

单棕榈酸山梨糖醇酯对塑型脂肪热性质及机械性能的影响

刘丽艳¹, 李琳², 李冰¹, 万力婷¹, 毛琳璐¹, 焦文娟¹, 张霞¹

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640)

(2. 东莞理工学院, 广东东莞 523000)

摘要: 本研究以棕榈硬脂为基料油, 添加 1.0%、2.0%、4.0%(质量比)的单棕榈酸山梨糖醇酯(SMP), 考察不同浓度 SMP 的加入对混合油脂固体脂肪含量和热力学性质的影响, 并模拟起酥油工业制备过程, 考察不同 SMP 添加量对模型起酥油的质构及流变特性的影响, 为工业生产中提高产品品质提供指导。结果表明: SMP 的加入起到了稳定混合油脂晶体结构的作用, 随着温度升高及 SMP 浓度的增加, 稳定晶体结构的作用越显著, 当温度达到 33.3 °C 时, 加入 4% SMP 的混合油脂比棕榈硬脂的固体脂肪含量提高了 1.65%。在降温过程中, SMP 的加入缩短了混合油脂的结晶诱导时间, 1%、2%、4% SMP 的加入均可使棕榈硬脂的结晶起始温度提高约 5 °C。加入 2%、4% SMP 的模型起酥油样品的质构特性及流变特性变化基本一致, 加入 2% SMP 的模型起酥油硬度和弹性模量比未加入 SMP 的模型起酥油分别提高了 30%和 15%。从产品品质及生产成本考虑, 加入 2% SMP 即缩短结晶诱导时间, 又有效提高了产品性能。

关键词: 单棕榈酸山梨糖醇酯; 塑型脂肪; 固体脂肪含量; 热力学; 硬度; 流变

文章编号: 1673-9078(2019)03-52-57

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.3.009

Effect of Sorbitan Monopalmitate Addition on Thermal and Mechanical Properties of Plastic Fats

LIU Li-yan¹, LI Lin², LI Bing¹, WAN Li-ting¹, MAO Lin-lu¹, JIAO Wen-juan¹, ZHANG Xia¹

(1.South China University of Technology, School of Food Science and Engineering, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China)(2.Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, China)

Abstract: The effects of sorbitan monopalmitate (SMP, 1.0%, 2.0%, 4.0%) on solid fat content and thermal crystallization behavior of palm stearin (PS) were investigated. A PS-based shortening was prepared under the simulating industrial process parameters. The effects of SMP on texture and rheological properties of the shortening samples were studied. The results showed that SMP played a role in stabilizing the crystal structure of the mixture of PS and SMP. With the increase of temperature and concentration of SMP, the stabilization of crystal structure became more significant. At the temperature of 33.3 °C, the solid fat content of PS and 4% SMP was 1.65% higher than that of PS. In the cooling process, the addition of SMP shortened the induction time of crystallization of PS and SMP. The addition of 1%, 2% and 4% SMP could increase the onset crystallization temperature of PS and SMP by about 5 °C. The texture and rheological properties of the shortening samples with 2% and 4% SMP were basically the same. The hardness and modulus of elasticity of the shortening samples with 2% SMP were 30% and 15% higher than those without SMP respectively. Considering the product quality and production cost, adding 2% SMP can shorten the crystallization induction time and effectively improve the product performance.

Key words: sorbitan monopalmitate; plastic fats; SFC; thermodynamic; hardness; rheology

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1501214; 31461660; 31871758); 国家重点研发计划课题 (2016YFD0400203); 广州市珠江科技新星专项资助 (201806010144)

作者简介: 刘丽艳 (1981-), 女, 实验师, 博士在读, 研究方向: 油脂化学与营养

通讯作者: 张霞 (1985-), 女, 助理研究员, 研究方向: 油脂化学与营养

随着国家经济及食品工业的发展以及人均消费水平的提高, 塑性脂肪作为现代食品工业中新型食用油脂制品的需求愈来愈大, 对产品的质量要求也愈来愈高。室温下呈固态的由固体脂和液体油两部分均匀融合并经一定加工而成的脂肪称为塑性脂肪, 如牛油、棕榈油、乳脂和椰子油等。目前市场上的塑性脂肪有很多种类, 已经商业化的有起酥油、人造奶油和黄油

等塑性脂肪产品。起酥油是在如今的食物行业中发挥重要作用的一类塑型脂肪,起酥油产品一般不用于直接食用,但在烘焙、煎炸和糕点类食物中有着广泛应用^[1]。棕榈油因其产量大、价格低、塑性范围大且不含反式酸,在起酥油生产中需求量逐年增大^[2-4]。但作为起酥油的基料油,棕榈硬脂存在一些缺陷,体现在生产过程中结晶速度慢,在储藏过程中由于重结晶现象,易引起油脂起砂而影响产品质量^[5,6]。目前工业上改善棕榈硬脂作为基料油存在的缺陷,主要通过添加乳化剂等。食物生产中常见的乳化剂有单脂肪酸甘油酯、山梨糖醇酯、大豆磷脂等,其中单脂肪酸甘油酯的用量最大。但工业应用乳化剂时,对乳化剂的种类及浓度的选择主要基于经验,对乳化剂改善棕榈硬脂物性的机理并无深入研究。本文选择棕榈硬脂为基料油,选取工业上常用的乳化剂单棕榈酸山梨糖醇酯(Sorbitan Monopalmitate, SMP)为对象,在棕榈硬脂中分别添加不同浓度(m/m , 0%、1%、2%、4%)的SMP,考察SMP对棕榈硬脂固体脂肪含量和热性质的影响,模拟工业制备过程,制备模型起酥油样品,探究在制备过程中SMP对起酥油宏观性能的影响规律,为SMP在起酥油的工业生产应用提供理论指导。

1 材料与办法

1.1 实验材料

棕榈硬脂:深圳精益油脂有限公司;单棕榈酸山梨糖醇酯>98%,阿达玛斯试剂公司。

1.2 仪器

Minispec 120 脉冲核磁共振仪,德国 Bruker 公司;TA.XT-Plus 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;Rheostress 600 流变仪,德国 HAKEE 公司;DC-3006 低温恒温水浴循环器,中国宁波新芝仪器厂;BS224S 电子分析天平,德国 Sartorius 公司。

1.3 办法

1.3.1 模型起酥油的实验室制备

本研究中使用的模型起酥油是通过在实验室中模拟实际生产过程得到的。起酥油制备过程模拟以下几个步骤:融化、急冷、捏合、熟化^[7]。以棕榈硬脂为基料油,分别添加 0%、1%、2%、4% (质量百分比)的SMP,将混合物在 80 °C 条件下加热搅拌 30 min,使样品充分融化并混合均匀,将融化搅拌好的样品迅速放到-18 °C 条件下保存 30 min,最后将样品转移到 25±1 °C 条件保存 17 h,得到所需模型起酥油样品。

1.3.2 理化指标

熔点的测定,采用 AOCS CC3 -25 办法测定油脂的上升熔点;碘价的测定,采用 GB/T 5532-2008 办法;酸价,采用 GB/T 5530-2005 办法。

1.3.3 固体脂肪含量测定

采用脉冲核磁共振仪(pNMR)测定油脂样品结晶过程中的固体脂肪含量(SFC)^[8]。SFC 测量时取一定量的棕榈原料油,分别添加 0%、1%、2%、4% (质量百分比)的SMP,在 80 °C 条件下加热搅拌 30 min,使样品充分融化并混合均匀后倒入 pNMR 专用玻璃管中,在 0 °C 的恒温槽中放置 90 min,测量其 SFC,再逐渐升温至 5 °C、10 °C、21.1 °C、26.7 °C、33.3 °C、40 °C 和 45 °C,在各个温度点下保持 30 min,再测量各温度下的 SFC 值,记录相应数据^[9]。

1.3.4 热性质分析

采用 Q-100 DSC 分析加入了 0%、1%、2%、4% (质量百分比)的SMP的混合物的结晶行为。用 DSC 专用液体铝盘称取约 6 mg 棕榈硬脂与 SMP 混合物,同时用空的铝盒作为对照。在室温条件下,以 10 °C/min 加热到 80 °C,平衡 10 min;再以 5 °C/min 降温到-40 °C,平衡 10 min,测得结晶曲线,平行测量三次。

1.3.5 硬度

本研究中采用质构仪来测定模型起酥油样品的硬度。对自制的起酥油样品在 25 °C 的环境温度下进行起酥油硬度的测定,同一样品采用均匀取点的方法进行多次测量,最终结果取其平均值。

质构仪测量条件:采用的探头为 P6,探测速度为 2 mm/s,探测深度为 10 mm,每个样品重复测定 5 次,结果取其平均值。

1.3.6 流变性质

本课题使用 Hakee 流变仪对模型起酥油样品的线性粘弹性区域进行测定,测试使用 PP 35Ti 转子,测试温度在 25 °C 的环境温度下,测试频率 1 Hz,扫描压力的变化范围为从 20 Pa 到 23000 Pa,使用仪器自带的软件计算弹性模量 $G^{[10]}$ 。每个起酥油样品测定三次,取平均值。

1.3.7 统计分析

使用 SPSS 软件进行方差分析, $p<0.05$ 时表明存在显著性差异, $p<0.01$ 时表明差异非常显著。

2 结果与讨论

2.1 基料油的基本理化指标

为了更好的研究温度变化条件下,SMP 对棕榈硬脂结晶结构及应用性能的影响,首先必须对实验选取

的基料油进行基本的物理参数及固体脂肪含量检验，以便为下文研究其热性质和模型起酥油的宏观物理性能变化提供参考。

表 1 棕榈硬脂的基本物理性质

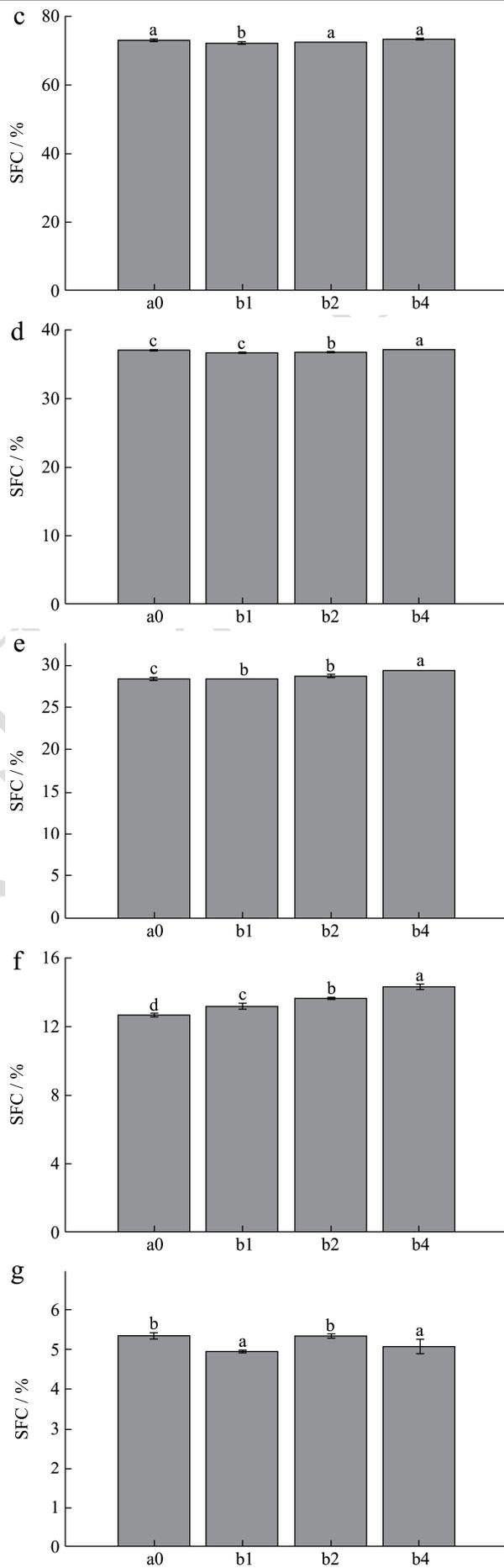
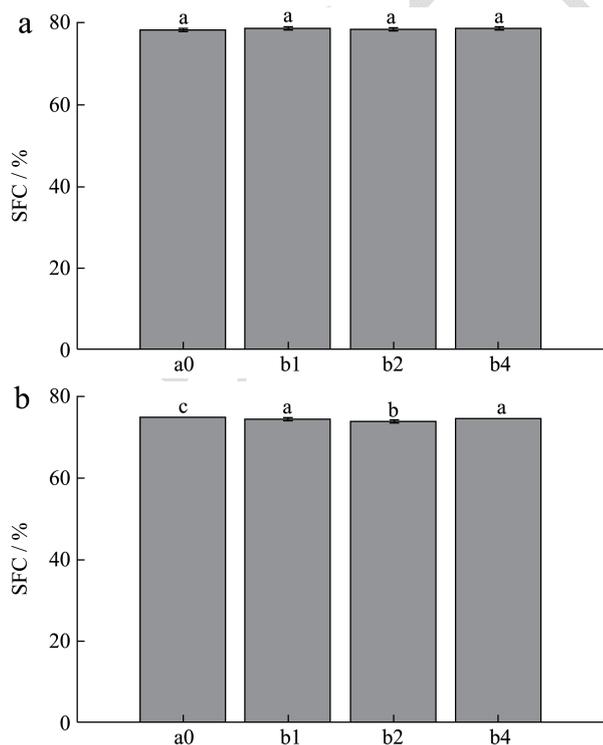
Table 1 The basic physical properties of palm stearin

熔点/°C	碘值/(g I/100 g)	酸价/(mg/g)
43.06±0.65	45.50±0.28	0.17±0.01

一般而言，油脂的熔点与油脂中的甘油三酯的组成有很大关系，若油脂中的甘油三酯的组成以高熔点的组分为主，油脂的熔点则会较高。该棕榈硬脂熔点为 43.06 °C，说明高熔点的饱和脂肪酸含量较多。碘值表示脂肪的不饱和程度。酸价是表示脂肪体系中游离脂肪酸的含量，酸价越高，说明脂肪中的游离脂肪酸含量越高，品质较好。该棕榈硬脂的酸价为 0.17 mg/g 表明所用油脂新鲜度好。

2.2 SMP 对棕榈硬脂固体脂肪含量的影响

SFC 目前被生产起酥油、人造奶油、黄油等脂肪产品的厂家作为控制质量的重要对照指标。对于塑型脂肪产品而言，根据 SFC 值可以判断产品的许多物理特性。例如，塑型脂肪要求在冰箱温度下尽可能地具有可塑性，而在室温下和适当的时间内能保持其外形及不析出油，这些性质与其在不同温度下 SFC 值有关。在不同的温度下，专用油脂具有不同的 SFC 值，而 SFC 值与脂肪晶体类型、结晶速率及预热过程有密切关系^[1]。在不同温度下，测定 SMP 不同添加量的油脂的 SFC 值，结果如图 1 所示。



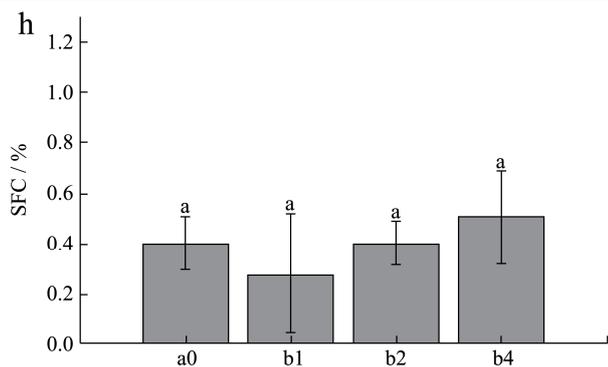


图 1 SMP 与棕榈硬脂混合油在不同温度下的 SFC 值

Fig.1 SFC value (%) of PS and the mixture of PS with SMP at different temperatures

注: a: 0 °C; b: 5 °C; c: 10 °C; d: 21.1 °C; e: 26.7 °C; f: 33.3 °C; g: 40 °C; h: 45 °C。显著性差异由小写字母 a、b、c、d 表示 ($p < 0.05$)。

如图 1 所示, 棕榈硬脂及其与不同浓度 SMP 混合物的 SFC 随着温度的升高而降低, SMP 对模型起酥油样品 SFC 的影响在较高的温度下体现更明显。当温度为 0 °C 时, 各样品间的 SFC 无差异, 说明此时较大的过冷度对固体脂肪含量起主导作用。当温度在 21.1 °C~33.3 °C 时, 乳化剂的浓度对模型起酥油 SFC 值影响较大 ($p < 0.05$)。在 21.1 °C 时, 当 SMP 浓度大于 1% 时, 模型起酥油 SFC 值随 SMP 浓度的增加而增加 ($p < 0.05$)。而 1% SMP 的添加对其 SFC 无显著影响 ($p > 0.05$), 表明在此温度下, 低浓度的 SMP (1%) 对模型起酥油的结晶总量没有显著性改变。而当温度达到 33.3 °C 时, 模型起酥油 SFC 随着 SMP 浓度的增加而增大 ($p < 0.05$), 说明 SMP 在混合油脂升温的过程中起到了稳定晶体结构的作用。当温度超过 33.3 °C 时, 起酥油快速融化, 固体脂肪含量小于 12%, 基本不具有塑性脂肪的应用价值。

2.3 SMP 对棕榈硬脂热性质的影响

塑性脂肪的结晶热性质是由其组成成分中的甘油三酯的性质决定的^[12]。相转变所发生的起始温度、峰温度等可以反映组分的结晶情况^[13,14]。因此, 采用 DSC

对加入了 0、1%、2%、4% SMP 的棕榈硬脂样品以 5 °C/min 的降温速率从 80 °C 降温到 -40 °C 过程的结晶曲线进行测定, 通过分析结晶起始温度及焓变, 研究 SMP 对棕榈硬脂热性质的影响。

由图 2 和表 2 看出, 棕榈硬脂及其与 SMP (质量比 1%、2%、4%) 混合样品在 5 °C/min 的降温过程中, 出现两个主要放热峰, 峰 A 出现在 33 °C 到 20 °C 之间, 为高熔点的甘油三酯, 峰 B 出现在 12 °C 到 -5 °C 之间, 为低熔点的甘油三酯。由图 2 可见, SMP 的加入使得峰 A 右移, 而对峰 B 的影响较小说明 SMP 的加入显著提高了棕榈硬脂中高熔点部分甘油三酯的结晶起始温度, 例如, 加入了 1% SMP 的棕榈硬脂样品结晶起始温度为 30.33 °C, 结晶热焓为 13.87 J/g, 未加入 SMP 的棕榈硬脂的结晶起始温度为 25.24 °C, 结晶热焓为 13.87 J/g, 结晶起始温度提高了 5.09 °C, 结晶热焓降低了 1.28 J/g, 随 SMP 浓度增加, 棕榈硬脂高熔点部分结晶初始温度无显著性差异 ($p > 0.05$)。Cerdeira 指出乳化剂影响油脂结晶的方式有两种, 一种是乳化剂作为异相晶核, 通过杂质催化作用加速成核, 另一种是和油脂共同结晶, 当与基料油中主要基团相似时, 加快结晶速度, 不相似时则延缓结晶^[15]。推测 SMP 中的脂肪酸成分与棕榈硬脂基料油中的主要脂肪酸相同, 所以 SMP 与棕榈硬脂共同结晶, 加速结晶速度。

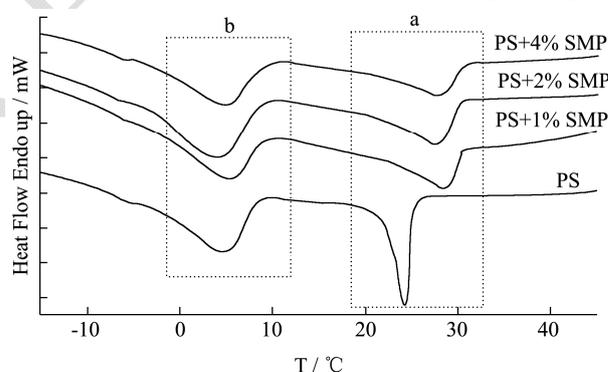


图 2 PS 及其与 SMP (质量比 1%、2%、4%) 混合物以 5 °C/min 的速率从 80 °C 至 -40 °C 的 DSC 曲线

Fig.2 DSC thermograms of the cooling of PS and its mixtures with SMP (m/m, 1%, 2%, 4%) from 80 °C to -40 °C at 5 °C/min

表 2 棕榈硬脂及其与 SMP (质量比 1%、2%、4%) 混合物结晶曲线起始温度及焓值变化

Table 2 Onset temperature (T_{onset}) and enthalpy variation (ΔH_c) of crystallization curves for PS and its mixtures with SMP (m/m, 1%, 2%, 4%) from 80 °C to -40 °C at 5 °C/min

样品	峰 B		峰 A	
	$T_{onset}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J/g})$	$T_{onset}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J/g})$
PS	7.75±0.25	21.80±0.46	25.24±0.11	15.15±0.19
PS+1%SMP	8.54±0.47	28.48±0.37	30.33±0.24	13.87±0.42
PS+2%SMP	7.89±0.23	23.08±0.41	30.09±0.36	13.67±0.31
PS+4%SMP	7.85±0.31	24.78±0.39	30.45±0.14	19.08±0.64

2.4 SMP 对模型起酥油样品硬度的影响

起酥油产品的功能特性及操作性能主要体现在其机械性能上,包括产品的质构特性及流变特性^[16]。目前,主要通过产品的硬度来对其质构特性进行表征,通过产品的粘弹性模量来体现其流变特性^[17]。硬度指产品抗大形变的能力,目前一般采用穿刺法对其进行测量,是体现产品打发性、起酥性、成型能力的一个重要性质^[18]。在塑性脂肪中,影响产品硬度的因素主要包括 SFC、晶体晶型、结晶网络等^[19-21]。本文以棕榈硬脂作为基料油,添加 0%、1%、2%、4% SMP,经过急冷捏合熟化等过程模拟工业生产起酥油,考察添加不同添加量 SMP 对模型起酥油样品机械性能的影响,其中模型起酥油在 25 °C 下的硬度见图 3。

结果表明,未加入 SMP 的模型起酥油的硬度为 147.80 g,加入 1% SMP 的模型起酥油硬度为 203.67 g,加入了 SMP 的模型起酥油的硬度明显大于没有加 SMP 的模型起酥油 ($p < 0.05$),而随着 SMP 浓度的增大,硬度值没有显著性差别 ($p > 0.05$)。据前文固体脂肪含量研究得知,在 26.7 °C 时,加入 2%、4% SMP 的混合油脂的固体脂肪含量显著大于未加 SMP 的棕榈硬脂 ($p < 0.05$)。此结果与已有研究一致,即塑性脂肪的 SFC 对其硬度有一定的影响,但是,并不完全相关,硬度的大小也与其晶型或微观结构有关。Sabine^[7]等研究了氢化棕榈油及豆油分别与低芥酸菜籽油混合物,发现,即使混合油样的 SFC 值相同,样品最终的硬度并不相同,可能与晶体类型及结晶网络间的差异有关。

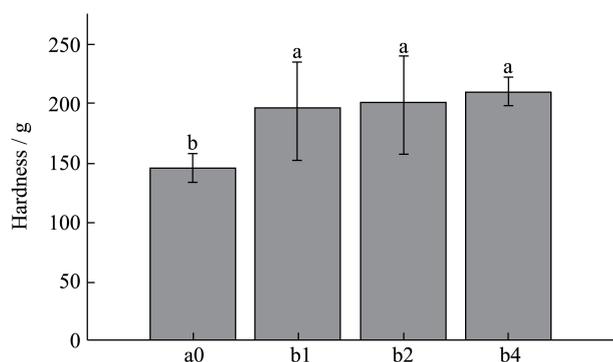


图3 模型起酥油在 25 °C 下的硬度

Fig.3 Hardness of model shortenings at 25 °C

注: a0: PS; b1: PS+1% SMP; b2: PS+2% SMP; b4: PS+4% SMP。

2.5 SMP 对模型起酥油样品流变性能的影响

塑性脂肪产品可以被看作是一类软材料物质,流变学性质对塑性脂肪来说非常重要,将影响产品的涂

抹性、可塑性等^[22,23]。弹性模量表示体系储存能量的能力,在一定程度上反应塑性脂肪体系的聚集形态,塑型脂肪样品的弹性模量与其 SFC 及结晶网络结构有关^[23]。流变性质的测定采用 Hakke 流变仪,在小形变的前提下对添加不同浓度 SMP 的模型起酥油样品的线性粘弹性区域进行测定,弹性模量 G' 可以通过样品的线性粘弹性区域计算获得^[18],在 25 °C 下模型起酥油的弹性模量见图 4。

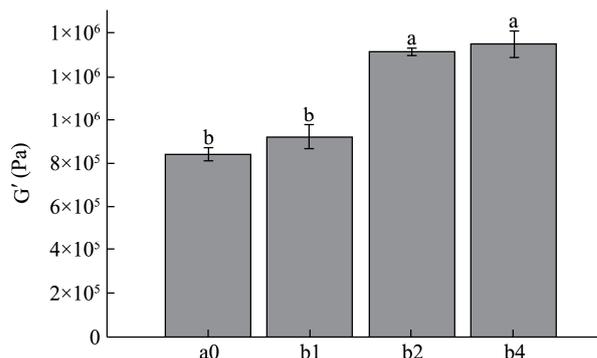


图4 模型起酥油在 25 °C 下的弹性模量

Fig.4 Elasticity modulus (G') of model shortenings at 25 °C

注: a0: PS; b1: PS+1% SMP; b2: PS+2% SMP; b4: PS+4% SMP。

由图 4 可见,比未加入 SMP 或加入 1% SMP 的模型起酥油的弹性模量没有显著性差异 ($p > 0.05$),分别为 8.33 Pa 和 9.17 Pa。当 SMP 浓度大于 1% 时,模型起酥油弹性模量显著增大 ($p < 0.05$),添加 2% 和 4% SMP 的模型起酥油的弹性模量分别达到 13.09 Pa 和 13.48 Pa,这与硬度变化保持一致。如前所述,弹性模量反应塑性脂肪体系的聚集形态,与体系的微观网络结构相关,推测 SMP 加入到棕榈硬脂基起酥油的结晶网络结构中,且含有 2% 或 4% 的 SMP 的模型起酥油改变了纯棕榈硬脂中甘油三酯分子的聚集状态,从而改变了模型起酥油的结晶网络结构。

3 结论

SMP 的加入能够改变棕榈硬脂的固体脂肪含量,随着温度升高,SMP 的加入起到了稳定塑型脂肪晶体结构的作用,当温度达到 21 °C 以上时,稳定晶体结构的作用随着 SMP 浓度的增加而更加显著。在降温过程中,SMP 的加入显著缩短了油脂结晶的诱导时间,加入 1%、2%、4% 的 SMP 均可使油脂结晶的起始温度提高约 5 °C。加入 2%、4% 的 SMP 对模型起酥油样品的质构特性及流变特性的影响规律一致,加入 2% SMP 的模型起酥油硬度和弹性模量比未加入 SMP 的模型起酥油分别提高了 30% 和 15%。从产品品质及生产成本考虑,加入 2% SMP 即缩短结晶诱导时间,又

有效提高了产品性能。

参考文献

- [1] 王德志,马传国,王高林,等.专用油脂在食品工业中的应用[J].中国油脂,2008,33(4):7-11
WANG De-zhi, MA Chuan-guo, WANG Gao-lin, et al. Application of special oils in food industry [J]. China Oils and Fats, 2008, 33(4): 7-11
- [2] J B Lowe, J D Marth. A genetic approach to mammalian glycan function [J]. Annual Review of Biochemistry, 2003, 72(1): 643-691
- [3] Watanabe A, Tashima I, Matsuzaki N, et al. On the formation of granular crystals in fat blends containing palm oil [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1992, 69(11): 1077-1080
- [4] Deffense E. Fractionation of palm oil [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1985, 62(2): 376-385
- [5] Ng W L. A study of the kinetics of nucleation in a palm oil melt [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1990, 67(11): 879-882
- [6] Garbolino C M, Bartoccini, E Flöter. The influence of emulsifiers on the crystallization behavior of a Palm oil-based blend [J]. Eur J Lipid Sci Technol. European Journal of Lipid Science & Technology, 2005, 107(9): 616-626
- [7] Braipson-Danthine S, C Deroanne. 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
- [8] Putte K V, J V D Enden. Fully automated determination of solid fat content by pulsed NMR [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1974, 51(7): 316-320
- [9] AOCS. (1990). Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society (4th edition) [M]. Champaign: American Oil Chemists' Society
- [10] Laia O M, H M Ghazalia, F Cho, et al. Physical and textural properties of an experimental table margarine prepared from lipase-catalysed transesterified palm stearin: palm kernel olein mixture during storage [J]. Food Chemistry, 2000, 71(2): 173-179
- [11] Lumor S E K, Byung Hee, C C Akoh. Optimization of solid fat content and crystal properties of a trans-free structured lipid by blending with palm midfraction [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(19): 9294-9298
- [12] Breitschuh B, E J Windhab. Direct measurement of thermal fat crystal properties for milk-fat fractionation [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1996, 73(11): 1603-1610
- [13] Chong C L, Z Kamarudin P. Lesieur, et al. Thermal and structural behaviour of crude palm oil: Crystallisation at very slow cooling rate [J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2010, 109(4): 410-421
- [14] Man Y B C, C P Tan. Comparative differential scanning calorimetric analysis of vegetable oils: II. Effects of cooling rate variation [J]. Phytochemical Analysis, 2010, 13(3): 129-141
- [15] Cerdeira M, S Martini, R J Candal, et al. Polymorphism and growth behavior of low-trans fat blends formulated with and without emulsifiers [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2006, 83(6): 489-496
- [16] Marangoni A G. The nature of fractality in fat crystal networks [J]. Trends in Food Science & Technology, 2002, 13(2): 37-47
- [17] Rousseau D, A G Marangoni. The effects of interesterification on physical and sensory attributes of butterfat and butterfat-canola oil spreads [J]. Food Research International, 1998, 31(5): 381-388
- [18] Brunello N, S E Mcauley, A Marangoni. Mechanical properties of cocoa butter in relation to its crystallization behavior and microstructure [J]. LWT - Food Science and Technology, 2003, 36(5): 525-532
- [19] Campos R, S S Narine, A G Marangoni. Effect of cooling rate on the structure and mechanical properties of milk fat and lard [J]. Food Research International, 2002, 35(10): 971-981
- [20] Litwinenko J W, A M Rojas, L N Gerschenson, et al. Relationship between crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties in a palm oil-based shortening [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2002, 79(7): 647-654
- [21] Kalnin D, P Lesieur, F Artzner, et al. Systematic investigation of lard polymorphism using combined DSC and time-resolved synchrotron X-ray diffraction [J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2005. 107(9): 594-606
- [22] Himawan C, V M Starov, A G Stapley. Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization [J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2006. 122(1-3): 3-33
- [23] Narine S S, A G Marangoni. Elastic modulus as an indicator of macroscopic hardness of fat crystal networks [J]. LWT - Food Science and Technology, 2001. 34(1): 33-40

现代食品科技