

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。同时对流化床燃烧的环境污染、灰渣物理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年级学生作为教学参考书。亦可供从事本专业的工程技术人员和现场运行管理人员参考。

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沔阳印刷厂印刷

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.

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 γ' 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 γ 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 e 表示。密实重量与容重、空隙率之间的关系为

$$\gamma_s = (1-e)\gamma' \quad (1-5)$$

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_R 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_s 间具有如下关系：

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

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）

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

式中： ϵ_i ——内部摩擦系数；

内摩擦角为

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

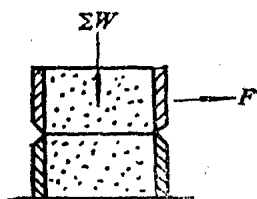


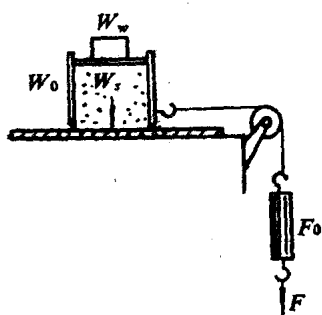
图1-1 直接切断法测定内摩擦角装置

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_s 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_w 大于壁面摩擦角 Φ_w （即 $\Phi_w > \Phi_w$ ）；对没有粘附性的物料， $\Phi_i \geq \Phi_w$ ， $\Phi_s \geq \Phi_w$ （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_w 所用的装置。其壁面摩擦系数 ξ_w 为水平力的总和 ΣF 与垂直力的总和 Σw 之比，即

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

$$\text{而} \quad \Phi_w = \text{tg}^{-1} \xi_w \quad (1-11)$$



式中：

- F_0 ——弹簧秤自重，
- F ——弹簧秤读数，
- W_0 ——木框的重量；
- W_s ——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；

④物料与气流的运动状态。

一般说来，物料的颗粒越细则粘附越容易，这是由于粒子小时单位质量的附着力以及机械的相互牵连作用增大的缘故。物料在壁面的粘附现象与气流速度及壁面的加工情况有关。当物料的附着力大于分离力时，会在壁面产生粘附。因此，必须选择合适的气流速度并且把壁面加工光滑。在弯头和除尘器内壁，由于离心力使冲击力及表面压力增高，所以容易产生粘附层。在管路断面的突然扩大处或伴有涡流的地方，由于气流速度降低，分离力减小，也容易产生粘附。

(6) 流体的压缩性与膨胀性

严格地说，流体密度是随压强和温度的变化而改变的，具有压缩性。但由于液体压缩性很小，一般可看作不可压缩流体。气体有明显的压缩性，但在一般情况下其运动速度比音速小得多，且当终压不大于初压的20%时，其密度变化很小，也可当作不可压缩流体处理。

流体的压缩性可用流体的容积压缩系数 β 来表示（当温度不变时），即

$$\beta = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \text{ [米}^2\text{/牛顿]} \quad (1-12)$$

式中： V ——容积[米³]
 p ——压力[牛顿/米²]。

它表示当压力增高一个单位时，容积 V 的相对减少值。

当温度变化时，流体容积改变的特性称为膨胀性。可用温度膨胀系数表示（当压力不变时），即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \text{ [1/}^\circ\text{C]} \quad (1-13)$$

它表示当温度增高1[°]C时，容积 V 的相对增加值。

(7) 流体的粘滞性

各种流体的动力粘性系数 μ 随着流体的温度和压力而变，压

力的影响不大，温度的影响显著。液体的 μ 随温度增加而下降，气体的 μ 随温度增加而增加。在研究流体的运动规律时， μ 和 ρ 经常是以 μ/ρ 的形式相伴出现，为应用方便，就把 μ/ρ 叫做运动粘性系数，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ [米}^2\text{/秒]} \quad (1-14)$$

对于水的运动粘性系数可按泊肃叶公式计算：

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{\mu}{\rho} \\ &= \frac{0.01775}{1 + 0.0387t + 0.000221t^2} \text{ [厘米}^2\text{/秒]} \end{aligned} \quad (1-15)$$

空气的粘性系数可按下式计算：

$$\mu = 1.758 \times 10^{-6} \times \frac{380}{380 + t} \times \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{1.75} \text{ [牛顿·秒/米}^2\text{]} \quad (1-16)$$

式中： ρ ——流体的密度[千克/米³]；

ν ——流体的运动粘性系数[米²/秒]；

t ——流体的温度[°C]。

流体的压缩性、膨胀性是流体内在应力变化引起流体体积的变化，而粘滞性促使切应力的变化引起流体形状变化。切应力大小取决于速度梯度，也可以理解为取决于变形角速度的大小。用公式表示则为

$$\tau = \frac{T}{F} = \mu \frac{dv}{dn} \quad (1-17)$$

式中： τ ——单位面积上所具有的摩擦力，叫摩擦应力或切应力；

T ——内摩擦力，其大小与流体的种类、流体的接触面积、垂直于接触面的速度梯度有关；

F ——流体的接触面积；

$\frac{dv}{dn}$ ——法线方向（垂直于接触面）的速度梯度。

在短暂时间内，可认为法线方向的速度梯度近似等于角变形速度，即

$$\frac{dv}{dn} \approx \frac{da}{dt} \quad (\text{角变形速度})$$

因为

$$\frac{da}{dt} \approx \frac{\text{tg}(da)}{dt} \approx \frac{dv \cdot dt}{dn} = \frac{dv}{dn} \quad (1-18)$$

从公式(1-17)还可看出，切应力的大小也取决于粘性系数 μ 。

(8) 物料的几何性质

几何性质是指物料的形状与大小。形状是各种各样的，大小范围也很宽，有以微米为单位的粉末和飞灰，也有以毫米为单位的煤粒、渣粒、砂子及矿石等。

如果物料的颗粒是大小均匀的球形，可以取其直径作为粒径。若颗粒的大小和形状不一，则应按一定的方法确定其平均粒径。因此，粒径可分为单一粒径(代表单个粒子)和粒子群的平均粒径(代表许多不同粒径的粒子群)，粒径的计算测定方法在许多专门书籍上都有介绍，在此不作详细介绍只对常用的粒子群平均粒径的计算方法作简要说明。

① 颗粒群的平均粒径计算

如果粒子较粗，可以一粒一粒数数目时，则可从试验中任意地广泛采集 n 个(实际应在大于200粒以上，越多越好)粒子，再用天平测定其总重量 $W_{..}$ ，设粒子的密实重度为 γ'_s ，则平均粒径 d 可按下式计算：

$$W_{..} = n \frac{\pi}{6} d^3 \gamma'_s$$

得

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6W_{..}}{\pi\gamma'_s n}} \quad (1-19)$$

式中: $W_{..}$ —— n 个粒子的总重量;
 n ——粒子个数;
 d_s ——粒子群平均粒径(等体积粒径);
 γ'_s ——粒子的密实重度。

对于粒子细到无法一粒一粒数数目时,则可采用重量平均直径法或比表面积平均直径法:

重量平均直径 \bar{d}_s ,它是各粒径 d_s (所处的相邻筛之孔径 d_s 和 d_{s+1} 的平均直径)与其重量分额 x_s 乘积的总和,即

$$\bar{d}_s = \sum_{i=1}^{n+1} x_i d_i \quad (1-20)$$

此法较简单,实质是算术平均法,它突出了粗颗粒的作用。

比表面积的平均直径法是在床层颗粒的比表面积起重要作用时才应用。设非球形颗粒的比表面积为 a'_i ,则

$$a'_i = \left(\frac{\text{颗粒表面积}}{\text{颗粒体积}} \right) = \frac{\pi d_i^2 / \Phi_i}{\pi d_i^3 / 6} = \frac{6}{\Phi_i d_i} \quad (1-21)$$

式中: Φ_i ——球形度,即形状系数, $\Phi_i = \frac{S_{i0}}{S_i}$

S_{i0} ——圆球体的表面积;

S_i ——颗粒的表面积。

设分布粒度非球形颗粒的平均比表面积 \bar{a}'_i 为

$$\bar{a}'_i = \sum_{d_{s,i} - d_{s,\min}}^{d_{s,i} - d_{s,\max}} a'_i x_i \quad (1-22)$$

若球形度相同,则

$$\bar{a}'_i = \frac{6}{\Phi_s} \sum_{d_{s,i}=d_{s,\min}}^{d_{s,i}=d_{s,\max}} x_i/d_{s,i} \quad (1-23)$$

用平均粒径 \bar{d}_s 表示的比表面积为

$$\bar{a}'_i = 6/(\Phi_s \bar{d}_s)$$

则

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum_{d_{s,i}=d_{s,\min}}^{d_{s,i}=d_{s,\max}} \frac{x_i}{d_{s,i}}} \quad (1-24)$$

或

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{x_i}{d_i}} \quad (1-25)$$

式中: n ——标准筛层数。

上述重量平均直径法和比表面积平均直径法中均需知道颗粒群中全部粒子的粒度分布。而颗粒群进行粒度分级一般是用筛分法。

② 粒度分布的表示法

物料的粒度组成可以用粒度分布的测定值表示,一般是用粒径 d_i 与它所占重量百分数 x_i 的粒度特性曲线表示。

③ 筛分

将大小不同的物料进行粒度分级时,一般可用筛分法。普通的筛子用平织的金属丝网制成。对孔径为25.4毫米(1英吋)以上的孔,直接称呼开孔的尺寸来表示孔的大小。对孔径小于25.4毫米(1英吋)的孔,用25.4毫米(1英吋)长度上的孔数表示,称为“网目”,简称为“目”。而德国是将1平方厘米中的孔数称为“目”。

表1所示的是我国常用的泰勒标准筛的目数（每25.4毫米孔数）和对应孔径（相邻网线间的孔径）的节录。

表 1-1 泰勒标准筛

目 数	孔 径 (微米)	目 数	孔 径 (微米)
3	6.680	48	0.295
4	4.699	65	0.208
6	3.327	100	0.147
8	2.362	150	0.104
10	1.651	200	0.74
14	1.168	270	0.53
20	0.833	400	0.38
35	0.417		

④形状系数

形状系数是用来描述粒子形状的参数。通常对于粒子群的平均直径计算是对形状相同而大小不同的粒子群而言。对那些形状不同，大小不一的粒子群来说，一般不能直接计算平均直径，必须先通过球形系数折算成球形之后，才能计算其平均直径。

单一粒子常见的形状系数有五种：

a. 面积形状系数 φ_s ：

$$\varphi_s = \frac{\text{粒子的总表面积}}{(\text{粒径})^2} \quad (1-26)$$

b. 体积形状系数 φ_v ：

$$\varphi_v = \frac{\text{粒子的体积}}{(\text{粒径})^3} \quad (1-27)$$

c. 比表面形状系数 φ_r ：

$$\varphi_r = \frac{\varphi_s}{\varphi_v} \quad (1-28)$$

d. 比表面：