

高等学校教材

锅炉原理

第二版

(下册)

西安交通大学 陈学俊 陈听宽 主编

机械工业出版社

757
(2)2

351074

高等学校教材

锅炉原理

第二版

(下册)

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。下册内容包括蒸发受热面、过热器与再热器、省煤器与空气预热器、受热面外部工作过程、自然循环锅炉水动力学、直流锅炉与强制循环锅炉的水动力学与传热、蒸汽的净化、锅炉水工况、锅炉的启停与运行、空气动力计算、受热面管壁温度计算、锅炉振动、锅炉科学技术的发展等。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

(下 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 版式设计：霍永明

责任印制：王国光 责任校对：熊天荣

*

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 $787 \times 1092^{1/10}$ ·印张 $19^{1/2}$ ·字数 471 千字

1981 年 1 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 45,401—48,200·定价：5.45 元

*

ISBN 7-111-02845-7/TK·111 (课)

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，同时又注意汲取国外先进机组的特性和数据资料，反映国外科学技术的新成果。

本书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，对全书进行了认真审阅。并承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，提了不少意见和建议。我校有关教研究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，作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者不吝指正。

编者

1990年2月

下册符号说明

A	面积 (m^2)		循环倍率
	燃料中灰分质量百分数	k	盐分携带系数
	静压转换系数		绝对粗糙度 (mm)
a	盐分配系数		烟气中飞灰浓度 (g/m^3)
	导湿系数 (m^2/s)	k_p	压力修正系数
	各部分灰分占总灰分的百分数	l	长度 (m)
B	燃料量 (kg/s)	M	烟气中有害物质排出量 (kg/h)
	宽度 (m)		流量系数
b	宽度 (m)	m	质量 (kg)
	大气压 (Pa)		金属抗磨性系数
Bi	毕渥数	Nu	努塞特数
C	工质混合不完全系数	n	数
	投资费用		蒸发率
	成本	p	压力 (MPa)
c	比热容 [$kJ/(kg \cdot K)$]		排污百分率
	盐分浓度比	Pr	普朗特数
	声速 (m/s)	Δp	阻力 (Pa)
c_p	定压比热容 [$kJ/(kg \cdot K)$]		压降 (Pa)
D	蒸发量、产汽量 (kg/s)	Q	燃料发热量 (kJ/kg)
	直径 (m)		相对于每公斤燃料的传热量 (kJ/kg)
d	直径 (m)	q	受热面热负荷 (kW/m^2)
	清洗装置中蒸汽凝结百分率	q_A	炉膛断面热负荷 (kW/m^2)
E	单位耗电量 ($kW \cdot h/t$)	q_m	质量流量 (kg/s)
	运行维修费用	q_v	炉膛容积热负荷 (kW/m^3)
G	给水量 (t/h)		容积流量 (m^3/s)
	每公斤燃料烟气的质量 (kg/kg)	R	锅筒蒸发面或蒸汽容积负荷
g	重力加速度 (m/s^2)		煤的结灰或结渣指数
H	高度 (m)	Re	雷诺数
	水质硬度 (mg/kg)	r	半径 (m)
	风机压头 (Pa)		汽化潜热 (kJ/kg)
h	高度 (m)	S	水循环压头 (Pa)
	风压 (Pa)		真空度 (Pa)
$\Delta H, \Delta h$	通风阻力 (Pa)		含盐量 (mg/kg)
	压降 (Pa)		滑速比
h_{zs}	自生通风力 (Pa)	St	斯特罗哈数
i	工质比焓 (kJ/kg)	s	管间节距 (m)
	烟囱锥度	s₁	管间横向节距 (m)
K	传热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]	s₂	管间纵向节距 (m)

s_2	管间对角线节距 (m)	ε	污染系数 ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)
T	热力学温度 (K)	ξ	局部阻力系数
	管壁表面的磨损量 (g/m^2)	η	效率百分数
t	工质或管壁温度 ($^\circ\text{C}$)		不均匀系数
Δt	温压 ($^\circ\text{C}$)		飞灰颗粒碰撞受热面的撞击率
V	每公斤燃料的空气量或烟气体积 (m^3/kg)	θ	烟气温度 ($^\circ\text{C}$)
	容积 (m^3)		补偿年限
v	工质比容 (m^3/kg)	λ	导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
w	蒸汽湿度百分数		摩擦阻力系数
	速度 (m/s)		波长 (m)
	水当量 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]	μ	烟气中飞灰浓度 (kg/kg)
w_0	循环水速 (m/s)		动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ρw	质量流速 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		热均流系数
X	清洗水份额百分数		流量系数
x	角系数	ζ	受热面利用系数
	质量含汽率		流动阻力系数
	相对长度	ρ	密度 (kg/m^3)
γ	压差 (Pa)		热偏差
z	总阻力系数	Σ	总和
α	过量空气系数	σ	表面张力 (N/m)
	放热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	σ_1	管束横向相对节距
	倾角	σ_2	管束纵向相对节距
α_1	烟气对管壁放热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	σ_2'	管束对角线相对节距
α_2	管壁对工质放热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	τ	时间 (s)
$\Delta\alpha$	漏风系数	ϕ	热通量 (kW)
β	空气侧过量空气系数	φ	截面含汽率
	外径与内径的比值		单位长度热通量 (kW/m)
	容积含汽百分率	ψ	热有效系数
	倾角		炉膛截面形状系数
Δ, δ	差值		汽水混合物摩擦阻力修正系数
δ	厚度 (m)		

角 码 说 明

<i>i</i>	进口; 饱和水	<i>il</i>	溢流
<i>o</i>	出口; 饱和蒸汽	<i>j</i>	计算; 进口
<i>b</i>	壁; 比	<i>jb</i>	局部
<i>bh</i>	饱和	<i>jd</i>	净段
<i>c</i>	出口	<i>jd</i>	净段
<i>cc</i>	除尘器	<i>jd</i>	净段
<i>cd</i>	沉淀	<i>jh</i>	积灰
<i>cl</i>	错列管束	<i>jl</i>	节流
<i>cz</i>	垂直管	<i>jr</i>	加热水区段
<i>d</i>	对流; 顶端; 动压	<i>js</i>	金属; 加速
<i>dj</i>	电动机	<i>yx</i>	集箱; 机械; 界限
<i>dl</i>	倒流; 当量	<i>jz</i>	结渣
<i>dq</i>	带汽	<i>k</i>	空气; 孔; 宽; 卡门涡流
<i>dw</i>	低位	<i>km</i>	可磨性
<i>e</i>	额定; 止回阀	<i>ky</i>	空气预热器
<i>eh</i>	恶化	<i>l</i>	炉膛; 露点
<i>f</i>	辐射	<i>lg</i>	连接管
<i>fh</i>	飞灰	<i>lj</i>	临界
<i>fj</i>	分配集箱	<i>lk</i>	冷空气
<i>fl</i>	分离	<i>ll</i>	理论
<i>fy</i>	飞逸	<i>ls</i>	炉水
<i>g</i>	高; 根部	<i>lz</i>	流动阻力
<i>gb</i>	管壁	<i>mc</i>	摩擦
<i>gj</i>	管间	<i>mk</i>	溢水门坎
<i>gp</i>	管屏	<i>ms</i>	磨损
<i>gq</i>	过热蒸汽; 管圈	<i>n</i>	内
<i>gr</i>	过热; 过热器	<i>nb</i>	内壁
<i>gs</i>	给水; 管束	<i>nl</i>	逆流
<i>gsb</i>	给水泵	<i>p</i>	偏差管
<i>gt</i>	锅筒	<i>pj</i>	平均
<i>gz</i>	工质	<i>ps</i>	排污水
<i>h</i>	汽水混合物	<i>pw</i>	排污
<i>hb</i>	灰壁	<i>py</i>	排烟
<i>hd</i>	滑动	<i>q</i>	蒸汽; 鳍片
<i>hf</i>	焊缝	<i>qd</i>	区段; 启动
<i>hj</i>	汇集集箱	<i>qh</i>	欠熔
<i>hl</i>	回路	<i>qi</i>	前
<i>ho</i>	后	<i>qs</i>	气室; 汽水混合物
		<i>qx</i>	清洗

<i>rj</i>	溶解	<i>wb</i>	外壁
<i>rh</i>	热空气	<i>wl</i>	弯头
<i>rl</i>	热力	<i>x</i>	下
<i>rs</i>	加热水	<i>xh</i>	循环
<i>s</i>	水	<i>xj</i>	下降
<i>sb</i>	水冷壁; 水泵	<i>y</i>	燃料应用基; 烟气
<i>sd</i>	速度	<i>yc</i>	引出管
<i>sg</i>	水垢	<i>yu</i>	运动
<i>sh</i>	上	<i>yf</i>	引风机
<i>shb</i>	再循环泵	<i>yr</i>	引入
<i>sj</i>	实际	<i>ys</i>	允许
<i>sl</i>	顺列管束; 水力	<i>yx</i>	有效
<i>sm</i>	省煤器	<i>yz</i>	烟气再循环; 烟囱
<i>sp</i>	水平管	<i>zf</i>	蒸发; 制粉系统
<i>sr</i>	蓄热	<i>zl</i>	质量
<i>ss</i>	上升	<i>zs</i>	折算; 自生通风
<i>tf</i>	通风	<i>zx</i>	纵向
<i>ts</i>	提升	<i>zw</i>	重位压头
<i>tz</i>	停滞	<i>zy</i>	自由水面

下 册 目 录

第二版前言

下册符号说明

第十三章 蒸发受热面	1
§ 13-1 锅炉管束与凝渣管束	1
§ 13-2 自然循环锅炉水冷壁	3
§ 13-3 直流锅炉水冷壁	7
第十四章 过热器与再热器	16
§ 14-1 概述	16
§ 14-2 过热器与再热器结构型式	17
§ 14-3 过热器水动力学	25
§ 14-4 过热器与再热器系统的设计与 布置	33
§ 14-5 汽温变化特性	38
§ 14-6 汽温调节	42
第十五章 省煤器与空气预热器	51
§ 15-1 概述	51
§ 15-2 省煤器	52
§ 15-3 管式空气预热器	56
§ 15-4 回转式空气预热器	61
§ 15-5 低温受热面的布置与技术经济 分析	67
第十六章 受热面外部工作过程	75
§ 16-1 概述	75
§ 16-2 对流受热面的磨损	75
§ 16-3 锅炉受热面的结灰	81
§ 16-4 锅炉低温对流受热面烟气侧的 腐蚀	87
§ 16-5 锅炉高温受热面烟气侧的腐蚀	94
§ 16-6 油灰的结垢、腐蚀及防止方法	98
第十七章 自然循环锅炉水动力学	102
§ 17-1 概述	102
§ 17-2 管内汽液两相流体的基本特性	103
§ 17-3 水循环回路循环特性计算	108
§ 17-4 水循环全特性曲线分析	118
§ 17-5 循环可靠性校核	122
§ 17-6 水循环回路的设计布置	127
§ 17-7 不稳定工况对锅炉水循环的	

影响	128
第十八章 直流锅炉与强制循环锅炉 的水动力学与传热	132
§ 18-1 直流锅炉蒸发受热面中的水动力 特性	132
§ 18-2 直流锅炉蒸发受热面中的热 偏差	146
§ 18-3 直流锅炉蒸发受热面内的放热 过程	149
§ 18-4 低倍率循环锅炉的水力特性	157
§ 18-5 复合循环锅炉的水力特性	164
第十九章 蒸汽的净化	169
§ 19-1 概述	169
§ 19-2 蒸汽带盐的机理	170
§ 19-3 汽水分离装置的设计	176
§ 19-4 蒸汽清洗	183
§ 19-5 分段蒸发	189
第二十章 锅炉水工况	193
§ 20-1 锅内结垢	193
§ 20-2 锅内腐蚀	197
§ 20-3 锅筒锅炉水工况	201
§ 20-4 直流锅炉水工况	204
第二十一章 锅炉的启停与运行	208
§ 21-1 自然循环锅炉的启动和停用	208
§ 21-2 直流锅炉的启动和停用	211
§ 21-3 锅炉的运行控制	217
§ 21-4 锅炉的变压运行	222
第二十二章 空气动力计算	227
§ 22-1 概述	227
§ 22-2 空气动力计算原理	228
§ 22-3 烟道计算	237
§ 22-4 风道计算	241
§ 22-5 风机的选择	243
§ 22-6 烟囱设计	244
第二十三章 受热面管壁温度计算	248
§ 23-1 受热面管壁温度工况	248
§ 23-2 壁温校核点工质温度的确定	257

§ 23-3 壁温校核点最大热负荷的确定	261	§ 25-5 沸腾燃烧	286
§ 23-4 管子内壁放热系数的确定	266	§ 25-6 提高受热面质量与新型对流 受热面	289
第二十四章 锅炉振动	272	§ 25-7 中间负荷与变压运行	291
§ 24-1 声驻波基本特性	272	§ 25-8 环境保护问题	294
§ 24-2 对流受热面烟道振动的产生与 防止	273	附录	297
§ 24-3 炉膛振动的产生与防止	275	一、国际单位制与工程单位制的换算	297
第二十五章 锅炉科学技术的发展	277	二、空气和平均成分烟气的物理特性	298
§ 25-1 锅炉容量及蒸汽参数	277	三、水和水蒸汽的动力粘度	299
§ 25-2 汽水循环方式	279	四、水和水蒸汽的导热系数	300
§ 25-3 基础理论研究	282	五、水和水蒸汽的普朗特数 Pr	301
§ 25-4 劣质煤的燃烧	284	参考文献 (上、下册)	302

第十三章 蒸发受热面

在近代动力锅炉中，炉墙上均敷设了水冷壁。中压锅炉的水冷壁是蒸发受热面，高压和超高压锅炉的水冷壁主要是蒸发受热面，但炉膛顶部常布置辐射过热器。在直流锅炉中，一部分水冷壁用作加热受热面和过热受热面，但水冷壁仍然主要是蒸发受热面。在超临界压力直流锅炉中，水冷壁是用作加热水和过热蒸汽。因此在低于临界压力的各种动力锅炉中，我们讨论蒸发受热面一般即指炉膛水冷壁。它的传热方式主要是辐射换热。

在中压工业锅炉及小容量电站锅炉中，常把后墙水冷壁的上部拉稀成为凝渣管束，形成对流蒸发受热面。在低压工业锅炉中，炉膛水冷壁满足不了蒸发受热面的需要，还要增加锅炉管束，这也是对流蒸发受热面，凝渣管束与锅炉管束的传热方式主要是对流换热。

§ 13-1 锅炉管束与凝渣管束

在小型低压锅炉中，常采用上下双锅筒的结构，锅炉管束就胀接在两锅筒之间(图13-1)。来自炉膛的烟气流横向冲刷管束。由于工作压力低，汽化热所占比例较大，仅炉膛水冷壁的吸热量还不能满足汽化热的需要，因此在炉膛出口后面还需要布置这样的对流蒸发受热面。通常在管束中用耐火砖把烟道隔成几个流程，同时各流程的烟气流截面随烟气温度降低而逐渐缩小，以保持足够高的烟气流速。有时为了防止烟气从炉膛流入管束时结渣而堵塞烟气通道，把入口处几排管子的节距加大。我国小型锅炉一般采用 $\phi 51 \times 2.5\text{mm}$ 的管子作锅炉管束，节距 $s_1 = 100\text{mm}$ 、 $s_2 = 95\text{mm}$ ，管子弯曲半径 $R = 160\text{mm}$ 。

凝渣管束是布置在炉膛出口的对流管束。这个管束在结构上横向和纵向节距都设计得很大，因此它本身不容易结渣，即使在锅炉燃烧不正常时在凝渣管束上结了一些渣，也不会把烟气通道堵塞。同时烟气流过这个管束时，它的温度会降低几十度，烟气中携带的飞灰就会因此而凝固，不致再粘结在受热面上。凝渣管束可以保护后面密集的过热受热面不结渣堵塞，因此有时它也称为防渣管束。

一般锅炉中的凝渣管束常由后墙水冷壁管上部拉稀组成，如图13-2所示。

在中压和高压锅炉中，一般采用 $\phi 60 \times 3.5$ (中压)和 $\phi 60 \times 5$ (高压)的管子。采用的横向、纵向相对节距多在以下范围内：

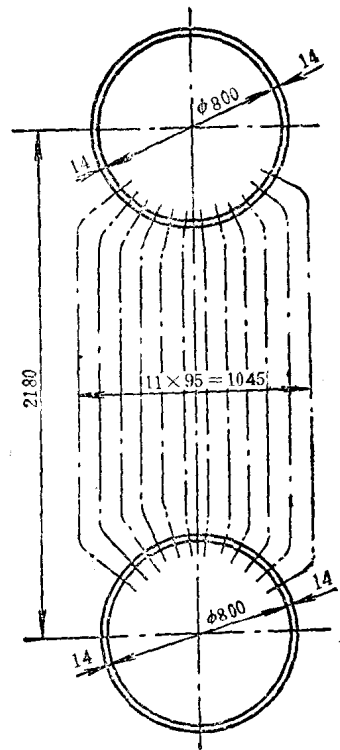


图13-1 小型锅炉蒸发管束简图

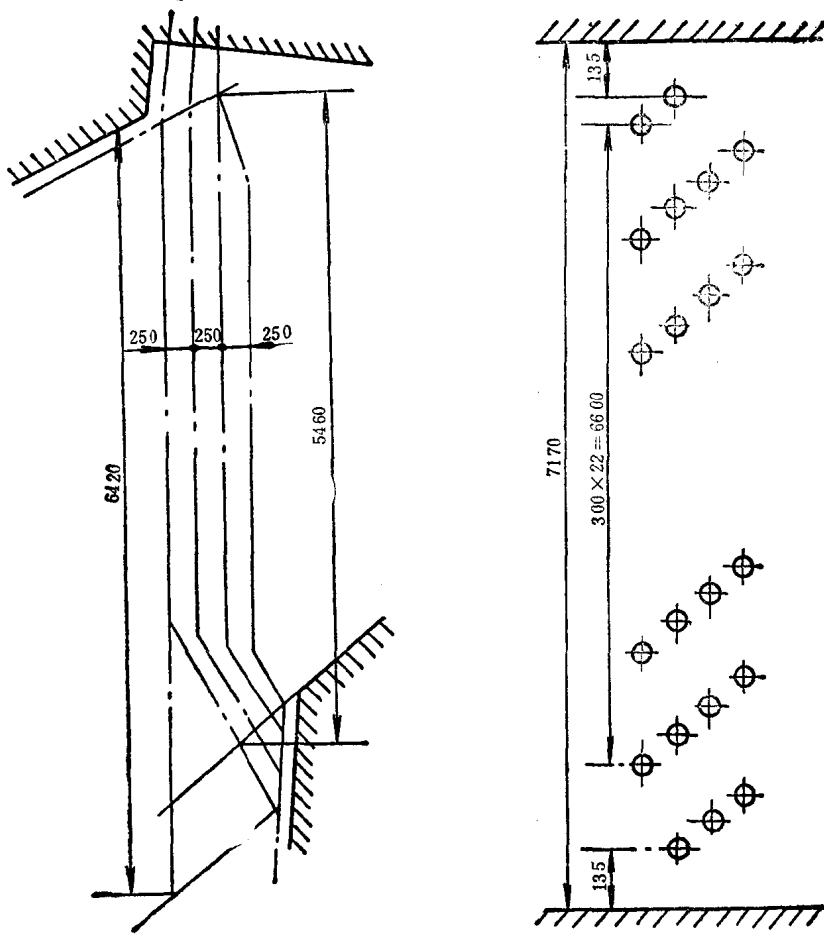


图13-2 国产120 t/h 中压煤粉锅炉凝渣管束

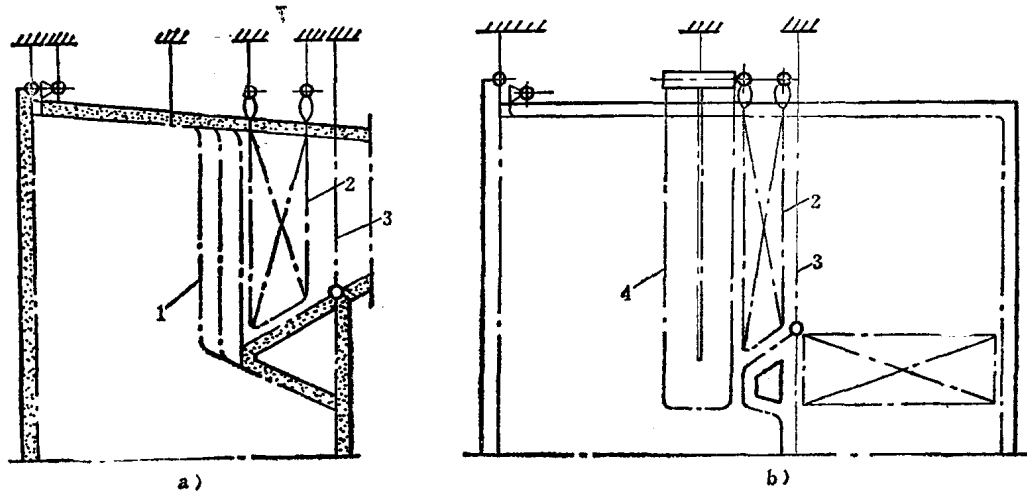


图13-3 锅炉炉膛出口管束布置简图

a) 中压锅炉带凝渣管束的布置 b) 高压锅炉带屏式过热器的布置

1—凝渣管束 2—过热器 3—后水冷壁吊挂管 4—屏式过热器

$$\frac{s_1}{d} = 3 \sim 5; \quad \frac{s_2}{d} = 3 \sim 5$$

在采用全悬吊式结构中，中压锅炉凝渣管束的结构可采用图13-3 a所示的结构，其中一排全垂直的管子承受后水冷壁及其炉墙的全部重量。现代高压锅炉及超高压锅炉一般不采用凝渣管束的结构，而以在炉膛出口的屏式过热器来代替，同时炉顶也布置过热受热面，见图13-3 b。

§ 13-2 自然循环锅炉水冷壁

水冷壁的采用最初是为了保护炉墙，降低它的温度，提高运行可靠性，而今天它已成为锅炉的主要受热面。水冷壁有以下的作用：

1) 保护炉墙，减少熔渣和高温对炉墙的破坏作用。装设水冷壁后，炉墙的内壁温度大大降低，因此炉墙的厚度可以减小，重量减轻。对于敷在水冷壁管子上的炉墙，即敷管炉墙或管承炉墙，水冷壁也起了悬吊的作用。

2) 火焰对水冷壁的辐射传热已成为锅炉传热的重要方式。辐射传热与热力学温度的四次方成比例，炉内火焰温度很高，因而水冷壁的辐射吸热很强烈。

水冷壁通常是以外径 $\phi = 60 \sim 51 \text{mm}$ 的无缝钢管组成，材料为20A。中压锅炉管子尺寸为 $\phi 60 \times 3$ ，高压锅炉为 $\phi 60 \times 5$ 。

在中小容量锅炉上用得比较广泛的是光管水冷壁，如图13-4、图13-5所示。光管水冷壁一般贴近炉膛四壁，互相平行地垂直布置，上部与锅筒或上集箱连接，下部与下集箱相连。

水冷壁布置的紧密程度以管间节距 s 与管子外径 d 的比值 (s/d) 来表示。当 s/d 增大，即布置较稀时，管子背面

受到炉墙反射的热量较多，金属的利用率较高，但对炉墙的保护作用较差。反之，当 s/d 减小，即布置较密时，金属的利用率较差，但对炉墙的保护作用较好。这可从下式明显看出：

$$\frac{A_{sj}}{A_l} = \frac{\pi d l n}{s n l x} = \frac{\pi}{\left(\frac{s}{d}\right) x} \quad (13-1)$$

式中 A_{sj} ——实际的水冷壁管子面积；
 A_l ——炉膛有效辐射受热面积；
 x ——水冷壁角系数；
 n ——管子数；

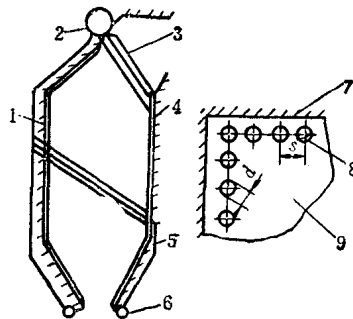


图13-4 煤粉炉水冷壁

1—水冷壁 2—锅筒 3—防渣管
 4—炉墙 5—下降管 6—集箱
 7—炉墙 8—水冷壁管 9—燃烧室

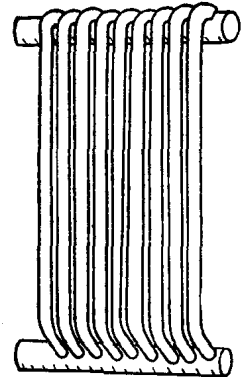


图13-5 整排水冷壁结构

l ——管子长度。

当 s/d 减小时， x 值增加较少，因而从上式可见 $A_{s,i}/A_i$ 值增加，亦即增加了单位面积有效辐射受热面所需要的实际金属耗量，如图13-6所示。因此，从保护炉墙考虑， s/d 不宜用得过小。但是除小容量工业锅炉外($s/d \leq 2.0$)，中大容量锅炉实际采用的 s/d 值均很小 $s/d = 1.1 \sim 1.20$ 。这是为了有可能采用轻型炉墙和敷管炉墙，尤其是对于后一种炉墙， s/d 值小于1.1，这样可以节约锅炉总的材料成本。在大容量锅炉中，前面已经讲过，炉墙面积相对较小，必须密布水冷壁管，否则无法达到必需的有效辐射受热面积。

在大容量锅炉中，较多的采用了膜式水冷壁。目前，膜式水冷壁大多是由光管和鳍片（扁钢条）焊接而成，如图13-7所示。图13-8 a 为每根光管上先焊好鳍片，然后把鳍片焊接起来。中间焊缝为单面焊，安装时此焊缝放在炉膛向火侧。这样做可使未经热处理的焊缝在不受压力的鳍片上。图13-8 b 为两根已焊好鳍片的管子与放在它们中间的一根光管焊接起来，这样可比上一种省去一条焊缝。图13-8 c 为两根光管间焊上一条鳍片而成。此外还有一种方法是不用扁钢，而用埋弧焊接法将管子一起焊成管排，此时，管子之间的鳍片是由焊丝金属熔化，同时用低熔点的附加焊丝填充而成。

采用在钢厂轧制和挤压的鳍片管而制成的膜式水冷壁，由于鳍片材料必须和管子材料相同，水冷壁管径与节距受鳍片管品种规格的限制，因此只在大批量生产时才比较经济。图13-9是 $\phi 60 \times 5.5 \text{ mm}$ 的鳍片管，鳍片的断面近似梯形，是在异形钢管厂直接轧成的，相邻两鳍片尖端再焊接在一起，焊缝大大减少，并且焊接时不影响管子本体金属，但是鳍片管价格昂贵。

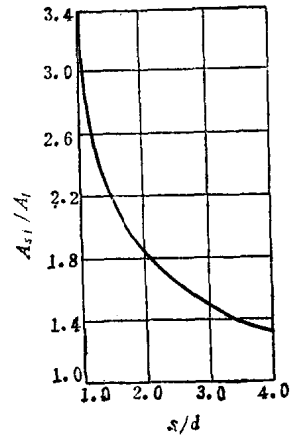


图13-6 $\frac{A_{s,i}}{A_i}$ 与 $\frac{s}{d}$ 之间的关系

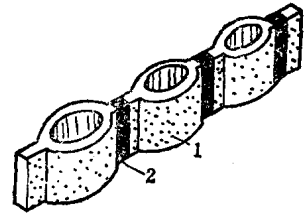


图13-7 膜式水冷壁
1—鳍片管 2—焊缝

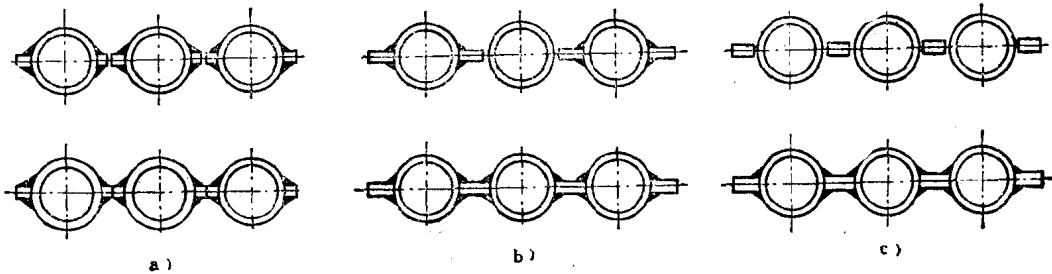


图13-8 膜式水冷壁的几种结构

膜式水冷壁的 s/d 约为1.3~1.35。从经济角度看，最好采用尽可能大的管间节距，即采用尽可能宽的鳍片，这样可降低水冷壁重量，减少金属耗量，并且鳍片可以用比管子便宜的金属材料制造，降低贵重金属的耗量。但鳍片也不能过宽，否则在同样向火面热负荷下，鳍

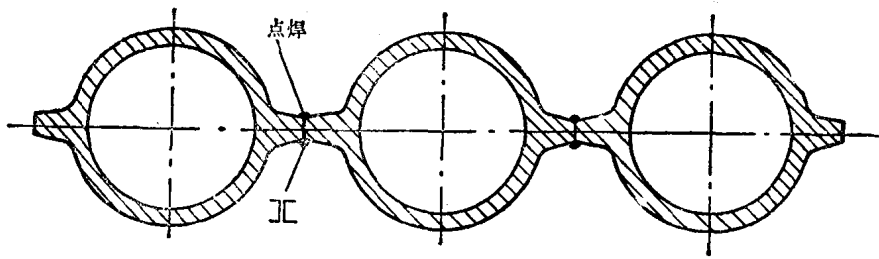


图13-9 轧制鳍片管的焊接

端的金属温度增高。如图13-10所示,鳍片宽度为 b ,鳍片根部厚度为 δ_g ,由炉膛来的辐射热负荷 q_r 通过鳍片向火表面,并通过鳍片根部流入管子,传给管内工质。由此可知,鳍片根部的热负荷 q_g 为

$$q_g = q_r \frac{b}{\delta_g} \quad (13-2)$$

由上式可见,在炉膛受热面热负荷(即向火面热负荷)相同时,如 b/δ_g 值增加,则鳍片根部热负荷 q_g 也增大。 q_g 过大是不允许的,因此鳍片宽度是有限的。鳍片也不能过厚,过厚会使它的向火面与背火面的温差太大引起过大的热应力。

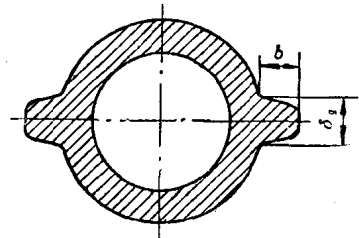


图13-10 鳍片管

炉膛受热面热负荷主要与炉内燃烧过程有关,而后者又主要决定于燃料品种,如燃油锅炉的炉膛受热面热负荷要比燃煤锅炉为高。这样,燃油锅炉水冷壁的鳍片宽度相对应小一些。在自然循环锅炉中,由于水冷壁内工质为汽水混合物,沸腾放热系数很大,锅炉负荷变动时,冷却作用较稳定,因此,自然循环锅炉的膜式水冷壁的工作条件比直流锅炉要好一些。对不同的燃料和工质循环方式都应设计出鳍片管的最佳形状和几何尺寸,但考虑到便于制造和安装,类型也不宜过多。目前国内各锅炉厂对自然循环锅炉的膜式水冷壁采用节距 $s=80\text{mm}$,管径 $d=60\text{mm}$,管壁厚3、5、6mm,鳍片宽度 $b=10\text{mm}$,鳍片厚度9mm,端部厚度6mm。

膜式水冷壁的发展最初是为了得到良好的炉膛气密封,减少炉膛漏风和采用微正压燃烧,为取消引风机运行创造条件。它还有其他一系列优点,其中主要是炉墙不用耐火材料,而只需轻型的绝热材料,这样可大大减少炉墙材料和重量,从而也大大减少钢架、地基等材料和成本,而且便于采用悬吊结构;由于炉膛气密封性好,可降低排烟热损失,提高热效率;由于蓄热能力小,炉膛

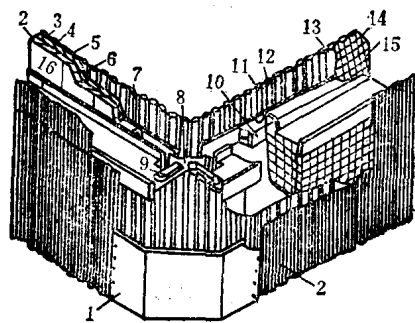


图13-11 装设膜式水冷壁与敷管炉墙的炉膛构造示意图

- 1—滑动螺栓 2—外波形护板(厚1mm) 3—双层绝热板(各厚50mm) 4—耐热涂料 5—水冷壁管 6—鳍片 7—拉紧装置 8—炉角连接件 9—压板 10—T型钢梁 11—紧固件 12—间隔筋片 13—钢丝网 14—绝热涂料 15—钢丝网 16—绑带

燃烧室升温快冷却亦快，可缩短启动和停炉时间。膜式水冷壁的缺点主要是制造工艺较复杂，设计时必须考虑到它的一些特点。如不允许两相邻管子的金属温度差超过 50°C （这个要求对自然循环锅炉是容易做到的）；因要把水冷壁系统制成整体焊接的悬吊框式结构，设计膜式水冷壁时必须保证有足够的膨胀延伸自由；还应保证人孔、检查孔、看火孔以及管子横穿水冷壁等处有绝对的密封性。图13-11示出了装设膜式水冷壁炉膛的构造。

对于不易着火的燃料，为使燃料迅速着火和稳定燃烧，或在旋风炉及液态排渣炉中为了获得较高的温度，常常需要把一部分水冷壁管表面遮盖起来，以减少该部位的吸热量，这部分水冷壁表面称做卫燃带。常用的敷设卫燃带的方法是在卫燃带区域的水冷壁管表面焊上许多长 $20\sim 25\text{ mm}$ 、直径 $6\sim 12\text{ mm}$ 的销钉（或称抓钉），然后敷上铬矿砂耐火塑料，如图13-12所示。耐火塑料是97%铬矿砂和3%耐火粘土，再加上 $6\%\sim 7\%$ 的水玻璃。铬矿砂耐高温性能良好，而其导热系数比粘土耐火砖高得多，有利于冷却。在这种卫燃带构造中销钉起着冷却和固定的作用，焊接质量要好。

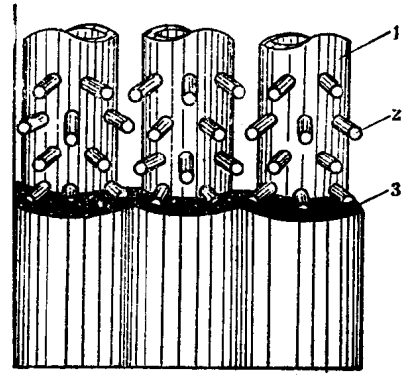


图13-12 卫燃带的构造
1—水冷壁管 2—销钉 3—铬矿砂耐火塑料

近年来，对高压锅炉及超高压锅炉，广泛采用平炉顶结构，炉顶由过热器顶棚管组成。

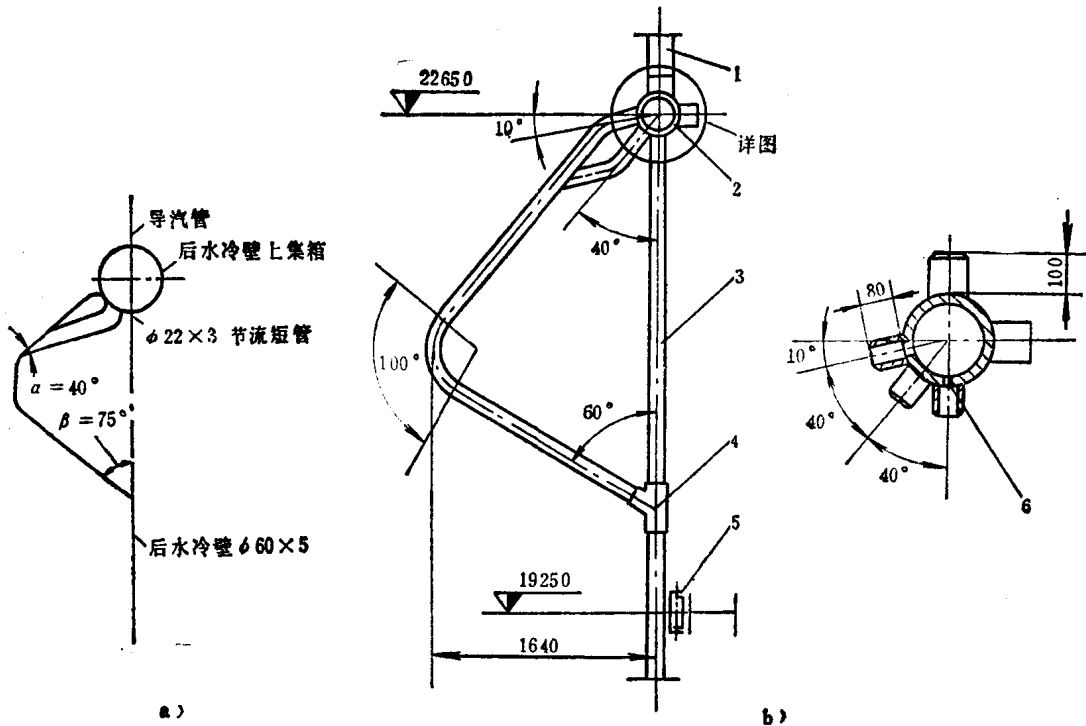


图13-13 折焰角结构

a) 230/100-6型锅炉 b) 410/100-1型锅炉

1—接管 2—集箱 3—上升管 4—三叉管 5—刚性管 6—节流小孔

在平炉顶结构中，后水冷壁上部常做成一个折焰角（简称鼻子）与上集箱相连，炉膛出口处不装凝渣管束。折焰角的作用是：

1) 增加了水平连接烟道的长度，并空出了凝渣管束的位置，可以在不增加锅炉深度的情况下布置更多的过热器受热面，通常这个部位用以布置屏式过热器。

2) 改善烟气流冲刷屏式过热器的空气动力特性，增加横向冲刷的作用，增长烟气流程，加强烟气混合，使烟气流沿着烟道高度分布趋于均匀。

折焰角的突出部分，有的设计中几乎占燃烧室深度的一半，但最常用的突出部分为炉膛深度的30%左右。如图13-13所示，一般取 $\alpha = 25^\circ \sim 45^\circ$ ， $\beta = 45^\circ \sim 75^\circ$ 。

水冷壁是一庞大的组合体，承担锅炉的大部分热负荷，必须注意它的热膨胀问题。水冷壁一般是上部固定，下部能自由膨胀。水冷壁管的上集箱固定在支架上，下集箱则由水冷壁悬挂着。水冷壁管自身吊拉件限制其水平方向的移动，以免引起结构变形，但要保证水冷壁管能上下滑动，如图13-14所示。

水冷壁管穿过炉墙的部分要留出膨胀间隙。为了防止漏风，间隙内填充石棉绳。对于敷管炉墙，炉墙贴附在膜式水冷壁管外面形成一个整体，穿墙部分可不留间隙。

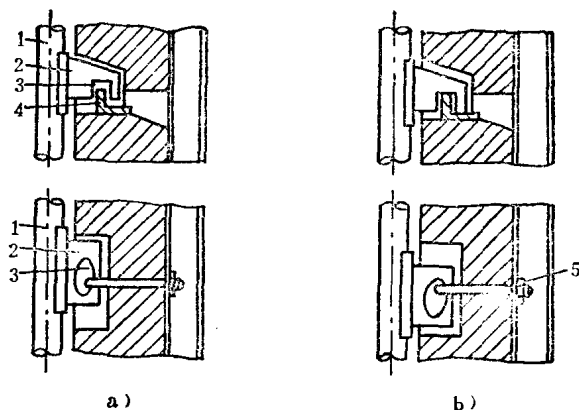


图13-14 水冷壁管的吊拉件示意图

a) 安装时位置 b) 运行时位置

1—水冷壁管 2—拉钩 3—膨胀间隙 4—支架 5—张力构件

§ 13-3 直流锅炉水冷壁

一、水平围绕上升管带型水冷壁

直流锅炉与自然循环锅炉在结构上的差异除了无锅筒之外，主要在于炉膛部分的水冷壁。

400-140型直流锅炉的水冷壁为水平围绕上升管带式。对于水平围绕式的辐射受热面，为了使管子在炉膛内盘绕上升，炉膛的四面墙上至少有一面上的管子是倾斜的，即一面倾斜三面水平；也可以是二面倾斜、二面水平的双管带盘绕上升。图13-15所示即为400-140型直流锅炉下辐射区的双管带展开图。

倾斜角度的选择要考虑多方面的需要，首先是管内工质的汽水分层问题（详见第18章）。试验指出，倾斜角为 5° 以上时，由汽水分层而造成的管子上下壁温差已较小，若倾斜角达 $9^\circ \sim 11^\circ$ 时，汽水分层就不再发生，但是角度太大又将造成结构布置上的困难。目前，国内的设计约在 $9^\circ \sim 15^\circ$ 之间。对于汽水分层问题，还可以用选择较高的质量流速（ ρw ）来避免，所以即使是水平布置部分，只要管子中工质具有足够的质量流速，亦不致发生严重的汽水分层。

至于采用的管带数，这与锅炉的容量有关。为了使流动阻力不致太大，每根管圈内的流速在保证水动力稳定（详见第18章）及不发生汽水分层等的前提下不宜过高。对于容量大的锅炉，辐射受热面平行联接的管子数目就要多些。如果用单回路管带，则管带宽度太宽，管