

实用粉体技术

李克永 杨 伦 侯廷久 译

中国建筑工业出版社

实用粉体技术

[日] 坂下 撰 等 著
李克永 杨 伦 侯廷久 译

中国建筑工业出版社

本书是有关粉体技术的译文集，对粉体物性、粉体过程的连续化、粉体技术的现状和发展以及粉体技术的实际应用均作了精辟的阐述。

可供从事粉体技术的科技工作者及有关工业院校师生参考。本书选辑了27篇文章，其中，李克永译文11篇、杨伦译文9篇、侯廷久译文7篇。

实用·粉粒体プロセスと技術

坂下 撰 等著

昭和52年

* * *

实用粉体技术

李克永 杨伦 侯廷久 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：13¹/₂，字数：354千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷

印数：1—3,500册 定价：1.65元

统一书号：15040·4512

译 者 的 话

粉体作业有着数千年以上悠久的传统实践历史，如粉碎和混合等，但是作为专门体系的学科——粉体技术迄今还只有短短的30年左右。最早的可追溯到1948年的美国J.M. Dallavalle所著《尘粒学》一书，其中包括有细颗粒技术方面的内容。1956年日本成立粉体工学研究会，其会志创刊于1964年。1960年英国H.E. Rose开设了粉体技术的大学课程。从此之后，粉体技术在学术团体、文献书刊、国际会议、大学教育和科学研究等方面日见活跃，大大促进了它本身学术水平的迅速提高。目前，在英、西德、美、日等国大学的化工、无机材料工程与机械等专业中，一般都设有粉体技术的课程与实验，其中包括研究生院的课程设置。近几年，我国部分高校的有关专业也设置了相应的课程和实验。

粉体的粒度范围，若按广义来讲，可以从只有几个微米细粉末或烟雾气溶胶直至泥浆或石块。粉体颗粒的存在状态有单一颗粒、颗粒群和颗粒床。粉体技术内容极为广泛，从粉体的生成一直到粉体的实际应用，则有下列内容：

(1) 颗粒的形成，如粉碎、沉淀、结晶和磨损；

(2) 颗粒与颗粒和颗粒与气体或液体之间的相互作用，涉及表面化学和表面物理学，例如颗粒的润湿与分散、气溶胶、胶体和悬浮体的特性；

(3) 颗粒本身的特性，如粒度分布、形状、比表面积和多孔结构，以及颗粒集合体的填充性与流动性；

(4) 工厂中需予解决的关于固体处理方面的单元操作，如贮存、输送、混合、干燥、流态化、密实、粒化、分级以及与流

体的相互分离。

粉体技术包括粉体科学和粉体工程两大方面。前者系指粉体性质的基础研究，也是材料科学的组成部分之一，当然它更是后者的重要基础；粉体工程则为粉体在工程实用中的各项单元操作。

粉体技术是相当重要的新兴学科。国民经济中不少重大问题都与粉体技术有关，例如：能源、原料、材料的合理利用与回收，磨损的防止以及环境污染等。近一、二十年来，粉体技术的发展更加迅速。仅从以下几方面即可说明粉体技术的进展概况。

(1) 对粉体性质的研究，主要有三个方面：颗粒形态学、粉体力学和粒度测定技术。颗粒形状是影响粉体各种现象的典型因素之一，特别是粘附性与流动性均与颗粒的形状相关联，但其关联的准确性乃取决于对形状的表述手段。对电子陶瓷、磁性材料以及粉末冶金等复合材料，亟待解决颗粒的形状问题。最近对此已有所突破。美国 J.K. Beddow 等采用傅里叶级数来作形状分析，通过电子计算机的数据处理，对颗粒形状作出了定量的表达。粉体力学在料仓设计中的成功应用，可以认为是粉体技术的实用典范。目前，对粉体剪切测试、振动下的粉体流动性质以及粘附力的测定，也都有了较大的进展。粒度是粉体性质中最基本的、也是最早进行研究的项目，近年来在这方面的工作主要致力于粒度分布在生产线上的联机测定技术，其中包括采用 γ 射线的光学法、表面积联机测定以及微粉体的粒度分布测定。

(2) 对粉碎的研究，就其节约能源来讲，显然极为重要。据估计，全世界粉碎过程所消耗的能量约占全球能耗总量的 4% 以上。目前，粉碎技术的主要内容有三个方面的：单一颗粒的粉碎物理学、粉碎过程的系统工程分析以及粉碎的机械化学 (Mechano chemistry) 效应。按自由界面的表面能来衡量粉碎能量利用效率是不恰当的，应按断裂物理学并用单一颗粒的粉碎实验来估计粉碎能耗的最低值，一般，它是工业值的 50% 左右；这方面的实验结果，可作为对某种粉碎过程的鉴定或粉碎机的应用指

南。按速度论对粉碎过程的系统工程分析，其中包括有粒度分布系数、速度函数、可碎性函数以及粉碎机容量效应指数等。机械化学效应是粉碎技术的新的一个重要研究动向，它是指在粉碎（特别是微粉碎）之后，对粉体所激发产生的物质本身的物理化学变化；由此，即可获知促进粉体反应过程的手段，又可找到助碎（磨）的有效措施。

（3）输送（包括供料）的最高目标是要使粉体过程实现控制化，高度控制技术在粉体输送中的应用是近年来的努力方向。由于明显的优越性，气力输送受到愈来愈多的兴趣与重视。无论是机械输送或者气力输送，既要研究大输送量的技术经济性，又要开发极小输送量的高度控制技术。

（4）收尘方面除了基础理论研究之外，还考虑了高温高压下采用颗粒填充的收尘性能及其压力损失的模型，近年对纤维微观结构的收尘机理，取得了研究成就，其目的是为了降低压力损失与提高捕集效率。

（5）混合已被按照概率论的观点来进行研究，美国的范良政对此作出了成就。对于分级、筛分也同样应该采用统计方法来处理。这是发展粉体技术的重要途径之一。

为了对粉体技术作进一步的具体介绍，特将实用性较强的译文选辑为《实用粉体技术》译文集。本书乃以日本1977年出版的《实用粉体过程与技术》一书为主，选择了其中的21篇，另外又添选了其它一些国家的有关文章6篇。本书为国内从事粉体技术的科技人员提供参考。谬误之处，请批评指正。

杨 伦

一九八二年十一月十五日

目 录

粉体物性和粉体过程.....	1
粉体技术的现状和今后动向.....	20
粉体过程连续化的现状和问题.....	43
粉体过程所用机器的选择方法.....	65
粉体材料工学中的一些流变学问题.....	78
粉碎技术的现状及其存在问题.....	110
粉碎过程的能量消耗.....	120
干粉料的混合.....	137
粉体混合技术的现状和发展.....	152
粉体过程的混合连续化.....	163
粉体过程的混练连续化.....	172
粉体过程中的干燥连续化.....	184
粉体过程的供料装置和连续化.....	209
料仓的料流和设计.....	227
粉粒体料仓堵塞的防止方法.....	252
改流体在料仓中的应用.....	267
粉粒体的输送机械及选定条件.....	279
粉粒料的高浓度低速输送方法.....	298
密相气力输送系统的设计和性能.....	312
空气提升器设计方法.....	330
粉体测量装置和控制系统.....	351
流化床造粒技术及其应用.....	360
微形胶囊技术及其应用.....	370
食品工业中造粒技术的动向.....	379
催化剂工业中造粒技术及其问题.....	386
水泥流化烧成与大颗粒流化床.....	395
在粉体诸现象中助剂、添加剂的效果.....	406

粉体物性和粉体过程

[日] 坂 下 撰^①

粉体过程的单元操作包括造粒、粉碎、分级、除尘、混合、输送、给料、包装等过程。这些操作过程均受粉体物性的影响，其中也有由于粉体物性而使过程的操作范围受到了限制。虽然粉体物性和粉体操作有非常密切的关系，但到目前为止物性对各过程的影响尚不清楚。

物性对各过程的影响尚不清楚的原因有三：第一，粉体过程所产生的现象是基本粉体物性的综合表现；第二，对单元操作的机理或运动论尚不明确；第三，物性测定技术确立的比较晚。

本文将与贮存、给料、输送操作有关的粉体物性为中心而加以阐述。

1. 粉体物性的概述

根据流体力学¹⁾，粉体的基本物性有密度、粒径、形状、分布、堆积构造、流动、沉降、透过等。在实际粉体过程中和在设备中产生的一些现象，都是这些物理性质的复杂组合，因此很多情况不能用单一粒子的动作以及理想模式来说明。这就是说与单一或理想粒子有关的基本物性是有一定价值的，但它对于一个集团或运动着的粉体群的物性来说，就不能寄予更高的希望。

另一方面，对于粉体设备进行运转或设计时，在贮仓、给料机内粉体的流动性，在气流输送中粉体的悬浮性等都是不可缺少

^① Shizuka Sakashita (坂下 撰)日本制碱工程有限公司技术开发室部长

的粉体物性。这些现场的粉体物性是由基本粉体物性组合而成，如果它们能简单求出，则粉体过程的故障和设计错误就不致出现了。

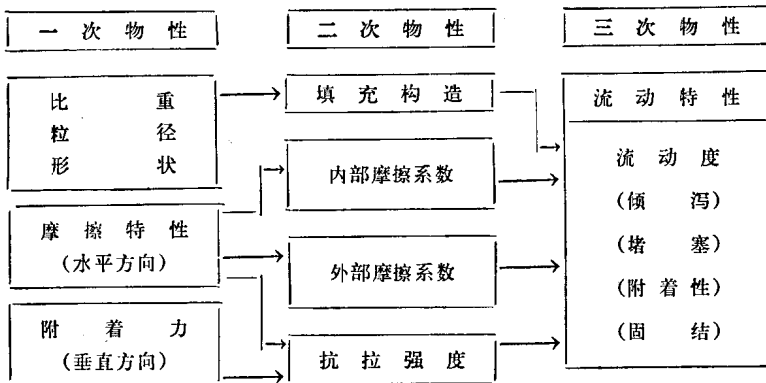
可是，现实很复杂，单从粒径、形状、分布、密度等推测集合体的粉体物性还存在很多问题。

现将基本物性作为一次物性，粉体过程中的物性作为三次物性，处于二者之间的为二次物性。这样可以把粉体物性系统化。在一次物性和三次物性之间用二次物性来过渡，这是一贯的作法。

表 1 给出神保²⁾关于流动性的方案。比重、粒径、形状、水平运动的摩擦特性、以及由垂直方向对粉体加力而产生的附着力都属于一次物性。这些一次物性可以由填充构造内部和外部的摩擦系数以及抗拉强度等集合体的二次物性表现出来。这些二次物性的组合形成粉体在贮存和给料时的流动性。

粉体流动特性的分类(神保²⁾)

表 1



如果以这种方法来判定粉体的流动性，贮槽是否能设计出来呢？回答是否定的。在贮槽设计时，除流动性外，还应知道由于贮槽构造形成的粉体压力、力的分布以及粉体的运动情况。因粉体压力和运动情况对粉体层的填充构造有影响，因而粉体重力流

也有一定变化。

综如上述，设计应以构成粉体三次物性的诸因素来判定，若已弄清了它的运动机理，即可开始设计。以粉碎现象为例，根据田中³⁾提出影响粉碎性能的因素有真比重、表面能、硬度、杨氏模量、泊松比、压缩强度等。而一次物性的真比重、硬度又通过二次物性的杨氏模量、泊松比、压缩强度这些材力特性，最终表现出所谓粉碎性的三次物性。因此，即或弄清粉碎能量、弄清粉碎机内的机理，特别是弄清球磨机内粉体集合体、或单一粒子的运动，但因不能弄清粉碎的概率，那么粉碎能和粉碎粒度也不能预测。

如果能弄清粉体操作或粉体处理机内部粉体整体的运动机理，就会有三次物性，从而会使粉体物性和单元操作建立联系。

表2是单元操作和粉体基本现象相互关联的分类表。由此表可以看出堆积层的物性和集合体以及二相混流运动，都和单元操

粉体单元操作和粉体基本现象的关系

表 2

单元操作 (根据性能分类)		粉体物性论			粉体运动论				化学 变化
		物理的	化学的	堆积层	粒子群	二次混流	流体运动	破坏	
粉 碎		○	○		○	○		◎	
机 械 分 离	筛 分	◎			◎				
	风力分级	◎			○	◎			
	湿式分级	◎				◎	○		
	沉降分离	◎		○		◎	◎		
	离心分离	○		○			◎		
	气体过滤	○		○			◎		
	流体过滤	○		○			◎		
	收 尘	◎				◎			
	比重分离	◎	○		◎				
	磁力分离	◎	○		◎				
	静电分离	◎	○		◎				

续表

单元操作 (根据性能分类)		粉体物性论			粉体运动论				化学 变化
		物理的	化学的	堆积层	粒子群	二次混流	流体运动	破坏	
混合	固体混合	○		○	⊙				
	捏和、混练	○	○	○	⊙	⊙			
	均化	○	○			⊙			
	搅拌	○	○		⊙				
运输	贮仓	○		⊙	⊙				
	给料	○		⊙		⊙		○	
	气力输送	○				⊙			
	水力输送	○			⊙				
	机械运输	○			⊙				
	包装	○		⊙	○		⊙		
填充层	○	○	⊙	⊙	⊙	⊙			
流动层	○	○	⊙	⊙					
移动层	○	○	⊙	⊙				○	
造粒	○	○	⊙	⊙					
压缩成型	○	○	⊙					○	
发泡	○	○							
浮选	○	○						⊙	
烧结	○	○	⊙					⊙	
焙烧、烧结	○	○	⊙	⊙				⊙	
燃烧	○	○	⊙	○				⊙	
吸附、脱吸	○	○	⊙					⊙	
催化	○	○	⊙	⊙				⊙	
干燥	○	○	○	⊙		⊙			
萃取	○	○	○			⊙		○	
溶解	○	○						⊙	
结晶	○	○						⊙	
升华	○	○	○					⊙	

作有重要关系。换句话说，若把粉体堆积层的物性和集合体还有在两相混流中粉体运动机理结合起来，粉体现象就可以理解。

2. 贮仓、供料系统和粉体物性

贮仓、供料系统，若用人身来对比相当于动脉，它的成败直接影响粉体过程的成败，这样说并不算过分。

特别需要指出的是，粉体填充层的摩擦、附着特性和重力流动的机理，所有这些粉体力学的因子都是特别重要的。

2.1 粉体的流动性

粉体是否容易流动，如表 1 所示那样，要看填充物的构造、摩擦特性以及附着力在粉体压力下是怎样变化、在理解此点的基础上就可以研究闭塞和倾泻两种极端情况。

(1) 闭塞

粉体的闭塞不仅是在贮仓里发生，在投料机、运输机这类处于高浓度填充状态的操作中也会发生。若发生这种现象，粉体过程将完全停止。

闭塞现象是由粉体填充层的压缩而引起的。现在把粉体向图 1 (a) 那样圆筒中填塞加压，然后轻轻地去掉荷重及圆筒，这时可能出现两种情况，一种是象图 1 (b) 那样没有崩溃而保持原形，另一种如图 1 (c) 那样崩溃了，并以适当的安息角呈山形。若如图 1 (b) 那样可以定形时，则粉料填充层具有强度 f 。象这样的粉体从贮仓里流出必然会引起闭塞，若剪断力 s 大于 f 仍不能破坏时，这种物料是不能从贮仓里流出的。另外，如图 1 (c) 那样能崩溃的粉体，其强度几乎等于零，因而不会闭塞。

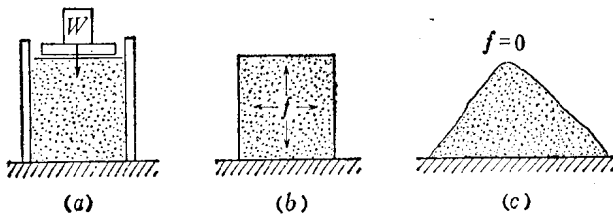


图 1 粉体层的压缩和强度

我们观察一下象这样的典型现象在贮仓内将出现怎样情景。若贮仓内的压力分布为(P)，强度分布为(f)，剪断力分布为(S)时，研究一下图 2 所示的典型。在图 2 上，粉体单元由于受粉体压力 P (因情况不同，所加的送料冲击力或排出时的超过压力) 致使填充致密并具有附着强度 f 。而另一方面，因贮仓构造和粉体力学特性产生的剪切力若大，就不能象图 1 (b) 那样形成成型层，而处于流动状态。若剪切力 S 小于强度 f 则如图 1 (b) 那样形成成型层并引起闭塞。即在 f 等于 S 点时则会产生拱形，把这个条件下的直径 B 规定为界限流出直径。若贮槽出口直径大于 B 就不会产生闭塞。这个条件可由 Jenike 的剪断盒来确定。

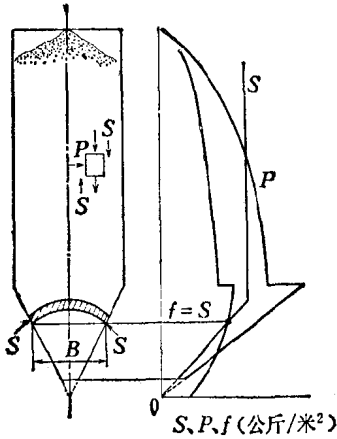


图 2 漏斗内的压力、强度、剪断力的分布和拱桥

Jenike 的剪断盒的构造如图 3 所示，若求得垂直应力 σ 和剪断应力 τ 时，则粉体压缩层的摩擦特性 (内部摩擦角 ϕ_i 、有效摩擦角 δ 、附着力 c 、抗拉强度 T) 就可以被求出来。另外，若将这个装置底部的框用与壁材料相同的板来代替，可求出壁的摩擦角 ϕ_w 。

由剪断盒的测试结果，可求得象图 4 所示那样三种线 (屈服

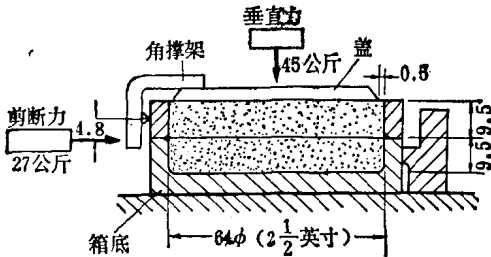


图 3 剪断测试仪 (Jenike 盒)

轨迹线)。把它用公式表示出来可得如下三式:

$$\tau = \tan \Phi_1 \sigma \quad (1) \dots\dots (\text{直线 } a)$$

$$\tau = \tan \Phi_1 \sigma + c \quad (2) \dots\dots (\text{直线 } b)$$

$$(\tau/c)^n = 1 + (\sigma/T) \quad (3) \dots\dots (\text{曲线 } c)$$

其中(3)式即所谓Farley-Valentin式,若(3)式中 $n=1$ 时变为(2)式, $n=1, c=0$ 时就会变(1)式。

具有上述强度 f 的粉体(图1b)其 $\tau-\sigma$ 关系象曲线 c 那样。不符合(1)(2)式(库伦(クーロン))的粉体称谓非库伦粉体,而非库伦粉体具有引起闭塞的物理性质。

另外,在尚无公式(3)时,Farley就试探着与粉体物性相关联的实验,他在实验范围内把50微米以上的粗粒当作库伦粉体,并确定了附着力 c 和拉伸应力之间有 $c=2T$ 的关系。今后,若能根据粒径、形状、填充构造的关系决定(3)式的 n (切变指数)、 C 、 T ,那么作为工业计算方法就很方便了。

根据剪断试验得到的曲线可求 σ/τ 的数值, Jenike用它确定了流动函数 FF 的定义。流动函数可作为表示贮槽内粉体流动性(或闭塞性)的数值,表3列出了 FF 值和流动性的关系。

流动函数和流动性 (Jenike)

表 3

FF值	流 动 性
$FF < 2$	附着性很大不能流出
$2 < FF < 4$	有附着性
$4 < FF < 10$	容易流出
$FF < 10$	自由流出

把粉体流动函数 FF 画在图5上,在这个图上,根据漏斗形状、摩擦系数 Φ_w 、有效摩擦角 σ 可求料斗的流动因素(引用文献4),15)上所载的 ff 图),于是可画出料斗流动函数 ff 。象

图5中粉体c^①那样 $ff < FF$ 时,不会引起闭塞,象粉体b那样 ff 线和 FF 线相交时,交点 f_c 以上部分将引起闭塞。另外象a^①那样 $ff > FF$ 时将引起闭塞而不能流出。在粉体a^①的情况下,改变贮仓的半顶角 θ_1 和壁摩擦,完全可以存出 $ff < FF$ 的条件。

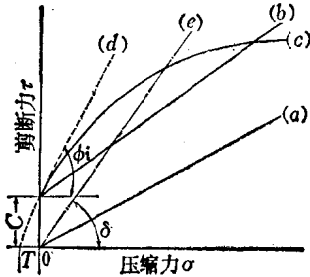


图4 莫尔圆和粉体力学特性式

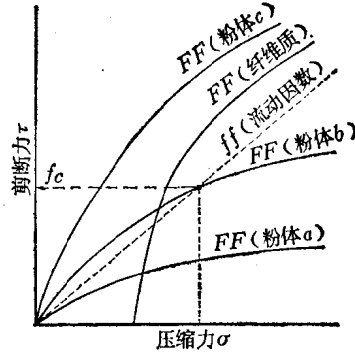


图5 料斗和粉体拱形条件

用粉体密实强度 f_c (如图1(b)所示那样固结粉体会产生一定强度)与容重 γ 可由(4)式求出流出直径(或宽度) B :

$$B = \frac{f_c}{\gamma} (1 + m) \quad (4)$$

式中 m 是出口形状系数,当出口为矩形时 $m = 0$,圆形时 $m = 1$ 。从 m 值来看,矩形出口比圆形出口难堵塞。

上述的Jenike方法是一种完全以粉体力学为基础的方法。与之对应的有Carr^{6,7,8)}的完全经验方法。Carr方法认为粉体流动性(引起闭塞的容易程度)易动性可由测定粉体二次物性,而测定休止角、平板角、附着系数、压缩率而求出。表4是Carr法判断流动性的依据,而Carr法测定方法容易,每个人用起来差别不大,对这种客观地表现粉体物性应给予较高的评价。另外,文献9)、10)提出流动性和压缩率相关性很大,这能说明Carr方

① c原文是a,而a原文是c,若按原文印理论上讲不通,故予改正——译者注

法能综合的表现填充物构造和摩擦系数大小。特别是压缩率大的非库伦粉体，含水率又大时，其流动性可由 Carr 方法来判定。

Carr 流动性指数⁶⁾

表 4

流动性	指数	拱 桥 防止法	休 止 角		压 缩 率		平 板 角		附 着 率	
			度	指数	%	指数	度	指数	%	指数
最 好	90~100	不 必 要	<25	25	<5	25	<25	25		
			26~29	24	6~9	23	26~30	24		
			30	22.5	10	22.5	31	22.5		
良 好	80~90	不 必 要	31	22	11	22	32	22		
			32~34	21	12~14	21	33~37	21		
			35	20	15	20	38	20		
较 好	70~80	有时振动	36	19.5	16	19.5	39	19.5		
			37~39	18	17~19	18	40~44	18		
			40	17.5	20	17.5	45	17.5		
普 通	60~69	分 界 点 有 拱 桥	41	17	21	17	46	17		
			42~44	16	22~24	16	47~59	16		
			45	15	25	15	60	15	<6	15
不 太 好	40~59	应有防止 方 法	46	14.5	26	14.5	61	14.5	6~9	14.5
			47~54	12	27~30	12	62~74	12	10~29	12
			55	10	31	10	75	10	30	10
不 好	20~39	采取强有 力 对 策	56	9.5	32	9.5	76	9.5	31	9.5
			57~64	7	33~36	7	77~89	7	32~54	7
			65	5	37	5	90	5	55	5
非 常 坏	0~19	需要特别 装 置	66	4.5	38	4.5	91	4.5	56	4.5
			67~89	2	39~45	2	92~99	2	57~79	2
			90	0	>45	0	>99	0	>79	0

(2) 溢出性

含空气的微粉（一般在100微米以下）在贮槽和给料机内，从微小间隙会溢出含气体的粉体，把这种现象叫溢出。Carr把这种情况和流动性一样表示为易动性，这个易动性能充分表示溢出性，因而这个易动性对溢出性有参考价值。

2.2 偏析

粒径差大的粉体，和重度不同的粉体，在向贮槽给料和排料时，粗粒和微粉、比重轻的和比重重的会产生分离。把这种现象叫偏析。如果出现分料现象，则粒度分布就失去均一性，就会出现品质不合格的产品，因而在下一个操作中就会引起异常现象。容易引起偏析的粉体，多数是流动性好的粉体，而Carr流动点在60以上的粉体。

关于偏析的机理，Matthee¹¹⁾、Zenz¹²⁾、Van Denburg¹³⁾等人有过文章。而作者根据偏析的机理将其分为：附着偏析、填充偏析和滚落偏析三种。作者认为按这种分类来考虑对策是不会错的。图6是偏析的几种典型，(a)是在沉降时粗细粒分离，此时微粉在壁上附着很厚一层，由于振动或其它外力作用，这个层可能引起剥落，从而产生粒度不匀的粉体。特别是沉降速度和布朗运动速度相等、粒度又在几个微米以下的微粉以及带静电的微粉这种偏析倾向就会更强。

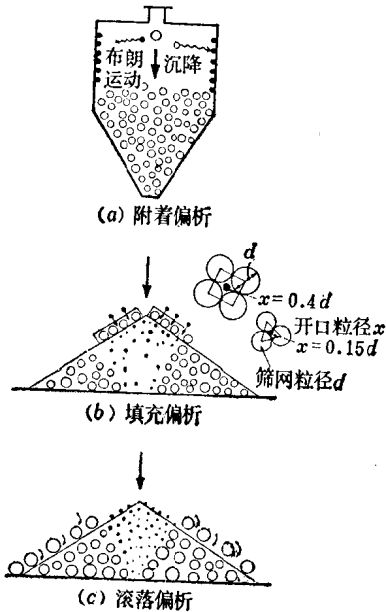


图6 偏析的形态

(b)是在倾斜状堆积层移动时的情况，遇到这种情况还是很多的。这时充填状态下的粗粒子会有筛分作用，小粒子从间隙中漏出而被分离出来。此时若粒子填充状态致密，微粉直径是大粒子（起筛子作用的粒子）的1/10以下时，微粉就可以漏出。但是填充疏松时很大粒子也会流下而被分出。因此，将过程搞成脱气相当充分、物料密实、给料速度又很大，这时作为筛网作用的粗粒也会很快流下来，这种作法可作为制止偏析现象的