



普通高等学校热能动力类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

电站锅炉原理

华中理工大学 容奎恩 浙江大学 袁镇福 合编
华北电力大学 刘志敏 上海交通大学 田子平



中国电力出版社

普通高等学校热能动力类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

电站锅炉原理

华中理工大学 容釜恩 浙江大学 袁镇福 合编
华北电力大学 刘志敏 上海交通大学 田子平

中国电力出版社

前 言

本书是根据中电联关于《普通高等学校第四轮前二年（1996～1997年）热能动力类专业本科教材编审出版计划，按照热能动力类教学指导委员会锅炉教学组通过的教学大纲而编写的。

全书共分十五章，内容密切结合热能动力类专业“锅炉原理”课程的教学要求，全面系统地阐述了锅炉的工作原理：包括锅炉的构成和工作过程，锅炉用燃料，煤粉制备，燃烧基本理论及燃烧设备，各对流受热面的主要运行问题，各类型锅炉的水动力工况，蒸汽净化，锅炉机组的布置及热力计算方法等。

本书着重阐述锅炉工作过程的基本理论、整体系统及基本计算方法，突出运行问题。并按照我国电力工业发展的趋势，在取材方面，尽量反映我国大型电站锅炉的现状、特点，以及我国锅炉方面科学研究的新成果和新技术，同时又注意吸收国外的先进经验及新技术。

本书由华中理工大学容奎恩、浙江大学袁镇福、华北电力大学刘志敏及上海交通大学田子平合编，并由华中理工大学容奎恩统稿。其中容奎恩编写第一、三、六章及第七章第一至五节；袁镇福编写第二、五、八、九章及第七章第六节；刘志敏编写第十、十一、十二章；田子平编写第四、十三、十四、十五章。

本书由中国工程院院士、浙江大学岑可法教授主审。岑可法院士在百忙中详细审阅了全部书稿，提出了许多宝贵的意见和建议，详细而具体，使编者在修改过程中得益非浅，特此向岑可法院士表示深切的谢意。

本书从讨论编写大纲开始，直到整个编写过程，都得到热能动力类专业教学指导委员会锅炉教学组全体委员以及兄弟院校的大力支持和帮助，特向他们表示衷心的感谢。

许多大型火电厂、锅炉厂、电力设计院、研究所，为本书的编写提供许多宝贵的资料和建议；本书的编写也引用了所列参考文献作者们不少宝贵的资料，也一并向他们表示由衷的感谢。

由于编者水平所限，书中缺点和错误难免，恳请读者指正。

编 者

1997年3月

主要符号表

拉丁字母符号

<i>A</i>	燃料的工业分析灰分, % 燃烧器区域炉膛截面积, m^2	<i>k</i>	辐射减弱系数, $1/(MPa \cdot m)$ 化学反应速度常数 不均匀系数
<i>a</i>	黑度, 湍流系数, 磨损系数, 分配系数 炉膛宽度, m	<i>k_0</i>	频率因子
<i>B</i>	燃料消耗量, t/h (kg/s)	<i>L</i>	长度, m
<i>b</i>	炉膛深度, m 煤粉细度系数	<i>l</i>	长度, m
<i>Bi</i>	毕渥准则	<i>M</i>	燃料中工业分析水分, %
<i>C</i>	反应物或生成物浓度, 修正系数	<i>n</i>	管数, 均匀性指数
<i>C</i>	燃烧中碳的含量, %	<i>p</i>	压力, MPa 排污率, %
<i>CO</i>	干烟气中一氧化碳容积含量, %	<i>Q</i>	热量, kJ 燃料发热量, kJ/kg
<i>c</i>	比热容	<i>q</i>	热负荷 kW/m^2 , kW/m^3
<i>D</i>	水量、蒸汽量, 锅炉蒸发量, t/h 扩散系数 汽包, 管子或联箱直径, mm	<i>q_1</i>	锅炉的有效利用热, %
<i>d</i>	管直径, mm	<i>q_2</i>	排烟热损失, %
<i>DT</i>	灰分的变形温度, $^{\circ}C$	<i>q_3</i>	气体 (化学) 未完全燃烧热损失, %
<i>E</i>	活化能, 能量, $kW \cdot h/t$, kJ/t , 磨损量	<i>q_4</i>	固体 (机械) 未完全燃烧热损失, %
<i>F</i>	流通面积, 炉墙面积, 面积, m^2	<i>q_5</i>	散热损失, %
<i>FC</i>	燃料工业分析中的固定碳, %	<i>q_6</i>	其他热损失, %
<i>Fo</i>	傅里叶准则	<i>R</i>	煤粉筛分中筛子上的剩余量, %
<i>Fr</i>	弗劳德准则	<i>R</i>	通用气体常数 半径, m
<i>FT</i>	灰分的流动温度, $^{\circ}C$	<i>r</i>	蒸发潜热, kJ/kg
<i>f</i>	管子流通截面, m^2	<i>r</i>	风率, %
<i>H</i>	受热面积, m^2 高度, m 硬度	<i>S</i>	含盐量, mg/kg
<i>HGI</i>	哈氏可磨度	<i>ST</i>	灰分软化温度, $^{\circ}C$
<i>h</i>	高度, m	<i>St</i>	stokes 准则
<i>I</i>	空气或烟气的焓 (比焓), kJ/kg	<i>S</i>	辐射层厚度, m
<i>i</i>	水或蒸汽的焓 (比焓), kJ/kg	<i>s</i>	管距, mm
<i>K</i>	循环倍率 传热系数 $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	<i>T</i>	热力学温度, K
		<i>t</i>	温度, $^{\circ}C$
		<i>U</i>	通道截面周界长度, m
		<i>u</i>	燃烧器区域炉膛周长, m

V	燃料工业分析中的挥发分, % 容积, m^3	X	质量含汽率, %
v	比容, m^3/kg	x	水冷壁、受热面角系数,
w	流速, m/s	Z	总阻力系数

希腊字母符号

α	过量空气系数, 倾斜角 放热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	λ	热导率 $\text{kW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 或 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 沿程摩擦阻力系数
β	燃料特性系数, 扩散速度常数 管子外径与内径之比 容积含汽率, % 清洗不完全程度 空气预热器空气量与理论空气量之比	μ	动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, μ 飞灰浓度, kg/kg
Δ	差值符号	ν	运动粘度, m^2/s
δ	厚度, mm	ξ	局部阻力系数 利用系数
ϵ	沾污系数, 灰污系数	ρ	密度, kg/m^3
ζ	辐射受热面灰污系数 局部阻力系数	σ	表面张力, N/m
η	效率, 热效率, % 热不均系数, 均匀系数	σ_0	玻耳兹曼辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
Θ	无量纲温度	τ	时间, 秒
θ	烟气温度, $^\circ\text{C}$	φ	截面含汽率, % 保热系数 钢球充满系数
		ψ	辐射受热面热有效系数
		ω	蒸汽中水分含量 (湿度), %

角 标 符 号

ad	空气干燥基	gl	锅炉
ar	收到基	gr	高位, 过热器
b	弹筒, 管壁	gs	锅水, 加热
c	顺列, 出口	gy	干烟气
ch	传热	h	火焰
ck	出口	hu	汽水混合物
cr	临界	hz	灰渣
d	对流, 干燥基	j	计算值, 焦炭粒子
daf	干燥无灰基	jl	节流
dl	当量	jx	界限
dt	倒流	k	空气
f	辐射	ky	空气预热器, 火焰
fg	发光	l	炉, 炉膛
fh	飞灰	ld	露点
g	汽包, 工质, 给水	lj	临界
gb	管壁	lk	冷空气

lm	漏煤
lq	冷却
lx	联箱
lz	炉渣
max	最大值
mf	煤粉系统
min	最小值
n	内径
net	低位
nl	逆流
o	理论值, 基本值
p	屏, 偏差管
pb	屏区水冷壁
pc	偏差
pj	平均值
pw	排污
py	排烟
q	蒸汽, 气体, 不发光, 源子气体
r	燃料, 燃烧, 燃烧器
	输入, 入口
rk	热空气
rq	热前段

rs	热水段
s	错列, 上升
sl	顺流
sld	酸露点
sm	省煤器, 省煤段, 蒸发
ss	上升
stz	停滞
th	炭黑粒子
xj	下降
y	烟气
yc	沿程
yd	运动
yh	烟道灰
yl	溢流灰
yx	有效
zf	制粉系统, 蒸发段
zh	着火
zr	再热, 再热器
zs	折算
zw	重位
'	进口, 饱和水
"	出口, 饱和汽

目 录

前 言

主要符号表

第一章 绪论	1
第一节 锅炉机组的工作过程	1
第二节 锅炉的容量和参数	3
第三节 锅炉分类	4
第四节 锅炉的安全和经济指标	18
第二章 锅炉受热面	20
第一节 水冷壁	21
第二节 过热器与再热器	27
第三节 省煤器与空气预热器	40
第三章 锅炉燃料	52
第一节 煤的常规特性	52
第二节 煤的常规特性对锅炉工作的影响	60
第三节 煤的燃烧特性及其影响	62
第四节 煤的结渣和沾污特性指标	64
第五节 煤的分类	66
第六节 液体及气体燃料	69
第四章 燃烧过程的物质平衡和锅炉热平衡	72
第一节 燃烧过程的物质平衡	72
第二节 燃烧产物计算和测定	73
第三节 焓温表	83
第四节 锅炉热平衡	86
第五章 煤粉制备	96
第一节 煤粉特性	96
第二节 煤的可磨性与磨损性	98
第三节 中速磨煤机及制粉系统	100
第四节 钢球磨煤机及制粉系统	106
第五节 风扇式磨煤机及制粉系统	114
第六章 燃烧过程的基本理论	117
第一节 化学反应速度及其影响因素	117
第二节 煤、焦炭和煤粉的燃烧	121
第三节 燃烧过程着火和熄火的热力条件	130
第四节 影响煤粉气流着火的因素	131
第五节 燃烧完全的条件	135

第七章	煤粉炉及燃烧设备	137
第一节	煤粉炉的炉膛及燃烧器	137
第二节	旋流燃烧器及其布置	141
第三节	直流燃烧器及其布置	147
第四节	煤粉火炬的稳燃技术	156
第五节	W 形火焰燃烧方式	162
第六节	煤粉炉的点火装置	167
第七节	水冷壁沾污、结渣及安全运行	170
第八章	过热器和再热器的运行问题	179
第一节	汽温调节	179
第二节	管壁温度计算	185
第三节	热偏差	187
第四节	沾污及高温腐蚀	193
第九章	尾部受热面运行问题	195
第一节	尾部受热面的积灰	195
第二节	尾部受热面的磨损	197
第三节	空气预热器低温腐蚀与堵灰	204
第十章	自然循环	211
第一节	自然循环工作原理和基本方程组	211
第二节	蒸发受热面的安全工作问题	214
第三节	两相流体流动阻力和两相流体质量、容积参数	218
第四节	两相流体重位压差和两相流体真实容积参数	223
第五节	自然循环特性的计算	226
第六节	自然循环安全性检查	232
第七节	提高自然循环安全性措施	242
第十一章	强制流动锅炉及其水动力特性	247
第一节	强制循环锅炉和直流锅炉工作原理及工作过程特点	247
第二节	直流锅炉蒸发受热面水动力学	250
第三节	直流锅炉蒸发受热面的传热恶化	265
第四节	直流锅炉蒸发受热面结构形式	269
第五节	低循环倍率锅炉	277
第六节	部分负荷复合循环锅炉	281
第十二章	蒸汽净化	287
第一节	概述	287
第二节	饱和蒸汽的机械携带	289
第三节	蒸汽的选择性携带	294
第四节	汽水分离装置	298
第五节	蒸汽清洗装置	304
第六节	排污	308
第十三章	锅炉本体的设计和布置	311

第一节 锅炉本体布置	311
第二节 主要设计参数的选定	315
第三节 锅炉热力计算方法	318
第十四章 炉膛传热计算	322
第一节 炉膛传热原理	322
第二节 炉膛黑度计算	325
第三节 炉膛受热面的辐射特性	328
第四节 几种炉膛传热计算方法	332
第五节 炉膛结构和热负荷分布	337
第十五章 对流受热面计算	342
第一节 对流受热面传热特点	342
第二节 对流受热面的传热计算	345
第三节 传热系数	347
第四节 温压计算	365
第五节 受热面布置和计算	371
第六节 扩展受热面的对流传热计算	374
参考文献	380

第一章 绪 论

第一节 锅炉机组的工作过程

现代电站锅炉就是利用燃料燃烧释放的热能或其他热能加热给水，以获得规定参数（温度、压力）和品质的蒸汽的设备。

火力发电厂的生产过程，实质上就是将一次能源（煤、燃料油和可燃气体等）转化为二次能源（电力）的能量转换过程。在火力发电厂中，锅炉产生的高温高压水蒸气，推动汽轮机、带动发电机发出电能。所以，锅炉是火力发电厂三大主要设备之一。

水要变为水蒸气，就要吸热，它的热源来自燃料。燃料要与空气中的氧化合，才能燃烧放热，燃料燃烧后变成高温的燃烧产物（烟气）。这个过程就是把燃料的化学能转变为燃烧产物热能的过程。然后，高温的烟气通过对各种受热面的传热，将热能传给水，水吸热后便变成蒸汽，蒸汽进一步吸热成为高温的过热蒸汽，因此，锅炉内的工质不但有水和水蒸气，而且必须有燃料和空气。

进入锅炉的水，即给水，其温度大都低于锅炉压力下的饱和温度，而从电站锅炉产生的蒸汽都是过热蒸汽。因此，水在锅炉中的汽化过程，实际上要经过预热、汽化、过热三个阶段。为了提高蒸汽动力循环的效率，现代电站锅炉水的汽化，还有第四个阶段——再过热阶段，这就是：锅炉产生的过热蒸汽送到汽轮机高压缸膨胀做功后，蒸汽的压力和温度都降低了，再将这些蒸汽送回到锅炉中加热，即再过热，然后再送到汽轮机的中、低压缸去继续做功。

水汽化的四个阶段，分别在锅炉各种受热面中进行。预热阶段主要在省煤器中进行，汽化阶段在蒸发受热面（水冷壁、凝渣管、对流管束等）中进行，过热阶段在过热器中进行，而再热阶段则在再热器中进行。

由此可见，锅炉是进行燃料燃烧、传热和汽化三种过程的综合装置，其内部过程比较复杂。

根据我国的燃料政策，锅炉的燃料主要是煤。将煤磨制成煤粉，然后送入锅炉炉膛中燃烧，这种锅炉便是煤粉炉。图 1-1 是一台煤粉炉及其辅助系统的示意图，可以用来说明锅炉的主要构成和工作过程。

运输到火力发电厂去的原煤，要经过初步破碎和除铁、除木屑后，送到原煤斗 1，从原煤斗靠自重落下的煤，经过给煤机 2 进入磨煤机 3 中，磨制成合格的煤粉，由预热空气通过排粉风机将磨好的煤粉经燃烧器喷入炉膛的空间中燃烧，燃料的化学能便转变为燃烧产物（烟气）的热能。高温的烟气经炉膛进入水平烟道和尾部烟道，烟气在流动过程中，以不同的换热方式将热量传给布置在锅炉中的各种受热面。在炉膛内主要以辐射方式将热量传给布置在炉膛四周墙壁上的水冷壁（辐射受热面），在炉膛上部则以半辐射、半对流方式

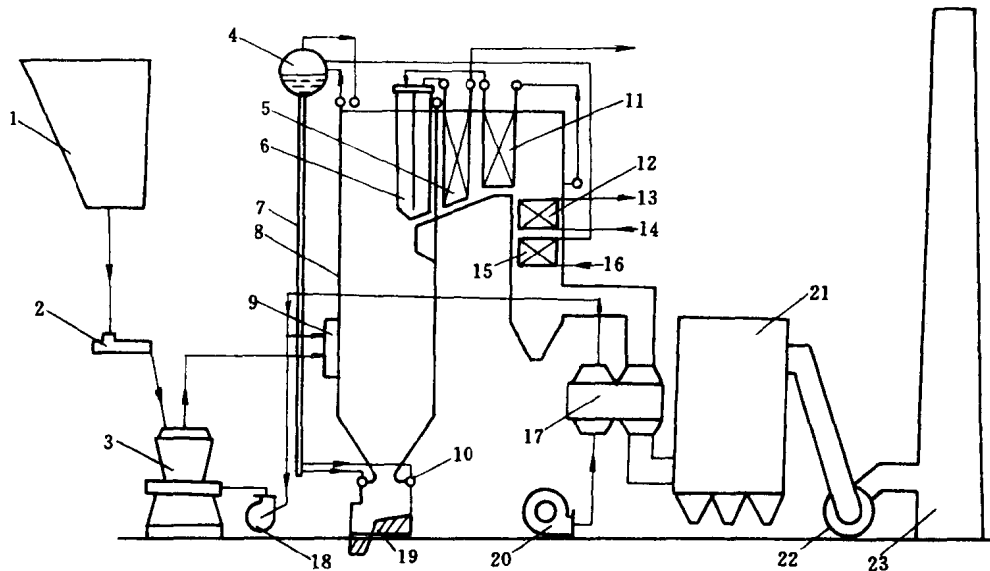


图 1-1 煤粉锅炉及其辅助系统示意图

- 1—原煤斗；2—给煤机；3—磨煤机；4—汽包；5—高温过热器；6—屏式过热器；7—下降管；
8—炉膛水冷壁；9—燃烧器；10—下联箱；11—低温过热器；12—再热器；13—再热蒸汽出口；
14—再热蒸汽进口；15—省煤器；16—给水；17—空气预热器；18—排粉风机；
19—排渣装置；20—送风机；21—除尘器；22—引风机；23—烟囱

传给屏式过热器 6，而在水平烟道和尾部烟道中主要以对流方式传热，所以布置在其中的高温过热器 5、低温过热器 11、再热器 12、省煤器 14 和空气预热器 17 都是对流受热面。

煤中灰分不参与燃烧过程，其中较大的灰粒会因自重从气流中分离出来，沉降于炉膛底部的冷灰斗中，形成固态渣，最后由排渣装置 19 中排出，大量细小的灰粒则随烟气排出炉外。

烟气离开锅炉时，温度已较低，它再进入除尘器 21，将烟气中大部分灰粒除掉，然后经引风机 22 通过烟囱 23 排至大气中。

由燃烧器送入炉膛的预热空气，是由送风机 20 将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器 17 中，加热后，才送入燃烧器的。通过空气预热器加热后的空气分成两路，一路是通过燃烧器直接送入炉膛，主要起混合、扰动、强化燃烧的作用，称为二次风。另一路则通过排粉风机 18 进入磨煤机中，将煤加热和干燥，便于磨粉，同时也将磨制好的煤粉输送到燃烧器，送入炉膛。这股携带煤粉的空气称为一次风。

给水来自给水泵，它首先进入省煤器，在省煤器中，水自下而上流动，被从上而下流动的烟气加热。受热后进入汽包 4，然后汽包里的水沿着下降管 7 下降至水冷壁的下联箱 10，再进入水冷壁管子中。水在水冷壁管子中，因吸收了炉内的辐射热，其中部分水便变成水蒸气，此时水冷壁管子中的工质是汽水混合物。汽水混合物上升进入汽包，在汽包内装有汽水分离器，其作用是将汽水混合物的汽和水分离。分离出来的水留在汽包下部，连

同不断送入汽包的给水一起又下降，随着在水冷壁吸热而又上升，周而复始，形成自然循环。这种锅炉便是自然循环锅炉。

在汽包中分离出来的蒸汽，从汽包顶部引出，首先进入敷设在炉顶的顶棚过热器，然后流经低温过热器 11、屏式过热器 6，到高温过热器 5，加热达到额定温度后送至汽轮机中做功。图 1-1 所示的锅炉中还装有再热器 12，它的蒸汽来自经汽轮机高压缸做功后、温度和压力都降低了的排汽，这排汽送到再热器中加热，然后再送回汽轮机的中、低压缸去继续做功。

现代电站锅炉对给水和蒸汽的品质都有较高的要求。当给水含有杂质时，在锅炉内，锅水的杂质浓度会随着锅水的不断汽化而升高。这些杂质会在锅炉的受热面上结成水垢，使传热恶化，严重时会使受热面管子过热烧坏。这些杂质也会溶解在蒸汽中，携带杂质的蒸汽进入汽轮机做功时，杂质也会沉积在汽轮机的通流部分，影响汽轮机的出力、效率和运行的安全性。因此，进入锅炉的给水必须预先处理，运行时也必须严格监视炉水和蒸汽的品质。

以上所提到的汽包、水冷壁、过热器、再热器、省煤器、空气预热器、燃烧器和排渣装置都是锅炉的部件。这些部件加上其间的连接管道（烟道和风管）、构架（包括平台扶梯）和炉墙等组成的整体，称为锅炉本体。

要保证锅炉本体连续可靠地运行，还必须有连接的烟、风管道及各种辅助系统和附属设备，组成统一的锅炉机组才行。所谓锅炉机组是指锅炉本体加上锅炉范围内的烟、风管道、煤粉管道、燃料管道及其附属设备、测量仪表及其他必要的附属机械。

锅炉机组的辅助系统和附属设备较多。现代电站锅炉的辅助系统包括：燃料供应系统、煤粉制备系统、给水系统、通风系统、除灰除尘系统、水处理系统、测量及控制系统等七个辅助系统。各个辅助系统都配备有相应的附属设备和仪器仪表。

第二节 锅炉的容量和参数

一、锅炉容量

锅炉容量即锅炉的蒸发量，是指锅炉每小时所产生的蒸汽量，单位是 t/h （或 kg/s ）。

在大型锅炉中，锅炉容量又分为额定蒸发量和最大连续蒸发量两种。

蒸汽锅炉的额定蒸发量是指在额定蒸汽参数、额定给水温度和使用设计燃料，并保证热效率时所规定的蒸发量。

蒸汽锅炉的最大连续蒸发量是指在额定蒸汽参数，额定给水温度和使用设计燃料，长期连续运行时所能达到的最大蒸发量。

二、锅炉的蒸汽参数

蒸汽锅炉的额定蒸汽参数是指额定蒸汽压力和额定蒸汽温度。

额定蒸汽压力是指蒸汽锅炉在规定的给水压力和规定的负荷范围内，长期连续运行时应予保证的出口蒸汽压力，单位是 MPa 。

额定蒸汽温度是指蒸汽锅炉在规定的负荷范围、额定蒸汽压力和额定给水温度下长期

连续运行所必须保证的出口蒸汽温度，单位是℃。

在装有再热器的现代电站锅炉中，锅炉的蒸汽参数除额定过热蒸汽参数外，还应包括额定再热蒸汽参数。

按照我国制订的标准，我国电站锅炉的蒸汽参数及容量系列如表 1-1 所示。

表 1-1 我国电站锅炉的蒸汽参数及容量系列

参 数			最大连续蒸发量 (t/h)	发 电 功 率 (MW)
蒸 汽 压 力 (MPa)	蒸 汽 温 度 (℃)	给 水 温 度 (℃)		
2.5	400	105	20	3
3.9	450	145~155	35, 65	6, 12
		165~175	130	25
9.9	540	205~225	220, 410	50, 100
13.8	540/540	220~250	420, 670	125, 200
16.8	540/540	250~280	1025	300
17.5	540/540	260~290	1025, 2008	300, 600

注 蒸汽温度中的分子、分母分别为过热蒸汽温度和再热蒸汽温度。

第三节 锅 炉 分 类

一、按锅炉的用途分类

固定式锅炉按其用途可分为：

(1) 电站锅炉。锅炉产生的蒸汽主要用于发电的锅炉。

(2) 工业锅炉。蒸汽主要用于工业企业生产工艺过程以及采暖和生活用的锅炉。按照我国标准规定，工业锅炉的最大额定蒸汽压力为 2.45MPa（表压），最大连续蒸发量最大为 65t/h。

(3) 热水锅炉。用以产生热水供采暖、制冷和生活用的锅炉。

二、按锅炉容量分类

按锅炉容量的大小，锅炉有大、中、小型之分，但它们之间没有固定、明确的分界。随着我国电力工业的发展，电站锅炉容量不断增大，大中小型锅炉的分界容量便不断变化。从当前情况来看，发电功率等于或大于 300MW 的锅炉才算是大型锅炉。

三、按锅炉的蒸汽压力分类

按照锅炉出口蒸汽压力，可将锅炉分为低压锅炉 [出口蒸汽压力（表压）不大于 2.45MPa]，中压锅炉（表压为 2.94~4.90MPa），高压锅炉（表压为 7.84~10.8MPa），超高压锅炉（表压为 11.8~14.7MPa），亚临界压力锅炉（表压为 15.7~19.6MPa），超临界压力锅炉（绝对压力超过临界压力 22.1MPa）。

低压锅炉主要用于工业锅炉，而发电功率等于或大于 300WM 的锅炉都采用亚临界压

力和超临界压力的锅炉。

四、按锅炉的燃烧方式分类

根据炉内燃烧过程的气体动力学原理，锅炉有四种不同的燃烧方式，对应于四种不同的锅炉。

1. 火床燃烧方式和火床炉

固体燃料以一定厚度分布在炉排上进行燃烧的方式称为火床燃烧方式，用火床燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为火床炉。火床炉的工作特点是：有一个固定的或可运动的炉排，将块状的固体燃料送入炉内，在炉排上形成固体燃料层，空气从炉排下的通风孔隙穿过燃料层向上流动，在高温下，空气和燃料发生燃烧反应，大部分燃料在炉排上形成火床燃烧，只有少数细小颗粒的固体燃料和燃烧生成的可燃气在火床上的炉膛空间燃烧。燃料在炉排上燃烧生成的高温烟气也离开燃料层向上流动，升入炉膛。火床炉有链条炉、推动炉排炉、双层炉排炉、人工炉等多种型式。其中链条炉是结构较完善、热效率较高、机械化程度较高的火床炉，其结构示意图 1-2。但链条炉因其炉排结构复杂，体积庞大，金属消耗量较大，且其热效率不及煤粉炉高，不适应大容量锅炉发展的需要，故只用于 1~65t/h 的锅炉中。

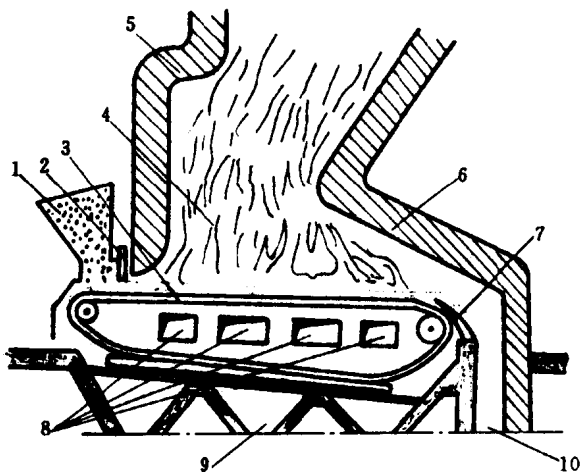


图 1-2 链条炉结构示意图

- 1—煤斗；2—煤闸门；3—链条炉排；4—炉膛；
5—前拱；6—后拱；7—除渣板（俗称老鹰铁）；
8—风室；9—灰斗；10—灰渣口

2. 火室燃烧方式和室燃炉

燃料以粉状、雾状或气态随同空气

喷入炉膛中进行燃烧的方式称为火室燃烧方式，用火室燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为室燃炉。其气体动力学特点是：粉状、雾状或气态的燃料颗粒随同空气—烟气流作连续的运动，燃料颗粒悬浮在空气—烟气流中，连续流过炉子的连续空间，并在悬浮状态下着火、燃烧，直至燃尽。所以火室燃烧方式也叫悬浮燃烧方式。煤粉炉、燃油锅炉和燃气锅炉都属于室燃炉。特别是煤粉炉，它是现代大中型电站锅炉的主要型式，其结构示意图可参看图 1-1。

3. 旋风燃烧方式和旋风炉

燃料和空气在高温的旋风筒内高速旋转，细小的燃料颗粒在旋风筒内悬浮燃烧，而较大的燃料颗粒被甩向筒壁液态渣膜上进行燃烧的方式称为旋风燃烧方式，用旋风燃烧方式来组织燃烧的锅炉称为旋风炉。旋风炉有立式和卧式两种。图 1-3 示出三种旋风炉的结构示意图。美国常用卧式旋风炉，我国及前苏联则多用 BTH 立式旋风炉，德国则用 KSG 立式旋风炉。旋风炉采用液态排渣。由于旋风炉的负荷调节范围较小，而且不能快速启动和停炉，炉温也较高， NO_x 的排放量较煤粉炉大，故在我国电厂中很少使用。

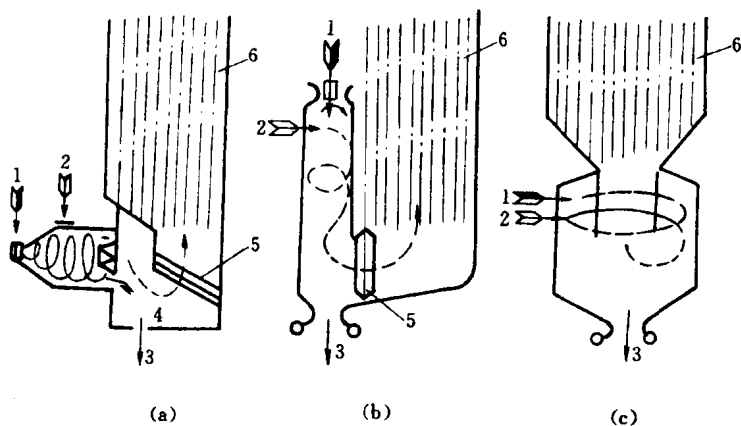


图 1-3 旋风炉结构示意图

(a) 卧式旋风炉；(b) BTM 立式旋风炉；(c) KSG 立式旋风炉

1—燃料；2—二次风；3—液态渣；4—燃尽室；5—捕渣管束；6—冷却室

4. 流化床燃烧方式和流化床锅炉

流化床燃烧方式的气体动力学基础是固体物料的流态化。所谓固体物料的流态化，是指固体颗粒在与流动着的流体混合后，能像流体那样自由流动的现象。流化床燃烧方式就是燃料颗粒在大于临界风速（由固定床转化为流化床的风速）的空气流速作用下，在流化

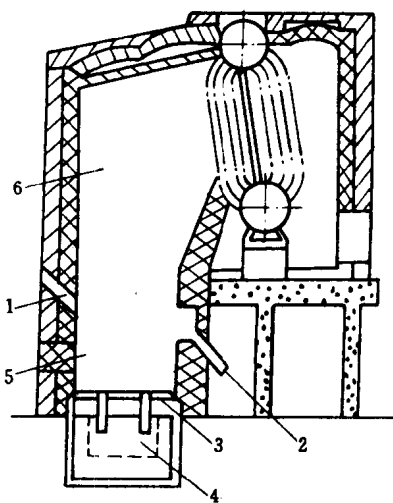


图 1-4 鼓泡流化床锅炉结构示意图

1—给煤口；2—溢流口；3—布风板；
4—风室；5—沸腾段；6—悬浮段

床上呈流化状态的燃烧方式。采用流化床燃烧方式的锅炉称为流化床锅炉。流化床燃烧是本世纪 60 年代发展起来的新型燃烧技术，30 多年来发展很快，应用范围已从中、小型的工业锅炉发展到较大型的电站锅炉；流化床燃烧技术本身也由第一代的鼓泡流化床发展到第二代的循环流化床。图 1-4 所示是一台小型鼓泡流化床锅炉的结构示意图，碾碎成细小颗粒的燃料从前墙用给煤机通过给煤口送入床内，床内布置有倾斜（或垂直）的埋管蒸发受热面，空气由风室通过床下的布风板送入床层，将燃料颗粒吹起。吹起的燃料颗粒上升到一定高度，在重力作用下又会落下，再由空气吹起上升，然后又落下，如此反复上升、落下，好像水在沸腾时的状态一样，固体颗粒层也膨胀起来，此时固体颗粒（又称床料）便进入流化状态，因此流化床锅炉又称沸腾锅炉。

流化床燃烧有许多优点：燃料适应性广，能燃劣质煤；在燃烧过程中能有效控制有害气体 NO_x 和 SO_2 的产生和排放；燃烧热强度大，能缩小炉膛体积；床内传热能力强，能节省受热面的金属消耗；负荷调节性能好，且调节范围大；灰渣可以综合利用等。但由于这是一种新发展的燃烧技术，第一代的鼓泡流化床还存

在燃烧效率低，床内埋管受热面易磨损，截面热负荷低而不利于向大型发展，用石灰石脱硫效率较低等的缺点。为发挥流化床锅炉的优点，解决鼓泡流化床存在的问题，近年来又发展了第二代的循环流化床燃烧技术。循环流化床与鼓泡流化床的差异在于加大了空气流速（或称流化速度）。鼓泡流化床的空气流速只要略大于临界风速便可，若加大流化速度，达到使床内全部固体颗粒都被吹出炉膛时的极限速度（称为输送速度），此时炉膛内的气固两相流动工况则转变为输运床（又称浓相输送）。如果在炉膛出口处安装一个高效率的分离器，将气流中的固体颗粒分离出来，再用固体物料回送装置送回至炉膛底部，继续在床内燃烧，并维持炉内流化床料总量不变的连续工作状态，这就是循环流化床。

循环流化床的流化速度约为鼓泡床的2~3倍，循环流化床内不再有鼓泡流化床那样清晰的分界面，固体颗粒充满整个上升空间，有强烈的物料返混、颗粒的外循环和横向混合特征，而且使得整个上升段内温度均匀，有利于延长燃烧和脱硫时间；物料通过分离器多次循环回到炉内，更大大延长了燃料颗粒在炉内的停留和反应时间，燃烧效率可达97%~99%，脱硫效率可达90%，同时也能有效抑制NO_x的生成。另外，由于循环流化床的截面热负荷比鼓泡流化床要大得多，有可能实现锅炉的大型化。因此，循环流化床不但具有鼓泡流化床的全部优点，而且几乎可以解决鼓泡流化床的所有缺点。只要实现容量的大型化，循环流化床锅炉在电站上的应用便可与煤粉锅炉竞争。

因为循环流化床锅炉的性能在很多方面都可与煤粉锅炉相比美，在某些方面，例如减少污染等，还优于煤粉锅炉，所以循环流化床锅炉出现以后，立刻受到国内外的高度重视，并得到迅速发展。世界上第一台发电功率为250MW中间过热的循环流化床锅炉已于1995年在法国电力公司普罗旺斯电站投入运行。各国正在生产和设计110~500MW发电容量的大型电站锅炉，循环流化床锅炉可望成为新一代高效率、低污染的电站燃煤锅炉机组。特别在我国，电站锅炉以燃煤为主，而且主要燃用劣质煤，燃煤量的增大将使煤燃烧引起的环境污染问题更加严重，因而对污染物的排放限制将更加严格，这将会促使循环流化床锅炉在我国的发展和应用。

图1-5为芬兰阿斯龙(Ahlstrom)公司生产的Pyroflow型循环流化床锅炉的结构示意图。该锅炉的发电功率为110MW，炉膛四周敷设了水冷壁，炉膛上部布置有屏式过热器，从炉膛出来带有大量固体床料的热烟气进入分离器，由分离器分离出来的热灰（含未完全燃烧的炭粒）落入分离器下的U形回送装置中。这个U形回送装置实际上也是一个流化床输送机，其底部同样装有布风板，高压空气由此进入，使U形回送装置中的热灰流态化，它一方面

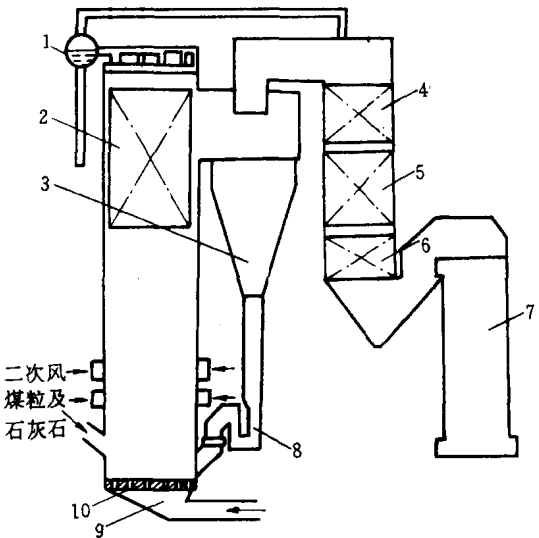


图1-5 阿斯龙公司的Pyroflow循环流化床锅炉
1—汽包；2—屏式过热器；3—旋风分离器；4—高温
过热器；5—低温过热器；6—省煤器；7—空气预热器；
8—U形回送装置；9—风箱；10—布风板