

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1-1 概 述	1
§ 1-2 锅炉的工作原理	1
§ 1-3 典型工业锅炉的结构	3
§ 1-4 锅炉的经济性	10
第二章 燃烧过程和工业锅炉燃烧设备	17
§ 2-1 概 述	17
§ 2-2 燃料的燃烧过程	17
§ 2-3 燃料的燃烧计算	22
§ 2-4 工业锅炉燃烧设备的分类及其对燃烧设备的要求	26
§ 2-5 链条炉燃烧过程及设备	29
§ 2-6 其它机械化炉	39
§ 2-7 沸腾炉	43
第三章 锅炉的设计与热力计算	50
§ 3-1 概 述	50
§ 3-2 锅炉受热面的布置和燃烧设备的选择	50
§ 3-3 层燃炉炉膛和辐射受热面设计	52
§ 3-4 层燃炉炉膛辐射传热计算	53
§ 3-5 沸腾炉的布置和炉膛传热计算	60
§ 3-6 对流受热面的设计	69
§ 3-7 对流受热面的传热计算	74
§ 3-8 对流受热面的传热计算的方法	85
第四章 蒸汽锅炉的自然循环和汽水分离	89
§ 4-1 概 述	89
§ 4-2 自然循环原理	89
§ 4-3 自然循环锅炉的水动力计算	92
§ 4-4 水循环故障	101
§ 4-5 工业锅炉自然循环回路设计	103
§ 4-6 蒸汽品质及汽水分离	106
第五章 锅炉受压元件强度计算	115
§ 5-1 概 述	115
§ 5-2 金属机械性能及强度理论	115
§ 5-3 安全系数与许用应力	120

§ 5-4 圆筒形元件强度计算	123
§ 5-5 封头强度计算	131
§ 5-6 孔的加强计算	135
§ 5-7 锅壳式锅炉的强度计算	140
第六章 锅炉的烟、风阻力计算	148
§ 6-1 概述	148
§ 6-2 锅炉自生通风能力计算	150
§ 6-3 烟气、空气流动阻力计算	153
§ 6-4 锅炉烟、风系统总压降计算及风机选择	166
§ 6-5 烟、风道合理布置	172
第七章 热水锅炉	175
§ 7-1 概述	175
§ 7-2 热水锅炉及采暖系统的汽化问题	178
§ 7-3 热水锅炉内水的流动阻力	182
§ 7-4 热水锅炉平行连接管的工作	185
§ 7-5 热水锅炉受热面的水动力特性	188
§ 7-6 自然循环热水锅炉的特性	191
参考文献	197

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

锅炉是把燃料的化学能转变为蒸汽或热水热能的设备。蒸汽是推动火力发电厂汽轮机和其他机械的动力，蒸汽和热水也是很多生产部门（如纺织、化工、造纸、钢铁等）和生活采暖的热源。

固定锅炉可分为电站锅炉和工业锅炉两大类。电站锅炉是火力发电厂三大主机之一，它的容量大、蒸汽参数高，燃烧方式以室燃为主。工业锅炉则用于为生产和采暖提供热源，它的容量小（蒸发量不大于65t/h），蒸汽参数低（压力小于3.9MPa、温度不超过450℃），在我国燃烧方式以层燃为主。电站锅炉和工业锅炉之间没有严格的界限，电站锅炉也向生产和采暖系统供应蒸汽，小型火力发电厂也用工业锅炉的蒸汽作汽轮机的动力。

我国现有的工业锅炉已超过35万台，它们的单机容量小，金属消耗大，运行效率低，每年消耗的燃料约占全国煤总产量的1/3。同时，工业锅炉也是大气污染的重要根源。因此，提高工业锅炉的效率，降低金属消耗和造价，减轻对大气的污染，提高机械化、自动化水平是锅炉工作者的重要任务。

本书主要讲述我国层状燃烧和沸腾燃烧工业锅炉的原理及设计计算方法。

§ 1-2 锅炉的工作原理

为了供出一定数量并具有要求的压力和温度的蒸汽和热水，工业锅炉必须进行着三个主要的工作过程：

燃料燃烧过程：燃料在炉膛内燃烧，释放出化学能，将燃烧产物（烟气）加热至很高的温度。

烟气的流动和传热过程：高温烟气流经锅炉的受热面，并向受热面内的工质传递热量，烟气温度逐渐降低。

锅内过程：工质（单相的水或蒸汽、双相的汽水混合物）在锅内流动，冷却金属受热面，本身被加热、汽化。汽水混合物在锅筒内进行汽水分离。

下面以一台双锅筒横置式链条炉（图1-1）为例，说明工业锅炉的工作过程。

煤经煤仓13进入煤斗，靠重力落到由电动机带动不断向前移动的链条炉排2上，经煤闸板调节煤层厚度后，煤随炉排进入炉膛3，逐渐被加热、着火、燃烧，待燃尽后变为灰渣，最后从炉排末端落入灰渣斗。

送风机9将冷空气送入空气预热器7，被烟气加热后送至炉排下面的风室，然后穿过炉排到达燃料层，和燃料发生化学反应，形成高温烟气。在层燃炉的火焰中心，烟气温度

可达 $1300\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 。高温烟气以辐射传热方式向布置在炉膛四周的水冷壁传递热量，到炉膛出口处，烟气温度降至 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 。烟气离开炉膛后，经凝渣管进入由蛇形管构成的过热器4及与上、下锅筒连接的对流管束5。烟气以对流传热的方式将热量传递给管内的工质，使其温度升高或汽化。经对流管束后，烟气温度已降到 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，再进入锅炉的尾部受热面——省煤器6和空气预热器7。省煤器由直径为 $\phi 32\sim \phi 38\text{mm}$ 的无缝钢管弯制而成，烟气在管外作横向冲刷，将热量传给管内的给水。空气预热器用有缝钢管焊制而成，烟气在管内纵向通过，并传递热量给在管外作横向冲刷的空气。烟气温度降到了 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以下，排出锅炉，最后经除尘器8、引风机11和烟囱12进入大气。

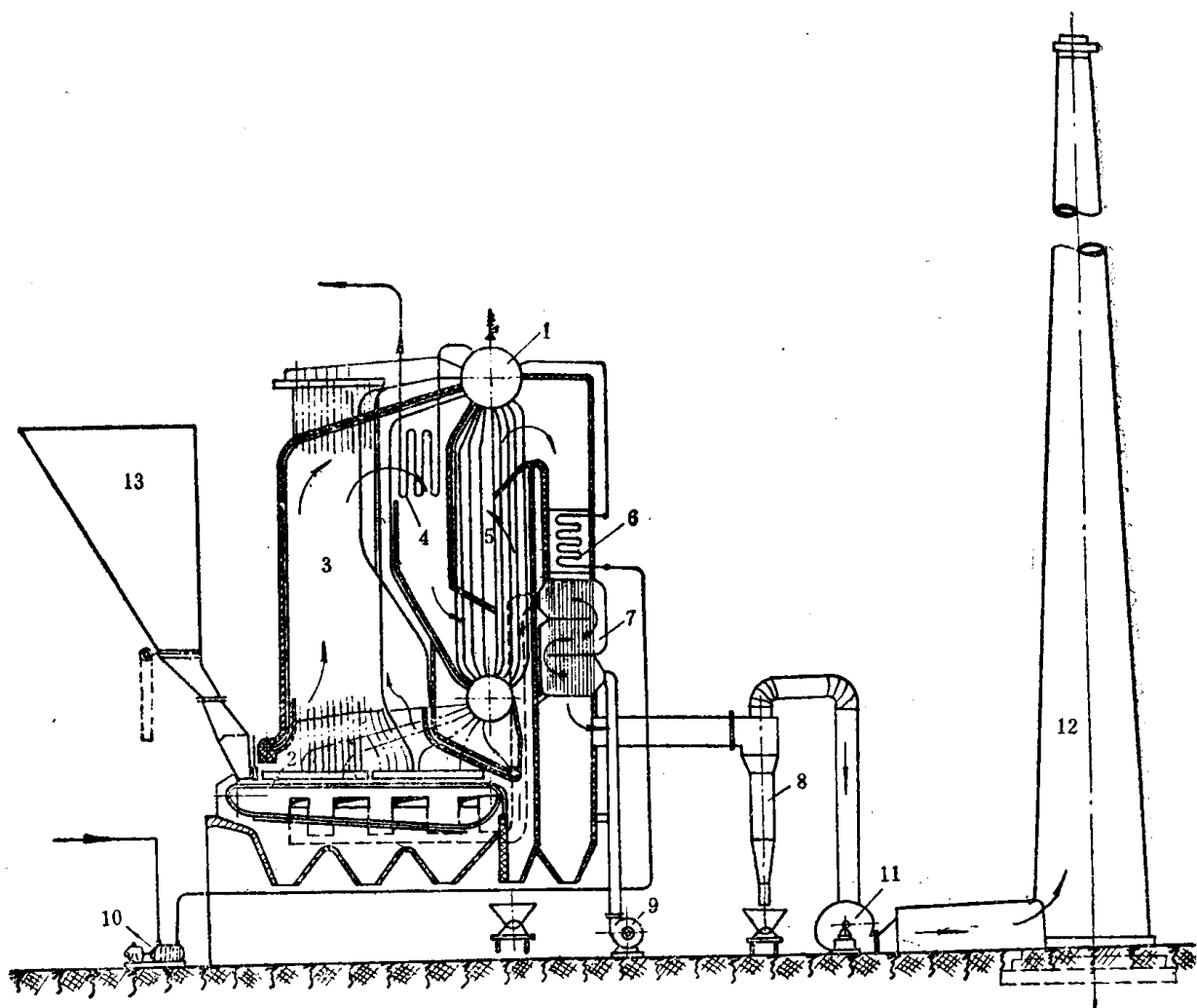


图 1-1 锅炉设备示意

1—上锅筒；2—链条炉排；3—炉膛；4—过热器；5—对流管束；6—省煤器；7—空气预热器；
8—除尘器；9—送风机；10—给水泵；11—引风机；12—烟囱；13—煤仓

给水泵10将给水经省煤器6送至上锅筒1，与锅水混合后从对流管束受热弱的管子向下流入下锅筒，再由下降管进入水冷壁的下集箱。水在水冷壁中吸收烟气的辐射热量，使部分水蒸发，工质变为汽水混合物。由于它的密度比下降管内水的密度小，在重力的作用下，水在下降管内向下流动、汽水混合物在水冷壁管内向上流动，这便是自然循环。在对

流管束中受热弱的管子（产汽量少、工质密度大）和受热强的管子之间也有类似的自然循环。从水冷壁和受热强的对流管束流入的汽水混合物在上锅筒被分离，分离出的水继续进行自然循环，而蒸汽从顶部引出，送至过热器4，在其中被烟气加热到额定温度，最后离开锅炉。

§ 1-3 典型工业锅炉的结构

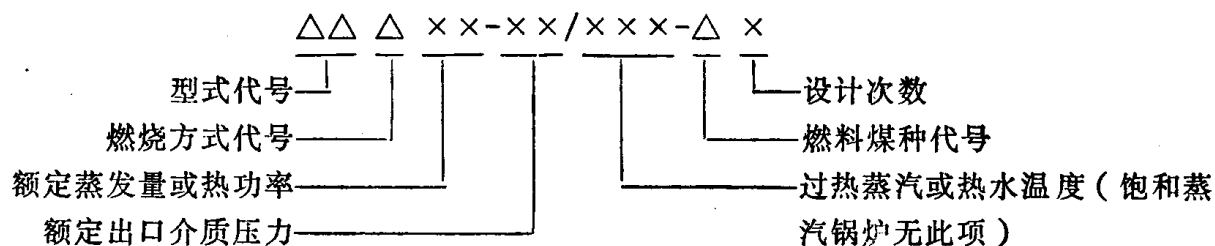
工业锅炉有工业蒸汽锅炉和热水锅炉两种。本节介绍几种典型的工业蒸汽锅炉结构，热水锅炉将在第七章讲述。

根据国家标准GB1921-88，工业蒸汽锅炉的基本参数应符合表1-1的规定。根据实际需要，本书将蒸汽压力扩展到3.9MPa，温度到450℃。

表 1-1 工 业 蒸 汽 锅 炉 基 本 参 数

额定蒸发量 (t/h)	额 定 出 口 蒸 汽 压 力 (MPa) (表压)										
	0.4	0.7	1.0	1.25		1.6		2.5			
	额 定 出 口 蒸 汽 温 度 (°C)										
	饱和	饱和	饱和	饱和	250	350	饱和	350	饱和	350	400
0.1	△										
0.2	△										
0.5	△	△									
1	△	△	△								
2		△	△	△			△				
4		△	△	△			△		△		
6			△	△	△	△	△	△	△		
8			△	△	△	△	△	△	△		
10			△	△	△	△	△	△	△	△	△
15				△	△	△	△	△	△	△	△
20				△		△	△	△	△	△	△
35				△			△	△	△	△	△
65										△	△

我国工业锅炉的型号由三部分组成（JB1626-81），即



锅炉型式代号用两个汉语拼音字母代表，见表1-2。燃烧方式代号用一个拼音字母代表，见表1-3。燃料煤种代号用罗马数字代表，见表1-4。

表 1-2

锅 炉 型 式 代 号

锅壳式锅炉	立 式	火 管	LH(立、火)	水管式锅炉	单 锅 筒	纵 置	DZ(单、纵)
						横 置	DH(单、横)
		水 管	LS(立、水)			立 式	DL(单、立)
	卧 式	外 燃	WW(卧、外)		双 锅 筒	纵 置	SZ(双、纵)
						横 置	SH(双、横)
		内 燃	WN(卧、内)			纵 横	ZH(纵、横)
					强制循环	QX(强、循)	

表 1-3

燃 烧 方 式 代 号

固 定 炉 排	G(固)	链 条 炉 排	L(链)	沸 腾 炉	F(沸)
活 动 手 摇 炉 排	H(活)	倒 转 链 条 炉 排	D(倒)	半 沸 腾 炉	B(半)
抛 煤 机	P(抛)	往 复 推 动 炉 排	W(往)	室 燃 炉	S(室)
下 饲 炉 排	A(下)	振 动 炉 排	Z(振)	旋 风 炉	X(旋)

表 1-4

燃 料 煤 种 代 号

烟 煤	I 类	AI	石煤、煤矸石	I 类	SI
	II 类	AII (烟)		II 类	SII (石)
	III 类	AIII		III 类	SIII
无 烟 煤	I 类	WI	贫 煤	P(贫)	
	II 类	WII (无)			
	III 类	WIII	褐 煤	H(褐)	

一、水火管快装锅炉

这种锅炉是60年代我国设计的一种炉型，型号为KZL(快装链条炉)。在我国生产的小型锅炉中，它占有很大的比例，蒸发量有1t/h、2t/h和4t/h三种。

图1-2为一台4t/h水火管快装锅炉简图。它采用轻型链条炉排。本体受热面由烟管和水管共同组成。连接锅筒前、后管板的烟管是锅炉的主要受热面。锅筒的两侧和后管板布置有水冷壁，它和锅筒的底部构成了锅炉的辐射受热面。烟气有三个回程：燃料燃烧产生的烟气先向炉膛后部流动，从后烟箱的一侧进入第一对流烟管，烟气在烟管内向前流动到前烟箱后，转180°进入锅筒另一侧的第二对流烟管，再向后流动，最后离开锅炉本体。

由于该锅炉采用了水管和烟管的组合，锅炉结构紧凑、外形尺寸小，故均做成为快装锅炉。快装锅炉是将锅炉本体、燃烧设备、炉墙、构架等在锅炉制造厂制做并安装后出厂的。用户只要接通汽、水、烟、风管道，锅炉即可投入运行。设计时，这种锅炉的外形尺寸必须小于铁路运输所允许的最大尺寸。

水火管快装锅炉在我国已使用了20多年，在长期运行中也暴露了一些问题，如该炉结

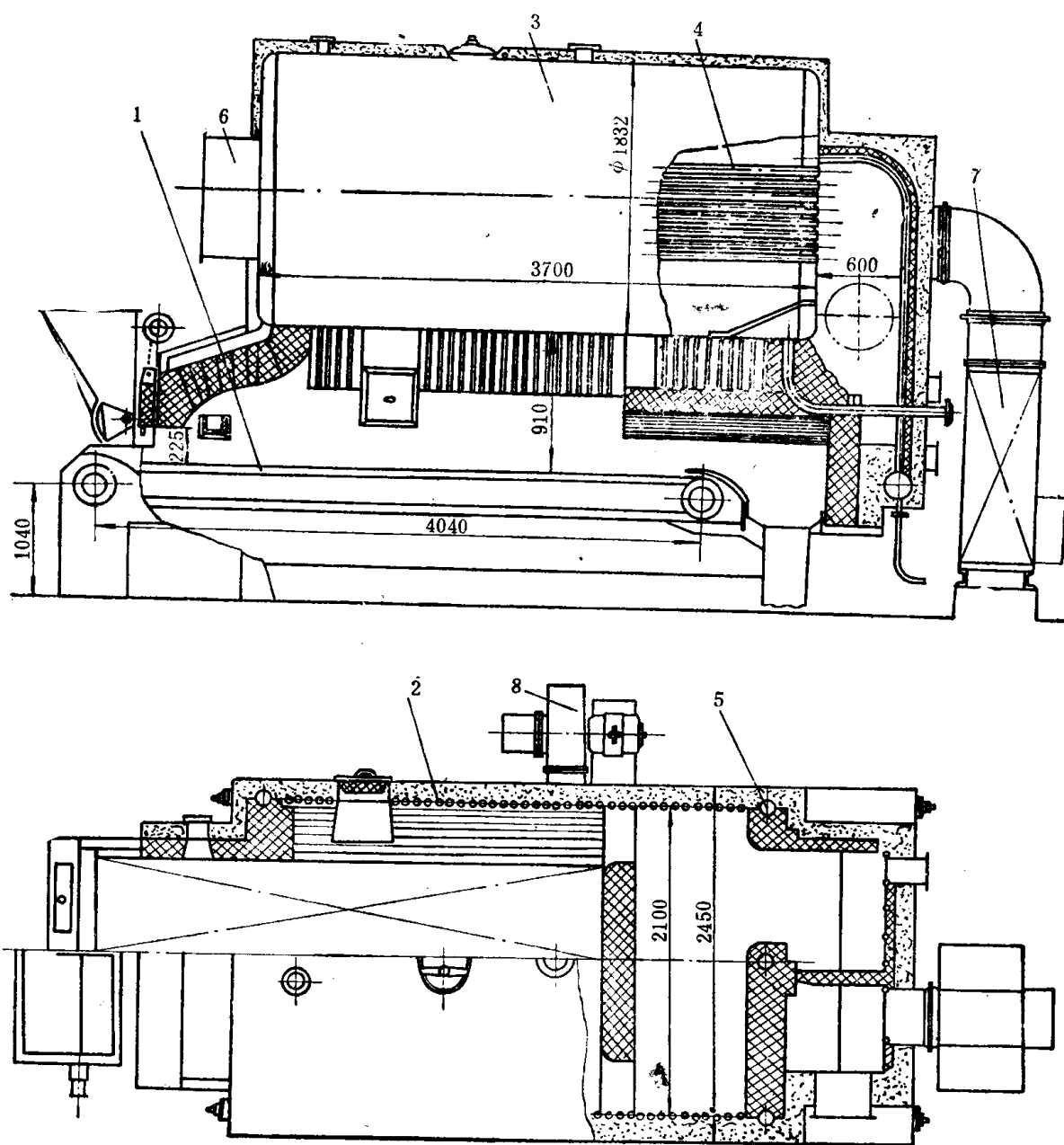


图 1-2 4t/h水火管快装锅炉

1—炉排；2—水冷壁；3—锅筒；4—烟管；5—下降管；6—烟箱；7—省煤器；8—送风机

构过于紧凑、炉膛太低、水冷程度过大，致使锅炉出力不足、实际运行效率低、煤种适应性差。同时，某些结构也不够合理，可靠性差。但这种锅炉在全国各地生产和使用都很广泛，不宜做大的变动。

近几年来，为扩大该锅炉的煤种适应性、保证其出力、提高实际运行效率，已将原KZL系列锅炉完善化，并被DZL（单锅筒纵置式链条炉）取代。完善化后的4t/h水火管快装锅炉主要进行了如下的改进：

（1）增加炉膛高度和后拱长度，将锅筒和炉排之间的距离增加100mm，使后拱的遮盖率由原来的20%增至35%以上，以利于煤的着火和燃烧。

（2）扩大链条炉排面积，由原来的4.5m²增至5.4m²，延长燃料在炉排上停留的时

间。

(3) 增加锅炉受热面积, 烟管受热面由 80m^2 变为 90m^2 , 省煤器受热面由 27.8m^2 增加到 34.75m^2 。

(4) 改进链条炉结构, 加大炉排片厚度、改进侧密封和各风室间的结构, 以减少漏风、漏煤及各风室间的穿风。

(5) 采用新型炉墙及保温层结构, 减少散热损失。

(6) 用双速节能型送、引风机代替老式送、引风机, 新型风机本身效率高, 节流损失小, 也便于调节。

在保证锅炉安全方面也采用了一些相应的措施。

实测说明, 完善化的DZL4-7型水火管快装锅炉在运行中能保证其额定出力, 并有110%的超负荷能力; 对煤的适应性能扩大到II、III类烟煤。同时, 锅炉效率明显提高, 在额定负荷下, 当燃用发热量为 $20160\sim 20580\text{kJ/kg}$ 的烟煤时, 测定热效率大于80%, 排烟温度为 170°C 左右。

二、双锅筒纵置式锅炉

这种锅炉上、下锅筒的中心线垂直前墙, 故称为“纵置式”。图1-3所示为 10t/h 双锅筒纵置式链条炉排锅炉(SZL10-13)。它的右侧为炉膛, 左侧为对流管束, 有时称为“D”型锅炉。炉膛四周布置有水冷壁。前、后墙水冷壁伸入炉膛, 管子上敷有耐火材料, 这便是炉膛的前、后拱。

燃料在炉排上燃烧产生的烟气向上经前、后拱的喉部至炉膛上部, 再经后墙水冷壁拉稀而成的凝渣管进入燃尽室, 然后从左侧的烟窗到对流管束。烟气在第一对流管束内向前流动, 在前端转弯后, 向后流经第二对流管束, 最后经铸铁省煤器和空气预热器排出锅炉。

为使燃料充分燃烧, 链条炉排或往复炉排需要有足够的长度, 炉膛也要有一定的高度。采用“D”型布置的锅炉很容易满足上述要求, 并能使炉膛和对流管束配合得很好。这是因为与纵向布置的上、下锅筒连接的对流管束可以排列成窄长的形状, 这与长的炉排(炉膛)相适应。该种锅炉还有结构紧凑、热效率较高的优点。因此, 它作为中、小容量($2\sim 20\text{t/h}$)的工业锅炉, 得到广泛应用。

三、单锅筒纵置式锅炉

图1-4为 20t/h 单锅筒纵置式抛煤机倒转炉排链条锅炉(DZL20-25/400-A)。上锅筒中心线垂直前墙, 位于炉膛正上方。炉膛两侧的下部有两根直径为 $\phi 325\text{mm}$ 的大集箱, 锅筒和大集箱之间布置有很多管子, 形成两侧对称的对流管束, 呈人字形, 故有时称这种锅炉为“人字型”锅炉(或A型锅炉)。

该锅炉由两台风力抛煤机给煤。它比链条炉的煤种适应性强、负荷调节方便。由于抛煤机将大颗粒的煤抛向炉膛后部, 故采用鳞片式倒转炉排, 燃料随炉排由后向前移动, 逐渐燃尽, 灰渣在前端落入冷灰斗。为使悬浮在炉膛中的碳粒燃尽, 减小排出烟气的黑度, 该锅炉在炉膛内设置后拱, 并在炉膛上方增加了燃尽室。

两侧管束中靠近炉膛的两排管子之间装有耐火材料, 作为炉膛的两侧炉墙, 炉墙内侧

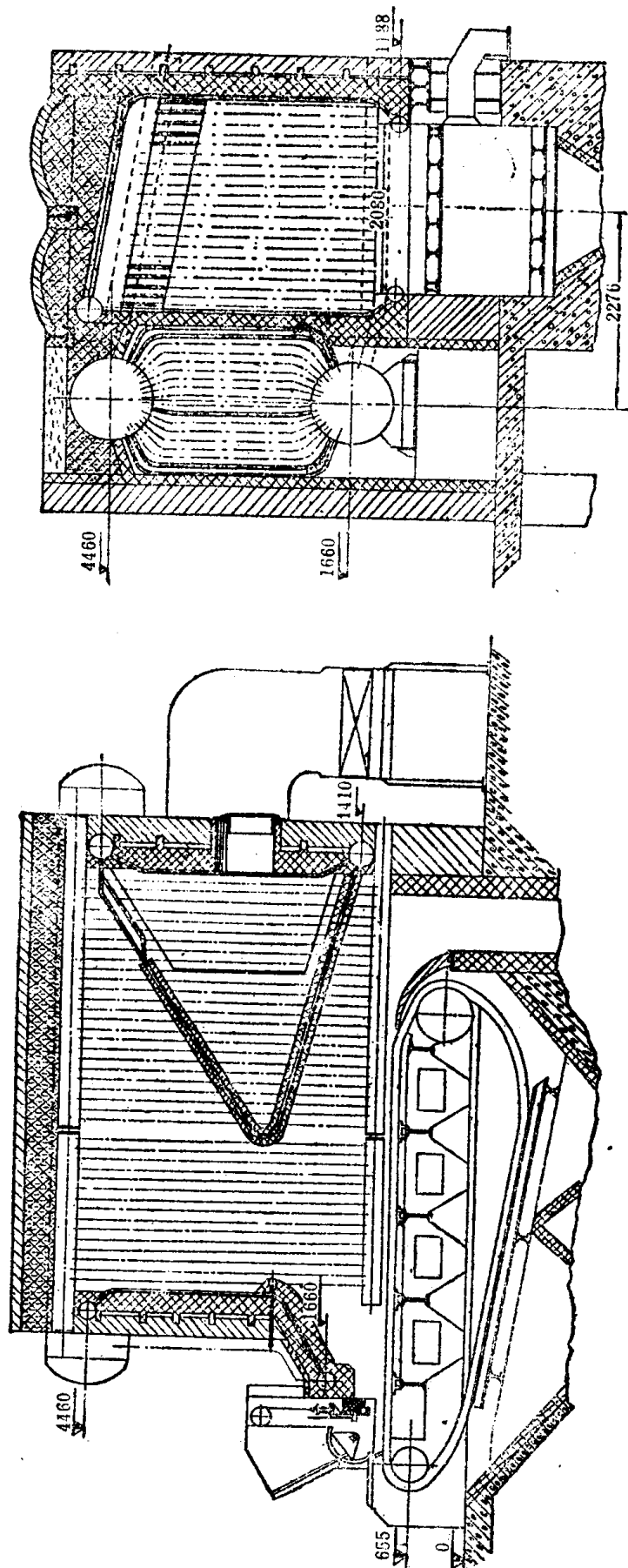


图 1-3 双锅筒纵置式链条炉排锅炉

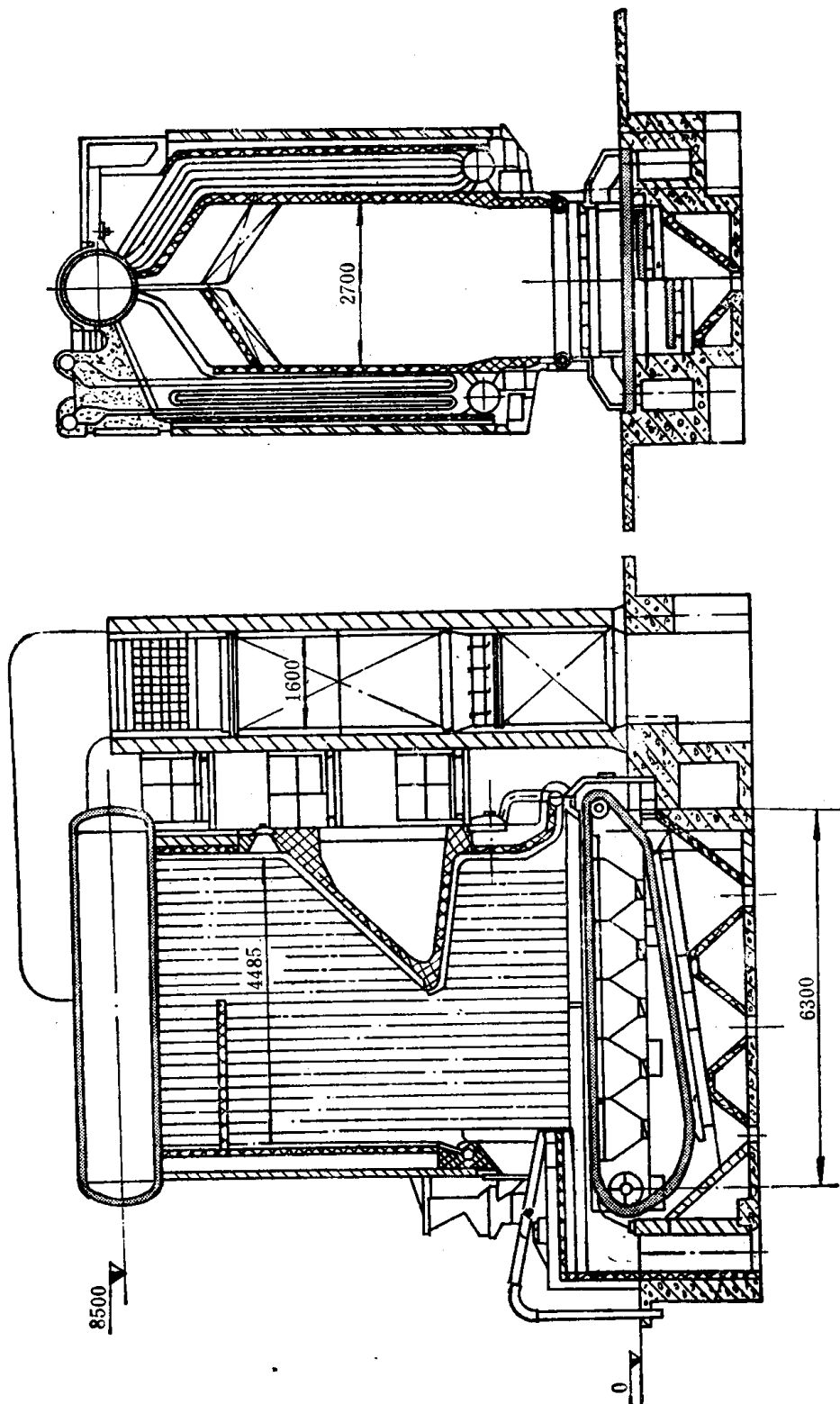


图 1-4 单锅筒纵置式锅炉

的管子就是侧墙水冷壁，外侧的几排管子便是对流管束。

左侧烟道的前部装有过热器，后部布置对流管束。右侧烟道全部为对流管束。烟气在炉膛内向前流动，分两股从靠近前墙的两侧墙上部烟气出口窗进入左右侧对流烟道。烟气由前向后迂回流经过热器和对流管束后，两股烟气在炉顶汇合，最后向下经省煤器和空气预热器离开锅炉。对流烟道内设有挡板，控制其开度，可调节过热蒸汽温度。

这种锅炉只有一个锅筒，两侧对称，故其结构紧凑，金属耗量少，制造也较方便。

四、单锅筒横置式锅炉

图1-5所示为35t/h单锅筒横置式自然循环锅炉，额定出口蒸汽压力为3.9MPa，温度为450℃。

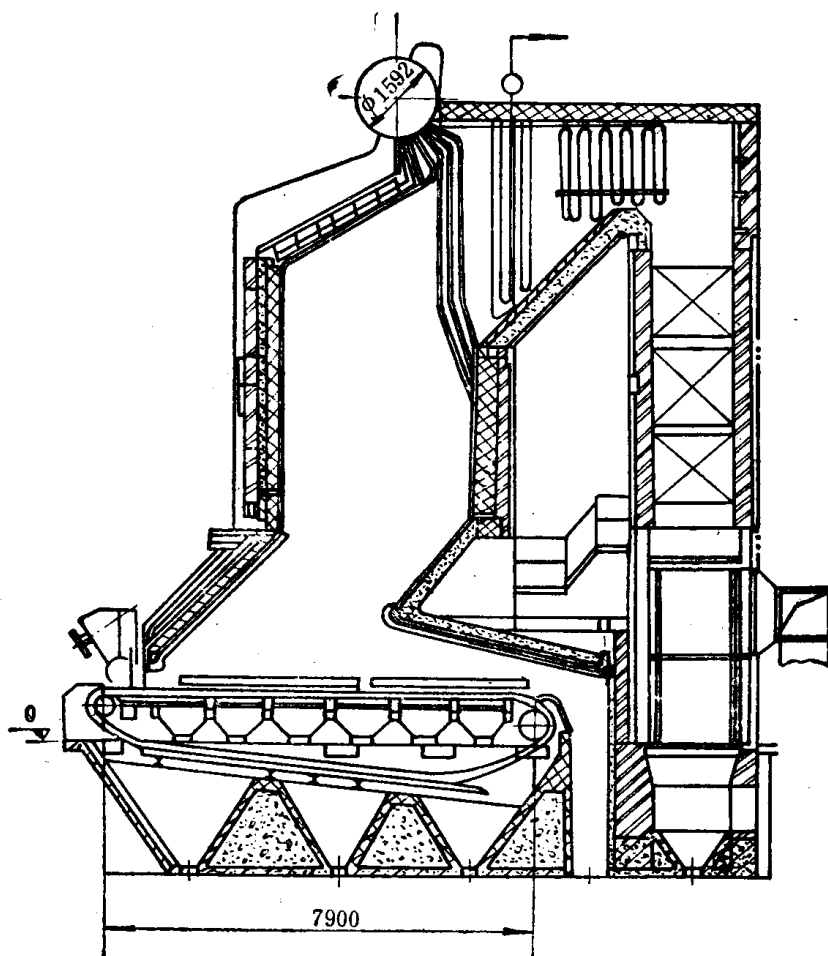


图 1-5 单锅筒横置式锅炉

该锅炉仍使用链条炉排，锅炉整体呈“Π”形布置。前部为四周布满水冷壁的炉膛。水平烟道布置有高、低温段悬挂式过热器，两段过热器之间装有面式减温器。锅炉的后面为尾部烟道，布置有三组串联的沸腾式省煤器和一组管式空气预热器。由于蒸汽参数较高，不必布置对流管束。

五、沸腾床锅炉

我国已有多种沸腾床锅炉产品，图1-6为一台35t/h燃用石煤的沸腾床锅炉。它有两个平行前墙的上、下锅筒，两锅筒之间布置有许多 $\phi 42 \times 5\text{mm}$ 的管子作对流管束。尾部受热

面为一组省煤器和两组空气预热器。

炉膛的下部为沸腾层(段),上部为悬浮段(室)。在沸腾层内布置水平埋管,以控制沸腾层内的温度。炉膛的前墙和两侧墙为重型炉墙,后墙为由 $\phi 60 \times 4.5 \times 80\text{mm}$ 鳍片管组成的膜式水冷壁,它把炉膛和过热器、对流管束隔开。过热器装在炉膛出口的斜烟道内,分高温、低温两级,中间装设面式减温器。

沸腾炉可以燃烧其它燃烧设备上难以燃烧的煤种。图 1-6 所示的锅炉能燃用低位发热量为 $4200 \sim 6300\text{kJ/kg}$ 的石煤,此时锅炉的设计效率为 62.2% 。

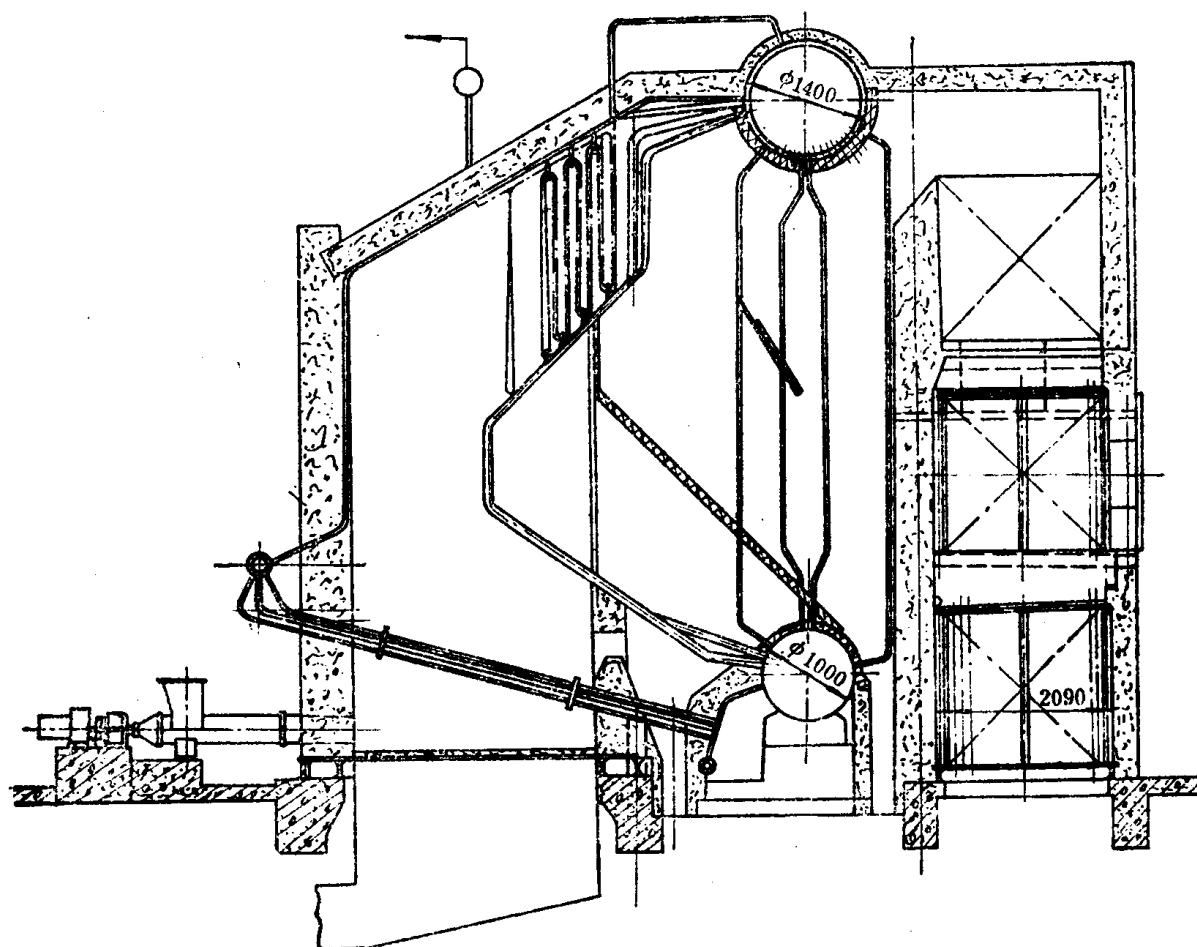


图 1-6 35t/h 沸腾床锅炉

§ 1-4 锅炉的经济性

一台性能优良的工业锅炉除能保证长期安全运行和满足环保要求外,还必须有良好的经济性。锅炉的经济性包括运行费用和制造费用两部分。一般来说,这两者之间是有矛盾的。如为减少燃料的消耗,可采用较大的燃烧空间和较低的排烟温度,但这将使锅炉的钢材及非金属材料消耗量上升,制造费用增加。在进行锅炉设计时,应通过经济技术比较,选用合理的参数,使锅炉在规定的回收期间内运行费用和制造费用的总和最少。

锅炉的制造费用主要取决于金属、非金属的消耗量及制造耗用的工时。这是锅炉设计要解决的问题，将在第三章中讨论。

锅炉的运行费用主要是购置燃料、耗电及工资的费用。在锅炉出力、参数一定时，燃料消耗量取决于锅炉效率。

根据国家标准GB2588-81，热力设备的热效率定义为有效热量占供给热量的百分比。因而，锅炉的热效率就是有效利用热量占输入热量的百分比。锅炉热效率表明了锅炉设备的完善程度和管理水平，是重要的经济技术指标。

一、各主要工业国家锅炉热效率计算方法的比较

各国都有锅炉热效率计算方法，其主要区别如下：

(1) 采用的燃料发热量不同 有的国家（美、法等）用燃料的高位发热量作为计算锅炉热效率的基础。有的国家（苏联、联邦德国等）则利用低位发热量。英、日却规定两种发热量都能用。

(2) 选用的基准温度不同 在计算输入热量和各项热量损失时，需要选定作为起算点的基准温度。美、日采用大气温度或平衡系统进风温度为基准。联邦德国选用25℃，只有苏联以0℃为基准。

(3) 反平衡效率热损失项目不同 各国热损失项目的构成见表1-5。从表1-5中看出，美国ASME标准所列热损失项目最详尽。但有些项目，如炉膛冷灰斗辐射热损失、设备冷却水带走的热损失等数值很小，测量又很困难，美国实际上对这些项目一般也不测量和计算。

苏联和日本的计算包括了各主要的热损失项目，忽略了一些细小的热损失项目。这种计算方法具有简单明了、便于经济性分析的特点。

二、我国工业锅炉热效率的计算方法及提高锅炉热效率的途径

结合我国的实际情况，并吸收了各国计算方法的优点，我国制定了工业锅炉和电站锅炉性能试验方法两个标准，其特点和计算方法如下：

(1) 采用燃料的低位发热量为计算基础 由于工业锅炉排烟温度较高（一般为150~200℃），烟气中水蒸气的汽化潜热在锅炉内不能被利用，因此我国以燃料应用基低位发热量为计算基础。

锅炉的有效利用热量是工质在锅炉内吸收的热量 Q_1 ，它等于供出工质的总焓与给水焓之差，按下式计算：

对于生产过热蒸汽的工业锅炉

$$Q_1 = D(h_{gr} - h_{gs}) + \frac{p}{100} D(h_{bh} - h_{gs}) \quad \text{kW} \quad (1-1)$$

对于生产饱和蒸汽的锅炉

$$Q_1 = (D + D_{gs})(h_{bh} - h_{gs} - \frac{r\omega}{100}) + \frac{p}{100} D(h_{bh} - h_{gs}) \quad \text{kW} \quad (1-2)$$

对于热水锅炉

$$Q_1 = m(h_2 - h_1) \quad \text{kW} \quad (1-3)$$

表 1-5

各国锅炉反平衡效率中热损失的项目

序号	损失项目	美国 ASME	中国 GB、JB	苏联 1977 年方法	联邦德国 DIN	英国 BS	日本 JIS
1	干排烟气损失	1	1	排烟损失 Q_1	干排烟物理热损失	排烟热损失	排烟热损失
2	燃料中水分损失	2	2				
3	氢燃烧生成水损失	3	3	Q_1 (排烟损失)			
4	空气中水分损失	4	4				
5	雾化蒸汽的损失	5	5				
6	吹灰损失						
7	低位发热量计算时的 2、3 项						
8	气体不完全燃烧损失 (CO)	8	8	Q_2 (化学未完全燃烧损失)	不完全燃烧损失	7 水蒸汽的物理热损失	气体中不完全燃烧损失
9	气体不完全燃烧损失 (H_2)	9	9	Q_2 (气体未完全燃烧损失)	燃烧产物的未燃部分损失	未完全燃烧损失	
10	气体不完全燃烧损失 (C_mH_n)	10	10				
11	炉渣损失		11				
12	粗灰损失		12 (沉降灰)				
13	细灰损失		14 (飞灰)	Q_3 (机械未完全燃烧损失)	未燃部分损失	灰渣未燃部分损失	灰渣未燃部分损失
14	粉灰损失						
15	专门干燥剂中灰损失						
16	漏煤损失		16				
17	石子煤损失		17				
18	辐射损失	18 表面辐射与对流损失	18 散热损失 Q_4	Q_4 (散热损失) (灰粉大时计入 Q_1)	18 辐射、传导、对流损失 (系统)	18 辐射损失 (系统范围)	18 散热损失 (本体)
19	灰渣物理热损失		19 灰渣物理热损失 Q_5		19 炉渣和灰分的物理热损失	19 炉渣物理显热损失	灰渣物理热损失 (自 1964 年以来, 按下列值取定: 燃煤锅炉: 1.5% 重油锅炉: 1.0% 其中包括本体以外的散热损失)
20	燃料物理热	20 (加入热量为正值)					
21	空气物理热						
22	灰渣冷却水损失	22 灰汁中水温上升产生的损失		Q_5 (灰渣物理热损失)	(加入热量为正值)	22 灰渣冷却水损失	
23	灰冷却水损失	23 灰斗中水蒸发产生的损失			23 其它部分冷却水带走的热损失	23 灰中冷却水损失	
24	送、排风、疏水、泄漏损失						
25	冷却水带走的损失	25 冷却水吸收的热损失					
26	炉排下降时带走的损失						
27	辅机损失	27 (加热为正值)					
28	不明部分的损失					28 不明部分损失	28 不明部分损失

上三式中 D 、 D_{sv} 、 m ——锅炉蒸发量、自用饱和蒸汽量和热水锅炉循环水量, kg/s;

h_{gr} 、 h_{bh} 、 h_{gs} ——工作压力下, 过热蒸汽、饱和蒸汽、给水的焓, kJ/kg;

ω 、 p ——蒸汽湿度和锅炉排污率, 对于工业锅炉, 一般 $\omega=1\%\sim 3\%$,
 $p=3\%\sim 5\%$;

r ——汽化潜热, kJ/kg;

h_2 、 h_1 ——热水锅炉的热水焓和回水焓, kJ/kg。

输入锅炉的热量主要是燃料带入锅炉的热量, 因而用正平衡计算锅炉热效率 η 的公式, 即

$$\eta = \frac{Q_1}{BQ_r} \times 100 \% \quad (1-4)$$

式中 B ——燃料消耗量, kg/s;

Q_r ——1kg燃料输入热量, 燃煤工业锅炉可近似地认为就是煤的低位发热量, 即

$Q_r \approx Q_{rl}$, kJ/kg。

(2) 采用环境温度作基准温度 如取某一定值 (25°C 或 0°C) 为基准温度, 虽可便于不同锅炉热效率的比较, 但不符合实际情况。我国采用环境温度为基准温度, 即符合实际也比较简单, 这是因为进入锅炉的空气和燃料处于环境温度下, 其显热可不必计算。

为便于不同锅炉热效率相互比较, 在锅炉设计时, 以一固定温度为基准温度。对于工业锅炉, 一般取 20°C 。在做锅炉热效率试验时, 用入口风温为基准温度。当它与设计工况的数值有偏差时, 需进行热效率的修正。

(3) 锅炉热损失项目 为兼备实用、简明而又完善的特点, 我国热效率的计算方法中热损失由五项构成 (表1-5), 锅炉反平衡热效率 η 按下式计算:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \% \quad (1-5)$$

1) 排烟热损失 q_2 : 离开锅炉的烟气, 其焓值高于基准温度下进入锅炉的空气焓, 便形成了锅炉的排烟热损失。按下式计算:

$$q_2 = \frac{H_{py} - \alpha_{py} H_{lk}^\circ}{Q_r} (100 - q_4) \% \quad (1-6)$$

式中 H_{py} 、 H_{lk}° ——锅炉的排烟焓和基准温度下进入锅炉的理论冷空气焓, kJ/kg;

α_{py} ——排烟处的过量空气系数。

排烟热损失是锅炉各项热损失中最大的一项。它主要取决于排烟处的烟气温度和过量空气系数。排烟温度每升高 $12\sim 15^\circ\text{C}$ 或排烟处的过量空气系数增加 0.1 , q_2 将提高约 1% 。

为减小 q_2 , 在锅炉运行中应防止受热面结垢和结渣, 尽量减少受热面的积灰, 以降低排烟温度。同时, 应控制炉膛的送风量和减少烟道的漏风, 以降低排烟处的过量空气系数。

设计锅炉时, 选用较低的排烟温度可减少排烟损失。但排烟温度过低将使尾部受热面传热温差减小, 势必使金属消耗量、制造费用增加。应通过经济技术比较确定最佳的排烟温度。图1-7表示了确定最佳排烟温度的方法。

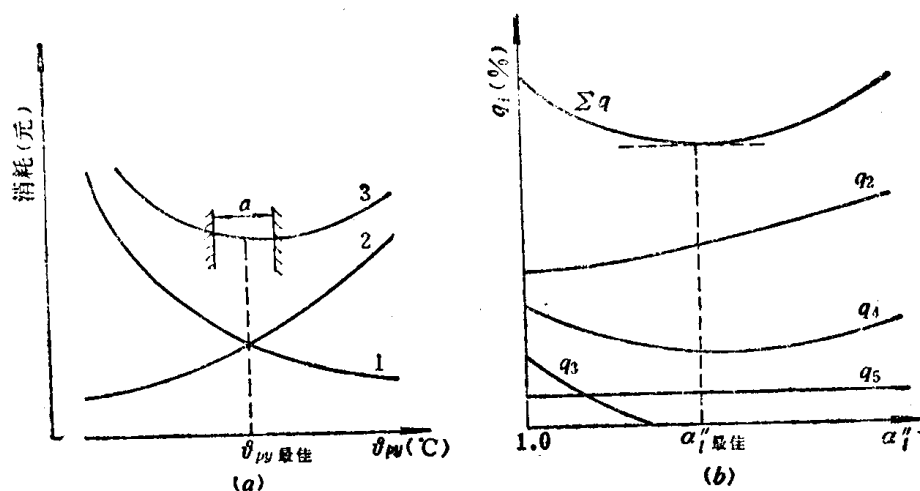


图 1-7 确定最佳排烟温度 θ_{pu} 和最佳过量空气系数 α'_i 的方法

(a) 最佳 θ_{pu} ; (b) 最佳 α'_i

1—受热面的消耗; 2—燃料的消耗; 3—总的消耗;

a—推荐的最佳排烟温度区域

设置尾部受热面的工业锅炉, 排烟温度不宜低于 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。进行工业锅炉设计时, 可在下列范围内选取: 当蒸发量 $D < 10\text{t/h}$ 时, 取 $140\sim 180^{\circ}\text{C}$; 当 $D = 10\sim 20\text{t/h}$ 时, 取 $130\sim 170^{\circ}\text{C}$; 当 $D > 20\text{t/h}$ 时, 取 $120\sim 160^{\circ}\text{C}$ 。对于高硫分、高水分的燃料, 为减轻受热面的低温腐蚀, 应选用较高的排烟温度。

2) 气体(化学)不完全燃烧损失 q_1 : 烟气中含有未燃尽的可燃气体(如 CO 、 H_2 、 CH_4 等), 其热量未放出被排出锅炉, 造成的热损失就是 q_1 。在燃煤工业锅炉中, 未燃尽的气体主要是 CO 。

对于运行的锅炉, 气体不完全燃烧损失可通过烟气分析, 测出烟气中各种气体容积百分比求得, 计算公式为

$$q_1 = \frac{263(C' + 0.375S')}{Q_r} \cdot \frac{\text{CO}}{\text{RO}_2 + \text{CO}} (100 - q_2) \% \quad (1-7)$$

式中 C' 、 S' ——燃料应用基的碳和硫, %;

CO 、 RO_2 ——一氧化碳和二氧化碳加二氧化硫的容积百分比, %。

气体不完全燃烧损失与燃料的性质、燃烧设备的型式、炉膛温度及过量空气系数等因素有关。在正常情况下, 燃煤锅炉的 q_1 数值不大。在设计锅炉时, 可根据燃料和燃烧设备的型式选取:

对于链条炉和往复炉排锅炉, 当燃用烟煤、褐煤时, q_1 为 $0.5\% \sim 2\%$, 对贫煤、无烟煤, q_1 为 $0.5\% \sim 1\%$;

对于抛煤机炉, 各种煤的 q_1 均为 $0.5\% \sim 2\%$;

对于沸腾炉, 当燃用石煤和煤矸石时, q_1 为 $0 \sim 1\%$, 对其他煤, q_1 为 $0 \sim 1.5\%$ 。

3) 固体(机械)不完全燃烧损失 q_4 : 在锅炉的灰渣、飞灰和层燃炉的漏煤中, 均有未燃尽的燃料颗粒, 它的热量没有放出, 形成了固体不完全燃烧损失。对于运行的锅炉, 它可通过测量灰渣、飞灰和漏煤的质量和含碳量来计算:

$$q_4 = \frac{33727}{Q_r} \left(\frac{G_{hz} C_{hz} + G_{fh} C_{fh} + G_{lm} C_{lm}}{100 B} \right) \times 100 \% \quad (1-8)$$

式中 G_{hz} 、 G_{fh} 、 G_{lm} ——单位时间内灰渣、飞灰和漏煤的质量, kg/s;

C_{hz} 、 C_{fh} 、 C_{lm} ——灰渣、飞灰和漏煤中的含碳量, %;

33727——1kg纯碳的发热量, kJ/kg。

飞灰很难收集和称重, 因而常借助于灰平衡来求 q_4 。对于层燃炉, 可按下式计算:

$$q_4 = \frac{33737 A^y}{Q_r} \left(\frac{C_{hz}}{100 - C_{hz}} a_{hz} + \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} a_{fh} + \frac{C_{lm}}{100 - C_{lm}} a_{lm} \right) \% \quad (1-9)$$

$$a_{hz} + a_{fh} + a_{lm} = 1$$

式中 a_{hz} ——灰渣中的灰占煤中总灰的份额, $a_{hz} = \frac{G_{hz}(100 - C_{hz})}{B A^y}$;

a_{fh} ——飞灰中的灰占煤中总灰的份额, $a_{fh} = 1 - a_{hz} - a_{lm}$;

a_{lm} ——漏煤中的灰占煤中总灰的份额, $a_{lm} = \frac{G_{lm}(100 - C_{lm})}{B A^y}$;

A^y ——燃料应用基灰分。

对燃煤工业锅炉来说, q_4 是主要的热损失项目, 一般为8%~15%。影响 q_4 的因素有燃料的性质、燃烧方式和过量空气系数等。

设计锅炉时, 可根据燃烧方式和燃料种类在下列范围内选取: 对于链条炉和抛煤机炉, 烟煤取8%~12%; 无烟煤取10%~15%。对于往复炉排, 褐煤、贫煤和II类烟煤取7%~10%; I类烟煤和I类无烟煤取9%~12%。对于沸腾炉, I类烟煤取12%~17%; 褐煤取5%~12%; 石煤或煤矸石取15%~27%。

从上面的讨论看出, q_1 、 q_2 和 q_4 均与过量空气系数有关。若炉膛出口过量空气系数 α_1' 过小, 虽然 q_2 较小, 但燃料由于得不到充足的氧气 q_1 和 q_4 会增大。相反, 若 α_1' 过大, 将使 q_2 增大。同时, 由于炉温会降低, q_4 也会增大。因此, 应该通过燃烧调整试验, 找出使 $(q_2 + q_3 + q_4)$ 最小的 α_1' (最佳 α_1' 见图1-7)。运行中, 应该使锅炉实际的过量空气系数接近最佳 α_1' 。最佳 α_1' 在下列范围:

链条炉和往复炉排锅炉: 1.3~1.5; 抛煤机炉: 1.3~1.4; 沸腾炉: 1.1~1.2。

4) 散热损失 q_5 : 锅炉的炉墙、钢架、锅筒、集箱的表面温度高于环境温度(基准温度), 这将有热量散失到大气中去。其大小主要取决于锅炉的表面积和温度, 即

$$q_5 = \frac{A_s \alpha_s (t_s - t_0)}{E Q_r} \times 100 \% \quad (1-10)$$

式中 A_s ——散热表面积, m²;

α_s ——散热表面放热系数, kW/(m²·K);

t_s 、 t_0 ——散热表面温度和环境温度, °C。

设计工业锅炉时, q_5 可按表1-6查取。从表1-6中看出, 随着锅炉容量的增加, q_5 减小。这是由于外表面积相对减少引起的。工业锅炉容量小, 故散热损失较大。

当锅炉不在额定负荷下运行时, q_5 也会变化。当锅炉实际蒸发量 D' 和额定蒸发量 D 相差大于25%时, 实际散热损失按下式计算: