

锅炉原理及计算

清华大学电力工程系锅炉教研组 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书介绍了中、大型锅炉原理及计算。内容包括锅炉的热力计算,受热面布置,燃烧设备,水的自然循环,汽水分离设备,强制循环及直流锅炉,空气动力计算,强度计算,炉墙等基本原理及计算方法。通过较多的实例,说明了所介绍的原理及计算方法。此外,还列有附录,编入了锅炉设计计算中必要的资料和数据。

本书可供锅炉工作者及高等院校锅炉专业师生参考。

锅 炉 原 理 及 计 算

清华大学电力工程系锅炉教研组 编著

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

衡 阳 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1979年9月第一版 开本: 787×1092 1/16

1979年9月第一次印刷 印张: 33 3/4

印数: 00001—36,120 字数: 790,000

统一书号: 15031·236

本社书号: J434·15—6

定 价: 3.45 元

前 言

本书介绍了中、大型锅炉的工作原理及计算方法,是在清华大学锅炉专业多年使用的教材的基础上编写而成的。

全书共十三章,包括热力计算、燃烧设备、蒸汽净化、水的自然循环、强制循环锅炉及直流锅炉、空气动力计算、锅炉钢材及强度计算、炉墙和构架等内容。

为便于自学,本书编入了较多的实例。通过这些例题,读者可以较具体地理解所介绍的基本原理和掌握所介绍的计算方法。为便于初学者联系实际,本书内容的编排次序大致与一般锅炉设计进行的顺序相同。书末列有附录,比较系统地给出了某130[吨/时]油炉的热力计算、空气动力计算、水循环计算、强度计算的例题。此外,也适当地编入了锅炉计算中所必需的资料和数据,可供从事锅炉设计、制造、运行和检修人员参考。

本书的编写得到哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂、北京锅炉厂、吴泾热电厂、杨树浦电厂、北京热电厂、高井电厂等单位的大力支持,并提供了有关资料,有的单位还对初稿提出了宝贵的意见。在此,我们表示衷心的感谢。

限于我们的水平,书中一定会有不少缺点和错误,希望读者指正。

清华大学电力工程系锅炉教研组

一九七六年七月

目 录

第一章 绪论	1
1-1 锅炉的容量、参数	1
1-2 锅炉蒸汽参数对锅炉型式、受热面布置的影响	2
1-3 锅炉的总体布置	7
1-4 锅炉设计的步骤	10
第二章 辅助计算与炉膛设计	11
2-1 燃料数据的分析和整理	11
2-2 空气平衡	16
2-3 空气和烟气的体积和焓温表	19
2-4 锅炉效率和燃料消耗量的估算	24
2-5 煤粉炉和油炉炉膛的设计	28
2-6 炉膛中辐射受热面的设计	32
第三章 炉内传热计算	39
3-1 炉内传热的基本概念	39
3-2 炉内传热的基本方程式及上海锅炉厂研究所固态排渣煤粉炉炉内传热计算方法	40
3-3 炉内传热相似理论解法	46
3-4 水冷壁的灰污系数、热有效性系数及炉膛黑度	54
第四章 对流受热面的传热计算	57
4-1 对流受热面传热计算的基本概念	57
4-2 温压的计算	57
4-3 传热系数	61
4-4 烟气侧对流放热系数	63
4-5 灰污系数、热有效性系数和利用系数	74
4-6 烟气辐射放热系数	77
4-7 工质侧对流放热系数	80
4-8 对流受热面的传热计算	80
4-9 上海锅炉厂研究所对流受热面的传热计算方法	87
4-10 屏式受热面的传热计算	89
4-11 转向室的传热计算	96
4-12 锅炉的热力计算	97
第五章 对流受热面的设计	101
5-1 对流蒸发管簇和凝渣管簇的设计	101
5-2 过热器的任务、基本型式及运行特性	103
5-3 过热蒸汽温度的调节	104
5-4 过热器的管壁温度和过热器受热面所用的钢材	109
5-5 过热器的热偏差	111
5-6 过热器的设计	116

5-7	再热器(中间过热器)的设计	123
5-8	省煤器的设计	126
5-9	空气预热器	131
5-10	管式空气预热器	132
5-11	回转式空气预热器	137
5-12	省煤器和空气预热器的配合	142
5-13	排烟温度的选择	147
5-14	对流受热面的腐蚀及其防止	148
5-15	对流受热面中的烟气流速	153
第六章	煤气和重油的燃烧	160
6-1	锅炉燃烧设备的概述	160
6-2	煤气燃烧原理	161
6-3	煤气燃烧器	171
6-4	重油燃烧原理	176
6-5	重油的雾化	180
6-6	重油燃烧器的配风器的型式和原理	189
第七章	煤粉燃烧	203
7-1	煤粉燃烧的特点	203
7-2	煤粉制备	207
7-3	旋流煤粉燃烧器及其布置	234
7-4	直流煤粉燃烧器	238
7-5	煤粉燃烧器的选用和计算	251
7-6	炉膛热负荷的选用	260
7-7	液态排渣炉和旋风炉	266
第八章	蒸汽的净化	271
8-1	概述	271
8-2	排污及分段蒸发	272
8-3	汽水分离	279
8-4	蒸汽的清洗	285
8-5	汽包汽水分离内件的选择及布置	286
第九章	自然循环锅炉的水循环	290
9-1	水循环及其计算的基本概念	290
9-2	下降管流阻及其计算	293
9-3	汽水混合物的重度及运动压头的计算	296
9-4	上升管的流阻和有效压头	304
9-5	水循环计算的图解	309
9-6	影响水循环安全的一些因素的分析	310
9-7	水循环故障的表现及其验算	316
第十章	强制循环锅炉及直流锅炉	325
10-1	强制循环锅炉	325
10-2	直流锅炉的工作特点	333
10-3	我国直流锅炉的发展	336

10-4	直流锅炉蒸发受热面的流动特性	343
10-5	直流锅炉蒸发受热面的膜态沸腾问题	359
10-6	直流锅炉炉膛辐射(蒸发)受热面的结构型式	367
10-7	直流锅炉的水力计算	372
10-8	直流锅炉的水工况	373
10-9	复合循环直流锅炉	376
第十一章	锅炉的空气动力计算	383
11-1	概述	383
11-2	锅炉烟、风道的流阻计算	384
11-3	锅炉受热面的阻力计算	396
11-4	自生通风力计算	405
11-5	送、吸风机的选择与调节	408
第十二章	锅炉受压元件钢材及强度计算	411
12-1	概述	411
12-2	锅炉中钢材的工作条件	411
12-3	金属的机械性能	412
12-4	锅炉钢材在制造和运行中的性能	413
12-5	锅炉钢材的种类、牌号及其应用情况	420
12-6	安全系数与许用应力	424
12-7	受热面管子的强度计算	425
12-8	汽包和联箱的强度计算	430
12-9	凸形封头的强度计算	434
12-10	圆形平端盖和平堵头的强度计算	436
12-11	孔的加强计算	436
第十三章	锅炉的炉墙和构架	442
13-1	锅炉炉墙及其结构	442
13-2	炉墙材料及其性能	449
13-3	炉墙的传热计算	456
13-4	膜式水冷壁鳍片温度的计算	461
13-5	锅炉构架和平台、扶梯	463
附录 I	130[吨/时]中参数燃油锅炉的热力计算例题	469
附录 II	对流过热器的管壁温度计算	501
附录 III	130[吨/时]中参数燃油锅炉的水循环计算例题	507
附录 IV	130[吨/时]中参数燃油锅炉的空气动力计算例题	522
附录 V	130[吨/时]中参数燃油锅炉的强度计算例题	528

目

第一章 绪 论

在解放前,由于帝国主义的侵略和掠夺,我国只能制造结构简单的小型锅炉,生产的数量也很有限。

解放后,在第一个五年计划期间,我国建立了上海、哈尔滨等锅炉厂,并开始制造中、高参数的中型、大型电站锅炉。1955年我国制出40[吨/时],配六千千瓦汽轮机的中参数(40[大气压],450[°C])的链条炉,到六十年代已开始设计制造二十万千瓦,670[吨/时]超高参数(140[大气压],540[°C],再热到540[°C])的锅炉。近年来,锅炉工业又取得了更大的进展,已设计制造出935[吨/时],配三十万千瓦汽轮机的亚临界参数(170[大气压],570[°C],再热到570[°C])的直流锅炉,并正在设计更大容量的锅炉。在小型工业锅炉方面也设计制造出各种容量的快装锅炉和散装锅炉。在有关锅炉的科学研究上也取得了不少的成果。我国的锅炉研究机构在大量实验的基础上开始提出我国自己的锅炉热力计算方法。在锅炉的设计和计算中已开始采用电子计算技术。在燃烧方法上,来自群众的沸腾燃烧方法已广泛地用于燃烧某些燃料,在沸腾炉的结构和燃烧改进的研究上取得了不少的成果。现在正向设计制造更大容量、更高参数的锅炉发展。

1-1 锅炉的容量、参数

表 1-1 中列出了我国锅炉的容量和参数的系列。

表 1-1 我国锅炉的容量、参数系列

参 数			容 量 [吨/时]	备 注
蒸汽压力 [表大气压]	蒸汽温度 [°C]	给水温度 [°C]		
6	饱和	20	0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1, 1.5, 2, 3	
8	饱和	20	0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1, 1.5, 2, 3, 4	
13	饱和 250 300 350	50 (100)	1.5, 2, 3, 4, 6.5, 10, 15, 20	20 以上未定
(16)	350 375	100	6.5, 10, 15, 20	20 以上未定
25	400 420	100	6.5, 10, 15, 20	20 以上未定
39	450	172	35, 65, 75, (120), 130, (240)	

(续表)

参 数			容 量 [吨/时]	备 注
蒸汽压力 [表大气压]	蒸汽温度 [°C]	给水温度 [°C]		
100	510 540	215	230 220, 410	
140	540/540* 555/555*	240	670 400	200,000 千瓦 125,000 千瓦
170	555/555* 540/540*	320	1000 1980	300,000 千瓦 600,000 千瓦

* 再热蒸汽温度。

我国习惯上称蒸汽压力在 13[大气压] 及以下的锅炉为低参数锅炉, 25 到 39[大气压] 的锅炉为中参数锅炉, 100 [大气压] 的锅炉为高参数锅炉, 140 [大气压] 为超高参数锅炉, 170[大气压] 为亚临界参数锅炉, 225[大气压] 以上为超临界参数锅炉。

由表 1-1 还可看出, 小容量锅炉一般采用低参数, 中小型锅炉采用中、高参数, 容量更大的锅炉采用超高参数、亚临界参数, 甚至采用超临界参数。

1-2 锅炉蒸汽参数对锅炉型式、受热面布置的影响

锅炉的型式从汽水流动的情况来分可以分为: 自然循环锅炉、强制循环锅炉、直流锅炉三种。自然循环锅炉中汽水主要靠水和蒸汽密度的差别而循环流动。锅炉工作压力愈低, 这个差别愈大, 循环比较可靠。在锅炉为高、超高参数锅炉时, 只要适当地设计锅炉的循环回路, 汽水循环还是可以很可靠的, 甚至在锅炉采用亚临界参数时, 虽然汽包中压力已达 185[大气压] 左右, 水和蒸汽密度差别已比较小, 只要很好地掌握炉内辐射传热的分布规律, 合理地设计循环系统, 还是可以把锅炉制成自然循环的型式。不过在参数高时, 汽包壁要设计得很厚, 在制造上很困难, 汽包的重量也很重, 运输、安装都较困难。

强制循环锅炉主要是借循环系统中的循环泵使汽水循环, 在可以采用自然循环锅炉的参数领域都可以采用强制循环, 由于它的循环不是靠汽和水的密度差, 因此在锅炉工作压力高于 185[大气压], 甚至接近 200[大气压] 时仍可采用这种循环形式的锅炉。参数再高则由于汽水不容易或不可能用汽包来分离, 就只有采用直流锅炉。

直流锅炉中的工质——水、汽水混合物、蒸汽是由于给水泵的压力而流动的, 因此称为直流锅炉。它只有互相连接的受热面, 从省煤器到过热器没有保证汽水分离的汽包。当锅炉工作压力接近或超过临界压力 (225 绝对大气压) 时只有采用直流锅炉。当锅炉工作压力低于临界压力时, 由于直流锅炉可以省去沉重而难于制造的汽包, 有时采用直流锅炉也是合算的, 它的缺点是给水质量要求较高, 对自动控制系统的要求也较高, 给水泵消耗能量较大, 因此一般只有在锅炉参数为高压或超高压时才开始采用。

一般上述各种型式锅炉的采用的领域可以用图 1-1 来说明。

锅炉的蒸汽参数除了对锅炉型式选择有决定性的影响以外, 还对锅炉受热面的布置

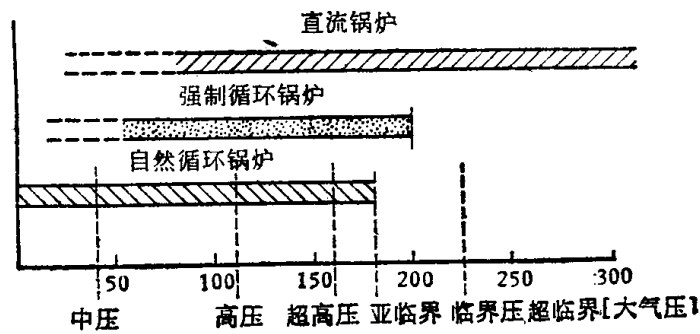


图 1-1 锅炉工作压力与锅炉型式

有影响。

锅炉给水在进入锅炉后吸收热量，最后成为过热蒸汽。给水在锅炉中所吸收的总热量根据热力学来分析可以分为预热热、汽化热与过热热三部分。锅炉的给水温度、蒸汽参数不同，这三部分热量的比例也不同（参阅图 1-2）。压力愈高，汽化热愈小，预热热、过热热则相应增大。对超高参数再热锅炉来说，除过热热之外，还有再热热（即再过热热量）。这几部分热量的比例随参数变化而产生的变化可从图 1-2 及图 1-3 中清楚地看出来。这几部分热量比例的变化会对锅炉受热面的布置有很大的影响。

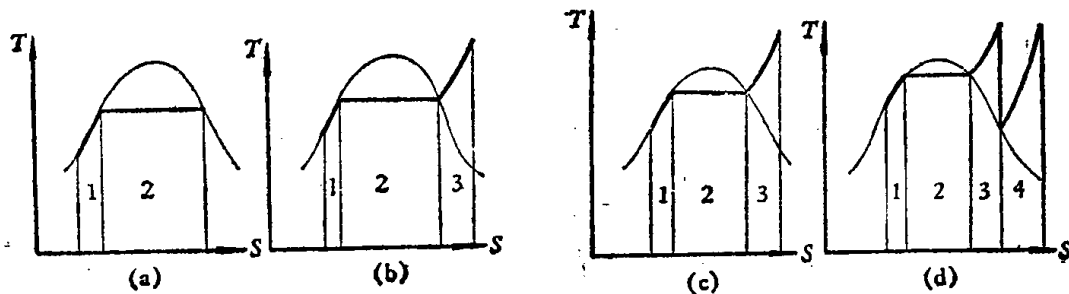


图 1-2 锅炉蒸汽参数对预热热、汽化热、过热热分配比例的影响

(a)—13 大气压；(b)—39 大气压，450[°C]；(c)—100 大气压，540[°C]；(d)—140 大气压，555[°C]/555[°C]

图中 1—预热热；2—汽化热；3—过热热；4—再热热

蒸汽压力 [at]	给水温度 [°C]	过热温度 [°C]	再热温度 [°C]	预热热	汽化热	过热热	再热热
13	50	—	—	23.9	—	76.1	—
16	100	375	—	16.1	—	69.5	14.4
39	172	450	—	13.6	—	66	20.4
100	215	540	—	18.8	—	51.7	29.5
140	240	570	—	21.2	—	43.4	35.4
140	240	555	555	17.9	36.7	28.6	16.8

图 1-3 不同参数的锅炉预热热、汽化热、过热热的分配比例

由图 1-3 可以看出，由低压到中压，由中压到高压，预热热与过热热所占的比例是增大的，而汽化热则是减少的。

对低参数小容量的锅炉来说，受热面中以蒸发受热面为主，因此锅炉结构常采用图 1-4 所示的型式。在这种锅炉中，水冷壁、对流受热面基本上是蒸发受热面，只在尾部装有

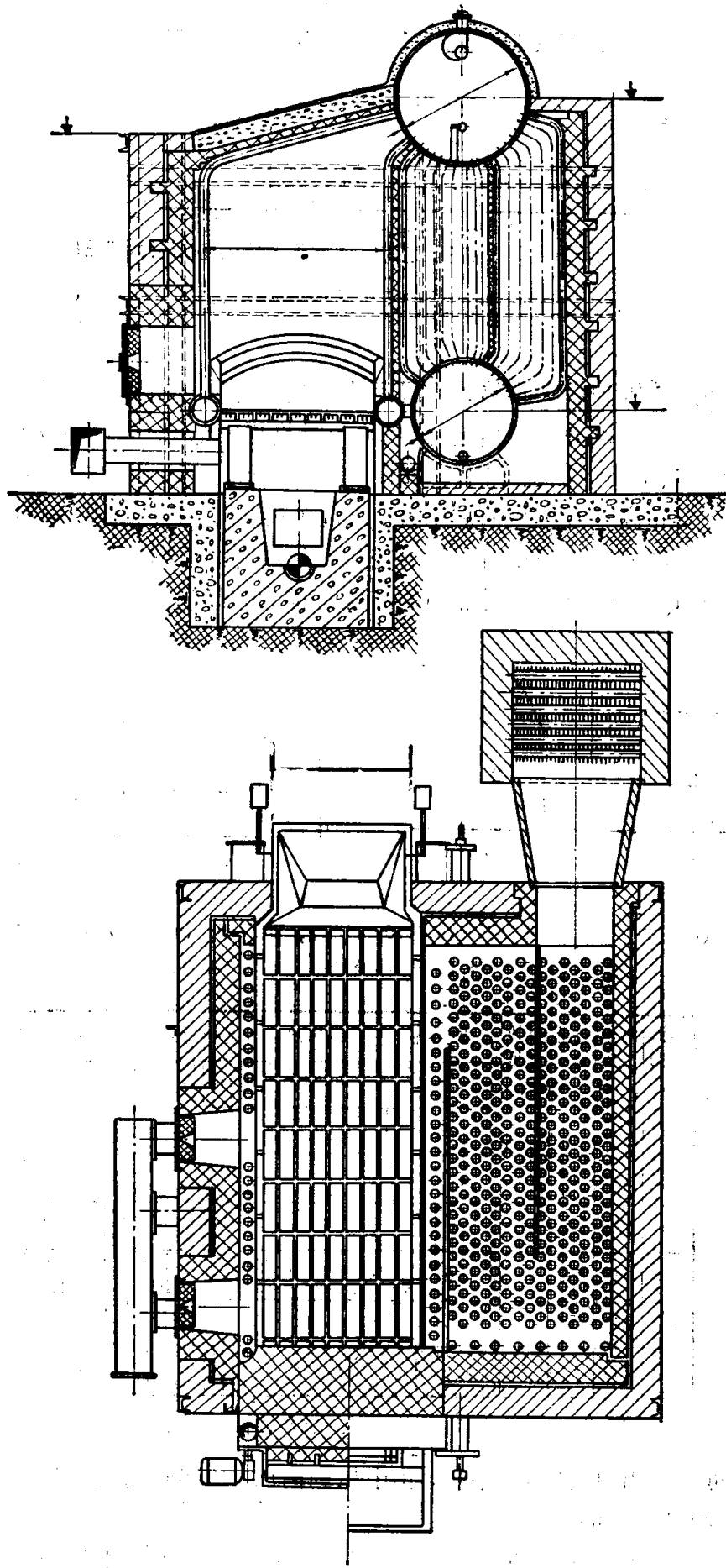


图1-4 低参数小型锅炉受热面的布置 (ZZZ-4-13型振动炉排锅炉总图)

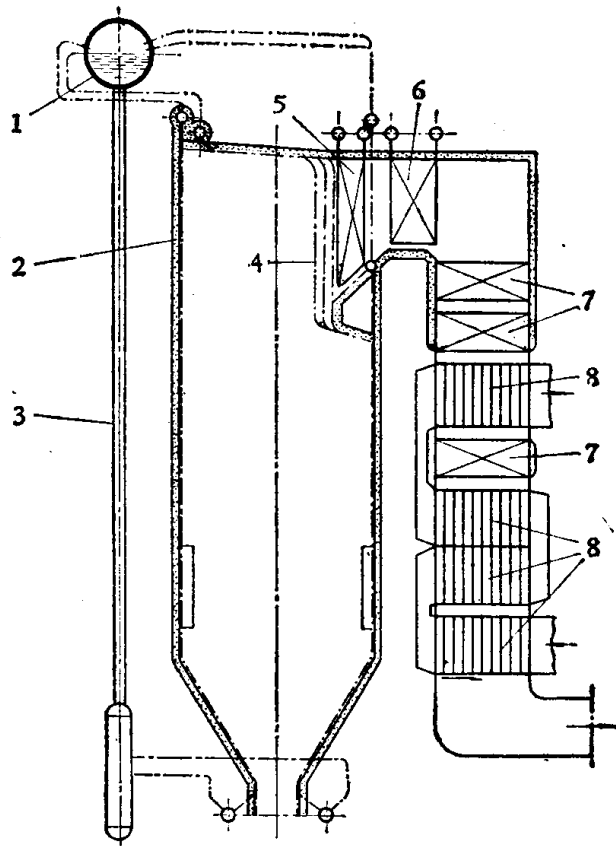


图 1-5 中参数锅炉的受热面的布置

1—汽包；2—水冷壁；3—集中下降管；4—凝渣管簇；5—高温对流过热器；
6—低温对流过热器；7—省煤器；8—空气预热器

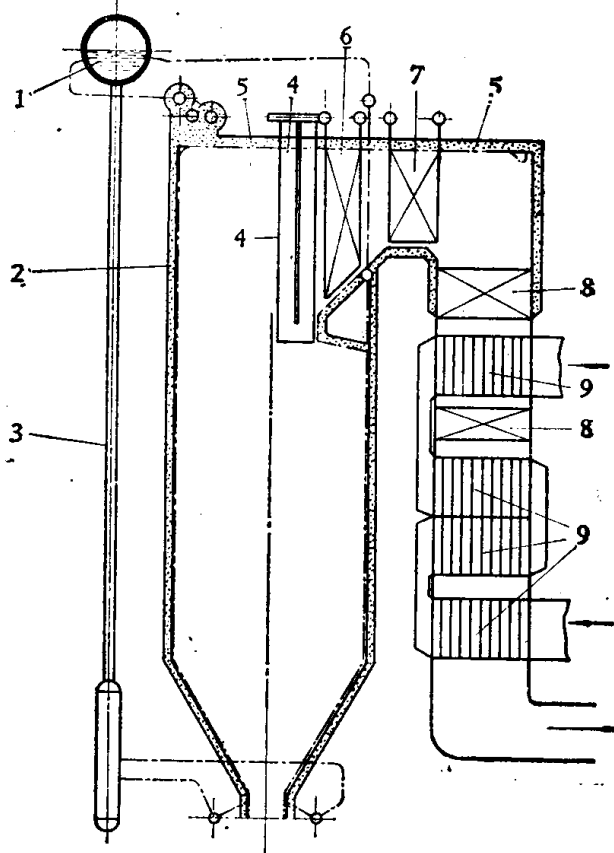


图 1-6 高参数锅炉的受热面的布置

1—汽包；2—水冷壁；3—集中下降管；4—屏式过热器；5—顶棚过热器；
6—高温对流过热器；7—低温对流过热器；8—省煤器；9—空气预热器

面积不大的铸铁省煤器以预热给水(吸收预热热),同时使烟气通过它时得到进一步冷却,减少排烟损失,提高锅炉效率。

对中参数锅炉来说,预热热与过热热所占比例增大,汽化热所占比例减小,因此过热器受热面与省煤器受热面增加,同时由于采用了煤粉燃烧,尾部还增加了空气预热器,在炉膛中装设了很多水冷壁。炉膛中水冷壁吸热很多,它所吸收的热量基本上已足以满足汽化热的要求,因此除了在炉膛出口有几排凝渣管之外,和低压锅炉相比,不再需要更多的对流蒸发受热面。这样,中压锅炉一般具有图 1-5 的型式。

对高参数锅炉来说,预热热与过热热所占比例还要加大些,汽化热所占比例还要减小些。由于汽化热减少,不必把炉膛里的水冷壁都作成蒸发受热面,同时,由于蒸汽温度高些,为了得到足够的温压,有必要将一部分过热器受热面移入炉膛,如顶棚过热器、炉膛出口代替凝渣管簇的屏式过热器。图 1-6 中示有比较典型的高参数锅炉受热面布置的简图。

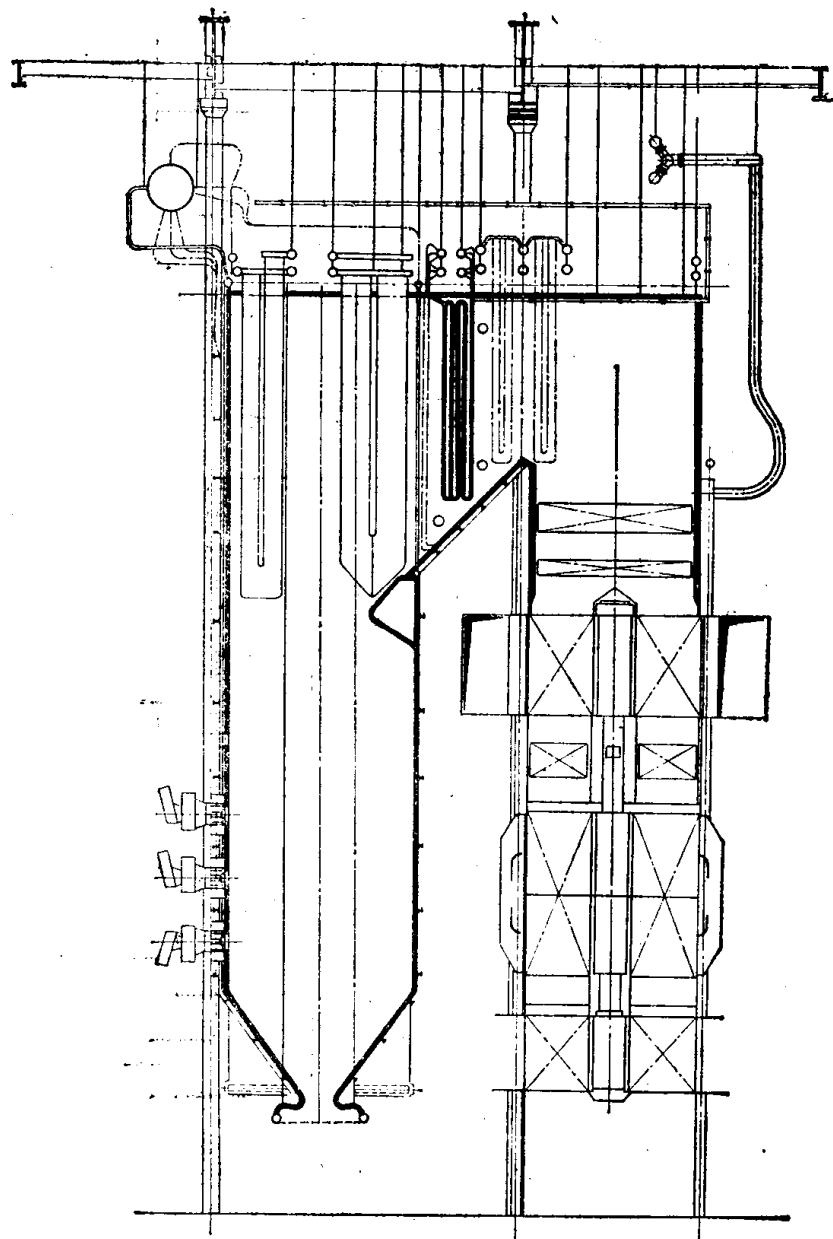


图 1-7 国产 670 [吨/时] 超高参数再热锅炉简图

有时中参数锅炉也采用图 1-6 中的布置方案,不过这样作时会增加合金钢的消耗量,并不一定合算。

对超高参数带有再热的锅炉,由于汽化热所占比例进一步减少,过热热、再热热增大,有必要把更多的过热器受热面放入炉膛中。图 1-7 中示有我国的 670 [吨/时]二十万千瓦的超高压再热锅炉。在炉膛中除了在高压锅炉中就有了的出口屏式过热器及顶棚过热器之外,又在炉膛上部前侧装设了前屏式过热器。在水平烟道的后面和垂直烟道的最上面布置了再热受热面。过热受热面和再热受热面进一步向前移入炉膛,同时也向后扩张到原来(中高参数时)放省煤器的部位(见图 1-7)。对亚临界参数再热锅炉来说,这种过热、再热受热面的扩张将更加明显。对超临界参数的锅炉来说,没有相变,也没有汽化潜热存在,但是在锅炉设计中仍习惯地用省煤器、过热器等名称,不过它们之间已无明确的界限。

1-3 锅炉的总体布置

锅炉的总布置也就是锅炉炉膛和炉膛中的辐射受热面与对流烟道和其中的各种对流受热面的总布置,既与锅炉的参数、容量有关,也和锅炉所用的燃料性质等因素有关。由

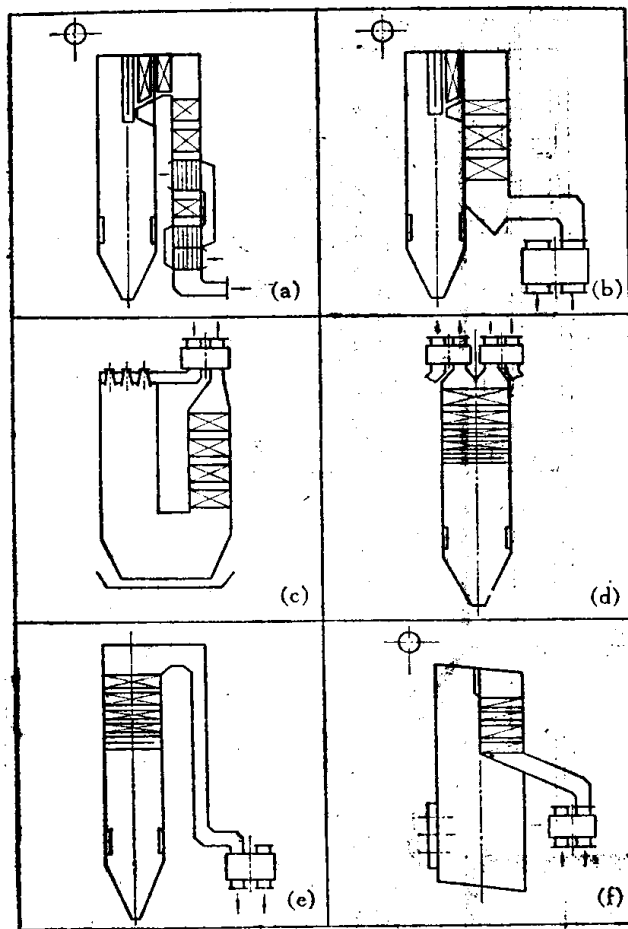


图 1-8 锅炉的总布置

(a)一倒 U 形方案; (b)一倒 L 形方案; (c)一U 形方案; (d)一塔形方案;
(e)一改良塔形方案; (f)一箱形方案

于具体条件的不同,会产生很多不同的总布置方案。

图 1-8 中示出了比较常见的中型、大型锅炉的布置方案。其中最常见的是倒 U 形方案(图 1-8a)。这个方案虽然占地面积稍大,但布置受热面比较方便,检修尾部受热面(指后面垂直烟道中的受热面)也比较方便,送风机、引风机、除尘设备都可放在地面上。由于它有这些优点,采用得较多,如图 1-5、1-6、1-7 中所示出的锅炉都属于倒 U 形布置。

倒 L 形方案(图 1-8b)与倒 U 形方案很相近,只是取消了水平烟道,尾部受热面和前面炉膛一样,采用完全悬吊的结构,节省材料。例如国产 220[吨/时]高参数锅炉采用这种布置方案时,比采用倒 U 形布置方案可节省钢材约 250[吨],耐火材料约 200[吨]。不过它的尾部受热面的检修困难。在采用管式空气预热器时,因为不好悬吊,不宜采用这种方案。

U 形布置(图 1-8c)时,燃烧器布置在炉膛顶部,煤粉管道、空气管道也都要一直联到这样的高度,不很合理,锅炉结构也复杂,采用的比较少。

塔形布置(图 1-8d)适用于灰分较多的燃料,烟气在对流受热面中不改变流动方向,

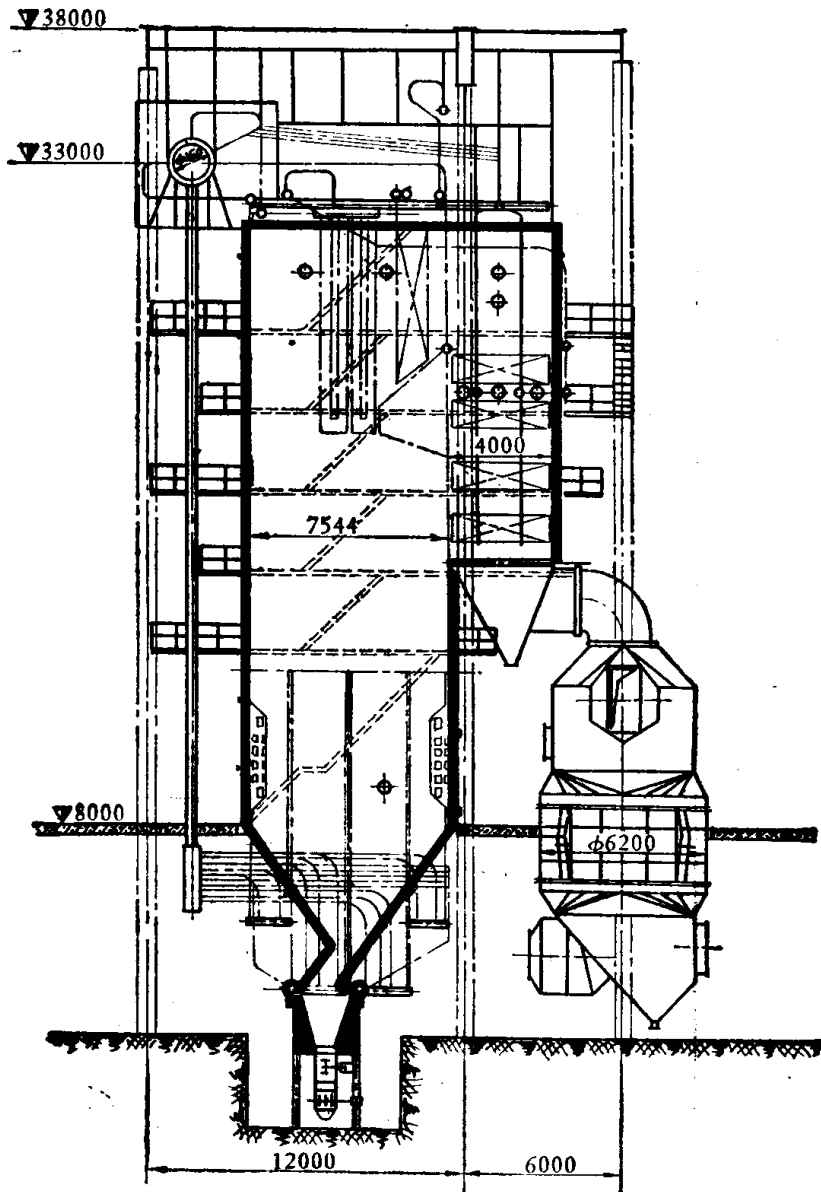


图 1-9 国产 230 [吨/时] 高压锅炉布置简图(倒 L 形方案)

因此烟气中的飞灰不会因离心力而集中，因而不会引起局部受热面集中地磨损。但是在锅炉高度很大，尤其是在空气预热器、除尘器、送吸风机置于炉顶时，锅炉高达七、八十米或近百米，锅炉的支架很困难，因此只有在燃料中灰份很多时才采用。有时为了减少所支架的重量，把空气预热器、除尘器、送吸风机仍放于地面上(图 1-8e)，结果就与倒 U 形方案近似。

在燃油时，由于可以把炉膛容积相对地缩小，又可以省去或简化凝渣管簇，可以把锅炉布置成箱形方案(图 1-8f)。这种方案一般只用于燃油或天然气锅炉。

图 1-9 中示有倒 L 形布置的国产 220[吨/时] 高压锅炉，其中回转式空气预热器由另外的支架支承。

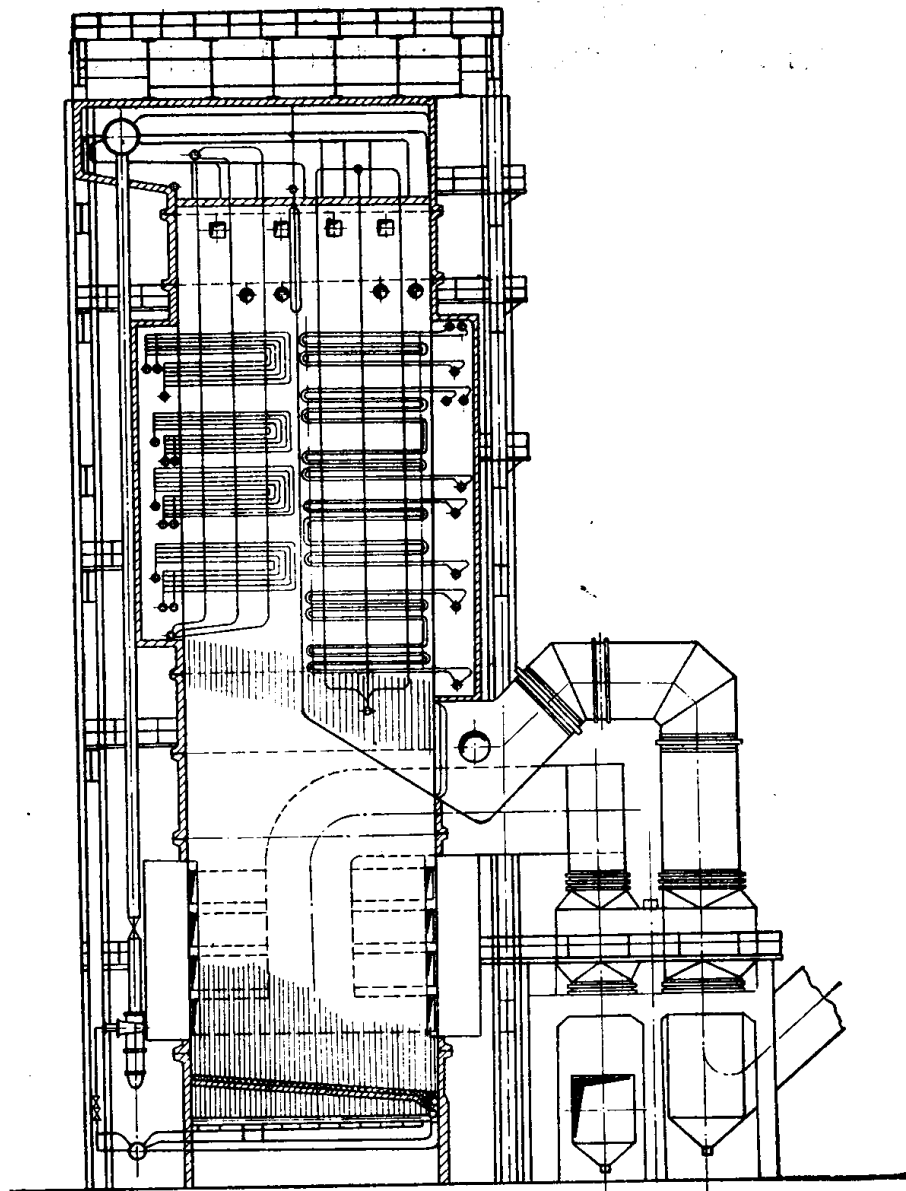


图 1-10 675 [吨/时] 箱形布置，强制循环超高压燃油再热锅炉的简图

图 1-10 中示有 675 [吨/时] 超高参数箱形布置的再热锅炉的结构简图。

在国外还可以看到更多型式的布置方案，如 T 形、倒 N 形、L 形……等。这些布置形式在国产锅炉中使用较少。

1-4 锅炉设计的步骤

锅炉的设计是锅炉制造工作中的重要环节之一。在设计锅炉之前，应根据所给定的锅炉容量、参数、燃料特性有目的地进行调查研究，取得第一手资料，然后进行设计。一般开始设计时先选定锅炉的总布置，进行燃料消耗量的估算，然后再决定炉膛结构，进行炉内传热计算，决定对流受热面的结构，进行对流受热面的传热计算。在以上的结构设计和传热计算中须预先选定受热面的材料、管径及壁厚，布置好下降管系统。在以上的计算（或称热力计算）结束以后，再根据它的计算结果，计算管壁温度并核算强度，进行水循环计算，核算水循环是否安全可靠，进行空气动力计算，核算烟风道流阻是否合理。在一切都正常合理时，即可根据以上的初步设计和计算进行进一步的设计。

在以后各章中将分别介绍结构设计的基本原理及计算的基本方法。

第二章 辅助计算与炉膛设计

在进行锅炉设计时,在决定炉膛尺寸、各种受热面的面积及结构之前,必须预先决定燃料消耗量、烟气在各受热面处的成分等主要数据。例如在计算一个受热面的吸热量时,就必须知道这个受热面前后烟气的焓,同时为了计算烟气在受热面中的对流和辐射放热系数,也必须知道烟气的体积、烟气中三原子气体(指 H_2O 、 CO_2 等)所占的容积份额、烟气中飞灰的浓度[公斤/公斤]等数值。因此在进行锅炉设计时,就必须预先把这些数值计算出来,列好表格,以便在计算中随时查用。这些计算都属于辅助计算。

在燃料消耗量已估算出来以后,就可在燃烧设备方面进行设计,决定燃烧设备的结构和尺寸、炉膛尺寸等,然后再布置受热面,进行热力计算。燃烧设备种类、结构繁多,有关知识也不少,必须专门介绍。现在为了使读者结合一个锅炉的设计过程学习热力计算等内容,因此不全面地介绍燃烧设备方面的问题,而只介绍固态排渣煤粉炉的设计问题,以使热力计算内容介绍得比较完整。炉膛内辐射受热面的设计问题以及炉墙问题也都在本章作简单的介绍。

2-1 燃料数据的分析和整理

在锅炉设计中,燃料的原始数据是非常重要的,而且所给出的数据必须正确,有代表性,才能使锅炉设计符合要求。现将锅炉设计中对煤、油、煤气三种燃料的原始数据的要求分述于下。

1. 煤

煤的原始资料应包括:工作基元素成分、工作基低位发热量 Q_{dw}^0 、纯燃基挥发物含量 V^r 、灰熔点 (t_1 ——开始变形温度; t_2 ——开始软化温度; t_3 ——开始熔化温度, $^{\circ}C$)、可磨度。

在锅炉设计的计算中要求的煤的成分为工作基(以燃烧时煤的成分为 100%)成分,而在实际分析工作中以及分析某些问题时却常会出现分析基(以试验室空气中风干的试样的成分为 100%)、干燥基(除去水分以外的成分为 100%)和纯燃基(除去水分、灰分后的成分为 100%)。这几种成分可以用表 2-1 中的换算因子来换算。

在煤样的分析和试验中一般包括以下几种分析试验:工作基全水分试验、分析基的工业分析、分析基的高位发热量试验、分析基的元素成分分析、灰熔点试验、可磨度试验等。

工作基全水分试验的结果是工作基水分 W^g , [%]。

以空气干燥试样进行的煤的工业分析得到的结果是分析基水分 W^l 、挥发物 V^l 、固定碳 C_{ga}^l 和灰分 A^l 的百分比 ($W^l + V^l + C_{ga}^l + A^l = 100$)。

以空气干燥试样的煤的元素进行分析得到的是煤的分析基水分、灰分、碳、氢、氧、氮、