

解决电厂疑难问题的**金钥匙**

超临界机组 金属高温蒸汽氧化

CHAO LINJIE JIZU
JINSHU GAOWEN
ZHENGQI YANGHUA

钟万里 王伟 梁永纯 林介东 编著
林清如 刘红文 虞月荣



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

解决电厂疑难问题的**金钥匙**

超临界机组 金属高温蒸汽氧化

CHAO LINJIE JIZU
JINSHU GAOWEN
ZHENGQI YANGHUA

钟万里 王伟 梁永纯 林介东 编著
林清如 刘红文 虞月荣



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 简 介

本书系统介绍了火力发电厂超临界机组高温蒸汽氧化现象,阐述了超临界机组用金属材料的氧化机理、氧化皮脱落、高温蒸汽氧化的防治等。

本书作者根据多年在超临界机组高温蒸汽氧化领域的科研与工程实践,并吸收了大量近年来国内外的最新技术编写。全书共分11章,分别介绍了超(超)临界机组的发展及现状、超(超)临界发电机组用金属材料及其特征、金属的高温氧化、超临界蒸汽对钢表面的氧化作用、奥氏体不锈钢高温蒸汽氧化、SA—213 T91 钢高温蒸汽氧化、SA—213 T23 钢高温蒸汽氧化、高温蒸汽氧化物的检测、高温蒸汽氧化对锅炉侧的影响、剥落的氧化层对汽轮机和凝结水系统的影响以及高温蒸汽氧化的预防措施等。

本书资料翔实、理论结合实际,无论是对于电厂检验人员,生产、运行人员还是管理人员,都具有重要的指导意义,同时对耐热钢的生产及研发技术人员有较强的参考价值,还可以作为电站理化检验人员等的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

超临界机组金属高温蒸汽氧化 / 钟万里等编著. —北京: 中国电力出版社, 2010

(解决电厂疑难问题的金钥匙)

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0822 - 0

I. ①超… II. ①钟… III. ①火力发电 - 发电机 - 机组 - 金属材料 - 高温 - 氧化 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 169314 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

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 7.25 印张 190 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 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



解决电厂疑难问题的金钥匙
超临界机组金属高温蒸汽氧化

截至 2009 年底，全国发电装机容量达到 8.74 亿千瓦。其中，火电达到 6.52 亿千瓦，约占总容量的 74.60%。为了节约能源和保护环境，应对全球气候变化，大力发展超临界、超超临界机组是今后国家电力建设的主要潮流。我国对火电发展的基本方针是提高能源效率，优化发展煤电。据统计，截止 2009 年底，我国已经投运近 40 台超（超）临界机组，目前在建及拟建的近 120 台，目前国产超（超）临界机组的设计、制造和运行水平已经接近国际先进水平。

随着蒸汽温度和压力的提高，超临界锅炉的效率在大幅度提高，供电煤耗大幅下降；但提高蒸汽参数的同时也遇到了一些技术难题，主要是金属材料在高温、高压下的性能问题，尤其是材料的抗高温腐蚀和高温蒸汽氧化能力。伴随着超临界机组蒸汽温度的提高，锅炉受热面的材料等级也逐步向高等级方向发展，高温受热面管 T23、T91 和 TP347H 等材料的蒸汽氧化及由此产生的一系列问题日益引起关注。在高温蒸汽的作用下，氧化膜的生成是不可避免的，其剥落取决于膜的临界厚度、温度变化速率等。氧化膜的剥落将引起爆管，同时损害汽轮机叶片、污染凝结水，并成为热力设备易结垢部位的沉积物。

因此，如何有效减缓氧化膜的生成和脱落是预防此类事故发生的关键所在。为了适应我国火电建设的需要，作者根据多年在超临界机组高温蒸汽氧化领域的科研和工程实践，并吸纳近年来国内外先进技术的重大进展，编写本书。全书共分 11 章，较全面的阐述了高温蒸汽氧化的理论与工程实践。本书对于电厂检验人员、生产运行人员和管理人员具有重要指导意义，

对耐热钢生产及研发人员也有较强的参考价值，同时还可作为电站理化检验人员和超临界机组人员的培训教材。

本书在编写过程中得到了广东电网公司电力科学研究院金属所同事的大力支持，在此表示感谢！

无论在国内还是国外，书中所涉及超临界机组用钢的使用时间都不长，在高温蒸汽氧化方面的研究较少，公开发表的相关学术文献也不多。再加上时间仓促和作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2010 年 7 月于广州



目 录



解决电厂疑难问题的金钥匙
超临界机组金属高温蒸汽氧化

前言

第一章 超（超）临界发电机组的发展及现状	(1)
第一节 超（超）临界发电机组简介	(1)
第二节 国际超（超）临界参数锅炉的发展情况	(3)
第三节 我国超（超）临界参数锅炉的发展情况	(12)
第二章 超（超）临界发电机组用金属材料及其特性	(16)
第一节 超（超）临界发电机组用金属材料概述	(16)
第二节 几种常用的超（超）临界发电机组用新材料特性介绍	(23)
第三节 超（超）临界锅炉用新材料对焊接接头的要求	(29)
第四节 超（超）临界发电机组用新材料的焊接	(32)
第三章 金属的高温氧化	(39)
第一节 金属高温氧化的一般概念	(40)
第二节 金属高温氧化的热力学	(49)
第三节 金属高温氧化的动力学	(55)
第四节 金属的氧化膜	(58)
第五节 合金的氧化	(61)
第四章 超临界蒸汽对钢表面的氧化作用	(77)
第一节 蒸汽中氢含量变化对钢表面氧化的表征	(77)
第二节 蒸汽对奥氏体不锈钢表面氧化的影响	(84)
第三节 铁素体耐热钢的氧化机制	(89)
第五章 奥氏体不锈钢高温蒸汽氧化	(95)
第一节 奥氏体不锈钢管内壁氧化膜特性	(96)

第二节	奥氏体锅炉管氧化膜的应力数值模拟与剥落机理	(108)
第三节	奥氏体不锈钢锅炉管氧化膜剥落机制	(118)
第六章	SA—213 T91 钢高温蒸汽氧化	(122)
第一节	SA—213 T91 钢的特性	(122)
第二节	SA—213 T91 钢的氧化形貌	(132)
第三节	SA—213 T91 钢运行管蒸汽侧氧化层形成机理	(141)
第七章	SA—213 T23 钢高温蒸汽氧化	(146)
第一节	SA—213 T23 钢的特性	(146)
第二节	SA—213 T23 钢的抗氧化性能	(151)
第三节	SA—213 T23 钢蒸汽侧氧化层形成机理	(159)
第八章	高温蒸汽氧化物的检测	(161)
第一节	奥氏体不锈钢管弯头氧化物沉积的检测	(161)
第二节	铁素体钢管内壁氧化膜的检测	(187)
第九章	高温蒸汽氧化对锅炉侧的影响	(195)
第一节	氧化层剥落的影响因素及剥落规律	(196)
第二节	某电厂 1 号炉高温过热器 T91 管爆管案例	(198)
第三节	某电厂高温过热器 TP347H 管爆管案例	(205)
第十章	剥落的氧化层对汽轮机和凝结水系统的影响	(209)
第十一章	高温蒸汽氧化的预防措施	(213)
第一节	锅炉侧高温蒸汽氧化的预防措施	(213)
第二节	汽轮机侧固体颗粒侵蚀的预防措施	(218)
参考文献		(223)



第一章

超（超）临界发电机组的发展及现状

第一节 超（超）临界发电机组简介

锅炉内的工作介质是水，水的临界压力是 22.115MPa，临界温度是 347.15℃，在这个压力和温度下，水和蒸汽的密度是相同的，就叫水的临界点。对于火力发电机组，当蒸汽的压力大于水的临界点压力（22.115MPa）时，称为超临界（Supercritical）机组，以 SC 表示。一般超临界机组的蒸汽参数为：压力 24 ~ 26MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度 540 ~ 566/540 ~ 566℃，相应的机组效率约为 41% ~ 42%。

所谓超超临界（Ultra Supercritical）机组是相对于常规超临界机组的蒸汽参数而言的，国际上普遍认为，在超临界参数的基础上蒸汽压力和温度再提升一个档次，通常把主蒸汽压力为 24.1 ~ 31MPa、主蒸汽/再热蒸汽温度为 580 ~ 600/580 ~ 610℃ 的机组定义为超超临界机组的范畴，也称为高效超临界（High Efficiency Supercritical）机组，发电效率可达 45% ~ 47%。但目前，各国对超超临界参数起始点的定义有所不同，如日本定义压力大于等于 24MPa 或温度大于 566℃；丹麦定义压力大于 27.5MPa；我国电力百科全书中将蒸汽压力高于 27MPa 的机组称为超超临界机组。目前我国在建的超超临界机组蒸汽参数为：压力 25 ~ 26.5MPa，主蒸汽/再热蒸汽温度 600/600℃。

超（超）临界火电机组具有显著的节约能源和改善环境的



特点，超超临界机组与超临界机组相比，热效率可提高约4%。未来火电建设将主要是发展高效率、高参数的超临界（SC）和超超临界（USC）火电机组，它们在发达国家已得到广泛的研究和应用。

超（超）临界火电机组由于参数本身的特点决定了超临界锅炉只能采用直流锅炉。在超（超）临界锅炉内随着压力的提高，水的饱和温度也随之提高，汽化潜热减少，水和汽的密度差也随之减小。当压力提高到临界压力（22.115MPa）时，汽化潜热为零，汽和水的密度差也等于零，水在该压力下加热到临界温度（374.15℃）时即全部汽化成蒸汽。超临界压力时情况相同，当水被加热到相应压力下的相变点（临界温度）时即全部汽化。因此，超临界压力下水变成蒸汽不再存在汽水两相区，由此可知，超临界压力直流锅炉由水变成过热蒸汽经历了两个阶段，即加热和过热，而工质状态由水逐渐变成过热蒸汽。因此，超临界直流锅炉没有汽包，启停速度快，与一般亚临界汽包炉相比，超临界直流锅炉从启动到满负荷运行，变负荷速度可提高1倍左右；变压运行的超临界直流锅炉，在亚临界和超临界压力范围内工作时，都存在工质的热膨胀现象，并且在亚临界压力范围内可能出现膜态沸腾，在超临界压力范围内可能出现类膜态沸腾。超临界直流锅炉要求的汽水品质高，要求对凝结水进行100%除盐处理。由于超临界直流锅炉水冷壁的流动阻力全部依靠给水泵克服，既提高了制造成本又增加了运行耗电量，且直流锅炉普遍存在流动不稳定、热偏差和脉动水力等问题。另外，为了达到较高的质量流速，必须采用小管径水冷壁，较相同容量的自然循环锅炉，超临界直流锅炉本体金属耗量最少，锅炉质量轻；但由于蒸汽参数高，要求的金属等级高，其成本高于自然循环锅炉。

第二节 国际超（超）临界参数锅炉的发展情况

从20世纪50年代开始，世界上以美国和德国等为主的工业化国家就已经开始了对超临界和超超临界发电技术的研究。经过近半个世纪的不断进步、完善和发展，目前超（超）临界发电机组已经进入了成熟和商业化运行的阶段。世界上超（超）临界发电机组的发展过程大致可以分成以下三个阶段：

第一个阶段，是从20世纪50年代开始，以美国和德国等为代表。当时的起步参数就是超超临界参数，但随后由于电厂可靠性的问题，在经历了初期超超临界参数后，从20世纪60年代后期开始，美国超临界机组大规模发展时期所采用的参数均降低到常规超临界参数。直至80年代，美国超临界机组的参数基本稳定在这个水平。

第二个阶段，大约是从20世纪80年代初期开始。由于材料技术的发展，尤其是锅炉和汽轮机材料性能的大幅度提高，以及对电厂水化学方面认识的深入，克服了早期超临界机组所遇到的可靠性问题。同时，美国对已投运的机组进行了大规模的优化及改造，可靠性和可用率指标已经达到甚至超过了相应的亚临界机组。通过改造实践，形成了新的结构和新的设计方法，大大提高了机组的经济性、可靠性和运行灵活性。期间，美国又将超临界技术转让给日本（GE向东芝、日立，西屋向三菱），联合进行了一系列新超临界电厂的开发、建设。这样，超临界机组的市场逐步转移到了欧洲和日本，涌现出了一批新的超临界机组。

第三个阶段，大约是从20世纪90年代开始，进入了新一轮的发展阶段。这也是世界上超（超）临界机组快速发展的阶段，即在保证机组高可靠性、高可用率的前提下采用更高的蒸汽温度和压力。其主要原因在于国际上对环保的要求日益严格，同时新材料的开发成功和常规超临界技术的成熟也为超超临界机



组的发展提供了条件。主要以日本（三菱、东芝、日立）、欧洲（西门子、阿尔斯通）的技术为主。这个阶段，超超临界机组的技术发展具有以下三方面的特点：

（1）蒸汽压力取值并不太高，多为 25MPa 左右，而蒸汽温度取值相对较高，主要以日本的技术发展为代表。近期欧洲及日本生产的新机组，大多数机组的压力保持在 25MPa 左右，蒸汽温度均提高到了 580 ~ 600℃ 左右。

（2）蒸汽压力和温度同时都取较高值（28 ~ 30MPa，600℃ 左右），从而获得更高的效率，主要以欧洲的技术发展为代表，在采用高温的同时，压力也提高到 27MPa 以上。压力的提高不仅关系到材料强度及结构设计，而且由于汽轮机排汽湿度的原因，压力提高到某一等级后，必须采用更高的再热温度或二次再热循环。近年来，提高压力的业绩主要来源于欧洲和丹麦一些设备制造厂家。

（3）开发更大容量的超超临界机组以及百万等级机组倾向于采用单轴方案。为尽量减少汽缸数，大容量机组的发展更注重大型低压缸的开发和应用。日本几家公司和西门子、阿尔斯通等在大功率机组中已开始使用末级钛合金长叶片。

为了发展高效率的超超临界机组，从 20 世纪 80 年代初开始，美国、日本和欧洲都投入了大量财力和研究人员开展了各自的新材料研发计划，这些材料分别针对不同参数级别的机组，如 593℃ 级别（包括欧洲的 580℃ 机组和日本的 600℃ 机组）、620℃ 级别、650℃ 级别和正在研发之中的更高温度级别的机组。新开发的耐热材料在投入正式使用之前进行了大量的实验室和实机验证试验。到目前为止，欧洲已经成功投运了主汽温度为 580℃ 的超超临界机组，日本投运了主汽温度为 600℃ 的超超临界机组。从材料的实机验证结果来看，国际上目前成熟的材料已经可以用于建造蒸汽温度为 620℃ 的机组，而据日本最新的报导称，已经可以提供蒸汽温度为 650℃ 机组所需的关键部件材料。

据统计，目前全世界已投入运行的超临界及以上参数的发电机组大约有 600 多台。其中，美国有 170 多台，日本和欧洲各约 60 台，俄罗斯及原东欧国家 280 余台。目前发展超超临界技术领先的国家主要是日本、德国和丹麦等。

一、主要发达国家超（超）临界燃煤发电技术的发展概要

国际上超临界和超超临界机组的热力参数经历了高一低一高的演变过程，在人们认识到超临界循环比亚临界循环可显著提高效率时，全世界发达国家都利用这一技术兴建电厂。初期蒸汽参数取得比较高，超过了当时的材料技术发展水平，致使超临界机组的可用率和可靠性都较低，迫使机组降低参数运行。20 世纪 90 年代以来，由于环保和节约能源的需要，机械和材料等问题的逐步解决，超临界技术得到了完善和提高，高参数的超超临界机组进入了一个新的发展时期。

1. 美国

美国是开发和发展超临界发电技术最早的国家之一。在 20 世纪 50 年代初就开始了超临界发电技术的探索性研究。1957 年世界上第一台 125MW 的超超临界机组投运。

从 1967 ~ 1976 年 10 年间，美国共投运了 118 台超临界和超超临界机组。美国早期的超临界机组发展很快，当时多数超临界机组的容量为 500 ~ 800MW，比同容量亚临界机组早投运 6 ~ 8 年。美国早期只生产了三台超超临界机组，由于这一时期的超超临界机组事故较多，可用率低而且维护费用高，因此之后便停止了生产。

到 20 世纪 80 年代，又退回到超临界参数，大力发展常规超临界机组。80 年代初，美国的超临界机组投运了约 170 台，最小单机容量为 125MW，最大单机容量达 1300MW。80 年代，针对燃料价格上涨、环保要求日益严格，结合早期超临界和超超临界机组设计和运行的经验及当时的技术水平，按照超临界机组与亚临界机组同等的可靠性和运行特性的设计要求，对机组蒸汽参数和容量等各方面进行了优化研究，得到的结论为：机



组蒸汽参数采用 31MPa、566 ~ 593℃、二次中间再热、功率 700 ~ 800MW 为最佳方案。

从 1990 年开始,美国超临界机组的蒸汽参数又趋于提高。目前,美国超临界机组在数量上居世界第二位,并拥有 9 台世界上最大的超临界机组,单机容量为 1300MW (见表 1-1)。另外,美国也是采用二次再热超临界机组较多的国家。为了提高机组可用率,美国超临界机组的参数多为:主蒸汽压力为 24.1MPa,主蒸汽温度为 538℃,一次再热温度 538℃,二次再热温度 552/565℃。

表 1-1 美国现役单机容量最大的 1300MW 火电机组

电 站	锅炉制造 厂家	锅炉蒸发 量 (t/h)	运行 方式	主蒸汽压 力 (MPa)	主/再热蒸汽 温度 (℃)	投运时间
Cumberland 1&2	B&W	4535	定压	24.2	539/539	1972/1973
Amos 3	B&W	4533	定压	26.5	543/538	1974
Gavin 1&2	B&W	4533	定压	26.5	543/538	1974/1975
Mountaineer 1	B&W	4533	定压	26.5	543/538	1980
Rockport 1&2	B&W	4533	定压	26.5	543/538	1984/1989
Zimmer	B&W	4533	定压	26.5	543/538	1990

目前,美国正在组织和支持一项发展更高参数超超临界发电机组的研究项目“760℃”计划,目标是研制适合蒸汽参数为 38.5MPa/760℃的新合金材料,将超超临界机组的主蒸汽温度提高到 760℃的水平,从而大大提高超超临界机组的效率。

2. 日本

日本发展超临界技术采用引进、仿制、创新的技术路线。从引进机组到自制机组只用了 1 ~ 2 年时间,从亚临界到超临界,从 300、600 到 1000MW,每上一个台阶只用了 3 ~ 4 年时间,为开发大型超超临界机组积累了技术储备。

从 20 世纪 60 年代开始,日本从美国引进 600、1000MW 超

临界机组，在国内制造同型机组；随后从欧洲引进超临界滑压运行技术，使其超临界机组不仅具有高效率，同时还具有与亚临界机组同样的安全可靠性与运行灵活性。

到 80 年代，超临界机组容量占总装机容量 50% 左右，投运的机组蒸汽参数一般为 24.1MPa/538℃/566℃。随着材料工业的不断发展，蒸汽参数得到进一步提高。由于 450MW 以上的机组全部采用超临界参数，超临界机组占总装机容量的绝大多数，使日本的供电煤耗居世界最低水平。1989 年生产投运了功率 700MW、蒸汽参数为 31MPa/566℃/566℃/566℃的超超临界机组。

90 年代以后，相继投运了一批参数为 25MPa/600℃/610℃的超超临界机组，日本的超超临界发电技术正在向更高参数发展。2001 年生产投运了功率 1050MW、参数为 25MPa/600℃/610℃的超超临界机组。

日本 1997 年以来投运的部分超（超）临界机组见表 1-2 所示。日本的超（超）临界发电技术正在向更高参数发展。目前研究的目标是将气温提高到 630℃/700℃，下一步研发的目标是进一步将气温提高到 700℃/700℃，机组的热效率将分别增加约 3% 和 4.7%。日本以超超临界机组可靠性高、经济性好以及技术发展快，而成为研究和应用超超临界发电技术最好的国家之一。

表 1-2 日本 1997 年以来投运的部分超（超）临界机组

电 厂	电力公司	额定功率 (MW)	主蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (℃)	投运时间 (年·月)
原町 1 号	东北电力	1000	24.5	566/593	1997.7
松浦 2 号	电源开关	1000	24.1	593/593	1997.7
三隅 1 号	中部电力	1000	24.5	600/600	1998.7
七尾太田 2 号	北陆电力	700	24.1	593/593	1998.7
原町 2 号	东北电力	1000	24.5	600/600	1998.7
橘湾	四国电力	700	24.1	566/593	2000.7

续表

电 厂	电力公司	额定功率 (MW)	主蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (℃)	投运时间 (年·月)
橘湾火力 1 号	电源开关	1050	25	600/610	2000. 7
敦贺 2 号	北陆电力	700	24. 1	593/593	2000. 10
橘湾火力 2 号	电源开关	1050	25	600/610	2001. 7
碧南 4 号	中部电力	1000	24. 1	566/593	2001. 11
新矶子 1 号	电源开关	600	25	600/610	2002. 4
苫东厚真 4 号	北海道电力	700	25	600/610	2002. 6
碧南 5 号	中部电力	1000	24. 1	566/593	2002. 11
苓北 2 号	九州电力	700	24. 1	593/593	2003. 7
常陆那珂 1 号	东京电力	1000	24. 5	600/600	2003. 12
广野 5 号	东京电力	700	24. 5	600/600	2004. 7
舞鹤 1 号	关西电力	900	24. 5	595/595	2004. 8

3. 俄罗斯

俄罗斯在火力发电技术的研究开发上独立于其他国家，其超临界机组的研制也主要立足于国内，有其自己的特点，是发展超临界机组最坚决的国家。

苏联在 20 世纪 40 年代末就开始研究、生产 300MW 机组，第一台 300MW 超临界机组于 1963 年投入运行，参数 23.5MPa/540℃/540℃，机组的可靠性与经济性基本达到设计要求，逐步形成了 300、500、800、1200MW 四个容量等级。俄罗斯生产的超临界机组的蒸汽参数大多为常规超临界参数，蒸汽压力一般为 24MPa 左右，蒸汽温度一般在 545 ~ 565℃ 范围内，第一台超临界 500、800MW 机组于 1968 年投入运行。1978 年生产了一台 1200MW 的超临界机组，1981 年投入运行，蒸汽参数为 23.5MPa/540℃/540℃，已经运行了二十多年。苏联本国内

300MW 及以上容量机组全部采用超临界参数,至今已有 200 多台超临界机组投入运行,是超临界机组数量最多的国家,全国大约 40% 的电力由超临界机组提供。由于大量采用超临界机组,苏联火电机组的平均供电煤耗处于较低水平。

经过长期的试验研究,俄罗斯已经形成了一套比较完整的具有特色的超临界技术和产品系列,其超超临界机组在设计上采用了一些有别于其他国家的特有技术。目前俄罗斯新一代高参数超超临界机组主蒸汽压力为 30 ~ 32MPa,主蒸汽温度和再热蒸汽温度为 580 ~ 600℃,给水温度为 300℃,当凝汽器压力为 3.4 ~ 3.6kPa 时,预计机组净效率可以达到 44% ~ 46%。

4. 欧洲

在欧洲约有 60 台超临界机组,大部分在德国、意大利、荷兰和丹麦。

德国也是发展超临界发电技术最早的国家之一,早在 20 世纪 50 年代和 60 年代就已经开始和美国同步开展了超临界机组的研究工作。1956 年就投运了一台蒸汽参数为 34MPa/610℃/570℃/570℃、容量为 88MW 的小功率超临界机组;1972 年投运了一台参数为 24.5MPa/535℃/535℃、430MW 的超临界机组;1979 年投运了一台蒸汽参数为 25.5MPa/530℃/540℃/530℃、475MW 的超临界机组。

德国近年来很重视发展超临界机组,目前已投运和在建的超临界机组近 20 台。西门子集团公司在 20 世纪末设计的超超临界机组,容量在 400 ~ 1000MW 范围内,蒸汽参数为 27.5MPa/589℃/600℃,机组净效率在 45% 以上。德国近期新建机组全部为 800MW 及以上等级的超超临界机组。2002 年,德国投运了功率为 1025MW、蒸汽参数为 26.5MPa/576℃/599℃的超超临界锅炉。总之,德国超超临界机组的特点是压力在 25 ~ 30MPa 范围,温度 580℃ ~ 600℃/600℃,但总的来说温度水平低于日本。其代表性机组如表 1-3 所示。



表 1-3

德国代表性机组

投产日期	电站	容量 (MW)	压力 (MPa)	温度 (°C)
1992	Staudinger	500	25	540/560
1999	Lippendorf	933	26.7	554/593
2000	Niederaubem	965	26.9	580/600
2000	Hessler	700	30	580/600
2002	Niederaussem K	1025	26.5	576/599

丹麦也是欧洲较早应用超临界发电技术的国家之一，其他如芬兰、挪威等国也投运了一批容量为 380 ~ 930MW，蒸汽参数为 26 ~ 27.8MPa/554 ~ 593℃ 的超临界及超超临界机组。丹麦的超超临界机组追求技术上可能达到的最高效率而不太考虑成本。压力接近 30MPa，温度为 580℃/600℃ 或 580℃/580℃/580℃，倾向于采用二次再热。机组多数为 400MW 供热机组，由于采用低温海水冷却循环（背压 26kPa）等技术，其循环效率可达 47%。2000 年，丹麦生产、投运了功率为 430MW，参数为 30.5MPa/582℃/600℃ 的超超临界锅炉，该机组采用一次中间再热，设计效率为 49%，成为迄今世界上报导过的热效率最高的火电机组。

综上所述，超超临界机组的技术发展可以归纳为以下三点：

(1) 在 400 ~ 1000MW 的容量范围内，均有成功业绩。已经投运的大容量（>700MW）机组的进汽压力均不大于 27.5MPa，已经应用的超超临界温度的先进水平是 580 ~ 610℃ 范围内，国外在这一温度下的材料技术已经基本成熟。

(2) 采用二次再热的超超临界机组，除了早期美国的三台机组外，只有日本两台和丹麦的机组。采用二次再热可使机组的热效率提高 1% ~ 2%，但也造成了调温方式、受热面布置等的复杂性，成本明显提高。

(3) 目前世界上先进的超超临界机组效率已经达到 47% ~ 49%，背压的降低对机组效率的影响是不可忽视的，配置脱硫、