

郑裕国 薛亚平 金利群 等编著

生物加工 过程与设备



Chemical Industry Press



化学工业出版社
现代生物技术与医药科技出版中心

生物加工过程与设备

郑裕国 薛亚平 金利群 等编著



化学工业出版社

现代生物技术与医药科技出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

生物加工过程与设备/郑裕国等编著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 3
ISBN 7-5025-5293-6

I. 生… II. 郑… III. ①生物工程-化工过程
②生物工程-化工设备 IV. Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 020321 号

生物加工过程与设备

郑裕国 薛亚平 金利群 等编著

责任编辑: 侯玉周

文字编辑: 孔 明

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 关 飞

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
现代生物技术与医药科技出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 32 $\frac{3}{4}$ 插页 1 字数 814 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5293-6/Q·86

定 价: 66.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

生物技术是探索生命现象和生物物质的运动规律,并利用生物体的机能或模仿生物体的机能进行物质生产,为社会服务的一门技术,是21世纪最活跃、发展最迅速的科学技术之一,它将为解决人类面临的能源、资源、健康、环境、粮食等问题开辟新的途径,对促进医药、食品、化工、材料、农牧渔业、环境保护等国民经济重要领域的发展有着举足轻重的作用。近年来,人们已经认识到现代生物技术的发展离不开化学工程技术,如生物质原料的处理、生物反应器的设计、生物产物的分离纯化等都会用到化学工程的原理和方法及技术,由此,结合生物技术和化学工程的生物加工过程应运而生。生物技术发展的最终目标是造福人类,取得相应的经济效益和社会效益,因此,随着生物技术的迅速发展,作为生物技术实现产业化的关键技术之一——生物加工过程与设备的研究开发日益受到各方面的重视和关注,已成为生物技术的一个十分重要的领域。

生物技术是国家重点发展的高新技术,国内的许多高校都设立了生物工程专业,生物工程专业是该专业的一门必修课。尽管,现代社会的信息来源具有多样性,但教材和参考书仍然是学生获得知识和教师传授知识的良好载体。编写本书的目的之一是为生物工程、生物技术、食品工程、制药工程等专业提供一本实用的教材和参考书。

近年来,生物工程技术已经取得了令人瞩目的巨大成就和发展,与此相对应,生物加工过程与设备的技术进步也日益明显。为进一步促进生物加工过程与设备的发展,满足生物工程技术的教学科研和产品开发生产的需要,本书对国内外生物加工过程与设备的基本内容和最新发展做了阐述和总结。愿本书能对我国的生物加工产业的发展有积极作用。

本书由郑裕国、薛亚平、金利群、张勇、王志江、郑仁朝、张建芬、廖春燕、董华平、卢志明等同志编写,研究生徐建妙、徐亚蓉、吴明火、陈静、蔡谦为本书查阅了资料,王文峰、程建、屠国根、任小景等为本书绘制了全部插图。在全书的编写过程中,得到了中国工程院院士、浙江工业大学校长沈寅初教授的悉心指导和热情鼓励,也得到了浙江工业大学领导和教师的大力支持,还得到了浙江工业大学绿色化学合成技术国家重点实验室培育基地的关心和支持。在全书的构思、编写、修改、审阅、出版等众多环节中,得到了化学工业出版社的大力支持和指导。在此,编者对所有关心、指导、帮助和支持本书出版的前辈、同仁和朋友们表示深切的谢意。

由于编者的水平和经验有限,书中难免存在不当和遗漏之处,敬请读者批评和指正。

编者

2004年春于浙江工业大学·杭州

内 容 提 要

本书以进行生物加工过程分析和设备设计与选型的需要为目的,系统阐述了生物加工过程的基本原理,对生物工程设备的作用、设计计算、选型和结构特点进行了详细讨论,内容包括在生物工程技术中从原料处理、生物反应到生物产品提取纯化等一系列操作过程与设备。本书力求理论与实践密切结合,突出重点,并反映生物加工过程与设备的国内外最新进展。

本书可作为高等院校生物工程、生物技术、食品工程、制药工程等专业的教材和教学参考书,也可供广大从事生物、制药、食品、发酵、化工、环境等领域的科技、开发、管理的专业人员作为生产、设计和科研的参考书。

目 录

第一章 生物质原料处理过程与设备	1
第一节 生物质原料筛选与分级.....	1
第二节 生物质原料的粉碎.....	6
第三节 生物质原料固体间的混合	20
第二章 生物细胞培养基制备过程与设备	24
第一节 液体培养基的灭菌	24
第二节 淀粉质原料的蒸煮与糖化	34
第三节 纤维素和半纤维素的水解	44
第四节 糖蜜原料的稀释与澄清	51
第五节 啤酒生产中麦芽汁的制备设备	54
第六节 淀粉水解制糖	60
第七节 固体培养基制备	67
第三章 物料输送过程与设备	73
第一节 液体输送设备	73
第二节 气体输送设备	79
第三节 固体输送设备	83
第四章 空气供给工程	102
第一节 空气除菌过程与设备.....	102
第二节 生物加工过程的空气调节.....	124
第五章 生物反应器设计基础	141
第一节 生物反应过程模型简介.....	141
第二节 生物反应过程的剪切力.....	147
第三节 生物反应器的传质问题.....	150
第四节 生物反应器的混合.....	156
第五节 生物反应器的操作方式.....	159
第六章 生物反应器结构与设计计算	168
第一节 机械搅拌式生物反应器.....	168
第二节 气升式生物反应器.....	177
第三节 鼓泡塔生物反应器.....	184
第四节 膜生物反应器.....	191
第五节 酶生物反应器.....	200
第六节 固定化生物反应器.....	206
第七节 固态发酵生物反应器.....	213
第八节 动物细胞培养生物反应器.....	229
第九节 植物细胞培养生物反应器.....	238

第十节 微藻培养生物反应器·····	244
第十一节 嫌气发酵生物反应器·····	249
第七章 生物反应器的放大与控制 ·····	259
第一节 生物反应器的放大·····	259
第二节 生物反应器的参数检测·····	264
第三节 控制理论与应用·····	281
第八章 细胞破碎与料液分离过程设备 ·····	286
第一节 细胞破碎设备·····	286
第二节 固液分离设备·····	288
第三节 膜分离技术与设备·····	302
第九章 萃取过程与设备 ·····	313
第一节 液-液萃取分离过程与设备·····	313
第二节 双水相萃取·····	322
第三节 固-液萃取方法与设备·····	330
第四节 超临界萃取过程与设备·····	334
第十章 离子交换、吸附与色谱分离设备 ·····	342
第一节 离子交换过程原理与设备·····	342
第二节 吸附过程原理及设备·····	360
第三节 色谱原理与设备·····	372
第十一章 蒸发与结晶 ·····	398
第一节 蒸发·····	398
第二节 结晶·····	415
第十二章 蒸馏过程与设备 ·····	424
第一节 蒸馏·····	424
第二节 分子蒸馏·····	442
第三节 水蒸气蒸馏·····	447
第十三章 干燥过程与设备 ·····	458
第一节 气流干燥·····	458
第二节 喷雾干燥·····	464
第三节 沸腾干燥与沸腾造粒干燥·····	472
第四节 真空干燥和真空冷冻干燥·····	477
第十四章 生物工程压力容器 ·····	485
第一节 概述·····	485
第二节 压力容器的材料·····	488
第三节 内压薄壁容器设计·····	494
附录 ·····	508
参考文献 ·····	511

第一章 生物质原料处理过程与设备

很多生物工程产品是以生物质为原料的，如柠檬酸发酵用薯干作为原料，酒精发酵以玉米或薯干作为原料，氨基酸发酵以玉米或大米作为原料。这些原料在进行生物反应之前，需要作预处理，包括分级、除杂、粉碎等。生物质原料的预处理是生物加工的第一步。

第一节 生物质原料筛选与分级

生物加工原料在很多情况下来源于植物，属生物质原料，如植物的块根和块茎以及秸秆等。这些原料在收获、贮藏、运输等过程中，往往会混入沙土、石子甚至金属等杂物。工厂在进行生产前，必须先将原料中混杂的杂物除去。因为，杂物特别是铁片、石子等混入原料，会给后续加工带来麻烦，在原料的粉碎过程中，容易使粉碎机的筛板磨损，使机器发生故障，机械设备的运转部位由于磨损而损坏；这些杂物带入到产物的提取分离过程中，如蒸馏分离，有些杂质会在蒸馏塔中沉积下来，使塔板的溢流管发生堵塞现象；还有些杂质会使醪泵、研磨机等设备的内部机械零件遭到损坏，严重影响正常生产。有时遇到有大量或大块的夹杂物时，甚至会堵塞阀门、管路和泵，使生产停顿。此外，杂质存在也会对生产中的反应过程产生不良影响。所以在生产前，原料的除杂、筛选与分级处理是十分必要的。

一、筛选与分级设备

(一) 磁力除铁器

除铁的目的是将夹杂在原料中的小铁块、螺丝等金属杂物除去，因为这些金属混杂物若不加以清除，随原料进入机内，将会损坏机器，甚至引起粉尘爆炸事故，须在清理过程中用磁选设备除去。

磁选设备的主要部件是磁体。每个磁体都有两个磁极，其周围存在磁场。磁体分永久磁体和电磁体。谷物清理多采用永久磁体。磁场要有足够的磁场强度。

磁选设备分永磁溜管和永磁滚筒。

1. 永磁溜管

永磁溜管（见图 1-1）的永久磁铁装在溜管上边的盖板上。一般在溜管上设置 2~3 个盖板，每个盖板上装有两组前后错开的磁铁。工作时，原料从溜管上端流下，磁性物体被磁铁吸住。工作一段时间后进行清理，可依次交替地取下盖板，除去磁性杂质。溜管可连续地进行磁选。永磁溜管结构简单，不占地方。为了提高分离效率，应使流过溜管的物料层薄而均匀。

2. 永磁滚筒

永磁滚筒（见图 1-2）主要由进料装置、滚筒、磁芯、机壳和传动装置等部分组成。磁芯由锶钨铁氧体永久磁铁和铁隔板按一定顺序排列成 170°的圆

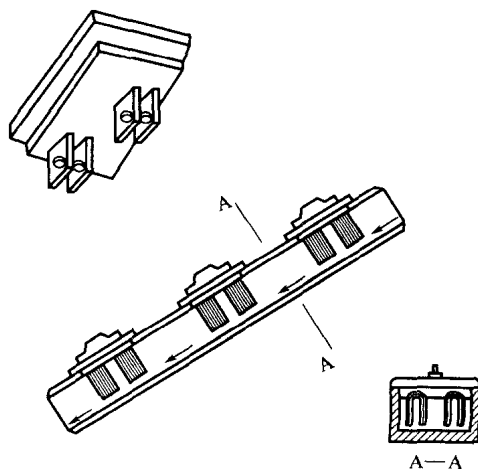


图 1-1 永磁溜管

弧形，安装在固定的轴上，形成多极头开放磁路。磁芯圆弧表面与滚筒内表面间隙小而均匀（一般小于 2mm），滚筒由非磁性材料制成，外表面敷有无毒而耐磨的聚氨酯涂料作保护层，以延长使用寿命。滚筒通过蜗轮蜗杆机构由电动机带动旋转。磁芯固定不动。滚筒质量轻，转动惯量小。永磁滚筒能自动地排除磁性杂质，除杂效率高（98%以上），特别适合于除去粒状物料中的磁性杂质。

为了有效地保障安全生产和产品质量，在原料加工的全过程中，凡是高速运转的机器全部应装有磁选设备。为了保证磁选效果，物料通过磁极面的速率不宜过快，永磁溜管的物料速率一般为 0.15~0.25m/s，永磁滚筒的圆周速率一般为 0.6m/s 左右。

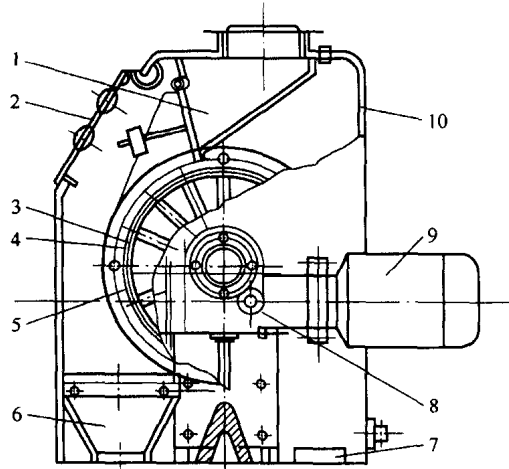


图 1-2 永磁滚筒的结构

- 1—进料斗；2—观察窗；3—滚筒；4—磁芯；5—隔板；
- 6—小麦出口；7—铁杂质收集盒；8—变速机构；
- 9—电动机；10—机壳

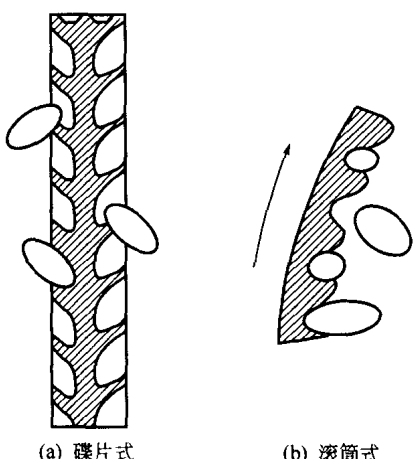


图 1-3 精选机工作示意

（二）精选机

颗粒状的生物质原料（如大麦、小麦）等必须进行精选和分级，其主要原理是按颗粒长度进行分级，以除去不必要的杂粒。常用的精选机有滚筒精选机和碟片精选机两种，其都是利用带有袋孔（窝眼）的工作面来分离杂粒，袋孔中嵌入长度不同的颗粒，带升高度不同而分离。结构示意图如图 1-3。

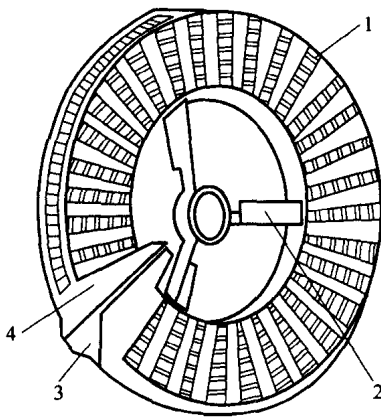


图 1-4 碟片的工作情况

- 1—碟片；2—叶片；
- 3—短粒出口；4—盛物槽

1. 碟片式精选机

在金属碟片的平面上制成许多袋形的凹孔，孔的大小和形式视除杂条件而定。碟片在粮堆中运动时，短小的颗粒嵌入袋孔被带到较高的位置才会落下，因此只要把收集短粒斜槽放在适当位置上，就能将短粒分出来，如图 1-4 和图 1-5 所示。

碟片精选机的特点是工作面积大，转速高，产量比滚筒精选机大；而且为除去不同品种杂质所需要的不同袋孔可用于同一机器中，即在同一台机器上安装不同袋孔的碟片；碟片损坏可以部分更换，还可分别检查每次碟片的除

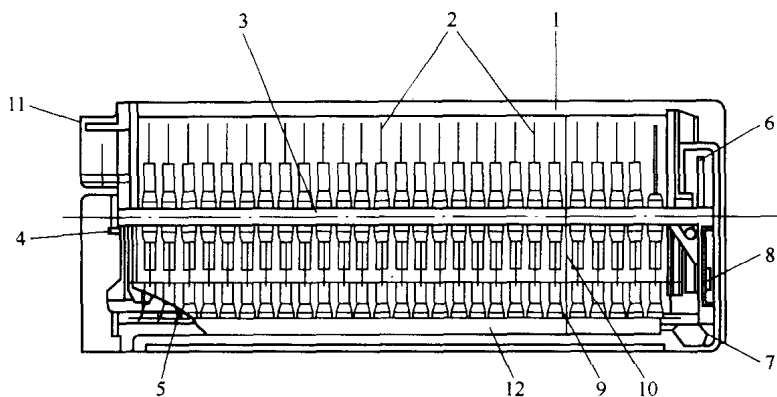


图 1-5 碟片精选机结构

1—进料口；2—碟片；3—轴；4—轴承；5—绞龙；6—大链轮；7—小链轮；
8—链条；9—隔板；10—孔；11—长粒物料出口；12—淌板

杂效果，因此碟片精选机是比较优越的精选机，缺点是碟片上的袋孔容易磨损，功率消耗较大。表 1-1 所示为碟片精选机的技术特性。

表 1-1 碟片精选机的技术特性

项 目 \ 型 号	FTT ϕ 25in $\times$ 27 个	FTT ϕ 25in $\times$ 23 个	项 目 \ 型 号	FTT ϕ 25in $\times$ 27 个	FTT ϕ 25in $\times$ 23 个
生产能力/ $t \cdot (24h)^{-1}$	140	120	除燕麦	70~75	70~75
碟片直径/mm	630	630	传动轮转速/ $r \cdot \min^{-1}$	175	17.5
碟片数目	27	23	所需功率/kW	1.9	1.5
碟片转速/ $r \cdot \min^{-1}$			外形尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)/mm	2200 $\times$ 872 $\times$ 853	1900 $\times$ 872 $\times$ 853
除荞麦	55~60	55~60			

注：1in=0.0254m。

2. 滚筒精选机

图 1-6 所示为滚筒精选机工作示意图。袋孔 2 是开在筛转圆筒 1 的内表面，长粒子大麦依靠进料位差和利用滚筒本身的倾斜度，沿滚筒长度方向流动由另一端流出，而短粒子大麦嵌入袋孔的位置较深，被带到较高位置而落入中央槽 4 之中由螺旋输送机 3 送出。根据滚筒转速差别又分为快速滚筒精选机和慢速滚筒精选机，两者结构基本相似，但由于高速时使颗粒的离心力增大，中央、斜槽和螺旋输送机位置应较低速的高。高速滚筒精选机和低速滚筒精选机技术特性举例列于表 1-2 中，作为参考。

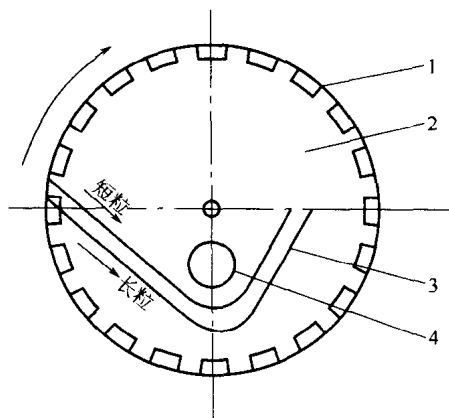


图 1-6 滚筒精选机工作示意

1—筛转圆筒；2—袋孔；
3—螺旋输送机；4—中央槽

表 1-2 滚筒精选机技术特性

技术特性	低速滚筒精选机	高速滚筒精选机	技术特性	低速滚筒精选机	高速滚筒精选机
从大麦中除荞麦时生产能力/ $kg \cdot h^{-1}$	1000	3000	轴转速/ $r \cdot \min^{-1}$	50	120
功率/kW	0.3	0.55	尺寸：长/mm	830	2853
圆筒直径/mm	600	600	宽/mm	640	640
圆筒长度/mm	2200	2000	质量/kg	300	350
筒转速/ $r \cdot \min^{-1}$	13	45			

此外低速滚筒精选机的安装应与水平线成 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 角，颗粒原料向出口运动速度约为 $0.03 \sim 0.05 \text{m/s}$ ，平均生产率为 $100 \sim 140 \text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ (m^2 为袋孔面积的单位)。而高速滚筒精选机可接近水平安装，其生产率可达 $500 \text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。

二、筛选设备

筛选是谷物等生物质原料清理除杂最常用的方法。筛面上配备适当的筛孔，使物料在筛面上作相对运动。

生产用的生物质原料大多数都是粉粒状的，例如各种谷物、大米、麸皮等。其中常含有各种杂质，如泥土、砂石、草籽、杂谷、金属等，可以先用筛子清除。为保证生产质量，生产过程又往往将粒度不同的物料加以分级，也可以要用筛子来完成。这两方面的操作都可称为筛选。筛选操作常常是将物料从筛的一端加入，并使其向筛的另一端移动，从而使尺寸小于筛孔的物料穿过筛孔落下，成为筛下物，而尺寸大于筛孔的物料经过筛面从筛的另一端引出。

筛选可以用人工的方法进行，但这时生产效率将会受到极大的限制。生物加工过程中的筛选操作都由筛选机械来完成。

筛选机械有很多种不同的构造，发酵工厂中常用的是振动筛和转筒筛。

振动筛是原料加工中应用最广的一种筛选与风选结合的清理设备，多用于清除小及轻的杂质。振动筛主要由进料装置、筛体、吸风除尘装置和支架等部分组成，如图 1-7 所示。

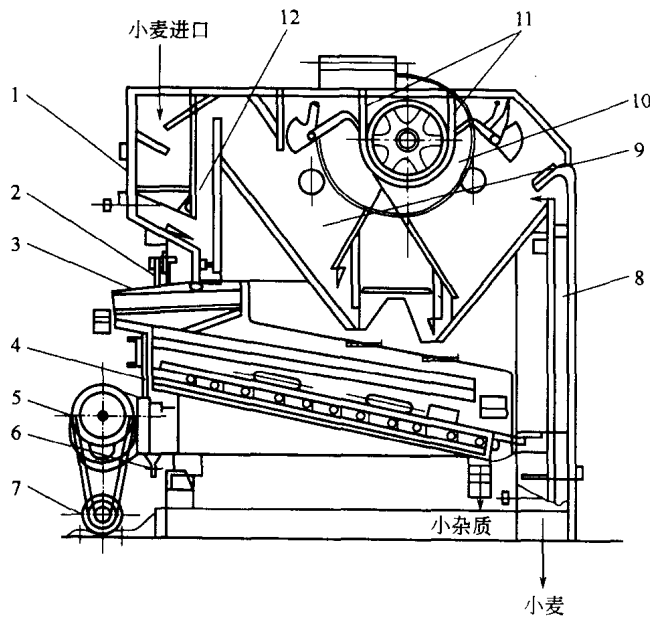


图 1-7 振动筛的结构

1—进料斗；2—吊杆；3—筛体；4—筛格；5—自衡振动器；6—弹簧限振器；
7—电动机；8—后吸风道；9—沉降室；10—风机；11—风门；12—前吸风道

进料装置的作用是保证进入筛面的物料流量稳定并沿筛面均匀分布，以提高清理效率。进料量可以调节。进料装置由进料斗和流量控制活门构成。按其构造有喂料辊和压力门进料装置两种。喂料辊进料装置需要传动，只有筛面较宽时才采用。压力门进料装置结构简单，操作方便，喂料均匀，特别是重锤压力门进料装置，动作灵敏，能随进料变化自动调节流量，故为筛选设备普遍采用。

筛体是振动筛的主要工作部件，它由筛框、筛子、筛面清理装置、吊杆、限振机构等组成。筛体内有三层筛面。第一层是接料筛面，筛孔最大，筛上物为大型杂质，筛下物为粮粒及大型杂物，筛面反向倾斜，以使筛下物集中落到第二层的过程中，筛条的棱对料产生切割作用，厚度约有筛孔的 1/4，一层料及其中的细粒被棱切割而被筛下。曲筛的分级粒度大致是筛孔尺寸的一半。但随着筛条棱的磨损，通过筛孔的粒度将减少。

振动筛是一种平面筛，常用筛子有两种：一种是由金属丝（或其他丝线）编织而成的；另一种是冲孔的金属板。筛孔的形状有圆形、正方形、长方形等。大麦粗选机用的是长方形的冲孔筛板。筛板开孔率一般为 50%~60%，开孔率越大，筛选效率越高，但开孔率过大会影响筛子的强度。目前使用的筛选机，筛宽在 500~1600mm 之间，振幅通常取 4~6mm，频率可在 200~650 次/min 范围内选取，其生产能力由下面公式决定

$$G=Bq \quad (1-1)$$

式中 B ——筛面的宽度，m；

q ——单位筛宽流量，kg/(m·h)；

如不知道 q 值，也可用下面近似公式计算生产能力

$$G=3600B_0hV_{cp}\varphi\rho \quad (1-2)$$

式中 B_0 ——筛面有效宽度，m，取 $B_0=0.95B$ ；

h ——筛面物料层厚度，m，取 $h=(1\sim2)d$ (d 为物料最大直径，m)；

V_{cp} ——物料沿筛面运动的平均速度，m/s，取 0.5m/s 以下；

φ ——物料松散系数，取 0.36~0.64；

ρ ——物料的密度，kg/m³。

生物加工厂如啤酒厂，常用的另一种筛是圆筒分级筛，用于大麦精选后的分级。根据大麦分级的要求，在圆筒筛上布置不同孔径的筛面，一般安排矩形孔筛子用 1mm 厚的钢板制作，筛孔长 25mm，宽 2.2~2.5mm，可以将大麦分成三级，即大麦腹径（颗粒厚度）为 2.5mm 以上，2.2~2.5mm 和 2.2mm 以下 3 种。前两种为制麦芽用，后者作饲料。有时根据具体情况可以多增加一种筛板。如原大麦较大时，可增设矩形孔 25mm×2.8mm；如原大麦较瘦小，可增设矩形孔 25mm×2.0mm，将大麦分成四级。

圆筒分级筛如图 1-8 所示。筛筒的倾斜角度为 3°~5°。筛筒直径与长度之比为 1:(4~6)，圆周速度约为 0.7~1.0m/s，速度太快，粒子反而难以穿过筛孔，使生产率下降。圆筒用厚 1.5~2.0mm 的钢板冲孔后卷成筒状筛，整个圆筒往往分成几节筒筛，布置不同孔径的筛面，筒筛之间用角钢连接作加强圈，如用摩擦传动则可作为传动的滚筒。圆筒用托轮支承在用角钢或槽钢焊接的机架上，圆筒一般以齿轮传动。筛分的原料由分设在下部的两个螺旋输送机分别送出，未筛出的一级大麦从最末端卸出。圆筒分级的优点是：设备简单，电动机传动方便。缺点是：筛面利用率小，仅为整个筛面的 1/5。圆筒分级筛的生产能力可用下面的经验公式计算

$$G=q\pi DL\varphi \quad (1-3)$$

式中 q ——单位筛面负荷量，kg/(m²·h)，大麦取 $q=450\sim550$ kg/(m²·h)；

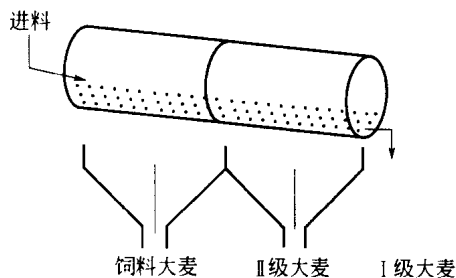


图 1-8 圆筒分级筛

D ——筛面直径, m;

L ——筛筒长度, m;

φ ——筛面有效系数, 取 $\varphi=1/4\sim 1/6$ 。

第二节 生物质原料的粉碎

在生物生产中, 为了加速后续的生物反应和化学反应等过程的反应速度, 对于使用的固体生物质原料, 常需将其粉碎。使大块固体物料破碎成小块物料的操作, 通常称为粉碎, 而使小块物料进一步粉碎为粉末状物料, 有时则称为磨碎或研磨, 很多情况下, 统称为粉碎。

在以固体生物质为原料的生物反应生产过程中, 对原料粉碎的效果好坏, 不仅直接反映出粉碎操作的合理性和经济性, 而且会间接影响到下一工序如蒸煮、浸出、水解(酸解或酶解)和发酵等的效果和效率。

生物工厂均采用机械粉碎的方法, 达到固体生物质原料粉碎的目的。

粉碎机械有多种类型, 但机械粉碎的工作原理主要有以下几种方式。

① 挤压粉碎。固体原料放在两挤压面之间, 当挤压面施加的挤压力达到一定值后, 物料即被粉碎。大块物料往往先以这种方式破碎。

② 冲击粉碎。物料受瞬时冲击力而被粉碎。这种方式特别适用于脆性物料的破碎。

③ 磨碎。物料在两相对运动的硬质材料平面或各种形状的研磨体之间, 受到摩擦作用而被研磨成细粒。这种方式多用于小块物料的细磨。

④ 劈碎。物体放在一带有齿的面和一平面间受挤压即劈裂而粉碎。

⑤ 剪碎。物料在两个破碎工作面间, 如同承受载荷的两支点(或多支点)梁, 除了在外力作用点受劈力外, 还发生弯曲折断。多用于较大块的长、薄、硬或脆性物料粉碎。

固体物料的粉碎, 可按粉碎物料和成品的粒度大小, 可作如下的分类。

① 粗碎。原料粒度范围为 $40\sim 1500\text{mm}$, 成品粒度约为 $5\sim 50\text{mm}$;

② 中、细碎。原料粒度范围为 $5\sim 50\text{mm}$, 成品粒度为 $0.1\sim 5\text{mm}$;

③ 微粉碎。原料粒度范围为 $5\sim 10\text{mm}$, 成品粒度 $<100\mu\text{m}$ 左右;

④ 超微粉碎。原料粒度范围为 $0.5\sim 5\text{mm}$, 而成品 $<10\sim 25\mu\text{m}$ 。

物料粉碎前后的粒度比称为粉碎比或粉碎度。如以 x 表示之, 则

$$x = \frac{d_1}{d_2} \quad (1-4)$$

式中 d_1 ——粉碎前物料的平均粒径, mm;

d_2 ——粉碎后物料的平均粒径, mm。

可见粉碎比表示粉碎操作中物料粒度变小的比例。磨碎时粉碎比较粗碎和中、细碎时为大。对于一次粉碎后的粉碎比, 粗碎约为 $2\sim 6$, 中、细碎为 $5\sim 50$, 磨碎为 50 以上。总粉碎比是表示经过几道粉碎步骤后的总结果。

粉碎物料时, 必须根据固体物料的物理性质、块粒大小、需要破碎或粉磨的程度, 选择适当的破碎方法。一般来说, 任何一种粉碎机往往利用几种破碎方式进行物料的粉碎。选择粉碎物料的方法, 必须根据物料的物理性质, 物料的大小, 粉碎的程度等, 应特别注意物料的硬度和破裂性。对坚硬的和脆性的物料, 挤压和冲击很有效。对韧性物料剪切力作用较好。对方向性物料则以劈碎为宜。但不论哪一种粉碎机, 很少单独使用其中的一种方法, 而是几种方法的组合, 使粉碎更加有效。

无论粉碎机械属哪种作用力形式，原料的性质如何及所需粉碎度怎样，都应符合下述一些基本要求。

- ① 粉碎后的物料颗粒大小要均匀；
- ② 已被粉碎的物块，须立即从轧压部位排除；
- ③ 操作能自动化，如能不断地自动卸料等；
- ④ 容易更换磨损的部分，在操作发生故障时，有保险装置使能自动停止；
- ⑤ 产生极少的粉尘，以减少环境污染及保障工人健康；
- ⑥ 单位产品消耗的能量要小。

下面介绍几种粉碎设备。

(一) 锤式粉碎机

锤式粉碎机是利用快速的锤刀对物料进行冲击粉碎，广泛用于各种中等硬度的物料，如甘薯、玉米等生物质原料的中碎与细碎作业，尤其适用于脆性物料。由于脆性物料抗冲击性较弱，因此，从工作原理来说，采用这种破碎方式非常合理。锤式粉碎机最大特点是具有很高的破碎比（达10~50）这是其他粉碎机不能比拟的。此外单位产量能耗低、构造简单、结构紧凑、生产能力高等都是锤式粉碎机的优点。因此，粉碎机在工业上获得广泛应用。但锤式粉碎机也存在一些缺点，如工作部件易于磨损，物料含水量过高（超过10%~15%）时，易于堵塞，因而维修工作量大。锤式粉碎机的结构如图1-9所示，它比较简单，更换锤片和筛面操作方便，但运转时震动声音较大，如果转子安装得平稳，则锤片运转较均衡。这种粉碎机适用于甘薯干等块状原料和野生植物原料的粉碎，操作要求低，较易把小块原料锤碎成细粉末，对原料品种变化的适应性也较强。

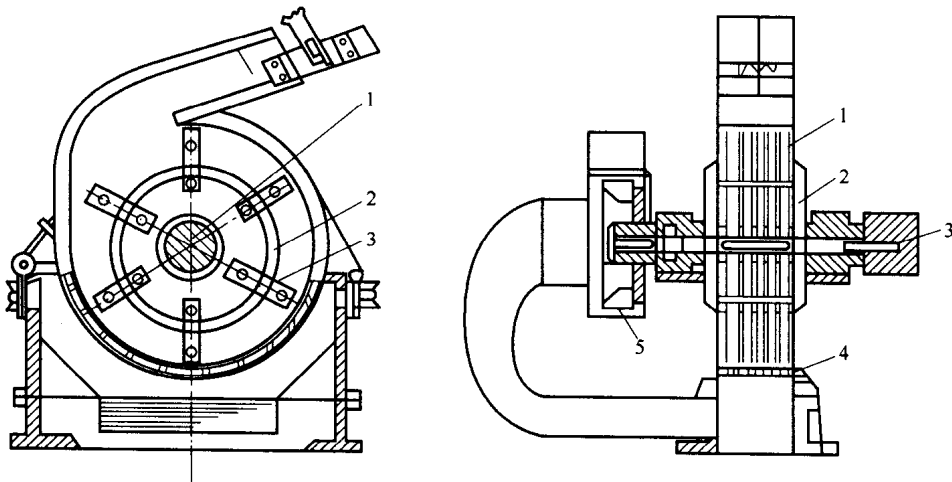


图 1-9 锤式粉碎机的一般形式

1—轴；2—转鼓；3—锤刀；4—栅栏；5—抽风机

锤式粉碎机内有一根水平轴，轴上装有一些圆盘，圆盘的周边安装着板状锤片（杆锤），周围有圆筒形外壳。外壳分为两部分，上部为有沟形的表面，下部则为有孔的筛板，以被粉碎的物料通过筛孔落下。这种设备的一般形式可以自制，轴的圆周线速达60~70m/s。锤式粉碎机的主要构件如下。

1. 锤刀

其主要部件是一个转动的圆筒，它装在轴上，主要是利用许多锤刀做圆周运动来锤碎原

料。锤刀的形式一般有矩形、带角矩形和斧形，用高碳钢片制成。矩形的锤刀具有可多次再用的优点，当一般的角被磨钝后，可以倒转换再用，直至四边角全部用遍为止。但装换时，应注意避免由于质量的不等而引起转子的不平衡。由于矩形锤刀有多次再用的优点，所以，粉碎一般原料时，多采用这种锤刀。但是对韧性较大的原料进行粉碎时，则采用斧形锤刀较适宜，由于斧形锤刀的重心偏于尖端，与同样质量的矩形锤刀相比较，斧形锤刀的打击粉碎力要大得多。如图 1-10 所示。

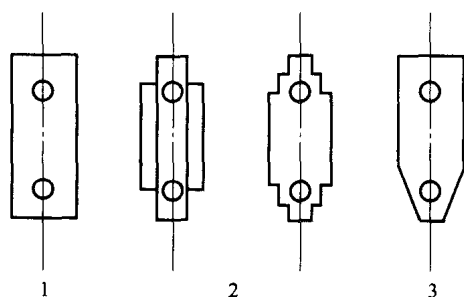


图 1-10 锤刀的形式

1—矩形；2—带角矩形；3—斧形

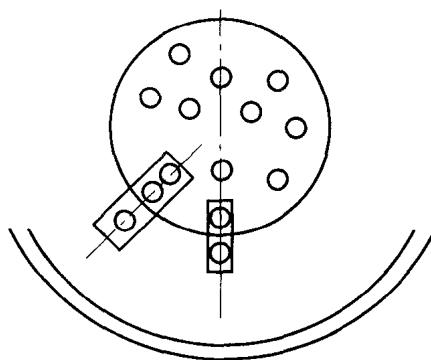


图 1-11 改进后的锤刀装置

原料的粉碎是由于锤刀的撞击作用，因此锤刀磨损甚速，经常要更换，否则会降低粉碎效果，而经常调换新的锤刀，则钢板耗用量大。为了充分有效使用锤刀，某厂对锤刀的装置进行改进，如图 1-11 所示，于圆形的转子距离中心轴不同的位置上，对称地开有许多孔，可把磨损后的锤刀的角切平，装在离中心轴较远的孔上。这样既保证了锤刀顶端到筛面的距离，也可节省制造新锤刀的钢材。

2. 筛面

用来控制粉碎程度，筛面采用铁板冲制。粉料通风的筛孔，孔径在 1.5~2.5mm 之间，许多酒精厂所采用的筛孔大小都在此范围内。提高粉碎机效率的方法，一般有下列常用的几种。

① 采用密闭循环法。为了减少磨损，能较快地把大小不同的物料颗粒分开，将没有达到规定的颗粒与已达到要求的细粉一起通过筛面，再在粉碎机外部用单独的筛子，把不合要求的物料分离开来，重新回到粉碎机中进行粉碎。如此密闭循环，可提高生产能力达 45%~70%。

② 增加吸风装置。增加吸风机后，可以加速粉料离开筛孔，把粉碎机内已经粉碎好的细粉抽出来，提高了粉碎机的工作效率。据某厂采用后的经验，安装了旋风分离器，可以提高粉碎机的生产能力大约 30% 左右，而电耗也大为降低。

③ 采用鳞状筛代替平筛。含水分较高的原料，会使粉碎带来困难，使锤式粉碎机的筛孔堵塞，粉碎效果显著降低，电耗也会增大，这时可采用湿式粉碎来解决此问题。在年产不同的工厂里，采用锤式粉碎机的数量也各有不同，产量大的工厂一般数量多些，这与动力大小也有关系。但是，必须同时设有两套，一套备用，轮流使用。

锤式粉碎机通常发生的不正常情况及其处理措施如下。

① 出现锤式粉碎机堵塞现象。其产生的原因可能有下面三个：即进料量太多；筛孔堵塞；有异物落入机内。通常可采用下列三个措施来处理：首先是打开锤式粉碎机，进行疏

通；还可以取出筛子，疏通筛眼；或者可以停止磨粉，取出异物。

② 锤式粉碎机运转时有杂声。这是由于硬质杂物落入锤式粉碎机内。一般采取的措施是：停止锤式粉碎机运转，取出杂物，并检查筛子是否损坏。

③ 粉粒直径过大，超过规定范围。这是应为筛子磨损或破裂而引起的，处理的办法是调换新筛子。

④ 锤式粉碎机落料过大。原因是筛子未安装，或者是筛子脱头裂口大。采取的措施是停车检查，装筛或是换筛。

筛板用以控制物料的粒度。筛板上有许多筛孔，筛孔直径根据产品粒度来确定。筛板上的孔有圆形或长条形，细粉碎机的筛孔多为圆形，粗粉碎机的筛孔多为长条形。筛板表面与锤刀顶端间隙对产品粒度有影响，产品粒度越小，间隙也越小，一般为 5~10mm。

锤式粉碎机的生产能力，可按半经验公式计算。

设从一个圆孔中排出的产品体积为

$$V_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 d \mu \quad (1-5)$$

式中 d_0 ——筛孔直径，m；

d ——产品粒度，m；

μ ——排料系数，一般取 0.7。

锤刀扫过筛孔时，才有产品排出，如果转子上有 K 排锤刀，则转子转动一周，锤刀就扫过 K 次，排料也为 K 次，如果转子转数为 n (r/min)，筛孔总数为 Z 个，则每小时排出产品的体积为

$$V = 60V_0 K n Z \quad (1-6)$$

如果是长方形筛孔，则

$$V_0 = LCd\mu \quad (1-7)$$

式中 L ——筛孔长度，m；

C ——筛孔宽度，m。

动力消耗 N (kW) 可按下面经验公式估算

$$N = AD^2 Ln \quad (1-8)$$

式中 D ——锤刀末端的直径，m；

L ——转子轴向长度，m；

n ——转子转速，r/min；

A ——系数，由实验确定。

(二) 辊式粉碎机

辊式粉碎机广泛用于破碎黏性和湿物料块。啤酒厂粉碎麦芽和大米都是用辊式粉碎机，常用的有两辊式、四辊式、无辊式和六辊式等。

1. 两辊式粉碎机

两辊式粉碎机主要工作机构为两个相对旋转的平行装置的圆柱形辊筒。工作时，装在两辊之间的物料由于辊筒对物料的摩擦作用而被拖入两辊的间隙中被粉碎。两辊式粉碎机制造简便，结构紧凑，运行平稳。通常适于中碎和细碎。

两辊式粉碎机依照装配结构可分为：①一个辊筒的轴承座可沿导轨滑移，另一辊筒轴承座固定 [见图 1-12 (a)]；②两个辊筒轴承座均可沿导轨滑移 [见图 1-12 (b)]。

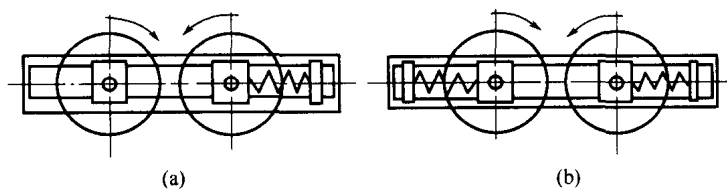


图 1-12 两辊粉碎机简图

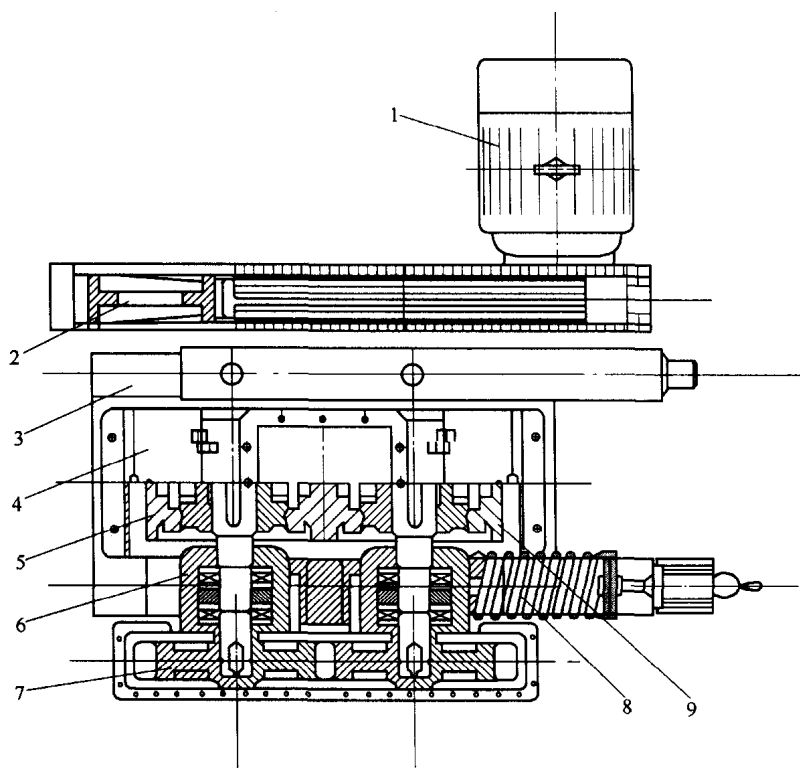
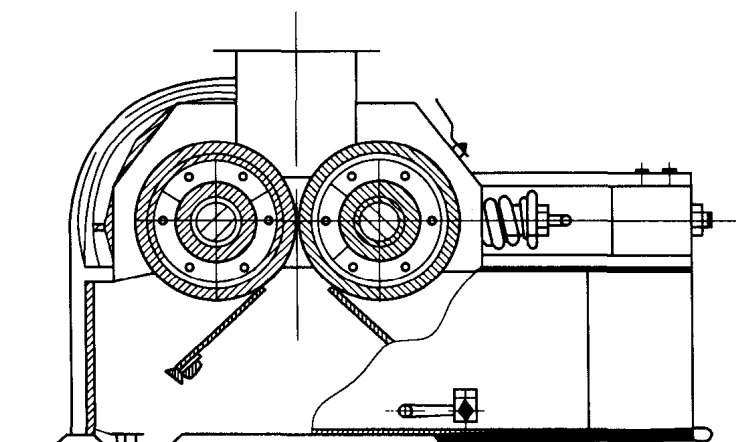


图 1-13 $\phi 400\text{mm} \times 250\text{mm}$ 两辊式粉碎机

- 1—电动机；2—三角皮带传动装置；3—机架；4—安全罩；5—固定破碎辊筒；
6—滚动轴承座；7—加长齿齿轮；8—保险弹簧；9—可移动破碎辊筒