



大型燃气—蒸汽联合循环电厂培训教材

深圳能源集团月亮湾燃机电厂
中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会

编

余热锅炉分册

YURE GUOLU FENCE



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

大型燃气-蒸汽联合循环电厂培训教材

余热锅炉分册

深圳能源集团月亮湾燃机电厂
中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会 编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了 F 级余热锅炉的基础知识及典型结构,并详细叙述了 F 级余热锅炉典型汽水系统与辅助系统、锅炉启停操作、运行调整和事故处理等内容。全书共分 8 章,第 1 章概述余热锅炉组成、工作过程与分类等基础知识;第 2 章介绍了卧式、立式自然循环余热锅炉典型结构;第 3 章详述典型汽水系统及其运行维护要点;第 4 章详述余热锅炉辅助系统及其运行维护要点;第 5 章详述余热锅炉启动;第 6 章详述余热锅炉运行监视和调整;第 7 章介绍余热锅炉停炉、保养和维护;第 8 章介绍余热锅炉常见事故处理,附录列有余热锅炉典型 T-Q 图与启动曲线、典型 PID 图与设备规范、焓熵图及常用阀门知识等。

本书内容全面,图文并茂,适合作为燃气-蒸汽联合循环电厂运行人员培训用书,也可作为电厂从事相关工作的管理人员、技术人员和筹建人员的技术参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型燃气-蒸汽联合循环电厂培训教材.余热锅炉分册 / 深圳能源集团月亮湾燃机电厂,中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会编. —重庆:重庆大学出版社, 2014.4

ISBN 978-7-5624-7851-5

I. ①大… II. ①深…②中… III. ①燃气-蒸汽联合循环发电—发电厂—技术培训—教材②废热锅炉—技术培训—教材 IV. ①TM611.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 274469 号

大型燃气-蒸汽联合循环电厂培训教材

余热锅炉分册

深圳能源集团月亮湾燃机电厂
中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会 编

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:杨粮菊 版式设计:杨粮菊

责任校对:邬小梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

万州日报印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:306千 插页:8 开 8 页:

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—4 000

ISBN 978-7-5624-7851-5 定价:29.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

《余热锅炉分册》

编 委 会

主 任 苏 坚

副主任 (按姓氏笔画排序)

朱小英 杨 中 程芳林

委 员 甘孟必 曹建中 胡国良

编写人员名单

主 编 甘孟必

参编人员 (按姓氏笔画排序)

王如发 王勇涛 李观轩

张 恒 赵 君 曹 乾

谢 毅

序言

1791年英国人巴伯首次描述了燃气轮机(Gas Turbine)的工作过程。1872年德国人施托尔策设计了一台燃气轮机,从1900年开始做了4年的试验。1905年法国人勒梅尔和阿芒戈制成了第一台能输出功率的燃气轮机。1920年德国人霍尔茨瓦特制成了第一台实用的燃气轮机,效率为13%,功率为370 kW。1930年英国人惠特尔获得燃气轮机专利,1937年在试车台成功运转离心式燃气轮机。1939年德国人设计的轴流式燃气轮机安装在飞机上试飞成功,诞生了人类第一架喷气式飞机。从此燃气轮机在航空领域,尤其是军用飞机上得到了飞速发展。

燃气轮机用于发电则始于1939年,由于发电用途的燃机不受空间和质量的严格限制,所以尺寸较大,结构也更加厚重结实,因此具有更长的使用寿命。虽然燃气-蒸汽联合循环发电装置早在1949年就投入运行,但是发展不快。主要是因为轴流式压气机技术进步缓慢,如何提高压气机的压比和效率一直在困扰压气机的发展,直到20世纪70年代轴流式压气机在理论上取得突破,压气机的叶片和叶形按照三元流理论进行设计,压气机整体结构也按照新的动力理论进行布置,压气机的压比才从10不断提高,现在压比则超过了30,效率也同步提高,也同时满足了燃机的发展需要。

影响燃机发展的另一个重要原因是燃气透平的高温热通道材料。提高燃机的功率就意味着提高燃气的温度,热通道部件不能长期承受1000℃以上的高温,这就限制了燃机功率的提高。20世纪70年代燃机动叶采用镍基合金制造,在叶片内部没有进行冷却的情况下,燃气初温可以达到1150℃,燃机功率达到144 MW,联合循环机组功率达到213 MW。20世纪80年代采用镍钴基合金铸造动叶片,燃气初温达到1350℃,燃机功率270 MW,联合循环机组功率398 MW。90年代燃机采用镍钴基超级合金,用单向结晶的工艺铸造动叶片,燃气初温1500℃,燃机功率334 MW,联合循环机组功率498 MW。进入21世纪,优化冷却和改进高温部件的隔热涂层,燃气初温1600℃,燃机功率470 MW,联合循环机组功率680 MW。解决了压比和热通道高温部件材料的问题后,随着燃机功率的提

高,新型燃机单机效率大于 40%,联合循环机组的效率大于 60%。

为了加快大型燃气轮机联合循环发电设备制造技术的发展和应⤿,我国于 2001 年发布了《燃气轮机产业发展和技术引进工作实施意见》,提出以市场换技术的方式引进制造技术。通过打捆招标,哈尔滨电气集团公司与美国通用电气公司,上海电气集团公司与德国西门子公司,东方电气集团公司与日本三菱重工公司合作。三家企业共同承担了大型燃气轮机制造技术的引进及国产化工作,目前除热通道的关键高温部件不能自主生产外,其余部件的制造均实现了国产化。实现了 E 级、F 级燃气轮机及联合循环技术国内生产能力。截至 2010 年燃气轮机电站总装机容量 2.6 万 MW,比 1999 年燃气轮机装机总容量 5 939 MW 增长了 4 倍,大型燃气-蒸汽联合循环发电技术在国内得到了广泛的应用。

燃气-蒸汽联合循环是现有热力发电系统中效率最高的大规模商业化发电方式,大型燃气轮机联合循环效率已达到 60%。采用天然气为燃料的燃气-蒸汽联合循环具有清洁、高效的优势。主要大气污染物和二氧化碳的排放量分别是常规火力发电站的 1/10 和 1/2。

在《国家能源发展“十二五”规划》提出:“高效、清洁、低碳已经成为世界能源发展的主流方向,非化石能源和天然气在能源结构中的比重越来越大,世界能源将逐步跨入石油、天然气、煤炭、可再生能源和核能并驾齐驱的新时代。”规划要求“十二五”末,天然气占一次能源消费比重将提高到 7.5%,天然气发电装机容量将从 2010 年的 26 420 MW 发展到 2015 年的 56 000 MW。我国大型燃气-蒸汽联合循环发电将迎来快速发展的阶段。

为了让广大从事 F 级燃气-蒸汽联合循环机组的运行人员尽快熟练掌握机组的运行技术,中国电机工程学会燃机专委会牵头组织有代表性的国内燃机电厂编写了本套培训教材。其中燃气轮机/汽轮机分册分别由三家电厂编写,深圳能源集团月亮湾燃机电厂承担了 M701F 燃气轮机/汽轮机分册,浙能集团萧山燃机电厂承担了 SGT5-4000F 燃气轮机/汽轮机分册,广州发展集团珠江燃机电厂承担了 PG9351F 燃气轮机/汽轮机分册;深圳能源集团月亮湾燃机电厂还承担了余热锅炉分册和电气分册的编写;深圳能源集团东部电厂承担了热控分册的编写。

每个分册内容包括工艺系统、设备结构、运行操作要点、典型事故处理与运行维护等,教材注重实际运行和维护经验,辅

以相关的原理和机理阐述,每章附有思考题帮助学习掌握教材内容。本套教材也可作为燃机电厂管理人员、技术人员的工作参考书。

由于编者都是来自生产一线,学识和理论水平有限,培训教材中难免存在缺点与不妥之处,敬请广大读者批评指正。

燃机专委会
2013 年 10 月

前言

本套培训教材包括燃气轮机/汽轮机分册、电气分册、余热锅炉分册和控制分册。电气分册是本套教材丛书的一个分册。

本书主要介绍了美国通用电气、德国西门子和日本三菱公司的 F 级发电机结构、原理与运行,大型变压器主要结构部件的性能与运行,发电厂电气一次系统的构成和运行原理,高压电器的原理和性能,配电装置的组成,发电厂的防雷与过电压,发电厂电气设备的继电保护,发电机的励磁系统、同期系统,厂用电系统及快切系统、直流系统、不停电电源系统,发电厂控制系统等内容。本书以实用为出发点,选材力求突出 F 级燃气轮机机组电气系统和电气设备的特点,注重理论和实际相结合,注重知识的深度和广度的结合,注重专业知识和技能的结合,注重新设备新技术的应用。

本培训教材编写人员为一线运行人员,编写偏重于运行实践,内容丰富、实用性强,对电厂技术人员全面掌握配套 F 级机组电气的知识有较大的帮助。

本培训教材在燃气轮机专委会的直接领导下,由甘孟必主编,林士涛主审。其余编写人员如下:第一章由谢毅编写;第二章由王勇涛编写;第三章由张恒编写;第四章由李观轩编写;第五章由谢毅编写,其中启动典型实例部分由王如发编写,赵君参与编写;第六章由李观轩编写,其中水位调节部分由王如发编写,王勇涛参与编写;第七章由赵君编写,其中停炉部分由曹乾编写,王勇涛、谢毅参与编写;第八章由曹乾编写,王如发参与编写;附录由曹乾编写。

在本书正式编写前,编委会对培训教材编写的原则、内容等进行了详细的讨论并提出了修改意见;编写期间电厂各级技术骨干提出了不少建设性的意见和建议,同时教材编写过程中也得到了深圳能源集团东部电厂及其他电厂的专家和技术人员的大力帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

编委会

2013 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 余热锅炉的作用、组成及工作过程	1
1.2 余热锅炉的分类	5
1.3 余热锅炉的特点	8
1.4 余热锅炉技术参数	9
复习思考题	11
第2章 余热锅炉结构	12
2.1 卧式余热锅炉结构	12
2.2 立式余热锅炉结构	21
2.3 锅炉本体附件	29
复习思考题	33
第3章 汽水系统	34
3.1 给水系统	34
3.2 高压汽水系统	43
3.3 中压/再热汽水系统	45
3.4 低压汽水系统	46
复习思考题	48
第4章 余热锅炉辅助系统	49
4.1 排污疏水系统	49
4.2 取样系统	53
4.3 加药系统	54
4.4 选择性催化还原(SCR)系统	59
4.5 烟气连续在线监测系统	64
复习思考题	66
第5章 余热锅炉启动	67
5.1 启动前准备	68
5.2 余热锅炉的启动	75
5.3 启动典型实例	79

复习思考题	81
第 6 章 余热锅炉运行调整	82
6.1 余热锅炉运行调整任务	82
6.2 余热锅炉水位控制与调节	82
6.3 余热锅炉蒸汽温度控制与调节	92
6.4 余热锅炉蒸汽压力控制与调节	97
6.5 汽水品质控制与调节	100
复习思考题	110
第 7 章 停炉、保养和维护	111
7.1 余热锅炉停运	111
7.2 余热锅炉保养	114
7.3 余热锅炉维护	118
复习思考题	123
第 8 章 事故处理	124
8.1 锅炉事故处理原则	124
8.2 锅炉常见事故处理	125
复习思考题	133
附 录	134
附录 1 典型曲线和图表	
附录 2 热力计算平衡表	
附录 3 设备规范	
附录 4 典型锅炉系统图	
附录 5 常用阀门简介	
附录 6 焓熵图与术语表	
参考文献	167

第 1 章

绪 论

“余热锅炉”英文简写为 HRSG, 即 Heat Recovery Steam Generator 的简称, 直译成中文为热回收蒸汽发生器。我国习惯上称为“余热锅炉”, 本书也采用“余热锅炉”的名称。余热锅炉是燃气-蒸汽联合循环发电的主设备之一, 用于回收燃气轮机的排气余热, 产生合格的蒸汽来推动蒸汽轮机做功。

在燃气轮机内做功后排出的烟气, 仍具有较高的温度, 一般为 $400 \sim 610\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且烟气流量非常大(F 级机组烟气流量通常在 600 kg/s 以上)。安装在燃气轮机排气管道后的余热锅炉, 利用这部分排气热能加热给水, 使水变成蒸汽, 用来发电、供热, 或作为其他工艺用汽。

目前我国发电市场发展越来越受到能源政策和节能、环保要求的制约, 在人口集中的大中城市, 采用高效、节能、低污染的联合循环或者热电联供是大势所趋。随着燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机组成的联合循环发电技术不断发展, 燃气轮机性能不断提高, 余热锅炉已向大型化、多流程、高参数方向发展。余热锅炉高压蒸发量已达到 270 t/h 以上, 工作压力 10 MPa 以上。

F 级燃气-蒸汽联合循环机组是国际上技术成熟、性能可靠的产品, 在国内外有相当数量的装机台数, 并配套了不同类型的余热锅炉。本章主要介绍 F 级燃气-蒸汽联合循环发电机组配套余热锅炉的基本知识, 包括余热锅炉的作用、组成及工作过程、分类、特点及其技术参数等。

1.1 余热锅炉的作用、组成及工作过程

1.1.1 余热锅炉的作用

余热锅炉的作用是吸收燃气轮机排气的热能, 产生可用的过热蒸汽驱动蒸汽轮机带动发电机发电, 或对外供汽供热。在燃气-蒸汽联合循环电厂中, 燃气轮机是工作在高温区域的一种热机, 宜于利用高品位的热量; 蒸汽轮机是工作在低温区域的一种热机, 宜于利用低品位的热量。通过余热锅炉将燃气轮机和蒸汽轮机结合起来, 将高品位和低品位的热量同时利用起来, 从而提高了循环效率。

图 1.1 为典型的燃气-蒸汽联合循环示意图,图中的三压、无补燃、再热、卧式、自然循环余热锅炉吸收燃气轮机排气热能,产生高压、中压、低压三个压力等级的过热蒸汽,分别送到蒸汽轮机的高压汽缸、中压汽缸、低压汽缸,用于驱动蒸汽轮机。一般情况下,压力等级数取决于燃气轮机功率和系统设计,余热锅炉和蒸汽轮机可以配置为更简单的单个压力等级或两个压力等级。

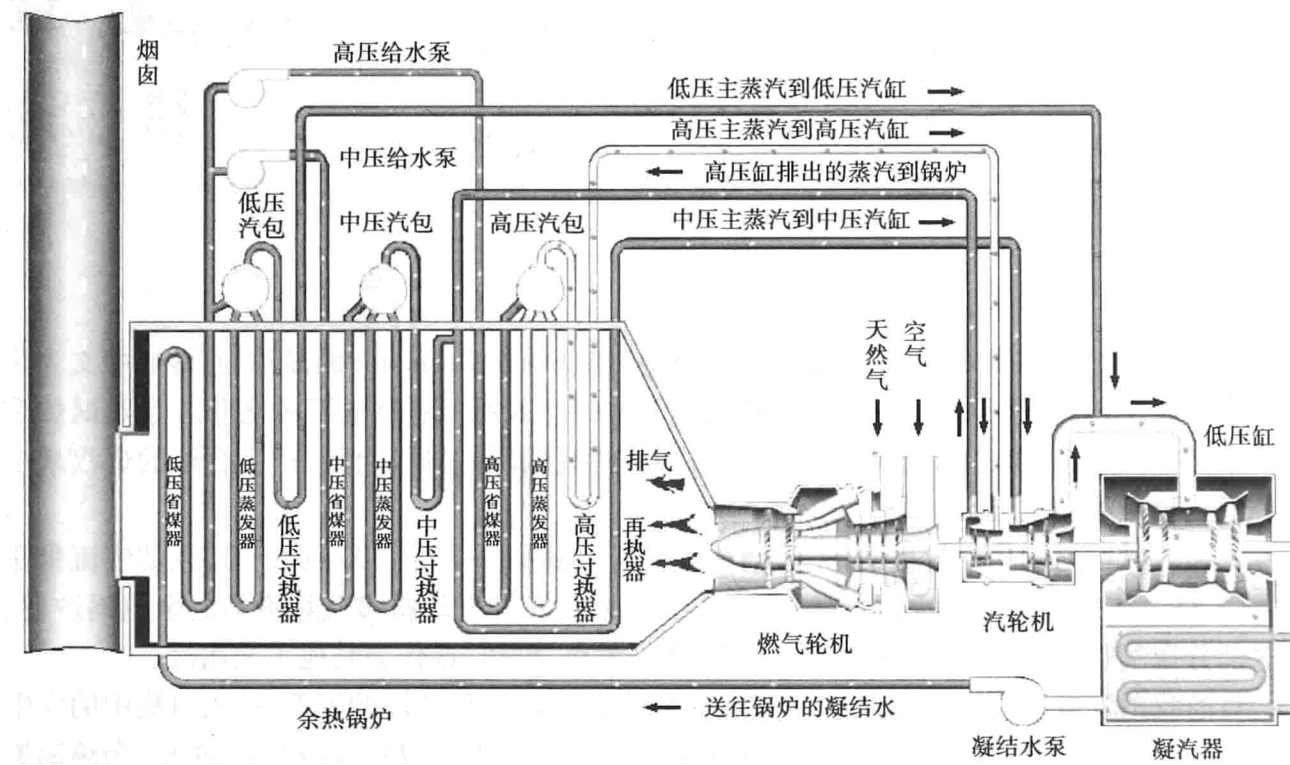


图 1.1 典型燃气-蒸汽轮机联合循环示意图

加装余热锅炉和蒸汽轮机后与燃气轮机组成的联合循环,较简单循环机组的发电量和热效率均有大幅提高。有资料显示,在不增加燃料耗量的情况下,通过余热锅炉产生的蒸汽能使机组发电容量和热效率增加 50%左右。

在整个联合循环中,余热锅炉设计参数取决于燃气轮机和蒸汽轮机参数,随着燃气轮机参数不断提高,锅炉设计参数及机组热效率也将随之不断提高。目前最新型的 F 级燃气-蒸汽轮机联合循环机组热效率可高达 59%。

1.1.2 余热锅炉组成及工作过程

余热锅炉通常由锅炉本体及配套的汽水系统、辅助系统构成。余热锅炉本体由进口烟道、锅炉受热面、出口烟道、烟囱等组成。从燃气轮机排出的烟气,在进口烟道内扩散后,依次流经过热器、蒸发器、省煤器,最后经烟囱排入大气,如图 1.2 所示为单压卧式自然循环余热锅炉组成图。图 1.3 所示为单压立式强制循环余热锅炉组成图。

卧式余热锅炉与立式余热锅炉为两种不同型式的余热锅炉,其差别在于受热面的布置方式不同,但其系统工作流程相同。多压力等级的余热锅炉,除了受热面布置方式不同,汽包安装高度发生变化外,在每一压力等级内的工作流程、基本工作原理相同。

下文以单压卧式自然循环余热锅炉为例阐述余热锅炉的基本工作原理,即单一压力等级

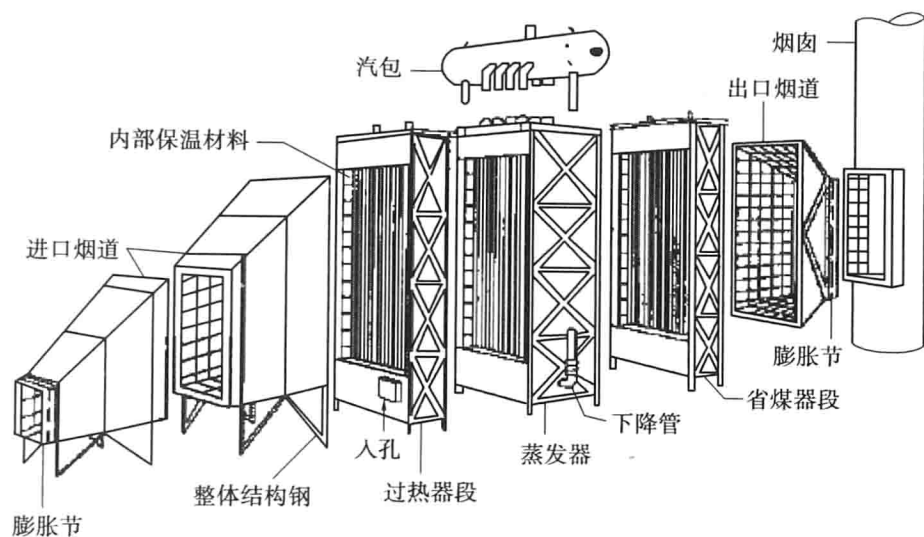


图 1.2 单压卧式自然循环余热锅炉组成图

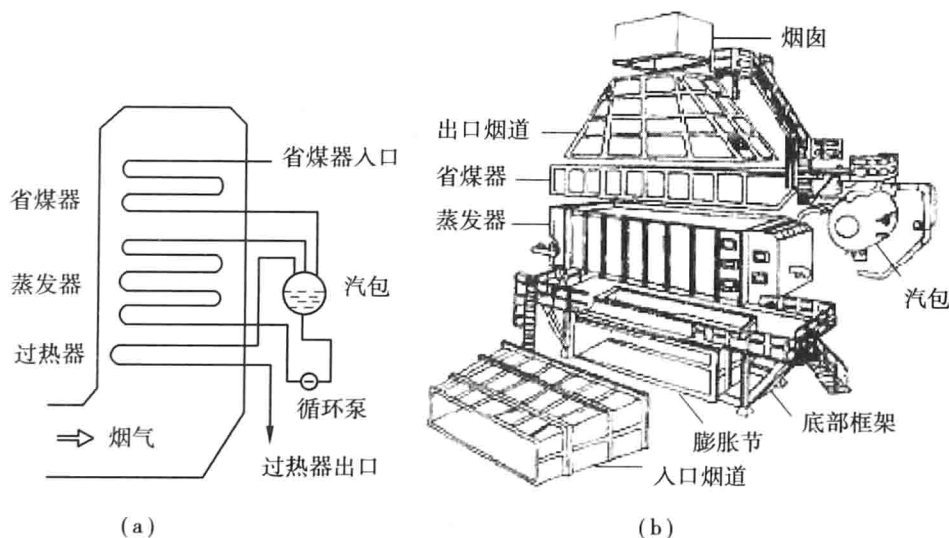


图 1.3 单压立式强制循环余热锅炉组成图

过热蒸汽的产生过程。

图 1.4 所示汽包与蒸发器的上联箱相连,下降管与蒸发器的下联箱相连,下降管位于炉墙外面,不吸收烟气的热量。直立蒸发器管簇内的水吸收烟气的热量后,部分水受热后变成蒸汽,由于蒸汽的密度较水的密度小,两者密度差形成了水循环动力。不吸热下降管内的水比较重,向下流动,直立管内汽水混合物向上流动,形成连续产汽过程。

进入余热锅炉的给水,在省煤器中完成预热,温度升高到接近饱和温度的水平,进入汽包后通过下降管送往蒸发器内受热汽化,在蒸发器中部分给水相变成为饱和蒸汽;从蒸发器出来的汽水混合物进入汽包后进行汽水分离,分离出来的水进入蒸发器再次循环受热汽化,分离出来的饱和蒸汽进入过热器,在过热器中饱和蒸汽继续被加热升温成为过热蒸汽送往蒸汽轮机。

对于受热面横向布置的立式余热锅炉,从给水加热到过热蒸汽的工质状态变化过程与受热面立式布置的卧式余热锅炉完全相同,但工质在受热面内流动方向为水平方向。由于汽水混合物在蒸发器中水平流动,汽相自然上升受阻,流动阻力增加,水循环动力相对较弱。为弥补循环动力的不足,通常采用在下降管进入蒸发器前增加循环泵的方式确保水循环动力的稳

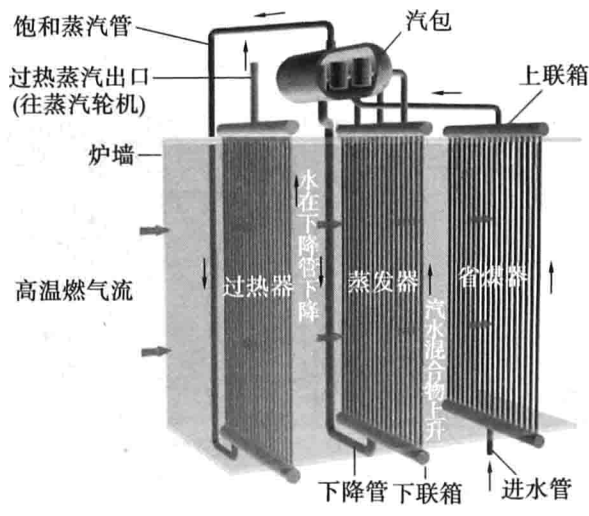


图 1.4 余热锅炉原理图

定,因此早期的立式余热锅炉一般带强制循环泵,构成立式强制循环余热锅炉,如图 1.3(a)所示。随着技术的发展,可采用提高汽包安装高度的方式来增加水循环稳定性,目前国内 F 级联合循环机组配套的立式自然循环锅炉,就采用了这种方法。

图 1.5 为 F 级机组配套的卧式无补燃三压再热自然循环余热锅炉。与图 1.2 所示的单压自然循环余热锅炉对比,增加了两个等级的汽水系统和再热器。蒸汽轮机高压缸排汽与中压过热蒸汽并汽混合,通过再热器加热升温后送往蒸汽轮机中压缸做功。这部分蒸汽叫做再热蒸汽,再热蒸汽提高了余热锅炉的效率及机组运行的经济性。

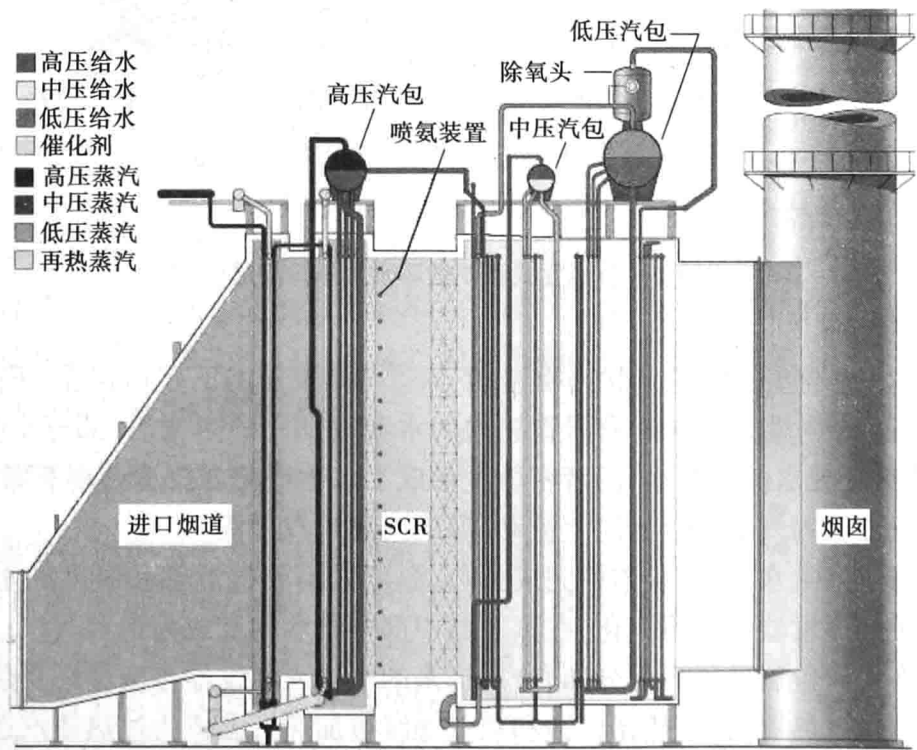


图 1.5 除氧头式三压再热自然循环余热锅炉

图 1.5 所示卧式三压再热自然循环余热锅炉由进口烟道、受热面组件、SCR(Selective Catalytic Reduction 的缩写,选择性催化还原,用于脱硝)、高中低压汽包、烟囱及管道容器等组成。

给水进入低压省煤器吸热后,进入低压汽包(低压汽包上带除氧头的则先进入除氧头,目前F级余热锅炉多为凝汽器真空除氧,不再带除氧头)。如图1.1所示低压汽包两端分别有下降管和给水分管,给水分管分别为中压系统和高压系统的给水泵供水,经过高、中压给水泵加压后的水,被送到相应的高、中压省煤器受热后再送入高、中压汽水系统。

图1.6为F级机组配套的立式无补燃三压再热自然循环余热锅炉,也是由进口烟道、受热面组件、SCR系统、高中低压汽包、烟囱及管道容器等组成的。不同的是,其受热面采用水平布置方式。

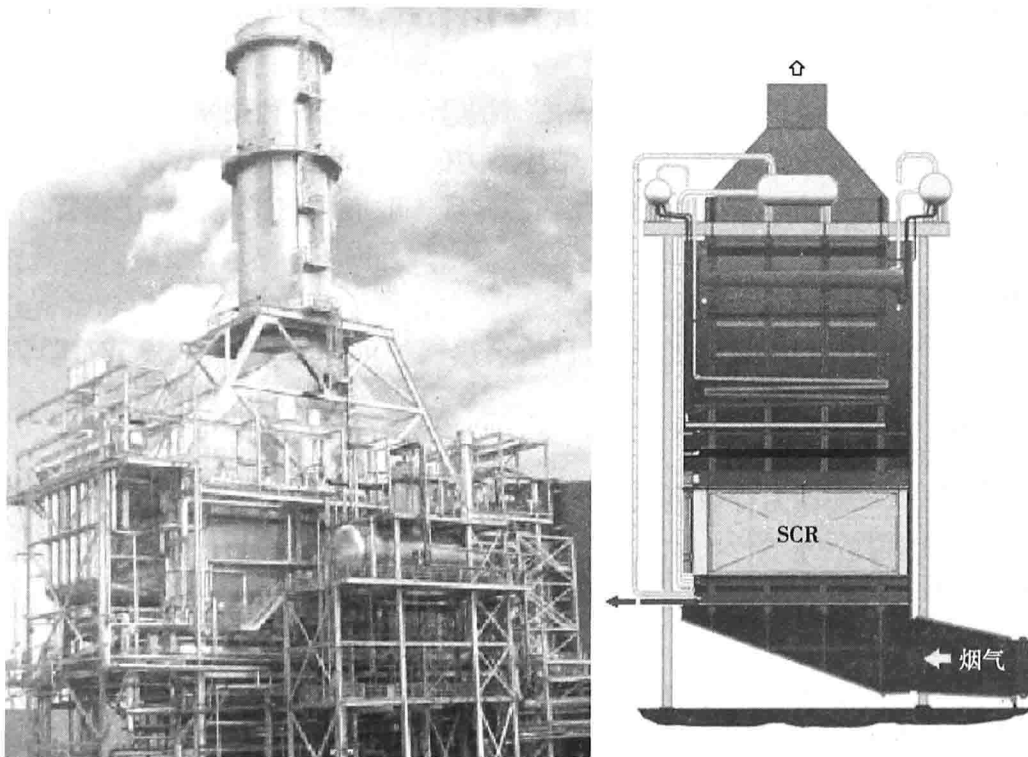


图 1.6 立式三压自然循环余热锅炉

1.2 余热锅炉的分类

余热锅炉可以从不同的角度进行分类,通常可从工作介质、烟气侧热源、结构以及蒸汽参数等方面对余热锅炉进行分类,本节依次从循环方式、受热面布置方式、产生蒸汽的压力等级、烟气侧热源、有无汽包和余热锅炉用途等分类角度作简要介绍。

(1) 按受热面布置方式分类

按余热锅炉本体结构布置方式分类,可划分为卧式布置余热锅炉和立式布置余热锅炉。

1) 卧式布置余热锅炉

如图1.2所示为典型的卧式单压自然循环余热锅炉。目前F级机组配套的卧式余热锅炉主流配置为三压再热自然循环余热锅炉,大部分情况下采用凝汽器真空除氧,不带除氧头。

2) 立式布置余热锅炉

如图1.3所示为典型的立式单压强制循环余热锅炉。目前F级机组配套的立式余热锅炉的主流配置为三压再热自然循环余热锅炉,采用不带除氧头的凝汽器真空除氧方式。

(2) 按循环方式分类

根据余热锅炉蒸发器中汽、水循环的方式分类,余热锅炉可分为自然循环锅炉(见图 1.2)和强制循环锅炉(见图 1.3)。早期立式余热锅炉采用强制循环泵来弥补水循环动力不足的问题,随着余热锅炉技术的不断发展,近年来立式余热锅炉也逐渐开始倾向于采用自然循环。

1) 自然循环余热锅炉

自然循环方式余热锅炉如图 1.2 所示,锅炉为水平布置。自然循环余热锅炉的传热管簇通常为垂直布置,依靠汽水密度差推动工质流动,烟气水平方向地流过垂直方向安装的管簇。汽包布置在管簇模块上方,汽水循环多采用自然循环方式,其工作原理过程如图 1.4 所示。

2) 强制循环余热锅炉

强制循环方式的余热锅炉如图 1.3 所示,强制循环余热锅炉利用水泵压头和汽水密度差推动工质流动。在立式余热锅炉中,为弥补循环动力的不足,通常采用在下降管进入蒸发器前增加循环泵的方式确保水循环动力的稳定。强制循环一般应用在受热面水平布置的立式余热锅炉上。

(3) 按产生蒸汽的压力等级分类

按余热锅炉产生的蒸汽压力等级分类,目前余热锅炉可分为单压、双压、双压再热、三压、三压再热五大类。

1) 单压级余热锅炉

余热锅炉只生产一种压力等级蒸汽供给蒸汽轮机使用。

2) 双压级余热锅炉

余热锅炉生产两种不同压力等级蒸汽供给蒸汽轮机使用。

3) 三压再热余热锅炉

余热锅炉生产三种不同压力等级的蒸汽供给蒸汽轮机,目前 F 级余热锅炉多采用如图 1.5 所示的三压再热余热锅炉。

采取何种等级的余热锅炉,主要取决于与之匹配的燃气轮机型式、参数和用户的需要。燃气轮机在额定功率下排气温度低于 538℃ 的联合循环,多采用单压或双压余热锅炉,而大功率、高排气温度的燃气轮机多配置三压再热的余热锅炉。

(4) 按烟气侧热源分类

按烟气侧热源供给区分,可分为有补燃余热锅炉和无补燃余热锅炉,前者除了吸收燃气轮机排气的余热外,还加入一定量的燃料进行补燃,提升燃气轮机排气温度,以增加蒸汽产量和提高蒸汽参数。

1) 无补燃余热锅炉

这种余热锅炉单纯回收燃气轮机排气的热量,产生一定压力和温度的蒸汽。余热锅炉生成的新蒸汽温度不可能高于燃气轮机的排气温度,余热锅炉蒸汽温度和流量随着燃气轮机负荷的变化而改变。

2) 有补燃余热锅炉

由于燃气轮机排气中含氧 14%~18%,可在余热锅炉适当位置安装补燃燃烧器,燃用天然气或燃油等燃料,提高燃气轮机排气温度,相应提高蒸汽参数和产汽量,改善联合循环的变工况特性。

一般来说,采用无补燃余热锅炉的联合循环效率相对较高。目前,大型联合循环多采用无