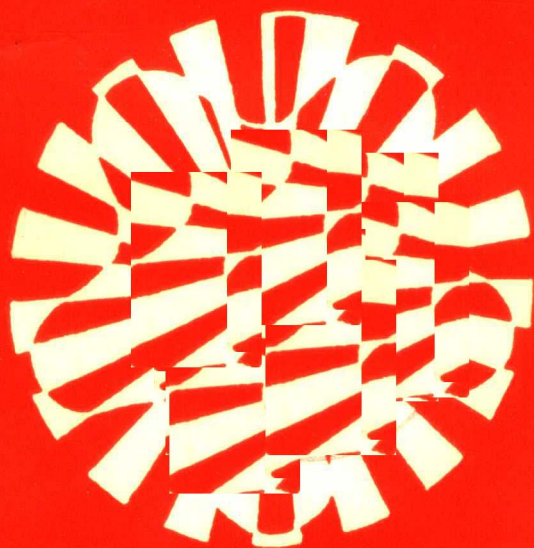


水利电力系统领导
干部岗位培训教材

电力生产现代技术 火电厂部分

王 鸿 林 主编



河海大学出版社

(苏)新登字第013号

内 容 提 要

本书共分六篇计二十一章。第一篇介绍现代锅炉技术；第二篇介绍现代汽轮机技术；第三篇介绍火力发电厂自动控制；第四篇介绍发电厂的电气部分；第五篇介绍火电厂的水处理与化学监督；第六篇介绍火电厂高温设备用钢及焊接。全书论述系统明晰、内容丰富、具有很强的实用性，反映了火电生产的最新技术和成果

本书可供水利、电力系统大中型企业厂长(经理)、党委书记、总工程师、总经济师、总会计师岗位培训时使用，也可供其它经济管理干部和科技干部的岗位培训和高等院校有关专业选用。

电力生产现代技术(火电厂部分)

王鸿林 主编

*

河海大学出版社出版发行

武进县第三印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张19.5 字数486.7千字

1991年10月第一版 1991年10月第一次印

印数1——10000册

*

ISBN 7-5638-0266-9/TK·6

定价：7.00元

编写说明

为了适应水利电力系统大中型企业领导干部岗位职务培训工作的开展,部教育司、生产司、基建司组织了部分有专长的教授、讲师和专业科技干部,编写了一套体现水利电力行业特点的领导干部岗位培训教材,共有十四本,书名是:《电力企业管理》、《电力生产企业现代管理》、《电力生产企业现代管理案例》、《电力生产现代技术(电网部分)》、《电力生产现代技术(供电部分)》、《电力生产现代技术(火电厂部分)》、《电力生产现代技术(水电厂近代技术)》、《电力建设现代管理》、《电力施工企业管理》、《火电施工现代技术》、《送变电施工现代技术》、《水电基建管理系统分析方法》、《水电施工企业经营管理》、《水利水电施工现代技术》。

这套教材主要是供给水利电力系统大中型企业局厂长(经理)、党委书记、总工程师、总经济师、总会计师岗位培训时使用,也可供其它经济管理干部和科技干部的岗位培训和高等院校有关专业选用。

由于经验不足,编写时间又很仓促,再加上当前水利电力企业正处在改革之中,一些问题正在研究探索,而且新的技术又在不断发展,因此,书中一定会存在着不完善或者欠妥之处,望读者批评指正。

水利电力部教育司

1987.8.

前 言

《电力生产现代技术(火电厂部分)》一书是根据原水电部教育司下达的“局厂长、党委书记、“三总师”岗位培训教材编审出版计划”的要求编写的。在原水电部教育司、生产司的热忱帮助和指导下，写成了讲义，经东北电力学院第1-6期连续六届总工程师岗位培训班的试用和反复修改。又经东北电管局、电力试验研究院、东北电力设计院、吉林省电力局、吉林热电厂等单位专家的集体会审和徐伟勇教授的全面审定，历时5年才形成此稿。但由于此教材涉及面较广，学员要求又不尽一致，限于编者水平，不免仍有谬误和不妥之处，谨请读者批评指正。

本书第一篇由王鸿林同志编写；第二篇的第六、七两章由金国华同志编写；第八章和第九章的第六节由叶荣学同志编写；第九章的一至五节由黄雅罗同志编写；第三篇由张玉铎同志编写；第四篇的第十三、十四章由祝洪博同志编写；第十五、十六章由黄玉琤同志编写；第十七章由陈占梅同志编写；第五篇的第十八章一至四节和第五节的一、三由姚继贤同志编写；第五节的二和第十九章由王卓昆同志编写；第六篇的第二十章由郭德耀同志编写；第二十一章由姜求志同志编写。在编写过程中曾得到金关福、陈华成等同志和北京水利电力经济管理学院等兄弟单位的大力支持和指正，有的还提供了大量素材和资料，谨此一并致谢。

编 者

一九九〇年八月

目 录

第一篇 现代锅炉技术

第一章 锅炉技术的发展	(1)
第一节 我国动力锅炉的发展及现状	(1)
第二节 超临界参数机组的应用	(2)
第三节 低污染燃烧技术	(4)
第二章 现代锅炉的蒸发受热面及其水动力特性	(9)
第一节 自然循环的蒸发受热面	(9)
第二节 强制循环的蒸发受热面	(12)
第三节 蒸发受热面的水动力特性	(18)
第三章 现代煤粉锅炉的燃烧系统	(27)
第一节 煤粉细度与燃料可磨性	(27)
第二节 磨煤机	(28)
第三节 制粉系统	(32)
第四节 燃烧设备	(36)
第四章 大型锅炉的运行调节	(39)
第一节 中间再热单元机组的负荷适应性	(39)
第二节 单元机组的功率调节系统	(40)
第三节 单元机组的变压运行	(42)
第四节 单元机组的蒸汽旁路系统	(44)
第五章 大型锅炉设备的缺陷及处理	(48)
第一节 锅炉本体的缺陷	(48)
第二节 锅炉辅机的缺陷及解决措施	(52)

第二篇 现代汽轮机技术

第六章 大型汽轮机的结构特点	(56)
第一节 现代汽轮机概述	(56)
第二节 汽缸的结构及其支承	(61)
第三节 转子的结构及其支承	(63)
第四节 汽轮机的测量装置与保护系统	(67)
第七章 汽轮机的热膨胀与热应力	(71)
第一节 概述	(71)
第二节 汽缸与转子的相对膨胀	(71)

第三节	汽缸与转子的热翘曲	(72)
第四节	热应力的分析	(74)
第八章	汽轮机的电液调节系统	(78)
第一节	功频电液调节系统的工作原理	(78)
第二节	功频电液调节系统主要单元特性	(81)
第三节	功频电液调节系统的动态特性分析	(91)
第四节	汽轮机的数字电液控制系统	(101)
第五节	工业用汽轮机的电液调节系统	(104)
第六节	汽轮机调节系统的新发展	(107)
第九章	大型汽轮机的运行和故障	(111)
第一节	机组启停的控制	(111)
第二节	汽轮机停机后的强迫冷却	(114)
第三节	汽轮发电机组轴系扭振	(117)
第四节	转子弯曲及其防止	(120)
第五节	汽轮机转子断裂及其对策	(121)
第六节	汽轮机的故障诊断	(124)

第三篇 火力发电厂自动控制

第十章	火电厂热工自动控制系统	(132)
第一节	引言	(132)
第二节	汽温控制系统	(132)
第三节	给水控制系统	(136)
第四节	燃烧过程控制系统	(139)
第五节	单元机组负荷协调控制系统	(146)
第十一章	火电厂程序控制与自动保护	(153)
第一节	引言	(153)
第二节	TM汽轮机启停程序控制系统	(153)
第三节	AFS-1000锅炉燃烧器控制和炉膛保护系统	(156)
第四节	RMS700系列汽轮机监测保护装置	(159)
第五节	锅炉灭火保护	(163)
第十二章	火电厂计算机控制	(166)
第一节	引言	(166)
第二节	计算机控制系统的组成和分类	(166)
第三节	常用控制程序	(171)
第四节	分散型综合控制系统的组成	(177)
第五节	分散型综合控制系统的基本控制单元	(179)
第六节	分散型综合控制系统的网络结构	(181)
第七节	分散型控制系统的通信	(184)

第八节	SPECTRUM综合分散型过程控制系统简介	(186)
-----	-----------------------	-------

第四篇 发电厂电气部分

第十三章	发电厂电气设备	(197)
第一节	电气设备综述	(197)
第二节	六氟化硫断路器	(199)
第三节	真空断路器	(205)
第十四章	发电厂电气一次系统	(208)
第一节	电气一次系统综述	(208)
第二节	主接线的运行分析	(209)
第三节	主接线的可靠性分析	(212)
第四节	发电机出口断路器和隔离开关	(216)
第五节	发电厂厂用电系统的接地方式	(218)
第十五章	大型发电机的继电保护	(222)
第一节	大电机的特点及其对继电保护的要求	(222)
第二节	发电机的差动保护	(225)
第三节	发电机的匝间短路保护	(227)
第四节	发电机定子单相接地保护	(228)
第五节	发电机失磁保护	(230)
第六节	发电机异常运行保护	(231)
第十六章	大型发电机的励磁系统及其自动调节	(234)
第一节	励磁系统概述	(234)
第二节	大型发电机的励磁系统	(235)
第三节	自动励磁控制系统的任务和自动励磁调节器	(241)
第十七章	大型发电机的非正常运行与故障	(246)
第一节	发电机失磁异步运行	(246)
第二节	发电机非全相运行	(249)
第三节	发电机的事故及预防	(251)

第五篇 火电厂的水处理与化学监督

第十八章	火电厂的水处理	(256)
第一节	水中悬浮物和胶体杂质的处理	(256)
第二节	水中有机物的处理	(260)
第三节	水的淡化处理	(261)
第四节	水的化学除盐	(266)
第五节	火电厂其他用水处理	(273)
第十九章	热力设备的腐蚀及防护	(275)

第一节	锅炉设备的腐蚀及防护.....	(275)
第二节	汽轮机的腐蚀及防护.....	(278)
第三节	凝汽器铜管的腐蚀及防护.....	(279)
第四节	热力设备腐蚀实例.....	(281)

第六篇 火电厂高温设备用钢及焊接

第二十章	锅炉和汽轮机用钢.....	(285)
第一节	锅炉和蒸汽管道用钢.....	(285)
第二节	螺栓和阀门用钢.....	(291)
第三节	汽轮机用钢.....	(292)
第二十一章	钢材的焊接.....	(295)
第一节	焊接的基本知识.....	(295)
第二节	焊接材料.....	(297)
第三节	焊接设备与工具.....	(298)
第四节	焊接接头的热处理.....	(299)
第五节	焊接缺陷与裂纹断口分析.....	(300)
第六节	焊接接头的质量检验.....	(301)

第一篇 现代锅炉技术

第一章 锅炉技术的发展

第一节 我国动力锅炉的发展及现状

锅炉技术主要是沿着不断增大容量和不断提高参数(压力和温度)这两个方向发展的,近年来也有向低污染方向发展的趋势。

增大锅炉(或发电机组)的容量,能减少生产每吨蒸汽(或每度电)的金属消耗、占地面积、建设投资和运行管理人员。且电厂循环热效率也会随容量增大致使锅炉外壁散热损失、汽轮机内部损失等相对减少而有所提高。所以,增大容量能显著提高经济效益和劳动生产率。但增大机组容量也受生产需要、燃烧技术、制造能力、甚至电网容量等一系列条件的限制,因此他总是逐步发展的。

1955年我国制造了40t/h链条炉(6000kW级),接着生产了75t/h和130t/h中压煤粉炉(12和25MW级),1958年制成了230t/h高压炉(50MW级),60年代开始生产400t/h和670t/h超高压炉(100和200MW级),70年代生产了935t/h和1000t/h亚临界直流炉(300MW级),80年代在引进美国燃烧工程公司(CE)制造技术的基础上,生产了近2000t/h(600MW级)的亚临界强制循环汽包炉。在筹建中的最大锅炉是准备引进苏联的2650t/h(800MW级)的超临界直流炉。90年代可望自行设计和制造这类大容量超临界机组。

美国1973年已有4300t/h(1300MW级)的锅炉投入运行,苏联1981年投入了3950t/h(1200MW级)的超临界直流炉。我国建国40年来,尽管锅炉工业发展很快,但与工业发达国家相比,还存在一定差距。

提高蒸汽参数,可使每公斤蒸汽的可用能量增加,也可降低发电的汽耗率和热耗率。所以,在不断增大容量的同时,还应不断提高蒸汽参数。我国主要动力锅炉的容量和参数见表1-1。

表 1-1 主要国产动力锅炉的容量和参数

压力分类	蒸汽压力 MPa (kgf/cm ²)	蒸汽温度 ℃	给水温度 ℃	额定蒸发量 t/h	机组容量 MW
中 压	3.8 (39)	450	150、170、172	35、65、75、120、130	6、12、25
高 压	9.8 (101)	510、540	215	220、230、410	50、100
超 高 压	13.7 (140)	540/540、555/555	240	400、670	125、200
亚 临 界	16.7 (170) 18.3 (186.5)	541/541、555/555、570/570	260、278.3	935、1000、2008	300 600

现分别说明提高压力和温度的不同影响。

一、提高压力的影响

从水蒸汽的焓—熵图中(图 1-1)可以看出:在一定的初温 t_1 和背压 p_0 下,提高初压可使理想焓降增大($\Delta h_2 > \Delta h_1$),即能使蒸汽的做功能力增高。

但从图 1-1 中也可以看出:如果只提高压力而不提高温度,将使排汽的湿度增大(即干度 $x_2 < x_1$)不利于汽机后几级叶片的安全工作。所以,提高初压的同时,必须相应的提高初温,才能保证排汽湿度不超过允许值。

提高压力使汽化潜热减少,会影响锅炉受热面的布置,还会使汽水密度差减小,不利于汽包内的汽水分离,蒸汽的溶盐能力也会增大,致使蒸汽品质不易保证。由于汽水密度差的减小,也会影响蒸发受热面内部的汽水自然循环。此外,阀门、高压加热器、给水泵等造价增高而工作可靠性相对下降。所以,初压的提高也是随着这些问题的不断解决而逐渐发展的。

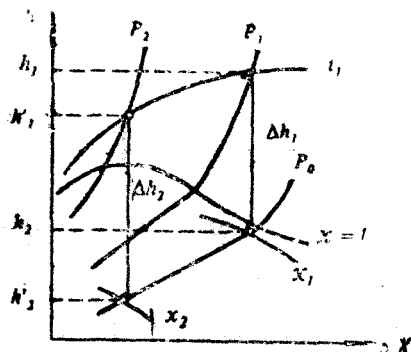


图 1-1 水蒸汽的焓—熵图

$P_2 > P_1$; $\Delta h_2 > \Delta h_1$; $x_2 < x_1$;

P_0 ——背压; t_1 ——初温

二、提高温度的影响

提高蒸汽温度能使蒸汽的焓值增加,也能有效地增大做功能力。当然,如只提高温度而不相应的提高压力,将使汽轮机排汽的干度增大,甚至呈过热状态,也是不经济的。所以汽温汽压总是相应提高的。但提高温度因受材料耐热性能的限制比提高压力要困难得多。即使采用价格昂贵的奥氏体钢,汽温也不能超过650℃。我国都采用珠光体钢。汽温低于450℃部分,一般用碳钢,汽温高于450℃部分用合金钢,但最高不超过570℃。对于超高压以上机组来说,这个温度是偏低的。所以不得不将汽轮机高压缸的排汽(汽温已降到300~350℃)重新送回锅炉再热器中去加热,经再次加热以后的蒸汽,温度又上升到接近一次汽温的数值(不超过所用材料的许用值),而后送入汽轮机的中、低压缸继续做功,这种机组称为中间再热机组。超临界压力的机组,有的还采用两次中间再热,即中、低压缸之间的蒸汽又进行一次回炉再热。

第二节 超临界参数机组的应用

当压力增高到22.1297MPa(225.6kgf/cm²)时,出现汽化潜热等于零的现象,即饱和水与饱和蒸汽的焓值相等,比容、密度、对盐类的溶解能力等各种物理、化学性质也都一样。水在加热过程中,不再出现温度不变焓值增加的蒸发现象。该压力称为临界压力,相应的饱和温度(374.15℃)则称为临界温度。

50年代美国就投产了汽压达30~35MPa,汽温超过600℃的超临界机组。当时因材料性能及经验不足等原因,机组的可用率低,维护费大,造价也较高,没有收到预期的经济效果。

一度影响了超临界机组的声誉。后来由于材料工业的发展、设计运行制造等经验的积累,以及日本、苏联等采用较低参数(24~25MPa, 540~570℃)的超临界机组,取得了较高的可用率,超临界机组,又得到广泛应用。美国1980年末已有167台超临界机组,总容量为113021MW,单机容量250~1300MW,平均676.8MW;日本1985年末已有77台超临界机组投入运行,总容量45100MW,单机容量350~1000MW,平均586MW;苏联1985年末已投运182台,其中300MW机组154台,总容量64500MW,单机最大1200MW,平均356MW。综合美国、日本、苏联等国的经验可以认为:24~25MPa, 540~570℃,一次中间再热的这种所谓较低档次的超临界压力机组,其可用率已接近亚临界机组,而热效率则比亚临界机组高1.6%左右。

我国计划从美国引进两套600MW的超临界机组、装于石洞口二厂;从苏联引进两套500MW、两套800MW的超临界机组,分别装于伊敏和绥中,参数都属于这一档次。在消化吸收引进技术并取得运行经验之后,我国也将自行设计和生产超临界机组。下面初步分析一下如何选择第一批国产超临界机组的容量和参数问题。

一、机组容量的选择

在循环参数一定的条件下,增大机组容量对经济性有两方面的影响:一方面因汽轮机内部损失相对减少,内效率提高;另一方面汽轮机漏汽损失也随机组尺寸增大而增加。综合两方面的因素使汽机热效率随机组容量增大而增高的幅度是递减的。图1-2表明了当进汽温度为538/538℃不变的条件下,机组容量、新汽压力与热耗降低量之间的关系。由图可以看出:当压力为24MPa时,机组容量由200MW增大到300MW,净热耗约降低50kJ/kW-h,由300MW增加到600MW,只能降低约15kJ/kW-h,容量再增大热耗降低量则更少。所以,在汽温受材料限制不能大幅度提高的情况下,从热经济性角度看,机组容量以600MW为宜。考虑到增大容量还有节省投资等其他方面的优点,也不宜超过800MW。因更大容量的机组会导致锅炉不得不采用双炉膛结构,汽轮机因轴系过长不得不采用双轴布置等,这些因素又会增加单位容量的投资,一定程度上抵消了增大容量的优越性。

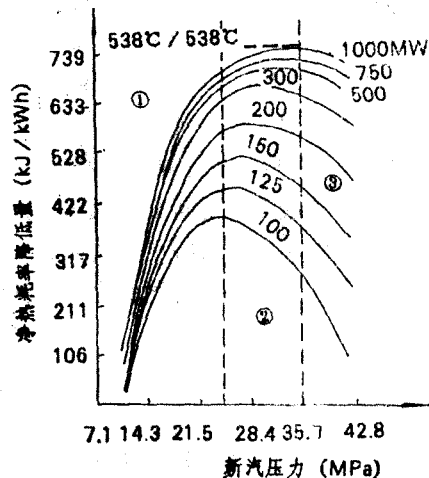


图 1-2 机组容量对热耗率的影响

二、机组参数的选择

提高新汽温度可以显著提高机组效率,但会使投资迅速增加而可靠性显著下降。所以国外近期建造的超临界机组多数采用较低的新汽温度,与国产超高压、亚临界机组相近。为了确保第一批自制超临界机组有较高的钢材自给率和设备可用率,新汽温度应取540℃为宜。

提高蒸汽压力能增高循环热效率，但给水泵耗功也同时增加。图1-3显示了保持汽温540/540℃不变的条件下，新汽压力与机组热效率之间的关系。由图可以看出：新汽压力由17MPa提高到25MPa时，净热耗大约可降低1.75%，约140kJ/kW·h。继续升高初压，热耗降低甚微，而对给水泵、阀门、高压加热器等要求却继续增高，所以在汽温受限的情况下，压力最好不超过25MPa。

再热蒸汽的压力、温度和再热级数等也都有个优化选择问题，这里也只作概略的定性分析。在工程应用的参数范围内，由一次再热增加到两次再热，发电热耗可降低1.7%~2.4%，但投资大幅度增加，运行、维护也更加复杂。为了保证综合效益和适应我国的技术水平，最好还是采用一次再热。再热压力通常为新汽压力的20%左右。因此，超临界机组的再热汽压，会比亚临界机组高。如再热汽温保持540℃不变，随着汽轮机中压缸进汽压力的相应提高，将使汽轮机排汽湿度增大，这不仅使末几级叶片的工作条件变差、影响长叶片的工作寿命，也降低低压缸的内效率。如果把中压缸进口汽温由535℃，提高到545℃，不仅可改善末几级叶片的工作条件，还可降低热耗约0.3%，相比于增加不多的造价来说，还是经济的。所以，在初温540℃不变的情况下，应适当提高再热温度以充分发挥超临界机组的优越性。例如：将锅炉出口的540/540℃改为540/550℃或540/555℃，经计算是有利的。

当然，这种低档次的超临界机组，热效率比亚临界机组提高不多(1.6%左右)，如建在煤价较低的矿口附近，效益更不明显。因此，发展这种超临界机组的目的，不单纯是为了节约一次能源，也是为了今后发展更高参数的超临界机组做好技术准备。

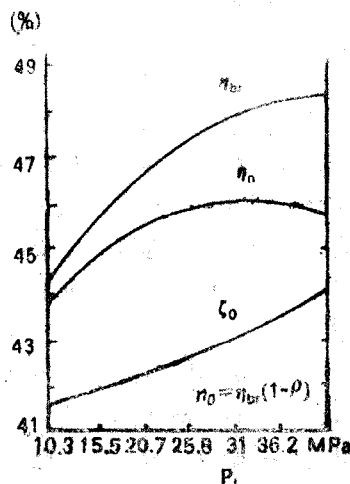


图 1-3 新汽压力对机组热效率的影响
 η_{br} —毛效率； η_n —净效率；
 ζ_o —给水泵影响系数； P_1 —新汽压力

第三节 低污染燃烧技术

煤燃锅炉对大气的污染以随烟气排出的氮氧化合物(NO_x)、氧化硫(SO_2 、 SO_3)和粉尘(飞灰)为主。目前我国还没有对电厂作出氮氧化合物的排放规定。对二氧化硫和粉尘也只限制总排放量(见表1-2)，而不限浓度(mg/Nm^3)。所以电厂设计时可以通过增加烟囱高度或烟囱台数来解决超标问题。国外同时控制总排放量和浓度两项指标，为了使浓度达标，用于除硝、除硫和除尘的投资，有的甚至达到建厂投资的三分之一，这就不得不迫使人们研究低污染燃烧技术。目前，被认为较有前途的有以下两种方式：一种是气化燃烧；一种是循环燃烧。

表 1-2 电站排放标准(GBJ4-73)

烟囱高度 m	排放量 kg/H	
	粉 尘	二氧化硅
35	82	82
45	170	170
60	310	310
80	650	650
100	1200	1200
120	1700	1700
150	2400	2400

一、气化燃烧

1984年美国在柯尔瓦特(Cool Water)建成了一座被誉为“世界上最洁净的燃煤电厂”，容量为120MW，预计下一台将装200~250MW的机组，它的工艺流程如图1-4所示。

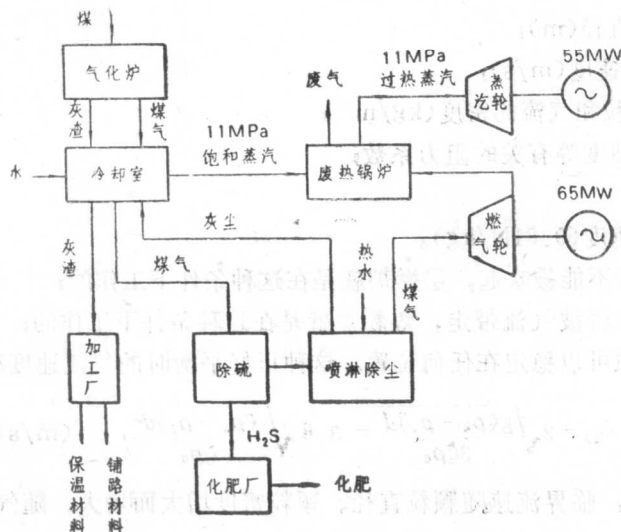


图 1-4 柯尔瓦特电厂流程图

将煤在特定的气化器中气化，即通过不完全燃烧方式产生含 H_2 、 CO 、 CO_2 、 C_nH_m 、 H_2S 等可燃气体的高温合成煤气(这套工艺是德士古(Taxaco)公司的专利，我国山东鲁南化肥厂已引进德士古炉技术)。气化器出来的高温灰渣和煤气在冷却器中被冷却，冷却器产生11MPa压力的饱和蒸汽，被送往废热锅炉去进一步过热。被冷却的灰渣加工成绝热保温材料 and 铺路材料，被冷却后的煤气经除尘、除硫(除 H_2S 率达97%~99%)后又用热水喷淋以抑制煤气燃烧中 NO_x 的生成，然后送往一台65MW的燃气轮机中燃烧发电。被清除下来的 H_2S 卖给附近一家肥料公司生产化肥。除下的粉尘返回燃料气化系统混入灰渣。燃气轮机的排气，进入废热锅炉，它将本炉产生的饱和蒸汽连同冷却器送来的饱和蒸汽一并加热成过热蒸汽，送往一台55MW的蒸汽轮机发电。这个电厂几乎看不见排烟，也极少灰渣、飞灰、 SO_2 、 NO_x 等污染。经济效益也比常规燃煤电厂高，所以颇受世界各国的重视。

这种燃气—蒸汽联合循环的发电方式，在燃气或燃油电厂早有先例，但对燃煤电厂因受气化炉效率低，建厂初投资高及高温除尘技术等限制，始终未能发展。我国曾两次派人前往柯尔瓦特电厂参观考察，认为在气化、除尘、除硫、降低燃烧温度抑制 NO_x 的形成，以及综合利用等方面确有突破，环境效益非常明显。

二、循环燃烧

循环燃烧技术是在流态化燃烧技术的基础上发展起来的。下面先介绍一下流态化燃烧的概念。

1. 燃料颗粒的运动特点

假设颗粒是均匀的球体，当它受到上升气流的冲刷时，气流对颗粒的升力 F 和颗粒在

气流中的重力 G ，可分别用下式表示：

$$F = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \zeta \frac{\omega_a^2}{2} \rho_a \quad (\text{N}) \quad (1-1)$$

$$G = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_k - \rho_a) g \quad (\text{N}) \quad (1-2)$$

式中： d ——颗粒的直径(m)；

ω_a ——气流的速度(m/s)；

ρ_k 、 ρ_a ——颗粒和气流密度(kg/m³)；

ζ ——与气流粘度等有关的阻力系数；

π ——圆周率；

g ——重力加速度(9.81N/kg)。

当 $G > F$ 时，颗粒不能被吹起，层燃炉就是在这种条件下工作的；

当 $G < F$ 时，颗粒将被气流带走，煤粉炉就是在这种条件下工作的；

当 $G = F$ 时，颗粒可以稳定在任何位置。这种正好平衡时的气流速度称为临界流速。

$$\omega_{c,j} = 2 \sqrt{\frac{g(\rho_k - \rho_a)d}{3\zeta\rho_a}} = 3.6 \sqrt{\frac{(\rho_k - \rho_a)d}{\zeta\rho_a}} \quad (\text{m/s}) \quad (1-3)$$

由上式可以看出：临界流速随颗粒直径、颗粒密度增大而增大，随气流粘度、气流密度增大而减小。

工程实际中颗粒层内部的气流速度是不均匀的，颗粒也并非球体，颗粒的迎风面随运动而异，平衡只是暂时的。在一定的通风速度范围内，颗粒既不会停留在炉篦上，也不会被气流带走，而是在一定高度内上下翻腾运动。燃料如在这种气流工况下燃烧，就称为流态化燃烧。

2. 流化床锅炉

采用流态化方式燃烧的锅炉称为流化床锅炉，也叫鼓泡床锅炉或沸腾炉，其原理如图1-5。

炉内设有布风板，相当于层燃炉的炉篦，其下是风箱，其上有使布风均匀的风帽，既作为载热体又作除硫剂的炉料堆于其上。炉料通常由石灰石、白云石和燃烧生成的灰渣等组成。正常运行时，由于穿过布风板的风速较高，炉料并非稳定在布风板上而是呈流态化运动，上下左右翻腾，加入炉内的燃料往往不到炉料的10%，迅速被大量灼热炉料加热而着火，反过来又加热炉料。炉料一方面受着火燃料的加热，另一方面又在翻腾运动中不断碰撞埋管受热面而把热量传给工质，达到热量平衡，温度稳定。烟气与对流受热面的换热过程则类似常规锅炉，这种燃烧方式有以下特点：

1) 炉料中有大量的钙，燃烧过程中能保持较大的钙硫摩尔比，使燃烧生成的氧化硫得以与钙结合成硫酸钙而存在于炉料中，从而大大减少排烟中的氧化硫含量；

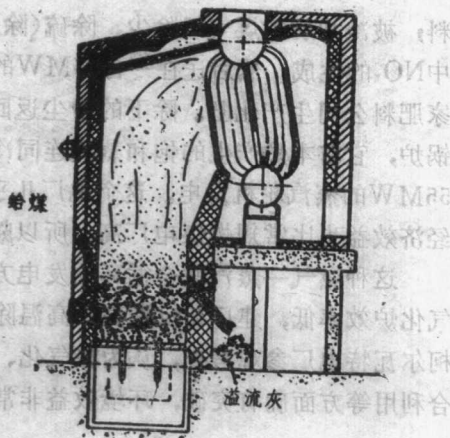


图 1-5 流化床锅炉简图

2) 通过改变炉料对埋管的放热, 或给煤量与炉料的比例, 可控制燃烧区温度, 通常维持 850°C 左右, 即属于低温燃烧, 它可抑制氮氧化合物的生成, 甚至可降到常规煤粉炉的10%;

3) 由于炉内始终保存着大量炽热炉料, 能保证入炉燃料的及时着火和稳定燃烧, 燃料颗粒随炉料翻腾运动, 在炉内停留的时间又比煤粉炉长, 因此, 能适应各种劣质燃料, 发热量只有 $4000\sim 6000\text{kJ/kg}$ 的石煤、矸石、油页岩等也能稳定燃烧;

4) 不断被炉料碰撞的埋管受热面, 传热效果很好, 约为水冷壁的2~3倍, 对流管的5~6倍。

我国60年代后期就有小型采暖或工业用流态化燃烧的沸腾炉问世, 至今已有几千台这种锅炉在运行, 但主要着眼于劣质煤和矸石的利用, 并非以一种洁净的燃烧方式而得到推广。相反, 由于沸腾炉的飞灰量比一般层燃炉高得多, 在没有配置完善除尘装置的情况下, 用小型沸腾炉取代层燃炉, 显然会加剧环境污染。此外, 这种沸腾炉还有飞灰可燃物含量高、埋管易磨损、燃料颗粒要求均匀、耗电多于同容量的层燃炉, 以及受布风均匀等限制不利于大型化等弱点。

3. 循环燃烧锅炉

近年来国外在流化床锅炉的基础上, 进一步加大风速, 使炉料处于气力输送状态, 而后把带出炉膛的物料, 又分离下来送入炉内燃烧, 即研制了所谓循环燃烧锅炉。这种锅炉与沸腾炉的区别是炉内没有明显的料层厚度, 即沸腾段与悬浮段之间没有明显的界限。与煤粉炉的区别是炉内具有大量物料, 足以保证燃烧稳定。由于它也像沸腾炉那样利用大量炉料作载热体和脱硫剂, 实现了低温燃烧, 有效地控制了氧化硫和氧化氮的排放。所以近年来发展较快。至1986年末已有42台这种锅炉投入运行, 其中芬兰最多22台; 联邦德国次之12台; 瑞典6台; 奥地利和爱尔兰各一台。最大容量为 270t/h 。1987年美国在纽克拉(Nucla)电厂投入了一台 420t/h , 10.6MPa , 540°C 的循环燃烧锅炉, 配110MW机组。1989年又在德克萨斯(Texas)州投入了一台 499t/h , 18.3MPa , $540/540^{\circ}\text{C}$ 烧褐煤的亚临界循环燃烧锅炉。可见美国在循环燃烧技术的研究开发方面, 虽然起步较晚, 但发展速度较快。日本、加拿大和我国也都在积极研制这种锅炉。

图1-6是美国燃烧工程公司(CE), 引进联邦德国鲁奇(Lurgi)公司专利生产的CE/Lurgi型循环燃烧锅炉的示意图。下面简单说明其工作特点:

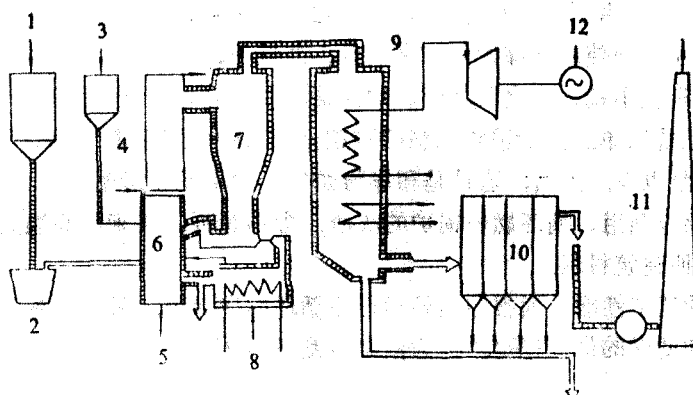


图 1-6 循环燃烧锅炉示意图

1—原煤仓; 2—破碎机; 3—石灰石仓; 4—二次风; 5—一次风; 6—燃烧室; 7—高温分离器;

8—外置流化床换热器; 9—对流竖井; 10—布袋除尘器; 11—烟囱; 12—发电机

图中约占总风量 40% 的一次风 5, 通过布风板进入燃烧室底部, 流化风速 5~9m/s。(比沸腾炉高), 足以将 10mm 以下的颗粒吹起。但因氧气供应不足炉膛下部属于气化燃烧区。燃料经原煤仓 1、破碎机 2, 破碎到 3~10mm 以下(视不同流化速度而异), 连同由石灰石仓 3 来的 1mm 以下的脱硫剂, 一起进入燃烧室 6 的下方。除少量大颗粒呈流态化燃烧之外, 大量炉料和可燃气体均随气流上升。二次风 4 从燃烧室中部切向引入, 促使上升的气体和固体可燃物强烈燃烧。二次风以上布置有水冷壁, 所以炉膛上下温度比较均匀, 大约都在 850℃ 左右, 这个温度最有利于脱硫反应 ($\text{SO}_3 + \text{CaO} \rightarrow \text{CaSO}_4$, $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$)。被气流带出燃烧室的炉料, 其数量可达给煤量的几倍乃至几十倍, 全部进入高温分离器 7, 分离下来的物料一部分直接返回炉内循环燃烧, 一部分通过外置式流化床换热器 8, 使物料冷却至 400~500℃ 后送回燃烧室 6 或排出。流化床换热器是通过流态化运动的物料与埋管的不断碰撞而换热的, 所以, 类似于沸腾炉, 不过它并不燃烧, 只是用炉料的物理热加热埋管中的工质。被冷却后的物料, 送回炉内的部分用以调节炉温。燃烧室下部温度高于 850℃ 时, 可增加回炉的低温物料量, 减少排出量。由分离器引出的高温烟气, 经对流竖井 9 冷却后, 排向除尘器 10 和烟囱 11。

这种循环燃烧锅炉, 具有以下优点:

1) 排烟中有害气体的含量低。由于采用了分段(两级)燃烧, 炉子下部缺氧, 並有物料回输使床温保持在 850℃ 左右。这种低温燃烧不仅可以大大减少 NO_x 的生产 (<200PPM), 也十分有利于脱硫。

2) 脱硫剂利用率高。由于石灰石也反复循环, 反复与烟气中的氧化硫反应, 因此, 只需保持 Ca/S 摩尔比为 1.5, 即可使脱硫率达 90% 以上, 而一般沸腾炉为了防止脱硫剂随烟气带出, 所用石灰石的颗粒较大, 表面一层成为硫酸钙以后, 内部的石灰石就不能再和氧化硫接触, 致使石灰石不能充分利用。此外, 氧化硫随烟气上升, 离开物料翻腾运动的沸腾层以后, 就难以和石灰石接触, 反应机率也低。所以 Ca/S 摩尔比必须保持 4 以上, 才能达到循环燃烧的脱硫率。

3) 燃烧效率高, 炉膛断面小。按炉型不同物料的循环倍率(即进入分离器的物料量与给料量之比)约在 2.5~40 之间。反复循环和强烈扰动, 有利于碳的燃尽, 故不同煤种的燃烧效率均可达到 98%~99%, 对于低挥发份和多灰份的燃料, 锅炉效率可超过常规煤粉炉。炉膛断面热强度也比煤粉炉稍高, 比沸腾炉则更高。

4) 燃料适应性广。由于它比沸腾炉具有更多的炽热炉料来保证新燃料的稳定燃烧, 所以煤种变化影响很小。即使烧低挥发份、高灰份、高硫份、高水份、低灰熔点的煤, 也不像煤粉炉那样会产生燃烧不稳、灭火“放炮”、炉内结渣或引起高低温腐蚀等问题。

5) 燃料制备系统简单。由于进炉燃料的颗粒比煤粉炉的煤粉粗得多, 所以, 燃料制备的系统简单, 耗电量也少。当然, 这只是和煤粉炉比, 而不是和层燃炉比。

6) 灰渣便于综合利用。循环燃烧锅炉的灰渣, 含碳量低, 又未经高温熔煅, 活性较好, 利于制作水泥或其他建筑材料。

7) 具有较好的调节性能。据报导国外运行的循环燃烧锅炉, 适应负荷变化的能力约为每分钟 5%, 不投油助燃的最低稳定负荷为额定蒸发量的 25%~30%。说明调峰能力也不亚于普通煤粉炉。

综上所述: 从环境保护、劣质燃料利用、灰渣处理等方面分析, 循环燃烧锅炉用于燃煤电站以取代煤粉炉的可能性是存在的。因此, 我国也正在组织力量, 研究和开发这种锅炉。

第二章 现代锅炉的蒸发受热面及其水动力特性

燃料燃烧所产生的热量是通过各种受热面传递给工质的。现代锅炉的受热面有省煤器、蒸发受热面、过热器、再热器等。其中除蒸发受热面外，其他受热面的结构特征和运行特性随锅炉参数、容量提高的变化都不大。所以，下面仅就现代锅炉蒸发受热面的不同类型和工作特性作简单说明。

第一节 自然循环的蒸发受热面

蒸发受热面按布置位置和传热方式的不同可分为两种，一种是布置在烟道中受烟气冲刷，以吸收对流热为主的，称对流管束；另一种是布置在炉膛四周，以吸收辐射热为主的，称水冷壁。现代锅炉由于压力高汽化潜热少，靠炉膛四周的水冷壁就已足够完成蒸发任务。所以，已不用对流管束。

工质在水冷壁中的连续流动，可以靠外力促成，也可以靠升降水管中汽水的密度差来推动。靠外力(如水泵)流动的叫强制循环，靠汽水密度差流动的叫自然循环。

一、自然循环原理

图 2-1 是简单自然循环回路的示意图，它由上升管(水冷壁)、上汽包、下降管、下联箱等主要部件所组成。上升管中的水因受热而产生一部分蒸汽，汽水混合物进入汽包后，进行汽水分离。分离出来的汽进入过热器。分离下来的饱和水则和省煤器来的给水混合，又流入下降管经下联箱进入上升管继续循环。在下降管—下联箱—上升管—汽包—下降管这个闭合回路中，没有加入水泵等外力，工质为什么能连续流动呢？让我们来分析一下下联箱中的压强：如果汽包水位到下联箱中心的高度为 h ，下降管中水的平均密度为 ρ_{xj} ，上升管中汽水混合物的平均密度为 ρ_s ，假设工质不流动，则下联箱中的水左侧压强等于汽包压力加下降管液柱的重位压头($P_{a0} + h\rho_{xj} \cdot g$)；右侧压强等于汽包压力加上升管汽水混合物柱的重位压头($P_{a0} + h\rho_s \cdot g$)。因为两侧液柱的密度不同 $\rho_{xj} > \rho_s$ 。因此，两侧压力不会平衡($\Delta P = gh(\rho_{xj} - \rho_s) = 9.81h(\rho_{xj} - \rho_s) > 0$)，下联箱中的水一定被压向压力低的一侧(上升管侧)。促进这种流动的动力(ΔP)取决于下降管高度 h 和密度差($\rho_{xj} - \rho_s$)的乘积，这就是自然循环的原理。

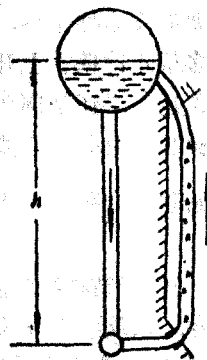


图 2-1 自然循环回路示意图

当流动稳定以后，下联箱两侧压强是相等的。也即，实际上下联箱中(或回路任何部位)只可能存在一种压力。根据伯努利方程，流体在管内流动的压力变化(或流经管段的两端压差) ΔP 等于重位压差 ΔP_{rw} 、加速度损失 ΔP_{fa} 及流动阻力 ΔP_{fs} 之和，而一般锅炉的管子中速度变化相对不大，为便于分析可将加速度损失忽略不计，则下降管两端压差(即下联箱压力减汽包压力)为：

$$\Sigma \Delta P_{xj} = h\rho_{xj} \cdot g - \Delta P_{fs} \quad (\text{Pa}) \quad (2-1)$$