activity-enhanced antibacterial and anticancer applications[J]. *Rsc Advances*, 2020, 10(51): 30785–30795.
- [9] 任柯昱, 翁翔宇, 路慧, 等. 姜黄中姜黄素和姜黄油提取工艺研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 119–122. [REN K Y, WENG X Y, LU H, et al. Study on the extraction process of curcumin and turmeric oil from turmeric[J]. *China Condiment*, 2024, 49(7): 119–122.]
- [10] ABDOU E S, GALHOUM G F, MOHAMED E N. Curcumin loaded nanoemulsions/pectin coatings for refrigerated chicken fillets[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 445–453.
- [11] PATRA D, EL KURDI R. Curcumin as a novel reducing and stabilizing agent for the green synthesis of metallic nanoparticles[J]. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2021, 14(3): 474–487.
- [12] GóRAL D, GóRAL-KOWALCZYK M. Application of metal nanoparticles for production of self-sterilizing coatings[J]. *Coatings*, 2022, 12(4): 480.
- [13] RAHA S, AHMARUZZAMAN M. ZnO nanostructured materials and their potential applications: Progress, challenges and perspectives[J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(8): 1868–1925.
- [14] LI S Z, PEI M J, WAN T T, et al. Self-healing hyaluronic acid hydrogels based on dynamic Schiff base linkages as biomaterials[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 250: 116922.
- [15] LEI J F, LI X Y, WANG S, et al. Facile fabrication of biocompatible gelatin-based self-healing hydrogels[J]. *Acs Applied Polymer Materials*, 2019, 1(6): 1350–1358.
- [16] 姜紫薇, 白顺杰, 白婵, 等. 壳寡糖的生物活性及其在食品添加剂方面的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 1–8. [JIANG Z W, BAI S J, BAI C, et al. Biological activities of chitooligosaccharides and their application progress in food additives[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2024, 15(3): 1–8.]
- [17] LIU S X, JIANG N, CHI Y Q, et al. Injectable and self-healing hydrogel based on chitosan-tannic acid and oxidized hyaluronic acid for wound healing[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2022, 8(9): 3754–3764.
- [18] MATEI A, STOIAN M, BRINCOVEANU O, et al. Preparation and characterization of nanocomposites based on chitosan with ZnO-curcumin[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(12): 19829–19839.
- [19] WEIS M, SHAN J W, KUHLMANN M, et al. Evaluation of hydrogels based on oxidized hyaluronic acid for bioprinting[J]. *Gels*, 2018, 4(4): 82–90.
- [20] BAO Z, YU A, SHI H, et al. Glycol chitosan/oxidized hyaluronic acid hydrogel film for topical ocular delivery of dexamethasone and levofloxacin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 167: 659–666.
- [21] MAI X T, ZHANG X X, TANG M M, et al. Preparation of carboxymethyl chitosan/double-formaldehyde cellulose based hydrogel loaded with ginger essential oil nanoemulsion for meat preservation [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2024, 33(6): 1359–1369.
- [22] BEYENE A M, MONIRUZZAMAN M, KARTHIKEYAN A, et al. Curcumin nanoformulations with metal oxide nanomaterials for biomedical applications[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 460.
- [23] TILWANI Y M, LAKRA A K, DOMDI L, et al. Preparation and functional characterization of the bio-composite film based on chitosan/polyvinyl alcohol blended with bacterial exopolysaccharide EPS MC-5 having antioxidant activities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 245: 125496.
- [24] LI S D, CHEN N, LI X P, et al. Bioinspired double-dynamic bond crosslinked bioadhesive enables post-wound closure care[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(17): 2000130.
- [25] 范丽萍, 刘志伟, 焦文娟, 等. 壳寡糖复合物的制备及其功效研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 404–415. [FAN L P, LIU Z W, JIAO W J, et al. Preparation and efficacy study progress of chitooligosaccharide complexes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 404–415.]
- [26] BARTYZEL A, KACZOR A A. Synthesis, crystal structure, thermal, spectroscopic and theoretical studies of N_3O_2 -donor Schiff base and its complex with Cu^{II} ions[J]. *Polyhedron*, 2018, 139: 271–281.
- [27] YUE Y, LIU Y, LIN Y K, et al. A carboxymethyl chitosan/oxidized hyaluronic acid composite hydrogel dressing loading with stem cell exosome for chronic inflammation wounds healing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 257: 128534.
- [28] 郑宇航, 麦栩滔, 王文卓, 等. 姜黄素介导的光动力杀菌对产气荚膜梭菌的作用机制[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 121–128. [ZHENG Y H, MAI X T, WANG W Z, et al. mechanism of photodynamic bactericidal effect mediated by curcumin on *Clostridium perfringens*[J]. *Food Science and Technology*, 2024, 45(12): 121–128.]
- [29] ZHOU L B, FU J C, BIAN L Y, et al. Preparation of a novel curdlan/bacterial cellulose/cinnamon essential oil blending film for food packaging application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 212: 211–219.
- [30] WU Y M, MA Y, GAO Y L, et al. Poly(lactic acid)-based pH responsive membrane combined with chitosan and alizarin for food packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 214: 348–359.
- [31] ROY S, PRIYADARSHI R, RHIM J W. Development of multifunctional pullulan/chitosan-based composite films reinforced with ZnO nanoparticles and propolis for meat packaging applications[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2789.