



现代食品工程 高新技术

主编 高福成 副主编 王海鸥
编者 郑建仙 许学勤 杨瑞金 邹延军
唐 蕾

● 中国轻工业出版社

现代食品工程高新技术

主 编 高福成
副主编 王海鸥
编 者 郑建仙 许学勤 杨瑞金
 郇延军 唐 蕾



392355

中国轻工业出版社

内 容 提 要

本书从食品工程角度出发,系统介绍了现代食品工程的高新技术,扼要论述了它们的基本原理、涉及的主要装置及其在食品工业中的应用。

本书共分为8篇26章。内容包括:食品粉碎、造粒新技术;食品工业能源新法应用技术;食品包装、杀菌新技术;食品分离新技术;食品保鲜新技术;冷冻关联食品加工技术;食品质构调整技术;生物技术在食品工业中的应用。

本书的读者对象主要为大专院校食品工程专业师生、从事食品专业的工程技术人员和科研人员等。

图书在版编目(CIP)数据

现代食品工程高新技术/高福成主编. —北京:中国轻工业出版社, 1997, 5

ISBN 7-5019-2019-2

I. 现… I. 高… II. 食品工业-新技术 N. TS2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 01159 号

中国轻工业出版社出版发行

(100740 北京市东长安街 6 号)

责任编辑:李亦兵

三河市利森达印务有限公司印刷 新华书店经销

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 46.25

字数: 1074 千字 印数: 1-4000 册

定价: 80.00 元

京工商广临字 304 号

前 言

为了适应当前高等院校教学改革,无锡轻工大学对原有食品专业教学计划进行了深入研讨,拟定食品四年制本科专业仅设一个专业,即食品科学与工程专业。在合理利用计划学时和妥善设置食品专业必要课程和实践环节的前提下,拟定前期三年的教学进程达到该专业培养目标中最基本的要求,包括课程中的普通食品工艺学在内的以前作为最后专业课处理的课程,以及实践环节中除毕业实践之外的环节。完成这一进程也就基本完成该专业所应具备的最基本的专业理论知识和工程师技能训练。这样,就有可能巧为设计四年制中的最后一年,使教学计划更能适应市场经济的发展,更能符合教育和科学的同步现代化进展。

本书是专门为那些对食品工程学特别感兴趣的学生编写的系列教学参考书之一。能使学生的个性得到充分发挥,使他们可以跨学科学习相关食品技术。

本书共分为 8 篇 26 章。编写分工如下:

王海鸥 第 8 章~第 14 章,第 17 章~第 18 章

许学勤 第 15 章~第 16 章,第 19 章

郑建仙 第 1 章~第 2 章

杨瑞金 第 3 章~第 7 章

郇延军 第 21 章~第 22 章

唐 蕾 第 20 章,第 23 章~第 26 章

全书由高福成主编。

本书取材来自国内外的有关专著和各类文献,不少内容无现成可借鉴的系统资料,缺点和错误肯定难免,希望广大读者批评指正。

编者

序 言

古代的饮食生活单纯，技术方面主要是栽培、狩猎、饲养和简单的加工贮藏。产业革命后，人们试图用科学原理解释过去的经验贮藏法，并陆续开发了科学的保藏和贮藏方法以及优质食品的制造技术。从此，原来依靠手工的食品加工变成了依靠动力和机械的食品加工。由原料的粉碎、筛分、分级、分离和浓缩等方法而获得纯度远比过去为高的食品原材料，如面粉、奶油、植物油，开始出现了象今天所讲的经初级分离重组后的组合食品，如饼干、冰淇淋等。

19 世纪初期，尼古拉·阿佩尔的罐藏法是划时代的革新。当时拿破仑拨款悬赏征求久藏食品的方法，阿佩尔发明了把食物煮熟后密封在瓶子里，浸泡在沸水中的方法。如此制成的罐头食品经过海军历时 8 个月的海上运输、酷暑和潮湿的考验而仍能鲜美可口。阿佩尔由此得到了拿破仑一笔巨额的奖赏，以此开办了世界上第一家罐头食品厂。此后半个世纪内出现了英国马口铁锡焊制罐，俄国白铁盒肉类罐头，美国广口玻璃瓶罐头。

长期以来，食品腐败的机理和罐头为什么能防腐仍是未解之谜，食品的开发和发展不是靠系统的试验，不是靠科学的方法，而是靠偶然的发现或随意的试验。真正科学的食品技术始自 130 年前的路易斯·巴斯德。他向法国科学院报告中用科学的原理阐明了食品败坏是由于细菌的作用。这一发现对罐头食品以及其它保藏食品的发展起了极其重要的作用。也就从那时起，科学家在食品加工和开发方面所起的作用愈来愈大。及至第一次世界大战爆发，粮食和副食的大量加工和运输迫不得已，食品干燥技术、罐头制造和其它食品加工技术便突飞猛进。第二次世界大战又迫使这些技术受到进一步的刺激。不仅耐藏性和耐运输性，也开发了附带方便性的加工食品制造技术。例如马铃薯片、速溶咖啡、冷冻食品等。

二战前后，欧美各地普遍形成加工食品规模生产制的基础，加上后来生物化学、食品化学、营养学、微生物学、酶学、食品卫生学、食品分析等学科的进步，以及机械工程、化学工程、电子工程、高分子化工和检测技术的发展，由这些科学技术综合起来的食品加工技术，便取得了划时代的飞跃。也就是说，从这时起，有可能进行以提高加工食品品质为前提的高效连续生产，有可能开发出新的食品素材和新型的食品，有可能进行保证品质处于安全下的高效流通。值得一提的是 1955 年以来，由于石油化学的进步，出现了价格低廉、性能优越的塑料包装材料，从而产生食品包装的第二次革命。此外，由于食品工程发展中引入电子技术和检测技术，使传统凭经验和直觉的食品加工，有可能

组合成为不接触人手的连续生产系统,从而使加工的传统食品能够满足消费者的嗜好和要求,且供应价格为消费者乐意接受。例如速冻烹调食品,高温短时杀菌牛乳和果汁,无菌包装牛乳和果汁,无菌过滤鲜啤酒、生酒、生酱油,喷雾干燥粉末油脂、调料、香料,各种优质冷冻干燥食品,高压杀菌软罐头食品,固定化酶技术加工的异构糖浆等。

未来食品生产和消费趋势与未来社会经济发展变化密切联系,如人口的增长,土地和人口向扩张中城镇的转移,粮食资源和能源的匮乏等。这些变化将逐渐成为地球规模宏观左右社会经济发展的重要因素。但是,由于先进保藏技术和重要食品技术的发明和采用,农作物单产的提高,资源开发利用的成功,总的趋势是人们的生活方式和相应饮食生活将发生很大的变化,现有的一切现代化进程将更向前推进。

社会劳动生产率的不断提高将使人们的休假日增多,使家庭的收入增加,这就使家居生活突出地追求享乐性、方便性、零食性和自我创作自我鉴赏以及食生活的外食化,如家常餐厅、新式家族餐厅、专席餐厅、点心沙龙和咖啡厅等。

娱乐、旅游、登山、宇航和体育运动是消遣闲暇、有益身心健康的最好办法。这些活动在时间、空间上都要求食品具有突出的方便性、特殊生理功能性和健美增进性等等。

生活水平的提高也必给人们带来对精神生活的更高欲求,艺术将渗入饮食生活,对食品将更重视审美价值。传统古代名宴的复制,豪华膳席摆设的展现,高级餐具和炊具的陪衬等都是明显的例子。

富有、闲适、享乐的人生必将伴随对生命的重视,对健康和长寿的追求,对新一代优生优育的关怀。因此寻求常人在正常生理条件下能有效防御现代社会“文明病”,寻求不同年龄群(老人、儿童、孕产妇)在特殊生理状态下能延年益寿、顺利康复、健康成长、寻求人们在特殊生活方式下能消疲劳、抗骚扰、善机动、敏应变的所谓功能性食品,已成为当今全球性的热潮,并将成为未来食品研究所追逐的目标。低盐、低糖、低脂、高纤维食品,疗效、保健食品,强骨食品,智商(IQ)食品,开胃食品,防便秘食品,美容食品,防老年痴呆食品,抗癌食品,孕妇食品,产妇食品等均属此。另一方面,对健康和长寿的极端重视必然从反面带来对一切包括功能性食品在内的加工食品的疑惧,从而颇有使食物复归天然、复归原始鲜食的愿望。最低限度加工保藏的食品便是现时和未来发展这种愿望的现实可行方案。加上对动物脂肪和胆固醇的疑惧,便产生植物食品,即素食。中国和亚洲许多信仰佛教的国家,素食有悠久的历史。开发精致的现代化素食有着很大的潜力。

综观以上,可见时代在巨变,生活方式在走向新世纪,饮食生活也随之走向未来。“未来食品”似乎是不可捉摸的幻想食品,正象幻想小说中所描述的给读者以扑朔迷离、荒诞无稽感觉的食品。这样的食品,从其本质要素看,不再是传统简单的两要素。即:①保持和修补机体处于正常状态的营养素补给源和维持机体必要运动的能量补给源,这是生理学、生物学上所必需的要素;②色、香、味、形、质构的享受和食欲的满足,这是心理学上所必需的要素。

诚然,对于未来的食品,万变仍不离此两项要素,但要给予强调和扩充。生理学、生物学所需要的不只在在于补给源的提供,而且还包括消化吸收的促进,体内合成代谢的协调,宁静、节奏、动作的调节,健康的增进和疾病的预防。有人称此为食品的第三功能

或补充功能，称具有这种功能的食品为功能性食品。中华宝贵遗产“药食同源”的理论以及以此理论为依据的形形色色功能性食品已经在世界范围内引人注目。另外，心理学上所必需的要素也不只限于色香味形质构的享受和食欲的满足，而且还要满足便携、即席、豪华、气派、艺术等心理上的要求。

特别需要指出的是功能性食品，它已为越来越多的消费者所需求，已为越来越多的工业界人士所赏识，正在形成现代食品工业的一个新领域。功能性食品是社会和科学发展及其交互影响的产物。它的出现标志着作为食品中的关键组分开始从重点要求大量的传统营养素转向重点要求微量的生理活性物质。从充分利用天然食物资源出发，便日益兴起专门制备某些微量生理活性物质的新兴工业，以供应功能性食品工业所需的配料。要制成能满足消费者需求的这类新型的功能性食品，单凭传统的分离重组工程往往不能奏效。由于功能性素材的“微量”和“生理活性”，传统分离重组的方法、系统和设备不能完全保证分离重组的效率和保留配料的活性。因此，往往需要依靠现代高新的工程技术才能完成这一任务。

本书将现代食品工程广为应用的高新技术，划分为如下 8 大类：

- (1) 食品粉碎、造粒新技术；
- (2) 食品工业能源新法应用技术；
- (3) 食品包装、杀菌新技术；
- (4) 食品分离新技术；
- (5) 食品保鲜新技术；
- (6) 冷冻关联食品加工技术；
- (7) 食品质构调整技术；
- (8) 食品工业生物技术应用。

可以预言，未来食品工业的竞争将是科学技术的竞争。

目 录

第一篇 食品粉碎、造粒新技术

第一章 微粉碎和超微粉碎	(1)
第一节 粉碎理论.....	(2)
第二节 干法超微粉碎和微粉碎.....	(9)
第三节 湿法超微粉碎	(30)
第四节 粒度分布与测定	(39)
第五节 超微粉碎或微粉碎的应用	(44)
第二章 微胶囊造粒技术	(51)
第一节 总论	(51)
第二节 物理法微胶囊造粒技术	(58)
第三节 物化法微胶囊造粒技术	(70)
第四节 化学法微胶囊造粒技术	(85)
第五节 微胶囊造粒技术在食品工业中的典型应用	(91)

第二篇 食品工业能源新法应用技术

第三章 远红外线应用	(103)
第一节 远红外加热的原理.....	(103)
第二节 远红外加热设备.....	(113)
第三节 远红外加热在食品工业中的应用.....	(122)
第四章 微波应用	(129)
第一节 微波加热的原理.....	(130)
第二节 微波加热设备.....	(135)
第三节 微波加热在食品加工中的应用.....	(140)
第五章 水油混合深层油炸与真空油炸	(150)
第一节 油炸的基本理论和方法.....	(150)
第二节 水油混合式深层油炸技术.....	(153)
第三节 常用油炸工艺对食品营养价值的影响.....	(159)

第四节 真空低温油炸·····	(165)
第六章 过热蒸汽新法应用 ·····	(175)
第一节 过热蒸汽的性质·····	(175)
第二节 过热水蒸气的产生与设备·····	(178)
第三节 过热蒸汽在食品加工中的应用·····	(182)

第三篇 食品包装、杀菌新技术

第七章 高频电阻焊制罐 ·····	(191)
第一节 电阻焊制罐工作原理·····	(191)
第二节 高频电阻焊机·····	(194)
第三节 影响电阻焊罐焊接质量的因素·····	(199)
第四节 高频电阻焊制罐生产工艺与工艺要点·····	(205)
第八章 无菌包装 ·····	(209)
第一节 无菌包装的基本概念和基本原理·····	(209)
第二节 无菌包装材料及其杀菌方法·····	(210)
第三节 无菌包装设备与无菌包装过程·····	(216)
第九章 蒸煮袋与软罐头 ·····	(235)
第一节 蒸煮袋·····	(235)
第二节 软罐头·····	(259)
第三节 蒸煮袋强度的检测方法及主要仪器·····	(273)
第十章 超高温杀菌 ·····	(282)
第一节 超高温杀菌的基本原理·····	(282)
第二节 UHT 瞬时杀菌的基本过程及设备·····	(287)
第十一章 欧姆杀菌和高压杀菌 ·····	(317)
第一节 欧姆杀菌·····	(317)
第二节 高压杀菌·····	(331)

第四篇 食品分离新技术

第十二章 膜分离技术 ·····	(346)
第一节 膜分离的基本原理和方法·····	(347)
第二节 膜分离装置及其流程·····	(359)
第三节 膜分离在食品工业中的典型应用·····	(366)
第十三章 超临界流体萃取 ·····	(378)
第一节 超临界流体萃取的基本原理和方法·····	(379)
第二节 超临界流体萃取的过程系统及操作特性·····	(388)
第三节 超临界流体萃取在食品工业中的应用·····	(390)
第十四章 液膜分离 ·····	(396)
第一节 液膜分离的基本原理·····	(396)

第二节	液膜体系——液膜和它包裹的内相	(406)
第三节	液膜分离的工艺流程及其应用	(415)

第五篇 食品保鲜新技术

第十五章	气调保鲜	(422)
第一节	基本原理与分类	(422)
第二节	气调保鲜的条件与管理	(427)
第三节	气调冷藏库	(432)
第四节	薄膜封闭层气调方法	(436)
第五节	减压贮藏	(446)
第十六章	电离辐射保鲜	(451)
第一节	电离辐射的基本原理	(452)
第二节	食品辐射保鲜的基本效应	(464)
第三节	辐射在食品保鲜中的应用	(469)

第六篇 冷冻关联食品加工技术

第十七章	冷冻浓缩	(477)
第一节	冷冻浓缩的理论和方法	(477)
第二节	冷冻浓缩装置系统及应用	(482)
第十八章	冷冻干燥	(491)
第一节	冷冻干燥的理论基础	(492)
第二节	冷冻干燥装置	(497)
第三节	冷冻升华干燥在食品工业中的应用	(515)
第十九章	流化速冻	(520)
第一节	食品冻结过程与速冻原理	(520)
第二节	流态化速冻方法	(528)
第三节	食品流化速冻装置	(539)
第四节	蔬菜、水果流态化冻结工艺	(547)
第二十章	冷冻粉碎	(551)
第一节	冷冻粉碎原理	(551)
第二节	冷冻粉碎设备	(553)
第三节	冷冻粉碎技术在食品加工中的应用	(557)

第七篇 食品质构调整技术

第二十一章	蒸煮挤压	(560)
第一节	蒸煮挤压技术的基本概念和理论	(561)
第二节	挤压机主要部件	(584)
第三节	挤压过程中物质成分的变化	(602)

第四节	挤压机操作.....	(621)
第五节	挤压食品工艺介绍.....	(623)
第二十二章	气流膨化.....	(629)
第一节	气流膨化的特点与工艺.....	(629)
第二节	气流膨化机的主要部件及工作原理.....	(630)
第三节	典型气流式膨化机的结构.....	(636)

第八篇 生物技术在食品工业中的应用

第二十三章	酶促反应工程.....	(641)
第一节	酶学基础.....	(641)
第二节	酶反应动力学.....	(647)
第三节	酶反应器.....	(654)
第四节	酶反应技术在食品工业中的应用.....	(658)
第二十四章	微生物反应工程.....	(667)
第一节	微生物学基础.....	(667)
第二节	微生物反应动力学.....	(678)
第三节	微生物反应器.....	(688)
第二十五章	动植物细胞培养技术.....	(696)
第一节	动植物细胞培养技术基础.....	(697)
第二节	动植物细胞的生长与代谢.....	(703)
第三节	动植物细胞反应器.....	(707)
第四节	动植物细胞培养技术在食品工业中的应用.....	(711)
第二十六章	食品工业废弃物处理和利用.....	(714)
第一节	食品加工废物的回收和利用.....	(714)
第二节	食品工业废水的处理和排放.....	(719)

第一篇 食品粉碎、造粒 新技术

第一章 微粉碎和超微粉碎

粉碎操作在食品工业中占有非常重要的地位，主要表现在：

(1) 迎合某些食品消费和生产的需要，如面粉是以粉末形式使用的，巧克力等很多食品的生产需将各种配料粉碎至足够细小的颗粒才能保证物料的均匀分布和终产品的品质；

(2) 增加固体表面积以利于后道处理的顺利进行，如果蔬干燥前和玉米湿加工前需将大块物料粉碎成小块物料；

(3) 工程化食品和功能性的生产需要，各种配料粉碎后才能混合均匀，粉碎的好坏对终产品的质量影响很大。

随着现代食品工业的不断发展，普通的粉碎手段已开始不足适应生产的需要，于是出现了超微粉碎手段，并得到了迅猛的发展。在功能性食品生产上，某些微量活性物质（如硒）的添加量很小，如果颗粒稍大，就可能带来毒副作用。这就需要非常有效的超微粉碎手段将之粉碎至足够细小的粒度，加上有效的混合操作才能保证它在食品中的均匀分布。又如膳食纤维一个重要的生理功能是通过促进排便，达到防治便秘与结肠癌的目的，功能发挥与纤维的持水力、膨胀力有很大的相关关系，而持水力、膨胀力又与纤维的比表面积（粒度）有一定的关系；粒度越小比表面积越大，持水力与膨胀力就相应增大，这样就需要有效的超微粉碎手段。当然，比表面积仅是影响纤维持水力、膨胀力众多因素中的一个。就以传统的巧克力产品来说，浆料精磨后的粒度对终产品的质构和口感特性有决定性的影响，而精磨操作实际上就是一种超微粉碎过程。

因此，超微粉碎技术已成为现代食品加工的重要新技术之一。因为在超微粉碎过程中能量的利用率很低，目前对该技术本身的研究集中在如何提高能量的利用率上。例如，大型球磨机粉碎过程中的能量利用率仅 0.6%，其余 99.4% 以摩擦、热量和噪音等形式损失掉，而气流式超微粉碎机的能量利用率也仅 2% 左右。

第一节 粉碎理论

一、有关粉碎的基本概念

粉碎是用机械力的方法来克服固体物料内部凝聚力达到使之破碎的单一操作。习惯上有时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粒的操作称为磨碎或研磨，两者又统称粉碎。

物料颗粒的大小称为粒度，它是粉碎程度的代表性尺寸。对于球形颗粒来说，其粒度即为直径。对于非球形颗粒，则有以面积、体积或质量为基准的各种名义粒度表示法。有关这方面的详细内容，将于本章第四节讨论。

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、微粉碎和超微粉碎四种：

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

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，达到 300~1000 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。

对于大块物料粉碎成细粉的粉碎操作，如要通过一次粉碎完成则粉碎比大，设备利用率低，故通常分成若干级，每级完成一定的粉碎比。这时可用总粉碎比来表示，它是物料经几道粉碎步骤后各道粉碎比的总和。

粉碎操作有好几种方法，每种方法有其特定的适用场合。这些方法包括开路粉碎、自由粉碎、滞塞进料粉碎和闭路粉碎 4 种。

开路粉碎是粉碎设备操作中最简单的一种，它不用振动筛等附属分粒设备，故设备投资费用低。物料加入粉碎机中经过粉碎作用区后即作为产品卸出，粗粒不作再循环。由于有的粗粒很快通过粉碎机，而有的细粒在机内停留时间很长，故产品的粒度分布很宽，能量利用不充分。

自由粉碎法中，物料在作用区的停留时间很短。当与开路磨碎结合时，让物料借重力落入作用区，限制了细粒不必要的粉碎，因而减少了过细粉末的形成。此法在动力消耗方面较经济，但由于有些大颗粒迅速通过粉碎区，导致粉碎物的粒度分布较宽。

滞塞进料粉碎法在粉碎机出口处插入筛网，以限制物料的卸出。对于给定的进料速率，物料滞塞于粉碎区直至粉碎成能通过筛孔的大小为止。因为停留时间可能过长，使得细粒受到过度粉碎，且功率消耗大。滞塞进料法常用于需要微或超微粉碎的场合，以一台设备操作可获得很大的粉碎比。

闭路粉碎是从粉碎机出来的物料流先经分粒系统，分出过粗的料粒后重新回入粉碎

机。在这种情况下，粉碎机的工作只是针对颗粒较大的，物料的停留时间短，所以动力消耗可以降低。所采用的分粒方法根据送料的形式而定，如采用重力法加料或机械螺旋送料时常用振动筛作为分粒设备，当用水力或气力输送时则常用旋风分离器。

粉碎操作除了上述所谓干法之外，还有湿法。后者是将原料悬浮于载体液流（常用水）中进行粉碎。此法可克服粉尘飞扬问题，并可采用淘析、沉降或离心分离等水力分级方法分离出所需的产品。在食品加工上，粉碎经常作为浸出的预备操作，使组分易于溶出，故颇适于湿法粉碎法，例如玉米淀粉的制造。

实践证明，湿法操作一般消耗能量较干法操作的大，同时设备的磨损也较严重。但湿法比干法易获得更微细的粉碎物，故在超微粉碎中应用甚广。

二、粉碎理论

（一）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 and 剪切力（摩擦力）三种。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，如图 1-1 所示。

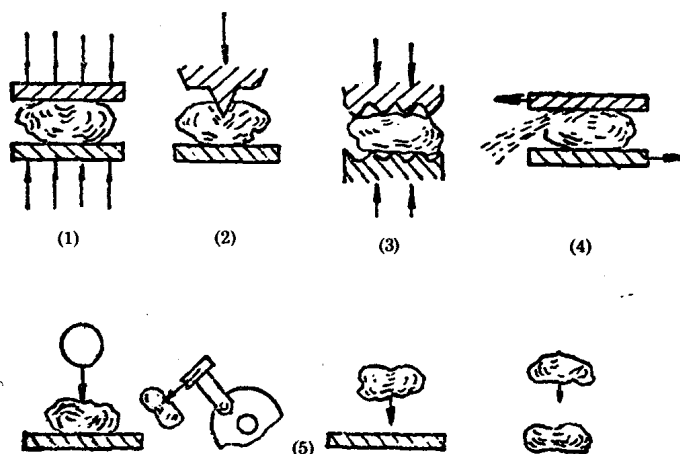


图 1-1 粉碎的基本方法

(1) 压碎 (2) 劈碎 (3) 折断 (4) 磨碎 (5) 冲击破碎

(1) 压碎 物料置于两个粉碎面之间，施加压力后物料因压应力达到其抗压强度极限而被粉碎。

(2) 劈碎 用一个平面和一个带尖棱的工作表面挤压物料时，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。

(3) 折断 被粉碎的物料相当于承受集中载荷的两支点或多支点梁，当物料内的弯曲应力达到物料的弯曲强度极限时而被折断。

(4) 磨碎 物料与运动的表面之间受一定的压力和剪切力作用，当剪应力达到物料

的剪切强度极限时，物料就被粉碎。

(5) 冲击破碎 物料在瞬间受到外来的冲击力而粉碎，它对于粉碎脆性物料最有利。

(二) 物料的力学性质

物料的力学性质与所要选择的粉碎方式有很大的关系。根据物料应变与应力的关系以及极限应力的不同。其力学性质包括以下 4 种：

(1) 硬度 它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弹性变形的能力越大。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 它是根据物料弹性极限应力的的大小来划分的性质，有强与弱之分，强的材料抵抗塑变的能力越大。

(3) 脆性 它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 它是一种抵抗物料裂缝扩展能力的特性，韧性越大，则裂缝末端的应力集中就越容易得到缓解。

对一种具体的物料来说，上述 4 种力学特性之间有内在的联系，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。

选择粉碎方法时，须视被粉碎物料的物化性质与所要求的粉碎比而定，尤其是物料的机械性质影响更大，其中物料的硬度和破裂性更居首要地位。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裂、冲击为宜。

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，例如压碎和折断，冲击和磨碎等。

(三) 物料在粉碎过程中的变化

目前，人们对粉碎机理的认识尚不彻底。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：一是裂解发生前的变形能，这部分能量与颗粒的体积有关；二是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愈大的颗粒存在的可能性就愈大。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。但粉碎条件纯粹是偶然的，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。其余的能量则消耗

于以下几个方面：①未破碎颗粒的弹性变形；②物料在粉碎室内的来回运转；③颗粒之间的摩擦；④颗粒和磨碎机之间的摩擦；⑤发热；⑥振动的噪音；⑦传动机件和电动机的无效能耗。

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。颗粒表面一般是不规则，所以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。

颗粒中最弱的裂纹隙决定着颗粒的粉碎强度，并决定粉碎所产生颗粒的数量。具有最弱裂隙的颗粒最容易被粉碎，并产生最大的颗粒，但与同样粒度且有较强的最弱裂隙颗粒比较起来，它们需要多经过几次粉碎，所以要把它们粉碎至特定的粒度并不一定更容易。

研磨的直接目的是形成裂缝，并通过消耗应变能使颗粒变形从而扩大裂缝产生粉碎。有用功正比于新的表面积，并且因为裂缝长度是比例于所产生的新表面积的平方根，有用功仅比例于原料直径的平方根减去产物直径的平方根。产生新表面消耗的能量 E' 是：

$$E' = E \left(\frac{\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_1} - \sqrt{d_2}} \right) \quad (1-1)$$

式中 d_1 —— 进入粉碎机中物料的直径

d_2 —— 从粉碎机中排出产物的直径

E —— 输入的能量

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或简称粉碎能。粉碎能消耗于以下几方面：

- (1) 粉碎机械传动中的能耗；
- (2) 颗粒在粉碎发生之前的变形能；
- (3) 粉碎产品新增加表面积的表面能；
- (4) 颗粒表面结构发生变化所消耗的能，如产生表面活性点、表面形成无定形层或氧化物层；
- (5) 晶体结构发生变化所消耗的能；
- (6) 磨介之间的摩擦、振动及其它能耗。

人们曾对球磨机的能耗进行测定分析，发现输入的能量大部分以热的形式散失，如

表 1-1 所示。

表 1-1 粉碎能耗的分析

能 耗 类 别	P/kW	占总能耗的百分数/%
(1) 轴承、齿轮等机械传动的损失能耗	57	12.3
(2) 单位时间内粉碎产品带走的热	222	47.6
(3) 单位时间内筒体辐射的热	30	6.4
(4) 单位时间内气流带走的热	144	31.0
(5) 单位时间新生表面的表面能	3	0.6
(6) 其它损耗:		
磨介的摩擦	5	} 2.1
磨介温升散热	2	
振动、水分蒸发及其它	3	
总 计	466	100.0

由于粉碎过程比较复杂,受影响的因素较多,且这些因素在不同条件下又有不同的变化,诸如物料的性质、形状、粒度大小与分布、粉碎机的类型和操作方法等,都将直接影响粉碎时的能量消耗。因此,已有的粉碎理论尚未发展到能够对一给定物料减小粒度所需要的能量作精确定量计算的程度。

尽管如此,近百年来研究积累已提出了数种能耗假说,其中比较著名的有表面积假说、体积假说和裂缝假说三种。它们在一定程度上反映了粉碎过程的各种变化,具有一定的概括性和指导意义。

(一) 表面积假说

表面积假说由 P. R. Rittinger 最早提出。它的物理基础是,组成任何纯粹性晶体物质质点之间具有恒定的分子吸引力,粉碎所消耗的能量与用来拆开分子间吸引力产生新表面所需的能量有一定的关系。鉴于粉碎后产品的比表面大大增加,输入的粉碎能量越多,产品的粒度越细,则比表面越大,故 Rittinger 提出所谓“表面积假说”:粉碎能耗与粉碎后物料的新生表面积成正比,或粉碎单位重量物料的能耗与新生的比表面成正比。用式子表示即:

$$E \propto \Delta S = C_1 \Delta S = C_1 (S_2 - S_1) = \frac{C_1 C_2}{\delta} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) = K_1 \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right)$$

$$\text{即:} \quad E = K_1 \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \quad (1-2)$$

式中 E —— 粉碎物料所消耗的能量

ΔS —— 物料粉碎后所增加的表面积

δ —— 物料密度

d_1, d_2 —— 物料颗粒粉碎前后的粒度

C_1, C_2, K_1 —— 比例常数