

月桂酸型甘油二酯 – 大豆油基油泡沫的制备及其在蛋黄酱中的应用

李紫薇^{1,2}, 仇超颖^{1,2}, 汪 勇^{1,2}

(1. 暨南大学 食品科学与工程系, 广州 510632; 2. 广东省油料生物炼制与营养安全国际联合研究中心, 广州 510632)

摘要:旨在构建健康、低脂、高稳定性的新型蛋黄酱产品,以甘油和月桂酸为原料经过 Novozyme 435 脂肪酶催化,制备月桂酸型甘油二酯(DAG)粗产物,采用分子蒸馏和硅胶柱层析技术对粗产物进行纯化得到高纯度月桂酸型 DAG(纯度 > 92%),以此为原料制备油泡沫,探究了搅打时间对油泡沫起泡能力、气泡粒径分布、微观结构及稳定性的影响,并将油泡沫 50% 部分替代或完全替代大豆油用于蛋黄酱制备,研究油泡沫对蛋黄酱流变学特性、色泽、稳定性的影响。结果表明:随着搅打时间的延长,气泡表面吸附的晶体数量明显增多,气泡粒径增大,起泡率先增大后基本保持不变,搅打时间为 15 min 时油泡沫起泡率最高,且此时的油泡沫储存 2 个月体积无明显变化;采用油泡沫部分替代及完全替代大豆油后可降低蛋黄酱的黏度,增加蛋黄酱在应力及频率扫描下的弹性模量,蛋黄酱表现出良好的塑性和稳定性,且蛋黄酱的色泽 L^* 值增加, a^* 值和 b^* 值降低。采用月桂酸型 DAG 搅打获得的油泡沫可有效降低蛋黄酱的油脂含量和热量,可作为油脂替代物用于新型蛋黄酱产品的开发。

关键词:低热量蛋黄酱;油泡沫;月桂酸型甘油二酯;流变学特性

中图分类号:TS225.6;TS219 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)03-0072-06

Preparation of diglycerol laurate – based soybean oil foam and its application in mayonnaise

LI Ziwei^{1,2}, QIU Chaoying^{1,2}, WANG Yong^{1,2}

(1. Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangdong Joint International Research Centre of Oilseed Biorefinery, Nutrition and Safety, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Aiming to prepare healthy, low-fat mayonnaise with good stability, diglycerol laurate (DAG) with high purity (> 92%) was synthesized via esterification of lauric acid with glycerol by using Novozyme 435 and followed by purification steps involving molecular distillation and silica gel column chromatography, and used as raw material for the preparation of oil foam, and the effects of whipping time on the foaming ability, bubble particle size distribution, microstructure and stability of the oil foam were investigated. Soybean oil was 50% partially replaced or completely replaced by oil foam for the preparation of mayonnaise, and the effects of oil foam on the rheological properties, color and stability of mayonnaise were investigated. The results showed that the number of crystals adsorbed on the surface of the bubbles increased significantly with the prolonging of the whipping time, the particle size of the bubbles increased, and the foaming rate first increased and then remained basically unchanged. The

收稿日期:2023-03-27;修回日期:2023-11-01

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2022B0202010003)

作者简介:李紫薇(1999),女,在读硕士,研究方向为油脂加工与营养(E-mail) liziweixx@163.com。

通信作者:仇超颖,副研究员,博士(E-mail) tcyqiu@jnu.edu.cn。

foaming rate was the highest when the whipping time was 15 min, and the oil foam volume did not change significantly after 2 months of storage. After using oil foam to partially replace and completely replace soybean oil, the viscosity of mayonnaise decreased, the modulus of elasticity

of mayonnaise under stress and frequency scanning increased, mayonnaise showed good plasticity and stability, and the color L^* value of mayonnaise increased, a^* value and b^* value decreased. The oil foam obtained by whipping with DAG can effectively reduce the oil content and calorie of mayonnaise, and can be used as a oil substitute for the development of new mayonnaise products.

Key words: low-calorie mayonnaise; oil foam; diglycerol laurate; rheological property

蛋黄酱是一种具有独特质构特性及风味的半固态水包油(O/W)型乳液,主要由植物油、蛋黄液、醋、盐、糖等制作而成,已被广泛用作调味品。传统的蛋黄酱中含有70%~80%的脂肪,过度摄入脂肪可能会增加肥胖、高血脂、心血管疾病等的风险^[1],不利于人体健康,而降低蛋黄酱中的脂肪含量可能会影响食品的质地、口感及稳定性。已有研究将脂肪替代物如蛋白质、多糖等应用于低脂蛋黄酱的制备中,可达到与脂肪相似的口感和质地。如:Liu等^[2]使用小麦面筋稳定的高内相乳液生产的蛋黄酱具有与全脂蛋黄酱相似的感官特性和摩擦学性能,并且具有更好的热稳定性;申瑞玲等^[3]使用燕麦糊精生产的低脂蛋黄酱具有与全脂蛋黄酱相似的可接受度、外观和风味,且热量较低;姜雯翔等^[4]使用 α -淀粉酶水解的大米淀粉替代脂肪制备低脂蛋黄酱,发现葡萄糖值为1.5的大米糊精替代30%脂肪制备的蛋黄酱感官品质最优;Li等^[5]使用魔芋凝胶替代油脂制备蛋黄酱,发现其与全脂蛋黄酱具有类似的质地,且具有更好的储存稳定性。虽然上述新型产品拥有与市售产品类似的流变学性质,但脂肪含量的减少使得产品的感官品质及理化特性较难达到相应的要求。

蛋黄酱中油相含量及组成是影响O/W型乳液流变学性质和稳定性的关键因素。油泡沫是一种通过充气搅打将气体包裹在油相中的非均相体系,具有热量低、塑性好、质地细腻等优点,作为传统饱和脂肪替代物受到广泛的关注。目前已有报道将油泡沫应用于含油加工食品如蛋黄酱、海绵蛋糕等产品中,以降低食品中饱和脂肪和反式脂肪的含量,改善食品的口感和质地。如:Saremnejad等^[6]使用单、双甘油酯混合物油泡沫制备的低脂蛋黄酱具有与全脂蛋黄酱相似的流变特性和稳定性;Gehin-Delval等^[7]使用可可脂改良剂油泡沫作油相制备的蛋黄酱具有与全脂蛋黄酱相似的质地,且产品的油腻感降低。Mohan等^[8]使用油泡沫制作的蛋糕与起酥油制作的蛋糕具有相似的硬度和咀嚼性。目前,脂

质成分包括长链脂肪醇、脂肪酸、单甘酯以及蔗糖酯和卵磷脂等,已被广泛用作油泡沫的晶体颗粒稳定剂,其中甘油二酯(DAG)作为功能性结构脂质,具有一定的抗炎和抗骨质疏松,减少体内脂肪蓄积及降低胆固醇、餐后血糖等功效^[9],引起人们的广泛关注。DAG作为乳化剂已用于O/W型和油包水(W/O)型乳液食品中^[10]。本课题组前期研究发现^[11],当DAG部分替代全氢化棕榈油时可制备稳定的油泡沫,同时发现月桂酸型DAG比相同脂肪酸组成的单甘酯、甘油三酯基泡沫体系表现出更高的稳定性和起泡能力^[12]。因此,DAG基油泡沫在低饱和食品加工中有十分重要的应用前景。

本文以月桂酸型DAG为原料制备油泡沫,考察搅打时间对油泡沫起泡能力、稳定性及微观结构的影响,筛选出制备稳定油泡沫的最适搅打时间,并利用该油泡沫作为油相部分或完全替代蛋黄酱中的大豆油,研究油泡沫对蛋黄酱流变学特性、色泽、稳定性的影响,以期食品工业开发健康、低脂、高稳定性的新型蛋黄酱产品以及扩大DAG的应用范围提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

月桂酸,纯度98.0%,麦克林生物有限公司;甘油,纯度99%,天津市大茂化学试剂厂;Novozyme 435脂肪酶,诺维信(中国)生物技术有限公司;大豆油,益海嘉里有限公司;石油醚、乙酸乙酯,均为市售分析纯。

1.1.2 仪器与设备

N-1300旋转蒸发仪,上海爱朗仪器有限公司;数显恒温加热磁力搅拌器,德国IKA公司;集热式恒温加热磁力搅拌器、循环水式真空泵,巩义市予华仪器有限责任公司;MD-80分子蒸馏设备,广州市汉维仪器设备有限公司;DDQ-B01K1手持式电动打蛋器,小熊电器股份有限公司;Kinexus pro旋转流变仪,英国Malvern仪器有限公司;DM2700P偏振光

显微镜,德国徕卡仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 月桂酸型 DAG 的制备及纯化

参照 Wang 等^[12]的方法制备及纯化月桂酸型 DAG。

制备:称取一定量的月桂酸和甘油(底物物质的量比 2.25:1)于 500 mL 圆底烧瓶中,并将其置于恒温加热磁力搅拌器内,在 55 °C 下加热至原料完全熔化,加入 5% 的 Novozyme 435 脂肪酶,抽真空反应 3 h,反应结束后过滤除去 Novozyme 435 脂肪酶,得到月桂酸型 DAG 粗产物。

纯化:在刮膜转速 300 r/min、真空度 0.1 Pa 和进料流速 40 mL/h 条件下采用分子蒸馏对粗产物进行纯化。再利用硅胶柱层析除去分子蒸馏后产物中的甘油三酯,洗脱剂为石油醚-乙酸乙酯-甲酸(体积比 4:1:0.05),得到高纯度月桂酸型 DAG(纯度 >92%)。

1.2.2 油泡沫的制备

向大豆油中加入 10% (以大豆油质量计)的月桂酸型 DAG,在 80 °C 下加热 1 h,使其混合均匀,随后将其置于 -18 °C 冰箱快速冷却 1 h,取出后放置 5 h 缓慢恢复到室温,使用手持式电动打蛋器在速率 350 r/min、温度 22 °C 条件下搅打一定时间得到油泡沫。

1.2.3 蛋黄酱的制备

参照 Saremnejad 等^[6]的方法,先将 8% 蛋黄、6% 水、3% 盐、2% 醋、1% 糖混合均匀,随后缓慢加入 80% 的大豆油/大豆油与油泡沫混合物(比例 1:1)/油泡沫,并用电动打蛋器搅拌 20 min,分别得到全脂蛋黄酱(对照组)、部分替代蛋黄酱和完全替代蛋黄酱。

1.2.4 油泡沫指标的测定

1.2.4.1 微观结构及粒径分布

用偏振光显微镜(PLM)观察油泡沫在 400 倍放大倍数下的微观结构,随后利用 Nano Measure 1.2.5 Image 软件对气泡粒径分布进行分析。

1.2.4.2 起泡性

根据搅打前后样品体积变化计算起泡率(x),计算公式如下。

$$x = \frac{V_f - V_s}{V_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_s 和 V_f 分别代表搅打前和搅打后泡沫的体积。

1.2.4.3 稳定性

取起泡性最好的油泡沫约 10 mL 于样品瓶中,并将其置于 22 °C 培养箱中储存 6 个月,观察泡沫体

积的变化。

1.2.5 蛋黄酱性能测定

1.2.5.1 流变学特性

利用 Kinexus pro 旋转流变仪对蛋黄酱的流变学特性进行分析,选用 20 mm 平行板进行测量,测量间隙为 0.5 mm,测量温度为 22 °C。

表观黏度:在稳定的剪切条件下,以 0.1 ~ 100 s^{-1} 的剪切速率测量样品的表观黏度。

应力扫描:在频率 1 Hz 和 0.01% ~ 100% 的应变范围内进行振幅扫描,测定弹性模量(G')和黏性模量(G'')随应变的变化。

频率扫描:在线性黏弹性区域内测量 G' 和 G'' 随频率(0.1 ~ 100 Hz)的变化情况。

1.2.5.2 色泽

利用色度计测量蛋黄酱的颜色(L^* 、 a^* 、 b^*),每个样品重复测量 3 次。其中: L^* 代表物体的亮度, L^* 越大表明物体越亮或越白, L^* 越小表明物体越暗或越黑; a^* 代表物体的红绿色, a^* 大于 0 表明物体偏红色, a^* 小于 0 表明物体偏绿色; b^* 代表物体的黄蓝色, b^* 大于 0 表明物体偏黄色, b^* 小于 0 表明物体偏蓝色。

1.2.5.3 稳定性

取约 10 mL 的样品放置于 20 mL 玻璃样品瓶中,并置于 22 °C 下储存,观察样品在 0 d 和 15 d 外观的变化。

1.2.6 数据处理

每个样品至少进行 3 次重复实验,数据用“平均值 ± 标准差”表示,使用 SPSS 25.0 软件进行统计分析, $p < 0.05$ 认为有统计学差异。

2 结果与讨论

2.1 搅打时间对油泡沫微观结构、气泡粒径分布及起泡能力的影响

不同搅打时间下油泡沫的起泡率见图 1,油泡沫的 PLM 图及气泡粒径分布见图 2。

由图 1 和图 2 可看出,搅打 3 min 后,空气被较快充入体系中,此时起泡率较低,仅为 10%,大部分 DAG 晶体分布在连续相中(PLM 图),气泡表面已有明显晶体层吸附。随着搅打时间的延长,起泡率迅速增加,并在 15 min 时达到最大值(148%),但气泡粒径也随之增大。Müller - Fischer 等^[13]研究发现,较大的气泡通常对应更高的起泡性。PLM 图显示气泡表面吸附的晶体数量明显增多,连续相中的晶体数量减少,这也与 Mishima 等^[14]的研究结果一致,即在充气过程中油相中晶体会扩散到油气界面处。与搅打初期不同,此时气泡表面形成了较厚

的晶体层,阻碍了气泡形状弛豫,使其呈现非球形,与搅打初期的小气泡相比,大气泡更容易发生变形,这可能是由于拉普拉斯压力随着气泡直径的增加而降低导致^[15]。随着搅打时间进一步延长,起泡率基本保持不变,泡沫粒径则继续增大,这可能是由于搅打过度所导致。杜李阳^[16]研究发现,过度搅打使得相邻气泡的界面晶体出现连接,从而导致了气泡的破裂及合并,使得泡沫粒径变大,与本文结论相似。

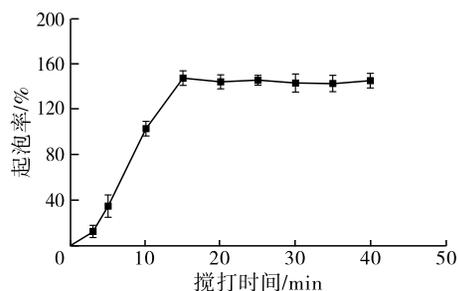


图1 不同搅打时间下油泡沫的起泡率

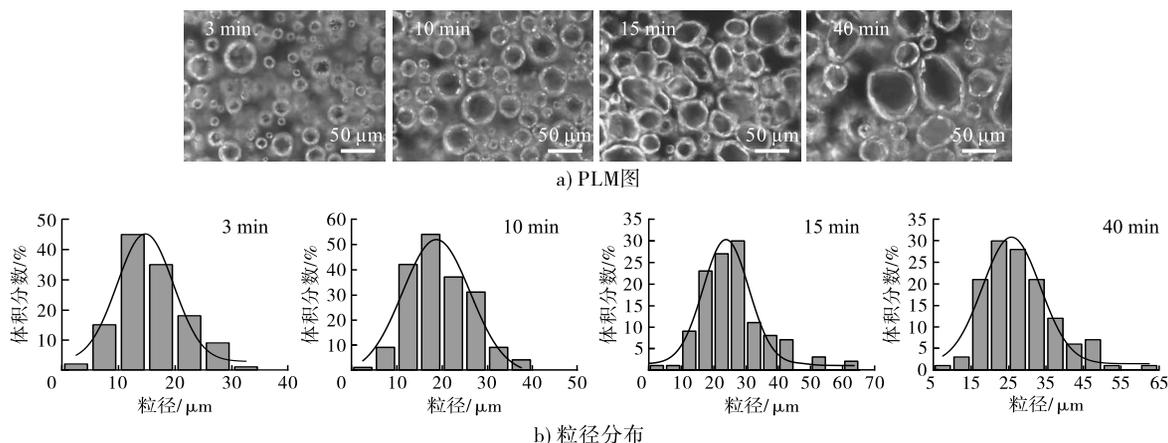


图2 不同搅打时间下油泡沫的 PLM 图及气泡粒径分布

2.2 油泡沫的稳定性

搅打 15 min 制备的油泡沫储存 0、2、6 个月体积的变化见图 3。

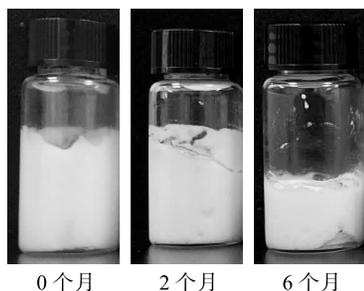


图3 搅打 15 min 后油泡沫储存 0、2、6 个月体积的变化

油泡沫稳定性决定了其储存能力及在食品体系中的应用特性。由图 3 可看出,储存 2 个月后,油泡沫体积无明显变化,且未出现油相分离现象。Binks 等^[17]研究发现颗粒稳定的油泡沫,当其颗粒与界面的接触角位于 $40^\circ \sim 90^\circ$ 之间时油泡沫的稳定性较好。DAG 分子中具有疏水基团和亲水基团,研究表明,高纯度月桂酸型 DAG 与油-气界面的接触角约为 56° ^[18],这反映高纯度月桂酸型 DAG 颗粒有利于稳定油泡沫。此外,从油泡沫的 PLM 图(图 2a)可以看出,油泡沫的连续相和界面均分布有亮的发光层,表明 DAG 晶体吸附在气泡表面,油泡沫中的 Pickering 稳定和 network 稳定作用有效减缓了气泡聚结和奥斯特瓦尔德熟化^[19],油泡沫在储存 2 个月内能

够保持较好的稳定性。从图 3 还可看出,储存 6 个月后油泡沫的体积明显减小,推测长期储存气泡会发生合并和部分失稳,导致油泡沫体积减小。

2.3 蛋黄酱的流变学特性

按 1.2.3 的方法制备 3 种蛋黄酱样品(其中油泡沫为起泡性最好的),测定其表观黏度、流变黏弹性,结果如图 4 所示。

从图 4a 可以看出,3 种蛋黄酱样品表观黏度均随着剪切速率增加而降低,显示出剪切稀化行为,表明蛋黄酱样品均为假塑性流体^[2]。蛋黄酱黏度主要与液滴的堆积紧密程度有关,由于气泡的裹入以及表面吸附的 DAG 晶体之间的相互作用,相邻液滴之间连接,形成致密的三维网络结构,使得蛋黄酱具有较高的黏度,随着剪切速率的增加,网络结构被破坏,导致黏度减小^[20-21]。此外,全脂蛋黄酱的表观黏度略高于部分替代蛋黄酱和完全替代蛋黄酱,这可能与油脂含量有关,降低蛋黄酱中油脂含量会降低油滴堆积密度和相互作用,从而导致黏度降低^[22]。

由图 4b 可看出,在线性黏弹区(应变 $< 0.1\%$)内 3 种蛋黄酱样品 G' 始终高于 G'' ,说明样品中均形成了稳定的弹性网络,具有半固体特性。由图 4c 可看出,在整个频率范围内,样品的 G' 始终大于 G'' ,说明所有蛋黄酱样品均表现半固体特征。随着频率的增加, G' 和 G'' 略有增加,说明二者表现出一定的频

率依赖性。一般而言,脂肪含量较高的乳液会显示出较高的 G' 值^[23],然而本实验中脂肪替代蛋黄酱的 G' 高于对照组,这可能是由于吸附在油-气界面的晶体及连续相中的晶体增强了网络结构强度,月

桂酸型 DAG 的高熔点特性也使得 G' 增加。Phuah 等^[24] 研究发现随着棕榈仁油 DAG 含量增加,蛋黄酱的网络结构逐渐增强,与本文研究结果相似。

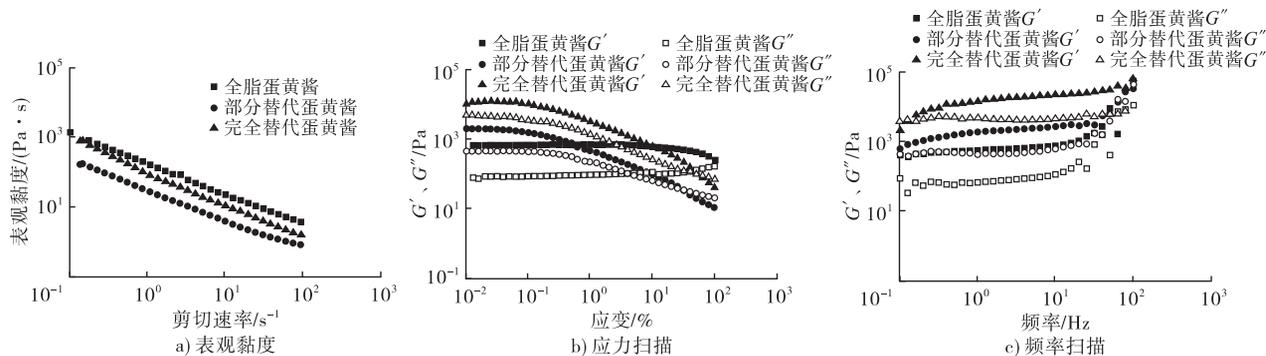


图4 剪切作用下3种蛋黄酱的表现黏度及黏弹性变化

2.4 蛋黄酱的色泽

3种蛋黄酱样品的色泽测定结果见表1。

表1 3种蛋黄酱的色泽

样品	L^*	a^*	b^*
全脂蛋黄酱	75.93 ± 3.80	3.13 ± 1.00	29.60 ± 3.20
部分替代蛋黄酱	85.30 ± 1.93	2.23 ± 0.21	21.93 ± 0.55
完全替代蛋黄酱	90.40 ± 4.17	0.90 ± 0.00	13.83 ± 0.40

由表1可看出,全脂蛋黄酱的 b^* 值最大,表明具有更深的黄色值,这可能与大豆油油滴的分布有关。而随着油泡沫含量增加,蛋黄酱的 L^* 值增大, a^* 、 b^* 值降低,其中完全替代蛋黄酱的颜色呈白色(见图5),这是由于较多气泡存在于体系结构中,同时气泡被脂肪晶体包裹,形成的油泡沫均匀分散于乳化体系中所致。Park^[25]、王超^[26] 等研究也发现蛋黄酱的 L^* 值会随着脂肪代替物含量的增加而增加。

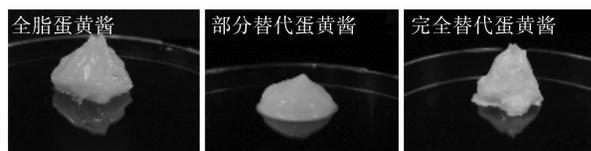
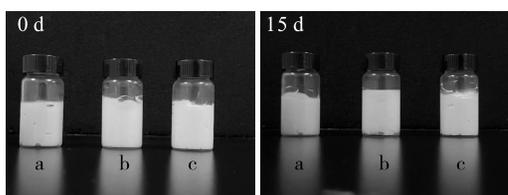


图5 3种蛋黄酱的外观

2.5 蛋黄酱的稳定性

图6为3种蛋黄酱样品在22℃下储存0d和15d后的外观变化。



注:a.全脂蛋黄酱;b.部分替代蛋黄酱;c.完全替代蛋黄酱

图6 3种蛋黄酱在22℃下储存0d和15d后的外观变化

蛋黄酱的稳定性决定了产品的货架期。由图6可以看出,储存15d后,全脂蛋黄酱和完全替代蛋黄酱均表现出较好的稳定性,而部分替代蛋黄酱稳定性略低,底层出现一定程度的析水现象。较高的黏度可以减缓液滴的移动速度,并能够抑制液滴的合并、聚集和沉淀,而部分替代蛋黄酱样品黏度较低(图4a),导致其稳定性较差,同时,从微观结构(图7,偏振光显微镜测定)也可以看出,完全替代蛋黄酱中液滴和气泡均紧密堆积排列,而部分替代蛋黄酱中内部气泡和液滴排列较为松散,未形成良好的堆积结构,不利于样品的长期稳定。

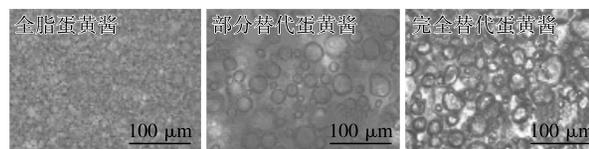


图7 3种蛋黄酱的微观结构

3 结论

考察了搅打时间对月桂酸型 DAG 基油泡沫微观结构、气泡粒径、起泡能力的影响,发现随着搅打时间的延长晶体分散体系起泡能力先迅速增加,搅打15min时起泡率达到最大值(148%),然后基本保持不变,搅打过程中气泡粒径逐渐增大,同时较长的搅打时间使得气泡发生变形,气泡表面形成明显的厚结晶层吸附。油泡沫(搅打15min的)储存2个月仍具有良好的稳定性,主要是通过油-气界面的 Pickering 结晶和三维网络结构稳定的。使用油泡沫(搅打15min的)50%部分替代或完全替代大豆油制备新型低脂蛋黄酱,发现与全脂蛋黄酱相比,脂肪替代蛋黄酱 G' 较高,完全替代蛋黄酱在储存15d后仍具有优异的稳定性,然而部分代替蛋黄酱稳定性下降,底层出现析水现象。因此,采用月桂

酸型 DAG 搅打获得的油泡沫可作为油脂替代物用于新型蛋黄酱产品的开发,可有效降低蛋黄酱的油脂含量和热量,并提高产品的品质,但针对该产品的感官特性和消费者可接受度还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] MOZAFFARIAN D. Dietary and policy priorities for cardiovascular disease, diabetes, and obesity: A comprehensive review [J]. *Circulation*, 2016, 133(2): 187–225.
- [2] LIU X, GUO J, WAN Z L, et al. Wheat gluten – stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers[J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 77: 168–175.
- [3] 申瑞玲, 罗双群, 董吉林. 燕麦糊精替代蛋黄酱脂肪的研究[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(10): 41–45.
- [4] 姜雯翔, 刘娟, 方东路, 等. α -淀粉酶酶解大米淀粉替代蛋黄酱中的脂肪[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(6): 70–74, 79.
- [5] LI J, WANG Y, JIN W, et al. Application of micronized konjac gel for fat analogue in mayonnaise [J]. *Food Hydrocolloid*, 2014, 35: 375–382.
- [6] SAREMNEJAD F, MOHEBBI M, KOOCHEKI A. Practical application of nonaqueous foam in the preparation of a novel aerated reduced – fat sauce[J]. *Food Bioprod Process*, 2020, 119: 216–225.
- [7] GEHIN – DELVAL C, CHISHOLM H, GUNES Z D, et al. Food composition comprising gas bubbles: WO/2016/150968[P]. 2016 – 09 – 29.
- [8] MOHANAN A, HARRISON K, COOPER D M L, et al. Conversion of pulse protein foam – templated oleogels into oleofoams for improved baking application[J/OL]. *Foods*, 2022, 11(18): 2887[2023 – 03 – 27]. <https://doi.org/10.3390/foods11182887>.
- [9] 毛逸霖, 周俊, 陈凯, 等. 甘油二酯的代谢机制及营养功能研究进展[J]. *中国油脂*, 2023, 48(11): 80–89.
- [10] YANG J, QIU C, LI G, et al. Effect of diacylglycerol interfacial crystallization on the physical stability of water – in – oil emulsions [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 327: 127014[2023 – 03 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127014>.
- [11] LEI M, ZHANG N, LEE W J, et al. Non – aqueous foams formed by whipping diacylglycerol stabilized oleogel [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 312: 126047[2023 – 03 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126047>.
- [12] WANG S, LEE W J, WANG Y, et al. Effect of purification methods on the physicochemical and thermodynamic properties and crystallization kinetics of medium – chain, medium – long – chain, and long – chain diacylglycerols[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(31): 8391–8403.
- [13] MÜLLER – FISCHER N, WINDHAB E J. Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor – stator device within a wide static pressure range[J]. *Colloids Surf*, 2005, 263(1/2/3): 353–362.
- [14] MISHIMA S, SUZUKI A, SATO K, et al. Formation and microstructures of whipped oils composed of vegetable oils and high – melting fat crystals[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2016, 93(11): 1453–1466.
- [15] HEYMANS R, TAVERNIER I, DEWETTINCK K, et al. Crystal stabilization of edible oil foams[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2017, 69: 13–24.
- [16] 杜李阳. 基于单甘油酯和茶皂苷的多相结构化油脂构建研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [17] BINKS B P, ROCHER A, KIRKLAND M. Oil foams stabilised solely by particles[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(5): 1800–1808.
- [18] QIU C, WANG S, WANG Y, et al. Stabilisation of oleofoams by lauric acid and its glycerol esters[J/OL]. *Food Chem*, 2022, 386: 132776 [2023 – 03 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132776>.
- [19] GUNES D Z, MURITH M, GODEFROID J, et al. Oleofoams: Properties of crystal – coated bubbles from whipped oleogels – evidence for Pickering stabilization [J]. *Langmuir*, 2017, 33(6): 1563–1575.
- [20] LIU H, XU X M, GUO S D. Rheological, texture and sensory properties of low – fat mayonnaise with different fat mimetics[J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2007, 40(6): 946–954.
- [21] 郭安民. 大豆油体 – 羟丙基甲基纤维素乳液的性质及在蛋黄酱中的应用研究 [D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [22] CHUNG C, DEGNER B, MCCLEMENTS D J. Development of reduced – calorie foods: Microparticulated whey proteins as fat mimetics in semi – solid food emulsions [J]. *Food Res Int*, 2014, 56: 136–145.
- [23] MA L, BARBOSA – CÁNOVAS G. Rheological characterization of mayonnaise. Part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations [J]. *J Food Eng*, 1995, 25(3): 409–425.
- [24] PHUAH E T, BEH B K, LIM C S Y, et al. Rheological properties, textural properties, and storage stability of palm kernel – based diacylglycerol – enriched mayonnaise [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, 118(2): 185–194.
- [25] PARK J J, OLAWUYI I F, LEE W Y. Characteristics of low – fat mayonnaise using different modified arrowroot starches as fat replacer [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 153: 215–223.
- [26] 王超. 亚麻籽胶与淀粉调控乳液中油滴聚集制备脂肪替代物及其应用 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.