

不同硬脂酸添加量下大豆分离蛋白/海藻酸钠膜特性研究

朱秀清¹ 陈 华¹ 和铭钰¹ 冯旭梅¹ 李 杨^{1,2} 滕 飞¹

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省绿色食品科学研究院, 哈尔滨 150028)

摘要: 为改善大豆分离蛋白/海藻酸钠复合膜的耐水性, 通过添加不同添加量(0%、2%、4%、6%、8%、10%)硬脂酸制备大豆分离蛋白/海藻酸钠/硬脂酸三元复合膜, 探究硬脂酸对大豆分离蛋白/海藻酸钠复合膜的机械性能、阻水性能和微观结构的影响, 最终明确不同硬脂酸添加量对耐水性变化的影响规律。结果表明: 与大豆分离蛋白/海藻酸钠二元复合膜相比, 添加6%和8%硬脂酸后, 复合膜的断裂伸长率、水蒸气透过率显著下降, 并且对其含水率及水溶性也有显著影响。当硬脂酸添加量为8%时, 三元复合膜的水蒸气渗透性最低, 水蒸气透过系数为 $(2.95 \pm 0.49) \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$, 接触角最大, 为 $91.68^\circ \pm 9.02^\circ$ 。通过傅里叶变换红外光谱和扫描电子显微镜分析可知, 大豆分离蛋白和海藻酸钠通过共价交联形成网络结构, 加入的硬脂酸则分布在网络结构的缝隙中, 当硬脂酸添加量为8%时, 膜的表面较为光滑平整, 内部结构致密, 能够形成良好的网络结构, 键与键之间结合较强, 能有效提高复合膜的阻水性能。

关键词: 硬脂酸; 大豆分离蛋白; 海藻酸钠; 复合膜; 耐水性

中图分类号: TS214.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)05-0406-07

OSID:



Effect of Stearic Acid on Properties of Soy Protein Isolate/Sodium Alginate Films

ZHU Xiuqing¹ CHEN Hua¹ HE Mingyu¹ FENG Xumei¹ LI Yang^{1,2} TENG Fei¹

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Heilongjiang Green Food Science Research Institute, Harbin 150028, China)

Abstract: Soy protein isolate/sodium alginate composite films were prepared with stearic acid to improve the water resistance of soy protein isolate/sodium alginate composite films. Effects of different stearic acid additions (0, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%) on composite films were evaluated by measuring mechanical properties, water resistance and microstructure of composite films. The results showed that with the 6% and 8% stearic acid addition, elongation at break and water vapor transmittance was significantly decreased, and water content and water solubility were also greatly affected compared with that of the composite film without stearic acid. When the adding amount was 8%, ternary composite films had the lowest water vapor permeability value ($(2.95 \pm 0.49) \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$) and highest contact angle value ($91.68^\circ \pm 9.02^\circ$). Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that soy protein isolate and sodium alginate formed the network structure through covalent crosslinking, and stearic acid was distributed in the gaps of the network structure. Therefore, when 8% stearic acid was added, the formation of a good network structure made the molecular structure of the composite films denser, and imparted smoother surfaces and flatter cross-sections to the composite films, which can improve the water-resistance performance of the composite films. These results showed that the water resistance of soy protein isolate/sodium alginate composite films can be improved by using appropriate stearic acid effectively, which would have important implications in the development of biopolymer-based packaging materials with moisture barrier properties.

Key words: stearic acid; soy protein isolate; sodium alginate; composite films; resistance to water

收稿日期: 2021-05-31 修回日期: 2021-07-16

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020C028)、国家自然科学基金青年科学基金项目(32001686)和黑龙江省博士后科研启动项目(LBH-Q20070)

作者简介: 朱秀清(1968—),女,教授,主要从事蛋白质分子化学及大豆深加工研究,E-mail: xqzhuwang@163.com

通信作者: 滕飞(1986—),女,副教授,主要从事生命科学研究,E-mail: tengfei@neau.edu.cn

0 引言

传统塑料使用带来的不可再生资源消耗以及塑料废弃物处理造成的环境问题日益严重,因此研究人员正致力于开发廉价且优质的新型生物降解包装材料^[1]。目前用于生产食品包装材料的天然高分子物质有多糖、脂类和蛋白质。大豆分离蛋白(Soy protein isolate, SPI)因其成本低、成膜性能优异、生物相容性好而备受关注,但 SPI 膜普遍存在机械强度不足、耐水性低等问题^[2]。近年来,研究者们普遍采用改性处理如物理改性、化学改性和酶改性等提高蛋白膜性能^[3-5]。此外,联合改性也是改善膜性能的有效方法,多糖或脂肪酸与蛋白复合,可以增强膜的物理化学性质,如多糖可以提高蛋白膜的机械性能,脂肪酸则可以提高蛋白膜的阻水性能^[6]。文献[7]利用壳聚糖显著提高了明胶膜的机械性能和耐水性。文献[8]将不同类型的多糖(海藻酸钠、果胶、卡拉胶和芦荟多糖)直接添加或共混干燥到 SPI/月桂酸膜中,用于改善膜的力学性能和耐水性。

海藻酸钠(Sodium alginate, NaAlg)是从褐藻或马尾藻中提取的一种天然多糖物质,具有生物降解性、良好的凝胶性、成膜性和生物相容性,可与蛋白、多糖和脂类等大分子物质复合制成具有良好性能的复合膜^[9]。文献[10]制备并表征了以水杨酸与阿魏酸交联的海藻酸钠可食用膜,以了解两者对膜特性变化的影响。文献[11]制备了具有缓慢释放抗菌物质的海藻酸钠/玉米醇溶蛋白抗菌复合膜并对其表征以及对抗菌性能进行了分析。SPI/NaAlg 复合膜^[12]与单一膜相比,机械性能有了极大提高,但柔韧性较差,脆性较强,极大地限制了其在食品工业中的广泛应用,因此可以通过添加脂类来改善复合膜的阻水性能。疏水性物质硬脂酸(Stearic acid, SA)是一种含有十八碳链的饱和脂肪酸,天然存在于动植物体内。在复合膜中添加硬脂酸不仅可以提高膜的阻水性能,还可以降低复合膜的表面活性,提高膜的接触角,构造出疏水表面^[13]。硬脂酸还可以起到增塑的作用,增加膜内分子的柔韧性和运动空间,降低分子之间的作用力^[14]。文献[15]研究了缓冲液的酸碱度、乙醇添加量、载姜黄素量、膜中硬脂酸量等因素对姜黄素从壳聚糖-果胶-硬脂酸膜中释放的影响。文献[16]使用酪蛋白酸钠和硬脂酸制备可食用膜,研究了硬脂酸和酪蛋白酸钠与水的比例对所制备膜的水蒸气透过率和机械性能的影响。

目前,硬脂酸影响蛋白基膜的阻水性能主要通过测定水蒸气渗透性、表面润湿性、含水率及水溶性

等指标体现,然而关于硬脂酸影响 SPI/NaAlg 复合膜阻水性能的结构变化及结构与性能相关性仍存在研究空白。因此本文利用硬脂酸复合 SPI 和海藻酸钠,采用改性技术制备三元复合膜,探究硬脂酸对复合膜的机械性能和阻水性能的影响,并对其进行微观表征,以期对 SPI/NaAlg 复合膜的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白(纯度 91.32%),河南川锦生物科技有限公司;硬脂酸(分析纯,纯度 98%),上海麦克林生化科技有限公司;海藻酸钠(化学纯,粘度(200±20) mPa·s),上海麦克林生化科技有限公司;甘油(分析纯,99%),上海源叶生物科技有限公司;其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

AUY 120 型分析天平(精度 0.000 1 g),北京赛多利斯仪器系统有限公司;HWS-26 型电热恒温水浴锅,上海一恒仪器有限公司;S22-2 型恒温磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;SB25-12 DTD 型超声波细胞破碎仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;电热恒温鼓风干燥箱,上海新苗医疗器械制造有限公司;HP-50 型数显推拉力计测试机,乐清市艾德堡仪器有限公司;数显游标卡尺,得力集团有限公司;视频光学动态接触角测量仪,瑞典百欧林科技有限公司;台式高速冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;傅里叶变换红外光谱仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;S-3400 N 型扫描电子显微镜,日本日立公司。

1.3 方法

1.3.1 SPI/NaAlg/SA 复合膜制备

准确称取 5.00 g SPI、0.50 g 海藻酸钠,加 2.50 mL 甘油、150 mL 蒸馏水,磁力搅拌 30 min,然后分别添加 0.2%、4%、6%、8% 和 10% (占成膜液中 SPI 质量分数)的硬脂酸,在 70℃ 下恒温水浴并搅拌 40 min,制备 SPI/NaAlg/SA 成膜液。对上述成膜溶液进行超声 200 W、脱气 20 min,然后倾倒至平板,置于 65℃ 干燥箱中干燥 3 h 后揭膜,揭膜后将其置于相对湿度(RH)为 75% (饱和氯化钠溶液)的干燥器中平衡 2 d,测定膜性能。

1.3.2 机械性能测定

参照文献[17]的方法,稍作修改。利用数显推拉力计测试机对复合膜样品的拉伸强度以及断裂伸长率进行测定。将裁剪好的膜样品夹在两个探头之间,有效拉伸长度为 50 mm,十字头速率为 15 mm/min,记录膜样品断裂时的最大作用力和长

度,膜的拉伸强度(Tensile strength,TS)和断裂伸长率(Elongation at break,EB)计算公式为

$$T=\frac{F}{S}$$

(1)

$$E=\frac{L-L_0}{L_0}\times 100\%$$

(2)

式中 T ——样品拉伸强度,MPa
 F ——样品断裂时承受的最大作用力,N
 S ——样品横截面面积, mm^2
 E ——样品断裂伸长率,%
 L ——样品断裂时的长度,mm
 L_0 ——样品初始长度,mm

1.3.3 水蒸气渗透性测定

水蒸气渗透性的测定采用拟杯子法,参照文献[18]的方法,并稍作修改。在 20℃ 条件下,将干燥的硅胶放入玻璃杯至杯口 5 mm 处(RH 为 0;水蒸气压力为 0 kPa)。选择厚度均匀且完整的复合膜,先用游标卡尺测量厚度,然后再用凡士林将膜密封于杯口,称量。保持 20℃ 的条件,将玻璃杯放在盛有蒸馏水的干燥器中(RH 为 100%;水蒸气压力为 2.346 kPa),使复合膜两侧保持 0/100% 的相对湿度差。每隔 2 h 称量一次,共称量 6 次,且每组试验重复 3 次,水蒸气透过系数(Water vapor permeability,WVP)计算公式为

$$W=\frac{\Delta md}{At\Delta p}$$

(3)

式中 W ——水蒸气透过系数, $\text{g}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$
 Δm ——稳定后膜质量增量,g
 d ——膜平均厚度,mm
 A ——有效透水蒸气膜的面积, m^2
 t ——测定时间间隔,h
 Δp ——膜两侧水蒸气压差,kPa

1.3.4 含水率及水溶性测定

参照文献[19]的方法,稍作修改。将膜样品称量之后,置于 105℃ 干燥箱中干燥 24 h,再称量。膜的含水率计算公式为

$$M_c=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\%$$

(4)

式中 M_c ——膜含水率,%
 m_1 ——干燥前膜质量,g
 m_2 ——干燥 24 h 之后膜质量,g

将干燥后的膜样品置于盛有 30 mL 蒸馏水的烧杯中,室温(20℃)放置 24 h,之后 5 000 r/min 离心 5 min,将不溶性的膜再次干燥至质量恒定,再次称量。膜水溶性指数计算公式为

$$W_s=\frac{m_2-m_3}{m_2}\times 100\%$$

(5)

式中 W_s ——膜水溶性指数,%
 m_3 ——最终干燥膜质量,g

1.3.5 接触角测定

参照文献[20]的方法,稍作修改。通过坐滴法来测定膜的表面润湿性。首先将 1.3.1 节的成膜液浓度增大,蛋白质质量浓度由 3.33 g/(100 mL)增大为 5 g/(100 mL),其他物质基于 SPI 的相对含量不变,然后干燥成膜。25℃ 条件下,将裁好的膜片固定于测试台上,滴 1 滴去离子水(约 5 μL),此时开始计时,10 s 后拍摄膜的接触角图像。试验重复 3 次,结果取平均值。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱分析

参照文献[21]的方法,稍作修改。使用傅里叶红外光谱仪在波数 400 ~ 4 000 cm^{-1} 范围内对干燥处理后的膜进行扫描,25℃ 环境下,以分辨率 4 cm^{-1} ,扫描 32 次,得到红外吸收光谱。

1.3.7 扫描电镜分析

参照文献[22]的方法,稍作修改。应用钨灯丝扫描电子显微镜观察膜的表面以及横断面形貌,用双面胶将膜固定在样品台表面上,用喷金仪在真空状态下喷金,加速电压设为 5.00 kV,膜的表面和横断面均放大 1 000 倍。

1.4 数据统计与分析

在本研究中,所有收集的数据均为 3 次测定的平均值及 3 次重复试验,结果表示为平均值 $\pm$ 标准差(SD),利用 SPSS Statistics 22 软件,使用方差分析(ANOVA)对数据进行差异显著性比较, $P < 0.05$ 为显著性差异。采用 Origin 9.5 软件进行数据统计、图表绘制及图谱分析处理。

2 结果与分析

2.1 机械性能

不同添加量硬脂酸对复合膜拉伸强度和断裂伸长率的影响如图 1(不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同)所示,与二元复合膜相比,随着硬脂酸添加量的增加,复合膜的拉伸强度呈现先上升后下降的趋势。添加 2%、4%、6% 硬脂酸,复合膜的拉伸强度增加可能是因为 SPI 和海藻酸钠通过共价键、氢键等化学键形成网络结构,加入的硬脂酸则分布在网络结构的缝隙中,能够形成良好的网络结构,键与键之间结合较强,从而导致拉伸强度增加^[23];当添加量继续增加时,拉伸强度下降,这可能是因为 SPI 游离的氨基被硬脂酸的长碳链取代,氢键减少,从而拉伸强度降低^[24]。断裂伸长率随着硬脂酸添加量的增加则呈现先下降后上升的趋势。断裂伸长率降低可能与含水率减小和蛋白质链之间的

空间位阻增加有关^[24],SPI 和海藻酸钠能够形成良好的网络结构,增强了蛋白质链之间的空间位阻,这导致断裂伸长率降低;添加 10% 硬脂酸时,断裂伸长率增加,这可以表明硬脂酸起到了增塑的作用,可以增加蛋白质分子的柔韧性,降低蛋白质与蛋白质之间的作用力,因此随着硬脂酸浓度的增加,断裂伸长率增加。文献[25]以不同比例的硬脂酸和胱氨酸制备具有良好力学性能和阻水性能的 SPI 膜,断裂伸长率研究也有类似结果。

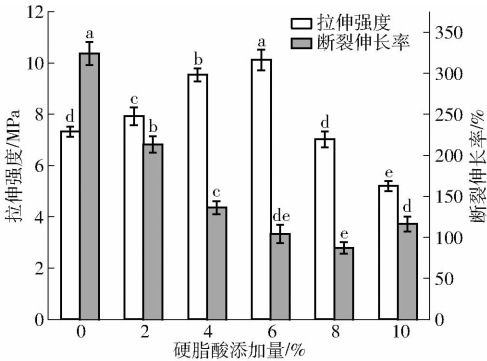


图1 硬脂酸添加量对 SPI/NaAlg 复合膜机械性能的影响

Fig.1 Effect of different concentrations of stearic acid on mechanical properties of SPI/NaAlg composite films

2.2 水蒸气渗透性

水蒸气透过系数是评价包装材料的重要指标。由表 1 可知,随着硬脂酸添加量的增加,复合膜的水蒸气透过系数呈现先下降后上升的趋势。当硬脂酸添加量为 8% 时,复合膜的水蒸气透过系数达到最小值(2.95 ± 0.49) g·mm/(m²·h·kPa) (P < 0.05),这可能是因为成膜过程中,SPI 和海藻酸钠通过共价键、氢键等化学键形成网络结构,加入的硬脂酸则分布在网络结构的缝隙中,使得复合膜能够形成良好的网络结构,有效提高复合膜的阻水性能^[23]。但添加过量的硬脂酸会造成乳化不均,使得硬脂酸在膜表面结晶不连续,从而导致 WVP 升高^[26]。

表1 硬脂酸添加量对 SPI/NaAlg 膜水蒸气渗透性、含水率及水溶性的影响

硬脂酸 添加量/%	水蒸气透过系数/ (g·mm· (m ² ·h·kPa) ⁻¹)	含水率/%	水溶性指数/%
0	(5.01 ± 1.24) ^a	(17.13 ± 1.34) ^a	(35.07 ± 0.65) ^a
2	(4.07 ± 0.59) ^{ab}	(15.73 ± 1.17) ^{ab}	(33.73 ± 1.59) ^{ab}
4	(3.78 ± 0.38) ^{ab}	(14.87 ± 1.07) ^b	(31.40 ± 0.80) ^{bc}
6	(3.51 ± 0.61) ^{ab}	(13.93 ± 1.02) ^b	(29.83 ± 1.46) ^{cd}
8	(2.95 ± 0.49) ^b	(13.67 ± 1.32) ^b	(27.97 ± 1.80) ^d
10	(3.46 ± 1.18) ^{ab}	(13.73 ± 1.10) ^b	(27.87 ± 1.03) ^d

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。

2.3 含水率及水溶性

由表 1 可知,硬脂酸添加量对三元复合膜的含水率无显著影响(P > 0.05),但二元复合膜的含水率显著高于添加硬脂酸的三元复合膜的含水率。这可能是因为硬脂酸是一种疏水性很强的物质,可以降低复合膜对水分的吸附能力^[27]。

水溶性可以反映膜的亲水性能,膜含有的亲水基团越多或基团亲水性越好,复合膜的水溶性也就越高^[28]。试验过程中膜保持了完整性。由表 1 可知,膜的水溶性随着硬脂酸添加量的增加而显著降低(P < 0.05),当添加量大于 6% 时,水溶性变化不显著。这可能是由于硬脂酸的添加阻碍了蛋白和多糖分子的运动,使能自由活动的亲水基团减少,导致复合膜的水溶性下降^[26]。

2.4 接触角

通常用接触角来衡量膜的亲水或疏水特性,当接触角小于 90°时,膜亲水;反之膜疏水^[17]。图 2 反映了水在复合膜表面的分散状况。二元复合膜表现出高度亲水的性质,接触角最小,为 58.80° ± 7.47° (P < 0.05)。随着硬脂酸添加量的增加,复合膜的接触角呈现先增大后减小的趋势。当硬脂酸添加量为 8% 时,复合膜的接触角最大,为 91.68° ± 9.02° (P < 0.05)。试验结果表明添加适量硬脂酸能有效提高 SPI/NaAlg 复合膜的耐水性,同时也侧面验证 WVP 试验的结果。

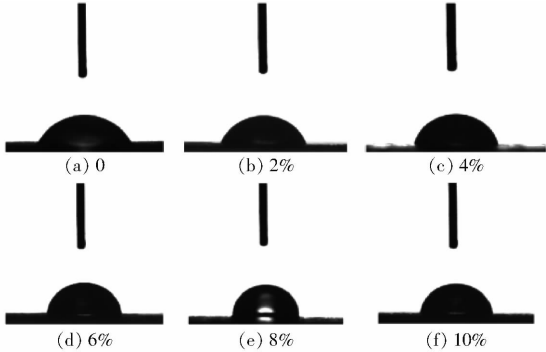


图2 不同硬脂酸添加量的 SPI/NaAlg/SA 复合膜接触角图像

Fig.2 Contact angle pictures of SPI/NaAlg/SA composite films

2.5 红外光谱分析

当两种或者更多物质混合时,可以利用红外光谱来反映复合膜中各物质之间的相互作用,这种相互作用将直接影响复合膜的性能^[29]。图 3 显示了不同添加量硬脂酸的 SPI/NaAlg 复合膜在 4 000 ~ 400 cm⁻¹ 范围内红外光谱图。二元膜分别在 1 625、1 536、1 235 cm⁻¹ 处显示 SPI 的酰胺 I 带(C=O 伸缩振动)、酰胺 II 带(N-H 弯曲振动)和酰胺 III 带(C-N 和 N-H 拉伸振动)^[30]。此外位于 3 274 cm⁻¹ 处的峰

归因于膜中游离 O—H 基团和 N—H 拉伸振动^[31]。硬脂酸添加量从 0 增加到 8% 时,3 274 cm⁻¹ 处的吸收峰向 3 272 cm⁻¹ 处移动,这个结果表明复合膜中氢键的数量增加。文献[17]通过添加纳米纤维素和阿魏酸来制备具有良好力学和阻隔性能的大豆蛋白复合膜,红外光谱研究也有类似结果。当添加 10% 时,吸收峰向 3 274 cm⁻¹ 处移动,这可能是因为添加过量的硬脂酸会引起蛋白质的相对浓度下降,导致 SPI 和海藻酸钠分子之间键合作用被削弱^[32]。该结果也解释了水分阻隔性变化的原因。纯硬脂酸在 1 710、2 848、2 914 cm⁻¹ 附近的吸收峰分别归属于羰基的伸缩振动、亚甲基的对称伸缩振动和亚甲基的不对称伸缩振动^[33]。三元复合膜的红外光谱在 2 848 ~ 2 914 cm⁻¹ 处显示独特的构象变化,这可能是因为 SPI 游离的氨基被硬脂酸的长碳链取代^[24]。此外,在三元复合膜中没有观察到 1 710 cm⁻¹ 附近的吸收峰,这可能是因为三元复合物的形成减弱了硬脂酸中羰基的红外吸收^[34]。

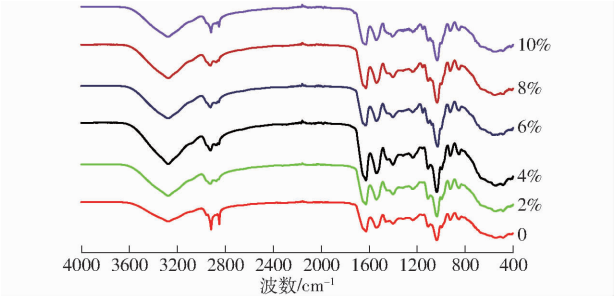


图 3 不同硬脂酸添加量的 SPI/NaAlg/SA 复合膜红外光谱图

Fig. 3 FTIR spectra of SPI/NaAlg/SA composite films with different amounts of stearic acid addition

2.6 扫描电镜分析

图 4 为添加不同比例硬脂酸的复合膜放大 1 000 倍下的表面扫描电镜图。由图 4 可知,SPI/NaAlg 二元复合膜的表面光滑平坦,这表明 SPI、甘油和海藻酸钠的混合物是均匀的。随着硬脂酸添加量的增加,硬脂酸聚集并嵌入到膜基质中,从而导致相对不均匀的表面。表面出现白点可能与硬脂酸的不均匀填充有关^[35]。当添加 10% 时,膜的表面更为粗糙且呈现出连续的网络结构。这可能是因为复合膜中过量的硬脂酸聚集而影响 SPI 与海藻酸钠形成的网络结构,进而影响膜的阻水性能^[36]。

图 5 为添加不同比例硬脂酸的复合膜放大 1 000 倍下的截面扫描电镜图。由图 5 可知,随着硬脂酸添加量的增加,膜内空隙逐渐减少,这可能是因为加入的硬脂酸填充在复合膜的网络结构中,形成复杂的蛋白质-多糖-脂质网络,使得复合膜内部结

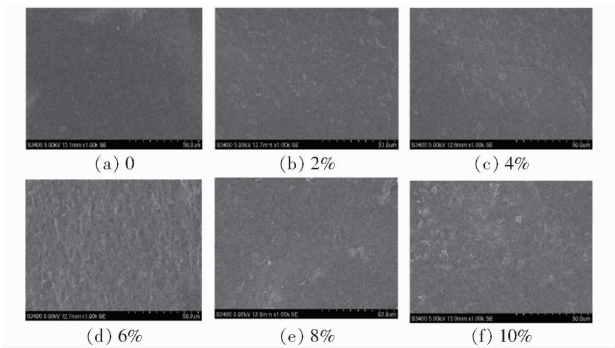


图 4 不同硬脂酸添加量的 SPI/NaAlg/SA 复合膜表面扫描电镜图

Fig. 4 SEM images of outer surface of SPI/NaAlg/SA composite films with different amounts of stearic acid addition

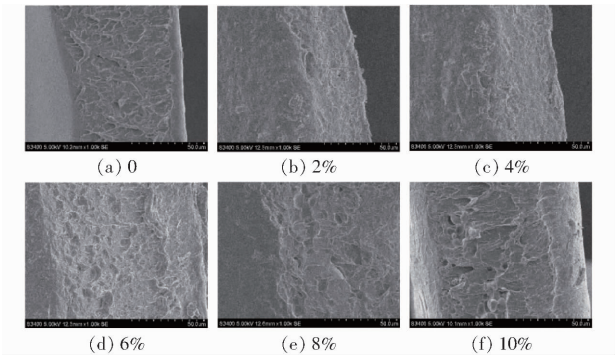


图 5 不同硬脂酸添加量的 SPI/NaAlg/SA 复合膜的截面扫描电镜图

Fig. 5 SEM images of cross section of SPI/NaAlg/SA composite films with different amounts of stearic acid addition

构变得十分致密^[37]。当添加 10% 时,复合膜表面已经出现球状的硬脂酸颗粒,这可能是因为当硬脂酸添加量较大时,三者相容性较差,在缓慢的干燥过程中,部分硬脂酸向膜表面迁移,并最终在复合膜表面形成脂质层^[38]。

3 结束语

通过添加不同添加量硬脂酸制备 SPI/NaAlg/SA 三元复合膜,对比复合膜机械性能和阻水性能的不同,并通过傅里叶变换红外光谱图和扫描电镜图对复合膜进行微观结构表征,探究硬脂酸对其耐水性变化的影响。结果表明:添加 8% 硬脂酸后,三元复合膜的断裂伸长率、水蒸气透过率显著下降,接触角最大,对其含水率及水溶性也有显著影响。此外,红外光谱结果表明复合膜的拉伸强度及水分阻隔性的增加可能是因为硬脂酸与蛋白质和海藻酸钠之间发生了相互作用,使之形成了相对稳定的网络结构。通过扫描电镜图可以看出添加 8% 硬脂酸的三元复合膜表面结构较为光滑平整,出现的空隙较少,复合膜内部结构致密。综上添加适量硬脂酸能有效提高 SPI/NaAlg 复合膜的耐水性。

参 考 文 献

- [1] GAHRUIE H H, ZIAEE E, ESKANDARI M H, et al. Characterization of basil seed gum-based edible films incorporated with *Zataria multiflora* essential oil nanoemulsion[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 166: 93 – 103.
- [2] LIU Kai, XU Xiangxin, LIU Huiping, et al. Mechanical properties and water sensitivity of soybean protein isolate film improved by incorporation of sodium caseinate and transglutaminase[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 153: 106154.
- [3] 赵扬, 甄超英, 王静. 微波改性对大豆分离蛋白膜特性的影响研究[J]. 河北工业科技, 2016, 33(2): 139 – 145.
ZHAO Yang, ZHEN Chaoying, WANG Jing. Effect of microwave modification on the characteristics of soy protein isolate films[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2016, 33(2): 139 – 145. (in Chinese)
- [4] 江连洲, 徐靛, 张莉, 等. 大豆生物解离纤维素可食性膜制备与成膜机理研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 335 – 342.
JIANG Lianzhou, XU Liang, ZHANG Li, et al. Preparation of EAEP fiber films and its mechanism of film formation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 335 – 342. (in Chinese)
- [5] STUCHELL Y M, KROCHTA J M. Enzymatic treatments and thermal effects on edible soy protein films[J]. Journal of Food Science, 2010, 59(6): 1332 – 1337.
- [6] 潘红阳. 大豆蛋白基复合型可食性膜的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006: 1 – 6.
PAN Hongyang. Study on soy protein-based composite edible films[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006: 1 – 6. (in Chinese)
- [7] HOSSEINI S F, REZAEI M, ZANDI M, et al. Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films[J]. Food Chemistry, 2013, 136(3 – 4): 1490 – 1495.
- [8] PAN Hongyang, JIANG Bo, CHEN Jie, et al. Blend-modification of soy protein/lauric acid edible films using polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2014, 151(4): 1 – 6.
- [9] 任邦来, 秦娜娜. 不同浓度海藻酸钠处理对油桃保鲜效果的影响[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(9): 38 – 41.
REN Banglai, QIN Na'na. Effect of coating with different concentrations of sodium alginate on nectarine fresh-keeping[J]. Food and Nutrition in China, 2016, 22(9): 38 – 41. (in Chinese)
- [10] YERRAMATHI B B, KOLA M, ANNEM MUNIRAJ B, et al. Structural studies and bioactivity of sodium alginate edible films fabricated through ferulic acid crosslinking mechanism[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 301: 110566.
- [11] 刘新新, 刘钟栋. 海藻酸钠/玉米醇溶蛋白抗菌复合膜的制备及其性能[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 113 – 118.
LIU Xinxin, LIU Zhongdong. Preparation of edible antimicrobial packaging film with sodium alginate as matrix and its property identification[J]. Food Industry, 2020, 41(4): 113 – 118. (in Chinese)
- [12] 高惠, 李瑜涛, 戴晓娟, 等. 不同添加剂对可食性大豆蛋白-海藻酸钠复合膜性能的影响[J]. 食品安全导刊, 2020(15): 124 – 126.
- [13] DELACABA K, PENA C, CIANNAMEA E M, et al. Characterization of soybean protein concentrate-stearic acid/palmitic acid blend edible films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(3): 1796 – 1807.
- [14] LODHA P, NETRAVALI A N. Thermal and mechanical properties of environment-friendly ‘green’ plastics from stearic acid modified-soy protein isolate[J]. Industrial Crops and Products, 2005, 21(1): 49 – 64.
- [15] DWI S, FITHRIYA H, HENI O, et al. Chitosan-pectin-stearic acid film for controlled-release of curcumin[J]. Materials Science Forum, 2019, 948: 69 – 77.
- [16] REZVANI E, SCHLEINING G, SÜMEN G, et al. Assessment of physical and mechanical properties of sodium caseinate and stearic acid based film-forming emulsions and edible films[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 598 – 605.
- [17] 李彤, 张宏, 赵晓彤, 等. 大豆分离蛋白/纳米纤维素/阿魏酸复合膜的制备及其包装性能[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 253 – 260.
LI Tong, ZHANG Hong, ZHAO Xiaotong, et al. Preparation and packaging properties of soybean protein isolate/cellulose nanofiber/ferulic acid composite film[J]. Food Science, 2020, 41(17): 253 – 260. (in Chinese)
- [18] ZHANG Cheng, WANG Zhigao, LI Yang, et al. The preparation and physiochemical characterization of rapeseed protein hydrolysate-chitosan composite films[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 694 – 701.
- [19] GOUNGA M E, XU Shiyang, WANG Zhang. Whey protein isolate-based edible films as affected by protein concentration, glycerol ratio and pullulan addition in film formation[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(4): 521 – 530.
- [20] HAN Yingying, YU Miao, WANG Lijuan. Soy protein isolate nanocomposites reinforced with nanocellulose isolated from licorice residue: water sensitivity and mechanical strength[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 117(1): 252 – 259.
- [21] 姚玉梅, 袁湘汝, 韩鲁佳, 等. 不同分子质量牛骨胶原蛋白肽制备复合膜特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 318 – 325.
YAO Yumei, YUAN Xiangru, HAN Lujia, et al. Microstructures and properties of bovine bone collagen polypeptide composite films with different molecular weight distributions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 318 – 325. (in Chinese)
- [22] YU Zhilong, SUN Lin, WANG Wei, et al. Soy protein-based films incorporated with cellulose nanocrystals and pine needle extract for active packaging[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 112(1): 412 – 419.

- [23] SHELLHAMMER T H, RUMSEY T R, KORCHTA J M. The viscoelastic properties of lipid film-forming materials[J]. Food Engineering, 1997, 33(3/4): 305–320.
- [24] YE Qianqian, HAN Yufei, ZHANG Jizhi, et al. Bio-based films with improved water resistance derived from soy protein isolate and stearic acid via bioconjugation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214(2): 125–131.
- [25] LIU Guoqin, LI Lin, LI Bing, et al. Mechanical properties and sorption characteristics of stearic acid–cysteine–soy protein isolate blend films[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 153–158.
- [26] 刘莹, 王朋丽. 壳聚糖-明胶-硬脂酸三元共混膜材料的制备及膜特性的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 87–91.
LIU Ying, WANG Pengli. Research of preparation and performance of chitosan–gelatin–octadecanoic acid composite films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(19): 87–91. (in Chinese)
- [27] JIMÉNEZ A, FABRA M J, TALENS P, et al. Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(1): 302–310.
- [28] 王亚珍, 谢晶, 李立, 等. 壳寡糖对壳聚糖-明胶-壳寡糖三元复合膜的性能影响研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 134–137.
WANG Yazhen, XIE Jing, LI Li, et al. Effect of chitosan oligosaccharide on properties of chitosan–gelatin–chitosan oligosaccharide ternary composite films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8): 134–137. (in Chinese)
- [29] ABUGOCH L E, TAPIA C, VILLAMÁN M C, et al. Characterization of quinoa protein-chitosan blend edible films[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 879–886.
- [30] WANG Haixia, WANG Lijuan. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 624–633.
- [31] WEI Jingyi, ZHANG Zhuo, CAI Qing, et al. Effects of high hydrostatic pressure on structural and physical properties of nisin-SPI film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111(1): 976–982.
- [32] 支雅雯, 张华江, 王晓琪, 等. 不同增塑剂对大豆蛋白包装薄膜机械性能稳定性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 245–251.
ZHI Yawen, ZHANG Huajiang, WANG Xiaoqi, et al. Effect of different plasticizers on mechanical stability of soybean protein packaging films[J]. Food Science, 2018, 39(3): 245–251. (in Chinese)
- [33] 胡瑞省, 刘会茹, 顾丹丹, 等. 硬脂酸亚甲基 C—H 伸缩振动红外光谱研究[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(10): 71–75.
HU Ruisheng, LIU Huiru, GU Dandan, et al. Study on infrared spectroscopy of stearic acid methylene C—H stretching vibration[J]. Experimental Technology and Management, 2014, 31(10): 71–75. (in Chinese)
- [34] 郑梦歌. 淀粉-脂肪酸-蛋白质三元复合物的形成机制及对淀粉功能性质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2018: 23–24.
ZHENG Mengge. Formation mechanism of starch–fatty acid–protein ternary complex and its effect on starch functional properties[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018: 23–24. (in Chinese)
- [35] WANG Zhe, ZHOU Jing, WANG Xiaoxuan, et al. The effects of ultrasonic/microwave assisted treatment on the water vapor barrier properties of soybean protein isolate-based oleic acid/stearic acid blend edible films[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 51–58.
- [36] GALUS S. Functional properties of soy protein isolate edible films as affected by rapeseed oil concentration[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 233–241.
- [37] 顾赛麒, 余晓梅, 蔡燕萍, 等. 单月桂酸甘油酯添加量对大豆分离蛋白复合膜成膜特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 245–251.
GU Saiqi, YU Xiaomei, CAI Yanping, et al. Effect of glycerol monolaurate addition on the properties of soy protein isolate composite film[J]. Food Science, 2017, 38(21): 245–251. (in Chinese)
- [38] 潘红阳, 张根义. 不同脂类及添加量对大豆蛋白基可食性膜性能的影响[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(1): 86–89.
PAN Hongyang, ZHANG Genyi. Soy protein isolate emulsion film performance as affected by lipid and amount[J]. Food Research and Development, 2006, 27(1): 86–89. (in Chinese)