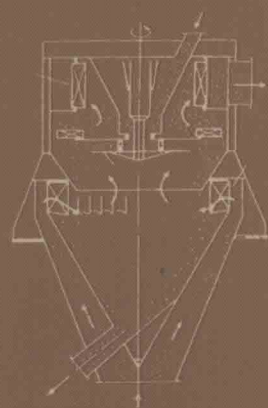
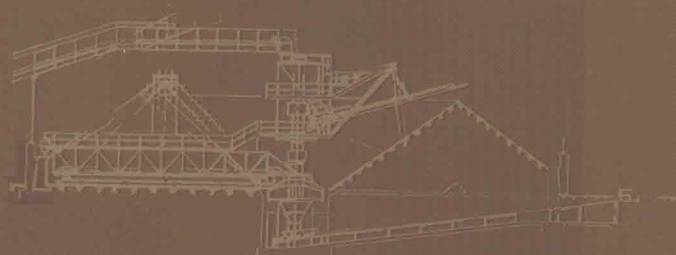
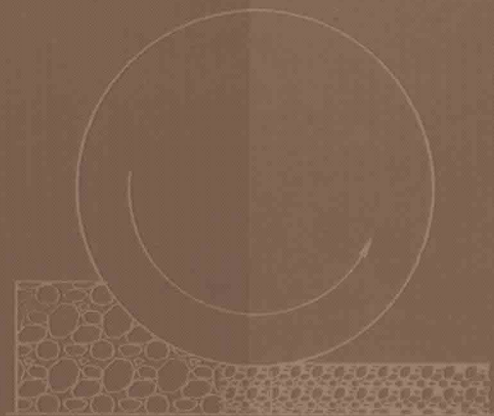


无机非金属材料 工业机械与设备

WUJI FEIJINSHU CAILIAO GONGYE JIXIE YU SHEBEI

张庆今 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

无机非金属材料 工业机械与设备

张庆今 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

内容简介

本书介绍无机非金属材料工业生产过程中常用的机械设备,其中包括粉碎理论及粉碎机械、筛分过程及筛分机械、颗粒流体力学及其设备、混合过程及混合机械设备、仓流过程及贮料喂料设备、起重运输机械等。此外,还编入现代生产中出现的新概念、新技术和新设备,如粉碎过程的机械力化学及极限比表面积理论、均化过程的预均化和均化设备、冲击粉碎原理及冲击式粉碎机、料层挤压粉碎原理及挤压式粉磨机、超细粉磨原理及超细粉磨机械等。

本书的写作特点是理论密切联系实际,在重点介绍机械过程的基本要领和理论的同时,详细介绍各类机械设备的构造、工作原理、主要工作参数计算、工作性能及用途,并附有适当的计算例题,使内容更新颖、系统、实用,对读者掌握这方面的理论、机械设备及其应用技术有所帮助。

本书可作高等院校无机非金属材料科学与工程专业的教材,亦可供科研、设计部门和生产厂矿的科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料工业机械与设备/张庆今编著. —广州:华南理工大学出版社, 2011. 9
ISBN 978-7-5623-3410-1

I. ①无… II. ①张… III. ①无机非金属材料-工业生产-机械设备 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 097699 号

总发行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 22236386 87111048 (传真)

E-mail: scutcl3@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com.cn

责任编辑: 张颖

印刷者: 佛山市浩文彩色印刷有限公司

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 36 字数: 945 千

版次: 2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1~2000 册

定价: 55.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

工厂的每一条工艺生产线都要通过相应的机械设备来实现。工业生产的发展水平，很大程度上取决于机械设备的完善与否。工业生产的技术进步，总是反映在工艺设备的技术进步上。在无机非金属材料工业工厂中亦是如此。

本书介绍无机非金属材料工业生产过程中常用的机械设备，着重介绍机械过程的基本概念和典型的机械设备，包括粉碎理论及粉碎机械、筛分过程及筛分机械、颗粒流体力学及设备、混合过程及混合机械设备、仓流过程及贮料喂料设备、起重运输机械等。介绍这些机械设备的类型、构造、工作原理、主要工作参数计算及性能、用途，并附有计算例题。以便读者掌握这方面的知识和技能，并应用于实践，指导生产和科学实验。

本书编写尽量体现先进性、科学性和实践性。着重阐述机械过程的基本理论和原理，同时采用按理论线索带动具体机械设备的叙述方法。这样既保持学科内在联系，又照顾读者的认识规律，做到理论联系实际，培养分析问题和解决问题的能力，使具有从事一般科学研究的水平和进行技术革新的技能，以适应无机非金属材料工业现代化发展的需要。

本人从事硅酸盐工程、粉体工程及超微颗粒学教学、科研和设计五十多年。编写的《硅酸盐工业机械及设备》一书，自从1992年出版以来，得到广大读者的厚爱，已先后重印了9次。19年来，无机非金属材料科学与工程取得飞速发展，生产中的新工艺、新技术、新设备及操作控制手段日新月异。为了适应现代教学、科研和生产的需要，在该版本基础上进行编改，删去部分生产中少用的机械设备内容，将生产中出现的新概念、新技术和新设备作了补充。例如，粉碎过程的机械力化学及极限比表面积理论、混合过程的预均化和混合设备、冲击粉碎原理及冲击式粉碎机、料层挤压粉碎原理及挤压式粉磨机、超细粉磨原理及超细粉磨机械等，使内容更新颖、系统、实用，以期对读者在掌握这方面的新理论、新设备及其应用技术有所帮助。

本书可作为高等院校无机非金属材料科学与工程专业的教材，亦可供科研、设计部门和生产厂矿的有关技术人员参考使用。

由于本人水平所限，书中不妥或错误之处，敬请读者批评指正。

张庆今

2011年3月于广州

目 录

第一篇 粉碎机械	(1)
第1章 概述	(1)
第一节 物料粉碎的基本概念	(1)
第二节 物料的易碎性与易磨性	(6)
第三节 粉碎物料的粒度特性	(7)
第四节 粉碎理论	(11)
第五节 粉碎机械的分类	(16)
第2章 颚式破碎机	(18)
第一节 工作原理及类型	(18)
第二节 构造	(20)
第三节 工作参数的确定	(26)
第四节 性能及应用	(32)
第3章 圆锥破碎机	(33)
第一节 工作原理及类型	(33)
第二节 粗碎圆锥破碎机	(34)
第三节 中细碎圆锥破碎机	(36)
第四节 颚旋式破碎机	(41)
第4章 辊式破碎机	(43)
第一节 双辊破碎机	(43)
第二节 单辊破碎机	(49)
第5章 轮碾机	(50)
第一节 工作原理及类型	(50)
第二节 构造	(51)
第三节 工作参数的确定	(54)
第四节 性能及应用	(56)
第6章 冲击式粉碎机	(57)
第一节 冲击粉碎原理	(57)
第二节 冲击式粉碎机	(61)
第7章 球磨机	(91)
第一节 工作原理及类型	(91)
第二节 构造	(96)
第三节 球磨机介质运动分析及工作参数的确定	(128)
第四节 性能及应用	(150)

第8章 挤压式粉磨机	(151)
第一节 料层挤压粉碎原理	(151)
第二节 辊磨机	(154)
第三节 辊压机	(174)
第四节 筒辊磨机	(194)
第五节 使用挤压式粉磨机的粉磨系统	(201)
第9章 超细粉磨设备	(207)
第一节 超细粉磨原理	(207)
第二节 超细粉磨设备	(209)
第二篇 筛分机械	(229)
第10章 概述	(229)
第一节 筛分及其类型	(229)
第二节 筛分过程及筛分效率	(230)
第三节 筛面及筛制	(235)
第四节 筛分机械分类	(237)
第11章 筛分机械	(238)
第一节 回转筛	(238)
第二节 摇动筛	(240)
第三节 振动筛	(244)
第三篇 颗粒流体力学及设备	(255)
第12章 颗粒流体力学的基本原理	(255)
第一节 概述	(255)
第二节 颗粒在流体内做相对运动时的阻力	(256)
第三节 颗粒在流体中的运动	(258)
第四节 流体通过颗粒层的流动	(268)
第五节 固体流态化	(271)
第13章 流体分级设备	(285)
第一节 空气选粉机	(285)
第二节 水力分级机	(312)
第14章 料浆脱水设备	(315)
第一节 厚浆池	(315)
第二节 过滤设备	(317)
第15章 收尘设备	(332)
第一节 概述	(332)
第二节 降尘室	(334)
第三节 惯性收尘器	(335)
第四节 旋风收尘器	(336)
第五节 袋式收尘器	(349)

第六节	电收尘器	(362)
第七节	颗粒层收尘器	(374)
第八节	水膜收尘器	(376)
第16章	气力输送设备	(378)
第一节	概述	(378)
第二节	管道式气力输送设备	(379)
第三节	空气输送斜槽	(397)
第四篇	混合机械设备	(401)
第17章	概述	(401)
第一节	混合过程	(401)
第二节	混合原理	(402)
第三节	混合效果的评价方法	(403)
第四节	影响混合的主要因素	(408)
第18章	预均化机械设备	(412)
第一节	预均化原理	(412)
第二节	预均化堆场的均化方式	(416)
第三节	预均化机械	(421)
第19章	混合机械及设备	(435)
第一节	混合机类型	(435)
第二节	料浆搅拌机械	(437)
第三节	粉料混合机械设备	(441)
第五篇	起重运输机械	(461)
第20章	起重机械	(463)
第一节	桥式起重机	(463)
第二节	电动葫芦	(467)
第21章	输送机械	(469)
第一节	带式输送机	(469)
第二节	链板输送机	(497)
第三节	斗式提升机	(502)
第四节	螺旋输送机	(514)
第五节	振动输送机	(521)
第六节	滚柱输送机	(531)
第22章	装卸机械	(534)
第一节	斗式装载机	(534)
第二节	叉式装卸车	(535)
第三节	抓斗门式起重机	(536)
第四节	卸车机	(536)

第六篇 贮料及喂料设备	(538)
第23章 贮料设备	(538)
第一节 贮料设备的作用和类型	(538)
第二节 粉粒体在存仓内的流动	(539)
第三节 存仓的计算及布置	(546)
第四节 存仓闭锁设备	(552)
第24章 喂料设备	(555)
第一节 概述	(555)
第二节 有挠性牵引构件的喂料设备	(555)
第三节 转动式喂料设备	(557)
第四节 振动式喂料设备	(559)
参考文献	(567)

第一篇

粉碎机械

第1章 概 述

第一节 物料粉碎的基本概念

一 粉碎过程

固体物料在外力作用下，克服了内聚力，使之碎裂的过程，称为粉碎过程。

施加外力的方法可用人力、机械力、电力或采用爆破等方法。矿山采石多数采用爆破方法，而将大块物料碎裂为小颗粒物料多数采用机械方法。

随着粉碎的进行，大块物料碎裂为小块，小块物料碎成细粉，物料的总表面积在不断地增加。因此，固体物料的粉碎可以提高物理作用的效果及化学反应的速度。几种固体物料的混合，也必须在细粉状态下才能得到均匀的效果。固体物料经粉碎后，为烘干、混合、运输和储存等操作准备好有利条件。

在无机非金属材料工业中，数量很大的固体原料、燃料和半成品等需要经过各种不同程度的粉碎，使其块度达到各工序所要求的大小，以便操作加工。因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的过程称为破碎；将小块物料碎裂为细末的过程称为粉磨。粉碎过程通常还按以下方法进一步划分：



常用物料粉碎前的尺寸 D 与粉碎后的尺寸 d 之比来说明粉碎过程中物料尺寸变化情况，比值 i 称为粉碎度（或称粉碎比），即

$$i = \frac{D}{d} \quad (1-1)$$

通常所说的粉碎度系指平均粉碎度，即粉碎前后物料的平均直径比值，它主要用来表明物料粉碎前后粒度变化的程度，并能近似地反映出机械的作业情况。另外，为了简易地

表示和比较各种破碎机械的这一主要特征,也可用破碎机的最大进料口宽度与最大出料口宽度之比来作为粉碎度,称为公称粉碎度(或称公称破碎比)。破碎机的平均粉碎度一般都较公称粉碎度低,这在破碎机选型时应特别注意。

每一种粉碎机械所能达到的粉碎度是有一定限度的。破碎机的粉碎度一般为 3 ~ 30; 粉磨机的粉碎度可达 1000 以上。

由于破碎机的粉碎度较小,如果要求达到的粉碎度超出上述范围,就得接连使用两台或多台破碎机来进行破碎。接连使用几台破碎机的破碎过程,称为多级破碎。破碎机串联的台数叫破碎级数。这时原料尺寸与最后破碎产品尺寸之比,叫做总粉碎度。在多级破碎时,如果各级的粉碎度分别为 $i_1, i_2, \dots, i_n$ 则总粉碎度为:

$$i_0 = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n \quad (1-2)$$

即总粉碎度等于各级粉碎度之乘积。如果已知破碎机的粉碎度,即可根据总粉碎度求得所需的破碎级数。

粉碎机械工作的基本技术经济指标是单位电耗(即单位质量粉碎产品的能量消耗)和粉碎度。近来也有把粉碎度与产量的乘积称为质量系数,把它作为对粉碎机技术评价和对比的指标之一。单位电耗用以判别粉碎机械的动力消耗是否经济;粉碎度用来说明粉碎过程的特征及鉴定粉碎质量。两台粉碎机械单位电耗即使相同,但粉碎度不同,则这两台粉碎机械的经济效果还是不一样的。一般说来,粉碎度大的机械工作得较好。因此,要鉴定一台粉碎机械的好坏,应同时考虑其单位电耗及粉碎度的大小。

二 粉碎方法

虽然粉碎机械类型繁多,但按施加外力的方法不同,不外是通过下述几种方法使物料粉碎:

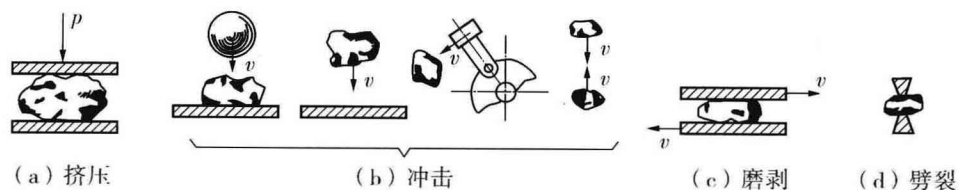


图 1-1 常用的几种粉碎方法

挤压法 如图 1-1a 所示,物料夹在两个工作面之间,由于工作面施加逐渐增大的静压力而粉碎。

冲击法 如图 1-1b 所示,物料受瞬间冲击力作用而粉碎。产生冲击力的原因是,运动的工作体对物料的冲击;高速运动的物料向固定的工作面冲击;高速运动的工作体向悬空的物料冲击;高速运动的物料互相冲击。

磨剥法 如图 1-1c 所示,物料夹在两个作相对运动的工作面之间,靠运动的工作面对物料摩擦时所施的剪切力,或者靠物料彼此之间摩擦时的剪切作用而使物料粉碎。

劈裂法 如图 1-1d 所示,物料搁在尖棱工作体间受尖劈楔入,物料因拉应力而粉碎。

除了上述用机械方法进行粉碎外,还有使用爆裂、电水锤、超声波和低声波、热力破碎和等离子破碎等粉碎方法,但目前尚未大规模使用。

不同形式的粉碎机,粉碎物料的方法各不尽同。在一台粉碎机中也不是单纯使用一种方法,通常都是由两种或两种以上的方法结合起来进行粉碎的。

应该根据物料的性质、尺寸以及需要粉碎的速度来选用恰当的粉碎方法。对于坚硬物料的粗、中碎，宜用挤压法；对于脆性和软质物料的破碎，宜用冲击法或劈裂法；对粉磨，一般采用磨剥法和冲击法；对于粘湿物料，如韧性物料那样采用磨剥法或配以挤压法。冲击法应用范围较广，可用于破碎和粉磨。

三 粉碎系统

粉碎作业可以通过不同的粉碎系统来完成。根据处理的物料性质、粒度大小、要求的粉碎度、生产规模以及使用的粉碎机等，可能有各种不同的粉碎系统。粉碎系统包括粉碎级数和每级中的流程两个方面。

1. 粉碎级数

就破碎作业而言，破碎系统的级数主要取决于物料要求的粉碎度和破碎机的类型。当选用一种破碎机就能满足粉碎度及生产能力的要求时，采用一级破碎系统；如果需要选用两种或三种破碎机，进行几级破碎才能满足要求时，采用二级或三级破碎系统。破碎的级数愈多，系统愈复杂，不仅设备和土建的投资增加，而且劳动生产率低，维护费用高，扬尘点也多，因此应力求减少破碎的级数。目前破碎系统不仅向减少破碎级数、简化生产流程的方向发展，而且在单一工序中同时进行破碎、烘干等多种作业。

2. 粉碎流程

粉碎系统中每级的流程也可以有不同的方式。破碎系统的基本流程如图 1-2 所示。图 1-2a 表示单纯的破碎，其流程简单，设备布置与车间的建筑也相应简化，操作控制也较为方便。但是，单纯的破碎没有充分发挥破碎机的生产能力，甚至有时还不能满足生产的工艺要求。

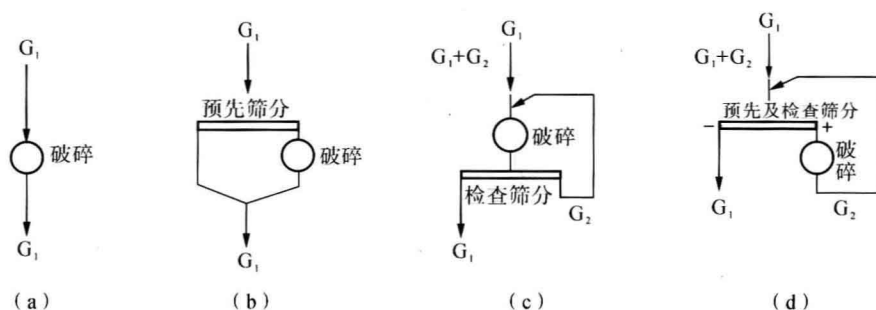


图 1-2 破碎系统的基本流程

带有预先筛分的破碎流程如图 1-2b 所示，由于预先除去物料中不需要破碎的细粒，使破碎系统的总产量有所增加，同时也减少了动力消耗、破碎机工作部件的磨损以及粉尘的形成，这在物料的细粒含量愈多的情况下就愈有利。

带有检查筛分的后两种破碎流程如图 1-2c 及 d 所示，采用这两种流程可以获得全部合乎要求粒度的产品，为下一阶段的粉碎作业创造有利条件。但是，这两种流程比较复杂，建筑投资较大，操作管理也比较麻烦。因此，第三种流程实际上极少采用；第四种流程往往由于必需的工艺要求才能采用，而且只用于多级破碎系统中的最后一级。

凡是不带筛分或仅有预先筛分的破碎流程，从破碎机卸出的物料全部作为产品，不再经破碎机循环，称为开流(或开路)流程(图 1-2a 及 b)。凡是有检查筛分的破碎流程，从破碎机卸出的物料要经过检查筛分，粒度合乎要求的颗粒作为产品，其余作为循环料重新

送回破碎机, 再次进行破碎, 称为圈流(或闭路)流程(图 1-2c 及 d)。开流流程的优点是比较简单, 设备少, 扬尘点也比较少; 缺点是当要求破碎产品粒度较小时, 开流流程的破碎效率低, 在用一级或二级破碎时产品有时会含有少数粒度大于合格产品的料块。圈流流程可以将大颗粒物料筛去, 保证产品粒度合格, 破碎效率较开流为高。但是, 圈流流程需要的设备较多, 流程较复杂。目前, 我国水泥厂的石灰石破碎多数采用开流流程, 有时在中碎机的入料溜槽处加设倾斜的固定格筛, 起预先筛分、减轻堵塞与磨损、提高产量等作用。

与破碎作业相似, 粉磨作业也有一级和二级(粗磨和细磨)粉磨。每级亦可分为开流和圈流两种主要流程(图 1-3)。使用开流粉磨流程时, 从磨机卸出的物料全部作为产品, 不再经磨机循环。使用圈流粉磨流程时, 从磨机卸出的物料要经过一套分级设备。细度合乎要求的颗粒作为产品, 其余作为循环料重新送回磨机, 再次进行粉磨。

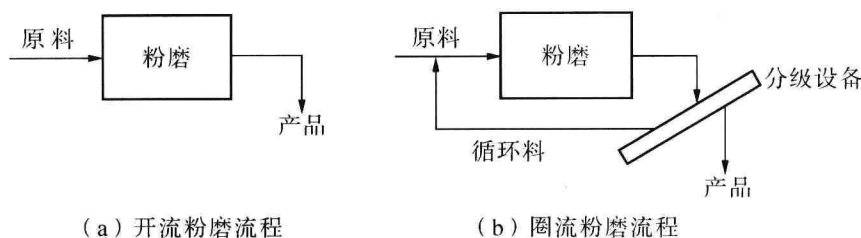


图 1-3 粉磨流程

开流粉磨流程比较简单, 但要使只经过一次粉磨后的产品全部符合要求的细度, 其中必然会有一部分物料成为过细的粉末, 出现过粉碎现象。另外, 已经粉碎的细小颗粒会把粗颗粒包围起来, 构成弹性衬垫, 使其不能直接受到粉磨介质的作用, 因而使磨机的生产能力下降。在圈流流程中, 设有分级设备, 料流速度可快些, 可将大小颗粒物料一起卸出, 经分级处理后, 又将大颗粒物料送回磨机循环, 消除了过粉碎和衬垫作用。因此, 磨机的生产能力较高, 单位电耗和机械的磨损也相应有所降低。但是, 圈流粉磨流程多了一套分级设备和循环料的运输设备, 设备比较复杂, 管理上也比较麻烦, 这些设备也产生了一些电耗。

粉碎流程的选择须根据具体生产情况而定。一般说来, 在细度要求不太严格, 生产规模较小的粗、中碎过程, 多用开流流程。对于细度要求比较严格、生产规模较大、消耗电力较多的细磨过程, 在条件许可时, 宜用圈流流程。

3. 分别粉磨与混合粉磨

工业生产中的粉磨通常是混合物料的粉磨。例如, 制备水泥生料时是将石灰石、粘土、铁粉等原料一起粉磨。何况每种原料本身也是一种混合物, 例如, 石灰石中除了主成分石灰石(碳酸钙)之外, 还有粘土、石英、燧石等。粉磨混合物料有两种方法:

(i) 分别粉磨: 分别将物料分开, 单独地进行粉磨, 然后再混合搅拌, 使之均匀。

(ii) 混合粉磨或称共同粉磨: 将混合物料一起投入磨机中进行粉磨, 在粉磨过程中即可使物料混合均匀。值得注意的是, 混合粉磨时某种物料会对另一些物料产生影响, 可能使其他物料加速粉磨, 起助磨作用; 或者使其他物料延缓粉磨, 起滞磨作用。反过来说, 其他物料对该种物料也可能产生助磨或滞磨的作用。助磨或滞磨的影响来自物性和颗粒大小两方面。颗粒大小的影响可以是一次的或者二次的。原料某种组分颗粒大小的影响属于一次影响。由于物性的关系, 使某组分的颗粒尺寸分布发生变化, 这种变化后的尺寸大小对粉磨速度发生影响, 这属于二次影响。因此, 混合粉磨是复杂的过程, 粉磨速度随混合

物料各组分的配比及颗粒尺寸大小而异。总的来说，如果是两种物料的混合粉磨，它们之间的相互影响有四种类型(图 1-4)。图中横坐标是 A、B 两种物料的配合比，纵坐标是物料的易磨性。物料 A 的易磨性是 H_A ，物料 B 的易磨性是 H_B ；物料 B 比较难磨。直线 1 表示这两种物料混合粉磨时彼此的易磨性不受影响。曲线 2 表示这两种物料混合粉磨时两者的易磨性有所提高，可使粉磨速度加快。曲线 3 表示这两种物料混合粉磨时其中任一种物料都会使另一种物料的易磨性降低，两者都起滞磨作用。曲线 4 表示 B 的存在使 A 的粉磨加速，起助磨作用；A 的存在使 B 的粉磨速度减慢，起滞磨作用。

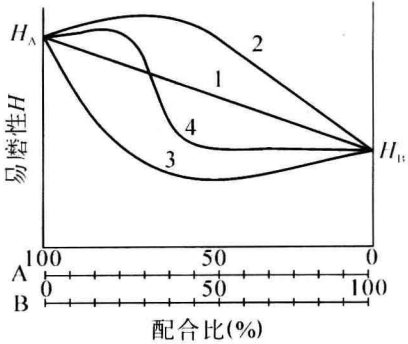


图 1-4 混合粉磨可能发生相互影响的几种情况

图 1-5 显示不同质量配比的水泥熟料和矿渣混合粉磨时对产品比表面积和功耗指标的影响。从图可以看出，矿渣的功耗指标较大，因为它比较难磨。水泥熟料掺入少量矿渣，功耗指标增大，但也可使产品的比表面积增大。必须指出，这时产品比表面积的增大是由于混合料难磨，从而使粉磨时间延长，熟料颗粒变得更细，提供更大的比表面积的缘故。所以这时产品比表面积的增大是以功耗指标的增大为代价换来的，粉磨要消耗更多的能量。

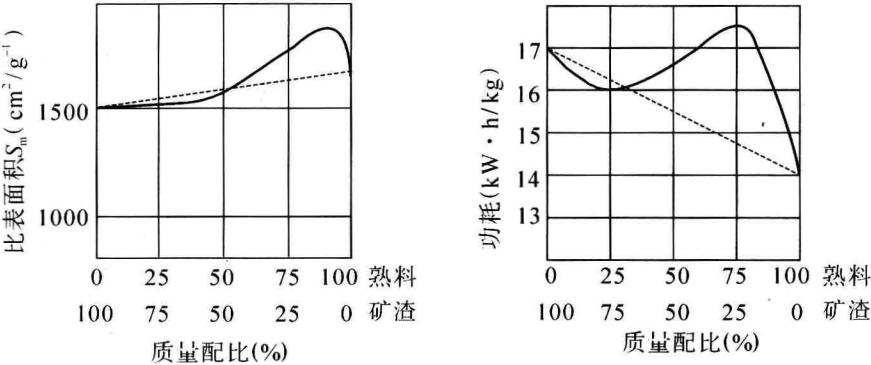


图 1-5 水泥熟料与矿渣混合粉磨时比表面积、功耗与配比的关系

由于混合粉磨会影响颗粒的尺寸，所以会引起某一物料富集于大的或小的粒级之内。图 1-6 表示这种现象。图中显示难磨的物料 A 与易磨的物料 B 在不同的质量配比时的混合粉磨情况。难磨的物料 A 配比增多时，组分 A 更加集中于粗粒级中。因此，粉磨水泥时，石膏等易磨性好的物料有富集于细粒级的倾向。

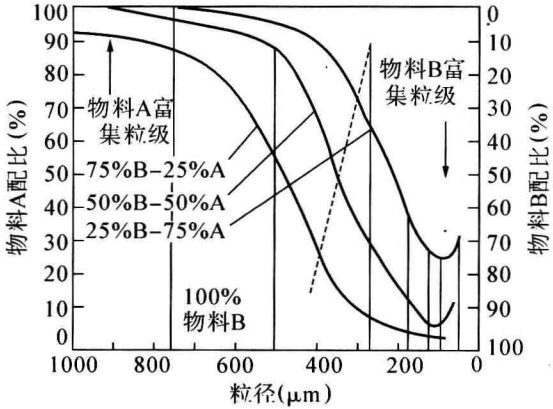


图 1-6 混合粉磨时物料成分的富集情况

第二节 物料的易碎性与易磨性

物料粉碎的难易程度,谓之易碎性。同一粉碎机械在相同的操作条件下,粉碎不同的物料时,生产能力是不同的,这说明各种物料的易碎性不同。易碎性与物料的强度、硬度、密度、结构的均匀性、含水量、粘度、裂痕、表面情况以及形状等因素有关。强度与硬度皆表示物料对外力抵抗能力,但是硬度大的物料并不一定很难粉碎,因为物料的破碎是一块块分裂开来的,破碎难易的决定因素是物料的强度。硬度大而强度不大的结构松驰的脆性物料比之强度大而硬度小的韧而软的物料易于破碎。虽然硬度大的物料不一定很难破碎,但是却难以粉磨,同时也使粉碎机的工作表面容易磨损,这是因为粉磨过程与破碎过程不同,前者是工作体在物料表面不断磨削而生成大量细粉的过程,故粉磨过程中硬度比强度的影响较大。

由于物料的易碎性与许多因素有关,一般用相对易碎系数来表示物料的易碎性。它是标准物料单位产量的电耗为基准做相对比较而得出来的。某一物料的易碎系数 K_M 是指采用同一台粉碎机,同一物料尺寸变化条件下,粉碎标准物料的单位电耗 E_b (J/t) 与粉碎风干状态下该一物料的单位电耗 E (J/t) 之比,即

$$K_M = \frac{E_b}{E} \quad (1-3)$$

物料的易碎系数意大,愈容易粉碎。易碎系数的测定方法目前国家尚无明确规定,各部门可自行选定标准物料来测定自己所需测定的物料的相对易碎系数,科学地进行破碎工艺过程的生产控制。水泥工业中,一般选用中等易碎性的回转窑水泥熟料作为标准物料。标准物料的易碎系数 K_M 取为 1,若被测物料的相对易碎系数 K_{M1} 大于 1,则说明其易碎性好,比标准物料容易破碎;反之,若 K_{M1} 小于 1,则易碎性不好,较标准物料难于破碎。

已知某一种粉碎机粉碎某一种物料的生产能力 Q ,利用易碎系数,就可求出这台粉碎机在粉碎另一种物料时之生产能力 Q_1 ,即

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{K_{M1}}{K_M} \quad (1-4)$$

物料粉磨的难易程度,谓之易磨性。物料粉磨的难易程度往往用消耗单位能量时物料比表面积的增加—— cm^2/J 或 $\text{cm}^2/\text{kW} \cdot \text{h}$ 表示易磨性。另外还用易磨性的倒数—— J/cm^2 表示物料的抗磨性。粉磨过程消耗单位能量所引起的物料比表面积的增加与当时物料的细度有关。因此一般来说,物料的易磨性与细度有关。随着细度的提高,物料变得越来越难磨。当颗粒粉碎得很细时,就会发生很严重的聚结,有可能使易磨性变为负数,因而使易磨性变得无意义。因此,人们所说的易磨性的值,往往是指磨到中等细度时的值,即相当于 0.08 mm 筛孔的筛上筛余为 10%,或比表面积为 $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ (透气法)时的值;同时,还规定喂入磨机的原料在 0.08 mm 的筛上筛余 $R_{0.08} \approx 100\%$ 。比表面积 ≈ 0 。

既然规定了细度,易磨性也就可以表示为每消耗单位能量能使多少千克物料达到规定的细度,即其单位为 $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。抗磨性则可以表示为每吨物料所消耗的能量,单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 。

粉磨时的能量消耗也与粉磨的方式,即磨机的种类有关。作为物料的一种性质去测定

物料的易磨性时，必须规定磨机的种类、尺寸及工作条件，也就是说，要求使用标准磨机在标准条件下进行粉磨。

某种物料的易磨性与标准物料的易磨性的比值叫易磨性系数。一般选用标准砂作标准物料，有时也用水泥厂的水泥熟料作标准物料。

与易磨性系数一样，粉磨功指数 W_i 也表示同样的内容——每吨物料从无限尺寸粉磨到一定细度 ($10\ \mu\text{m}$) 时的能量消耗。它的值也必然受到物料易磨性的影响。它们之间的关系，人们曾作过试验，得出表示物料易磨性与粉磨功指数关系的经验式如下：

$$W_i = \frac{1.10 \times 16}{G^{0.82}} \sqrt{\frac{P}{100}} \quad (\text{kW} \cdot \text{h/t}) \quad (1-5)$$

式中 P ——试验用筛的筛孔尺寸 (μm)；

G ——试验磨机转一圈的平均产量 (g/r)。

G 值越大，物料愈容易粉磨，粉磨功指数也就越小，故 G 称为物料的易磨特性。

为了使上式的形式与功耗的计算式联系起来，特将其改造为如下形式：

$$W_i = \frac{1.10 \times 44.5}{P^{0.23} G^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (\text{kW} \cdot \text{h/t}) \quad (1-6)$$

式中 P ——试验用成品筛的筛孔尺寸 ($80\ \mu\text{m}$)。

G ——试验磨机每转一圈平均产生的成品量 (g/r)；

F_{80} ——入磨试样有 80% 通过时的筛孔尺寸 (μm)；

P_{80} ——粉磨产品有 80% 通过时的筛孔尺寸 (μm)。

粉磨功指数的书写，应注明成品筛的筛孔尺寸，如 $W_i = 12.8\text{kW} \cdot \text{h/t}$ ($P = 80\ \mu\text{m}$)。国家标准规定以它代表被测物料的易磨性系数。粉磨功指数的物理意义是：被测物料从理论入磨粒度粉磨为成品时，所需要消耗的能量。其数值越大，物料越难粉磨；反之，数值越小，物料越易粉磨。这恰好与相对易碎系数相反，应用时宜注意。

第三节 粉碎物料的粒度特性

一 粒径表示方法

表示颗粒大小的尺寸，一般叫做粒径。对于球形颗粒，其直径也就是粒径。生产过程中所遇到的物料形状常是不规则的，但是也可以使用“粒径”一词来表示其大小。而对于粒径大小不同的颗粒所组成的颗粒群，则应选择一个“平均粒径”来表达全部颗粒的平均尺寸。

(一) 单颗粒粒径

对于形状不规则的单颗粒，可以由各个方向不一致的尺寸加以平均，得到“平均径”，或是以在同一物理现象中与之有相同效果的规则体直径（即等效径）表示。如果在三个互相垂直的方向上，料块或颗粒的尺寸为 l 、 b 及 h （如图 1-7 所示），则单颗粒粒径可用表 1-1 中各种计算公式来确定。

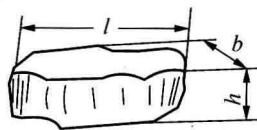


图 1-7 颗粒三度向尺寸

表 1-1 单颗粒粒径的计算方法

名 称	计 算 公 式	名 称	计 算 公 式
长轴径	l	三轴调和平均径	$3/\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}\right)$
短轴径	b	三轴表面积平均径	$\sqrt{2lb + 2bh + 2hl} / 6$
定向径	$l \sim b$	体面积平均径	$3l \cdot b \cdot h / (l \cdot b + b \cdot h + h \cdot l)$
二轴平均径	$(l+b)/2$	圆形等效径	$(4A/\pi)^{1/2}$
三轴平均径	$(l+b+h)/3$	球体等效径	$(4V/\pi)^{1/3}$
二轴几何平均径	$(l \cdot b)^{1/2}$	等效径(斯托克斯径)	$\sqrt{18\mu u_0 / (\rho_s - \rho) g}$
三轴几何平均径	$(l \cdot b \cdot h)^{1/3}$		
二轴调和平均径	$2/\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b}\right)$		

注： A —颗粒投影面积； V —颗粒体积； μ —流体粘度； u_0 —颗粒沉降速度； ρ_s —颗粒密度； ρ —流体密度； g —重力加速度。

当料块的三个方向皆可量度时，可用三轴平均径公式来定出物料的直径。显然，唯有大料块才能这样做。当颗粒只有两个方向可以量度，例如在显微镜下观测颗粒的大小时，就要用二轴平均径公式来定出颗粒直径。如果颗粒只有一个方向可以量度，就要用单轴径公式定出颗粒直径。例如用筛析法确定颗粒的大小时，是用筛孔尺寸来表示物料的尺寸。

(二) 粒群平均粒径

对于一堆大小不同、形状不规则的颗粒群，除算出单颗粒的平均径外，还要将不同大小的单颗粒粒径再加以平均，确定一个能代表全部颗粒的平均尺寸。工业上多用筛析方法来确定物料的尺寸。用套筛将物料试样分成若干狭窄粒级，根据相邻两层筛面筛孔尺寸，算出残留在这两层筛面之间的颗粒平均径，再根据每一狭窄粒级的直径，算出颗粒群的平均直径。颗粒群的平均粒径计算公式见表 1-2。

表 1-2 颗粒群平均径的计算方法

平均粒径的名称	计 算 公 式	物 理 意 义
算术平均径	$\overline{d}_n = \sum nd / \sum n$	单一粒径的算术平均值
几何平均径	$\overline{d}_g = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{1/n}$	几个粒径乘积的几次方根
调和平均径	$\overline{d}_h = \sum n / \sum (n/d)$	各粒径的调和平均值
体面积平均径	$\overline{d}_{vs} = \sum nd^3 / \sum nd^2$	全部颗粒的体积除以总表面积
质量平均径	$\overline{d}_m = \sum nd^4 / \sum nd^3$	质量等于总质量，数目等于总个数的等颗粒粒径
面积平均径	$\overline{d}_s = (\sum nd^2 / \sum n)^{1/2}$	将总表面积除以总个数取其平方根
体积平均径	$\overline{d}_v = (\sum nd^3 / \sum n)^{1/3}$	将总体积除以总个数取其立方根
比表面积径	$d_s = \phi / \rho_s S_m$	由比表面积计算的粒径
中位径	d_{50}	以粒径分布的累积值为 50% 时的粒径表示
多数径	d_{mod}	以粒径分布中含量最高的粒径表示

注： S_m —比表面积； ϕ —比表面形状系数。

粒径有着多种表示方法，采用不同的测定方法，会得到不同的粒径。就是采用同一的测定数据，由于应用目的不同，采用不同的计算方法，其结果也不相同。各种平均粒径的具体应用，要视所讨论问题的性质，结合测定方法和生产操作过程来选用，否则会得出不正确的结果。一些平均粒径所适用的有关物理化学过程见表 1-3。

表 1-3 不同物理化学过程所采用的平均粒径

符号	平均粒径名称	适用的机械、物理、化学过程
$\overline{d_n}$	算术平均径	蒸发、各种尺寸的比较(筛分析)
$\overline{d_{vs}}$	体面积平均径	传质、反应、颗粒充填层的流体阻力
$\overline{d_m}$	质量平均径	气力输送、质量效率、燃烧、物料平衡
$\overline{d_s}$	平均面积径	吸收、粉磨
$\overline{d_v}$	平均体积径	光的散射、喷射的质量分布比较、破碎
d_s	比表面积径	蒸发、分子扩散
d_{s0}	中位径	分离、分级装置性能表示
d_{sf}	等效径	气力输送、沉降分析

二 粉碎产品的粒度组成

在生产过程中，无论原料或粉碎产品，都是由大小不同、形状不规则的块状、粒状或粉状颗粒组成。为了表征它们的外形尺寸大小，经常使用“粒度”或“细度”这两个术语，它们没有明显区别，只是人们习惯对块粒状物料称为“粒度”，而对粉状物料称为“细度”。为了鉴定这些物料的粒度分布情况，通常将它们按一定粒径范围分成若干粒级。在一批物料中，各粒级颗粒的相对质量数值，称为这种物料的粒度组成(或称粒度特性)。

物料的粒度分布是通过各种粒度分析方法测定得出的。粒度分析所得数据可以整理在记录表上，用来说明物料的粒度组成特性。为了更明显地比较物料的粒度组成情况，通常将测得的数据作出物料的粒度组成特性曲线。一般是在普通的直角坐标上绘制曲线，用纵轴表示大于或小于某粒径的累积百分数，横轴表示相应的粒径(或筛孔尺寸)，所描绘的曲线称为粒度累积分布曲线(或称积分曲线)，如图 1-8 所示。曲线上任一点表示大于或小于某粒径的累积百分含量。根据粒度组成特性曲线可以清楚地判断物料粒度分布情况。如果曲线是直线(如图 1-8 中线 2)，说明此物料全部大小颗粒是均匀分布的；如果得出凹形曲线(如图 1-8 中线 1)，说明物料中含有较多的细小粒级；如果得出的曲线是凸形的(如图 1-8 中线 3)，则说明物料中大颗粒占多数。

作出粒度累积分布曲线，不仅可以求得记录表中没有给出的任意中间粒级百分数，同时还可以检查和判断产品质量情况。为了比较各种物料的特性，可将两条、三条或更多条的曲线放在同一图中(如图 1-8)，以便于比较研究。

以纵轴表示一定的粒径等差间隔范围内(例如以 5 mm 为一等差间隔)的颗粒百分含

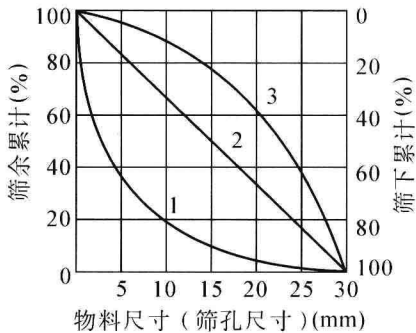


图 1-8 粒度累积分布曲线