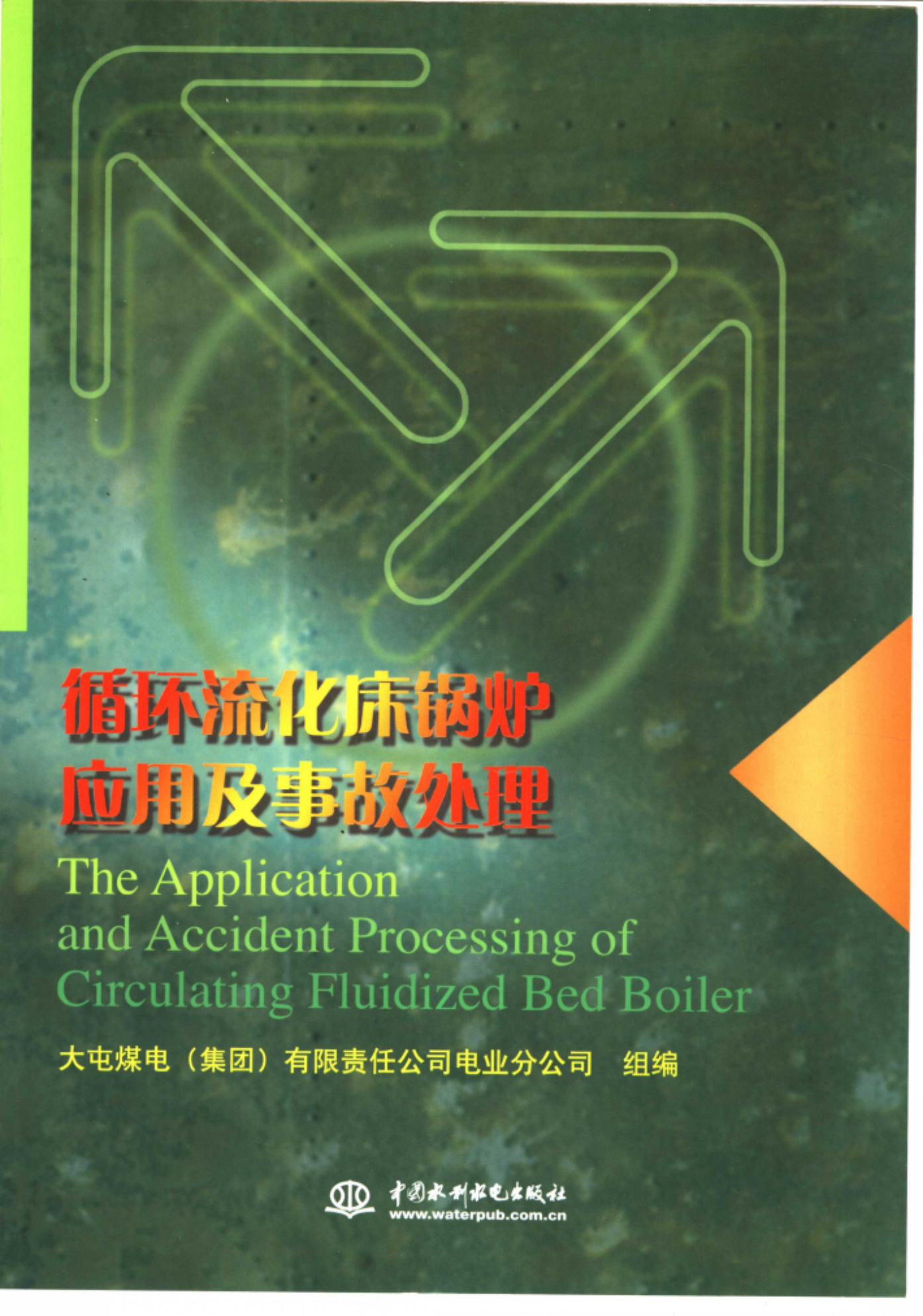




循环流化床锅炉 应用及事故处理

The Application
and Accident Processing of
Circulating Fluidized Bed Boiler

大屯煤电（集团）有限责任公司电业分公司 组编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑：李莉

E-mail: ll@waterpub.com.cn

The Application and Accident Processing of Circulating Fluidized Bed Boiler

封面设计 | 北京瑞兴文化艺术中心 / 李菲
Tel: (010) 68311017 63202266-2701
E-mail: art@waterpub.com.cn
www.waterpub.com.cn / art

ISBN 7-5084-2460-3



9 787508 424606 >

ISBN 7-5084-2460-3

定价：20.00 元

循环流化床锅炉 应用及事故处理

The Application and Accident Processing of Circulating Fluidized Bed Boiler

大屯煤电（集团）有限责任公司电业分公司 组编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

随着各种等级循环流化床锅炉陆续投入运行,运行人员如何安全、可靠地保证机组的经济、高效运行已成为电厂面临的重要课题。本书主要针对这个课题进行分析和探讨。

本书共分九章。主要讲述:循环流化床锅炉的概念、原理、特点;循环流化床锅炉计算机控制系统;循环流化床锅炉本体;循环流化床锅炉辅助系统;循环流化床锅炉的试验与调试;循环流化床锅炉的启动与停运;循环流化床锅炉正常运行调整;循环流化床锅炉常见的事故处理以及国内外循环流化床锅炉介绍等内容。其中,循环流化床锅炉的运行调整和事故处理为本书的重点。

本书适合于从事循环流化床锅炉运行、安装、调试、检修等方面工作的工程技术人员参考、阅读,可作为电厂锅炉工的技术培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉应用及事故处理/大屯煤电(集团)
有限责任公司电业分公司组编. —北京:中国水利水电
出版社, 2004

ISBN 7-5084-2460-3

I. 循... II. 大... III. 流化床—循环锅炉—技术
培训—教材 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 114802 号

书 名	循环流化床锅炉应用及事故处理
作 者	大屯煤电(集团)有限责任公司电业分公司 组编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 8.75 印张 199 千字
版 次	2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	20.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国是煤炭生产的大国，煤炭在一次能源消耗中占有绝对重要的地位，因此排入大气的 SO_2 和 NO_x 绝大部分来自煤的直接燃烧。循环流化床是近年发展起来的一种新型高效、低污染、清洁燃烧技术，循环流化床锅炉内湍流运动强烈，燃料及脱硫剂经过多次循环，反复地进行低温燃烧和脱硫反应，从而实现低 NO_x 排放、高效脱硫以及与煤粉炉相近的燃烧效率。同时，循环流化床具有燃料适应性广、负荷调节性能好、灰渣易于综合利用等优点，因此循环流化床技术得到了大力推广。电站循环流化床锅炉进入新的发展时期，不仅在数量上迅速扩大，同时在容量上也迅速增长。目前配 135MW 级发电机组的大型循环流化床锅炉正趋于成熟，300MW 机组正在上马建设。

本书从循环流化床锅炉的概念出发，循序渐进地讲解了它的工作原理、特点以及其配套的控制系统 INFI—90，并且以 DG—440/137 型号锅炉为例，详细介绍了锅炉的本体系统与辅助系统。特别是对于流化床锅炉区别于煤粉炉的部件，如旋风分离器、回料器、布风板、冷渣器等，采用了图文结合的生动版式进行叙述，最后从实际出发，重点就机组各系统的试验调试、各种工况下的启动与停运、正常运行参数的调整以及常见事故处理等方面进行了分析总结。

本书既可作为电厂锅炉工人的培训教材，也可供从事循环流化床锅炉运行、安装、调试、检修等方面工作的工程技术人员参考、阅读。

本书在编写过程中，得到了大屯煤电（集团）有限责任公司电业分公司各级领导和工程技术人员的全力支持和帮助，也得到了徐州电力试验中心、电力书店、山东电力高等专科学校等单位的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

鉴于时间和作者的水平有限，书中难免出现疏漏和不妥之处，敬请专家、读者批评指正。

编 者

2004 年 11 月

编 审 委 员 会 名 单

主 任：姜 华

副 主 任：苗在宽 程祥武 肖心治 刘广朝

参加编写人员：周双庆 罗贤飞 张定台 张 栋
马福军 焦云美 刘芝萍

主 编：姜 华 张定台

副 主 编：周双庆 罗贤飞

主 审：刘 勇 王立志 王自岭

目 录

前 言

第一章 循环流化床锅炉的概念、原理及特点	1
第一节 循环流化床锅炉的概念	1
第二节 循环流化床锅炉的工作原理	2
第三节 循环流化床锅炉的特点	3
第二章 循环流化床锅炉的计算机控制系统	13
第一节 锅炉燃烧控制	13
第二节 给水、蒸汽系统控制	16
第三节 炉膛安全监控系统	18
第四节 单元机组协调控制系统	22
第三章 循环流化床锅炉本体	25
第一节 炉膛	26
第二节 旋风分离器	27
第三节 回料装置	28
第四节 布风装置	30
第五节 汽水系统及烟风系统	31
第四章 循环流化床锅炉辅助系统	37
第一节 风机	37
第二节 排渣系统	43
第三节 给煤、石灰石系统	45
第四节 膨胀与密封系统	47
第五节 耐磨材料	48
第六节 点火油系统	49
第七节 电除尘系统	50
第八节 吹灰系统	51
第五章 循环流化床锅炉的试验与调试	52
第一节 锅炉水压试验与安全门校验	53

第二节	转动机械试运转及联锁关系试验	56
第三节	冷态空气动力场试验	59
第四节	烘炉	62
第五节	化学清洗及煮炉	63
第六节	冲管	65
第七节	除灰、除渣系统调试	68
第八节	电除尘调试	71
第九节	锅炉整套起动	73
第十节	锅炉性能验收试验	82
第六章	循环流化床锅炉的起动与停运	84
第一节	循环流化床锅炉起动前的检查工作	84
第二节	循环流化床锅炉起动前的准备工作	86
第三节	冷态起动	88
第四节	压火热备用及热态起动	93
第五节	停运和保养	94
第六节	停炉后的冷却	95
第七章	循环流化床锅炉正常运行调整	97
第一节	床温控制	97
第二节	床压控制	98
第三节	汽温调整	99
第四节	负荷调整	100
第五节	回料器风量及灰温调整	101
第八章	循环流化床锅炉常见事故及故障处理方法	103
第一节	炉膛结焦事故	104
第二节	爆燃事故	105
第三节	耐火材料坍塌事故	106
第四节	返料器的堵塞事故	107
第五节	冷渣器的堵塞事故	108
第六节	炉管爆破事故	108
第七节	水冷布风板漏渣事故	111
第八节	电除尘器故障	111
第九节	石灰石系统故障	114
第十节	锅炉熄火事故	114
第十一节	辅机故障	116
第九章	国内外各主要类型循环流化床锅炉介绍	119
第一节	上海锅炉厂生产的 465t/h 循环流化床锅炉	119

第二节 哈尔滨锅炉厂生产的 440t/h 循环流化床锅炉	123
第三节 国外典型循环流化床锅炉	124
附录	126
参考文献	132

第一章

循环流化床锅炉的概念、原理及特点

循环流化床锅炉燃烧技术是一种新型的高效低污染、目前商业化最好的清洁燃烧技术之一，20 世纪 70 年代的能源危机和越来越突出的环保问题促进了这种燃烧技术的发展。循环流化床锅炉兼有鼓泡流化床锅炉和常规煤粉锅炉的长处，又克服了鼓泡流化床锅炉燃烧和脱硫效率低、难以大型化等缺点，同时也避免了煤粉炉所需价格昂贵的烟气脱硫装置。流化床燃烧设备按流体动力特性分为鼓泡流化床和循环流化床，按工作条件分为常压和增压式流化床。

现在大型循环流化床锅炉按锅炉自身特点和开发厂商名称分类的主要炉型有三大流派，分别为：以德国 Lurgi 公司为代表的鲁奇型和以美国的 Foster Wheeler 公司、芬兰的 Alstom 公司（两者兼并）为代表的 FW Pyroflow 型和德国 Babcock 公司的 Circofluid 型。按物料循环倍率可分为：

- (1) 低循环倍率循环锅炉，循环倍率 $K < 15$ 。
- (2) 中倍循环循环锅炉，循环倍率 $15 \leq K \leq 40$ 。
- (3) 高倍循环循环锅炉，循环倍率 $K > 40$ 。

第一节 循环流化床锅炉的概念

一、流态化

在流化床中，当固体颗粒中有流体通过时，随着流体速度逐渐增大，固体颗粒开始运动，且固体颗粒之间的摩擦力也越来越大，当流速达到一定值时，固体颗粒之间的摩擦力与它们的重力相等，每个颗粒可以自由运动，所有固体颗粒表现出类似流体状态的现象，这种现象称为流态化。

对于液固流态化的固体颗粒来说，颗粒均匀地分布于床层中，称为散式流态化。而对于气固流态化的固体颗粒来说，气体并不均匀地流过床层，固体颗粒分成群体作紊流运动，床层中的空隙率随位置和时间不同而变化，这种流态化称为聚式流态化。循环流化床锅炉属于聚式流态化。

固体颗粒（床料）、流体（流化风）以及完成流态化过程的设备称为流化床。相对于各种流化状态，还有几种不正常的流化状态。其中：

- (1) 沟流。一次风流速在未达到临界流速时，空气在床料中分布不均匀，颗粒大小和

空隙率不均匀,阻力也有大有小,大量的空气从阻力小的地方穿越料层,其他部分仍处于固定状态,这种现象称为沟流。沟流一般可以分为贯穿沟流和局部沟流。

(2) 气泡与节涌。在床料被流化过程中,一次流化风主要以“气泡”形式在床料中向上运动,在上部小气泡聚集成大气泡。当气泡向上运动达到某一高度时崩裂,气泡中所包含的固体颗粒喷涌而下,这种现象称为节涌。

(3) 分层。床料在流化过程中,较粗较重的颗粒一般在底部,细而轻的颗粒悬浮于上部,这种分层现象在鼓泡床中比较常见,在湍流和快速流化床中则不太明显。

二、临界流化速度

(1) 对于由均匀粒度的颗粒组成的床层中,在固定床通过的气体流速很低时,随着风速的增加,床层压降成正比例增加,并且当风速达到一定值时,床层压降达到最大值,该值略大于床层静压,如果继续增加风速,固定床会突然出现“解锁”现象,床层压降降至为床层的静压。如果床料是由宽筛分颗粒组成的话,其特性为:在大颗粒尚未运动前,床

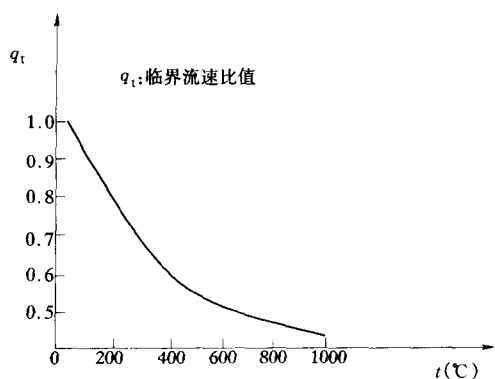


图 1-1 床温与临界流化风速关系图

内的小颗粒已经部分流化,床层从固定床转变为流化床的解锁现象并不明显,而往往会出现分层流化的现象。颗粒床层从静止状态转变为流态化所需的最低速度,称为临界流化速度。随着风速的进一步增大,床层压降几乎不变。循环流化床锅炉正常运行所需的流化风速一般是 2~3 倍的临界流化速度。

(2) 影响临界流化速度的因素有:

1) 料层厚度对临界流速影响不大。

2) 料层的当量平均料径增大则临界流速增加。

3) 固体颗粒密度增加时临界流速增加。

4) 流体的运动粘度增大时临界流速减小:如床温增高时,临界流速减小。床温与临界流速比值 (q_t) 的关系如图 1-1 所示。

第二节 循环流化床锅炉的工作原理

当气体通过颗粒床层时,该床层随着气流速度的变化会呈现不同的流动状态。如图 1-2 所示,固体颗粒随着气流速度的增大分别呈现五种不同的流动状态:固定床、鼓泡流化床、紊(湍)流流化床、快速流化床、气力输送。循环流化床处于紊(湍)流流化床与快速流化床阶段。

(1) 固定床,如图 1-2 (a) 所示。此种状态下,气流在颗粒的缝隙中流过,所有的固体颗粒呈静止状态。

(2) 鼓泡流化床,如图 1-2 (b) 所示。当气流速度达到一定值时,静止的床层开始松动,当气流速度超过临界流化风速时,料层内会出现气泡,并不断上升,而且还聚集成

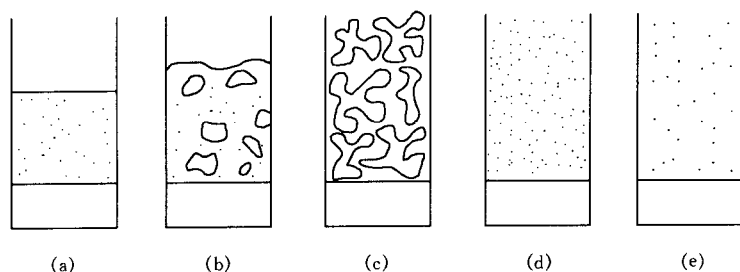


图 1-2 不同气流速度下固体颗粒床层的流动状态
(a) 固定床；(b) 鼓泡流化床；(c) 紊流流化床；(d) 快速流化床；(e) 气力输送

更大的气泡穿过料层破裂。整个料层呈现沸腾状态。鼓泡流化床存在明显的分界面，其上部为稀相区，包括床层表面至流化床出口间的区域，称为自由空间或悬浮段。下部为密相区，也称为沸腾段。

(3) 紊（湍）流流化床，如图 1-2 (c) 所示。随着气流速度继续上升到一定数值，固体颗粒开始流动，床层分界面逐渐消失，固体颗粒不断被带走，以颗粒团的形式上下运动，产生高度的返混。此时的气流速度为床料终端速度。

(4) 快速流化床，如图 1-2 (d) 所示。当气流速度进一步增大，固体颗粒被气流均匀带出床层。此时气流速度大于固体颗粒的终端速度，床内颗粒浓度基本相等。床内颗粒浓度呈上稀下浓状态。循环流化床的上升段属于快速流化床。快速流态化的主要特征为床层压降用于悬浮和输送颗粒并使颗粒加速，单位高度床层压降沿床层高度不变。

(5) 气力输送，如图 1-2 (e) 所示。分为密相气力输送和稀相气力输送。对于前者，床内颗粒浓度变稀，并呈上下均匀分布状态，其单位高度床层压降沿床层高度不变。增大气流速度，床层压降减小。对于后者，增大气流速度，床层压降上升。密相气力输送的典型特征为：床层压降用于输送颗粒并克服气、固两相与壁面的摩擦。稀相气力输送的床层压降主要受摩擦压降支配。

由上述燃烧分类可知，链条炉排炉采用的是固定床燃烧方式，而煤粉炉则采用了最稀相的悬浮燃烧方式。

第三节 循环流化床锅炉的特点

在循环流化床锅炉中，气固流态处于紊流流化床和快速流化床、快速流化床和气力输送之间，其主要特点表现在床内无明显稀相区和密相区的分界面，存在颗粒团和返混现象。在结构方面典型循环流化床锅炉结构一般如图 1-3 所示，其基本流程为：煤和脱硫剂送入炉膛后，迅速被大量惰性高温物料包围，着火燃烧，同时进行脱硫反应，并在上升烟气的作用下向炉膛上部运动，对水冷壁和炉内布置的屏式过热器或屏式再热器等其他受热面放热。粗大粒子进入悬浮区域后在重力及外力作用下偏离主气流，从而贴壁下流。气固混合物离开炉膛后进入高温旋风分离器，大量固体颗粒（煤粒、脱硫剂）被分离出来回送炉膛，进行循环燃烧。未被分离出来的细粒子随烟气进入尾部烟道，以加热对流式过热

器、省煤器和空气预热器，经除尘器排至大气。

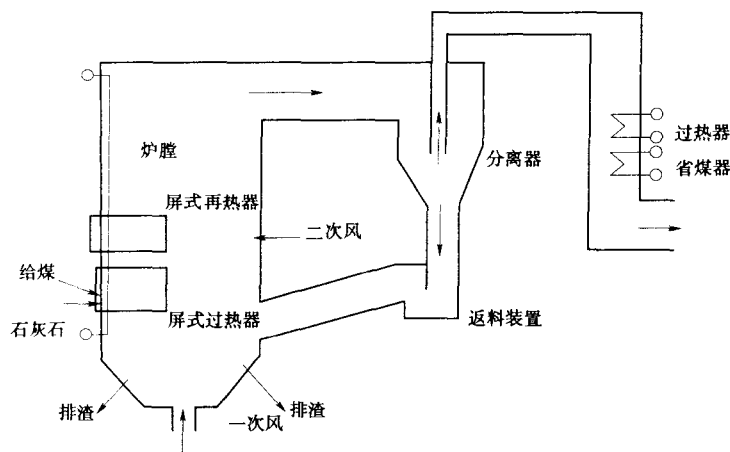


图 1-3 典型循环流化床锅炉简图

1. 低温的动力控制燃烧

由于循环流化床燃烧温度水平比较低，床温一般在 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ 之间，其燃烧反应控制在动力燃烧区内，并有大量固体颗粒的强烈混合，这种情况下的燃烧速度主要取决于化学反应速度，也就是决定于温度水平，而物理因素不再是控制燃烧速度的主导因素。循环流化床燃烧的燃烬度很高，性能良好的锅炉燃烧效率可达到 $98\%\sim 99\%$ 以上。

2. 高速度、高浓度、高通量的固体物流态化循环过程

循环流化床锅炉内的物料参与了炉膛内部的内循环和由炉膛、分离器和返料装置所组成的外循环，共两种循环，整个燃烧过程以及脱硫过程都是在这两种循环运动过程中逐步完成的。

3. 高强度的热量、质量和动量传递过程

在循环流化床锅炉中可以人为地改变炉内物料循环量，以适应不同的燃烧工况。

物料分离系统是循环流化床锅炉的结构特征，鼓泡流化床锅炉的燃烧主要发生在流化床内，所以大量物料参与循环实现整个炉膛内的控制燃烧过程，是循环流化床锅炉区别于鼓泡流化床锅炉的根本特点。循环流化床锅炉燃烧必须具备的三个条件是：

(1) 要保证一定的流体速度，而且还要保证物料粒度处于适当的、使床层在快速流化区域的粒度。

(2) 要有足够的物料分离。

(3) 要有物料回送，要有充分的措施以维持物料的平衡。

各种燃烧方式的主要特性比较如表 1-1 所示。

一、粒的夹带、扬析

当床层流动状态转到紊流流化床时，密相床层和稀相床层的界面开始模糊，颗粒夹带量明显增加。当气流通过颗粒层时，一些终端速度小于床层表观风速的细颗粒将被上升气

表 1-1

各种燃烧方式的主要特性比较

燃烧方式	固定床	鼓泡流化床	循环流化床	悬浮燃烧
颗粒平均直径 (mm)	<300	0.03~3	<8	0.02~0.08
燃料燃烧区高度 (m)	0.2	1~2	15~40	27~45
过剩空气系数	1.2~1.3	1.2~1.25	1.1~1.2	1.15~1.3
燃烧区域风速 (m/s)	1~3	0.5~3	3~12	15~30
床层与受热面间的传热系数 [W/(m ² ·K)]	50~150	200~500	100~250	50~100
磨 损	小	中	中	较小
燃烧效率 (%)	97~99.9	85~90	90~96	99
燃烧中心温度 (℃)	1200	850~950	850~950	1600
煤的粒度 (mm)	6~32	6 以下	9 以下	0.1 以下
截面热负荷 (MW/m ²)	0.5~1.5	0.5~1.5	3.0~5.0	4.0~6.0
脱硫效率 (%)		80~90	80~90	低
气体混合	接近塞柱流	复杂二相流	弥散塞柱流	接近塞柱流
固体运动	静止	上下运动	大部分向上、 部分向下	向上
空隙率	0.4~0.5	0.5~0.85	0.85~0.99	0.98~0.998
温度梯度	大	很小	小	显著
NO _x 排放 (mg/m ³)	400~600	300~400	50~200	400~600

流带走，这一过程称为扬析。由于扬析过程中更多颗粒被夹带着离开床层，其中终端速度大于床层表观风速的颗粒，经过一定的分离高度后会陆续返回床层，因此存在着输送分离高度，英文简称 TDH。此过程就是通常所说的循环流化床的内循环。在 TDH 以上的空间，颗粒浓度不再降低，床层表面至 TDH 之间的空间称为自由空间，燃用宽筛分的燃煤流化床锅炉，其炉膛出口高度通常低于 TDH，因此同时存在着夹带和扬析现象。发生扬析现象的颗粒的来源有三个：

- (1) 给煤中的细颗粒。
- (2) 煤在挥发分析出阶段破碎形成的细颗粒。
- (3) 在煤燃烧的同时，由于磨损造成的细颗粒。

二、宽筛分颗粒特性

1. 宽筛分颗粒定义

进入锅炉的燃料颗粒直径一般是不相同的，如果粒径粗细范围较大，即较宽，称为宽筛分；粒径粗细范围较小，称为窄筛分。循环流化床（气固流化床）床料中的颗粒通常是粒径由小到大的宽筛分布，由于颗粒的直径不同，其流动工况和规律也各不相同。这样就需要显示出颗粒大小的分布规律，利用此规律来研究两相流动和燃烧，或者求出分散相颗粒直径的平均值，以平均直径颗粒的运动来代表分散相颗粒群的运动规律，粒径的分布规

律是一个重要特性。除了要知道颗粒尺寸的分布规律外，还要了解各颗粒所占表面积分布规律和各颗粒重量的分布规律。燃料的筛分对锅炉运行的影响较大，一旦锅炉确定下来，其燃料筛分基本就确定下来。对于挥发分较高的煤，粒径允许范围较大，筛分较宽；对于挥发分较低的煤，其粒径要求较小，筛分较窄。

2. 宽筛分颗粒分类

(1) C类颗粒。这类颗粒粒度很细，一般都小于 $20\mu\text{m}$ ，颗粒间相互作用力很大，很难流态化。

(2) A类颗粒。这类颗粒粒度比较细。一般为 $20\sim90\mu\text{m}$ ，通常很易流化。

(3) B类颗粒。这类颗粒具有中等粒度，粒度范围为 $90\sim650\mu\text{m}$ ，具有良好的流化性能。它在流体速度达到临界流化速度后就会发生鼓泡现象。

(4) D类颗粒。这类颗粒粒度通常具有较大的粒度和密度，并且在流化状态时颗粒混合性能较差。大多数循环流化床锅炉内的床料和燃料均属于 D类颗粒。

3. 宽筛分颗粒流化时的动力特性

- (1) 小于流体密度的物体浮在床层表面，密度大于流体密度的物体会下沉。
- (2) 床层表面保持水平，形状保持容器的形状。
- (3) 在任一高度的静压近似等于在此高度以上单位床截面积内固体颗粒的重量。
- (4) 床层内颗粒混合良好，加热床层时所有床料温度基本保持均匀。
- (5) 床层内固体颗粒可以像流体一样从底部或侧面的孔中排出。
- (6) 几个流化床底部连通后，床层高度自动保持同一水平高度。

三、循环流化床内的传热

1. 在循环流化床中存在着各种不同的传热过程

- (1) 颗粒与气流之间的传热。
- (2) 颗粒与颗粒之间的传热。
- (3) 整个气固多相流与受热面之间的传热。
- (4) 气固多相流与入床气流间的传热。

2. 影响循环流化床传热的各种因素

(1) 气体物理性质的影响。气膜厚度及颗粒与表面的接触热阻对传热起到主要作用。比如，气体密度增加，传热系数增大；气体粘度增大，传热系数减小；气体导热系数增大，传热系数增大。具体循环流化床各部位的传热系数如表 1-2 所示。

表 1-2 循环流化床各部位的传热系数

位置 (部位)	传热面方位	传热系数 [W/(m ² ·K)]	可能出现的问题
二次风下部	水平或竖直	300~500	腐蚀、剥蚀、磨损、负荷调节性能差，阻碍颗粒间横向混合
二次风上部	竖直	150~250	传热较好的受热面
二次风上部悬吊受热面	竖直	150~250	轻微剥蚀、磨损、减少颗粒间横向混合

(2) 固体颗粒物理特性的影响。具体分为以下几方面：

1) 固体颗粒尺寸的影响。对于小颗粒床，传热系数随固体颗粒平均直径增大而减小；对于大颗粒床，传热系数随固体颗粒平均直径增大而增大。

2) 固体颗粒密度的影响。传热系数随固体颗粒密度增大而增大。

3) 形状及表面状态的影响。球形和较光滑的颗粒，传热系数较高。

4) 固体颗粒导热系数的影响。影响较小。

5) 固体颗粒粒度分布的影响。对于小颗粒床，粒径越小，传热系数越大；对于大颗粒床，粒径越大，传热系数越大。

3. 流化风速的影响

对于循环流化床的密相区，传热系数随流化风速的增大而减小；对于循环流化床的稀相区，传热系数随流化风速的增大而增大。

4. 床温对传热系数的影响

床与传热面间的传热系数随床温的升高而升高。

5. 管壁温度的影响

传热系数随壁温的升高成线性规律地增大。

6. 固体颗粒浓度的影响

床层颗粒浓度是影响循环流化床床层与床壁面传热最主要的因素之一。传热系数随床层颗粒浓度的增加而显著增加。

7. 床层压力的影响

床层压力增大，传热系数增加。

四、循环流化床内的燃烧过程

(1) 煤粒送入循环流化床内迅速受到高温物料和烟气的辐射而被加热，首先水分蒸发，然后煤粒中的挥发分析出并燃烧、最后是焦炭的燃烧。其间伴随着煤粒的破碎、磨损，而且挥发分析出燃烧过程与焦炭燃烧过程都有一定的重叠。煤粒在流化床中的燃烧过程如图 1-4 所示。

循环流化床内沿高度方向可以分为密相床层和稀相空间，密相床层运行在鼓泡床和紊流床状态。循环流化床内绝大部分是惰性的灼热床料，其中的可燃物只占很小的一部分。这些灼热的床料成为煤颗粒的加热源，在加热过程中，所吸收的热量只占床层总热容量的千分之几，而煤粒在 10s 左右就可以燃烧（颗粒平均直径在 0~8mm），所以对床温的影响很小。

(2) 循环流化床内煤的燃料着火。流化床内燃料着火的方式，固体质点表面温度起着关键作用，是产生着火的点灶热源，这类固体近质点可以是细煤粒，也可以是经分离后的高温灰粒或者是布风板上的床料。当固体质点表面温度上升时，煤颗粒会出现迅猛着火。另外，颗粒直径大小对着火也有很大的影响，对一定反应能力的煤种，在一定的温度水平之下，存在临界的着火粒径，小于这个颗粒直径，因为散热损失过大，燃料颗粒就不能着火，逸出炉膛。

(3) 循环流化床内煤的破碎特性。煤在流化床内的破碎特性是指煤粒在进入高温流化

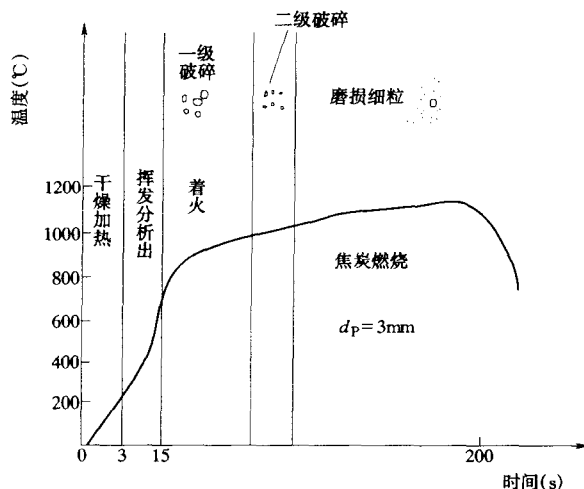


图 1-4 燃烧过程图

床后粒度急剧减小的一种性质。但引起粒度减小的因素还有颗粒与剧烈运动的床层间磨损以及埋管受热面的碰撞等。影响颗粒磨损的主要因素是颗粒表面的结构特性、机械强度以及外部操作条件等。磨损的作用贯穿于整个燃烧过程。

煤粒进入流化床内时，受到炽热床料的加热，水分蒸发，当煤粒温度达到热解温度时，煤粒发生脱挥发分反应，对于高挥发分的煤种，热解期间将伴随一个短时发生的拟塑性阶段，颗粒内部产生明显的压力梯度，一旦压力超过一定值，已经固化的颗粒表层可能会崩裂而形成破碎；对低挥发分煤种，塑性状态虽不明显，但颗粒内部的热解产物需克服致密的孔隙结构都能从煤粒中逸出，因此颗粒内部也会产生较高的压力，另外，由于高温颗粒群的挤压，颗粒内部温度分布不均匀引起的热应力，这种热应力都会引起煤颗粒破碎。

煤粒破碎后会形成大量的细小颗粒，特别是一些可扬析颗粒会影响锅炉的燃烧效率。细煤粒一般会逃离旋风分离器，成为不完全燃烧损失的主要部分。破碎分为一级破碎和二级破碎。一级破碎是由于挥发分逸出产生的压力和孔隙网络中挥发分压力增加而引起的；二级破碎是由于作为颗粒的联结体——形状不规则的联结“骨架”（类似于网络结构）被烧断而引起的破碎。

煤的破碎发生的同时也会发生颗粒的膨胀，煤的结构将发生很大的变化。一般破碎和膨胀受下列因素的影响：挥发分析出量；在挥发分析出时，碳水化合物形成的平均质量；颗粒直径；床温；在煤结构中有效的孔隙数量；母粒的孔隙结构等。

(4) 循环流化床的脱硫与氮氧化物的排放控制。SO₂ 是一种严重危害大气环境的污染物，SO₂ 与水蒸气进行化学反应形成硫酸，和雨水一起降至地面即为酸雨。NO_x 包括 NO、NO₂、NO₃ 三种，其中 NO 是导致酸雨的主要原因之一，同时它还参加光化学作用，形成光化学烟雾，还造成了臭氧层的破坏。煤加热至 400℃ 时开始首先分解为 H₂S，然后逐渐氧化为 SO₂。其化学反方程式为

