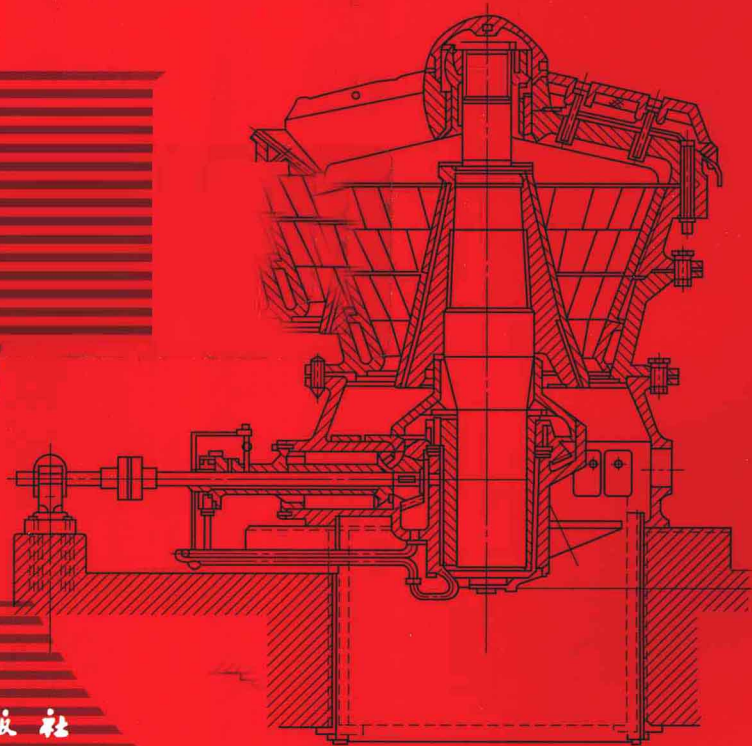


王利剑 主编 李建伟 张冬阳 副主编

非金属矿

粉碎工程与设备

FEIJINSHU KUANG
FENSUI GONGCHENG YU SHEBEI



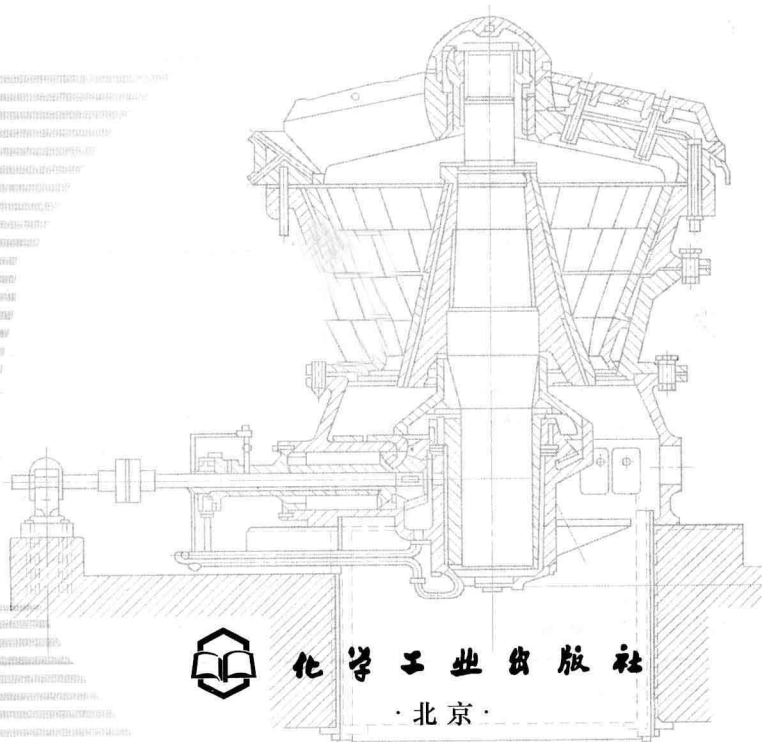
化学工业出版社

王利剑 主编 李建伟 张冬阳 副主编

非金属矿

粉碎工程与设备

FEIJINSHU KUANG
FENSUIGONGCHENG YUSHEBEI



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地阐述了非金属矿物粉碎工程的基本理论、基础知识,并结合最新的技术发展,介绍了粉碎工艺过程中的新技术和新设备,及时反映当今技术和设备发展的动态,同时也总结了编者多年的技术实践经验。本书内容涵盖了非金属矿物材料粉碎过程中的破碎、粉磨、分离、分级、输送、计量、给料、均化等各环节的主要工艺技术,重点介绍了具有代表性设备的应用、结构、原理、性能特点及主要参数的计算与选择,既重视加工技术的理论性研究,又注重加工技术的实用性论述。本书语言精练、通俗易懂、内容翔实、数据准确。

本书理论性和实用性较强,可作为本专科院校非金属材料、矿物加工等专业师生的教学用书,也可供从事非金属矿物材料、无机非金属材料、复合材料以及矿物加工、非金属矿深加工、化工、环境工程等专业领域的科研和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

非金属矿粉碎工程与设备/王利剑主编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-122-11459-4

I. 非… II. 王… III. ①非金属矿-粉碎-生产工艺
②非金属矿-粉碎-化工设备 IV. ①TD163②TQ029

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 104980 号



责任编辑: 朱 彤
责任校对: 洪雅姝

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 刘丽华

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 装: 北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 480 千字 2011 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

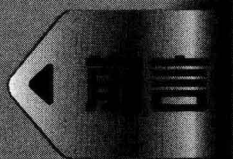
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

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: 49.00 元

版权所有 违者必究



非金属矿物精细粉体和功能性非金属矿物材料是伴随现代科技革命、产业发展、社会进步、人类生活质量的提高和环保意识的普遍觉悟而发展起来的。目前，我国非金属矿物粉体工业，虽然规模较大，在国家的经济建设中起着重要的作用，但是，它的科技含量和产品档次还不高，我国仍有一些非金属矿物粉体，特别是与现代高新技术和新材料发展相关的非金属矿物深加工粉体产品要依赖进口，加强非金属矿物的深加工利用研究，开发高附加值产品，与国计民生密切相关。

矿物原料的粒度大小和粒度分布及颗粒形状对无机非金属矿物材料的性能或功能的发挥有很大影响。由于超细粉体具有比表面积大、表面活性高、化学反应速率快、烧结温度低且烧结体强度高、填充补强性能好、遮盖率高等优良的物理化学性能，因此，许多应用领域要求非金属矿物原（材）料的粒度微细（微米或亚微米）；部分领域不仅要求粒度超细而且要求粒度分布范围窄。新的市场形势下，对各类非金属矿超细、窄分布粉体的需求量将不断增加。因此，粒度控制和精细粉体分级技术以及特殊粒形（如片状、针状、球状等）粉体的加工技术将是非金属矿物加工技术的重点发展方向之一。

本书对非金属材料粉碎加工的基本方法、基础理论有较为系统的阐述，综合了近年来非金属材料粉碎加工的最新理论和技术成果以及编者多年的技术、科研经验，可供广大无机非金属材料、矿物材料、建材、化工及新材料领域的科研人员、技术人员阅读或参考，也可作为相关专业本专科师生的教学参考书。

本书由王利剑主编，李建伟、张冬阳副主编，赵跃智、田文杰、马名杰、李奇、胡骥、张俊、李志荣参加了编写。在撰写过程中，郑水林教授给予了很大的指导和帮助。

由于非金属矿粉碎工程技术涉及面较广，交叉学科也较多，加之作者知识和水平的局限性，书中不足之处在所难免，欢迎专家学者及广大读者批评斧正。

编者

2011年6月

第 1 章 绪论	1
1.1 粉碎工程简介	1
1.2 粉碎工程的基本理论	1
1.2.1 粉碎机理	2
1.2.2 粉碎物理学	2
1.2.3 粉碎功耗	5
1.2.4 粉碎过程的物理化学	5
1.2.5 粉碎动力学	6
1.2.6 粉碎工艺学	6
第 2 章 破碎过程与设备	8
2.1 概述	8
2.1.1 粉碎的意义及分类	8
2.1.2 粉碎的有关概念	9
2.2 粉碎物料的基本物性	11
2.2.1 物料的强度	11
2.2.2 物料的硬度	12
2.2.3 物料的易碎(磨)性	13
2.2.4 物料的脆性和韧性	14
2.3 粉碎理论	14
2.3.1 表面积假说	14
2.3.2 体积假说	15
2.3.3 裂纹理论	15
2.3.4 强度理论	16
2.3.5 断裂理论	16
2.4 粉碎工艺	17
2.4.1 粉碎方式	17
2.4.2 粉碎模型	18
2.4.3 混合粉碎和选择性粉碎	19
2.5 破碎设备	20
2.5.1 颚式破碎机	21
2.5.2 锤式破碎机	31
2.5.3 辊式破碎机	39
2.5.4 反击式破碎机	43
2.5.5 圆锥式破碎机	52
2.6 破碎工艺实例	59
第 3 章 粉磨过程与设备	61
3.1 概述	61
3.1.1 粉磨的意义	61
3.1.2 粉磨机的分类及特点	61
3.1.3 粉磨作业的特点、工艺技术指标和粉磨系统	62
3.2 粉磨设备	65
3.2.1 球磨机	65
3.2.2 辊压机	99
3.2.3 立式磨机	103
3.3 粉磨工艺实例	117
3.3.1 生料粉磨系统	117
3.3.2 水泥粉磨系统	121
3.3.3 煤粉制备系统	122

第4章 超细粉碎过程与设备 124

- 4.1 概述 124
 - 4.1.1 超细粉碎概念及意义 124
 - 4.1.2 超细粉体的特性 124
- 4.2 超细粉碎设备 125
 - 4.2.1 机械冲击式超细粉碎机 125
 - 4.2.2 气流粉碎式超细粉碎机 126
 - 4.2.3 搅拌磨 131
 - 4.2.4 振动磨 138
 - 4.2.5 胶体磨 141

第5章 粉碎物料分级过程与设备 142

- 5.1 概述 142
 - 5.1.1 概念及意义 142
 - 5.1.2 分级粒径和分级效率 143
- 5.2 筛子分级 145
 - 5.2.1 基本概念 145
 - 5.2.2 筛分机理 147
- 5.2.3 筛分设备 148
- 5.3 流体分级 149
 - 5.3.1 颗粒在流动着的流体内的运动 149
 - 5.3.2 流体分级设备 152
 - 5.3.3 选粉效率和循环负荷 164

第6章 粉碎物粉分离过程与设备 165

- 6.1 概述 165
 - 6.1.1 概念及意义 165
 - 6.1.2 分离效率 165
- 6.2 气固分离 167
 - 6.2.1 收尘设备主要性能指标 168
 - 6.2.2 收尘设备类型 169

第7章 粉碎物料输送过程与设备 193

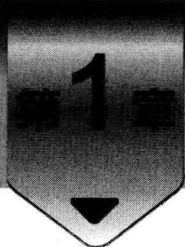
- 7.1 概述 193
- 7.2 胶带输送机 194
 - 7.2.1 工作原理和结构 194
 - 7.2.2 应用及特点 205
- 7.3 螺旋输送机 206
 - 7.3.1 构造与工作原理 206
 - 7.3.2 主要零部件 207
 - 7.3.3 应用及特点 210
- 7.4 斗式提升机 211
 - 7.4.1 构造与工作原理 212
 - 7.4.2 类型、特点及应用 213
 - 7.4.3 主要零部件 213
 - 7.4.4 装料和卸料方式 220
- 7.4.5 提升机产品标记说明 221
- 7.5 链式输送机 222
 - 7.5.1 概述 222
 - 7.5.2 板式输送机 224
 - 7.5.3 刮板输送机 226
 - 7.5.4 埋刮板输送机 228
 - 7.5.5 FU型链式输送机 230
 - 7.5.6 其他类型链式输送机 232
- 7.6 空气输送设备 232
 - 7.6.1 概述 232
 - 7.6.2 空气输送斜槽 234
 - 7.6.3 管道式气力输送设备 236

第8章 粉碎物料喂料及计量设备 246

- 8.1 概述 246
- 8.2 转动式喂料机 247
 - 8.2.1 圆盘喂料机 247
 - 8.2.2 叶轮喂料机 248
 - 8.2.3 螺旋喂料机 249
- 8.3 振动式喂料机 249
 - 8.3.1 电磁振动喂料机 249
 - 8.3.2 摆动式喂料机 252
- 8.4 计量设备 253
 - 8.4.1 电子皮带秤 253

8.4.2	核子秤	255	8.4.6	螺旋电子秤	259
8.4.3	失重秤	257	8.4.7	科里奥利秤	259
8.4.4	冲击式流量计	257	8.4.8	汽车衡	264
8.4.5	溜槽式流量计	258	8.4.9	轨道衡	264

参考文献	265
------	-----



绪 论

1.1 粉碎工程简介

粉碎是固体物料尺寸减小、粒形改变的加工系统工程。换句话说就是把大块物料加工成细小颗粒物料整个工艺过程。因加工过程中尺寸及形状变化相当大，粉碎过程不可能在一个设备的加工中得以实现。通常要根据用户工艺要求和机械设备的特性，对原料依次地进行加工分段实施。粉碎通常是工业生产中的第一道加工工序，占有极为重要的地位。我国每年约有数百亿吨固体物料需要进行粉碎加工。粉碎工程学是粉体工程最重要的一个分支，是研究固体物料粉碎行为及其属性的学科。它从理论上及实践上研究粉碎过程的规律及其优化。由于研究对象的复杂性，它必然涉及各种学科的多方面知识，是多种学科相互交织的综合性学科，由于粉碎对象的非均质性，决定了粉碎工程是一门实验性很强的学科。粉碎工程主要是运用力学分析方法对理想的微观变化过程进行研究以揭示粉碎的本质，用变动工艺参数的数理统计法研究不同状态下的粉碎效果，用数学模拟预测破碎规律，用比拟放大进行结果的转换，用生产实践经验来验证理论研究的效果。当然，其他相关学科的发展也必然会促进粉碎工程的发展。

1.2 粉碎工程的基本理论

在粉碎工程发展的漫长历程中，粉碎原理和粉碎工艺的发展总是与矿物加工工业的发相适应，不断满足矿物加工工业的新要求。从矿物加工工业发展初期到现在，粉碎作业的首要任务是为矿物加工工业提供具有一定颗粒、粒度组成和充分解离而又不过粉碎的加工原料，以利于下一步加工处理和使用，这在冶金、化工、建材、煤炭、水泥等许多工业部门是十分明确的。因此，在相当长的时期里，粉碎的唯一基本原则是不作不必要的粉碎。在近代粉碎工业发展的一个多世纪以来，在粉碎原理上着重研究固体物料的碎裂规律及其功耗，提出了三大破碎功耗学说；在工艺设备上，设备品种不多，流程比较单一。

随着现代工业的发展，由于矿产资源向着贫、细、杂方面推移，开采规模日益扩大，在

20 世纪 60~70 年代出现了设备大型化的热潮。进入 80 年代以后, 由于世界能源紧缺, 推进了“多碎少磨”节能工艺的发展。由于高新技术的发展和矿物加工工业的精细化, 对粉碎工程提出了新的要求。因此, 粉碎原理的研究向多学科、多领域和交叉学科方向拓展, 从而推进粉碎原理不再停留在粉碎机理、粉碎物理学和粉碎功耗方面, 而且出现了粉碎动力学、粉碎物理化学等新的领域, 粉碎工艺出现了多样化。

1.2.1 粉碎机理

外部机械力作用于原料上, 在裂缝、损伤、解理、晶界处产生应力集中而破碎。新产生的粒子又吸收了破碎能, 使之再次产生新的裂缝 (有时可称为预损伤)。大致可分为三个阶段。

(1) 破碎阶段 吸收能量, 破碎至几个大片或大块, 原料产生新的损伤。

(2) 压裂阶段 几个大片、大块继续被压断。

(3) 压实阶段 片状物料被折断生成小块, 被压碎或压实。在此过程中, 先是单粒子被压, 然后是粒群受力被压碎 (层压破碎), 而后被压实 (粉碎作用几乎消失)。

通过对粉碎机理的研究, 以统计学观点对粉碎进行分类, 分为三种粉碎模型: 体积破碎模型、表面积破碎模型、均一破碎模型。

1.2.2 粉碎物理学

粉碎物理学是在传统的粉碎原理——岩石的机械力学基础上发展起来的, 视野更加开阔, 对生产的指导意义更加突出。岩石的机械力学, 在传统的粉碎原理中, 主要考虑两个方面: 一是岩矿的物理性质 (岩石的结构和构造、孔隙度、含水率和硬度、密度、容重及碎胀性) 与其被粉碎的难易程度的关系; 二是岩矿在外力作用下, 因其性质和载荷大小、速度的不同, 发生弹性形变和塑性形变直至粉碎的相关规律。

粉碎物理学则大大地扩大了其研究的范围, 也更接近于粉碎的实际过程。主要方面有单颗粒粉碎、料层粉碎、粉碎极限、选择性破碎等。

(1) 单颗粒粉碎 单颗粒粉碎是粉碎技术的基础。1920 年格里菲思 (Griffith) 提出了强度理论。在理想情况下, 如果施加的外力未超过物体的应变极限, 则物体又会恢复原状而未被破碎。但由于固体物料内部存在着许多细微裂纹。将引起应力集中, 致使裂纹扩展。这一理论一直统治着固体单颗粒粉碎机理的研究。

随着现代物理学的发展, 突破了 Griffith 的强度理论。研究发现, 物料的实际强度大多数小于它的理论强度, 而破碎所消耗的能量比理论预测的要高得多。因此, 提出了比 Griffith 更完整的关于能最平衡理论 (Rumpt, 1961 年)。该理论认为, 破碎的能量来源包括:

- ① 外力;
- ② 由外力产生的应力场;
- ③ 组织缺陷、热处理等引起的残余应力;
- ④ 成分的热能;
- ⑤ 在破裂点或裂缝面上的吸热化学反应或吸附;
- ⑥ 弹性波的动能。

舒纳特于 20 世纪 80 年代中期, 归纳了应力状态与颗粒的关系, 他指出有关材料特性可分为两类: 第一类是作为反抗粉碎阻力参数; 第二类是应力所产生的结果参数。舒纳特等人对此进行了较全面的研究, 推进了单颗粒粉碎理论的发展。

(2) 料层粉碎 为了实行“多碎少磨”和“以碎代磨”, 自 20 世纪 80 年代以来, 许多粉碎设备的改进和新设备的研制都是以料层粉碎为基础进行的。如 PEX 系列细颚式破碎机、旋盘式圆锥破碎机、惯性圆锥破碎机、压辊磨机和立轴式冲击粉碎机等。

料层粉碎有别于单颗粒粉碎, 单颗粒粉碎是指粒子受到应力作用及发生粉碎是各自独立进

行的,即不存在粒子间的相互作用。而料层粉碎是指大量的颗粒相互聚集,彼此接触所形成的粒子群受到应力作用而发生的粉碎现象,即存在着粒子间的相互作用。

料层粉碎与单颗粒粉碎物料数量的界限,依据阿齐兹(Aziz)的研究,体积中的固体容积百分率为10%时,则表现为单颗粒粉碎行为。超过45%则为料层粉碎行为。依据舒纳特的研究,在容器内进行料层粉碎应消除器壁效应的影响,当物料中最大颗粒粒径为 X 、容器直径为 D 、料层高度为 h 时,必须满足 $D/X > 10$, $h/X > 6$, $h/D < 1/3$ 。

料层粉碎研究目前尚不深入,已有的成果包括如下几个方面。

① 料层粉碎存在着一个极限粉碎概率。在单颗粒粉碎中,由于粉碎是单个发生的,只要输入的能量所产生的应力达到和超过了该粒子的极限应力,则该粒子即发生粉碎。因此,其粉碎概率可以达到100%。

料层粉碎过程是在群体颗粒中发生的粉碎事件,先行粉碎所产生的细颗粒对粗颗粒产生缓冲效应和保护效应,而使其避免受到继续粉碎。因此,粉碎概率不可能达到100%,而存在着一个极限粉碎概率。极限粉碎概率大小与被粉碎物料的性质、给料粒度、应力类型等有关。

② 料层在粉碎之前有一个压缩过程,料层的孔隙度变化较大。单颗粒粉碎,由于矿物一般表现为弹性-脆性体,颗粒在发生较小的形变之后即发生破碎。

在料层粉碎中,物料呈自然堆积状态,孔隙度较高。在受力作用时有一个压缩过程。只有当密度达到一定程度后,粉碎才开始发生。

③ 料层粉碎的应力与应变受施载体形状的影响。一些学者的研究表明,当应力达到极限值时,不同几何形状的施载体引起的应变是不同的。它们的顺序是:平板-平板<圆柱体-两个圆柱体<圆柱体-圆柱体<球体-两个球体<平板-球体<平板-圆柱体<球体-球体。其中引起应变的最小的为平板-平板;最大的为球体-球体。

④ 料层粉碎的比能耗。在压力 p 作用下,料层由原始料层厚度 h_1 ,被压缩成厚度 h_2 ,料层由松散变为紧密。在此过程中物料颗粒受到粉碎,则外力所作的功 W 为:

$$W = \int_{h_1}^{h_2} p dh$$

这个功是由以下各部分组成:

- a. 耗于克服料层颗粒与压模壁之间的摩擦能;
- b. 耗于颗粒变形的能;
- c. 耗于颗粒粉碎的能;
- d. 耗于颗粒接触部分移动和形成新接触表面的能。

根据试验研究,比能耗与给矿量的关系有一个“低谷”,低载荷时,低谷比较平坦,高载荷时,低谷变窄。这说明在高压粉碎过程中,给料过多或过少都导致单位质量功耗过高。因此,加大载荷提高产品细度,相应的给料量要严格控制在一个较小的适当范围内,这些单位质量的功耗才最低,否则就会增加比能耗。

根据研究,料层粉碎的比能耗与料层的高度(h)、构成料层的物料粒度及粒度组成的性质与外加压力等因素有关。

对应于最小比能耗,一般最佳料层数为6~10层。单颗粒粉碎快速加载时,比能耗低,粉碎概率大,而料层粉碎慢速加载时,比能耗低,粉碎概率大。当料层粉碎进入最后结团阶段时,如果不失时机地卸载,将物料松散再压,便能有效地提高能量利用率。

(3) 粉碎极限 随着矿物加工工业向精细化发展,对于产品粒度的要求在一些工业部门已达到微粒和超微粒的粒度范围。到底机械粉碎方式能达到多细,近几年一些学者提出了粉碎极限的问题,这也属于粉碎物理学的一个新领域。

有些学者认为其主要原因是能量壁垒,或叫能量障碍。究竟如何?下面根据一些研究进展来进行讨论。

众所周知,能够独立存在并保持原物质性质(化学性质)的最小微粒是分子。因此,能够将其固体物质(如某矿物)分割成最小颗粒极限粒度是该物质分子的大小。

用机械方法缩小颗粒的粒度,假设达到了粒子粒度的终点,则称为粉碎的极限粒度。这个极限粒度的大小决定于该矿物的晶格结构和结构阻力。根据计算,石英的粒度在 $10\sim 100\text{\AA}$ ($0.001\sim 0.1\mu\text{m}$)范围内,按表面面积计,超过了 $6\times 10^6\sim 6\times 10^7\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 的范围。高登(Gaudin)的计算,石英的单位晶体的值为 $0.0005\mu\text{m}$ 。这些值,应该说是限定的粉碎绝对极限粒度。由于现代粉碎手段的限制,至今人们还不可能获得达到粉碎极限粒度的产品,而只能获得10倍甚至100倍于它的粒度,如 $0.1\sim 1\mu\text{m}$,已是很困难的了。如磨矿,有人将磨矿时间延长到100h以上,所获得的产品细度降低不大,甚至某些矿物随着磨矿时间的延长,产品粒度反而变粗。

因此,这里存在着一个粉碎实际极限粒度。依据一些学者的研究,其原因如下。

① 现有的任何一种粉碎设备,由于其性能本身的特征,其破碎(磨碎)比是一定的,因此,要使其超出粉碎实际极限是困难的。

② 任何现有的粉碎设备,其输入的能量及能量利用率都是一定的,而粉碎的效果取决于该设备依次粉碎能量的大小和能量利用率。延长粉碎时间,增加的是累积能量,而累积能量大小并不是粉碎的决定性因素。

③ 随着颗粒粒度的减小,表面能增大,导致颗粒的聚合力(内聚力或黏着力)增加,从而形成粒度减小与聚合的动力平衡粒度。

④ 随着颗粒粒度的减小,导致在粉碎过程中,晶体表面的错位和晶体结构上的明显错位,引起机械化学上的变化。如石英表面形成非晶形膜、方解石变成霞石等。

⑤ 随着颗粒粒度的减小,颗粒的破碎阻力增大,一次粉碎所需的粉碎能量显著增大,从而导致粉碎能量的分散。

⑥ 在批量磨矿中,随着试验时间的延长,粗细颗粒的比例发生变化,残余颗粒会阻碍细粒获得足够的粉碎能量,而细粒又会对残余颗粒产生保护效应。

由此可见,要实现超细粉碎,使产品尽可能达到粉碎极限粒度,关键在于提高一次粉碎的局部应力,即一次粉碎输入的有效能量,而不在于无限延长磨矿时间。

(4) 选择性粉碎 岩石的破碎有各种各样的目的,大致的划分有两种:第一种情况只要求将岩石的大小减小到一定的尺寸,如获得碎石。这时将块状岩石看成是各向同性、同体积的物料,可以按获得的粒度或表面积来划分;第二种情况是在选矿和其他许多工艺过程中,要求岩石的一种矿物或多种矿物解离,以便利用物理-化学的方法将不同的矿物颗粒分离出来。这时岩石必然看成是各向异性的,每个相具有自己的固有的性质和组成。

由此可见,对于每一种目的应该有一套粉碎方法。而实际上恰恰相反,在决定各种粉碎任务时,运用的是相同的破碎和磨碎的方法。并且绝大多数情况下,运用的粉碎方法是建立在无序的粉碎过程的基础上,是在不定强度载荷的联合作用下实现的,导致在不可知的方向上的粉碎,具有相应的粉碎概率。显然,这种无序粉碎,消耗大量的能量,又易造成过粉碎。用于选矿等广义的准备作业的岩石粉碎,其指导思想是沿分割相表面粉碎,并且用最低的能耗,这就是选择性粉碎。

从这个概念出发,列夫尼切夫新近提出了选择性粉碎的两个原则:第一是沿分割相表面粉碎,即粉碎的几何学选择原则;第二是用最低的能耗,即粉碎的动力学选择原则,并进行了理论计算。

两种矿物的交界面是复杂的。矿石的解离特性取决于构成矿石的各矿物相及相界面的强度。矿物共生界面的作用,不仅是构成结构成一个整体的矿石,而且决定着外应力的传递、分配及各组分的解离。矿物间的联结强度取决于成矿及继后的变质条件在内的许多因素,这些因素决定了共生界面的结晶学及结晶化学的参数、化学组成及化学键的结构与类型。成矿及变质

过程中,如果有能使原子通过共生界面扩散的条件(温度、用力、时间),则界面可变为过渡区,其强度高于界面的共生矿物或它们其中之一。

在粉碎时,矿物的解离取决于粉碎方法,即每一个粒子消耗的能量的形式和数量及粒子的选择性机械强度。选择性机械强度表征了在(内或外)应力作用下,在其中的组分完全解离时的矿石解离特性。这个数值取决于晶体间强度和穿晶强度的比。晶体间的强度可以由界面间岩石选择性解离的阻力来获得,穿晶强度由其岩石中任何矿物的选择性解离的阻力来确定。因此,欲选择合理的粉碎制度,以期达到最佳的解离,必须对矿石中各组成矿物及其界面特性、碎裂的动力学特性等进行综合考虑。

1.2.3 粉碎功耗

一个半世纪以来,粉碎过程的功耗问题始终是粉碎机理研究的重心,这方面研究便于认识粉碎过程的输入功与粉碎前后物料潜能变化的关系,为确定物料的可碎性、合理地选择和设计粉碎设备及评价粉碎效率等提供理论基础。

众所周知,功耗理论有三大著名的功耗学说,即雷廷格尔(P. Ritinger)的“面积说”,基克(F. Kick)的“体积说”,邦德(F. Bond)和王仁东的“裂缝说”。这三大理论的提出,历经了近100年(1867~1950年)。

(1) 面积说 1876年德国学者P. Ritinger提出剪力变形模型:破碎所消耗的能量与破碎过程中碎石新产生的表面积成正比:

$$\Delta E = k_R \Delta S = k_R \Delta (D^2)$$

(2) 体积说 1885年F. Kick提出压缩变形模型:垂直压力起主要作用,与颗粒体积或质量成正比:

$$\Delta E = k_K \Delta V = k_K \Delta (D^3)$$

(3) 裂缝说 1950年美国学者F. E. Bond和中国学者王仁东提出:

$$\Delta E = k_B \Delta (D^{2.5})$$

这三大理论,各自只反映了粉碎过程的某一阶段,都有片面性,但互不矛盾,而是相互补充。对于粗粒物料的粉碎过程,体积说比较实际;对于细粒物料的粉碎,面积说与实际过程较吻合;裂缝说适用于中等粒度的粉碎过程。

然而这三大学说都还存在着一些问题,首先表现在这个学说公式的意义与物理实质存在着矛盾。即当外力做功稍大于零时,破碎比就相应地增大,则发生微小的破碎。实际上外力所做的功如不超过内聚能量,物体是不会发生破碎的。其次,上述学说中均将功的比例系数视为常数,而实际上不是常数,物料愈细,强度愈大,已为许多经验所证明。另外,这些学说中对于物料群的粒度表示法,都是采用平均直径。而实际物料是由许多粒级和粒级含量各不相同的离散体系组成,且并不连续,即使平均粒度相等,但其粒度分布可能完全各异,这必然影响到公式的准确性和可靠性。

1.2.4 粉碎过程的物理化学

传统的观点是将粉碎过程视作一个机械力学过程,而实际上粉碎过程是一个物理过程。

如粉碎功耗的三大学说,始终是突出了表面能与粉碎功耗的关系。粉碎的物理化学问题属粉碎引起的机械化学反应的一个组成部分。机械化学反应是由机械能诱发的化学反应,是机械运动能与化学能量的交换。

在许多应用领域,如塑料填料、涂料等,不仅对非金属矿粉体产品的粒度、纯度有要求,还对其表面物理化学性质如白度、亮度、亲水性、疏水性、吸附活性、电性、比表面积等有要求。

对于金属矿物,在分选过程中,粉体的表面性质对分选也是至关重要的决定性因素。因

此, 如能有目的地将粉碎加工与机械激活表面改性和表面包覆结合起来, 将简化工艺流程并提高经济效益。

目前, 粉碎物理化学的研究, 除对机械化学反应方面的研究外, 对于粉碎界则着重于下列三个方面:

① 物料可碎性的调节。为了突破各种粉碎设备的粉碎实际粒度极限, 使产品接近粉碎的绝对粒度极限, 为了进一步降低粉碎能耗而开展了助磨剂的研究; 为了改善后续的加工工艺, 而开展了选择性粉碎的研究等。

② 粉碎对物料可选性的调节。主要是改善粉碎过程所造成的物理化学环境对矿物表面性质和结构性质的影响, 从而有利于分选、分离、浸取、萃取等。

③ 为节约钢耗开展的介质磨损速率的调节研究。

1.2.5 粉碎动力学

将磨矿过程作为一个速率过程来进行数学描述, 即研究颗粒的减小与时间的关系, 这就是磨矿动力学。

目前, 粉碎(磨矿)动力学已有零级、一级和多级动力学的发展, 但主要是零级和一级。

(1) 零级动力学 试验表明, 在磨机内细粒子初期生成率是零级速率现象, 即生成的细粒子总数与磨矿时间成正比。其数学表达式如下。

用粗粒子减少表示:
$$-\frac{dw}{dt} = k$$

用细粒子生成表示:
$$w_i = k_i t$$

式中 w_i ——小于粒度 d_i 的粒子累积重量;

k_i ——对于生成的小于粒度 d_i 的零级速率常数;

t ——磨矿时间。

(2) 一级动力学的基本方程式

$$R_t = R_0 (1 - k_p)^{t^m}$$

式中 R_t ——磨至 t 时刻粗级别的剩余产率;

R_0 ——磨矿起始时刻粗级别的含量;

k_p ——相对磨矿速度;

t ——磨矿时间;

m ——常数。

(3) 一级动力学普遍方程式

$$R = R_0 k \left(\frac{N\eta}{B} \right)^m$$

式中 N ——输入功率;

η ——能量利用率;

B ——磨机的生产率。

1.2.6 粉碎工艺学

粉碎工艺学的范围较广, 这里只就几年来有关节能新工艺的情况做一简介。节能新工艺的基本原则是“多碎少磨”和“以碎代磨”, 因为破碎的能耗低于研磨的能耗, 破碎的能量利用率高于研磨的能量利用率。

(1) 降低破碎产品粒度采取的主要措施

① 选用合适的破碎腔几何形状和运转参数, 进一步改进破碎机的结构;

② 研制以料层粉碎理论为基础的新型破碎机, 重点是研制超细碎破碎机;

③ 强化预先筛分,尤其是强化中碎前的预先筛分,推广新三段-闭路流程;

④ 调整各段破碎比,充分发挥各破碎段设备的负荷潜力,尤其是适当增大粗中碎破碎比,减轻第三段破碎机负荷;

⑤ 运用功率控制,自动调节排矿口;

⑥ 选择合理的碎矿工艺,在破碎段加入选别作业,早丢多丢废石和排出尾矿。

(2) 改进和强化磨矿过程的主要方面

① 改进磨矿设备,重点在磨腔内元件(如衬板、介质)、工作参数和传动系统方面的改进;

② 研制新型高效节能磨机;

③ 合理使用自磨机和自磨工艺;

④ 提高与磨机配套使用的筛分、分级的效率,改进分级工艺;

⑤ 研究来源广、高效、廉价和无污染的助磨剂,人工调节物料的可磨性;

⑥ 依据断裂力学的理论,采用矿石预损伤手段,增加矿石颗粒中裂纹,改善矿石的可磨性;

⑦ 提高磨矿过程的自动控制水平。

(3) 破碎的新工艺

常用的破碎工艺主要有一段、两段和三段破碎流程,可以是开路,也可以是闭路。

一段破碎流程一般使用颚式破碎机,为自磨机提供合理组成的矿石。

两段破碎流程的构成,在近几年有许多改进,出现了多样化的势头。主要工艺流程如下。

① 颚式破碎机-圆锥破碎机 产品细度 $<15\text{mm}$ 。

② 颚式破碎机-旋盘式破碎机 产品粒度 $12\sim10\text{mm}$ 。

③ 颚式破碎机-锤式破碎机 产品粒度 $<12\text{mm}$ 。

④ 颚式破碎机-细碎颚式破碎机 产品粒度 $<15\text{mm}$ 。

⑤ 细碎颚式破碎机-高压辊磨机 产品粒度 $<5\text{mm}$ 。

对于两段破碎流程,目前的趋势是使用颚式破碎机-细碎颚式破碎机,产品较细,生产率较高,能耗较低。但细碎颚式破碎机-高压辊磨机更有前途,目前的问题是细碎颚式破碎机开路工作时,产品较粗,闭路致使流程复杂。因为高压辊磨机的给料粒度 $<22\text{mm}$,与细碎颚式破碎机开路连接尚有些困难。再者细碎颚式破碎机给料粒度有限制,若采矿粒度稍大,在前面要增加一段普通颚式破碎机。

三段破碎流程其前景是用高压辊磨机替代细碎圆锥破碎机,这样才能确保破碎最终粒度小于 5mm 。目前主要是在中碎前的预先筛分上作文章,出现了三种新三段-闭路流程。

(4) 磨矿的新工艺 球磨工艺的发展不快,前段时间主要是大型化,用筛分和水力旋流器更替螺旋分级机。采用筛分分级在我国取得了很大进展,水力旋流器使用进展较慢,主要是耐磨材料问题,引起关注的磨矿工艺是高压辊磨机配套的磨矿工艺。因为该工艺可降低磨矿能耗 20% 以上,提高磨机生产能力 $50\%\sim100\%$ 。目前已出现四种类型的工艺流程,即预磨流程、终磨流程、半终磨流程和混合磨流程。

随着世界经济和科学技术的迅速发展,随着新的粉碎理论和作用机理的出现及运用,新型高效节能粉碎工程设备将不断涌现,原有设备类型也将不断得到优化和更新换代,使粉碎工艺和流程不断完善及发展,从而粉碎过程不断向高效、节能、低消耗及更高产品质量和更多产品类别的方向发展。



破碎过程与设备

2.1 概述

2.1.1 粉碎的意义及分类

生产中所需要的原料，有的细至粉末，有的粒度大于 1m 以上。工厂中对原料和半成品必须进行不同程度的粉碎，使其粒度达到要求的大小，以便于进行再加工。如面粉厂将小麦磨成面粉，以利于分选、加工和使营养物质更易于吸收；燃煤的火力发电厂将煤块研磨成煤粉，以利于煤在炉膛内与空气充分接触，进行完全燃烧；水泥厂将原料磨成细粉，以利于在窑炉内提高固相反应速率，使反应更加完全，将熟料、石膏及混合材等混合后磨成水泥，以利于在使用时水化反应的进行；某些化工厂将催化剂分散成粉状，可以加大固气传质速率，提高催化效果；某些颜料、涂料被制成细粉，以提高其均匀度等。

物料经粉碎后，比表面积增加，可提高化学反应速率和物理作用效果；几种不同固体物料的混合，在细粉状态下易达到均匀的效果；物料经粉碎后，便于干燥、传热、贮存和运输；物料经粉碎后，还可用于材料科学、环境保护和选矿等部门。

在建筑材料生产中，粉碎作业是很重要的过程。例如：每生产 1t 水泥，需破碎和粉磨的物料量约 4t，而用于粉碎的电费占总电费的 70% 左右，同时粉碎作业的情况直接关系到产品质量和产品成本。

根据处理物料尺寸大小的不同，可将粉碎分为破碎和粉磨两个阶段。将大块物料碎裂成小块物料的过程称为破碎；小块物料磨成细粉的过程称为粉磨。为了明确起见，通常按以下方法进一步划分。

- ① 粗碎 将物料破碎到 100mm 左右。
- ② 中碎 将物料破碎到 30mm 左右。
- ③ 细碎 将物料破碎到 3mm 左右。
- ④ 粗磨 将物料粉磨到 0.1mm 左右。
- ⑤ 细磨 将物料粉磨到 60 μ m 左右。

⑥ 粗磨 将物料粉磨到 $5\mu\text{m}$ 或更小。

2.1.2 粉碎的有关概念

2.1.2.1 粉体和粉碎的基本知识

所谓粉体指大量具有相互作用的微小固体颗粒的集合体。众所周知,自然界中的物质,其存在的状态一般为气态、液态和固态,而粉体却不能简单地归结为其中的某一种状态。从微观上看,单个的颗粒属于固态,具有固体的特性;而从宏观上看,对于整个颗粒群即粉体来说,却具有类似于液体的特性。比如,粉体具有流动性,没有固定的外形,其整体的形状可随容器的形状而改变;粉体层内部的压力与其深度有关,但又不像液体那样与深度成正比,而且某一点的压力也不是在各个方向上都相同。此外,粉体不是连续体,受压后体积会显著变小,这一点又与气体相似。

粉体的种类不同,其电、磁、光、热、吸附、溶解、燃烧等物理、化学性能也各不相同,但不同的粉体都是大量微小固体颗粒的集合体,通常具有以下共同的力学性能。

(1) 比表面积大 单位质量的粉体具有很大的表面积(如水泥的比表面积为 $2500\sim 5000\text{cm}^2/\text{g}$),因而具有较高的化学活性,特别有利于提高固相反应的速率。

(2) 可塑性强 便于制成各种形状的产品。

(3) 流动性好 便于进行贮存、输送、混合、成型、干燥等单元操作。

据估计,人类在日常生活和生产中所使用的产品,有 80% 以上是直接以粉体的形式或通过粉体的形式进行再加工而制成的。在许多行业都要进行粉体作业(机械能),所谓粉体作业(机械能)即将大块物料或大颗粒的物料经破碎、输送、粉磨、分级等工序,制备出符合一定粒度要求的粉体(或称粉末)。

粉体的操作过程主要有:

① 粒径变化过程,包括粉碎(减小物料的粒径)和造粒(增大物料的粒径);

② 分离过程,包括分级(筛分、流体分级)、过滤、干燥、除尘等;

③ 移动过程,包括混合、输送、仓贮、流态化等;

④ 粉体的物性及粉体过程参数的测量。

用机械方法或非机械方法(电能、热能、原子能、化学能等)克服固体物料内部的内聚力将其分裂,从而使物料的尺寸减小、比表面积增加的过程,称为粉碎。如矿山采石多用爆破的非机械方法,而将大块的物料碎裂成小块或将小块物料磨成细粉时多采用机械的方法。

大块物料破碎成小块物料称为破碎;小块物料磨成细粉称为粉磨。破碎与粉磨统称为粉碎。相应地完成这些作业的机械,称为破碎机械和粉磨机械,或统称为粉碎机械。

物料经粉碎尤其是经粉磨后,其粒度显著减小,比表面积显著增大,因而有利于几种不同物料的均匀混合,便于输送和贮存,也有利于提高高温固相反应的程度和速率。

2.1.2.2 粉碎比

粉碎比是指粉碎前物料粒径(D)和粉碎后物料粒径(d)的比值,即为 $i=D/d$ 。粉碎比表示物料粒度在粉碎过程中减小的倍数,表征物料被粉碎的程度。粉碎比是衡量物料粉碎前后粒度变化程度的一个指标,也是粉碎设备性能的评价指标之一。对一定性质的物料,粉碎比是确定破碎机械或粉磨机械的主要依据。

物料粉碎前的平均粒径与粉碎后的平均粒径之比称为平均粉碎比,又称真实粉碎比。它能较真实地反映粉碎程度,所以在科研及理论研究中常被采用。

公称粉碎比:对破碎机而言,允许的最大进料口尺寸与最大出料口尺寸之比(或极限粉碎比),在工程设计中常被采用,根据最大块直径来选择粉碎机给料口宽度。

各种粉碎机械的粉碎比均有一定的范围。一般情况下,破碎机械粉碎比为 $3\sim 100$,近年来研制的立式反击式破碎机的粉碎比为 $40\sim 1000$;粉磨机械粉碎比为 $500\sim 1000$ 。

必须指出,在实际粉碎作业中,最大进料粒度通常总小于允许的最大进料粒度,因此粉碎机的平均粉碎比一般都较公称粉碎比小 10%~30%,在粉碎机的选型时应注意这一点。

粉碎比与单位电耗(单位质量粉碎产品的能量消耗)是粉碎机械的重要技术经济指标,后者用以衡量粉碎作业动力消耗的经济性;前者用以说明粉碎过程的特征及粉碎质量。当两台粉碎机粉碎同一物料且单位电耗相同时,粉碎比大者工作效果就好。因此,鉴别粉碎机的性能要同时考虑其单位电耗和粉碎比的大小。

2.1.2.3 粉碎级数

物料每经过一次粉碎机称为一个粉碎段。若要求的粉碎比不大,一段粉碎即可满足。但对于粉体作业来说,由于要求的粒度较细,粉碎比很大,往往需要把几台粉碎机串联组成粉碎流程。串联粉碎机的台数即为粉碎级数,或粉碎段数。对物料进行多次(段)粉碎,其总粉碎比等于各段粉碎比的乘积,即:

$$i=i_1 \times i_2 \times i_3 \times \cdots \times i_n$$

粉碎级数是决定粉碎工艺流程的基本指标,这主要决定粉碎物料的原始粒度和最终粒度。粉碎级数越多,粉碎流程就越复杂,工程投资相应增加,因此,在可能的条件下,应尽量采用一级或两级粉碎流程。

2.1.2.4 粉碎产品的粒度特性

物料经粉碎或磨后,成为多种粒度的集合体。为了考察其粒度分布情况,通常采用筛析方法或其他方法将它们按一定的粒度范围分为若干粒级。

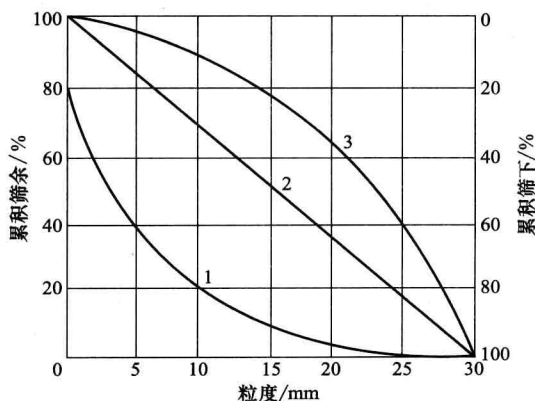


图 2-1 粒度组成特性曲线

根据测得的粒度分布数据,分别以横坐标表示粒度、以纵坐标表示累积筛余或累积筛下百分数,即可作出累积粒度特性曲线,如图 2-1 所示。借助于该特性曲线可较方便明了地反映粒度分布情况。

图 2-1 中曲线 1 呈凹形,表明粉碎产品中含有较多细粒级物料;凸形曲线 3 则说明产品中粗级物料较多;直线 2 表明物料粒度是均匀分布的。粒度分布曲线不仅可以用于计算不同粒级物料的含里,还可将不同粉碎机机械粉碎同一物料所得的曲线进行比较,以判断它们的工作情况。

2.1.2.5 粉碎的流程

工业上粉碎和筛分(或分级)通常组成一个联合系统,所谓粉碎流程实际上是粉碎筛分(或分级)流程。由于粉碎机的粉碎比限制,往往不可能在一次粉碎中达到所要求的物料粒度,同时还因生产的经济原则,常把几台粉碎机串联起来使用,而每一台只实现整个粉碎过程的一部分,这样的部分称为流程的段,只带一段粉碎的为一段粉碎筛分(或分级)流程,两段以上的为多段流程。

一段粉碎筛分(或分级)流程只有四种基本型式,如图 2-2 中的 A~D 所示。A 表示单纯粉碎工艺,操作控制方便,占地面积少,但只适用于对粉碎产品粒度要求不高的场合。例如大块物料需要用皮带输送机输送时,可采用该流程,用破碎机将大块物料破碎成小块。

B 表示带预先筛分的粉碎工艺,用于原料中已含有相当数量的合格细粉的情况。由于预先筛除物料中不需要粉碎的细粒,相对地减少了进入粉碎机的总给料量,有利于防止粉碎机内过粉碎,有利于节能。

C、D 两种工艺流程均带有检查筛分,能够将粉碎产物中大于所要求的产品粒度的物料分离出来,送回粉碎机进行再粉碎,因此可获得全部符合粒度要求的产品。但 C 流程根据其工