羊世远, 吴明俏, 汪壮鹏, 等. 米糠蜡-高油酸葵花籽油凝胶构建及其在面包中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 63−71. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040140

YANG Shiyuan, WU Mingqiao, WANG Zhuangpeng, et al. Construction of Rice Bran Wax-High Oleic Acid Sunflower Seed Oleogel and Its Application in Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 63−71. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040140

· 研究与探讨 ·

米糠蜡-高油酸葵花籽油凝胶构建及其在面包中的应用

羊世远[1,2], 吴明俏[2], 汪壮鹏[2], 涂　瑾[2], 吴磊燕[2,3,*]

（1.海南科技职业大学财经学院, 海南海口 570100;
2.江西农业大学食品科学与工程学院, 江西南昌 330000;
3.江西大由大食品有限公司, 江西赣州 341000）

摘　要: 为揭示蜡基油凝胶结构与面包质量之间的关系，本文基于研究不同冷却温度（20、4、−18 ℃）对米糠蜡（C24-C32）—高油酸葵花籽油基油凝胶结晶网络结构的影响，并以 20 ℃ 冷却、添加 3%、5%、8%、10% 米糠蜡制备的油凝胶等量替代人造黄油在面包中的应用进行评价。油凝胶的微观结构、晶型、持油率、硬度和热性质结果表明，20 ℃ 冷却下的油凝胶呈密集的树枝状结晶网络及 β'晶型的存在，冷却温度的提高增加了分形维数 Db 值（1.822±0.013~1.835±0.105）；随着米糠蜡含量逐渐增多，油凝胶晶体网络愈加密集，Db 值（1.053±0.104~1.783±0.023）、硬度（10.43 g~256.12 g）、持油率（48.33%~95.42%）显著增加（P<0.05），熔融/结晶峰值温度逐渐增大；傅里叶红外光谱表明油凝胶分子间存在范德华力。在面团硬度和流变特性上，油凝胶制备的面团硬度与黄油组面团相似，弹性模量 G'和黏性模量 G"值均低于黄油组面团。含 10% 米糠蜡制成的油凝胶 β'晶体相对含量显著高于其它组别（P<0.05），且所制作的面包在质构特性、比容、气孔结构上趋于黄油组的面包。所有添加油凝胶的面包表皮颜色 L^*、a^*和 b^*值均低于黄油组面包，对面包芯颜色影响不大。综上，蜡基油凝胶中密集的结晶网络结构和高 β'晶体含量是影响面包品质的关键因素。

关键词: 油凝胶, 米糠蜡, 结晶网络, 晶型, 面包

中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0063−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040140　　本文网刊:

Construction of Rice Bran Wax-High Oleic Acid Sunflower Seed Oleogel and Its Application in Bread

YANG Shiyuan[1,2], WU Mingqiao[2], WANG Zhuangpeng[2], TU Jin[2], WU Leiyan[2,3,*]

（1.School of Finance and Economics, Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 570100, China;
2.School of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330000, China;
3.Jiangxi Dayou Da Food Co., Ltd., Ganzhou 341000, China）

Abstract: To elucidate the relationship between the structure of wax-based oleogels and bread quality, this study examined the effects of varying cooling temperatures (20, 4, −18 ℃) on the crystalline network structure of rice bran wax (C24-C32)—high oleic sunflower oil-based oleogels. Additionally, the application of these oleogels in bread was evaluated by substituting margarine with equal amounts of oleogels prepared with 3%, 5%, 8%, and 10% rice bran wax under 20 ℃ cooling. The results pertaining to the microstructure, crystal polymorph, oil-holding capacity, hardness, and thermal properties of the oleogel demonstrated that oleogels cooled at 20 ℃ exhibited a dense dendritic crystalline network

收稿日期: 2025−04−14

基金项目: 江西省水稻产业技术体系项目（JXARS-01）; 国家自然科学基金资助项目（32060583）; 海南科技职业大学校级科研资助项目（HKKY2024-25）。

作者简介: 羊世远（1998−）, 男, 硕士, 助教, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: yanghkd@hvust.edu.cn。

*** 通信作者:** 吴磊燕（1973−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 蛋白界面、粮油食品加工, E-mail: fswuly@jxau.edu.cn。

with the presence of β' polymorphs. Elevated cooling temperatures increased the fractal dimension Db values (1.822±0.013~1.835±0.105). As the rice bran wax content increased, the crystalline network of oleogels became progressively denser, accompanied by significant increases (P<0.05) in Db values (1.053±0.104~1.783±0.023), hardness (10.43 g~256.12 g), and oil-holding capacity (48.33%~95.42%). Correspondingly, the melting/crystallization peak temperatures increased gradually. Fourier transform infrared spectroscopy confirmed the existence of van der Waals forces among the oleogel constituents. In relation to dough hardness and rheological properties, the hardness of doughs prepared with the oleogels was comparable to that of the butter-containing dough, while both the storage modulus (G') and loss modulus (G") were lower than those of the butter-based dough. The oleogel containing 10% rice bran wax displayed a significantly higher relative content of β' polymorphs than other groups (P<0.05), and the resultant bread showed texture properties, specific volume, and crumb structure approaching those of the butter-containing bread. The L^*, a^*, and b^* values of the crust color for all oleogel-added breads were lower than those of the butter-containing bread, with minimal impact on the crumb color. In summary, the dense crystalline network structure and high β' polymorph content in wax-based oleogels are critical factors influencing bread quality.

Key words: oleogel; rice bran wax; crystalline network; crystal type; bread

固体脂肪如人造黄油广泛用于饼干、面包、酥饼等各种烘焙产品，赋予面团柔软、充气良好、黏弹性优异的结构，并改善面团的曝气性，增加烘烤后产品香味[1−2]。然而，通过氢化工艺生产的人造黄油常含有反式脂肪酸，对人体健康造成负面影响，因此寻找代替氢化人造黄油的工艺技术非常重要[3]。

油凝胶化被认为可用于代替固体脂肪的一类技术，将凝胶剂溶解于液态植物油中，依靠静电作用力、π-π 堆积、范德华力及氢键等束缚液态植物油形成具有三维网络结构的有机凝胶体系，可以减少反式脂肪酸含量，同时增加饮食中的不饱和脂肪酸[4−5]，在食品中应用前景较好。常见的凝胶剂有植物和动物蜡、单甘油酯、乙基纤维素、磷脂、植物甾醇和 γ-谷维素等，它们能结构化植物油，形成与固体脂肪相似的黏弹性质和可塑性[6]。

米糠蜡是米糠油加工过程中的副产物，熔点在 78~81 ℃，精制的米糠蜡为淡黄色略微发白的固体，能够在 1% 的浓度下通过加热与液体植物油均匀分散，从而发生凝胶化行为[7]，因其简单、高效、安全且廉价的优点被认为是最佳的人造黄油凝胶剂[8]。Zhao 等[9] 研究发现米糠蜡与高油酸大豆油制备的油凝胶能够代替起酥油而不会影响面包品质。Pang 等[10] 利用米糠蜡与米糠油凝胶部分代替起酥油制作饼干，所制得的饼干酥脆度与起酥油制作的饼干相似且硬度和 L^*值较低。尽管蜡基油凝胶在烘焙产品中得到广泛应用，但油凝胶晶型与面包品质之间的关系尚未明确。此外，凝胶剂类型、油相组成、冷却速率和剪切条件会对油凝胶晶体结构产生影响，从而能够调控油凝胶形成具备传统固体脂肪的可塑性特征。Han 等[11] 研究表明在不同的冷却速率下含多不饱和脂肪酸的液油能在缓慢冷却速率下促进紧密晶体结构形成。Doan 等[12] 观察到在 2 ℃/min 的冷却速率下米糠蜡构造的米糠油基油凝胶形成较大的枝晶结构，晶体含量较多。与此同时，Wijarnprecha 等[13] 研究表明在不同的冷却速率下米糠蜡基油凝胶晶型与蜡自身结晶特性相关。然而，从构造油凝胶结晶网络结构角度探讨对面包内部特征（气孔结构、质构等）影响尚未有研究。因此，本文以米糠蜡和高油酸葵花籽油构造稳定的油凝胶，探究不同冷却温度对油凝胶晶型及网络结构的影响，随后以添加不同质量分数的米糠蜡在最佳冷却温度下形成的油凝胶全部代替人造黄油，从油凝胶结晶网络和晶型方面对面包品质特性影响进行试验分析，为更进一步开发健康食品提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

高油酸含量葵花籽油（脂肪酸组成：油酸 81.42%，亚油酸 8.89%，棕榈酸 4.06%，硬脂酸 3.07%） 中粮悠采厨房食品（上海）有限公司；精制米糠蜡（纯度≥97%） 浙江湖州圣涛生物技术有限公司；白燕牌面包粉 广东白燕粮油实业有限公司；黄油 广州南侨食品股份公司；高活性干酵母 安琪酵母股份有限公司；绵白糖、鸡蛋、食盐 均购于网上商城。

TA-XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司；XRD-7000 粉末衍射仪、IRTracer-100 傅里叶红外光谱仪 日本岛津仪器有限公司；DM4500P 偏振光显微镜 徕卡显微系统（上海）贸易有限公司；DSC214 差示扫描量热仪 德国耐驰仪器制造有限公司；Discovery HR-1 型流变仪 美国 TA 仪器有限公司；SS-05A 微电脑螺旋式搅面机、SP-18S 醒发箱、SGC-3Y 烘烤箱 广州三麦机械设备有限公司；DSH-50-1 水分测定仪 上海越平科学仪器（苏州）制造有限公司；GYW-1M 水分活度仪 深圳市冠亚技术科技有限公司；高精度分光测色仪 美国 Hunterlab 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油凝胶样品的制备 参考朱小勇等[14] 的方法并稍作修改。在 50 mL 烧杯中加入 2.5 g 米糠蜡，20 g 高油酸含量葵花籽油构建稳定油凝胶，恒温磁力搅拌器边搅拌边升温，温度提高到 90 ℃，300 r/min 搅拌 1 h 直至米糠蜡全部溶解于油相中，取出在 20、

4、−18 ℃ 下冷却保存；然后分别称取 3%、5%、8%、10% 质量浓度的米糠蜡加入高油酸含量葵花籽油中，加热溶解同上，在 20 ℃ 下保存 48 h 得到油凝胶。

1.2.2　凝胶微观结构观察　参考 Li 等[15] 的方法，将一滴熔化的油凝胶样品滴至载玻片上，盖上载玻片，于室温下（20 ℃）静置 24 h 后测定。使用偏振光显微镜观察样品，放大倍数设置为 200×。采用 ImageJ 软件计算获得的偏光图像分形维数 Db 值。

1.2.3　油凝胶晶型分析　参考 Gao 等[16] 的方法并稍作修改。在 X 射线衍射仪器检测片的圆孔中加入适量（0.3 g 左右）样品并抹平，测定条件：室温，使用 Cu 源 X 射线管（波长 1.54056 Å、工作电压 40 kV、电流 30 mA），狭缝模具 0.3 mm，以 5°/min 进行扫描，步长为 0.01°，扫描范围 10°~40°，使用 Jade6 软件进行数据分析并由以下公式计算 β'晶体相对含量[17]。

$$\beta'\text{晶体相对含量}(\%) = \frac{\beta'\text{晶体区域面积}}{\text{晶体区域面积} + \text{无定形区域面积}} \times 100 \qquad \text{式（1）}$$

1.2.4　油凝胶基本性质测定

1.2.4.1　油凝胶外观形态观察　将 30 g 热的油凝胶样品倒入 50 mL 试管中，置于 20 ℃ 下 48 h 后倒置试管观察油凝胶状态。

1.2.4.2　持油率　参考 Ghan 等[18] 的方法并稍微修改，取约 5 g 油凝胶，放入称重过的离心管中记为 W_1（g），然后再次称重为 W_2（g），使用离心机在 20 ℃ 下 9000 r/min 离心 15 min。最后，在排出多余的液体油后，再次称重为 W_3（g），并用以下公式进行持油率计算。

$$\text{持油率}(\%) = \frac{100 \times (W_3 - W_1)}{W_2 - W_1} \qquad \text{式（2）}$$

1.2.4.3　硬度特性　保证油凝胶样品表面平整用于质构特性测定。测定条件：探头 P/5，移动速度 2 mm/s，测试速度 2 mm/s，触发力 5 g，压缩率 50%。

1.2.5　油凝胶分子间作用力　采用傅里叶变换红外光谱（FTIR）并配备衰减全反射（ATR）采样附件测定油凝胶样品分子间作用力。将样品放置待测区，在 500~4000 cm^{-1} 的范围内获得光谱。从光谱中减去空气背景，并通过 OMNIC 软件进行分析。

1.2.6　油凝胶热特性　参考 Meng 等[19] 的方法。称取 7~8 mg 凝胶油样品置于铝盘中密封，空的铝盘作为参考。参数设定为快速升温至 80 ℃ 并保持 10 min 以消除晶体记忆；之后，以 10 ℃/min 的降温速率将密封的铝盘降温至为−10 ℃ 保持 5 min；随后再以 10 ℃/min 的升温速率升温至 80 ℃。采用 Universal Analysis 2000 进行数据分析。

1.2.7　面团及面包制作　面包配方参考 AACC 10-11.01[20] 的方法，高筋粉 100 g、水 60 g、糖粉 6 g、干酵母 2 g、黄油/油凝胶 3 g、食盐 1.5 g。将干性物料倒入和面机中，低速混合并缓慢加水成为光滑面团。将市售黄油或油凝胶倒入和面机中，并与面团低速混合。随后，将面团高速搅打，直到它吸入油脂变得有弹性并且可以从半透明薄膜中拉出。从机器中取出面团，在室温下松弛 30 min。之后，将面团切成相等质量（80 g）的小块，然后捏合成圆形。将面团放入醒发箱中，温度设定为 38 ℃，湿度设定为 75%，发酵 90 min。烤箱温度上下火 200 ℃ 下烘烤 12 min。

1.2.8　面团质地特征与流变学特性测定

1.2.8.1　面团硬度　参考周锦枫等[21] 的方法并稍作修改进行面团硬度测定。搅打好的面团称取 20 g 揉搓成圆，用质构仪进行硬度测定。测定条件：探头 P/36R，移动速度 1 mm/s，测试速度 1 mm/s，触发力 5 g，压缩率 50%。

1.2.8.2　面团流变特性　参考 Tanislav 等[22] 的方法，并稍作修改。将面团置于 Discovery HR-1 型流变仪平板上，放置 5 min 以平衡面团中的应力，并在测定过程采用二甲基硅油密封以防止测定过程中面团水分的蒸发。使用 40 mm 直径的平板模具，设置参数：温度 25 ℃，夹缝距离为 2 mm，频率扫描应变力 0.01%，扫描范围 0.1~100 rad/s。

1.2.9　面包基本性质测定

1.2.9.1　质构特性　烘烤成熟的面包室温冷却 2 h，从面包中心切取 20 mm 厚的面包片进行质构测试。测定条件同 1.2.8.1。

1.2.9.2　比容　根据 GB/T 20981-2007《面包油菜籽置换法》的方法进行面包比容测定。

$$\text{面包比容}(\text{mL/g}) = \frac{\text{面包体积}(\text{mL})}{\text{质量}(\text{g})} \qquad \text{式（3）}$$

1.2.9.3　水分含量及水分活度　根据 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定—直接干燥法》测定面包水分；使用冠亚 GYW-1M 水分活度仪测定面包水分活度。

1.2.10　面包色差测定　取冷却后的面包利用全自动色差仪测定面包的 L^*、a^*、b^*值，色差偏差（ΔE）是样品色差值与对照样品色差值之间的偏差，计算公式如下：

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2} \qquad \text{式（4）}$$

式中 L^*表示明亮度，a^*为红绿值，正值表示红色，负值表示绿色；b^*为黄蓝值，正值表示黄色，负值表示蓝色。L_0、a_0、b_0 分别对应对照组面包（黄油）的色差值；L_1、a_1、b_1 表示试验样品面包色差值。

1.2.11　面包剖面气孔结构数字分析　参考孟祥平等[23] 的方法。将冷却 2 h 后的面包切片，使用扫描仪进行扫描，扫描频率为 600 dpi。采用 Image J 软件将扫描图像截取最大矩形面积并转为 8-bit 灰度图像，利用 Otsu thresholding 技术对图像进行处理，在处理后图像的不同位置选取 30 mm×30 mm 图像 3

次, 测定面积>0.1 mm^2 的气泡的个数、气孔表面分率(Area fraction, AF)和气孔稠密度(Cell density, CD)。

1.3 数据处理

样品均进行 3 次平行测定, 结果以平均值±标准偏差的形式表示。数据处理使用 Excel, SPSS19.0 用于数据单因素方差分析和显著性差异分析(Duncan 法), P<0.05 表示具有显著性差异, 作图使用 Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 油凝胶晶体结构

油凝胶的结晶网络结构能直接影响它的物理性质。利用偏光显微镜研究不同冷却温度和添加不同质量分数米糠蜡的油凝胶晶体结构。分形维数 Db 可以评估油凝胶晶体网络有序性与晶体聚集程度, Db 值越大, 晶体网络结构越强, 凝胶结构越稳定[24]。如图 1A~图 1C 和表 1 所示, 不同冷却温度下的米糠蜡基油凝胶晶体网络结构差异明显。随着冷却温度的下降, 油凝胶晶体组装由尺寸较大的晶簇逐渐变为稀疏细小晶体, Db 值(1.835±0.105~1.822±0.013)也随之变小, 这说明在较低的冷却温度下会形成较弱的油凝胶晶体网络结构, 较高冷却温度能促进脂质分子在结晶过程中排列, 晶体有更多时间相互作用聚集。因此, 在 20 ℃ 冷却温度下米糠蜡基油凝胶具有更加稳定的晶体网络结构。

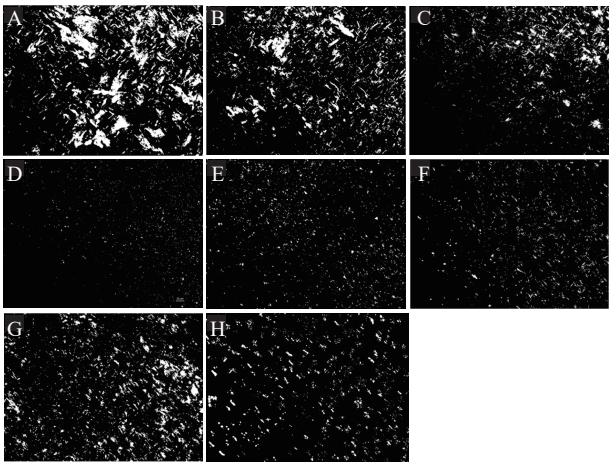


图 1 黄油与油凝胶偏光显微镜图像(200×)

Fig.1 Polarizing microscope images of butter and oleogels (200×)

注: A 为米糠蜡(20 ℃); B 为米糠蜡(4 ℃); C 为米糠蜡(−18 ℃); D~G 分别为添加 3%、5%、8%、10% 米糠蜡(20 ℃); H 为黄油。

从图 1D~图 1H 中可以看出, 黄油的晶体呈棒状结构, 晶体数量较多; 而添加不同质量分数米糠蜡基油凝胶所形成的晶体结构和晶体数量差异明显。油凝胶在添加量为 3% 米糠蜡下其晶体尺寸较小且晶体数量较为稀疏; 添加 5% 米糠蜡的油凝胶晶体尺寸及数量变大且密集; 添加量为 8% 时, 油凝胶晶体呈簇状, 出现树枝状结构; 在添加 10% 米糠蜡可以观察到油凝胶具有较大晶簇, 分支变多, 晶体网络结构更加致密。王菊花等[25] 研究也发现, 随着米糠蜡添加量的增加, 亚麻籽油基油凝胶形成致密的结晶网络结构。不同质量分数米糠蜡基油凝胶的 Db 值也随着米糠蜡浓度的增加显著增大(P<0.05), 10% 米糠蜡 Db 值最大, 为 1.783±0.023。综上所述, 随着米糠蜡添加量不断增加, 晶体大小和数量逐渐增多从而聚集成晶簇, 形成更致密的晶体网络结构, 能更好地截留流动态植物油形成油凝胶, 从而提高持油率与硬度。

2.2 油凝胶晶型

脂肪晶体结构在油脂结晶过程中会产生同质多晶现象, 脂肪晶型主要分为三种: α、β'及 β[26]。利用 XRD 进行广角 X 射线衍射可以得知晶体结构信息。其中 α 和 β 晶型衍射峰分别在 4.15 Å和 4.6 Å 左右, 而 β'晶型在 3.8 Å和 4.2 Å有两个强衍射峰[27]。图 2A 为不同冷却温度下米糠蜡基油凝胶的 XRD 谱图。与纯蜡相比, 米糠蜡基油凝胶在 2θ=20°附近出现宽峰, 这与植物油中存在的液态甘油三酯有关。所有油凝胶样品均出现 β'晶型特征峰, 然而, 在−18 ℃ 下冷却的油凝胶衍射峰强度明显弱于 20 ℃ 和 4 ℃, 说明该冷却温度下的油凝胶晶体含量较少, 这与偏光显微观察到的结果一致。通过 XRD 进一步表明, 冷却温度为 20 ℃ 的米糠蜡基油凝胶具有更加有序的分子排列, 形成稳定的结晶网络结构。本研究将以冷却温度为 20 ℃ 制备油凝胶进行后续研究。

从图 2B 中可以观察到, 与黄油相比, 添加不同质量分数米糠蜡基油凝胶呈现相似的衍射峰, 随着米糠蜡添加量增加, 油凝胶的衍射峰形变得愈加尖锐。所有不同质量分数米糠蜡的油凝胶均在 4.15 Å和 3.8 Å附近出现较强衍射峰, 表明主要以 α 和 β'晶型为主。黄油在 3.8 Å附近出现两个强度很小的 β特征峰。油凝胶体系中含有的 β'晶体是烘焙脂肪理想的晶体结构, 能给产品带来良好的曝气性与柔软质[28]。

图 2C 为添加不同质量分数米糠蜡的油凝胶和黄油中的 β'晶体相对含量。黄油中的 β'晶体相对含量与油凝胶相比是最低的, 油凝胶中的 β'晶体相对含量随着米糠蜡添加量的增加显著增加(P<0.05)。在烘焙食品中, 晶型结构对于烘焙类产品品质至关重要, 更多细小 β'晶体能够增强脂肪保留空气的能力,

表 1 黄油与油凝胶 Db 值

Table 1 Db values of butter and oleogels

样品	米糠蜡(20 ℃)	米糠蜡(4 ℃)	米糠蜡(−18 ℃)	3%米糠蜡(20 ℃)	5%米糠蜡(20 ℃)	8%米糠蜡(20 ℃)	10%米糠蜡(20 ℃)	黄油
分形维数Db	1.828±0.018^a	1.835±0.105^a	1.822±0.013^a	1.053±0.104^e	1.445±0.003^d	1.553±0.044^c	1.783±0.023^a	1.687±0.041^b

注: 同行不同字母表示具有显著差异(P<0.05)。

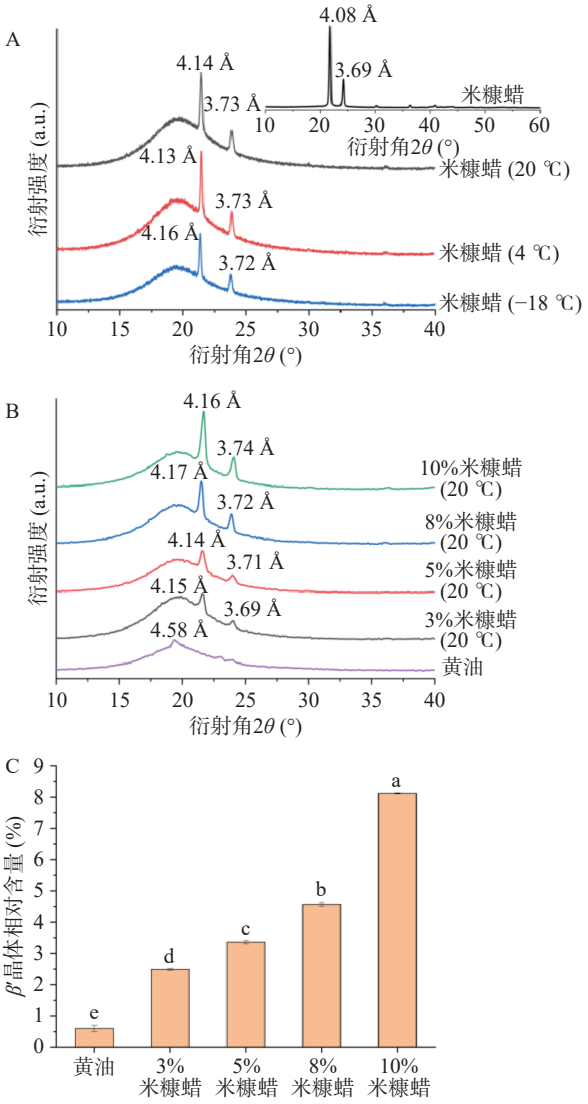


图 2　黄油与油凝胶 XRD 谱图及 β'晶体相对含量

Fig.2　XRD pattern of butter and oleogels, relative content of β' crystals

注：不同的小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)，图 3、图 6 同。

在烘烤过程中将更多的晶体界面转移到膨胀气泡表面，从而提高气泡稳定性，形成稳定的气孔，保证烘烤产品松软多孔结构[29−30]。

2.3　油凝胶基本性质

图 3 是添加不同质量分数米糠蜡基油凝胶和黄油的外观形态。所有油凝胶在倒置下均未出现流动现象，说明葵花籽油在 3% 米糠蜡添加量下可以形成稳定的凝胶体系。添加质量分数为 5%、8% 和 10% 米糠蜡的持油率及硬度均大于黄油，而添加 3% 米糠蜡的油凝胶低于黄油。油凝胶的持油率(48.33%~95.42%)和硬度(10.43 g~256.12 g)与米糠蜡添加量呈线性关系。这一结果与孟宗等[31] 报道一致。油凝胶的硬度和持油率随米糠蜡浓度的增加而增加。

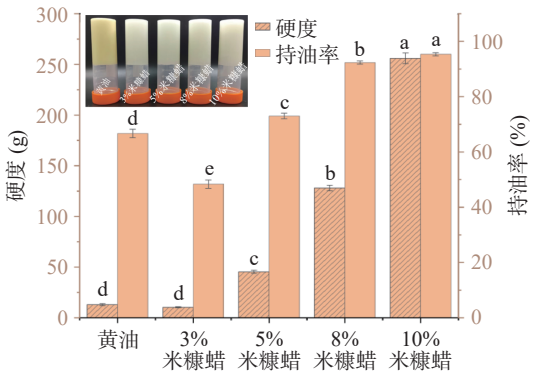


图 3　黄油和油凝胶基本性质

Fig.3　Basic properties of butter and oleogels

2.4　油凝胶分子间作用力

采用 FTIR 来研究油凝胶体系中分子间相互作用。如图 4 所示，不同样品的红外光谱呈现相似波动特征峰；在 2930 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 附近出现的吸收峰与-CH_3 和-CH_2-的伸缩振动有关，不同质量分数米糠蜡基油凝胶特征峰均出现红移现象，这种轻微变化是由于范德华力引起的烷基链流动性的变化[32]。在 1740 cm^{-1} 附近出现的吸收峰是与酯键相关的 C=O；在 1460 cm^{-1} 和 1368 cm^{-1} 附近的吸收峰主要来自-CH_2-及-CH_3 基团的 C-H 弯曲振动；1164 cm^{-1} 和 1100 cm^{-1} 特征峰是 C-O-H 和 C-O-C 基团的 C-O 拉伸振动，而在 735 cm^{-1} 附近观测到的吸收峰主要来自 CH_2 弯曲。油凝胶样品中特征峰没有出现或消失，只观察到油凝胶样品吸收峰的红移。姚云平等[33] 在米糠蜡与硬酯酰乳酸钠复配制成的油凝胶红外光谱上也观察到了相似现象。这表明米糠蜡油凝胶稳定网络仅通过物理相互作用，特别是范德华力。

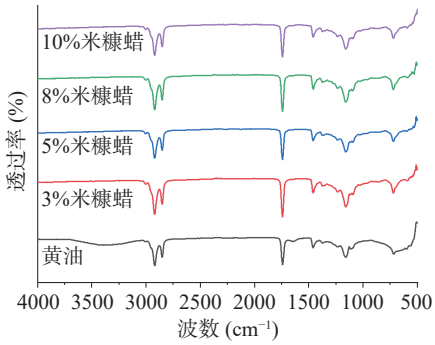


图 4　黄油和油凝胶的 FTIR 图谱

Fig.4　FTIR spectrum of butter and oleogels

2.5　油凝胶热性质

利用 DSC 进一步探究不同质量分数米糠蜡制备的油凝胶熔融和结晶特性行为。如图 5 所示，所有的油凝胶在热力学行为上只有一个吸热峰和放热峰出现。在熔融曲线(图 5A)上，随着米糠蜡添加量的增加，油凝胶熔融峰值温度上升，其峰值温度范围较窄(62.44~69.93 ℃)。这与 XRD 结果相符合，β'晶体具有高于 α 晶型、低于 β 晶型的熔点[34]。在结晶曲线(图 5B)上，随米糠蜡含量的增多，油凝胶结晶峰值温度升高，峰值温度范围较宽(48.63~62.21 ℃)。葵花籽油基油凝胶在降温过程中比升温过程具有更加广泛的峰值温度范围。这可能与蜡中含有的长链

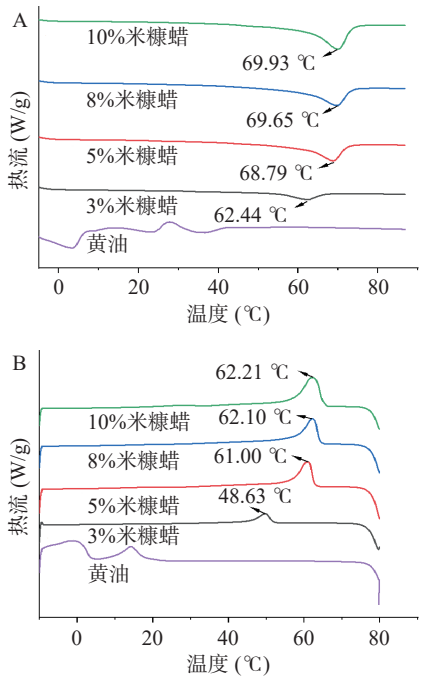


图 5 黄油和油凝胶的 DSC 熔融结晶特性

Fig.5 DSC melting and crystallization characteristics of butter and oleogels

脂肪酸和脂肪醇等化学成分有关，长链蜡酯的存在是在较高温度下结晶的原因[35]。

2.6 面团质地特征与流变学特性

面团流变特性对产品的最终质量有影响。在图 6A 中可以观察到，添加 10% 米糠蜡油凝胶面团硬度显著大于黄油组面团（P<0.05），这可能归因于油凝胶面团中米糠蜡含量较高。正如上述油凝胶硬度结果所示，米糠蜡含量越高，油凝胶硬度越大，导致在面团体系中出现类似的硬度结果。在流变特性上（图 6B~图 6D），所有面团的 G'（弹性模量）值始终大于 G"（损耗模量）值，tanδ 值均<1；随着振荡频率的增加，面团的 G'值和 G"值也逐渐增大，表现出频率依赖性；此外，油凝胶面团 G'值和 G"值均低于黄油组，且随着米糠蜡含量增加，黏弹性模量先下降后增大，tanδ 值先提高后降低。然而，其它组别的油凝胶面团 tanδ 值均大于 3% 米糠蜡油凝胶，表明油凝胶中米糠蜡含量的增加导致面团黏性特征更加明显。这与 Jung 等[36] 观察到的结果一致。Zhao 等[37] 将米糠蜡-高油酸大豆油凝胶制成的面团也观察到类似结果。固体脂肪能抑制更多的面筋网络交联，赋予面团优异的黏弹性，黄油中含有的大量固体脂肪能使面团更加柔软带有弹性，油凝胶中由物理作用截留的液体油可能影响了面团的水化阶段，进而阻碍面筋蛋白网络的形成，面团丧失部分黏弹性质[38]。

2.7 面包基本性质

如表 2 所示。添加黄油和油凝胶的面包样品中水分含量和水分活度相似，差异不明显。米糠蜡油凝胶的面包硬度大于黄油组（除 10% 组），随着添加量的增加硬度逐渐降低，10% 米糠蜡油凝胶面包与黄

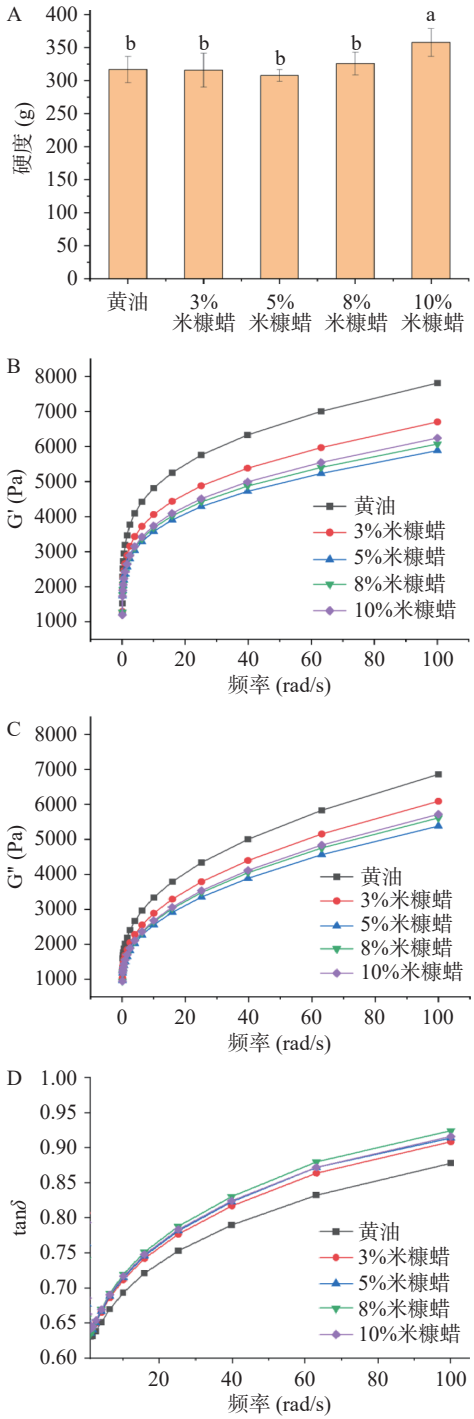


图 6 黄油和油凝胶的面团硬度及流变特性

Fig.6 Dough hardness and rheological characteristics of butter and oleogels

油组无显著性差异（P>0.05）、比容都显著低于黄油组（P<0.05），且 10% 米糠蜡油凝胶面包在弹性和咀嚼性上与黄油组无显著性差异（P>0.05）。随着油凝胶样品硬度的增大，面包硬度和咀嚼性逐渐变小，比容增加，结果与 Zhao 等[37] 的研究结果一致。是油凝胶中的结晶网络所造成的。如前所述，10% 米糠蜡制备的油凝胶结晶网络更加致密，同时所含有的 β'晶体相对含量是所有油凝胶组别中最高，有助于面团在搅打过程中更好地捕获并保持空气，烘烤期间稳定气泡，从而使面包获得柔软质地。

表 2　面包基本性质参数

Table 2　Basic property parameters of bread

添加物	质构特性						
	硬度(g)	凝聚性	弹性	咀嚼性(mJ)	比容(mL/g)	水分含量(%)	水分活度
黄油	80.50±5.15^{cd}	0.85±0.02^{ab}	0.91±0.02^{bc}	62.50±5.09^{cd}	7.61±0.32^{a}	41.89±0.11^{a}	0.95±0.003^{b}
3%米糠蜡	104.20±14.84^{a}	0.84±0.02^{ab}	0.94±0.02^{a}	82.73±11.11^{a}	5.90±0.14^{c}	40.81±0.23^{b}	0.95±0.007^{b}
5%米糠蜡	92.64±6.82^{b}	0.85±0.03^{ab}	0.94±0.03^{abc}	74.18±6.83^{ab}	6.24±0.32b^{c}	41.84±0.46^{a}	0.96±0.001^{a}
8%米糠蜡	91.38±13.42^{bc}	0.83±0.01^{b}	0.94±0.02^{ab}	71.46±10.05^{bc}	6.47±0.16^{b}	41.48±0.22^{a}	0.96±0.002^{a}
10%米糠蜡	75.40±5.85^{d}	0.86±0.02^{a}	0.91±0.03^{c}	59.03±6.10^{d}	6.62±0.03^{b}	41.37±0.53^{ab}	0.95±0.002^{ab}

注：同列不同的小写字母表示具有显著差异(P<0.05)，表3、表4同。

表 3　黄油和米糠蜡油凝胶的面包颜色

Table 3　Bread color of butter and rice bran wax oleogels

添加物	面包表皮色度				面包芯色度			
	L^*	a^*	b^*	ΔE	L^*	a^*	b^*	ΔE
黄油	50.66±0.61^{a}	7.30±0.41^{a}	13.99±0.64^{a}	16.25±0.54^{c}	41.08±0.19^{a}	0.06±0.01^{a}	3.07±0.11^{a}	27.71±0.23^{c}
3%米糠蜡	38.68±0.11^{c}	0.31±0.12^{c}	1.81±0.13^{c}	30.52±0.18^{a}	39.49±0.51^{cd}	-0.08±0.06^{cd}	2.17±0.34^{cd}	29.68±0.65^{a}
5%米糠蜡	38.55±0.56^{c}	0.32±0.43^{c}	1.85±0.63^{c}	30.30±0.83^{ab}	39.85±0.63^{bc}	-0.07±0.06^{bc}	2.92±0.63^{ab}	29.22±0.78^{ab}
8%米糠蜡	39.16±0.43^{bc}	0.69±0.39^{bc}	2.37±0.51^{bc}	29.78±0.67^{ab}	38.56±0.84^{d}	-0.17±0.05^{d}	1.68±0.37^{d}	30.37±0.45^{a}
10%米糠蜡	39.48±0.11^{b}	0.95±0.11^{b}	2.72±0.14^{b}	29.73±0.09^{b}	40.90±1.28^{ab}	0.03±0.10^{ab}	2.40±0.36^{bc}	27.96±1.52^{bc}

2.8　面包色差

通过色差仪评估黄油和不同质量分数米糠蜡基油凝胶对面包样品颜色的影响，如表 3 所示。添加油凝胶制备的面包表皮颜色与黄油组有显著性差异(P<0.05)。添加油凝胶的面包表皮 L^*、a^*和 b^*值均低于黄油制备的面包，面包表皮 L^*值越低，其颜色越暗，表明油凝胶能使面包表皮颜色变深。对于面包内部颜色，主要是由较白蜂窝状结构组成，全部油凝胶面包样品的 L^*值与黄油组差异显著(除 10% 米糠蜡组外)(P<0.05)，10%米糠蜡油凝胶面包在 L^*值上与黄油组更接近，表明米糠蜡的加入使面包芯色泽略微变暗。

2.9　面包气孔结构

面包内部气孔分布可以在一定程度上说明面包柔软程度。图 7 是处理后的面包内部气孔结构图。可以直观地观察到黄油制备的面包气孔大小分布均匀，主要以细密气孔为主；添加 3%、5% 和 8% 米糠蜡油凝胶制作的面包内部结构开始出现大气孔，稀疏且不均匀，10% 米糠蜡油凝胶制作的面包气孔结构与黄油组相似。含高不饱和脂肪酸油相组成的油凝胶缺乏固体脂肪晶体，特别是 β'晶体的缺失会导致面团在烘烤过程中无法保持气泡稳定，从而影响内部气泡的膨胀致使面包失去柔软度[39]，这与上述面包质构观察结果一致。

表 4 为面包气孔的基本参数，其中 AF 表示气孔表面分率，CD 表示单位体积气孔数量。一般认为当 AF 与 CD 值越大时，烘焙产品品质越高，质地更加柔软，具有更令消费者喜欢的高比容。黄油组面包的气孔总数及 CD 值比 3%、5% 和 8% 米糠蜡油凝胶面包大，与 10% 米糠蜡油凝胶面包相比，在 CD 值上

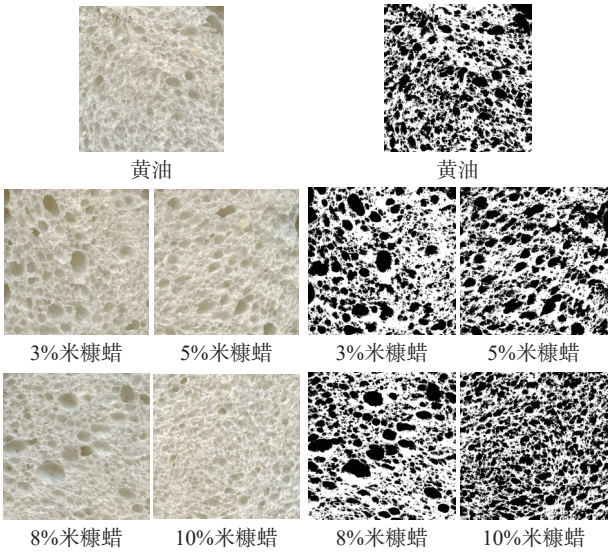


图 7　面包内部气孔扫描(A)及阈值转化结果(B)

Fig.7　Scanning of internal pores in bread (A) and the result of threshold transformation (B)

表 4　面包内部气孔参数

Table 4　Internal porosity parameters of bread

添加物	气孔总数(个)	AF(%)	CD(cells/cm^2)
黄油	394.75±27.84^{a}	21.35±2.40^{b}	43.86±3.09^{b}
3%米糠蜡	359.75±47.00^{c}	19.22±3.80^{c}	39.97±5.22^{d}
5%米糠蜡	370.25±66.41^{b}	26.71±2.90^{a}	41.70±7.38^{c}
8%米糠蜡	346.50±24.15^{c}	23.42±5.21^{b}	35.17±2.68^{e}
10%米糠蜡	387.25±8.06^{a}	23.86±8.31^{b}	45.70±4.90^{a}

显著低于 10% 米糠蜡油凝胶面包(P<0.05)，气孔总数与 AF 值差异不明显，说明添加较高质量分数米糠蜡的油凝胶所制作的面包具有与黄油组相似的内部气孔结构。面团在烤制过程中气泡会因温度的上升导致破裂，而气泡周围的 β'晶体能够保护气泡过度膨

胀。正如前述结果，10% 浓度米糠蜡油凝胶结晶网络结构致密，增强了液油附着在气孔表面的能力，且 β'晶体相对含量较高，能够更好地保护气泡，赋予最终产品内部气孔密集均匀结构。

3 结论

在 20 ℃ 的冷却温度下，米糠蜡-高油酸葵花籽油凝胶晶体网络结构更加紧密有序。随着米糠蜡添加量的增加，油凝胶持油率、硬度、结晶峰值温度与熔融峰值温度随之增加，晶体网络结构更加致密。油凝胶中的晶型主要呈现为 β'晶型，范德华力在油凝胶构造中起重要作用。与黄油制备的面团相比，油凝胶制备的面团具有更低的弹性模量和黏性模量。在面包品质上，10% 米糠蜡油凝胶制作的面包表皮颜色较黄油组面包更为深暗，面包芯颜色变化不明显，且硬度（75.40±5.85 g）、弹性（0.91±0.03 mm）、咀嚼性（59.03±6.10 mJ）、比容（6.62±0.03 mL/g）与黄油组面包（80.50±5.15 g、0.91±0.02 mm、62.50±5.09 mJ、7.61±0.32 mL/g）相似，内部气孔细小均匀且密集，这是因为油凝胶中更致密的晶体网络结构和较高的 β'晶体含量赋予面包优异的气体滞留性。以上结果表明蜡基油凝胶晶体网络结构和 β'晶体含量是影响面包品质的关键因素，为开发蜡基油凝胶低脂健康产品提供理论依据。未来可以研究蜡与其它凝胶剂复配制备油凝胶应用在烘焙专用油脂或烘焙产品中。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] DEMIRKESEN I, MERT B. Recent developments of oleogel utilizations in bakery products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(14): 2460−2479.

[2] YAZAR G, ROSELL C M. Fat replacers in baked products: Their impact on rheological properties and final product quality[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(25): 7653−7676.

[3] BARROSO N G, OKURO P K, RIBEIRO A P B, et al. Tailoring properties of mixed-component oleogels: Wax and monoglyceride interactions towards flaxseed oil structuring[J]. Gels, 2020, 6(1): 5.

[4] MANZOOR S, MASOODI F A, NAQASH F, et al. Oleogels: Promising alternatives to solid fats for food applications[J]. Food Hydrocolloids for Health, 2022, 2: 100058.

[5] PEHLIVANOĞLU H, DEMIRCI M, TOKER O S, et al. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(8): 1330−1341.

[6] 张若宁, 张彦慧, 刘楠, 等. 油凝胶作为氢化油脂替代物的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(8): 222−234. [ZHANG Ruoning, ZHANG Yanhui, LIU Nan, et al. Research progress of oleogel as a substitute for hydrogenated fats[J]. China Food Additives, 2022, 33(8): 222−234.]

[7] 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. [ZHOU Hang. Study on crystallization characteristics and application of rice bran wax oleogel[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.]

[8] SIVAKANTHAN S, FAWZIA S, MUNDREE S, et al. Optimization and characterization of new oleogels developed based on sesame oil and rice bran oil[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 142: 108839.

[9] ZHAO Muxin, RAO Jiajia, CHEN Bingcan. Effect of high oleic soybean oil oleogels on the properties of doughs and corresponding bakery products[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2022, 99(11): 1071−1083.

[10] PANG Min, KANG Shengmei, LIU Lin, et al. Physicochemical properties and cookie-making performance as fat replacer of wax-based rice bran oil oleogels[J]. Gels, 2022, 9(1): 13.

[11] HAN Wanjun, CHAI Xiuhang, LIU Yuanfa, et al. Crystal network structure and stability of beeswax-based oleogels with different polyunsaturated fatty acid oils[J]. Food Chemistry, 2022, 381: 131745.

[12] DOAN C D, van de WALLE D, DEWETTINCK K, et al. Evaluating the oil-gelling properties of natural waxes in rice bran oil: Rheological, thermal, and microstructural study[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2015, 92(6): 801−811.

[13] WIJARNPRECHA K, ARYUSUK K, SANTIWATTANA P, et al. Structure and rheology of oleogels made from rice bran wax and rice bran oil[J]. Food Research International, 2018, 112: 199−208.

[14] 朱小勇, 孟宗, 李进伟, 等. 凝胶剂种类对凝胶油物性及结晶形态的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(10): 37−43. [ZHU Xiaoyong, MENG Zong, LI Jinwei, et al. Effect of gels on physical properties crystal morphologies of organogel oils[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(10): 37−43.]

[15] LI Shiyi, ZHU Ling, WU Gangcheng, et al. Relationship between the microstructure and physical properties of emulsifier based oleogels and cookies quality[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131966.

[16] GAO Weifeng, YANG Guolong, ZHANG Dan, et al. Evaluation of high oleic sunflower oil oleogels with beeswax, beeswax-glyceryl monopalmitate, and beeswax-Span80 in cookie preparation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6198−6207.

[17] FROST K, KAMINSKI D, KIRWAN G, et al. Crystallinity and structure of starch using wide angle X-ray scattering[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3): 543−548.

[18] GHAN S Y, SIOW L F, TAN C P, et al. Influence of soya lecithin, sorbitan and glyceryl monostearate on physicochemical properties of organogels[J]. Food Biophysics, 2020, 15(3): 386−395.

[19] MENG Zong, GUO Ying, WANG Yong, et al. Oleogels from sodium stearoyl lactylate-based lamellar crystals: Structural characterization and bread application[J]. Food Chemistry, 2019, 292: 134−142.

[20] ANALYSIS A A M O. Method 44-15.02. Moisture-Air-Oven Methods[Z]. Cereals & Grains Association St. Paul, MN, USA. 2013.

[21] 周锦枫, 吴磊燕, 钟雅云, 等. 三种甘油酯对冷冻面团及其面包品质的对比分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 38−47,112. [ZHOU Jinfeng, WU Leiyan, ZHONG Yayun, et al. Comparative analysis of three glycerides on the quality of frozen dough and bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 38−47,112.]

［22］ TANISLAV A E, PUȘCAȘ A, PĂUCEAN A, et al. Evaluation of structural behavior in the process dynamics of oleogel-based tender dough products[J]. Gels, 2022, 8(5): 317.
［23］ 孟祥平, 栾广忠, 孙华幸, 等. 木聚糖酶对米糠面团特性及面包烘焙品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 190−195. ［MENG Xiangping, LUAN Guangzhong, SUN Huaxing, et al. Effects of xylanase on properties of dough and baking qualities of bread enriched with rice bran[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(16): 190−195.］
［24］ LEE J H, AKOH C C, LEE K T. Physical properties of trans-free bakery shortening produced by lipase-catalyzed interesterification[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2008, 85(1): 1−11.
［25］ 王菊花, 许佳敏, 佟祎鑫, 等. 米糠蜡添加量对亚麻籽油基油凝胶结构及性质的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(7): 17−22. ［WANG Juhua, XU Jiamin, TONG Yixin, et al. Effect of rice bran wax addition on structure and properties of linseed oil-based oleogel[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(7): 17−22.］
［26］ MATTICE K D, MARANGONI A G. Fat crystallization and structure in bakery, meat, and cheese systems[M]. Structure-Function Analysis of Edible Fats, 2019: 287−311.
［27］ SUN Hao, XU Jie, LU Xinzhu, et al. Development and characterization of monoglyceride oleogels prepared with crude and refined walnut oil[J]. LWT, 2022, 154: 112769.
［28］ LIU L Y, ACOSTA R I S, YANG J S, et al. Evaluation of oil-gelling properties and crystallization behavior of sorghum wax in fish oil[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125567.
［29］ LI Shiyi, ZHU Ling, LI Xiaojing, et al. Determination of characteristic evaluation indexes for novel cookies prepared with wax oleogels[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(12): 5544−5553.
［30］ PAREYT B, DELCOUR J A. The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: A review on sugar-snap cookies[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, 48(9): 824−839.
［31］ 孟宗, 李陆茵, 李兴伟, 等. 植物蜡及液态植物油构建油凝胶的物性研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 17−22. ［MENG Zong, LI Luyin, LI Xingwei, et al. Physical properties of oleogels structured by vegetable wax and liquid vegetable oil[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(11): 17−22.］
［32］ LI Jiaxi, GUO Ruihua, WANG Mengxun, et al. Development and characterization of compound oleogels based on monoglycerides and edible waxes[J]. ACS Food Science & Technology, 2022, 2(2): 302−314.
［33］ 姚云平, 宁灵, 于佳睿, 等. 乳化剂对米糠蜡凝胶油理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 184−190. ［YAO Yunping, NING Ling, YU Jiarui, et al. Effects of three emulsifiers on structure and properties of rice bran wax oleogel[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(11): 184−190.］
［34］ 陈小霞, 陈莹, 王永华, 等. 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[J]. 中国油脂, 2023, 48(12): 134−141. ［CHEN Xiaoxia, CHEN Ying, WANG Yonghua, et al. Physical properties of olive oil diacylglycerol oleate(O-DAGO)-based oleogel and its application in cookies[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(12): 134−141.］
［35］ HOLEY S A, SEKHAR K P C, MISHRA S S, et al. Effect of oil unsaturation and wax composition on stability, properties and food applicability of oleogels[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2021, 98(12): 1189−1203.
［36］ JUNG D, OH I, LEE J, et al. Utilization of butter and oleogel blends in sweet pan bread for saturated fat reduction: Dough rheology and baking performance[J]. LWT, 2020, 125: 109194.
［37］ ZHAO Muxin, LAN Yang, CUI Leqi, et al. Formation, characterization, and potential food application of rice bran wax oleogels: Expeller-pressed corn germ oil versus refined corn oil[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125704.
［38］ WANG Q, ESPERT M, SALVADOR A, et al. Shortening replacement by emulsion and foam template hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)-based oleogels in puff pastry dough. Rheological and texture properties[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100558.
［39］ DEMIRKESEN I, MERT B. Utilization of beeswax oleogel-shortening mixtures in gluten-free bakery products[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2019, 96(5): 545−554.