

脱脂芝麻粕稳定高内相乳液的制备及特性

杨思琪^{1,2}, 王 凌¹, 李 斌¹, 邓乾春², 李 晶¹, 魏先领¹

(1. 华中农业大学 食品科技学院, 武汉 430070; 2. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430070)

摘要:分别以去皮和带皮脱脂芝麻粕为稳定剂制备了高内相乳液(HIPEs),研究了该乳液的基本性质,探讨了脱脂芝麻粕添加量、油相体积分数、体系 pH 以及离子浓度对 HIPEs 微观结构、粒径及流变性质的影响。结果表明:油相体积分数为 0.75 时,去皮和带皮脱脂芝麻粕稳定 HIPEs 的最低添加量分别为 5.0% 和 3.0%;去皮和带皮脱脂芝麻粕添加量为 5.0% 时,其稳定 HIPEs 的最高油相体积分数分别为 0.75 和 0.85;脱脂芝麻粕在中性 pH 以及添加适量 NaCl 下,制备的 HIPEs 更稳定。流变性质研究表明,HIPEs 内部存在以弹性为主的凝胶网络结构,随着脱脂芝麻粕添加量的增大,HIPEs 粒径逐渐减小且呈均匀分布,黏弹性能逐渐增大。

关键词:脱脂芝麻粕;高内相乳液;凝胶网络结构;黏弹性能

中图分类号:TS229;O648.2+3 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)06-0018-07

Preparation and characterization of high internal phase emulsions stabilized by defatted sesame meal

YANG Siqu^{1,2}, WANG Ling¹, LI Bin¹, DENG Qianchun²,
LI Jing¹, WEI Xianling¹

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430070, China)

Abstract: High internal phase emulsions (HIPEs) were prepared using defatted sesame meal (DSM) and peeled defatted sesame meal (PDSM) as stabilizers, and the basic properties of the emulsion were studied. The effects of sesame meal dosage, oil phase volume fraction, pH and ion concentration on the microstructure, particle size and rheological properties of HIPEs were examined. The results indicated that at an oil phase volume fraction of 0.75, the minimum dosages of PDSM and DSM were 5.0% and 3.0%, respectively; at DSM and PDSM dosage of 5.0%, the highest oil phase volume fractions of PDSM and DSM stabilizing HIPEs were 0.75 and 0.85, respectively; DSM and PDSM stabilized HIPEs had the best stability under the condition of neutral pH as well as proper amount of NaCl. The rheological properties showed that there was an elasticity-dominated gel-like network structure inside HIPEs. As the increases of DSM and PDSM dosages, the particle size of HIPEs decreased and distributed uniformly, and the viscoelasticity increased.

Key words: defatted sesame meal; high internal phase emulsion; gel-like network structure; viscoelasticity property

收稿日期:2020-01-15;修回日期:2020-03-26

基金项目:湖北省自然科学基金创新群体项目(2019CFA011)

作者简介:杨思琪(1995),女,在读硕士,研究方向为天然产物化学与食品化学(E-mail) siqiqiysq@163.com。

通信作者:王 凌,副教授,博士(E-mail) wangling@mail.hzau.edu.cn。

芝麻油生产过程中产生大量的副产物——芝麻饼粕或芝麻渣^[1],芝麻粕富含蛋白质、碳水化合物、木脂素类化合物以及矿物质元素等^[2]。目前国内对外对芝麻粕的利用主要在饲料开发上^[3],以及提取芝麻粕中的蛋白用于植物蛋白饮料、休闲食品、调味品等^[4],但总体对芝麻粕的利用较少。

高内相乳液 (High internal phase emulsions, HIPEs) 一般是指内相体积分数占总体积分数超过 0.74 的乳液体系^[5], 可广泛用于药物递送、化妆品、多孔聚合物材料、生物活性物质保护等领域^[6-7]。目前可用来稳定 HIPEs 的物质主要有小分子表面活性剂、固体颗粒物、两亲性嵌段共聚物, 以及通过表面活性剂和固体颗粒的协同作用来稳定乳液等^[8]。传统的 HIPEs 一般是由小分子表面活性剂稳定的, 但是由于小分子表面活性剂在动力学上不稳定的特性, 在油水界面的粘附作用比较弱, 一般需要大量的表面活性剂来稳定乳液^[9]。研究发现, 由固体胶体颗粒稳定的 HIPEs 在低相对分子质量表面活性剂方面比常规的 HIPEs 更具优势, 因为其表现出较强的抗凝聚稳定性, 并且可形成黏弹性可控的凝胶状网络结构^[10], 对食品质量保持和质构调控均有一定作用, 目前许多无机和有机颗粒已被用作 HIPEs 的有效稳定剂, 但是其中食品级颗粒在食品生产中的应用不是很广泛。两亲性嵌段共聚物由于其两亲特性和空间排布结构, 在 HIPEs 的制备过程中不仅可以作为表面活性剂稳定 HIPEs, 还可以发挥表面修饰作用^[11]。此外, 由于水包油型 HIPEs 的水分含量相对较少, 因此具备良好的微生物稳定性^[12], 可降低自身变质速率, 减少防腐剂用量, 从而延长食品的货架期。

脱脂芝麻粕具有良好的乳化性质, 可以用作乳化剂制备 O/W 乳液^[13], 目前尚未见关于其稳定 HIPEs 的研究。在前期的研究中, 经过接触角的测量得知, 带皮脱脂芝麻粕具有中间润湿性, 在油水界面的吸附性能较好, 并且用其制备的低油相乳液具有较好的稳定性, 在此基础上, 进一步探究其是否能稳定更高油相的乳液体系。本文以实验室制备的脱脂芝麻粕为原料, 通过乳液外观、光学显微镜、乳液粒径和动态振荡扫描等, 探究去皮脱脂芝麻粕和带皮脱脂芝麻粕稳定 HIPEs 的性质以及脱脂芝麻粕添加量、pH、油相体积分数、离子强度对 HIPEs 的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

带皮芝麻和去皮芝麻, 购于鲁丰食品有限责任公司; 金龙鱼大豆油, 益海嘉里投资有限公司; 石油醚、叠氮化钠、盐酸、氢氧化钠等均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

FW135 粉碎机; DSHZ-300A 水浴恒温振荡器; GZX-9070 MBZ 数显鼓风干燥箱; T18 高速剪切

机, 德国 IKA 公司; FE28 数显 pH 计, 瑞士 Mettler Toledo 公司; Mastersizer 2000 激光粒度分析仪, 英国 Malvern 公司; Nano ZS 90 纳米激光粒度仪, 英国 Malvern 公司; RX50 光学显微镜; AR2000ex 流变仪, 美国 TA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 脱脂芝麻粕的制备

将芝麻置于 60℃ 烘箱中加热 30 min 使水分含量恒定, 趁热倒入粉碎机中进行粉碎, 以石油醚为萃取溶剂, 在芝麻粉与石油醚质量体积比 1:5、萃取温度 30℃ 下连续萃取 48 h, 摇动速度为 150 r/min, 除去滤液并于通风橱中室温挥尽石油醚, 60℃ 烘箱烘干 4 h, 过 120、140 目筛, 取 120~140 目之间的脱脂芝麻粕, 在室温条件下贮藏于密封袋中, 置于干燥器备用。

1.2.2 乳液的制备

分别称取一定质量的带皮脱脂芝麻粕 (DSM) 与去皮脱脂芝麻粕 (PDSM) 以及一定体积的蒸馏水, 加入 0.02% 叠氮化钠得到芝麻粕悬浮液。调节芝麻粕悬浮液的 pH, 加入一定量的 NaCl, 按一定体积分数加入油相, 用高速分散机将油水混合物于 10 000 r/min 均质 5 min (所有均质过程均将油水混合物置于冰水中防止因高速搅拌使乳液体系温度升高), 形成乳液, 室温保存。

1.2.3 乳液表征

1.2.3.1 粒径的测定

采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定乳液的粒径及粒径分布, 采用湿法进样器进样, 测定前轻轻地振荡保证测试样品分布均匀, 随后把样液逐滴加入到分散剂 (蒸馏水) 中, 分散均匀进行测定。乳液粒径大小用 $D_{4,3}$ 表示。

1.2.3.2 形态观测

新鲜制备以及贮藏不同时间的乳液, 通过肉眼观察其外观, 光学显微镜观察乳液微观结构并用照相机拍摄图像。

1.2.3.3 流变性质分析

用 AR2000ex 流变仪对乳液动态黏弹性、流变性进行分析。使用直径 40 mm 的平板, 测量间距 1.0 mm, 应变 0.2%, 频率 1 Hz。采用频率扫描测定黏弹性变化, 扫描范围为 0.1~10 Hz; 以稳态剪切模式测定黏度变化, 剪切速率为 0.01~100 s⁻¹。

1.2.4 数据统计分析

相同实验条件下, 所有数据均至少重复测量 3 次, 所有结果均用 Origin 软件进行处理。

2 结果与讨论

2.1 不同添加量脱脂芝麻粕稳定的 HIPEs

在芝麻粕悬浮液 pH 7.0、大豆油体积分数 0.75 的条件下,改变脱脂芝麻粕的添加量分别为 0.2%、0.5%、1.0%、3.0%、5.0%、7.0%,考察脱脂芝麻粕添加量对 HIPEs 性质的影响。图 1 和表 1 分别为脱脂芝麻粕添加量对乳液粒径分布和 $D_{4,3}$ 的影响(图中未显示的添加量表明无法形成乳液)。

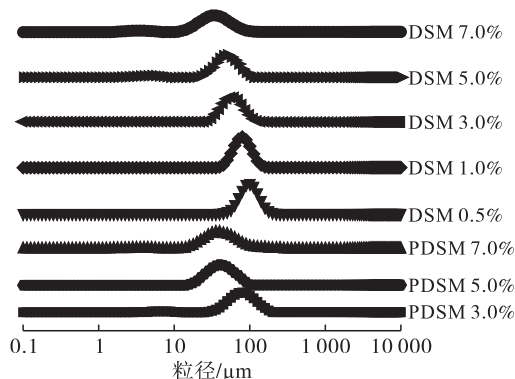
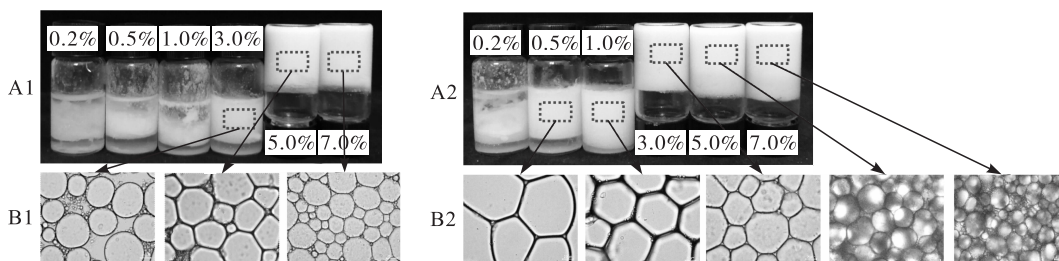


图 1 脱脂芝麻粕添加量对 HIPEs 粒径分布的影响

由图 1 和表 1 可见,随着脱脂芝麻粕添加量的逐渐增大,HIPEs 的粒径逐渐减小,并趋向于均匀分布。脱脂芝麻粕添加量的增加会导致乳液液滴尺寸分布峰值逐渐向较小尺寸移动,并且 $D_{4,3}$ 也随着脱脂芝麻粕添加量的增大而逐渐减小,在脱脂芝麻粕添加量从 5.0% 增加到 7.0% 时,乳液液滴粒径的大小变化不明显,这可能是由于在 5.0% 的添加量下,



注:A. 新鲜制备的 HIPEs 外观(A1. PDSM; A2. DSM); B. HIPEs 的光学显微照片(B1. PDSM; B2. DSM)。

图 2 不同添加量脱脂芝麻粕稳定的 HIPEs 外观和微观结构

由图 2 可见,在 PDSM 制备的 HIPEs 中,脱脂芝麻粕添加量小于 3.0% 时,由于连续相颗粒浓度较低,无法形成 HIPEs,脱脂芝麻粕添加量为 3.0% 时形成的 HIPEs 流动性较强,这可能是由于在此添加量下刚刚可以稳定油滴产生的界面面积,处于临界浓度,内部网络结构强度比较弱,因此在宏观上呈现流动型。在 DSM 稳定的 HIPEs 中,脱脂芝麻粕添加量为 0.2% 时无法形成 HIPEs,有大量的油析出,脱脂芝麻粕添加量为 0.5% 和 1.0% 时可以形成 HIPEs,但是 HIPEs 迅速发生相分离形成两层——脂肪上浮层和水相层。脂肪上浮层厚度随着脱脂芝

脱脂芝麻粕足以完全稳定油水界面。另外,在同等添加量下,DSM 制备的 HIPEs 粒径小于 PDSM 制备的 HIPEs,表明 DSM 可以更好地稳定 HIPEs。芝麻粕的主要成分是蛋白质,带皮芝麻与去皮芝麻相比含有较多的纤维素^[14],因此推测芝麻粕中的纤维素在稳定乳液过程中起到了一定作用。研究表明,蛋白质在纤维素上的物理吸附可以调节纤维素的润湿性和界面特性,并且蛋白质和纤维素的协同作用可提高乳液的稳定性^[15],结合前期实验测得的带皮脱脂芝麻粕在油水界面的三相接触角与去皮芝麻粕相比更接近 90°,推测可能是带皮脱脂芝麻粕中纤维素和蛋白质的协同作用或者是发生了改性,从而改变了带皮脱脂芝麻粕的表面润湿性,使得其稳定的 HIPEs 更稳定,液滴粒径更小。

表 1 脱脂芝麻粕添加量对 HIPEs 粒径($D_{4,3}$)的影响

脱脂芝麻粕	添加量/%	$D_{4,3}/\mu\text{m}$
PDSM	3.0	85.141 ± 0.426
PDSM	5.0	51.244 ± 1.355
PDSM	7.0	46.167 ± 0.043
DSM	0.5	107.597 ± 0.509
DSM	1.0	86.837 ± 0.157
DSM	3.0	65.642 ± 0.031
DSM	5.0	45.471 ± 0.176
DSM	7.0	39.865 ± 0.048

图 2 为脱脂芝麻粕不同添加量下 HIPEs 的外观和微观结构。

麻粕添加量的增加而增加,而在脱脂芝麻粕添加量大于等于 3.0% 时,即可形成倒置的 HIPEs。通过显微结构图可以观察到随着脱脂芝麻粕添加量的增加,油滴粒径逐渐减小,网络结构更加致密,大量油滴在高浓度下呈现高度紧密堆积以及相互联系的状态,内部油滴均排列紧凑,这也是 HIPEs 的普遍特性^[16],但是在较低的添加量下 PDSM 和 DSM 都无法形成 HIPEs,随着添加量的增加 HIPEs 的液滴更加紧密地结合。

为了确定脱脂芝麻粕添加量对 HIPEs 网络结构强度的影响,通过动态振荡扫描表征其流变学特性,结果如图 3 所示。

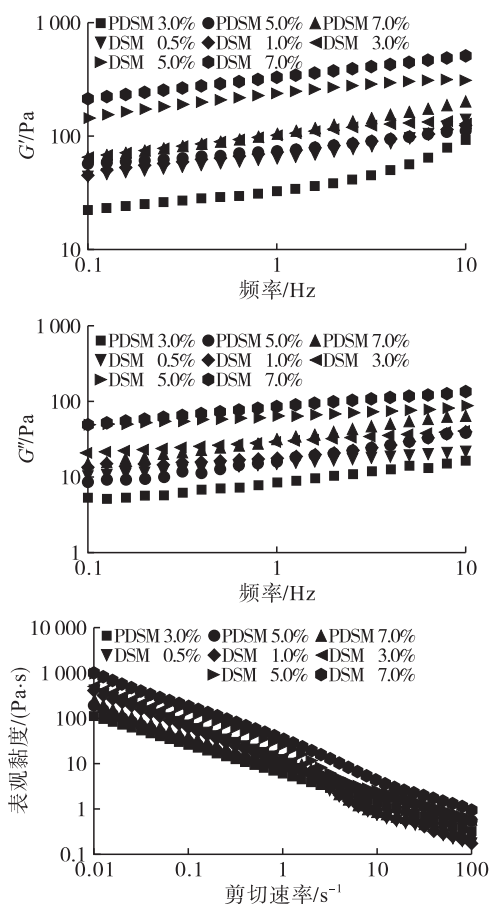


图3 脱脂芝麻粕添加量对 HIPEs 流变性质的影响

由图3可见,在测试频率范围内所有 HIPEs 的储能模量(G')远远大于损耗模量(G''),说明所有的 HIPEs 都形成了以弹性为主的凝胶网络结构,但是在脱脂芝麻粕添加量从 5.0% 增至 7.0% 时,HIPEs 的黏度和黏弹性未显著增加,这与前面的表征结果是一致的。 G' 和 G'' 随着振荡频率的增加呈现上升的趋势,在测试频率范围内,HIPEs 的 G' 和 G'' 随脱脂芝麻粕添加量的增加而增大,表明凝胶网络结构强度增大,这在 Liu 等^[17]研究的牛血清白蛋白-纤维素纳米晶复合物浓度对其形成的 HIPEs 的影响中也有体现。脱脂芝麻粕添加量的增加在一定程度上增加了水相的黏度,从而随着脱脂芝麻粕添加量的增大,HIPEs 的黏弹性更好。

在同等脱脂芝麻粕的添加量下 DSM 稳定的 HIPEs 的 G' 、 G'' 和表观黏度都大于 PDSM 稳定的 HIPEs。Dickinson^[18]研究表明,与蛋白结合后的多糖-蛋白复合物具有更高的表面活性。Xu 等^[19]研究了微晶纤维素浓度对大豆分离蛋白稳定的姜黄素乳液流变特性的影响,发现微晶纤维素浓度越高,乳液的黏弹性都逐渐增高,这可能是因为微晶纤维素的存在导致了致密凝胶网络结构的形成以及液滴的空间重排。因此,带皮脱脂芝麻粕中更高的纤维素

含量可能是导致其稳定的 HIPEs 凝胶结构比去皮脱脂芝麻粕更强的原因。

2.2 不同油相体积分数下脱脂芝麻粕稳定的 HIPEs

在脱脂芝麻粕添加量 5.0%、芝麻粕悬浮液 pH 7.0 条件下,研究大豆油体积分数对 HIPEs 性质的影响。图4和表2分别为油相体积分数对 HIPEs 粒径分布和 $D_{4,3}$ 的影响。

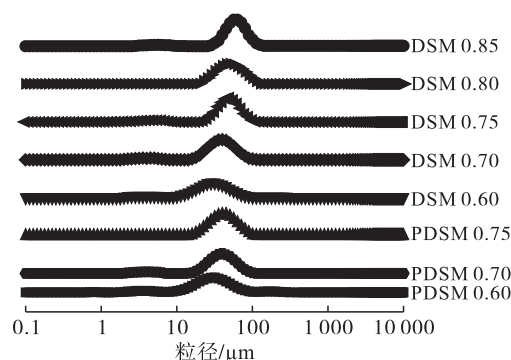


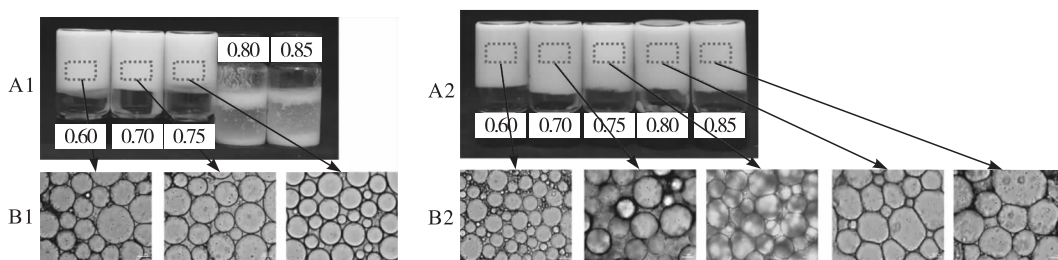
图4 油相体积分数对 HIPEs 粒径分布的影响

表2 油相体积分数对 HIPEs 粒径($D_{4,3}$)的影响

脱脂芝麻粕	油相体积分数	$D_{4,3}/\mu m$
PDSM	0.60	47.98 ± 0.04
PDSM	0.70	51.31 ± 0.12
PDSM	0.75	53.36 ± 0.05
DSM	0.60	39.73 ± 0.73
DSM	0.70	41.37 ± 0.12
DSM	0.75	49.61 ± 0.01
DSM	0.80	62.34 ± 0.11
DSM	0.85	73.42 ± 0.18

由图4和表2可见,随着油相体积分数的增加,HIPEs 的粒径逐渐变大,在同等油相比例下,DSM 稳定的 HIPEs 粒径小于 PDSM 稳定的 HIPEs。实验发现,PDSM 稳定的 HIPEs 中,油相比例增至 0.8 及以上,就无法形成 HIPEs,且有大量的油析出。

图5为不同油相体积分数制备的 HIPEs 的外观和微观结构。由图5可见:在油相体积分数小于等于 0.75 时,PDSM 均可形成倒置的 HIPEs;油相体积分数大于等于 0.80 时,PDSM 就无法稳定 HIPEs,发生相分离,表明此时 PDSM 的添加量以及连续相体积不足以稳定 HIPEs。由 HIPEs 的微观结构图可见,HIPEs 内部油滴大小分布广泛,这可能是因为实验采用的均质方式难以形成内部结构高度均一、油滴粒径小的 HIPEs。PDSM 在油相体积分数为 0.60 ~ 0.75,DSM 在油相体积分数为 0.60 ~ 0.85 时都能形成倒置的 HIPEs。



注:A. 新鲜制备的 HIPEs 外观(A1. PDSM;A2. DSM);B. HIPEs 的光学显微照片(B1. PDSM;B2. DSM)。

图 5 不同体积分数的油相制备的 HIPEs 的外观和微观结构

油相体积分数对 HIPEs 流变性质的影响见图 6。

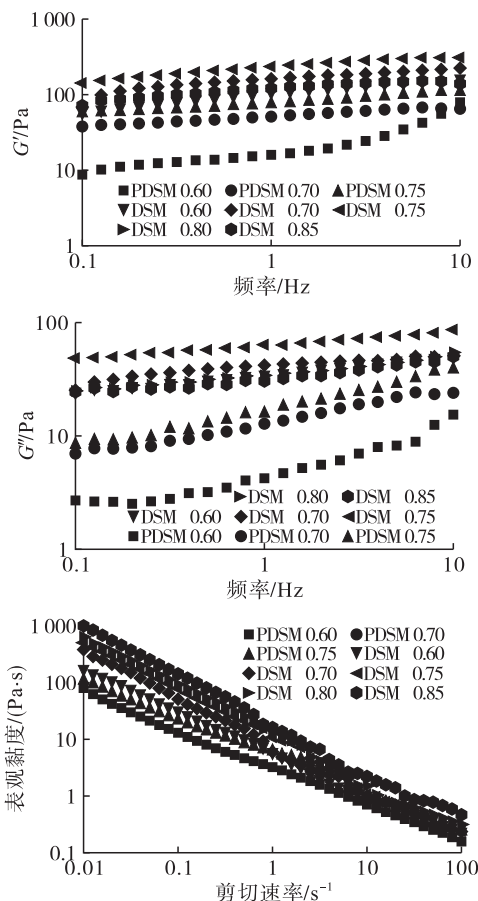


图 6 油相体积分数对 HIPEs 流变性质的影响

由图 6 可见,HIPEs 的 G' 明显大于 G'' ,表明此状态下的 HIPEs 为凝胶状,且呈现出弹性为主的凝胶性质,但在同一频率下,DSM 稳定的 HIPEs 的 G' 和 G'' 比 PDSM 稳定的 HIPEs 的 G' 和 G'' 的值大,说明前者的凝胶性更强。另外,随着油相体积分数的增加,HIPEs 的表观黏度逐渐增加。

2.3 不同 pH 条件下脱脂芝麻粕稳定的 HIPEs

由于脱脂芝麻粕的主要成分是蛋白质,理论上存在等电点且对 pH 敏感,可以通过 pH 来实现对 HIPEs 稳定性的调节。在脱脂芝麻粕添加量 5.0%、油相体积分数 0.75 条件下,分别调节芝麻粕悬浮液

pH 为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0,考察 pH 对 HIPEs 性质的影响。pH 对 HIPEs 粒径分布和 $D_{4,3}$ 的影响分别见图 7 和表 3。

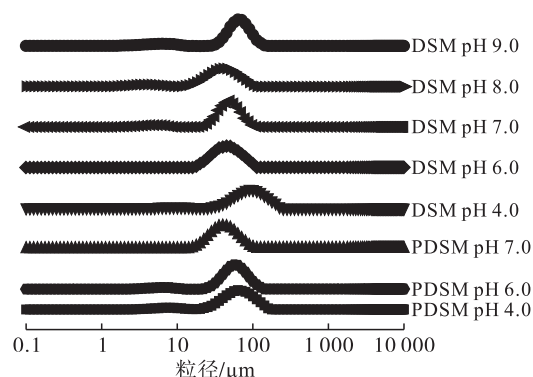


图 7 pH 对 HIPEs 粒径分布的影响

表 3 pH 对 HIPEs 粒径 ($D_{4,3}$) 的影响

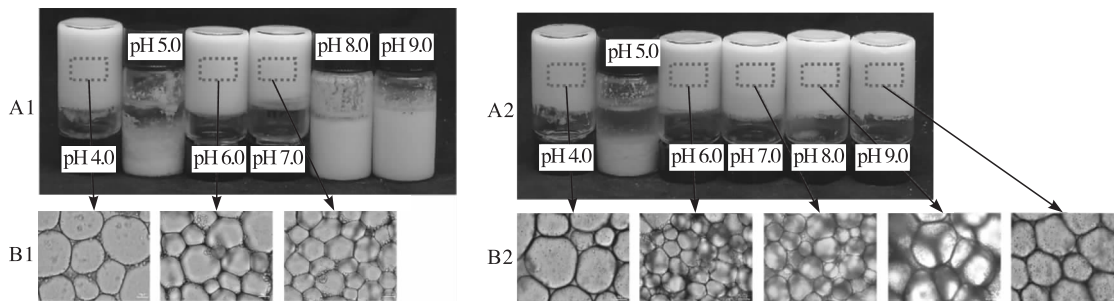
脱脂芝麻粕	pH	$D_{4,3}/\mu\text{m}$
PDSM	4.0	75.32 ± 0.48
PDSM	6.0	73.36 ± 0.81
PDSM	7.0	53.36 ± 0.05
DSM	4.0	82.63 ± 0.95
DSM	6.0	56.54 ± 0.13
DSM	7.0	50.61 ± 0.01
DSM	8.0	62.34 ± 0.11
DSM	9.0	65.42 ± 0.07

由图 7 和表 3 可见,PDSM 与 DSM 稳定的 HIPEs 对 pH 的响应有所不同,PDSM 稳定的 HIPEs 在中性条件下粒径最小,在碱性条件(pH 8.0、9.0)下无法形成 HIPEs,而 DSM 稳定的 HIPEs 在 pH 为 4.0 时粒径最大,在中性和碱性条件下粒径相对较小。PDSM 和 DSM 在 pH 5.0 时都无法形成 HIPEs,这种现象产生的原因可能是由于芝麻蛋白的等电点位于 5.0 左右,在等电点附近芝麻蛋白的乳化能力最小^[20]。

图 8 为不同 pH 条件下制备的 HIPEs 的外观及微观结构。由图 8 可见,PDSM 和 DSM 稳定的 HIPEs 在 pH 为 5.0 时都发生严重的油析现象,表明该 pH 下 HIPEs 不稳定,这也与芝麻粕蛋白在等电点(pH 5.0)时乳化性较差相对应。PDSM 在 pH

4.0、6.0和7.0时可以形成稳定的 HIPEs,并且在储存1个月后可以保持其倒置的状态。而 DSM 稳定的 HIPEs 在 pH 4.0、pH 6.0~9.0 时都能形成倒置的 HIPEs,且在1个月内都能保持倒置而不发生变

化。光学显微照片结果表明,DSM 稳定的 HIPEs 中的凝胶状网络逐渐增强,且 HIPEs 粒径有先减小后增大的现象,这与粒径测得的结果一致。



注:A. 新鲜制备的 HIPEs 外观(A1. PDSM;A2. DSM);B. HIPEs 的光学显微照片(B1. PDSM;B2. DSM)。

图8 不同 pH 条件下制备的 HIPEs 的外观及微观结构

不同 pH 对 HIPEs 流变性质的影响见图9。由图9可见,在测试条件下,所有样品的 G' 均高于 G'' , 表明形成了 HIPEs 的凝胶状结构。此外,除了 pH 5.0, PDSM 稳定的 HIPEs 的 G' 和 G'' 均随 pH 的增加而增加,DSM 稳定的 HIPEs 的 G' 随着 pH 从 4.0 增至 9.0 呈先增加后降低的趋势,在 pH 7.0 时最大。总体而言,该结果说明 DSM/PDSM 稳定的 HIPEs 形成的凝胶状结构在芝麻蛋白等电点 pH 5.0 时被破坏,并且在中性条件下 G' 和 G'' 达到最大值,在偏酸和偏碱的条件下黏弹性都有所降低,说明在中性条

件下 PDSM 和 DSM 稳定的 HIPEs 具有良好的稳定性,凝胶性也最强。PDSM 稳定的 HIPEs 的表观黏度随 pH 增加而增加;DSM 稳定的 HIPEs 的表观黏度随 pH 从 4.0 增加到 7.0 而增加,在 pH 为 8.0~9.0 时有所下降。另外,HIPEs 的表观黏度随剪切速率的增大而下降,呈现了剪切变稀的特性。这表明制备的 HIPEs 属于牛顿流体,另外 PDSM 稳定的 HIPEs 在同等条件下, G' , G'' 和表观黏度都低于 DSM 稳定的 HIPEs,这与 HIPEs 粒径大小也是对应的。

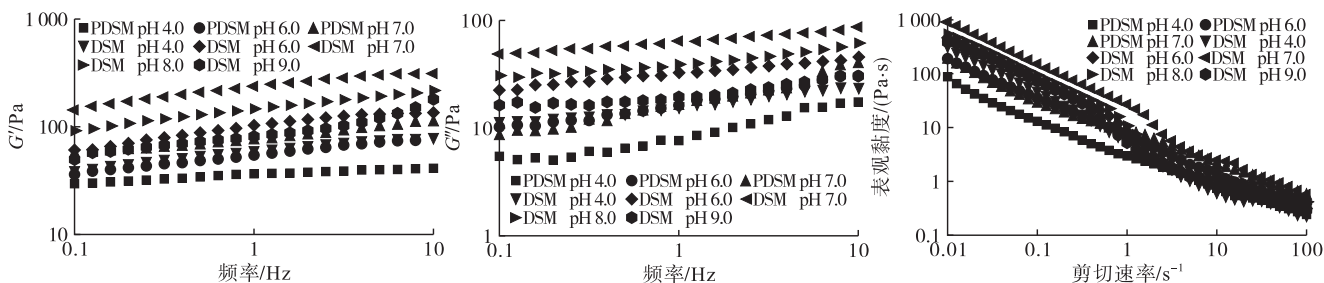
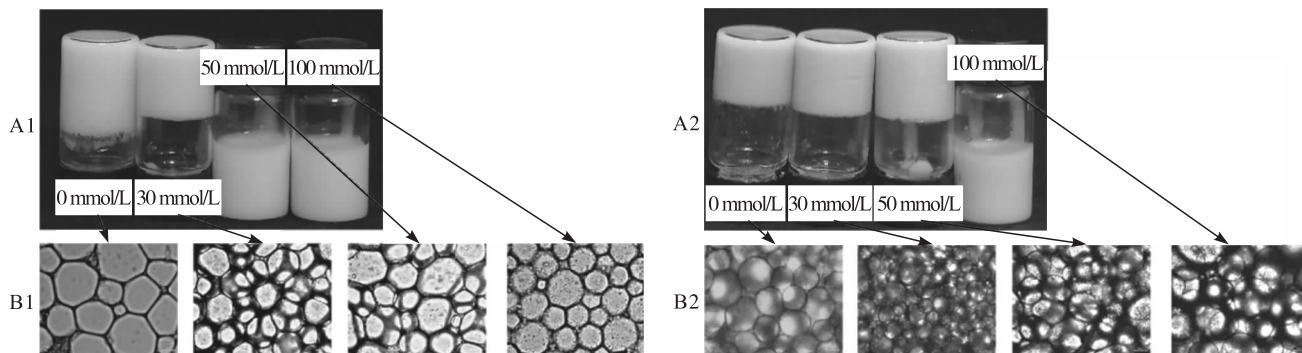


图9 pH 对 HIPEs 流变性质的影响

2.4 离子浓度对 HIPEs 稳定性的影响

在脱脂芝麻粕添加量 5.0%、油相体积分数 0.75、芝麻粕悬浮液 pH 7.0 条件下,分别向芝麻粕悬

浮液中加入 NaCl 至浓度为 30、50、100 mmol/L,考察离子浓度对 HIPEs 稳定性的影响,结果见图 10。



注:A. 新鲜制备的 HIPEs 外观(A1. PDSM;A2. DSM);B. HIPEs 的光学显微照片(B1. PDSM;B2. DSM)。

图10 不同离子浓度制备的 HIPEs 的外观和微观结构

由图 10 可见,随着 NaCl 浓度从 0 mmol/L 增加至 30 mmol/L, PDSM 稳定的 HIPEs 粒径减小,但当 NaCl 浓度从 30 mmol/L 升至 100 mmol/L, HIPEs 的粒径逐渐变大,且无法形成倒置的 HIPEs。随着 NaCl 浓度从 0 mmol/L 增加至 50 mmol/L, DSM 稳定的 HIPEs 粒径先减小后增大,但 HIPEs 均呈现倒置不流动的凝胶状;当 NaCl 浓度从 50 mmol/L 升至 100 mmol/L, HIPEs 的粒径逐渐变大, HIPEs 处于流动的状态。结果表明,在脱脂芝麻粕稳定的 HIPEs 中添加适量的盐离子可以提高 HIPEs 的稳定性。

3 结论

本研究以去皮芝麻和带皮芝麻为原料分别制备去皮脱脂芝麻粕(PDSM)和带皮脱脂芝麻粕(DSM)后,采用一步乳化法制备 HIPEs,探究了 PDSM 和 DSM 稳定 HIPEs 的能力。研究证实 PDSM 和 DSM 可作为高效乳化剂稳定水包油型 HIPEs,形成的 HIPEs 外观呈凝胶状,倒置不流动,在一定条件下室温储藏 1 个月后仍保持稳定。PDSM 稳定 HIPEs 的最高油相体积分数(ϕ)为 0.75(脱脂芝麻粕添加量 5.0%),形成 HIPEs 的脱脂芝麻粕最低添加量为 5.0% ($\phi = 0.75$),而 DSM 稳定 HIPEs 的最高油相体积分数为 0.85(脱脂芝麻粕添加量 5.0%),形成 HIPEs 的脱脂芝麻粕最低添加量为 3.0% ($\phi = 0.75$)。通过研究 HIPEs 在不同脱脂芝麻粕添加量、不同 pH 以及添加不同浓度 NaCl 后的粒径变化、储藏稳定性以及流变学性质等发现,脱脂芝麻粕添加量越高、在中性 pH 以及添加适量的 NaCl 下 HIPEs 越稳定, HIPEs 是以弹性为主的凝胶网络结构, HIPEs 的粒径越小粒径分布越均匀,凝胶网络结构强度和黏弹性增强。脱脂芝麻粕作为 HIPEs 的稳定剂实现了脱脂芝麻粕的再利用,形成 HIPEs 的储藏稳定性良好,在实际工厂化生产中具备较强的可操作性。

参考文献:

- [1] 王瑞萍,黄纪念,艾志录,等. 芝麻饼粕蛋白研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23):398-401.
- [2] 张海容,陈金娥,高瑞苑. 响应面法优化超声提取芝麻粕中多酚工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(1):110-114,126.
- [3] 朱中胜,张莹,刘红艳,等. 芝麻粕在动物饲料中的应用研究[J]. 饲料博览,2018(11):22-25.
- [4] 郑华丽,魏安池,牛新培. 芝麻饼粕蛋白应用进展[J]. 粮食与油脂,2012,25(8):8-10.
- [5] CAMERON N R, SHERRINGTON D C. High internal phase emulsions (HIPEs)—structure, properties and use in polymer preparation[J]. Adv Polym Sci, 1996, 126: 163-214.
- [6] PERRIN E, BIZOT H, CATHALA B, et al. Chitin nanocrystals for Pickering high internal phase emulsions[J]. Biomacromolecules, 2014, 15(10): 3766-3771.
- [7] HUNG C F, FANG C L, LIAO M H, et al. The effect of oil components on the physicochemical properties and drug delivery of emulsions: tocol emulsion versus lipid emulsion[J]. Int J Pharm, 2007, 335(1/2): 193-202.
- [8] SILVERSTEIN M S. PolyHIPEs: recent advances in emulsion-templated porous polymers[J]. Prog Polym Sci, 2014, 39(1): 199-234.
- [9] BARTL V H, VON BONIN W. Über die polymerisation in umgekehrter emulsion[J]. Die Makromolekulare Chemie: Macromol Chem Phys, 1962, 57(1): 74-95.
- [10] SU J, WANG X, LI W, et al. Enhancing the viability of *Lactobacillus plantarum* as probiotics through encapsulation with high internal phase emulsions stabilized with whey protein isolate microgels[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(46): 12335-12343.
- [11] 冯雪艳,马贵平,姚立. 表面活性剂稳定的高内相乳液的研究进展[J]. 化学通报,2016, 79(10): 891-896.
- [12] YANG T, ZHENG J, ZHENG B S, et al. High internal phase emulsions stabilized by starch nanocrystals[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 82: 230-238.
- [13] 李斌,何玲玲,李艳,等. 一种利用芝麻粕制备天然抗氧化性水包油型乳液的方法: CN107637669A[P]. 2018-01-30.
- [14] 李焱然. 芝麻湿法脱皮优化、设计及其溶出多糖的结构表征[D]. 郑州:河南工业大学,2017.
- [15] PINDAKOVAÁ L, KASPARKOVA V, BORDES R. Role of protein-cellulose nanocrystal interactions in the stabilization of emulsion[J]. J Colloid Interf Sci, 2019, 557: 196-206.
- [16] LIU X, GUO J, WANG Z L, et al. Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 77: 168-175.
- [17] LIU F, ZHENG J, HUANG C H, et al. Pickering high internal phase emulsions stabilized by protein-covered cellulose nanocrystals[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 82: 96-105.
- [18] DICKINSON E. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers[J]. Food Hydrocolloid, 2009, 23(6): 1473-1482.
- [19] XU D, ZHANG J, CAO Y, et al. Influence of microcrystalline cellulose on the microrheological property and freeze-thaw stability of soybean protein hydrolysate stabilized curcumin emulsion[J]. LWT - Food Sci Technol, 2016, 66: 590-597.
- [20] 朱旻鹏,关彦明,王俊伟,等. 金属离子和 pH 值对芝麻饼分离蛋白功能性的影响[J]. 粮食加工, 2009, 34(1): 41-43.