

现代食品工业新技术系列

脉冲电场 非热灭菌技术

Maichong Dianchang
Feire Miejun Jishu

曾新安 陈勇 主 编
高文宏 副主编



中国轻工业出版社

现代食品工业新技术系列

脉冲电场非热灭菌技术

曾新安 陈勇 主编

高文宏 副主编

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

脉冲电场非热灭菌技术/曾新安, 陈勇主编. —北京:
中国轻工业出版社, 2005.1

(现代食品工业新技术系列)

ISBN 7-5019-4614-0

I. 脉… II. ①曾… ②陈… III. 食品加工-灭菌-技术
IV. TS205.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 104972 号

责任编辑: 白洁 姚怀芝

策划编辑: 白洁 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 邱亦刚

版式设计: 丁夕 责任校对: 燕杰 责任监印: 吴京一

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街6号, 邮编: 100740)

印刷: 河北省高碑店市鑫昊印刷有限责任公司

经销: 各地新华书店

版次: 2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 12

字数: 318千字

书号: ISBN 7-5019-4614-0/TS·2713 定价: 28.00元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-65141375 85119845

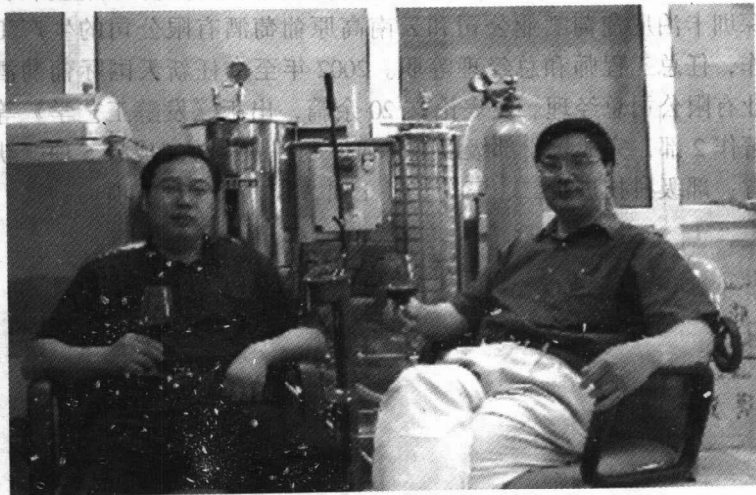
网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

40045K1X101ZBW

作者简介



曾新安（左）和陈勇（右）

曾新安：男，1972 年出生，博士，副教授。现工作于华南理工大学轻工与食品学院，任院长助理，省级葡果酒评酒委员。主要研究方向为物理场强化食品生化反应过程机理及相关技术设备研究。所主持研制的酒类催陈设备已在国内多家大型酒类企业推广应用，所研制的脉冲电场灭菌装备和酱油沉淀去除装备也达到中试水平。讲授研究生课程 2 门，发表论文 30 多篇，其中被 SCI 和 EI 收录论文 3 篇，申报国家专利 9 项，已授权 4 项，获得省级鉴定成果 3 项，主持科技部项目的子项目、广东省攻关、广东省基金和广州市重大攻关项目各 1 项和企业委托项目 10 余项。

陈勇：男，1956 年出生，博士，高级工程师。中国葡萄酒专业委员会秘书长，国家级葡萄酒评酒委员。曾先后在湖南省轻工业高等专科学校、深圳大学从事教学、科研工作，历任食品系主任、科研处处长等职务。先后设计和建设了各类食品企业 20 余家。自 1996 年起先后主持欧味宝公司、新疆楼兰酒业公司、深圳卡泊尼葡萄酒业公司和云南高原葡萄酒有限公司的生产工作，任总工程师和总经理等职。2002 年至今任新天国际葡萄酒业有限公司总经理。发表论文 20 余篇，出版《发酵工艺学》等著作 2 部，完成省、部级以上科研课题并获得鉴定成果 5 项，获省、部级科技进步二、三等奖各 1 项，获国家专利 3 项。

前 言

近年来，随着人们对方便、营养和保健食品提出越来越高的要求，许多传统的食品加工方法受到了新兴技术强有力的挑战。就灭菌领域而言，传统的灭菌方法为热灭菌。众所周知，热处理对食品的营养、风味和色泽等外观品质方面有较大损害，还会造成加工过程中的一些问题。以牛奶灭菌为例，现在企业普遍采用的是超高温瞬时灭菌，即在 137℃ 对牛奶进行 3s 左右的高温灭菌，这样处理后的牛奶有明显的高温焦味，色泽变黄，天然奶香减少，有蛋白质变性沉淀（后续的均质工序可掩盖这种影响），最为严重的是高温处理牛奶会导致大量变性蛋白质凝结在管道上，导致管道堵塞，清洗极为不便。此外，紫外线灭菌在表面和空气消毒方面广泛应用；化学消毒剂主要用于对器皿和环境进行消毒，不能直接应用到食品上。因此，寻求低温高效实用的灭菌方法成为广大相关企业的共同心声。

非热灭菌技术又称冷灭菌技术，就是不以热致死为主要机理的灭菌方法，现在已经比较成熟的有辐照和高静压处理技术等。辐照技术被大量使用在固态和已包装食品的灭菌，其效果非常好，很多出口食品采用该技术。高静压技术目前只适用于小规模间歇操作，其灭菌效果也已得到业界认可，一些高附加值的保健食品采用该技术灭菌。在众多的非热灭菌技术中，高强电场灭菌技术是一项很有潜力但目前并非十分完善的技术。其机理在于采用高电场强度的瞬间脉冲进行处理，高场强导致了微生物的致死，很短的脉冲持续时间保证了物料升温很小和几乎没有电化学反应发生。但由于脉冲是直接作用在待处理的液态食品物料上，一般液态食品的电阻比较小，这相当于要在很小的负载上产生和

施加很大的脉冲功率，这对脉冲源的功率放大系统要求很高。处理量越大，电极接触面积越大，对电源的要求越高。这就是国内外很多研究单位能研制出小试装备，但在工业化面前望而却步的原因。当然，除了脉冲电源部分，处理室的设计、电极沉积、物料中含有气泡、物料冷却以及处理过程中由于物料升温而导致的电导率变化，从而影响高压输出等均是业界工程技术人员等必须直面解决的问题。

本课题组从 10 年前开始着手研究高强脉冲电场非热灭菌技术。华南理工大学轻化工研究所（教育部直属）历来以物理场辅助处理手段为研究方向，涉及电、磁、超声波和强光等物理方法。科研成果“超声波起晶器”已在 10 多个国家近 150 家糖厂推广使用，曾获“国家科技进步二等奖”。其他成果如“高强电场酒类催陈装备”也已在国内多家大型葡萄酒厂工业化应用，颇具影响力。本人于 1994 年开始以《高压电场对微生物和酶的影响及作用机理研究》为题进行硕士论文研究，后又以相关课题进行博士论文研究，到目前为止本单位已先后有 3 名博士、5 名硕士完成相关课题研究。这些年来，本课题组查阅、翻译、整理了大量的外文文献，已整理在册的直接参考文献有 150 篇左右，课题组多年来坚持每个月 1~2 次的相互学习交流，向其他成员介绍所查阅的文献及心得，因而几年下来，本团队在关于脉冲电场非热灭菌技术方面有了比较深刻的认识 and 了解。

本课题组于 2001 年获得广州市重大科技攻关项目资助，重点研究脉冲电场灭菌设备的中试和工业化。到目前为止，我们所研究的中试设备应用效果良好，初始菌含量为 10^6 cfu/mL 的物料灭菌后基本能控制在 10^2 cfu/mL 以下，物料升温小于 30°C ，处理量在 50L/h 左右。

在多年以前就想将所掌握的资料整理成书出版，但一直懈怠，未能脱稿，近 1~2 年来，国内涉足本领域的学者越来越多，常有相关文章见诸专业杂志，而在 1994 年以前相关资料很少。

但短短十年过去，现在通过网络就可以查得大量的相关文献。根据已有资料，将其整理出版成书，就想给同行作一个参考资料，可免去看大量英文文献之苦，亦可作入门之用。但由于本人才疏学浅，错漏在所难免，恳请阅者指正。

本书全书由曾新安博士主编，陈勇博士和高文宏博士承担了大量资料整理和编写工作，扶雄副教授协助完成了大量图片整理和文字处理工作，徐娅莉硕士、张鹰博士参与了部分章节的翻译和编写。于淑娟教授，李国基高工，张本山副教授和耿予欢博士是本课题组成员，参与了本书的部分编写工作。

曾新安

2004 年夏于华南理工大学

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 脉冲电场灭菌技术与传统灭菌方法	(1)
1.2 国内外脉冲电场技术的研究进展	(3)
1.3 渐趋实用的非热灭菌技术	(7)
第2章 电场与电介质理论	(12)
2.1 电场与电场强度	(12)
2.2 电场参数	(14)
2.3 电介质物理	(16)
2.3.1 电介质的极化和电导(介电常数)	(16)
2.3.2 极化的基本形式	(19)
2.3.3 极化强度	(22)
2.4 电介质的损耗	(23)
2.5 绝缘介质的电击穿	(26)
2.5.1 气体放电	(26)
2.5.2 液体的电击穿	(27)
2.5.3 绝缘固体的热击穿	(28)
第3章 脉冲电路与食品电化特性	(29)
3.1 脉冲电场原件及系统	(30)
3.2 脉冲电路介绍	(30)
3.2.1 Heesch 高压脉冲电源	(33)
3.2.2 简化的指数衰减脉冲波形电路和平方波电路	(33)
3.2.3 Barbosa-Canovas 高压重复脉冲发生电路	(35)
3.2.4 Q.H.Zhang 等设计的各种脉冲波形电路	(36)
3.2.5 Blumlein 平方波电路	(39)

3.2.6 磁感应脉冲发生电路	(41)
3.3 脉冲电场处理的主要操作参数	(42)
3.4 食品电特性和电模型	(43)
3.5 食品介电常数和电导率的变化	(47)
3.6 食品介质击穿	(48)
第4章 脉冲电场处理系统	(51)
4.1 过程设计基本概念	(51)
4.1.1 基本理论方面	(52)
4.1.2 脉冲能量对灭菌的影响	(62)
4.1.3 物料的流动方式	(66)
4.2 连续流系统中处理室温度的变化	(68)
4.2.1 脉冲电作用下物料温度增加的计算	(69)
4.2.2 温度增加模拟处理室设计	(71)
4.2.3 处理室中半径温度分布模拟	(73)
4.2.4 几种脉冲电场处理室的微生物致死效果评价	(78)
4.3 静态处理室介绍	(81)
4.3.1 Sale 和 Hamilton 设计的静态处理室	(81)
4.3.2 Dum 和 Pearlman 设计的静态处理室	(82)
4.3.3 Grahl 等设计的静态处理室	(82)
4.3.4 华盛顿州立大学设计的静态处理室	(83)
4.4 连续处理系统	(84)
4.4.1 Dum 和 Pearlman 设计的连续流处理系统	(84)
4.4.2 Matsumoto 等设计的有盖电场处理系统	(85)
4.4.3 WSU 连续处理系统	(86)
4.4.4 Barbosa-Canovas 等采用的电场优化系统	(88)
4.4.5 J. McDonald 等设计的连续处理系统	(93)
4.4.6 Q. Howard Zhang 等设计的连续处理系统	(94)
4.4.7 一套完整脉冲电场处理系统的流程	(95)
4.5 脉冲电场处理室中的电化学反应和电极腐蚀	(97)

4.5.1 理论和模拟	(99)
4.5.2 电极电化学反应实验	(104)
4.5.3 电极腐蚀临界频率	(109)
第5章 脉冲电场对微生物的作用机理	(114)
5.1 细胞膜极化穿孔动力学机制	(114)
5.1.1 充电时间常数和细胞模型	(116)
5.1.2 细胞系统的放电脉冲和电特性	(118)
5.1.3 膜的电极化	(123)
5.1.4 膜的导电通道	(127)
5.1.5 临界穿透膜电位	(128)
5.1.6 极化微孔的生存期限	(130)
5.1.7 脉冲电场下整个细胞系统的反应	(133)
5.2 电机械模型	(137)
5.3 微生物的形态学修饰	(143)
第6章 脉冲电场灭菌效果	(148)
6.1 影响脉冲电场灭菌效果的因素	(148)
6.1.1 内在微生物特性的影响	(148)
6.1.2 介质或者食品特性的影响	(158)
6.1.3 脉冲电场参数的影响	(164)
6.2 脉冲电场对芽孢杆菌的杀灭效果	(167)
6.2.1 芽孢杆菌生长活动情况测定	(167)
6.2.2 脉冲电场对嗜热芽孢杆菌的杀灭效果	(170)
6.2.3 嗜热芽孢杆菌微热量的变化	(171)
6.3 脉冲电场对黑曲霉及其柠檬酸产品的影响	(173)
6.4 脉冲电场处理使霉菌子囊孢子和分生孢子失活	(175)
6.4.1 <i>B. fulva</i> 分生孢子的失活	(176)
6.4.2 <i>N. fischeri</i> 子囊孢子的失活	(178)
6.5 脉冲电场处理对橙汁中微生物的影响	(180)
6.6 脉冲电场处理对附着菌或游离菌的影响	(182)

6.6.1	脱脂乳和缓冲液中独立生长细菌的失活	(183)
6.6.2	次致命破坏的细胞	(184)
6.6.3	附着细菌的失活	(185)
6.6.4	电导率对脉冲电场处理效率的影响	(187)
6.7	脉冲电场处理使小肠结肠炎耶耳森氏菌失活	(189)
6.7.1	耶耳森氏菌的培养和脉冲电场处理	(190)
6.7.2	威布尔分布规律	(190)
6.7.3	不同脉冲电场条件对耶耳森氏菌失活的影响	(191)
6.7.4	脉冲电场对耶耳森氏菌致死影响的研究结论	(199)
6.8	脉冲电场处理对无害李斯特菌的致死影响	(202)
6.8.1	脉冲电场处理无害李斯特菌的方法与条件	(204)
6.8.2	无害李斯特菌的抗热性	(204)
6.8.3	脉冲电场参数改变使无害李斯特菌失活	(206)
6.8.4	处理液成分改变对无害李斯特菌失活的影响	(211)
6.8.5	无害李斯特菌的亚致死损伤	(215)
6.8.6	处理前后无害李斯特菌细胞原子显微镜观察	(217)
6.9	脉冲电场处理对大肠杆菌的影响	(219)
6.9.1	大肠杆菌培养和脉冲电场处理	(219)
6.9.2	搅拌对大肠杆菌失活的影响	(223)
6.9.3	在固体凝胶介质中大肠杆菌的失活及死角的位置	(225)
6.9.4	脉冲宽度和能量对大肠杆菌失活的影响	(228)
6.9.5	食品组分对大肠杆菌失活的影响	(229)
6.9.6	食品微粒对大肠杆菌失活的影响	(231)
6.10	脉冲电场与尼生素协同灭菌	(233)
第7章	脉冲电场对酶的影响	(237)
7.1	酶在食品工业中的作用	(237)
7.2	脉冲电场处理酶的研究进程	(238)
7.3	影响脉冲电场处理酶活力的因素	(245)
7.3.1	操作参数对酶活力的影响	(245)

7.3.2	酶的类型对酶失活的影响	(246)
7.3.3	其他因素对酶失活的影响	(246)
7.4	酶的失活动力学	(247)
7.4.1	酶失活的机理探讨	(249)
7.4.2	脉冲电场与其他作用协同使酶失活	(250)
7.5	脉冲电场处理酶的方法和效果举例	(250)
7.5.1	脉冲电场对脂酶的影响	(250)
7.5.2	脉冲电场对果胶甲酯酶的影响	(252)
7.5.3	脉冲电场对蛋白酶的影响	(255)
7.5.4	脉冲电场对碱性磷酸酶的影响	(256)
7.5.5	脉冲电场对脂肪氧化酶的影响	(257)
7.5.6	脉冲电场对多酚氧化酶的影响	(258)
7.5.7	脉冲电场对乳酸脱氢酶的影响	(259)
第 8 章	脉冲电场处理对食品风味和品质的影响	(262)
8.1	脉冲电场处理后橙汁中风味、色泽及 维生素 C 的保留	(262)
8.1.1	橙汁风味和品质的分析方法	(263)
8.1.2	脉冲电场处理后包装材料对风味保留的影响	(265)
8.1.3	脉冲电场处理后包装材料对感官品质的影响	(268)
8.1.4	脉冲电场处理后橙汁中维生素 C 的保留	(268)
8.2	脉冲电场处理后番茄汁品质的变化	(270)
8.2.1	脉冲电场处理后番茄汁的生物稳定性	(271)
8.2.2	脉冲电场处理对番茄汁中脂肪氧化酶的影响	(273)
8.2.3	脉冲电场处理对番茄红色素的影响	(274)
8.2.4	脉冲电场处理对番茄汁维生素 C 含量的影响	(275)
8.2.5	脉冲电场处理对番茄汁颗粒大小分布、糖度、 pH 和黏度的影响	(277)
8.2.6	番茄汁的感官品质变化	(278)
8.3	脉冲电场处理对蔓越橘汁的品质的影响	(279)

8.3.1	蔓越橘汁中总挥发性成分的保留	(280)
8.3.2	蔓越橘汁中色素的稳定性	(281)
8.4	脉冲电场对蛋白食品组分与结构的影响	(283)
8.4.1	脉冲电场对卵清蛋白溶液的影响	(284)
8.4.2	脉冲电场对透析卵清凝胶性质的影响	(285)
8.4.3	脉冲电场对高或低蛋白浓度的 β -乳球蛋白的影响	(285)
8.4.4	脉冲电场对以 β -乳球蛋白为稳定剂的水包油型乳化剂的影响	(288)
8.4.5	脉冲电场对食品水包油乳化剂的影响	(288)
8.5	脉冲电场对胡萝卜、土豆以及苹果结构特性的影响	(293)
8.5.1	植物组织处理装置	(294)
8.5.2	脉冲电场作用下植物组织的压力变形	(295)
8.5.3	脉冲电场作用下植物组织的结构松弛	(298)
8.6	通过电极化提取果汁的代谢产物	(305)
8.7	脉冲电场处理对苹果切片中可溶物质扩散系数的影响	(306)
8.7.1	扩散系数测定	(307)
8.7.2	未处理以及热预处理苹果切片的扩散	(311)
8.7.3	脉冲电场处理苹果切片的扩散	(312)
第 9 章	脉冲电场波形和微生物失活的傅立叶变换关系	(319)
9.1	傅立叶变换	(319)
9.2	各波形的傅立叶变换图谱	(321)
9.3	傅立叶变换参数关系	(326)
9.4	不确定函数的傅立叶变换	(332)
参考文献		(334)

第1章 绪 论

1.1 脉冲电场灭菌技术与传统灭菌方法

灭菌是食品、生物、化工、制药等行业中至关重要的工序之一。19世纪中叶,法国科学家巴斯德发现发酵和腐败都是微生物所为,并创立了巴氏消毒法,导致了人类社会的深刻变化,这是现代医学和生物学发展的重要里程碑,其影响波及到人类生活的各个方面。自此以后,人们在微生物学方面开展了大量研究工作,关于微生物生长、代谢和死亡的机制与规律及各种灭菌工艺和技术的研究一直是核心内容之一。人们研究的灭菌方法可分为化学法和物理法两大类,化学法是在处理对象中加入化学物质,杀灭或抑制微生物生长,达到防腐保鲜的目的,这种方法对要求不高且无需食用的产品比较实用,但在食品和药物中大量加入会危及人体健康,化学物质在食品中长时间残留是这种方法的最大弊病;物理法是采用各种物理手段进行灭菌,主要有热灭菌法、膜滤法、微波法、 Co^{60} γ 射线辐照法、高静压法和强光法等。

这些常规灭菌方法有诸多不足:

- 1) 热灭菌法需要对物料进行加热,且耗能、耗时,易破坏食品风味和形态,并带来副产物;
- 2) 化学消毒剂仅限于对环境、器皿等消毒,不能直接作用于食品上;
- 3) 紫外线穿透力很弱,只对表面消毒有效;
- 4) 微波灭菌高效实用,但升温也很高,据研究,其灭菌机理仍然主要是热作用;

5) Co^{60} γ 射线辐照法由于其方便快捷, 可先包装后杀菌, 且可实现大宗处理, 应用范围日益扩大, 仅广州近年来就建成了 3 家大型的辐照中心, 但这种技术在我国目前仍然处于限制使用的阶段, 其原因在于残留大, 对食品损伤也大, 我国有明文规定辐照食品必须在包装上标明“辐照食品”字样, 但目前大多数企业很少能做到这一点;

6) 膜滤法成本高, 易堵塞膜孔;

7) 高静压强法主要是间歇操作, 设备庞大, 应用不方便, 很难做到大宗处理;

8) 其他方法如强光处理和光触媒等方法仍然处于研究和试验阶段。

在食品行业中, 各种液态食品的保鲜问题是困扰行业发展的难题, 其中以高蛋白含量奶制品的灭菌最为严重, 如豆奶、牛奶、酸奶等。鲜奶采用巴氏灭菌, 其条件一般为 $85 \sim 90^\circ\text{C}$ 处理 $15 \sim 30\text{s}$, 活菌残留在 3000cfu/mL 以内, 杀菌后产品在 4°C 左右能保存约 10d , 这种灭菌方法条件温和但灭菌不彻底, 风味及营养保持好。陈奶一般采用利乐包装, 进行高温瞬时灭菌, 杀菌温度为 137°C 左右, 杀菌时间为 3s , 其货架期可以达到 6 个月, 但风味及营养已大为损害。对于酱油等调味品的灭菌, 升温至 85°C 、保持 30min 的杀菌过程使生产效率大为降低, 不仅能耗大, 其风味品质等也受到影响, 二次沉淀大量增加。对于啤酒的灭菌, 现国内各大啤酒集团如珠江啤酒、青岛啤酒等已采用膜滤法取代传统热灭菌工艺, 但膜滤法仍有诸多弊端, 如膜孔易堵塞, 要经常清洗和更换等, 造成费用提高。国外已有采用高压脉冲电场灭菌法取代膜滤除菌。

对液态蛋的灭菌难度很大, 原因在于温度升高很容易导致蛋白质变性, 因此在美国采用脉冲电场 (Pulsed Electric Field, 简称 PEF) 处理技术对食品进行灭菌研究最早的处理对象之一就是液态蛋。类似地在生物、制药等行业, 由于许多药物具有特殊的活

性和热敏性使得对其灭菌十分麻烦，而现在涌现出来的种种营养保健品对灭菌的要求更高。随着人们生活水平的提高，对食物的卫生 and 安全性要求越来越高，传统的灭菌标准和方法已难以满足需要，由于灭菌技术的落后直接导致了产品质量低劣和竞争力低下，灭菌技术已经成为严重制约企业发展的瓶颈，新型灭菌技术的开发和广泛推广势在必行。

脉冲电场灭菌技术是将待灭菌液态物料采用泵送等方式流经设置有高强脉冲电场的处理器，微生物在极短时间内受强电场力作用后，细胞结构破坏，菌体死亡。该技术具有如下独到优点：

- 1) 灭菌效果好，一般能达到灭菌 6 个数量级以上；
- 2) 杀菌时间短，物料实际接受脉冲电场作用的时间在毫秒以内，整体灭菌工序操作时间在数秒以内，与超高温短时灭菌时间类似；
- 3) 杀菌温度低，一般物料杀菌处理后升温在 30℃ 以内。若物料不预先进行降温处理，假设初始温度在 25℃ 左右，处理后的物料温度低于 55℃，完全处于对物料的营养和风味进行充分保护的“冷处理”范围，产热少，副产物少，对食品的化学成分、外观及风味等基本无影响；
- 4) 处理均匀，在电场中各部分的物料均受到了相同大小场强的处理（电极边缘除外）；
- 5) 耗能小，有研究指出，脉冲电场灭菌技术的耗能仅为热处理的 40% 左右；
- 6) 对环境无污染，无二次污染及三废问题。

1.2 国内外脉冲电场技术的研究进展

国外自 20 世纪初就有人利用高压电场对牛奶进行灭菌，近一二十年，有关研究逐渐升温，日本、美国等发达国家已制造出成套的技术设备。在使用该技术对各种食品进行灭菌保鲜方面已