

超(超)临界机组 锅炉检验

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
谢国胜 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超(超)临界机组 锅炉检验

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
谢国胜 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由超（超）临界锅炉概述、超（超）临界锅炉的特点及其材料、超（超）临界机组锅炉检验检测技术、超（超）临界机组锅炉检验、超（超）临界锅炉典型案例等五章组成。

本书深入浅出，通俗易懂，既有许多相关的超（超）临界锅炉、材料、无损检测及理化检验等基础知识，又有解决超（超）临界锅炉复杂疑难技术问题的分析方法和方案，并汇集了国内外大量的新资料，实际应用性较强，适用于从事超（超）临界机组锅炉设计、制造、安装、检修、检验检测、焊接等工作的广大技术人员使用，也可以作为高校相关专业的教材。

图书在版编目（CIP）数据

超（超）临界机组锅炉检验/谢国胜主编；国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京：中国电力出版社，2015.12
ISBN 978-7-5123-8610-5

I. ①超… II. ①谢… ②国… III. ①超临界机组-电厂锅炉-检验
IV. ①TM621.3-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 283442 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>）

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

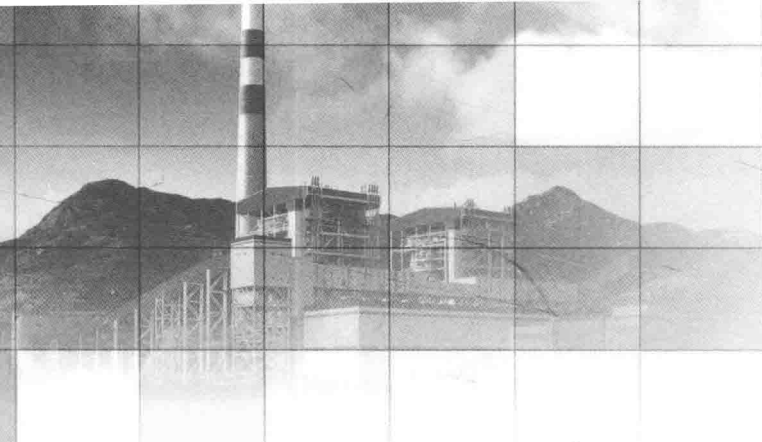
787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 263 千字 1 插页

印数 0001—1500 册 定价 49.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，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）临界机组锅炉检验

编 委 会

主 编 谢国胜

副 主 编 龙 毅 龙会国 杨湘伟

参编人员 （按姓氏笔划为序）

刘云龙 沈丁杰 彭碧草 熊 亮

前 言

按照绿色发展和国务院大气污染防治计划的要求，全国将全面推广超低排放和世界第一流的能耗标准，这是推进化石能源清洁化、改善大气质量、缓解资源约束的重要举措。今后一段时间内，大力发展高效率、低污染的超临界（SC）和超超临界（USC）燃煤机组在这一举措中将起到至关重要的作用。

从亚临界机组向超（超）临界机组转变，关键是要提高机组的蒸汽压力及温度，为了应对这些温度、压力方面的变化，超（超）临界机组锅炉大量使用新型的、高等级的铁素体、奥氏体耐热钢。截止到目前，国内超（超）临界机组运行使用的年限不长，并没有经过设计年限的长时间严苛考验，长期运行后材料性能如何变化、是否需要评价、安装过程中焊接及热处理易出现问题、锅炉容量增加及结构复杂情况下的运行产生的新问题等，如何有效地监督检验，这些都是从事超（超）临界机组锅炉设计、制造、安装、运行、检修、检验检测等相关技术人员共同关心的问题。

锅炉检验是国家法律规定的检验，电力行业标准也有相关要求，是保障锅炉安全稳定运行的重要手段。本书编撰单位湖南省湘电锅炉压力容器检验中心有限公司和国网湖南省电力公司电力科学研究院结合自身六十余年来电站锅炉、特别是近十余年来超（超）临界机组锅炉检验检测工作经验，收集了国内外 SC、USC 锅炉有关锅炉结构特点、材料、检验检测技术、锅炉检验及典型案例等资料，编写了该书，在此对资料提供者、提供帮助的行业内有关技术人员、专家和本编撰单位的全体同仁一并表示感谢！

全书共分五章，第一～二章由龙毅、彭碧草编写，第三～四章、附录由龙会国、熊亮、刘云龙编写，第五章由杨湘伟、沈丁杰编写。全书由谢国胜统稿、编审。

无论在国内还是国外，书中所涉及的超（超）临界机组锅炉使用时间还都不

长，公开发表的有关设计、制造、安装、运行、检修、检验检测等学术文献也较少，再加上时间仓促和水平所限，书中难免存在不足与疏漏之处，恳请读者指正。

编者

2015年12月于长沙

目 录

前言

第一章	超(超)临界锅炉概述	1
第一节	超(超)临界锅炉的发展历程、现状和趋势	1
第二节	超(超)临界锅炉投运后面临的新问题	4
第三节	超(超)临界锅炉检验的必要性及目的	6
第二章	超(超)临界锅炉的特点及其材料	8
第一节	超(超)临界锅炉的结构特点	8
第二节	典型铁素体耐热钢	11
第三节	典型奥氏体耐热钢	13
第四节	超(超)临界锅炉关键部件用新型耐热钢焊接及热处理	19
第三章	超(超)临界机组锅炉检验检测技术	29
第一节	常用理化检测技术	29
第二节	常见无损检测技术	37
第三节	奥氏体不锈钢晶间腐蚀试验与检测技术	47
第四节	小径管焊缝超声波检测技术	53
第五节	锅炉弯管内氧化皮堆积量检测技术	58
第六节	集箱及受热面异物堵塞检测	69
第四章	超(超)临界机组锅炉检验	73
第一节	超(超)临界锅炉典型失效形式及预防措施	73
第二节	制造阶段的检验重点	84
第三节	安装阶段检验重点	87
第四节	在役锅炉检验重点	90
第五节	锅炉“四管”检验	101
第五章	超(超)临界锅炉典型失效案例分析	107
第一节	电站锅炉失效分析技术	107
第二节	超(超)临界锅炉典型失效案例分析及处理	116

附录一	超（超）临界机组锅炉检验重要技术标准	169
附录二	电站锅炉常用金属材料硬度值	173
附录三	电站锅炉常用材料焊接及其热处理工艺	175
附录四	电站锅炉常用钢材的化学成分、力学性能及参考数据	

超（超）临界锅炉概述

第一节 超（超）临界锅炉的发展历程、现状和趋势

“能源、环境、发展”是 21 世纪人类所面临的三大主题。世界能源短缺问题已经在大多数国家甚至全球范围内出现。而目前，电力是最主要的二次能源，是在消耗一次能源的基础上产生的高品位能源，可以肯定地说，电力工业是国民经济发展的基础。自第二次工业革命以来，社会生产进入电气时代，人们的生活方式也与电息息相关，电力作为二次能源，在生产和生活中发挥着不可或缺的作用，电力能否得到合理有效的供给，已经成为国民经济健康稳定发展的一个关键因素。由世界电能构成比例可知，在整个世界范围内，煤炭发电所提供的电能所占比例最大，如图 1-1 所示。

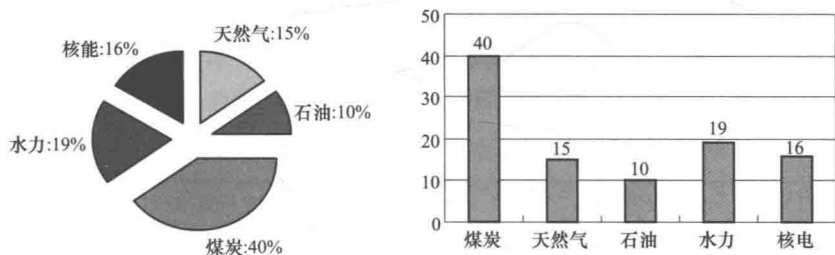


图 1-1 世界电能构成比例

世界电力能源以煤炭为主，特别是我国是以一次能源——煤炭作为主要能源的国家（煤炭资源丰富，已探明储量 10 077 亿 t），所以我国的能源发展政策是以煤炭为主体、电为中心，保障社会经济的可持续发展的，并且这种能源消费格局在较长时间内不会改变。预计到 2020 年，我国发电总装机容量将达到 13.4 亿 kW，其中燃煤发电机组装机容量仍将占约 65%，见表 1-1。发展燃煤发电机组，必定会带来巨大的环境压力。排放的烟气中含有 SO_x 、 NO_x 和 CO_2 等废气，并排出大量的灰渣和污水，给人类带来四大环境问题：温室效应、酸雨、臭氧层破坏和大气污染。因此，“十一五”期间，国家发展和改革委员会指定的电力发展总方针为“大力开发水电，优化发展煤电，积极推进核电建设，适度发展天然气发电，加快新能源发电”。优化发展煤电——清洁煤发电技术，其优点是高效低排放。其目标是加强电源结构调整，限制小火电厂的发展。例如，新建火电厂一般都要使用单机容量在 600MW 及以上的高参数、高效率的机组；发展坑口电站，变输煤为输煤与输电并举，减轻运输压力；在港口、路口、负荷中心建设电厂，适应电网安全稳定运行的需要，提高供电的可靠性，支持鼓励发展热电联产、开发环保技术，促进脱硫等环保设备



的国产化，开展清洁煤技术的试验和示范工程；适当发展燃气蒸汽联合循环电站，提高效率，减轻环境污染。

表 1-1

中国电力能源发展趋势

年份	容量/亿 kW	火电/%	水电/%	核电/%	新能源/%
2000	3.19	72.1	24.87	0.66	
2005	4.70	74.80	23.20	1.90	0.14
2006	6.22	77.82	20.07	1.20	0.10
2007	7.1329	77.73			
2020	13.40	65.0	23.0	4.0	

从火电站的设计、制造和实际运行过程中，人们已经认识到只有提高蒸汽参数（压力和温度），才能有效地提高机组的热效率，降低煤耗，减少 CO_2 排放量，满足环境保护和节约能源的要求，因此，世界各国的电站锅炉都向着大容量和高参数的方向发展。如表 1-1 所示，随着机组参数的提高，优化发展煤电，节约能源，减少 CO_2 排放量，满足环境保护的要求，与亚临界机组相比较，超超临界机组具有如下主要优点：

（1）机组效率提高：热效率可提高 6% 以上。

（2）机组煤耗将降低：如表 1-2 所示，将主蒸汽参数为 27MPa、温度为 600℃ 的超超临界机组煤耗与亚临界机组相比，前者比后者供电单位煤耗降低了 46g/kW·h。对于一台 1000MW 机组，年利用 5000h，采用超超临界参数，每年可节约标煤 23 万 t，若采用参数更高的超 700℃ 机组，节煤效果将更加可观。

表 1-2

蒸汽参数与火电厂效率、供电耗煤的关系

机组类型	蒸汽压力/MPa	蒸汽温度/℃	电厂效率/%	供电煤耗*/kW·h
中压机组	3.5	435	27	460
高压机组	9.0	510	33	390
超高压机组	13.0	535/535	35	360
亚临界机组	17.0	540/540	38	324
超临界机组	25.5	567/567	41	300
高温超临界机组	25.0	600/600	44	278
超超临界机组	30.0	600/600/600	48	256
高温超超临界机组	30.0	700	57	215
超 700℃ 机组	超 30	超 700	60	205

*. 供电煤耗用标煤量统计，标煤量是一个统计折算标准，1kg 标煤的发热量为 7000kcal（1kcal=4.1868kJ）。

（3）机组有利于环保：使用超超临界机组相对于亚临界机组可有效减少污染物 SO_2 、 NO_x 及粉尘的排放量。

大容量、高参数（高温、高压）超超临界机组代表了未来电站锅炉发展的趋势。

在这种趋势下，同时在发电设备需求的强劲拉动下，近几年电站锅炉行业迎来了前所未有的发展机遇，尤其是大容量、高参数机组的设计、制造、安装、运行及检修等，取得



了长足的进步。大容量、高参数超临界机组（按主蒸汽出口压力分类，压力大于 22.0MPa 为超临界压力锅炉）、超（超）临界机组（国际上通常把主蒸汽压力在 28MPa 以上或主汽、再热汽温度在 580℃ 以上的机组定义为超（超）临界机组，详见表 1-2）代表了未来电站锅炉发展的趋势。目前全世界投入运行的超临界及以上参数的 600 多台发电机组中有 1/10 属于超（超）临界机组。美国已运行的超临界机组有 170 多台，正在研究用于 700℃ 的超（超）临界机组的锅炉材料。日本的超临界机组首先引进美国和欧洲的技术，再进行二次开发，现在跃居世界发展超临界技术的先进国家行列。日本 450MW 以上的火力发电机组全部采用超临界或者超（超）临界机组，总数有 60 余台，其容量占总装机容量的 61%。日本在 1995 年就已将火电机组的主蒸汽参数提高到 593℃、压力为 31MPa，而日本各制造公司正着手对参数为 34.5MPa/620℃/650℃、31MPa/593℃/593℃/593℃ 和 34.4MPa/649℃/593℃/593℃ 的超（超）临界机组进行全面的研究，力求其相对热效率提高 10% 以上。俄罗斯 300MW 以上容量的机组全部采用超临界参数，共有超临界机组 280 余台。欧洲在目前超（超）临界机组主蒸汽参数为 600℃、压力为 30MPa 的基础上，进一步发展超（超）临界机组，在 2014 年建成了主蒸汽参数为 700℃、压力为 37.5MPa 的超（超）临界机组。欧洲 COST 522 计划开发应用铁素体钢的蒸汽参数为 29.4MPa/620℃/650℃ 的超（超）临界机组。“Thermie700℃ 计划”旨在开发蒸汽参数达 37.5MPa/700℃/700℃ 的超（超）临界机组，其效率可达 52%~55%。美国的目标则更高，结合考虑美国燃煤腐蚀等问题，将蒸汽温度定为 760℃。我国也不例外，自从 1955 年我国生产出第一台主蒸汽温度为 450℃、压力为 3.82MPa 的 6MW 火电机组以来，经过 50 多年的不懈努力，也将火电机组的主蒸汽参数提高到 600℃、压力为 26.5MPa。图 1-2 展示了我国火电机组蒸汽参数的变化趋势。我国主蒸汽温度按下列的发展过程获得较大的进步，完成从 350℃→435℃→535℃→538℃→545℃→566℃→600℃ 的过渡，其中仅用两年，就从超临界迈向了超（超）临界。采用超（超）临界机组配合烟气净化装置，已经成为优化煤电结构的主要方向。预计在未来 10 年左右，我国火电机组蒸汽参数还将从目前的 600℃、26.5MPa 提高到 630~650℃、30MPa，甚至更高。到目前为止我国超超临界机组水平达到或接近国际先进水平。

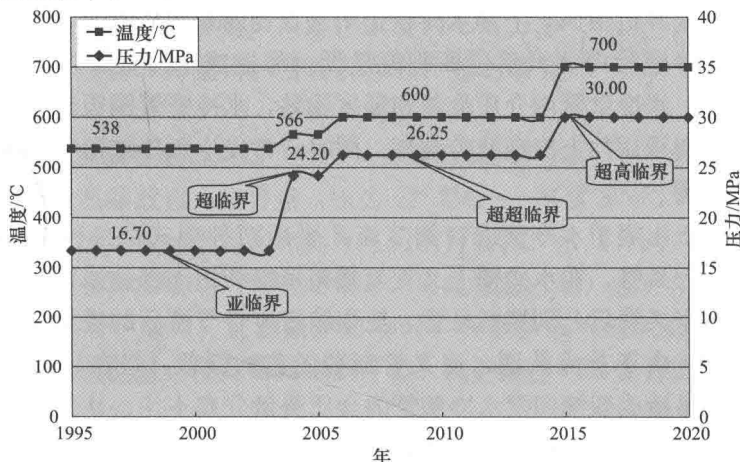


图 1-2 中国火电机组蒸汽参数发展趋势



第二节 超（超）临界锅炉投运后面临的新问题

一、超（超）临界锅炉炉型及燃烧系统配置方式

超（超）临界机组锅炉整体多采用Ⅱ型布置、塔型布置等结构。燃烧方式采用正压直吹反向双切圆、四角切圆方式燃烧、前后墙对冲燃烧、W型火焰等燃烧方式。这几种布置形式和燃烧方式在世界上都有成功的经验，但随着锅炉蒸汽温度压力参数的提高

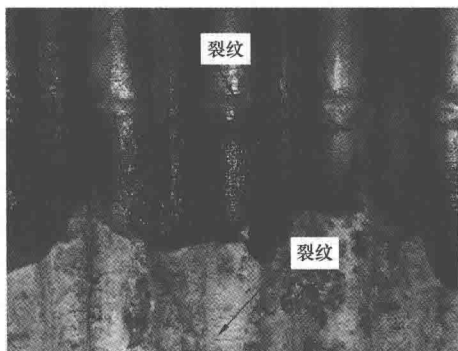


图 1-3 某电厂燃烧器附近水冷壁管的裂纹

及容量的增大，锅炉使用时，高温高压部件温度场、应力场分布状态和特点均呈现明显变化，应加强研究沿炉膛宽度方向热负荷及烟气温度分布，充分考虑低负荷稳燃和高效燃烧、炉膛结渣、水冷壁高温腐蚀、低 NO_x 排放、尾部对流受热面的磨损等方面问题，同时对煤种变化和煤质变差趋势的适应能力、负荷调节能力等方面的问题。如图 1-3 所示为某电厂超（超）临界机组运行 $3 \times 10^4 \text{h}$ 后，燃烧区域水冷壁管裂纹。

二、受压部件结构设计更复杂，面临新问题更多

超（超）临界机组锅炉容量大（炉膛宽、炉身高）、参数高（压力大、温度高），从而在运行过程中膨胀量大、膨胀应力大。设计上未考虑消除大膨胀问题，从而易引起膨胀系统出现普遍拉裂的现象（如出口侧水冷壁集箱管座焊缝大量裂纹、包墙集箱管座焊缝大量裂纹及鳍片撕裂等现象）大量出现，严重影响机组安全运行。

超（超）临界机组锅炉炉膛变长、变宽，使整个锅炉钢结构的长度、宽度均发生改变，设计时如未加以考虑，则可能造成炉顶大板梁挠度的超标。

变压运行超（超）临界直流锅炉水冷壁有两种型式：炉膛上部用垂直管、下部用螺旋管圈及内螺纹垂直管屏。螺旋管圈水冷壁锅炉也有两种型式，一种是光管；另一种是内螺纹管。当超（超）临界机组锅炉下部水冷壁采用垂直管或采用光管时，尤其在机组偏离设计负荷运行时，水冷壁管内蒸汽单位面积流量低，易造成水冷壁管过热，形成热疲劳裂纹。炉膛烟温偏差，水冷壁管内介质流速和温度偏差，水冷壁管圈吸热不均会导致温度偏差应力频繁变化引起承压件上出现疲劳破坏。同时，常发生水冷壁运行状态下的高温腐蚀和磨损，炉膛结焦等。

超（超）临界机组锅炉水冷壁进口侧节流孔采用两种型式：一种是在集箱内部管口侧；另一种是采用三叉管，在水冷壁三叉管与集箱短接管相连部位采用节流孔圈，三叉管一分为二，部分在三叉管后分别接三叉管，使集箱短接管节流后的流量一分为四。当采用三叉管节流方式时，由于节流孔圈、三叉管制造工艺的偏差，且在后续三叉管中蒸汽容量、流量的减少，易造成后续四根水冷壁管内介质流量分布不均，从而造成吸热不均，长期运行中优先在介质流量小的水冷壁管热负荷高的区域出现疲劳裂纹等。

过热器、再热器常出现由于屏间烟气流速变化造成屏间温差和同一管屏内偏差，导



致过热爆管和磨损泄漏，为控制管屏间温差和同一管屏内偏差，过热器、再热器进口集箱设计节流孔，往往由于异物或氧化皮堵塞引起超温爆管。如图 1-4 所示为某电厂分隔屏集箱节流孔堵塞引起分隔屏管超温爆管。



图 1-4 分隔屏管爆管及对应节流孔堵塞

三、锅炉承压部件采用的新材料

随着温度和压力参数的提高，超（超）临界锅炉用过热器、再热器材料、主蒸汽管道、再热蒸汽管道，采用了可耐高温腐蚀与蒸汽腐蚀的 Super304H、HR3C、25Cr 等奥氏体钢和 A213T91、A213T92 等马氏体钢，末级过热器出口集箱与主汽导管采用了含 Cr 量达 12% 的新型耐热钢 P122、A335P91、A335P92 等马氏体钢。超（超）临界机组由于新材料的普遍应用，导致异种钢焊接问题较多，且由于不同材质的膨胀问题，导致膨胀引起失效，特别是奥氏体耐热钢材料在过热器和再热器等部件上的应用，常发生由于氧化皮剥落堆积堵塞导致的超温爆管。同时 P92/T92 等材料在我国属于新材料，国际上使用经验也不多，材料使用性能将会是超（超）临界锅炉长期运行须重点关注的问题。如图 1-5 所示，某电厂 1 号机组锅炉为东方锅炉（集团）股份有限公司生产的 DG1900/25.4-Ⅱ1 型、600MW 超临界参数变压直流型锅炉，累计运行约 2.5 万小时后检查发现高温过热器、高温再热器管屏存在严重的氧化皮剥落堆积现象。



图 1-5 高温过热器弯头氧化皮堆积

四、循环方式对水质要求

理论上，水的状态参数达到临界点（压力 22.1MPa、温度 374℃）时，水完全汽化在瞬间完成，在临界点时，饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽、水共存的两相区，二者的参数不再有区别。由于在临界参数下汽水密度相等，因此在超（超）临界压力下无法维持自然循环，直流锅炉成为唯一型式。直流锅炉启动时，在锅炉点火前就必须不断地向锅炉进水，以保证足够的启动流量，使受热面得到冷却。锅炉进水一次变为蒸汽，给水水质影响受热面管子内水循环过程、结垢、腐蚀、传热等情况，影响蒸汽品质。因此，超（超）临界锅炉水质要求比亚临界自然循环和控制循环的锅炉要求要高。



五、主要辅机阀门设备

超（超）临界锅炉对辅机的要求是严格的。目前我国超（超）临界锅炉给水泵、锅炉再循环水泵、高压阀门等基本全部进口。由于介质的温度高、压力大，水泵及阀门的结构、材料、密封性能、高温高压平稳运行性能、可靠性和安全性能等均有更高要求。

第三节 超（超）临界锅炉检验的必要性及目的

一、超（超）临界锅炉检验的必要性

电站锅炉在运行过程中，受压元件在高温高压水汽介质作用下，在外部高温火焰辐射或延期冲刷下，可能发生腐蚀、变形、磨损、结垢、过烧、泄漏等缺陷，更严重的发生爆管等事故，所以即使锅炉的设计非常合理，制造安装质量良好，运行操作正常，随着使用时间的推移，也不可避免地会在运行中出现各种问题。而实际情况往往比这更为复杂，结构、设计上的考虑不周，制造安装中的误差，材料本身的缺陷，即使经过严格的质量检验，也只能把缺陷控制在一定的范围内，甚至还有个别缺陷没有被检验发现而隐藏下来，这些缺陷将在运行中发展。再加上仪表或自动装置失灵、运行人员失误，造成设备未按设计要求运行，或检修质量不良，都将会产生缺陷或加剧缺陷的发展。总之，由于诸多复杂因素的影响，设备随时会出现各种缺陷，如不及及时发现并加以消除，最终将会导致设备破坏，甚至造成机组非停，严重影响电力生产安全稳定运行。《特种设备安全法》、《锅炉定期检验规程》等法律法规明确要求对电站锅炉进行定期检验，特别是对高参数大容量的超（超）临界锅炉定期检验可有效确保发电机组的安全稳定运行，提高电站锅炉设备健康水平，延长设备使用寿命。

二、锅炉定期检验分类及检验范围

锅炉定期检验工作包括外部检验、内部检验和水（耐）压试验三种。

外部检验是指锅炉在运行状态下对锅炉安全状况进行的检验；内部检验是指锅炉在停炉状态下对锅炉安全状况进行的检验；水压试验是指锅炉以水为介质，以规定的试验压力对锅炉受压部件强度和严密性进行的检验。

检验周期一般规定：

（1）锅炉的外部检验一般每年进行一次。

（2）内部检验，锅炉一般每 2 年进行一次，成套装置中的锅炉结合成套装置的大修周期进行；电站锅炉结合锅炉检修同期进行，一般每 3~6 年进行一次；首次内部检验在锅炉投入运行后一年进行，成套装置中的锅炉和电站锅炉可以结合第一次检修进行。

（3）水（耐）压试验，检验检测人员或者锅炉使用单位对锅炉安全状况有怀疑时，应当进行水（耐）压试验；因结构原因无法进行内部检验时，应当每 3 年进行一次水（耐）压试验。

电站锅炉定期检验范围：

（1）锅炉本体。

（2）主蒸汽管道：指锅炉主蒸汽出口至汽轮机电动主汽阀前第一条焊缝（不含焊缝）之间的蒸汽管道和一次阀前第一条焊缝（不含焊缝）以内的疏水管、排气管及减温减压



阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的高压旁路管道等。

(3) 再热蒸汽管道: 再热蒸汽管道包括再热蒸汽热段管道和再热蒸汽冷段管道。再热蒸汽热段管道指锅炉再热蒸汽出口至汽轮机电动主阀门前第一条焊缝(不含焊缝)之间的再热蒸汽管道和一次阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的疏水管、排气管及减温减压阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的低压旁路管道等;再热蒸汽冷段管道指逆止阀后第一条焊缝(不含焊缝)以外至锅炉本体的再热蒸汽冷段管道及一次阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的疏水管、排气管等。

(4) 主给水管道: 锅炉给水泵出口阀后第一条焊缝(不含焊缝)以外至锅炉本体的主给水管道及一次阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的疏水管、排气管等。

(5) 排污管道: 排污管道出口第一条焊缝(不含焊缝)以外至一次阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的管道。

(6) 锅炉启动系统: 汽水(启动)分离器、储水箱(罐)及水位控制阀前第一条焊缝(不含焊缝)以内的承压管道。

(7) 安全附件和仪表: 安全阀、压力测量装置、水(液)位测量与示控装置、温度测量装置、排污和排放装置等安全附件, 以及安全保护装置和相关的仪表等。

参考文献

- [1] 赵钦新, 朱丽慧. 超临界锅炉耐热钢研究. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 吴敬儒, 陈剑波. 我国电力工业发展规划问题. 中国电力, 2005, 38 (9): 11-14.
- [3] 张素心, 阳虹, 姚祖安. 超临界汽轮机的开发与展望. 上海汽轮机, 2002, 1: 15-22.
- [4] 杨富. 加快超(超)临界机组用新型钢开发确保超超临界机组稳步发展. 600MW/1000MW 超(超)临界机组新型钢国产化研讨会, 2009, 3: 1-6.
- [5] 肖汉才, 周臻. 超临界机组和超(超)临界机组的优势及在我国大力发展的广阔前景. 电站系统工程, 2004, 20 (5): 8-10.
- [6] 陆燕荪. 从超临界机组的发展透视研发新材料的紧迫性. 发电设备, 2006, 3: 149-151.
- [7] 赵钦新, 顾海澄, 陆燕荪. 国外电站锅炉耐热钢的一些进展. 动力工程, 1997, 17: 7-17.
- [8] 张顺生. 电站锅炉行业现状与发展趋势分析. 电器工业, 2009, 1: 56-57.
- [9] 胡平. 超(超)临界火电机组锅炉材料的发展. 电力建设, 2005, 26 (6): 26-29.
- [10] 周荣灿, 范长信, 李耀君. 电站用材的现状与发展趋势. 钢管, 2006, 35 (1): 19-25.
- [11] Masuyama F. History of power plants and progress in heat resistant steels. isij international, 2001, 41 (6): 612-625.
- [12] 刘堂礼. 超临界和超(超)临界技术及其发展. 广东电力, 2007, 20 (1): 19-22.

第二章

超（超）临界锅炉的特点及其材料

第一节 超（超）临界锅炉的结构特点

一、锅炉的主要布置型式

大容量超超临界电站锅炉的总体布置型式主要有两种，即 Π 型和塔型。 Π 型是传统普遍采用的形式，烟气由炉膛经水平烟道进入尾部烟道，再在尾部烟道通过各受热面后排出。其主要优点是锅炉高度较低，尾部烟道烟气向下流动有自身吹灰作用，各受热面易于布置成逆流形式，对传热有利等。其主要缺点是烟气流经水平烟道和转弯烟室，引起灰分的浓缩集中，使尾部受热面的局部磨损加重，燃烧器布置比较困难，烟气分布的不均匀性较大，水平烟道中的受热面垂直布置疏水困难，炉膛前后墙结构差别大，后墙水冷壁布置比较复杂等。我国电站锅炉普遍采用这种布置方式。

塔式布置是将所有承压对流受热面布置在炉膛上部，烟气一路向上流经所有受热面后，再折向后部烟道，流经空气预热器后排出。这种布置方式的最大优点是烟气温度比较均匀，对流受热面的磨损较轻，对流受热面水平布置易于疏水，水冷壁布置比较方便，穿墙管大大减少等，因而在大型锅炉中采用更为优越，在欧洲得到广泛的应用。

二、水冷壁系统

超（超）临界变压运行锅炉的水冷壁结构型式主要有螺旋管圈水冷壁和垂直水冷壁两种型式，目前这两种水冷壁结构型式均已成功运行。

螺旋管圈水冷壁布置形式分为两段，在折焰角下方水冷壁螺旋上升，这是在炉膛的高热负荷区，管圈中每根管子能同样地绕过炉膛的各个壁面，因而每根管子的吸热量相同，管间的热偏差最小。再通过中间混合集箱或分叉管过渡到热负荷较低的炉膛上部垂直管水冷壁。螺旋管圈的主要优点是自由地选择管子的尺寸和数量，因而能选择较大的管径和较高的质量流速，适用于变压运行，得到了广泛的应用，至今仍是超（超）临界锅炉水冷壁的主要结构形式。其缺点是螺旋管圈制造安装支承困难，流动阻力大且吹灰困难。

三、过热器和再热器

过热器和再热器的运行安全要求在某种程度上要高于水冷壁。当前，超（超）临界锅炉过热器、再热器水动力设计技术和运行技术已经比较成熟，而且在超（超）临界条件下，水动力特性要优于亚临界。但是现在 1000MW 超（超）临界锅炉的主蒸汽、再热蒸汽温度已经升高到 $605^{\circ}\text{C}/603^{\circ}\text{C}$ 甚至以上，可以说已经达到当前金属材料所能承受的顶级，加之锅炉容量的增加，热偏差也随之增大，所以对于锅炉过热器、再热器而言，必须周密



设计,稍有不慎就会产生严重后果。

超(超)临界锅炉的过热器一般采用多级布置,严格控制每一级的焓升,以防止热偏差过大,基本采用辐射-对流组合式,包括顶棚、包覆、低温过热器、分割屏过热器、后屏过热器和高温过热器等几个部分。顶棚和包覆布置在低温区域,吸热少,传热效果差。低温过热器一般布置在尾部烟道中分墙后部,由水平和立式两部分组成,顺列布置横向节距较大,以控制烟气流速,减少对管子的磨损。屏式过热器布置在炉顶前部,悬吊在炉膛前上方,起到分隔炉膛烟气、减少烟气出口残余扭转应力的作用。后屏过热器布置在炉膛上部的后半部分,高温过热器布置在水平烟道后部,一般在低温过热器和后屏过热器后布置2~3级减温水,以控制主蒸汽温度,消除热偏差,保护过热器安全。以上是1000MW超超临界锅炉过热器的一般形式,不同的锅炉布置会略有不同。

由热力学可知,采用再热循环可以提高朗肯循环的效率,一般可使机组的效率提高2%~3%,因此在大容量电站中普遍采用。再热器一般采用两段布置,低温再热器布置在尾部烟道中分墙前部,高温过热器布置在水平烟道后部,大多数机组布置在高温过热器后面。在级间有喷水减温器,以防止汽温过高烧坏再热器,但是减温水不能作为调节再热汽温的手段,再热汽温调节由摆动燃烧器的摆角和调节烟气挡板实现。

在超临界机组中,采用二次再热,可以进一步提高热效率,但是管路系统复杂,成本加大,因此当前在一般超超临界机组中基本上都采用一次再热。但是,二次再热是一种发展趋势,国外的锅炉生产厂商均倾向于在大容量超超临界锅炉上使用二次再热,丹麦的两台超超临界机组采用二次再热,使用深海冷却水可以使热效率达到47%,是当前世界上热效率最高的超(超)临界机组。

四、炉膛和燃烧系统

现代超(超)临界锅炉一般都配备先进的燃烧系统,无论是直流燃烧器切圆燃烧还是旋流燃烧器前后墙对冲布置,都能达到预防结渣、降低 NO_x 排放和飞灰可燃物含量的目的。

切圆燃烧中四角火焰的相互支持,一、二次风的混合便于控制,其煤种适应性更强,可以燃烧各种低挥发分和高灰分的煤种,适合我国燃煤电站锅炉煤种多变和煤质逐渐变差的特点,因而采用直流燃烧器切圆燃烧方式更适合我国的国情。目前投运600MW以上的超(超)临界机组绝大多数采用切圆燃烧方式。同时为了防止大容量锅炉切圆燃烧炉膛出口烟气流存在残余旋转应力,使炉膛出口烟温及烟量分布偏差加剧,导致炉膛出口过热器与再热器区域烟温偏大,ALSTOM-CE率先使用了单炉膛反向双切圆燃烧技术,后来三菱重工引进了这种燃烧技术的专利,设计了多台超临界和超(超)临界机组。由于双切圆燃烧技术增加了燃烧器数量,降低了单只燃烧器的负荷,可以有效防止结渣,保证燃尽,使炉膛内热负荷分布均匀,炉膛出口烟温偏差降低。因此,采用单炉膛双切圆燃烧技术已成为Ⅱ型布置切圆燃烧锅炉超大型化后的发展趋势。

直流燃烧器和旋流燃烧器均普遍使用了煤粉浓淡分离技术,利用风粉混合物通过入口分离器分成浓淡两股,分别通过浓相和淡相两个喷嘴通道进入炉膛。浓相煤粉浓度高,所需着火热量少,利于着火和稳燃;由淡相补充后期所需的空气利于煤粉的燃尽。同时,浓淡燃烧均偏离了 NO_x 生成量高的化学当量燃烧区,大大降低了 NO_x 的生成量。

超(超)临界锅炉一般采用分级供氧方式,一次风设计风率一般为15%~25%,二次