

Physical Technologies for
Food Processing

食品物理加工技术

丘泰球 任娇艳 杨日福 主编



科学出版社

食品物理加工技术

Physical Technologies for Food Processing

丘泰球 任娇艳 杨日福 主编

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、技术特点、装置设计、工艺流程、机理探讨、应用前景等方面阐述了食品物理加工技术的整体内涵,重点介绍超声波、超(亚)临界流体、膜分离、共结晶、光及多种组合技术等现代物理加工方法在食品加工中的基础理论、加工工艺和加工设备。本书内容参阅了大量国内外相关学科的研究进展,内容新颖,条理清晰,融实用性、前瞻性、科学性和通俗性于一体,以求读者能更好地理解相关知识,掌握相关技术。

本书既可供高等学校食品科学与工程、食品质量与安全、轻工科学与工程、化学与化工、生物科学与工程等专业教师和学生使用,又可为食品生产企业开发新技术、新工艺和新设备提供参考与借鉴,有利于推动我国现代食品工业的转型升级,为整个食品产业的健康和可持续发展提供支持。

图书在版编目(CIP)数据

食品物理加工技术 / 丘泰球, 任娇艳, 杨日福主编. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057884-6

I. ①食… II. ①丘… ②任… ③杨… III. ①食品加工 IV. ①TS205

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 127829 号

责任编辑: 李秀伟 / 责任校对: 严 娜

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 27 1/2

字数: 652 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编委会名单

主 编 丘泰球 任娇艳 杨日福

副 主 编 胡爱军 罗登林

参编人员 (按姓氏拼音排序)

曹美芳	陈家逸	陈康宗	崔玉涵	范晓丹
郭 娟	杭方学	胡爱军	胡双飞	胡松青
黄萍萍	李 凯	李 旺	李 文	刘宏生
陆海勤	罗登林	彭 彬	丘泰球	任娇艳
石海燕	唐湘如	王 超	王玉龙	温诗雅
徐明芳	严卓晟	杨李益	杨日福	张 伟
郑亚美				

序

传统的食品加工技术(如高温加热、酸碱处理等)常常会导致食品品质的下降,如在产品的纹理、颜色、味道、质构等方面产生不良影响,还会造成生物活性物质的损失。随着人们对食品在营养、健康和感官品质方面更高的追求,传统的食品加工技术正面临着许多挑战。因此,如何让食品保留其新鲜和营养品质属性,正受到生产者和消费者的高度重视。食品产业必须与相关前沿技术深度融合,这是以常规化学、生物学为基础的传统食品加工方法难以实现的,而食品物理加工技术创新将起到重要作用。为了满足人民对食品日益增长的需求,探索各种新兴食品加工技术取代传统方法已成为必要。近年来,食品科技人员不断研究使用各种新兴的物理加工技术(如超声技术、超临界流体技术、光技术、膜分离技术等)在食品加工中应用的可能性。这些新兴的物理加工技术不仅可以显著缩短处理时间,节省能源,减少污染,而且能提供更加安全、营养和健康的食品,使整个食品行业受益。

食品物理加工技术是指利用现代声学、光学、电学、磁学、力学等物理方法或将这些方法耦合,改进食品加工过程的一类新技术。在国家倡导“工业4.0”的大背景下,物理加工技术具有提高加工效率、降低生产成本、提高食品品质、保障食品安全,从而实现节能减排,促进绿色发展,引领食品产业升级转型等技术特征及优势。

该书着重讨论超声波、超高压、电场、光、力、微波等物理方法在食品领域中的应用。编者们在该领域内长期从事相关教学、科研和装备研制工作,该书内容参阅了大量国内外相关学科研究进展,内容新颖,条理清晰,融实用性、前瞻性、科学性和通俗性于一体,以求读者更好地理解相关知识,掌握相关技术。

综合来看,该书具有一定的学术水平和使用价值,可供高等院校作为教学参考书,也可作为在工业、农业和医药等领域从事与物理加工技术有关的科技工作者的优秀参考著作。该书的出版将有助于促进食品物理加工技术的发展,从而更好地为国民经济建设服务。

 (Da-Wen Sun)

华南理工大学食品科学与工程学院教授、博导

爱尔兰皇家科学院院士

欧洲人文和自然科学院院士

波兰科学院外籍院士

国际食品科学院院士

国际农业与生物系统工程科学院院士

国际制冷科学院院士

2017年11月

前 言

食品产业涵盖了食品原料生产、加工与制造、仓储物流与消费等全产业链的各个环节，是关系到国计民生的支柱产业。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、产品得率和活性、能量消耗等关键指标提升的难度越来越大。因此，需要创新加工方法和技术，以提高食品加工效率和综合利用程度，降低能耗和减少环境污染，提升国民营养与健康水平，保障食品质量安全。

食品物理加工技术是现代物理学与传统食品产业深度融合而产生的食品加工新领域，它是指将各种物理方法应用于食品加工中，以达到提高生产效率、改善食品品质、保障食品安全、节约生产能耗、减少排放污染，实现食品的绿色生产，这些方法包括超声技术、电场技术、磁场技术、光学技术、微波技术、超临界流体技术等。物理加工技术不仅可以被广泛应用于食品的去皮与杀菌、提取分离、酶解反应、发酵工程、均质乳化和干燥脱水、分子改性等产品的生产与制造，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与信息采集，逐步实现食品加工制造的自动化、信息化、网络化和智能化，提高食品的自动化生产水平，也就是“工业 4.0”的目标。

为了适应食品科技及其产业发展的需要，本书编写组成员在结合自己多年来的教学经验、科研成果和工程实践的基础上，查阅和参考了大量国内外文献和相关学科的一些著作，编写了《食品物理加工技术》一书，本书旨在提供新兴食品物理加工技术的基本概念、设备和生产方法，并强调各种组合技术在实际中的应用。

本书主要编写人员包括多年从事食品科学与工程、物理科学与技术、制糖工程等方面的教学和科研的高校教师，以及具有丰富生产经验的企业技术人员和专家，他们对相关领域均有一定的造诣和独特见解。但由于本领域相关技术发展日新月异，加之作者的水平 and 经验有限，书中对相关技术的阐释、内容的编写等方面都难免存在缺点和疏漏，敬请广大读者批评和指正。

丘泰球

华南理工大学食品科学与工程学院教授、博导

2017 年 10 月

目 录

序

前言

1 非热物理加工技术对豆类糖蛋白特性的影响	1
1.1 超高压技术	1
1.2 与物理加工相关的豆类糖蛋白特性概述(以芸豆为例)	6
1.3 超声及超高压微射流均质等加工预处理技术对豆类凝集素得率及活性的影响	10
1.4 超高压处理对芸豆凝集素结构和活性的影响	11
1.5 不同处理前后豆类凝集素对 α -淀粉酶抑制活性、 α -葡萄糖苷酶抑制活性的影响	14
1.6 相关结论与展望	16
参考文献	17
2 基于力和光机电一体的类球形果蔬前处理装备	19
2.1 类球形果蔬品种、加工方法、前处理流程分类	19
2.2 基于力和光机电一体的类球形果蔬前处理装备的优越性	21
2.3 基于力和光机电一体的类球形果蔬前处理装备研制	22
2.4 基于力和光机电一体的类球形果蔬前处理装备介绍	36
2.5 典型案例	43
2.6 展望	51
参考文献	51
3 超声及其耦合技术强化提取	53
3.1 超声强化提取的基本原理	53
3.2 双频超声提取的空化效应	55
3.3 双频超声提取设备	60
3.4 双频超声提取技术及设备应用	65
3.5 三频超声提取的原理	71
3.6 三频超声提取技术及设备应用	73
3.7 超声耦合技术强化提取	76
参考文献	85
4 超声波处理种子对农作物生长的影响	87
4.1 引言	87
4.2 超声波处理农作物种子增产原理及其设备	87
4.3 超声波处理水稻种子	90
4.4 超声波处理玉米种子	99

4.5	超声波处理小麦种子	101
4.6	超声波处理花生种子	102
4.7	超声波处理番薯种子	103
4.8	超声波处理南瓜和西瓜种子	103
4.9	超声波处理姜种子	105
4.10	超声波处理其他农作物种子	105
4.11	展望	107
	参考文献	109
5	超声结晶技术	110
5.1	超声结晶的原理	110
5.2	超声对结晶过程的影响	113
5.3	超声结晶设备	116
5.4	超声结晶的应用	120
5.5	超声结晶的发展方向	128
	参考文献	129
6	超声干燥技术	133
6.1	超声干燥的原理及特点	133
6.2	超声预处理干燥技术	142
6.3	超声强化渗透脱水技术	149
6.4	超声耦合热风干燥技术	152
6.5	超声耦合喷雾干燥技术	157
6.6	超声与其他干燥技术的耦合	158
	参考文献	160
7	超声杀菌技术	162
7.1	超声杀菌机理	162
7.2	超声杀菌效果的影响因素	163
7.3	超声杀菌技术与装备	167
7.4	食品加工中超声波的生物学效应	176
7.5	超声杀菌技术的应用现状	179
7.6	超声杀菌存在的问题及展望	181
	参考文献	181
8	超声技术在淀粉和纤维素开发中的应用	185
8.1	超声技术在淀粉开发中的应用	185
8.2	超声技术在纤维素开发中的应用	198
	参考文献	202
9	超声耦合电场提取技术	205
9.1	超声提取技术	205

9.2	电场强化提取技术	207
9.3	超声协同电场提取技术国内外研究现状	208
9.4	超声-高压矩形脉冲电场协同强化提取技术	209
9.5	超声协同静电场强化提取技术	220
	参考文献	227
10	超声耦合微波技术在食品工业上的应用	230
10.1	超声耦合微波萃取技术的基础理论	230
10.2	超声耦合微波萃取的影响因素和萃取设备	236
10.3	超声耦合微波萃取技术的应用	244
	参考文献	252
11	超临界 CO ₂ 流体萃取及其强化技术	254
11.1	超临界 CO ₂ 流体特性及其应用	254
11.2	超临界 CO ₂ 流体萃取与分离	259
11.3	超临界 CO ₂ 流体萃取过程强化技术	263
	参考文献	281
12	亚临界水及其耦合技术	283
12.1	亚临界水概述	283
12.2	亚临界水提取技术	285
12.3	亚临界水提取设备的研制	287
12.4	亚临界水提取天然产物活性成分的应用	289
12.5	亚临界水色谱技术在目标组分分离检测和环境样品分析中的应用	296
12.6	亚临界水的水热液化效应及其在生物资源转化和有机合成中的应用	301
12.7	亚临界水耦合技术	309
12.8	亚临界水及其耦合技术存在的问题与展望	311
	参考文献	312
13	超临界流体色谱法及其在化学成分检测中的运用	319
13.1	超临界流体色谱法概述	319
13.2	超临界流体色谱原理	320
13.3	超临界流体色谱装置	321
13.4	超临界流体色谱法运用	324
13.5	结语	331
	参考文献	331
14	膜分离技术在食品工业中的研究应用	333
14.1	膜分离技术的基本概括	333
14.2	膜分离技术在制糖工业中的应用	334
14.3	膜分离技术在果蔬汁加工中的应用	339
14.4	膜分离技术在调味品中的应用	341

14.5	膜分离技术在食品行业的其他应用	347
14.6	结束语	349
	参考文献	350
15	蔗糖共混结晶产品的制备及其结构与性质	353
15.1	溶液结晶基础	353
15.2	共混结晶概述	357
15.3	蔗糖共混结晶产品的制备	360
15.4	共混结晶产品的结构	364
15.5	蔗糖共混结晶产品的性质	370
15.6	共混结晶工艺技术的应用前景	372
15.7	总结	374
	参考文献	375
16	压榨机械作用力在植物精油提取及高品质果汁制备中的应用	376
16.1	常用于果汁加工的压榨技术基本原理	376
16.2	常用于果汁提取及加工的压榨设备	379
16.3	压榨技术在制备精油中的应用	388
16.4	压榨技术在精油提取的应用实例	392
	参考文献	393
17	脉冲强光技术在食品杀菌工业中的应用	394
17.1	脉冲强光技术的发展历史	394
17.2	脉冲强光杀菌设备及其工作原理	396
17.3	脉冲强光技术在食品加工中的应用	401
17.4	脉冲强光杀菌技术特点及发展趋势	410
	参考文献	412
18	挤压技术在食品工业中的应用	414
18.1	挤压技术	414
18.2	挤压加工技术特点和设备	414
18.3	挤压加工技术分类及应用	418
18.4	存在的问题与展望	424
	参考文献	426

1 非热物理加工技术对豆类糖蛋白特性的影响

内容概要：在传统的豆类加工工艺中，一般都采用加热的方式去除豆类食品中凝集素的抗营养性，但其有益的活性如 α -葡萄糖苷酶抑制活性、 α -淀粉酶抑制活性等也随之丧失。通过采用不同强度的非热物理加工技术(超声、高静压或超高压微射流均质处理等)对豆类进行处理，可在去除芸豆凝集素抗营养特性的同时，保留其有益的生理活性，且借助光谱、质谱等分析技术可对糖蛋白凝集素结构表征，并在此基础上可追踪研究糖蛋白凝集素不同结构状态下的生理活性变化。非热物理加工处理(超高压、超声、微射流均质等)在食品加工中的重要意义在于，可实现低温条件下较大幅度地降低食品营养成分的损失。

1.1 超高压技术

1.1.1 超高压技术的概念

超高压技术(ultrahigh pressure processing)，是利用 100~1000MPa 的压力，在常温或较低温度下，使食品中的酶、蛋白质和淀粉等生物大分子结构及功能改变，以实现杀菌、灭酶及改善食品功能性质等的一种新型食品加工技术。

1.1.2 超高压技术的基本原理

超高压处理技术遵循下列两个基本原理。

第一个是 Le Chatelier 原理(Escobedo-Avellaneda et al., 2011)，是指反应平衡将朝着减小系统外加作用力影响的方向移动。这意味着超高压处理将促使反应朝着体积减小的方向移动，包括化学反应平衡及分子构象的可能变化。根据该定律，外部高压会使受压系统的体积减小，反之亦成立。因此加压处理会使食品成分的理化反应向着压缩状态的方向进行，反应速度常数 k 值增加或减小则取决于反应的“活性体积”(ΔV^* =反应复合物体积-反应物体积)是正还是负。以水为例，当水溶液被压缩时，压缩能量 $E=2/5 \times P \times C \times V_0$ (式中， P 为外部压力； C 为溶液的压缩常数； V_0 为体积的初试值)。在压力为 400MPa 下，1L 水的压缩能量为 19.2kJ，这与 1L 水从 20℃升至 25℃时所吸收的 20.9kJ 的热量大致相当。

第二个是帕斯卡原理(Norton and Sun, 2008)，即液体压力可瞬间均匀地传递到整个样品。帕斯卡原理的应用与样品的尺寸和体积无关，表明整个样品将受到均一的处理，传压速度快，不存在压力梯度，这也使得超高压处理过程较为简单，而且能耗也较少。而热处理为了达到样品中心预定的温度，将可能导致加热点和表面的过热。根据帕斯卡定律，外加在液体上的压力可瞬时以同样的大小传递到系统的各个部分，故而对液体从外部施以高压，将会改变液态物质的某些物理性质。仍以水为例，对其从外部施压，当

压力达到 200MPa 时, 水的冰点将降至 -20°C ; 室温下的水加压至 100MPa, 体积将减少 19%; 30°C 的水经快速加压至 400MPa 时则会产生 12°C 的温升。同样, 在食品的高压处理过程中, 高压也会改变食品中某些生物高分子物质的空间结构, 使生物材料发生某些不可逆的变化。研究发现, 食品在液体中, 加压 100~1000MPa, 并保持一定的作用时间之后食品中的酶、蛋白质、淀粉等生物高分子物质将分别失活、变性和糊化。压力上升过程是一个纯物理过程, 它与传统的食品加热处理工艺机理完全不同。当食品物料在液体介质中体积被压缩之后, 形成高分子物质立体结构的氢键、离子键和疏水键等非共价键即发生变化, 结果导致蛋白质、淀粉等发生变性, 酶失去活性, 细菌等微生物被杀死。但在此过程中, 高压对高分子物质如蛋白质及低分子物质如维生素、色素等的共价键无任何影响, 故高压食品可很好地保持原有的营养价值、色泽和天然风味, 这一特点正好迎合现代人类返璞归真、崇尚自然、追求天然食品的消费心理。

1.1.3 超高压技术的优缺点

超高压技术应用范围较广, 工艺简单方便, 易于规模化生产, 优点包括: ①一定压力下可杀灭有害微生物, 延长货架期 2~3 倍; ②某些超高压处理产品可少加甚至不添加防腐剂即可达到保藏的需求; ③属于非热处理方式, 对产品风味和营养价值影响较小; ④压力瞬间均匀地传至样品, 可保持样品的形状; ⑤特定的超高压处理条件, 可改善产品的风味、质地和其他性质; ⑥处理条件多样化, 可获得多样化的产品类型; ⑦处理工艺相对简单, 耗时短, 效率高; ⑧超高压中传导压力介质可循环利用, 较为环保, 可较大程度地满足消费者对天然、健康和营养产品的追求。超高压技术作为一种新兴加工方式, 在食品加工中的应用亦具有一定的局限性, 如处理质地较脆的样品时, 产品会发生严重形变; 某些酶和芽孢对超高压有很强的耐受性, 故需选取合适的高压处理工艺以保证产品的安全性; 超高压设备成本较高, 且设备技术需进一步成熟完善。但随着超高压技术的不断发展, 这些问题正逐渐得到解决和改善。

1.1.4 超高压处理设备简介

1.1.4.1 超高压食品加工设备的结构特点

目前国外常见的高压食品加工装置的主体部分, 即其加压装置是由高压容器和压力发生器(或称为加减压系统)两大部分组成, 高压容器是整个装置的核心, 它承受的操作压力可高达数百甚至上千兆帕, 对其技术要求也较高。而压力发生器的加压方式又分为外部加压式和内部加压式两种。结合食品工业的行业特色, 人们发现高压食品加工装置的特点是, 承受很高的操作压力(150~1000MPa), 循环载荷次数多(连续工作, 通常为 2.5 次/h)。因此, 高压容器及其密封结构的设计必须正确合理地选用材料, 保证其足够的力学强度、高断裂韧性、低回火脆性和时效脆性, 一定的抗应力腐蚀及腐蚀疲劳性能。鉴于食品加工工业中的特殊要求, 即要有一定处理能力和较短的单位生产时间, 有效保证产品的高质量要求, 故而要设法缩短生产附加时间(如密封装置的开启时间), 将装置设计成便于快装快卸操作的轻便形式。

1.1.4.2 超高压装置压力发生器的设计

超高压装置的压力发生器,即加减压系统如图 1-1 所示,在容器内产生高压基本有两种方式:一是外部加压式,外部加压式设备是采用超高压泵通过管道将高压介质泵入超高压容器内以达到设定的压力,这种方法为大部分工业化生产所采用。二是内部加压式,即以活塞直接加压或由液压装置推动活塞压缩超高压容器内压媒产生高压,压力介质通常是水和油的混合物,添加油的目的是润滑和防锈。这种方法升压速度快,但对密封材料要求严格,且损耗较大。根据液压装置与高压容器的连接形式又可分为分体型和一体型两种。前者的高压容器顶盖兼具活塞功能,后者的液压装置与高压容器经高压活塞连成一体。

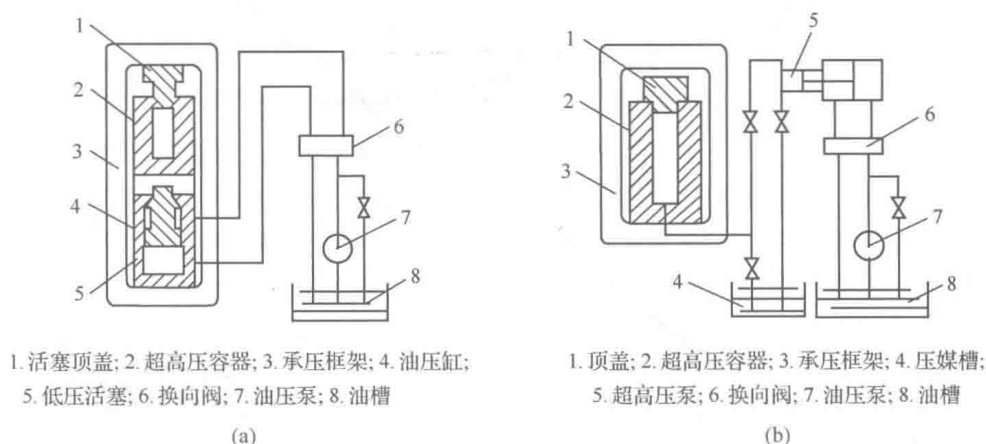


图 1-1 超高压设备原理示意图

(a) 内部加压式; (b) 外部加压式

1.1.5 超高压处理技术对蛋白质结构及功能特性的影响

超高压作用的机理是通过压力作用使物质分子结构与体积发生改变,当这一变形足够大时,将会影响物质分子间化学键的破坏和重组。蛋白质的一级结构是由组成肽链的氨基酸种类及序列决定,两个氨基酸分子间脱水缩合形成一个肽键,其为共价键,对压力不敏感,需要很高的压力才可使肽键断裂,改变氨基酸序列。

蛋白质二级结构主要包括 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲,这些结构是肽链主链的局部构象排布,由骨架上的羰基和酰胺基团之间形成的氢键维持。超高压处理对不同来源的植物蛋白二级结构影响各异,一般认为高于 600MPa 的压力可导致蛋白质二级结构发生变化,甚至造成非可逆变性。例如,黄薇(2016)发现超高压对麦醇溶蛋白中的 SH—含量无明显影响,但会使面筋蛋白和麦谷蛋白中 SH—含量减小、二硫键含量增加。采用 600MPa 压力处理虽然对蛋白质的一级结构无显著影响,但会降低蛋白质 β 转角结构含量;油菜籽蛋白则随着压力的升高,其 α 螺旋的含量先上升后下降, β 折叠和无规则卷曲的含量先下降后上升, β 转角含量上升。超高压处理不同蛋白质对二级结构

的影响作用不一致,这是因为蛋白质的种类及自身结构特性不同,但超高压技术处理的确会导致蛋白质二级结构的变化是公认的事实。

蛋白质三级结构是由多肽链在二级结构或超二级结构甚至结构域基础上进一步盘绕、折叠,通过侧链氨基酸残基间的非共价键维持固定的特定空间结构。研究表明,一般 100MPa 以上压力即可使蛋白质三级结构发生显著变化,如大豆蛋白 7S 和 11S 亚基组分在 200MPa 压力下保压 1min 即开始发生分子解离、部分二硫键断裂、内部疏水基团暴露等。此外,由于蛋白质本身具有一定的荧光性,当外界环境改变导致蛋白质三级结构发生变化时,蛋白质的一些荧光发射基团位置发生改变,导致蛋白质固有的荧光性发生改变,荧光度的变化与蛋白质的种类及固有发光基团的数目和位置相关。

适度高压处理可使蛋白质的四级结构发生变化,蛋白质的空间结构决定了蛋白质不同的功能特性,因此高压作用导致蛋白质的空间结构改变将会进一步引起蛋白质功能特性的变化。蛋白质溶解性主要与二硫键、氢键和疏水键有关,研究表明蛋白质在较低压力处理下溶解性下降,之后随着压力上升,蛋白质的溶解性会上升。超高压引起蛋白质变性进而形成聚合物,大多是二硫键的形成造成的。较高压力处理会使蛋白质分子伸展,压力消除后,伸展的蛋白质分子重新形成二、三级结构,会对蛋白质溶解性产生影响,使一些蛋白质可溶。例如,李汴生等(1999)对高压处理后大豆分离蛋白溶解性和流变特性的变化及其机理研究发现,经 400MPa、15min 高压处理,低浓度大豆分离蛋白溶解性及表观黏度增加,而在低于 400MPa 高压处理时,大豆分离蛋白分子发生一定程度的解聚和伸展,蛋白质电荷分布加强,颗粒减小。

凝胶性是食品蛋白质的主要功能特性之一。蛋白质凝胶是液体蛋白质分子规律交联后所形成的占据原来液体空间的三维空间网络结构。超高压处理可促进大豆蛋白的凝胶化,超高压处理过程中,凝胶强度与疏水性、二硫键及自由巯基变化相关,如张宏康等(2001)发现超高压处理高浓度大豆分离蛋白溶液可形成凝胶,且凝胶强度随着蛋白质溶液的质量分数、温度及处理压力的增高而增强,且超高压处理得到的凝胶强度比热处理的凝胶在外观上更平滑、细致。

蛋白质的乳化性和乳化稳定性对于食品品质极为重要,经超高压处理大部分植物蛋白的乳化性及乳化稳定性均增加。超高压处理后,蛋白质分子伸展,与水作用的极性或离子基团增多,同时,蛋白质分子内部的疏水基团也暴露出来,使亲水、亲油性达到很好的平衡,乳化性和稳定性提高。刘坚等(2006)通过超高压(100~600MPa)处理鹰嘴豆分离蛋白,发现随压力的增大和处理时间的延长,鹰嘴豆分离蛋白的表面疏水性、乳化性和起泡性都显著提高,但当压力大于 400MPa 时乳化性能下降,压力大于 500MPa 时起泡性、表面疏水性下降。刘坚等(2007)在利用超高压处理鹰嘴豆分离蛋白时发现,在 pH 为 6.0~8.0,增大压力和延长保压时间均显著地提高鹰嘴豆分离蛋白的起泡能力。袁道强和郭书爱(2008)发现在 400MPa 压力作用下保压 12.5min 可有效提升大豆分离蛋白的乳化特性,乳化能力和乳化稳定性分别提高 86.6%和 24.7%。因此,超高压处理可以改善蛋白质的诸多功能特性包括溶解性、凝胶性及乳化稳定性等。

1.1.6 超高压对酶活力的影响

酶的化学本质是蛋白质,高静压作用可破坏共价键、疏水键及氢键等维持蛋白质三维结构的次级键,从而导致酶蛋白结构崩溃,使酶活性中心丧失,从而达到改变催化活性的目的,而食品加工过程中为保持良好的食品品质,需要破坏某些有不良影响的酶的活性。比如脂肪氧化酶是催化脂肪氧化的酶类,在大豆制品中,脂肪氧化酶的分解导致氢过氧化物含量增加,是豆制品异味(特别是腐败风味和豆腥味)的主要来源。脂肪氧化酶对热敏感,在常压下,温度升高至 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 可达到灭酶的作用,而在高静压下经过一个循环或多个循环仅需较低的温度即可达到灭酶的效果。Wang 等(2011)发现超高压可使豆制品中脂肪氧化酶发生钝化,且脂肪氧化酶的等温和等压钝化作用在两种体系中是不可逆的。保持一定温度下,随着压力增加($250\sim 650\text{MPa}$),脂肪氧化酶钝化速率常数增加,且在 30°C 时脂肪氧化酶钝化速率常数对压力较为敏感。在其他领域中,超高压对酶的影响也很大。以果胶甲基酯酶为例,在室温下,新鲜橘汁中果胶甲基酯酶在 $100\sim 400\text{MPa}$ 处理下可被灭活。超高压钝化酶动力学模型主要有三种,包括一级动力学模型、两段式模型和部分转换模型。两段式模型和部分转换模型的建立是基于一级动力学模型。例如,超高压钝化豆奶等中的脂肪氧化酶符合一级动力学模型,超高压钝化李子中的果胶甲基酯酶符合两段式模型,而超高压钝化葡萄和香蕉中的果胶甲基酯酶符合部分转换模型。具体属于哪一类钝酶模型与所处理对象的酶种类、处理条件、酶来源等有关。

1.1.7 超高压处理技术在食品领域的应用研究进展

超高压技术在食品工业中的应用研究越来越广泛。一般来说,利用超高压技术杀灭食品中微生物的原理是因超高压作用可以使细胞形态改变,破坏细胞壁和生物膜从而使微生物致死。超高压杀菌的效果一般与压力大小、处理时间、处理温度及加压方式等密切相关。一般来说,霉菌和酵母菌等耐压性更高的菌群在 350MPa 的压力下需要保压 10min 才可以全部被杀灭。超高压技术在大豆制品中主要起到灭菌和灭酶的作用。豆腐中大部分微生物在 58°C 下, 400MPa 高静压处理后大幅降低,也有一些微生物如芽孢杆菌等具有抗超高压的作用,在高压处理后仍可保持一定活性。超高压对微生物灭活的影响取决于微生物的类型、保压时间、处理温度、溶液成分等诸多因素。此外,环境介质也是影响超高压处理效果的一个重要因素,食品成分如蔗糖、果糖、葡萄糖和盐的渗透压等有助于高压环境中微生物的存活。此外,不同介质的酸碱程度对超高压灭酶效果影响也很大,如将商品大豆脂肪氧合酶 I 溶于 0.2mol 柠檬酸磷酸盐($\text{pH } 4.0\sim 9.0$)和 0.2mol Tris($\text{pH } 6.0\sim 9.0$)缓冲溶液中,置于 400MPa 和 600MPa 压力下 20min ,在碱性条件下脂肪氧合酶丧失 80% 的活性,而在酸性条件下则完全失活。

超高压除了在灭酶杀菌方面有较多的应用外,还因为对物质的分子结构有一定影响而被推广应用到更多方面。例如,超高压处理可以促进淀粉糊化。超高压使淀粉糊化类似于热糊化,具体可以分为两步:第一步,淀粉颗粒的无定形区发生水合作用,使淀粉

颗粒溶胀, 结晶区域变形; 第二步, 结晶区与水充分接触。并且类似于淀粉的糊化温度和糊化度会随着加热时间和时间的改变而变化, 压力大小与作用时间不同, 淀粉的糊化温度和糊化度也不同。此外, 超高压对其他植物蛋白如谷朊粉等也有显著改性作用。谷朊粉是一种从小麦面粉中分离、提取并烘干而制成的蛋白质产品, 又名面筋蛋白, 主要由麦谷蛋白、麦醇溶蛋白构成, 是一种传统的食品添加剂和品质改良剂。超高压加工作为一种能改变蛋白质功能特性的物理加工手段, 对谷朊粉性质有显著影响。Kieffer 等(2007)研究发现超高压作用于谷朊粉、麦谷蛋白、麦醇溶蛋白的机理在于高压引起蛋白质双硫键的断裂和重新生成, 如谷朊粉在 200MPa、30℃处理时, 其蛋白质组成中醇溶性蛋白的比例提高, 面团强度下降; 进一步提高处理压力和温度, 谷朊粉中醇溶性蛋白的比例及巯基含量均下降。黄薇(2016)研究发现超高压会提高面筋蛋白和麦醇溶蛋白的玻璃化转变温度、降低麦谷蛋白的玻璃化转变温度。扫描电镜结果证实超高压对面筋蛋白的质地无显著影响, 但对麦醇溶蛋白和麦谷蛋白的质地影响很大, 压力破坏了麦醇溶蛋白亚基的球状结构。

1.2 与物理加工相关的豆类糖蛋白特性概述(以芸豆为例)

1.2.1 糖蛋白的组成

糖蛋白含有常见的 20 种氨基酸, 其中以苏氨酸、丝氨酸, 脯氨酸、天冬酰胺、赖氨酸的含量较高。在自然界中已发现的单糖虽然有很多种, 但通常在糖蛋白中出现的单糖只有几种。在植物糖蛋白中, 糖基的成分主要是阿拉伯糖、半乳糖和 *N*-乙酰葡萄糖胺, 其次是甘露糖、木糖、葡萄糖及糖醛酸等。糖蛋白中的糖有时可以和其他基团结合, 如硫酸基团和磷酸基团等。

1.2.2 糖蛋白的结构

糖蛋白是由长度不一、带分支的寡糖与多肽链共价连接而形成。糖蛋白的糖链可以是直链或支链, 不同糖蛋白分子中, 其糖链数目不等, 分布亦不均。例如, 膜糖蛋白的糖链全部暴露于膜外侧肽链上, 理论上讲, 糖链有无数种结构形式。然而, 生物体内有某种限制因素, 使实际存在的糖链类型大减, 分为两类糖链, 即 *N*-连接的糖链和 *O*-连接的糖链。

1.2.2.1 *N*-连接的糖链

N-连接的糖链根据其所连接糖链的情况, 可分为三类: ①高甘露糖型, 即寡糖链只含有甘露糖和 *N*-乙酰氨基葡萄糖, 且只有甘露糖连接在戊糖核心区上, 如卵蛋白; ②复杂型, 即寡糖链除含有甘露糖和 *N*-乙酰氨基葡萄糖外, 还有半乳糖、岩藻糖和唾液酸等; ③杂合型(混合型), 既含甘露糖链, 又有 *N*-乙酰氨基半乳糖链连接在戊糖核心结构上。

1.2.2.2 O-连接的糖链

O-连接的糖链存在多种形式,其结构共同点是由一个或少数几种单糖与某些含羟氨基酸连接,不存在共有的核心结构。但在O-乙酰半乳糖胺连接的糖链中已发现有4种核心结构,研究较多的是黏蛋白、血浆蛋白和膜蛋白。

1.2.3 糖蛋白的生物活性优势

糖蛋白具有增强免疫调节、抑制肿瘤、调节血糖代谢等作用,在新型特种药物及功能性食品开发方面具有广阔的运用前景,诸多研究对糖蛋白的药理作用及保健功能进行了深入的研究,主要表现在以下几个方面:①免疫调节活性。一些糖蛋白为细胞膜结合受体,对维持免疫系统环境稳定性、抵抗病原微生物对机体的损害等均有重要作用。②调节血糖代谢作用。高脂血症是指血液中一种或多种脂质成分的含量异常增高的病症,大量的研究表明,糖蛋白有很好的降血糖和降血脂功效。③抗肿瘤活性。大多数具有抗肿瘤活性的糖蛋白来自于海洋生物,糖蛋白抗肿瘤活性的最大特点是对肿瘤细胞具有靶向杀伤作用,但对正常细胞毒副作用较小。

1.2.4 芸豆的介绍

芸豆(*Phaseolus vulgaris* L.),属豆科蝶形花亚科菜豆族菜豆属,别名四季豆、菜豆、腰豆、肾豆等。芸豆根据食用情况可分为软荚型(菜用菜豆)和硬荚型(粒用菜豆),前者收获新鲜豆荚做蔬菜用,后者收集籽粒做粮食用;此外,根据种皮颜色又分为白芸豆、黄芸豆、紫芸豆、红芸豆、奶花芸豆和黑芸豆等。

芸豆具有极高的营养及药用价值,全世界90多个国家或地区均有种植,是我国小杂粮中极具前景的作物之一,也是陕西、云南、贵州、四川、黑龙江等大力提倡发展的重要农作物。我国是芸豆生产及出口大国,芸豆生产位于世界第三位,仅次于印度和巴西(单良等,2004)。在我国,芸豆除了以原料形式大量出口外,主要利用途径是制作豆沙、豆馅、豆酥及高档糖果、豆粉、豆奶等。近年来,随着食品加工技术的发展,芸豆可用于各种精制食品、方便食品、营养食品及组织化食品等的生产,使得芸豆的应用范围不断扩大。

芸豆蛋白是一种7S寡聚球蛋白,含3个多肽亚基(α 、 β 和 γ),其氨基酸组成中赖氨酸、亮氨酸和精氨酸含量较高。另外,芸豆蛋白中还有两种重要的糖蛋白,即植物凝集素与 α -淀粉酶抑制剂。普通食用时,需将芸豆煮透方可食用,因为凝集素是一类抗营养物质。然而,研究报道凝集素还具有促进免疫反应、抗癌、抗肿瘤及抗HIV病毒等生物学活性。

1.2.5 凝集素简介

凝集素(lectin 或 agglutinin)是指一大类非免疫原的能选择性凝集细胞或沉淀含糖大分子的蛋白质或糖蛋白。凝集素首次发现于1888年,俄国Dorpat大学Stillmark H.在研究蓖麻籽抽提液对血液的毒性时,发现有蛋白质可凝集人和动物的红细胞,命名为蓖麻