



**作者简介:**马青山,男,1970年生,浙江大学化学工程博士,现在北京化工大学从事化学工程博士后研究。主要从事聚烯烃合金与工程研究,已发表相关论文数篇。

# 粉粒体三次物性的分析与测量

马青山<sup>1</sup>,冯连芳<sup>1</sup>,顾雪萍<sup>1</sup>,王凯<sup>1</sup>,赵建明<sup>2</sup>,程迈<sup>2</sup>

(1.浙江大学聚合反应工程国家重点实验室,浙江 杭州 310027;2.浙江省化工研究院,浙江 杭州 310023)

**摘要** 综述了粉粒体几种主要三次物性的分析测量方法,包括粉粒体流动性、流化特性、喷流性和流变性,总结了这些测量方法的共同特点,并对粉粒体基础研究发展前景做了分析。

**关键词** 粉粒体;三次物性;测试方法

粉体技术在化工、食品、制药、冶金、采矿等许多工业部门及环保方面都有广泛的应用,并且是许多传统工业和新兴加工工业的核心环节。在粉粒体工程设计中,粉粒体物性是必不可少的数据。在粉粒体物性研究方面,研究较多的有粒子的平均粒度、粒度分布、颗粒形状、比表面积等,这些性质被称为一次物性(又称为几何性能)。工艺工程中的粉粒体不是单个粒子,在很多情况下是由不同形状、不同粒度按不同比例组成的粉粒群,它的物性是由许多基本物性组合而成,与单一粒子的物性有很大的差别。再加上受外界因素,如空气中的水分、气温变化、存放时间长短、自身质量的挤压、振动等影响,都会改变其物性,情况比较复杂。在各种工艺过程中人们引进了流动性、喷流性、附着性等,称为三次物性(又称为工艺性能),这些概念定义比较模糊,没有统一的测量方法。为了在一次物性和三次物性之间架起一道桥梁,人们引进了二次物性(又称为力学性能),如静止角(安息角)、内摩擦角、外摩擦角等,但这些物性仅是表征粉粒体静止的、不受外界环境影响情况下的特征,与粉粒体实际的情况具有很大的差距,

且不能直接用于工程计算。所以,如何对粉粒体三次物性(即工艺性能)进行直接测定,科研人员进行了大量工作。

## 1 粉粒体流动性

粉粒体流动性测量仪器大致可分为两大类,即剪切类和流动类。剪切类测量装置主要是测量切向应力与法向应力之间的关系,得到屈服曲线。这类装置中有代表性的有直接剪切仪、Jenike 剪切仪等(见图1、2)。流动类是通过测量一定条件下粉体流动速率或流出时间来表征粉粒体的流动性,较具代表性的测量方法有流出时间法、Carr 百分法和狭缝流速测定仪等。

剪切类粉粒体流动性测试仪共同的特点是都有一个试样室,且一般试样室分为可动和固定两部分。首先在试样室内以一定的法向应力制得试样,

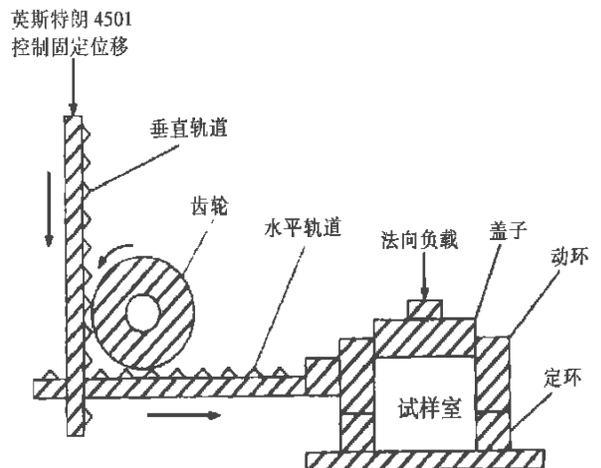


图1 直接剪切仪

收稿日期:1999-08-06

基金项目:浙江省自然科学基金资助(598008),化学工程国家重点联合实验室浙江大学聚合反应工程实验室开发基金资助

通信联系人:冯连芳

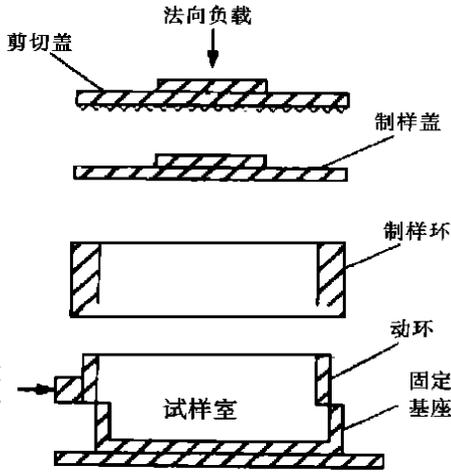


图2 Jenike 剪切仪

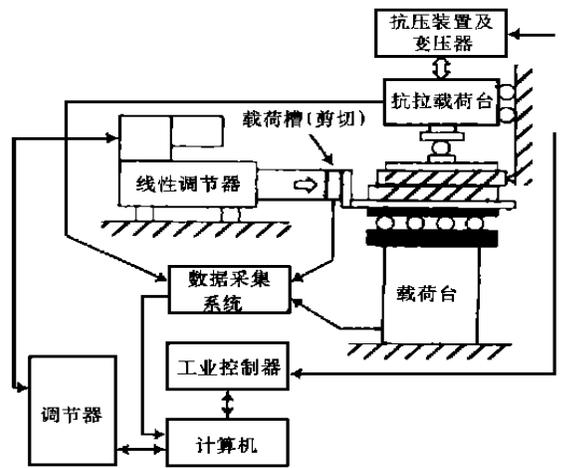


图3 计算机控制剪切仪

然后以一定的切向应力去破坏它,测得切向应力与法向应力之间的关系,得到屈服曲线,典型的屈服曲线一般符合下式

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (1)$$

除了以上两种较典型的剪切类流动性测试仪外,科研人员根据这一原理还研制了许多其它类型的剪切仪,如三轴剪切仪、旋转剪切仪(RSL)等。Kamath 等人<sup>[1]</sup>用以上4种测试仪在相同条件下测定了面粉和蔗糖的流动特性,并对测试结果进行了比较。对于粘结性物料,如类似于面粉,4种测试仪测得的结果比较相近。对于非粘结性物料,如类似于蔗糖,RSL测得的结果与其他3种仪器测得的结果有较大差距,其他3种比较接近。

Ladipo 等人<sup>[2]</sup>研制了一种计算机控制剪切仪(见图3),该仪器的法向应力和切向应力都有应力传感元件传送到计算机,且可以控制。所以利用一个试样即可完成一条屈服曲线的测定,大大减小了工作量。

流动类测试仪中,流出时间法最为简单,而 Carr 百分法应用范围最广,且目前已有定型仪器<sup>[3]</sup>,如日本细川公司的粉体物性测试仪(见图4)。

采用该仪器测得安息角、压缩率、铲积角、均匀系数或粘着力4项,以粒径非常均匀的细砂作为参照,Carr 把流动性定为100分<sup>[4]</sup>,上述每项占25分。对于其它粉体,将4项得分之和分为7档(见表1),得分越高流动性越好,总得分高于80分一般不会堵塞,低于60则一般会架桥。该法在工程设计中得到广泛应用,它的缺点是只给出定性指标,其流动性指标仍不能用于诸如输送压降、混合时间、搅拌功率等的工程计算。

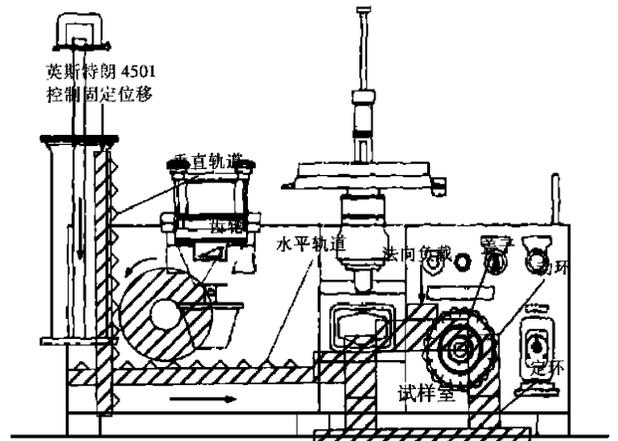


图4 细川粉体物性测试仪

定义(slot flow meter),该仪器原理非常简单,主要是一个圆筒,圆筒上端开口,下端封闭,在圆筒的壁上开有多个狭缝,圆筒中间为一分布锥,物料由顶端连续加入,从狭缝流出,狭缝的宽度应保证最大的粒子可以通过,并能使圆筒内保留一定物料。流速  $M$  仅与圆筒中物料高度  $h$  有关,即与圆筒内物料的量有关。圆筒放在一称量装置上,当减去圆筒质量,且忽略加料时的冲击力,则可得到圆筒内保留物料的质量,进而得到物料高度。其中物料流速与物料高度的关系即可表征物料的流动性好坏。

在没有流化的情况下,即可忽略气体的影响,如粒子较大时,  $M$  与  $h$  的关系为

$$M = C_g^{1/2} \rho h (W - kd_p)^{3/2} \quad (2)$$

当完全流化时,  $M$  与  $h$  的关系为

$$M = C_d(2/3)(2g)^{1/2} \rho W h^{3/2} \quad (3)$$

该仪器具有许多优点,如可在多灰尘和高温的现场操作,受其他因素的影响较小。另外,该仪器还可以通过不连续加料来考察动态的  $dM/dt$  与  $M$  的关系。

Harris 等人<sup>[5]</sup>开发了如图5所示的狭缝流速测

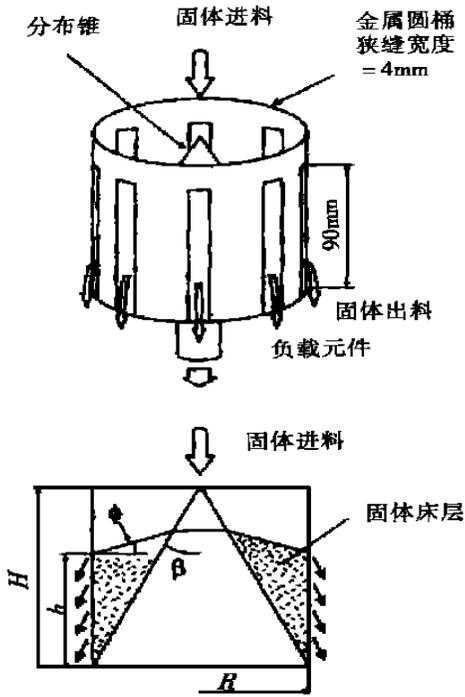


图5 狭缝流速测定仪(SFM)

## 2 粉粒体流化特性

随着流态化技术应用范围不断拓广,固体物料的性质千差万别,致使流化特性也千差万别。其中表征粉粒体流化特性比较完备的有 Geldart<sup>[6~8]</sup>提出的分类方法,该分类法根据流化特性与粒径及密度的关系,将粉粒体分成 A、B、C、D 等 4 类, Geldart 将这些颗粒分别称为充气、砂状、粘性和喷流颗粒,并将各类颗粒流动特性描述为:

**A 类颗粒:** 具有较小的粒径和密度(一般小于  $1.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),床层产生气泡前先膨胀,存在均一流化区,且膨胀比较大。突然关闭气源,床层塌落缓慢,一般在  $0.3\sim 0.6\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,与气体在致密相中表观气速相当,气泡上升速度远大于致密相中气体速度。粒径分布越大或平均粒径越小,则平均气泡径越小,且存在最大气泡径。

**B 类颗粒:** 平均粒径  $40\sim 500\mu\text{m}$ , 密度  $1.4\sim 4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 与 A 类颗粒不同,当表观气速稍大于起始

表 1 Carr 为粉粒体流动性

流动性	流动指数	安息角		压缩率		铲积角		均匀系数		粘附性	
		/ (°)	得分	/ %	得分	/ (°)	得分	均匀度	得分	/ %	得分
很好	90~100	<25	25	<5	25	<25	25	1	25		
		26~29	24	6~9	23	26~30	23	2~4	23		
		30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5		
较好	80~89	31	22	11	22	32	22	6	22		
		31~34	21	12~14	21	33~37	21	7	21		
		35	20	15	20	38	20	8	20		
好	70~79	36	19.5	16	19.5	39	19.5	9	19.5		
		37~39	18	17~19	18	40~44	18	10~11	18		
		40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5		
一般	60~69	41	17	21	17	46	17	13	17		
		42~44	16	22~24	16	47~59	16	14~16	16		
		45	15	25	15	60	15	17	15	<6	15
不好	40~59	46	14.5	26	14.5	61	14.5	18	14.5	6~9	14.5
		47~54	12	27~30	12	62~74	12	19~21	12	10~29	12
		55	10	31	10	75	10	22	10	30	10
差	20~39	56	9.5	32	9.5	76	9.5	23	9.5	31	9.5
		57~64	7	33~36	7	77~89	7	24~26	7	32~54	7
		65	5	37	5	90	5	27	5	55	5
很差	0~19	66	4.5	38	4.5	91	4.5	28	4.5	56	4.5
		67~89	2	39~45	2	92~99	2	29~35	2	57~79	2
		90	0	>45	0	>99	0	>35	0	>79	0

流化速度,床层即产生气泡,床层膨胀比小,床层塌落速度快,气泡上升速度与致密相中气体上升速度相当,气泡大小与颗粒大小无关。

C类颗粒:平均粒径小于 $30\mu\text{m}$ ,由于这类粒子颗粒极细,晶格缺陷较大,因此粒子间引力较大,或者是由于静电力或粒子较湿,使粒子间吸附力大于流体作用于粒子上的力,易于结块,在通常条件下很难流化,床层节涌和沟流严重。

D类颗粒:这类颗粒粒径和密度比B类颗粒更大,因此起始流化速度更大,床层内气泡上升速度比致密相中气体速度小,所以致密相中气体可以从气泡底部流入而从顶部流出。这类颗粒一般不能稳定流化,只能喷动流化。

Geldart 根据流化特性与粒径及密度的关系绘制了颗粒分类图(见图6),这种分类方法非常简单、明了,而且非常实用,所以被广泛接受。但是有时根据该分类图查得的某种物料的流化特性却与 Geldart 所描述的流化特性不同,即在A类与B类,A类与C类,B类与D类分界处有重叠,这是由于 Geldart 划分物料仅仅根据粉粒体的平均粒径和密度,有时这两项指标不能完全表征所有物料的流化特性,而且 Geldart 也没有考虑流体性质对流化特性的影响,因此它仅仅适用于空气或与空气性质相近的气体。

为此, Molerus<sup>[9]</sup> 提出了修正的 Geldart 分类图。该分类图考察了粒子之间相互作用力以及流体对于粒子的作用,得到的分类图在A类与C类之间以及A类与B类之间有一重叠区,该分类图给出了此重叠区的范围,落在此重叠区内的粒子其流化特性须经流化实验才能确定。

除了 Geldart 分类法外, Puncocchar 等人<sup>[10,11,12]</sup> 从分析泡相(bubble-phase)性质出发,考察了流体对粒子的作用,提出了如下判据

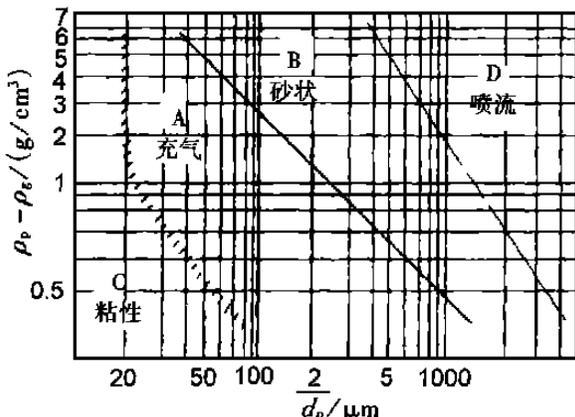


图6 Geldart 粉体流体特性分类图

$$Q = \left(-\frac{1}{F_d} \frac{\partial F_d}{\partial \epsilon}\right)_{u, \epsilon} = \frac{1}{1 - \epsilon + Re^*} + \frac{3}{\epsilon} \quad (4)$$

其中,  $Re^* = \frac{f_2(u)}{f_1(u)} \phi Re$ ,  $Re = \frac{ud_p \rho_f}{\mu}$ 。

$f_1(u)$  和  $f_2(u)$  是如下式所示的流化床中压力降方程中的系数

$$\left(-\frac{\Delta P}{L}\right)_{u, \epsilon} = f_1(u) \frac{\mu u}{(\phi d_p)^2} \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} + f_2(u) \frac{\rho_f u^2}{\phi d_p} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \quad (5)$$

若压降方程采用著名的 Ergun 方程<sup>[13]</sup>

$$\left(-\frac{\Delta P}{L}\right)_{u, \epsilon} = 150 \frac{\mu u}{(\phi d_p)^2} \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_f u^2}{\phi d_p} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \quad (6)$$

则  $Re^* = \frac{1.75}{150} \phi Re$

将  $Q$  值对  $Re^*$  和  $\epsilon$  做图,即为 Puncocchar 的流化特性分类图,见图7。

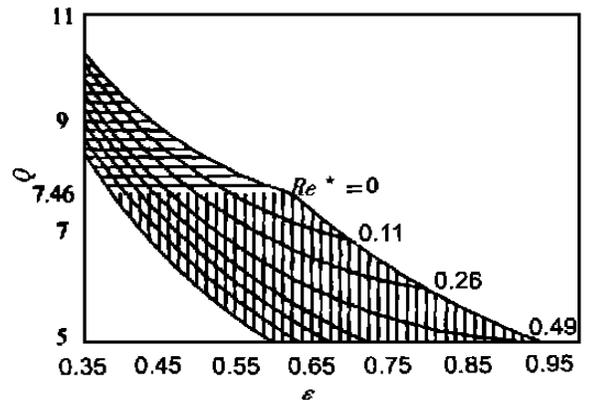


图7 Puncocchar 粉体流化特性分类图

$Q$  值越高,体系越容易形成泡,流态化也越容易,这类颗粒被称为膨胀类颗粒,对应于 Geldart 分类图中A类或B类颗粒。 $Q$  值越低,体系越容易形成喷涌或沟流,流化效果也就越差,这类颗粒被称为非膨胀类颗粒,对应于 Geldart 分类图中C类或D类颗粒。通过实验,发现  $Q = 7.46$  可作为这两类物料的分界点。这种分类方法从另一角度分析了流化体系特性,对粉粒体物料分类是一很好补充。

Goossens<sup>[14]</sup> 研究了文献中粉粒体流化特性数据,发现流化特性可由 Archimedes 准数  $Ar$  和 Reynolds 准数  $Re$  确定,并绘制了通用流化特性分类图(见图8)。该分类法把物料分为5类,流化特性由流化介质(流体密度和粘度)和流化粒子(粒子密度和粒径)性质决定,图中还绘出了流化区域,根据流化区域边界点的  $Ar$  和  $Re$  值,还可求得起始流

化速度  $v_{mf}$  和带出速度  $v_t$ 。

郭慕孙等提出用床层塌陷法评价颗粒物料的流动性<sup>[15]</sup>,并建立了无因次沉降时间模型。秦绍宗等研制了鼓泡流化床光纤料面跟踪仪,代替了以往快速摄影床层测量法。钱梓文等提出了两种鉴别流化床特性的控制算法<sup>[15,16]</sup>,该方法的原理是鼓泡流化床中存在3种气体流型:气泡流、气体通过浓相悬浮颗粒间隙流和浓相中相互接触颗粒结构内部气体由于自重挤压而排出的气流。在床层塌落过程中,具有上述3种流动形式的气固体系会形成3个连续相继的沉降段:快速的气泡溢出阶段、浓相固体以恒速受阻沉降的中间阶段和最后的浓相固体减速压缩阶段。通过料面跟踪技术,把气体的流动形态由空间转变为时间坐标,提供了一种判别流态化特性的新办法。

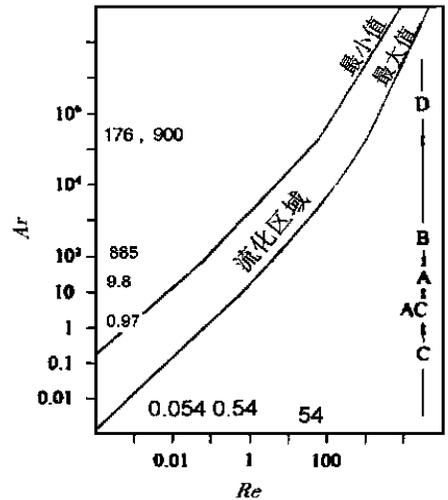


图8 Goossens 粉粒体流化特性分类图

表2 Carr 粉粒体喷流性

喷流性	喷流指数	泛滥程度	流动性		滑落角		差角		分散性	
			指数 (表1)	得分	(°)	得分	(°)	得分	(°)	得分
很高	80~100	必须采用 旋转密封	>60	25	<10	25	>30	25	>50	25
			59~56	24	11~19	24	29~28	24	49~44	24
			55	22.5	20	22.5	27	22.5	43	22.5
			54	22	21	22	26	22	42	22
			53~50	21	22~24	21	25	21	41~36	21
			49	20	25	20	24	20	35	20
			48	19.5	26	19.5	23	19.5	34	19.5
			47~45	18	27~29	18	22~20	18	33~29	18
			44	17.5	30	17.5	19	17.5	28	17.5
			43	17	31	17	18	17	27	17
较高	60~79	一般要求 旋转密封	42~40	16	32~39	16	17~16	16	26~21	16
			39	15	40	15	15	15	20	15
			38	14.5	41	14.5	14	14.5	19	14.5
			37~34	12	42~49	12	13~11	12	18~11	12
			33	10	50	10	10	10	10	10
很可能	40~59	有时要求 旋转密封	32	9.5	51	9.5	9	9.5	9	9.5
			31~29	8	52~56	8	8	8	8	8
			28	6.25	57	6.25	7	6.25	7	6.25
			27	6	58	6	6	6	6	6
可能	25~39	由流动速度 和加料速度 确定	26~23	3	59~64	3	5~1	3	5~1	3
			23	0	>64	0	0	0	0	0
			23	0	>64	0	0	0	0	0
不会	0~24	不要求	23	0	>64	0	0	0	0	0

以上几种粉粒体流化特性评价方法中,后几种方法考虑了流体性质以及流体与粒子相互作用对流态化特性的影响,使结果更接近于事实,但是这几种方法都须通过流态化实验才能确定,与 Geldart 分类法相比各有优缺点,所以采用哪种方法应由工艺开发过程的要求决定。

### 3 粉粒体喷流性

喷流性是指物料在处理过程中,由于自动充气而流化,形成类似流体的性质,使物料产生粉尘或多组分体系产生离析。目前,能够客观评价粉粒体喷流性的只有 Carr 喷流性分析,该方法只需测得粉粒

体分散度、滑落角、差角(安息角与滑落角的差值)和流动性,其中流动性即前面述及 Carr 流动性分析方法,其他3项均可由细川公司粉粒体物性测试仪测量。其评价方法与 Carr 流动性评价方法相同,每项最高得分为25分,将4项得分之和分为5档进行评价(见表2)。得分越高越容易喷流,总得分高于60分的混合组分或多分散体系容易形成离析。Carr 喷流性评价方法在工程上应用比较方便,人为误差小,因此得到广泛应用。

#### 4 粉粒体流变

用研究流体的手段研究粉粒体性质目前还不多见,因为粉粒体明显具有固体的性质,所以研究较多的有粒径、密度、硬度、空隙率等。但是这些都是个体性质,在工艺过程中,粉粒体不是单个粒子,在多数情况下是由不同形状、不同粒径按不同比例组成的粒子群,它的性质由个体性质决定,但又与个体性质不同,具有自己独特的性质,例如具有流动性、可压缩性、不具有固定形状等流体的性质。在流态化和悬浮液中曾把粉粒体性质与流体性质进行了比较,在流态化中,当气速大于一定数值,气体成为连续相,固体为分散相,这时体系明显具有了流体的性质,所以压降、浓度等成为流态化中主要研究对象。流态化中,搅拌功率的研究也有报道<sup>[17]</sup>。

悬浮液是一种非均相流体,固体粒子分散在液体中,流体为连续相。悬浮液的流变研究较充分,从稀悬浮液到浓悬浮液,从牛顿流体的分散介质到非牛顿流体的分散介质,从单一的粘度研究到研究剪切特性、粘塑性、依时性、粘弹性等复杂的流变特性。在许多工业过程中,整个过程经历了从悬浮液到粉粒体的转变,如SPS制备过程就经历了均相流体→稀悬浮液→浓悬浮液→湿粉体→干粉体的转变过程,所以将粉粒体性质与流体性质进行比较就非常必要了。

在悬浮液中,表观粘度一般随固体浓度的增加而增加(见图9), $\phi_M$ 为临界固相分率。不同体系 $\phi_M$ 值差异很大,如SPS聚合过程中,当转化率大于15%,体系中已无液态苯乙烯存在。Moreland<sup>[18]</sup>研究发现80目煤粉与矿物油组成的悬浮液体系 $\phi_M=0.4$ ;Cheng<sup>[19]</sup>报道聚苯乙烯( $500\mu\text{m}$ )与水-甘油体系 $\phi_M=0.55$ 。固相含率大于 $\phi_M$ 值时的流变研究较少,这时的流变行为更为复杂,Cheng等称之为粒粘性(granulo-viscous)。

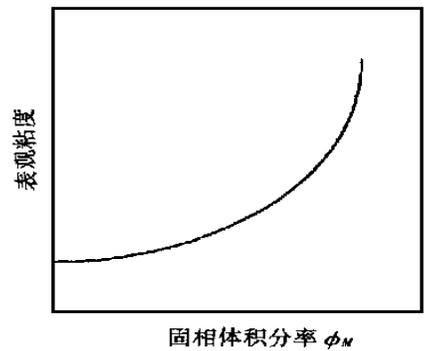


图9 悬浮液表观粘度随浓度的变化

Ishida等人<sup>[20]</sup>测量了物料在一敞口斜槽中滑下时的速度及速度分布,其中斜槽底部铺有粗糙的砂纸,侧壁为光滑玻璃。他们共测量了3种物料不同倾角和不同物料厚度的速度分布,通过变量分析,得到如下流变方程

$$\tau_{yz} = k_{\tau y} - k_{\tau y} (dv_z/dy) \quad (7)$$

该方程与宾汉流体非常相似,其中 $k_{\tau y}$ 相当于屈服应力, $k_{\tau y}$ 相当于表观粘度。这是第一次用流变方程表征粉粒体的流动特性。

Lloyd等人<sup>[21]</sup>还研究了粗粉体在通气情况下以及加入少量细粉后的流变,所用仪器为Couette型剪切仪,粒子放入两同心圆筒之间,剪切力由扭矩计测量,为防止物料波动,内圆筒为特殊设计。通过实验得到如下定性规律:不通气情况下,剪切力主要由大粒子决定,但是加入少量细粉可大大降低剪切应力,其中小粒子起了“润滑”的作用;通气情况下,剪切力是通气速率的函数,较小的通气速率即可大大降低剪切力;细粉含量及性质对剪切力与气速关系有较大影响,其中粒径为 $30\mu\text{m}$ 左右的细粉效果最为显著;剪切力随剪切速率变化曲线大致可分为两段:低剪切速率下,剪切力不随剪切速率变化,表现为粉体性质;高剪切速率下,剪切力是剪切速率的函数,表现为流体的性质。加入细颗粒可减小“粉体区”的范围,增大“流体区”的范围;通气情况下,较少的细粉就有较显著的效果。

#### 5 结 语

粉粒体在化工及其相关行业有着广泛的应用,粉粒体技术直接影响着制药、矿业、生物、食品以及新材料行业的发展。但是粉粒体基础研究与实际应用的要求还有较大差距,要想对粉粒体操作内在规律进一步认识,必须在两方面进行深入研究:一是提出新的理论去解释粉粒体操作中的规律;二是研

制新的仪器对粉粒体性质进行评价。由于数据获取技术和计算机技术的发展,将使这些逐渐成为可能。例如,利用计算机模拟粉体的混合或流化过程已经实现<sup>[22,23]</sup>。粉粒体的物性研究目前还局限在从现象出发,每一种评价方式都刻意模仿实际操作中的状态,所以粉粒体的贮藏、运输、混合、流化等都有自己的评价方式,但目前还没有提出一种普遍适用的物性评价法。从流体的研究经验来看,应从粉粒体作用的特点出发,对粉粒体之间的作用,以及粉体粒子与少量添加物(如气体、液体)之间的作用进行分析,提炼出共性的特点,最终得到类似于流体中“粘度”甚至“雷诺准数”的概念。这需要广大科技工作者大量的研究才能实现。

### 〔参考文献〕

- [1] Kamath S, Puri V M, Manbeck H B, et al. Flow properties of powders using four testers——measurement, comparison and assessment [J]. Powder Technology, 1993, 76: 277.
- [2] Ladipo D D, Puri V M. Computer controlled shear cell for measurement of flow properties of particulate materials [J]. Powder Technology, 1997, 92: 135.
- [3] 日本细川公司. 粉粒体物性测试仪说明书 [Z].
- [4] Ralph L, Carr Jr, Div B I F. Evaluating flow properties of solids [J]. Chemical Engineering, 1965, 18(1): 163.
- [5] Harris B J, Davies C E, Davidson J F. The slot flow meter: a new device for continuous solid flow measurement [J]. Chem Eng Sci, 1997, 52(24): 4637.
- [6] Geldart D. Types of gas fluidization [J]. Powder Technology, 1973, 7: 285.
- [7] Geldart D, Abrahamsen A R. Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures [J]. Powder Technology, 1978, 19: 133.
- [8] Geldart D, Harnby N, Wong A C. Fluidization of cohesive powders [J]. Powder Technology, 1984, 37: 25.
- [9] Molerus O. Interpretation of Geldart's type A, B, C and D powders by taking into account inter-particle cohesion forces [J]. Powder Technology, 1982, 33: 81.
- [10] Puncochar M, Darhos J, Cermak J. The dependence of fluidization regime upon the bed structure at the onset of fluidization [J]. Chem Eng Sci, 1990, 45(3): 764.
- [11] Puncochar M, Darhos J, Cermak J. The limit of applicability of pressure drop correlation [J]. Chem Eng Sci, 1990, 45(9): 2994.
- [12] Puncochar M, Darhos J. A novel approach in classification of solid particles with respect to the quality of fluidization [J]. Chem Eng Sci, 1992, 47(12): 3137.
- [13] Ergun S. Fluid flow through particle columns [J]. Chem Eng Prog, 1952, 48(2): 89.
- [14] Walter R A Goossens. Classification of fluidized particles by Archimedes number [J]. Powder Technology, 1998, 98: 48.
- [15] 郭慕孙. “用床层塌落法判别流态化特性研究”的说明 [J]. 化工冶金, 1983, 4(3): 1-28.
- [16] 钱梓文, 陈强, 李洪钟. 鉴别流态化特性的两种控制算法 [J]. 化工冶金, 1997, 18(4): 25.
- [17] Shin Ichi, Makishima, Takshi Shirai. Power requirements for agitating fluidized bed [J]. J Chem Eng Japan, 1969, 2(2): 224-228.
- [18] Moreland C. Viscosity of suspensions of coal in mineral oil [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1963, (2): 24.
- [19] Cheng D C H. Further observations on the rheological behavior of dense suspensions [J]. Powder Technology, 1984, 37: 255.
- [20] Ishida M, Shirai T. Velocity distributions in the flow of solid particles in an inclined open channel [J]. J Chem Eng Japan, 1979, 12(1): 46.
- [21] Lloyd P J, Webb P J. The flooding of a powder——the importance of particle size distribution [J]. Powder Technology, 1987, 51: 125.
- [22] Xu B H, Yu A B. Numerical simulation of the gas-solid flow in fluidized bed [J]. Chem Eng Sci, 1997, 52(16): 2785.
- [23] Seibert K D, Burns M A. Simulation of structural phenomena in mixed-particle fluidized bed [J]. AIChE J, 1998, 44(3): 528.

## Measurement and Analysis Methods of Powder Properties

Ma Qingshan<sup>1</sup>, Feng Lianfang<sup>1</sup>, Gu Xueping<sup>1</sup>,  
Wang Kai<sup>1</sup>, Zhao Jianming<sup>2</sup>, Cheng Mai<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Polymerization Engineering, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310027;  
2. Zhejiang Chemical Industry Research Institute, Zhejiang Hangzhou 310023)

**Abstract** There are wide varieties of techniques for measuring gas and liquid properties, but few for powder. Handling of powder is always problematic because of the paucity. In this paper, the measurement methods of several powder properties are reviewed, including flowability, quality of fluidization, floodability and rheological behaviour. Some areas where research is needed for further progress are noted.

**Key words** powder; property; measurement and analysis