

第 2 篇

锅 炉

主编单位 机械工业部上海发电设备成套设计研究所
编写单位 机械工业部上海发电设备成套设计研究所
上海锅炉厂
西安交通大学
机械工业部哈尔滨电站设备成套设计研究所
东南大学
东方电站成套设备公司
上海工业锅炉研究所
杭州锅炉厂
上海船舶运输科学研究所
华东电力试验研究所

主 编 王孟浩

副 主 编 许晋源 宋汉武

编 写 人 戈宗英 蒋伟权 王孟浩 许晋源
何佩鳌 董厚忱 徐汉章 陆炳生
戴滨和 沈 新 陈来九 周世荣
郑志庆 吴元新 高才革 宋汉武
邵慰骏 乐长义

主 审 陈之航

常用符号表

A^{af} ——燃料的应用基灰分 (%)	q_v ——炉膛容积热负荷 [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$]
a_s ——排渣率 (%)	q_o ——管子外壁热负荷 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
a_f ——炉膛黑度	q_2 ——排烟热损失 (%)
B ——实际燃料消耗量 [kg/h (或 m^3/h)]	q_3 ——气体 (化学) 未完全燃烧热损失 (%)
B_c ——计算燃料消耗量 [kg/h (或 m^3/h)]	q_4 ——固体 (机械) 未完全燃烧热损失 (%)
c_p ——比定压热容 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]	q_5 ——散热损失 (%)
D ——蒸发量 (t/h)	q_6 ——灰渣物理热损失 (%)
D_{bd} ——排污水流量 (t/h)	R ——炉排面积 (m^2)
D_1 ——过热蒸汽流量 (t/h)	r_1 ——一次风率 (%)
D_2 ——再热蒸汽流量 (t/h)	r_2 ——二次风率 (%)
d_i ——内径 (mm)	r_3 ——三次风率 (%)
d_o ——外径 (mm)	T' ——火焰平均温度 (K)
F_f ——炉壁面积 (m^2)	t_{ca} ——冷风温度 ($^\circ\text{C}$)
G ——循环水量 (t/h)	t_{fw} ——给水温度 ($^\circ\text{C}$)
H ——循环回路高度 (m)	t_{ha} ——热风温度 ($^\circ\text{C}$)
受热面积 (m^2)	t_1 ——过热蒸汽温度 ($^\circ\text{C}$)
h ——风压 (Pa)	t_2 ——再热蒸汽温度 ($^\circ\text{C}$)
h ——工质的焓 (kJ/kg) ^①	U ——炉膛周长 (m)
h_{fw} ——给水焓 (kJ/kg) ^②	V^{dmf} ——燃料可燃基挥发分 (%)
h_{bd} ——排污水焓 (kJ/kg) ^②	V^0 ——理论空气量 [m^3/kg (或 m^3/m^3)]
h_g ——燃烧产物的焓 [kJ/kg (或 kJ/m^3) ^②]	V_g^0 ——理论烟气体量 [m^3/kg (或 m^3/m^3)]
h_1 ——过热蒸汽焓 (kJ/kg) ^②	W^{af} ——燃料的应用基水分 (%)
h_2 ——再热蒸汽焓 (kJ/kg) ^②	w ——工质流速 (m/s)
K ——传热系数 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]	w_0 ——循环水速 (m/s)
循环倍率	w_a ——空气速度 (m/s)
携带系数 (%)	w_g ——烟气速度 (m/s)
K_c ——界限循环倍率 (第 5 章)	α ——过量空气系数
p ——压力 (MPa)	α_2 ——管壁对工质的放热系数 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]
Q_b ——每 1kg (或 1m^3) (标准) 燃料带入锅炉的热量 [kJ/kg , 或 kJ/m^3 (标准)]	α_i ——炉膛出口过量空气系数
LHV——燃料的应用基低位发热量 [kJ/kg (或 kJ/m^3)]	α_{eg} ——排烟处过量空气系数
Q_1 ——锅炉的有效利用热量 (kJ/h)	α_c ——对流放热系数 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$] ^②
q_{cr} ——临界热负荷 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	α_r ——辐射放热系数 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]
q_s ——炉膛截面热负荷 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	
q_i ——管子内壁热负荷 [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	

① 本篇所说的焓均指比焓。

② 按 GB3102.4—97 规定, 对流放热系数称为表面传热系数。

ρ ——密度 (kg/m^3)	θ'_i ——炉膛出口烟温 ($^{\circ}\text{C}$)
Δp ——阻力 (MPa ; Pa)	θ_{cg} ——排烟温度 ($^{\circ}\text{C}$)
Δt ——平均温压 ($^{\circ}\text{C}$)	ξ ——受热面利用系数
$\Delta \alpha$ ——漏风系数	ρw ——质量流速 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
ε ——积灰系数	φ ——保热系数
η ——锅炉热效率 (%)	ψ ——辐射受热面平均吸热能力

第1章 概 论

锅炉（蒸汽发生器）是利用燃料或其他能源的热能，把工质（一般为净化的水）加热到一定参数（温度、压力）的换热设备。

通常把燃料的燃烧、放热、排渣等称为炉内过程，把工质的流动、传热、汽水分离、热化学等称为锅内过程。图 2·1-1 为燃烧煤粉控制循环锅炉的工作流程。

锅炉按用途可分为电站锅炉、工业锅炉和船用锅炉，其工作原理基本相同，但各具特点，见表 2·1-1。其中以电站锅炉最为庞大和复杂，技术要求最高。本篇第 1~11 章、14~16 章主要内容为锅炉技术中的共性问题，侧重电站锅炉；第 12、13 章主要内容为工业锅炉、余热锅炉和船用锅炉。

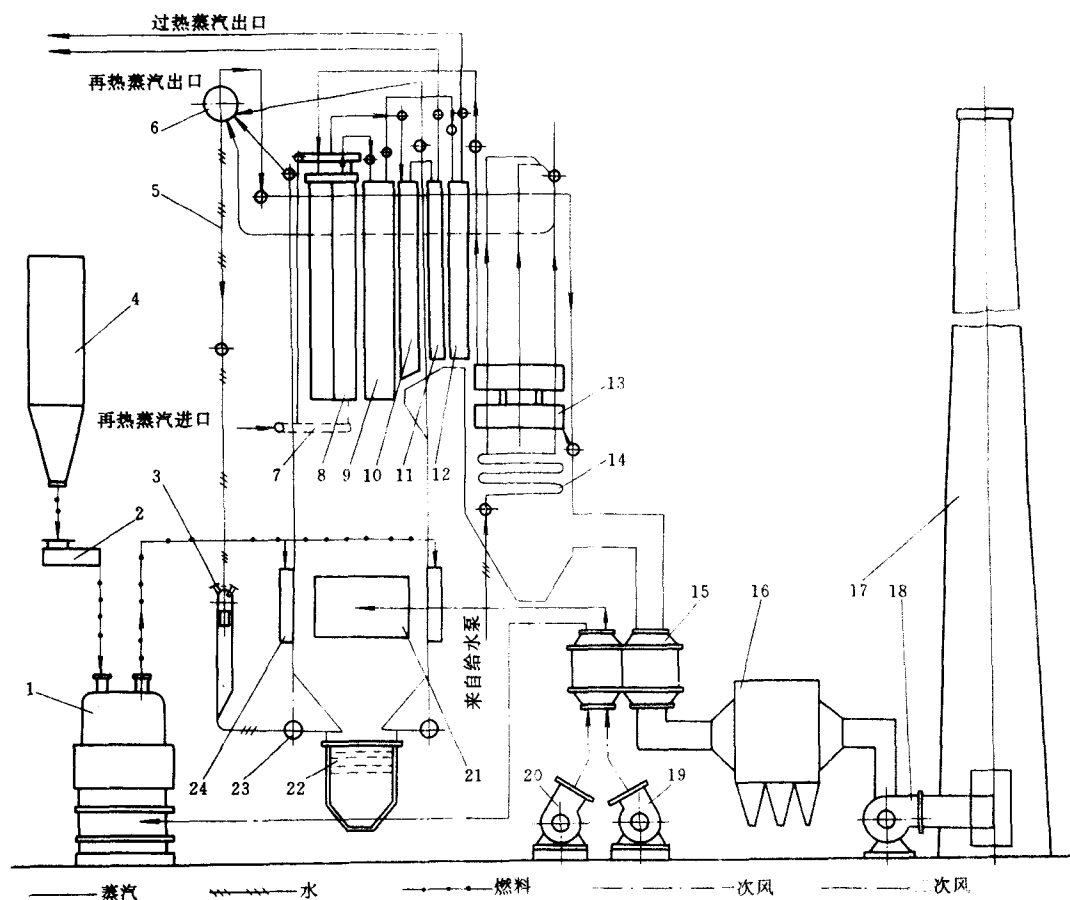


图 2·1-1 燃煤控制循环锅炉的工作流程

- 1—磨煤机 2—给煤机 3—循环泵 4—煤仓 5—下降管 6—锅筒 7—墙式再热器
8—分隔屏 9—后屏 10—屏式再热器 11—末级再热器 12—末级过热器 13—低温过热器 14—省煤器
15—空气预热器 16—静电除尘器 17—烟囱 18—引风机 19—二次风机
20—一次风机 21—大风箱 22—出渣设备 23—下水包 24—燃烧器

表 2·1-1 各类锅炉的主要特点

种 类	主 要 特 点
电站锅炉	用于发电。现代电站锅炉一般为大容量，采用高参数，火室燃烧，适用于各种燃料，热效率高达 90% 左右
工业锅炉	蒸汽（或热水）直接用于工业生产和取暖等。一般为较小容量，采用低参数，火床燃烧，热效率为 70%~90%
船用锅炉	一般采用低、中参数，对体积、质量都有严格要求。炉膛容积热负荷高，水循环回路高度小，以燃油为主

1 锅炉类型及蒸汽参数系列

电站锅炉类型及蒸汽参数系列见表 2·1-2、表 2·1-3。工业锅炉见本篇第 12 章。余热锅炉和船用锅炉见本篇第 13 章。

1. 额定蒸发量 锅炉在额定的蒸汽参数和给水温度下，连续运行时所必须保证的最大蒸发量（国际上称 MCR），一般用符号 D 表示，单位为 t/h。设计时，对定压运行的锅炉应保证在 $(70\sim 100)\%D$ 范围内过热和再热蒸汽的温度达到额定值；对滑压运行的锅炉则保持额定汽温的负荷范围可以扩大。

2. 锅炉最低允许蒸发量 主要取决于燃烧稳定性和水循环安全性。汽压在 3.9~13.7MPa 的自然循环煤粉锅炉，最低允许蒸发量约为 $(30\sim 50)\%D$ ；燃

表 2·1-2 电站锅炉类型

分类方法		名 称		简 要 说 明		
锅 内 过 程	按循环方式	自然循环锅筒锅炉		利用汽水密度差建立工质循环，只能应用在临界压力以下		
		辅助循环锅筒锅炉		利用汽水密度差和循环泵的压头建立工质循环，只能应用在临界压力以下		
		直流锅炉		水一次通过受热面变成蒸汽，用于高压以上		
		复合循环锅炉		带循环泵的直流锅炉，适用于亚临界和超临界压力		
	按锅炉出口蒸汽压力	中压锅炉（3.9MPa）		一般采用自然循环，超高压及超高压以上时都带一次再热		
		高压锅炉（9.8MPa）				
		超高压锅炉（13.7MPa）				
		亚临界压力锅炉（16.7MPa）		各种循环方式均可适用，由技术经济比较确定。应注意防止膜态沸腾和高温腐蚀		
超临界压力锅炉（>22MPa）		采用直流或复合循环。应注意防止类膜态沸腾和高温腐蚀				
炉 内 过 程	按所用燃料或能源	化石燃料	固体燃料锅炉		燃料成分和灰渣特性是影响锅炉设计的主要因素，国产锅炉以燃煤为主	
			液体燃料锅炉		具有较高的炉膛容积热负荷和烟速。为防止低温腐蚀和堵灰，宜采用低氧燃烧并提高进风温度和排烟温度	
			气体燃料锅炉		具有较高的炉膛容积热负荷和烟速。应注意防止燃烧器回火和爆炸	
		原子能锅炉		利用核反应堆所释放热能的蒸汽发生器		
		其他能源锅炉		利用木屑、甘蔗渣、造纸废液、生活垃圾及地热、太阳能等的蒸汽发生器		
		按燃烧方式	火床燃烧锅炉		主要用于工业锅炉	
	火室燃烧锅炉		主要用于电站锅炉			
	旋风炉（分立式和卧式）		燃烧室热负荷高，有利于强化燃烧。液态排渣。液态渣可综合利用			
	沸腾燃烧锅炉		低温燃烧，可进行炉内脱硫			
	按排渣方式		固态排渣锅炉		燃煤锅炉的主要排渣方式	
液态排渣锅炉		应注意防止析铁、炉膛高温腐蚀和产生过量氧化氮（NO _x ）				

(续)

分类方法		名称	简要说明
炉内过程	按炉内烟气压	负压锅炉	有送、引风机，平衡通风，是燃煤锅炉的主要型式
	力	微正压锅炉（2~5kPa）	不需引风机，主要用于液体和气体燃料，适于低氧燃烧，炉墙密封要求高
		增压锅炉（>0.29MPa）	仅用于油、气燃料，配蒸汽-燃气联合循环
布置型式	按炉型等	倒U型、塔型、箱型、D型等	倒U型适用于各种燃料、塔型适用于低质烟煤和褐煤、箱型适用于液体和气体燃料、D型适用于低、中参数
	按电站布置	露天、半露天、室内	以室内或露天布置采用最为广泛

油锅炉约为30%D。从循环安全性考虑，直流和复合循环锅炉的最低允许蒸发量可再低些。

表 2·1-3 我国电站锅炉蒸汽参数系列

蒸发量 (t/h)	出口蒸汽压力 (MPa)					配凝汽式 汽轮发电 机组功率
	3.9	9.8	13.7	16.7~18.3	25.3	
	出口蒸汽温度 (℃)					(MW)
	450	540	540/540①	541/541①		
35②	0					6
65②	0					12
130	0					25
220		0				50
410		0				100
420			0			125
670			0			200
1025				0		300
1900					0	600
2080				0		600

① 分子为过热汽温，分母为再热汽温。
② 仅用于热电联供机组。

2 锅炉的可靠性和经济性

1. 可靠性 与设计、制造、安装质量和运行水平密切相关。一般用连续运行时数、事故率和可用率几项指标来衡量。

连续运行时数=两次检修之间的运行时数

事故率= $\frac{\text{总事故停运时数}}{\text{总运行时数} + \text{总事故停运时数}} \times 100\%$

可用率= $\frac{\text{总运行时数} + \text{总备用时数}}{\text{统计时间总时数}} \times 100\%$

例如石横电厂6号300MW机组1990年的可用率为92.57%。

2. 经济性 主要体现在制造成本和运行性能两

个方面。衡量的指标主要有热效率、钢材耗量和使用寿命。

a. 热效率 这是锅炉最重要的技术经济指标之一，指供给锅炉的全部热量中被有效利用的百分数，用符号η表示。

$$\eta = \frac{\text{有效利用热量}}{\text{供给锅炉的总热量}} \times 100\%$$

锅炉热效率与燃料种类及其特性、燃烧时过量空气的大小，空气预热器进风和烟气出口温度以及锅炉中的结渣和积灰等工况有关。

例如，上海石洞口电厂1号300MW机组的锅炉，其设计效率为91.77%，但运行时做性能试验时实测的效率为91.3%。

b. 钢材耗量 金属耗量是反映锅炉制造成本的技术经济指标之一，但由于锅炉使用的钢材品种、规格繁多，价格差异很大，故即使是钢材耗量完全相同的锅炉其材料成本价格也会不同。因此，它又不是一项绝对的指标。

c. 使用寿命 除设计、制造质量因素外，它与运行方式，诸如起停次数、运行参数，带负荷型式等有很大关系，例如起停过程中锅筒的温度变化疲劳应力、金属管壁的超温运行及腐蚀等。

3 锅炉的发展趋向

1. 排放控制 锅炉燃料在燃烧过程中所产生的尘粒、烟气中的SO₂和NO_x是造成大气污染的主要因素。对尘粒的控制趋于使用高效长寿命的袋式除尘器，或与静电除尘器一起使用。对SO₂和NO_x的控制则根据燃料含硫量、排放标准要求、机组容量及经济等因素分别采用烟气脱硫装置、炉内喷石灰石脱硫和低过量空气燃烧、分级燃烧和低NO_x燃烧器等方法。

2. 提高调峰能力 由于电网的峰谷差日益增大，火电机组趋于带中间负荷，频繁起停，并要求燃煤锅炉

能在20%~30%左右的低负荷下不用油助燃运行。因此对电站锅炉的燃烧设备、锅筒等受压部件及汽水循环系统的设计提出了一系列的要求。对于直流锅炉来说,采用螺旋管圈能较好满足调峰要求。

3. 掌握低质燃料的燃烧技术 我国有大量的低质燃料可用于电站锅炉。主要包括难于着火的无烟煤、贫煤、低热值的烟煤、褐煤及低灰熔点的煤等。燃用这些燃料时主要的困难在于着火不稳、结渣、积灰、磨损和高温腐蚀等。解决的措施一般为开发新型稳燃燃烧器和燃烧方法;加大炉膛尺寸;降低单个燃烧器输入热量;加大燃烧器与炉墙、灰斗和燃烧器之间的距离;降低烟气流速等。也可以在关键受热面上加保护层;过热器、再热器采用复合材料管子和燃料中加入添加剂等方法,以解决高温腐蚀问题。

4. 发展超临界压力参数和增压沸腾床联合循环 发展超临界机组以进一步提高机组循环效率。开发新型的高温耐腐蚀耐磨材料以适应更高参数的要求。与此同时,还应发展运行压力高出大气压10~20倍的增压沸腾床锅炉,并与燃气轮机作联合循环,提高机组

循环效率,减少大气污染。

5. 提高自动化水平 电站锅炉自动控制装置的发展方向是采用以微处理机为基础的分散控制系统来实现数据采集;炉膛安全监察,以提高锅炉运行的安全性;协调控制,将锅炉运行时的各种变量根据负荷需要维持在一定水平;顺序控制。总的来说,自动化的发展是使高参数大容量电站锅炉运行更安全可靠,进一步提高经济性和负荷适应性。

6. 电子计算机辅助设计 广泛采用计算机进行各项性能计算并绘图。进行炉膛流体动力的计算机模拟以确定最佳的燃烧工况、优化炉膛设计,满足日趋严格的锅炉运行性能及环保要求。

7. 综合利用 锅炉燃用高灰分的低质燃料所产生的大量灰渣越来越多地被用于铺路和制造水泥。随着环保要求日趋严格,烟气脱硫装置逐步得到应用,对脱硫过程中产生的副产品和废物(一般为固态硫酸钙和淤泥)应根据技术、经济等因素、分别加工处理后作为墙体材料、水泥生产中的阻滞剂、铺路和筑堤材料等。

第2章 锅炉总体

电站锅炉中,锅炉总体广义称之为“锅炉岛”,除了锅炉本体以外尚包含相应的辅助系统和设备^[1]。

大型电站锅炉的总体设计包含如下主要内容:

(1) 参数及系统的选择。按照所给定的参数、容量及运行方式等,选择热力系统、循环方式、炉型、燃烧方式、燃烧系统、吹灰系统和出渣系统等。

(2) 热力性能设计。包括热力特性、结构尺寸、水动力特性、动态特性、运行安全性和经济性指标等的设计和确定。

对装在高原地区的锅炉,应对烟速、阻力、传热等进行低气压修正。对可能因卡门涡流造成振动的烟道及受热面进行振动核算并采取措施。

(3) 总体布置。按上述系统和性能的要求,进行锅炉各组件和主要辅机的总体布置,以达到锅炉预期热力性能,满足承载抗震、定向膨胀、抗爆、烟气密封、安全运行和检测、检修等要求。

(4) 关键组件结构应力分析。在预定的运行方式下,确定合理的承载结构,特殊件强度核算,受热变形后组件柔度、偏摆、允许推力、寿命预测等计算,以校

核性能设计和结构设计的合理性,确保锅炉在设计条件和寿命期内安全运行。

(5) 部组件设计。可以分为受压件和非受压件的设计。根据各自作用,采用成熟合理的结构,确当选材,满足强度、刚度、稳定性、膨胀和密封等要求,并应易于制造、安装和维修。

(6) 辅助设备的选用。如磨煤机、吹灰设备、各类风机、各类阀门等的选用。

(7) 自控和监测装置的配置。按锅炉的容量等级,配置相应的自控系统。大容量锅炉一般需配置炉膛安全监察保护系统(FSSS或BMS)、吹灰程控系统、定期排污程控系统、预热器泄漏控制系统(LCS)、预热器远红外监控系统、炉膛火焰和锅筒水位的远距离监测等。并能与协调控制系统(CCS)接口,使锅炉具有自动减负荷(RB)、主燃料切断(MFT)和快速切断(FCB)等功能。

(8) 环保措施。按不同燃料种类,应考虑粉尘、SO₂和NO_x排放量的控制。

随着锅炉技术的发展,当前工业锅炉的总体设计,

也按自身特点逐渐考虑了上述有关方面的内容（参见本篇第12章）。

1 影响锅炉总体的因素

主要因素（设计条件）有：

- (1) 地理气象条件，如气温、雨雪量、地震烈度、风载、场地土壤类别、海拔高度等；
- (2) 燃料特性；
- (3) 参数容量；
- (4) 运行模式；
- (5) 用户的特殊要求等。

1.1 燃料特性的影响

燃料特性是指燃料的着火、可燃、结渣（俗称结焦）、积灰和飞灰磨损等特性。它们对锅炉总体设计是至关重要的。为了正确判断这些特性，世界各国已广泛开展了各种测定方法和判断标准的研究。

锅炉总是根据给定的燃料进行设计的，并允许有一定的偏差范围。但如同一台锅炉改用另一类型的燃料（如燃煤改为燃油、烟煤改为无烟煤），将可能会严重影响锅炉的运行经济性、可靠性和寿命。

燃料特性对锅炉设计的影响是多方面的，并且互相关联，见图 2-2-1。

表 2-2-1 列出燃料种类对锅炉总体的一般影响。

图 2-2-2 示出燃料对炉膛大小的影响。

表 2-2-1 燃料种类对锅炉总体的一般影响

项 目	燃 料			
	油、天然气	烟 煤	无烟煤	高水分褐煤
炉膛容积大小	小	中	大	大
炉型（参见图 2-2-14）	D 型、箱型	倒 U 型	倒 U 型	塔型、半塔型、倒 U 型
燃烧器型式（参见图 2-2-16）	旋流、四角切向	四角切向、旋流	四角切向、W 型（U 型）、CUF 型	周向切入
再热汽温调节方式	烟气再循环、喷水	燃烧器摆动	挡板调温、汽-汽热交换器、喷水	喷水、汽-汽热交换器
制粉系统	—	中速磨直吹、球磨乏气送粉	球磨热风送粉双进双出球磨直吹	风磨磨直吹
干燥介质	—	热空气 + 冷空气	热空气 + 冷空气	高温炉烟 + 低温炉烟 + 热空气

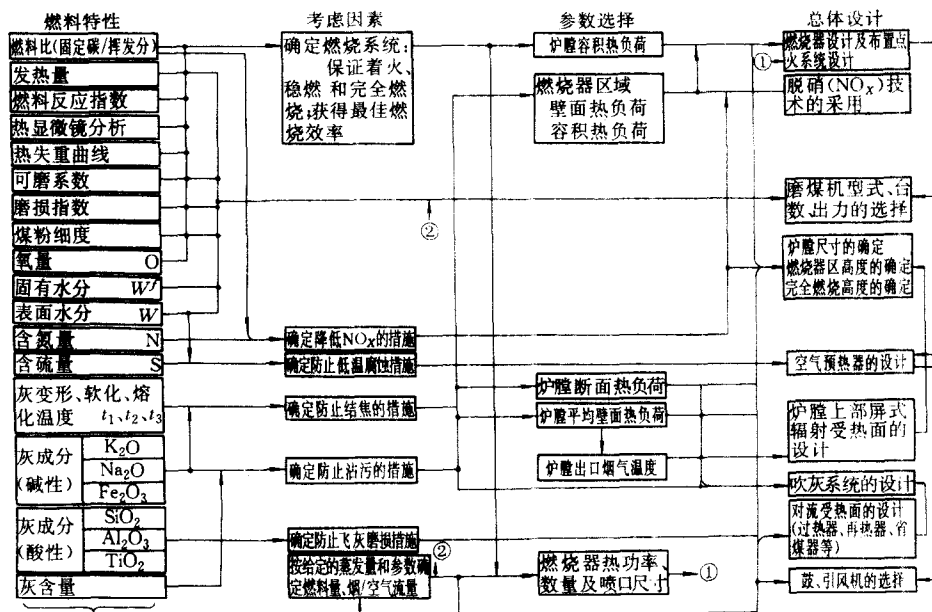


图 2-2-1 燃煤特性对锅炉本体设计和辅助设备选择的一般影响

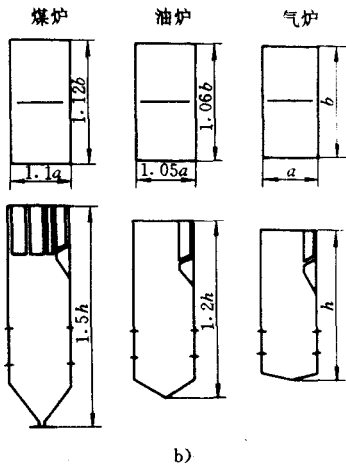
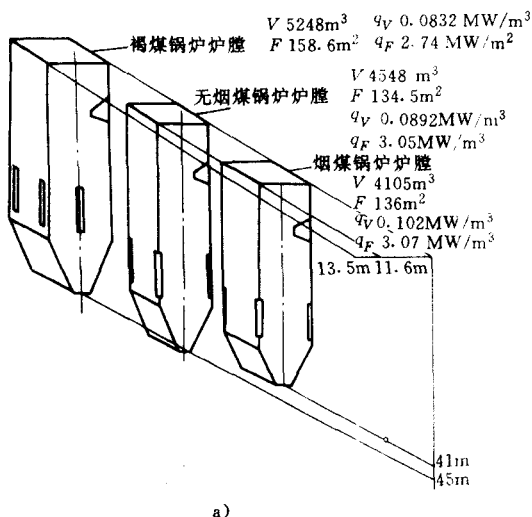


图 2-2-2 燃料对炉膛大小的影响
a) 同一容量 (670t/h) 不同煤种的影响
b) 同一容量, 不同燃料种类的影响

1.2 蒸汽参数的影响

高参数大容量是电站锅炉发展的方向。锅炉的蒸汽参数除了对循环方式的选择 (参见本章 3 节)、是否采用再热系统等有决定性影响外, 还与各级受热面的配置直接有关。锅炉给水要成为过热蒸汽 (进汽轮机高压缸) 和再热蒸汽 (进汽轮机中压缸) 一般需经过加热、蒸发 (汽化)、过热和再热四个过程。不同蒸汽参数下锅炉中工质各过程吸热分配比例不同 (见表 2-2-2), 配置各级受热面时要与之适应。压力愈高, 汽化潜热愈小, 蒸发热量愈小, 达到超临界压力时为零。

工质焓与压力、温度的关系见图 2-2-3。

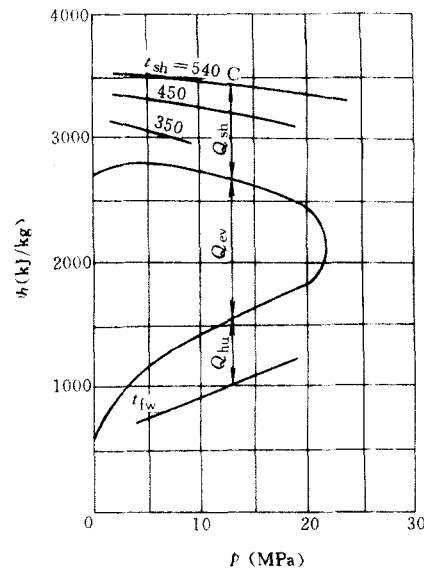


图 2-2-3 工质焓与压力、温度的关系
 p —工质压力 h —工质焓 t_{sh} —过热蒸汽温度
 t_{fw} —给水温度 Q_{sh} —加热热量
 Q_{ev} —蒸发热量 Q_{hu} —过热 (再热) 热量

表 2-2-2 不同蒸汽参数下锅炉中工质各过程吸热量分配比例

蒸汽压力 (MPa)			蒸汽温度 (°C)			给水温度 (°C)	吸热百分比 (%)				注
主出蒸汽口	再热蒸汽进口	再热蒸汽出口	主出蒸汽口	再热蒸汽进口	再热蒸汽出口		加热	蒸发	过热	再热	
1.28	—	—	350	—	—	105	14.4	72.3	—	13.3	低压参数
3.83	—	—	450	—	—	150	17.9	63.4	—	19.7	中压参数
9.81	—	—	540	—	—	215	20.4	49.5	—	30.1	高压参数
13.73	2.6	2.4	540	314	540	240	21.8	33.8	29.8	15.2	超高压参数
16.73	3.65	3.45	540	323	540	262	20.1	32.4	31.3	16.2	亚临界压力参数
18.3	3.83	3.63	541	323	541	282	19.9	29.1	34.7	16.3	超压 5% 亚临界压力参数
25.3	4.78	4.58	541	301	569	286	11.9	—	67.0	21.1	超临界参数

在低压参数小容量锅炉中,以加热和蒸发为主,因此除了炉膛水冷壁外,尚需布置大量对流管束,甚至形成多锅筒结构。由于要求过热温度不高,过热器常布置在较低烟温区以降低材料费用。有时为了降低排烟温度也可设置省煤器,但一般不装空气预热器。

中压参数锅炉,由于工质所需的蒸发热量比例与炉膛辐射受热面的吸热量相适应,蒸发吸热基本上可由水冷壁来完成,而水的加热(有时含一定的蒸发)则由省煤

器来完成。省煤器已成为锅炉不可缺少的组成部分。过热器一般布置在凝渣管后的对流传热区域。由于广泛采用煤粉燃烧,在尾部还设置了空气预热器,根据所需的热风温度可布置成单级回转式或管式空气预热器,也可与省煤器间隔布置成双级管式空气预热器。

高压参数锅炉中,炉膛壁面积增大跟不上容量增大的矛盾尚不显著,故加热、蒸发受热面布置仍与中压参数类似。但由于过热吸热量比例增大,如果只用对流

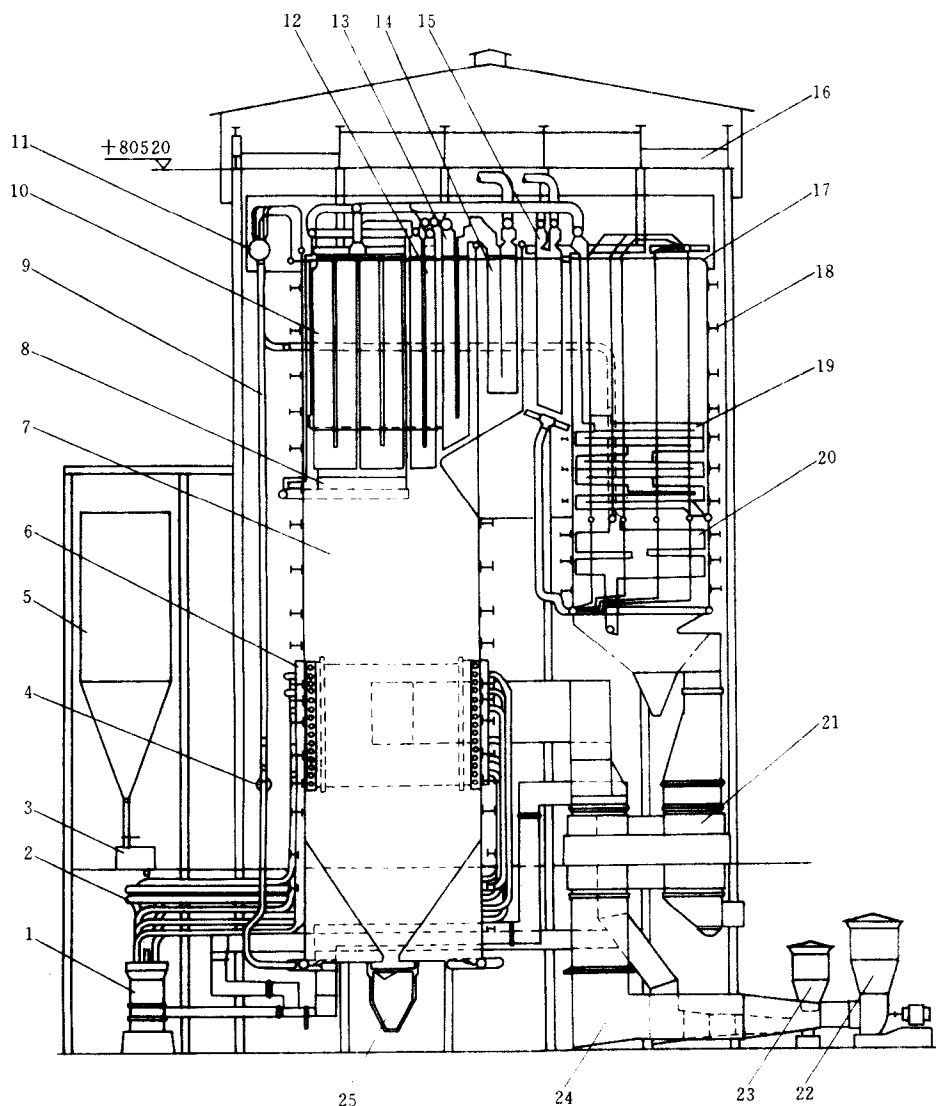


图 2-2-4 2008t/h 亚临界压力辅助(控制)循环锅炉

- 1—磨煤机 2—煤粉管道 3—给煤机 4—循环泵 5—煤斗 6—燃烧器 7—炉膛 8—墙式再热器
9—下水管 10—分隔屏过热器 11—锅筒 12—后屏过热器 13—屏式再热器 14—末级再热器
15—末级过热器 16—钢构架 17—包覆过热器 18—刚性梁 19—低温过热器 20—省煤器
21—回转式空气预热器 22—鼓风机 23—一次风机 24—风道 25—出渣装置

过热器,则消耗钢材过多,布置地位上也往往发生困难,因此尚需在炉膛出口处布置屏式过热器,组成对流-辐射型过热器系统。对于容量 $\geq 220\text{t/h}$ 锅炉,屏式受热面是降低炉膛出口烟温的一项必要措施。

亚临界压力参数一般都应用在大容量锅炉中，炉膛壁面增大不足的矛盾相当突出。在满足燃料燃尽和不产生炉内结渣所要求的炉膛高度和宽度情况下，一般需在炉膛内设置较多的辐射、半辐射式过热器或再热器，甚至水冷屏，以降低炉膛出口烟温到所要求的数值。亚临界压力参数的机组，为了提高电站的循环效率，均需设置再热器。由于过热、再热吸热量比例增大和移向高温区，应更多注意过热器和再热器热偏差和安全性。同时，由于汽水密度差的减少，要特别注意水冷壁冷却可靠，防止膜态沸腾的产生。

水在高于临界压力 (22.14MPa) 下受热时, 不发生沸腾, 不存在汽化潜热, 不产生汽水双相混合物, 从液体 (水) 连续变成气体 (蒸汽)。所以超临界压力参数锅炉必须采用直流锅炉或复合循环锅炉, 其受热面布置类似亚临界压力参数, 但各受热面间热量分配已有明显差异, 水冷壁自下而上介质温度逐步升高, 工作条件更为恶化, 要特别注意防止传热恶化和管间壁温偏差。对过热器和再热器的要求也更高^[2]。

总之,随着蒸汽参数的提高、锅炉容量的增大,对机组可靠性、经济性、可控性、成套性和自控水平等要求也随之提高,相应对锅炉总体的要求也提出更高的标准。

图 2·2-4 为国产配 600MW 的 2008t/h 亚临界压力辅助循环（控制）锅炉。

1.3 运行方式的影响

以前高参数大容量机组在电网中通常带基本负荷。但随着国家经济水平的发展,电网容量的增大,目前及今后要求新投运的大容量机组必须参与电网调峰,以适应负荷大幅度变化和频繁起停的要求,即要按照中间负荷或两班制运行方式进行机组设计。

各种变负荷运行方式见图 2·2-5。

中间负荷机组的锅炉设计除了满足带基本负荷的要求外,还必须考虑由于负荷升降率增大,起停频繁和变负荷循环次数增加(图 2·2-6)带来的可靠性、可控性和快速应变能力等问题。需通过应力分析来验证厚壁元件、管系柔度和承载结构等可靠性;通过动态特性分析和各类试验来验证锅炉总体各子系统和整个动态系统是否具有良好的可控性和快速负荷响应能力。

2 锅炉热力系统

指工质在锅炉各级受热面内的流动顺序；各级受热面沿烟气流程的布置位置及热量分配（焔增）的关系。

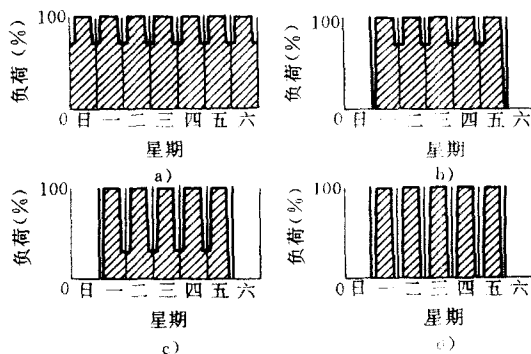


图 2-2-5 各种变负荷运行方式

a) 基本负荷方式 b) 周末停运基本负荷方式

c) 周末停运中间负荷方式 d) 周末停运两班制方式

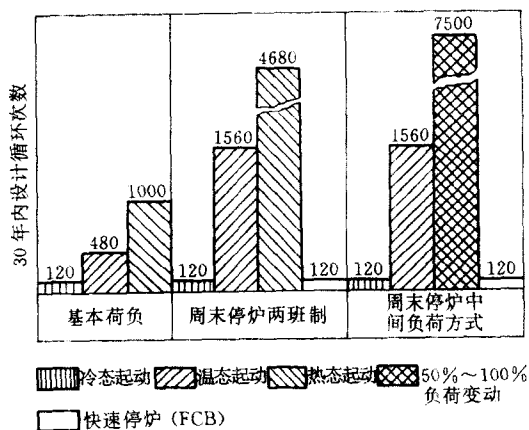


图 2·2-6 国内某电站 300MW 锅炉 30 年

寿命期内的预期运行模式

图 2·2-7 为一亚临界控制循环锅炉实例。

影响锅炉热力系统的主要因素有锅炉参数、燃料特性、循环方式、调温措施、燃烧方式、运行模式以及制造厂技术传统等。

受热面布置时需要考虑: (1) 防止结渣, 良好燃尽和控制炉膛出口温度; (2) 平稳的负荷-汽温特性; (3) 合理选取各级焓增。一般在炉膛内布置辐射受热面, 如水冷壁、墙式和屏式过热器、再热器等; 在炉膛后的低温烟区布置对流受热面, 如过热器、再热器、省煤器、蒸发器及空气预热器等。

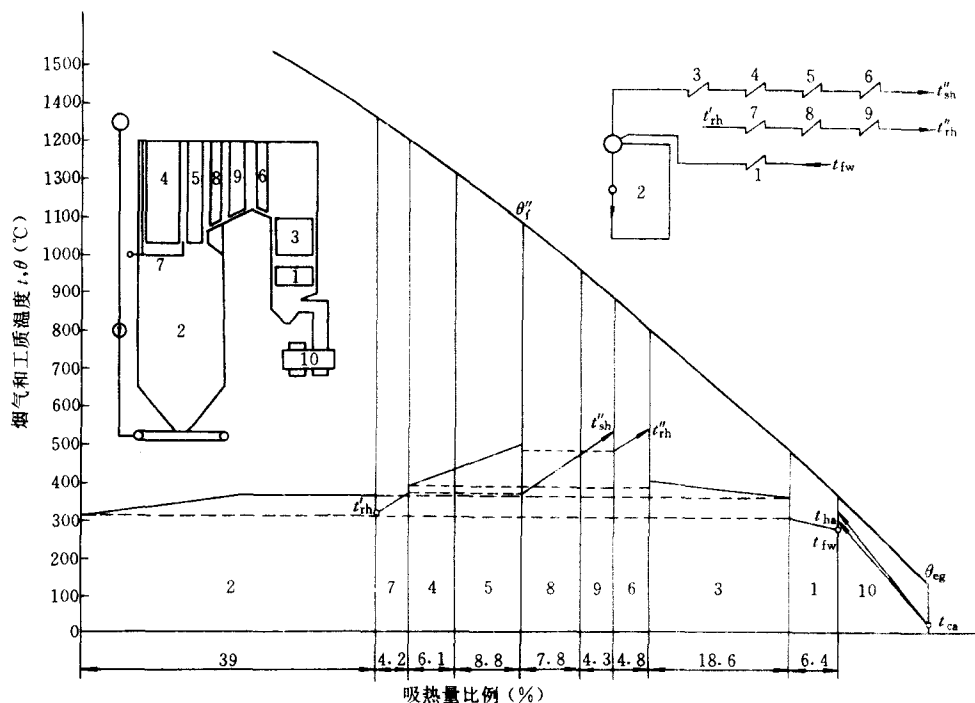


图 2-2-7 1025t/h 亚临界控制循环锅炉

1—省煤器 2—炉膛 3—低温过热器和包覆管 4—分隔屏 5—后屏 6—高温过热器
7—墙式再热器 8—屏式再热器 9—高温再热器 10—空气预热器

θ'_f —炉膛出口温度 θ_{eg} —排烟温度 t_{ca} 、 t_{ha} —冷、热空气温度

t_{fw} 、 t'_{sh} 、 t'_{rh} 、 t''_{rh} —给水、过热器出口、再热器进口、再热器出口介质温度

3 循环方式

工质在炉膛水冷壁中的流动方式称为循环方式，常分为自然循环、辅助循环（控制循环）、直流和复合循环四种，见图 2-2-8。一般根据机组参数、容量、运行模式和技术传统等来选用。

3.1 自然循环锅筒锅炉

主要特点：(1) 水冷壁受热后，依靠水与汽水混合物密度差产生的工质流动（水循环）来冷却。因此锅炉

点火后，循环才得以开始，管内的循环流速随吸热量（负荷）增大而增加；(2) 锅筒是“蒸发”和“过热”的固定分界点；(3) 自补偿能力较强；(4) 锅筒和水冷壁有较大的蓄热和蓄水能力，可允许在给水、燃料和蒸发量之间有短时间的不协调。相对于直流锅炉，自控水平较低；(5) 给水带入的盐分可以在蒸发系统中浓缩和排出，相对于直流锅炉，给水品质要求低些；(6) 厚壁锅筒和较大直径的水冷壁，限制了锅炉的起停速度和调峰能力；(7) 金属耗量较大。

自然循环适用于亚临界压力及以下的锅炉。图

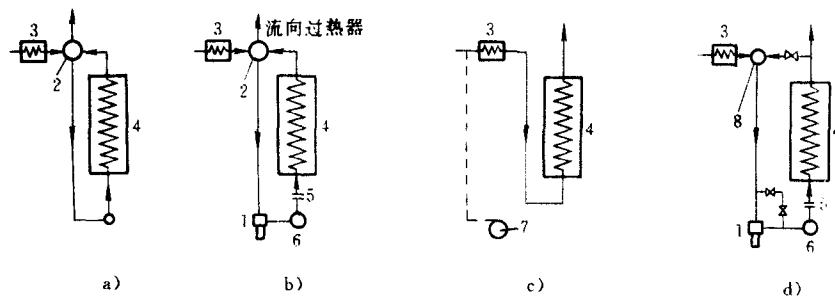


图 2-2-8 蒸汽锅炉的各种循环方式

a) 自然循环 b) 辅助循环 c) 直流 d) 复合循环

1—循环泵 2—锅筒 3—省煤器 4—炉膛水冷壁 5—节流圈 6—分配集箱 7—给水泵 8—混合器

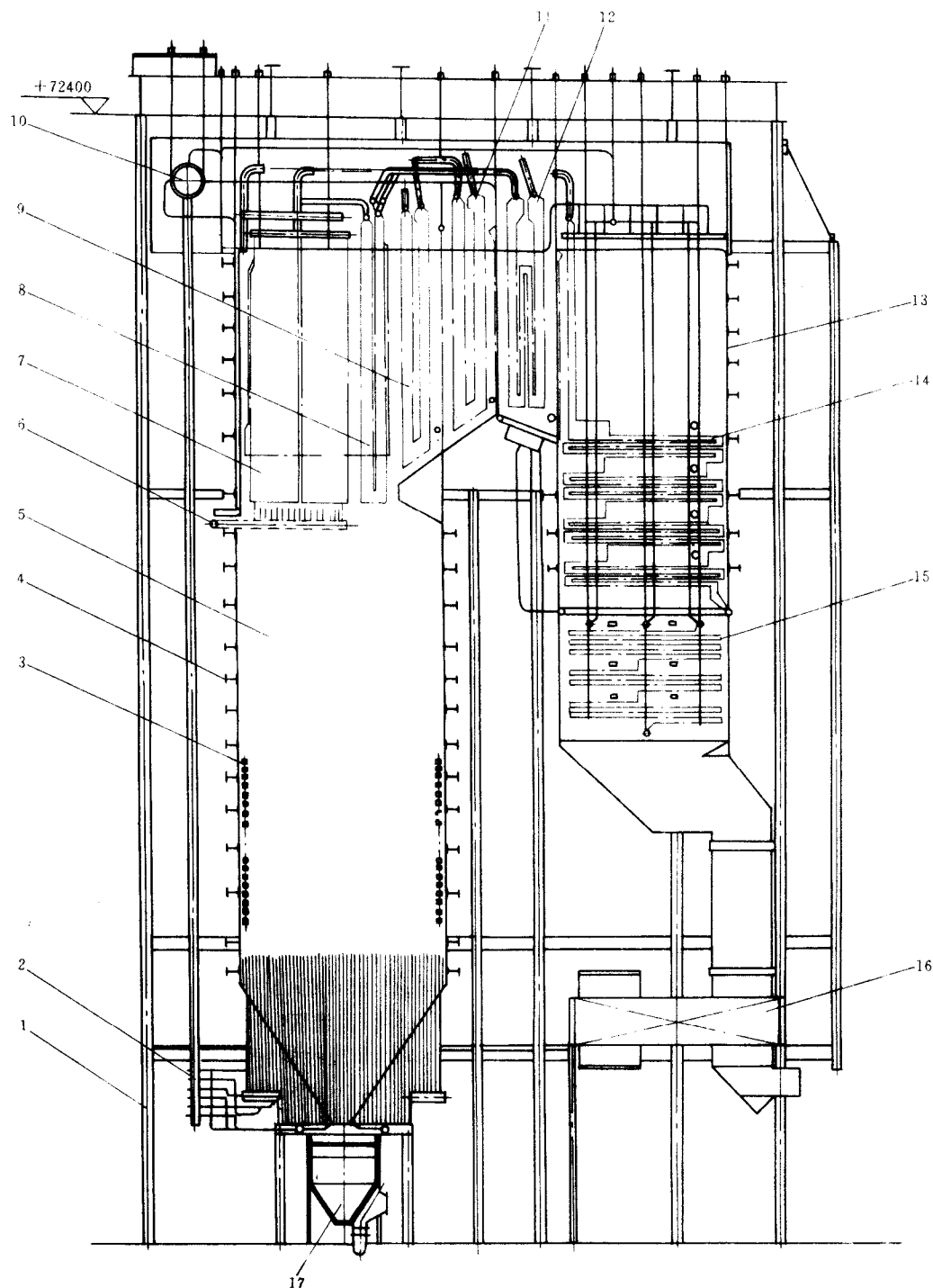


图 2-2-9 300MW, 1025t/h 亚临界压力自然循环锅炉

- 1—钢架 2—下水管 3—燃烧器 4—刚性梁 5—炉膛 6—墙式再热器 7—屏式过热器
 8—后屏过热器 9—屏式再热器 10—锅筒 11—末级再热器 12—末级过热器
 13—包覆过热器 14—低温过热器 15—省煤器 16—空气预热器 17—出渣装置

2·2-9 为配 300MW 机组的 1025t/h 亚临界压力自然循环锅炉。

亚临界压力大容量自然循环锅炉设计时, 需要注意: (1) 由于汽水密度差减小、循环运动压头减弱, 增

加了汽水分离和蒸汽净化的难度；(2)由于容量的增大，使炉膛单位周界长度的蒸发量提高，循环倍率下降，高热区的水冷壁一般需采用内螺旋管以防止膜态沸腾的发生；(3)提高调峰能力；(4)解决锅筒制造、运输和安装中的难题。

已投运的最大自然循环锅炉出口主蒸汽压力为17.3MPa，锅筒压力20.2MPa，主汽流量2350t/h，汽温541/541℃，配720MW机组。

3.2 辅助循环锅炉

辅助循环锅炉是在自然循环基础上发展起来的。在水管系统中设置低压头循环泵，以产生机械外力来补充热力压差，增加循环回路的流动压头（0.25~0.35MPa），见图2-2-10。在每根上升管入口处装有经精确计算的节流孔板，以确保水冷壁充分冷却。70年代后期，将内螺旋管防止膜态沸腾的优越性应用到控制循环锅炉上，称为改良型控制循环锅炉（国外称为CC+型）。提高了可靠性，降低了泵的消耗功率。

主要特点：(1)先循环后点火，停炉后5~6h可入炉检修；(2)循环压头大，锅筒可采用“内夹套”结构，使锅筒上下壁温在任何工况下一致，缩短了起停时间，提高了变负荷速率，有利于带中间负荷和两班制运行；(3)循环系统设计自由，可满足最合适的燃烧要求；(4)循环泵压差变化显示了管内洁净程度，用以监视水质；(5)可加快酸洗速度和质量；(6)循环系统质量较轻；(7)相对于自然循环锅炉，更适宜在亚临界压力下超压5%运行。

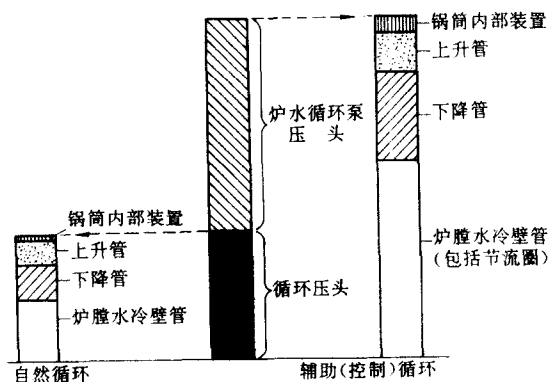


图 2-2-10 自然循环和辅助循环的循环压头和阻力的比较

无轴封湿式电机型循环泵及其系统的工作可靠性是辅助循环锅炉安全运行的关键。设置备用泵是提高可靠性的措施之一。国内外的运行实践已表明由炉水循环泵引起的强迫停机率约为0.06%~0.1%，但由

于减少了循环系统中事故率，锅炉可用率同自然循环相比持平甚至略有提高（≈1%）。

已投运的最大控制循环锅炉，出口主汽压17.3MPa，主汽流量2950t/h，汽温541/541℃，配1000MW机组。

3.3 直流锅炉

依靠给水泵压头，使给水顺序通过各级受热面成为过热蒸汽。适用于各种压力，广泛用于亚临界和超临界参数。

直流炉的主要特点在水冷壁系统的设计，水冷壁内工质从进口到出口，有相当大的温升，出口可达到微过热，相邻管在启动、停运和扰动工况下，可能有较大的温差，因此需要采取相应技术措施来保护水冷壁。与自然循环相比，制造、运输较方便，金属耗量少，热容量小调节反应快，变负荷适应性强，起停快。但因在系统中无法排出给水中杂质，故给水品质要求高；没有锅筒，蒸发和过热没有固定分界点，自控要求较高；汽水系统阻力大，给水泵耗功大。

设计直流锅炉时应注意：(1)防止水冷壁内发生膜态沸腾（亚临界）或类膜态沸腾（超临界），造成管子过热；(2)防止水动力特性不稳定及热偏差过大；(3)提高给水品质，不仅补给水，凝结水也需进行除盐处理；(4)提高自控水平；(5)设置启动旁路系统，减少工质损失和热损失，并满足启动工况的要求。启动系统可以采用循环泵或加热器或疏水扩容器等。

直流锅炉管屏有螺旋围绕、一次垂直上升、多次垂直上升和多程回带等。随着机组向高参数大容量发展，气密性膜式水冷壁的广泛采用，防止传热恶化的内螺旋管技术的应用等，螺旋围绕和一次垂直上升管屏得到了广泛采用。

螺旋围绕管圈具有容量范围广，水冷壁管圈吸热均匀，能按最佳燃烧要求设计炉膛截面和尺寸，故燃料适应性广，水冷壁管冷却可靠，汽水阻力较低等优点。但它的支吊、冷灰斗结构较为复杂，制造和安装工作量较大。

已投运的最大一次垂直上升直流炉（UP炉），出口主汽压力26.4MPa，主汽流量4227~4389t/h，汽温541/541℃，配1300MW机组。

已投运的最大螺旋围绕管圈直流炉，出口主汽压力25MPa，汽温542/567℃，配1000MW机组。

3.4 复合循环锅炉

复合循环锅炉是在直流锅炉和辅助循环锅炉基础

上发展起来的,综合了两者的优点,适用于亚、超临界压力。特点是在省煤器和水冷壁之间设置循环泵,在部分负荷(一般在50%~90%额定负荷以下)时,投入循环泵,使水冷壁系统内除直流流量外还有循环流量;超过此负荷,切除循环泵或“浮动”,锅炉按直流炉方式运行,见图2·2-11。

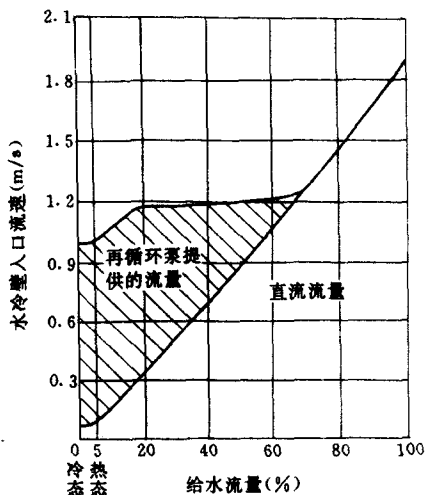


图 2·2-11 再循环系统水冷壁的流量

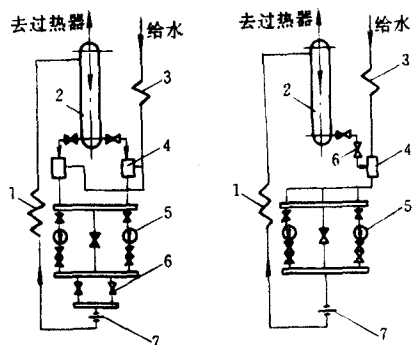
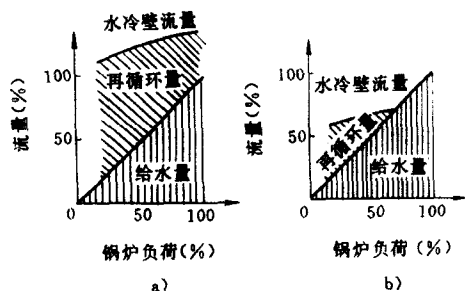


图 2·2-12 亚临界压力复合循环

- a) 全负荷复合循环 b) 部分负荷复合循环
1—水冷壁(蒸发受热面) 2—汽水分分离器
3—省煤器 4—混合器 5—循环泵
6—控制阀 7—节流圈



同直流炉相比,其主要优点是:(1)水冷壁设计质量流速可按循环泵切除时的负荷取用较低值,管径可取得较大,降低流动阻力,减小了给水泵耗功;(2)启动流量低,锅炉的最低负荷可降到约10%额定负荷,简化了启动系统,减少了启动损失,便于滑压运行;(3)水冷壁工质流量和温度变化小,温度应力相应减小,部分负荷时水冷壁冷却条件改善,提高了安全性,可少用甚至不用内螺纹管来防止传热恶化;(4)水冷壁管管径可以取得较大,水冷壁的刚性特别对于中容量锅炉易于得到保证。

复合循环按临界循环负荷率可以分为全负荷复合循环(又称低倍率循环锅炉)和部分负荷复合循环(图2·2-12)。前者常用于亚临界压力,后者常用于超临界压力。

按循环泵在系统中的位置,可以分为串联式(循环泵在系统中与给水泵成串联)和并联式两种(图2·2-13)。

已投运的最大复合循环锅炉,主汽压25MPa,主汽流量3180t/h,汽温543/568℃,配1000MW机组。

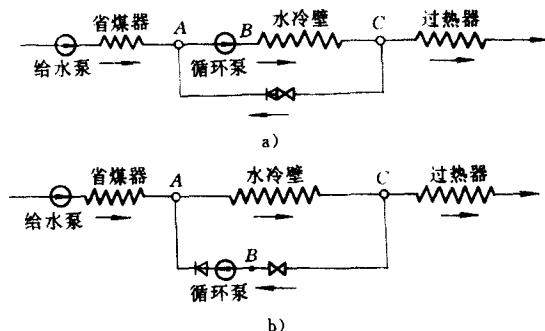


图 2·2-13 复合循环系统图

- a) 串联式 b) 并联式

4 炉型

常用的炉型见图2·2-14。

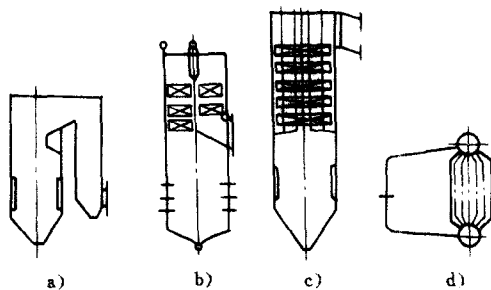


图 2·2-14 常用炉型

- a) 倒U型 b) 箱型 c) 塔型 d) D型

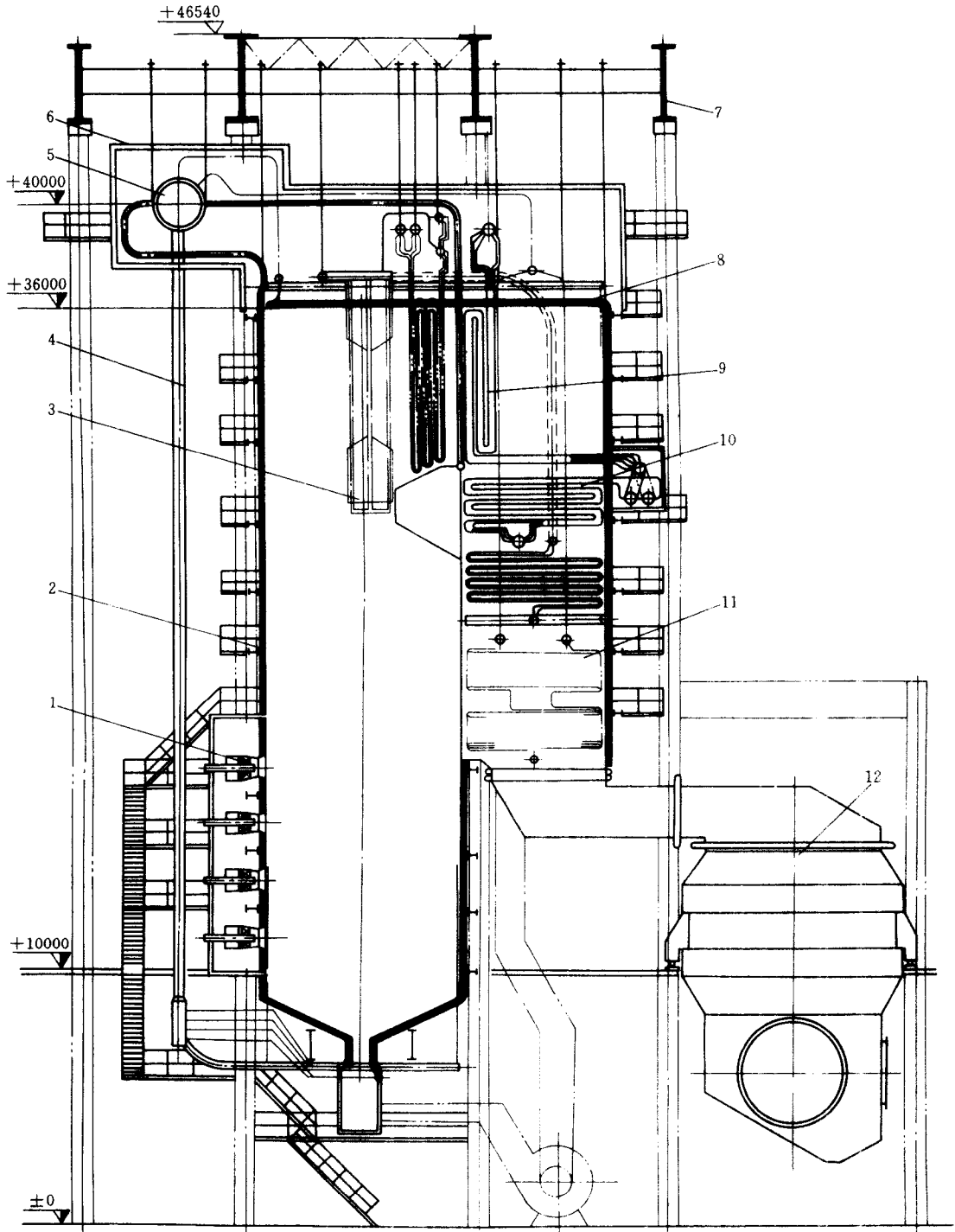


图 2-2-15 670t/h 自然循环锅筒锅炉 (13.7MPa, 540/540°C)

- 1—燃烧器 2—膜式水冷壁 3—屏式过热器 4—下降管 5—锅筒 6—炉顶罩壳 7—构架
8—顶棚过热器 9—对流过热器 10—再热器 11—省煤器 12—回转式空气预热器