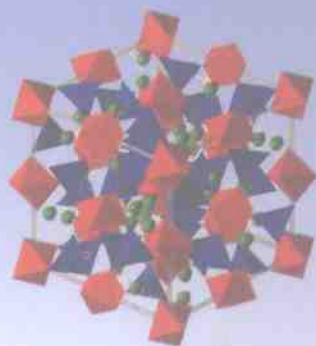


WUTP

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

粉体工程

蒋阳 陶珍东 主编



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

Powder Engineering

粉体工程

蒋阳 陶珍东 主编

武汉理工大学出版社

【内 容 提 要】

粉体工程是对粉体及其制备、加工、处理和应用的—门新兴学科。从粉体科学与工程的内涵来分析,粉体科学研究的是各类粉体体系中一些带有共性的基础问题,如粉体特性、粉末粒度、粉末颗粒间的相互作用、粉体与介质的相互作用、粉末制备的基本物理与化学原理等问题;而粉体工程是在粉体制备与应用的工程实践中,各项单元操作及其工艺优化组合,以及过程的控制。粉体工程涉及化工、材料、冶金、医药、生物工程、农业、食品、机械、电子、航空、航天等工业领域,与化学、物理、力学等基础学科相关,表现出跨学科、跨技术的交叉性和基础理论的概括性。

本书具体的研究内容包括三大方面,一是粉体的基本性能与表征,包括粉末颗粒的几何学形态特性,粉末颗粒的粒径、粒径分布、颗粒形状的科学定义;粉末粒径及粒径分布的测量原理与方法;粉体堆积特性与摩擦学特性,以及相关粉体物性测量的原理与方法。也包括粉体的表面与界面化学。二是粉体工程的单元操作的基本过程、原理、技术与装备,包括粉磨、分离、分级、粉体储存与输运等。三是粉末的制备的物理、化学基本原理以及相关的技术与装备。此外,还论述了粉体工程中有关粉尘存在的危害及其预防。

图书在版编目(CIP)数据

粉体工程/蒋阳,陶珍东主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2008.12
ISBN 978-7-5629-2868-3

I. 粉…

II. ① 蒋… ② 陶…

III. 粉末技术

IV. TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 209526 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>(理工图书网)

E-mail:tiandaoquan@126.com

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:27.5

字 数:710 千字

版 次:2008 年 12 月第 1 版

印 次:2008 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:42.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。

《粉体工程》作者简介

蒋 阳 安徽省滁州人,合肥工业大学工学学士、硕士,中国科学技术大学理学博士,香港城市大学博士后。国家 863 计划,国家自然科学基金、国家博士点专项基金、教育部科技发展计划评审专家,美国化学会、美国材料学会、欧洲材料学会会员。现任合肥工业大学材料科学与工程学院教授,博士生导师。曾作为日本学术振兴会(JSPS)学者参与中日核心大学交流计划,在日本丰桥技术科学大学和大阪大学访问研究。还先后在香港城市大学物理与材料科学系从事博士后研究和任研究员、高级访问学者。2004 年入选国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”,2004 年获得安徽省“第六届江淮十大杰出青年”称号,2001 年获得中国科学院院长奖,拥有 3 项国家发明专利。由于氧化物精密陶瓷材料的研究成果获得国家科技进步三等奖和安徽省科技进步一等奖,由于“连续反应技术制备超细氧化物瓷粉体的研究与开发”的研究成果获安徽省科技进步三等奖。

蒋阳教授近年来在低维纳米材料的化学液相控制合成、一维半导体纳米材料的控制合成,结构分析,性质的研究,纳米光电导器件,粉末冶金过程与粉末冶金材料理论,新型无机功能材料与器件,氧化物系纳米陶瓷粉体与精细陶瓷材料等方面均取得了多项具有创新性的高水平的研究成果。

陶珍东 博士,教授,硕士研究生导师,山东颗粒学会秘书长。1982 年毕业于武汉建筑材料工业学院;2004 年获得山东大学工学博士学位。济南大学教学指导委员会委员,济南大学首届优秀教学奖获得者。

主要研究方向为粉体制备与处理、工业废料资源优化再利用。自 1982 年以来,一直从事材料加工工程领域的教学和科学研究,先后承担了无机非金属材料工艺学、硅酸盐工业生产机械设备、粉体工程与设备、粉体科学与工程等课程的教学工作和相关课题的研究工作。

普通高等学校材料科学与工程类专业 新编系列教材编审委员会

顾 问：郭景坤 袁润章 范令惠 杨南如

胡道和 王民权 岳文海 曹文聪

主任委员：张联盟

副主任委员：徐德龙 郑治祥 雷绍锋

委 员：(以姓氏笔画为序)

万发荣 马保国 王国梅 王培铭 文梓芸

叶卫平 叶枝荣 叶 菁 田道全 曲祖元

刘亚云 刘 军 孙成林 吴建青 陈 文

宋晓岚 林宗寿 杨长辉 姜洪舟 陶珍东

钱觉时 钱春香 高建明 徐秋林 黄佳木

黄学辉 蒋 阳 程晓敏 程 新 谢峻林

曾令可 葛 勇 潘 伟 薛理辉

秘 书 长：田道全

总责任编辑：徐秋林

出版说明

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。教育部颁布重新修订的《普通高等学校本科专业目录》后,为适应 21 世纪人才培养需要,及时组织并实施了面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划、世界银行贷款 21 世纪初高等理工科教育教学改革项目,部分高等学校承担了其中材料科学与工程专业教学改革项目的研究与实践。已经拓宽了专业面的材料科学与工程专业,相应的业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的材料科学与工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。武汉理工大学出版社在教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会的指导和帮助下,经过大量的调研,组织国内几十所大学材料科学与工程学科的知名教授组成“普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材编审委员会”,共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问,遵照教育部材料科学与工程专业教学指导委员会的有关会议及文件精神,经过充分研讨,决定首批编写出版 14 种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。本套新编系列教材的编写具有以下特色:

教材体系体现人才培养目标——本套系列教材的编写体现了高等学校材料科学与工程专业的培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程专业的课程设置和各部门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合,组成一套完整的、各门课程有机联系的系列化教材。本套教材的编写除正文以外,还增加了本章提要、本章小结、思考题与习题等内容,以使教材既适合于教学,又便于学生自学。

教材内容反映教改成果——本套系列教材的编写坚持“少而精”的原则,紧跟教学内容和课程体系改革的步伐,教材内容注重更新,反映教学改革的阶段性成果,以适应 21 世纪材料科学与工程专业人才的培养要求。本套系列教材的编写中,凡涉及材料科学与工程学科的技术规范与标准,全部采用国家最新颁布实施的技术规范和标准。

教材出版实现立体化——本套教材努力使用和推广现代化的教学手段,实现立体化出版,凡具备条件的课程都将根据教学需要,及时组织编写、制作和出版相应的电子课件或教案,以适应教育方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施重新修订的本科专业目录后,组织全国多所高等学校材料科学与工程学科的具有丰富教学经验的教授们共同编写的一套面向新世纪、适应新专业的全新的系列教材。能够为新世纪我国材料科学与工程专业的教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为一套开创性的系列教材,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳地希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提宝贵的意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为我国高等教育事业的发展作出贡献。

前 言

本书是按照教育部无机非金属材料工程专业教学指导委员会教材建设的规划和专业规范,为适应工程教育的教学改革,满足加强基础、拓宽专业面的需要而编写的。

随着现代科学技术的发展,无机非金属材料工程领域所需要的人才已由单一的专业性向着全面、系统的掌握无机非金属材料科学与工程领域基本专业知识的综合性方向转变。工程教育的评估也对相关专业的学生在基础理论、专业知识、工程实践等方面提出了更高的要求。为了适应这一转变,各有关院校进行了新一轮的人才培养模式和教学方法与内容的改革和课程建设。国内开办有无机非金属材料工程、粉体材料科学与工程等专业的院校众多,但各高校的专业设置背景、办学基础和历史的不同,这些学校相关专业的教学重点和特色各不相同,这就需要有一个能满足各方面要求的统编教材。

粉体工程是无机非金属材料工程、粉体材料科学与工程等专业的一门重要的技术基础课程,它涉及机械、化学化工、冶金、材料、环境等许多工程问题。编写一本适合本专业特点的教材,可以帮助学生对粉体工程基本原理、工艺、工程装备等有较为深入和全面的理解,并为后续课程的学习及工作奠定良好的基础。为此,在教育部无机非金属材料工程专业教学指导委员会的指导下,合肥工业大学、济南大学、哈尔滨工程大学、大连工业大学、内蒙古科技大学等单位一些长期从事粉体工程教学和科研的教师和研究人员根据自己的工作积累以及学科最新发展,结合相关院校的教学实际共同编写了本教材。

本书由合肥工业大学蒋阳教授和济南大学陶珍东教授任主编,并分别编写了第1章、第6章和第10章;合肥工业大学程继贵教授编写了第8章;合肥工业大学吕珺博士编写了第9章;哈尔滨工程大学魏彤博士编写了第2章;大连工业大学高文元教授、赵鸣博士编写了第5章、第7章;内蒙古科技大学宋希文教授编写了第3章、第4章。全书由蒋阳教授和陶珍东教授统稿。天津大学徐明霞教授对全书的编写提纲及书稿内容进行了审阅。

本材料在编写过程中综合了目前粉体工程领域的最新科技进展,参阅了国内外粉体工程领域的相关教材、专著和文章,并列于参考文献中,在此对上述作者深表感谢。由于编者的水平有限,书中必有许多缺点和错误,敬请各高校师生在使用本教材和读者阅读本教材时能及时批评指正,以便再版时修改。

编 者

2008年12月

目 录

1 粉末的性能与表征	(1)
1.1 粉末颗粒的粒径与形状	(1)
1.1.1 粒径	(1)
1.1.2 粉体的粒径分布	(3)
1.1.3 平均粒径	(8)
1.1.4 颗粒的形状	(11)
1.2 粉末粒径的测量	(16)
1.2.1 粒径测量方法分类	(16)
1.2.2 显微镜法	(17)
1.2.3 筛分法	(19)
1.2.4 重力沉降光透法	(21)
1.2.5 激光衍射法	(24)
1.2.6 比表面法	(26)
1.3 粉末体的性质	(34)
1.3.1 粉末体的堆积性质	(34)
1.3.2 粉体的摩擦性质	(38)
1.3.3 粉体压缩性与成形性	(50)
思考题	(51)
参考文献	(52)
2 粉体表面与界面化学	(53)
2.1 粉体的表面现象与表面能	(53)
2.1.1 粉体颗粒的表面现象	(53)
2.1.2 粉体颗粒的表面能与表面活性	(54)
2.2 粉末颗粒的分散	(56)
2.2.1 颗粒在气相中的分散	(56)
2.2.2 颗粒在液体中的分散	(62)
2.3 粉末颗粒的表面改性	(71)
2.3.1 改性的机理与目的	(71)
2.3.2 改性的方法	(72)
2.3.3 改性效果的评价	(81)
思考题	(82)
参考文献	(82)
3 粉碎	(84)
3.1 粉碎概论	(84)

3.1.1	定义与方法	(84)
3.1.2	粉碎模型	(86)
3.2	粉碎的基本理论	(87)
3.2.1	裂纹的形成与扩展	(87)
3.2.2	粉碎能耗理论	(88)
3.2.3	单颗粒粉碎	(91)
3.2.4	粉碎动力学	(92)
3.3	粉碎技术	(95)
3.3.1	粉碎操作	(95)
3.3.2	破碎设备	(96)
3.3.3	粉磨设备	(108)
3.3.4	超细粉碎设备	(117)
	思考题	(120)
	参考文献	(121)
4	分级	(122)
4.1	概述	(122)
4.1.1	分级的概念	(122)
4.1.2	分级性能的评价	(123)
4.2	筛分分级的原理与设备	(125)
4.2.1	概述	(125)
4.2.2	筛分机理	(127)
4.2.3	筛分设备	(132)
4.3	颗粒流体系的分级原理与设备	(135)
4.3.1	重力分级	(136)
4.3.2	离心分级	(136)
4.3.3	旋风分级	(138)
4.3.4	粗分级	(139)
4.3.5	湿式分级	(140)
4.4	超细粉分级设备	(142)
4.4.1	超细粉分级的原理及发展动向	(142)
4.4.2	干法超细分级	(143)
4.4.3	湿法超细分级	(146)
	思考题	(147)
	参考文献	(147)
5	分离	(148)
5.1	分离概述	(148)
5.1.1	概述	(148)
5.1.2	分离效率	(149)
5.2	气固系统分离	(149)

5.2.1	概述	(149)
5.2.2	分离性能	(150)
5.2.3	收尘装置	(152)
5.3	液固分离	(176)
5.3.1	浓缩	(177)
5.3.2	过滤	(183)
5.3.3	过滤技术及过滤设备的发展趋势	(200)
5.4	干燥	(200)
5.4.1	干燥的概念	(200)
5.4.2	干燥过程的基本理论	(201)
5.4.3	恒定干燥条件下的干燥速率	(210)
5.4.4	干燥器	(213)
5.4.5	干燥器的选用和发展方向	(236)
	思考题	(237)
	参考文献	(237)
6	混合与造粒	(238)
6.1	混合	(238)
6.1.1	概述	(238)
6.1.2	混合机理和混合效果评价	(238)
6.1.3	混合过程与混合速度	(240)
6.1.4	影响混合的因素	(241)
6.1.5	混合设备	(243)
6.2	造粒	(249)
6.2.1	颗粒群的凝聚	(249)
6.2.2	压缩造粒	(249)
6.2.3	挤出造粒	(250)
6.2.4	滚动造粒	(251)
6.2.5	喷浆造粒	(253)
6.2.6	流化造粒	(255)
	思考题	(256)
	参考文献	(256)
7	粉体的贮存与粉体输送	(257)
7.1	粉体的贮存	(257)
7.1.1	物料贮存的作用与分类	(257)
7.1.2	仓内粉体的重力流动	(258)
7.2	固气两相流的输送理论	(266)
7.2.1	固气两相流与固液两相流的输送原理	(266)
7.2.2	颗粒的流体输送的分类和特点	(267)
7.2.3	浓度与混合比	(271)

7.2.4	沉降速度与悬浮速度	(271)
7.2.5	固气两相流的压力损失	(273)
7.3	固气两相流输送设备	(274)
7.3.1	装置设计	(274)
7.3.2	常见气力输送设备	(278)
7.4	粉体机械输送设备	(285)
7.4.1	胶带输送机	(286)
7.4.2	螺旋输送机	(295)
7.4.3	斗式提升机	(300)
7.4.4	其他机械化式输送机	(309)
	思考题	(316)
	参考文献	(316)
8	金属粉末的制备	(317)
8.1	还原法制备金属粉末	(318)
8.1.1	还原过程的基本原理	(318)
8.1.2	固体碳还原法制铁粉	(326)
8.1.3	气体还原法	(332)
8.1.4	金属热还原法	(338)
8.2	雾化法制备金属粉末	(339)
8.2.1	二流雾化法	(340)
8.2.2	离心雾化法	(350)
8.3	电解法制取金属粉末	(352)
8.3.1	水溶液电解法	(353)
8.3.2	熔盐电解法	(360)
	思考题	(362)
	参考文献	(362)
9	超细粉末的制备	(363)
9.1	气溶胶颗粒的制备	(363)
9.1.1	气溶胶的概念	(363)
9.1.2	气溶胶的制备	(364)
9.2	气相反应合成超微粉末颗粒	(371)
9.2.1	原理	(371)
9.2.2	化学气相反应法	(375)
9.2.3	气相燃烧法	(378)
9.2.4	热解法	(378)
9.2.5	激光诱导合成超细颗粒	(379)
9.2.6	气相蒸发法	(380)
9.3	液相法制备粉末颗粒	(385)
9.3.1	溶剂蒸发法	(385)

9.3.2	喷雾热解法	(387)
9.3.3	沉淀法	(388)
9.3.4	水解法	(391)
9.3.5	氧化还原法	(392)
9.3.6	水热法与溶剂热法	(393)
9.3.7	溶胶—凝胶法	(394)
9.3.8	微乳液法	(396)
9.4	固相法制备超微粉末	(396)
9.4.1	机械粉碎法	(396)
9.4.2	固相化学反应法	(397)
9.4.3	固态燃烧合成法	(399)
	思考题	(402)
	参考文献	(402)
10	粉尘的危害与防护	(403)
10.1	概述	(403)
10.1.1	粉尘的来源	(403)
10.1.2	粉尘的分类	(403)
10.1.3	粉尘的性质及其危害	(404)
10.2	粉尘对呼吸系统的影响	(405)
10.2.1	颗粒在呼吸系统中的穿透、沉积	(405)
10.2.2	摄入颗粒的危害、临界值	(409)
10.2.3	粉尘致病的机理	(410)
10.2.4	粉尘防护	(413)
10.3	粉尘爆炸及防护	(414)
10.3.1	粉尘爆炸的基本概念	(414)
10.3.2	粉尘爆炸的特点	(416)
10.3.3	粉尘爆炸的机理及发生爆炸的条件	(416)
10.3.4	粉尘爆炸的影响因素	(418)
10.3.5	粉尘爆炸的预防与防护	(422)
	思考题	(425)
	参考文献	(426)

1 粉末的性能与表征

本章提要

粉末体简称粉末或粉体(Powder),通常是指由大量的固体颗粒及颗粒间的空隙所构成的集合体。而组成粉末体的最小单位或个体称为粉末颗粒(Powder Particle),简称颗粒,其大小一般小于 $1000\ \mu\text{m}$ 。粉体在相关工业生产中可以是原料、半成品或成品。粉末颗粒的大小、形状、表面性质、堆积特性,各种物理性质、化学性质不仅关系到粉体的应用,也直接取决于并影响生产粉体的单元操作过程。因此,在研究粉体工程学时,首先必须研究粉体与粉末颗粒的特性。

粉体的基本性质可归纳为粉体的几何形态性质、粉体的力学性质、粉体的物理与化学性质等。本章的主要内容是讨论粉末颗粒的几何学形态特性,给出粉末颗粒的粒径、粒径分布、颗粒形状的科学定义;粉末粒径及粒径分布的测量原理与方法;粉体堆积特性与摩擦学特性以及相关粉体物性的测量方法。

1.1 粉末颗粒的粒径与形状

1.1.1 粒径

粉末体中,颗粒的大小用其在空间范围所占据的线性尺寸表示,称为粒径。对于球形颗粒,其直径即为粒径。多数情况下,颗粒是非球形的或不规则的,但其粒径可用球体、立方体或长方体代表尺寸来表示,称为几何学粒径。其中,用球体的直径表示不规则颗粒的粒径,称为当量径或相当径。当量径依据不同的测量方法而与颗粒的各种物理现象相对应。

(1) 几何学粒径

当对一不规则颗粒作三维尺寸测量时,可作一个外接的长方体如图 1.1 所示。若将长方体放在笛卡儿坐标系中,其长、宽、高分别为 l 、 b 、 h ,可表示为颗粒的三轴径。

根据该长方体的三维尺寸可计算不规则颗粒的粒径,用于比较不规则颗粒的大小。常见的外接长方体表示的颗粒粒径如表 1.1 所示。

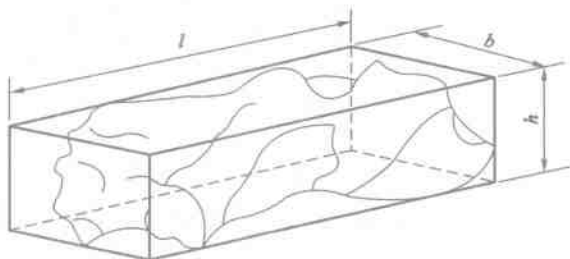


图 1.1 不规则颗粒的外接长方体

表 1.1 以颗粒外接长方体的三维尺寸计算的单一颗粒粒径

序号	计算式	名称	物理意义
1	$\frac{l+h}{2}$	长短平均径 二轴平均径	二维图形算术平均
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	三维图形算术平均
3	$\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$	三轴调和平均径	与外接长方体比表面积相同的球体直径
4	\sqrt{lb}	二轴几何平均径	平面图形上的几何平均
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	与外接长方体体积相同的立方体的一条边
6	$\sqrt{\frac{lb+bh+lh}{3}}$	三轴等表面积平均径	与外接长方体比表面积相同的立方体的一条边

(2) 投影径

利用显微镜测量颗粒的粒径时,可观察到颗粒的投影。此时的颗粒以重心最低的状态稳定地处在观察平面上。可根据其投影的大小定义粒径。

① Feret 径

用与颗粒投影相切的两条平行线之间的距离来表示的颗粒粒径。比较粒径的大小应取某一特定方向的平行线,如垂直或水平。如图 1.2 所示。

② Martin 径

用在一定方向上将颗粒的投影面积分为两等分的直径来表示颗粒的粒径。比较粒径的大小时,其分割的方向也应一致。如图 1.3 所示。

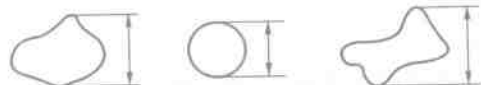


图 1.2 Feret 径的图示

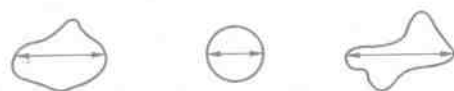


图 1.3 Martin 径的图示

③ 割线径

割线径指用某一确定方向的直线切割颗粒所得的割线长表示的颗粒粒径。主要用于显微镜法测量中,利用直线测微尺以视场向一个方向移动,测量落在目镜测微尺上所有颗粒被截取部分的长度。如图 1.4 所示。

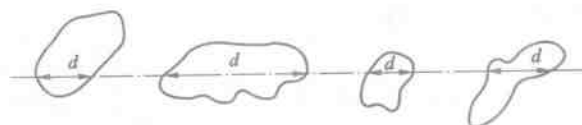


图 1.4 割线径的图示

④ 投影面积相当径 (Heywood 径)

用与颗粒投影面积相等的圆的直径来表示的颗粒粒径。

⑤ 投影周长相当径

用与颗粒周长相等的圆的直径来表示的颗粒粒径。

(3) 筛分径

颗粒通过粗孔网并停留在细孔网上时,以粗细筛孔径的算术平均值或几何平均值表示颗粒的粒径。如图 1.5 所示,筛分径可表示为: $(a_1 + a_2)/2$ 或 $\sqrt{a_1 a_2}$ 。

(4) 球当量径

① 等表面积当量径

它指用与颗粒具有相同表面积的球的直径表示的颗粒粒径。

用 D_s 表示,颗粒的表面积 $S = \pi D_s^2$ 。

② 等体积(球)当量径

它指用与颗粒体积相等的球的直径表示的颗粒粒径。

用 D_v 表示,颗粒体积 $V = \pi D_v^3/6$ 。

③ 等比表面积(球)当量径

它指用与颗粒比表面积相等的球的直径表示的颗粒粒径。用 D_{sv} 表示。

④ Stokes 径

它在斯托克斯定律(Stokes Law)适用的条件下,即悬浊液的雷诺数小于 1 时,用与颗粒具有相同沉降速度的球的直径表示的颗粒粒径。它是通过离心沉降或重力沉降方法获得的。记为 D_{sk} ,此时颗粒与球体的密度应相同。

⑤ 光散射当量径

它指用能给出相同的光散射密度的标准颗粒球直径表示的颗粒粒径。

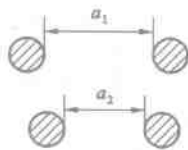


图 1.5 筛分径的图示
 a_1, a_2 分别为粗细筛的筛孔尺寸

1.1.2 粉体的粒径分布

粉体中颗粒的平均大小称为粉体的粒径,习惯上可将粒径与粒度通用。粉体中颗粒的粒径相等时(如标准颗粒),则可用单一粒径表示其大小,这时粉体称为单粒径体系。实际生产过程中所处理的粉体是由许多粒径大小不一的颗粒组成的分散体系,这时粉体称为多颗粒体系。粒径分布,又称粒度分布,是指若干个按大小顺序排列的一定范围内颗粒量占颗粒群总量的百分数,它是用简单的表格、绘图或函数的形式给出的颗粒群粒径的分布状态。

粉体的粒径分布常表示成频率分布和累积分布的形式。频率分布表示各个粒径范围内对应的颗粒百分含量(微分型);累积分布表示大于或小于某粒径的颗粒占全部颗粒的百分含量与该粒径的关系(积分型)。此外还有以长度和面积为基准的。工程上采用质量为基准的情况较多。

1.1.2.1 频率分布和累积分布

当用某一定义的粒径测量了 N 个颗粒的粒径后,记录了从粒径 $D_p + dD_p$ 范围内的颗粒的数目为 dn 个,则频率分布 $q_0(D_p)$ 可定义为:

$$q_0(D_p) = \frac{1}{N} \frac{dn}{dD_p} \quad (1.1)$$

这里应满足:

$$\int_0^{\infty} q_0(D_p) dD_p = 1 \quad (1.2)$$

若将式(1.1)写成不连续的表达式,即:

$$\overline{q_0}(D_p) = \frac{1}{N} \frac{\Delta n}{\Delta D_p} \quad (1.3)$$

式中 Δn 是粒径为 $D_p - \Delta D_p/2$ 到 $D_p + \Delta D_p/2$ 颗粒的数量。由此可给出如图 1.6(a) 所示的粒径分布直方图。

累积分布可由下式给出：

$$Q_0 = \int_0^{D_p} q_0(D_p) = \int_0^{D_p} \frac{1}{N} \frac{dn}{dD_p} \quad (1.4)$$

因此频率分布与累积分布的关系为：

$$\frac{dQ_0}{dD_p} = q_0(D_p) \quad (1.5)$$

上述的定义是以颗粒的个数为基准的。在以质量或体积为基准时，粒径的频率分布和累积分布可定义为：

$$q_1(D_p) = \frac{1}{M} \frac{dm}{dD_p} \quad (1.6)$$

$$Q_1(D_p) = \int_0^{D_p} \frac{1}{M} \frac{dm}{dD_p} \quad (1.7)$$

这里 M 为粉末颗粒的总质量， dm 为粒径在 D_p 到 $D_p + dD_p$ 范围内颗粒的质量。

表 1.2 给出了某种粉末个数基准和粒径分布的数据，颗粒粒径是用显微镜测量的 Feret 径。图 1.6 为依据表 1.2 中计算的数据绘制的粒径的频率分布与累积分布的直方图。

表 1.2 粒径分布的数据分析

初始数据		处理数据						累积百分数 $Q_0(\%)$
粒径 (μm)	颗粒数 Δn	粒径分布 ΔD_p	平均粒径 D_p	$q_0(D_p)$				
				$\frac{100\Delta n}{N}$ (%)	$\bar{q}_0 = \frac{100\Delta n}{N\Delta D_p}$ (%/μm)	$\Delta \ln D_p$	$\bar{q}_0^* = \frac{100\Delta n}{N\Delta(\ln D_p)}$	
0~0.2	10	0.2	0.1	1	5	—	—	1
0.2~0.4	80	0.2	0.3	8	40	0.693	11.5	9
0.4~0.6	132	0.2	0.5	13.2	66	0.405	29.3	22.2
0.6~0.8	142	0.2	0.7	14.2	71	0.288	49.3	36.4
0.8~1.0	138	0.2	0.9	13.8	69	0.223	61.9	50.2
1.0~1.2	112	0.2	1.1	11.2	56	0.182	61.5	61.4
1.2~1.4	75	0.2	1.3	7.5	37.5	0.154	48.7	68.9
1.4~1.6	65	0.2	1.5	6.5	32.5	0.134	48.5	75.4
1.6~1.8	52	0.2	1.7	5.2	26	0.118	44.0	80.6
1.8~2.1	65	0.3	1.95	6.5	21.7	0.154	42.2	87.1
2.1~2.7	62	0.6	2.4	6.2	10.3	0.251	24.7	93.3
2.7~3.6	32	0.9	3.15	3.2	3.6	0.288	11.1	96.5
3.6~5.1	35	1.5	4.35	3.5	2.3	0.348	10.1	100

可连接分布直方图上各矩形顶部中点构成粒径分布的曲线。显然，只有在 Δd 足够小时，

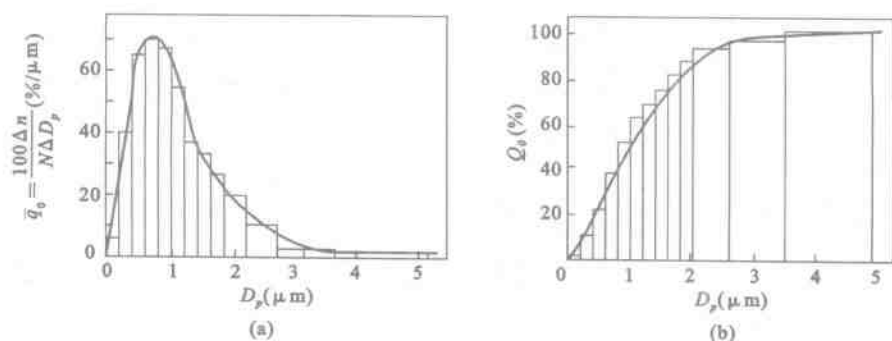


图 1.6 粒径的频率分布与累积分布

(a) 频率分布; (b) 累积分布

获得的曲线才有意义。此时可用粒级的平均粒径绘制粒径分布曲线。在分析粒径分布时,如取各粒级的 Δd 相等,频率分布能比较直观地表示颗粒的组成特性。但若改变 Δd ,则所得频率分布会发生变化。同样若改成以质量为标准,其分布曲线也会不同。

由于粒径的频率分布与累积分布存在微分关系[如式(1.5)所示]。如果横坐标相同时,累积分布曲线上各粒径点的切线的斜率 dQ_0/dD_p 即为频率分布曲线上所对应的粒径点的频率值。逐点作切线求斜率即可得频率分布。

粒径分布曲线除可直观地表示粉体的粒径分布特性外,用有限个粒径分布的测定的数据所作的光滑曲线还可读出粒径表格中未能给出的任意一个粒级的颗粒的百分含量。

1.1.2.2 粒径分布函数

粒径分布的表格、直方图、曲线虽能直观地反映粉体粒径分布的特性,却仍不能反映出具有相同或相似粒径分布特性的共性规律。数学函数可对粒径分布进行最精确最简便的描述。利用数学函数可求取各种平均粒径等粉末特性参数,也可进行各种基数的换算。在实际测定时,还可根据不太多的测定数据求出粒径分布的函数表达式,从而推断出整个粒径分布的规律。

能够用于表达粒径分布规律的函数很多,但其适用粉体类别和粒径范围均有一定的限制,计算结果与实际也有一定的误差。这里仅介绍几种常用的函数表达式。

(1) 正态分布

自然界中,凡是随机现象均是许多偶然因素共同作用的总和,多个偶然因素所起的作用具有相同的权重,没有哪个起主导作用。但就总体而言,一切随机现象都具有其必然性,即这些随机现象出现的频率总是有统计规律地在某个一定的常数附近摆动。这个随机现象的概率模型就是正态分布。

正态分布的概率密度函数(频率分布的函数)可由式(1.8)给出:

$$\phi_{u,\sigma} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.8)$$

式中 x ——自变量;

a ——平均值;

σ ——标准偏差。

图 1.7 给出了不同参数的正态分布密度函数的图形。