

米糠油乳液的超声制备及其特性

姚俊胜, 杨波, 杨光, 曹洪伟, 王剑宇

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了制备稳定性更好的米糠油乳液, 以酪蛋白酸钠和米糠油为原料, 采用超声波处理方法, 研究了酪蛋白酸钠添加量、脂水比、超声波强度对制备米糠油乳液的影响。结果表明, 当酪蛋白质量分数为 0.6% 时, 蛋白利用率较高, 乳液的蛋白吸附量达到 90%, 乳液中油滴的平均粒径比质量分数为 0.5% 的样品明显减小。油相比比例的增加会明显增大米糠油乳液的黏度, 通过光学显微镜的观察发现, 脂水比为 3:2 的米糠油乳液中油滴的空间分布密集, 此时乳化活性比脂水比 1:2 的乳液高出 $16 \text{ m}^2/\text{g}$ 左右。当蛋白质量分数为 0.6%、脂水比为 3:2、超声波强度在 240~360 W 时制备的酪蛋白酸钠-米糠油乳液蛋白利用率较高且稳定性好。超声处理明显提高了乳液的稳定性, 超声波改变了酪蛋白酸钠的二级结构, 影响了 β -转角和 β -折叠的比例。

关键词: 米糠油; 酪蛋白酸钠添加量; 脂水比; 超声波

中图分类号: TS 210 文献标志码: A

Ultrasonic preparation of rice bran oil emulsion and its characteristics

YAO Junsheng, YANG Bo, YANG Guang, CAO Hongwei, WANG Jianyu

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to prepare rice bran oil emulsion with better stability, sodium caseinate and rice bran oil were used as raw materials, and ultrasonic treatment was used to study the effects of sodium caseinate addition, lipid/water ratio, and ultrasonic intensity on the preparation of rice bran oil emulsion. The results showed that when the addition amount of casein reached 0.6% (w/w), the protein utilization rate was higher. The protein adsorption capacity of the emulsion reached 90%, and the average particle size of the oil droplets in the emulsion was significantly reduced compared to the sample with 0.5% (w/w). The increase in the ratio of oil significantly increased the viscosity of the rice bran oil emulsion. Observations by optical microscope revealed that the oil droplets in the rice bran oil emulsion with a lipid/water ratio of 3:2 were densely distributed. When the lipid/water ratio was 3:2, the emulsifying activity of the emulsion was about $16 \text{ m}^2/\text{g}$ higher than that of the emulsion with a lipid/water of 1:2. When the protein addition amount reached 0.6% (w/w), the lipid/water ratio was 3:2, and the ultrasonic intensity was 240~360 W. The sodium caseinate utilization rate of the prepared emulsion is

收稿日期: 2021-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32102140)

第一作者: 姚俊胜 (1995-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 食品工程. E-mail: 18086790151@163.com

通信作者: 杨波 (1968-), 女, 副教授. 研究方向: 食品生物技术. E-mail: yangbo6899@126.com

high and the stability was high. Ultrasonic treatment obviously improves the stability of the emulsion, and ultrasonic changes the secondary structure of sodium caseinate, which affects the ratio of β -turn and β -sheet.

Keywords: rice bran oil; addition amount of sodium caseinate; lipid/water ratio; ultrasound

米糠是稻米脱壳过程中产生的副产物，其中含有丰富的蛋白质、维生素、膳食纤维等营养物质^[1]。米糠油是将米糠用压榨或溶剂浸出等方法进行处理后获取的，其不饱和脂肪酸含量达 80% 以上，且主要为油酸和亚油酸，富含甾醇、微生物 E、谷维素等多种生物活性成分，是世界公认的健康营养油^[2-3]。

酪蛋白酸钠是一种被广泛研究、和商业相关的食品材料，它可以提供蛋白质，并且具有良好的乳化性和耐热性，可用于改善食品材料的粘性和凝胶特性^[4]。宫晓玥等^[5]利用酪蛋白酸钠减小了椰奶粒径、增大了 ζ -电位从而减少了界面张力，使椰奶的稳定性得到提高。

超声波由于具有较强的穿透性^[6]，在食品领域中被广泛应用于食品生产、食品改性以及食品分析等方面，尤其是食品乳化加工过程。譬如超声波乳化技术通过超声空化作用处理两种或两种以上的不相溶液体，使其中一种被均匀地分散在另一种液体之中，形成乳状液^[7]，能有效改善乳化液的各种稳定性。Li 等^[8]利用超声波制备大豆油体系的蛋白乳液，乳液的界面性质结构和氧化稳定性得到增强。王中江等^[9]利用超声波制备的大豆蛋白-磷脂酰胆碱纳米乳液，其乳化产率较高，并且具有较好的储藏稳定性。

乳液在多种食品加工应用中起着关键作用，例如奶酪、加工肉制品、烘焙食品等。鉴于米糠油和酪蛋白酸钠的高营养价值及米糠油较高的烘焙价值，本研究以米糠油为油相、以酪蛋白酸钠为乳化剂，利用超声波制备乳液，讨论乳液制备最佳工艺，为后期应用到食品中提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

食品级酪蛋白酸钠(山东百思特食品健康有限公司)，米糠油(浙江得乐康食品股份有限公司)，其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

JY98-IIIDN 超声波破碎仪，上海净信实业发

展有限公司；DHR-1 旋转流变仪，沃特世科技(上海)有限公司；MGL-16M 台式高速冷冻离心机，美瑞克仪器(上海)有限公司；E200 生物显微镜，尼康仪器(上海)有限公司；UPH-IV-20TNP 超纯水机，四川优普超纯科技有限公司；TDL-80-2B 离心机，上海安亭科学仪器厂；LC-MSH-PRO 磁力搅拌器，邦西仪器科技(上海)有限公司；WFJ 7200 可见分光光度计，尤尼柯(上海)仪器有限公司；AL204 电子天平，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 酪蛋白酸钠添加量对米糠油乳液的影响

a. 米糠油乳液的制备

在 50 ml 的烧杯中加入 10 g 米糠油，另取一个 50 ml 烧杯加入 10 g 蒸馏水，酪蛋白酸钠添加量分别为油水总质量的 0.4%，0.5%，0.6%，0.7%，0.8%，0.9%。将酪蛋白酸钠加入到蒸馏水中加热搅拌 1 h，另一个装有米糠油的烧杯也同时以相同的温度加热搅拌 1 h，搅拌结束后将两相混合，利用超声波破碎仪进行超声处理，超声功率为 240 W，超声总时间为 1 min 30 s(开 4 s，关 6 s)，将制备好的乳液用 NaOH 或 HCl 将 pH 值调至 7。每个处理组做 3 次重复。

b. 乳化活性的测定

参考 Pearce 等^[10]提出的比浊法，从新鲜制备的乳液底部吸取 50 μ l 的乳液于小烧杯中，并于小烧杯中加入 5 ml 0.1% 的 SDS 溶液，混合均匀后用分光光度计测定 500 nm 处的吸光值 A_0 ，1%SDS 溶液为空白对照。通过公式计算得出乳化活性

$$EAI\left(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}\right)=\frac{2 \times 2.303}{C \times(1-\phi) \times 10^4} \times A_0 \times 101$$

ϕ = 油的体积/乳化液的体积

式中， C 为蛋白质质量浓度，g/ml。

c. 界面蛋白吸附量的测定

将 Keerati-u-rai 等^[11]的方法稍作修改，制作的新鲜乳液在 10 000 r/min 离心 30 min，并用注射器将下层清液吸出，测定清液中的蛋白质质量浓

度。界面蛋白吸附量计算式为

$$[(C_0 - C_f) \times 100] / C_0$$

式中: C_0 表示乳液中初始蛋白质质量浓度, g/ml; C_f 表示离心后下层清液中的蛋白质质量浓度, g/ml。

d. 米糠油乳液黏度的测定

采用流变仪测定乳液黏度, 取适量米糠油乳液置于 40 mm 平板上, 使其均匀分布。测试温度 25 ℃, 剪切速率 1~300 s⁻¹, 总剪切时间 180 s。

e. 米糠油乳液平均粒径及分布的测定

参照杨贵妃等^[12]的方法, 用超纯水将待米糠油乳液稀释 1000 倍, 使用激光粒径仪测定米糠油乳液的粒径, 平衡时间为 120 s, 每组样品测定 3 次, 取平均值。

f. 米糠油乳液微观结构的观察

将制备好的新鲜乳液用搅拌棒拌匀, 吸取 1 ml 乳液加入到 10 ml 的 SDS 溶液中, 混匀后吸取 10 μl 滴到载玻片上, 并盖好盖玻片。将制备好的样片用光学显微镜观察, 选择 10 倍目镜、40 倍物镜观察, 选择视野清晰、最具代表性的区域进行拍摄。

1.3.2 脂水比例对米糠油乳液的影响

对上述米糠油乳液的制备步骤稍作修改, 蛋白质质量分数固定为 0.6%, 制作脂水比分别为 1:2, 2:3, 1:1, 3:2, 2:1 的乳液, 超声功率为 240 W, 超声总时间为 1 min 30 s (开 4 s, 关 6 s), 将制备好的乳液用 NaOH 或 HCl 将 pH 值调至 7。每个处理组重复 3 次。不同脂水比的米糠油乳液的乳化活性、乳液黏度、平均粒径及分布、乳液微观结构观察均同 1.3.1。

1.3.3 超声强度对米糠油乳液的影响

将米糠油乳液的制备稍作修改, 蛋白质添加量固定为 0.6%, 脂水比为 3:2, 分别用超声强度为 120, 240, 360, 480, 600 W 来制备, 将制备好的乳液用 NaOH 或 HCl 将 pH 值调至 7。每个处理组重复 3 次。

超声强度对界面蛋白吸附量、对油滴粒径及分布的影响同前述。超声强度对蛋白质二级结构的影响参照刘潇^[13]的方法稍作修改, 乳液在 20 ℃、10 000 g 条件下进行离心 30 min, 将离心后的乳析层取出并滤干水分。利用红外光谱 (FTIR) 对滤去水分的乳析层样品进行扫描, 采用 Peak Fit 软件对红外光谱中的酰胺 I 区 (1600~1700 cm⁻¹) 进行处理, 根据 Byler 等^[14]的方法计算蛋白的二级结构

含量。

1.3.4 数据分析

每个实验重复 3 次, 每次实验的每个处理有 3 个平行样。用 SPSS Statistics 26 和 Excel 2019 进行数据处理, 用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 酪蛋白酸钠添加量对乳化液的影响

2.1.1 酪蛋白酸钠添加量对乳化活性的影响

蛋白乳化液油水混合能力即油脂的乳化效果通常采用乳化活性来表征, 其代表每单位质量的蛋白质 (g) 能够乳化油脂的表面积 (m²)^[15]。

在预实验中发现, 当蛋白质质量分数低于 0.5% 时, 高强度的超声处理使在油水界面形成的蛋白质膜被破坏, 不能形成乳液, 所以超声制备乳液的最低蛋白质质量分数起点定为 0.5%。图 1 给出了蛋白添加对乳化活性的影响, 图中 a~e 表示数据之间具有显著性差异 (P 值小于 0.05)。随着蛋白质添加量的增加, 乳化活性呈现降低趋势, 在水分含量一定的情况下, 高浓度的蛋白会造成无法充分吸水溶胀, 反而降低乳化效果。李良等^[16]在研究大豆蛋白和乳清蛋白混合浓度变化 (1.5%~2.5%) 对乳化活性的影响时发现, 维持乳状液高乳化活性蛋白浓度存在最佳浓度点。

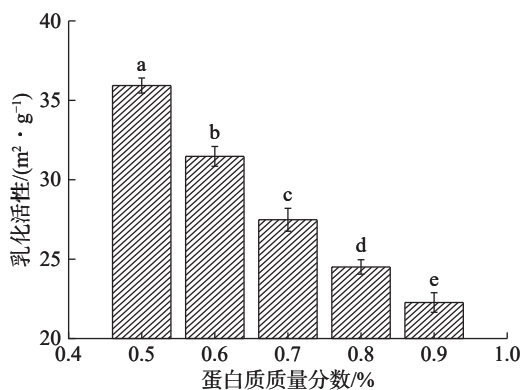


图 1 蛋白添加量对乳化活性的影响

Fig.1 Effect of protein addition on emulsifying activity

2.1.2 酪蛋白酸钠添加量对界面蛋白吸附量的影响

由图 2 可知, 超声波制备的米糠油乳液的界面蛋白吸附量均高于 80%, 呈现增长趋势, 随后趋于平稳。蛋白质质量分数在 0.8% 之后, 界面蛋白吸附量逐渐达到饱和临界值。超过 80% 的酪蛋白酸钠均作用在油水界面上, 蛋白质质量分数增加会使越来越多的蛋白包裹住油滴, 甚至形成多

层吸附，这有利于界面膜的稳定性。Castellani 等^[17]研究油水乳化界面时发现，蛋白覆盖率高的乳液呈现出更稳定的趋势，因为高蛋白覆盖率降低了乳化液的界面张力。

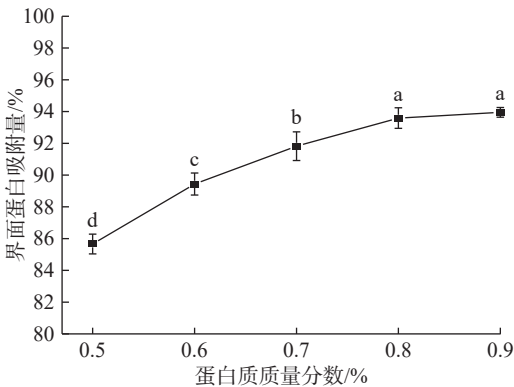


图2 蛋白质浓度对乳化液蛋白吸附量的影响
Fig.2 Effect of protein addition on protein adsorption

2.1.3 酪蛋白酸钠添加量对乳化液黏度的影响

乳液的黏度与液滴在体系中运动和迁移的速率有关，黏度大的乳液中连续相和分散相的流动性差，这样有利于保持乳液的稳定。

图3是黏度在剪切率 $1\sim300\text{ s}^{-1}$ 的变化。剪切率为 1 s^{-1} 时，蛋白质添加量的增加导致乳液黏度的增加，当蛋白质质量分数达到0.8%时，乳液黏度趋于稳定。所有乳液均呈现出剪切变稀的行为，说明该乳液是非牛顿假塑性流体^[18]。随着剪切速率的增加，乳液的黏度减小，各组之间黏度差距逐渐减小，最终趋于平稳。李成倍等^[19]通过研究酪蛋白酸钠水溶液发现随着蛋白质添加量的增加，水溶液的黏度也会增加。因此，酪蛋白酸钠溶液本身的黏度越大，制作成乳液之后对油滴的运动和迁移限制就越大，有利于体系的稳定。

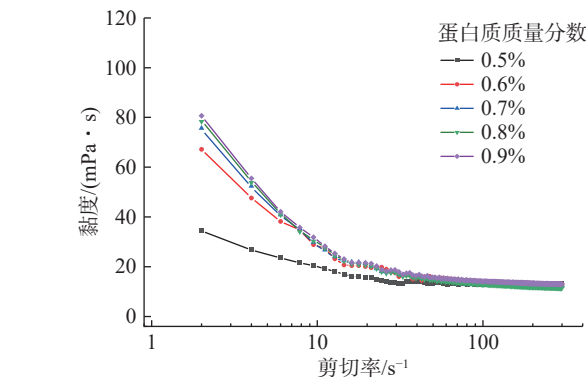
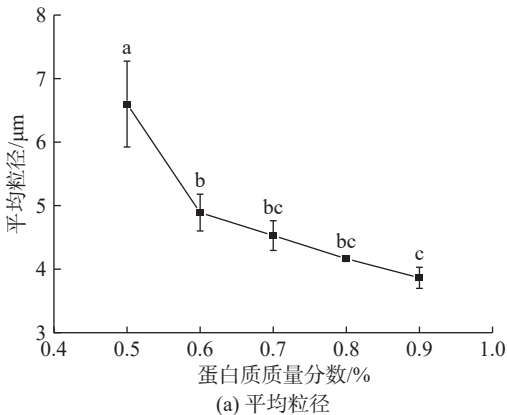


图3 蛋白质添加量对乳液黏度的影响
Fig.3 Effect of protein addition on the viscosity of emulsion

2.1.4 酪蛋白酸钠添加量对乳液粒径及分布的影响

由图4(a)可知，超声制备的乳液的平均粒径均低于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，随着蛋白质添加量的增加，油滴的平均粒径逐渐减小，当蛋白质质量分数达到0.8%时，平均粒径变化不明显。蛋白质质量分数大于0.8%时，不会影响平均粒径的大小，如果想进一步减小平均粒径，可能要采取其他措施。

由图4(b)可知，随着蛋白质添加量的增加，峰逐渐变窄并向左移动，说明乳状液中的油滴的粒径在逐渐减小，并且油滴大小逐渐相近且均匀。油滴变得更均匀，因此会减少油滴的聚合或者大油滴的出现，这样的乳化液体系会相对稳定。

2.1.5 酪蛋白酸钠添加量对乳液微观结构的影响

由图5可见，随着酪蛋白酸钠添加量的增加，乳液的液滴大小明显减小。因为蛋白质添加量的增加，会有更多的蛋白质将打散的小油滴包裹住。上面分析到界面蛋白吸附量的增加，使更多的蛋白质作用在油水表面，导致油滴难以聚合，大油滴的数量明显减少。

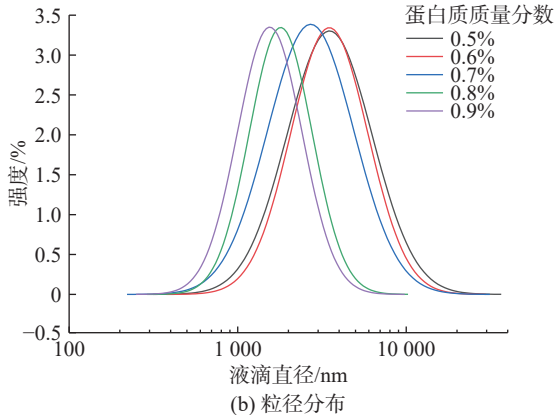


图4 蛋白质添加量对乳液平均粒径（左）及分布（右）的影响
Fig.4 Effect of protein addition on the average particle size (left) and distribution (right) of the emulsion

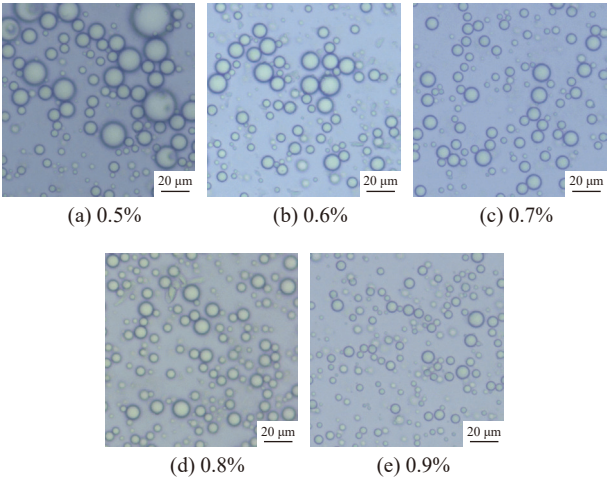


图 5 不同蛋白质添加量的乳液微观结构观察

Fig. 5 Observation of the microstructure of emulsion with different protein additions

2.2 脂水比例对乳液的影响

2.2.1 脂水比例对乳液乳化活性的影响

脂水比对米糠油乳液的乳化活性影响如图 6 所示, 随着油相的增多, 乳化活性呈增长趋势。由于蛋白质含量一定, 水相含量越多, 蛋白水溶液的浓度越低, 油相体积在乳液体系中变少, 导致超声处理后乳液中的油水界面面积减少, 乳化活性降低。当脂水比达到 2 : 1 时, 无法制备稳定的乳液。这是由于油相体积过大, 没有足够多的

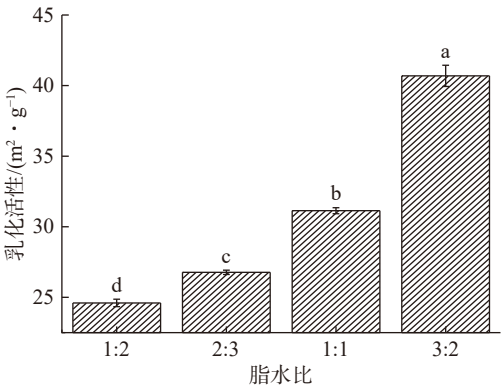


图 6 脂水比对乳化活性的影响

Fig. 6 Effect of lipid/water ratio on emulsifying activity

蛋白质包裹油滴; 另外一个原因可能是油滴数量过高, 连续相无法继续维持各油滴之间的缓冲作用, 无法形成稳定的乳液。因此 3 : 2 为最适脂水比。

2.2.2 不同脂水比对乳液粒径及分布的影响

如图 7 所示, 当脂水比小于 1 : 1 时, 乳状液的平均粒径及分布几乎没有差异, 当脂水比达到 3 : 2 时, 平均粒径减小, 因为当油相比比例较低时, 会有较多的蛋白质没有吸附, 导致蛋白质发生耗散絮凝, 因此粒径增加。还有一种原因就是油相增多, 导致分散在水相中的油滴数量增多, 体系中的更多的蛋白质将油滴包裹住, 粒径呈减小趋势。

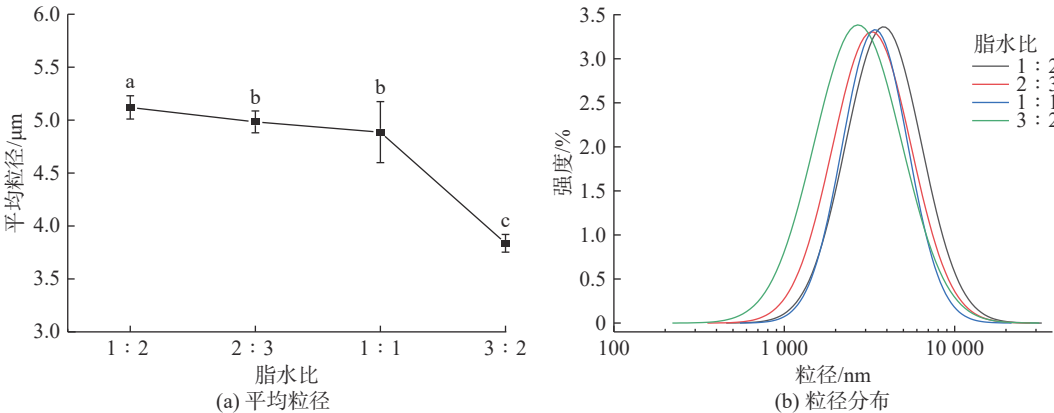


图 7 脂水比对乳液平均粒径及分布的影响

Fig.7 Effect of lipid/water ratio on the average particle size and distribution of the emulsion

2.2.3 不同脂水比例的乳液微观结构观察

图 8 是不同脂水比的米糠油乳液的光学显微镜观察, 样品 a, b, c 的分散性明显高于样品 d, 样品 d 的油滴比较紧密, 并且油滴的大小更加均匀。如图 8(e) 所示, 当脂水比达到 2 : 1 时, 会有较大的油脂聚集体, 因为油滴数量增多, 单位界

面面积可获得的颗粒数减少, 油滴之间相互挤压, 导致部分油滴变形或破乳, 这也验证了 2.2.1 中的分析。

2.2.4 脂水比例对乳液黏度的影响

图 9 为米糠油乳液的黏度在剪切率 1~300 s⁻¹ 时的变化。剪切率为 1 s⁻¹ 时, 米糠油乳液中油相

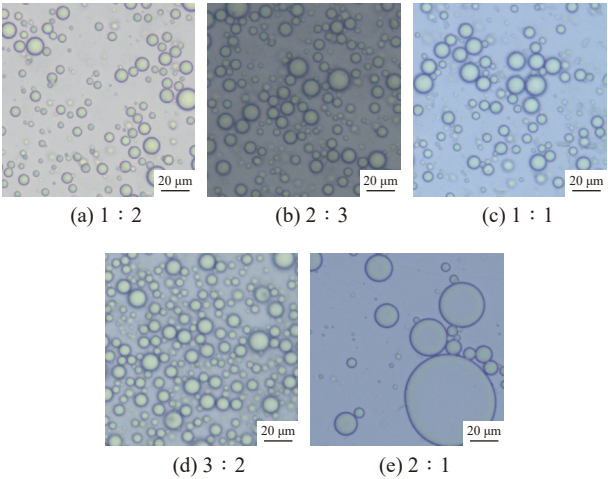


图8 不同脂水比的乳液的光学显微镜图

Fig. 8 Optical microscope images of emulsions with different lipid/water ratio

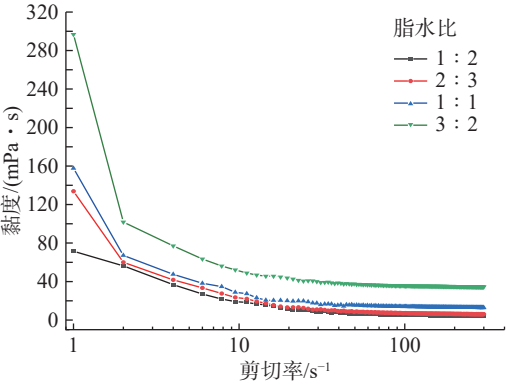


图9 脂水比对乳液黏度的影响

Fig. 9 Effect of lipid/water ratio on the viscosity of emulsion

增加，乳液的黏度呈增长趋势，脂水比在3：2时的黏度远远高于脂水比1：2时的黏度。由图可知，随着剪切率的增加，脂水比3：2时的黏度一直远大于其余各组。米糠油本身就具有一定的黏度，油相增多导致黏度增大。另一方面，油相体积增多，分布在较少的水相中，导致分散的空间较小，乳滴比较密集，导致乳液黏度增大。Dickinson^[20]在研究蛋白质稳定水包油乳状液时发现，乳液剪切的黏度增加和油滴在乳液体系中的堆叠程度有关。王小庆等^[21]也研究了油相比比例对黑豆分离蛋白乳液的影响，也得出了类似结论，增加了油相的黑豆分离蛋白乳液，由于油脂分子和蛋白质分子之间作用，增强了蛋白质分子之间的相互作用，使得蛋白质分子之间的连接更加紧密，制成乳液后其黏度逐渐增大。

2.3 超声强度对米糠油乳液的影响

2.3.1 超声强度对界面蛋白吸附量的影响

如图10所示，不同超声强度制备的米糠油乳

液的蛋白吸附量均在80%以上。彭松林等^[22]用均质机制备蛋白质质量分数为0.5%的大豆油乳液，界面蛋白吸附量仅为33.71%。超声作用大大提高了乳液的界面蛋白吸附量。一方面是超声作用导致乳液体系温度升高，促进了蛋白质的溶解，体系中可利用的蛋白质增多^[23]；另一方面是超声作用使体系中的分散相数量变多，因此油水界面面积增大，会有更多的蛋白质吸附在油水界面上。罗昭锋等^[24]发现超声处理可诱导蛋白聚集，而高压处理不会引起聚集。王中江等^[9]通过分析浊度与界面蛋白吸附量，发现超声处理可部分诱导纳米乳液液滴表面蛋白聚集，增加了界面蛋白含量。

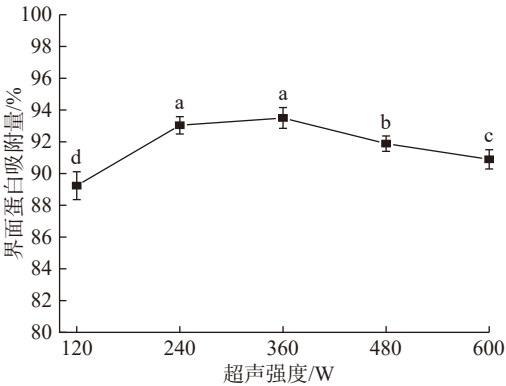


图10 超声强度对乳液界面蛋白吸附量的影响

Fig.10 Effect of ultrasonic intensity on the absorption of protein on emulsion

随着超声强度的增加，界面蛋白吸附量先增加后降低。超声功率在240～360 W的界面蛋白吸附量最大，但是再提升超声强度会降低其吸附量，导致这种情况的原因是超声强度过大，剧烈的超声作用影响了蛋白质的吸附作用。

2.3.2 超声强度对乳液粒径及分布的影响

图11给出了超声强度对乳液粒径的影响。由图11(a)可知，超声强度升高到240 W后油滴的平均粒径无明显差异。由图11(b)发现，240 W时油滴的平均粒径差异很小，但是超声波强度的增大会使粒径分布曲线变窄，说明高强度超声波会使乳液中的油滴粒径变得更加均匀。Pongsawatmanit等^[25]用超声波处理对β-乳球蛋白稳定的棕榈水包油乳剂也得到了相似的结论：超声波强度可以影响粒径的大小和分布，增强超声波强度可以使油滴粒径变小。

2.3.3 超声强度对蛋白质二级结构的影响

超声强度对酪蛋白酸钠红外光谱的影响见图12。

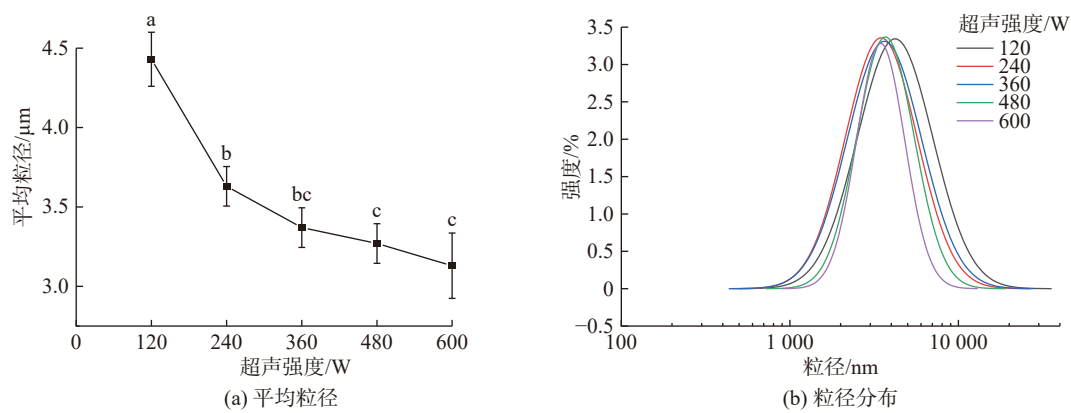


图 11 超声强度对油滴平均粒径及分布的影响

Fig.11 Effect of ultrasonic intensity on the average particle size and distribution of oil droplets

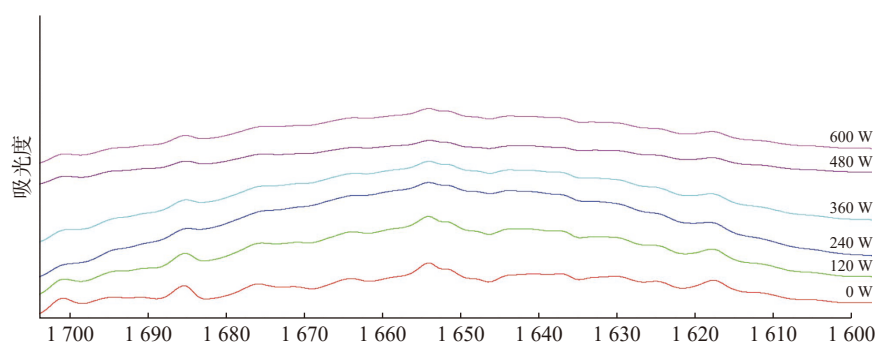


图 12 不同超声强度对酪蛋白酸钠红外光谱的影响 (波数 1 600~1 700 cm⁻¹)

Fig.12 Effect of intensity ultrasound on FTIR of sodium caseinate (wave number1 600~1 700 cm⁻¹)

超声波造成酪蛋白酸钠的二级结构的变化见图 13，主要是 β -转角和 β -折叠的比例发生改变，但是进一步增加超声波强度对酪蛋白酸钠二级结构的影响并不明显。蛋白质结构的变化可能有利于蛋白快速迁移到油脂表面，因此疏基和疏水基团的暴露使疏水相互作用或者共价键增强，有利于乳液

界面的稳定。

3 结 论

通过实验发现，酪蛋白酸钠-米糠油乳液的乳化特性与蛋白添加量、脂水比、超声强度有关。

a. 蛋白质质量分数 $\geq 0.6\%$ 时，界面蛋白吸附量达到 90%，并且乳液中的油滴平均粒径较小且分布均匀，质量分数为 0.6% 时的乳化活性较高，说明蛋白利用率较高，蛋白质添加量的增加会导致乳液黏度的增加。

b. 对黏度影响最大的是脂水比，当脂水比达到 3 : 2 时，黏度远大于其余各组，这与油滴在乳液体系统中的堆积有关。

c. 超声强度大大提高了乳液的各项性质，但是超声强度不宜过高，当超声强度大于 360 W 时，界面蛋白吸附量会下降。超声强度升高会使油滴在乳液中的分布更加均匀。超声波影响了酪蛋白酸钠的二级结构，酪蛋白酸钠的 β -转角和 β -折叠的比例发生了变化。

综上所述，当蛋白质质量分数达到 0.6%，脂

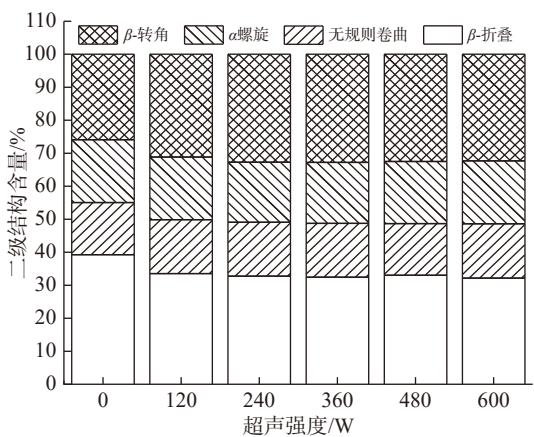


图 13 超声强度对酪蛋白酸钠二级结构的影响

Fig. 13 Effect of ultrasonic intensity on the secondary structure of ammonium caseinate

水比为3:2, 超声强度在240~360 W时, 酪蛋白酸钠-米糠油乳液的蛋白利用率高且稳定性较好。

参考文献:

- [1] 左英秀, 沈军. 稻米加工副产物米糠综合利用的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2020, 27(6): 11-14.
- [2] PRASAD B J, SHARAVANAN P S, SIVARAJ R. Retraction notice to "Health benefits of black rice -A review". [GAOST 2(2019) 109-113][J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2020, 3(4): 172.
- [3] KHOEI M, CHEKIN F. The ultrasound-assisted aqueous extraction of rice bran oil[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 503-507.
- [4] WEN X X, GOLDING M. Effects of urea addition on the structural and material properties of sodium caseinate solutions and emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 42: 162-170.
- [5] 宫晓玥, 向东, 李玉洁, 等. 酪蛋白酸钠-椰奶乳液的制备及表征[J]. *食品工业*, 2020, 41(1): 143-148.
- [6] 薛明华, 苏明旭, 蔡小舒. 超声多信号融合表征颗粒两相流实验研究[J]. *上海理工大学学报*, 2009, 31(1): 35-39,44.
- [7] 张伊依. 体系条件及超声波处理对大豆油预乳化效果的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [8] LI K, LI Y, LIU C L, et al. Improving interfacial properties, structure and oxidative stability by ultrasound application to sodium caseinate prepared pre-emulsified soybean oil[J]. *LWT*, 2020, 131: 109755.
- [9] 王中江, 常宗明, 张翠, 等. 超声波及高压均质制备大豆蛋白-磷脂酰胆碱纳米乳液的特性比较[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 157-165.
- [10] PEARCE K N, KINSELLA J E. Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1978, 26(3): 716-723.
- [11] KEERATI-U-RAI M, CORREDIG M. Heat-Induced changes occurring in oil/water emulsions stabilized by soy glycinin and β -conglycinin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16): 9171-9180.
- [12] 杨贵妃, 杨柳, 钟金锋, 等. 超声均质法制备以乳清蛋白-OSA 变性淀粉为乳化剂的纳米乳液[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(12): 169-175.
- [13] 刘潇. 小麦蛋白基乳液凝胶的构建、应用及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [14] BYLER D M, SUSI H. Examination of the secondary structure of proteins by deconvolved FTIR spectra[J]. *Biopolymers*, 1986, 25(3): 469-487.
- [15] 张根生, 岳晓霞, 李继光, 等. 大豆分离蛋白乳化性影响因素的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(7): 48-51.
- [16] 李良, 张小影, 朱建宇, 等. 大豆-乳清混合蛋白对 O/W 乳液稳定性及流变性的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 372-379.
- [17] CASTELLANI O, BELHOMME C, DAVID-BRIAND E, et al. Oil-in-water emulsion properties and interfacial characteristics of hen egg yolk phospholipids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(1): 35-43.
- [18] WANG J M, XIA N, YANG X Q, et al. Adsorption and dilatational rheology of heat-treated soy protein at the oil-water interface: relationship to structural properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 3302-3310.
- [19] 李成倍, 袁妍, 向琪瑞, 等. 酪蛋白酸钠水溶液流变特性研究[J]. *食品科技*, 2013, 38(6): 54-57,66.
- [20] DICKINSON E. Flocculation of protein-stabilized oil-in-water emulsions[J]. *Colloids and Surfaces B:Biointerfaces*, 2010, 81(1): 130-140.
- [21] 王小庆, 任健. 不同油相比对黑豆分离蛋白乳液凝胶特性的影响[J]. *中国油脂*, 2018, 43(1): 103-106.
- [22] 彭松林, 张伊依, 赵紫悦, 等. 酪蛋白酸钠-大豆油乳化体系的影响因素[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(1): 107-115,124.
- [23] JAMBRAK A R, LELAS V, MASON T J, et al. Physical properties of ultrasound treated soy proteins[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(4): 386-393.
- [24] 罗昭锋, 瞿鑫, 沐万孟, 等. 超声和高压处理对牛血清白蛋白结构的影响[J]. *中国生物工程杂志*, 2006, 26(1): 46-49.
- [25] PONGSAWATMANIT R, HARNSILAWAT T, MCCLEMENTS D J. Influence of alginate, pH and ultrasound treatment on palm oil-in-water emulsions stabilized by β -lactoglobulin[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, 287(1/3): 59-67.

(编辑: 董伟)