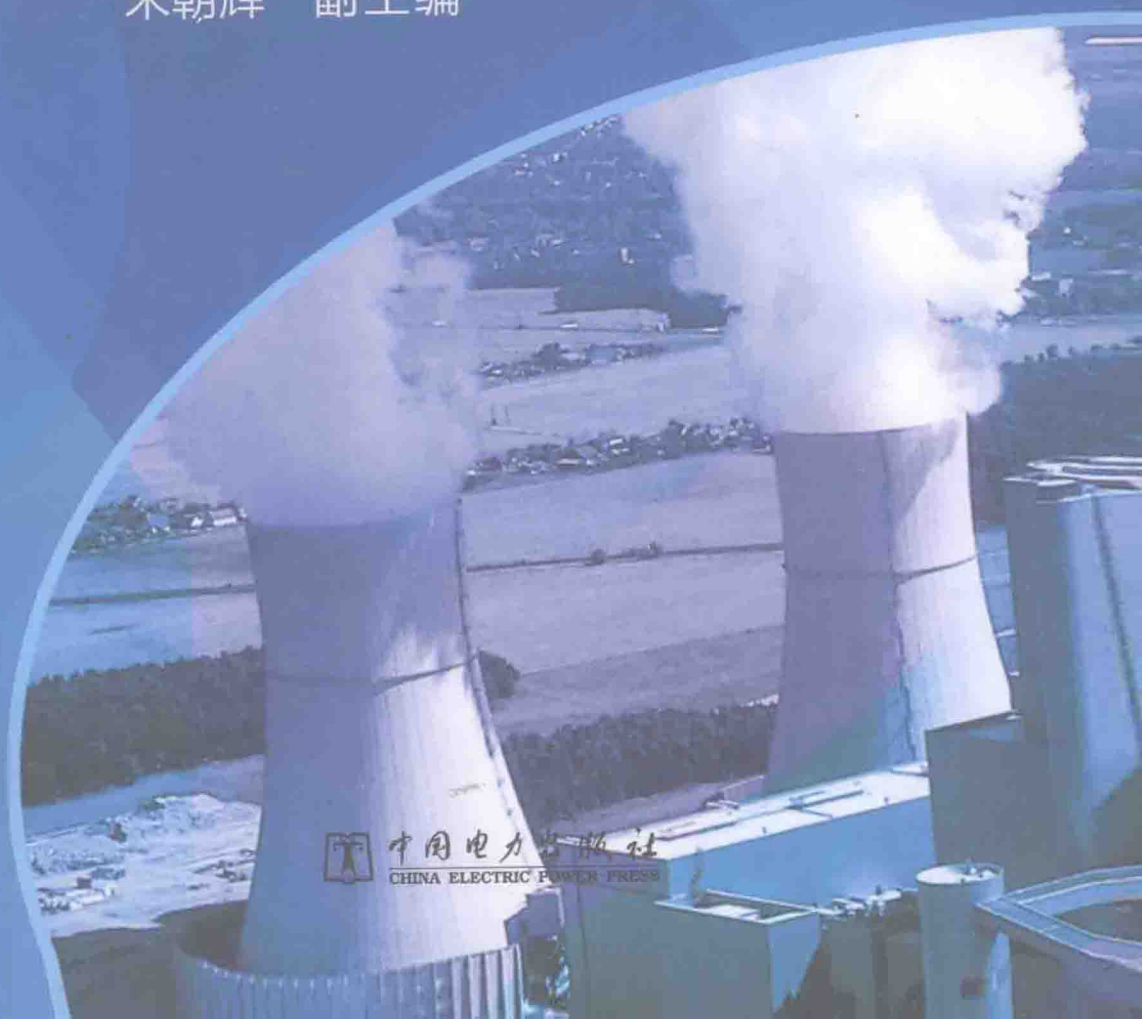


# 超超临界机组 锅炉设备安装

孟祥泽 主 编  
宋朝辉 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 超超临界机组 锅炉设备安装

孟祥泽 主 编  
宋朝辉 副主编

## 内 容 提 要

本书重点介绍超超临界机组锅炉设备的安装工艺,分为十二章,主要内容包括锅炉安装前的准备工作,锅炉钢架及有关金属结构安装,锅炉本体受热面安装,锅炉管道及阀门安装,T91/P91、T92/P92钢焊接,风机与离心水泵安装,磨煤机安装,电除尘器和除渣与除灰设备及管道安装,防腐与保温,脱硫与脱硝设备安装,锅炉启动准备与试运等。

本书可供电建企业从事锅炉安装工作的技术人员和管理人员使用,也可供相关专业高等院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

超超临界机组锅炉设备安装/孟祥泽主编. —北京:中国电力出版社,2014.5

ISBN 978-7-5123-5469-2

I. ①超… II. ①孟… III. ①超临界压力锅炉-设备安装  
IV. ①TK229.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第007543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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2014年5月第一版 2014年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19印张 465千字

印数0001—3000册 定价58.00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，世界先进水平的超超临界机组效率达到了 43%~48%。

火力发电是世界上最主要的发电方式，超超临界火电机组具有显著的节能和改善环境的效果，同级别超超临界机组与超临界机组相比，热效率可提高 1.2%，一年可节约 6000t 优质煤。未来火力发电厂建设将主要是发展大容量、高效率、高参数的超超临界火电机组，这在我国已得到广泛的研究和应用。

在火力发电厂的生产过程中，锅炉机组的安装和运行质量对电厂的安全运行至关重要，学习锅炉设备的安装工艺，提高安装质量，是火力发电厂安全经济运行的重要保证。

当前我国超超临界机组已经被广泛采用，广大技术工人迫切需要掌握超超临界机组锅炉设备安装的专业技术。为此我们编写了本书，希望能帮助广大技术工人提高业务水平。

本书由孟祥泽主编、宋朝辉副主编，参加编写的还有史国梁、杨小刚、刘勇、张建强、孙峰柏、吕冰、徐黄萍等。

在本书编写过程中，山东电力建设第一工程公司、山东省特种设备协会给予了大力支持并提供了部分资料，在此表示衷心的感谢。

由于编者专业水平、施工经验所限，本书缺点和不妥之处在所难免，热忱期望读者和同行批评指正。

编 者

2014 年 1 月



前言

<b>第一章 超超临界机组锅炉设备介绍</b> .....	1
第一节 电站锅炉的发展 .....	1
第二节 典型超超临界锅炉介绍 .....	6
<b>第二章 锅炉安装前的准备工作</b> .....	25
第一节 施工组织设计 .....	25
第二节 施工总平面布置与机械布置 .....	27
第三节 力能供应 .....	31
<b>第三章 锅炉钢架及有关金属结构安装</b> .....	36
第一节 锅炉钢架组合 .....	36
第二节 锅炉钢架安装 .....	45
第三节 平台、扶梯安装 .....	58
第四节 高强度螺栓施工工艺 .....	61
第五节 烟风管道安装 .....	63
第六节 空气预热器安装 .....	71
第七节 燃烧装置安装 .....	82
第八节 锅炉密封 .....	85
<b>第四章 锅炉本体受热面安装</b> .....	88
第一节 受热面设备组合 .....	89
第二节 水冷壁安装 .....	109
第三节 过热器安装 .....	137
第四节 再热器安装 .....	159
第五节 省煤器安装 .....	168
第六节 受热面吊挂装置安装及其调整 .....	173
<b>第五章 锅炉管道及阀门安装</b> .....	178
第一节 锅炉管道安装 .....	178
第二节 阀门安装 .....	182
<b>第六章 T91/P91、T92/P92 钢焊接</b> .....	185
第一节 T91/P91 钢简介 .....	185
第二节 T91 钢焊接 .....	186

第三节	P91 钢焊接	190
第四节	T92/P92 钢及其焊接工艺	193
<b>第七章</b>	<b>风机及离心水泵安装</b>	197
第一节	风机安装	197
第二节	离心水泵安装	207
<b>第八章</b>	<b>磨煤机安装</b>	212
第一节	概述	212
第二节	低速磨煤机安装	218
第三节	中速磨煤机安装	233
第四节	高速磨煤机安装	242
<b>第九章</b>	<b>电除尘器和除渣与除灰设备及管道安装</b>	249
第一节	电除尘器安装	249
第二节	除渣系统设备及管道安装	255
第三节	除灰系统设备及管道安装	258
<b>第十章</b>	<b>防腐与保温</b>	264
第一节	防腐	264
第二节	锅炉本体保温施工	265
第三节	电除尘器保温	267
第四节	锅炉附属设备保温	268
第五节	锅炉附属管道保温	270
第六节	烟风煤粉管道保温	271
<b>第十一章</b>	<b>脱硫与脱硝设备安装</b>	274
第一节	脱硫设备安装	274
第二节	脱硝设备安装	279
<b>第十二章</b>	<b>锅炉启动准备与试运</b>	288
第一节	锅炉整体水压试验	288
第二节	锅炉化学清洗	291
第三节	蒸汽严密性试验与安全阀校验	293
第四节	锅炉试运	295
	<b>参考文献</b>	297

# 超超临界机组锅炉设备介绍

## 第一节 电站锅炉的发展

电站锅炉已经具有一百多年的历史，由于发展迅速，因此至今种类繁多，从低压锅炉、中压锅炉、高压锅炉、超高压锅炉、亚临界压力锅炉、超临界压力锅炉发展到今天的超超临界压力锅炉。电站锅炉蒸汽参数的设计是按照汽轮机入口参数来选择的，同时考虑适当的锅炉至汽轮机间的温降和压降来确定。我国电站锅炉和与汽轮机蒸汽参数如表 1-1 所示。

表 1-1 我国电站锅炉和与汽轮机蒸汽参数

机 组 类 型	汽轮机初参数		汽轮发电机组效率 (%)
	汽压 (MPa)	汽温 (°C)	
中压机组	3.4	435	30~32
次高压机组 (适用于小容量热电厂)	4.9~5.9	435~470	—
高压机组	8.8	535	37~39
超高压机组	15.7~16.2	535/535	42~43
亚临界参数机组	16.2	535/535	44~45
超临界参数机组	23.5	535/535	—
超超临界参数机组	25.0	600/600	—

蒸汽参数的选定涉及很多因素，这些因素往往也因时因地而异，所以必须通过全面的技术经济论证才能确定。对于不同国家，甚至不同生产厂家，由于具体条件不同（其中包括经验积累、习惯等），因此所采用的蒸汽参数系列也会有一定的差异。

亚临界压力、超临界压力和超超临界压力的锅炉是今后压力参数选择的主要对象，锅炉容量在 1000t/h (配 300MW 机组) 以上，从工质流动方式来讲，除了当前大量的自然循环锅炉可适用于低压锅炉一直到亚临界压力锅炉外，强制循环锅炉一般也用在亚临界压力锅炉上。强制循环锅炉是在下降管与水冷壁进口集箱之间安装一台循环水泵，以解决亚临界锅炉水循环回路中由于水、汽间密度差小而引起的水循环不可靠的问题。直流锅炉是使进入锅炉中的水在受热面管内做一次性流动（即出口全部变为蒸汽），它对给水品质要求非常严格，并且只用在亚临界压力、超临界压力和超超临界压力的锅炉上。直流锅炉的另一种形式，也称复合循环直流锅炉，即在直流锅炉省煤器出口与蒸发区入口间加装一台再循环泵，此方式在国外被广泛地采用。目前在我国自然循环锅炉、强制循环锅炉、直流锅炉、复合循环锅炉都有应用，现将其工作原理介绍如下。

## 一、各种水循环锅炉的工作原理

### 1. 自然循环锅炉

自然循环锅炉是指在锅炉蒸发系统中，利用下降管中的水与上升管中的汽水混合物的密度差作为推动力，建立起工质循环流动（又称水循环），使蒸发受热面受到冷却的锅炉。自然循环由汽包、下降管、下集箱和上升管（即水冷壁）组成一个循环回路。由于上升管中的水在炉内受热产生了蒸汽，汽水混合物的密度小，而下降管在炉外不受热，管中是水，其密度大，两者密度差就产生推动力，水沿下降管向下流动，而汽水混合物则沿上升管向上流动，这样就形成了水的自然循环流动。

随着锅炉容量的增大，自然循环锅炉的压力也相应提高。饱和水与饱和水蒸气之间的密度差也随压力增大而减小。由于下降管中的水温与饱和水温非常接近，故可以认为是饱和水。随着锅炉的工作压力升高，下降管中的水与上升管中的汽水混合物之间的密度差逐渐减小。由于自然循环锅炉是靠下降管中的水与上升管中的汽水混合物的密度差形成的推动力建立起工质流动循环的，因此当压力升高后，这个推动力也随之减小，工质在蒸发系统中的循环流动，也随压力提高而逐渐变得困难。当压力达到临界值 22.12MPa 时，饱和汽、水之间的密度差为零，这时工质循环停止。因此，自然循环锅炉的压力一般都在超高压（15.3MPa）及以下。要向更高压力发展，就变得相当困难。

目前，英国、美国、日本都已解决了亚临界压力自然循环锅炉的三大问题：一是水循环问题；二是汽水分离问题；三是汽包的制造和运输问题。美国最大的自然循环锅炉配 885MW 机组，参数为 17.5MPa、540/540℃。在炉膛高热负荷区域，为使光管水冷壁得到充分冷却并维持核态沸腾，就需要一定的质量流速，而且它随着汽包运行压力的升高而增加。现在已经证明，自然循环能达到这种质量流速，但这种设计防止传热恶化的可靠性较小，特别在不稳定工况下。英国公司在自然循环锅炉上试验采用内螺纹管，以防止传热恶化，使水冷壁得到充分冷却。试验证明螺纹管在亚临界压力下是很有效的，即使当压力为 21MPa 时，效果也仍然很好。另外，采用光管时，循环倍率及炉膛水冷壁管内流速要求都很大，这样就要求管子流通截面（包括下降管与上升管）相当大，而采用内螺纹管就可使自然循环锅炉设计更加经济。亚临界压力自然循环锅炉在我国也得到了发展，各大锅炉厂的亚临界压力自然循环锅炉已经有一定数量的投入。

### 2. 强制循环锅炉

强制循环锅炉是指在自然循环锅炉蒸发系统的下降管与水冷壁管之间装设循环泵，以增加工质循环推动力的锅炉。

循环泵的压头（即升压能力）一般为 0.25~0.35MPa。由于有循环泵的推动，克服了自然循环锅炉不能向更高压力发展的缺点，强制循环锅炉可以用在比自然循环锅炉更高的亚临界压力范围。一般锅炉出口水蒸气压力在 17.3MPa 左右。

强制循环锅炉的结构与自然循环锅炉基本相同，它也有汽包，所不同的是在下降管中增加了循环泵，以增强汽水循环的动力。

强制循环锅炉与自然循环锅炉比较：

优点：可适用于亚临界、超临界压力；由于工质在受热面中是强制流动，因而受热面的布置较灵活，受热均匀，水循环好；启、停炉快；水冷壁可采用小管径、薄管壁（压力准许）的管子，相对汽包容积减小，节省钢材。



缺点：加装循环泵，系统复杂，投资高，检修困难。

### 3. 直流锅炉

直流锅炉是指靠给水泵压力，使给水顺序通过省煤器、蒸发受热面（水冷壁）、过热器并全部变为过热水蒸气的锅炉。由于给水在进入锅炉后，水的加热、蒸发和水蒸气的过热都是在受热面中连续进行的，不需要在加热中途进行汽水分离，因此它没有自然循环锅炉的汽包。在省煤器受热面、蒸发受热面和过热器受热面之间没有固定的分界点，随锅炉负荷变动而变动。

直流锅炉的主要优点是它可用于一切压力，特别是在超临界压力及以上压力范围内被广泛应用。由于它没有汽包，因此加工制造方便，金属消耗量小；水冷壁布置比较自由，不受水循环限制；调节反应快，负荷变化灵活；启、停迅速；最低负荷通常低于汽包锅炉。但对给水品质和自动调节要求高，汽水系统阻力大，给水泵的耗电量较大。

### 4. 复合循环锅炉

复合循环锅炉是指在锅炉省煤器出口与水冷壁入口之间装有再循环泵，水冷壁出口与再循环泵之间装有再循环管的锅炉。锅炉在运行中，流经水冷壁受热面的水流量除了有从省煤器来的水流量外，还有由循环泵提供的再循环水流量。

复合循环锅炉是在直流锅炉和强制循环锅炉的基础上发展起来的。多用于亚临界和超临界压力。与直流锅炉相比，复合循环锅炉的主要优点是：

- (1) 水冷壁的质量流速可用较低的数值，以减少流动阻力。
- (2) 锅炉的最低水循环安全负荷可降低至额定负荷的 10%。
- (3) 水冷壁工况可得到改善。由于工质流量及温度变化小，使水冷壁产生的温度应力减小，在低负荷下能保证水冷壁管中工质有最低质量流速，水冷壁的冷却条件较好。
- (4) 质量流速用循环泵来保证，可以避免采用过小直径的水冷壁管（一般用直径为 32mm 及以上的管子）。

## 二、超超临界机组的发展

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。我国电力总装机容量已逾 11 亿 kW，但火电机组平均单机容量截至 2009 年为 10.31 万 kW，平均供电煤耗达 330g/kWh，比国外先进水平高 70~80g/kWh，高出 25% 以上，资源浪费太大，废气排放严重。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。

### 1. 超超临界压力锅炉的发展

世界上第一台试验性的超临界锅炉是西门子公司制造的。1949 年苏联安装了第一台超超临界试验机组，直流锅炉出口参数为 29.4MPa、600℃（12t/h），经节流至 15MPa 后通入汽轮机，以后又生产了 29.4MPa、650℃ 型号为 P-100-300 的 100MW 机组，作为改造中压机组的前置级。1956 年联邦德国投运 1 台参数为 34MPa、610℃/570℃/570℃，容量为 88MW 的机组。

美国在 20 世纪 50 年代末投运了 2 台具有代表性的超超临界机组，菲罗电厂 6 号机组，容量为 125MW，参数为 31MPa、621℃/566℃/538℃；艾迪斯顿电厂 1 号机组，容量为

325MW, 参数为 34.3MPa、649℃/566℃/566℃。费城电力公司的艾迪斯顿 1 号机从 1960 年开始按设计参数运行 8 年, 后因材料问题出现一些故障, 1968 年起参数降为 31MPa、610℃/557℃/557℃。美国一开始就试制这样高参数的超超临界机组, 不可避免地会频繁发生事故, 故不得不降低参数运行。在开发初期, 过高的蒸汽参数超越了当时的技术水平。以后将蒸汽参数降至 24.1MPa、538~566℃, 并逐步完善, 这种蒸汽参数保持了 20 余年。

日本引进美国的技术并结合欧洲的适合变压运行的本生式直流锅炉, 成功地开发了超超临界机组。在 1989 年和 1991 年成功地投运 2 台 700MW、31MPa、566℃/566℃/566℃的机组, 运行情况良好, 可用率水平很高。1998 年投运主蒸汽和再热蒸汽温度均为 600℃的原町 2 号 1000MW 机组, 该机组实测发电机端效率达 44.7%。

欧洲在 1995~1999 年至少投运 9 台蒸汽压力为 28.5~31.0MPa、温度为 545~587℃的超超临界机组, 在建的还有 10 台, 并将蒸汽温度提高至 600℃以上。其中丹麦已投运的 2 台超超临界机组的热效率可达 47%~49%。

我国 2007 年华能玉环电厂由哈尔滨锅炉厂引进日本三菱 (MHI) 技术生产的 1000MW 机组超超临界直流锅炉投入商业运行, 过热蒸汽流量为 2952.54t/h, 压力为 27.46MPa, 温度为 605℃。截至 2013 年 8 月, 我国已经投运 600℃超超临界机组达 100 台, 超过 80 000MW, 数量和总容量居世界第一。

## 2. 蒸汽参数的选择

机组的蒸汽参数是决定机组热经济性的重要因素。一般压力为 16.6~31.0MPa, 温度在 535~600℃的范围内, 压力每提高 1MPa, 机组的热效率上升 0.18%~0.29%; 新蒸汽温度或再热蒸汽温度每提高 10℃, 机组的热效率就提高 0.25%~0.3%; 如果采用二次再热的机组则比一次再热机组的热效率高 1.5%~2.0%。现在常规的超临界机组采用的蒸汽参数为 24.1MPa、538℃/566℃。超超临界机组一般采用二次再热, 其参数为: 31.0MPa、566℃/566℃/566℃或 31.0MPa、593℃/593℃/593℃或 34.5MPa、649℃/593℃/593℃。

随着参数的提高, 对材料的要求、产品开发的技术难度、机组的造价也越来越高, 比较超超临界机组的三种参数, 前两种现实性更大些。随着科技的不断发展, 到 2015 年参数可达 40MPa、700℃/720℃/720℃。

## 3. 超超临界压力锅炉的关键技术

超超临界压力锅炉的关键技术是多方面的, 在设计和制造上都有高难度技术, 如材料的选择、水冷壁系统及其水动力安全性、受热面布置、二次再热系统汽温的调控等, 其中热强度性能高、工艺性好、价格低廉的材料的发展是最关键的问题。

(1) 材料。早期的超超临界锅炉使用了大量的奥氏体钢, 奥氏体钢比铁素体钢具有高的热强性, 但热膨胀系数大、导热性小, 抗应力腐蚀能力低、工艺性差, 热疲劳和低周疲劳性能 (特别是厚壁件) 也不及铁素体钢, 且成本高得多, 并造成许多奥氏体钢制部件损伤事故。世界各国一直致力于开发新材料和新工艺, 改进和开发新型铁素体钢和奥氏体耐热钢。最近几十年的研究集中于开发能够替代奥氏体钢的低成本、高强度的铁素体钢, 并已经开发了具有良好焊接性能和断裂韧性且能够用于 620℃的铁素体钢。

1) 在铁素体钢基础上发展起来的新钢种能很好地应用在 538℃/17MPa 条件下。

2) 锅炉管道和集箱用钢需要高蠕变强度。基于这个原因, 发展合金集中于含 Cr9%~12%的铁素体钢。在含 Cr9%~12%的铁素体钢中加入 Nb、Mo、V、W 等产生了 3 种新型

合金 P92、P122 和 E911, 它们能够工作在  $620^{\circ}\text{C}/34\text{MPa}$  条件下。含 Co 和 W 的 12%Cr 新型钢种 NF12 和 SAVE12 能应用在  $650^{\circ}\text{C}$  条件下。初步研究表明, 温度超过  $650^{\circ}\text{C}$  时, 可能需要奥氏体钢或者镍基合金。

3) 过热器和再热器管需要蒸汽侧抗氧化能力和向火侧抗腐蚀能力强的钢。在温度超过  $565^{\circ}\text{C}$  高温时就需要奥氏体钢。根据煤种不同, 可能需要高 Cr 钢和镀层钢。对于  $620^{\circ}\text{C}$  条件下, 在无腐蚀条件下可以采用 Super304H、AA1、17CW-MO; 但在腐蚀条件下, 就需要含 20%~25%Cr 的钢, 如 HR3C、NF709 和镀 IN72 合金。另外几种合金 Inconel671、NF709、Cr30A 和镀 Inconel671 (50%) 合金可以用于  $650^{\circ}\text{C}$  条件下。

4) 对于水冷壁部分, 根据蠕变强度和焊接性能可以采用两种含 Cr2.5% 和 Cr12% 的 T23 和 HCM12 合金。纯粹从蠕变强度考虑, 它们可以用于  $595\sim 650^{\circ}\text{C}$  范围内; 当某些锅炉含  $\text{NO}_x$  较低, 存在向火侧腐蚀时, 这些合金就必须进行镀层, 或用含 Cr18%~20% 的合金表面涂层。

(2) 水冷壁。超超临界压力锅炉的水冷壁系统主要包括螺旋管圈水冷壁和由内螺纹管组成的垂直管圈水冷壁。螺旋管圈水冷壁可以自由地选择管子的尺寸和数量, 因而能选择较大的管径和保证水冷壁安全的质量流速。管圈中的每根管子均同样地绕过炉膛和各个壁面, 因而每根管子的吸热相同, 管间的热偏差最小, 适用于变压运行。其缺点是螺旋管圈的制造安装支承等工艺较为复杂且流动阻力大。内螺纹管组成的垂直管圈水冷壁受沿炉膛周界热负荷偏差的影响较大, 除了需要采取一定的结构措施 (例如加装节流装置) 使管内工质流量的分配与管外热负荷的分布相适应外, 还要求较高的运行操作水平和自动控制水平。在开发超超临界压力机组时, 有必要在现有的超临界压力水冷壁内沸腾传热研究的基础上, 扩展试验研究的压力范围, 同时要防止似膜态沸腾现象, 确保水冷壁系统工作的安全性。

(3) 二次中间再热系统。在设计二次中间再热锅炉时, 必须考虑到在带基本负荷且高效率运行时, 最佳的再热器受热面布置和再热蒸汽温度控制方法。超超临界压力锅炉采用了二次中间再热系统, 蒸汽温度的控制要比一次中间再热机组复杂得多。原则上各种调温手段都可以进行再热温度的调节, 但考虑到在部分负荷时再热蒸汽温度必须具备能确保设计值蒸汽温度的特性, 负荷变化时, 再热蒸汽温度对设计变化率必须稳定。

再热蒸汽温度的控制还应考虑到以下两点:

- 1) 为了降低机组的效率, 在正常运行时不用再热器喷水减温。
- 2) 采用再循环风机来控制再热蒸汽温度会增加电厂的动力消耗。

#### 4. 我国发展超超临界机组的技术参数

蒸汽参数  $25\text{MPa}/600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$  (发电效率约为 44.63%, 发电煤耗率为  $275\text{g}/\text{kWh}$ ), 同时不排除蒸汽参数  $28\text{MPa}/600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$  (发电效率约为 44.99%, 发电煤耗率为  $273\text{g}/\text{kWh}$ ) 的可能, 提高压力后, 其热效率提高约 4 个百分点, 其技术经济性根据实际工程而定。

#### 5. 我国发展超超临界机组的参数等级

(1) 1000MW 容量等级机组和 600MW 容量等级机组采用超超临界参数方案, 其中 600MW 容量等级超超临界机组应作为我国电网中的主力机组。经研究分析, 为保证机组的技术经济合理性, 超超临界机组的单机容量应在 350MW 以上, 超临界机组的单机容量应在 300MW 以上。

(2) 1000MW 容量等级超超临界机组推荐采用单轴布置。对常规背压 (4.9kPa) 条件, 1000MW 容量等级汽轮机可采用 43~48in (1092.2~1219.2mm) 末级叶片四缸四排汽结构, 其排汽损失在设计规范内; 600MW 容量等级汽轮机采用 1000mm 末级叶片四缸四排汽结构是合适的, 同时可采用 48in 末级长叶片的两排汽结构。

大型超临界煤粉锅炉的整体布置主要采用 II 型布置和塔式布置。锅炉水冷壁形式中的螺旋管圈和垂直管屏两种形式均有运行业绩, 均是可行的, 但在数量上前者较多。

(3) 采用二次中间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、结构等的复杂性, 成本明显提高, 因此推荐一次中间再热。

我国超超临界机组的推荐参数 25MPa/600℃/600℃ 是日本目前所采用的方案, 压力比欧洲的低, 温度比欧洲的高, 目前世界上还没有该参数的 1000MW 单轴超超临界机组。这个方案适合我国经济和电力发展的需要。

28MPa/600℃/600℃ 超超临界机组参数方案的技术水平略高于 25MPa/600℃/600℃ 参数方案, 但仍属同一等级的。目前, 这个方案采用的压力比日本的高、温度比欧洲的高, 该参数与 1000MW 容量等级的组合方案具有世界先进水平。

根据我国目前及未来可能的资源条件和各种能源技术发展水平及其经济性, 燃煤发电仍然在电力结构中占据不可替代的地位。大力发展先进、高效、清洁的燃煤发电技术是实现电力工业可持续发展的重要手段。

## 第二节 典型超超临界锅炉介绍

### 一、DG3000/26.15-II 1 超超临界锅炉

某电厂 1000MW 超超临界锅炉 (锅炉型号: DG3000/26.15-II 1) 采用日本 BHK 公司技术, 由 BHK 进行性能设计并提供锅炉的性能保证, 东方锅炉 (集团) 股份有限公司和东方日立锅炉有限公司共同进行锅炉的基本设计、技术设计、施工设计和锅炉制造供货, 如图 1-1 所示。

#### (一) 锅炉概况及主要技术参数

##### 1. 锅炉形式

本锅炉是复合变压运行的超超临界本生直流锅炉, 一次中间再热、单炉膛、尾部双烟道结构, 采用烟气挡板调节再热蒸汽温度, 固态排渣、全钢构架、全悬吊结构、平衡通风、露天布置、前后墙对冲燃烧, 燃用济北矿区煤。

##### 2. 锅炉的主要参数

锅炉的主要参数见表 1-2。

表 1-2

锅炉的主要参数

参 数	单 位	锅炉最大连续蒸发量 (BMCR)	额定工况 (BRL)
锅炉蒸发量	t/h	3033	2889
过热器出口蒸汽压力	MPa (a)	26.25	26.11
过热器出口蒸汽温度	℃	605	605
再热蒸汽流量	t/h	2469.7	2347.1
再热器进口蒸汽压力	MPa (a)	5.1	4.841

续表

参 数	单 位	锅炉最大连续蒸发量 (BMCR)	额定工况 (BRL)
再热器出口蒸汽压力	MPa (a)	4.9	4.641
再热器进口蒸汽温度	℃	354.2	347.8
再热器出口蒸汽温度	℃	603	603
省煤器进口给水温度	℃	302.4	298.5

## 3. 锅炉主要结构界限尺寸

锅炉主要结构界限尺寸见表

1-3。

表 1-3 锅炉主要结构界限尺寸

mm	
名 称	数 据
锅炉深度	74 800 (预留脱硝)
锅炉宽度 (外排柱中心距)	70 000
顶板支承面标高	84 400
炉膛宽度	33 973.4
炉膛深度	15 558.4
顶棚标高	69 700
水平烟道深度	5486.4
尾部竖井前烟道深度	5486.4
尾部竖井后烟道深度	9144
水冷壁下集箱标高	5700

## 4. 锅炉总体布置简介

炉膛水冷壁分上、下两部分,下部水冷壁采用全焊接的螺旋上升膜式管屏,螺旋水冷壁管采用了内螺纹管,上部水冷壁采用全焊接的垂直上升膜式管屏,螺旋水冷壁与上部垂直水冷壁的过渡方式采用中间汇集集箱形式。

螺旋管圈水冷壁部分,刚性梁由垂直刚性梁和水平刚性梁构成网格结构,刚性梁体系及炉墙等的自重荷载完全由垂直搭接板支吊,并采用可膨胀的带张力板的垂直刚性梁支承系统,使下部炉膛和冷灰斗

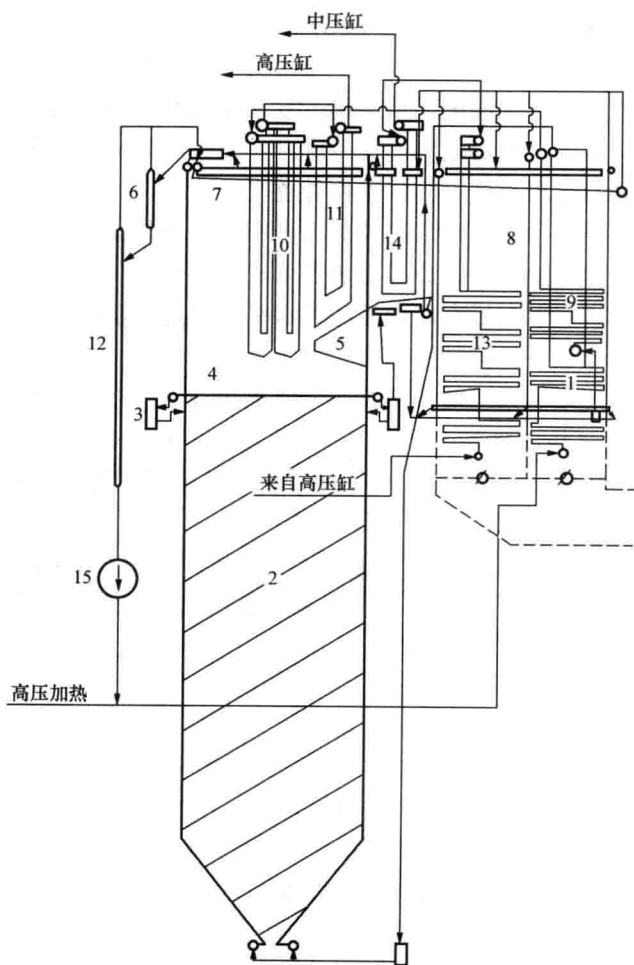


图 1-1 DG3000/26.15-II 1 超超临界锅炉系统布置

- 1—省煤器; 2—螺旋水冷壁; 3—螺旋水冷壁出口汇集集箱; 4—上部水冷壁; 5—折焰角; 6—启动分离器; 7—顶棚过热器; 8—包墙过热器; 9—低温过热器; 10—屏式过热器; 11—高温过热器; 12—贮水箱; 13—低温再热器; 14—高温再热器; 15—锅炉再循环泵 (BCP)

的荷载能传递给上部垂直水冷壁。刚性梁和水冷壁之间相互不直接焊接，可以相对滑动。炉膛水冷壁采用悬挂结构，整个水冷壁和承压件向下膨胀，由于水冷壁的四周壁温比较均匀，因此水冷壁与垂直搭接板之间相对胀差较小，刚性梁与水冷壁能够相对滑动。

过热器受热面采用辐射—对流型布置。过热器受热面由四部分组成：第一部分为顶棚及后竖井烟道四壁及后竖井分隔墙；第二部分是布置在尾部竖井后烟道内的水平对流过热器；第三部分是位于炉膛上部的屏式过热器；第四部分是位于折焰角上方的末级过热器。

过热器系统按蒸汽流程依次为：顶棚过热器、包墙过热器/分隔墙过热器、低温过热器、屏式过热器及高温过热器。按烟气流程依次为：屏式过热器、高温过热器、低温过热器。采用两级喷水减温：低温过热器至屏式过热器间布置有一级喷水减温器，屏式过热器至高温过热器间布置有二级喷水减温器。

再热器系统按蒸汽流程依次为：低温再热器、高温再热器。

过热蒸汽温度调节采用改变水煤比和二级喷水减温两种方法，过热蒸汽管道在屏式过热器与高温过热器之间进行一次左右交叉，以减小两侧汽温偏差。喷水减温器布置在低温再热器和高温再热器之间的连接管道上。

再热器受热面采用纯对流型布置，再热器由位于尾部前烟道的水平对流低温再热器及位于高温过热器后的高温再热器组成。再热蒸汽温度通过尾部双烟道平行烟气挡板调节。

省煤器布置在尾部后竖井水平低温过热器的下方。后竖井省煤器、水平低温过热器均通过省煤器吊挂管悬吊到大板梁上。

燃烧器采用前后墙对冲分级燃烧技术。在炉膛前后墙各分三层布置低  $\text{NO}_x$  旋流式 HT-NR3 煤粉燃烧器，每层布置 8 只，全炉共设有 48 只燃烧器。在最上层燃烧器的上部布置了燃尽风喷口 (AAP)。每只燃烧器均配有机械雾化油枪，用于启动和维持低负荷燃烧。油枪总输入热量相当于 30%BMCR。

锅炉按预留脱硝装置设计，锅炉钢构架、烟风管道、空气预热器的布置和设计均满足未来上脱硝装置的条件，预留的脱硝装置按东方锅炉（股份）有限公司环保工程分公司脱硝设备的空间和荷重等考虑。

## （二）锅炉设备介绍

### 1. 水冷壁

炉膛宽度为 33 973.4mm，深度为 15 558.4mm，高度为 64 000mm。水冷壁中介质向上流动。冷灰斗的角度为  $55^\circ$ ，除渣口的喉口宽度为 1289.7mm。

从水冷壁进口到折焰角下一定距离的炉膛下部水冷壁（包括冷灰斗水冷壁）采用螺旋盘绕膜式管圈，中部螺旋水冷壁管的倾角为  $23.578^\circ$ ，螺旋盘绕膜式管圈均采用材料为 15CrMo、厚度 6.4mm、双面坡口扁钢。

水冷壁前墙和侧墙螺旋管与垂直管的管数比为 1:2。后墙的螺旋管与前墙、侧墙有所不同，每两根螺旋管有一根直接上升为垂直水冷壁，垂直水冷壁进口集箱引出的管子数与螺旋管数之比为 1:1。

上炉膛水冷壁采用结构和制造较为简单的垂直管屏，由上部管屏、折焰角管屏、水平烟道包墙管屏和凝渣管四部分组成。水冷壁出口工质汇入上部水冷壁出口集箱后由连接管引入水冷壁出口汇集集箱和分离器进口汇集集箱，再由连接管引入启动分离器。上炉膛垂直段及折焰角水冷壁膜式壁均采用国产材料为 12Cr1MoV、9mm 厚度、双面坡口扁钢。水平烟道



底部及水平烟道垂直段水冷壁膜式壁采用国产材料为 15CrMo、6.4mm 厚度、不开坡口扁钢。

后水冷壁折焰角水冷壁处设计有临时检修吊篮用绳孔，临时检修吊篮用绳孔布置在靠近后墙水冷壁处。

水冷壁管子规格和材料见表 1-4。

表 1-4 水冷壁管子规格和材料

序号	规格 (mm)	材 质	管子名称
1	φ38.1×7.5	SA-213T2	内螺纹管
2	φ31.8×6.4	SA-213T12、SA-213T2	光管
3	φ31.8×7.5	SA-213T12	光管
4	φ76.2×20	SA-213T22	凝渣管

### 2. 启动分离器和贮水箱

启动分离器布置在炉前，垂直水冷壁出口，采用旋风分离形式。启动分离器规格为 φ1060×120mm，总高度为 4.7m，数量为 2 个。经水冷壁加热以后的工质分别由 6 根连接管沿切向逆时针向下倾斜 15°进入两个启动分离器，分离出的水通过连接管进入启动分离器下方的贮水箱。启动分离器内设有阻水装置和消旋器。贮水箱的规格为 φ1102×126mm，总高度为 24m，数量为 1 个。启动分离器和贮水箱端部均采用锥形封头结构，封头均开孔与连接管相连。

启动分离器和贮水箱由连接管连接，分开布置，启动分离器做成 2 只，减小直径，即可减小壁厚，在频繁启、停、滑压运行和温度变化时，其热应力可控制在较小的范围内，可缩短启、停时间，提高负荷变化率。贮水箱布置 1 个，以控制水位的稳定性。贮水箱内设有 3 个水位控制值，即高水位、正常水位和低水位，贮水箱内水位由再循环泵流量调节阀（360 阀）、贮水箱水位控制阀（361 阀）调节。

### 3. 顶棚过热器及后竖井区域

(1) 来自启动分离器的蒸汽由连接管进入顶棚过热器入口集箱。根据所处的烟温水平确定顶棚管及膜式壁扁钢的材料和规格。顶棚过热器上设有专供检修炉膛内部的炉内检修平台用绳孔及临时检修吊篮用绳孔，临时检修吊篮用绳孔布置在靠近前墙和两侧墙水冷壁处。

顶棚过热器管子规格和材料见表 1-5。

表 1-5 顶棚过热器管子规格和材料

序 号	规 格 (mm)	材 质	数 量	扁钢厚度
1	φ63.5×10.7	SA-213T12	296	12、9mm
2	φ57×9.3	SA-213T2	296	9、6.4mm

(2) 包墙进口连接管采用三通结构形式将单根进口连接管分成两路引入包墙进口集箱。前、后包墙，中隔墙与侧包墙出口集箱相互独立，通过包墙出口连接管引入位于锅炉两侧的包墙出口汇集集箱，再由汇集集箱上部出口连接管引入低温过热器进口集箱。后竖井前烟道深度为 5486.4mm，布置在前烟道中的低温再热器蛇形管采用支撑结构，由前包墙、中隔墙支撑。

省煤器出口蛇行管采用裤衩管的形式引入吊挂管，用于支吊低温过热器蛇形管，荷载传

递至顶棚上的省煤器出口集箱，再从集箱两侧引出集中下水管到锅炉两侧的集中下降管分配集箱。低温过热器出口集箱上方 I 象限引出 14 根低温过热器进口集箱吊挂管至顶棚之上的低温过热器出口集箱。后竖井包墙过热器管子规格和材料见表 1-6。

表 1-6 后竖井包墙过热器管子规格和材料

序号	区域、规格 (mm)	材 质	数 量	节距 (mm)
1	水平烟道侧包墙 $\phi 31.8 \times 6.4$	SA-213T2	43	63.5
2	后竖井前、中、后包墙 $\phi 38.1 \times 6.5$	SA-213T2	891	114.3
3	前包墙拉稀管 $\phi 57 \times 16.5$	SA-213T12	—	228.6
4	中隔墙拉稀管 $\phi 45 \times 8.9$	SA-213T2	—	228.6
5	后竖井侧包墙 $\phi 38.1 \times 6.5$	SA-213T2	129	114.3

#### 4. 屏式过热器布置

屏式过热器布置在上炉膛区，为全辐射受热面，在炉深方向布置了 2 排，每一排管屏沿炉宽方向布置 19 片屏，共 38 片。管屏由  $\phi 45$ （外圈管为  $\phi 50.8$ ）的管子绕成。屏式过热器管屏的横向节距  $S_1 = 1714.5\text{mm}$ ，纵向节距  $S_2 = 57\text{mm}$ ，炉内受热面管子采用 Super304H 和 HR3C（外三圈）。每片屏式过热器出口分配集箱与出口汇集集箱相连，蒸汽在汇集集箱中混合。屏式过热器管屏进口段带 SA-213T22 过渡段、出口段带 SA-213T92 过渡段，工地无异种钢焊口。每片管屏均带单独的进、出口分配集箱，屏式过热器蛇形管均由集箱承重并由集箱吊杆传至大板梁上。屏式过热器进、出口汇集集箱均分为两段、工地焊接。

屏式过热器管子规格和材料见表 1-7。

表 1-7 屏式过热器管子规格和材料

序号	规格 (mm)	材 质	序号	规格 (mm)	材 质
1	$\phi 48.6 \times 7.7$	SA-213T22 (工地对接焊口)	8	$\phi 45 \times 7.3$	HR3C
2	$\phi 45 \times 7.1$	SA-213T22 (工地对接焊口)	9	$\phi 45 \times 9.2$	HR3C
3	$\phi 48.6 \times 7.9$	HR3C	10	$\phi 45 \times 7.1$	Super304H
4	$\phi 50.8 \times 8.2$	HR3C	11	$\phi 45 \times 8.3$	Super304H
5	$\phi 50.8 \times 9$	HR3C	12	$\phi 45 \times 6.7$	Super304H
6	$\phi 50.8 \times 10.3$	HR3C	13	$\phi 48.6 \times 8.6$	SA-213T92 (工地对接焊口)
7	$\phi 50.8 \times 11$	HR3C	14	$\phi 45 \times 8$	SA-213T92 (工地对接焊口)

#### 5. 高温过热器

高温过热器是由位于折焰角上部的一组悬吊受热管组成，沿炉宽方向布置 36 片，管排横向节距  $S_1 = 914.4\text{mm}$ ，管子纵向节距  $S_2 = 57\text{mm}$ ，每片管屏由 24 根管子并联绕制而成，炉内受热面管子的材质为 Super 304H 和 HR3C（外三圈）。高温过热器管屏进口段带 SA-213T91 过渡段、出口段带 SA-213T92 过渡段，工地无异种钢焊口。相邻两片管屏引入同一个高温过热器进、出口分配集箱，高温过热器进、出口分配集箱各 18 个。

高温过热器管子规格和材料见表 1-8。



表 1-8 高温过热器管子规格和材料

序号	规格 (mm)	材 质	序号	规格 (mm)	材 质
1	φ48.6×6.2	SA-213T91 (工地对接焊口)	9	φ48.6×9.5	HR3C
2	φ45×5.7	SA-213T91 (工地对接焊口)	10	φ50.8×7.6	HR3C
3	φ45×8.2	SA-213T92 (工地对接焊口)	11	φ50.8×6.8	HR3C
4	φ48.6×8.9	SA-213T92 (工地对接焊口)	12	φ50.8×10	HR3C
5	φ45×6	HR3C	13	φ45×5.6	Super304H
6	φ45×8.8	HR3C	14	φ45×5.7	Super304H
7	φ48.6×6.5	HR3C	15	φ45×8	Super304H
8	φ48.6×8.8	HR3C	16	φ45×8.2	Super304H

## 6. 高温再热器

高温再热器共 98 片管屏, 每片管屏由 12 根管子并绕成 U 型, 横向节距 342.9mm, 纵向节距 70mm。炉内受热面管子采用 Super304H 和 HR3C (外三圈)。高温再热器管屏进口段带 SA-213T22 过渡段、出口段带 SA-213T91 过渡段, 工地无异种钢焊口。

高温再热器管子规格和材料见表 1-9。

表 1-9 高温再热器管子规格和材料

序号	规格 (mm)	材 质	序号	规格 (mm)	材 质
1	φ50.8×4	SA-213T22 (工地对接焊口)	4	φ50.8×3.2	HR3C
2	φ50.8×4	SA-213T91 (工地对接焊口)	5	φ50.8×4	HR3C
3	φ50.8×3.2	Super304H	6	φ50.8×4	Super304H

## 7. 低温再热器

低温再热器由水平段和垂直段两部分组成。水平段分四组水平布置于后竖井前烟道内, 由 6 根管子绕制而成, 每组之间留有足够的空间便于检修, 沿炉宽方向共布置 296 排, 横向节距  $S_1=114.3\text{mm}$ 。低温再热器垂直段管子与水平段出口管相连, 由每两排水平段合成一排垂直段, 横向节距 228.6mm, 横向排数 148 排。低温再热器水平段由包墙过热器支撑, 垂直出口段通过低温再热器出口集箱悬吊在大板梁上。

低温再热器管子规格和材料见表 1-10。

表 1-10 低温再热器管子规格和材料

序号	规格 (mm)	材 质	序号	规格 (mm)	材 质
1	φ57×4.2	SA-209T1a(低温再热器一、二、三、四组)	3	φ57×5.7	SA-213T22(低温再热器四组)
2	φ57×5	SA-209T1a(低温再热器一、二、三、四组)	4	φ50.8×6	SA-213T22(低温再热器垂直段)

## 8. 低温过热器

低温过热器布置在后竖井后侧烟道内, 由下向上分为水平管组和垂直管组两段。水平段由 3 管绕制而成, 沿炉宽方向共布置 296 片, 管间横向节距 114.3mm。垂直段管由水平段的两排管合成一排管, 共 148 片, 管间横向节距为 228.6mm。

低温过热器管子规格和材料见表 1-11。