



普通高等教育“十二五”规划教材

锅炉原理

(第三版)

周强泰 主 编

周克毅 冷 伟 钟 辉 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TK22-43
01-3

013064043



普通高等教育“十二五”规划教材

锅炉原理

(第三版)

主 编 周强泰
副主编 周克毅 冷 伟 钟 辉
编 写 华永明 赵伶玲
主 审 樊泉桂



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1671863

TK22-43
01-3

820430810

林峰收 附 “五十二” 育建等高职普



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。本书内容围绕燃料与燃烧、锅炉受热面、锅炉热力计算、锅炉内部过程与外部过程、燃煤污染物净化技术和锅炉运行等内容，着重于基本原理、基本理论和主要设备及系统的工作原理的论述，介绍了近年来电厂锅炉设备成熟的新技术和国内外锅炉技术的新成就。全书力求突出内容的先进性、系统性，注重理论与实践的紧密结合。

本书可作为高等学校本科能源动力类专业“锅炉原理”课程教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉原理/周强泰主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2013.7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5123-4224-8

I. ①锅… II. ①周… III. ①锅炉-高等学校-教材
IV. ①TK22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 058045 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1986 年 5 月第一版

2013 年 7 月第三版 2013 年 7 月北京第十九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25 印张 605 千字

定价 45.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

2009年出版的《锅炉原理(第二版)》,已对1986年出版的《锅炉原理》作了重大修改和增删,包括全书体系的调整 and 内容的全面更新。

本次修订仍保留第二版全书六篇的结构和体系。这种编排有利于对“锅炉原理”面广量多的课程内容进行连贯性和系统性的安排,也方便因教学时数、教学要求或学生实际情况不同而对教学内容进行必要的增删。

《锅炉原理(第三版)》主要对第二版中存在的一些不完善、不精确的叙述进行了修改或补充;对部分内容作了压缩或删除;紧密结合电站锅炉新技术和国家颁布的新标准进行论述;针对近几年国内外可再生能源技术的迅速发展,在本书第十八章中增加了可再生低碳生物质燃料发电技术相关内容,分别介绍了农作物秸秆燃烧锅炉、城市生活垃圾焚烧炉及其烟气净化等技术。

第三版的主编、副主编、编写人员及所写章节与第二版相同,可再生低碳生物质燃料发电技术部分由周强泰编写。在书稿修改过程中,东南大学能源与环境学院盛昌栋教授根据教学过程中的经验提供了许多宝贵的建议,在此向盛昌栋教授表示衷心感谢。

编 者

2013.7



第一版前言

本书系根据高等学校热动力类教材编审委员会的决定,并按锅炉教材编审小组 1983 年昆明会议通过的教材编写大纲在原《电厂锅炉原理》的基础上进行编写的。

全书共十五章。参加编写的有东南大学范从振(编写第一、十二、十三、十四、十五章)、周强泰(编写第二、七、九、十、十一章)和西安交通大学的贾鸿祥(编写第三、四、五、六、八章)。

范从振教授担任本书主编,领导全书编写工作。周强泰副教授参加了书稿的统编工作。

本书由华中工学院马毓义教授主审。编者对马毓义教授在审稿中所提宝贵意见表示衷心感谢。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,希读者批评指正。

编 者

1985.2

第三版前言

范从振教授主编的《锅炉原理》1986年出版至今已有20多年。我国以燃煤为主的电力工业,主要为电力工业服务的锅炉制造业以及火力发电厂设备,发生了巨大而深刻的变化。在这些变化中特别要指出的有两点:其一,电力工业规模和单机容量增大。至2007年年底,我国发电装机容量已达7.13亿kW,2008年则将突破8亿kW,其中火电机组约占70%;近几年新增发电容量的设备普遍为600MW和1000MW的超临界和超超临界压力机组。其二,环保和节能要求提高。电力工业面临资源 and 环境越来越严格的约束,以降低能源消耗、减少污染物排放为目标的节能减排任务已列入企业日常生产的约束性目标;淘汰高能耗、严重污染环境的小火电机组,增加高效、环保型、大容量火电机组发电容量的比重,对火力发电而言,显得更加重要。在此新形势下,需要探讨围绕能源的高效利用、环境的综合保护和治理,大容量火电机组及其安全经济运行等与锅炉技术有关的新理论、新经验和新方法,并对其进行阐述。

本书编者在组织《锅炉原理(第二版)》书稿内容时,围绕燃料与燃烧、锅炉受热面、热力计算、锅炉内部过程与外部过程、燃煤污染控制和锅炉运行等主题,着重于基本原理、基本理论和主要设备及系统的工作原理的论述,对原版内容作了较大的更新和增删;本着“与时俱进”的精神,结合介绍了近年来发电厂锅炉设备成熟的新技术和国内外锅炉技术的新成就,以及用力学、热力学、传热学、燃烧学、化学动力学、流体力学和两相流体力学等基本理论对这些新技术和新成就进行的分析和阐述;全书体系也作了适当调整,力求突出内容的先进性、系统性和理论与实践的紧密结合。

本书由东南大学周强泰教授担任主编,周克毅教授、冷伟副教授和钟辉副教授任副主编,参加编写的人员还有华永明副教授和赵伶玲副教授。其中周强泰编写绪论、第二章、第九章、第十章中的第一~第六节、第十一章、第十六章中的第一~第五节和附录A、附录B,周克毅编写第十二章、第十六章中的第六节和第十七章,冷伟编写第一章、第十三章、第十四章和第十五章,钟辉编写第五章、第六章和第七章,华永明编写第三章、第八章和第十九章,赵伶玲编写第四章、第十章中的第七节和第十八章。

华北电力大学樊泉桂教授担任本书主审,提出了许多宝贵意见,编者在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2009.6

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
绪论(火力发电厂和锅炉工作原理)	1
第一节 火力发电厂生产过程及热力系统	1
第二节 锅炉的工作原理及构成	2
第三节 电厂锅炉的主要特征指标	3
第四节 锅炉的分类	5
第五节 燃煤发电及锅炉技术的发展概况	11
复习思考题	17

第一篇 燃料与燃烧

第一章 燃料及燃烧计算	18
第一节 锅炉用燃料	18
第二节 煤的成分	18
第三节 燃料的某些特性	22
第四节 煤的分类	23
第五节 液体和气体燃料	27
第六节 燃料的燃烧计算	28
第七节 烟气分析	33
复习思考题	36
第二章 煤粉制备	37
第一节 煤粉的性质	37
第二节 磨煤机	41
第三节 制粉系统	51
第四节 磨煤机及制粉系统选型	56
复习思考题	57
第三章 燃烧过程的理论基础	58
第一节 燃烧化学反应动力学	58
第二节 燃烧反应的动力区和扩散区	63
第三节 煤和煤粉的燃烧	68
复习思考题	72
第四章 燃烧设备	73

第一节	电厂锅炉的燃烧设备	73
第二节	直流射流和直流煤粉燃烧器射流特点	73
第三节	旋转射流和旋流煤粉燃烧器射流特点	80
第四节	煤粉气流的着火	83
第五节	低 NO_x 燃烧	86
第六节	典型直流煤粉燃烧器	89
第七节	典型旋流煤粉燃烧器	94
第八节	煤粉锅炉炉膛	95
	复习思考题	101

第二篇 锅炉受热面

第五章	蒸发受热面	102
第一节	锅炉汽水工质吸热量的分配	102
第二节	汽包锅炉蒸发受热面系统	102
第三节	汽包锅炉水冷壁	104
第四节	汽包	106
第五节	循环泵	107
第六节	直流锅炉蒸发受热面系统	108
	复习思考题	112
第六章	过热器和再热器	113
第一节	过热器和再热器的作用和工作特点	113
第二节	过热器和再热器的型式和结构	114
第三节	过热器和再热器的系统	121
第四节	过热器和再热器的汽温特性	126
第五节	运行中影响汽温的因素	128
第六节	蒸汽温度的调节方法	129
	复习思考题	134
第七章	省煤器和空气预热器	135
第一节	尾部受热面的作用和工作特点	135
第二节	省煤器	135
第三节	管式空气预热器	139
第四节	回转式空气预热器	141
	复习思考题	147

第三篇 锅炉热力计算

第八章	锅炉热平衡计算	149
-----	---------------	-----

第一节 锅炉机组热平衡	149
第二节 锅炉机组热平衡试验	157
复习思考题	158
第九章 炉内辐射传热计算	160
第一节 炉内辐射传热基本概念	160
第二节 炉内辐射传热特点	162
第三节 煤粉炉中火焰辐射强度沿炉膛截面方向的减弱	164
第四节 煤粉锅炉炉内传热计算方法	168
第五节 炉内辐射传热计算的热有效系数法	172
第六节 炉膛水冷壁结构特征	174
第七节 水冷壁热有效系数	174
第八节 炉内热负荷的分布规律	175
第九节 基于苏联 1973 年炉膛传热计算框架的方法	176
复习思考题	177
第十章 对流受热面传热计算	179
第一节 对流传热计算的基本公式	179
第二节 传热温压	183
第三节 传热系数	184
第四节 放热系数	187
第五节 污染系数、热有效系数、利用系数和鳍(肋)片效率	196
第六节 对流受热面的面积、介质流速、流通截面积和附加受热面	199
第七节 三分仓回转式预热器的计算	203
复习思考题	207
第十一章 半辐射受热面的计算	209
第一节 半辐射受热面及其传热特点	209
第二节 半辐射受热面传热系数的计算	210
第三节 屏空间透过屏区出口的穿透辐射	213
第四节 半辐射受热面吸收的炉内直接辐射	214
第五节 半辐射受热面工质侧和烟气侧热平衡方程	218
第六节 转向室空间辐射计算	219
复习思考题	220
第十二章 锅炉机组的设计和布置	222
第一节 锅炉热力计算的程序和方法	222
第二节 主要设计参数的选择	226
第三节 影响锅炉布置的因素	229
第四节 锅炉的典型布置	232
复习思考题	234

第四篇 锅炉内部过程

第十三章 蒸发受热面的工质流动和传热	235
第一节 两相流动和传热	235
第二节 两相流的基本参数和流动压降	239
第三节 自然循环原理及计算	244
第四节 自然循环的安全性	250
第五节 强制流动蒸发受热面的水动力特性	253
复习思考题	259
第十四章 受热面的热偏差和壁温计算	261
第一节 热偏差的基本概念	261
第二节 过热器和再热器的热偏差	262
第三节 蒸发受热面的热偏差	267
第四节 受热面的壁温计算	271
复习思考题	273
第十五章 蒸汽净化和锅炉水质	274
第一节 蒸汽品质及其污染原因	274
第二节 蒸汽的机械携带	275
第三节 蒸汽的溶解性携带	278
第四节 汽水分离和蒸汽净化装置	280
第五节 给水品质和锅炉水工况	283
复习思考题	287

第五篇 锅炉外部过程及燃煤污染物净化技术

第十六章 结渣和高温积灰及高温腐蚀	289
第一节 煤粉锅炉受热面的积灰和腐蚀	289
第二节 燃煤矿物成分的化学物理特性	290
第三节 影响高温受热面灰污染的几个主要化学反应	292
第四节 炉膛水冷壁结渣和高温腐蚀	295
第五节 高温对流受热面的积灰和腐蚀	298
第六节 对流受热面的蒸汽侧高温氧化	301
复习思考题	304
第十七章 尾部受热面的磨损和低温腐蚀及积灰	305
第一节 尾部受热面的飞灰磨损	305
第二节 飞灰磨损速率	309
第三节 尾部受热面防磨保护	311

第四节	空气预热器烟气侧腐蚀——低温腐蚀	314
第五节	防止和减轻空气预热器低温腐蚀的措施	318
第六节	尾部受热面的积灰与防止	319
	复习思考题	323
第十八章	燃煤污染物及控制技术	325
第一节	煤粉燃烧排放物对环境的污染	325
第二节	高效除尘技术	326
第三节	脱硫技术	329
第四节	脱硝技术	332
第五节	CO ₂ 减排技术	335
	复习思考题	342

第六篇 锅 炉 运 行

第十九章	锅炉运行	343
第一节	锅炉静态特性	343
第二节	汽包锅炉的动态特性和运行调节	346
第三节	汽包锅炉的启动和停用	351
第四节	单元机组中锅炉的变压运行	354
第五节	直流锅炉运行和启停的特点	356
	复习思考题	363
附录 A	热力计算算例	365
A1	炉膛传热计算	365
A2	前屏过热器传热计算	368
A3	三分仓回转式预热器传热计算	373
附录 B	主要符号表	380
参考文献		384

绪论 (火力发电厂和锅炉工作原理)

第一节 火力发电厂生产过程及热力系统

现代社会离不开电。电能是最清洁的能源,使用方法简单,调节方便,容易转换。电力工业的发展水平实际上是工农业发展、人民生活水平和科技与国防现代化的重要标志。生产电力的方法很多,如水力发电、核能发电、火力发电、太阳能发电、风能和地热能等发电。当前电力主要由火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂产生。在我国,火力发电是生产电力的主要方式。

火力发电厂(简称火电厂)是将化石燃料(煤、油、气等)的化学能转换成电力的生产企业,在转换过程中要经过一系列化学和物理变化,主要的转换设备有锅炉、汽轮机和发电机。在锅炉中化石燃料的化学能先转变成载热体的热能,再转换为在汽轮机内做功的工质——蒸汽的热能,在汽轮机中蒸汽的热能转换为汽轮机高速旋转的机械能,通过发电机转变为最终产品——电能输出。所以,在火力发电厂中,锅炉、汽轮机和发电机被称为三大主要设备。为实现电能生产,除三大主机外,还需要一系列不可缺少的辅助设备,并将其与主机组成一个整体。

火力发电厂是燃料和水的需求大户,为了节约资源,应尽可能提高能量的转换效率;为了电能生产的连续性,除连续地向火电厂供应燃料外,在火电厂内应实现蒸汽—水的不断循环,以节约优质用水,并提高整个发电

过程的经济性。火电厂的汽水循环系统又称热力系统。图 0-1 所示为火电机组热力系统。图中 1 表示锅炉,燃料在锅炉炉内燃烧所放出的热量将供给锅炉的给水加热、蒸发汽化,并进一步过热,以产生高压高温的过热蒸汽。后者沿主蒸汽管进入汽轮机 2 的高压缸膨胀做功,汽压汽温随之下降。中压中温蒸汽沿管道返回锅炉的再热器中再次加热到较高的温度,然后被送到汽轮机 2 的中低压缸,完成做功过程后的低压低温蒸汽排向凝汽器 4,被循环水冷却为凝结水。凝结水泵 5 将凝结水输送至低压加热器 7 加热然后至除氧器 9,除去可能存在的气体。由给水泵 6 升压后的给水,经高压加热器 8 加热至给水的额定温度后进入锅炉,进行汽—水的下一循环。凝结水和给水在加热器中加热的热源,来自在汽轮机中不同程度做过功的抽汽。

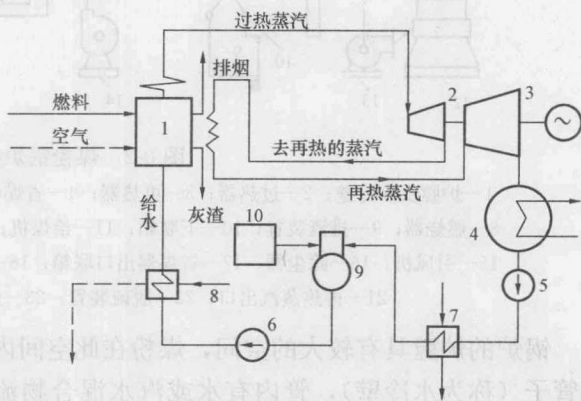


图 0-1 火电机组热力系统示意

- 1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；
5—凝结水泵；6—给水泵；7—低压加热器；
8—高压加热器；9—除氧器；10—水处理设备

第二节 锅炉的工作原理及构成

我国的火力发电厂以燃煤为主，燃煤火电厂所生产的电力占我国发电总量的 80% 以上。燃煤火电厂锅炉（简称电厂锅炉）的主要燃烧方式为煤粉燃烧。原煤经过磨煤机磨制成一定细度的煤粉，由空气送入锅炉的炉膛燃烧，向锅炉提供热源。图 0-2 所示为一台自然循环煤粉锅炉的主要设备。由煤仓落下的煤经给煤机 11 送入磨煤机 12 磨制成煤粉。煤在磨制过程要用热空气干燥和输送。送风机 14 将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器 5，冷空气在此被烟气加热。热空气的一部分经送粉风机 13 送入磨煤机，将煤加热和干燥，同时作为输送煤粉的介质。从磨煤机排出的气粉混合物经燃烧器 8 进入炉膛 1 中燃烧。由空气预热器来的另一部分热空气直接进入燃烧器参与燃烧反应。

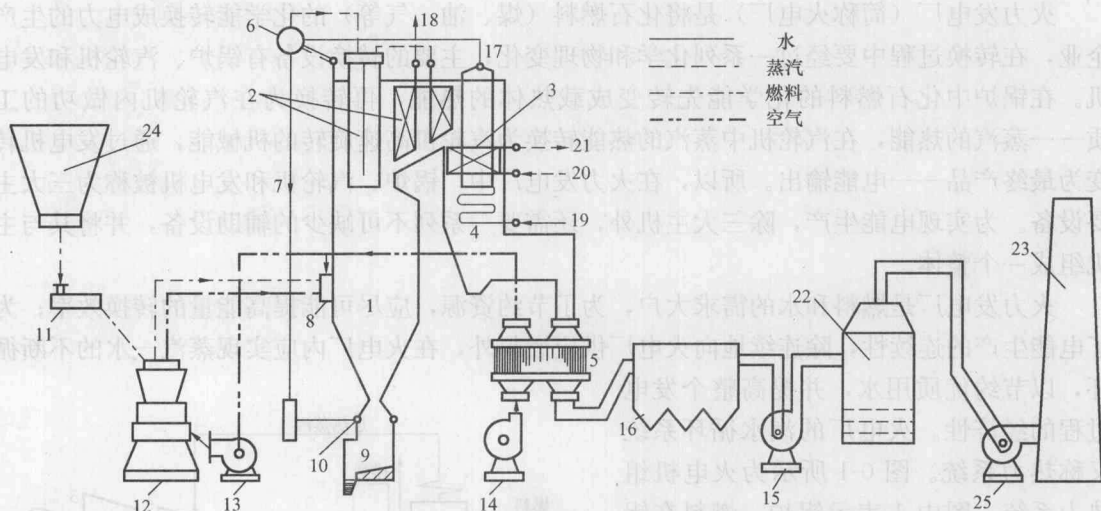


图 0-2 煤粉锅炉机组示意

- 1—炉膛及水冷壁；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—送粉风机；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；19—给水；20—再热蒸汽进口；
21—再热蒸汽出口；22—脱硫装置；23—烟囱；24—煤仓；25—增压风机

锅炉的炉膛具有较大的空间，煤粉在此空间内悬浮燃烧。炉膛周围墙壁上布置密集排列的管子（称为水冷壁），管内有水或汽水混合物流过，既能吸收炉膛内高温燃烧的辐射热，又能保护炉墙不致被烧坏。燃烧火焰中心具有 1500°C 或更高的温度，但在炉膛上部出口处，烟气温度要降低到稍低于煤灰熔点的水平，以免炉内融化的灰渣黏结在对流烟道内与烟气接触的受热面上。煤粉燃烧所生成的灰渣，大的沉降于炉膛底部的冷灰斗中，逐渐被冷却和凝固，并落入排渣装置 9，形成固态排渣；大量细小的灰粒，在悬浮燃烧过程中随烟气离开炉膛，流经一系列对流受热面，也逐渐冷却，最后由引风机 15 引送经除尘、脱硫等工艺后排入烟囱。锅炉排烟温度通常为 $110\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，为减少排烟所带出的飞灰对环境的污染，离开锅炉的烟气先经除尘器 16，使 $95\%\sim 99\%$ 的飞灰被捕捉下来，最后只有极少量微细灰粒排入大气。为了防止或减轻燃烧过程中产生的硫化物 (SO_2 、 SO_3) 随排烟进入大气造成酸雨

等危害, 锅炉在除尘器前或后装有脱硫设备²²。锅炉的燃烧设备多采用低 NO_x 燃烧技术, 有些锅炉还配备脱硝装置, 以减少随排烟向大气排放的氮氧化物 (NO_x) 的浓度。

送入锅炉的水称为给水, 由给水到过热蒸汽的中间要经过一系列的加热过程。首先是把给水加热到饱和温度, 其次是饱和水的蒸发汽化 (相变), 最后是饱和蒸汽的过热。加热给水的受热面称为省煤器。饱和水转变成饱和蒸汽的受热面称为蒸发受热面, 这一转变是在炉膛中布置的水冷壁 1 内完成的; 把饱和蒸汽加热为过热蒸汽的受热面称为过热器 2。为了提高锅炉—汽轮机组的循环热效率, 火电厂大多采用具有蒸汽再热的再热循环, 因而在电厂锅炉中还有再热器 3, 有时也称为二次过热器。

当送入锅炉的给水含有杂质时, 在蒸发受热面系统中循环的锅炉水的杂质浓度, 会随锅炉水的蒸发汽化而升高, 严重时会导致在蒸发受热面内结成水垢而使传热恶化, 壁温升高甚至烧毁。由锅炉汽包 6 送出的蒸汽可能因带出含有杂质的锅炉水而被污染; 高压时蒸汽还能从水中因直接溶解带出一些杂质; 蒸汽进入汽轮机后, 所含杂质会部分沉积在汽轮机的通流部分, 影响汽轮机的出力、效率和工作安全。这样, 对电厂锅炉送出的蒸汽, 不仅要求有一定的压力和温度, 还要有一定的洁净度。因此, 对给水品质也有很高的要求, 给水要进行预处理; 汽包锅炉的汽包内要求配置高效的汽水分离装置, 分离效率高达 99.7%~99.9% 以上; 汽包水侧和水冷壁的下联箱 10 中还设有锅炉水排污装置。

由此可见, 锅炉机组是由诸多设备、锅炉本体 (含受热面和相关部件) 以及烟、风道和管路等组成的庞大设备和复杂的系统组合。锅炉机组的系统可分为若干子系统, 主要的两个为煤粉制备和燃烧系统、汽水系统。

1. 煤粉制备和燃烧系统

该系统包括原煤仓、磨煤机、煤粉分离器 (图 0-2 中在磨煤机 12 内)、燃烧器、燃烧室 (炉膛) 以及相应的煤粉输送设备 (送风机) 及管路。该系统向锅炉提供符合要求的煤粉, 组织好煤粉和气流的合理流动, 在炉内实现煤粉的良好燃烧。

2. 汽水系统

锅炉机组的汽水系统, 依水、汽的流动方向, 由图 0-2 的给水管 19 开始, 经省煤器、汽包 (下部水侧)、下降管、水冷壁及其引出管、汽包 (上部汽侧) 和过热器, 至过热蒸汽出口 18 为止; 对于具有蒸汽再热的锅炉机组, 还包括再热器, 后者常与再热前、后的蒸汽管道合称为再热蒸汽系统。汽水系统中的水或蒸汽所流经的受热面是承压受热面。汽水系统的主要作用是将燃料燃烧所释放的热量, 通过与相关受热面的热交换, 安全可靠和高效地传递给受热面内的工质, 使锅炉给水加热、蒸发汽化和过热, 产生符合要求的过热蒸汽。再热器系统则应把在汽轮机高压缸中做过功的蒸汽再次加热到较高的额定温度。

除上述主要子系统外, 锅炉还有许多其他子系统和相关设备, 如输煤系统, 除灰、除尘系统, 启动系统, 疏水系统, 排污水系统等, 这里不一一介绍。

第三节 电厂锅炉的主要特征指标

电厂锅炉是燃料耗费很多、结构复杂庞大和多个系统相互结合的设备综合体, 可以有不同的性能评判指标, 但作为生产电能的火力发电厂的主要设备之一的电厂锅炉, 首先应符合安全可靠、经济节能和环境友好等要求。

一、安全可靠

安全可靠生产始终是电力生产的首要任务。电厂锅炉不能发生任何人身及非人身重大事故,如人员伤亡、承压容器和燃烧系统爆炸、停运燃烧系统的再燃等。不影响人身安全或不造成设备重大损伤的事故也应尽量减少。常用于锅炉工作可靠性分析的统计指标如下:

(1) 连续运行小时数=两次停炉(维修)之间的运行小时数。

(2) 事故率= $\frac{\text{事故停运小时数}}{\text{总运行小时数}+\text{事故停运小时数}} \times 100\%$ 。

(3) 可用率= $\frac{\text{运行总时数}+\text{备用时数}}{\text{统计期间总时数}} \times 100\%$ 。

统计时一般以一年作为一个周期。连续运行小时数越多,事故率越低,可用率越高,表示锅炉工作越可靠。电厂锅炉的连续运行小时数一般要求 5000h 以上,可用率超过 90%~95%。

二、经济性

锅炉可以有不同的具体经济指标。从可持续发展的角度,资源的节约应放在第一位,尤其是燃料的节约。电力生产的能耗指标,最重要的是煤耗率,以每发出单位电能(kW·h)所消耗的标煤(标准煤)的质量(kg或g)计算。由于不同质量的燃煤有不同的发热量,为便于对比,把发热量为 29 310kJ/kg (7000kcal/kg) 的煤作为标煤,机组煤耗率都应折算到标煤计算。

锅炉从燃料中吸收的有效利用热为 $\dot{Q}_1 = BQ_{\text{net,ar}}\eta_b$ (kW), 其中 B 为锅炉耗煤量, kg/s; $Q_{\text{net,ar}}$ 为煤的收到基低位发热量, kJ/kg; η_b 为锅炉效率。由热量 $\dot{Q}_1$ 产生的高温高压蒸汽输送给汽轮机,在扣除主蒸汽管道的散热损失(以管道效率 η_p 表示)后,用于推动汽轮机转动,再扣除冷源热损失(以汽轮机的绝对内效率 η_i 表示)后才是汽轮机的可用功。该热量在转变成电能 P 时,还应考虑汽轮机—发电机的机械传动效率 η_m 和发电机效率 η_g 。因此,发电机发出电功率 P (kW) 时,输入锅炉的热量应为

$$BQ_{\text{net,ar}} = B^s Q_{\text{ar}}^s = \frac{P}{\eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g} \quad \text{kW (kJ/s)}$$

$$\text{或} \quad B^s Q_{\text{ar}}^s = \frac{3600P}{\eta_b \eta_p \eta_i} \quad \text{kJ/h} \quad (0-1)$$

式中 Q_{ar}^s ——标准煤的收到基低位发热量, $Q_{\text{ar}}^s = 29\,310\text{kJ/kg}$;

B^s ——标准煤的消耗量, $B^s = B \frac{Q_{\text{net,ar}}}{Q_{\text{ar}}^s}$, kg/s;

η_e ——汽轮发电机的绝对电效率, $\eta_e = \eta_i \eta_m \eta_g$ 。

电力生产的煤耗率有发电煤耗率和供电煤耗率之分,发电煤耗率 b_g 若以 g 标煤/(kW·h) 表示可写为

$$b_g = \frac{B^s}{P} = \frac{3600 \times 1000}{29\,310 \eta_b \eta_p \eta_e} = \frac{123}{\eta_b \eta_p \eta_e} \quad (0-2)$$

供电煤耗率 b_n 应考虑厂用电率 ξ 大小,其计算式为

$$b_n = \frac{123}{\eta_b \eta_p \eta_e (1-\xi)} = \frac{123}{\eta_{cp} (1-\xi)} \quad (0-3)$$

式中 η_{cp} ——全厂(锅炉—汽轮机—发电机机组)的发电效率,又称毛效率;扣除厂用电率 ξ 后的效率为净效率。

各种效率的数值可以用百分数表示,也可以用份额数表示,在式(0-1)和式(0-2)中,煤耗率是按效率的份额数计算的。

锅炉与汽轮机之间的主蒸汽管道,保温后的能量损失很少,管道效率高达0.99;机械传动效率和发电机效率也都很高,达0.990~0.995。因此影响火电机组煤耗率大小的主要因素是汽轮机的绝对内效率(也称实际循环热效率) η_i 、锅炉效率 η_b 和厂用电率 ξ 。

锅炉效率(%)定义为锅炉每单位时间向热力系统提供的有效利用热(即锅炉中水和蒸汽吸收的热量)与锅炉输入热量之比再乘以100,即

$$\eta_b = \frac{\text{锅炉有效利用能量}}{\text{锅炉输入热量}} \times 100\% \quad (0-4)$$

在我国输入热量中的燃煤发热量按低位发热量计算(见第一章和第八章),锅炉的有效利用热量是从燃料燃烧放出的热量(输入热量)中取得的,但锅炉系统中某些吸热量,如从锅炉低温烟气中所吸收或从锅炉高温排渣中所吸收,但不进入热力系统(用于热力循环)的热量,不能计入锅炉有效利用热之中。

现代电厂锅炉的效率都在90%~92%以上,超临界和超超临界压力锅炉的效率已达93%~94%。

三、环保性能

燃煤电厂消耗国内煤炭消耗量的50%~60%,是有害气体和粉尘排放的重要污染源。一台功率为100万kW(1000MW)的燃煤锅炉,每年消耗中等偏高质量原煤350万~400万t,产生CO₂750万~900万t,SO₂3.5万~7.0万t,NO_x1.5万~2.0万t,粉尘80万~90万t。全国火电行业产生的污染物则几百甚至上千倍于上述数量,若都排放至大气,会对环境造成致命的影响,必须在排放前作严格的处理,以减少煤燃烧后有害的污染物向大气的排放。

CO₂属温室气体,大气中CO₂浓度增高,会造成地表平均温度升高,使地球变暖而带来一系列生态问题。目前对化石燃料碳元素的燃烧产物(CO₂)还缺乏有效的控制手段,减少化石燃料的应用,提高化石燃料的能源效率,是减少CO₂排放的主要方法。因此,提高能源利用率,即节能,不仅是有关资源领域可持续发展的一个战略措施,也是涉及环境保护的重要举措。

燃煤锅炉产生的粉尘飞灰、SO₂和NO_x,可分别通过高效除尘装置、脱硫设备、低NO_x和超低NO_x燃烧技术或同时辅以脱硝设备等措施得到有效的控制。高效除尘设备的除尘效率可达99%,脱硫设备的脱硫效率可达95%,脱硝设备NO_x脱除率,依据设备的复杂性可达50%~80%和80%~90%。有关这些污染物的排放指标,国家制定了严格的标准(参见第十八章)。

第四节 锅炉的分类

一、按锅炉容量和参数分类

锅炉的容量一般指单机蒸发量,为单位时间内锅炉所能供应的蒸汽质量,以t/h或kg/s表示,有时也用与配套汽轮发电机的出力相匹配的输出功率(MW)表示锅炉的容量。锅炉设计蒸发量一般为最大长期连续蒸发量。按蒸发量的大小,锅炉有小型、中型和大型之分,但它们之间只有相对意义,没有固定的分界。以往的大型锅炉,现在只能列为中小型了。按

2002 年我国电力行业标准《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》(DL/T 831—2002), 容量达 300MW 的锅炉才列为大容量锅炉, 但我国从 2007 年开始, 在电网覆盖范围内新建的纯凝汽式发电厂中, 不允许再采用单机容量小于 (含) 300MW 的机组了。

锅炉的参数主要指锅炉出口处过热蒸汽 (也称主蒸汽) 的压力和温度。锅炉设计的蒸汽压力和温度称为额定压力 (MPa) 和温度 ($^{\circ}\text{C}$)。对于具有蒸汽再热的锅炉, 蒸汽参数中还包括再热蒸汽的流量、压力和温度。此外, 锅炉参数也包括给水温度等。

按主蒸汽压力的高低, 锅炉可分为低压 ($p \leq 2.45\text{MPa}$)、中压 ($p = 2.94 \sim 4.92\text{MPa}$)、高压 ($p = 7.84 \sim 10.80\text{MPa}$)、超高压 ($p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$)、亚临界压力 ($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$)、超临界压力 ($p > 22.1\text{MPa}$) 和超超临界压力等等级。对超临界压力锅炉和超超临界压力锅炉的压力分界点, 目前还没有明确一致的说法。超临界压力锅炉主蒸汽压力一般为 $p = 23 \sim 25\text{MPa}$, 我国目前文献上把 $p > 26\text{MPa}$ 定为超超临界压力。

锅炉压力与机组容量一般有某种对应关系, 主蒸汽压力等级提高要求机组容量相应有所增大。表 0-1 列出了国产电厂锅炉的参数、相匹配容量和循环方式。表中没有列出高压以下压力等级的锅炉, 这些锅炉煤耗率高, 已经遭到或正在进行淘汰。为了提高能源利用率, 应该增加高效率大容量机组的比例, 有计划地逐步淘汰超高压压力等级机组的问题, 也应提到议事日程。

表 0-1 国产电厂锅炉的参数、相匹配容量和循环方式

压力等级	主蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (主/再) ($^{\circ}\text{C}$)	给水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	蒸发量 (t/h)	配套机组功率 (MW)	循环方式
超高压	13.7	540/540	240	420	125 (135)	自然循环
				670	200 (210)	自然循环
亚临界	16.7~17.5	540/540	260	1025	300 (330)	自然循环
	17.5~18.3	540/540	278	2008	600 (650)	控制循环
超临界	25.4	543/569	289	1950	600 (650)	直流
	25.4	571/569	282	1910	600 (650)	直流
超超临界	26.25	603/605	296	2950	1000	直流

二、按燃烧方式分类

按燃煤的燃烧方式, 锅炉可分为层燃炉、流化床炉、旋风炉和室燃炉。

1. 层燃炉

层燃炉具有炉排, 煤块在固定的或移动的炉排上燃烧, 在燃烧过程中燃料保持层状。燃烧所需空气由炉排下方引入, 穿过炉排上面的燃料层使之进行燃烧反应。移动炉排最典型的例子是链条炉, 炉排与前后两个滚轮构建成的链条炉排紧贴在燃料层的下面, 燃料由炉前煤斗进入炉排面后, 随移动炉排向炉后方向运动, 到达炉后时基本烧完, 剩余灰渣排至灰斗。当空气穿经燃料层时会把部分燃料细粒吹起, 这些燃料细粒和燃料层燃烧时产生的可燃气体, 在燃料层上方的炉膛空间仍可进行部分燃烧。

层燃炉在炉排前后部位的炉膛下方都有由耐火材料构成的离炉排面一定距离的前、后拱。前拱主要用于促进燃料的加热和着火燃烧; 后拱用于引导刚离开燃料层的燃烧产物的流