

高等学校教学参考书

热发电厂蒸汽锅炉

[苏]M·И·列兹尼柯夫 IO·M·利波夫著

高体基 孙秉枢
顾兆龙 周琴芳译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要讲述热电厂蒸汽锅炉的工作原理、结构以及运行有关知识,对原子能发电厂的蒸汽发生器也作了适当介绍。内容包括:发电厂蒸汽的生产,动力燃料及其特性,燃料燃烧前的准备,炉内过程理论基础,燃料燃烧产物,燃料热量的利用效率,煤粉炉燃烧室,燃气燃油炉燃烧室,工质运动的特性、参数和方程式,受热面的温度工况,开式水力系统的流体动力学,闭式水力系统的流体动力学,穿泡系统水动力学,工质中杂质特性的物理化学基础,水工况,受热面外部过程,蒸发受热面,蒸汽过热器和调节过热汽温的方法,低温受热面,受热面的换热,蒸汽锅炉的布置和热力计算,大容量动力机组的蒸汽锅炉,蒸汽锅炉的运行,原子能发电厂的蒸汽发生器,蒸汽锅炉的金属等二十五章。

本书系苏联高等学校发电厂热能动力装置专业的教科书,可供我国相应专业作教学参考书,对从事锅炉专业工作的生产、科研等部门的工程技术人员也有一定参考价值。

[苏] М.И.РЕЗНИКОВ Ю.М.ЛИПОВ
ПАРОВЫЕ КОТЛЫ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
МОСКВА ЭНЕРГОИЗДАТ 1981

高等学校教学参考书

热电厂蒸汽锅炉

[苏] М.И.列兹尼柯夫 Ю.М.利波夫著

高休基 孙秉枢 顾兆龙 高萃芳 译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 19.5印张 441千字

1989年6月第一版 1989年6月北京第一次印刷

印数0001—2510册 定价3.85元

ISBN 7-120-00622-3/TK·106

译 者 序

本书系苏联莫斯科动力学院电站锅炉教研室为“发电厂热能动力装置”专业编写的教材，经苏联高等和中等专业教育部核准作为该专业的高等学校教科书。苏联教材都是根据教学大纲要求编写的，具有内容完整、系统性强、论述严谨、既充分反映科技和生产发展现况又比较好地符合教学过程要求等特点。近年来我们翻译介绍苏联教材较少，本书系八十年代初期出版，内容比较新，概括了苏联多年来在发展电站锅炉方面的成熟经验和七十年代锅炉技术的成果，比较适合我国发展大机组的现实情况，我们相信将本书翻译介绍给我国读者会起到一定的积极作用。

本文按俄文译名“热力发电厂蒸汽锅炉”。按我们的理解，热力发电厂泛指用热机作原动机发电的电厂。这样在书中讨论原子能发电厂的蒸汽发生器就是顺理成章的事了。为了更符合我们的习惯，也为了更确切，在译文中很明确地乃是指燃用有机燃料发电的场合，我们一律译做“火力发电厂”，特此说明。

全书共二十五章，第一章至第十二章由高体基同志翻译，第十三章至第十五章由孙秉枢同志翻译，第十六章至第二十五章由顾兆龙和周琴芳同志合译。本书的翻译曾得到浙江大学热物理系 陈运铎 教授和清华大学热力工程系徐秀清教授的支持和帮助，东南大学周强泰教授、清华大学徐秀清教授、施德强副教授、机械电子工业部北京电工研究所李之光教授曾帮助审阅部分译稿，在此表示深切的谢意。

限于译者水平，译文中错误与欠妥之处实所难免，希望读者给予批评指正。

译 者

1986年3月

前 言

《热力发电厂蒸汽锅炉》是根据同名课程的教学大纲编写的教科书。书中阐述了热力发电厂蒸汽锅炉和原子能发电厂蒸汽发生器的过程理论、结构以及运行有关知识,所有这些内容对培养工程师都是必不可少的。

全书贯穿了四个彼此相关并且反映现代科学技术进步的基本科学技术原理:现代化大容量蒸汽锅炉的燃料系统、烟风系统和汽水系统中进行的物理-化学过程,以及根据现代科学成就对这些过程作出的解释;蒸汽锅炉的物理-化学过程、结构和布置与锅炉元件的关系;技术-经济上已得到论证的先进工艺过程;蒸汽锅炉中所进行的各种过程与锅炉运行之间的关系。对以上内容的分析有利于合理地选择蒸汽锅炉的工艺过程、结构和运行工况。

首先,教科书说明了蒸汽锅炉在现代大容量蒸汽轮机火力发电厂的整个电能生产系统中的意义和地位,然后分析了蒸汽锅炉的分类、设备主要元件的用途及各种元件之间的相互关系。在开始的章节中简明地叙述了汽水系统、燃料系统、以及烟风系统中所进行的物理-化学过程。这样可以引导学生思考一些问题,而这些问题在以后各章节中将进一步详细研究。

本书用了许多章节来阐明动力燃料及其技术特性、燃料燃烧前的制备、燃烧的基本理论、蒸汽锅炉中燃料燃烧的工艺程序,以及燃料热量利用的有效性。另外,还分析了蒸汽锅炉的水动力学基础、温度工况和水工况,所有这些构成了一系列有关蒸汽生产过程的问题。

根据燃料燃烧过程和蒸汽形成过程研究了蒸汽锅炉及其元件的结构。还对以下方面给予了特别的重视:蒸汽的高参数和超临界参数的建立及其过程,组件结构,有发展前途燃料的利用,设备工作可靠性和经济性的提高。

在不违背现行标准资料的条件下,书中列出了热力计算和水力计算的基本原则、步骤和程序。考虑到数学手段在工程实践中的重大意义,特别强调了必须利用电子计算机来进行热力计算和水力计算。在具有总结性特点的最后几章中,阐述了蒸汽锅炉的结构、锅炉的发展趋势及运行原理。

与原子能动力技术的发展、它的前景和巨型发电站的建设相联系,原子能发电厂的蒸汽发生器具有重大的理论和实践意义。在高等院校所用的教科书中,首次同时阐述了发生于热力发电厂蒸汽锅炉内和原子能发电厂蒸汽发生器中的一系列过程。此外,还单独编写了一章来介绍原子能发电厂的蒸汽发生器。

本书还精心绘制了各种图表。为了能比较深刻地分析许多图示中所要研究的问题,对不同方案的系统和结构进行了比较。设备结构的描述简明扼要,以确保对工作过程有一个比较清楚的理解。这样就使得掌握和记忆现代蒸汽生产装置的各种特性和复杂设备的有关

知识变得容易了。

本教科书的总目的是要反映由苏联科学院院士М.А.Стырикович在莫斯科动力学院首先开设的《发电厂蒸汽发生器》课程多年的教学经验。

教科书的第1、9~15、17~19、21、22、24、25章由М.И.Резников编写；第2~8、16、20章由Ю.М.Липов编写；第23章由Б.И.Шмуклер编写。

衷心地感谢莫斯科动力学院发电厂蒸汽发生器教研室的同事们（教研室主任——科学技术博士В.С.Протопопов教授），感谢评阅者萨拉托夫工业学院蒸汽发生器教研室（教研室主任——科学技术博士А.В.Змачинский教授）。科学技术副博士、钢铁科学研究员Б.И.Шмуклер对完善本书原稿提出了宝贵意见。科学技术副博士А.Я.Антонов副教授为本书作了科学上的编辑工作。科学技术副博士Г.А.Уварова、А.Я.Дубровский、Л.Т.Пашков为完善本书部分章节提出了意见和建议，在此一并表示感谢。

欢迎读者对本书提出批评和建议，来信请寄：113114，Москва，М-114，Шлюзовая наб., 10，Энергоиздат.

目 录

译者序

前 言

第一章 发电厂中蒸汽的生产	1
第一节 蒸汽锅炉在电厂系统中的地位和作用	1
第二节 蒸汽锅炉的分类	5
第三节 生产蒸汽的工艺系统	7
第四节 蒸汽锅炉的主要特性	11
第二章 动力燃料及其特性	13
第一节 燃料的种类及其成分	13
第二节 燃料的燃烧发热量和折算特性	15
第三节 固体燃料的技术特性	17
第四节 重油和天然气的技术特性	19
第五节 矿物燃料的主要产地	22
第三章 发电厂燃料燃烧前的准备	23
第一节 固体燃料的燃烧方式	23
第二节 制粉系统	24
第三节 煤粉的特性和最佳磨碎细度	27
第四节 煤粉制备系统的设备	30
第五节 重油和天然气燃烧前的准备	34
第四章 炉内过程的理论基础	37
第一节 化学反应动力学基础	37
第二节 燃料燃烧的机理	39
第三节 燃烧的动力区域和扩散区域	43
第四节 燃料-空气混合物的着火和燃烧前沿	45
第五节 燃料燃尽强度	46
第五章 燃料燃烧产物	48
第一节 燃烧产物的成分	48
第二节 运行锅炉过量空气系数的确定	51
第三节 烟气中的有毒物质和保护周围环境的措施	53
第六章 燃料热量的利用效率	56
第一节 蒸汽锅炉的热平衡和效率	56
第二节 热损失的分析	58
第七章 煤粉炉的燃烧室	65
第一节 燃烧室的基本特性	65

第二节	燃烧设备及其布置	67
第三节	固态排渣燃烧室	72
第四节	液态排渣燃烧室	73
第八章	燃气燃油炉的燃烧室	76
第一节	燃烧室的结构	76
第二节	重油喷嘴	77
第三节	天然气燃烧器	80
第四节	天然气重油复合燃烧器	81
第九章	工质运动的特性、参数和方程式	84
第一节	汽水系统水动力学和热交换的基本方程式	84
第二节	汽水混合物的运动特性	86
第三节	汽水混合物的运动工况	90
第四节	水力阻力	91
第五节	工质在动力机组系统中的热物理性质	94
第十章	受热面的温度工况	96
第一节	受热面加热和冷却的分类	96
第二节	蒸发管中的换热危机	97
第三节	沿管道长度的温度工况	99
第四节	沿管道截面周长的温度工况	103
第五节	原子能发电厂蒸汽发生装置中的热交换特点	107
第十一章	开式水力系统的流体动力学	109
第一节	开式水力系统的分类	109
第二节	水平蒸发管中工质流的水动力稳定性	110
第三节	垂直蒸发管中工质流的水动力稳定性	114
第四节	热偏差	119
第五节	联箱对工质按管子分配的影响	123
第六节	工质流的脉动	125
第十二章	闭式水力系统的流体动力学	128
第一节	自然循环的规律性	128
第二节	循环回路的计算方法	131
第三节	蒸发管的全水力特性及其在评价循环可靠性中的作用	133
第四节	下降管的水动力特性及其对循环可靠性的影响	136
第十三章	穿泡系统水动力学	139
第一节	穿泡过程的规律性	139
第二节	蒸汽清洗设备中的动力层	143
第三节	放热和杂质的不均匀性对两相动力层的影响	143
第十四章	工质中杂质特性的物理化学基础	146
第一节	给水污染及其对设备工作的影响	146
第二节	杂质在水载热质中的溶解度和沉积形成的规律	147

第三节	杂质从水中向饱和蒸汽中的转移	152
第十五章	水工况	157
第一节	从系统中排除杂质的方法	157
第二节	直流锅炉的水工况	158
第三节	汽包锅炉的无垢水工况	161
第四节	获得洁净蒸汽的方法	162
第十六章	受热面的外部过程	170
第一节	积灰形成的机理	170
第二节	对流受热面的磨损	173
第三节	受热面的腐蚀	175
第十七章	蒸发受热面	179
第一节	蒸发受热面的吸热及其布置	179
第二节	提高炉膛水冷壁可靠性的方法及水冷壁的结构	180
第三节	气密性水冷壁的特点及提高其可靠性的方法	186
第四节	覆盖涂料的水冷壁	192
第十八章	蒸汽过热器和过热蒸汽温度的调节方法	193
第一节	蒸汽过热器的分类	193
第二节	蒸汽过热器的工作条件及提高可靠性的方法	197
第三节	蒸汽过热器的布置	199
第四节	调节过热蒸汽温度的方法	200
第十九章	低温受热面	208
第一节	低温受热面的布置	208
第二节	省煤器	209
第三节	空气预热器	211
第四节	提高空气预热器耐腐蚀性的方法	218
第二十章	蒸汽锅炉受热面的换热	221
第一节	贴墙式水冷壁的热力特性	221
第二节	火炬的辐射能力	223
第三节	燃烧室内的辐射换热计算	225
第四节	锅炉烟道内的辐射换热	229
第五节	锅炉烟道内的对流换热	231
第六节	对流受热面中烟气速度和工质速度的选择	234
第二十一章	蒸汽锅炉的布置和热力计算	236
第一节	蒸汽锅炉的布置和建造结构	236
第二节	锅炉的热力系统	243
第三节	锅炉的热力计算	245
第二十二章	火力发电厂大容量动力机组的蒸汽锅炉	249
第一节	发电厂的类型、容量及运行工况对蒸汽锅炉结构的影响	249
第二节	现代蒸汽锅炉的特点	253

第二十三章 蒸汽锅炉的运行	262
第一节 运行工况和指标	262
第二节 锅炉的稳定运行工况	264
第三节 在允许负荷范围内的不稳定工况	266
第四节 单元机组的启动系统	269
第五节 锅炉的停炉和减负荷方式	274
第六节 锅炉点火和单元机组启动工况	276
第二十四章 原子能发电厂的蒸汽发生器	282
第一节 原子能发电厂蒸汽发生器的分类及其特点	282
第二节 水载热质蒸汽发生器	283
第三节 液态金属载热质及气体载热质蒸汽发生器	286
第四节 作为蒸汽发生器的反应堆	289
第二十五章 蒸汽锅炉的金属	291
第一节 金属在高温下的性能	291
第二节 蒸汽锅炉的金属	293
第三节 强度计算	296
第四节 运行中对金属的监督	298
参考文献	301

第一章 发电厂中蒸汽的生产

第一节 蒸汽锅炉在电厂系统中的地位和作用

发电厂是生产电能的工业企业。在苏联和世界上其它经济发达的国家，电能的主要部分都是在利用所燃烧的有机燃料的化学能进行工作的火力发电厂（ТЭС）中生产的。在用核燃料工作的发电厂——原子能发电厂（АЭС）和用水流能量工作的发电厂——水力发电厂（ГЭС）中也生产电能。

不论发电厂属于何种类型，通常，电能都是集中生产的。这就是说，各个独立的发电厂都并联于一个总的电网进行运行，也就是都联合于覆盖着具有大量电能用户的广大地区的电力系统之中。这就提高了用户的供电可靠性，减少了所需要的备用容量，藉助于在并入电网的电厂之间合理分配负荷，还可降低所生产电能的成本，还可以装建单机容量更大的机组。利用在一些发电厂中与电能同时生产出来的热水和低压蒸汽进行集中供热，也得到了广泛的使用。发电厂、电力网和热力网，以及电能用户和热用户，共同组成动力系统。各独立的动力系统通过系统间用更高电压的连接联合成联合的动力系统。在这个基础上近年内将建立起苏联统一动力系统——国家动力事业的最高组织形式。

火力发电厂。用有机燃料工作的基本型式的火力发电厂是蒸汽轮机发电厂，它又被分成仅生产电能的凝汽式发电厂（КЭС）和同时生产电能和热能的热化式（供热式）发电厂（ТЭЦ）。

蒸汽轮机发电厂的优点在于集中极大功率于一台机组的可能性，具有相对较高的经济性，用于建筑物的基建投资最低，以及比较短的建设期限。蒸汽轮机发电厂的主要的热力机组是蒸汽锅炉和蒸汽轮机（图1-1）。蒸汽锅炉乃是用来生产蒸汽的受热面的组合系统，它利用燃料燃烧时释放出的热能把不断输入其中的水转变成蒸汽，而燃料则是同燃烧所必需的空气一起送入炉膛之内的。供入蒸汽锅炉的水称作给水。给水加热至饱和温度，而后蒸发，而从沸水（锅水）中分离出的饱和蒸汽则进一步过热。

燃料燃烧时生成燃烧产物（烟气）——载热介质，它通过受热面把热量传给称工作质的水和蒸汽。在流过受热面之后，燃烧产物在较低的温度下通过烟囱排入大气。为了减少当地空气中污染物的浓度，大容量发电厂的烟囱常建成200~300m甚至更高的高度。燃用固体燃料剩下的灰和渣，它们也都是从锅炉机组排出的。锅炉中得到的过热蒸汽送入汽轮机，在汽轮机里蒸汽的热能转变为汽轮机转轴所传递的机械能。最终带动发电机，在发电机里机械能转变为电能。从汽轮机排出的乏汽进入凝汽器——蒸汽在其中被冷却水冷却并凝结的设备，冷却水既可以来自天然水源（河流、湖泊、池塘、海），也可以来自人工水源（冷水塔）。

在装置了单机容量200MW及以上机组的现代火力发电厂中，采用蒸汽中间再过热。通常采用一次蒸汽中间再过热（图1-1，a）。在功率很大的装置中才采用二次蒸汽中间再

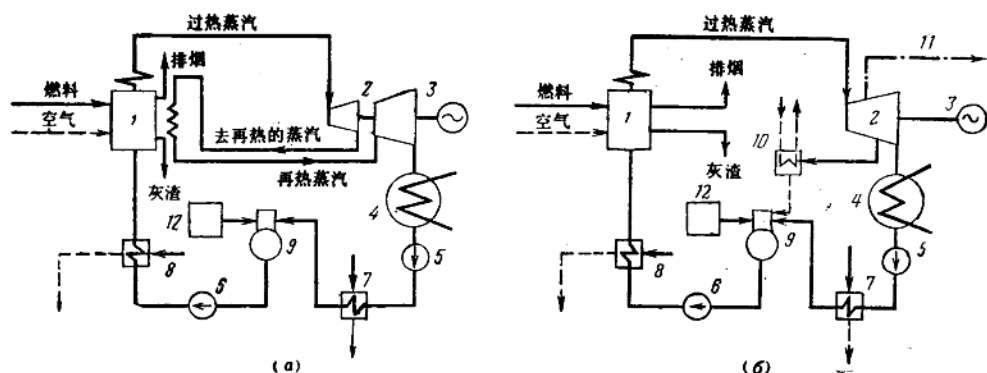


图 1-1 火力发电厂的原则性热力系统

(a) 凝汽式发电厂; (b) 供热式发电厂

1—蒸汽锅炉; 2—蒸汽轮机; 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—热网水加热器; 11—工业抽汽; 12—水处理设备

过热, 此时从汽轮机中间级来的蒸汽两次返回锅炉。中间再过热提高了汽轮机装置的效率, 相应地也降低了生产电能的汽耗率, 还降低了汽轮机低压级中蒸汽的湿度, 并减少了工作叶片的侵蚀磨损。

凝结水用凝结水泵压过低压加热器 (ПНД) 送入除氧器。在凝结水达到沸腾时水中将析出引起设备腐蚀的氧气和二氧化碳。从除氧器出来的水用给水泵打过高压加热器 (ПВД) 送入蒸汽锅炉。凝结水在低压加热器中和给水在高压加热器中的加热, 都是用来自汽轮机的抽汽进行的, 这就是所谓的回热加热。给水的回热加热提高了汽轮机装置的效率, 减少了凝汽器中的热损失。

因此, 在凝汽式发电厂中 (图 1-1, a), 蒸汽锅炉用它产生的蒸汽的凝结水作给水。这种凝结水的一部分损失于电厂系统中, 并构成泄漏损失。在供热式电厂中, 除此之外, 还有部分蒸汽要用来满足工业企业的工艺需要或用于生活热用户。在凝汽式发电厂中, 泄漏损失占总汽耗量的份额不大——约 0.5%~1%, 为了弥补它, 需要在水处理设备中预先处理过的水作为补充水。在热电厂中, 补充水量可达 30%~50%, 甚至更多。

补充水和汽轮机凝结水含有一定杂质, 主要是溶于水中的盐、金属氧化物和气体。这些杂质和给水一起进入锅炉。在汽化过程中水中杂质的浓度会逐渐提高, 在一定条件下它们可能以沉积层的形式沉淀到锅炉工作表面上, 这种沉积层恶化了通过工作面的传热。此外, 水中杂质在汽化过程中也常常转移到蒸汽中, 但是为了避免杂质在汽轮机通流部分沉积, 蒸汽的洁净度应是很高的。根据以上两点原因, 给水不允许有较大的污染; 给水和所生产的蒸汽的允许污染量由专门的标准规定。

保证锅炉工作的设备和机械有: 燃料制备设备; 向锅炉供应给水的给水泵; 供给燃烧用的空气的送风机; 用来把烟气通过烟囱排入大气的引风机, 以及其它辅助设备。蒸汽锅炉和所有上述设备的组合组成锅炉装置。现代大型锅炉装置乃是用来生产蒸汽的复杂的工艺设施, 其中进行的全部工作过程完全是机械化和自动化的; 为了提高工作可靠性, 还装

置有事故自动防护装置。

蒸汽锅炉的发展趋势是：增大单机容量；提高蒸汽的初始压力和初始温度；采用蒸汽中间再过热；控制操作机械化和自动化；为了简化和加速它的安装，设备均制成大型组件并以组件方式供货。

原子能发电厂。实现可调节的重元素原子核裂变链式反应的设备称作核反应堆。作为核燃料既可使用天然的同位素 ^{235}U ，也可使用人工的同位素 ^{233}U 、 ^{239}Pu 等。作为链式裂变反应的结果而释放出来的核能转变成热能，这个热量是由载热质从反应堆中引出的。随原子能发电厂系统的不同，可分为单回路的原子能发电厂、双回路的原子能发电厂和三回路的原子能发电厂。

在单回路的原子能发电厂（图1-2，a）中，蒸汽直接在反应堆中形成。因而，反应堆同时也就是蒸汽发生器。单回路原子能发电厂简单，造价低，它的设备组成数目最少。但在反应堆中辐照的影响下，工质（水和汽）受到污染，因此不仅是反应堆，而且电厂汽水系统的其他设备也都应有生物防护。蒸汽的污染会导致在设备部件内生成沉积。因为这些沉积有放射性，所以设备的检修很困难。

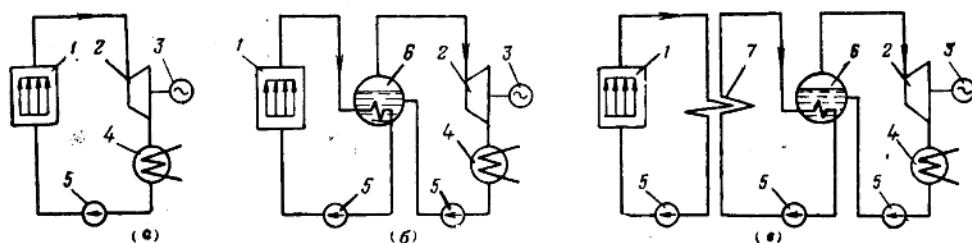


图 1-2 原子能发电厂的原则性热力系统

(a)单回路；(b)双回路；(c)三回路

1—反应堆；2—蒸汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—泵；6—蒸汽发生器；7—中间热交换器

在双回路的原子能发电厂（图1-2，b）中，在反应堆中被加热的液体流、气体流或者熔融金属流乃是载热质，它在蒸汽发生器中将热量传递给工质。因而，在双回路的原子能发电厂中设置了附加设备——蒸汽发生器，它使电厂的造价大为提高。为了在蒸汽发生器中将载热质的热量传递给工质，需要有温差。所以，在采用水作载热质时，进入汽轮机的蒸汽的温度要比单回路原子能发电厂中的为低。具有两个回路就没有必要在反应堆中维持比进入汽轮机的蒸汽压力更高的压力。同时双回路原子能发电厂还有比单回路原子能发电厂优越之处，因为双回路电厂中放射性仅限制在第一回路范围内，所以汽轮机和第二回路中其它设备的解体检修是安全的。生物防护仅在第一回路中才是必须的。

在三回路原子能发电厂（图1-2，c）中，作为第一回路的载热质应用液体钠。在反应堆中辐照的影响下，钠趋于活化，即形成具有高能 γ 射线的同位素。所以第一回路与中间工作回路——第二回路是隔离开的。第二回路的载热质也是钠或者钠-钾合金。为了防止第二回路在第一回路放射性钠的密封性遭到破坏时渗入，第二回路中的压力要维持得比第

一回路中高些。第三回路的工质采用水。在三回路原子能发电厂中，生物防护扩展到前两个回路。

蒸汽燃气联合装置和磁流体动力装置。随着超临界参数蒸汽 ($p=25.5\text{MPa}$, $t_{\text{н.н}}=545^\circ\text{C}$) 和蒸汽中间再过热 ($t_{\text{н.н}}=545^\circ\text{C}$) 的应用、回热的发展、汽轮机组高效率和大功率 (1200MW及以上) 的达到，火力发电厂的热经济性已接近于自身的热力学极限 (效率略高于40%)。进一步提高蒸汽的初参数，由于要使用价格昂贵的高合金钢，汽轮机组的价格就会急剧增加。同时也使保持已经达到的可靠性指标发生困难。

把蒸汽轮机装置 (ПТУ) 与高温的燃气轮机装置 (ГТУ) 结合起来的联合系统已拟定好，并进行了试运行。大家都知道，现时燃气轮机装置在高温部分工作、蒸汽轮机装置在低温部分工作的蒸汽-燃气装置 (ПГТУ) 已引起了大家的实际兴趣。图1-3上示出了两种蒸汽-燃气装置的基本系统。在两个系统中燃气轮机部分都是用高温热量工作的。在图1-3(a)所示的装置中，这个热量是在燃烧室中在向它供入燃料和经压气机压缩过的空气的情况下，通过燃烧释放出来的。在燃烧室中形成的燃气在燃气透平中加以使用。排出的燃气同燃料一起进入生产蒸汽的蒸汽锅炉的炉膛。蒸汽轮机就是用此锅炉生产的蒸汽工作的。在进入锅炉炉膛的燃烧产物中，含有约16%的氧气，因此锅炉的理论空气量预先就不作规定，这样空气预热器也可不要了。蒸汽-燃气装置的燃料消耗率，比相同蒸汽初参数的蒸汽轮机装置要低3%~4%。

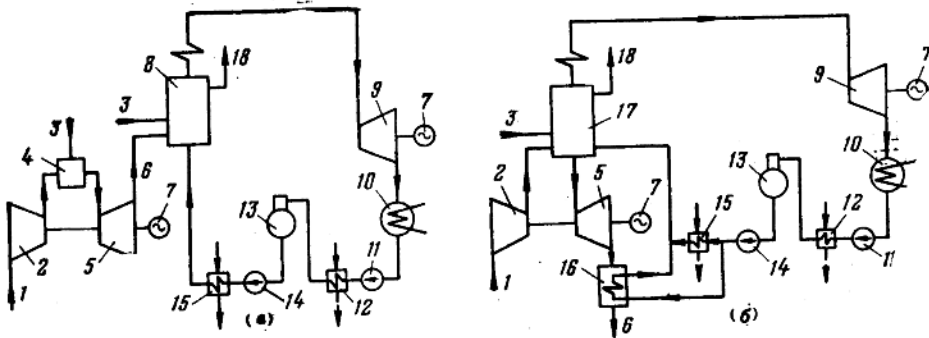


图 1-3 蒸汽-燃气装置热力系统图

- 1—空气；2—压气机；3—燃料；4—燃烧室；5—燃气透平；6—排气；7—发电机；8—蒸汽锅炉；
9—蒸汽轮机；10—凝汽器；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—热交换器；17—增压蒸汽锅炉；18—度烟气

蒸汽-燃气装置的另一种系统 (图1-3, б) 预定要用增压燃烧蒸汽锅炉 (БПК)，在这种锅炉中燃料的燃烧和传热都是在高压 (0.6~0.7MPa) 条件下完成的。这就使得这些过程得以强化，因而同通常的锅炉相比，锅炉可设计成具有较少金属耗量和很小的尺寸。正如同在前一种系统中那样，燃气透平是用高温燃烧产物——增压燃烧锅炉炉膛烟气的热量来工作的。蒸汽轮机是用增压燃烧锅炉产生的蒸汽工作的。燃气透平排出的燃烧产物，被用于生产蒸汽的部分水流加以冷却。在相同的蒸汽初参数条件下，与蒸汽轮机装置

相比，燃料消耗率可降低4%~6%，单位投资也可降低8%~12%。

用核燃料工作的蒸汽-燃气联合装置已研制完成（图1-4）。这里燃烧室为采用气体载热质的动力反应堆代替。作为载热质采用惰性气体——氦，它允许反应堆出口处的温度提高到1500℃以上。高温气冷反应堆可以很有效地应用于设置有蒸汽轮机的原子能发电厂。在用核燃料工作的蒸汽-燃气装置中，蒸汽锅炉乃是利用燃气透平排气余热的装置。

还有一种有蒸汽动力循环参加的联合系统，这就是磁流体动力装置（МГДУ）。它的特点是部分热能不用机器转变成电能（图1-5）。空气在压气机中压缩并在锅炉中加热到1000~1200℃后，再同燃料一起送入燃烧室。在这里生成的燃烧产物，在2500℃被电离。气体电离的强度借助于向燃烧室加入添加剂来达到，添加剂主要是钾、铯和其它碱金属的化合物。

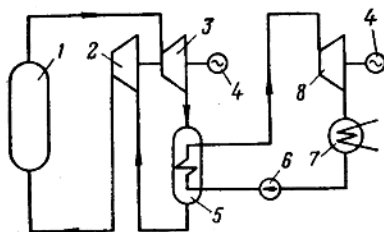


图 1-4 用核燃料工作的蒸汽-燃气联合装置

1—反应堆；2—压气机；3—燃气透平；4—发电机；
5—蒸汽发生器；6—给水泵；7—凝汽器；
8—蒸汽轮机

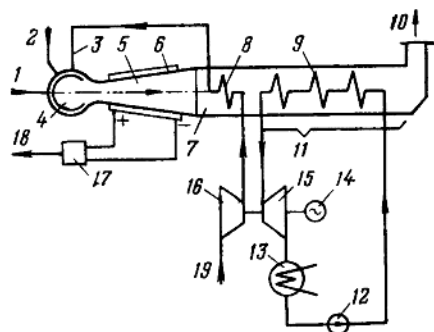


图 1-5 装有磁流体动力装置的发电厂的原则性热力系统

1—燃料；2—电离添加剂；3—热空气；4—燃烧室；
5—磁流体动力通道；6—电磁铁；7—气体通道；8—
空气预热器；9—蒸汽锅炉的受热面；10—燃烧产物排
出口；11—蒸汽锅炉；12—水泵；13—凝汽器；14—
发电机；15—蒸汽轮机；16—压气机；17—直流交流
变换器；18—送入电网的电能；19—空气

具有导电性质的热电离气体（高温等离子体），通过喷嘴进入通道，在通道中以大约700m/s的速度流动。强大的永久磁铁在通道中建立起磁场。等离子体在强大的磁场中运动时，电离的粒子在回路中感应出直流电流，随后它再被转换成交流电流。气流在1500~2000℃的温度下从通道流出。这个高温气体的热量用于加热燃烧室所必须的空气，以及用来产生蒸汽轮机所用的蒸汽。磁流体动力装置的效率可达50%~60%。大约全部电能的70%~80%是在磁流体动力通道中生产的，其余则是在蒸汽轮机装置中生产的。

从分析发电厂生产电能的原则性系统中可以得出结论，火力发电厂中的蒸汽锅炉和原子能发电厂中的蒸汽发生器都是必不可少的设备，也是主要的动力装置之一。蒸汽锅炉和蒸汽发生器用来生产保证汽轮机必须功率所需要的蒸汽量和给定的蒸汽参数。

第二节 蒸汽锅炉的分类

按照相变规律，连续获得过热蒸汽的过程的特点是：给水加热到饱和温度，汽化，以

及最终将饱和蒸汽过热到给定温度。这些过程的进行都有其明确边界，并且是在三组受热面中实现的。在省煤器中水加热到饱和温度，在蒸发（汽化）受热面中产生蒸汽，在过热器中蒸汽得到过热。

为了连续将热量带走以保证受热面金属的正常温度工况，工质在受热面中（水在省煤器中、汽水混合物在蒸发管中、过热蒸汽在过热器中）连续流动。此时水在省煤器中和蒸汽在过热器中相对于受热面作一次性流动（图1-6）。水在省煤器中流动时要产生水力阻力，此阻力由给水泵建立的压头所克服。给水泵所建立的压力应该超过蒸发区开始处的压力，应超过的数值为省煤器的水力阻力。相仿地，蒸汽在过热器中的流动是以蒸发区和汽轮机之间的压差为先决条件的。

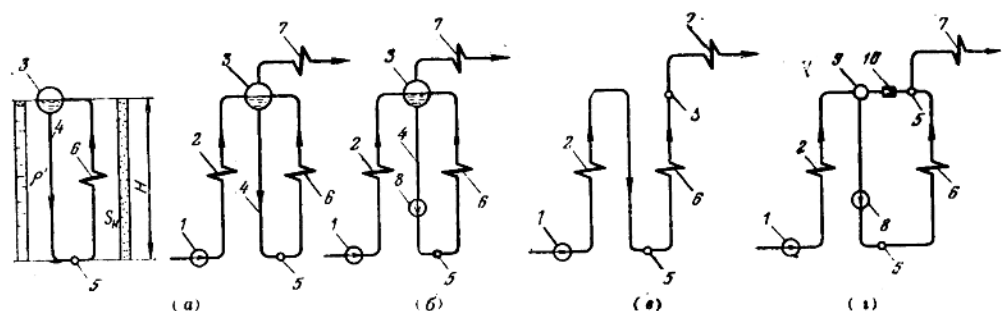


图 1-6 在蒸汽锅炉中生成蒸汽的基本流程

(a) 自然循环；(b) 多次强制循环；(c) 直流系统；(d) 复合循环
1—给水泵；2—省煤器；3—汽包；4—下降管；5—联箱；6—蒸发管；7—过热器；8—多次强制循环泵；9—混合器；10—逆止阀

克服蒸发管中水和汽一起流动的水力阻力的方式，在各类锅炉中是不同的。由此可将锅炉区分为自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉。

自然循环锅炉。我们来研究由两个管系组成的封闭回路的工作（图1-6, a）：在上部用汽包3在下部用联箱5连接的受热管6和不受热管4。由受热管和不受热管组成的封闭水力系统形成循环回路。水占据的汽包容积称作**水容积**，而汽占据的容积则称**汽容积**。汽水容积的分界面称作**蒸发面**。汽包的水容积和生成蒸汽的管子里充满了**锅水**。

在受热管6中，水处于沸腾状态，所以这些管子充满了密度为 ρ_n 的汽水混合物。不受热管4由密度为 ρ' （在汽包压力下）的水所充满。因而，回路的低点——联箱，从一侧承受着充满了不受热管的水柱的压力，它等于 $H\rho'g$ ，而从另一侧则承受着充满了受热管的汽水混合物柱的压力，它等于 $H\rho_n g$ 。生成蒸汽的结果是建立引起回路中工质流动的压差 $H(\rho' - \rho_n)$ ，这个压差称作**自然循环的运动压头**，即

$$S_{\text{ab}} = H(\rho' - \rho_n)g, \quad (1-1)$$

式中 S_{ab} ——自然循环的运动压头，Pa； H ——回路的高度，m； ρ' 和 ρ_n ——分别为水和汽水混合物的密度， kg/m^3 ； g ——自由落体的加速度， m/s^2 。

汽水混合物顺着受热管向上运动，与此相应地，它们得到了**上升管**的名称，而水顺着不

受热管向下运动，这些管子则称作下降管。

这样的机组称作**自然循环锅炉**，就是在生成蒸汽的管子中，工质的运动是在这些管子受热时自然发生的循环压头的作用下建立起来的。

与水在省煤器和蒸汽在过热器中的运动不同，在这两种部件中，工作过程是在工质一次通过其受热面的情况下完成的，而工质在循环回路中的运动则是多次的。也就是说，在通过生成蒸汽的管子的一个循环过程中，水不是完全被蒸发，而仅是部分被蒸发，并以汽水混合物的形态进入汽包。在自然循环条件下，蒸发管出口处的质量含汽率为3%~25%。例如在出口处的含汽率等于20%的情况下，则水要完全蒸发，应当进行五次通过循环回路的流动。

所以，生成蒸汽的过程是连续进行的，送入汽包的给水也应是连续的并与蒸汽流量相适应的，水在回路中整个时间都在循环，并且它的数量是不变的。循环着的水的质量流量 $G_n(\text{kg/s})$ 与单位时间里生成的蒸汽量 $G_v(\text{kg/s})$ 之比，称作**循环倍率**，即

$$k = G_v / G_n \quad (1-2)$$

在自然循环锅炉中，循环倍率在4~30范围内，或更大一些。

在蒸发管里，也可以强制性地组织起工质的流动，例如借助于在回路中接入的泵。这种机组称作**多次强制循环锅炉**（图1-6，б）。在这种情况下，循环的运动压头要超过自然循环情况下的运动压头好几倍。这就使得可以根据锅炉的结构条件来任意地布置蒸发管，即不仅在汽水混合物垂直上升运动情况下，而且在汽水混合物水平甚至倾斜运动情况下，都可在管中组织起循环。在这种型式的蒸汽锅炉中，循环倍率为3~10。

自然循环和多次强制循环锅炉的特点是有汽包——能把循环限制在**封闭水力系统**中并保证水能从蒸汽中分离的容积。汽包汇集了锅炉的所有区段：热水段，蒸发段和过热段。

汽包锅炉在低于临界压力即 $p < p_{kp}$ 下工作。

直流锅炉没有汽包，工质一次流过蒸发管（图1-6，в），因此循环倍率 $k=1$ 。直流锅炉乃是**开式水力系统**。直流锅炉的特点是没有热水段、蒸发段和过热段的汇集点。在直流锅炉的蒸发受热面内，水不间断地转变成蒸汽。直流锅炉可在亚临界压力（ $p < p_{kp}$ ）和超临界压力（ $p > p_{kp}$ ）下工作。

在**复合循环锅炉**（图1-6，г）中，在启动时逆止阀10开启，机组按图1-6（б）之系统工作。在达到一定的负荷时，循环泵被切除，逆止阀自动关闭，锅炉切换成按直流系统（图1-6，в）工作。

第三节 生产蒸汽的工艺系统

图1-7示出了装有直流煤粉炉的汽轮机发电厂中生产蒸汽的工艺系统。块状固体燃料整车送入燃料收卸间。车厢推入**翻车机**，和它一起围绕自己的轴线翻转约180°，把燃料卸入布置在下方的煤斗。借助于自动**给煤机**把燃料送到**第一次提升皮带运输机**上，再把燃料送入**碎煤机**。从这里被粉碎了的燃料——**碎煤**（尺寸不大于25mm）用**第二次提升皮带**送入锅炉煤斗。而后，碎煤进入**磨煤机**，在磨煤机里被最终粉碎并被干燥。生成的煤粉空气

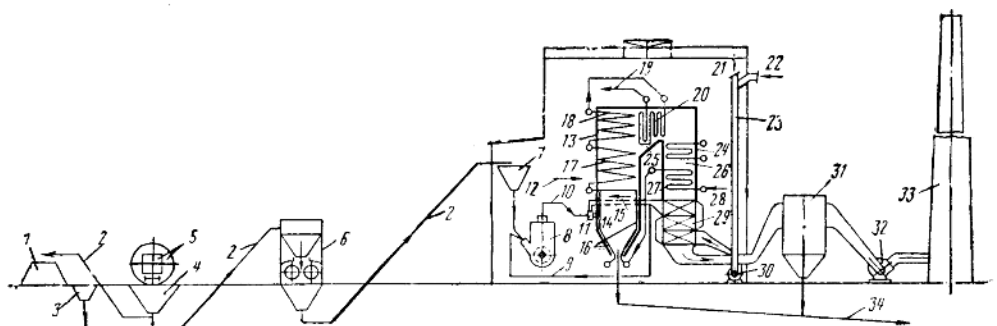


图 1-7 生产蒸汽的工艺流程

1—煤堆；2—皮带运输机；3和4—煤斗；5—翻车机和火车车厢；6—碎煤机；7—碎煤煤斗；8—磨煤机；9—一次风；10—煤粉空气混合物；11—燃烧器；12—炉前；13—蒸汽锅炉；14—炉膛；15—二次风；16—下辐射区；17—中辐射区；18—上辐射区；19—过热蒸汽；20—对流过热器；21—从车间吸入空气；22—室外吸入空气；23—冷风道；24—再热器；25—水平烟道；26—对流井（竖直烟道）；27—省煤器；28—给水；29—空气预热器；30—送风机；31—除尘器；32—引风机；33—烟囱；34—灰渣沟

混合物则进入炉膛。

在苏联的动力事业中，具有Π形断面的蒸汽锅炉（详见第廿一章第一节）得到了最广泛的应用，它是用上部水平烟道连接起来的两个竖直棱柱形竖井。第一个竖井是炉膛尺寸较大，取决于机组容量和所燃用的燃料，它的容积可在很宽的范围内（从1000~30000m³甚至更大）波动。在炉膛四周沿整个壁高布置着成平面的管子系统——水冷壁。它们通过直接辐射从火炬获得热量，因此是辐射受热面。在现代机组中，炉膛水冷壁通常作成相互焊接并形成完全气密（不透气的）壳体的鳍片管。气密性水冷壁系统覆盖有用绝热材料（减少机组的散热损失）构成的外壳，它既保证锅炉间内具有正常的清洁卫生条件，又消除了烧伤工作人员的可能性。

第二个竖井和将其与炉膛连接起来的水平烟道用来布置以对流方式获得热量的受热面，所以它们被称为对流烟道，而垂直竖井本身则称作对流竖井。布置在对流烟道内的受热面，称作对流受热面。

在对炉膛水冷壁放热后，燃烧产物在900~1200℃的温度（取决于燃料种类）下离开炉膛进入水平烟道。

随着在炉膛水冷壁管中的流动，水转变成蒸汽，生成蒸汽的受热面即是蒸发受热面或汽化受热面。在直流锅炉中蒸发受热面布置在炉膛下部，所以被称作下辐射区（HPЧ）。在超临界压力情况下，下辐射区中设置得有辐射式省煤器。进入锅炉的水称作给水。

给水含有杂质。在汽化过程中蒸汽含量增加，此时水被蒸发，杂质浓度增大。在杂质达到一定浓度时，在汽化区的终端，管子内表面会形成锅垢状的沉积。沉积物的导热率比