

乳化剂与内水相镁盐浓度对油包水乳液稳定性的影响^{*}

朱巧梅¹ 韩湘² 郇金龙³ 殷丽君¹

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 北京市科学技术委员会农村发展中心, 北京 100097;
3. 北京工商大学食品学院, 北京 100048)

摘要: 研究并讨论了内水相镁盐与疏水乳化剂 PGPR 对油包水(W/O)乳液稳定性的影响。制备 W/O 乳液的油水质量比为 3:2, 油相中疏水乳化剂聚甘油蓖麻醇酸酯(PGPR)质量分数为 0.5%~2.0%, 水相中 MgCl₂·6H₂O 的质量分数为 0~12.0%。采用 Turbiscan Lab Expert 稳定性分析仪分析了 W/O 乳液贮藏 14 d 过程中的整体稳定性。结果表明:在 14 d 贮藏过程中,液滴的聚沉和沉淀会导致乳液失稳。提高疏水乳化剂 PGPR 和镁盐的浓度可提高 W/O 乳液的稳定性。对 W/O 乳液的粒径分布及油水两相界面特性进行分析,发现 W/O 乳液稳定的机制在于乳液粒径的减小以及油水界面张力的降低。此外,油水两相界面粘弹性也在一定程度上改善了乳液稳定性,油水界面膜粘弹性随着镁盐浓度的增加呈现先上升后下降的趋势。

关键词: 油包水乳液 镁盐 稳定性 粒径 界面特性

中图分类号: TS201.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0217-07

Influence of Concentrations of Emulsifier and Magnesium Salt Contained in Internal Phase on Stability of W/O Emulsions

Zhu Qiaomei¹ Han Xiang² Li Jinlong³ Yin Lijun¹

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Rural Technology Development Center, Beijing Municipal Science & Technology Commission, Beijing 100097, China
3. School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The effect of PGPR and added magnesium chloride hexahydrate on properties of W/O (water-in-oil) emulsions was investigated. W/O emulsions were formulated with 60% oil phase containing 0.5%, 1.0% and 2.0% PGPR and 40% aqueous phase containing magnesium salt at various concentrations from 0 to 12.0%. Stability of these W/O emulsions was studied with Turbiscan Lab Expert during 14-day storage. The result indicated that coalescence and sedimentation were the main reasons for destabilization. By increasing the concentrations of PGPR and magnesium chloride, TSI values of W/O emulsions decreased and therefore W/O emulsions became more stable with respect to coalescence. The stabilization mechanism was attributed to the decrease of emulsion droplets and the reduction in interfacial tension. Besides, interfacial viscoelastic measurements between soybean oil and water were conducted. The results indicated that stabilizing effect of PGPR and magnesium salt was not due to the rheological properties of interfacial film. The viscoelastic parameters of interfacial film increased at a lower concentration of magnesium salt (below 2%) while further increasing the concentration of magnesium salt to 6% led to a slight decrease of interfacial viscoelastic parameters. Increasing the concentration of PGPR from 0.5% to 2% led to a reduction in viscoelastic parameters.

Key words: Water-in-oil emulsions Magnesium salt Stability Particle size Interfacial properties

收稿日期: 2014-09-12 修回日期: 2014-10-19

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31171648)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD34B03)

作者简介: 朱巧梅, 博士生, 主要从事食品乳液加工及应用研究, E-mail: zhuqiaomei1010@163.com

通讯作者: 殷丽君, 教授, 博士生导师, 主要从事食品材料微细化加工及相关评价技术研究, E-mail: ljyin@cau.edu.cn

引言

乳液是由两互不相容液体混合而成的热力学不稳定体系。根据内外相的不同,可将其分为油包水(W/O)乳液和水包油(O/W)乳液^[1]。对W/O乳液控释特性的研究有很多^[2-5],但W/O乳液在放置过程中易发生聚沉、Ostwald 熟化、沉淀等,最终导致乳液失稳。因此制备稳定的W/O乳液有利于提高其应用价值。

影响W/O乳液稳定性的因素很多,如乳化剂的类型、油的化学特性及内水相添加物等^[6-7]。聚甘油蓖麻醇酸酯(PGPR)是食品行业中常用的非离子型乳化剂,其HLB值较低,能够很好地稳定W/O乳液,并用来改善食品粘度和流动性。对于内水相添加物,尤其是无机电解质,Aronson等发现^[8],MgSO₄的添加可减少W/O乳液的聚沉,从而改善乳液稳定性。Koroleva等^[9]和Scherze等^[10]的研究表明,在分散相中添加无机电解质可以减小W/O乳液中的Ostwald 熟化速率,进而提高乳液稳定性。在前期的研究中^[11-12],W/O乳液被用来包埋卤水并将其用于豆腐生产加工中进而改善豆腐的品质,并探讨了不同制备条件(如温度、均质压力、乳化剂添加量等)对W/O乳液稳定性的影响,但并未对内水相的镁离子浓度对乳液稳定性的影响进行研究。因此,本文通过测定粒径、透光度、界面张力及粘弹特性来阐明内水相镁盐对W/O乳液稳定性影响的机理,为提高W/O乳液稳定性提供一个新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

聚甘油缩合蓖麻醇酸酯(PGPR,商品名818SK,日本太阳化学株式会社),金龙鱼大豆油(市售大豆油),MgCl₂·6H₂O为分析纯,实验用水为去离子水。

1.2 主要仪器与设备

NS1001L Panda2K型高压均质机(意大利GEA Niro So-avi公司),T25型均质机(德国IKA公司),长风水浴锅(北京市长风仪器仪表公司),Turbiscan Lab Expert稳定性分析仪(法国Formulation公司),Malvern Mastersizer 3000型粒度分析仪(英国马尔文公司),Leica DM 1000型光学显微镜(德国莱卡公司),界面扩张流变仪(德国Dataphysics公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 W/O乳液的制备

W/O乳液凝固剂的制备采用两步均质法^[13-14]。以溶解0.2、2.0、6.0、12.0 g MgCl₂·6H₂O

的去离子水为分散相,溶解有0.5、1.0、2.0 g PGPR的大豆油为连续相,连续相与分散相按质量比3:2在65℃水浴槽中搅拌15 min。水浴后的混合液用高速均质机在13 000 r/min下均质4 min,将获得的初级乳液在60 MPa压力下进行高压均质,最终获得W/O乳状液,4℃保存。

1.3.2 W/O乳液稳定性分析

本实验采用Turbiscan Lab Expert稳定性分析仪对PGPR制备的W/O乳液的稳定性进行分析。仪器采用脉冲红外光源($\lambda = 880$ nm)自下而上扫描样品,仪器上有2个同步检测器,测量探头分别采集透射光(Transmission, TM)和背散射光(Backscattering, BS)的数据,在55 mm长度上每40 μm 扫描一次。在一定时间内连续扫描样品,可获得投射光与被散射光信号对样品高度的函数曲线图,从而可反映出样品中颗粒运动趋势以及乳液的稳定性。由于本实验中的乳液样品不透光,因此采用BS对乳液稳定性进行分析。实验时,将装有20 mL的W/O乳液样品放入仪器专用测试玻璃瓶中,每30 min扫描一次,连续扫描24 h,随后将乳液在室温(20℃)中放置。经过14 d储存后的乳液样品再放入仪器中连续扫描1 h以测定其放置14 d过程中乳液的稳定性。乳液稳定性可以通过稳定性动力学指数来进行表征,公式为

$$B_s \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda^*}}$$

$$\lambda^* = \frac{2d}{3\varphi(1-g)Q_s}$$

$$T_{st} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i - \chi_{BS})}{n-1}}$$

式中 B_s ——背散射光强度

λ^* ——光子传送的平均自由光程

T_{st} ——稳定性动力学指数

φ ——颗粒浓度

g 、 Q_s ——Mie 定律常数

d ——颗粒平均直径

χ_i ——每分钟测量的平均散射强度

χ_{BS} —— χ_i 的平均测量值

n ——扫描次数

1.3.3 粒径分析

本实验采用Malvern Mastersizer 3000型粒度分析仪来分析W/O乳液的粒径。将样品放入仪器中的样品分散单元中,并采用大豆油(折射系数为1.47)对乳液进行稀释。为了避免测试过程中产生气泡干扰,在测试前先对分散介质超声处理5 min,

待其稳定后进行测定。每个测试至少重复3次。

1.3.4 光学显微镜

取0.5 mL W/O 乳液于载玻片上,盖上盖玻片,将其置于 Leica DM 1000 型光学显微镜下,观察乳液粒径大小并分析其颗粒特性,放大倍数为100。

1.3.5 W/O 乳液的界面特性

采用 Dataphysics 公司的 OCA20 界面流变测定仪分别测定了12个样品的界面扩张流变性质。取10 mL 含有镁盐的内水相置于石英槽中;注射器取适量含 PGPR 的大豆油溶液,固定于升降台上,恒温下预平衡30 min。推动注射器挤出5~7 μL 油滴,与石英槽中的水接触形成油水界面。对液滴的面积施加频率为0.2 Hz 的正弦扰动,摄像机能拍摄到液滴面积的瞬间变化。通过相应软件的处理,可以得到整个吸附过程中油-水界面张力和扩张参数的变化。相应的计算公式为

$$E = \frac{d\gamma}{d\ln A}$$

或

$$E = \varepsilon_d + i\omega\eta_d$$

$$\varepsilon_d = |E| \cos\theta$$

$$\eta_d = \frac{E}{\omega} \sin\theta$$

式中 E ——界面扩张模量

γ ——界面张力 A ——界面面积

ε_d ——扩张弹性模量

η_d ——扩张粘度

ω ——界面面积正弦变化频率

θ ——扩张模量的相角

2 结果与分析

2.1 乳液整体稳定性分析

W/O 乳液样品在室温下放置14 d后,观察其稳定状态(图1),样品管上的数字为镁盐的质量分数(%).刚制备的W/O 乳液都呈均一稳定的白色液体状,放置14 d后,可发现PGPR 和镁盐的添加量对乳液的稳定性影响很显著。低于2.0% PGPR 下的乳液出现严重的油析现象,尤其是不添加镁盐时。此外,低浓度镁盐下的W/O 乳液底部出现局部澄清状态,而高浓度下镁盐形成的乳液稳定性较好,没有出现油析和分层现象。

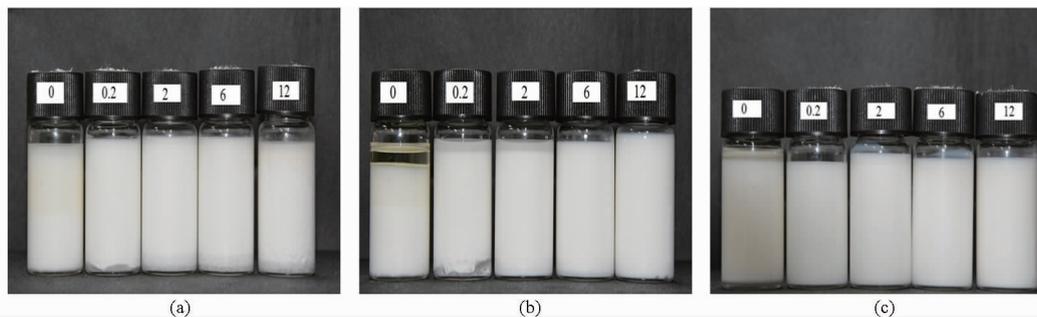


图1 14 d后的W/O 乳液图

Fig.1 Picture of W/O emulsion after 14 d storage

(a) 0.5% PGPR (b) 1.0% PGPR (c) 2.0% PGPR

采用 Turbiscan Lab Expert 稳定性分析仪分析了W/O 乳液的整体稳定性(图2和表1)。图2分别比较了2种PGPR 浓度下不同镁盐含量的W/O 乳液的背散射光强度变化。所有乳液的背散射光强度都有下降的趋势,表明乳液在放置过程中粒径不断变化,产生了局部的聚沉现象,尤其对于0.5% PGPR 下的W/O 乳液,这种变化更加显著。在不添加镁盐情况下,装有0.5% PGPR 的W/O 乳液玻璃管顶部产生了明显的澄清现象。加不同浓度镁盐后,乳液的底部出现了澄清现象,而顶部不再出现明显的油析现象。原因可能是添加镁盐后,油水密度发生改变,由于低浓度PGPR 不利于乳液的稳定,因此乳液之间的碰撞摩擦导致油水界面膜破裂,内相包裹镁盐的水释放出来,从而下沉到底部。而对于2.0% PGPR 的乳液而言,镁盐的添加提高了背散射

光强度,使得乳液更加稳定。在12.0%的镁盐添加量下,乳液的底部产生了轻微的局部沉淀现象。以上分析可知,增加PGPR 和镁盐浓度有利于提高乳液的稳定性,乳液在放置过程中,沉淀和聚沉是导致乳液不稳定的主要原因。

TSI 值(稳定性动力学指数)是衡量乳液整体稳定性的一个重要指标,TSI 值越大,乳液越不稳定。从表1中可以看出,随着W/O 乳液放置时间的延长,TSI 值越来越大,表明乳液在逐渐地趋于不稳定。比较相同镁盐添加量、不同PGPR 浓度下的W/O 乳液发现:在相同的放置时间下,随着PGPR 浓度的增加,W/O 乳液的TSI 值不断减小,说明PGPR 改善了乳液的稳定性。此外,添加镁盐也可提高乳液的稳定性。在0.5% PGPR 的W/O 乳液中,当添加2.0% 镁盐时,乳液的TSI 值从13.05 下降到4.15,

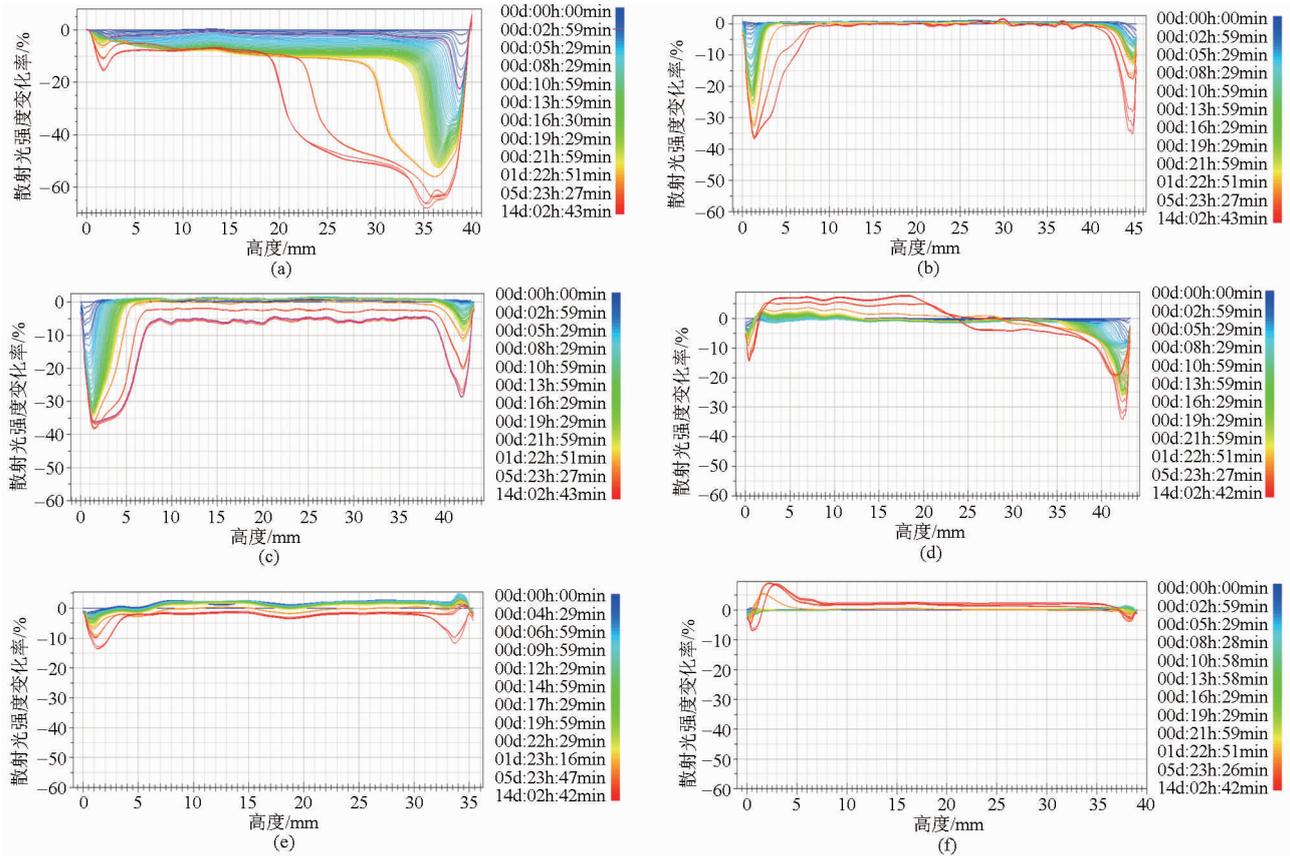


图2 W/O 乳液整体稳定性

Fig. 2 Global stability of W/O emulsions

- (a) 0.5% PGPR (b) 0.5% PGPR - 2.0% 镁盐 (c) 0.5% PGPR - 12.0% 镁盐
 (d) 2.0% PGPR (e) 2.0% PGPR - 2.0% 镁盐 (f) 2.0% PGPR - 12.0% 镁盐

表1 W/O 乳液的 TSI 值

Tab. 1 TSI values of W/O emulsions

乳液样品	放置时间/d			
	1	2	6	14
0.5% PGPR	13.05 ± 0.63	17.55 ± 0.91	26.20 ± 1.27	31.75 ± 2.19
0.5% PGPR - 2.0% 镁盐	4.15 ± 0.21	5.25 ± 0.07	7.30 ± 0.14	8.35 ± 0.07
0.5% PGPR - 12.0% 镁盐	3.25 ± 1.06	4.90 ± 0.56	8.80 ± 0.28	12.55 ± 0.07
1.0% PGPR	7.75 ± 0.35	8.65 ± 0.35	10.50 ± 0.42	12.25 ± 0.35
1.0% PGPR - 2.0% 镁盐	4.55 ± 0.07	5.15 ± 0.21	6.35 ± 0.21	7.30 ± 0.14
1.0% PGPR - 12.0% 镁盐	2.05 ± 0.35	3.00 ± 0.28	4.90 ± 0.42	6.25 ± 0.35
2.0% PGPR	1.85 ± 0.21	3.00 ± 0.14	4.50 ± 0.14	5.50 ± 0.42
2.0% PGPR - 2.0% 镁盐	0.90 ± 0.14	1.55 ± 0.07	3.05 ± 0.21	4.30 ± 0.28
2.0% PGPR - 12.0% 镁盐	0.67 ± 0.04	1.25 ± 0.07	2.80 ± 0.28	4.00 ± 0.42

进一步增加镁盐到 12.0% 时, W/O 乳液的 TSI 值降至 3.25。1.0% 和 2.0% PGPR 浓度下的 W/O 乳液也具备相同的变化趋势。总之, W/O 乳液在放置过程中越来越不稳定, 而镁盐和 PGPR 的添加可提高 W/O 乳液的稳定性。

2.2 乳液粒径分析

图 3 比较了不同 W/O 乳液的粒径分布。从图中可以看出, PGPR 制备的 W/O 乳液呈双峰分布, 粒径分为两个区域: 粒径 0 ~ 1 μm 和 1 ~ 10 μm (或 1 ~ 100 μm)。随着 PGPR 浓度的增加, 小粒径乳液

液滴的体积分数在不断增加, 而大粒径液滴的体积分数在下降。此外, 镁盐的添加使得 W/O 乳液粒径分布范围变窄。当添加 12.0% 的镁盐时, 乳液粒径分布范围从 1 ~ 100 μm 变为 1 ~ 10 μm。表 2 更直观地表明了不同 W/O 乳液平均粒径的变化。不添加镁盐时, 当 PGPR 的质量分数从 0.5% 增加至 2.0% 时, W/O 乳液的粒径从 4.7 μm 降至 2.1 μm。在同一 PGPR 浓度下, W/O 乳液的粒径会随着镁盐的增加而下降。在 0.5% PGPR 下, 当添加镁盐到 12.0% 时, W/O 乳液的平均粒径从 4.7 μm 降至

2.7 μm 。由 1.0% 和 2.0% PGPR 制备的 W/O 乳液也出现了相同的变化趋势。粒径变化结果与乳液整

体稳定性分析结果一致, PGPR 和镁盐均对 W/O 乳液的稳定性有促进作用。

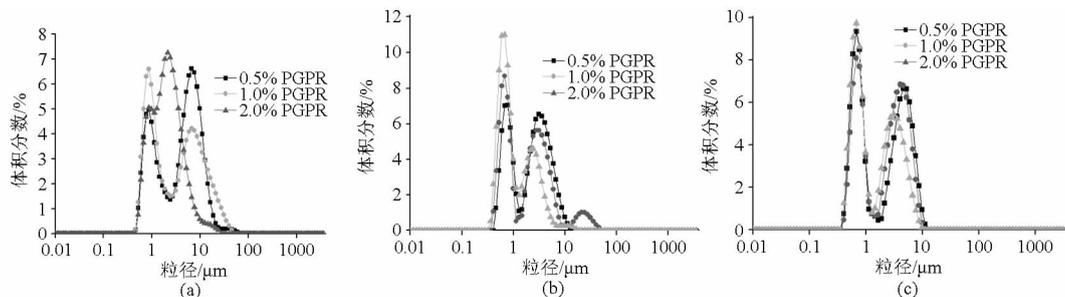


图 3 W/O 乳液的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of W/O emulsions

(a) 不添加镁盐 (b) 2.0% 镁盐 (c) 12.0% 镁盐

表 2 W/O 乳液平均粒径分析

Tab. 2 Average particle size analysis of W/O emulsions

PGPR 质量 分数/%	μm				
	0	0.2	2.0	6.0	12.0
0.5	4.70 ± 0.30	3.10 ± 0.10	2.50 ± 0.01	3.00 ± 0.02	2.70 ± 0.03
1.0	3.60 ± 0.20	2.80 ± 0.20	2.20 ± 0.01	2.70 ± 0.01	2.70 ± 0.02
2.0	2.10 ± 0.01	2.00 ± 0.03	0.90 ± 0.03	1.00 ± 0.02	1.20 ± 0.03

W/O 乳液粒径的变化也可通过显微镜下的结果得到验证, 如图 4 所示。从图中可以看出, 由含有 PGPR 的大豆油作为油相的 W/O 乳液液滴呈球状, 其中, 与添加镁盐的乳液相比, 不添加镁盐的 W/O 乳液粒径较大, 而且粒径分布很不均一, 较小的粒径粘附在大粒径液滴, 很容易引起乳液的絮凝和聚沉。随着镁盐浓度的增加, 大液滴的比例显著降低。McClements 等的研究表明, 较低的乳液粒径会减小乳液的碰撞效率, 从而减少乳液滴聚沉, 提高 W/O 乳液的稳定性^[15]。另一方面, Li 等的研究表明, 乳液粒径的降低会增加乳液的比表面积, 从而增加了液滴之间的摩擦力并导致乳液的粘度提高, 最终会减小乳液液滴聚沉的速率, 提高乳液稳定性^[11]。因此, 增加 PGPR 和镁盐的浓度可提高 W/O 乳液的稳定性。

2.3 W/O 乳液界面特性分析

采用界面扩张流变仪测定了乳液中油水界面张力的变化, 见表 3。不考虑镁盐的影响, 可以看出 PGPR 只能小幅度地降低油水的界面张力。W/O 乳液中不添加镁盐时, 当 PGPR 的质量分数从 0.5% 增加到 2.0%, W/O 乳液的界面张力由 4.03 mN/m 降至 3.50 mN/m。对于添加相同浓度镁盐的 W/O 乳液, 乳液的界面张力值几乎达到了平衡, 随着 PGPR 浓度增加只是略有下降。可见, 在 0.5% ~ 2.0% 的范围内, PGPR 对 W/O 乳液界面张力的影

响并不显著。而镁盐对油水界面张力的影响明显要比 PGPR 显著, 在 0.5% PGPR 下的 W/O 乳液, 当镁盐质量分数达 12.0% 时, 其界面张力为 1.08 mN/m, 而 1.0% 和 2.0% PGPR 下的界面张力值均小于 1.0 mN/m。有研究表明, 在油相中存在一些脂肪酸, 这些脂肪酸与乳化剂分子一起聚集在油水界面上, 从而减小了乳化剂分子在界面上的吸附率和乳化效率, 而盐离子的添加则会减少油相中脂肪酸的界面活性, 从而提高 PGPR 在油水界面上的吸附密度, 降低了界面张力^[16-17]。本实验采用的大豆油中富含亚油酸、亚麻酸, 在乳液制备过程中, 大豆油和水混合, 经过高温和均质可能会使大豆油中的脂肪酸分解形成小分子游离脂肪酸, 这些小分子游离脂肪酸会与 PGPR 竞争性吸附在油水界面上, 从而降低乳液稳定性。而二价镁盐可以结合这些游离脂肪酸, 减少它们与 PGPR 在界面上的竞争性吸附, 从而有利于 PGPR 在油水界面上的吸附。界面张力的降低有利于减小均质过程中破裂乳液所需的力, 更容易形成小粒径乳液颗粒, 从而提高乳液稳定性^[18]。

除了降低界面张力外, 镁盐会影响 W/O 乳液的界面粘弹特性。表 4 ~ 6 反映了不同 PGPR 质量分数及镁盐质量分数对 W/O 乳液界面粘弹性的影响。一般来说, 乳化剂分子对油水界面膜粘弹性的影响为随着乳化剂分子含量的增加, 油水界面膜粘弹性会有一个先增加后降低的趋势^[19]。而在本实验中, 只看到随着 PGPR 浓度的增加, W/O 乳液的界面粘弹性呈现下降的趋势。之前的研究表明^[20], 采用大豆油作为油相, 当 PGPR 质量分数大于 0.8% 时, 就已达到乳化剂分子的临界胶束浓度 (CMC)。因此, 当 PGPR 质量分数大于 1.0% 时, PGPR 分子在界面上的吸附达到饱和, 乳化剂在界面上主要进行分子的重新排布, 而进一步增加 PGPR 浓度会影响扩散交换过程, 最终导致界面膜

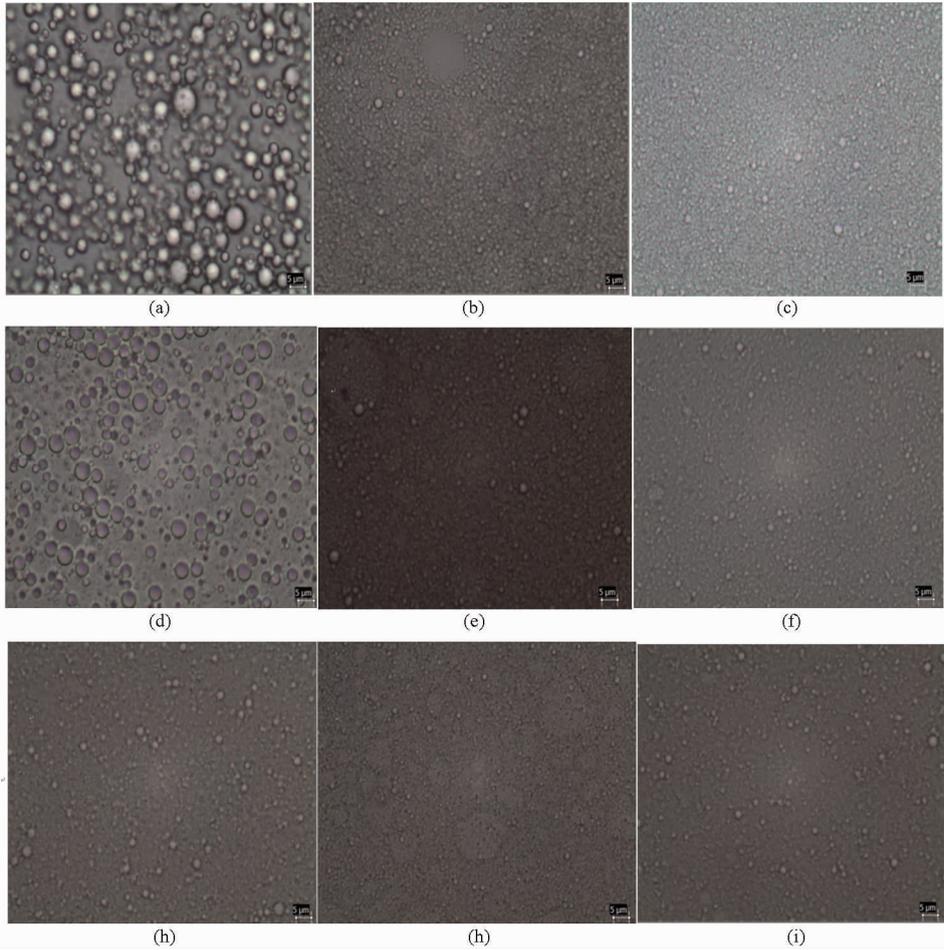


图 4 W/O 乳液微观结构

Fig.4 Microstructure of W/O emulsions

- (a) 0.5% PGPR (b) 0.5% PGPR - 2.0% 镁盐 (c) 0.5% PGPR - 12.0% 镁盐
 (d) 1.0% PGPR (e) 1.0% PGPR - 2.0% 镁盐 (f) 1.0% PGPR - 12.0% 镁盐
 (g) 2.0% PGPR (h) 2.0% PGPR - 2.0% 镁盐 (i) 2.0% PGPR - 12.0% 镁盐

表 3 不同油水界面张力变化

Tab.3 Interfacial tension of different oil-water interfaces

镁盐质量 分数/%	PGPR 质量分数/%		
	0.5	1.0	2.0
0	4.03 ± 0.03	3.61 ± 0.02	3.50 ± 0.01
2.0	2.50 ± 0.03	2.21 ± 0.02	2.05 ± 0.01
6.0	2.00 ± 0.04	1.02 ± 0.00	1.00 ± 0.01
12.0	1.08 ± 0.02	0.77 ± 0.04	0.63 ± 0.01

表 4 0.5% PGPR 下的油水界面粘弹性

Tab.4 Interfacial viscoelasticity of oil-water interfaces with 0.5% PGPR

镁盐质量分数/%	$E/(mN \cdot m^{-1})$	$\varepsilon_d/(mN \cdot m^{-1})$	$\eta_d/(mN \cdot m^{-1})$
0	6.38 ± 0.49	6.01 ± 0.43	2.14 ± 0.25
2.0	13.45 ± 0.17	12.32 ± 0.17	5.41 ± 0.05
6.0	8.87 ± 0.66	8.29 ± 0.74	3.17 ± 0.18

表 5 1% PGPR 下的油水界面粘弹性

Tab.5 Interfacial viscoelasticity of oil-water interfaces with 1% PGPR

镁盐质量分数/%	$E/(mN \cdot m^{-1})$	$\varepsilon_d/(mN \cdot m^{-1})$	$\eta_d/(mN \cdot m^{-1})$
0	6.12 ± 0.01	5.57 ± 0.08	3.04 ± 0.38
2.0	8.83 ± 0.05	7.93 ± 0.04	3.89 ± 0.03
6.0	6.85 ± 0.12	6.34 ± 0.05	2.57 ± 0.23

表 6 2% PGPR 下的油水界面粘弹性

Tab.6 Interfacial viscoelasticity of oil-water interfaces with 2% PGPR

镁盐质量分数/%	$E/(mN \cdot m^{-1})$	$\varepsilon_d/(mN \cdot m^{-1})$	$\eta_d/(mN \cdot m^{-1})$
0	4.98 ± 0.10	4.32 ± 0.10	2.48 ± 0.04
2.0	6.35 ± 0.02	5.60 ± 0.01	3.00 ± 0.01
6.0	3.56 ± 0.10	3.30 ± 0.02	1.36 ± 0.20

粘弹模量的下降。此外,随着镁盐浓度的增加,乳液的界面粘弹性呈现一个先增加后下降的趋势,这与 Opawal 的研究结果相似^[21]。添加一定浓度的镁盐会使得 PGPR 中的蓖麻醇酸分子链在水中产生“盐

析效应”,从而使得乳化剂分子在界面上的分布和交联增加,促进了界面粘弹性的增加。在较高的盐浓度下,PGPR 中的极性亲水基与水相的交联降低,从而导致界面粘弹性下降。可见,乳液稳定性的提

高主要在于油水界面张力的降低,界面粘弹性只在一定程度上影响着乳液的稳定性。

3 结束语

通过两步均质法实现了 W/O 乳液对镁盐的包埋并探究了疏水乳化剂 PGPR 和镁盐对 W/O 乳液

稳定性的影响。结果表明 PGPR 和镁盐浓度的增加均有利于提高 W/O 乳液的稳定性,其主要原因在于二者可减小乳液的粒径,并降低乳液的界面张力。此外,镁盐在一定程度上影响了乳化剂分子在油水界面膜上的分布,提高了乳液的界面粘弹性。

参 考 文 献

- 1 Rousseau D. Fat crystals and emulsion stability—a review [J]. *Food Research International*, 2000, 33(1): 3–14.
- 2 Miller D J, Henning T, Grünbein W. Phase inversion of W/O emulsions by adding hydrophilic surfactant—a technique for making cosmetics products[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 183–185: 681–688.
- 3 Frelichowska J, Bolzinger M A, Valour J P, et al. Pickering w/o emulsions: drug release and topical delivery [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, 368(1): 7–15.
- 4 Clément P, Laugel C, Marty J P. In vitro release of caffeine from concentrated W/O emulsions: effect of formulation parameters [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2000, 207(1–2): 7–20.
- 5 Clément P, Laugel C, Marty J P. Influence of three synthetic membranes on the release of caffeine from concentrated W/O emulsions [J]. *Journal of Controlled Release*, 2000, 66(2): 243–254.
- 6 Bonnet M, Cansell M, Placin F, et al. Impact of sodium caseinate concentration and location on magnesium release from multiple W/O/W emulsions [J]. *Langmuir*, 2010, 26(12): 9250–9260.
- 7 Su J, Flanagan J, Hemar Y, et al. Synergistic effects of polyglycerol ester of polyricinoleic acid and sodium caseinate on the stabilisation of water-oil-water emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(2): 261–268.
- 8 Aronson M P, Petko M F. Highly concentrated water-in-oil emulsions: influence of electrolyte on their properties and stability [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1993, 159(1): 134–149.
- 9 Koroleva M Y, Yurtov E V. Effect of ionic strength of dispersed phase on Ostwald ripening in water-in-oil emulsions [J]. *Colloid Journal*, 2003, 65(1): 40–43.
- 10 Scherze I, Knoth A, Muschiolik G. Effect of emulsification method on the properties of lecithin-and PGPR-stabilized water-in-oil-emulsions [J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2006, 27(4): 427–434.
- 11 Li J L, Qiao Z H, Tatsumi E, et al. A novel approach to improving the quality of bittern-solidified tofu by W/O controlled-release coagulant. 1: preparation of W/O bittern coagulant and its controlled-release property [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(7): 1790–1800.
- 12 酃金龙,程永强,焦翔,等. W/O 及 W/O/W 乳液型缓释凝固剂对卤水豆腐品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9):162–168.
Li Jinlong, Cheng Yongqiang, Jiao Xiang, et al. Effect of W/O and W/O/W controlled-release emulsion coagulants on characteristic of bittern-solidified tofu[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9):162–168. (in Chinese)
- 13 朱巧梅,酃金龙,殷丽君,等. W/O 乳液凝固剂对 SPI 冷凝胶流变特性及微观结构的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 240–246.
Zhu Qiaomei, Li Jinlong, Yin Lijun, et al. Effect of W/O emulsion coagulants on the rheological properties and microstructure of cold-set SPI gels [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 240–246. (in Chinese)
- 14 朱巧梅,酃金龙,殷丽君,等. 新型 W/O 盐卤凝固剂对大豆蛋白凝胶中水分变化的影响[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(5): 100–105.
Zhu Qiaomei, Li Jinlong, Yin Lijun, et al. Effect of novel W/O bittern coagulant on the change of water in soy protein gel [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(5):100–105. (in Chinese)
- 15 McClements D J. *Food emulsions: principles, practice, and techniques* [M]. Boca Raton FL: CRC Press, 1998.
- 16 Márquez A L, Medrano A, Panizzolo L A, et al. Effect of calcium salts and surfactant concentration on the stability of water-in-oil (w/o) emulsions prepared with polyglycerol polyricinoleate[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 341(1): 101–108.
- 17 Lee L, Hancocks R, Noble I, et al. Production of water-in-oil nanoemulsions using high pressure homogenisation: a study on droplet break-up [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 131: 33–37.
- 18 Hattrem M N, Dille M J, Seternes T, et al. Macro-vs. micromolecular stabilization of W/O/W-emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 37: 77–85.
- 19 Wang W, Li K, Wang P, et al. Effect of interfacial dilational rheology on the breakage of dispersed droplets in a dilute oil-water emulsion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 441: 43–50.
- 20 Gülseren İ, Corredig M. Interactions between polyglycerol polyricinoleate (PGPR) and pectins at the oil-water interface and their influence on the stability of water-in-oil emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 34: 154–160.
- 21 Opawale F O, Burgess D J. Influence of interfacial properties of lipophilic surfactants on water-in-oil emulsion stability [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1998, 197(1): 142–150.