

内部资料
注意保存

对外科技交流资料选编

1983—1984

(三)

中国农业机械化科学研究院

中国农业机械学会

一九八四年十月

目 录

第 一 篇

第一章 散状物料的流动性	(1)
一、流动性的定义及意义.....	(1)
二、内摩擦角及破坏包络线.....	(2)
三、破坏包络线的测定.....	(3)
四、崩溃函数或流动函数.....	(6)
五、附着与凝聚力的测定.....	(7)
六、休止角的测定.....	(10)
七、根据流速表示流动性.....	(15)
八、用散状物料充填性表示的流动性.....	(18)
九、流动性的综合表示法—卡尔流动指数.....	(20)
第二章 关于散状物料内摩擦系数和剪切过程的研究	(25)
一、绪言.....	(25)
二、以往的研究概况.....	(25)
第三章 单面剪切试验测定散状物料内摩擦系数的正确方法	(29)
一、绪言.....	(29)
二、试验装置、方法和散状试料.....	(29)
三、试验结果与分析.....	(30)
四、结论.....	(39)
第四章 定容积单面剪切试验散状物料的内摩擦系数	(40)
一、绪言.....	(40)
二、试验装置、试验方法和散状试料.....	(40)
三、试验结果及分析.....	(42)
四、结论.....	(47)
第五章 单面剪切试验测定散状物料的内摩擦系数	(49)
一、绪言.....	(49)
二、试验装置、方法、测定条件和散状试料.....	(49)
三、各种散状物料的破坏包络线 ($\sigma_{z,w}-\tau_{x,\max}$ 关系和 $\sigma_{z,w}-\tau_{x,s}$ 关系) 的测定 结果及分析.....	(50)
四、测定条件对各种散状物料内摩擦系数的影响及其分析.....	(52)
五、修正破坏包络线和修正内摩擦系数的计算与分析.....	(54)
六、结论.....	(57)

第六章 以单面剪切测试潮湿散状物料的内摩擦系数及剪切附着 力	(58)
一、前言	(58)
二、试验装置、试验方法及散状试料	(58)
三、实验结果及分析	(59)
四、结束语	(65)
第七章 散状微粉的滑动摩擦特性及流动性	(68)
一、绪言	(68)
二、实验装置、实验方法及粉体试料	(68)
三、结果及分析	(69)
四、结束语	(74)
第八章 定载荷单面剪切微粉试验时的垂直应力分布和内摩擦系 数	(76)
一、绪言	(76)
二、试验装置、方法和散状物料微粉试料	(76)
三、试验结果与分析	(78)
四、结论	(84)
第九章 散状物料的破坏过程及拉伸强度	(86)
一、前言	(86)
二、试验装置、方法及散状试料	(86)
三、结论与分析	(87)
四、结束语	(91)
第十章 双重圆筒式内筒回转型剪切试验机中环型散状物料充填 层底压和侧压的测定	(92)
一、绪言	(92)
二、试验装置、试验方法和粉体试料	(92)
三、试验结果	(93)
四、比较分析	(98)
五、结论	(102)
第十一章 双重圆筒式内筒回转型剪切试验机测定散状物料剪切 应力和内摩擦系数的结果及其评价	(104)
一、绪言	(104)
二、测定装置、测试方法和散状试料	(104)
三、试验结果及其分析	(105)
四、结论	(111)
第十二章 混合、揣合的基础知识及机械选择	(112)

一、混合、揣合的基础知识	(112)
二、混合、揣合设备的选择和附属设备	(122)

第 二 篇

第一章 散状物料混合理论及应用	(126)
------------------------	-------

一、散状物料的混合	(126)
二、散状物料的揣合	(136)

第二章 混合机及揣合机分类	(140)
----------------------	-------

散状物料的混合	(140)
---------	-------

第三章 散状物料混合机的混合性能	(151)
-------------------------	-------

一、前言	(151)
二、散状物料混合的研究	(151)
三、混合室回转型混合机	(155)
四、混合室固定型混合机	(157)
五、流动化混合	(159)
六、稀释微量混合	(159)
七、微粉料的混合	(160)

第四章 散状物料和散状混合物的流动指数及混合应用	(162)
---------------------------------	-------

一、绪言	(162)
二、散状物料及散状混合物的流动性指数测定结果与探讨	(162)
三、混合试验	(168)
四、结论	(170)

第五章 间歇式螺旋环带型混合机其环带形状和大小对混合性能的影响	(171)
--	-------

一、绪言	(171)
二、实验装置, 试料和试验方法	(173)
三、实验结果	(173)
四、实验结果的总结和研究	(176)
五、结论	(178)

第六章 螺旋环带型搅拌机的混合性能	(179)
--------------------------	-------

一、绪言	(179)
二、试验装置、试料及试验方法	(179)
三、试验结果及分析	(180)
四、用混合速度系数整理其结果	(184)
五、结论	(186)

第七章 V型混合机的混合分析	(187)
-----------------------	-------

一、序言	(187)
------	-------

二、试验方法及装置	(187)
三、试验结果及分析	(189)
四、总结	(193)
第八章 混合物料粒径对各种混合机最佳使用条件, 混合均匀度及混合速度的影响	(194)
一、前言	(194)
二、试验物料	(194)
三、试验结果及分析	(195)
四、结论	(200)
第九章 散状物料的密度与粒径对各种混合机混合性能及最佳使用条件的影响	(201)
一、绪言	(201)
二、试验装置、方法及试料	(201)
三、试验结果及分析	(202)
四、结论	(208)
第十章 散状物料的流动性、比重对混合速度及混合均匀度的影响	(210)
一、前言	(210)
二、单一及混合试料流动指数和比重的测量及分析	(210)
三、混合试验	(213)
四、结论	(216)
第十一章 二维水平圆筒混合机混合不同密度物料的分级现象研究	(218)
一、前言	(218)
二、试验装置、方法及试料	(218)
三、物料密度对混合运动状态和混合机理的影响	(219)
四、混合试验结果及分析	(224)
五、结论	(229)
第十二章 各种因素对混合机混合速度系数的影响	(231)
一、绪言	(231)
二、各种因素对混合速度系数的影响	(231)
三、试验结果的整理与分析	(234)
第十三章 混合物料内摩擦系数对各种混合机混合性能的影响	(239)
一、前言	(239)
二、试验装置、方法及散状试料	(239)

三、试验结果与分析·····	(240)
四、结束语·····	(243)
第十四章 各种形状混合室混合机的混合分析·····	(244)
一、试验装置和试验方法·····	(244)
二、试验结果及分析·····	(245)
三、混合机的选用·····	(249)
第十五章 关于散状物料加工工艺流程的调查·····	(251)
一、前言·····	(251)
二、调查结果·····	(251)
三、结束语·····	(258)
第十六章 散状潮湿物料的拉伸强度对搅拌阻力的影响·····	(259)
一、前言·····	(259)
二、试验装置、方法及散状试料·····	(259)
三、结果与分析·····	(260)
四、结论·····	(263)
第十七章 揣合物料的搅拌阻力及拉伸强度·····	(264)
一、前言·····	(264)
二、试验装置及方法·····	(264)
三、试验结果及分析·····	(264)
四、结束语·····	(266)
第十八章 间歇式行星单螺旋型混合机的混合性能·····	(267)
一、绪言·····	(267)
二、试验装置及试验方法和条件·····	(267)
三、试验结果及其分析·····	(269)
四、结束语·····	(273)
第十九章 间歇式行星螺旋混合机内物料运动和混合过程·····	(275)
一、前言·····	(275)
二、试验装置及方法·····	(275)
三、摄影观察物料运动状态结果及分析·····	(277)
四、示踪剂食盐浓度分布与随混合时间的变化·····	(279)
五、混合过程试验分析·····	(280)
六、结论·····	(283)
第二十章 对搅拌机及物料混合过程的计算机模拟试验研究·····	(284)
一、概念·····	(284)
二、前言·····	(284)
三、随机数模型·····	(285)
四、循环模型·····	(290)

五、分离模型.....	(292)
六、结论.....	(297)
第二十一章 高速冲击式粉碎机的粉碎混合.....	(299)
一、序言.....	(299)
二、试验装置、方法，粒体试料以及混合均匀度的计算.....	(300)
三、试验结果与分析.....	(301)
四、结论.....	(306)

第 一 篇

第一章 散状物料的流动性

一、流动性的定义及意义

散状物料流动性的定义简单地讲就是散状物料的流畅程度。但是，只用流体粘度系数（或非牛顿流体可见粘度）是不能定量表示的。由于散状物料的状态或者处理方法的不同，流动性的表现也不同。如果不根据相应的要求去定量测定分析，也就没有意义了。例如，在重力作用下的流速，如后述，可以定量表示流动性。但是，流速大的物质不一定在任何条件下流动性都是好的。在休止角方面，虽然可以说种类相同或者类似的散状物料休止角越小的物质流动性也就越好。但是在不同的散状物料之间也有相反的情况。所以仅仅用休止角还不能完全说明物料的流动性的好坏。总之，根据散状物料处于不同的状态，得出散状物料的流动状态也就不同。例如，打开容器底部出口或排料口等使容器内部的物料很快流空时，那么流速大的物质就认为流动性好。但是，散状物料再通过漏斗等均匀补充到密封的容器时，流速的均匀性便成为更重要的要素了。因而，测定散状物料的流动性首先要考虑它处于什么样状态以及采用什么操作方法，然后再选择相适应的状态（不限于一种方法），用相适应的方法来测定。表1就是用这个观点来粗略分类的。

散状物料的流动形态，如表1所示，分为重力流动、机械强制流动、振动流动、压缩流动和气力流动，并根据不同散状物料的运动状态或操作从右栏的内容来考虑。对这些状态及操作的流动性的表示，可直接或间接地进行分析，如果尚不充分可以把它列在表1最右栏。

表1 流动性的直观状态（及操作）的实例以及与其相对应的流动性的表现形式

种 类	现象及操作	流动性的表示
重力流动	从瓶、漏斗中流出，充填滑槽，砂计时器，旋转搅拌移动层	流速，壁面摩擦角，休止角，出口直径
机械强制流动	搅拌散状物料，链式输送机，螺旋输送机，台式送料器，带式混合机，旋转式输送机、挤压机	内摩擦角，壁面摩擦角，休止角，出口直径。
振动流动	振动送料器，振动输送，振动筛，充填，流出。	休止角，流速，压缩度，可见密度，

压缩流动	压缩成型（压片）	压缩度，壁面摩擦角，内摩擦角
气力流动	流动层，气力输送，空气活塞，通气振动干燥，气力搅拌。	休止角， u_{mf} ，通风阻力，可见粘度

归根结底，流动性是摩擦、附着凝聚、压缩性等基础力学的总和特性，散状物料的处理方法，状态以及相应的表现是各不相同的。因此，下面叙述最基本的摩擦特性及附着力的测定。并对流速、充满系数等的间接表示法及卡尔提出的综合流动指数做概要说明。

二、内摩擦角及破坏包络线

在散状物料层内加一垂直应力 σ ，假定在与 σ 垂直方向作用一剪切应力 τ ，当 σ 一定时，剪切应力 τ 增加到极限不再增加时，物料沿着 τ 的作用面产生滑动。这个面称为滑动面（二向应力状态的滑动线）。极限 τ 与 σ 有如库仑定律似的线性关系，因此称具有这种关系的散状物料为库仑物料。

$$\tau = \mu_i \sigma + c \quad (1)$$

式中： μ_i 内摩擦系数

c 附着力

但是，也有很多 σ 与 τ 间没有线性关系的散状物料，称为非库仑物料。一般库仑物料用下式表示。

$$\tau = \sigma \frac{\partial \tau}{\partial \sigma} + c(\sigma). \quad (2)$$

但法利（Farley）等人认为多数散状物料适用于下式：

$$\left(\frac{\tau}{c}\right)^n = \frac{\sigma T}{T} \quad (3)$$

式中： n —与流动性有关的指数， $n=1$ 时为库仑物料，即如公式（1）示。

T —散状物料层的纯抗拉强度，可由式（3）中 σ - τ 的关系中得知。

产生滑动时的 σ - τ 关系，不论是公式（1）还是公式（3），都是表示极限应力状态的莫尔圆的包络线，故称为破坏包络线（英文缩写为 YL ），这是从塑性力学角度定义散状物料流动性。

σ - τ 的极限应力状态叫做塑性平衡状态。只有在产生滑动或者崩溃的初期，式（1）、（3）才成立。在滑动面附近的颗粒层产生膨胀，剪切槽内颗粒产生运动。通常在这种状态下，散状物料层是非各向同性体。杰尼克（Jenike）把散状物料层在保持各向同性同时产生的连续滑动状态叫做“流动”，此时 σ 与 τ 的关系如图（1）示，通过原点经过各 YL 的终点 T_1 、 T_2 ……与莫尔破坏圆群连接成一直线。这直线与 σ 轴的夹角 δ 称为有效摩擦角。它是散状物料流动性的重要参数。

库仑物料在物料层内各处塑性平衡时，最大和最小主应力关系可参照图1。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \leq \frac{1 + \sin \varphi_i}{1 - \sin \varphi_i} + \frac{2 \cos \varphi_i}{\sigma_2 (1 - \sin \varphi_i)} \quad (4)$$

把不等号的范围叫做散状物料层的弹性状态。在流动状态时有如下式关系。与式（4）同时成立，

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1 + \sin \delta}{1 - \sin \delta} \quad (5)$$

因而成为：

$$C = \frac{\sigma_1 (\sin \delta - \sin \varphi_i)}{(1 + \sin \delta) \cos \varphi_i} \quad (6)$$

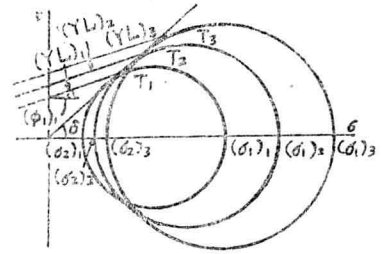


图1 破坏包络线YL与有效摩擦角 δ

三、破坏包络线的测定

根据以上所述，一般的方法是确定破坏包络线YL，来定量表示散状物料层的摩擦特性和附着性。

1. 三向挤压法

图2是试验装置的结构示意图。

将散状物料装入高约直径的2.5倍用薄橡胶制成的圆筒内，立置于加压室中，靠加压室中水的压力在径向给薄橡胶圆筒加一定的压力 P_2 。在这种状态下，若在轴向上不断增加压力，这个压力把 P_2 作为最小主应力，当达到相当于极限应力状态的最大主应力 P_1 的值时，由散状物料层内滑动而产生崩溃。因而，根据不同的 P_2 值求出相应的 P_1 值，就可以得出莫尔破坏圆群。所以按图3所示延伸圆群的包络线就能求出YL。按照最初的成型压力 P_0 。决定散状物料层的空隙率。因而，根据 P_0 的变化可获得各种空隙率的散状物料层的YL群。

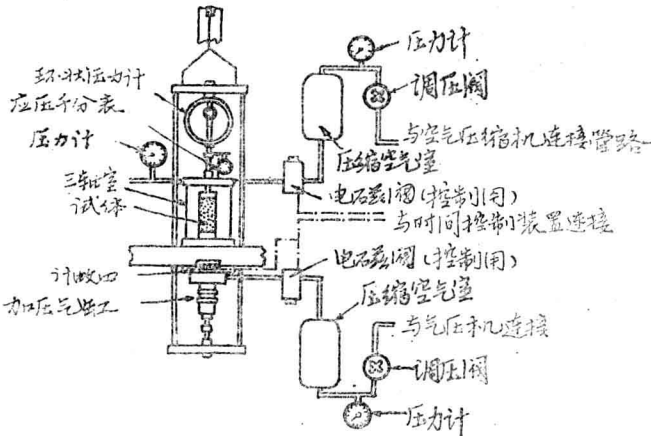


图2 三轴压缩试验装置

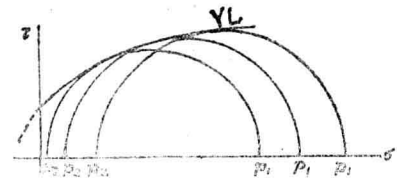


图3 莫尔破坏圆和YL

2. 单纯压缩法

按三向挤压试验的同样尺寸使附着散状物料成型，直立放置并在轴向进行压缩，测定其崩溃的压力。这个压力 f 。表示散状物料层的强度，就叫做单纯挤压破坏强度（unconfind

yield strength)。在这种状态，因为最小主应力为0，所以莫尔破坏圆就变成通过原点及 σ 轴上 f_c 点的圆。因为单纯挤压法仅能求出 f_c ，所以不能直接求出破坏包络线。但是若能测出滑动面的角度，就能确定破坏圆上剪切面极限应力状态的点，所以库仑物料用这个点接起来就可以决定 YL 。又，如果根据二分割槽测出的抗拉强度 T ，以公式(3)作为前提，就能决定 c 、 n ，图4中 P 点即能够表示溃崩面上的极限应力状态。在这个点有：

$$\tau = \frac{f_c \cos \phi_i}{2}$$

$$\sigma = \frac{f_c (1 - \sin \phi_i)}{2}$$

$$\frac{d\tau}{d\sigma} = \frac{\tau}{n(\sigma + T)} = \tan \phi_i$$

把它代入公式(3)为：

$$n = \frac{\cos \phi_i \cos \phi_i}{(1 - \sin \phi_i + 2T/f_c)} \quad (7)$$

图5是以散状物料层的各种空隙率 ϵ 测定重质碳酸钙(表面积直径 $\sim 8\mu$)的 f_c 、 ϕ_i 及 T 的结果。 f_c 因 ϵ 的变化而有明显的变化， T 也由于 ϵ 的增加了的同时而减少。但是，内摩擦角 ϕ_i 几乎没有变化。根据图5，用式(7)计算 n ，如表(2)示。可见剪切指数(shear index) n 越小其流动性就越好，对有附着性的微小颗粒散状物料， ϵ 越大，流动性越好，结果与以往的经验相吻合。

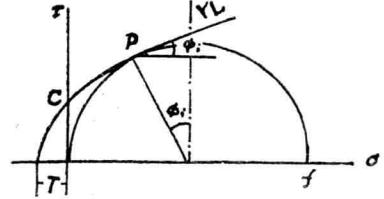


图4 单纯压缩试验的莫尔圆和 YL

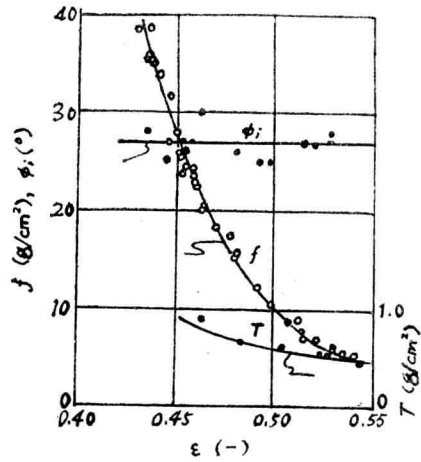


图5 重质碳酸钙的 f_c 、 ϕ_i 及 T

表2

剪切指数的计算值

$\epsilon(-)$	0.45	0.46	0.47	0.48	0.50	0.52	0.54
$f_c(\text{g/cm}^2)$	26.8	22.0	18.3	12.6	10.4	7.1	5.1
$T(\text{g/cm}^2)$	0.94	0.86	0.80	0.74	0.64	0.54	0.47
$n(-)$	2.84	2.80	2.76	2.646	2.616	2.506	2.397

3. 直接剪切法

这种方法通常是把散状物料放到具有上下两层的剪切槽里，给予垂直应力 σ ，随后把一个槽横向拉开，测定散状物料层剪切应力 τ ，以求 σ - τ 的关系。

一般圆形槽较多，为了做谷物等粗粒体的剪切试验，有的采取上槽固定，下槽可移动的构造。如图6。

特别是较细的散状物料剪切试验，需要把料均匀地充填在槽内并具有一定密度。杰尼克(Jenike)主张按下列程序进行。

1. 预压力 (Pre-Consolidation)

如7(a)图,把上下槽①、②稍微偏心叠合并在上层安上框子③,随后放入物料加压力 σ_c 放入恒温箱内。

(2) 预备变形

如图7(b),加 σ_c 后再给予剪切力 τ ,使上下槽恰好叠合。但在这种状态下,用比没有发生滑动界限的 τ 稍低的 τ 达到叠合,通过预备试验求出偏心程度是很有必要的。这是为了使槽内的散状物料应力均衡,按着偏心的位置加力使其变形,把上下槽重合成同心状态。用已加给的 σ_c 状态,给上槽微小角度进行多次往返扭曲运动,也能够达到这个目的。

(3) 剪切

完成以上工序后,去掉预压应力 σ_c ,卸下安装在上部槽的框子,扒掉槽表面的物料,使上面与槽表面达到一样平滑。给予比 σ_c 还小的垂直负荷 σ ,测定剪切应力 τ 。反复进行这样操作,(每一次都需要返回到最初的预压位置。最好预备几个同样槽使预压同时进行。)求得 σ - τ 关系,即 YL 。以 $\sigma = \sigma_c$ 作为这个曲线的终结。改变预压力反复进行同样实验就能取得图(8)那样和前所不同的 YL 。在各 YL 的终点,在 σ 轴上有圆心的 YL 并与莫尔破坏圆相切点,连接这些圆群的切线,并通过原点,得到有效摩擦角 δ 。

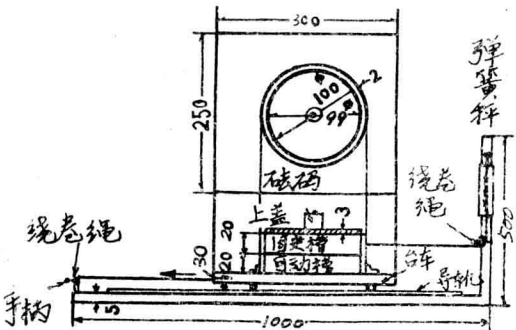


图6 粗粒用剪断试验装置

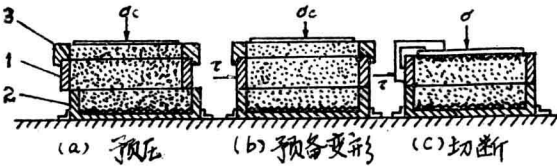


图7 直接剪断试验的顺序

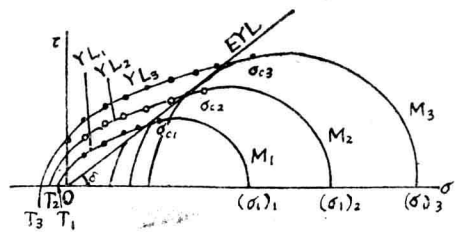


图8 破坏包络线

以上是杰尼克的单面剪切方法。实际上由于测定值的变动,未必能取得如图8所示那样明显的破坏包络群。

对于剪切元件的形状、尺寸、剪切速度的影响,虽有很多研究,但还没能制定出相应标准。主要问题是在上下测量元件间的表面,均匀进行剪切。为达到此目的,如图9示,还有在与剪切面成直角方向插入薄板,进行剪切试验的方法。可是很多研究人员多采用在上部加压力和把底部制成粗糙面的方法。另外,如图10所示把剪切元件制成圆环状的圆

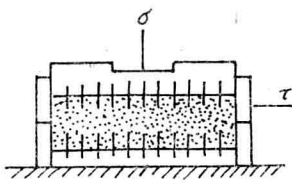


图9 设有叶片的剪切试验装置

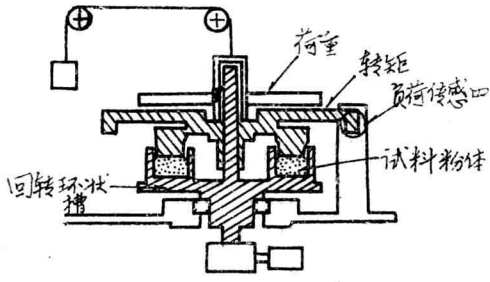


图10 环式剪切装置

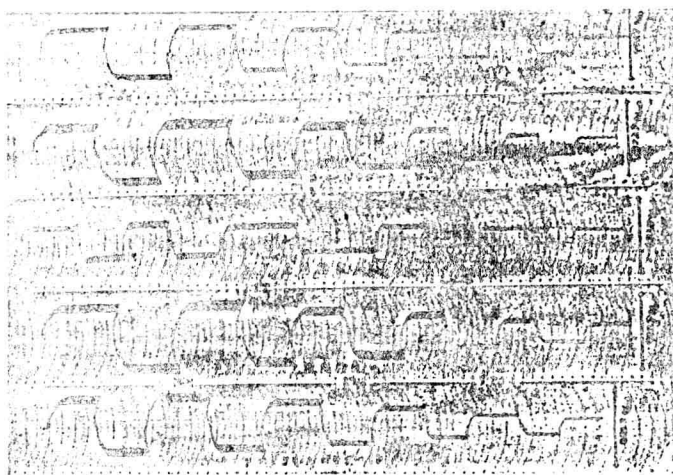


图11 根据剪切环测定结果

筒，这种方法的特点是剪切面发生滑动后剪切面积不变。从而给予一定的预压力时，因垂直载荷逐渐减少，故无需更换散状物料就可求得一条 YL 线。如果在预定的剪切面产生理想的滑动时，可求得动摩擦系数。图11就是根据剪切环测定的记录结果。

匀速转动下环槽，把作用于上环槽的转动力矩 M ，用电阻应变仪测定。用 $\tau = M / (2\pi/3) (R_2^3 - R_1^3)$ 求出。式中 R_1, R_2 为环状部的内半径和外半径。

四、崩溃函数或流动函数

如上述纯挤压强度 f_c 是按压应力 σ_c 即根据和它对应的最大主应力 σ_1 而变化。杰尼克对流动函数 FF (flow function) 给出如下定义：

$$FF = \frac{\sigma_1}{f_c} \quad (8)$$

对一定的 σ_1 如果挤压强度 f_c 小，流动性就好。所以 FF 是衡量流动性的一个函数，其值越大，流动性就越好。另外，威廉斯 (Williams) 等人认为：说成流动，还不如作为引起崩溃的临界状态一种特性，称为崩溃函数。

根据剪切试验求 YL ，画出通过 YL 终点并与之相切的应力圆求 σ_1 ，再通过原点，从与 YL 终点相切的应力圆求 f_c 。可是用这种方法求出的 σ_1, f_c 颇有误差。威廉斯等人提出在各 σ_1 值处直接求 f_c 的方法，这不外乎是纯挤压法，即使圆筒状散状物料层内产生均匀的轴向 σ_1 ，用 σ_1 把薄层物料边挤压边堆积的方法。

图12是笔者测定流动指数的一例。流动性最好的是氧化铝，其 FF 值最大。另外， FF 随 σ_c 增大而增大。（这种情况的产生是由于纯挤压所致，所以压实应力 σ_c 和最大主应力 σ_1 相等）即 f_c 。虽然与 σ_1 同时增加，但其增加速度不如 σ_1 快。图13是通过剪切槽求得的 f_c 与 σ_c 关系结果。据此，即是同样散状物料也由于不同的测定法，其流动指数也不尽一样。可以说，用环槽的方法比用杰尼克的方法，测定的流动性好。

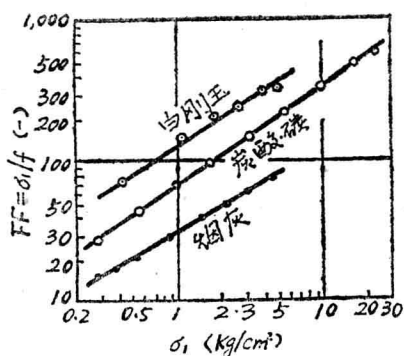


图12 流动因素测定例

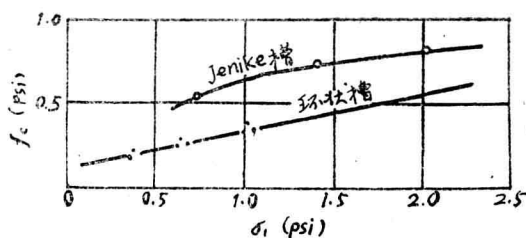


图13 由于测定法造成 f_c 差异

五、附着与凝聚力的测定

1. 附着、凝聚的机理

形成附着和凝聚的基本机理是分子间产生的力，表面张力及静电力。实际中这些力又很少单独存在。即便在理想条件下单纯计算某种力，往往也是没用的。要掌握整个附着和凝聚现象，有必要进行分类。鲁波夫 (Rumpf) 作分类如下：

(1) 物料结拱

散状物料结团就是由这个机理形成的。从流动性方面来看，对于贮藏操作是很重要的。还可详分如下：①烧结，②化学反应，③部分溶化，④结团粘合，⑤—1 溶解物质的结晶，⑤—2 胶质状悬浮微粒的沉淀。

结团现象是受温度、湿度、水分、压力等影响的同时贮藏时间是最关键因素。

(2) 因不自由流动粘合剂而造成的附着

这种粘合有高粘性粘合剂和30—50 Å以下厚度的吸附层。后者实际上是由于空气中的水分形成薄吸附层。因此，颗粒间相互容易接触，又因为极薄，分子之间引力不会降低。接触面积增加，也是影响附着和结团的一个因素。

(3) 液体结拱的毛细管负压及表面张力

(水膜力) 实际上散状物料的附着和结团现象主要是由于这些原因所致。散状物料遇到湿度高的空气，颗粒表面就吸着水分，吸附的水就在颗粒接触点或在最近的接点形成液桥 (liquid bridge, 略称液桥) 根据液桥而产生的粒子结合力，即在一个接触点的附着力(或聚力) F ，如图14示，在等径球粒间，用下式表示：

$$F = \pi D_p T \sin \beta \sin(\beta - \delta) + \frac{\pi}{4} D_p^2 T \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \sin^2 \beta \quad (9)$$

T 表示液体表面张力(常温的水是73达因/厘米)， δ 是接触角。这个公式是液桥在和颗粒接触部位切断时的情况，如果考虑在液桥的最狭窄部位切断时，应当用 R_2 代替式中的 $D_p \sin \beta$ 。加上重力及浮力的影响，如果微细颗粒时可以忽视这些。还有如果给定 D_p 及粒子间距离 a ，则根据液桥的体积可以决定 β ，所以，以 a/D_p 为参数，以式(9)可以求得无因次附着力 $FH = F/D_p T$ 与液体所占粒子间空隙的比例，即饱和度 S_L 的关系。鲁波夫等人对于 $\sigma = 0$ 的

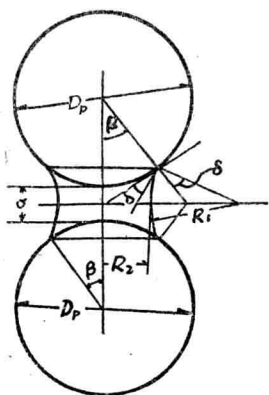


图14 等径球粒子间的液体架桥

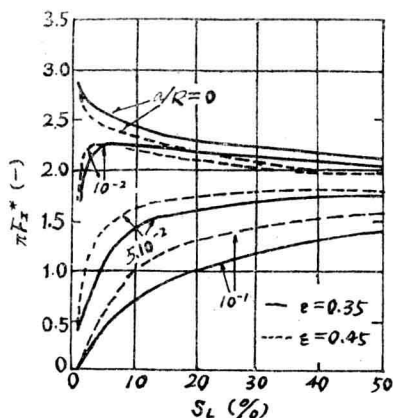


图15 饱和度和附着力

情况计算的结果如图15。即球粒处于完全接触状态时，液桥越小附着力越大，随 a 的增加在 S_L 增加的同时，附着力变得更大。有人曾对不等径颗粒间，颗粒与平板间，球粒与圆锥形颗粒间的液桥强度做过计算，因而不用上述的圆弧近似法而用液桥断面，求得了较精确值。

(4) 颗粒间引力

引力分为①分子间力（范德瓦耳斯吸附作用及化学结合力）②静电力，③磁力。其中范德瓦耳斯吸附作用和静电力对散状物料产生附着固结现象影响最大，微粉体产生附着主要是范德瓦耳斯吸附作用。但当颗粒表面间距大于0.1微米时，就失去了效用。

$$\text{这时球形颗粒间的 } F = \frac{AD_p}{24a^2} \quad (10)$$

$$\text{平板与球间的 } F = \frac{AD_p}{12a^2} \quad (11)$$

由上式可计算范德瓦耳斯吸附作用的 F 力。常数 A 一般为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 尔格，根据鲁波夫的理论，如果是金银、石墨的颗粒时，约 1.9×10^{-11} 尔格，聚苯乙烯约 27×10^{-12} 尔格。

薄吸附层的存在有助于范德瓦耳斯吸附作用力的增加。即被吸附的分子强烈地结合在固体表面，作用于固体的一部分，其结果使颗粒表面平滑，颗粒间距离减小， F 与 a^2 成反比变化，正负带电的两球间的静电引力，用下式求出：

$$F = \frac{3\varphi^2 D_p^2}{1 + a/D_p} \quad (12)$$

式中 φ 是表面电荷密度，但肉眼可见的颗粒，因受相邻颗粒形状或壁板极性的影响，因而很难定量计算。

2. 单颗粒接触点附着力的测定

(1) 弹簧秤法及振动子法

如图16, 17所示方法。用这种方法可直接测定颗粒和容器壁面或颗粒间接触点的附着力。虽然有些微颗粒不易测定，但也不失为简捷的测定方法。

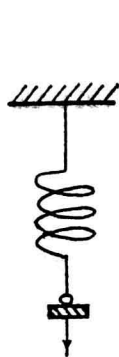


图16 弹簧秤法



图17 振子法

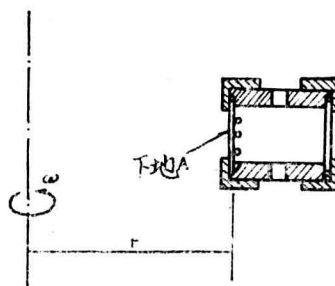


图18 离心法

(2) 离心法

如图18, 在基底A上(如玻璃板)撒上颗粒物料, 把附着槽放置在一定温度的干燥器内, 经一定时间后再放入离心机转动。作用在粒径(当量球径) D_p 颗粒的分离力 f :

$$f = \frac{\pi}{6} D_p^3 P_p r \omega^2 \quad (\text{达因})$$

因此当 f 大于附着力时, 颗粒就脱离基底测定在各种转速下剩余颗粒, 就可求出附着力的分布情况。

图19是测定的一例。较困难的是求得当量球径 D_p 。各转速的分离力与残留率 φ 之间存在着曲线关系。在这种情况下, 玻璃板与硅砂间的附着力与 D_p 没有关系。这个方法的特点是, 通过测定各转速下颗粒分离状态的试验, 能够求得附着力的分布, 其分布幅度很广。

3. 散状物料层的附着和凝聚力的测定

在考虑散状物料层的附着力和凝聚力时, 应首先明确定义这种现象。本章第二节里叙述的关于破坏包络线上的C点, 在土壤力学中称为附着力或粘着力。这从 YL 式也可知垂直应力为零时发生滑动时的剪切应力, 从 YL 上可以间接求出其值。对于不是剪切破坏而是拉伸破坏时, 破坏面的垂直作用应力, 即抗拉强度 σ_z , 也可定义为附着力或凝聚力。但为了与C有区别, 这里叫做抗拉强度。对等径球粒随机充填时的抗拉强度, 有从每个接触点的附着力 F , 推算 σ_z 的鲁波夫式:

$$\sigma_z = \frac{9}{8} \frac{1-\varepsilon}{\pi D_p^2} K \frac{F}{g_c} \quad (14)$$

K 是一个颗粒的平均接触点数, F 的单位是达因, σ_z 的单位是 $G/\text{厘米}^2$ 。测得 σ_z 的另一种方法是把散状物料制成圆筒状, 然后用抗拉试验机测出。如测定缓慢集聚状态的抗拉强度时, 如图20示采用两个槽。即把左右两个槽合起来把散状物料均匀地充填, 达到规定的空隙率 ε 。为此要把散状物料层的体积固定, 最好是根据样品的重量规定 ε 。例如抗拉强度为3~5

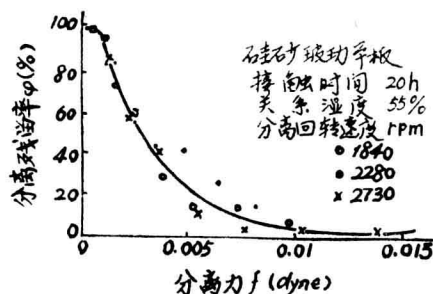


图19 离心法的残留率曲线

$\times 10^{-8} \text{ mm/s}$, 抗拉阻力最好采用非连接型的阻力线变形计, 用记录器将变化记录下来。如图21示那样, 抗拉阻力的变化异常急剧, 如果是微细散状物料, 很快就可以剪断有水分的散状物料, 就是分阶段的破断。图22, 23就是分别对细散状物料及散状物料抗拉强度的测定结果, 都是根据 e 的变化, 特别是附着性细散状物料, 其倾向尤为显著。

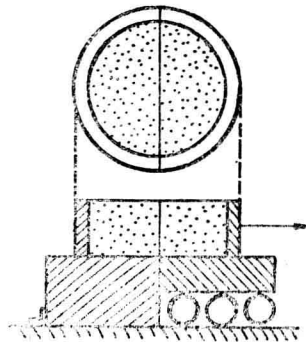


图20 引张试验法 (二分割槽)

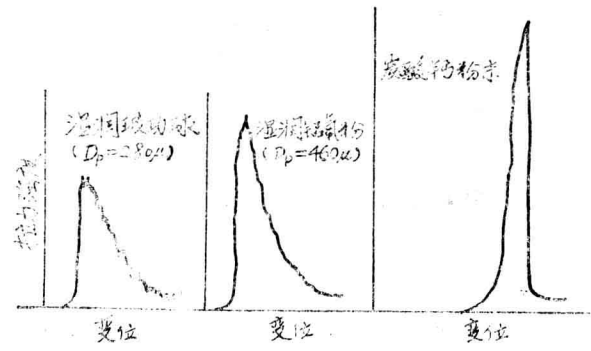


图21 拉力强度测定一例

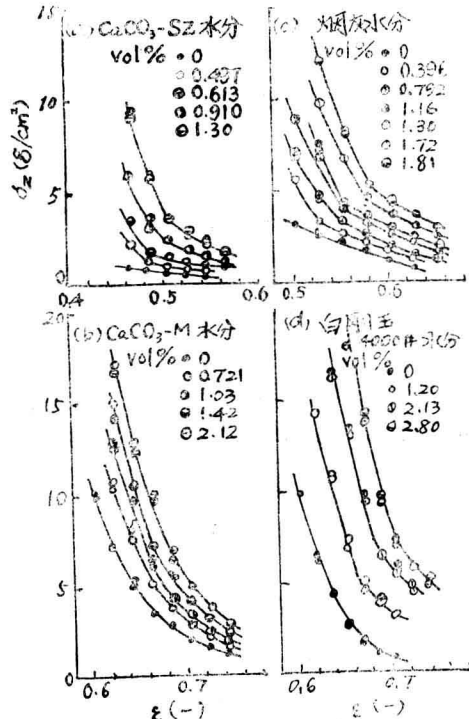


图22 粉体拉力强度的测定例

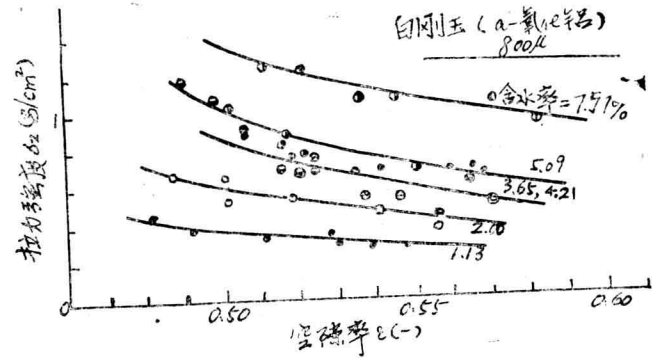


图23 粉体拉力强度的测定例

六、休止角的测定

要掌握散状物料流动性的表现形式, 实际上采用最多的是休止角(angle of repose) ϕ_r 。然而又很难将休止角和其它表示流动性的参数联系起来。对于不同种类的散状饲料, 未必能够按照物料的大小来判断流动性的好坏。同一种类的散状物料由于环境和粒度的变化而流动