

食品分离重组 工程技术

主编 高福成 副主编 许学勤
编者 郑建仙 夏文水 王洪新 葛文光
杨瑞金 王海鸥

 中国轻工业出版社

食品分离重组工程技术

主 编 高福成
副主编 许学勤
编 者 郑建仙 夏文水 王洪新
葛文光 杨瑞金 王海鸥

中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

食品分离重组工程技术/高福成主编. -北京: 中国轻工业出版社, 1998. 7
ISBN 7-5019-2133-4

I. 食… I. 高… II. 食品工程学 N. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 01911 号

2P36/24

责任编辑: 李亦兵

策划编辑: 李亦兵 责任终审: 滕炎福 封面设计: 赵小云

版式设计: 丁夕 责任校对: 郎静瀛 责任监印: 胡彬

*

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 中国人民警官大学印刷厂

经销: 各地新华书店

版次: 1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 51.25

字数: 1187 千字 印数: 1—3000

书号: ISBN 7-5019-2133-4/TS·1340 定价: 99.00 元

· 如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换 ·

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4篇24章。编写分工如下：

许学勤 第3~5章，第15~18章

王海鸥 第12章

郑建仙 第1~2章，第6~9章，第13章

王洪新 第21~22章

夏文水 第19~20章

葛文光 第23~24章

杨瑞金 第10~11章，第14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，有些来自本校的学术论文。由于编写此类图书尚属首次，缺点和错误肯定难免，希望广大读者批评指正。

目 录

绪言	(1)
----	-----

第一篇 食品粉碎和微粒化技术

第一章 粉碎	(5)
第一节 粉碎理论	(5)
第二节 磨介式粉碎	(16)
第三节 冲击式粉碎	(37)
第四节 转辊式粉碎	(48)
第二章 筛分	(61)
第一节 筛分理论	(61)
第二节 往复振动式筛分	(72)
第三节 高速振动式筛分	(85)
第四节 平面回转式筛分	(96)
第三章 均质(匀浆)	(112)
第一节 液体食品与均质	(112)
第二节 均质设备的类型与均质机理	(115)
第三节 均质设备	(117)
第四节 均质效应及影响因素	(130)
第四章 乳化	(136)
第一节 乳化液的类型及特点	(136)
第二节 食品乳化剂	(139)
第三节 乳化液制备与设备	(145)
第四节 典型食品乳化液	(151)

第二篇 食品分离技术

第五章 分级	(157)
第一节 清洗	(158)
第二节 按大小分选和分级	(164)
第三节 按重量、相对密度、形状和颜色因素分级	(172)
第六章 离心分离和旋液分离	(181)
第一节 离心分离理论	(181)
第二节 沉降式离心机	(196)

第三节	过滤式离心机	(201)
第四节	分离式离心机	(211)
第五节	旋液分离	(217)
第七章	压榨	(225)
第一节	压榨理论	(225)
第二节	间歇式压榨机	(236)
第三节	连续式压榨机	(240)
第八章	沉淀分离	(251)
第一节	溶剂沉淀	(251)
第二节	盐析沉淀	(255)
第三节	沉淀剂沉淀	(261)
第四节	等电点沉淀和变性沉淀	(265)
第五节	絮凝分离	(270)
第九章	界面力分离	(286)
第一节	泡沫分离理论	(286)
第二节	泡沫分离过程	(297)
第三节	吸附分离理论	(306)
第四节	吸附分离过程	(320)
第十章	结晶	(335)
第一节	结晶基本原理	(335)
第二节	结晶方法与结晶设备	(349)
第三节	结晶操作的基本计算	(358)
第四节	食品工业中重要的结晶分离过程	(360)
第十一章	浸提	(371)
第一节	浸提理论	(371)
第二节	浸提流程与浸提装置	(379)
第三节	浸提操作计算	(385)
第四节	浸提在食品工业中的应用	(390)
第十二章	离子交换	(393)
第一节	离子交换的基本原理与离子交换树脂	(396)
第二节	离子交换的基本概念	(404)
第三节	离子交换的操作过程、装置及其设计原理	(417)
第四节	离子交换在食品及其有关工业中的应用	(437)
第十三章	膜分离	(442)
第一节	膜分离的分类与特点	(442)
第二节	反渗透与超滤	(447)
第三节	电渗析	(492)
第四节	膜分离在食品工业中的应用	(512)

第十四章	工业色谱分离技术	(524)
第一节	大型工业色谱分离过程原理.....	(526)
第二节	工业色谱分离工艺过程与设备.....	(537)
第三节	色谱分离技术的应用.....	(543)

第三篇 食品重组技术

第十五章	混合	(554)
第一节	基本理论.....	(554)
第二节	混合过程特性和混合器相似放大.....	(563)
第三节	食品粉粒料的混合器.....	(572)
第十六章	搅拌(液态食品)	(586)
第一节	液状食品搅拌装置.....	(586)
第二节	液体食品搅拌的功率.....	(592)
第三节	搅拌槽内的传热和传质.....	(597)
第四节	搅拌设备的相似放大.....	(599)
第十七章	捏和	(605)
第一节	捏和操作的基本理论.....	(605)
第二节	食品捏和机.....	(611)
第十八章	成型	(618)
第一节	压模成型.....	(618)
第二节	挤模成型.....	(631)
第三节	注模成型与制膜成型.....	(639)
第四节	喷丝与滴丸法造型.....	(646)
第五节	包衣成型.....	(652)

第四篇 现代典型食品分离重组工程范例

第十九章	新生婴儿配方乳粉分离重组工程	(656)
第一节	牛乳与人乳的成分比较.....	(657)
第二节	牛乳酪蛋白的分离.....	(660)
第三节	乳清蛋白的改性.....	(665)
第四节	免疫球蛋白及生理活性成分的提取分离.....	(670)
第五节	新生婴儿配方乳重组技术.....	(675)
第二十章	甲壳素的分离修饰及其在工业上的重组应用	(679)
第一节	甲壳素的结构与性质.....	(679)
第二节	甲壳素的分离.....	(683)
第三节	甲壳素的改性.....	(695)
第四节	重组应用.....	(701)
第二十一章	制粉工程中的分离重组技术	(710)

第一节	小麦制粉的分离工程技术·····	(711)
第二节	玉米制粉的分离工程技术·····	(720)
第三节	谷物蛋白质的分离提取技术·····	(723)
第四节	玉米、小麦淀粉的分离技术·····	(727)
第五节	小麦深度加工技术·····	(729)
第六节	制粉工程中的重组应用技术·····	(731)
第二十二章	高效天然抗氧化剂的提取分离及在耐藏油脂制品中的 重组工程技术·····	(738)
第一节	天然抗氧化剂的原料来源及分子结构特点·····	(739)
第二节	天然抗氧化剂的提取分离技术及实际范例·····	(743)
第三节	抗氧化剂应用的理论基础·····	(749)
第四节	天然抗氧化剂在耐藏油脂制品中的重组应用·····	(752)
第二十三章	分离精制甜菊苷及其作为甜味剂重组低糖食品·····	(761)
第一节	甜菊苷的浸出·····	(761)
第二节	甜菊叶浸出液的澄清·····	(765)
第三节	甜菊叶浸出液絮凝处理后的过滤·····	(771)
第四节	甜菊苷的吸附和解吸·····	(773)
第五节	甜菊苷解吸液的离子交换·····	(776)
第六节	甜菊苷的浓缩和干燥·····	(779)
第七节	甜菊苷重组各类食品·····	(782)
第二十四章	大豆多肽的提取及重组功能性食品·····	(786)
第一节	大豆多肽的原料及其预处理·····	(786)
第二节	大豆蛋白质的酶解·····	(790)
第三节	大豆多肽的物化性质及生理功能·····	(797)
第四节	大豆多肽的应用及重组食品·····	(805)

绪 言

在人类食用农产、林产、畜产和水产食物的早期，分离重组技术就已出现，只不过是简单、初级的分离和重组，为的是使食物易于成型，便于进食，宜于咀嚼，利于消化。稻谷脱壳去糠，小麦磨粉去麸，水果剥皮去核，小麦分出面筋、淀粉，牛奶分出奶油、乳酪，便是原始简单分离的例子。蔬菜、肉类加盐制作腌菜、腌肉，面粉加糖制作焙烤食品，便是原始简单重组的例子。简单分离重组技术历史是漫长的。在漫长历史中，虽然技术上也有很大进步，但未见技术运用在广度、深度和精度上有引人注目的新突破。香肠是一种名贵的肉食品，德国人认为香肠是他们的一大发明。其实香肠的发明者是古代美索不达米亚的苏美尔人，用的是简单的分离重组技术，而德国人运用的也不过是复杂一点的分离重组技术，做成具有各种风味的香肠，最著名的品种有慕尼黑白肠、吕贝克小香肠、图林根红肠和纽伦堡香肠等。虽然品种达 1500 种之多，技术上说到底还是属于简单的分离重组。

历来，食品的本质要素被认为：一是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，亦即生物学和正常生理学所必不可少的要素；二是对色、香、味、形和质构的享受，从而引起食欲上的刺激和满足，亦即心理学上所必不可少的要素。这两项要素也有称之为第一、第二两项功能。社会历史发展到今天，这两项本质要素丝毫没有弱化。相反，随着现时人们生活的富有、闲适和享乐，人们对这两项本质要素期盼全面加强，尤其对第二项要素，要求愈来愈高。

自然界中天然生物色素、香料、调味料的资源极其丰富。从这些资源中提取分离这些物质作为添加剂掺合到工业食品中去，由于它们一般具有一定的敏感性，分离和重组技术就变得复杂化，就要采用高新分离重组技术。这是色素、香料、调味料开发中所面临的问题。天然食物在加工中原有色、香、味的保留也涉及新的分离重组技术。例如，对于特种风味的名贵果品的果汁加工，值得以昂贵代价采用新式的冷冻浓缩分离方法。像苹果浓缩汁那样不是什么十分名贵的果汁，它的天然香气令人垂涎不已，现代技术也不惜一定代价先分离回收而后重组的方法。天然色确实宝贵，它不仅满足人们心理美感，对于处于现代文明时代的消费者，它还起着解除他们恐惧现代文明病的心理作用。人们为了制造保留天然绿色的优质大蒜粉，较早以前就采用了冷冻干燥的分离方法。现在，为了进一步保留天然绿色，又在冷冻干燥的预冻阶段，结合了冷冻粉碎这一步。

且不论食品的包装，就说食物的形，它在现代人们饮食生活中愈来愈重要，愈来愈讲究。造形绝不仅仅是为了调理、食用方便，更重要的是为了满足美感的心理要求，为了礼仪、民俗上的需要。与造形技术有关的是食物的质构 (texture)，它是食物在口腔中的触觉性质，包括粒感、润滑性、粘性、硬度、弹性、可塑性等的力学性质。形和质构结合在一起即为狭义的“形质”。要塑造特定形状并具特定质构性质的食品，关键在于有可

供选择的多种性能的原材料和科学、精确的配方，以及合适的造形手段，归根结底是一个复杂的分离重组问题。这样，所需的面粉就不是过去那种面粉，而是现代面粉厂提供的经过复杂分离重组，具有各自特有性能，适用于特定用途的系列等级专用面粉。儿童的嘴巴非常敏感，知道哪种巧克力好吃，吃起来润滑细腻，但不晓得现代食品工业是如何采用超微粉碎技术来精磨，把所有的成分精磨到巧克力质构所要求的精度。食品的重组光是确定配方本身按现代要求就相当复杂。设想要考虑多少种原材料，多少种其中所含的营养素。如果作为线性规划问题求解，以产品品质（简单一点，仅考虑造形和质构）为考察指标，由于每种营养素都有其最大值或最小值（有时两者同时）约束条件，原料重组配比的线性规划问题不可能有可行解。这样就必须寻求附加措施，例如额外添加强化措施，问题就变得更复杂。除借助电子计算机外，别无办法。

时代发展到今天，对食品的本质要素还不只止于上述两项及其强化。人们生活的富有、闲适和享乐必然伴随对生命的重视，对健康、长寿的追求，对新一代优生优育的关怀。另一方面，社会文明和科技进步也给人类带来生存环境日益恶化，空气和水源严重污染以及多种恶性疾病发病率升高等。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”的食品，寻求不同年龄群在特殊生理条件下能延年益寿、顺利康复或健康成长的特殊食品，寻求人们在特殊生活方式（休闲、旅游、体育、登山、宇航、娱乐等）下能耐疲劳、抗骚扰、善机动、敏应变的特需食品等，便成为当今和未来食品研究所追求的目标，以及食品生产所竞相争夺的热门行业。这些特殊食品除了毫无例外仍需具备或甚至必须强化上述第一、第二功能之外，还必需具备为满足特殊要求的特定功能，有人称此为食品的补充功能，或称第三功能，而具有此补充功能的食品则称为功能性食品。

全球功能性食品生产热潮的兴起使食品生产的技术含量大大提高，高新技术的运用更显频繁，分离重组技术更形复杂。要生产功能性食品，首先要研究、生产作为它的关键成分的功能因子材料。有时这就成为从食品工业中派生出来的独立、特殊工业部门。由于这些特殊材料或具有生理活性，或具有生物活性，或有时本身就是有生命的（如活菌），因此从一定资源提取这些材料，采用一般的分离方法有时就不见得奏效，多半要依靠高新的分离技术。同样，添加这些功能因子材料组成功能性食品，采用一般的重组方法有时也不见得奏效，多半要依靠新的重组方法。

随着科学研究的不断深入，被揭示出的功能因子材料将愈来愈多。就目前而论，业已确定的功能因子材料主要可分 9 大类：

- (1) 活性多糖；
- (2) 功能性单糖、低聚糖、多元糖醇等功能性甜味料；
- (3) 多不饱和脂肪酸、油脂替代品、磷脂、胆碱等功能性油脂；
- (4) 自由基清除剂；
- (5) 维生素 A、维生素 E、维生素 C 等；
- (6) 硒、锗、铬、铁、铜、锌等微量活性元素；
- (7) 谷胱甘肽、降血压肽、促进钙吸收肽、易消化吸收肽、免疫球蛋白等肽和蛋白质；

(8) 乳酸菌类特别是双歧杆菌；

(9) 其他活性物质。

以上 9 类功能因子材料的具体品种约有 100 种之多。可以想象由这些材料掺入而成的功能性食品将不计其数。每种这样食品及其相应功能因子材料的分离重组制造工程，多少都有它一定的难度。这里只要简要说明一下从牛乳制造母乳化乳粉（详见第 19 章）作为例子，就足以说明分离重组的复杂性。

对于婴儿，母乳是最为营养的食品。但是，由于各种原因，任何时候用母乳替代品喂养总是实际存在的。母乳替代品中，以牛乳较为理想，为举世长期公认。但牛乳与母乳毕竟有很大差异，尤其是两者在蛋白质组成和蛋白质分子结构上差异更为显著。后者是两乳引起婴儿不同生理效应的主要原因。主要表现在：

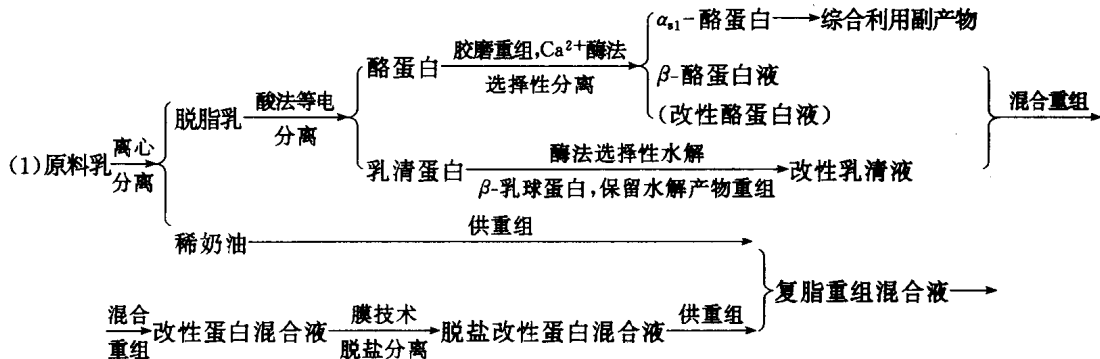
(1) 牛乳中含有 7 倍于母乳的酪蛋白。其中， α_{s1} -酪蛋白的含量，牛乳中很丰富，母乳中为痕量； β -酪蛋白的含量，牛乳中也很丰富，母乳中则是主要的酪蛋白成分。在婴儿胃腔内， α_{s1} -酪蛋白很难消化，而 β -酪蛋白较易消化。这是为什么婴儿食用牛乳出现消化障碍的主要原因。

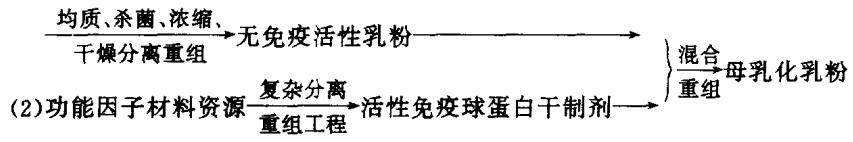
(2) 牛乳乳清中含有大体上与母乳相等含量的蛋白质。但牛乳所含以 β -乳球蛋白为主， α -乳白蛋白较低，而母乳所含主要为 α -乳白蛋白，几乎不含 β -乳球蛋白。 β -乳球蛋白是引起变态反应的原物质，这是婴儿食用牛乳可能出现过敏反应的主要原因。

(3) 牛乳含有明显较母乳中为少的免疫球蛋白。免疫球蛋白在婴儿肠道内存留，不仅保护了肠粘膜不致受微生物侵蚀，而且还防止异蛋白的吸收，所以它是一种必要的抗体，目前已被确认为一种功能因子材料。但是免疫球蛋白对温度十分敏感，温度过高，活性将消失。因此将牛乳改性加工制造母乳化乳粉时，要想保留牛乳中少量活性免疫球蛋白是不可能的。

主要差异如上所述，此外在碳水化合物、脂肪、矿物质等方面也有差异，但不是关键性的差异。

针对牛乳和人乳上述的主要差异，分离重组技术旨在尽量消除或转化不利成分，保留或添加有效成分。由牛乳制取母乳化乳粉的主要分离重组步骤参阅下图。由图可见此项分离重组工程的复杂性。





第一篇

食品粉碎和微粒化技术

第一章 粉 碎

粉碎是用机械力的方法克服固体物料内部凝聚力达到破碎的单元操作。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粉的操作称为磨碎或研磨,不过习惯上两者又统称粉碎。

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 原料粒度在 40~150mm 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,成品粒度在 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,例如面粉是以粉末形式使用的,巧克力等食品的生产需将各种配料粉碎至足够细小的颗粒,才能保证物料的统一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,例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食品的生产需要,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。

第一节 粉碎理论

一、粉碎物料的粒度与粒度分布

(一) 粒度

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。

以表面积为基准的名义粒度 d_s ，是指外表总面积等于该颗粒表面积的球体直径。假设颗粒表面积为 S ，则

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

以体积为基准的名义粒度 d_v ，是指总体积等于该颗粒体积的球体直径。假设颗粒体积为 V ，则

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

d_v 是表示粉碎物颗粒最常用的代表性尺度，又称为颗粒的当量直径 d_p 。

由于物料的粉碎过程比较复杂，粉碎物颗粒形状通常并非球形，有时变化还很大。为此特引入球形度 φ_s 来表示颗粒形状偏离球形的程度，定义为同体积球体表面积与颗粒实际表面积的比值。根据式 (1-1) 和式 (1-2) 可知：

$$\varphi_s = \frac{\pi d_v^2}{\pi d_s^2} = \frac{d_v^2}{d_s^2} = \frac{6}{d_v} \cdot \frac{d_v^3}{6d_s^2} = \frac{6}{d_v} \cdot \frac{V_p}{S_p}$$

即
$$\varphi_s \cdot d_v = \frac{6V_p}{S_p} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表明，球形度与颗粒的比表面积 ($\frac{V_p}{S_p}$) 有关， φ_s 值越小，则比表面积越大。对于很多粉碎物物料来说，球形度常在 0.6~0.7 之间；对于球形颗粒， $\varphi_s=1$ ；对于立方体形颗粒来说， $\varphi_s = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}} = 0.806$ 。

立方体和球形一样都是规则的形状，为了表示颗粒形状偏离这些规则形状的程度，也有采用形状系数的概念。假设任意选取颗粒的某一代表性尺寸 L ，则必有：

$$V_p = aL^3 \quad S_p = 6bL^2 \quad (1-4)$$

这里， a 和 b 是与颗粒几何形状及代表性尺寸的选择有关的系数。对于立方体，若选择边长为代表性尺寸，则 $a=b=1$ 。对球体，若选择直径为代表性尺寸，则 $a=b=\frac{\pi}{6}$ 。将式 (1-4) 中两式相除可得：

$$\Phi = \frac{a}{b} = \frac{L}{6} \cdot \frac{V_p}{S_p} \quad (1-5)$$

Φ 即是颗粒根据代表性尺寸 L 的形状系数。由此可见，形状系数不仅与比表面积有关，而且与代表性尺寸的选择有关。如果按通常情况选取 $L=d_v$ ，则形状系数 Φ 为球形度 φ_s 的倒数。对于球体， $\Phi=1$ ；对于其他形状，则 $\Phi>1$ 。

(二) 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:

$$f(d) = \frac{dA(d)}{d(d)} \quad (1-6)$$

频率分布函数也有粒数的 (f_N)、表面积的 (f_S) 和体积的 (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} , 则有:

$$\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f(d)d(d) = 100\% \quad (1-7)$$

粉碎物颗粒的粒度分布可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通过数理统计方法综合成粒度分布函数式。用于固体粉碎的粒度分布函数有多种表示法, 但各有其适用的特殊场合。

对数正态分布函数, 近些年来逐渐被采用, 其表达式为:

$$f_N(d) = \frac{d_N}{d(d)} = \frac{1}{d\delta_G\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\lg d - \lg d_{GM})^2}{2\delta_G^2}\right] \quad (1-8)$$

式中包含两个参数, d_{GM} 为几何平均粒度, δ_G 为几何标准差。

平方根正态分布函数, 形式上与对数正态分布函数相似, 唯以 \sqrt{d} 代替 $\lg d$ 而已。其表达式为:

$$f_N(d) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}d\delta_G} \exp\left[-\frac{(\sqrt{d} - \sqrt{d_{GM}})^2}{2\delta_G^2}\right] \quad (1-9)$$

罗森-拉姆勒 (Rosin-Rammler) 分布函数, 这是使用最广泛的经验分布函数式, 表达形式为:

$$R_d = 100 \cdot \exp\left[-\left(\frac{d}{d_{RM}}\right)^n\right] \quad (1-10)$$

式中 R_d —— 粒度大于 d 的物料体积 (或质量) 百分率

d_{RM} —— 颗粒的罗拉平均粒度

n —— 常数

罗拉平均粒度 d_{RM} 的定义是大于此粒度的物料体积或质量占总体积或总质量的百分数为 36.8%。

(三) 平均粒度

平均粒度有各种表示方法, 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的不同, 而所有方法则有算术平均、几何平均和调和平均等数种。表 1-1 表示常见的几种平均粒度。

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大的粒度。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 $d_{AM} > d_{GM} > d_{HM}$ 。

以上 3 种平均粒度都是直接按粒度本身进行平均的。如果先用算术平均的方法求取颗粒的平均表面积, 再按此表面积来计算粒度, 即为面积平均粒度 d_{SM} , 它是反映颗粒平

均表面积的一种粒度。另外，还有体积平均粒度 d_{VM} ，计算方法相同，只是基准取体积而已，这是反映颗粒平均体积的一种粒度表示法。

调和平均粒度是反映颗粒比表面积平均值的粒度。如果以颗粒总体的平均表面积和平均体积为依据，即得体面平均粒度或沙得（Sauter）平均粒度，其定义是：

$$d_{VS} = \frac{d_{VM}^3}{d_{SM}^2} \quad (1-11)$$

沙得平均粒度是从另一方面反映颗粒比表面积，在颗粒产品粒度分析上已得到广泛的应用。

表 1-1 几种常见的平均粒度计算法

平均粒度	基准	平均方法	数学表达式
算术平均 (d_{AM})	粒径	算术	$d_{AM} = \frac{\sum d \cdot f_N(d) \cdot \Delta d}{100}$ (1-12)
几何平均 (d_{GM})	粒径	几何	$d_{GM} = \sqrt[100]{d_1^{f_N(d_1)\Delta d_1} \cdots d_n^{f_N(d_n)\Delta d_n}}$ (1-13)
调和平均 (d_{HM})	粒径	调和	$d_{HM} = \frac{100}{\sum \frac{1}{d} \cdot f_N(d) \cdot \Delta d}$ (1-14)
面积平均 (d_{SM})	面积	算术	$d_{SM} = \frac{\sqrt{\sum d^2 \cdot f_N(d) \cdot \Delta d}}{100}$ (1-15)
体积平均 (d_{VM})	体积	算术	$d_{VM} = \frac{\sqrt[3]{\sum d^3 \cdot f_N(d) \cdot \Delta d}}{100}$ (1-16)
沙得平均 (d_{VS})	体积面积	算术	$d_{VS} = \frac{\sum d^3 \cdot f_N(d) \cdot \Delta d}{\sum d^2 \cdot f_N(d) \cdot \Delta d}$ 或 $\frac{(d_{VM})^3}{(d_{SM})^2}$ (1-17)

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，如果通过一次粉碎完成，则粉碎比太大，设备利用率低。故通常分成若干级，每级担负一定的粉碎比。这时可用总粉碎比来表示，它是物料经几道粉碎步骤后粉碎比的总和。

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，如图 1-1 所示。

(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到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。

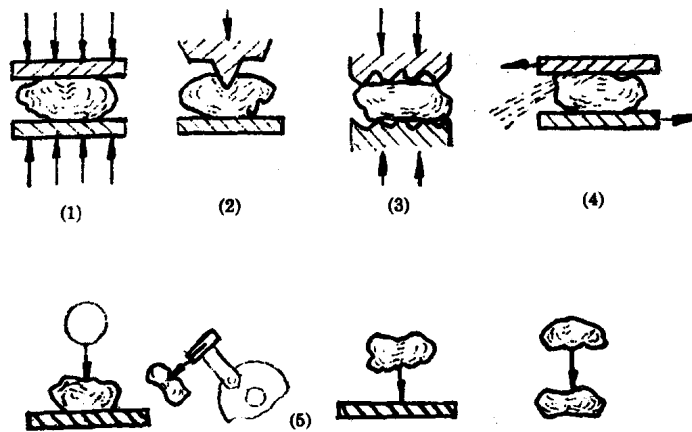


图 1-1 粉碎的基本方法

(1) 压碎 (2) 劈碎 (3) 折断 (4) 磨碎 (5) 冲击破碎

(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 硬度是根据物料弹性模数大小来划分的性质，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的大小来划分的性质，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，则裂缝末端的应力集中就越容易解决。

对某种具体的物料来说，上述 4 种力学特性之间有着内在的联系，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大。

选择粉碎方法时，须视粉碎物料的物化性质与所要求的粉碎比而定，尤其是被粉碎物料的机械性质则影响更大，其中物料的硬度和破裂性更居首要地位。对于特别坚硬的