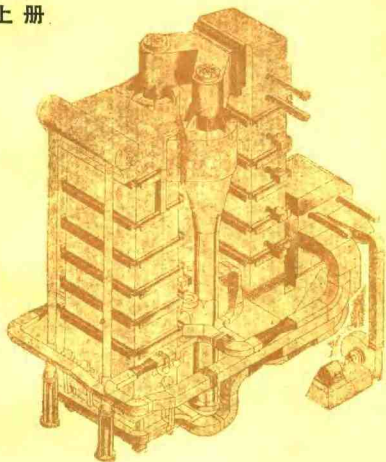


上册



华中理工大学 刘焕彩 主编

设计 | 与 | 原理 | 锅炉 | 流化床

内 容 提 要

本书原为研究生教材,在编写过程中,汇集了当前国内外及编者在“六·五”期间流化床燃烧方面的研究与应用成果。

全书共分八章,除介绍流化床燃烧锅炉的基础理论、设计、运行外,还介绍了快速循环流化床的研究与应用,同时对流化床煤炭的环境污染、灰渣物燃热利用等进行了论述。

书中汇集了设计实例和计算,实用性较强。

本书可供热能动力工程专业的研究生和高等学校学生作为教学参考书,亦可从事本专业的工程技术人员和现场运行管理人员参读。

流化床锅炉原理与设计(上)

刘焕彩 主编

责任编辑 杨元庆

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.625 字数: 206 000

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数: 1-2 000

ISBN7-5609-0204-9/TK·8

定价: 1.45元

前 言

六十年代以来,流化床燃烧技术由于它独特的优点而受到世界各国的普遍重视,各国学者和研究机关为此开展了大量的理论研究和工业性试验,并且已进入商业化应用阶段。我国研究流化床锅炉起步较早,至今已有近二十年历史,已从小容量工业流化床锅炉向大容量电站锅炉发展,在劣质燃料利用、设计、运行、点火、防磨等方面形成了自己的特色。可以预计,随着燃烧科学的不断发展,能源日益紧张和环境保护日益严格的要求,流化床燃烧研究必将得到极大的发展。

多年来我们从事流化床锅炉的科研、设计、调试和运行工作中,深感流化床燃烧技术的研究远远不能满足当前工业发展的需要,在理论上也很难满意地阐述与解决实际应用中所出现的问题,编者汇集了国内高等院校和工厂、科研设计部门的科学实践与理论成果,并结合自己在教学、科研中所积累的经验编成此书。书中着重阐述流化床锅炉的特点,并针对第二代流化床锅炉——快速循环流化床锅炉的原理、炉型、飞灰循环与输送、设计要点等进行了介绍,至于一般工业锅炉所涉及的机械强度计算、烟风道阻力计算、汽水分离及水循环计算等,为了节省篇幅,在本书中一概未予列入。读者可参考工业锅炉教科书及有关技术手册。

全书分上、下两册,共分八章,由刘焕彩教授主编。各章编者如下:第一章由朱策民副教授编写,第二、四章由刘焕彩教授编写,第三、六章由刘德昌副教授编写,第五、七章由林志杰副教授编写,第八章由伍蔚恒高级工程师编写。

本书由湖北省电力中心试验所陈家阶高级工程师,山东工业大学许炳松副教授审定,并提出许多宝贵意见,在此谨向他们表

示衷心的感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，热忱希望同行们和读者批评指正，以便今后不断完善提高。

编者

1987.8.

符 号 说 明

A : 常数

A_T : 燃料的应用基灰分(%)

A_f : 燃料的分析基灰分(%)

A^s : 燃料的干燥基灰分(%)

A_V : 常数

$A_{OV}-A_V$ 的前指数因子

a_{f1} : 溢流渣占燃料灰分的份额

a_{1s} : 冷渣占燃料灰分的份额

a_{fs} : 飞灰占燃料灰分的份额

a'_{fs} : 离开炉膛的飞灰占燃料灰分的份额

B : 燃料消耗量(千克/时)

B_j : 计算燃料消耗量(千克/时)

B^s_j : 沸腾层燃料计算消耗量(千克/时)

B_0 : 斯蒂芬-波尔兹曼常数

$5.775 \times 10^{-8} \text{ 瓦/米}^2 \text{ 开}^4$

c_{fs} : 飞灰中可燃物含量(%)

c_{FE} : 溢流渣中可燃物含量(%)

c : 比热(焦耳/千克℃)

c_{s1} : 沉降灰中可燃物含量(%)

c_{1s} : 冷渣中可燃物含量(%)

c_1 : 沸腾床入口氧浓度(千克/米³)

c_f : 浮化层中氧浓度(千克-摩尔/米³)

c_s : 气泡在床层出口氧浓度(千克-摩尔/米³)

c_g : 气泡中氧浓度(千克-摩尔/米³)

σ : 碳粒子表面辐射系数(千克-摩尔/米²)

c' : 燃料应用基含碳率%

$(c\theta)_{1s}$: 溢流渣燃烧热(千焦/千克)

$(c\theta)_{1s}$: 冷渣燃烧热(千焦/千克)

$(c\theta)_{fs}$: 飞灰燃烧热(千焦/千克)

D_{SD} : (锅炉机组)额定蒸发量(千克/时)

D : (锅炉机组)实际蒸发量(千克/时)

D_g : 过热蒸气产量(千克/时)

D_{s1} : 不通过过热器饱和蒸汽抽取量(千克/时)

D_{yw} : 锅炉排污水量(千克/时)

d_m : 煤粒的起始直径

d_i : 碳粒的直径

D_g : 气泡直径

$\overline{D_g}$: 气泡平均直径

D_k : 气体扩散系数

d_{max}, d_{1s} : 最大粒径

E : 挥发份析出活化能(千焦/千克-摩尔)

E_s : 平均活化能(焦耳/克-摩尔, 千焦/千克-摩尔)

e_{s1} : 床的有效厚度

e_i : 碳粒的厚度

e_{st} : 悬浮段的厚度

f : 未燃碳占初始碳量的份额

G : 床料重量(千克)

H' : 燃料应用基氢份(%)

H_f : 沸腾层高度(米)

H_{ef} 悬浮段高度(米)
 H_{1j} 临界状态下的床层高度(米)
 H_s 离布风板以上高度(米)
 H_{sj} 静止料层高度(米)
 H_{1j} 床中浸没受热面(米²)
 I^0 理论烟气焓(千焦/千克)
 I', I'' 进出受热面的烟气焓(千焦/千克)
 i'_{aT}, i'_{aP} 流出空气预热器的空气焓(千焦/千克)
 i_{aT} 饱和蒸汽焓(千焦/千克)
 i_{pT} 排污水焓(千焦/千克)
 i''_{aT} 过热器出口蒸汽焓(千焦/千克)
 di 水或蒸汽的热焓增量(千焦/千克)
 $I^{0,1}$ 理论空气焓(千焦/千克)
 I''_{Tj} 每公斤燃料的燃烧产物在 $\theta_{a,1}$ 下离开床层时的焓(千焦/千克)
 $I_{T,1}$ 进入待磨层的热空气焓(千焦/千克)
 I_{Tj} 排屑焓(千焦/千克)
 k 传热系数(瓦/米²·℃)
 k_f, k_f' 反应速度常数 厘米/秒;
 (米/秒)
 $k_{s,1}$ 床层对浸没受热面的传热系数
 (瓦/米²·℃)
 k_0, h_f 的前指数因子(1/秒)
 k_s 气流表面传热系数(厘米/秒)
 $\overline{k_f}$ 总反应速率常数(厘米/秒)
 k_A 化学反应速率常数(厘米/秒)
 k_A 分子扩散速率常数
 $k_{A,1}$ 碳球表面的反应速率(千克/米²·秒)
 M 由乳化相供给的氧气(克-摩尔/厘米³)
 $\dot{M}$ 碳粒的燃烧速率(千克/时)

M 碳的分子量(千克/千克-摩尔)
 N 流化数
 n, n_1 指数
 N' 燃料应用适宜速率(%)
 N_c 碳粒子中碳的摩尔数
 N_0 氧的摩尔数
 $N_{s,1} = \frac{k_{s,1} \cdot d_{s,1}}{\lambda_{s,1}}$ 粒子的努谢尔准则
 O_T 燃料应用基氧分(%)
 P 表压(牛顿/米²)
 Q'_{DWT} 燃料干燥基低位发热量(千焦/千克)
 Q''_{DWT} 燃料可燃基低位发热量(千焦/千克)
 Q'_{DWT} 燃料应用基低位发热量(千焦/千克)
 Q_1, q_1 锅炉机组有效利用热(千焦/千克, %)
 Q_2, q_2 锅炉炉膛排烟热损失(千焦/千克, %)
 Q_3, q_3 锅炉机组气体未完全燃烧热损失(千焦/千克, %)
 Q_4, q_4 锅炉机组固体未完全燃烧热损失(千焦/千克, %)
 $Q_{4,1}, q_{4,1}$ 沸腾床固体未完全燃烧热损失(千焦/千克, %)
 Q_5, q_5 锅炉机组散热损失(千焦/千克, %)
 Q_6, q_6 锅炉机组灰渣物理热损失(千焦/千克, %)
 $Q_{6,1}, Q_{6,1}', Q_{6,1}''$ 溢流液、冷流、沉降灰的物理热损失(千焦/千克)

Q_r 锅炉整体的可支配热(千焦/千克)
 Q_{r1} 锅炉机组总有效利用热(千焦/千克)
 Q_{r1v} 床中总有效发热量(千焦/千克)
 Q_{r1} 每千克燃料的燃烧产物通过床层传给浸没受热面内工质的热量(千焦/千克)
 Q_{r2} 每千克燃料在床中有效发热量
 Q_{s1} 在锅炉炉膛中受热, 送往别处的水或空气的吸热量(千焦/千克)
 Q_{s2} 受热面传递的热量(千焦/千克)
 Q_{r3} 受热面烟气的放热量(千焦/千克)
 Q_1 灰与空气生成热(千焦/千克)
 q_0 流出与流进气泡的全体速率(厘米³/秒)
 q_r 从乳化相通过气泡的全体速率(厘米³/秒)
 q_{r1} 燃烧每千克燃料所需的空气进入床层的热量(千焦/千克)
 q_{r1} 每千克燃料燃烧产物在 θ_{s1} 下, 离开床时每克的热量份额
 Q_{n1} 受热面内工质吸收的热量(千焦/千克)
 Q_{f1} 壁管受热面吸热量(千焦/千克)
 Q_{f2} 悬浮层受热面吸热量(千焦/千克)
 Q_1 壁管受热面吸热量(千焦/千克)
 Q_{s1} 过热层受热面吸热量(千焦/千克)
 Q_{f1} 对流管受热面吸热量(千焦/千克)
 Q_{s1} 省煤器受热面吸热量(千焦/千克)
 Q_{s1} 空气预热器受热面吸热量(千焦/

千克)
 q_{s1} 锅炉机组在额定蒸发量时的散热损失(%)
 R 炉排面积(米²)
 R_s 布风板面积(米²)
 R_g 气体常数(焦耳/克·摩尔)
 r 从煤粒中心为起点的径向距离(厘米)
 r 粒子的真实密度(千克/米³)
 r_s 粉层的堆积密度(千克/米³)
 r_{n0} 煤粒的起始半径(厘米)
 $Rep = \frac{d v}{\nu}$ 粒子雷诺数
 $Sh = \frac{a_s l}{D_s}$ 施维兹准则
 $Se = \frac{r}{D_s}$ 斯密特准则
 S_j 燃料应用基含碳率(%)
 T_{s1} 床温(开)
 T_p 粒子温度(开)
 T_{s1} 粒子中心绝对温度(开)
 T_{f1} 粒子表面绝对温度(开)
 t_1 灰的开始变形温度(℃)
 t_2 灰的软化温度(℃)
 t_3 灰的熔化温度(℃)
 t_{r1} 热空气温度(℃)
 t_{s1} 给水温度(℃)
 Δt_{s1} 省煤器出口处烟气与给水的温差(℃)
 Δt 受热面烟气流与工质侧的平均温差(℃)
 T_{s1}, t_{s1} 浸没受热面平均外壁温差(开, ℃)
 T_{s1}, t_{s1} 浸没受热面平均内壁温差(开, ℃)

• V 中的最终挥发份析出量(克/克-摩尔)

V 挥发份含量(克/克-摩尔)

V_{v1} 溢流层中挥发份含量(%)

V_{v2} 沉降层中挥发份含量(%)

V_{v3} 冷渣中挥发份含量(%)

V_{f1} 飞灰中挥发份含量(%)

V_f 灰粒中灰分(厘米³)

V_g 气泡体积(厘米³)

V' 燃料可燃基挥发份(%)

V_0 燃料应用基理论空气量(标米³/千克)

V_0^0 燃料干燥基理论空气量(标米³/千克)

V_f 气量(标米³/千克)

V_Y^0 理论气量(标米³/千克)

V_Y^{*1} 烟道内实际烟气体积(标米³/千克)

w 室温下的实际截面速度(米/秒)

w_f 粒子飞出(终端)速度(米/秒)

w_{s1} 床温下床层烟气平均速度(米/秒)

w_{s1} 室温下最小(临界)流化速度(米/秒)

w_g 气泡速度(米/秒)

w_{sf} 悬浮段烟气平均速度(米/秒)

w_s 固定床料层空隙气流真实速度(米/秒)

X 变换因子

希腊字母符号

α 过剩空气系数

α_1 壁的热导性(厘米²/秒)

α_{p1} 锅炉机组排烟处过剩空气系数

α_f 床的辐射放热系数(瓦/米²·℃)

α_4 床的对流放热系数(瓦/米²·℃)

α_{s1} 床对浸没受热面的总的放热系数(瓦/米²·℃)

α_2 浸没受热面内壁对固体的放热系数(瓦/米²·℃)

$\Delta\alpha_1$ 各段烟道的漏风系数

α_{s1} 气体质量交换系数(厘米/秒)

ε 料层空隙率

ε_1 粒子内部空隙率

ε_{1s} 临界状态床料层的空隙率

η 锅炉机组热效率(%)

η_r 燃烧效率(%)

θ_{s1} 床运行温度(℃)

θ_g 烟气温度(℃)

θ_{p1} 排烟温度(℃)

θ_{f1}^0 流化床理论层燃温度(℃)

λ 每千克燃料的初始产热在床内的放热份额

μ_{f1} 流化床内的颗粒浓度(千克/米³)

μ_{f1} 烟气中的飞灰浓度(千克/千克)

μ 动力粘度(牛·秒/米²)

ν 运动粘度(米²/秒)

ρ_{s1} 床料的密度(克/厘米³)；(千克/米³)

ρ_s 固体粒子的密度(千克/米³)

ρ_{1s} 颗粒子的摩尔数(千克-摩尔/米³)

ρ_g 烟气的密度(千克/米³)

$\sigma=5.693 \times 10^{-8}$ 辐射常数 (瓦/米²

·开⁴)

τ_t 停留时间(秒)

τ_d 扩散时间(秒)

τ_f 反应时间(秒)

$\tau_{r,j}$ 颗粒的燃烬时间(秒)

$\tau'_{r,j}$ 微颗粒在悬浮段的燃烬时间
(秒)

φ 保热系数

Ω V' 与 A' 的比值

上标

$\bar{}$ 分析基

$\bar{}$ 干燥基

• 理论

$\bar{}$ 可燃基

$\bar{}$ 实际

$\bar{}$ 应用基

下标

Δ 布风

Δ 饱和蒸汽

Δ 床层

Δ 对流

Δ 低位

Δ 额定

f 沸腾层

f 飞灰

f 辐射

f 锅炉

上册 目 录

主要符号表

第一章 流化床空气动力特性.....	(1)
§ 1-1 流化床中的两相流	(1)
§ 1-2 流化床的总体性状	(33)
第二章 流化床燃烧过程.....	(92)
§ 2-1 流化床燃烧工况	(92)
§ 2-2 流化床中煤粒挥发物的析出	(93)
§ 2-3 流化床中碳粒的燃烧	(104)
§ 2-4 流化床内燃烧动力特性	(122)
§ 2-5 影响流化床锅炉燃烧效率的因素和提高燃烧 效率的措施	(131)
第三章 流化床传热.....	(136)
§ 3-1 传热的基本方程	(136)
§ 3-2 影响流化床传热的因素	(139)
§ 3-3 流化床的传热模型和机理	(153)
§ 3-4 水平管和倾斜管局部放热系数	(169)
§ 3-5 垂直管的局部放热系数	(175)
§ 3-6 水平埋管和倾斜埋管放热系数	(176)
§ 3-7 水平管的最大放热系数	(181)
§ 3-8 垂直埋管放热系数	(183)
§ 3-9 对流化床传热需要加强研究的问题	(185)
第四章 流化床锅炉的设计与计算.....	(187)
§ 4-1 流化床锅炉的设计程序	(187)
§ 4-2 基本参数的选择	(190)

§ 4-3	燃料燃烧计算	(194)
§ 4-4	锅炉热平衡及燃料消耗量计算	(201)
§ 4-5	炉膛结构特性和传热计算	(209)
§ 4-6	对流受热面的传热计算	(231)
§ 4-7	布风装置的设计	(238)
§ 4-8	小型流化床锅炉简易计算	(256)

参考文献

第一章 流化床空气动力特性

§ 1-1 流化床中的两相流

流化床中空气动力特性对于床料（包括煤粒）的混合、煤粒的燃烧、气相与固相间的质交换、床料的夹带与扬析以及床层对于埋浸管束的传热等等均有重大的影响。因此，对于从事流化床燃烧技术和传热方面的研究、从事流化床锅炉设计与运行的工程技术人员及操作工人来说，了解流化床中的空气动力特性是十分必要的。而两相流动则是流化床的基础理论，因此也必须有所了解。

一、流化床的两相流动理论基础

1. 两相流

灰尘在大气中进行的紊乱运动；河流中水和泥沙的流动；选矿中矿粒的输送与分级；矿浆的流动；化工生产中的流态化工艺过程；煤粉燃烧中的风粉流动；流化床中气流物料的运动及其夹带与扬析等等，所有这些工艺过程均是液体或空气与固体颗粒的一起流动，从物理学的观点来说，这是液态或气态与固态物质混合在一起的流动，这种流动叫做两相流。本章的重点是结合流化床燃烧技术，谈谈气固方面的两相流。

2. 两相流的分类

物质的相态，从宏观上可分为固相、液相、气相和等离子相（离子化的固体）。不同相态的物质，其物性差异甚大，且它们的流动规律及其处理方法也不相同。按照流场内的状态，两相流可分为如下六种：

（1）液体—气体流动；

- (2) 液体—固体流动；
- (3) 气体—固体流动；
- (4) 液体—等离子体流动；
- (5) 等离子体—固体流动；
- (6) 气体—等离子体流动。

3. 研究气—固两相流的目的

研究气固两相流的目的，是为了便于研究流化床流态化规律、夹带与扬析规律，以及细灰回燃装置采用气力输送时气流与物料的运动规律，以便进一步改善流化床的流化质量、减少夹带与扬析颗粒、组织好床内循环或床外循环燃烧，有效地提高流化床燃烧锅炉的燃烧效率并减少烟尘污染。

4. 两相流的处理方法

在两相流中，首先可依据流体力学的基本方程对各相列出其相应的守恒方程，同时还要考虑两相间的相互作用。故描述两相流的方程组要比单相流复杂得多。因此对两相流的处理方法和对单相流的处理方法，既有共同之处，也有其不同的特点。

气—固两相流随着流速的大小和流道的几何形状不同而具有各种不同的流型，气—固界面也很复杂和多变，因此按适当的边界条件来求解气—固两相流的微分方程组是很困难的。对于两相流的处理常用如下几种方法：

(1) 与处理单相流动一样，从物理概念出发，用因次分析法从基本微分方程中得到描述某一特定两相流动过程的一些无因次参数，然后根据试验数据得出经验关联式。这就是所谓的经验方法。

(2) 根据所研究过程的特点，采用适当的简化，再从两相流的基本方程求得描述该过程的函数形式，然后用试验方法定出方程中的经验系数。这就是所谓的半经验方法。

(3) 首先分清两相流的流型，然后根据各种流型的特点分析其流动特性并建立关联式。这种分析方法，有人称为两相流的

流体力学分析法。

上述三种处理方法各有优缺点。经验或半经验处理方法所得到的关联式或曲线，一般都便于工程上的应用，特别是用于与试验条件相同或相似的情况。但终因其是在一定的试验条件下所得出的经验或半经验公式，故应用也就有其局限性。而流体力学分析法，则因其比较深入地探究两相流的实质问题，自然也就具有较普遍的意义。所以近年来，这种分析方法受到了广泛的重视，并取得了不少进展，研究文章与成果越来越多。但因两相流的分界复杂，目前还不能严格确定，故将这种分析方法所得结果用于实际还不很普遍。

5. 两相流的特性参数

对于气—固两相流的描述，除了要引用单相流的参数外，还要利用一些两相流所特有的参数，因此，在讨论两相流的规律以前应对这些参数有初步了解。

(1) 密度 单位体积内物质的质量称为密度。

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \text{ (千克/米}^3\text{)} \quad (1-1)$$

(2) 重度 单位体积内物质所具有的重量

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \text{ (牛顿/米}^3\text{)} \quad (1-2)$$

重度与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中： g ——重力加速度， $g = 9.81$ (米/秒²)。

气体重度与压力、温度的关系为：

$$\gamma_g = \frac{p}{RT} \text{ (牛顿/米}^3\text{)} \quad (1-4)$$

式中： T ——绝对温度 (开)；

R ——气体常数，对空气 $R = 29.3$ (千克·米/千克·开)；

p ——压力 (牛顿/米²)。

密实重量——指固体物料在密实状态下单位体积所具有的重量，也称真实重量，以符号 r' 表示。它的单位为(千克/米³)。

容重——指固体物料在松散状态下单位体积所具有的重量，以符号 r 表示。容重也称堆积重量，其大小取决于松散堆积状态下的空隙率。所谓空隙率是指物料颗粒之间的空隙体积与包含空隙的整个物料体积之比，用符号 ϵ 表示。密实重量与容重、空隙率之间的关系为

$$r_s = (1 - \epsilon)r' \quad (1-5)$$

物料在20°C时的重量与体积跟物料相等(包括空隙)的水的重量之比，称为固体物料的视比重。当研究粉末燃料的流体输送、磨碎、燃烧过程时所用的公式都包含有视比重这一因素。测定视比重的简便方法可应用容积比重瓶来测定，燃料的重量除以湿燃料放入容积比重瓶后液体所增加的体积(即燃料及其中包含的空隙所占的总体积)便可算出视比重，其单位为(千克/米³)，可用符号 r_s 表示。

(3) 湿度 固体物料中水分的含量。常以湿态材料的重量百分数表示，即

$$W = \frac{G - G'}{G} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中： W ——含水量的百分数；

G ——物料干燥前的重量；

G' ——物料干燥后的重量。

物料的湿度对物料的流化及输送均有很大影响，湿度过大，物料的松散性就差，在输送过程中可能粘附在输料管、及卸料口等装置的内壁上，或在喉管处形成不易散开的团块，致使堵塞。

(4) 摩擦角 摩擦角是表示粒状物料静止及运动的力学特性的物理量。在设计输送物料装置时，摩擦角是重要的因素。为能恰当地表示在不同条件下得到的物料的某些性质，规定了以下几种摩擦角。

①静止角 把物料自然堆积成一个锥体，则锥体的母线与水平面的夹角，称为静止角或休止角，也叫自然堆角。对同一物料而言，粒径越小则静止角越大，这是由于微细颗粒相互粘附性增大的缘故。而且，颗粒的球形系数越大（即颗粒越接近于球形），静止角越小。绝大多数物料在松散充填时的孔隙率 ε 与静止角 Φ ，间具有如下关系：

$$\Phi_s = 0.05(100\varepsilon + 15)^{1.57} \quad (1-7)$$

若物料不是松散自然下落充填，而是经过振动下落，则静止角减小，流动性增加，且颗粒越大的物料，通过振动下落其效果更为显著。

②内部摩擦角 将物料层切断，测定产生滑动时的切断力 F 和垂直方向的总作用力 ΣW ，则得（参看图1-1）

$$\varepsilon_i = \frac{F}{\Sigma W} \quad (1-8)$$

式中： ε_i ——内部摩擦系数；

内摩擦角为

$$\Phi_i = \text{tg}^{-1} \varepsilon_i \quad (1-9)$$

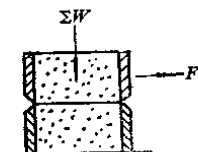


图1-1 直接切断法测定内摩擦角装置

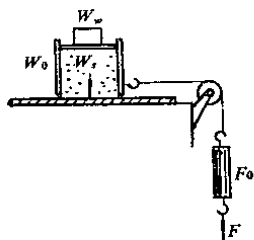
③壁面摩擦角与滑动角 壁面摩擦角表示料层与固体壁面之间的摩擦，滑动角表示每个粒子与壁面的摩擦。其影响因素比静止角 Φ ，和内摩擦角 Φ_i 还要多，现象也更为复杂。一般说来，滑动角 Φ ，大于壁面摩擦角 Φ_s 。（即 $\Phi_s > \Phi_s$ ）；对没有粘附性的物料， $\Phi_i \geq \Phi_s$ ， $\Phi_s \geq \Phi$ 。（当壁面粗糙度等于或超过粒子尺寸时，则等式成立）。

图1-2为测定 Φ_s 所用的装置。其壁面摩擦系数 ξ_s 为水平力的总和 ΣF 与垂直力的总和 Σw 之比，即

$$\xi_s = \frac{F_0 + F_s}{W_0 + W_s + W_s} \quad (1-10)$$

而

$$\Phi_s = \text{tg}^{-1} \xi_s \quad (1-11)$$



式中:

F_0 ——弹簧秤自重,
 F ——弹簧秤读数;
 W_0 ——木框的重量;
 W ——重块的重量;
 W ——物料的重量。

物料全部滑落时的滑动角 ϕ , 通常比开始滑动时的角度大 10° 以上。对于细粉, 则由于

粘附的缘故, 滑动角也可能大于 90° 。因此, 实际上通常规定滑落时的角度的 90% 为滑动角。

(5) 物料的粘附性

在物料输送中, 物料在流道内壁会形成粘附层, 严重时还会造成输料通道堵塞。影响粘附的因素很多, 实践证明, 细粉末或水分多的及有显著带电性的物料, 均会使输料设备的内壁面粘附严重。

粘附现象与物料颗粒之间的附着力以及与物料和固体壁面之间的附着力有关。颗粒之间的附着力包括: 分子之间的相互引力、附着水分的毛细管力和静电引力。这些力往往同时起作用, 但对不同物料, 其影响程度不同。对极细的粉料需考虑分子之间的引力, 而对含水率高的物料, 水分则起主要作用。此外, 对有些物料需考虑由于融(溶)化而互相粘结。对纤维类物料, 要考虑物料的互相缠绕。

在输料管内, 除有物料与壁面之间的附着力外, 还有因气流流动而产生的分离力。因此, 影响粘附的因素包括:

- ①物料及壁面的理化性质;
- ②物料、壁面及气流的物理参数, 如温度、湿度、带电情况、表面状态等;
- ③物料的粒径及粒度分布;