

硬脂烷醇与米糠蜡配比对葵花籽油凝胶微观结构及结晶行为的影响

武永恒, 杨国龙, 孟鹏程, 刘 伟

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:为探究硬脂烷醇(SA)和米糠蜡(RW)在油凝胶中的相互作用机制,以不同配比的SA和RW为凝胶剂制备了葵花籽油凝胶,采用差示扫描量热仪(DSC)、低场核磁共振仪和偏光显微镜(PLM)探究不同SA与RW配比对油凝胶热性质、微观结构形态和结晶行为的影响。结果发现:不同油凝胶的固体脂肪含量(SFC)随温度的升高出现二次降低现象;随着SA和RW配比的变化,SA和RW在体系中按熔点高低顺序结晶,在结晶过程中出现共晶现象;RW油凝胶的晶体为棒状或针状结构,SA油凝胶的晶体为片状结构,当SA在凝胶剂中占比增加时,晶体聚集体形态由针状或棒状晶体聚集体转变为针状晶体夹杂小片状晶体的聚集体,再转变为片状晶体夹杂细小针状晶体的聚集体;在20℃下,当SA与RW质量比为1:9、3:7、5:5和7:3时,油凝胶呈现两步结晶现象,SA与RW质量比为0:10、9:1和10:0时油凝胶呈现一步结晶现象;30℃下,SA与RW质量比为7:3时油凝胶呈现两步结晶现象,其余油凝胶呈现一步结晶现象。综上,不同配比的SA和RW对油凝胶的影响主要体现在SFC的熔化趋势变化、热性质差异、晶体形态变化和结晶行为的差异上,这些变化是由于在微观结构上两种凝胶剂晶体粒子之间相互作用导致的。

关键词:油凝胶;硬脂烷醇;米糠蜡;微观结构;结晶行为

中图分类号:TS225.1;TQ645.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)04-0051-07

Effects of ratio of stearyl alcohol to rice bran wax on the microstructure and crystallization behavior of sunflower seed oil oleogels

WU Yongheng, YANG Guolong, MENG Pengcheng, LIU Wei

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to investigate the interaction mechanism of stearyl alcohol (SA) and rice bran wax (RW) in oleogels, sunflower seed oil oleogels were prepared by the mixture of SA and RW with various ratios as gelators. The effects of the ratio of RW to SA on the thermal properties, microstructure and morphology, and crystallization behavior of these oleogels were investigated by differential scanning calorimeter (DSC), low field nuclear magnetic resonance and polarizing microscope (PLM). The results showed that the solid fat contents (SFC) of different oleogels showed two-step decrease with temperature increasing. As the content of SA increased, RW and SA melted and crystallized sequentially. The cocrystal behavior appeared in the crystallization of the binary oleogels. The crystal morphology of RW oleogel was needle-like or rod-like structure, that of SA oleogel was plate-like. With decrease of the ratio of RW to SA, the morphology of the oleogels changed from the aggregates of needle-like or rod-

like crystal to aggregates of needle-like crystals entrapped with small plate crystals, to aggregates of large plate crystals entrapped with small needle-like crystals. The oleogels formed by the gelators with the mass ratio of SA to RW 1:9, 3:7, 5:5 and 7:3 presented two-step crystallization,

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31772003)

作者简介:武永恒(1996),男,硕士研究生,研究方向为脂质高值化利用(E-mail)1873550829@qq.com。

通信作者:杨国龙,教授,博士(E-mail)ygl88888@haut.edu.cn。

others showed one – step crystallization at 20 °C. The oleogels formed by the gelators with the mass ratio of SA to RW 7:3 showed two – step crystallization, and the others indicated one – step crystallization at 30 °C. In conclusion, the influence of different ratios of SA to RW in oleogels shows variety of SFC melting process, thermal properties differences, variety of crystal morphology and different crystallization behavior, which are caused by the interaction of SA and RW crystals particles in the microstructure.

Key words: oleogels; stearyl alcohol; rice bran wax; microstructure; crystallization behavior

油凝胶是以油或有机液体为连续相,由低浓度的单组分凝胶剂或多组分的凝胶剂分子组成,其含有零反式脂肪酸和低饱和脂肪酸,可作为传统起酥油的替代品^[1]。

动植物蜡来源广、价格低,在较低浓度下即可形成油凝胶,常被用作凝胶剂,其中常用的蜡有蜂蜡、米糠蜡、巴西棕榈蜡、小烛树蜡和葵花蜡等^[2]。米糠蜡是米糠油精炼过程中的副产物,主要由长链脂肪酸与长链脂肪醇形成的酯(95%以上)组成,米糠蜡酯主要以长链偶数酯类(C46~C60)为主,熔点78~82 °C^[3]。硬脂醇即十八烷醇,熔点59.4~59.8 °C,被广泛应用于材料、医药、化妆品等行业^[4-5],近年来研究者也将其应用于油凝胶的制备。

研究表明,单一凝胶因子无法模拟出塑性脂肪复杂的层次结构^[6],所形成的油凝胶性能往往有所不足,在储存中可能会出现析油、加工特性不好等问题,因而通常采用凝胶剂复配的策略调节油凝胶的结构和性能。

本研究采用硬脂醇与米糠蜡复配制备复合油凝胶,研究二者比例对油凝胶热性质、微观结构和结晶行为的影响,以期复合油凝胶的制备与应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

硬脂醇(食品级,纯度≥99.0%),广州欧贝迪生物科技有限公司;米糠蜡(食品级,蜡酯含量≥95.0%),浙江湖州圣淘生物科技有限公司;高油酸葵花籽油,上海日清食品有限公司。

ATY224 电子分析天平,日本岛津公司;RCT Basic Package 1 恒温磁力搅拌器,德国 IKA 公司;MQ20 低场核磁共振仪,德国布鲁克仪器公司;NETZSCH 204 F1 差示扫描量热仪(DSC),德国耐驰仪器制造有限公司;CI-POL 偏光显微镜,日本尼康公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油凝胶的制备

以硬脂醇(SA)和米糠蜡(RW)的质量比为

0:10、1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1 和 10:0 制备凝胶剂,分别对应命名为 RW10、SA1RW9、SA2RW8、SA3RW7、SA4RW6、SA5RW5、SA6RW4、SA7RW3、SA8RW2、SA9RW1 和 SA10。将凝胶剂按质量分数为 10% 添加到葵花籽油中,于 80 °C 恒温磁力搅拌器中加热搅拌 30 min 后,将样品于(20±2)°C 恒温箱中放置 24 h,得到复合油凝胶,备用。

1.2.2 固体脂肪含量(SFC)的测定

取 4 g 油凝胶置于核磁管中,于 80 °C 下消除结晶记忆,测定 0~80 °C 下油凝胶的 SFC,每 5 °C 测 1 次,直到 SFC 变为 0,每个样品平行测定 3 次。

1.2.3 热性质的测定

参照文献[7-9]的方法测定样品的熔化、结晶曲线,并绘制相图。取 10 mg 油凝胶于 DSC 的铝盘中,测定条件:氮气流速 50 mL/min;在 0 °C 保持 5 min,以 5 °C/min 加热到 100 °C,保持 5 min,再以 5 °C/min 冷却到 0 °C。

1.2.4 晶体形态的测定

用毛细管蘸取油凝胶样品并涂在载玻片上,用盖玻片轻轻推开,使油凝胶样品能够以适当厚度均匀地分布于载玻片上,置于偏光显微镜下观察。

1.2.5 等温结晶测定

参考胡培泓等^[10]的方法采用低场核磁共振仪测定样品的等温结晶。取约 5 g 油凝胶置于核磁管中,于 80 °C 下放置 30 min 以消除结晶记忆后,迅速转移至 20 °C 和 30 °C 的恒温水浴锅中使其结晶,每隔 30 s 测定其 SFC,直到不变为止。每组平行测定 2 次。

一步结晶曲线由方程(1)拟合^[11],两步结晶曲线由方程(2)拟合^[12]。

$$Y = S_{\max 1} \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{\mu_1 \times e}{S_{\max 1}} (\lambda_1 - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$Y = S_{\max 1} \times \left[1 - \exp \left(\frac{-2\mu_1}{S_{\max 1}} \times t \right) \right] + S_{\max 2} \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{\mu_2 \times e}{S_{\max 2}} (\lambda_2 - t) + 1 \right] \right\} \quad (2)$$

式中:Y 为结晶 t 时的 SFC,%; $S_{\max 1}$ 为一步结晶

的最大 SFC 或两步结晶过程中第一阶段结晶平衡时的 SFC, %; μ_1 为一步结晶过程的结晶速率或两步结晶过程中第一步结晶过程的结晶速率, %/min; λ (λ_1 和 λ_2) 为结晶诱导时间, min; $S_{\max 2}$ 为两步结晶过程中第二次结晶达到平衡时的 SFC 与第一次结晶平衡时 SFC 的差值, %; μ_2 为两步结晶过程中第二步结晶过程的结晶速率, %/min; t 为结晶时间, min; e 为欧拉数。

1.2.6 数据分析

使用 SPSS 软件对数据进行处理分析, 并使用 Origin 9.0 软件绘图。采用 Image J 软件对偏光显微镜图片进行处理。

2 结果与分析

2.1 SFC

SFC 随温度的变化曲线是衡量油凝胶特性的一项重要指标^[13]。不同油凝胶的 SFC 随温度的变化曲线如图 1 所示。

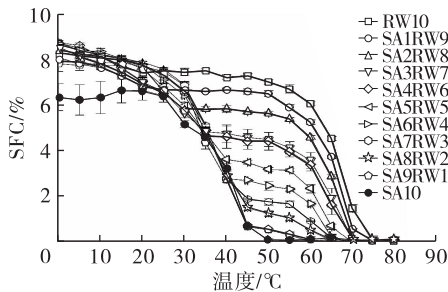


图 1 不同油凝胶的 SFC 随温度的变化曲线

由图 1 可知, 不同油凝胶的 SFC 均随温度升高而下降, SA 与 RW 比例不同, 油凝胶 SFC 曲线下降趋势不同。在 0°C 时, RW10 油凝胶的 SFC 为 8.7%, 高于 SA10 油凝胶的 6.4%。随温度升高, RW10 油凝胶的 SFC 在低于 50°C 时变化不大, 在 50~75°C 范围内下降较快。而 SA10 油凝胶的 SFC 在温度低于 25°C 时变化不大, 在 25~50°C 之间快速下降。0°C 时 SA2RW8 油凝胶的 SFC 为 8.5%, 随着温度上升, 0~30°C 之间 SFC 出现第一阶段下降, 在 30°C 时 SA2RW8 油凝胶的 SFC 为 5.3%, 在 50~75°C 之间 SA2RW8 油凝胶的 SFC 下降较快, SFC 快速降至 0。当 SA 在凝胶剂中占比增加时, 0°C 时 SA6RW4 油凝胶的 SFC 为 8.7%, 0~40°C 范围内 SFC 曲线出现第一阶段下降, 由 8.7% 快速降至 2.7%, 40~65°C 范围内出现第二阶段的下降, SFC 由 2.7% 降至 0。SA9RW1 油凝胶在 0~45°C 之间出现第一阶段的熔化, SFC 下降较快, 在 45~60°C 之间出现第二阶段的熔化。总的来说, 第一阶段 SFC 随温度升高呈现持续下降趋势, 熔化温度集

中在 30~50°C 之间, 随着 SA 在凝胶剂中占比的增加, 第一阶段的熔化过程逐渐扩大, 熔化终止温度逐渐升高; 第二阶段 SFC 随温度升高呈现下降趋势, 熔化温度集中在 60~75°C 之间, 随着 SA 在凝胶剂中占比的增加, 第二阶段 SFC 的熔化起始温度逐渐降低。

2.2 热性质

加热和冷却过程中不同油凝胶的熔化曲线和结晶曲线如图 2 所示。

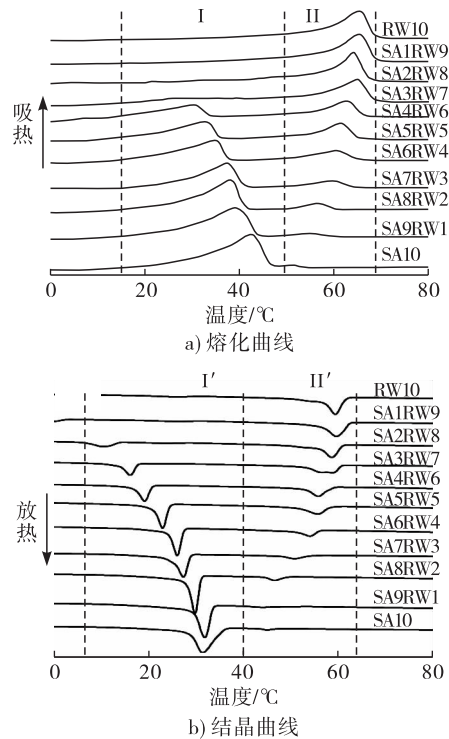


图 2 不同油凝胶的熔化、结晶曲线

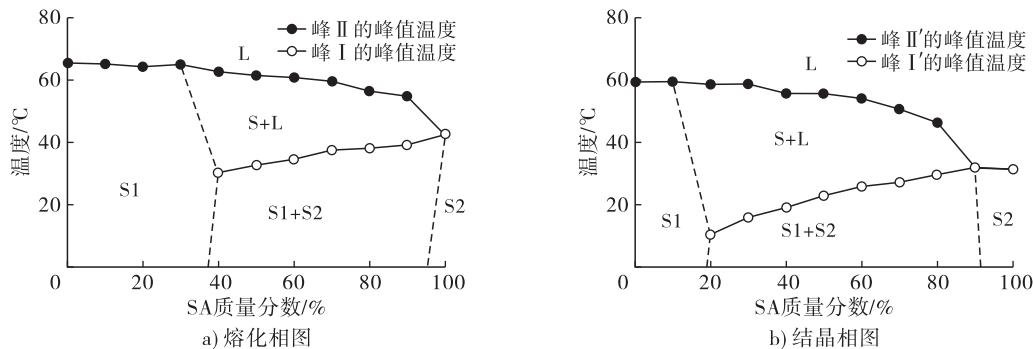
由图 2a 可知, RW10、SA1RW9、SA2RW8 和 SA3RW7 均有 1 个吸热峰, 峰值温度在 64.0~65.5°C 之间。SA10 有 1 个宽大的吸热峰 (峰值温度 42.5°C) 和 1 个微小的吸热峰, 微小吸热峰可能是 SA 中少量高熔点组分熔化形成的^[14]。SA4RW6、SA5RW5、SA6RW4、SA7RW3、SA8RW2 和 SA9RW1 均有 2 个吸热峰, 其中吸热峰 I 在低于 50°C 的区域, 由 SA 晶体熔化形成, 吸热峰 II 位于高于 50°C 的区域, 为 RW 晶体的熔化吸热形成的, 随着凝胶剂中 SA 含量的增加, 高温区吸热峰的峰值温度逐渐降低, 而低温区吸热峰的峰值温度逐渐升高。

由图 2b 可知, 冷却过程中 RW10 和 SA1RW9 有 1 个放热峰, 峰值温度为 59°C 左右。SA9RW1 和 SA10 有 1 个明显的放热峰, 峰值温度为 32°C 左右。SA2RW8、SA3RW7、SA4RW6、SA5RW5、SA6RW4、SA7RW3、SA8RW2 均有 2 个明显的放热峰, 其中放热峰 II' 的峰值温度高于 40°C, 为 RW 结晶放热所

致,放热峰 I' 的峰值温度低于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 为 SA 结晶放热形成的。随着凝胶剂中 SA 含量的增加,低温区放热峰的峰值温度逐渐升高,而高温区放热峰的峰值温度逐渐降低。与熔化曲线相比,结晶峰值温度

相对于融化峰值温度降低,这与结晶滞后现象有关^[15]。

图 3 为 SA - RW 油凝胶的熔化相图和结晶相图。



注:L 表示油凝胶完全熔化为液相态,S1 表示以 RW 为主要固相组分的固相态,S2 表示以 SA 为主要固相组分的固相态,S1 + S2 表示以 SA 和 RW 为主要固相组分的固相态,S + L 表示熔化的 SA 和未熔化的 RW 形成的固液共存态

图 3 SA - RW 油凝胶的熔化、结晶相图

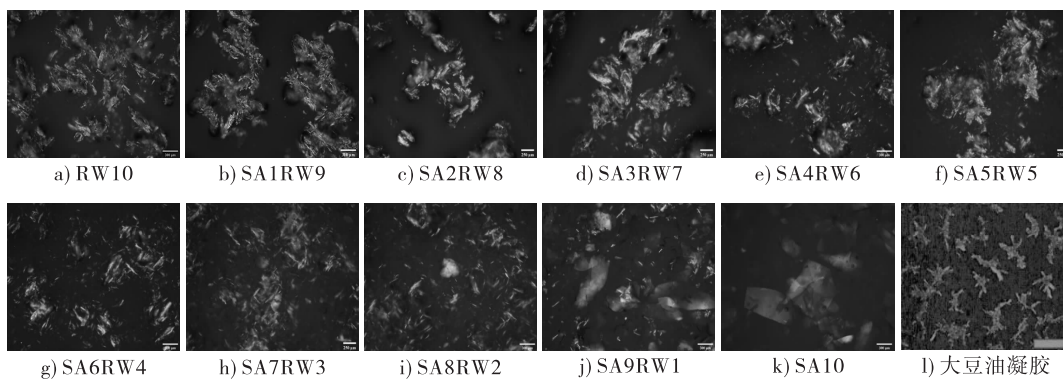
由图 3a 可知:在熔化相图中,温度在液相线以上时,油凝胶为液体(L);温度介于液相线和固相线之间时,油凝胶为固体颗粒(RW 晶体)分散于熔融态物质中的状态(S + L);温度低于固相线时,油凝胶为固态。在固相区域中,SA 在凝胶剂中的质量分数小于 19% 时,固相为富含 RW 晶体的固体(S1);当 SA 在凝胶剂中的质量分数大于 19% 但小于 90% 时,固相为 RW 晶体和 SA 晶体共存的固体(S1 + S2);当 SA 的质量分数大于 90% 时,固相为 SA 晶体为主的固体(S2)。

上时,油凝胶为液体(L);温度介于液相线和固相线之间时,油凝胶为固体颗粒(RW 晶体)分散于熔融态物质中的状态(S + L);温度低于固相线时,油凝胶为固态。在固相区域,SA 在凝胶剂中的质量分数小于 19% 时,固相为富含 RW 晶体的固体(S1);当 SA 在凝胶剂中的质量分数大于 19% 但小于 90% 时,固相为 RW 晶体和 SA 晶体共存的固体(S1 + S2);当 SA 的质量分数大于 90% 时,固相为 SA 晶体为主的固体(S2)。

2.3 油凝胶的微观形态

油凝胶的微观形态如图 4 所示。

由图 3b 可知:在结晶相图中,温度在液相线以



注:a ~ k 分别为 SA 与 RW 质量比为 0:10 ~ 10:0 的油凝胶的偏光照片;l 为 5% 米糠蜡 - 大豆油凝胶的偏光照片

图 4 不同油凝胶的微观形态

由图 4 可知,RW10 油凝胶的晶体为针状或棒状,晶体相互堆积形成更大的网状聚集体进而截留液态油。Blake 等^[15]研究发现,RW 油凝胶晶体呈针状或棒状结构,Pandolsook 等^[16]研究发现,在脱色 RW 与未脱色 RW 形成的油凝胶中,晶体均为长针状结构,与本研究结果一致。而周航^[17]研究发现,RW 油凝胶晶体形态与结晶速度有关,在

慢速结晶($1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时晶体呈现较大的树枝状结构(图 4l),快速冷却($10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时晶体呈现较小的棒状结构。SA10 油凝胶的晶体为片状结构或片状堆积而成的块状结构(图 4k),这与 Schaink 等^[18]在显微镜下观察到的 SA 的片状结构结果一致。

SA1RW9、SA2RW8、SA3RW7、SA4RW6 油凝胶

中晶体仍为针状或棒状,但随着凝胶剂中 SA 占比的增加,晶体聚集物逐渐变小(图 4b ~ 图 4e),主要表现为 RW 晶体特征,未出现 SA 晶体特征的片状结构,但在 SA4RW6 油凝胶中 RW 晶体形态变细, RW 晶体周围出现絮状区域,这些絮状区域是 SA 结晶片层结构的初级形态,同时此过程也涉及到相态的转变^[19]。SA5RW5 油凝胶中除了大量的棒状或针状晶体聚集物,还出现了少量的片状晶体(图 4f)。SA6RW4、SA7RW3 和 SA8RW2 油凝胶中有针

状晶体聚集物和片状晶体,呈现出 RW 晶体和 SA 晶体共存的现象,二者相互交错形成网络结构,且随着 SA 占比的增加,凝胶中片状结构晶体逐渐变大,针状晶体逐渐变小(图 4g ~ 图 4i)。SA9RW1 油凝胶中有明显的 SA 晶体的片状结构,同时有少量的 RW 细小针状晶体分布于其中(图 4j)。

2.4 等温结晶行为

20℃和30℃时不同油凝胶的等温结晶曲线如图5所示,等温结晶曲线拟合参数如表1所示。

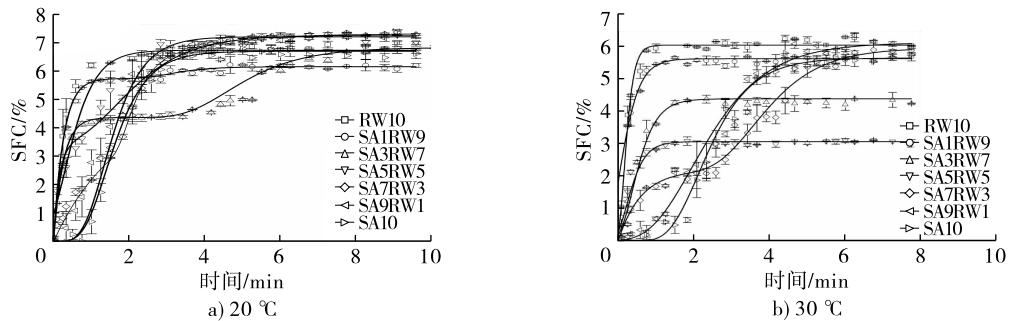


图5 20℃和30℃时不同油凝胶的等温结晶曲线

表1 20℃和30℃时不同油凝胶等温结晶曲线的拟合参数

项目	$S_{max1}/\%$	$\mu_1/(%/min)$	λ_1/min	$S_{max2}/\%$	$\mu_2/(%/min)$	λ_2/min
20℃						
RW10	6.73 ± 0.03	5.52 ± 0.22	-	-	-	-
SA1RW9	5.74 ± 0.02	11.00 ± 0.18	-	0.41 ± 0.02	0.24 ± 0.16	2.38 ± 0.83
SA3RW7	4.37 ± 0.05	8.70 ± 0.34	-	2.46 ± 0.11	0.80 ± 0.05	3.46 ± 0.14
SA5RW5	3.41 ± 0.54	11.30 ± 2.56	-	3.86 ± 0.55	1.34 ± 0.18	0.62 ± 0.43
SA7RW3	4.77 ± 0.14	1.46 ± 0.02	-	2.55 ± 0.13	2.91 ± 0.43	1.67 ± 0.08
SA9RW1	7.21 ± 0.00	4.67 ± 0.29	0.76 ± 0.09	-	-	-
SA10	6.70 ± 0.00	4.14 ± 0.15	0.79 ± 0.03	-	-	-
30℃						
RW10	6.03 ± 0.01	15.60 ± 1.23	-	-	-	-
SA1RW9	5.61 ± 0.02	6.96 ± 0.55	-	-	-	-
SA3RW7	4.38 ± 0.00	4.69 ± 0.41	-	-	-	-
SA5RW5	3.06 ± 0.00	4.16 ± 0.39	-	-	-	-
SA7RW3	2.18 ± 0.15	1.80 ± 0.17	-	3.77 ± 0.24	1.39 ± 0.21	2.59 ± 0.28
SA9RW1	6.11 ± 0.04	2.05 ± 0.07	0.85 ± 0.07	-	-	-
SA10	5.64 ± 0.05	2.70 ± 0.16	1.36 ± 0.10	-	-	-

由表1可知,20℃时,RW10、SA9RW1和SA10油凝胶为一步结晶,而SA1RW9、SA3RW7、SA5RW5和SA7RW3油凝胶则为两步结晶。30℃时,RW10、SA1RW9、SA3RW7、SA5RW5、SA9RW1和SA10油凝胶为一步结晶,SA7RW3油凝胶为两步结晶。

20℃时,RW10油凝胶为一步结晶,结晶诱导时间几乎为0,体系瞬间成核,较短时间内即可达到结晶平衡,结晶速率为 $5.52\%/min$,结晶平衡时SFC为 6.73% 。SA10油凝胶也为一步结晶,结晶速率

($4.14\%/min$)较RW10油凝胶低,有较短结晶诱导时间($0.79\ min$),结晶平衡时间比RW油凝胶长,结晶平衡时SFC为 6.70% ,与RW10油凝胶相当。SA1RW9、SA3RW7、SA5RW5和SA7RW3油凝胶呈现两步结晶过程。其中:SA1RW9油凝胶第一步结晶的结晶速率是 $11.00\%/min$,平衡时SFC为 5.74% ;第二步结晶的结晶速率是 $0.24\%/min$,结晶诱导时间为 $2.38\ min$,平衡时SFC为 6.15% (平衡时的SFC为 S_{max1} 与 S_{max2} 之和)。SA3RW7油凝胶

第一步结晶的结晶速率是 8.70%/min,平衡时 SFC 为 4.37%;第二步结晶的结晶速率是 0.80%/min,结晶诱导时间为 3.46 min,平衡时 SFC 为 6.83%。SA5RW5 油凝胶第一步结晶的结晶速率是 11.30%/min,平衡时 SFC 为 3.41%;第二步结晶的结晶速率是 1.34%/min,结晶诱导时间为 0.62 min,平衡时 SFC 为 7.27%。SA7RW3 油凝胶第一步结晶的结晶速率是 1.46%/min,平衡时 SFC 为 4.77%;第二步结晶的结晶速率是 2.91%/min,结晶诱导时间为 1.67 min,平衡时 SFC 为 7.32%。SA9RW1 油凝胶为一步结晶,结晶速率为 4.67%/min,平衡时 SFC 为 7.21%,结晶诱导时间为 0.76 min。当凝胶剂中某一种组分(RW 或 SA)占比较高时,相对应的结晶速率也较快。RW 含量较高的油凝胶,结晶诱导时间很短,表现为瞬间成核,结晶速率较大,因而结晶平衡时间短;SA 含量较高的油凝胶存在一定的结晶诱导时间,结晶速率相对较小,体系达到平衡的时间略长。

30℃ 时, RW10、SA1RW9、SA3RW7 和 SA5RW5 油凝胶均表现出一步结晶趋势,随着凝胶剂中 SA 占比的增加,其结晶速率减小,平衡时 SFC 逐渐减小,可能的原因是在一定 SA 与 RW 配比范围内,SA 和 RW 存在一定的相互作用,使得结晶速率降低和平衡时 SFC 降低。SA7RW3 油凝胶表现出两步结晶行为,第一步结晶的结晶速率很小(1.80%/min)。SA9RW1 和 SA10 油凝胶皆表现出一步结晶行为,与 SA10 油凝胶相比,SA9RW1 油凝胶的结晶速率小,结晶诱导时间短,平衡时 SFC 略大。与 20℃ 时相比,总体上 30℃ 时相应油凝胶结晶平衡时的 SFC 减小,结晶速率降低,结晶平衡时间延长。

3 结 论

本文研究了 SA 与 RW 不同配比对油凝胶的 SFC、热性质、微观结构形态及结晶行为的影响。油凝胶的 SFC 随温度变化曲线呈现二次熔化趋势,低温区对应以 SA 为主的晶体熔化,高温区对应以 RW 为主的晶体熔化。DSC 结果显示,随着 SA 在凝胶剂中占比的增加,体系出现 2 个结晶峰,其中高熔点组分 RW 先结晶,熔点较低的 SA 后结晶。等温结晶结果显示,20℃ 下 SA1RW9、SA3RW7、SA5RW5 和 SA7RW3 油凝胶出现两步结晶。30℃ 下 RW10、SA1RW9、SA3RW7、SA5RW5、SA9RW1 和 SA10 均呈现出一步结晶,且随着 SA 占比增加,结晶速率和平衡时的 SFC 先减小后增大,SA7RW3 油凝胶呈现两步结晶趋势。偏光显微镜显示,RW 油凝胶晶体

为棒状或针状结构,少量 SA 在油相中呈针状,随着 SA 占比的增加,SA 首先在 RW 晶体周围形成絮状的结晶区域,接着絮状区域转变为层状结构,同时 RW 的晶形由棒状堆积变为细长的针状结构。综上,不同配比的 SA 与 RW,凝胶剂晶体粒子之间的相互作用会对油凝胶的晶体网络的熔化和结晶特性、晶体形态及等温结晶特性产生影响。

参考文献:

- [1] 王一川,邓梓萌,毛立科.基于蜂蜡油凝胶的植物奶油制备与性质表征[J].食品科学,2022,43(10):43-50.
- [2] KHIABANI A A, TABIBIAZAR M, ROUFEGARINEJAD L, et al. Preparation and characterization of carnauba wax/adipic acid oleogel: a new reinforced oleogel for application in cake and beef burger [J/OL]. Food Chem, 2020, 333: 127446 [2022-02-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127446>.
- [3] 崔杨棣.米糠蜡的应用开发[J].油脂科技,1984(S2):619-629.
- [4] YADAV I, KASIVISWANATHAN U, SONI C, et al. Stearic acid modified stearyl alcohol oleogel: analysis of the thermal, mechanical and drug release properties [J]. J Surfactants Deterg, 2017, 20(4): 851-861.
- [5] 齐迪.纳米限域下十六醇和十八醇的相行为研究[D].山东泰安:山东农业大学,2017.
- [6] 史逸飞.天然蜡基凝胶油脂的构建及应用研究[D].江苏无锡:江南大学,2021.
- [7] CALLAU M, SOW-KEBE K, JENKINS N, et al. Effect of the ratio between fatty alcohol and fatty acid on foaming properties of whipped oleogels [J/OL]. Food Chem, 2020, 333: 127403 [2022-02-24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127403>.
- [8] TAVERNIER I, DOAN C D, VAN D E WALLE D, et al. Sequential crystallization of high and low melting waxes to improve oil structuring in wax-based oleogels [J]. RSC Adv, 2017, 7(20): 12113-12125.
- [9] SERRATO-PALACIOS L, TORO-VAZQUEZ J F, DIBILDOX-ALVARADO E, et al. Phase behavior and structure of systems based on mixtures of *n*-hentriacontane and melissic acid [J]. J Am Oil Chem Soc, 2015, 92(4): 533-540.
- [10] 胡培泓,杨国龙,徐倩.司盘 65-米糠蜡油凝胶的结晶行为及微观形态的研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(6):25-32.
- [11] FOUBERT I, VANROLLEGHEM P A, VANHOUTTE B, et al. Dynamic mathematical model of the crystallization kinetics of fats [J]. Food Res Int, 2002, 35(10): 945-956.

(下转第 62 页)

- [2] 张姗姗, 赵凡, 魏小豹, 等. ‘凤丹’和紫斑牡丹6个产地种子脂肪酸组分的比较[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 84-90.
- [3] CAO G X, LIN H Q, CHENG Y H, et al. Factors affecting fruit and seed production of *Paeonia ostii* "Feng Dan", an economically important oil tree[J]. Plant Spec Biol, 2021, 36(2): 258-268.
- [4] LI C Q, HU L Z, QUE B B, et al. Expression profiles of genes involved in fatty acid and lipid biosynthesis in developing seeds of *Paeonia ostii*[J]. Genes Genom, 2021, 43(8): 885-896.
- [5] SONG H L, LIU J B. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. Food Res Int, 2018, 114:187-198.
- [6] 杨湄, 刘昌盛, 周琦, 等. 加工工艺对菜籽油主要挥发性风味成分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(4): 551-557.
- [7] XU Y Q, WANG C, LI C W, et al. Characterization of aroma-active compounds of pu-erh tea by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and simultaneous distillation-extraction (SDE) coupled with GC-olfactometry and GC-MS[J]. Food Anal Method, 2016, 9(5): 1188-1198.
- [8] 王子宜, 韩海燕, 王静. 固相微萃取在样品分析中的最新研究进展和应用前景[J]. 广州化工, 2020, 48(12): 18-20.
- [9] 龙奇志, 黄永辉, 钟海雁, 等. 茶油挥发物质的固相微萃取条件的优化[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(1): 70-74.
- [10] 刘非, 杜丽平, 肖冬光. 酱油挥发性成分固相微萃取条件的优化[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(7): 70-75.
- [11] 王武, 查甫本, 张静, 等. 响应面法优化固相微萃取-气质联用法检测鸭肉中挥发性风味物质[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 329-334.
- [12] 李媛媛, 李德美, 张亚东, 等. 顶空固相微萃取葡萄酒挥发性物质的条件优化[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 138-142.
- [13] 吕长平, 秧拯民, 孙田娇, 等. 储藏条件对‘凤丹’籽粒酶活性及籽油品质的影响[J]. 经济林研究, 2021, 39(2): 196-205.
- [14] 石嘉悻, 张檬达, 鞠兴荣. 响应面法优化柚稻挥发性成分 SPME 萃取条件的研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(12): 120-125,130.
- [15] 冯涛, 桑敏, 庄海宁, 等. 银杏葡萄酒香气成分的萃取条件优化及其香气物质的测定[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(5): 124-131.
- [16] 张军安, 陈波. 顶空固相微萃取-气质联用分析酸枣仁挥发性成分[J]. 中药材, 2012, 35(2): 235-240.
- [17] 张静, 罗敏蓉, 王西芳, 等. 固相微萃取气质联用测定番茄香气成分条件优化[J]. 北方园艺, 2017(13): 7-13.
- [18] 刘红. 热反应型风味基料的研制及与市售相关产品的风味比较[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2010.
- [19] 刘韬, 乔宁, 饶敏, 等. 基于顶空固相微萃取与气相色谱-质谱联用技术分析“赣南早”脐橙酒香气成分[J]. 中国食品添加剂, 2017(9): 205-209.
- [20] 王勇勤, 郭新, 黄笠原, 等. 基于电子鼻和气相色谱-质谱联用技术分析不同贮藏时间羊肉火腿香气成分[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 215-221.
- [21] 丛莎. 生咖啡豆贮藏过程中脂质氧化对其风味品质劣变的影响研究[D]. 黑龙江 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.

(上接第 56 页)

- [12] BAYARD M, LEAL - CALDERON F, CANCELL M. Free fatty acids and their esters modulate isothermal crystallization of anhydrous milk fat [J]. Food Chem, 2017, 218: 22-29.
- [13] PUSCAS A, MURESAN V, MUSTE S. Application of analytical methods for the comprehensive analysis of oleogels; a review [J/OL]. Polymers, 2021, 13(12): 1934 [2022-02-24]. <https://doi.org/10.3390/polym13121934>.
- [14] DOAN C D, TAVERNIER I, BIN SINTANG M D, et al. Crystallization and gelation behavior of low- and high melting waxes in rice bran oil: a case-study on berry wax and sunflower wax [J]. Food Biophys, 2017, 12(1): 97-108.
- [15] BLAKE A I, CO E D, MARANGONI A G. Structure and physical properties of plant wax crystal networks and their relationship to oil binding capacity [J]. J Am Oil Chem Soc, 2014, 91(6): 885-903.
- [16] PANDOLSOOK S, KUPONGSAK S. Influence of bleached rice bran wax on the physicochemical properties of organogels and water-in-oil emulsions[J]. J Food Eng, 2017, 214: 182-192.
- [17] 周航. 米糠蜡凝胶油的结晶特性及应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [18] SCHAINK H M, VAN MALSSSEN K F, MORGADO - ALVES S, et al. Crystal network for edible oil organogels: possibilities and limitations of the fatty acid and fatty alcohol systems [J]. Food Res Int, 2007, 40(9): 1185-1193.
- [19] VALOPPI F, CALLIGARIS S, MARANGONI A G. Structure and physical properties of oleogels containing peanut oil and saturated fatty alcohols [J/OL]. Eur J Lipid Sci Technol, 2017, 119(5): 1600252 [2022-02-24]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600252>.