

177159

高等学校教材



电厂热力设备及其运行

华北电力大学 王加璇 姚文达 合编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是供学习和掌握发电厂主要热力设备的工作原理、结构、系统连接、热经济性分析与计算、控制与保护以及其经济运行而编写的。全书共分四篇十七章。第一篇锅炉设备、第二篇汽轮机、第三篇发电厂用泵与风机、第四篇发电厂的热力系统及其经济运行。每一章皆附有思考题。

本书是为高校热能动力专业以外的热动类其他专业编写的教材,也可以供相关专业作培训教材和在此领域内工作的工程技术人员进修自学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂热力设备及其运行/王加璇,姚文达编.-北京:
中国电力出版社,1997

高等学校教材

ISBN 7-80125-308-6

I. 电… I. ①王… ②姚… III. ①火电厂-热力
系统-高等学校-教材 ②火电厂-热力系统-运行-高等
学校-教材 N. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04590 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京密云红光印刷厂

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997 年 9 月第一版 1997 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.875 印张 559 千字 2 插页

印数 0001—2000 册 定价 23.40 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)

前 言

本书是根据能源部热能动力类专业教学委员会确定的任务,为热动类生产过程自动化、电厂化学等专业编写的教材,它是在王加璇主编的《热工基础及热力设备》下册的基础上修订改写的,修订改写工作由王加璇与姚文达二人合作完成初稿,然后由王加璇统稿。这次修订对本书的体系作了适当地变动,对非重点的章节作了适当精简,尤其是在文字上进行了精炼,更进一步突出了重点。全书共分四篇,各篇之间相对独立,可以根据专业需要适当选用,以扩大其适用范围。

当我们在原书的基础上改写成这本独立成册的教科书时,我们仍不能忘记当年热动类教材编审委员会“热力发电厂”组的委员们在汪孟乐与郑体宪两位组长领导下,在编写这本教材的大纲时所花的精力,前后经四次会议讨论,为此组织过两次小组扩大会议进行过教学经验交流,并将初稿油印出来在各校试用,征求使用意见之后始动笔编写。还应提及的是原书汽轮机部分由武汉水利电力大学陈汝庆老师执笔,这次修订成新书时因时间紧,来不及再通讯联络,只由原书主编王加璇执笔改写并统稿,在此我们感谢陈汝庆和李良民两位老师与我们合作中所作的贡献。本书承蒙北方交通大学齐起生教授审阅,提出了不少的宝贵意见和建议,在此一并深表感谢。

尽管本书在原书使用7年之后,经过数次征求意见的基础上重新改写,而且作了较大的改进,收入了近年来发展的一些新技术、新内容,但作者们的经验和水平有限,再加上编写时间短促,疏漏不当之处在所难免,热忱欢迎读者批评指正。

编 者

1995.3

主要符号表

一、主体符号

A	面积、煤中灰分含量
a	黑度、飞灰或炉渣份额
B	宽度、燃料量、翼弦长
C	反应物浓度
c	比热、速度
D	锅炉蒸发量(或负荷)、蒸汽(或给水)流量
d	直径、汽耗率
E	弹性模量、活化能、能量
e	部分进汽度
F	力
f	频率
G	重力
g	重力加速度
H	焓降、循环回路高度、扬程、吸上高度
h	比焓、高度、显热
I	转动惯量
K	传热系数、循环倍率、碳酸盐分解系数、蒸汽携带系数
k	化学反应常数
L	长度、翼展
l	叶栅高度
M	马赫数、力矩、转矩、火焰中心位置常数
m	质量
N	数目
n	转速、化学反应指数
P	功率
p	压力、阻力

Q	热量
q	热流密度、流量
R	通用气体常数
r	半径、汽化潜热
S	熵、压头、含盐量
s	节距, 比熵
T	热力学温度
t	摄氏温度
u	速度
V	体积、煤中挥发分含量
v	速度
W	功、煤中水分含量、化学反应速度
w	速度及其分量、相对流速
x	速度比、蒸汽含汽率
Y	压差
y	挠度
z	数目、垂直标高
α	传热系数、过量空气系数、质量交换系数
β	容积含汽率、动叶(或叶片)的进口(或出口)角
δ	厚度
Δ	差值
ϵ	迟缓率、压力比
κ	绝热指数
ζ	阻力系数
η	效率、不均匀系数
λ	热导率
ρ	密度、反动度、排污率
σ	应力
τ	时间
Φ	喷嘴速度系数

φ 保温系数、截面含汽率、热偏差
 ψ 热有效系数、动叶速度系数
 θ 烟温的无因次量
 ω 角速度、蒸汽湿度

二、角 标

a 空气、音速、轴
 ah 空气预热器
 as 灰
 at 雾化
 av 平均
 b 动叶的、抽出
 bl 排污
 bw 锅炉水
 c 凝结、对流、常数、计算、碳酸盐
 ca 冷空气、设计值
 cr 临界的
 d 下降管、驱动、干的
 df 倒流
 dg 干烟气
 e, ef 有效的
 el 电的
 em 电磁的
 ex 排出
 f 燃料、摩擦
 fas 飞灰
 fg 排烟
 fu 炉膛
 fw 给水的
 g 烟
 h 热

hw 热水
 i 内部的
 im 介质、工质
 in 输入、送入
 l 漏入
 m 机械、质量、远动
 max 最大值
 mix 混合
 min 最小值
 me 金属
 n 喷嘴
 oh 外部热源
 op 最佳值
 r 相对、径向、上升管
 ra 额定
 re 炉渣、再热
 rh 再热
 s 级、蒸汽
 sat 饱和的
 sh 过热的
 ss 饱和蒸汽的
 st 停滞的
 sup 过热器
 t 理论、循环的
 u 圆周方向
 v 体积、容积
 va 蒸发、蒸汽
 w 壁面的
 z 轴向的
 0 理论、初始状态
 $'$ 进口、饱和水
 $''$ 出口、饱和汽

目 录

前 言

主要符号表

绪论 1

第一篇 锅 炉 设 备

第一章 锅炉整体.....	5
第一节 锅炉蒸汽发生过程.....	5
第二节 锅炉类型及规范.....	6
第三节 自然循环锅炉.....	10
第四节 强制流动锅炉.....	23
思考题.....	34
第二章 受热面.....	36
第一节 蒸发受热面.....	36
第二节 过热受热面.....	41
第三节 水和空气的预热.....	55
第四节 受热面整体布置.....	62
思考题.....	68
第三章 辅机系统.....	69
第一节 燃料特性.....	69
第二节 煤粉制备.....	77
第三节 锅炉通风.....	86
第四节 烟尘和灰渣处理.....	87
第五节 燃料运输.....	92
思考题.....	96
第四章 燃烧过程.....	98
第一节 燃烧空气量和烟气体量.....	98
第二节 锅炉热损失及热效率.....	105
第三节 燃烧基本原理.....	113
第四节 悬浮燃烧.....	118
第五节 流态化燃烧.....	130
思考题.....	132
第五章 传热过程.....	133
第一节 炉内辐射传热过程.....	133
第二节 对流受热面传热过程.....	138

第三节	对流放热系数	142
第四节	辐射放热系数	143
第五节	污染系数和传热有效系数	144
第六节	受热面积和平均温压	145
思考题		146
第六章	锅内流动过程	147
第一节	自然循环原理及特性	147
第二节	强制流动特性	155
第三节	清洁蒸汽获得	157
思考题		162
第七章	锅炉运行特性	163
第一节	自然循环锅炉静态特性	163
第二节	自然循环锅炉动态特性	168
第三节	直流锅炉运行静、动态特性	175
思考题		178
第八章	锅炉安全运行技术	179
第一节	汽包热应力	179
第二节	起停过程中受热面保护	181
第三节	自然循环锅炉正常运行调节	182
第四节	自然循环锅炉滑参数起停	184
第五节	直流锅炉运行	186
第六节	事故处理	189
思考题		191

第二篇 汽 轮 机

第九章	汽轮机工作原理	192
第一节	蒸汽在喷嘴叶栅中的流动和能量转换	193
第二节	蒸汽在动叶栅中的能量转换	196
第三节	级的分类与轮周效率	200
第四节	汽轮机级内损失、效率和功率	205
思考题		208
第十章	多级汽轮机	210
第一节	汽轮机的分类和型号	210
第二节	多级汽轮机中能量转换	212
第三节	多级汽轮机的结构	218
第四节	汽轮机的轴封系统	226
思考题		228
第十一章	凝汽设备与冷却装置	229
第一节	凝汽设备的组成、结构和作用	229
第二节	发电厂的供水系统	235

第三节 凝汽设备的运行	238
第四节 干式冷却系统	241
思考题	244
第十二章 汽轮机的调节与保护	246
第一节 汽轮机调节原理	246
第二节 调节系统的特性	252
第三节 中间再热式汽轮机的调节	262
第四节 供热式汽轮机的调节	270
第五节 汽轮机的保护装置	275
第六节 汽轮机的供油系统	284
思考题	287
第十三章 汽轮机运行	288
第一节 汽轮机的负荷特性	288
第二节 蒸汽初参数变化对汽轮机运行的影响	295
第三节 蒸汽品质对汽轮机运行的影响	298
第四节 汽轮机的热膨胀、热变形和热应力	300
第五节 汽轮机的启动和停机	312
思考题	321

第三篇 发电厂泵与风机

第十四章 泵与风机的原理及结构	322
第一节 离心式泵与风机的基本理论	322
第二节 轴流式泵与风机的基本原理	328
第三节 泵与风机的结构	331
思考题	337
第十五章 泵与风机性能和调节	338
第一节 泵与风机的损失和效率	338
第二节 泵与风机的工作性能曲线	339
第三节 水泵的汽蚀性能	341
第四节 泵与风机的运行工作点	342
第五节 泵与风机的并联运行	343
第六节 泵与风机的调节	344
思考题	345

第四篇 发电厂的热力系统及其经济运行

第十六章 发电厂的热力系统	346
第一节 给水回热加热系统	346
第二节 给水除氧系统	355
第三节 发电厂的汽水损失与补充	361
第四节 原则性热力系统图	363

第五节 发电厂全面性热力系统	367
思考题	373
第十七章 发电厂的经济运行	374
第一节 发电厂的损失和经济指标	374
第二节 单元机组的经济运行	377
第三节 并列运行机组的经济调度	379
思考题	383
参考文献	384

绪 论

1. 电力工业在国民经济中的作用

电能由于其固有的优点而成为国民经济各领域最广泛使用的能量，从而成为人类社会生产和生活中时刻不可离开的二次能源。电能的优点首先是它的可转换性，这是任何其他形式的能量无法相比的，它可以很方便地转换成机械能、热能、光能、化学能等各种能量形式。而且转换程度理论上可以说是百分之百，因此，我们常把电能叫做高级能形的能量。在一定意义上可以说能量的可转换性表征着其可用性。电能不仅在存在形式上易于转换，而且在其质量指标上也易于改变。电能的质量指标是电压与频率。人们可以通过变压器很容易地提高或降低其电压，如需要远距离输送电能时，可通过升压变压器将电压升高以减少其输送中的能量损失；当用于电气设备时，又可通过降压变压器获得所需要的电压。频率也可通过变频器来改变。其次是输送方便，可以通过配电装置很容易地分配到各用户。再次是电能的可控制，即可以实现最精确的控制。当今的科学技术的新成果，如电视、电脑、电传真等等无不与电有关，总之电能的应用已深入到社会生产和生活的各个领域，一个国家的电气化程度已成为国民经济现代化的一个重要标志。只有电力工业的迅速发展才有可能保证整个国民经济的迅速而稳步地发展。

热力发电厂是电力工业的主要组成部分。热力发电厂包括燃化石燃料（煤、油、气）的火力发电厂与使用核燃料的核动力电厂，迄今为止，热力发电厂在世界大多数国家中仍占着各种发电形式中的主导地位，我国的火力发电占70%左右，而且根据我国国情，火力发电厂基本上是燃煤电厂。随着全国电能需求量不断发展，而一次能源中煤的产量增长可能赶不上发电容量增长的需要，因此，今后适当加速发展核电是必然趋势。我们以热力发电厂的概念来概括火力发电厂与核电厂是有根据的。因为这两种发电方式在原理上是一致的，都是利用热能实现循环，最终转换为电能，其差别只是在蒸汽发生系统，一个是用燃煤锅炉，一个是用核反应堆，本书中所讲汽轮机装置等原理基本上也可以用于核电厂。

我国的动力资源如煤炭、石油、天然气等都很丰富，水力资源也很可观，除了因我国人口众多的因素使人均指标略逊于世界先进国家外，完全可以说我国的动力资源为发展电力工业提供了坚实的基础，而人均指标低的现状只会促使我们更加努力珍惜资源、合理用能、节能降耗，使动力资源发挥更大的效益，这就敦促我们掌握高新技术，以满足国家经济发展不断增长的需要。建国以来，我国电力工业发展很快，截至1994年底，全国完成发电量9050亿kW·h，比上年增长10.23%，其中水电1685亿kW·h，火电7230亿kW·h，核电135亿kW·h。水电比上年增长15.41%；火电比上年增长7.94%，电网秩序进一步稳定，供电可靠性不断提高，主要电网频率合格率达99.62%。新增发电机组容量每年以1000~1500万kW增加，今后这个数字还将不断增大。

我国的发电装机容量尽管按人均占有水平还较低，但从总量上看，已有了相当规模，

“八五”末或“九五”初将迈进世界前三名。我国发电设备制造在解放前基本是空白，连部件、备件都依赖于外国，发展至今不仅有了若干个电力设备生产基地，而且发电设备的容量与参数以及设备质量、自动化程度等各方面都赶上或接近世界先进水平。现在已具备生产 600MW 及以上汽轮发电机组与其配套锅炉的能力。我国的各大电力系统中，主力机组的单机容量已经逐渐地由 200MW 过渡到 300MW。并将继续向 600MW 迈进。随着单机容量的增大，初蒸汽参数也向高压、超高压、亚临界与超临界压力逐步过渡。

虽然我国电力工业发展是高质量高速度的，但与所要达到的现代化的大目标还是有一定距离的。现代化的一个重要条件和其重要结果是人的现代化。要实现电力工业现代化，必须培养出大批的优秀的技术人员和管理干部的队伍。既要着眼于整体队伍素质的提高，又要着力于培养出一些国际上一流水平的专家。否则很难实现我国电力工业发展的宏伟目标。

2. 火力发电厂的生产过程

火力发电厂的基本任务是实现从燃料的化学能到输出电能的能量转换过程。按其燃用的燃料分可分为燃煤、燃油和燃气电厂，按其容量分则有大型电厂、中型电厂和小型电厂，按其机组蒸汽初参数分则有为低压、中压、高压、超高压、亚临界和超临界压力等几种类型；按使用的原动机分则可分为蒸汽轮机（这是基本机组）、燃气轮机（主要用于调峰和燃

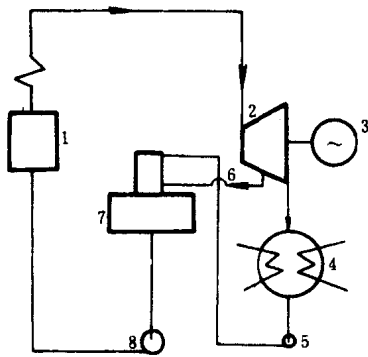


图 0-1 凝汽式电厂生产过程简图

- 1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；
4—凝汽器；5—凝结水泵；6—汽
轮机抽汽；7—除氧器；8—给水泵

气蒸汽—联合循环)和柴油机（一般用于用户处自备备用发电设备）等电厂；按照供出能量分可分为凝汽式电厂和热电厂。在凝汽式电厂中安装着凝汽式机组，只用于发电输出单一的电能，这类电厂可建为远离市区，特别在采煤地区的所谓“坑口电站”，既可避免燃料的长途运输（变输煤为输电），又有利于环境保护，其排放的灰渣还可就地用于回填煤矿。热电厂的全名为热电联产厂，它能同时输出电、热两种形式的能量，既能供电又能供热。热负荷又可分生产工艺过程用汽和供暖与供热水的热负荷，当然这种热电厂不能离负荷中心太远。它突出的优点是：热电联产而燃料消耗率低，也就是热经济性能较高。但建在市区或其附近的热电厂必须装备较完善的环境保护设施，其投资费用往往高达全厂投资的 30%~40%。

火力发电厂的种类虽多，但从能量转换的观点分析，其基本能量转换过程是相同的，即依次由燃料的化学能转换为热能、机械能最后转换成电能。

图 0-1 为一凝汽式电厂的生产过程简化了的系统图，可以明显地示出上述的能量转换过程。其详细过程可对照参看图 0-2 的凝汽式燃煤电厂生产过程示意图。

由图 0-2 可见，原煤由输煤皮带 1 从煤场（图上未示出）输送至锅炉车间原煤斗 2，再与由锅炉尾部空气预热器来的热空气一起送入磨煤机 3，这是中速磨直吹式制粉系统，磨制完毕的煤粉，成为风粉混合物由排粉机 4 送入锅炉的燃烧室燃烧，在炉膛中燃烧产生的高温热能以辐射传热传给水冷壁管，被管中的热水所吸收，完成加热、蒸发，经过热器过热

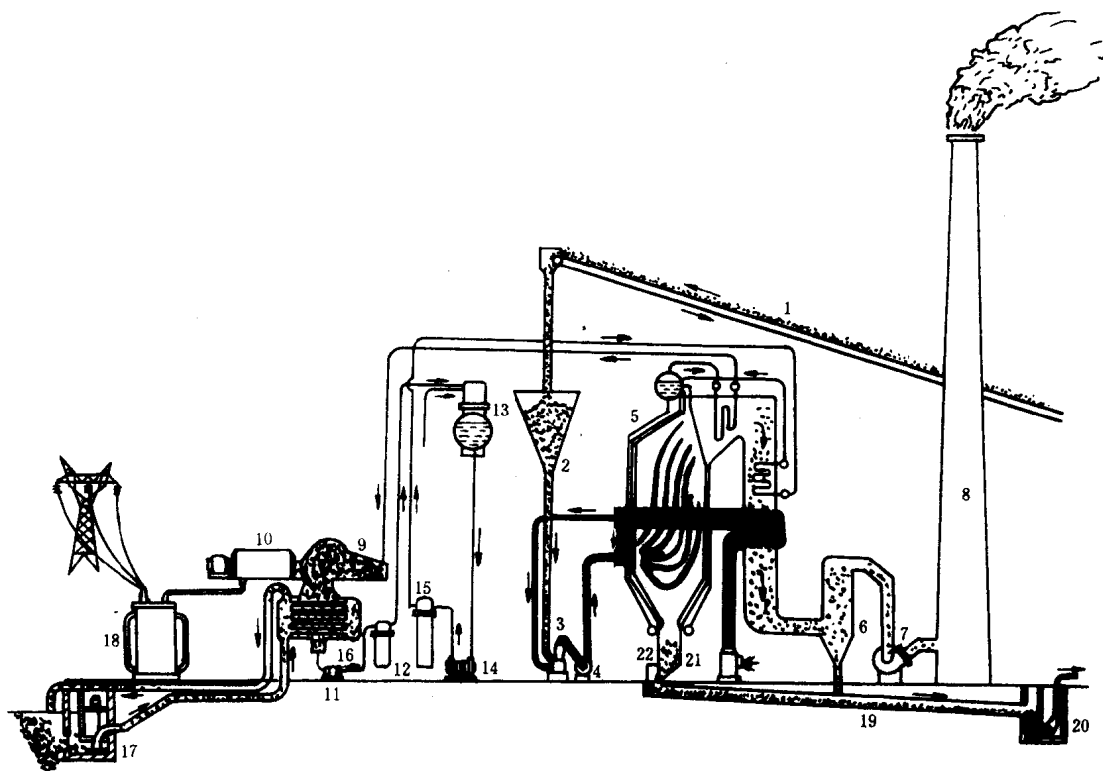


图 0-2 凝汽式燃煤电厂生产过程示意图

1—输煤皮带；2—原煤斗；3—磨煤机；4—排粉机；5—锅炉；6—除尘器；7—引风机；8—烟囱；
9—汽轮机；10—发电机；11—凝结水泵；12—低压加热器；13—除氧器；14—给水泵；15—高压加
热器；16—凝汽器；17—循环水泵；18—主变压器；19—冲灰沟；20—灰渣泵；21—送风机；22—渣斗

而成为合格的过热蒸汽,送往汽轮机 9。被水与蒸汽冷却了的烟气经过尾部受热面,由引风机 7 吸引经过除尘器 6 除去飞灰而排入烟囱再排到大气中。

由锅炉送往汽轮机的蒸汽，在汽轮机中膨胀，推动汽轮机转子转动，在汽轮机的主轴上得到旋转的机械功，驱动与其同轴的发电机转子旋转，转子上的磁场产生的磁通切割发电机定子绕组而产生电流，完成发电全过程。

进入汽轮机的部分蒸汽从中间抽出送至高压加热器 15，除氧器 13 与低压加热器 12 去加热凝结水和给水，其余大部分蒸汽在汽轮机中做功后变成乏汽，由汽轮机排汽室排放到凝汽器，被循环水冷却而凝结成凝结水，由凝结水泵 16 抽出，经过低压加热器送至除氧器除氧后由给水泵 14 经过高压加热器送入锅炉，完成一个循环，这样周而复始地连续做功发电。

凝汽器中的循环（冷却）水由循环水泵 17 从河中吸入，在凝汽器中温度升高后排放到河水的下游。

给水进入锅炉，先经省煤器再进入汽包，经过下降管 5 到锅炉的下联箱，利用锅炉水的自然循环在水冷壁（上升管）中受热汽化而上升至汽包，完成炉水的水循环。进入汽包

的实际上是汽水混合物，经汽包中的汽水分离器后，蒸汽进过热器而水留在汽包的下部容水空间，再由下降管回到水冷壁重复前述过程。

以上简单地讲述了电厂从煤到电的全过程，但是实际上每个设备中所进行过程都十分复杂，除了主要设备的工作原理、结构和系统连接等外，还有自动控制和保护以及设计计算、经济运行等问题。本书就将这些问题分成四篇十七章进行讲述和讨论。

第一篇 锅 炉 设 备

锅炉设备是火力发电厂主要设备之一。本篇共有八章，全面介绍锅炉设备的基本工作原理、结构及系统。同时介绍锅炉运行静态特性及动态特性、锅炉安全运行的基本知识。

第一章 锅 炉 整 体

本章以锅炉蒸汽发生过程为基本线索，介绍锅炉本体结构、各受热面的作用、蒸发受热面不同循环流动方式及锅炉整体的布置型式。

第一节 锅 炉 蒸 汽 发 生 过 程

锅炉是一种能量转换设备，将燃料的化学能转换为蒸汽的热能。燃料燃烧后，化学能转变为烟气的热能，再将热能传递给水，使水完成预热、蒸发、过热（和再过热）过程。获得一定压力、温度、品质合格的蒸汽。锅炉在长期工作中，能连续产生的最大蒸发量为额定蒸发量。近代锅炉亦称蒸汽发生器。由图 1-1 可以看出不同参数下，预热、蒸发、过热过程的吸热比例。

实际电站锅炉结构非常复杂，现以图 1-2 锅炉简化原理图为例，介绍锅炉蒸汽发生过程，它与图 1-1 (b) 相对应。

锅炉本体由炉膛、水平烟道、尾部烟道组成。水冷壁受热面布置在炉膛四侧壁面。辐射式过热器布置在炉膛顶部和水平烟道顶部。对流过热器布置在水平烟道内。再热器、省煤器及空气预热器布置在尾部烟道内。

煤粉和空气经燃烧器进入炉膛，在空间悬浮燃烧，形成的烟气流经水平烟道和尾部烟道，成为锅炉排烟。

在炉膛内，烟气以辐射传热方式，将热能传递给水冷壁。在水平和尾部烟道内主要

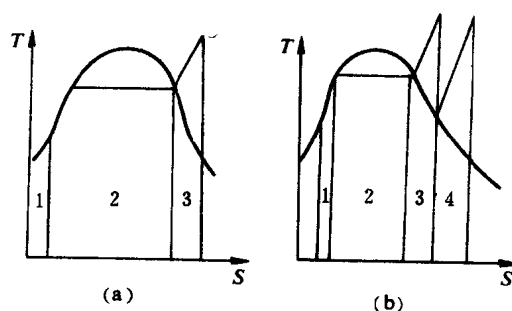


图 1-1 不同参数下温熵图

(a) 高参数：10MPa、540℃；

(b) 超高参数：14MPa 540℃/540℃

1—预热热；2—汽化热；3—过热热；4—再热热

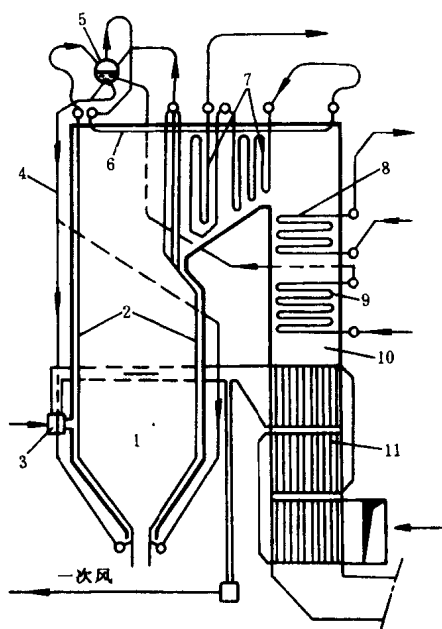


图 1-2 锅炉简化原理图

- 1—炉膛；2—水冷壁；3—燃烧器；4—下降管；
5—汽包；6—辐射式过热器；7—对流过热器；
8—再热器；9—省煤器；10—对流尾部烟道；
11—空气预热器

以对流传热方式，将热能传递给各受热面。

给水进入省煤器后，与烟气进行对流热交换，得到预热后进入汽包。再由下降管进入炉膛各面墙水冷壁。吸收炉内辐射传热、完成蒸发过程。汽水混合物由水冷壁管向上流动，再回到汽包。由于下降管中水的密度大于水冷壁中汽水混合物密度，形成自然循环。在汽包内汽水分离，饱和蒸汽再经过辐射过热器、各级对流过热器，成为达到额定压力、温度和一定流量的蒸汽。由汽轮机高压缸来的蒸汽，在再热器内被加热到额定温度后，再送入汽轮机的中压缸。

送风机将锅炉顶部空气吸入，送入空气预热器预热，热风再送入制粉系统干燥煤粉，或送入炉膛助燃，如图 1-3 所示。

从锅炉出来的排烟，经过除尘器除去烟气中飞灰，由引风机送入烟囱，排入大气。烟气自炉膛流经水平和尾部烟道、除尘器，是在引风机抽力下克服流动阻力的，最后排入烟囱。锅炉本体烟气侧处于负压状态。

由炉膛下部排出的炉渣或除尘器分离出的细灰用水力除灰设备送到灰场。

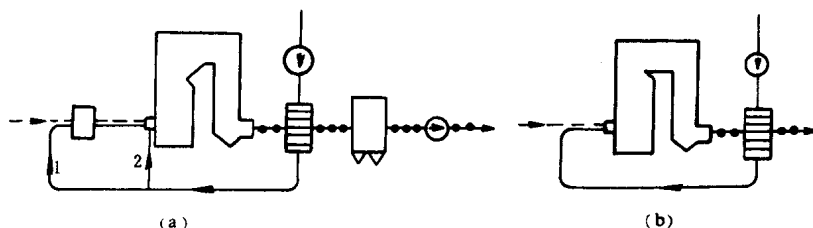


图 1-3 烟气和空气系统

(a) 平衡通风；(b) 正压通风

1—一次风；2—二次风

第二节 锅炉类型及规范

以燃料分类锅炉有：燃煤炉、燃油炉、燃气炉。我国火力发电厂以燃煤为主，本书仅介绍燃煤锅炉。

燃煤锅炉的燃烧方式可分为层燃、室燃及流化床燃烧。电站锅炉现已很少用层燃炉。根

据炉内气流的流动工况，室燃炉又可分为火炬燃烧和旋风燃烧。

1. 室燃炉

室燃炉中，燃料全部在炉膛内悬浮燃烧，形成火炬，也称火炬燃烧。是电站锅炉主要燃烧方式。可以燃烧液体或气体燃料，也可燃用煤粉。

燃用煤粉的室燃炉称为煤粉炉。按炉膛排渣方式不同，煤粉炉又有固态排渣和液态排渣之分。固态排渣煤粉炉是我国电站主要发电设备。

固态排渣炉在燃用灰熔点低的煤时，往往造成严重结渣。液态排渣炉恰恰能克服这一缺点。液态排渣炉内，火焰中心位置较低，部分水冷壁敷有耐火材料，所以炉膛下部温度很高。落到炉底的灰渣呈熔化状态，炉底积有一层液态熔渣，通过出渣孔流到炉外。图 1-4 为液态排渣炉常用的几种形式。

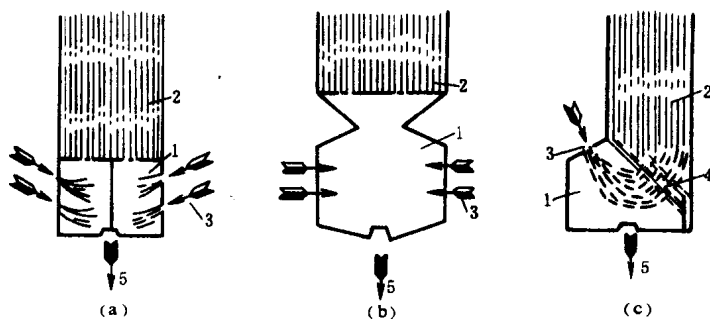


图 1-4 液态排渣炉

(a) 开式单室液态排渣炉；(b) 半开式单室液态排渣炉；(c) 双室液态排渣炉

1—敷有耐火材料的受热面；2—冷却室辐射受热面；

3—燃料和空气；4—捕渣管；5—液态渣

2. 旋风炉

旋风炉以圆柱形旋风筒作为主要燃烧室，如图 1-5 所示。旋风筒用水冷壁管弯制而成，内壁敷以耐火材料。旋风筒有卧式和立式两种。由于气流切向进入旋风筒，筒内产生强烈旋转气流。颗粒细微的燃料在筒内悬浮燃烧，较大的煤粒贴附在内壁熔渣膜上燃烧。与煤粉炉相比，旋风筒内温度高，煤粒与空气之间相对流速大。旋风炉燃烧比煤粉炉强烈。但有害气体 NO_x 排放量大，对大气污染严重。

因气流强烈旋转，熔渣在筒壁形成液态渣膜。熔渣通过渣孔流出。卧式旋风炉的烟气通过喇叭口排出。BTN 立式旋风炉烟气出口设在下部筒壁上。KSG 立式旋风炉烟气出口设在旋风筒上部。旋风炉可以燃烧较粗的煤粉或煤屑，可减轻煤粒破碎的负担。

3. 流化床燃烧

空气高速通过燃烧室下部的布风板，使煤粒实现流态化。在流化床内煤粒上下翻腾，进行燃烧。由于煤粒与空气之间相对速度较大，故燃烧强烈。由于流化床内燃烧温度较低，可以减轻有害气体对大气的污染，以高效而低 NO_x 燃烧引起全世界的重视。各国都投入了大量资金和力量进行开发研究。当前以循环流化床锅炉引世人瞩目。

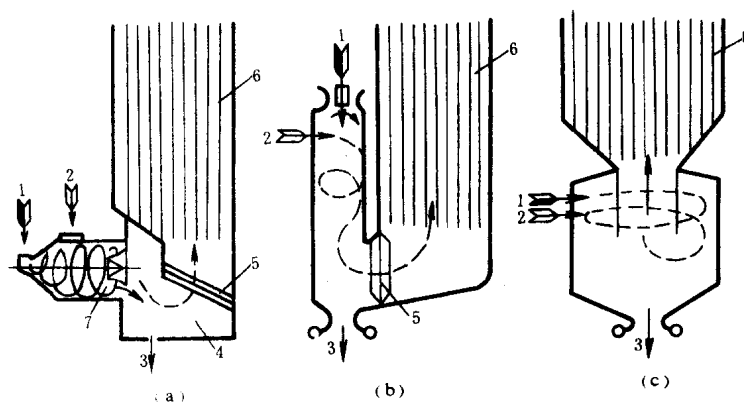


图 1-5 旋风炉

(a) 卧式旋风炉；(b) BTN 立式旋风炉；(c) KSG 立式旋风炉

1—燃料；2—二次风；3—液态渣；4—燃尽室；5—捕渣管；6—冷却室；7—喉口

本书将在第四章重点介绍固态排渣煤粉炉和循环流化床锅炉。

锅炉若以蒸发受热面内介质的循环流动方式分类可分为自然循环锅炉和强制流动锅炉。强制流动锅炉又可细分为：直流锅炉、多次强制循环、低循环倍率、复合循环锅炉，如图 1-6 所示。

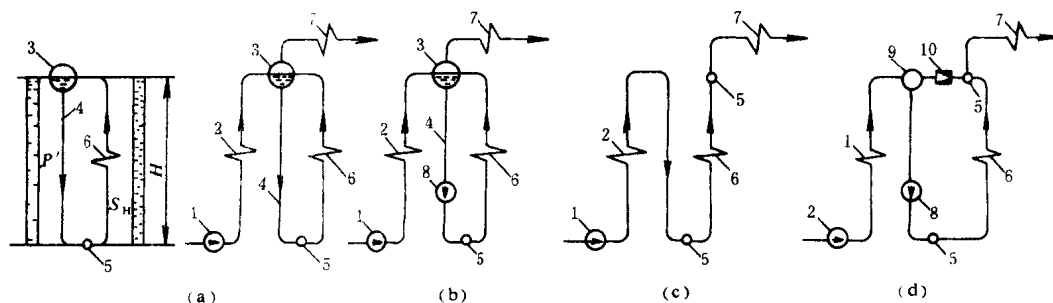


图 1-6 蒸发受热面循环方式

(a) 自然循环；(b) 多次强制循环；(c) 直流锅炉；(d) 复合循环

1—给水泵；2—省煤器；3—汽包；4—下降管；5—联箱；6—蒸发受热面；7—过热器；

8—循环泵；9—混合器；10—背压阀

图 1-6 (a) 为自然循环锅炉，此时蒸发受热面即为上升管，循环回路是由下降管、上升管、汽包和下联箱组成。上升管受热后，部分水蒸发汽化，管内充满密度为 ρ_m 的汽水混合物。下降管在炉墙外不受热，管内充满密度为 ρ' 的水。上升管侧的静压头为 $H\rho_m g$ ，下降管侧的静压头为 $H\rho' g$ ，两侧静压头差为 $H(\rho' - \rho_m)g$ 称为运动压头，以它克服循环流动过程中的阻力。汽包中的水由下降管向下流动，汽水混合物由上升管向上流动，形成自然循环。汽包中饱和汽去过热器。补充水由给水泵经省煤器打入汽包。省煤器中水的流动阻力依靠给水泵的压头来克服。上升管进口水的质量流量为 G_w ，出口蒸汽流量 D_s ，两者比值