

绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白可食膜性能的影响

马中苏¹, 王亚静¹, 陈珊珊¹, 张宁¹, 隋思瑶¹, 张丽萍²

(1. 吉林大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130062) (2. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 以绿豆皮纤维素为原料, 采用硫酸水解法制备绿豆皮纳米纤维素并将其应用到浓缩乳清蛋白可食膜中, 研究了绿豆皮纳米纤维素的微观形貌、结晶结构以及绿豆皮纳米纤维素添加量对浓缩乳清蛋白膜抗拉强度、断裂伸长率、氧气透过率、水蒸气透过系数、透光率及微观结构的影响。结果表明: 绿豆皮纳米纤维素为棒状结构, 长度约为 100~200 nm, 直径约为 10~20 nm, 且保持典型的纤维素 I 型结构, 结晶度较高; 绿豆皮纳米纤维素与浓缩乳清蛋白有很好的相容性; 当绿豆皮纳米纤维素添加量为 1% 时, 膜的水蒸气透过系数达到最小值, 为 $2.67 \times 10^{-13} \text{ g}/(\text{cm s Pa})$; 膜的透光率达到最大值, 为 39.31%; 此时膜表面较为平整均匀。当绿豆皮纳米纤维素添加量为 2% 时, 膜的抗拉强度最大为 1.41 MPa, 此时断裂伸长率为 139.8%; 膜的氧气透过率达到最小值, 为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d Pa})$ 。绿豆皮纳米纤维素的添加能够有效的提高浓缩乳清蛋白膜的性能。

关键词: 绿豆皮纳米纤维素; 浓缩乳清蛋白; 可食膜; 性能

文章编号: 1673-9078(2016)5-40-45

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.5.07

Effects of Mung Bean Hull Nanocrystalline Cellulose on the Performance of Whey Protein Concentrate Edible Film

MA Zhong-su¹, WANG Ya-jing¹, CHEN Shan-shan¹, ZHANG Ning¹, SUI Si-yao¹, ZHANG Li-ping²

(1.College of Food Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China)

(2.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Mung bean hull cellulose was used as the raw material to obtain nanocrystalline cellulose by sulfuric acid hydrolysis, which was applied to prepare a whey protein concentrate film. The morphology and crystalline structure of mung bean hull nanocrystalline cellulose and the effects of the amount of added mung bean hull nanocrystalline cellulose on the tensile strength, elongation at break, oxygen permeability, water vapor permeability, transmittance, and microstructure properties of whey protein concentrate films were evaluated. The results showed that the mung bean hull cellulose nanocrystals had a rod-shaped structure with the length ranging from 100 to 200 nm and the diameter ranging from 10 to 20 nm. In addition, the typical cellulose I structure was maintained, with relatively high crystallinity. Mung bean hull nanocrystalline cellulose had good compatibility with the whey protein concentrate. When the content of mung bean hull nanocrystalline cellulose was 1%, the lowest water vapor permeability [$2.67 \times 10^{-13} \text{ g}/(\text{cm s Pa})$] and the highest transmittance of the films were reached, and the surface of the whey protein concentrate film was smooth and homogeneous. When the content of mung bean hull nanocrystalline cellulose was 2%, the tensile strength was highest (1.41 MPa), the elongation at break was 139.8%, and the lowest oxygen permeability [$1.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d Pa})$] was obtained. The addition of mung bean hull nanocrystalline cellulose can effectively improve the performance of whey protein concentrate films.

Key words: mung bean hull nanocrystalline cellulose; whey protein concentrate; edible films; performance

近年来, 环境保护越来越受到人们的重视, 可食膜由于其无污染、无毒无害、可降解、同时具有良好的包装性能和一定的营养价值引起了人们的广泛关

收稿日期: 2015-07-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD16B00); 国家星火计划项目 (2013GA670001)

作者简介: 马中苏 (1952-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事食品保藏与物流研究

通讯作者: 张丽萍 (1957-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事杂粮深加工研究

注^[1]。可食膜按照其主要成制备材料可分为蛋白质基可食膜、多糖基可食膜、脂质基可食膜和复合型可食膜, 由于可食膜绿色环保的特性及优良的包装性能使其在果蔬保鲜、肉类和水产品加工与保鲜、方便和快餐食品的制作、糖果和焙烤食品的保藏以及食品包装等领域拥有广阔的应用前景^[2]。

绿豆皮作为绿豆粉丝和绿豆芽等产品生产过程的废弃物, 其中含有 50%~60% 的纤维素, 是很好的纤维素来源^[3]。纳米纤维素(nanocrystalline cellulose, NCC) 是一种纳米尺寸的纤维素晶体, 制备方法主要有水解

法、机械法、生物法和静电纺丝法等^[4]。纳米纤维素不仅拥有纤维素的生物相容性、可降解及可再生等性能,同时还具有高强度、高结晶度和较大的比表面积^[5]等优点,这些特性使其在食品、医药及复合材料等领域应用广泛。浓缩乳清蛋白(whey protein concentrate, WPC)是通过超滤等技术从乳清中分离浓缩的可溶性蛋白质,具有良好的营养特性和成膜性,能形成透明、柔软、有弹性、阻隔性能较好的可食膜^[6-7]。目前国内外已有一些将纳米纤维素应用于可食膜以及复合材料中的研究,但对绿豆皮纳米纤维素制备及其对浓缩乳清蛋白可食膜性能影响的研究还鲜有报道^[8-9]。

本文采用硫酸水解法制备绿豆皮纳米纤维素,研究了绿豆皮纳米纤维素形貌和结晶结构;以浓缩乳清蛋白为成膜基材,将绿豆皮纳米纤维素添加到浓缩乳清蛋白膜中,研究了绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白膜机械性能、阻气性能、阻水性能、透光率及微观结构的影响,以期能提高膜的各项理化性能,且为绿豆皮纳米纤维素在可食膜中的实际应用提供新的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

浓缩乳清蛋白(蛋白质质量分数82%,脂肪质量分数6.5%,碳水化合物质量分数5%,水分含量 $\leq 5\%$):天津市光复精细化工研究所;绿豆皮纤维素:实验室自制;甘油:分析纯,天津福晨化学试剂厂;氢氧化钠、盐酸:分析纯,北京鼎国生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

TGL-16C 台式离心机:上海安亭科学仪器厂;JEM-1011 型透射电镜:日本电子株式会社;D/max2500pc 型 X 射线衍射仪:日本理学公司;TSY-T1L 型透湿性测试仪、XLW(B)型智能电子拉力试验机:济南兰光机电技术有限公司;GDP-C 型气体渗透性测试仪:德国 Brugger 公司;Nexus-670 型傅里叶变换红外光谱仪:美国 Nicolet 仪器公司;TU-1810 紫外-可见分光光度计:北京普析通用仪器有限责任公司;FD-1C-80 型冷冻干燥机:北京博医康实验仪器有限公司;自制成膜器:20 cm \times 20 cm 有机玻璃板(聚甲基丙烯酸甲酯)。

1.3 试验方法

1.3.1 绿豆皮纳米纤维素的制备

准确称取 10.00 g 绿豆皮纤维素,分散于 100 mL

质量分数为 64% 的硫酸水溶液中,于 50 °C 条件下恒温加热并不断搅拌 1.5 h,加入去离子水稀释 10 倍终止反应,以 10000 r/min 的速度经过多次离心以得到乳白色绿豆皮纳米纤维素悬浮液,将此悬浮液装入透析袋(截留分子量 8000~14000)中,用去离子水透析数天至 pH 值恒定,之后超声振荡 20 min,真空冷冻干燥后即得绿豆皮纳米纤维素粉末。

1.3.2 绿豆皮纳米纤维素的微观形态

用移液枪吸取少量质量分数 1% 的绿豆皮纳米纤维素悬浮液滴在铜网上,室温下干燥,加速电压为 200 kV 条件下用透射电镜观察其微观形态和粒径分布情况。

1.3.3 绿豆皮纳米纤维素 X-射线衍射

采用 D/max2500pc 型 X 射线衍射仪对绿豆皮纤维素和绿豆皮纳米纤维素进行分析,Cu 靶, K α 射线,管压 40 kV,电流 250 mA,步进扫描范围为 5~40°;步长 0.02°;扫描速度 2°/min,采用 Jade 5.0 软件进行分峰拟合,根据各峰的峰面积计算结晶度 X_c^[10]。

1.3.4 可食膜的制备

取 100 mL 质量分数 10% 的 WPC 溶液用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值至 8;80 °C 水浴加热 20 min,加热过程中一直搅拌并且保持方向不变;取出冷却后加入 6 mL 增塑剂甘油和不同量(与 WPC 质量比)的绿豆皮纳米纤维素;-0.8 MPa 下真空脱气 3 h;在 40 °C 下干燥成膜。

1.3.5 可食膜的性能测定

1.3.5.1 红外光谱(FT-IR)

将膜干燥剪碎研磨后采用 KBr 压片,利用傅里叶变换红外光谱仪进行红外分析,扫描范围为 4000~400 cm⁻¹。

1.3.5.2 扫描电镜(SEM)

采用扫描电子显微镜观察膜表面微观结构形态,取 2 mm \times 2 mm 膜样品固定,喷金处理,加速电压 15 kV。

1.3.5.3 膜的厚度(FT)

在膜表面四角各取一点,中央取一点,用螺旋测微器测定五个点的膜厚并取平均值,用于计算膜的其他性能。

1.3.5.4 机械性能

按照国标《塑料薄膜拉伸性能试验方法》(GB/13022-1991),将膜裁成 15 mm \times 120 mm 矩形样品,置于温度 23 °C、相对湿度 50% 的恒温恒湿箱内平衡 12 h,以智能电子拉力试验机测定抗拉强度(TS)和断裂伸长率(E),实际试验长度为 80 mm,试验速度为 200 mm/min,每个样品重复测量 3 次取平

均值。

1.3.5.5 氧气透过率 (OP)

按照国标《塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法-压差法》(GB/T1038-2000), 采用气体透过性测试仪测定, 测试面积为 108 mm², 试验气体为 99% 的氧气, 每个样品重复测量 3 次取平均值。

1.3.5.6 水蒸气透过系数 (WVP)

按照国标《包装材料试验方法-透湿率》(GB/T16928-1997), 采用 TSY-T1L 型透湿性测试仪测定, 测试面积为 100 mm², 每个样品重复测量 3 次取平均值。

1.3.5.7 透光率 (T)

将膜裁成矩形试样(9 mm×45 mm), 贴于比色皿内侧, 在 560 nm 波长下以空比色皿作对照用紫外-可见分光光度计测定透光率^[15], 每个样品重复测量 3 次取平均值。

1.3.5.8 数据处理

采用 Origin 软件作图, SPSS17.0 软件作为数据处理工具分析试验结果, 并采用 Duncan 多重比较检验法进行显著性分析 ($p \leq 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 绿豆皮纳米纤维素的微观形态

绿豆皮纳米纤维素透射电镜图如图 1 所示, 绿豆皮纳米纤维素呈棒状结构, 长度约为 100~300 nm, 直径约为 10~20 nm, 粒径较小且分布均匀。这说明绿豆皮纳米纤维素尺寸较小, 分散性较好; 硫酸能够有效的水解绿豆皮纤维素, 使其尺寸降低到纳米级别。

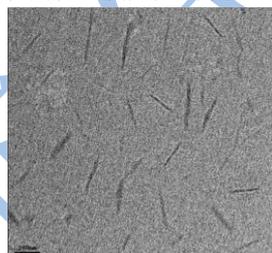


图 1 绿豆皮纳米纤维素透射电镜图

Fig.1 TEM images of mung bean hull nanocrystalline cellulose

2.2 绿豆皮纳米纤维素 X-射线衍射分析

绿豆皮纤维素和绿豆皮纳米纤维素 X-射线衍射图如图 2 所示。绿豆皮纤维素和绿豆皮纳米纤维素衍射峰的位置基本没有发生变化, 分别在 $2\theta=16.53^\circ$ 、 22.28° 和 34.65° 处出现较强的衍射峰, 根据特征峰的位置及 22.28° 衍射峰处没有出现双峰可以判断绿豆皮纳米纤维素与绿豆皮纤维素均属于典型的纤维素 I

型结晶结构, 且晶体类型没有改变, 纳米纤维素制备过程中纤维素晶型没有被破坏^[11]。经过 Jade 5.0 软件结合 X-射线衍射图计算出绿豆皮纤维素和绿豆皮纳米纤维素的结晶度分别为 50.88% 和 75.79%, 这是因为在硫酸水解过程中, 氢离子进入到了纤维素的无定形区, 促进糖苷键的断裂, 使得无定形区水解破裂, 有效提高了绿豆皮纳米纤维素的结晶度^[12]。

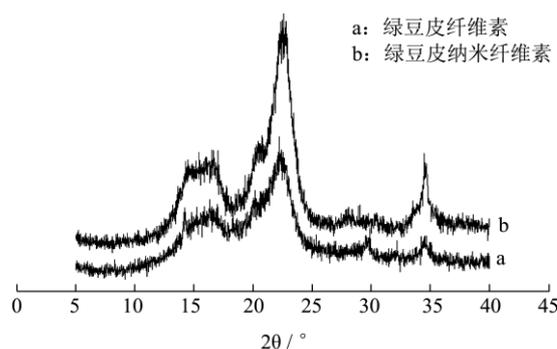


图 2 绿豆皮纤维素和绿豆皮纳米纤维素 X-射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction patterns of mung bean hull cellulose and mung bean hull nanocrystalline cellulose

2.3 浓缩乳清蛋白膜红外光谱分析

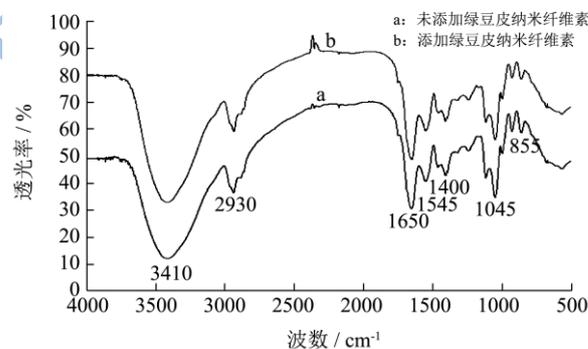


图 3 添加绿豆皮纳米纤维素前后浓缩乳清蛋白膜红外光谱图

Fig.3 FT-IR spectra of whey protein concentrate films with and without mung bean hull nanocrystalline cellulose

添加绿豆皮纳米纤维素前后浓缩乳清蛋白膜的红外光谱图见图 3。a 为未添加绿豆皮纳米纤维素的浓缩乳清蛋白膜, b 为添加绿豆皮纳米纤维素后的浓缩乳清蛋白膜。 3410 cm^{-1} 处的吸收峰是由 O-H 的伸缩振动引起的, 2930 cm^{-1} 处的吸收峰是属于甲基和亚甲基中 C-H 键的不对称伸缩振动, 1650 cm^{-1} 处的吸收峰是由于酰胺 I 带的 C=O 伸缩振动引起的, 1545 cm^{-1} 处的吸收峰属于酰胺 II 带的 N-H 弯曲振动峰, 1400 cm^{-1} 处的吸收峰显示的是酰胺 III 带 C-N 的伸缩振动, 1045 cm^{-1} 是 C-O 键的反对称伸缩振动峰, 855 cm^{-1} 处的吸收峰是由 C-H 键弯曲振动引起的。添加绿豆皮纳米纤维素后, 膜 C-H 振动峰由 2930 cm^{-1} 处向 2920 cm^{-1} 处发生

了偏移, 这表明绿豆皮纳米纤维素与浓缩乳清蛋白分子间形成了氢键或共价键, 分子间的氢键作用增强, 同时也影响了大分子共价键的振动强度, 使得吸收峰的峰值向低波数方向移动^[9], 但并未产生新的吸收峰, 说明绿豆皮纳米纤维素与浓缩乳清蛋白具有很好的相容性。

2.4 浓缩乳清蛋白膜扫描电镜分析

不同绿豆皮纳米纤维素添加量对膜表面微观结构的影响如图 4 所示。与未添加绿豆皮纳米纤维素的浓缩乳清蛋白膜相比, 当绿豆皮纳米纤维素添加量为 1% 时, 膜表面较为光滑平整, 突起较少, 说明绿豆皮纳米纤维素在膜中分布均匀, 并与浓缩乳清蛋白通过氢键连接形成了较为致密均一的网状结构^[13], 提高了二者的相容性。当绿豆皮纳米纤维素添加量继续增加时, 膜表面变得粗糙, 绿豆皮纳米纤维素明显团聚形成了较多的突起, 当绿豆皮纳米纤维素添加量为 5% 时, 过多的绿豆皮纳米纤维素自身团聚已无法与浓缩乳清蛋白发生交联作用, 只能镶嵌在膜表面, 使得膜表面粗糙且呈现凹凸不平的现象。

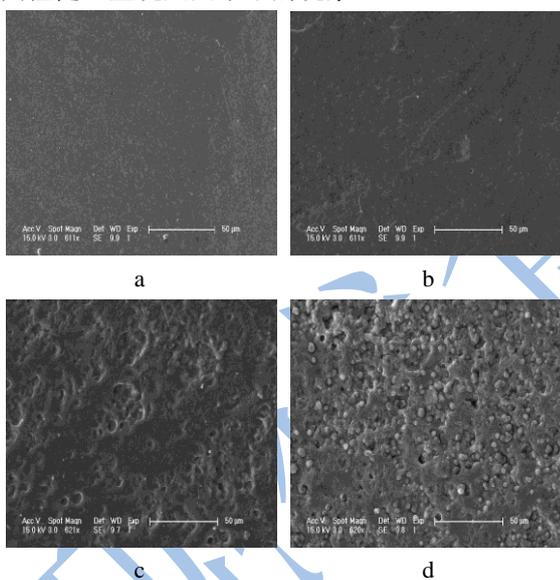


图 4 不同绿豆皮纳米纤维素添加量所成膜扫描电镜图

Fig.4 SEM images of the films with different amounts of added mung bean hull nanocrystalline cellulose

注: a.绿豆皮纳米纤维素添加量 0, b.绿豆皮纳米纤维素添加量 1%, c.绿豆皮纳米纤维素添加量 2%, d.绿豆皮纳米纤维素添加量 5%。

2.5 绿豆皮纳米纤维素添加量对膜机械性能的影响

绿豆皮纳米纤维素添加量对膜断裂伸长率和抗拉

强度的影响如图 5 所示。浓缩乳清蛋白膜的断裂伸长率最大为 149.05%, 随着绿豆皮纳米纤维素添加量的增加, 断裂伸长率逐渐减小。这是由于绿豆皮纳米纤维素与浓缩乳清蛋白通过氢键作用和分子间范德华力等形成致密的网状结构, 破坏了乳清蛋白膜本身的柔韧性和连续性, 提高了膜的硬度和脆度, 因此膜的断裂伸长率呈现降低的趋势^[14]。随着绿豆皮纳米纤维素添加量的不断增加, 浓缩乳清蛋白膜的抗拉强度呈现先增大后减小的趋势, 当绿豆皮纳米纤维素添加量为 2% 时, 抗拉强度达到最大值 1.41 Mpa, 此时断裂伸长率为 139.8%。这是因为绿豆皮纳米纤维素作为增强剂添加到浓缩乳清蛋白膜中, 纳米纤维素表面的羟基与乳清蛋白表面的极性基团通过氢键相连接, 形成了增强的网络结构, 从而提高了膜的抗拉强度; 当绿豆皮纳米纤维素添加量大于 2% 时, 过多的绿豆皮纳米纤维素发生团聚现象, 分散性较差, 使得膜表面凹凸不平, 受力不均匀, 容易产生应力集中, 从而导致膜的抗拉强度逐渐降低。

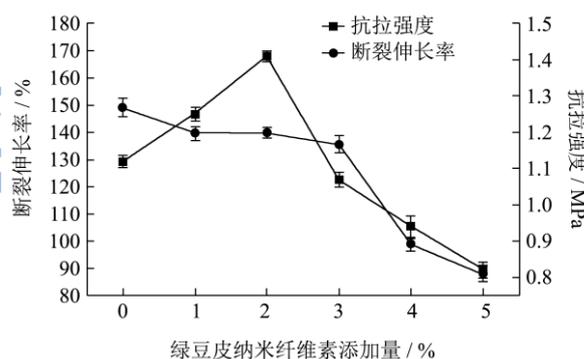


图 5 绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白膜断裂伸长率和抗拉强度的影响

Fig.5 Effect of mung bean hull nanocrystalline cellulose on the elongation and tensile strength of whey protein concentrate film

2.6 绿豆皮纳米纤维素添加量对膜氧气透过率的影响

绿豆皮纳米纤维素添加量对膜氧气透过率的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 随着绿豆皮纳米纤维素添加量的不断增加, 浓缩乳清蛋白膜的氧气透过率呈现先减小后增大的趋势, 当绿豆皮纳米纤维素添加量为 2% 时, 氧气透过率达到最小值 $1.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \text{ d Pa})$, 膜阻气性能最好。这是因为适量的添加绿豆皮纳米纤维素, 乳清蛋白与绿豆皮纳米纤维素通过氢键连接形成交联网状的稳定结构, 起到了阻碍氧气通过的作用, 延长了氧气通过膜内部的时间, 使膜的氧气透过率降低, 阻气性能提高。但是过量的添加绿豆皮纳米纤维

素, 由于其本身的自身团聚会破坏乳清蛋白大分子的网状结构, 并且低溶解性的纤维素扩大了网状结构的自由空间^[14], 使得膜氧气透过率增大, 阻气性能降低。

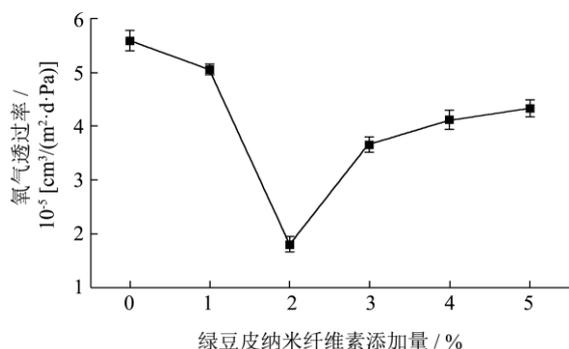


图6 绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白膜氧气透过率的影响

Fig.6 Effect of mung bean hull nanocrystalline cellulose on oxygen permeability of whey protein concentrate film

2.7 绿豆皮纳米纤维素添加量对膜水蒸气透

过系数的影响

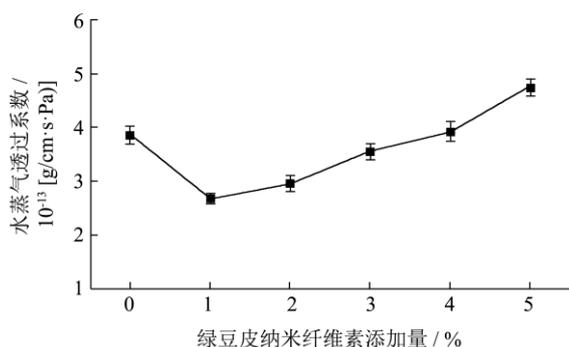


图7 绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白膜水蒸气透过系数的影响

Fig.7 Effect of mung bean hull nanocrystalline cellulose on the water vapor permeability of whey protein concentrate film

绿豆皮纳米纤维素添加量对膜水蒸气透过系数的影响如图7所示。随着绿豆皮纳米纤维素添加量的不断增加, 浓缩乳清蛋白膜的水蒸气透过系数呈现先减小后增大的趋势, 当绿豆皮纳米纤维素添加量为1%时, 水蒸气透过系数达到最小值 $2.67 \times 10^{-13} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 阻水性能最好。这是因为绿豆皮纳米纤维素与乳清蛋白通过氢键作用形成了更加致密的网状结构, 使得水分子在膜内的扩散路径更加曲折^[15], 延缓了水分子的扩散速度, 阻碍了水分的通过, 降低了膜的水蒸气透过系数, 从而提高了膜的阻水性能。当绿豆皮纳米纤维素添加量大于1%时, 随着添加量的继续增大, 绿豆皮纳米纤维素自身开始团聚, 破坏了乳清蛋白大分子的网状结构^[16], 使得水分子易于通过

膜, 因此提高了膜的水蒸气透过系数, 使得膜的阻水性能变差。

2.8 绿豆皮纳米纤维素添加量对膜透光率的

影响

绿豆皮纳米纤维素添加量对膜透光率的影响如图8所示。随着绿豆皮纳米纤维素添加量的不断增加, 浓缩乳清蛋白膜的透光率呈现先增大后减小的趋势, 当绿豆皮纳米纤维素添加量为1%时, 膜透光率达到最大值39.31%。这是由于绿豆皮纳米纤维素添加到浓缩乳清蛋白膜中之后形成的致密网状结构阻止了光的散射, 从而提高了膜的透光率。当绿豆皮纳米纤维素添加量大于1%时, 由于过多绿豆皮纳米纤维素的自身团聚现象, 使得膜表面不再均匀光滑, 导致膜的透光率开始下降。

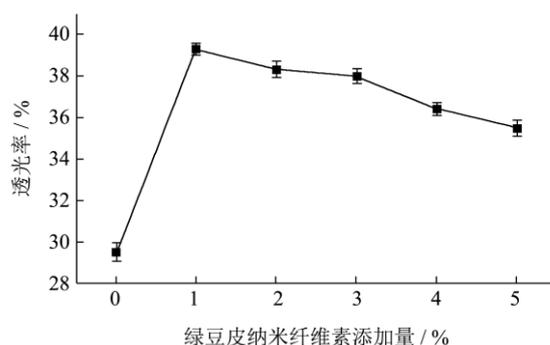


图8 绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白膜透光率影响

Fig.8 Effect of mung bean hull nanocrystalline cellulose on the transmittance of whey protein concentrate film

3 结论

3.1 绿豆皮纳米纤维素为棒状结构, 长度约为100~300 nm, 直径约为10~20 nm; X-射线衍射结果表明其仍具有典型纤维素I型结晶结构, 且结晶度明显提高。

3.2 由红外光谱分析结果可知, 添加绿豆皮纳米纤维素的膜C-H振动峰向低波数方向发生了偏移, 但并未产生新的峰, 这表明绿豆皮纳米纤维素与浓缩乳清蛋白分子间氢键作用增强, 相容性很好; 由扫描电镜结果可知, 绿豆皮纳米纤维素添加量为1%时, 膜表面较为光滑平整, 随着添加量的增大, 膜表面越来越粗糙, 并呈现出凹凸不平的现象。

3.3 随着绿豆皮纳米纤维素添加量的增大, 浓缩乳清蛋白膜抗拉强度和透光率呈现先增大后减小的趋势, 膜的氧气透过率和水蒸气透过系数呈现先减小后增大的趋势。当绿豆皮纳米纤维素添加量为1%时, 膜的

水蒸气透过系数达到最小值, 为 2.67×10^{-13} g/(cm s Pa); 膜的透光率达到最大值, 为 39.31%; 当绿豆皮纳米纤维素添加量为 2% 时, 膜的抗拉强度最大为 1.41 MPa, 此时断裂伸长率为 139.8%; 膜的氧气透过率达到最小值, 为 1.8×10^{-5} cm³/(m² d Pa)。

3.4 通过将绿豆皮纳米纤维素添加到浓缩乳清蛋白可食膜中, 能够有效的提高浓缩乳清蛋白膜的机械性能和物理性能, 使得浓缩乳清蛋白膜在食品包装等领域具有更好的应用前景, 同时也为绿豆皮纳米纤维素-浓缩乳清蛋白复合膜的制备提供了参考。

参考文献

- [1] 姬娜,熊柳,卜祥辉,等.可食性绿豆淀粉膜制作工艺的研究[J].中国粮油学报,2012,27(1):103-106
JI Na, XIONG Liu, BU Xiang-hui. Study on processing technology of edible mung bean starch film [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(1): 103-106
- [2] Duygu A, Evren A, Funda T. Physical, antibacterial and antioxidant properties of chitosan films incorporated with thyme oil for potential wound healing applications [J]. Journal of Material Science: Materials in Medicine, 2010, 21(7): 2227-2236
- [3] Furao L, Qibiao W, Lin L, et al. Antioxidant activities of water-soluble polysaccharide extracted from mung bean (*Vigna radiata* L.) hull with ultrasonic assisted treatment [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81: 323-329
- [4] Rosa M F, Medeiros E S, Maimonge J A, et al. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(1): 83-92
- [5] Henriette M C, de Azeredo. Nanocomposites for food packaging applications [J]. Food Research International. 2009, 42(9): 1240-1253
- [6] 隋思瑶,张宁,王亚静,等.超声波微波协同改性乳清蛋白/壳聚糖可食膜工艺优化[J].农业工程学报, 2014, 30(10): 254-261
SUI Si-yao, ZHANG Ning, WANG Ya-jing, et al. Process optimization for whey protein concentrate -chitosan edible films combined with ultrasonic/microwave assisting treatment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 254-261
- [7] Ewelina B, Sabina G, Andrzej L. Characterisation of composite edible films based on wheat starch and whey-protein isolate [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50: 372-380
- [8] 李晶晶,宋湛谦,李大纲,等.棉花纳米纤维素增强木塑复合材料[J].高分子材料科学与工程,2015,31(3):142-146
LI Jing-jing, SONG Zhan-qian, LI Da-gang, et al. Wood plastic composites reinforced with cotton cellulose nanofibers [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(3): 142-146
- [9] M P Arrieta, E Fortunati, F Dominici, et al. Multifunctional PLA-PHB/cellulose nanocrystal films: Processing, structural and thermal properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 107: 16-24
- [10] 任海伟,李金平,张铁,等.白酒丢糟制备微晶纤维素工艺优化及结构特性[J].现代食品科技,2013,29(10):2461-2468
REN Hai-wei, LI Jin-ping, ZHANG Tie, et al. Optimization of preparation conditions and structural properties of microcrystalline cellulose from distillers grains [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(10): 2461-2468
- [11] B Nasri-Nasrabadi, T Behzad, R Bagheri. Preparation and characterization of cellulose nanofiber reinforced thermoplastic starch composites [J]. Fibers and Polymers, 2014, 15(2): 347-354
- [12] Franciele M P, Paulo J A S, Florencia C M. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from banana peels [J]. Cellulose, 2014, 21: 417-432
- [13] 刘潇,董海洲,侯汉学.花生壳纳米纤维素的制备及其对淀粉膜性能的影响[J].中国粮油学报,2015,30(1):112-116
LIU Xiao, DONG Hai-zhou, HOU Han-xue. The preparation of peanut shell nanocellulose and the effects on the properties of starch films [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(1): 112-116
- [14] 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 whean-bran cellulose film [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(2): 183-191
- [15] 马中苏,隋思瑶,张宁,等.肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜性能的影响[J].现代食品科技,2015,31(2):113-118
MA Zhong-su, SUI Si-yao, ZHANG Ning, et al. Effects of cinnamaldehyde concentrations on the performance of whey protein concentrate -chitosan composite film [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(2): 113-118
- [16] Zhongping Song, Huiming Xiao, Yi Zhao. Hydrophobic-modified nano-cellulose fiber/PLA biodegradable composites for lowering water vapor transmission rate (WVTR) of paper [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 111: 442-448

现代食品科技