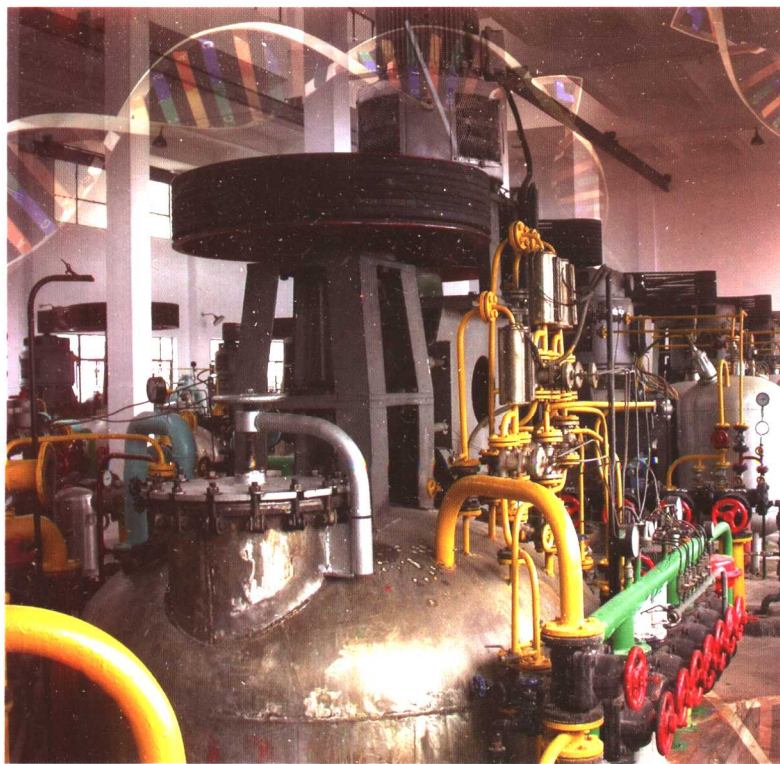


普通高等教育“十一五”规划教材

生物工程 生物技术系列

# 生物工程设备

郑裕国 主 编  
薛亚平 副主编



 化学工业出版社

普通高等教育“十一五”规划教材

# 生物工程设备

郑裕国 主 编

薛亚平 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书内容包括了在生物过程工程中从原料处理、生物反应到生物产品提取纯化等一系列操作过程设备,重点介绍了各种设备的原理、构造、设计、应用、参数检测、放大、控制理论等工程方面的基本知识。本书理论与实践密切结合,突出重点,力求反映生物工程设备的国内外最新进展。本书有助于培养生物工程类高级技术人才,解决生物过程中的技术瓶颈,促使更多的生物技术产品产业化。

本书可作为普通高等院校生物工程本科专业教材,也可作为生物技术、食品工程、制药工程等本科专业的教材或教学参考书。对于广大从事生物、制药、食品、发酵、化工、轻工、环境等领域的科技、开发、生产、管理的专业人员,也是一本有价值的生产、设计和科研参考书。

本书有配套的多媒体课件,对一些生物工程设备进行更直观、生动的介绍,以便读者更容易地了解、掌握本书内容。

#### 图书在版编目(CIP)数据

生物工程设备/郑裕国主编. —北京:化学工业出版社,  
2007.4

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5025-9615-6

I. 生… II. 郑… III. 生物工程-设备-高等学校-教材 IV. Q81

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第038183号

---

责任编辑:赵玉清

文字编辑:项 激

责任校对:陶燕华

装帧设计:郑小红

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张21½ 字数576千字 2007年6月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:38.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

生物技术作为 21 世纪最活跃、发展最迅速的科学技术之一，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，对于促进医药、食品、化工、材料、能源、农牧渔业、环境保护等国民经济重要领域的发展有着十分重要的作用。当生物技术的研究成果，从实验室走向产业化时，会涉及到许多工程技术问题，如生物质原料的处理、生物反应过程的设计、生物产物的分离纯化等，由此，生物工程设备的设计、选型、控制和应用等就成为现代生物技术成功实现产业化的关键。

生物工程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，生物工程设备是该专业的一门必修课。浙江工业大学于 1980 年设立生物工程专业（经历微生物化学工程、发酵工程、生物化工、生物工程等专业名称更改），生物工程设备作为专业必修课历时 20 多年，成为浙江省精品课程。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。为进一步促进生物工程设备的发展和现代生物技术产业化技术开发，满足生物工程专业的教学需要，为此，根据 20 多年的讲授经验，对课程讲义和笔记进行了整理，编写了本教材。

本教材重点介绍了设备的原理、构造、设计、应用、参数检测、放大、控制理论等工程方面的基本知识，理论与实践密切结合，突出重点，并反映生物工程设备的国内外最新进展。编写本书的目的是为生物工程本科专业提供一本教材，同时也可以作为生物技术、食品工程、制药工程等专业使用的教材或参考书。

在多年的教学实践基础上，开发了与本教材配套的多媒体课件，采用 PowerPoint、Flash 动画、影音文件等，以图片、动画、声音和影像等多种形式，对一些生物工程设备进行介绍，以便使读者更容易掌握本书的内容。

本书主要章节由郑裕国、薛亚平编写，浙江工业大学教师王远山、徐建妙参与部分章节的编写工作，研究生梁露怡、鲁海英、张俊伟、贾立壮、金少军、王宝峰、林志坚为本书查阅了资料并协助进行了本书的整理、校对等工作，林志坚为本书绘制了部分插图，多媒体课件主要由王远山、徐建妙开发。在全书的编写过程中，得到了中国工程院院士、浙江工业大学名誉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。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，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评和指正。

编者

于杭州 浙江工业大学

2007 年 3 月

# 目 录

绪论 .....	1
----------	---

## 第一篇 生物质原料处理设备

<b>第一章 生物质原料预处理设备</b> .....	4
<b>第一节 生物质原料筛选与分级设备</b> .....	4
一、磁力除铁器 .....	4
二、筛选设备 .....	4
三、精选机 .....	6
<b>第二节 生物质原料的粉碎</b> .....	7
一、锤式粉碎机 .....	7
二、辊式粉碎机 .....	9
三、湿式粉碎机 .....	11
四、球磨机 .....	12
五、切片机 .....	13
六、超细粉碎机 .....	14
七、纳米粉碎机 .....	15
<b>第三节 生物质原料混合设备</b> .....	16
一、回旋型混合机 .....	16
二、固定型混合机 .....	17
<b>第二章 生物细胞培养基制备设备</b> .....	18
<b>第一节 液体培养基的灭菌</b> .....	18
一、湿热灭菌原理和影响灭菌的因素 .....	18
二、连续灭菌流程与设备 .....	20
三、分批灭菌过程与设备 .....	23
<b>第二节 淀粉质原料的蒸煮与糖化</b> .....	25
一、连续蒸煮糖化 .....	25
二、间歇蒸煮糖化 .....	30
<b>第三节 纤维素和半纤维素的水解</b> .....	31
一、蒸汽爆裂法 .....	32
二、稀酸预处理法 .....	32
三、酸酶水解法 .....	34
<b>第四节 糖蜜原料的稀释与澄清</b> .....	35
一、糖蜜稀释器 .....	35
二、糖蜜原料的澄清 .....	36
<b>第五节 啤酒生产中麦芽汁的制备设备</b> .....	37
一、糊化锅 .....	37
二、糖化锅 .....	39
三、过滤槽 .....	39
四、麦汁煮沸锅 .....	40
五、糖化醪过滤槽 .....	41
<b>第六节 固体培养基制备</b> .....	41

## 第二篇 生物反应设备

<b>第三章 生物反应器设计基础</b> .....	45
<b>第一节 生物反应过程的剪切力</b> .....	45
一、剪切力的度量方法 .....	45
二、剪切作用的影响 .....	46
三、低剪切反应器的设计 .....	47
<b>第二节 生物反应器的传质问题</b> .....	48
一、气-液质量传递 (气-液传质) .....	48
二、液-固质量传递 .....	53
<b>第三节 生物反应器的混合</b> .....	54
一、混合机理 .....	54
二、宏观流体与微观流体 .....	56
<b>第四章 生物反应器</b> .....	57
<b>第一节 机械搅拌式生物反应器</b> .....	58
一、机械搅拌式生物反应器的结构 .....	58
二、搅拌轴功率计算 .....	61
三、反应器中热量传递 .....	64
<b>第二节 气升式生物反应器</b> .....	66
一、气升式生物反应器 (ALR) 的主要类型及结构 .....	66
二、气升式生物反应器的主要参数 .....	69
三、气升式反应器的流体动力学模型 .....	70
四、气升式反应器的设计 .....	71
<b>第三节 鼓泡塔生物反应器</b> .....	73
一、鼓泡塔生物反应器的结构 .....	73
二、流体力学特征 .....	74
三、传热和传质 .....	75
四、鼓泡塔反应器模型 .....	76
<b>第四节 膜生物反应器</b> .....	80
一、膜生物反应器的类型 .....	80

二、膜材料和膜组件 .....	81	一、固态发酵基础理论 .....	116
三、膜生物反应器工艺设计的考虑因素 .....	84	二、固态发酵的生物反应器 .....	118
四、膜生物反应器的应用 .....	85	三、固态发酵生物反应器的设计 and 应用 .....	127
<b>第五节 动植物细胞培养装置和酶反应器 .....</b>	<b>86</b>	<b>第五章 生物反应器的放大与控制 .....</b>	<b>130</b>
一、动物细胞培养生物反应器 .....	86	第一节 生物反应器的放大 .....	130
二、植物细胞培养生物反应器 .....	93	一、经验放大法 .....	130
三、酶生物反应器 .....	98	二、其他放大方法 .....	134
<b>第六节 微藻培养生物反应器 .....</b>	<b>104</b>	第二节 生物反应器的参数检测 .....	135
一、开放式大池培养系统 .....	105	一、生物加工过程的参数 .....	135
二、密闭式反应器 .....	105	二、检测方法与仪器 .....	138
<b>第七节 厌氧发酵生物反应器 .....</b>	<b>108</b>	第三节 控制理论与应用 .....	145
一、酒精发酵设备 .....	108	一、生物过程的控制特征 .....	145
二、啤酒发酵设备 .....	111	二、先进控制理论在反应器控制中的应用 .....	148
<b>第八节 固态发酵生物反应器 .....</b>	<b>116</b>		

### 第三篇 产物分离设备

<b>第六章 细胞破碎与料液分离设备 .....</b>	<b>150</b>	二、离子交换设备 .....	185
第一节 细胞破碎设备 .....	150	第二节 吸附过程原理与设备 .....	192
一、高速珠磨机 .....	150	一、吸附过程与原理 .....	193
二、高压匀浆器 .....	151	二、吸附设备 .....	195
三、超声波振荡器 .....	151	第三节 层析原理与设备 .....	200
第二节 固液分离设备 .....	152	一、凝胶层析 .....	200
一、过滤设备 .....	152	二、亲和层析过程与设备 .....	205
二、离心分离设备 .....	156	<b>第九章 蒸发与结晶设备 .....</b>	<b>213</b>
第三节 膜分离技术与设备 .....	161	第一节 蒸发设备 .....	213
一、反渗透膜分离技术与设备 .....	161	一、概述 .....	213
二、纳滤膜分离技术与设备 .....	166	二、常用蒸发设备结构 .....	214
三、超滤膜分离技术与设备 .....	166	三、蒸发器的附属设备 .....	218
四、微滤膜分离技术与设备 .....	167	四、蒸发器的选型 .....	219
<b>第七章 萃取设备 .....</b>	<b>168</b>	五、蒸发设备的设计计算 .....	220
第一节 液-液萃取分离设备 .....	168	第二节 结晶设备 .....	226
一、液-液萃取分类 .....	168	一、晶核的生成和晶体的生长 .....	226
二、液-液萃取设备 .....	169	二、结晶设备的结构与特点 .....	226
三、液-液萃取过程与计算 .....	171	<b>第十章 蒸馏过程与设备 .....</b>	<b>230</b>
第二节 固-液萃取设备 .....	173	第一节 酒精蒸馏 .....	230
一、固-液萃取原理 .....	173	一、两塔式流程 .....	230
二、固-液萃取设备 .....	175	二、三塔式蒸馏 .....	231
第三节 超临界萃取设备 .....	177	三、多塔蒸馏 .....	232
一、超临界流体的性质 .....	177	第二节 分子蒸馏 .....	232
二、超临界流体萃取过程 .....	178	一、分子蒸馏的原理 .....	233
三、超临界流体萃取系统 .....	178	二、分子蒸馏器的种类与特征 .....	234
<b>第八章 离子交换、吸附和层析分离设备 .....</b>	<b>182</b>	第三节 水蒸气蒸馏 .....	236
第一节 离子交换过程原理与设备 .....	182	一、水蒸气蒸馏的过程和原理 .....	237
一、离子交换过程原理 .....	182	二、水蒸气蒸馏的方式与设备 .....	238
		<b>第十一章 干燥设备 .....</b>	<b>245</b>

第一节 气流干燥 .....	245
一、气流干燥流程与设备 .....	245
二、气流干燥器的形式 .....	245
三、气流干燥的特点和适用范围 .....	246
四、气流干燥的计算 .....	248
第二节 喷雾干燥 .....	249
一、气流喷雾干燥设备 .....	250
二、离心喷雾干燥设备 .....	251
第三节 沸腾干燥与沸腾造粒干燥 .....	255

一、沸腾干燥原理、特点和形式 .....	255
二、单层卧式多室的沸腾干燥设备构造 和操作 .....	255
三、沸腾造粒干燥设备的原理、流程和 设备构造 .....	256
四、沸腾干燥的计算 .....	258
第四节 真空干燥和真空冷冻干燥 .....	259
一、真空干燥 .....	259
二、真空冷冻干燥 .....	259

## 第四篇 其他设备

第十二章 物料输送设备 .....	265
第一节 液体输送设备 .....	265
一、离心泵 .....	265
二、往复泵 .....	268
三、其他类型的泵 .....	269
第二节 气体输送设备 .....	270
一、空气压缩机 .....	270
二、离心通风机 .....	272
三、离心鼓风机 .....	273
第三节 固体输送设备 .....	274
一、带式输送机 .....	274
二、斗式提升机 .....	275
三、螺旋输送机 .....	276
四、气力输送设备 .....	277
第十三章 空气供给工程设备 .....	287
第一节 空气除菌设备 .....	287
一、空气除菌和灭菌方法 .....	287
二、空气过滤除菌流程 .....	289
三、空气预处理设备 .....	290
四、介质过滤除菌 .....	294
第二节 生物加工过程的空气调节 .....	303
一、空气调节的方法 .....	304

二、空气的增湿和减湿的原理 .....	304
三、空气调节设备及其计算 .....	306
第十四章 生物工程压力容器 .....	312
第一节 概述 .....	312
一、压力容器的基本要求 .....	312
二、压力容器的结构与分类 .....	312
三、压力容器零部件的标准化 .....	314
第二节 压力容器的材料 .....	315
一、压力容器用钢的基本要求 .....	315
二、压力容器用钢的品种与类型 .....	316
三、压力容器的腐蚀及防护措施 .....	317
四、压力容器钢材的选择 .....	319
第三节 内压薄壁容器设计 .....	320
一、内压薄壁圆筒的应力分析 .....	320
二、内压薄壁圆筒的设计 .....	321
三、设计参数的确定 .....	322
四、封头的设计 .....	324
五、压力试验 .....	328
附录 .....	330
参考文献 .....	331

# 绪 论

## 一、生物工程设备在现代生物技术领域的地位和重要性

1982年,国际经济合作及发展组织(OECD)提出了能广泛接受的生物技术定义,即“生物技术是应用自然科学及工程学原理,依靠生物作用剂(biological agent)的作用将物料进行加工以提供产品为社会服务的技术”。这里的生物作用剂是指酶、整体细胞或生物体,一般也称生物催化剂。由此可见,生物技术的最终目的是生产出能为人类利用的各类产品,创造经济效益和社会效益。利用生物技术手段将原料转化为产品,包含了一系列的生物反应过程、化学反应过程和物理操作过程。这些反应过程和操作过程具有不同的生产工艺条件,需要在不同的反应设备和操作设备中进行,按照不同的方式进行排列、组合构成不同的生物技术生产流程。因此,随着生物技术的迅猛发展,离不开生物工程设备的研究、开发;生物工程设备的发展又可以极大地促进生物技术产品的开发和生产。可以说,生物工程设备在现代生物技术产业中具有十分重要的地位,对生物技术的发展有巨大的促进和推动作用。

## 二、生物工程设备的发展历程

生物技术的发展过程与生物工程设备的工程科学和设计制造等技术紧密相连,生物工程设备的发展历程与生物技术的发展历程相一致。因此,生物工程设备的发展由以下阶段组成。

### 1. 自然发酵阶段

数千年之前,尽管人们还不清楚微生物的存在,并不懂得微生物与发酵的关系,然而,凭着生活经历和实践经验,已经将微生物应用于日常生活中,掌握了酿酒、制醋等技术。由于这一时期,人们只知其然而不知其所以然,靠的是实践经验和自然发酵,因此,将其称为自然发酵阶段。这一时期,所用到的设备仅仅是古老的坛坛罐罐。

### 2. 纯种培养技术阶段

1667年,荷兰人列文霍克(Antony Van Leowen Hoek)发明了显微镜,观测到了微生物的存在。1857年,法国人巴斯德(Louis Pasteur)通过实验首次证明了酒精发酵是由酵母菌引起的,而且不同的微生物可以引起不同的发酵过程。随着微生物筛选、分离技术的进步,纯种培养技术逐步被建立,开创了纯种培养技术时期的新局面。从19世纪末到20世纪30年代,多种工业发酵过程陆续建立,啤酒、葡萄酒、酒精、丙酮、丁醇、柠檬酸等发酵产品相继上市。

这一阶段的生物技术发展具有工艺过程和设备简单、生产规模较小、产品化学结构简单且属于微生物初级代谢产物等特点。

### 3. 通气搅拌好氧培养技术阶段

20世纪20年代末,英国人弗莱明(Flemming)发现了青霉素。40年代初,建立了青霉素的深层液体发酵工艺,有效提高了青霉素的发酵效价,开创了微生物发酵工程的新纪元,极大促进了生物技术的发展。人们从经济要求出发,利用微生物的生物合成,通过通气搅拌好氧培养技术的运用,各种抗生素、有机酸、酶制剂、维生素、激素等生物技术产品相继被规模化生产。这时期,人工管理微生物的特征尽管还是依赖外界环境因素的控制,然而已经从分解代谢转到合成代谢。由于化学工程技术人员参与了生物反应过程的开发,在理论和实践相结合的基础上,诞生了反映生物过程和化工过程相交叉的一门新学科——生物化学工程。与通气搅拌



好氧培养技术相关联的生物工程新设备不断出现,要求不断提高,生产规模逐渐扩大。

#### 4. 代谢控制发酵技术阶段

随着微生物遗传学和生物化学的发展,在20世纪50~60年代,逐步建立了氨基酸、核苷酸微生物工业,通过遗传突变有目的地控制微生物的一系列代谢反应途径,这标志着代谢控制发酵技术时期的到来。这一时期,生物工程设备也得到了长足进步,通气搅拌生物反应器的结构进一步得到改进,规模扩大,具有低能耗、简单结构、空气搅拌等特点的气升式生物器开始出现,用于生物反应产物分离的新型介质被研制和使用。该阶段的主要特点是:对纯种培养要求更为严格,生物工程设备的规模巨大,生物技术产品品种增加,次级代谢产物大量出现,生物工程设备配套技术发展迅速。

#### 5. 基因重组技术发展阶段

随着分子生物学的发展,建立了基因操作技术,人们可以按照特定的目的对基因进行重组,基因工程菌被构建。同时,细胞融合技术、固定化技术、生物催化技术的发展赋予生物过程以新的生命力,由此推动了生物工程设备的提高和发展,如针对大多数基因工程菌的表达产物在胞内的特点,超声细胞破碎和高压匀浆等新技术相继出现。

#### 6. 生物催化工程发展阶段

20世纪80~90年代,化学品的生物催化工业生产技术相继被研究开发。生物催化法生产的丙烯酰胺成功上市,开创了我国利用生物催化技术生产大宗化学品的先河。1999年,“*Current Opinion in Microbiology*”杂志发表了一篇文章,在此文中提到:继医药和农业之后,广泛认为工业生物催化将是生物技术的第三个浪潮。1999年底美国出版了一本题为“新生物催化剂:21世纪化学工业的基本工具”专门性书籍。由此,以生物催化为核心内容的工业生物技术在支撑新世纪社会进步与经济发展的技术体系中的地位已经被提到空前的战略高度,被誉为“生物技术的第三个浪潮”。工业生物催化技术的发展,为解决当代资源、能源、环境等诸多问题提供了有效手段,成为当前优先发展的高科技产业之一。以生物催化为核心的生物制造技术将是人类社会的一个重大技术革命,其深度、广度和长远的影响可以与工业革命相匹敌。一系列生物催化的新型设备及设备流程在工业生产中得到应用。

### 三、生物工程设备的要求

生物技术产品的产业化实施过程,包含了优良菌株的选育或基因重组构建、工艺过程优化、工程开发等几个环节。工艺过程优化和工程开发都离不开相应设备的选型、设计,即实现生物技术过程都是通过一定的设备来进行的。但设备必须为实现特定的生物工艺过程服务,必须满足生物工艺过程的基本要求。

#### 1. 工程学和工程理念的要求

利用适当的生产设备,按照合理的方式,生产为人类利用的不同产品,获得经济效益和社会效益。在这生产过程中,需要研究工业生产过程的系统规律,合理安排生产设备,最优化组建设备流程,这些都是工程学的研究范畴。对于生物工程设备,需要满足工程学和工程理念上的要求,即在将原料转化为产品的过程中,需要考虑理论上的正确性、技术上的可行性、操作上的安全性、经济上的合理性,通过质量衡算、动量衡算、热量衡算达到物料和能量的有效集成,体现工程学要求的反应速率、最优化、技术经济指标等问题。

#### 2. 生物过程特点对生物工程设备的要求

利用生物体或其组成部分所具有的活性进行物质的转换,生产各种人类需要的产品,这样的生物过程的特点在于生物催化剂参与了反应。由于生物催化剂的存在,生物反应过程与化学反应过程相比,具有反应条件温和、反应机理复杂、生物体动态变化等特点。以生物反应器为核心,可以将生物生产过程分为上游、中游、下游三个部分。

上游生物技术的主要任务是生物催化剂（包括菌体、酶等）的制备。虽然这方面的工作通常由生物学领域的科学家承担和完成，但作为生物工程领域的工程师也必须掌握生物催化剂的生理生化特性和培养条件，解决工业生物催化剂的大规模制备技术，建立生物催化剂无菌转接等装备。上游生物加工中，还包括原材料的物理和化学以及生物处理、培养基制备和灭菌等问题，这里包含了物料破碎、混合、输送等多种化工单元操作及热量传递、灭菌动力学等工程技术、设备问题。

中游生物技术是整个生物生产过程的关键，是实现生物技术产业化的必由之路，生物反应器更是其关键工程设备。生物反应器为特定的细胞提供适宜的生长、繁殖、代谢的场所，或为酶提供进行特定生化反应的条件，它的结构、控制和操作方式与产品的产量、质量和生产过程的能耗等有着密切的关系。生物反应器中存在着物料的流动和混合、传质和传热等大量的化学工程问题，也存在着氧和基质的供需和传递、细胞生长繁殖、生化反应动力学、产物代谢等大量的生物工程问题，需要对生物反应器进行检测和控制。随着生物技术的发展，对中游生物加工过程提出了更高的要求，研究开发新型生物反应器显得十分重要和迫切。

生物生产过程的下游是对目的产物的提取和精制。由于生物反应液中的目的产物的浓度较低，同时其与其他杂质存在着结构相似性，而且一些具有生物活性的产品对温度、酸碱度存在着敏感性，下游过程往往是步骤多、工序长、要求高。采用的分离、纯化手段包括一些典型的化工单元操作，如离子交换、色层分离、电泳、过滤、萃取、吸附、蒸发、沉淀、结晶、干燥等，其中所用到的一些生物工程设备与化工设备存在着相似性，但必须根据生物产品的特点对这些设备进行相应的调整和改进。开发新型生物分离设备，对生物技术的发展具有十分重要的作用。

#### 四、课程内容和任务

《生物工程设备》是生物工程专业的一门主干专业课程，它是从生物工程的研究内容和范畴出发，根据生物工程设备共性技术，阐述生物生产过程中的主要设备的作用原理、设计方法。生物工程设备是从事生物工程技术领域的研究开发人员都应当了解、掌握的一门学科。学习《生物工程设备》课程的主要任务是使学生在已学习微生物学、生物化学、物理化学、化工原理和生物工艺学等课程的基础上，研究生物过程工程及设备的相关问题，进一步了解国内外生物技术和生物工程的研究前沿，认识原料处理设备、生物反应设备、生物分离设备的应用与研究开发现状及发展趋势，掌握生物过程设备流程、主要设备的结构、设计计算、工程放大、优化控制等技术，使学生能够独立地解决生物工业生产、实验研究及技术开发方面的设备问题。

# 第一篇 生物质原料处理设备

## 第一章 生物质原料预处理设备

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设备

生物质原料在进行加工前，必须先将原料中的杂物除去。像铁片、石子那样的杂物混入原料，会给后续加工带来困难，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。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、管道和泵，使生产停顿。

#### 一、磁力除铁器

磁力除铁器（磁选设备）的主要作用是利用磁性除去原料中的含铁杂质，其主要部件是磁体。磁体有永久磁体和电磁体两种。磁选设备分永磁溜管和永磁滚筒。

##### 1. 永磁溜管

永磁溜管(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。

##### 2. 永磁滚筒

永磁滚筒(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。磁芯由锶钙铁氧体永久磁铁和铁隔板按一定顺序排列成圆弧形并安装在固定的轴上，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。滚筒通过蜗轮蜗杆结构由电动机带动旋转。磁芯固定不动。滚筒质量小，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。

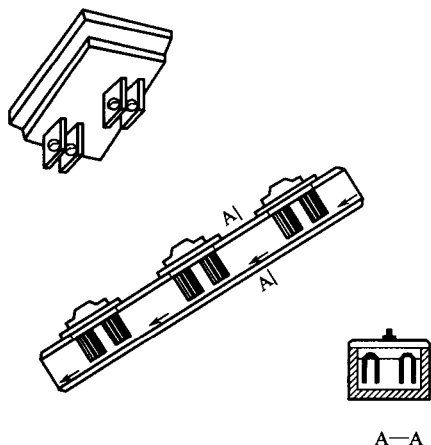


图 1-1 永磁溜管

#### 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。

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 1-3 所示。

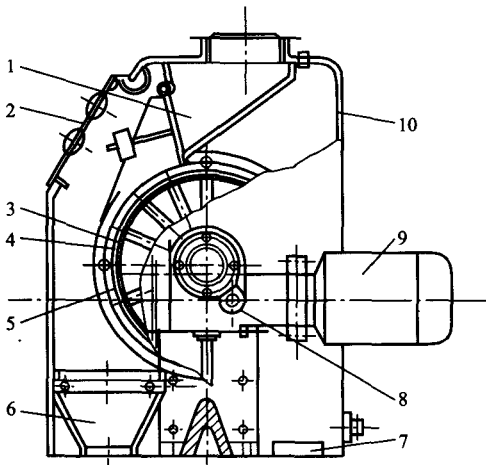


图 1-2 永磁滚筒的结构

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

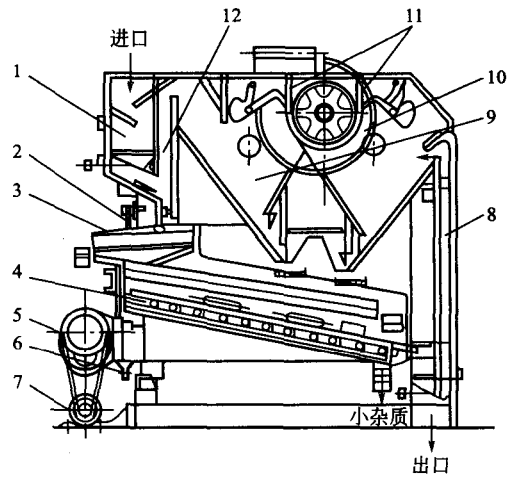


图 1-3 振动筛的结构

- 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进料装置两种。

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，筛下物为粮粒及小型杂物，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，厚度约为筛孔的 1/4，一层料及其中的细粒被棱切割而被筛下。筛的分级粒度大致是筛孔尺寸的 1/2。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，常用的有两种：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计算：

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

式中， $G$  为生产能力，kg/h； $B$  为筛面的宽度，m； $q$  为单位筛宽流量，kg/(m·h)。

如不知道  $q$  值，也可用下面近似公式计算生产能力：

$$G = 3600B_0 h V_{\varphi} \rho \quad (1-2)$$

式中， $B_0$  为筛面有效宽度，m，取  $B_0 = 0.95B$ ； $h$  为筛面物料层厚度，m，取  $h = (1 \sim 2)d$  ( $d$  为物料最大直径)； $V_{\varphi}$  为物料沿筛面运动的平均速度，m/s，取 0.5m/s 以下； $\varphi$  为物料松散系数，取为 0.36~0.64； $\rho$  为物料的密度，kg/m<sup>3</sup>。

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。

圆筒分级筛如图 1-4 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

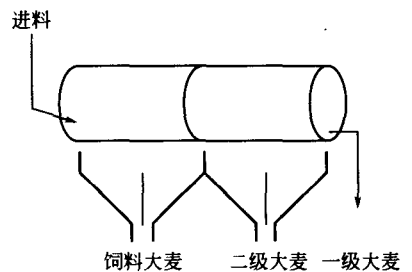


图 1-4 圆筒分级筛

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。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， $q$  为单位筛面负荷量， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，大麦取  $q=450\sim 550\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ； $D$  为筛面直径， $\text{m}$ ； $L$  为筛筒长度， $\text{m}$ ； $\varphi$  为筛面有效系数， $\varphi=1/6\sim 1/4$ 。

### 三、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式和碟片式两种，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，利用带升高度不同而分离。精选机的工作情况如图 1-5 所示。

#### 1. 碟片式精选机

在金属碟片的平面上制出许多袋形的凹孔，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的斜槽放在适当位置上，就能将短粒分出来，如图 1-6 和图 1-7 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，还可分别检查碟片每次的除杂效果，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。

#### 2. 滚筒式精选机

图 1-8 所为滚筒式精选机工作示意图。袋孔 2 是开在筛转圆管 1 的内表面，长粒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高速滚筒精选机和低速滚筒精选机，两者结构基本相似，但由于高速时颗粒的离心力增大，中央、斜槽和螺旋输送机位置应较低速的高。

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  $0.03\sim 0.05\text{m}/\text{s}$ ，平均生产率为  $100\sim 140\text{kg}/[\text{h} \cdot \text{m}^2]$ （袋孔面积）。而高速滚筒精选机可接近水平安装，其生产率可达  $500\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。

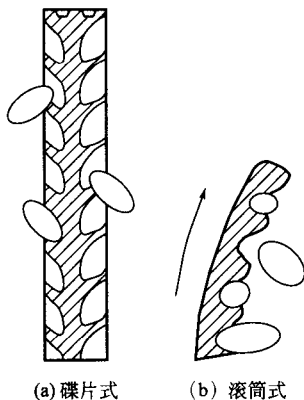


图 1-5 精选机的工作情况

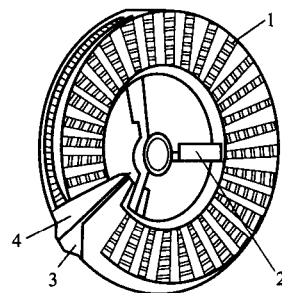


图 1-6 碟片的工作情况

1—碟片；2—叶片；3—短粒出口；4—盛物槽

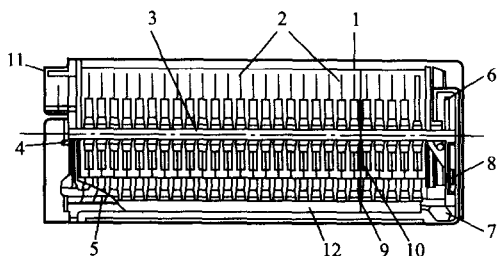


图 1-7 碟片式精选机结构

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

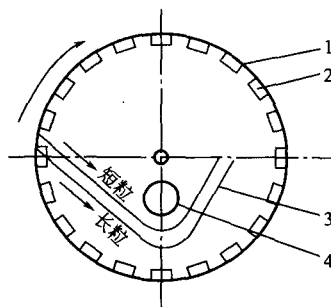


图 1-8 滚筒式精选机工作情况

1—筛转圆管；2—袋孔；3—螺旋输送机；4—中央槽

## 第二节 生物质原料的粉碎

使大块固体物料破碎成小块物料的操作，通常称为破碎，而使小块物料进一步粉碎为粉末状物料，则称为磨碎或研磨，两者统称为粉碎。

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剪力外，还发生弯曲折断。多用于较大块的长或薄的硬、脆性物料的粉碎。

固体物料的粉碎，可按粉碎物料和成品的粒度大小，分类如下：

(1) 粗碎 原料粒度范围为 40~1500mm，成品粒度约为 5~50mm；

(2) 中、细碎 原料粒度范围为 5~50mm，成品粒度为 0.1~5mm；

(3) 微粉碎 原料粒度范围为 5~10mm，成品粒度小于 100 $\mu$ m；

(4) 超微粉碎 原料粒度范围为 0.5~5mm，而成品粒度小于 25 $\mu$ m。

可用粉碎比表示粉碎操作中物料粒度变小的比例。对于一次粉碎后的粉碎比，粗碎约为 2~6，中、细碎为 5~50，粉碎为 50 以上。总粉碎比是表示经过几道粉碎步骤后的总结果。

### 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，如地瓜、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。锤式粉碎机的最大特点是具有很高的粉碎比（达 10~50），这是其他粉碎机不能比的。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，这种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，如工作部件易磨损，物料含水量过高（超过 10%~15%）时易堵塞，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，但运转时振动、噪声较大，如果转子安装平稳，则锤刀运转也较均衡。

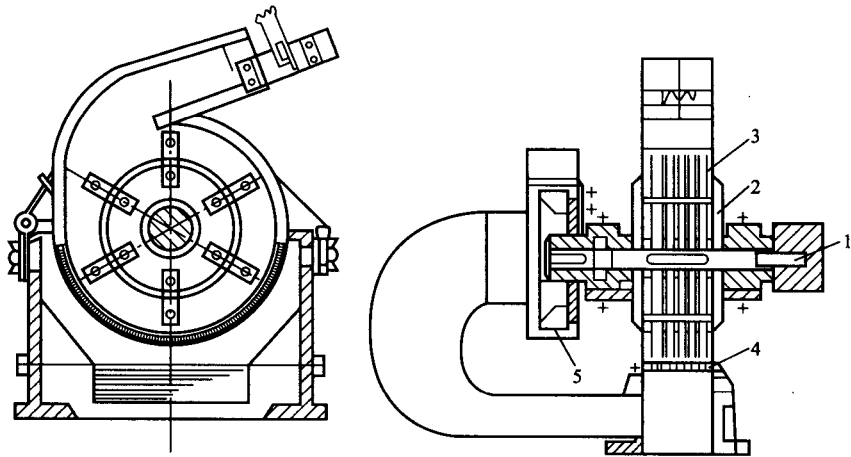


图 1-9 锤式粉碎机的结构

1—轴；2—转鼓；3—锤刀；4—栅栏；5—抽风机

锤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，锤碎机就是利用许多锤刀作圆周运动来锤碎原料的。锤刀的形式一般有矩形、带角矩形和斧形，由高碳钢片制成，如图 1-10 所示。

原料的粉碎是由于锤刀的撞击作用，因此锤刀磨损很快，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，可以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，对称地开多个孔，锤刀磨损后，可把磨损锤刀的刀角切平，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。

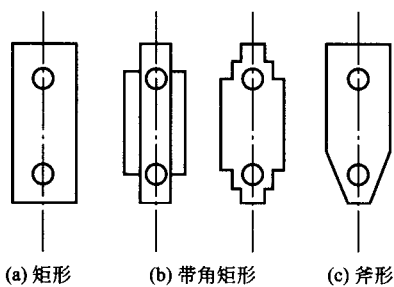


图 1-10 锤刀的形式

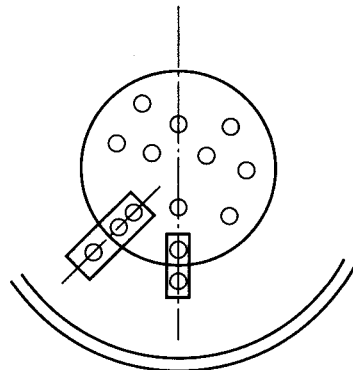


图 1-11 改进后的锤刀装置

### 2. 筛面

筛面采用铁板冲制，用来控制粉碎程度。粉料通过筛孔，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，一般有以下几种。

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，将没有达到要求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。

③ 采用鳞状筛代替平筛。

④ 采用湿式粉碎。含水分较高的原料，会给粉碎带来困难，使锤碎机的筛孔堵塞，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。

### 3. 筛孔

筛板用于控制物料的粒度，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：

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

式中， $d_0$ 为筛孔直径，m； $d$ 为产品粒度，m； $\mu$ 为排料系数，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1周，锤刀就扫过 $K$ 次，排料也为 $K$ 次，如果转子转速为 $n$ (r/min)，筛孔总数为 $Z$ 个，则每小时排出产品的体积为：

$$V = 60V_0 K n Z \quad (1-5)$$

如果是长方形筛孔，则：

$$V_0 = l c d \mu \quad (1-6)$$

式中， $l$ 为筛孔长度，m； $c$ 为筛孔宽度，m。

动力消耗 $N$ (kW)可按下面经验公式估算：

$$N = AD^2 Ln \quad (1-7)$$

式中， $D$ 为锤刀末端的直径，m； $L$ 为转子轴向长度，m； $n$ 为转子转速，r/min； $A$ 为系数，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、五辊式和六辊式等。

### 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：一个辊筒的轴承座可沿导轨滑移，另一辊筒轴承座固定 [图 1-12(a)]；两个辊筒轴承座均可沿导轨滑移 [图 1-12(b)]。

图 1-13 为一台两辊式粉碎机，其中一个辊筒轴承座为可移动的。作为粉碎作业工作部件的两个辊筒相对转动。固定辊筒的轴承座装在机架上，可移动的辊筒的轴承座由弹簧压紧，在承受载荷过大时，弹簧被压缩，轴承座可沿导轨滑移。两轴承之间装有支承架及可拆装的钢垫

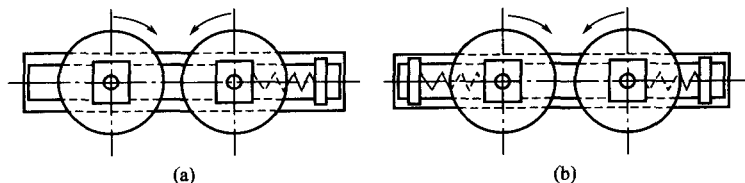


图 1-12 两辊式粉碎机辊筒的装配结构



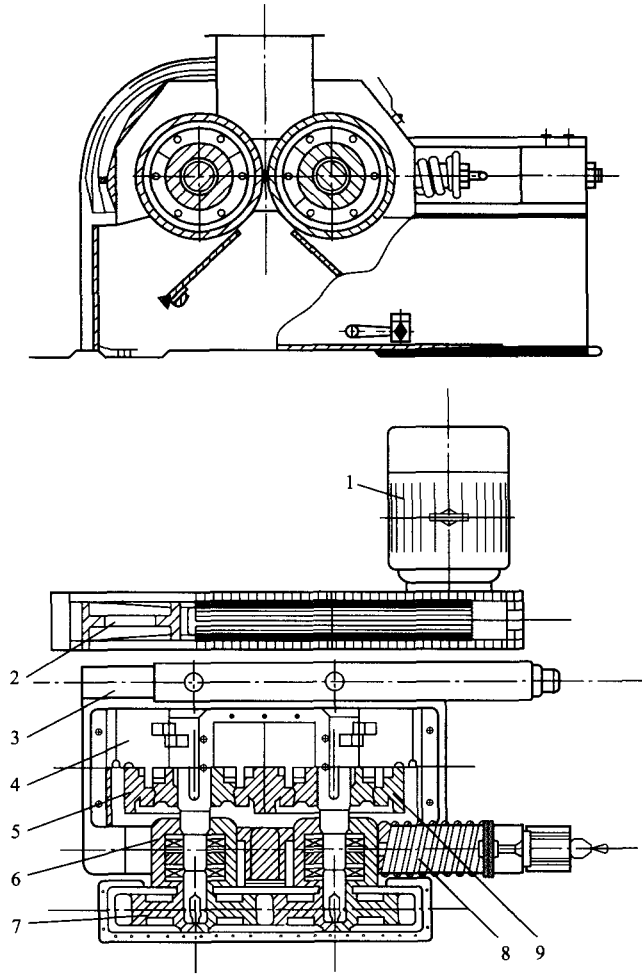


图 1-13  $\phi 400\text{mm} \times 250\text{mm}$  两辊式粉碎机

1—电动机；2—V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—可移动粉碎辊筒

片，增减垫片厚度可调节两辊间的间隙。

当辊筒间隙内落入不能粉碎的硬物时，可移动辊筒使弹簧压缩而向后滑移。硬物通过后，借弹簧力恢复到原来位置。辊筒的挤压力可由调节螺母及弹簧压板来调整。辊筒外表面装配有耐磨护套，护套材料大多用锰钢。为延长护套使用寿命，也有在护套表面焊一层耐磨硬质合金的。两辊筒下侧设有刮刀，用于刮除黏附在辊面上的物料。

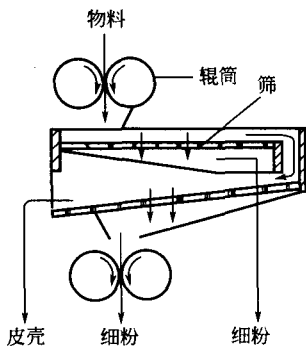


图 1-14 四辊式粉碎机

### 2. 四辊式粉碎机

四辊式粉碎机由两对辊筒和一组筛子所组成，如图 1-14 所示。原料经第一对辊筒粉碎后，由筛选装置分离出皮壳排出，粉粒再进入第二对辊筒粉碎。

### 3. 五辊式粉碎机

该机前三个辊筒是光辊，组成两个磨碎单元；后两个辊筒是丝辊，单独成一磨碎单元。通过筛选装置的配合，可以分离出细