

乳化盐对 Mozzarella 干酪功能特性的影响*

罗洁¹ 王芳² 任发政¹ 郭慧媛¹

(1. 中国农业大学教育部-北京市共建功能乳品重点实验室, 北京 100083;
2. 畜产品北京高等学校工程研究中心, 北京 100083)

【摘要】 针对 Mozzarella 干酪品质存在的缺陷,拟通过添加乳化盐来改善 Mozzarella 干酪功能特性。在 Mozzarella 干酪拉伸过程中分别添加 1%、3%、5% 的柠檬酸钠、焦磷酸钠,测定贮藏第 21 天干酪功能特性的变化。结果表明,添加乳化盐后干酪的硬度和粘聚性显著上升($P<0.05$),油脂析出面积显著增加($P<0.05$),干酪熔化性改善,其中添加 3% 的柠檬酸钠和焦磷酸钠后,熔化面积分别增加了 37.58% 和 59.57%;干酪中钙离子含量下降,说明乳化盐通过螯合酪蛋白胶体,削弱了酪蛋白间的相互作用,从而改善了 Mozzarella 干酪的功能特性。

关键词: Mozzarella 干酪 乳化盐 质构特性 熔化特性

中图分类号: TS252.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)08-0138-05

Effects of Emulsifying Salts on Functionality of Mozzarella Cheese

Luo Jie¹ Wang Fang² Ren Fazheng¹ Guo Huiyuan¹

(1. Key Laboratory of Functional Dairy, Co-constructed by Ministry of Education and Beijing Municipality, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Animal Product, Beijing 100083, China)

Abstract

Effects of two types of emulsifying salts on the functionality of Mozzarella cheese were studied. Trisodium citrate (TSC) and trisodium pyrophosphate (TSPP) were added to the stretching water at level of 1%, 3% and 5% during hot-stretching step, respectively. The main composition, textural properties, meltability and free oil content of the cheese prepared were measured, and the rheological behaviors of the cheese were also observed. The results showed that addition of TSC and TSPP significantly affected the meltability of the cheese. Also, hardness, cohesiveness and free oil content of the cheese increased ($P<0.05$). Meltability content was increased by 37.58% and 59.57% with TSC of 3% and TSPP of 3%, respectively. Addition of the emulsifying salts promoted solubilization of phosphate in the cheese, resulting in protein-protein interactions decreased and protein-water interactions increased. The results showed that addition of TSC and TSPP into stretching water could significantly improve the functionality of Mozzarella cheese.

Key words Mozzarella cheese, Emulsifying salts, Textural properties, Meltability

引言

Mozzarella 干酪属于质构型干酪,其功能特性包括未烘烤之前的质构特性和烘烤时的熔化特性^[1]。质地和熔化性差是 Mozzarella 干酪品质低下的主要表现,因此,改善其功能特性是目前 Mozzarella 干酪

研究的热点之一。

Metzger 等^[2]研究发现,降低牛奶中的钙含量能使干酪获得较柔软的质地和较好的熔化性;Tunick 等^[3]研究发现,增加干酪的水分含量或者降低干酪的蛋白含量能改善 Mozzarella 干酪的熔化性,但水分含量过高将缩短干酪的货架期,导致终产品过粘^[4]。

收稿日期: 2010-10-29 修回日期: 2011-01-06
* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BADB9B06)和北京市重大科技项目(D10110504600000)
作者简介: 罗洁,博士生,主要从事干酪科学与加工研究,E-mail: lizzyj925@hotmail.com
通讯作者: 郭慧媛,讲师,主要从事畜产品科学与加工研究,E-mail: guohuiyuan99@gmail.com

乳化盐是再制干酪制作中不可缺少的原料,添加乳化盐可以促进酪蛋白溶解、水合蛋白质,从而改善再制干酪的功能特性^[5]。研究人员将这种方法应用于 Mozzarella 干酪的生产中,试图改善 Mozzarella 干酪的功能特性。Mizuno 等^[6]采用干盐法添加乳化盐,发现乳化盐可以溶解和水合蛋白质从而使 Mozzarella 干酪获得良好的功能特性,且添加柠檬酸钠、焦磷酸钠比其他乳化盐的效果好^[7]。但这种添加方法因为乳化盐颗粒较大,无法快速与干酪充分作用,使大量乳化盐颗粒在热烫拉伸过程中损失在拉伸水中;而且直接添加固体乳化盐颗粒,会造成乳化盐在干酪中分布不均。

本研究在 Mozzarella 干酪热烫拉伸过程中添加乳化盐,通过测定储藏第 21 天干酪的成分、质构、熔化性和油脂析出性变化,分析乳化盐对 Mozzarella 干酪功能特性的影响,并通过干酪流变性的变化探讨影响其熔化性的机理。

1 材料与方法

1.1 实验材料

牛乳:新鲜牛乳由北京三元食品股份有限公司提供(含乳脂肪 3.8%~4.0%,蛋白质 2.95%~3.11%,酪蛋白 2.7%~2.8%,固形物 12.1%~12.3%)。发酵剂:TCC-3 直投式菌种,由 CHR Hansen 提供。凝乳酶:Stamix1150,由 CHR Hansen 提供(含 50%牛胃蛋白酶和 50%小牛皱胃酶,酶活力为 1 070 U/g)。乳化盐:柠檬酸钠、焦磷酸钠,购自北京化工厂(分析纯)。

1.2 实验仪器

干酪槽、干酪刀、干酪特制打孔器(中国农业大学功能乳品实验室提供)、DK-8B 型电热恒温水槽(上海精宏实验设备有限公司)、KDY-9830 型凯式定氮仪(北京思贝得研究所)、pH211 型精密酸度计(意大利哈纳科仪公司)、求积仪(无锡测绘仪器厂)、TMS Pro 型质构仪(美国 Food Technology Corporation)、3K30 型高速离心机(美国 Sigma 公司)、AR-1500ex 型旋转流变仪(美国 TA 公司)。

1.3 研究方法

1.3.1 Mozzarella 干酪制作工艺

根据 Kindstedt 等^[8]的干酪制作工艺进行改良,分别称取干酪质量的 1%、3%、5% 的乳化盐与 1.8% 的 NaCl 加入 80℃ 热烫拉伸水中,并设立不添加乳化盐的空白组和用干盐法添加 3% 焦磷酸钠的对照组,进行热烫拉伸。

1.3.2 Mozzarella 干酪成分测定

采用酸度计测定干酪的 pH 值^[9];根据 GB

5009.3—2010 的方法测定干酪的水分含量;根据 GB/T 5009.46—2003,采用哥特里-罗兹法测定脂肪含量;采用凯氏定氮法测定干酪中的总氮量^[9];采用钼蓝比色法测定磷含量;采用高锰酸钾滴定法测干酪中的总钙含量^[9];参照 McMahon^[10]的方法测定干酪可分离水分含量。

1.3.3 Mozzarella 干酪功能特性测定

Mozzarella 干酪质构特性的测定参考 Drake^[11]的质构剖面分析法(TPA),测试速度为 2.4 mm/s,下压距离为 30%;Mozzarella 干酪熔化性与油脂析出性的测定参照郭媛^[12]的方法。

1.3.4 Mozzarella 干酪流变性测定

对 Mizuno^[6]测定干酪流变性的方法进行改良,从干酪中心采集,样品直径 40 mm,厚度 2 mm,剪应变 0.005,角频率 1 Hz,升温速率 3℃/min,升温范围 20~80℃。

1.3.5 统计处理

每个实验重复 3 次,采用 SPSS 统计软件(SPSS Statistics 17.0)进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 乳化盐对 Mozzarella 干酪主要成分的影响

由表 1 可以看出,与空白组相比,Mozzarella 干酪 pH 值、水分含量、脂肪含量和蛋白质含量没有显著性差异($P>0.05$);可分离水分含量显著增加($P<0.05$);钙含量显著降低($P<0.05$),且随乳化盐添加量的增加干酪中钙含量降低的趋势减缓;添加柠檬酸钠后干酪磷含量下降,而随焦磷酸钠添加量的增加干酪中磷含量显著上升($P<0.05$)。与空白组相比,对照组干酪 pH 值、水分含量、脂肪含量、蛋白质含量没有显著性差异($P>0.05$);可分离水分含量下降($P<0.05$);钙、磷含量增加($P<0.05$)。

在热烫拉伸水中添加乳化盐通过与酪蛋白胶体螯合,打乱了酪蛋白酸钙-磷酸钙胶体的排列,磷酸盐胶体溶解,一部分钙和磷游离出来并损失在热烫拉伸水中,干酪中钙和磷的含量降低^[7],但添加焦磷酸钠后,由于磷酸盐中磷离子的引入,干酪中磷的含量也随之增加^[13];添加高含量(5%)乳化盐的干酪钙离子含量较低含量的有所回升,可能是因为高乳化盐浓度的环境中,游离出的钙与乳化盐残余酸根离子形成新的沉淀,例如与柠檬酸钠形成柠檬酸钙四水化合物 $\text{Ca}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$ ^[6,14],故钙含量回升。

乳化盐中的钠离子置换干酪中副 κ -酪蛋白磷酸钙的钙离子,而乳化盐残余酸根负离子具强结合水的能力,这部分水被离心出,是可分离水分,故添加乳化盐后干酪可分离水分含量上升。

表 1 乳化盐对 Mozzarella 干酪主要成分的影响

Tab. 1 Effects of emulsifying salts on main composition of Mozzarella cheese

参数	空白组	对照组	柠檬酸钠添加量/%			焦磷酸钠添加量/%		
			1	3	5	1	3	5
pH 值	5.21 ± 0.01 ^a	5.23 ± 0.01 ^a	5.23 ± 0.01 ^a	5.23 ± 0.02 ^a	5.22 ± 0.01 ^a	5.23 ± 0.01 ^a	5.22 ± 0.01 ^a	5.22 ± 0.01 ^a
水分含量/%	50.98 ± 1.30 ^a	49.33 ± 0.82 ^a	50.69 ± 0.57 ^a	51.50 ± 1.35 ^a	51.04 ± 1.16 ^a	49.62 ± 1.21 ^a	50.98 ± 0.74 ^a	50.18 ± 0.29 ^a
脂肪含量/%	23.07 ± 1.15 ^a	22.76 ± 0.30 ^a	22.13 ± 0.58 ^a	22.89 ± 1.53 ^a	23.00 ± 0.01 ^a	22.48 ± 0.85 ^a	22.96 ± 0.64 ^a	22.39 ± 0.12 ^a
蛋白质含量/%	24.76 ± 0.06 ^a	24.54 ± 0.75 ^a	25.04 ± 0.66 ^a	25.08 ± 0.57 ^a	25.00 ± 0.69 ^a	24.43 ± 0.26 ^a	24.81 ± 0.39 ^a	24.11 ± 0.32 ^a
钙含量/mg·(100 g) ⁻¹	736 ± 5.06 ^c	742 ± 2.82 ^c	609 ± 8.02 ^{ab}	606 ± 3.04 ^a	683 ± 6.46 ^c	600 ± 12.84 ^a	639 ± 7.65 ^b	712 ± 2.67 ^d
磷含量/mg·(100 g) ⁻¹	437 ± 7.01 ^b	600 ± 9.17 ^f	434 ± 6.39 ^{ab}	427 ± 6.64 ^a	423 ± 7.93 ^a	508 ± 9.84 ^c	538 ± 4.60 ^d	569 ± 3.43 ^e
可分离水分含量/%	5.93 ± 0.01 ^c	5.34 ± 0.01 ^b	3.94 ± 0.01 ^a	10.59 ± 0.01 ^h	6.13 ± 0.01 ^d	8.53 ± 0.01 ^e	8.37 ± 0.01 ^f	7.12 ± 0.01 ^e

注:同一行字母相同表示与空白组差异不显著,不同则表示差异显著($P < 0.05$)。

对照组用干盐法添加焦磷酸钠后,焦磷酸钠、钙与蛋白质结合,形成新的酪蛋白酸钙-磷酸钙体系^[6~7],钙含量无显著性差异,可分离水含量下降。这说明不同的乳化盐添加方式,乳化盐与酪蛋白胶体螯合的方式和程度不同。选用热烫拉伸水中添加焦磷酸钠方式时,焦磷酸钠颗粒溶于热烫拉伸水中,从外包围酪蛋白纤维,同样能螯合酪蛋白酸钙-磷酸钙胶体,使钙离子含量下降。

表 2 乳化盐对 Mozzarella 干酪质构的影响

Tab. 2 Effect of emulsifying salts on textural profile of Mozzarella cheese

参数	空白组	对照组	柠檬酸钠添加量/%			焦磷酸钠添加量/%		
			1	3	5	1	3	5
硬度/N	11.06 ± 0.15 ^a	18.44 ± 0.79 ^d	14.70 ± 0.64 ^c	10.90 ± 0.02 ^a	14.15 ± 0.58 ^c	14.32 ± 0.91 ^c	12.49 ± 0.35 ^b	19.76 ± 0.88 ^e
粘聚性/g·s ⁻¹	85.18 ± 0.10 ^a	142.4 ± 1.99 ^e	115.23 ± 2.20 ^d	82.94 ± 1.49 ^a	100.47 ± 2.25 ^c	107.49 ± 1.82 ^{cd}	89.65 ± 1.38 ^b	144.33 ± 2.61 ^e
弹性	2.197 ± 0.03 ^a	2.297 ± 0.13 ^a	2.263 ± 0.16 ^a	2.209 ± 0.03 ^a	2.179 ± 0.04 ^a	2.313 ± 0.04 ^a	2.284 ± 0.20 ^a	2.322 ± 0.07 ^a

注:在同一行字母中,a~e 相同则表示与空白组差异不显著,不同则表示差异显著($P < 0.05$)。

成更加均一的蛋白质基质,蛋白质间力分布更均匀,干酪硬度增加^[14]。

2.3 乳化盐对 Mozzarella 干酪熔化性的影响

熔化性是评价 Mozzarella 干酪品质最重要的指标。图 1 中 a~e 相同则表示差异不显著,不同则表示差异显著($P < 0.05$)。与对照组和空白组相比,添加柠檬酸钠和焦磷酸钠后,干酪的熔化性显著改善($P < 0.05$),添加焦磷酸钠的干酪熔化性较添加柠檬酸钠的好。其中,添加 3% 柠檬酸钠以及 3% 和 5% 焦磷酸钠后干酪熔化面积分别增加了 37.58%、59.57%、58.93%。

干酪的熔化性主要取决于酪蛋白胶粒的相互作用,酪蛋白胶粒之间的相互作用减弱,干酪熔化性提高。添加乳化盐后,钠离子螯合了部分酪蛋白胶体,从而打乱了酪蛋白酸钙-磷酸钙胶体的排列和结构,使得一部分钙和磷游离出来,酪蛋白胶粒之间的相

2.2 乳化盐对 Mozzarella 干酪质构特性的影响

质构是影响消费者购买干酪关键品质之一。由表 2 可以看出,与空白组相比,对照组与实验组 Mozzarella 干酪的硬度和粘聚性均显著上升($P < 0.05$),弹性变化不显著($P > 0.05$)。添加乳化盐对干酪质构的影响主要是因为酪蛋白之间的原始结构被破坏或者被打乱,从而导致酪蛋白间的结构变化^[7]。添加乳化盐后,酪蛋白间相互作用降低,形

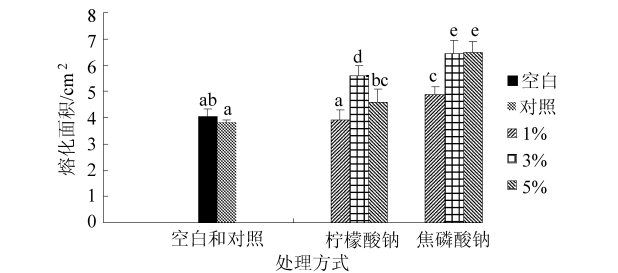


图 1 乳化盐对 Mozzarella 干酪熔化性的影响

Fig. 1 Effect of emulsifying salts on meltability of Mozzarella cheese

互作用减弱,干酪熔化性提高^[7]。对照组采用干盐法将焦磷酸钠添加至干酪凝块中,焦磷酸钠和钙与蛋白质结合形成了新的酪蛋白酸钙-磷酸钙体系,从而使酪蛋白胶粒间相互作用增强,熔化性无法改善^[6]。

根据 Rudan 等^[15]建立的关于焙烤时 Mozzarella

干酪熔化及褐变的模型,焦灼硬壳是阻碍干酪熔化时流动性的重要因素。由表 1 可知加入乳化盐后可分离水分含量增加,因此干酪表面水分蒸发丧失的速度较慢,形成焦灼硬壳的速度也相对缓慢;在 Mozzarella 干酪中添加乳化盐,蛋白质基质的重新分布削弱了蛋白胶束之间的相互作用,束缚在蛋白基质中的脂肪球被释放出来^[16],释放的脂肪球在加热时聚集在一起,随蛋白基质的崩塌而流动形成干酪的疏水表面,减缓了水分的蒸发丧失^[15];此外,由表 2 可知乳化盐的添加使干酪的粘聚性增加,增加了 Mozzarella 干酪熔化时的流动性,改善了干酪的熔化性。

2.4 乳化盐对 Mozzarella 干酪油脂析出性的影响

油脂析出性对 Mozzarella 干酪品质的影响显著。图 2 中字母相同则表示差异不显著,不同则表示差异显著 ($P < 0.05$)。与空白组相比,对照组干酪油脂析出性无显著性差异 ($P > 0.05$);添加柠檬酸钠和焦磷酸钠后干酪的油脂析出面积显著增大 ($P < 0.05$)。随柠檬酸钠添加量的增加,干酪油脂析出面积呈上升的趋势;随焦磷酸钠添加量的增加,干酪油脂析出面积呈先上升后下降的趋势;添加焦磷酸钠的干酪油脂析出面积较添加柠檬酸钠的大。

乳化盐能促进干酪水合,导致酪蛋白基质膨胀。交互作用膨胀的蛋白质可以对分散在蛋白质线性结构间乳浆通道中的脂肪球施加压力,使脂肪球被挤压破裂连在一起形成油块,包裹在蛋白质网络中^[10]。当干酪受到热的作用,蛋白质网络坍塌,这些大的油块就形成游离油脂释放出来。同时,乳化盐还能影响酪蛋白的乳化作用^[17],使脂肪熔化连在一起形成游离油脂的倾向变小,高浓度乳化盐倾向形成较少的游离油脂。

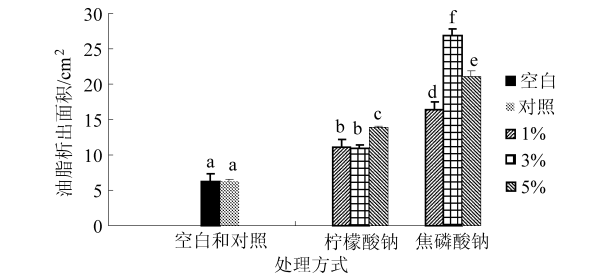


图 2 乳化盐对 Mozzarella 干酪油脂析出性的影响
Fig. 2 Effects of emulsifying salts on free oil content of Mozzarella cheese

2.5 乳化盐对 Mozzarella 干酪流变性的影响

干酪熔化时先松软坍塌后开始流动。松软坍塌与加热时干酪失去弹性有关,流动则在干酪粘性模

量比弹性模量作用强时发生^[17]。

图 3a 中,在高温(大于 60℃)时,相同温度下添加 3% 柠檬酸钠的 Mozzarella 干酪损耗正切值最大,粘性变化趋势较为剧烈,表征了其干酪的流动性好;且当损耗正切值为 1 时,即达到弹性模量与粘性模量相等的临界点,添加 3% 柠檬酸钠的干酪对应的温度最低,说明其最先达到软化点,样品熔化较早,流动距离大,因此在 4 组干酪中其熔化性最好。其他依次是添加 5% 柠檬酸钠、空白组、添加 1% 柠檬酸钠、对照组的 Mozzarella 干酪。图 3b 中,高温区相同温度下添加 5% 焦磷酸钠的 Mozzarella 干酪损耗正切值最大,其他依次是添加 3% 焦磷酸钠、空白组、添加 1% 焦磷酸钠、对照组的 Mozzarella 干酪。这与图 1 中采用熔化面积衡量干酪熔化性得到的结果一致。

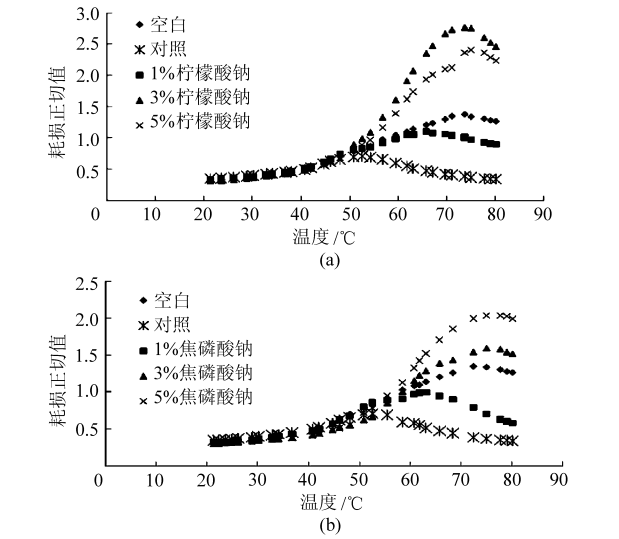


图 3 添加乳化盐的 Mozzarella 干酪流变学特性曲线
Fig. 3 Rheology property curves of Mozzarella cheese with addition of emulsifying salts

3 结束语

在热烫拉伸水中添加乳化盐能改善 Mozzarella 干酪的功能特性。研究表明,添加乳化盐后 Mozzarella 干酪硬度增加、粘聚性增加、油脂析出面积增加、熔化性显著改善,其中添加 3% 柠檬酸钠和添加 3%、5% 焦磷酸钠的 Mozzarella 干酪的熔化效果最佳。添加的乳化盐通过与酪蛋白酸钙-磷酸钙胶体螯合,导致胶体溶解,钙离子游离,酪蛋白间相互作用削弱,酪蛋白与水的相互作用增强。与干盐法添加乳化盐的方式相比,在热烫拉伸水中添加柠檬酸钠和焦磷酸钠,干酪熔化面积和油脂析出面积均显著增加,更适于工业化生产。

参 考 文 献

- 1 McMahon D J, Oberg C J, McManus W. Functionality of Mozzarella cheese[J]. Australian Journal of Dairy Technology, 1993, 48(2): 99 ~ 104.
- 2 Metzger L E, Barbano D M, Runda M A, et al. Effect of milk preacidification on low fat Mozzarella cheese composition and yield[J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83(4): 648 ~ 658.
- 3 Tunick M H, Mackey K L, Smith P W, et al. Effect of composition and storage on the texture of Mozzarella cheese[J]. Netherlands Milk and Dairy Journal, 1991, 45: 117 ~ 125.
- 4 Kosikowski F V, Mistry V V. Cheese and fermented milk foods: volume 1[M]. Westport: Origins and Principles, 1997.
- 5 Berger W, Klostermeyer H, Merkenich K, et al. Processed cheese manufacture: a JOHA guide[P]. BK Giulini Chemie GmbH & Co, OHG, Ladenburg, Germany, 1998.
- 6 Mizuno R, Lucey J A. Effect of two types of emulsifying salts on the functionality of pasta filata cheese [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(10): 3 411 ~ 3 425.
- 7 Mizuno R, Lucey J A. Effect of emulsifying salts on the turbidity and calcium phosphate protein interactions in casein micelles [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(9): 3 070 ~ 3 078.
- 8 Kindstedt P S, Rowney M, Roupas P. Technology, biochemistry and functionality of pasta filata/pizza cheese[M] // Law B A. Technology of cheese making. Sheffield, UK: Academic Press, 1999: 193 ~ 221.
- 9 黄伟坤. 食品检验与分析[M]. 北京:轻工业出版社,1989.
- 10 McMahon D J, Fife R L, Oberg C J. Water partitioning in Mozzarella cheese and its relationship to cheese meltability[J]. Journal of Dairy Science, 1999, 82(7): 1 361 ~ 1 369.
- 11 Drake M A, Gerard P D. Relationship between instrumental and sensory measurements of cheese texture[J]. Journal of Texture Studies, 1999, 30(4): 451 ~ 476.
- 12 郭媛,郭慧媛,王芳,等. 堆叠 pH 值对 Mozzarella 干酪熔化特性的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(3):156 ~ 160.
Guo Yuan,Guo Huiyuan,Wang Fang, et al. Effect of milling pH value on Mozzarella cheese meltability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):156 ~ 160. (in Chinese)
- 13 Cheng L J, Augustin M A, McKinnon I R, et al. The effect of mineral salt addition on Mozzarella cheese-making[J]. Australian Journal of Dairy Technology, 1997, 52(8): 8 ~ 14.
- 14 Pastorino J, Hansen C L, McMahon D J. Effect of sodium citrate on structure-function relationships of cheddar cheese[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(10): 3 113 ~ 3 121.
- 15 Rudan M A, Barbano D M. A model of Mozzarella cheese melting and browning during pizza baking[J]. Journal of Dairy Science, 1998, 81(8): 2 312 ~ 2 319.
- 16 Lucey J A, Johnson M E, Horne D S. Invited review: perspectives on the basis of the rheology and textural properties of cheese[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(9): 2 725 ~ 2 743.
- 17 Kindstedt P S, Kiely L J, Gilmore J A. Variation in composition and functional properties within brine salted Mozzarella cheese [J]. Journal of Dairy Science, 1992, 75(11): 2 913 ~ 2 921.

(上接第 167 页)

- 7 应义斌. 水果形状的傅里叶描述子研究[J]. 生物数学学报,2001,16(2):234 ~ 240.
Ying Yibin. Fourier descriptor of fruit shape[J]. Journal of Biomathematics, 2001,16(2):234 ~ 240. (in chinese)
- 8 Zahn C T, Roskies R Z. Fourier descriptors for plane closed curves[J]. IEEE Transactions on Computers, 1972, C-21(3): 269 ~ 281.
- 9 Frank P Kuhl, Charles R Giardina. Elliptic Fourier features of a closed contour[J]. Computer Graphics and Image Processing,1982,18(3):236 ~ 258.
- 10 汪业衡,张翔. 椭圆傅里叶级数展开法和椭圆光波导的截止频率[J]. 光学学报,2000,20(2):204 ~ 213.
Wang Yeheng, Zhang Xiang. Elliptical fourier series expansion method and cutoff frequencies of elliptical optical waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2000,20(2):204 ~ 213. (in chinese)
- 11 余少波,鞠发平,肖英明. 物体识别不变性方法比较分析(II)-统计方法[J]. 海军工程学院学报,1993,62(1):8 ~ 15.
Yu Shaobo,Ju Faping, Xiao Yingming. Comparison and analysis of invariants recognition (II)-algebraical method [J]. Journal of Naval Academy of Engineering,1993,62(1): 8 ~ 15. (in Chinese)