

食品物理加工技术与装备发展战略研究

贾敬敦 马海乐 葛毅强 魏 珣◎著



科学出版社

食品物理加工技术 与装备发展战略研究

贾敬敦 马海乐 葛毅强 魏 珣 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要从食品物理加工技术的基本概念、发展历程、技术特征、应用前景、产业影响、技术体系建设等方面阐述了食品物理加工技术的整体发展概况,重点介绍了超高压、超声波、电场、磁场、射频、高压微射流、红外、微波、快速物理检测等九类现代物理技术在食品加工中应用的基础理论与技术研究进展,以及装备开发现状,从世界学术论文发表和专利申报的角度分析了食品物理加工技术的发展态势。

本书可供食品产业相关行政管理人员、科研教学人员、企业技术人员等阅读参考,并可为开拓食品产业新领域,推进具有中国优势的现代食品工业体系,引领食品产业持续健康发展提供支撑,为国家科技与行业主管部门提供决策依据。

图书在版编目(CIP)数据

食品物理加工技术与装备发展战略研究 / 贾敬敦等著. —北京:科学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-03-046810-9

I. ①食… II. ①贾… III. ①食品加工-研究 IV. ①TS205

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第303891号

责任编辑:李秀伟 夏 梁 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 伟 / 封面设计:北京铭轩堂广告设计公司

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:22 1/4

字数:505 000

定价:150.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编写人员名单

顾问组

组 长

贾敬敦

副组长

孙宝国 朱蓓薇 蒋丹平 赵红光

成 员

王 硕 赵杰文 刘成梅 廖小军 孙大文 刘东红 吴继红

主要编写人

主 编

贾敬敦 马海乐 葛毅强 魏 珣

编写人（按姓氏汉语拼音排序）

葛毅强 韩 忠 黄星奕 贾敬敦 蒋丹平 刘 伟 马广鹏
马海乐 潘忠礼 任晓锋 孙康泰 魏 珣 王 蓓 王永涛
王云阳 杨瑞金 曾新安 赵红光 郑 菲

校 对

朱华平 李 杨 李 强

序 言

我国是全球第一大食品工业国，食品产业已成为我国国民经济最具活力的“新的增长点”和发展现代农业的“新空间”。食品产业是产业原料牵着千家万户农民，产品质量关系千家万户居民的民生产业，也是拉动内需、增加就业、保障民生、促进经济增长，大量转化农产品和增加农民收入的支柱产业。

但是，我国食品产业正面临着近 30 年来最艰难而相对漫长的转型期。相关资料显示，2012 年开始，中国食品工业增速和利润率已经连续 3 年下跌，到 2014 年，中国 37 607 家规模以上食品企业创造了 1.8 万亿美元的产值，虽保持了 8% 的增速，但却是增速首次下跌到个位数。另一方面，伴随人们生活方式、饮食习惯和营养健康需求的变化，“方便、美味、可口、营养、安全、实惠、健康、个性化、多样性”的产品新需求和“智能、节能、低碳、环保、绿色、可持续”的产业新要求已成为食品产业发展的新常态，也对食品产业科技提出了新要求。

因此，如何聚焦资源环境新约束和增长方式新要求下的新常态，把握现代农业新潜力和传统食品新空间下的新机遇，适应食品消费新需求和市场经营新业态下的新模式，迎接食品科技新趋势和创新食品新态势下的新挑战，实现高效利用、新型加工、生物工程、节能减排、清洁生产、智能物流、现代加工和低碳制造等食品高新技术快速发展与不断创新，已成为未来食品产业向方便、营养、健康和高效、节能、低碳方向可持续发展的重大课题，也对我国提出了严峻挑战。面对食品产业发展的新形势和新阶段，我国食品产业科技发展只有瞄准世界高技术前沿，面向国家战略和产业发展需求，全面实施创新驱动食品产业发展战略，才能引领和支撑食品产业不断优化产业结构，改变增长方式。依靠科技创新驱动，是我国食品产业实现可持续健康发展的根本途径。

物理加工方法作为一种引入了声、光、电、磁、力等物理学方法的绿色加工技术，不仅可以显著改善产品的生物学活性，更重要的是减少化学溶剂过多使用的状况，改善了食品食用安全性；避免了传统加工温度过高，降低了食品营养成分被破坏的程度。国际上，不少学者利用红外、射频、微波等热物理场进行果蔬干法杀青，可避免传统热水漂烫杀青引起的养分流失、废水排放、耗水量大等问题；利用红外进行果蔬脱皮，可消除传统碱液脱皮方法因废液排放引起的水体污染问题；利用物理灭霉杀虫，取代传统的硫熏技术，消除二氧化硫排放对大气臭氧层的破坏。我也深信，随着科技的创新发展，并通过我们大家的共同努力，一定能够从食品物理加工技术发展中找到最终的突破口，

实现“厨房革命”和餐饮制作模式的“新变革”,从而实现食品加工的革命性发展。近年来,物理加工技术的研发和产业化已成为全球食品领域关注的热点。

作为食品产业高新技术研究的重点领域,“十五”以来,科技部就食品物理加工技术在国家 863 计划、科技支撑计划等项目计划中给予了长期稳定的关注和支持;特别是“十二五”863 计划的现代农业技术领域围绕食品超高压、超声波等加工技术进行了重点部署,全面推进了我国在该领域的快速发展。

《食品物理加工技术与装备发展战略研究》一书的出版,既是对我国近 20 年来在该领域科技工作的系统回顾和阶段性重要成就的全面总结,也是对该领域国际学术研究、技术发展前沿和装备开发的系统介绍,更是对该领域未来科技发展的预测及展望。

胡小松

中国食品科学技术学会副理事长

中国农业大学食品科学与营养工程学院院长

2015 年 7 月 7 日

前言

我国是一个人口众多的国家，食品产业在国民经济中具有举足轻重的战略地位。改革开放 30 多年来，我国食品工业一直以年均两位数的速度递增，成为了我国增速最快、最具活力的支柱产业，对保障民生、促进国家发展起到了重要的作用。但是近几年，我国的食品工业面临着艰难的转型期，如何通过创新驱动提高食品加工制造的效率、降低工业生产的能耗、淘汰影响食品安全品质的落后生产方式、提高食品的营养特性、改善食品的感官品质，已经成为食品产业迈向新的发展时代的重要课题，也是中国食品工业持续保持健康发展的新常态。

食品物理加工技术——一种通过科技革命赋予新内涵的革命性食品加工新技术在国际上悄然兴起。国际上大量的科学研究结果表明，现代物理学方法在食品加工中的应用，对于食品加工效率和产品安全品质的提升、能源消耗与环境污染的降低，产生了许多意想不到的效果，展现了广阔的应用前景。

食品物理加工分为非热物理加工、热物理加工和物理快速检测。非热物理加工主要采取的物理学手段包括超高压、超声波、紫外线、激光、电场、磁场等。近 20 年来，非热物理加工在食品杀菌钝酶和分离提取等领域的应用得到快速发展，在理论研究、方法创新、装备开发、产业化应用等方面取得了一系列重大进展。近年世界各国大量的研究发现，非热物理加工技术在酶解反应、微生物发酵、生物大分子改性修饰、膜分离、陈酿等加工领域展现出更加广阔的应用前景，在技术的产业化方面潜力巨大。食品热物理加工主要包括利用微波、红外、射频、脉冲强光等物理学方法，除了过去应用于干燥之外，还在杀菌、灭酶、杀虫、脱皮等加工领域中应用广泛。基于物理学手段的食品品质快速检测技术近些年也得以快速发展，基础理论研究、产业化应用均取得了重大突破，由品质检测向过程参数检测是今后的一个发展方向。

两年来，作者收集了大量国内外资料，查阅和参考了相关学科的各类著作和文献，旨在详细阐释超高压、超声波、高压脉冲电场、磁场、射频、高压微射流、红外、微波、无损检测等技术的基本概念与技术特征，研究应用现状与进展，国内外发展趋势，以及促进技术与产业发展的对策建议，并通过文献计量学方法厘清了食品物理加工技术态势分析。作者试图努力为从事和关心物理加工技术与装备工作的政产学研用的各方面力量提供一些有力的支撑，乃至希望高等院校的师生也能从中得到帮助。但是由于本领域发展日新月异，加之作者的经验和水平有限，书中对于相关技术的阐释和评述难免有不妥

之处，敬请广大读者批评指正。

本书的编写得到了“2014年食品物理加工技术及装备座谈会”和“2015年食品物理加工技术创新座谈交流会”两次会议的大力推进，也得到了很多同行专家的帮助和支持，中国农业大学胡小松教授为本书做序，在此一并表示衷心感谢！

作 者

2015年8月

目 录

序言
前言

第一章 食品物理加工技术与装备发展战略研究总论

第一节 食品物理加工技术及其发展历程	001
一、食品物理加工技术的内涵	001
二、食品物理加工技术的发展历程	002
三、食品物理加工技术的发展趋势	006
第二节 食品物理加工技术特征及应用	009
一、食品非热物理加工技术	009
二、食品热物理加工技术	013
三、食品物理快速检测技术	014
第三节 物理加工技术对食品产业的影响	014
一、提高食品品质，保障食品安全	014
二、提高加工效率，降低生产成本	015
三、节能减排，促进绿色发展	015
四、变革烹饪方式，推进厨房革命	016
五、实现食品制造业自动化、信息化、网络化与智能化的必然选择	016
第四节 我国食品物理加工技术研究体系建设情况	017
第五节 发展建议	020
一、人才培养	021

二、学科建设.....021

三、科学研究.....022

第二章 超高压食品加工技术及装备研究进展

引言.....023

第一节 基本概念与技术特征.....024

 一、基本概念.....024

 二、基本原理.....025

 三、技术特征.....025

 四、发展历程.....025

第二节 基础研究现状.....026

 一、杀菌.....026

 二、超高压对蛋白质的影响.....038

 三、超高压对食品品质的影响.....046

 四、技术与装备开发.....052

第三节 超高压技术的应用.....054

 一、超高压在果蔬中的应用.....055

 二、超高压在肉制品加工中的应用.....056

 三、超高压在水产品加工中的应用.....057

 四、超高压在乳制品加工中的应用.....057

 五、超高压技术在其他食品中的应用.....058

 六、超高压技术在我国的应用.....059

第四节 优势和存在的瓶颈与局限性.....060

 一、技术优势.....060

 二、发展瓶颈与挑战.....061

 三、国内外发展趋势.....064

 四、对策建议.....066

参考文献.....067

第三章 食品超声加工技术及装备研究进展

第一节 超声波的基本概念与技术特性.....082

 一、超声波的基本概念.....082

 二、超声波的技术特性.....082

第二节 超声波在食品加工中的应用进展	083
一、超声波在食品加工中的应用概述	083
二、主要食品超声加工的理论研究、技术与装备开发及产业化推广的进展	088
第三节 技术优势和存在的瓶颈与局限性	105
一、超声波在食品加工中应用的主要优势	105
二、技术瓶颈和局限性	106
第四节 今后的发展趋势	106
第五节 对策建议	108
一、加强以产业化为导向的科学研究工作	108
二、建立研究平台, 加强协同创新	108
三、加强国际合作与交流	109
参考文献	109

第四章 高压脉冲电场技术及装备研究进展

第一节 基本概念与技术特征	113
一、基本概念	113
二、基本原理	114
第二节 研究应用现状与进展	118
一、在食品工业中的应用领域	118
二、在主要应用领域理论研究、技术与装备开发及产业化推广的进展	119
三、优势和存在的瓶颈与局限性	129
第三节 国内外发展趋势	131
一、国际发展趋势	131
二、国内发展趋势	132
三、下一步研究方向与重点	132
第四节 对策及建议	134
参考文献	136

第五章 食品磁场加工技术及装备研究进展

第一节 基本概念与技术特性	140
一、基本概念	140
二、基本原理	140

三、技术特征.....141

第二节 磁场在食品加工中的应用进展.....142

一、食品磁场加工的理论研究.....142

二、应用研究.....147

三、装备开发.....156

四、技术优势和存在的瓶颈与局限性.....160

五、今后的发展趋势.....160

六、对策建议.....161

参考文献.....161

第六章 食品农产品射频加热技术及装备

第一节 基本概念与技术特征.....167

一、基本概念.....167

二、射频加热原理.....168

三、射频加热设备.....172

四、技术特征.....177

第二节 研究进展.....177

一、在食品工业中的应用领域.....177

二、理论研究、技术与装备开发及产业化推广的进展.....179

三、技术优势和存在的瓶颈与局限性.....189

四、发展趋势.....190

第三节 对策建议.....191

一、射频加热装备和介电特性测定设备引进.....191

二、专用智能化射频加热高新技术装备研究.....191

三、射频加热杀菌杀虫烫漂工艺研究及产业化示范.....191

参考文献.....192

第七章 动态高压微射流技术及装备研究进展

第一节 基本概念与技术特征.....198

一、基本概念.....198

二、基本原理.....199

三、技术特征.....201

四、发展历程.....201

第二节 研究应用现状与进展	202
一、在食品工业中的应用领域	202
二、在主要应用领域理论研究、技术与装备开发及产业化推广的进展	220
三、优势和存在的瓶颈与局限性	225
第三节 国内外发展趋势	226
一、国际发展趋势	226
二、国内发展趋势	228
三、下一步研究方向与重点	229
第四节 对策建议	230
一、建议加强开展新型专用型动态高压微射流装备和核心元件的研发	230
二、建议加强开展动态高压微射流技术在食品领域中的应用	230
参考文献	231

第八章 食品红外加工技术及装备

引言	240
第一节 红外辐射的基本概念与技术特征	240
一、基本概念	240
二、基本原理	241
三、技术特征	245
四、发展历程	248
第二节 研究应用现状与进展	249
一、红外加工技术在食品工业中的应用领域	249
二、红外加工技术在主要应用领域理论研究、技术与装备开发, 以及产业化推广的进展	254
三、优势和存在的瓶颈与局限性	269
第三节 国内外发展趋势	270
一、下一步研究方向与重点	271
二、对策建议	271
参考文献	272

第九章 微波技术及装备研究进展

第一节 基本概念与技术特征	277
一、基本概念	277

二、基本原理	277
第二节 研究应用现状与进展	283
一、在食品工业中的应用领域	283
二、在主要应用领域理论研究、技术与装备开发及产业化推广的进展	284
三、优势和存在的瓶颈与局限性	289
第三节 国内外发展趋势	293
一、国际发展趋势	293
二、国内发展趋势	295
三、下一步研究方向与重点	296
第四节 对策建议	303
参考文献	304

第十章 食品农产品无损检测技术及装备研究进展

第一节 基本概念与技术特征	308
一、基本概念	308
二、基本原理	309
三、技术特征	310
四、发展历程	311
第二节 研究进展	311
一、在食品工业中的应用领域	311
二、在主要应用领域理论研究、技术与装备开发及产业化推广的进展	312
三、优势和存在的瓶颈与局限性	316
第三节 国内外发展趋势	318
一、国际发展趋势	318
二、国内发展趋势	319
第四节 对策建议	320
参考文献	320

第十一章 食品物理加工技术态势分析

第一节 食品物理加工技术基础研究分析	326
第二节 食品物理加工专利技术分析	334

食品物理加工技术与装备发展战略研究总论

随着经济全球化水平的提高，高端制造技术、现代网络技术、智能传感技术、尖端生物技术的高速发展对食品产业的技术进步起到了重要的支撑作用。人们健康意识的加强、城镇化速度的加快、工作节奏的加快与生活方式的变化，对食品产业的技术创新与快速发展提供了前所未有的市场需求，2014年10.89万亿元的食品工业总产值及其过去16年18.84倍的增长幅度印证了我国食品产业蕴含的需求空间。但与此同时，频发的食品安全事件、严重的环境污染、高能耗低效率的传统加工技术导致食品产业面临着巨大的挑战。它山之石，可以攻玉，学科交叉融合是充分发挥现代制造技术优势，迎接食品产业挑战、克服发展瓶颈重要的创新动力，可以为食品产业升级和持续发展提供重要的科技支撑，这正是本研究报告著述的重要起因。

第一节 食品物理加工技术及其发展历程

一、食品物理加工技术的内涵

一门科学技术当经过了几个世纪甚至更长时间的发展之后，其在技术层面提升的空间自然越来越小、理论创新的源泉也越来越匮乏，这时借力其他学科的优势是其实现跨越的重要途径之一，食品科学也是如此，这就是谓之学科交叉的优势。

长期以来，以化学和生物学方法为基础的传统食品加工技术，由于经历了长期的方法研究与参数优化，其加工效率、产品得率、产品活性、能量消耗等关键指标提升的难度越来越大。为此，近年来国内外越来越多的学者，从不同的角度，探索性地将声、光、电、

磁、力等物理学方法应用于食品加工的各个环节中,大量的研究数据证明,物理学方法的应用确实产生出了许多意想不到的效果,展现出了广阔的应用前景,一种新的食品加工技术——食品物理加工技术在国际上悄然兴起。

食品物理加工技术是指利用现代声学、光学、电学、磁学、力学等物理学方法,改进传统食品加工过程的一类新技术。食品物理加工技术不仅可被广泛应用于食品酶解、微生物发酵、有效成分提取、杀菌钝酶、菌种诱变、陈化催熟等食品生物化学加工过程的强化;还可以通过对食品品质特性和食品加工过程参数的快速识别,实现食品制造业自动化、信息化、网络化、智能化信号的快速采集。对于传统的在重力场和地磁环境下完成的食品加工过程而言,现代物理学方法的介入,显著促进了加工介质对加工对象的作用效果,因此加工效率、产品品质与安全性、降耗减损、环境友好等指标出现了大幅度提升;对于食品品质及加工过程检测而言,物理快速检测技术突破了化学分析速度慢的难题,可以方便地实现现场、原位、在线信息采集。

二、食品物理加工技术的发展历程

尽管食品物理加工作为一门专门技术,不像食品化学那样有完整的理论体系与技术方法,但是将声、光、电、磁、力等物理学方法应用在食品加工过程中的研究由来已久,而且近10年的发展速度迅猛,成为食品领域世界性的研究热点,也对食品产业的发展带来许多期望。

1899~1914年,美国学者 Hite 就以牛奶、苹果汁、梨汁、桃汁、葡萄汁为研究对象,进行了超高压杀菌技术的研究。1990年日本首先将超高压杀菌技术在果汁、沙拉酱、果酱、海鲜、果冻等食品中进行了商业化应用。此后欧洲和北美的大学、公司和研究机构也相继加快了对超高压设备和加工技术的研究。目前,在美国、西班牙、法国、澳大利亚等发达国家,超高压杀菌技术在果蔬制品、肉制品、乳制品、海产品的商业化应用已经达到了较高水平。我国从2000年开始了超高压杀菌技术规模化与系统化的研究与应用。十几年来,超高压杀菌技术的研究与应用在中国迅速发展,在增压器、承压框架、耐压容器、泄压阀、密封组件等关键环节实现了技术突破,陆续开发出具有自主知识产权的超高压小型实验设备、中型中试设备和大型生产型设备。

早在1929年,Harway E.等就在 *J. Bacteriol.* (第17卷,第373~379页)上报道了其开展高频声波降解发光细菌的研究,1962年 Hughes D. E.等在 *Science* (第138卷,第108~114页)上报道了其开展超声细胞裂解的研究。之后的几十年,美国、日本、欧洲不断有学者将超声波应用于膜分离、消泡、肉质嫩化、脱气、减黏脱附、冷冻、结晶、除霜解冻、乳化等食品加工过程的强化,不少技术已经进入产业化应用阶段,但是上述加工多数利用的是超声空化效益引起的振动搅拌作用。近几年,更多的学者加速开展超

声波在农产品中有效成分提取、食品杀菌灭酶、酶解、发酵等加工过程的应用,这些应用主要利用了超声空化效应引起的声化学效应,其中的超声辅助提取技术已经进入了产业化阶段,提取罐可以达到 1000L 以上。我国关于超声波在食品加工中的应用研究也主要集中在分离提取、酶解反应等方面,近年来在工业化设备研制上实现了重大飞跃,技术成果的产业化迅速推进,超声辅助提取技术已经在工业化生产中广泛使用,超声辅助酶解技术在功能多肽的生产中已经形成多条生产线。

从 19 世纪开始,已经有电流应用于食品加工上的报道。直到 20 世纪 60 年代,才开始有关于高压脉冲电场技术应用研究的报道。国际上目前从事脉冲电场研究的单位有德国 DIL 公司、德国食品科技中心、美国 DTI 公司、美国俄亥俄州立大学、美国华盛顿州立大学、美国农业部东部研究中心、法国 HAZEMEYER 公司、新西兰奥塔戈大学、加拿大圭尔夫大学、匈牙利中央食品研究中心,主要开展电场在细胞降解、液态食品保藏、苹果汁榨取等方面的技术研究与推广工作,工业化规模设备处理量可达 10 000L/h。国内学者紧密跟踪国际发展前沿,从多角度开展电场在食品加工中的应用研究。然而,如果关于杀菌机制尚未明确、安全性无法得到保证等问题不能有效解决,脉冲电场杀菌技术的商业化应用将长期停滞不前。但是脉冲电场技术在果蔬汁榨取、果蔬干燥、肉品加工等方面的商业化应用前景广阔,吸引了不少工业界的高度关注,形成了不少成功产业化的案例。

1962 年 Gerencser V. F. 在 *Nature* 上发表了题为 *Inhibition of Bacterial Growth by Magnetic Fields* 的文章,报道了磁场对细菌活性有一定的抑制作用。但是近年来国际上关于强磁杀菌的研究工作为数不多,我国相关课题组在进行杀菌方法与参数优化的同时,积极探索高强度磁场引起微生物凋亡的理论基础。但是,缘于杀菌效果有待提高,目前高强度脉冲磁场的杀菌技术尚未进入工业化应用阶段。相反,国内外将磁场加工的目标转移到低强度磁场,应用于微生物发酵、酶促反应等生化过程的强化,由于磁场处理效果及其装备制造没有瓶颈问题,因此许多具有广阔应用前景的重要成果开始进入商业化应用阶段。

均质技术最初在 1560 年由 Ambroise Pare H. 用于描述制备乳白色药理学液体的手段。1900 年,在巴黎世界博览会上展示了由 Auguste Gaulin 发明的用于均质牛奶的装置(French Patent No.295 596),并且第一次使用了“homogenized”(均质)这个词。动态高压微射流技术正是基于高压均质的工业应用开发出来的。1985 年,Chardonnet 等采用动态高压微射流设备制备微乳;1999 年,Guerzoni 等研究了高压微射流均质对山羊奶的杀菌保鲜效果,研究表明高压微射流均质 100MPa 处理能够有效控制在短期储藏过程中肠球菌及葡萄状球菌的生长;1992 年,Barenholz 等发表了有关动态高压微射流技术生产大批量脂质体的报道;2011 年,李志报道了利用动态高压微射流技术处理提取甘薯叶中黄酮类化合物的研究工作。近 10 年来,国内外大量的学者还将动态高压微射流技术应用于蛋白质、酶、多糖,膳食纤维等食品生物大分子的改性处理研究。我国的廊坊通用机械有限公司也在积极推