

豌豆蛋白结构修饰对咖啡冷冻充气乳液 品质特性的影响

杨焜婷, 叶子乐, 杨进洁, 宋柯颖, 蒋 将, 刘元法

(江南大学 食品学院, 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:以含有咖啡的冷冻充气乳液体系作为研究对象,将经过 pH 偏移处理、超声处理、pH 偏移结合超声处理后的豌豆分离蛋白应用到该体系中,测定了搅打前后乳液的理化性质和油脂结晶行为,分析豌豆蛋白结构修饰对咖啡冷冻充气乳液体系品质特性的影响。结果表明:pH 偏移和超声处理后的蛋白乳液粒径均减小,黏度增加,并可以在相应乳液中观察到脂肪簇的聚集,促进液滴中脂肪晶体的穿刺从而导致脂肪的部分聚结,利于充气结构中气泡的保留。在搅打后,pH 偏移处理、超声处理、pH 偏移结合超声处理的乳液膨胀率由 32.49% 分别提高到 55.04%、45.07% 和 63.97%,并具有较好的保形性,说明乳液在充气后形成良好的油脂三维网络结构,抑制了脂肪晶体的迁移,改善了流变性能;同时在经过 pH 偏移和超声处理后乳液中形成了更小的冰晶,获得更细腻的质地;其中以 pH 偏移结合超声处理的乳液的品质最佳。

关键词:豌豆分离蛋白;pH 偏移处理;超声处理;咖啡;冷冻充气乳液

中图分类号:TS201.21;TS277 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)04-0102-07

Effect of structural modified pea protein on the quality characteristics of coffee frozen aerated emulsions

YANG Kunting, YE Zile, YANG Jinjie, SONG Keying, JIANG Jiang, LIU Yuanfa

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: With the frozen aerated emulsion system containing coffee as subject, the pea protein isolate with pH - shifting treatment, ultrasonic treatment and their combination were applied to the emulsion system, the physicochemical properties and fat crystallization behavior of the emulsion before and after whipping were determined to analyze the effect of the modification of pea protein on the coffee frozen aerated emulsion system. The results showed after pH - shifting and ultrasonic treatment, the particle size of the emulsions decreased, the viscosity increased, and more dense fat clusters could be observed in emulsions, which would promote the puncture of fat crystals in the droplets leading to partial coalescence of fat and facilitating the retention of bubbles. After whipping, the expansion rate of emulsion stabilized by proteins treated by pH - shifting, ultrasonic and their combination increased from 32.49% to 55.04%, 45.07%, and 63.97%, respectively, and had better shape retention, which indicated that the emulsions formed a good three - dimensional fat network structure after whipping, inhibited the migration of fat crystals, and improved rheological properties. Smaller ice crystals were formed in emulsions after

pH - shifting and ultrasonic treatments and the texture of emulsions got finer, and the quality of the frozen aerated emulsion obtained by the combination treatment of pea protein was the best.

Key words: pea protein isolate; pH - shifting treatment; ultrasonic treatment; coffee; frozen aerated emulsion

收稿日期:2021-05-27;修回日期:2021-11-28

基金项目:山东省重点研发计划课题(2020CXGC0106042)

作者简介:杨焜婷(1995),女,在读硕士,研究方向为油脂与植物蛋白(E-mail)6180112103@stu.jiangnan.edu.cn。

通信作者:蒋 将,教授,博士生导师(E-mail)jiangjiang@jiangnan.edu.cn。

冷冻充气乳液,包括市面上常见的冰淇淋、冷冻奶油和加工蛋黄酱等食品,是一种复杂的泡沫体系^[1-2]。该体系可由均质后的 O/W 乳液在经过冷冻老化及搅打后,连续相包裹空气增稠,形成充气结构。小分子乳化剂和蛋白质通过竞争性吸附作用吸附在脂肪球表面,形成具有黏弹性的界面膜,从而促进在后续过程中脂肪部分聚结行为的发生^[3-4]。低温条件下对乳液进行搅打时,油滴中的脂肪晶体会刺破界面膜,并与相邻的脂肪球内脂肪部分聚结形成脂肪晶体的三维网络结构^[5]。在之后的储存和硬化过程中,充气乳液内部冰晶的形成也对最终产品的感官质量和稳定性起到至关重要的作用^[6]。

咖啡与茶、可可并称为世界三大饮料,随着我国人民生活水平的提高,咖啡这一传统的西方饮食也逐渐受到关注,在经过适当的烘焙处理后,咖啡豆中的成分会发生一系列化学反应,形成较好的咖啡特征风味。Heimovi 等^[7]发现在轻度和中度烘焙条件下,咖啡中的多酚含量较高。咖啡中的多酚主要有绿原酸、咖啡酸和阿魏酸等,具有很高的抗氧化能力,可预防多种疾病,如心脑血管疾病、癌症,并且可以延缓衰老。通过在冷冻充气乳液的生产过程中添加适量咖啡,不但可以增加乳液的功能性,丰富品种,也可以改善咖啡的单一饮用方式。

目前,牛奶蛋白由于其良好的界面性能和持水性被广泛应用于冷冻充气乳液体系中^[8-9]。但牛奶蛋白热量较高,并含有乳糖,对过敏人群不够友好。豌豆蛋白必需氨基酸含量丰富,具有良好的营养价值和较低的致敏性,是一种重要的植物蛋白源。但是由于豌豆蛋白结构致密,导致其乳化性、起泡性等功能性质较差,从而限制了豌豆蛋白在食品工业中的应用^[10]。

改性修饰常用来改善蛋白质的功能性质。pH 偏移是一种温和简便的化学改性方法,其原理为将蛋白质暴露在远离等电点的极端 pH 条件下,蛋白质分子表面的电荷分布发生变化,其产生的排斥力促使蛋白质分子展开,而当 pH 调回中性时,蛋白质分子的结构发生一定程度折叠,二、三级结构发生变化,处于熔球态,此时的蛋白质结构部分展开,内部的疏水性基团暴露,表面疏水性增强,乳化性、起泡性等功能性质得到改善^[11]。超声技术是一种物理改性方法,其利用超声的空化效应以机械性断键来改变蛋白质的结构,促进蛋白质构象改变,蛋白质的聚集程度降低,亚基发生解离,从而改善蛋白质的功能特性^[12]。pH 偏移结合超声处理可以进一步提高

蛋白质的功能特性,如 Li 等^[13]通过超声辅助 pH 偏移处理对菜籽分离蛋白进行改性,结果发现,超声辅助 pH 偏移处理可以显著提升菜籽分离蛋白溶解度,并且蛋白质的二级结构与三级结构发生变化,证明超声辅助 pH 偏移处理是一种有效的蛋白质修饰方式。

目前,植物蛋白在冷冻充气乳液体系中的应用较少,为制备植物基冷冻充气乳液,本研究使用豌豆蛋白替代牛奶蛋白作为蛋白源,通过 pH 偏移处理、超声处理和二者结合对豌豆蛋白进行改性,并将其应用于含有咖啡的冷冻充气乳液体系中,测定搅打前后乳液的品质特性,为豌豆蛋白在食品体系中的应用提供理论依据和指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

豌豆,购于无锡雪浪菜市场;椰子油,购于无锡欧尚超市;蔗糖酯(S370,HLB 值为 3),日本三菱公司;食品级瓜尔胶,淄博中轩生化有限公司;氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl)、蔗糖等均为分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司;中度烘烤咖啡豆、纸质滤膜,购于无锡星巴克咖啡店。

1.1.2 仪器与设备

Turbiscan Lab Expert 多重光散射仪,法国 Formulacion 公司;超声波细胞破碎机,宁波新芝生物科技有限公司;DHR3 流变仪,美国 TA 仪器公司;Ultra-Turrax T18 高速分散器,德国 IKA 公司;AH-2010 高压均质机,加拿大 ATS 公司;Zetasizer nano ZS 纳米粒度与 Zeta 电位仪,英国马尔文公司;DM2700P 偏光显微镜(PLM),德国 Leica 公司;5804R 冷冻离心机,美国 Eppendorf 公司;ICM-150 冰淇淋机,香港德国宝公司;HH-2 数显恒温水浴锅,金坛市精达仪器厂;pH 计,梅特勒-托利多仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 豌豆分离蛋白的制备

将豌豆利用粉碎机粉碎,称取一定量的豌豆粉,按料水比 1:10 分散至去离子水中,用 2 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 9.0,室温搅拌 2 h 后在 10 000 × g、4℃ 的条件下离心 30 min,上清液采用 2 mol/L 的 HCl 调至 pH 4.5,静置 30 min,在 4℃、3 000 × g 的条件下离心 20 min。沉淀水洗 3 次,至水洗液 pH 为 7.0,冷冻干燥,得豌豆分离蛋白(NPP)。

1.2.2 豌豆分离蛋白的改性

将 NPP 粉末均匀分散于去离子水中,制成 NPP

质量分数为 10% 的溶液,在室温下搅拌 1.5 h 后置于 4 °C 冰箱中过夜保存,使得蛋白质分子充分水化,待处理。

pH 偏移处理:取一定量 NPP 溶液,用 2 mol/L NaOH 溶液将其 pH 调至 12,搅拌 60 min 后,利用 2 mol/L HCl 将溶液的 pH 调至中性并稳定 1 h,得 pH 偏移处理蛋白(BPP)。

超声处理:利用超声波细胞破碎机对豌豆分离蛋白溶液进行超声处理。将 NPP 溶液置于 50 mL 烧杯中,将超声探头置于液面下 1.0 cm 进行处理。超声处理条件为超声功率 475 W、超声频率 20 kHz、超声脉冲间歇比 5 s/5 s、处理时间 5 min,得超声处理蛋白(UNPP)。

pH 偏移结合超声处理:将 BPP 溶液进行超声处理。两种改性条件均与单独处理一致,得 pH 偏移结合超声处理蛋白(UBPP)。

1.2.3 咖啡与豌豆蛋白溶液的混合

将中度烘焙咖啡豆粉碎后,于 100 °C 的去离子水中浸提 10 min,并将浸提液通过纸质滤膜进行过滤,将滤液进行喷雾干燥,得到咖啡粉。相同质量咖啡粉与经过不同改性处理的豌豆蛋白溶液室温搅拌混合 2.5 h 以上,得到含有咖啡的豌豆蛋白溶液(咖啡粉质量分数 0.375%)。

1.2.4 搅打前乳液的制备

将 0.3% 蔗糖酯(S370)、0.2% 瓜尔胶、15% 蔗糖和 4% (豌豆蛋白质量分数计)含有咖啡的豌豆蛋白溶液混合,再加入 10% 的椰子油混合,补充去离子水使最终体系质量分数为 100%。在 60 °C 下搅拌至完全分散,之后使用高速分散器在 13 800 r/min 条件下将混合物混合 2 min 获得粗乳液,将其置于 80 °C 水浴锅中保温 10 min 进行巴氏杀菌,随后使用高压均质机对粗乳液进行两段式高压均质(15 MPa/3 MPa)得到细乳液,立即置于 4 °C 下冷却并保存 6 h 进行老化。

1.2.5 搅打前乳液的稳定性表征

利用 Turbiscan Lab Expert 多重光散射仪对搅打前乳液稳定性进行测定。取一定量细乳液至仪器专用玻璃瓶中,并轻放至仪器测试槽中,设置测试温度 30 °C,测试时长 60 min。通过脉冲近红外(波长 880 nm)光源对样品进行扫描,仪器的同步检测器可接收不能通过样品的背散射光(BS)。基于接收到的样品的背散射光强度变化,使用 TurbiSoft Ver 2.1.0.52 分析数据。Turbiscan 稳定性指数(TSI)根据式(1)计算。

$$I_{TS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{BS})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中: I_{TS} 为稳定性指数; x_i 为每次扫描过程的背散射光强度; x_{BS} 为平均背散射光强度; n 为扫描次数。

1.2.6 搅打前乳液的流变特性分析

取一定量在 4 °C 老化 6 h 的细乳液,使用流变仪在 4 °C 恒温下测试搅打前乳液的流变性质。样品在测量之前的平衡时间均为 120 s。

静态流变:采用直径 40 mm 的 4° 锥板在 0.1 ~ 100 s⁻¹ 的剪切速率下进行剪切黏度测试。

动态流变:采用直径 40 mm 的平板测试乳液样品的黏弹性。在线性黏弹区选择合适的应变(0.1%)条件,设置频率范围为 0.1 ~ 10 Hz,测试搅打前乳液的黏性模量(G'')。

1.2.7 搅打前乳液的油脂结晶行为观察

将一定量按 1.2.4 方法制备的细乳液加热至 80 °C 以消除乳液油相的结晶记忆,使用点样棒取 1 滴乳液置于预热的载玻片上并覆盖盖玻片,轻轻按压后置于 4 °C 恒温箱中保存 12 h 以便油脂结晶的生长。之后用配备有 Canon 数码相机的偏光显微镜在目镜 10 ×、物镜 20 × 的条件下观察乳液油相部分的结晶形态。

1.2.8 搅打前乳液粒径的测定

使用纳米粒度与 Zeta 电位仪测量乳液粒径的分布。取一定量在 4 °C 老化 6 h 的细乳液,用去离子水稀释 1 000 倍,取 3 mL 稀释液置于专用比色皿中测定平均粒径(Z-Ave)。测定条件为:测试温度 25 °C,平衡时间 120 s。

1.2.9 冷冻充气乳液的制备

将 300 g 老化的细乳液在刮面式冰淇淋机中连续搅打 15 min(冰淇淋机内壁温度 -20 °C,机器中心温度 -5 ~ -6 °C)后,快速置于 -18 °C 下硬化 48 h,得冷冻充气乳液。

1.2.10 冷冻充气乳液膨胀率的测定

先后取相同体积老化的细乳液(m_1)和搅打 15 min 的细乳液(m_2)于质量相同的铝盒中称重,并根据下式计算膨胀率(x)。

$$x = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100\% \quad (2)$$

1.2.11 冷冻充气乳液融化特性的分析

取 60 g 冷冻充气乳液置于 96 孔板上,并在室温(20 °C)条件下自然融化 60 min,记录第一滴样品滴下的时间(T_s)。在融化结束后测量样品在 60 min 内的滴漏量,并将融化速率表示为第 60 min 时

的滴漏质量相对于初始样品质量的比例。测试期间每隔 30 min 记录样品形状的变化,评估样品在融化过程中保持其初始形状的能力。

1.2.12 冷冻充气乳液中冰晶形态的观察

为观察冰晶分布,在温度程序下模拟冷冻充气乳液制备过程中的温度变化,利用显微镜观察冰晶的最终形态。温度程序为:将搅打前的乳液在 4 ℃ 下保持 10 min,然后以 24 ℃/min 的速度冷却至 -20 ℃,然后以 1.5 ℃/min 升温至 -6 ℃,并保持 4 min,最后将样品冷却至 -18 ℃ 保持 10 min 后进行拍照记录。将每个样品的冰晶图片选取 3 张,利用 Image-Pro Plus 6.0 对其结冰情况进行分析。

1.2.13 数据处理与分析

实验数据通过数据分析软件 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(ANOVA)。多组样品间的差异显著性分析通过 Duncan 模型检验获得,图形的绘制使用 Origin 9.4 软件。 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与讨论

2.1 搅打前乳液的稳定性

在搅打前,乳状液体系需要保持稳定均一,这也是形成冷冻充气乳液体系的前提。按 1.2.5 方法测定搅打前乳液的 TSI,结果见图 1。

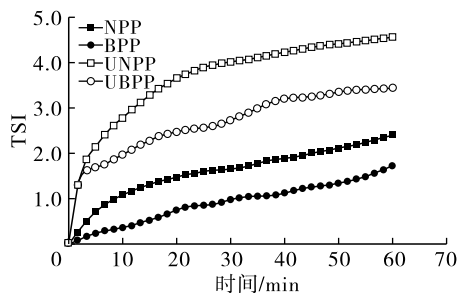


图 1 搅打前乳液的稳定性指数

Turbican Lab Expert 多重光散射仪可以通过分析单位时间内背散射光强度的变化对样品中分子的运动情况进行分析,并通过比较不同时刻样品背散射光强度的变化来检测样品的稳定性动力学,直观地反映样品的稳定性^[14-15]。由图 1 可看出,经过 pH 偏移处理后,乳液的 TSI 下降,但是在经过超声处理后,乳液的 TSI 有所增大。TSI 越大说明乳液越不稳定。Ertugay 等^[16]研究发现,pH 偏移处理可以使蛋白质的部分结构展开从而改善其界面性质,乳化性和起泡性得到改善,可以形成更具黏弹性的界面膜。超声处理可有效地解离蛋白质分子中的亚基,通过超声空化作用破坏蛋白质分子中的疏水键和氢键,从而使乳液稳定性下降,TSI 增大,但通过

实验观察,经超声处理的乳液在搅打前仍然保持稳定。搅打前乳液稳定性一定程度的下降有利于搅打时乳液的失稳,从而使乳液在搅打时更容易形成充气结构。

2.2 搅打前乳液的流变性质(见图 2)

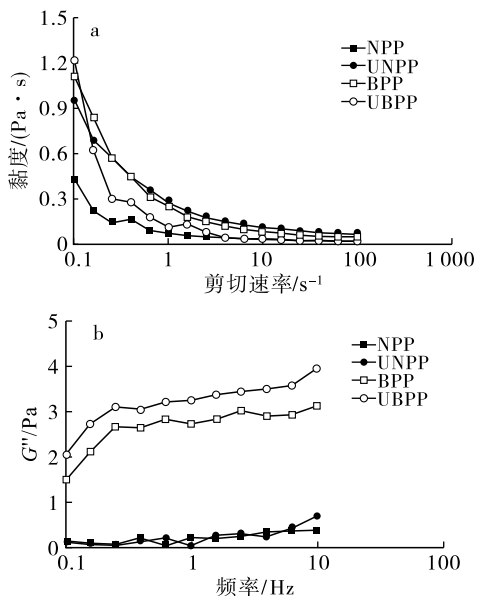


图 2 搅打前乳液的流变特性

乳液的黏度也与其搅打过程密切相关。乳液黏度过高时,在搅打过程中不易包裹气泡,很难获得较好的膨胀率,而乳液黏度较低时,也不利于体系对于气泡的截留。由图 2a 可看出,随着剪切速率(0.1 ~ 100 s⁻¹)的不断增大,4 种乳液样品的黏度均下降并表现出剪切变稀的趋势,且经 pH 偏移处理和超声处理后,乳液的黏度增大,4 种搅打前乳液的初始黏度大小顺序为 UBPP > BPP > UNPP > NPP。搅打前乳液黏度的提高有利于降低乳液的水分活度和结冰温度,进而使得冷冻充气乳液口感提升,冰晶减小,同时增加一定的抗融性能^[17]。由图 2b 可看出,经过 pH 偏移处理后乳液的 G' 增大,进一步通过超声处理,乳液的 G' 进一步增大,这是因为蛋白质在水相中展开程度增加所致^[12]。

2.3 搅打前乳液的油脂结晶分布

搅打前乳液在老化的过程中,乳液中的油脂部分会发生结晶行为,这会影响到后续搅打过程中油脂骨架的形成和乳液充气结构的稳定性。乳液中油脂结晶的形态是影响最终冰淇淋体系物化性质的关键因素。图 3 为 NPP、BPP、UNPP 和 UBPP 搅打前乳液的油脂结晶分布情况及粒径。

由图 3 可看出,NPP 乳液中的油脂结晶数量较少,且结晶分布较为分散,BPP、UNPP、UBPP 乳液具有较 NPP 乳液中更多的油脂结晶分布,UNPP 和

UBPP 乳液中脂肪晶体增加,同时出现了晶体的聚结行为。同时,根据乳液的平均粒径分布发现,pH 偏移处理后,乳液的平均粒径减小,这说明 pH 偏移可以促进乳液形成更小的液滴,再经超声处理后,粒径分布进一步降低,这与 Ertugay 等^[16]报道的结果类似,超声处理可促进乳液体系中的液滴更加均一细小。而仅超声处理,乳液粒径相比未经处理略有减小。

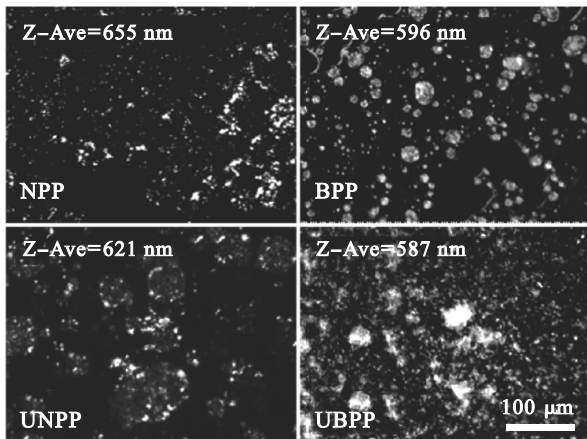


图3 搅打前乳液的油脂结晶分布情况及粒径

2.4 冷冻充气乳液的膨胀率

冷冻充气乳液的膨胀率可以表征乳液在搅打过程中截留气泡的能力,同样,膨胀率的增长也代表着油脂部分聚结水平的增加^[18]。冷冻充气乳液的膨胀率如图4所示。

由图4可知,NPP 冷冻充气乳液的膨胀率仅有32.49%,而在 pH 偏移处理及超声处理后膨胀率分别提高至55.04%和45.07%。BPP 冷冻充气乳液

经过超声处理后,膨胀率进一步提高,达到了63.97%。搅打过程中,油脂的部分聚结行为使得油滴中的脂肪晶体形成三维网络结构,这种脂肪晶体的网络结构可以固定流动的气泡,使得气泡不容易破裂流出,乳液由油-水界面稳定转化为空气-水、空气-油界面稳定,形成最终的充气结构。BPP 的熔球结构在搅打过程中有利于脂肪晶体穿透形成油脂部分聚结结构,从而固定气泡,膨胀率增大。超声处理后,蛋白质分子结构发生变化,并且乳液中由于含有较多的脂肪晶体,稳定性有一定的下降,液滴的界面膜变薄,脂肪晶体更容易刺穿界面膜,从而促进脂肪晶体的部分聚结行为,形成更稳定的油脂骨架,固定住更多的气泡,最终乳液的膨胀率提高。适当的膨胀率可以使得最终的冷冻充气乳液口感柔软细腻,这同样与蛋白质结构的柔韧性和乳液的稳定性有关。

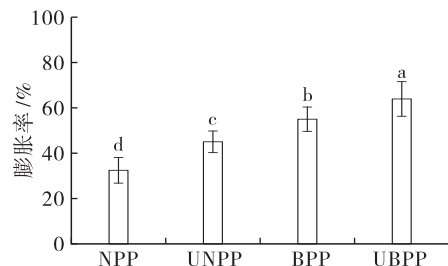


图4 冷冻充气乳液的膨胀率

2.5 冷冻充气乳液的融化特性

冷冻充气乳液的融化特性是评价其产品性能的重要指标,其受到多种因素的影响,如乳液的膨胀率、黏度等。冷冻充气乳液的融化特性如图5和表1所示。

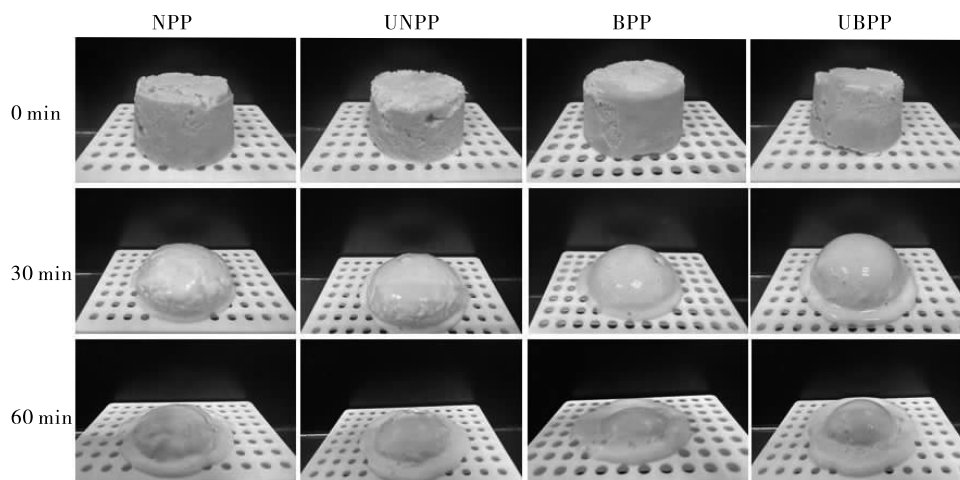


图5 冷冻充气乳液在融化0、30、60 min 时的外形形态

由图5可看出,室温放置30 min时,不同处理的冷冻充气乳液均已出现不同程度的融化行为,且 pH 偏移处理和超声处理具有协同减缓冷冻充气乳液融化速率的作用。脂肪晶体的部分聚结行为会影

响冷冻充气乳液的融化速率,融化速率越慢,三维网络结构越稳定,保形性越好。Soukoulis 等^[19]研究发现,充气乳液膨胀率的增加会导致乳液内部具有较低的传热速率,这是因为结构中的气泡会导致传热

速率减慢。BPP 和 UBPP 冷冻充气乳液由于其较高的膨胀率,融化过程中表面出现气泡,并且融化速率显著降低($P < 0.05$)(见表 1)。在融化 60 min 后样品周围出现了融化部分的堆积行为,这与乳液的黏度适当增加有利于气泡的截留有关。Pereira 等^[20]研究发现,搅打前乳液黏度的增加使形成的充气乳液具有更高的抗融性。

表 1 冷冻充气乳液融化开始时间(T_s)及测量 60 min 时的融化速率

乳液	T_s/s	融化速率/%
NPP	723 ± 17^c	79 ± 2^a
UNPP	719 ± 13^c	78 ± 4^a
BPP	975 ± 6^b	72 ± 3^b
UBPP	$1\ 216 \pm 16^a$	51 ± 3^c

注:不同字母表示同一列数据间具有显著差异($P < 0.05$)。下同

2.6 冷冻充气乳液中的冰晶观察

理想的冷冻充气乳液应具有光滑、无明显冰晶感的质地,并且期望的冰晶尺寸应小于 $55\ \mu\text{m}$ ^[21]。冰晶的大小会影响乳液的功能特性,其平均尺寸会影响搅打充气乳液的质地和外观^[22]。图 6 为冷冻充气乳液中的冰晶形态。表 2 为冷冻充气乳液的结冰面积。

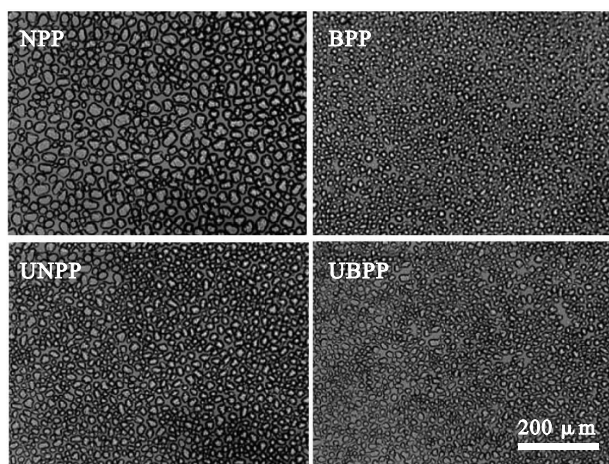


图 6 冷冻充气乳液中的冰晶形态

表 2 冷冻充气乳液的结冰面积

乳液	结冰面积/%
NPP	83.46 ± 0.03^a
UNPP	73.14 ± 0.06^c
BPP	77.25 ± 0.06^b
UBPP	70.36 ± 0.05^d

由图 6 和表 2 可看出,BPP 冷冻充气乳液中的冰晶尺寸小于 NPP 冷冻充气乳液,并且结冰面积有所下降。UNPP 和 UBPP 冷冻充气乳液中的冰晶尺

寸比未超声处理的冷冻充气乳液有所下降。冰晶的形成与水相中的自由水含量有关,结冰面积越大,自由水含量越多,说明 pH 偏移处理和超声处理均可以改善蛋白质的持水能力,从而减少乳液中的自由水含量,限制冰晶的生长。同时可以看出,pH 偏移处理结合超声处理形成的冰晶更加细小、致密,UBPP 乳液中的结冰面积比 NPP 乳液相比下降了 15.7%。pH 偏移处理后,再经超声处理,可以进一步提高蛋白质的持水性,有利于冷冻充气乳液形成更小的冰晶,减少乳液中的结冰面积。

3 结 论

pH 偏移处理和超声处理均可以改善豌豆蛋白界面性质,以二者及二者结合用于豌豆蛋白的改性中,并将改性豌豆蛋白用于咖啡冷冻充气乳液的制备,考察改性方法对咖啡冷冻充气乳液品质的影响。结果发现,pH 偏移结合超声处理的豌豆蛋白应用在咖啡冷冻充气乳液中时,搅打前的乳液具有最高的黏度和较多的脂肪簇聚集行为,搅打后形成的冷冻充气乳液的膨胀率最高,并具有良好的保形性,形成了较好的油脂三维网络结构,融化速率降低,并且乳液中的冰晶尺寸最小。pH 偏移、超声处理豌豆蛋白可为拓宽冷冻充气乳液的种类和实际加工过程提供指导。

参考文献:

- [1] HUCK - IRIART C, PIZONES RUIZ - HENESTROSA V M, CANDAL R J, et al. Effect of aqueous phase composition on stability of sodium caseinate/sunflower oil emulsions [J]. Food Bioproc Tech, 2013, 6 (9): 2406 - 2418.
- [2] JIANG J, JIN Y, LIANG X Y, et al. Synergetic interfacial adsorption of protein and low - molecular - weight emulsifiers in aerated emulsions [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 81: 15 - 22.
- [3] GOIBIER L, LECOMTE S, LEAL - CALDERON F, et al. The effect of surfactant crystallization on partial coalescence in O/W emulsions [J]. J Colloid Interface Sci, 2017, 500: 304 - 314.
- [4] CAO Z Y, LIU Z L, ZHANG H J, et al. Protein particles ameliorate the mechanical properties of highly polyunsaturated oil - based whipped cream: a possible mode of action [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2019, 99: 105350 [2021 - 05 - 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105350>.
- [5] PETRUT R F, DANTHINE S, BLECKER C. Assessment of partial coalescence in whippable oil - in - water food emulsions [J]. Adv Colloid Interface Sci, 2016, 229: 25 - 33.

- [6] SOUKOULIS C, FISK I. Innovative ingredients and emerging technologies for controlling ice recrystallization, texture, and structure stability in frozen dairy desserts: a review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2016, 56 (15): 2543 – 2559.
- [7] HEIMOVI I, BELAK – CVITANOVI A, HORI D, et al. Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting [J]. *Food Chem*, 2011, 129 (3): 991 – 1000.
- [8] RELKIN P, SOURDET S, SMITH A K, et al. Effects of whey protein aggregation on fat globule microstructure in whipped – frozen emulsions [J]. *Food Hydrocolloid*, 2006, 20 (7): 1050 – 1056.
- [9] HIDALGO M E, BORDINO J, ACCIARRI G, et al. Effects of cholesterol extraction process and fat and whey protein additions on ice cream mixes [J]. *J Food Sci*, 2019, 84 (5): 980 – 989.
- [10] 丁芳芳, 田少君, 常慧敏, 等. 超声改性豌豆蛋白乳液稳定性的研究 [J]. *中国油脂*, 2020, 45 (2): 76 – 80, 100.
- [11] 蒋将. pH 偏移处理诱导熔球态大豆蛋白的结构变化及功能性质的改善 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2011.
- [12] ZHONG Z, XIONG Y L. Thermosonication – induced structural changes and solution properties of mung bean protein [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 62: 104908 [2021 – 05 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104908>.
- [13] LI Y H, CHENG Y, ZHANG Z L, et al. Modification of rapeseed protein by ultrasound – assisted pH shift treatment: ultrasonic mode and frequency screening, changes in protein solubility and structural characteristics [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 69: 105240 [2021 – 05 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105240>.
- [14] LEMARCHAND C, COUVREUR P, VAUTHIER C, et al. Study of emulsion stabilization by graft copolymers using the optical analyzer Turbiscan [J]. *Int J Pharmaceut*, 2003, 254 (1): 77 – 82.
- [15] ROLAND I, PIEL G, DELATTRE L, et al. Systematic characterization of oil – in – water emulsions for formulation design [J]. *Int J Pharmaceut*, 2003, 263 (1): 85 – 94.
- [16] ERTUGAY M F, SENGUL M. Effect of ultrasound treatment on milk homogenisation and particle size distribution of fat [J]. *Turk J Vet Anim Sci*, 2004, 28 (2): 303 – 308.
- [17] 陈龙. 纳米微晶纤维素作为脂肪替代品在冰淇淋中的应用 [D]. 天津: 天津商业大学, 2015.
- [18] WARREN M M, HARTEL R W. Effects of emulsifier, overrun and dasher speed on ice cream microstructure and melting properties [J]. *J Food Sci*, 2018, 83 (1/2/3): 639 – 647.
- [19] SOUKOULIS C, CHANDRINOS I, TZIA C. Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with κ – carrageenan on storage quality of vanilla ice cream [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2008, 41 (10): 1816 – 1827.
- [20] PEREIRA G D, DE RESENDE J V, DE ABREU L R, et al. Influence of the partial substitution of skim milk powder for soy extract on ice cream structure and quality [J]. *Eur Food Res Technol*, 2011, 232 (6): 1093 – 1102.
- [21] PARK S H, JO Y J, CHUN J Y, et al. Effect of frozen storage temperature on the quality of premium ice cream [J/OL]. *Korean J Food Sci An*, 2015, 35 (6): 793 [2021 – 05 – 27]. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.6.793>.
- [22] COOK K L K, HARTEL R W. Mechanisms of ice crystallization in ice cream production [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2010, 9 (2): 213 – 222.

· 公益广告 ·

适度加工，营养更丰富！

《中国油脂》宣

