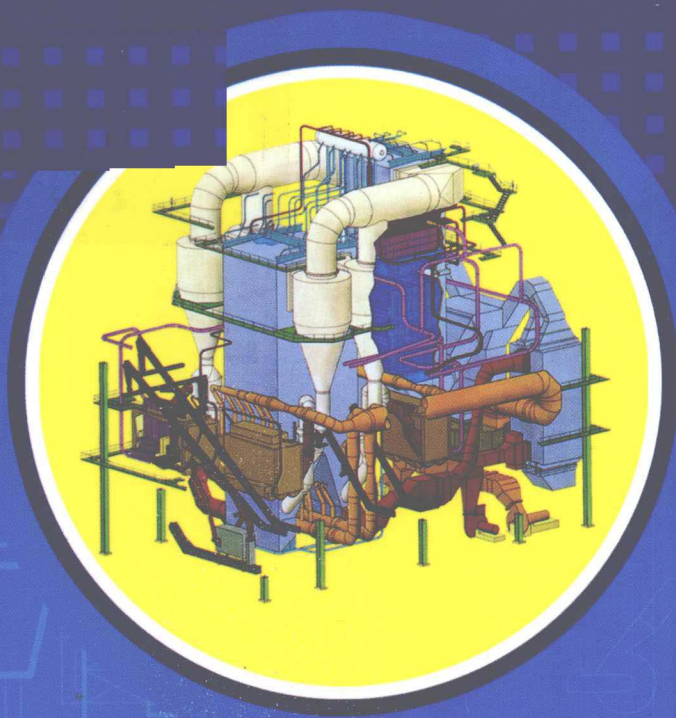


大型循环流化床 锅炉机组工艺设计

罗必雄 等 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

大型循环流化床 锅炉机组工艺设计

罗必雄 霍沛强 李 刚 万承军 罗宇东 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

循环流化床锅炉燃烧技术是一种成熟的清洁燃烧技术,具有燃料适应能力广、燃烧后温室气体 NO_x 排放低、可以在炉内干法脱硫等突出优点,已成为主流的燃烧技术之一。

本书介绍了目前国内电力市场上主流循环流化床锅炉设备的技术特点,给出了锅炉主要工艺系统的设计与计算方法,研究了辅机选型原则和工艺布置方案,探讨了循环流化床锅炉的改进方向和原则。

本书可供火力发电厂或者其他行业从事燃煤循环流化床锅炉烟风物料等系统工艺设计的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

大型循环流化床锅炉机组工艺设计/罗必雄等编著. —北京:中国电力出版社, 2010.4

ISBN 978-7-5123-0269-3

I. ①大… II. ①罗… III. ①流化床-循环锅炉-锅炉运行-设计
IV. ①TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 062210 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 4 月第一版 2010 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.5 印张 163 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 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

循环流化床 (Circulating Fluidized Bed) 锅炉燃烧技术是一种成熟的清洁燃烧技术, 具有燃料适应能力广、燃烧后温室气体 NO_x 排放低、可以在炉内干法脱硫等突出优点, 近 20 年内得到了迅速推广, 目前已成为主流的燃烧技术之一。

流化燃烧技术最早源于化工行业, 用于电站锅炉的流化床技术从鼓泡床开始, 逐步发展到 CFB, 并且向着大容量、高参数的方向发展。国内流化床燃烧技术起步并不晚, 早期在鼓泡床技术上曾经一度达到世界先进水平, 尤其在劣质煤燃烧方面颇有建树, 但在随后的 CFB 技术开发和炉型大型化进展上得不到突破, 与世界先进水平拉开了距离。从 20 世纪 90 年代开始, 国内的电力需求迅速增长, 在满足社会电力需求的同时, 为了减少环境污染, 国家提倡采用清洁燃烧技术。国内锅炉制造厂依托工程项目, 先后两次引进国外先进的 CFB 设计制造技术, 并结合自主研发, 再度达到世界先进水平。国内已经能自行设计制造各种规格的 CFB 锅炉, 容量最大可以达到 1024t/h 等级, 主蒸汽达到亚临界参数, 目前 2000t/h 等级的超临界 CFB 锅炉正在自主研发过程中, 总体概念设计已经完成。

CFB 机组虽然与其他锅炉同属以煤炭作为燃料的燃烧—换热设备, 但是由于锅炉设备的型式和工作原理均不相同, 锅炉的配套工艺设计思路有一定的区别。笔者在工作中发现, 国内针对 CFB 本体技术方面的资料和文献已经非常丰富, 但大多偏重于原理论述和技术介绍, 目前针对 CFB 机组系统和工艺设计方面的资料非常有限。国内电力行业设计方面最权威的 DL 5000—2000《火力发电厂设计技术规程》没有涉及专门针对 CFB 机组的技术条款, 只在资料性的附录中对 CFB 的工艺设计有简单的要求, 远远不能满足设计单位的应用要求。对于工程设计人员, 在设计工作开展前需要尽量掌握设备与系统的资料, 尤其是初次接触 CFB 机

组的设计人员。笔者编著本书的目的就是要把近 10 多年来 CFB 机组工程上的经验进行总结和提炼，全面介绍 CFB 设备以及相关系统，一方面为从事 CFB 工艺系统设计的工程技术人员提供参考，另一方面也希望起到抛砖引玉的效果，与同行们共同提高我国 CFB 发电机组的技术水平。

本书第一章至第三章，以及第十二章由罗必雄编写；第五章至第八章，以及第十一章和部分附录由霍沛强编写；第四章、第九章和部分附录由李刚编写；第五章部分内容以及第十章由万承军和罗宇东编写；全书由罗必雄主编和统稿。

限于作者水平，书中疏漏与不足之处在所难免，恳请读者指正。

主要符号说明

a_{qu} ——地震影响系数	$L_b^{\max}$ ——按刚度条件加固肋的长度, mm
B ——锅炉燃料消耗量, t/h	L_k ——长圆筒与短圆筒的临界尺寸
B_{cf} ——给煤机出力, t/h	$L_s^{\max}$ ——按强度条件加固肋的长度, mm
B_j ——锅炉计算燃料消耗量, t/h	m_c ——加固肋和壁板的组合质量, kg/m
B_L ——锅炉每小时石灰石用量, t/h	m_{Ca} ——钙硫摩尔比
c_{rc} ——燃料的比热容, kJ/(kg·°C)	N_{cf} ——给煤机数量
D ——加固肋设计间距, mm	n_f ——安全系数
D_e ——管道截面当量直径, m	$n_{f, s}$ ——圆形管道加固肋安全系数
D_{rh} ——锅炉再热蒸汽流量, t/h	p_a ——多年平均大气压, MPa
D_{tw} ——减温水流量, t/h	P_t ——壁板设计组合荷载, Pa
$D_s^{\max}$ ——按强度约束最大加固肋间距, mm	p_v ——空气中水蒸气的分压力, MPa
$D_b^{\max}$ ——按挠度约束最大加固肋间距, mm	p_1 ——始端压力, Pa
D_0 ——锅炉过热蒸汽流量, t/h	p_2 ——末端压力, Pa
d ——含湿量, g/kg	p_0 ——管道内压, Pa
d_c ——圆形管道中心线到加固肋中性轴的直径, mm	P_1 ——管道自重, Pa
d_i ——圆形管道内径, mm	P_2 ——保温自重, Pa
d_l ——锅炉排污率, %	P_3 ——积灰荷载, Pa
E ——设计温度下钢材的弹性模量, Pa	P_4 ——雪荷载, Pa
A ——截面面积, m ²	p_{f0} ——基本雪压, Pa
F_{gz} ——支吊架的工作荷载	P_5 ——风荷载标准值, Pa
$F_{qu, H}$ ——地震引起作用在支吊架上的水平力	p_{wind} ——基本风压, Pa
f_s ——加固肋自振频率, Hz	$[p]$ ——许用的工作压力, Pa
f_w ——壁板自振频率, Hz	I_A ——宽度面上的加固肋截面惯性矩, cm ⁴
g ——重力加速度, 9.8m/s ²	I_B ——高度面上的加固肋截面惯性矩, cm ⁴
G_{ash} ——灰渣排放量	I_c ——加固肋和壁板的组合截面惯性矩, cm ⁴
$h_{rh, c}$ ——冷再热蒸汽比焓, kJ/kg	I_{min} ——圆形管道最小需要的壁板与加固肋组合截面惯性矩, cm ⁴
$h_{rh, h}$ ——热再热蒸汽比焓, kJ/kg	h_{fw} ——给水比焓, kJ/kg
h_0 ——过热蒸汽比焓, kJ/kg	h_s ——锅炉汽包饱和水比焓, kJ/kg
H_1 ——始端标高, m	h_{tw} ——减温水比焓, kJ/kg
H_2 ——末端标高, m	Q ——管道内流量, m ³ /h
L ——长度	Q_{B-MCR} ——在 B-MCR 下计算流量, m ³ /h

Q_{TB} —— 风机 TB 工况下设计流量, m^3/h	$\bar{\Delta}$ —— 相对粗糙度
Q_b —— 锅炉输入热量	Δp_{TB} —— 风机 TB 工况下设计压头, Pa
Q_{lr} —— 低负荷下流量, m^3/h	Δh_w —— 流动阻力损失, Pa
Q_1 —— 锅炉有效利用热量	Δh_f —— 沿程阻力损失, Pa
Q_2 —— 锅炉排烟损失	Δh_ζ —— 沿程阻力损失, Pa
Q_3 —— 气体不完全燃烧损失	α —— 过量空气系数
Q_4 —— 固体不完全燃烧损失	β —— 相邻面的刚度影响系数
Q_5 —— 锅炉本体散热损失	β_H —— 高度 H 处的风振系数
Q_6 —— 灰渣物理热损失	δ —— 烟风道壁板厚度, mm
Q_{ha} —— 锅炉助燃空气带入的热量	δ_{min} —— 圆形管道计算最小壁厚, mm
$Q_{net, ar}$ —— 燃料的低位发热量	η_b —— 锅炉热效率, %
q_1 —— 锅炉有效利用热量比例	λ —— 流动摩擦阻力系数
q_2 —— 锅炉排烟损失系数	μ_L —— 石灰石纯度, %
q_3 —— 气体不完全燃烧损失系数	μ_r —— 积雪分布系数
q_4 —— 固体不完全燃烧损失系数	μ_H —— 风压高度变化系数
q_5 —— 锅炉本体散热损失系数	μ_s —— 风载体型系数
q_6 —— 灰渣物理热损失系数	ν —— 流体的运动黏度
Re —— 雷诺数	ν —— 泊松比
S —— 周长	ζ —— 管件的局部阻力系数
t_{rc} —— 燃料的初始温度, $^{\circ}C$	ρ —— 流体密度, kg/m^3
V —— 实际干空气量, m^3/kg (标况)	ρ_{steel} —— 钢铁的密度, $7.85kg/m^3$
V^a —— 实际湿空气量, m^3/kg (标况)	ρ_{ash} —— 飞灰堆积密度, kg/m^3
V_g —— 实际烟气量, m^3/kg (标况)	$[\sigma]^t$ —— 设计温度下许用应力, Pa
V_0 —— 理论干空气量, m^3/kg (标况)	ϕ —— 空气相对湿度, %
W_A —— 矩形烟风道的宽度, mm	ϕ —— 焊缝系数
W_B —— 矩形烟风道的高度, mm	ω —— 流速, m/s
W_M —— 石灰石中含水分的质量百分比	ω_1 —— 始端流体流速, m/s
Z_c —— 加固肋和壁板的组合截面模量, cm^3	ω_2 —— 末端流体流速, m/s
Δ —— 管子的绝对粗糙度, mm	

目 录

前言

主要符号说明

	第一章	循环流化床锅炉概述	1
	第一节	流化床原理概述.....	1
	第二节	国产大型循环流化床锅炉技术简介.....	3
	第二章	典型炉型介绍	8
	第一节	哈尔滨锅炉厂典型炉型.....	8
	第二节	东方锅炉厂典型炉型.....	12
	第三章	循环流化床锅炉与煤粉锅炉比选	17
	第一节	循环流化床锅炉相对煤粉锅炉的技术特点.....	17
	第二节	经济投资对比	22
	第三节	推荐选用循环流化床锅炉的原则.....	22
	第四章	炉内防磨设计	24
	第一节	防磨措施介绍	24
	第二节	炉膛水冷壁防磨设计.....	26
	第三节	受热面防磨设计.....	28
	第四节	旋风分离器防磨设计.....	28
	第五章	渣冷却设备	30
	第一节	冷却方式	30
	第二节	常用冷渣器设备特点.....	34
	第三节	冷渣器选型	40
	第六章	点火和助燃系统	42
	第一节	床上/床下点火方式对比	42

第二节	节油措施	44
	第七章 循环流化床锅炉燃烧系统	46
第一节	系统概况	46
第二节	燃烧系统计算	47
第三节	烟风阻力计算	57
第四节	管道选型及优化设计	61
	第八章 锅炉辅机设备选型原则	79
第一节	空气预热器	79
第二节	风机	85
第三节	给煤机	91
第四节	石灰石输送系统	93
第五节	除尘器	94
第六节	给水泵	104
第七节	回料器流化风机	106
	第九章 炉内脱硫	108
第一节	炉内干法脱硫原理	108
第二节	脱硫后对设计的影响	110
	第十章 除灰渣系统	116
第一节	长距离输灰系统	116
第二节	除渣系统设计	118
	第十一章 锅炉房布置设计	121
第一节	给煤方式对布置的影响	122
第二节	煤仓间的其他布置方式设计	123
第三节	炉底设备布置	124
	第十二章 技术发展探讨	126
第一节	继续大型化设计方案	126
第二节	提高参数采用直流循环	128
第三节	系统设计与运行方式优化	130

附录 A 壁板与加固肋组合截面参数	132
附录 B 两种截面的烟风道材料用量对比	136
附录 C 脱硫前后灰渣成分变化（举例）	138
附录 D 石灰石成分换算	140
参考文献	141

第一章

循环流化床锅炉概述

第一节 流化床原理概述

主流的燃烧技术有层燃、流化燃烧、悬浮燃烧三大类型，如图 1-1 所示。链条炉、炉排炉等采用层燃方式；沸腾炉、循环流化床（CFB）锅炉采用流化燃烧方式；煤粉锅炉采用悬浮燃烧方式。三类燃烧方式有较大差异，因此应用范围也各不相同，其中流化燃烧方式介于层燃与悬浮燃烧之间，对燃料适应性更好，具有更广泛的应用范围。

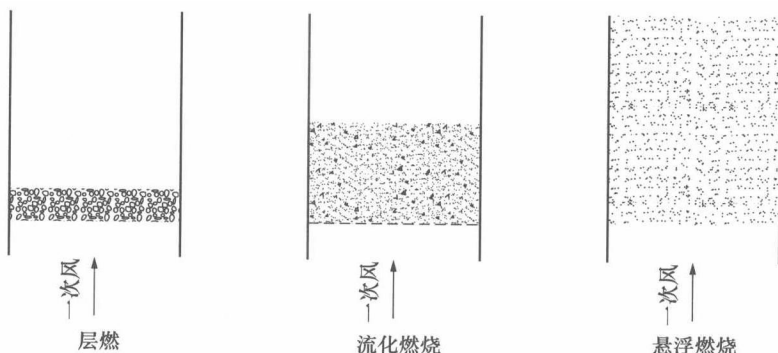


图 1-1 三种典型燃烧方式的燃料状态

流化床燃烧技术是建立在物料流化状态基础上的，燃料在流化状态中进行强烈的传热与传质，完成燃烧过程。物料要达到流化状态，需要有合适的流化速度。当气流通过随意堆放的一定颗粒范围的物料时，如果流速较低，气流对颗粒的作用力无法克服重力，颗粒静止不动，气流只能从堆放物料的间隙中流过，气流的流动阻力与流速成幂函数关系，这时的状态称为固定床。

当流速继续增加时，达到一个临界值后，流体的浮力、黏性力与固体颗粒的重力形成平衡，堆放物料的空隙率增加，固体颗粒分布不需要支撑面，并可在空间内自由运动。在宏观上，流化状态的气固混合物具有一些液体的特点，例如在空间中与空气有明显的分界、分界面总是保持水平、具有良好的流动性等。此时，物料层内任意两点的压力约等于单位截面内的颗粒重量，称之为流化态。达到流

化态的临界气体流速，称为流化速度。

达到流化速度后，继续增加气体流速，物料层先是均匀膨胀，当流速达到一定范围后，物料层就会出现气泡，随流速增加，气泡增大增多，使物料层剧烈翻腾，宏观上像液体的沸腾，因此称为鼓泡床或沸腾床。

在鼓泡床之后，如果气体流速继续增加，气泡被撕裂破坏，形成湍流床。当流速足够大时，变成快速床，物料层的界面变得弥散，需要不断补充物料，否则物料层的颗粒会被气流全部带走。CFB 锅炉的物料流化状态就属于快速床。

早期的流化燃烧技术采取沸腾炉（鼓泡床）方案，对难以着火的劣质燃料适应性能好，在小容量锅炉上得到了广泛应用。但是，由于鼓泡床锅炉截面热负荷小，不利于大型化，同时炉内脱硫效率相对较低，因此，大容量流化燃烧的锅炉均采用 CFB 技术。

CFB 设计重点之一是在各种负荷下保持炉内物料的平衡，加入 CFB 锅炉炉膛内的燃料颗粒具有宽筛分特性，细颗粒被烟气携带到稀相区继续燃烧，然后被带入旋风分离器，较粗的颗粒停留在密相区；粗颗粒在密相区燃烧过程中析出挥发分和水分，表面一部分固定碳也燃烧反应生成气体，颗粒孔隙率增加，比重降低，同时在密相区与相邻颗粒互相磨损后，颗粒变小，当颗粒的重力小于流化风的携带力时，就被带出炉膛进入旋风分离器。在旋风分离器内较大的颗粒被分离下来送到炉膛内继续循环燃烧，直到粒径减小到旋风分离器不能捕集。这些较小的颗粒随烟气排出锅炉。要提高燃烧效率，就要提高分离器的气固分离效率，因此烟气携带走的飞灰少于加入的燃料，不足以平衡炉内的物料循环，而且在运行中，负荷变动或者其他原因引起床压升高，床压升高到一定范围，会影响流化效果，最后破坏正常的流化状态，因此需要另外设置排渣系统辅助平衡炉内的物料循环。物料循环与流化风速度、稀相区的烟气速度及分离器的效率都是密切相关的，在各种负荷下保持物料循环的平衡，合理分配浓相区和稀相区的燃烧份额，是保证 CFB 设计成功的关键。炉内循环状况和燃烧份额分配确定后，CFB 的主要特征参数就得到确定，如物料循环倍率、炉膛与尾部受热面的吸热比例、燃烧效率等，锅炉的性能特点就基本确定。

CFB 锅炉独特的性能特点，令其与以往的一些燃烧方式相比，具有较明显的优点，主要表现为：

(1) CFB 锅炉炉膛内物料分为浓相区和稀相区，浓相区物料混合强烈，新加入炉内的燃料受到炉内大量高温灰的加热，有利于着火。因此，CFB 锅炉对燃料适应能力强，尤其是对于难着火的劣质燃料，着火性能与沸腾炉相当。

(2) CFB 锅炉与沸腾炉相比, 有较高的燃烧效率, 可接近煤粉锅炉的水平, 对于难燃尽的劣质燃料, CFB 的燃烧效率可高于煤粉锅炉。

(3) 稳燃效果好, 燃用劣质燃料时, 煤粉锅炉不投辅助燃料时最低稳燃负荷一般在 60%~90%; 而同样的燃料, CFB 锅炉可以达到 40%~50%, 节约价格昂贵的辅助燃料。

(4) 在炉内添加石灰石脱硫方面, CFB 锅炉的脱硫效率高于沸腾炉, 并且需要的钙硫摩尔比例较低。

(5) 低温燃烧, CFB 锅炉床面燃烧温度为 850~950℃, 燃烧产生的氮氧化物(NO_x)污染物较低。

由于 CFB 锅炉具有这些突出的优点, 使其在火力发电机组上得到了越来越广泛的应用。为了满足火力发电机组向高参数、大容量发展的趋势, CFB 锅炉目前也发展到亚临界参数, 容量达到 1024t/h 等级, 可以与 300MW 机组配套。超临界参数、600MW 容量的 CFB 锅炉的产品开发也得到国内外锅炉制造厂的重视, 总体概念设计已经完成, 一些关键技术正在攻关和验证中。可以预见, 与当前大型煤粉锅炉出力相当的高参数 CFB 锅炉将很快进行项目示范, 在电力行业得以推广并将充分发挥 CFB 锅炉的优点, 火力发电厂的燃料选择将更广泛, 污染物排放可控制在更低的标准。

第二节 国产大型循环流化床锅炉技术简介

国内现在已经有 4 家锅炉厂具备为 300MW 机组配套 CFB 锅炉的能力, 锅炉的蒸发量为 1024t/h。更大容量的超临界 2000t/h 等级 CFB 锅炉的示范项目正在建设中。在 670t/h 及以下容量的 CFB 锅炉技术中, 引进技术和国内自主研发多种技术流派并存; 在 1024t/h 等级的 CFB 锅炉技术中, 目前技术成熟的流派主要有引进消化 Alstom 双床面、外置床技术, 参考国外成功经验自主研发单床面技术, 引进国际最先进的 Foster Wheeler 单床面技术。

在 20 世纪末, 为了提高国内 CFB 锅炉设计制造技术, 缩小与国外先进水平的差距, 原国家计委决定以技贸结合方式引进一台 300MW 的 CFB 锅炉及其设计制造技术与系统设计技术, 并通过示范工程的建设对引进技术消化吸收创新, 形成了我国大型 CFB 锅炉自主设计制造能力。经过论证确定以白马电厂 300MW 示范工程项目作为引进大型 CFB 锅炉设计制造技术的依托工程, 并确定由国内规模和实力最强大的哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂、东方锅炉厂共同消化引进技术, 并

以此为基础自主开发更大容量的 CFB 锅炉机组。项目立项后, 1997 年 3 月发布国际合作征询书, 经过方案评审和合同谈判, 确定引进法国阿尔斯通公司(Alstom)为技术及设备供应商。2003 年 4 月引进锅炉的各设计制造和系统设计技术合同生效, 2003 年 5 月 15 日白马示范项目正式开工建设, 2006 年 4 月 17 日通过 168h 试运, 投入商业运行, 主要性能指标达到或超过了设计保证值。

无锡华光锅炉厂与 Foster Wheeler 进行了多次磋商, 于 2006 年 8 月签订了 200~300MW 容量 CFB 锅炉技术转让许可证协议。Foster Wheeler 对无锡华光锅炉厂技术人员进行培训。2007 年 4 月采用引进技术与沈阳金山热电有限公司签订了 2 台 200MW 容量的 CFB 锅炉。目前华光锅炉厂已经有成熟的 300MW 容量 CFB 锅炉的设计方案, 但尚未有运行业绩。

为了避免日后知识产权纠纷, 也为日后全面自主化开发打下基础, 国内主要锅炉厂消化引进技术之后, 结合国内科研、调试、运行及设计上的经验, 开始向市场推广自主技术的 300MW 容量 CFB 锅炉机组。自主型 CFB 锅炉技术路线主要有两大类, 其中东方锅炉厂自主研发的 CFB 锅炉采用单床面结构, 配置 3 个气冷式旋风分离器; 哈尔滨锅炉厂和上海锅炉厂吸取了 Alstom 技术的优点, 采用双床面结构, 配置 4 个绝热式旋风分离器, 但是取消了较复杂的外置换热器系统。

目前, 国内火力发电厂主力机组单机容量为 300~600MW, 因此, 以下以亚临界 300MW 机组配套 1024t/h 容量锅炉为例, 介绍国内几种技术流派 CFB 锅炉的技术特点。表 1-1 列出了 300MW 亚临界 CFB 锅炉的主要技术规范。

表 1-1 300MW 亚临界 CFB 锅炉主要技术规范

序号	项 目	单 位	规范或说明	备 注
1	锅炉最大连续蒸发量	t/h	1024	按汽轮机进汽量要求
2	过热器出口蒸汽压力	MPa.g	17.4	
3	过热器出口蒸汽温度	℃	540	
4	再热蒸汽量	t/h	845	按汽轮机进汽量要求
5	冷段再热蒸汽压力	MPa	3.8	与高压缸排汽有关
6	冷段再热蒸汽温度	℃	320	与高压缸排汽有关
7	热段再热蒸汽压力	MPa	3.5	
8	热段再热蒸汽温度	℃	540	
9	给水温度	℃	282	与回热系统设计有关
10	入炉煤最大颗粒	mm	8~10	
11	密相区燃烧温度	℃	850~950	

续表

序号	项 目	单 位	规范或说明	备 注
12	脱硫 Ca/S 摩尔比例	—	1.8~2.4	随脱硫要求改变
13	旋风分离器效率	%	≥99	
14	锅炉排烟温度	℃	130	与燃煤特性有关
15	配置空气预热器类型	—	管式或回转式	
16	锅炉低位热值热效率	%	≥90	与燃煤特性有关
17	脱硫效率	%	≥90	与钙硫比、燃煤特性有关
18	NO _x 排放浓度	mg/m ³ (标况)	≤200	与燃煤特性有关

一、引进 Alstom 型的技术特点

Alstom 以德国 LURGI 为基础,整合了 STEIN 和 CE 的技术,300MW 容量的 CFB 锅炉采用单炉膛、双床面结构,炉膛下部均分为两部分,按倒置的“Y”形布置。下部炉膛分为两部分后,锅炉深度方向尺寸减少 1/2,有利于二次风穿透至锅炉中心缺氧区域,提高煤粉颗粒的燃尽率。采用绝热式旋风分离器,每台锅炉标准配置为 4 台,左右侧各布置 2 台。每台锅炉还设置 4 台外置换热器(外置床),旋风分离器排下来的循环灰一部分排入炉膛前墙,另一部分排入外置换热器。通过调整进入外置换热器和炉膛的循环灰分配比例,达到控制床温和蒸汽温度的目的。4 个外置式换热器中的 2 个布置高温再热器和低温过热器,主要作用是用来调节再热蒸汽温度;另 2 个外置式换热器内布置一级中温过热器和二级中温过热器,主要作用是用来调节床温。锅炉采用回料器给煤方式,给煤和旋风分离器回送的循环灰混合预热后再进入炉膛内。采用床上与床下联合点火方式,设置 2 台风道点火器和 8 只床上油枪。冷渣器型式为隔墙式风水联合冷渣器,一般每台锅炉配置数量为 4 台。

炉水系统采用自然循环,采用三级过热器系统,设有三级喷水减温系统,再热器为两级,高温再热器布置在外置换热器内,正常工况通过调节外置换热器的循环灰流量来控制再热蒸汽温度,事故状态下采用紧急喷水减温系统调节。

外置换热器内大量的循环灰及绝热式旋风分离器的耐磨、耐火材料能蓄留大量热量,机组紧急停机后,如果锅炉不能继续供水会引起受热面干烧,导致金属材料超温损坏寿命。为了避免这种危害,Alstom 技术推荐配置 1 台由柴油机驱动

的紧急补水泵作为事故备用。

二、引进 Foster Wheeler 型的技术特点

Foster Wheeler 整合了芬兰奥斯龙的 CFB 锅炉技术，与 Alstom 技术的最大区别在于炉膛和旋风分离器的结构，在 300MW 容量甚至在 460MW 容量上，仍坚持采用单床面结构，采用大动量二次风喷嘴来保证炉膛中心燃烧空气的补充。经过数值分析和模型试验，证明旋风分离器非对称布置也能保证烟气分配的大致均匀性，因此标准设计每台锅炉采用 3 台旋风分离器。分离器采用给水冷却，可以防止循环灰在分离器内自燃引起金属材料超温，同时可以显著地减小分离器内耐火材料的敷设厚度。锅炉不设外置换热器，这也是与 Alstom 技术流派明显的技术区别，由于没有外置换热器，旋风分离器的绝热材料厚度也较小，炉内蓄热量较少，紧急停炉时，可以依靠自然通风和炉内存水蒸发就可以满足冷却要求，因此不需要设置紧急补水泵。给煤方式为炉前给煤，设置气力播煤风，增加入炉燃煤抛送距离，从而提高播煤的均匀性。Foster Wheeler 常采用床下点火方式，一般设置 2~4 台风道点火器用于锅炉启动和稳燃。随着锅炉容量的增加，需要的点火能量也相应增加，单只风道点火器的容量有限，炉底布置过多的风道点火器也妨碍检修，因此在大容量 CFB 锅炉上，也设置有少量的床上点火油枪。锅炉排渣方式与常见的炉墙一侧出渣方式不同，采用炉底排渣方式，排渣管穿过风室并设有水冷套。冷渣器可以选用 Foster Wheeler 典型的选择性风水联合冷渣器或者国内目前常用的滚筒式冷渣器。

炉水循环方式为自然循环，炉水从汽包下降管引出进入炉膛水冷壁和水冷旋风分离器。过热器分为三级，设置两级喷水减温系统。设置两级再热器，再热器汽温调节方式采用 Foster Wheeler 专利技术，在低温再热器入口设置并联旁路，旁路出口的蒸汽和低温再热器出口的蒸汽混合后再进入高温再热器。通过控制低温再热器旁路的蒸汽流量来控制再热蒸汽的吸热量，实现蒸汽温度调节的目的。这种调节方式比喷水减温经济性高，反应灵敏度又高于烟气挡板调节。为了保证再热器安全，同时设置了紧急喷水减温系统作为事故状态下的调节手段。

三、自主研发型技术特点

引进吸收进口技术以后，结合国内 CFB 锅炉的实际运行经验，国内哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂、东方锅炉厂各自进行了技术研发工作，向市场推出了具有自主知识产权的 300MW 容量等级的 CFB 锅炉。由于各自的技术路线不同，自主型

的 CFB 锅炉也各自具有鲜明的特点。

哈尔滨锅炉厂与上海锅炉厂自主研发的方案较类似,炉膛结构借鉴了 Alstom 技术的优点,炉膛采用双床面结构,有利于二次风有效地补充入炉内,提高燃尽率。

哈尔滨锅炉厂与上海锅炉厂的设计方案均取消了外置换热器,以求简化系统。取消了外置换热器后,锅炉受热面布置与蒸汽温度调节方式受到影响最大,不能再参照原来 Alstom 的技术方案。增加竖井烟道内的对流受热面不能满足锅炉总体布置要求,因此在炉膛上方布置了一部分屏式过热器和屏式再热器。屏式受热面布置在锅炉前后墙,为了防止烟气横向冲刷管子,屏式受热面距离旋风分离器入口有一定距离,布置在烟气冲刷的死角区。锅炉竖井采用双烟道结构,一侧竖井烟道布置过热器,另一侧布置低温再热器,采用烟气挡板调节再热器蒸汽温度。

旋风分离器仍采用绝热式结构,锅炉左右侧各布置 2 台,给煤口布置在回料器上,但是炉膛到分离器的烟气接口从炉膛前后墙改为侧墙,为前后墙布置屏式受热面提供空间。其中哈尔滨锅炉厂设计的回料器采用“一分为二”的结构,每个回料器入口为 1 个,出口分为 2 个,给煤口设置在每个回料器出口处,每台锅炉共 8 个给煤口。取消外置床以后,旋风分离器的循环灰改为从锅炉侧墙进入炉膛。上海锅炉厂的设计方案与哈尔滨锅炉厂的略有不同,设置在每个回料器上的给煤口有 2 个,可以分别接受 2 台给煤机送煤,每台锅炉 4 个回料器共 8 个给煤机接口。但每个回料器到炉膛只有 1 个出口,实际回料器到炉膛的给煤口只有 4 个。为了避免单个给煤口给煤量过大,在炉膛两边侧墙水冷壁上各开 2 个给煤口,加上回料器到炉膛的给煤口,每台锅炉的给煤口一共 8 个,提高了给煤的均匀性。

锅炉点火方式采用床上和床下联合点火,与 Alstom 技术相似,设置两个风道点火器和若干床上油燃烧器。

冷渣器采用较为可靠的滚筒式冷渣器,通过调整滚筒转速来调节出渣量,因此可以取消设置在排渣口用来调节排渣量的锥形阀。国内大量机组运行经验证明,滚筒式冷渣器基本不受入炉煤粒大小的影响,故障率低,适应目前国内 CFB 锅炉运行管理的实际水平。