

循环流化床 锅炉设备与运行

路春美 程世庆 王永征 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

循环流化床 锅炉设备与运行

路春美 程世庆 王永征 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是为适应循环流化床锅炉迅速发展的需要而编写的, 主要对循环流化床锅炉的结构特点、工作原理、流体动力学特性、传热与燃烧特性、燃烧污染物排放与控制特性、启动运行与变负荷特性等进行了介绍, 对循环流化床锅炉的主体结构、关键部件、主要辅助设备, 如气固分离装置、返料装置、布风装置、给料装置、点火装置和冷渣装置等进行了分析, 同时对循环流化床锅炉炉衬、受热面的防磨措施、灰渣利用特性等进行了探讨。书中结合基本原理和实际需要给出了一定的计算实例, 有较强的工程实用性。

本书可供从事循环流化床锅炉安装、调试、运行、管理等工作的技术人员学习和参考, 也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

循环流化床锅炉设备与运行/路春美, 程世庆, 王永征编著. —北京: 中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1723-8

I. 循… II. ①路…②程…③王… III. 流化床-循环锅炉-基本知识 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 068707 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 9 月第一版 2003 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 353 千字

印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

煤炭是我国的主要能源,近年来,我国一次能源消费结构中煤炭所占的比例一直保持在74%以上,煤炭燃烧造成的环境污染,已成为国际上十分关注的问题。循环流化床燃烧技术是近几十年来发展起来的一种高效、低污染清洁燃烧技术,在国内外得到了迅速发展和商业推广。随着循环流化床锅炉在我国的广泛应用,从事循环流化床锅炉运行、安装、调试、管理等工作的人员队伍迅速扩大,作者在与现场人员的工作接触或对有关人员的培训中发现,他们迫切希望有一本循环流化床锅炉方面的专门书籍,全面介绍循环流化床锅炉的基本知识和实用技术,以满足他们日常工作中学习的需要。为此,山东大学陈祖杰教授、路春美教授,济南锅炉集团有限公司总工程师殷国昌研究员共同分析了读者的需求,一起策划并确定了编写宗旨和总体结构;山东大学清洁煤燃烧课题组的部分教师,结合自己多年的科研、教学和工程实践经验共同编写了本书。

本书共分九章,第一、二、三章分别介绍了循环流化床锅炉的基本原理和特点、流体动力学特性以及循环流化床锅炉的燃烧与传热特性;第四、五章着重分析了循环流化床锅炉的主体结构、关键部件与主要辅助系统;第六章讨论了循环流化床锅炉的燃烧污染物排放特性与主要控制措施;第七、八章专门探讨了循环流化床锅炉的启动、运行、调试特性及炉衬、受热面的磨损与防护措施;第九章叙述了循环流化床锅炉灰渣的综合利用问题。

本书由山东大学路春美教授、程世庆副教授、王永征副教授等共同编写,其中第六、七、八、九章与第五章的第五节由路春美负责编写,第一、二、四、五章由程世庆负责编写,第三章由王永征负责编写。山东大学研究生李官鹏、张雷、毕见重、韩奎华、赵建立同学帮助搜集了大量资料,并分别整理了第一、二、六、八、九章的书稿,杨冬、田园、高攀等同学协助完成了书中部分图表、公式、文字的录入工作。

本书由济南锅炉集团有限公司殷国昌研究员、山东大学陈祖杰教授担任主审,他们逐章逐节仔细审阅了书稿,与作者进行了反复讨论,并提出了很多宝贵意见,在此表示深切的感谢!

作者还要感谢山东省电力科学研究院的张庆国高工和程新华高工,以及济南锅炉集团有限公司、山东烟台开发区华鲁热电厂等单位,他们为本书的编写

提供了大量的参考资料。

由于水平所限，书中谬误和不妥之处在所难免。恳请读者批评指正。

作者

2003 年 5 月于山东大学南校区

主要符号表

A

A	灰分; 入炉颗粒中小于 1mm 的份额, %
A_{ar}	煤的收到基灰分, %
A_b	布风板有效面积, m^2
A_j	煤灰的碱度
A_{zs}	折算灰含量, g/MJ
Ar	阿基米德数

B

B	给煤量, 锅炉的燃料消耗量, kg/h
B_j	计算燃料消耗量, kg/h

C

c_r	燃料比热容, kJ/(kg·°C)
c_D	阻力系数
C_{fh}	飞灰含碳量, %
C	标准状况下的气体浓度, mg/ m^3
C_0	脱硫前 SO_2 在标准状况下的浓度, mg/ m^3
C_1	脱硫后 SO_2 在标准状况下的浓度, mg/ m^3

D

d	颗粒直径, mm
d_{max}	颗粒最大允许粒径, mm
d_{or}	小孔直径, mm
d_p	颗粒平均直径, mm
D	锅炉负荷, kg/h
D_{bq}	饱和蒸汽量, kg/h
D_{gq}	过热蒸汽量, kg/h
D_{ps}	锅炉机组排污水量, kg/h
DT	变形温度

E

E_c	比冲蚀能量, J/ mm^3
E_m	比熔化能量, J/ mm^3

F

f	风帽小孔面积, m^2
F	测点处管道截面积, m^2
F_T	风道的截面积, m^2
FT	流动温度

G

G	烟气量 (第六章), m^3/h
G_A	灰渣量, kg/h
G_b	料层重量, N
G_s	固体颗粒流率; 循环物料流率, kg/(s· m^2)

H

Δh	床层高度, m
H_0	静止料层厚度, m
H_d	被磨材料的硬度
H_{mf}	临界状态下的床层高度, m
H_p	颗粒的硬度
h	比焓, kJ/kg
h_r	燃料的物理热, kJ/kg

K

K	排放系数, 修正系数
-----	------------

M

m_{Ca}	每小时需要钙的质量, kg/h
m_s	每小时燃烧硫的质量, kg/h
m_{SO_2}	每小时 SO_2 的生成量, kg/h
M_{zs}	折算水分

N

n	风帽数量, 压降减小系数; 转速
N_{ar}	氮收到基

P

p	全压, 压头, Pa
-----	------------

p_{amp} 当地大气压, Pa
 p_d 动压, Pa
 p_s 静压, Pa
 p_{st} 工况下的管道静压, Pa
 p_0 标况下的气体压力, Pa
 p_v 平均动压值, Pa
 Δp 风道中的压力损失; 分离器阻力, Pa
 Δp_b 床层压降; 床层阻力, Pa
 Δp_{fr} 固定床因摩擦阻力带来的压降, Pa
 Δp_d 布风板阻力, Pa
 Δp_{d0} 流动密封阀压降, Pa
 Δp_{d1} 主床布风板压降, Pa
 Δp_{h0} 流动密封阀料层压降, Pa
 Δp_{h1} 主床返料管以下料层压降, Pa
 Δp_{CB} 循环床压降, Pa
 Δp_{EA} 回送装置阀部分的压降, Pa
 Δp_{SP} 分离器压降, Pa
 Δp_{CE} 料腿的压力, Pa
 P 功率, kW

Q

q_g 空气流量, m^3/h
 q_v 风机流量; 气体流量, m^3/s
 $Q_{net, ar}$ 收到基低位发热量, MJ/kg
 Q_{gr} 煤的高位发热量, MJ/kg
 Q_{net} 煤的低位发热量, MJ/kg
 Q_r 送入锅炉的热量, kJ/kg
 q_1 锅炉机组的有效利用率, %
 q_2 排烟热损失, %
 q_3 化学未完全燃烧损失, %
 q_4 机械未完全燃烧损失, %
 q_5 散热损失, %
 q_6 灰渣的物理热损失, %
 Q_1 锅炉机组有效利用热, kJ/kg
 Q_2 排烟带走的热损失, kJ/kg
 Q_3 化学未完全燃烧损失, kJ/kg
 Q_4 机械未完全燃烧损失, kJ/kg
 Q_5 锅炉散热损失, kJ/kg
 Q_6 灰渣物理热损失, kJ/kg
 Q_w 外部热源加热空气时带入锅炉的热量, kJ/kg

Q_{gl} 锅炉机组总的有效利用热量, kJ/h
 Q_{mf} 临界流化流量, m^3/h
 Q_{qt} 其他利用热量, kJ/h
 q_4^{ca} 粗颗粒煤粒产生的固体未完全燃烧损失, %

R

R 循环倍率; Ca/S 摩尔比
 Re 雷诺数
 Re_1 终端沉降雷诺数
 Re_{mf} 临界流化风速对应的雷诺数

S

S_{gs} 煤的折算含硫量, g/MJ
 s_1 横向节距
 s_2 纵向节距
 ST 软化温度

T

t_0 进风温度, $^{\circ}C$
 T 烟气的绝对温度, K
 t_r 燃料的温度, $^{\circ}C$
 t_{lk} 冷空气温度, $^{\circ}C$

U

u_0 表观风速, m/s
 u_{01} 上准则风速, m/s
 u_{02} 下准则风速, m/s
 u_g 气体流速, m/s
 u_h 颗粒水平流速, m/s
 u_m 最低允许流化风速, m/s
 u_{mb} 鼓泡风速, m/s
 u_{mf} 临界流化风速, m/s
 u_{or} 小孔风速, m/s
 u_p 颗粒速度, m/s
 u_{pl} 密相气力输送向稀相气力输送的转变速度, m/s
 u_{re} 气固相对速度, m/s
 u_t 终端速度, m/s

V

V_{daf} 干燥无灰基, %
 V^0 标况下的理论空气量, m^3/kg

V_y	标况下的实际烟气量, m^3/kg
V_y^0	标况下的理论烟气量, m^3/kg
$V_{k,t}$	标况下锅炉燃烧所需要的空气量, m^3/h
$V_{y,t}$	标况下锅炉燃烧产生的烟气量, m^3/h

ρ_{g0}	标况下的气体密度, kg/m^3
ρ_p	颗粒密度, kg/m^3
ξ	布风板阻力系数
ϕ_p	球形度参数

希腊字母

α_{fh}	过量空气系数; 原子量; 夹角
α_{fh}	煤灰中飞灰所占份额, %
α_{hz}	锅炉排渣率
α_l	锅炉炉膛的过量空气系数
α_{py}	排烟过量空气系数
α_t	流化床中的过量空气系数
$\Delta\alpha$	漏风系数
$\Delta\alpha_l$	炉膛漏风系数
$\Delta\alpha_{ky}$	空气预热器的漏风系数
α''_l	炉膛出口过量空气系数
β	过量空气系数 (用于空气计算); 夹角
β'_{ky}	空气预热器的过量空气系数
β''_{ky}	空气预热器空气出口的过量空气系数
δ	磨损速率
ε	空隙率; 相对耐磨性
ε_b	静止料层的堆积空隙率
ε_{mf}	临界床层空隙率
$\bar{\varepsilon}$	平均床层空隙率
η	转化率; 开孔率; 分离效率, %
$\eta(d_i)$	分级效率, %
η_{fi}	锅炉机组的反平衡效率, %
ζ	阻力系数
μ	气体的动力粘度, $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$
ν_g	气体的运动粘度, m^2/s
ρ	材料密度, kg/m^3
ρ_b	静止料层的堆积密度, kg/m^3
ρ_g	气体密度, kg/m^3

上标

0	理论值; 表观; 初始; 标准状态
'	入口
"	出口
ca	冷渣
oa	溢流渣
da	沉降灰
fa	飞灰

下标

ar	收到基
ad	空干 (分析) 基
bq	饱和蒸汽
d	干燥基
daf	干燥无灰基
gq	过热蒸汽
gs	给水
hz	灰渣
k	空气
ky	空气预热器
l	炉膛
mf	临界流化
ps	排污水
py	排烟
or	小孔
qt	其他
r	燃料
y	烟气

前言

主要符号表

循环流化床锅炉的工作原理及其特点 1

第一节 循环流化床锅炉的工作原理	1
第二节 循环流化床锅炉的特点	5
第三节 循环流化床锅炉的应用与发展	8

循环流化床流体动力学特性 10

第一节 流化颗粒的分类	10
第二节 临界流态化速度及床层阻力特性	11
第三节 颗粒的终端速度	16
第四节 循环流化床的宏观流体动力学特性	18

循环流化床锅炉燃烧与传热 25

第一节 煤在循环流化床内的燃烧过程	25
第二节 循环流化床锅炉燃料及燃烧计算	28
第三节 循环流化床锅炉的燃烧特性	40
第四节 循环流化床锅炉的炉内传热	43

循环流化床锅炉主体结构及其关键部件 48

第一节 循环流化床锅炉的主要型式	48
第二节 循环流化床锅炉主要热力参数的确定	57
第三节 炉膛	65
第四节 气固分离器	69
第五节 固体物料返料装置	77
第六节 过热器和尾部受热面	83
第七节 循环流化床锅炉的炉墙、膨胀与密封	85
第八节 布风装置	87

循环流化床锅炉的辅助系统 93

第一节 点火装置	93
第二节 炉前碎煤、给煤设备及系统	95
第三节 灰渣冷却与处理装置	102
第四节 风、烟系统	111

第五节 循环流化床锅炉的 DCS 系统 116

2.2 循环流化床内主要污染物的排放与控制 123

第一节 概述 123

第二节 硫氧化物的生成与控制机理 126

第三节 影响循环流化床脱硫效率的主要因素 132

第四节 氮氧化物的生成及控制机理 136

第五节 影响氮氧化物排放的主要因素 139

第六节 同时降低硫氧化物和氮氧化物排放的主要措施 142

第七节 其他污染物的生成与控制 143

2.3 循环流化床锅炉的启动与运行 146

第一节 循环流化床锅炉的冷态试验 146

第二节 循环流化床锅炉的烘炉、点火启动与停运 152

第三节 循环流化床锅炉的变工况运行特性 161

第四节 循环流化床锅炉的运行调节 168

第五节 循环流化床锅炉运行中的常见问题及处理方法 175

2.4 循环流化床锅炉的磨损及预防 181

第一节 循环流化床锅炉的磨损与原因分析 181

第二节 影响磨损的主要因素分析 189

第三节 防磨的主要技术措施 194

2.5 循环流化床锅炉灰渣利用 206

第一节 循环流化床锅炉灰渣的基本特性 206

第二节 循环流化床锅炉灰渣的综合利用 210

参考文献 220

第一章

循环流化床锅炉的工作原理及其特点

第一节 循环流化床锅炉的工作原理

一、流态化过程

流态化是固体颗粒在流体作用下表现出类似流体状态的一种现象。固体颗粒、流体以及完成流态化的设备称为流化床。流体作为流化介质，一般有气体和液体两大类，在锅炉燃烧中，流化介质为气体，固体煤颗粒以及煤燃烧后的灰渣（床料）被流化，称为气固流态化。流化床锅炉与其他类型燃烧锅炉的根本区别在于燃料处于流态化运动状态，并在流态化过程中进行燃烧。

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。随着气流速度的增加，固体颗粒分别呈现出固定床、起始流态化、鼓泡流态化、节涌、湍流流态化及气力输送等状态。

在流速较低时，气流仅是在静止颗粒的缝隙中流过，这时称为固定床，如图 1-1（a）所示。

当气体速度增加到一定值时，颗粒被上升的气流托起，床层开始松动，气体对颗粒的作用力与颗粒的重力相平衡，通过床层任意两个截面的压力降与在此两截面间单位面积上颗粒和气体的重量之和相等。这时床层开始进入流态化，如图 1-1（b）所示，对应的气流速度称为最小流化速度或称为临界流态化速度。

当气流速度超过最小流化速度时，除了非常细而轻的颗粒床会均匀膨胀外，一般床料内将出现大量气泡，气泡不断上移，聚集成较大的气泡穿过料层并破裂。此时气—固两相强烈混合，犹如水被加热至沸腾状，这样的床层称为鼓泡流化床。鼓泡流化床床层有明显的床层表面，如图 1-1（c）所示。鼓泡流态化状态下，整个流化床分两个区域：一个是下部的密相区又称沸腾段，它有明显的床层表面；另一个是上部的稀相区（床层表面至流化床出口区域），称为自由空间或悬浮段。

当气流速度达到一定数值，颗粒将被夹带流动，此时对应的气流速度称为该颗粒的终端速度。在该状态下，床层表面基本消失，颗粒夹带变得相当明显，如果不及时向床内补充颗粒，床中颗粒最终将全部被吹空。在该状态下，由于存在某些颗粒的大量返混，床层底部颗粒浓度较大，上部空间颗粒浓度要小很多。可以观察到不同大小和性质的颗粒团（乳化相）和气流团（气泡相）的紊乱运动。此时床层呈现湍流床状态，见图 1-1（e）。

当气流速度进一步增大，颗粒就由气体均匀带出床层，我们称这种状态为颗粒气体输送的稀相流化床，如图 1-1（f）所示。此时气流速度大于颗粒的终端速度，床内颗粒浓度上下

基本均匀分布。在湍流和稀相流态化状态下，有大量的颗粒被携带出床层、炉膛。为了稳定操作，必须用分离器把这些颗粒从气流中分离出来，然后再返回床层，这样就形成了循环流化床。

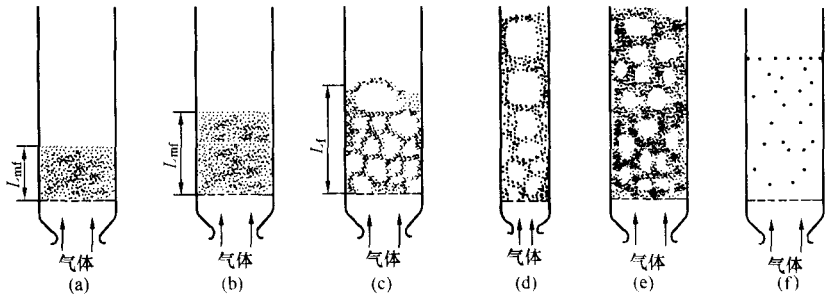


图 1-1 不同气流速度下固体颗粒床层的流动状态
(a) 固定床；(b) 起始流态化；(c) 鼓泡流化床；(d) 节涌；
(e) 湍流流态化；(f) 具有气力输送的稀相流态化

上述流态化状态仅仅对单一尺寸颗粒而言。对于燃煤流化床锅炉，由于床内为一定尺寸范围的宽筛分颗粒，在床的下部形成主要由较大颗粒组成的湍流流化床，而较细颗粒则由气流携带进入输送状态，经分离器和返料器构成颗粒的循环。另外某些小颗粒在上行过程中，产生凝聚、结团，以及与壁面的摩擦碰撞，而沿壁面回流，从而形成循环流化床的内部循环。

二、宽筛分颗粒流态化时的流体动力特性

从直观形态看，密相气体流态化与处于沸腾状态的液体非常相像，并且在许多方面具有与液体一样的特性。主要有以下几点：

- (1) 在任一高度的静压近似于在此高度以上单位床截面内固体颗粒的重量。
- (2) 无论床层如何倾斜，床表面总是保持水平，床层的形状也保持容器的形状。
- (3) 床内固体颗粒可以像流体一样从底部或侧面的孔口中排出。
- (4) 密度高于床层表观密度（如果把颗粒间的空体积也看做颗粒体积的一部分，这时单位体积的燃料质量就称为表观密度）的物体在床内会下沉，密度小的物体会浮在床面上。
- (5) 床内颗粒混合良好，因此，当加热床层时，整个床层的温度基本均匀。

三、循环流化床锅炉的工作过程

流化床燃烧是床料在流化状态下进行的一种燃烧，其燃料可以为化石燃料、工农业废弃物和各种生物质燃料。一般粗重的粒子在燃烧室下部燃烧，细粒子在燃烧室上部燃烧。被吹出燃烧室的细粒子采用各种分离器收集下来之后，送回床内循环燃烧。图 1-2 给出了循环流化床锅炉的工作过程。

在燃煤循环流化床锅炉的燃烧系统中，燃料煤首先被加工成一定粒度范围的宽筛分煤，然后由给料机经给煤口送入循环流化床密相区进行燃烧，其中许多细颗粒物料将进入稀相区继续燃烧，并有部分随烟气飞出炉膛。飞出炉膛的大部分细颗粒由固体物料分离器分离后经返料器送回炉膛，再参与燃烧。燃烧过程中产生的大量高温烟气，流经过热器、再热器、省煤器、空气预热器等受热面，进入除尘器进行除尘，最后由引风机排至烟囱进入大气。循环

流化床锅炉燃烧在整个炉膛内进行，而且炉膛内具有很高的颗粒浓度，高浓度颗粒通过床层、炉膛、分离器和返料装置，再返回炉膛，进行多次循环，颗粒在循环过程中进行燃烧和传热。

锅炉给水首先进入省煤器，然后进入汽包，后经下降管进入水冷壁。燃料燃烧所产生的热量在炉膛内通过辐射和对流等传热形式由水冷壁吸收，用以加热给水生成汽水混合物。生成的汽水混合物进入汽包，在汽包内进行汽水分离。分离出的水进入下降管继续参与水循环；分离出的饱和蒸汽进入过热器系统继续加热变为过热蒸汽。

锅炉生成的过热蒸汽引入汽轮机做功，将热能转化为汽轮机的机械能。一般 125MW 及以上机组锅炉将布置有再热器，这些机组中的汽轮机高压缸排汽将进入锅炉再热器进行加热，再热后的蒸汽进入汽轮机中、低压缸继续做功。

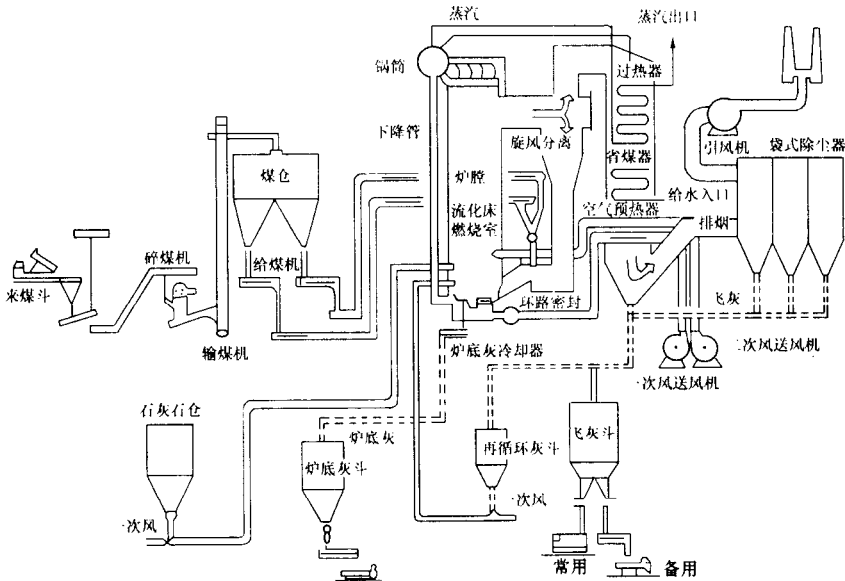


图 1-2 循环流化床锅炉的工作过程

四、循环流化床锅炉的基本构成

循环流化床锅炉可分为两个部分。第一部分由炉膛（流化床燃烧室）、气固分离设备（分离器）、固体物料再循环设备（返料装置、返料器）和外置换热器（有些循环流化床锅炉没有该设备）等组成，上述部件形成了一个固体物料循环回路。第二部分为尾部对流烟道，布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器等，与常规火炬燃烧锅炉相近。

图 1-3 为典型循环流化床锅炉燃烧系统的示意。燃料和脱硫剂由炉膛下部进入锅炉，燃烧所需的一次风和二次风分别从炉膛的底部和侧墙送入，燃料的燃烧主要在炉膛中完成。炉膛四周布置有水冷壁，用于吸收燃烧所产生的部分热量。由气流带出炉膛的固体物料在分离器内被分离和收集，通过返料装置送回炉膛，烟气则进入尾部烟道。

1. 炉膛

炉膛的燃烧以二次风入口为界分为两个区。二次风入口以下为大粒子还原气氛燃烧区，二次风入口以上为小粒子氧化气氛燃烧区。燃料的燃烧过程、脱硫过程、 NO_x 和 N_2O 的生成

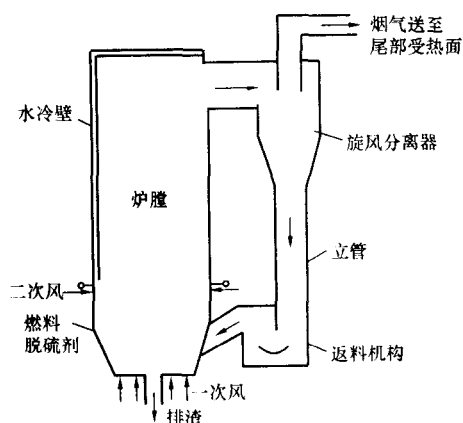


图 1-3 典型的循环流化床锅炉燃烧系统示意

及分解过程主要在燃烧室内完成。燃烧室内布置有受热面，它完成大约 50% 燃料释热量的传递过程。流化床燃烧室既是一个燃烧设备，也是一个热交换器、脱硫、脱氮装置，集流化过程、燃烧、传热与脱硫、脱硝反应于一体。所以流化床燃烧室是流化床燃烧系统的主体。

2. 分离器

循环流化床分离器是循环流化床燃烧系统的关键部件之一。它的形式决定了燃烧系统和锅炉整体布置的形式和紧凑性，它的性能对燃烧室的空气动力特性、传热特性、物料循环、燃烧效率、锅炉出力 and 蒸汽参数、对石灰石的脱硫效率和利用率、对负荷的调节范围和锅炉启动所需时间以

及散热损失和维修费用等均有重要影响。

国内外普遍采用的分离器有高温耐火材料内砌的绝热旋风分离器、水冷或汽冷旋风分离器、各种形式的惯性分离器和方形分离器等。

3. 返料装置

返料装置是循环流化床锅炉的重要部件之一。它的正常运行对燃烧过程的可控性、对锅炉的负荷调节性能起决定性作用。

返料装置的作用是将分离器收集下来的物料送回流化床循环燃烧，并保证流化床内的高温烟气不经过返料装置短路流入分离器。返料装置既是一个物料回送器，也是一个锁气器。如果这两个作用失常，物料的循环燃烧过程建立不起来，锅炉的燃烧效率将大为降低，燃烧室内的燃烧工况变差，锅炉将达不到设计蒸发量。

流化床燃烧系统中常用的返料装置是非机械式的。设计中采用的返料器主要有两种类型：一种是自动调整型返料器，如流化密封返料器；另一种是阀型返料器，如“L”阀等。自动调整型返料器能随锅炉负荷的变化，自动改变返料量，不需调整返料风量。阀型返料器要改变返料量则必须调整返料风量，也就是说，随锅炉负荷的变化必须调整返料风量。

4. 外置换热器

部分循环流化床锅炉采用外置换热器。外置换热器的作用是，使分离下来的物料部分或全部（取决于锅炉的运行工况和蒸汽参数）通过它，并将其冷却到 500℃ 左右，然后通过返料器送至床内再燃烧。外置换热器内可布置省煤器、蒸发器、过热器、再热器等受热面。

外置换热器的实质是一个细粒子鼓泡流化床热交换器，流化速度是 0.3~0.45m/s，它具有传热系数高、磨损小的优点。采用外置换热器的优点如下：①可解决大型循环流化床锅炉床内受热面布置不下的困难；②为过热蒸汽温度和再热蒸汽温度的调节提供了很好的手段；③增加循环流化床锅炉的负荷调节范围；④增加同一台锅炉对燃料的适应性；⑤节约锅炉受热面的金属消耗量。

其缺点是它的采用使燃烧系统、设备及锅炉整体布置方式比较复杂。

德国鲁奇型和美国巴特尔型、FW 型和 Alstom-CE 型循环流化床燃烧系统均采用了外置换热器。我国日前开发的 220t/h 以下的循环流化床锅炉均没有采用，大型循环流化床锅炉

拟采用。

第二节 循环流化床锅炉的特点

一、循环流化床锅炉的典型工作条件

循环流化床锅炉的典型工作条件可归纳为表 1-1。

表 1-1 循环流化床锅炉的工作条件

项 目	数 值	项 目	数 值
床层温度 (°C)	850 ~ 950	床层压降 (kPa)	6 ~ 12
流化速度 (m/s)	4 ~ 8	炉内颗粒浓度 (kg/m³)	150 ~ 600 (炉膛底部) 3 ~ 40 (炉膛上部)
床料粒度 (μm)	100 ~ 700	Ca/S 摩尔比	1.5 ~ 3
床料密度 (kg/m³)	1800 ~ 2600	壁面传热系数 [W/(m²·K)]	130 ~ 250
燃料粒度 (mm)	0 ~ 13		
脱硫剂粒度 (mm)	0 ~ 2		

二、循环流化床燃烧过程的特点

循环流化床燃烧是一种在炉内使高温运动的烟气与其所携带的湍流扰动极强的固体颗粒密切接触,并具有大量颗粒返混的流态化燃烧反应过程;同时,在炉外将绝大部分高温的固体颗粒捕集,并将它们送回炉内再次参与燃烧过程,反复循环地组织燃烧。显然,燃料在炉膛内燃烧的时间延长了。在这种燃烧方式下,炉内温度水平因受煤中灰的变形温度和脱硫最佳温度的限制,一般在 850℃左右。这样的温度远低于普通煤粉炉中的温度水平。这种“低温燃烧”方式好处很多,炉内结渣及碱金属析出均比煤粉炉中要改善很多,对灰特性的敏感性减低,也无需很大空间去使高温灰冷却下来,氮氧化物生成量低,可在炉内组织廉价而高效的脱硫工艺等。从燃烧反应动力学角度来看,循环流化床锅炉内的燃烧反应在动力燃烧区(或过渡区)内。由于相对来说循环流化床锅炉内的温度不高,并有大量固体颗粒的强烈混合,这种情况下的燃烧速率主要取决于化学反应速率,也就是决定于温度水平,而物理因素不再是控制燃烧速率的主导因素。循环流化床锅炉内燃烧的燃尽度很高,通常,性能良好的循环流化床锅炉燃烧效率可达 98% ~ 99%,甚至更高。

从图 1-3 可看出,循环流化床锅炉内的固体物料(包括燃料、残炭、灰、脱硫剂和惰性床料等)经历了从炉膛、分离器和返料装置返回炉膛的循环运动,整个燃烧过程以及脱硫过程都是在循环运动的动态过程中逐渐完成的。

在循环流化床锅炉中,大量的固体物料在强烈的湍流下通过炉膛,通过人为操作可改变物料循环量,并可改变炉内物料的分布规律,以适应不同的燃烧工况。在这种组织方式下,炉内的热量、质量和动量传递过程十分强烈,从而使整个炉膛高度及水平方向上的温度分布非常均匀。同时,强烈的动量质量传递使循环流化床内的颗粒产生磨损和碎裂,进一步强化了燃烧。

三、循环流化床锅炉的优点

循环流化床锅炉独特的流体动力特性和结构使其具有许多独特的优点。

1. 燃料适应性广

这是循环流化床锅炉的主要优点之一。在循环流化床锅炉中,按质量百分比计,新加入

燃料仅占床料的 1% ~ 3%，其余是未燃尽焦炭和不可燃的固体颗粒，如脱硫剂、灰渣或砂。这些炽热物料为新加入燃料提供了稳定充足的点火热源。循环流化床锅炉的特殊流体动力特性使得气—固和固—固混合非常好，因此燃料进入炉膛后很快与大量灼热床料混合，燃料被迅速加热至高于着火温度，而床层温度没有明显降低。循环流化床锅炉既可燃用优质煤，也可燃用各种劣质燃料。不同设计的循环流化床锅炉，可以燃烧高灰煤、高硫煤、高灰高硫煤、高水分煤、低挥发分煤、煤矸石、煤泥、石油焦、尾矿、煤渣、树皮、废木头、垃圾等。

2. 燃烧效率高

国外循环流化床锅炉，燃烧效率一般高达 99%。我国自行设计、投运的流化床锅炉效率也可高达 95% ~ 99%。该炉型燃烧效率高的主要原因是煤粒燃尽率高。煤粒燃尽率分三种情况分析：较小的颗粒（ $< 0.04\text{mm}$ ）随烟气一起流动，在飞出炉膛前就完全燃尽了，在炉膛高度有效范围内，它们燃烧的时间是足够的；对于较大一些的煤粒（ $> 0.6\text{mm}$ ），其终端速度高，只有当通过燃烧或相互摩擦而碎裂，其直径减小时，才能随烟气逸出，较大颗粒则停留在燃烧室内燃烧；对于中等粒度的颗粒，循环流化床锅炉通过分离装置将这些颗粒分离下来，送回燃烧室进行循环燃烧，给颗粒燃尽提供了足够时间，以达到燃尽的目的。运行锅炉的实测数据表明，该型锅炉的炉渣可燃物仅有 1% ~ 2%，锅炉效率可达 88% ~ 90%。

3. 高效脱硫

流化床低温燃烧的特点使其能够与多数天然石灰石的最佳燃烧脱硫温度相一致。普通鼓泡流化床锅炉添加石灰石后有较好的炉内脱硫效果，循环流化床锅炉的脱硫比鼓泡流化床锅炉更有效。循环流化床锅炉在结构设计合理、运行操作适当以及添加合适品种和粒度的石灰石等条件下，脱硫剂化学当量比（钙硫比）为 1.5 ~ 2.5 时，可以达到 90% 的脱硫效率，而鼓泡流化床锅炉和其他燃烧方式的锅炉则很难达到该指标。

与燃烧过程不同，脱硫反应进行得较为缓慢。为了使氧化钙（石灰石煅烧后的产物）充分转化为硫酸钙，烟气中的二氧化硫气体必须与脱硫剂有充分长的接触时间和尽可能大的反应比表面积。事实上，脱硫剂颗粒的内部还不能完全反应，越小的颗粒越能得到高的利用率。鼓泡流化床锅炉中，气体在燃烧区域的平均停留时间为 1 ~ 2s，在循环流化床锅炉中则为 3 ~ 4s。循环流化床锅炉中石灰石颗粒粒径通常为 0.1 ~ 0.3mm，而鼓泡流化床锅炉中则为 0.5 ~ 1mm。0.1mm 颗粒的反应比表面积是 1mm 颗粒的数十倍，再加上石灰石颗粒也参与循环，可反复使用，因此，无论是脱硫剂的利用率还是二氧化硫的脱除率，循环流化床锅炉都比鼓泡流化床锅炉优越。

4. 氮氧化物（ NO_x ）排放低

氮氧化物排放低是循环流化床锅炉另一个非常吸引人的特点。运行经验表明，循环流化床锅炉的 NO_x 排放范围为 50 ~ 150ppm 或 40 ~ 120mg/MJ。循环流化床锅炉 NO_x 排放低的主要原因是：一低温燃烧，燃烧温度一般控制在 850 ~ 950℃ 左右，此时空气中的氮一般不会生成 NO_x ；二分段燃烧，抑制燃料中的氮转化为 NO_x ，并使部分已生成的 NO_x 得到还原。

5. 燃烧强度高，炉膛截面积小

炉膛单位截面积的热负荷高是循环流化床锅炉的主要优点之一。循环流化床锅炉的截面热负荷约为 3 ~ 6MW/m²，接近或高于煤粉炉。同样热负荷下鼓泡流化床锅炉需要的炉膛截面积要比循环流化床锅炉大 2 ~ 3 倍。

6. 燃料预处理及给煤系统简单

循环流化床锅炉的给煤粒度一般小于 13mm, 因此与煤粉锅炉相比, 燃料的制备破碎系统大为简化。此外, 循环流化床锅炉能直接燃用高水分煤 (水分可达到 30% 以上), 当燃用高水分燃料时也不需要专门的处理系统。循环流化床锅炉的炉膛截面积较小, 同时良好的混合使所需的给煤点数量大大减少。在循环流化床锅炉中, 燃料还可以加入返料管内, 这样在进入炉膛前经历一个预热过程, 既有利于燃烧, 也简化了给煤系统。

7. 负荷调节范围大, 调节速度快

当负荷变化时, 只需调节给煤量、空气量和物料循环量, 不必像鼓泡流化床锅炉那样采用分床压火技术。一般而言, 循环流化床锅炉的负荷调节比可达 (3~4):1。此外, 由于截面风速高和吸热控制容易, 循环流化床锅炉的负荷调节速率也很快, 一般可达每分钟 4%~5%。

8. 易于实现灰渣综合利用

循环流化床的燃烧过程属于低温燃烧, 同时炉内优良的燃尽条件使得锅炉的灰渣含碳量低, 低温燃烧的灰渣易于实现综合利用, 如灰渣作为水泥掺和料或建筑材料。同时低温燃烧也有利于灰渣中稀有金属的提取。脱硫后含有硫酸钙的灰渣还可以用来制作膨胀水泥。

四、循环流化床锅炉存在的问题

经过十多年不断深入的研究、实践和改进, 我国的循环流化床锅炉已经进入稳步发展阶段。早期普遍存在的磨损、结渣、出力不足等问题现在已经基本得到解决。但随着锅炉自身的发展以及锅炉容量的增大, 用户对锅炉可靠性、可控性、自动化程度等要求越来越高, 同时也出现了一些新的问题。

循环流化床锅炉自身的缺点有: ① N_2O 排放较高。流化床燃烧技术可有效地抑制 NO_x 、 SO_x 的排放, 但是, 又产生了另一个环境问题, 即 N_2O 的排放问题。 N_2O 俗称笑气, 是一种对大气臭氧层有着非常强的破坏作用的有害气体, 同时具有干扰人的神经系统的作用。近年来的一系列研究结果表明, 流化床低温燃烧是产生 N_2O 的最大污染源。因此, 控制循环流化床锅炉氮氧化物的排放必须同时考虑到 NO_x 和 N_2O 。② 厂用电率高。由于循环流化床锅炉独有的布风板、分离器结构和炉内料层的存在, 烟风阻力比煤粉炉大得多, 通风电耗也相应较高, 因此, 一般认为循环流化床锅炉厂用电率比煤粉炉高。

目前我国运行的循环流化床锅炉还存在以下诸方面的问题: ① 炉膛、分离器以及回送装置及其之间的膨胀和密封问题。特别是锅炉经过一段时间运行后, 由于选型不当和材质不合格, 加上锅炉的频繁启停, 导致一些部位出现颗粒向炉外泄漏现象。② 由于设计和施工工艺不当导致的磨损问题。炉膛、分离器以及返料装置内由于大量颗粒的循环流动, 容易出现材料的磨损、破坏问题。一些施工单位对循环流化床内某些局部部位处理不当, 出现凸台、接缝等, 导致从这些部位开始磨损, 然后磨损扩大, 导致炉墙损坏。③ 炉膛温度偏高以及石灰石选择不合理导致的脱硫效率降低问题。早期设计及运行的循环流化床锅炉片面追求锅炉出力, 对脱硫问题重视不够, 炉膛温度居高不下, 石灰石种类和粒度的选择没有经过仔细的试验研究, 导致现有循环流化床锅炉脱硫效率不高, 许多锅炉脱硫系统没有投入运行, 缺乏实践经验的积累。④ 飞灰含碳量高的问题。只要循环流化床锅炉燃烧系统设计合理、运行调整良好, 其底渣含碳量通常很低, 至于飞灰含碳量较高, 仅对于比较难于燃烧的煤种和在负荷比较低时。提高炉膛温度是降低飞灰含碳量的有效手段, 但受到石灰石最佳脱硫温度的限