

doi:10.12301/spxb202400156

文章编号:2095-6002(2025)01-0117-09

引用格式:江军,刘思佳,李志雄,等. 绿豆蛋白对魔芋葡甘聚糖基山茶油乳液膜结构和性能的影响[J]. 食品科学技术学报, 2025,43(1):117-125.



JIANG Jun, LIU Sijia, LI Zhixiong, et al. Effects of mung bean protein on structure and properties of konjac glucomannan-based camellia oil emulsion films[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025,43(1):117-125.

绿豆蛋白对魔芋葡甘聚糖基山茶油乳液膜结构和性能的影响

江军, 刘思佳, 李志雄, 朴建航, 王月荷, 许文琳, 陈凯*
(湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 湖北武汉 430068)

摘要:为改善魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)基山茶油(camellia oil, CO)乳液膜的结构和性能,添加绿豆蛋白(mung bean protein, MBP)构建KGM/可得然胶(curdlan, Cur)/MBP-CO乳液体系(KCM-CO)。KCM-CO乳液的粒径分布结果表明,MBP与KC-CO体系相容性良好,乳化液滴平均粒径下降约35.1%, $K_{54}C_{40}M_6$ -CO的平均粒径最小,达32.73 μm ,分布均匀;扫描电镜和红外光谱分析表明,KCM-CO乳液膜的微观结构连续且致密,MBP乳化液滴均匀分布于KGM/Cur(KC)多糖网络中,以氢键相结合;MBP的添加导致乳液膜的断裂伸长率提升了27%,但拉伸强度显著下降;乳液膜表面疏水性液滴的分散性以及粗糙度的增大,导致水接触角显著提高,最高为101.4°,表现为强疏水性。随着MBP的添加,KCM-CO乳液膜的水蒸气和氧气阻隔性能显著提升,水蒸气透过系数和过氧化值分别下降了43%和52.9%,这有利于抑制果蔬贮运期间的呼吸代谢。KCM-CO乳液膜的透光率下降,有利于提升食品包装的阻光性能。KCM-CO乳液膜在食品保鲜领域有一定的应用潜力。

关键词:魔芋葡甘聚糖;可得然胶;绿豆蛋白;山茶油;乳液膜;阻隔性能;保鲜

中图分类号: TS206.4

文献标志码: A

可食性膜通常以多糖、蛋白质、脂质等为原料,以分子互作形成三维网络结构,原料来源丰富、可生物降解,被广泛用于食品、医药等领域^[1-2]。薄膜性能的改善主要聚焦于机械性能、阻隔性能、耐水性能等方面^[3]。基于生物聚合物和脂质的乳液膜(emulsion film)是可食性膜中的重要一类。脂质提升了乳液膜的水分阻隔和耐水性,有利于食品保鲜应用^[4];均匀分散于乳液膜大分子骨架中的乳液提升了气体阻隔性能;多糖、蛋白质和脂质的添加有助

于改善乳液膜的机械性能。苏爽等^[5]构建的大豆分离蛋白/大豆油乳液膜的拉伸强度提升了33%,水溶性显著下降。Chen等^[4]制备的魔芋葡甘聚糖基山茶油乳液膜,断裂伸长率显著升高,溶失率和水蒸气透过率显著下降。周婷婷等^[6]以蛋清蛋白和可得然胶为基质,以肉桂油为油相构建的乳液体系强度显著增强,控释效果良好。

魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)由 β -甘露糖和 β -D-葡萄糖通过 β -1,4-糖苷键连接,支

收稿日期:2024-03-12

基金项目:湖北省教育厅科研计划项目(Q20211408);大学生创新创业训练项目(S202210500068,202310500044)。

Foundation: Scientific Research Project of Education Department of Hubei Province (Q20211408); College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (S202210500068, 202310500044)。

第一作者:江军,男,硕士研究生,研究方向为食品软物质结构与功能。

*通信作者:陈凯,男,副教授,博士,主要从事食品软物质结构与功能方面的研究。

链由 β -1,3-糖苷键连接^[4]。KGM 资源丰富,成膜性、稳定性、生物相容性和可降解性良好,在食品保鲜中应用广泛^[7]。可得然胶(curdlan, Cur)由 D-葡萄糖经 β -1,3-糖苷键连接,成膜性和生物降解性良好,在食品工业中广泛应用^[4]。绿豆蛋白(mung bean protein, MBP)具有良好的乳化性、吸油性及表面疏水性,可作为表面活性剂聚集在油-水界面形成乳液,提升多糖基薄膜的阻隔性能^[8]。山茶油(camellia oil, CO)含油酸、亚油酸和亚麻酸等不饱和脂肪酸,可作为活性剂乳化分散在多糖复合物中,得到的乳液涂层对延长肉类保质期有积极作用^[9]。以多糖、蛋白质等为基质研究薄膜结构和性能的报道较多,但与果蔬保鲜相关的生物质基乳液膜阻隔性能的研究较少。

本研究拟以 KGM、Cur 为基质构建多糖网络,以 MBP 乳化山茶油分散于多糖网络中,增加分子间通道阻力,构建具有一定阻隔和耐水性能的 KGM 基乳液膜。研究希望构建可对外阻隔氧气、对内阻隔水性能良好的乳液膜,为食品保鲜技术提供理论参考和新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

KGM(食品级),湖北武汉力诚生物科技有限公司;Cur(食品级),山东中科生物科技股份有限公司;MBP(食品级),陕西纽芙生物科技有限公司;山茶油(CO)(食品级),上海源叶生物科技有限公司;甘油(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

DK-S22 型数显恒温水浴锅,上海精宏仪器设备有限公司;OS20-Pro 型电动搅拌器,美国塞洛捷克公司;BGZ-246 型电热鼓风干燥箱,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;UPT-II-10T 型超纯水机,四川优普超纯科技有限公司;VERTEX70 型傅里叶变换红外光谱仪,德国布鲁克有限公司;JSM6390LV 型扫描电镜,日本电子仪器有限公司;ME204 型万分之一分析天平,上海梅特勒-托利多有限公司;DSA25 型接触角测量仪,德国克鲁斯公司;TA.XT Plus 型质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;W3/031 型水蒸气渗透率测试仪,济南 Labthink 仪器公司;Mastersizer 2000 型激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;TU-1900 型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;WF28 型色度仪,深圳威福光电科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 KCM-CO 乳液和乳液膜的制备

KCM-CO 乳液膜配制方法见表 1。准确称取样品,将 KGM 与 MBP 分散于超纯水中,加入山茶油和甘油后,60 °C、600 r/min 搅拌 1 h,使其充分溶胀,制得 KGM-MBP 分散液。将 Cur 冷水分散 30 min,随后在 90 °C、600 r/min 条件下搅拌 30 min 得到 Cur 分散液。将 Cur 分散液缓慢加入 KGM-MBP 分散液中,在 10 000 r/min 条件下均质 3 min,最后 90 °C、900 r/min 搅拌 1 h,即获得 KCM-CO 乳液^[10-11]。将乳液缓慢倒入圆形塑料板($d = 15$ cm),置于烘箱中 60 °C 干燥成膜,相对湿度 50% \pm 2% 环境温度(25 \pm 1) °C 的条件下平衡 48 h 后使用。

表 1 KCM-CO 乳液膜配制

Tab. 1 Preparation of KCM-CO emulsion films

样品	$m(\text{KGM})/\text{g}$	$m(\text{Cur})/\text{g}$	$m(\text{甘油})/\text{g}$	$m(\text{山茶油})/\text{g}$	$m(\text{MBP})/\text{g}$	$V(\text{水})/\text{mL}$
KC-CO	0.6	0.4	0.15	0.10	0	100
$\text{K}_{58}\text{C}_{40}\text{M}_2$ -CO	0.58	0.4	0.15	0.10	0.02	100
$\text{K}_{56}\text{C}_{40}\text{M}_4$ -CO	0.56	0.4	0.15	0.10	0.04	100
$\text{K}_{54}\text{C}_{40}\text{M}_6$ -CO	0.54	0.4	0.15	0.10	0.06	100
$\text{K}_{52}\text{C}_{40}\text{M}_8$ -CO	0.52	0.4	0.15	0.10	0.08	100
$\text{K}_{50}\text{C}_{40}\text{M}_{10}$ -CO	0.5	0.4	0.15	0.10	0.1	100

1.3.2 KCM-CO 乳液粒径分布测定

将 KCM-CO 乳液快速摇匀,用去离子水稀释,使用粒度仪检测粒径,泵速为 2 000 r/min,折射率设置为 1.46^[10]。

1.3.3 KCM-CO 乳液膜微观形貌观察

将乳液膜裁剪成 4 mm \times 4 mm 尺寸的样品用于观察膜表面形貌,另将乳液膜在液氮中冷冻脆断后用于观察截面形貌,以 KC-CO 膜为对照组。用导

电胶黏贴在扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 样品台上, 喷金处理 (压力 7.5 Pa、厚度 20 nm、时间 90 s、加速电压 30 kV), 观察倍数为 600 倍。

1.3.4 乳液膜结构测定

将乳液膜裁剪成 2 cm × 2 cm (大小) 用于红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 扫描。实验温度为 25 °C, 扫描波数为 750 ~ 4 000 cm⁻¹, 分辨率为 0.5 cm⁻¹。

1.3.5 KCM-CO 乳液膜机械性能测定

利用质构仪测试乳液膜的拉伸强度 (TS) 和断裂伸长率 (EAB)。将膜裁剪成 0.5 cm × 5 cm 的长条, 两端分别预留 1 cm 用于拉伸固定, 随机取 3 个点使用数显千分尺测量样品膜厚, 计算平均值。采用 Tension 模式, 记录力和形变, 平行测试 30 次。测试条件: 初始夹具间隔为 3 cm, 测试速度为 0.5 mm/s, 触发力为 5.0 N。TS (MPa) 和 EAB (%) 计算见式 (1)、式 (2)。

$$TS = F / (T \times W); \quad (1)$$

$$EAB = (L - L_0) / L_0 \times 100\%。 \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) 中, F 为最大负荷即拉力, N; W 为膜的宽度, mm; T 为膜的平均厚度, mm; L 为膜断裂前的最大长度, cm; L_0 为膜的起始长度, cm。

1.3.6 KCM-CO 乳液膜静态水接触角测定

用双面胶带将乳液膜样品 (3 cm × 3 cm) 固定在载玻片上, 用精密注射器在膜上滴入 3.0 μL 去离子水, 稳定 30 s 后记录水接触角 (WCA)。

1.3.7 KCM-CO 乳液膜水蒸气透过系数测定

采用 W3/031 型水蒸气渗透性测试仪检测乳液膜的水蒸气透过系数 (WVP)。将盛有去离子水的测试杯用乳液膜样品密封, 测试箱条件设置为温度 25 °C、相对湿度 60%, 该方法遵循 GB/T 1037—2021。

1.3.8 KCM-CO 乳液膜氧气透过性测定

将 20 mL 大豆油注入加厚聚碳酸酯塑料杯中, 用乳液膜密封, 置于 50 °C 的烘箱中放置 7 d, 根据 GB 5009.227—2023, 测定大豆油的过氧化值^[12]。

1.3.9 KCM-CO 乳液膜色度和透明度测定

色度: 使用色度仪测定乳液膜的色度, 每个平行取 6 个点, 记录亮度 (L^*)、红绿度 (a^*)、黄蓝度 (b^*), 以标准白色背景 ($L_0 = 86.91, a_0 = 0.15, b_0 =$

6.98) 为参照。总色差 (ΔE) 计算见式 (3)。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}。 \quad (3)$$

透明度: 使用紫外可见分光光度计在波长 300 ~ 800 nm 扫描乳液膜样品, 获得透光光谱^[13]。

1.4 数据处理

所有样品均进行 3 次以上平行测试, 结果以平均值 ± 标准偏差表示, 方差分析采用 SPSS 20.0 软件 ($P < 0.05$), 绘制图表采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 KCM-CO 乳液粒径分布分析

乳液粒径分布是体现乳化性、乳液稳定性和质量的重要指标, 对分析乳液体系和乳液膜的微观结构、阻隔性能和气体透过性具有重要作用^[9]。KCM-CO 乳液的粒径分布见图 1。由图 1 可知, 各配比 KCM-CO 样品中的大部分液滴的粒径分布于尖而窄的单峰处, 平均粒径位于 30 ~ 55 μm, 少数液滴粒径较大。结果表明, 各乳液体系整体上乳液分布均一, KGM、Cur、MBP 及山茶油间能够较好地结合分布。随着 MBP 的添加, 乳液平均粒径相较于 KC-CO 明显下降, 表明 MBP 对山茶油的乳化具有促进作用, MBP 充当了油-水界面的表面活性剂, 阻止了油滴聚集, 降低了表面张力。适当含量的 MBP 可使液滴密度增大、粒径减小, 这有利于提升乳液的稳定性以及乳液膜的阻隔性能^[14]。其中, K₅₄C₄₀M₆-CO 的平均粒径最小, 是因为 MBP 含量继续增加引起蛋白质的絮凝聚集而形成更大的乳液液滴。相较于 KC-CO, K₅₄C₄₀M₆-CO 的平均粒径减小了 35.1%。

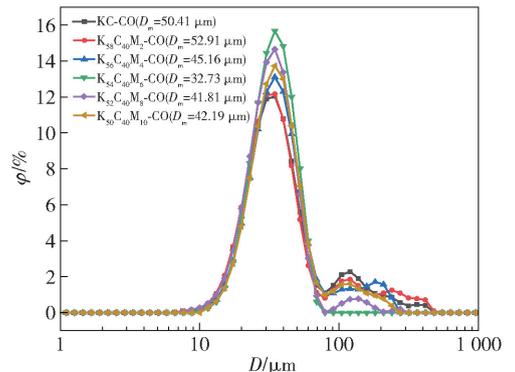


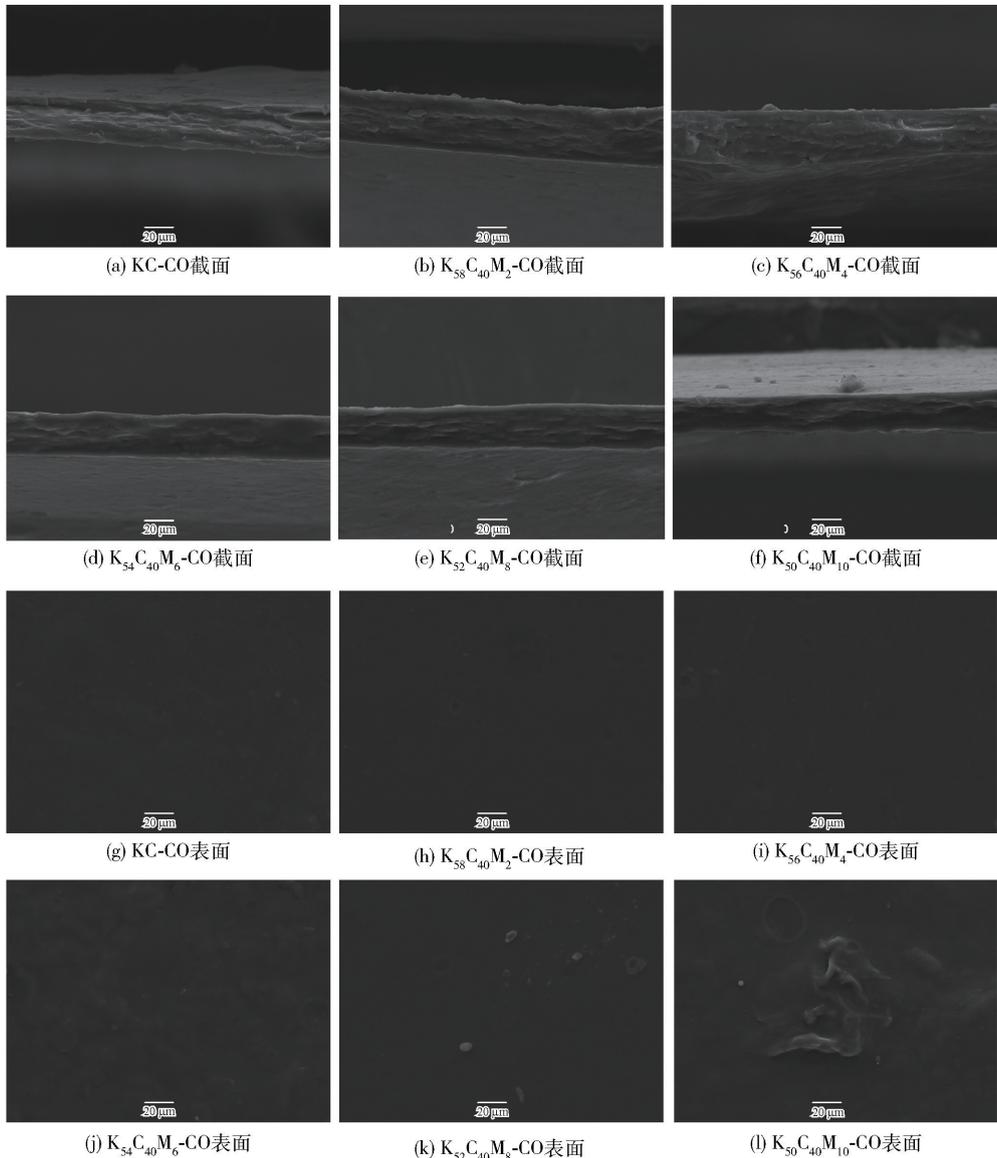
图1 KCM-CO 乳液的粒径分布

Fig. 1 Size distribution of KCM-CO emulsions

2.2 KCM-CO 乳液膜的微观结构观察结果

前期研究发现, KGM 与 Cur 质量比为 3:2 时, 复合膜具有较佳相容性, 结构和性能较优, 本研究在小幅度改变二者质量比的前提下逐渐添加 MBP, 研究 KCM-CO 乳液膜的结构和性能^[15]。KCM-CO 乳液膜的微观结构见图 2。由图 2 可知, 整体上, KC-CO 和 KCM-CO 乳液膜的截面和表面均表现出连续性和致密性, 表明体系分子间相容性良好。随着 MBP

的添加, KCM-CO 膜与 KC-CO 膜相比, 截面更加平滑均一, $K_{54}C_{40}M_6$ -CO 和 $K_{52}C_{40}M_8$ -CO 的截面最为平整, 结果与粒径分布相符, 归因于液滴的粒径减小和密度增大, 增强了乳液膜中的均一性分布。乳液膜表面可见少量圆形凹陷, 是由于乳液中油滴单元结合于 KGM 和 Cur 的分子矩阵中, 在成膜过程中部分油滴酪化于膜表面形成凹陷, 此现象与前人研究一致^[9]。



放大倍数为 600 倍。

图 2 KCM-CO 乳液膜的扫描电镜结果

Fig. 2 Results of SEM of KCM-CO emulsion films

2.3 KCM-CO 乳液膜结构分析

KCM-CO 乳液膜的红外光谱见图 3。纯 KGM 膜在 $3\ 314.2\ 877.1\ 018\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰分别为 O—H

拉伸振动、C—H 拉伸振动和 C—O—C 拉伸振动^[16]。 $1\ 641\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰为 O—H 弯曲, $806\ \text{cm}^{-1}$ 和 $872\ \text{cm}^{-1}$ 是 KGM 中的甘露糖的特征峰^[15]。纯 Cur

在 3290 和 1626 cm^{-1} 处的特征峰与分子间和分子内的氢键有关。MBP 在 1638 cm^{-1} 处为酰胺 I (主要与 C—O 的拉伸振动有关) 的特征峰^[17]。由图 3 可知,随着蛋白质添加量逐渐升高,特征峰波数从 1638 cm^{-1} 增大到 1652 cm^{-1} ,表明随着蛋白质含量的升高,蛋白质多肽键与多糖分子间相互作用形成氢键^[18]。 $1024\sim 1013\text{ cm}^{-1}$ 处的峰形变化是由 C—O 伸缩振动或甘油的 O—H 形变引起^[4,9]。KCM—CO 乳液膜的红外光谱中含有 KGM、Cur、MBP 各自的特征吸收峰,且没有新的吸收峰的出现,表明各组间未发生化学反应,未形成共价键^[19]。

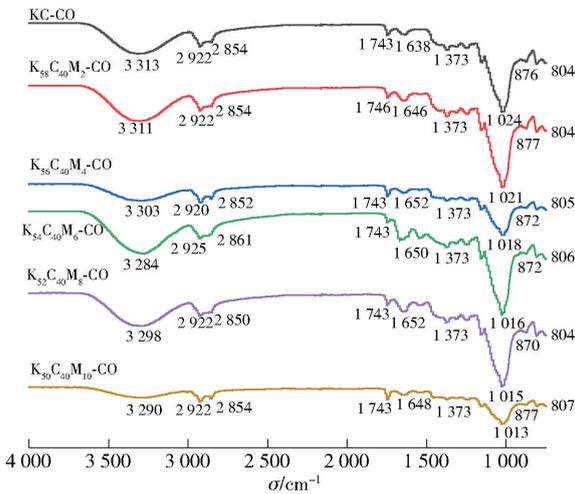


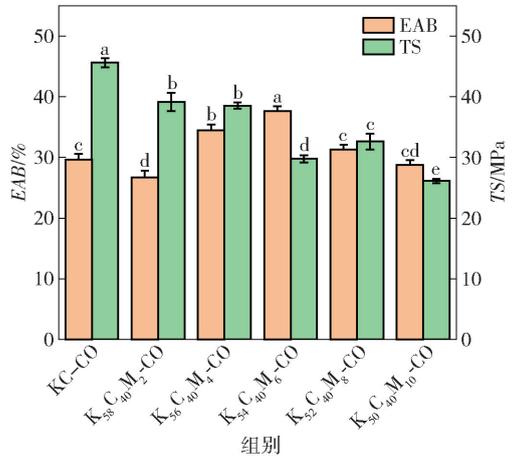
图3 KCM—CO乳液膜的红外光谱

Fig. 3 FTIR spectra of KCM—CO emulsion films

2.4 KCM—CO乳液膜机械性能分析

KCM—CO乳液膜的 TS 和 EAB 见图 4。由图 4 可知,随着 MBP 的加入,TS 逐渐降低,EAB 呈现先增高后降低的趋势。KC—CO 乳液膜的 TS 最高 (45.63 MPa), $K_{50}C_{40}M_{10}$ —CO 乳液膜的 TS 最低 (26.12 MPa),这是由于 MBP 的加入引起分布于多糖阵列的乳液液滴的数量增多,乳液膜的内在不连续性加剧,多糖网络与 MBP 分子间滑移性增加,从而导致 TS 下降,与前人研究的变化趋势相符^[20]。 $K_{54}C_{40}M_6$ —CO 乳液膜的 EAB 最高 (37.6%), $K_{58}C_{40}M_2$ —CO 乳液膜的 EAB 最低 (26.7%)。结果表明,适当添加 MBP 能够有效地提升乳液膜的断裂伸长率,这是因为密集的乳化液滴分布于多糖分子间促进了分子链间的滑移性,使乳液膜的韧性增强,但是当 MBP 添加量达到一定程度后,MBP 分子出现聚集现象,降低了多糖三维网络的均一性,造成 EAB 下降,这与 SEM 结果较为一致^[20]。与 KC—CO

相比,KCM—CO 乳液膜的 EAB 最高提升了 27% 。



不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 KCM—CO乳液膜的拉伸强度和断裂伸长率

Fig. 4 Tensile strength and elongation at break of KCM—CO emulsion films

2.5 KCM—CO乳液膜水接触角分析

WCA 是表征膜表面疏水性和水分阻隔性能的重要指标。通常,WCA 值越大,膜的表面疏水性越强,WCA 大于 90° 即表现为强疏水性^[21]。表面水接触角分为疏水性 ($\theta > 65^\circ$) 和亲水性 ($\theta < 65^\circ$)^[22]。KCM—CO 乳液膜的水接触角见图 5。由图 5 可知,KC—CO 和 KCM—CO 乳液膜的水接触角均大于 65° ,表明制备的乳液膜都具有疏水性表面。当 MBP 添加量达到一定程度,KCM—CO 乳液膜的 WCA 逐渐升高,表现为强疏水性,这归因于乳化液滴单元在多糖矩阵中的分布情况以及膜表面粗糙度,油相的存在增强了界面的疏水性^[23],与 KCM—CO 乳液膜的微观结构和性能分析结果相符。

2.6 KCM—CO乳液膜气体透过性分析

透气性是表征生物聚合膜阻隔性能的重要指标。KCM—CO 乳液膜气体透过性分析结果见图 6。由图 6(a)可知,随着 MBP 含量的增加,WVP 从 $13.8 \times 10^{-13}\text{ g}\cdot\text{cm}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ 下降到 $7.87 \times 10^{-13}\text{ g}\cdot\text{cm}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$,降幅约为 43% ,表明 MBP 的加入能够显著改善乳液膜的水分阻隔性能,这一现象可以用自由体积模型来解释^[24]。薄膜的 WVP 取决于水蒸气在生物聚合膜基体中的吸附和扩散。MBP 通过乳化山茶油油滴,镶嵌到多糖网络结构中,减少了 KC 多糖结构之间的空隙和多糖薄膜网络之间的自由体积,增大了路径的曲折性,同时增加了界面数量和水分子的分散性,从而提高了水分阻隔性能^[10]。这与水接触角的结果相符。可以推测,

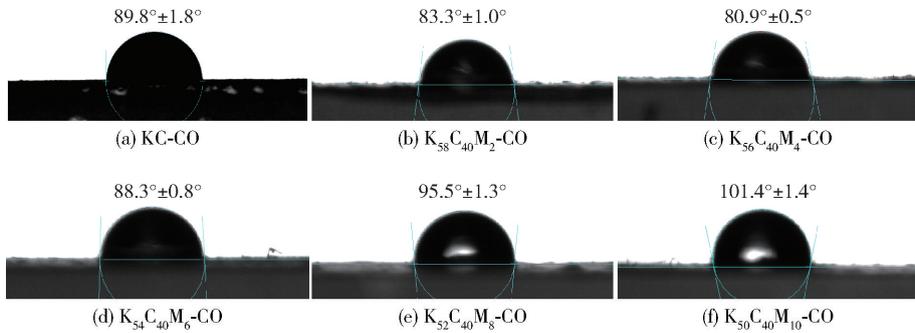
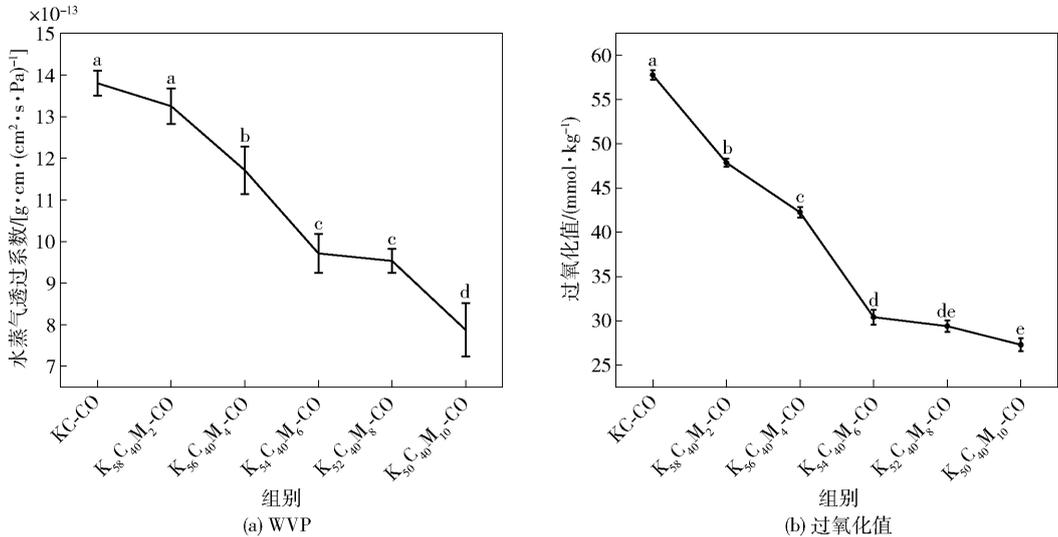


图5 KCM-CO乳液膜的水接触角

Fig. 5 Water contact angles of KCM-CO emulsion films



不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图6 KCM-CO乳液膜的WVP和过氧化值

Fig. 6 WVP and peroxide value of KCM-CO emulsion films

KCM-CO乳液膜有助于抑制果蔬贮运过程中的水分流失,具有潜在的应用价值。

过氧化值可用来表示油脂和脂肪酸等被氧化的程度,可间接反映膜对 O_2 的阻隔性能。由图6(b)可知,随着MBP含量的逐渐增加,过氧化值逐渐降低,降幅约为52.9%,表明乳液膜的氧气透过性逐渐下降,KCM-CO的氧气阻隔性能得到显著提升。与WVP类似,这主要归因于MBP乳化液滴在KC多糖网络中的分布,减少了网络间的自由体积,使氧气透过的路径更加曲折,从而降低了氧气透过性。

根据粒径分布、SEM、FTIR结果可推测,MBP的加入有效乳化了山茶油滴,形成的乳化油滴均匀分布于KC的多糖网络结构中,与多糖分子链以氢键作用相结合。KCM-CO乳液膜保鲜机制见图7。一方面,当KCM-CO乳液膜以包装膜或涂膜方式应用

于果蔬保鲜时,乳液膜可在果蔬表面形成一道致密的有机屏障,阻隔外界空气中的氧气进入果蔬有机体,仅有少量氧气可透过KCM-CO膜维持果蔬低强度的有氧呼吸。一方面乳化液滴的分布增进了氧气移动路径的曲折度,从而进一步降低了果蔬的呼吸强度^[25];另一方面,果蔬呼吸作用产生一定量水蒸气,KCM-CO乳液膜的低WVP阻隔了大部分水蒸气的逃逸,少量水分子经过膜内曲折的孔道以及乳化液滴的疏水作用蒸发至外界,使果蔬贮藏期间的干耗得到抑制^[3]。

2.7 KCM-CO乳液膜色度和透明度分析

KCM-CO乳液膜的表面色度见表2。表2结果表明,MBP的添加对乳液膜的色度(L^* 、 a^* 、 ΔE)有显著影响($P < 0.05$)。随着MBP的添加,乳液膜的亮度(L^*)先上升后下降,这是因为低MBP含量的乳液膜表面较为光滑,增强了折射和反射作用;而随着MBP含

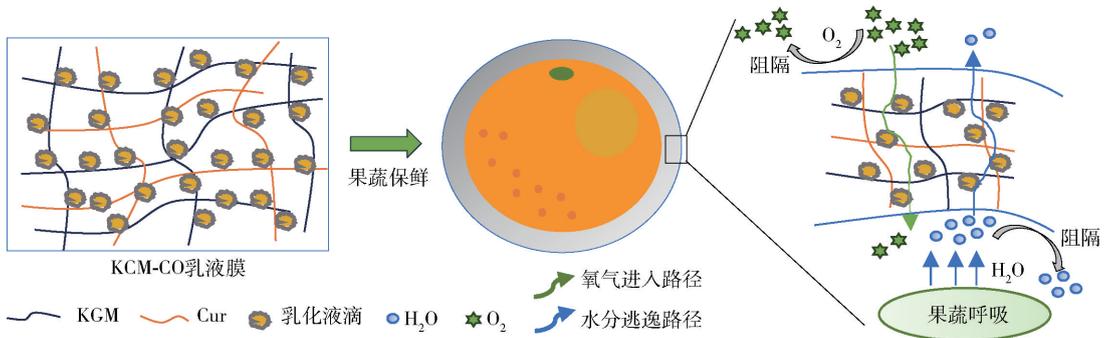


图7 KCM-CO乳液膜的分子组装结构及作用机制设计

Fig. 7 Molecular assembly structure and mechanism design of KCM-CO emulsion films

表2 KCM-CO乳液膜的颜色变化

Tab.2 Color changes of KCM-CO emulsion films

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
KC-CO	87.61 ± 0.12cd	0.55 ± 0.017a	8.06 ± 0.168a	1.35 ± 0.11c
$K_{58}C_{40}M_2-CO$	87.82 ± 0.02b	0.47 ± 0.05b	8.02 ± 0.12a	1.59 ± 0.18b
$K_{56}C_{40}M_4-CO$	88.26 ± 0.06a	0.39 ± 0.04c	7.8 ± 0.06a	1.65 ± 0.04ab
$K_{54}C_{40}M_6-CO$	87.83 ± 0.015bc	0.33 ± 0.02d	8.43 ± 0.02a	1.73 ± 0.03ab
$K_{52}C_{40}M_8-CO$	87.57 ± 0.03d	0.27 ± 0.04e	8.57 ± 0.01a	1.713 ± 0.03ab
$K_{50}C_{40}M_{10}-CO$	87.39 ± 0.08d	0.28 ± 0.04de	8.73 ± 0.07a	1.820 ± 0.08a

不同小写字母表示同列数据差异显著($P < 0.05$)。

量升高,乳液膜表面更加粗糙,光反射下降。 a^* 和 ΔE 显著变化,这是由于MBP与前体系相容改变了组分配比,自身所带颜色也改变了乳液膜色度^[26]。

作为食品包装薄膜,膜的透光率非常重要,透光率越大,膜的透明性越好。KCM-CO乳液膜透光率见图8。由图8可知,相较于KC-CO膜,添加了MBP的乳液膜的透光率下降,因为MBP逐渐乳化山茶油滴,粒径下降,分布于KC网络的液滴密度增大,减小了透光率^[27]。

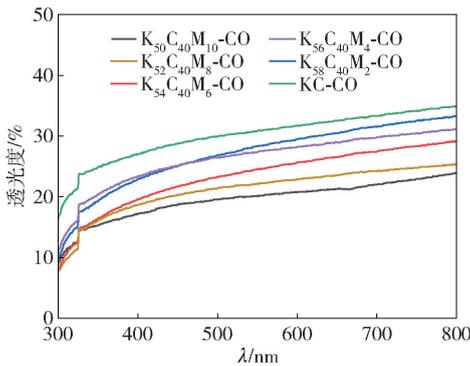


图8 KCM-CO乳液膜的紫外-可见光透光率

Fig. 8 UV-vis transmittance of KCM-CO emulsion films

3 结论

MBP的添加促进了KCM-CO乳液膜的结构和

性能改善。MBP乳化了山茶油,阻止了油滴聚集,降低了表面张力。与KC-CO相比,KCM-CO乳液液滴的粒径减小,平均粒径减小了35.1%,乳液体系更为均匀。MBP在乳液体系中相容性良好,所形成的乳液膜连续、致密。MBP乳化山茶油形成的液滴均匀分布于KC多糖网络中,并以氢键相结合,MBP的添加提升了乳液膜的断裂伸长率,增幅达27%,增进了孔道的曲折性和界面数。乳液膜表面粗糙度的增大以及疏水性液滴的分散使乳液膜的WCA明显提高。KCM-CO乳液膜的WVP和过氧化值得以显著改善,分别降低了43%和52.9%,增强了对外阻隔氧气和对内阻隔水分的能力,有利于抑制果蔬呼吸强度。KCM-CO乳液膜在果蔬保鲜中具有一定的应用潜力。

参考文献:

[1] MIAO J S, ZHANG T J, ZOU M Y, et al. Preparation and characterization of dialdehyde starch-soybean protein isolate stabilized carvacrol emulsion composite films[J]. Reactive and Functional Polymers, 2023, 192: 105710.

[2] LI S Q, WANG X N, LUO Y, et al. A green versatile packaging based on alginate and anthocyanin via incorporating bacterial cellulose nanocrystal-stabilized camellia oil Pickering emulsions[J]. International Journal of Bio-

- logical Macromolecules, 2023, 249: 126134.
- [3] CHEN K, TIAN R M, JIANG J, et al. Moisture loss inhibition with biopolymer films for preservation of fruits and vegetables: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263(Pt 1): 130337.
- [4] CHEN K, JIANG J, TIAN R M, et al. Properties of konjac glucomannan/curdlan-based emulsion films incorporating camellia oil and the preservation effect as coatings on 'Kyoho' grapes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258(Pt 1): 128836.
- [5] 苏爽, 江睿生, 朱旻鹏, 等. 大豆分离蛋白 O/W 型乳液膜的制备及其性质研究 [J]. 中国粮油学报, 2023, 38(7): 107 - 114.
- SU S, JIANG R S, ZHU M P, et al. Preparation and characterization of soy protein isolate oil in water emulsion film [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(7): 107 - 114.
- [6] 周婷婷, 宫金华, 杨雯, 等. 肉桂油对蛋清蛋白/可得然胶凝胶理化特性及释放肉桂醛性能的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(4): 82 - 93.
- ZHOU T T, GONG J H, YANG W, et al. Effects of cinnamon oil on physicochemical properties of egg white protein/curdlan gels and release behaviors of cinnamaldehyde [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(4): 82 - 93.
- [7] KUANG Y, ZHAO S, LIU P M, et al. Schiff base type casein-konjac glucomannan conjugates with improved stability and emulsifying properties via mild covalent cross-linking [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108733.
- [8] 王瑞雪. 绿豆蛋白凝胶特性的改善及其形成机理的研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023: 1 - 7.
- WANG R X. Study on the improvement of mung bean protein gel properties and its formation mechanism [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2023: 1 - 7.
- [9] ZHOU X, ZONG X X, ZHANG M, et al. Effect of konjac glucomannan/carrageenan-based edible emulsion coatings with camellia oil on quality and shelf-life of chicken meat [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 331 - 339.
- [10] XIAO M, TANG B, QIN J M, et al. Properties of film-forming emulsions and films based on corn starch/sodium alginate/gum Arabic as affected by virgin coconut oil content [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 32: 100819.
- [11] TONGNUANCHAN P, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Emulsion film based on fish skin gelatin and palm oil: physical, structural and thermal properties [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 48, 248 - 259.
- [12] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准食品中过氧化值的测定; GB 5009. 227—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [13] SUKYAI P, ANONGJANYA P, BUNYAHWUTHAKUL N, et al. Effect of cellulose nanocrystals from sugarcane bagasse on whey protein isolate-based films [J]. Food Research International, 2018, 107: 528 - 535.
- [14] LIU Z, SHEN R, YANG X B, et al. Characterization of a novel konjac glucomannan film incorporated with Pickering emulsions: effect of the emulsion particle sizes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 179: 377 - 387.
- [15] CHEN K, TIAN R M, XU G J, et al. Characterizations of konjac glucomannan/curdlan edible coatings and the preservation effect on cherry tomatoes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 232: 123359.
- [16] WU C H, PENG S H, WEN C R, et al. Structural characterization and properties of konjac glucomannan/curdlan blend films [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(2): 497 - 503.
- [17] KUDRE T G, BENJAKUL S, KISHIMURA H. Comparative study on chemical compositions and properties of protein isolates from mung bean, black bean and Bambara groundnut [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(10): 2429 - 2436.
- [18] MOGHADAM M, SALAMI M, MOHAMMADIAN M, et al. Development of antioxidant edible films based on mung bean protein enriched with pomegranate peel [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105735.
- [19] XIAO M, PENG C, QIN J M, et al. Development of a water gradient film through film and ice-glazing approach utilizing konjac glucomannan and high acyl gellan gum for enhanced preservation of frozen snakehead (*Channa argus*) filets [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109904.
- [20] WAN Z L, WANG L Y, MA L L, et al. Controlled hydrophobic biosurface of bacterial cellulose nanofibers through self-assembly of natural zein protein [J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2017, 3(8): 1595 - 1604.
- [21] WU K, WAN Y, LI X, et al. Impact of heating and drying temperatures on the properties of konjac glucomannan/curdlan blend films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 167: 1544 - 1551.

- [22] VOGLER E A. Structure and reactivity of water at bio-material surfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1998, 74: 69 – 117.
- [23] SHI W J, TANG C H, YIN S W, et al. Development and characterization of novel chitosan emulsion films via Pickering emulsions incorporation approach [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 253 – 264.
- [24] ZHANG H J, SELLAIAN S, SAKO K, et al. Effect of free-volume holes on static mechanical properties of epoxy resins studied by positron annihilation and PVT experiments[J]. *Polymer*, 2020, 190: 122225.
- [25] HIRA N, MITALO O W, OKADA R, et al. The effect of layer-by-layer edible coating on the shelf life and transcriptome of ‘Kosui’ Japanese pear fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 185: 111787.
- [26] 孙海涛, 赵兵兵, 钟子杰, 等. 黑木耳多糖对大豆分离蛋白可食膜性质的影响及表征[J]. *食品科技*, 2022, 47(6): 229 – 234.
- SUN H T, ZHAO B B, ZHONG Z J, et al. Effect and characterization of *Auricularia auricular* polysaccharide on properties of soybean protein isolate edible film[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(6): 229 – 234.
- [27] 穆凯宇, 杨昱姝, 刘佳欣, 等. 不同添加剂对酪蛋白可食膜理化性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 159 – 168.
- MU K Y, YANG Y S, LIU J X, et al. Effects of different additives on the physicochemical properties of casein edible film[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(10): 159 – 168.

Effects of Mung Bean Protein on Structure and Properties of Konjac Glucomannan-Based Camellia Oil Emulsion Films

JIANG Jun, LIU Sijia, LI Zhixiong, PIAO Jianhang, WANG Yuehe, XU Wenlin, CHEN Kai*
(School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To improve the structure and properties of konjac glucomannan (KGM)-based camellia oil emulsion film, mung bean protein (MBP) was added to construct KGM/curdlan (Cur)/MBP – CO emulsion system (KCM–CO). The results of droplet size distribution of KCM–CO emulsions showed that the compatibility of MBP and KC – CO system was good, and the average droplet size decreased by 35.1%, and the average droplet size of $K_{54}C_{40}M_6$ –CO was the lowest of 32.73 μm , and the distribution was uniform. Scanning electron microscope and FTIR spectra analysis showed that the microstructure of the KCM–CO emulsion films were continuous and dense, and the MBP emulsified droplets were uniformly distributed in the KGM/Cur (KC) polysaccharide network combined by hydrogen bonds. The addition of MBP resulted in a 27% increase in elongation at break, but a significant decrease in tensile strength. The increase of distribution of hydrophobic droplets on the surface of the emulsion films and the roughness caused the water contact angle to increase significantly, up to 101.4° at most, showing strong hydrophobicity. With the addition of MBP, the water vapor and oxygen barrier properties of KCM–CO emulsion films were significantly improved, and the water vapor permeability and peroxide values decreased by 43% and 52.9%, respectively. These would be conducive to inhibiting the respiratory metabolism of fruits and vegetables during storage and transportation. The light transmittance of KCM–CO emulsion films was decreased, which was conducive to improving the light barrier of food packaging. KCM–CO emulsion films showed certain application potential in food preservation.

Keywords: konjac glucomannan; curdlan; mung bean protein; camellia oil; emulsion film; barrier properties; preservation

(责任编辑:张逸群)