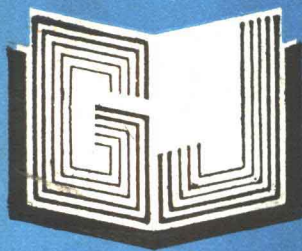


982995



高等学校教材

# 流化床燃烧技术

华中理工大学 刘德昌 主编  
华北电力学院 阎维平

29  
6



## 内 容 提 要

本书阐述了流化床燃烧的气动力学、传热、流化床燃烧、污染控制的基本原理,介绍了近几年来国内外流化床锅炉设计、运行方面的经验及编者的研究成果。全书共九章,内容包括流化床的基本性质、流化床燃烧、传热与流化床燃烧污染控制、循环床锅炉、流化床锅炉设计与运行,以及流化床燃烧技术在工业上的应用等。

本书是高等学校电厂热能动力专业的教材,也可以作为热能工程、工程热物理、采暖通风专业学生的参考书,还可供火电厂、锅炉厂、动力车间、化肥厂、水泥厂、有关设计院、研究所从事流化床锅炉和工业窑炉设计、制造、运行和研究等方面的工程技术人员阅读参考。

### 高 等 学 校 教 材 流 化 床 燃 烧 技 术

华中理工大学 刘德昌 主编  
华北电力学院 阎维平

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售  
北京市地矿局印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 10.5印张 233千字  
1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷  
印数 0001—2390册

ISBN7-120-02400-0/TK·357

定价 8.30元

# 前 言

流化床燃烧具有高效、低污染和对燃料适应性强等优点，从而受到世界各国的普遍重视。从 60 年代的第一代鼓泡床燃烧技术，发展到第二代循环床燃烧技术，现在已进入第三代燃烧技术——煤的流化床燃烧与煤化工相结合，煤的流化床燃烧与煤的气化相结合，加压流化床燃烧与燃气、蒸汽轮机联合循环发电和煤燃烧的综合利用技术的研究。可以预计，流化床燃烧技术将是下一个世纪的燃烧技术，对常规的煤粉燃烧技术将提出挑战。

我国已有许多单位都在从事流化床燃烧锅炉的研究、设计、制造和运行方面的工作。鼓泡床锅炉已工业化，循环床锅炉已投入运行，第三代燃烧技术正处于起步研究阶段。流化床的燃烧技术，除在锅炉上得到了广泛的应用外，还在高温工业窑炉和水泥工业等领域得到了应用。为了满足教学的需要和加速流化床燃烧技术的发展，我们编写了这本书。本书总结了国内外发展流化床燃烧技术的经验和近几年来所取得的最新研究成果。

本书由华中理工大学刘德昌（编写第一、六、九章）和华北电力学院阎维平（编写第二、四章）主编，华中理工大学林志杰（编写第三、五章）、朱策民（编写第七、八章）参编，由刘德昌统稿。

本书由重庆大学王致均教授审阅，在此表示感谢。

由于水平所限，书中缺点和错误难免，欢迎批评指正。

编 者

1995 年 3 月

# 目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 流化床燃烧锅炉发展概况	1
第二节 流化床锅炉的特点	3
第三节 流化床锅炉的组成与分类	4
第四节 发展流化床锅炉的意义	6
第二章 流化床的基本性质	8
第一节 粉体颗粒的物理特性	8
第二节 固定床及起始流态化下的气体动力特性	11
第三节 流态化的基本性质	16
第四节 流化的两相理论及气泡行为	19
第五节 布风装置的基本特性	24
第六节 流化床颗粒携带	26
第七节 流化床的模拟放大	29
第三章 流化床燃烧	31
第一节 流化床燃烧特点	31
第二节 流化床中煤粒挥发分析出及燃烧	32
第三节 流化床中炭粒的燃烧机理及影响燃烧速度的因素	35
第四节 流化床燃烧动力特性	41
第五节 悬浮段中炭粒的燃烧	43
第六节 影响流化床燃烧效率的因素及提高燃烧效率的途径	46
第四章 流化床传热	50
第一节 概述	50
第二节 流化床与受热面间放热的机理模型	51
第三节 颗粒对流换热分析解	54
第四节 影响流化床与受热面换热的因素	57
第五节 流化床与浸埋表面间放热系数的测定	62
第六节 流化床与受热面间放热系数的实验关联式	64
第七节 颗粒与气体间的换热	67
第五章 流化床燃烧污染控制	70
第一节 流化床燃烧产物的排放	70
第二节 流化床燃烧过程脱硫	72
第三节 流化床燃烧过程脱氮	76
第六章 循环床燃烧锅炉	87

第一节	循环床锅炉的发展概况 .....	87
第二节	循环床锅炉的特性和优缺点 .....	88
第三节	循环床燃烧系统的组成及其主要部件 .....	90
第四节	循环床锅炉的种类及其特点 .....	91
第五节	循环流化床气动力特性 .....	94
第六节	循环床的传热 .....	97
第七节	循环床锅炉的燃烧特性 .....	99
第八节	循环床锅炉的污染控制特性 .....	101
第九节	循环床锅炉的布置和设计要点 .....	103
第十节	循环床锅炉物料回送技术 .....	107
第十一节	小型循环床锅炉的最新发展 .....	109
<b>第七章</b>	<b>流化床锅炉设计 .....</b>	<b>113</b>
第一节	煤的特性和蒸汽参数对流化床锅炉整体布置的影响 .....	113
第二节	流化床的结构及若干参数的确定 .....	118
第三节	布风装置的种类及设计 .....	123
第四节	受热面布置及设计 .....	129
<b>第八章</b>	<b>流化床锅炉运行 .....</b>	<b>136</b>
第一节	流化床锅炉的冷态试验 .....	136
第二节	流化床锅炉点火 .....	140
第三节	流化床锅炉运行 .....	146
第四节	流化床锅炉受热面的磨损及防磨措施 .....	148
<b>第九章</b>	<b>流化床燃烧技术在工业上的应用 .....</b>	<b>151</b>
第一节	流化床燃烧技术在锅炉上的应用 .....	151
第二节	流化床燃烧技术在高温烟气炉上的应用 .....	155
第三节	流化床燃烧技术在水泥工业上的应用 .....	157
第四节	流化床燃烧技术的其他应用 .....	159
参考文献	.....	160

# 第一章 绪 论

## 第一节 流化床燃烧锅炉发展概况

流化床燃烧锅炉具有许多优点：对燃料适应性强，燃烧效率高，污染控制特性好，负荷调节范围大，适合改造超龄锅炉，便于实现灰渣的综合利用等。近年来，国际上主要工业发达国家都集中财力和人力加快了对它的理论研究和工业发展研究。

### 一、国际上流化床燃烧锅炉的发展现状及趋势

当前国际上流化床锅炉的发展集中在以下几方面：

(1) 带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉 美国 TVA 夏伍衣 (Shawnee) 示范电厂于 1988 年投入运行，蒸发量为 499t/h 的锅炉可作为典型代表。试运行结果表明：该锅炉具有高效、低污染燃烧，对煤种适应性强，负荷调节特性好等优点。

(2) 带飞灰燃尽床的鼓泡床锅炉 日本电力动力发展公司研制的蒸发量为 156t/h、带 5 万 kW 机组的锅炉可作为典型代表。自 1987 年投运以来已累计运行 1 万 h，运行结果表明：燃烧稳定，对煤种适应性好，锅炉效率高，能达到环保要求。

(3) 循环床锅炉 联邦德国、美国、芬兰、中国都在积极发展各自形式的循环床锅炉。联邦德国的 Lurgi 型，其典型代表是杜易斯堡 (Duisberg) 的 270t/h、带 9.6 万 kW 机组的锅炉。到 1994 年 4 月它已累计运行 6 万 h，锅炉效率达到了 90.8%。美国的拜特乐 (Battelle) MSFB 锅炉，典型代表是 1984 年在爱尔兰 Kerry 县投运的、蒸发量为 53t/h 的锅炉。实践证明：其对燃料适应性、污染控制特性极好，燃烧效率达 99%。芬兰有奥斯龙型 (Ahlstrom)，典型代表是美国纽克拉 (Nucla) 电厂 420t/h、带 11 万 kW 电功率的锅炉，到 1994 年底已累计运行 3.4 万 h。中国清华大学和华中理工大学研制了具有  $\Pi$  型布置的循环床锅炉。清华大学和四川锅炉厂联合开发的 35t/h 循环床锅炉于 1989 年在包头纺织总厂点火试运行。华中理工大学与武昌锅炉容器厂研制的 35t/h 循环床锅炉也在益阳石煤发电综合利用实验厂投入运行。

(4) 先进的加压流化床燃烧系统 即将煤的气化、煤的燃烧相结合，搞蒸汽轮机和燃气轮机联合循环发电。美国福斯特惠勒公司受能源部的委托正在试验研究一种先进的加压流化床燃烧系统。其主要研究内容是：部件性能研究；污染控制新方法研究；降低发电成本 22%。联邦德国鲁奇公司正在发展一种非传统的循环床燃烧系统——18 万 kW 热功率的联合循环电厂。该系统由一个产生煤部分气化的加压流化床和一个燃烧加压流化床排出的残炭和煤的常压循环床组成。加压流化床产生的高温烟气推动燃气轮机发电；常压循环床产生的蒸汽推动蒸汽轮机发电。试验厂的试验证明：焦炭的气化率达 60%~75%，燃烧效率大于 99%， $Ca/S=1.5\sim 2.0$  时脱硫效率达 90%~97%。

(5) 各种新型流化床锅炉 旋涡流化床锅炉、煤的气化和残炭燃尽两段流化床锅炉、快

速内循环床锅炉、多提升管浅床流化床锅炉等,各种新型流化床锅炉正在美国、英国发展,目前已进入工业性试验研究阶段。这些炉型的共同特点是结构紧凑。

(6) 旧锅炉、超龄锅炉、燃油锅炉改造和电厂扩容工程中流化床燃烧技术的应用 煤粉锅炉改带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉,其典型代表是美国黑狗子电站二号机组,锅炉蒸发量为 472t/h,电功率为 12.5 万 kW。燃油锅炉改烧煤泥的循环流化床锅炉,其典型代表是法国 Emile Huchet 电厂 10 万 kW 燃油锅炉的改造,改造后其电功率扩大到 12.5 万 kW。燃油锅炉改带飞灰燃尽床的鼓泡床锅炉,其典型代表是日本电力动力公司正在进行的将 Takehara 电厂 35 万 kW 燃油锅炉的改造设计,该锅炉计划于 1995 年试运行。

综上所述,目前国际上流化床锅炉的发展趋势是:

(1) 为了提高燃烧效率和脱硫剂的利用率,正在积极发展各种形式的带飞灰燃尽床和飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉和各种形式的循环床锅炉。

(2) 正在寻求发展第三代燃烧技术——非常规加压流化床燃气、蒸汽联合循环发电,以达到高效、低污染、低成本的目的。

(3) 为了满足大电网的需要,发展 10~35 万 kW 流化床锅炉是当前主要目标。

(4) 采用流化床燃烧新技术,实现对旧锅炉、超龄锅炉改造和电厂扩容,提高效率,减少污染,增强对燃料的适应性,亦是世界各国普遍关注的问题。

## 二、我国流化床燃烧锅炉的发展

我国发展流化床锅炉已有近 20 年的历史。这 20 年来,发展流化床锅炉的主要目的是利用劣质燃料。其发展过程大致可分成三个阶段:

(1) 改造旧锅炉,掌握流化床燃烧技术。从 60 年代中期到 70 年代中期,主要是改造旧锅炉,利用当地劣质燃料。其典型代表是广东江门甘蔗化工厂的 50t/h 和四川永荣矿务局的 19t/h 的流化床锅炉。通过这些改造旧锅炉的试验,基本上掌握了流化床燃烧技术,为研制新锅炉打下了基础。

(2) 研制新锅炉,应用流化床燃烧技术。上海发电设备成套设计研究所和上海锅炉厂在一系列试验台试验和工业性试验的基础上,共同研制了电站用 35t/h 和 130t/h 流化床锅炉,分别安装在益阳石煤发电综合利用试验厂和鸡西矿务局滴道电厂。东方锅炉厂也在试验研究的基础上制造了 35t/h 流化床锅炉,安装在四川永荣矿务局电厂。这几台锅炉的运行实践证明:流化床锅炉是利用我国劣质燃料的一条途径。

(3) 发展循环床锅炉,提高流化床燃烧技术。为了提高燃烧效率,各科研单位、高等学校和制造厂家合作,研制了各种形式的循环床锅炉和带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉。清华大学与中国科学院工程热物理所研制的 35、75t/h 循环床锅炉相继运行;哈尔滨工业大学、上海发电设备成套设计研究所研制的 130t/h 带飞灰循环燃烧的新型 130t/h 鼓泡床锅炉已投入运行;浙江大学研制的 35t/h 煤泥流化床锅炉也已投入运行;华中理工大学研制的 35t/h 循环床锅炉具有典型的 II 型布置和中温除尘的特点,也已投入运行。清华大学与中国科学院工程热物理所目前正在研制 220t/h 的循环床锅炉。这阶段发展的特点是循环床锅炉与带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉同时并举,并以利用劣质煤为中心转向高效、低污染的煤燃烧技术的综合发展。

我国能源结构是以煤为主，年原煤产量超过 10 亿 t。另外，我国煤矸石的堆积量为 10~12 亿 t，并以年近 1 亿 t 的数量增加，其中 1/3 以上的煤矸石热值在 3350kJ/kg 以上，有利用价值。石煤的储量也十分丰富，仅南方几省就有 618.8 亿 t。褐煤已查明的储量为 845 亿 t。入洗原煤量 1989 年为 1.9 亿 t，1990 年为 2.1 亿 t，相应的煤泥量为 1300 万 t 和 1500 万 t，热值为 8374kJ/kg 左右。应用流化床燃烧技术，燃烧上述燃料，无疑有重要战略意义。可以预料未来的 5~10 年间，是我国流化床燃烧锅炉向大型化发展的年代。我国的发展战略布署是：因地制宜地发展带飞灰循环燃烧的鼓泡床锅炉和各种形式的循环床锅炉，切忌一风吹，一边倒；在旧锅炉和超龄锅炉的改造中使用流化床燃烧技术，以达到既能提高燃烧效率、减少污染，又能利用低质燃料的目的。

## 第二节 流化床锅炉的特点

流化床锅炉与层燃锅炉、煤粉锅炉相比，前者具有高效、低污染、低成本等特点，显示了它强大的生命力，近 10 年来得到了迅速的发展。特别是加压流化床燃烧技术能将煤化工和煤燃烧综合，实现蒸汽-燃气联合循环发电，是世界主要工业发达国家正在致力发展的第三代燃烧技术。

### 一、流化床燃烧锅炉的优点

(1) 对燃料的适应性特别好，可以烧优质煤，也可以烧各种劣质燃料——高灰煤、高硫煤、高灰高硫煤、高水分煤、各种煤矸石，还可以烧油页岩、石油焦、尾矿、煤泥、尾气、炉渣、树皮、废木头、垃圾等。在燃料来源、品种和质量多变的情况下，采用流化床燃烧技术是特别适宜的。

(2) 燃烧效率高。采用带飞灰循环燃烧的流化床锅炉，根据炉型和煤种的不同，燃烧效率可达 90%~99%。

(3) 流化床的截面热强度高，鼓泡床锅炉的截面热强度为 1~3MW/m<sup>2</sup>，循环流化床的截面热强度为 3~8MW/m<sup>2</sup>。

(4) 流化床燃烧温度一般为 900℃左右，采用石灰石作为床料添加剂时，炉内脱硫效果好。与煤粉锅炉采用烟气干法和湿法脱硫相比，前者电厂投资和运行费用大为降低。

(5) 流化床锅炉一般采用分级燃烧，燃烧温度不高，NO<sub>x</sub> 的生成量显著减少。鼓泡床锅炉烟气中 NO<sub>x</sub> 的浓度为 300~400ppm，循环流化床锅炉烟气中 NO<sub>x</sub> 的浓度为 100~200ppm。

(6) 流化床锅炉的负荷调节范围大，调节性能好。对鼓泡床锅炉，采用分床压火或调节料层厚度，负荷变化范围为 100%~50%。对循环床锅炉，采用改变灰循环量可使锅炉的负荷变化范围为 100%~25%。负荷的连续变化速率可达 5%~10%。

(7) 流化床锅炉的溢流渣、冷渣含碳量低，可作为水泥熟料的添加剂和建筑材料。

### 二、流化床燃烧锅炉的缺点

(1) 鼓泡床锅炉如不采用飞灰循环燃烧，则燃烧效率不高；采用飞灰循环燃烧，燃烧效率可与煤粉锅炉相媲美，但系统较复杂。



(2) 流化床锅炉的排烟原始含尘浓度比一般层燃锅炉高很多，特别在烧高灰分煤时就高得更多，这就对除尘设备的型式及除尘系统的组成提出了更高的要求。否则，将影响在第一类、二类环保地区的使用。

(3) 流化床锅炉采用高压鼓风机，其电耗较高，且噪声大，污染环境。

(4) 床内受热面、炉墙及对流受热面的磨损比层燃锅炉和煤粉锅炉严重。

### 第三节 流化床锅炉的组成与分类

#### 一、流化床锅炉的组成

流化床锅炉主要由浓相床、稀相床（悬浮段）、床内受热面、布风装置和尾部受热面五部分组成（图 1-1）。布风装置由风室、布风板和风帽组成。浓相床内的床料与煤被流化，煤被燃烧。细小煤粒吹入悬浮段继续燃烧。燃烧室内煤燃烧放出热的一部分被床内受热面吸收；另一部分被烟气和飞灰带离燃烧室被后面的对流受热面吸收。布风装置将燃烧空气均匀分配，使浓相床流化质量良好，获得好的燃烧效果和床与受热面之间好的传热工况。

#### 二、流化床锅炉的分类

根据流化床的流动形态和床料的不同，流化床锅炉可分成三大类：鼓泡床锅炉、循环床锅炉和加压流化床锅炉。

##### 1. 鼓泡床锅炉（图 1-1）

鼓泡床锅炉的特点是流化速度较低。流化速度  $u = q_v / (A_b \times 3600)$ ， $q_v$  为进入燃烧室的流化空气量 ( $m^3/h$ )， $A_b$  为床的截面积 ( $m^2$ )。鼓泡床热态流化速度一般为  $3 \sim 4 m/s$ 。煤粒的尺寸一般为  $0 \sim 10 mm$ 。浓相床由乳化相和气泡相组成，床内有埋管受热面，是这种锅炉的另外两个特点。这类锅炉的优点是结构较简单，缺点是飞灰含碳量高，燃烧效率不高。

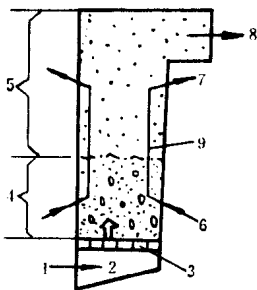


图 1-1 流化床锅炉结构

1—流化空气；2—风室；3—布风板；4—浓相床；5—悬浮段；6—水进口；7—汽水混合物出口；8—高温烟气去对流受热面；9—床内受热面

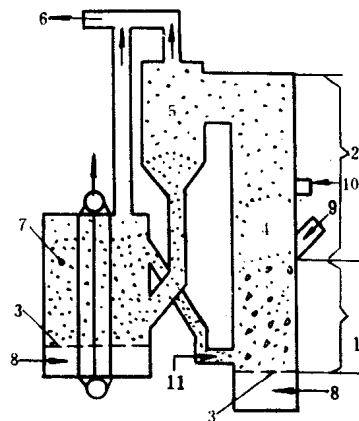


图 1-2 MSFB 锅炉

1—大粒子床；2—小粒子床；3—布风装置；4—燃烧室；5—高温分离器；6—高中温烟气去对流受热面；7—外部低速流化床热交换器；8—流化空气；9—给煤口；10—二次风；11—L 阀送灰器

## 2. 循环床锅炉

循环床锅炉有如下几种类型：

(1) 多粒子流化床锅炉 (图 1-2) MSFB (Multi-Solids Fluidized Bed) 锅炉是由美国拜特 (Battelle) 哥伦布实验室研制的。它主要由燃烧室、高温分离器、飞灰回送装置和外部低速流化床热交换器组成。燃烧室由下部大粒子床和上部小粒子床组成。燃烧室内没有布置受热面。高温分离器收集燃烧室出来的飞灰送入外部低速流化床热交换器, 生产蒸汽和使蒸汽过热。被冷却了的飞灰再回送至燃烧室再燃烧。飞灰的回送采用非机械式的 L 阀。这种锅炉的特点是燃烧与传热分开。来自高温分离器和外部低速流化床热交换器的高中温烟气流入尾部对流受热面, 冷却和除尘之后, 经引风机排入大气。这种锅炉的优点是燃烧效率高, 但结构复杂。

(2) Pyroflow 循环床锅炉 (图 1-3) 这种锅炉主要由燃烧室、高温分离器、送灰装置组成。与 MSFB 锅炉相比, 它没有外部低速流化床热交换器。它的优点是结构较简单, 燃烧效率高。

(3) Circofluid 循环床锅炉 (图 1-4) 这种锅炉的特点是: 鼓泡床上加了一个小粒子床; 采用中温分离器; 没有外部低速流化床热交换器; 燃烧室顶部布置有对流受热面和采用了烟气再循环。它的优点是燃烧效率高, 结构比较简单。

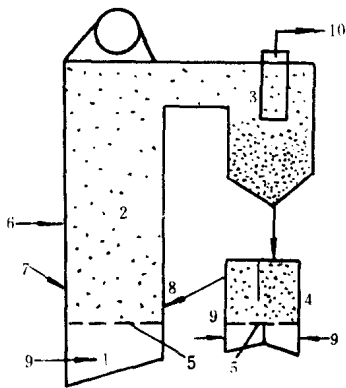


图 1-3 Pyroflow 循环床锅炉

1—风室; 2—燃烧室; 3—高温分离器;  
4—送灰器 (流化室封型); 5—布风板;  
6—二次风; 7—给煤; 8—循环灰通道;  
9—流化空气; 10—高温烟气去尾部对流  
受热面

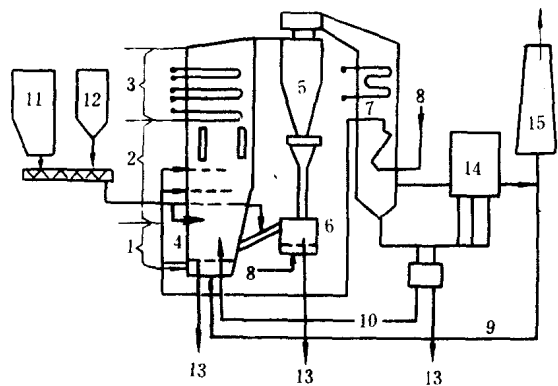


图 1-4 Circofluid 循环床锅炉

1—大粒子床; 2—小粒子床; 3—对流受热面; 4—热  
空气 (二、三次风); 5—中温分离器; 6—送灰器; 7—  
废热锅炉; 8—冷空气; 9—循环烟气; 10—循环  
飞灰; 11—煤仓; 12—石灰石仓; 13—排灰点;  
14—除尘器; 15—烟囱

鼓泡床锅炉和循环床锅炉在工业锅炉和电站锅炉中都已商品化了。表 1-1 给出了它们的有关数据。

## 3. 加压流化床锅炉

加压流化床锅炉是一种清洁、高效的燃烧新技术。由于它在满足环保排放要求和实现电站大型化方面有显著的优越性, 所以被认为是燃煤联合循环发电中十分有前途的方案之

表 1-1

流化床燃烧锅炉的有关数据比较

项 目 \ 形 式	鼓泡床锅炉	Circrofluid 锅炉	Pyroflow 锅炉	MSFB 锅炉
热功率范围 (MW)	1~100	20~400	20~400	4~200
流化速度 (m/s)	1~3.5	3.5~5.0	6.0~8.0	7~10
高温分离器温度 (°C)	—	300~500 (中温)	850	850
尾部除尘器温度 (°C)	130~150	130~150	130~150	130~150
燃烧效率 (%)	90~95	99	99	99
飞灰循环倍率	—	10~20	50~100	35
1MW 热功率消耗的电功率 (kW)	14	18	26	—
启动时间 (h)	2	2	16	16
脱硫效率/钙硫比 $\eta_{SO_2}/(Ca/S)$	90%/3	90%/1.6	90%/1.6	90%/1.6
$NO_x$ (mg/m <sup>3</sup> )	<300	<200	<200	<200

一, 受到世界各国的普遍重视。瑞典 ABB 公司分别在瑞典、西班牙和美国建立了发电功率为 80MW 的加压流化床燃烧联合循环示范性电站。美国拟建发电功率为 330MW 的加压流化床联合循环发电商业性电站。我国东南大学自 1981 年起, 经历了 10 年的实验室规模的研究, 建立了 1MW 热功率的试验装置, 进行了燃烧和排放控制等方面的试验。目前正在研制试验规模的电厂。

#### 第四节 发展流化床锅炉的意义

##### 一、节约燃料和利用劣质煤

我国是一个以煤为主要能源的国家, 煤炭资源仅次于前苏联、美国, 煤炭年产量占世界第一位。已探明我国煤炭储量达 7700 亿 t, 南北煤炭储量和质量差别甚大。北方煤炭资源丰富、煤质好。南方煤炭资源贫乏、煤质差。多年来煤矸石的累积量为 10~12 亿 t 以上, 加上洗中煤, 每年可用来发电的劣质煤、煤矸石可达 4000~5000 万 t, 可装机 2000~3000MW。流化床燃烧锅炉能烧优质煤, 也能烧劣质煤。带飞灰燃尽床的鼓泡床锅炉和循环床锅炉燃烧效率高, 可与煤粉锅炉相竞争。从节约煤炭和利用劣质煤的观点出发, 发展流化床锅炉的意义是不言而喻的。

##### 二、保护大气环境

煤燃烧过程中生成的  $SO_x$ 、 $NO_x$  等有害气体已威胁全球, 我国每年排入大气中的  $SO_2$  约 87% 和  $NO_x$  约 67% 来自煤的燃烧, 造成了大面积酸雨, 严重影响工业和农业的生产。

燃烧过程中生成的  $CO_2$  和  $N_2O$  等是产生地球温室效应的气体, 更引起世界各国科学家密切的关注。研究报告指出, 1988 年的地球平均温度比前一些年提高了 6°C。由于气候变暖, 地球的海平面在过去 100 年中升高了 14cm。专家们估计: 如果现在地球变暖的趋势不加控制, 到 2100 年, 地球海平面将升高 1m。这将威胁沿海好几亿人口的居住问题。如孟

加拉国领土的 15% 将被海水淹没，埃及 12%~15% 的可耕地将变成海洋。总之，这一情况对岛国的影响是十分严重的。就我国来说，将涉及到上海等沿海大中城市的淹没。

总之，燃烧过程中生成的有害气体，特别是温室效应气体引起的全球变暖是没有国界的。保护环境，保护地球，也就是保护人类本身，应作为头等重要的大事列入联合国的议事日程。

流化床燃烧，采用石灰石作添加剂能实现燃烧过程中脱硫。另外，流化床燃烧温度可控制在 850~950℃，燃烧过程中生成的  $\text{NO}_x$  能满足环保的排放标准。

### 三、流化床燃烧有利回收 $\text{CO}_2$

$\text{CO}_2$  是一种温室效应气体，它的有害影响如上所述。流化床燃烧首先采用床内脱硫，然后再用湿法脱除烟气中的残余  $\text{SO}_2$ 。在烟气中  $\text{SO}_2$  含量极微的情况下，用压力为  $3.535 \times 10^5 \text{Pa}$  的蒸汽轰击烟气能回收  $\text{CO}_2$ ，使其压缩和液化，最后通过过滤达到食用等级的质量，以液体和干冰的形式出售。这一方面起到了减轻地球的温室效应，另一方面能以出售二氧化碳液体和干冰得到直接的经济效益。由于减小了温室效应，阻止地球变暖而带来的海平面上升所得到的社会效益是无法用数字表示清楚的。

综上所述，流化床燃烧是一种很有前途的燃烧方式。

## 第二章 流化床的基本性质

### 第一节 粉体颗粒的物理特性

由粉体颗粒组成的流化床层的特性与粉体颗粒的物理特性密切相关，其中以颗粒的粒径、形状因子、粒径分布及堆积特性最为重要。

#### 一、单个颗粒大小的表示方法

一个颗粒的大小，应当用一个具有代表性的几何尺寸来表示，该尺寸应最能体现这个颗粒在所应用场合中的作用。实际中常用的非球形颗粒，可由一个具有某种特征的直径连同另一个表示形状特性的因数近似的描述。颗粒床层研究中常见的四种直径有：

(1) 体积直径  $d_v$  即与待测颗粒具有相同体积  $V_p$  的假想圆球直径，可表示为

$$d_v = (6V_p/\pi)^{\frac{1}{3}} \quad (2-1)$$

(2) 面积直径  $d_s$  即与待测颗粒具有相同外表面积  $S$  的圆球直径，可表示为

$$d_s = \sqrt{S/\pi} \quad (2-2)$$

(3) 面积体积直径  $d_{sv}$  即与待测颗粒具有相同的体积和外表面积比的圆球直径，可表示为

$$d_{sv} = \frac{6V_p}{S} = \frac{6}{a} \quad (2-3)$$

式中  $a$ ——比表面积，见式 (2-5)。

(4) 筛分直径  $d_p$  颗粒可以通过的最小方筛孔的宽度。

颗粒形状因子  $\phi$  的定义：一个与待测颗粒体积相等的圆球表面积与该颗粒的表面积之比。 $\phi$  与上述各直径的关系为

$$\phi = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad \text{或} \quad \phi = \frac{d_{sv}}{d_v} \quad (2-4)$$

统计数据表明， $d_v \approx d_p$ 。由于  $d_p$  测定方便，因而常用  $d_{sv} = \phi d_p$ 。在固定床及流化床的研究工作中，把  $\phi d_p$  的乘积看作一个单独参数。直接测定  $\phi$  值很困难，但可以间接确定（见本章第二节）。某些粉体颗粒的形状因子的数值见表 2-1。

表 2-1 粉体颗粒的形状因子

种 类	$\phi$
粉碎煤粉	0.73~0.75
粉碎砂石	0.8~0.9
圆砂	0.92~0.98

#### 二、粉体颗粒的粒径分布及平均粒径

实践证明，千奇百态的多分散粉体颗粒，其颗粒大小总服从统计学的某种分布规律。因而，由分布曲线不难得出其中心趋势，如平均粒径及离散程度。

## 1. 粒径分布

在粉体样本分析中，将某一大小或某一大小范围内的颗粒数目与颗粒大小的关系称为频数分布曲线。自然产生或人工磨制的粉体颗粒分布曲线常可近似为对数正态分布，如图 2-1(a) 所示。为分析方便，常绘在对数坐标纸上，对正态分布曲线的中心趋势可一目了然 (图 2-1, b)。

另一种重要的粒径分布表示方法为累积质量百分比分布，即将颗粒大小的质量百分比按从小到大的方式累积，所得的累积分布表示小于某一粒径的颗粒质量的百分数。对于理想的对数正态分布，则累积分布在概率纸上应为一条直线，如图 2-2 所示。

较之频数分布，累积分布更有用。如实际中可能遇到的二元以上的颗粒混合物，在频数百分比分布曲线上则出现多个峰值而无法确定其中心趋势，采用累积分布则会消除曲线的多峰状况。另外，由于累积分布在概率纸上为一直线，故可由较少的测量数据得到完整的分布曲线。

## 2. 平均粒径

各种平均粒径被用来定量地表达多分散粉体颗粒的大小，各种平均粒径值都是基于某一物理概念或由粒径分布的某一集中趋势定义的。在流态化研究中常采用以下两种平均粒径。

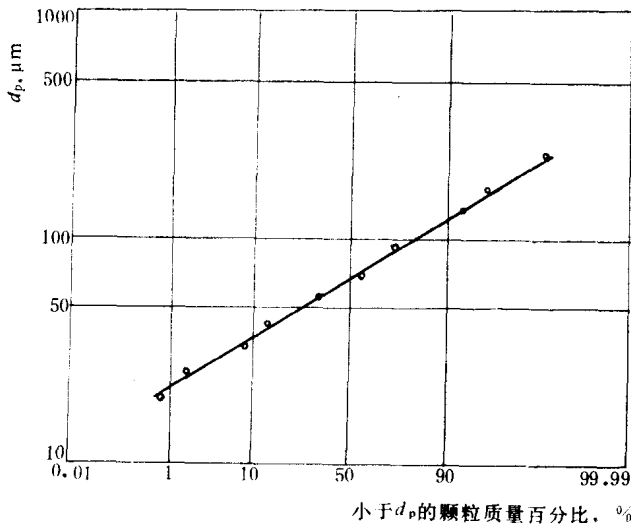


图 2-2 颗粒累积分布曲线

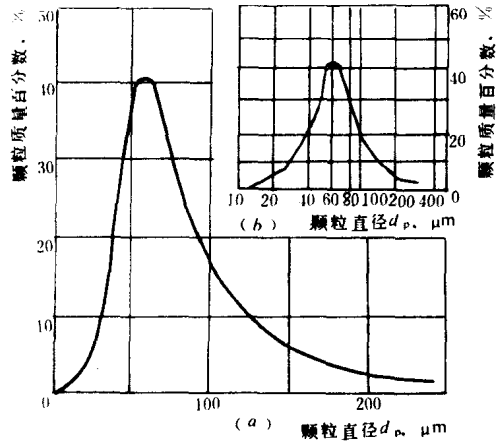


图 2-1 颗粒频数分布曲线  
(a) 粉体颗粒分布曲线；(b) 粉体颗粒在对数坐标图上分布曲线

(1) 比表面积粒径 这是单位体积的粉体颗粒总表面积的当量直径。在某一球形颗粒组成的样本中，直径为  $d_i$  的  $N_i$  个颗粒的总表面积与总体积之比定义为比表面积  $a_i$ ，即

$$a_i = \frac{\pi N_i d_i^2}{\frac{\pi}{6} N_i d_i^3} = \frac{6}{d_i} \quad (2-5)$$

对全部样本的平均比表面积  $\bar{a}$  为

$$\bar{a} = \sum_i x_i a_i$$

式中  $x_i$ ——直径为  $d_i$  的颗粒质量百分比。

平均比表面积与对应的样本的平均粒径的关系为

$$\bar{a} = \frac{6}{d_p} = \sum_i x_i a_i$$

将式 (2-5) 代入上式得平均粒径

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}} \quad (2-6)$$

$d_p$  值可由筛分法得到。对非球形颗粒，由颗粒形状因子  $\phi$  加以修正，即  $d_{sv} = \phi d_p$ 。在纯经验关联式中往往直接采用筛分平均粒径  $d_p$ 。

(2) 几何平均粒径 (又称为中位数值粒径)

$$d_g = (d_1^{x_1} \cdot d_2^{x_2} \cdots d_i^{x_i})^{\frac{1}{m}} \quad (2-7)$$

式中  $m$ ——样本总质量。

若以对数表示，则有

$$\lg d_g = \frac{1}{m} \sum_i (x_i \lg d_i)$$

所以，几何平均粒径也为对数意义上的算术平均粒径，即在对数坐标上表示的正态分布的中位数粒径 [图 2-1(b)]。在对数概率纸上累积分布百分比为 50% 所对应的粒径，即几何平均粒径。这样，将筛分数据整理绘在概率纸上应近似连为一直线，由 50% 所对应的粒径为几何平均粒径。对非球形颗粒，同样用  $\phi$  修正，即  $d_{sv} = \phi d_g$ 。实际上，此乘积对于颗粒混合物来说，是唯一能恰当地表示其粒径和形状特性的量。

对同一粉体样本，各种平均粒径的大小有时相差悬殊。在工程技术上，一般要指明所采用的平均粒径，比较试验结果或引用关联式时也应注意，否则会得出不准确的结论。

### 3. 粒径分布离散程度的特征数

几种粒径分布的粉体样本，有可能得到完全相同的平均粒径。因此，在给出粒径分布的平均粒径的同时，还应给出一个能表示粒径分布宽窄程度的参数，这个参数叫做粒径分布离散程度的特征数。研究亦表明，粒径分布宽窄对流化状态有明显的影响。定性比较粒径分布宽窄可由粒径分布曲线直观地得出。累积分布曲线具有独特的优越性，其在概率纸上的斜率即粒径分布宽窄的度量。斜率越小，分布越集中；反之越宽。

目前，还没有定量地定义粒径分布宽窄的满意方法。从实用角度出发，有人建议采用相对粒径分布宽度，即分布的标准偏差  $\sigma$  与中位数粒径  $d_m$  的比值， $\sigma/d_m$ 。这两值可方便地由累积分布曲线上求得。表 2-2 给出粒径分布宽窄的判据。

表 2-2 粒径分布宽窄的推荐判据

$\sigma/d_m$	0	0.03	0.17	0.25	0.33~0.48	0.6~0.7	>0.8
离散程度	均一	窄	较窄	较宽	宽	很宽	极宽

#### 4. 粒径分布的测定

上述各种求平均粒径的方法均需要知道颗粒样本的粒径分布，即要测定样本中各个级别的颗粒质量。筛分是对样本进行分级的最常用的方法。筛分的主要工具是标准筛，是由若干个不同筛孔尺寸的筛子，由大至小由下而上顺序叠成套筛，顶上有一盖（为减少粉尘的损失），底层有一底盘（承受筛下的颗粒）组成。筛框直径为 200mm，高度 50mm，筛网材料为金属丝。筛孔的系列是基于某一可达到的最小孔边长尺寸，以  $\sqrt{2}$  或  $\sqrt[3]{2}$  的倍数递增。筛分时，将称过重的样本（100g 左右）放在最上层的筛子上，采用机械振动方法簸动 5~10min 左右，使样本按粒子的大小分布留在各层筛上分成若干粒径级，然后称各粒径级的质量，并计算各粒径级的质量百分比，各粒径级的平均粒径取其上下两筛孔直径的几何平均值。

### 三、粉体的密度与空隙率

粉体是微小粒子的集合体，颗粒间空隙充满气体。其中，对于没有内部孔隙的颗粒来说，其单位体积的质量称为颗粒的真实密度  $\rho_p$ 。对含有孔隙的颗粒，若把孔隙的体积也看作为颗粒体积的一部分，则可得到假密度。而对包括空隙在内的混合体而言，其单位体积的质量称为视在密度  $\rho_b$ （一般不计气体的质量）。若在体积为  $V$  的粉体中，气体与颗粒所占的体积分别为  $V_a$  与  $V_s$ ，则  $V_a$  占总体积的份额称为空隙率  $\epsilon$ ，且有如下关系

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_a + V_s} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (2-8)$$

当颗粒为均匀圆球时， $\epsilon$  的变化范围为 0.26~0.48。对一般工程材料  $\epsilon$  往往超出此范围。空隙率的数值与颗粒的形状、粒径、粒径分布、充填方法及容器的大小有关，在流态化下还与流化条件有关。

## 第二节 固定床及起始流态化下的气体动力特性

### 一、固定床层的流动阻力

气体通过颗粒固定床层的流动依颗粒的大小及密度不同而呈不同的流动状态。对低密度小尺寸的颗粒床层，在达到起始流态化前，床层内的流动均维持在层流状态。对高密度大尺寸的颗粒床层，则流动可能进入过渡区或湍流区。因而，所产生的压力损失对前者主要是归于气体与颗粒表面间的摩擦，而后者主要是归于流道截面积的突然扩大和收缩以及气体对颗粒的撞击。由于气体通过颗粒层的流动与气体流经管道具有相似之处，因而可以借用其基本分析结论。

当气体以层流流经床层时，仿照管内层流的流量定律：流经管长  $l$  的体积流量正比于比压降  $\Delta p/l$  和管子直径的四次方，且反比于流体粘度  $\mu$ 。将床层中的通道视为许多弯曲孔道，孔道的当量直径为  $d_c$ ，通道长度与床层深度  $H_s$  成正比，则

$$\frac{\Delta p}{H_s} \propto \frac{\mu}{d_c^3} u_1 \quad (2-9)$$

式中： $u_1$  为孔道中的气流速度，与流经床层的空截面速度  $u$ （以床层截面计）的关系为



$$u_1 = u/\epsilon \quad (2-10)$$

床层孔道的当量直径用床层孔道的体积  $V_n$  与床层颗粒的全部表面积  $S$  之比来表示。结合式 (2-8) 及比表面积  $a$  的定义可得

$$d_e = \frac{\epsilon}{a(1-\epsilon)} \quad (2-11)$$

连同式 (2-3) 带入式 (2-9), 得

$$\frac{\Delta p}{H_s} \propto \frac{\mu}{d_{sv}^2} \times \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} u$$

层流式的雷诺数  $Re = \frac{d_e u_1 \rho}{\mu} < 1$ 。

在充分湍流的情况下 ( $Re > 1000$ ), 阻力系数与  $Re$  无关, 因而压降与流体动压成正比, 与通道直径成反比, 可得到

$$\frac{\Delta p}{H_s} \propto \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \times \frac{\rho u^2}{d_{sv}}$$

在范围很宽的过渡区中 ( $Re = 1 \sim 1000$ ), 假定总的压力损失为层流与湍流损失之和, 即

$$\frac{\Delta p}{H_s} = K_1 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \times \frac{\mu u}{d_{sv}^2} + K_2 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \times \frac{\rho u^2}{d_{sv}}$$

$K_1$  及  $K_2$  取决于颗粒粒径、形状、筛分宽度及床层空隙率。综合范围很广泛的 640 组试验数据 (包括各种粒径的球体、砂及粉煤, 流化气体为空气、 $CO_2$ 、 $N_2$ 、 $CH_4$  及  $H_2$ ), 尔贡 (Ergun) 整理得  $K_1 = 150$ ,  $K_2 = 1.75$ , 从而得出已被广泛接受的 Ergun 半经验关联式

$$\frac{\Delta p}{H_s} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \times \frac{\mu u}{d_{sv}^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \times \frac{\rho u^2}{d_{sv}} \quad (2-12)$$

对非球形颗粒, 式中  $d_{sv} = \phi d_p$ ,  $\mu$  为动力粘度。

## 二、起始流态化的特征

流体自下而上地穿过随意填充状态的床层且流速又较低时, 颗粒不动, 为固定床阶段。随流速的增加, 流体在床层两端的压力降也将增大, 且随流态不同而与流速成幂函数的关系。当流速达到某一极限值, 即床层压降达到与单位床截面上床层颗粒的质量相等时, 颗粒不再由布风板支持, 而全部由流体的升举力所承托。对单个颗粒来讲, 不再依靠与其他邻近颗粒的接触来维持它的空间位置。床层空隙率或多或少地加大, 开始进入流态化, 床层压降将维持不变, 固定床与流化床的分界点被称为起始流态化点。

处于起始流态化下的床层均匀且平稳, 并且在很多方面呈现类似液体的性质, 可以象液体一样具有流动性, 可由一个容器开孔流到另一个容器。当容器倾斜, 床层上表面保持水平, 轻物浮起, 重物下沉。床层中任意两点压力差大致等于此两点的床静压差。

对已流化的床层, 如将流速逐渐减小, 固定床的压降略小于升速时的压降 (图 2-3), 这是因为粒子逐渐静止下来时, 大体保持为随意填充床层状态, 其床层空隙率较大所致。降速曲线的转折点所对应的空截面流速称为最小流化速度  $u_{mf}$ 。相应的床层空隙率称为最小空