

连续流磁感应电场设备在牛奶灭菌中的应用案例

郑子涛¹, 薛丽萍¹, 张令涛¹, 杨哪^{1,2}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214000; 2. 英都斯特(无锡)感应科技有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 牛奶富含营养, 是优质蛋白质、维生素和矿物质的丰富来源, 同时也成为微生物生长的良好培养基, 因此在生产过程中需要杀菌处理。目前, 热处理是主要的牛奶杀菌方法, 虽然有效杀灭病原微生物, 但高温会导致热敏营养成分损失。磁感应电场是一种新兴的物理技术, 利用电磁感应原理, 使食品在无接触的情况下, 通过热和非热效应来处理微生物。在本案例中, 感应电场用于处理全脂牛奶, 研究了其对微生物的杀灭效果, 并与传统热处理进行比较, 以评估不同参数条件下牛奶的主要营养成分和理化性质的变化, 为感应电场处理牛奶产品的应用提供技术参考。

关键词: 感应电场; 全脂牛奶; 巴氏杀菌; 激光共聚焦; 杀菌

Application case of continuous flow magnetic induction electric field equipment in milk sterilization

Zheng Zitao¹, Xue Liping¹, Zhang Lingtao¹, Yang Na^{1,2}

(1. School of food science and technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 2. Induce-Tech Co., Ltd, Wuxi, 214000, China)

Abstract: Milk is packed with nutrients and is a rich source of high-quality protein, vitamins and minerals. At the same time, it also becomes a good medium for microbial growth, so it needs sterilization treatment in the production process. At present, heat treatment is the main milk sterilization method, although it is effective in killing pathogenic microorganisms, but high temperature will lead to the loss of heat-sensitive nutrients. Induced electric field is an emerging physical technology that uses the principle of electromagnetic induction to enable food to handle microorganisms through thermal and non-thermal effects without contact. In this case, induced electric field was used to treat whole milk, and its killing effect on microorganisms was studied, and compared with traditional heat treatment, so as to evaluate the changes of main nutrients and

physical and chemical properties of milk under different parameter conditions, and provide technical reference for the application of induced electric field treatment of milk products.

Keywords: Induced electric field; Whole milk; Pasteurization; Confocal laser scanning microscopy; Sterilization

1 仪器设备

磁感应电场低温流体杀菌系统（MIH-S6）由英都斯特（无锡）感应科技有限公司提供，如图 1 所示，系统由电源、磁芯（铁镍合金）、蠕动泵、控制系统、冷却系统和无菌灌装系统构成。应用包括：饮料（牛奶、豆浆、果汁等），调味品（酱油、醋等），全蛋液，黄酒，果酒，中药提取物等的杀菌和灭酶处理。



图 1 磁感应电场低温杀菌系统示意图

磁感应电场低温杀菌系统可以调整激励电压、工作频率和样品流速控制处理的电场密度（强度）与时间，通过热效应与非热效应的结合对样品杀菌，表 1 显示了感应电场系统参数。

表 1 磁感应电场低温杀菌系统参数

指标	仪器性能
激励电压	0-800 V
频率	30-80 kHz
磁感应电流密度	0-20 A/cm ² （热效应）
磁感应电场强度	0-200 V/cm ² （非热效应）

处理方式	间歇式/连续式
处理量	0-3000 mL/min (0-180 L/h)

中国仪器仪表学会

2 材料与方法

2.1 材料与仪器

全脂牛奶（脂肪含量 4%）购自无锡天资乳业有限公司；营养肉汤及营养琼脂培养基，广东环凯微生物科技有限公司；甘露醇高盐琼脂及麦康凯琼脂培养基，青岛海博生物技术有限公司；P0469S 电泳预制胶，上样缓冲液，碧云天生物技术； α -乳清蛋白、 β -乳球蛋白及氨基酸标准样品购自 Sigama 公司；其余试剂来自国药集团，均为分析纯及以上。

H10 型红外热成像仪，海康威视公司；FE-28 型 pH 计及 FE-38 型电导率仪，瑞士 Mettler Toledo 公司；NR110 型色差仪，日本 3NH 公司；Nano Brook Omni 激光粒度仪，美国 Brookhaven 公司；LSM710 型激光共聚焦显微镜，德国 Zeiss 公司；No.1100 型氨基酸专用高效液相色谱系统，美国 Agilent 公司。

2.2 处理参数和条件

对于感应电场（Induced electric field, IEF）处理，将容器中的牛奶（ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ）以不同的流量（4、6、8 L/h）泵入样品管道，处理时间取决于液体通过二次管道时的停留时间。然后，在频率为 50 kHz 的激励电压（300、400、500 V）下工作。在此过程中，使用红外测温设备记录样品的温度，当牛奶通过出口后使用冷却系统将其冷却至室温，然后样品通过无菌灌装系统进行包装。以 64°C 和 69°C 的常规加热(CH)处理作为对照，即 CH64 和 CH69。此外，使用 HTST 组(72°C , 15 s)作为对照处理。这些处理的参数如表 2 所示。

表 2 不同料液的磁感应电场处理参数

编号	激励条件 (V)	流速 (L/h)	处理时间(s)	感应电场强度 (V/cm)	出口温度 ($^\circ\text{C}$)
E300-4	300	4	196.2	11.11	45
E300-6	300	6	130.8	11.11	36
E300-8	300	8	98.1	11.11	33
E400-4	400	4	196.2	14.81	69
E400-6	400	6	130.8	14.81	54
E400-8	400	8	98.1	14.81	47
E500-4	500	4	196.2	18.52	95
E500-6	500	6	130.8	18.52	87
E500-8	500	8	98.1	18.52	64

CH64	--	--	98.1	--	64
CH69	--	--	196.2	--	69
HTST	--	--	15	--	72

2.3 分析方法

2.3.1 微生物处理

金黄色葡萄球菌和大肠杆菌甘油管从-80 °C取出后在室温下解冻涂布至营养琼脂培养基上，使用前，将菌株接种于营养肉汤培养液中，在 37°C、200 rpm 振荡 12 h 中扩大培养。将培养液离心（8000 rpm，4°C，15min）后收集细菌，用无菌水冲洗两次。将细菌浓度调整为 10^9 - 10^{10} CFU/mL，并以 1%的比例加入牛奶中，调整初始细菌浓度为 10^7 - 10^8 CFU/mL。在电场或热处理后进行涂布平板计数。处理后的样品保存在 4°C，期间每 4 天测量一次菌落总数。

2.3.2 pH、电导率和颜色测量

使用 pH 计和电导率仪测量牛奶样品，使用前校准并稳定至 20°C 下进行。

根据 CIE-Lab 系统来测量牛奶样品的色度，其中 L^* 代表亮度， a^* 代表红度， b^* 代表黄度。平行测量三次，色差值 ΔE 通过以下公式进行计算：

$$\Delta E = ((L^* - L_c^*)^2 + (a^* - a_c^*)^2 + (b^* - b_c^*)^2)^{0.5}$$

其中， L^* 、 a^* 、 b^* 为处理后样品的颜色值， L_c^* 、 a_c^* 、 b_c^* 为对照的颜色值。

2.3.3 粒径测量

使用基于动态光散射方法的激光粒度仪测量牛奶的粒度分布^[1]。使用含有 20 mmol/L 咪唑、5 mmol/L 氯化钙和 30 mmol/L 的氯化钠的 Ca-咪唑缓冲液稀释样品，测量在 20 min 内进行，以减少溶液的不稳定性造成的影响。

2.3.4 乳脂肪膜测量

在 10 mL 牛奶样品中加入 10 μ L 0.1% 尼罗红染色液。将混合物孵育 30 分钟，使脂肪染色。随后，将 10 μ L 染色的样品转移到玻璃载玻片上。使用倒置激光共聚焦显微镜对牛奶进行微观结构分析^[2]，探针标记的脂肪在 488 nm 波长下被激发。

2.3.5 酪蛋白和乳铁蛋白含量测量

取样品 1 mL，4500 rpm 离心 10 min，取上清液 200 μ L，去离子水稀释 5 倍；加入 12 μ L 10% 醋酸，调节 pH 为 4.6-4.7，使酪蛋白析出。8000 rpm 离心 10 min，去除上清；沉淀物用

去离子水冲洗两次。沉淀的酪蛋白用 0.1 mol/L NaOH 溶液溶解。酪蛋白含量采用凯氏定氮法^[3]测定，蛋白质转换系数为 6.40。

乳铁蛋白检测采用牛乳铁蛋白 ELISA 试剂盒。使用前，将试剂置于室温。取 1ml 牛奶，4000 rpm 离心 10 min，收集下层样品，稀释 1000 倍。根据试剂盒提供的说明进行测量。

2.3.6 凝胶电泳分析

在还原和非还原条件下，使用电泳对牛奶中的蛋白质进行分析^[2]。使用梯度浓度为 4-20% 的预制凝胶。然后将牛奶样品稀释 5 倍，与上样缓冲液按 4:1 的比例混合，在沸水浴中加热 5 min 使蛋白变性，取 8 μ L 样品上样，电泳后用 0.1% 考马斯亮蓝溶液(甲醇:乙酸:水= 1:1:8)染色 2h。随后，用脱色液(乙醇:乙酸:水= 1:1:8)对凝胶进行脱色。

2.3.7 游离氨基酸含量测量

使用高效液相色谱测量牛奶中游离氨基酸含量，Agilent Hypersil ODS 柱(5 μ m, 4.0 mm * 250 mm)，采用梯度洗脱，洗脱程序为：0 min, 8%B; 17 min, 50%B; 20.1 min, 100%B, 24.0 min, 0%B; 流动相流速为 1.0 mL/min; 柱温为 40°C。紫外检测器检测波长为 328 nm，脯氨酸在 262 nm 处检测，氨基酸含量使用外标法进行定量。将 10% 的三氯乙酸与牛奶以 1:1 的比例混合制备样品。使混合物沉淀 1 h; 收集上清液，用 0.22 μ m 膜过滤后注射。

2.3.8 数据处理

实验结果采用 SPSS22 进行分析。在 95% 的置信水平上对数据进行方差分析，并使用不同的字母表示显著性差异($P < 0.05$)。除非另有说明，所有实验均重复三次($n = 3$)进行测量。

3 磁感应电场处理牛奶案例结果分析

3.1 对牛奶微生物的处理

考察了电场强度和停留时间对其杀灭大肠杆菌和金黄色葡萄球菌效果的影响。结果如图 2A 所示。接种牛奶中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的初始菌落计数分别为 7.39 和 7.13 Log。在 IEF (11.11 V/cm) 下，在 8、6 和 4 L/h 的流速下，样品的温度仅为 33、36 和 45°C，相应的保留时间分别为 98.1、130.8 和 196.2 s(表 2)。E400-8 组出口温度为 47°C, 14.81 V/cm，持续 98.1 s，大肠杆菌菌落减少 0.89 Log，金黄色葡萄球菌菌落减少 0.51 Log。低于 50°C 的常规热处理没有显著的杀菌效果^[4]。因此，失活效应可归因于非热效应，更具体地说，是 47°C 下感应电场的影响。

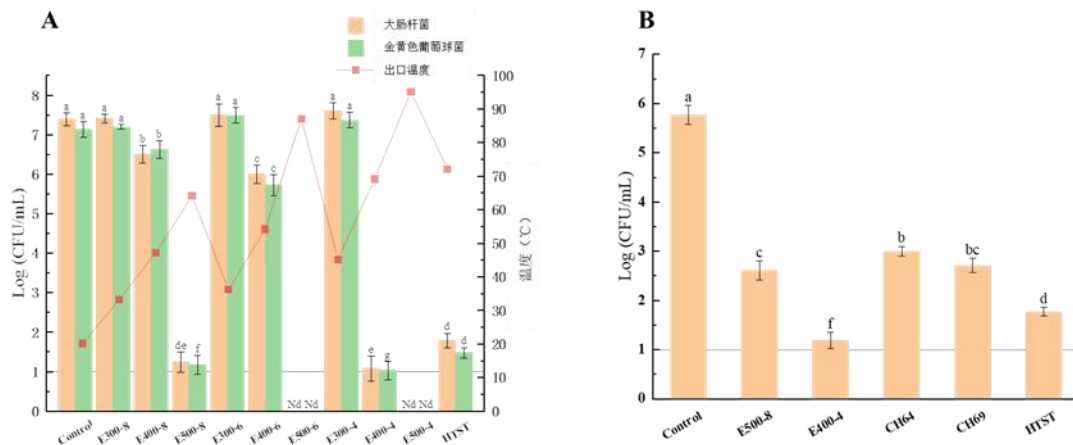


图 2 (A) 不同处理后牛奶中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌数量及出口温度；(B) 不同处理后生奶菌落总数

使用原料奶在 64°C 到 72°C 的温度范围内进行 IEF 或常规热处理，结果与添加细菌的灭菌奶不同(如图 2B 所示)。本试验原料乳初始菌落数为 5.77 Log；经 18.52 V/cm IEF 处理后，菌落总数减少了 3.16 Log，而 64°C 处理的对照组减少了 2.77 Log。IEF 的非热效应相对有限。E400-4 组在较高温度下经过较长时间的 IEF 处理，减少了 4.58 Log，而在 69°C 处理的对照组减少了 3.06 Log。与 14.81 V/cm 的 E400-4 组相比，HTST 处理导致总微生物减少 4.00 Log，杀菌效果较弱。电场强度越强，持续时间越长，温度升高的幅度越大。电场处理的失活机制通常被认为以热效应为主，IEF 处理中也观察到由于非热效应对细菌造成的细胞膜损伤。张^[5]和吴^[6]等人观察到 IEF 处理后细菌细胞形态学的微观损伤，推测是电场导致细胞膜完整性和功能的丧失。

3.2 对牛奶理化性质的影响

牛奶的 pH 值通常在 6.6 到 6.8 之间。结果(表 4)表明，与对照组(pH = 6.68)相比，IEF 处理和常规热处理都略微提高了牛奶的 pH 值。用 IEF 处理过的牛奶的电导率明显高于对照或热处理过的牛奶。牛奶的导电性受其成分和温度的影响，包括蛋白质、氨基酸、脂肪和 Ca²⁺含量。电场对细胞结构的破坏导致细胞内物质的释放，如蛋白质和核酸^[7]，导致电导率增加。

表 4 牛奶体系中微生物的杀菌效果

参数	pH	Conductivity	L	a	b	ΔE
Control	6.68±0.01 a	6194±18.66 b	75.56±0.02 b	-1.23±0.02 ab	3.88±0.04 a	--
E500-8	6.70±0.00 a	6245±69.86 a	75.53±0.04 b	-1.28±0.02 b	3.66±0.06 ab	0.22
E400-4	6.71±0.01 a	6254±18.57 a	75.64±0.02 b	-1.28±0.01 b	3.50±0.09 b	0.39
CH64	6.71±0.03 a	6193±20.68 b	75.72±0.07 b	-1.19±0.00 a	3.61±0.02 b	0.31
CH69	6.73±0.01 a	6165.5±6.65 b	76.18±0.01a	-1.20±0.01 a	3.55±0.03 b	0.7
HTST	6.71±0.03 a	6147±42.12 b	76.40±0.29 a	-1.18±0.06 a	3.55±0.25 b	0.9

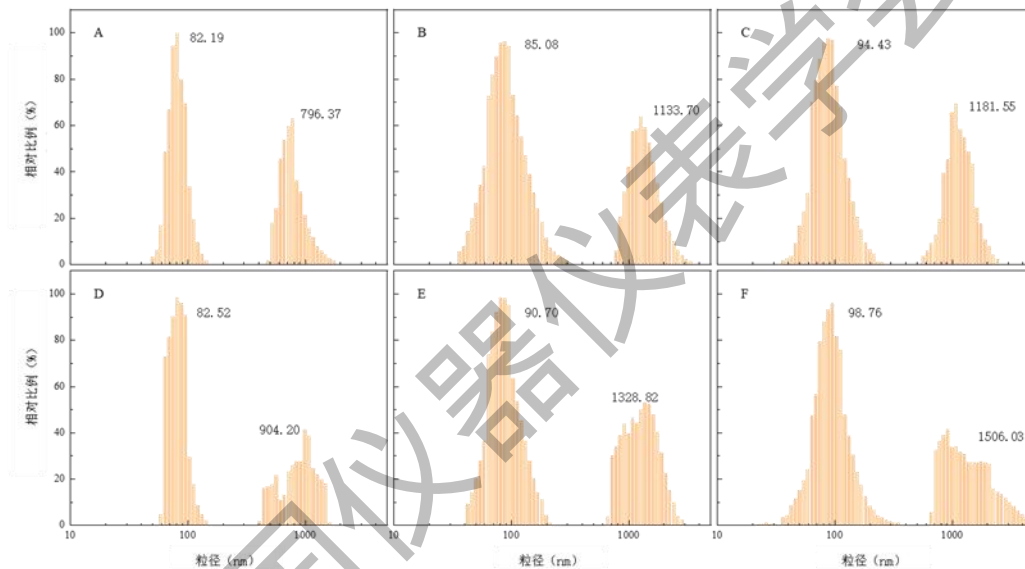


图 3 牛奶粒径分布图, A, 对照组; B, IEF500-8 组; C, IEF400-4 组; D, CH64 组; E, CH69 组; F, HTST 组。

当液体中存在粒子并均匀反射所有波长的光时, 溶液呈现白色^[8]。脱脂牛奶的乳白色是由酪蛋白胶束的光散射引起的, 而在全脂牛奶中, 反射光的更大比例来自更大、更有效的脂肪球。 L^* 值(亮度)的增加是由于牛奶中的粒度大小分布变化, 包括乳脂的积累和变性 β -乳球蛋白与酪蛋白的结合。粒径大小测量结果(图 3)显示, IEF 和 CH 处理后的牛奶样品略有增加, 温度越高, 增加的幅度越明显, 但 IEF 组相对于 CH 组, 酪蛋白胶束的粒径大小都略有增加, 在 64°C 和 69°C 时分别增加了 3.10% 和 4.11%。激光共聚焦结果(图 4)显示, 随着处理温度的升高, 乳脂球聚集, 而 IEF 组的脂肪球更细, 更分散。乳脂球的聚集可能是由于脂肪

球膜表面吸附了更多的酪蛋白胶束，这也是由二硫键交换反应引起的^[9]。激光共聚焦结果和粒径大小测量结果呈现出相同的趋势，越高的温度下，较大的脂肪球的数量越多。

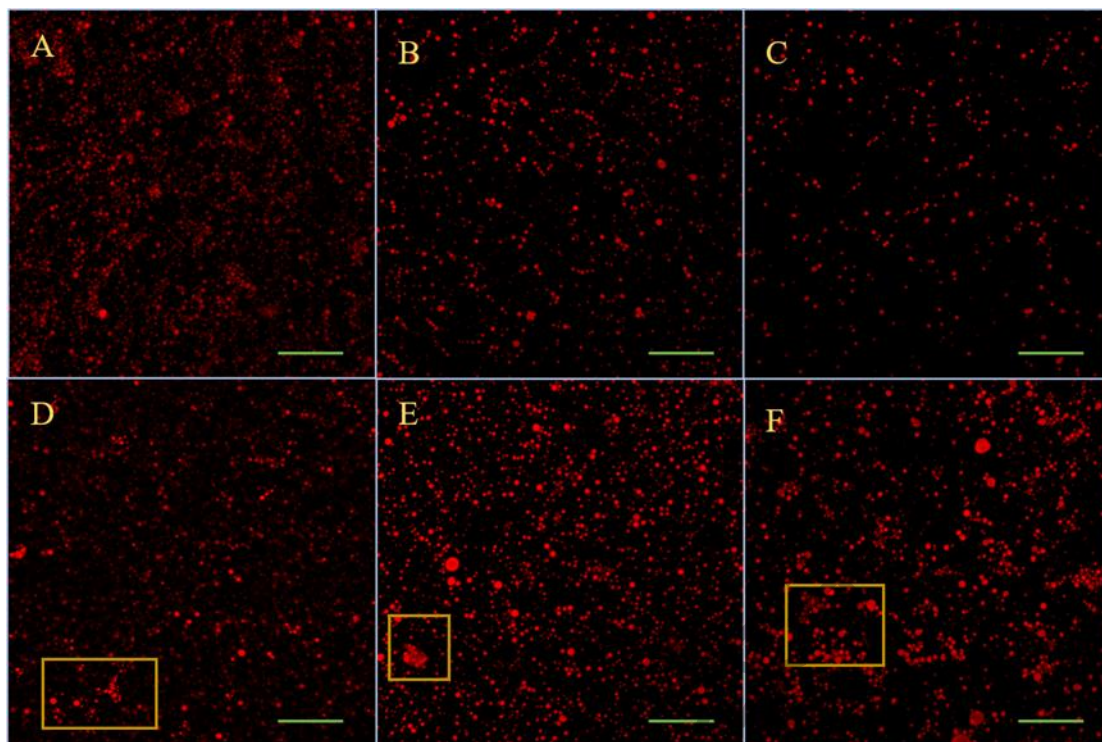


图4 牛奶的激光共聚焦图, A, 对照组; B, IEF500-8组; C, IEF400-4组; D, CH64组; E, CH69组; F, HTST组

CH69 和 HTST 组 L^* 和 a^* 值显著升高, b^* 值显著降低 (表 4), 说明处理后颜色发生了变化, IEF 组的变化相对更低。在高温处理过程中, 叶黄素和 β -类胡萝卜素的浓度受到影响, 导致牛奶颜色发生变化^[10]。色差 $\Delta E < 0.5$ 时, 一般很难用肉眼检测到。E500-8 组和 E400-4 组的 ΔE 值都低于 0.5, 表明视觉差异很小。然而, 在较高温度下, CH 组的 ΔE 值大于 0.5, 表明颜色变化更明显。

3.3 对牛奶蛋白质和游离氨基酸含量的影响

酪蛋白具有优良的热稳定性, 在 pH 为 6.7 时, 即使加热到 100°C 保持 24 小时, 牛奶不会聚集, 酪蛋白的含量也不会改变。然而, 随着半胱氨酸含量的降低, 其他蛋白质和变性 β -乳球蛋白可能与酪蛋白结合并共沉淀^[11], 导致等电点法测定的蛋白质含量增加。结果(表 5)显示处理过的牛奶中酪蛋白含量略有增加。乳铁蛋白是一种热敏蛋白, 低温长时(60°C, 30 min)或高温短时(72°C, 15 s)等处理对牛奶中的乳铁蛋白含量没有影响^[12]。在实验中也观察到类似的结果, 即使在 69°C 下, IEF 处理对乳铁蛋白含量也没有显著影响。

表5 生理盐水体系中微生物的杀菌效果

参数	Control	E500-8	E400-4	CH64	CH69	HTST
酪蛋白	2.28±0.17 a	2.26±0.12 a	2.35±0.08 a	2.28±0.01 a	2.30±0.14 a	2.35±0.00 a
乳铁蛋白	0.40±0.03 a	0.38±0.02 a	0.37±0.01 a	0.37±0.00 a	0.35±0.02 a	0.36±0.01 a

SDS-PAGE 电泳结果(图 5)显示, 在还原和非还原电泳实验中, 所有蛋白之间没有显著差异。在本研究中, 只有对照组和 CH64 组出现了稍暗的条带, 说明 IEF 和低温 CH 处理对蛋白质的影响较弱。由于使用了低强度和短时间的 IEF, 处理对牛奶中热敏蛋白含量的影响最小。总的来说, 在 IEF 组和未处理的样本之间没有观察到显著差异。

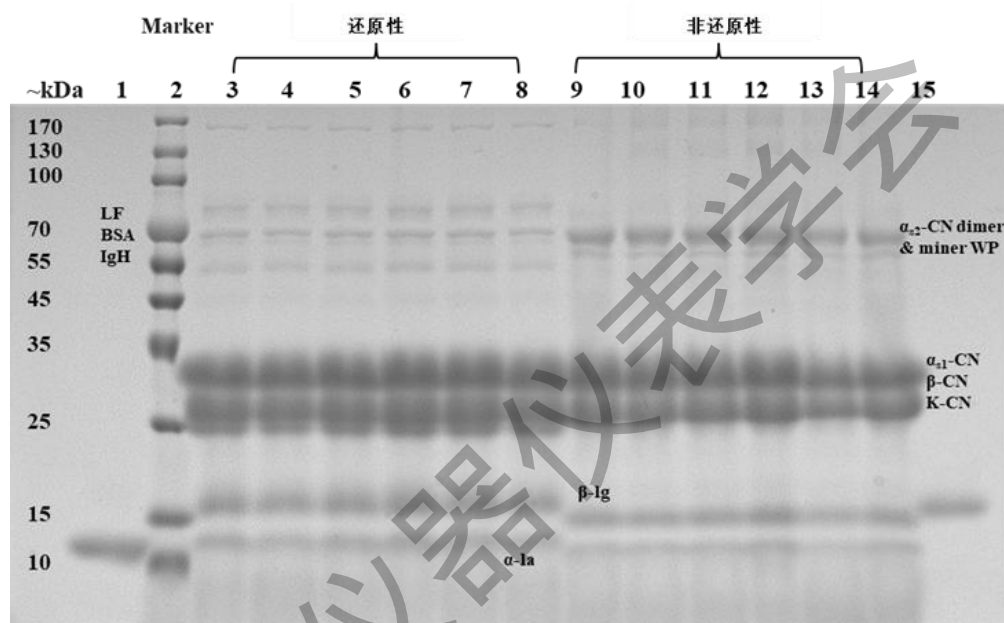


图 5 牛奶凝胶电泳图, 泳道 1、15 为 α -1a 和 β -Ig 标记(还原性), 泳道 2 为分子量标记, 3-8、9-14 分别为还原和非还原组, 从左至右分别为 Control、IEF500-8、IEF400-4、CH64、CH69 和 HTST 组

与对照组相比(表 5, E400-4 组(14.81 V/cm)的总游离氨基酸含量无显著变化, 而 E500-8 组(18.52 V/cm)的总游离氨基酸含量略有增加, 这种增加可能归因于对蛋白质构象的非热效应。较高的 IEF (E500-8 组, 18.52 V/cm)下, 与对照组和 HTST 组相比, 天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、组氨酸、蛋氨酸和苯丙氨酸含量显著升高, 甘氨酸和亮氨酸含量略有下降。精氨酸、半胱氨酸和缬氨酸含量在各处理后均有所下降。电场对蛋白质结构修饰的主要贡献可能是促进蛋白质-蛋白质相互作用或蛋白质与其他大分子(如碳水化合物和脂质)之间复合物的形成 [13]。

表 5 不同处理后牛奶游离氨基酸含量

游离氨基酸	Control	E500-8	E400-4	CH64	CH69	HTST
-------	---------	--------	--------	------	------	------

天冬氨酸	1.54±0.00 ab	1.56±0.03 a	1.49±0.03 bc	1.47±0.01 c	1.47±0.03 c	1.53±0.03 ab
谷氨酸	5.49±0.02 ab	5.59±0.03 a	5.49±0.07 ab	5.49±0.03 ab	5.43±0.05 b	5.49±0.08 ab
丝氨酸	0.09±0.02 ab	0.08±0.02 a	0.09±0.01 ab	0.08±0.00 ab	0.07±0.01 a	0.10±0.04 ab
组氨酸	0.12±0.01 ab	0.15±0.02 a	0.08±0.01 b	0.09±0.01 b	0.10±0.01 ab	0.13±0.04 ab
甘氨酸	0.44±0.00 bc	0.44±0.01 bc	0.44±0.00 ab	0.45±0.00 ab	0.45±0.00 a	0.44±0.00 c
苏氨酸	1.76±0.01 a	1.74±0.04 a	1.75±0.01 a	1.76±0.02 a	1.72±0.01 a	1.75±0.02 a
精氨酸	0.46±0.02 a	0.44±0.01 ab	0.43±0.01 b	0.42±0.00 b	0.45±0.01 ab	0.43±0.00 b
丙氨酸	0.57±0.01 a	0.59±0.01 a	0.57±0.01 a	0.60±0.04 a	0.62±0.05 a	0.42±0.22 a
酪氨酸	0.13±0.01 a	0.14±0.03 a	0.13±0.02 a	0.12±0.01 a	0.16±0.02 a	0.16±0.02 a
半胱氨酸	0.05±0.03 ab	0.02±0.00 b	0.02±0.00 b	0.03±0.00 b	0.06±0.02 a	0.03±0.00 b
缬氨酸	0.19±0.01 a	0.18±0.00 b	0.18±0.00 b	0.18±0.00 b	0.19±0.00 a	0.18±0.01 b
蛋氨酸	0.03±0.01 c	0.5±0.03 a	0.23±0.04 b	0.31±0.13 b	0.23±0.15 b	0.27±0.04 b
色氨酸	0.17±0.02 a	0.15±0.00 a	0.16±0.02 a	0.18±0.01 a	0.18±0.02 a	0.18±0.01 a
苯丙氨酸	0.09±0.04 ab	0.12±0.02 a	0.08±0.03 ab	0.04±0.00 b	0.08±0.03 ab	0.06±0.03 ab
异亮氨酸	0.11±0.02 a	0.13±0.01 a	0.11±0.03 a	0.08±0.00 a	0.11±0.02 a	0.09±0.03 a
赖氨酸	0.14±0.02 a	0.13±0.01 a	0.14±0.01 a	0.13±0.01 a	0.14±0.02 a	0.12±0.01 a
亮氨酸	0.26±0.04 a	0.12±0.08 b	0.17±0.00 ab	0.17±0.00 ab	0.23±0.03 a	0.19±0.01 ab
脯氨酸	0.49±0.02 a	0.50±0.04 a	0.49±0.06 a	0.44±0.02 a	0.48±0.01 a	0.48±0.02 a
总游离氨基酸	12.14±0.19 b	12.56±0.13 a	12.05±0.26 b	12.04±0.15 b	12.18±0.2 ab	12.05±0.06 b

3.4 牛奶储藏期

图 6 显示了处理后 4°C 储存期间乳汁的总菌落数。由于原料奶中初始菌落含量高，表明低温和中温处理不能完全灭菌。因此，随着时间的推移，菌落总数逐渐增加。IEF500-8 组和 HTST 组的初步结果相似，导致菌落生长趋势相似。贮藏 12 天后菌落卫生指数超过 5 Log，表明微生物安全性受损^[14]。然而，与 HTST 组相比，IEF400-4 组将牛奶的保质期延长了约 6 天，这表明 IEF400-4 在抑制微生物生长方面是有效的。

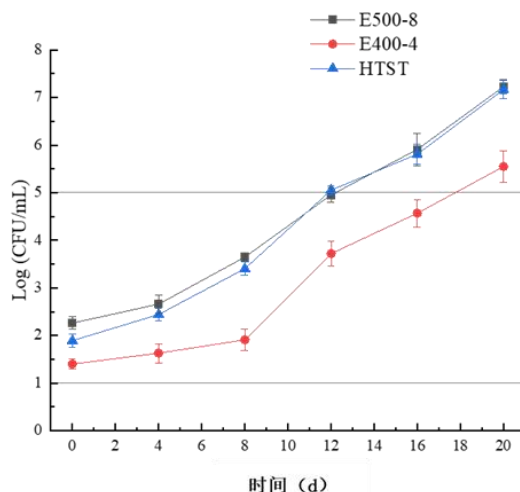


图6 牛奶的储藏期

4 总结

本案例基于磁电耦合的连续流实验装置,对牛奶进行感应电场杀菌处理。由于非热效应,IEF处理比HTST处理取得了更好的细菌灭活效果。这种效应随着电场和温度的增大而增强。与CH处理相比,在64°C和69°C的IEF处理后观察到额外的0.4和1.5 Log失活效应。此外,IEF处理对牛奶的理化性质和营养成分(包括颜色、游离氨基酸和蛋白质含量)的影响很小。所有经过IEF处理的牛奶都显示出最小的视觉差异,但热处理后的样品呈现明显的颜色变化。随着温度的升高,乳脂球开始聚集,经过IEF处理后,乳脂球变得更细、更分散。此外,与CH处理相比,IEF处理的牛奶的储存期延长了6天。

参考文献:

- [1] WANG T, LI H, DENON Q, et al. Investigating the effect of diluents and fat globules on the size measurement of casein micelles by dynamic light scattering[J/OL]. International Dairy Journal, 2023, 142: 105640.
- [2] LI Y, JOYNER H S, CARTER B G, et al. Effects of fat content, pasteurization method, homogenization pressure, and storage time on the mechanical and sensory properties of bovine milk[J/OL]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(4): 2941-2955.
- [3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准, 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [4] CRAVEN H M, SWIERGON P, NG S, et al. Evaluation of pulsed electric field and minimal heat treatments for inactivation of pseudomonads and enhancement of milk shelf-life[J/OL].

- Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(2): 211-216.
- [5] ZHANG L, YANG N, JIN Y, et al. Putative inactivation mechanism and germicidal efficacy of induced electric field against *Staphylococcus aureus*[J/OL]. *Food Microbiology*, 2023, 111: 104208.
- [6] WU S, XU X, YANG N, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in apple juice via induced electric field (IEF) and its bactericidal mechanism[J/OL]. *Food Microbiology*, 2022, 102: 103928.
- [7] CHEMAT F, VIAN M A, FABIANO-TIXIER A S, et al. A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products[J/OL]. *Green Chemistry*, 2020, 22(8): 2325-2353.
- [8] CHENG N, BARBANO D M, DRAKE M A. Hunter versus CIE color measurement systems for analysis of milk-based beverages[J/OL]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(6): 4891-4905.
- [9] SHARMA P, OEY I, EVERETT D W. Interfacial properties and transmission electron microscopy revealing damage to the milk fat globule system after pulsed electric field treatment[J/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 47: 99-107.
- [10] ROCHA R S, SILVA R, RAMOS G L P, et al. Ohmic heating treatment in high-protein vanilla flavored milk: Quality, processing factors, and biological activity[J/OL]. *Food Research International*, 2022, 161: 111827.
- [11] ANEMA S G, LI Y. Effect of pH on the Association of Denatured Whey Proteins with Casein Micelles in Heated Reconstituted Skim Milk[J/OL]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(6): 1640-1646.
- [12] FRANCO I, PÉREZ M D, CONESA C, et al. Effect of technological treatments on bovine lactoferrin: An overview[J/OL]. *Food Research International*, 2018, 106: 173-182.
- [13] PEREIRA R N, RODRIGUES R M, RAMOS Ó L, et al. Electric Field Processing: Novel Perspectives on Allergenicity of Milk Proteins[J/OL]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(43): 11227-11233.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准, 巴氏杀菌乳: GB 19645-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.