

现代食品深加工技术丛书

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

脉冲电场食品非热加工技术

曾新安 主编



科学出版社

现代食品深加工技术丛书

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

脉冲电场食品非热加工技术

曾新安 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在参阅与整理国内外脉冲电场领域最新的研究进展基础上,汇集作者课题组二十多年硕博研究生主要的研究成果,详细介绍了脉冲电场技术原理与概念、脉冲电场的杀菌、脉冲电场对食品组分的影响、脉冲电场辅助提取、电场强化干燥与浸渍工艺、脉冲电场强化化学反应、脉冲电场加速酒的陈酿以及脉冲电场技术在工业上的应用现状,充分展现了脉冲电场作为非热加工技术的巨大潜力,以期为我国脉冲电场技术的发展提供参考。

本书可供脉冲电场相关方面的爱好者、专业研究人员和技术人员参考,也可作为食品、物理、生物、化工、材料等相关专业本科生和研究生的教辅书。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲电场食品非热加工技术/曾新安主编. —北京:科学出版社, 2019.11

(现代食品深加工技术丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-063095-7

I. ①脉… II. ①曾… III. ①电磁脉冲-电场-应用-食品加工
IV. ①TS205

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第247196号

责任编辑:贾超 侯亚薇 / 责任校对:杜子昂

责任印制:吴兆东 / 封面设计:东方人华

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年11月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年11月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:340 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书编委会

总主编：孙宝国

副总主编：金征宇 罗云波 马美湖 王 强

编 委（以姓名汉语拼音为序）：

毕金峰	曹雁平	邓尚贵	高彦祥	郭明若
哈益明	何东平	江连洲	孔保华	励建荣
林 洪	林亲录	刘宝林	刘新旗	陆启玉
孟祥晨	木泰华	单 杨	申铉日	王 硕
王凤忠	王友升	谢明勇	徐 岩	杨贞耐
叶兴乾	张 敏	张 慤	张 偲	张春晖
张丽萍	张名位	赵谋明	周光宏	周素梅

秘 书：贾 超

联系方式

电话：010-64001695

邮箱：jiachao@mail.sciencep.com

本书编委会

主 编：曾新安

编 委：韩 忠（华南理工大学）

刘志伟（湖南农业大学）

洪 静（河南工业大学）

张智宏（江苏大学）

王满生（中国农业科学院麻类研究所）

汪浪红（西北大学）

许飞跃（华南理工大学）

陈博儒（华南理工大学）

丛 书 序

食品加工是指直接以农、林、牧、渔业产品为原料进行的谷物磨制、食用油提取、制糖、屠宰及肉类加工、水产品加工、蔬菜加工、水果加工、坚果加工等。食品深加工其实就是食品原料进一步加工，改变了食材的初始状态，例如，把肉做成罐头等。现在我国有机农业尚处于初级阶段，产品单调、初级产品多；而在发达国家，80%都是加工产品和精深加工产品。所以，这也是未来一个很好的发展方向。随着人民生活水平的提高、科学技术的不断进步，功能性的深加工食品将成为我国居民消费热点，其需求量大、市场前景广阔。

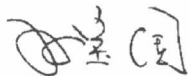
改革开放 30 多年来，我国食品产业总产值以年均 10% 以上的递增速率持续快速发展，已经成为国民经济中十分重要的独立产业体系，成为集农业、制造业、现代物流服务业于一体的增长最快、最具活力的国民经济支柱产业，成为我国国民经济发展极具潜力的、新的经济增长点。2012 年，我国规模以上食品工业企业 33 692 家，占同期全部工业企业的 10.1%，食品工业总产值达到 8.96 万亿元，同比增长 21.7%，占工业总产值的 9.8%。预计 2020 年食品工业总产值将突破 15 万亿元。随着社会经济的发展，食品产业在保持持续上扬势头的同时，仍将有很大的发展潜力。

民以食为天。食品产业是关系到国民营养与健康的民生产业。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，人民对食品工业提出了更高的要求，食品加工的范围和深度不断扩展，所利用的科学技术也越来越先进。现代食品已朝着方便、营养、健康、美味、实惠的方向发展，传统食品现代化、普通食品功能化是食品工业发展的大趋势。新型食品产业又是高技术产业。近些年，具有高技术、高附加值特点的食品精深加工发展尤为迅猛。国内食品加工中小企业多、技术相对落后，导致产品在市场上的竞争力弱。有鉴于此，我们组织国内外食品加工领域的专家、教授，编著了“现代食品深加工技术丛书”。

本套丛书由多部专著组成。不仅包括传统的肉品深加工、稻谷深加工、水产品深加工、禽蛋深加工、乳品深加工、水果深加工、蔬菜深加工，还包含了新型食材及其副产品的深加工、功能性成分的分离提取，以及现代食品综合加工利用新技术等。

各部专著的作者由工作在食品加工、研究开发第一线的专家担任。所有作者都根据市场的需求，详细论述食品工程中最前沿的相关技术与理念。不求面面俱到，但求精深、透彻，将国际上前沿、先进的理论与技术实践呈现给读者，同时还附有便于读者进一步查阅信息的参考文献。每一部著作对于大学、科研机构的学生或研究者来说，都是重要的参考。希望能拓宽食品加工领域科研人员和企业技术人员的思路，推进食品技术创新和产品质量提升，提高我国食品的市场竞争力。

中国工程院院士



2014年3月

前 言

历经多年酝酿与辛勤撰写,《脉冲电场食品非热加工技术》一书终于可以付梓。自 1994 年至今,作者课题组从事脉冲电场(PEF)技术研究的 40 余名研究生或博士后先后毕业了,含出站博士后 1 名、博士 14 名、硕士 25 名;另外,还有 20 余名在读的博士与硕士研究生,在夜以继日地继续进行着师兄师姐们未详尽的 PEF 相关技术研究。在此,要感谢电器设备工程师潘永康 20 多年一直不离不弃地陪着我们进行设备研发,潘师傅是“救火队员”,也是大伙儿的信心保障。

1994 年,我有幸进入华南理工大学攻读硕士学位。所在单位为教育部直属轻化工研究所,当时号称有四大研究法宝——“电磁声光”。那时,研究所的“溶剂-超声波协同起晶技术”已在数百家糖厂工业化应用,获国家科学技术进步奖二等奖。天然溶液研究室在电磁应用的研究方面也颇有建树。入校不久,大约在 1994 年 10 月,导师找我谈话,谈到广东省是调味品大省,但酱油的沉淀问题一直限制着行业的发展,我国酱油与日本酱油相比,澄清度相差很大,澄清度虽然不影响风味,但卖相不佳,严重影响出口。是否可以采用电磁场处理去除二次沉淀呢?接到这个课题后,我到图书馆查找了很久,也没有找到多少相关资料,便求助于当时在中国农业大学同样就读食品专业的高中同桌邓志平,当时我也就是抱着试试看的态度给老同学写了封信,没想到几个月后我这位同桌煞费苦心地从北京图书馆查到 3 篇文章,复印后寄给我。相比于信息高度发达、检索手段全面快捷的当今社会,当时找到这 3 篇文章甚是不易。拿到这份资料时,我如获至宝。邓志平师从罗云波教授,后来去了普渡大学、斯坦福大学,我们一直都有密切联系。这 3 篇文章中,一篇是 Howard Zhang(张庆华)老师关于高强脉冲电场灭菌的综述,一篇是德国 D. Knorr 教授的文章,还有一篇是殷涌光老师在美国申请的一项关于脉冲电场灭菌的专利。我以仅有的这些文献作为参考,开始进

行脉冲电场研究，并逐渐着迷，成为“钻石级”脉冲电场发烧友；同时也与张庆华、殷涌光等老师建立了数十年的脉冲电场缘分。2017年，在美国诺福克举行第二届世界生物、医药、食品和环境技术电穿孔和脉冲电场大会，我和张老师共同主持脉冲电场食品加工分会场，与脉冲电场食品非热加工技术的前辈同台，那一刻令我永生难忘。

关于电场催陈也是一个美妙的故事。现在看来，在20多年前要搭建一套符合有效灭菌要求的脉冲电场设备确实很难。我们串联了32个60W的绝缘栅双极晶体管(IGBT)希望能获得理想高压，为了测量峰值电压，设备会经常性被烧掉，要重新试验。现在的IGBT比那时好用多了，单个功率在1000W以上。脉冲电场技术在食品工业中的产业化应用迎来了真正的春天。而电场对酒催陈而言不需要杀菌那么高的设备条件，物料不与酒接触，因此电流很小，这样设备的设计制造就相对容易很多。1997年，我刚硕士毕业留校工作，深圳红葡萄酒公司进口葡萄原浆发酵生产葡萄酒，想研发一种加速酒陈酿的技术。当时，我所在实验室的研究人员每天进行各种催陈试验与品尝，渐渐地能感觉到酒质量变化的细微差别。后来，我们确定电场催陈是一种有效、可靠的技术，并研发了瓶装酒、散装酒、橡木桶装酒等形式的催陈设备，在深圳红葡萄酒公司、江苏红葡萄酒厂、云南红酒庄葡萄酒有限公司、新疆新天系列葡萄酒销售有限公司（现中信国安葡萄酒业股份有限公司）等数十家企业进行产业化应用。2008年，*New Scientist*、*Nature China*以及“CCTV-1科技博览”的相关亮点报道，使脉冲电场在当时算是掀起了一波小高潮。由于对葡萄酒、果酒感官品评的深刻体会以及与葡萄酒企业的密切联系，2011年我成为中国酒业协会葡萄酒国家评酒委员，也正是与葡萄酒、果酒企业深度合作项目的经费支撑着本课题组脉冲电场灭菌技术设备的研发持续不断。

超高静压技术的发展促进了脉冲电场技术的发展。超高静压和脉冲电场似乎是完全不搭界的两项技术，两者唯一共同点是均被冠以“非热”的新型处理技术。食品非热加工技术在华南理工大学被称作食品绿色加工技术，是一个学科方向；江苏大学在马海乐教授领导下发展了食品物理加工技术，两者外延不尽相同，但都以“非热”为本质特征。2013年，

在胡小松、廖小军教授的领导下，我、刘东红、马海乐、杨瑞金和张德权等发起成立“中国食品科学技术学会非热加工技术分会”，为本领域标志性事件。“食品非热加工国际研讨会”及“食品物理加工技术国际研讨会”已连续召开多届，热度逐渐上涨，非热概念逐渐深入人心。特别是，超高静压应用技术的突破和非浓缩还原果汁的逐渐流行，极大地引领了非热产业的发展。脉冲电场技术在产业化进程中还有很多“瓶颈”技术要解决，还有很多“硬骨头”要啃。当前国际上脉冲电场研究的热点已经从美洲转移到了欧洲，超过 130 家欧洲企业在产业化应用脉冲电场技术，且预计年增长超过 30%，这极大地激励和鼓舞着国内脉冲电场技术的发展。我国第一台工业化脉冲电场灭菌设备正在酝酿之中，而应用于提取、干燥、改性修饰等方面的加工设备也即将面世，请各位读者拭目以待。

本书共 8 章，由曾新安教授主持编写。编写分工如下：第 1 章绪论，由曾新安与陈博儒负责编写；第 2 章脉冲电场技术原理和概念，由曾新安与许飞跃负责编写；第 3 章脉冲电场杀菌，由刘志伟负责编写；第 4 章脉冲电场对食品组分的影响，由韩忠与洪静共同合作完成编写；第 5 章脉冲电场辅助提取，由张智宏负责编写；第 6 章电场强化干燥与浸渍工艺，由王满生负责编写；第 7 章脉冲电场强化化学反应与加速酒的陈酿，由曾新安与汪浪红负责编写；第 8 章脉冲电场技术的工业化应用，由洪静与陈博儒编写。

本书在参考与整理脉冲电场领域最新的国际研究进展的基础上，集成了 20 多年作者课题组硕博研究生的主要研究成果，同时也在 2005 年出版的《脉冲电场非热灭菌技术》基础上完善扩充，有再版之意。书中某些内容可能欠周密论证，难免疏漏，在此先行致歉，同时热切欢迎广大读者批评指正！



2019 年 11 月于广州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 脉冲电场简介	1
1.1.1 传统食品热加工与脉冲电场非热加工	1
1.1.2 脉冲电场技术的发展	2
1.2 脉冲电场在食品加工中的应用	7
1.2.1 脉冲电场技术加工食品的特点	7
1.2.2 脉冲电场在食品加工应用中的研究进展	8
1.2.3 脉冲电场对经济和环境因素的影响	16
1.3 本章小结	17
思考题	17
参考文献	18
第 2 章 脉冲电场技术原理和概念	22
2.1 电学基本概念	22
2.2 脉冲电场基本知识	24
2.2.1 脉冲电场处理系统	25
2.2.2 脉冲电场处理室	25
2.2.3 脉冲波形	27
2.2.4 电介质物理	29
2.2.5 主要操作参数	38
2.3 食品电特性和相关模型	39
2.3.1 食品介质击穿	42
2.3.2 食品介电常数和电导率变化	43
2.3.3 脉冲参数对物料温度的影响	45
2.4 能量计算	45
2.4.1 键能	45
2.4.2 脉冲电场能量	48
2.5 脉冲电场技术特点	51
2.6 本章小结	51
思考题	52

参考文献	53
第3章 脉冲电场杀菌	54
3.1 引言	54
3.2 脉冲电场杀菌机理	54
3.2.1 细胞膜电穿孔机制	54
3.2.2 细胞膜电崩溃机制	56
3.2.3 脉冲电场处理亚致死现象	58
3.3 脉冲电场杀菌效果影响因素	60
3.3.1 脉冲电场处理因素	60
3.3.2 微生物特性	61
3.3.3 食品物料因素	62
3.4 脉冲电场杀菌动力学模型	62
3.4.1 一级杀菌动力学模型	62
3.4.2 Hulsheger 模型	63
3.4.3 Fermi 模型	64
3.4.4 Weibull distribution 模型	64
3.4.5 Log-logistic 模型	65
3.5 脉冲电场对脂质体细胞模拟体系的作用	65
3.5.1 粒径对脉冲电场处理下脂膜通透性的影响	66
3.5.2 脂质体脂膜流动性对脉冲电场处理下脂膜通透性的影响	66
3.5.3 脂质体脂膜组成对脉冲电场处理下脂膜通透性的影响	68
3.6 脉冲电场杀菌应用现状	69
3.6.1 脉冲电场对食品中致病菌的杀灭效果	69
3.6.2 脉冲电场对食品中致腐菌的杀灭效果	80
3.6.3 不同杀菌方式协同脉冲电场杀菌	87
3.7 本章小结	92
思考题	93
参考文献	93
第4章 脉冲电场对食品组分的影响	102
4.1 脉冲电场对碳水化合物的影响	102
4.1.1 淀粉的概述	102
4.1.2 脉冲电场对淀粉结构特征的影响	104
4.1.3 脉冲电场对淀粉理化性质的影响	107
4.1.4 脉冲电场协同淀粉酯化改性的影响	109
4.1.5 脉冲电场协同淀粉改性的机理	122

4.1.6 脉冲电场对壳聚糖降解的影响	124
4.1.7 脉冲电场对淀粉络合物制备的影响	127
4.1.8 脉冲电场对其他碳水化合物的影响	128
4.1.9 脉冲电场对食品其他组分的影响	128
4.1.10 本节小结	129
4.2 脉冲电场对蛋白质的影响	129
4.2.1 脉冲电场对大豆分离蛋白的影响	129
4.2.2 脉冲电场对牛乳蛋白理化性质的影响	130
4.2.3 脉冲电场对蛋白质作用的讨论	131
4.2.4 本节小结	132
思考题	132
参考文献	132
第5章 脉冲电场辅助提取	137
5.1 概述	137
5.2 脉冲电场提取机理	138
5.2.1 脉冲电场诱导植物组织损伤	138
5.2.2 脉冲电场提取设备	139
5.2.3 影响提取率的主要因素	141
5.3 脉冲电场辅助提取多酚	146
5.3.1 茶多酚	147
5.3.2 苹果多酚	148
5.3.3 柑橘类多酚	149
5.3.4 葡萄多酚	150
5.4 脉冲电场辅助提取多糖	151
5.4.1 动物多糖	151
5.4.2 植物多糖	152
5.4.3 真菌多糖	153
5.5 脉冲电场辅助提取蛋白质	153
5.6 脉冲电场辅助提取脂类	155
5.7 脉冲电场辅助提取核酸	157
5.8 本章小结	158
思考题	159
参考文献	159
第6章 电场强化干燥与浸渍工艺	163
6.1 引言	163

6.2	电场强化干燥	163
6.2.1	电场强化干燥的概述	163
6.2.2	电场强化干燥的常用系统装置	164
6.2.3	电场强化干燥的基本原理	168
6.2.4	电场在食品物料干燥中的应用	174
6.2.5	电场作用下食品物料的干燥特性	184
6.2.6	电场强化干燥技术的优势及需要改进之处	185
6.3	电场强化浸渍	185
6.3.1	传统浸渍方法	185
6.3.2	强化浸渍的新型技术	187
6.3.3	电场强化浸渍的基本原理及常用实验装置	187
6.3.4	电场强化浸渍的应用实例	188
6.4	本章小结	191
	思考题	192
	参考文献	192
第7章	脉冲电场强化化学反应与加速酒的陈酿	201
7.1	电场在化学反应方面的运用	201
7.2	电场强化酯化反应	201
7.2.1	酯的理化性质	201
7.2.2	酯类物质的应用	202
7.2.3	酯化反应机理	203
7.2.4	电场强化乙醇和乙酸酯化反应	205
7.2.5	电场强化乙醇和丙酸酯化反应	206
7.2.6	电场强化乙醇和乳酸酯化反应	206
7.2.7	电场强化酯化反应的机理	207
7.3	电场强化氨基酸螯合反应	208
7.3.1	螯合物的概念及特点	208
7.3.2	氨基酸螯合物的应用	209
7.3.3	氨基酸螯合金属元素的方法	209
7.3.4	电场强化甘氨酸-铁反应活性	210
7.3.5	电场强化甘氨酸-铜反应活性	211
7.3.6	电场强化氨基酸螯合反应的机理	212
7.4	电场强化美拉德反应	214
7.4.1	美拉德反应及其机理	214
7.4.2	美拉德反应的应用	215

7.4.3 脉冲电场强化美拉德反应的运用	216
7.4.4 电场强化美拉德反应的机理	219
7.5 电场在酒催陈方面的运用	220
7.5.1 几种酒类催陈技术	220
7.5.2 现有技术存在的缺陷	221
7.5.3 电场催陈葡萄酒及其香气成分的变化	221
7.5.4 电场催陈白兰地酒及其香气成分的变化	224
7.5.5 电场催陈白酒及其香气成分的变化	226
7.5.6 电场催陈的机理研究	227
7.6 本章小结	228
思考题	229
参考文献	229
第8章 脉冲电场技术的工业化应用	231
8.1 商业及产业化应用	231
8.1.1 果汁的杀菌	231
8.1.2 辅助提取	233
8.1.3 改善质构	240
8.1.4 酒类的催陈	244
8.1.5 在木质纤维素生物精炼厂中的应用	245
8.2 脉冲电场设备的发展	245
8.3 脉冲电场的应用前景展望	252
8.3.1 下一步研究方向与重点	252
8.3.2 对策及建议	254
思考题	255
参考文献	255
附录	258
索引	260

第1章 绪 论

1.1 脉冲电场简介

1.1.1 传统食品热加工与脉冲电场非热加工

民以食为天。新鲜食物保存期短，不利于贮藏与运输。原始的食物加工方式多为晾晒、风干或火烤，后来发展为盐腌制、糖浸渍等，但这些方法耗时长，质量难以保证。随着人类社会的进步与发展，食品加工方式不断改进，热加工逐渐在食品加工与贮藏中作为改善食品品质、延长贮藏期最常用的方法。目前，食品工业普遍采用巴氏灭菌、高温短时灭菌、超高温瞬时灭菌、热烫、蒸发浓缩等热加工方式，具有杀灭致病菌与致霉菌、钝化酶类、去除有害成分、改善食品品质特性以及提高食品中营养成分的可利用率和可消化性等作用。然而热加工技术存在较为明显的不足，如破坏食品中热敏性营养成分，导致色泽、香气、口感、质构发生劣变，还有可能在加工过程中产生食品安全问题，如在高温下某些食物会发生美拉德反应产生4-甲基咪唑等有害物质。

巴氏灭菌奶采用低温长时加热处理，将鲜牛奶置于62~65℃保持30 min，处理后在4℃左右冷藏能保存10 d左右，虽然处理条件温和，风味及营养保持好，但杀菌不彻底，存在一定的安全风险。而采用超高温(135~150℃)瞬时加热处理，其货架期长达6个月，但风味及营养物质会大幅下降。酱油等调味品的热杀菌过程是将酱油升温至85℃、保持30 min，不仅能耗大，风味品质等也受到影响，二次沉淀物也会大量增加。对液态蛋进行热加工难度较大，原因在于液态蛋的蛋白质凝固点较低，温度略高易导致蛋白质变性，破坏其功能特性。

随着人们生活水平的提高，消费者对食品质量与安全性能的要求也越来越高。今天的消费者不仅要求食品新鲜安全，而且要求食品保持原有的天然风味和营养成分。利用传统热加工技术生产的食品已越来越不能满足消费者的需求。为了解决这一问题，很多新兴的食品加工技术应运而生，其中食品非热加工技术已得到广泛的研究，并取得了很好的进展，主要包括高强度脉冲电场、超高静压技术、高压二氧化碳技术、辐照技术、脉冲磁场技术等。它们主要用于食品的杀菌与钝酶，也能对某些食品大分子进行降解或改性，增强功能性。食品“非热加工”与

传统的“热加工”相比,具有加工温度低、更好保持食品原有的色香味等特点,特别是对热敏性食品功能性营养成分具有极佳的保护作用;同时,非热加工还具有环境污染小、加工能耗低与污染排放少等优点,而日渐受到追捧。

脉冲电场(PEF)技术是一种温和的非热加工技术,将物料作为电介质放置在两个电极之间进行处理,使微生物细胞膜发生不可逆电穿孔效应,达到细胞失活或有效成分溶出的目的,是一种温和高效的细胞破碎技术,由于具有非热和提取液杂质少等优点,可有效提取活性成分,主要用于果蔬汁、液态乳制品和液态蛋等黏性及电导率相对较低的食品加工。此技术还可改变果蔬细胞的内部组织结构,使物料细胞产生不可逆破坏,导致细胞快速失水,有利于提高食品干燥速率。随着健康、新鲜、营养的观念深入人心,脉冲电场非热加工技术在食品绿色生产与加工、保障食品质量与安全方面发挥独到的作用。

1.1.2 脉冲电场技术的发展

早在19世纪末,就出现了利用电流进行食品加工的相关报道,研究发现直流电或低频交流电可通过热效应和电化学反应进行杀菌^[1]。20世纪20年代,人们将鲜牛奶预热至52℃置入平行平板电场,对其施加220V连续交流电,当电流通过食品时产生焦耳效应,将牛奶加热至71℃,并在此温度下保持15s后,便得到“电力消毒牛奶”^[2]。20世纪40年代,苏联学者Flaumenbaum发现通过交流电场可将苹果泥中的细胞破碎,提高了苹果的出汁率,这个过程称作“电聚合”^[3]。20世纪50年代,人们开始利用高电压脉冲放电杀菌,该工艺是将电极置于液体介质中,通过高压脉冲产生电弧,以及高达250MPa的瞬态压力冲击波、紫外光、强电流和臭氧等综合效应,可将悬浮在蒸馏水中的大肠杆菌、粪链球菌、枯草芽孢杆菌、克氏链球菌和耐辐射微球菌灭活,灭活率高达95%^[4]。相比直流电流和低频交流电流,高电压脉冲更能快速有效地杀灭微生物,能量利用率更高,但其电解损耗、电解产物以及冲击波、紫外光等可能给食品带来污染,因此当初该技术被认为不适合用于食品加工。

1.1.2.1 脉冲电场之父——Heinz Doevenspeck 的开创性工作

20世纪60年代,德国工程师Heinz Doevenspeck首次报道了脉冲电场的产生、应用及对微生物细胞膜的影响。他发现脉冲电场能将物料细胞破壁,改善细胞内的相分离,可应用于微生物的灭活。另外,一系列试验研究验证了脉冲电场会对物质表面电荷产生影响,可通过电絮凝的方式去除废水中悬浮的蛋白质,可用于鱼类污水的处理^[5]。Doevenspeck与德国一家鱼粉生产商展开合作,开发鱼粉加工新工艺。与传统鱼粉加工不同的是,该工艺采用脉冲电场替代传统蒸煮系统加工