DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2022.08.001

不同亚麻籽胶添加量对大豆分离蛋白成膜性能的影响

胡海玥[1],石可歆[1],李海岭[2],李子来[2],袁哲[2],周彩莹[1],杨晨[1,3*],汪建明[1*]

(1. 天津科技大学 食品科学与工程学院,天津 300457;2. 山东天骄生物技术有限公司,山东 菏泽 274108;3. 优滋福(天津)食品科技有限公司,天津 300457)

摘 要:为探究亚麻籽胶添加量对大豆分离蛋白膜的作用机理,将不同添加量(0%、1%、2%、3%、4%、5%)的亚麻籽胶与大豆分离蛋白复配以制备复合膜,对复合膜成膜液的流变特性和粒径,以及复合膜的横截面微观结构、二级结构和热稳定性进行测定分析。结果表明,不同亚麻籽胶添加量的成膜液均为非牛顿流体,成膜液的储能模量G′和损耗模量G″随着亚麻籽胶添加量的增加而增大,且G′均大于其相应的G″,说明亚麻籽胶的添加使膜的网络结构变得更紧密,最高热失重分解温度提高;当亚麻籽胶添加量为3%时,蛋白质分子与亚麻籽胶形成氢键,膜横截面的微观结构显示,该变化可以使膜更加致密。当亚麻籽胶添加量为4%和5%时,过量的亚麻籽胶影响了蛋白质分子间的相互作用,使膜断面出现纹路,最高热失重分解温度下降,但仍比单一大豆分离蛋白膜高。

关键词:多糖;亚麻籽胶;大豆分离蛋白;复合膜;作用机理

Effects of Addition Amounts of Flaxseed Gum on the Film-Forming Properties of Soybean Protein Isolate

HU Hai-yue[1],SHI Ke-xin[1],LI Hai-ling[2],LI Zi-lai[2],YUAN Zhe[2],ZHOU Cai-ying[1],YANG Chen[1,3*],WANG Jian-ming[1*]

(1. Collage of Food Science and Engineering,Tianjin University of Science & Technology,Tianjin 300457,China;2. Shandong Tianjiao Biotech Co.,Ltd.,Heze 274108,Shandong,China;3. Useful Food Science and Technology Co.,Ltd.,Tianjin 300457,China)

Abstract:To explore the effects of addition amounts of flaxseed gum on soybean protein isolate membrane,the present study prepared a composite membrane by compounding flaxseed gum of different addition amounts (0%,1%,2%,3%,4%,and 5%) with soybean protein isolate. The rheological properties and particle size of the composite film-forming liquid,as well as the cross-sectional microstructure,secondary structure and thermal stability of the composite film were measured and analyzed. The results showed that film-forming liquids with different addition amounts of flaxseed gum were all non-Newtonian fluids. The storage modulus G′ and loss modulus G″ of the film-forming liquids increased with the increase in the addition of flaxseed gum,and G′ was greater than its corresponding G″,indicating that the addition of flaxseed gum made the network structure of the membrane tighter and the maximum thermogravimetric decomposition temperature increased. When the addition amount of flaxseed gum was 3%,protein molecules formed hydrogen bonds with flaxseed gum,and this change made the membrane denser as revealed by the cross-sectional microstructure. When the addition amounts of flaxseed gum were 4% and 5%,the excessive flaxseed gum affected the interaction between protein molecules,causing lines on the membrane section and lowering the maximum thermogravimetric decomposition temperature

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(32001626);天津市自然科学基金项目(18JCYBJC43700);天津市合成生物技术创新能力提升行动重大科技攻关任务(TSBICIP-KJGG-004-09);山东省自然基金项目(ZR2020KC029)

作者简介:胡海玥(1997—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品科学与营养。

*通信作者:杨晨(1984—),女(汉),副教授,博士,研究方向:食品科学、食品胶体;汪建明(1972—),女(汉),教授,博士,研究方向:食品科学与营养、农产品加工。

which was still higher than that of a single soybean protein isolate membrane.
Key words: polysaccharide; flaxseed gum; soybean protein isolate; composite membrane; action mechanism

引文格式:
胡海玥,石可歆,李海岭,等.不同亚麻籽胶添加量对大豆分离蛋白成膜性能的影响[J].食品研究与开发,2022,43(8):1-8.
HU Haiyue, SHI Kexin, LI Hailing, et al. Effects of Addition Amounts of Flaxseed Gum on the Film-Forming Properties of Soybean Protein Isolate[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 1-8.

随着现代食品工业科学技术的不断更新与发展,可食用膜作为一种具有可降解性能的环保新型食品包装出现在人们的视野中。同时,为了增加其柔韧性并降低脆性,常使用甘油、山梨糖醇等作为增塑剂,降低聚合物分子间的内聚力,增加聚合物链的流动性[1]。将各类可食用的材料应用于食物保鲜方面具有非常悠久的历史,比如将食用蜡涂抹在食品表面用于保鲜,但保鲜效果不佳[2]。

大豆分离蛋白(soybean protein isolate,SPI)是一种常见的食品添加剂,多数以低温脱溶大豆粕为原料生产,其蛋白质含量在 90%以上,蛋白质内部存在氢键、肽键、疏水键、二硫键、离子键等化学结构,具有一定的稳定性,并含有人体必需氨基酸[3-4]。SPI 来源广泛,具有良好的成膜能力[5-6]。但是单一的 SPI 膜存在机械强度不足、功能性较差[7]等缺点,从而导致其应用范围受到限制。Yan 等[8]研究 SPI 与多酚结合物的形成对蛋白质结构和乳化性能的影响,结果表明表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate,EGCG)的加入改变了 SPI 多肽链的二级结构和三级构象,可见 β-链含量减少,α-螺旋和无规则卷曲含量增加。SPI 与 EGCG 以质量比 3:200 共价结合后,复合物表现出最佳的溶解性和乳化性能。阳晖[7]通过探究仙草胶对可食性蛋白膜功能特性的影响及作用机理,发现仙草胶和蛋白质分子之间存在着相互作用,如共价交联和分子间氢键作用,添加适量仙草胶会使蛋白膜中无序结构减少,而有序结构增加;而添加过量仙草胶会破坏膜的结构,导致无序结构增加。因此,以 SPI 为成膜基质,添加其他具有功能性的物质,能够提高膜的物理-机械强度和增加功能性。亚麻籽胶(faxseed gum,FG)是一种绿色安全的食品添加剂,由国家绿色食品发展中心认定[9-10],在食品工业中,因其具有良好的增稠性、乳化性和乳化稳定性[11],被广泛用作增稠剂、乳化剂和稳定剂[12-13]。一般来说,在食品配方中添加增稠剂会改变其流变特性,通过增加增稠剂的浓度,不仅会增加流体的剪切黏度,还会增加流体的拉伸黏度[14]。Jiang 等[15]利用 FG 和魔芋葡甘聚糖制备新型复合凝胶的水胶体,研究结果表明,复合凝胶的微观结构变得致密,孔径变小;FG 和魔芋葡甘聚糖分子链之间表现出强烈的相互作用和协同效应。

本研究以 SPI 作为成膜基质,探究不同 FG 添加量对 SPI 膜的作用机理,将 SPI 与 FG 以不同质量比复配,以甘油为增塑剂制备复合膜,对复合膜的横截面微观结构、二级结构、热稳定性进行分析,并对成膜液的流变特性、粒径进行测定。本研究旨在为今后研究多糖与 SPI 的作用机制提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

SPI(98%,食品级):山东万得福生物科技有限公司;FG(99%,食品级):浙江一诺生物科技有限公司;甘油(食品级):天津津东天正精细化学试剂厂;氢氧化钠(分析纯):天津市津科精细化工研究所;溴化钠(分析纯):天津市华东试剂厂。

1.2 仪器与设备

HJ-6A 恒温磁力搅拌器:上海易友仪器有限公司;GZX-9030MBE 电热鼓风干燥箱:上海博旭医疗生物仪器股份有限公司;D-500 高剪切分散均质机:德国维根技术(北京)有限公司;FGG1800 通风橱:武汉贝科科技股份有限公司;NICOLET IS50 傅里叶变换红外光谱仪:德国 Thermo Scientific 公司;SU1510 扫描电子显微镜:日本 Hitachi 公司;Q50 热重分析仪:美国 TA Instruments 有限公司;Bettersize2600 激光粒度分析仪:黑龙江丹东百特仪器有限公司;MARS60 动态流变仪:德国 HAAKE 有限公司。

1.3 FG/SPI 成膜液及复合膜的制备

准确称取 SPI 粉末 5 g,溶于 100 mL 蒸馏水中,磁

力搅拌 10 min 至 SPI 完全溶解，调节 pH 值至 10，加入 2 mL 甘油，放入 80 ℃水浴锅搅拌加热 30 min，将 FG按照 0%、1%、2%、3%、4%、5%的添加量与 SPI 充分混合（分别用 FG-0、FG-1、FG-2、FG-3、FG-4、FG-5 表示），继续加热 30 min，然后均质 5 min，冷却至室温（25 ℃），静置 30 min，获得成膜液，备用。

将 70 mL 成膜液倒入 20 cm×20 cm 的亚克力平板上，铺匀，放入通风橱内干燥 24 h 后取出揭膜。将膜放入装有饱和 NaBr 溶液的干燥器中，平衡 2 d 后进行测定。

1.4 成膜液流变特性测定

参考 Murillo-Martínez 等[16]的方法，并稍作修改。取一定量的成膜液滴于动态流变仪测试台平行板上，选用 CP50 锥板，将平行板的间距设定为 1 mm，在 25 ℃下进行试验。在静态流变性能测定中，设定模式为控制速率，将剪切速率设置为 0.01 s^{-1}~100 s^{-1}。测定动态流变性能时，先对成膜液进行应变扫描，确定成膜液的线性黏弹性区，频率为 10 Hz~0.1 Hz。设定模式为控制应变，测定成膜液的储能模量（G′）和损耗模量（G″）。

1.5 成膜液粒径测定

参考 Zuo 等[17]的方法，用激光粒度分析仪测定分析成膜液的粒径分布。分散相和水的折射率分别为 1.570 和 1.333，测试温度为 25 ℃。在分析前用蒸馏水将样品稀释至 1/1 000。

1.6 膜横截面的微观结构观察

应用扫描电子显微镜观察膜的横截断面，将样品用液氮进行淬断，用导电胶将膜垂直固定于载物台上，喷金，将断面放大 1 000 倍观察。

1.7 膜的红外光谱检测

应用傅里叶变换红外光谱仪采集蛋白膜在 4 000 cm^{-1}~400 cm^{-1} 的红外吸收光谱，应用衰减全反射附件，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数为 32[18]。

1.8 膜的热失重分析

参考雷会宁[19]的方法，应用热重分析仪测定膜的热失重曲线，称取 5 mg~8 mg 膜样品，以氮气为载气，测定温度为 0 ℃~600 ℃，升温速率为 20 ℃/min。

1.9 数据统计分析方法

采用 SPSS 23.0 软件进行方差分析和差异显著性分析。试验所得数据利用 Excel 进行数据整理，通过 Origin 2018 软件对试验数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 FG 添加量对成膜液静态流变特性的影响

成膜液的流变学行为与其性质和结构有着很强的关联性[7]。如果成膜液的黏度过高，可能会导致成膜时膜内气泡难以消除，但如果黏度过低，成膜时膜的厚度会较薄，导致性能的降低。不同 FG 添加量对成膜液表观黏度的影响如图 1 所示。

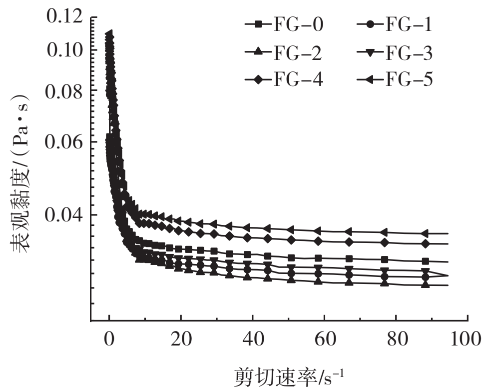


图 1 不同 FG 添加量对成膜液表观黏度的影响

Fig.1 The effect of different FG addition amount on the apparent viscosity of film-forming liquid

所有样品在剪切速率为 0.1 s^{-1}~100 s^{-1} 时均表现出剪切稀化现象，属于假塑性流体（非牛顿流体）。这种现象主要是由于成膜液内部结构随着剪切速率增加而被破坏，导致黏度降低[20]。由图 1 可知，与 FG-0 成膜液相比，FG-1 、FG-2 和 FG-3 成膜液的表观黏度略有下降，可能是由于 FG-0 成膜液表现出了弱凝胶状态[15]，而 FG 的添加，阻碍了 SPI 自身的作用，使空间位阻效应发生，导致这种弱凝胶状态被破坏，从而造成成膜液表观黏度的下降[21]。阳晖[7]在仙草胶/SPI 成膜液中也发现添加少量的仙草胶会使蛋白质与仙草胶成膜液表观黏度降低，推测是仙草胶会引起蛋白质交联，使有效分子体积增大。在制备成膜液的过程中，添加 FG 后继续加热 30 min，这时，FG 和 SPI 易发生美拉德反应[20]，使蛋白质发生交联，增大其分子的有效体积[22]，也会使成膜液的表观黏度降低。而 FG-4 和 FG-5 成膜液的表观黏度与 FG-0 成膜液相比有了提升，原因可能是过量的 FG 未能与 SPI 作用。根据 Liu 等[14]的研究结果，FG 是一种阴离子杂多糖，D-木糖、L-阿拉伯糖、D-葡萄糖、L-半乳糖、D-半乳糖醛酸和 L-鼠李糖是 FG 的主要成分。FG 作为一种水胶体，具有明显的保水能力和流变特性，以及弱凝胶性能，可以与水反应，使更多的水分子被固定，从而导致表观黏度的增加。

2.2 FG 添加量对成膜液动态流变特性的影响

动态流变学可以反映各种组分之间的相互作用和结构特征[23]。因此，应用小幅度振荡剪切，研究 FG 添加量对成膜液动态流变特性的影响。图 2 为 FG 添加量对成膜液 G′和 G″的影响。

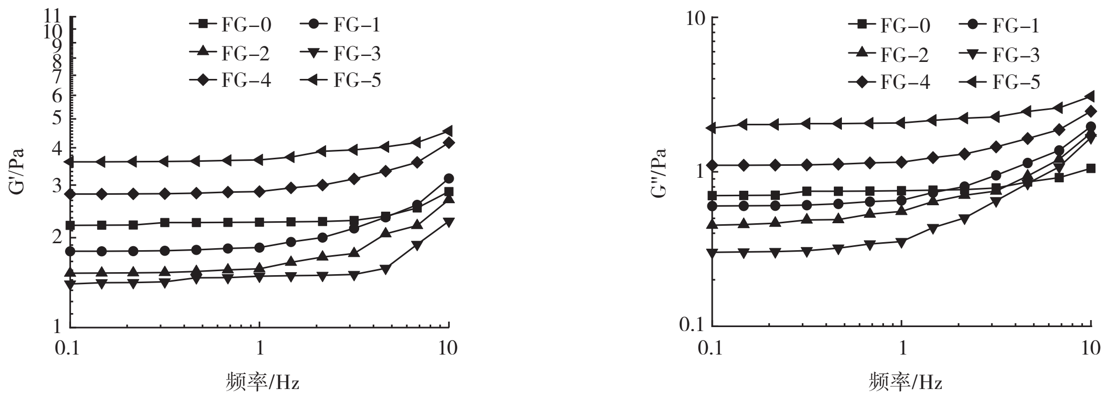


图 2　不同 FG 添加量对成膜液 G′和 G″的影响

Fig.2　The effect of different FG addition amount on the G′ and G″ of film-forming liquid

由图 2 可知，所有成膜液的储能模量（G′）和损耗模量（G″）均随着频率升高而逐渐增大，因此所有的成膜液都可以被认为是弹性弱凝胶。在 0.1 Hz~10 Hz 频率范围内，所有成膜液的 G′都大于其相应的 G″，表示成膜液的不可逆变性程度小于可逆变性程度，即弹性行为大于黏性行为。这种现象可能是由于分子链有足够的时间在低频下解开和重新排列[15]，表明成膜液是黏性流体。因为缠结点在临时交联连接区中发挥作用，所以分子链在高频下解开的时间较短[24]。但是由于在胶体悬浮液中不存在纠缠效应，这意味着 FG 和 SPI 具有良好的相容性，这两个组分之间具有紧密的交联网络结构[25]。当 FG 添加量为 1%~3%时，FG 中的亲水基团[13]减弱了 SPI 分子自身之间的相互作用，减少凝集。Guerrero 等[26]研究发现，添加少量的多糖会导致蛋白质分子之间的作用被减弱。而 FG-4 和 FG-5 成膜液的 G′和 G″高于 FG-0，FG 有很强的吸水性，其水溶液具有较高的黏度，该现象可能与过量的未与 SPI 反应的 FG 有关，即过量的 FG 抑制了 SPI 分子之间的相互作用[27]，影响 SPI 的凝胶结构，从而增大成膜液的 G′和 G″值。

2.3　FG 添加量对成膜液粒径的影响

动态光散射可以在一定程度上反映 FG 对成膜液中粒径分布的影响。图 3 是不同 FG 添加量对复合膜成膜液粒径的影响。

由图 3 可知，不同成膜液的粒径分布均呈现双峰状态。FG-0 成膜液的粒径为 14.86 μm，随着 FG 添加量的增大，成膜液的平均体积也随之发生变化，在添加量为 0%~2%时，粒径随 FG 添加量增加而增大，FG-1 粒径为 33.47 μm，FG-2 粒径为 55.62 μm，FG-3 粒径为 58.38 μm。这可能是因为 FG 与 SPI 相互作用并聚集[28]，致使粒径增大。当 FG 添加量大于 3%时，成膜液的粒径增加量变大，FG-4 的粒径为 75.67 μm，FG-5

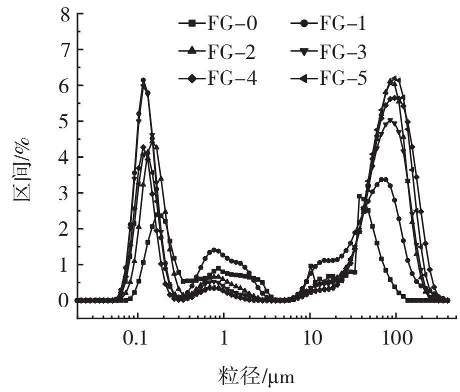


图 3　FG 添加量对成膜液粒径的影响

Fig.3　The effect of FG addition amount on the particle size of the film-forming liquid

的粒径下降至 68.44 μm，这种现象可能是由于大量的 FG 不能与蛋白质分子交联，从而导致 FG 自身聚集，使成膜液的粒径增大，从而证明了流变学中当 FG 添加量大于 3%时的成膜液黏度增大这一推测。所有添加 FG 的成膜液的粒径均大于单一 SPI 成膜液。

2.4　FG 添加量对膜断面微观结构的影响

膜断面的微观结构可以在一定程度上反映膜是否具有均一性和致密性[29]。FG/SPI 复合膜横截断面微观结构如图 4 所示。

由图 4 可知，所有膜的横截断面均表现出了较为紧密的状态，不同的 FG 添加量对其膜断面的纹理有一定的影响。FG-3 的断面最为平整，其余 FG 添加量的膜均存在一定程度上呈现鳞片状或条纹的纹理，但均匀致密，没有出现 FG 与 SPI 不融合的情况，说明成膜液中的各组分之间相容性较好。单一 SPI 膜（FG-0）、FG-1 和 FG-2 的横截面有一定的褶皱，原因可能是 FG 添加量不足，大多数蛋白质分子未与 FG 发生交联，蛋白质分子之间形成了作用力，出现了聚集的趋势。

FG-3 的横截断面平整，无明显纹理或突起，这可

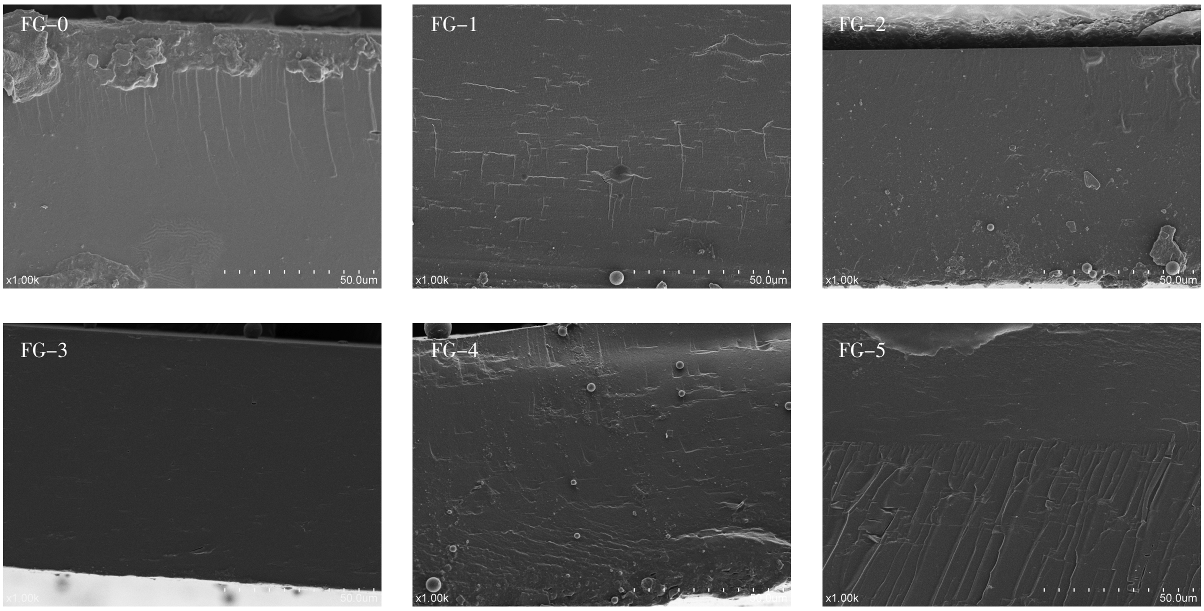


图 4 FG/SPI 复合膜断面扫描电镜图(1 000×)

Fig.4 Scanning electron micrograph of cross-section of FG/SPI composite film (1 000×)

能是因为当 FG 添加量为 3%时,减弱了 SPI 分子之间的相互作用。当 FG 添加量大于 3%时,即 FG-4 和 FG-5 的复合膜横截面也出现了褶皱,根据对成膜液流变特性的测定,发现 FG-4 和 FG-5 的成膜液黏度较高,导致其成膜比 FG 添加量为 0%~3%的成膜液要困难,不容易形成均一稳定的体系,这个现象与张盼[30]的研究结论相似。也可能是 FG 之间的作用使其出现了团聚的现象,从而使膜的横截面变得不均匀,影响其宏观性质。

2.5 FG 添加量对膜二级结构的影响

采用傅里叶变换红外光谱分析研究 FG 添加量对膜二级结构的影响,结果见图 5。

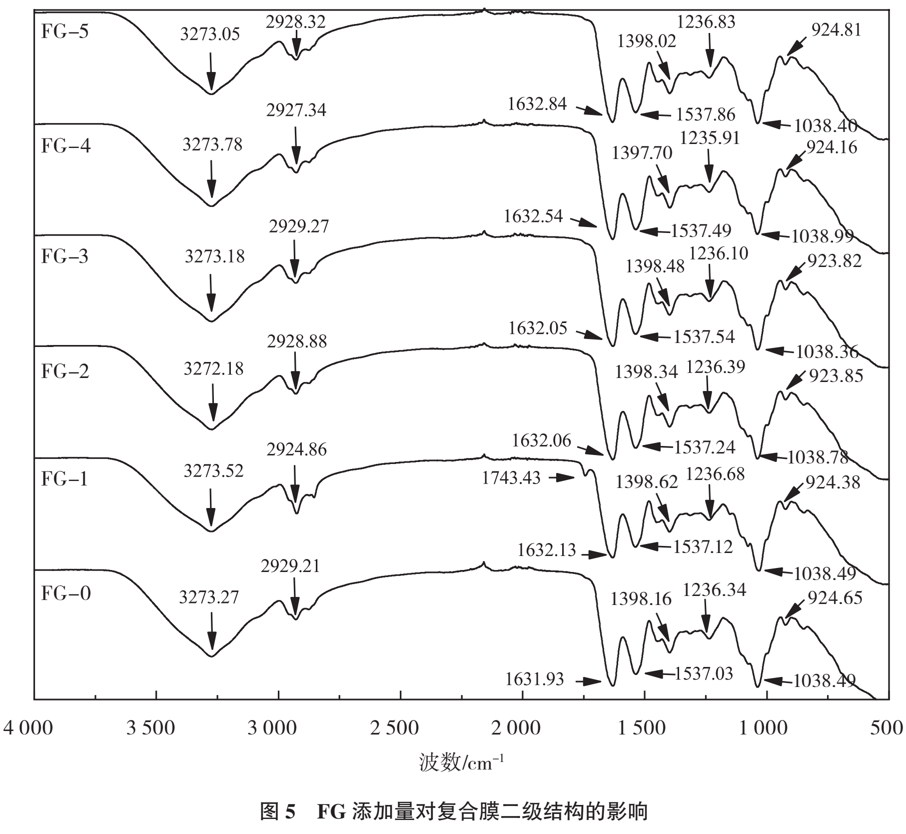


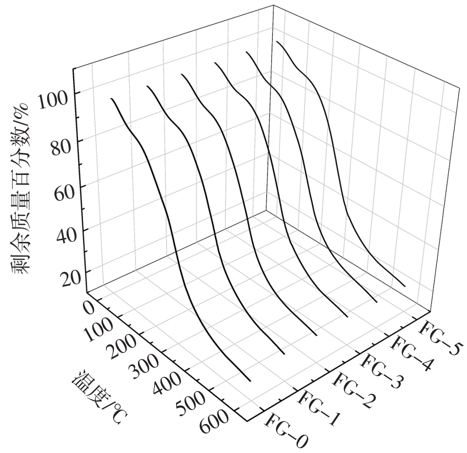
图 5 FG 添加量对复合膜二级结构的影响

Fig.5 The effect of FG addition amount on the secondary structure of the composite film

所有膜样品在 1 031 cm^{-1}~1 039 cm^{-1} 处都显示出一个特征性吸收峰，这是在制作膜过程中所添加的甘油的特征峰[17]。所有膜样品在酰胺Ⅰ带和酰胺Ⅱ带处均显示特征峰。3 270 cm^{-1}~3 273 cm^{-1} 主要反映了分子间羟基的伸缩振动变化[31]。2 923 cm^{-1}~2 924 cm^{-1} 代表的是$-CH_2$ 拉伸。添加了 FG 后，3 273 cm^{-1} 处峰位置和强度的细微变化表明了氢键的产生[32]，证明了 SPI 和 FG 之间存在氢键的相互作用。1 630 cm^{-1}~1 650 cm^{-1} 代表的是 C=N 伸缩振动峰，这里的形状也发生了细微的改变，而这种改变在 FG-2 时最大，代表有一定的美拉德反应在 FG 和 SPI 之间产生，从而导致结构的改变。由此可得，FG 对 SPI 膜的化学结构有一定的影响。化学结构的变化，可以引起膜宏观性质的改变，在对膜的横截面微观结构进行观察时发现，FG-3 的膜横截面相较其他膜而言较为均一致密，也与氢键的产生有关[33]。

2.6 FG 添加量对膜热稳定性的影响

测定材料的热失重分解温度可以判断其热稳定性[18]。FG 添加量对复合膜热重（thermal gravimetry，TG）和差热重（differential thermal gravimetry，DTG）曲线的影响如图 6 所示。



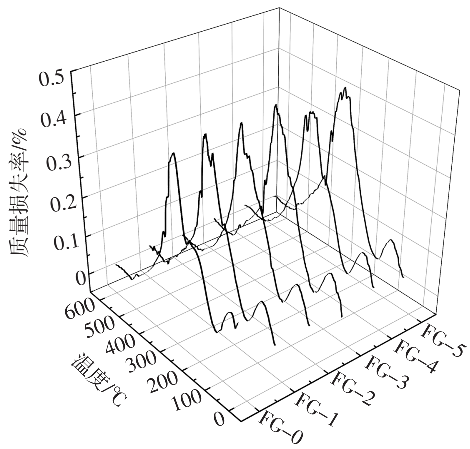


图 6 FG 添加量对复合膜 TG 和 DTG 曲线的影响

Fig.6 The effect of FG addition amount on the TG and DTG curves of composite film

由图 6 可知，所有膜均经历了 3 个阶段的热损失。25 ℃至 100 ℃为第一个热降解阶段，这个阶段的质量损失主要是因为膜中的水分蒸发。100 ℃至 250 ℃为第二个热降解阶段，此阶段主要为增塑剂甘油的蒸发；250 ℃以上为第三个热降解阶段，此阶段为蛋白质和 FG 的损失阶段。

热失重分解温度的最高点，可以在一定程度上代表膜的耐高温性能[34]。FG 添加量为 0%时，即 FG-0，其热失重分解温度最高点为 285.00 ℃；随着 FG 添加量的增大，复合膜的最高热失重分解温度呈现先上升（FG-1 为 310.36 ℃，FG-2 为 312.65 ℃，FG-3 为 317.84 ℃）后下降（FG-4 为 298.38 ℃，FG-5 为 297.87 ℃）的趋势。但添加了 FG 的复合膜的耐高温性能均优于单一的 SPI 膜。当 FG 添加量为 4%和 5%时，最高热失重分解温度周围均有与之相近的峰，这可能代表的是未与 SPI 结合的 FG 的分解温度峰。

3 结论

本文探究了不同 FG 添加量（0%~5%）对 SPI 膜的作用机理，通过对成膜液特性进行探究，发现所有成膜液均属于假塑性流体，弹性行为大于黏性行为，说明 FG 与 SPI 具有良好的相容性，具有较为紧密的网络结构，添加了 FG 的复合膜的热稳定性能均较单一的 SPI 膜有了提升，最高热失重分解温度从 FG-0 的 285.00 ℃，提升至 FG-3 的 317.84 ℃。粒径结果显示，FG 与 SPI 可以产生聚集体。但是当添加量为 4%和 5%时，未能与 SPI 分子发生反应的 FG 阻碍 SPI 分子之间的相互作用，导致膜的断面重新出现纹理，最高热失重分解温度下降，化学反应减弱。扫描电镜分析表明，所有膜的断面均为紧密的状态，当 FG 添加量为 3%时，复合膜的断面无明显纹理或突起。通过红外光谱分析，FG 可以与 SPI 产生一定的氢键相互作用，从而提升膜的各种性能。本研究探究了 FG 对 SPI 成膜液以及复合膜的影响，可为今后深入研究 FG 对蛋白质成膜特性影响提供一定的参考。

参考文献：

[1] PELISSARI F M, ANDRADE-MAHECHA M M, SOBRAL P J D A, et al. Optimization of process conditions for the production of films based on the flour from plantain bananas (*Musa paradisiaca*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 52(1): 1-11.

[2] BHARTI S K, PATHAK V, ALAM T, et al. Materiality of edible film

packaging in muscle foods: A worthwhile conception[J]. Journal of Packaging Technology and Research, 2020, 4(1): 117-132.

[3] WANG C, JIANG L Z, WEI D X, et al. Effect of secondary structure determined by FTIR spectra on surface hydrophobicity of soybean protein isolate[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 4819-4827.

[4] MORIYAMA T, KISHIMOTO K, NAGAI K, et al. Soybean β-conglycinin diet suppresses serum triglyceride levels in normal and genetically obese mice by induction of β-oxidation, downregulation of fatty acid synthase, and inhibition of triglyceride absorption[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2004, 68(2): 352-359.

[5] WANG H X, HU D Y, MA Q Y, et al. Physical and antioxidant properties of flexible soy protein isolate films by incorporating chestnut (*Castanea mollissima*) bur extracts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 33-39.

[6] WANG X S, TANG C H, LI B S, et al. Effects of high-pressure treatment on some physicochemical and functional properties of soy protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(4): 560-567.

[7] 阳晖. 仙草胶对可食性蛋白膜功能特性的影响及作用机理[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
YANG Hui. Effects of hsian-tsao gum upon functional properties of edible protein-based films and their mechanism[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.

[8] YAN S Z, XIE F Y, ZHANG S, et al. Effects of soybean protein isolate-polyphenol conjugate formation on the protein structure and emulsifying properties: Protein-polyphenol emulsification performance in the presence of chitosan[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 609: 125641.

[9] HU Y X, SHIM Y Y, REANEY M J T. Flaxseed gum solution functional properties[J]. Foods, 2020, 9(5): 681.

[10] 何婵, 马宏伟. 亚麻籽胶对小麦面团结构和功能特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(2): 89-92.
HE Chan, MA Hongwei. Effects of flaxseed gum on the structure and functional properties of wheat dough[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(2): 89-92.

[11] VIEIRA J M, ANDRADE C C P, SANTOS T P, et al. Flaxseed gum-biopolymers interactions driving rheological behaviour of oropharyngeal dysphagia-oriented products[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106257.

[12] LIU D Y, ZHANG L L, WANG Y C, et al. Effect of high hydrostatic pressure on solubility and conformation changes of soybean protein isolate glycated with flaxseed gum[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127530.

[13] 白英, 王昕, 张琳璐. 亚麻籽胶的提取及特性研究进展[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 217-223.
BAI Ying, WANG Xin, ZHANG Linlu. Extraction and physical properties of flaxseed gum[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(11): 217-223.

[14] LIU J, SHIM Y Y, TSE T J, et al. Flaxseed gum a versatile natural hydrocolloid for food and non-food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 146-157.

[15] JIANG Y Y, REDDY C K, HUANG K H, et al. Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 1156-1163.

[16] MURILLO-MARTÍNEZ M M, PEDROZA-ISLAS R, LOBATO-CALLEROS C, et al. Designing W1/O/W2 double emulsions stabilized by protein-polysaccharide complexes for producing edible films: Rheological, mechanical and water vapour properties[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(4): 577-585.

[17] ZUO F, PENG X Y, SHI X D, et al. Effects of high-temperature pressure cooking and traditional cooking on soymilk: Protein particles formation and sensory quality[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 50-56.

[18] MOHAMMADIAN M, MOGHADDAM A D, SHARIFAN A, et al. Structural, physico-mechanical, and bio-functional properties of whey protein isolate-based edible films as affected by enriching with nettle (*Urtica dioica* L.) leaf extract[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(5): 4051-4060.

[19] 雷会宁. 大豆分离蛋白复合膜制备及应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
LEI Huining. Researches on preparation and application of soy protein isolated composite film[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2015.

[20] HOPKINS E J, CHANG C, LAM R S H, et al. Effects of flaxseed oil concentration on the performance of a soy protein isolate-based emulsion-type film[J]. Food Research International, 2015, 67: 418-425.

[21] ZHU F. Polysaccharide based films and coatings for food packaging: Effect of added polyphenols[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129871.

[22] 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.

[23] ZHANG L M, LIU Z L, HAN X B, et al. Effect of ethanol content on rheology of film-forming solutions and properties of zein/chitosan film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 807-814.

[24] 樊彦玲. 基于果胶/海藻酸钠/黄原胶的可食性膜的制备及应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
FAN Yanling. Preparation and application of edible film based on pectin/sodium alginate/xanthan gum[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.

[25] DAI L M, ZHANG J, CHENG F. Cross-linked starch-based edible coating reinforced by starch nanocrystals and its preservation effect on graded Huangguan pears[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125891.

[26] GUERRERO P, KERRY J P, DE LA CABA K. FTIR characterization of protein-polysaccharide interactions in extruded blends[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 111: 598-605.

[27] ÇAKıR E, FOEGEDING E A. Combining protein micro-phase separation and protein-polysaccharide segregative phase separation to

produce gel structures[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(6): 1538-1546.

[28] 孙阳, 张利铭, 刘战丽, 等. 油酸对壳聚糖/玉米醇溶蛋白膜性能的影响[J]. 精细化工, 2019, 36(12): 2378-2384.
SUN Yang, ZHANG Liming, LIU Zhanli, et al. Effect of oleic acid on the properties of chitosan/zein blend film[J]. Fine Chemicals, 2019, 36(12): 2378-2384.

[29] CHILLO S, FLORES S, MASTROMATTEO M, et al. Influence of glycerol and chitosan on tapioca starch-based edible film properties[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(2): 159-168.

[30] 张盼. 可食性多糖基材抗菌包装膜的制备及应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
ZHANG Pan. Preparation and application of edible polysaccharide antibacterial packaging film[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2018.

[31] WONGSASULAK S, TONGSIN P, INTASANTA N, et al. Effect of glycerol on solution properties governing morphology, glass transition temperature, and tensile properties of electrospun zein film[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010: 118(2): 910-919.

[32] HAN D L, YAN L F, CHEN W F, et al. Preparation of chitosan/graphene oxide composite film with enhanced mechanical strength in the wet state[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 653-658.

[33] WANG Z, KANG H J, ZHANG W, et al. Improvement of interfacial interactions using natural polyphenol-inspired tannic acid-coated nanoclay enhancement of soy protein isolate biofilms[J]. Applied Surface Science, 2017, 401: 271-282.

[34] 胡诚成, 倪勇. 热失重法快速评估交联聚乙烯材料热老化寿命的可靠性研究[J]. 电线电缆, 2021(3): 16-18, 27.
HU Chengcheng, NI Yong. Reliability study on rapid evaluation of thermal aging life of cross-linking polyethylene by thermogravimetry[J]. Wire & Cable, 2021(3): 16-18, 27.

加工编辑:王艳
收稿日期:2021-09-15