

超超临界锅炉 设计及运行

樊泉桂 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

超超临界锅炉 设计及运行

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, 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旋管垂直管屏水冷壁的流动特性和传热特性以及优化设计、超临界和超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、超临界和超超临界锅炉的汽温特性及汽温调节、超临界和超超临界锅炉的启动系统及启动特性、超临界和超超临界机组的金属材料、煤粉燃烧新技术及超临界锅炉炉型结构分析、超临界和超超临界机组的变压运行、超临界 W 型火焰锅炉的优化设计、超临界褐煤锅炉、部分超临界锅炉运行中出现的主要问题和解决措施等。

本书可作为从事超临界和超超临界机组锅炉设计、运行的工程技术人员和科研人员的参考用书, 也可供高等院校相关专业的研究生和本科生以及从事电力行业管理的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

超超临界锅炉设计及运行/樊泉桂著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5123-0673-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 135766 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>)

北京市丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 435 千字 1 插页

印数 0001—3000 册 定价 39.00 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

《超超临界及亚临界参数锅炉》一书自出版以来，受到专业界同行的关注，许多专业技术工作者对原书的内容提出了建设性的意见和建议。为了满足专业界的需求，本书作者对原书进行了大幅修改。主要修改体现在：根据工程实际数据和运行经验及试验数据，新增了超超临界锅炉设计和运行特性的理论及技术方面的内容，包括：①新增了超超临界锅炉的中间点温度与汽温控制问题分析。②新增了超临界和超超临界锅炉的汽温偏差分析。③新增了超临界W型火焰锅炉以及水冷壁的优化设计论证。④新增了超临界褐煤锅炉。⑤对原书中的错误和不足之处做了修改和补充：补充了几种新型煤粉燃烧器的燃烧机理，补充了超临界锅炉变压运行的内容；修改并补充了超临界机组金属材料的内容；在部分章节中增补了超临界锅炉运行中出现的主要问题、原因分析和解决措施。⑥由于条件限制，删除了原书中亚临界参数锅炉的内容。鉴于上述原因，新书名确定为《超超临界锅炉设计及运行》。

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。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及图例。注意探索规律，对各类超临界锅炉的共同性和特殊性进行了分析研究。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以及汽温偏差等超临界锅炉设计和运行的关键问题方面，提出了见解和比较具体的理论与实践依据；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，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

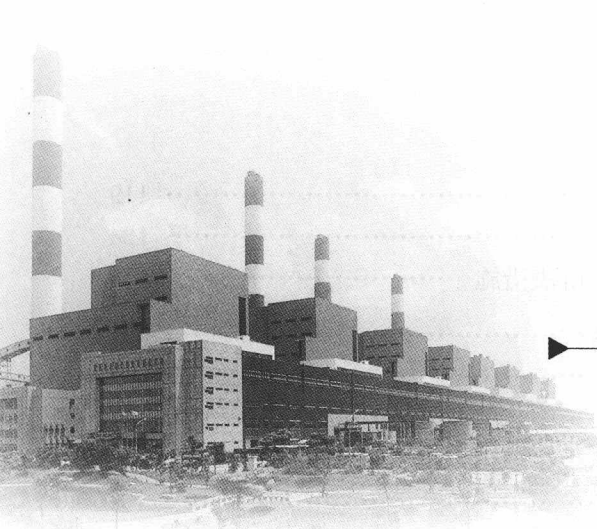
内螺纹管垂直管屏水冷壁的流动特性和传热特性以及优化设计、超临界和超超临界锅炉水冷壁工质温度和中间点温度以及水煤比的优化控制、超临界和超超临界锅炉的汽温特性及汽温调节、超临界和超超临界锅炉的启动系统及启动特性、超临界和超超临界机组的金属材料、煤粉燃烧新技术及超临界锅炉炉型结构分析、超临界和超超临界机组的变压运行、超临界 W 型火焰锅炉的优化设计、超临界褐煤锅炉、部分超临界锅炉运行中出现的主要问题和解决措施等。

本书参考了大量的新资料和新文献，采纳了国内同行专家的建议。特别是上海锅炉有限责任公司的专家曹汉鼎对本书的修改提供了热诚的帮助，安徽省特种设备检测院的专家徐文清提供了重要的修改建议和真诚的帮助。在此，特别向提供建议和帮助的专家表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中难免出现错误和不完善之处，希望读者批评指正。

作者

2010年6月



目 录

超超临界锅炉设计及运行

前言

第一章 超临界和超超临界机组的技术性能	1
第一节 超临界和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.....	7
第三节 超临界机组的热效率及影响因素.....	8
第四节 超临界机组与亚临界机组的主要区别	19
第五节 超临界锅炉的性能要求	22
第六节 超临界直流锅炉的主要特点	23
第七节 新一代超临界锅炉的技术特点	25
第八节 部分超临界锅炉燃用的典型煤质	27
第二章 超临界和超超临界锅炉的形式及系统	30
第一节 X 电厂 600MW 超临界锅炉	30
第二节 B 电厂 600MW 超临界锅炉	36
第三节 Q 电厂 600MW 超临界锅炉	42
第四节 C 电厂 600MW 超临界锅炉	45
第五节 典型的 1000MW 超超临界锅炉.....	49
第六节 塔型超临界和超超临界锅炉	61
第七节 超临界褐煤锅炉	69
第八节 超临界 W 型火焰锅炉.....	79
第九节 超临界锅炉受热面的设计特点	83
第三章 超临界和超超临界锅炉的传热及水动力特性	91
第一节 超临界压力下水和水蒸气的热物理特性	91
第二节 超临界压力下水冷壁管的传热特性	93
第三节 水冷壁的形式与质量流速优化设计	97
第四节 螺旋管圈水冷壁的特点及水动力特性	99
第五节 光管垂直管屏水冷壁的特点及水动力特性.....	103
第六节 内螺纹管垂直管屏水冷壁的变压运行特性.....	106
第七节 超临界锅炉水冷壁工质温度控制.....	112
第八节 超临界锅炉水冷壁传热恶化的判据.....	116

第九节	1000MW 超超临界锅炉的水冷壁系统	119
第十节	超临界 W 型火焰锅炉水冷壁的优化设计	124
第十一节	垂直管屏水冷壁运行中出现的问题与解决措施	128
第四章	超临界和超超临界锅炉的启动系统及启动特性	133
第一节	超临界直流锅炉启动系统的主要任务	133
第二节	带循环泵的启动系统	134
第三节	带循环泵和扩容器的启动系统	144
第四节	简化型启动系统	151
第五节	带快速启动旁路的启动系统	152
第六节	带三级旁路的启动系统	154
第七节	带大气式扩容器的启动系统	157
第八节	超临界机组的启动特性	160
第九节	超临界机组的旁路系统与启动方式	172
第五章	超临界和超超临界机组的金属材料	175
第一节	超临界和超超临界机组的金属材料类型与性能	175
第二节	超临界和超超临界机组锅炉的金属材料	185
第三节	超临界和超超临界机组汽轮机的金属材料	189
第六章	超临界和超超临界锅炉的中间点温度控制和汽温调节	192
第一节	超临界锅炉的中间点温度控制	192
第二节	超临界锅炉的汽温特性	195
第三节	超临界锅炉的汽温调节	199
第四节	500MW 和 800MW 超临界机组的运行特性	205
第五节	国内早期 600MW 超临界锅炉的运行特性	207
第六节	1000MW 超超临界锅炉中间点温度和汽温控制	209
第七节	超超临界锅炉的汽温偏差	214
第七章	煤粉燃烧新技术及超临界锅炉炉型结构分析	223
第一节	低负荷运行无油稳燃技术	223
第二节	燃烧过程 NO _x 控制新技术	225
第三节	超临界锅炉燃烧器及配风技术	234
第四节	W 型火焰锅炉的燃烧器及配风方式	249
第五节	超临界和超超临界锅炉的炉型结构分析	252
第八章	超临界和超超临界机组的变压运行	258
第一节	超临界机组的运行模式及经济性比较	258
第二节	超临界机组调峰运行的特点	262
第三节	超临界锅炉调峰运行中的主要问题	266
第四节	超超临界锅炉的运行特性	268
参考文献	274

第一章

超临界和超超临界机组的技术性能

第一节 超临界和超超临界机组的发展概况

超临界是一个热力学概念。对于水和水蒸气，压力超过临界压力 22.129MPa 的状态，即为超临界状态。水和水蒸气在临界压力 22.129MPa 对应的饱和温度为 374.15℃。超临界机组即指蒸汽压力达到超临界状态的发电机组。

关于超超临界机组的划分，世界上尚未有统一的规范。在中国电力行业，蒸汽参数达到 27MPa/580℃/600℃ 以上的高效超临界机组，属于超超临界机组，即由于蒸汽压力和蒸汽温度提高，机组热效率达到 43%~48% 或以上，供电煤耗为 260~290g/(kW·h)，比同容量的常规超临界机组效率提高 5% 或更高，且锅炉和汽轮机机组所用钢材发生较大变化的机组。

超临界和超超临界机组的最大优势是能够大幅度提高循环热效率，降低发电煤耗。但相应地需要提高金属材料的档次和金属部件的焊接工艺水平。全世界主要的工业国家十分注重发展超临界和超超临界机组，苏联境内超临界机组数量及总容量居世界首位。在美国、德国、日本等国家也具有相当数量的超临界机组。目前，日本是世界上超临界机组技术最先进的国家，其技术先进的主要体现是发电煤耗最低，可实现变压运行。日本目前正在研究发展超超临界机组技术的高强度耐热金属材料，并实现了采用垂直管屏内螺纹管水冷壁变压运行的新技术。

超临界机组的发展在 20 世纪 60~70 年代曾经历过低谷时期，主要是因为当时试验条件所限，没有认识到超临界压力下工质的大比热容特性对水动力特性以及传热特性的影响，因而引发了水冷壁多次爆管等事故。经过理论与技术方面的不断发展，发现了超临界压力下的工质存在类膜态沸腾导致的传热恶化问题，克服了技术发展的障碍。与此同时，随着金属材料工业的发展，超临界机组获得了新的生命力。

中国从 20 世纪 90 年代开始引进超临界机组，上海石洞口电厂引进的瑞士 ABB 公司的 600MW 超临界机组，天津盘山电厂、辽宁绥中电厂引进俄罗斯的 500、800MW 超临界机组已经运行多年。21 世纪初，上海外高桥电厂 900MW、福建后石电厂 600MW、江苏常熟电厂 600MW、河南沁北电厂 600MW、浙江玉环电厂 1000MW、山东邹县电厂 1000MW、江苏泰州电厂 1000MW、浙江宁海电厂 1000MW 等超临界和超超临界机组相继建成并投入运行。中国哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂、东方锅炉厂、北京巴威公司分别采用引进日本三菱公司技术、法国阿尔斯通技术、日本日立公司技术、英国三井巴布科克公司技术和美国 B&W 公司技术以及 FW 公司技术设计和制造超临界及超超临界机组。哈尔滨汽轮机厂、上海汽轮机厂、东方汽轮机厂分别引进日本东芝公司技术、德国西门子公司技术、日本日立公司技术设

计和制造超临界及超临界汽轮机组,标志着中国电力工业开始跨入了世界领先技术水平的行列。

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 600、900、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%,发电煤耗为 330~340g/(kW·h)。与世界目前超临界机组发电技术相比,热效率相差 10%~18%,多消耗燃料量达 25%~30%或以上。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%或以上,同时多消耗水资源 6%~10%或以上。

据统计,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,可以使 NO_x 排放量减少 80%~90%。但是研究表明,流化床在 850~950℃ 低温燃烧时出现的 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,必须使流化床达到 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较多的困难,且运行效果也不容易达到理想的状态。

超临界和超超临界直接空冷机组由于受气候环境的影响,对机组热效率有所影响。直接空冷机组的汽轮机背压年平均值一般为 15kPa,对 600MW 超临界机组的煤耗影响大约为 3.7g/(kW·h),对 1000MW 超超临界机组的煤耗影响大约为 6g/(kW·h)。而 2 台 1000MW 空冷机组比循环水冷却的凝汽式机组节水约 3600t/h,每年大约节水 $2.5 \times 10^7 \text{ t/m}^3$ 。

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的项目,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情况

序号	电厂及地区	机组功率 (MW)	序号	电厂及地区	机组功率 (MW)
1	上海石洞口	2×600	31	江苏镇江	2×600
2	上海外高桥	2×900		江苏镇江	2×1000
	上海外高桥	2×1000	32	黑龙江鹤岗	2×600
3	河南平顶山	2×1000	33	黑龙江哈三	2×1000
4	河南沁北	2×600	34	黑龙江双鸭山	2×600
5	河南洛河	2×600	35	天津北疆	4×1000
6	河南新乡宝山	2×600	36	天津盘山	2×500
7	河南首阳山	2×600	37	江西丰城	2×600
8	河南三门峡	2×600	38	江西黄金埠	2×600
9	河南南阳	2×600	39	内蒙古伊敏	2×500
10	河南开封	2×600	40	陕西蒲城	2×600
11	河南鸭河口	2×600	41	河北西柏坡	2×600
12	河南鹤壁	2×600	42	河北上安	2×600
13	河南禹州	2×600	43	河北曹妃甸	2×1000
14	河南信阳	2×600	44	山西王曲	2×600
15	河南姚孟	2×600	45	山西古城	2×1000
16	河南民权	4×600	46	山东邹县	4×1000
17	湖南长沙	2×600	47	山东莱州	4×1000
18	湖南湘潭	2×600	48	山东微山湖	2×600
19	湖南益阳	4×600	49	山东费县	2×600
20	江苏泰州	2×1000	50	山东潍坊	2×600
21	江苏常熟	4×600	51	山东沾化	2×660
22	江苏常州	2×600	52	山东日照岚山	4×600
23	江苏扬州	4×600	53	山东烟台八角	2×660
24	江苏利港	2×600	54	广东汕头海门	4×1000
25	江苏太仓	2×600	55	广东汕尾	8×600
26	江苏南京马渡	2×600	56	广东潮州	4×1000
27	江苏徐州岚山	2×600	57	广东珠海	2×600
28	江苏吕四港	3×600	58	广东大亚湾钢厂	4×600
29	江苏南京金陵	2×1000	59	广东惠来	4×600
30	江苏沙洲	4×600	60	广东江门台山	2×600

续表

序号	电厂及地区	机组功率 (MW)	序号	电厂及地区	机组功率 (MW)
61	广东河源	2×600	97	广东三水恒益	2×600
62	浙江玉环	4×1000	98	广东湛江雷州	2×1000
63	浙江宁海	4×1000	99	广东珠江	2×1000
64	浙江乌沙山	4×600	100	广东虎门	2×1000
65	浙江兰溪	4×600	101	广东珠海	2×1000
66	浙江苏州	2×600	102	广东台山	2×1000
67	浙江台州	2×600	103	广东三门	2×1000
68	浙江北仑港	2×1000	104	江苏徐州	2×1000
69	安徽阜阳	2×600	105	江苏连云港新海	2×1000
70	安徽芜湖	2×1000	106	江苏南通天生港	2×1000
71	安徽铜陵	2×1000	107	江苏南京下关	2×600
72	安徽平圩	2×600	108	江苏射阳港	2×600
73	安徽田集	2×600	109	江苏镇江谏壁	2×1000
74	安徽宿州	2×600	110	河北衡水	2×600
75	福建宁德	4×600	111	河北秦皇岛卢龙	4×600
76	福州江阴	2×600	112	河北廊坊固安	2×600
77	福建后石	6×600	113	河北张家口下花园	2×600
78	福建古雷	4×900	114	河北张家口蔚县	2×600
79	福州可门	8×600	115	山西古交	2×600
80	福建泉州南埔	2×600	116	山西大同二电	2×600
81	福建罗源湾	4×600	117	山西霍州兆光	2×600
82	湖北蒲圻	2×1000	118	山西左权	2×600
83	湖北荆门热电	2×600	119	山西定襄	2×1000
84	湖北阳逻	2×600	120	福建石狮鸿山	2×600
85	湖北大别山	2×600	121	福建惠安	2×1000
86	辽宁大连庄河	2×600	122	浙江苍南	2×1000
87	辽宁绥中	2×800	123	浙江宁海	2×1000
88	辽宁营口	2×300	124	浙江乌沙山	2×1000
	辽宁营口	2×600	125	云南镇雄	2×600
89	广西钦州	2×600	126	河南荥阳	2×600
90	广西贵港	2×600	127	河南天益	2×600
91	吉林九台	4×660	128	河南郑州新密	2×1000
92	上海漕泾	2×1000	129	河南燕山	2×1000
93	上海望亭	2×600	130	河南三门峡	2×1000
94	海南	2×1000	131	河南巩义豫联	2×1000
95	广东海门	2×1000	132	河南郑州裕中	2×1000
96	广东惠州平海	2×1000	133	河南旬阳	4×1000

续表

序号	电厂及地区	机组功率 (MW)	序号	电厂及地区	机组功率 (MW)
134	河南沁北	2×1000	159	安徽池州	2×600
135	河南番阳	2×1000	160	安徽六安	2×600
136	陕西宝鸡	2×600	161	安徽淮南凤台	2×600
137	陕西榆林府谷	2×1000	162	安徽马鞍山	2×600
138	陕西榆林段寨	2×1000	163	广西防城港	2×600
139	宁夏灵武	2×1000	164	广西北海	2×600
140	甘肃酒泉金塔	2×1000	165	广西崇左	2×600
141	新疆昌吉奇台	2×600	166	广西贺州	2×1000
	新疆昌吉奇台	4×1000	167	湖北黄石西塞山	2×660
142	新疆塔城乌苏	2×600	168	湖北鄂州	2×600
143	新疆玛纳斯	2×600	169	湖北汉川	2×1000
144	新疆哈密伊吾淖毛湖	2×600	170	湖北荆沙	2×600
	新疆哈密伊吾淖毛湖	4×1000		湖北荆沙	2×1000
145	新疆西山热电	2×600	171	湖南冷水江金竹山	2×600
	新疆西山热电	2×1000	172	湖南株洲	4×1000
146	内蒙鄂温克	2×600	173	湖南井冈山	2×600
147	内蒙海勃湾	2×600	174	山东枣庄十里泉	2×600
148	内蒙呼和浩特金桥	2×600	175	山东滨州博兴	2×1000
149	内蒙克什克腾	2×1000	176	山东寿光	2×1000
150	内蒙鄂尔多斯长城	2×1000	177	山东黄岛	2×600
151	内蒙锡林郭勒盟正蓝	2×600	178	吉林长山	2×600
152	辽宁绥中	2×1000	179	吉林白城	2×600
153	辽宁铁岭	2×600	180	江西景德镇	2×600
154	贵州大龙	2×600	181	江西抚州	2×1000
155	贵州黔西	2×600	182	重庆合川双槐	2×600
156	贵州都匀	2×600	183	重庆江津	2×1000
157	贵州兴义	2×600	184	四川宜宾珙县	2×600
158	贵州六枝	2×1000		四川宜宾珙县	2×1000

3. 先进技术的排放目标值

在降低发电煤耗和总排放量的基础上, 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 脱除率 (%)	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，但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，最重要的问题仍然是机组运行的可靠性问题。因为我国的煤质资源比较复杂，很难保证机组燃用单一品种的煤质，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，例如增加炉膛容积、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。

超临界锅炉与亚临界汽包锅炉运行中的最大区别在于水冷壁的工作特性。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旋管，与20世纪80年代的超临界锅炉相比，可靠性进一步提高。

由于蒸汽参数的大幅度提高，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、热导率，减小了热应力，同时提高了金属材料的抗烟气腐蚀和抗蒸汽腐蚀的能力以及降低金属材料的膨胀系数等，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，在改善汽轮机通流特性、增加回热加热级数、改变汽轮机上下汽缸的结构和强度方面也取得了较大的技术进步，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

新一代超临界和超超临界机组采用多级配风的低 NO_x 燃烧器，实现了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，实现了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600MW超临界机组的成功投运，开创了超临界机组国产化的新纪录。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和超超临界机组的能力。

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	600MW 超临界机组			1000MW 超超临界机组		
	机组功率 (MW)	600	600	600	1000	1000
蒸汽流量 MCR (t/h)	1900	1900	1795	2953	3091	3033
过热蒸汽压力 (MPa)	25.4	25.4	26.15	27.46	27.46	26.25
过热蒸汽温度 (°C)	543	571	605	605	605	605
再热蒸汽流量 (t/h)	1640.3	1607.6	1464	2457	2581	2469.7
再热蒸汽进口压力 (MPa)	4.61	4.71	4.84	6.0	6.06	4.99
再热蒸汽出口压力 (MPa)	4.42	4.52	4.64	5.8	5.86	4.79
再热蒸汽进口温度 (°C)	297	322	350	359	374	356.3
再热蒸汽出口温度 (°C)	569	569	603	603	603	603
给水温度 (°C)	283	284	293	296	298	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
水冷壁的形式	螺旋管圈 垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏	垂直管屏	垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏	螺旋管圈 垂直管屏
水冷壁管	内螺旋管	内螺旋管	内螺旋管	内螺旋管	光管	内螺旋管
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	广东河源	浙江玉环	浙江宁海	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	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
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 (°C)	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 (°C)	338	295	283	319.3	327
再热蒸汽出口温度 (°C)	566	545	545	568	569
给水温度 (°C)	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
水冷壁的形式	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

续表

名称	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
水冷壁管	光管	光管	光管	光管	内螺纹管
制造厂商	瑞士苏尔寿公司	俄罗斯波多尔斯公司	俄罗斯塔干罗格公司	阿尔斯通公司	三井巴布科克公司

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 (°C)	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	约 2.3
给水温度 (°C)	260	275	285	300	约 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影响因素

影响超临界机组的热效率及煤耗的技术因素有很多，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；汽轮机进汽调节阀门补汽技术；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。

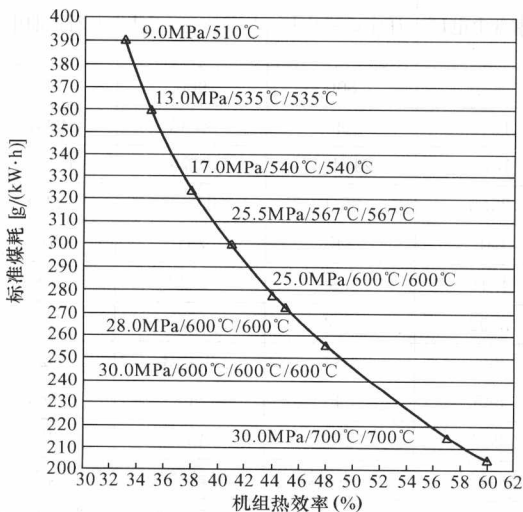


图 1-1 机组热效率与煤耗的关系

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，蒸汽温度每提高 20°C，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°C/540°C 提高到 30MPa/600°C/600°C 时，相对热效率大约可提高 6%。但是影响蒸汽参数的主要因素是金属材料及其性能。

图 1-2 给出了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，机组热效率每提高1%，则标准煤耗降低5.31g/(kW·h)。

图1-3所示为日本东芝公司研究的蒸汽压力与温度对热效率的影响。

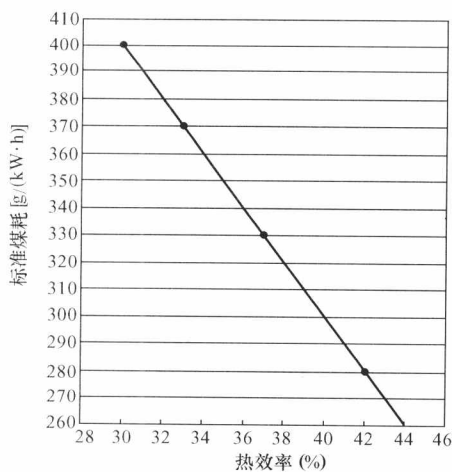


图1-2 煤耗统计数据的平均值

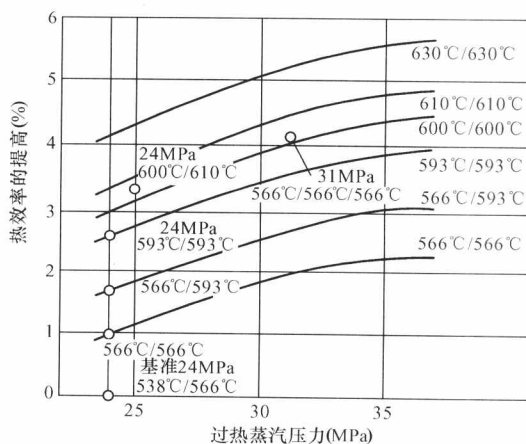


图1-3 日本东芝公司研究的蒸汽压力与温度对热效率的影响

二、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，其循环热效率未必相同，除了汽轮机的技术因素影响外，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1.52MPa，省煤器的总压降为0.23MPa。

图1-4所示为600MW超临界机组锅炉的给水压力和主蒸汽压力与600MW亚临界机组锅炉的数据比较。上海石洞口第二电厂600MW超临界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超临界机组锅炉的压降损失在100%负荷时约为6MPa，比600MW亚临界机组锅炉大2~4MPa，由此引起的热效率降低0.4%~0.8%。

图1-5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。

锅炉采用内螺纹管结构，降低质量流速，其中主要降低了最大质量流速。根据采用内螺纹管的数量，最大质量流速多数维持在2150~2412kg/(m²·s)。质量流速有所降低，但降低质量流速所减小的阻力被内螺纹管增加的阻力部分抵消。某电厂600MW超临界机组锅炉内螺纹管水冷壁的阻力仍然保持在1.83MPa，比上海石洞口第二电厂600MW超临界机组锅炉光管螺旋管圈水冷壁仅低0.01MPa。

国产化1000MW超超临界机组锅炉汽水系统流程采用了优化设计，BMCR负荷时汽水系统总阻力限制在3.6~4.0MPa范围内。图1-6所示为1000MW超超临界机组锅炉的汽水系统阻力，其中T电厂锅炉在炉膛下部采用内螺纹管垂直管屏水冷壁，采用低质量流速[最大为1848kg/(m²·s)，最小为464kg/(m²·s)]，并将汽水分离器布置在低温烟道蒸发器之后，图中数据表示的水冷壁系统阻力包括省煤器阻力+水冷壁阻力+低温烟道蒸发器阻力，同时由于水冷壁系统设计了2条旁路，水冷壁阻力在BMCR时为1.82MPa，大于过热器系统阻力。而Z电厂锅炉下水冷壁采用螺旋管圈，水冷壁中工质质量流速较高[最大为

2500kg/(m²·s), 最小为 750kg/(m²·s)], 过热器系统中包含水平烟道包墙管以及尾部竖井烟道的包墙管过热器, 图中数据表示的水冷壁系统阻力包括省煤器阻力+水冷壁阻力+顶棚管阻力。水冷壁阻力在 BMCR 时为 1.52MPa, 小于过热器系统阻力。

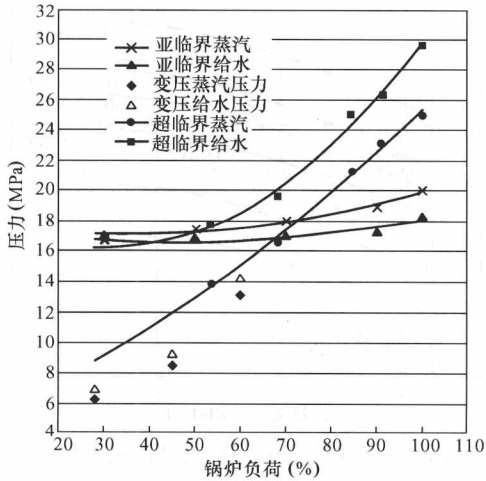


图 1-4 600MW 超临界和亚临界机组锅炉压力的比较

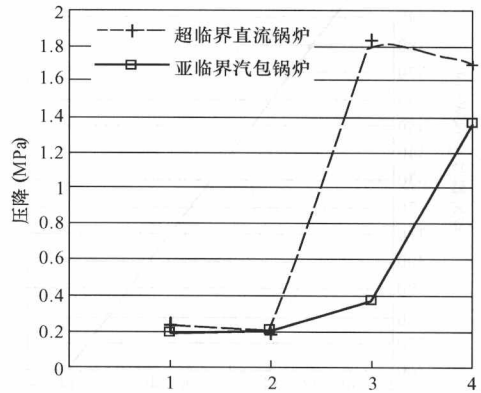


图 1-5 600MW 亚临界和超临界锅炉受热面压降的比较
1—省煤器；2—省煤器重位；3—水冷壁；4—过热器

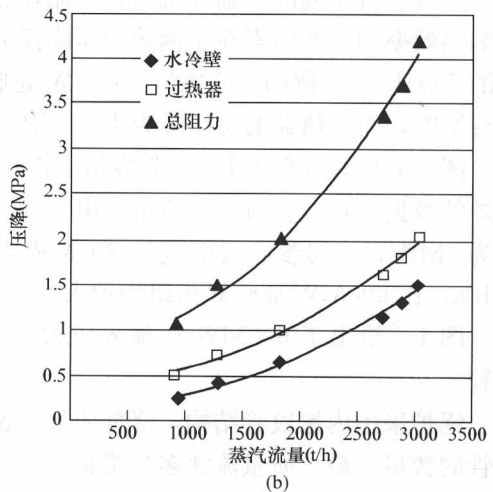
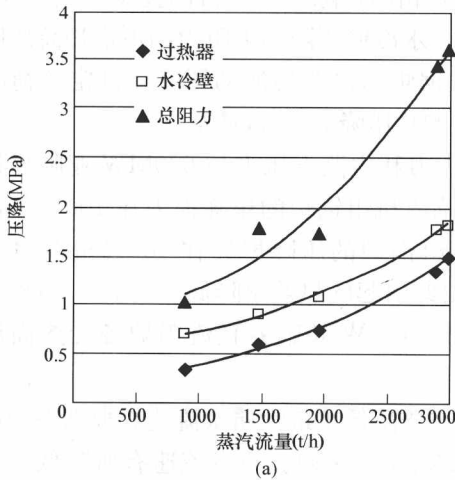


图 1-6 1000MW 超超临界机组锅炉的汽水系统阻力
(a) T 电厂锅炉阻力；(b) Z 电厂锅炉阻力

三、降低凝汽器背压和提高给水温度

1. 凝汽器背压对热效率的影响

(1) GEC-ALSTHOM 改进型汽轮机凝汽器背压由 2.3kPa 降低到 2.1kPa, 热效率提高 0.3%。

(2) ABB 改进型汽轮机凝汽器背压由 4.6kPa 降低到 3.7kPa, 热效率提高 0.7%。

(3) 采用二次再热可提高效率, 但主要是考虑排汽湿度降低影响汽轮机长期可靠运行。例如, 丹麦某电站汽轮机背压为 2.1kPa, 采用二次再热, 可使排汽湿度降到 8%; 不采用二