

油脂深加工

乳化剂 *HLB* 值对棕榈油基乳液功能性质的影响金燕¹, 蒋将¹, LO Seong Koon², 梁新宇², PIATKO Michael³, CAMPBELL Shawn³, 刘元法¹

(1. 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;

2. 维益食品公司, 江苏苏州 215000; 3. 维益食品公司, 美国纽约 14213)

摘要:以搅打充气乳液为对象, 运用 Turbiscan、流变仪、粒度仪、显微镜测定乳液充气前后的物理稳定性, 探究食品乳化剂 *HLB* 值(3.8~15.0)对棕榈油基乳液功能性质的影响。结果表明:*HLB* 值在 3.8~10.0 范围对于乳液稳定性影响不明显, 但进一步增加 *HLB* 值, 导致乳液热稳定性下降, 颗粒聚集严重; 在低乳化剂 *HLB* 值(3.8~10.0)范围内, 乳液搅打充气时间随着 *HLB* 值的增加而延长, 样品起泡率也随之增加, 但硬度变化不明显; 当 *HLB* 值为 10.0 时, 乳液的搅打起泡率达到最大, 为 3.17; 进一步增加乳化剂 *HLB* 值(12.0~15.0), 样品搅打充气时间明显缩短, 表明乳液脂肪部分聚集更容易发生, 但得到的样品硬度偏大, 且样品的稳定性随着时间的延长明显下降。最终确定最佳乳化剂 *HLB* 值为 10.0。

关键词:棕榈油基乳液; 乳化剂 *HLB* 值; 起泡率; 硬度

中图分类号: TS202.3; TS227

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2018)12-0069-06

Effect of emulsifier *HLB* value on the functional properties of palm oil – based emulsion

JIN Yan¹, JIANG Jiang¹, LO Seong Koon², LIANG Xinyu², PIATKO Michael³, CAMPBELL Shawn³, LIU Yuanfa¹

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology,

Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Rich Product Corporation,

Suzhou 215000, Jiangsu, China; 3. Rich Product Corporation, New York 14213, USA)

Abstract: With whipping aerobic emulsion as object, the effects of emulsifier *HLB* values (3.8–15.0) on physical stability, rheology and microstructure of palm oil – based emulsion were examined by Turbiscan, rheometer, dynamic laser light scattering and microscope. The results showed that the emulsion had high thermal stability in the *HLB* value range of 3.8–10.0. As *HLB* value increased, the thermal stability of the emulsion decreased, and the particles seriously aggregated. In low *HLB* value range (3.8–10.0), with *HLB* value increasing, whipping aerobic time of the emulsion and the product foaming rate increased, while the hardness unchanged. When the *HLB* value was 10.0, the whipping foaming rate of emulsion was the highest, reaching 3.17. When the *HLB* value was 12.0–15.0, the whipping aerobic time shortened significantly, which showed that the accumulation of fat in the emulsion was more likely to occur, the hardness of the obtained sample increased, and the stability of the sample significantly decreased with the extension of time. As a result, the optimal emulsifier *HLB* value was determined as 10.0.

Key words: palm oil – based emulsion; emulsifier *HLB* value; foaming rate; hardness

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-07-19

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0401404)

作者简介: 金燕(1991), 女, 在读硕士, 研究方向为油脂与植物蛋白(E-mail) jinyan2017x@163.com。

通信作者: 刘元法, 教授, 博士生导师(E-mail) yfliu@jiangnan.edu.cn。

搅打充气乳液体系是一种特殊的乳状液, 该体系在搅打充气前是水包油乳液体系, 充气后形成由

部分絮凝的结晶脂肪支撑的气泡结构^[1]。在搅打充气过程中,油脂的聚集速率对于充气产品最终稳定性的影响十分重要。目前,由于氢化植物油价格较低,具有良好的稳定性,能够形成稳定的 β' 晶型,成为市场上销售的搅打充气乳液油脂的主要来源。但是氢化植物油中含有大量的反式脂肪酸和饱和脂肪酸,容易引起心血管疾病,对人体健康产生不利的影响^[2-3]。

棕榈油及其分提物因其较高的氧化稳定性以及良好的脂肪塑性,并且价格低廉,被认为是食品工业中替代氢化油的最可靠来源。将其替代氢化油制备充气乳液,不仅能降低成本,而且能够减少反式脂肪酸和饱和脂肪酸对人体的危害。但棕榈油结晶颗粒粗大,结晶速率缓慢,制备的搅打充气乳液性质往往很不稳定,通过添加不同的乳化剂,能够改善油脂的结晶特性,促进或者延缓油脂结晶,从而影响最终产品的稳定性^[4]。

此外,乳化剂能够降低乳液中各种构成相之间的界面张力,使之形成均匀稳定的分散体系。乳化剂是表面活性物质,分子中同时具有亲水基团和亲油基团,能被迅速吸附到油水界面上,降低形成乳液所需要的能量,从而提高乳液的稳定性^[5]。当乳化剂与蛋白共同存在油水界面时,乳化剂能够取代界面上的部分蛋白,降低界面膜的强度,促进充气过程中脂肪部分聚集速率^[6-7]。乳化剂亲水亲油平衡(*HLB*)值直接反映了其亲水亲油特性,不同*HLB*值乳化剂之间存在协同作用^[8]。亲水性乳化剂具有较强的表面活性和界面活性,取代界面蛋白能力较强^[9],而亲油性乳化剂普遍具有较好的复配性能和调节油脂结晶的能力^[10],两者混合能够改善充气乳液的性能。通常将低*HLB*值的乳化剂与高*HLB*值的乳化剂复配,以发挥各自的优点,提高产品的性能。

本文选取一种能够促进脂肪结晶、改善产品稳定性的亲油性乳化剂(单硬脂酸甘油酯,*HLB*值为3.8)与亲水性乳化剂(蔗糖酯 S1570,*HLB*值为15.0)复配,得到不同*HLB*值的复合乳化剂(3.8~15.0),观察不同*HLB*值乳化剂对乳液稳定性及充气后产品流变性质、稳定性的影响,并最终确定最佳*HLB*值复配乳化剂。

1 材料与方法

1.1 实验材料

棕榈油,上海丰益集团;酪蛋白酸钠,北京百灵威有限公司;蔗糖,国药集团;蔗糖酯 S1570(*HLB*值为15.0),日本三菱公司;单硬脂酸甘油酯(*HLB*值为3.8),广州嘉德乐有限公司;氯化钠、磷酸二氢

钠、磷酸氢二钠,分析纯;黄原胶、瓜尔胶、玉米糖浆均为食品级。

Turbiscan Lab 多重光散射仪,法国 Formulacion 公司;DHR3 流变仪,美国 TA 仪器公司;AH2010 高压均质机,ATS 工业系统有限公司;Ultra - Turrax T18 高速分散机,德国 Ika 公司;Zetasizer Nano ZS 纳米粒度与 Zeta 电位仪,英国马尔文公司;偏光显微镜、光学显微镜,德国 Leica 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳液的制备

将 0.60% 酪蛋白酸钠、10.00% 蔗糖、3.00% 玉米糖浆、0.15% 黄原胶、0.08% 瓜尔胶溶于一定量 60℃ 水中,搅拌至其完全溶解,然后将 25% 预融化的原料油(棕榈油)缓慢加入到水相中,再加入 0.50% 复配好的乳化剂,用水补足到 100%,持续搅拌直至油水两相混合均匀。然后用高速分散机进行预乳化,剪切速率为 13 800 r/min,剪切时间 2 min。随后在高压均质机 15/3 MPa 压力下均质一次。均质后的乳液用冰水浴迅速降温至 4℃,然后转移至 4℃ 恒温箱老化 24 h。

1.2.2 乳液稳定性测定

利用 Turbiscan Lab 多重光散射仪测定乳液稳定性。利用不同方向对散射光的折射率不同,检测不同时间下乳液内部状态的变化,分析得到 Turbiscan 稳定性指数表征乳液的稳定性。设置条件:50℃,每隔 1 min 扫描一次,扫描时长 40 min。

1.2.3 乳液粒径分布测定

对不同*HLB*值乳化剂制备的乳液在 4℃ 老化 24 h 后进行粒径分布测定,样品用超纯水按质量比 1:1 000 稀释。测定条件:颗粒折射率 1.46,分散剂折射率 1.33,颗粒吸收率 0.001,每个测试样品重复 3 次,结果取平均值。

1.2.4 乳液微观结构观察

用去离子水以 1:10(质量比)的比例稀释乳液,移取 2 μ L 稀释后的乳液滴在载玻片中央,从一侧缓慢盖上盖玻片,避免气泡,然后使用装有 CCD 摄像机的光学显微镜(物镜 50 \times ,目镜 10 \times)观察乳液中脂肪球的分布。

1.2.5 乳液起泡率测定

在室温下,取 400 g 老化 24 h 后的乳液置于 1 L 的搅拌缸内,以固定的搅打速率打发一定时间,直至产品表面光泽消失,出现软尖峰,纹路清晰为止,得到搅打充气乳液,并将打发好的样品装入专用裱花袋,观察随着时间变化,产品裱花性质的变化。使用 50 mL 干燥的平口铝盒,装满未打发的乳液并称重,

用同样平口铝盒装入打发后乳液(注意不要混入气泡),装满后用刮刀刮去多余的样品后称重,并按下式计算乳液起泡率。

$$N = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0}$$

式中: N 为起泡率,以倍数计; m_0 为空铝盒质量,g; m_1 为搅打后乳液和铝盒的总质量,g; m_2 为搅打前乳液和铝盒的总质量,g。

1.2.6 搅打充气乳液流变性质测定

使用DHR3流变仪测定搅打充气乳液的黏弹性系数。选取40 mm平板,设定间隙为3 mm,温度为10℃,用药勺移取适量充气样品置于流变仪平板中央,缓慢降夹具以减少其对充气乳液的破坏,当平板下降到3.05 mm时,用小钥匙移除平板周围多余的样品避免边缘效应。测定模式如下:

动态应变扫描:确定乳液线性黏弹区,频率固定1 Hz,应变范围为0.01%~1.00%。

动态频率扫描:频率范围为0.1~10.0 Hz,以对数取点方式采集数据,控制应力在线性黏弹区中间,测量过程中记录储存模量(G')、损耗模量(G'')。

每个测试样品重复3次,结果取平均值。

1.2.7 搅打充气乳液微观结构观察

用点样棒移取少量充气乳液置于载玻片上,然后从一侧轻轻盖上盖玻片,然后用点样棒轻轻一压,确保压片力度一致。再使用装有CCD摄像机的偏光显微镜对充气乳液进行观察(物镜10×,目镜10×)。

1.2.8 乳化剂HLB值计算

一般认为,非离子表面活性剂的HLB值具有加和性。混合乳化剂的HLB值可按其组成的各个乳化剂的质量分数加以计算,计算公式如下:

$$HLB_{ab} = HLB_a \times A\% + HLB_b \times B\%$$

2 结果与分析

2.1 乳液稳定性

采用背散射光扫描样品,采集不同时间样品的状态,拟合出稳定性指数(TSI)表征乳液的稳定性。在相同时间下比较TSI值可以分析乳液稳定性差异,TSI值越低,乳液的稳定性越高^[11]。图1为不同HLB值乳化剂对样品的稳定性指数随时间变化的影响。从图1可以看出,在短时间内(500 s),随着时间的延长,TSI值上升较快,说明这段时间样品内部状态变化比较剧烈。随后,样品TSI值基本达到平衡,说明乳液基本上已达到稳定的状态。随着HLB值的增加,样品TSI值增加,说明样品的热稳定性下降。可能是因为随着HLB值的增加,亲水性乳

化剂含量增大,取代界面蛋白能力增强,油水界面膜变薄^[12],油滴之间的静电排斥作用下降,从而导致乳液的热稳定性下降。

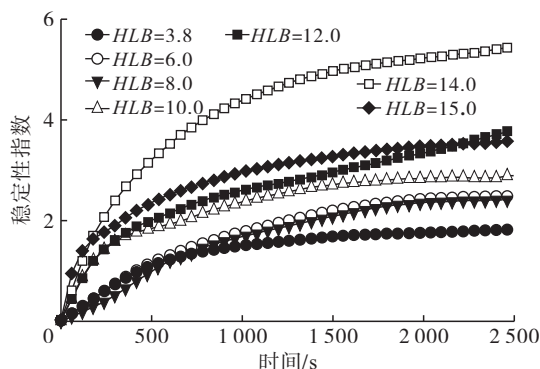


图1 添加不同HLB值乳化剂乳液的稳定性指数

2.2 乳液粒径分布

图2为添加不同HLB值乳化剂乳液在4℃老化24 h后的粒径分布图。

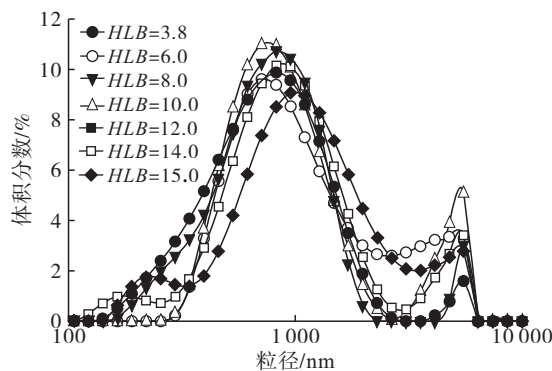


图2 添加不同HLB值乳化剂乳液的粒径分布

从图2可以看出,乳液在老化24 h后呈现不规则的多峰分布,主峰后都有不同程度的拖尾现象。第一个峰主要集中在800~1200 nm,第二个峰分布在3000~5000 nm,这个峰的形成主要归结于部分脂肪球聚集体的形成。当HLB值从3.8增加到6.0,主峰先向左偏移,继续增加HLB值,峰值变化不明显,当HLB增加到14.0、15.0时,峰明显向右偏移,而且在200~400 nm范围内,出现一个小的杂峰,说明乳液内部有粒径更小的油滴出现,但是其内部有大的颗粒聚集体出现,导致主峰向右偏移。有研究^[13]表明,HLB值高的亲水性的乳化剂拥有更强的表面活性,更容易乳化水包油乳液。低粒度尺寸的杂峰出现说明其乳化效果增强。但主峰向右偏移,平均粒径明显增大,可能是因为水溶性乳化剂的界面活性增强,解吸蛋白能力增强,油水界面膜出现更多的空隙,导致脂肪球内部的晶体更容易穿刺界面发生部分聚集,从而形成一些大的脂肪球聚集体^[14]。

2.3 乳液微观结构

乳液的微观结构图直接反映了乳液内部脂肪球

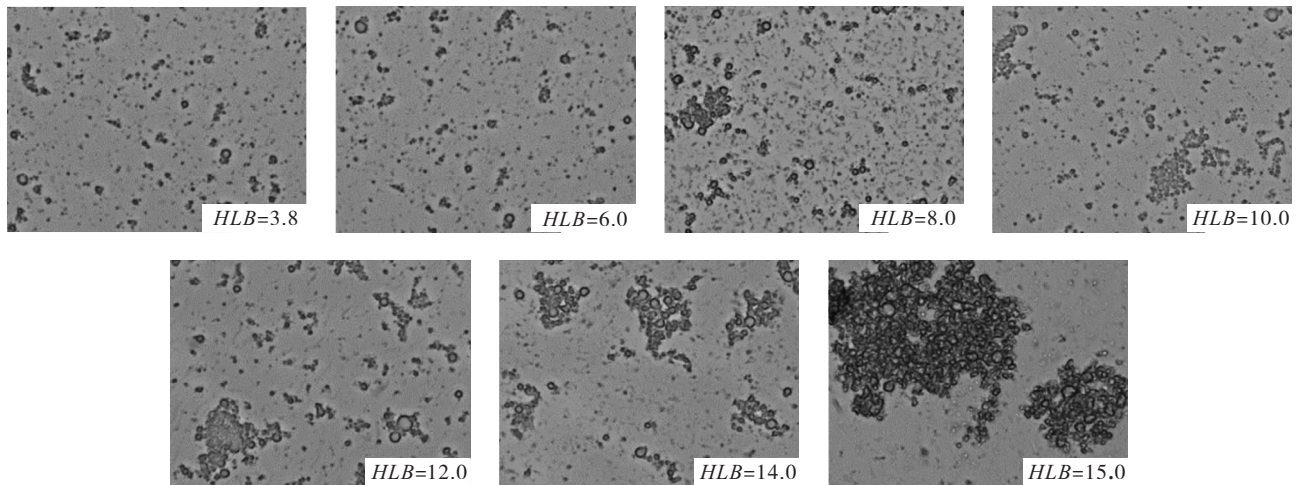


图3 添加不同 HLB 值乳化剂乳液的微观结构

从图3可以看出,当 HLB 值为 3.8 和 6.0 时,乳液颗粒呈单个颗粒状态,油滴分散性良好。当 HLB 值增加到 8.0 时,开始出现油滴聚集体,但聚集体较少,进一步增加 HLB 值,颗粒聚集体越来越多。当 HLB 值为 15.0 时,乳液中有结块现象,形成大颗粒聚集体,大颗粒聚集体的形成导致乳液粒径增大,这与乳液粒径分布图结果保持一致。脂肪球内的晶体穿透界面膜,交联附近的脂肪球,形成脂肪球聚集体。这些大的颗粒聚集体,被认为是造成乳液黏度明显上升的一个重要原因,乳液颗粒之间相互交联,

的分散和颗粒聚集状态,反映出乳液的稳定性。图3为不同 HLB 值乳化剂对乳液微观结构的影响。

增强了颗粒之间的相互作用,从而增大了剪切过程中所施的屈服应力,这与 Munk 等^[15]的研究结果相似。

2.4 乳液起泡能力

搅打充气时间是评价乳液部分聚集速率重要的指标,通常认为,搅打充气时间越短,脂肪部分聚集速率越快^[6]。另一方面,乳液起泡率是判断乳液包裹气泡能力的有效指标。不同 HLB 值乳化剂对乳液起泡能力的影响如表 1 所示。

表1 不同 HLB 值乳化剂对乳液起泡能力的影响

乳液中添加的乳化剂的 HLB 值	样品质量/g	样品温度/°C	搅打充气时间/s	起泡率(倍)
3.8	409.27 ± 5.25	8.8 ± 0.3	303 ± 6 ^a	2.79 ± 0.02 ^b
6.0	401.25 ± 3.21	8.9 ± 0.1	294 ± 5 ^a	2.83 ± 0.03 ^b
8.0	412.69 ± 7.86	9.2 ± 0.1	311 ± 4 ^a	3.01 ± 0.05 ^d
10.0	415.74 ± 7.21	9.0 ± 0.0	386 ± 7 ^b	3.17 ± 0.05 ^E
12.0	395.24 ± 4.25	9.4 ± 0.3	284 ± 10 ^a	2.93 ± 0.03 ^c
14.0	404.12 ± 5.96	9.2 ± 0.1	315 ± 8 ^a	2.84 ± 0.01 ^b
15.0	401.20 ± 3.45	9.2 ± 0.2	293 ± 9 ^a	2.49 ± 0.02 ^a

从表 1 可以看出,在 HLB 值 3.8 ~ 10.0 范围内,随着 HLB 值的增加,搅打充气时间延长,同时起泡率从 2.79 增加到 3.17,达到最大。起泡能力的提高,说明该乳液具有良好的包裹气泡的能力。但进一步增加 HLB 值,搅打充气时间开始缩短,脂肪部分聚集速率加快,而且起泡率也呈下降趋势。这是因为随乳化剂 HLB 值的增大,水溶性乳化剂含量增加,而水溶性乳化剂解吸蛋白能力增强,形成的油水界面膜更薄,从而导致脂肪晶体更容易穿刺界面膜,与相邻的脂肪球之间形成桥梁,从而快速形成部分聚集的脂肪网络结构,从而缩短了充气时间。

2.5 搅打充气乳液流变性质

搅打充气乳液的黏弹性直接影响口感、质构、涂抹性等性能。选用线性黏弹区内的应变,测定搅打充气乳液黏弹性模量随频率的变化,研究不同 HLB 值乳化剂对搅打充气乳液流变性质 (G' , G'') 的影响,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,对搅打充气乳液应变扫描发现,在低乳化剂 HLB 值范围内(3.8 ~ 10.0),储存模量(G')比较接近,随着 HLB 值的增加(12.0 ~ 15.0), G' 也逐渐增大,但样品的线性黏弹区变窄,说明高 HLB 值的搅打充气乳液内部结构更加脆弱,相同应

力下,其内部结构更容易遭到破坏。对搅打充气乳液进行频率扫描发现,所有样品的 G' 值大于 G'' 值,表明该体系为更接近固体的弹性结构。随着扫描频率的增加,样品 G' 随之增加。不同 HLB 值样品之间呈现与应变扫描同样的趋势。乳化剂 HLB 值在 3.8 ~ 10.0 范围内, G' 没有明显变化。当 HLB 达到 12.0 时,样品 G' 增加明显,说明样品形成了坚硬的

结构。当 HLB 过高时(12.0 ~ 15.0),样品结构不稳定,可能是样品搅打充气过程中,脂肪聚集速率过快,形成了过度聚集的状态^[16-17]。另外,随着单硬脂酸甘油酯(GMS)含量的降低,其对棕榈油的结晶修饰作用降低,棕榈油结晶易形成粗大的晶体颗粒,不利于泡沫结构的稳定性和产品的感官品质^[4-5]。

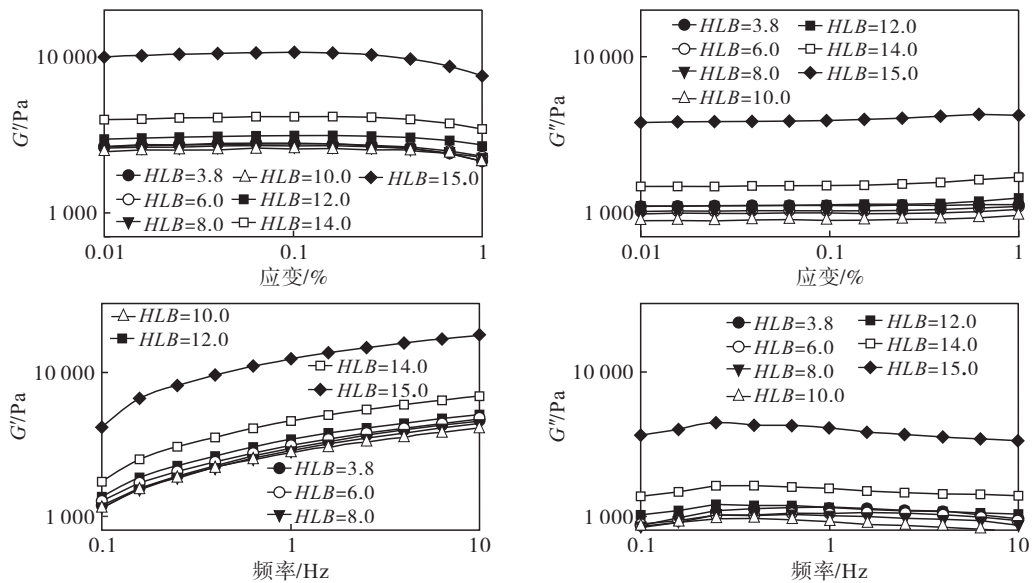


图 4 添加不同 HLB 值乳化剂充气乳液的流变性质

2.6 充气乳液微观结构

搅打充气乳液的稳定性与分散性气泡的分布如

尺寸大小、均一度紧密相关。图 5 为添加不同 HLB 值乳化剂乳液搅打充气后样品的微观结构图。

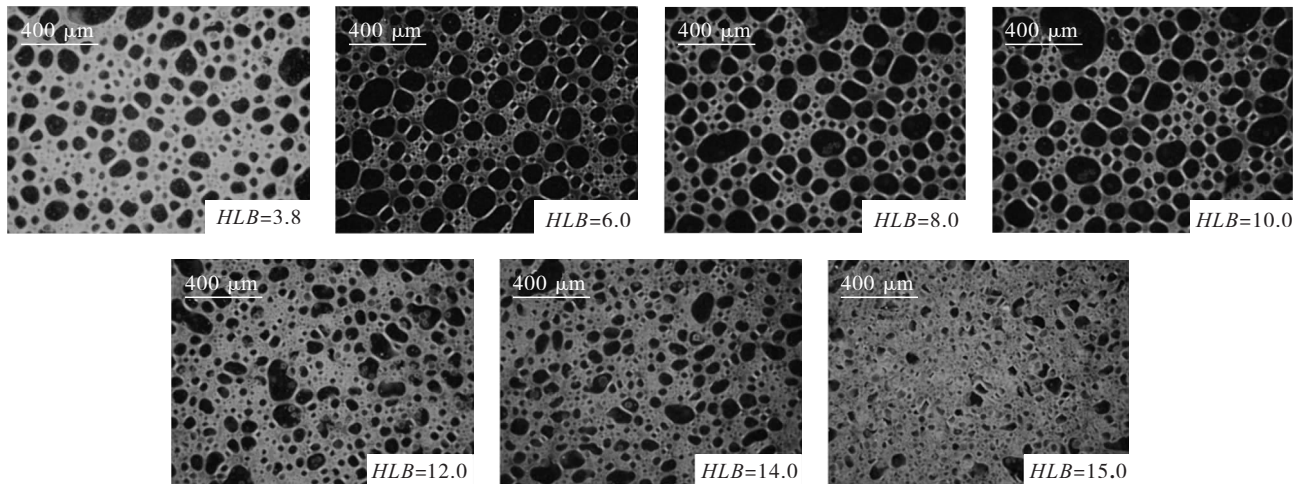


图 5 添加不同 HLB 值乳化剂充气乳液的微观结构

由图 5 可以看出,气泡均匀地分散在结晶脂肪形成的网络结构中央。脂肪球的分布对于搅打充气乳液的稳定性具有十分重要的影响。结晶脂肪在气泡周围均匀分布,有助于样品在储藏过程中结构的稳定性^[18]。当 HLB 值为 3.8 时,分布在气泡周围的结晶桥梁较粗,通过对搅打充气乳液的内部结构观察,发现 HLB 为 3.8 的样品在储藏过程中不容易变粗糙。这主要是 GMS 对棕榈油的结晶修饰作用贡

献比较大。有研究报道,GMS 能够加速棕榈油结晶速率,形成更多更小的晶体^[5],从而增加充气乳液的稳定性。随着 HLB 值的增加,样品稳定性下降。当乳化剂 HLB 值增加到 12.0 时,样品气泡分布变得不均匀,短时间内样品内部结构变得粗糙。这主要是由于当 HLB 值过高,在搅打充气过程中脂肪部分聚集速率加快,形成的脂肪晶体粒径较大,在外力的作用下容易刺破已形成的气泡,导致结晶的脂肪

形成过度聚集的状态^[19-20],形成粗糙的固态乳液结构,不利于气泡的稳定。

3 结论

不同 *HLB* 值乳化剂对于酪蛋白酸钠乳液充气前后有明显的影响。在低 *HLB* 值条件下(3.8 ~ 10.0)制备的乳液,具有较好的热稳定性,且粒径分布较均匀。在此 *HLB* 值范围内,乳液搅打充气时间和起泡率均随乳化剂 *HLB* 值的增加而增加,当乳化剂 *HLB* 值为 10.0 时,起泡率达到最大,为 3.17。搅打充气后的乳液硬度没有明显的变化,气泡结构较完整,具有较好的稳定性。但随着乳化剂 *HLB* 值的进一步增加,乳液中出现大的油滴聚集体,且聚集程度随着 *HLB* 值的增加变得更加严重,当 *HLB* 值为 15.0 时,脂肪球聚集最严重。同时,脂肪部分聚集速率随着乳化剂 *HLB* 值的增加而加快,当 *HLB* 值超过 12.0 时,搅打充气容易造成样品过度聚集,气泡分布不均,形成的产品硬度偏大。所以,确定合适乳化剂 *HLB* 值为 10.0。

参考文献:

- [1] BROOKER B E, ANDERSON M, ANDREWS A T. The development of structure in whipped cream [J]. *Food Struct*, 1986, 5(2): 277-285.
- [2] 丁福祺, 郑耀坤. 以棕榈油为原料的人造奶油起酥油的研制[J]. *中国油脂*, 1997, 22(2): 3-6.
- [3] 邵景东, 刘一军. 食品中反式脂肪酸危害及检测方法研究进展[J]. *中国公共卫生*, 2006, 22(3): 366-367.
- [4] MARUYAMA J M, SOARES F A S D M, D'AGOSTINHO N R, et al. Effects of emulsifier addition on the crystallization and melting behavior of palmolein and coconut oil[J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(10): 2253-2263.
- [5] PALANUWECH J, COUPLAND J N. Effects of surfactant type on the stability of oil-in-water emulsions to dispersed phase crystallization [J]. *Colloid Surface A*, 2003, 223: 251-262.
- [6] HOTRUM N E, STUART M A C, VAN VLIET T, et al. Elucidating the relationship between the spreading coefficient, surface-mediated partial coalescence and the whipping time of artificial cream[J]. *Colloid Surface A*, 2005, 260(1): 71-78.
- [7] MUNK M B, LARSEN F H, VAN DEN BERG F W J, et al. Competitive displacement of sodium caseinate by low-molecular-weight emulsifiers and the effects on emulsion texture and rheology [J]. *Langmuir*, 2014, 30(29): 8687-8696.
- [8] 吕心泉, 闵健慧, 安辛欣. 复配乳化稳定剂的研制及其在饮料中的应用[J]. *中国食品添加剂*, 2003(1): 57-63.
- [9] ROUIMI S, SCHORSCH C, VALENTINI C, et al. Foam stability and interfacial properties of milk protein-surfactant systems[J]. *Food Hydrocoll*, 2005, 19(3): 467-478.
- [10] FREDRICK E, FOUBERT I, DE SYPE J V, et al. Influence of monoglycerides on the crystallization behavior of palm oil[J]. *Cryst Growth Des*, 2008, 8(6): 1833-1839.
- [11] 江漩涛, 敬加强, 杜磊, 等. TURBISCAN LAB 稳定性分析仪研究稠油乳液稳定性[J]. *现代化工*, 2016, 36(1): 176-179.
- [12] EUSTON E, SINGH H, MUNRO P A, et al. Competitive adsorption between sodium caseinate and oil-soluble and water-soluble surfactants in oil-in-water emulsions [J]. *J Food Sci*, 1995, 60(5): 1124-1131.
- [13] JIANG J, JIN Y, LIANG X, et al. Synergetic interfacial adsorption of protein and low-molecular-weight emulsifiers in aerated emulsions [J]. *Food Hydrocoll*, 2018, 81: 15-22.
- [14] VAN AKEB G A. Competitive adsorption of protein and surfactants in highly concentrated emulsions: effect on coalescence mechanisms[J]. *Colloid Surface A*, 2003, 213(2): 209-219.
- [15] MUNK M B, MARANGONI A G, LUDVIGSEN H K, et al. Stability of whippable oil-in-water emulsions: effect of monoglycerides on crystallization of palm kernel oil[J]. *Food Res Int*, 2013, 54(2): 1738-1745.
- [16] FREDRICK E, WALSTRA P, DEWETTINCK K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions [J]. *Adv Colloid Interf*, 2010, 153(1): 30-42.
- [17] LEAL-CALDERON F, THIVILLIERS F, SCHMITT V. Structured emulsions [J]. *Curr Opin Colloid In*, 2007, 12(4): 206-212.
- [18] CHANG Y, HARTEL R W. Stability of air cells in ice cream during hardening and storage [J]. *J Food Eng*, 2002, 55(1): 59-70.
- [19] 赵强忠. 搅打稀奶油的搅打性能和品质的变化规律及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [20] 余权, 赵强忠, 赵谋明, 等. 乳化剂 *HLB* 值对含大豆蛋白搅打稀奶油的搅打性能及质构特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2010(10): 11-14.