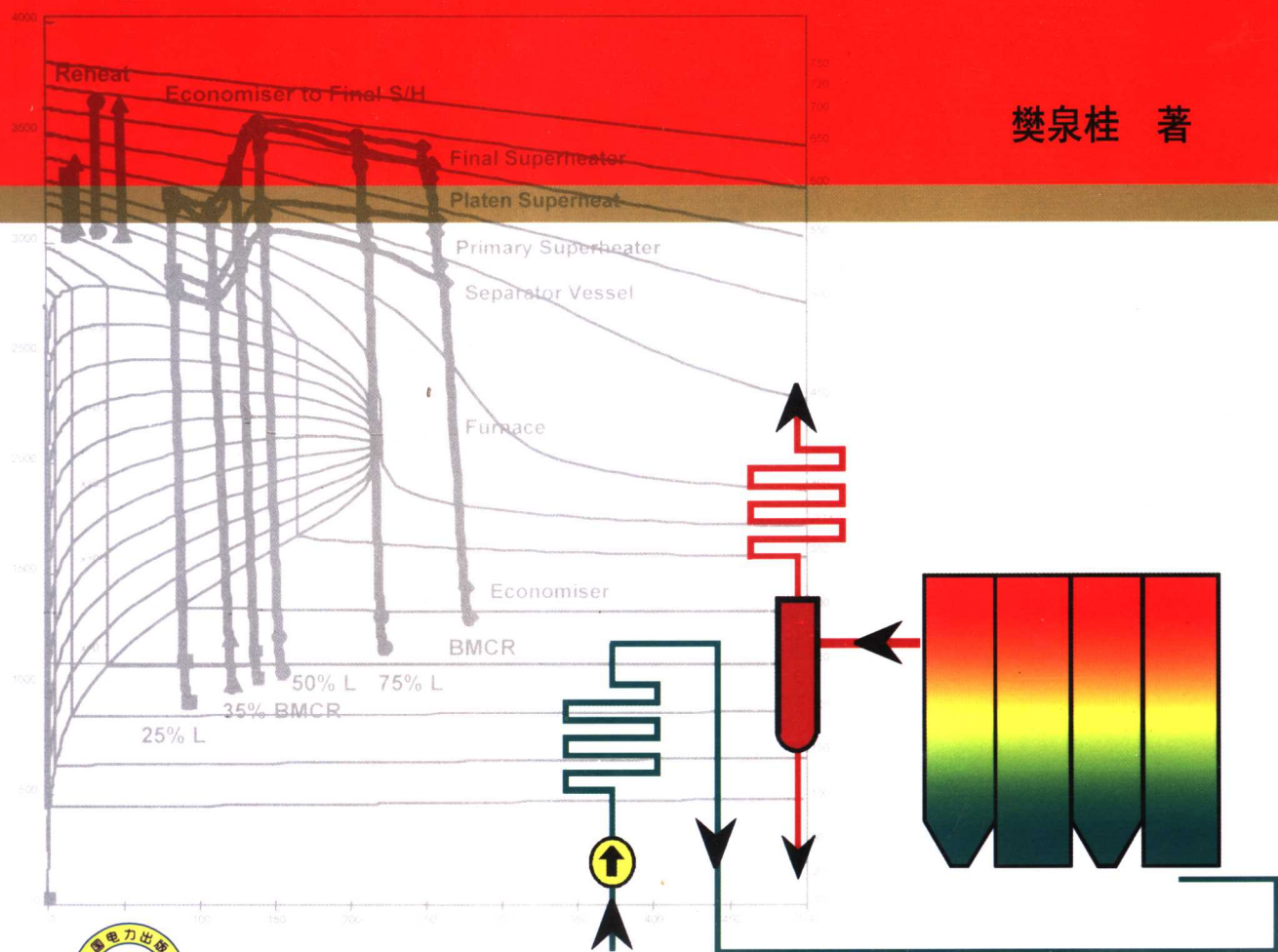


超超临界

及亚临界参数锅炉

樊泉桂 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书突出超临界和超超临界机组锅炉设计及运行的理论和新技术。主要包括：

- 超临界机组的新技术和经济性
- 各种型式的超临界和超超临界锅炉的设计特点及系统布置
- 超临界锅炉中间点温度和水煤比的优化控制
- 超临界直流锅炉启动系统及启动特性
- 超临界机组的金属材料
- 超临界直流锅炉的汽温特性及控制
- 煤粉燃烧新技术及超临界锅炉炉型结构分析
- 亚临界参数锅炉的设计理论和运行特性

责任编辑：潘宏娟 潘琳
封面设计：左铭

► 上架建议：电力工程/火力发电



超超临界 及亚临界参数锅炉

樊泉桂 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书重点阐述新一代超临界和超超临界机组锅炉设计及运行方面的主要理论和
技术。包括超临界机组的新技术和经济性；各种型式的超临界和超超临界锅炉的
设计特点及系统布置；超临界锅炉螺旋管圈水冷壁与内螺纹管垂直管屏水冷壁的流
动特性和传热特性，以及优化设计；超临界锅炉中间点温度和水煤比的优化控制；
超临界锅炉的汽温特性和汽温调节；超临界直流锅炉启动系统及启动特性；超临
界机组的金属材料；煤粉燃烧新技术。书中内容还包括亚临界参数锅炉的设计理论
和运行特性；调峰机组的变压运行以及火焰检测技术等。

本书适用于从事超临界和超超临界以及亚临界机组锅炉设计、运行的工程技术
人员、科研人员及管理人员，也可供高等院校相关专业的研究生和本科生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

超超临界及亚临界参数锅炉/樊泉桂著. —北京：中
国电力出版社，2007

ISBN 978-7-5083-6081-2

I. 超… II. 樊… III. ①超临界压力锅炉-设计②
超临界压力锅炉-运行 IV. TK229.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 149517 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 484 千字

印数 0001—4000 册 定价 38.00 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

前言

Preface

21 世纪以来,我国的电力工业迈进了一个崭新的发展阶段。以高效率、低煤耗的技术设备实现能源利用和环境保护并重的可持续发展为战略目标,其重要标志是超临界和超超临界机组正在飞速发展。据初步统计,全国大约有八十多个电厂或已经投入运行、或正在建设、或预计建设约两百多台超临界和超超临界机组,多数机组为引进技术国产化产品。这些机组体现了现阶段我国国情和国际上新一代超临界机组的最新技术特征。

限于 20 世纪 90 年代以前国内超临界机组的实际状况,《亚临界与超临界参数锅炉》一书中关于超临界机组锅炉方面的内容的广泛性和理论深度已经不能满足当前和今后电力生产的实际需要。根据超临界和超超临界机组在中国迅速发展的趋势,经过最近几年比较广泛的调查研究,综合了国内外的最新研究成果和作者本人的理论研究结果。作者认为:新一代超临界机组锅炉在设计理论及技术基础,尤其是设计概念方面发生了重大变化,同时也注意到其相当一部分来源于亚临界机组的实践成果和超临界机组锅炉的实践及新技术研究成果。这次新出版的《超超临界及亚临界参数锅炉》与原书相比,新增有关超超临界及超临界机组锅炉方面的内容约占 60% 以上,同时也对亚临界参数锅炉的内容进行了大量的补充和修改。

本书的主要特点是:重点阐述目前国内正在发展的具有世界先进技术水平的超临界和超超临界机组锅炉,内容新颖,类型齐全。采用大量实际数据,以定性和定量分析相结合阐述了超临界机组锅炉的运行特性,数据来源于实际工程和运行试验,引用了参考文献中的部分数据和实例。尤其是对各类超临界锅炉的共同性和特殊性进行了探索性的研究。在超临界压力下工质热物理特性对锅炉运行特性的影响,在水冷壁工质温度和中间点温度控制、汽温特性和汽温控制,在超临界锅炉设计和运行的关键问题等方面,提出了作者的理论见解;避免空泛化及抽象化的理论叙述,增强了系统性、逻辑性、实用性;相对独立的模块化结构和简洁明确的理论观点也增强了可读性。

本书的核心内容包括新一代超临界和超超临界机组锅炉的理论研究、设计新概念及运行特性方面的几个关键性问题。具体内容包括:超临界和超超临界机组的新技术和经济性;各种类型超临界锅炉的特点及系统布置;超临界锅炉螺旋管圈水冷壁与内螺纹管垂直管屏水冷壁的流动特性和传热特性以及优化设计;超临界锅炉水冷壁工质温度和中间点温度以及水煤比的优化控

制；超临界锅炉的汽温特性及汽温控制；超临界直流锅炉启动系统及启动特性；超临界锅炉的煤粉燃烧新技术；超临界机组的金属材料；亚临界参数锅炉的相关设计理论和运行特性以及火焰检测技术；超临界与亚临界机组的变压运行等。

第一～六章主要分析超临界和超超临界机组锅炉的技术特点、理论和设计新概念以及运行特性，介绍了超临界机组的金属材料；第七章介绍并分析了超临界与亚临界锅炉的煤粉燃烧新概念和新技术；第八～十二章主要分析亚临界机组锅炉和 W 型火焰锅炉的技术性能、理论概念以及运行特性，其中第十章的内容也适用于超临界锅炉；第十三～十五章主要包括 300、600MW 单元机组的变压运行、大型锅炉热力计算方法改进和火焰检测技术等。

本书参考了大量的新资料和新文献，在此特别向相关单位与作者表示真诚的谢意。

全书由张经武审阅，他认真、细致地通读了书稿，并以丰富的工程实际经验和严谨的学术态度对书稿进行了修改，使本书的严谨性大为提高，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2007 年 7 月

目
录

Contents

前言

第一章 超临界及超超临界机组的技术性能	1
第一节 超临界及超超临界机组的发展概况	1
第二节 超临界和超超临界机组的容量及参数	5
第三节 超临界机组的热效率及煤耗	6
第四节 超临界机组与亚临界机组的主要区别	13
第五节 超临界锅炉的性能要求	15
第六节 超临界直流锅炉的主要特点	15
第七节 新一代超临界锅炉的技术特点	17
第八节 部分超临界锅炉燃用的典型煤质	19
第二章 超临界及超超临界锅炉的型式及系统	22
第一节 X 电厂 600MW 超临界锅炉	22
第二节 B 电厂 600MW 超临界锅炉	28
第三节 Q 电厂 600MW 超临界锅炉	32
第四节 C 电厂 600MW 超超临界锅炉	35
第五节 典型的 1000MW 超超临界锅炉	39
第六节 塔型超临界和超超临界锅炉	51
第七节 上海石洞口第二电厂 600MW 超临界锅炉	57
第八节 800MW 超临界锅炉	59
第三章 超临界锅炉水冷壁的传热及水动力特性	62
第一节 超临界压力下水和水蒸气的热物理特性	62
第二节 超临界压力下水冷壁管的传热特性	64
第三节 水冷壁型式与质量流速优化设计	67
第四节 螺旋管圈水冷壁的特点及水动力特性	69
第五节 光管垂直管屏水冷壁的特点及水动力特性	73
第六节 内螺旋管垂直管屏水冷壁的变压运行特性	76
第七节 30MPa 以上压力水冷壁的水动力及传热特性	82
第八节 超临界锅炉水冷壁工质温度控制	83

第九节	超临界锅炉水冷壁传热恶化的判据	87
第十节	1000MW 超超临界锅炉的水冷壁系统	90
第四章	超临界锅炉的启动系统及启动特性	95
第一节	超临界直流锅炉启动系统的主要任务	95
第二节	带循环泵的启动系统	96
第三节	带循环泵和扩容器的启动系统	107
第四节	简化型启动系统	112
第五节	带快速启动旁路的启动系统	113
第六节	带三级旁路的启动系统	115
第七节	带大气式扩容器的启动系统	118
第八节	超临界机组的启动特性	121
第九节	超临界机组的旁路系统与启动方式	129
第五章	超临界机组的金属材料	132
第一节	超临界机组金属材料的类型和性能	132
第二节	超临界机组锅炉的金属材料	140
第三节	超临界机组汽轮机的金属材料	143
第六章	超临界锅炉的中间点温度控制和汽温调节	146
第一节	超临界锅炉的中间点温度控制	146
第二节	超临界锅炉的汽温特性	149
第三节	超临界锅炉的汽温调节	152
第四节	500 和 800MW 超临界机组的运行特性	158
第五节	上海石洞口第二电厂 600MW 超临界锅炉的运行特性	161
第六节	超临界机组的变压运行	163
第七章	煤粉燃烧新技术及超临界锅炉炉型结构分析	167
第一节	低负荷运行无油稳燃技术	167
第二节	燃烧过程 NO _x 控制新技术	169
第三节	超临界锅炉燃烧器及配风技术	178
第四节	超临界和超超临界锅炉的炉型结构分析	190
第八章	亚临界参数锅炉的类型及性能	199
第一节	亚临界参数锅炉的主要类型	199
第二节	亚临界参数锅炉的汽包装置	210
第三节	自然循环锅炉的技术性能	212
第四节	控制循环锅炉的技术性能	213
第五节	复合循环锅炉的技术性能	214

第九章 亚临界参数锅炉的运行特性	216
第一节 给水压力与温度变化的静态特性.....	216
第二节 过热蒸汽压力与温度变化的静态特性.....	217
第三节 再热蒸汽压力与温度变化的静态特性.....	222
第四节 蒸汽流量、燃料量及过量空气系数.....	224
第五节 亚临界机组的启动特性.....	225
第十章 亚临界锅炉受热面布置及传热特性	229
第一节 亚临界锅炉受热面布置的特点.....	229
第二节 汽温调节方式与受热面传热特性.....	231
第三节 亚临界锅炉过热器和再热器系统.....	234
第十一章 W型火焰锅炉的燃烧技术和综合性能	240
第一节 W型火焰锅炉的整体布置	240
第二节 W型火焰锅炉的技术特点	247
第三节 W型火焰锅炉的燃烧技术	248
第四节 W型火焰锅炉的汽温特性	253
第五节 变负荷过程的动态特性.....	255
第六节 配置 W 火焰锅炉的 660MW 机组的启动特性	259
第十二章 亚临界锅炉的水动力及传热特性	263
第一节 亚临界锅炉水动力特性概述.....	263
第二节 亚临界自然循环锅炉的水动力及传热特性.....	263
第三节 控制循环锅炉的水动力特性.....	266
第四节 循环特性参数之间的关系.....	267
第十三章 调峰机组的变压运行	269
第一节 调峰机组变压运行的特点.....	269
第二节 调峰锅炉运行中的主要问题.....	274
第三节 调峰锅炉的变压运行特性.....	276
第四节 几种典型锅炉的调峰性能.....	280
第十四章 大容量锅炉热力计算的改进方法	282
第一节 现行方法的特点与问题.....	282
第二节 前苏联的炉膛换热计算校准方法.....	283
第三节 分隔屏过热器传热计算的改进方法.....	287
第四节 屏式过热器传热计算的改进方法.....	289
第五节 大容量锅炉炉膛温度分布计算的改进方法.....	292
第六节 煤的灰污特性与受热面传热系数.....	295

第十五章 大容量锅炉的火焰探测技术	299
第一节 火焰探测技术的发展及类型	299
第二节 红外动态火焰探测原理及系统组成	300
第三节 红外光谱火焰动态响应特性	301
第四节 可见光火焰探测系统组成及运行原理	304
参考文献	306

现了国产化。这些产品体现了现阶段中国国情和新一代超临界机组技术进步的主要特征,即蒸汽压力为 25~28MPa,蒸汽温度为 540~604℃,机组发电功率为 600MW、900MW、1000MW 级,机组热效率为 40%~44%,发电煤耗为 300~275g/(kW·h),单位时间的水资源节约 6%~10%,污染物的排放量大 幅度降低。

根据统计数据,中国亚临界机组的循环热效率为 37%,发电煤耗约为 330~340g/(kW·h)。与世界目前及未来先进水平的超临界机组发电技术相比,热效率相差 10%~18%,多消耗燃料量 25%~30%以上。即便采用最新的燃烧技术,污染物的总排放量也相应增加 25%~30%以上,同时多消耗水资源 6%~10%以上。

据统计分析认为,采用新一代超临界和超超临界机组,热效率比国内现有机组平均水平提高 10%,节煤近 25%,一台 1000MW 级的超临界机组,一年就可以节约煤炭约 70 万 t。

发展超超临界机组的意义不仅在于提高了机组的发电效率,提高了能源利用率,同时,还能节约水资源。对于同容量的 600MW 机组,国内目前亚临界机组的耗水量为 1t/s,而国际先进水平为 0.8t/s。

超超临界机组将是适合中国洁净煤燃烧和提高能源利用率的主要方向。洁净煤燃烧技术的另一个方向是采用流化床燃烧技术,其可以使 NO_x 排放量减少 80%~90%。但是研究表明,流化床在 850~950℃的低温燃烧出现的 N₂O 排放是一个更为严重的污染问题。N₂O 俗称笑气,是一种对大气臭氧层破坏性极强的有害气体,同时对人的神经系统也具有毒害作用。而流化床低温燃烧是产生 N₂O 的最大污染源。因此,控制氮氧化物的排放必须同时考虑到 NO_x 和 N₂O。但控制 N₂O 的生成,必须达到 1000℃以上的燃烧温度。煤粉燃烧属于高温燃烧,只产生 NO_x。因此,采用超临界机组,可降低煤耗,减少污染物总量的排放。同时通过改进燃烧技术,使 NO_x 的排放进一步降低。

一、我国超临界和超超临界机组分布及技术水平

1. 我国超临界和超超临界机组的分布情况

现阶段我国超临界和超超临界机组主要分布在沿海地区和电力缺口较大的区域。沿海地区具有得天独厚的水资源优势,海水直接作为冷却水,冷却效果基本不受季节的影响,而且海水温度低,冷却效果好,易于维持凝汽器的真空度和降低汽轮机的背压,提高机组循环热效率,节省煤耗,同时节约大量淡水资源。而淡水资源紧缺的地区,也可以节约用水量 6%以上。不过就目前而言,采用空冷凝汽器技术,可以节水 2/3。但常年气温较高且水资源紧缺或者煤炭供应运输距离较远的地区,建设大容量超临界和超超临界机组会遇到比较多的困难,且运行效果也不容易达到理想的状态。

表 1-1 初步统计了我国超临界和超超临界机组的发展现状以及在全国各地区的分布情况。表中数据包含已经运行、或正在建设、或规划建设项目。特别说明,表 1-1 的统计未经任何机构确认,仅供参考。

2. 我国电厂超临界机组的基本参数

提高蒸汽参数和采用最先进的多种技术成果是新一代超临界和超超临界机组提高机组发电效率,降低发电煤耗,减小污染物排放量,节省水资源的根本出路。根据我国各地区现状,综合分析机组造价和综合效益,将超临界机组和超超临界机组的基本参数确定为 25~28MPa,540~605℃,容量为 600、900、1000MW 级,符合目前和未来国内火力发电的发展战略。

表 1-1

我国各地超临界和超超临界机组的分布

序号	电厂及地区	机组功率	序号	电厂及地区	机组功率
1	上海石洞口	2×600MW	46	山东邹县	4×1000MW
2	上海外高桥	2×900MW	47	山东莱州	4×1000MW
	上海外高桥	2×1000MW	48	山东微山湖	2×600MW
3	河南平顶山	2×1000MW	49	山东费县	2×600MW
4	河南沁北	2×600MW	50	山东潍坊	2×600MW
5	河南洛河	2×600MW	51	山东沾化	2×660MW
6	河南新乡宝山	2×600MW	52	山东日照岚山	4×600MW
7	河南首阳山	2×600MW	53	山东烟台八角	2×660MW
8	河南三门峡	2×600MW	54	广东汕头海门	4×1000MW
9	河南南阳	2×600MW	55	广东汕尾	8×600MW
10	河南开封	2×600MW	56	广东潮州	4×600MW
11	河南鸭河口	2×600MW	57	广东珠海	2×600MW
12	河南鹤壁	2×600MW	58	广东大亚湾钢厂	4×600MW
13	河南禹州	2×600MW	59	广东惠来	4×600MW
14	河南信阳	2×600MW	60	广东江门台山	2×600MW
15	河南姚孟	2×600MW	61	广东深圳河源	2×600MW
16	河南民权	4×600MW	62	浙江玉环	4×1000MW
17	湖南长沙	2×600MW	63	浙江宁海	4×600MW
18	湖南湘潭	2×600MW	64	浙江乌沙山	4×600MW
19	湖南益阳	4×600MW	65	浙江兰溪	4×600MW
20	江苏泰州	2×1000MW	66	浙江苏州	2×600MW
21	江苏常熟	4×600MW	67	浙江台州	2×600MW
22	江苏常州	2×600MW	68	浙江北仑港	2×1000MW
23	江苏扬州	4×600MW	69	安徽阜阳	2×600MW
24	江苏利港	2×600MW	70	安徽芜湖	2×600MW
25	江苏太仓	2×600MW	71	安徽铜陵	2×600MW
26	江苏南京马渡	2×600MW	72	安徽平圩	2×600MW
27	江苏徐州澜山	2×600MW	73	安徽田集	2×600MW
28	江苏吕四港	3×600MW	74	安徽宿州	2×600MW
29	江苏南京	2×300MW	75	福建宁德	4×600MW
30	江苏沙洲	4×600MW	76	福州江阴	2×600MW
31	江苏镇江	2×600MW	77	福建后石	6×600MW
	江苏镇江	2×1000MW	78	福建古雷	4×900MW
32	黑龙江鹤岗	2×1000MW	79	福州可门	8×600MW
33	黑龙江哈三	2×1000MW	80	福建泉州南埔	2×600MW
34	黑龙江双鸭山	2×600MW	81	福建罗源湾	4×600MW
35	天津北疆	4×1000MW	82	湖北蒲圻	2×1000MW
36	天津盘山	2×500MW	83	湖北荆门热电厂	2×600MW
37	江西丰城	2×600MW	84	湖北阳逻	2×600MW
38	江西黄金埠	2×600MW	85	湖北大别山	2×600MW
39	内蒙古伊敏	2×500MW	86	辽宁大连庄河	2×600MW
40	陕西蒲城	2×600MW	87	辽宁绥中	2×800MW
41	河北西柏坡	2×600MW	88	辽宁营口	2×300MW
42	河北上安	2×600MW		辽宁营口	2×600MW
43	河北曹妃甸	2×1000MW	89	广西钦州	2×600MW
44	山西王曲	2×600MW	90	广西贵港	2×600MW
45	山西古城	2×1000MW	91	吉林九台	4×600MW

3. 先进技术的排放目标值

在降低发电煤耗、降低总排放量的基础上，进一步实现排放量的最低值是超临界机组采用新的燃烧技术和脱硫技术的根本目的。表 1-2 列出了污染物排放的目标值。目前采用先进技术的设备，可以将污染物排放值控制在表所列的目标值以下。

表 1-2 污染物排放的目标值

排放物及脱硫率	目标值
颗粒物 (mg/m ³ , 标准状态下)	20
SO ₂ (mg/m ³ , 标准状态下)	400
SO ₂ 脱硫率 (%)	88
NO _x (mg/m ³ , 标准状态下)	300

二、我国超临界和超超临界机组的技术水平和可靠性

1. 在提高机组运行可靠性和热效率，降低煤耗方面的技术水平

随着超临界机组的蒸汽参数不断提高，容量不断增大，可靠性成为影响机组效率的重要因素。超临界机组和超超临界机组在技术上已经比较成熟，而且新一代超临界机组和超超临界机组的技术进步十分明显。20 世纪 80 年代以后，随着耐高温高压金属材料的性能水平不断提高和超临界机组技术逐步趋于成熟，其可靠性与亚临界机组接近，世界先进水平的超临界机组和超超临界机组可用率可以达到 85% 以上，最高达到 90%。不过国外电厂大机组燃用的煤质比国内的煤质变化较小，一般燃用优质煤。

国内超临界机组的运行实践表明，超临界机组运行出现的问题中除了水冷壁等蒸发系统爆管和螺旋管圈水冷壁变形外，其他大多数问题并非是超临界机组自身固有的问题。新一代超临界机组采用了大量比较成熟的技术，可靠性水平将进一步提高。运行中既要注意超临界机组的一些特殊问题，也要更多地注意防范出现类似亚临界机组的问题。

对于我国目前的情况而言，最重要的问题仍然首先是机组运行可靠性。因为我国的煤质资源比较复杂，很难保证机组燃用单一品质的煤质，因此煤质变化对于机组运行的可靠性构成了随机性的潜在问题。新一代超临界机组和超超临界机组已经充分考虑了锅炉对煤质变化的适应性问题。比如增加炉膛容积，提高炉膛高度，提高燃烧器在低负荷的稳燃能力等。同时，国内电厂对大机组变煤质运行初步积累了一些经验，只要运行人员对超临界和超超临界机组的运行特性能够充分认识并有足够的理论与技术准备，由于煤质变化出现的问题是可以避免和不难解决的。

超临界锅炉运行中最特殊的是水冷壁的工作特性与亚临界汽包锅炉不同。变压运行的超临界直流锅炉的水冷壁既要在亚临界压力范围内工作，也要在超临界压力范围内工作，中间还要经过临界压力，所以既可能发生亚临界压力下的膜态沸腾，也可能发生超临界压力下的类膜态沸腾问题。但新一代超临界直流锅炉吸取了亚临界锅炉水冷壁的经验，在高热负荷区域一般都采用内螺纹管，与 20 世纪 80 年代的超临界锅炉相比，可靠性进一步提高。

由于蒸汽参数大幅度提高，锅炉、汽轮机、蒸汽管道、高压加热器等需要采用新材料，以提高耐高温、抗蠕变能力和承受超临界和超超临界压力的强度，并减小壁厚，提高机组对快速负荷变化的适应能力。新研制的金属材料提高了锅炉、汽轮机的疲劳寿命，降低导热系数，减小热应力，同时提高了高参数下金属耐腐蚀和常温下抗氧化的能力以及降低金属的膨胀系数等，使新金属材料的性能得到全面提升。各工业发达国家都在研制新一代金属材料，以适应超临界机组向超高参数发展的需要。

此外，采用汽轮机末级长叶片，改善汽轮机通流特性，增加回热加热级数，改变汽轮机上下气缸的结构和强度方面，也取得了较大技术进步，使机组性能得以大幅度提升。

2. 在降低污染物排放量方面的技术水平

新一代超临界机组和超超临界锅炉采用了多级配风的低 NO_x 燃烧器, 实现首先在火焰内脱氮的新概念。与此同时, 在炉膛内进一步采用多级配风, 实现在炉内脱氮的新概念。除此之外, 采用降低水冷壁的热负荷, 均衡炉膛内的温度分布的技术措施, 对于降低 NO_x 污染物取得了良好的效果。

SO_2 的排放控制主要通过烟气脱硫装置来实现。

新一代超临界机组和超超临界机组的技术已经成熟。国内已经实现了大规模的成套设备国产化, 河南沁北电厂 600 MW 超临界机组的成功投运, 开创了超临界机组国产化的新记录。国内哈尔滨锅炉厂、哈尔滨汽轮机厂和东方锅炉厂、东方汽轮机厂, 北京巴威厂、上海锅炉厂等已经具有生产超临界机组和超超临界机组的能力。随着国内超临界机组和超超临界机组技术的不断成熟与进步, 超临界机组和超超临界机组的价格也会有所降低。

第二节 超临界和超超临界机组的容量及参数

国产化超临界和超超临界机组的基本参数见表 1-3。

表 1-3 国产化超临界和超超临界机组的基本参数

参 数	单 位	600MW 超临界机组			1000MW 超超临界机组		
机组功率	MW	600	600	600	1000	1000	1000
蒸汽流量 MCR	t/h	1900	1900	1795	2953	2953	3033
过热蒸汽压力	MPa	25.4	25.4	26.15	27.56	27.65	26.25
过热蒸汽温度	℃	543	571	605	605	605	605
再热蒸汽流量	t/h	1640.3	1607.6	1464	2457	2446	2469.7
再热蒸汽进口压力	MPa	4.61	4.71	4.84	6.0	4.92	4.99
再热蒸汽出口压力	MPa	4.42	4.52	4.64	5.8	4.77	4.79
再热蒸汽进口温度	℃	297	322	350	359	375	356.3
再热蒸汽出口温度	℃	569	569	603	603	603/613	603
给水温度	℃	283	284	293	296	297	302.4
燃烧方式		对冲燃烧	对冲燃烧	四角燃烧	双切圆燃烧	双切圆燃烧	对冲燃烧
水冷壁型式		螺旋管圈 垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏	垂直管屏	垂直管屏	垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏
水冷壁管		内螺纹管	内螺纹管	内螺纹管	内螺纹管	内螺纹管	内螺纹管
锅炉制造厂		北京巴威厂	东方锅炉厂	哈尔滨锅炉厂	哈尔滨锅炉厂	上海锅炉厂	东方锅炉厂
电厂		浙江兰溪	河南沁北	广东深圳河源	浙江玉环	国内尚未实施	山东邹县

引进型超临界参数锅炉的容量和参数见表 1-4。

表 1-4 引进型超临界参数锅炉的容量和参数

名 称	单 位	上海石洞口 第二电厂	天津盘山电厂	辽宁绥中电厂	上海外高桥电厂	山西王曲电厂
机组功率	MW	600	500	800	900	600
过热蒸汽流量	t/h	1900	1650	2650	2788	1944.7

续表

名称	单位	上海石洞口第二电厂	天津盘山电厂	辽宁绥中电厂	上海外高桥电厂	山西王曲电厂
再热蒸汽流量	t/h	1613	1481	2151.5	2476	1588.5
过热蒸汽压力	MPa	25.4	25.0	25.0	25.76	24.8
过热蒸汽温度	℃	541	545	545	542	571
再热蒸汽进口压力	MPa	4.77	4.15	3.86	5.92	4.85
再热蒸汽出口压力	MPa	4.57	3.92	3.62	5.74	4.67
再热蒸汽进口温度	℃	338	295	283	319.3	327
再热蒸汽出口温度	℃	566	545	545	568	569
给水温度	℃	286	267	277	273	289
燃烧方式		四角燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	四角燃烧	对冲燃烧
水冷壁型式		螺旋管圈 垂直管屏	垂直管屏	垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏
水冷壁管		光管	光管	光管	内螺纹管	内螺纹管
制造厂商		瑞士苏尔寿	俄罗斯波多尔斯	俄罗斯塔干罗格	阿尔斯通	三井巴布科克

国外超临界和超超临界机组的循环热效率见表 1-5。

表 1-5 国外超临界和超超临界机组的循环热效率

蒸汽压力 (MPa)	25	25	27	29	35
一、二次汽温 (℃)	540/540	560/560	580/600	582/580/580	700/720
凝汽器压力 (kPa)	2.7	2.3	2.3	2.3	~2.3
给水温度 (℃)	260	275	285	300	~330
电厂热效率 (%)	42	43	45.1	47	53~55

第三节 超临界机组的热效率及煤耗

影响超临界机组的热效率及煤耗的技术因素很多，主要包括：提高机组蒸汽参数；采用优化的变反动度的新型汽轮机叶片；汽轮机进汽调节阀补汽技术；采用可调间隙的汽封结构；降低凝汽器背压；增加回热加热级数，提高给水温度；采用内螺纹管水冷壁降低水冷壁质量流速，减小水冷壁流动阻力；控制过热器和再热器减温水量；开发高效燃烧低污染排放和低负荷无油稳燃的燃烧技术；采用带有循环泵的启动系统，加快机组启动速度；优化运行方式；优化辅机配置，降低投资成本和运行电耗等。新技术的综合采用可提高新一代超临界机组的效率，降低发电煤耗。机组热效率与煤耗的关系见图 1-1。

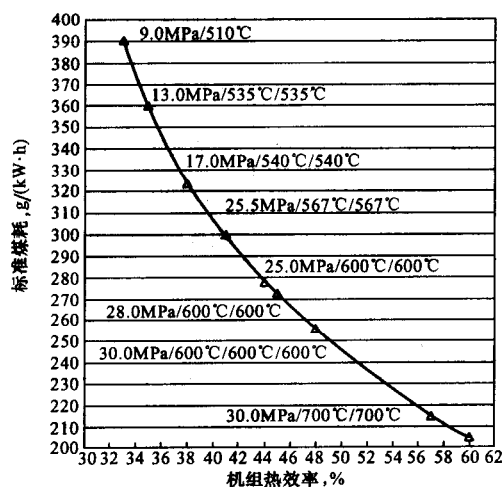


图 1-1 机组热效率与煤耗的关系

影响超临界机组的热效率及煤耗的技术因素很多，主要包括：提高机组蒸汽参数；采用优化的变反动度的新型汽轮机叶片；汽轮机进汽调节阀补汽技术；采用可调间隙的汽封结构；降低凝汽器背压；增加回热加热级数，提高给水温度；采用内螺纹管水冷壁降低水冷壁质量流速，减小水冷壁流动阻力；控制过热器和再热器减温水量；开发高效燃烧低污染排放和低负荷无油稳燃的燃烧技术；采用带有循环泵的启动系统，加快机组启动速度；优化运行方式；优化辅机配置，降低投资成本和运行电耗等。新技术的综合采用可提高新一代超临界机组的效率，降低发电煤耗。机组热效率与煤耗的关系见图 1-1。

一、蒸汽参数及再热对热效率的影响

研究表明，一次中间再热机组，蒸汽温度提高 20℃，机组热耗下降 0.5%~0.6%，循环热效率可提高 1.0%；蒸汽压力每提高 2MPa，循环热

效率大约可提高 0.4%。蒸汽参数由 18MPa/540℃/540℃ 提高到 30MPa/600℃/600℃ 时，相对热效率大约可提高 6%。但是限制蒸汽参数的主要因素是金属材料及其性能。

图 1-2 给出根据国内电厂统计的国内高压、超高压、亚临界、超临界机组发电标准煤耗统计数据的平均值。其中超临界机组的发电标准煤耗是上海石洞口第二电厂在机组投产后前几个月的运行煤耗数据。如果近似按线性估算，机组热效率提高 1%，标准煤耗降低 5.31 g/(kW·h)。

图 1-3 是日本东芝公司研究的蒸汽压力与温度对热效率的影响。

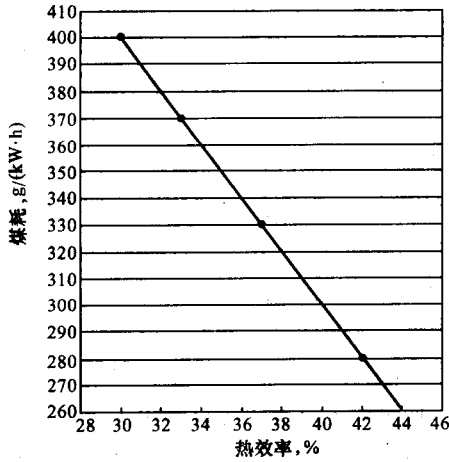


图 1-2 煤耗统计数据平均值

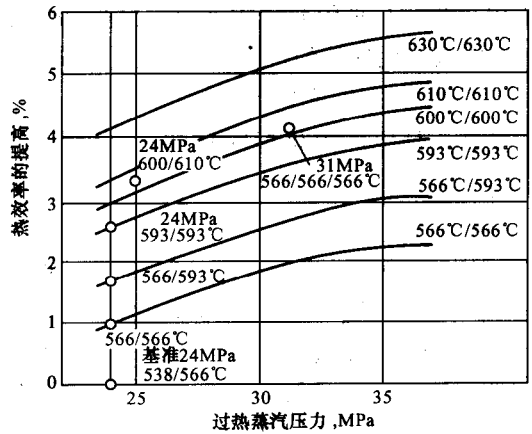


图 1-3 蒸汽压力与温度对热效率的影响

二、汽轮机叶片和汽封以及阀门技术

1. GEC-ALSTHOM 公司的技术

(1) 高压缸采用可控涡叶型，与径向叶片相比高压缸效率提高 1.2%，中压缸效率提高 0.8%。

(2) 采用复合倾斜式叶型，提高汽轮机级效率 0.1%。

(3) 低压缸采用超音速叶片型，效率提高 2.7%。

(4) 采用新长叶片，增大出口环形面积，降低出口流速以减少排汽损失，出口流速由 290m/s 降低到 210m/s，马赫数由 0.76 降低到 0.55，排汽损失由 22kJ/kg 降低到 12kJ/kg，汽轮机效率提高 0.8%。

2. 西门子公司技术

(1) 采用微反动式叶片。西门子公司为上海外高桥电厂提供的 900MW 汽轮机高中压缸采用全三维，各级采用优化的变反动度，并带一定倾斜度的叶片，以降低叶型损失及二次流损失，能大幅减少超音速流动在叶片背弧引发冲击波所造成的损失，其综合内效率可提高 2%。第一级以后的各级叶片的反动度在 30%~60%。

(2) 末级长叶片。上海汽轮机厂有限公司与西门子公司合作设计制造的浙江玉环电厂参数为 26.25MPa/600℃/600℃ 以及外高桥参数为 27MPa/600℃/600℃ 的 1000MW 汽轮机，采用三种长叶片 977、1146、1430mm。

(3) 上海外高桥电厂 900MW 超临界机组汽轮机末级为 1146mm 长叶片，西门子公司为

解决湿汽冲蚀叶片问题，在空心的末级静叶内通入较高温度的三级抽汽蒸汽，使静叶片表层水膜被加热而逐步蒸发，避免了动叶受水膜脱落产生的大水滴的冲蚀。同时也避免了由于水滴大都会撞向动叶背侧而导致的蒸汽动能消耗，因而也相应提高了级效率。

3. 汽封、单流中压缸技术

- (1) GEC-ALSTHOM 采用可调间隙的汽封结构，可提高高压缸级效率 0.2%。
- (2) 采用单流中压缸，降低进口部位的端部损失，中压缸效率提高 2%。
- (3) 俄罗斯新一代汽轮机采用新叶型和可调间隙的汽封结构。
- (4) 上海外高桥电厂 900MW 超临界机组汽轮机高中压缸的第一级静叶无叶顶间隙及漏气损失，同时与采用冲动式动叶，减少动叶压降相结合的措施，提高了高中压部分的级效率。低压级采用独特的推杆技术，减小了动、静之间的间隙，提高了低压部分的级效率。

4. 汽轮机进汽调节阀门补汽技术

浙江玉环电厂 1000MW 超超临界机组汽轮机配置两个主蒸汽调节汽阀和三个小流量补

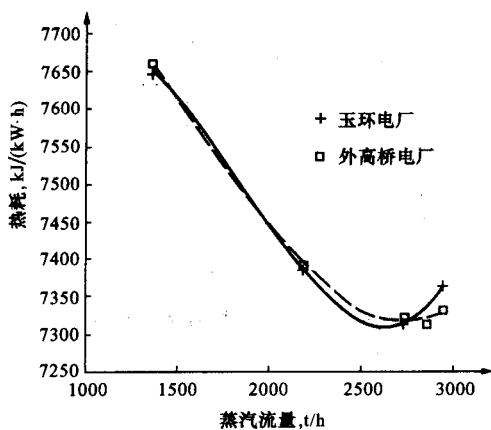


图 1-4 汽轮机补气时热耗随负荷的变化

汽阀。通过补汽阀的蒸汽是主蒸汽调节汽阀前的新蒸汽，约占进汽量的 5%~10%。经补汽阀后温度降低 30℃。这部分蒸汽通入高压第 5 级动叶。全周进汽具有叶片应力低，无附加汽隙激振，滑压运行经济性和安全可靠性的特点。补汽阀技术在保持全周进汽优势的同时，使全周进汽滑压运行额定工况的进汽压力提高到额定压力，从而提高机组经济性。补汽阀开启时，机组由滑压运行转变为定压运行，阀门全开时，汽轮机进汽量是额定工况的 108%，补汽阀流量为 8%，热耗下降 23kJ/(kW·h) 左右。图 1-4 给出浙江玉环电厂和上海外高桥电厂采用汽轮机补汽技术的热耗值。从图 1-4 的数据可以看到，采用补汽技术的

的机组，虽然在整体上因为在高负荷阶段转变为定压运行和无节流损失，因而运行经济性随负荷增加而提高，但在特定工况下，随着补汽量增加，机组热耗略有增加，经济性略有下降。例如，两个电厂 1000MW 超超临界机组的补汽量分别为 8.03% 和 3%，机组负荷大于 90% 后热耗比补汽量为 0% 时相应增加 47kJ/(kW·h) 和 20kJ/(kW·h)。

三、锅炉压降损失对循环热效率的影响

蒸汽参数相同的超临界机组，循环热效率未必相同，除了汽轮机的技术因素外，影响热效率的主要因素在于锅炉的压降损失。其中水冷壁压降损失阻力约占锅炉总压降损失的 50% 以上。例如 Q 电厂 600MW 超临界机组锅炉水冷壁的流动压降在额定负荷时为 1.84MPa，而过热器的总压降为 1.52 MPa，省煤器的总压降为 0.23MPa。

图 1-5 是超临界 600MW 机组锅炉的给水压力和主汽压力与亚临界 600MW 锅炉的数据比较。上海石洞口第二电厂 600MW 机组锅炉的压降损失在 100% 负荷时约为 4MPa，而同参数绥中电厂 800MW 机组锅炉的压降损失在 100% 负荷时约为 6MPa，比亚临界 600MW 机组锅炉大 2~4MPa，由此引起的热效率降低 0.4%~0.8%。

图 1-6 给出了 600MW 亚临界压力汽包锅炉和 600MW 超临界直流锅炉各受热面压降比较。