

600MW 火力发电机组培训教材

600MW HUO LI FA DIAN JI ZU PEI XUN JIAO CAI

热力系统及运行

施 晶 主编



1085831

- * 首套 600MW 级火电机组的新投产培训、岗位技能培训和职业技能鉴定的理想培训教材
- * 突出亚临界、超临界、超超临界压力的 600MW 级机组安装调试、运行维护和检修试验
- * 适用于生产人员、工人、技术人员和管理干部等的上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

600MW 火力发电机组培训教材

热力系统及运行

施 晶 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

2000年由华东六省一市电机工程(电力)学会组编的《600MW火力发电机组培训教材》出版以来,深受600MW级火力发电机组的生产人员、工人、技术人员和管理干部等上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的欢迎。2006年,本套教材全面修订,其内容更贴合了亚临界、超临界、超超临界压力的600MW级火力发电机组的运行技术和性能特点,更好地满足各类电力生产人员的培训需要。

本书是《600MW火力发电机组培训教材》(热力系统及运行)分册,是本套教材新增的一个分册,以使本套教材的内容更全面。本书共11章,主要介绍600MW机组的锅炉汽水系统、锅炉燃烧系统、补给水系统、抽汽及加热器系统、轴封及真空系统、汽轮机疏水系统、发电机辅助系统、汽轮机油系统、机组辅助系统和机组的启停内容。

本书可作为600MW级火力发电机组运行、维护及管理岗位生产人员、工人、技术人员的上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定等的培训教材,也可供大专院校有关专业师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

热力系统及运行/施晶主编. —北京:中国电力出版社,
2010.11
600MW火力发电机组培训教材
ISBN 978-7-5123-1116-9

I. ①热… II. ①施… III. ①火电厂-热力系统-运行-技术
培训-教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第226752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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年4月第一版 2011年4月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 440千字
印数 0001—3000册 定价 45.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

近 10 多年来,大容量、高参数、高效率的大型发电机组在我国日益普及,由于 600MW 火力发电机组具有容量大、参数高、能耗低、可靠性高、环境污染小等特点,在我国《1994—2000—2010—2020 年电力工业科学技术发展规划》、《电力工业技术政策》及《电力工业装备政策》中都把 600MW 机组的开发研究和推广应用作为一项重要内容。自 1985 年以来,全国已有 100 多台的 600MW 机组陆续地投入电网运行,他们即将成为我国电力系统的主力机组。为了确保 600MW 机组的安全、稳定、经济运行,600MW 机组岗位运行、技能鉴定和继续教育等培训工作就显着十分重要了。

为适应这一形势发展的需要,使广大生产岗位工人、技术人员和管理干部熟悉、了解和掌握 600MW 火力发电机组的技术性能和特点,2004 年华东地区六省一市电机工程(电力)学会组织启动了《600MW 火力发电机组培训教材》(第一版)的修订工作,并历时两年完成了此套图书的编审工作,《600MW 火力发电机组培训教材》(第二版)于 2006 年陆续出版。

本书名为《热力系统及运行》,是作为《600MW 火力发电机组培训教材》(第二版)新增的一个分册,以使本套培训教材内容上更为全面。

目前,国内已投运及在建的 600MW 机组以超临界参数为主,超临界机组的热效率比亚临界机组高 2%~3%,这一容量机组也是我国火电建设中大力发展的系列,华能石洞口第二电厂 2×600MW 超临界机组为中国首次从国外引进的具备当时国际先进水平的 600MW 超临界火力发电机组,此两台机组自 1992 年投产运行以来,已安全可靠发电 17 年。机组的安全运行也为超临界机组的技术引进国产化水平提供了很好的借鉴意义,本书重点以此机组为参照对 600MW 机组热力系统进行介绍分析,可为大机组运行人员提供借鉴。

本书共十一章,内容包括 600MW 机组的锅炉汽水系统、锅炉燃烧系统、补给水系统、抽汽及加热器系统、轴封及真空系统、汽轮机疏水系统以及发电机辅助系统、汽轮机油系统、机组辅助系统和机组的启停内容。全书重点讲述 600MW 超临界机组热力系统工作流程、系统特点及机组各热力系统的运行内容。

本书由石洞口第二电厂施晶主编,在编写过程中还得到了樊哲军、陈志刚、范洪章、宋子凯、王永康、舒庆元等同志的大力支持与帮助,在此表示感谢。同时,大唐国际托克托电厂韩志成审阅了书稿,并提出宝贵的完善意见及有关技术资料,在此表示由衷的谢意。

由于水平有限,加之时间仓促,书中疏漏及不当之处还请广大读者提出批评,以便改进。

编 者

2010 年 11 月

目 录

前言

第一章 概述	1
• 第一节 超临界和超超临界的概念	1
• 第二节 机组热力系统工作原理	4
• 第三节 机组的热力系统	7
• 思考题	9
第二章 锅炉汽水系统	10
• 第一节 主蒸汽、再热汽及旁路系统	10
• 第二节 锅炉启动系统	23
• 第三节 锅炉减温水系统	33
• 第四节 锅炉吹灰系统	36
• 思考题	50
第三章 锅炉燃烧系统	51
• 第一节 锅炉制粉系统	51
• 第二节 锅炉风烟系统	68
• 第三节 锅炉燃油系统	88
• 思考题	96
第四章 补给水系统	99
• 第一节 凝结水及补水系统	99
• 第二节 给水系统	108
• 思考题	138
第五章 抽汽及加热器系统	140
• 思考题	149
第六章 轴封及真空系统	151
• 第一节 真空系统	151
• 第二节 轴封系统	154
• 第三节 故障处理	158
• 思考题	159
第七章 汽轮机疏水系统	161

• 思考题	164
第八章 发电机辅助系统	165
• 第一节 发电机氢气系统	165
• 第二节 发电机密封油系统	172
• 第三节 发电机定冷水系统	178
• 思考题	184
第九章 汽轮机油系统	186
• 第一节 汽轮机油系统及净油系统	186
• 第二节 汽轮机液压油系统	194
• 思考题	198
第十章 机组辅助系统	200
• 第一节 工业水系统	200
• 第二节 循环水系统	202
• 第三节 闭冷水系统	213
• 第四节 辅汽系统	219
• 第五节 仪用气及杂用气系统	221
• 思考题	230
第十一章 600MW 机组的启停	231
• 第一节 600MW 机组冷态启动	231
• 第二节 600MW 机组滑参数停机	245
• 思考题	254

概 述

建设火力发电厂的目的是把燃料的化学能转换成电能，并由送变电设施把电能输送到各个用户。从经济角度考虑，还希望用较少的燃料，发出尽可能多的电能。这就要求电厂既要安全、可靠，又要有较高的总效率。因此，选择良好的发电设备，组成科学有序的热力系统，并且培养一支技术过硬的运行队伍，是建设现代化电厂首要任务。

全世界能源供应的日益紧张以及对环境保护要求的日益严格，促使火力发电机组采用更高的参数以获得更佳的效率，同时，新材料的开发成功也为大容量、高参数机组的制造和应用从技术上提供了条件。事实上，自从锅炉、汽轮机成为大规模火力发电的主要动力机械以来，其发电机组一直沿着不断提高蒸汽参数、增大单机功率、改进材料性能和制造工艺、提高自动化水平的方向发展。其经济性、安全性、可靠性、清洁性、灵活性以及自动化程度都在不断地改善。

600MW 级燃煤机组是世界多数工业发达国家重点发展的火电厂主力机组，在一些国家火力发电机组标准系列中是一个重要的级别。这一容量等级的机组也是目前我国火电建设中将要大力发展的系列之一。从 1992 年我国第一台引进的 600MW 超临界机组在石洞口第二电厂投运开始，先后有沁北电厂的 600MW 超临界机组、营口电厂的 600MW 超超临界机组、外高桥电厂的 900MW 超超临界机组、玉环电厂和邹县电厂的 1000MW 超超临界机组等相继投产。最近几年 600MW 及 1000MW 级的超临界或超超临界机组更是以超常规的速度发展，至 2010 年 5 月全国已投入运行的 600MW 及以上超临界或超超临界机组已接近 300 台，标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段。

第一节 超临界和超超临界的概念

一、水蒸气的热力学特性

物质由液态变为汽态的现象称为汽化，汽化通常有两种方式：蒸发和沸腾。蒸发是液体表面缓慢的汽化现象，它在任何温度下都会发生；沸腾是液体表面和内部同时发生的剧烈汽化现象，它相对于一定的压力，只能在一定的温度下发生，该沸腾温度称为沸点。一般而言，同样条件下，不同液体的沸点是不同的；同种液体，压力越高，沸点越高。沸腾时气体与液体共存，两者温度相同，沸腾过程中，温度始终保持为沸点。

将装有水的容器密闭起来，保持一定温度，显然，水会汽化，随着水的汽化，水面上部空间的水蒸气增多，即蒸汽压力要升高，蒸汽压力升高使蒸汽液化速度加快，而使水汽化速度减慢，到某一时刻，当水汽化速度与水蒸气液化速度相同时，容器内水量和空间水蒸气量不再变化。我们把这时汽、液两相达到平衡时的状态称为饱和状态。这种平衡状态不是静态的平衡，而是一种动态平衡，即汽化、液化过程仍在进行，只是汽化速度与液化速度相同而已。处于饱和状态下的水和水蒸气分别称为饱和水与饱和蒸汽。此时饱和水与饱和蒸汽的压力和温度相同，称为饱和压力与饱和温度。这种蒸汽和水共存的状态称为湿饱和蒸汽。如果对容器进行加热，那么水的汽化

会加快，水逐渐减少，水蒸气逐渐增多，直至水全部变为蒸汽，这时的蒸汽称为干饱和蒸汽。

当水温低于饱和温度时，称为过冷水，或未饱和水。如果对干饱和蒸汽继续进行加热，使蒸汽温度进一步升高，这时的蒸汽称为过热蒸汽，其温度超过饱和温度的值，称为过热度。

临界点（相变点）：一个大气压下的水的饱和温度为 100°C 。随着压力增加，水的饱和温度也随之增加，汽化潜热（从饱和水加热到干饱和蒸汽所需热量）减小，水和汽的密度差也随之减小。当压力提高到 221.2bar 时，汽化潜热为零，汽和水的密度差也为零，该压力称之为临界压力。水在该压力下加到 374.15°C 时，即全部汽化，此时的饱和水和饱和蒸汽已不再有区别，该温度称之为临界温度。

二、超临界机组的概念

水作为火力发电机组热力系统的常用工质，具有其自身的物理特性，在压力较低的情况下，当水被加热成为水蒸气的过程中，有一个汽、水共存的汽化阶段。但是在压力提高到临界参数的情况下，水从液态转化成气态（水蒸气）的过程中不再有汽化这一阶段，即水完全汽化在一瞬间完成，在饱和水和饱和蒸汽之间不再有两相区存在。

由于水的临界状态点的参数为 22.12MPa 、 374.15°C ，因此将锅炉出口蒸汽的参数高于临界状态点的机组即称为超临界机组，而锅炉出口蒸汽的参数低于临界状态点的机组即称为亚临界机组。目前我国投产的超临界机组锅炉的出口参数大多为 $25.4\text{MPa}/541^{\circ}\text{C}/569^{\circ}\text{C}$ （对应的汽轮机进口参数为 $24.2\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ ）。

由于在超临界参数后，水的汽化过程已经不存在，水的汽化过程在高于临界参数与低于临界参数时有很大的区别，所以超临界火力发电机组的结构型式以及运行方式等都有其自身的特点，例如，超临界锅炉必须采用直流锅炉，如采用汽包炉，在超临界参数状态下运行，汽包水位是无法监视的（饱和水和饱和蒸汽之间已不存在两相区别）。

三、超超临界机组的概念

锅炉出口蒸汽参数越高，机组效率越高，但锅炉出口蒸汽参数受金属材料、制造工艺等因素的限制。早在 1979 年，日本的电源开发公司首次提出“超超临界”蒸汽参数的概念，超超临界机组是相对于常规超临界机组的蒸汽参数而言的，与超临界的概念有明确的物理定义区别。但是进入超临界后参数如何分挡，目前世界上还没有定论，对超临界和超超临界参数的划分还没有统一的标准。不同国家的超超临界机组有不同的参数系列。日本提出超超临界机组为蒸汽压力 $\geq 24.2\text{MPa}$ ，蒸汽温度 $\geq 593^{\circ}\text{C}$ 的机组；而丹麦的标准为蒸汽压力 $\geq 27.5\text{MPa}$ ；1997 年，西门子公司则以采用“ 600°C 材料”的机组来区分。尽管这样，国际上普遍认为，在常规超临界参数的基础上压力和温度再提升一个档次，也就是主蒸汽压力超过 24.2MPa ，或者主蒸汽温度/再热蒸汽温度超过 566°C ，都属于超超临界的范畴。目前国际上已经在运行或正在设计建设的超超临界机组压力参数分为 25MPa 、 27MPa 和 $30\sim 31\text{MPa}$ 三个级别，温度则为 $580\sim 620^{\circ}\text{C}$ 。

我国电力百科全书认为主蒸汽压力 $\geq 27\text{MPa}$ 为超超临界机组。2004 年 2 月，我国国家高新技术研究发展计划（863 计划）“大型超超临界火电技术研究”课题确定超超临界机组将是中国火电的发展方向，并确定现阶段超超临界蒸汽参数为： $25\sim 28\text{MPa}/580\sim 600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ ，机组容量为 $700\sim 1000\text{MW}$ 。有专家认为，这只是我国超超临界机组的起步参数，专家预计，未来 $10\sim 20$ 年间将开发蒸汽参数更高、达到 $30\sim 35\text{MPa}/650\sim 700^{\circ}\text{C}$ 的二次再热机组，机组效率向 $50\%\sim 55\%$ 迈进。目前国内已经建成投产的 600MW 级及 1000MW 级超超临界机组汽轮机进口初参数为 $25\sim 26.25\text{MPa}$ 、主蒸汽/高温再热蒸汽温度为 $600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 。

四、石洞口第二电厂 $2\times 600\text{MW}$ 超临界机组概况

华能上海石洞口第二电厂是华能国际电力股份有限公司的直属电厂。电厂一期拥有中国首次

从国外引进的具有 80 年代末国际先进水平的两台 600MW 超临界火力发电机组。电厂一期工程由美国萨金伦迪公司 (SARGENT AND LUNDY) 总体设计, 于 1998 年开工建设, 1992 年实现双投。

石洞口第二电厂 $2 \times 600\text{MW}$ 超临界机组锅炉由美国燃烧公司和瑞士苏尔寿公司 (CE-SULZER) 合作设计制造, 为超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉, 单炉膛, 一次中间再热, 四角切圆燃烧方式, 平衡通风, II 型露天布置, 固态排渣, 全钢架悬吊结构。锅炉设计煤种为东神神木煤, 校核煤种为晋北煤。

锅炉设计为带基本负荷并参与调峰。在 $35\% \sim 100\%$ 负荷范围内以纯直流干态运行, 在 35% 负荷以下为湿态运行。

制粉系统采用中速磨煤机直吹式制粉系统, 每炉配 6 台磨煤机, 煤粉细度按 200 目筛通过率为 75% , 磨煤机单台最大容量为 54.9t/h 。

机组配置 $2 \times 50\% \text{BMCR}$ 调速汽动给水泵和一台启动用 $40\% \text{BMCR}$ 容量的电动调速给水泵。

旁路系统采用高低压串联旁路。高压旁路容量为 $4 \times 25\%$; 低压旁路容量为 65% 。

石洞口第二电厂 $2 \times 600\text{MW}$ 超临界机组汽轮机由瑞士 ABB 公司设计制造, 为超临界压力、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、反动、凝汽式汽轮机 (D54 型), 额定蒸汽参数为 $242\text{bar}/538^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$, 额定功率 600MW , 最大连续出力 627.7MW , 调门全开出力 643.7MW 。从汽轮机机头看为顺时针方向旋转。

石洞口第二电厂 $2 \times 600\text{MW}$ 超临界机组发电机由瑞士 ABB 公司设计制造, 为 50WT23E-128 型三相同步汽轮发电机。发电机额定容量 719.084MVA (氢压 $4.6\text{kg}/\text{cm}^2$, 氢温 45°C , $\cos\phi$ 为 0.9), 发电机最大输出功率 747.0MVA ($\cos\phi$ 为 0.9 时)。

发电机采用水氢氢冷却方式: 定子绕组水内冷, 转子绕组和定子主出线氢内冷, 铁芯轴向氢冷。

石洞口第二电厂 $2 \times 600\text{MW}$ 超临界机组 DCS 系统配置了当时自动化水平较高的仪控设备。主要仪控设备采用加拿大 (Bailey) 公司的 Network-90 系统, 2007、2008 年先后对两台机组的 DCS 系统进行了升级改造, 现为瑞士 ABB 公司的 SYMPHONY 控制系统, 该系统的覆盖面有锅炉和汽轮机的模拟量控制系统 (BCS)、锅炉燃烧管理系统 (BMS)、机组辅助设备的顺序控制系统 (SCS)、数据采集系统 (DAS)、命令管理系统 (MCS)、机组自启停系统 (UAM) 和大连锁保护系统 (PRO)。

汽轮机 DEH 控制系统采用瑞士 ABB 公司的 PROCONTROL P 分散控制系统, 产品型号为 TURBOTROL5, 2007、2008 年 DCS 改造时同步进行了改造。

给水泵汽轮机电液控制系统 (MEH) 采用瑞士 ABB 公司的 PROCONTROL-P 分散控制系统, 产品型号为 TURBOTURN, 2007、2008 年 DCS 改造时同步进行了改造。

DCS 系统改造后汽轮机 DEH 及给水泵汽轮机 MEH 进入机组 DCS SYMPHONY 控制系统。

高压旁路控制采用瑞士苏尔寿公司设计制造的有独立液压油和喷水减温调节回路的 AV-6 系统。

低压旁路的控制系统为瑞士 ABB 公司的 PROCONTROL P 分散控制系统。

因机组热力系统复杂, 在对各个系统工作流程及逻辑关系等的介绍方面为表述清晰, 本书将以石洞口第二电厂 $2 \times 600\text{MW}$ 机组 (以下简称“本机组”或“该机组”) 作为参照进行表述。600MW 级超临界机组的热力系统运行参数大同小异, 因此对本机组热力系统及运行的介绍, 可为同类机组的运行提供很好的借鉴。

第二节 机组热力系统工作原理

一、工质传热方式及各自特点

锅炉是把燃料的化学能转变为蒸汽热能的一种设备。为了使这种能量的转换更为有效，除了组织好燃料在炉内燃烧外，还要求把所产生的热量通过锅炉受热面传送给水和蒸汽。锅炉的热量传递有传导、对流和辐射三种方式。

(一) 热传导

热量从一个物体的高温部分传到低温部分，或两个不同物体紧密接触时热量从高温物体传到低温物体的现象，称为热传导或导热。导热不仅可发生在固体壁面中，同样也可发生在气体和液体中，但气体和液体的导热同时伴有对流，不属于纯导热。

导热可分为两类，稳定导热和不稳定导热。如果在导热过程中，壁面各处的温度不随时间变化而变化，这种导热称为稳定导热，如正常运行时锅炉炉墙的导热，汽轮机汽缸壁中的导热都属于稳定导热。一般来说，正常运行条件下热力设备壁面中的导热都可视为稳定导热。如果导热过程中壁面各处温度随时间变化而变化，这种导热称为不稳定导热。如机组启动时，炉墙各部分温度逐渐升高，汽轮机汽缸壁、转子各部分温度逐渐升高，这些情况中的导热都属于不稳定导热。一般来说，机组启、停或变工况运行时，热力设备壁面中的导热都可视为不稳定导热。

不同物质的导热性能不同，常用导热系数来衡量物质导热性能的好坏，导热系数越大，物质的导热性能就越好。

(二) 热电流

流体与流体之间发生相对位移时的热量传递现象称为热对流。自然界中的风就是典型的热对流现象，即热、冷空气间的对流。火电厂换热设备中，流体与壁面直接接触，且存在温差，这种由于温差而使流体与壁面之间发生的热量传递现象称为对流换热，如锅炉受热面管内流体与管内壁或管外烟气与管外壁间都存在着对流换热。

对流换热实质上是流体与壁面、流体与流体的导热及流体与流体间的热对流共同作用下换热方式。因此，对流换热除了受导热规律支配外，还要受流体流动规律的影响，很显然对流换热要比导热复杂得多。

(三) 热辐射

当我们打开锅炉看火孔时，会立刻感到脸部灼热，这是由于炉内火焰或高温烟气的热量传到我们脸部的缘故。那么，热量是通过什么方式传到我们身上的呢？显然，这不可能是空气导热的结果，因为空气的导热系数很小，不可能传导这么多的热量，也不可能传导得这么快。是对流吗？也不是，因为锅炉处于负压运行，火焰或高温烟气不会向外冲，只有冷空气由炉外进入炉膛。因此，热量是通过另一种方式传到我们身上的，这种不需要物质直接接触便可进行热量传递的方式就是热辐射。太阳的能量能传到地球也是热辐射的作用。

热辐射的原因是由于热的物体向外发射电磁波的过程。理论和实验都表明，物体只要有一定的温度，就会不停地向外以电磁波的方式发射辐射能。

辐射换热的特点如下：

- (1) 热辐射不需要介质就可进行热量传递。
- (2) 只要物体温度大于0 (K) (K为绝对温标单位，零点规定为分子绝对停止运动时的温度)。物体表面便不停地向外发出辐射能。
- (3) 辐射换热中伴随有能量的转换。

二、朗肯循环

电厂必须连续生产电能，为此要求热能动力系统连续不断地将热能转变为机械能。如果只依靠工质（在热能向机械能转换过程中起媒介作用的物质称为工质）的膨胀过程将热能转变为机械能，那么工质膨胀到一定程度就失去了做功能力，做功过程也就随之结束。这样是无法完成连续不断地将热能转变为机械能的。因此，必须在工质膨胀做功后经历某些过程，使它恢复到原来状态，以便能再进行膨胀做功过程，这样就能连续不断地转变为机械能。把工质经历一系列状态变化又回到原来状态的全部过程，称为一个热力循环。

蒸汽动力循环是指以水蒸气为工质的动力循环，朗肯循环是火电厂广泛采用的基本动力循环。朗肯循环依次由四个过程组成：定压加热过程、绝热膨胀过程、定压放热过程和绝热压缩过程。它们分别在火电厂中的锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵中完成。朗肯循环装置示意如图 1-1 所示，其作用和工作原理如下：

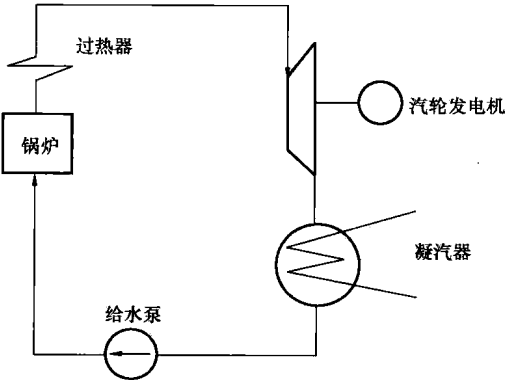


图 1-1 朗肯循环装置示意图

- (1) 锅炉（带有省煤器、水冷壁和过热器）：给水在锅炉中定压加热为过热蒸汽，即主蒸汽，然后由蒸汽管道输送给汽轮机。
- (2) 汽轮机：蒸汽在汽轮机中绝热膨胀做功，将部分热能转变为汽轮机转子的机械能，然后将做功后的蒸汽（即乏汽）排入凝汽器。
- (3) 凝汽器：乏汽在凝汽器中定压放热给冷却水（循环水），并凝结为凝汽器工作压力下的饱和水，即凝结水。凝汽器的工作压力可看成是汽轮机排汽压力。
- (4) 给水泵：凝结水在给水泵中绝热压缩升压后送回锅炉，成为锅炉给水。

这样，工质完成了一次朗肯循环，再周而复始，不断将热能转变为机械能。

朗肯循环在 p - V 、 T - S 图上的表示，如图 1-2、图 1-3 所示。

图 1-2 中 4→5→6→1 过程为给水在锅炉中被定压加热成蒸汽的过程，其中 4→5 是水定压预热为饱和水，5→6 是饱和水定压汽化成饱和干蒸汽，6→1 是干蒸汽定压加热为过热蒸汽，1→2 过程为过热蒸汽在汽轮机中绝热膨胀做功的过程，3→4 是凝结水在给水泵中被绝热压缩为给水的过程。

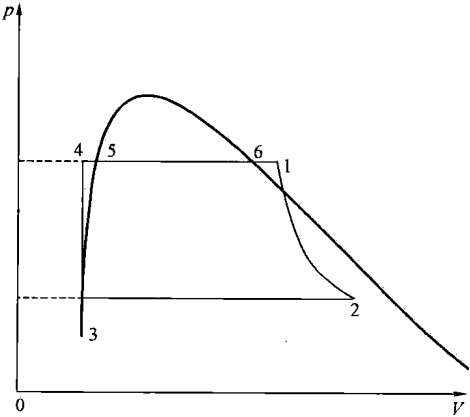


图 1-2 朗肯循环在 p - V 图上的表示

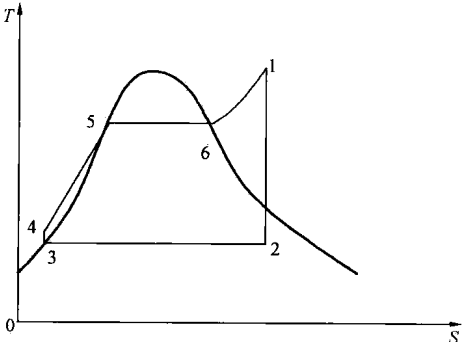


图 1-3 朗肯循环在 T - S 图上的表示

在朗肯循环 T - S 图上, 定压线 $4 \rightarrow 5$ 与饱和水线十分靠近, 可认为与饱和水线重合, 此外 $3 \rightarrow 4$ 过程为定熵压缩水时, 水温变化很小, 可认为压缩前后水温相同, 这样 3 、 4 两点相重合。 $4 \rightarrow 1$ 为水在锅炉中定压加热过程, 因此, 朗肯循环的 T - S 图通常简化为如图 1-4 所示。

图 1-4 中, $3 \rightarrow 4$ (重合) 为水在给水泵中被绝热压缩, 比容基本不变, 温度和焓略有升高, 熵不变。 $4 \rightarrow 5$ 是不饱和水在省煤器中定压加热到饱和水, 比容、焓、熵都增加。 $5 \rightarrow 6$ 是饱和水在水冷壁中定压加热成干蒸汽, 温度不变, 比容、焓、熵都增加。 $6 \rightarrow 1$ 是把干蒸汽在锅炉过热器中定压加热成过热蒸汽, 温度、比容、焓、熵都增加。 $1 \rightarrow 2$ 为过热蒸汽在汽轮机中绝热膨胀过程, 压力、温度降低, 比容增加, 焓降低, 熵不变。 $2 \rightarrow 3$ 为排汽 (乏汽) 在凝汽器中定压放热凝结过程, 温度不变, 比容、焓、熵减小。

超临界机组在超临界参数状态下在 T - S 图上的循环过程, 如图 1-5 所示。

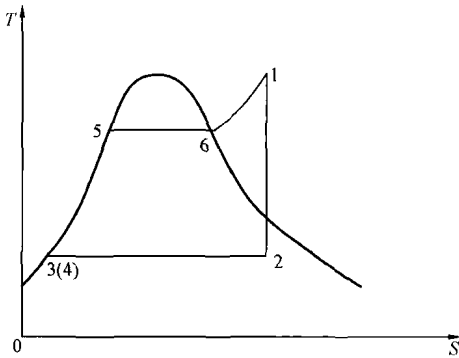


图 1-4 朗肯循环在 T - S 图上的简化图

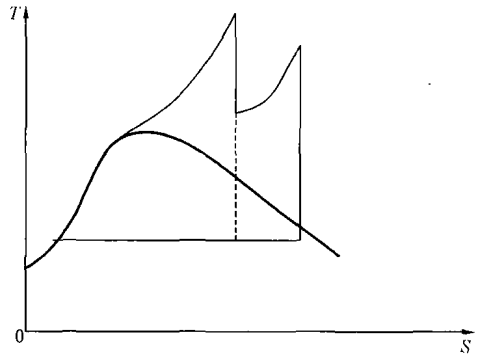


图 1-5 机组在超临界参数状态下 T - S 图

三、热力基本状态参数

1. 温度

通俗地说, 温度就是物质的冷热程度。衡量温度的标尺有两种: 摄氏温标和绝对温标 (或称热力学温标)。在摄氏温标中, 温度用 t 表示, 单位为 $^{\circ}\text{C}$, 其零点规定为标准大气压下, 纯水的冰点, 即 $0(^{\circ}\text{C})$; 将纯水的沸点定为 $100(^{\circ}\text{C})$ 。在绝对温标中温度用 T 表示, 单位为 K , 其零点规定为分子绝对停止运动时的温度, 即 $0(\text{K})$, 相当于摄氏温标中的 $-273(^{\circ}\text{C})$ 。

两者的关系为:
$$T = t + 273(\text{K})$$

2. 压力

物体单位面积上所受到的作用力, 用符号 p 表示, 气体的压力可理解为大量气体分子在做无规则热运动时对容器壁面连续碰撞产生的综合结果, 常用单位有 kPa 、 bar 、 MPa 。

$1\text{MPa} = 10\text{bar}$;

$1\text{MPa} = 1000\text{kPa}$;

$1\text{bar} = 100\text{kPa}$ 。

大气压力——大气环境中物体受到的大气的作用力;

绝对压力——工质的真实压力;

表压力——压力表指示的压力;

真空——真空表指示的值, 表示工质真实压力低于大气压力的数值, 即

真空 = 大气压力 - 绝对压力

用压力表计或真空表测量压力时, 由于压力表和真空表总是处于大气环境中 (这些表计指针指零时, 实际处于大气压力平衡中) 压力表或真空表的读数只表示工质的真实压力与大气压力的

差值，并不代表工质的真实压力，所以

$$\text{绝对压力} = \text{表压力} + \text{大气压力}$$

3. 比容

单位质量工质所占的容积称为比容，比容用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。对于一定量的工质，比容越大，所占的容积越大。蒸汽在汽轮机中膨胀做功时，比容是不断增大的，汽轮机末级蒸汽的比容比第一级大几百倍。

4. 比热

单位量的气体温度升高或降低 1°C 所吸收或放出的热量，用符号 q 表示，单位为 kJ/kg 。

5. 内能

工质内部储存的能量称为内能，用 U 表示，单位为 kJ ，对于 1kg 工质具有的内能，用 u 表示，单位为 kJ/kg 。内能由两部分组成：①内动能：工质的分子或原子时刻不停地做无规则热运动而具有的能量，内动能取决于工质的温度；②内位能：克服分子间的作用力具有的能量，内位能取决于工质的比容和压力。

6. 焓

焓的定义是： $H=U+PV$ ，其中 U 是物质的内能， PV 是其推动力。工质在流动过程中要进出某个设备时，工质必须推开它前方的流体才能前进，这部分能量为工质压力与容积的乘积。物质的内能加上其推动力，即物质移动时所传输的能量。在热力设备中，工质总是不断地从一处流到另一处，随着工质的移动而转移的能量不等于内能而等于焓，用 H 表示，单位为 kJ ；对于 1kg 工质，焓用 h 表示，单位为 kJ/kg 。电厂热力设备中工质都是流动的，因此衡量工质具有的能量是焓，而不是内能。在 1 个标准大气压下，温度为 0°C 的气体其焓值为 0 。

7. 熵

熵没有直接的定义。熵用符号 S 表示，单位为 kJ/K ，对于 1kg 工质，用 s 表示，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。熵的变化量等于加热量与加热绝对温度的比值。对于可逆过程，熵的变化量表明工质有无吸放热。如经历某个可逆过程后，工质熵增大，表示工质吸热；工质熵减少，表示工质放热；工质熵不变，表示工质绝热。

第三节 机组的热力系统

一、热力系统组成

发电厂的任务是将燃料中的热能转变为电能，这种转化是根据已定的热力循环通过一系列设备来完成的。将全厂热力设备按照热力循环的顺序，由汽、水管道及附件连接成的有机整体称为发电厂的热力系统。火电厂的热力系统有母管制和单元制两种，在母管制系统中，可有多台锅炉和多台汽轮机，每台锅炉产生的蒸汽均送入主蒸汽母管，汽轮机则从主蒸汽母管取得蒸汽，锅炉与汽轮机之间没有一一对应的关系，系统错综复杂。为了简化热力系统，节约投资，提高机组的热效率，现代大容量高参数机组都是采用一机一炉的单元制热力系统，锅炉、汽轮机、发电机纵向串联成一个整体，尤其对中间再热机组，只能采用单元制运行方式。本书以南方某 600MW 超临界机组的热力系统为基础，详细叙述火力发电厂各热力系统的构成、作用及其运行。

热力系统中包括工质流过并在其中发生状态变化的各种设备，除锅炉和汽轮发电机外，还有凝汽设备、给水回热加热器、除氧器、补充水处理设备、减温减压设备，以及各种水泵等。整个热力系统可以看作一部庞大而复杂的机器，任何部分发生故障或事故，都会影响整个发电厂的安全和经济运行。当然，为了维持发电厂热力系统的安全经济运行，还需一些辅助系统提供支持和

保障,包括冷却水系统、压缩空气系统、汽轮机油系统、发电机密封油系统、发电机氢气系统、发电机定冷水系统,等等。

火力发电厂在选定了锅炉和汽轮机后,就应根据锅炉、汽轮机制造厂提供的本体汽水系统来拟定机组的热力系统及相应的辅助系统。火力发电厂热力系统及辅助系统主要包括:

(1) 锅炉汽水系统。主要由主蒸汽、再热汽及旁路系统,锅炉启动系统,锅炉减温水系统,锅炉吹灰系统组成。

(2) 锅炉燃烧系统。主要由制粉系统、风烟系统及燃油系统组成。

(3) 机组补给水系统。主要由凝结水及补水系统、给水系统组成。

(4) 机组抽汽及加热器系统。

(5) 机组轴封系统。

(6) 汽轮机疏水系统。

(7) 发电机辅助系统。主要由氢气系统、发电机密封油系统及定冷水系统组成。

(8) 汽轮机油系统。主要由汽轮机润滑油及净油系统、汽轮机液压油(EH)系统组成。

(9) 机组辅助系统。主要由工业水系统、循环水系统、闭冷水系统、辅汽系统、仪用及杂用气系统组成。

二、机组的运行

机组的运行状态决定着整个电厂的安全性和经济性。单元制机组是炉-机-电串联构成的一个不可分割的整体,其中任何一个环节运行状态发生变化都将引起其他环节运行状态的改变。600MW 机组全部采用单元制集中控制,自动化程度高。其运行控制的基本任务是能快速地满足外界负荷的要求,同时保证机组的稳定经济运行。负荷控制的目标就是控制锅炉和汽轮发电机的各自出力相互适应,而相互适应的标志是主汽压的稳定程度。根据单元机组不同的运行工况,在机组负荷控制方式上有锅炉跟随汽轮机方式、汽轮机跟随锅炉方式和机炉协调控制方式。从机组的变负荷的参数调节特性上,可分为定压运行、滑压运行等运行方式。单元制机组的锅炉、汽轮机和发电机的运行调节既密切相关,又各有所侧重,锅炉侧重于运行调整控制,主要包括燃烧调整和蒸汽温度、压力、流量及品质的控制;汽轮机侧重于运行监视,主要包括各部位温度、压力、振动及转速、轴向位移、差胀、应力等参数;发电机的运行则着重于单元机组与外界电网的联系,主要包括有功、无功、电压、电流、频率等。

当机组遇到异常工况或机组运行工况大幅度变化时,应视实际情况及时解除有关的自动调节,进行手动调整并使机组各项运行参数尽快稳定。在调整燃料量、风量、给水量以及锅炉主汽温、再热汽温时,应注意调整幅度,不要过调,以防止煤水比失调。还应协调好机组的各个状态参数,避免运行参数大范围波动而造成机组异常或事故扩大。

由于单元制机组采取集中控制,因此对运行人员的素质和能力提出了更高的要求,机组值班人员也由过去的单一专业发展成集锅炉、汽轮机、发电机,甚至包括热工自动、电力系统与自动、继电保护等相关专业于一身的全能型机组值班员。机组在正常运行时,目前国内火电厂普遍采用一名机组值班员监盘操作;在机组启动、停机和异常工况处理时,则需要一名备用机组值班员或助理值班员协助共同完成机组的操作调整任务;另外,整台机组的正常运行还需配备1~2名机组巡操员完成就地运行设备的巡检、操作。

机组的外围系统,像煤、灰渣、水处理、脱硫、脱硝、脱碳等一些相对独立的辅助系统,则自成系统,相对于整台机组来说则是“分散式集中控制”。对于机组外围系统的运行管理,目前国内电厂有多种运行管理模式:既有电厂完全自己运行管理;也有运行人员外包,电厂参与管理;还有外围系统运行管理完全外包。关于机组的外围系统这里不作介绍。

思考题

1. 什么是临界点？超临界与超超临界的含义？
2. 传热方式有哪几种？各自有何特点？
3. 朗肯循环在 T - S 图上如何表示？各线段表示什么热力过程？参数如何变化？
4. 画出机组在超临界参数状态下在 T - S 图上的循环过程。
5. 炉膛水冷壁传热分哪几类？各有什么特点？
6. 超临界锅炉的特点是什么？

锅炉汽水系统

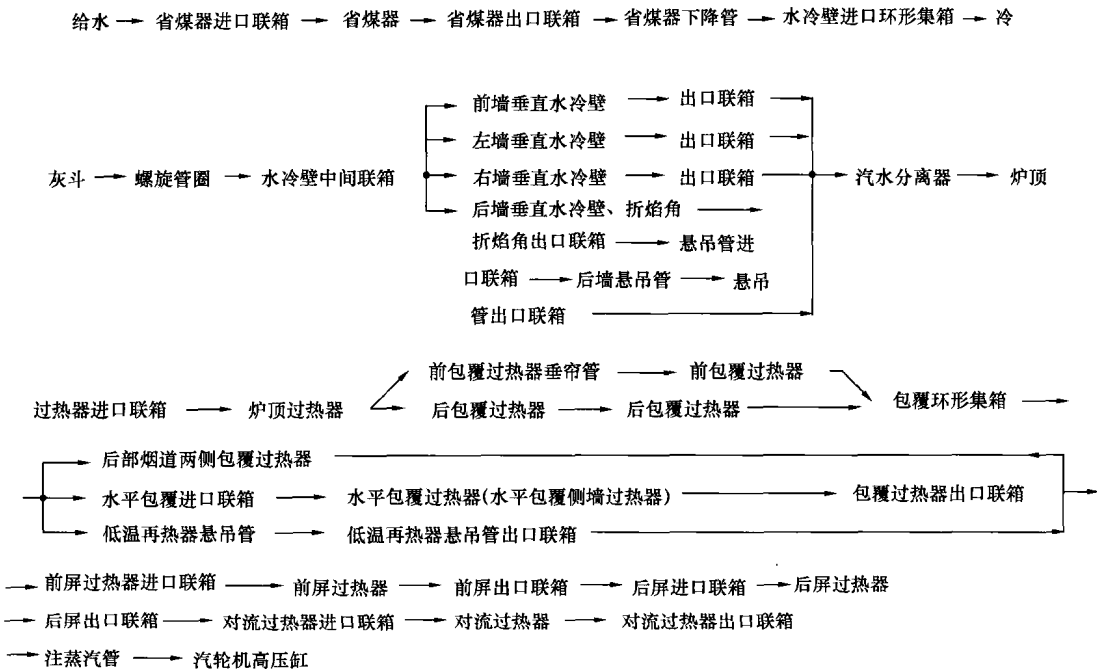
第一节 主蒸汽、再热汽及旁路系统

石洞口第二电厂 $2 \times 600\text{MW}$ 机组超临界压力直流锅炉是由 CE-SULZER 合作设计的, 锅炉为一次中间再热直流锅炉, 单炉膛, 平衡通风, 露天布置, 锅炉后部为 II 型双流程布置。

锅炉的汽水流程以内置式汽水分离器为界设计成双流程, 从冷灰斗进口一直到折焰角前的中间混合集箱为螺旋管圈, 再连接至炉膛上部垂直上升的水冷壁 (一次垂直上升), 后引入汽水分离器, 从汽水分离器出来的蒸汽引至后部流程的炉顶及后包覆系统, 再进入前屏、后屏过热器及高温过热器。

一、一次、二次汽系统流程

1. 一次汽系统流程



2. 二次汽系统流程

低温再热器进口联箱 → 低温再热器 → 低温再热器出口联箱 → 高温再热器进口联箱 → 高温再热器 → 高温再热器出口联箱 → 汽轮机中压缸

其锅炉受热面整体布置, 如图 2-1 所示。

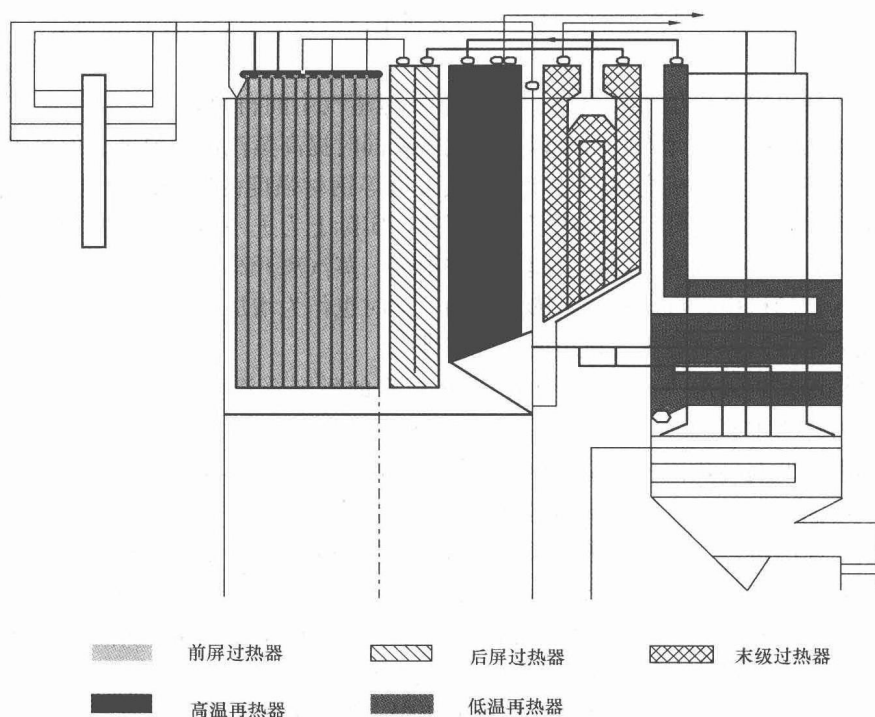


图 2-1 锅炉受热面布置示意图

二、过热器

过热器的作用是将蒸汽从饱和或微过热状态加热到额定的过热汽温。在锅炉负荷及工况变动时，过热器应保证过热汽温波动处于允许范围之内。

从蒸汽性质上来说，汽水分离器出口到末级过热器都是过热器。过热器分前屏过热器、后屏过热器、末级过热器和包覆过热器。其中，前屏过热器属于辐射过热器。后屏过热器为对流、辐射混合布置型（半辐射半对流过热器），总的汽温特性属于辐射对流特性。末级过热器悬吊在水平烟道后侧，采用逆流布置，以增加传热温差，属于对流过热器。辐射过热器汽温特性为随负荷增加汽温下降，对流过热器汽温特性为随负荷增加汽温上升。在前屏过热器与后屏过热器之间的连接管上装有一级喷水减温，在后屏过热器与末级过热器之间的连接管上装有二级喷水减温，用于调节锅炉出口主蒸汽温度。包覆过热器包括炉顶包覆、水平烟道两侧及底部包覆、尾部烟道包覆管。其中尾部烟道包覆从炉顶到低温再热器为止，省煤器以下周壁为普通结构炉壁。

主蒸汽系统从前屏过热器开始，沿烟道流向流程呈左右分布的双回路布置。后屏过热器与末级过热器之间在连接上有一次交叉，从而有效地改善了位于烟道中心及烟道两侧的受热面由于受热不均而造成的温度偏差。另外，从锅炉末级过热器出口到汽轮机高压缸进口这一段管路采用“2—1—2”接法，即锅炉出口和汽轮机入口均为双管布置，而中间部分采用单管布置，使两侧蒸汽能够很好地混合，有效地减小了锅炉两侧的热偏差。

锅炉启动过程中过热器的保护：在锅炉启动过程中，尽管烟气温度不高，过热器管壁却有可能超温。这是因为锅炉点火初期由于产生的蒸汽量很小，过热器管内蒸汽流量小，立式过热器管内还有可能存有积水（疏水），在积水排除前，过热器处于干烧状态。这时就必须限制过热器入口的烟气温度。控制烟气温度的办法是限制燃料量和调整炉膛火焰中心的位置。随着蒸汽压力的升高，过热器内蒸汽流量增大，使管壁逐渐得到良好的冷却。这时用限制过热器出口汽温的办