



“十三五”普通高等教育本科规划教材

循环流化床锅炉 原理与运行

王世昌 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

循环流化床锅炉 原理与运行

王世昌 编
陈 群 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

循环流化床(CFB)锅炉可以用作工业锅炉和电站锅炉,其燃料不仅包括煤炭,也覆盖了所有常规固体燃料的范围。本书内容包括基础理论,CFB 锅炉结构、原理与运行,CFB 锅炉安全、环保、经济性评价等,并含有各类图表和例题讲解与讨论,以及若干针对性较强的 CFB 锅炉工程计算练习和分析。

本书可以作为能源与动力工程专业全日制本科生选修课教材、非能源与动力工程专业全日制工科本科生在循环流化床锅炉领域的入门课教材,以及相关单位从事 CFB 锅炉专业的工程师的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉原理与运行 / 王世昌编. —北京: 中国电力出版社, 2016.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9467-4

I. ①循… II. ①王… III. ①循环流化床锅炉—高等学校—教材 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 137328 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

*

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.5 印张 221 千字

定价 22.00 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

前言

根据《中国电力行业年度发展报告 2014》的统计数据,截至 2013 年底,中国的电站锅炉约有 7228 台。其中煤粉锅炉(PC 锅炉)约有 6628 台,循环流化床锅炉(CFB 锅炉)约有 600 台。煤粉锅炉燃烧的动力煤包括:无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤等。循环流化床锅炉除了可以燃烧动力煤以外,还可以燃烧煤矸石、秸秆、城市固体废弃物等劣质固体燃料。2014 年,中国的原煤产量约为 38.7t,其中煤矸石的产量约 1.52 亿 t,火电消耗的原煤约为 17.1 亿 t;中国的粮食总产量约为 6.07 亿 t,农作物秸秆的产量约为 7.9 亿 t;中国的城市数量为 665 个,固体废弃物的总产量约为 4 亿 t。目前国内部分地级城市供热企业使用 CFB 锅炉作为热网的热源。

CFB 锅炉的特点:①广泛的燃料适应性。CFB 锅炉可以被设计成燃烧任何固体燃料的锅炉,PC 锅炉只能燃烧热值较高的煤炭。一般而言,在锅炉运行中,CFB 锅炉的燃料适应性也比 PC 锅炉更强。②CFB 锅炉可以作为电站锅炉或者工业锅炉,燃煤电站可以是凝汽式电站或者热电联产电站、热电冷三联产电站。③由于采用了燃烧中脱硫技术以及燃烧温度较煤粉锅炉低,CFB 锅炉烟气中的 SO_2 、 NO_x 排放浓度远低于 PC 锅炉。④由于 CFB 锅炉布置了循环灰分离器,烟气中的飞灰颗粒浓度比煤粉锅炉 PC 锅炉低。⑤CFB 锅炉燃烧产生的飞灰和灰渣可以作为建筑材料进行资源化利用,二次污染较小。⑥CFB 锅炉风机电耗高、受热面的磨损较为严重,同时运行中的 CFB 锅炉循环灰系统可能发生泄漏。因此 CFB 锅炉的现场环境不够清洁,相对于采用 PC 锅炉,采用 CFB 锅炉的燃煤电厂的供电煤耗比较高。

本教材的主要内容:①基础理论篇,分为 6 章,主要内容包括中国动力燃料的特点、循环流态化燃烧的基本理论、燃烧产物计算等;②CFB 锅炉结构、原理与运行篇,分为 4 章,主要内容包括 CFB 锅炉的锅侧、炉侧的结构、工作原理、运行理论以及锅炉总体布置的要求等;③CFB 锅炉安全、环保、经济性能评价篇,分为 3 章,主要内容包括 CFB 锅炉的安全、环保、经济性能指标和评价方法。本教材突出了工程计算和计算结果的工程意义分析,对学生掌握专业知识具有重要意义。

本书由华北电力大学王世昌编写,清华大学陈群主审。由于作者编写水平的局限性,书中难免有疏漏和不足之处,欢迎全国高校师生以及能源动力工程领域的业内人士提出宝贵意见和建议。

作 者

2016 年 4 月 26 日

于北京市昌平区华北电力大学

目 录

前言

第一篇 基础理论

第 1 章 CFB 锅炉概述	3
1.1 CFB 锅炉的技术发展历程简述	3
1.2 中国煤炭资源的分布特点和利用现状	6
1.3 中国经济发展走向和居民生活方式变化与 CFB 锅炉的关系	7
1.4 CFB 锅炉在当代中国的技术意义	8
复习思考题	9
习题	10
第 2 章 气固两相流动基本理论	11
2.1 单相流动	11
2.2 固体颗粒的 Geldart 分类	13
2.3 气固两相流动	15
2.4 CFB 锅炉床料颗粒特性	18
复习思考题	20
习题	20
第 3 章 CFB 锅炉燃烧和传热基本理论	21
3.1 气体燃料燃烧理论	21
3.2 液体燃料燃烧理论	23
3.3 固体燃料燃烧理论	24
3.4 链条锅炉燃烧特点	27
3.5 煤粉锅炉燃烧特点	28
3.6 CFB 锅炉燃烧特点	28
3.7 传热学概述	29
3.8 链条锅炉传热特点	30
3.9 煤粉锅炉传热特点	30
3.10 CFB 锅炉传热特点	31
复习思考题	31
习题	32
第 4 章 中国典型动力煤特性	33
4.1 四种常用基准	33

4.2	工业分析成分	33
4.3	元素分析成分	35
4.4	高位发热量和低位发热量	36
4.5	灰熔点与灰成分	37
4.6	哈氏可磨系数	38
4.7	中国动力煤的分类	39
4.8	中国动力煤的主要产地及特性	39
4.9	中国农作物秸秆的资源化利用	40
4.10	中国城市固体废弃物的资源化利用	40
	复习思考题	41
	习题	41
第 5 章	燃烧产物计算	43
5.1	空气量	43
5.2	烟气分量	44
5.3	烟气焓	45
5.4	锅炉本体热平衡	48
5.5	锅炉机组热效率	52
	复习思考题	53
	习题	54
第 6 章	水冷壁工质循环方式的锅炉分类	55
6.1	自然循环锅炉	55
6.2	控制循环锅炉	56
6.3	直流锅炉	57
6.4	锅炉受热面及其作用	59
	复习思考题	60
	习题	60

第二篇 CFB 锅炉结构、原理与运行

第 7 章	CFB 锅炉本体结构与工作原理	65
7.1	炉侧结构与工作原理	65
7.2	锅侧结构及其工作原理	73
	复习思考题	77
	习题	78
第 8 章	CFB 锅炉辅机结构与工作原理	79
8.1	送风机	79
8.2	引风机	80
8.3	罗茨风机以及其他风机	80
8.4	冷渣器	81

8.5	捞渣机	82
8.6	给煤机	83
8.7	碎煤机	83
8.8	烟气 SCR 脱硝系统	85
8.9	除尘器	86
8.10	FGD 装置	87
8.11	吹灰器	88
8.12	暖风器	89
	复习思考题	90
	习题	91
第 9 章	CFB 锅炉运行理论与技术简介	92
9.1	缺陷消除与冷态试验	92
9.2	CFB 锅炉的启动	93
9.3	CFB 锅炉的运行调整	96
9.4	CFB 锅炉的停炉	100
9.5	CFB 锅炉运行中常见的技术问题	101
	复习思考题	103
	习题	104
第 10 章	CFB 锅炉机组的总体设计要求	105
10.1	炉膛设计技术要求简介	105
10.2	循环灰系统设计技术要求简介	106
10.3	竖井烟道受热面设计技术要求简介	107
10.4	环保设备设计技术要求简介	109
10.5	锅炉其他辅机设计技术要求简介	109
10.6	钢架设计技术要求简介	110
10.7	CFB 锅炉机组布置方式	111
	复习思考题	112
	习题	114

第三篇 CFB 锅炉安全、环保、经济性能评价

第 11 章	CFB 锅炉的安全性能评价	119
11.1	小修	119
11.2	大修	119
11.3	计划外停炉	120
11.4	引起停炉原因	120
11.5	燃煤电厂的人身伤亡事故	122
	复习思考题	123
	习题	123

第 12 章 CFB 锅炉的环保性能评价	124
12.1 CO ₂ 减排	124
12.2 SO ₂ 减排	124
12.3 NO _x 减排	125
12.4 飞灰中可吸入颗粒物 PM _{2.5} 减排	126
12.5 底渣（炉渣）减排	128
12.6 污水减排	129
12.7 石膏雨和氨气减排	129
12.8 电磁污染和噪声污染	129
复习思考题	129
习题	129
第 13 章 CFB 锅炉的经济性能评价	131
13.1 静态初投资	131
13.2 建设周期损失的资金	132
13.3 运行费用	132
13.4 CFB 锅炉检修费用	133
13.5 人工费	134
13.6 设备技术改造费用	134
13.7 计划外停炉费用	136
13.8 银行贷款的本金与利息	136
13.9 排污费	137
13.10 CFB 锅炉运行收益与税金	137
复习思考题	138
习题	138
参考文献	139

第一篇

基 础 理 论

The graphic design features a central globe with a grid of latitude and longitude lines. Surrounding the globe are several concentric circles and a series of radiating lines that create a sense of motion and depth. The overall aesthetic is modern and technological, with a focus on geometric shapes and a monochromatic color scheme.

第1章 CFB 锅炉概述

1.1 CFB 锅炉的技术发展历程简述

1.1.1 锅炉的概念及其作用

锅炉是通过燃烧将燃料蕴藏的化学能连续地转化成水、水蒸气或其他工质热能的工业装置。

按照用途,锅炉可以分成工业锅炉、电站锅炉、机车锅炉、船用锅炉4类。为了减少污染,目前国内铁路交通中的机车锅炉已经全部淘汰。

对于电站锅炉而言,受热面包括炉侧受热面1个(空气预热器)和锅侧受热面4个(省煤器、水冷壁、过热器、再热器)。

根据水和水蒸气的热力学性质,提高锅炉的压力就可以降低汽化潜热,从而使燃料的单位放热量产生更多的蒸汽。锅炉每小时的蒸汽流量称为锅炉容量。因此,从热力学角度来讲,提高蒸汽压力是提高锅炉容量的主要途径。

电站锅炉的基本水汽流程为:给水→省煤器→汽包/启动分离器→水冷壁→汽包/启动分离器→低温过热器(含I级喷水减温器)→屏式过热器(含II级喷水减温器,过热器出口管道左右交叉)→高温过热器(末级过热器)→汽轮机高压缸→(事故喷水减温器)低温再热器→高温再热器(含喷水减温器)。

CFB锅炉的炉侧基本流程为:

(1) 原煤→破碎+热风→炉膛→燃烧→高温烟气→对炉膛内的受热面(水冷壁、过热器、再热器扩展屏)放热→循环灰→低温过热器→低温再热器→省煤器→空气预热器→(冷烟气)烟道出口。

(2) 冷空气→暖风器→空气预热器→热空气。

(3) 原煤或者混合燃料+热空气→燃烧→高温烟气+灰渣+飞灰→炉膛下部→排出底渣(炉渣)。

(4) 原煤或者混合燃料+热空气→燃烧→高温烟气+灰渣+飞灰→炉膛上部→循环灰分离器→尾部烟道→低温烟气+飞灰颗粒。

电站锅炉机组(工程领域也称作锅炉岛)包括锅炉本体和锅炉辅机。锅炉本体包括受热面、炉墙、燃烧设备、吹灰器等。锅炉辅机(辅助机械和设备的总称)包括给水泵、给煤机、碎煤机(CFB锅炉)、石灰石破碎机、冷渣器(CFB锅炉)、除渣机、除尘器、烟气脱硫装置、烟气脱硝装置等。

1.1.2 固定床燃烧方式

小型燃煤锅炉(容量 $D < 20\text{t/h}$)一般为链条锅炉(FB,见图1-1)。这种锅炉的燃烧特点是:

(1) 固定床燃烧,燃烧速度慢,无法实现锅炉的大型化,与电站汽轮机对锅炉的要求矛盾。

(2) 一次风（从炉排下向燃料的送风）率一般超过 70%，飞灰颗粒中含有的未燃尽碳无法在飞灰颗粒飞行中燃尽，燃烧效率低，因此锅炉效率也低。

(3) 燃烧旺盛区的温度超过 1050℃，容易造成炉排局部高温结渣。

(4) 由于原煤破碎过程不是很均匀，燃料粒径分布不均匀，大颗粒燃料不能很好地燃尽，底渣（炉渣）含碳量较高。

1.1.3 喷动床的出现

喷动床干燥器的结构与工作原理如图 1-2 所示。大颗粒气固两相流的应用首先出现在农业生产过程中的粮食干燥工艺中。由于规模化生产，短期内无法通过自然晾晒的方法进行干燥。为了对大批粮食进行保鲜，加拿大等国家的第一产业工人使用了喷动床干燥器，脱除粮食中的水分，保证了粮食在较长时间内不会霉烂变质。

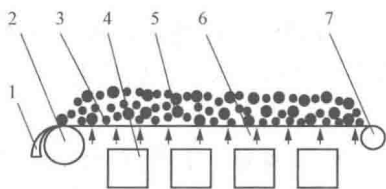


图 1-1 链条锅炉燃烧原理示意图

1—老鹰铁；2—动力轮；3—链条锅炉排；

4—风室；5—煤层；6—一次风；7—从动轮

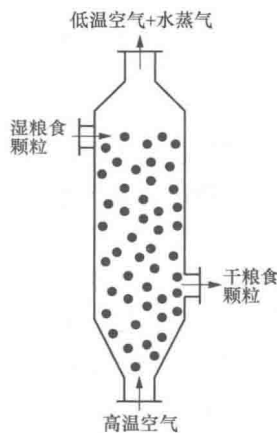


图 1-2 喷动床干燥器结构与工作原理示意图

喷动床的工作原理是：在一个密闭的圆筒形容器中自下向上通热风，水分含量较高的粮食（如小麦、玉米、水稻、高粱等）颗粒从容器的上方进入，热风在向上流动过程中与粮食颗粒相遇并形成气固两相流。由于固体颗粒与气流之间的相对速度，形成强烈的对流换热作用，粮食颗粒中的水分蒸发形成水蒸气，热空气在上升过程中温度逐步下降，形成冷空气，最后冷空气与水蒸气从筒形容器的上方离开喷动床。经过干燥的粮食颗粒从喷动床下方流出。

床速是空气流量与床层内部横截面面积的比值。喷动床的流动是一种床速较低的气固两相流，其技术特点是绝大部分颗粒都集中在下半部的密相区，换热强烈。

1.1.4 鼓泡床的出现

由于世界范围内的工业化生产对能源的需求急剧增加，将原油大分子分解成小分子产品（如汽油、煤油、柴油等）的石油的流化催化裂解工艺（FCC）应运而生。在石油裂解工艺中比较有效的工艺是将原油在反应釜中进行催化裂解反应，催化剂吸附在固体颗粒表面，固体颗粒被流态化，从而大大提高催化剂的利用率。这就导致了床速较低的鼓泡流态化反应釜的出现。鼓泡床的床速比喷动床更低（床速 $u < 3\text{m/s}$ ），同时固体颗粒粒径也可以更小。较小的催化剂颗粒粒径增加了单位质量催化剂颗粒的外表面积，从而大大加快了石油催化裂解反应的速度。

1.1.5 鼓泡床锅炉的出现

18 世纪 70 年代, 英国工程师瓦特的蒸汽机开始在世界范围内广泛使用。同时蒸汽机的不断改进要求更大容量的锅炉连续提供蒸汽, 全球煤炭的消耗量也逐步大幅度增加。德国于 19 世纪 70 年代开始了电气化生产时代, 市场对电力的巨大需求导致了煤炭供应的紧张。德国的煤炭资源大部分是热值较低的褐煤。为了尽可能充分地使用现有煤炭资源, 德国的鲁奇公司 (Lurgi) 等企业在 20 世纪 50 年代以后逐步研制开发了一种可以燃烧低热值煤炭的鼓泡流态化锅炉——鼓泡床锅炉 (BB)。

鼓泡床锅炉的床速一般小于 3.0m/s 。其技术特点是:

- (1) 可以燃烧煤矸石、褐煤等低热值燃料。
- (2) 由于床速较低, 燃烧和放热份额的大部分集中在密相区, 见图 1-3。
- (3) 为了维持床温, 必须在密相区布置埋管受热面, 但是此受热面的磨损速度很快, 不利于锅炉的长期连续运行。每年的小时数为 8760h , 鼓泡床一般只能运行 $2000\sim 2300\text{h}$ 就必须停炉检修。
- (4) 密相区以上炉膛部分的燃烧份额很小, 由于没有循环灰系统, 粒径较小的飞灰颗粒不能反复燃烧, 烟气中携带的飞灰颗粒的含碳量较高, 锅炉效率很低。
- (5) 由于燃烧反应集中在密相区, 如果提高锅炉容量, 就必须扩大布风板的面积 (图 1-3 中风室上部横截面面积), 增加密相区的高度 (如图 1-3 中的密相区所示)。受到锅炉制造工艺和送风机压头的限制, 不可能大幅度提高鼓泡床锅炉的容量。

1.1.6 循环流化床锅炉的出现

水是一种地球上广泛分布、无毒、廉价的自然资源, 水蒸气在工业生产中得到普遍使用, 同时工业生产需要的电力大部分来自于蒸汽轮机-发电机组产生的电能。为了进一步提高锅炉容量、降低污染物排放量、扩大燃烧低热值燃料锅炉的使用范围, 经过德国、英国、美国、加拿大等国家的学者、专家以及锅炉制造商的努力, 20 世纪 50 年代研制出了床速超过 5m/s 、带有循环灰系统设备的循环流化床锅炉, 如图 1-4 所示。

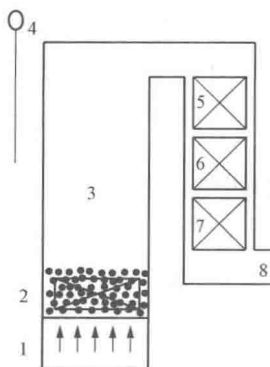


图 1-3 鼓泡床锅炉结构原理示意图

1—风室、布风板; 2—密相区、埋管受热面; 3—炉膛;
4—汽包、下降管; 5~7—竖井烟道受热面; 8—烟道出口

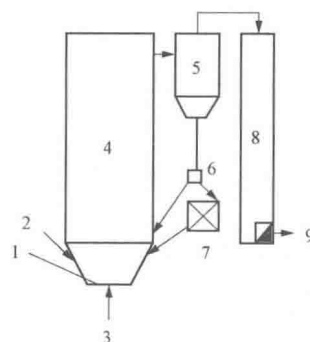


图 1-4 CFB 锅炉结构与原理示意图

1—布风板; 2—密相区; 3—一次风; 4—炉膛;
5—循环灰分离器; 6—回料阀;
7—外置换热器 EHE; 8—竖井烟道; 9—烟道出口

循环流化床锅炉的技术特点是:

(1) 床速 (即流化速度) $u=5.0\sim 8.0\text{m/s}$, 是快速气固两相流态化。

(2) 锅炉受热面的热流密度称作热负荷。沿着炉膛高度方向 (垂直向上方向) 燃烧份额略有降低, 但是基本上均匀地分布在整個炉膛高度上, 热负荷分布比较均匀。

(3) 有物料循环系统, 颗粒粒径较小的飞灰颗粒中的碳元素可以在炉膛中反复燃烧, 低热值煤的燃尽度较高, 锅炉效率较高。

(4) 由于炉膛内热负荷沿着高度方向分布比较均匀, 锅炉容量可以做得比较大, 目前国内最大的 CFB 锅炉容量已经接近 2000t/h。

(5) 外置换热器 EHE 中布置了少量的过热器、再热器受热面, 通过调整 EHE 中的循环灰流量, 可以调整蒸汽温度以及密相区的床温。

(6) 由于燃尽度较高, 飞灰底渣中的含碳量较低, 当飞灰、底渣作为建筑材料添加剂时, 可以提高建筑材料的质量。

各种燃煤锅炉的燃烧性能参数对比见表 1-1。

表 1-1 各种燃煤锅炉的燃烧性能参数对比

锅炉炉型	燃料	燃料颗粒粒径 (mm)	燃烧效率 (%)	锅炉效率 (%)
PC 锅炉	高热值煤	0.04~0.09	约 95	>91
CFB 锅炉	低热值燃料	1~10	约 99	>85
BB	低热值燃料	20~50	约 85	>74
FB	低热值燃料	20~50	约 88	>65

[例 1-1] 计算锅炉每年的燃料消耗量。

已知: 300MW 亚临界煤粉锅炉, 燃料消耗量 $B=126\text{t/h}$, 每年运行 $n=6000\text{h}$ 。

解 根据已知条件, 300MW 亚临界锅炉每年的燃料消耗量为:

$$B_a=Bn=126\times 6000=756000\text{t/a}$$

计算结果分析与讨论:

(1) 1 台 300MW 煤粉锅炉每年消耗 75.6 万 t 煤, 煤的年消耗量很大。

(2) 为了提高电站锅炉的效率, 应当提高朗肯循环效率。提高蒸汽压力不仅可以提高朗肯循环效率, 还可以提高锅炉的蒸发量。

1.2 中国煤炭资源的分布特点和利用现状

1.2.1 中国煤炭资源的分布特点

中国煤炭的探明储量为 1100 亿~1300 亿 t。适合做炼焦用的优质烟煤都分布在黄河以北地区。适合做电站锅炉燃料的动力煤, 无烟煤分布在山西、河南、贵州、湖南、江西、广西、福建、广东等地; 适合做动力煤的贫煤分布在山西、山东、河南、四川、重庆、湖北、江西; 适合做动力煤的烟煤分布在山西、陕西、内蒙古西部、宁夏、甘肃东部、新疆、黑龙江、安徽、江苏、河北等地; 适合做动力煤的褐煤分布在内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、云南。煤矸石主要分布在各煤炭基地, 北方占多数。

1.2.2 中国煤炭资源的利用现状

全国生产的煤炭约有 1/2 用于发电厂燃料, 约有 1/4 用于炼焦, 其余的煤炭基本上被工业

锅炉所消耗。工业锅炉分布在第一、第二、第三产业的各企业中。居民生活消耗的煤炭比例很小。

东南沿海地区的燃煤电厂可能会燃用价格较低的海外煤炭,这些煤炭主要来自澳大利亚、印度尼西亚、越南、朝鲜、俄罗斯等国。

长江以南地区城市密集、人口稠密,已经开始尝试用 410~670t/h 循环流化床锅炉燃烧煤炭、煤矸石、秸秆、城市固体废弃物形成的混合燃料。由于国家环保政策的鼓励,各中等城市政府都对节能型锅炉的生产过程进行了必要的经济补偿,因此循环流化床锅炉在快速工业化的现代中国应用前景非常广阔。

[例 1-2] 计算燃烧秸秆的节煤效果。

已知: 秸秆的发热量 $Q_{\text{net,ar,straw}}=8\text{MJ/kg}$, 煤的发热量 $Q_{\text{net,ar}}=21\text{MJ/kg}$, 每年全国的秸秆产量约为 13.6 亿 t, 假设被电站锅炉利用 30%。

解 根据已知条件, 电站锅炉燃烧秸秆每年节省的煤炭数量为:

$$B_{\text{straw,coal}} = 13.6 \times 30\% \times \frac{Q_{\text{net,ar,straw}}}{Q_{\text{net,ar}}} = 13.6 \times 30\% \times \frac{8}{21} = 1.554 \text{ 亿 t/a}$$

计算结果分析与讨论:

(1) 燃烧秸秆可以每年节省煤炭 1.554 亿 t。

(2) 秸秆是循环生长的可再生能源, 燃烧过程中, 其二氧化碳排放量为 0, 因此可以大量减排 CO_2 等温室气体。

1.3 中国经济发展走向和居民生活方式变化与 CFB 锅炉的关系

1.3.1 中国经济的发展走向

1949~1978 年, 中国经济总量增长速度缓慢。1979~2013 年, 中国经济总量经过几次调整, 总体快速增长。与此对应, 中国的电力装机容量也快速增长, 1949 年全国火电、水电、核电等总装机容量只有 185 万 kW, 到 2013 年已超过 11 亿 kW, 增长幅度超过 595 倍, 年均增长幅度达到 9.29 倍。

中国的主要一次能源是煤炭。由于经济增长对煤炭的需求大幅度提高, 煤矸石、油页岩、石油焦、秸秆、城市固体废弃物的年产量越来越大。PC 锅炉却不能独立燃烧煤矸石、油页岩、石油焦、秸秆、城市固体废弃物等低热值固体燃料, 即便是掺烧, 低热值燃料的比例也不会超过 5%。因此, 用燃料适应性很好的 CFB 锅炉燃烧低热值燃料是当代中国的唯一选择。

1.3.2 中国居民生活方式的变化

截至 2013 年底, 中国大陆部分人口数量超过 13.4 亿, 其中农业人口比例为 47%, 约有 6.29 亿。据 1993 年以来的统计数字, 全国农业人口比例平均每年降低 0.7%。大量农村人口进入城市, 引起了城市日用消费品总额的持续增长。对住房、汽车、学校、医院、商店等的需求量不断增长, 从而带动了钢铁、水泥、汽车、化工、煤炭、电力以及进出口、交通等行业产值大幅度增长。

CFB 锅炉作为一种可以消耗秸秆、城市固体废弃物的设备, 可以节省宝贵的不可再生的煤炭资源、减少 CO_2 等温室气体的排放总量, 产生供热、供冷、发电用蒸汽。因此 CFB 锅炉在中国未来的工业化进程中将有较为广阔的应用前景。

[例 1-3] 计算燃烧城市固体废弃物 (MSW) 的节煤效果。

已知: MSW 的发热量 $Q_{\text{net,ar,MSW}}=8\text{MJ/kg}$, 煤的发热量 $Q_{\text{net,ar}}=21\text{MJ/kg}$, 每年全国的 MSW 产量约为 5 亿 t, 假设被电站锅炉利用 20%。

解 根据已知条件, 电站锅炉燃烧 MSW 每年节省的煤炭数量为:

$$B_{\text{MSW,coal}} = 5 \times 20\% \times \frac{Q_{\text{net,ar,MSW}}}{Q_{\text{net,ar}}} = 5 \times 20\% \times \frac{8}{21} = 0.381 \text{ 亿 t/a}$$

计算结果分析与讨论:

(1) 燃烧秸秆可以每年节省煤炭 0.381 亿 t, 城市固体废弃物中, 部分是生物质可以大量减排 CO_2 等温室气体。

(2) 城市固体废弃物成分比较复杂, 燃烧过程中可能会产生二噁英等高毒性物质, 因此需要仔细研究 MSW 的燃烧技术, 以免造成二次污染。

1.4 CFB 锅炉在当代中国的技术意义

1.4.1 国内主要的工业锅炉制造厂

四川锅炉厂、济南锅炉厂、芜湖锅炉厂、无锡锅炉厂、杭州锅炉厂等一般都可以生产 240t/h 及以下容量的 CFB 锅炉。

1.4.2 国内主要的电站锅炉制造厂

上海锅炉厂有限公司、哈尔滨锅炉厂有限公司、东方锅炉厂有限公司、巴威锅炉有限公司、武汉锅炉厂有限公司等锅炉制造商一都可以生产 220~1025t/h 容量的 CFB 锅炉。目前东方锅炉厂有限公司已经可以生产 2000t/h 级的超临界压力 CFB 锅炉。

1.4.3 全国主要的发电企业

全国主要的发电企业有华能电力集团、大唐电力集团、国电电力集团、华电电力集团、中电投电力集团、国华电力集团等。全国各省区市都有电力公司, 国家电网公司、国投电力以及一些民营企业也有下属发电企业。

1.4.4 全国主要的输电企业

南方电网公司主要经营广东、广西、贵州、云南、海南等地的电网。国家电网公司主要经营中国大陆范围内南方电网公司以外的其他电网。

1.4.5 新兴中等规模以上城市对热力、制冷、电力的需求

中国目前的城市数量为 665 个, 地级城市为 287 个 [见《中国统计年鉴 (2015)》]。国内城市大部分分布在长江以南地区。新兴城市的企业数量和国民生产总值 GDP 增长速度较快。工业生产和居民生活对热力、制冷、电力的需求旺盛。长江以南地区, 煤炭资源相对匮乏, 城市固体废弃物、秸秆等替代燃料所占比例较高。因此, 中等容量 (410~670t/h) CFB 锅炉在此地区有较好的市场前景。

1.4.6 循环流化床锅炉在发电行业的技术意义

作为无序能, 热能和冷能不能像电能 (有序能) 一样远距离传输。CFB 锅炉可以为中等规模城市提供热力、制冷和电力支持。由于具有较好的燃料适应性, CFB 锅炉可以用 MSW 作为一部分燃料, 在中等规模城市的供热、制冷、供电领域, 也可以把大型城市规划成若干区域, 作为大型城市的区域供热热源。

1949~2012 年全国经济与电力数据的关系见表 1-2。

表 1-2 1949~2012 年全国经济与电力数据的关系（不含台、港、澳数据）

年份	人口（亿人）	GDP（亿元）	电力装机容量（万 kW）	煤炭产量（亿 t）
1949	4.5	441	185	0.324
1979	9.7	6175	6302	6.35
1993	11.98	45586	18449	11.41
2012	13.54	519322	114491	36.5

〔例 1-4〕 计算国内地级城市需要的 CFB 锅炉数量。

已知：国内地级城市 287 个，每个城市需要 $D=410\text{t/h}$ 的 CFB 锅炉数量 $n=3\sim 4$ 台。

解 根据已知条件，国内地级城市需要的 CFB 锅炉（ $D=410\text{t/h}$ ）数量为：

$$n_1=287\times 3=861 \text{ 台}$$

$$n_2=287\times 4=1148 \text{ 台}$$

计算结果分析与讨论：

（1）全国地级城市需要 CFB 锅炉 861~1148 台，平均 1005 台。

（2）由于中国社会生产方式和居民生活方式的工业化，每年都有少量的县级城市实际上上升到地级城市水平。因此 CFB 锅炉的需求量每年都在增加。

（3）目前全国的电站锅炉总量约为 7228 台，其中 CFB 锅炉约为 600 台（见《中国电力行业年度发展报告 2014》）。各发电公司如果能及时把握时机，在全国合理布局，可以将发电、供热、制冷三联产电厂安装在全国各中等规模以上的城市周边，充分利用城市固体废弃物、秸秆等燃料资源，高品质的蒸汽热能用来发电，低品质的蒸汽热能用来供热和制冷。这符合能源梯级利用的原则。

复习思考题



1. 提高朗肯循环的主要措施有哪些？（答案：①提高蒸汽压力；②提高蒸汽温度；③采用再热循环；④采用回热循环；⑤降低凝汽器蒸汽压力）

2. 查阅 4.9、9.8、13.7、17.3MPa 等压力下水的汽化潜热，说明提高锅炉容量的主要技术措施。（答案：4.9MPa 汽化潜热 $r=1847\text{kJ/kg}$ ；9.8MPa 汽化潜热 $r=1330\text{kJ/kg}$ ；13.7MPa 汽化潜热 $r=1087\text{kJ/kg}$ ；17.3MPa 汽化潜热 $r=834\text{kJ/kg}$ 。提高锅炉容量的主要措施是提高蒸汽压力，降低汽化潜热）

3. 在超临界参数范围内，提高蒸汽压力为什么可以进一步提高锅炉容量。（答案：随着压力提高，过热蒸汽焓逐步降低，给水焓逐步提高，过热蒸汽焓与给水焓之差越来越小，1kg 煤释放的热量可以将更多的给水加热成蒸汽，锅炉容量必然提高）

4. 秸秆所含元素中有 K、Na 等易于结渣的成分，在设计燃烧秸秆的 CFB 锅炉时，应怎样考虑这些技术问题？（答案：适当掺烧 Na_2O 、 K_2O 等含量较低的煤）

5. 用 CFB 锅炉燃烧塑料等 MSW 时，容易产生 N_2O 等有害气体，在设计燃烧 MSW 的 CFB 锅炉时，应采取什么技术措施解决这个技术问题？（答案：适当提高床温，大约 870°C ）

6. 简述 CFB 锅炉对新兴城市的技术和节能、环保意义。（答案：新兴城市的基础设施建