

粉体的流体分级 技术与设备

张佑林 编著

武汉工业大学出版社

• 武 汉 •

前 言

翻阅这本书的读者诸君,一定或多或少地与粉体打过交道,正在或将要从事与粉体有关的工作,大家都十分了解粉体与我们的生活之间密不可分的关系。实际上,不仅我们的生活离不开粉体,而且国民经济的各个生产部门都与粉体有关,特别是化工、建材、冶金、矿山、轻工、食品、医药等行业,离开了粉体简直无法想象。据有的学者估计,人类在日常生活和生产中所使用的产品,有80%以上是直接以粉体的形式或通过粉体的形式进行再加工而制成的。另一方面,有害的粉尘又是破坏人类的生存环境、危害人类健康的主要污染源之一,因此,无论是从利用粉体为人类造福,还是从防止有害粉体对人类的危害这两方面来讲,我们都必须对粉体进行深入的研究。

“粉体工程学”就是研究粉体的性质及其加工、处理技术的一门新兴、跨行业的工程学科,但粉体的加工却是一种古老的技术。自古以来,人们就需要从不能直接利用的天然物质中,去除无用的部分,取出需要的部分(比如将小麦制成面粉),或按不同的用途将物质分开,这就需要对天然物质进行粉碎和分级。粉碎是使物体分裂的技术,而分级则是使物体分开的技术,这两项技术从古代起就与人类的生存密切相关。有的学者甚至将粉碎、分级与火的使用作为人类最基本的三大发明,这在一定程度上说明了粉体及其加工技术是多么的重要。

分级与粉碎一样,都是粉体工程中最基本的操作之一。分级的作用不是减小物料的粒径,生成细粉,而是将物料中合格的细粉分离出来,以提高粉碎效率,降低能耗,同时也能保证产品的质量。对于某些生产微粉、超微粉的粉碎-分级系统,其技术难点有时不是无法获得符合要求的超微颗粒,而是无法将这些颗粒从物料中及时地分离出来,在这种情况下,分级设备的性能就起着决定性的作用。

粉体的分级包括筛分和流体分级两大类,而流体分级的适用范围比筛分要大得多,但是迄今为止,国内尚未见到系统介绍粉体的流体分级技术与设备的专著,关于流体分级的内容,都是作为粉体工程或化工机械、建材机械等专业书籍的一部分来介绍的。有鉴于此,笔者不揣浅陋,根据所能收集到的国内外关于流体分级的资料,并结合自己多年从事建材机械和粉体工程

教学、科研中的体会,编成此书,奉献给从事粉体及其加工设备的生产、设计、研究的同行们。

为编写此书,笔者在日本姬路工业大学留学期间,收集了大量的有关资料,并得到了姬路工业大学粉粒体工学講座的大島 敏男教授、廣田 満昭教授和鈴木 道隆助教授的具体指导和帮助。大島教授退休前是日本粉体工学会的常务理事,这次专门为本书写了序言。在编写此书的过程中,我的导师史 新教授、朱昆泉教授,武汉工业大学机电学院建材机械教研室的许林发、郑金宝二位教授及其他老师给了我很大的支持和帮助。在此谨向上述老师们以及本书所引用的参考文献的作者们表示衷心的感谢。此外,借本书出版的机会,我还要向在三年的留学生活中给予我关心和照顾的日本姬路工业大学工学部産業機械工学科全体教师以及三軒 齊教授、龟岡 紘一助教授,山口大学工学部機械工学科の日高 照晃教授、石田 武助教授以及横田 逸雄、大石 博等先生表示诚挚的谢意。

在本书定稿之前,笔者曾选取书中的部分内容,在山东省建筑材料机械厂举办过“粉体的流体分级”讲座,得到了该厂工程技术人员的好评。此书若能对从事生产各种粉体产品和设计、制造流体分级设备的工程技术人员和操作人员起到一定的参考作用,笔者将感到由衷的欣慰。尽管笔者力求正确、系统、完善,但由于所收集的资料和本人水平有限,书中的错漏之处,还请读者不吝赐教。谢谢!

張佑林

1997年10月

于武汉工业大学

序 文

粉体は、古来から食物、陶器、絵の具などの形で、人間の知恵として生活の中に取り入れられてきた。産業技術が発達した現在においては、あらゆる産業分野で、原料、中間体、製品の形で粉体が用いられており、さらに半導体製造や宇宙開発などの先端技術から、地球環境保全に至るまで、粉体技術が深い関わりを持つようになっている。

このように粉体が広く利用されるのは、粉体が細かい固体粒子の集合体で、比表面積が大きいという特徴を持つからであるが、これを有効に利用するためには、目的に応じた粒径分布を持つものを得ることが第一に要求される。粉体を製造するには、核生成から粒子成長を経て所定の粒子径の物質を作り出す方法と、大きい固体を粉砕し所定の粒子径に揃えた物質を取り出す方法の二つに大別される。いずれの方法においても、得られた粉体から所定の粒径分布のものだけを取り出す分級操作が必要で、特に粉砕によって粉体を製造する場合には、分級操作が製品品質を決定する重要な役割を果たしている。

本書は、目的とする粉体を得るためには欠かすことの出来ない”分級操作と装置”について解説した専門書である。分級を扱う場合には、まず粉体の基礎性質を把握しておく必要があるので、特に粒子径と粒径分布の意義と測定法に重点を置いて解説した後、各種分級法の原理と操作、および分級装置を詳述し、さらに粉砕操作における分級の関わりを示している。

著者の張佑林先生は、1990年10月から1992年9月までの2年間、日本に留学し、姫路工業大学の私の研究室で粉体工学の研究に従事された。この間、主に粉体物性の測定と、粉体物性が粉体操作に及ぼす影響について、精力的な研究を進められた。

今回、先生が長年の研究成果と調査結果を基に、本書を

出版されることはまことに喜ばしく、中国の粉体技術者や学生の良き指針書になることを信じている。また、本書の発刊を機に、中国と日本の粉体工学の交流がますます盛んになり、中日友好の一助となることを願って止まない。

1997年10月

姫路工業大学名誉教授

大島 敏男

序 (译文)

自古以来,人类就凭借自己的聪明才智,将粉体以食物、陶器、颜料等形式应用于日常生活之中。在工业技术高度发达的今天,所有的工业领域都需要以原料、中间产品或产品的形式使用粉体,甚至从半导体制造、宇宙开发等尖端技术到地球环境的保护,也与粉体技术具有密不可分的关系。

粉体之所以能得到如此广泛的应用,是因为粉体乃微小固体颗粒的集合体,具有比表面积大的特征的缘故;而为了有效地利用这一特征,首先就要求能够按照使用目的的不同,得到具有相应的粒度分布的粉体。制造粉体的方法大致可分为两种:一种是由生成核经过粒子成长,制成具有所需粒径的颗粒,另一种是对大块的固体物料进行粉碎,再选出所需粒径范围的颗粒。无论使用哪种方法,都必须利用分级操作从制成的粉体中只选出具有指定粒径分布的部分,特别是用粉碎的方法制造粉体时,分级操作对于决定产品的质量起着更为重要的作用。

为了得到所需要的粉体,分级操作是不可缺少的,本书就是介绍“分级技术与设备”的专业书籍。由于在进行分级操作时,首先必须掌握粉体的基本物性,所以本书特意在重点介绍了颗粒的粒径与粒度分布的含义及其测定方法之后,再详细地叙述各种分级方法的原理、操作以及分级装置,并进一步阐述粉碎操作与分级的关系。

本书的作者张佑林先生,在1990年10月至1992年9月留学日本的二年中,曾在姫路工業大学我的研究室里从事粉体工程学的研究工作,在此期间,他主要对粉体物性的测试以及粉体物性对粉体操作的影响进行了精心而有成效的研究。

这次张先生根据多年收集的资料和研究成果,编撰成书出版,可喜可贺。相信此书可以成为中国从事粉体工程的技术人员和大学生很好的基础参考教材。此外,借此书出版的机会,谨祝愿中日粉体工程学界的学术交流日益兴盛,并起到为中日友好的大厦添砖加瓦的作用。

姫路工業大学 名誉教授

大島 敏男

1997年10月

(王雅君 译)

目 录

1 概论	(1)
1.1 粉体与粉体工程学	(1)
1.1.1 粉体及其性能	(1)
1.1.2 粉体的用途	(1)
1.2.3 粉体工程学	(2)
1.2 粉体的分级	(3)
1.2.1 分级的一般性定义	(3)
1.2.2 粉体的分级	(3)
1.2.3 分级的作用	(4)
1.3 流体分级	(4)
1.3.1 流体分级的定义	(4)
1.3.2 流体分级的原理	(5)
2 颗粒的大小及其测试	(7)
2.1 单个颗粒的大小	(7)
2.1.1 三轴径	(8)
2.1.2 当量粒径和等效粒径	(8)
2.2 粒度分布	(9)
2.2.1 粒度分布的概念	(9)
2.2.2 频率分布	(10)
2.2.3 累积分布	(12)
2.3 粒度分布的数学模型	(13)
2.3.1 正态分布	(13)
2.3.2 对数正态分布	(14)
2.3.3 罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布	(15)
2.3.4 高丁-舒曼(Gaudin-Schuhmann)分布	(15)
2.4 平均粒径	(16)
2.4.1 统计粒径	(16)
2.4.2 数学平均粒径	(16)
2.4.3 加权平均粒径	(17)
2.4.4 粒度分布的平均粒径	(18)
2.5 粒度分布的测试	(18)
2.5.1 显微镜法	(19)
2.5.2 小孔通过法	(20)
2.5.3 光衍射法	(20)
2.5.4 筛分法	(21)
2.5.5 液相沉降法	(21)
2.5.6 空气透过法	(22)
2.5.7 气体吸附法	(23)

3	流体分级的基础理论	(24)
3.1	颗粒在流体中的相对运动	(24)
3.1.1	颗粒在流体中运动时受到的阻力	(24)
3.1.2	颗粒在流体中的一维运动方程与沉降末速度	(27)
3.1.3	颗粒在流体中的二维运动	(34)
3.1.4	沉降末速度的修正	(38)
3.2	流体分级的基本原理	(41)
3.2.1	重力分级的原理与分级粒径	(42)
3.2.2	惯性式分级的原理	(43)
3.2.3	离心力分级的原理与分级粒径	(44)
4	分级机的评价方法	(45)
4.1	分级结果的评价方法	(45)
4.1.1	部分分级效率	(45)
4.1.2	分级径	(47)
4.1.3	评价分级精度的几种指数	(47)
4.1.4	综合分级效率	(48)
4.1.5	分级精度的计算示例	(52)
4.1.6	分级精度的评价与粒度测定	(53)
4.2	分级机的性能及评价	(54)
4.2.1	粉体浓度	(54)
4.2.2	分级径与分级精度	(55)
4.2.3	能量利用率	(56)
4.2.4	分级机的体积与价格比	(57)
4.2.5	分级系统的评价	(57)
4.3	粉体物性对分级性能的影响	(58)
4.3.1	颗粒密度的影响	(58)
4.3.2	颗粒形状的影响	(59)
4.3.3	粉体凝聚性的影响	(59)
5	干式流体分级设备	(61)
5.1	概述	(61)
5.2	重力沉降及惯性式分级设备	(63)
5.2.1	重力沉降式分级设备	(63)
5.2.2	惯性式分级设备	(63)
5.2.3	双重圆筒式分级装置	(64)
5.2.4	通过式分级装置	(65)
5.3	自由涡式离心力分级设备(旋风筒)	(67)
5.4	强制涡式离心力分级机	(70)
5.4.1	离心式分级机(第一代)	(70)
5.4.2	旋风式分级机(第二代)	(76)
5.4.3	高效分级机(第三代)	(83)

5.5	微粉分级机	(94)
5.6	其他类型的分级设备	(97)
5.6.1	空气冲击筛(风筛)	(97)
5.6.2	喷射涡旋式分级设备	(100)
5.6.3	利用附壁效应的分级设备	(101)
6	湿式流体分级设备	(103)
6.1	重力沉降分级设备	(103)
6.1.1	间歇式重力沉降分级设备	(103)
6.1.2	机械式重力沉降分级设备	(104)
6.2	水力冲击分级设备	(115)
6.2.1	多级水力冲击式分级设备	(115)
6.2.2	圆锥复合型水力分级设备	(117)
6.3	液体旋流器	(119)
6.4	离心力分级机	(125)
6.4.1	圆筒式离心力分级机	(126)
6.4.2	分离板式离心力分级机	(128)
6.5	弧形筛	(130)
7	分级机的选择	(137)
7.1	按分级原理进行选择	(137)
7.1.1	筛分与流体分级	(137)
7.1.2	干式分级与湿式分级	(137)
7.2	按处理能力进行选择	(140)
7.3	按产品的粒度进行选择	(141)
7.3.1	产品粒度规格的表示方法	(141)
7.3.2	按产品的粒度范围进行选择	(142)
7.4	从节能的角度进行选择	(142)
7.4.1	单位能耗与处理量及分级粒径的关系	(143)
7.4.2	分级机的选择及节能措施	(144)
7.5	从设备、土建费用的角度进行选择	(144)
7.6	按粉体的性质进行选择	(144)
8	粉碎-分级系统的设计	(145)
8.1	粉碎-分级系统	(145)
8.1.1	粉碎-分级系统的组成	(145)
8.1.2	细颗粒回收率、粉碎效率与循环负荷	(148)
8.2	粉碎-分级系统的应用实例	(149)
8.2.1	水泥	(149)
8.2.2	复印机用碳粉	(150)
8.2.3	精密陶瓷	(151)
8.2.4	面粉	(152)

8.2.5 矿物.....	(154)
8.3 粉碎机的流通特性	(154)
8.3.1 粉碎机流通特性的模型及其表示方法.....	(154)
8.3.2 球磨机的流通特性.....	(155)
8.4 粉碎-分级系统的实验方法及数据处理	(158)
8.4.1 粉碎-分级系统的实验方法	(158)
8.4.2 粉碎-分级系统的数据处理	(159)
8.5 粉碎-分级系统的设计	(160)
9 分级机的安装、操作与维修	(163)
9.1 分级机的安装与试运转	(163)
9.1.1 安装的准备、顺序与过程	(163)
9.1.2 试运转.....	(165)
9.2 粉碎-分级系统的操作	(166)
9.2.1 系统的启动与停车.....	(166)
9.2.2 粉碎-分级系统操作的最优化	(166)
9.2.3 分级参数的调节与控制.....	(168)
9.3 分级机的维护与检修	(169)
10 流体分级的研究课题与展望	(172)
10.1 流体分级的研究方向与课题	(172)
10.2 超微粉分级的研究课题.....	(174)
10.2.1 超微粉分级设备的种类及其大型化	(174)
10.2.2 分散装置	(176)
10.2.3 超微粉的附着对策	(178)
10.2.4 超微粉的捕集	(179)
10.2.5 超微粉分级中的其他问题	(179)
附录1 常用物理量的单位(节选)	(180)
附录2 常用物理量单位的换算系数(节选)	(183)
附录3 水和空气的性能(节选)	(185)
附录4 常用的标准筛制(节选)	(186)
附录5 部分粉体的物性值	(187)
附录6 国内主要分级机制造厂名录	(191)
参考文献	(193)

1 概 论

1.1 粉体与粉体工程学

1.1.1 粉体及其性能

天然或人工制成的粒状物称为颗粒,颗粒一般是指固体颗粒,但也可延伸包括液体和气体颗粒(如气溶胶)。大量具有相互作用的微小固体颗粒的集合体叫做粉体,而较大的固体颗粒的集合体则叫做粒体,合起来称为粉粒体,由于这二者之间并没有明确的界线,而且粉体工程中所研究的对象通常都是较小的颗粒群,因此一般就称为粉体。粉体是指整个颗粒群,而颗粒是构成粉体的要素,通常是指单个的粒子。

众所周知,自然界中的物质,其存在的状态一般为气态、液态或固态,而粉体却不能简单地归结为其中的某一种状态。从微观上看,单个的颗粒属于固态,具有固体的特性;而从宏观上看,对于整个颗粒群即粉体来说,却具有类似于液体的特性,比如,粉体具有流动性,没有固定的外形,其整体的形状可随容器的形状而改变;粉体层内部的压力与其深度有关,但又不像液体那样与深度成正比,而且某一点的压力也不是在各个方向上都相同。此外,粉体不是连续体,受压后体积会显著地变小,这一点又与气体有些相似。因此,有的学者认为粉体应归属于气、液、固等三态之外的第四态,是物质存在状态的另一种新的形式。

粉体的种类不同,其电、磁、光、声、热、吸附、湿润、溶解、燃烧等物理、化学性能也各不相同,但不同的粉体都是大量微小固体颗粒的集合体,通常具有以下共同的力学性能:

(1) 比表面积大。单位质量的粉体具有很大的表面积(如水泥的比表面积为 $2500\sim 5000\text{ cm}^2/\text{g}$),因而具有较高的化学活性,特别有利于提高固相反应的速度。

(2) 可塑性强。便于制成各种形状的产品。

(3) 流动性好。便于进行贮存、输送、混合、成型、干燥等单元操作。

1.1.2 粉体的用途

自然界的物质中,可以直接被人类利用的只是极少数。人类通过长期的生产实践活动,逐渐学会了从天然物质中去除不要的成分,提取需要的成分的技术,从而扩大了自己的活动范围,增强了人类的生存能力。而为了“提取需要的成分”,往往要先将天然物质制成粉体,然后才能进行提取,因此有的学者认为,人类最基本的三大发明是火与物质的粉碎、分级技术。

粉体与人类的生存息息相关,据有人估计,人类所赖以生存的物质中,有80%以上是以粉体的形式存在或通过粉体的形式进行再加工而得到的。自古以来,人类的生活就与粉体有关,从“粉”字的构成来看,“粉”从米,将“米”“分”裂成细小之物就是粉,可见在食品中要用到粉,另据《说文解字》,“粉,从米,工声,所以傅面者也。”可见粉还作为化妆品使用。在现代社会,粉体的应用更是深入到国民经济的各个部门,深入到我们日常的生活之中,不仅各行各业都要使用

与粉体有关的原料、中间制品,利用与粉体有关的技术,有的还生产与粉体有关的产品,我们每个人都或多或少地要使用与粉体有关的物品。下面列举的是在一些行业中应用粉体的实例:

(1) 农业:土壤、种子、化肥、农药、饲料。

(2) 冶金工业:原矿、选矿、煤炭(粉)、耐火材料。

(3) 建筑材料工业:石灰石、粘土、铁粉、矿渣、粉煤灰、水泥、玻璃、陶瓷、石灰、石膏、河砂、涂料。

(4) 机械电子工业:铸造用型砂、粉末冶金、硬质合金、研磨材料、磨削材料、荧光粉、磁性材料、氧化钛、二硫化钼。

(5) 化学工业:塑料、橡胶、高分子材料、油漆、火药、催化剂。

(6) 轻工业:颜料、染料、油墨、碳粉、化妆品、牙膏、纸浆、填充剂。

(7) 食品工业:面粉、奶粉、淀粉、糖、盐、调味品。

(8) 医药卫生:药粉、药片、药膏。

此外还可以举出很多应用粉体的例子,但仅从上面列举的例子中就可以看出,粉体的应用范围的确非常广泛,几乎到了无所不包的地步。

另一方面,随着现代大工业的发展,危害人类健康的粉尘和光化学烟雾,成了破坏人类生存环境的主要污染源之一,为了保护人类的生存环境,必须对有害的粉尘和光化学烟雾进行收集和处理,在这一方面也要用到与粉体有关的技术与设备。

1.1.3 粉体工程学

粉体工程学是一门跨学科、跨行业(部门)的新兴技术科学,其主要内容包括粉体的物性和粉体的操作过程两个方面。加强对粉体物性的基础研究,掌握粉体的特性和运动规律,是解决各种粉体操作过程中技术问题的关键之一。1948年美国J. M. 戴拉凡尔所著的《尘粒学》,促进了对粉体物性的基础研究,1956年日本成立了粉体工程研究会,1960年英国人H. E. 罗斯开设了有关粉体技术的课程。我国于1987年成立了颗粒学会,开始比较系统地研究粉体工程学。

粉体的物性主要研究粉体的宏观性能与其微观结构之间的关系,是以粉体力学和表面物理学为基础,从单个颗粒、颗粒集合体的性质和固气、固液界面现象着手,研究各行各业中所共有的粉体问题及其有关的基础理论,具体内容包括:

(1) 粉体颗粒的几何特征,如颗粒的大小和形状、粉体的粒度分布、表面积、密度(体积)等。

(2) 粉体的力学性能,如粉体的填充特性,内部摩擦力与剪切试验,附着力与拉伸试验,粉体的压缩,粉体的流动性,粉体与流体的相对运动。

(3) 粉体的物理化学性能,如粉体的电、磁、光、声、热等方面的性能,粉体的湿润,对气体的吸附,粉体的燃烧和爆炸,粉体的机械化学,颗粒的表面改性等。

粉体的操作过程主要有:

(1) 粒径变化过程,包括粉碎(减小物料的粒径)和造粒(增大物料的粒径)。

(2) 分离过程,包括分级(筛分、流体分级)、选别、过滤、干燥、除尘。

(3) 移动过程,包括混合、输送、给料、仓贮、流态化。

(4) 粉体的物性及粉体过程参数的测量。

本书所介绍的内容就是粉体操作过程中的流体分级以及与流体分级有关的粉体的物性。

1.2 粉体的分级

1.2.1 分级的一般性定义

“分级”一词并不只是粉体工程学的专业术语,在其他行业和日常生活中也用得较多。作为日常生活中的一般用语,“分级”是“区分等级”或“区分等次位置”的意思;作为专业术语,“分级”的一般性定义是:按照某种标准,对大量的事物逐个地进行判断,并将其分别划分到相应的事物群中去的操作的总称。如对棉花、苹果、鸡蛋等农副产品按其质量或大小进行分级,对企业按其规模或效益进行分级,还有对设备的分级管理,医学上的分级救治、分级护理等。

在分级的一般性定义中包含着以下四个方面的内容:

- (1) 分级的对象是大量事物的集合体。
- (2) 分级的结果是由这些事物分别构成的集合体。
- (3) 分级是对事物的特性一个一个地进行评价和判断,而不是对事物集合体的特性进行评价。
- (4) 评价事物的标准或手段,由于分级的对象、目的和难易程度而各不相同。

前二项是说明分级的对象及结果,即使有时评价的直接对象只有几个甚至一个,也隐含着有许多同类事物进行比较这一假定。第3项是规定要对大量事物的集合体中的每一个事物的特性逐个地进行评价和判断,而不是从整体上对集合体的特性进行评价。第4项是说明分级这一概念本身不受、也不应该受判断标准和评价手段的约束。后二项对于粉体工程学中分级的定义特别重要。

1.2.2 粉体的分级

在粉体工程学中,分级操作的对象是粉体,分级的结果则是得到二组或二组以上的、具有某种特性的粉体,分级就是按照某种判断标准将粉体进行分离。由于分级技术在不断地发展,这种“判断标准”也在逐渐增多,为了兼顾粉体分级定义的包容性和现阶段的实用性,可将其分为广义的粉体分级和狭义的粉体分级。

1.2.2.1 广义的粉体分级

参照“分级”的一般性定义,结合粉体工程学的具体情况,广义的粉体分级是利用粉体颗粒的特性(如粒径、形状、密度、化学成分、颜色、放射性、磁性、静电特性等)的差别将其分离的操作的总称。括号中的说明可使“颗粒的特性”具体化,便于理解,当然,去掉括号中的说明,也不改变定义的实质。

对粉体进行分级时,是以粉体颗粒的某种特性作为判断标准的。在粉体颗粒的特性中,有些不能量化(如颜色等)、或者可以量化但其变化是不连续的(如密度等),有些则可以量化并且其变化是连续的(如粒径等)。基于前者的广义的粉体分级称为选别(选分),如重力选矿就是利用颗粒密度的差别进行操作的,而基于后者的广义的粉体分级就是狭义的粉体分级。

1.2.2.2 狭义的粉体分级

狭义的粉体分级往往是利用颗粒的几何特征的差别进行操作的。颗粒的几何特征包括颗粒的大小和形状,表示粉体中颗粒的大小和形状的“粒度”和“形状系数”,其变化可认为是连续的,因此,狭义的粉体分级是利用粉体颗粒的大小或形状的差别将其分离的操作。按颗粒的大

小进行的分级称为粒度分级,而按颗粒的形状进行的分级则称为形状分级。由于形状分级目前还处于实验室研究阶段,没有达到实用化的程度,因此,通常所说的粉体分级,一般就是指粒度分级。

粒度分级(以下就简称为分级)在建材和其他一些行业中又称为选粉,按照分级原理或分级方法、手段的不同,可分为筛分和流体分级两种,筛分(只能进行粒度分级)是利用具有一定大小的孔径的筛面,将粉体按颗粒大小的不同进行分级的,而流体分级正是本书所要介绍的内容。关于筛分与流体分级的区别与比较,请参阅 7.1.1。

1.2.3 分级的作用

分级是粉体工程学中最基本的操作过程之一,其作用主要有:

(1) 作为独立的粉体操作过程,通过分级可以按需要去除粉体原料或产品中过大或过小的颗粒,使原料或产品的粒度控制在一定的范围之内,如复印机所用的碳粉,其颗粒的粒径范围要求为 $8\sim 15\mu\text{m}$,粒径过大或过小都会影响复印的质量。此外,粉体产品的粒度越小,其附加价值越大,因此,将粉体产品中较小的颗粒分离出来,制成微粉或超微粉产品(其余的粉体仍可作为一般产品),可以满足高精尖技术的要求,并大大提高其附加价值。

(2) 与粉碎操作配合,组成粉碎-分级系统,这时分级的作用是及时将合格的细颗粒从中间产品中分离出来,使较粗的颗粒再返回粉碎机中进行粉碎,这样既可防止较粗的颗粒混入产品之中,保证产品的质量,又可避免粉碎机内产生过粉碎,减少粘球现象或衬垫作用,从而提高粉碎效率。此外,还可以很方便地调节产品的粒度,以适应产品或工艺条件的改变。

(3) 为了掌握生产线的工作情况和产品是否合格,在生产过程中必须按时取样并对产品进行粒度分布的检验,在产品的粒度分布测定中也要用到分级。

1.3 流体分级

1.3.1 流体分级的定义

关于粉体分级的定义,目前有各种各样的说法,尚未形成统一的、具有权威性的表述。除了 1.2.2 中所介绍的定义之外,还有很多,下面是其中的几个例子。

(1) 《辞海》(上海辞书出版社,1989 年)中关于分级的定义是:

利用不同粒度和比重的颗粒在水或空气中沉降速度(受力)的不同,根据要求将其分成不同粒度或比重的级别的作业。有时也将筛分称为分级。

(2) 《中国大百科全书》(化工)(中国大百科全书出版社,1987 年)中关于分级的定义是:

分级是按颗粒在流体介质中的沉降速度来选择颗粒,粗颗粒沉降分离出去,细颗粒随流体带走。按所用的流体介质分为水力分级和气流分级。

(3) 《化学工程手册》(第 19 篇,颗粒及颗粒系统)(化学工业出版社,1989 年)中关于分级的定义是:

颗粒分级是把颗粒分离成不同粒度级别的过程,往往是一种以液体或气体为介质的固-固分离。

上述 3 种定义都限定分级是在流体介质中进行,有的甚至限定在水或空气中进行,这实际上更加接近于流体分级的定义。然而,即使对流体分级而言,定义 1 和定义 2 是以颗粒在流体

介质中的沉降速度作为分级的评价标准,而定义 3 则没有指明分级的评价标准,这样就没有包括在流体中利用颗粒的惯性进行分级的情况(参见 3.2.2 和 5.2.2)。为了弥补这一不足,可以将粉体的流体分级定义为:利用颗粒在流体中受到流体的力学作用时运动情况的差异将其分离的操作。

利用流体的分级有时并不一定符合上述定义,例如弧形筛(参见 6.5)和空气冲击筛(风筛)(参见 5.6.1),虽然在分级操作中也要用到流体(水或空气),但作为判断颗粒大小的基准的是筛孔尺寸而不是颗粒的运动情况,严格地说,就不能称为流体分级设备,不过,由于在这类设备中流体所起的作用非常重要,没有流体的作用,这类设备就无法工作,因此,在习惯上还是将其称为流体分级设备,或者至少认为是类似于流体分级的分级设备。

按照分级时所使用的流体介质,流体分级可分为二种:利用气体(通常是空气)作为介质的分级称为气力分级(风力分级),又称为干式分级;而利用液体(通常是水)作为介质的分级称为液力分级(水力分级),又称为湿式分级。

1.3.2 流体分级的原理

为了在流体中对粉体进行分级,必须有二个以上的方向相反的力作用在粉体颗粒上(这些力可分为二类,一类是使颗粒产生运动的力,另一类是阻碍颗粒运动的力),各个颗粒受到这些力的作用时,由于颗粒本身某种特性(如粒径、密度、磁性等)的不同,其运动的情况或者说其运动的轨迹就不同,这样就可以按所需要的标准将特性相同的颗粒群(比如粒径大于或小于某一值)分别集中到不同的地方,从而将粉体按颗粒的某种特性进行分离。

在流体分级中,由于粉体是受到流体的力学作用而分离的,所以要受到颗粒的粒径、形状、密度、磁性等诸多因素的影响,具有按几个因素而分级的可能性,这一点与单纯只靠筛孔的尺寸对粉体按粒径进行分离的筛分是不同的。现以利用离心力按粒径进行的分级作为例子来分析一下流体分级的原理,忽略重力等次要因素的影响,可将分级原理简单地归结为颗粒所受到的离心力与流体阻力的平衡。

颗粒受到的离心力为:

$$F_c = mR\omega^2 \quad (1-1)$$

颗粒受到的流体阻力为:

$$F_d = C_D A \rho u^2 / 2 \quad (1-2)$$

式中 m ——颗粒的质量,kg;

R ——颗粒所在处的回转半径,m;

ω ——颗粒所在处的回转角速度,rad/s;

C_D ——流体阻力系数;

A ——颗粒在运动方向上的投影面积,m²;

ρ ——流体的密度,kg/m³;

u ——颗粒与流体的相对速度,m/s。

由于离心力 F_c 与颗粒的质量成正比,也就是与颗粒的体积、即粒径的三次方成正比,而流体阻力 F_d 却与颗粒的投影面积、即粒径的二次方成正比,因此,随着粒径的增大,离心力 F_c 比流体阻力 F_d 增加得更快。当 $F_c = F_d$ 时,颗粒处于静止、平衡状态,以这一点作为分界,若某一颗粒受到的 $F_c > F_d$,则该颗粒向分级装置的外侧运动,被分到粗颗粒群一边;反之, $F_c < F_d$ 的颗粒则向内侧运动,被分到细颗粒群一边。在不同的分级装置中,颗粒受到的力的种类不同,但

其分级原理是一样的,现将几种分级装置中颗粒的受力情况列于表 1-1 中。

表 1-1 几种分级装置中颗粒的受力情况

颗粒的特性	第一种力	第二种力	流体介质	分级装置
粒 径	重力或离心力	筛网及粒层的阻力	气体、液体	空气冲击筛、弧形筛
	重 力	流体阻力	气体、液体	重力沉降分级设备
	惯性力	流体阻力	气体、液体	惯性分级设备
	离心力	流体阻力	气体、液体	旋风筒、水力旋流器、离心力分级机
密 度	重力	流体阻力	液体	重力选矿装置
		浮 力	液体	浮沉分离装置
化学成分	重力、离心力	浮力	液体	浮选装置
磁 性	重力、离心力	磁 力	气体、液体	磁选装置、除铁机

由表 1-1 可见,在流体中进行的分级操作,不一定都属于按颗粒的大小进行的狭义的粉体分级,按颗粒的密度、磁性等进行的选别也是在流体中进行操作的,实际上有时也很难将狭义的粉体分级与选别明确地区分开来,不过,按照现阶段约定的说法,通常所说的流体分级,专指按颗粒的大小进行的分级(本书所介绍的内容也仅限于此),而不包括选别。

2 颗粒的大小及其测试

粉体的流体分级是按颗粒的大小将粉体进行分离的,分级的结果往往要通过对粉体粒度分布的测试才能进行判断。由于颗粒的形状千差万别,表示颗粒大小的方法也有很多种。此外,对于同一种粉体试料,选用的测试方法不同,测得的结果也不会相同,因此有必要首先介绍一下颗粒的大小及其测试方法。

在图 2-1 中列出了粉体、生物及自然界中几种常见物质的大小,通过对比,可以增加对颗粒大小(或粉体粗细)的感性认识。

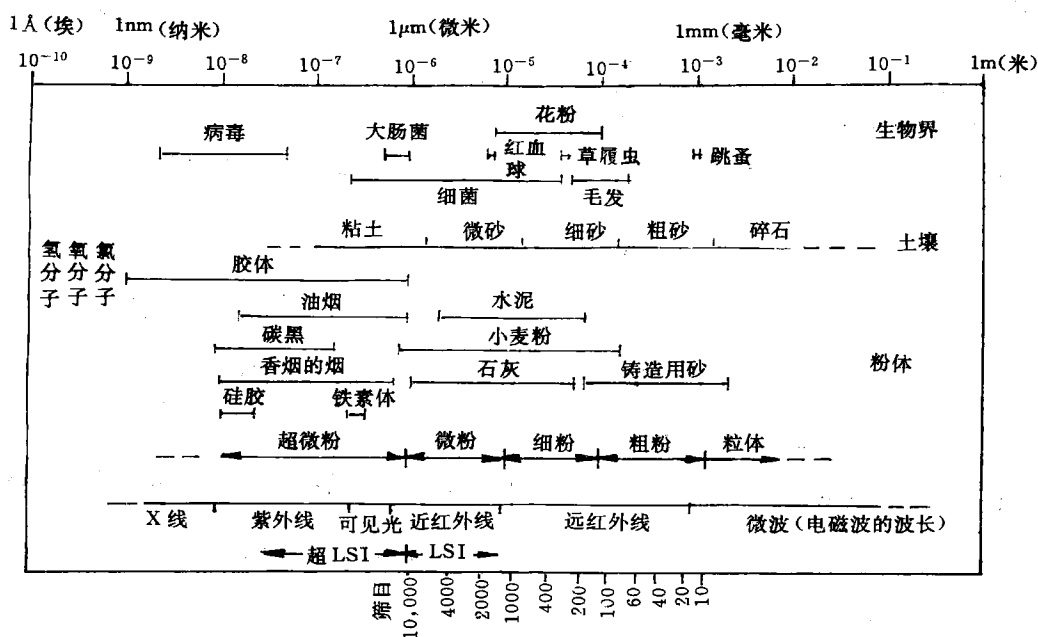


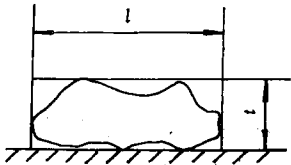
图 2-1 粉体、生物及自然界中几种常见物质的大小

2.1 单个颗粒的大小

颗粒的大小是颗粒最基本的几何参数,但只有球形颗粒和正方体颗粒才可以用一个尺寸表示其大小,其他形状规则的颗粒,如长方体、圆锥体的大小,则需要二个或二个以上的尺寸才能完全表示,而实际的颗粒绝大多数是不规则的,因此不可能用一个或几个尺寸完全表示其大小,通常要根据粉体的用途,选择最具代表性的尺寸来表示。表示单个颗粒大小的代表性尺寸称为粒径。“粒径”这一术语,其原意是将颗粒与球进行比较,以各种球当量径来表示颗粒大小的,但后来演变成表示颗粒大小的所有代表性尺寸的总称,尽管大部分代表性尺寸并没有“直径”的含义。

在表示颗粒的大小时还常常使用“粒度”这一术语，“粒度”通常是指颗粒大小、粗细的程度。若将“粒径”与“粒度”加以区别的话，“粒径”具有长度的量纲，而“粒度”则是用长度量纲以外的单位，如泰勒筛的“目”等。不过，在实际应用时往往对二者不加区别，只是在习惯上表示颗粒的大小时常用“粒径”，而表示颗粒大小的分布时常用“粒度”。

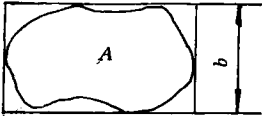
对于同一个颗粒，由于定义和测量方法的不同，其粒径不是唯一的值，这些粒径大致可分为三轴径、当量粒径和等效粒径等三种。



2.1.1 三轴径

用体积最小的、颗粒的外接长方体的长 l 、宽 b 、厚(或高) t 来定义其大小时， l 、 b 、 t 就称为三轴径，并且 l 称为长径， b 称为短径。三轴径通常用显微镜测量，这时所观察到的是颗粒处于稳定状态下的平面投影(图 2-2)。使投影夹在两平行线之间，其中间隔最大的平行线间的距离即为长径 l ，而将其垂直方向上的平行线的间距作为短径 b ，显微镜载玻片至颗粒最高点的距离即为厚度 t 。

图 2-2 颗粒的三轴径



利用测得的 l 、 b 、 t ，按照不同的需要，可以取不同的平均值作为颗粒的粒径，这些粒径的名称及定义列于表 2-1 中。

表 2-1 三轴径及其平均值

序号	名 称	定 义	说 明
1	长 径	l	
2	短 径	b	
3	二轴算术平均径	$(l+b)/2$	通常 $t < b < l$ 。用标准筛测粒度时 b 是基本控制尺寸
4	三轴算术平均径	$(l+b+t)/3$	平面投影的算术平均值，反映颗粒投影的基本大小
5	二轴几何平均径	$\sqrt{lb}$	算术平均值。厚度 t 难于测定
6	三轴几何平均径	$\sqrt[3]{lbt}$	平面投影的几何平均值，更接近于度量颗粒的投影面积
7	三轴调合平均径	$\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{t}}$	与外接长方体等体积的正方体的边长
8		$\sqrt{\frac{1}{6}(2lb+2bt+2lt)}$	与外接长方体等表面积的正方体的边长

2.1.2 当量粒径和等效粒径

在实际的生产工艺过程中，测量粉体颗粒的粒径往往不是目的，而是为了某种工艺的需要，或与粉体的用途有关，因此，可以将形状不规则的颗粒与球形颗粒(当然也可以与其他形状规则的颗粒)从某一角度进行比较，换算成具有长度量纲的数值，这样求得的粒径称为球当量粒径，简称为当量粒径。在表 2-2 中列出了几种当量粒径的定义及其计算公式。

表 2-2 中的定义 1~定义 4 是从几何学的角度、而定义 5、定义 6 则是从物理学的角度来定义的。定义 5 和定义 6 认为，在同一流体中具有相同沉降速度的颗粒，其大小相等。由于流