

高等学校教材

锅炉原理

第二版
(上册)

西安交通大学 陈学俊 陈听宽 主编

机械工业出版社

330537

高等学校教材

锅炉原理

第二版

(上册)

西安交通大学 陈学俊 陈听宽 主编



机械工业出版社

本书全面系统地阐述锅炉工作的基本原理，锅炉设计的基础和基本方法。全书共设二十五章，分上下两册出版。上册内容包括概论、锅炉型式、锅炉燃料、燃烧计算与热平衡计算、火床炉、煤粉制备、煤粉炉、燃油炉与燃气炉、旋风炉与沸腾炉、炉膛传热及计算、对流受热面及屏式受热面的传热计算、锅炉热力计算方法及其设计布置等。本书是高等学校锅炉专业的教材，也可供从事锅炉设计、制造、运行和科学研究的工程技术人员参考。

锅 炉 原 理

第 二 版

(上 册)

西安交通大学 陈学俊 陈听宽 主编

责任编辑：郝育生 钱飒飒 责任校对：刘志文
责任印制：卢子祥 版式设计：霍永明

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $17^{3/4}$ 字数 431 千字
1981年一月沈阳第一版

1991年10月北京第二版·1991年10月北京第十一次印刷
印数 46 701—00,000 定价：5.00元

ISBN 7-111-02824-4/TK·109(课)

第 二 版 (上 册)

机 械 工 社
(201)

D1147 / 11

第二版前言

锅炉原理是锅炉专业的一门主要专业课。本书是在1981年出版的高等学校试用教材《锅炉原理》的基础上，根据1985年9月高等学校锅炉专业教材编审委员会制订的新教学计划和教学大纲以及审定的修改大纲进行修订的。作者还根据几年来教学经验及国内外锅炉工业的发展对本书进行了修订。除锅炉钢材和受压元件强度计算一章因另行设课加以删除外，第二版体系上仍与第一版保持一致，但在内容上进行了更新和适当的修改。全书授课约需180学时，共编二十五章，分上、下两册出版。

本书全面系统地阐述了锅炉的基本工作原理。内容包括锅炉的燃料、燃烧设备及燃烧原理、传热过程、水动力过程、受热面外部工作过程、蒸汽净化与水工况、各主要部件的设计原理、空气动力计算、管壁温度计算、锅炉的启动与运行以及锅炉技术的发展等。本书着重阐述锅炉工作过程的基本理论、锅炉设计的基础和基本方法。在取材方面尽量反映我国锅炉工业在设计、制造、运行和科学研究方面的成果，同时又注意吸取国外先进机组的数据和资料，反映国外科学技术的新成果。

本书可作为高等工科院校锅炉专业的教材，也可作为热能动力类其它专业的参考书，亦可供从事锅炉设计、制造、运行和科学研究工作的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学陈学俊、陈听宽教授主编，参加编写的还有黄祥新教授、金定安、陈正包、丁昭、俞建洪、张鸣远副教授，由陈听宽教授对全书统稿。上海机械学院陈之航、卓宁教授任主审，全国锅炉专业教学指导委员会主任许晋源教授对本书进行了校阅。

在编写过程中，曾得到许多锅炉厂、电厂、研究所、设计院和兄弟院校的支持与帮助，为我们提供了许多宝贵的资料和有益的建议。本书第一版出版后，曾收到许多读者来信，提供了不少意见和建议。西安交通大学有关教研室的许多同志也为本书提供了资料和帮助。书中还引用了许多单位的资料和经验。在此一并向上述同志和单位表示衷心感谢。

由于本书涉及面广，编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者不吝指正。

编者

1990年12月

上册符号说明

A 面积(m^2)	火焰发光系数
燃料中灰分含量的质量分数(%)	n 数
吸收率	转速(r/min)
a 总灰分中各类灰分的质量分数	旋流强度
黑度	Nu 努塞特数
B 燃料消耗量(kg/s)	p 压力(MPa)
b 宽度(m)	排污率(%)
Bo 波尔兹曼准则	Pr 普朗特数
C 浓度	Q 燃料发热量(kJ/kg)
热容量(kJ/K)	相对于每公斤燃料的热量(kJ/kg)
c 比热容[$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]	Q_1, q_1 有效利用热量(kJ/kg), (%)
c_p 定压比热容[$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	Q_2, q_2 排烟热损失(kJ/kg), (%)
D 蒸发量(kg/s)	Q_3, q_3 化学不完全燃烧热损失(kJ/kg), (%)
直径(m)	Q_4, q_4 机械不完全燃烧热损失(kJ/kg)(%)
分子扩散系数	Q_5, q_5 散热损失(kJ/kg), (%)
d 直径(m)	Q_6, q_6 灰渣物理热损失及其它损失(kJ/kg), (%)
空气中水蒸气含量(g/kg)	q 受热面热负荷(kW/m^2)
E 肋片有效系数	热流密度(kW/m^2)
活化能(kJ/mol)	q_A 炉膛断面热负荷(kW/m^2)
e 水冷壁管中心到炉墙的距离(m)	q_{tr} 炉排热负荷(kW/m^2)
f 截面比	q_v 炉膛容积热负荷(kW/m^3)
炉膛形状系数	q_m 质量流量(kg/s)
G 重油雾化蒸气消耗率(kg/kg)	R 通用气体常数[$\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$]
g 重力加速度(m/s^2)	煤粉细度(%)
H 高度(m)	传热热阻($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
h 高度(m)	Re 雷诺数
风压(Pa)	RO₂ 三原子气体
Δh 烟风阻力损失(Pa)	r 半径(m)
I 每公斤燃料烟气或空气的焓(kJ/kg)	烟气中气体的容积分数
i 工质比焓(kJ/kg)	汽化潜热(kJ/kg)
K 传热系数[$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]	烟气再循环率(%)
循环倍率	风率
k 可磨系数	s 管间节距(m)
磨损指数	s_1 管束横向节距(m)
辐射减弱系数[$1/(\text{m}\cdot\text{MPa})$]	s_2 管束纵向节距(m)
L 每公斤燃料的空气质量(kg/kg)	s'_2 管束对角线向节距(m)
l 长度(m)	T 热力学温度(K)
M 气流旋转动量矩($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)	t 摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)
炉膛传热参数	t_1 灰分开始变形温度($^{\circ}\text{C}$)
m 质量(kg)	

- t_2 灰分软化温度($^{\circ}\text{C}$)
 t_3 灰分熔化温度($^{\circ}\text{C}$)
 Δt 温压($^{\circ}\text{C}$)
 U 周界长度(m)
 V 煤中挥发分含量的质量分数(%)
 每公斤燃料的空气量、烟气量(m^3/kg)
 容积(m^3)
 V_c 每公斤燃料烟气的热容量($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
 v 工质比容(m^3/kg)
 W 燃料中水分含量的质量分数(%)
 假液化系数
 w 速度(m/s)
 x 角系数
 质量含汽率
 相对高度
 Z 数
 曝光不均匀系数
 α 过量空气系数
 放热系数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)
 倾角($^{\circ}$)
 α_1 烟气对管壁放热系数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)
 α_2 管壁对工质放热系数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)
 $\Delta\alpha$ 漏风系数
 β 燃料特性系数
 空气侧过量空气系数
 热风再循环系数
 倾角($^{\circ}$)
 Δ, δ 差值。
 δ 厚度(m)
- 有效辐射层厚度(m)
 ε 污染系数($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
 ζ 局部阻力系数
 水冷壁污染系数
 η 效率(%)
 不均匀系数
 Θ 无因次绝对温度
 θ 烟气温度($^{\circ}\text{C}$)
 λ 热导率($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
 μ 烟气中飞灰浓度(kg/kg)
 动力粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
 ν 运动粘度(m^2/s)
 ξ 受热面利用系数
 ρ 密度(kg/m^3)
 炉排面积与炉膛壁面积之比
 Σ 总和
 σ_0 绝对黑体辐射常数($\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$)
 σ_1 管束横向相对节距
 σ_2 管束纵向相对节距
 σ'_2 管束斜向相对节距
 τ 时间(s)
 Φ 热通量(kW)
 φ 保热系数
 辐射系数
 ψ 热有效系数
 肋片修正系数
 温压修正系数
 ω 炉排片冷却度

角 码 说 明

· 进口	管束
饱和水	gw 高位
~ 出口	gy 干烟气
饱和蒸汽	gz 工质
① 理论值	h 灰
基准值	化学
b 壁	hb 灰壁
备用	hx 横向
表面	hy 火焰
bh 饱和	hz 灰渣
bz 捕渣管束	j 计算
c 抽气点	焦炭颗粒
cl 错列管束	jr 前置燃烧室
cr 传热	jw 减温器
d 对流	ix 假想
大的	k 空气
dl 当量	空容积
dr 导热	扩散
ds 对数	kl 颗粒
dt 弹筒	km 可磨性
dw 低位	ky 空气预热器
e 额定	l 炉膛
f 燃料分析基	肋片
辐射	lb 炉壁
fg 发光	lf 漏风
fh 飞灰	lj 临界
fi 附加	lk 冷空气
ft 沸腾	ll 理论
g 管子	lm 漏煤
燃料干燥基	lp 炉排
高度	lt 流通
工作	ly 硫酸盐
gb 隔板	m 磨煤机
gd 过渡区	mf 煤粉
gi 管间	ms 磨损
gk 干空气	n 内
gp 管屏	nl 逆流
gq 过热蒸汽	nz 凝渣管束
gr 过热器	p 屏
gs 给水	pb 屏区水冷壁

ph 平衡
pi 平均
 屏间
ps 排污水
py 排烟
q 气体
 蒸汽
 切向
 全
qs 气室
qt 其它
r 燃料可燃基
 燃料
 燃烧器
 燃烧室
 可燃的
 热
 入口的
rk 热空气
s 水
sg 水垢
sj 实际
sl 顺流
 顺列管束

sm 省煤器
tf 通风
th 炭黑
w 外
wh 雾化
wr 外热源
x 小的
xh 循环
xt 系统
y 燃料应用基
 烟气
yi 元件
yx 有效
yz 烟气再循环
z 渣
 轴向
zf 蒸发
 制粉系统
zh 着火
zq 再热蒸汽
zr 再热器
zs 折算
zx 纵向

上册目录

上册符号说明

第一章 概论..... 1

§1-1 锅炉在国民经济中的作用..... 1

§1-2 锅炉的一般工作原理..... 1

§1-3 锅炉的发展简况、类型与系列..... 4

第二章 锅炉型式..... 11

§2-1 自然循环锅炉..... 11

§2-2 直流锅炉..... 23

§2-3 强制循环锅炉..... 31

第三章 锅炉燃料..... 35

§3-1 煤的成分及性质..... 35

§3-2 煤的成分基准及换算..... 37

§3-3 煤的挥发分及焦炭特性..... 39

§3-4 煤的发热量..... 40

§3-5 煤灰的熔融特性..... 42

§3-6 我国煤的分类..... 44

§3-7 液体燃料和气体燃料..... 47

第四章 燃烧计算与热平衡计算..... 49

§4-1 燃烧所需空气量计算..... 49

§4-2 燃烧产生的烟气体量计算..... 50

§4-3 烟气分析..... 54

§4-4 烟气中一氧化碳含量的计算..... 57

§4-5 过量空气系数及漏风系数..... 59

§4-6 空气和烟气焓的计算..... 64

§4-7 锅炉的热平衡..... 66

§4-8 锅炉效率及燃料消耗量的确定..... 72

第五章 火床炉..... 74

§5-1 火床炉工作特性..... 74

§5-2 抛煤机炉..... 78

§5-3 链条炉燃烧过程..... 81

§5-4 链条炉排结构..... 85

§5-5 链条炉炉膛布置..... 90

§5-6 抛煤机链条炉..... 98

§5-7 振动炉排..... 101

§5-8 往复推动炉排炉..... 103

第六章 煤粉制备..... 105

§6-1 煤粉..... 105

§6-2 磨煤机..... 108

§6-3 制粉系统..... 112

第七章 煤粉炉..... 115

§7-1 煤粉的燃烧..... 115

§7-2 旋流式燃烧器工作原理..... 121

§7-3 旋流式燃烧器的设计和布置..... 131

§7-4 直流式燃烧器概况..... 138

§7-5 直流式燃烧器的炉内空气动力场..... 139

§7-6 直流式燃烧器设计..... 142

§7-7 液态排渣炉..... 145

第八章 燃油炉与燃气炉..... 149

§8-1 油燃烧的特点..... 149

§8-2 油雾化器..... 150

§8-3 配风器..... 156

§8-4 燃油锅炉的炉膛..... 160

§8-5 油燃烧过程中减少污染物产生的方法..... 161

§8-6 气体燃料炉..... 162

§8-7 点火装置..... 166

第九章 旋风炉及沸腾炉..... 168

§9-1 旋风炉..... 168

§9-2 沸腾炉..... 171

第十章 炉膛传热及计算..... 185

§10-1 炉膛传热过程..... 185

§10-2 炉内温度场分布规律..... 188

§10-3 炉膛黑度..... 191

§10-4 火焰黑度..... 191

§10-5 炉膛受热面的辐射特性..... 194

§10-6 炉膛传热计算..... 199

§10-7 炉膛出口烟温..... 205

第十一章 对流受热面及屏式受热面的传热计算..... 211

§11-1 基本方程式..... 211

§11-2 传热系数..... 214

§11-3 对流放热系数..... 218

§11-4 辐射放热系数..... 227

§11-5 受热面的污染系数、热有效系数和利用系数..... 230

§11-6 扩展表面对流受热面传热计算..... 233

§11-7 管内传热强化计算..... 238

§11-8 温压..... 240

第十二章 锅炉热力计算方法及其设计布置..... 246

§12-1 锅炉热力计算的任务及计算顺序..... 246

§12-2 锅炉的设计计算..... 247

§12-3 锅炉的校核计算..... 252

§12-4 电子计算机计算..... 253

§12-5 设计锅炉时基本参数的选择..... 261

§12-6 锅炉整体外型布置的选择..... 264

§12-7 蒸汽参数与燃料性质对受热面布置的影响..... 266

§12-8 锅炉的热力系统..... 269

第一章 概 论

§1-1 锅炉在国民经济中的作用

火力发电是电力工业的主要组成部分。目前在世界多数国家及我国电力工业中,火力发电约占总发电量的70%。至2000年以前,这一比例数值在我国将不会有多大变化。从世界角度看,由于核电站的发展,今后火力发电所占比例将有所下降,但估计到2000年,火力发电仍将占那时世界总发电量的50%以上。

水电站基建投资一般较大,建设时间较长,运行工况受自然条件影响。目前我国水电站的建设速度还不能满足要求,但我国水力资源丰富,且因水电站无燃料消耗,成本低廉,并可结合防洪、灌溉、运输等方面统筹进行,故今后应大力发展。火力发电虽然成本较高,但基建投资较少,一般不受地区限制,建设时间较短,能较快地满足工农业发展的需要。核电站在我国正在兴建,但目前所占比例不大,有待今后进一步发展。至于新能源发电,如太阳能、地热、风力、磁流体及核聚变等,在2000年以前其数量还将很少,在当前尚处于应积极组织开发研究阶段。

1989年我国电站总装机容量已超过1.2亿kW,总发电量达5800亿kW·h。为满足国民经济发展和四化建设的需要,至2000年我国总发电量应达到1.2万亿kW·h左右,因此火力发电建设的规模将是巨大的。锅炉是火力发电厂三大主机之一,火力发电的发展要求锅炉工业以相应的速度发展,因此,锅炉工业的任务也是巨大的。在“八·五”期间,我国将积极进行亚临界及超临界压力电站锅炉的设计、制造、投产以及与之有关的试验研究工作。

在各种工业企业的动力设备中,锅炉是重要的组成部分。锅炉生产的蒸汽供工业生产直接需用,还供取暖使用。工业锅炉数量大、分布广,每年燃煤量约大于全国煤炭总产量的四分之一。因此,提高效率、提高机械化、自动化水平以及防止环境污染等,均是工业锅炉的重大研究课题。

锅炉工业本身也在不断发展。目前国外工业锅炉的涵义已从蒸发量为每小时几吨的锅炉发展到蒸发量为每小时200吨的锅炉。电站锅炉已由高压、超高压锅炉发展到大量生产亚临界压力和超临界压力锅炉,单台容量达1300MW。锅炉除一般工业锅炉与电站锅炉之外,还包括一切动力工业中用以产生蒸汽的换热设备,如核反应堆蒸汽发生器及太阳能锅炉等。总之,随着国民经济的发展,锅炉工业必将在实现我国四个现代化中发挥愈来愈重要的作用。

§1-2 锅炉的一般工作原理

锅炉是一种生产蒸汽的换热设备。它通过煤、油或天然气等燃料的燃烧释放出化学能,并通过传热过程将能量传递给水,使水转变成蒸汽,蒸汽直接供给工业生产中所需的热能,或通过蒸汽动力机械转变为机械能,或通过汽轮发电机转换为电能。所以锅炉的中心任务是把燃料中的化学能最有效地转换为蒸汽的热能。因此,近代锅炉亦称蒸汽发生器。

锅炉除了和所有的动力机械产品一样,必须不断降低成本并提高效率和质量外,由于锅

炉本身的性能，它还具有以下特点：

(1) 可靠性要求高 锅炉一旦事故停炉，将使电厂临时中断对外供电，影响甚广，其直接、间接损失远远超过锅炉本身的价值。

(2) 综合性强 锅炉与汽轮机、发电机同为电厂三大主机，但锅炉除了一般性的产品内在矛盾外，还要能适应燃料性质，使整个电厂得到安全经济的运行，因而多了一个外在矛盾。此外，锅炉还和其它工业部门的发展有着十分密切的关系，如石油化工企业中的废热锅炉，蒸汽燃气联合动力装置中的压力燃烧锅炉以及核反应堆工程中的蒸汽发生器等。

(3) 金属耗量和体积大 以一台配300MW机组的电站锅炉为例，金属耗量达4000t，体积达2万m³。

(4) 生产周期长 一台大容量锅炉从设计、制造、安装到投入运行，目前一般需时2~3年，今后即使采用设计新技术及制造安装新工艺，提高自动化水平，要想把上述全过程在更短时间内完成，还是比较困难的。

(5) 锅炉产品不能在制造厂内整装试运 除小容量工业锅炉外，不可能把锅炉在制造厂内全部组装好并投入试运行，这给鉴定和提高产品质量带来不少困难。

下面以一台锅炉为例来说明锅炉是如何组成和工作的。图1-1是一台中等容量和参数的锅炉简图。

这台锅炉所用的燃料为煤，首先将煤送进磨煤机（图中未示出）磨制成煤粉。两侧炉墙上装有燃烧器，煤粉由空气携带，通过燃烧器送入炉膛中燃烧。这台锅炉的蒸发受热面全部装在炉子内壁上，组成水冷壁，充分利用炉膛中高温烟气辐射传来的热量，使燃烧产物在进入后面的对流受热面时，可以达到必需的冷却，同时也起到了保护炉墙的作用。在火焰中心处的烟气温度达到1500~1600℃，而在炉膛出口处降低到1000~1200℃。

后墙水冷壁上（在水平烟道前方）拉稀成数列凝渣管束。拉稀的作用是防止结渣，同时对其后方的过热器也起了保护的作用。水冷壁一般是由直径为50~76mm的管子组成。

这台锅炉的过热器是放在水平烟道中，位于凝渣管束的后方。过热器的作用是把从锅筒（汽包）出来的饱和蒸汽加热成过热蒸汽，目的是减少供热管道内的冷凝损失或提高电站的效率。

过热器一般是由直径为30~50mm的蛇形管所组成。烟气流过过热器后，温度降低到500~600℃，然后转弯至尾部受热面。尾部受热面之一的省煤器位于尾部竖井的上方。省煤器的作用是使给水在进入锅筒之前，被预先加热到某一温度（低于饱和温度或达到饱和温度，甚至产生部分蒸汽）。省煤器也是由很多平行的蛇形管组成，管子外径一般为25~38mm。另一尾部受热面为空气预热器，它的作用是使空气在进入炉膛以前被加热到一定温度，以改善炉内燃烧过程、降低排烟温度、提高锅炉效率。空气预热器是由许多管子所组成，管径在30~51mm范围内。

这一台锅炉的工作情况简述如下：电站汽机分场的给水加热器使给水加热到150~175℃（中压锅炉）或215~240℃（高压锅炉），由给水管道将给水送至省煤器，在其中被加热到某一温度后，给水进入锅筒，然后沿下降管下行至水冷壁进口集箱。水在水冷壁内吸收炉膛内的辐射热而形成汽水混合物上升回到锅筒中。经过汽水分离装置，蒸汽由锅筒上部离开，流往过热器中。在过热器内，饱和蒸汽继续吸热成为过热蒸汽，然后送往汽机中去。煤经过磨煤机被磨成一定细度的煤粉，由空气流携往燃烧器，燃烧器喷出的煤粉与空气一起混合燃

烧，在炉膛中放出大量的热量。燃烧后的热烟气上升，流经凝渣管束，过热器、省煤器和空气预热器后，再经除尘装置清除其中的飞灰，最后才由引风机送往烟囱排入大气。

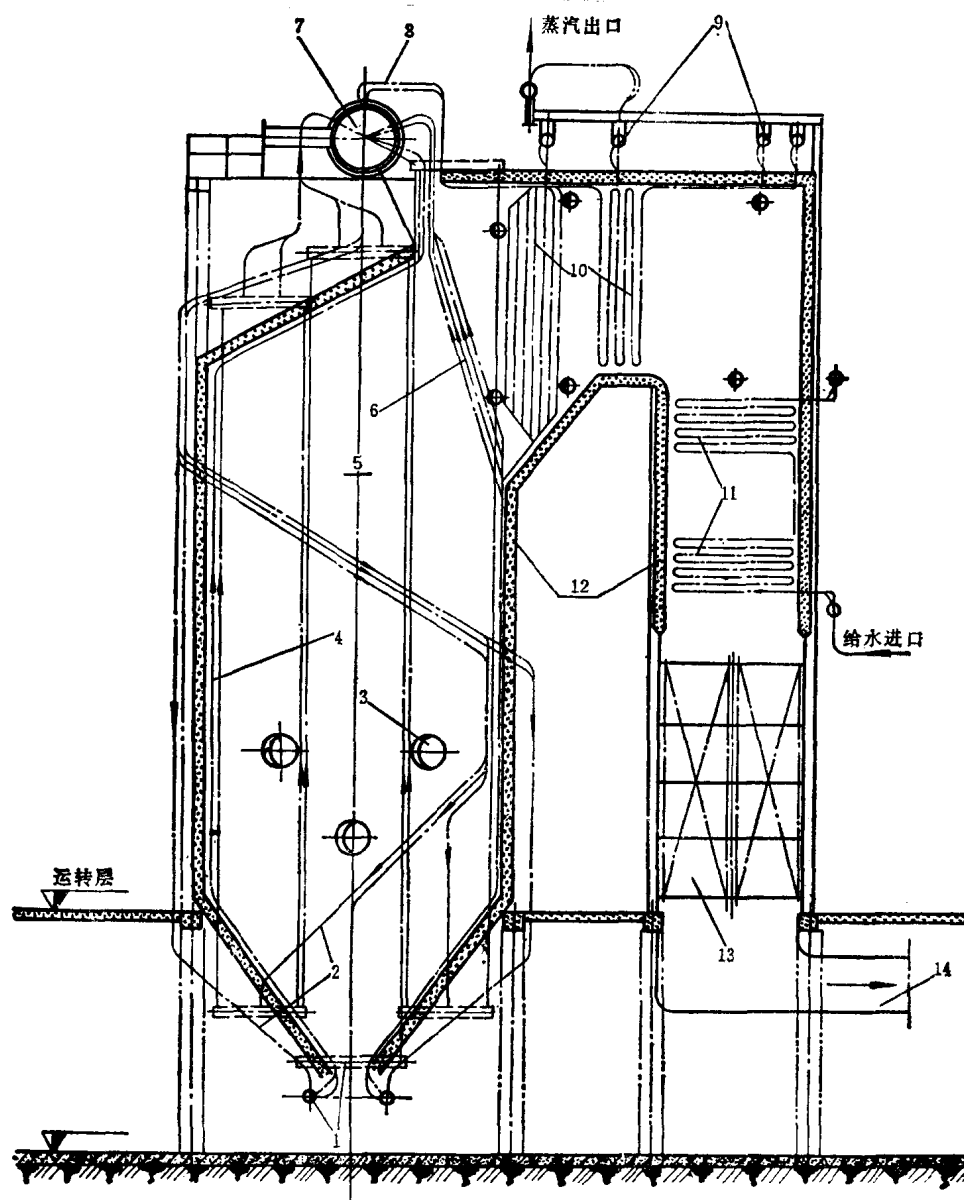


图1-1 锅炉简图

- 1—水冷壁集箱 2—下降管 3—燃烧器 4—水冷壁 5—炉膛 6—凝渣管束 7—锅筒
8—饱和蒸汽引出管 9—过热器中间集箱 10—过热器 11—省煤器 12—炉墙 13—空气预热器 14—烟气出口

以上所述的几个主要部分即炉膛、燃烧器、水冷壁、过热器、省煤器、空气预热器以及钢架炉墙等组成锅炉的主要部件，称为锅炉本体。此外，锅炉还有重要的辅助装置：1) 磨煤装置，包括磨煤机、排粉机、粗粉及细粉分离器以及煤粉输送管道；2) 送风装置，包括送风机及风道，送风机将空气通过空气预热器送往炉子中；3) 引风装置，包括引风机及烟囱，将

炉子中排出的烟气送入大气中；4) 给水装置，包括给水泵、给水管道及水处理设备；5) 燃料供应装置，将燃料由储煤场送到锅炉房，包括装卸和运输机械等；6) 除灰装置，从锅炉中除去灰渣并送电厂；7) 除尘装置，除去锅炉烟气中的飞灰，改善环境卫生；8) 自动控制与仪表，包括热工测量仪表及自动控制设备。现代化锅炉中还包括工业电视及计算机技术的应用。

由上可见，近代锅炉是一个复杂、大型、具有高度技术水平的设备，各个组成部分的繁简程度决定于锅炉的容量、蒸汽参数和燃料的性质，也决定于工作的可靠性、经济性以及自动化水平。

§1-3 锅炉的发展简况、类型与系列

一、锅炉发展简况

锅炉技术的发展是与工业生产的需要和科学技术的进步紧密相关的。18世纪下半叶，欧洲正处于产业革命前夕，1872年英国的工人阶级首先创造了锅炉，并用它来产生动力及生产用蒸汽。当时的锅炉属于圆筒形，锅炉的构造极为笨重简单，产生的蒸汽量有限，压力不高，燃烧方法简单，热效率低。后来，由于工业生产的发展，要求增大锅炉容量和提高蒸汽压力和温度，锅炉的型式和构造也相应地得到了发展。从锅炉的发展史来看，锅炉型式的发展可归纳为两个方向。

一个方向是在圆筒形锅炉的基础上，在圆筒内部增加受热面积。开始是在一个大圆筒内增加了一个火筒，在火筒中燃烧燃料。以后是两个火筒。再后，从火筒发展到很多小直径的烟管，这时可在烟筒外燃烧燃料（纯烟管式）或仍在火筒中燃烧燃料（火筒—烟管式）。这些锅炉因为燃烧后的烟气在管中流过，所以通称为火管式锅炉。

另一个方向是增加圆筒外部的受热面积，即增加水筒的数目，燃料在筒外燃烧。和火管式锅炉的发展相似，水筒的数目不断增加，发展成为很多小直径的水管。这些锅炉因为水在管中流过，所以统称为水管式锅炉。

下面列出曾经出现过的各种锅炉型式，可以帮助我们清楚地了解锅炉型式的发展过程。

(1) 火管锅炉（亦系一种自然循环锅炉）

火筒式锅炉：单火筒式→双火筒式

火管式（或烟管式）锅炉

火筒—火管式

火管—水管式

(2) 水管锅炉

自然循环锅炉

直水管锅炉：整联箱式→分联箱式

弯水管锅炉：多锅筒式→水冷壁式（单或双锅筒）

强制循环锅炉

多次强制循环锅炉（辅助循环锅炉）；低倍率循环锅炉

直流锅炉（包括超临界压力复合循环锅炉）

锅炉开始时主要是沿着上述第一个方向即增加圆筒内部受热面积的火管式锅炉发展的，

火管式锅炉发展简况如图1-2所示。

火管式锅炉受热面积少、容量小、工作压力低、金属耗量大、锅炉效率低。并且由于水容积大，如发生受热面金属损裂、爆破等情况，易发生爆炸危险。因此，这种型式的锅炉，显然不能适应后来单台容量加大，汽压、汽温日益增长的电站动力的要求，所以此种锅炉目前在电站中已不应用。但因它的构造（包括燃烧设备）较简单，水及蒸汽容积大，对负荷变动适应性较好，对水质的要求比水管式锅炉低，维修也较方便，故目前各国还有制造，多用于一些小型工业企业生产、交通运输及生活取暖用汽上。当然现时的火管式锅炉在具体结构、制造工艺、工作性能以及自动化程度等方面已不是一百多年前的原型所能比拟的了。

火管式锅炉限制了锅炉蒸汽参数及容量的继续提高。19世纪中叶，锅炉开始沿第二个方向，即水管式锅炉发展。水管式锅炉为继续提高锅炉容量和参数创造了条件。

水管式锅炉发展的初期为直水管型式，如图1-3所示。

直水管锅炉的特点是：汽水系统缺乏弹性，管子集箱等受热部件膨胀受限制时易损坏受压部件；沸腾管束倾斜度小，汽水循环不良，工作不可靠；集箱上手孔多，制造费时，金属耗量大，易发生泄漏。因此这种锅炉的工作压力仍不易提高，容量亦受限制，因之现时已很少应用。但由于这种锅炉易于制造，易于清理水垢，在国外中小容量锅炉中还有采用这种型式的。

在本世纪初期，一些工业国家的蒸汽动力发电站向中参数发展，直水管锅炉就不能很好满足这个要求。于是出现了弯水管锅炉，它的发展简况如图1-4所示。

此时，制造工艺及水处理技术水平已能解决采用弯水管锅炉的困难。弯水管式锅炉开始时采用多锅筒式，以保证有足够多的受热面和较大的蓄水容积。因此，金属耗量大，优点并不显著。虽然如此，弯水管锅炉却是锅炉发展史上一大进步。

随着生产发展的需要，材料、制造工艺、水处理技术以及热工控制技术等各方面的进步，锅炉技术水平也得到很快提高。特别是水冷壁式锅炉的出现，过热器及省煤器的应用，以及锅筒内部分离元件的改进，可以减少锅筒的数目，节约金属，提高锅炉热效率，以及提高锅

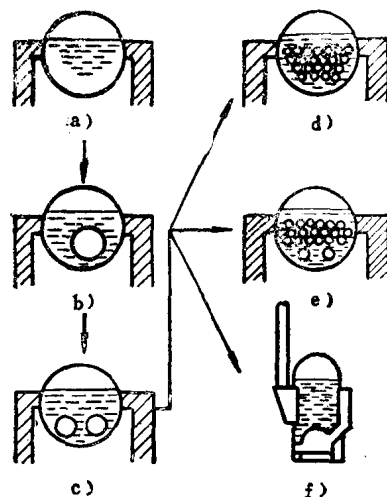


图1-2 火管式锅炉发展简图

- a) 圆筒锅炉 b) 单火筒锅炉 c) 双火筒锅炉
d) 火管锅炉 e) 火筒-火管锅炉 f) 立式火管锅炉

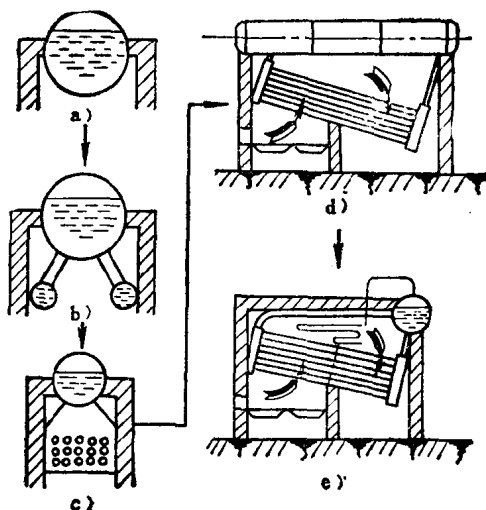


图1-3 直水管式锅炉发展简图

- a) 圆筒锅炉 b) 多水筒锅炉 c) 整集箱式锅炉
d) 纵锅筒分集箱式锅炉 e) 横锅筒分集箱式锅炉

炉的容量和参数。到本世纪30年代,已广泛应用中参数($2\sim 4\text{MPa}$, $385\sim 450^{\circ}\text{C}$)中等容量($6\sim 25\text{MW}$)的水冷壁式弯水管锅炉,使锅炉走向近代化的道路。随后,尤其是第二次世界大战以后,锅炉工业发展很快,40年代开始应用高参数大容量锅炉(如 10MPa 、 $\geq 510^{\circ}\text{C}$ 、 50MW),50年代开始采用超高参数(如 $\geq 14\text{MPa}$ 、 $540\sim 570^{\circ}\text{C}$)大容量($100\sim 200\text{MW}$)锅炉,60年代开始采用配 $200\sim 600\text{MW}$ 汽轮发电机组的亚临界参数($17\sim 18\text{MPa}$, $540\sim 570^{\circ}\text{C}$)锅炉,目前最大的单台自然循环锅炉的容量已达 850MW 。

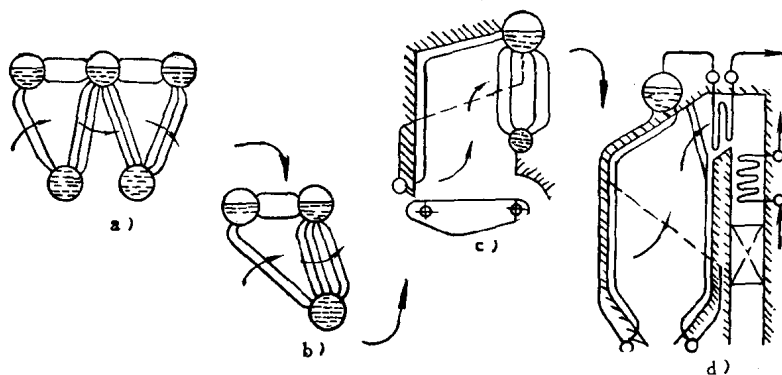


图1-4 弯水管式锅炉发展简图

a) 多锅筒锅炉 b) 三锅筒锅炉 c) 双锅筒锅炉 d) 单锅筒锅炉

应该指出的是,水管锅炉的直水管式和弯水管式锅炉,以及火管式锅炉都是自然循环锅炉,即蒸发部分的水循环是靠水、汽的密度差产生的压头来保证的。在发展自然循环锅炉的同时,本世纪30年代,德国和苏联开始应用直流锅炉如图1-5所示,40年代美国又开始应用多次强制循环锅炉,如图1-6所示。

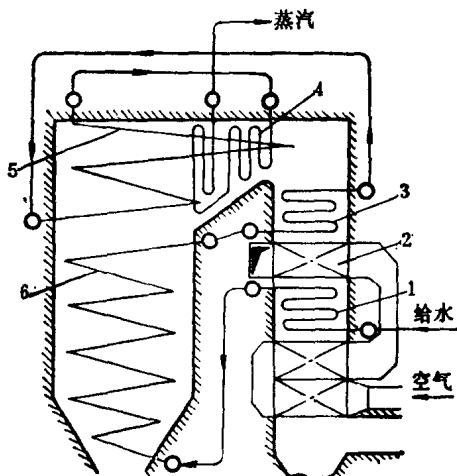


图1-5 直流锅炉简图

1—省煤器 2—空气预热器 3—过渡区 4—对流过热器 5—炉膛过热受热面(上辐射) 6—炉膛蒸发受热面(下辐射)

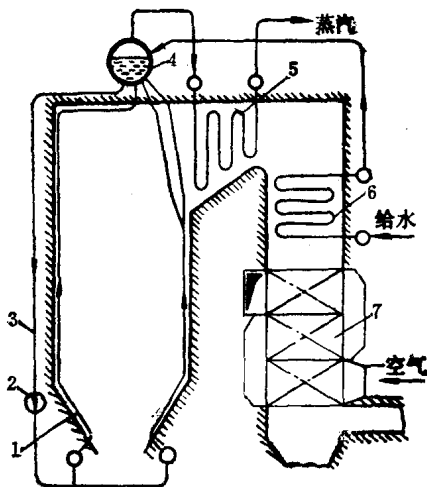


图1-6 强制循环锅炉简图

1—炉膛蒸发受热面 2—循环泵 3—下降管 4—锅筒 5—过热器 6—省煤器 7—空气预热器

在直流锅炉中，给水由给水泵进入省煤器，经炉膛蒸发受热面、对流过渡区（近代直流锅炉已取消外置对流过渡区）及过热器，然后送往汽轮机。各部分流动水阻力全由水泵来克服。在多次强制循环锅炉中，外表看来和自然循环锅炉相似，但实际上在蒸发受热面部分的下降管系统中，装有一台至几台循环泵，用以保证蒸发受热面的水循环。

这两种型式锅炉的发展是因为当时锅炉正处于要求向高参数大容量过渡的准备时期，自然循环锅炉遇到了下列几个主要困难：

- （1）由于压力提高，对自然循环锅炉的水循环是否能可靠工作没有把握。
- （2）给水处理技术落后及内部锈蚀问题较严重。
- （3）厚锅炉钢板的供应和锅筒的制造工艺较困难。

为此，各国曾先后提出各种型式的锅炉。不过后来的实践表明，当时这些型式锅炉同样不能全部解决上述存在的困难，有的甚至远不及自然循环锅炉简单可靠。而在自然循环锅炉中，虽未能全部解决上述困难，但并不比其它型式锅炉更严重。例如内部锈蚀，随着水处理技术的进步是可以解决的。因此，当时出现和试验研究过的很多型式锅炉，大都未能获得推广应用。不过其中的直流锅炉和多次强制循环锅炉，虽也未能全部解决上述问题，甚至带来一些自然循环锅炉没有的困难，但也带来比自然循环锅炉优越的地方。因为它们是强制流动或强制循环的，可以不用或缩小锅筒，采用小直径管子，可任意的布置受热面。这些都使得锅炉具有金属耗量低、制造工艺简单、启停炉快等优点，压力愈高愈显出它们的优越性。现时，对一般超高压参数，自然循环锅炉占优势；对于亚临界压力，自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉还难绝对分出优劣，应根据具体条件决定使用。目前单台最大的多次强制循环锅炉容量是1000MW。在西欧还发展了低倍率强制循环锅炉，它与多次强制循环锅炉的不同点是取消了锅筒，循环倍率更小一些，最大的单台容量达600MW，如图1-7所示。在超临界压力时，直流锅炉是唯一可以采用的一种型式，最大的单台容量达1300MW。在直流锅炉与强制循环锅炉发展的基础上又出现了复合循环锅炉，它的最大单台容量是1000MW，它的系统简图如图1-8所示。

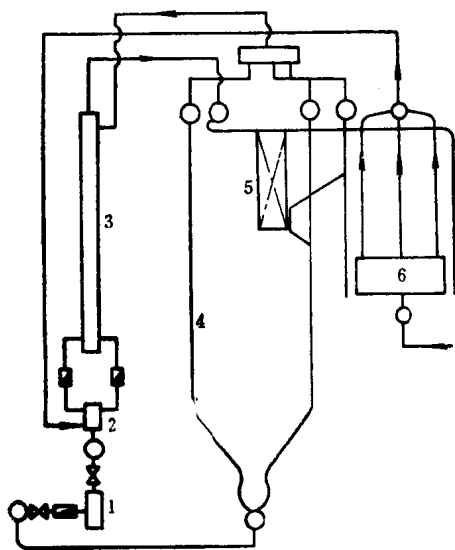


图1-7 低倍率强制循环锅炉简图

1—再循环泵 2—混合器 3—汽水分离器
4—水冷壁 5—过热器 6—省煤器

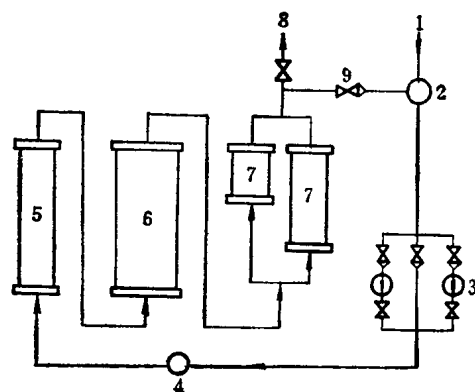


图1-8 复合循环锅炉系统简图

1—来自水冷壁 2—混合球 3—再循环泵 4—分配器
5—双面水冷壁 6—炉膛四周水冷壁 7—对流井
包墙水冷壁 8—去过热器 9—再循环管路

从上面所述的锅炉发展简史可知,促使锅炉发展的主要原因是生产的发展和需要。锅炉的出现虽已近200年,但向现代化发展却是近30多年的事情。我国解放后,在短短的20余年时间内,由只能手工生产一些小型生活用和工业用的双火筒锅炉和火管锅炉,到建立了制造现代化大型锅炉的工业基础。这是动力工业的广大工人和技术人员在党的领导下努力奋斗的结果。我国在1955年生产投运了第一台中参数6MW电站锅炉。到文化大革命前,我国已能生产50MW的中高压参数锅炉,并试制了高压高温(14MPa, 540℃)的100MW锅炉(蒸发量410t/h)。1969年制造和投运了一台超高参数(14MPa, 555/550℃)125MW中间再热的锅炉,并于1972年投运了同参数同容量的直流锅炉。1974年,配200MW机组(蒸发量670t/h)的超高压(14MPa, 540/540℃)自然循环锅炉投产。1975年配300MW机组的亚临界参数(17MPa, 570/570℃)直流锅炉投入运行,进入80年代,亚临界参数300MW自然循环锅炉与多次强制循环锅炉投产,1986年亚临界参数600MW锅炉也投入运行。我们相信,随着我国四个现代化的实现,我国的锅炉工业一定可以在不长的时间内,达到世界先进工业国家的水平。

促进锅炉发展的另一些主要因素为:

(1) 节约燃料 提高蒸汽温度和压力的目的,主要就在于提高电站效率,节约燃料消耗量。上面所述已可见参数提高将对锅炉型式发展有多么深刻的影响。为了提高锅炉本身的热效率,必须改善燃烧、降低锅炉的排烟温度等。特别是为了解决劣质燃料的经济燃烧,出现了种种燃烧方式和炉子型式。并由于降低排烟温度和提高空气温度而出现了省煤器和空气预热器等

(2) 节约材料 节约锅炉本身及电站厂房建筑材料,特别是金属材料,这是影响锅炉型式的另一个主要因素。例如减少锅筒数目、水冷壁式锅炉的出现、用小直径管子等都是出于这一目的,甚至直流锅炉的采用也包含着这一因素。增大锅炉的单台容量,在降低金属耗量方面有很大作用,这是锅炉向大容量发展的一个主要原因。

(3) 提高可靠性 由上述可知,一些老式锅炉,如集箱式锅炉的淘汰,主要是由于结构弹性差,易受应力破坏,水循环不良,易使水管过热爆管等等。又如近代大容量锅炉,多采用亚临界压力,温度多采用540℃,亦主要是考虑到工作的可靠性问题。

为了提高锅炉工作的经济性和可靠性,还应尽力提高锅炉的机械化和自动化水平,这往往也引起锅炉结构的相应变化。

上述种种因素的影响和要求,往往彼此发生矛盾。应根据我国的能源、材料和技术发展的方向,按照我国的经济建设方针,在保证锅炉可靠地满足生产需要的前提下,为降低锅炉金属消耗量和提高锅炉的热效率而采用各种新技术,设计制造各种新型锅炉。

二、锅炉的类型、系列和技术经济指标

锅炉按用途可分为工业锅炉、船舶锅炉和电站锅炉等;按蒸汽压力可分为低压锅炉、中压锅炉、高压锅炉、超高压锅炉、亚临界压力锅炉和超临界压力锅炉;按燃料可分为,燃煤锅炉、燃油锅炉和燃气锅炉;按燃烧方式可分为火床炉、煤粉炉、沸腾炉等;按汽水流动的情况可分为自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉。上述最后的一种分类是根据工作原理来分,概括性较强,

为使锅炉产品规格能科学地排列,从而使制造及使用部门都有依据的进行设计、制造和配套使用,促进动力工业生产,提高产品质量,并使各种辅机,如风机、水泵、磨煤机等都