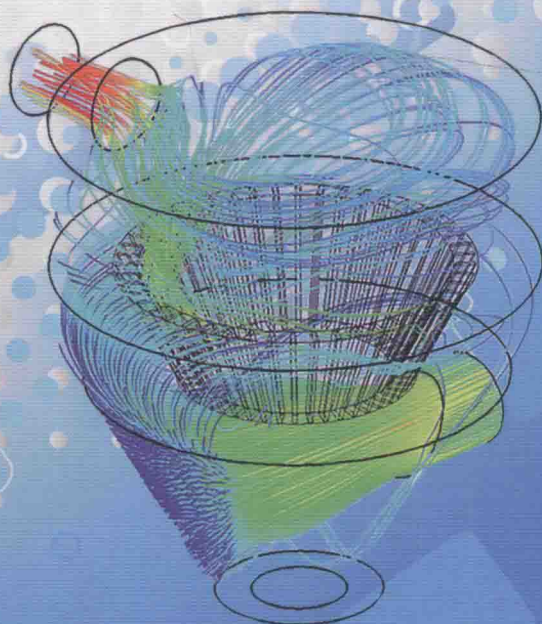


Processing Technologies and Equipments for
Micro-nano powder

微纳粉体 加工技术与装备

俞建峰 宋明淦 主编



化学工业出版社

Processing Technologies and Equipments for
Micro-nano powder

微纳粉体 加工技术与装备

俞建峰 宋明淦 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以粉体微纳化技术以及相关设备使用为主线，详细介绍了微纳材料的性能与特性、微纳材料的表征与测试技术、微纳化工艺设计以及相关设备的选择，并给出了粉体设备的仿真设计计算案例。

本书适合材料和机械相关领域的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

微纳粉体加工技术与装备/俞建峰, 宋明淦主编. —北京:
化学工业出版社, 2019.8
ISBN 978-7-122-34422-9

I. ①微… II. ①俞… ②宋… III. ①纳米材料-加工
IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 083723 号

责任编辑: 邢 涛

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 王素芹

装帧设计: 韩 飞

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: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 28 字数 704 千字 2019 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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: 180.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2019—08

创新的高纤维食品物料全利用加工装备技术

——果蔬、谷物专用湿法粉碎装备与成套工程技术供应商



(专业的食品全利用粉碎设备 细度可达300目以上 产能: 2kg-50000kg/h)



大蒜粉碎



豆浆

豆渣粉碎



番茄粉碎



核桃粉碎



红枣粉碎



橘子皮粉碎

橘子皮粉碎



桑葚粉碎

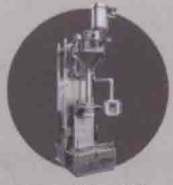


生姜粉碎

无锡市科丰自控设备有限公司，坐落在美丽的太湖之滨，是一家专业制造在线称重控制系统的高科技企业，公司拥有一支高素质的技术团队，公司产品主要集中在各类物料的拆包投料、气力输送进仓、配料混合、成品包装、自动码垛进库等一体化生产线的设备制造及研发，广泛应用于食品、化工、粮食、饲料、橡塑等行业的原料生产企业。



减量抽气包装秤



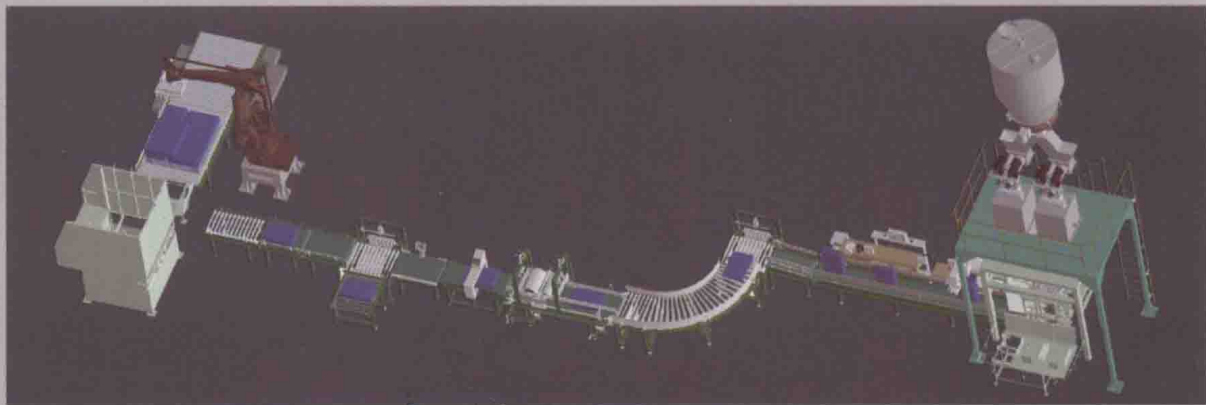
竖式抽气升降
蛟龙包装秤



蛟龙压送阀口秤



双蛟龙吨包装秤



自动化生产码垛线，已经越来越适用于各大企业的标准化生产，具有生产稳定、可靠、降低人工作业强度等特点，科丰码垛生产线可以根据客户需求，搭配不同的运行部件，为用户制造合适自身需求的自动化码垛生产线。

标准化码 垛线配置	包装 设备	缝包输 送机构	倒包输 送机构	爬坡整 平机构	封箱 机组	检重 机构	剔除 机构	金属 检测	喷码 机构	缓冲供 包机构	托盘 系统	机器人	码垛 能力
选择范围	自制	国产 钮郎	自制	自制	自制	自制	自制	国产 进口	国产 进口	自制	自制	安川 ABB等	≤1200 包

www.kefeng.cn



无锡市科丰自控设备有限公司
WuXi KeFeng Automation Co.,Ltd

地址：无锡市滨湖区胡埭工业园张舍路11号
电话：0510-85874243 85166449
传真：0510-85810067
邮箱：kfwbg@kefeng.cn

前言

粉体的微纳化在各领域得到蓬勃发展,产业规模空前扩大,微纳粉体在新材料、微电子、轻化工、生物医药、食品以及国防军事等诸多相关行业的应用越来越广泛。目前,发达国家粉体加工技术日新月异,以高新技术为特点的粉体加工与分级设备层出不穷,我国虽起步较晚,但近些年也取得了较快发展,在设备研发与应用方面取得了较大突破。为了进一步推动粉体技术的发展,我国专门成立了国家特种超细粉体工程技术研究中心,一些省份(如江苏省、山西省)也建设了超细粉体工程技术研究中心。

粉体微纳化技术包括制备、分级和输送等。目前,微纳粉体的制备仍然以机械粉碎法为主,制得的产品粒度可降低至亚微米级甚至纳米级、粒度分布也比较窄,但是仍不能直接满足工业应用的严格要求。粉体分级的意义在于将机械粉碎法制得的粉体分选得到满足工业要求的粒度范围产品,随着新设备和新技术的研发,分级粒径已可减小到亚微米级。气力输送是现代粉体领域不可或缺的重要环节,它以密封式输送管道代替传统的机械输送物料,是一种较为适合粉体物料输送的现代物流系统。此外,随着计算机技术的发展,现代仿真技术在粉体设备设计、分级效果评价等领域的应用越来越广泛。借助于仿真技术,可以详细分析设备内部的物理场分布、颗粒运动状态等,这对于粉体设备结构优化和开发具有重要意义。

本书编撰的目的是总结近年来粉体微纳化相关理论、技术与装备等方面的主要进展,以及现代仿真技术在微纳粉体领域的应用,为从事该领域科学研究、技术开发以及生产应用人员提供有价值的参考书籍。

本书以粉体微纳化技术及相关设备的应用为主线,系统总结了微纳粉体粉碎与分级技术的基础理论和应用实例以及粒度检测原理和方法。本书分为7章,第1章介绍微纳粉体的特点和应用、相关技术与装备以及未来发展趋势;第2章力求全面精炼地介绍国内外具有代表性的微纳粉体粉碎与分级技术的理论基础;第3章介绍粉体的表征与测试技术,通过实例介绍相关检测设备的使用方法;第4章详细介绍微纳粉体粉碎技术基本原理和典型设备及其应用;第5章介绍微纳粉体粉分级术和典型设备及应用;第6章主要介绍粉体气力输送方面相关理论和系统结构;第7章通过实际案例详细介绍现代仿真技术在粉体设备设计领域的应用。

本书由俞建峰和宋明淦主编,江南大学机械工程学院研究生傅剑、赵江、夏晓露、郑向阳、吴撼、楼琦、王智、唐永康、梁洁、程洋、石赛、谢耀聪、李治等参与了编写工作并付出了艰辛的努力,在此表示感谢。本书的编写还得到了相关微纳米粉体加工企业——无锡赫普轻工设备技术有限公司和无锡市科丰自控设备有限公司的大力支持,为本书提供了相关设备技术资料,在此一并致谢。编者还要感谢关心、支持、指导本书出版的专家学者,衷心感谢他们提出的宝贵建议。同时,对提供技术资料的相关企业和参考文献中涉及的国内外专家学者表示诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大专家和读者批评指正。

俞建峰于江南大学
2018年12月26日

目 录

第 1 章	绪 论	1
1.1	微纳粉体材料的特点及应用	1
1.2	微纳粉体材料的制备与分级	4
1.2.1	超细粉碎技术与装备	4
1.2.2	精细分级技术与装备	8
1.3	粉体微纳化技术与装备的发展趋势	9
1.3.1	粉体微纳化装备的智能化和网络化	9
1.3.2	粉体微纳技术工艺的优化	10
	参考文献	11
第 2 章	粉体微纳化技术理论基础	12
2.1	超细微纳米化破碎理论机理分析	12
2.1.1	超细粉碎理论基础	12
2.1.2	超细粉体的特征	15
2.1.3	物料粉碎方式	19
2.1.4	物料粉碎模型	20
2.1.5	物料粉碎理论	20
2.2	气流冲击粉碎理论	29
2.2.1	喷嘴高速气流的形成	29
2.2.2	颗粒的加速规律	31
2.2.3	冲击粉碎理论	33
2.3	剪切粉碎理论	37
2.3.1	剪切粉碎模型	37
2.3.2	剪切粉碎理论	39
2.4	研磨粉碎理论	48
2.4.1	研磨粉碎模型	48
2.4.2	理论的应用	50
2.5	微纳粉体分级理论	54
2.5.1	粉体分级概述	54
2.5.2	主要粉体分级理论	54
2.5.3	评价参数	64

参考文献	70
------------	----

第 3 章

微纳粉体表征与测试方法

72

3.1 粒度分布及其测试	72
3.1.1 粒度	72
3.1.2 粒度分布	73
3.1.3 平均粒径	74
3.1.4 粒度测试	74
3.2 比表面积测试	87
3.2.1 BET 比表面积	88
3.2.2 BJH 中孔分析模型	89
3.2.3 V-Sorb X800 比表面积及孔径测试仪使用方法	93
3.3 颗粒形貌测试	100
3.3.1 高分辨率电子显微镜	100
3.3.2 扫描电子显微镜 (SEM)	101
3.3.3 透射电子显微镜	103
3.3.4 原子力显微镜	104
3.3.5 X 射线衍射	105
参考文献	106

第 4 章

微纳粉体粉碎技术与装备

107

4.1 机械冲击磨	108
4.1.1 工作原理及特点	108
4.1.2 主要影响因素	108
4.1.3 典型设备及应用	109
4.2 气流粉碎机	115
4.2.1 工作原理及特点	115
4.2.2 主要影响因素	117
4.2.3 典型气流粉碎设备	122
4.2.4 应用领域	138
4.3 介质磨机	139
4.3.1 球磨机	139
4.3.2 搅拌磨机	145
4.3.3 砂磨机	153
4.3.4 振动磨机	165
4.3.5 行星式球磨机	178
4.4 超细剪切	193
4.4.1 工作原理及特点	194
4.4.2 主要影响因素	203

4.4.3	典型超细剪切设备	207
4.4.4	应用领域	212
4.5	超高压微射流粉碎	212
4.5.1	工作原理	212
4.5.2	设备结构	219
4.5.3	应用领域	220
4.6	胶体磨	221
4.6.1	工作原理及特点	221
4.6.2	关键结构部件	224
4.6.3	典型胶体磨设备	226
4.6.4	应用领域	230
4.7	低温粉碎	230
4.7.1	低温粉碎技术简介	230
4.7.2	工作原理及特点	231
4.7.3	主要影响因素	232
4.7.4	典型设备及应用	233
	参考文献	236

第5章

微纳粉体分级技术与装备

238

5.1	涡流空气分级机	238
5.1.1	概述	238
5.1.2	工作原理	240
5.1.3	典型设备及应用	240
5.1.4	应用领域	246
5.2	静电场分级装置	246
5.2.1	概述	246
5.2.2	工作原理	246
5.2.3	典型设备及应用	249
5.2.4	影响因素	257
5.2.5	应用领域	258
5.3	旋流分级	258
5.3.1	概述	258
5.3.2	工作原理	262
5.3.3	典型设备	270
5.3.4	影响因素	273
5.3.5	应用领域	276
5.4	振动筛	276
5.4.1	概述	276
5.4.2	工作原理	280

5.4.3 典型设备及应用	283
5.4.4 应用领域	285
参考文献	286

第 6 章

微纳粉体输送技术

288

6.1 气力输送技术简介	288
6.1.1 气力输送系统的特点	288
6.1.2 气力输送技术的应用	289
6.2 气力输送系统分类	289
6.2.1 按输送装置分类	290
6.2.2 按物料流动状态分类	291
6.3 气力输送两相流理论	293
6.3.1 颗粒行为	293
6.3.2 两相流流型	294
6.4 气力输送系统相关参数	296
6.4.1 粉体物料性质	296
6.4.2 料气比	299
6.4.3 输送气量	300
6.4.4 输送能力	300
6.4.5 输送气流速度	300
6.4.6 输送管道的参数	301
6.4.7 输送管道的压损	302
6.5 气力输送系统组成	303
6.5.1 气源	303
6.5.2 供料装置	305
6.5.3 管道	307
6.5.4 料气分离装置	308
6.5.5 除尘器	308
6.6 气力输送发展趋势	309
参考文献	310

第 7 章

粉体设备仿真设计技术

312

7.1 FLUENT 模拟计算	312
7.1.1 涡流空气分级机内部流场模拟	312
7.1.2 动态旋流器内部流场数值模拟	325
7.1.3 水力旋流器内部流场模拟	343
7.1.4 湿法搅拌磨设备内部流场模拟	356
7.1.5 搅拌桨的流场分析	366
7.1.6 颗粒水力分级流场分析	375

7.2	离散单元法 EDEM 模拟	386
7.2.1	离散元仿真流程	386
7.2.2	球磨机颗粒碰撞模拟	387
7.3	湿法搅拌磨设备 Fluent 与 EDEM 耦合	395
7.3.1	CFD-DEM 耦合法理论基础	395
7.3.2	CFD-DEM 耦合法仿真流程	396
7.3.3	FLUENT 与 EDEM 耦合模拟仿真	396
7.3.4	结果后处理与分析	403
7.4	EDEM 与 ANSYS 的耦合	405
7.4.1	CFD-DEM 耦合法理论基础	405
7.4.2	ANSYS 与 EDEM 耦合模拟仿真	405
7.4.3	结果后处理与分析	412
7.5	静电场分级 COMSOL 模拟	413
7.5.1	静电场分级仿真概述	413
7.5.2	软件预设操作	416
7.5.3	几何建模	417
7.5.4	材料属性设置	421
7.5.5	物理场条件设置	422
7.5.6	网格划分	427
7.5.7	求解器设置	430
7.5.8	后处理	431
7.5.9	静电场分级仿真总结	438
	参考文献	439

第 1 章 | 绪 论

1.1 微纳粉体材料的特点及应用

一般来说，粉体是由大量固体颗粒所构成的聚集体或者堆积体，组成粉体的最小单元称为粉体颗粒，其粒径通常小于 $1000\mu\text{m}$ 。如图 1-1 所示的粉体颗粒粒径尺寸分布，微纳粉体一般指粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的粉体物料，通常又可分为微米粉体、亚微米粉体和纳米粉体。粒径在 $1\sim 10\mu\text{m}$ 范围的粉体称为微米粉体，粒径在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 范围的粉体称为亚微米粉体，粒径在 $1\text{nm}\sim 0.1\mu\text{m}$ 范围的粉体称为纳米粉体。

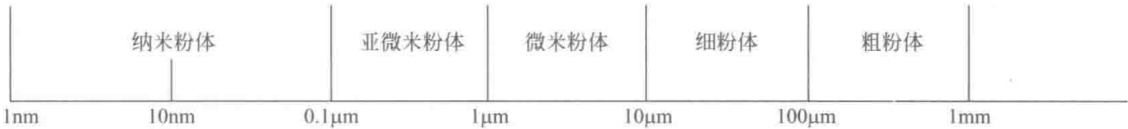


图 1-1 粉体颗粒的粒径尺寸分布

随着颗粒尺寸减小，颗粒表面结构及活性发生改变，比表面积增大，表面分子排列、电子分布结构及晶体结构均发生变化，使得微纳粉体颗粒具有表面效应、小尺寸效应、量子效应和宏观量子隧道效应，从而使微纳粉体具有一系列优异的光学性能、磁性能、力学性能、化学性能以及表面和界面性能。因此微纳粉体具有化学反应速率快、溶解度大、溶解速率快、吸附性强和填充性好的特点，还拥有独特的分散性与流变性能。

作为伴随现代高新技术和新材料产业发展起来的新兴产业，微纳粉体工业是继 IT 和信息产业之后发展较快的行业。自 20 世纪 70 年代以来，微纳粉体已逐渐发展为许多国家的研究热点。随着对微纳粉体独特性质和加工技术研究的不断深入，微纳粉体在诸多现代工业和高新技术产业都获得了广泛应用，主要体现在新材料行业、微电子行业、轻化工行业、生物医药行业、食品行业以及国防军事工业等领域，大大推进了相关领域的发展。

(1) 新材料行业

在新材料行业，纳米材料备受青睐。纳米新材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺寸或由它们作为基本单元构成的新型材料，主要应用有纳米陶瓷材料、纳米半导体材料以及纳米催化材料等。

传统的陶瓷材料中晶粒不易滑动、材料质脆、烧结温度高，纳米陶瓷的晶粒尺寸小，晶

粒容易在其他晶粒上运动。因此,纳米陶瓷材料具有高强度、高韧性以及良好的延展性,这些特性使纳米陶瓷材料可在常温或次高温下进行冷加工。如果在次高温下将纳米陶瓷颗粒加工成形,然后做表面退火处理,由此制成的高性能陶瓷材料其表面保持常规陶瓷材料的硬度和化学稳定性,而内部仍具有纳米材料高延展性的优点。

使用硅、砷化镓等半导体材料制成的纳米材料,具有许多优异性能。例如,纳米半导体中的量子隧道效应使某些半导体材料的电子输运反常、电导率降低,热导率也随颗粒尺寸的减小而下降,甚至出现负值。这些特性在大规模集成电路器件以及光电器件等领域发挥重要的作用。

纳米粒子是一种极好的催化剂,这是由于纳米粒子尺寸小、表面的体积分数较大、表面的化学键状态和电子态与颗粒内部不同以及表面原子配位不全,导致表面的活性位增加,使它具备了作为催化剂的基本条件。镍或铜锌化合物的纳米粒子对某些有机物的氢化反应是极好的催化剂,可替代昂贵的铂或钯催化剂。纳米铂黑催化剂可以使乙烯的氧化反应温度从 600°C 降低到室温。

(2) 微电子行业

超细材料对外部环境的敏感性大大提高,被认为是传感元器件最理想的基础材料。在微电子行业,微纳粉体的典型应用主要体现在制备磁记录材料、电子浆料和电子陶瓷材料。

采用微纳粉体制备的磁记录材料具有稳定性好、图像清晰、信噪比高以及失真小等优点,其代表是超细针状 Fe_3O_4 磁粉。超细磁粉制作的录音带和录像带,其记录密度比普通磁带高10倍。目前,磁记录材料所用的磁性颗粒尺寸大致处于亚微米级与纳米级之间。

作为微电子领域不可或缺的电极材料,电子浆料是未来微纳粉体的重要应用之一。用于导电浆的导电性粉末有Au、Pt、Pd、Ag、Cu、Ni等,用于介电浆的粉末有 BaTiO_3 、 TiO_2 等,用于电阻浆的粉末有 RuO_2 、 MoO_3 、 LaB_6 、C等。

在电子陶瓷材料方面,通常是以 BaTiO_3 作为PTC热敏电阻器和陶瓷电容器的主要原料。随着工艺设备的不断优化和PTC应用领域的不断扩大以及陶瓷电容器需求量的持续增长, BaTiO_3 微粉的市场前景非常广阔。此外,在显像管器件中,显像管用的 Al_2O_3 微粉的平均粒径通常要求为 $1.5\sim 5.5\mu\text{m}$;黑底石墨乳的粒径(G-72B)要求小于 $1\mu\text{m}$ 。

(3) 轻化工行业

微纳粉体由于粒度细、比表面积大、表面活性高等特性,因而具有很高的化学活性,被广泛应用于精细化工产品、高效催化剂等领域。赤磷超细化后可制成高性能催化剂,利用其进行催化可使石油的裂解速度提高1~5倍。油漆、涂料等化工产品的固体成分经超细化后可大大提高产品的附着力。

在化妆品领域,着色剂和填充粉料大量应用于化妆品中的粉底、眼影及粉饼类产品,为了使这些粉料能均匀地分散于乳化体系中,可以使用少量的悬浮剂,以实现粉体的稳定分散,并同时具有良好的基色表现力和细腻润滑的肤感。这要求粉体除了具备与乳化体系良好的亲和性外,还必须具有足够小的粒度。气流粉碎机与物料接触部分采用镜面设计,易于清洗、消毒,系统的全密封性对物料无污染。产品粒度均匀,粒度分布窄,非常适用于色料和粉体填充剂的生产过程。

随着化学工业的发展,超细非金属矿物材料在化学工业应用领域扮演越来越重要的角色。采用湿化学方法制造的超细高纯 Al_2O_3 粉体,因具有机械强度高、硬度大、高温绝



缘电阻高、耐化学腐蚀性和导热性良好等优良性能,已被广泛应用在化工行业的各个生产环节之中。此外,将微纳粉体材料用于废气和废水的处理有望成为未来环境保护发展的趋势。

(4) 生物医药行业

超细粉碎加工可显著提高药品的生物活性和有效成分的利用率,对中药材进行超细粉碎加工,可使其具有独特的小尺寸效应和表面效应,从而表现出许多优异性能。研究表明,难溶性药品经超细粉碎后,溶解性和溶解速率得到改善,从而大大提高了难溶性药物被人体吸收的效率。当药物粉碎至 $10\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 时,药物作用时会有易吸收、特异性、靶向性等优点,更能充分发挥药物的作用,提高有效成分的吸收率和利用率,节省用药量,减轻患者的经济负担。据预测,随着微纳粉体技术在生物医药领域应用的逐步深化,超细粉碎技术将在一定程度上改变传统的制药工业,尤其是某些中药的传统制作工艺和使用方法。超细粉碎对于药品的意义还在于能生产更细粒径的药物,有利于固体药物的溶解和吸收,可以提高难溶性药物的生物利用度。

采用超细粉碎技术,可将传统工艺制得的 $75\mu\text{m}$ 以上粒径的药物粉末粉碎至 $5\sim 10\mu\text{m}$ 以下,有效改善其均匀性和分散性。例如,利用超细粉碎技术对农药粉末进行处理,能够使得其性能得到较大提升。一方面,超细农药粉体由于具有比表面积大、吸附能力强的特性而耐雨水冲刷,保持农药长效;另一方面,由于表面活性强,农药在农副产品和环境中具有更快的分解速率,农药残留量降低,减少环境污染。

微纳粉体还可以作为治疗药物的载体,用于对药物表面进行包敷,在注入人体后对其进行外部磁场导航,使药物能够准确到达病变位置,达到高效治疗的目的。这一方案在癌症的早期诊断和治疗中都起到十分重要的作用。

(5) 食品行业

随着粉体微纳米化技术的发展,纳米食品成为食品行业的研究热点。纳米食品是指利用食品高新技术,对食品成分进行纳米尺度的处理和加工改造而得到的纳米级食品。

采用超细粉碎技术制成的纳米食品,其成分的某些结构会发生改变,能显著提高吸收率,加快营养成分在人体内的运输,还可以降低保健食品的毒副作用。纳米食品具有高营养价值,在增强体质、预防疾病、恢复健康、调节身体机能以及延缓衰老等方面表现出独特优势。

大部分果蔬的皮与核均含有丰富的维生素和微量元素,具有很好的营养价值,然而常规粉碎产品的粒度大,严重影响食品口感,超细化后则可以显著改善食用口感和吸收。果蔬微纳粉体由于溶解性和分散性好,容易消化吸收,被用于食品原料添加到糕点、果酱、冰淇淋、乳制品等诸多种类的食品中,不仅丰富食品营养,而且能够增进食品的色、香、味等特性,增添食品品种。

食用菌富含人体所必需的氨基酸,是一种高蛋白低脂肪的有机食物,在改善膳食结构、促进营养平衡和提高人体免疫力方面有显著特效。然而,采用常规方法生产的食用菌,其保鲜期较短,无法长期储存。采用超细粉碎技术对食用菌进行超细加工后得到微纳米化产品,可以显著提高其生物活性和有效成分的利用率。此外,经超细粉碎后的食用菌含水量较低,这可以有效地抑制微生物繁殖,从而大大延长了产品的保鲜期。

此外,有研究表明:咖啡颗粒越细,味道就越浓,但如果太细则会导致苦味增加;巧克

力颗粒太大,会使得口感粗糙,且需要较长时间方能品尝到美味,而过细则在生产中需要很长时间和更多能量,这会增加巧克力中可可脂的含量。因此,严格控制颗粒粒度对食品领域而言也是十分重要的。

(6) 国防军事工业

国防军事和航空航天领域主要利用微纳粉体及其复合材料的高耐热性、强吸收性、致密性和其他特定属性,制成具有隔热、吸光吸波、吸收辐射等的特种材料。

将超细燃料加入火箭推进剂中,可以大大提高推进剂的燃烧速率,改善燃料中粉体的力学性能,从而提高火箭的命中精度和威力,对实现国防现代化极为重要。

利用超细粉体制造超硬塑性抗冲击材料来制备坦克等的复合板,不但可以减轻复合板的重量,还能提高复合板的抗冲击性能。

1.2 微纳粉体材料的制备与分级

对于微纳粉体制备而言,超细粉碎与精细分级技术是关键。

科学技术的发展为微纳粉体的制备提供了多种方法,从制备原理出发可分为化学合成法和物理粉碎法。化学合成法是通过化学反应或物相转换,由离子、原子或分子等经过晶核形成和晶体长大而制备得到粉体。化学合成法所制备的微纳粉体具有粒径小、粒度分布窄、粒形好及纯度高的优点,然而其生产工艺复杂、成本高且产量低,因而主要应用于实验室研究或高性能材料制备。物理粉碎法又称机械粉碎法,是通过机械力的作用使物料粉碎。相对于化学合成法而言,物理粉碎法工艺简单、成本低且产量高,适应于大批量工业生产,且粉碎过程中产生的机械化学效应使得粉体活性提高。因此,目前微纳粉体材料的主要制备方法为物理粉碎法。

另一方面,工业应用对微纳粉体的制备方法提出了一系列严格要求,主要有以下几点:产品粒度均匀,分布范围窄;产品纯度高,无污染;低成本,高产量;工艺简单连续,自动化程度高;生产过程安全可靠。

1.2.1 超细粉碎技术与装备

机械粉碎是制备微纳粉体比较常用的方法。近半个世纪以来,国内外对超细粉碎理论、方法、设备进行了大量的深入研究,微纳粉体行业已经取得了许多突破性进展。因此,机械粉碎法在金属、非金属、有机药材、无机药材、食品、农药、化工、材料、电子、军工以及航空航天等行业应用广泛。随着科学技术的发展以及工业应用对不同种类不同要求物料粉碎的需要,各种类型的粉碎设备不断推陈出新。目前,工业上普遍应用的超细粉碎设备的类型主要有气流磨、高速机械冲击磨、旋风自动磨、振动磨、搅拌磨、转筒式球磨机、行星式球磨机、研磨剥片机、砂磨机、高压辊磨机、高压水射流磨、高压均质机、胶体磨等。其中,气流磨、高速机械冲击磨、旋风自动磨和高压辊磨机等为干法超细粉碎设备,研磨剥片机、砂磨机、高压水射流磨和胶体磨等为湿法超细粉碎设备,振动磨、搅拌磨、旋转筒式球磨机和行星式球磨机等既可用于干法超细粉碎也可用于湿法超细粉碎。振动磨、搅拌磨、旋转筒式球磨机、行星式球磨机、研磨剥片机以及砂磨机等属于介质超细研磨机。不同类型的超细粉碎设备的粉碎原理、进料粒度、产品粒度和应用范围如表 1-1 所示。



表 1-1 超细粉碎设备类型及应用

设备类型	粉碎原理	进料粒度 /mm	产品粒度 $d_{97}/\mu\text{m}$	应用范围
气流磨	冲击、碰撞	<2	1~30	化工原料、精细磨料、精细陶瓷原料、药品及保健品、金属及稀土金属粉等
高速机械冲击磨	冲击、碰撞、剪切、摩擦	<10	3~74	化工原料、中等硬度以下的非金属矿及陶瓷原料、药品及保健品等
振动磨	摩擦、碰撞、剪切	<5	1~74	化工原料、精细陶瓷原料、各种硬度的非金属矿、金属粉、水泥等
搅拌磨	冲击、碰撞、剪切、摩擦	<1	1~5	化工原料、精细陶瓷原料、各种硬度的非金属矿、金属粉、药品及保健品等
旋转筒式球磨机	摩擦、冲击	<5	5~74	化工原料、精细陶瓷原料、各种硬度的非金属矿、金属粉、水泥等
行星式球磨机	压缩、摩擦、冲击	<5	5~74	各种硬度的非金属矿、化工原料、精细陶瓷原料等
研磨剥片机	摩擦、碰撞、剪切	<0.2	2~20	化工原料、涂料和造纸原料、填料、陶瓷原料、各种非金属矿等
砂磨机	摩擦、碰撞、剪切	0.2	$\leq 1\sim 20$	化工原料、涂料和造纸原料、填料、陶瓷原料、各种非金属矿等
旋风自动磨	冲击、碰撞、剪切、摩擦	<40	10~45	化工原料、中等硬度以下的非金属矿及陶瓷原料、药品及保健品等
高压辊(滚)磨机	挤压、摩擦	<30	5~45	各种非金属矿、化工原料、精细陶瓷原料等
高压水射流磨	冲击、碰撞	<0.5	10~45	涂料和造纸原料及填料、中等硬度以下的非金属矿和陶瓷原料等
高压均质机	空穴效应、湍流、剪切	<0.03	1~10	食品、药品、涂料、颜料、轻化工原料等
胶体磨	摩擦剪切	<0.2	1~20	化工原料、涂料、石墨、云母等非金属矿以及蔬菜、水果等食品和保健品等
超细剪切	剪切、冲击、摩擦	<20	1~10	主要适用于食品、药品中的纤维物料
低温粉碎	冲击、碰撞、剪切、摩擦	<10	1~25	食品、医药、化工、涂料、高分子材料、新材料及陶瓷原料等
超声粉碎	超声分散、空化效应	<10	<4	动植物细胞、病毒细胞以及脆度大且结构松散的材料

(1) 高速机械冲击磨

高速机械冲击磨的工作原理是：物料在进入机体后，受到高速旋转的转子上安装的锤头、叶片、刀片、棒等冲击元件的猛烈冲击，在空气涡流和离心力的双重作用下发生相互碰撞，同时与转子发生强烈的剪切、研磨与碰撞，从而实现超细粉碎的目的。高速机械冲击磨在非金属矿行业应用较为普遍，适用于煤系高岭土、方解石、大理石、白垩、滑石等中等硬度以下非金属矿物的超细粉体生产，产品粒度一般可达 $d_{97}=10\mu\text{m}$ 。高速机械冲击磨的优点

是粉碎比大、细粉粒度可调、产能高、效率高，并且结构简单、配套设备少、占地面积小。典型的国产高速机械冲击磨有山东省青岛派力德粉体工程设备有限公司生产的 PCJ 系列立式超细粉碎机、PWC 系列卧式超细粉碎机，上海世邦机器有限公司生产的 CM51、ACM53 等型号的超细粉磨机，上海细创粉体装备有限公司生产的 JCF 型机械粉碎机、JBL 系列棒式机械粉碎机。

(2) 气流磨

气流磨即气流粉碎机，又称流能磨或喷射磨。其工作原理是：将干燥、无油的压缩空气通过喷嘴产生高压喷射气流，使粉体颗粒相互碰撞、剪切、摩擦而破碎。气流磨是比较常用的超细粉碎设备之一，广泛应用于滑石、大理石、高岭土等中等硬度以下的非金属矿、化工原料、保健食品、稀土等粉体的超细粉碎加工，产品粒度一般可达 $d_{97}=3\sim5\mu\text{m}$ 。除了产品粒度细，气流磨产品还具有粒度分布窄、颗粒表面光滑、颗粒形状规则、纯度高、活性大以及分散性好的优点。经过几十年的发展，气流磨结构不断更新、类型不断增多，目前气流磨主要有扁平（圆盘）式、循环管式、靶式、对喷式、流化床逆向喷射式、气旋式等几种机型。国产气流磨典型代表设备有江苏省昆山市密友装备制造有限责任公司生产的 QYF-600 型气流粉碎机、QBF 型惰性气体保护气流粉碎机等。

(3) 振动磨

振动磨是一种以球或棒为介质的超细粉磨设备。其工作原理是：利用研磨介质在做高频振动的筒体内对物料进行冲击、研磨、剪切等作用，使物料在短时间内被粉碎。振动磨按操作方式不同可分为间歇式和连续式，按磨筒数量不同分为单筒式和多筒式，按振动特点不同分为惯性式和偏旋式等多种结构。振动磨被广泛应用于建材、冶金、化工、陶瓷、玻璃、耐火材料和非金属矿等行业的微纳粉体加工，产品粒度一般可达几微米。振动磨的优点是可直接与电动机相连、结构紧凑、体积小、质量轻，介质填充率和振动频率高、单位筒体容积产量高，产品粒度均匀且能耗低、节能效果好。代表设备有温州矿山机械厂生产的 MZ-200 型振动磨。

(4) 球磨机

球磨机是最古老的研磨机，被称为粉碎机之王。其工作原理是：当球磨机按规定的转速运转时，研磨介质与物料一起在离心力和摩擦力的作用下被提升到一定高度，之后由于受重力作用而脱离筒壁沿抛物线轨迹下落，此过程周而复始，使处于研磨介质之间的物料受到冲击作用而被击碎；同时，由于研磨介质的滚动和滑动，颗粒受研磨、摩擦、剪切等作用而被磨碎。球磨机广泛应用于化工原料、陶瓷原料、涂料等产品的超细粉碎。其优点是对物料的适应性强，能连续生产，可满足现代工业大规模生产要求；粉碎比大，可达 300 以上，并易于调整研磨产品的粒度；结构简单，可靠性强，磨损部件易于检查和更换，维护方便；可适应多种工况，如粉碎与干燥或粉碎与混合同时进行，既可用于干法粉碎又可用于湿法粉碎。现如今，使用较多的有旋转筒式球磨机、行星式球磨机等。

行星式球磨机是一种内部无运动部件的球磨机。其工作原理是：由电动机带动传动轴旋转，固定齿轮带动传动齿轮轴转动，使球磨筒体既产生公转又产生自转，从而带动磨腔内的球磨介质产生强烈的冲击与摩擦力等作用，使球磨介质之间的物料被粉碎和超细化。行星式球磨机研磨产品的最小粒度可达 $0.1\mu\text{m}$ ，被广泛应用于建材、陶瓷、冶金、电子、化工、轻工、医药以及环保等行业。