

超(超)临界火电机组检修技术丛书

# 汽轮机设备检修

王德坚 张 磊 满菁华 合编  
张 伟 吕富周 沈思雯 主审  
张立华

新机组

新材料

新工艺

新技术



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是《超(超)临界火电机组检修技术丛书》的一个分册,主要内容包括超(超)临界汽轮机设备的主要结构及技术特点,本体设备检修,调节、保护及供油系统设备检修,水泵设备检修,辅机设备检修,管道与阀门检修等。书中对汽轮机设备的检修进行了详细介绍,内容充实,实用性强。

本书可作为汽轮机检修人员技能培训教材,也可作为新入厂职工上岗培训的学习资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

汽轮机设备检修/王德坚等编. —北京:中国电力出版社,2012.3

(超(超)临界火电机组检修技术丛书)

ISBN 978-7-5123-2775-7

I. ①汽… II. ①王… III. ①火电厂-超临界汽轮机-设备检修 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第036826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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012年7月第一版 2012年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 30.25印张 689千字 1插页

印数 0001—3000册 定价 88.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
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)临界火电机组检修技术丛书

# 汽轮机设备检修

王德坚 张 磊 满菁华 合编  
张 伟 吕富周 沈思雯 主审  
张立华

新机组

新材料

新工艺

新技术



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超(超)临界火电机组检修技术丛书

# 汽轮机设备检修

王德坚 张 磊 满菁华 合编  
张 伟 吕富周 沈思雯 主审  
张立华



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是《超（超）临界火电机组检修技术丛书》的一个分册，主要内容包括超（超）临界汽轮机设备的主要结构及技术特点，本体设备检修，调节、保护及供油系统设备检修，水泵设备检修，辅机设备检修，管道与阀门检修等。书中对汽轮机设备的检修进行了详细介绍，内容充实，实用性强。

本书可作为汽轮机检修人员技能培训教材，也可作为新入厂职工上岗培训的学习资料。

### 图书在版编目（CIP）数据

汽轮机设备检修/王德坚等编. —北京：中国电力出版社，2012.3

（超（超）临界火电机组检修技术丛书）

ISBN 978-7-5123-2775-7

I. ①汽… II. ①王… III. ①火电厂-超临界汽轮机-设备检修 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 036826 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>）

印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 月第一版 2012 年 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.25 印张 689 千字 1 插页

印数 0001—0000 册 定价 0.00 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）临界火电机组检修技术丛书》

## 编 委 会

主 任：张效胜

副主任：张 伟 王焕金

主 编：张 磊

参 编 （按姓氏笔画排列）：

于龙根 王德坚 王丽娜 王 亮 片秀红 代云修

吕富周 张立华 张 伟（华电） 张东风 沈思雯

陆 强 杨立久 李 诚 杜海涛 陈 媛 单志栩

单汝钢 周长龙 赵学良 柴 彤 徐鹤飞 徐坊降

高洪雨 黄东安 彭 涛 满菁华 廉根宽 雷 亮

潘 淙

## 前 言

随着火力发电技术的发展,单机容量为 600MW 和 1000MW 的超临界和超超临界火电机组正迅速成为新建火力发电厂的主力型机组。这些新机组投产运营后,由于单机容量增大和新技术的应用,对设备的检修工艺和管理体制提出了新的要求。科学的检修工艺和管理体制将为设备的安全、稳定、长周期运行提供可靠的技术和管理保障。根据当前技术人员对超(超)临界火电机组检修技术的迫切需求,作者有针对性地编写了《超(超)临界火电机组检修技术丛书》。本丛书共分五个分册,分别是《锅炉设备检修》、《汽轮机设备检修》、《电气设备检修》、《热工控制设备检修》、《辅助设备检修》。

本丛书由山东省电力学校张效胜担任编委会主任,张伟和王焕金担任编委会副主任。全套丛书由山东省电力学校张磊组织编写和统稿。

本丛书可作为超(超)临界火电机组生产运行、检修维护人员的培训教材,也可供从事超(超)临界火电机组设计、制造、安装工作的技术人员和大中专院校热动类专业师生参考。

在丛书的编写期间,得到了国内各发电集团公司的大力支持,在此深表感谢!

由于水平所限,加之时间仓促,收集资料不全,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编委会

2011年4月

**超(超)临界火电机组检修技术丛书**

**汽轮机设备检修**

## 本书前言

随着电力工业的发展,大幅度提高发电效率、加速发展洁净煤技术的超(超)临界机组成为我国可持续发展、节约能源、保护环境的重要措施,超(超)临界发电机组安全、稳定、长周期运行是满足电网安全供电的重要保证,而抓好机组检修的质量是保证机组长周期、稳定运行的重要手段。本书在总结了近几年来国内 600MW 超临界和 1000MW 超超临界的火力发电机组汽轮机设备维护和机组检修经验的基础上,查阅大量的技术资料,按照标准检修程序编写,详细地叙述了国内超(超)临界汽轮机设备的主要结构、原理、技术性能、检修工序、检修工艺方法,以及汽轮机设备常见故障与处理方法。

本书在编写的过程中,得到了华电邹县发电厂杜峰、国电聊城发电厂张爱军、付晋,国电费县发电有限公司闫福军、郭霆的悉心指导与帮助,在此表示衷心的感谢!

本书由山东省电力学校王德坚、张磊、满菁华、沈思雯与华电新乡发电厂张伟和华电国际潍坊发电厂吕富周合编。山东省电力学校张立华担任本书主审。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

**编者**

2011 年 12 月

# 目 录

前言

本书前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 超(超)临界汽轮机技术特点.....	1
第二节 典型汽轮机设备.....	9
<b>第二章 超(超)临界汽轮机本体设备检修</b> .....	19
第一节 汽轮机本体设备 .....	19
第二节 汽缸检修 .....	24
第三节 隔板、汽封检修 .....	49
第四节 转子检修 .....	72
第五节 滑销系统检修.....	109
第六节 汽轮机轴承检修.....	113
第七节 发电机密封装置检修.....	137
第八节 盘车装置检修.....	148
第九节 汽轮机典型事故及预防.....	150
<b>第三章 超(超)临界汽轮机调节、保护及供油系统设备检修</b> .....	165
第一节 超(超)临界汽轮机调节、保护及油系统简介.....	165
第二节 汽轮机调节、油系统一般设备的检修方法和质量要求.....	169
第三节 配汽机构检修.....	185
第四节 调节保安系统检修.....	190
第五节 润滑油系统检修.....	205
第六节 油净化装置检修.....	215
<b>第四章 超(超)临界汽轮机水泵设备检修</b> .....	217
第一节 超(超)临界汽轮机水泵设备简介.....	217
第二节 水泵一般项目的检修.....	221
第三节 给水泵检修.....	252

第四节	液力耦合器检修·····	265
第五节	前置泵检修·····	270
第六节	凝结水泵检修·····	282
第七节	循环水泵检修·····	291
第八节	真空泵检修·····	303
<b>第五章</b>	<b>超（超）临界汽轮机辅机设备检修·····</b>	<b>322</b>
第一节	高压给水加热器检修·····	322
第二节	低压加热器检修·····	335
第三节	凝汽器检修·····	342
第四节	除氧器检修·····	357
第五节	轴封加热器及轴封加热器风机检修·····	363
<b>第六章</b>	<b>超（超）临界机组管道与阀门检修·····</b>	<b>369</b>
第一节	管道简介·····	369
第二节	管道一般检修工艺·····	378
第三节	管道检修·····	398
第四节	阀门简介·····	404
第五节	阀门一般项目的检修工艺·····	410
第六节	关断类阀门检修·····	427
第七节	调节类阀门检修·····	446
第八节	保护阀门检修·····	458
<b>参考文献</b> ·····		<b>475</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 超(超)临界汽轮机技术特点

### 一、汽轮机发展趋势

节约一次能源, 加强环境保护, 减少有害气体的排放, 降低地球的温室效应, 已越来越受到国内外的高度重视。从目前世界火力发电技术水平来看, 提高火力发电厂效率的方法除整体煤气化联合循环 (IGCC)、增压流化床联合循环 (PFBC) 外, 还有超 (超) 临界压力技术 (USC)。我国已经把大幅度提高发电效率、加速发展洁净煤技术的超 (超) 临界机组作为我国可持续发展、节约能源、保护环境的重要措施。新一代大容量超 (超) 临界燃煤机组已具备了优良的经济、环保和启动调峰运行性能, 并在低负荷时仍然保持较高的效率。从我国国情出发, 发展超 (超) 临界机组有利于降低我国平均供电煤耗, 有利于电网调峰的稳定性和经济性, 有利于保持生态环境, 提高环保水平, 有利于实现技术跨越, 创建国际一流的火力发电厂。随着锅炉朝着大容量高参数的方向发展, 火力发电机组随着蒸汽参数的提高, 效率也相应提高:

(1) 亚临界机组 (16~17MPa、538℃/538℃), 净效率约为 37%~38%, 煤耗为 330~350g。

(2) 超临界机组 (24~28MPa、538℃/538℃), 净效率约为 40%~41%, 煤耗为 310~320g。

(3) 超超临界机组 (30MPa 以上、566℃/566℃), 净效率约为 44%~46%, 煤耗为 280~300g。

由于效率的提高, 不仅煤耗大大降低, 污染物排量也相应减少, 经济效益十分明显。以亚临界机组 16.6MPa/538℃/538℃为参照基础, 如果保持温度级别不变, 仅压力采用超临界, 即 24.1MPa/538℃/538℃, 则效率可以提高约 1.9%, 如果在此基础上提高再热温度到 566℃, 效率提高不明显, 约 0.3%, 如果同时提高初、再热蒸汽温度到 566℃, 则效率提高比较明显, 约提高 1%; 在 24.1MPa/566℃/566℃的基础上如果同时提高压力和温度参数, 则效率提高比较明显, 如提高到 25MPa/600℃/600℃, 则效率又可提高 1.8%左右, 但如果在此参数下仅再提高压力等级到 30MPa, 效率的提高并不明显, 仅有 0.5%, 而要在此基础上同时提高温度和压力参数, 则又受到材料性能的制约。对于蒸汽参数的材料和新工艺及蒸汽参数的选择, 要考虑初期的投资成本及利息、煤价等, 因此火

力发电厂发展趋势是向高参数发展，以此来提高能量的使用效率，而研发百万千瓦级超临界机组的关键是新材料的研发、高温区的结构设计、末级长叶片的研发。

下面是世界上 5 大公司汽轮机参数对效率的影响。

### 1. 日立公司汽轮机参数对效率的影响（见图 1-1）

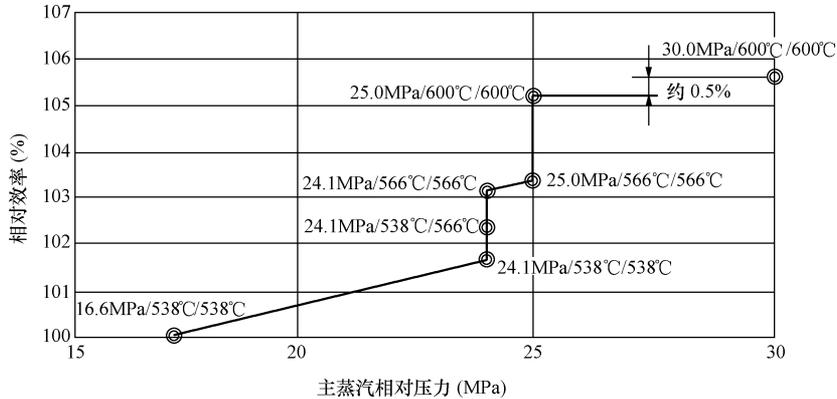


图 1-1 日立公司汽轮机参数对效率的影响

### 2. 三菱公司 7 个超（超）临界机组的效率（见表 1-1）

表 1-1 三菱公司 7 个超（超）临界机组效率比较表

机组	容量 (MW)	温度 (°C)	投运年份	实测效率 (%)
HEKINAN 碧南 3 号	700	538/593	1993	47.8
NANAO-OTA1 号	500	566/593	1995	47.9
MATSUURA2 号	1000	593/593	1997	49.2
MISUMI 川越 1 号	1000	600/600	1998	49.3
TACHIBANAWAN 橘湾 2 号	1050	600/610	2000	49.5
MAIZURU1 号	900	595/595	2004	
HIRONO5 号	600	600/600	2005	

### 3. 东芝公司汽轮机参数对效率的影响（见图 1-2）

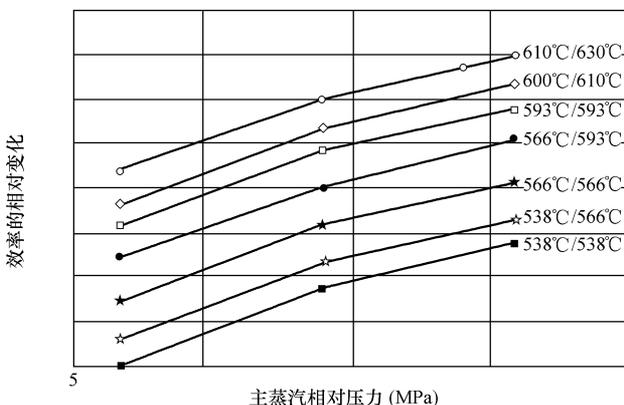


图 1-2 东芝公司汽轮机参数对效率的影响

### 4. 阿尔斯通公司汽轮机参数对效率的影响（见图 1-3）

相对热效率的改善： $25^{\circ}\text{C} = 1.25\%$ 改善（温度每提高  $25^{\circ}\text{C}$ ，则相对热效率提高  $1.25\%$ ）。

### 5. 西门子公司超超临界机组 3 个代表性参数下的效率

(1) 1980 年——750MW/22.5MPa/538°C，超超临界，热效率为 48%。

(2) 2000 年——1000MW/25.0

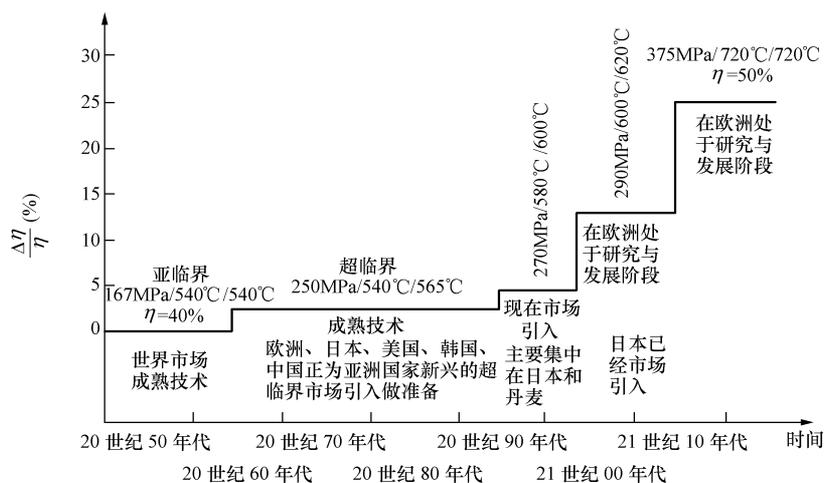


图 1-3 阿尔斯通公司汽轮机参数对效率的影响

MPa/600℃，超超临界，热效率为 51%。

(3) 2010 年——35.0MPa/700℃，超超临界，热效率为 56%。

## 二、发达国家超（超）临界汽轮机技术特点

### 1. 西门子公司

西门子（Siemens）公司共生产超（超）临界机组 45 台（包括 700MW 容量以下的机组）。在超临界汽轮机方面，西门子公司 1951 年就生产了 625℃ 的超超临界汽轮机，至今进汽温度 600℃ 的机组已有 14 台在运行。近 10 年，西门子公司在单轴大功率机型开发中取得了更加成功的业绩。表 1-2 为西门子公司超临界及超超临界汽轮机的发展业绩。

表 1-2 西门子公司超临界及超超临界汽轮机的发展业绩（1990 年后）

机 组	所在国	容量 (MW)	投运年份	压力 (MPa)	温度 (℃)
STEAG KW HERNE 4	德国	500	1989	25	530/530
FYNSVAERKET BOLCK 7	丹麦	410	1991	24	538/538
KW SCHWARZE PUMPE 1	德国	813	1997	25.2	542/562
KW SCHWARZE PUMPE 2	德国	813	1997	25.2	542/562
ALTBACH HKW 2	德国	395	1997	26.3	542/565
BOXBERG BLOCK Q	德国	915	1999	25.8	541/578
AVEDOERE, 2	德国	375	1999	30	580/600
NIEDERAUSSEM	德国	1025	2002	26.5	576/600
BEXBACH, II	德国	750	2002	25	575/595
外高桥 1 号	中国	980	2003	25	538/566
外高桥 2 号	中国	980	2004	25	538/566

自 1997 年起，德国西门子公司发电部（简称 KWU）在 50Hz、单轴、900MW 功率等级领域领先一步取得了独特的业绩；近 10 年由日本和欧洲制造的共计 8 台 50Hz、单

轴、900MW 功率等级的机组业绩中, 西门子公司拥有了其中的 6 台, 另为 Alstom (阿尔斯通) 的两台 930MW、26MPa/550°C/580°C 机组, 其中最大的 1025MW、单轴、参数 26.5MPa/576°C/599°C 的超超临界汽轮机 (锅炉参数为 27.49MPa/580°C/600°C) 已于 2002 年 8 月正式投运。

目前西门子公司汽轮机产品系列中的 HMN 系列可适应 200~1200MW、50Hz/60Hz 的超(超)临界机组, 蒸汽参数可达 30MPa/600°C/620°C。

西门子公司超(超)临界大功率汽轮机的主要特点是高压缸采用单流程、小直径筒式结构, 中压缸进口为双层结构并作涡旋式冷却, 轴承箱与汽缸分离并刚性落地。机组采用滑压运行, 调峰性能好。各转子采用整锻转子, 转子之间由整体刚性联轴器连接。

西门子公司膨胀系统设计具有独特的技术风格和独特的结构设计。西门子公司各轴承座直接支撑在基础上, 其特点为机组的绝对死点及相对死点均在高、中压汽缸之间的推力轴承处; 中压汽缸与低压内缸以及低压内缸之间有推拉装置, 减小低压段动静相对间隙。汽缸与轴承座之间有耐磨、滑动性能良好的金属介质。

机组通流部分设计采用全三维技术, 除低压末三级外, 其余所有的高、中、低压叶片级全部采用弯扭耦合叶片, 级反动度控制在 30%~40% 的水平。目前西门子公司 50Hz 机组中有运行业绩的末级叶片为 1146mm, 是世界上已运行的最长、排汽面积最大的叶片, 并正在开发排汽面积为 16m<sup>2</sup> 的 1420mm 钛合金叶片。

西门子公司参与欧洲联合开发的 600°C 的材料已应用于单轴 1000MW 机组上。

西门子公司超(超)临界汽轮机高压缸常采用的材料见表 1-3。

表 1-3 西门子公司超(超)临界汽轮机高压缸常采用的材料

主蒸汽温度 (°C)	540	566	600
主蒸汽压力 (MPa)	24.5	24.5	29.4
转子	1%CrMoV	1%CrMoV 或 10%Cr	10%Cr
静叶环/内缸	1%CrMoV	9%~10%Cr	
进汽缸	9%~10%Cr	9%~10%Cr	
排汽缸	1%CrMoV		

## 2. 阿尔斯通公司

Alstom 公司是国际上发电设备制造行业中业绩突出的著名公司之一, 在超超临界发电技术上具有自己的特点。

Alstom 由原 Abb、原 Alstom 公司合并而成, 已生产投运的超(超)临界机组有 40 余台, 功率 600MW 以上容量的超超临界机组有 15 台, 其中:

1300MW (24.2MPa/538°C/538°C、3600r/min)	双轴	8 台
1300MW (25.4MPa/538°C/538°C、3000r/min 或 1500r/min)	双轴	1 台
930MW (26.0MPa/550°C/580°C、3000r/min)	单轴	2 台
680MW (25.0MPa/535°C/563°C、3000r/min)	单轴	1 台

640MW (24.2MPa/538℃/538℃、3600r/min)	单轴	1 台
627MW (24.2MPa/538℃/566℃、3000r/min)	单轴	2 台

Alstom 公司提出目前超临界及超超临界蒸汽参数的范围:

超临界机组为 24.0MPa, 540℃/565℃; 超超临界机组为 30.0MPa, 600℃/620℃。目前正在设计 1100MW 四缸四排汽超超临界汽轮机, 汽轮机参数为 27MPa, 600℃/605℃, 背压 4.8kPa, 功率 1100MW。

原 Abb 公司采用独特的传统工艺焊接转子, 锻件小、锻造质量高, 有利于快速启动; 采用套环紧固件无中分面法兰的高压内缸, 使内、外缸紧凑小巧, 降低了热应力, 避免高温螺栓装拆带来的不便, 内缸和转子采用高铬材料。Abb 公司另一个独特的传统工艺为两个转子间共用一个轴承支撑, 四缸机组只有 5 个轴承, 大大缩短机组长度。

Alstom 的汽轮机采用模块化、系列化设计, 有利于满足用户要求; 高、中、低压进汽采用涡壳结构, 减少进汽损失, 通流部分可优化设计以达到高效率; 低压转子为由多个锻件按照埋弧焊工艺焊接在一起的装配式设计, 代表了阿尔斯通动力系统的成熟技术。

Alstom 已经开发了 50Hz、49 英寸钛合金末级叶片, 叶根为 4 叉枫树形, 叶片采用整体围带和凸台拉筋连接成为全周结构, 叶片环形面积为 13.2m<sup>2</sup>, 并将应用于新设计的 1100MW 四缸四排汽超超临界汽轮机。

为减少围带汽封的漏汽损失, Alstom 研制开发了刷子汽封。围带汽封第一列采用刷子汽封, 其他汽封仍采用传统汽封, 即使刷子汽封损坏, 传统汽封仍起作用。刷子汽封材料由镍基材料组成, 能耐 700℃ 高温, 运行时与围带间隙接近于 0, 有效地减少了汽封漏汽。

Alstom 公司的材料开发大致可以分成三个阶段: 20 世纪 90 年代前主要采用 X20 (11%~12%Cr), 适应温度为 565℃。从 90 年代开始, 在 9%Cr 钢中添加 W, 得到更高的蠕变断裂强度, 在管子材料上采用 P91、E911 和 P92。叶片采用奥氏体钢 StT17/13W。第二阶段参加开发 11%Cr 钢, 添加 Co、B, 得到更好的蠕变断裂强度和抗氧化性能。预计使用温度可以达到 625℃。第三阶段是参加开发适应于 700、725℃ 的材料。Alstom 还参与了美国 DOE 的 Vision21 中的超超临界材料项目。HCM12 和镍基合金 Alloy617 即将进行试验。

### 3. 东芝公司

东芝公司的超临界机组是在引进美国 GE 公司技术基础上发展的。东芝公司的超超临界机组是指蒸汽参数超过 24.1MPa/566℃/566℃ 的机组, 东芝公司生产的超超临界 (USC) 汽轮机容量在 1000MW 的机组有 8 台, 其中:

1000MW (24.1MPa/538℃/566℃、CC4F-41、3000r/1500r/min)	4 台
1000MW (24.5MPa/566℃/593℃、CC4F-41、3000r/1500r/min)	1 台
1000MW (24.1MPa/566℃/593℃、CC4F-40、3600r/min)	2 台
1050MW (25.0MPa/600℃/610℃、CC4F-48、3600r/min/1800r/min)	1 台

东芝公司在已成熟应用 24.2MPa/538℃/566℃ 参数的基础上, 正在发展 31MPa/593℃/610℃ 的技术, 并应用在大功率机组上。东芝公司可以生产 1000MW 等级单轴汽轮

机,有适用于蒸汽温度超过 600℃/610℃的材料,蒸汽参数可达 31.6MPa/600℃/610℃。

东芝公司通过采用通流部分的三维设计、新的叶片形线、复合倾斜喷嘴、倾斜动叶,整体叶顶汽封和改进排汽蜗壳形线等,使汽轮机内效率得到改善。东芝公司的 42in 和 48in 末级叶片采用了全三维设计和跨音速叶形。

东芝公司超(超)临界典型的汽轮机采用的材料见表 1-4。

表 1-4 东芝公司超(超)临界典型的汽轮机采用的材料

部 件	24.5MPa/566℃/593℃	25.0MPa/600℃/610℃	28.0MPa/610℃/630℃
	原町 HARAMACHI 1 号	橘湾 TACHIBANAWAN 1 号	先进蒸汽参数
高压外缸	1.25Cr1MoV 钢	1.25Cr1MoV 钢	1.25Cr1MoV 钢
高压内缸	1.25Cr1MoV 钢	12CrMoVNbN 钢	12CrMoVNbN 钢
中压外缸	1.25Cr1MoV 钢	1.25Cr1MoV 钢	1.25Cr1MoV 钢
中压内缸	12CrMoVNbN 或 1.25Cr1MoV 钢	12CrMoVNbN 或 1.25Cr1MoV 钢	12CrMoVNbN 或 1.25Cr1MoV 钢
喷嘴室	1.25Cr1MoV 钢	12CrMoVNbN 钢	9Cr1MoNbV 钢
高中压叶片	10.7CrMoVNbN 钢	11CrWVNbNReCo 钢	11CrWVNbNReCo 钢
高中压喷嘴	10.7CrMoVNbN 钢	10.7CrMoVNbN 钢	10.7CrMoVNbN 钢
高压转子	1.25Cr1MoV 钢	12CrMoVNbN 钢	12CrMoVNbN 钢
中压转子	12CrMoVNbN 钢	12CrMoVNbN 钢	12CrMoVNbN 钢
调节阀	1.25Cr1MoV 钢	9Cr1MoNbV 钢	9Cr1MoNbV 或 10Cr1MoWNBVCb 钢
再热调节阀	1.25Cr1MoV 钢	10Cr1MoWNBVCb 钢	10Cr1MoWNBVCb 钢

所有的转子均为整锻无中心孔的转子,转子与转子之间采用刚性联轴器相互连接。每个转子配有独立的双轴承支撑。

每根转子在加工前,都要进行超声探伤和其他各种试验以确保锻件满足物理和化学特性的要求。动叶组装好后,进行动平衡试验仔细对转子进行平衡,并用高速动平衡机以额定速度对其进行最终平衡。

机组在设计时,对于轴系稳定性主要通过以下几方面来解决蒸汽激振力的影响:每根转子在工厂内部进行低速和高速动平衡,将不平衡量降到最小;设计使转子的临界转速和额定转速不产生相互的影响;转子设计精确对中,保证在运转时不会产生额外的力和力矩;合理设计动静之间的间隙,保证在启动和停机时转子和汽封不会产生摩擦;安装防汽流涡动的汽封,防止转子的不稳定振动。

同时,东芝公司在汽轮机叶片设计方面具有丰富的经验。通过现代化手段计算叶轮的挠性、弯曲度的影响,以及许多其他用来确定叶片设计的复杂因素,使所有的叶片都是高效、无故障和高度可靠的。叶片由不锈钢锻件加工制成,具有良好的强度和抗疲劳特性,并有较高的抗汽蚀性和抗腐蚀性。这些叶片的叶形选自一组曾大量使用的标准叶片中的叶形。带有菌形叶根并通过紧固加工配合件与轮缘外包配合,外包配合用来保护轮缘不受蒸汽侵蚀。

## 4. 三菱公司

三菱公司的超临界汽轮机是在引进美国 Westinghouse（西屋电气）公司技术基础上发展的，三菱公司自 1967 年第 1 台超临界汽轮机投运以来，至今已有 28 台，其中 23 台已投入运行。统计至 2002 年已投运的容量 700MW 以上的超（超）临界机组有 10 台。到目前为止，三菱公司已经生产了 1000MW 等级汽轮机 6 台，其业绩如表 1-5 所示。

表 1-5 三菱公司 1000MW 等级汽轮机的业绩

电厂名	机组	容量 (MW)	压力 (MPa)	温度 (°C/°C)	投运日期	转速 (r/min)	型号	末叶 (in)
袖浦	4 号	1000	24.1	538/566	1979.08	3000/1500	CC4F	44
松浦	1 号	1000	24.1	538/566	1990.06	3600/1800	CC4F	44
东扇岛	2 号	1000	24.1	538/566	1991.03	3000/1500	CC4F	44
松浦	2 号	1000	24.1	593/593	1997.07	3600/1800	CC4F	46
三隅	1 号	1000	24.5	600/600	1998.06	3600/1800	CC4F	46
橘湾	2 号	1050	25.0	600/610	2000.12	3600/1800	CC4F	46

虽然上述机组都是双轴机组，但高、中压缸的设计可以用于单轴机组。尽管没有单轴 1000MW 等级、50Hz 超超临界参数机组的业绩，但 50Hz 和 60Hz 机组的差别并不大，可以通过模化设计成 50Hz 的机组。

1996 年之后投运的两台超超临界机组参数分别为 1000MW/24.2MPa/593°C/593°C 和 1000MW/24.5MPa/600°C/600°C。三菱公司已在大机组上广泛应用 593°C、600°C 的主蒸汽参数，并进一步发展到 610°C 的再热蒸汽温度。

三菱公司汽轮机为反动式汽轮机。已运行的 1000MW 机组为四缸四排汽，由双分流高压缸、双分流中压缸和两个双流半转速低压缸组成。高、中压缸分别为双层缸，低压缸为三层缸。

三菱公司最新设计的 TC4F-48 型 1000MW 汽轮机采用全速、串联布置、新开发 48in 末级叶片。其参考机型分别为：

高压部分：1050MW 的 CC4F-46 型汽轮机高压缸，3600r/min，进汽参数为 25.1MPa/600°C，高压缸采用双流型。

中压部分：1050MW 的 CC4F-46 型汽轮机中压缸，3600r/min，进汽参数为 4.1MPa/610°C。中压缸也采用双流型，中压缸转子在进汽侧采用了冷却措施，用高压缸排汽进行冷却。

低压部分：700MW 的 TC4F-40 型汽轮机低压缸，3600r/min，蒸汽参数为 24.1MPa/538°C/566°C。低压缸也采用双流型，48in 末级叶片是从 3600r/min 机组的 40in 末级叶片模化而得到的。40in 的末级叶片从 1999 年开始已经在多台机组上成功应用。

三菱公司汽轮机高温材料的适用范围、适用温度和材料型号列于表 1-6。

## 5. 日立公司

日立公司的超临界机组是在引进美国 GE 公司技术的基础上发展的。日立公司于 1971 年制造了第一台超临界汽轮机，容量为 600MW，蒸汽参数为 24.13MPa/566°C/566°C，到目前为止，日立公司已经投入运行和在建的超（超）临界汽轮机共 28 台。