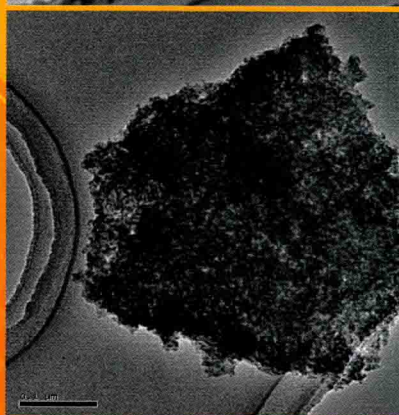
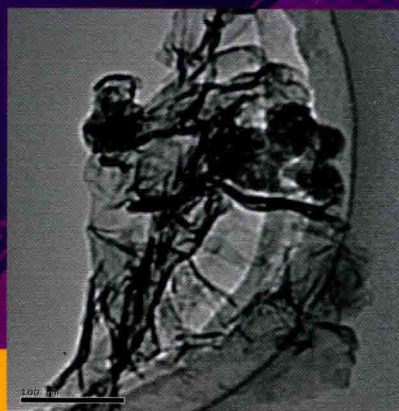
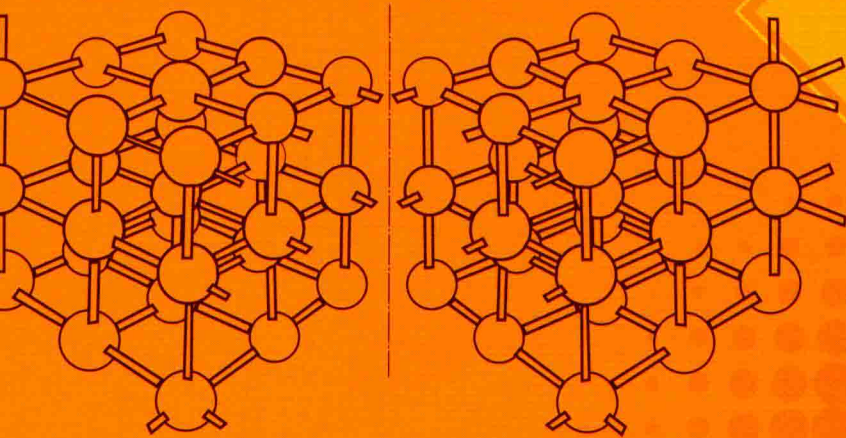


POWDER MEASURING
AND ANALYTICAL
TECHNIQUES

粉体测试 与分析技术

王介强 徐红燕 等编著



化学工业出版社

POWDER MEASURING
AND ANALYTICAL
TECHNIQUES

粉体测试
与分析技术

王介强 徐红燕 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

随着新材料产业的迅速发展,各种粉体材料与粉体测试技术日益受到人们的关注。掌握粉体测试技术不仅对开发和生产各种新型粉体材料具有非常重要的意义,也能为更好地监测大气中的细微颗粒物(如PM_{2.5}等)打下坚实的基础。本书对粉体超细或纳米化后的性能变化及细微颗粒物的危害性有系统和详细的论述。

全书概念清楚,思路清晰,内容全面,易于读者理解。主要内容包括粉体试样的取样方法、粉体的表观特性及其测试技术、粉体的密度与测定、粉体晶态结构与成分测试、粉体表面特性及其测试技术、粉体显微分析技术、粉体的分子光谱测试与分析、粉体的力学性能及其评价方法、超微粉体理化特性的基本理论、超微粉体的物理特性与测试、超微粉体的化学特性与测试、细微颗粒物的危害性及其监测等。

本书既可供粉体材料、无机非金属材料以及化工、环境保护等相关行业工程技术人员、科研人员阅读和参考,也可供在校大专院校有关专业师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉体测试与分析技术/王介强等编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-122-28947-6

I. ①粉… II. ①王… III. ①粉体-参数测试②粉体-参数分析 IV. ①TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 017667 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 王 静

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 史利平

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 装: 高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 371 千字 2017 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 59.00 元

版权所有 违者必究

前言

粉体材料涉及的种类很多,微纳米化后,性能通常发生很大变化。随着粉体材料科学与工程的发展,特别是粉体材料的微纳米化,作为一种特殊而又重要的材料存在形态,对其表征及其相关性能测试与分析方面尚没有专门的书籍,基于此,结合编著者多年从事粉体科研与教学的积累,编写了这本《粉体测试与分析技术》。

本书针对材料粉体化后的特点,首先介绍了粉体的粒度、形貌、比表面积、多孔特征、密度、晶态结构、化学成分、表面成分、表面能、表面电性等基本性能的测试方法及其原理,还介绍了显微分析技术和分子光谱分析技术在粉体表征中的应用,分别对粉体的力学性能、超微粉体的物理性能和化学性能及其测试技术进行了重点介绍,并且介绍了细微颗粒物的危害性及其监测技术。

本书在撰写过程中得到了笔者所在的材料工程教研室各位老师的大力支持,他们为本书的编写提出了很多很好的建议,付出了辛勤劳动。本书编写分工如下:王介强教授编写了第1、第3~7、第9、第12章;徐红燕副教授编写了第2、第11章;陶珍东教授编写了第8章,还进行了统稿并提出了宝贵的修改意见;李金凯博士编写了第10章。赵蔚琳教授和郑少华教授就纳米流体和纳米颗粒的抗磨减摩性及其测试提供了有益的资料,姜奉华副教授对本书的编写也提出了许多有益的建议,研究生刘庆、薛菲以及本科生刘鸣天和靖彭同学为本书图表编辑以及参考文献整理做了大量工作,在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

2016年10月

目录 Contents

第 1 章 粉体试样的取样方法 1

1.1 ▶ 二分法	1
1.2 ▶ 圆锥四分法	2
1.3 ▶ 层叠交替铲分法	3
1.4 ▶ 旋转划分机	3
1.5 ▶ 料流切断法	4
1.6 ▶ 超微粉体的取样	5
参考文献	5

第 2 章 粉体的表观特性及其测试技术 6

2.1 ▶ 粉体粒度及其测试技术	6
2.1.1 单颗粒尺寸的表示方法	6
2.1.2 颗粒群尺寸的表示方法	8
2.1.3 粉体粒度的测量技术	9
2.2 ▶ 粉体颗粒形状与表征	18
2.2.1 颗粒形状因数	18
2.2.2 颗粒形状的分形表征	19
2.2.3 颗粒形状的观测	21
2.3 ▶ 粉体比表面积与孔分析	22
2.3.1 粉体比表面积与孔的基本概念	22
2.3.2 粉体比表面积与孔分析表征原理	22
2.3.3 粉体比表面积和孔径分布测试方法	31
参考文献	38

第 3 章 粉体的密度与测定 39

3.1 ▶ 粉体有效密度的测定	39
3.1.1 测试原理	39

3.1.2 测试设备	41
3.1.3 试样测定	41
3.2 ▶ 粉体松装密度的测定	42
3.2.1 漏斗法	42
3.2.2 斯柯特容量计法	43
3.2.3 振动漏斗法	44
3.3 ▶ 粉体振实密度的测定	45
参考文献	46

第4章 粉体晶态结构与成分测试 47

4.1 ▶ 粉体晶态结构测试与分析	47
4.1.1 粉体晶态结构的X射线衍射分析法	47
4.1.2 粉体晶态结构的电子衍射分析法	50
4.1.3 粉体晶态结构的中子衍射分析法	50
4.2 ▶ 粉体的化学成分测试	51
4.2.1 特征X射线分析法	52
4.2.2 原子光谱分析法	54
参考文献	58

第5章 粉体表面特性及其测试技术 59

5.1 ▶ 粉体表面成分分析技术	59
5.1.1 俄歇电子能谱法	59
5.1.2 X射线光电子能谱法	61
5.2 ▶ 粉体表面能及其测试	64
5.2.1 粉体表面能特点	64
5.2.2 粉体表面能测量技术	66
5.3 ▶ 粉体表面电性及测试	67
5.3.1 颗粒表面电性起源与带电结构	67
5.3.2 颗粒表面 ζ 电位的测定	71
参考文献	72

第6章 粉体显微分析技术 73

6.1 ▶ 扫描电子显微镜分析	74
6.1.1 扫描电镜的基本结构与成像原理	74
6.1.2 扫描电镜的粉体试样制备与显微分析	76
6.1.3 扫描电镜的能谱仪和波谱仪分析	78
6.2 ▶ 透射电子显微镜分析	79
6.2.1 透射电镜的基本结构与成像原理	79
6.2.2 透射电镜的图像衬度及电子衍射	80

6.2.3 透射电镜的粉体试样制备与显微分析	82
6.3 ▶ 扫描隧道显微镜分析	83
6.4 ▶ 原子力显微镜分析	86
6.4.1 原子力显微镜的工作原理与基本结构	86
6.4.2 原子力显微镜的粉体样品制备	88
参考文献	89

第7章 粉体的分子光谱测试与分析 90

7.1 ▶ 红外光谱分析	91
7.1.1 红外光谱分析法的原理	91
7.1.2 红外光谱测试粉体样品制备及分析	92
7.2 ▶ 拉曼光谱分析	95
7.2.1 拉曼光谱分析法的原理	95
7.2.2 拉曼光谱在粉体材料研究中的应用	96
7.3 ▶ 红外光谱与拉曼光谱的比较	98
7.4 ▶ 紫外-可见吸收光谱法	99
7.4.1 紫外-可见吸收光谱法的原理	99
7.4.2 紫外-可见吸收光谱法在粉体材料研究中的应用	100
参考文献	102

第8章 粉体的力学性能及其评价方法 103

8.1 ▶ 粉体易磨性及其评价方法	103
8.1.1 相对易磨性及其测定方法	103
8.1.2 Bond 粉碎功指数法	104
8.1.3 相对易磨性系数和 Bond 粉碎功指数的比较	107
8.2 ▶ 粉体分散性及其评价方法	109
8.2.1 粉体颗粒间的相互作用力	109
8.2.2 粉体分散性的评价方法	110
8.3 ▶ 粉体流动性及其评价方法	113
8.3.1 粉体的内摩擦角和休止角	114
8.3.2 粉体摩擦角的测试方法	115
8.3.3 粉体流动性的评价方法	118
8.4 ▶ 粉体综合特性测试	119
8.4.1 粉体综合特性测试仪简介	119
8.4.2 粉体特性参数的测试过程	120
参考文献 ▶	128

第9章 超微粉体理化特性的基本理论 129

9.1 ▶ 粉体纳米化后的电子能态特征	129
---------------------------	-----

9.1.1 纳米颗粒的电子结构	129
9.1.2 纳米颗粒中的电子关联和激发	130
9.1.3 电子能级的离散特性	130
9.1.4 库仑堵塞和量子隧穿	131
9.2 ▶ 粉体纳米化后的基本效应	132
9.2.1 量子尺寸效应	132
9.2.2 小尺寸效应	132
9.2.3 表面效应	133
9.2.4 宏观量子隧道效应	134
9.2.5 介电限域效应	135
参考文献 ▶	135

第 10 章 超微粉体的物理特性与测试 136

10.1 ▶ 超微粉体的热学性能	136
10.1.1 基本表现	136
10.1.2 粉体的可烧结性及其评价方法	137
10.1.3 纳米流体的热学性能及其测试方法	138
10.2 ▶ 超微粉体的磁学性能	141
10.2.1 基本概念	141
10.2.2 超微粉体的磁性测量	145
10.3 ▶ 超微粉体的电学性能	145
10.3.1 超微粉体的导电性	145
10.3.2 超微粉体的巨磁电阻效应	147
10.4 ▶ 超微粉体的光学特性	148
10.4.1 宽频带强吸收	148
10.4.2 超微粉体的发光特性	149
10.4.3 超微粉体分散体系的光学性能	157
10.5 ▶ 纳米颗粒的抗磨减摩性及其测试	159
10.5.1 纳米颗粒的抗磨减摩机理	159
10.5.2 纳米抗磨剂的抗磨减摩性能测试	161
参考文献	165

第 11 章 超微粉体的化学特性与测试 166

11.1 ▶ 超微粉体的吸附特性	166
11.1.1 基本原理	166
11.1.2 粉体吸附水中污染物性能的测试	166
11.2 ▶ 超微粉体的催化特性	168
11.2.1 粉体的非均相催化特性	168
11.2.2 粉体的光催化特性	170
11.2.3 粉体光催化性能的测试	172

11.3 ▶ 超微粉体的电化学可循环储能特性	174
11.3.1 可充电电源与电极活性材料	174
11.3.2 粉体活性材料电化学性能的测试	176
11.3.3 以粉体为活性材料组装超级电容器及其性能测试	182
11.4 ▶ 超微粉体的敏感特性	185
11.4.1 粉体气敏性能的基本原理	186
11.4.2 粉体气敏性能的评价	188
11.4.3 粉体气敏性能的测试	189
参考文献	193

第 12 章 细微颗粒物的危害性及其监测 195

12.1 ▶ 大气中细微颗粒物的来源与种类	195
12.2 ▶ 显微镜下的 PM _{2.5}	197
12.3 ▶ 细微颗粒物的危害性及其机制	199
12.3.1 对人体健康的危害性	199
12.3.2 对生物的危害性	201
12.3.3 对空气能见度及气候的影响	202
12.3.4 对粉尘自燃和爆炸的影响	202
12.4 ▶ 细微颗粒物的监测技术	204
12.4.1 PM _{2.5} 与空气质量标准	204
12.4.2 PM _{2.5} 监测技术	205
12.4.3 粉尘爆炸监测技术	210
参考文献	212

附录 I 激光衍射法粒度测试中各种材料的折射率 213

附录 II 配制悬浮液不同粉体材料所适用的液体介质及分散剂 231

第1章

粉体试样的取样方法

对粉体进行性能测试，首先要选取有代表性的试样，液体和气体一经搅拌就均匀化，采取其代表性试样就不需要特别下功夫，但是，粉体在流动和搅拌情况下，会因粒度差或密度差而引起分离、偏析。不管性能测试方法是如何正确，如果取样的操作方法不适当，就不能获得令人信赖的结果。所以，粉体试样的科学取样是进行粉体性能测试的必要前提。

粉体试样的取样通常要进行划分和缩分操作。所谓划分就是把大量粉体试样分为组成相同的复数份数的操作。所谓缩分就是指粉体制品的进厂检查、出厂检查和工程管理时，从大量粉体中，选取少量的代表性试样的操作。一种情况是反复上述的划分操作后进行缩分，另一种情况是系统地进行抽样，把这些试样合并后，再重复划分操作来取得缩分的试样。通常有以下几种操作方法。

1.1 二分法

图 1-1 所示为中型粉体物料二分器结构简图及实物照片，以左右交错的斜槽装置，使粉体料流分为左右两个方向，成为分别由两个受料箱接料的结构。必须使所含的最大颗粒试料不堵塞斜槽，所选择的双划分器，其缝隙宽度要与粉体粒度相适应。该划分器适用于比较干燥的流动性好的粉体，而不适用于具有扬尘性、黏附凝聚性的粉体。后者以采用带有特殊加料器的旋转划分机（如后所述）为佳。受料箱至少备有三个，此箱是不可缺少的容器，但容易被挪作他用而散失，所以使用后必须整齐齐备，妥善保管。

使两个受料箱准备接受来自八个份份的粉体试样，在进行划分操作时，应注意如下事项。

(1) 将附着在斜槽和受料箱上的料尘用刷子或压缩空气仔细地除净，必要时可用水清洗。

(2) 把应划分的试样向受料箱投入时，一边沿着受料箱长边方向振动，同时使试样能在受料箱中逐层地叠积。这对粒度分布范围宽而容易偏析的试样，显得更为重要。

(3) 使受料箱长边与斜槽缝隙方向垂直，慢慢地倾斜给料容器使试样流出。如果向划分器急剧地倒入粉料，则将使斜槽的两侧流出的粉体量互不平衡，而使划分精度降低。这是由于倒入时的惯性，容易使粉料在斜槽的某一侧流出的缘故，所以，应该保持细流且与斜槽缝隙方向垂直的方向撒料。

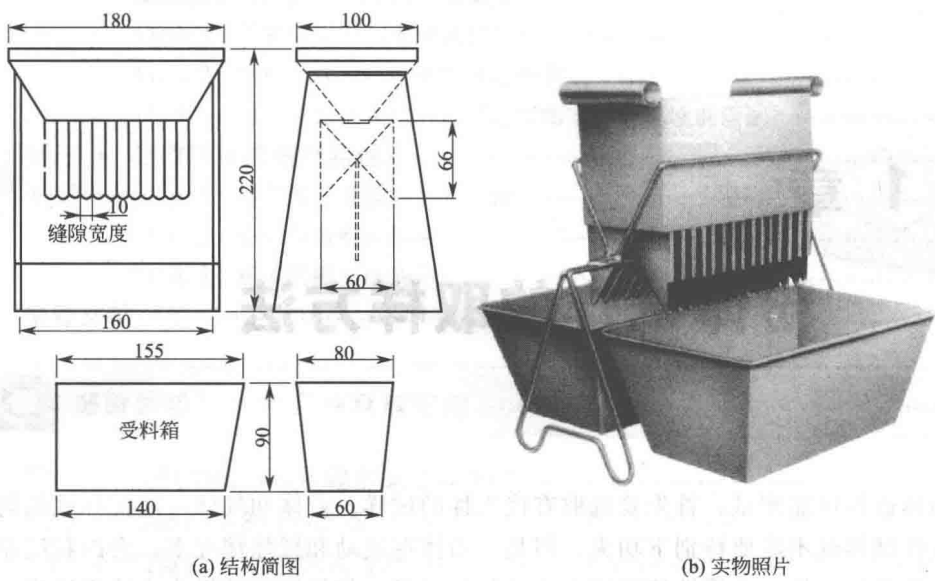


图 1-1 中型粉体物料二分器结构简图及实物照片（单位：mm）

双划分器的制造精度即使很好，但从斜槽左右两侧流出的粉体量与粒度也多少存在偏差，因此，Carpenter 提出了左右相抵的方法。如图 1-2 所示，反复进行划分操作，得到编号①～⑧的划分试样，然后将①与⑧、②与⑦等分别合并，得到四个划分试样。

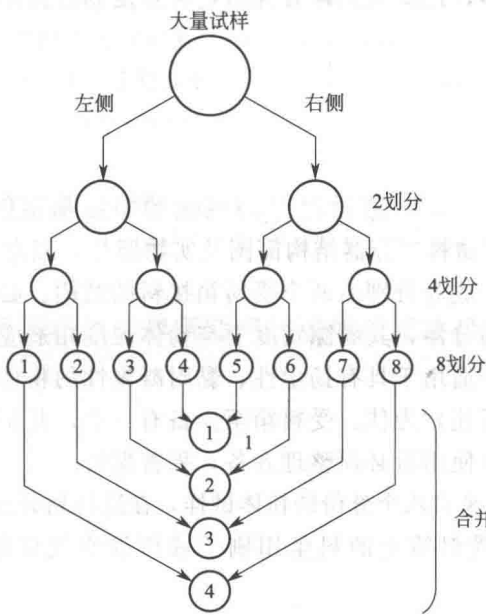


图 1-2 划分粉体物料 Carpenter 左右相抵法示意图

1.2 圆锥四分法

此法就是众所周知的历来作为化学分析用的试样缩分法。此法对流动性好的粉体试料，

由于粒度偏析使其划分精度远远不及双划分器的划分精度。可是，双划分器不适用于具有黏附凝聚性、潮湿等的粉体，而圆锥四分法由于不需要添配特殊的仪器设备，所以仍然常被采用。

如图 1-3(a) 所示，将大小相同的铝箔 1、2、3、4 顺次叠放。将漏斗（直径为 30mm 或 75mm）置于堆积中心 c 的正上方，使粉体垂直落下。对于通不过漏斗的黏附凝聚性粉体，应放在粗孔的筛网上，边用刷子擦下，边使之堆积。用药匙分次做少量加料，也可采用小型振动加料器。粉料堆积后，如图 1-3(b)、(c) 所示，把堆料摊成圆盘形状，然后挪开铝箔，使之划分为四份，再交互合并而成两个部分，即每次操作划分为两份。少量物料时，因为排列铝箔很方便，常采用圆锥四分法。

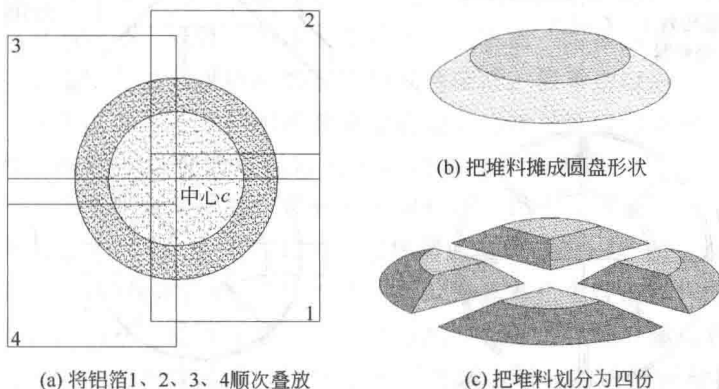


图 1-3 粉体物料圆锥四分法示意图

1.3 层叠交替铲分法

如图 1-4 所示，将试样一层一层地堆成堤状，然后从一端顺序垂直截取，并且左右交替分开做双划分。此方法的精度显然欠佳，但不需要添配特殊的仪器设备，便于处理大量的物料，该方法也可以用于室外大规模地划分矿石，如对各种矿物原料进行易磨性指数测试常采用该方法取样。

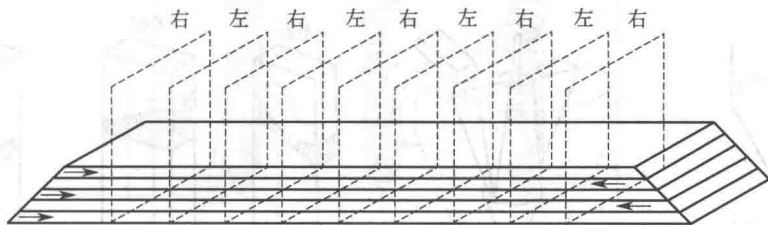


图 1-4 粉体物料层叠交替铲分法示意图

1.4 旋转划分机

如图 1-5 所示，有旋转型受料器和旋转型料嘴两种。前者比较适用于少量物料的划分，而后者由于受料箱的大小不受限制，所以处理量没有限制。大型的划分装置可划分几吨的试

样。如果不停留地划分试样，也能达到使出厂粉体制品批量之间没有偏差的目的。

划分数最大每次约为 12 划分，超过 12 划分数则偏差就变得明显。旋转速度达到最佳值，能使试样质量分配精度符合标准。旋转轴的设计必须可靠，以保证作完全水平的旋转。

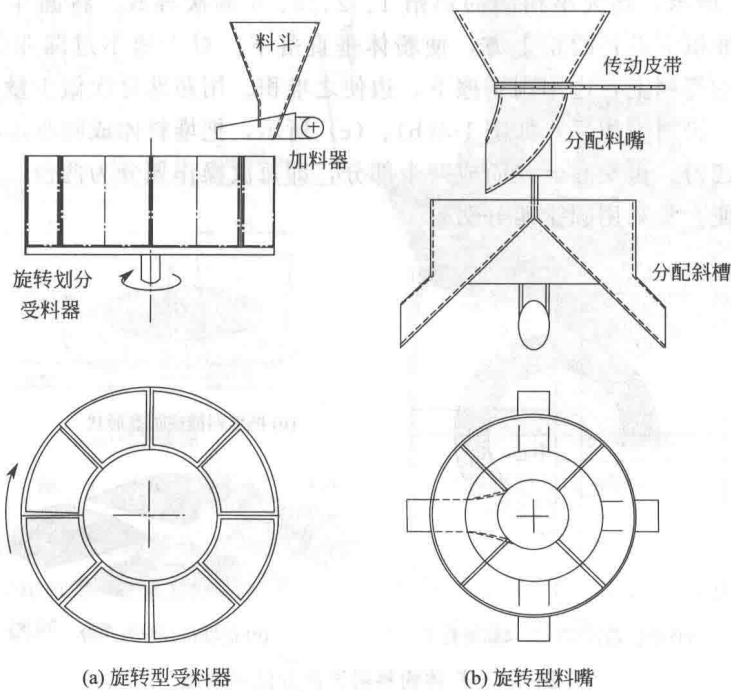


图 1-5 粉体物料旋转划分机结构示意图

1.5 料流切断法

图 1-6(a) 所示为取样时的情况，一边使加料斗全部料粉流出，一边定时横切料流来取得试样。在工程中可以采用如图 1-6(b) 所示的取样器。这时，需要注意如图 1-6(c) 所示的料流切断形状。由于料流偏析，以均等切断的方式为佳。

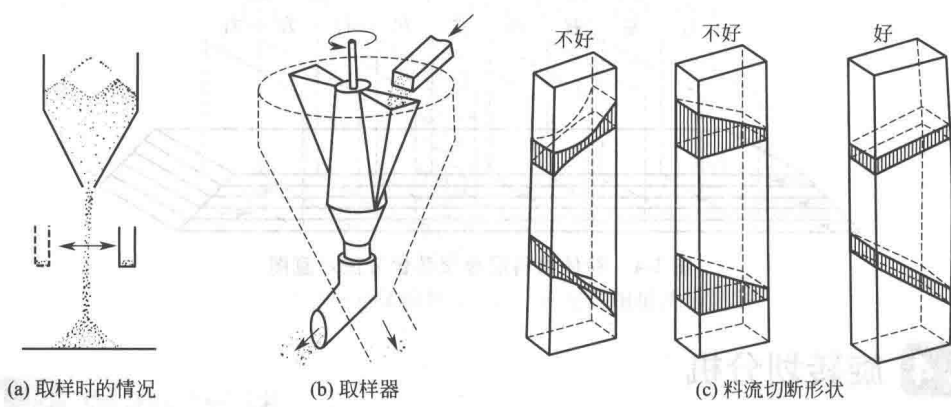


图 1-6 粉体物料的料流切断法示意图

1.6 超微粉体的取样

开展超微粉体的研究,对于如何得到具有代表性的样品是一大难题。在实际操作过程中,要化验的物料是大量的,其组成有的比较均匀,有的很不均匀。化验时所称取的分析试样只是几克、几百毫克或更少,而分析结果必须能代表全部物料的平均组成,因此,仔细而正确地采取具有代表性的“平均试样”,就具有极其重要的意义。一般来说,采样误差常大于分析误差,因此如果采样不正确,分析结果就毫无意义,甚至给生产和科研带来很坏的后果。对颗粒大小不均匀的超微粉体试样,加之微颗粒表面因带电等作用对取样器产生的吸附或排斥作用,选取具有代表性的均匀试样是一项较为复杂的操作。为了保证采取的试样具有代表性,必须按一定的程序,自物料的各个不同部位,取出一定数量大小不同的颗粒,取出的份数越多,试样的组成与被分析物料的平均组成越接近。但考虑以后在试样处理上所花费的人力、物力等,应该以选用能达到预期准确度的最节约的采样量为原则。目前,超微粉体的取样方法有多种,取样器以管式取样器为主,以取样器在料桶内与水平面呈 45° 夹角取样,两侧对称取样。还有定量取样器、螺旋绞刀取样器、自动连续取样器、水泥取样器、闭合式取样器等多种。图1-7所示为闭合式粉体取样器的取样方法示意图。但因超微粉体的流动性差,这几种取样器对超微粉体的适用性低,要取得具有代表性的试样非常困难,需要针对超微粉体的特点,研制新型的取样器或采用特殊的取样方法。如对超微粉体进行电镜观测时,观测区域通常为很小的视野范围,这就要求所观测区域内的微量颗粒样品具有代表性,为保证取样的代表性,通常采用将粉体制成分散液再取样的方法,一般取约20mg的粉体置于50mL的小烧杯中,加入30mL无水乙醇或超纯水,然后在搅拌的同时进行超声波处理10min左右,得到高度分散的两相体,然后尽快用滴管将分散液滴加到表面覆有碳膜的透射电镜用铜网上,或扫描电镜用的试样台或锡纸上,待液体介质完全挥发后,就可放入电镜观测,若用锡纸就将其粘在样品台的导电胶带上放入电镜。由于制取了均匀分散的悬浮体,采用该法取样可使被观测的粉体具有较好的代表性,该方法非常适于超微粉体的取样分析。

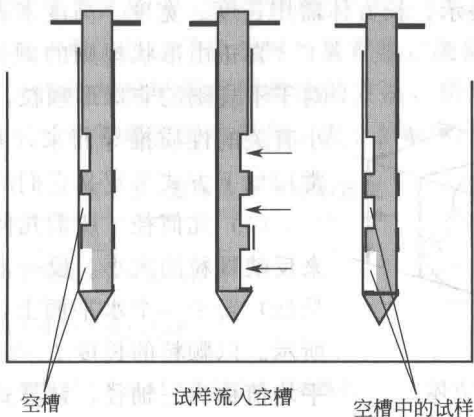


图 1-7 闭合式粉体取样器的取样方法示意图

参 考 文 献

- [1] [日] 三轮茂雄, 日高重助. 粉体工程实验手册 [M]. 杨伦, 谢淑娴译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [2] 陆厚根. 粉体工程导论 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.

粉体的表观特性及其测试技术

2.1 粉体粒度及其测试技术

粉体的颗粒尺寸是反映粉体特性的基本指标之一，它影响了粉体的物理、化学、力学性能及其使用性能，如粉体的颗粒尺寸缩减到纳米尺度（一般认为在 100nm 以下）时，粉体的一些物理和化学性能如导电性、磁性、催化性等与毫米以上级粉体颗粒相比会发生根本性的变化；粉体粒度变化对粉体的力学性能也影响显著，如粉体颗粒尺寸缩减到纳米尺度时，其抗破坏能力急剧增强，传统的机械力难以制备更细的粉体产品；颗粒尺寸的变化也直接影响粉体的使用性能，表现在粉体的堆积、分散、沉降和流变性能等。

2.1.1 单颗粒尺寸的表示方法

球形颗粒的大小可用直径表示，长方体颗粒可用其边长来表示，对于其他形状规则的颗粒可用适当的尺寸来表示。有些形状规则的颗粒可能需要一个以上的尺寸来表示其大小，如锥体需要用直径和高度来表示，长方体需用长度、宽度、高度来表示。

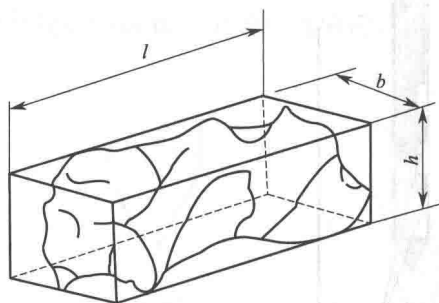


图 2-1 颗粒的外接长方体

真正由形状规则的颗粒构成的粉体颗粒并不多，对于不规则的非球形颗粒，是利用测定某些与颗粒大小有关的性质推导而来，并且使之与线性量纲有关。常用如下方式来定义它们的大小和粒径。

(1) 几何径 所谓几何径就是以颗粒的三维尺度来反映颗粒的大小。设一个颗粒以最大稳定度（重心最低）置于一个水平面上，此时颗粒的投影如图 2-1 所示。以颗粒的长度 l 、宽度 b 、高度 h 定义的粒度平均值称为三轴径，计算式及物理意义列于表 2-1。

在显微镜下测定颗粒尺寸时，用显微镜的线性目镜测微标尺如游丝测微标尺，将颗粒的投影面积分成面积大约相等的两部分。这个分界线在颗粒投影轮廓上截取的长度，称为马丁直径（ d_m ）。沿一定方向测量颗粒投影轮廓的两端相切的切线间的垂直距离，在一个固定方向上的投影长度，称为弗雷特直径（ d_f ）。马丁直径和弗雷特直径如图 2-2 所示。显然，在显微镜下，一个不规则的颗粒的粒径 d_m 和 d_f 的大

小均与颗粒取向有关。然而，当测量的颗粒数目很多时，因取向所引起的偏差大部分可以互相抵消，故所得到的统计平均粒径的平均值，还是能够比较准确地反映出颗粒的真实大小。

表 2-1 三轴径的平均值计算式及物理意义

序号	计算式	名称	意义
1	$\frac{l+b}{2}$	二轴平均径	显微镜下出现的颗粒基本大小的投影
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	算术平均
3	$\frac{3}{\frac{1}{l}+\frac{1}{b}+\frac{1}{h}}$	三轴调和平均径	与颗粒的比表面积相关联
4	$\sqrt{lb}$	二轴几何平均径	接近于颗粒投影面积的度量
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	假想的等体积的长方体的边长
6	$\sqrt{\frac{2(lb+lh+bh)}{6}}$		假想的等表面积的长方体的边长

由上面可以看出，对于非球形不规则形状的粉体颗粒，采用单纯的几何径来定义颗粒尺寸尽管比较直观，但测量起来还是有一定难度，在工程上很不实用。

(2) 当量径 对于形状不规则的颗粒如一块石头，它也具有一些用单一物理量可以描述的性质，如它的质量、体积和表面积等。因此，我们可以用这样的方法：先测量出石头的质量，将这块石头转换成相同质量也即相同体积的球体，得出球体的直径（2r），这就是等球体理论，也就是说尽管要测量的这块石头的形状不规则，但存在一个与这块石头质量相等的球体，因而可以用该球体的直径来反映石头的粒径，这就是所谓的“当量径”，即利用测定某些与颗粒大小有关的性质推导而来，并且使之与线性量纲有关。除采用上述的等体积球当量直径，类似的还有等表面积球当量直径。对于薄片状的二维颗粒，常用与圆形颗粒相类比的方法，所得到的粒径称为圆当量径，常用的有等投影面面积圆当量径和等周长圆当量径。表 2-2 中列出颗粒当量直径的定义。

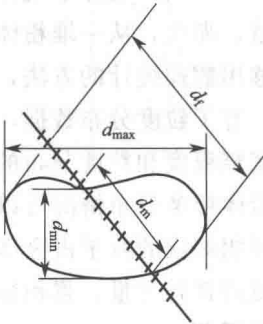


图 2-2 马丁直径和弗雷特直径

表 2-2 颗粒当量直径的定义

符号	名称	定义	公式
d_v	体积直径	与颗粒具有相同体积的圆球直径	$V = \frac{\pi}{6} d_v^3$
d_s	面积直径	与颗粒具有相同表面积的圆球直径	$S = \pi d_s^2$
d_{sv}	面积体积直径	与颗粒具有相同外表面积和体积比的圆球直径	$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$
d_{St}	Stokes 直径	与颗粒具有相同密度且在同样介质中具有相同自由沉降速度(层流区)的直径	
d_a	投影面直径	与置于稳定的颗粒的投影面面积相同的圆的直径	$A = \frac{\pi}{4} d_a^2$
d_L	周长直径	与颗粒的投影外形周长相等的圆的直径	$L = \pi d_L$
d_A	筛分直径	颗粒可以通过的最小方筛孔的宽度	

对一个不规则形状的颗粒,利用粉体颗粒所具有的不同的物理性质可以得出不同的当量直径,不同的描述方式给出不同的颗粒尺寸。需要注意的是,每一种表征手段描述的是颗粒某一特定的性质(如体积、比表面积、自由沉降速度、投影面面积或周长等)所对应的颗粒尺寸。每一种表述方法都是正确的,只是描述了颗粒的不同性质。我们只能用同一种描述方式来对不同颗粒的大小进行比较。

2.1.2 颗粒群尺寸的表示方法

我们实际处理的粉体试样一般是以颗粒群的形式存在,是由许多颗粒构成的一个集合体。如果构成粉体的所有颗粒,其大小和形状都是一样的,则称这种粉体为单分散粉体。在自然界中,单分散粉体尤其是超微单分散粉体极为罕见,目前只有用人工化学合成的方法可以制备出近似的单分散粉体。迄今为止,还没有利用机械的方法制备出单分散粉体的报道。大多数粉体都是由参差不齐的各种不同大小的颗粒所组成,而且形状也各异,这样的粉体称为多分散粉体。

对于多分散粉体物料的颗粒尺寸表示,则采用粒度分布的概念。实践证明,多分散粉体的颗粒大小服从统计学规律,具有明显的统计效果。如果将这种物料的粒径看作是连续的随机变量,那么,从一堆粉体中按一定方式取出一个分析样品,只要这个样品的量足够大,完全能够用数理统计的方法,通过研究样本的各种粒径大小的分布情况,来推断出总体的粒度分布。有了粒度分布数据,便不难求出这种粉体粒度的某些特征值,例如平均粒径、粒径的分布宽窄程度和粒度分布的标准偏差等,从而可以对成品粒度进行评价。

粉体粒度分布情况可以用频率分布或累积分布及其特征参数来表示。频率分布表示与各个粒径相对应的粒子占全部颗粒的百分含量。累积分布表示小于或大于某一粒径的粒子占全部颗粒的百分含量,累积分布是频率分布的积分形式,一种是按粒径从小到大进行累积,称为筛下累积(undersize,用“-”号表示),另一种是从大到小进行累积,称为筛上累积(oversize,用“+”号表示)。百分含量一般以颗粒质量或个数为基准。粉体的频率分布和累积分布常用坐标图曲线的形式表达,如图2-3中的A曲线为试样粒度的频率分布曲线,B曲线为该试样粒度的筛下累积分布曲线,两条曲线都能反映该试样的粒度分布特征,只是反映的角度不同,一个是基于某一粒度的频率值,另一个是基于某一粒度的累积值。在科学研究和工程实际中,为方便,常采用粒度分布的特征参数来反映粉体试样的粒度特征,常用的有众数粒径(mode diameter) D_{mo} 、中位粒径(medium diameter) D_{50} 和 D_{90} 、 D_{10} 及 ΔD_{mo} 等。众数粒径 D_{mo} 是指颗粒出现最多的粒度值,即粒度频率分布曲线的最高峰值,也称最频粒径。中位粒径 D_{50} 是指将粉体样品的个数(或质量)分成相等两部分的颗粒粒径,在粒度累积分布曲线上累积值为50%对应的粒度值。同样的道理, D_{90} 和 D_{10} 则分别是指累积值为90%和10%所对应的粒径。 ΔD_{mo} 是指众数直径即最高峰的半高宽。

值得注意的是,对于同一粉体试样的粒度分布曲线,其纵坐标百分含量是以颗粒质量为准还是以颗粒个数为基准,相应的粒度分布曲线具有很大的差异。如图2-4是对同一粉体试样粒度分布的测试结果,以颗粒个数为基准对测试数据进行处理得到的粒度频率分布曲线如图2-4(a)所示,其对应的平均粒径为 $0.087\mu\text{m}$;而以颗粒质量为准对测试数据进行处理得到的粒度频率分布曲线如图2-4(b)所示,其对应的平均粒径为 $8.831\mu\text{m}$,二者相差100倍。