

微波改性蛋白复合膜的制备及性质研究

Preparation and research on microwave modified blended protein film

王娜¹ 高育哲² 王庆峰² 肖志刚² 王鹏¹ 李哲²

WANG Na¹ GAO Yu-zhe² WANG Qing-feng² XIAO Zhi-gang² WANG Peng¹ LI Zhe²

(1. 东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 沈阳师范大学粮食学院, 辽宁 沈阳 110034)

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

2. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang, Liaoning 110034, China)

摘要: 以大豆分离蛋白和玉米醇溶蛋白为原料, 通过对玉米醇溶蛋白进行微波改性后制备微波改性蛋白复合膜。选择大豆分离蛋白液与改性玉米醇溶蛋白液体积比、乙醇添加量、成膜液 pH 值及水浴温度为考察因素, 以复合膜的机械性能(抗破强度与断裂距离)为目标值进行单因素试验, 并对最佳成膜条件下制得的微波改性蛋白复合膜的微观结构、热特性以及 FT—IR 进行分析。结果表明: 大豆分离蛋白液与改性玉米醇溶蛋白液体积比为 3:1、无水乙醇添加量 20%、成膜液 pH 值 12、水浴温度 80℃ 条件下, 微波改性蛋白复合膜的抗破强度为 2 900 g, 断裂距离为 16.08 cm; 复合膜具有很好的表现特征和热稳定性, 分子间相互作用紧密, 其二级结构具有蛋白质的典型特征。

关键词: 大豆分离蛋白; 玉米醇溶蛋白; 微波改性; 蛋白复合膜; 机械性能; 结构特性

Abstract: With the soy protein isolated(SPI) and zein as the raw material, through modified the zein by microwave to make the microwave modified blended protein film. Selecting the protein liquid volume ratio of SPI and modified zein, ethanol content, pH of film-forming liquid and water bath temperature as studying factors, the mechanical properties of blended film (breaking strength and fracturing distance) as targets for single factor experiment was studied. And the microstructure, thermal characteristics and FT—IR of the microwave modified blended protein film were also studied, which was obtained by the best ultrasonic film-forming conditions. The results showed that the blended film had the maximal breaking strength (2 900.00 g) and the highest fracturing distance (16.08 mm), with

the protein liquid volume ratio of SPI and modified zein 3:1, the ethanol content 20%, the pH of film-forming liquid 12 and the water bath temperature 80℃. The blended film has the better microstructure and thermal stability, the closer intermolecular interactions, and the typical characteristics of secondary structure.

Keywords: soy protein isolated; zein; microwave modification; blended protein film; mechanical properties; structural characteristics

可降解包装膜是以天然可食性物质(蛋白质、多糖、纤维素等)为原料, 通过分子间相互作用形成具有多孔网络结构的薄膜^[1]。目前, 可食性包装膜的研究已从单一原料逐步转向复合原料, 以及对原料改性的研究上^[2]。

玉米醇溶蛋白富含大量氨基酸^[3], 并且在食品包装中的应用有着悠久的历史, 如包裹糖果、水果、坚果、封装药物等^[4]。但与其他蛋白膜相比, 玉米醇溶蛋白膜过脆且灵活性较差, 无法适用于工业加工^[5], 这些缺陷限制了玉米醇溶蛋白膜的应用。目前, 已有一些报道^[6,7]采用脂类、多糖和甘油来降低玉米醇溶蛋白膜的脆性。大豆分离蛋白(soy protein isolated, SPI)来源广泛、价格低廉、具有一定的成膜性^[8], 其制成的蛋白膜具有良好的机械性能, 能够保持水分, 确保食品的原味, 故其已经作为生物塑料的可替代资源被用于食品包装领域^[9,10]。目前, 大豆分离蛋白与动物蛋白、多糖、纳米材料等复合, 制备生物薄膜的研究较为广泛, 但其与玉米醇溶蛋白复合制膜的研究少有报道。蔡花真等^[2]利用大豆分离蛋白与玉米醇溶蛋白制备了可食性复合膜, 但制得的复合膜机械性能存在缺陷, 断裂伸长率较低。这是由于大豆分离蛋白易溶解在水中而非乙醇溶液, 而玉米醇溶蛋白却恰恰相反, 若在正常情况下制备大豆分离蛋白与玉米醇溶蛋白复合膜, 成膜液中将会出现不溶物沉淀影响复合膜的性质。

微波是一种非电离电磁辐射, 它通过电磁场中极性分子之间的相互作用来提高极性物质的温度^[11]。微波通过分子的振荡、键能的破坏、粒子之间的相互摩擦和碰撞作用, 可以促进分子内极性基团的排列、接触和反应^[12], 因此微波技术

基金项目: “十二五”农村领域国家科技支撑计划课题(编号: 2012BAD34B02); 黑龙江省教育厅科学技术研究重点项目(编号: 12511z006); 哈尔滨市优秀学科带头人基金(编号: 2012RFXXN107)

作者简介: 王娜(1990—), 女, 东北农业大学在读硕士研究生。
E-mail: wangna901130@126.com

通讯作者: 肖志刚

收稿日期: 2015-05-21

已广泛应用于蛋白的辅助提取,及蛋白的改性等方面,有报道^[13,14]指出,微波可以改善蛋白质的乳化活性、溶解性、起泡能力与泡沫稳定性等。有研究^[15]表明,由于具有穿透能力强、选择性好、加热速度快、方便控制、热量均匀等特点,微波已逐渐被用于生物材料属性的研究中。

本试验拟从复合膜机械性能入手,选用微波对玉米醇溶蛋白进行改性,并将改性后的玉米醇溶蛋白与大豆分离蛋白混合制备蛋白复合膜,探讨最佳成膜条件,选取机械性能最优的微波改性蛋白复合膜进行微观结构、热特性和 FT—IR 分析。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

玉米醇溶蛋白:蛋白质含量为 85%,吴江市八坼药用辅料厂;

大豆分离蛋白:蛋白质含量为 91%,哈尔滨高科技(集团)有限公司。

无水乙醇、丙三醇、葡萄糖、聚乙二醇 400、盐酸、氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子分析天平:DF110 型,中国轻工机械总公司常熟衡器工业公司;

数显搅拌水浴锅:HH-4 型,常州赛普实验仪器厂;

数字酸度计:PHS-25℃型,上海大普仪器有限公司;

磁力搅拌器:CJ-881 型,江苏省金坛市医疗仪器厂;

自动定氮仪:Kjeltec 8400 型,丹麦 FOSS 全自动定氮仪公司;

微波光波炉:G8023CSL-K3 型,广东格兰仕集团有限公司;

质构仪:CT3 型,美国博勒飞公司;

扫描电子显微镜:S4800 型,日本日立公司;

差热扫描量热分析仪:TA-Q20 型,美国 TA 公司;

傅里叶红外光谱仪:Nicolet 6700 型,美国热电公司。

1.2 方法

1.2.1 微波改性蛋白复合膜的制备 取 6.7%(*m/V*)的大豆分离蛋白溶于蒸馏水中制成大豆分离蛋白液;取 6.7%(*m/V*)的玉米醇溶蛋白溶于蒸馏水中制成玉米醇溶蛋白液;用 0.1 mol/L NaOH 调节玉米蛋白溶液 pH 值到 12.0 后将溶液经微波改性处理,处理条件为 60℃、350 W、2 min。然后将大豆分离蛋白溶液和微波改性玉米蛋白溶液按不同比例混合,加入不同体积比的无水乙醇,并用 0.1 mol/L NaOH 调节混合液至不同 pH 值后,向混合液中加入 2.0%(*V/V*)的聚乙二醇 400、1.0%(*V/V*)的丙三醇和 0.1%(*m/V*)的葡萄糖,置于磁力搅拌器上搅拌 30 min。搅拌均匀后将混合液于不同温度的水浴锅中加热 15 min(在水浴过程中应持续搅拌溶液,使其受热均匀)。加热完成后,冷却至室温,超声去泡,倒膜,然后于电热鼓风干燥箱中 45℃恒温干燥,再取出置于相对湿度为 80%的干燥器中回软,揭膜,即得大豆分离蛋白与改性玉米醇溶蛋白复合膜。

1.2.2 微波改性蛋白复合膜机械性能的测定 根据 ASTM 标准方法(D882-01)并加以改进,本试验选用抗破强度和断裂距离来衡量样品的机械性能。将待测样品用 TA-DE 型号夹具固定于质构仪上,选用 TA41 型号探针,触发点负载 5 g,负载距离 20 mm,测试速度 0.5 mm/s。每个试验做 3 个平行,取算术平均数。

1.2.3 微波改性蛋白复合膜成膜条件单因素试验设计 选取大豆分离蛋白液与改性玉米醇溶蛋白液体积比、无水乙醇添加量、成膜液 pH 值及水浴温度为因素,以复合膜的机械性能为指标,固定其他因素考查某一因素的变化情况,进行单因素试验。

(1) 蛋白液体积比的影响:无水乙醇添加量为 20%,成膜液 pH 为 12,水浴温度为 80℃,大豆分离蛋白液与改性玉米醇溶蛋白液体积比选取 4:1,3:1,2:1,1:1,1:2,考察蛋白液体积比对蛋白复合膜机械性能的影响。

(2) 无水乙醇添加量的影响:蛋白液体积比为 3:1,成膜液 pH 为 12,水浴温度 80℃,无水乙醇添加量选取 10%,20%,30%,40%,50%,考察无水乙醇添加量对蛋白复合膜机械性能的影响。

(3) 成膜液 pH 值的影响:蛋白液体积比为 3:1,无水乙醇添加量为 20%,水浴温度为 80℃,成膜液 pH 选取 9,10,11,12,13,考察 pH 值对蛋白复合膜机械性能的影响。

(4) 水浴温度的影响:蛋白液体积比为 3:1,无水乙醇添加量为 20%,成膜液 pH 为 12,水浴温度选取 50,60,70,80,90℃,考察水浴温度对蛋白复合膜机械性能的影响。

1.2.4 微波改性蛋白复合膜微观结构分析 取待测样品放置于 60℃烘箱中烘干 12 h,取出后用液态氮冷冻破碎,分别将破碎后样品的表面和截面放入离子溅射仪中镀膜,再置于 S4800 扫描电子显微镜中,于 5 kV 加速电压、2 000 和 5 000 倍放大倍数下进行观察与拍照。

1.2.5 微波改性蛋白复合膜热特性分析 取 5 mg 样品于专用铝盒中压片,以空铝盒为空白对照,测定参数设置:扫描温度 25~220℃、扫描速率 10℃/min,得 DSC 图谱,并通过 TA Universal Analysis 软件对图谱进行分析。

1.2.6 微波改性蛋白复合膜 FT—IR 分析 采用衰减全反射法收集样品的傅里叶变换红外光谱,扫描光谱范围 4 000~400 cm⁻¹^[16]。

1.2.7 数据处理方法 采用 SPSS 20.0 软件对数据进行处理,用 Microsoft Excel 2003 绘制试验中折线图、Origin 8.0 绘制 DSC 图谱和 FT—IR 色谱图。

2 结果与分析

2.1 蛋白液体积比的影响

由图 1 可知,蛋白液体积比对复合膜机械性能影响明显,随着大豆分离蛋白含量的减少,复合膜的抗破强度和断裂距离呈现先小幅度升高后大幅度下降的趋势。在蛋白液体积比为 3:1 时,蛋白复合膜具有最佳的机械性能:抗破强度 2 900 g,断裂距离 16.08 cm。可能是随着大豆分离蛋白含量的减少,两种蛋白质分子凝聚时产生的氢键、二硫键减少,

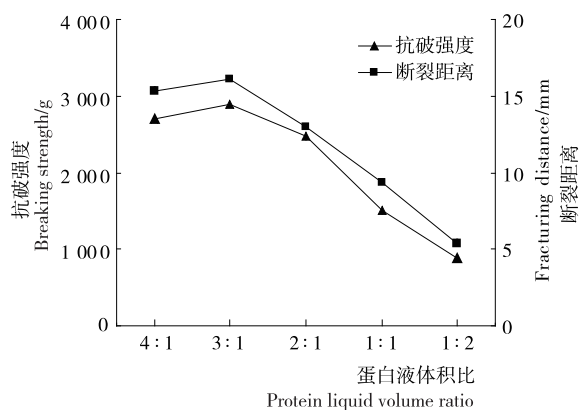


图 1 蛋白液体积比对微波改性蛋白复合膜机械性能的影响

Figure 1 Influence of protein liquid volume ratio on the mechanical properties of microwave modified blended protein films

疏水性相互作用降低,使得复合膜的机械性能减退。但大豆分离蛋白含量过高时,蛋白成膜溶液中出现未溶解的蛋白质颗粒,影响了复合膜的均匀性,阻碍了蛋白质紧密网络结构的形成^[17],致使复合膜的抗破强度降低。同时适量的改性玉米醇溶蛋白的添加,使复合膜在形成过程中分子间作用力增强,蛋白分子间以氢键结合得更紧密,有利于形成稳定的刚性结构。因此选取大豆分离蛋白液与改性玉米醇溶蛋白液体积比为 3:1 较为适宜。

2.2 乙醇添加量的影响

由图 2 可知,随着乙醇添加量的增加,蛋白复合膜的抗破强度和断裂距离均呈现先升高后降低的趋势。乙醇添加量在 20% 时,抗破强度和断裂距离达到最大值。可能是过低的乙醇浓度致使蛋白质之间的交联程度不完全,不能形成致密、均匀的蛋白复合膜,从而影响了膜的机械性能^[18]。并且在试验过程中发现,乙醇添加量在 30% 以上时,成膜液易产生颗粒沉淀,表明大豆分离蛋白没有完全溶解参与反应,导致膜的抗破强度和断裂距离大幅度降低^[19]。故选取 20% 的乙醇添加量较为适宜。

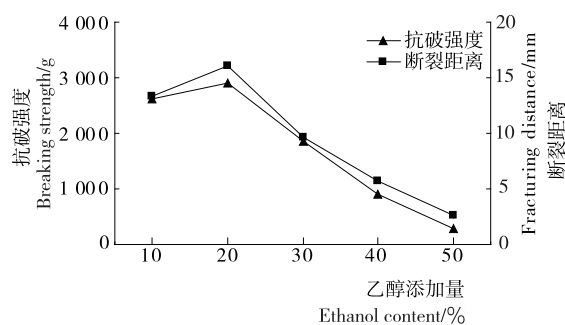


图 2 乙醇添加量对微波改性蛋白复合膜机械性能的影响

Figure 2 Influence of ethanol content on the mechanical properties of microwave modified blended protein films

2.3 成膜液 pH 值的影响

由图 3 可知,随着成膜液 pH 值的升高,复合膜的抗破强度和断裂距离呈逐渐上升的趋势;在 pH 12 时达到最大值,而继续增大成膜液 pH,复合膜的机械性能却有所降低。可能是 pH 值的增加使得蛋白分子的外部环境和内部结构发生改变,从而导致分子内巯基和疏水基团的暴露,增加了蛋白质分子之间的作用力,这些作用力提高了蛋白复合膜的机械性能^[8]。而当 pH 值为 13 时,溶液呈现强碱性,蛋白分子结构破坏严重,致使膜机械性能降低。故选取成膜液 pH 值为 12。

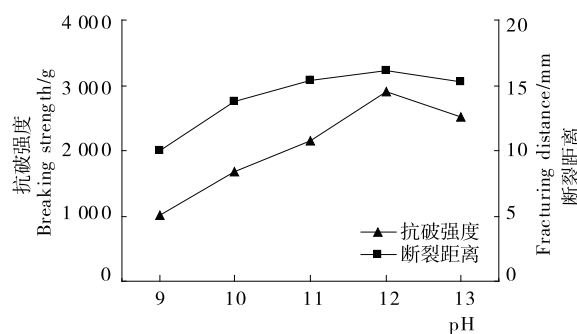


图 3 pH 对微波改性蛋白复合膜机械性能的影响

Figure 3 Influence of pH on the mechanical properties of microwave modified blended protein films

2.4 水浴温度的影响

由图 4 可知,随着水浴温度的升高,蛋白复合膜的机械性能逐渐提高,在 80 °C 时提取率达到最大值,可能是随着成膜温度的升高,蛋白分子运动加剧,有利于分子间氢键、二硫键和疏水键的形成^[20],使得复合膜具有较为致密的空间结构,提高复合膜的机械性能。当温度超过 80 °C 时,抗破强度增加得不明显,且断裂距离有所降低,可能是较高的温度使得溶剂迅速蒸发,导致蛋白质分子间交联反应不彻底,蛋白质分子网状结构不稳定^[19],从而引起复合膜易断裂。综合考虑,水浴温度 80 °C 较为适宜。

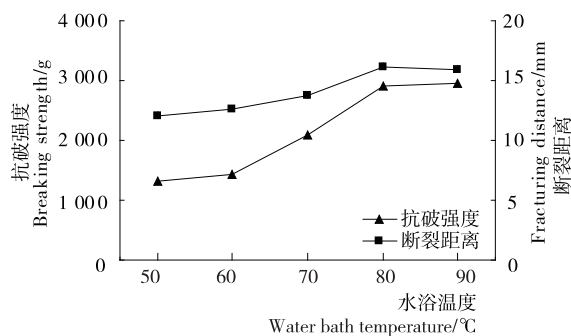
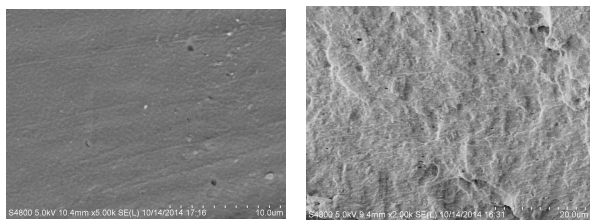


图 4 水浴温度对微波改性蛋白复合膜机械性能的影响

Figure 4 Influence of water bath temperature on the mechanical properties of microwave modified blended protein films

2.5 微波改性蛋白复合膜微观结构分析

对上述最佳成膜条件下获得的微波改性蛋白复合膜的表面和横断面分别做扫描电子显微镜观察,结果见图5。



(a) 表面扫描电镜图($\times 5\,000$) (b) 横断面扫描电镜图($\times 2\,000$)

图5 微波改性蛋白复合膜扫描电镜图

Figure 5 Scanning electron micrographs of the microwave modified blended protein film

由图5可知,微波改性蛋白复合膜具有光滑的外表,其表面结构十分平整,凸起和凹陷均很少,孔数极少且孔径很小;微波改性蛋白复合膜内部结构均匀致密,少有漏洞,洞孔直径较小且非常稀疏。可能是微波改性后的玉米醇溶蛋白分子内部结构发生了一定的改变,分子重新排列组合,与大豆分离蛋白混合后,分子内非共价键的相互作用力增强,蛋白分子间氢键和氢氧根形成更紧凑的结构,使得蛋白分子间结合更紧密,从而蛋白复合膜具有致密的空间网络结构^[21]。这表明孔洞和凹陷直接影响到复合膜的抗破强度和断裂距离,其与黄国平等^[22]研究结果相似。

2.6 微波改性蛋白复合膜热特性分析

热稳定性是衡量蛋白膜在食品加工和保藏过程中的一个重要因素,本试验对上述最佳成膜条件下获得的微波改性蛋白复合膜做DSC测定分析,DSC图谱见图6。

如图6所示微波改性蛋白复合膜在检测温度范围内有2个吸热峰,DSC检测结果表明,微波改性蛋白复合膜的玻璃态转化温度 T_g 为 $(81.11 \pm 0.48)^\circ\text{C}$,热变性温度 T_m 为 $(172.69 \pm 0.61)^\circ\text{C}$,变性热焓 ΔH_f 为 $(40.10 \pm 0.46) \text{ J/g}$ 。这表明微波改性蛋白复合膜具有较高的热稳定性,并且其热变性温度普遍高于常规条件下制得的大豆分离蛋白膜^[23],Kokoszka等^[24]证实蛋白质相互作用的增加,将会促进热量的聚集,从而提高膜的热变性温度;同时微波改性的处理使维

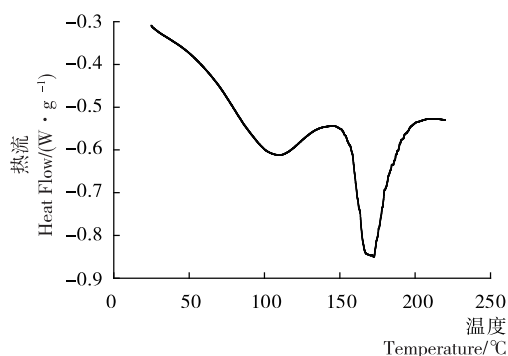


图6 微波改性蛋白复合膜DSC图谱

Figure 6 DSC thermogram of the microwave modified blended protein film

持蛋白质分子结构的化学键以及相互作用力发生改变,与大豆分离蛋白混合后,蛋白分子间伴随着不同程度的降解和聚合,分子间相互交联成稳定的网状结构,从而改善了膜的热性能^[25],有利于提高其加工性能。

2.7 微波改性蛋白复合膜FT-IR分析

蛋白质分子红外光谱分为3个区域,即在 $1\,700 \sim 1\,600 \text{ cm}^{-1}$ 范围内 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动(酰胺I);在 $1\,600 \sim 1\,500 \text{ cm}^{-1}$ 范围内 $\text{N}-\text{H}$ 的变角振动(酰胺II);在 $1\,220 \sim 1\,330 \text{ cm}^{-1}$ 范围内 $\text{C}-\text{N}$ 的伸缩振动和 $\text{N}-\text{H}$ 的变角振动(酰胺III)^[26,27],其振动频率则可以反映出多肽或者蛋白质的二级结构(α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲)^[28]。

微波改性蛋白复合膜的红外光谱图见图7,综合现有文献^[25,29]从图7中可知:复合膜在 $1\,630 \text{ cm}^{-1}$ (酰胺I)处有较强烈的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰,此振动可形成 β -转角;在 $1\,530 \text{ cm}^{-1}$ (酰胺II)存在 $\text{N}-\text{H}$ 的变角振动,其属于 β -折叠,是由伸展的多肽链组成的;在 $1\,240 \text{ cm}^{-1}$ (酰胺III)处的峰属于 $\text{N}-\text{H}$ 变角振动和 $\text{C}-\text{N}$ 伸缩振动所形成的 α -螺旋和无规则卷曲;在 $2\,980 \sim 2\,850 \text{ cm}^{-1}$ 出现的通常为 $-\text{CH}_2-$ 和 $-\text{CH}_3$ 的饱和 $\text{C}-\text{H}$ 反射峰;在 $3\,280 \text{ cm}^{-1}$ 附近存在由 $\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 形成的较宽的吸收带。由此可知大豆分离蛋白与改性玉米醇溶蛋白分子间的 $-\text{OH}$ 与展开的 $\text{C}=\text{O}$ 键相互作用,形成了致密的空间网络结构^[30];并且在变性及成膜过程中,微波改性蛋白复合膜在二级结构上并没有被完全破坏,仍保留一定的特征结构,复合膜仍具备蛋白质的典型特征。

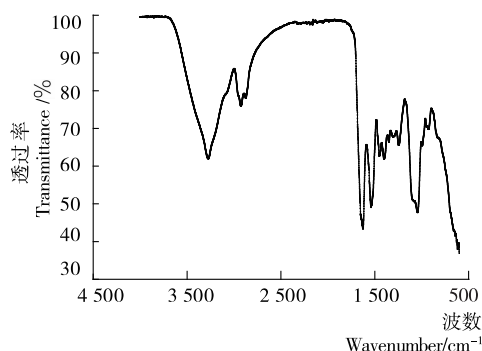


图7 微波改性蛋白复合膜FT-IR图谱

Figure 7 FT-IR spectrum of the microwave modified blended protein film

3 结论

(1) 本试验研究表明微波改性蛋白复合膜成膜的最佳单因素条件为:大豆分离蛋白液与改性玉米醇溶蛋白液体积比为3:1、无水乙醇添加量20%、成膜液pH值12、水浴温度 80°C ,此条件下制得的微波改性蛋白复合膜的抗破强度为2900 g,断裂距离为16.08 cm。

(2) 微波改性蛋白复合膜表面光滑、凹凸有秩、孔数极少且孔径很小、内部结构均匀致密;热稳定性好,具有较高的热变性温度;分子间相互作用紧密,二级结构没有被完全破坏,仍具有蛋白质的典型特征。

参考文献

- 王海鸥. 可食性膜及其在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2002(5): 4~8.
- 蔡花真,徐艳艳,李梦琴,等. 可食性复合蛋白成膜条件研究[J]. 食品与机械,2010,26(5): 112~114.
- Chen Ye, Ye Ran, Li Xiu-ming, et al. Preparation and characterization of extruded thermoplastic zein poly (propylene carbonate) film[J]. Industrial Crops and Products, 2013(49): 81~87.
- Biswasa Atanu, Selling G W, Woods K K, et al. Surface modification of zein films[J]. Industrial Crops and Products, 2009, 30 (1): 168~171.
- Shi Ke, Huang Yu-ping, Yu Hai-long, et al. Reducing the brittleness of zein films through chemical modification[J]. J. Agric. Food Chem. , 2011, 59(1): 56~61.
- Ghanbarzadeh B, Oromiehie A, Musavi M. Effect of plasticizing sugars on rheological and thermal properties of zein resins and mechanical properties of zein films[J]. Food Research International, 2006, 39(8): 882~890.
- Guo H X, Heinämäki J, Yliruusi J. Stable aqueous film coating dispersion of zein[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 322(2): 478~484.
- 刘少博,陈复生,刘昆仑,等. 胶原蛋白与大豆分离蛋白复合膜制备的研究[J]. 食品与机械,2014,30(4): 107~112.
- Cunningham P, Ogale A A, Dawson P L, et al. Tensile properties of soy protein isolate films produced by a thermal compaction technique[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(4): 668~671.
- Swain S N, Biswal S M, Nanda P K, et al. Biodegradable soy-based plastics: opportunities and challenges[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2004, 12(1): 35~42.
- Zubov V P, Chikhacheva I P, Nikolaeva E I, et al. Microwave-assisted synthesis of composite sorbents on the basis of silica modified by polyvinyl alcohol[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2009, 79(2): 191~194.
- Li Ji, Zu Yuan-gang, Luo Meng, et al. Aqueous enzymatic process assisted by microwave extraction of oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) seed kernels and its quality evaluation[J]. Food Chemistry, 2013, 138(4): 2 152~2 158.
- 张德欣,李治龙,刘新华. 微波处理对提高谷朊粉品质的影响[J]. 农产品加工,2010(6):45~49.
- 陈剑兵,夏其乐,张俊,等. 微波技术对大豆蛋白功能特性的影响[J]. 保鲜与加工,2007,7(4):33~35.
- Copt A B, Neve O Y, Barak I, et al. Evidence for a specific microwave radiation effect on the green fluorescent protein[J]. Biophysical Journal, 2006, 91(4): 1 413~1 423.
- 顾璐萍. 食品蛋白质的性质对其成膜性能的影响[D]. 无锡:江南大学,2013.
- 李超,李强,李梦琴,等. 制膜条件对可食性小麦面筋蛋白膜机械性能的影响[J]. 广州食品工业科技,2004,20(4): 8~11.
- 贾祥祥,郭兴凤,鲁亚楠,等. 制备条件对玉米醇溶蛋白膜机械性能的影响[J]. 粮食与饲料工业,2012(7): 36~40.
- 艾志录,李梦芹,张平安,等. 小麦面筋蛋白膜的研制及其耐湿性的改善[J]. 中国食品学报,2003,3(4): 56~61.
- 唐亚丽,赵伟,卢立新,等. 增塑剂浓度和干燥温度对大豆蛋白膜阻油性能与机械性能的影响[J]. 安徽农业科学,2011, 39 (30): 378~379.
- Wang Zhe, Sun Xiu-xiu, Lian Zi-xuan, et al. The effects of ultrasonic/microwave assisted treatment on the properties of soy protein isolate/microcrystalline wheat-bran cellulose film[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(2): 183~191.
- 黄国平. 玉米醇溶蛋白的超声波提取、改性及释药性能的研究[D]. 广州:华南理工大学,2004.
- 姜燕,唐传核,温其标. 大豆分离蛋白膜的 DSC 分析[J]. 食品与发酵工业,2008,34(1): 28~30.
- Kokoszka S, Debeaufort F, Hambleton A, et al. Protein and glycerol contents affect physico-chemical properties of soy protein isolate-based edible films[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2010, 11(3): 503~510.
- 刘海飞,肖志刚,王娜,等. 稳态化米糠蛋白超声波辅助提取及其性质研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11): 235~241.
- 卢雁,张玮玮,王公轲. FTIR 用于变性蛋白质二级结构的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(1): 88~93.
- Gu Lu-ping, Wang Miao, Zhou Jing-wen. Effects of protein interactions on properties and microstructure of zein-gliadin composite films[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(2): 288~298.
- Surewicz W K, Mantsch H H, Chapman D. Determination of protein secondary structure by Fourier transform infrared spectroscopy:a critical assessment[J]. Biochemistry, 1993, 32(2): 389~394.
- Schmidt V, Giacomelli C, Soldi V. Thermal stability of films formed by soy protein isolate-sodium dodecyl sulfate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 87(1): 25~31.
- 江艳,武培怡. 大豆蛋白的中红外和近红外光谱研究[J]. 化学进展,2009, 21(4):705~714.

(上接第 113 页)

- 胡英,郭文松,胡万超,等. 加工番茄酱厂生产线自动除杂装置的设计[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2 356~2 357.
- 张雪松. 基于线阵 CCD 的红枣分选技术[J]. 食品与机械, 2008, 24(3): 81~83
- 孙小丽,坎杂,张若宇,等. 6SF-40 型加工番茄色选设备性能试验与参数优选[J]. 农机化研究, 2011(4): 152~154.
- 黄刚,薛河. 红外线光电开关在输送带速度测试系统中的应用[J]. 起重运输机械, 2005(6): 31~33.
- 朱仁盛,曲波. 光电传感器的应用[J]. 煤矿机电, 2000(3): 101~102.
- 陈海峰,张建宁,张翠珠. 全自动苹果去皮机供料系统设计与 PLC 控制[J]. 食品与机械, 2009, 25(1): 106~108.
- 唐立平. 气动物流输送及分拣系统的 PLC 控制[J]. 液压与气动, 2010(7): 54~56.
- 蔡积仁. 浅谈滚动摩擦[J]. 物理通报, 2006(2): 37~39.
- C 基特利. 伯克利物理学教程·第 1 卷:力学[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- 侯慧波,张春玲,蒋永衡. 新疆番茄酱的加工工艺及品质控制[J]. 农产品加工(学刊), 2010(11): 55~57.
- 刘西宁,程明. 6TXH-3600 型青核桃脱皮清洗机的研制[J]. 新疆农机化, 2012(1): 23~24.