

盖国胜主编 马正先主审

超 细 粉 碎 分 级 技 术

理论研究 · 工艺设计 · 生产应用

CHAOXI FENSUI FENJI JISHU

—Lilun yanjiu · Gongyi sheji · Shengchan yingyong

中国矿业大学



TB4
11

00007144

超细粉碎分级技术

理论研究·工艺设计·生产应用

盖国胜	主编	马正先	主审
盖国胜	马正先	陶珍东	合编
胡小芳	徐政	彭晓	

HK73/26



 中国轻工业出版社



C0482653

前 言

随着我国科学与工业技术的进步，粉体工程作为一门科学越来越显得重要。特别是超细粉碎分级技术作为粉体加工制备过程的重要手段，在材料、非金属矿、化工、冶金、食品、医药、饲料等行业得到了广泛的应用。为了普及这一技术，加快粉体工程技术的发展，此书作者们将自己多年研究成果和工业应用经验整理成书，并力求使全书有系统性和可读性。由于粉碎技术涉及到的行业较多、内容复杂，设备、工艺、产品间的关系交错、复杂，作为特定产品的单元作业进行更详细的介绍是比较困难的。因此书中一定会有讨论得不够的地方，殷切希望读者批评指正。

此书是以从事粉体加工的工程技术人员为主要读者群，也可兼作研究生专业教材。针对粉碎与分级中常出现的问题，书中系统阐述了超细粉碎与分级的基本原理、数学模型、计算机模拟、系统优化、粉体表面改性等，对粉碎与分级设备、原理、工艺设计等工程上实际问题及相关知识做了介绍，同时还列举了大量的工业应用实例，以便工程设计人员参考。

本书由盖国胜主编，并撰写了第一章的第一节、第二节，第二章，第八章，第九章。马正先做全书的统稿和主审，并撰写了第三章。陶珍东撰写了第一章的第三节、第四节，第六章。徐政撰写了第五章。胡小芳撰写了第七章。彭晓撰写了第四章。

此书在编写过程中参阅了大量的文献，在此向编写这些文献的作者们表示衷心的感谢。

作 者

1999年春于清华园

作者简介

盖国胜：副教授、博士后。1982年春武汉工业大学机械系机械专业毕业，后在山东建材学院材料系任教。1985年赴日本东北大学素材研究所留学主修超细粉碎。1987年回国后任山东建材学院粉体工程研究所所长。1992年春获东北大学矿物工程系粉体工艺博士学位。同年在清华大学化工系做博士后，研究方向为粉体制备与细粉流态化。1994年之后分别在清华大学工程力学系和材料系任教，继续从事粉体制备与处理方面的研究与开发。现任中国颗粒学会制备与处理专业委员会委员，中国粉体工业信息网秘书长，《中国粉体技术》杂志编委。共在国内外发表研究论文40余篇，合著专业书籍两本。完成十几项研究课题并获国家专利八项。

马正先：副教授，硕士。1983年夏武汉工业大学机械系毕业，后在山东建材设计院从事建材工业设计。1996年考回母校读硕士研究生，毕业后在山东建材学院机械系任教，从事粉碎机械的研究与开发。1999年在清华大学工程力学系做国内访问学者。共在国内外杂志上发表文章30多篇，获两项国家专利。

陶珍东：副教授。1982年夏武汉工业大学硅酸盐工程系毕业，后在山东建材学院粉体研究所任教，从事粉体工艺过程的研究与教学。1989年在南京化工大学材料系参加研究生课程学习。现任山东省颗粒学会副秘书长。在国内外杂志上发表文章多篇，完成专项课题多个。

徐 政：讲师，博士。1986年北京科技大学矿物工程专业毕

业后在长沙矿冶研究院工作，1992年在该院硕士研究生毕业并分配到北京科技大学任教，从事矿物粉体加工过程的研究，1999年春获工程博士学位。在国内外杂志上发表文章多篇，完成专项研究课题多个。

胡小芳：讲师，博士。1982年华南理工大学无机材料系毕业，后在山东建材学院任教，1985年考回母校攻读硕士学位，1997年获工程博士学位。1999年在清华大学材料系做国内访问学者。完成与水泥陶瓷材料有关的工程项目多个，发表文章多篇。

彭 晓：博士。1993年东北大学资源工程系毕业，同年攻读硕士研究生从事磁性颗粒和流体的研究。硕士毕业后继续攻读博士学位，在清华大学材料系从事粉体表面改性处理的研究。

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 粉体工程与粉碎分级	(1)
1.1.1 学科命名	(2)
1.1.2 学科形成的基础	(2)
1.1.3 研究与技术市场	(4)
1.2 粉碎分级技术的应用范围	(5)
1.2.1 非金属矿物的加工	(6)
1.2.2 材料工业的应用	(8)
1.2.3 医药工业的应用	(10)
1.2.4 食品工业的应用	(12)
1.2.5 化学工程的应用	(13)
1.2.6 环保与二次资源加工	(15)
1.3 粉碎过程机理	(18)
1.3.1 被粉碎物料的基本物性	(19)
1.3.2 材料的粉碎机理	(25)
1.3.3 粉碎过程热力学原理	(27)
1.3.4 粉碎方法	(31)
1.3.5 粉碎模型	(35)
1.3.6 混合粉碎和选择性粉碎	(36)
1.4 粉体的细度特征	(39)
1.4.1 粒径	(39)
1.4.2 粒度分布	(45)
1.4.3 粉体的比表面积	(52)
1.4.4 颗粒的形状分析	(55)

1.4.5	筛目与粒径的关系	(58)
第2章	粉碎理论与数学模型的研究	(60)
2.1	粉碎系统及状态分析	(60)
2.1.1	系统的稳定	(60)
2.1.2	球磨系统主要因素结构解析	(62)
2.1.3	系统参变量分析	(64)
2.1.4	粉碎设备工作状态与噪声	(69)
2.2	粉碎过程数学模型	(74)
2.2.1	解析模型	(74)
2.2.2	动力学模型	(77)
2.2.3	能耗模型	(78)
2.2.4	相似模型	(81)
2.2.5	搅拌粉磨过程动力学模型	(84)
2.2.6	粉碎过程的粉碎与传输模型	(86)
2.2.7	粉碎数学模型的进展	(92)
2.3	粉碎过程的系统优化理论研究	(92)
2.3.1	粉碎过程多目标优化	(94)
2.3.2	粉碎过程多目标期望规划	(105)
2.3.3	优化介质配比的线性规划求解	(109)
2.4	粉碎过程参数优化	(110)
2.4.1	给料特性对粉碎过程的影响	(111)
2.4.2	介质制度对粉碎过程的影响	(113)
2.4.3	操作因素对粉碎过程的影响	(115)
2.4.4	助磨剂用于超细过程的优化	(117)
	参考文献	(123)
第3章	超细粉碎设备与系统	(125)
3.1	机械冲击式粉碎机	(125)

3.1.1	机械冲击式粉碎机的粉碎机理	(125)
3.1.2	机械冲击式粉碎机的一般特点	(125)
3.1.3	立式机械冲击粉碎机	(126)
3.1.4	卧式机械冲击式粉碎机	(137)
3.1.5	粉碎工艺简介	(144)
3.1.6	机械冲击式超细粉碎机的发展趋势	(147)
3.2	气流粉碎机	(147)
3.2.1	扁平式气流粉碎机	(148)
3.2.2	循环管式气流磨	(153)
3.2.3	靶式气流磨	(155)
3.2.4	对喷式气流磨	(158)
3.2.5	流化床对喷式气流磨	(161)
3.2.6	LDP 系列复合式气流粉碎机	(164)
3.2.7	气流粉碎工艺系统	(166)
3.2.8	气流粉碎机的发展方向	(174)
3.3	球磨机	(175)
3.3.1	球磨机的结构与原理	(175)
3.3.2	球磨机类型	(178)
3.3.3	高细球磨机的应用	(181)
3.4	振动磨	(185)
3.4.1	振动磨的构造及工作原理	(185)
3.4.2	振动磨的类型	(187)
3.4.3	振动磨的主要特点和参数	(196)
3.4.4	振动磨超细粉磨工艺	(202)
3.4.5	振动磨的发展趋势	(203)
3.5	搅拌磨	(204)
3.5.1	搅拌磨的构造及工作原理	(204)
3.5.2	几种典型搅拌	(207)
3.5.3	搅拌磨的一般特点和应用	(221)

3.5.4	搅拌磨的发展方向	(223)
3.6	雷蒙磨	(224)
3.6.1	雷蒙磨的结构与原理	(224)
3.6.2	雷蒙磨的特点和应用	(227)
3.6.3	新型雷蒙磨系统	(228)
3.7	高压辊式磨机	(230)
3.7.1	辊压机	(230)
3.7.2	立式磨	(238)
3.8	几种新型结构的超细粉碎设备	(244)
3.8.1	离心磨	(244)
3.8.2	卧式双筒连续超微磨机	(247)
3.8.3	立式双筒连续磨机	(248)
3.8.4	新型干式塔磨	(249)
3.8.5	干湿两用偏心搅拌球磨机	(250)
3.8.6	MICROS 型超微湿式粉碎机	(251)
3.9	超细粉碎设备与技术的发展趋势	(253)
	参考文献	(255)

第 4 章	粉碎机械力化学及粉体表面改性	(257)
4.1	粉碎机械力化学	(257)
4.1.1	机械力化学	(257)
4.1.2	粉磨过程的机械力化学效应	(258)
4.1.3	粉磨过程机械力化学效应的应用	(260)
4.2	粉体的表面改性	(261)
4.2.1	改性原因	(262)
4.2.2	改性方法	(262)
4.2.3	改性工艺	(264)
4.2.4	改性设备	(265)
4.2.5	表面改性剂	(266)

4.2.6	改性机理	(268)
4.2.7	改性效果评价	(271)
4.3	高能球磨法在新材料开发中的应用	(272)
4.3.1	高能球磨法合成新材料的影响因素	(273)
4.3.2	高能球磨法的基础研究现状	(275)
4.3.3	高能球磨法在材料合成中的最新应用	(276)
4.4	振动粉磨过程中重钙的机械力化学改性	(277)
4.4.1	粉磨改性工艺的影响因素	(278)
4.4.2	粉磨过程中机械力化学改性的特点	(286)
4.4.3	重钙振动粉磨改性工艺流程	(288)
4.5	纳米粉对复合材料性能的改善	(291)
4.5.1	纳米粉体材料的应用实例	(292)
4.5.2	几种已工业化的国产纳米粉	(293)
4.5.3	纳米 SiO_{2-x} 对复合材料性能的改善	(294)
	参考文献	(300)

第5章 超细分级理论研究..... (304)

5.1	分级过程理论	(304)
5.1.1	分级及其分类	(304)
5.1.2	分级精度及其表示方法	(305)
5.1.3	分级机的容量、处理量和分级效果	(308)
5.1.4	气固两相流的特点	(311)
5.1.5	分级机的切割粒径	(315)
5.2	转子型超细分级机转子叶片之间的流场的数值 模拟	(317)
5.2.1	流场的数值模拟计算步骤	(317)
5.2.2	分级机叶轮内部流场的数值模拟	(319)
5.2.3	模拟条件	(320)
5.2.4	流场模拟结果	(322)

参考文献.....	(345)
第 6 章 超细分级设备.....	(347)
6.1 重力式超细分级机	(347)
6.1.1 水平流型重力分级机	(348)
6.1.2 垂直流型重力分级机	(348)
6.2 惯性分级机	(348)
6.3 离心式分级机	(349)
6.3.1 自由涡离心式分级机	(349)
6.3.2 准自由涡型离心式分级机	(353)
6.3.3 强制涡分级机	(356)
6.4 射流分级机	(369)
参考文献.....	(372)
第 7 章 粉体加工特性及其贮存与捕集.....	(374)
7.1 概述	(374)
7.2 粉体特性	(374)
7.2.1 流变力学特性	(374)
7.2.2 静电与化学特性	(379)
7.3 超细粉体的贮存	(384)
7.3.1 贮料的分类与作用	(384)
7.3.2 贮料与物性	(384)
7.3.3 加料装置	(388)
7.4 超细粉体的捕集	(393)
7.4.1 对捕集回收系统的要求	(393)
7.4.2 捕集方式的选择	(394)
7.4.3 主要捕集设备	(395)
参考文献.....	(403)
第 8 章 超细粉碎工艺设计.....	(405)

8.1	超细粉碎系统流程选定	(405)
8.1.1	批次系统	(406)
8.1.2	连续系统	(407)
8.1.3	开路系统	(408)
8.1.4	闭路系统	(408)
8.1.5	循环负荷率与粉碎/分级效率	(410)
8.2	超细粉碎系统设备选定	(412)
8.2.1	设备选型应考虑的工艺特性	(413)
8.2.2	批次超细粉碎工艺配用设备	(416)
8.2.3	连续超细粉碎工艺配用设备	(419)
8.2.4	连续超细粉碎系统生产能力标定和估算	(423)
8.3	与系统设计有关的周边问题	(424)
8.3.1	物料特性的影响	(424)
8.3.2	产品细度表征	(427)
8.3.3	系统辅助设备选用	(428)
	参考文献	(430)

第9章	超细粉体产品的工业生产	(431)
9.1	超细改性填料	(431)
9.2	超细食品的加工	(434)
9.3	磨料微粉生产线	(436)
9.4	锆英砂超细粉生产线	(438)
9.4.1	锆英砂超细粉碎的工艺特点	(438)
9.4.2	技术要求和现状	(438)
9.5	超细水泥矿渣生产线	(440)
9.6	造纸涂布浆料生产线	(441)
9.6.1	小型生产系统	(442)
9.6.2	大型生产系统	(443)
9.7	药物超细粉碎	(444)

9.7.1	有机难溶药物研磨粉碎	(444)
9.7.2	中草药类的粉碎细化	(445)
9.8	雷蒙磨技术改造生产微细粉	(446)
9.8.1	改造分析器转子	(446)
9.8.2	用超细分级机头替代分析器	(447)
9.8.3	系统串联超细分级机	(448)
9.9	振动磨超细生产线	(448)
9.10	冲击磨配合干式搅拌磨滑石超细加工线.....	(449)
9.11	超细粉连续改性生产线.....	(451)
9.12	橡胶的粉碎生产线.....	(452)
9.13	塑料粉碎生产线.....	(454)

第 1 章 概 论

1.1 粉体工程与粉碎分级

粉碎是伴随人类从原始走向文明的基本技能，从谷物的研磨到石器的加工，粉碎技术为人类向大自然攫取赖以生存的资源提供了有效的帮助。直到工业化快速发展的当今时代，它仍起着越来越重要的作用。人类所涉及物质从宏观存在形式上可分为流体和固体，而固体物料多以粉粒状态存在或被处理的。粉碎分级技术是粉体加工工艺中的一部分，几乎在所有与粉体工程有关的行业中都与粉碎分级技术有着不可分割的联系。为了加深对粉碎分级技术的理解和认识，应首先明确粉体的概念、粉体工程学的起源、基础和背景。

随着科学技术的发展，对粉粒体及其过程的研究逐渐形成了工程研究中的一个分支——粉体工程学（也称为颗粒学）。对该学科的系统研究，国外起始于 20 世纪 60 年代，而国内则开始于 20 世纪 80 年代后期。到目前为止，许多院校开设该课程并设立了专业；有十几个省市成立了此类学术机构。随着经济体制改革和国民经济的发展，全国各地涌现出来的各类粉体工程研究所、粉体技术开发公司、专业粉体产品和设备生产厂家已有近百家之多，全国性的相关学术和信息机构也逐渐成立。国家有关部门也把对粉粒体技术的研究提到了相当重要的地位。自 1989 年以来，国家自然科学基金委制订的研究指南中，分别在无机非金属材料 and 化工类将对粉体的研究摆在了鼓励研究方向的前位。

1.1.1 学科命名

对粉粒体的研究，涉及到的学科和行业非常广泛。粉体工程学就是在现代科技综合化趋势下由相关学科交叉形成的，它在不同层次上对各专业学科所涉及粉粒体及其过程的共性问题进行研究，具有横断性。交叉学科的形成标志不仅是在大学里设置课程、在社会上形成研究该知识领域的职业和成立相应的学术团体，而更重要的是这个学科作为知识系统中的一个子系统，有无其独特属性区别于其他子系统。粉体工程学的独特属性，首先体现在它以粉粒体作为物质存在的特殊形式为认识的基点，将探索粉粒体及有关过程的规律和解决应用问题为目标。作为交叉学科它没有确切的研究规则和评价准则，而受具体研究对象的工艺特性和价值观的制约。

目前对学科和研究对象的命名很不统一，它反映了从不同角度或出发点对同一事物和现象认识上的差异。国际上的 Fine Particle、Powder 和 Bulk Solids 分别找到了汉语的同义词：颗粒、粉体与散体。颗粒是指几何尺寸相对于所研究约束空间尺度来说比较小的单个块状固体。颗粒总是以粉体这种集合体的形式出现，集合产生了个体所不具有的特殊性，粉体工程学的研究必然包括了对颗粒的研究。考虑问题出发点的不同，形成了国内外对该学科命名上的分歧：从个体颗粒出发，则将该学科称之为颗粒学；从集合体粉体和工程的观点出发，则将其称为粉体工程学。命名的差异有助于从不同的角度加深对粉粒体及其过程的认识，是有利的一面；但也给传播和交流带来不便。

1.1.2 学科形成的基础

诺贝尔奖获得者 H. A. 西蒙说过：交叉学科不应该是人为形

成的，而应该是对一个真正科学机会的反应。只有当两个或更多的不同领域的知识在解决某些特定问题上变得相互联系起来时，富有成效的交叉学科研究才能得以发展。粉体工程学的形成也是走过了这样一条道路，其形成基础有四点：第一，众多学科的粉粒体知识储备达到了一体化或正在向这个方向发展，除了各学科的工艺性差异外，对粉粒体研究的界限日益模糊，所使用的语言和概念框架日益接近。第二，在粉粒体知识储备中蕴含着不同学科学者共同感兴趣的一系列相互联系的具体问题。如超细粉碎和分级的问题就引起了材料、化工、电子、冶金、医药等学科学者的共同关注。第三，一些共同性的问题借助于不同学科所提供的观念、工具、技术手段和研究技巧而得到了解决，如激光粒度测定和颗粒图象分析等。第四，在改革开放的十几年中，海内外学术交流增加；国家改变了大一统的计划经济模式后，使过去从上到下按产品种类划分科研和高等教育的格局受到了巨大冲击。这都为新兴交叉学科的出现改善了环境，粉体工程学就是在这样的基础上在全国推开的。

作为新生交叉学科的粉体工程学正在从以下几个方面去完善：第一，在词汇和知识结构方面。由于学科的交叉性，各类专业术语被纷纷带入、知识结构划分不明确都给交流和教学带来不便。如同样的固体颗粒细化过程就有粉磨、磨矿、制粉、粉碎、打粉、研磨等不同的说法。语言的差异只能在交流和知识的积累中同化，但作为一个学科仍需要将其术语规范化、知识系统化。适合我国国情的粉体工程专业用语辞典、教科书和手册正在陆续出版，以推进学科的发展。第二，在某些部门设立粉体工程专业研究机构，有意识地强化研究队伍专业学科的多元性和与非同行合作意识，以适应粉粒体研究的交叉横断性特点。第三，开展专题性国内外学术交流活动，提倡合理合法有消化吸收能力的拿来主义，避免研究上的重复劳动，加速科技进步。

粉体工程学的形成是渐变过程，它来自不同学科人员共同的

努力。粉体工程学在原有学科割据的空白地带划出了新的领域。涉足这里的学者，需要在一门与粉体工程学相关的学科中打下坚实的基础，以一种严谨的科学态度来增加对粉体工程学这一交叉学科的贡献。投身于这个事业，不仅是作为自己学科的代表，使用自己的学术语言和观点，还要相互学习并尽可能使自己的知识成为合作研究的共同基础。在心智交融的交叉研究中，需要来自不同学科的成员对彼此的专业语言和观点至少部分地达到心领神会的程度，面对粉体工程广泛的课题内容，共建坚实的背景知识。通过了解不同学科思考问题的角度和解决问题的方式，真正发挥出这一交叉学科的优势。

1.1.3 研究与技术市场

在市场经济条件下，工程技术的发展需要来自生产应用中实际课题的推动，课题越多、越复杂其发展就越具有生命力。另一方面，技术研究成果需要广阔的技术市场来扩散销售，达到推动生产力发展并获得经济效益的目的。因而，对一门学科来说，其理论与生产应用之间的密切程度基本决定了该学科的发展前景。对粉体工程学来说，其研究与技术市场分析如下。

①粉体工程学因涉及面广、技术成果实用性和普遍性较强，而具有广泛的课题来源和转移成果的技术市场。立足于粉粒体及处理过程这一基本点，粉体工程学面对着来自众多行业的相似技术问题。如同样的粉粒体混合过程涉及了医药、食品、精细化工、饲料、冶金、非金属材料等行业，混合均匀度的高低直接影响各相关产品的质量，如何实现高均匀度混合成了一致的问题。解决来自不同行业的同类课题，既综合了多学科的知识和方法又丰富了粉体工程学的内容，有利于同类技术向其他行业的移植。

②广泛的课题来源使粉体工程学的发展无行业限制，不易受由于商品市场波动而造成行业兴衰的影响。作为对固体物料进行