

高等学校教材

..... 专 科 适 用

电厂热力设备及运行

南京电力高等专科学校 俞国泰 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书内容包括锅炉、汽轮机两大部分。全书以火力发电厂煤粉锅炉及凝汽式汽轮机为重点，紧紧围绕电厂的生产实际，系统地介绍了热力设备的工作原理、基本构造、运行特性和运行调节，并对电厂的燃料运输、除尘、除灰、供水及运行的经济性评价等内容作了一般性的说明。

本书为大专电厂热工过程自动化专业必修课教材，亦可作为有关专业的教材及工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂热力设备及运行/俞国泰主编.-北京:中国电力出版社,1997

高等学校教材·专科适用

ISBN 7-80125-250-0

I. 电… I. 俞… II. 火电厂-热力系统-运行-高等学校-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 18191 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市滨河印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

*

1997 年 5 月第一版 1997 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 378 千字 1 插页

印数 0001—3580 册 定价 16.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

电
边
1
B

前 言

本书是根据电力工业部高等专科学校教材编审出版规划编写的，作为电厂热工过程自动化专业学生学习火力发电厂生产过程的基本原理和设备的必修课教材。

本着适当加强基础理论，紧密联系生产实践的基本原则，全书力求保持锅炉、汽轮机课程的系统性；同时针对电厂热工过程自动化专业的特点，突出热力设备的系统性和整体性，强调热力设备的运行特性、变化规律和调节规律，重点反映热工参数的物理本质对电厂安全、经济的影响，分析热工参数间的相互联系。本书编写中充分注意内容难点的分散，在文字的表达上力求深入浅出，通俗易懂。

本书共分八章。第一、二、三、四章由南京电力高等专科学校朱建宁编写，第五、六、八章由南京电力高等专科学校俞国泰编写，第七章由南京电力高等专科学校王毅林编写。本书由俞国泰担任主编，领导全书稿的编写工作。本书由沈阳电力高等专科学校王大振主审，根据王大振在审稿中所提宝贵意见，由朱建宁、王毅林进行了修改和统编工作。

限于编者水平，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1995.10

目 录

前言

第一章 锅炉设备概述	1
第一节 电厂锅炉的工作过程	1
第二节 电厂锅炉产品示例	4
第三节 对电厂锅炉的基本要求	7
第二章 锅炉的基本理论	9
第一节 燃烧过程的理论基础	9
第二节 锅炉的传热过程	14
第三节 锅炉水循环	18
第四节 水蒸气特性对锅炉受热面布置的影响	28
第三章 锅炉系统及设备构造	30
第一节 锅炉燃烧及燃烧设备	30
第二节 锅炉的汽水系统及设备	61
第三节 典型电厂锅炉及其主要附件	77
第四章 锅炉安全运行的基本知识	81
第一节 自然循环锅炉的启动和停止	81
第二节 直流锅炉启停特点	90
第三节 复合循环锅炉启动特点	95
第四节 锅炉参数调节和运行控制	95
第五节 锅炉的变压运行	105
第六节 锅炉运行中常见事故及其处理	106
第五章 汽轮机的工作原理	111
第一节 概述	111
第二节 汽流在喷嘴叶栅中的能量转换	117
第三节 汽流在动叶栅中的能量转换	129
第四节 级的最佳能量转换	133
第五节 凝汽式多级汽轮机	139
第六章 汽轮机结构	174
第一节 汽轮机本体概述	174
第二节 汽缸的结构及其热膨胀	175
第三节 隔板及其支承	181
第四节 轴承及油膜振荡	185
第五节 动叶片的结构	193
第六节 转子的结构	195

第七节	联轴器	199
第八节	汽封装置	200
第九节	盘车装置	203
第十节	国产大型机组的结构介绍	205
第七章	汽轮机的辅助设备	208
第一节	概述	208
第二节	火力发电厂的供水系统	209
第三节	凝汽设备与抽气器	211
第四节	给水回热加热系统及其设备	218
第五节	给水除氧系统及其设备	228
第八章	汽轮机的启动和停机	234
第一节	汽轮机汽缸和转子的热膨胀、热应力、热变形	234
第二节	母管制机组的冷态启动	242
第三节	单元制机组的冷态启动	249
第四节	汽轮机的热态启动	254
第五节	汽轮机的停机	256

第一章 锅炉设备概述

锅炉是将燃料燃烧释放出的热能或其他能量转换的热能加热给水，以获得规定蒸汽参数和品质的设备。

目前我国从产业类型出发，按照锅炉的用途，一般将锅炉工质出口压力在 3.9MPa 以上的锅炉划归为电厂（电站）锅炉范畴。锅炉作为火力发电厂能量转换过程的首要环节，将燃料的化学能转换为蒸汽的热能，为发电提供高温高压蒸汽。随着现代科学技术的发展，节能和环保要求的提高，电厂锅炉在尽量利用煤（特别是劣质煤）及大力控制燃烧产物对大气污染的前提下，明显地向着大容量、高参数和以管理科学化来提高锅炉机组的经济性、可靠性及运行灵活性方向发展，因而结构十分复杂，机械化和自动化程度较高，型式也越来越多。

在本章中简要介绍用煤作为能源的锅炉设备的能量转换过程；锅炉设备的分类和基本构成；以及为了满足发电的要求，保证锅炉本身运行的安全性和经济性所必须的调节内容。

第一节 电厂锅炉的工作过程

图 1-1 为一台电厂煤粉锅炉及辅助设备的示意图。以下将按该图示例来说明其基本结

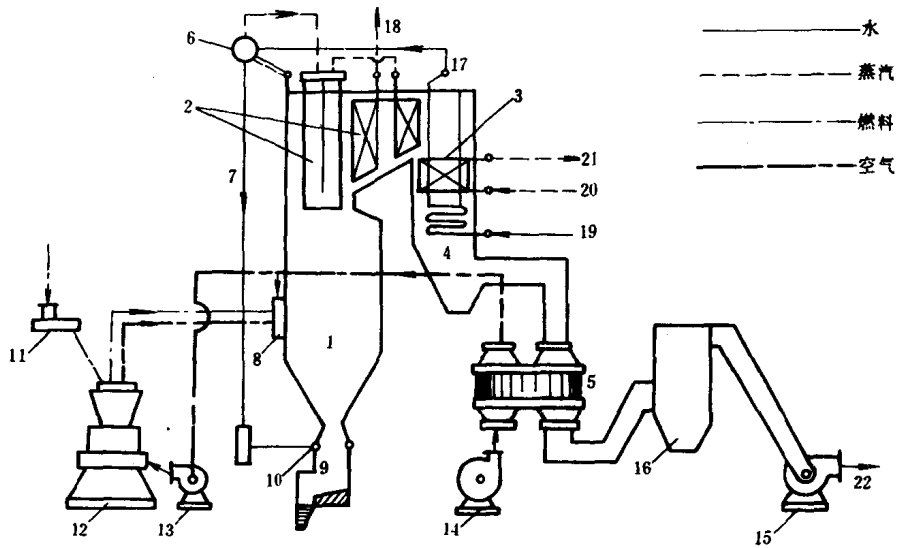


图 1-1 煤粉锅炉及辅助设备示意

- 1—炉膛水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽包；
7—下降管；8—燃烧器；9—排渣装置；10—下联箱；11—给煤机；12—磨煤机；
13—排粉机；14—送风机；15—引风机；16—除尘器；17—省煤器出口联箱；18—
过热蒸汽出口；19—给水；20—再热蒸汽进口；21—再热蒸汽出口；22—排烟

构和工作过程。

一、锅炉设备的组成

电厂锅炉由本体设备和附属设备两部分组成。本体设备包括汽水系统；燃烧系统；起支承和悬吊设备、平台、扶梯等全部锅炉重量的构架；构成锅炉燃烧室和烟道，使火焰和烟气与外界隔绝，防止热量散失和烟气漏出并阻止冷空气漏入，保证燃烧过程和传热过程正常进行的炉墙等。附属设备则包括维护锅炉连续工作所设置的辅助设备和安全附件。

汽水系统和燃烧系统通过受热面把水加热、蒸发和过热，水和蒸汽的流动及汽水分离等锅内过程与燃烧、放热、排渣、烟（空）气流动等组成的炉内过程科学地统一在锅炉设备中。从放热介质中连续或周期性地吸收热量并将热量传递给受热介质的固体表面称为受热面。按受热面从放热介质中吸收热量的主要方式可分为辐射受热面和对流受热面两类。因此，锅炉各受热面的布置和结构型式都力求以组织良好的传热过程为原则。

辅助设备包括通风设备、燃料供应设备、制粉设备、给水设备和除尘除灰设备。

锅炉附件由水位计、安全门、吹灰器、排污装置、热工仪表、自动控制装置，以及一些汽水管道和阀门等组成，以保证锅炉生产的安全并用以控制锅炉的运行工况。

1. 汽水系统

汽水系统指容纳汽、水的受压系统，即锅。它的作用是吸收煤燃烧放出的热量，把水加热成一定温度的过热蒸汽，然后输送到汽轮机设备中。把水加热到过热蒸汽的过程经历了加热、蒸发、过热三个阶段，对应于这三个阶段的过程的设备连接组成了汽水系统。

汽包是汇集、贮存、净化蒸汽和补充给水的圆筒形受压容器。安装在锅炉顶部的汽包是省煤器、水冷壁和过热器的连接枢纽，其上部是蒸汽、下部是水，在其内部装有汽水分离装置，进行汽水分离过程以得到接近于干饱和的蒸汽，并将锅水中的一部分杂质通过连续排污排出锅外。

水冷壁是布置在炉膛内四面墙上的许多平行的管子，为锅炉的主要蒸发受热面。水冷壁受热面主要以辐射换热的方式吸收烟气放出的热量，使管内的水汽化而产生蒸汽，汽水混合物在其中向上流动。此外，水冷壁还起到保护炉墙和防止结渣的作用。

过热器是利用烟气的热量将饱和蒸汽继续加热为过热蒸汽的热交换器，它由蛇形管组成。过热器设置的数量及安排的位置视锅炉供热能力和供热品位而定，一般装在炉膛出口部位、炉膛顶部或锅炉烟道内。

再热器安装在过热器后的烟道中，主要以对流换热的方式将在汽轮机中做过部分功的蒸汽再次进行加热后再返回汽轮机继续做功。经过再热器加热的蒸汽称为再热蒸汽。

省煤器安装在锅炉尾部的低温烟道中，是利用烟气余热加热锅炉给水，以回收排烟余热的热交换器。

下降管是水冷壁的供水管，即汽包中的水在其中下降流动，并通过下联箱均匀地分配到水冷壁的各上升管中。锅水中的一部分沉淀物质通过下联箱上的定期排污装置排出锅外。

2. 燃烧系统

燃烧系统泛指燃料和烟（空）气这一侧的全部空间，即炉。其性能力求能够合理、有效地组织和控制燃料的燃烧过程，以使燃料在炉内良好地燃烧，放出热量，得到满意的燃

烧效果，提高燃料的利用率。燃烧系统由炉膛、燃烧器及相应供给燃料和空气、排除烟气的设备等组成。

炉膛是燃料燃烧的空间。随燃料性质和燃烧方式的不同，炉膛和燃烧设备也不同。图 1-1 煤粉炉的燃烧室借助于气流的输送，大量的煤粉在炉墙和水冷壁围成的空间内呈悬浮状燃烧。

燃烧器布置在炉膛的墙上，将煤粉和空气从不同的地点以一定的速度喷入炉膛，使煤粉和空气进入炉内能进行良好的混合，并能及时稳定的着火和燃烧。

空气预热器布置在锅炉尾部烟道中，其作用是利用温度较高的排烟余热加热燃料燃烧所需空气的热交换器。空气经过加热后再送入炉膛和制粉设备系统中，不但可以进一步降低排烟温度，而且对于强化炉内燃烧，提高燃烧的经济性，干燥和输送煤粉都是有利的。

3. 附属设备

附属设备是为锅、炉服务所配备的一些组件和设备。

通风设备包括送风机、引风机、风道、烟道和烟囱等，用以连续供给燃料燃烧所需的空气以及排出燃烧后生成的烟气。燃料供应设备由锅炉房煤斗前的所有供煤设备组成，保证锅炉所需燃料的供应。制粉设备的作用是在锅炉工作时，将原煤干燥、磨碎成一定细度的煤粉，并送入炉内燃烧。不同形式的制粉系统所包括的具体设备有所区别，一般由煤斗、给煤（粉）机、磨煤机、煤粉分离装置、排粉机等设备组成。给水设备由给水泵、给水管路和阀门等组成，克服给水管路与省煤器的阻力和汽包的压力，向锅炉连续或间断地供水。水处理设备的作用为消除给水中溶解杂质和降低给水硬度，保证锅炉水质指标，以防止在锅炉受热面内结水垢和腐蚀，从而提高锅炉运行的经济性和安全性。除尘设备（除尘器）的作用是清除烟气中携带的飞灰和一部分未燃尽的碳粒，降低烟尘的排放浓度，以减轻飞灰对环境的污染和对引风机的磨损。除灰设备是用来清除锅炉灰渣和由除尘器分离出来的细灰，并将其送往储灰场的设备。

安全门是锅炉的一种重要保护设备，用以对锅炉内部压力极限值的控制及对锅炉安全的保护。排污装置的作用是为了排放锅炉内因锅水蒸发而残留下的杂质及其他有害物质，使锅水的质量控制在允许的范围内，使受热面保持清洁，纯净锅水，净化蒸汽；同时在锅炉停炉、满水时也可起到放水的作用。吹灰器的作用是消除锅炉受热面外部的积灰，以增强传热效果。反映温度、压力、水位和流量等的热工检测仪表是监视锅炉运行状况，防止事故发生的重要标志。为了使电厂锅炉在最安全、经济的条件下运行，工业自动化仪表在锅炉工作中起着自动调节运行工况的作用。管道和阀门在锅炉的各个系统中起着连接与切换运行方式的重要作用，因此其设计、安装、布置与使用的正确与否，不但影响锅炉运行的可靠性，而且与锅炉的经济性和合理性有着密切的关系。

二、锅炉的工作过程

如图 1-1 所示，为实现能量的转换和传递，在锅炉中同时进行着三个互相关联的主要过程。

1. 燃料的燃烧过程

煤斗中的煤通过给煤机的控制借助于自重落入磨煤机，在磨煤机中对煤同时进行干燥

(这里利用从空气预热器引来的热空气进行干燥)和磨碎,磨制成的煤粉在空气(一次风)的带动下,通过燃烧器喷入炉内燃烧。为了给燃烧提供充足的空气并在炉内起到搅拌混合作用,根据悬浮燃烧过程的区域性,还要经燃烧器向炉内分批送入大量的热空气(二次风)。干燥和燃烧所需的热空气由送风机送入空气预热器加热后,一部分经排粉机送入磨煤机,在起干燥的同时也起输送煤粉的作用;另一部分热空气直接进入燃烧器参与炉内燃烧反应。为保证煤粉及时着火,强化燃烧,提高燃尽程度,一次风和分批送入的二次风的风量用挡板分别调整控制。通过连续给煤、逐渐着火、燃烧以及燃尽的炉内燃烧过程,燃料的化学能转化为燃烧产物(烟气和灰渣)的热能。燃烧所形成的灰渣,一部分呈焦渣状落入炉膛底部渣斗中,由排渣装置连续或定期地排出,其余大部分则呈细灰状态被烟气带走。

2. 烟气向水、汽等工质的传热过程

燃烧产生的高温烟气以强烈的辐射换热方式将热量传递给水冷壁管内工质,与此同时烟气受引风机的作用而向炉膛上方流动,经过炉膛出口后依次掠过水平烟道中的过热器、再热器、尾部烟道中的省煤器和空气预热器,以横向冲刷的对流换热方式将热量传递给受热面管束内的工质。最后因沿途放热而使温度递减的烟气,以经济的较低烟温经除尘器除尘后被引风机抽出,由烟囱排入大气。

3. 蒸汽的产生过程

蒸汽的产生过程主要包括水的汽化、蒸汽汇集和汽水分离及蒸汽过热过程。锅炉的给水,由给水泵升压经回热加热后流入省煤器而得到预热,然后进入汽包。汽包中的锅水不断沿着炉墙外的下降管下行至水冷壁下联箱,经下联箱分配后引入一系列并联的水冷壁管中,水在水冷壁管中受火焰辐射传热而产生大量气泡,形成汽水混合物。因水冷壁管中汽水混合物的平均密度较下降管内饱和水的密度小,所以形成了锅水的自然循环而上升进入汽包。汽水混合物在汽包内汇集并进行汽水分离后,分离出来的饱和蒸汽被引入过热器继续加热而形成具有一定压力和温度的过热蒸汽,在出口联箱汇集后经由出汽总管输送到汽轮机;分离出来的水又沿着下降管进入水冷壁重复循环。锅炉中的水循环同时也保证了与高温烟气相接触的金属受热面得以冷却而不会被烧坏,是锅炉能长期安全可靠运行的先决条件。对于具有再热器的中间再热锅炉,汽轮机高压缸排汽又被重新送回锅炉的再热器再次进行加热,提高温度后再送往汽轮机的中、低压汽缸继续做功。

第二节 电厂锅炉产品示例

电厂锅炉是火力发电厂的三大主机之一,视工作条件、工作方式和应用场合的不同,结构型式各异,因此我国电厂锅炉按与发电机组的配套情况,已成为规格系列化生产。

一、电厂锅炉的基本特征

从能源利用的角度看,锅炉是一种能量转换设备,其基本特征常用下列指标表明。

1. 性能特征

电厂锅炉以其供热能力与供热品位为性能标志,以锅炉产品供出的热量表示性能特征。

(1) 蒸发量 表征锅炉容量(生产能力)大小的指标,即电厂锅炉在设计运行条件下

长时间内能维持正常工作的最大蒸发量，也称额定蒸发量，用符号 D_e 表示，单位为 t/h。

(2) 蒸汽参数 表征锅炉产品规范（供热品位）的特性数据，是锅炉设计中规定和运行中要求达到且有严格控制波动范围的数据；是指电厂锅炉出口主汽门前过热蒸汽的压力和温度；对于中间再热锅炉，还应同时说明再热蒸汽进、出锅炉时的流量、压力和温度；为保证锅炉出口处的蒸汽参数，运行人员还应掌握扩大到锅炉主要受热面处的汽温和汽压。蒸汽压力用符号 p 表示，单位为 MPa；蒸汽温度用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 给水温度 电厂锅炉给水温度是指给水进入省煤器入口处的温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

我国电厂锅炉的容量和蒸汽参数系列见表 1-1，以供了解电厂锅炉的生产和配套情况。

表 1-1 我国电厂锅炉的容量和参数系列

压力类别	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	给水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	额定蒸发量 (t/h)	配套机组容量 (MW)
中 压	3.8 (39)	450	150, 172	35 65, 75 120, 130	6 12 25
高 压	9.8 (100)	510, 540 540	215	220, 230 410	50 100
超 高 压	13.7 (140)	555/555 540/540	240	400 670	125 200
亚临界压力	16.7 (170)	570/570 555/555	260	935 1000	300

注 (1) 蒸汽压力为表压力，兆帕数均为约数，括号中的数值为工程大气压，是准确值，1 工程大气压 = $1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.80665 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

(2) 以分数形式表示的蒸汽温度，分子为过热汽温、分母为再热汽温。

2. 技术经济指标

电厂锅炉技术经济指标用锅炉热效率、排烟含尘浓度、成本及可靠性等几项来表示。电厂锅炉应保证运行安全可靠、低耗易造、保护环境和节能高效。

(1) 锅炉热效率 锅炉热效率是从热平衡概念出发，用来定量评价锅炉经济性的重要指标。通常是指锅炉产生蒸汽时有效利用的热量与同时间进入炉内的燃料在完全燃烧情况下所放出热量之比值，用符号 η_{el} (%) 表示。

当从不同的角度对能量的有效利用程度进行评价时，锅炉热效率可以有设计热效率和实际运行热效率之分。锅炉作为一种工业产品，这两个热效率应该是统一的，要求锅炉实际运行热效率达到指定的设计目标值，从这个意义上来说，我国电厂锅炉的能源利用水平 ($\eta_{el} = 90\%$ 左右) 还是比较高的。但在锅炉实际使用过程中，其内部和外部条件都是不断变化的，不可能与设计工况完全一致，可见，唯有实际运行热效率才能真实地反映能量有效利用的状况与水平。

(2) 钢材消耗率及耗电率 钢材消耗率是用于代表成本的一个重要经济指标，定义为锅炉单位蒸发量所用的钢材重量，其数值一般在 $2.5 \sim 5.0 \text{t} \cdot (\text{t}/\text{h})^{-1}$ 内，随燃料性质和锅炉类型而变化。生产 1t 蒸汽耗用的电量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$) 称为耗电率。

(3) 锅炉可靠性 锅炉工作的可靠程度是反映锅炉技术的另一重要指标。因发电

设备非计划停运的一半以上是由锅炉事故造成的，所以提高锅炉工作的可靠性对电力生产具有十分重要的意义。常用的衡量指标有：

连续运行时数=两次计划检修之间的运行小时数；

事故率=事故停用小时数/(运行总时数+事故停用小时数)×100%；

可用率=(运行总时数+备用总时数)/统计时间总时数×100%。

当以一年为一统计周期时，目前国内较好的指标是：连续运行小时数在4000h以上；事故率为1%；可用率为90%。

在保证锅炉安全可靠、运行热效率高的基础上，应合理降低钢材消耗率和减小运行的耗电量。但这三个方面是相互矛盾的，因此衡量锅炉性能的优劣应从这几方面对锅炉进行综合的技术经济比较，从而给出综合的评判。

(4) 排烟的含尘浓度 锅炉排放的烟尘是我国当前主要的大气污染物之一，为了满足环境质量的要求，国家标准中按烟囱高度规定了电厂锅炉允许烟囱排放量(kg/h)。为了降低烟囱的排放浓度，除选用合适的燃烧方式和燃烧设备确保锅炉较高的燃烧效率以消除黑烟外，必须采用高效除尘装置以减小飞灰排放量。随着大气污染防治工作的进一步开展，电厂锅炉还必须防止气态污染物SO₂、SO₃、NO_x等对环境的破坏。

3. 分类特征

电厂锅炉的分类方法较多，从不同的角度对锅炉进行分类和评价，其名称和指标能反映出某个方面的特征及特性。常用的分类方法有：

按锅炉用途分类，电厂锅炉主要用于发电，但也用于大型锅炉房内提供生产（工艺和动力）用汽。

按锅炉产生的蒸汽量分类，小容量锅炉 $D_e < 220\text{t/h}$ ，中容量锅炉 $D_e = 220 \sim 410\text{t/h}$ ，大容量锅炉 $D_e \geq 670\text{t/h}$ 。

按锅炉出口工质压力分类，中压锅炉 $p = 3.822\text{MPa}$ ，高压锅炉 $p = 9.8\text{MPa}$ ，超高压锅炉 $p = 13.72\text{MPa}$ ，亚临界压力锅炉 $p = 16.66\text{MPa}$ ，超临界压力锅炉 $p > 22.11\text{MPa}$ 。

按推动汽水混合物在锅内的流动方式分类，电厂锅炉大多为利用工质密度差而产生工质循环的自然循环汽包锅炉。当锅炉压力增大而使自然循环流动压头下降，甚至根本不可能产生自然循环时则采用多次强制循环汽包锅炉、直流锅炉和附有循环泵的低循环倍率锅炉及复合循环锅炉。

按燃烧方式分类，电厂锅炉主要采用燃料在炉膛空间悬浮燃烧的燃烧室燃烧锅炉。

按所用燃料或能源分类，在我国的燃料政策下，绝大部分电厂锅炉是燃用煤等固体燃料的锅炉，只在特定区域中采用燃油、燃气锅炉。

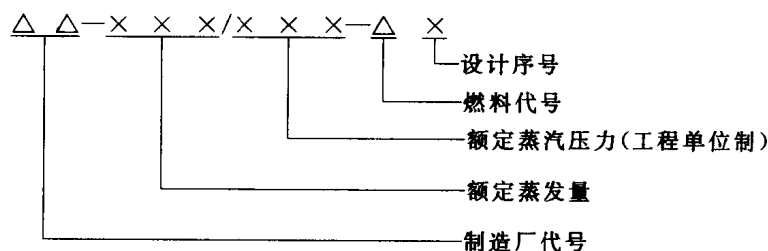
按排渣方式分类，有燃料燃烧后生成的灰渣成固态排出的固态排渣锅炉和燃烧后生成的灰渣成液态从渣口流出的液态排渣锅炉。

按炉膛压力分类，由引风机保持炉膛为负压的锅炉是电厂锅炉的主要型式，微正压锅炉则不需引风机而炉膛表压力为2000~5000Pa。

此外，按锅炉本体结构型式分类，电厂锅炉主要采用倒U形布置形式；按锅炉房型式分类，电厂锅炉主要采用露天或室内布置。

二、电厂锅炉型号

电厂锅炉产品型号由用短横线相连的三部分组成，各部分又由若干段表示，其形式及各段含义如下所示：



例 SG-1000/170-YM2 表示上海锅炉厂制造的 1000t/h、17MPa (170kgf/cm²) 电厂锅炉，设计燃料为油煤两用，第二次变型设计。

第三节 对电厂锅炉的基本要求

节约能源和阻止能源消耗对环境的日益破坏是当今电厂锅炉要积极开展的两大工作，因此锅炉必须在设计、制造、运行诸方面采取相应的措施，以适应目前的发展趋势。

一、对设计的基本要求

改进设计，合理布置受热面，完善燃烧设备，以使燃烧稳定且能适应多变的负荷变化；具有良好地保温性能和密封性能；降低受压元件和其他受热面的金属消耗量；制造工艺相对简单，便于安装，以提高锅炉的经济性。

正确选用钢材，确保各受压元件具有足够的强度；保证受热面能得到可靠的冷却和自由的膨胀；避免或减小零、部件的复合应力和局部应力集中；安全附件和各种仪表配装合理、齐全；配备性能良好的消烟除尘设备和考虑噪声治理技术；设计符合安全监察机构有关条文的规定，以保证锅炉的安全可靠性。

二、对制造的基本要求

良好的设计须通过优良的制造手段和生产工艺予以实现，以防止粗制滥造所造成的先天性缺陷给锅炉发生重大事故留下隐患，保证锅炉投运后有较高的实际性能水平。

三、对运行的基本要求和自动调节的内容

发电厂的发电量在保证供电品质尽可能稳定在规定值的前提下要随着外界负荷的改变而变化，要求电厂锅炉不但要可靠地满足汽轮机的负荷要求，生产具有蒸汽品质合格的蒸汽，防止锅炉运行中任何不正常情况的发生和扩大，而且保证燃料燃烧过程的经济性和传热过程的稳定性。

从图 1-1 锅炉的基本构成与生产过程的关系可以看出，锅炉是一个多输入、多输出、多回路、非线性的互相关联的生产对象，最终为了保证供热的稳定，输入与输出参数间存在着许多交叉的影响。面对这样一个复杂的调节对象、较多的调节参数、被调节参数和错综复杂的扰动参数，要求人工操作显然是不可能的，必须依靠自动化装置来进行协调的动作。保证蒸发量随时与汽轮机用汽量相适应，使汽温、汽压稳定在规定的范围内；均衡给水并

维持汽包正常水位，保证合格的蒸汽品质；维持稳定经济的燃烧，尽量减小热量损失，提高锅炉效率；及时而准确地对锅炉进行调整等方面构成了自动调节的内容。锅炉设备自动调节的作用就是使锅炉这样一个复杂的调节对象能得到安全、可靠和经济的运行。现代大容量高参数以煤为燃料的电厂再热锅炉，随着电子计算机在锅炉自动调节技术方面的应用，劳动条件、工作环境得到改善，运行的安全性和经济性得到进一步提高。

第二章 锅炉的基本理论

在锅炉设备中，燃烧是基础，产生蒸汽是目的，这两者是通过传热过程而联系起来的。将燃料的化学能转换为蒸汽热能的经济性主要取决于燃烧效率。燃烧效率越高，可以从燃料中取得的热量越多；锅炉内部工作介质（水、蒸汽和汽水混合物）受传热过程影响的流动规律则在很大程度上决定了锅炉的工作可靠性。精心组织好燃烧过程，使燃料的化学能充分燃烧产生大量的热能；根据工作介质的流动特性恰当布置受热面和烟气流程，使炉内热量最有效地传给工质；加强烟气余热的回收利用，减少可用能损失等几方面内容则构成了锅炉的基本理论。

第一节 燃烧过程的理论基础

锅炉的燃烧过程是指燃料中的可燃成分与空气（氧）发生剧烈氧化反应，放出光和热时所遵循的基本规律和表现出的物理、化学现象。按照燃料和空气的形态是否相同，燃烧过程可分为均相燃烧和多相燃烧两大类。固体燃料（煤）的燃烧属多相燃烧的范畴。要使燃料在燃烧时保证稳定、连续和达到最大的放热效果，且充分有效地利用燃烧时所放出的热量、化学反应速度和燃烧过程中物理现象（热交换、物质的扩散等）之间的相互关系，构成了燃烧过程的极其复杂性。

炉内燃烧过程的理论基础从建立一般性的物理概念出发，由性质上来分析各个物理及化学因素对燃烧过程的影响程度，找出经验数据的综合方法以及实际工作的合理方向，尽量使研究的结果接近炉内燃料燃烧时的实际要求。

一、燃烧过程的主要阶段

在悬浮燃烧方式中，磨成粉状的煤粉颗粒在气流的承载下连续地流过燃烧室，当良好的燃尽程度要求呈悬浮状态下的煤粉在飞越炉膛的极短时间内（1~3s）完成吸热升温 and 燃烧放热两大过程时，则必须尽可能增加煤粉的燃烧速度，使其在炉膛出口处前结束燃烧。因此，煤粉气流的复杂燃烧过程一般可按进行的时间分为以下三个阶段。

1. 预热阶段

此阶段包括煤粉气流的预热、燃料的烘干和挥发性气体的分解逸出等过程。进入炉内的煤粉气流受高温烟气加热后，水分开始蒸发，煤粉得到干燥，随之挥发性气体由于热稳定性差而被分解出来，剩余的固体物逐渐形成焦炭。显然，这一阶段的特点是煤粉气流尚未开始燃烧，只从炉内吸取热量使煤粉气流温度升高，故也称此阶段为着火前的准备阶段。

2. 燃烧阶段

当煤粉气流因受热而温度不断升高时，析出的挥发性气体首先达到着火温度而燃烧，随之大量焦炭从挥发性气体燃烧的局部高温处及炉内高温区吸收热量，待挥发性气体将要燃

尽且其燃烧产物又被空气流吹走以后，焦炭便开始着火燃烧。这一阶段的特点是燃料中的可燃成分与氧在高温下进行剧烈的燃烧反应，放出大量的热量。虽然挥发性气体的析出、燃烧和焦炭的着火燃烧并非依次进行而是交错发展的，但总的来说挥发性气体的燃烧在前，焦炭的燃烧在后，且挥发性气体燃烧速度快，仅占整个燃烧所需时间的10%左右，焦炭则燃烧缓慢，占去煤粉气流燃烧总时间的绝大部分。

3. 燃尽阶段

在此阶段中，由于焦炭逐渐燃尽，所需的空气量减少，燃烧速度减慢，更加之焦炭中可燃质点外层被灰分所包围，阻碍了未燃尽的可燃成分与空气的良好接触，使得燃烧进行得十分缓慢，放热量大为减小，故要将焦炭粒燃烧完所需的时间较长。

二、完全迅速燃烧的必要条件

燃烧过程中最关键的是着火和燃尽这两个阶段，只有在实现及时、稳定着火的条件下，燃烧过程才能得以充分地发展，促进燃尽过程的进行，提高燃烧的完善程度。为此要做到燃烧迅速而完全，必须具备下列条件。

1. 保持足够高的炉内温度

燃料开始发生剧烈氧化所需的最低温度叫做燃料的着火温度；把煤粉气流加热到着火温度以上所需的能量称为着火热。煤粉气流着火的发生是由于吸收炉内热量，温度不断升高而引起的，因此维持炉内的高温环境，可以促使煤粉气流很快着火，提高燃烧阶段的化学反应速度，保证焦炭的燃尽。

2. 供给适量的空气

燃料燃烧所必需的空气量依据氧化反应方程而定。空气量不足，燃烧不完全；空气量过大，则会降低炉内温度水平，延长燃烧时间，造成燃尽的困难。

3. 保证煤粉与空气的良好混合

适合的空气量必须以正确的方法供给燃料，使燃烧过程达到最佳的热力工况。依据燃烧过程中不同阶段对空气的需要量，在煤粉炉中燃烧所需的空气量是分期分批从不同地点送入炉内的。总的原则是既不能因空气的加入影响煤粉气流的燃烧，又要对燃烧过程及时地补充氧气，以保证燃烧过程的连续发展，使燃烧时间最短。

4. 有必要的燃烧时间

焦炭的燃烧是整个燃烧过程中最长的阶段，其燃烧放热所需的时间要求锅炉有足够的空间予以保证，否则到了炉膛出口处，烟气温度很快下降，燃烧就会停止，从而增大不完全燃烧损失。

以上条件之间有密切联系且有相互矛盾之处，所以在分析炉内的燃烧过程时必须全面考虑，分清解决问题时的主次关系。

三、影响燃烧的基本因素

对应于煤粉气流燃烧的三个阶段及迅速完全燃烧四个要素，可以将燃烧空间（炉膛）分为着火区、燃烧区、燃尽区和无用空间四种作用和特性都不同的区域。着火及燃烧区域的作用是保证稳定的着火并使燃料的大部分在此区域内燃烧，其基本特点是燃料与高温烟气之间、燃料与空气间的混合非常强烈。燃尽区的作用是保证燃料的燃尽，其基本特

点是混合不强烈，气流之间依靠浓度差和温度差的扩散速度相当缓慢。无用空间指温度较低，没有进行燃烧的区域，这种区域的存在使得燃烧的有效空间减小。通过对不同区域的分析研究，可以从中找出构成影响燃烧过程实效的基本因素。

(一) 煤粉气流着火物理模型

煤粉气流着火的热源来自炉内高温烟气的直接混入和炉膛的辐射热，而前者是主要的。图 2-1 为煤粉气流受热时着火的物理模型。此模型假定着火过程是稳定的，各股气流的比热容相等且忽略煤粉所占有的体积，认为着火的热源来自炉内高温烟气的直接混入。当要求煤粉气流在进入炉内不太远的距离内达到着火温度而实现稳定着火时，建立在混合原则基础之上的热平衡方程为

$$V_1 t_0 + S_r t_g = (V_1 + S_r) t_i \quad (2-1)$$

式中 V_1 ——单位质量燃料相对的一次风量；
 S_r ——一次风煤粉混合物被加热到着火温度所必须卷吸的烟气量；
 t_0 ——一次风煤粉混合物的温度；
 t_g ——卷吸烟气的温度；
 t_i ——着火温度。

从式 (2-1) 可以看出，当煤粉具有一定的体积，煤粉气流在着火前还必须消耗足够的热量去干燥、加热煤粉时，实现稳定着火的必要条件是高温烟气提供着火用的热量必须大于一次风煤粉混合物被加热到着火所需要的热量，即

$$S_r (t_g - t_i) > V_1 (t_i - t_0) \quad (2-2)$$

煤粉气流的着火与燃料本身的着火温度密切相关，不同种类燃料的着火温度差别很大，也即着火条件差别很大。着火温度高的煤粉气流必须加热到很高温度才能正常地引燃，为此在确保煤粉细度，促进加热升温有利着火的条件下，可以从两方面采取相应的技术措施改善着火条件。

1. 尽量减小着火所需的热量

提高煤粉与一次风气流的初温可降低着火所需热量，使着火点向前移动。电厂锅炉在燃用贫煤、无烟煤等着火温度高的煤种时广泛采用热空气 (380~420℃) 来输送煤粉，使得热空气和煤粉混合后的一次风温度大约在 250℃ 左右的数量级就是为了减少着火热的缘故。

一次风量增加时将煤粉气流加热到着火温度所需之热量加大，因而在其他条件不变的情况下，由于一次风量加大而使着火区域内的煤粉浓度降低，化学反应析出的热量减小，温度提高的速度也降低，将使着火点推迟。

改变一次风速的大小则意味着单位时间内流经着火区的煤粉空气混合物的热容量变

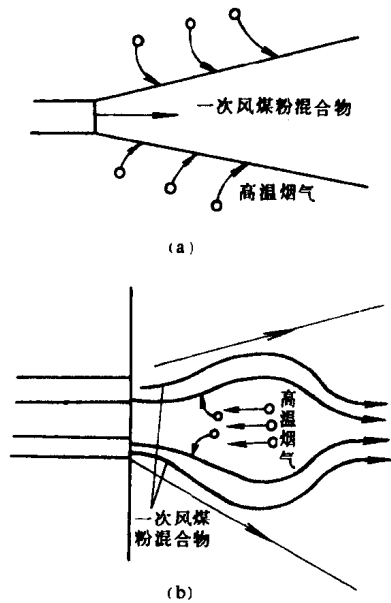


图 2-1 煤粉气流受热时着火的物理模型
 (a) 外侧着火；(b) 内侧着火

化，当加热速度不变时，一次风速增加或过低，将使着火地点滞后或过于靠前。

显然从着火的角度看一次风量、一次风速和一次风温应以保证燃料在着火期间所需的氧量及控制着火地点为原则，待煤粉气流着火后再及时送入二次风，以促使燃烧的进一步发展。因此，在着火以前为保证不增加一次风量应尽可能减少二次风的混入，同时控制好二次风的混入时间和地点，保证燃料与空气间的良好混合，不使煤粉气流着火后缺氧。

2. 尽可能增加着火热量

在煤粉气流所需着火热量一定的条件下，所能提供的着火热量由卷吸烟气的数量和温度水平所决定。着火所需热量越少的燃料，越易保证燃料的稳定着火，所以着火条件优越。

煤粉气流着火所必须保证的最小卷吸量由下式确定：

$$S_r = V_1 \frac{t_i - t_0}{t_g - t_i} \quad (2-3)$$

S_r 愈小，煤粉气流的着火稳定性能愈好。因 S_r 与一次风量成正比，且一次风量与输送煤粉及燃料着火期间所需氧量有关，所以对一定燃料的着火来说，在理论上存在着一个最有利的一次风量；当一次风煤粉混合物的温度越高和着火温度越低时，均可使 S_r 减小；增加卷吸烟气的温度，也可使 S_r 减小。

可见，炉膛内温度水平的高低及设法把高温烟气的热量供应到一次风煤粉气流中去是保证及时、稳定着火的重要方面。实际应用中对着火稳定性较差的煤种常采取适当减小一次风量、在炉内敷设卫燃带、热风送粉、增大一次风的煤粉浓度等手段，就是为了使放热量相对集中，达到有效提高炉内温度水平的目的；而增强一次风煤粉气流内、外侧炉内高温烟气的直接混入（回流与卷吸），强化一次风与高温烟气及时、充分地混合则有赖于高性能的燃烧器与炉膛形状的合理配合。

(二) 煤粉颗粒的燃烧

一次风煤粉气流着火以后，煤粉颗粒在流动过程中适时补入足量二次风的条件下完成燃烧。发生在煤粉颗粒与气流之间的多相燃烧，如图 2-2 所示。

由于燃烧反应在固体表面上进行且认为是不可逆的，故发生在煤粉颗粒表面上的多相燃烧包括以下几个连续的阶段：①氧化剂从周围环境向煤粉颗粒表面转移和扩散；②氧化剂被煤粉颗粒表面吸附；③氧化剂在煤粉颗粒表面进行化学反应；④燃烧产物由表面解吸；

⑤燃烧产物离开煤粉颗粒表面扩散到周围环境中去。

可见，煤粉颗粒燃烧与许多物理的、化学的因素密切相关。为提高燃烧程度而采取的任何技术措施，其有效的程度总要看能否预先查明最慢的、对总过程的燃烧速度起着阻碍作用的现象而定。

1. 燃烧速度

研究表明，煤粉颗粒的燃烧速度主要决定于氧化剂扩散到两相分界面所需的时间（即氧化剂的扩散或供应速度）和煤粉颗粒表面上化学反应所需的时间（即化学反应速度）。

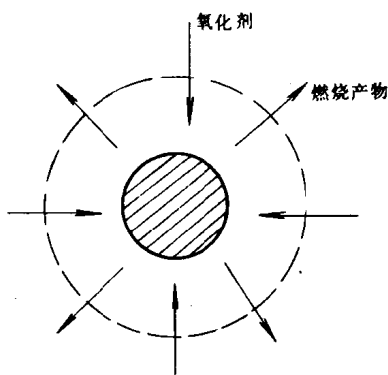


图 2-2 煤粉颗粒的多相燃烧