

# 橄榄油基二酰甘油油酸酯基油凝胶的物理性质及其在饼干中的应用

陈小霞<sup>1</sup>, 陈莹<sup>2</sup>, 王永华<sup>2</sup>, 覃小丽<sup>3</sup>, 王卫飞<sup>4</sup>, 桑祯玉<sup>1</sup>, 杨博<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 生物科学与工程学院, 广州 510006; 2. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广州 510640; 3. 西南大学 食品科学学院, 重庆 400715; 4. 广东省农业科学院 蚕业与农产品加工研究所, 广州 510640)

**摘要:**为开发基于双甘油酯(DAG)的油凝胶作为饼干馅料中起酥油替代品,使用橄榄油基二酰甘油油酸酯(O-DAGO)为基料油,5%的小烛树蜡(CLW)和0~35%的橄榄油基二酰甘油硬脂酸酯(O-DAGS)组合为凝胶剂制备O-DAGO基油凝胶。研究了O-DAGO基油凝胶脂肪酸组成、微观结构、固体脂肪含量、硬度及热力学性能,并将其用作饼干的油脂基质,研究了O-DAGO基油凝胶对饼干基本理化性质的影响。结果表明:O-DAGO基油凝胶的饱和脂肪酸含量( $\leq 23.50\%$ )低于起酥油(52.07%),O-DAGO基油凝胶主要含有油酸( $> 63\%$ );当O-DAGS含量增加时,O-DAGO基油凝胶的晶体数量增加,固体脂肪含量也逐渐升高;O-DAGS含量15%的O-DAGO基油凝胶硬度(73.19 g)与起酥油(75.42 g)接近,当O-DAGS含量为25%和35%时硬度则显著大于起酥油( $p < 0.05$ );随O-DAGS含量增加,油凝胶的熔融和结晶温度升高;O-DAGS含量不超过25%的油凝胶应用在饼干中显示出与起酥油饼干相似的硬度,更低的油脂迁移率。总的来说,O-DAGO基油凝胶应用于饼干中显示出较高的起酥油替代潜力。

**关键词:**橄榄油基二酰甘油油酸酯;橄榄油基二酰甘油硬脂酸酯;小烛树蜡;油凝胶;物理性质;饼干  
**中图分类号:**TS222+.1;TS221 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2023)12-0134-08

## Physical properties of olive oil diacylglycerol oleate (O-DAGO) - based oleogel and its application in cookies

CHEN Xiaoxia<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>2</sup>, WANG Yonghua<sup>2</sup>, QIN Xiaoli<sup>3</sup>,  
WANG Weifei<sup>4</sup>, SANG Zhenyu<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>

(1. School of Biology and Biological Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. School of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** For the development of diacylglycerol (DAG) - based oleogels as shortening substitutes in cookie fillings, olive oil diacylglycerol oleate (O-DAGO) was used as the base oil, complex of 5% candelilla wax (CLW) and 0-35% olive oil diacylglycerol stearate (O-DAGS) was used as gelling agent to prepare O-DAGO-based oleogel. The fatty acid composition, microstructure, solid fat

收稿日期:2022-10-14;修回日期:2023-09-03

基金项目:国家重点研发项目(2019YFD1002403);国家自然科学基金(31930084);国家杰出青年科学基金(31725022);佛山市南海区人才创新创业团队(201811070001)

作者简介:陈小霞(1995),女,硕士研究生,研究方向为油脂化学(E-mail)1769670216@qq.com。

通信作者:杨博,教授(E-mail)yangbo@scut.edu.cn。

content, hardness and thermodynamic properties of O-DAGO-based oleogel were studied, and using O-DAGO-based oleogel as a oil base for cookies, the influence of O-DAGO-based oleogel on the basic physicochemical properties of cookie was studied. The results showed that the saturated fatty acid content of O-DAGO-based

oleogel ( $\leq 23.50\%$ ) was lower than that of shortening ( $52.07\%$ ), and O-DAGO-based oleogel mainly contained oleic acid ( $> 63\%$ ). When the content of O-DAGS increasing, the number of crystals of O-DAGO-based oleogel increased, and the solid fat content also increased gradually. The hardness (73.19 g) of O-DAGO-based oleogel with O-DAGS content 15% was close to that of shortening (75.42 g), but it was significantly higher than shortening when O-DAGS content was 25% and 35% ( $p < 0.05$ ). The melting and crystallization temperatures of oleogel increased with the increase of O-DAGS content. The application of oleogel with no more than 25% O-DAGS in cookies showed similar hardness, lower oil migration rate to shortening. Generally speaking, the application of O-DAGO-based oleogel in cookies shows a high substitution potential for shortening.

**Key words:** O-DAGO; O-DAGS; CLW; oleogel; physical property; cookie

饼干是食品行业中最受欢迎的零食之一,具有较长的保质期、各种各样的形态以及酥脆的口感等特性。脂肪是饼干中除面粉和糖之外的第三大成分,占20%~40%<sup>[1]</sup>。起酥油是饼干中常使用的一种功能性脂肪,可以通过包裹淀粉和面筋颗粒来抑制谷蛋白网络的发展,从而嫩化最终产品<sup>[2]</sup>。然而,起酥油的主要成分是部分氢化植物油(PHOS),其饱和脂肪酸含量高,不恰当的生产方式还可能产生反式脂肪酸,而高饱和脂肪酸和反式脂肪酸的食物与心血管疾病风险和死亡率的增加有关<sup>[3]</sup>。世界卫生组织(WHO)建议个人摄入的饱和脂肪酸不超过其每日能量摄入量的10%,反式脂肪酸不超过1%<sup>[4]</sup>。因此,开发更健康的起酥油替代品是十分有必要的。

凝胶化是一种新型的油脂结构化方法,可以使油脂具有类似固体的特性,其优点是少量的凝胶剂即可结构化大量的食用油,并且可以保留油脂中不饱和脂肪酸的营养成分<sup>[5]</sup>。常用的油凝胶剂有单甘油酯(MG)、双甘油酯(DAG)、甘油三酯(TAG)、蜡、脂肪酸、脂肪醇等<sup>[6]</sup>。其中MG和蜡因其可食用性、安全性和高效率而被广泛研究<sup>[7]</sup>。然而,过多的蜡由于高熔点特性会产生不良的蜡质口感<sup>[8]</sup>,MG基油凝胶中形成的球状晶体导致持油率较低<sup>[9]</sup>。DAG有一个羟基极性头部,与MG的机制相似,主要形成氢键相互作用来固化油脂,DAG需要较高的含量(通常超过20%)来促进结晶,低含量时还可能抑制结晶的形成<sup>[10]</sup>。目前,使用多组分凝胶剂共同固化液态油脂引起了更多的关注,多组分凝胶剂可以弥补单组分凝胶剂的缺点,如:高熔点蜡与低熔点蜡组合可以调节熔点,从而改善油凝胶的物理性质<sup>[11]</sup>;MG与DAG组合不仅可以减少凝胶剂的用量,还可以使油凝胶具有理想的针状结晶<sup>[12]</sup>。目前还没有蜡与DAG组合凝胶剂结构化植物油的研究。

富含DAG的油脂是一种对人体健康有益的脂

质。研究表明,DAG不仅可以抑制内脏脂肪的储存,而且还具有降低餐后血清TAG和胆固醇水平的作用,并在一定程度上改善血清葡萄糖水平<sup>[13]</sup>。在关于DAG基塑性脂肪的研究中,Chen等<sup>[14]</sup>用橄榄油基二酰甘油油酸酯(O-DAGO)和橄榄油基二酰甘油硬脂酸酯(O-DAGS)的混合物部分替代(10%~40%)可可脂,可以防止巧克力在储存期间起霜;Saberi等<sup>[15]</sup>研究棕榈油DAG对棕榈油结晶动力学的影响时,发现高添加量的棕榈油DAG可显著增加棕榈油的熔点和结晶起始时间,并建议将其用于替代人造奶油和起酥油。然而,在食品工业中没有完全使用DAG基(DAG含量 $> 80\%$ )油脂来替代起酥油的研究。

本研究首次探究O-DAGO基油凝胶的物理特性,并将其应用在饼干中,研究其对饼干品质的影响。具体地,使用5%小烛树蜡(CLW)和不同含量的O-DAGS(0~35%)制备O-DAGO基油凝胶,并完全替代起酥油应用在饼干中。研究了O-DAGO基油凝胶的脂肪酸组成、微观结构、固体脂肪含量(SFC)、硬度和热力学行为等特性,并比较了完全由O-DAGO基油凝胶制作的饼干与起酥油饼干及O-DAGO饼干的品质,以期探究DAG基油凝胶的物理性质及开发基于DAG的油凝胶作为饼干馅料中起酥油替代品提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

橄榄油基二酰甘油油酸酯(O-DAGO, 15.12% TAG, 54.96% 1,3-DAG, 29.52% 1,2-DAG, 0.19% MG, 0.21% FFA)、橄榄油基二酰甘油硬脂酸酯(O-DAGS, 12.02% TAG, 68.59% 1,3-DAG, 19.16% 1,2-DAG, 0.14% MG, 0.10% FFA),广东粤膳特医营养科技有限公司;小烛树蜡(CLW),上

海麦克林生物科技有限公司;起酥油,嘉里粮油食品工业有限公司;低筋面粉,江苏新良面粉有限责任公司;盐、糖粉、苏打粉,均购自当地超市。

### 1.1.2 仪器与设备

BS224S 分析天平,德国赛多利斯集团;恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;安捷伦 7890A 气相色谱仪;BK - POL 透反射偏光显微镜;TA - XT. PLUS 物性分析仪、质构仪,英国 SMS 公司;脉冲核磁共振仪,德国布鲁克公司;差示扫描量热仪,德国耐驰公司;KS42LY 烤箱;CR - 400 色差仪,科尼卡美能达有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 O - DAGO 基油凝胶的制备

采用 CLW 和 O - DAGS 作为凝胶剂,CLW 在体系中的质量占比固定为 5%,O - DAGS 和 O - DAGO 的总质量占比为 95%,其中 O - DAGS 的质量占比分别为 0%、5%、15%、25% 和 35%。称取各组加入烧杯中,在 90℃ 下加热,直至混合物完全澄清,在 25℃ 恒温培养箱中静置形成稳定的油凝胶,在室温下储存及进行后续分析。

### 1.2.2 饼干的制作

分别按低筋面粉质量称取 1.5% 奶粉、1% 盐、45% 糖粉、1% 苏打粉、11% 纯水,混合均匀后加入低筋面粉质量 40% 的 O - DAGO/油凝胶/起酥油,使用打发器将混合物低速打发 90 s 后加入低筋面粉混合均匀,使用饼干模具将面团压制直径 51 mm、厚度 6 mm 的圆片,再置于烤箱中采用上下火模式 180℃ 烘烤 12 min,制得饼干。

### 1.2.3 O - DAGO 基油凝胶性质分析

#### 1.2.3.1 脂肪酸组成

使用气相色谱仪分析油凝胶的脂肪酸组成。固体样品在 60℃ 下加热熔融混匀。将 100 mg 油样溶解在 4 mL 异辛烷中,然后加入 200 μL 2 mol/L 氢氧化钾 - 甲醇溶液,涡旋 2 min,加入无水硫酸钠涡旋混合,静置 40 min,上清液通过薄膜过滤,进行气相色谱分析。气相色谱条件:CP - Sil 88 毛细管柱(60 m × 0.25 mm,0.2 μm),进样口温度 250℃,检测器温度 280℃,空气流量 400 mL/min,氢气流量 30 mL/min,柱流量 0.5 mL/min,进样量 1 μL,分流比 30:1,载气(氮气)流量 45 mL/min。

#### 1.2.3.2 微观结构

取适量熔融的油凝胶滴加在载玻片上,小心盖上盖玻片避免气泡产生。在室温下放置 24 h 后采用偏振光显微镜在 10 倍和 40 倍下观察油凝胶的微观结构。

#### 1.2.3.3 固体脂肪含量(SFC)

使用脉冲核磁共振仪测定样品的 SFC。称取 0.3 g 样品在 90℃ 下加热 30 min 消除晶体记忆,装入核磁管。样品在 0℃ 下冷却 1 h 使其完全结晶,再加热至 70℃,期间每 10℃ 记录 1 次 SFC,样品在每个温度下保持 40 min。

#### 1.2.3.4 硬度

使用 TA - XT. PLUS 物性分析仪和 P5 探针测定样品的硬度。测试条件:测量前速度 2 mm/s,测量中速度 1 mm/s,测试后速度为 2 mm/s,压缩深度 15 mm。

#### 1.2.3.5 热力学性能

采用差示扫描量热仪分析样品的热力学性质。取 10 mg 左右样品置于密封铝盘中,以空白铝盘为对照,将样品冷却至 -20℃,保持 5 min,以 10℃/min 的速率升温至 90℃,保持 5 min 后以相同的速率降温至 -20℃,绘制熔融曲线和结晶曲线,分析样品在加热和冷却过程中的峰值。

### 1.2.4 饼干的指标评价

#### 1.2.4.1 烘焙损失率

取烘焙前饼干,称其质量,记为  $M_1$ ,烘焙后将饼干取出,称其质量,记为  $M_2$ 。按公式(1)计算烘焙损失率( $x$ )。

$$x = (1 - M_2/M_1) \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.4.2 硬度及扩散系数

硬度:采用质构仪测定饼干冷却后的硬度。使用直径为 50 mm 的圆柱形探头(P/50)进行测定。压缩比 60%,触发力 2 g,以 2 mm/s 的速度进行压缩直到饼干碎裂,所需最大的力记录为饼干的硬度。

扩散系数:饼干冷却 60 min 后,将 6 块饼干边对边水平放置,测定总直径,并旋转 90°再次测定,共测定 3 次,计算饼干的平均直径,将 6 块饼干堆叠测量饼干的厚度,重复堆叠 3 次测量,计算平均厚度,以平均直径与厚度的比值计算扩散系数。

#### 1.2.4.3 色度

饼干冷却后用 CR - 400 色差仪测定饼干的色度,选择饼干表面的 3 个点进行测试,分别确定  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,按公式(2)计算饼干的总色差( $\Delta E$ ),结果取 3 次测试的平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L_c^* - L_s^*)^2 + (a_c^* - a_s^*)^2 + (b_c^* - b_s^*)^2} \quad (2)$$

式中: $L_c^*$ 、 $a_c^*$ 、 $b_c^*$  分别为起酥油对照样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值; $L_s^*$ 、 $a_s^*$ 、 $b_s^*$  分别为油凝胶样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。

#### 1.2.4.4 油脂迁移率

在培养皿中放置 5 层纸,称总质量,记为  $M_0$ ,将质量为  $M_1$  的饼干置于其中,放入 30℃ 的恒温箱中,

24 h 后取出饼干,称纸和培养皿总质量,记为  $M_2$ ,根据公式(3)计算饼干的油脂迁移率( $x$ )。

$$x = (M_2 - M_0) / M_1 \times 100\% \quad (3)$$

### 1.2.5 数据分析

所有数据均进行3次重复,结果以“平均值 ± 标准偏差”形式表示。运用 SPSS 软件进行差异性

显著分析( $p < 0.05$ ),使用 Origin 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 O-DAGO 基油凝胶性质

#### 2.1.1 脂肪酸组成

表1为起酥油、O-DAGO 基油凝胶、O-DAGS 和 O-DAGO 的脂肪酸组成。

表1 样品的脂肪酸组成

项目	油凝胶					O-DAGS	O-DAGO	起酥油
	5% CLW	5% CLW + 5% O-DAGS	5% CLW + 15% O-DAGS	5% CLW + 25% O-DAGS	5% CLW + 35% O-DAGS			
肉豆蔻酸								0.99 ± 0.17
棕榈酸	13.70 ± 0.06	14.31 ± 0.18	15.66 ± 0.15	16.94 ± 0.20	18.34 ± 0.13	26.45 ± 0.25	11.05 ± 0.12	46.49 ± 0.09
棕榈油酸	0.93 ± 0.07	0.92 ± 0.11	0.90 ± 0.07	0.88 ± 0.16	0.86 ± 0.09	0.77 ± 0.07	0.98 ± 0.13	
硬脂酸	3.27 ± 0.10	3.39 ± 0.05	3.82 ± 0.11	4.17 ± 0.08	4.56 ± 0.12	6.87 ± 0.04	3.24 ± 0.06	4.59 ± 0.12
油酸	68.24 ± 0.23	67.36 ± 0.21	66.05 ± 0.19	64.70 ± 0.23	63.31 ± 0.26	55.79 ± 0.24	72.87 ± 0.38	37.49 ± 0.19
亚油酸	10.55 ± 0.11	10.32 ± 0.16	10.11 ± 0.13	9.71 ± 0.09	9.41 ± 0.10	7.74 ± 0.06	10.21 ± 0.07	8.79 ± 0.08
亚麻酸	1.15 ± 0.07	1.12 ± 0.04	1.08 ± 0.06	1.05 ± 0.03	0.98 ± 0.09	0.48 ± 0.03	0.94 ± 0.12	
花生酸	0.49 ± 0.04	0.49 ± 0.03	0.55 ± 0.04	0.56 ± 0.03	0.60 ± 0.07	0.77 ± 0.05	0.31 ± 0.01	
其他	1.67 ± 0.11	2.09 ± 0.14	1.83 ± 0.19	1.99 ± 0.21	1.94 ± 0.23	1.13 ± 0.18	0.41 ± 0.19	1.65 ± 0.16
SFA	17.46 ± 0.17	18.19 ± 0.11	20.03 ± 0.15	21.67 ± 0.14	23.50 ± 0.12	34.09 ± 0.13	14.60 ± 0.04	52.07 ± 0.23
MUFA	69.17 ± 0.15	68.28 ± 0.12	66.95 ± 0.23	65.58 ± 0.16	64.17 ± 0.22	56.56 ± 0.28	73.85 ± 0.36	37.49 ± 0.14
PUFA	11.70 ± 0.12	11.44 ± 0.07	11.19 ± 0.11	10.76 ± 0.08	10.39 ± 0.07	8.22 ± 0.08	11.15 ± 0.10	8.79 ± 0.06

注:SFA. 饱和脂肪酸;MUFA. 单不饱和脂肪酸;PUFA. 多不饱和脂肪酸

由表1可看出,起酥油饱和脂肪酸含量最高,超过50%,其次是O-DAGS,饱和脂肪酸含量为34.09%,O-DAGO的饱和脂肪酸含量最低,为14.60%,5种O-DAGO基油凝胶的饱和脂肪酸含量处于O-DAGS和O-DAGO之间,为17.46%~23.50%。8种油样O-DAGO的油酸含量最高(72.87%),5种O-DAGO基油凝胶的油酸含量均在60%以上,O-DAGS的油酸含量为55.79%,起酥油的油酸含量(37.49%)最低。油酸可以降低血液中的总胆固醇,增加高密度脂蛋白的含量<sup>[16]</sup>。另

外,油酸比多不饱和脂肪酸更不容易被氧化<sup>[17]</sup>,因此O-DAGO基油凝胶适用于饼干中,以减轻烘焙过程中脂肪酸氧化带来的饼干品质下降。起酥油的SFA/UFA最高,达到1.13,而5种O-DAGO基油凝胶显示出相对较低的SFA/UFA(0.22~0.32)。综上,O-DAGO基油凝胶是一种健康的油脂。

#### 2.1.2 油凝胶的微观结构

用偏振光显微镜在10倍和40倍物镜下观察油凝胶,结果见图1。图中亮白色区域代表的是晶体,而暗色区域则是液态油。

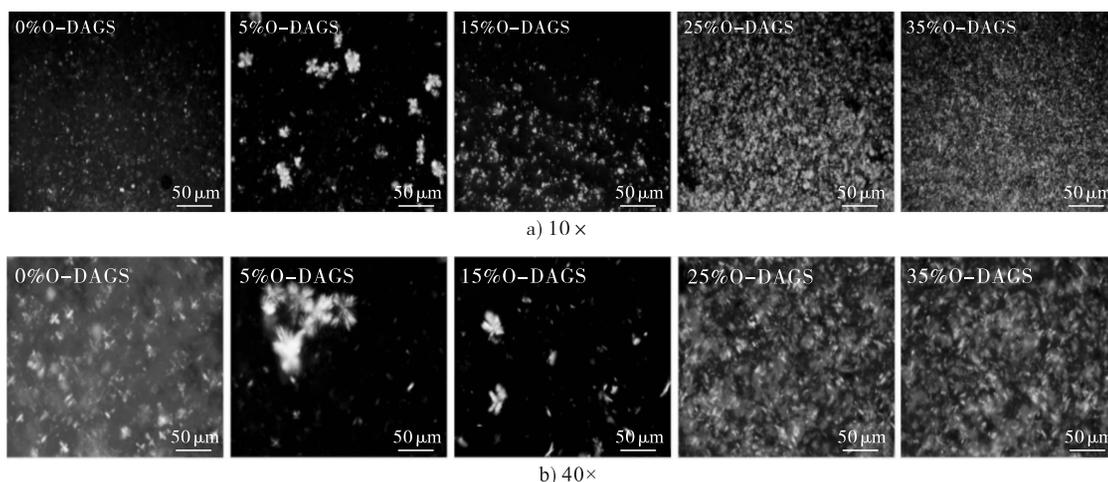


图1 O-DAGO 基油凝胶的偏振光显微图

由图1可看出,在O-DAGS含量较低时O-DAGO基油凝胶表现出大而少的簇状晶体,而在O-DAGS含量达到25%时,晶体变得更小更紧凑,且形成针状晶体。这可能是因为较高的O-DAGS含量形成了更多的成核点,晶体生长迅速,并从零星的晶核瞬间生长为针状或者杆状<sup>[18]</sup>。有研究通过冷冻中扫描电镜观察发现针状结构可能具有更大比面积的板状晶体的边缘<sup>[11]</sup>,具有紧凑的结构,可以有效地束缚液体油。这些现象可以解释为DAGS在低水平时结晶动力不足,形成较少的成核位点,在高水平时则促进结晶<sup>[10]</sup>。仅含5%CLW的油凝胶也产生了许多晶体。CLW主要由正烷烃(26~33个碳原子)和高分子质量的酯(29~33个碳原子)组成<sup>[19]</sup>,其成分的低极性、长碳链和高熔点特点,即使在低浓度下,也可以形成包裹液态油的三维结晶网络。

### 2.1.3 SFC

图2为O-DAGS、O-DAGO、O-DAGO基油凝胶及起酥油的SFC曲线。

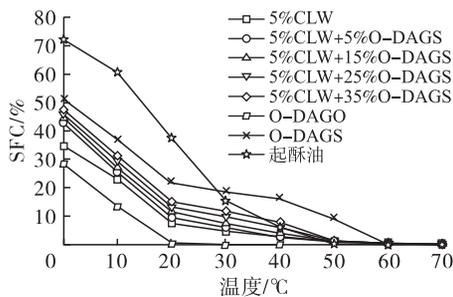


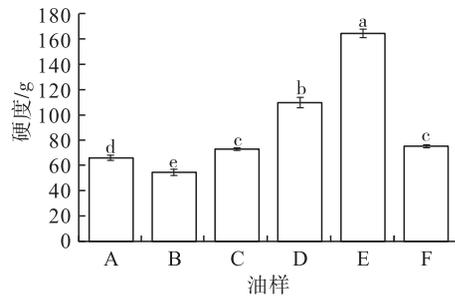
图2 样品的SFC曲线

由图2可看出,O-DAGO基油凝胶、O-DAGS和O-DAGO的SFC曲线在0~70℃呈现两个明显的趋势段,在0~20℃快速下降,在20~70℃缓慢下降。起酥油显示出更加陡峭的曲线,在10~30℃之间SFC迅速下降,且高于O-DAGO基油凝胶;30℃之后SFC缓慢下降,与O-DAGO基油凝胶的SFC接近。37℃下的SFC决定了脂肪是否在口腔中具有蜡感<sup>[20]</sup>,O-DAGS含量低于25%的油凝胶在37℃下的SFC低于起酥油,然而在60℃时油凝胶仍存在少量未熔化的脂肪(SFC 0.35%~0.72%),因此其对于口感会有一些影响。20℃下的SFC决定了室温下油脂的状态<sup>[21]</sup>。O-DAGO在20℃时是液体状态,SFC仅为0.16%,这是由于O-DAGO的不饱和脂肪酸含量高达85%,使得O-DAGO的熔点大大降低。仅含有5%的CLW油凝胶,20℃下的SFC增加到7%以上,表明CLW是O-DAGO的高效凝胶剂。随着O-DAGS含量的

增加,油凝胶的SFC也在缓慢增加,相比O-DAGO和O-DAGS,30~50℃下O-DAGO基油凝胶的SFC更接近于起酥油。

### 2.1.4 硬度

图3为O-DAGO基油凝胶与起酥油的硬度。



注:A. 5% CLW; B. 5% CLW + 5% O-DAGS; C. 5% CLW + 15% O-DAGS; D. 5% CLW + 25% O-DAGS; E. 5% CLW + 35% O-DAGS; F. 起酥油。不同小写字母表示存在显著性差异( $p < 0.05$ )

图3 O-DAGO基油凝胶与起酥油的硬度

硬度反映了油凝胶的强度和晶体的密度。由图3可知,CLW和O-DAGS组合可以调节O-DAGO基油凝胶的硬度,O-DAGS含量5%的油凝胶硬度最低,这是由于低含量的O-DAGS不足以形成成核位点,反而会吸收增长的晶体界面并阻止进一步结晶,从而影响晶体形态及硬度,与偏振光显微结果一致。O-DAGS含量15%的油凝胶硬度(73.19 g)最接近起酥油(75.42 g),而O-DAGS含量25%和35%的油凝胶硬度较起酥油的大。有研究报道使用3% CLW为凝胶剂的奇亚籽油凝胶的硬度可以达到345 g<sup>[22]</sup>,本研究中使用5% CLW的O-DAGO基油凝胶则表现出更低的硬度(66.29 g),这可能是DAG与TAG结构的差异造成的,通过形成结晶颗粒固化油脂的凝胶剂更容易构建在TAG液态基料油的结构中,这种结构更加紧凑。除此之外,脂肪酸组成、凝胶剂在植物油中的极性也影响油凝胶的硬度。汪鸿等<sup>[23]</sup>报道的4%和6% CLW构建的低芥酸菜籽油凝胶硬度与本研究中5% CLW构建的O-DAGO基油凝胶硬度接近。然而,DAG基油凝胶与TAG基油凝胶的差异需要更多的基础研究来阐明。

### 2.1.5 热力学性能分析

图4、图5分别为原料油、起酥油和O-DAGO基油凝胶的DSC曲线。

由图4可看出,CLW存在56.0℃和63.3℃重叠的结晶峰,对应于CLW不同成分的结晶,主要是正烷烃和蜡酯的结晶<sup>[20]</sup>。油脂中主要含有 $\alpha$ 、 $\beta'$ 和 $\beta$ 晶型, $\alpha$ 晶体显示出最低的结晶和熔化温度, $\beta$ 晶

体有最高的结晶和熔化温度,而 $\beta'$ 晶体的结晶和熔化温度在二者之间<sup>[24]</sup>。研究指出1,3-DAG主要形成 $\alpha$ 和 $\beta$ 结晶结构,而1,2-DAG中只存在 $\beta'$ 结晶形式,且1,3-DAG的熔点比1,2-DAG高<sup>[25]</sup>。O-DAGS的1,3-DAG含量比O-DAGO的高,因此从结晶熔融曲线中可以看出O-DAGS具有更高的结晶温度和熔融温度。O-DAGO在 $-2.4^\circ\text{C}$ 时

有1个结晶峰,熔化曲线在 $10.9^\circ\text{C}$ 处有1个明显的峰,在 $18.8^\circ\text{C}$ 处有1个小的肩峰,晶体全部熔化温度在 $20^\circ\text{C}$ 左右,与其在室温下呈现液体状态相符合。熔化行为与油的SFC密切相关,起酥油在 $4.6^\circ\text{C}$ 时存在1个明显的宽熔化峰,在低温下有大量的固体脂肪。起酥油的最高熔化峰值温度( $40.7^\circ\text{C}$ )低于O-DAGS,熔化行为与SFC曲线的趋势一致。

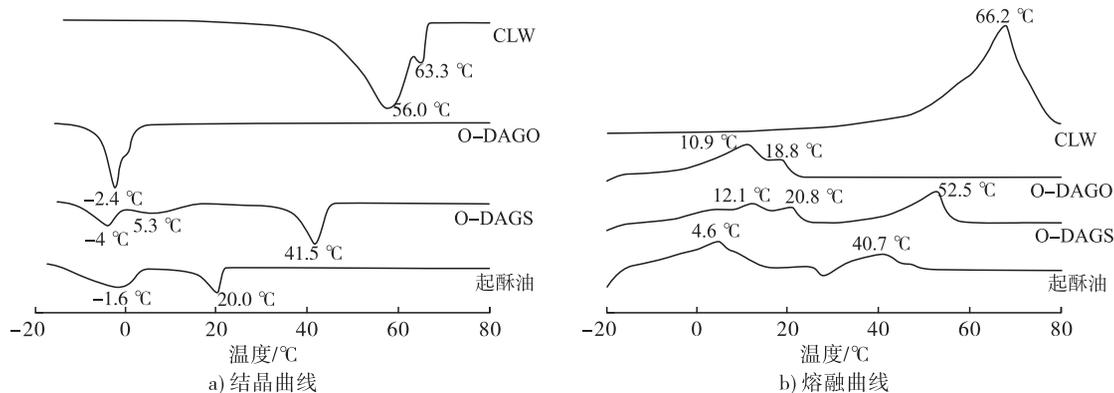


图4 原料油和起酥油的DSC曲线

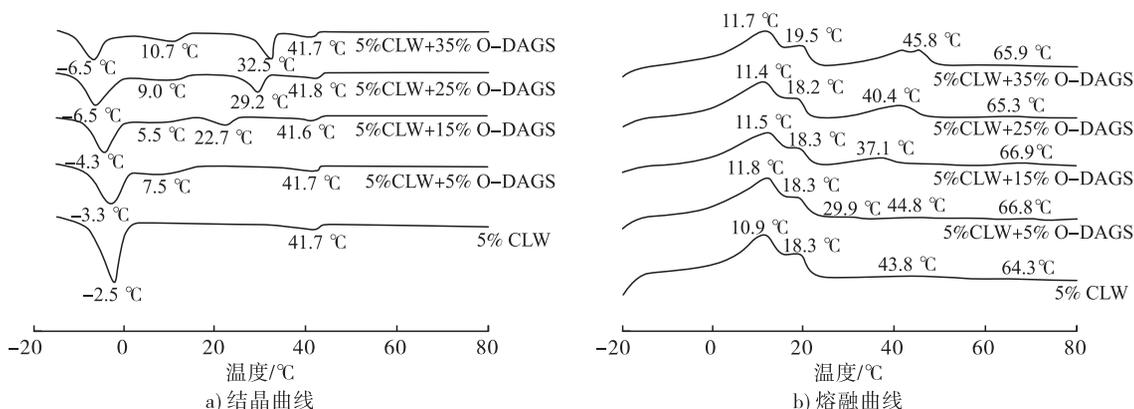


图5 O-DAGO基油凝胶的DSC曲线

由图5a可看出,5种O-DAGO基油凝胶在 $41.7^\circ\text{C}$ 附近均出现相似的结晶峰,这可能与含有一定量的CLW有关。在5%CLW油凝胶中,只有2个结晶峰,添加O-DAGS的油凝胶除O-DAGS含量5%的油凝胶相比5%CLW油凝胶增加1个结晶峰外,其他3种含O-DAGS的油凝胶均增加2个结晶峰,且随O-DAGS含量增加,新的结晶峰温度不断升高,推测O-DAGS含量的增加促进了 $\alpha$ 晶体向高熔点的 $\beta'$ 晶体及 $\beta$ 晶体的转化<sup>[26]</sup>。

由图5b可看出,5种O-DAGO基油凝胶在 $65^\circ\text{C}$ 附近都存在相似的熔化峰,5%CLW油凝胶和O-DAGS含量5%的油凝胶在 $44^\circ\text{C}$ 左右存在熔化行为,这归因于CLW不同组分的熔化。对比5%CLW油凝胶,O-DAGS含量5%的油凝胶在 $29.9^\circ\text{C}$ 处出现了1个新的弱峰,且此峰随着O-DAGS含量增加不断向高温转移,峰的大小也明显增加,与结

晶的趋势相似。这与O-DAGS含量较高的油凝胶含有更多的固体脂肪有关。

## 2.2 饼干的评价指标

按1.2.2方法分别采用起酥油、O-DAGO和O-DAGO基油凝胶制作饼干,测定相关指标,结果见表2。

由表2可看出,随着O-DAGS含量从5%增加到35%,烘焙损失率降低,这是食品工业中所期望的,这可能与O-DAGS具有稳定水分子的作用有关。较低的硬度对应较好的口感。O-DAGO饼干的硬度最高( $38.05\text{ N}$ ),这可能与O-DAGO的固体脂肪含量较低,不能很好地覆盖面筋颗粒使得谷蛋白相互黏连有关。O-DAGS含量在5%~25%的油凝胶饼干硬度与起酥油饼干的硬度( $28.73\text{ N}$ )差异不显著,其中O-DAGS含量5%的油凝胶饼干表现出最低的硬度( $23.22\text{ N}$ ),这可能与CLW和O-

DAGS 具有协同乳化作用,可以在面团中均匀分布有关。O-DAGS 含量为 35% 时,油凝胶饼干的硬度达到 38.04 N,远高于起酥油饼干的,硬度过高,这是因为过高含量的 O-DAGS 在面团中不容易分散均匀,导致通气性不佳,造成硬度增大。起酥油饼干的直径最大(6.61 mm),O-DAGO 饼干的直径(6.10 mm)和扩散系数(5.40)最小,厚度最大

(1.13 cm)。起酥油的 SFC 较高,大量的脂肪融化导致直径显著增加。O-DAGO 在室温下为液体状态,SFC 仅为 0.16%,制备的饼干直径增加不明显。油凝胶饼干的直径和厚度随着 O-DAGS 含量的增加总体减少,这可能与油凝胶的硬度有关,硬度过大的脂肪难以在体系中均匀分散,易于结块,通气性差,导致饼干窄小<sup>[27]</sup>。

表 2 不同油脂基质饼干的基本指标测定结果

项目	起酥油	O-DAGO	油凝胶				
			5% CLW	5% CLW + 5% O-DAGS	5% CLW + 15% O-DAGS	5% CLW + 25% O-DAGS	5% CLW + 35% O-DAGS
烘焙损失率/%	7.18 ± 0.05cd	7.54 ± 0.12a	7.25 ± 0.07bc	7.29 ± 0.10b	7.11 ± 0.06de	7.05 ± 0.04e	7.03 ± 0.04e
硬度/N	28.73 ± 4.12b	38.05 ± 6.34a	28.79 ± 3.82b	23.22 ± 2.13b	27.62 ± 2.66b	28.95 ± 2.85b	38.04 ± 5.07a
直径/cm	6.61 ± 0.24a	6.10 ± 0.21e	6.45 ± 0.13b	6.49 ± 0.18b	6.31 ± 0.08c	6.26 ± 0.12cd	6.24 ± 0.09d
厚度/cm	1.08 ± 0.02b	1.13 ± 0.01a	1.06 ± 0.01b	1.11 ± 0.03a	1.03 ± 0.01c	1.02 ± 0.01c	1.02 ± 0.02c
扩散系数	6.12 ± 0.10a	5.40 ± 0.14c	6.08 ± 0.07a	5.85 ± 0.01b	6.12 ± 0.02a	6.14 ± 0.05a	6.13 ± 0.05a
色度							
$L^*$ (亮度)	86.34 ± 0.87a	77.02 ± 1.09f	82.37 ± 0.98e	83.44 ± 1.27b	82.85 ± 0.88d	82.88 ± 0.56d	83.29 ± 0.42c
$a^*$ (绿红)	5.14 ± 0.28b	7.75 ± 0.42a	4.60 ± 0.86e	4.38 ± 0.18f	4.67 ± 0.23d	4.75 ± 0.31c	4.41 ± 0.54f
$b^*$ (蓝黄)	28.84 ± 0.25c	28.65 ± 0.45d	28.57 ± 0.31e	29.27 ± 0.29a	28.32 ± 0.36g	29.01 ± 0.49b	28.42 ± 0.32f
$\Delta E$	0	9.68	4.02	3.03	3.56	3.48	3.16
油脂迁移率/%	0.36 ± 0.03b	0.48 ± 0.07a	0.23 ± 0.01c	0.24 ± 0.01c	0.20 ± 0.02d	0.12 ± 0.01e	0.07 ± 0.01f

注:同行不同小写字母表示存在显著性差异( $p < 0.05$ )

饼干的颜色与烘烤过程中形成的非酶褐变有关。起酥油饼干的亮度最高(86.34),O-DAGO 饼干的亮度最低(77.02),而不同的油凝胶饼干显示出中等亮度(82.37~83.44)。研究发现, $L^*$  值越高与 SFC 越高、阻断非酶褐变的底物浓度越高有关<sup>[27]</sup>。 $\Delta E$  随着 O-DAGS 含量的增加总体呈降低趋势。食品中油脂的迁移和氧化会导致饼干品质下降。O-DAGO 饼干的油脂迁移率最高,其次是起酥油饼干,O-DAGO 基油凝胶饼干的油脂迁移率较低,且随着 O-DAGS 含量的增加,O-DAGO 基油凝胶饼干的油脂迁移率总体降低。研究指出,油凝胶化是减少脂肪迁移的有效途径<sup>[28]</sup>。

总的来说,O-DAGS 含量不超过 25% 的 O-DAGO 基油凝胶制作的饼干具有适中的硬度和扩散系数,油脂迁移率较低,在饼干制作中具有较高的替代起酥油的潜力。

### 3 结论

将 CLW 的含量固定为 5%,不添加或添加 5%~35% 的 O-DAGS 制备 O-DAGO 基油凝胶,该油凝胶相较于起酥油有更健康的脂肪酸分布。随 O-DAGS 含量增加,油凝胶硬度、SFC、熔融和结晶温度随之增加。通过测定不同油脂基质饼干的性质

发现,过低或过高的 SFC 都不利于饼干的质量,5% CLW 与 5% O-DAGS 组合的 O-DAGO 基油凝胶表现出最低的硬度(23.22 N),具有较好的口感。O-DAGS 含量越高的饼干油脂迁移率越低。O-DAGS 含量不超过 25% 的 O-DAGO 基油凝胶制作的饼干硬度适中,表现出较高的替代起酥油应用于饼干中的潜力。未来可以研究 DAG 基油凝胶应用在其他烘焙产业中开发低饱和脂肪酸和零反式脂肪酸的健康食品。

### 参考文献:

- [1] DA SILVA T L T, FERNANDES G D, ARELLANO D B. Development of reduced saturated fat cookie fillings using multicomponent oleogels[J]. J Am Oil Chem Soc, 2021, 98(11): 1069-1082.
- [2] MERT B, DEMIRKESEN I. Evaluation of highly unsaturated oleogels as shortening replacer in a short dough product[J]. LWT - Food Sci Technol, 2016, 68: 477-484.
- [3] CUI X T, SALEH A S M, YANG S, et al. Oleogels as animal fat and shortening replacers: research advances and application challenges[J]. Food Rev Int, 2023, 39(8): 5233-5254.
- [4] YAZAR G, ROSELL C M. Fat replacers in baked products: their impact on rheological properties and final

- product quality[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63: 7653 – 7676.
- [5] SIVAKANTHAN S, FAWZIA S, MADHUJITH T, et al. Synergistic effects of oleogelators in tailoring the properties of oleogels: a review[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2022, 21(4): 3507 – 3539.
- [6] LI L, LIU G, BOGOJEVIC O, et al. Edible oleogels as solid fat alternatives: composition and oleogelation mechanism implications[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2022, 21(3): 2077 – 2104.
- [7] LI S, ZHU L, LI X, et al. Determination of characteristic evaluation indexes for novel cookies prepared with wax oleogels[J]. *J Sci Food Agric*, 2022, 102(12): 5544 – 5553.
- [8] SHI Y, LIU C, ZHENG Z, et al. Gelation behavior and crystal network of natural waxes and corresponding binary blends in high – oleic sunflower oil[J]. *J Food Sci*, 2021, 86(9): 3987 – 4000.
- [9] PALLA C A, DOMINGUEZ M, CARRÍN M E. An overview of structure engineering to tailor the functionality of monoglyceride oleogels[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2022, 21(3): 2587 – 2614.
- [10] SABERI A H, CHIN – PING T, OI – MING L. Phase behavior of palm oil in blends with palm – based diacylglycerol[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2011, 88(12): 1857 – 1865.
- [11] TAVERNIER I, DOAN C D, VAN DE 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.
- [12] WANG X, MA D, LIU Y, et al. Physical properties of oleogels fabricated by the combination of diacylglycerols and monoacylglycerols[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2022, 99(11): 1007 – 1018.
- [13] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. Production, safety, health effects and applications of diacylglycerol functional oil in food systems: a review[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(15): 2509 – 2525.
- [14] CHEN Y, WANG W, ZHANG W, et al. Characteristics and feasibility of olive oil – based diacylglycerol plastic fat for use in compound chocolate[J/OL]. *Food Chem*, 2022, 391: 133254[2022 – 10 – 14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133254>.
- [15] SABERI A H, LAI O M, TORO – VÁZQUEZ J F. Crystallization kinetics of palm oil in blends with palm – based diacylglycerol[J]. *Food Res Int*, 2011, 44(1): 425 – 435.
- [16] ROMAN O, HEYD B, BROYART B, et al. Oxidative reactivity of unsaturated fatty acids from sunflower, high oleic sunflower and rapeseed oils subjected to heat treatment, under controlled conditions[J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2013, 52(1): 49 – 59.
- [17] BOWEN K J, KRIS – ETHEERTON P M, WEST S G, et al. Diets enriched with conventional or high – oleic acid canola oils lower atherogenic lipids and lipoproteins compared to a diet with a western fatty acid profile in adults with central adiposity[J]. *J Nutr*, 2019, 149(3): 471 – 478.
- [18] ZHU T, ZHANG X, WU H, et al. Comparative study on crystallization behaviors of physical blend – and interesterified blend – based special fats[J]. *J Food Eng*, 2019, 241: 33 – 40.
- [19] ARANDA – LEDESMA N E, BAUTISTA – HERNÁNDEZ I, ROJAS R, et al. Candelilla wax: prospective suitable applications within the food field[J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2022, 159: 113170 [2022 – 10 – 04]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113170>.
- [20] MENG Z, LIU Y F, JIN Q Z, et al. Characterization of graininess formed in all beef tallow – based shortening[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(21): 11463 – 11470.
- [21] WANG X, MA D, LIU Y, et al. Physical properties of oleogels fabricated by the combination of diacylglycerols and monoacylglycerols[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2022, 99(11): 1007 – 1018.
- [22] TRUJILLO – RAMÍREZ D, REYES I, LOBATO – CALLEROS C, et al. Chia seed oil – candelilla wax oleogels structural features and viscoelasticity are enhanced by annealing[J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2022, 153: 112433[2022 – 10 – 14]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112433>.
- [23] 汪鸿, 孙立斌, 张亮, 等. 小烛树蜡油脂凝胶的性质及作用机理研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 91 – 95.
- [24] HIMAWAN C, STAROV V M, STAPLEY A G. Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2006, 122(1/2/3): 3 – 33.
- [25] LO S K, TAN C P, LONG K, et al. Diacylglycerol oil: properties, processes and products: a review[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2008, 1(3): 223 – 233.
- [26] JIANG J, SONG Z, WANG Q, et al. Ultrasound – mediated interfacial protein adsorption and fat crystallization in cholesterol – reduced lard emulsion[J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 58: 104641[2022 – 10 – 14]. <https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2019.104641>.
- [27] SCIARINI L S, VAN BOCKSTAELE F, NUSANTORO B, et al. Properties of sugar – snap cookies as influenced by lauric – based shortenings[J]. *J Cereal Sci*, 2013, 58(2): 234 – 240.
- [28] ONACIK – GÜR S, ZBIKOWSKA A. Effect of high – oleic rapeseed oil oleogels on the quality of short – dough biscuits and fat migration[J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(5): 1609 – 1618.