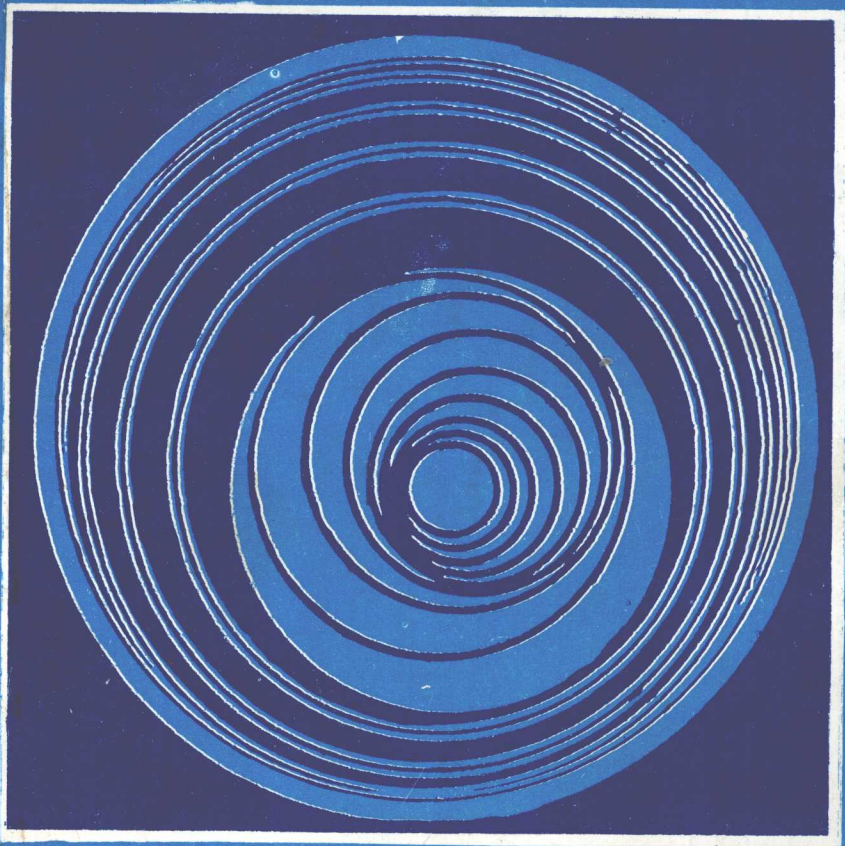


气力混合与气力输送

QILI HUNHE YU QILI SHUSONG

郑金宝 编著



武汉工业大学出版社

气力混合与气力输送

郑金宝 编著

武汉工业大学出版社

· 武 汉 ·

(鄂)新登字 13 号

内容提要

本书共三章:粉体物性、粉料气力混合与气力输送。先介绍粉体物性,再阐述气力混合与气力输送过程。重点突出气固两相流理论及其在流化床混合装置、气固喷射器、气力提升泵、空气输送斜槽等设备上的应用。还介绍了正交试验设计法和大量试验研究数据,并辅以例题。注重理论联系工程实际,有较高的应用价值。

本书可作硅酸盐工程、化工、冶金、建筑材料和建材机械等专业研究生和本科生教材,亦可供从事气力混合和气力输送的科研、设计和工厂管理的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

气力混合与气力输送/郑金宝编著. —武汉:武汉工业大学出版社,1994. 12

ISBN 7-5629-0973-3

I. 气… I. 郑… III. ①粉状货物运输:管道气力运输②管道气力运输-气力输送机-应用-粉状货物运输 IV. U17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 05756 号

武汉工业大学出版社出版发行

(武昌珞狮路 14 号 邮政编码 430070)

武汉工业大学出版社印刷厂印刷 新华书店湖北发行所经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:250千字

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数:1—1000

定价:15元

前 言

气力混合是继机械混合之后,发展起来的一种新颖混合技术,已广泛应用于工业生产中。各种粉料产品的制备,均以参与物料的充分混合为前提。如水泥工业中,就是由于生料气力均化和预分解炉两大新技术的应用,才使预分解窑得以脱颖而出,成为当前水泥工业发展方向。在市场经济竞争中,产品要优质高产;原材料、工艺能耗要降低;生产过程要尽可能自动化。因此,气力混合日益受到人们重视。

气力输送是一门比较年轻的科学技术。近年来已广泛应用于各个工业部门。现在水泥工业中已较广泛地采用了密相(中相)动压气力输送装置。60年代末出现的密相静压气力输送,已成为近代气力输送的发展方向,被称为第三代气力输送装置。它能耗小、管道磨损少,除尘净化系统大为简化,已成为不污染或少污染环境的新型输送设备。70年代国内就进行研究和开发,目前水泥工业和其他工业已开始采用了密相静压气力输送装置。

气力混合和气力输送均属于粉体工程中的粉粒体流动过程。由于粉体物性变化多端,过程机理尚不透彻和物性测试技术尚未完善等原因,长期以来,主要依赖于人们的经验来设计符合各种生产工艺过程的气力混合和气力输送。随着人们对产品需求的多样化和高档化,要求人们能按粉体物性来正确设计、选择和使用气力混合与气力输送这两个单元操作。

这两个单元操作具有三个特点:一是粉体物性变化对流动过程影响很大(尤其要注意如何来控制其流动性);二是要弄清其过程机理,才能使粉体物性和粉体流动过程建立起联系;三是实验研究仍然是其主要的研究手段。只有全面研究和掌握这三方面的知识,综合起来加以决策,才能胜任这两个单元的设计和操作。因此,本书既突出气固两相流理论及其应用,又介绍试验研究的方法和成果。注意理论联系工程实际,并辅以实例,有较大的应用价值。

本书内容是根据作者多年来承担的国家和各类科研项目,如微粉原料均化机理研究、气固喷射器的理论和实验研究、水泥生料均化的正交试验、空气输送斜槽中粉粒体的运动和参数设计等科研课题和科学试验的研究成果,并参阅大量国内外文献和研究生的教学工作,经多次整理而成。

本书可作硅酸盐工程、化工、冶金、建筑材料和建材机械等专业本科生和研究生教材,亦可供从事气力混合和气力输送的科研、设计和工厂管理的工程技术人员参考。

由于本人水平有限,书中不当之处在所难免,敬请批评指正。

编著者

1994年11月

目 录

第一章 粉体物性.....	(1)
第一节 粉体物性与粉体过程关系.....	(1)
第二节 粒子统计特性.....	(2)
一、单个粒子粒径(2) 二、粒度分布(3) 三、粒子群平均粒径(5) 四、粒子形状(7)	
第三节 粒子床层充填特性.....	(8)
一、真密度和松散密度(8) 二、空隙率(9) 三、床层比表面积(9)	
第四节 粉体流变学特性.....	(9)
一、粉体摩擦角(9) 二、压缩率(12) 三、粘附力(12)	
第五节 粉体流动特性	(13)
第二章 气力混合	(18)
第一节 概述	(18)
第二节 粉料气力混合	(19)
一、混合度(19) 二、混合机理(26) 三、流化床气力混合基本原理(32)	
第三节 粉料气力混合装置	(55)
一、间歇式气力混合(55) 二、连续式气力混合(64)	
第四节 粉料混合装置选择	(72)
一、装置类型(72) 二、选型原则和步骤(74) 三、小试和中试(76)	
第五节 粉料混合正交试验	(77)
一、试验研究的意义及要求(77) 二、水泥生料(加煤)物性试验研究(78)	
三、水泥生料流化性能试验研究(80) 四、水泥生料混合的正交试验(82)	
第三章 气力输送	(89)
第一节 概述	(89)
一、气力输送类型(89) 二、气力输送优缺点(91)	
第二节 管内气固两相流体流动过程	(93)
一、粒子在垂直管道内的运动状态(93) 二、粒子在水平管道内的运动状态(94) 三、管道内粒子群的运动方程(96)	
第三节 稀相气力输送.....	(100)
一、管内两相流压力损失(100) 二、主要参数(103)	
第四节 中相气力输送.....	(107)
一、概述(107) 二、集团输送状态气力输送(108) 三、气固喷射器(121) 四、流态化气力输送(127)	
第五节 密相静压气力输送.....	(143)
一、概述(143) 二、装置类型(144) 三、栓流气力输送压力损失(148) 四、影响栓流气力输送的因素(151)	
第六节 气力输送系统主要部件.....	(155)
一、供料器(155) 二、输送管道(155) 三、气固分离器和除尘器(158)	
参考文献.....	(159)

第一章 粉体物性

第一节 粉体物性与粉体过程关系

粉体是大量固体微粒子的集合体,并且微粒子间具有一定的相互作用力。粉体是由一个个固体微粒所组成,但作为粉体已失去了固体所固有的特性。按状态来分类,有的学者认为粉体应归属于气、固、液三相以外的第四相。因此有必要把它作为一种体系来研究。

粉体材料具有以下共性:1,单位质量粉料具有巨大的表面积,比块料固体化学性质活泼,特别有利于固相反应;2,流动性好,便于进行混合、输送、干燥等单元操作;3,可塑性好,便于成型等。根据不同情况,有的原料就是粉体;有的中间过程是粉体;有的制品本身是粉体,形式多样。因而,在国民经济各个部门,如化工、建材、冶金、食品、医药等,都与粉体有密切的关系。

粉体工艺学是一门新兴的边缘学科。它包括粉体物性和粉体过程两个方面。以粉体物性为研究对象,研究粉体性质及其在工程中应用的各项单元操作过程的原理和设备。在建材工业中,水泥、玻璃及玻璃纤维、陶瓷等生产过程中,都涉及到大量的粉体处理过程。粉体过程中单元操作有粉碎、分级、混合、贮存、输送、造粒和除尘等。从粉体过程来看,可分为三类:一是移动过程,包括混合、输送、贮存;二是分离过程,包括分级、筛分和除尘等;三是粒径变化过程,包括粉碎、结晶和造粒等。这些粉体过程都与粉体物性有非常密切关系。

粉体物性是研究粉料宏观性质和微观结构之间关系,即构成粉体的基本单位——微粒子的尺寸和表面性质、粒子间相互作用力、粒子的充填结构和接触状态等因素,对粉体的宏观性质产生的影响。它是研究新材料的基础之一,也是粉体过程的重要基础。两者既有区别,又有联系。

粉体工作者应既能进行粉体材料的设计,又会组织生产线。首先要掌握粉体的物性,然后根据生产工艺和粉料物性,选择合适的一系列单元操作,再进行组合排列,就可建成一条生产线。应该指出:不是单纯从设备,而是首先从粉体物性的角度来重新认识粉体工程,并考察整个单元操作所组成的体系。

本书仅重点研究气力混合和气力输送这两个单元操作,两者均属于粉体移动过程。其区别只是前者粒子移动量小,而后者粒子移动量大。但它们均与粉体流动性能密切相关。

气力混合是利用气体和粉料之间良好接触,以获得良好的流态化质量。通过对流、剪切和扩散三种方式,使化学成分不同的多组分粒子之间产生相对运动,粒子之间互相交叉换位,各组分均匀分布,获得良好的混合质量。粉体物性,如粉料粒度及其分布、粒子密度和形状、流化性能和流动性能等,都会影响粉料混合质量的好坏。混合和离析是同时存在的。大多数粉料混合属多组分体系,如水泥生料由三、四种组分形成。由于各组分粒子物理性质存在差别,使混合物可能造成离析。造成离析的主要原因是由于各组分之间的粒度、密度和形状上差别引起的。因此,要掌握各组分的粒度及其分布、粒子密度和形状,以便采取相应措施,尽量减少离析,获得良好的混合质量。

气力输送可分为稀相与中相动压输送和密相静压输送两大类。第一类中,粉体粒子处于悬浮状态,则气力输送难易程度主要取决于气体对粒子曳力与粒子重力之比,曳力愈大输送愈容

易,反之重力越大,则输送愈困难。由式(2-62)可知,曳力与重力之比 K 值可用下式表示:

$$K = \frac{\zeta \frac{\pi d_s^2}{4} \rho_a \frac{u_a^2}{2}}{\frac{\pi}{6} d_s^3 \rho_s g} = \frac{3\zeta \rho_a u_a^2}{4 \rho_s g d_s} = \frac{3\zeta \rho_a}{4 \rho_s} Fr^2 \quad (1-1)$$

式中 ζ ——阻力系数,可看作常量,但与粒子形状有关; d_s ——球形粒子直径; ρ_s ——粒子密度; ρ_a ——空气密度; u_a ——空气速度; Fr ——弗鲁德准数

$$Fr = \frac{u_a}{\sqrt{g d_s}} \quad (1-2)$$

由上式可知,每单位重力的曳力 K 与 d_s 、 ρ_s 和形状有关。粒子 d_s 和 ρ_s 愈大,输送愈困难。 K 值与 Fr 的平方成正比,与粒子密度成反比。在稀相气力输送的计算公式中,常常要涉及到弗鲁德准数,如同在纯流体输送中常常遇到雷诺准数一样。在密相静压输送中,料栓和气栓相间排列,并通过气体静压推动料栓进行输送。此时,只有能够成栓的粉料才能输送。由研究获得成栓条件是粉料内摩擦角要大于粉料与输送管道壁面的外摩擦角。这就涉及到粉料的流动性能。

气力混合和气力输送这两个单元操作均涉及到气相和固相的颗粒流体力学。在研究之前,应先对粉体及气体的性质有所了解。这样才能进一步深入讨论与气力混合有关的“流态化”理论和与气力输送有关的“流态化”和“管内两相流”理论。纯气体性质已在流体力学中讲述过,这里仅对粉体物性进行介绍。

粉体物性包含的内容极其丰富,这里仅限于讨论与气力混合和气力输送有关的粉体物性。它们包括粉体粒子统计特性、粒子床层充填特性、粉体流变学特性和粉体流动特性。有关粉体的流化特性在另外章节中再详述。

第二节 粒子统计特性

由许多微小粒子组成的集合体称为粉体。粒子统计特性包括:粒径及其粒度分布和粒子形状。下面分别阐述这三方面内容:

一、单个粒子粒径

表示粒子大小的数值称为粒径。对于球形粒子,球的直径即为其粒径。但生产中常遇到的是不规则形状的粒子,则需按一定要求来确定其粒径。由大小不一、形状不同的粒子组成的粉体,则应适当地选择一个规定的平均直径计算方法来计算其平均粒度,以代表该粉体中全部粒子的平均尺寸。根据粒子大小可以把粉体分为四种,即颗粒、粗粉、微粉和超微粉。以一个立方厘米中含有粒子个数来区分之,颗粒为一个左右,粗粉为 $10^3 \sim 6$ 个;微粉为 $10^9 \sim 15$ 个;超微粉为 $10^{18} \sim 21$ 个。其相应的测量方法如下:用肉眼可观察到颗粒和粗粉粒径;用光学显微镜可测量微粉粒径;用电子显微镜可测量超微粉粒径。

粒径表示方法已达数十种,它与测量方法密切相关。测量粒径方法大体上有两种:一是直接测定法来确定当量直径。例如,用筛析法确定的粒径是属测量长度的一维方法;用显微镜测定的粒径是投影长度的一维方法或投影面积的两维方法。二是间接测定法确定的等效直径。例如,用沉降法测定粒子的沉降速度;用透气法测定粉体的比表面积,这就是常用于测定水泥比表面积的 Blaine 法。再用相应的理论公式求出等效直径。

(一) 当量粒径

假定已直接测得某粒子的三轴径分别为长径 l 、短径 b 和厚度 t , 则可利用已测得数据与理想形状的某个方面特征相当的粒径来表示, 称此粒径为当量直径。如, 把与测得投影面积相等的圆形或正方形的代表尺寸作为粒径, 称其为面积当量径。同样, 如果用某种方法测定出粒子体积, 则可取与该粒子体积相等的球体、圆柱体或立方体等代表尺寸作为粒径, 称其为体积当量径。

1. 平均径(对于二维尺寸)

$$\left. \begin{array}{l} \text{算术平均径} \\ \text{几何平均径} \\ \text{调和平均径} \end{array} \right\} \begin{array}{l} d_1 = \frac{l+b}{2} \\ d_2 = \sqrt{lb} \\ d_3 = \frac{2}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b}} \end{array} \quad (1-3)$$

2. 体积当量径

$$d_{v1} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1-4)$$

3. 面积当量径

$$d_{s2} = \sqrt{\frac{S_0}{\pi}} \quad (1-5)$$

4. 比表面积当量径

$$d_{s3} = \frac{6}{S} = \frac{6V}{S_0} \quad (1-6)$$

式中 V 、 S_0 和 S 分别表示测得粒子的体积、表面积和比表面积。

(二) 等效粒径

这是一种间接测量方法。例如, 先测出某种粒子在液体中的沉降速度, 然后再用适合于球形粒子的 Stokes 沉降速度公式(1-7)计算出粒子的等效粒径。

$$d_e = \sqrt{\frac{18\mu u_0}{(\rho_s - \rho_f)g}} \quad (1-7)$$

此等效粒径表示试验的非球形粒子与同样密度粒径为球形粒子 d_e , 在沉降速度上是完全等效的。由式(1-7)得到的粒径, 称为斯托克斯径。因此, 讨论粒子在流体中的沉降速度时, 可以不考虑试验粒子形状的影响。

二、粒度分布

粉体是由各种不同粒径的粒子组成, 其粒径基本上也是连续变化的。通常抽取一小部分粉体试样, 应用粒度测定仪将粒径从大到小按一定的粒径范围分成若干粒级, 并测得各粒级相应的粒子数或质量, 就获得了该物料的粒度分布特性。它有如下三种表示方法。

(一) 列表法

某粉料粒径测量值, 列于表 1-1。

该表是将粒径按每 $5\mu\text{m}$ 分成相等间隔的九个粒级进行测量。测得每个粒级的粒子个数为 n_i 。某粒级的平均粒径 d_i 可按此粒级的上下极限粒径的算术平均值求得。然后用处于某平均粒径 d_i 以上的各粒径的粒子数累积量对总粒子数的百分率来表示筛上物累积百分数 R 。筛下

粉料粒径测量数据表

表 1-1

粒 径 μm	某粒级的 平均粒径 $d_i(\mu\text{m})$	某粒级的 粒子数 n_i	筛上累积 粒子数	筛上累积 $R(\%)$	筛下累积 $D=(100-R)$ %	频 率 $f_i = \frac{n_i}{n_{\Sigma}}(\%)$
40~45	42.5	5	5	2	98	2
35~40	37.5	7	12	4.9	95.1	2.9
30~35	32.5	26	38	15.5	84.5	10.6
25~30	27.5	22	60	24.5	75.5	9.0
20~25	22.5	35	95	38.8	61.2	14.2
15~20	17.5	82	177	72.2	27.8	33.5
10~15	12.5	56	233	95.1	4.9	22.9
5~10	7.5	10	243	99.2	0.8	4.1
0~5	2.5	2	245	100	0	0.8

物累积百分数 $D=100-R$ 。以上数值列于表 1-1 相应位置上。

列表法便于记录和整理测定的原始数据,供进一步处理数据用。

(二) 图形法

把上述表格中数据绘制成曲线,可以比较形象地显示出粉体粒度分布数据的集中和分散程度,便于分析和研究问题。比表格法直观,工程上应用较多。常用的图形表示方法有累积分布曲线和频率分布曲线。

1. 累积分布曲线

将平均粒径 d_i 作横坐标,筛上物累积百分率 R (或筛下物累积百分率 D) 作纵坐标,在直角坐标中绘制成筛上物(或筛下物)累积分布曲线,如图 1-1 所示。常用三种绘制方法:一是算术坐标法,即纵横坐标均为等分法。常用于粒度分布比较均匀场合。二是半对数坐标法,即纵坐标为等分坐标,横坐标为对数坐标。常用于粒度分布中,细粒级较多并需要详细了解场合。如水泥生料、水泥等粉料。三是双对数坐标,即纵横坐标均用对数坐标表示。它可将曲线变为直线,便于写出粒度分布方程式。

筛上物累积分布曲线有两个重要特征:(1)对应于某一粒径 d_i 的 R_i 值,表示直径大于 d_i 的粒子占全部粒子总数的百分率;(2)在该批粒子的最小粒径处,其 $R=100\%$ 。

2. 频率分布曲线

将平均粒径 d_i 作横坐标,可在直角坐标中绘制成频率分布曲线,如图 1-2 所示。

$$f_i = \frac{dR}{d(d_i)} \approx \frac{\Delta R}{\Delta d_i} \quad (1-8)$$

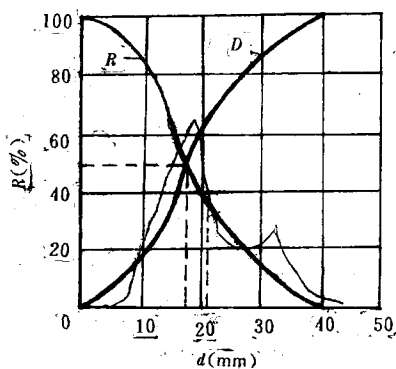


图 1-1 累积分布曲线

当 Δd_i 取得较小时,可用差分来近似代替微分,则实验数据可用矩形图形来表示(如图 1-3),将各个矩形顶部中点连成一条光滑的曲线,即为频率分布曲线。

频率分布曲线也有两个重要特征:(1)在一定的粒级范围内的粒子质量(或个数)占全部粒子质量(或个数)的百分率,等于该粒级范围内频率分布曲线下的面积;(2)频率分布曲线下的全部面积等于 1。

3. 两种粒度分布曲线的关系和用途

(1) 两者关系。比较累积分布曲线和频率分布曲线的定义可知,两者关系为

$$\left. \begin{aligned} f_i &= \frac{dR}{d(d_i)} && \text{(微分曲线)} \\ R_i &= \int f_i d(d_i) && \text{(积分曲线)} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

两者可以通过微分或积分来互相转换。

(2) 用途。累积分布曲线在生产中得到广泛应用。主要有三种用途:一是通常将筛析试验所得粒度组成先作出累积分布曲线,再由此曲线微分来求得频率分布曲线。若直接用筛析结果绘制频率分布曲线,其误差较大。因为筛孔间距是等比级数或无规律,而不是等差级数,则不能保证粒级范围 Δd_i 为常数。二是可以求出列表法没有给出的任意粒级质量百分含量。三是可用于比较和研究各种物料的粒度特性。为此,可将两条或更多条的各种物料的粒度累积分布曲线放在同一张图上,如图 1-4 所示。图中曲线 3 为凸形,它表示物料中粗粒子占多数;曲线 2 为直线,它表示物料中各粒级含量相等。曲线 1 为凹形,它表示物料中细粒子占多数。这对破碎机的选择及破碎系统型式确定、粉料的混合和输送方式均有重要作用。

频率分布曲线能直观地给出粒度分布的全貌。可从曲线上直接求得任一粒级的含量以及含量最多的粒径。图 1-1 中表示了含有双峰的频率分布曲线,水泥生料和叶腊石粉料就属此种类型。

(三) 粒度分布方程式

可以把测试所得的粒度分布数据,用数理统计方法整理成粒度分布方程式。然后利用此方程式来计算粒子群的平均粒径、比表面积。也可用于研究筛分效率和粉碎功耗理论。此处不赘述,可参阅有关专门书籍。

三、粒子群平均粒径

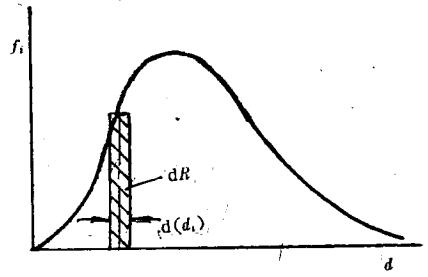


图 1-2 频率分布曲线

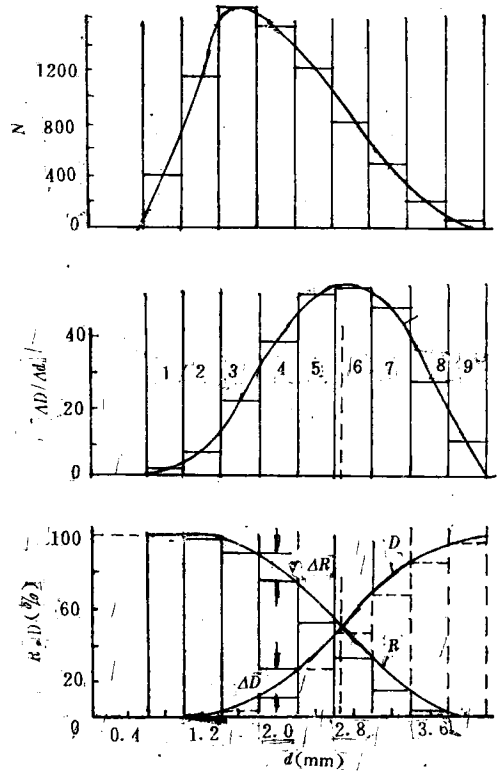


图 1-3 频率分布曲线和累积分布曲线关系

实用上为方便起见,用某个平均粒径来代表整个粒子群具有的某种粒度分布特征。通常使用的代表粒径如下:

(一) 中位径

累积分布曲线上, $R=50\%$ 处的粒子直径称为中位径。即中位径以上和以下的粒子质量(或个数)相等,相当于算术平均值。中位径也称为 50% 粒径,记为 d_{50} ,如图 1-1 所示。相应于 $R=25\%$ 和 $R=75\%$ 的粒径,分别称为 d_{25} 和 d_{75} 。用 d_{25}/d_{75} 比值来评定粒度分布的集中程度。其比值越接近于 1,则粉体中粒子大小越均齐。

(二) 众数径

频率分布曲线中,相应于频率 f_i 最大的粒径,称为众数径。即粉体中含有这种粒径的质量(或个数)最大,记为 d_{mod} 。

(三) 比表面积径

每单位质量的粉体所具有的表面积的和,称为比表面积。它可用透气法测定空气透过粉体层(固定床)时的流体阻力,再应用固定床流体阻力公式进行计算求得。比表面积径就是以比表面积等效作为准则来确定粒子群的平均直径。

当把粉体看作由 n 个相同直径 d_s 的球形粒子组成的集合体时,其比表面积 S 为

$$S = \frac{n \pi d_s^2}{n \rho_s \frac{\pi}{6} d_s^3} = \frac{6}{\rho_s d_s} \quad (1-10)$$

式中 ρ_s ——粒子的真密度。

若实际测试得到的比表面积为 S_w ,则按“比表面积等效”准则,即

$$S = S_w \quad (1-11)$$

由式(1-10)和(1-11)得,

$$d_s = \frac{6}{\rho_s S_w} \quad (1-12)$$

由上式可知,比表面积径与比表面积成反比。所以, S_w 越大则 d_s 越小。比表面积径的用途很广,它的大小与粉体层的流体阻力有密切关系。它的数值大小对燃烧、吸附和水泥的水化反应有很大影响。

(四) 调和平均径

若直径为 d_1, d_2, \dots, d_n 的球形粒子,其相应的质量为 m_1, m_2, \dots, m_n 。密度为 ρ_s ,总质量为 $\sum_{i=1}^n m_i$,则粒径 d_1 的比表面积为

$$S_1 = \frac{\left(\frac{m_1}{\rho_s \frac{\pi}{6} d_1^3} \right) \pi d_1^2}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{6}{d_1 \rho_s} \frac{m_1}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

$$S_2 = \frac{6}{d_2 \rho_s} \frac{m_2}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

同理可得,

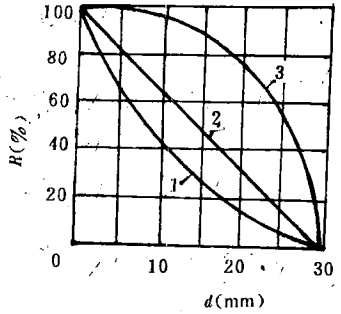


图 1-4 粒度组成特性曲线
1—凹形曲线; 2—直线;
3—凸形曲线

$$S_n = \frac{6}{d_n \rho_s} \frac{m_n}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1-13)$$

根据比表面积等效性,则

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (1-14)$$

将式(1-10)和式(1-13)代入式(1-14),得

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i}} \quad (1-15)$$

d_s 称为调和平均径。可由已知的粒度分布曲线求得。实质上,它也是比表面积径,只不过是由两种测量方法来求得。式(1-12)是由测比表面积 S_w 求 d_s ,而式(1-15)是由测得粒度分布曲线求 d_s 。

四、粒子形状

工业中所遇到的粒子,大多不是规则的几何形状,而是千差万别的。它将影响粉体的流动性和充填性。根据粉体的不同用途,对粒子的形状就有不同的要求。如:铁道路基用碎石粒子形状以正多面体为理想形状,应该排除扁平 and 细长形。这样才能在冲击和挤压作用下产生密实的充填结构;铸造用型砂既要求强度高,又要求空隙率大而便于排气,应以球形粒子为佳;研磨用砂纸中粉料粒子要求有棱角,且以短棱镜状为理想。

颗粒形状表示方法有三种:形状系数、形状指数和粗糙度系数。

(一) 形状系数

形状系数是实际粒子的形状和球形粒子差异的程度。有如下三种表示方法:

1. 体积形状系数 φ_v

$$V = \varphi_v d_s^3 \quad (1-16)$$

式中 V ——一个粒子体积。

对于球形粒子, $\varphi_v = \pi/6$; 对于边长为 d_s 的立方体, $\varphi_v = 1$ 。

2. 表面积形状系数 φ_s

$$S = \varphi_s d_s^2 \quad (1-17)$$

式中 S ——一个粒子的表面积。

对于球形粒子, $\varphi_s = \pi$; 对于边长为 d_s 的立方体, $\varphi_s = 6$ 。

3. 比表面积形状系数 φ

$$S_w = \frac{S}{\rho_s V} = \frac{\varphi_s d_s^2}{\rho_s \varphi_v d_s^3} = \varphi \frac{1}{\rho_s d_s} \quad (1-18)$$

式中 S_w ——单位质量的比表面积,其中

$$\varphi = \varphi_s / \varphi_v \quad (1-19)$$

对于球形粒子, $\varphi = 6$ 。对于边长为 d_s 的立方体, $\varphi = 6$ 。

(二) 形状指数

根据使用目的不同,先确定理想的形状,然后用形状指数来表示理想形状和实际形状粒子之间的接近程度。

1. 球形度 ψ

根据体积比表面积的定义,可知,

$$S = \frac{S_0}{V} \quad (1-20)$$

将式(1-4)、(1-5)和(1-6)三式代入上式,可得

$$d_{e3} = \frac{d_{e1}^3}{d_{e2}^2} = \left(\frac{d_{e1}}{d_{e2}}\right)^2 d_{e1} = \psi d_{e1} \quad (1-21)$$

其中

$$\psi = \left(\frac{d_{e1}}{d_{e2}}\right)^2 = \frac{\pi d_{e1}^2}{\pi d_{e2}^2} \\ = \frac{\text{与非球形粒子体积相等的球表面积}}{\text{非球形粒子表面积}} \quad (1-22)$$

由上式可知, ψ 的物理意义是非球形粒子的形状与球形粒子的差异程度,称其为球形度。对于球形粒子 $\psi=1$; 正立方体 $\psi=0.806$ 。其它有规则形状的粒子可查有关手册。

式(1-22)仅适用于表面积和体积可以计算的粒子。对于不规则形状粒子,表面积测定有困难,可用如下实用球形度来表示。

$$\psi_w = \frac{\text{与非球形粒子投影面积相等的圆直径}}{\text{非球形粒子投影图最小外接圆直径}} \quad (1-23)$$

式中最小外接圆直径可由圆形筛目决定。

2. 体积充满度

体积充满度 f_v 表示粒子体积 lbt 与粒子的外接立方体体积 V 之比,即:

$$f_v = \frac{lbt}{V} \quad (1-24)$$

(三) 粗糙度系数

形状系数是个宏观量。但微观上来看,粒子表面上有很多微小裂纹和孔洞。粗糙度系数 R 表示粒子实际表面积 S_1 与外观看成光滑粒子的表面积 S_2 之比,则

$$R = \frac{S_1}{S_2} > 1 \quad (1-25)$$

粒子表面的粗糙程度与粒子间摩擦、粘附、吸水性以及空隙率等密切相关。应给予足够的重视。

必须指出,任何一种当量直径(平均直径)都不能全面地代表一条粒度分布曲线,而只能在某个方面与原分布曲线等效。要看所讨论问题的性质,结合测定方法从各种当量粒径中选择之,否则会严重失实。如:粉料层流体阻力计算中,用比表面积径;粒子类型判别中用 d_{50} 径;气力输送中用调和径、比表面积径;悬浮速度计算中用体积平均径或质量平均径。

气力混合的难易与粒径大小和形状有关。一般来说,粒径愈大,混合愈难;球形粒子往往比棱角粒子易混合。纤维状和叶片状物料适宜于稀相输送;粉末状物料适合于中相动压和空气输送斜槽输送;微细粒子、粉末和形状不一的粉粒混合物适宜于密相静压气力输送。对于粗糙而坚硬多棱的粒子,应采取措施防止输送管道和管道弯管的磨损。

第三节 粒子床层充填特性

一、真密度和松散密度

粉体是大量粒子的集合体,粉体粒子之间充满着气体。因此,可以认为粉体是固气两相混合物。设体积为 V 的粉体中,固相占有体积为 V_s ,具有质量为 G_s ;气相占有体积为 V_a ,具有质量为 G_a 。但 $G_s \gg G_a$,在粒子密度计算时,一般可忽略不计。粒子密度计算如下:

$$\begin{cases} \rho_s = G_s/V_s \\ \rho_b = G_s/(V_s + V_a) = G_s/V \end{cases} \quad (1-26)$$

二、空隙率

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (1-27)$$

空隙率 ε 大小反映出粒子充填的密实程度。它对固定床的流体阻力和混合的均匀程度影响很大。

空隙率与粒子形状、粒度分布、粒子表面粗糙程度、装填方法和充气程度有关。当粒子为同径球体时,进行有规则排列, $\varepsilon = 0.26 \sim 0.48$ 。一般粉体的形状和排列均不规则,则空隙率变化更大。表面光滑球形粒子易流动,使空隙率小;粒度分布较宽的粒子群,因小粒子易充填于大粒子之间的空隙中,空隙率会较小。若已知 ρ_b 和 ρ_s ,则可按(1-27)式求出 ε 值。但松散密度测定值的再现性差,这是因为其空隙体积与装填方式有关。如缓慢装填,会形成松散排列;如振实装填,会形成较紧密排列。在几十米高的大型粉料筒仓中,由于粉料自重作用,导致上部粉料较松散,下部粉料较密实。充气程度对空隙率影响极大。由于气流作用,在稀相气力输送中,粒子呈悬浮状态,其空隙率最大;在气力混合中,其空隙率居中;在密相静压气力输送中,料栓的空隙率较小。

三、床层比表面积

床层比表面积是单位床层体积中,粒子所具有的表面积。若有 n 个当量直径为 d_s 、形状系数为 q_s 的粒子群置于床层中,则由式(1-27)可得床层体积为

$$V = \frac{V_s}{1 - \varepsilon} = \frac{n \frac{\pi}{6} d_s^3}{1 - \varepsilon} \quad (1-28)$$

由床层比表面积定义可得

$$S'_v = \frac{n \pi d_s^2 / q_s}{V} = \frac{6(1 - \varepsilon)}{q_s d_s} \quad (1-29)$$

第四节 粉体流变学特性

与固体和液体的性质不同,粉体有其特殊的流变学特性。本节主要叙述以下三个特性:(1)粉体摩擦角;(2)粉体压缩;(3)粘附力。

一、粉体摩擦角

(一) 内摩擦角

用剪切测定仪可测得内摩擦角数值,其测试原理如图 1-5 所示。在压盖 4 上施加一定重力 W 的压块(逐级增加共施加四、五级压力)。每次加压后,逐渐增加秤盘 5 中的砝码,直到上、下方盒间发生错动时,记录此时砝码重力 F 值。如果上、下方盒内粉料的截面积为 A ,则粉体层受到垂直应力 $\sigma = W/A$,相应的极限剪应力 $\tau = F/A$ 。将测得 4~5 组数据画成曲线,如图 1-6 所示。此曲线表达式为

$$\tau = \sigma \tan \phi_s + C \quad (1-30)$$

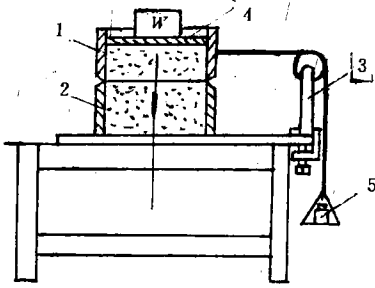


图 1-5 内摩擦角测定

1—上方盒；2—下方盒；3—支架；4—压盖；5—秤盘

式中 ϕ_s ——粉料内摩擦角； C ——粉料层之间的粘附力。

式(1-30)是土力学中著名的库仑公式，它与实验结果基本符合。内摩擦角大的粉料，其极限剪应力也大，则表明粉料层难以剪切破坏。因此，在料仓内粉料易发生堵塞现象。

(二) 壁面摩擦角

壁面摩擦系数是粉料层与壁面材料板之间发生相对位移瞬间，剪切力与垂直力之比。这个比值的反正切就是壁面摩擦角。用图 1-7 所示剪切仪可以测得壁面摩擦角。其测定方法与测定内摩擦角的方法完全一样。

(三) 安息角

1. 注入角。粉体通过小孔缓慢地落到平板上，形成圆锥形料堆，再测定堆积体倾斜角，称为注入角。如图 1-8 所示。

2. 排出角。粉体从小孔缓慢流出后，测定箱体中堆积粉料的倾斜角，称为排出角。如图 1-9 所示。

3. 倾斜角。装入水平圆筒中的粉料，随着圆筒旋转，形成稳定倾斜面时的角度，称为倾斜角。如图 1-10 所示。

一般来说，排出角大于注入角。倾斜角大于注入角。

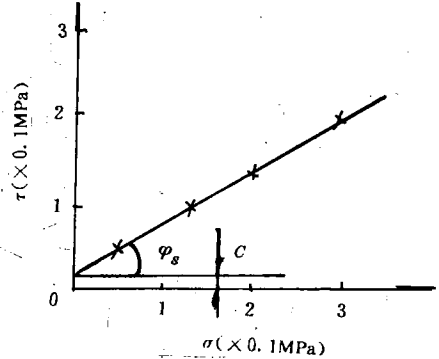


图 1-6 抗剪强度曲线

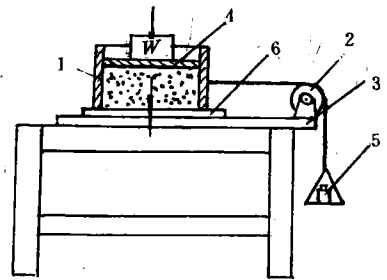


图 1-7 壁面摩擦角测定

1—方盒；2—滑轮；3—支架；
4—压盖；5—秤盘；
6—壁面材料板

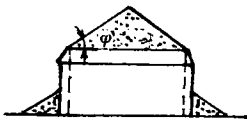


图 1-8 注入角测定



图 1-9 排出角测定

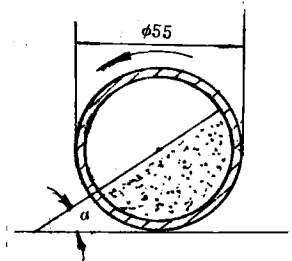


图 1-10 倾斜角测定

(四) 应用

1. 几种粉料的安息角、内摩擦角和壁面摩擦角,列于表 1-2 中。

几种物料的主要物理特性

表 1-2

物料名称	平均粒径 mm	真密度 t/m ³	松散密度 t/m ³	安息角 (°)	内摩擦角 (°)	壁摩擦角 (与钢板) (°)
玻璃配合料	0.217		1.18	41~46	30	28.2
纯碱	0.096		0.62	43.5	32.5	31.5
石膏	0.076	2.35	0.84	45~48.5	31	26.6
干硅砂	0.205	2.5	1.53	30~34.5	28.8	24.1
水泥	0.025	3.2	1.05	52		
水泥生料	0.122	2.7	0.82	48		
滑石粉	>0.01	2.6~2.85	0.56~0.95			21.8
陶土	0.087	2.4	1.4		23.5	17.6

2. 减少安息角措施。若粉料不是依靠自身重力缓慢运动形成安息角,而是采用振动器振动,则安息角减少,流动性增加,使料仓中粉料容易排出。通过透气层向粉料通入低压空气时,安息角会显著减少。这有利于粉料从料仓中卸料。空气输送斜槽就是利用此流态化原理来输送粉料。

3. 粉料含水量对诸角的影响。

表 1-3~表 1-5 列出了硅砂含水量对其安息角、内摩擦角和壁面摩擦角(对钢板)的影响。

含水量与物料的安息角关系

表 1-3

含水量	干	1.35%	4.0%	6.5%	9.0%
安息角(°)	34.4	56.2	57.1	57.3	58.2

含水量与物料内摩擦角关系

表 1-4

含水量	干	1.9%	4.2%	5.6%
内摩擦角(°)	28.8	24.7	24.7	23.7

含水量与物料壁面摩擦角(对钢板关系)

表 1-5

含水量	干	1.35%	2.5%	4.0%	5.5%
壁面摩擦角(°)	24.1	24	25.2	25.1	27

由上述各表中可知,对于 $d_{50}=0.205\text{mm}$ 硅砂,其安息角随含水量增加而增加;内摩擦角随含水量增加而减少;壁面摩擦角(对钢板)随含水量增加而增加。

4. 只有能够成栓的粉料才能采用静压密相脉冲栓流气力输送。粉料成栓的必要条件是粉

料的内摩擦角大于壁面摩擦角。由表 1-4 和表 1-5 可知,当含水量小于 1.35% 时,可采用脉冲栓流气力输送来输送硅砂。当含水量大于 1.35% 时,壁面摩擦角大于内摩擦角,则粉料不能成栓,就不宜采用脉冲栓流方法进行输送。

二、压缩率

以自由充填或振动充填方式把粉料装入圆筒内都是以物料自重为主。因此,充填比较疏松,不能得到密实充填状态。如在脉冲栓状气力输送中,料栓两端就会受到几个大气压的气体使料栓压缩而密实。为此就需要对粉料层进行加压密实,以研究其压缩率。

通常将一定量的粉料装入圆筒形钢模中,通过活塞施加不同的压力。每加一次压力后,粉料受到压缩而使料面下降,记录每次施加外载荷数值和相应料面下降深度,直到料面基本不再下降为止。粉体压缩过程大致分为四个阶段。先是粉料粒子互相推挤。然后,粉体内架桥崩溃。接着,粒子表面高低不平部分相互摩擦或推挤而变成平滑,粒子发生变形。最后,粒子被破碎而变成微细粉末,粉体内空穴逐步消失,粉体体积不再减少。

图 1-11 表示了玻璃配合料的外加压力与粉体压缩率的关系曲线。应该指出:只有在相同外载荷作用下,才能进行各种粉料的压缩率比较。干硅砂、玻璃配合料、纯碱和石膏粉料的压缩率比较列于表 1-6 中。

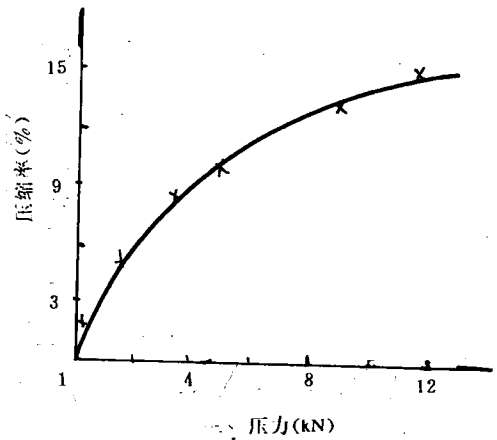


图 1-11 玻璃配合料的外载荷与压缩率关系曲线

粉料密度和压缩率

表 1-6

	干硅砂	玻璃配合料	纯碱	石膏
松散密度 (t/m^3)	1.53	1.18	0.62	0.84
0.1MPa 下,压缩率(%)	1.3	3.9	14.9	21.9
0.2MPa 下,压缩率(%)	很小	5.8	16.3	22.9

粉料压缩率大,则表明粒子间空隙率较大,其透气性能好。因而该粉料形成的料栓稳定性较差。这种粉料形成的料栓在气力输送过程中容易在气体压力下散塌,甚至被击穿,最后成为动压输送。为了防止料栓被击穿,可采用较长料栓和较小口径的输送管道。通常压缩率大的粉料,其松散密度较小。因而,即使料栓较长也能用较低气体压力来进行正常输送。相反,硅砂松散密度大、压缩率小,透气性差,则采用较短料栓长度时不易被击穿。但料栓也不能太短,否则在垂直管道输送中,由于重力作用易使料栓散塌。

由上讨论可知,脉冲栓状气力输送对粉体物性要求是在输送过程中,既能形成料栓,又能保持稳定状态。即其物性,既要求内摩擦角大于壁面摩擦角,又要求透气性小。

三、粘附力