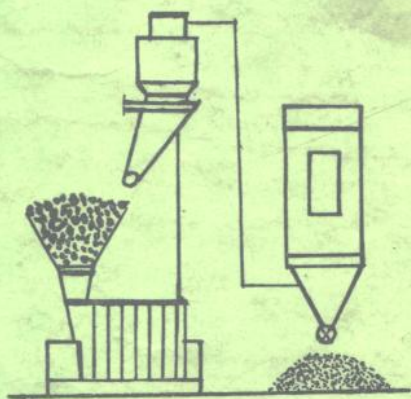


超细粉碎原理、工艺设备及应用

郑水林 编著



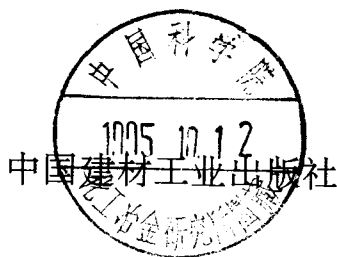
中国建材工业出版社

71.34
321

超细粉碎原理、工艺设备及应用

郑水林 编著

2010/01



(京) 新登字 177 号

内 容 简 介

本书共分为 9 章, 其中前 4 章讨论了超细粉碎的原理, 如粉碎过程力学和粉碎过程物理化学, 并介绍了超细粉碎基础知识, 如粒度与粒度组成特性的表示方法, 各种现代粒度测定方法等; 第 5 至第 8 章系统地介绍了各种超细粉碎和分级设备的结构、工作原理、性能特点及应用; 第 9 章讨论了非金属矿超细粉碎的特点及工艺设备的选择原则, 列出了可供选择的国内外主要超细粉碎设备生产厂家的设备类型及应用范围并介绍了主要非金属矿的超细粉碎工艺和生产实践。

本书可供从事矿物加工或非金属矿深加工、粉体工程、化工等的大专院校师生和工程技术人员参考。

超细粉碎原理、工艺设备及应用

郑水林 编著

*

中国建材工业出版社出版

(北京市百万庄国家建材局内 邮编: 100831)

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

北京市桦星电脑激光照排

北京管庄印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.25 字数: 250 千字

1993 年 5 月第一版第一次印刷

印数: 2500 册

ISBN 7-80090-169-6/TH·2 定价: 13.00 元

自序

超细粉碎是非金属矿工业最主要的深加工技术之一，也是现代化工、电子、轻工、冶金新材料用微细粉体原料最主要的加工技术之一。随着我国工业的逐步现代化，超细粉碎日益显示出作为微细粉体加工技术的重要性。

近年来，超细粉碎技术越来越受到我国非金属矿加工行业及相关行业的重视，超细粉碎工艺及设备的开发和研制呈现出方兴未艾之势。但有关这方面的文献资料则不多，虽然一些同行做了许多工作，但是，系统总结和介绍超细粉碎技术的专著则比较少见。本书是作者积多年教学与科研工作而写的，希望该书的出版能有助于我国超细粉碎技术以及非金属矿深加工技术的发展。

本书内容共分为9章，其中第1章至第4章是基础部分，包括粒度表示方法、粒度测定方法、粉碎过程力学和粉碎过程物理化学，对微细粉体的粒度表示和测定方法、超细粉碎加工过程的能耗规律、机械化学现象以及助磨剂等作了重点介绍；第5至第8章是工艺设备部分，系统地介绍了目前应用的各类超细粉碎和精细分级设备的结构、性能、特点及应用；第9章是应用部分，主要介绍了非金属矿超细粉碎加工的特点、工艺类型和设备选择以及非金属矿超细粉碎加工实例。

超细粉碎技术是粉碎工程技术的新发展。因此，一些基本原理和基础知识是相通的。一些粉碎设备既可用于所谓的

“细磨”，也可用于“超细磨”或“超细粉碎”。本书对这些相通的基本原理或基础知识，如粒度表示方法、能耗假说，以及相通的设备，如球磨机等也作了介绍。但是，本书的重点是以往粉碎工程著述中涉及较少的超细粉碎原理、工艺设备及其应用。

本书是在总结前人和同行专家工作的基础上完成的，在编写过程中，参阅了大量前辈和同行专家的研究成果以及国内外许多设备生产厂家的产品样本和说明书，并得到了许多专家的支持和帮助，在此，深表谢意！

该书虽然是积多年教学和科研工作而出，但因作者学识水平所限，书中难免有错误或编排不当之处，恳望读者予以指正。

编 者

1993. 1

绪 论

作为粉碎工程一部分的超细粉碎技术是适应现代化工、电子、生物及其他新材料、新工艺对矿物及其他原材料的细度要求而发展的一项新的粉碎工艺技术。超细粉碎技术发展的历史不长，但是，由于它对现代科学技术及新材料发展的重要意义，已成为原材料加工技术重要的开发目标之一。

对于非金属矿来说，超细粉碎是最重要的深加工技术之一。现代新型陶瓷、涂料、油漆、塑料、橡胶、造纸等的填料、微电子材料、化学材料等对非金属矿微细粉体物料的需求不断增长，据估计，仅高级陶瓷市场，全球工业产值将由1986年的37.5亿美元增加到75亿美元左右，年平均增长速度达7~8%。其所用的非金属矿物原料既要求纯又要求微细。

现代超细粉碎的粒度界限如何划分目前尚无一致的说法，对于非金属矿深加工来说，一般将10 μm 以下的粉体物料称为“超细”粉体，生产这些“超细”粉体的粉碎工艺技术习惯称之为超细粉碎。由于物料粉碎到微米级，与粗粒粉体物料相比，超细粉体产品的比表面积和比表面能显著增大。因而在超细粉碎过程中，粉体颗粒相互之间的作用力大大增加，相互团聚的趋势增大，到一定程度，粉体物料处于粉碎 \rightleftharpoons 团聚的动态过程。此外，随着物料粒度的减小，颗粒本身的缺陷减少，强度增大。因此，在超细粉碎工艺中，必须设置相应的精细分级设备，以便及时地分出合格的细粒产品，避免

微细粉体物料因“过磨”而团聚；此外，还可通过添加助磨剂或分散剂等降低颗粒的强度，改善研磨环境，提高粉碎效率、降低能耗。

超细粉碎过程不仅仅是粒度减少的过程，同时还伴随着物料晶体结构及表面物理化学性质等的变化。这些变化对相对较粗的粉碎过程来说是微不足道的，但对于超细粉碎过程，因粉碎时间较长，物料粒度较细以及粉碎强度相对较大等原因，这些变化在某些情况下不容忽视。现在，一般将因机械粉碎作用产生的这些变化称之为粉碎过程机械化学。由于粉体物料因超细粉碎而产生的晶体结构及物化性能的变化对其应用的影响，超细粉碎过程的机械化学现象越来越引起工程技术人员的高度重视。

由于粒度微细，超细粉碎产品的粒度分析技术也有其特点。传统的粒度分析方法——筛分法已不能满足其要求，许多现代的分析与测试技术，如电子显微镜、激光粒度分析仪、库尔特计数器、X射线衍射、高速离心式分级技术及比表面积测试技术已应用于超细粉体的粒度分析和产品细度控制。此外，微细物料的粒度及粒度特性的描述也提出了新的要求，如用比表面积来表示产品细度等等。

迄今为止的超细粉碎方法主要是机械粉碎，包括高速机械冲击式磨机、气流磨、振动磨、搅拌磨、胶体磨、盘磨机、辊压磨、球磨机等各种粉碎设备以及作为配套设备的精细分级、产品输送、介质分离、除尘、脱水、检测、控制等工艺设备、构成完整的超细粉碎工艺系统。在工艺上有批量开路、连续开路、连续闭路等几种形式，包括干法和湿法两种粉碎方式。

综上所述，超细粉碎是一个涉及到机械、粉体工程、力

学、物理化学、固体物理、化学、流变学、矿物加工、现代仪器与测试技术等多种学科的工程技术，它的研究内容主要包括以下几个方面。

(1) 超细粉碎基础理论。包括微细粉体粒子的粒度及表面物理化学等特性；粉碎过程的描述；不同超细粉碎方法（或机械应力的施加方式）如冲击、研磨、摩擦、剪切、压碎、剥蚀等在不同粉碎环境中的能耗规律、粉碎效率、产品细度与能量利用率，以及对粉碎物料的晶体结构和物理化学性能等的影响；磨矿物理化学环境以及助磨剂、分散剂等对产品细度、物化性能以及粉碎效率的影响等。这些基础研究对于超细粉碎工艺技术的开发和应用都是极为重要的。例如，根据不同超细粉碎方法对粉体物料晶体结构及物化性能的不同影响，结合物料的用途，选择合适的超细粉碎工艺设备，避免因超细粉碎加工给物料的使用性能带来不利的影响或利用超细粉碎加工技术对粉体物料进行选择性的机械激活；通过适度地添加助磨剂有目的地改善超细粉碎的物理化学环境以提高粉碎效率并降低能耗等等。

(2) 超细粉碎工艺设备，包括粉碎机以及配套的精细分级、产品输送、介质分离（搅拌磨）等。这是超细粉碎最主要的研究内容之一。今后的发展趋势是，除了进一步开发高效低耗的粉碎设备外，更多地将是在现有粉碎设备的基础上改进、配套和完善精细分级设备及其他辅助工艺设备，即更多地从整个工艺的角度来进行研究和开发。另外，开发超细粉碎与干燥、混合以及物料的表面改性组合的工艺也是超细粉碎工艺研究开发的领域之一。

(3) 超细粉体的粒度检测和控制技术，这是实现超细粉碎工业化连续生产的重要条件之一，也是超细粉碎技术较活

跃的研究领域之一。今后研究的重点和发展趋势将是开发快捷、方便、实用、准确的粒度分析和控制仪器，尤其是在线粒度分析仪。

目 录

绪 论

1 粒度与粒度特性	(1)
1.1 粒度的表示方法	(1)
1.1.1 单个颗粒的粒径表示方法	(2)
1.1.2 粒群的平均直径	(3)
1.1.3 计算平均粒径方法的选择	(6)
1.2 粒度组成特性的表示方法	(9)
1.2.1 列表法	(9)
1.2.2 图解法	(11)
1.2.3 矩值法	(15)
1.2.4 函数法	(18)
2 粒度测定方法	(29)
2.1 概述	(29)
2.2 筛分分析	(34)
2.3 显微镜法	(37)
2.3.1 光学显微镜	(39)
2.3.2 电子显微镜	(41)
2.4 沉降法	(41)
2.4.1 移液管 (又称水析管)	(43)
2.4.2 比重计法	(48)

2.4.3	光透过法	(53)
2.4.4	沉降天平	(56)
2.4.5	离心沉降	(60)
2.5	库尔特计数器与激光粒度分析仪	(65)
2.5.1	库尔特计数器	(65)
2.5.2	激光粒度分析仪	(66)
2.6	透过法	(70)
2.6.1	基本原理	(70)
2.6.2	装置与方法	(72)
2.7	吸附法	(78)
3	粉碎过程力学	(80)
3.1	晶体的破碎与变形	(80)
3.2	裂纹及其扩展	(84)
3.2.1	裂纹的扩展条件与扩展力	(85)
3.2.2	裂纹的扩展速度与物料的粉碎速度	(88)
3.2.3	裂纹尖端的能量平衡	(89)
3.3	粉碎机械的施力作用	(91)
3.4	粉碎能耗假说	(95)
3.4.1	表面积假说	(95)
3.4.2	体积假说	(98)
3.4.3	裂缝假说(又称榜德功耗学说)	(99)
3.4.4	Clarles 公式	(102)
3.4.5	其他粉碎能耗公式	(104)
3.5	物料的强度、硬度与可磨性	(106)

4 粉碎过程物理化学	(111)
4.1 粉碎过程热力学	(111)
4.2 粉碎过程机械化学	(114)
4.2.1 矿物晶体结构的变化	(116)
4.2.2 矿物物理化学性质的变化	(123)
4.2.3 超细磨矿过程中的化学反应	(126)
4.3 助磨剂	(127)
4.3.1 概述	(127)
4.3.2 助磨剂的作用原理	(128)
4.3.3 助磨剂的分类与应用	(137)
5 冲击式磨机	(142)
5.1 冲击粉碎原理	(142)
5.2 高速机械冲击式磨机	(147)
5.2.1 超细粉碎机 (Super Micron Mill)	(148)
5.2.2 分级研磨机 (Classifier Mill)	(158)
5.2.3 喷射粉磨机	(159)
5.3 气流磨	(162)
5.3.1 扁平式或水平圆盘式气流磨 (Micronizer)	(164)
5.3.2 循环管式气流磨	(172)
5.3.3 对喷式 (逆向) 气流磨	(175)
5.3.4 靶式气流磨 (Target Type Fluid Energy Mill)	(180)
5.3.5 AFG 流态化床逆向喷射磨	(182)
5.3.6 气流粉碎工艺	(186)

6	球磨机、振动磨、搅拌磨	(197)
6.1	球磨机	(197)
6.1.1	球磨机的粉碎原理	(197)
6.1.2	球磨机的分类	(200)
6.1.3	球磨机的结构	(203)
6.2	振动磨	(203)
6.2.1	振动磨的粉碎原理和粉碎特性	(204)
6.2.2	振动磨的特点	(209)
6.2.3	振动磨的类型和结构	(211)
6.2.4	新型振动磨	(214)
6.3	搅拌磨	(216)
6.3.1	概述	(216)
6.3.2	TRZK 干式和 NRZK 湿式搅拌磨	(220)
6.3.3	砂磨机	(223)
6.3.4	塔式磨	(227)
6.3.5	JM 系列立式螺旋搅拌磨	(230)
6.3.6	搅拌磨的新发展	(232)
7	胶体磨、雷蒙磨、高压辊磨、离心磨	(234)
7.1	胶体磨	(234)
7.2	雷蒙磨	(238)
7.3	高压辊磨机	(243)
7.3.1	高压辊磨机的结构、工作原理和 工艺参数	(243)
7.3.2	高压辊磨机在非金属矿超细粉碎中 的应用	(247)

7.4	离心磨	(247)
8	分级原理与分级设备	(253)
8.1	概述	(253)
8.2	分级原理与分级效率	(255)
8.2.1	分级原理	(255)
8.2.2	分级效率	(260)
8.3	干法(或空气)分级机	(265)
8.3.1	循环气流及旋风器式分级机	(265)
8.3.2	离心机械式风力分级机	(269)
8.4	湿法分级机	(287)
8.4.1	水力旋流器	(287)
8.4.2	螺旋式离心分级机	(289)
9	非金属矿的超细粉碎	(292)
9.1	非金属矿超细粉碎的特点	(292)
9.1.1	粒度与粒度组成	(293)
9.1.2	颗粒形状(或晶形)	(293)
9.1.3	纯度	(297)
9.1.4	表面物理与化学性质	(297)
9.2	工艺类型与设备选择	(298)
9.2.1	工艺类型	(298)
9.2.2	工艺设备的选择	(300)
9.3	非金属矿超细粉碎各论	(313)
9.3.1	石墨	(313)
9.3.2	云母	(320)
9.3.3	滑石	(324)

9.3.4	高岭土	(328)
9.3.5	石灰石等富含碳酸钙矿物	(331)
9.3.6	膨润土	(335)
9.3.7	重晶石	(337)
9.3.8	硅灰石	(337)
9.3.9	锆英砂	(338)
9.3.10	煤粉.....	(338)
主要参考文献.....		(341)

1 粒度与粒度特性

被粉碎物料的粒度和粒度特性的定性和定量的描述是粉碎工程研究的基本内容之一。同时，被粉碎物料的粒度分布是评价粉碎工艺和设备性能的重要参数，也是选择分级工艺和设备的基本依据之一。对于物料的应用来说，粒度的大小及其分布是重要的性能指标之一。

1.1 粒度的表示方法

描述物料细分状态的个别物理单元称为颗粒，从实用的观点来看，颗粒是物料的离散的单元。颗粒物料大小的量度，即粒度，通常用线性尺寸“粒子的直径”来表示，也可用颗粒的面积或体积来表示颗粒的粒度。但是，“粒子的直径”这个术语是不够明确的。例如，如果颗粒是规则的球体，那么球体的直径可以认为是“粒子的直径”；若颗粒是规则的立方体形，粒子的直径可以是立方体的棱边、主对角线和一个侧面的对角线。利用这些尺寸中的一个，同样可以定出立方体形颗粒的体积、表面积和比表面积等几何特征。然而，棱边、主对角线和侧面的对角线的度量是不相等的。若是形状不规则的颗粒，问题就更为复杂。如果是一群大小、形状不一的颗粒，“粒子的直径”就更不明确。下面我们对此分别进行讨论。

1.1.1 单个颗粒的粒径表示方法

尽管工业生产中遇到的粉体，是一群粒度分散、大小不连续的颗粒群，但其粒度的表述都是建立在个别粒子的粒径统计值的基础上的。因此，必须先了解单个颗粒的粒径表示方法。

单个颗粒的粒径表示方法与测定方法有关。由于所采用的测定方法不同，目前出现的表示方法主要有以下几种（详见表 1-1）。

- (1) 用指定的特征线段表示；
- (2) 用算术平均直径表示；
- (3) 用几何特征的平均值表示；
- (4) 用等效直径，即某种图形的当量直径表示；
- (5) 用有效直径，即相当于具有相同沉降末速的球体的直径表示。

表 1-1 粒子直径的各种表示方法

类型	名称	符号	计算方法
指定的特征线段表示的直径	长轴径	d_l	l
	短轴径	d_w	w
	定方向径	d_g	$l \sim w$
	定方向等分径	d_m	$l \sim w$
算术平均径	二轴平均径	d_{l+w}	$(l+w) / 2$
	三轴平均径	d_{l+w+h}	$(l+w+h) / 3$
几何平均径 ⁽¹⁾	调和平均径	d_h	$3 \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{w} + \frac{1}{h} \right)^{-1}$
	表面积平均径	d_{sur}	$\sqrt{(2lw+2wh+2hl) / 6}$
	体积平均径	d_{cub}	$3lw h / (lw+wh+hl)$
等值直径	外接矩形等值径	d_{lw}	\sqrt{lw}
	正方形等值径	d_f	\sqrt{F}