

热电厂 实用技术丛书

节能技术及 工程实例

王汝武 主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心

热电厂实用技术丛书

节能技术及工程实例

王汝武 主编



化学工业出版社

环境·能源出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

节能技术及工程实例/王汝武主编. —北京:
化学工业出版社, 2005. 10
(热电厂实用技术丛书)
ISBN 7-5025-7797-1

I. 节… II. 王… III. 热电厂-节能-研究
IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 126046 号

热电厂实用技术丛书
节能技术及工程实例

王汝武 主编
责任编辑: 郑叶琳
文字编辑: 陈 喆
责任校对: 周梦华
封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

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

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 277 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7797-1

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《热电厂实用技术丛书》编委会

主 任 周小谦

副 主 任 郁 刚 王振铭

编 委 (以姓氏笔画为序)

王汝武 王国刚 王振铭 王鼎臣 邢培生

杜文学 汪玉林 郁 刚 周小谦

丛 书 主 编 汪玉林

本分册主编 王汝武

本分册编写人员 (以姓氏笔画为序)

王汝武 杨乃桥 林东宇

序

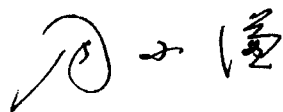
节约能源、保护环境是我国实现可持续发展战略的重要组成部分，这已成为我国的一项基本国策。目前，在商业企业可大规模实现能源转换的技术中，热电联产、热电装置的热电效率是最高的。建设热电厂，实现热电联产、热电冷联供是节约能源、保护环境、提高企业经济效益的有效途径。新中国成立以来，在我国电力和工业建设及城市建设中，都高度重视热电联产的建设，使热电联产在我国得到较大的发展。到2003年底，全国共有6MW以上热电联产机组2121台，总容量达到43691.8MW，占全国火电装机总容量的11.6%，为国民经济发展提供了强大动力，为节约能源、保护环境做出了巨大贡献。初步估算，从发电侧看比纯凝汽发电节省3000万吨以上原煤，从供热侧看比小锅炉节省4000多万吨原煤，相应估算减少CO₂排放1.8亿吨，减少SO₂排放120多万吨，并减少了NO_x和粉尘的排放。在我国能源结构中以煤为基础的格局，以电为中心的发展战略，在相当长的时间内是不会变的。

目前，在我国电厂的能源结构中，燃煤电厂的发电量约占全国总发电量的80%以上，即使到2020年，燃煤电厂的发电量仍将在70%以上。煤燃烧排放的SO₂和NO_x以及粉尘仍是大气主要污染源。努力提高能源利用率，尽可能减少煤炭消耗，减少温室气体和SO₂的排放，仍然是环境保护的重要任务。为此，继续加大热电联产建设步伐，扩大热电联产在电力装置中的比例，就成为今后电力建设中一个重要任务，也是我国实施节约能源、保护环境可持续发展战略的必然选择。

我们不仅要不断增加热电联产的比例、节约能源，同时还要不断提高热电联产的建设、运行管理水平，以进一步提高效率、降低消耗、减少污染、增加效益。近年来，随着科学技术的发展，一些新技术、新设备、新工艺、新的管理理念在火电厂广泛应用，促进了企业技术进步，在节约能源、改善环境方面取得显著成效。循环流化床燃烧技术的应用，不仅能燃烧劣质煤、高硫煤，而且使环境得到改善；脱硫除尘技术的广泛应用减少了SO₂、NO_x以及粉尘的排放，对保护和改善人类的生态环境，保障人体健康起到积极作用；电厂水处理采用膜分离技术，既减少水污染，又节约用水，提高企业经济效益；提高电厂主要设备锅炉、汽轮机、电气设备效率降低了煤耗，风机、水泵及其他辅助设备的电耗，降低工厂用电；完善电厂热力系统及设备的优化配置，改善运行操作，加强运行管理，采用综合利用技术、自动化技术等，都使能源消耗大幅度降低，提高了能源利用率，提高了企业经济效益。

随着热电联产产业的发展，热电厂建设迅速发展，从业人员迅猛增加，热电联产、节约能源、环境保护、综合利用、电厂自动化技术等新技术广泛应用，热电行业对热电新技术普及的要求日益强烈，因此，编辑出版一套适用于热电行业的技术丛书是很有必要的。

由中国电机工程学会组织编写，化学工业出版社出版的《热电厂实用技术丛书》（以下简称《丛书》）正是适应了这一形势要求。《丛书》涵盖了热电厂建设、热电设备、热电技术各个领域，对当今热电厂已经应用的新技术、新设备、新工艺都作了论述，并着重介绍实际应用成果，理论联系实际，经验实用具体。参加《丛书》编写的人员大多是在热电行业第一线的高级工程师，具有丰富的理论和实践经验，《丛书》的编写具有科学性、实用性和可操作性。相信这套《丛书》对于提高我国热电厂的建设技术和管理水平、热电厂的综合利用、环境保护的水准以及提高企业的经济效益都将会起到积极的促进作用。对于热电行业的专业技术人员、技术工人以及热电厂设计、运行、管理及相关人员，这套《丛书》是一套很好的参考书。因此，我向广大热电科技工作者及有关人员推荐《热电厂实用技术丛书》，以飨读者。



2005 年 11 月

前 言

随着我国国民经济的持续发展,电力工业也有了长足的进步。目前,我国装机容量和发电量已经跃居世界第二。2004年,全国装机容量达到4.4亿千瓦,发电量21870亿千瓦时,其中73%是火电机组,消耗原煤量近10亿吨。

随着电网容量的增加,大型机组(300MW机组)的比例增大,供电煤耗呈逐年降低的趋势,2003年全国平均供电煤耗已降至 $377\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,但与世界先进水平的 $343\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 还有一定的差距。造成差距的原因主要有两个方面:一是200MW以下机组在电网中还占有一定的比重;二是热电机组的比重太小,供热机组的容量又普遍偏小。2002年,我国6MW以上供热机组的总容量为3743kW,占同容量火电机组的14.58%,而能源利用率较先进的国家如丹麦、荷兰等供热机组占40%以上,俄罗斯在1997年达到50.67%。

随着科学技术的发展,热能转变成电能的技术也在进步,特别是在热力、燃烧、传热、流体动力、自动控制等学科都出现了很多可应用于电厂的实用技术。例如循环流化床燃烧技术、变频技术、喷射技术、热管技术等。这些技术在部分热电厂已取得可观的节能效果,尽管有些技术不是高精尖技术,例如汽轮机低真空运行,通过凝汽器补水等常规技术,可一旦转换成生产力,也会产生巨大的经济效益。

本书把近年来出现的节能技术从理论到实践进行了系统的总结,以便这些实用技术能得到进一步推广。本书首先介绍了蒸汽动力循环的基础理论知识及设备和系统的节能潜力,再介绍设备和系统的节能方法及应用实例。本书重点介绍电厂的主要热力设备(锅炉和汽轮机)及系统的节能方法,对其主要辅机风机和水泵的调速节能也作了深入论述。本书可供设计院的动力工程师、电厂的运行人员及管理工程师等热能动力工作者参考。

本书由高级工程师王汝武主编,第一章至第五章由王汝武编写,第六章由高级工程师杨乃桥编写,第七章由工程师林东宇编写。本书编写参考了杨玉恒教授、林万超教授及多位作者的相关著作,在此一并表示感谢。

由于编者知识水平有限,不足之处在所难免,请读者批评指正。

王汝武

2005年10月

内 容 提 要

本书是由中国电机工程学会组织编写的《热电厂实用技术丛书》之一。本书把近年来出现的节能技术从理论到实践进行了系统的总结,介绍了蒸汽动力循环的基础理论,设备和系统的节能潜力、节能方法、技术及应用实例,重点介绍了电厂的主要热力设备和系统的节能方法,对其主要辅机风机和水泵的调速节能也作了深入论述。

本书是热电厂、火力发电厂专业技术人员,运行和管理人员以及电力设计院的专业技术人员的一本很好的参考书,并可作为培训教材。

目 录

第一篇 热电厂节能技术分析

第一章 热电厂节能技术的意义和发展	1
一、热电厂节能的意义	1
二、热电厂节能技术的发展	1
第二章 蒸汽动力循环和主要设备	3
第一节 蒸汽动力循环及效率计算	3
一、水蒸气作为工质的卡诺循环	3
二、简单蒸汽动力装置——朗肯循环	3
三、再热循环	7
四、回热循环	7
五、热电联产循环	10
第二节 热电联产的效率及影响因素	11
一、热电联产的类型	11
二、热电联产的效率及影响因素	11
三、热电联产的主要热经济指标	17
四、热电联产的燃料节省	20
第三节 热电联产的主要设备	21
一、锅炉	21
二、供热式汽轮机组的类型	34
三、背压式机组的动力特性	38
四、调整抽汽式机组的动力特性	39
第三章 热电厂的热力系统	45
一、原则性热力系统的拟定	45
二、全面性热力系统	45
三、主蒸汽系统	45
四、锅炉给水系统	47
五、给水回热系统	48
六、给水除氧系统	50
第四章 电厂节能潜力分析及方法	53
第一节 主要设备的节能潜力及方法	53
一、锅炉机组的能量分析	53
二、循环流化床锅炉的经济运行	56
三、汽轮机的节能潜力及方法	56

第二节 热力系统的节能潜力及方法	71
一、高压加热器的投停方式对机组经济性的影响	71
二、火电厂通过凝汽器补水	74
三、热电厂最佳负荷的分配方法	80

第二篇 热电厂节能技术的应用及工程实例

第五章 主要设备的节能	86
第一节 锅炉排烟余热的利用	86
一、低压省煤器系统	86
二、系统的联结方式及热力分析	86
三、低压省煤器在 100MW 机组上的应用	87
第二节 煤粉及链条炉改造为循环硫化床锅炉	88
一、锅炉技改的必要性	88
二、技改技术路线	89
三、中压煤粉(链条)炉改造为 CFB 锅炉的基本指导思想	90
四、35t/h 链条炉改成 35t/h 循环流化床锅炉的实例	91
第三节 循环水供热技术及实践	97
一、低温循环水供热系统	98
二、高温循环水混水供热系统	98
三、高温循环水混水供热系统的实践	99
第四节 凝汽机组打孔抽汽的工艺技术	100
一、开孔位置及抽汽管直径	100
二、具体施工工艺	101
三、验收和其他几个问题	102
第五节 汽轮机压力匹配器的应用	102
一、压力匹配器的原理及其工作过程	102
二、压力匹配器的主要损失及效率	104
三、压力匹配器的极限状态	107
四、压力匹配器将不可调节抽汽改为调整抽汽	108
五、汽轮机压力匹配器的应用方式及工程实例	111
第六节 利用汽轮机拖动给水泵工程实例	114
一、利用除氧器加热系统的压差	115
二、利用锅炉富余蒸汽	115
三、采用汽动泵的必要条件	116
第七节 热电冷联产	117
一、吸收式制冷	117
二、热电冷联产技术实例	120
第六章 液力偶合器调速节能	125
第一节 火(热)电厂风机水泵调速节能	125

第二节 各种调速装置的分类与比较·····	126
第三节 风机水泵调速方式及选择时应考虑的问题·····	128
第四节 调速调节与节流调节的比较·····	129
第五节 液力调速的优点·····	129
第六节 调速型液力耦合器及其在电厂的应用·····	130
一、液力耦合器的分类·····	130
二、液力耦合器的工作原理·····	131
三、调速型液力耦合器·····	132
四、液力耦合器的辅助系统·····	133
五、液力耦合器在火(热)电厂的应用·····	134
第七节 液力调速的节能效果及实例·····	138
一、风机水泵的流量调节方式·····	138
二、液力耦合器调速调节的节能原理·····	140
三、电厂节能实例·····	143
第八节 液力耦合器的匹配选型·····	146
一、调速型液力耦合器的匹配·····	147
二、调速型液力耦合器的选型·····	148
第九节 液力耦合器的发热与冷却·····	152
一、调速型液力耦合器发热功率的计算·····	152
二、选择冷却器·····	152
三、冷却水用量·····	154
第十节 液力传动的工作液体·····	154
 第七章 变频调速技术·····	 156
第一节 变频调速原理·····	156
一、变频调速的基本原理·····	156
二、变频器的基本结构及分类·····	157
三、变频调速的性能·····	159
第二节 通用变频器在电厂的应用·····	160
一、变频调速的节能应用·····	160
二、典型的变频调速控制系统·····	160
三、变频器及其外围设备的选择·····	161
四、变频器的运行与维护·····	163
五、工程实例·····	164
第三节 高压变频器在电厂的应用·····	165
一、高压变频器简介·····	165
二、高压变频器的分类及基本特性·····	165
三、电厂应用高压变频器的问题与对策·····	170
 参考文献·····	 173

第一篇 热电厂节能技术分析

第一章 热电厂节能技术的意义和发展

一、热电厂节能的意义

随着经济的发展和技术的进步，电能在生产生活中的作用越来越重要，很难想象停止了电能供应的现代化城市会怎样运转。

据统计，我国发电能耗占总能耗的 $1/3$ 以上。2004 年，全国燃煤火电机组已达到 3.4 亿千瓦以上。按年运行 6000h，发电煤耗 $400\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，全国需耗标煤 8.16 亿吨，如果发电效率提高 1%，将少耗标煤 8160 万吨，减少粉尘排放量 83 万吨，减少 CO_2 排放量 13.3 万吨。这对于改善环境将起到显著作用。

国民经济的可持续发展，必须提高能源的利用率。电力工业是我国消耗一次能源的大户，其中排放大量的粉尘， SO_2 、 NO_x 等有害气体，大量的低温余热及污水废渣更是环境污染的主要原因。通过利用先进技术例如循环流化床锅炉，可以提高燃煤效率，减少有害气体的排放；反渗透膜水处理技术，可以减少酸碱用量，也大大减少了污水的排放；采用循环水供热技术及低温余热回收技术，利用了低温余热，也减少了环境污染。

二、热电厂节能技术的发展

热电厂是将燃料的化学能通过燃烧变成热能（这个过程是在锅炉中完成的），热能在汽轮机中转换成机械能，机械能通过发电机转换成电能。这些过程是通过朗肯循环完成的，朗肯循环在 18 世纪提出，最早应用于蒸汽机车，后应用于以蒸汽轮机作原动机的发电厂，经过 200 多年的发展与完善，已将简单朗肯循环的效率大大提高了，蒸汽动力循环的完善包括回热循环、再热循环、蒸汽-燃气联合循环和热电联产的应用。热电联产是完善蒸汽动力循环、提高燃料利用率的一项重要技术措施，它将简单朗肯循环的燃料利用率提高近一倍。提高热电厂主辅机的制造水平也可使循环效率大大提高。锅炉、汽轮机制造水平的提高，使热电厂能够应用高参数（高压高温）的蒸汽，提高循环效率；辅机制造水平的提高，降低了电厂用电率，也提高了整个电厂的效率。

随着科学技术的发展，其他领域的技术进步也带动了热电厂技术的进步，促进了热电厂节能技术的提高。例如变频技术的发展，使热电厂主要的辅机——风机和水泵的耗能大大降低；随着人们生活水平的提高，不仅需要冬季采暖还需要夏季制冷，这又出现了热电冷联供，实现热电冷循环，增加了热电厂的热负荷，使热电厂的效率大大提高。

由于热电联产实现了能量的梯级利用，高品位的热能用来发电，低品位的热能用来供热，减少了冷源损失，这给提高中小型凝汽电厂的效率指明了方向，即凝汽式机组改为供热机组，应用打孔抽汽、低真空运行循环水供热等技术。打孔抽汽既可以供生活用汽，也可以供工业用汽，在给用汽要求较严的工业（如要求供汽压力不能波动太大）供汽时，则不能满足要求，这是因为打孔抽汽的蒸汽压力随着汽轮机电负荷和热负荷的变化而变化。为了满足生产的需要，又出现了变不可调节抽汽为可调节抽汽的蒸汽喷射式热泵技术。

随着节能和环保要求的提高，锅炉的燃烧技术也在不断改进，从早期的层燃式链条炉改进为悬浮燃烧的煤粉炉，又改进为沸腾燃烧的循环流化床锅炉，这种锅炉的燃烧效率达到98%以上，同时减少了排烟中 SO_2 、 NO_x 的含量。

锅炉排烟余热的利用技术也在迅速发展，从低温省煤器、低温空气预热器到暖风机的应用，使锅炉的排烟温度从 200°C 以上降低到 120°C 以下。

第二章 蒸汽动力循环和主要设备

第一节 蒸汽动力循环及效率计算

为了深入了解热电厂节能技术的原理,正确利用这些节能技术,首先应当了解热电厂的蒸汽动力循环和主要设备。

一、水蒸气作为工质的卡诺循环

卡诺循环是理想气体做功效率最高的循环,由于实际困难,水蒸气动力装置并不按照卡诺循环。但研究以蒸汽作为工质的卡诺循环,有助于更好地了解实际装置所应用的基本循环的作用原理及其与卡诺循环的差距,从而对基本循环的各种改进办法提出线索和方向。

热力学第二定律证明了在相同界限温度间,卡诺循环的热效率最高。在采用实际气体作为工质的循环中,因定温加热和放热不能实现,故实际上难于采用。在采用饱和蒸汽作为工质时,这两个困难都不存在。由于饱和水吸热汽化及饱和蒸汽凝结放热,当压力恒定时,温度也不变,因而有等温加热、等温放热的可能性。所以如果以饱和蒸汽作为工质时,原则上可以采用卡诺循环。如果使用过热蒸汽作为工质,则不可能实现等温加热和放热,即不能按卡诺循环运行。图 2-1 中 1—2—c—5—1 为水蒸气卡诺循环在 p - V 图与 T - S 图上的表示。然而实际在蒸汽动力装置中不采用卡诺循环。因为使用卡诺循环时,汽轮机中蒸汽的绝热膨胀过程 1—2、冷凝器中定温凝结过程 2—c 和锅炉中的定温吸热过程 5—1 可以近似实现,但在压缩机中绝热压缩过程 c—5 却难于实现,主要是水和汽的混合物压缩有困难,工作不稳定,而且功耗较大。另外,循环局限于饱和区,上限温度 T_1 受临界温度限制,所以即使采用卡诺循环热效率也不高,而且在汽轮机中膨胀终点,蒸汽湿度较大,不利于汽轮机工作。

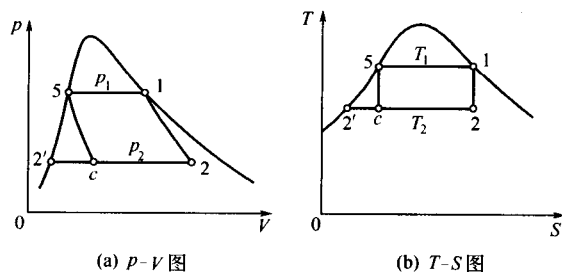


图 2-1 水蒸气卡诺循环的 p - V 图及 T - S 图

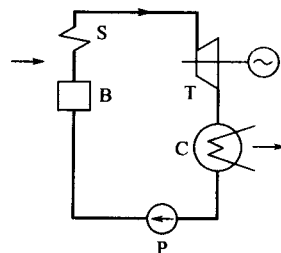
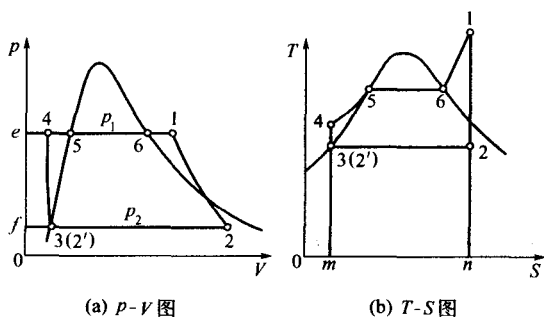


图 2-2 简单蒸汽动力装置系统

二、简单蒸汽动力装置——朗肯循环

蒸汽动力装置实际采用的基本循环是朗肯循环。简单蒸汽动力装置系统如图 2-2 所示。

图中 B 是锅炉,燃料在炉中燃烧,将化学能变成热能,在锅炉中水定压吸热,汽化成饱和蒸汽;S 为过热器,饱和蒸汽在其中过热成过热蒸汽;T 为汽轮机,蒸汽在其中膨胀做功;C 为凝汽器,从汽轮机排出的乏汽在其中凝结放热,变成凝结水;P 为锅炉给水泵,将凝结水升压,送入锅炉,完成一个循环。

图 2-3 朗肯循环的 p - V 图及 T - S 图

简单蒸汽动力装置的循环称为朗肯循环。图 2-3 给出了朗肯循环的 p - V 图与 T - S 图。热电厂的蒸汽动力循环都是在朗肯循环的基础上加以改进而得到的，所以朗肯循环是各种复杂蒸汽动力装置的基本循环，研究朗肯循环是研究复杂循环的基础。

朗肯循环与水蒸气卡诺循环不同之处主要在于乏汽的凝结是完全的，即不是止于 c 点（图 2-1），而是要使乏汽全部凝结，

一直到饱和线，现在的汽轮机大都使用过热蒸汽，蒸汽在过热区的加热是等压过程，而非等温过程（图 2-3 中 6—1），与卡诺循环的加热过程全部为等温加热不同。完全凝结使循环增加了一段水加热过程 4—5，减小了循环的平均温差，对热效率不利，但对简化设备、减小升压功耗是有好处的，因为用泵压缩水比压缩汽水混合物容易得多。采用过热蒸汽提高了循环加热温度，减少了膨胀末端的湿度，有利于提高效率。

（一）朗肯循环的热效率

在朗肯循环的 p - V 图及 T - S 图（图 2-3）上，1—2 为蒸汽在汽轮机中绝热膨胀做功，膨胀终了的状态 2 为低压绝热下的湿蒸汽，压力为 0.005MPa 相应的饱和温度 $t_s = 32.90^\circ\text{C}$ ；2—3 为乏汽在凝汽器中凝结，将汽化潜热传给冷却循环水，这是等压等温过程；3—4 为凝结水通过凝结水泵及锅炉给水泵升压；高压水在锅炉中吸热，从过冷水变成过热蒸汽，回到 1 点，完成了一个循环。

每千克蒸汽绝热流过汽轮机时，做功 W_T

$$W_T = h_1 - h_2 = p\text{-}V \text{ 图上面积 } e-1-2-f-e$$

每千克水经过水泵时，水泵功耗为

$$W_P = h_4 - h_3 = p\text{-}V \text{ 图上面积 } e-4-3-f-e$$

每千克新蒸汽从热源吸收热量为

$$q_1 = h_1 - h_4 = T\text{-}S \text{ 图上面积 } m-4-5-6-n-m$$

每千克乏汽在凝汽器中的冷却水放出的热量为

$$q_2 = h_2 - h_3 = T\text{-}S \text{ 图上面积 } m-3-2-n-m$$

循环净功为

$$W_0 = W_T - W_P = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) = p\text{-}V \text{ 图上面积 } 1-2-3-4-5-6-1$$

循环有效热量为

$$q_0 = q_1 - q_2 = (h_1 - h_4) - (h_2 - h_3) = T\text{-}S \text{ 图上面积 } 1-2-3-4-5-6-1$$

因而 $q_0 = W_0$

循环热效率为

$$\eta_t = \frac{W_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{W_T - W_P}{q_1} \quad (2-1)$$

根据上式计算循环的效率时， h_1 和 h_2 为蒸汽的焓值，可以在水蒸气焓-熵图上查得；1 是新蒸汽的状态点（根据 p 值和 V 值确定），2 点是新蒸汽等熵膨胀的终点，确定膨胀终点压力，即可查出此值； h_3 、 h_4 为水的焓值，可根据压力和温度在水蒸气表上查得，也可以用

近似公式计算。

由于水泵功耗较小, 可将水泵功耗略去。这时循环热效率的近似式为

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2} \quad (2-2)$$

当循环的压力 p_1 很高时, 例如在 9.8MPa 以上, 水泵功耗 W_p 占汽轮机输出功 W_T 的 2% 左右。在较粗略的计算中, 可将水泵功耗忽略不计。在设计热电厂时, 水泵功耗列入厂用电考虑范围。

(二) 蒸汽参数对热效率的影响

1. 初温 t_1 对热效率的影响

卡诺循环的效率 $\eta_t = 1 - \frac{t_2}{t_1}$, 初温 t_1 越高, 效率 η_t 越高。初温对朗肯循环的影响大致相同, 在相同的初压及背压下, 提高新汽的温度 t_1 , 可以使热效率增大。

提高新蒸汽温度之所以能提高热效率, 可以看作在原有的循环上, 加上一附加的循环 1—1_a—2_a—2—1 (图 2-4), 由于附加循环的平均温差比原来大, 所以和原循环合并后热效率必然提高。

另外, 提高新蒸汽的初温, 还可使终态 2 的湿度减少, 这对提高汽轮机相对效率有利。

提高新蒸汽温度受材料耐热性能的限制, 也受锅炉、汽轮机制造成本的限制, 现阶段汽轮机所采用的蒸汽初温上限在 550℃ 左右。

2. 初压 p_1 对热效率的影响

在相同的初温及背压下, 提高初压可以使热效率提高。由图 2-5 可见, 提高初压时, 循环的平均温差增大, 所以循环的热效率提高。

提高初压引起的问题是蒸汽膨胀终态的湿度增大, 使汽轮机的内效率降低, 并使汽轮机后几级叶片受到冲刷, 降低汽轮机的使用寿命, 因此限制蒸汽膨胀终态的湿度不得超过 12%。一般是初温 t_1 和初压 p_1 同时提高, 可以使膨胀终态的湿度不增加太大, 但提高初温 t_1 要考虑到材料的限制。

3. 背压 p_2 对热效率的影响

在一定的初温 t_1 、初压 p_1 下, 降低背压 p_2 也能使效率提高, 因为背压 p_2 降低, 终温 t_2 也降低, 增大了循环的温差。从图 2-6 看出, 背压较低的循环功 1—2_a—3_a—5—6—1 比背压较高的循环功 1—2—3—5—6—1 大出面积 2—2_a—3_a—3 的数值。

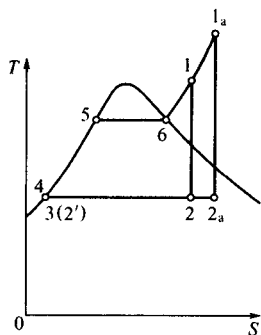


图 2-4 水蒸气朗肯循环提高初温的 T-S 图

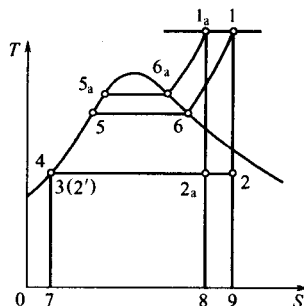


图 2-5 水蒸气朗肯循环提高初压的 T-S 图

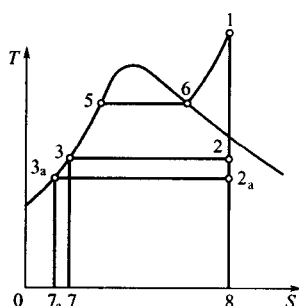


图 2-6 水蒸气朗肯循环背压降低的 T-S 图

p_2 的降低, 受到环境温度 t_2 的限制。现代大型动力设备中, p_2 通常为 0.0039MPa 左右, 相当于 $t_2 = 28.98^\circ\text{C}$ 。

(三) 有摩擦阻力的实际循环

以上讨论的理想的可逆循环, 实际是蒸汽动力装置的循环, 每一个过程都是不可逆过程。在汽轮机中, 汽流高速流动和叶片表面摩擦, 存在摩擦损失, 锅炉内的传热过程存在不可逆温差。下面只讨论汽轮机有摩擦的实际循环。

考虑到摩擦汽轮机中的绝热可逆膨胀过程 1—2 变为不可逆的绝热过程 1—2_{act}。在这样的循环中, q_1 不变, q_2 增大, 如图 2-7 所示, q_2 增大的部分为 2—2_{act}—7—8。

汽轮机中所做的实际内部功为

$$W_{\text{act}} = h_1 - h_{2_{\text{act}}} = (h_1 - h_2) - (h_{2_{\text{act}}} - h_2)$$

少做的功等于多排出的热量 $(h_{2_{\text{act}}} - h_2)$, 如图 2-8 所示。

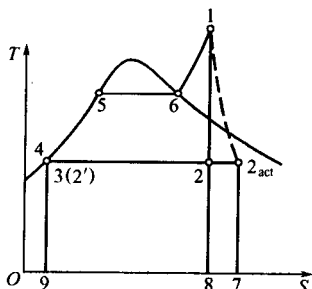


图 2-7 水蒸气做功实际循环图

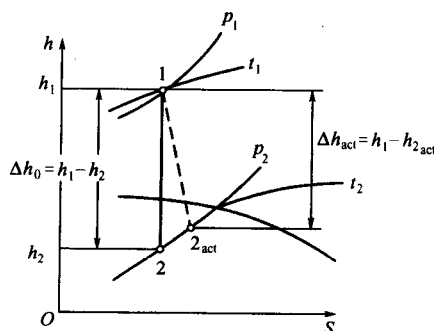


图 2-8 水蒸气在汽轮机中做功的 h - S 图

汽轮机内蒸汽所做的实际功 $W_{T_{\text{act}}}$ 和理论功 W_T 的比值称为汽轮机内部相对效率, 以 η_{0i} 表示, 简称汽轮机效率

$$\eta_{0i} = \frac{W_{T_{\text{act}}}}{W_T} = \frac{h_1 - h_{2_{\text{act}}}}{h_1 - h_2} \quad (2-3)$$

对于实际运行中的汽轮机, 蒸汽终态点 2_{act} 可以根据实验测定 (测定 p_2 或 t_2 以及测定干度 X_{act}), 而 $h_{2_{\text{act}}}$ 可根据实际终态点 2_{act} 在焓-熵图上查出。

蒸汽在实际循环中所做的内部功与热源所供给的热量的比值叫做内部效率, 以 η_i 表示

$$\eta_i = \frac{W_{2_{\text{act}}}}{q_1} = \frac{h_1 - h_{2_{\text{act}}}}{h_1 - h_i} = \frac{\eta_{0i}(h_1 - h_2)}{h_1 - h_i} = \eta_{0i} \eta_h \quad (2-4)$$

在设计计算中, 常需计算蒸汽的消耗量, 设总的蒸汽消耗量为 D (kg/h), 而实际循环所产生的功率为 N_i (kW), 则

$$N_i = \frac{D(h_1 - h_{2_{\text{act}}})}{3600}$$

实际内部汽耗 [kg/(kW·h)] 为

$$d_i = \frac{D}{N_i} = \frac{3600}{h_c - h_{2_{\text{act}}}}$$

若再考虑轴承等处的机械损失, 则机械效率

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (N_e \text{ 为汽轮机的轴功率})$$