



普通高等教育“十二五”规划教材

食品加工单元操作原理

张根生 韩冰 主编



科学出版社

unit operations

Principles of food processing

普通高等教育“十二五”规划教材

食品加工单元操作原理

张根生 韩 冰 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要探讨和阐述食品生产加工过程中常用的单元操作基本原理和所需设备及其在实际工作中的应用,以指导人们进行食品工艺学的学习和实践。本书在编写过程中参阅了大量的中外文献,总结了十几所院校的食品技术原理教学成果,从核心理论、知识要点和具体应用三个方面进行编写。本书内容全面、丰富,层次分明,针对性强,语言精练,通俗易懂,在知识的深度和广度上力求能够满足教师的课堂教学和学生的课后复习巩固需要。

本书可作为高校食品类专业的教材,还可作为食品行业工程技术人员及相关从业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

食品加工单元操作原理/张根生,韩冰主编. —北京:科学出版社,2013
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-036912-3

I. ①食… II. ①张…②韩… III. ①食品加工—高等学校—教材 IV. ①TS205

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 042181 号

责任编辑:刘 丹 高璐佳 韩书云 / 责任校对:李 影
责任印制:阎春香 封面设计:迷底书装

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>

北京华正印刷有限公司

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 3 月第一次印刷 印张:20

字数:506 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《食品加工单元操作原理》编写委员会

主 编 张根生 哈尔滨商业大学

韩 冰 哈尔滨商业大学

副主编 李晓东 东北农业大学

李范洙 延边大学

王 梁 哈尔滨学院

毛迪锐 北华大学

编 委 张根生 哈尔滨商业大学

韩 冰 哈尔滨商业大学

李晓东 东北农业大学

李范洙 延边大学

王 梁 哈尔滨学院

毛迪锐 北华大学

葛英亮 哈尔滨学院

李次力 哈尔滨商业大学

邵秀芝 山东轻工业学院

陈 奇 长沙理工大学

审 核 赵 全 哈尔滨学院

前 言

进入 21 世纪, 食品安全成为公众和各大媒体广泛关注的问题, 在技术领域, 如何使处于生物链各阶段的食物被人类安全高效地利用, 保障人类的生存和发展, 是食品科技工作者的一项重要任务。这不仅涉及法律法规的制定和执行、市场的监督和管理, 更大程度上是依赖于科学技术的发展和利用。《食品加工单元操作原理》以食品生产加工过程中常用的单元操作作为研究对象, 同时, 介绍了其主要设备和具体应用, 它是食品工艺学的基础, 体现了食品科学和工程学的紧密结合。

本书共分 10 章, 主要内容包括: 食品微细化技术、食品混合技术、食品分离技术、食品浓缩与结晶技术、食品热处理技术、食品干燥技术、食品低温处理与保藏技术、食品辐照加工技术、食品腌渍与烟熏技术、食品生物技术。其中, 绪论由张根生编写; 第一章、第八章和第十章由韩冰编写; 第二章由张根生、陈奇和邵秀芝编写; 第三章由毛迪锐编写; 第四章由王梁编写; 第五章由张根生、李晓东和李次力编写; 第六章由毛迪锐和王梁编写; 第七章由张根生、李范洙和葛英亮编写; 第九章由葛英亮编写; 全书审核由赵全完成。

在本书编写期间, 得到了编者所在院校相关部门及师生的关心和帮助, 在此表示由衷的感谢。

由于编者水平有限, 书中难免有疏漏和不当之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 12 月于哈尔滨

目 录

前言	
绪论	1
第一章 食品微细化技术	4
第一节 食品粉碎基本理论	4
一、粉碎物料的粒度与粒度分布	4
二、粉碎力与粉碎能耗	6
三、粉碎的能耗假说	8
四、粉碎操作工艺	10
第二节 干法粉碎技术	11
一、冲击式粉碎	11
二、磨介式粉碎	15
三、转辊式粉碎	21
第三节 湿法粉碎技术	23
一、胶体磨	24
二、高压均质机	25
三、超声波乳化器	26
第四节 食品微细化技术在食品工程中的应用	26
一、巧克力生产	27
二、功能性食品基料	28
三、软饮料加工	29
第二章 食品混合技术	30
第一节 固体食品的混合	30
一、固体粉粒体混合的基本原理	31
二、混合过程特性	36
三、固体食品混合设备	39
第二节 液态食品的搅拌	45
一、旋转桨叶式搅拌机	45
二、往复转动桨叶式和管道桨叶式搅拌机	48
三、非桨叶式混合机	48
第三节 食品的捏合操作	49
一、捏合操作的基本理论	50
二、食品捏合机	54
第三章 食品分离技术	58
第一节 分级与分选	58

一、清洗	58
二、按大小分选和分级	62
三、按质量、相对密度、形状和颜色因素分级	66
第二节 压榨	68
一、压榨理论	69
二、压榨操作的基本方法	69
三、压榨设备	70
第三节 沉淀分离	73
一、溶剂沉淀	73
二、盐析沉淀	74
三、沉淀剂沉淀	76
四、等电点沉淀	77
五、变性沉淀	77
六、絮凝分离	78
第四节 离心分离	81
一、离心分离理论	82
二、离心沉降	83
三、离心分离	84
四、离心过滤	84
五、离心机的种类	85
第五节 浸提	87
一、浸提理论	87
二、浸提流程和设备	89
三、浸提操作在食品中的应用	93
第六节 超临界萃取分离技术	93
一、超临界流体的萃取原理	94
二、超临界流体萃取的过程系统	97
三、超临界流体萃取技术在食品工业中的应用	99
第七节 膜分离技术	100
一、膜分离技术理论	101
二、膜分离技术的基本工艺	104
三、膜的分类及特点	107
四、膜分离技术在食品工业中的应用	108
第四章 食品浓缩与结晶技术	111
第一节 蒸发浓缩技术	111
一、蒸发浓缩的基本原理	112
二、食品物料蒸发浓缩的特点	112
三、蒸发器的类型及选择	113
第二节 冷冻浓缩技术	118
一、冷冻浓缩基本理论	118

二、冷冻浓缩的工艺流程	119
三、冷冻浓缩设备	121
四、冷冻浓缩在食品工业中的应用	123
第三节 食品结晶技术	124
一、结晶的基本原理	124
二、结晶方法与结晶设备	131
三、影响晶体质量的因素	133
第五章 食品热处理技术	135
第一节 食品热杀菌技术	136
一、加热对微生物、酶的影响	136
二、食品的热传递	143
三、食品热处理条件的确定	150
四、加热杀菌方法和装置	154
第二节 食品微波加热技术	158
一、微波加热的原理	159
二、微波加热设备	163
三、微波加热在食品加工中的应用	165
第三节 食品远红外线加热技术	167
一、远红外加热的原理	167
二、远红外加热设备	170
三、远红外加热在食品工业中的应用	172
第六章 食品干燥技术	174
第一节 食品干燥加工基础	174
一、湿物料中的水分	174
二、湿空气的性质	179
三、干燥动力学	180
四、干燥过程中食品物料的主要变化	183
第二节 食品干燥方法	186
一、对流干燥	186
二、接触干燥	195
三、冷冻干燥技术	196
第七章 食品低温处理与保藏技术	203
第一节 食品低温处理技术原理	204
一、低温对微生物的影响	204
二、低温对酶活性的影响	206
三、低温对其他变质因素的影响	207
四、低温对食品物料贮藏性的影响	207
第二节 食品的冷却和冷藏	208
一、食品的冷却	208
二、食品的冷藏	213

第三节 食品的冻结和冻藏·····	217
一、食品的冻结·····	217
二、食品的冻藏·····	225
第八章 食品辐照加工技术 ·····	234
第一节 食品辐照基础·····	235
一、放射性衰变及其规律·····	235
二、辐照量单位与吸收剂量·····	236
三、食品辐照装置·····	238
第二节 食品在辐照过程中的变化·····	241
一、食品辐照的物理学效应·····	241
二、辐照对食品质量的影响·····	243
三、食品辐照的活体生物效应·····	249
第三节 辐照在食品中的应用·····	251
一、影响辐照效果的因素·····	251
二、辐照在食品中的应用·····	253
三、辐照食品的卫生安全性·····	255
第九章 食品腌渍与烟熏技术 ·····	258
第一节 食品腌渍技术·····	258
一、食品腌渍加工的基本原理·····	259
二、食品的腌制·····	263
三、食品的糖制·····	271
第二节 食品烟熏技术·····	275
一、烟熏目的及防腐作用·····	275
二、熏烟的成分及其影响因素·····	276
三、烟熏的方法及装置·····	281
第十章 食品生物技术 ·····	285
第一节 发酵工程·····	285
一、食品发酵概念及其对食品品质的影响·····	285
二、食品发酵中微生物的利用·····	286
三、控制食品发酵的因素·····	289
第二节 酶工程·····	292
一、酶工程的分类和内容·····	292
二、酶的性质和食品加工·····	294
三、酶在食品生产中的应用·····	295
第三节 细胞工程·····	296
一、细胞工程的基本原理·····	296
二、细胞培养·····	298
三、细胞工程在食品工业的应用·····	302
参考文献 ·····	305

绪 论

“民以食为天”，食物是人类生存和发展的重要物质基础。人类的一切生命活动，包括生长、发育、细胞更新、组织修复等都必须从外界摄取物质和能量。为维持正常生活机能而经口摄入体内的含有营养素的物料统称为食物或食料。一般把经过加工和处理，可作为商品流通的食物称为食品。食品作为商品的最主要特征是每种食品都有其严格的理化和卫生标准，它不仅包括可食用的内容物（实体），还包括为了流通和消费而采用的各种包装方式和内容（形体）及销售服务。

食品加工的最初形式是干制食品，这可以追溯到原始游牧时期，人们把吃不完的肉任意弃置、自然风干，当无猎获时而重新食之，但第一个人工利用热空气干燥食品的例子出现在1795年的法国。冷却或冷冻食品的历史也可追溯到很早以前，最初是利用自然冰来延长食品的保藏期。19世纪，美国人David、Boyle和德国人Linde分别发明了以氨为制冷剂的压缩式冷冻机。从此人工冷源开始逐渐代替了天然冷源，使食品的冷冻、冷藏的技术手段发生了根本性的变革。利用高温生产安全食品可追溯到1810年的法国，阿培尔（Appert）为法国军队研制可保藏的食品，发明了食品的商业化灭菌技术。到了19世纪60年代，巴斯德（Pasteur）在研究啤酒和葡萄酒时发明了巴氏消毒法。

食品加工是以动物、蔬菜或海产品为原料，利用劳动力、机器、能量及科学知识，把它们转变成半成品或可食用的产品。食品加工的所有发展都具有类似或共同的起因，一是要获得或维护产品中微生物的安全性；二是延长食品货架寿命。如果食物没有经过一些加工处理，则食用后就有可能引发疾病，也没有希望在全年获得许多季节性商品。

食品工业是指有一定生产规模、相当的动力和设备，采用科学生产和管理方法，生产商品化食品及其他工业产物的体系。食品工业与人民生活密切相关，食品工业的发展水平标志着一个国家人民的生活水平，直接关系到民族和国家的盛衰。食品工业具有投资少、建设周期短、收效快的特点，其产品不仅供应国内市场，而且也是国家重要的出口换汇物资。食品工业已是我国国民经济的支柱产业，对推动农业发展，增加农民收入，改变农村面貌，推动国民经济持续、稳定、健康发展具有重要意义。

中国是一个有着13亿人口的大国，食品工业是关系国计民生的“生命工业”。按2011年我国国民经济行业分类，食品工业包括4个大类、21个中类、79个小类。这4个大类为：①食品加工业，包括粮食及饲料加工业、植物油加工业、制糖业、屠宰及肉类蛋类加工业、水产品加工业、食用盐加工业和其他食品加工业；②食品制造业，包括糕点和糖果制造业、乳制品制造业、罐头食品制造业、发酵制品业、调味品制造业、食品添加剂制造业和其他食品制造业；③饮料制造业，包括乙醇及饮料酒制造业、软饮料制造业、制茶业和其他饮料制造业；④烟草加工业，包括烟叶复烤业、卷烟制造业和其他烟草加工业。

显然，现代食品工业已发展成为包括食品加工业和食品制造业的一大产业。现代的食品加工也不再是传统的农副产品初级加工的概念范畴，而是指对可食资源的技术处理，以保持和提高其可食性和利用价值，开发适合人类需求的各类食品和工业产物的全过程。

20世纪80年代以来，在巨大的市场需求拉动下，食品工业成为工业发展中发展最快的

行业之一。1980~2000年,我国食品工业总产值年均增长速度达13.1%,至2000年我国食品工业总产值(当年价)已达8434亿元,利税达1430.3亿元,出口创汇达132.31亿美元。2008年,我国食品工业总产值达4.2万亿元,占当年国内生产总值(GDP)的13.97%,成为国民经济的重要支柱产业。2010年,我国年销售额在2000万元以上的食品企业有41867家,从业人员654万人,现价工业总产值达6.31万亿元;按工业增加值计算,食品工业占全国工业的10.4%。据专家预测,到2015年我国食品工业总产值将达12.7万亿元,利税达1.6万亿元。随着工业化、城镇化及全球化的发展及人们收入水平的不断提高,食品工业的重要性越来越显著。食品工业主要产品产量大幅增长,质量提高,品种多样,丰富了我国食品市场,满足了人们生活水平不断提高的要求。

食品加工是依据技术上先进、经济上合理的原则,利用适合的食品加工单元操作组合,把食品原料转变为食品的操作。例如,浓缩橘子汁生产加工过程主要包括:橘子的选择(分级、清洗等)、压榨取汁、澄清过滤(或均质脱气)、真空浓缩、灌装、杀菌、冷却贮藏等操作单元;速冻豌豆生产加工过程主要包括:豌豆的选择、分级、清洗、热烫灭酶、快速冷却、单体速冻、包装、冻却贮藏等操作单元;午餐肉罐头生产加工过程主要包括:原料肉解冻、腌制、绞肉及斩拌、装罐、真空密封、高压杀菌、冷却贮藏等操作单元。由于食品种类的繁多,其生产过程中所涉及的操作单元的数量是非常可观的。而且对于某一特定产品来说,由于加工方法的不断完善,各个生产厂家在生产中采用的方法、设备均有不同程度的差异。要想把所有食品生产加工工艺都学到是一件不可能做到的事情,也没有必要。便捷的办法是通过系统地学习食品加工单元操作的原理,用其指导食品工艺学的学习和食品加工工艺的研究,具有事半功倍的效果。

食品工业中的加工过程可以划分为一系列使物料发生预期的物理变化的基本操作,即单元操作。例如,许多食品加工所共有的单元操作,包括清洗、涂膜、过程控制、粉碎、干燥、浓缩、发酵、成型、加热处理、低温处理、物料输送、混合、包装、泵送和分离等。其中大部分单元操作可适用于多种食品的生产制造。例如,加热处理可运用于牛奶中的巴氏杀菌、罐藏食品的灭菌、花生米的烘炒及面包的焙烤等各种液体和干燥食品的制备过程。

此外,每一单元操作都可能包含大量不同的操作形式。例如,混合这种单元操作包括液体物料的搅拌混合、固体物料的混合、可塑食品的捏合混合等。制造蛋白质泡沫时,要在空气中搅打、混合;制备干蛋糕混合配料时,则采用将各种干燥辅料掺和的办法来混合;制造蛋黄酱时,需选择乳化的方法混合;牛奶制品则要选用均质的方法混合以防止脂肪分离;在面包面团的混合、醒发过程中,需采用捏合混合。

特别强调的是,将所有食品加工过程简单地划分成单元操作并不是十分正确的,有时会发生单元操作的交叉现象。例如,滤除啤酒中的微生物既可以看作清洗过程也可以看作分离过程,两者都有一定的道理;谷物的磨粉操作既可看作破碎,也可看作分离,尽管实际上它兼有这两种单元操作,即先破碎后分离。但交叉现象并不影响单元操作这一概念的重要意义,它促使人们能够有条理地进行思考,而且许多食品教科书和绝大部分食品设备目录均按照单元操作进行分类。

对于任何一种食品的整体加工过程,如午餐肉罐头和浓缩橘汁的生产,都可以看出这些加工过程总是由一系列单元操作按照合理的顺序组合而成的。在现代化的食品加工中,这些单元操作连接得非常紧密,以至于足以实现连续平稳的自动控制生产。

因此,食品加工的关键因素之一便是恰当地选择各种单元操作,并将其正确地组合成一

些更为复杂的完整加工体系。这些单元操作及其构成的整个加工过程需消耗大量的能源。能耗费用是产品成本的重要组成部分，促使人们集中精力从优化能源的角度来考虑各种单元操作、设备设计以至整个加工过程。目前，人们非常感兴趣的是分析加热/冷却过程和回收利用原来被排至下水道或大气中的热量；对脱水、浓缩、冷冻、杀菌和其他一些单元操作在操作时间和温度方面进行了重新评价，因为这两个因素不仅影响着能源的消耗，而且还与产品的特性和安全性能有关；物料输送与清洗过程所需能源通常与果蔬的种类和原料进厂前的农业操作有关，去皮、切割和破碎中的能耗也是如此；生产包装纸、镀锡薄钢板、铝板、玻璃和塑料等各种现代化包装材料及各种不同包装形式所需要的能源也各有差异；采用脱除水分的方法进行保藏会影响产品的质量与体积，进而影响产品在随后的运输和气调保藏中的能耗。一般而言，工业化生产的加工食品所消耗的能源远远低于家庭制备类似产品时的能耗。

近年来，随着食品加工新技术的不断涌现，每个单元操作的选择余地也在不断增加。人们已经做了大量的研究工作，开发了超临界萃取、欧姆加热及高压杀菌技术等提高产品质量和生产效率的加工方法。

食品加工单元操作原理是一门运用微生物学、生物学、化学、物理学等各方面的基础理论和知识，研究及讨论食品生产和贮运过程涉及单元操作的基本原理的学科。本书按食品产业链中与食品工业紧密相连的重要单元操作方法划分章节，阐明食品加工过程中常见的重要单元操作的基本原理和设备及其在实际工作中的应用，希望通过教学或自学，使读者比较牢固地掌握基本理论与知识，以指导人们进行食品工艺学的学习和实践，为将来所从事的食品实际工作奠定坚实的基础。

第一章 食品微细化技术

第一节 食品粉碎基本理论

粉碎 (size reduction) 是用机械力的方法来克服固体物料内部凝聚力, 使固体物料成为达到一定尺寸的颗粒或小块物料的单元操作。习惯上将大块物料分裂成小块物料的操作称为破碎; 将小块物料分裂成细粉的操作称为磨碎或研磨。两者又统称为粉碎。

根据被粉碎物料和成品粒度的大小, 粉碎可分为粗粉碎、中粉碎、微粉碎和超微粉碎 4 种。

- 1) 粗粉碎原料粒度为 40~1500mm, 成品颗粒粒度为 5~50mm。
- 2) 中粉碎原料粒度为 10~100mm, 成品颗粒粒度为 5~10mm。
- 3) 微粉碎 (细粉碎) 原料粒度为 5~10mm, 成品颗粒粒度在 100 μ m 以下。
- 4) 超微粉碎 (超细粉碎) 原料粒度为 0.5~5mm, 成品颗粒粒度在 25 μ m 以下。

粉碎操作在食品工业中占有非常重要的地位, 主要表现在以下 3 个方面。

1) 适应某些食品消费和生产的需要。例如, 面粉是以粉末形式使用的, 巧克力等食品生产需要将各种配料粉碎至足够细小的颗粒才能保证物料的统一分布和最终产品的品质。

2) 增加固体表面积, 以利于后续处理的顺利进行。例如, 在蔬菜干燥前和玉米湿加工前一般需将大块物料粉碎成小块物料。

3) 配方食品和功能性食品的生产需要。一般来说, 各种配料经粉碎来控制相近的粒度, 才能混合均匀, 防止各种粉料混合后再产生自动分级的离析现象, 粉碎的好坏对最终产品的质量影响很大。

一、粉碎物料的粒度与粒度分布

1. 粒度

粒度 (particle size) 是指物料颗粒的大小, 是粉碎程度的代表性尺寸。对于球形颗粒来说, 其粒度为其直径。对于非球形颗粒, 则有以表面积、体积或质量为基准的各种粒度表示法。

(1) 表面积为基准的名义粒度 d_s

将颗粒的表面积转换成球体表面积, 得到的球体直径为以表面积为基准的粒度 d_s 。假设颗粒表面积为 S , 则

$$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1-1)$$

(2) 体积为基准的名义粒度 d_v

将颗粒的体积转换成球形体积, 得到的球体直径为以体积为基准的粒度 d_v 。假设颗粒

体积为 V ，则

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1-2)$$

d_v 最常用来表示粉碎物颗粒的代表性尺寸，又称为颗粒的当量直径 (d_p)。

2. 粒度分布

粉碎后的固体颗粒不仅形状不一致，其大小也不一致。在全部颗粒中，粒度小于 d 的所有颗粒的粒数、表面积和体积占全部颗粒的粒数、表面积和体积的百分率，分别称为粒数、表面积与体积的累积分布函数，以符号 $A(d)$ 表示。

如将累积分布函数对粒度 d 微分，即得频率分布函数 $f(d)$ 为

$$f(d) = \frac{dA(d)}{d(d)} \quad (1-3)$$

频率分布函数也有粒数 [$f(N)$]、表面积 [$f(S)$] 和体积 [$f(V)$] 3 种，分别表示粒度为 d 、粒度增量为 1 单位范围内颗粒数目、表面积和体积所占的百分率。由上述定义可知，若最小粒度为 d_{\min} 、最大粒度为 d_{\max} ，则

$$\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f(d)d(d) = 100\% \quad (1-4)$$

粉碎物料颗粒的粒度分布可以通过筛分或显微镜观察等方法进行测定，这样得到的实际粒度分布可以通过数理统计方法综合成粒度分布函数式。

3. 平均粒度

平均粒度是指固体颗粒的平均大小，其有多种表示方法，多数是以粒数的频率分布进行加权平均。由于平均时所采用的基准和方法不同，平均粒度的表示方法有算术平均值、几何平均值和调和平均值等。表 1-1 列出了常见的几种平均粒度的计算方法。其中，算术平均粒度 d_{am} 适用于过大和过细颗粒不太多、分布较为平衡的场合。几何平均粒度 d_{gm} 对于对数正态分布来说是频率最高的粒度。调和平均粒度 d_{hm} 与颗粒的比表面积有关，当比表面积是颗粒产品一项重要的特性时它是一种有意义的粒度表示法。一般来说这 3 种粒度的大小顺序为 $d_{am} > d_{gm} > d_{hm}$ 。

表 1-1 几种常见的平均粒度算法

平均粒度算法	基准	数学表达式	
算术平均粒度 (d_{am})	粒径	$(d_1 + d_2 + \dots + d_n)/n$	(1-5)
几何平均粒度 (d_{gm})	粒径	$\sqrt[n]{d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n}$	(1-6)
调和平均粒度 (d_{hm})	粒径	$\frac{n}{\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \dots + \frac{1}{d_n}\right)}$	(1-7)
加权平均粒度	粒径	$(d_1 \times f_1 + d_2 \times f_2 + \dots + d_n \times f_n)/n$	(1-8)

粉碎前后的粒度比称为粉碎比或粉碎度，它主要指粉碎前后的粒度变化，同时近似反映出粉碎设备的作业情况。一般粉碎设备的粉碎比为 3~30，但超微粉碎设备可远远超出这个范围，为 300~1000 甚至以上。对于一定性质的物料来说，粉碎比是确定粉碎作业程度、选择设备类型和尺寸的主要根据之一。

4. 粒度分布的测定

用来测定微粉碎物或超微粉碎物粒度分布的方法较多，常用的有筛析法、显微镜法和沉

降法等，下面做些简单的讨论。

(1) 筛析法

筛析法就是用机械力摇动样品使之通过一系列孔径一级比一级小的筛，并称量每个筛上保留的样品质量。筛子运动的形式会影响筛分过程和筛分结果，振动运动最有效，之后依次是旁敲运动、底敲运动、既有敲拍又有旋转的运动及旋转运动。在筛分过程中时间是一个重要的影响参数，单位筛面积上粉末的载荷或厚度会影响筛分时间，用一组选定的筛子来筛分一定量物料，每个筛子进行筛分所需要的时间应与筛子的载荷比例相当。因此，用筛析法分析粉碎物料的粒度分布时，其运动形式、筛分时间和载荷都应该标准化。筛分操作完成后，应检查各级的质量总和与取样量的差值，不应超过 1%，否则需重新取样分析。

(2) 显微镜法

该法是测定粒度分布最直观的方法，其分析下限由透镜的分辨能力所决定，当颗粒粒度接近于光源的波长时就不能被分辨。载玻片上的颗粒粒径是用一个有标准刻度的测微器目镜来测量。调节测微器使目镜的瞄准线（或叉线）移动到颗粒的一边，并记录测微器上的读数；再把瞄准线移动到颗粒的另一边，并记录测微器上读数。两次读数之差即是颗粒的直径。沿着一个任意固定的路线测量全部颗粒。

用来进行计数的颗粒视野应当是随机的，需要计数的颗粒视野数取决于每个视野里的颗粒数量。原则上被测颗粒的数量应多到这样的程度，即即使测量大于这个数量的颗粒，测量结果也不发生变化。英国标准用显微镜计数规定至少要有 625 个颗粒，如果颗粒的粒度分布宽就必须数更多的颗粒，假如颗粒粒度分布窄则只要数 200 个颗粒就足够了。

(3) 沉降法

沉降法可用在粒度为 $1\sim 200\mu\text{m}$ ，确定粉碎物的粒度分布并计算颗粒粒度。沉降法又分为重力沉降和离心沉降两种方法。重力沉降法是在专用的重力沉降粒度测定仪（带有自动记录仪）上进行，当测得颗粒沉降至一定高度 H 所需的时间 t 后，就可计算出沉降速度 Y ，再根据相关公式即可求出颗粒直径 d ，并得出粒度分布曲线。离心沉降法测定粒径的基本原理依据固体颗粒在液体介质中的沉降速度随颗粒大小的不同而不同，离心力的作用加速了颗粒的沉降速度。

(4) 激光粒度测定仪

该设备是一种先进的颗粒粒度测定仪器，它是让颗粒通过一个高速空气的喷嘴而射出，颗粒速度由激光测速仪测量。根据颗粒的速度即可求出粒度大小。

二、粉碎力与粉碎能耗

1. 粉碎力的种类与形式

物料粉碎时所受到的作用力包括挤压力、冲击力和剪切力（摩擦力）3种。根据施力种类与方式的不同，物料粉碎的基本方法包括压碎、劈碎、折断、磨碎和冲击破碎等形式（图 1-1）。

(1) 压碎

压碎是将物料置于两个粉碎面之间，逐渐加压后物料因压应力达到其抗压强度极限而被粉碎。这种粉碎方式仅适用于脆性物料。食品加工中常用的挤压方式是对辊粉碎，当对辊的线速度相等时，则为纯粹的挤压方式。被处理物料如果具有一定的韧性或塑性，则处理后物

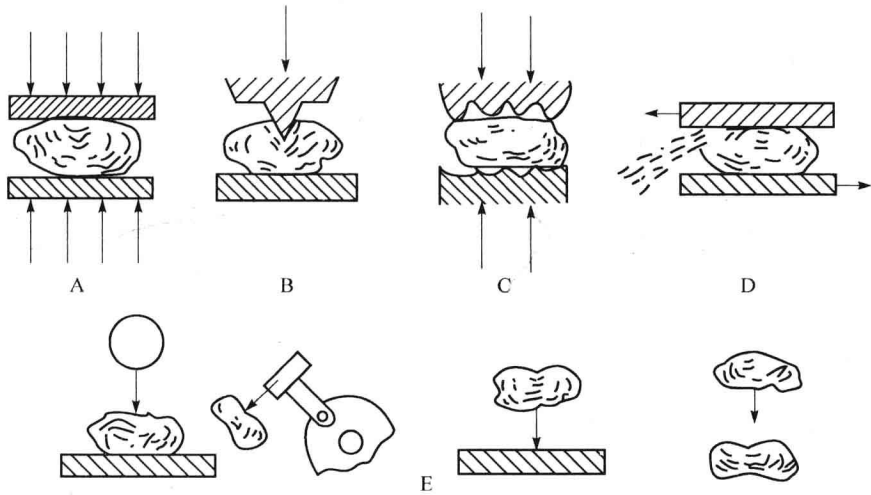


图 1-1 粉碎的基本方法

A. 压碎; B. 劈碎; C. 折断; D. 磨碎; E. 冲击破碎

料可呈片状,如轧制麦片、米片及油料轧片等处理方式均属于此类。

(2) 劈碎

劈碎用一个平面和一个带尖棱的工作表面挤压物料,物料沿压力作用线的方向劈裂,这是由于劈裂平面上的拉应力达到或超过物料拉伸强度极限的原因。

(3) 折断

折断是指物料在工作构件间承受弯曲应力超过强度极限而折断的食品粉碎方式。一般用来处理较大块的长或薄的脆性物料,粉碎的粒度较低。

(4) 磨碎

磨碎是指物料与粗糙工作面之间在一定压力下相对运动而摩擦,使受到破坏,表面剥落的食物粉碎方式,这是一种既有挤压又有剪切的复杂过程。

(5) 冲击破碎

冲击破碎是指当物料与工作构件以相对高速运动撞击时,受到时间极短的变载荷,物料被击碎的食物粉碎方式。这种粉碎方式适用于质量较大的脆性物料,冲击粉碎应用范围很广,从较大块的破碎到微粉碎均可以使用,而且可以粉碎多种物料。最典型的冲击粉碎机械是锤击式粉碎机,它在食品工业中用得很多。也有利用物料自身高速运动而碰撞粉碎的机械,称为超高速喷射粉碎机,但是其能耗很大。

2. 物料的力学性质

物料的力学性质会影响粉碎效果。根据物料应变与应力的关系及极限应力的不同,其力学性质包括以下 4 种。

(1) 硬度

硬度是根据物料弹性模量大小来划分的性质,有硬与软之分。硬度越高表明物料抵抗塑性变形的能力越大,要使之产生塑性变形越困难。物料的硬度是确定粉碎作业程序、选择设备类型和尺寸的主要依据。

(2) 强度

强度是根据物料弹性极限应力的来划分的性质,有强与弱之分。

(3) 脆性

脆性是根据物料塑变区域长短来划分的性质，有脆性和可塑性之分。

(4) 韧性

韧性是一种抵抗物料裂缝扩展能力的特性，韧性越大，则裂缝末端的应力就越集中。

对一种具体的物料来说，上述4种力学性质之间有内在的联系，导致物料综合性质的复杂化，这些对粉碎时所需的变形力均有影响。总的来说，凡是强度越强、硬度越小、脆性越小而韧性越大的物料，其所需的变形能就越多。物料的硬度和破裂性是选择粉碎方法的首要依据，对于特别坚硬的物料用挤压和冲击很有效，对于韧性物料用研磨和剪切较好，而对于脆性物料则以劈碎和冲击破碎为宜。

实际上，任何一种粉碎机都不是单纯利用上述某种方法进行粉碎，而是结合利用两种或两种以上的粉碎方法实现的，如压碎和折断、冲击破碎和磨碎等。

3. 物料在粉碎过程中的变化

目前，人们对粉碎机制的认识尚不彻底。通常认为物料受到各种不同粉碎力作用后，首先要产生相应的应变，并以变形内能形成积蓄于物料内部。当局部积蓄的变形能超过某临界值时，裂解就发生在脆弱的断裂线上。从这一角度分析，粉碎至少需要两方面的能量：①裂解发生前的变形能，这部分能量与颗粒的体积有关；②裂解发生后出现新表面所需的表面能，这部分能量与新出现表面积的大小有关。

到达临界状态（未裂解）的变形能与颗粒的体积有关，这是因为脆弱的断裂线和疵点对于粒度越大的颗粒存在的就可能性就越大。大颗粒所需的临界应力就较小颗粒小，因而消耗的变形能也就较少，这就是粉碎操作为什么随着粒度减小而变得更加困难的原因。在粒度相同情况下，由于物料的力学性质不同所需的临界变形能也不相同。物料受到应力作用时，在弹性极限应力以下则发生弹性变形；当作用的应力在弹性极限应力以上时就会出现永久变形，直至应力达到屈服应力。在屈服应力以上，物料开始流动，经历塑变区域直至达到破坏应力而断裂。

对于任何一个颗粒来说，都存在着一个临界粉碎能量。许多颗粒受到的冲击不足以使其粉碎，而是在一些特别有力的猛然冲击下才粉碎的。因此，最有效的磨碎机只利用了不到1%的能量去粉碎颗粒和产生新表面。假如作用力没有超过物料的弹性极限，物料就被迫变形或受到应力。当此力除去时，颗粒即恢复其原来的状态，而变形颗粒中的应力机械能以热的形式表现出来。当作用力超过弹性极限时，颗粒就会被粉碎。颗粒表面一般不规则，因此表面上高出的那部分先受到力的作用，这样可能在物料的局部地区产生高的应力和温度。当粉碎发生时力的作用点就转移，释放出的应力能量一部分供给了新产生的表面，超过的部分表现为热。

颗粒中的裂纹隙在结构上总是脆弱的，在应力作用下它可以发展成为裂缝。粉碎过程中的有用功与所产生新裂缝的长度成正比。颗粒吸收应变能并在剪切力或压应力作用下发生变形，直至能量超过最弱的裂纹隙，从而引起颗粒的破碎或开裂。粉碎需要的应变能与已形成裂缝的长度成正比，因为扩大裂缝至粉碎所需的补充能是由周围的剩余能量流向裂缝的能量来提供。

三、粉碎的能耗假说

物料粉碎时，当作用力超过颗粒之间的结合力时产生粉碎，外力做的功称为粉碎能耗。