

超（超）临界机组 高温氧化检测及防护技术

贵州电网有限责任公司

组织编写

张英

主 编

陈俊卫 牧灏

副 主 编

CHAO(CHAO)LINJIE JIZU
GAOWEN YANGHUA JIANCE JI FANGHU JISHU



化学工业出版社

超（超）临界机组 高温氧化检测及防护技术

贵州电网有限责任公司 组织编写

张 英	主 编
陈俊卫 牧 灏	副 主 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书对超(超)临界火电机组运行情况、高温蒸汽氧化现状及危害、耐热钢研究进展等内容进行了简要介绍,重点阐述了高温蒸汽氧化腐蚀试验设备研制、不同蒸汽温度耐热钢氧化研究、不同蒸汽压力氧化腐蚀研究、恒温恒压高温氧化腐蚀研究、氧化皮剥落研究、氧化皮检测设备研制、不同表面处理耐热钢高温氧化腐蚀研究等超(超)临界火电机组高温蒸汽氧化腐蚀机理及防护技术,最后根据多年研究成果提出超(超)临界机组锅炉氧化皮剥落与防治检测及评估方法,保障生产正常运行。

本书适合火电厂、电力研究院等电力行业,锅炉管道等生产企业从业人员以及相关电力、化学等专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

超(超)临界机组高温氧化检测及防护技术/张英
主编;贵州电网有限责任公司组织编写. —北京:化学
工业出版社,2017.11

ISBN 978-7-122-30871-9

I. ①超… II. ①张…②贵… III. ①超临界机组-
氧化-研究 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 263511 号

责任编辑:张 艳 刘 军
责任校对:王 静

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 13½ 字数 260 千字 2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究



随着电力行业的快速发展，新投产的超（超）临界火电机组向着高参数、大容量方向发展。在高温高压蒸汽运行环境中，超（超）临界机组锅炉过热器和再热器管内壁不可避免地发生蒸汽氧化，形成一定厚度的氧化皮。当氧化皮的厚度达到临界值时，机组在运行过程或启停过程中温度波动幅度较大时，氧化皮与基体受到较大的热应力，若超过其结合强度，氧化皮就会脱落。脱落的氧化皮容易沉积在管道的弯头处，导致管道蒸汽流通不畅，热量无法及时带出致使管壁金属受热面发生局部过热，导致爆管事故。火电机组故障不仅对电厂造成重大经济损失，且严重影响电网网架结构安全，造成的非计划停电损失巨大。

针对以上问题，贵州电网有限责任公司电力科学研究院开展了一系列的研究工作，并组织编写了本书。其目的在于明确氧化皮剥落的危害，深入掌握超临界机组炉管氧化皮剥落的机理。本书中提出了设备运行过程中基于氧化皮腐蚀剥落的指导性检测技术和防护措施，有利于保证超（超）临界机组的安全运行。

本书对超（超）临界火电机组运行情况、超（超）临界火电机组高温蒸汽氧化现状及危害进行了简单介绍，重点阐述了超（超）临界火电机组高温蒸汽氧化研究、解决了超（超）临界机组准确检测氧化皮剥落情况的问题，有利于正确判断锅炉运行状况，并提出合理的表面处理措施，对耐热钢进行防护，避免锅炉爆管造成事故（事件），可供电厂运行检测人员参考，同时，该技术对于新投运的超（超）临界锅炉管道防护具有指导作用。

本书由张英主编，陈俊卫、牧灏副主编。参加编写的人员还有李军

卫、蒋震、李冶。在本书编写过程中，得到了贵州电网有限责任公司科技部的大力支持，在此表示衷心的感谢！

虽然编者力求全面、科学地阐述超（超）临界机组高温氧化检测及防护技术的相关内容，但限于时间和水平，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正！

编者

2017年8月

I 目 录 I

I CONTENTS I

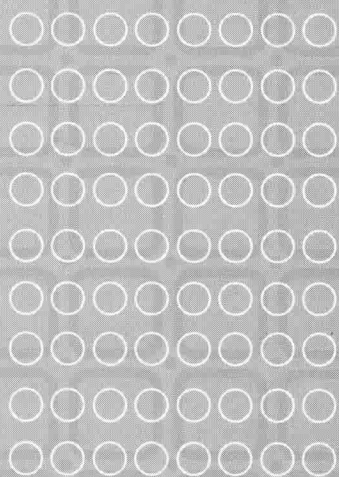
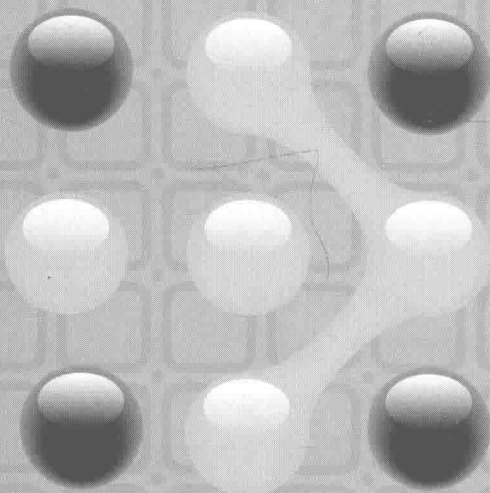


第 1 章 绪论	001
1.1 火电机组简介	003
1.1.1 火电机组的分类	005
1.1.2 亚临界火电机组	006
1.1.3 超临界火电机组	008
1.1.4 超（超）临界火电机组	012
1.2 超（超）临界火电机组运行情况	014
1.2.1 超（超）临界火电机组运行现状	014
1.2.2 超（超）临界火电机组运行中存在的问题	016
1.3 超（超）临界火电机组高温蒸汽氧化现状及危害	018
1.3.1 超（超）临界火电机组高温蒸汽氧化现状	018
1.3.2 超（超）临界火电机组高温蒸汽氧化危害	023
1.4 超（超）临界火电机组耐热钢研究进展	027
1.4.1 珠光体耐热钢的研究进展	027
1.4.2 铁素体耐热钢的研究进展	028
1.4.3 奥氏体不锈钢的研究进展	032
小结	036
第 2 章 超（超）临界火电机组高温蒸汽氧化研究	039
2.1 高温蒸汽氧化腐蚀试验设备研制	041
2.1.1 高温蒸汽氧化腐蚀试验设备研制的意义	041
2.1.2 高温蒸汽氧化腐蚀试验设备发展概况	041
2.1.3 高温蒸汽氧化腐蚀试验设备的研制过程及结果	043
2.1.4 应用实例	045
2.2 不同蒸汽温度耐热钢氧化研究	051

2.2.1	不同蒸汽温度耐热钢氧化研究的意义	051
2.2.2	S304H 耐热钢不同温度氧化试验过程及结果	053
2.2.3	TP347H 耐热钢不同温度氧化试验过程及结果	064
2.3	不同蒸汽压力氧化腐蚀研究	070
2.3.1	不同蒸汽压力氧化腐蚀研究的意义	070
2.3.2	不同蒸汽压力氧化腐蚀试验结果及分析	070
2.4	恒温恒压高温氧化腐蚀研究	076
2.4.1	恒温恒压高温氧化腐蚀研究的意义	076
2.4.2	恒温恒压高温氧化腐蚀试验结果及分析	077
小结		086
第 3 章	超（超）临界火电机组锅炉氧化皮剥落研究	089
3.1	氧化皮剥落研究	091
3.1.1	氧化皮剥落研究的意义	091
3.1.2	氧化皮剥落研究建模及分析	091
3.2	氧化皮检测设备研制	119
3.2.1	研制氧化皮检测设备的意义	119
3.2.2	氧化皮检测设备理论研究和设计	123
3.2.3	氧化皮检测设备试验及验证	136
小结		152
第 4 章	不同表面处理耐热钢高温氧化腐蚀研究	155
4.1	不同表面处理耐热钢高温氧化腐蚀研究的意义	157
4.2	耐热钢表面处理研究现状	157
4.2.1	表面纳米化研究进展	157
4.2.2	喷丸研究进展	160
4.3	耐热钢表面处理设计	162
4.4	耐热钢表面处理试验结果及分析	164
4.4.1	经过表面机械研磨后的试验结果及分析	164

4.4.2 经过喷砂处理后试样氧化的试验结果及分析	169
4.4.3 经过喷丸处理后试样氧化的试结果及分析	176
小结	183
 第5章 结语	 185
5.1 锅炉管氧化皮剥落产生的不良影响	187
5.2 选定的无损检测方法	189
5.3 氧化皮剥落评估方法	189
5.4 锅炉管氧化皮剥落防治措施	191
 参考文献	 197

第1章 绪论



自21世纪以来,超(超)临界火电机组大量建设,对我国火电结构的优化和技术升级发挥了极为重要的作用。但由于超(超)临界火电机组起步较晚,发展速度快,特别是600℃温度等级的超(超)临界参数在600MW和1000MW等级机组上的大量推广应用都是在近年内实施,所以超(超)临界火电机组的研究工作越来越受到重视。虽然自投运以来,超(超)临界机组有较明显的节煤效益,然而,由于超(超)临界机组工作温度和压力远远高于以往的亚临界机组,同时需要经常参与调峰运行,出现过多次炉管过热导致爆管等故障,甚至导致机组停运,造成巨大的经济损失。由于超(超)临界机组的运行特点,过热器与再热器管是工作环境最为恶劣的高温承压部件,其内壁承受高温高压蒸汽氧化,外壁承受高温烟气的腐蚀和煤粉颗粒的冲蚀。尤其是内壁的蒸汽高温氧化腐蚀,一方面使管壁的有效壁厚减薄,应力增加,承载能力降低;另一方面氧化形成的氧化皮达到一定厚度时会脱落,并沉积于弯管处,造成管子堵塞,导致过热爆管。此外剥落的氧化物颗粒会导致汽轮机前级叶片和喷嘴等的冲蚀以及汽门卡涩等。这些问题在现役超临界和超(超)临界机组中非常普遍,已成为困扰超(超)机组安全运行的突出问题,因此,研究超(超)临界机组高温受热面高温蒸汽氧化检测及防治技术十分必要。

1.1 火电机组简介

煤炭是我国的主要一次能源,我国电力行业的发展依赖于煤炭。21世纪以来,风能、太阳能、生物质能、核能等新能源技术得到很大改进,但是仍然存在一定的技术问题,新能源技术的发电总量远远不能满足我国对电力的需求。有关统计数据表明,截至2016年年底,我国的整体装机容量达到16.5万亿千瓦,其中火电的装机容量达到整体装机容量的74%,近年来,我国能源生产能力稳步提高。在今后的一段时期,煤炭依旧作为我国主体能源,其地位不会改变。当然,我国能源利用方式粗犷,能源形势复杂严峻等问题依然存在,而高效和清洁的利用煤炭资源是保障能源安全的关键。在火力发电方面,则要求向着更高参数的方向发展,加快淘汰分散的小型燃煤锅

炉。发展超（超）临界技术，继续提高机组参数是实现我国能源结构调整的有力手段，是保障生态环境的有效办法，也是未来火力发电行业的大势所趋，意义重大。可以看出，我国燃煤发电装机容量呈继续增加的趋势，在未来相当长一段时间之内，燃煤发电依旧是我国电力供应的主要途径，并且处于相当重要的地位。

火力发电厂是利用煤炭、石油、天然气或其他燃料的化学能生产电能的工厂，火力发电厂类型很多，但从能量转换观点分析，其基本过程是：燃料的化学能—热能—机械能。而火电机组是燃煤火电厂设备组件中的关键部分。火电机组的热力系统由锅炉、汽轮机与过热器、再热器、凝汽器、高低压加热器和除氧器等主要辅助设备构成。其简要的生产过程是：煤粉送到锅炉的炉膛燃烧（化学能转为热能），加热炉膛四周管内的水而变成蒸汽，蒸汽被送到汽轮机冲动转子而使之转动（热能转为动能，动能又转为机械能），汽轮机带动发电机发电（机械能转为电能）。

锅炉设备是火电机组主要的热力设备之一，它的任务是使燃料通过燃烧将化学能转变为热能，并以此热能加热水，使其成为一定数量和具有一定品质（压力、温度等）的蒸汽。火力发电厂中所采用的锅炉，通常都是容量很大、参数很高、结构十分复杂、机械化和自动化程度较高的锅炉。这种锅炉被称为电厂锅炉或电站锅炉。锅炉包括燃烧设备和传热设备，传热设备通常称为锅炉受热面。由炉膛、烟道、汽水系统以及炉墙和构架等部分组成的整体，称为锅炉本体。除锅炉本体之外，还有供给空气的送风机、排除烟气的引风机、煤粉制备系统、给水设备和除灰除尘设备等一系列辅助设备。将一定数量的燃料和相应数量的空气送入炉膛内燃烧，燃烧所释放出的热量，通过锅炉受热面（即换热表面）传递给水，使水在定压下汽化而形成一定压力和温度的蒸汽。简单来说，锅炉的生产过程就是燃料的燃烧、热量的传递、水的汽化和蒸汽的过热等。

电厂锅炉的主要参数为蒸汽参数，指过热器出口处蒸汽的额定表压力和额定温度。通常蒸汽表压力不超过 6MPa 的称为中压或低压锅炉；在 6~10MPa 之间的称为高压锅炉；在 10~14MPa 之间的称为超高压锅炉；在 14~22.13MPa 之间的称为亚临界压力锅炉；蒸汽表压力超过 22.13MPa 的

称为超临界压力锅炉。目前,国内将压力大于 25MPa 的称为超(超)临界锅炉,准确来说应该叫高效超临界锅炉。

汽轮机是火力发电厂和核电站的原动机,是一种外燃回转式动力机械。通过它将蒸汽的热能转换成机械能,借以拖动发电机旋转发电。与内燃机相比较,汽轮机具有可利用多种燃料、运行平稳、单机功率大、效率高、使用寿命长等一系列优点。由于每台汽轮机都配有调节保护装置和其他辅助设备,汽轮机得以连续安全、经济运行并适应外界负荷的变化。汽轮机与发电机的组合称为汽轮发电机组。汽轮机按照进汽参数分类如表 1-1 所示。

表 1-1 汽轮机按照进汽参数分类

类型	主蒸汽压力 /MPa	主蒸汽温度 /℃	功率 /MW
低压汽轮机	<1.5	<360	≤ 3
中压汽轮机	$2\sim 4$	$370\sim 450$	<50
高压汽轮机	$6\sim 10$	$480\sim 535$	$25\sim 100$
超高压汽轮机	$12\sim 14$	$535\sim 550$	>100
亚临界汽轮机	$14\sim 22.13$	$535\sim 550$	>200
超临界汽轮机	>22.13	>560	≥ 300
超(超)临界汽轮机	>25	≥ 580	≥ 300

1.1.1 火电机组的分类

由于水在加热过程中会汽化,一个饱和压力下必然对应一个饱和温度,在水的定压加热过程中,每个压力下,水都将经历一个未饱和水点、饱和水点、湿饱和蒸汽点(x 点)、干饱和蒸汽点(b 点),直至过热蒸汽点。随着压力的增高,饱和水点有向右移动的趋势,干饱和蒸汽点有向左移动的趋势,汽化阶段随着压力的增高而逐渐缩短,当两点重合时,这点就是水的临界点,此时饱和水与饱和蒸汽已经没有任何差别。因此,水的临界点 $p=22.129\text{MPa}$, $T=374.12^\circ\text{C}$ 。

就蒸汽的压力与温度参数而言,可以将发电机组分为超高压、亚临界、超临界、超(超)临界发电机组,具体可参照表 1-1。

超高压火电机组一般是指蒸汽参数在 $12\sim 14\text{MPa}$ 的锅炉和汽轮发电

机组。

亚临界火电机组蒸汽参数低于水的临界状态点,一般指蒸汽压力在16~19MPa的锅炉和汽轮发电机组。将蒸汽参数超过水临界状态点的参数,统称为超临界机组(Supercritical, SC)。一般超临界机组的蒸汽压力为24~26MPa,其典型参数为: $p=24.1\text{MPa}$, $T=538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$;国内正在建造的600MW超临界机组的参数为: $p=25.4\text{MPa}$, $T=538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$;或 $p=25.4\text{MPa}$, $T=566^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ 。

超(超)临界机组实际上是在超临界机组参数的基础上进一步提高蒸汽压力和温度,国际上通常把主蒸汽压力在24.1~31MPa、主蒸汽/再热蒸汽温度为 $(580\sim 600^{\circ}\text{C})/(580\sim 610^{\circ}\text{C})$ 机组定义为高效超临界机组,即通常所说的超(超)临界(USC)机组。国内正在建设的超(超)临界机组(USC)的主蒸汽 $p=25\sim 26.5\text{MPa}$, $T=600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 。

在超临界和超(超)临界状态,水由液态直接变为气态(由湿蒸汽直接变为热蒸汽、饱和蒸汽),热效率高。因此,超临界,超(超)临界发电机组已经成为国外尤其是发达国家主力机组。火电机组随着蒸汽参数的提高,机组效率不断上升。根据实际运行的燃煤机组的经验,亚临界机组(17MPa, $538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$)的净效率为37%~38%,一般超临界机组(24MPa, $538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$)的净效率为40%~41%,超(超)临界机组(30MPa, $566^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$)的净效率为44%~45%。从供电煤耗来看,亚临界机组为330~340g/(kW·h),超临界机组为310~320g/(kW·h),超(超)临界机组为290~300g/(kW·h)。由于机组效率提高,污染物的排放也相应减少,经济效益十分明显。

目前,由于超高压火电机组已不常见,基本退出运行,故本书不介绍该类机组。亚临界、超临界、超(超)临界发电机组是目前广泛应用的火电机组,本章主要将对这三类机组进行介绍。

1.1.2 亚临界火电机组

据《2015中国电力年度发展报告》统计,截至2014年年底,600MW及以上容量机组占全国火电机组容量的41.58%,300~600MW(不含

600MW) 占比 35.75%, 300MW 以下 (不含 300MW) 占比 22.67%。我国的火电中大部分的燃煤机组主要是亚临界机组, 还有相当一部分 100MW 及以下的机组。我国的亚临界火电机组主要是 300MW 和 600MW 火电机组, 多数 300MW 级机组主要兴建于 20 世纪 80 年代末至 90 年代, 主蒸汽皆为亚临界参数, 国产 300MW 机组历经早期型、引进型以及相应的改进和优化, 热耗率有进一步的降低, 实际完成的供电煤耗, 引进型机组最低为 $358\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 比进口机组高 $31\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 经第 3 阶段优化后的机组为 $340\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 已接近进口机组水平。其中较早投产的至今已服役 20 年左右。一般机组设计寿命为 30 年, 然而多数火电机组 (尤其是汽轮发电机组) 实际服役的寿命可长达 40 年或者是 50 年以上。然而, 如果让我国分布在各地数量不菲的 300MW 级机组多运行若干年, 由于机组在热耗、煤耗等经济指标上明显落后于参数更高的 600MW 级、1000MW 级在役机组, 则势必要影响我国节能、减排、降耗的效果, 延缓我国“低碳经济”“绿色能源”的进程。因此, 低功率的火电机组可能面临被淘汰的形势。

相对参数更高的机组, 600MW 亚临界机组锅炉出事故的概率较小, 具有安全稳定性。亚临界机组消耗电能更低, 压力参数及系统的漏泄量较低。与亚临界相比, 超临界锅炉压力高, 给水泵、循环泵消耗电能较多; 亚临界机组没有复杂的启停操作, 与超临界相比, 启停操作相对简单, 热损失较低。超临界压力锅炉为了保证水冷壁和过热器的冷却, 再启动必须建立一定的启动压力和流量, 所以超临界机组必须装置一套专用的启动系统, 启动操作复杂, 热损失也随着增大。此外, 亚临界火电机组相对超临界安全性更高。超临界直流锅炉由于压力高, 容易发生膜态沸腾, 对直流锅炉的水冷壁质量要求高, 安全性有所降低。

目前, 600MW 亚临界火电机组已在我国得到广泛应用, 成为我国燃煤机组的主力机型, 本身具有可靠性强, 耗能低、排放指标达标的较好水平, 但与国外先进机组相比仍有一定差距, 需要在生产运行中不断研究分析, 建立整体优化理论体系, 在节能、环保、安全稳定运行方面进行进一步优化, 提升使用效益, 力争达到世界先进水平。

1.1.3 超临界火电机组

超临界机组是指主蒸汽压力大于水的临界压力的机组,即压力不小于22.12MPa,常规超临界参数(conventional supercritical)机组,其主蒸汽压力一般为24MPa左右,主蒸汽和再热蒸汽温度为540~560℃;常规超临界机组的效率可比亚临界机组高2%左右。常规超临界机组的典型参数是24.1MPa,538℃/566℃,对应的发电效率为40%~42%。

此外,自1990年以来,我国先后从美国、俄罗斯等国引进了一批超临界机组。1992年在上海石洞口二厂建成第一座超临界2×600MW机组,后陆续建成了南京2×300MW、营口2×300MW、盘山2×500MW、伊敏2×500MW和绥中2×800MW等超临界机组。2004年建成的我国第一个国产超临界机组——华能沁北电厂2×600MW机组如图1-1所示。之后相继引入超临界技术制造安装大量的国产机组,这些机组的安装、调试及运行对我国研究、设计、制造和管理超临界机组有极大的帮助。

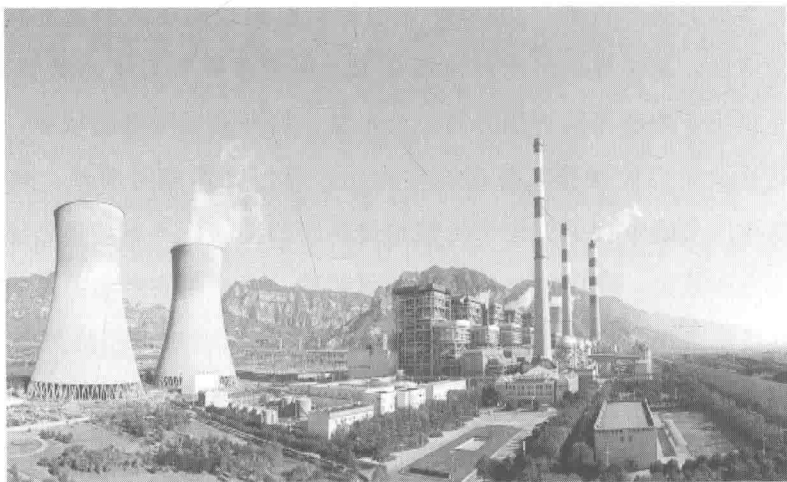


图 1-1 华能沁北电厂

伴随着中国电力工业的发展,火电机组仍有相当大的潜力和市场。十多年来,我国已投运了一大批超临界机组,具体见表1-2。超临界机组具有较好的技术性能,投运后不仅在提高发电煤炭利用率和降低污染方面发挥了一

定的作用，而且通过这些机组的成功运行，我国电力行业掌握了超临界机组电站的设计、调试、运行、检修技术，积累了丰富的应用经验和培养了大批技术人员，为我国超临界和超（超）临界机组的应用奠定了基础。

表 1-2 我国已投运的典型超临界电站主要参数统计

发电厂	制造方	机组/台	功率/MW	参数/(MPa/℃/℃)
华能石洞口二厂	ABB	2	600	24.2/538/566
国华盘山电厂	苏联	2	520	23.54/540/540
华能南京电厂	苏联	2	320	23.54/540/540
国电外高桥电厂二期	西门子	2	900	23.53/542/568
华能营口电厂	苏联	2	320	23.54/545/545
华能伊敏电厂	苏联	2	500	23.54/545/545
国华绥中发电厂	苏联	2	800	23.54/545/545
漳州后石电厂	三菱	6	660	25.4/542/569
华能沁北电厂	东方/哈尔滨	2	600	24.2/566/566

超临界机组是火电机组大家族中的“节能减排新星”。超临界机组和亚临界机组比较具有如下特点。

① 热效率高、热耗低。超临界机组比亚临界机组可降低热耗 2.5%，故可节约燃料，降低能源消耗和大气污染物的排放量。

② 在超临界压力下，水和蒸汽比热容相同，状态相似，单相的流动特性稳定，没有汽水分层和在中间集箱处分配不均的问题，不需要像亚临界压力锅炉那样用复杂的分配系统来保证良好的汽水混合，回路比较简单。超临界锅炉水冷壁管道内单相流体阻力比亚临界汽包炉双相流体阻力低。

③ 可靠性好。在目前的洁净煤发电技术中，超临界机组发电技术运行可靠性能相比于亚临界机组来说更高。超临界机组可用率及可靠性与亚临界机组相当，已被国内外超临界机组电厂的运行实践所证实。据统计美国 7 台 1300MW 超临界机组，可用率在 83.03% 以上，平均年运行在 7000h 以上。日本的可用率在 90% 以上，俄罗斯的可用率在 87.8% 以上。我国已投运的超临界机组可用率也比较高。石洞口二厂 2 台机组的平均可用率为 88.02%。在可靠性上不存在超临界、亚临界两种机组的差异，也不存在机