

乳粉对可可脂/代可可脂结晶特性的影响

张露^{1,2}, 熊苗^{1,2}, 丁利杰^{1,2}, 李学红^{1,2}, 沈琪³, 张虹³

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省食品生产与安全协同创新中心, 郑州 450001; 3. 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司, 上海 200137)

摘要:为提高巧克力制品品质,研究了乳粉种类及添加比例对可可脂及代可可脂结晶特性的影响。采用差示扫描量热仪(DSC)和X-射线衍射(XRD),考察不同添加比例的全脂乳粉、脱脂乳粉和乳清粉对可可脂和代可可脂(基于棕榈油和棕榈仁油)在非等温条件下结晶行为的影响。结果表明:全脂乳粉或乳清粉的加入会降低可可脂和代可可脂的结晶和熔化温度,其中全脂乳粉的影响最为显著;脱脂乳粉的加入则表现为提高可可脂和代可可脂的结晶和熔化温度。添加脱脂乳粉或乳清粉后代可可脂仍然稳定在 β' 晶型,而全脂乳粉的加入则导致代可可脂冷却结晶后 β 晶型的出现。高比例的全脂乳粉或乳清粉的加入均会导致调温后可可脂结晶中亚稳定态 β' 晶型的出现,即阻碍了可可脂稳定态晶型 β 晶型的形成,影响了巧克力的调温效果,而脱脂乳粉的添加对可可脂的稳定晶型无影响。

关键词:乳粉;可可脂;代可可脂;结晶特性

中图分类号:TS225.6;TQ641 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)08-0022-06

Effect of milk powder on crystallization behavior of cocoa butter and cocoa butter replacer

ZHANG Lu^{1,2}, XIONG Miao^{1,2}, DING Lijie^{1,2}, LI Xuehong^{1,2}, SHEN Qi³, ZHANG Hong³

(1. Department of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Henan Province, Zhengzhou 450001, China; 3. Wilmar (Shanghai) Biotechnology Research & Development Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: To improve the quality of chocolate products, the effects of types and dosage of milk powder on crystallization behavior of cocoa butter (CB) and cocoa butter replacer (CBR) were studied. Differential scanning calorimetry (DSC) and X-ray diffraction (XRD) were used to investigate the effects of dosage of whole milk powder, skim milk powder and sweet whey powder on the crystallization behavior of CB and CBR (based on palm oil and palm kernel oil) under nonisothermal conditions. The results showed that the crystallization point and melting point of CB and CBR significantly decreased by the addition of whole milk powder and sweet whey powder, especially whole milk powder, but they increased by the addition of skim milk powder. CBR was stabilized in β' polymorph by the addition of skim milk powder or sweet whey powder, while the addition of whole milk powder in CBR accelerated the formation of β polymorph. The addition of a high proportion of whole milk powder or sweet whey powder in CB increased the ratio of β' polymorph, indicating inadequate tempering. The addition of skim milk powder had no significant influence on the thermo-stable polymorph of CB.

Key words: milk powder; cocoa butter; cocoa butter replacer; crystallization behavior

收稿日期:2019-11-19;修回日期:2019-12-23

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(31401661)

作者简介:张露(1975),女,副教授,博士,研究方向为食品物性学(E-mail)2001008@zzuli.edu.cn。

巧克力是一种由颗粒状分散相(糖、可可粉及乳粉)与连续相(可可脂或代可可脂)组成的复杂

多相分散体系^[1],其所含油脂的结晶方式和特性决定了巧克力产品的最终品质,如光泽度、口熔性、脆性、货架期等^[2-4]。因此,在巧克力及巧克力制品生产中,对其所含可可脂及代可可脂结晶的控制至关重要^[5-8]。

按照 Lutton 的分类方法,天然可可脂可分为 I、II、III、IV、V、VI 6 种晶型,从 I 型到 VI 型 6 种晶型的熔点分别为 17.3、23.3、25.5、27.5、33.8℃ 和 36.3℃^[9]。V 型晶型的可可脂表现出最佳的感官品质,如良好的光泽度、硬度和脆性,而且能够在口腔中迅速熔化,释放风味。为获得具有 V 型晶型的巧克力产品,加工过程中一般对其进行调温处理^[10]。但储存期及储存环境等因素仍会影响巧克力产品的晶型。研究表明,经过储存后巧克力晶型由 V 型转变为 VI 型,此时巧克力制品常会出现表面起霜的现象,影响产品的外观及口感^[11]。

可可脂的甘三酯成分主要为 1-棕榈酸-2-油酸-3-硬脂酸甘油酯(POS)、1,3-二棕榈酸-2-油酸甘油酯(POP)和 1,3-二硬脂酸-2-油酸甘油酯(SOS),这 3 种甘三酯在可可脂的甘三酯成分中占到 70%~80%。 α 、 β' 、 β 是甘三酯较常见的 3 种晶型,此外,还有 sub- α 、 γ 等晶型^[12]。每种晶型又可分为几种亚型,如可可脂的 III、IV、V、VI 晶型可分别对应于甘三酯 POS 的 β'_2 、 β'_1 、 β_2 和 β_1 晶型^[2]。与可可脂不同,代可可脂冷却结晶后稳定在 β' 晶型,因此在加工过程中无需经过调温。

巧克力产品在加工过程中一般会加入乳粉进行调节感官特性及理化特性,乳粉的种类及其理化性质是影响产品的感官特性及加工工艺条件的重要因素。金世琳^[13]指出经滚筒干燥的全脂乳粉的游离脂肪含量高,可减少制品中可可脂的用量,同时赋予巧克力更好的风味及降低巧克力浆料的黏度。Attaie 等^[14]发现使用相似颗粒度的全脂乳粉时,乳粉的游离脂肪含量与巧克力的黏度具有较好的相关性,巧克力加工中添加喷雾干燥的全脂乳粉比添加滚筒干燥的全脂乳粉的浆料黏度更低。Ashleigh 等^[15]研究了采用不同工艺生产的脱脂乳粉,作为标准的白巧克力生产原料,其对巧克力的感官品质和挥发性影响显著,研究认为其风味差异可能归因于美拉德反应衍生的化合物和硫化物。目前关于乳粉及其在油脂中应用的研究多关注于形态学及流变学特性,缺乏对乳粉添加于相关油脂后油脂结晶特性的研究。且研究对象主要为全脂乳粉,对于脱脂乳粉以及乳清粉在巧克

力加工中应用的研究报道较少,关于不同乳粉添加后对可可脂/代可可脂结晶特性的影响未见报道。

本研究分别选取可可脂和代可可脂作为连续相介质,由于乳粉中所含的乳脂以及乳糖含量均会对巧克力的结晶特性产生不同的影响^[16-19],因此本研究选择 3 种乳粉(全脂乳粉、脱脂乳粉、乳清粉)及不同添加比例作为分散相,通过 DSC 和 XRD,研究 3 种体系的结晶特性,为巧克力生产中的配方设计及参数调整提供理论依据,为后期工艺优化和产品改良提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

100% 可可脂、代可可脂(Lik39),益海嘉里集团(上海);全脂乳粉、脱脂乳粉, Fonterra Ltd(新西兰);甜乳清粉, Lactalis(法国)。3 种乳粉组成成分见表 1。

乳粉	乳糖	蛋白质	脂肪	矿物质	水分
全脂乳粉	40.3	24.5	26.3	5.8	3.1
脱脂乳粉	54.5	32.9	0.9	7.9	3.8
乳清粉	75.0	11.8	1.0	7.5	2.6

Q20 差示扫描量热仪(DSC),美国 TA 公司;RCS-90 电子控温系统,美国 TA 公司;D8 ADVANCE X-射线衍射仪,德国 Bruker 公司;MINIC-100 迷你金属浴;XHF-DY 高速分散器。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备

将全脂乳粉、脱脂乳粉、乳清粉分别粉碎过 200 目筛,按照 0%、20%、40%、60%、80%、100% 的添加比例(乳粉质量/分散相质量)添加于分散相(可可脂或代可可脂)中,采用高速分散器搅拌混匀,待测。

1.2.2 可可脂的调温

取出适量样品于离心管中,置于迷你金属浴中模拟巧克力调温过程的温度变化进行程序控温。控温过程如下:加热至完全熔化→冷却至 40℃ 保温 20 min→冷却至 26℃ 保温 30 min→加热至 29℃ 保温 30 min→冷却至 15℃。由于剪切力对于晶型的转变影响显著,为减少影响因素,本实验在调温过程中不采用任何形式的剪切。

1.2.3 非等温条件下的 DSC 测定条件

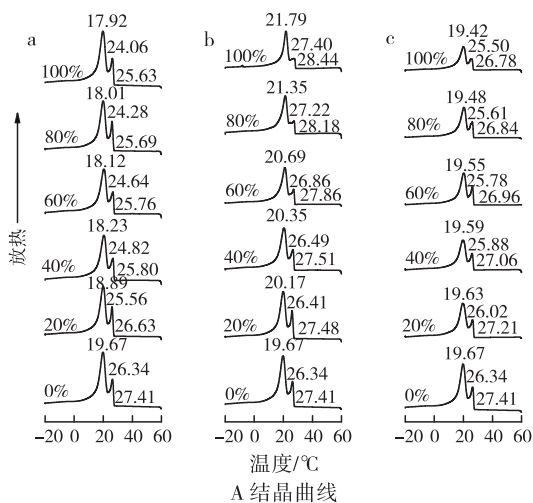
未调温样品取 6~10 mg 于 DSC 专用样品盘中压紧待测,DSC 控温程序为 60℃ 保温 5 min,再以

2 °C/min 降温至 -20 °C, 保温 5 min, 再以 2 °C/min 升至 60 °C。

按照 1.2.2 方法完成调温处理的样品, 立即取 6~10 mg 于 DSC 专用样品盘中压紧待测, 调温后可测脂的 DSC 熔化曲线控温程序为 20 °C 平衡 5 min, 然后以 2 °C/min 升温至 45 °C。

1.2.4 X-射线衍射测定晶型

采用 D8 ADVANCE X-射线衍射仪测定各样品的结晶晶型, 该设备使用 Cu 靶 ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$), 工作电压 40 kV, 电流 40 mA, 在 20 °C 条件下, 扫描角



注: a. 全脂乳粉; b. 脱脂乳粉; c. 乳清粉。下同。

图 1 不同添加比例乳粉的代可可脂 DSC 曲线

由图 1 可知, 代可可脂样品在冷却和升温过程中具有两个明显陡峭的结晶峰和多个熔化峰。如图 1A 所示, 不同添加比例全脂乳粉的样品的两个结晶峰峰值温度和起始结晶温度都低于代可可脂 (0%), 随着全脂乳粉添加比例的增加, 样品起始结晶温度 (结晶点) 和结晶峰的峰值温度相应降低, 结晶点从未添加乳粉的代可可脂 (0%) 时的 27.41 °C 下降到添加比例为 100% 时的 25.63 °C, 下降了约 2 °C。添加脱脂乳粉后, 代可可脂的起始结晶温度和结晶峰峰值温度随脱脂乳粉添加比例的增加而升高。乳清粉的加入能够降低代可可脂的结晶点和熔点, 但影响没有全脂乳粉显著。随着乳清粉添加比例从 0% 增加至 100%, 乳清粉/代可可脂混合物的起始结晶温度降低约 0.6 °C。

由于代可可脂为多种甘三酯的混合物, 其组分复杂, 因而熔化阶段表现为多个吸热峰重叠, 使得熔点的选取变得困难。因此, 选取最为明显的两个吸热峰的峰值温度代表熔化温度, 同时选取熔化终止温度, 对各个样品加以对比。如图 1B 所示, 添加全脂乳粉后样品的熔化峰的峰值温度低于代可可脂的, 随着全脂乳粉添加比例的不断增大熔化峰的峰

度 2θ 为 $5^\circ \sim 30^\circ$, 步长为 0.02° 。

1.2.5 数据处理

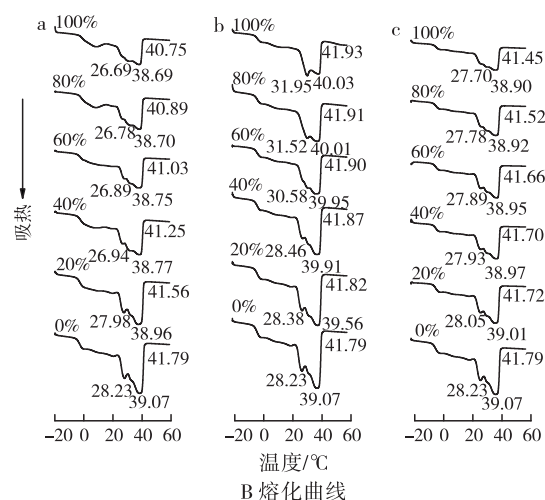
每组实验平行测定 3 次, 采用 Origin8.0 软件绘图, 利用 SPSS 22.0 软件处理实验数据。

2 结果与讨论

2.1 不同乳粉及其添加比例对混合物热物理特性的影响

2.1.1 乳粉/代可可脂混合物

图 1 为不同添加比例乳粉的代可可脂在非等温条件下的 DSC 结晶和熔化曲线。



值温度和熔化终止温度也相应降低, 两个熔化峰的峰值温度分别从 28.23 °C 和 39.07 °C 下降至 26.69 °C 和 38.69 °C, 熔化终止温度也从 41.79 °C 下降至 40.75 °C。由此可知, 全脂乳粉的添加能够显著降低代可可脂的结晶点和熔点, 且全脂乳粉比例越高, 混合物结晶点越低, 产品的熔点越低。添加脱脂乳粉后, 相应的熔化峰的峰值温度和熔化终止温度升高, 呈现出与添加全脂乳粉完全不同的变化趋势。即脱脂乳粉的添加能够提高结晶点, 添加比例越大, 脱脂乳粉与代可可脂混合物的结晶点越高, 结晶速度越快, 产品的熔点越高。

在图 1 的 DSC 测定结果中, 选取同一添加比例的乳粉, 对添加 3 种不同乳粉的代可可脂样品的结晶和熔化的起始、峰值、终止温度进行单因素方差分析。3 种乳粉的添加比例均为 20% 时的分析结果如表 1 所示。由表 1 可以看出 $P < 0.01$, 即 3 组样品间呈极显著差异。在所有添加比例下 (20%、40%、60%、80%、100%), 均得到 $P < 0.01$ 的分析结果 (分析数据不在此逐一枚举), 由此可知 3 种不同乳粉的添加对代可可脂结晶和熔化温度影响极显著。

表1 20%乳粉/代可可脂混合物结晶熔化时的
起始、峰值、终止温度

项目	添加20% 全脂乳粉	添加20% 脱脂乳粉	添加20% 乳清粉
T_{11}			
平均值/°C	26.01	26.41	26.03
RSD/%	0.42	0.20	0.18
P值		<0.01	
T_{12}			
平均值/°C	19.03	20.01	19.60
RSD/%	0.12	0.15	0.27
P值		<0.01	
T_{p1}			
平均值/°C	26.85	27.47	27.34
RSD/%	0.19	0.22	0.15
P值		<0.01	
T_{21}			
平均值/°C	27.65	28.31	27.93
RSD/%	0.18	0.07	0.18
P值		<0.01	
T_{22}			
平均值/°C	38.95	39.82	38.98
RSD/%	0.13	0.08	0.08
P值		<0.01	
T_{p2}			
平均值/°C	41.51	41.91	41.69
RSD/%	0.14	0.10	0.07
P值		<0.01	

注: T_{11} 是第一个结晶峰峰值温度, T_{12} 是第二个结晶峰峰值温度, T_{p1} 是起始结晶温度, T_{21} 是第一个熔化峰峰值温度, T_{22} 是第二个熔化峰峰值温度, T_{p2} 是熔化终止温度。 $P < 0.01$,表明样品之间存在极显著差异。

2.1.2 乳粉/可可脂混合物

不同添加比例乳粉的可可脂在非等温条件下的DSC熔化结晶曲线(未经调温处理)如图2所示。由图2可知,在未进行调温处理的状态下,由于此时可可脂结晶处于亚稳定态,因此其结晶和熔化温度都显著低于代可可脂。如前所述,可可脂的甘三酯组成主要为POS、SOS和POP,因此与代可可脂相比,其熔化曲线的吸热峰较为集中和尖锐(图2B)。选取结晶点、结晶峰峰值温度、熔化起始温度(熔点)、熔化峰峰值温度、熔化终止温度作为指标加以对比。结果显示,全脂乳粉和乳清粉的添加降低了可可脂的结晶点和熔点,脱脂乳粉的添加升高了可可脂的结晶点和熔点。

为了保证巧克力的最佳口感,需要经过调温处理将其所含可可脂稳定在V型晶型。不同添加比例乳粉的可可脂样品经过调温处理后的DSC熔化曲

线如图3所示。

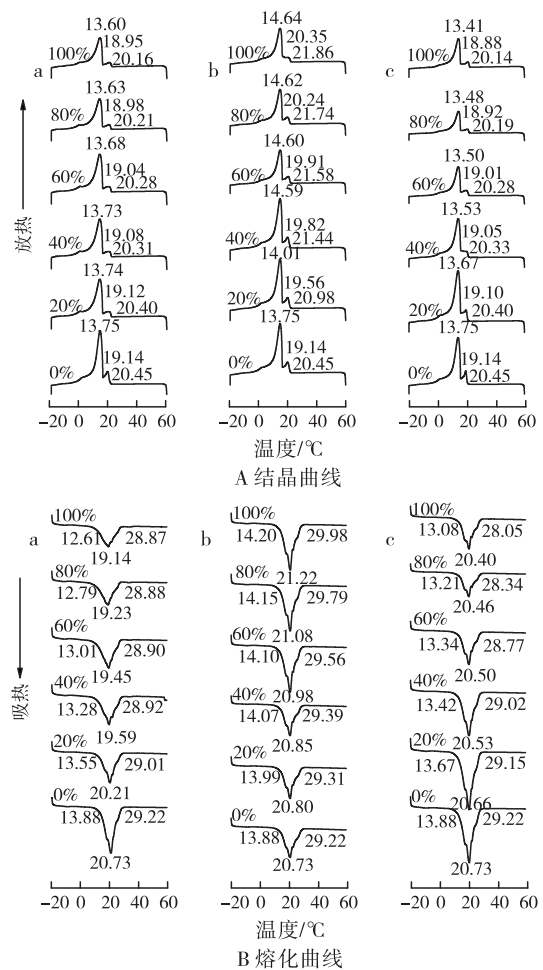


图2 不同添加比例乳粉的可可脂DSC曲线

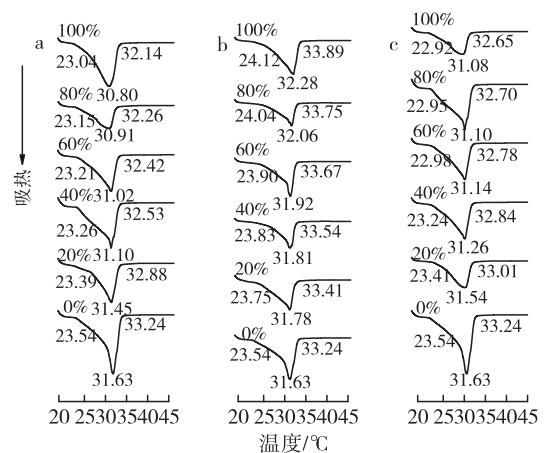


图3 不同添加比例乳粉的可可脂(调温后)DSC熔化曲线

如图3所示,经过调温处理后,可可脂的结晶晶型从热力学亚稳定晶型开始转变为热力学稳定晶型,熔点显著升高,DSC曲线的熔化峰表现为一个更为尖锐的吸热峰。全脂乳粉和乳清粉的添加降低了调温后可可脂结晶的熔点,而脱脂乳粉添加比例为100%时调温后的可可脂熔点升高了约0.6°C。但经过调温处理后,全脂乳粉对于可可脂结晶的影响程度比未经调温时有所缓和,熔化峰峰值温度从

可可脂样品(0%)的 $31.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至添加比例为100%时的 $30.80\text{ }^{\circ}\text{C}$,降低了 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$,而在未经调温处理时,对应样品的熔化峰峰值温度则降低了 $1.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着各种乳粉添加比例的增加,样品的熔化焓值显著降低(见表2)。

表2 不同添加比例乳粉的可可脂混合物调温后的熔化焓值

乳粉添加 比例/%	熔化焓值/(J/g)		
	a	b	c
0	116.80	116.80	116.80
20	94.20	92.59	83.22
40	91.22	89.32	82.17
60	83.83	81.85	62.07
80	56.72	55.30	54.84
100	47.70	45.74	47.24

注:a.可可脂+全脂乳粉;b.可可脂+脱脂乳粉;c.可可脂+乳清粉。

选取乳粉的添加比例为20%,对添加3种不同乳粉的可可脂样品调温后的结晶和熔化的起始、峰值、终止温度进行单因素方差分析,结果如表3所示。

表3 20%乳粉/可可脂混合物(调温后)熔化时的起始、峰值、终止温度

项目	添加20% 全脂乳粉	添加20% 脱脂乳粉	添加20% 乳清粉
T_{21}			
平均值/ $^{\circ}\text{C}$	23.43	23.77	23.40
RSD/%	0.13	0.21	0.09
P值		<0.01	
T_{22}			
平均值/ $^{\circ}\text{C}$	31.48	31.81	31.44
RSD/%	0.10	0.16	0.16
P值		<0.01	
T_{p2}			
平均值/ $^{\circ}\text{C}$	32.86	33.53	32.91
RSD/%	0.12	0.18	0.24
P值		<0.01	

注: T_{21} 是熔化起始温度, T_{22} 是熔化峰峰值温度, T_{p2} 是熔化终止温度。 $P < 0.01$,表明样品之间存在极显著差异。

由表3可以看出, $P < 0.01$,即3组样品间呈极显著性差异。在各个添加比例下的分析结果均显示 $P < 0.01$ (分析数据略),即3种不同乳粉的添加对可可脂调温后的熔点影响极显著。

2.2 不同乳粉及其添加比例对混合物稳定晶型的影响

2.2.1 乳粉/代可可脂混合物

图4为不同添加比例乳粉的代可可脂XRD图谱。

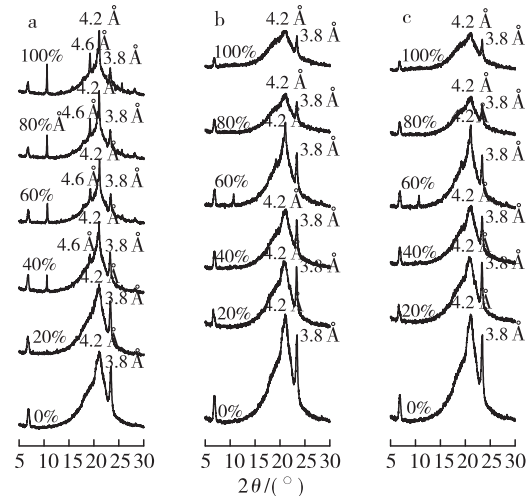


图4 不同添加比例乳粉的代可可脂XRD图谱

由图4a可知,不同添加比例全脂乳粉样品的XRD图谱存在明显的差异。其中添加比例为20%全脂乳粉的样品同代可可脂样品一样具有两个特征峰,特征峰的 d 值均为 $4.2\text{ }\text{Å}$ 和 $3.8\text{ }\text{Å}$,是 β' 晶型的特征峰。添加比例为40%及以上的全脂乳粉的样品出现 d 值为 $4.6\text{ }\text{Å}$ 的特征峰,对应 β 晶型的出现。即随着全脂乳粉添加比例的增加, β 晶型的比例增加。分析其原因,应该与全脂乳粉中的高脂肪含量(26.3%)有关,脂肪存在稀释作用,从而诱导了热力学稳定性更高的 β 晶型的出现。

由图4b、4c可知,代可可脂的稳定晶型的晶体结构为 β' 晶型,加入不同比例的脱脂乳粉、乳清粉后,样品的晶型并没有发生变化,样品的晶型仍为 β' 型。所以加入脱脂乳粉、乳清粉并不会改变代可可脂的晶型。

2.2.2 乳粉/可可脂混合物

图5为不同添加比例乳粉的可可脂(调温后)XRD图谱。

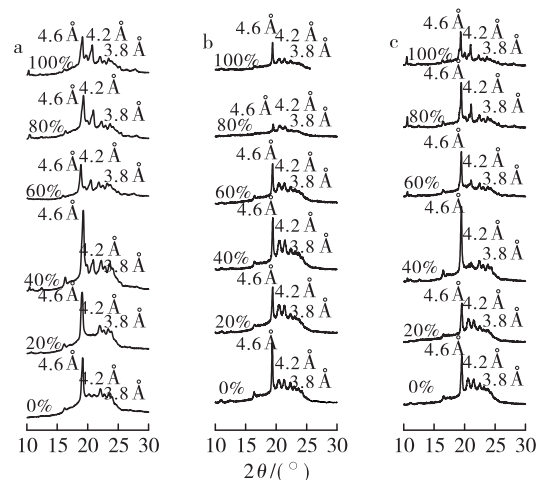


图5 不同添加比例乳粉的可可脂(调温后)XRD图谱

由图5a可知,未添加乳粉的可可脂样品经过调

温处理,放置 24 h 后测定的 XRD 图谱有 1 个强度很大的 d 值为 4.6 \AA 的特征峰和 4 个强度较弱的 d 值分别为 4.3 、 4.1 、 3.9 、 3.8 \AA 的特征峰,表示样品具有典型的 β_2 晶型,即可可脂的 V 型^[2,10],说明调温效果良好。而当全脂乳粉的添加比例大于等于 40% 时,该样品的 XRD 图谱出现 d 值为 4.2 \AA 的特征峰,随着乳粉添加比例的继续增大, d 值为 4.2 \AA 和 3.8 \AA 的特征峰的强度逐渐增强,代表着 β' 晶型的出现,即此时样品中 β' 和 β 晶型同时存在。且随着全脂乳粉添加比例的增大, β' 晶型比例逐渐增加。由图 5b 可知,添加脱脂乳粉后样品的 XRD 图谱特征峰与未添加时相同,即脱脂乳粉的添加对样品的结晶晶型无显著影响。由图 5c 可知,乳清粉的添加对可可脂调温后晶型的影响表现出与全脂乳粉近似的趋势,即随着乳清粉添加比例的增加,导致 β' 晶型的出现且比例逐渐增加。比较乳清粉和脱脂乳粉,二者成分的主要差异为乳糖和蛋白质含量。乳清粉的乳糖含量为 75.0%,蛋白质含量为 11.8%,而脱脂乳粉的乳糖含量为 54.5%,蛋白质含量为 32.9%。由于乳糖在可可脂体系中是以结晶的形式存在,因此推测乳清粉对可可脂结晶产生影响的原因与其超高的乳糖含量有关。

3 结论

3 种不同乳粉(全脂乳粉、脱脂乳粉、乳清粉)的添加对可可脂和代可可脂的结晶行为影响显著,特别是在非等温条件下,表现出对连续相油脂(可可脂或代可可脂)结晶点、熔点和结晶晶型的改变。

全脂乳粉或乳清粉的添加会降低可可脂和代可可脂的结晶和熔化温度,尤以全脂乳粉作用最为显著;脱脂乳粉的加入则表现为提高可可脂和代可可脂的结晶和熔化温度。全脂乳粉的加入会导致代可可脂结晶中 β 晶型的出现,而高比例的全脂乳粉和乳清粉的添加会导致调温后的可可脂结晶中亚稳定的 β' 晶型的出现,降低可可脂稳定态晶型(V型)的比例,影响调温的效果和产品的最终品质。脱脂乳粉的添加并不改变可可脂和代可可脂的热力学稳定晶型。

参考文献:

[1] AFOAKWA E O, PATERSON A, FOWLER M, et al. Particle size distribution and compositional effects on textural properties and appearance of dark chocolates[J]. *J Food Eng*, 2008, 87(2): 181–190.
 [2] SATO K. Introduction: relationships of structures, properties, and functionality//In crystallization of lipids [M]. NJ, Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2018: 1–15.
 [3] GLICERINA V, BALESTRA F, ROSA M D, et al. Rheo-

logical, textural, and calorimetric modifications of dark chocolate during process[J]. *J Food Eng*, 2013, 119: 173–179.
 [4] 王风艳,王兴国,孙小玲,等. 乳化剂对可可脂结晶行为的影响[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(1): 53–56.
 [5] SMITY K W, CAIN F W, TALBOT G. Nature and composition of fat bloom from palm kernel stearin and hydrogenated palm[J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(17): 5539–5544.
 [6] SONWAI S, ROUSSEAU D. Controlling fat bloom formation in chocolate – impact of milk fat on microstructure and fat phase crystallisation[J]. *Food Chem*, 2010, 119: 286–297.
 [7] DELBAEREL C, VAN D W D, DEYPERE F, et al. Relationship between chocolate microstructure, oil migration, and fat bloom in filled chocolates[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, 118: 1800–1826.
 [8] AFOAKWA E O. Fat bloom formation and development in chocolates, in chocolate science and technology [M]. UK, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2016: 345–364.
 [9] WILLE R L, LUTTON E S. Polymorphism of cocoa butter[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1966, 43(8): 491–496.
 [10] LONCHAMPT P, HARTEL R W. Surface bloom on improperly tempered chocolate[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2006, 108(2): 159–168.
 [11] GARTI N, ASERIN A. Cocoa butter and related compounds [M]. Urbana: AOCS Press, 2012: 275–305.
 [12] LARSSON K. Classification of glyceride crystal forms [J]. *Acta Chem Scand*, 1966, 20(8): 2255–2260.
 [13] 金世琳. 巧克力专用乳粉[J]. *中国乳品工业*, 1996, 24(4): 21–23.
 [14] ATTAIE H, BREITSCHUH B, BRAUN P, et al. The functionality of milk powder and its relationship to chocolate mass processing, in particular the effect of milk powder manufacturing and composition on the physical properties of chocolate masses[J]. *Int J Food Sci Tech*, 2003, 38(3): 325–335.
 [15] ASHLEIGH S, ALISTAIR S G, ANGELA R, et al. Impact of the skim milk powder manufacturing process on the flavor of model white chocolate[J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(6): 1186–1195.
 [16] DHONSI D, STAPLEY A G F. The effect of shear rate, temperature, sugar and emulsifier on the tempering of cocoa butter[J]. *J Food Eng*, 2006, 77(4): 936–942.
 [17] AFOAKWA E O, PATERSON A, FOWLER M. Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate[J]. *Eur Food Res Technol*, 2007, 226(6): 1259–1268.
 [18] PAJIN B, RADUJKO I, ŠEREŠ Z, et al. Influence of low-melting milk fat fraction on crystallization and physical properties of chocolate[J]. *Brit Food J*, 2012, 114(6): 868–879.
 [19] SVANBERG L, AHRNE L, LORENN, et al. Effect of sugar, cocoa particles and lecithin on cocoa butter crystallisation in seeded and non-seeded and non-seeded chocolate model systems [J]. *J Food Eng*, 2011, 104(1): 70–80.