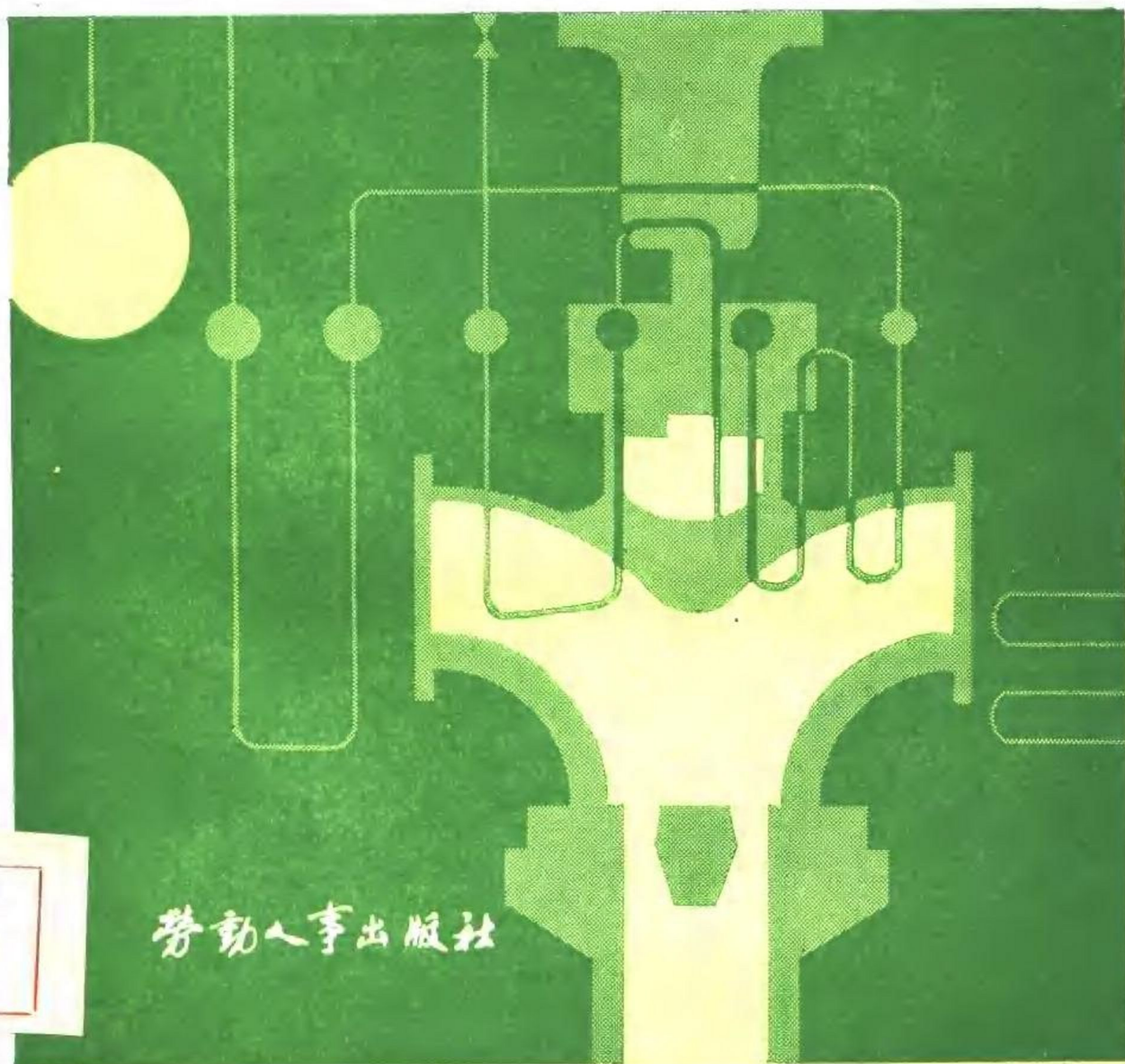




锅炉压力容器安全技术丛书

动力锅炉检验及故障分析

赵敦 朱兆富 编



劳动人事出版社

动力锅炉检验 及故障分析

赵 敦 朱兆富 编

劳动人事出版社

内 容 提 要

本书简要系统地介绍了国产高参数、大容量蒸汽锅炉的结构组成、技术特性、材料要求、主要部件的工作原理以及检修检验的基础知识和要点；并分析了电站锅炉常见及重大故障发生的原因，提出了应采取的防范措施。书中还简要地介绍了国外动力锅炉发展趋势，及新型高参数锅炉的原理和结构。

本书是锅炉监察人员短期训练班使用的教材，也可供中等专业学校锅炉专业教师、学生及动力锅炉工作者参考阅读。

动力锅炉检验及故障分析

赵 敬 朱兆富 编

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 16开本 7 印张 174千字

1986年8月北京第1版 1986年8月第1次印刷

印数1—8,700

书号：15238·0142 定价：1.55元

前 言

这本书是根据劳动人事部锅炉与压力容器安全监察局，举办锅炉监察人员短训班的需要编写的。1980年我们曾编写了《高中压锅炉检验讲义》和《锅炉承压部件常见故障及其防止措施》两本讲义，并于当年在杭州举办的短训班上试讲。此次重写合并成一册，删去一些检修细节及次要内容，增添了近年的有关资料，作了较多的修改。

我们在书中介绍了大、中型锅炉的主要结构、技术特性；简要阐述了主要部件的工作原理；详细说明了为保持锅炉安全经济运行所必需的检修管理知识和检验技术；列举了锅炉受压部件的损坏、故障事例、发生的原因、应采取的防范措施与焊接措施。目的是，想从正反两方面阐明确保锅炉安全运行应遵循的原则和具体技术措施。最后一章介绍了国外大型锅炉发展情况及新型高参数锅炉工作原理。

我们把这本书献给锅炉安全监察员和动力锅炉专业工作者，供他们参考。限于编者水平，书中必然会有不少缺点和错误，恳望读者批评指正。

劳动人事部锅炉与压力容器安全监察局李毅同志对本书的编写给予了大力支持和帮助，原华东电管局吴作泉同志对本书作了校阅，在此一并表示感谢。

1985年11月

目 录

第一章 动力锅炉的结构.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 典型动力锅炉简介.....	2
第三节 锅炉的蒸发系统.....	10
第四节 过热器与再热器.....	15
第五节 蒸汽温度调节设备.....	19
第六节 省煤器.....	23
第七节 空气预热器.....	24
第八节 燃烧设备.....	26
第九节 对汽水管道的材料要求、安全阀.....	29
第二章 动力锅炉的检验和修理.....	38
第一节 检修管理概述.....	38
第二节 汽包检修和检验要点.....	39
第三节 水冷壁的检修.....	41
第四节 过热器与再热器的检修.....	42
第五节 省煤器的检修.....	43
第六节 锅炉水压试验.....	44
第七节 空气预热器的检验.....	46
第八节 蒸汽管道的检验及监督.....	49
第九节 安全阀的检修及校验.....	52
第三章 锅炉故障分析及防止措施.....	55
第一节 受热面的超温损坏.....	55
第二节 受热面的腐蚀损坏.....	65
第三节 受热面的烟气磨损.....	79
第四节 承压部件的焊接质量问题.....	83
第四章 现代动力锅炉发展概况.....	94
第一节 概述.....	94
第二节 强制循环锅炉.....	96
附录 锅炉大检修项目表.....	105
参考文献.....	107

第一章 动力锅炉的结构

第一节 概 述

动力锅炉，亦称电站锅炉，是火力发电厂和大型工业企业动力车间的主要组成部分，它的作用是供应蒸汽驱动汽轮发电机或其他动力装置。动力锅炉是把煤、燃料油或天然气等燃料燃烧所发生的热量，转换成蒸汽的热能转换装置。

在火力发电厂中存在着三种能量转换过程：在锅炉中燃料的化学能转换成热能；在汽轮机中热能转换成机械能；最后在发电机中机械能转换成电能。

随着火力发电厂和动力设备的容量不断增大和蒸汽参数的提高，大型动力锅炉已成为工业装备中的一种巨型设备。锅炉设备一般由锅炉本体和辅助设备组成。

锅炉本体，按其作用是由“锅”和“炉”二大部分组合而成。“锅”是由水、汽系统的承压部件组成，包括给水管道、省煤器、汽包、蒸发管束、水冷壁、过热器和蒸汽管道等系统。“炉”则是由燃烧系统所包括的风道、空气预热器、燃烧器、炉膛和烟道等组成的。锅炉辅助设备主要有给水泵、送风机、给煤机、磨煤机、排粉机、吸风机、除尘器、烟囱以及相应的热工仪表、控制装置、保护装置等。

动力锅炉的构造和性能与小型工业锅炉相比有其明显的特点，下面作一简要介绍：

1.容量大。工业锅炉的蒸发量通常都在20吨/时以下，个别较大的也仅40吨/时。动力锅炉一般都在220吨/时以上，我国已在运行的最大的国产锅炉是1000吨/时，正在进行设计的有配用于60万千瓦机组的1980吨/时锅炉。国外最大的是配用于138万千瓦机组的4490吨/时锅炉。这是由于电网容量不断扩大，新添机组采用大容量可降低单位造价。

2.蒸汽参数高。随着单机容量的增大，为了提高机组的运行经济性，必须提高蒸汽参数和采用中间再热循环。工业锅炉蒸汽压力一般在8~13表大气压之间，个别的也不超过25表大气压，蒸汽温度一般不超过300~350℃。动力锅炉蒸汽压力则多在100~170表大气压之间，蒸汽温度多在510~540℃，最高达555℃。由于蒸汽参数的提高，一些高温承压部件必须用耐高温合金钢制成，而工业锅炉则很少采用合金钢。

国外超临界电站锅炉最高蒸汽压力达到350表大气压，蒸汽温度达到640℃，并可使二次再热蒸汽温度达到580℃。

3.自动化程度要求高。由于动力锅炉的蒸发量大，蒸汽参数高，因而在运行中锅炉给水、燃料的供给和燃烧工况的调节等都要求精确和及时。短时的缺水、熄火或蒸汽温度偏高偏低，都可能造成设备损坏的严重后果。锅炉运行中的重要调节对象和参数，如水位、汽温、汽压和燃烧工况等必须由自动控制装置来承担调节；在超越限额时应由热工保护装置和电气联锁装置等加以限止，避免损坏设备。有的大容量机组采用计算机控制最佳工况运行和自动升炉、停炉程序控制系统，以期获得安全可靠和经济运行的效果。

4.设备可靠性要求高。工业锅炉仅供小范围的热能需要，而动力锅炉须承担大片地区的电力或热能供应，一旦停炉影响面大，经济损失可观。因此要求设计、制造、安装、运行和检修维护工作都应以提高设备可用率为主要目标。在此基础上再求得其他经济指标的改

善。

由于动力锅炉的体积庞大，不可能在制造厂进行整体安装和调试。设备制造和安装过程中，必须严格执行质量管理和分项分部检验制度。还应十分注意经验资料的积累，以保证锅炉整体获得最高可用率，亦即最低的故障率。

5. 热效率较高。一般情况下工业锅炉效率在65%以下。动力锅炉由于燃烧和传热工况组织得较完善，热量利用较充分，锅炉效率多数在90%左右。

我国生产的中压以上电站锅炉见表1-1。

我国中压以上电站锅炉系列

表1-1

额定蒸发量 (吨/时)	蒸汽压力 (表大气压)	蒸汽温度 (°C)	再热蒸汽温度 (°C)	给水温度 (°C)	配汽轮机功率 (万千瓦)
130	39	450	—	150	2.5
240	39	450	—	150	5
220	100	540	—	215	5
410	100	540	—	215	10
400	140	555	555	235	12.5
670	140	540	540	235	20
935	170	570	570	265	30
1600	170	555	555	265	30
1980	170	540	540	265	60

动力锅炉的分类如下：

1. 按蒸发量分。小于220吨/时为小容量锅炉，220~410吨/时为中容量锅炉，大于670吨/时为大容量锅炉；

2. 按蒸汽参数分，有低压锅炉（≤15表大气压）、中压锅炉（25~40表大气压）、高压锅炉（100表大气压）、超高压锅炉（140表大气压）、亚临界压力锅炉（170表大气压）和超临界压力锅炉（≥225表大气压）；

3. 按燃料分，有燃煤炉、燃油炉和天然气锅炉等；

4. 按燃烧方式分，有层燃炉、室燃炉、旋风炉、沸腾炉等；

5. 按水循环方式分，有自然循环锅炉、直流锅炉、强制循环锅炉、复合循环锅炉等；

6. 按排渣方式分，燃煤锅炉按排渣方式不同，又分固态排渣炉和液态排渣炉。

国产电站锅炉的型号采用锅炉制造厂名的汉语拼音字母放在最前面，以蒸发量和蒸汽压力直接作为型号，最后是设计序号。例如，HG-220/100-1表示哈尔滨锅炉厂生产的220吨/时，100表大气压1型高压锅炉。各锅炉制造厂的字首：BG为北京锅炉厂；DG为东方锅炉厂；SG为上海锅炉厂；WG为武汉锅炉厂。

第二节 典型动力锅炉简介

了解和熟悉典型锅炉的设计参数和结构布置是掌握动力锅炉使用的必经途径。鉴于我国能源政策，电站锅炉以燃煤为主，而燃煤锅炉设备系统的复杂程度高、发生的故障和需要研究的内容多，故本文以烧煤锅炉设计为主。

一、HG-220/100-1高压蒸汽锅炉

此种锅炉系按燃用烟煤设计的自然循环固态排渣煤粉炉，由哈尔滨锅炉厂设计和首先生

产，与5万千瓦汽轮机组配套使用，是以后各大锅炉厂均有生产并较普遍采用的动力锅炉。此锅炉纵剖面如图1-1所示，其主要技术参数及特性如下：

额定蒸发量	220吨/时
过热蒸汽压力	100表大气压
过热蒸汽温度	540℃
给水温度	215℃
排烟温度	128℃
设计锅炉效率	91.8%

锅炉结构采用单汽包Ⅱ型布置。

燃烧室两侧墙装有切圆燃烧的直流喷燃器。燃烧室出口布置屏式过热器。水平烟道布置有二级对流过热器。后部垂直烟道装设双级布置的省煤器及管式空气预热器。

1. 蒸发设备

汽包置于炉顶前方，内径为 $\phi 1600$ 毫米，壁厚90毫米，直段长12.7米，总长14.37米，用22g钢板制成。汽包内装有52只 $\phi 290$ 毫米的旋风分离器作为汽水分离装置的一次分离装置，上面装有波形板顶帽。汽包顶部装有波形板和出汽孔板作为二次分离装置。中间装有给水冲洗蒸汽装置。

水冷壁采用管径为 $\phi 60 \times 5$ 毫米的密排光管，节距为64毫米。整个水循环系统分成14个循环回路，前后墙各4个，两侧墙各3个。下降管和水冷壁上联箱至汽包的水汽引出管都是 $\phi 133 \times 10$ 毫米的管子。

2. 燃烧设备

锅炉采用切向燃烧方式，在炉膛的两侧墙布置了4组角式煤粉燃烧器。4组燃烧器喷出的火焰，在炉膛中心形成一个直径800毫米的假想切圆。

整个燃烧器焊挂在水冷壁管子上，随着水冷壁管上下胀缩而移动，燃烧器箱体重量由钢索通过滑轮用平衡锤来平衡。这样的联结可使燃烧器与悬挂式炉墙紧密配合。

每个燃烧器系由6只喷口组成，最上面的喷口供接磨煤机乏气通入炉膛（三次风），第3、5喷口为带煤粉的一次风，其他3只喷口为二次风。最下面的1只二次风喷口装有 $\phi 57$ 毫米管子，用于放点火油枪或点火器。

3. 过热器

本炉的蒸汽过热系统由顶棚过热器、屏式过热器和对流过热器三部分受热面组成。对流过热器又分为低温过热器和高温过热器两部分（是沿着蒸汽流向，按其蒸汽温度而分）。

蒸汽的流程为：汽包——顶棚过热器——低温对流过热器——屏式过热器——高温对流过热器——集汽联箱引出。中间经过两级喷水减温器以调节蒸汽温度，第一级装在屏式过热

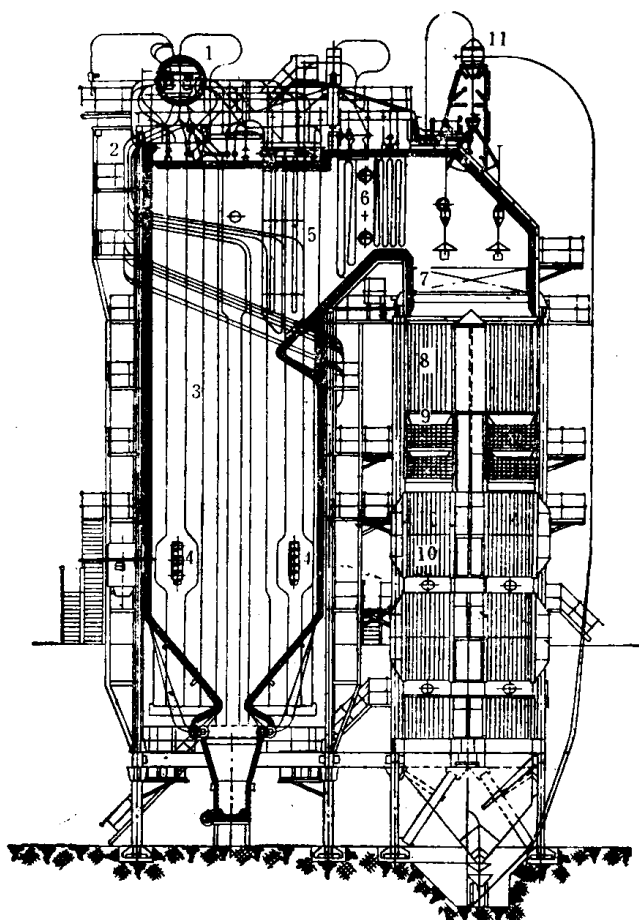


图1-1 HG-220/100型蒸汽锅炉总图

1-汽包 2-下降管 3-水冷壁 4-燃烧器 5-屏式过热器 6-对
流过热器 7-高温省煤器 8-高温空气预热器 9-低温省煤器
10-低温空气预热器 11-钢珠除灰装置

器前，第二级装在高温对流过热器的冷、热段之间，用作细调节。

顶棚过热器和低温对流过热器均采用 $\phi 38 \times 4$ 毫米的 20A 钢管。屏式过热器和高温对流过热器则均采用 $\phi 38 \times 4.5$ 毫米的 12Cr1MoV 合金钢管。屏式过热器布置在炉膛出口，共有 8 组悬吊在炉顶构架上。每组有一 $\phi 273 \times 35$ 小联箱承载屏式受热面。联箱内装有两道隔板，使蒸汽经过两次串联加热。

4. 省煤器及空气预热器

省煤器采用逆流传热、双级布置。省煤器的给水由下向上流经蛇形管，烟气由上向下冲刷蛇形管外壁。它被空气预热器分隔为上下两级，上级为高温省煤器，下级为低温省煤器。每一级又由对称的左右两组组成。高温省煤器沿烟道深度方向布置了 36 排蛇形管。低温省煤器由于空气预热器结构的要求，在沿深度方向又分为前后两组，每组各有 17 排蛇形管。高低温省煤器的蛇形管均由 $\phi 38 \times 4$ 毫米钢管弯成，都是错列布置。横向节距为 75 毫米，纵向节距：高温为 60 毫米，低温为 48 毫米。

省煤器联箱位于烟道外左右两侧，低温省煤器有进出水联箱各 4 只，高温省煤器有进出水联箱各 2 只。两级省煤器间用左右各 6 根 $\phi 60 \times 5$ 毫米连接管相连，并前后相交叉，以防止因炉烟温度相差产生的水温不均匀。省煤器联箱均用 $\phi 219 \times 20$ 毫米钢管制成。

空气预热器为管式双级布置，由管板、管子和支撑管组成。沿深度方向分为前后两组，每组由 4 只管箱组成。前后组之间有宽为 180 毫米的空气通道。

空气预热器分为上下两级，中间隔有低温省煤器。上级为高温空气预热器，只有一节管箱高，由 8 个管箱组成。下级低温空气预热器又分为上、中、下三节，每节由 8 个管箱分前后布置，共 24 个管箱。各管箱的管板厚度均为 16 毫米，受热面管径为 $\phi 40 \times 1.6$ 毫米，支撑管为 $\phi 133 \times 4$ 毫米。

从送风机送来的冷空气由低温空气预热器的下管箱前后两路进入，六次与受热面管子的外壁冲刷穿越后，从高温空气预热器管箱的前后出来时已加热到 300°C 。

二、SG-400/140 型超高压中间再热锅炉

上海锅炉厂生产的 SG400/140 型超高压中间再热自然循环锅炉，配用于 12.5 万千瓦汽轮发电机组。其结构特点按燃料及燃烧方式不同有五种变型设计，即前墙布置燃烧器燃用烟煤的 406 型、四角布置燃烧器燃烟煤的 408 型、燃用无烟煤的 409 型、系统化标准化设计燃烟煤的 410 型和燃油箱式锅炉 411 型。

图 1-2 所示是 410 型燃烟煤标准化设计的 SG400/140 型锅炉，其主要技术参数及特性如下：

额定蒸发量	400 吨/时
过热蒸汽压力	140 表大气压
过热蒸汽温度	555°C
再热蒸汽流量	330 吨/时
再热蒸汽压力（进口/出口）	25.5/24 表大气压
再热蒸汽温度（进口/出口）	$335/555^\circ\text{C}$
给水温度	235°C
排烟温度	119°C
热空气温度	280°C
设计锅炉效率	92.38%

这种按烟煤设计的锅炉为单炉膛四角切圆燃烧、 Π 型布置固态排渣煤粉炉，但后竖井与

炉膛后墙间无中间走廊，因此结构紧凑。锅炉考虑了全露天布置的要求，在炉墙刚性梁外面装有金属外护板，炉顶装有罩壳，保护炉顶合金钢管道，以防冷脆。

1. 蒸发设备

汽包内径为 $\phi 1600$ 毫米，壁厚80毫米，筒身长11.929米，总长13.730米，材料用13MnNiMo54(BHW-35)。汽包内两侧装有长排铅丝网分离器，上部装有清洗孔板及给水清洗分配管，顶部设有均流孔板。汽包底部布置有4根 $\phi 419 \times 36$ 毫米的大直径下降管。大直径下降管与水冷壁下联箱之间用46根 $\phi 133 \times 12$ 毫米的下降支管相连接。

水冷壁是由 $\phi 60 \times 6$ 毫米的鳍片管组成的膜式水冷壁，材质为20A优质钢，节距为80.5毫米。整个水循环系统分成14个循环回路，前后墙各4个，两侧墙各3个。前后水冷壁各由管子120根组成，两侧墙各96根。上联箱设有46根 $\phi 133 \times 10$ 毫米导汽管与汽包相连接，材质为10CrMo910。炉膛辐射受热面平均热负荷为 102×10^3 大卡/米²·时。

2. 燃烧设备

炉膛横断面成近似正方形，宽度为9.6米，深度为8.357米。炉膛四角布置直流式煤粉燃烧器，燃烧器中心标高为13.4米，燃烧火焰假想切圆直径为800毫米。

在锅炉额定负荷下，储仓式制粉系统采取热风送粉时，一次风占总风量的30%，一次风速选30米/秒。每一燃烧器有3个一次风喷口，4个二次风喷口和最上部1个三次风（乏气）喷口。二次风比例为55%，二次风速选40米/秒，三次风比例为15%。炉膛容积热负荷为 156×10^3 大卡/米³·时。

3. 过热器与再热器

过热蒸汽流程：汽包——顶棚管过热器——后竖井后墙包覆管——后竖井两侧包覆管——前屏过热器——一级喷水减温——后屏过热器——二级喷水减温——对流过热器——集汽联箱引出。

顶棚管和包覆管过热器均由管径 $\phi 38 \times 4$ 的20A钢管制成，节距45毫米，管间点焊有6毫米圆钢。前屏过热器共8片，宽1.83米，高10米，由21根 $\phi 38 \times 4$ 毫米管子制成。材质除外圈一根为Π-11外，其余为10Cr1MoV。管间节距为42毫米。后屏过热器有14片，每片屏宽2.5米，高9.5米，用13根 $\phi 38 \times 5$ 毫米管子组成。外圈一根为Π-11，其余为12Cr1MoV。两屏中心间距1080毫米。对流过热器由104排蛇形管组成，管径为 $\phi 38 \times 5$ 毫米，横向节距

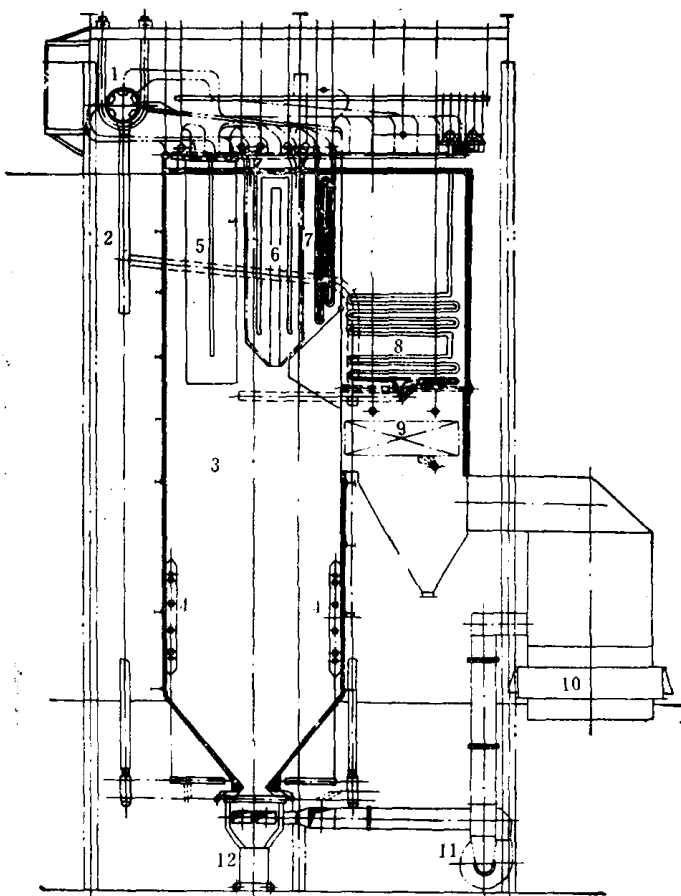


图1-2 SG-400/140型超高压中间再热锅炉总图

1-汽包 2-下降管 3-水冷壁 4-燃烧器 5-前屏过热器 6-后屏过热器 7-对流过热器 8-再热器 9-省煤器 10-空气预热器
11-烟气再循环风机 12-出渣设备

90 毫米, 进口段管子材质为 12Cr1MoV, 进口段用 Π-11。

再热器为单级, 水平布置于后竖井上部。在进入再热器前的蒸汽管道上, 设有事故喷水装置。再热器由 104 排蛇形管组成, 纵向布置垂直于前后墙。每排由 5 根管子套弯, 管径为 $\phi 42 \times 3.5$ 毫米, 分成上下两段, 下段用 20A 钢管, 上段用 10CrMo910 和 Π-11 二种钢材。整个再热器的重量由省煤器悬吊管承担, 吊在炉顶钢架上。再热蒸汽温度用烟气再循环来调节。当负荷降低至 70% 额定出力时, 再循环烟气量为总烟气量的 17%, 可维持额定再热蒸汽温度。

4. 省煤器与空气预热器

省煤器为单级, 分成串联的上下两组, 布置于再热器下面。它共有 204 排 $\phi 32 \times 4$ 毫米 20A 钢管制成的蛇形管, 水平放置垂直于前墙, 交叉排列和逆流传热布置。在省煤器上部的两只出水联箱上各引出 52 根 $\phi 42 \times 5$ 悬吊管, 作为承载再热器蛇形管用, 材质为 20A 号钢。

这种锅炉采用两台 $\phi 6.3$ 米直径的回转式空气预热器, 装在锅炉后部运行层上。它的转子高 2.4 米, 内装 0.5 毫米厚的传热波形板, 还设有蒸汽吹灰装置及水冲洗装置。

三、DG-670/140-4 型超高压中间再热锅炉

东方锅炉厂按贫煤设计的配用于 20 万千瓦发电机组的超高压锅炉如图 1-3 所示。其主要技术参数及特性如下:

额定蒸发量	670 吨/时
过热蒸汽压力	140 表大气压
过热蒸汽温度	540℃
再热蒸汽流量	579 吨/时
再热蒸汽压力 (进口/出口)	27.5/25.5 表大气压
再热蒸汽温度 (进口/出口)	325/540℃
汽包工作压力	156 表大气压
给水温度	240℃
排烟温度	140℃
设计锅炉效率	90.84%

锅炉为单炉膛 Π 型布置, 四角切圆燃烧, 固态排渣煤粉炉, 按燃用陕西秦岭贫煤设计。锅炉的炉膛四周、水平烟道及后竖井两侧墙均为水冷壁系统。炉膛上部及折焰角上部布置顶棚过热器、屏式过热器和高温对流过热器。后部垂直烟道布置有再热器、低温对流过热器和省煤器, 再后面是回转式空气预热器。其结构特点如下:

1. 蒸发设备

汽包内径为 1600 毫米, 壁厚 80 毫米, 筒身长 20 米, 材料为 18MnMoNb。汽包内部装有 84 个 $\phi 315$ 毫米的旋风分离器, 分前后二排对称布置。旋风分离器上部装有淋水清洗装置。汽包顶部装有波形板分离装置。

水冷壁是由 $\phi 60 \times 6$ 毫米, 节距为 80 毫米的鳍片管焊整片的膜式水冷壁, 材质为 20 号锅炉钢。整个水循环系统分成 32 个水循环回路, 即每面水冷壁各 8 个回路。下降管采用 6 根 $\phi 426 \times 35$ 毫米的集中下降管, 再通过 $\phi 159 \times 16$ 毫米的分配支管接至各水冷壁下联箱。水冷壁上联箱到汽包的汽水引出管大部分为 $\phi 159 \times 16$ 毫米管子, 少量为 $\phi 133 \times 13$ 毫米管子。

折焰角处后水冷壁采用整排弯管, 另接有 $\phi 32 \times 5$ 毫米管子, 以引出部分工作介质向上至 $\phi 159 \times 18$ 毫米小联箱, 然后接 $\phi 76 \times 7.5$ 管子至上联箱。

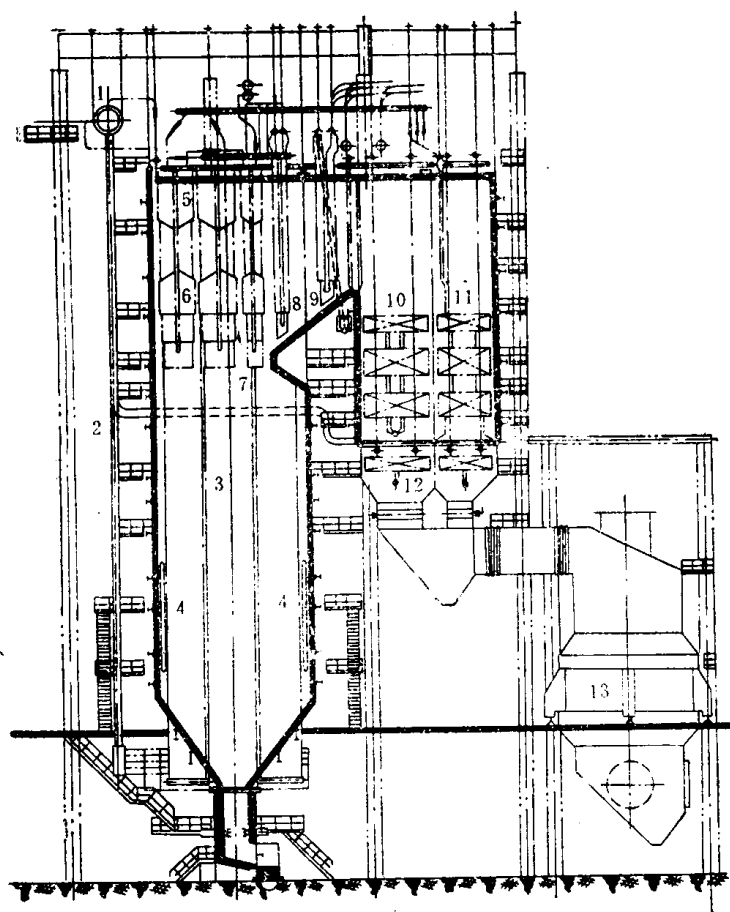


图1-3 DG-670/140-4型超高压中间再热锅炉

- 1.汽包 2.下降管 3.水冷壁 4.燃烧器 5.顶棚过热器 6.前屏过热器 7.后屏过热器 8.高压对流过热器 9.高温再热器 10.低温再热器 11.低温对流过热器 12.省煤器 13.回转式空气预热器

各水冷壁下联箱内还装有蒸汽加热管，用来在启动时加速水循环流动，接以13~16表大气压、320~350℃的蒸汽，耗汽量约15~20吨/时。

2. 燃烧设备

炉膛宽度11.92米、深度10.88米。燃烧器设于炉膛四角，每角分为上下四组，下数第一、三组装有低负荷助燃油枪及高能电火花点火装置。在额定负荷下燃烧器的一次风占总风量的28%，一次风速选30.8米/秒；二次风速选50~54.5米/秒，二次风量占总风量的68%。每组燃烧器的一次风喷口布置有“侧二次风口”，其风量占二次风总量的15.7%，作为锅炉燃烧调整的一种手段。

炉膛总容积4250米³。炉膛容积热负荷为115×10³大卡/米³·时。炉膛断面热负荷为3.8×10⁶大卡/米²·时。总辐射受热面2328米²。辐射受热面平均热负荷为112.5×10³大卡/米²·时。

3. 过热器与再热器

过热器由顶棚管、包覆管、大屏、后屏及对流过热器所组成。蒸汽流程依次为：汽包——顶棚管——后竖井包覆管——低温对流过热器——一级喷水减温器——大屏过热器——后屏过热器——高温对流过热器——集汽联箱引出。

顶棚管和包覆管均由管径φ38×5毫米、节距47.5毫米的20号钢鳍片管整焊构成。大屏沿炉宽布置4片，每片两组，由φ42×5毫米的12Cr1MoV管子制成，其管间采用管夹管的方式固定，夹持管的材料采用钢研102；同时，屏下缘最外两圈管子也采用钢研102材料。后屏过热器的管径、材料及结构均和大屏相同，其间以连接管交叉连接。

低温对流过热器由φ42×5毫米的20号钢管制成，水平布置在尾部烟道，其全部重量由

省煤器悬吊管承担。高温对流过热器由 $\phi 42 \times 5$ 毫米管子三套圈组成，冷段用 12Cr1MoV，热段用钢研102。为减少高温腐蚀，采用 Cr20Ni14SiZ 钢板制成冷却式固定元件夹住管圈。

再热蒸汽流程为：汽轮机高压缸排汽——低温再热器——喷水减温——高温再热器——出口联箱引出。

低温再热器由 $\phi 42 \times 3.5$ 毫米钢管制成，水平布置在尾部烟道，分上中下三组。上组材质为 12Cr1MoV，中下两组均为 20 号钢。全部重量由省煤器悬吊管承受。高温再热器用 $\phi 51 \times 3.5$ 毫米钢研102管子制成。

再热蒸汽温度的调节用烟气挡板作粗调节，喷水减温器作细调节。当为额定负荷时，后竖井再热器侧与过热器侧按一定比例分配；过热蒸汽尚须少量喷水，以维持二者汽温均达额定值。当负荷降低时，须关小过热器侧挡板，以增加再热器侧烟气量和吸热量来维持再热汽温，过热蒸汽温度则须靠减少喷水量和增加辐射吸热量来维持。据计算表明，在 70~100% 负荷时均能保持额定的 540℃。

4. 省煤器与空气预热器

省煤器分两个组件并列布置在后竖井的再热器及过热器烟道下部。采用 $\phi 32 \times 4$ 毫米 20 号钢管制作。其上联箱的引出管为 $\phi 42 \times 5$ 毫米管子，它就作为低温再热器和低温对流过热器的悬吊管。省煤器工作介质温升 30℃ 左右，前后两组略有差异。

两台风罩回转式空气预热器装于炉后标高 10 米的运转层，定子直径 $\phi 8.5$ 米，受热面高 1.8 米，用 0.5 毫米碳钢板轧制成波形板。预热器上装有蒸汽吹灰器及消防兼水冲洗装置。进风温度为 50℃，出风温度为 295℃。

四、SG-1000/170型亚临界压力直流锅炉

国产 1000/170 型直流锅炉是七十年代我国自行设计制造的容量最大的动力锅炉，如图 1-4 所示。该锅炉按燃用烟煤煤粉或燃油设计，配用于额定功率为 30 万千瓦的汽轮机组。其

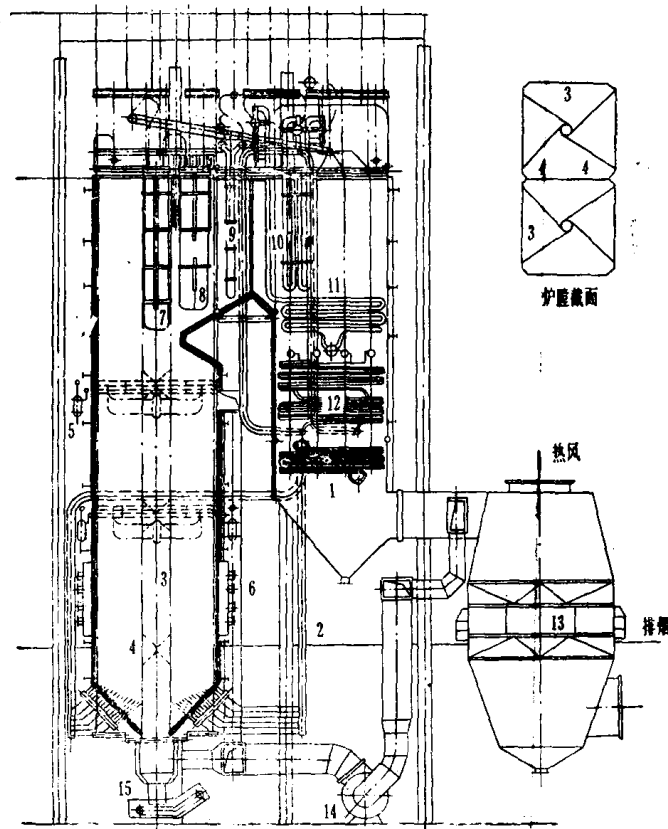


图1-4 SG1000/170型直流锅炉
总图

1. 省煤器
2. 大直径下降管
3. 水冷壁
4. 双面露光水冷壁
5. 混合器
6. 燃烧器
7. 前屏过热器
8. 后屏过热器
9. 高温对流过热器
10. 高温再热器
11. 低温再热器
12. 低温对流过热器
13. 空气预热器
14. 再循环风机
15. 排渣机

主要技术参数及特性如下:

额定蒸发量	1 000吨/时
过热蒸汽压力	170表大气压
过热蒸汽温度	555℃
再热蒸汽流量	830吨/时
再热蒸汽压力 (进口/出口)	36/34表大气压
再热蒸汽温度 (进口/出口)	325/555℃
给水温度	265℃
热风温度	323℃
排烟温度	128℃
设计锅炉效率	90.77%
燃煤量 (平顶山烟煤)	161吨/时
燃煤低位发热量	4 390大卡/公斤

1. 蒸发设备

锅炉给水经省煤器加热后, 首先至炉膛中间的双面水冷壁。水冷壁由 $\phi 51 \times 6$ 毫米的15CrMo 钢管组成, 前后分两片管屏, 中间留有2.5米宽通道以平衡两侧炉膛的烟压。每片管屏有54根管子。在省煤器与双面水冷壁之间的连接管路上装有过滤器。

炉膛四面水冷壁采用垂直一次上升管屏, 中间三次混合并分配, 沿高度由下向上分为底部、下部、中部、上部四个辐射区。前墙及后墙各8片、两侧墙各4片, 为由鳍片管组成的整焊膜式水冷壁。底辐射区、下辐射区和中辐射区采用 $\phi 22 \times 5.5$ 毫米的20A 碳钢鳍片管, 以获得较高的质量流速, 保证流动稳定性和传热安全。中辐射区和下辐射区还采用内螺纹管, 以防止膜态沸腾。

每片管屏还在联箱中间加装隔板, 使整个锅炉分成48个回路。在每个回路的入口连接管上, 装有一只调节阀, 以调节进水量, 使管壁温度和工作介质温度尽可能均匀。炉膛壁面平均热负荷为 124×10^3 大卡/米²·时。

2. 燃烧设备

炉膛成正方形, 宽各为8.5米, 深为8.475米。燃烧器布置在前后墙, 形成四角切圆燃烧。假想切圆直径为500毫米。

燃烧器有四层一次风口、五层二次风口, 相间排列均等配风。一、二次风口均可在 $\pm 20^\circ$ 范围内调整倾角。一次风喷嘴四周还有周界风。

炉膛有效容积为4730米³, 容积热强度为 149.4×10^3 大卡/米³·时, 断面热强度为 4.9×10^6 大卡/米²·时。

3. 过热器与再热器

过热器系统由顶棚管、包覆管、低温对流过热器、屏式过热器及高温对流过热器组成。在屏式过热器的前后各有一级喷水减温器。

顶棚管用 $\phi 38 \times 5.5$ 毫米20A 钢管制成, 节距为45毫米。包覆管为 $\phi 38 \times 5.5$ 毫米20A 钢管, 节距为76毫米, 管间焊有扁钢的膜式结构。它采取炉外大直径连接管下降, 炉内一次上升的系统结构。

低温对流过热器布置在后竖井中部, 是用 $\phi 42 \times 3.5$ 毫米的10CrMo910 钢管制成的水平蛇形管, s_1 —160毫米, s_2 —60毫米, 成逆流传热布置。

屏式过热器用 $\phi 38 \times 6$ 毫米 12Cr1MoV 管子制成, 20 根弯制成一屏, 共有 24 屏。屏的向火侧布置有由后水冷壁管接出的同样管径和材料的管子制作的护屏管。高温对流过热器系用 $\phi 38 \times 6$ 毫米的 Π -13 钢管制成的垂直蛇形管。管圈节距为 135 毫米, 四套圈、顺列顺流布置。

再热器由低温和高温两级组成。低温段布置在垂直烟道的上部, 采用 $\phi 51 \times 3.5$ 毫米的 15CrMo 钢管弯制成水平放置的蛇形管, s_1 —135 毫米, 七套圈顺列逆流布置, 出口端垂直向上穿出炉顶进入联箱。低温再热器之前装有事故喷水装置。低温与高温再热器之间装有微量喷水减温器。高温段采用 Π -11 钢制成的 $\phi 51 \times 3.5$ 毫米钢管, s_1 —180 毫米, 七套圈、顺列顺流垂直布置的蛇形管。

再热蒸汽温度由两台烟气再循环风机作为主调节。烟气从空气预热器前烟道接出, 由冷灰斗下部引入炉膛。另有喷头雾化式微量喷水减温器两台, 作为细调节, 每台最大喷水量为 10 吨/时。

4. 省煤器及空气预热器

对流省煤器布置在垂直烟道下部, 由 $\phi 32 \times 4.5$ 毫米的 20A 钢管组成双套圈错列逆流水平布置的蛇形管, s_1 —100 毫米, s_2 —50 毫米。由于煤种灰分达 30% 以上, 省煤器烟气流速选取 < 9 米/秒。炉膛双面水冷壁是幅射省煤器, 给水在其中继续加热, 出口处工作介质欠热为 57 大卡/公斤。

两台回转式空气预热器设在炉后低转层, 其转子直径为 9.5 米, 受热面用厚 0.5 毫米的 12CrSiCu 钢板轧制成波形板。受热面的冷端位于下方, 外壳装有铰链门, 以便更换冷端受热面。每台空气预热器重 257 吨, 全部重量通过横梁承受在立柱上。

第三节 锅炉的蒸发系统

锅炉的蒸发系统, 是吸收炉膛的辐射热量和部分对流传热以产生饱和蒸汽的受热面系统。自然循环锅炉的蒸发系统是由汽包、水冷壁、蒸发排管、下降管和联箱等所组成。

从锅炉给水进入锅炉到最后成为过热蒸汽, 其吸收热量的过程, 可分为预热段、汽化段和过热段三部分。如为中间再热机组配套时, 还有再热段。预热段是将锅炉给水由进入时的温度加热至汽包压力下的饱和温度。汽化段是将饱和温度下的炉水蒸发成饱和蒸汽。过热段则是将饱和蒸汽继续升温到所需的过热度。锅炉的蒸汽参数不同和给水温度不同, 这几部分热量的比例也不同, 如图 1-5 和图 1-6 所示。压力愈高, 汽化热愈小, 预热段和过热段所需热量增大。在超高压中间再热锅炉中, 还须有一部分供再过热用的热量。由此可以看出, 锅炉各受热面的布置, 须符合所选择蒸汽参数中各段所需的热量。这是从设计上保证锅炉满足技术规范的必要条件。

蒸汽锅炉按其蒸发系统的水循环方式不同, 可分为自然循环和强制循环两大类。

自然循环锅炉蒸发受热面中水流的流动, 完全依靠炉水受热后所产生蒸汽与水的重度差来推动。锅炉工作压力愈低, 这个差别愈大, 循环相对比较可靠。当压力逐渐提高, 比重差逐渐减小, 到接近临界压力时, 水汽自然循环推力也接近于零。要维持水汽流动, 以维持受热面得到足够冷却, 必须依靠外界的推力。因此, 自然循环一般只能用在出口蒸汽压力小于 170 表大气压的锅炉。

强制循环锅炉包括直流锅炉、辅助循环锅炉和复合循环锅炉等数种不同循环方式的锅

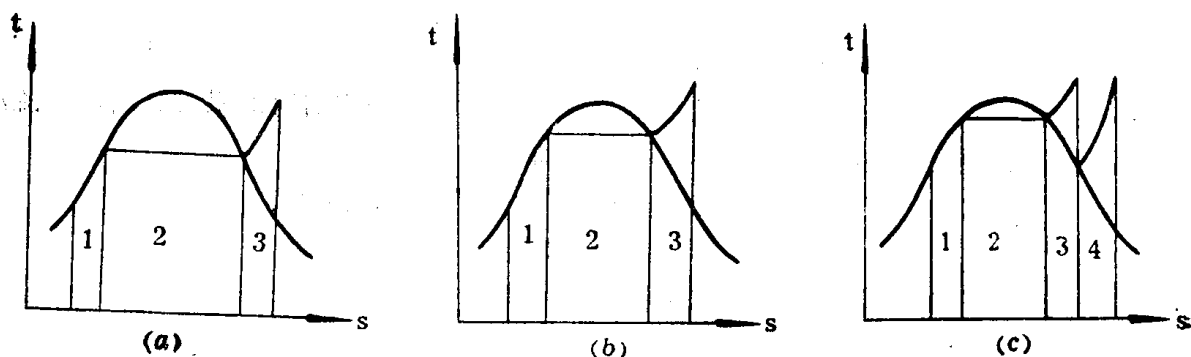


图1-5 锅炉蒸汽参数对各段热量分配的影响

(a)中压中温 (b)高压高温 (c)超高压中间再热

1. 预热段热量 2. 汽化段热量 3. 过热段热量 4. 再热段热量

蒸汽压力 (at)	给水温度 (°C)	过热温度 (°C)	再热温度 (°C)	预热段	汽化段	过热段	再热段
39	172	450		13.6	66	20.4	20.4
100	215	540		18.8	51.7	29.5	29.5
140	240	555	555	17.9	36.7	28.6	16.8

图1-6 不同蒸汽参数的各段热量分配比例

炉。在蒸发受热面中，依靠水泵压力建立强迫流动的锅炉都是强制循环锅炉。

辅助循环锅炉和自然循环锅炉一样设有汽包，但在蒸发系统的下降管中装有炉水循环泵来帮助推动水汽的循环流动。这样可使水冷壁采用小口径管子和布置成较任意的壁面来冷却炉墙，而不象自然循环锅炉那样必须采用较大管径和陡直布置的水冷壁以减少流动阻力。辅助循环锅炉虽然解决了水循环流动的困难，但是由于汽包中进行的汽水分离也随着压力升高、汽和水的比重差变小而难以进行。因此，辅助循环目前一般也只用出口蒸汽压力为180表大气压以下的锅炉中。

水循环的基本原理是：在自然循环锅炉中，由汽包经下降管至水冷壁再回到汽包的闭合蒸发系统称为循环回路。炉水在此回路中形成自然循环的过程（见图1-7），是由于水冷壁管受热产生蒸汽，其重度小于下降管中不受热水的重度。这个重度差促使水冷壁管中水汽混合物向上流动，下降管中水向下流动，并由此产生一个运动压头，造成循环流动。

运动压头可用下式表示：

$$S_{yd} = H(\rho_r - \rho_{qr}) \text{ 公斤/米}^3$$

式中 H ——循环回路高度，米；

ρ_r ——下降管中水的重度，公斤/米³；

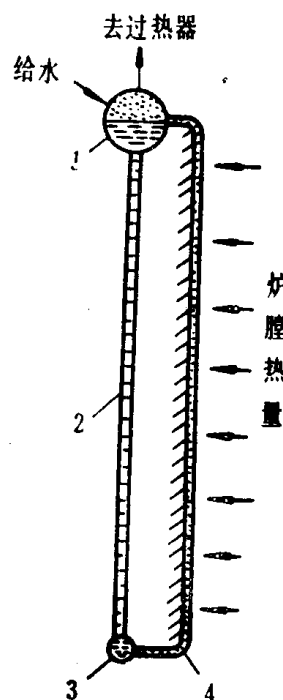


图1-7 自然循环过程图

1. 汽包 2. 下降管 3. 下联箱 4. 水冷壁

$r_{q,}$ ——上升管中水汽混合物的重度, 公斤/米³。

水在管中循环流动, 必然伴有流动阻力。下降管中水的流动有阻力, 上升管中水汽混合物的流动也有阻力, 同时还有水汽混物流经汽包中的汽水分离器时的阻力。当循环流动稳定时, 运动压头正好用来克服循环回路的阻力, 即:

$$H(r_s - r_{q,}) = \Delta P_{x,} + \Delta P_{r,} + \Delta P_{f,} \quad \text{公斤/米}^2$$

或简化为

$$S_{y,d} = \Sigma \Delta P$$

式中 $\Delta P_{x,}$ ——下降管流动阻力, 公斤/米²;

$\Delta P_{r,}$ ——上升管流动阻力, 公斤/米²;

$\Delta P_{f,}$ ——汽包分离设备流动阻力, 公斤/米²。

上述表达式表明, 运动压头是循环回路高度与重度差的乘积; 它表示产生循环流动的动力, 没有重度差就没有流动, 重度差越大, 流动的能量就越大。

运动压头与流动阻力的平衡表现在有稳定的流速上。一般以上升管入口处水的流速作为循环流速。设进入上升管的水流量为 G 公斤/时, 上升管的流通截面为 f , 米², 水的重度为 r_s , 公斤/米³, 则循环流速可按式求得:

$$\omega_0 = \frac{G}{3,600 f r_s} \quad \text{米/秒}$$

式中 r_s ——相应于入口处压力的饱和水重度。

锅炉水冷壁管或对流管簇工作的好坏, 在于是否有足够流速的水流经这些受热面, 把管壁的热量带走。管内供水流速高, 放热系数就大些, 就能把管壁传来的热量带走。反之, 如果水流得很慢或甚至不流动, 不能把管壁热量带走, 将导致管壁温度升高, 甚至超温爆管。

试验证明, 一般条件下, 循环流速大于0.2米/秒即可使水循环正常。循环流速不是在运行中可以任意控制的。对于一定参数、结构、炉膛热负荷的锅炉, 就有一个相应的循环流速。不同锅炉的各个循环回路, 都有其一定的循环流速。循环流速不合理, 主要应从结构上找原因和采取措施。锅炉在正常工况下的循环流速范围见表1-2。

锅炉循环流速范围表

表1-2

上升管型式	循环流速 (米/秒)	上升管型式	循环流速 (米/秒)
双面水冷壁	0.5~2.0	半辐射蒸发排管前三排管子	0.5~1.7
直接进汽包的水冷壁	0.5~1.5	对流蒸发排管	0.1~0.8
有上联箱的水冷壁	0.2~1.0	后部对流管簇	0.1~0.5
小容量锅炉水冷壁	0.2~0.8		

锅炉的循环倍率是指进入上升管的总水量与上升管中所产生的蒸汽量之比值, 可用下式表示:

$$K = \frac{G}{D}$$

式中 G ——进入上升管的水量, 公斤/时;

D ——上升管出口的蒸汽量, 公斤/时。

循环倍率大, 表示管子出口段汽水混合物中水的份额大, 也就是出口含汽量少。这样就可以使水冷壁的内壁上有一层水膜, 除了能有效地带走热量外, 还能带走炉水蒸发后沉积下