

普通高等教育“十五”规划教材



FUNDAMENTALS & EQUIPMENTS
OF UTILITY BOILER

电厂锅炉原理 及设备

南京工程学院 叶江明 主 编
南京工程学院 潘效军 副主编
山西大学 陈广利



普通高等教育“十五”规划教材



FUNDAMENTALS & EQUIPMENTS
OF UTILITY BOILER

电厂锅炉原理 及设备

南京工程学院 叶江明 主编

南京工程学院 潘效军 副主编

山西大学 陈广利

东南大学 周强泰 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书主要讲述大型火力发电厂燃煤锅炉的原理及设备。内容包括：燃料及燃料燃烧计算、锅炉热平衡及计算、水循环计算、锅炉热力计算；煤粉制备系统及设备、燃烧设备、蒸发设备、过（再）热设备、水和空气的加热设备；煤粉燃烧理论基础、自然循环原理、控制流动锅炉原理；蒸汽净化；锅炉运行及事故处理方法。

本书是高等学校热能动力工程专业必修课程，适用于热能动力工程类专业方向的学生，也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂锅炉原理及设备/叶江明主编. —北京：中国电力出版社，2004.8

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2056-5

I. 电... II. 叶... III. 火电厂-锅炉-高等学校-教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 080186 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004年8月第一版 2004年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 27印张 632千字

印数 0001—3000册 定价 38.00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)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

前 言

本教材是根据全国热动力工程专业教育指导委员会 2002 年 9 月南京会议精神，于 2002 年 11 月杭州会议上确定的“十五”规划教材。

本书是针对工程类“应用型”本科院校的相关专业编写的。因此，在编写过程中特别注重理论知识的够用和理论知识与实际的结合。本书在总结南京工程学院电厂锅炉课程长期教学和教材建设的基础上，参考本院张永涛教授等编写的《锅炉设备及系统》教材部分内容，本着“保持特色、突出重点、不断更新”的原则，对教学内容和表述方法进行了补充和更新，以适应技术进步和发展的需要。

全书共 13 章。南京工程学院叶江明副教授任主编，负责全书的统稿，并编写第一、六、九、十一、十三章；南京工程学院潘效军教授编写第七、八、十二章；山西大学工程学院陈广利老师编写第二、三、四、五、十章。全书由东南大学博士生导师周强泰教授主审。编者对周强泰教授为本书所付出的心血和汗水深表谢意！在本书的编写过程中，南京工程学院常务副院长朱皓强教授提出了许多宝贵的意见和建议。在此，对所有关心、支持本书出版的专家、学者表示由衷的感谢！

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请所有使用本教材的读者批评指正。

编 者

2003 年 12 月于南京

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 电厂锅炉的作用及设备构成	1
第二节 电厂锅炉设备的基本特征	3
第三节 锅炉的分类和型号	5
第四节 锅炉技术的发展	8
第二章 燃料及燃料燃烧计算	13
第一节 燃料的成分及其主要特性	13
第二节 燃料燃烧计算	25
第三节 烟气分析方法	32
第四节 空气和烟气焓的计算	37
第三章 锅炉机组热平衡	42
第一节 锅炉热平衡	42
第二节 锅炉输入热量和有效利用热量	43
第三节 锅炉的各项热损失	45
第四节 锅炉效率及燃料消耗量计算	51
第五节 锅炉热平衡试验方法	52
第四章 煤粉制备系统及设备	57
第一节 煤粉的性质	57
第二节 磨煤设备及其特性	59
第三节 煤粉制备系统	74
第四节 煤粉制备系统的主要辅助设备	78
第五节 煤粉制备系统的选型	84
第五章 煤粉燃烧理论基础及燃烧设备	89
第一节 燃烧的基本理论	89
第二节 煤粉气流的着火和燃烧	95
第三节 煤粉燃烧器及点火设备	103
第四节 煤粉炉的炉膛及其特性	118
第五节 燃烧调整试验方法	128
第六章 蒸发设备	133
第一节 概述	133
第二节 汽包	136
第三节 水冷壁的作用和结构	140

第四节	水冷壁的布置型式	144
第五节	蒸发受热面存在的问题及其防止措施	152
第七章	过热器和再热器	158
第一节	过热器和再热器的作用及其特点	158
第二节	过热器和再热器的结构型式及其汽温特性	159
第三节	热偏差	173
第四节	蒸汽温度的调节	178
第五节	对流受热面的高温积灰和高温腐蚀	187
第八章	省煤器和空气预热器	194
第一节	省煤器	194
第二节	空气预热器	202
第三节	尾部受热面的布置	215
第四节	低温受热面的积灰、磨损和腐蚀	216
第九章	自然循环原理及计算	228
第一节	自然循环的基本原理	228
第二节	两相流的流型和传热	230
第三节	两相流的特性参数及流动阻力	233
第四节	自然水循环的可靠性指标及计算方法	239
第五节	自然循环常见故障及提高安全性措施	245
第六节	自然循环锅炉的应用实例	251
第十章	蒸汽净化及水质工况	256
第一节	蒸汽污染的原因及其净化措施	256
第二节	饱和蒸汽的机械携带	258
第三节	蒸汽的溶解性携带	260
第四节	汽水分离和蒸汽清洗装置	263
第五节	电厂锅炉水质工况及水处理简介	270
第十一章	控制流动锅炉	277
第一节	控制循环锅炉	277
第二节	直流锅炉	283
第三节	复合循环锅炉	287
第四节	直流锅炉的流动特性	291
第五节	沸腾传热恶化及其防止措施	303
第六节	超临界压力锅炉简介	306
第十二章	锅炉热力计算及其设计布置	309
第一节	电厂锅炉整体布置及其主要设计参数的选择	309
第二节	电厂锅炉热力计算的任务及顺序	316
第三节	炉膛热力计算	318
第四节	对流和半辐射受热面的热力计算	329
第十三章	锅炉运行及事故处理	354

第一节 汽包锅炉的启动与停运	354
第二节 汽包锅炉的运行调节	364
第三节 锅炉在非设计工况下的运行	373
第四节 直流锅炉的运行和启停特点	377
第五节 锅炉的滑压运行	387
第六节 锅炉事故分析及其处理	391
附录 I 锅炉水动力计算线算图	398
附录 II 锅炉热力计算线算图	401
参考文献	424

第一章 绪 论

第一节 电厂锅炉的作用及设备构成

电力工业是国民经济发展的基础工业，电力工业的发展水平和电能供应的数量和质量是衡量工业、农业、国防和科技现代化水平的重要标准。发电能源的种类很多，如火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电、地热能发电、潮汐发电等。当前，世界上主要有三类发电形式：火力发电、水力发电和核能发电。而从总体上讲，火力发电仍然是世界电能生产的主要形式，我国由于能源构成的特点更是如此。

电能的生产企业称为发电厂。火力发电厂的生产过程可简要的用图 1-1 表示。燃料在锅炉 1 中燃烧，放出的热量将锅炉内的水加热、蒸发并过热成为具有一定温度和压力的过热蒸汽，过热蒸汽由管道引入汽轮机 2，蒸汽在汽轮机内膨胀做功，冲转汽轮机，带动发电机 3 转动并发出电能。蒸汽在汽轮机内做功后排入凝汽器 4，在其中被循环水泵 11 提供的冷却水冷却而凝结成水。凝结水由凝结水泵 5 提升压力后进入低压加热器 6 加热，经除氧器 7 除氧后，由给水泵 8 升压，再经高压加热器 9 进一步加热后送回锅炉继续重复上述循环过程。水在加热器和除氧器内加热的热源均来自汽轮机的各级抽汽 10。

由此看出，在火力发电厂中存在着三种形式的能量转换过程：在锅炉中燃料的化学能转化为蒸汽的热能；在汽轮机中蒸汽的热能转化为机械能；在发电机中机械能转化为电能。进行能量转换的主要设备——锅炉、汽轮机、发电机，被称为火力发电厂的三大主机。

锅炉是火力发电厂的三大主机中最基本的能量转换设备。其作用是使燃料在炉内燃烧放热，并将锅内工质由水加热成具有足够数量和一定质量（汽温、汽压）的过热蒸汽，供汽轮机使用。

目前我国电厂锅炉所用燃料主要是煤。现代大型电厂锅炉一般先将煤磨制成煤粉，然后送入锅炉燃烧放热并产生过热蒸汽。在锅炉中实现煤的化学能转换成蒸汽的热能时，进行着四个相互关联的工作过程，即煤粉制备过程、燃烧过程、通风过程和过热蒸汽的生产过程。由此可将电厂锅炉划分为这样几个系统：制粉和燃烧系统、烟风系统、汽水系统。煤粉制备过程是在煤粉制备系统内进行的。煤粉制备过程的任務是将初步破碎后送入锅炉房的原煤磨制成符合锅炉燃烧要求的细小煤粉颗粒

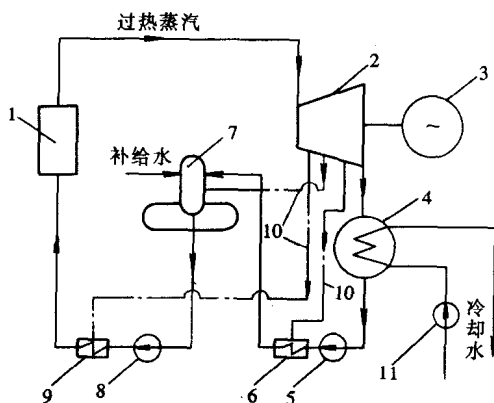


图 1-1 火力发电厂生产过程示意图

- 1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；
5—凝结水泵；6—低压加热器；7—除氧器；
8—给水泵；9—高压加热器；10—汽轮机
抽汽管；11—循环水泵

粒，供锅炉燃烧。燃烧过程在炉膛内进行，其任务是使燃料燃烧放出热量，产生高温火焰和烟气。为了使燃烧过程稳定持续地进行，必须连续提供燃烧需要的助燃氧气和将燃烧产生的烟气即时引出锅炉，这就是由锅炉的烟风系统来完成的通风过程。汽水系统的主要任务是通过各换热设备将高温火焰和烟气的热量传递给锅炉内的工质。

图 1-2 是一台煤粉锅炉主要设备的示意图。以下按该示意图说明电厂锅炉的构成及工作过程。由煤仓落下的原煤经给煤机 11 送入磨煤机 12 磨制成煤粉。在煤粉磨制过程中需要热空气对煤进行加热和干燥。送风机 14 将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器 5 被烟气加热。从空气预热器出来的热空气一部分经排粉风机 13 送入磨煤机中，对煤进行加热和干燥，同时这部分热空气也是输送煤粉的介质。从磨煤机排出的煤粉和空气的混合物经煤粉燃烧器 8 进入炉膛 1 燃烧。由空气预热器来的另一部分热空气直接经燃烧器进入炉膛参与燃烧反应。

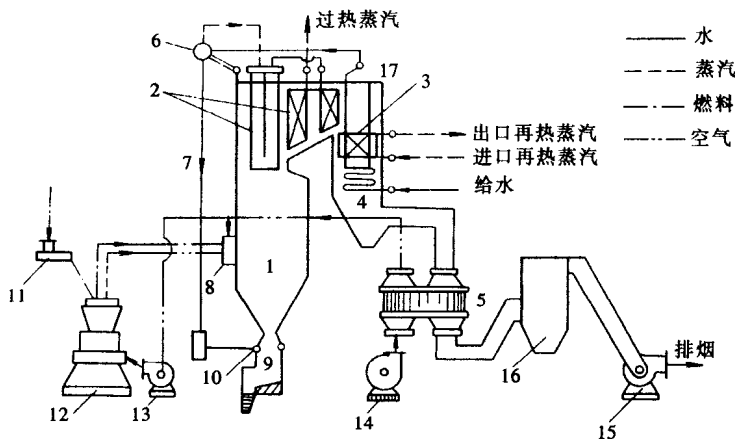


图 1-2 煤粉锅炉及辅助设备示意图

- 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—水冷壁下联箱；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

锅炉的炉膛具有较大的空间，煤粉在此空间内进行悬浮燃烧。煤粉燃烧放出热量，燃烧火焰中心具有 1500℃ 或更高的温度。炉膛周围布置大量水冷壁管，炉膛上部布置着顶棚过热器及屏式过热器等受热面。水冷壁和顶棚过热器等是炉膛的辐射受热面，其受热面管内有水和蒸汽流过，既能吸收炉膛的辐射热，使火焰温度降低；又能保护炉墙不致被烧坏。为了防止熔化的灰渣黏结在烟道内的受热面上，烟气向上流动到达炉膛上部出口处时，其温度要低于煤灰的熔点。

高温烟气经炉膛上部出口离开炉膛进入水平烟道，然后再向下流动进入垂直烟道。在锅炉本体的烟道内布置有过热器 2、再热器 3、省煤器 4 和空气预热器 5 等受热面。烟气在流过这些受热面时以对流换热为主的方式将热量传递给工质，这些受热面称为对流受热面。过热器和再热器主要布置于烟气温度较高的区域，称为高温受热面。而省煤器和空气预热器布置在烟气温度较低的尾部烟道中，故称为低温受热面或尾部受热面。烟气流经一系列对流受

热面时，不断放出热量而逐渐冷却下来，离开空气预热器的烟气（即锅炉排烟）温度已相当低，通常在 $110 \sim 160^{\circ}\text{C}$ 之间。

由于煤中含有灰分，煤粉燃烧所生成的较大灰粒沉降于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流动一起离开锅炉。为了防止环境污染，锅炉的排烟首先流经除尘器 16，使绝大部分飞灰被捕捉下来。最后，只有少量细微灰粒随烟气通过引风机 15 由烟囱排入大气。

送入锅炉的水称为给水。由送入的给水到送出的过热蒸汽，中间要经过一系列加热过程。首先把给水加热到饱和温度，其次是饱和水的蒸发（相变），最后是饱和蒸汽的过热。给水经省煤器加热后进入汽包锅炉（以汽包锅炉为例）的汽包 6，经下降管 7 引入水冷壁下联箱 10 再分配给各水冷壁管。水在水冷壁中继续吸收炉内高温烟气的辐射热达到饱和状态，并使部分水蒸发变成饱和蒸汽。水冷壁又称为锅炉的蒸发受热面。汽水混合物向上流动并进入汽包。在汽包中通过汽水分离装置进行汽水分离，分离出来的饱和蒸汽进入过热器吸热变成过热汽。由过热器出来的过热蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机做功。为了提高锅炉—汽轮机组的循环效率，对高压机组大都采用蒸汽再热，即在汽轮机高压缸做完部分功的过热蒸汽被送回锅炉进行再加热。这种对过热蒸汽进行再加热的锅炉设备叫做再热器，或称二次过热器。

当送入锅炉的给水含有杂质时，其杂质浓度随着锅水的汽化而升高，严重时甚至在受热面上结成垢后使传热恶化。因此给水要进行预处理。由汽包送出的蒸汽可能因带有含杂质的锅水而被污染。高压蒸汽还能直接溶解一些杂质。当蒸汽进入汽轮机后，随着膨胀做功过程的进行，蒸汽压力下降，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。因此，我们不仅要求锅炉能供给一定压力和温度的蒸汽，还要求它具有一定的洁净度。

第二节 电厂锅炉设备的基本特征

一、电厂锅炉的特性

表征锅炉设备基本特征的有：锅炉容量、蒸汽参数、燃烧方式、汽水流动方式和锅炉整体布置等方面。

锅炉容量：锅炉的容量用蒸发量表示，一般是指锅炉在额定蒸汽参数（压力、温度）、额定给水温度和使用设计燃料时，每小时的最大连续蒸发量。常用符号 D_e 表示，单位为 t/h （或 kg/s ）。习惯上，电厂锅炉容量也用与之配套的汽轮发电机组的电功率来表示，如 300MW 锅炉。

蒸汽参数：锅炉的蒸汽参数是指锅炉出口处的蒸汽温度和蒸汽压力。蒸汽温度常用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K ；蒸汽压力常用符号 p 表示，单位为 MPa 。锅炉设计时所规定的蒸汽温度和压力称为额定蒸汽温度和额定蒸汽压力。

锅炉所用燃料是多种多样的，有煤、油、气体及其他可燃物。在我国，由于煤炭资源丰富，而且分布地区广，所以常以煤作为锅炉的主要燃料。对于不同的燃料，锅炉的燃烧方式

不同，锅炉的结构也不一样。

锅炉的受热面，包括加热水的省煤器、使水汽化的蒸发受热面和加热蒸汽的过热器，一侧吸收烟气的热量，另一侧把热量传给水或蒸汽。不论哪种受热面，都应能随时把热量带走以保证受热面金属的正常工作，所以其内部工质应不断流动。锅炉省煤器中的工质（水）和过热器中的工质（蒸汽）都是一次流过受热面的。给水流经省煤器的阻力由给水泵提供的压头来克服。过热器中蒸汽的流动阻力是由压力降来克服的，即在过热器进口和出口之间存在压力差。而流经蒸发受热面的工质为水和汽的混合物。对于不同结构的锅炉，汽水混合物可能一次或多次流经蒸发受热面。所谓锅炉的汽水流动方式就是指推动汽水混合物流动的方式。

锅炉的整体布置是指炉膛、对流烟道以及各级受热面之间的相对位置。

电厂锅炉存在这样几个明显特点：电厂锅炉一般都是蒸发量在 400t/h 以上、超高压以上压力的锅炉，且大都进行中间再热，即锅炉容量大、蒸汽参数高。大容量、高参数电厂锅炉热效率都很高，多稳定在 90% 以上。大型电厂锅炉为实现安全、经济运行，大都设置一套高度可靠的自动化控制装置——自动化程度高。

二、电厂锅炉的安全和经济指标

除了上述表征锅炉设备的基本特征外，锅炉特征还可以用锅炉的安全和经济指标来表示。

在工业生产中，尤其在火力发电厂中，锅炉是重要设备之一，它的安全性和经济性对生产十分重要。而锅炉又是高温高压的大型设备，一旦发生爆炸或破裂事故，将是非常危险的。

锅炉的安全性常用下述几种指标来衡量：

(1) 连续运行小时数 = 两次检修之间运行的小时数；

(2) 事故率 = $\frac{\text{事故停用小时数}}{\text{总运行小时数} + \text{事故停用小时数}} \times 100\%$ ；

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

事故率和可用率按一适当长的周期来计算。我国通常以一年为一个统计周期。连续运行小时数越长，事故率越低，可用率越高，锅炉的安全可靠性就越高。

锅炉的经济性可用锅炉效率和锅炉的投资来说明。锅炉在运行中需要耗用一定量燃料，但燃料燃烧所放出的热量不能完全被利用：有些燃料未能完全燃烧，锅炉排出的烟气也带走一定热量等。因此，锅炉效率是一重要经济指标。而锅炉本身投资在很大程度上取决于制造时的钢材使用率。

锅炉效率的定义为：锅炉每小时的有效利用热量（即水和蒸汽所吸收的热量）占输入锅炉全部热量的百分数，常用符号 η 表示，即

$$\eta = \frac{\text{锅炉有效利用热量}}{\text{输入锅炉总热量}} \times 100\%。$$

钢材使用率是锅炉生产 1t/h 蒸汽所用钢材的吨数。锅炉的容量越小、蒸汽参数越高，则钢材使用率越大，一般来说，电厂各种锅炉的钢材使用率约在 2.5 ~ 5t/(t/h) 范围内。

第三节 锅炉的分类和型号

一、锅炉的分类

锅炉的分类方法很多，主要有以下几种。

1. 按锅炉容量分

按照蒸发量的大小，锅炉有小型、中型和大型之分，但它们之间没有固定的分界。随着锅炉工业的发展，锅炉的容量日益增大，以往的大型锅炉目前只能算中型甚至小型锅炉。根据目前的情况，一般认为 $D_e < 400\text{t/h}$ 的是小型锅炉， $D_e = 400 \sim 670\text{t/h}$ 的是中型锅炉， $D_e > 670\text{t/h}$ 的是大型锅炉。

表 1-1 中列出了几种典型电厂锅炉的蒸发量及与之配套的汽轮发电机组的电功率的简况。

表 1-1 典型电厂锅炉简况

压力类型	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (°C)	给水温度 (°C)	蒸发量 (t/h)	配套机组容量 (MW)	汽水流动方式
高 压	9.8	540	215	220	50	自然循环
		540		410	100	
超高压	13.7	555/555	240	400	125	自然循环、直流
		540/540		670	200	自然循环
亚临界压力	16.7	540/540	260	1000	300	自然循环
	16.7	540/540	262.4	1025	300	直流
	18.3	540.6/540.6	278.3	2008	600	控制循环
超临界压力	25	545/545	277	1000	300	直流
	25.4	541/569	286	1900	600	
	25	545/545	275	2650	800	

注 (1) 表中除超临界压力锅炉为引进外，其余均为国产锅炉；

(2) 蒸汽压力的数值为表压力；

(3) 以分式形式表示的蒸汽温度，分子为过热汽温，分母为再热汽温。

2. 按蒸汽参数分

按蒸汽压力的高低，可将锅炉分为：低压锅炉 ($p \leq 2.45\text{MPa}$ ，表压，下同)、中压锅炉 ($p = 2.94 \sim 4.92\text{MPa}$)、高压锅炉 ($p = 7.84 \sim 10.8\text{MPa}$)、超高压锅炉 ($p = 11.8 \sim 14.7\text{MPa}$)、亚临界压力锅炉 ($p = 15.7 \sim 19.6\text{MPa}$) 和超临界压力锅炉 ($p \geq 22.1\text{MPa}$) 等。

我国电厂锅炉和部分引进的超临界压力锅炉的蒸汽参数系列可见表 1-1。

3. 按燃烧方式分

按燃料在锅炉中的燃烧方式不同，锅炉可分为：层燃炉、室燃炉、旋风炉和流化床锅炉等，他们的示意图如图 1-3。

层燃炉具有炉算（或称炉排），煤块或其固体燃料主要在炉算上的燃料层内燃烧。燃烧

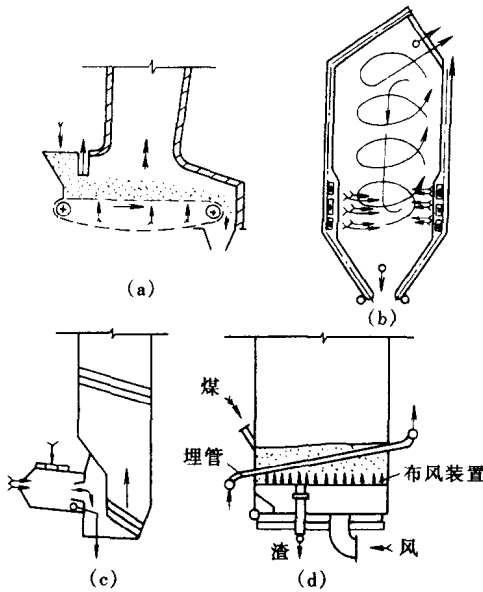


图 1-3 锅炉燃烧方式

(a) 层燃炉; (b) 室燃炉; (c) 旋风炉; (d) 流化床炉

布风板上的床料层中。床层中的物料为炽热的固体颗粒和少量煤粒，当高速空气穿过时床料上下翻滚，形成“沸腾”状态。在沸腾过程中煤粒与空气有良好的接触混合，着火燃烧速度快、效率高，床内安置有以水和蒸汽（或空气）为冷却介质的埋管，使床层温度控制在 $700 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之间。现代的流化床炉，为了提高燃烧效率减轻环境污染和对流受热面的磨损，在炉膛出口处将烟气中的大部分固体颗粒从气流中分离并收集起来，送回炉膛继续燃烧，称为循环流化床锅炉。沸腾炉可在常压下燃烧，也可在增压下燃烧。由增压沸腾炉出来的高温高压燃气，经除尘后可送入燃气轮机，而由埋管等受热面出来的蒸汽则送入蒸汽轮机，这样就形成所谓燃气—蒸汽联合循环。

4. 按水的循环方式分

按工质在蒸发受热面中流动的主要动力来源不同，一般可将锅炉分为自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉。这几种不同类型锅炉的示意图如图 1-4。

自然循环锅炉如图 1-4 (a) 所示。蒸发设备由不受热的下降管 4、受热的蒸发管 6、联箱 5、和汽包 3 组成。它们连结成一个闭合的蒸发系统。给水经给水泵 1 流入省煤器 2，受热后进入蒸发系统。当水在蒸发管中受热时，部分水变成蒸汽，故蒸发管内工质为汽水混合物，而受热下降管内工质为单相的水。由于水的密度大于汽水混合物的密度，故在联箱 5 的两侧有不平衡的压力差，借以推动工质在蒸发系统中循环流动。水在下降管中向下流动，汽水混合物在蒸发管中向上流动进入汽包 3。水和蒸汽在汽包内被分离，蒸汽由汽包上部引出经过过热器 7 过热，而分离出来的水与进入汽包的给水混合，流入下降管往复循环。这种循环流动是由于下降管与蒸发管内工质的密度差而形成，故称为自然循环。单位时间内

所需空气由炉算下的配风箱送入，穿过燃料层进行燃烧反应。这类锅炉多为小容量、低参数的工业用炉。

室燃炉是目前电厂锅炉的主要型式。燃油炉、燃气炉以及本章第一节介绍的煤粉炉均属于室燃炉。在燃烧煤粉的室燃炉中，燃料是悬浮在炉膛空间内进行燃烧的。在燃烧煤粉的室燃炉中，根据排渣方式的不同，又可分为固态排渣炉（如图 1-2）和液态排渣炉。在我国电厂锅炉中，固态排渣室燃炉占有绝对的优势。

旋风炉是一个圆柱形旋风筒作为燃烧室的炉子，气流在筒内高速旋转，较细的煤粉在旋风筒内悬浮燃烧，而较粗的煤粒则贴在筒壁上燃烧。筒内的高速旋转气流使燃烧加速，并使灰渣熔化形成液态排渣。旋风筒有立式和卧式两种布置形式，可燃用粗的煤粉或煤屑。

流化床炉又称沸腾炉，炉子的底部为一多孔的布风板，空气以高速穿经孔眼，均匀进入

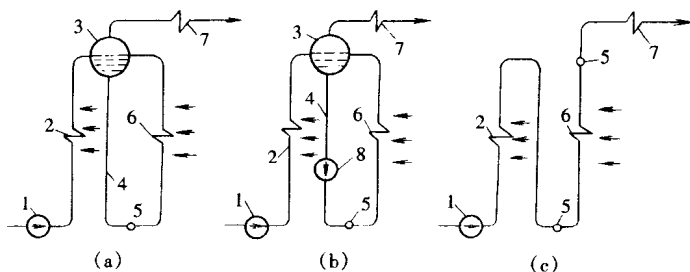


图 1-4 蒸发受热面内工质流动方式

(a) 自然循环; (b) 控制循环; (c) 直流式

1—给水泵; 2—省煤器; 3—汽包; 4—下降管;

5—联箱; 6—蒸发管; 7—过热器; 8—循环泵

进入蒸发管的循环水量同生成汽量之比称为循环倍率。自然循环锅炉的循环倍率约为 4~30。亚临界压力以下的锅炉主要采用自然循环的方式。

控制循环锅炉如图 1-4 (b)。从结构上看,控制循环锅炉和自然循环锅炉有许多相似之处,主要区别在于它在下降汇总管上设置了循环泵 8,以增强工质循环流动的推动力。控制循环锅炉的循环倍率在 3~10 之间,一般为 4 左右。

自然循环锅炉与控制循环锅炉的共同特点是都有汽包。汽包将锅炉的省煤器、蒸发设备、过热器分开,并使蒸发设备形成封闭的循环回路,蒸发受热面与过热器有固定的分界点。但汽包锅炉只适用于临界压力以下的工作压力。

直流锅炉如图 1-4 (c)。直流锅炉没有汽包,工质一次流过蒸发受热面,全部转变为蒸汽,即循环倍率等于 1。另外,直流锅炉的省煤器、蒸发受热面和过热器之间没有固定的分界点。工质在蒸发受热面内流动的阻力是由给水泵提供压头来克服的。直流锅炉既可设计为临界压力以下,也可设计为超临界压力。

随着超临界压力锅炉的发展以及炉膛热强度的提高,又发展起来的一种新的锅炉形式,即所谓复合循环锅炉。复合循环锅炉是由直流锅炉和控制循环锅炉发展而来的,是在一台锅炉上同时具有这两种循环方式的锅炉。复合循环锅炉的基本工作方式:锅炉在低负荷时蒸发受热面内工质有循环,即循环倍率大于 1;锅炉在高负荷时按直流方式工作,即工质一次通过蒸发受热面,循环倍率等于 1。

二、锅炉的型号

锅炉型号通常用一组规定的符号和数字来表示。它反映了锅炉产品的制造厂家、容量大小、参数高低、性能和规格等。国产电厂锅炉型号一般表示方式如下:

$$\triangle\triangle - \times \times \times / \times \times \times - \times \times \times / \times \times \times - \triangle \times$$

第一组为符号,是锅炉制造厂家的汉语拼音缩写。如 HG——哈尔滨锅炉厂; SG——上海锅炉厂; DG——东方锅炉厂; WG——武汉锅炉厂; BG——北京锅炉厂等。

第二组是数字。分子数字是锅炉容量,单位为 t/h;分母数字为锅炉出口过热蒸汽压力,单位为 MPa;

第三组也是数字。分子和分母分别表示过热蒸汽和再热蒸汽出口温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

最后一组中，符号表示燃料代号，而数字表示设计序号。煤、油、气的燃料代号分别是 M、Y、Q，其他燃料代号是 T。

例如，DG—670/13.7—540/540—M8 表示东方锅炉厂制造、锅炉容量为 670t/h，其过热汽压力为 13.7MPa，过热汽和再热汽的出口温度均为 540 $^{\circ}\text{C}$ ，设计燃料为煤，设计序号为 8。

第四节 锅炉技术的发展

一、我国电厂锅炉发展概况

解放前，我国没有电厂锅炉制造业，仅引进瑞士技术合作试制了两台与 2000kW 汽轮发电机组配套蒸发量为 12t/h 的锅炉。1949 年全国装机总容量仅 1849MW（其中火电装机容量为 1686MW），全国发电量为 4.3TW·h。装机居世界第 21 位，发电量居世界第 25 位，人均年占有发电量仅 9.1kW·h，发电煤耗超过 727g/(kW·h)。

新中国成立后在第一个五年计划期间，建立了上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂，开始生产中、高参数的中、大型电厂锅炉。随后又建立了武汉、北京以及东方等锅炉厂，也生产电厂锅炉。

我国火力发电经历了四个发展阶段。在 1949 ~ 1960 年的第一阶段，我国已经开始自行设计、制造了 6、12、25、50MW 中压和高压汽轮发电机组配套的锅炉。在 1961 ~ 1980 年的第二阶段，我国自行研制了超高压 125、200MW 和亚临界压力 300MW 汽轮发电机组配套的 400、670、1000t/h 的自然循环锅炉和直流锅炉。在 1981 ~ 1990 年的第三阶段，为适应我国改革开放政策和现代化的建设，火电建设得到了较快发展。在此阶段，火电装机容量增加了一倍以上，并从美国引进技术制造了先进的与 300MW 和 600MW 汽轮发电机组配套的 1025t/h 和 2008t/h 控制循环锅炉。同时还进口了多台 300 ~ 800MW 亚临界压力和超临界压力锅炉，另外还建设了 100MW 级的燃气 - 蒸汽联合循环发电机组。在 1991 年以后的第四阶段，火力发电伴随水力发电和已起步的核能发电继续加快发展，着重于努力提高火力发电的各项技术经济指标，尽可能达到节约能源并改善环境的目的。因此，循环流化床锅炉和燃气 - 蒸汽联合循环发电机组得到了较快的发展。

目前，我国发电设备总装机容量已达 0.353TW（其中火电装机容量为 0.2642TW），还有大量的大型机组正在建设之中。2003 年全年共完成发电量 1.8462PW·h，人均年占有发电量已达 1200kW·h 以上（但与发达国家相比仍较低）。发电煤耗已降至 350 g/(kW·h) 左右。

在工业锅炉方面，现我国已有 200 多家工业锅炉厂，能生产可以适应我国燃煤质量较差、效率和可靠性较高以及污染较低等条件的现代化工业锅炉。

二、锅炉技术的发展趋势

蒸汽动力从 19 世纪开始到现在，已得到了极大的发展。蒸汽动力中不可缺少的锅炉技术也得到了同样的、极大的发展。目前，虽然核动力等已有所发展，但燃用化石燃料的蒸汽动力仍是世界上能源提供的主力，并仍在迅速发展。

推动锅炉技术发展的动力主要有三方面因素：首先是燃料价格上涨，供应短缺问题。化