

# 循环流化床锅炉的启动调试与安全运行

西北电力建设集团公司 党黎军 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 循环流化床锅炉的启动调试与安全运行

西北电力建设集团公司 党黎军 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书介绍了循环流化床锅炉的启动、调试技术及安全运行方法。内容主要包括：循环流化床锅炉技术的发展概况，流化床的基本概念，循环流化床锅炉原理及关键控制，循环流化床锅炉的设计、安装、调试与运行之间的协调，循环流化床锅炉的启动与运行调节，循环流化床锅炉运行事故与防止、运行优化和设计改进技术等。

本书可作为从事流化床锅炉研究、设计、安装、调试、运行、检修等方面的技术人员和管理人员的必备参考书，也可作为高等学校热能与动力工程专业师生和相关培训班人员的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

循环流化床锅炉的启动调试与安全运行/党黎军编  
著. -北京: 中国电力出版社, 2002

ISBN 7-5083-0968-5

I. 循… II. 党… III. ①流化床-锅炉-调试②流化床-锅炉-运行 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 012583 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>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2002 年 8 月第一版 2005 年 8 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 415 千字

印数 17001—20000 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 序 言

循环流化床技术是煤洁净燃烧发电的核心技术。循环流化床电站以其优良的环保性能、优越的调峰经济性、良好的煤种适应性和高效的劣质燃料燃烧，以及较高的灰渣综合利用价值，在国内外发电行业中，对煤粉燃烧发电形成了强大竞争力，特别是在老厂改造方面更有着独特的优势，因此近年来发展迅速。作为一项新型燃烧技术，循环流化床理论的研究深度还远远不能满足工程应用发展的需要。大量实验室研究结果与商业应用之间还存在着差异；循环流化床商业应用的迅速与指导循环流化床商业应用的技术与管理标准的缺乏和落后存在突出矛盾；一些不利于循环流化床商业应用的做法需要纠正；关于循环流化床锅炉的运行特性、启动与运行安全性、设备运行限制条件，还需要进一步探索。我们在从事循环流化床电站工程建设中，深切体会到，需要有一本书能反映循环流化床电站锅炉运行安全和改进效果，来指导我们的工程实践，避免可能发生的事故，处理遇到的紧急情况。经过多年工业实验和工程实践，通过引进、吸收国际先进设计和运行管理思想与标准，并通过调查和走访用户，吸取和分析了大量的事故教训，吸收了诸多成功的经验，我们从用户的角度分析、认识循环流化床燃烧技术，形成了一些看法，编成本书。希望本书能为循环流化床燃烧技术的健康发展做一些贡献，为广大用户和从事循环流化床锅炉运行、设计、制造、安装、调试、工程管理与监理的专业技术人员、科研工作者和热能与动力工程专业学生提供帮助。

本书是在西北电力建设集团公司的支持下完成的。在编写过程中得到了西北电力建设集团公司何怀兴、薛奇和工程管理部的各位同事，西安交通大学博士生导师陈钟颀教授、温龙教授、李军教授、邢秦安高级工程师，清华大学岳光溪教授，国家电力公司李光华高级工程师，国家电力公司热工研究院邓世敏博士、刘振琪先生以及中国电力出版社编辑的大力支持。全书由姚惠珍同志完成终稿的修订工作，在此一并致谢。

由于成书仓促，加之作者水平所限，书中错误和不足之处敬请读者批评指正。

作者：党黎军

2001年5月于西安

# 目 录

## 序言

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第一章 循环流化床锅炉技术的发展概况 .....          | 1   |
| 第一节 CFB 的起源与发展简况 .....            | 2   |
| 第二节 循环流化床锅炉的主要炉型 .....            | 3   |
| 第三节 国外 CFB 的发展 .....              | 7   |
| 第四节 国内循环流化床锅炉技术的进展 .....          | 16  |
| 第二章 流化床的基本概念 .....                | 18  |
| 第一节 流态化的现象和定义 .....               | 18  |
| 第二节 宽筛分颗粒分类与特性 .....              | 24  |
| 第三节 颗粒在流化床内的受力与运动 .....           | 25  |
| 第四节 临界流化速度及床层阻力特性 .....           | 29  |
| 第五节 颗粒的夹带与扬析及饱和携带 .....           | 34  |
| 第六节 气固流态化分类及过渡准则 .....            | 36  |
| 第三章 循环流化床锅炉原理及关键控制 .....          | 54  |
| 第一节 循环流化床锅炉原理 .....               | 54  |
| 第二节 燃烧方式的比较 .....                 | 56  |
| 第三节 循环流化床锅炉的燃烧、传热与脱硫 .....        | 57  |
| 第四章 循环流化床锅炉设计、安装、调试与运行之间的协调 ..... | 90  |
| 第一节 业主和运行人员对循环流化床锅炉的要求 .....      | 90  |
| 第二节 主要参数的选择 .....                 | 93  |
| 第三节 循环流化床锅炉的设计 .....              | 106 |
| 第四节 电站循环流化床锅炉需要特别重视的工作 .....      | 116 |
| 第五节 典型电站循环流化床锅炉的设计与运行效果 .....     | 128 |
| 第五章 循环流化床锅炉的启动与运行调节 .....         | 148 |
| 第一节 启动前的准备工作 .....                | 148 |
| 第二节 启动和停炉顺序及关键控制 .....            | 157 |
| 第三节 循环流化床锅炉的启动 .....              | 168 |
| 第四节 系统的投入 .....                   | 182 |
| 第五节 运行调整 .....                    | 193 |

|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 第六节         | 停炉、压火与热态再启动 .....               | 211        |
| <b>第六章</b>  | <b>循环流化床锅炉运行事故与防止 .....</b>     | <b>215</b> |
| 第一节         | 预防循环流化床锅炉的燃烧事故 .....            | 217        |
| 第二节         | 预防循环流化床锅炉耐火材料塌落事故 .....         | 222        |
| 第三节         | 提高返料器工作可靠性 .....                | 226        |
| 第四节         | 防止冷渣器事故 .....                   | 229        |
| 第五节         | 受热面磨损爆管事故及风帽磨损事故的预防 .....       | 232        |
| 第六节         | 避免其他运行事故的措施 .....               | 238        |
| 第七节         | 选用非金属膨胀节处理循环流化床锅炉的膨胀与密封问题 ..... | 241        |
| <b>第七章</b>  | <b>运行优化和设计改进 .....</b>          | <b>246</b> |
| 第一节         | 优化运行提高 CFB 锅炉的可用率和性能 .....      | 246        |
| 第二节         | 循环流化床锅炉的密封风设计 .....             | 253        |
| 第三节         | 循环流化床锅炉送风系统的合理设计 .....          | 255        |
| 第四节         | 循环流化床锅炉主蒸汽超温原因及改进分析 .....       | 260        |
| <b>参考文献</b> | .....                           | <b>265</b> |

## 第一章

# 循环流化床锅炉技术的发展概况

我国是一个以煤炭为主要能源的国家。1990年,我国的能源供应为13.024亿t标准煤,其中,煤炭供应7.71亿t标准煤(煤炭产量为1080Mt),占一次能源比例的59.2%。根据预测,到2020年,我国的能源消耗将达到25.06亿t标准煤,其中,煤炭消耗占59.8%左右。我国一次能源以煤炭为主的局面在今后50年内不会改变;我国电力工业的发展对煤炭的消耗量也将快速增长;在我国的发电能源结构中,燃煤发电占主导地位的格局近期不会改变。

电力工业是我国国民经济的基础产业。电力工业的技术水平、规模和发展速度对经济、环境和社会的协调及可持续发展起着非常重要的作用。总体而言,在我国的电力生产中,燃煤发电技术水平相对落后。1999年,全国发电煤耗仍然为399g/(kW·h),局部地区高达490~510g/(kW·h);燃煤发电直接污染仍然较大,以SO<sub>2</sub>为例,近年排放量在520~680万t/a,其中,火电厂燃煤排放的SO<sub>2</sub>占全年总排放量的30%。SO<sub>2</sub>排放造成的酸雨问题已相当严重。伦敦是最早出现光化学烟雾的城市,在此之后,洛杉矶出现光化学烟雾,上海在1995年也出现了光化学污染。1989年,在乌鲁木齐市和西安市都出现过持续16天以上的弥天烟雾天气。我国南方29个城市,特别是西南地区,遭受酸雨危害严重。我国每年因酸雨危害而造成的农业损失在24亿元以上。因此,采用先进的洁净煤发电技术,是可持续发展战略对电力工业的必然要求。我国已把洁净煤发电技术列为中长期科技发展规划的重点,为跨世纪五大科技先导工程之一。国家电力公司已开展了AFBC(常压循环流化床)电站、PFBC(增压流化床联合循环)电站、PC+FGD(煤粉炉+烟气处理装置)电站以及IGCC(整体煤气化联合循环)电站的示范工程建设,一切均是为电力工业的可持续发展作技术准备,以适应电力市场的竞争和日益严格的环保要求。

从世界范围看,70年代初中东战争引发的石油危机,造成石油价格暴涨,给世界带来了巨大的影响和冲击,以石油为主的能源结构因此受到了严重威胁。西方主要工业国家从本国经济发展和国家安全的战略角度考虑,推行能源多样化的政策,并鼓励发电行业燃料多样化。煤炭以其储量大、价格稳定、易于获得等诸多优点而再次受到重视,但煤在燃烧过程中对环境造成的影响也是一个不容忽视的问题。因此,各国政府在考虑利用储量丰富的煤炭资源的同时,积极推动清洁煤技术的研究与开发工作。经过几十年的发展,在不同形式的清洁煤发电技术中,整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术由于具有效率高、对煤种的适应性广、环保指标好、副产品可再利用,且不会对环境造成二次污染等特点而被公认为21世纪最有发展前途的一种清洁煤发电技术,循环流化床煤气发生器是其核心设备。就目前的经济发展水平和环境保护要求而言,循环流化床锅炉与带烟气净化装置的煤粉炉是当前已经成熟的、商业运行中首先选用的两项洁净煤发电技术。循环流化床锅炉的经济性和安全性相比较而言更有优势,因此发展迅速。

循环流化床燃烧 (CFBC) 技术作为一种新型、成熟的高效低污染清洁技术, 具有许多其他燃烧方式不具备的优点。

(1) 循环流化床 (CFB) 可以实现中温燃烧, 因此, 氮氧化物的排放量远低于煤粉炉, 仅为  $200\text{mg}/\text{m}^3$  左右; 同时, 可实现在燃烧过程中直接脱硫, 且脱硫效率高, 技术设备经济简单, 因此, 其脱硫的初投资及运行费用远低于煤粉炉中加烟气脱硫 (PC + FCD)。

(2) 燃料适应性广, 且燃烧效率高, 特别适合于低热值劣质煤。

(3) 排出的灰渣活性好, 易于实现综合利用, 无二次灰渣污染。

(4) 负荷调节范围大, 在  $30\% \sim 100\%$  MRC 下, 可以稳定燃烧, 无需助燃油支持。

(5) 可以实现压火热备用, 这样, 在热启动时, 在床温大于  $650^\circ\text{C}$  的条件下可以直接投煤运行, 低负荷运行安全性好, 适合于调峰运行。

在我国目前环保要求日益严格、电厂负荷调节范围较大、煤种多变、原煤直接燃烧比例高、国民经济发展水平不平衡、燃煤与环保的矛盾日益突出的情况下, 采用循环流化床锅炉已成为首选的高效低污染的新型燃烧技术。

目前, 国外大型循环流化床锅炉主要有两大流派, 一是以德国的 Lurgi Lantjes Babcock (LLB)、法国的 Stein 和 ABB-CE 等公司为代表的鲁奇 (Lurgi) 派, 二是以美国的 Foster Wheeler (FW)、芬兰的 Alstom 等公司 (后者于 1995 年为前者所兼并) 为代表的 FW Pyropower 派。这两大类别的循环流化床锅炉出力均为  $300 \sim 700\text{t}/\text{h}$ 。目前已投运的最大的 CFB 锅炉是法国 Stein 公司为 Gardanne 电厂制造的配 250MW 机组的  $700\text{t}/\text{h}$ 、 $16.3\text{MPa}$ 、 $565/565^\circ\text{C}$ , 燃高灰分、高硫烟煤和高硫渣油锅炉, 锅炉效率为  $90.5\%$ , 脱硫率为  $97\%$ ,  $\text{NO}_x$  排放量低于  $250\text{mg}/\text{m}^3$ 。FW 公司生产并投运的大型 CFB 锅炉有加拿大的 Scotia 电厂的  $525\text{t}/\text{h}$  锅炉 ( $180\text{MW}$  机组), 已于 1993 年 5 月投运, 波兰的 Turow 电站配  $235\text{MW}$  机组锅炉, 两台  $300\text{MW}$  CFB 电站在美国 JEA 的北部电厂正在建设中, 计划于 2002 年投运。ABB-CE 公司生产的燃用无烟煤的  $220\text{MW}$  CFB 锅炉已在韩国东海电厂投运。

## 第一节

### CFB 的起源与发展简况

流化床的概念最早出现在化工领域。1921 年 12 月, 德国的 Friz Winkler 发明并成功地投运了流化床。他将燃烧产生的烟气引入一台装有焦炭颗粒的炉子的底部, 观察到了固体颗粒因受气体的阻力而被提升, 炉内颗粒看起来像沸腾的液体。1938 年 12 月, 麻省理工学院的 Warren K. Lewis 和 Edwin R. Gilliland 在流化床催化裂化过程 (FCC) 工艺设计中发明了快速流化床。1942 年 5 月 25 日, 美国新泽西标准石油公司 (Standard Oil of New Jersey) 在 Baton Rouge 炼油厂投运了一台快速流化床, 并在 1942 年年底又投运了几台这种装置。由于设计原因, 设备在除尘、固体物料在炉膛内停留时间的控制以及再热器等方面都存在问题。因为战争方面的迫切需要, 工业界已改用了低速鼓泡流化床的设计。战争结束后, 低速鼓泡流化床便成为流化床的主要形式。

50 年代, M. W. Kellogg 公司在南非 Sasolburg 的 Fischer Tropsch 投运了 Saso 费—托反应器。60 年代末, 德国 Lurgi 公司投运了 Lurgi/VAW 氢氧化铝焙烧反应器。循环流化床正式进入工业应用阶段。1971 年, Reh 提出了循环流化床的流态图, 并描述了循环流态化的基本特征。

1976 年, Yerushalmi 等首次提出了快速流态化的概念。

70 年代的能源危机和 80 年代的环境保护运动推动了循环流化床燃烧技术的发展。Lurgi 公司 Reh 等人提出了两种循环流化床锅炉结构图并申请了专利。1977 年, 芬兰 Ahlstrom 运行了一台直径 0.79248m、高 7.0104m 的 CFB 试验装置, 燃用泥煤、废纸屑、废木和煤来产生蒸汽。第一台商业规模的 CFB 锅炉出现在 1979 年, Foster Wheeler (原芬兰 Alstrom 公司) 在 Pihlava 投运了一台 5MW 的 CFB。1981 年 Kauttua 投运了一台 20MW 的 CFB。1985 年 11 月 Lurgi 公司和 Babcock 公司制造的 270t/h CFB 在 Duisburg 投运, 使 CFB 在电站锅炉领域的发展更为迅速。1987 年, 美国第一台大型 CFB 在 Colorado Ute 的 Nucla 电厂投入运行, 锅炉出力为 420t/h、110MW, 由 Foster Wheeler (奥斯隆 Pyropower) 制造。1995 年 11 月, 250MW CFB 在法国 Provence 电厂投运, 标志了 300MW 以下级的 CFB 技术的成熟。美国 JEA 的北部电厂正在建设 2×300MW 的 CFB 电厂, 计划分别在 2002 年 1 月和 5 月投产。

中国为了解决劣质燃料燃烧问题, 在 60 年代开始了流化床锅炉的研究工作。1965 年, 在广东省茂名市投运了一台 14t 的流化床锅炉。1970 年以后, 燃煤供应紧张, 煤质下降, 工业锅炉应用部门纷纷进行锅炉改造。为适应当时的形势, 1976 年后, 工业锅炉制造厂大力发展燃用劣质煤锅炉。到 1979 年, 共发展了 56 种规格的锅炉, 大部分是沸腾炉。但因为燃烧效率低和飞灰含炭量高, 沸腾炉发展缓慢。广东江门甘蔗化工厂的 50t/h、3.82MPa、450℃燃煤锅炉于 1971 年 12 月改为流化床锅炉, 运行情况良好, 为国内流化床锅炉的发展提供了宝贵经验。80 年代初, 燃烧煤矸石的 35t/h 和 130t/h 的流化床锅炉的投运使中国燃煤流化床技术一度在国际上处于先进水平。CFB 的研究开始于 80 年代初。1989~1991 年初, 首批 35~75t/h 的 CFB 投入运行。由于产品设计和循环流化床锅炉的理论发展落后的原因, 运行问题较多。经国家组织的完善化研究后, CFB 在 90 年代中后期得以快速发展。1994 年, 两台 50MW CFB 在大连化工厂投产; 1996 年, 从芬兰引进的 410t/h CFB 在内江投产, 外商独资的镇江纸业也引进投产了几台 410t/h 和 220t/h CFB, 白马电厂引进的 300MW CFB 正在建设之中。

## 第二节

### 循环流化床锅炉的主要炉型

循环流化床锅炉的主要炉型有三种 (见图 1-1): 德国 Lurgi 公司的 Lurgi 型、原芬兰 Ahlstrom 公司 (现为美国 Foster Wheeler 公司) 的 Pyroflow 型和德国 Babcock 公司研制的 Circofluid 型。

另外, 还有 MS FBC 炉型与 Lurgi 型炉型相近, 区别在于分离物料全部进入外置床, 外置床分冷、热段。瑞典 Studsvik 公司与美国 B&W 公司于 1984 年合作开发了 Studsvik/Bakcock 型炉型, 与 Pyroflow 型炉型相近, 只是分离器用了迷宫式。美国 B&W 公司的 IR 型循环流化床锅炉在尾部烟道还增加了一级分离器, 其发展势头强劲。

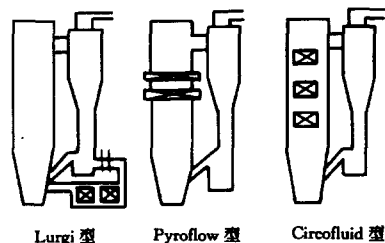


图 1-1 各种循环流化床燃烧装置

#### 一、FW 技术循环流化床锅炉

##### 1. FW Pyroflow 型循环流化床锅炉 (原 Ahlstrom 公司)

此型循环流化床锅炉大型化始于 1987 年的 Colorado Ute 420t/h 循环流化床锅炉。到目前为止,投运的循环流化锅炉,比较有代表性的是中国内江发电总厂的 410t/h CFB 锅炉、加拿大新斯可舍的 165MW 机组锅炉和波兰 Turow 电厂两台 235MW 机组的 CFB 锅炉。计划投运的循环流化床锅炉还有波兰 Turow 电厂的 1 台 235MW 和 3 台 260MW 机组的锅炉、AES 波多黎哥的 850t/h 锅炉以及美国 JEA 北部电厂 2 台 300MW 锅炉等。

主要技术特点如下:

- (1) 系统不设置灰冷却器,高温分离器分离下来的粒子直接由流化风送回燃烧室。
- (2) 燃烧室上部布置有  $\Omega$  形板形屏式过热器或再热器及翼墙。 $\Omega$  形管屏与气固流的接触面是一平面,气固流沿平坦的表面流动,可以较好地防止磨损。对于翼墙,由于气固流的流动方向是沿着管子的轴线,因而翼墙表面也不易磨损。
- (3) 利用除尘器捕捉下来的冷灰作为飞灰再循环,同时也作为调节燃烧室床温的主要手段。
- (4) 采用猪尾巴 (pigtail) 形风嘴,可以防止风帽形风嘴的磨损及流化恶化。
- (5) 裤衩形回料管的设计使得煤、脱硫剂及循环物料在床面上能比较均匀地分布。

## 2. FW 带 Intrex™ 流化床热交换器锅炉

NISCO 电厂 100MW 机组锅炉采用了 Intrex™ 流化床热交换器,300MW 级循环流化床锅炉预计采用整体式再循环热交换器 (Intrex™)。

主要技术特点如下:

- (1) 采用汽—水冷旋风筒。
  - 1) 采用顶部悬吊和燃烧室一起往下自由膨胀的结构,使热膨胀减小到最小,同时简化了燃烧室—旋风筒、旋风筒—尾部受热面连接处的机械设计量;
  - 2) 旋风筒可作为受热面的一部分;
  - 3) 可减少保温层的厚度,减轻重量,降低外表面的温度,减少散热损失;
  - 4) 有利于锅炉的快速启动;
  - 5) 旋风筒可在工厂预制成扇形,简化现场安装。
- (2) 采用倒 L 形风帽和水冷布风板。
- (3) 尾部受热面采用常规煤粉锅炉采用的标准设计及传统的平行双烟道受热面设计。
- (4) 采用整体式再循环热交换器 (Intrex™)。本设计采用了 Foster Wheeler 公司独特的整体式再循环热交换器 (Intrex™)。它实际上是一个采用非机械方式使固体转向的鼓泡硫化床。床内布置了蛇形管过热器等受热面,床料大小为  $200\mu\text{m}$  左右,流化速度为  $0.15 \sim 0.46\text{m/s}$ ,故不用担心管子磨损。整体式再循环热交换器由引入通道、主室和固体返回通道 (SRC) 组成,如图 1-2 所示,每个分离器配一个 Intrex™。采用 Intrex™ 流化床热交换器可以降低燃烧室高度,节约了受热面和钢材。整体式再循环热交换器的主要特点还有:
  - 1) 采用整体式水冷结构,Intrex™ 采用燃烧室使用的同一种膜式水冷壁结构和顶部悬吊结构,它和其他承压部件以同一比率向下膨胀;
  - 2) 固体转向采用非机械方式,高低风帽大体上用作流化开关,它可使 Intrex™ 进入旁路操作方式,从而避免使用高温机械阀;
  - 3) 固体返回通道 (SRC) 的设计,使固体颗粒均匀地通过燃烧室后墙上的每一个开口,并防止粗颗粒返回 Intrex™ 床;

4) 正常运行时无需采取任何措施控制固体粒子流量。

### 3. FW 公司的 Pyroflow Compact 型

Pyroflow Compact 型的主要特点如下:

(1) 采用膜式壁构成方形分离器, 内装涡旋发生器。

(2) 方形壁表面涂一薄层耐火耐磨层, 外部保温以减少热损失。

(3) 分离器与炉膛间免除膨胀节。

(4) 紧靠炉膛布置, 使布置简化, 方便了返料系统的设计与布置。

该型炉于 1989 年提出方案, 1992 年底在芬兰 Kuhmon 投运, 到 2000 年已有 30 台 Compact 投运。

### 二、Lurgi 技术的循环流化床锅炉

Lurgi 型循环流化床锅炉的发展始于世界上第一台 100MW 机组的 Duisburg 循环流化床锅炉。该锅炉具有外部流化床换热器, 在 1989 年原西柏林投运了第二台电厂循环床锅炉, 电功率为 110MW。此台锅炉是在 Duisburg 循环流化床锅炉的基础上发展和完善的, 称为第二代 Lurgi 型循环流化床锅炉。

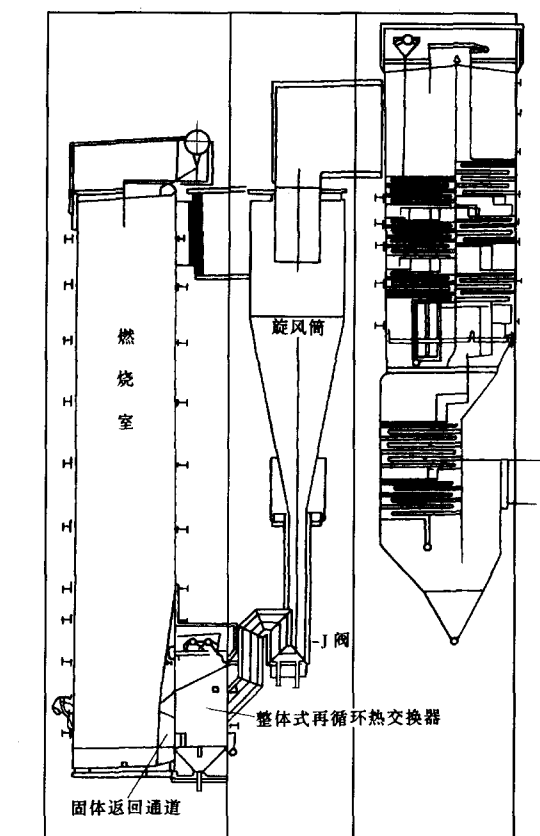


图 1-2 CFB 锅炉

Lurgi 型锅炉在法国得到了进一步的发展。法国电力公司对燃烧高硫煤和对煤粉锅炉的高效低污染排放改造非常重视。法国 Stein 工业公司于 1984 年与德国 Lurgi 公司签定了合作协议, 引进 Lurgi 型循环流化床锅炉技术, 并按照三个阶段发展循环流化床锅炉。第一步是将 Emile Huchet 电厂的一台 125MW 机组煤粉锅炉改造成燃烧洗煤泥的循环流化床锅炉, 并于 1990 年投运, 运行情况良好。第二步是将 Gardanne 电厂的一台 250MW 机组煤粉锅炉改造成循环流化床锅炉, 并燃烧当地的高硫煤, 该锅炉已于 1996 年投入商业运行。第三步是目前正在进行的, 发展 400、600MW 等级的循环流化床锅炉, 预计近几年内即可投入运行。

到目前为止, 容量大于 60MW 的该型锅炉大约有 25 台之多。最大容量为 1996 年 4 月投入运行的位于法国南部 Gardanne 电厂的 250MW 机组循环流化床锅炉。

图 1-3 为带外置换热器的循环流化床锅炉流程图。其主要技术特点是设置有专门的循环灰冷灰床。冷灰床是一个流化床式换热器, 床内布置有部分过热器和再热器, 通过控制锥形阀可以调节通过冷灰床的物料量, 从而达到控制过热汽温、再热汽温和床温的目的。

第一代 Lurgi 锅炉的燃烧室内没有布置受热面, 第二代锅炉上则布置了水冷受热面。

### 三、Babcock 公司开发的 Circofluid 型循环流化床锅炉

该型锅炉的主要技术特点如下:

(1) 烟气速度较低, 限制在  $3 \sim 3.5\text{m/s}$ 。

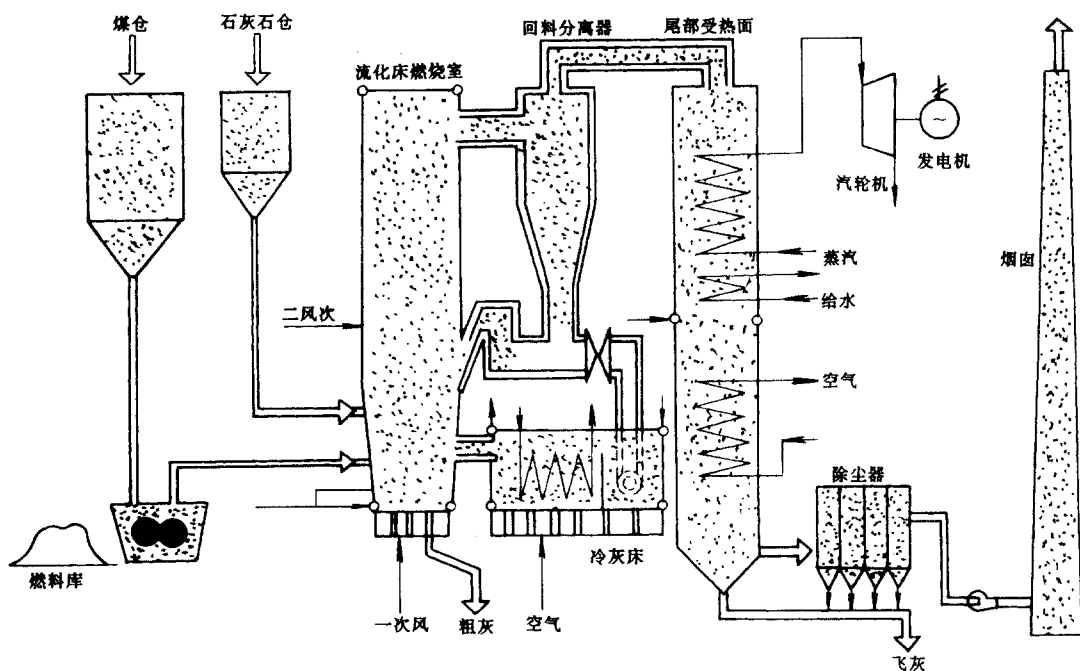


图 1-3 带外置换热器的循环流化床锅炉流程

(2) 由于烟气速度低，故在整个流化床燃烧室内布置有膜式水冷壁、蒸发受热面、过热器和省煤器等。锅炉呈塔式布置，出口烟气温度被冷却至约 300℃。

(3) 取消高温分离器，以中温分离器代之，故尺寸大大缩小。

(4) 循环倍率较低，约为 10~20 倍。

(5) 由于烟气速度低，炉膛断面热负荷较低，故目前运行的锅炉容量都较小，而且不易大型化。

到目前为止，该型最大容量锅炉为 1992 年在德国 Goldenburg 电厂投运的 290t/h 循环流化床锅炉。图 1-4 为 Circofluid 型循环流化床锅炉工艺流程图。

#### 四、循环流化床锅炉的大型化发展

随着锅炉容量的进一步增大，机组功率达到 400~600MW 时，燃烧室的包覆受热面积相对减小。这就从本质上带来了随循环流化床锅炉容量的增大，可容布置的受热面积减小的问题。为了解决循环流化床锅炉大型化中燃烧室内受热面布置的问题，不同的炉型采取了不同的措施。

Lurgi 型循环流化床锅炉从第一台 100MW 级 Duisburg 循环流化床锅炉上就采取了冷灰床（外部流化床换热器 EXE）。Foster Wheeler 大型循环流化床锅炉采取了 Intrex™ 流化床换热器。ABB CE 大型循环流化床锅炉采用了 Flextech 流化床换热器。

这些不同形式的内外部流化床换热器中布置了过热器和再热器，解决了锅炉燃烧室内受热面布置不下的问题。

Foster Wheeler Pyropower 锅炉公司（原属芬兰 Ahlstrom 公司）采取在燃烧室上部布置 Ω 形和翼片式管屏过热器、再热器受热面或部分蒸发受热面，在 400、600MW 级的循环流化床锅

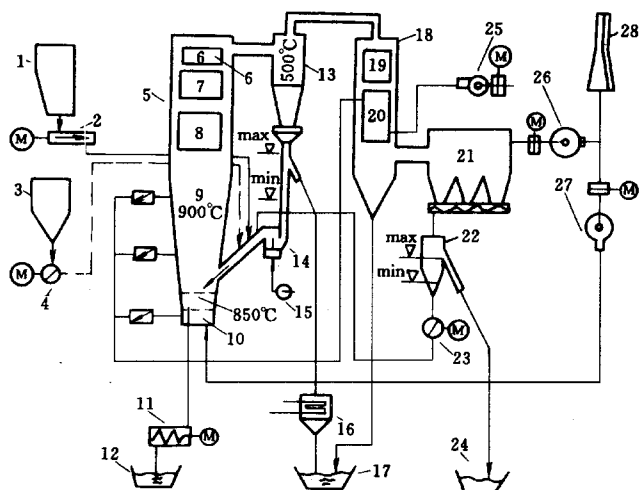


图 1-4 Circofluid 型循环流化床锅炉工艺流程

1—煤仓；2—给煤机；3—石灰石仓；4—给石灰石机；5—炉膛；  
6—省煤器；7—过热器；8—蒸发受热面；9—燃烧室；10—风室；  
11—排渣机；12—床料库；13—分离器；14—返料器；15—返料风  
机；16—循环灰冷却器；17—循环灰库；18—尾部烟道；19—省煤  
器；20—空气预热器；21—除尘器；22—飞灰循环仓；23—飞灰循环  
给灰机；24—飞灰库；25—送风机；26—引风机；27—烟气再循环风  
机；28—烟囱

炉燃烧室内还需布置全高度分隔式受热面。然而，随着循环流化床锅炉向 600MW 大容量的发展，外部流化床换热器（EXE、Intrex™、Flextex）的数量和体积将会给锅炉的整体布置带来问题。

Foster Wheeler 能源公司和 GEC Alsthom Stein 工业公司正在开展这方面的研究工作。他们的研究重点都集中在发展炉内流化床换热器上。

### 第三节

### 国外 CFB 的发展

经过近 20 年的迅速发展，国外循环流化床锅炉的技术已趋于成熟。无论是锅炉本身的大型化，还是各种配套技术和设备，都已经能适应用户的各种不同要求。对环境保护要求的日益严格促进了国外循环流化床锅炉的迅速发展，因而在某种程度上循环流化床锅炉的理论研究显得相对落后一些。近年来，由于能源形势的改善（油、气供应的宽松），其他洁净煤燃烧技术的发展以及人们对室温气体的关心，不少国家循环流化床锅炉的发展有所减缓，这就使相对落后的循环流化床锅炉的理论研究能够尽快开展。

国外循环流化床锅炉技术已经形成了几个各具特色的主要炉型（或流派）。它们是：

（1）鲁奇炉型。鲁奇公司是最早生产循环流化床锅炉的公司之一，其循环流化床锅炉的特点是采用高循环倍率（高速）、高温旋风分离器和外置流化床热交换器。目前，这种循环流化床锅炉的大型化问题已顺利解决。最大容量锅炉是法国普罗旺斯电厂配 250MW 机组的

700t/h 亚临界压力循环流化床锅炉，该锅炉已于 1995 年投入运行。

表 1-1 FW 公司 CFB 锅炉大型化一览表

| 电 厂          | 启动年份 (年) | 容 量 (MW) |
|--------------|----------|----------|
| Pilot        | 1976     | 0.5      |
| Pihlava      | 1979     | 5        |
| Kauttua      | 1981     | 20       |
| Colorado Ute | 1987     | 110      |
| Rajaani      | 1989     | 80       |
| Seinajoki    | 1990     | 125      |
| Nova Scotia  | 1993     | 165      |
| Turow        | 1998     | 235      |
| Jacksonville | 2003     | 300      |

(2) FW Pyroflow 型奥斯隆炉

型。这是由原芬兰的奥斯隆公司最早生产循环流化床锅炉，其特点是采用高循环倍率和高温旋风分离器，在炉膛内可布置少量受热面但不设外置流化床交换器。这种循环流化床锅炉的大型化问题也已顺利解决，已有各种容量的大型电站锅炉在世界各地（包括我国四川内江）运行，见表 1-1。

(3) 福斯特—惠勒炉型。它与奥斯隆炉型相近，其主要不同在于使用水冷高温旋风分离器和在大型亚临界（或超高压）锅炉上采用特殊的循环灰—过热蒸汽热交换器。这种炉型最大容量的锅炉是装在美国宾夕法尼亚州约克郡的 783t/h（配 250MW）亚临界压力循环流化床锅炉，该锅炉已于 1997 年上半年投入商业运行。在建设中的 JEA 北部电厂 2×300MW CFB 计划于 2002 年投运。

(4) 巴特利炉型。这是美国巴特利试验室开发的一种多固体循环流化床锅炉，其特点是采用专门的惰性固体作床料，且其密相区下部不布置受热面，因而对煤的粒度要求不高。按其设计意图，大颗粒煤（如 20mm 或更大）可通过不断循环使其燃尽。这种炉型的最大容量是日本三井的 300t/h 多固体循环流化床锅炉。目前采用这种炉型的用户较少。

(5) 德巴（德国巴高克）CIRCOFLUID 炉型。这是德巴在欧洲共同体资助下开发的一种低速（低倍率）循环流化床锅炉，其设计意图是尽可能将鼓泡床和高速循环床的优点很好地结合起来，其特点是采用低的循环倍率和中温（400~500℃）旋风分离器。锅炉采用塔式布置，分离器前、炉膛稀相区的上方布置大量对流受热面。这种锅炉的结构相对简单，但对大型化，特别是对再热器的布置，还需要研究。目前，最大容量的这种锅炉是装在捷克的燃褐煤的 350t/h 高压电站锅炉。

(6) 美国巴威的内循环炉型。这种锅炉采用高速床和两级分离器。炉膛出口前后的高温区装有两组槽型（惯性）分离器作为第一级分离，而分离下来的飞灰将在炉膛上部形成内部循环。据介绍，其累计分离效率可达 97.5%。锅炉尾部省煤器之后还有一个多管（旋风）分离器作第二次分离。这种锅炉的结构相对简单，其布置更接近传统的煤粉锅炉。目前，最大容量的这种锅炉是装在美国宾夕法尼亚州的燃高灰分煤的 210t/h 高压循环流化床锅炉。该公司已完成了几台 100~200MW 级的电站 IR-CFB 设计，可以提供 170MW 级的产品，并正在开发 350MW 级的 CFB。

表 1-2 世界上 CFB 市场份额（1999 年 11 月）

| Foster Wheeler | ABB   | GEC/Alstomstein | Kvaerner | Lurgi/Lentjes | Deutsche Babcock | 其他   |
|----------------|-------|-----------------|----------|---------------|------------------|------|
| 47%            | 14.5% | 8.5%            | 8%       | 7.7%          | 4.5%             | 9.8% |

世界上循环流化床锅炉的生产情况如表 1-2 所示。下面列举几台国际上流行的 CFB 电

站。

### 1. 美国纽克拉 (Nucla) 电厂 110MW 循环流化床锅炉

纽克拉电厂位于美国的科罗拉多州, 最初电厂有三台链条炉机组, 每台机组发电容量为 12.5MW。由于电厂效率低, 维护费用高, 有关方面于 1984 年决定用一台 420t/h 循环流化床锅炉来更新原来的链条炉, 并且在保留原来三台汽轮机的基础上增加一台新的 74MW 汽轮机, 使电厂的总发电容量达到了 110MW。

纽克拉电厂的循环流化床锅炉由奥斯隆 Pyropower 公司制造。图 1-5 为循环流化床锅炉的侧视图和顶视图。锅炉蒸发量为 420t/h, 蒸汽参数为 10.4MPa/540℃, 双炉膛设计, 炉膛高度约为 33.5m, 炉膛截面为 6.9m × 7.4m。每个燃烧室均有独立的燃料、风、石灰石和出灰系统, 但共用一个汽包和水—汽循环回路。每个炉膛的前墙有两个给煤点, 还有一部分煤从返料器中给入。该锅炉采用重力给煤, 石灰石则用气力输送法给入炉膛。炉膛上部布置有辐射过热器。旋风分离器的直径为 7m, 内衬有 0.3m 厚的隔热材料和耐磨材料。从两个旋风分离器出来的烟气进入共同的对流烟道, 依次通过过热器、省煤器和管式空气预热器, 然后经布袋除尘器送至烟囱排入大气。分离器分离下来的固体物料用回路密封器 (loop seal) 送回炉膛。

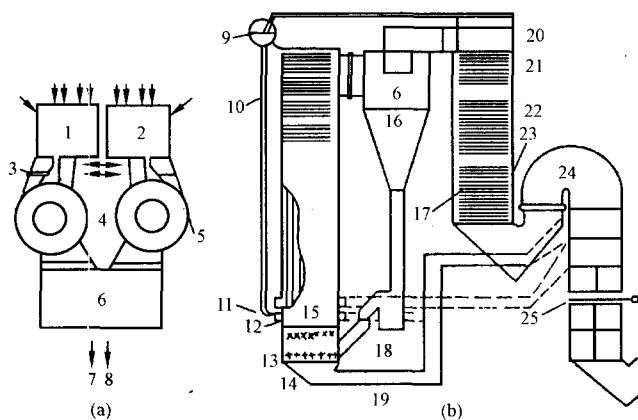


图 1-5 纽克拉循环流化床锅炉

(a) 顶视图; (b) 侧视图

- 1—燃烧室 B; 2—燃烧室 A; 3—膨胀节; 4—回路密封器; 5—旋风分离器; 6—对流烟道; 7—给石灰石; 8—给煤; 9—汽包; 10—下降管; 11—煤; 12—石灰石; 13—布风板; 14—风室; 15—水冷却; 16—旋风分离器; 17—吹灰器; 18—回路密封器; 19—点火燃烧器; 20—对流烟道; 21—末级过热器; 22—初级过热器; 23—省煤器; 24—空气预热器; 25—吹灰器

机组于 1985 年开始安装, 1987 年 5 月并网, 6 月首次投煤运行。1988 年到 1991 年 1 月美国能源部和电力研究院在该循环流化床锅炉上进行了 45 次试验, 结果表明, 锅炉的运行性能良好, 污染物排放远低于环保标准值, 环保性能良好。

### 2. 法国艾米吕希 (Emile Huchet) 电厂的 125MW 循环流化床锅炉

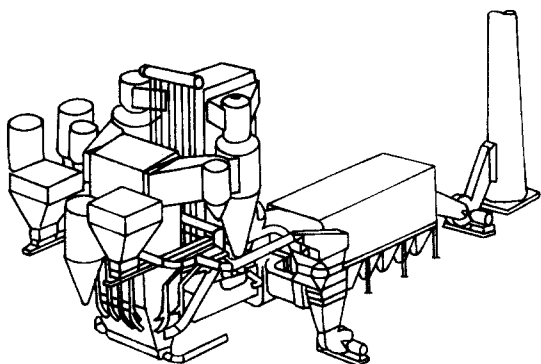


图 1-6 Emile Huchet 电厂循环流化床锅炉外形图

Emile Huchet 电厂位于法国的卡灵 (Carling), 隶属于法国碳公司 (CDF)。该电厂的 4 号炉原为 50 年代末期投运的 125MW 煤粉锅炉, 为解决该电厂附近洗煤泥的处理问题, CDF 决定将 Emile Huchet 电厂的 4 号炉改造成循环流化床锅炉。

图 1-6 为 Emile Huchet 电厂的 125MW 循环流化床锅炉的立体图。图 1-7 为锅炉的系统示意图, 该锅炉为鲁奇型循环流化床锅炉, 由燃烧室、旋风分离器 (2 只)、外置换热器 (2 只)、冷渣器、尾部对流受热面和布袋除尘器等组成。蒸汽参数见表 1-3。

循环流化床锅炉所燃用的燃料为洗煤泥和干煤, 燃料分析数据见表 1-4。当燃用洗煤泥时, 采用了煤泥燃料制备系统。

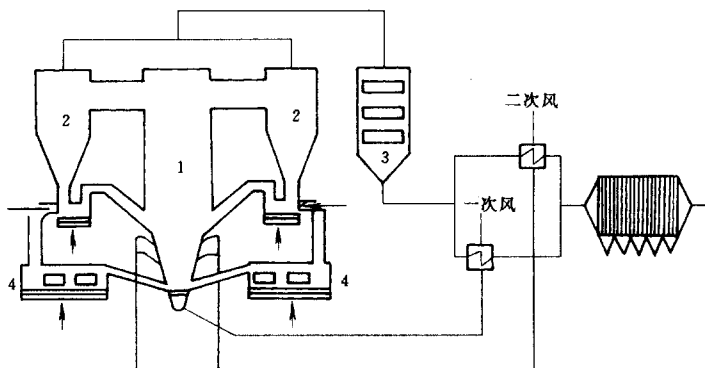


图 1-7 Emile Huchet 电厂循环流化床锅炉系统示意图

1—炉膛; 2—旋风分离器; 3—对流通道; 4—外置换热器

表 1-3 Emile Huchet 电厂循环  
床锅炉蒸汽参数

|               |      |
|---------------|------|
| 蒸发量 (t/h)     | 367  |
| 过热蒸汽温度 (°C)   | 545  |
| 过热蒸汽压力 (MPa)  | 13.4 |
| 再热蒸汽压力 (MPa)  | 3.0  |
| 再热蒸汽出口温度 (°C) | 540  |
| 再热蒸汽进口温度 (°C) | 351  |
| 给水温度 (°C)     | 242  |

表 1-4 Emile Huchet 电厂循环流  
化床锅炉燃料分析

| 项目               | 煤种    |       |
|------------------|-------|-------|
|                  | 煤泥    | 干煤    |
| 收到基低位发热量 (MJ/kg) | 10.45 | 20.27 |
| 收到基水分 (%)        | 33    | 8     |
| 干燥基灰分 (%)        | 45    | 28    |
| 干燥无灰基挥发分 (%)     | 35    | 36    |

在该电厂附近一废弃的煤矿中, 20 多年来已存积了 800 多万 t 煤泥。在燃料制备系统中, 用废弃矿井中的煤泥 (水分为 28%) 与洗煤厂新排放的煤泥经加水和部分添加剂后均匀混合, 使煤泥水分调节至 33% ~ 34%, 再经去除杂质 (粗颗粒等) 后用泵送至锅炉。

该锅炉于1987年12月28日在法国开始安装,1989年12月22日完成锅炉水压试验,1990年4月5日锅炉首次点火。1990年7月28日循环锅炉发电机组联网,三周以后发电机组达到满负荷125MW。1990年11月15日开始燃用煤泥。

在该循环流化床锅炉投运初期,遇到了以下问题:

(1) 启动时间过长。该锅炉最初设计用两只矿井瓦斯气燃烧器将床料加热至 $650^{\circ}\text{C}$ ,然后用6只瓦斯气和焦炉煤气燃烧器进一步加热,当床料温度达到 $750^{\circ}\text{C}$ 后投煤。然后在下述方面进行了改进:水冷风室敷设耐火材料,改进瓦斯气燃烧器,增加2只油燃烧器(热功率15MW)等,改进后冷态启动时间为8~10h。

(2) 振动。启动燃烧室风道和尾部受热面均有振动,但已分别通过调节空气流量和加装减振板后予以消除。

(3) 排烟温度过高。由于尾部受热面特别是一级空气预热器的积灰,使得排烟温度过高,为解决这一问题,在尾部受热面中增加了蒸汽吹灰器的数量。

1991年5月6日,在该循环流化床锅炉上进行了多次测试,测试内容及结果如下:

(1) 锅炉蒸发量。所有测试的锅炉蒸发量均能达到设计值,即 $367\text{t/h}$ 锅炉的最大蒸发量可达 $400\text{t/h}$ 。

(2) 锅炉效率在满负荷,燃用煤泥时锅炉效率达87.46%,燃用干燥煤时为89.83%。

(3) 污染物排放。该锅炉的设计保证值为 $\text{SO}_2 < 330\text{mg/m}^3$  (Ca/S为2.5), $\text{NO}_x < 300\text{mg/m}^3$ ;当地环保法规为 $\text{SO}_2 < 400\text{mg/m}^3$ , $\text{NO}_x < 400\text{mg/m}^3$ 。实测结果是 $\text{SO}_2$ 低于规定值 $150\text{mg/m}^3$  (Ca/S为2.3时), $\text{NO}_x$ 低于规定值 $250\text{mg/m}^3$  (平均值约为 $170\text{mg/m}^3$ ),粉尘排放低于规定值 $50\text{mg/m}^3$ 。

(4) 负荷变化能力。当锅炉负荷高于65%时,可达到 $4\%/ \text{min}$ 的负荷变化设计保证值,最大负荷变化率可达 $6\%/ \text{min}$ 。燃用干燥煤时,最低负荷可达设计保证值——40%负荷,燃用煤泥时最低负荷为50%负荷。

(5) 辅机功耗。测试所得的辅机功耗为9.5%。

(6) 设备可用率。运行第一年(1991年)的可用率超过了80%,1992年达到90%。

从1991年开始至1993年,法国电力公司(EDF)在该锅炉上进行了长达30周的进一步测试,分析及处理结果如下。

(1) 传热。满负荷时炉膛受热面的传热系数约为 $170\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;外置流化床换热器中的传热系数可高达 $400\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(2) 燃烧。烟气成分( $\text{CO}_2/\text{CO}/\text{O}_2$ )测试表明,在旋风分离器和尾部受热面均存在燃烧,特别是尾部受热面上所沉积的颗粒的燃烧。由于该区域烟气中氧含量低,会形成较多的一氧化碳,为控制一氧化碳排放,必须增加吹灰频率。

(3) 旋风分离器分离效率。尽管旋风分离器的内径达到7.6m,但测试表明分离器还是达到了很高的分离效率。对于直径为 $20\mu\text{m}$ 的颗粒,分离效率可达96%,当颗粒直径为 $60\mu\text{m}$ 时,分离效率可达99%。

(4) 气体污染排放。Ca/S为2~3时,满负荷时的 $\text{SO}_2$ 排放量低于 $280\text{mg/m}^3$ , $\text{NO}_x$ 的排放量随炉膛温度特别是炉膛底部的温度的升高而迅速降低,满负荷时 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放量在 $40\sim 120\text{mg/m}^3$ 范围内。

3. 法国普罗旺斯(Provence)的250MW循环流化床锅炉