doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.041

不同加工方式和蛋白组成下冰淇淋脂肪球低温失稳研究

程金菊[1,2]　王　东[1]　李晓东[1,2]

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学乳品科学教育部重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 利用乳清浓缩蛋白(WPC)和大豆分离蛋白(SPI)部分替代乳蛋白(SMP),对 3 种蛋白质组成(乳蛋白、乳蛋白-大豆分离蛋白和乳蛋白-乳清浓缩蛋白)的冰淇淋浆料进行均质前杀菌和均质后杀菌(65℃、30 min)的不同加工处理,通过分析搅打凝冻前后的脂肪球粒度分布和表面蛋白吸附特性、浆料流变学特性以及冰淇淋的融化率、膨胀率、硬度、气泡分布和感官特性,探究加工方式和蛋白质组成对脂肪球低温失稳作用及冰淇淋质构形成的影响。结果表明:乳蛋白冰淇淋脂肪球的失稳程度、流变学特性以及质构特性不受加工方式的影响。而对部分替代乳蛋白的混合蛋白冰淇淋浆料,两种加工方式均导致脂肪球粒度、表面蛋白质吸附量和浆料稠度系数的增加,相比于均质前杀菌,采用均质后杀菌使脂肪球表面蛋白质被蔗糖脂肪酸酯替代的程度增大,更有利于脂肪球发生低温失稳和冰淇淋质构形成,此时 SMP3WPC7、SMP7SPI3 两种混合蛋白冰淇淋的部分聚结度分别为 282.19% 和 252.70%,冰淇淋具有更高的膨胀率和抗融性,气泡分布均匀度更佳。

关键词: 冰淇淋; 加工方式; 脂肪球; 失稳作用; 质构

中图分类号: TS252.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0365-07　　**OSID**:

Effect of Processing Patterns and Protein Compositions on Destabilization of Fat Globules at Low Temperatures in Ice Cream Emulsions

CHENG Jinju[1,2]　WANG Dong[1]　LI Xiaodong[1,2]

(1. *College of Food Science*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory of Dairy Science*, *Ministry of Education*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Whey protein concentrate and soy protein isolate were used to partially substitute milk protein. The effect of processing patterns and protein compositions on the fat globules destabilization at low temperatures and textural formation of ice creams was studied by pasteurization at 65℃ for 30 minutes prior or after homogenization. Their formulations with milk proteins, milk-whey proteins and milk-soy proteins were made. Parameters such as fat particle size distribution, protein surface coverage, rheological property of mixes, ice cream overrun, melting rate, hardness, air bubble distribution and sensory property of ice cream were analyzed. The results indicated that the fat destabilization index, rheological property and texture properties of ice cream with milk proteins were not affected by processing patterns. However, for mixed proteins with milk-whey proteins or milk-soy proteins ice cream emulsions, two kinds of processing patterns led to the increase in fat particle size, protein surface coverage and consistency index. Pasteurization treatment after homogenization resulted in higher displaced rate of adsorbed protein by sucrose fatty acid ester when compared with pasteurization prior homogenization, which favored the destabilization of fat droplets and texture formation of ice cream. The partial coalescence degree for milk-whey protein and milk-soy protein ice cream was 282.19% and 252.70%, respectively. Moreover, ice cream showed high overrun values, and good melting resistance ability and bubble distribution uniformity.

Key words: ice cream; processing pattern; fat globule; destabilization; texture

收稿日期: 2020-05-23　修回日期: 2020-06-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019C030)和黑龙江省高校创新人才项目(UNPYSCT-2017013)

作者简介: 程金菊(1987—),女,讲师,博士,主要从事食品化学和乳品工程研究,E-mail: chengjinju@neau.edu.cn

通信作者: 李晓东(1968—),男,教授,主要从事乳品科学与技术研究,E-mail: hrblxd@163.com

0 引言

均质和杀菌是冰淇淋生产中必不可少的工艺环节,对产品质量起到至关重要的作用。在实际生产中,一般是先对混合料进行杀菌,然后进行均质。如果均质设备的无菌状态控制不当,将会严重影响冰淇淋的质量,因此,对于设备条件较差的企业,往往是先对混合料进行均质,然后进行杀菌。65℃、30 min 是常用的杀菌强度[1]。然而,杀菌热处理过程容易引起热敏感蛋白结构的改变,进而导致蛋白质吸附特性的变化[2-3],冰淇淋浆料搅打凝冻过程中,脂肪球的失稳作用受表面蛋白质和乳化剂吸附特性的影响,因此,加工工艺顺序的不同可能会影响脂肪球的失稳作用和冰淇淋质构的形成过程。

牛乳或脱脂乳粉是冰淇淋生产中最主要的蛋白质来源。近年来,随着食品工业的发展,乳清蛋白和大豆蛋白也被用作重要的蛋白质原料,用来部分替代乳蛋白,以降低产品的生产成本,增加产品多样性和健康功能多样性[4-5]。然而,乳清蛋白和大豆蛋白属于球状蛋白,相比于乳蛋白中的主要成分酪蛋白,对热比较敏感。因此,在用乳清蛋白或大豆蛋白部分替代乳蛋白时,蛋白质结构和吸附特性的改变可能引起脂肪球失稳程度的变化。

冰淇淋结构的形成在很大程度上取决于脂肪球的部分聚结失稳。在搅打凝冻过程中,发生部分聚结失稳的脂肪链,形成贯穿于半固态产品的网络结构,这种网络结构能够稳定充入气泡,使混合料在挤压过程中获得较好的干爽度,从而使冰淇淋获得较好的膨胀度和抗融性[6-8]。目前,尚未见杀菌和均质工艺顺序不同对混合浆料中脂肪球失稳作用影响的研究报道。本文探究加工方式和蛋白质组成对脂肪球低温失稳作用和冰淇淋质构的影响,为混合蛋白冰淇淋的开发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

脱脂乳粉(Skimmed milk powder,SMP,33.4%蛋白质),新西兰恒天然集团;乳清浓缩蛋白(Whey protein concentrate,WPC,80%蛋白质),美国 Hilmar 公司;大豆分离蛋白(Soy protein isolate,SPI,90%蛋白质),哈高科大豆食品有限责任公司;椰子油,市购;蔗糖脂肪酸酯(SE)和羧甲基纤维素钠(CMC),丹尼斯克有限公司。

1.2 仪器与设备

NS1001L 型高压均质机,意大利 Niro Soavi 公司;K9840 型凯氏定氮蒸馏仪,海能仪器股份有限公司;Malvern Kinexus 型流变仪、Malvern 2000 型粒度分析仪,英国 Malvern 公司;IC6308C 型全自动冰淇淋机,上海客浦电器有限公司。

1.3 研究方法与指标测定

1.3.1 冰淇淋浆料制备及冰淇淋生产工艺

冰淇淋含 4% 蛋白质、14% 蔗糖、10% 椰子油、0.3% 蔗糖脂肪酸酯、0.25% 羧甲基纤维素。调整 SMP、SPI、WPC 的质量,使蛋白质质量分数为恒定值(4%)。固形物含量利用乳糖进行调节,使非脂固形物含量一致。

根据课题组之前的研究结果[9],当乳清浓缩蛋白与脱脂乳粉的蛋白质量比为 7∶3 以及大豆分离蛋白与脱脂乳粉的蛋白质量比为 3∶7 时,更利于冰淇淋结构的形成。故采用这两种蛋白质组成来考察加工方式对脂肪球失稳作用的影响,分别记为 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3,以 SMP 作为对照。

采用均质前杀菌或者均质后杀菌两种不同加工方式:①配料混合→杀菌(65℃,30 min)→均质(一级 20 MPa,二级 4 MPa)→老化(4℃,12 h)→搅打凝冻→硬化。②配料混合→均质(一级 20 MPa,二级 4 MPa)→杀菌(65℃,30 min)→老化(4℃,12 h)→搅打凝冻→硬化。以不杀菌处理作为对照。

1.3.2 脂肪球粒度测定

采用 Malvern 2000 型粒度分析仪测定乳液中脂肪球粒度分布[9]。测定前,采用蒸馏水或 2% 十二烷基硫酸钠(SDS)对样品进行 100 倍稀释。SDS 能够使结合作用弱的脂肪球分离,因此用于区分脂肪球之间的聚集度与部分聚结度[10]。聚集度表征脂肪球之间聚集在一起的水平,计算公式为

$$F_D = (D_{4,3(water)} - D_{4,3(SDS)})/D_{4,3(SDS)} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $D_{4,3(water)}$——用水稀释时乳液的粒度

$D_{4,3(SDS)}$——用 SDS 溶液稀释时乳液的粒度

部分聚结度表征脂肪球通过晶体形成脂肪链或者脂肪聚结体的程度,是不可逆变化过程,计算公式为

$$P_{CD} = (D_{4,3(SDS)WE} - D_{4,3(SDS)E})/D_{4,3(SDS)E} \times 100\% \quad (2)$$

式中 $D_{4,3(SDS)WE}$——用 SDS 稀释时搅打凝冻样品的粒度

$D_{4,3(SDS)E}$——用 SDS 稀释时未搅打凝冻浆料的粒度

1.3.3 脂肪球表面蛋白质吸附量测定

取一定质量乳液于 30℃下离心(15 000g,60 min),收集上层乳化相,对其中的蛋白质和脂肪进行定量分析[9]。计算脂肪球表面蛋白质吸附量的公式为

$$\rho = P/(FA) \quad (3)$$

式中　ρ——表面蛋白质吸附量

P——蛋白质质量分数

F——脂肪质量分数

A——由粒度分析仪测得的脂肪球比表面积

1.3.4　流变学性质测定

采用 Malvern Kinexus 型流变仪(锥板 40 mm、2°)在 4℃下对冰淇淋老化液进行剪切速率扫描(扫描速率 0.01 ~100 s^{-1})。采用 Herschel - Bulkley 模型对其流变学参数进行拟合。Herschel - Bulkley 方程可表示为

$$\tau = \tau_0 + K\gamma^n \quad (4)$$

式中　τ——剪切应力

τ_0——屈服应力

γ——剪切速率

K——稠度系数

n——流体行为指数

1.3.5　冰淇淋的膨胀率测定

冰淇淋的膨胀率计算公式为

$$O_V = (m_0 - m_1)/m_1 \times 100\% \quad (5)$$

式中　m_0——搅打之前特定体积的冰淇淋浆料的质量

m_1——搅打凝冻后同体积的冰淇淋质量

1.3.6　冰淇淋的融化率测定

取硬化后的冰淇淋置于金属网上,金属网下面放置烧杯,在室温(20℃)条件下融化冰淇淋,每 10 min 记录一次烧杯内融化冰淇淋的质量,持续 90 min,作融化质量(m)与时间(t)的曲线,该曲线的斜率即为冰淇淋的融化率,单位为 g/(g·min)。

1.3.7　冰淇淋微观结构观察

采用电子显微镜观察融化状态下冰淇淋的气泡结构,利用 Image J 软件分析气泡直径。

1.4　感官评价

冰淇淋的感官评价在 25℃条件下进行,感官评价人员由具有正常感觉敏感度和食品专业背景的 15 名(女 10 名,男 5 名)专门小组成员组成,经培训后对冰淇淋进行感官评价,包括:风味口感(0 ~10 分,氧化及异味到非常好);组织形态(0 ~5 分,冰晶感到非常细腻);色泽外观(0 ~5 分,色泽异常到非常好)。

1.5　数据统计

采用 SPSS 20.0 软件进行数据方差分析($p < 0.05$),绘图采用 Origin 9.2 软件。

2　结果与分析

2.1　脂肪球粒度分布

由图 1 可知,SMP 冰淇淋浆料的粒度分布不受加工方式的影响(图 1a),均呈现单峰分布。SMP3WPC7 的冰淇淋浆料(图 1b),不经杀菌处理时粒度分布为单峰。采用均质前杀菌时,粒度仍呈现单峰分布,但是相比未杀菌处理,峰形向右移动,粒度增大。热特性研究发现,乳清蛋白在加热温度为 60℃时即开始变性[11],还有研究表明,即使温度未达到变性温度,脂肪滴在均质破碎过程中会引起温度瞬时增加,热和压力的双重效应会引起乳清蛋白的变性,使蛋白质发生聚集[12]。同时,热处理过程中,乳清蛋白中的 β-乳球蛋白与酪蛋白胶束表面的毛发状 κ-酪蛋白能够通过二硫键发生结合,β-乳球蛋白和 α-乳白蛋白也能够发生结合,形成蛋白质的聚集体[13],蛋白质聚集体的产生可能导致蛋白质在脂肪球表面的吸附速率降低,从而使脂肪球粒度变大[14]。而采用均质后杀

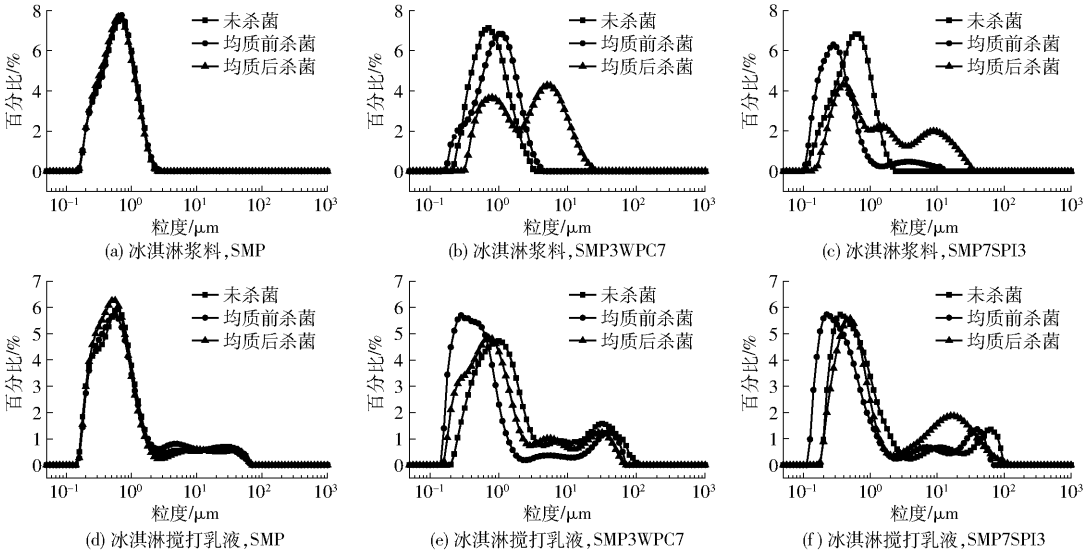

图 1　加工方式和蛋白质组成对脂肪球粒度分布的影响

Fig. 1　Effects of processing patterns and protein compositions on fat particle distribution

菌时,粒度呈双峰分布,这是由于采用均质后杀菌引起脂肪球表面的蛋白质和连续相中未吸附蛋白质之间相互作用增强,从而使脂肪球通过桥连聚集连接在一起[15]。SMP7SPI3 的冰淇淋浆料中(图 1c),未经杀菌处理的脂肪球粒度呈单峰分布。大豆分离蛋白的主要组分 7S 和 11S 的变性温度分别为 68℃和 85℃[2],β-大豆伴球蛋白的变性温度为 63℃[16]。采用均质前杀菌导致其亚基解离[2],并改变其界面活性,因此脂肪球粒度呈双峰分布。而采用均质后杀菌,脂肪球粒度分布呈现 3 个峰,这说明均质后杀菌增强了脂肪球表面蛋白质和未吸附蛋白质的结合作用,进而促进了脂肪球的聚集。

浆料经过搅打凝冻后的粒度分布如图 1d ~ 1f 所示。可以看出,相比未搅打的浆料,3 种蛋白质组成的冰淇淋经过搅打凝冻后,都在较大粒度范围内(10 ~ 100 μm)出现了分布峰。这是由于脂肪球中的一部分脂肪发生了结晶,脂肪晶体刺破脂肪球以及相邻脂肪球的界面膜,使脂肪球形成了不可逆的脂肪聚结体或者脂肪链[17-20]。

由表 1 可知,经过搅打凝冻之后,脂肪球的粒度比浆料粒度显著增大,这说明脂肪球在搅打凝冻过程中发生了失稳,不同加工方式对于 SMP 的浆料和搅打乳液粒度以及搅打凝冻后失稳程度(聚集度和部分聚结度)没有显著影响($p > 0.05$),但是对于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3,均质后杀菌的冰淇淋浆料和搅打乳液的 $D_{4,3(water)}$ 以及脂肪球的聚集度和部分聚结度都要高于均质前杀菌处理,采用均质后杀菌处理时的部分聚结度分别为 282.19% 和 252.70%。这说明采用乳清浓缩蛋白或大豆分离蛋白部分替代乳蛋白时,采用均质后杀菌更有利于脂肪球的低温失稳。

表 1 脂肪球粒度和失稳程度

Tab. 1 Fat particle size and fat destabilization index

样品类别		冰淇淋浆料		冰淇淋搅打乳液			
		$D_{4,3(water)}$/μm	$D_{4,3(SDS)}$/μm	$D_{4,3(water)}$/μm	$D_{4,3(SDS)}$/μm	聚集度/%	部分聚结度/%
SMP	未杀菌	(0.67 ± 0.02)^{a}	(0.59 ± 0.04)^{c}	(2.93 ± 0.19)^{a}	(1.23 ± 0.08)^{a}	(138.04 ± 6.97)^{a}	(109.44 ± 5.68)^{a}
	均质前杀菌	(0.68 ± 0.05)^{a}	(0.59 ± 0.05)^{c}	(2.89 ± 0.08)^{a}	(1.21 ± 0.10)^{a}	(135.70 ± 10.07)^{a}	(103.86 ± 7.44)^{a}
	均质后杀菌	(0.67 ± 0.02)^{a}	(0.58 ± 0.03)^{c}	(2.94 ± 0.11)^{a}	(1.24 ± 0.07)^{a}	(135.78 ± 7.21)^{a}	(109.17 ± 6.91)^{a}
SMP3WPC7	未杀菌	(0.70 ± 0.06)^{a}	(0.44 ± 0.00)^{a}	(5.11 ± 0.16)^{d}	(2.20 ± 0.08)^{d}	(131.93 ± 5.30)^{a}	(404.37 ± 14.85)^{e}
	均质前杀菌	(0.82 ± 0.06)^{a}	(0.44 ± 0.02)^{a}	(4.05 ± 0.16)^{b}	(1.53 ± 0.03)^{b}	(164.69 ± 3.10)^{b}	(254.51 ± 14.14)^{c}
	均质后杀菌	(2.18 ± 0.10)^{b}	(0.43 ± 0.04)^{a}	(4.56 ± 0.13)^{c}	(1.63 ± 0.09)^{b}	(180.52 ± 15.19)^{bc}	(282.19 ± 7.23)^{d}
SMP7SPI3	未杀菌	(0.71 ± 0.05)^{a}	(0.51 ± 0.02)^{b}	(4.62 ± 0.19)^{c}	(1.89 ± 0.14)^{c}	(145.04 ± 7.61)^{a}	(272.40 ± 10.32)^{d}
	均质前杀菌	(0.61 ± 0.03)^{a}	(0.51 ± 0.03)^{b}	(4.49 ± 0.09)^{bc}	(1.59 ± 0.11)^{b}	(191.50 ± 10.09)^{c}	(222.39 ± 2.08)^{b}
	均质后杀菌	(7.87 ± 0.33)^{c}	(0.51 ± 0.02)^{b}	(7.01 ± 0.25)^{e}	(1.70 ± 0.16)^{b}	(299.70 ± 13.60)^{d}	(252.70 ± 6.20)^{c}

注:同列字母不同表示差异显著($p < 0.05$),下同。

2.2 蛋白质吸附特性

由图 2(图中不同字母表示差异显著,下同)可知,对于 SMP 冰淇淋浆料(图 2a),加工方式不同并未引起脂肪球表面蛋白质吸附量的变化($p > 0.05$);而对于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3,相比于未杀菌,采用均质前杀菌和均质后杀菌这两种加工方式都导致表面蛋白质吸附量增加,但是均质前杀菌引起的增加量较高。如前所述,这是由于在杀菌过程中,部分乳清浓缩蛋白和大豆分离蛋白变性导致了蛋白质聚集体的产生,增加了其在脂肪球表面的吸附量。这种结果与文献[14]对乳清蛋白热处理研究结果一致,证明均质前热处理会增加脂肪球表面蛋白质吸附量。对酪蛋白和大豆蛋白的混合溶液热处理研究发现,即使在 95℃条件下,两者也不会发生相互作用[21],而 β-大豆伴球蛋白在杀菌过程中发生解离,解离后能

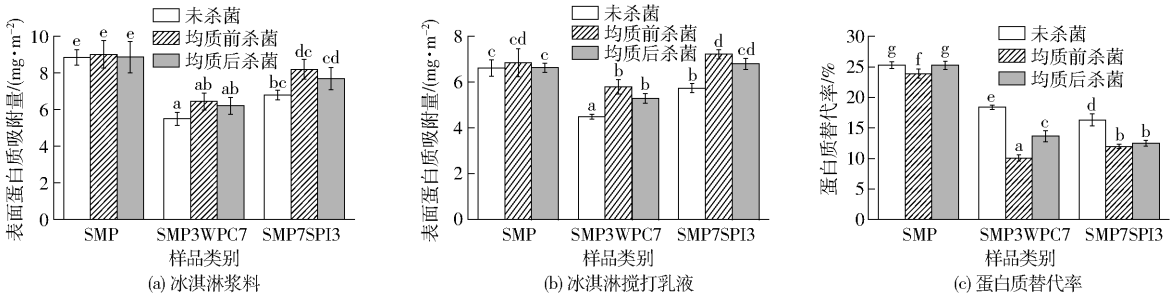

图 2 加工方式和蛋白质组成对表面蛋白吸附量及蛋白质替代率的影响

Fig. 2 Effects of processing patterns and protein compositions on protein surface coverage and displaced rate of protein

够促进可溶性聚集体的形成[2,22]，这种可溶性聚集体增加了蛋白质的疏水性，促进其在脂肪球表面的吸附。

由图 2b 可知，经过搅打凝冻之后，表面蛋白质吸附量降低，这是由于一部分蛋白质在凝冻搅打过程中被蔗糖酯竞争性解吸下来[23-24]。从图 2c 中可以看出，对 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3，采用均质前杀菌和均质后杀菌，都降低了搅打凝冻后蛋白质的替代率。而采用均质前杀菌的加工方式，蛋白质的替代率要低于均质后杀菌，这与形成了蛋白质的聚集体有关。

2.3　流变学特性

由图 3a 可知，3 种蛋白质组成的冰淇淋浆料的黏度都随着剪切速率的增加，呈逐渐下降的趋势，因此，具有剪切稀化的特性。采用 Herschel－Bulkley 模型，对稳态剪切过程中的剪切应力和剪切速率进行拟合，发现拟合曲线参数 $R^2 > 0.998$，说明 Herschel－Bulkley 模型可准确地描述冰淇淋浆料的流变学行为。冰淇淋浆料的稠度系数和流体行为指数如图 3b、3c 所示。由图 3b 可知，SMP 浆料的稠度系数不受加工方式的影响，而对于 SMP3WPC7，未杀菌和采用均质前杀菌的加工方式没有显著性差异（$p > 0.05$）。均质后杀菌的稠度系数高于均质前杀菌和未杀菌，这是由于均质后杀菌引起脂肪球的聚集造成的（图 1b）。对于 SMP7SPI3，加工方式对浆料的稠度系数没有显著影响（$p > 0.05$）。

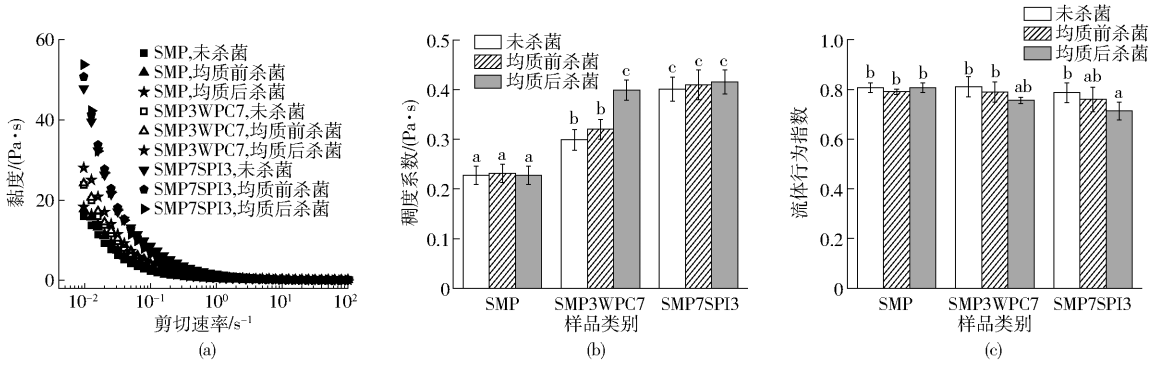

图 3　加工方式和蛋白质组成对冰淇淋浆料流变学特性和参数的影响

Fig. 3　Effects of processing patterns and protein compositions on rheological property and parameters of ice cream emulsion

由图 3c 可知，流体行为指数 n 为 0～1，因此，冰淇淋浆料为假塑性流体。对于 SMP 而言，加工方式对流体行为指数未产生显著影响，而在 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 的冰淇淋浆料中，均质后杀菌比均质前杀菌的 n 降低，剪切稀化作用更显著，这是因为均质后杀菌引起的脂肪球聚集，使其在剪切过程中抵抗剪切作用的能力降低[25-26]。

2.4　不同加工方式下脂肪球低温失稳对冰淇淋质构形成的影响

冰淇淋的膨胀率如图 4a 所示，采用乳清浓缩蛋白或大豆分离蛋白对乳蛋白进行部分替代后，其膨胀率增加。由图 2 可知，对于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3，脂肪球的表面蛋白质吸附量较 SMP 低，因此，连续相中的蛋白质含量较高，起泡性较强[27]，使冰淇淋的膨胀率提高。加工方式并未对 SMP 冰淇淋的膨胀率产生显著影响（$p > 0.05$）。而对于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋，相比于未杀菌，均质前和均质后杀菌均使膨胀率提高，造成这一结果是由于均质前杀菌热处理使蛋白质疏水性增加，而均质后杀菌使脂肪球聚集，这些变化都有利于空气泡充入后被更好地包裹，空气泡体积增加，因此膨胀率增加。均质后杀菌的加工方式更有利于空气泡的包裹，因此，膨胀率增加更为显著（$p < 0.05$）。

不同加工方式下冰淇淋的融化率如图 4b 所示，SMP 冰淇淋的融化率高于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3；冰淇淋的融化特性与脂肪球部分聚结度

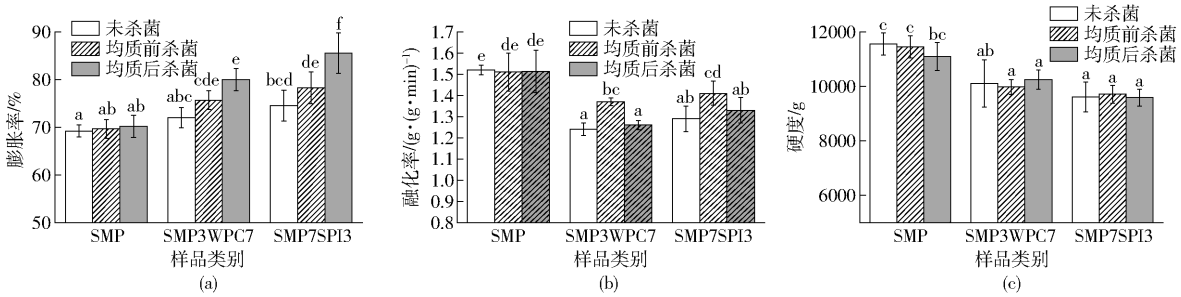

图 4　加工方式和蛋白质组成对冰淇淋质构的影响

Fig. 4　Effects of processing patterns and protein compositions on texture of ice cream

密切相关,脂肪球发生部分聚结后,形成的脂肪链结构逐渐取代空气泡周围的蛋白质,并包裹在气泡的周围,增加搅打充入气泡的稳定性,降低冰淇淋的融化率[28-29]。由表 1 可知,搅打凝冻后,脂肪球部分聚结度在 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋中高于 SMP 冰淇淋,因此,其抗融性更强。同时,由于均质前杀菌引起蛋白质发生变性聚集和搅打凝冻的蛋白质替代率降低,使部分聚结失稳作用减弱,因此,相比于未杀菌,均质前杀菌使 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋的融化率升高,而均质后杀菌未对融化率产生显著性影响($p>0.05$)。

冰淇淋的硬度如图 4c 所示,SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 的硬度低于 SMP,这是由于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋浆料的黏度高于 SMP(图 3b),较高的黏度阻碍了冰淇淋在储藏过程中冰晶的生长。而对于同一蛋白组成的冰淇淋而言,不同加工方式间硬度无显著差异($p>0.05$),这表明冰晶的生长特性未受到加工方式的影响。

冰淇淋的气泡是维持冰淇淋结构的重要因素,从图 5 可以看出,在 SMP(图 5a~5c)冰淇淋中,采用均质后杀菌时(图 5c),气泡分布更为均匀,气泡平均直径为 35 μm。在 SMP3WPC7 冰淇淋中(图 5d~5f),不同加工方式下气泡的分布情况无显著区别,气泡平均直径为 33 μm。在 SMP7SPI3 冰淇淋中(图 5g~5i)气泡分布均匀,数量较多,气泡尺寸较小,平均直径为 19 μm,均质后杀菌时大气泡的数量更少(图 5i),分布更为均一,这也证明该条件下其膨胀率更高。

综上,对于 SMP 冰淇淋,其膨胀率、抗融性、硬度等质构特性不受加工方式的影响;对于 SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋,均质后杀菌能够使其获得更理想的质构特性。

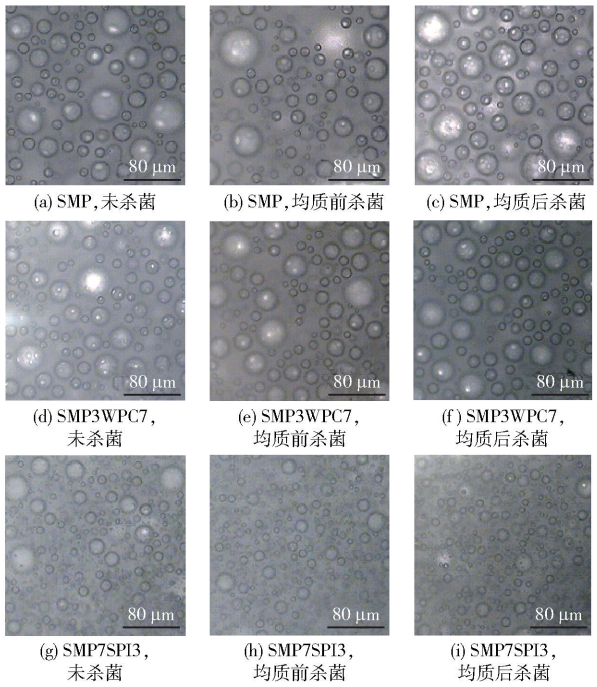

图 5 冰淇淋的气泡显微镜图像

Fig. 5 Optical micrographs of air cells for ice cream

2.5 冰淇淋的感官评价

以上结果表明,采用均质后杀菌获得的冰淇淋的质构特性更优,尤其在乳清浓缩蛋白和大豆分离蛋白对乳蛋白进行部分替代的配方组成中。因此,对采用均质后杀菌加工方式的冰淇淋进行感官评价,结果如表 2 所示。

表 2 冰淇淋的感官评价结果

Tab. 2 Sensory properties of ice cream

样品类别	风味口感(10 分)	组织形态(5 分)	色泽外观(5 分)	总得分(20 分)
SMP	$(9.25\pm0.02)^{a}$	$(4.51\pm0.06)^{a}$	$(4.11\pm0.03)^{a}$	$(17.85\pm0.03)^{a}$
SMP3WPC7	$(8.65\pm0.04)^{b}$	$(4.68\pm0.05)^{b}$	$(4.08\pm0.04)^{a}$	$(17.40\pm0.04)^{b}$
SMP7SPI3	$(8.45\pm0.04)^{c}$	$(4.71\pm0.06)^{b}$	$(4.06\pm0.05)^{a}$	$(17.20\pm0.05)^{c}$

感官评价总分为 20 分,评价标准参照国内外冰淇淋感官评价要求,SMP、SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋得分都高于 17 分。SMP 冰淇淋具有较强的奶香味、无冰晶砂砾感、适口松软、组织状态细腻平滑、呈现淡黄色、形体优良;SMP3WPC7 和 SMP7SPI3 冰淇淋的奶香味较弱,组织结构更为细腻,SPI 的部分替代使冰淇淋具有轻微的豆香,色泽较白,两者在组织形态和色泽外观方面无显著差异($p>0.05$)。

3 结论

(1)在全部由乳蛋白(脱脂乳粉)组成的冰淇淋浆料中,均质前杀菌和均质后杀菌两种加工方式对脂肪球粒度、失稳程度、表面蛋白吸附量以及流变学特性并未产生显著影响。

(2)在用乳清浓缩蛋白和大豆分离蛋白对乳蛋白进行部分替代的混合蛋白冰淇淋浆料中,均质前杀菌引起蛋白质变性和聚集,均质后杀菌增大了脂肪球表面蛋白和未吸附蛋白间的相互作用,使脂肪球发生聚集。两种加工方式均使脂肪球粒度增大、表面蛋白质吸附量增加和蛋白质替代率下降。相比均质前杀菌,采用均质后杀菌引起的脂肪球部分聚结失稳度更高,此时 SMP3WPC7、SMP7SPI3 两种混合蛋白冰淇淋的部分聚结度分别为 282.19% 和 252.70%,更有利于冰淇淋质构的形成,获得的冰淇淋膨胀率、抗融性、气泡均匀度更佳。

参 考 文 献

[1] SEGALL K I, GOFF H D. A modified ice cream processing routine that promotes fat destabilization in the absence of added emulsifier[J]. International Dairy Journal, 2002, 12(12): 1013 – 1018.

[2] KEERATI-U-RAI M, CORREDIG M. Heat-induced changes in oil-in-water emulsions stabilized with soy protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2141 – 2148.

[3] LIANG Yichao, PATEL H, MATIA-MERINO L, et al. Effect of pre- and post-heat treatments on the physicochemical, microstructural and rheological properties of milk protein concentrate-stabilised oil-in-water emulsions[J]. International Dairy Journal, 2013, 32(2): 184 – 191.

[4] PEREIRA G D G, RESENDE J V D, ABREU L R D, et al. Influence of the partial substitution of skim milk powder for soy extract on ice cream structure and quality[J]. European Food Research and Technology, 2011, 232(6): 1093 – 1102.

[5] SUTAR N, SUTAR P P, SINGH G. Evaluation of different soybean varieties for manufacture of soy ice cream[J]. International Journal of Dairy Technology, 2010, 63(1): 136 – 142.

[6] PATEL A R, DEWETTINCK K. Current update on the influence of minor lipid components, shear and presence of interfaces on fat crystallization[J]. Current Opinion in Food Science, 2015, 3: 65 – 70.

[7] FREDRICK E, HEYMAN B, MOENS K, et al. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: Ⅱ. The effect on partial coalescence and whipping properties[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 936 – 945.

[8] FREDRICK E, MOENS K, HEYMAN B, et al. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: Ⅰ. The effect on milk fat crystallization[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 892 – 898.

[9] CHENG Jinju, CUI Jie, MA Ying, et al. Effects of soy-to-milk protein ratio and sucrose fatty acid ester addition on the stability of ice cream emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 425 – 436.

[10] PALAZOLO G G, SOBRAL P A, WAGNER J R. Freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions prepared with native and thermally-denatured soybean isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 398 – 409.

[11] DE WIT J N, SWINKELS G A. A differential scanning calorimetric study of the thermal denaturation of bovine beta-lactoglobulin. Thermal behaviour at temperatures up to 100 degrees C[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1980, 624(1): 40 – 50.

[12] TRUONG T, BANSAL N, SHARMA R, et al. Effects of emulsion droplet sizes on the crystallisation of milk fat[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 725 – 735.

[13] CORREDIG M, DALGLEISH D G. Effect of temperature and pH on the interactions of whey proteins with casein micelles in skim milk[J]. Food Research International, 1996, 29(1): 49 – 55.

[14] SEGALL K I, GOFF H D. Secondary adsorption of milk proteins from the continuous phase to the oil-water interface in dairy emulsions[J]. International Dairy Journal, 2002, 12(11): 889 – 897.

[15] EUSTON S R, FINNIGAN S R, HIRST R L. Aggregation kinetics of heated whey protein-stabilized emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2000, 14(2): 155 – 161.

[16] RENKEMA J M, VAN VLIET T. Heat-induced gel formation by soy proteins at neutral pH[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 50(6): 1569 – 1573.

[17] KIM M, IRIS T, KOEN D. Crystallization behavior of emulsified fats influences shear-induced partial coalescence[J]. Food Research International, 2018, 113: 362 – 370.

[18] JIANG Jiang, JING Weiqin, XIONG Youling, et al. Interfacial competitive adsorption of different amphipathicity emulsifiers and milk protein affect fat crystallization, physical properties, and morphology of frozen aerated emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 670 – 678.

[19] FREDRICK E, WALSTRA P, DEWETTINCK K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2010, 153(1 – 2): 30 – 42.

[20] FULLER G T, CONSIDINE T, GOLDING M, et al. Aggregation behavior of partially crystalline oil-in-water emulsions: part Ⅱ—effect of solid fat content and interfacial film composition on quiescent and shear stability[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 23 – 32.

[21] BELICIU C M, MORARU C I. Physico-chemical changes in heat treated micellar casein-soy protein mixtures[J]. LWT—Food Sci. Technol., 2013, 54(2): 469 – 476.

[22] IWABUCHI S, WATANABE H, YAMAUCHI F. Thermal denaturation of beta-conglycinin. Kinetic resolution of reaction mechanism[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1991, 39(1): 27 – 33.

[23] ZHAO Qiangzhong, LIU Daolin, LONG Zhao, et al. Effect of sucrose ester concentration on the interfacial characteristics and physical properties of sodium caseinate-stabilized oil-in-water emulsions[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 506 – 513.

[24] JIANG Jiang, JIN Yan, LIANG Xinyu, et al. Synergetic interfacial adsorption of protein and low-molecular-weight emulsifiers in aerated emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 15 – 22.

[25] ROSSA P N, BURIN V M, BORDIGNON-LUIZ M T. Effect of microbial transglutaminase on functional and rheological properties of ice cream with different fat contents[J]. LWT—Food Sci. Technol., 2012, 48(2): 224 – 230.

[26] SOUKOULIS C, CHANDRINOS I. Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with κ-carrageenan on storage quality of vanilla ice cream[J]. LWT—Food Sci. Technol., 2008, 41(10): 1816 – 1827.

[27] OETJEN K, BILKE-KRAUSE C, MADANI M, et al. Temperature effect on foamability, foam stability, and foam structure of milk[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014, 460: 280 – 285.

[28] MÉNDEZ-VELASCO C, GOFF H D. Enhancement of fat colloidal interactions for the preparation of ice cream high in unsaturated fat[J]. International Dairy Journal, 2011, 21(8): 540 – 547.

[29] SOFJAN R P, HARTEL R W. Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream[J]. International Dairy Journal, 2004, 14(3): 255 – 262.