

高压均质对油脂预乳化大豆拉丝蛋白素食香肠质构特性的影响

黄培文, 陈林*, 丁婷, 陈琪华, 罗斌, 叶思源

(广东工业大学轻工化工学院食品系, 广州 510006)

摘要: 为了将预乳化工艺更好应用于大豆拉丝蛋白 (Textured Fibril Soy Protein, TFSP) 素食香肠的加工, 该研究通过采用不同的蛋白乳化剂和调控均质条件, 探究预乳化油脂对 TFSP 素食香肠流变特性、质构和微观结构的影响。结果发现随着均质压力从 0 增大到 30 MPa, 大豆分离蛋白 (Soybean Protein Isolate, SPI) 乳液和酪蛋白酸钠 (Sodium Caseinate, SC) 乳液的表现黏度都逐渐增大, SPI 乳液粒径为 24.80~0.39 μm , SC 乳液粒径为 12.37~0.12 μm 。对 TFSP 素肉糜进行温度扫描和频率扫描结果发现, 所有的素肉糜在蒸煮后都形成了具有黏弹性的乳液凝胶, 并且预乳液的均质压力越大, 素肉糜的弹性模量越大。沃-布剪切测试和质构特性 (Texture Profile Analysis, TPA) 测试发现, TFSP 素食香肠的剪切力和 TPA 质构特性都随着预乳液均质压力的增大而增大。采用激光共聚焦显微镜观察分析了不同预乳液和 TFSP 素食香肠的微观结构, 当预乳化的均质压力为 0~20 MPa 时, SC 乳液制备的 TFSP 素食香肠在蒸煮后发生了明显的乳液滴聚结; 然而 SPI 乳液制备的 TFSP 素食香肠在蒸煮后表现出对抗乳液滴聚结的能力强。因此, 采用 SPI 对植物油脂进行预乳化过程中, 均质压力为 20 MPa 时, 可以有效提升 TFSP 素食香肠的切片性和质构特性, 研究结果为油脂预乳化工艺在素食产品中的开发和应用提供参考。

关键词: 高压均质; 质构; 素食香肠; 油脂预乳化; 大豆分离蛋白; 酪蛋白酸钠

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.029

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-19-0269-08

黄培文, 陈林, 丁婷, 等. 高压均质对油脂预乳化大豆拉丝蛋白素食香肠质构特性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 269-276. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.029 <http://www.tcsae.org>

Huang Peiwen, Chen Lin, Din Ting, et al. Effects of pre-emulsification of oil treated by high pressure homogenization on the texture properties of textured fibril soy protein vegetarian sausages[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 269-276. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.029 <http://www.tcsae.org>

0 引言

与非素食者相比, 西方素食者的身体质量指数、血浆胆固醇浓度和缺血性心脏病死亡率都较低^[1]。有研究表明, 肉食者产生的二氧化碳当量排放 (7.19 kg/d) 是纯素食者 (2.89 kg/d) 的 2 倍以上^[2]。因此, 不管从环境的可持续性、健康和动物保护方面, 都推动了植物性食品的增长。植物基肉制品市场预计从 2018 年的 46 亿美元增加到 2026 年的 309 亿美元^[3]。素食者主要是以蔬菜、谷物、坚果、豆类和水果等膳食纤维含量较高, 脂肪含量较少的食品为主, 对非全素食者, 即蛋素、奶素食者有时还包括鸡蛋和乳制品等。在素食类产品中, 主要是通过热挤压加工技术, 使植物蛋白聚集成颗粒和各向异性的纤维状结构, 赋予产品类似肉的质地和口感^[3], 例如大豆拉丝蛋白 (Textured Fibril Soy Protein, TFSP)、大豆组织蛋白 (Textured Soybean Protein, TSP)、小麦面筋蛋白 (Vital Wheat Gluten, VWG) 等。

预乳化型香肠是将油或脂肪制备成预乳液, 然后添加到肉糜中制作而成的肉制品^[4]。与直接添加油脂相比, 使用预乳化工艺可以大大提高油脂分布的均匀性和蛋白质的稳定性, 从而提高产品的质构特性^[4]。素食香肠通常是添加液态的植物油, 采用传统的搅拌混合加工工艺, 很难形成具有动物肉制品中黏弹性网络凝胶, 导致质构松软, 出水出油率高。通过食品乳化剂如大豆分离蛋白 (Soybean Protein Isolate, SPI)、酪蛋白酸钠 (Sodium Caseinate, SC) 等, 将油脂预乳化形成乳液, 再添加到其他原辅料中可以有效提高香肠的凝胶网络结构, 并具有较高的持水持油率。根据 Youssef 等^[5]报道, 脂肪颗粒越小制备的香肠硬度越高; Li 等^[6]也指出小脂肪球的蛋白凝胶具有更高的凝胶强度。因此, 乳液的粒径大小可能对素食香肠的质构也有一定的影响。

高压均质 (High Pressure Homogenization, HPH) 是通过高压增压器将液体以高速穿过狭窄间隙, 从而产生空化、剪切等作用, 将液体中的颗粒均质化成更小液滴的加工技术^[7]。HPH 已经被广泛用于乳液的稳定和加工中, 通过控制 HPH 的压力、次数等制备出粒径分布范围窄的乳液颗粒。Cha 等^[8]报道了通过 HPH 可以大大减小乳液的液滴尺寸; Hogan 等^[9]报道了乳液液滴的大小随着均质压力的增加而减小。但是, 对于采用高压均质控制预乳化油脂的粒径大小进一步改善素食产品质构特性的

收稿日期: 2022-05-16 修订日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31601416); 广东省科技计划项目 (2017A020208064)

作者简介: 黄培文, 研究方向为食品生物技术。Email: gduhpw@126.com
*通信作者: 陈林, 博士, 副教授, 研究方向为食品生物技术、蛋白质化学工程。Email: l.chen@gdut.edu.cn

研究, 还未见报道。因此, 本文的研究目的是采用 SPI、SC 两种乳化剂制备预乳液, 通过控制 HPH 的压力来改变预乳液油滴的大小, 研究不同 HPH 下的预乳液对 TFSP 素食香肠的流变学特性、质构、微观结构的影响, 以期油脂预乳化工工艺在素食产品中的应用提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

SPI 由上海昊一有限公司提供 (品牌: 御馨 C05)。SC 购于恒天然乳品有限公司。大豆油、瓜尔豆胶、马铃薯淀粉购自广州 (中国) 当地一家超市。TFSP 购自百川食品有限公司。卡拉胶由北连生物科技有限公司提供。

1.2 主要仪器和设备

FS-2 可调高速匀浆机, 常州国华电器有限公司; DF-101S 集热式磁力搅拌器, 金坛市城东新瑞仪器厂; 超高压纳米均质机 AH-NANO, ATS 工业系统有限公司; 马尔文 MasterSizer 3000 激光粒度分析仪, 英国马尔文仪器有限公司; 安东帕旋转流变仪 MCR-301, 奥地利安东帕 (中国) 有限公司; TA.XTC-18 质构仪, 上海保圣实业发展有限公司; 蔡司 LSM800 激光共聚焦显微镜, 德国卡尔蔡司公司。

1.3 高压均质制备预乳化油脂

根据前期研究, 将 SPI 和 SC 分别以 50.0、40.0 g/L 的浓度分散于去离子水中, 于室温下搅拌 2 h 使其充分水合。SPI 和 SC 溶液中分别加入 40% (体积分数)、50% (体积分数) 的大豆油, 用高速匀浆机 10 000 r/min 转速下搅拌 2 min, 得到预乳液。预乳液在高压均质机 0~30 MPa 条件下均质 2 次, 得到乳液的粒径大小受均质压力控制的乳液样品, 用于进一步分析。

1.4 乳液粒度分布和平均粒径的测定

使用马尔文 MasterSizer 3000 激光粒度分析仪测定乳液粒径分布和平均粒径。参数设置为: 分析模式-通用; 进样器名称: Hydro LV; 颗粒吸收率: 0.001; 分散剂: 水; 分散剂折射率: 1.330; 遮光度为 8%~15%。乳液的粒度分布由仪器自带软件绘制得到, 平均粒径表示为表面积平均粒径 $d_{3,2}$; 每个样品重复测量 3 次, 结果取平均值。

1.5 流变特性

1.5.1 乳液样品的表观黏度

乳液样品的表观黏度采用安东帕 MCR-301 旋转流变

仪测定, 测定模式为旋转模式。在 25 ℃ 下, 将 5 mL 乳液样品加入双间隙测量系统中, 使用夹具为 DG26.7, 剪切速率为 1~1 000 s⁻¹, 测量不同均质条件下的乳液样品表观黏度随剪切速率的变化。

1.5.2 素肉糜的黏弹性

参照 Zhao 等^[10]报道的方法, 稍作修改。TFSP 素肉糜的黏弹性采用安东帕 MCR-301 旋转流变仪测定, 测定的模式为温度扫描下的振荡模式, 使用夹具为 PP-50。在恒定频率下进行应变扫描, 以获得素肉糜的线性黏弹区域 (Linear Viscoelastic Region, LVR)。然后以 1 Hz 的频率和 1% 的应变 (在 LVR 范围内) 对素肉糜进行温度扫描测量, 模拟 TFSP 素食香肠在蒸煮和冷却过程中的黏弹特性的变化。将素肉糜样品置于平行板之间 (间隙设置为 1.5 mm), 擦拭平行板周围的额外样品, 并在四周涂上硅油, 防止加热过程中样品的水分蒸发。温度扫描模式如下: 以 2 ℃/min 的恒定速率从 25 ℃ 加热到 100 ℃, 然后在 100 ℃ 保持 20 min, 再以 2 ℃/min 的恒定速率冷却到 25 ℃; 记录温度循环中的素肉糜样品弹性模量 G' 和损耗模量 G'' 的变化。上述温度扫描后, 在 0.1~10.0 Hz 范围内对素肉糜进行频率振荡扫描。

1.6 TFSP 素食香肠的制备

TFSP 用去离子水浸泡, 使其充分复水 12 h, 放入挤水器中脱水至干料的 3 倍质量。将脱水后的 TFSP 通过 Tenfly 绞肉机 (孔板为 7.0 mm), 使 TFSP 拆丝, 将拆丝完的 TFSP 与本文 1.3 中制备的预乳液 (SC 或 SPI 乳液)、马铃薯淀粉、卡拉胶、瓜尔豆胶、盐等其他原辅料按表 1 中的配方放入搅拌机中搅拌 30 min, 使所有配料充分混合。将混合完的素肉糜用塑料肠衣 (直径 38 mm) 进行手动灌肠, 确保填充均匀、紧实后, 每隔 10 cm 打结。将制备好的素食香肠放入蒸锅中, 以 100 ℃ 蒸煮 40 min, 蒸煮完成后取出冷却至 25 ℃, 进行真空包装后放入 4 ℃ 冰箱冷藏。

1.7 TFSP 素食香肠的质构测试

1.7.1 沃-布 (Warner-Bratzler) 剪切力测定

参照文献报道的方法^[11], 稍作修改。剥去香肠的塑料肠衣, 使用 TA.XTC-18 质构仪, TA/BS 切刀进行剪切力测试, 以评估香肠的破断力等参数。使用以下条件进行测试: 选择单次测试; 下压位移距离为 42 mm, 确保香肠被完全切断; 测前速度为 1.0 mm/s, 触发力为 0.05 N; 测试速度为 0.8 mm/s, 测后速度为 0.8 mm/s。

表 1 TFSP 素食香肠各种原辅料比例

Table 1 Proportions of raw materials and excipients of TFSP vegetarian sausages

成分 Ingredients	大豆拉丝蛋白 (干质量) TFSP (Dry weight)	预乳化油脂 Pre-emulsion	卡拉胶 Carrageen	瓜尔豆胶 Guar gum	马铃薯淀粉 Potato starch	食盐 Salt	大豆拉丝蛋白复水 TFSP absorbs water	总计 Total
比例 Proportion/%	10.24	61.32	1.14	1.14	3.98	1.70	20.48	100

1.7.2 质构分析 (Texture Profile Analysis, TPA)

TPA 测定参照陈林等^[12]的方法, 稍作修改。采用 TA.XTC-18 质构仪进行 TPA 测定, 使用该质构仪的圆柱型探头 (TA/36), 将制备好的香肠切成 15 mm×15 mm×20 mm

的长方体形状。在 TPA 测试时, 使用以下条件进行测试: 选择全质构测试; 下压形变为 50%; 测前速度为 3.0 mm/s, 触发力为 0.05 N; 测试速度为 1.0 mm/s, 测后速度为 1.0 mm/s。香肠的 TPA 质构特性表现为硬度、弹性、黏

聚性、咀嚼性等参数。

1.8 微观结构

乳状液和香肠样品的微观结构采用蔡司 LSM800 激光共聚焦显微镜 (Confocal Laser Scanning Microscopy, CLSM) 观察。将制备好的乳状液样品, 用去离子水稀释 5 倍, 加入尼罗红和尼罗蓝进行染色, 将 $10\ \mu\text{L}$ 等分试样滴在载玻片上, 盖上盖玻片, 以防止液滴流动。取同一批次不同香肠样品, 对整个香肠随机切片捣碎成肉糜状, 加入尼罗红和尼罗蓝染色, 将香肠碎片平铺在 CLSM 专用培养皿上 (直径 $d=20\ \text{mm}$)。尼罗红用于样品中油相的染色, 当油相被染色后, 在显微照片中呈现出绿色; 尼罗蓝用于样品中蛋白质染色, 当蛋白被染色后, 在显微照片中呈现出红色。使用两个激光激发源 (488、633 nm) 和两个接收通道对尼罗蓝和尼罗红染色情况进行观察分析, 通过软件 Zen 3.3 (Blue Edition) 获取图像。

1.9 数据处理

如无特殊说明, 所有试验均重复 3 次, 采用 IBM SPSS 21.0 对试验数据进行单因素方差分析 (ANOVA), 采用 Duncan's 法进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 均质压力对不同蛋白乳液平均粒径的影响

通过控制高压均质次数、压力等参数, 可以有效控制乳化液滴的尺寸^[8]。本试验通过改变高压均质机的压力 (0~30 MPa) 来控制乳液滴的粒径大小。如图 1 所示, 随着均质压力从 0 增大到 30 MPa, SPI、SC 制备乳液的粒径 $d_{3,2}$ 都显著减小 ($P<0.05$)。在 0、5、10、20、30 MPa 时, SPI 乳液粒径 $d_{3,2}$ 为 24.80、2.07、1.04、0.63、0.39 μm ; SC 乳液粒径 $d_{3,2}$ 为 12.37、2.35、0.18、0.16、0.12 μm 。此外, 如图 2 所示, SPI、SC 两种乳液的粒径都呈现集中分布, 并随着均质压力的增加朝小粒径方向迁移, 说明此时均质压力成为决定乳液滴粒径大小的主要因素, 因此可通过改变均质压力有效控制 SPI 乳液和 SC 乳液的粒径大小, 这与文献报道结果一致^[9]。

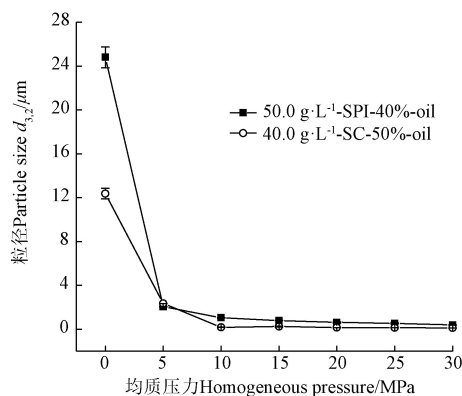


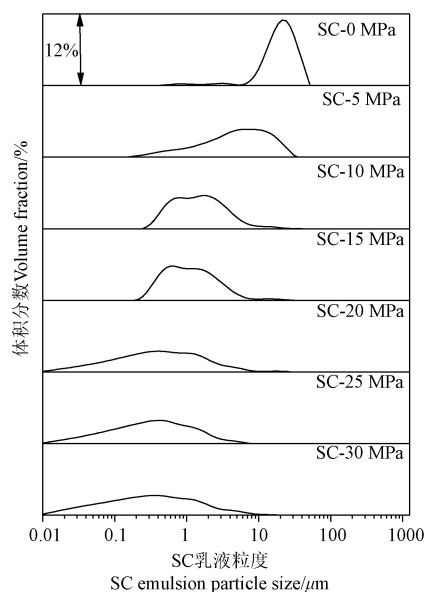
图 1 均质压力对乳液粒径的影响

Fig.1 Effects of homogeneous pressure on emulsion particle size

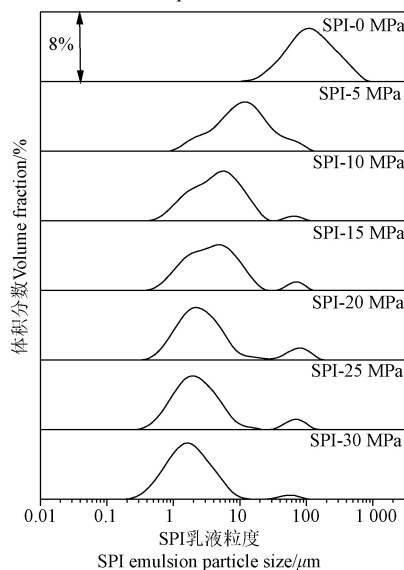
2.2 均质压力对不同蛋白乳液表观黏度的影响

不同均质压力下制备的 SPI 乳液和 SC 乳液的表观黏

度随剪切速率的变化如图 3 所示。两种乳液的表观黏度都随着剪切速率的增加而降低, 表明两种乳液都具有剪切变稀或假塑性行为, 这与之前的关于蛋白质乳液的报道一致^[13]。所有经过均质的 SC 乳液样品表观黏度均高于非均质 (0 MPa) 条件下的乳液样品, 并且随着均质压力的增大其表观黏度越大, 均质压力超过 20 MPa 后对乳液的表观黏度几乎没有影响。这可能是因为此时 SC 乳液的粒径大小相近, 乳液滴颗粒间的环境条件相似导致。然而当均质压力低于 10 MPa 时, SPI 乳液表观黏度较低, 这可能是因为低均质压力下, 乳液滴的平均粒径大, 对表观黏度影响较小。当均质压力继续增大时, 乳液的粒径减小到一定细度后, 粒径的改变才会影响 SPI 乳液的表观黏度。之前的文献也报道了乳液平均粒径越小, 其表观黏度越高^[14]。



a. SC 乳液粒度分布
a. SC emulsion particle size distribution



b. SPI 乳液粒度分布
b. SPI emulsion particle size distribution

图 2 不同均质压力下 SC 乳液和 SPI 乳液的粒度分布图
Fig.2 Particle size distribution of SC emulsion and SPI emulsion under different homogeneous pressures

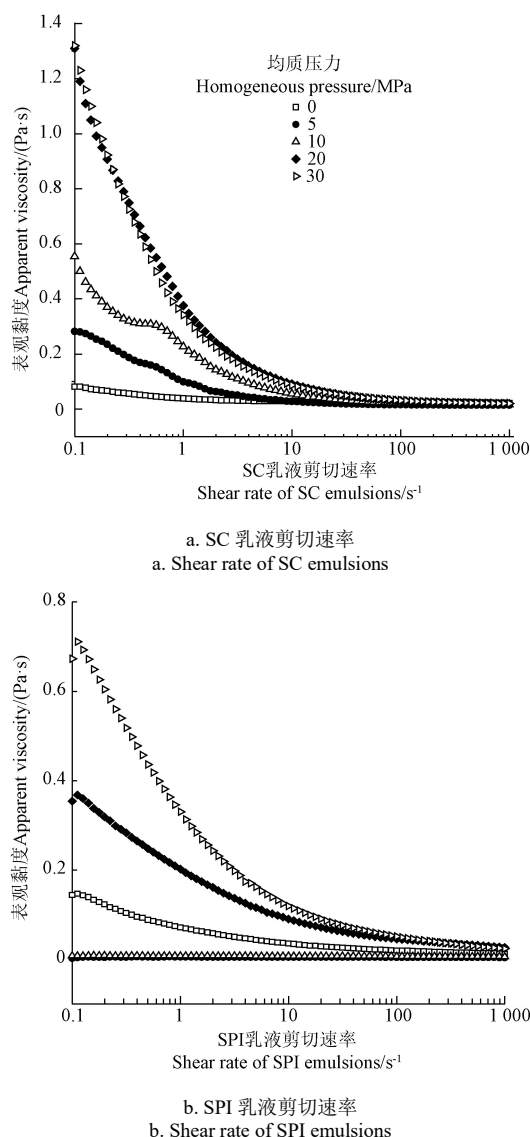


图3 不同均质压力下 SC 乳液和 SPI 乳液的表现黏度
Fig.3 Apparent viscosity of SC emulsion and SPI emulsion at different homogeneous pressures

2.3 不同均质压力制备的乳液对 TFSP 素肉糜流变学特性的影响

2.3.1 素肉糜的温度扫描结果

蛋白质凝胶是由三维基质或交联网络组成,凝胶具有较高的内聚性、可塑性等质构特征^[15]。通过对 TFSP 素肉糜进行升温测试,再做冷却测试,来模拟 TFSP 素食香肠在蒸煮过程中凝胶特性的变化。在温度扫描过程中,黏弹性通常以 G' (弹性模量) 和 G'' (损耗模量) 为表征,这与肉糜的凝胶强度密切相关^[16]。如图 4 所示,素肉糜在整个升温过程中,随着均质压力的增大,黏弹性也越大,说明乳化油滴的粒径越小,素肉糜的黏弹性表现越好。这可能是乳液颗粒在 TFSP、马铃薯淀粉等相互交联的网络结构中分布更加均匀,起到一定的黏合作用导致的^[17]。

在整个升温过程中,从 25~63 °C 时,所有样品的 G' 都缓慢下降;在 63~80 °C 时, G' 急剧增加;在 80~100 °C 时,所有素肉糜的 G' 又逐渐减小。Chen 等^[18]研究发现,乳液凝胶在加热期间储能模量的增加或减少,取决于两

个因素的平衡,一种是在较高温度下减弱颗粒间的相互作用导致出现更小的动态模量,另一种是微观结构的重组,加强了物理交联,从而增加了弹性模量。显然 TFSP 素肉糜在 80~100 °C 加热过程中的凝胶行为属于前者。从 100 °C 冷却到 25 °C 时,所有 G' 都比加热时明显增大。并且冷却完成后,随着 SPI 乳液和 SC 乳液均质压力的增加,TFSP 素肉糜 G' 越大,说明预乳液平均粒径的大小对 TFSP 素肉糜的黏弹性有重要影响。

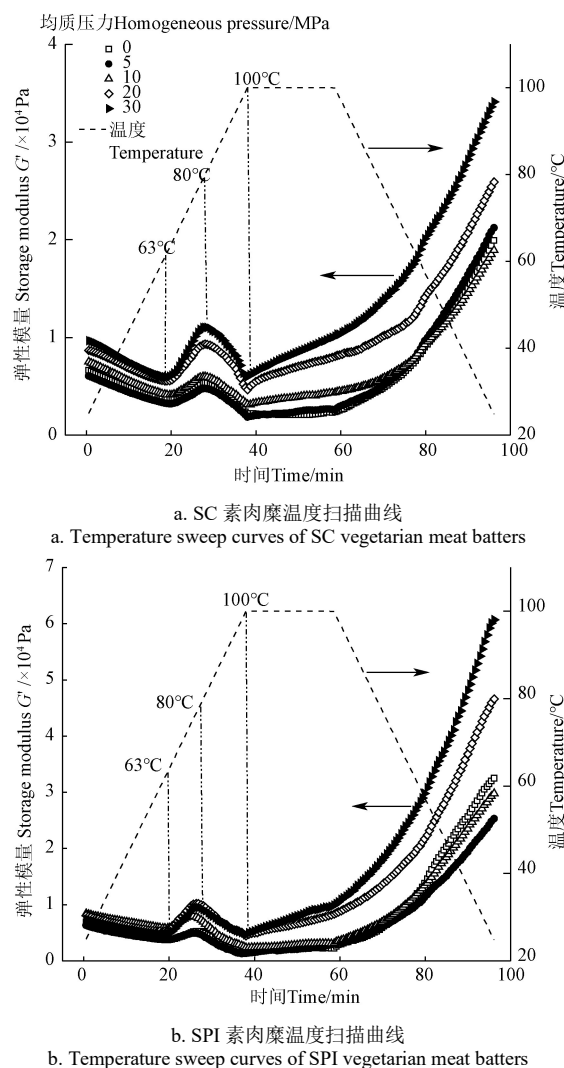


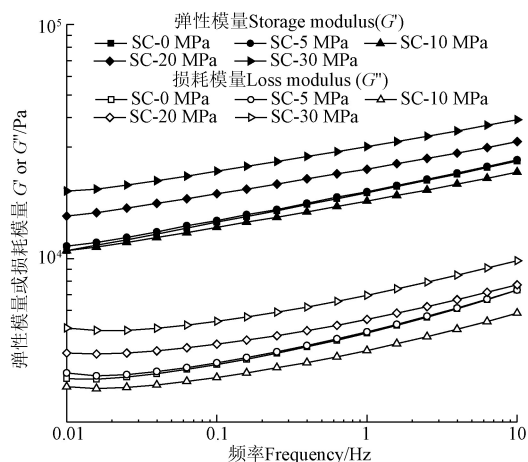
图4 不同均质压力下 SC、SPI 预乳液制备的素肉糜的温度扫描曲线

Fig.4 Temperature sweep curves of vegetarian meat batters prepared by SC pre-emulsion and SPI pre-emulsion at different homogeneous pressures

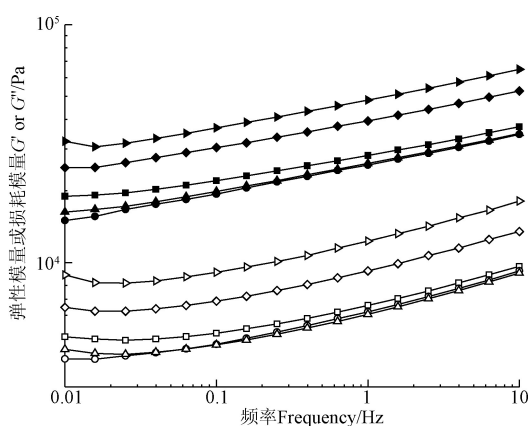
2.3.2 素肉糜的频率扫描结果

对所有温度循环后的 TFSP 素肉糜进行了 0.1~10.0 Hz 范围内的频率扫描测试。图 5 显示了冷却后 (25 °C) 所有 TFSP 素肉糜 G' 和 G'' 随频率的变化,所有样品都形成了凝胶结构。随着均质压力的增加, G' 和 G'' 的值均增加,而 G' 和 G'' 曲线趋于稳定平行,对频率的依赖性较小。上述结果表明,两种预乳液随着均质压力的增加,在 TFSP 素肉糜中形成的结构强度越高,并且证明了乳化油滴的大小是影响 TFSP 素食香肠质构特性的重要因素。这与前

人的研究结果一致, Zhao 等^[19]发现乳液体系中的液滴尺寸以及分布对肉糜的稳定性具有重要意义。这可能是因为乳液粒径越小越有利于乳液滴均匀填充在其他原辅料之间, 起到黏附作用, 有助于形成紧密的凝胶结构。



a. SC 素肉糜频率扫描曲线
a. Frequency sweep curves of SC vegetarian meat batters



b. SPI 素肉糜频率扫描曲线
b. Frequency sweep curves of SPI vegetarian meat batters

图 5 不同均质压力下 SC、SPI 预乳液制备的素肉糜频率扫描曲线

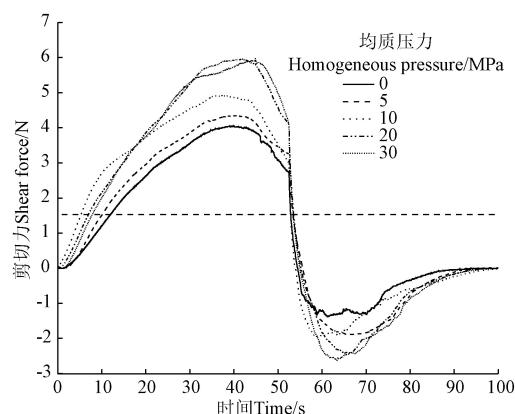
Fig.5 Frequency sweep curves of vegetarian meat batters prepared by SC pre-emulsion and SPI pre-emulsion at different homogeneous pressures

2.4 不同均质压力制备的乳液对 TFSP 素食香肠质构特性的影响

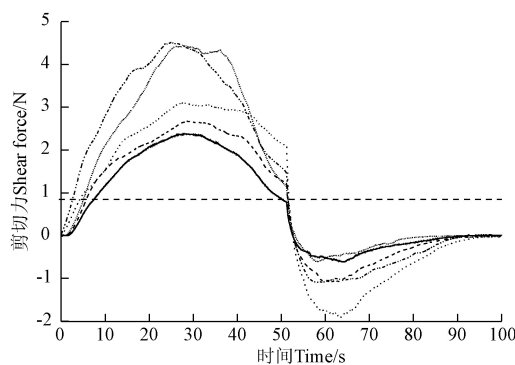
2.4.1 剪切力测定结果

采用 TA/BS 切刀对两种 TFSP 素食香肠进行剪切力测定, 质构曲线上最大峰值为香肠的剪切力。剪切力可以反映人的牙齿咬破香肠的难易程度。如图 6 所示, 与未均质组相比, 随着预乳液均质压力的增加, 表现为香肠的剪切力也在不断的增加, 并且在低均质压力下, 每增加 5 MPa, 对所有香肠样品的剪切力都有显著的提高 ($P<0.05$)。而超过 20 MPa 之后, 随着均质压力的升高, SC-TFSP 和 SPI-TFSP 素食香肠的剪切力无显著变化 ($P>0.05$), 说明在乳液粒径达到一定的细度之后, 对香

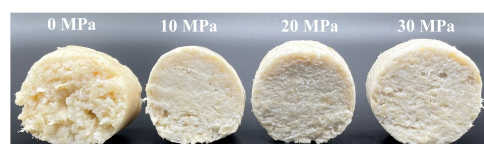
肠体系的填充效果相近, 对剪切力影响较小。另外, 如图 6c 和图 6d, 两种香肠的切片性可以看出随着乳液均质压力的增加, 香肠的切片性越好, 并且香肠的结构更加紧实细腻, 这与剪切力的结果一致。



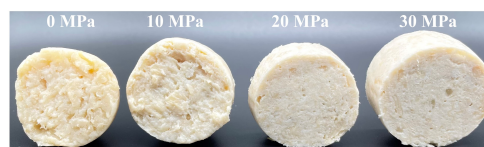
a. SC-TFSP 素食香肠剪切力曲线
a. Shear force curves of SC-TFSP vegetarian sausages



b. SPI-TFSP 素食香肠剪切力曲线
b. Shear force curves of SPI-TFSP vegetarian sausages



c. SC-TFSP 素食香肠切片截面
c. SC-TFSP Vegetarian sausage cutting cross section



d. SPI-TFSP 素食香肠切片截面
d. SPI-TFSP Vegetarian sausage cutting cross section

图 6 不同均质压力下两种乳液制备的 TFSP 素食香肠剪切力曲线和切片截面

Fig.6 Shear force curves and cutting cross section of TFSP vegetarian sausages prepared by two pre-emulsions under different homogeneous pressures

2.4.2 TPA 测定结果

如表 2 所示, SC-TFSP 和 SPI-TFSP 素食香肠的黏聚性、咀嚼性、硬度都随着预乳液均质压力的增加而增加。与未均质组相比, 不同均质压力下香肠的质构特性都显

著提高 ($P<0.05$)，这与乳液的表现黏度、素肉糜的流变学特性、沃布剪切力测定结果一致。这是因为由于体系中乳液黏度增加，对其他原辅料起到很好的黏合作用，从而提高了 SC-TFSP 和 SPI-TFSP 素食香肠的整体质构特性；另一方面与乳液的粒径大小有关，乳液粒径越小在香肠内部填充得更加均匀，能够形成更致密的蛋白质网络结构，从而增加了对压缩的抵抗力，提高香肠硬度^[17]。Guan 等^[20]认为硬度的增加对香肠质构特性是有利的，硬度是影响香肠产品整体可接受性的主要参数。

表2 不同均质压力下的预乳液制备 SC-TFSP 和 SPI-TFSP 素食香肠质构特性

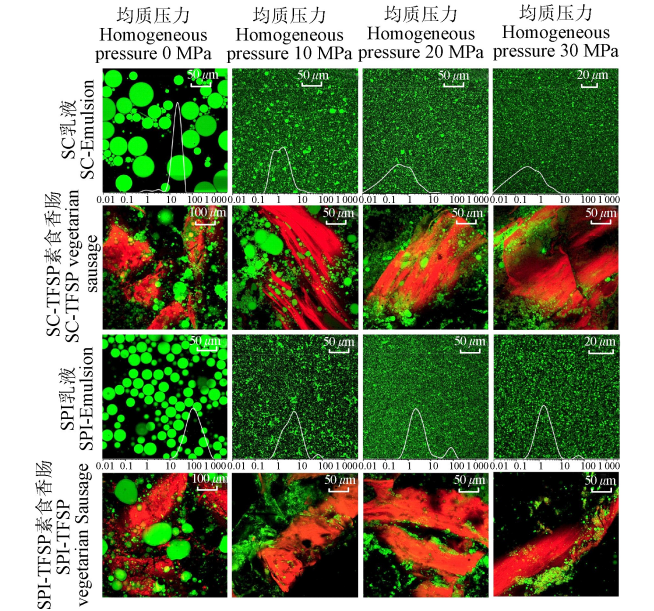
Table 2 Texture characteristics of SC-TFSP and SPI-TFSP vegetarian sausage prepared by pre-emulsion under different homogeneous pressures				
不同条件 Different conditions	硬度 Hardness	弹性 Springiness	黏聚性 Cohesiveness	咀嚼性 Chewiness
SC-0 MPa	177.26±10.44 c	0.24±0.01 d	0.26±0.01 c	11.34±1.07 d
SC-5 MPa	226.03±32.08 bc	0.28±0.03 cd	0.28±0.02 c	17.89±4.21 cd
SC-10 MPa	256.80±40.58 b	0.29±0.02 bc	0.29±0.01 bc	21.96±4.12 bc
SC-20 MPa	286.62±34.18 ab	0.32±0.01 b	0.32±0.03 b	28.97±1.08 b
SC-30 MPa	346.72±47.90 a	0.44±0.02 a	0.40±0.00 a	59.98±7.66 a
SPI-0 MPa	198.56±13.65 c	0.25±0.01 d	0.23±0.01 b	11.70±1.00 d
SPI-5 MPa	232.57±16.93 bc	0.30±0.04 cd	0.24±0.01 b	16.84±2.30 d
SPI-10 MPa	269.47±13.13 b	0.34±0.03 bc	0.27±0.01 a	25.21±4.38 c
SPI-20 MPa	444.49±46.22 a	0.37±0.01 ab	0.29±0.02 a	48.04±3.41 b
SPI-30 MPa	459.17±35.30 a	0.43±0.06 a	0.29±0.02 a	55.74±6.66 a

注：在相同乳液指标不同压力的比较中，不同字母表示数据间有显著性差异 ($P<0.05$)。
Note: In the comparison of different pressures of the same emulsion of index, data with different letters are significantly different ($P<0.05$).

2.5 微观结构

图 7 是通过 CLSM 观察不同均质压力下制备的预乳液以及素食香肠的微观结构，采用两种荧光染料对香肠中的蛋白和油相分别染色。从 SPI、SC 乳液的微观结构可以看出，两种乳液随着均质压力的增加，乳液滴的粒径越小，并且 2 种液滴都均匀分布，不发生聚结现象。但是 SC-TFSP 和 SPI-TFSP 素食香肠中的油滴都随着均质压力的增加而减小，并且都发生了不同程度的絮凝现象。这可能是由于香肠配方中的卡拉胶、瓜尔豆胶对乳液油滴起到一定的黏合作用^[21]，另一方面可能是盐的添加，导致了乳液的絮凝，本课题组前期研究发现^[22]，一定浓度的盐离子会导致 SC、SPI 乳液发生絮凝的现象。值得注意的是，均质压力低于 20 MPa 时，SC 乳液制备的素食香肠都出现了不同程度的聚结现象，而 SPI 制备的乳液则未聚结。这可能是由于 SC 是线性蛋白，在油滴表面形成较薄的界面层，在加热过程中，乳液的粒径越大，拉普拉斯压力越小，液滴越容易发生聚结^[23]。然而与之相对照的是，SPI-TFSP 素食香肠在较低的压力下也没有发生油滴聚结现象。本课题组前期研究发现，商品化 SPI 溶解性较差，含有大量不溶性蛋白颗粒，在均质乳化过程中，蛋白颗粒也会吸附油滴表面。因此 SPI 乳液界面膜是由可溶性蛋白和蛋白颗粒组成，其界面膜具有皮克林乳液特性，具有极高对抗油滴聚结的稳定性^[24]。另外，

结合质构数据表明，油脂预乳化液在素食香肠中发生聚结会影响其质构特性，导致硬度下降，是 TFSP 素食香肠质构松散，不紧实的原因之一。因此，均质压力为 20 MPa 时，SPI 乳液在 TFSP 素食香肠的加工中具有良好的乳化稳定性，油滴粒径小且未聚结，可有效提升 TFSP 素食香肠的质构特性。



注：红色代表蛋白质 (TFSP)；绿色代表油滴；黑色为背景。图中曲线为乳液对应的粒径分布图。
Note: Red represents protein (TFSP); Green represents oil droplets; Black was background. The curve in the figure is the particle size distribution map corresponding to the emulsion.

图 7 不同均质压力制备的预乳液和香肠的微观结构
Fig.7 Microstructure of pre-emulsion and sausage prepared at different homogeneous pressures

3 结 论

- 1) 随着均质压力从 0 增加到 30 MPa，大豆拉丝蛋白 TFSP (Textured Fibril Soy Protein) 素肉糜温度扫描和频率扫描的结果发现，所有的素肉糜在蒸煮后都形成了具有黏弹性的凝胶结构，并且预乳液的平均粒径 $d_{3,2}$ 越小，素肉糜的弹性模量 G' 越大。
 - 2) 随着均质压力从 0 增加到 30 MPa，TFSP 素食香肠的剪切力和 TPA 质构特性增大。
 - 3) 当预乳化的均质压力为 0~20 MPa 时，酪蛋白酸钠 SC (Sodium Caseinate) 乳液制备的 TFSP 素食香肠在蒸煮后发生了明显的乳液滴聚结；然而大豆拉丝蛋白 SPI (Soybean Protein Isolate) 乳液则表现出对抗乳液滴聚结的能力强，其制备的素食香肠在蒸煮后都可保持稳定，并且当制备乳液的均质压力大于 20 MPa 时，可以明显提升 TFSP 素食香肠质构特性。
- 综上所述，通过控制均质压力可以有效调控预乳液的粒径大小。均质压力为 20 MPa 时，与 SC 相比，SPI 制备的乳液表现黏度、素肉糜的流变学特性，TFSP 素食香肠的剪切力、质构特性都有明显提升。研究结果有助于拓宽乳液在食品中的应用，为开发健康、高品质的素食产品提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Kumar P, Chatli M K, Mehta N, et al. Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(5): 923-932.
- [2] Scarborough P, Appleby P N, Mizdrak A, et al. Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK[J]. *Climatic Change*, 2014, 125(2): 179-192.
- [3] Sha L, Xiong Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102: 51-61.
- [4] Chen Y C, Jia X W, Sun F D, et al. Using a stable pre-emulsified canola oil system that includes porcine plasma protein hydrolysates and oxidized tannic acid to partially replace pork fat in frankfurters[J]. *Meat Science*, 2020, 160: 107968.
- [5] Youssef M K, Barbut S. Physicochemical effects of the lipid phase and protein level on meat emulsion stability, texture, and microstructure[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(2): S108-S114.
- [6] Li R, Xue H, Gao B, et al. Study on the enhancement effect and mechanism of heat-induced gel strength of duck egg white by emulsified lipids[J]. *LWT*, 2022, 160: 113146.
- [7] 肖志刚, 王依凡, 王可心, 等. 高压均质-冷冻干燥技术制备大豆分离蛋白微粒及其功能特性[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 306-313.
- Xiao Zhigang, Wang Yifan, Wang Kexin, et al. Preparation and functional properties of soy protein isolate particles by high pressure homogenization-freeze drying technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. (Transactions of the CSAE), 2021, 37(13): 306-313. (in Chinese with English abstract)
- [8] Cha Y, Shi X, Wu F, et al. Improving the stability of oil-in-water emulsions by using mussel myofibrillar proteins and lecithin as emulsifiers and high-pressure homogenization[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 258: 1-8.
- [9] Hogan S A, McNamee B F, O'Riordan E D, et al. Microencapsulating properties of sodium caseinate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(4): 1934-1938.
- [10] Zhao Y Y, Wang P, Zou Y F, et al. Effect of pre-emulsification of plant lipid treated by pulsed ultrasound on the functional properties of chicken breast myofibrillar protein composite gel[J]. *Food Research International*, 2014, 58: 98-104.
- [11] Barekat S, Soltanizadeh N. Improvement of meat tenderness by simultaneous application of high-intensity ultrasonic radiation and papain treatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 39: 223-229.
- [12] 陈林, 陈维, Ettelaie Rammile, 等. 油脂预乳化提高大豆拉丝蛋白素食香肠品质[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 291-298.
- Chen Lin, Chen Wei, Ettelaie Rammile, et al. Improving the quality of vegetarian sausage prepared with textured fibril soy protein using oil pre-emulsification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2021, 37(13): 291-298. (in Chinese with English abstract)
- [13] Liu F, Tang C H. Cold, gel-like whey protein emulsions by microfluidisation emulsification: Rheological properties and microstructures[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(4): 1641-1647.
- [14] Xie H, Zhang Y, Cao M, et al. Fabrication of PGFE/CN-stabilized β -carotene-loaded peppermint oil nanoemulsions: Storage stability, rheological behavior and intelligent sensory analyses[J]. *LWT*, 2021, 138: 110688.
- [15] 胡坦, 张珮珮, 郑婷, 等. 高场强超声-加热联用增强大豆分离蛋白凝胶凝胶特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 306-314.
- Hu Tan, Zhang Peipei, Zheng Ting, et al. High intensity ultrasound-heat pretreatments improving gelation properties of cold-set soy protein isolate induced by glucono- δ -lactone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2016, 32(20): 306-314. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhu X X, Ning C, Li S Y, et al. Effects of L-lysine/L-arginine on the emulsion stability, textural, rheological and microstructural characteristics of chicken sausages[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(1): 88-96.
- [17] Youssef M K, Barbut S, Smith A. Effects of pre-emulsifying fat/oil on meat batter stability, texture and microstructure[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(6): 1216-1224.
- [18] Chen J S, Dickinson E. On the temperature reversibility of the viscoelasticity of acid-induced sodium caseinate emulsion gels[J]. *International Dairy Journal*, 2000, 10(8): 541-549.
- [19] Zhao Y Y, Hou Q, Cao S M, et al. Effect of regenerated cellulose fiber on the properties and microstructure of emulsion model system from meat batters[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 83-89.
- [20] Guan H N, Feng C M, Xu X J, et al. Effect of high-pressure processing enzymatic hydrolysates of soy protein isolate on the quality characteristics and oxidation stability of emulsion sausage[J]. *British Food Journal*, 2022, 100(10): 3910-3919.
- [21] Chang Y Y, Li D, Wang L Y, et al. Effect of gums on the rheological characteristics and microstructure of acid-induced SPI-gum mixed gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 108: 183-191.
- [22] 黄培文, 陈林. 探究不同食品乳化剂不稳定性现象及发生机理[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1-9[2022-06-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SPFX20211216000&uniplatform=NZKPT&v=_f6t9sWdgG5mVKD6YTKaHlBL0tXo1MhHOTER8BZHWH4KIsLlvzQBqS4IDIq7RhFM.
- Huang Peiwen, Chen Lin. A research on the instability and the mechanism of occurrence of different food emulsifiers[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*: 1-9 [2022-06-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SPFX20211216000&uniplatform=NZKPT&v=_f6t9sWdgG5mVKD6YTKaHlBL0tXo1MhHOTER8BZHWH4KIsLlvzQBqS4IDIq7RhFM.
- [23] Jafari S M, Assadpoor E, He Y, et al. Re-coalescence of

emulsion droplets during high-energy emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(7): 1191-1202.

[24] Chen L, Chen J S, Yu L, et al. Emulsification performance

and interfacial properties of enzymically hydrolyzed peanut protein isolate pretreated by extrusion cooking[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 607-616.

Effects of pre-emulsification of oil treated by high pressure homogenization on the texture properties of textured fibril soy protein vegetarian sausages

Huang Peiwen, Chen Lin^{*}, Din Ting, Chen Qihua, Luo Bin, Ye Siyuan

(Department of Food Science, College of Chemical Engineering and Light Industry,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Plant-based meat products have been the popular food at present, in order to prevent processed meat from cardiovascular disease and cancer today. The pre-emulsification technique can often be used to prepare an oil-in-water emulsion, before introducing the fat/oil into a meat product. Compared with the direct oil addition, the ability to bind water and oil can allow for the better dispersion of oil into the meat batter. Recently, several studies have also reported that the particle size of the pre-emulsified oil can influence the textural properties and gel formation of the sausage. However, few studies have reported the effects of droplet size and emulsifier in the pre-emulsion on the rheological and textural properties of vegetarian sausage. Therefore, the aim of this work was to apply the pre-emulsification for the processing of vegetarian sausages with Textured Fibril Soy Protein (TFSP). An investigation was made to clarify the effects of oils pre-emulsified on the rheological properties, texture, and microstructure of TFSP vegetarian sausages using different protein emulsifiers and homogenization conditions. The results show that the apparent viscosity of both Soybean Protein Isolate (SPI) and Sodium Caseinate (SC) emulsions increased gradually, as the pressure homogenization increased from 0 to 30 MPa. The particle size $d_{3,2}$ of SPI emulsions ranged from 24.80 to 0.39 μm , and the particle size $d_{3,2}$ of SC emulsions ranged from 12.37 to 0.12 μm . The temperature and frequency sweep of the TFSP vegetarian meat batter demonstrated all the vegetarian meat batters formed an emulsion gel with viscoelasticity after cooking. The higher the homogenization pressure of the pre-emulsion was, the higher the storage modulus (G') of the vegetarian meat batter was. In the Warner-Bratzler (WB) shear test and texture properties (Texture Profile Analysis, TPA), it was found that the breaking force and TPA (Hardness, Springiness, Cohesiveness, Chewiness) of TFSP vegetarian sausages increased with the decrease of the particle size $d_{3,2}$ of the pre-emulsion. The microstructures of different emulsions and TFSP vegetarian sausages were characterized by Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM). It was found that the coalescence of emulsion droplets occurred in the TFSP vegetarian sausages after cooking, when the SC emulsions were prepared at the pressure of 0-20 MPa. However, the TFSP vegetarian sausages prepared by the SPI emulsions showed a strong ability to resist the coalescence of emulsion droplets after cooking. Therefore, the shear force and textural properties of TFSP vegetarian sausage can be effectively improved, when the pressure was more than 20 MPa during the pre-emulsification of plant oils using the SPI. The finding can provide a strong reference for the development and application of the oil pre-emulsification process in vegetarian products.

Keywords: high pressure homogenization; texture; vegetarian sausages; pre-emulsification of oil; soy protein isolate; sodium caseinate