DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.16.027

# 非热杀菌技术在乳制品中的应用

冷佳[1,2],马嘉欣[1,2],肖然[1,2],李晓阳[1,2],牛天娇[1,2*]
(1.蒙牛鲜乳制品(天津)有限公司,天津 301700;2.内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司,内蒙古 呼和浩特 011599)

**摘　要**:传统热加工对乳制品有较好的杀菌效果,但高温处理对乳制品的营养成分影响较大。新型的非热杀菌技术,能够在保证食品安全的前提下,更好地保留食品中的热敏性营养物质,是未来食品加工发展的热点方向。该文综述以膜过滤技术、静态超高压技术、超高压射流技术、高压脉冲电场技术、高压二氧化碳技术为代表的非热杀菌技术在乳制品领域的应用研究,总结不同非热杀菌技术对乳制品中微生物杀灭和营养成分保留的研究现状,讨论非热杀菌技术的产业化应用现状和可行性,旨在为非热杀菌技术在乳制品加工产业化应用提供理论参考。

**关键词**:非热杀菌技术;乳制品;微生物;营养物质;产业化应用

## The Application of Non-thermal Sterilization Techniques in Dairy Products

LENG Jia[1,2], MA Jiaxin[1,2], XIAO Ran[1,2], LI Xiaoyang[1,2], NIU Tianjiao[1,2*]
(1. Mengniu Fresh Milk Products (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 301700, China; 2. Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Co., Ltd., Hohhot 011599, Inner Mongolia, China)

**Abstract**: Traditional thermal processing has a good sterilization effect on dairy products, but high-temperature treatment exerts a considerable negative impact on nutrients in dairy products. Novel non-thermal sterilization technologies, which can better preserve heat-sensitive nutrients in food while ensuring food safety, have become a research hotspot in the future development of food processing. This paper reviews the application research of non-thermal sterilization technologies represented by membrane filtration, static high-pressure processing, high-pressure jet processing, high-voltage pulsed electric field, and high-pressure carbon dioxide in dairy products, summarizes the current research status of microbial inactivation and nutrient retention in dairy products using different non-thermal sterilization technologies, and discusses the current status and feasibility of their industrial application, so as to provide theoretical references for the industrial application of non-thermal sterilization technologies in dairy product processing.

**Key words**: non-thermal sterilization technology; dairy products; microorganisms; nutrients; industrial application

引文格式:
冷佳,马嘉欣,肖然,等.非热杀菌技术在乳制品中的应用[J].食品研究与开发,2026,47(16):209-216.
LENG Jia, MA Jiaxin, XIAO Ran, et al. The Application of Non-thermal Sterilization Techniques in Dairy Products[J]. Food Research and Development, 2026, 47(16): 209-216.

乳制品中天然的蛋白质、脂肪和乳糖等复杂的营养组分为微生物提供了良好的生长繁殖条件,生产加工通常采用热杀菌的方式杀灭微生物以保证乳制品的安全[1]。随着消费者对乳制品天然营养成分关注度的提高,如何在有效杀灭微生物的同时保留乳制品中的营养成分是乳品制造业面临的新挑战。采用瞬时热杀菌的方式提高杀菌温度、缩短受热时间,能够部分保留乳制品中的营养成分但仍有大量热敏性营养物质损失,且随着加热温度的升高会产生蒸煮味影响产品风味[2]。

基金项目:呼和浩特市"政产学研推用银"创新联合体项目(2023RC-联合体-6);天津市科技计划项目(23YFZCSN00380)
作者简介:冷佳(1983—),女(汉),高级工程师,硕士,研究方向:乳制品科学及乳制品加工。
*通信作者:牛天娇(1978—),女(汉),正高级工程师,博士,研究方向:乳制品科学及乳制品加工。

非热杀菌作为新兴技术，兼具绿色、环保等优势，在全球环境、社会和治理（environment，social，and governance，ESG）可持续发展战略背景下，在国内外引发广泛关注并开展深入研究，具体见表 1。非热杀菌可在低温或常温条件下实现对食品的杀菌与酶钝化处理，在确保食品安全的前提下既能更好地保留食品中的营养成分，对风味物质的保留也优于热处理[3]。然而，我国在非热杀菌的研究起步相对较晚，前期研究方向多聚焦于果蔬、肉制品等热敏性食品，近几年实现了果汁超高压杀菌技术的商业化应用[4]。目前非热杀菌相关研究也逐渐扩展至乳制品中，旨在杀灭乳制品中致病微生物的同时，最大限度地保留牛乳的活性营养成分与新鲜感官品质。但现有与乳制品相关的综述内容多侧重于杀菌效果评价，对杀菌作用机制及营养物质保留等关键维度的探讨不足；现有综述对非热杀菌产品的产业化情况及可行性论述不充分。本文系统综述非热杀菌技术在乳制品中的杀菌作用机制及其对牛乳营养成分的影响，并讨论非热杀菌技术的产业化应用，以期为非热杀菌技术在乳制品领域的深入研究与产业化推广提供理论参考。

**表 1　非热杀菌技术在食品领域的早期应用情况与研究现状汇总**

**Table 1　Summary of the early application and research status of non-thermal sterilization technologies in the food industry**

| 非热杀菌技术 | 应用领域 | 早期应用情况和研究现状 | 文献 |
|---|---|---|---|
| 膜过滤 | 乳制品 | 1987 年 M.Piot 将膜用于全脂牛奶的过滤除菌（陶瓷膜内径为 4 mm，孔径为 1.8 μm）<br>当前研究集中于乳品灭菌及浓缩、乳品的标准化、乳蛋白浓缩、乳清的回收与加工利用 | [5-6] |
| | 饮用水 | 1987 年美国科罗拉多州采用 0.2 μm 孔径的中空纤维微滤膜，日处理水量为 105 $m^3$<br>当前研究集中于对饮用水进行纯化（水中杂质的隔离、清除或浓缩处理）、海水淡化 | [6-7] |
| | 果蔬汁 | 1977 年 Heatherbell 成功运用超滤技术制得了稳定的苹果澄清汁<br>当前研究集中于对果蔬汁进行澄清、浓缩，并用于果胶的提取 | [8-9] |
| | 调味品 | 日本在 20 世纪 80 年代开始将膜技术应用于酱油生产，通过超滤进行酱油的澄清和除菌<br>当前研究集中于对酱油、食醋、料酒和味精等进行过滤、澄清、降浊和脱色 | [10] |
| 超高压 | 果蔬 | 1990 年 4 月日本 Meidi-Ya 公司生产了第一个超高压食品果酱<br>当前研究集中于对果蔬汁、果蔬浆、果蔬冻干和发酵果蔬等果蔬产品进行杀菌和保鲜 | [4，11] |
| | 水产品 | 1898 年日本大洋渔业将狭鳕鱼糜 400 MPa 处理 10 min 制成鱼糕<br>当前研究集中于对鱼类和虾蟹贝类等水产品进行杀菌、保鲜、脱壳、改性、快速冷冻和解冻 | [12-13] |
| | 畜产品 | 1992 年日本的 Fujichiku 公司开发了高压处理生火腿的技术<br>当前研究集中于对火腿、牛肉和羊肉等产品进行改善嫩度、颜色、风味，杀菌和冻结与解冻 | [14-15] |
| | 乳制品 | 1899 年美国化学家 Hite 研究表明，常温下超高压（600 MPa/h）可将牛乳保质期延长 4 d<br>当前研究集中于对液态奶、发酵乳、干酪等乳制品进行杀菌保鲜、改善质地、改性胶凝 | [16-17] |
| 高压脉冲电场 | 果蔬 | 2000 年美国生产用于果汁（橙汁和苹果汁）加工的脉冲电场（pulsed electric field，PEF）系统<br>当前研究集中于提高果蔬出汁率与果汁纯度、果胶提取、对果蔬汁进行冷杀菌、钝酶以延长货架期，并研究其对营养品质的保留效果 | [18-19] |
| | 乳制品 | 当前研究集中于延长牛乳保质期、保留风味和营养成分；对乳中脂质氧化及挥发性风味物质的影响 | [20] |
| | 酒类 | 当前研究集中于对酒类进行催陈处理缩短自然储存时间、杀菌保鲜、缩短浸泡周期 | [21-22] |
| | 肉类 | 当前研究集中于改善肉制品的功能特性（保水能力、乳化能力及凝胶特性）、解冻、提高腌制速率 | [23-24] |
| 高压二氧化碳 | 肉制品 | 2006 年 Bertucco 等发现了高压二氧化碳（high pressure carbon dioxode，HPCD）对肉类（牛肉、鸡肉）中致病菌的显著杀灭效果<br>当前研究集中于对肉制品微生物、质构、感官的综合影响 | [25-26] |
| | 乳制品 | 2006 年 Bertucco 等研究了 HPCD 对乳制品（牛奶、奶酪）的钝酶（乳酸酶、脂肪酶）及杀菌效果<br>当前研究集中于在鲜奶、酸奶、奶酪中的微生物杀灭、酶活性保持及感官评价 | [25，27] |
| | 果蔬制品 | 2015 年 Ferrentino & Spilimbergo 采用 HPCD 结合高功率超声对鲜切胡萝卜进行杀菌<br>当前研究集中于对果蔬汁、果酱和鲜切蔬菜等的酶失活动力学、感官保持及工艺参数优化 | [28-29] |

## 1　膜过滤技术在乳制品中的研究及应用

膜过滤除菌（membrane filtration sterilization，MFS）是指采用致密具孔滤材去除料液中杂质和微生物的方法，由于过滤是在常温下进行的，因此能够有效地保留产品的色香味和营养成分，同时也降低了能源消耗，操作相对简单[5]。常用的膜分离技术主要包括微滤、超滤、纳滤和反渗透等类型（如图 1 所示）[6]。在膜过滤技术中，目前使用的膜材料以人工合成为主，根据材质差异可划分为陶瓷膜与有机膜两大类。其中陶瓷膜由于可耐受 500 ℃高温、可用强酸、强碱进行清洗和生产，并且使用寿命长达 10~15 年，因此应用广泛[30]。

段玉娟等[31]研究发现采用反渗透（reverse osmosis，RO）膜过滤系统可在低温条件下通过提升操作压力实现牛奶浓缩，从而最大限度地保留原料乳中的活性营养成分，在前处理阶段需要通过除菌分离机进行除菌，再通过 RO 膜进行浓缩，蛋白质含量可提升 4.5%。任

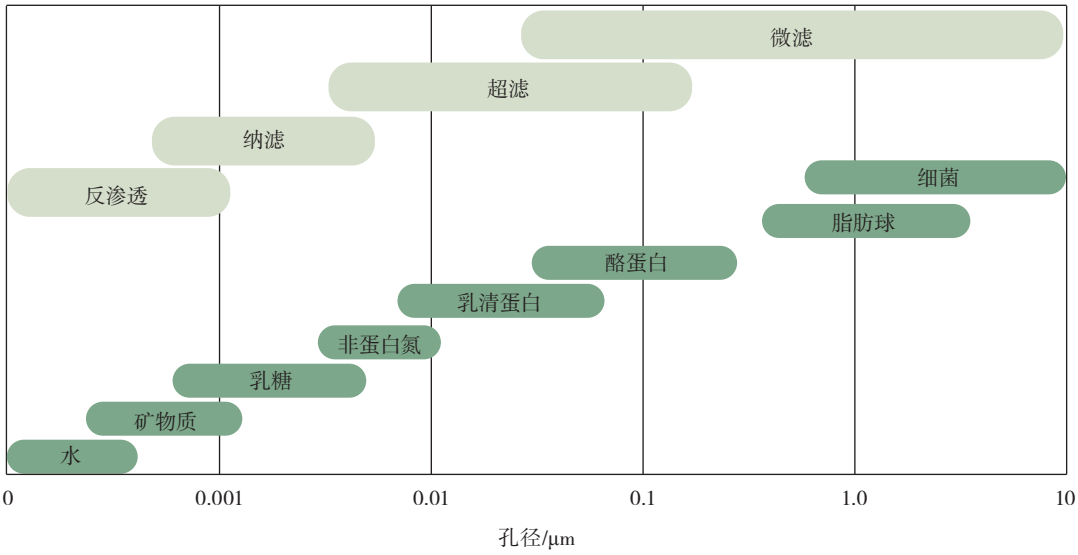


**图 1　乳成分膜分离机制**

**Fig.1　Schematic diagram of milk component membrane separation mechanism**

宪峰等[30]使用 1.4 μm 孔径的陶瓷膜对脱脂牛奶进行除菌，发现细菌截留率可达到 99.89%。膜过滤处理后牛奶中仍有部分微生物残留，因此为了更好地满足生产的需求，通常需要将膜过滤与其他杀菌技术进行协同应用。Zhang 等[32]研究结果表明，采用微滤结合 1 296 J/mL 超声处理可实现脱脂牛奶中细菌的完全去除，当微滤与高于 1 296 J/mL 超声波处理联用时，产品在 4 ℃条件下保质期可达 40 d。Wang 等[33]研究发现脱脂牛奶在(6±1)℃下经过微滤(孔径为 1.4 μm，跨膜压力为 75.8 kPa，错流速度为 7 m/s)，杀菌率达到 99.96%，微滤结合短时巴氏杀菌[(72±1)℃/25 s]可以几乎完全消除牛奶中的细菌，杀菌率达 99.99%。由于膜过滤已除去牛奶中绝大多数微生物，因此结合低强度的热处理即可满足产品微生物的要求，相较于普通巴氏杀菌和超高温瞬时灭菌(ultra high temperature，UHT)能更好地保留牛奶中的营养物质和风味成分。

膜过滤技术已成为乳制品加工中成熟度较高、产业化应用广泛的核心工艺之一。国外专业设备制造商如颇尔(Pall)、杜邦(DuPont)等可提供“过滤系统”(包括预过滤、后处理、清洗系统)的完整解决方案，其运行稳定性、操作可控性及规模化处理能力均满足工业生产需求，在实际生产中，通过膜组技术灵活搭配满足生产需求，与热杀菌协同实现商业化应用。国内企业伊利采用纳米级 RO 有机膜和微米级微滤陶瓷膜的双膜锁鲜工艺，协同 72 ℃巴氏杀菌进行处理；光明选用法国进口陶瓷膜，通过 1.4 μm 孔径进行除菌处理以及采用纳米级纳滤膜实现浓缩和减钠；美国 Fairlife 使用超滤技术结合高温短时巴氏杀菌生产超滤牛奶；意大利 Scada 公司通过低温陶瓷膜去除 95% 以上细菌。以上产业化应用的实例让膜过滤协同热杀菌技术在乳制品中的应用更加广泛。

## 2　高压杀菌技术在乳制品中的研究及应用

### 2.1　静态超高压杀菌技术在乳制品中的研究及应用

超高压技术(high pressure processing，HPP)是一种将食品置于柔性容器中，以水或油等液态介质传递压力，在常温或略高于常温条件下施加不低于 100 MPa 的静压并维持一定时间的处理方式。该方法能够有效杀灭微生物、钝化酶活性，同时最大程度地维持食品原有的色泽、风味、质地及营养成分[34]。

HPP 主要通过破坏微生物的细胞形态、膜结构和蛋白质功能，从而实现杀菌，微生物的种类、形态结构、生长状态都会影响 HPP 的灭活效果。营养体、革兰氏阴性菌、杆菌、霉菌酵母以及处于生长对数期的微生物对 HPP 抗性较弱，HPP 对其有显著的杀灭效果[35]；孢子、革兰氏阳性菌、球菌、细菌以及处于生长稳定期的微生物耐压性较强，对食品安全有威胁时需要考虑将 HPP 结合温度、pH 值、抑菌剂等方式进行协同杀菌。Stratako 等[36]研究发现 HPP(600 MPa/3 min)可以杀灭牛奶中存在的病原体(大肠杆菌、沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌)，同时保持与生牛乳相似的关键营养品质。Lim 等[37]发现在 600 MPa/10 min 高压处理条件下，牛奶中菌落总数致死率高于 99.9%，在 60 d 贮藏期内菌落总数维持在 2 lg(CFU/mL)以下，霉菌酵母和嗜冷菌高压处理后未检出，牛奶在 6 ℃保质期延长至 60 d，微生物满足安全要求，并且保质期内可以保持牛奶的理化和营养指标无显著变化。此外，Lim 等[38]研究发现 HPP 牛奶和热处理牛奶感官三角差异测试存在显著区别，喜好测试时 61% 小组成员对 HPP 加工牛奶的总体偏好高于热处理牛奶，感官分析(just-about-

right，JAR）评估显示乳味、奶油味、口感和余味等指标没有显著性差异（$P$>0.05）。赵婧茹等[39]综述的 HPP 对牛奶成分的影响显示，低压处理对蛋白质无明显影响，250 MPa 以上处理时会导致酪蛋白胶束形成聚集体，400 MPa 以上处理时乳清蛋白发生去折叠和变性。Sykora 等[40]研究表明 HPP 处理均导致免疫蛋白显著降解，尤其是乳铁蛋白减少 53%~84%、免疫球蛋白 A 减少 86%~95% 和免疫球蛋白 M 减少 81%~98%，且随着压力增加和周期时间延长，蛋白质保留率下降，高温短时处理在所有处理中保留了更高水平的天然蛋白质结构。

HPP 在国外已有商业化产品，如 Made By Cow 公司的超高压生牛乳通过高压冷压工艺处理，保留牛奶中更多的 $V_{B_1}$、$V_{B_2}$、$V_{B_{12}}$、$V_A$、钾、钙和蛋白质等天然营养成分。HPP 在国内乳制品行业未得到广泛的应用，目前仍处于研究阶段。其核心限制因素包括：1）杀菌效果不足，500 MPa 以下微生物的致死率普遍难以达到 99.9% 以上；2）高压下会导致牛奶中大分子物质如蛋白质发生变性；3）受高压舱体容量以及杀菌特性限制，工业化生产连续性较差。

2.2　动态超高压杀菌技术在乳制品中的研究及应用

动态超高压杀菌技术又叫超高压射流（ultra-high pressure jet，UHPJ）技术，通过高压泵将机械能转化为液压能，形成高压液体，并经高压喷射嘴高速喷出，形成高速射流。借助瞬时泄压膨化、强烈剪切及高速撞击等综合作用，可在实现食品均质化的同时有效杀灭微生物，且在处理过程中食品温度变化较小，能够较好地保留食品中的热敏性营养物质，对小分子物质影响较小[41]。

UHPJ 杀菌技术的主要机制源于液体经高压喷嘴高速喷出时发生的瞬时强力剪切和泄压造成的空化效应，从而使细胞受损，破坏微生物结构，同时高速喷出的流体在对撞过程中，其内部的颗粒与微生物产生强烈撞击，从而导致微生物菌体损伤[41]。超高压射流过程中机械能向热能的转化使流体温度升高，结合剪切、泄压及碰撞等多种效应的协同作用，共同引起微生物发生不同程度的结构破坏直至死亡。吴贞贞[42]研究发现 UHPJ 杀菌技术是通过破坏微生物细胞壁、损伤细胞膜及诱导蛋白质变性等途径实现杀菌，射流压力和射流温度对杀菌效果均会产生影响，喷射压力在 50 MPa 时即可使牛奶的保质期超过巴氏杀菌乳，200~300 MPa 时可使保质期长达 65 d，最佳工艺条件为进口温度 2~6 ℃、喷射压力 100 MPa、射流方式对撞射流。马岩峰[43]研究发现超高压射流喷射压力在 200 MPa 及以上时能够杀灭牛奶中的大肠菌群，进一步在 65 ℃恒温维持 15 s 后能够杀灭牛奶中 99% 以上的微生物，并且对牛奶中的活性物质有较好地保留，减少牛奶中活性蛋白的损失，且产品感官也有较好的表现，呈现出巴氏杀菌乳风味、奶油香气和甜味 3 项基本特征，并伴有轻微黄油、蒸煮、奶腥及塑料味，共 7 类感官属性，整体口感顺滑且具有清甜基调。UHPJ 乳由于未经过高温处理，相较于巴氏杀菌乳甜度更高、蒸煮味更低，但 UHPJ 乳保质期内存在微生物增长、营养物质损失变化等问题，还需要协同其他技术进行联合杀菌。Wei 等[44]研究发现超高压射流在 250 MPa 压力下，细菌总数、大肠菌群和嗜冷菌的数量分别减少了 4.43、2.47、3.08 lg（CFU/mL），免疫球蛋白 G（229.56±4.50）mg/L、乳过氧化物酶（3 349.74±106.39）U/L、$\beta$-乳球蛋白（3 749.28±29.95）mg/L 的含量显著高于巴氏杀菌奶（$P$<0.05）。赵培等[45]通过电子鼻、电子眼和感官评价研究表明，当射流压力达到 200 MPa 时，脱脂乳的乳香和甜味表现突出，能够较好的保留产品的风味，过高的射流压力会导致产品产生烧焦味、蛋白胨味等不良风味。

UHPJ 在乳制品领域的学术研究多集中于微生物致死率和营养物质保留率两个方向，对产品感官特性、保质期内理化指标及品质变化的研究内容相对匮乏，从产业化应用来看，当前市面尚无 UHPJ 处理的乳制品产品，配套仪器设备尚不完善，无法达到 99.9% 以上的杀菌效果，尚且不能实现产业化应用。对液体进行超高压射流灭菌的方法和设备[46-47]初步研究表明，UHPJ 对乳品具有显著杀菌效果，同时能较好地保留乳制品中的营养物质，相关设备已完成实验室验证，展现出良好的产业化应用前景。

## 3　高压脉冲电场杀菌技术在乳制品中的研究及应用

脉冲电场（pulsed electric field，PEF）是指利用瞬时高强度脉冲电场（微秒级的脉冲宽度）对两极间的食品物料进行处理，使其细胞膜发生电穿孔，从而达到杀菌钝酶的作用，PEF 处理时间短、温度低，避免了高温对产品品质产生的不良影响，处理过程中能够减少用水、减少排放、提高能源效率以及利用废粮副产品的能力[48]。

PEF 的杀菌机制是基于外加电场对微生物细胞膜的作用，在电场诱导下，细胞膜发生压缩并形成微孔，导致膜渗透性显著增强，亲水性孔的生成打开蛋白质通道，水分子、无机盐离子等小分子物质随之进入细胞内，引起细胞膨胀直至破裂，致使胞内物质外流，从而导致微生物失活[49]。脉冲电场杀菌效果受多种因素共同影响，主要包括：1）工作参数，如电场强度、脉冲时间、脉冲形状、脉冲宽度、脉冲数量；2）微生物特性，涉及生长时期、微生物种类及其对电场的耐受性（霉菌>乳酸菌>大肠杆菌>酵母菌）；3）食品特性，如成分组成、电导率、离子强度、pH 值和水分活度等[50]。Nabilah 等[51]分析表明微生物对 PEF 的耐电性，从高到低依次

为细菌芽孢、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌；脉冲波形对微生物灭活的影响从高到低依次为双极方波、单极方波和单极指数衰减波；影响微生物灭活的工艺参数从高到低依次为脉冲形状、入口温度、处理时间、脉冲宽度、电场、脉冲数和频率。Sawale等[52]研究表明在牛奶中使用3.3 V/μm电压、43 ℃和35次脉冲处理后，能够实现约3个对数单位的细菌减少，PEF处理对牛奶的感官属性（如颜色、口感）保持较好，且牛奶中的营养成分（如脂肪、蛋白质）的损失幅度极小。Sharma等[53]研究表明PEF处理不影响牛奶最终的脂肪熔化温度或黄嘌呤氧化酶变性温度，与热处理相比，PEF处理后黄嘌呤氧化酶的变性减少了约13%，在处理牛奶的热分析图中发现了新的吸热峰，表明由于牛奶脂肪球膜蛋白和脱脂牛奶蛋白之间的相互作用形成了复合物，揭示了未折叠疏水区域的存在。

PEF已在果汁领域实现商业化应用，如苹果汁、草莓汁和橙汁，该类产品已获美国监管机构批准并进入零售渠道。但PEF在乳制品领域的商业化应用尚未见报道。该技术应用中仍面临放电不均匀、局部过热等工艺挑战，需要与其他技术联合使用来突破瓶颈。

## 4 高压$CO_2$杀菌技术在乳制品中的研究及应用

高压二氧化碳（high pressure carbon dioxode，HPCD）技术是指在低于50 MPa的压力条件下利用$CO_2$实现杀菌与钝酶，同时能够较好地保留食品营养物质的一种非热杀菌技术[54]。HPCD杀菌技术具有下列优势：1）$CO_2$安全、无毒可循环利用，不会对环境造成污染；2）HPCD处理过程中杀菌压力较低，远低于超高压处理时的高压，对设备要求较低；3）HPCD处理在较低温度下即可实现有效杀菌，从而避免对食品营养成分造成显著破坏。处理结束后通过减压即可实现$CO_2$分离，该过程温和、操作简便且安全性较高。

HPCD杀菌机理有以下几个方面[55]：1）$CO_2$在微生物外部介质溶解；2）$CO_2$溶解渗入细胞后聚集在磷脂内膜上，使细胞渗透性增加，从而改变了细胞膜的流动性；3）通过$CO_2$溶解渗入细胞从而形成碳酸，降低微生物内部pH值；4）细胞内部pH值的降低钝化了和新陈代谢相关的酶；5）分子态$CO_2$和碳酸氢根离子对新陈代谢的抑制；6）微生物内部电解质平衡被打破；7）HPCD处理时的加压和卸压过程会导致部分细胞膜破裂从而使微生物死亡，细胞膜渗透性增加及细胞破裂会导致细胞内部的物质泄露。Liao等[56]研究表明HPCD在10~30 MPa、20~50 ℃、20~70 min处理条件下能够使生牛乳中天然存在的微生物失活，需氧细菌减少99.99%以上，酵母霉菌和大肠菌群完全失活。张艺林[57]研究表明微高压$CO_2$（*petit*-high pressure carbon dioxode，*p*-HPCD）联合肉桂植物精油在处理条件为1.3 MPa、6 h、40 ℃时，可以有效降低接种在牛乳中常见的食源性致病菌如鼠伤寒沙门氏菌和单增李斯特菌。Liao等[58]研究表明HPCD处理条件为20 MPa、50 min、50 ℃时能够使碱性磷酸酶完全失活，牛奶中的蛋白质和乳糖含量保持稳定，pH值和总固体含量降低，浊度和平均粒径显著增加。Zhang等[59]研究发现$CO_2$通过降低酸度、蛋白质和脂肪分解率来改善原奶的品质，通过减少挥发物的产生来改善风味，增加鲜味、浓郁度、奶香和甜度。HPCD处理条件为20 MPa、20~70 min、20~50 ℃时，牛奶中的蛋白质和乳糖仅出现轻微损失，钙离子保留率达到90%，HPCD在控制工艺参数时对保留牛奶中矿物质具备优势[60]。

HPCD处理后乳制品中营养物质保留率较高，联合温和热处理时杀菌效果较好，但该技术存在杀菌时间过长、$CO_2$形成碳酸降低产品pH值，引起酪蛋白凝聚，导致中性乳制品变性等问题，使其在乳制品的应用中受到限制。目前国内外尚无HPCD处理的商业化产品，相关技术仍处在概念、试点或研发阶段，未来应用方向或可向酸性乳制品领域拓展，以规避中性体系下的技术瓶颈。

## 5 等离子体、超声波杀菌技术在乳制品中的研究及应用

等离子体杀菌反应体系接近室温，通过产生的活性物质对微生物细胞结构进行不可逆的氧化损伤，同时辅以紫外线辐射和带电粒子/电场的物理破坏进行杀菌。Lee等[61]研究表明冷等离子体电晕放电处理10 min对全脂牛奶菌落总数和耐热细菌产生了积极影响。Ponraj等[62]研究表明氩气等离子体处理使原奶中菌落总数从6.8 lg（CFU/mL）降至1.9 lg（CFU/mL），并且氩气等离子体处理的牛奶在4 ℃下储存6周内细菌计数没有显著变化。目前由于等离子体对液体的渗透性效果欠佳，会出现液体界面和液体内部灭菌效果不一致的情况，因此如何确保牛奶受到均匀、等渗透效果的等离子体作用，且开发适用于连续流动生产、高效成本可控的大型工业化设备是当前技术开发面临的重要挑战。

超声波是频率大于20 kHz的声波，其穿透力强可以引起空化效应破坏和穿孔细胞膜，产生自由基，从而导致微生物细胞的破坏死亡[63]。Gregersen等[64]研究表明高强度超声处理在20 kHz、30 W、50 ℃条件下加速了酸性凝胶的形成，蛋白质变性作用因高强度超声处理导致的温度升高而增强，当超声功率超过30 W且温度高于50 ℃时，脂肪球粒径从3.39~3.89 μm减小至0.37~1.90 μm。超声波对牛奶中微生物的致死率仅能达到约90%，且高强度超声会使牛奶中的蛋白质和脂肪发生变性，作为单独的非热杀菌技术使用效果不

理想，需要与其他杀菌技术如温和加热或者其他非热技术进行联合处理。超声是一种很有前途的新型工具，应该根据相关标准进一步优化，使其能够用于工业规模的加工。

## 6 结语

非热杀菌技术因其处理温度低，能够更好地保留牛奶中的热敏性营养成分如活性蛋白、乳过氧化物酶和维生素等优于传统热加工。但目前存在单一非热技术杀菌率不足、受设备和成本限制，工业连续生产困难，仅小范围试研等问题。组合工艺是提高杀菌率的关键，可通过技术协同提升杀菌强度，同时保留营养与风味，为工业化生产提供方案。非热杀菌工业化生产未来以期从“协同”应用逐步迈向“迭代”升级。短期可在酸奶、乳饮料等品类中，结合传统工艺替代部分高温杀菌；长期随着设备升级与成本优化，有望成为乳制品杀菌主流技术之一。

非热杀菌技术具有低能耗、无污染的绿色环保属性，契合行业可持续发展趋势。尽管当前非热杀菌技尚未实现大规模应用，现有工艺亦难以满足上市需求，但随着工艺技术研发的持续深入、生产配套的日益完善及市场消费的驱动，其具有广阔的发展前景。未来应持续加强产学研合作，推动非热杀菌技术从实验室走向规模化工业生产，助力乳制品行业高质量发展。

## 参考文献：

[1] 王潇栋, 孔阳芷, 张艳玲, 等 . 杀菌技术的作用机制及在食品领域中的应用[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 1-8.
WANG Xiaodong, KONG Yangzhi, ZHANG Yanling, et al. Mechanism of sterilization technology and its application in food field[J]. China Brewing, 2022, 41(2): 1-8.

[2] 谭伟, 贺保平, 樊启程, 等 . 超高温瞬时杀菌对纯牛奶风味影响的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(6): 39-44, 48.
TAN Wei, HE Baoping, FAN Qicheng, et al. Research progress on the effect of ultra-high temperature processing on the flavor of pure milk[J]. China Dairy Industry, 2024, 52(6): 39-44, 48.

[3] 张晓, 王永涛, 李仁杰, 等 . 我国食品超高压技术的研究进展[J]. 中国食品学报, 2015, 15(5): 157-165.
ZHANG Xiao, WANG Yongtao, LI Renjie, et al. Advances of high hydrostatic pressure for food processing in China[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(5): 157-165.

[4] 庞晨璐, 路新如, 李怀宇, 等 . 超高压技术在果蔬产品中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(17): 204-210.
PANG Chenlu, LU Xinru, LI Huaiyu, et al. Research progress on applications of ultra-high pressure technology in fruit and vegetable products[J]. Food Research and Development, 2024, 45(17): 204-210.

[5] 陈晓宏 . 浅析过滤除菌法在食品工业中的应用[J]. 科技创业家, 2014(9): 232.
CHEN Xiaohong. Analysis on the application of filtration sterilization in food industry[J]. Technological Pioneers, 2014(9): 232.

[6] 杨方威, 冯叙桥, 曹雪慧, 等 . 膜分离技术在食品工业中的应用及研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 330-338.
YANG Fangwei, FENG Xuqiao, CAO Xuehui, et al. Application in the food industry and development of membrane separation technology[J]. Food Science, 2014, 35(11): 330-338.

[7] 郑昆, 杨红 . 膜分离技术在饮用水处理中的应用思考[J]. 现代食品, 2022, 28(23): 7-9.
ZHENG Kun, YANG Hong. Application of membrane separation technology in drinking water treatment[J]. Modern Food, 2022, 28(23): 7-9.

[8] 梁敏 . 膜分离技术在食品工业中的应用与开发[J]. 农产品加工(下), 2006(2): 40-42, 45.
LIANG Min. Developing and application of membrane technology in food industry[J]. Farm Products Processing, 2006(2): 40-42, 45.

[9] SARBATLY R, SARIAU J, KRISHNAIAH D. Recent developments of membrane technology in the clarification and concentration of fruit juices[J]. Food Engineering Reviews, 2023, 15(3): 420-437.

[10] 邱晓曼, 张耀, 陈程鹏, 等 . 膜分离技术及其在发酵调味品行业的应用[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 166-170.
QIU Xiaoman, ZHANG Yao, CHEN Chengpeng, et al. Membrane separation technology and its application in fermented condiment industry[J]. China Condiment, 2021, 46(3): 166-170.

[11] 夏文水, 钟秋平 . 食品冷杀菌技术研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2003, 15(6): 539-544.
XIA Wenshui, ZHONG Qiuping. Research progress in cold sterilization of foods[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2003, 15(6): 539-544.

[12] 朱震康 . 日开发超高压下制作鱼糕的新技术[J]. 国外水产, 1991(1): 33.
ZHU Zhenkang. Develop new technology of making fish cake under ultra-high pressure[J]. Foreign Aquaculture, 1991(1): 33.

[13] 赵煜, 朱旭, 朱建平, 等 . 带壳类水产品的壳肉分离技术研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(6): 1083-1096.
ZHAO Yu, ZHU Xu, ZHU Jianping, et al. Research progress on shell-meat separation technology of shelled aquatic products: A review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(6): 1083-1096.

[14] 张东芳, 郑凌君, 吴芳彤 . 超高压技术在肉制品加工中的应用[J]. 肉类工业, 2013(7): 50-53.
ZHANG Dongfang, ZHENG Lingjun, WU Fangtong. Application of UHP technology in meat product technology[J]. Meat Industry, 2013(7): 50-53.

[15] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Applied and emerging methods for meat tenderization: A comparative perspective[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(4): 841-859.

[16] 孙颜君, 孙颜杰 . 超高压技术在乳制品加工中应用的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(2): 26-31.
SUN Yanjun, SUN Yanjie. Recent advances in the use of high pressure technology in dairy processing[J]. China Dairy Industry, 2016, 44(2): 26-31.

[17] 高鑫, 李博, 刘小杰 . 超高压在乳品加工中的应用研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2021, 44(2): 37-42.
GAO Xin, LI Bo, LIU Xiaojie. Recent progress in the application of ultra-high pressure in dairy processing[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2021, 44(2): 37-42.

[18] SCHILLING S, SCHMID S, JÄGER H, et al. Comparative study of pulsed electric field and thermal processing of apple juice with particular consideration of juice quality and enzyme deactivation[J].

Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(12): 4545-4554.

[19] 刘凤霞, 孙建霞, 李静, 等 . 高压脉冲电场技术在食品加工中的应用研究新进展[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(4): 138-142.
LIU Fengxia, SUN Jianxia, LI Jing, et al. Review on novel application of pulsed electric fields in food processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(4): 138-142.

[20] VASHISHT P, SINGH L, MAHANTA S, et al. Pulsed electric field processing in the dairy sector: A review of applications, quality impact and implementation challenges[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(4): 2122-2135.

[21] 唐丹丽 . 脉冲电场辅助浸泡型青梅酒生产的工艺及储存品质变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
TANG Danli. Study on the production technology and storage quality change of soaked plum wine assisted by pulsed electric field[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.

[22] 王辉, 薛淑花, 刘小花, 等 . 高压电场在葡萄与葡萄酒加工中的应用及研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2022(5): 100-105.
WANG Hui, XUE Shuhua, LIU Xiaohua, et al. Application and research progress of high voltage electric field in grape and wine processing[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2022(5): 100-105.

[23] 王淑杰, 赵子瑞, 李文龙, 等 . 高压脉冲电场技术在食品加工及保藏中的应用[J]. 农业工程, 2022, 12(2): 63-67.
WANG Shujie, ZHAO Zirui, LI Wenlong, et al. Application of pulsed electric field technology in food processing and preservation [J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(2): 63-67.

[24] 霍俊辉, 郭雨晨, 韩敏义, 等 . 不同脉冲电场处理对牛肉腌制效果及食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 216-222.
HUO Junhui, GUO Yuchen, HAN Minyi, et al. Effects of different pulsed electric field treatments on the curing effect and edible quality of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 216-222.

[25] KOBAYASHI F, ODAKE S. Temperature-dependency on the inactivation of *Saccharomyces pastorianus* by low-pressure carbon dioxide microbubbles[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(2): 588-594.

[26] 牛力源, 张艺林, 刘静飞, 等 . 高压二氧化碳在肉品杀菌保鲜中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 471-479.
NIU Liyuan, ZHANG Yilin, LIU Jingfei, et al. Research progress on the application of high pressure carbon dioxide in meat pasteurization and preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 471-479.

[27] 陈多珍, 吴梦, 杨洋, 等 . 非热杀菌技术在乳制品中的应用研究进展[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(1): 68-72.
CHEN Duozhen, WU Meng, YANG Yang, et al. Advances in the application research of non-thermal sterilization technology in dairy products[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(1): 68-72.

[28] 黄彭, 丁捷, 胡晓敏, 等 . 鲜切果蔬物理防褐保鲜的研究进展[J]. 园艺学报, 2021, 48(6): 1217-1232.
HUANG Peng, DING Jie, HU Xiaomin, et al. Advances in fresh-cut fruit and vegetables based on physical anti-browning technology [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(6): 1217-1232.

[29] 李喜宏, 杨梦娇, 梁富浩, 等 . 非热加工技术调控果蔬产品内源酶活性研究进展[J]. 轻工学报, 2023, 38(4): 11-19.
LI Xihong, YANG Mengjiao, LIANG Fuhao, et al. Research progress on regulation of endogenous enzyme activities of plant raw materials fruit and vegetable products by non-thermal processing technology[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(4): 11-19.

[30] 任宪峰, 杨永龙, 张杰, 等 . 脱脂牛乳陶瓷膜过滤除菌工艺研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 129-132, 152.
REN Xianfeng, YANG Yonglong, ZHANG Jie, et al. Research about membran parameters impact the degerming parameter of skim milk[J]. Food & Machinery, 2011, 27(2): 129-132, 152.

[31] 段玉娟, 李剑峰, 杨学文, 等 . RO 反渗透膜过滤系统在乳制品工厂中的运用研究[J]. 中国乳业, 2022(7): 75-79.
DUAN Yujuan, LI Jianfeng, YANG Xuewen, et al. Research on the application of reverse osmosis membrane filtration equipment in dairy factory[J]. China Dairy, 2022(7): 75-79.

[32] ZHANG W J, LIU Y W, LI Z B, et al. Effects of microfiltration combined with ultrasonication on shelf life and bioactive protein of skim milk[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105668.

[33] WANG D, FRITSCH J, MORARU C I. Shelf life and quality of skim milk processed by cold microfiltration with a 1.4-μm pore size membrane, with or without heat treatment[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(10): 8798-8806.

[34] 姜志东, 张君怡, 马嘉欣, 等 . 超高压杀菌效果及机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 145-154.
JIANG Zhidong, ZHANG Junyi, MA Jiaxin, et al. Research progress on the microbial inactivation effect and mechanism of high hydrostatic pressure[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 145-154.

[35] 李仁杰, 王永涛, 廖小军 . 超高压对食品中微生物的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2523-2531.
LI Renjie, WANG Yongtao, LIAO Xiaojun. Effects of high hydrostatic pressure on microorganisms in foods[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(8): 2523-2531.

[36] STRATAKOS A C, INGUGLIA E S, LINTON M, et al. Effect of high pressure processing on the safety, shelf life and quality of raw milk[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 52: 325-333.

[37] LIM S H, CHIN N L, SULAIMAN A, et al. Microbiological, physicochemical and nutritional properties of fresh cow milk treated with industrial high-pressure processing (HPP) during storage[J]. Foods, 2023, 12(3): 592.

[38] LIM S H, CHIN N L, SULAIMAN A, et al. Sensory analysis for cow milk product development using high pressure processing (HPP) in the dairy industry[J]. Foods, 2022, 11(9): 1233.

[39] 赵婧茹, 王孟辉, 胡鹏丽, 等 . 超高压对牛奶影响的研究进展[J]. 食品工业, 2024, 45(1): 209-215.
ZHAO Jingru, WANG Menghui, HU Pengli, et al. Research progress on the effect of high hydrostatic pressure on milk[J]. The Food Industry, 2024, 45(1): 209-215.

[40] SYKORA R, BARMAN B, MOHAMED H M H, et al. Optimization of single-and dual-cycle high-pressure processing to process bovine milk for microbial safety and protein quality[J]. Journal of Dairy Science, 2025, 108(12): 13213-13224.

[41] XU F, XUE L, MA Y F, et al. Effects of ultra-high-pressure jet processing on casein structure and curdling properties of skimmed bovine milk[J]. Molecules, 2023, 28(5): 2396.

[42] 吴贞贞 . 超高压射流杀菌奶的工艺优化及其理论性质研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
WU Zhenzhen. Process optimization and theoretical properties of ultra-high pressure jet sterilization of milk[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[43] 马岩峰 . 超高压射流结合热杀菌工艺对鲜奶品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
MA Yanfeng. Effect of ultra-high pressure jet combined with thermal sterilization process on the quality of fresh milk[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[44] WEI S W, QIAO W C, YANG B Y, et al. Effects of industrial-scale, ultrahigh-pressure microfluidizer on microorganisms, active proteins, physical properties, and lipids of cow′s milk[J]. International Dairy Journal, 2025, 165: 106205.

[45] 赵培, 张珊, 吴子健, 等 . 基于快速气相色谱电子鼻研究超高压射流处理脱脂乳的感官品质[J]. 乳业科学与技术, 2024, 47(5): 1-6.
ZHAO Pei, ZHANG Shan, WU Zijian, et al. Quality evaluation of skimmed milk treated with ultra-high pressure jet using fast gas chromatography-based electronic nose[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2024, 47(5): 1-6.

[46] 牛天娇, 高源, 王艳发, 等 . 一种延长鲜奶保质期的方法: CN116762857B[P]. 2025-11-07.
NIU Tianjiao, GAO Yuan, WANG Yanfa, et al. A method for extending the shelf life of fresh milk: CN116762857B[P]. 2025-11-07.

[47] 牛天娇, 王成, 杜爽, 等 . 对液体进行超高压射流灭菌的方法和设备: CN118077756B[P]. 2024-07-02.
NIU Tianjiao, WANG Cheng, DU Shuang, et al. Method and equipment for ultra-high pressure jet sterilization of liquids: CN118077756B[P]. 2024-07-02.

[48] ARSHAD R N, ABDUL-MALEK Z, ROOBAB U, et al. Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 43-54.

[49] TOY J Y H, CHIN F W L, ZHANG L, et al. Novel food processing technologies for retaining nutrition of horticultural food products[J]. Future Postharvest and Food, 2024, 1(2): 198-212.

[50] LYTRAS F, PSAKIS G, GATT R, et al. Exploring the efficacy of pulsed electric fields (PEF) in microbial inactivation during food processing: A deep dive into the microbial cellular and molecular mechanisms[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 95: 103732.

[51] NABILAH U U, SITANGGANG A B, DEWANTI-HARIYADI R, et al. Meta-analysis: Microbial inactivation in milk using pulsed electric field[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(9): 5750-5763.

[52] SAWALE P, PATIL P, SINGH A, et al. Non-thermal techniques for microbiological safety, nutritional preservation, and enhanced efficiency in dairy processing[J]. Functional Food Science - Online ISSN: 2767-3146, 2024, 4(5): 180-203.

[53] SHARMA P, OEY I, EVERETT D W. Thermal properties of milk fat, xanthine oxidase, caseins and whey proteins in pulsed electric field-treated bovine whole milk[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 34-42.

[54] 饶雷 . 高压二氧化碳结合温度对枯草芽孢杆菌芽孢的杀灭效果与机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
RAO Lei. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores by combining treatment of high pressure $CO_2$ and temperature[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.

[55] 侯志强, 赵凤, 饶雷, 等 . 高压二氧化碳技术的杀菌研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(5): 40-48.
HOU Zhiqiang, ZHAO Feng, RAO Lei, et al. Research progress on pasteurization and sterilization using high pressure carbon dioxide technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(5): 40-48.

[56] LIAO H M, ZHONG K, LIAO X J, et al. Inactivation of microorganisms naturally present in raw bovine milk by high-pressure carbon dioxide[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(3): 696-702.

[57] 张艺林 . 微高压 $CO_2$ 联合肉桂精油的协同抗菌作用及在牛乳杀菌中的应用研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
ZHANG Yilin. Synergistic antibacterial effect of petit-high pressure $CO_2$ combined with cinnamon essential oil and its application in milk pasteurization[D]. Zhengzhou: University of Light Industry, 2022.

[58] LIAO H M, ZHONG K, HU X S, et al. Effect of high pressure carbon dioxide on alkaline phosphatase activity and quality characteristics of raw bovine milk[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 52: 457-462.

[59] ZHENG A R, LIU J, WANG M S, et al. Footprint analysis of $CO_2$ in microbial community succession of raw milk and assessment of its quality[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1285653.

[60] 刘若琳, 孙莹, 王宇晶, 等 . 新型乳品加工技术对乳品品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(9): 26-34.
LIU Ruolin, SUN Ying, WANG Yujing, et al. Effects of novel dairy processing technology on the quality of dairy products[J]. China Food Additives, 2025, 36(9): 26-34.

[61] LEE T A, LIN Y H, LI P H, et al. The effects of *Corona* discharge from a cold plasma source on the physicochemical properties and shelf-life of milk[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 103980.

[62] PONRAJ S B, SHARP J A, KANWAR J R, et al. Argon gas plasma to decontaminate and extend shelf life of milk[J]. Plasma Processes and Polymers, 2017, 14(11): 1600242.

[63] BERMUDEZ-AGUIRRE D, NIEMIRA B A. Pasteurization of foods with ultrasound: The present and the future[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10416.

[64] GREGERSEN S B, WIKING L, HAMMERSHØJ M. Acceleration of acid gel formation by high intensity ultrasound is linked to whey protein denaturation and formation of functional milk fat globule-protein complexes[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 254: 17-24.

加工编辑:王雪
收稿日期:2026-02-11