

熟化温度对棕榈基人造奶油质构、流变和结晶特性的影响

张智明^{1,2}, 张虹², 毕艳兰¹, 孙晓洋², 徐学兵^{*2}

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450052; 2. 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司, 上海 200137)

摘要:研究了熟化温度对棕榈油基人造奶油质构、流变特性和结晶特性的影响,主要包括对产品储藏及其温度波动过程中硬度、流变特性、即时固体脂肪质量分数、微观形态、热稳定性和晶型的影响,结果表明:熟化温度为 20 ℃ 的样品在储藏过程中出现后结晶现象,且其涂抹性最差;熟化温度为 30 ℃ 的样品,虽然涂抹性较好,但其硬度较小,温度波动 21 d 后发生起砂,且大量转化为 β 晶型;熟化温度为 25 ℃ 的样品具有合适的固体脂肪质量分数,完善的结晶网络,良好的硬度和涂抹性能,且其抵抗温度波动的能力较强,能够较长时间的维持 β' 晶型。研究也表明,稳定的熟化温度是很重要的,即便 5 ℃ 的差异也会造成产品性能的显著差异。

关键词: 熟化温度;质构;流变特性;结晶特性;人造奶油

中图分类号:TS 252.52 文献标志码:A 文章编号:1673—1689(2013)01—0105—07

Effect of Tempering Temperature on Texture, Rheological Property and Crystallization Behavior of Palm Oil-based Margarine

ZHANG Zhi-ming^{1,2}, ZHANG Hong², BI Yan-lan¹, SUN Xiao-yang², XU Xue-bing^{*2}

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China; 2. Wilmar (Shanghai) Biotechnology R&D Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: The effects of tempering temperature were evaluated on the physical behavior of palm oil-based margarine during various storage conditions. The physical properties were characterized based on hardness, rheological property, instant solid fat content, microstructure, thermal stability and polymorphic forms. The samples tempered at 20 ℃ had poor spreadability and post-hardening occurred during storage. Though the spreadability of the samples was best at 30 ℃; however, the samples were in general too soft with also poor thermal stability; while sandiness happened and the β form crystal became the mass crystallization forms after three weeks storage under temperature cycles. When the tempering temperature was 25 ℃, the samples had a proper solid fat content profile, hardness, and spreadability, with also a stable crystallization network, meanwhile the stability is better and the crystals mostly present as β' form under temperature cycles during storage. The study also indicates that the stable tempering temperature is critical. Slight temperature variation such as up to 5 ℃ can lead serious difference of the product properties.

Keywords: tempering temperature, texture, rheological property, crystallization behavior, margarine

收稿日期: 2012-05-02

* 通信作者: 徐学兵(1962—), 男, 山东郓城人, 教授, 主要从事食品、油脂和酶工程的研究。E-mail: xuxuebing@wilmar-intl.com

自 1869 年人造奶油问世以来, 以其优越的性能风靡全球。随着食品行业的飞速发展, 中西方文化交融程度的加深, 中国对人造奶油的需求量与日俱增。棕榈基油以其独特的性能优势和后反式酸时代主要替代方案之一成为人造奶油主要的原料油脂^[1]。人造奶油作为一种结晶产品, 其固体和结晶特性如固体脂肪质量分数(SFC)、同质多晶状态和微观形态极大地影响产品的功能特性和流变特性^[2], 而其流变特性与其食用感官品质和功能特性相关。Narine 等人总结了 50 年间关于晶体网络结构和宏观物理特性关系的研究, 发现脂肪体系的微观结构相比其他结晶行为(SFC、同质多晶)对宏观物理特性的影响更显著^[3]。Litwinenko 等人研究了冷却速率、过冷度和储藏时间对棕榈油基起酥油结晶行为、微观形态和流变特性的影响, 并建立了三者一定的联系^[4]。

人造奶油储藏过程中结晶特性的变化可导致硬度缺陷、油的离析和起砂等一系列品质问题^[5-6], 而影响结晶特性变化的因素主要有原料油组成、工艺条件和储藏条件。熟化是人造奶油生产的重要环节。熟化是指将已包装的人造奶油产品放在恒温室中静置 24~72 h^[7]。合适的熟化条件能有效改善产品塑性并提高产品在储藏期间合理温度波动下保持均一稠度的能力, 并有效改善人造奶油硬度缺陷、熔点升高、起砂和油的离析等一系列问题^[8]。但是, 目前研究对熟化过程中结晶的变化还存在很大的疑惑, 并缺少理论解释。作者将系统研究不同熟化温度对人造奶油的质构、流变特性和结晶特性的影响, 寻求棕榈油基人造奶油的最佳熟化温度, 为实际生产及研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要原料

全精炼棕榈硬质(PSt)和棕榈液油(POL):嘉里特种油脂(上海)有限公司提供, 脂肪酸组成见表 1; 蒸馏单甘脂($\geq 95\%$):南京同建食品科技有限公司产品; 大豆卵磷脂:秦皇岛金海食品工业有限公司产品; 柠檬酸:山东柠檬生化有限公司产品; 饮用水:可口可乐公司产品; 食盐:市售; 商品人造奶油:嘉里特种油脂(上海)有限公司产品。

1.2 主要仪器和设备

丹麦 G&A 公司人造奶油小试设备: 中国北京

微讯超技仪器技术有限公司产品; Bruker Minispec mq20 型脉冲核磁共振仪(P-NMR):德国 Bruker 公司产品; Physical MCR101 型流变仪:奥地利 Anton Paar 公司产品; E400POL 型偏振光显微镜(PLM):日本 Nikon 公司产品; DSC1.823° 型差示扫描量热仪(DSC):瑞士 Mettler-Toledo 公司产品; D8Advance 型 X-衍射仪:德国 Bruker 公司产品; KM760 型打蛋机:日本 KENWOOD 公司产品。

表 1 人造奶油原料油的脂肪酸组成

Table 1 Fatty acid composition of the feed oil of margarine

原料油	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	其它
PSt	0.14	1.16	61.94	5.52	24.97	5.32	0.95
POL	0.29	0.99	43.85	4.76	39.40	9.27	1.44

1.3 实验方法

1.3.1 人造奶油样品的制备 配方:83.2%棕榈液油和棕榈硬质(质量比 2:1), 质量分数 0.5%蒸馏单甘脂, 质量分数 0.3%卵磷脂, 质量分数 0.02%柠檬酸, 质量分数 13.98%饮用水和质量分数 2%盐。

工艺流程:乳化→急冷 1→急冷 2→捏合→熟化

工艺参数:乳化温度 60 °C、乳化搅拌速度 450 r/min、流量 50 L/h、液氮温度 -15 °C、急冷搅拌速度 300 r/min(两个急冷的液氮温度和搅拌速度一致)、捏合搅拌速度 200 r/min 和捏合出口温度 23.5 °C。

1.3.2 样品熟化及变温储藏 将 200 g 左右人造奶油样品装入 230 mL 左右的杯子中, 分别放置于 20、25、30 °C 的恒温箱中熟化, 在 0、1、3、7 d 取样检测。熟化 7 d 后, 将此样品进行温度循环波动实验, 即 25 °C 储藏 24 h, 5 °C 储藏 24 h, 共计储藏 21 d, 其样品在 7、14、21 d 取样检测。

1.3.3 硬度 采用质构仪, P6 探头。参数:测试前速度:1.00 mm/s; 测试中速度:2.00 mm/s; 测试后速度:2.00 mm/s; 探头感受到 5.0 g 力后下压 12.00 mm。每个样品测定 5 次, 取平均值作为最终硬度值。

1.3.4 流变特性 应变扫描:固定频率 1 Hz, 在 0.01%~100% 范围进行应变扫描以确定线性粘弹区(LVR)。LVR 是指在应变变化时, 样品的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 保持不变的区域。

频率扫描:固定应变在 LVR 内, 进行 1~5 Hz 的频率扫描以确定储能模量(G')、损耗模量(G'')、损耗角的正切值 ($\tan\delta = G''/G'$) 和复合模量 ($G^* =$

$\sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$)。 G' 代表样品的弹性性质, G'' 代表样品的粘性性质, $\tan\delta$ 则反映了整个体系粘性成分和弹性成分的相对强弱, 而体系的整体强度是由 G^* 确定的。

触变性测试: 在旋转模式下, 剪切速率按 1~50 (1/s), 50 (1/s), 50~1 (1/s) 程序段进行触变性测试, 确定静态屈服值 (τ_{SY})。

1.3.5 即时固体脂肪质量分数 用注射器将刚制出的人造奶油缓慢装入内径 0.8 cm 的固脂管中, 样品高度 4 cm, 确保样品内无气泡产生。将装好样品的固脂管分别放置于 20、25、30 °C 的恒温箱中储藏, 在 0、1、3、7 d 用核磁共振仪 (NMR) 测定其即时固体脂肪含量。每个样品测 2 次, 取平均值。

1.3.6 微观形态 采用偏振光显微镜 (PLM) 观察样品晶体的微观形态。首先将载玻片放在待测样品的恒温箱中保持 30 min, 使载玻片温度与样品温度一致。取适量样品于载玻片上压制成透明薄片, 利用偏振光显微镜观察, 显微镜放大倍数 10×10, 并利用随机图像处理软件进行处理。

1.3.7 X-射线衍射分析 将保存在恒温箱里的样品取出, 平铺于玻璃片上的圆孔内, 用 X-射线衍射仪测定。条件为 Cu 靶, 工作电压 40 kV, 电流 40 mA, 发射及防反射狭缝为 1.0 mm, 接受狭缝 0.1 mm, X 光管为陶瓷型, 光管功率 2.2 kW, 室温 25 °C 条件下, 扫描角度: $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$, 扫描速度为 2 度/min, 步长为 0.02°。在 4.15 Å 附近只出现一个强峰, 为 α 晶型; 在 4.20 Å 和 3.88 Å 附近出现两个强峰, 为 β' 晶型; 在 4.60 Å 附近出现一个非常强的峰, 为 β 晶型^[9]。

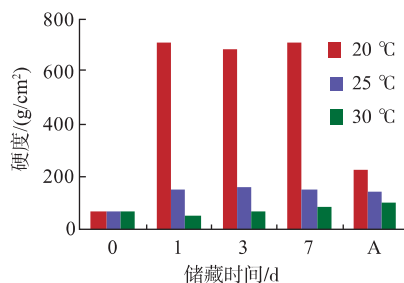
1.3.8 热稳定性 样品结晶热稳定性分析采用差示扫描量热法 (DSC)。将样品从恒温箱取出, 立即精确称量 3~8 mg, 放入专用铝盒内, 压紧密封, 进行检测。检测时以空铝盒做参比, 液氮为冷却介质。温度控制程序: 25 °C 稳定 5 min, 然后以 5 °C/min 的速率升温至 80 °C。

2 结果与讨论

2.1 熟化温度对硬度和即时固体脂肪含量的影响

人造奶油在低于灌装或包装温度熟化会造成产品可塑性变差或变硬的现象; 而在高于灌装或包装温度熟化, 产品的塑性和酪化性会得到改善。人

造奶油样品在 20、25、30 °C 3 个温度下熟化一周期间其硬度和即时固体脂肪质量分数的变化, 结果如图 1 和图 2 所示。



注: A 为 3 个熟化温度下熟化 7 d 后在 25 °C 下储藏 1 d 后的硬度

图 1 不同熟化温度下硬度的变化

Fig. 1 Change of hardness at different tempering temperature

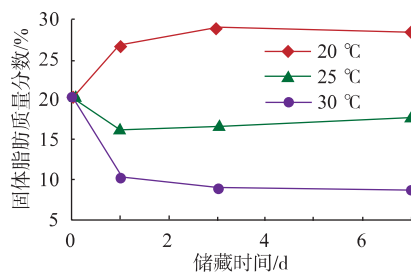


图 2 不同熟化温度下即时固体脂肪质量分数的变化

Fig. 2 Change of instant SFC at different tempering temperature

根据图 1 可得: 样品熟化期间, 其硬度在熟化第 1 d 的过程中也发生了较大变化。熟化温度为 20 °C 的样品硬度从 67.9 g/cm² 增加到 714.1 g/cm², 出现了明显的后结晶现象, 这可以从其即时固体脂肪质量分数的增加得到说明。后结晶现象是指产品在无捏合的情况下结晶固化^[6-7]。后结晶可能会造成产品硬度高于预期值、产品中存在液油、产品打发性下降和出现重新凝固的外观等品质问题, 因此后结晶现象是不希望发生的。熟化温度为 25 °C 的样品硬度增加到 155.9 g/cm², 而其即时固体脂肪质量分数却有少量降低。一般认为固体脂肪质量分数与硬度关联紧密, 产品加工中也常将固体脂肪质量分数作为一个评价人造奶油品质的指标, 但从上述结果可知利用固体脂肪质量分数并不能很好地预测人造奶油的硬度。Danthine 等人发现在混合油固体脂肪质量分数相同的情况下, 晶体网络结构和晶体

类型的不同会造成产品硬度的差异^[10]。熟化温度为 30 ℃ 的样品其硬度却降低到 57.8 g/cm², 且其即时固体脂肪质量分数也从 20.40% 下降 10.06%。此时产品过软, 无法保型, 会对产品的包装、运输以及储藏过程中的堆积造成不便; 而且其过低的固体脂肪质量分数也可能会使样品不能形成完善的晶体网络结构, 不足以包裹大量的液油, 有产生油的离析的风险。在 1~7 d 的熟化过程中, 不同熟化温度条件下的产品硬度虽有波动, 但变化不大。同时, 为比较 3 个熟化温度条件下样品在室温时的硬度, 将熟化

7 d 的样品统一转移至 25 ℃ 存放 1 d, 然后测其硬度。由低到高的 3 个熟化温度下样品的硬度分别为 232、149、107 g/cm²。相同条件下测定的 2 种商品人造奶油的硬度平均值为 130 g/cm²。可知熟化温度为 30 ℃ 的样品较软; 与熟化温度 20 ℃ 相比, 熟化温度为 25 ℃ 的样品的硬度较小, 且和商品人造奶油更为接近, 因此更容易加工。

2.2 熟化温度对流变特性的影响

利用流变仪检测分析人造奶油熟化 7 d 后样品的流变性能, 结果如表 2 所示。

表 2 不同熟化温度下熟化 7 d 后流变特性参数

Table 2 Rheological parameters after 7 days at different tempering temperature

温度/℃	LVR/%	τ_{SY} /Pa	G' /Pa	G'' /Pa	$\tan\delta$	G^* /Pa
20	0.08	3.82×10^3	1.42×10^5	4.87×10^4	0.34	15.01×10^4
25	0.07	2.57×10^3	0.41×10^5	1.21×10^4	0.30	4.27×10^4
30	0.10	1.60×10^3	0.37×10^5	1.08×10^4	0.29	3.85×10^4
商品人造奶油	0.07	2.12×10^3	0.51×10^5	1.96×10^4	0.38	5.46×10^4

根据表 2 可得: 所选熟化温度条件下人造奶油产品的 LVR 不大于 0.1%, 因此其内部结构较容易受到破坏。对比 G' 、 G'' 、 $\tan\delta$ 和 G^* 等流变参数, 随着熟化温度的升高, 除了熟化温度 25 ℃ 和 30 ℃ 下的 $\tan\delta$, 其他流变参数均有显著下降 ($P < 0.05$)。该结果说明熟化温度对样品的流变性质影响较大, 且随着熟化温度的升高, 样品的粘性成分所占相对比例和样品的整体机械加工强度降低。同时由于 3 个熟化温度下 $\tan\delta$ 均较小 ($\tan\delta < 1$), 这在一定程度上说明人造奶油仍是一种固体性质为主的粘弹性产品。 τ_{SY} 表示使样品流动的最小的力, τ_{SY} 越小, 样品越容易流动, 因此其涂抹性越好。但是 τ_{SY} 太小, 产品容易变形, 不足以保持产品的形状。实验结果显示随着熟化温度的升高其 τ_{SY} 逐渐减小, 可见熟化温度越高, 样品的涂抹性越好。但是从硬度的比较发现熟化温度为 30 ℃ 的样品太软, 不利于产品的储藏和运输。比较自制奶油与商品人造奶油的流变特性参数, 熟化温度为 25 ℃ 的样品与商品人造奶油较为相近, 因此两者具有相似的流变特性。 G' 是流变参数中较为灵敏的参数, 因此许多研究均利用 G' 的变化来衡量样品流变性质的改变。随着熟化温度的升高, G' 下降的百分比分别为 71% 和 10%, 而熟化 7 d 后的即时固体脂肪质量分数则分别为 26.87%、

16.25% 和 10.06%, 其下降的百分比则分别为 38% 和 52%。这表明 G' 和即时固体脂肪质量分数相关性并不高。这是由于样品流变特性的改变不仅取决于固体脂肪质量分数, 而且要受到晶体的类型、大小和晶体分布的影响^[3-4]。

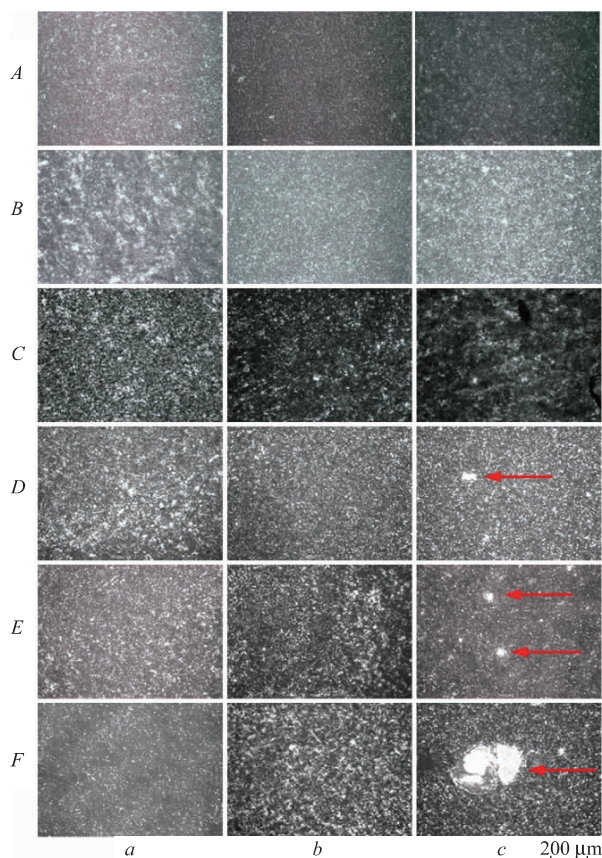
2.3 熟化温度对晶体微观形态的影响

食品的微观形态和组成决定其流变特性, 而这三者又共同影响着食品的质构特性。图 3 显示利用偏振光显微镜检测不同熟化温度下人造奶油样品微观形态的变化。

熟化 1 d 时, 3 个熟化温度下人造奶油产品的晶体颗粒均较小, 且分布均匀, 但是随着熟化温度的升高, 晶体网络的致密程度有所降低; 熟化 3 d 时, 熟化温度为 20 ℃ 的样品其晶体颗粒明显增大, 且已出现晶体的聚集现象, 而熟化温度为 25 ℃ 和 30 ℃ 下的样品结晶网络逐渐完善; 熟化 7 d 时, 熟化温度为 20 ℃ 的样品具有更加紧凑的晶体骨架, 即晶体颗粒之间具有更强的相互作用力, 这从该条件下 G^* 相对较大可得到印证。熟化温度为 25 ℃ 的样品其晶体颗粒尺寸有所增加使得晶体数目减少, 晶体颗粒间的结晶链有少量融化现象, 结晶网络相对疏松, 样品塑性有所改善。而对于熟化温度为 30 ℃ 的样品, 由于温度过高, 其低熔点组份出现大量融

化,结晶网络出现大量空隙,填充度明显降低。综上所述

可知,随着温度的升高,晶体颗粒间的链接较易融化,使得结晶网络疏松多孔,进而影响人造奶油样品的硬度。



注:a、b和c分别代表熟化温度为20、25、30℃;A、B和C分别表示储藏1、3、7d;对熟化7d后的样品进行温度波动,波动周期为25℃储藏24h,5℃储藏24h,D、E和F依次分别表示在此温度波动条件下储藏7、14、21d。

图3 不同熟化温度储藏及温度波动情况下微观形态的变化
Fig. 3 Change of microstructure during various storage conditions

有研究发现温度波动能够促进晶型的转化的作用,而且晶型的转化是诱使人造奶油起砂的主要原因^[11]。为验证3个熟化温度下样品的晶体稳定性,对熟化7d后的样品进行温度波动处理,波动周期为25℃储藏24h,5℃储藏24h,依次交替,观察人造奶油样品的起砂情况。根据图3可得:熟化温度为20℃的样品无起砂现象,但在温度波动过程其结晶网络遭受了一定程度的破坏;熟化温度为30℃的样品温度波动7d时出现了60 μm左右的晶

体颗粒,温度波动21d时出现了大于300 μm的晶体颗粒,而肉眼能够观察到的最小颗粒大小为100 μm左右^[12],出现明显的起砂现象;而熟化温度为25℃的样品在温度波动过程中结晶网络无明显变化。

综上可推断:较低的熟化温度会造成人造奶油样品的后结晶,而后结晶的样品由于其结晶的无序性使其抵抗温度波动的能力较小;较高的熟化温度下样品的固体脂肪质量分数较低,结晶量较少,不能形成完善的结晶网络,温度波动下容易起砂;合适熟化温度能够使产品具有良好的抵抗温度波动的能力。

2.4 熟化温度对晶型的影响

将熟化7d后的样品进行温度波动,波动周期为25℃储藏24h,5℃储藏24h。利用X-衍射检测分析不同熟化条件下的人造奶油样品经历温度波动21d后的晶型,结果如图4所示。

根据图4可知:熟化条件为20℃和25℃的产品在温度波动21d以后呈现 β 和 β' 晶型共存的状态,但是 β' 晶型的含量远大于 β 晶型的含量;熟化条件为30℃的样品在4.6 Å附近出现一个特别明显的强峰,表明这种产品是以 β 晶型为主,因此在一定程度上印证了晶型的转化是导致熟化温度为30℃样品起砂的主要原因。对于人造奶油产品而言, β' 晶型是理想的形态,由于 β' 晶型较小,所形成的结晶网络精细,包裹液油能力强,使产品表面光滑,质构柔软;而 β 晶型紧密粗大,在储藏过程中会不断增大,容易形成砂粒,也会导致人造奶油起泡性和打发性变差。综上可知棕榈油基的人造奶油不能在30℃及其以上的温度下熟化,过高的温度会导致产品晶型较早发生转化,造成一系列品质和功能特性的问题。

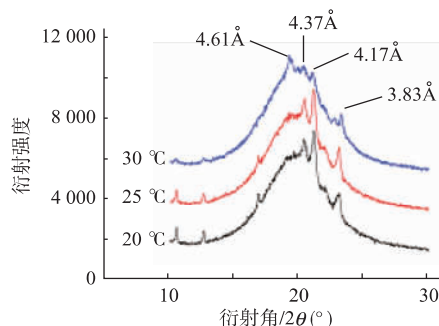
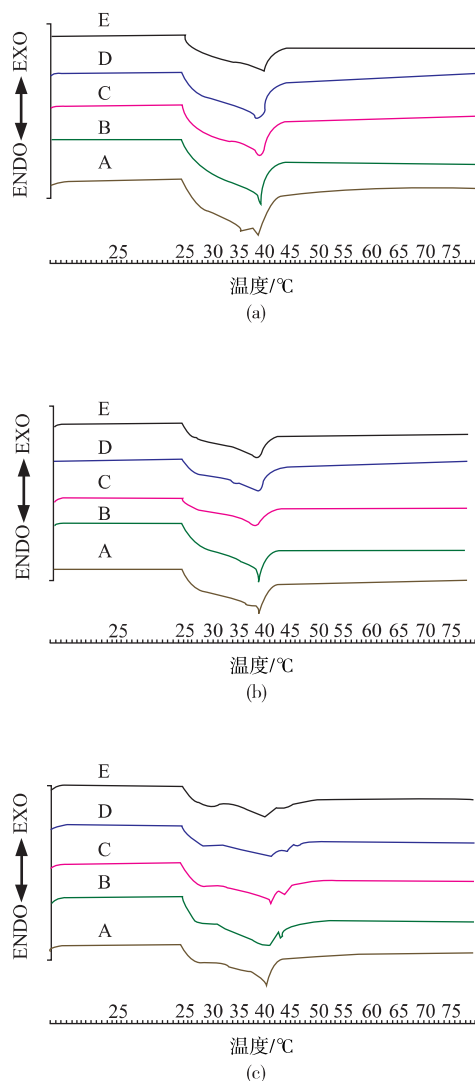


图4 不同熟化温度下样品温度波动21d后的X-衍射谱图
Fig. 4 X-RD spectra of samples after 21 days under temperature fluctuation cycle

2.5 熟化温度对晶体热稳定性的影响

利用差示扫描量热仪检测样品储藏中熔化曲线峰型和峰值的变化在一定程度上可以反映人造奶油样品晶体热稳定性的差异,熔化曲线趋于平缓 and 峰值的升高会带来人造奶油产品口感和口感的变差。检测分析不同熟化温度下人造奶油样品储藏过程中晶体热稳定性的变化,结果如图 5 和表 3 所示。



注:(a)(b)和(c)分别代表熟化温度为 20、25、30 °C; A 和 B 分别表示储藏 1 d、7 d; 对熟化 7 d 后的样品进行温度波动,波动周期为 25 °C 储藏 24 h, 5 °C 储藏 24 h, C、D 和 E 依次分别表示在此温度波动条件下储藏 7、14、21 d。

图 5 不同熟化温度下储藏及温度波动过程中样品热稳定性的变化

Fig. 5 Change of Thermal stability during various storage conditions

表 3 不同熟化温度储藏及温度波动过程中样品峰值的变化

Table 3 Change of Peak temperature during various storage conditions

储藏时间	a		b	c	
A	35.91	39.07	39.74	40.93	—
B	—	39.39	39.54	41.01	43.52
C	—	39.25	38.86	41.60	44.11
D	—	38.93	39.36	41.78	44.71
E	—	40.10	39.35	40.45	44.13

注:—表示此处无峰,其他注释如图 5。

从图 5(a)和表 3(a)可知:对比曲线 B 与曲线 A,较低温度的融化峰消失,这可能是由于后结晶组份的结构不稳定使得部分晶型发生转化造成的,但较高温度的峰值只增加了 0.32 °C,不会对融化特性产生较大的影响;对比曲线 B、曲线 C、曲线 D 和曲线 E,随着温度波动时间的延长,熔化曲线变的平缓,曲线 E 的峰值比曲线 B 增加了 0.71 °C,这可能是由于温度波动造成结晶程度不同或者少量晶型的转变造成的。从图 5(b)和表 3(b)可知:熟化 7 d 后样品的峰值变化不大,虽然温度波动后峰型变的相对平缓。图 5(c)和表 3(c)显示:相对于曲线 A,其他熔化曲线发生了明显变化,从熟化 7 d 开始,熔化曲线在 44 °C 附近出现一个明显的肩峰,样品熔点升高。从 X-衍射的结果可以得出造成这种现象的主要原因可能是该温度下样品大量的结晶从 β' 晶型转化为 β 晶型。综上对比 3 个熟化温度下人造奶油样品的热稳定性可知:熟化温度为 25 °C 的样品相对较为稳定,熟化温度为 20 °C 和 30 °C 的样品的晶体热稳定性较差。

3 结 语

通过研究分析棕榈油基人造奶油在不同熟化条件下硬度、流变特性、即时固体脂肪质量分数、微观形态、热稳定性和晶型转化发现:熟化温度为 20 °C 的人造奶油样品具有相对较好的热稳定性,且晶型以 β' 为主,但其样品即时固体脂肪质量分数较大(大于 25%),微观形态致密,出现明显的后硬现象,涂抹性较差;熟化温度为 30 °C 的样品抹性较好,但其即时固体脂肪质量分数太小(小于 10%),不能形成完善的结晶网络,使得硬度较小而不能有效保持

产品形状,且在温度波动时出现明显的起砂现象,热稳定性较差,晶型转化相对明显;熟化温度为 25℃的样品具有合适的即时固体脂肪含量、完善的结晶网络、适当的硬度和与市售高级人造奶油相似的流变特性,且其抵抗温度波动的能力较强,能够较

长时间的保持 β' 晶型,是棕榈油基人造奶油较为合适的熟化温度。研究也表明,稳定的熟化温度是很重要的,即便 5℃的差异也会造成产品性能的显著差异。

参考文献:

- [1] 丁福琪,刘恩礼,张颖.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.
DING Fu-qi,LIU En-li,ZHANG Ying. The research of margarine and shortening based on palm oil[J]. **China Oils and Fats**, 1997,22(2):3-6.(in Chinese)
- [2] LIU Y F,MENG Z,ZHANG F Q,et al. Influence of lipid composition,crystallization behavior and microstructure on hardness of palm oil-based margarines[J]. **European Food Research and Technology**,2010,230:759-767.
- [3] Narine S S,Marangoni A G. Relating structure of fat crystal networks to mechanical properties;a review[J]. **Food Research International**,1999,32:227-248.
- [4] Litwinenko J W,Rojas A M,Gerschenson L N,et al. Relationship between crystallization behavior,microstructure,and mechanical properties in a palm oil-based shortening[J]. **Journal of American Oil Chemists' Society**,2002,79:647-654.
- [5] Sato K,Ueno S. Crystallization,transformation and microstructures of polymorphic fats in colloidal dispersion states[J]. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**,2011,16:384-390.
- [6] 唐年初,王兴国.人造奶油常见缺陷及对策[J].西部粮油科技,2000,25(5):37-39.
TANG Nian-chu,WANG Xing-guo. Often having faults and countermeasures of margarine[J]. **China Western Cereals & Oils Technology**,2000,25(5):37-39.(in Chinese)
- [7] 王兴国.油料科学原理[M].北京:中国轻工业出版社,2011.
- [8] 张阜青.棕榈油基人造奶油品质缺陷及改善[D].无锡:江南大学,2009.
- [9] Souza V D,DeMan J M,DeMan L. Short spacings and polymorphic forms of natural and commercial solid fat;a review[J]. **Journal of American Oil Chemists' Society**,1990,79:647-654.
- [10] Braipson-Danthne S,Deroanne C. Influence of SFC,microstructure and polymorphism on texture (hardness) of binary blends of fats involved in the preparation of industrial shortenings[J]. **Food Research international**,2004,37(10):941-948.
- [11] Tanaka L,Miura S,Yoshioka T. Formation of granular crystals in margarine with excess amount of palm oil[J]. **Journal of American Oil Chemists' Society**,2007,84:421-426.
- [12] Tanaka L,Tanaka K,Yamato S,et al. Microbeam X-ray diffraction study of granular crystals formed in water-in-oil emulsion[J]. **Food Biophysics**,2009,4:331-339.