

热电厂实用技术丛书

锅炉设备运行及事故处理

邢培生 主编



化学工业出版社

环境·能源出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉设备运行及事故处理/邢培生主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11
(热电厂实用技术丛书)
ISBN 7-5025-7954-0

I. 锅… II. 邢… III. ①火电厂-锅炉运行②火电厂-锅炉运行-事故-处理 IV. TM621. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 142104 号

热电厂实用技术丛书
锅炉设备运行及事故处理

邢培生 主编
责任编辑: 郑叶琳
文字编辑: 余纪军
责任校对: 宋 玮
封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
购书咨询: (010) 64982530
(010) 64918013
购书传真: (010) 64982630
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷有限责任公司印装
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{2}$ 字数 323 千字
2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-7954-0
定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

《锅炉设备运行及事故处理》是由中国电机工程学会热电专业委员会组织编写的《热电厂实用技术丛书》之一。

热电厂锅炉设备的安全经济运行对保障人民群众生命和财产安全，促进国民经济的可持续发展，合理使用和节约能源，改善和保护环境具有重要的意义。

锅炉是热电厂的三大主机之一，是涉及生命安全、危险性较大的受火焰直接加热且具有爆炸性的特种设备，其安全性尤为重要，一直受到国家技术监察部门的监督和管理。同时，锅炉又是国民经济发展中耗煤大户，在今后相当长的时间内我国以煤炭为主体的能源消费格局不会改变的，节约能源和改善环境刻不容缓。

目前，我国在用的中小容量锅炉约 50 万台，包括热电厂用锅炉在内，年消耗煤炭占煤炭产量的一半左右。而这些锅炉的实际运行效率比设计值低许多。因此，提高锅炉机组的热效率、保证锅炉安全经济运行，是建立科学的安全管理运行机制、降低大气污染排放和改善大气环境质量的关键措施。

本书介绍了各类锅炉，尤其是循环流化床锅炉的特点，并对循环流化床锅炉技术的新发展进行了论述，还对各类锅炉运行的事故处理作了专门论述。本书由无锡华光锅炉股份有限公司董祖康教授级高工、朱晓峰教授级高工和邢培生高工共同编写，在编写过程中得到华光锅炉股份有限公司总经理贺旭亮高工的支持和指导，沈解忠总工、戴明根高工、吴跃光高工及毛军华、王政、钱钢、苏小平、吴文伟等同志的帮助并参与部分章节的审编工作。在本书文稿的整理和打印过程中得到丁剑锋、魏利岩、许晓敏、马红、朱平、许素勇、张静、黄胜华、陈琳、张春华等同志的帮助，谨在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免存在不妥之处，诚恳希望读者帮助和指正。

编者

2006 年 1 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 锅炉在热力发电厂中的作用和重要性	1
第二节 电站锅炉的发展概况	2
第三节 锅炉设备的基本特性	4
一、蒸汽参数对锅炉受热面布置的影响	4
二、燃料特性对锅炉燃烧设备的影响	5
第四节 热电站锅炉的类别	9
一、按循环方式分类	9
二、按运行方式分类	11
三、按承担负荷方式分类	11
四、按燃料性质分类	12
五、按燃烧方式分类	12
六、按炉内烟气压力分类	13
七、按锅炉整体布置形式分类	13
第二章 锅炉设备的结构和特点	15
第一节 锅炉设备的组成	15
一、中压中温顺转链条炉排锅炉	15
二、中温中压抛煤机倒转链条炉排锅炉	15
三、次高压煤粉燃烧锅炉	18
四、循环流化床高压锅炉	20
五、超高压再热煤粉锅炉	20
第二节 锅炉的燃烧装置	23
一、链条炉排	23
二、煤粉燃烧设备	30
三、沸腾炉的燃烧设备	46
四、锅炉的点火设备	47
第三节 锅炉的蒸发受热面系统	48
一、自然循环的原理及特性	48
二、锅炉蒸发系统的可靠性	56
三、水冷壁回路的设计和运行	57
第四节 锅筒内部的蒸汽净化装置	58
一、汽水品质要求	58
二、蒸汽的污染及杂质携带	58

三、饱和蒸汽的机械携带	59
四、蒸汽的选择性携带	60
五、汽水分离装置	60
第五节 过热器和再热器	64
一、过热器	64
二、再热器	66
三、蒸汽温度的调节	67
第六节 省煤器和空气预热器	72
一、省煤器	72
二、空气预热器	72
第七节 锅炉汽水管路及风机	73
一、汽水管路	73
二、除（吹）灰装置	75
三、风机	75
第八节 余热锅炉	77
一、余热及分类	77
二、余热锅炉结构	78
第三章 锅炉机组的热平衡	90
第一节 锅炉机组的热平衡方程	90
一、锅炉的输入热量	90
二、锅炉的输出热量	92
三、排烟热损失	93
四、可燃气体未完全燃烧热损失	94
五、机械不完全燃烧损失	94
六、散热损失	96
七、灰渣的物理热损失	97
第二节 锅炉的热效率	98
第三节 影响热效率的因素	98
一、煤质热值的变化	98
二、煤质水分的变化	98
三、煤质灰分的变化	99
四、可燃质挥发分的变化	99
五、进风温度的变化	100
六、给水温度的变化	100
七、煤粉细度的变化	100
第四章 锅炉设备的运行	102
第一节 启动前的准备工作	102
一、启动前的各项检查	102

二、锅炉的上水及烘煮炉	102
第二节 锅炉的启动与停运	103
一、主要启动步骤说明	103
二、锅炉的停运	106
三、单元制锅炉的滑参数启停	106
第三节 锅炉的运行调节	107
一、锅炉水位的调节	107
二、过热汽温的调节	108
三、锅炉的燃烧调节	108
四、锅炉的排污	109
五、锅炉的吹灰和打渣	109
第四节 锅炉在非设计工况下的运行	110
一、燃料特性的变化	110
二、给水温度的变化	110
三、锅炉漏风引起的变化	110
第五章 流化床锅炉基础和应用	111
第一节 流化床锅炉的基本概念	111
一、流化床锅炉的发展	111
二、流化床	112
三、快速流化床的结构	114
四、循环流化床锅炉	114
五、循环流化床锅炉的传热	114
六、循环流化床锅炉的特点	115
七、循环流化床锅炉的分类	117
八、发展初期遇到的技术难题	121
第二节 循环流化床锅炉的基本结构	122
一、燃烧系统	122
二、分离器	127
三、返料装置	129
四、受热面	129
五、耐火内衬	130
第三节 循环流化床锅炉的运行	131
一、烘炉	131
二、密封实验	132
三、冷态试验	132
四、点火	133
五、燃烧调整	135
六、负荷控制	136
七、汽温控制	137

八、床温·····	137
九、炉室差压·····	138
十、炉膛出口负压·····	138
十一、床层厚度·····	138
十二、返料风压及风量·····	138
十三、压火·····	139
十四、正常停炉·····	139
第四节 循环流化床锅炉的事故预防及处理·····	140
一、断煤·····	140
二、床层结渣·····	141
三、返料不正常·····	142
四、排渣堵塞·····	142
五、中心筒变形·····	142
六、耐火材料损坏·····	142
七、受热面磨损·····	143
八、烟气泄漏·····	143
九、风道振动开裂·····	143
第五节 生物燃料燃烧锅炉·····	143
一、概述·····	143
二、燃烧生物燃料遇到的问题及解决方法·····	144
三、典型燃生物燃料流化床锅炉·····	149
第六节 燃烧垃圾锅炉·····	162
一、概述·····	162
二、110MW CFB 锅炉·····	164
三、Kvaerner 150MW E—f—W CFB 工厂·····	170
四、Robbins 1450 t/d 垃圾燃烧工程·····	173
第七节 燃石油焦流化床锅炉·····	178
一、概述·····	178
二、石油焦燃烧可能出现的问题·····	179
三、ALSTOM 燃石油焦锅炉产品·····	179
四、2×150MW FHIC CFB 锅炉和 NID 系统·····	184
五、NISCO 热电厂·····	192
第八节 燃烧废渣的流化床锅炉·····	196
一、概述·····	196
二、Grovehurst 工厂·····	198
三、Lacq 渣焚烧厂·····	198
参考文献·····	202

第一章 绪 论

第一节 锅炉在热电厂中的作用和重要性

热电厂中，将煤、石油、天然气等燃料燃烧或其他热源释放出来的热量，通过金属受热面传递给经净化的水，将其加热到一定压力和温度的水或蒸汽的换热设备称为锅炉。

锅炉包括锅和炉两大部分，锅是指热烟气加热金属受热面的那部分受压容器，炉则是燃料燃烧的场所。通常把燃料燃烧、放热、排渣、出灰等称为炉内过程，而把受热面内工质水的流动、传热、汽化、过热及热化学等统称为锅内过程。

图 1-1 示出燃煤层燃炉膛的自然循环锅炉及相关辅机的工作流程图。这种锅炉一般用于热电联产的热电厂锅炉房范围内。

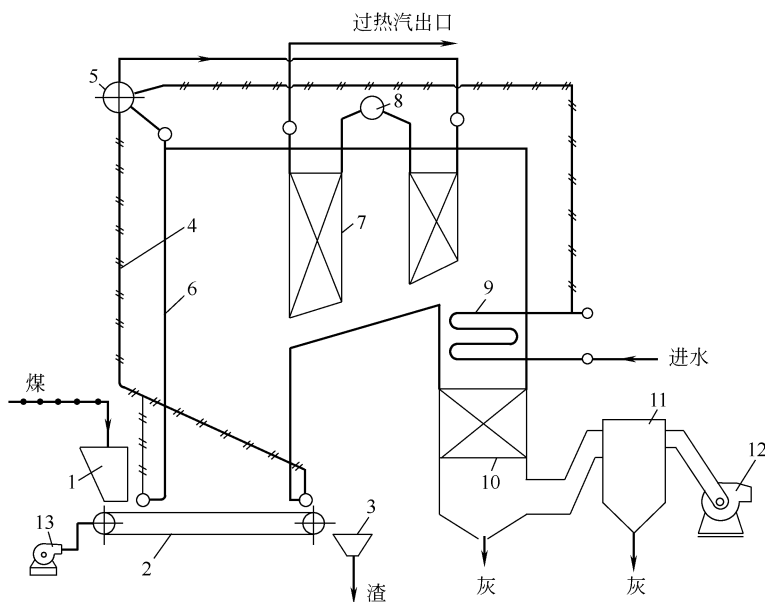


图 1-1 热电联产用链条锅炉及辅机工作流程图

- 1—煤斗；2—链条炉排；3—出渣装置；4—下降管；5—锅筒；6—水冷壁；7—过热器；8—减温器；
9—省煤器；10—空气预热器；11—烟气净化装置；12—引风机；13—鼓风机

图 1-2 示出燃烧煤粉的带蒸汽再热的自然循环锅炉及其相关辅机的工作流程图，也用于凝汽式发电机组的锅炉房范围内。

图 1-1 和图 1-2 均为燃煤的锅炉。前者煤首先送到炉前煤斗，然后在链条炉排上煤由前向后移动，在煤层上着火、燃烧及燃尽落入渣斗。后者煤首先送到磨煤机磨制成粉，然后由空气携带通过燃烧器送入炉膛中燃烧。两种炉型在燃烧后，炉膛中的高温燃烧产物释放出的热量被水冷壁吸收，烟气然后进入过热器（再热器），省煤器及空气预热器进行热交换。烟气经充分冷却后，再经除尘装置（烟气净化装置）清除其中飞灰等有害物质，最后由引风机

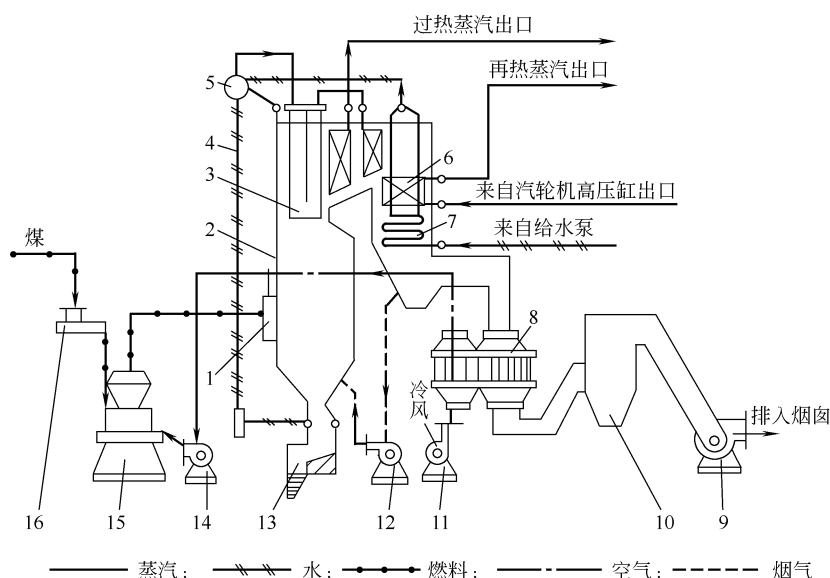


图 1-2 煤粉锅炉及其辅机工作流程图

1—燃烧器；2—水冷壁；3—过热器；4—下降管；5—锅筒；6—再热器；7—省煤器；
8—空气预热器；9—引风机；10—除尘器；11—送风机；12—再循环风机；
13—排渣装置；14—一次风机；15—磨煤机；16—给煤机

送往烟囱排入大气。

锅炉的汽水流程如下：在热力系统中高压加热器降水加热到一定温度后，又由给水管道送入省煤器进一步加热后给水进入锅筒，在锅筒内水从下部引入下降管然后分别进入水冷壁下部进口集箱，水冷壁管内水因吸收炉膛辐射热而加热，蒸发形成汽水混合物上升进入锅筒上部，锅筒内汽水混合物经汽水分离装置，水又回流入下降管，而汽则从锅筒顶部引出送入过热器。饱和蒸汽在过热器内不断被加热达到额定汽温后，将过热蒸汽送往汽轮机中。在过热器系统中为使汽温维持在很小范围内变动，往往要装设蒸汽减温器。再热蒸汽是由汽机高压缸排出蒸汽又经管道送入锅炉的再热器中继续加热达到额定温度后重新回入汽机的中压缸。

由上可见，锅炉是将燃料热能转变为蒸汽的综合性能量转换联动装置，是热力发电厂中三大主机（即锅炉、汽轮机和发电机）之首。在大型热力发电厂中锅炉岛包括一个庞大的建筑和一整套热交换，转动机械和处理的设备，工况十分复杂，其中某个部位产生故障，就会使整台机组停运，造成国民经济的重大损失。因此，锅炉设备的安全可靠运行，除配备有高度自动化的控制外，还要求高水平的运行维修人员精心操作、维护和保养。

第二节 电站锅炉的发展概况

在全世界，电力是国家经济发展的支柱，在各种发电设备中，热力发电量占总发电量的70%，在我国也占75%左右。降低每度电的能源消耗是热力发电始终追求的目标，也是衡量机组科技水平的一个指标。近十年来，我国热力发电厂的标准煤耗已从414g/kW·h降低到381g/kW·h（g——标准煤克）。众所周知，热力发电厂的煤耗是由机组的容量、蒸汽压力和温度及热力系统所决定。

表 1-1 示出了各类机组的参数及达到的煤耗指标。

表 1-1 各类机组的参数及达到的煤耗指标

机组类别	容量/MW	汽压/MPa	汽温/℃(过热/再热)	热效率/%	供电煤耗/(g/kW·h)
中压 ^②	6~50	3.82	450	28	450
高压	50~100	9.8	535	32	385
超高压	125~200	13	535/535	35	360
亚临界	300~600	17	540/540	38	324
超临界	300~900	25.5	567/567	41	300
高温超临界	600~900	25	600/600	44	278
超超临界	600~1000	30	600/600/600 ^①	48	256
高温超超临界	600~1000	30	700/700/700	57	214

① 二次再热汽温。
② 包括次高压机组（ $P=5.4\text{MPa}$ ， $t=485^{\circ}\text{C}$ ）。

由上表可见，虽然我国发电设备总装机容量已达到 4.4 亿度电，但从煤耗指标看机组的水平尚不高。目前有大量中、高压锅炉在运行。超临界参数的机组尚不够普及。

单机容量大小也是衡量发电设备水平的一个重要指标，它与参数是相匹配的，例如一台 300MW 热力发电机组其制造安装周期比三台 100MW 机组快一倍，且占地面积小一倍。但单机容量大小还受电网容量大小的制约，一般单机容量只能占电网容量的 10% 左右，否则单机事故停运或调负荷对电网影响太大。

我国电站锅炉的发展经历了不同的阶段：1953 年开始设计试制中压 35~75t/h 配 6~12MW 的汽轮机，然后形成了容量直到 240t/h 的中压锅炉系列，并在 20 世纪 60 年代很快开发了高压 220~410t/h 锅炉，配 50~100MW 汽轮发电机组，燃烧方式也逐步从链条炉排，抛煤机倒转炉排的层状燃烧转为悬浮状煤粉燃烧。锅炉的循环方式以自然循环为主，也生产了少量直流锅炉。我国自 20 世纪 60 年代就自行研制了超高压的 420t/h、670t/h 锅炉，70 年代就设计了 1000t/h 配 300MW 机组的亚临界参数的 UP 型直流锅炉。进入 80 年代我国锅炉行业引进了美国 CE 公司的亚临界压力的 300MW、600MW 的辅助循环锅炉的技术，逐步在大电站中担任主力机组角色，同时也自行研制了亚临界压力的配 300MW 机组的自然循环锅炉，20 世纪 90 年代又与国外公司联合设计了超临界压力的配 600MW 机组的直流锅炉。随着改革开放，国外一些大锅炉企业在国内电力行业投入了一批配 600MW 机组的亚临界压力自然循环锅炉以及配 300MW、500MW 和 800MW 机组的超亚临界压力锅炉，使我国热力发电厂的经济性不断提高。

与此同时，随着城市建设及大型工业企业的发展，热电联产，集中供热机组也大批兴起，已从中压的 35t/h、65t/h、75t/h 锅炉发展到安装投入一批高压和超高压参数锅炉，锅炉容量也达到单台 480t/h 以上。这类锅炉的燃烧方式已逐步从层燃炉、煤粉炉转向循环流化床。我国自行研制的带中间再热的超高压、高温旋风分离型循环流化床 480t/h 锅炉已投入运行。

在全世界由于超临界压力机组的可靠性不断提高，高温耐热钢材价格逐步下降，使大型热力发电机组也逐步从亚临界压力向超临界压力发展，且过热温度也同步提高。在一些国家，超临界参数已占主力机组地位：例如前苏联早已决定超临界压力为凝汽式热力发电厂主力机组普遍采用，300MW、500MW、800MW 及个别达 1200MW 容量的机组总数达 200 台以上。日本也有上百台超临界机组在运行，单台容量有 350MW 直到 1000MW。美国超临界

机组发展最早，20 世纪 80 年代已有 180 多台单机容量为 250~1300MW 的机组在运行，包括世界上容量最大的 1300MW 超临界压力燃煤机组。德国也有一批单台容量达 740MW 的超临界压力机组运行。

国外大型锅炉包括引进技术或进口机组的形式根据不同参数有锅筒形自然循环、辅助循环（锅筒型及低倍率带分离器型）、直流锅炉和复合循环等多种。自然循环锅筒型最大进口锅炉有亚临界压力的配 660MW 机组以及一批 300~500MW 机组，适宜于带中间负荷。辅助循环锅炉也有配 300~600MW 机组在运行。近年来，随着直流锅炉结构改进和可靠性提高，也适应于承担中间负荷。大型热力发电厂机组仍以燃煤的煤粉炉膛为主，循环流化床（CFB）锅炉正在向大型化发展之中，国外已有配 460MW 机组的锅炉在运行，国内已有各种容量和形式的循环流化床锅炉，现正在推广一批 300MW 的（1000t/h）亚临界压力燃煤的循环流化床锅炉，超高压的 480t/h 循环流化床锅炉已成功掌握。

第三节 锅炉设备的基本特性

锅炉设备包括锅炉本体、燃烧设备、燃料制备、烟气净化、灰渣处理以及水处理等各个部分，它们有各自的专业特性。锅炉整体是由炉膛、对流烟道及所有受热面组成，影响其布置的因素很多，除蒸汽参数、燃用燃料等主要因素外，还需要考虑到与电厂整体布置的合理性，各种汽水管道的、烟风、燃料管道布局的合理性，以及安装、维修、运行等具体要求。这里主要介绍机组参数及燃料对锅炉各受热面结构布置的影响。

一、蒸汽参数对锅炉受热面布置的影响

以水作为介质在锅炉内根据不同的吸热有加热、蒸发及过热三种状态。图 1-3 示出了随不同蒸汽压力变化这三种状态的焓的变化。

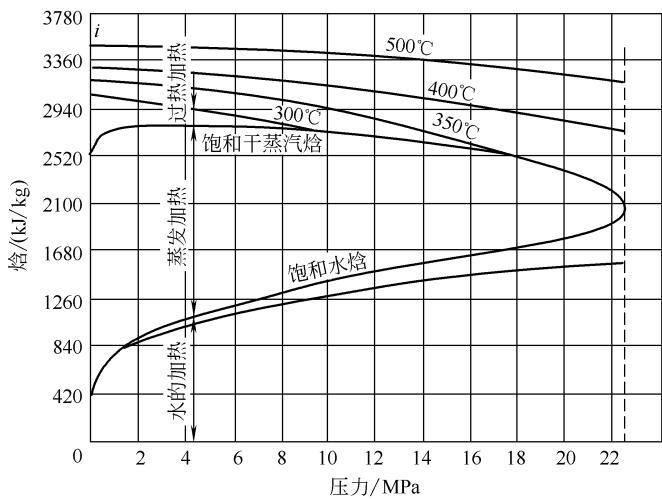


图 1-3 水蒸气焓随压力的变化

这三种吸热量分配的不同比例，也直接影响锅炉内受热面的布置。不同参数下工质吸热量的分配如表 1-2 所示。

由图 1-1 及表 1-2 可见，随汽压升高，加热及过热吸热量（包括再热蒸汽吸热量）增加，蒸发吸热量则减少。在锅炉的各受热面中，加热主要在省煤器内完成，蒸发吸热靠水冷

表 1-2 锅炉工质吸热量的分配比例

蒸汽参数及给水温度			总焓增 /(kJ/kg)	吸热量比例/%		
汽压/MPa	汽温/℃	给水温度/℃		加热	蒸发	过热
1.27	300	10.4	2596.2	14.8	75.6	9.6
2.45	400	104	2807	18.6	65.7	15.7
3.82	450	150	2690	17.9	62.4	19.7
9.81	540	215	2550	20.4	49.5	30.1
13.72	540/540	240	2820/430	21.2	33.8	29.8/15.2
16.69	540/540	270	2650/434	23.5	23.7	36.4/16.4

壁来完成。而过热吸热，是用过热器和再热器来完成的。因此，对于不同参数的锅炉，其受热面布置及所考虑的问题是有差别的。

对于电站锅炉，在中压时，蒸发吸热量与炉内辐射受热面的吸热量大致相近，炉膛内除布置水冷壁外，不必像低压锅炉那样，还需布置大量的多锅筒组成的对流管束受热面。其加热吸热量在省煤器内完成，当炉膛辐射吸热量低于蒸发吸热量时，可使省煤器出口有少量沸腾。锅炉尾部，往往根据不同的热风温度，布置一或两级空气预热器。过热器一般采用对流式，并布置在凝渣管或高温分离器后的高烟温区域，以尽量减少受热面及耐热钢材。

在高压锅炉中，由于炉膛水冷壁面积的增加不能满足容量的增大，水冷壁布置得较紧凑，蒸发及加热受热面的布置，仍类似于中压锅炉。但是，因过热吸热量比例增大，除对流过热器外，往往需在炉膛出口处以管屏形式布置半辐射过热器。这种过热器不但可以降低炉膛出口烟温，且具有变负荷时平衡汽温的作用。

对于超高压和亚临界压力的大容量锅炉，常带有中间再热，使过热热量进一步增加，需布置更多的辐射式、半辐射式的受热面。这时，锅炉容量的增加与水冷壁面积增加的矛盾更为突出，而炉膛高度的增加又有一定限度，因此往往需要采用双面曝光水冷壁或蒸发屏的结构。

二、燃料特性对锅炉燃烧设备的影响

目前我国热电厂锅炉所用燃料主要以煤为主，占热力发电厂总装机容量的 90% 以上。我国煤炭资源丰富，年产量已达 19 亿吨，其中发电用煤要占 40% 以上。但是，煤炭品种和成分十分复杂，对于追求高效、安全、低污染等严格要求的锅炉机组，燃料的良好燃烧和燃尽一直是锅炉工作者主要研究和攻关的课题，并直接与锅炉的整体布置，炉膛结构尺寸，燃烧设备，燃料制备系统和烟气处理等有关。

煤的燃烧方式很多，但是目前在热电厂使用的锅炉中主要有层状燃烧、煤粉燃烧及循环流化床燃烧三种方式。

1. 层状燃烧

又称火床式燃烧。其主要设备为链条炉排及抛煤机链条炉排（倒转），是热电厂 75t/h 锅炉以下及工业锅炉中应用最多的一种机械化燃烧设备。在链条炉排上煤为一种移动火床燃烧，燃料着火条件为“有限着火”。燃料通过煤斗随着由前向后移动的炉排进入炉内，开始其着火、燃烧和燃尽等过程。燃尽的煤渣随炉排移动到尾部落入了渣井，由出渣机送入渣场。抛煤机链条炉排（倒转）基本属于“无限着火”的层燃炉，煤由装在锅炉前墙的抛煤机抛入炉膛，颗粒大的被抛得较远，在由后向前移动的机械式链条炉排上着火、燃烧及燃尽，

而细小颗粒的煤在炉膛空间着火及燃烧，然后落在煤层上由炉前出渣并排出。链条炉排对煤种品位要求较高，而抛煤机炉排的煤质适应范围就较宽。表 1-3 中示出了煤质适应范围，各项特性指标由下列因素决定。

表 1-3 不同层状燃烧方式的煤质适应范围（参考值）

煤 质	链条炉排	抛煤机炉排
低位发热值/(kJ/kg)	14650~31400	10470~31400
灰分 $A_p/\%$	6~20	3~35
水分 $W_p/\%$	5~20	5~40
挥发分 $V_r/\%$	20~40	20~40
颗粒度/mm	0~30	0~30
膨胀指数	0~1.5	0~4
灰熔点/ $^{\circ}\text{C}$	>1250	>1250

- （1）灰分过大会造成床层燃料裹灰，燃尽差，飞灰损失增加。
- （2）水分影响低位发热值，略大有利于燃用膨胀指数高和煤末（颗粒 $<1\text{mm}$ ）含量高的煤。
- （3）膨胀指数反映黏结性能，抛煤机炉排可烧膨胀指数较高的煤，但过大，会造成床层结块而增大过量空气和炉渣含碳量。
- （4）对链条炉排的燃料粒度要求在 $10\sim30\text{mm}$ 为宜，且对 $<3\text{mm}$ 的煤粒 40% 以下，煤末量大，影响床层通风，增加飞灰含碳量。抛煤机炉排则要求 $6\sim30\text{mm}$ 颗粒 $>20\%$ ，而 $<3\text{mm}$ 的在 $20\%\sim50\%$ 之间，且 $<1\text{mm}$ 的颗粒度 $<15\%$ 为宜。
- （5）灰的软化温度和熔点应愈高愈好。
- （6）挥发分低的燃料，着火较困难，炉排面积要较大，往往需要采用长而低的后拱。对抛煤机炉排，也要采用前拱，来增加炉膛内烟气搅动。

总的说来，层燃炉膛上的燃烧强度不高，燃烧效率也不高（ $<90\%$ ），因此需要有很大的炉排面积，使锅炉的外形尺寸十分庞大，例如 35t/h 锅炉的炉排有效面积需要 $7.2\text{m}\times4.4\text{m}$ ，对于 75t/h 锅炉则需要 $8\text{m}\times9\text{m}$ 。因此容量再增大已不适合采用此种燃烧设备。抛煤机炉排因部分燃烧在炉膛空间悬浮状进行，热强度可较高，相对炉排面积可较小，但对 75t/h 容量的锅炉也需要有 $6.5\text{m}\times9\text{m}$ 的大小。炉排大了，结构强度、底座刚性都应专门设计，且制造、安装精度均要求较高，否则在运行中会产生跑偏和起拱等不良现象，炉排的下部配风均匀性也很重要。综合上述情况，对大容量层燃炉炉膛往往采用并列双炉排的结构，配备两台传动机械。近来在层燃链条炉排上还采用所谓“分层燃烧”的设备，即在煤斗内装设了筛格和滚轮，将原煤按不同颗粒进入炉排，使颗粒大的在炉排面下部，细小的煤粒在上部，改善了煤的着火、通风和燃烧条件，在一定程度上提高了燃烧效率。

层燃炉排操作较方便，可靠性较高，低负荷下运行稳定，电耗也较低，在 35t/h 容量以下的燃煤锅炉上采用较为广泛。

2. 煤粉燃烧

这种方式是指在磨煤机中把煤磨成粒度为 $1\sim500\mu\text{m}$ 的粉末，由燃烧器用热风将煤粉喷入炉膛空间内进行燃烧。与层燃炉膛相比，煤在炉膛中所进行的是空间悬浮状燃烧，煤粉与

空气的接触表面大大增加，燃烧猛烈，炉内燃烧温度高。从影响锅炉热效率最大的机械不完全燃烧损失 q_4 和排烟热损失 q_2 来看，煤粉炉均比层燃炉优越。因此煤粉燃烧技术已成为 75t/h 以上大中型锅炉主要采用的形式。煤粉炉与层燃炉的比较见表 1-4。

表 1-4 煤粉炉与层燃炉的比较 %

煤种	q_4		炉膛出口 α''		热效率 η	
	层燃	煤粉	层燃	煤粉	层燃	煤粉
无烟煤、贫煤和劣质煤	9~15	3~6	1.4~1.5	1.2~1.25	74~76	88~89
优质烟煤和褐煤	6~9	2~3	1.3~1.4	1.2	82~83	89~92

由于燃烧强度高，炉膛截面积可小，但高度较高，电站锅炉自 75t/h 以上普遍采用煤粉炉，运行中单台蒸发量最高可达 4300t/h。煤粉炉本体单位金属耗量比层燃炉低，但需增添磨煤设备、制粉系统和输送系统，耗电较大，灰渣利用没有层燃炉便利。

干的煤粉颗粒能吸附空气，具有类似于水一样的流动特性，所以和热风混合后借助风力通过管道来输送。不同的磨煤机和制粉系统所得到的煤粉细度是不同的，煤粉越细越好烧，但磨煤电耗大。对于易着火，易燃尽的煤种，煤粉可以粗一点（如烟煤和褐煤），反之像无烟煤就要细一点。

“煤粉细度”是用标准筛孔尺寸筛下来的煤粉多少来表示 (R_x)，对某一筛孔尺寸 X (μm) 如筛后留在筛子上的煤粉量为 a ，通过的量为 b ，则 $R_x = a/(a+b)\%$ 。显然 R_x 愈大表示煤粉愈粗。筛孔尺寸 X 在我国常用的有 R_{90} 及 R_{200} 两种， R_{90} 表示筛号为 70（每厘米长度内有 70 孔，每个孔的直径为 $90\mu\text{m}$ ），而 R_{200} 表示筛号为 30（每厘米长度有 30 孔，每个孔直径为 $200\mu\text{m}$ ）的煤粉细度。对于褐煤，还可使用 R_{500} 和 R_{1000} 等指标来表示。表 1-5 示出了运行中大约控制的范围。

表 1-5 不同煤种的 R_{90} 推荐值

煤种	$R_{90}/\%$	煤种	$R_{90}/\%$
无烟煤 挥发分 $V_r < 5\%$	5~6	优质烟煤	25~35
无烟煤 挥发分 $V_r = 6\% \sim 10\%$	6~10	劣质烟煤	15~20
贫煤	12~14	褐煤和油页岩	40~60

煤粉的另一项特性数据为可磨系数 K_{km} ，其计算公式为：

$$K_{km} = 1.96 [\ln(100/R_{qos})]^{\frac{2}{3}}$$

式中， R_{qos} 为试验燃料磨制后，煤粉在 $90\mu\text{m}$ 筛子上的筛余量 (%)。对于用作对比的标准燃料 $K_{km} = 1$ ，较之更软的煤 $K_{km} > 1$ ，硬的煤 $K_{km} < 1$ 。一般认为 $K_{km} < 1.2$ 属于难磨的煤种， $K_{km} > 1.6$ 属于易磨的煤种，测定 K_{km} 的目的是电厂运行前能预计磨煤机出力和电耗；在设计时，用于选用磨煤机形式，并计算出力和电耗。

煤粉细度和可磨系数是指导煤粉炉运行的重要指标，从经济性角度看，对某种磨煤机来说，煤粉愈粗，磨煤机出力愈大，电耗也愈低，磨损也愈小，但其指标最终由炉内过程的经济性、着火稳定性及结渣等因素决定。如果煤粉细度加粗到通常燃烧允许的数值，将使煤粉着火推迟，机械未完全燃烧热损失 q_4 增加，炉膛出口温度提高，有可能导致炉膛出口结渣。

煤粉燃烧的好坏还靠磨煤机选型，制粉系统的配置及燃烧器选型布置等诸多因素，并在

很大程度上决定炉膛结构形式及受热面布置设计。我国电站锅炉普遍采用长缝隙式燃烧器四角布置的切向燃烧方形炉膛，在引进的大机组中还有采用圆形燃烧器前后墙对冲布置的长方形炉膛。

根据不同煤种及制粉方式需要采用热风来输送煤粉及燃烧，热风温度约 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，这时锅炉尾部要布置 $1\sim 2$ 级空气预热器。

3. 循环流化床燃烧

煤的流化床燃烧技术是一种介于层燃和煤粉气力输送之间的燃烧方式，它利用固体颗粒在一定条件下被气体托起，整体显示出流体性质。流化床燃烧技术又称沸腾状燃烧，最早是由鼓泡流化床发展起来的，经不断完善在电站锅炉上逐步发展到循环流化床锅炉。它不但具有鼓泡床优点，还使大量细灰参与了循环，使其在燃烧、流动和传热方面与鼓泡床有很大区别，可以不设埋管，炉膛受热面受热均匀。循环流化床锅炉总的有以下优点，成为当前燃煤电厂鼓励采用的一种洁净煤燃烧技术。

(1) 燃料适应性广，几乎可烧一切品种的燃料，并具有很高的燃烧效率，包括高灰粉、高水分、低热值、低灰熔点的劣质燃料，如褐煤、炉渣、煤泥、煤矸石、木材等，甚至生物质燃料和垃圾焚烧技术中也具有明显优势。

(2) 因床内燃烧温度可控制在 $800\sim 950^{\circ}\text{C}$ 的较低温度范围内而保持稳定高效燃烧，所以可有效控制 NO_x 和 SO_x 等有害物的产生和排放。在采用分级燃烧方式送入二次风，又可控制燃料型 NO_x 的产生，一般 NO_x 生成量仅为煤粉炉的 $1/4\sim 1/3$ 。此外，在燃烧过程中喷入石灰石或白云石，可以脱去燃烧过程中生成的 SO_x ，脱硫率可达到 90% ，使之成为当前最经济有效的低污染燃烧技术，在全世界得到很快的发展。

(3) 燃烧热强度大，可以减小炉膛体积。炉膛截面热负荷可达 $4\sim 6\text{MW}/\text{m}^2$ ，为层燃炉的 $2\sim 6$ 倍，容积热负荷为 $1.5\sim 2\text{MW}/\text{m}^3$ ，是煤粉炉的 $8\sim 11$ 倍。

(4) 床内传热能力强，可减少受热面金属耗量。受热面布置也更为紧凑。

(5) 负荷调节性能好，幅度大，可以在 $30\%\sim 100\%$ 负荷范围内保持稳定燃烧。

(6) 由于低温燃烧，灰渣不会软化和黏结，对锅炉腐蚀作用小，其灰渣活性好，有利于灰渣的综合利用。

循环流化床锅炉的炉型要按布风燃烧（密相区和稀相区），颗粒流化及循环等不同燃烧工艺来决定。燃料的制备比煤粉炉简单，一般只需要通过一次破碎即可通过给煤机进入炉膛的布风板上部。布风板下装有等压风仓，布风板上装有风帽，使床面上的料层均匀吹起，因此具有较大的配风阻力。炉膛下部为密相区，由前后墙形成锥体，使较大的煤和床料颗粒翻滚。上部为稀相区，使煤粒呈流化状燃烧。烟气在炉膛出口进入分离器，使一定大小的颗粒分离后由下部出口经过返料装置回入炉膛料层上，完成循环。烟气则由分离器出口进入尾部烟道。分离器的形式种类很多，例如水冷方形，汽冷圆形，高温绝热，上排气及下排气等，并形成各自的专利。但从结构简单，紧凑角度看，趋向于采用高温绝热的形式。在我国已形成 $75\sim 480\text{t}/\text{h}$ 容量的各种压力的带园型高温绝热上排气旋风分离器的循环流化床锅炉产品系列。旋风筒内径达到 $\phi 3000\sim 7500\text{mm}$ 。循环流化床锅炉炉膛一般为长方形，瘦而高，其水冷壁结构与煤粉炉相接近；只有带方形水冷旋风分离的循环流化床锅炉，其后部分离器由水冷壁管包覆，这部分水冷壁结构及水循环特性复杂；汽冷旋风分离器由锅筒出口的蒸汽管包覆，出口过热度为 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。循环流化床锅炉配备的返料装置及冷渣器也有不少技术要求和专利产品。

4. 环境污染

锅炉排烟中有许多污染物，在燃煤热电站在我国发电设备占主要地位的情况下，如不采取措施，其后果是十分严重的。

排烟中的污染物有飞灰（包括炭黑）硫氧化物 SO_x ，氮氧化物 NO_x 及微量的 CO 等。一台煤粉锅炉，煤中约有 $15\% \sim 20\%$ 的氮在燃烧时会转换成 NO_x ，使 NO_x 大大超过环保要求。 NO_x 及 SO_x 这两种物质对人体及植物都十分有害，所以对燃煤锅炉要采取以下措施。

(1) 改进燃烧技术，研制低 NO_x 燃烧器，采用二级燃烧，低氧燃烧，烟气再循环等。对燃煤锅炉，如煤中 $\text{N}_2 \geq 1\%$ 时，要采取措施（如低过剩空气下运行，降低炉内烟温及二级燃烧分段送风等减少 NO_x 生成），或采用流化状燃烧技术。

(2) 排烟净化，采用高效的电气除尘装置及排烟脱硫和脱硝装置等。

(3) 采用高烟囱，把烟气扩散稀释利用风力将烟气送到远处。

(4) 燃料预处理，变成低硫少灰的净洁燃料等。

第四节 热电站锅炉的类别

蒸汽锅炉具有广泛的用途，不同领域使用的锅炉都具有其特殊的结构特点、技术要求和管辖范围。按蒸汽参数分类的如表 1-1 所示；按用途分类的锅炉有工业锅炉、船用锅炉、电站锅炉及余热锅炉等；按介质分类的有蒸汽、热水和导热油等。

热电站锅炉的参数、容量及燃料品种方面变化范围最大，运行方式也多样，其类别主要有以下几个方面。

一、按循环方式分类

锅炉的循环方式主要有自然循环、辅助循环、直流锅炉及复合循环等多种。

1. 自然循环锅炉

它在目前中小型热电站的中高压锅炉中占绝大部分，在亚临界压力 $300 \sim 600\text{MW}$ 容量锅炉上也有发展余地，其循环方式简单，工质靠下降管中的水与上升管中受热而变成的汽水混合物之间的密度差进行循环流动（循环倍率 $K=3 \sim 30$ ）。锅筒成为蒸发受热面的固定分界点，锅筒有较大的蓄热能力，能适应给水与燃料之间短时间的不协调，相应的可降低自动控制方面的要求。给水中的杂质及盐分可以在蒸发系统中浓缩，以排污方式排出，因此给水品质可相对较低，可降低水处理费用。根据工作原理，随着工作压力的升高，饱和水及汽之间的密度差减小，因此自然循环只限于临界压力以下（ $P < 22.1\text{MPa}$ ）工作。此外自然循环具有良好的自补偿特性，即水冷壁管吸热量增大，循环水速也随之增加，自动调节了管内的工质流量，保证受热强的管子冷却。

自然循环锅炉的汽水系统阻力较小，可降低给水泵压头。过去自然循环锅炉一般用于中压到超高压参数的机组。现在亚临界参数机组中也已普遍采用，尤其在亚临界压力锅炉水冷壁采用内细纹管技术后，可以防止管内工质因膜态沸腾而产生的传热恶化问题。目前最高出力为 $660 \sim 885\text{MW}$ ，出口压力为 18.03MPa （锅筒压力 19.5MPa ）的锅炉已投入运行，国产的 1000t/h 级、出口压力 $\leq 17.6\text{MPa}$ 的配 300MW 容量的锅炉已有较大的批量在运行。

自然循环锅炉最大缺点为受压件金属耗量较大，此外由于锅筒为厚壁件，存在上下及内外壁温差的问题，限制了锅炉的启停的速度，升压速度一般要 $\leq 0.05\text{MPa/min}$ 。对超高压锅炉的锅筒就要采用约 100mm 厚度的低合金钢材，亚临界要达到 $145 \sim 200\text{mm}$ 的壁厚，使制造、焊接及探伤工艺十分复杂，制造厂需设置大型卷板机或水压机等重型机械以及直线加

速器等探伤设备。100~200t 的锅筒起重及运输也很困难。自然循环锅炉的水冷壁管也要采用较大的直径和壁厚,对高压为 $\phi(60 \times 5)\text{mm}$,超高压为 $\phi(60 \times 7)\text{mm} \sim \phi(76 \times 8)\text{mm}$,相应下降管、引入管及汽水引出管的截面比也要增加,因此总的金属耗量远比其他循环方式的锅炉大,从而也限制了其推广使用。同时也使其他循环方式更具竞争力,例如在有些国家,规定自然循环只用于超高压及以下的锅炉上。

2. 辅助循环锅炉

它又称控制循环或多次强制循环锅炉,是在自然循环的基础上发展起来的,除了依靠水与汽水混合物之间的密度差以外,主要在蒸发受热面的下降管与上升管之间装设有再循环泵,用来克服循环回路的流动阻力。例如自然循环的运动压头一般只有 $0.05 \sim 0.1\text{MPa}$,而再循环泵的压头为 $0.25 \sim 0.35\text{MPa}$,比自然循环大好几倍,因此对水冷壁蒸发受热面布置就可较为自由,水冷壁管也可用直径较小的管子 ($\phi 42 \sim 51\text{mm}$ 左右),相应壁厚可减薄。锅炉的循环倍率一般为 $3 \sim 5$,比自然循环低。为减小各循环回路的热偏差,水冷壁入口可设置节流圈,以合理分配流量。由于循环压头增大,循环倍率减小,循环水量减小,允许锅筒直径减小,并可采用阻力较大,旋转强度大,蒸汽负荷高的涡流式汽水分离装置。

总之与自然循环锅炉比较,循环系统更为简单,金属耗量节省,水冷壁管可全部采用碳钢。

当前有一种改良型的辅助循环锅炉(又称低倍率循环锅炉)是在一般辅助循环锅炉基础上发展起来的,其区别是:循环倍率低,使循环倍率从 $K=4$ 降低到 $1.5 \sim 2$,循环泵数量减少,压头相应也降低,运行电耗低。在炉膛高热负荷区的水冷壁管采用内细纹管,可使管中质量流速降低,以满足上升管出口蒸汽干度低于不产生膜态沸腾(DNB)时的最大允许含汽率的要求。改良型辅助循环锅炉可采用更小的管径,较小直径的锅筒甚至可用立式汽水分离器来代替,总体重量更轻,循环可靠,投资及厂用电降低。

辅助循环锅炉的可靠性主要取决于循环泵的可靠性,循环泵要处于锅筒工作压力及相应饱和温度下运行,循环泵结构有其特殊性,为减少泄漏和良好密封,采用泵与马达一体的结构,马达的转子与定子之间用耐压不锈钢屏蔽。只有按照规定的要求进行安装、操作和维护,其可靠性可以得到保证。

我国 $300 \sim 600\text{MW}$ 的机组中,其引进技术首先采用辅助循环锅炉,进口的 $250 \sim 300\text{MW}$ 锅炉也有不少采用低倍率循环的炉型。

3. 直流锅炉

直流锅炉也是一种传统的锅炉循环方式,其蒸发受热面中工质流动是靠给水泵压头来完成,即给水一次通过加热(省煤器)、蒸发(水冷壁管)和过热(过热器)各个受热面。由于在蒸发受热面中工质从欠热状一次通过,全部蒸发完毕成为饱和蒸汽,因此循环倍率 $K=1$,即工况稳定时给水量等于蒸发量。与自然循环锅炉比较,直流锅炉主要特点如下。

(1) 蒸发受热面布置较为自由,主要取决于水动力特性。

(2) 无笨重的锅筒和大直径下降管,因此制造、安装及运输方便,锅炉受压件金属耗量低,热容量和水容积小,启停迅速,调节灵敏。

(3) 对给水品质要求较高,水处理系统及设备较复杂。

(4) 本体流动阻力大,给水泵消耗功率大。

(5) 对外界负荷变化适应性差,自动调节及控制系统较复杂,需设置专用的启动旁路系统。