

火力发电机组过程控制工程师培训教材

锅炉热力系统 及设备

第一册

江苏省电力科学研究院有限公司 组编
高绥强 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

火力发电机组过程控制工程师培训教材

锅炉热力系统 (第一册) 及设备

江苏省电力科学研究院有限公司 组编
高绥强 编



中国电力出版社

www.cespp.com.cn

内 容 提 要

本书是《火力发电机组过程控制工程师培训教材》的第一分册。本书着重介绍了锅炉本体、烟风系统、燃烧系统、制粉系统、灰渣系统五大部分的知识,主要包括锅炉汽水及燃烧系统的组成、蒸发设备、过热器和再热器和省煤器、送风机和引风机、容克式空气预热器、电气除尘器、燃料特性、煤粉特性及制粉设备、燃烧设备和燃烧系统、锅炉的整套启动、锅炉机组运行的控制与调整、锅炉机组的停运等内容。

本书内容丰富,系统性及实用性强。可作为火力发电机组过程控制工程师培训教材,也可供相关专业技术人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉热力系统及设备/江苏省电力科学研究所有限公司组编;高绥强编. —北京:中国电力出版社,2005

火力发电机组过程控制工程师培训教材

ISBN 7-5083-2554-0

I. 锅... II. ①江... ②高... III. 火电厂—锅炉—热力系统—技术培训—教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第123827号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

2005年3月第一版 2005年3月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 6印张 156千字

印数0001—3000册 定价12.00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)

编审委员会

主任委员 王海林

副主任委员 蒯狄正

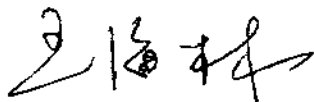
委 员 张红光 鲁松林 张 斌 陈 斌
王 继

火力发电机组过程控制系统是随着现代大型工业生产自动化的不断兴起和过程控制要求的日益复杂应运而生的综合控制系统，它是计算机技术、系统控制技术、网络通讯技术和多媒体技术相结合的产物，是完成过程控制、过程管理的现代化设备。现代化的电力企业已经大规模地使用集散控制系统作为企业生产过程的自动化控制。

先进的控制技术带来的好处是显而易见的，但也要求电力企业员工特别是过程控制工程师有很高的人力素质（包括专业技能），现在电力企业的经营，人力素质的提升成为企业竞争中最重要经营策略之一。提升人力素质就是提高电力企业各方面品质，就是提高生产力，就是提高竞争力。而提高人力素质最直接、最有效而成本最低的方法就是教育培训。

随着自动控制技术的发展，在发电企业中过程控制的重要性被逐渐体现出来，为了使发电机组安全、稳定的运行在电网中，发电企业需要一大批有相当专业技能和很高人力素质的过程控制技术及过程控制技术管理人员。过程控制工程师培训就是针对火力发电机组生产过程的热工控制专业技能的一种提高方式。

因此，江苏省电力科学研究院有限公司（江苏省电力公司技术中心）在培训讲义基础上组织编写了本套培训教材，它得到了江苏省电力公司、东南大学动力系及有关发电企业的各位领导和同仁的指导和帮助，谨向他们表示诚挚的谢意。



2004年7月6日

随着我国国民经济的迅速发展，对电力的直接需求和潜在需求也越来越大，因此现代电力工业是我国规模巨大、发展迅速的先行工业。锅炉在我国的电力工业中有着举足轻重的地位，它是火力发电厂三大主力设备之一。通常来说，锅炉是指利用燃料的燃烧热能或其他热能加热给水，用以生产规定参数和品质的蒸汽、热水的机械设备。在国民经济中，电力、机械、冶金、化工等行业都需要锅炉供给大量的蒸汽。由于各种工业的生产性质与规模不同，因此所要求的锅炉容量、蒸汽参数、结构性能方面差别很大。电站锅炉一般容量巨大，蒸汽参数（压力、温度）高，性能优异，它的工作过程通常是将煤燃烧释放出来的热能，通过受热面的金属壁面传给其中的工质——水，再把水加热成具有一定压力和温度的蒸汽来驱动发电厂中另外一个主力设备——汽轮机，从而把热能转变为机械能；汽轮机再带动发电机，将机械能转变为电能供给用户。

随着电站锅炉容量及运行参数的不断提高，不仅在锅炉的设计及制造工艺方面，而且在锅炉运行方面的控制要求也越来越高，这样也就诞生了集计算机技术、系统控制技术、网络通信技术等为一身的发电机组过程控制系统，它同时也对发电厂的过程控制工程师的专业水平提出了更高的要求，使得他们不仅要熟知本专业知识，而且还要对他们的控制对象有一个完整的了解，本书以采用上海锅炉厂SG1025/17.5-M868型锅炉及其辅助设备为主，其他型号的锅炉及其辅助设备为辅的原则，针对主要培训对象为发电厂机组过程控制工程师的实际情况，深入简出的系统介绍了电站锅炉的设计要求，工作原理、运行方式、系统组成以及辅助设备。

电站锅炉主要分为锅炉本体、烟风系统、燃烧系统、制粉系统、灰渣系统五大部分。锅炉本体主要由各种受热面组成，它的主要任务就是将煤燃烧产生的热量分阶段的传递给水，使其最终变成符合汽轮机要求的高温高压蒸汽；烟风系统的主要任务是为煤燃烧提供合适的风量，并使燃烧产生的高温烟气逐级流过锅炉本体受热面；燃烧系统的作用就是保证煤及其他辅助燃料的高效稳定燃烧；制粉系统的主要作用就是将原煤制成具有一定细度符合炉内燃烧要求的煤粉；灰渣系统的主要作用就是将煤粉燃烧后的固体残留物排放掉。总之这五大部分相辅相成，缺一不可，组成了电站锅炉这一有机的整体。本书分十三章介绍了这些内容。

在本书的编写过程中，我们参考了电力行业有关的规程和导则、制造厂家产品说明书以及其他相关的培训资料，谨在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，错误与遗漏之处在所难免，敬请批评指正。

高 俊 强

2004 年 6 月

序

前言

第一章	绪论	1
第一节	国外电站锅炉的发展情况	1
第二节	我国电站锅炉的发展和现状	2
第二章	锅炉总体介绍	5
第一节	锅炉主要性能参数及经济性指标	7
第二节	锅炉主要性能设计要求	9
第三节	锅炉设计条件和环境条件	14
第四节	锅炉整体布置形式和设计特点	19
第三章	锅炉汽水及燃烧系统的组成	29
第一节	锅炉的汽水系统	29
第二节	锅炉的燃烧系统	32
第四章	蒸发设备	35
第一节	汽包	35
第二节	水冷壁及水循环回路	38
第三节	炉水循环泵及其系统	41
第五章	过热器和再热器	45
第一节	过热器	45
第二节	再热器	50

第三节	蒸汽温度调节	55
第六章	省煤器	61
第一节	省煤器的作用及型式	61
第二节	省煤器的结构和系统	62
第三节	省煤器管的磨损及防磨措施	63
第七章	送风机和引风机	65
第一节	送风机和引风机的总体介绍	65
第二节	送风机和引风机的运行	67
第八章	容克式空气预热器	71
第一节	空气预热器的作用和工作原理	71
第二节	容克式空气预热器运行中存在的问题	76
第九章	电气除尘器	79
第一节	除尘器的类型和电气除尘器的优缺点	79
第二节	电气除尘器的运行	82
第十章	燃料特性	86
第一节	煤炭的生成和分类	86
第二节	煤的化学成分	91
第三节	与煤炭燃烧特性相关的指标	96
第十一章	煤粉特性及制粉设备	98
第一节	煤粉品质和性质	98
第二节	磨煤机概述	103
第三节	制粉系统运行	113
第十二章	燃烧设备和燃烧系统	120
第一节	煤粉燃烧器	120
第二节	油燃烧器和燃油系统	128
第三节	点火装置及火焰检测	132

第四节	燃烧系统及相关辅助系统的控制策略	139
第十三章	锅炉的整套启动	156
第一节	启动原则	156
第二节	冷态启动	157
第三节	启动时的注意事项	165
第四节	热态启动	167
第十四章	锅炉机组运行的控制与调整	169
第一节	燃烧调整	169
第二节	汽温调整和给水调整	171
第三节	锅炉吹灰	173
第十五章	锅炉机组的停运	175
第一节	停运方式及原则	175
第二节	停运步骤及控制要点	176

绪 论

第一节 国外电站锅炉的发展情况

随着世界各国电力需求的持续增长,电站锅炉作为火力发电厂三大主力设备之一,其制造技术及工艺水平得到了突飞猛进的发展。国外的锅炉制造业在 20 世纪 70 年代发展达到高峰。但是,随着锅炉工业的发展,运行锅炉对环境的影响也越来越受到各国政府的关注,因此,为了防止环境污染,目前,燃煤锅炉主要在净化燃烧产物技术上发展。总的来说,国外先进工业国家的燃煤锅炉具有单机容量大、热效率高、自动化控制程度完善、结构紧凑、现场安装方便等特点。同时,世界知名的电站锅炉制造厂都拥有专业化程度很高的先进制造工艺、装备及生产流水线。

在锅炉制造技术及自动化控制技术相配套的情况下,电站锅炉的容量越大、压力和温度越高,则电站锅炉与汽轮机的效率越高。世界各国在锅炉工业迅猛发展的时期,都在想方设法的提高电站锅炉的运行参数,但是,随着锅炉运行参数的提高,各种各样的问题也逐渐暴露出来,因此电站锅炉的容量、压力和温度参数实际上经历了发展、提高和稳定的三个阶段。20 世纪 60 年代中期,美国已制造投运了 600MW 机组,并进而开发研制 1300MW 和 1200MW 锅炉。20 世纪 70 年代中期,法国、德国和英国也制造了 600~700MW 的锅炉机组,日本自 60 年代引进美国技术制造大容量锅炉,70 年代完成国产化。前苏联 20 世纪 80 年代也投运了 1200MW 机组,并研究了 2000~2500MW 机组的制

造可行性。在锅炉容量增长的同时，锅炉的压力和温度参数也相应的提高，从原来的高压锅炉发展到超高压、亚临界压力、超临界压力。目前 300 ~ 800MW 机组有亚临界压力和超临界压力两类，600MW 以上机组大多数为超临界压力，超临界压力又有原来 25MPa 发展到 35MPa 的超超临界压力参数，近些年来，日本在大容量锅炉上均采用超临界压力，1981 ~ 1983 年投运的大容量锅炉全部是直流锅炉。

如何保护环境减少锅炉烟尘排放的污染已成为锅炉工业发展优先考虑的前提。目前，随着各项有害物的排放标准要求上日趋严格。世界各国除了在锅炉设备上采取一些措施，改善排放物危害的程度外，近十年来，各国还开发研制了一批清洁燃烧的循环流化床（CFB）锅炉，该类型锅炉的燃料送入燃烧室，受到强烈的混合和扰动，燃烧热便传给床料，床料又将热传给床料中的埋管和炉壁受热面，该流程提供了一个相对较低的稳定燃烧的温度，低温燃烧和物料的再循环为燃烧脱硫提供了最佳的温度条件，并且，燃烧中不会产生 NO_x 的排放物。目前，法国、美国的一些制造商已开发投运了 250MW 容量以上的（CFB）锅炉机组。

第二节 我国电站锅炉的发展和现状

建国以来，我国电站锅炉经历了从无到有的发展过程，一直保持着较高的持续增长速度。改革开放前，国产机组主要借鉴动力强国前苏联的成果，自力更生生产了从 65 ~ 1000t/h 各种类型的锅炉，配国产的 12 ~ 300MW 汽轮发电机组。改革开放以后，我国逐步引进美国、日本等工业发达国家的 300 ~ 600MW 大型机组，并且引进了西方发达国家的 300、600MW 锅炉制造的整套技术，从而使我国锅炉制造业跨上一个新的台阶。另外，在消化和吸收引进技术的基础上，经过优化设计的一批国产锅炉已逐步投产运行，锅炉热效率基本上保持在较高的水平。

锅炉设备的生产和技术发展能够从侧面反映一个国家的工业技术水平，我国在世界上排在发展中国家行列，锅炉行业的现状也同样如此。尽管在容量和参数发展上能够保持较高水平，但是，从基础研究、产品开发、设计、制造、运行到整个技术管理体系，和先进发达国家相比较，尚存在较大的差距，主要存在的问题有如下几个方面：

1. 机组可用率低

根据统计数据，我国火电机组的年利用率虽较高，但在可用率方面，比先进国家平均要低 4% ~ 10%，一般处于 76.82% ~ 88.42%。国产机组越大，可用率越低，大机组优越的经济性能未充分发挥。因此，提高大型火电机组的可靠性，有巨大的潜力可以发掘。

2. 锅炉承压部件爆漏事故多

根据近几年统计数据显示，大机组四管爆漏次数平均 2.5 次/年左右，其中以过热器爆管次数最多，平均约 0.8 次/(台·年)。总的来说与国外水平相比，我国大机组的四管爆漏事故高出 10% 左右。

3. 锅炉燃烧方面存在的问题较突出

由于电站锅炉的用煤难以定质供应，甚至在提供锅炉设计煤种时因煤矿资源难以确定而采用“人造煤质”，以致使锅炉的实际用煤与设计煤种不符合，给运行带来较多的困难。另外，我国煤种繁多，矿点分布复杂，煤矿、电厂、运输各环节的协调工作十分困难，因而电厂燃料相当混杂。由于电厂锅炉实用煤与设计不符，或煤种多变，煤质变差，造成设备损耗改造费用大量增加。

4. 主要辅助设备的问题

回转式空预器漏风较大，并且堵灰腐蚀严重，甚至有时影响到燃料风量的供给；中速磨出力不足，磨辊等的磨损速度较高，使用寿命较短；另外，还有轴流风机出现喘振和叶片磨损脱落等情况。

目前，我国电站锅炉的生产制造厂和电厂用户，都已正视上述一系列问题并采取了一系列的有效措施，对现役机组的技术问题，积极实行运行及管理优化，甚至于借助于一些科研力量进行协同攻关。可以预见，在我国实现现代化的进程中，和国际接轨的趋势会促进电站锅炉技术的进步和发展，尽早地接近和赶上先进发达国家的水平。

锅炉总体介绍

锅炉是火力发电厂三大主要设备之一。燃料在锅炉中燃烧放出热量并将热量传给水，借以产生一定压力和温度的蒸汽，锅炉所产生的蒸汽被引入汽轮机带动发电机发电。

我国电厂锅炉所用的燃料主要是煤，即一般把煤磨成煤粉，然后送入炉膛燃烧。图 2-1 为煤粉锅炉及辅助设备示意图。由煤仓落下的煤经给煤机 11 送入磨煤机 12 制成煤粉。送风机 14 将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器 5，冷空气在此被加热。热空气的一部分经过一次风机 13 送入磨煤机将煤加热和干燥，同时它本身也是输送煤粉的介质。

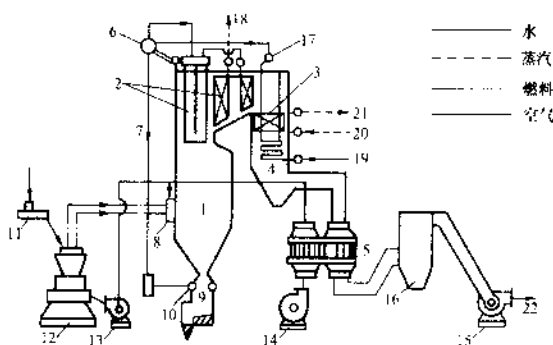


图 2-1 煤粉锅炉及辅助设备示意图

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—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；19—给水；20—进口再热蒸汽；21—出口再热蒸汽；22—排烟

从磨煤机排出的气粉混合物经燃烧器 8 进入炉膛燃烧。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。

锅炉的炉膛具有较大的空间，煤粉在此空间内悬浮燃烧，炉膛四周靠近炉墙布置有密集排列的水冷壁管 1，管内有水和蒸汽混合物流过，这样既能吸收炉膛的辐射热，又能保护炉墙不致烧坏。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的烟气温度要低于煤灰的软化温度，以免熔化的灰粒粘结在烟道内助受热面上。煤粉燃烧所生成的较大灰粒沉降到炉膛底部的冷灰斗中，逐渐冷却和凝固，并落入排渣装置 9，形成固态排渣。大量较细的灰粒随烟气离开炉膛，流经一系列的对流受热面并逐渐冷却，最后由引风机 15 经烟囱排入高空。排烟的温度通常在 150°C 左右。为了减少排烟带出的飞灰，防止环境被污染，离开锅炉的烟气先流经除尘器 16，使较大部分飞灰被捕捉下来。最后只有少量的细微灰粒排入大气。

送入锅炉的水称为给水。由送入的给水到送出的过热蒸汽，中间要经过一系列的加热过程。首先把水加热到饱和温度，其次是饱和水的蒸发，最后是饱和蒸汽的过热。加热给水的受热面叫做省煤器；使饱和水汽化成饱和蒸汽的受热面叫做蒸发受热面；把饱和蒸汽加热为过热蒸汽的受热面叫做过热器。为了提高锅炉—汽轮机组的循环热效率，对高压机组大多数要采用蒸汽再热，这样在锅炉中还有再热器或称二次过热器。

当送入锅炉的给水中含有杂质时，其杂质浓度随锅炉水汽化要升高，严重时会在受热面上结水垢使传热恶化，因此对给水要预先进行处理。由锅炉送出的蒸汽可能因带有锅炉水而被污染（水中含有杂质），高压蒸汽还能直接溶解一些杂质。蒸汽进入汽轮机，所含杂质会部分沉积在汽轮机通流部分，影响汽轮机的出力、效率和工作安全。这样不仅要求锅炉能供给一定压力和温度的蒸汽而且还要求蒸汽具有一定的净度。

众所周知，电能一般是不能大规模储存的，因此对于电站锅炉来说，它的出力要随发电机组负荷的变化而变化，这是发

电厂生产的一个重要特点。电站锅炉要达到这一要求，就必须按照外界负荷需要及时调整燃料量、送风量以及给水量。尤其现在随着我国国民经济的迅速发展及居民用电水平的不断提高，电网负荷随着天气的变化也越来越明显，电力负荷的峰谷差有时甚至可以达到电网容量的 40% 左右，所以要求电站锅炉在保持经济性及安全性的基础上要具有很大的变负荷运行能力。因此，对电站锅炉的基本要求可以概括为以下几点：

(1) 锅炉的蒸发量要满足汽轮发电机组的要求，能够在铭牌参数下长期运行，并具有较强的调峰能力。

(2) 在宽负荷范围内运行时能够保持正常的汽温和汽压。

(3) 锅炉要具有较高的经济性。

(4) 耗用钢材量要少，以减少初投资，降低成本。

(5) 锅炉在运行中要具有较强的自稳定能力。

上海锅炉厂引进美国燃烧工程公司 (CE) 技术生产的 SG1025/17.5-M 系列亚临界参数汽包炉作为我国目前电力行业 300MW 电站锅炉代表之一，很好的满足了上述要求，该炉采用控制循环、一次中间再热、单炉膛、四角切圆燃烧方式、燃烧器摆动调温、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊结构、露天布置的型式，在我国具有一定的代表性。下面我们就以该型炉为例，将有关电站锅炉的主要技术参数、热力特性、整体布置和设计特点、设计条件和环境条件等分别介绍一下。

第一节 锅炉主要性能参数及经济性指标

在火力发电厂中，锅炉的性能参数及经济性指标是一个非常重要的指标，它是一台锅炉综合性能的体现，锅炉的性能参数反映的是锅炉的运行特性，经济性指标反映的是锅炉的经济特性。我们知道锅炉在运行中要耗用一定的燃料，每千克燃料具有一定的热值。但是所耗用的热量未能完全被利用，有些燃料未能完全燃烧，排出的烟气也带走热量等。因此锅炉的经济性好坏最直接