



循环经济与清洁生产理论 探讨与运行

孙可法 沈晓仁 孙世洪 尹建峰
编 王 芳 孙 琳 孙 宇 王 颖 孙 宇

中国石化出版社

TK229.5
C13

411380



循环流化床锅炉理论 设计与运行

岑可法 倪明江 骆仲泱 严建华 著
池 涌 方梦祥 李绚天 程乐鸣

电力科技专著出版基金资助项目



中国电力出版社

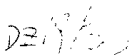
内 容 提 要

循环流化床锅炉技术是近十几年来迅速发展起来的一项高效低污染清洁燃烧技术。国际上这项技术在电站锅炉、工业锅炉和废弃物处理利用等领域已得到广泛的商业应用,并达几十万千瓦级规模的大型循环流化床锅炉发展;国内在这方面的研究、开发和应用也是方兴未艾,已有上百台循环流化床锅炉投入运行或正在制造之中。可以预见,未来的几年将是循环流化床飞速发展的重要时期。

本书是有关循环流化床锅炉理论、设计和运行方面的一本专著,它是作者在收集了国际、国内大量最新研究资料的基础上,根据近十几年来浙江大学在循环流化床锅炉技术方面的研究成果组织编写而成的。本书全面地介绍了循环流化床锅炉的原理、流动特性、传热传质特性、启动运行和变负荷特性、防磨和灰渣综合利用等;对循环流化床锅炉总体设计,分离机和物料回送装置、外置式换热器、布风装置、给料装置、点火装置、高温灰渣冷却装置等关键部件设计,以及对降低污染物排放和受热面防磨的各种措施进行了探讨;最后对循环流化床锅炉发展前景包括循环流化床锅炉大型化和联合循环技术的发展进行了分析。本书内容丰富、新颖,基础理论和工程应用紧密结合,反映了国内外最新研究成果。

本书可供从事循环流化床锅炉研究、设计、运行和管理人员参考,也可作为高等院校有关专业研究生、大学生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据



循环流化床锅炉理论、设计与运行/岑可法等著.-北京:中国电力出版社,1997

ISBN 7-80125-458-9

I. 循… II. 岑… III. 流化床-循环锅炉 IV. TK229.5

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第15903号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 邮政编码100044)
天津市实验小学印刷厂印刷
各地新华书店经销

1998年5月第一版 1998年5月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 48.25印张 1100千字
印数0001—2950册 定价66.00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)

前 言

能源与环境是当今社会发展的两大问题。我国是产煤大国,也是用煤大国,目前一次能源消耗中煤炭占76%,在可见的今后若干年内还有上升的趋势,而这些煤炭中又有84%是直接用于燃烧的,其燃烧效率还不够高,燃烧所产生的大气污染物还没有得到有效的控制,以致于我国每年排入大气的87%SO₂和67%NO_x均来源于煤的直接燃烧,可见发展高效、低污染的清洁燃煤技术是当前亟待解决的问题。循环流化床是近年来在国际上发展起来的新一代高效、低污染清洁燃烧技术,其主要特点在于燃料及脱硫剂经多次循环,反复地进行低温燃烧和脱硫反应,炉内湍流运动强烈,不但能达到低NO_x排放、90%的脱硫效率与与煤粉炉相近的燃烧效率,而且具有燃料适应性广、负荷调节性能好、灰渣易于综合利用等优点,因此在国际上得到迅速的商业推广。我国近几年来也有100多台循环流化床锅炉投入运行或正在制造之中,100MW级的循环流化床锅炉正在安装,而更大容量的电站循环流化床锅炉在国际上正在示范运行,已被发电行业所接受和公认。可以预见,未来的几年将是循环流化床技术飞速发展的重要时期。

国内循环流化床燃烧技术的研究和开发是从80年代开始的。历年来,经大专院校、科研单位、锅炉制造厂家和用户的共同努力,对循环流化床的流动特性、传热特性、燃烧特性、分离回送特性、脱硫脱硝特性、变负荷特性、煤种适应性、设计计算方法、运行及事故处理方法等,均进行了深入的研究和试验,不但开发出不同特色的循环流化床锅炉,而且发表了为数众多的科学论文。浙江大学作为该项技术研究开发的参与单位之一,多年来一直开展循环流化床锅炉理论研究和应用推广工作,同时积极培养流化床领域的硕士和博士研究生,感觉到非常迫切需要一本有关循环流化床锅炉原理、设计及运行方面的专著,供广大科技工作者及研究生们参考。为了使读者能全面、深入地了解和掌握循环流化床锅炉的原理、设计及运行,我们收集了国际、国内的大量资料以及近10多年来浙江大学的研究成果,组织撰写了这一专著。全书共分十四章,第一、二、三章分别讨论了循环流化床锅炉的原理及其流体动力特性,着重探讨了从鼓泡床过渡到循环流化床的各种特征,循环流化床内的气固运动和混合规律及其计算;第四章着重分析了循环流化床内的传热传质特性及有关传热计算的各种数学模型;第五章探讨了煤粒在循环流化床内的燃烧和气化过程,着重分析了物料再循环量对锅炉运行特性的影响;第六章研究了循环流化床内清洁燃烧的原理和方法,着重探讨了脱硫脱硝的模型以及降低污染物排放的各种可能措施;第七章专门探讨了循环流化床锅炉点火启动、正常运行及变负荷特性等问题;第八章叙述了循环流化床锅炉的总体设计问题,为以下各章的关键部件设计提供基础;第九和第十章分别探讨了循环流化床的分离机构及物料回送装置的设计方法;第十一章探讨了布风装置、给料装置、点火装置和高温灰渣冷却装置的设计方法;第十二章探讨了循环流化床各受热面的磨损、腐蚀原因及各种防磨措施;第十三章研究了流化床灰渣的利用问题;最后一章探索和分析了循环流化床锅炉的发展前景。

本书由岑可法教授、倪明江教授、骆仲泱教授、严建华教授、池涌教授、方梦祥副教授、李绚天副教授和程乐鸣博士共同撰写,这些作者都具有博士学位,绝大多数作者的博士论文就是研究流化床锅炉的,因此,可以说本书是作者多年来紧密合作、共同研究的集体结晶。书中引用了浙江大学热能工程研究所同事们及研究生们的大量研究资料,并在撰写过程中得到了他们的很多帮助,在此,要感谢黄国权副教授、杨家林高级工程师、樊建人教授、康齐福教授、吕荣高级工程师、蒋旭光工程师、施正伦高级工程师、罗卫红高级工程师、李晓东博士、方建华博士、高翔博士、王勤辉博士、陈飞博士、王树荣博士生、周劲松博士,没有他们的帮助和参与试验研究,本书是不可能完成的。

作者还要感谢国家自然科学基金委员会,先后批准了“循环流化床流动、燃烧、脱硫的机理性研究”、“用多相流动理论对锅炉尾部受热面磨损进行理论研究”、“将逾渗理论用于脱硫反应以改善流化床的脱硫效率”、“新型烟气脱硫除尘装置的机理性研究”、“流化床中颗粒与受热面的撞击频率及对传热和磨损的影响”、“颗粒团聚物对高浓度气固分离器分离机理影响的研究”和“异重流化床污泥洁净燃烧的机理研究”等七项国家自然科学基金项目。这些项目的部分研究成果已反映在本书之中。

承蒙东北电力学院孙健教授在百忙之中主审了本书。孙健教授逐章逐节地仔细审阅了书稿,并提出了很多宝贵的意见,使本书生辉不少,在此表示深切的谢意。

作者还要感谢中国科学院工程热物理研究所、清华大学、东南大学、华中理工大学、西安交通大学、东北电力学院、电力工业部热工研究院、上海电站设备成套研究所、杭州锅炉厂、无锡锅炉厂、东方锅炉厂、北京巴威公司等单位,本书引用了这些单位的有关研究成果。

循环流化床锅炉的理论和应用正在迅速地发展,限于作者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1995年2月于浙江大学求是园

总 符 号 表

A

A	面积, m^2
a	系数; 旋风分离器入口高度, m
A_b	床层横截面积或布风板有效面积, m^2
A_{ov}	小孔面积, m^2
A_p	颗粒表面积, m^2
A_{sp}	与颗粒体积相同的球体表面积, m^2
Ar	阿基米德数
A_w	受热面积, m^2
A_o	系数
$A(r)$	孔隙比表面积分布密度函数

B

B	给煤量, kg/h
b	常数; 网格半径, m
B_n	名义投煤速率 (计算给煤量), kg/h
B_r	颗粒循环速率, kg/h

C

\bar{C}_v	以流体容积表示的颗粒相的容积浓度
\bar{C}_w	以流体重量表示的颗粒相的重量浓度
C	反应物浓度, mol/m^3
c	常数
C^*	无因次浓度, $=C/C_0$; 饱和夹带颗粒浓度, kg/m^3
C_0	颗粒表面的反应物浓度, mol/m^3
C_1	颗粒内部径向位置 R 处的反应物浓度, mol/m^3
C_2	产物层中的反应物浓度, mol/m^3
C_b	环境中的反应气体浓度, mol/m^3
C_D	曳力系数
C_d	密相区中的颗粒浓度, kg/m^3

C_{DS}	层流时的曳力系数, $=24/Re$
C_{DT}	考虑到湍流脉动后的曳力系数
C_{It}	飞灰中的含碳量, %
C_i	反应界面处的反应物浓度, mol/m^3
C_{max}	最大颗粒浓度, kg/m^3
$c_{p,p}$	颗粒定压比热, $kJ/(kg \cdot K)$
$c_{p,g}$	气体定压比热, $kJ/(kg \cdot K)$
C_r	返料中的含碳量, %
C_s	快速床中的颗粒浓度, mol/m^3
C_v	以两相流总容积表示的颗粒相的体积浓度
C_w	以两相流总重量表示的颗粒相的重量浓度

D

\bar{d}	平均直径, m
D	直径, m
d	直径或径向距离, m
D_0	旋风分离器筒体直径, m ; 扩散系数前的系数, m^2/s
d_{10}	颗粒算术平均直径, m
D_{100}	旋风分离器中颗粒被完全分离的最小直径, m
D_2	旋风分离器排灰管直径, m
d_{20}	颗粒表面积平均直径, m
d_{23}	颗粒比表面积平均直径, m
D_3	筛余物函数
d_{30}	颗粒体积平均直径, m
d_{32}	颗粒面积平均直径, m
d_{43}	颗粒重量平均直径, m
D_{50}	旋风分离器切割直径, m
D_a	轴向扩散系数, m^2/s
D_b	床直径, m
d_b	气泡有效直径, m
d_c	絮状物等效直径, m

D_c	有效扩散系数, m^2/s ; 旋风分离器排气管直径, m
D_{i1}	二元分子扩散系数, m^2/s
D_p	产物层中的离子扩散率, m^2/s
d_p	颗粒直径, m
$d_{p,\max}$	最大粒径, m
$d_{p,\min}$	最小粒径, m
d_{pn}	颗粒直径分布密度函数最初值所对应的粒径, m
D_r	径向扩散系数, m^2/s
$d_{S,\text{sph}}$	与颗粒具有相同表面积的球体直径, m
D_w	立管直径, m
d_i	传热管直径, m
D_s	气体空穴直径, m
d_V	等效体积直径, m
d_s	气体空穴等效直径, m
$d_{V,\text{sph}}$	与颗粒具有相同体积的球体直径, m

E

E_{∞}	第 i 档粒经颗粒的扬析速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
E	活化能, kJ/mol
e	辐射吸收率
$E(t)$	停留时间分布密度函数
e_0	颗粒团吸收率
E_1	燃烧反应表现活化能, kJ/mol
E_2	烧结过程表现活化能, kJ/mol
E^2	微分算子
E_C	焦炭燃烧的表现活化能, kJ/mol
e_g	气体吸收率
e_p	固体颗粒吸收率
e_V	床内有效吸收率
E_R	挥发分燃烧的表现活化能, kJ/mol
e_s	传热表面吸收率
E_V	挥发分析出的表现活化能, kJ/mol

F

f_s	受热而被颗粒群覆盖的份额
f_i	稀相体积份额
$F(d_p)$	颗粒直径分布的积分函数
$f(d_p)$	颗粒直径分布的微分函数

F_{23}	颗粒的比表面积, m^2/m^3
F_A	阿基米德浮力, N
f_b	气泡频率, s^{-1}
F_i	第 i 档颗粒的夹带速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
F_{i0}	第 i 档颗粒在床层表面处的夹带速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$F_{i\infty}$	第 i 档颗粒在夹带分离高度的夹带速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
F_n	床层表面处各档颗粒的总夹带速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
F	函数; 截面积, m^2
f	空气与壁面的摩擦阻力系数; 频率
F_c	給料速度, kg/s
$f(t)$	压力脉动函数
f_i	絮状物相体积分率
F_D	气体对固体颗粒的曳力, N
F_d	破碎后粒径变化率
F_G	重力, N
F_h	旋风分离器出口面积, m^2
F_i	旋风分离器入口面积, m^2
F_K	频谱
F_s	综合破碎指数; 固体流量, kg/s
f_V	颗粒团的体积分率
$f(r)$	孔隙数量分布密度函数

G

g	重力加速度, $=9.81\text{m}/\text{s}^2$
G_s	每小时逃逸出锅炉的物料总量, kg/h
G_p	颗粒质量流量, kg/s
G_R	格拉肖夫数
G_c	颗粒循环速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

H

$h_{r,\theta}$	不同圆周角 θ 处的辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
H	总高度, m
h	受热面的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 高度方向的位置或距基准面的垂直距离, m
H_0	静止床高, m
h_0	特征长度, m

h_{1w} 床内浸没受热面的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{2w} 床壁面的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_B 颗粒传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_e 旋风分离器排气管高度, m
 h_{tc} 颗粒团对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{tr} 颗粒团辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 H_d 密相床层的高度, m
 h_d 固体颗粒分散相传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{dc} 固体颗粒分散相的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{dr} 固体颗粒分散相的辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{Rr} 气固传热系数的辐射换热分量, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{sp} 气固间的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h 特征高度, m
 h_w 床层与壁面的瞬时传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{mf} 临界流态化时的床层高度, m
 h_p 颗粒间的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{pc} 颗粒间传热系数的对流分量, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_r 辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

I

I 电流, A

K

\bar{k} 平均反应活性, m/s
 \bar{K}_p 床内脱硫剂平均转化率
 k 反应速度常数; 湍流动能
 K 硫酸盐化反应程度; 磨损系数
 K^* 最大转化率
 k_0 反应速度常数的指前系数, m/s
 k_1 石灰石煅烧反应速度常数, m/s
 k_2 烧结过程的表现反应速度常数, m/s
 K_g 晶粒的硫酸盐化程度
 k_m 传质系数, m/s
 k_s 本征反应速度常数, m/s

L

L 长度, m

l 颗粒团特征尺度, m
 L_a 颗粒在床内的加速段长度, m
 L_b 平均射线行程, m
 l_c 乳化石厚度, m
 l_g 气膜厚度, m

M

M 流量, kg/s; 相对分子质量
 m 气固混和比; 颗粒质量, kg
 \dot{m} 质量消耗速率, mol/s
 m_{cr} 临界颗粒浓度, kg/kg
 m_s 入口气固比, kg/kg
 m_i 质量浓度, kg/m^3
 m_{um} 饱和夹带率, kg/kg

N

N 气流转圈数; 颗粒数; 流化数; 气体输送颗粒的能耗
 n 幂指数; 颗粒数; 边界层个数; 压降减弱系数
 N_d 破碎后粒径变化率
 N_f 破碎比, 即破碎前后颗粒数之比
 N_f 流化数
 N_s 综合破碎指数
 N_{St} 努塞尔数
 $N_{St,sp}$ 气固间传热的努塞尔数
 n_s 颗粒数密度

P

p 静压, Pa
 Δp 压降或压差, Pa
 Δp_b 密相床层压降, Pa
 Δp_d 布风板压降, Pa
 Δp_{ref} 参考压降, Pa
 Δp_T 炉膛总压降, Pa
 Pe 皮克利数
 p_c 燃烧时二氧化碳的平衡分压, Pa
 Pr 普朗特数
 P° 孔隙堵塞常数

Q

Q	热量, kJ
q	传热速率, W; 流体的动压头, Pa
q _c	导热量, W
q _{rc}	返料风流量, Nm ³ /h
q _v	气体体积流量, Nm ³ /h

R

\dot{r}	半径变化速率, m/s
R	径向位置, m; 循环倍率
r	半径或径向位置, m
R(t)	t时刻的反应速率
R _∞	系数
R ₀	初始半径, m
r ₀	初始孔径, μm
r _{0,m}	t时刻已堵塞的最大原始孔径, μm
R ₁ ~R ₄	随机数
r ₂	反应界面的径向位置, μm
R ₄	磨损速率, kg/s
r _a	平均孔隙半径, μm
R _c	颗粒团的热阻, m ² ·K/W
Re	雷诺数
Re _t	终端沉降雷诺数
r _g	晶粒半径, μm
R _k	乳化石与壁面间的接触热阻, m ² ·K/W
R _n	气泡顶部的曲率半径, m
R _p	密度分布函数
r _p	名义孔隙半径, μm
R _{xy} (r)	x和y的相关函数

S

\bar{S}	石灰石的平均比表面积, m ² /mol
S	煅烧过程中石灰石的比表面积, m ² /mol
S ₁	CaCO ₃ 比表面积, m ² /mol
s ₁	横向节距, m
S ₂	CaO比表面积, m ² /mol
s ₂	纵向节距, m

S _A	可用比表面积, m ² /mol
S _c	最终比表面积, m ² /mol
Sc	施密特数
Sh	薛伍德数
S _p	相对总和分布函数
S _r	当地脱钙剂摩尔浓度, mol/m ³
St	斯特罗哈尔数
Stk	斯托克斯数
S _v	颗粒比表面积, m ² /m ³
S _x	煅烧份额为x时石灰石的比表面积, m ² /mol

T

Δt	温差, °C
T	热力学温度, K
t	摄氏温度, °C
T _b	床温, K
t _b	孔隙堵塞时间常数, s
T _g	气流温度, K
T _p	颗粒温度, K
t _{st}	硫酸盐化时间常数, s
T _w	壁面温度, K

U

u	风速, m/s
u ₀	流化速度, m/s
u _{br}	气泡相对速度, m/s
u _c	絮状物相的表现速度, m/s
u _{ch}	堵塞速度, m/s
u _f	气体在乳化石中的速度, m/s
u _{FD}	快速流态化向密相气力输送的转变速度, m/s
u _g	气相速度, m/s
u _{g,c}	絮状物中气体的速度, m/s
u _{g,t}	稀相中气体的速度, m/s
u _k	鼓泡流化床向湍流化床的转变速度, m/s
u _l	稀相的表现速度, m/s
u _{mb}	最小鼓泡速度, m/s
u _{nd}	临界流化速度, m/s

u_{or}	小孔风速, m/s
u_p	颗粒速度, m/s
$u_{p,c}$	絮状物中颗粒的速度, m/s
$u_{p,l}$	稀相中颗粒的速度, m/s
u_{st}	密相气力输送到稀相气力输送的转变速度, m/s
u_R	开始进入湍流状态时的表现速度, m/s
u_w	管间速度, m/s
u_z	终端沉降速度, m/s
u_{tr}	湍流流态化向快速流态化的转变速度, m/s
u_{tc}	输送速度, m/s

Y

V	体积容量, m^3
V_0	理论空气量, m^3
V_{CaO}	CaO的摩尔容积, $\times 10^{-6} m^3/mol$
V_{CaSO_4}	CaSO ₄ 的摩尔容积, $\times 10^{-6} m^3/mol$
V_g	气体体积, m^3
v_g	分离器内的气相速度, m/s
v_i	含尘气流入口速度, m/s
V_m	两相流总体积, m^3
V_p	颗粒体积, m^3
V_p	比孔容积, $\times 10^{-6} m^3/mol$
$V_{p,x}$	燃烧份额为 x 时的比孔容积, $\times 10^{-6} m^3/mol$
v_r	径向速度, m/s
v_s	沉降速度, m/s
v_t	切向速度, m/s
V_{ur}	挥发分析出时形成的焦油量, %
v_w	轴向速度, m/s

W

W	重量, kg
w	垂直速度分量, m/s

X

X_i	宽筛分颗粒中第 i 组分颗粒的重量份额
x	燃烧份额或失重率, %
x_{100}	完全燃烧时的失重率, %

Y

Y	颗粒的体积百分比, %
y	中间参数
$\langle \rangle$	数学期望

希腊字母

α	夹角; 体积膨胀比; 过量空气系数
α_1	一次风的过量空气系数
α_{fa}	飞灰份额, %
β	夹角; 传质系数; 临界标度指数
β'	临界标度指数
γ	风渣比, Nm^3/kg ; 常数
δ	无因次边界层厚度; 气泡分率; 灰层厚度
$\delta(t)$	t 时刻反应界面的位移量
δ_b	气泡体积份额
$\bar{\epsilon}$	截面平均空隙率
ϵ	空隙率; 黑度
ϵ_0	颗粒团对壁面的覆盖率
ϵ_1	床的中心区空隙率
ϵ_2	外环区空隙率
ϵ_3	恒常的密相床空隙率
ϵ_0	絮状物的空隙率
ϵ_{ch}	堵塞时的床层空隙率
ϵ_d	密相空隙率
ϵ_r	夹带区空隙率
ϵ_k	湍流动能的耗散率
ϵ_l	稀相空隙率
ϵ_w	壁面空隙率
ζ	式(3-40)中的常数; 无因次径向坐标
η	布风板开孔率, %
$\eta_f(d_p)$	分离器的分级效率, %
η_c	燃烧效率或燃烧份额, %
η_d	分离效率, %
η_{sc}	硫析出率, %
η_{sc}	脱硫效率, %
θ	无因次温度
θ	角度
λ	导热系数, $W/(m \cdot K)$; 能量耗散旋涡团尺度,

m

λ_g	气体导热系数, $W/(m \cdot K)$
λ_p	颗粒导热系数, $W/(m \cdot K)$
μ	气体的动力粘度, $Pa \cdot s$
μ_m	气固混合物的表现动力粘度, $Pa \cdot s$
ν	气体的运动粘度, m^2/s
ξ	径向坐标; 阻力系数
ξ_0	净气体的阻力系数
$\bar{\rho}_p$	固相分密度, kg/m^3
$\bar{\rho}_g$	气相分密度, kg/m^3
ρ_b	床层表现密度, kg/m^3
ρ_g	气相密度, kg/m^3
ρ_m	两相流密度, kg/m^3
ρ_p	颗粒密度, kg/m^3
ρ_s	固相密度 (真密度), kg/m^3
σ	正态分布中的标准差
σ_0	黑体辐射常数, $=5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K)$
τ	时间; 弯曲系数; 剪切应力
τ_s	颗粒弛豫时间, s
τ_{sv}	颗粒在流化床内的平均停留时间, s
τ_p	弯曲系数
ϕ	孔隙率
ϕ_{∞}	最终孔隙率
ϕ'	拟孔隙率, $=1-\phi$
$\phi(r)$	孔隙率分布密度函数
ϕ^*	常数
ϕ_0	初始孔隙率
ϕ^A	可用孔隙率
ϕ^B	扩散主干所占的孔隙率
ϕ_c	灰层孔隙率
ϕ_s	临界孔隙率
ϕ_e	有效孔隙率
ϕ_s	球形度
ϕ_s	反应物体积份额
Ψ	流函数

ψ	函数
ω	圆频率

下 标

0	表观; 初始
a	密相极限
ac	实际值
b	床层; 气泡相
c	絮状物; 临界; 焦炭
cond	热传导
conv	对流
cr	临界值
d	密相区; 布风板
e	夹带; 有效
eq	等价
fa	飞灰
g	气相; 晶粒
l	稀相
LS	返料机构
mb	临界鼓泡
mf	临界流化
or	小孔
p	颗粒
r	径向; 反应物
rad	辐射
rc	返料
re	相对
s	固相
SP	分离机构
ST	立管
surf	表面
susp	悬浮相
w	壁面

目 录

前 言

总符号表

第一章 循环流化床锅炉的原理及特点	1
第一节 循环流化床锅炉的原理	1
一、循环流化床的工作原理	1
二、流化床燃烧设备的主要类型	2
三、循环流化床锅炉的特点	3
四、循环流化床锅炉与其他炉型的比较	5
五、循环流化床锅炉的优点及尚需进一步研究的问题	10
第二节 循环流化床锅炉的发展概况	14
一、循环流化床的发展概况	14
二、循环流化床锅炉的发展概况	15
参考文献	24
第二章 宽筛分颗粒流态化的流体动力学特性	25
第一节 宽筛分颗粒特性的决定	25
一、Geldart 的颗粒分类方法	25
二、流态化时与宽筛分颗粒有关的特性	26
三、宽筛分颗粒平均参数的确定方法	38
第二节 床料颗粒在流化床内的运动规律	41
一、颗粒在流化床内的受力分析	41
二、颗粒流态化运动的简化过程	44
三、颗粒运动时阻力系数的确定	46
四、宽筛分颗粒流态化时的流体动力学特性	49
第三节 气固流态化分类	49
一、气固接触流型	49
二、各类气固流态化特性比较	50
三、各类流态化的过渡原理及准则	56
第四节 临界流化速度及床层阻力特性	66
第五节 流化床的气泡特性	78
一、两相鼓泡理论	79
二、气泡周围的气固运动	80
三、气泡运动的实验测定和定量描述	82
第六节 流化床内颗粒的夹带与扬析	93
参考文献	95
第三章 循环流化床的流体动力学特性	99

第一节 从鼓泡流化床到循环流化床的特征分析	99
一、流体动力特性的比较	99
二、传热、燃烧及污染物排放特性比较	104
第二节 循环流化床的局部流动特性	109
一、循环流化床底部加速区	110
二、循环流化床的相结构	110
三、颗粒在循环床上部的运动规律	111
四、絮状物的形成及转化	115
第三节 循环流化床的宏观流体动力特性	117
一、循环流化床内的空隙率分布	118
二、循环流化床的压力分布	122
三、气体速度分布	124
四、二次风的影响	125
第四节 循环流化床内颗粒运动的数值计算	127
一、鼓泡床模型	127
二、拟流体模型	128
三、多流体模型	129
四、颗粒轨道模型	136
第五节 循环流化床内颗粒和气体的混合	138
一、气体的扩散	138
二、固体颗粒的混合	144
第六节 内循环流化床的流体动力特性	148
一、带隔板的内循环流化床	148
二、不均匀布风实现内循环	153
参考文献	154
第四章 循环流化床内的传热和传质	161
第一节 循环流化床下部密相区与受热面间的传热	162
一、循环流化床下部密相区与受热面间的传热机理	162
二、影响循环流化床传热的各种因素	168
三、流化床内受热面瞬时和局部传热系数的分布	176
四、循环流化床内的辐射传热	176
五、密相区内垂直埋管的传热	179
六、密相段水平埋管的传热	183
七、循环流化床锅炉膜式壁和过热器的传热	184
八、湍流床内受热面的传热特点	187
九、快速床内受热面的传热特点	187
第二节 循环流化床上部稀相区受热面的传热	190
一、循环流化床上部稀相区的传热过程	190
二、影响循环流化床稀相区传热的因素	191
三、循环流化床锅炉稀相区的传热试验	196
第三节 循环流化床内颗粒的传热与传质	197
一、流化床内颗粒的传热过程	198

二、影响流化床内颗粒传热的有关因素	198
三、流化床内颗粒传热的准则方程	202
四、颗粒在流化床内的传热模型	204
五、流化床内颗粒与气流的传质	215
第四节 循环流化床内传热数学模型及计算	216
一、半经验的流化床传热计算模型	216
二、循环流化床的传热理论计算模型	222
参考文献	228
第五章 煤粒在循环流化床内的燃烧与气化过程	235
第一节 煤粒在流化床内的燃烧过程	235
第二节 循环流化床中煤的燃烧特性	237
一、煤粒在流化床中的破碎特性	237
二、流化床内煤粒的磨损特性	246
三、煤中挥发分的析出及燃烧	248
四、焦炭的着火与燃尽	269
第三节 循环流化床锅炉的燃烧特性	284
第四节 物料循环量对锅炉燃烧特性及运行的影响	289
一、物料循环量的表征	289
二、运行参数对确定物料循环量的影响	290
三、物料循环量的变化对运行的影响	291
四、有利循环倍率的确定方法	293
第五节 煤泥和煤水混合物的流化床燃烧机理	294
一、煤泥和煤水混合物的流变特性和输送特性	294
二、煤泥和煤水混合物高效低污染流化床燃烧的原则	297
三、异重流化床的流体动力特性	302
四、煤泥和煤水混合物燃烧时的结团特性	305
五、煤泥和煤水混合物的流化床燃烧过程	307
六、煤泥和煤矸石流化床燃烧	313
七、单颗煤水混合物流化床燃烧模型	314
第六节 循环流化床内的气化过程	317
一、煤在流化床中的气化动力学	317
二、影响气化过程的诸因素分析	321
三、生物质在流化床中的气化特性	324
四、循环流化床的气化工艺流程及特点	326
五、煤气化计算及模型	333
参考文献	338
第六章 循环流化床内脱硫脱硝机理及排放控制	345
第一节 SO_2 和 NO_x 对大气污染的影响	345
一、矿物燃料电站有害气体的排放	345
二、有害气体排放的危害性	345
三、各国对粉尘、 SO_2 和 NO_x 的排放控制标准	346
第二节 煤燃烧过程中 SO_2 析出动态特性及石灰石与 SO_2 的反应过程	347

一、煤燃烧过程中 SO_2 析出的动态特性	347
二、脱硫剂的选择	351
三、石灰石在流化床内的燃烧过程	355
四、石灰石在流化床内的脱硫机理	363
第三节 影响循环流化床脱硫效率的各种因素分析	366
第四节 循环流化床的脱硫模型	372
一、单颗粒脱硫剂反应模型	372
二、反应器模型	379
第五节 煤在循环流化床内燃烧过程中 NO_x 及 N_2O 的形成机理及排放的动态特性	382
一、 NO_x 的生成	382
二、 N_2O 在流化床内的形成和还原机理	386
三、燃料氮转化的反应动力学	388
第六节 循环流化床内氮氧化物的排放及其影响因素	396
第七节 同时降低循环流化床 SO_2 和氮氧化物排放的措施	403
参考文献	405
第七章 循环流化床锅炉的启动和运行	414
第一节 循环流化床的点火启动	414
一、床层升温过程	415
二、不同粒径的颗粒在点火过程中的作用	416
三、床下点火的机理和实现方法	416
四、分床启动技术	419
五、点火时需注意的几个方面	421
六、循环流化床锅炉的启动步骤	423
七、影响循环流化床锅炉启动速度的因素	424
第二节 循环流化床锅炉的正常运行	425
一、循环流化床锅炉正常运行的经验	426
二、关键参数的运行控制	429
三、正常运行和变负荷运行	430
四、压火及压火后的再启动	432
五、循环流化床的运行监测、保护和自动控制	433
六、控制系统及调节手段	434
第三节 参数变化对循环流化床运行的影响	436
一、煤种变化的影响	436
二、给料粒度和水分的影响	437
三、过量空气系数变化的影响	439
四、流化风速变化的影响	440
五、循环倍率变化的影响	442
六、静止床高与床层膨胀的影响	443
七、床温的影响	444
八、负荷变化时各种参数的变化	445
九、其他因素的影响	447
参考文献	449

第八章 循环流化床锅炉的总体设计	452
第一节 循环流化床锅炉的炉型选择	452
一、循环流化床锅炉的炉型分类	452
二、循环流化床锅炉炉型的对比及选择	459
第二节 循环流化床锅炉的放大问题	460
一、循环流化床锅炉的模化	460
二、循环流化床锅炉的放大	462
第三节 循环流化床锅炉设计时主要热力参数的确定	465
一、燃料特性的影响	465
二、颗粒粒径的确定	467
三、脱硫剂粒径及 Ca/S 摩尔比	468
四、物料平衡	468
五、热量平衡及能量分配	469
六、流化风速及热负荷的选择	470
七、床温的选择及控制	471
八、循环倍率及分离器效率的确定	472
九、其他热力参数的确定	473
第四节 炉膛的设计	474
一、炉膛的结构设计	474
二、循环流化床内的燃烧份额分布	477
三、添加脱硫剂对设计的影响	479
四、水循环	479
五、蒸汽参数对受热面布置的影响	480
六、一二次风配比及二次风的位置	480
七、炉膛的设计步骤	481
第五节 循环流化床过热器及尾部受热面的设计	482
一、尾部受热面的热量平衡	482
二、过热器和再热器的设计	482
第六节 老式锅炉改为循环流化床锅炉	484
参考文献	490
第九章 循环流化床的气固高温分离机构	494
第一节 高温飞灰分离的要求及形式	494
一、分离及回送对循环流化床锅炉的重要性	494
二、根据循环倍率确定所要求的旋风分离器的分离效率	494
三、分离效率的变化对循环流化床锅炉运行的影响	496
四、高温飞灰分离器的形式	497
第二节 高温旋风分离器	498
一、旋风分离器的主要形式及尺寸	498
二、影响高温旋风分离器分离特性的有关因素	502
三、高温旋风分离器分离机理	507
四、高温旋风分离器的其他形式	519
五、循环流化床旋风分离器的设计与耐火材料的键砌	545

第三节 惯性分离器	552
一、惯性分离器分类	552
二、烟气转弯的惯性分离器	553
三、百叶窗式分离器	555
四、撞击式分离器	560
第四节 多级分离	574
一、多级分离简介	574
二、多级分离试验研究	576
参考文献	578
第十章 固体物料回送装置	583
第一节 固体物料回送装置的形式及结构	583
一、固体物料回送装置的作用及分类	583
二、可控式非机械阀的工作原理	585
三、透流型非机械阀的工作原理	586
四、气力输送阀的工作原理	587
第二节 固体物料回送装置的试验研究	588
一、固体颗粒循环回路的压力平衡	588
二、循环物料量的测量方法	589
三、几种常用的物料回送装置的试验	593
第三节 固体物料回送装置的设计计算	601
一、立管的设计计算	601
二、L 阀的设计计算	603
三、流动密封阀的设计	604
四、循环流化床物料回送装置设计的一些特殊要求	605
第四节 流化床换热器	605
参考文献	608
第十一章 循环流化床关键部件的设计	612
第一节 布风装置的设计	612
一、布风板的重要性	612
二、布风装置形式及结构	612
三、其他形式的布风装置	618
第二节 給料装置的设计	622
一、常用給料机的种类	622
二、流化床給料装置的设计和布置	623
三、給料方式对流化床燃烧过程的影响	630
第三节 点火装置的设计	633
一、国内有代表性的流化床点火启动方式及实践	633
二、国外的流化床点火启动方法	638
三、床下热烟气点火的理论计算	639
第四节 高温灰渣冷却装置的设计	647
一、高温灰渣冷却器的分类及原理	648