

粉体流动性能的测试研究*

奚新国¹,张耀金²

(1.盐城工学院 材料工程系,江苏 盐城 224003 2.南京工业大学 材料学院,江苏 南京 210009)

摘 要 运用 Carr 和 Jenike 两种粉体流动性能的测试方法对水泥生料的流动性能进行了测试研究,并就相关结果进行了比较,研究表明 Jenike 法能更全面的反映出粉体的流动性能。
关键词 粉体;流动性能;Carr 法;Jenike 法
中图分类号 :TQ172.683 **文献标识码** :A **文章编号** :1671-5322(2003)01-0004-04

粉体是由不连续的微粒构成,是固体的特殊形态。它具有一些特殊的物理性质,如巨大的比表面积和很小的松密度,以及凝聚性和流动性等。在粉体的许多单元操作过程中涉及到粉体的流动性能,例如粉体的生产工艺、传输、储存、装填以及工业中的粉末冶金、医药中不同组分的混合等等。粉体的流动性能随产地、生产工艺、粒度、水分含量、颗粒形状、压实力大小和压实时间长短等因素的不同而有明显的变化,所以测定粉体的流动性对粉体工程具有重要的意义。

粉体流动性的测量方法很多,很长一段时期都是简单地根据粉体的休止角(又称安息角)来预测粉体的流动性能,这种办法带有较大的经验性,往往在实际单元操作中,流动情况很不理想,如在料仓中产生严重的堵塞(结拱或形成管斗)。后来 Carr^[1]提出了一套比较全面的表征粉体流动情况的办法,叫做流动指数,虽然比用休止角有所改进,但仍脱离不了经验性。美国学者 Jenike^[2]根据粉体力学的有关原理,提出了粉体的连续介质塑性模型,并发展了流动——不流动的判据,创建了一套科学的表示粉体流动性能的指标,并且用这些流动性能指标来指导粉体工程的实际。本文针对典型的水泥生料,分别用 Carr 法和 Jenike 法测定了这种粉体的流动性能。

1 粉体流动性能的测试

1.1 粉体的基本物理性能

本文所采用的粉体是某水泥厂的典型生料,基本物理性能如表 1。

表 1 粉体的基本物理性能

Table 1 Fundamentals physical properties of powder			
容积密度	真密度	水分含量	细度
0.974 g/cm ³	2.65 g/cm ³	0.8%	80 μm 方孔筛筛余 12%

1.2 Carr 法测试

Carr 通过对 2800 种粉体试样的测定,归纳提出了一套比较全面表征粉体流动性的方法,对粉体的休止角、压缩率、铲板角、凝集度等 4 项指标进行测定,将测定结果换算成表示高低程度的点数^[3],然后采用点加法得出总点数作为流动性指数 FI,以此来综合评估粉体流动性,表 2 是卡尔提出的流动性指数表。

表 2 卡尔流动性指数表

Table 2 Table of Carr's flow indexes	
流动性指数 FI	流动性能
90~100	流动性极好,无需辅助设备,不会形成拱堆
80~89	流动性良好,无需辅助设备,基本不形成拱堆
70~79	流动性中等,无需辅助设备。如果需要,要振动
60~69	流动性一般,物料附着挂料的边界线
40~59	流动性不好,必须搅动或振动
20~39	流动性非常不好,需更积极的搅动
0~19	流动性极不好,需特殊振动料斗

表 3 是本研究中测定的卡尔流动性指数的结果,运用点加法算得 :FI = 43,参见表 2 可知该粉

* 收稿日期 :2002-12-19
作者简介 奚新国(1970-),男,江苏大丰市人,盐城工学院讲师,南京工业大学在读博士研究生。

体的流动性能差。卡尔法一般仅可用来对粉体物料流动性能进行相对比较。

表 3 粉体的卡尔流动性指数

Table 3 Carr's flow indexes of the powders		
流动性	数值	点数
休止角	49°	12
压缩率	35.1%	7
铲板角	70°	12
凝集度	28.0%	12
总计	FI = 43	

1.3 Jenike 法测试

Jenike 以粉体力学理论为基础进行了大量的

表 4 粉体流动性能的基本表征参数

Table 4 The basic token parameter of powders' flow performance				
指标名称	符号	说 明	湿度增大的变化	压紧的变化
有效内摩擦角	$\delta(^{\circ})$	稳态流动时的动摩擦情况	一般变大	低压实下变小
内摩擦角	$\phi(^{\circ})$	粉体起始滑移时的摩擦情况	一般变小	一般变大
壁摩擦角	$\phi_w(^{\circ})$	粉体和壁材料的动摩擦系数	变大或变小	一般稍变小
容重	$\gamma(\text{g}/\text{cm}^3)$	单位体积的重量	低压实下变大	变大
无侧界屈服强度	$F(\text{kg}/\text{cm}^2)$	粉体的粘性度量方法,通常以压实力的函数给出	饱和前明显变大	明显变大
可压缩性系数	β	容重和压实力的双对数曲线斜率	变大	一般变化不大,但在高压时近零
透气性	$k(\text{m}/\text{s})$	气体通过粉体床压降梯度等于容重时的界面流速	饱和前一般增大	明显变小

图 1 是流动性能测定仪的主要部件 - 剪切池^[6]。底座和环尺寸相同,一般为圆形截面,试样置于池中,上面加上盖子。通过砝码挂架加砝码压紧试样,剪切力加在环和盖上,而底座不动。将试样压实到稳态,然后在较低的压实荷重下剪切到破裂。图 1 中的 V 表示砝码所加的位置和以及砝码的大小。从仪器的记录仪上读出该压实水准下的一对压实强度和剪切强度值 (W, S),进而作屈服轨迹 (YL),摩尔半圆和有效屈服轨迹 EYL 。有效屈服轨迹 EYL 与横坐标之间的夹角为有效内摩擦角 δ 。摩尔半圆过 (W, S) 坐标原点,并与屈服轨迹 YL 相切。摩尔半圆交于横坐标轴的另一点,就是该压实水准下物料的无侧界屈服强度 f_c 。无侧界屈服强度随压实程度不同而变化。每条屈服轨迹可以产生一个无侧界屈服强度 f_c 和相应的压实强度值 $\sigma_1(f'_c, \sigma'_1)$, σ_1 是从屈服轨迹坐标图上,过极限应力状态的终点画一摩尔半圆交于横坐标轴的右边一点就是该压实水准下对应无侧界屈服强度的压实强度。以 f'_c 为纵坐标, σ'_1 为横坐标, f_c 与 σ_1 的关系就叫流动函数。本研究中采用的粉体流动性能测定仪是由由南京玻璃

实验和深入的理论研究,归纳了一整套表示料仓内粉体流动性的参数和料仓定量设计的方法及理论,表 4 是詹尼克提出的表示流动性的综合性能参数^[4]。

Jenike 测试粉体物料的仪器主要有流动性能测定仪、压缩性测定仪和透气性测定仪。但是,对于大多数粉体,主要用有效内摩擦角、内摩擦角、壁摩擦角、容重和无侧界屈服强度等 5 个性能指标来表示流动性能^[5],它们可以用流动性能测定仪直接或间接测出。

纤维研究设计院开发研制的,剪切池直径为 64 mm。

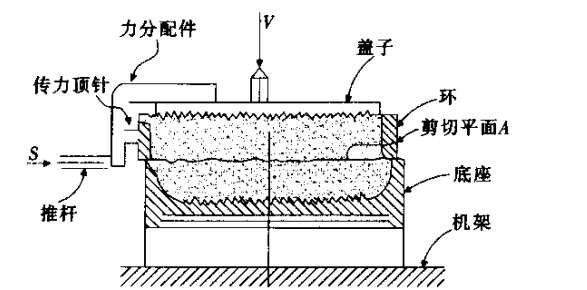


图 1 流动性能测试仪的主要部件 - 剪切池

Fig.1 The main part of the flow performance measurement - shearing cell

表 5 是实测数据,其中 w_0 表示预压实的砝码重量,其目的是保证剪切池里的粉体有相同的初始孔隙率。终点表示在极限应力状态的终点。图 2 中 YL' 、 YL'' 和 YL''' 分别表示不同压实水准下的屈服轨迹,它们和横坐标的夹角为内摩擦角 ϕ ,内摩擦角 ϕ 表示粉体起始滑移时的摩擦情况。有效内摩擦角 δ 与粉体的内摩擦角有关,它是物料处于流动状态时,衡量流动阻力的一个参数,当 δ 增加时,颗粒的流动性就降低。

表 5 瞬时屈服轨迹测定数据($w_0 = 3.35$), 单位 kPa

Table 5 Results of instantaneous yield locus of the powders

终点	第一压实水准			第二压实水准			第三压实水准		
	$w = 42.05 \quad s = 32.16$			$w = 28.20 \quad s = 19.77$			$w = 14.7 \quad s = 10.2$		
I	1	2	3	1	2	3	1	2	3
W_i	31.72	23.70	16.55	24.18	17.08	11.59	12.08	9.75	8.84
S_i	26.71	21.52	10.84	18.96	13.41	9.86	8.75	6.86	4.57

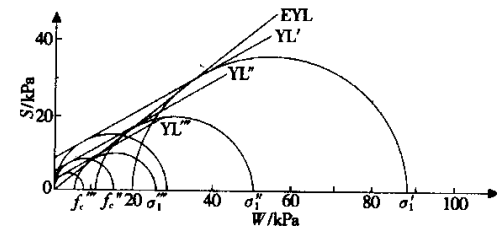


图 2 粉体的瞬时屈服轨迹

Fig.2 Instantaneous yield locus of the powders

瞬时屈服轨迹实际上表示了粉体与粉体之间的相互作用。在工程实际中还存在粉体和壁面的作用。为此本文以白铁皮为例测定了壁屈服轨迹,数据如表 6 所示。图 3 是按照屈服轨迹的制作方法,仍用类似的剪切试验,画出的粉体与固体壁面间的 $W_i - S_i$ 关系,这就是壁屈服轨迹,其斜率就是壁摩擦角 ϕ_w 。它表示粉体与壁面之间的摩擦角。

表 6 壁屈服轨迹测定数据(白铁皮) $w_0 = 3.05$ kPa

Fig.6 Results of wall yield locus of the powders

i	1	2	3	4	5
W_i (kPa)	49.10	33.85	18.6	9.45	4.88
S_i (kPa)	22.11	14.48	7.48	5.05	2.15

流动函数表征着仓内粉体的流动性。在实际工程中,为方便起见,用流动函数的斜率 FF 值代替。 FF 越大,粉体的流动性越好。 FF 与粉体流

表 7 FF 与粉体流动性的关系

Table 7 The relationship between FF and flow performances of powders

FF	$FF < 2$	$2 < FF < 4$	$4 < FF < 10$	$FF > 10$
粉体物料流动性	强粘附性,流不动	粘附性,不易流出	易流动	自由流动

综合上述的工作,Jenike 法测定水泥生料的流动性能如表 8 所示。从表 8 可以看出生料的流动性能不好,这和 Carr 法测定结果一致。但是 Carr 法在实际应用时,数据的重复性和可靠性比 Jenike 法差。在指导工程应用方面,如进行粉体模型实验时,Carr 法更是无能为力。而 Jenike 法可以依

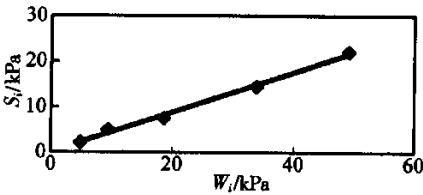


图 3 粉体的壁屈服轨迹

Fig.3 Wall yield locus of the powders

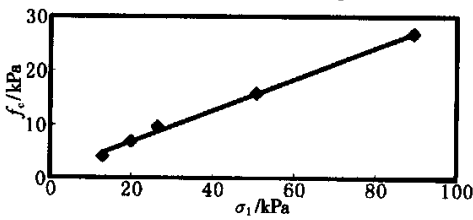


图 4 粉体的流动函数

Fig.4 Flow functions of the powders

动性的关系见表 7。

表 4 中的容重是单位体积散状固体物料的重量。用可压缩性测定仪测定,其基本原理是在剪切池中充填物料,放上顶盖,在顶盖上加一组不同的重量,用百分表读出相应重量下的物料深度,从而计算出容重与压实力间的关系。图 5 是测定的结果,画在双对数坐标纸上,所得直线的斜率称为可压缩性系数,经计算本生料的可压缩性系数 $\beta = 0.038$ 。

据相似准数^[7~8]指导料仓模拟。如果出料速率可控,如果要想让粉体在缩小的实验模型中的流动在全尺寸的工业料仓中重现,只要使模型中粉体的有效内摩擦角 δ 、内摩擦角 ϕ 、壁摩擦角 ϕ_w 、可压缩性系数 β 和比值 σ_1/f_c 等 Jenike 流动性能参数与全尺寸的工业料仓一样就可以了。

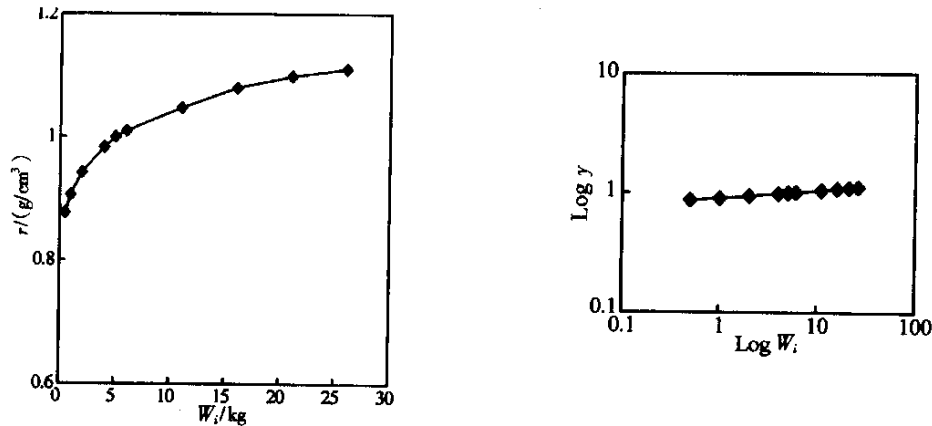


图 5 粉体的可压缩性测试结果

Fig.5 Results of compressive performance of the powders

表 8 Jenike 法测定粉体的流动性能的结果

Table 8 Results of powders ' flow performance
by Jenike method

有效内摩擦角	内摩擦角	壁摩擦角	可压缩性系数	FF
δ	ϕ	ϕ_w	β	
40°	31°	29.6°	0.038	3.1

法进行测定,两者的测定结果 $FI = 43$ 、 $FF = 3.1$ 都说明本生料的流动性能较差。

(2) Carr 法只能相对说明流动性的好坏,而 Jenike 法不但可以说明粉体流动性的好坏,且在量化测试过程的可操作性方面具有优越性,同时可定量地用来指导料仓设计。

2 结论

(1)生料的流动性能可以用 Carr 法和 Jenike

参考文献：

[1] 张荣善著. 散料输送与储存[M]. 北京: 化学工业出版社,1994.
[2] Jenike A W. Storage and Flow of Solids[A]. Bulletin 123 of Utah Experiment Station[C]. Utah :University of Utah, 1964.
[3] 川北公夫. 粉体工程学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社,1991.
[4] 张碧栋. 玻璃配合料[M]. 北京: 中国建材工业出版社,1992.
[5] 韩仲琦. 水泥厂中粉体物料的流动性和结拱[J]. 水泥技术,1989,(3) 32 - 36.
[6] 张佑林. 粉体的剪切试验及其装置. 武汉工业大学学报[J]. 1995,(3) 79 - 83.
[7] Johanson J R. Why Bulk Powders Flow or Don 't[J]. CHEMTECH, 1975,(9) 572 - 576.
[8] 奚新国. 套仓式重力均化仓用于水泥生料均化的研究[D]. 南京: 南京化工大学,1999.

The Study of Powder Flow Perormance Measurement

XI Xin-guo¹, ZHANG Yao-jin²

(1. Department of Material Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China 2. College of Materials Science and Engineering of Nanjing University of Technology, Jiangsu Nanjing 210009, China)

Abstract Carr method and Jenike method for measuring the flow performance of powders were introduced and compared. It is pointed out that Jenike method can reflect powder flow performance entirely.

Keywords powders ; flow performance ; Carr method ; Jenike method