

0345
4441

高等学校试用教材

散 体 力 学

太原重型机械学院 黄松元 编



机械工业出版社

前 言

本书是根据1987年5月在苏州召开的起重运输机械与工程机械专业教学指导委员会确定的教材编写规划和1987年底议定的散体力学教材编写大纲编写的。

本书着重阐述了散体力学的基本理论、力学模型、力学性质、散粒体在静力和交变力作用下的应力状态、散粒体的起拱和消除措施以及散粒体的模拟理论和应用等，最后列举了应用散体力学理论解决起重运输与工程机械设计问题的若干示例。

本书为起重运输机械与工程机械专业本科生及研究生的教材，同时也可供从事散料设备设计、使用和维护人员参考。

本书由上海交通大学洪致育教授主审。上海交通大学范祖尧教授、谢明军副教授对全稿亦进行了审阅，并提出了宝贵的意见。本书的编写还得到许多同志的支持和帮助，太原重型机械学院任雪珍同志提供全书插图，在此一并表示感谢。

限于编者的水平和时间及收集资料的困难，书中定有许多不妥之处，敬请读者批评指正。

编者 1992年6月

目 录

绪论	1	二、非极限平衡状态与极限平衡状态	13
§ 0-1 散体力学研究的任务	1	三、滑移表面	13
§ 0-2 散体力学的计算模型	1	§ 2-4 散粒介质的弹性及塑性变形	13
第一章 散粒体及其物理特性	3	一、弹性变形过程	13
§ 1-1 散粒体简介	3	二、塑性变形过程	14
一、定义与特征	3	三、弹性变形与塑性变形的物理概念	15
二、散粒体分类	3	§ 2-5 极限切应力	15
三、连续介质的假定	3	一、极限切应力与正应力关系	15
§ 1-2 散粒物料的颗粒组成和粒度	4	二、各种散粒物料的极限切应力曲线	16
一、定义	4	三、极限切应力线图说明	16
二、颗粒组成的测量方法	4	§ 2-6 侧压应力系数	17
三、散粒物料的粒度	4	一、定义	17
§ 1-3 孔隙率和湿度	5	二、理想散粒物料的侧压应力系数	18
一、孔隙率	5	三、理想物料的 $n_{\min}$ 、 $n_{\max}$ 值求解	19
二、孔隙比	5	四、侧压应力系数讨论	20
三、湿度	5	§ 2-7 散粒介质的滑移面	21
§ 1-4 堆积密度和堆积重度	6	一、滑移面倾角	21
一、静堆积密度和重度	6	二、主动与被动破坏的滑移线	22
二、压实后堆积密度	6	§ 2-8 散粒体主应力迹线	23
§ 1-5 流动性和堆积角	8	一、定义	23
一、流动性	8	二、主应力迹线	23
二、堆积角	8	§ 2-9 散粒体应力状态的变化	24
§ 1-6 磨损性和磨蚀性	8	一、应力状况的弹性变化	24
一、磨损性	8	二、应力状态的塑性变化	25
二、磨蚀性	8	三、过渡状态的应力圆	26
§ 1-7 粘结性和冻结性	8	第三章 散粒体静力学	27
§ 1-8 其它特殊性能	8	§ 3-1 散粒体的形成过程	27
第二章 散粒体的力学性质	10	一、散粒体的界面	27
§ 2-1 作用在散粒体上的质量力和表面力	10	二、基本的形成过程	27
一、质量力	10	§ 3-2 等高度无边界层的压应力	27
二、表面力	10	一、利用撒料形成水平物料层时的侧压	
§ 2-2 散粒体平面应力状态	10	应力	28
一、散粒体空间应力	10	二、去掉物料层上部分后形成的水平物	
二、散粒体平面应力	11	料层的侧压应力	28
三、莫尔应力圆	11	三、倾斜平面上无边界层的侧压应力	30
§ 2-3 散粒体的极限平衡	12	§ 3-3 散粒体的自由表面	32
一、极限平衡条件	12	一、自由表面的平衡条件	32

二、外摩擦系数与内摩擦系数的关系	32	二、气动法	54
三、堆积角 α 与底板倾角的关系	33	三、机械振动法	54
§ 3-4 宽型容器侧壁和底部的压应力	34	第五章 散粒体在交变力作用的应力	
一、作用力的分析	34	状态	56
二、作用力的计算	35	§ 5-1 概述	56
§ 3-5 窄而高容器侧壁和底部的压应力	36	一、动力现象	56
一、摩擦力作用在散粒体上、方向向上的情况	36	二、弹性波效应	56
二、摩擦力作用在散粒体上、方向向下的情况	38	§ 5-2 散粒体的垂直振动	57
三、作用于散粒体的摩擦力在周边的一部分区域内方向向下, 在周边的另一部分区域内则方向向上	39	一、垂直压应力	57
§ 3-6 支承平面上的压应力	40	二、侧压应力	57
一、支承平面上的压应力分布	40	三、极坐标应力变化图	58
二、料堆中心处的压应力	41	四、垂直振动对自然坡角的影响	58
§ 3-7 存仓壁压应力的一般计算	42	§ 5-3 散粒体的水平振动	59
一、静力的一般计算	42	一、水平振动特点	59
二、动力的一般计算	43	二、最大切应力	59
§ 3-8 局部压应力传递区	44	三、水平振动时的侧压应力和最大切应力	60
一、 $\sigma_i \leq \sigma_a/n_{min}$ 的情况	44	第六章 散粒体的孔口排料	61
二、 $\sigma_i > \sigma_a/n_{min}$ 的情况	45	§ 6-1 概述	61
§ 3-9 存仓闸门上的作用力	46	一、排料形式分类	61
一、闸门上的最大作用力	46	二、排料过程	61
二、闸门上的平均作用力	46	§ 6-2 “标准”排料形式的速度计算	62
三、推荐的计算式	47	一、理想物料	62
第四章 散粒物料的成拱	48	二、粘性物料	62
§ 4-1 概述	48	三、水力半径 R	62
§ 4-2 成拱理论简介	48	§ 6-3 “液体”流排料形式的速度计算	63
§ 4-3 无限长缝隙型孔的成拱	49	一、排料孔作中心对称布置	63
§ 4-4 圆形孔上的成拱	50	二、排料孔作侧向布置	63
§ 4-5 任意形状孔的成拱	50	§ 6-4 存仓的卸料能力	63
§ 4-6 拱形曲线	52	一、存仓卸料能力 Q 的计算	63
§ 4-7 存仓壁的倾角对成拱的影响	53	二、存仓卸空时间	64
§ 4-8 防止成拱的方法	53	§ 6-5 影响存仓排料能力的因素	64
一、加大存仓壁的倾角	53	一、排料孔的形状和尺寸	64
二、采用不对称形状存仓	53	二、排料速度	64
三、排料孔位置沿垂直壁设置	54	三、存仓底部倾角	66
四、加大排料孔尺寸	54	四、颗粒形状和颗粒尺寸	66
五、在排料孔上方装设挡板	54	五、散粒物料的内摩擦	66
§ 4-9 消除成拱的方法	54	六、排料孔的尺寸与物料粒度的比值	66
一、机械搅拌法	54	第七章 相似与模拟	67
		§ 7-1 概述	67
		一、模拟方法的步骤	67
		二、模拟参数	67
		§ 7-2 模拟理论	67

一、几何相似.....	67	第八章 散体力学应用举例	75
二、材料相似.....	68	§ 8-1 抓取过程中散粒体作用在抓斗上	
三、动力相似.....	68	的力	75
§ 7-3 理想物料的量纲分析	69	一、与颚板尺寸有关的阻力 F_1	75
一、量纲方程.....	69	二、切割物料沿颚板斜面移动的阻力 F_2	76
二、压应力量纲方程.....	70	三、抓取过程中物料堆被动力形成的阻	
三、速度量纲方程.....	70	力 F_3	78
四、输送能力量纲方程.....	71	§ 8-2 水平埋刮板输送机料层高度及刮板	
五、牵引张力量纲方程.....	71	节距的计算	78
六、功率量纲方程.....	71	一、输送物料流的高度计算.....	78
§ 7-4 粘性物料的量纲分析	72	二、刮板节距的计算.....	80
一、压应力量纲方程.....	72	§ 8-3 推土板与散粒体的相互作用	82
二、排料速度量纲方程.....	73	§ 8-4 行走机构在散粒体上的运行阻力	83
三、块状物料排料速度量纲方程.....	73	参考文献	85
四、输送能力量纲方程.....	74		

绪 论

§ 0-1 散体力学研究的任务

散体力学是研究散粒体（散粒物料）的平衡和运动的一门学科。散体力学研究散粒体平衡的基本规律，散粒体与其它物体作用时的相互关系以及散粒体颗粒相互作用时的关系，研究散粒体与某固体装置发生相互运动时的速度分布、压力分布、能量损失及所产生的力和位移。

散体力学在许多工业技术中有着广泛的应用。起重运输技术中的各种输送机械、气力和水力输送装置以及各类取物装置的设计都离不开散体力学的基本原理。矿山机械中的采掘、洗选和装载，也必须应用散体力学的理论。工程施工中的挖掘、铲运、震实也与散体力学密切相关。其它诸如储仓技术中存仓的强度、刚度和排料口尺寸的设计等，更是散体力学的直接应用。

因此，散体力学确是许多工业部门必须应用和研究的一门学科。

§ 0-2 散体力学的计算模型

在散体力学研究中，为了满足实际工程的要求而又使问题简化，往往不直接应用所研究的材料对象，而是运用使它简化了的计算模型。目前在散体力学中有两种计算模型：整体的连续介质和粒状的非连续介质。

通常利用整体连续介质作为实际散粒体的主要计算模型，它具有抵抗拉力和剪力的能力，但不能超过本身内摩擦力和粘聚力的极限。这种计算模型称为粘性散粒介质。

没有粘聚力的介质称为理想散粒介质或无粘性散粒介质。它只具有抵抗剪力的能力。

自然界中所有的各种各样的散粒体，可分为理想散粒介质和粘性散粒介质，这主要取决于散粒体的基本联系特征。理想散粒介质的特征十分近似谷物、面粉、水泥、砂石和碎石土等散粒物料的性质。粘性散粒介质的特征，近似于有粘聚力胶结联系的散粒物料，如干燥状态的粘土和亚粘土等。

散粒体的另一种计算模型为粒状不连续介质，即由相互接触的、呈散状规则的固体颗粒组成的介质。这种介质可以是无侧压的和有侧压的。颗粒的相互作用服从于概率法则。

整体散粒连续介质模型的优点，在于它能够利用把应力看作内力强度的概念，并能够采用微分平衡方程式。利用关于连续性的假定，就可以用一个统一的计算模型代替所有各种各样的散粒体，而模型的性质可以用有限的由试验确定的常数来表征。如果整体连续介质模型得不到符合实际需要的精度结果，那么对它的论证还是不够的。

粒状非连续介质模型，考虑散粒体实际颗粒的组成结构，并根据静力学原理，研究单个颗粒及其总的状态。这种计算模型的优点是：它可以不受连续性假定的限制。

目前基本上还是利用把散粒介质作为整体连续介质的概念，并且在研究它的应力状态时，用沿着散粒体任意截面上连续分布的假想力，来代替作用在散粒体接触点上的实际力。

在很大程度上，正确地揭示散粒体的内部所发生的物理现象和规律，往往需要依靠试验，只有从试验中才能够得到包含在计算公式中的物理力学特性数据。由于散粒体中所发生的现象与过程一般比较复杂，而且过去对散粒体力学研究不够充分，这就更需要重视和加强实验研究。因此，散体力学是一门理论和试验并重的学科。

第一章 散粒体及其物理特性

§ 1-1 散 粒 体 简 介

一、定义与特征

散粒体是由许多不同形状、不同大小的固体颗粒所构成机械的混合物。通常表现为各种不同的松散物料，如砂堆、卵石堆、谷物、煤堆等。散粒体的物理性质介于固体和液体之间。

散粒体与固体不同。散粒体的颗粒具有流动性，仅在一定的范围内能保持其堆积形状，它不能承受或只能承受很小的拉力，但能承受较大的压力和剪力，并随着法向压力的增大而增强。

散粒体与液体也不同。液体具有很大的流动性，液体本身没有固定的形状，抵抗剪力的能力很小，但能向各个方向传递相等的压强。散粒体虽则也能向各个方向传递压强，但不相等。

散粒体是不同于固体和流体的一种散粒介质。

二、散粒体分类

散粒体按照它们的集态可分为粘性散粒体和无粘性散粒体。前者具有内摩擦力和粘聚力（初始抗剪力），后者只具有内摩擦力而无粘聚力。这种只具有内摩擦力的散粒体，称为理想的散粒物料。

三、连续介质的假定

散粒体是由固体颗粒组成的，颗粒与颗粒之间具有空隙。所以从微观角度看，散粒体并不是连续分布的物料。但是散体力学并不研究微小的单颗粒运动，而只研究散粒体整体的机械运动及其属性，同时在大多数情况下，散粒体的颗粒度与容器或工作装置的尺寸相比是很小的，因此可以把散粒体视为由无数连续分布的、各向同性的颗粒所组成的连续介质。这就是散粒体的连续介质的假定。

在散体力学中，将散粒体假定为连续介质，就可以用数理微分方程的方法，把散粒体作为统一的连续介质模型来处理，又由于散粒体颗粒与颗粒之间具有一定的强度来阻止散粒体变形，所以与材料力学中应力分析一样，可把作用于散粒体颗粒接触点上的作用力想像为连续分布于散粒体任意截面上的假想力，就可以通过研究散粒体内的应力，来研究散粒体的滑移和滑移前的平衡状态。

相对容器尺寸来说，含有线尺寸较大的大块颗粒的散粒体破坏了连续性的假定。因而影响到计算的精度。但如果不采用连续性假定，而采用统计力学的方法来研究散粒体的不平衡状态似乎更合理些，但这样却使问题更复杂难解了，而对实际工作来说，也并非是不必要的。

在实际工程技术中经常遇到的各种散粒物料，如煤、砂子、矿石、水泥、小麦、谷物等，都是典型的散粒介质，均可应用连续性假定来求解各个技术问题。下面首先讨论散粒物

料共有的物理性质。

§ 1-2 散粒物料的颗粒组成和粒度

一、定义

所谓散粒物料的颗粒组成，是指物料按其颗粒尺寸大小的分布情况所占试样质量的百分比。

每个颗粒一般具有三个方向的尺寸，颗粒的大小是以颗粒的最大尺寸来表示。如图1-1所示，颗粒的大小用最大对角线表示。

二、颗粒组成的测量方法

在确定散粒物料粒度组成时，并非要对散粒物料的每个颗粒进行测量，而是采用如下的两种方法。

1. 沉淀法 对于颗粒尺寸小于0.1mm的物料，可采用沉淀法确定物料的粒度组成。取物料试样，利用大小不同的物料颗粒在液体或气体中具有不同的沉淀速度这个物理特性，可得到各组不同大小物料颗粒质量所占试样质量的百分比。

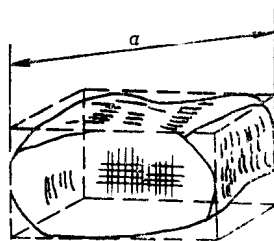


图1-1 颗粒的最大尺寸

2. 筛分法 对于颗粒尺寸大于0.1mm的物料，可采用筛分法确定物料的颗粒组成。取物料试样，顺利地通过一系列具有不同尺寸的标准筛孔（如图1-2所示），然后称量每一筛孔上物料质量所占试样质量的百分比。颗粒尺寸大于25mm时，应用有冲压孔的薄板筛孔进行筛选，颗粒尺寸小于25mm时，应用金属丝编制的筛子。

为方便起见，通常采用颗粒的分布状态曲线表示物料的颗粒组成，如图1-3所示。图中横坐标表示标准筛孔的尺寸，纵坐标表示颗粒尺寸按质量分布所占试样质量的累积百分比。

从图1-3中可以看出：最大颗粒尺寸 $a_{max} = 100\text{mm}$ ，最小颗粒尺寸 $a_{min} = 18\text{mm}$ ，图中 A 表示尺寸为 $0.8a_{max} \sim a_{max}$ ，亦即 $A = (0.8a_{max} \sim a_{max})$ ，称为最大物料块组，由图中得知 $A = 80 \sim 100\text{mm}$ 。

求得散粒物料的颗粒组成后，即可应用它求散粒物料的粒度。物料的粒度用所谓的“最大典型颗粒尺寸 a' ”来表示。

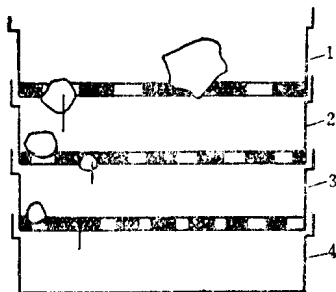


图1-2 散粒物料筛分

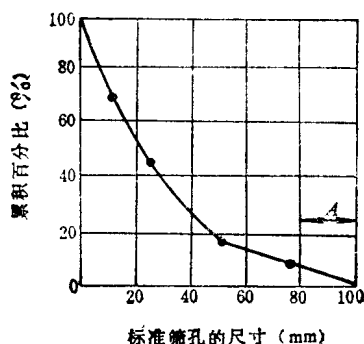


图1-3 颗粒分布状态曲线

三、散粒物料的粒度

最大典型颗粒尺寸 a' 的表示法分两类：

1. 预选物料 a' 的表示法 当散粒物料的最大颗粒尺寸 a_{max} 与最小颗粒尺寸 a_{min} 之比小于2.5时, 这种物料称为预选物料, 其最大典型颗粒尺寸 a' 以颗粒的平均尺寸表示, 即

$$a' = \frac{a_{max} + a_{min}}{2}$$

2. 原装物料 a' 的表示法 当散粒物料的最大颗粒尺寸 a_{max} 与最小颗粒尺寸 a_{min} 之比大于2.5时, 这种物料称为原装物料。对于原装物料, a' 的表示法有两种: 1) 当最大物料块组 A 本身的质量大于所取试样质量的10%时, 取最大典型颗粒尺寸 $a' = a_{max}$; 2) 当最大物料块组本身的质量小于所取试样质量的10%时, 取 $a' = 0.8a_{max}$ 。

散粒物料按粒度大小进行分类, 列于表1-1。

表1-1 散粒物料按粒度大小的分类

类别名称	最大典型颗粒尺寸 a' (mm)
大块物料	160以上
中块物料	60~160
小块物料	10~60
小颗粒物料	0.5~10
粉末状物料	小于0.5

§ 1-3 孔隙率和湿度

一、孔隙率

散粒物料由不同形状和大小的颗粒组成, 颗粒与颗粒之间存有间隙, 这种间隙称为孔隙。一定容积中孔隙体积与总体积 (物料体积与孔隙体积之和) 之比称为孔隙率。孔隙率 n 表示为

$$n = \frac{V_0}{V_1 + V_0}$$

式中 V_0 ——孔隙体积;

V_1 ——固体物料体积。

散粒物料的孔隙率与它的颗粒尺寸、颗粒形状、颗粒的相互位置及所受的压力有关。

二、孔隙比

孔隙体积与固体物料体积之比称为孔隙比。孔隙比 ε 的表示式

$$\varepsilon = \frac{V_0}{V_1}$$

孔隙率与孔隙比之间存在如下关系

$$n = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad \text{或} \quad \varepsilon = \frac{n}{1 - n}$$

三、湿度

散粒物料的孔隙, 充满了空气和水分。孔隙的水分可以是结构水、吸附水和表面水。

结构水是水与物料颗粒以化学化合方式联系在一起。吸附水是物料颗粒从周围空气中吸

收来的。表面水是颗粒表面上的水膜或充填在物料颗粒间的自由空间的水。

含有表面水的物料，称为潮湿物料。

当散粒物料长期露天存放，其表面水蒸发，仅留下结构水和吸附水，在这种状态下的物料称为风干物料。仅含有结构水的物料称为干燥物料。

用蒸发水的质量与固体颗粒质量之比来计算物料的湿度

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2}$$

式中 W ——物料的湿度；

m_1 ——物料在风干前的质量；

m_2 ——物料在风干后的质量。

§ 1-4 堆积密度和堆积重度

一、静堆积密度和重度

堆积密度是指散粒物料在松散状态下单位体积的质量，其单位是 kg/dm^3 或 t/m^3 ，用 $\rho_{\text{堆}}$ 表示。

堆积重度是指散粒物料在松散堆积状态下单位体积的重力，其单位是 N/dm^3 或 kN/m^3 ，用 $\gamma_{\text{堆}}$ 表示。

二、压实后堆积密度

在松散状态下的散粒物料受振动或动载荷后将被压实。压实后的散粒物料堆积密度 ρ 与松散状态的堆积密度 $\rho_{\text{堆}}$ 是不同的，两者之比称为压实系数。对于各种不同的散粒物料，这一系数值多在 1.05~1.52 的范围内变动。散粒物料根据堆积密度 $\rho_{\text{堆}}$ 进行分级，列于表 1-2 中。

表 1-2 散粒物料按堆积密度 $\rho_{\text{堆}}$ 分级

级 别 名 称	堆 积 密 度 $\rho_{\text{堆}}$ (t/m^3)
轻级散粒物料	$\rho_{\text{堆}} \leq 0.8$
中级散粒物料	$0.8 < \rho_{\text{堆}} \leq 1.6$
重级散粒物料	$\rho_{\text{堆}} > 1.6$

散粒物料的堆积密度还与颗粒的形状、大小、孔隙率和湿度有关。

各种干燥散粒物料的堆积密度列于表 1-3。

表 1-3 各种干燥散粒物料的堆积密度 (t/m^3)

物 料 名 称	堆 积 密 度	物 料 名 称	堆 积 密 度
普通煤、褐煤	0.8~0.85	甩干的泥煤	0.33~0.41
无烟煤	0.8~0.95	煤泥	0.55~0.65

(续)

物 料 名 称	堆 积 密 度	物 料 名 称	堆 积 密 度
甩干的褐煤	0.65~0.75	砾石混凝土	2.3
煤泥	0.75~1.0	生石灰、湿松泥土	1.7~1.8
渣	0.6~0.9	粉状熟石灰	0.5
机制煤球	1.0~1.1	块状熟石灰	2.0
焦炭	0.36~0.53	石灰石和碎石	1.6~2.0
硬本木炭	0.19~0.25	小块石灰石	1.2~1.5
软本木炭	0.13~0.17	粘土	1.8~2.0
褐铁矿	2.1	干的小块粘土	1.0~1.5
矿石	1.1~3.5	砾石	1.5~1.9
矿渣水泥	0.9~1.2	干碎石	1.8
波特兰水泥	1.3~1.6	湿碎石	2.0
硝酸盐	1.0~1.6	重晶石	2.9
苏打	0.67	黑麦	0.68~0.79
硫磺	2.0	燕麦	0.4~0.5
碎矾石、干松泥土	1.28	刨花、木屑	0.2~0.3
碎玻璃	1.3~1.95	大豆、玉米	0.7~0.8
碎石英	1.45~1.6	豌豆	0.3
碎石膏	1.3~1.6	棉籽	0.4
白垩土	2.5	甜菜	0.57~0.7
高炉炉渣	0.6~1.0	马铃薯	0.65~0.73
干灰	0.4~0.6	粟、谷子	0.85
湿灰	0.7	面粉	0.5~0.64
块盐	0.72~0.9	糠	0.25~0.3
干的细盐	1.0~1.3	麦芽	0.55
湿的盐	1.2~2.2	葵花籽	0.42
粗粒食盐	1.02	干的细砂	1.4~1.65
细粒食盐	0.75~0.79	湿的细砂	1.9~2.05
砂糖	0.72~1.1	不同湿度的大粒砂	1.4~1.9
小麦	0.7~0.83	自由填装的造型砂	1.15~1.3
大麦、麦种、亚麻种子	0.85~0.75	摇振后的造型砂	1.3~1.5
水泥的烧结块	1.28~1.52	捣固后的造型砂	1.45~1.6
混凝土	2.4	旧型砂	1.25~1.3
矿渣混凝土	1.8		

§ 1-5 流动性和堆积角

一、流动性

物料的流动性是散粒物料的重要特性之一。影响流动性的因素很多，其中有内摩擦力、粘聚力、堆积密度及物粒颗粒间所含空气的多少。物料的内摩擦力和粘聚力愈小、堆积密度愈小以及物料所含空气量愈多，则物料的流动性愈好。

二、堆积角

所谓堆积角是指散粒物料自由堆积在水平面上，且保持稳定的锥形料堆的最大堆角，即物料的自然坡度表面与水平面之间的夹角称为最大堆积角，用 ϕ 表示。堆积角 ϕ 的值与散粒物料的流动性有关，散粒物料的流动性愈好，堆积角就愈小。

形成散粒物料的堆积角有两种情况：一种是底平面保持静止时的静堆积角 ϕ_n ，另一种是底平面运动时的动堆积角 ϕ_d 。根据大量的试验资料，可近似取 $\phi_d = 0.7\phi_n$ 。

§ 1-6 磨损性和磨蚀性

一、磨损性

散粒物料在运动时，与其接触的固体表面被磨损的性质称为物料的磨损性，以被接触材料表面的相对磨损量来标定。

二、磨蚀性

散粒物料的尖锐棱边，在运动时对与其接触的固体表面产生机械损坏（如击穿、撕裂等）的性质称为物料的磨蚀性。

譬如，没有杂物的煤炭是无磨损性的物料，但煤块从较高处装落到胶带上时，胶带有时会被煤的尖锐棱边击穿、撕裂造成机械损坏。在这种情况下导致胶带迅速损坏的原因是煤的磨蚀性，而不是煤的磨损性。

§ 1-7 粘结性和冻结性

某些散粒物料在长期存放的情况下，失去其松散性质而聚集成团，物料的这种性质称为粘结性。某些散粒物料，只是在超过正常湿度下才粘结，而在干燥状态下不出现粘结，或呈现较弱的粘结。但是在所有情况下，随着散粒物料堆积层不断地增高，下层所承受的压力不断地增大，其粘结的可能性也就不断增大。

潮湿的散粒物料在低温情况下能冻结成块的性能叫冻结性。在冬季，很多散粒物料都具有冻结性。

§ 1-8 其它特殊性能

散粒物料除上述主要的物理性能外，有时还需考虑其它一些特殊性能，如爆炸危险性、自燃性、有毒性、腐蚀性、破碎性和缠绕性等。

除了爆炸物料本身有爆炸能力外，有的物料彼此互相混合能产生爆炸，如硝酸钾、硝石等，有些物料能分离出粉尘，容易燃烧引起爆炸，如煤的粉尘、粮食粉尘等。在物料颗粒剧烈运动的区域内，应尽量消除含有空气的容积空间，不允许基本物料的颗粒与别的物料混合，应严格遵守各种操作准则，以实现装置的安全运转。

具有小剂量毒性的物料，如蓖麻籽、铅氧化物等，都属于有毒的物料，在设计输送这些物料的工作装置时，必须力图保证其完全的气密性。

物料的其它特殊性能，在设计输送工作装置时，均应予以考虑。

第二章 散粒体的力学性质

§ 2-1 作用在散粒体上的质量力和表面力

在讨论散粒体平衡之前，我们先分析一下作用在散粒体上的力。这些力可以分为两类：质量力和表面力。

一、质量力

某种力场作用在散粒体全部颗粒（全部体积）上的力，称为质量力。它和散体的体积成正比。例如在重力场中由地球对散粒体全部颗粒的引力作用所产生的重力；磁场和电力场对磁性颗粒或带电颗粒所产生的磁力和电力等。

二、表面力

作用在物料所取分离表面上的力或作用在散粒体约束表面上的力，称为表面力。散粒体的压力和切应力，是研究散粒体平衡和滑移时经常遇到的两种表面力。如前所述，散粒体含有表面水时，颗粒表面的水膜具有表面张力，它是一种特殊类型的表面力，它不是接触面以外的物质作用的结果，而只是由表面层分子吸收所产生的。

若质量力与表面力相比，小到足以忽略不计的程度，则散粒体称为无重力作用的介质，而除此以外的其它情形，通称为有重力作用的介质。

§ 2-2 散粒体平面应力状态

如果通过受力散粒体的任意一点作不同方向的截面，那么该点在各个截面上的应力一般是不同的。散粒介质任意一点的各个截面上所作用的正应力和切应力，通常称为散粒介质在该点的应力状态。

一、散粒体空间应力

在任何应力状态下，都有三个互相垂直的平面，若在这三个平面内只有正应力而无切应力时，这些表面称为应力状态的主平面。垂直于主平面的轴线称为主轴线。作用在主平面的正应力称为主应力。主轴线用 x 、 y 、 z 表示，主应力用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示（见图2-1），取关系式 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，压应力取正号。为了以后叙述方便，包含某个矢量 i 和 j 的平面，将称为平面 $i-j$ 。

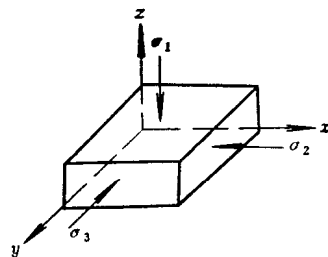


图2-1 作用于散粒体的主应力

由散粒体中分割出来的平行六面单元体，可以建立六个平衡方程式

$$\left. \begin{aligned} \Sigma F_x + \Sigma \sigma_x + \Sigma \tau_x &= 0 \\ \Sigma F_y + \Sigma \sigma_y + \Sigma \tau_y &= 0 \\ \Sigma F_z + \Sigma \sigma_z + \Sigma \tau_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

$$\Sigma M_x = 0$$

$$\Sigma M_y = 0$$

$$\Sigma M_z = 0$$

式中 F_x 、 F_y 、 F_z ——作用在散粒体颗粒上的质量力在任一坐标轴 x 、 y 和 z 上的投影；

σ_x 、 σ_y 、 σ_z ——作用在散粒体表面的正应力投影；

τ_x 、 τ_y 、 τ_z ——作用在散粒体同一表面的切应力投影；

M_x 、 M_y 、 M_z ——作用在散粒体上的力矩在坐标轴 x 、 y 、 z 的分量。

如果将散粒体的平衡作为空间问题处理，会使计算十分复杂。在散体力学中，常将空间应力问题简化为平面应力问题。

二、散粒体平面应力

为了求解散粒介质的平面应力问题，通过任一点取一单位高度的棱柱体(见图2-2)。顶点为 a 、 b 、 c 。使 ab 、 bc 边与主应力 σ_1 及 σ_2 的平面重合，然后求 ac 边上的正应力 σ 与切应力 τ 。

设 ac 斜截面面积为 (ac) ，则 ab 面面积和 bc 面面积分别为 $(ab) = (ac)\sin\alpha_1$ 和 $(bc) = (ac)\cos\alpha_1$ 。根据力的平衡原理， abc 角柱体上的所有力在 ac 截面法线方向的投影和为零，得出

$$(ac)\sigma - (ab)\sigma_2\sin\alpha_1 - (bc)\sigma_1\cos\alpha_1 = 0$$

以 (ab) 和 (bc) 值代入，则

$$\sigma = \sigma_1\cos^2\alpha_1 + \sigma_2\sin^2\alpha_1 \quad (2-2)$$

同理， abc 角柱体上所有的力在 bc 截面切线方向投影和为零，得出

$$(ac)\tau + (ab)\sigma_2\cos\alpha_1 - (bc)\sigma_1\sin\alpha_1 = 0$$

化简得

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\sin 2\alpha_1$$

由式(2-2)、式(2-3)可以看出，斜面上的应力随截面的倾斜角 α_1 而改变。因此，利用式(2-2)、式(2-3)就可求得在任意倾斜角 α_1 截面上的应力 σ 和 τ 的值，从而完全解决平面应力问题。

除了利用上述解析法求平面应力外，还可利用莫尔应力圆和极坐标应力图法求平面应力 σ 和 τ 的值。

三、莫尔应力圆

莫尔应力圆的方法是图解法的一种，如图2-3所示。

应用这种方法时，沿横坐标取线段 σ_1 (点1) 和 σ_2 (点2)，以线段1-2为直径作圆，而后自点1沿圆周量中心角 $2\alpha_1$ 的一段圆弧，这样求得的 C 点的横坐标将为斜截面上的正应力 σ ， C 点的纵坐标将为同一斜截面上的切应力 τ 。该斜截面与最大主应力 σ_1 作用面的倾斜角为 α_1 。实际上，由图2-3得

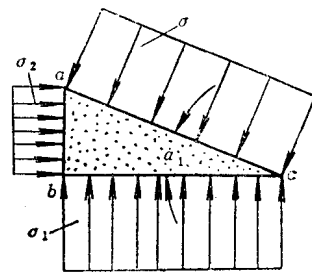


图2-2 单元角柱体的平衡简图

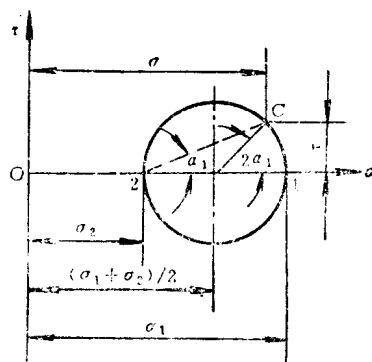


图2-3 莫尔应力圆

