



国产20万千瓦机组培训班讲义

锅炉蒸发原理与设备

锅炉运行

李 聪

吴孝恺

水利电力部生产司

前 言

我国电力工业发展已进入大机组、高参数、高度自动化的时代和单元集中控制的运行方式。“七五”期间，国产二十万千瓦汽轮发电机组将成为我国电厂中的主力机组之一，为了提高二十万千瓦机组电厂的机、炉运行值班人员素质和技术水平。自一九七九年起委托西安电力学校举办国产二十万千瓦机组运行培训班，并编写了教材，经过多次学习班试用反映良好，在试用教材的基础上经过整理、补充和修订，编写成《国产二十万千瓦机、炉运行培训讲义》。以满足二十万千瓦机组运行人员的培训和广大电力职工自学需要。也可供技校和中专师生参考。这套书包括《热工学基础》、《电厂金属材料》、《汽轮机调节》、《汽轮机运行》、《汽轮机设备》、《汽轮机辅助设备及热力系统》、《锅炉燃烧原理及设备》、《锅炉蒸发原理、设备、锅炉运行》、《热力过程自动化》、《锅炉自动控制系统》等。

西安电力学校有关同志为编写这套讲义付出了辛勤劳动，在此仅致谢意。

水利电力部生产司

一九八六年三月二十日

目 录

第一章 670吨/时燃煤锅炉简介.....	1
第一节 锅炉在国民经济中的作用.....	1
第二节 锅炉的一般工作原理.....	1
第三节 HG—670/140—7型锅炉简介.....	4
第四节 DG—670/140—4锅炉简介.....	24
第二章 锅炉蒸发设备及自然水循环原理.....	33
第一节 锅炉蒸发设备.....	33
第二节 自然水循环原理.....	38
第三节 自然水循环的安全问题.....	45
第三章 蒸汽的净化.....	51
第一节 概述.....	51
第二节 蒸汽中杂质的来源.....	52
第三节 提高蒸汽品质的途径.....	56
第四节 汽包内部装置示例.....	62
第四章 过热器与再热器.....	66
第一节 概述.....	55
第二节 过热器与再热器的结构.....	69
第三节 过热器与再热器的热偏差.....	71
第四节 蒸汽温度调节方法.....	77
第五节 过热器、再热器系统举例.....	89
第五章 省煤器与空气预热器.....	91
第一节 省煤器.....	91
第二节 空气预热器.....	97
第三节 尾部受热面布置.....	104
第六章 锅炉水处理与热力设备的腐蚀.....	111
第一节 天然水中的杂质.....	111
第二节 补给水处理.....	114
第三节 锅炉内结垢和锅炉内水处理.....	125
第四节 热力设备的腐蚀及防止.....	127
第七章 锅炉运行参数的调节.....	133
第一节 概述.....	133
第二节 蒸汽压力的调节.....	133
第三节 蒸汽温度的调节.....	139

第四节	水位的调节	146
第五节	锅炉工况变动的影响	150
第八章	燃烧调节	157
第一节	燃烧调节概述	157
第二节	燃烧量的调节	158
第三节	风量的调节	159
第四节	喷燃器的调节与运行方式	163
第五节	制粉系统的运行	168
第九章	锅炉的启动与停炉	171
第一节	概述	171
第二节	单元制锅炉的启动	171
第三节	锅炉停炉	185
第四节	670吨/时燃煤锅炉启停技术要点	186
第十章	锅炉的事故	199
第一节	概述	199
第二节	锅炉的水位事故	199
第三节	锅炉受热面的损坏	202
第四节	锅炉燃烧事故	204
第五节	负荷骤减	206
第六节	回转式空气预热器的故障	207
第七节	引风机故障	207
第八节	制粉系统故障	208
第九节	火电机组的可用率与事故率	211

第一章 670吨/时燃煤锅炉简介

第一节 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。目前在世界大多数国家和我国电力工业中，火力发电占总发电量的70%左右。到2000年前，这一比例数字在我国将不会有多大变化。从全世界来看，由于核电站的发展，今后火力发电所占比重将有所下降，即使如此，估计到2000年，火力发电仍将占当时世界发电总量的50%以上。

党的十一届三中全会和五届人大已向全国人民发出了伟大号召，要把全党的工作重点转移到实现社会主义现代化建设上来，要在本世纪内把我国建设成为四个现代化的社会主义强国。从电力工业具体任务来看，要建设很多大电厂，并在2000年前使我国发电机组总容量达到几亿千瓦的水平，其中火电建设的规模是巨大的。锅炉是火力发电厂三大主机之一，火力发电的发展即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，尤其是20万、30万千瓦以上的大容量锅炉的设计、制造、投产以及有关试验工作均需积极进行。

锅炉工业本身也在不断发展。目前国外电站锅炉已由高压、超高压锅炉，发展到大量生产亚临界压力与超临界压力锅炉，单台容量达130万千瓦。锅炉不仅是一般火力发电厂的锅炉，还包括一切动力工业中用以生产蒸汽的热交换器，如核反应堆蒸汽发生器及太阳能锅炉等。总之，随着国民经济的高速发展，锅炉工业必将在实现我国四个现代化中发挥其愈来愈重要的作用。

第二节 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，并通过传热过程把能量传递给水，使水变成蒸汽，蒸汽直接供给工业生产所需的热能，或通过蒸汽动力机械转换为机械能，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，它还具有以下的特点：

1. 可靠性要求高。锅炉一旦发生事故停炉，将使电厂临时中断对外供电，影响生产甚广，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运行，因而多了一个外

在矛盾。此外，锅炉还和其他工业部门的发展有着十分密切的关系，如蒸汽燃气联合动力装置中的压力燃烧锅炉及核反应堆中的蒸汽发生器等。

3. 金属耗量和体积大。以一台配20万千瓦机组的电站锅炉为例，金属耗量近三千吨，体积近二万立方米。

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，目前一般需要二年到三年，今后即是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的时间内完成，还是比较困难的。

5. 锅炉产品不能在制造厂内整装试运。这给鉴定和提高产品质量带来困难。

现在我们以一台锅炉为例来说明锅炉是如何组成和工作的。图1—1为一台中等容量和参数的锅炉简图。

这台锅炉所用的燃料是煤，首先将煤送进磨煤机（图中未示出）磨制成煤粉。两侧炉墙上装有喷燃器，煤粉由空气携带，通过喷燃器送入炉膛中燃烧。这台锅炉的蒸发受热面全部装在炉膛的内壁上，组成水冷壁，充分利用炉膛中高温烟气辐射传来的热量，使燃烧产物在进入以后的对流受热面时，可以达到必要的冷却，同时也起保护炉墙的作用。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作用，水冷壁一般是由直径为50~78毫米的管子组成。

这台锅炉的过热器是放在水平烟道中，位于凝渣管的后方。过热器的作用是把从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和提高电厂的效率。

过热器一般是由直径为30~50毫米的蛇形管组成。烟气流过过热器以后，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汽包之前，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25~38毫米。另一尾部受热面，即空气预热器，它的作用是使空气在进入炉膛之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30~51毫米范围内。

这一台锅炉的工作情况简述如下：电厂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），由给水管路将给水送至省煤器，在其中被加热到某一温度后，给水进入汽包，然后沿下降管行至水冷壁进口联箱。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汽包中，经过汽水分离装置，蒸汽由汽包上部离开，流经过热器中。在过热器内，饱和蒸汽继续吸热成为过热蒸汽，然后送入汽轮机中去。煤经过磨煤机被磨成一定细度的煤粉，由空气携带入喷燃器，喷燃器喷出来的燃料与空气一起混合燃烧，在炉膛中放出大量的热量。燃烧后的烟气上升、经凝渣管束、过热器、省煤器、空气预热器后，再经除尘装置清除其中的飞灰，最后才由风机送往烟囱排向大气。

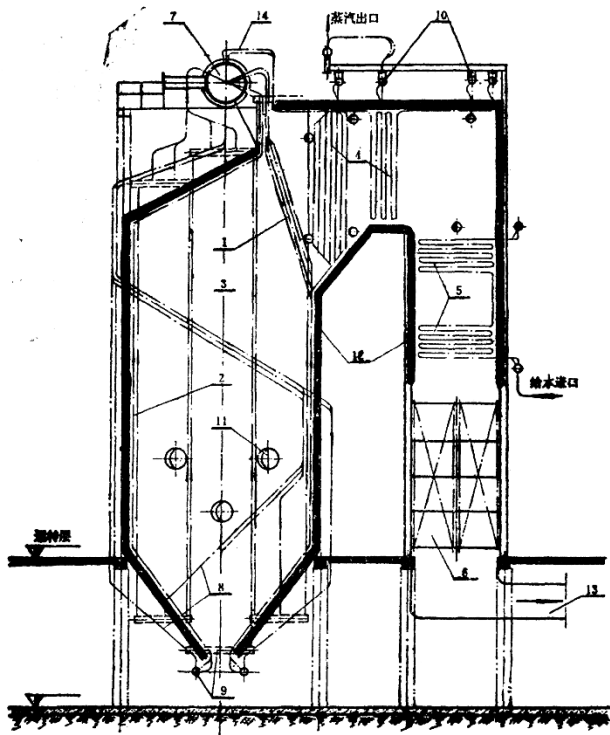


图 1-1 锅炉简图

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

以上所述的几个主要部分即炉膛、喷燃器、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膛中；3)引风装置，

包新引风机及烟囱，将炉中排出的烟气送往大气中；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，包括装卸和输送机械等；6) 除灰装置，从锅炉中除去灰渣并送出电厂；7) 除尘装置，除去烟气中的飞灰，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，蒸汽参数和燃料性质，也决定于工作的可靠性、经济性以及自动化水平。

第三节 HG—670/140—7型锅炉简介

HG—670/140—7型锅炉是哈尔滨锅炉厂设计制造的配20千瓦发电机组的超高压锅炉如图1—2所示。

一. 锅炉参数及燃料

额定蒸发量	●70吨/时
过热蒸汽压力	140公斤/厘米 ²
过热蒸汽温度	●40℃
再热蒸汽流量	●79吨/时
再热蒸汽入口压力	27.5公斤/厘米 ²
再热蒸汽出口压力	25.5公斤/厘米 ²
再热蒸汽入口温度	323℃
再热蒸汽出口温度	540℃
给水温度	240℃
设计燃料	劣质烟煤

二. 锅炉简介

本锅炉系超高压参数带一次中间再热的单汽包自然循环锅炉，配20万千瓦汽轮发电机组。锅炉呈“Π”型布置，炉膛四周布满膜式水冷壁，炉膛上方布置有前屏过热器，炉膛出口处有后屏过热器，水平烟道布置了对流过热器和再热器热段，尾部竖井中布置有再热器冷段和两级省煤器，两级空气预热器。

锅炉采用单段蒸发，大直径集中下降管。

过热蒸汽汽温调节采用二级给水喷水减温器。再热蒸汽汽温调节主要采用汽—汽热交换器，同时用少许喷水作为细调手段。

锅炉为燃用劣质烟煤的干态排渣的煤粉炉。采用角式煤粉喷燃器，四角布置，切圆燃烧方式。配有钢球磨煤机，中间仓储式制粉系统，及热风干燥，干燥剂送粉系统。

锅炉为室内布置。除下级省煤器和空气预热器为支撑结构外，锅炉本体全部悬挂在锅炉的顶板梁上。锅炉构架采用与厂房钢筋混凝土柱联合结构形式。

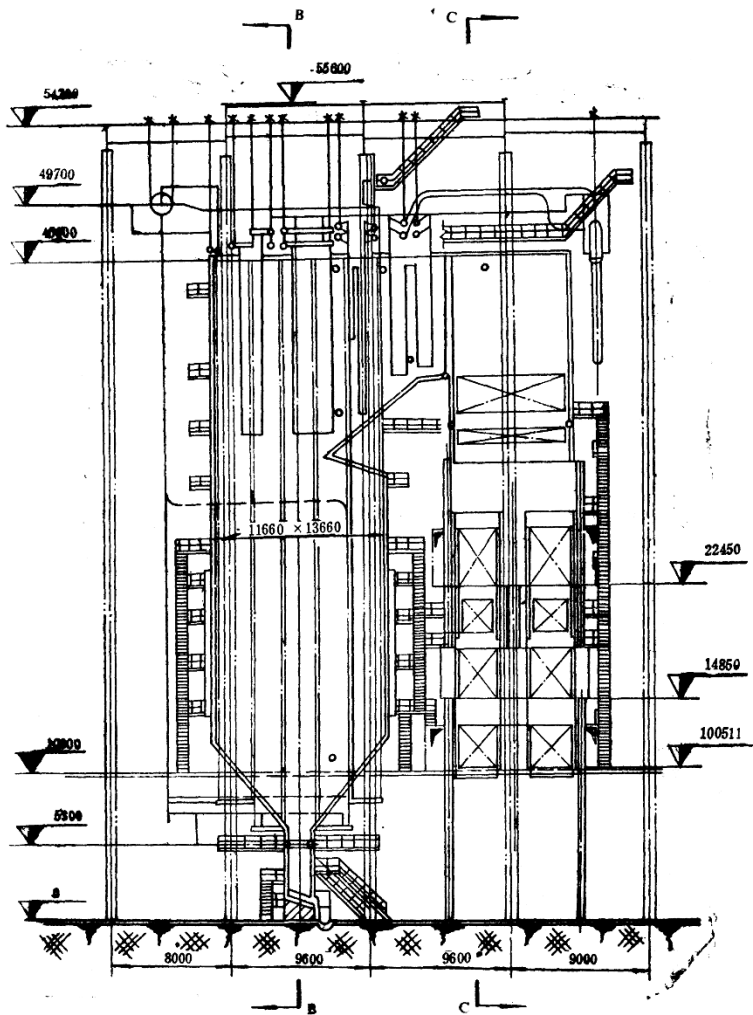


图 1-2 HC-670/140-7 井架总图

现将锅炉本体的主要部件分述如下：

1. 汽包及汽水分离设备

汽包内径为 $\phi 1800$ 毫米，壁厚为85毫米，圆筒部分的长度为18200毫米，材料为14MnMoVg钢。

锅炉为单级蒸发。汽包内装有80个 $\phi 315$ 毫米带导流板的旋风分离器。采用分组连通罩式连接系统，作为一次分离元件，每个旋风分离器的平均蒸汽负荷为9吨/时。汽水混合物在旋风分离器内由于离心力作用而分离。蒸汽向上经过分离器顶部的百叶窗逸出，进入汽空间进行重力分离。然后蒸汽通过平板式清洗装置，经给水清洗过的蒸汽再次进入汽空间进行二次重力分离。最后经汽包顶部的均汽孔板引出汽包进入过热器。

来自省煤器的给水，进入汽包后分为两路，50%通过清洗装置，50%直接进入汽包的水容积内。

为了防止产生旋涡斗，造成下降管带汽，在下降管进口处装有栅格型隔板。

汽包正常水位在汽包中心线以下150毫米处。最高、最低水位为正常水位 ± 50 毫米。

为了保证蒸汽品质，在汽包内部装有炉内水处理用的加药装置和连续排污装置。

汽包采用四组曲链片式吊挂装置悬吊于锅炉顶板上。四组吊挂装置的调正，应在冷、热情况下均保证汽包轴线水平无挠度为原则。

2. 水冷壁

炉膛四周由 $\phi 60 \times 6$ 的鳍片管焊成的膜式水冷壁（节距为80毫米）组成。炉膛宽度为13660毫米，深度为11660毫米，高度为38500毫米。

水冷壁分为上、中、下三个部件。每个部件又有前、后、侧组件之分。前、后水冷壁的下部管子倾斜与水平成 50° 角，形成冷灰斗。后水冷壁上部向炉内弯曲，形成折焰角，然后分成两路：一路56根管子（节距为240毫米）垂直上升穿过水平烟道进入后水冷壁上联箱；另一路共114根管子（节距为120毫米）以与水平成 40° 的倾角向后延伸进入斜包墙上联箱，形成水平烟道底部的斜包墙。

整个水冷壁共分为20个循环回路，前、后及两侧水冷壁各5个回路。

锅炉采用6根大直径集中下降管，用 $\phi 426 \times 36$ 毫米的20号钢管制成。靠锅炉中心的集中下降管由汽包垂直向下，以16根分散下降管向前水冷壁及侧水冷壁前第一回路供水；靠锅炉两侧的两根集中下降管在标高为28600毫米处向后弯，以18根分散下降管向后水冷壁及侧水冷壁后第一回路供水；另外两根集中下降管由汽包垂直向下，以16根分散下降管向两侧水冷壁其余回路供水。分散下降管用 $\phi 159 \times 14$ 毫米的20号钢管制成。

通过水冷壁连接管将水冷壁产生的汽水混合物从上联箱引入汽包。水冷壁连接管共74根用 $\phi 133 \times 13$ 毫米的20号钢管制成。其中前水冷壁用19根；两侧水冷壁共用32根；后水冷壁上联箱用9根，斜包墙上联箱用14根（穿过水平烟道）。

为了缩短锅炉启动时间，保证循环的可靠性，在水冷壁下联箱内均有外来蒸汽加热装置。

为了防止炉内燃烧不稳定及发生爆炸时破坏水冷壁及炉墙，沿炉膛高度方向每隔3米左右，装置一圈刚性梁。刚性梁一般采用56号工字梁组成。为了减少锅炉上部两侧刚

性梁的挠度，在水平烟道两侧设置了纵向刚性梁（立杆）。喷燃器区域的刚性梁因结构上的需要，做成框架式。

所有水冷壁的重量都通过吊杆装置悬挂在顶板梁上。锅炉运行时，水冷壁受热整体向下自由膨胀。吊杆装置的调整，以保证上联箱轴线水平无挠度为原则。所有的吊杆决不允许包在保温层内。向后弯曲的两根集中下降管，由普通弹簧吊架和恒力弹簧吊架承受其重量。其余4根集中下降管则通过汽包直接吊挂在顶板梁上。

根据运行、监测、检修等不同需要，设置了吹灰、打焦、吹灰、看火、监测孔、人孔及防爆门孔等。

3. 燃烧设备

喷燃器为四角双切圆布置的直流式喷燃器，假想切圆直径分别为 $\phi 1200$ 和 $\phi 600$ 毫米。喷燃器配钢球磨煤机、中间储仓、干燥剂送粉单位制粉系统。干燥剂的一部分作为一次风，另一部分作为三次风。

每组喷燃器从上到下布置三、三、二、一、二、一、二、二、一、二、一、二次风口。一次风率26%分成 4×4 个一次风口，风量平均分配。二次风率为53.4%分成 4×6 个二次风口，从上到下，每个二次风口配风量分别占30%，10%，15%，15%，10%，20%。三次风率为16.4%，分 4×2 个三次风口，布置在喷燃器的最上方，风量平均分配。设计一次风速为23米/秒，二次风速为48米/秒，三次风速为60米/秒。

每组喷燃器上还布置二只带有平流式配风器的点火油喷燃器。燃油量按锅炉额定负荷的25%设计，采用简单机械雾化油喷嘴，每只喷嘴实际最大出力为1593公斤/时，进油压力30公斤/厘米²，油配风器的设计风速为50米/秒。在油喷燃器中，配有电火花点火器。选用电火花引燃液化石油气—点燃重油—点燃煤粉的三级点火系统，每次点火工作完成之后，油枪稳燃叶轮和电火花点火器，分别由气缸带动，退出炉膛350毫米。配风器采用单独配风结构，在锅炉正常运行时，要求点油喷燃器有流速约10米/秒的热风通过，以冷却保护。

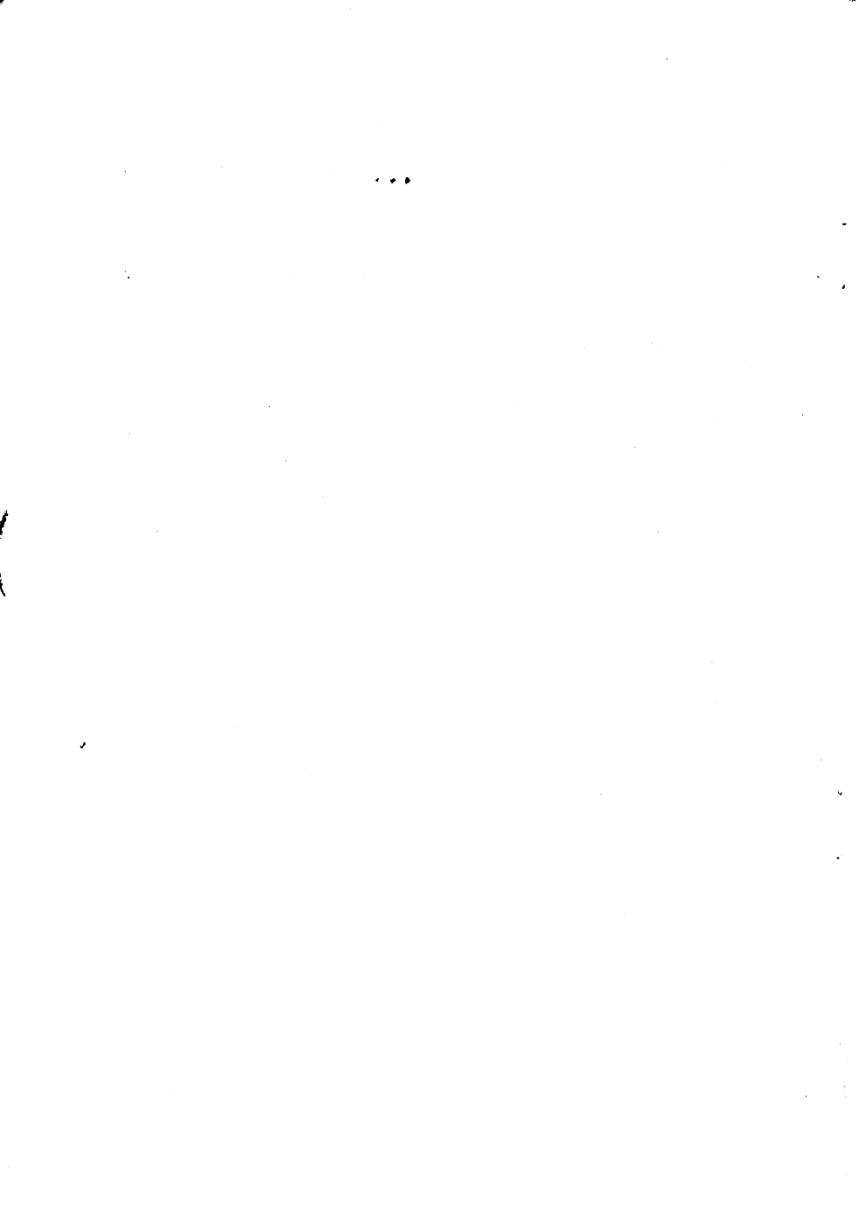
喷燃器与水冷壁连接处设置专用相对滑动密封装置。喷燃器各风管不随炉体向下膨胀，而悬挂于上部的梁上自成平衡系统。外部连接管道不得对喷燃器施加垂直或水平力。

各二次风口及油配风器进口处，设有手动调节风门，以便在运行时进行调节。

4. 过热器、再热器

(1) 过热器

锅炉采用了全辐射型的前屏过热器，半辐射型的后屏过热器，辐射对流兼有的顶棚及包墙过热器和对流过热器，组成辐射—对流式过热器系统如图1—3和图1—4所示。



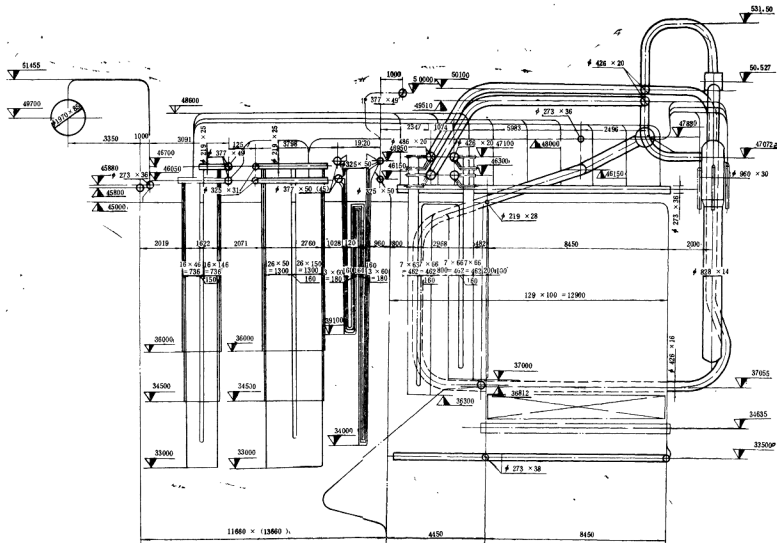
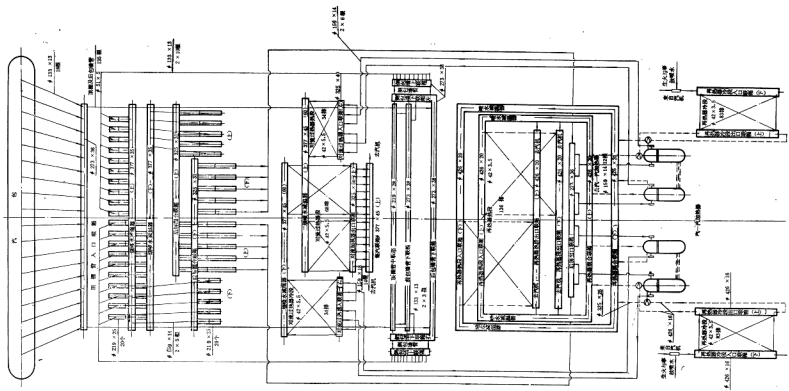


图 1-3 HC-670/140-7 保护过热器系统图 (侧视)



饱和蒸汽从汽包出来，由18根 $\phi 133 \times 13$ 的连接管引入顶棚过热器入口联箱，经135根 $\phi 51 \times 5.5$ 节距为100毫米的顶棚过热器流至位于水平烟道出口处的顶棚过热器中间联箱。然后蒸汽分成两路：一路由135根 $\phi 51 \times 5.5$ 节距为100毫米的管子组成，先向后再转下行，进入后包墙管下联箱，形成转向室顶棚和后包墙管过热器，再经联箱两端的锻造直角弯头进入两侧包墙管下联箱的后部；另一路由135根 $\phi 51 \times 5.5$ 的管子组成，从顶棚过热器中间联箱垂直向下，先拉稀成两排距200毫米穿过水平烟道，而后合为一排节距为100毫米进入前包墙管下联箱，形成后竖井前包墙管，再用6根 $\phi 133 \times 13$ 的连接管引入两侧包墙管下联箱的前部。来自前、后包墙管的蒸汽由两侧各130根 $\phi 51 \times 5.5$ 节距100毫米的侧包墙管向上进入两侧包墙管上联箱。然后以 2×10 根 $\phi 133 \times 13$ 的连接管将蒸汽引入前屏如图1—5和图1—6所示。

蒸汽通过20片过热器顺流到一级喷水减温器，经喷水並左右交换位置后，用 2×5 根 $\phi 159 \times 14$ 的连接管引入靠炉膛两侧各5片后屏过热器，逆流受热后至后屏混合联箱。第二次左右交换位置后，由靠炉膛中部左右各5片后屏过热器顺流至后屏出口小联箱。然后通过10根 $\phi 159 \times 14$ 的连接管引至后屏出口联箱如图1—7所示。

后屏出口联箱由12根 $\phi 159 \times 14$ 的连接管将蒸汽引入四个并联（对过热蒸汽而言）的汽—汽加热器，通过 $\phi 32 \times 4$ 和 $\phi 38 \times 4.5$ 的U型管与管外的再热蒸汽进行热交换后，通过12根 $\phi 159 \times 4$ 的连接管进入对流过热器入口联箱。先沿两侧各34排对流过热器冷段蛇形管逆流至二级喷水减温器。经喷水减温並再一次左右交换位置后，再沿炉中部 2×34 排对流过热器热段顺流至对流过热器出口联箱。最后以14根 $\phi 159 \times 18$ 的连接管引至集汽联箱。对流过热器如图1—8所示。蒸汽从集汽联箱两端引出，经导管送至汽轮机。

顶棚和包墙管过热器除穿过水平烟道部分，使用光管外，其余全部采用 $\phi 51 \times 5.5$ 的20号钢鳍片管焊成膜式壁，以保证锅炉有良好的密封性能。另外为使再热器冷段安装方便，该部位包墙管为光管，留有安装焊缝。安装时，再热器冷段蛇形管和侧包墙管交叉装配。前屏过热器共20片，屏间节距为650毫米，每片由17根 $\phi 38 \times 4.5$ 的管子弯曲而成，管间节距为46毫米，最外侧8根管子为12Cr2M₀WVB钢其余12Cr1M₀V钢。后屏过热器共20片，屏间节距650毫米。每片由27根 $\phi 42 \times 5$ 的管子弯曲而成。管间节距为50毫米，最外侧8根管子为12Cr2M₀WVB钢，其余均为12Cr1M₀V钢。前、后屏过热器，在12Cr2M₀WVB钢管与12Cr1M₀V钢小联箱之间接入一段12Cr1M₀V钢管。对流过热器蛇形管束共136排，节距为100毫米。每排由4根管子弯成两圈组成。全部管子采用 $\phi 42 \times 5.5$ 的12Cr1M₀V合金钢管。

(2) 再热器

锅炉再热器由布置在对流竖井中的再热器冷段和布置在水平烟道中的再热器热段组成。再热器冷段又分左右两个对称的管组。