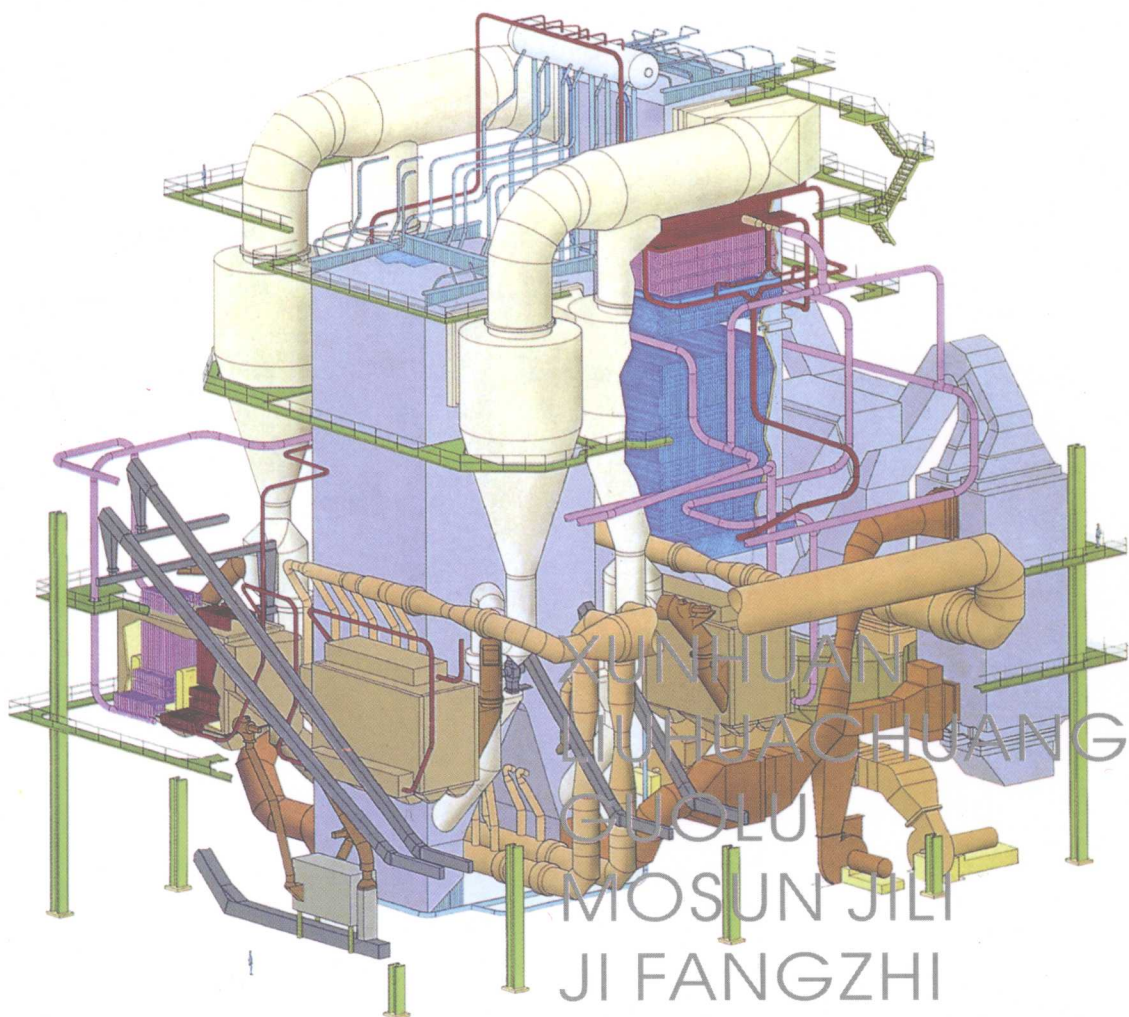




循环流化床锅炉

磨损 机理 及防治

全国电力行业CFB机组技术交流服务协作网 组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

XUNHUAN
LIUHUACHUANG
GUOLU
MOSUN JILI
JI FANGZHI

循环流化床锅炉 磨损 机理 及防治

全国电力行业CFB机组技术交流服务协作网 组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是为适应我国大型循环流化床(CFB)锅炉机组技术快速发展的需要而编写的,由5部分组成:CFB锅炉基本原理、材料的磨损与防磨、CFB锅炉金属磨损件的防磨技术、CFB锅炉用非金属耐磨材料、CFB锅炉金属件和耐火材料的磨损及预防。论述深入浅出,条理清晰,内容具有较强的工程实用性和针对性,便于读者学习和参考。

本书可作为从事 CFB 锅炉设计、安装、调试、运行和检修等工作的技术人员、管理人员的教材和参考书,也可作为大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉磨损机理及防治/全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网组编. —北京:中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6534-3

I. 循… II. 全… III. 流化床-循环锅炉-磨损-防治
IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 205986 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 3 月第一版 2008 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 267 千字

印数 0001—3000 册

定价 20.00 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

循环流化床锅炉磨损机理及防治

编委会

主任委员：郝卫平

副主任委员：郭伟 李玉生

委员：孙献斌 齐纪渝 贾永昌 石干 史然峰

审稿：刘德昌

主编：郝继红 李建锋

编委会

天津理工大学

2003年12月22日

序 言

foreword



由全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网组织编写的、我国第一部系统介绍循环流化床防磨技术的书籍《循环流化床锅炉磨损机理及防治》出版了。这是我国研究开发循环流化床燃煤技术以及动力行业运行维护循环流化床大量经验的结晶，是我国耐火材料、喷涂技术研究和生产单位经验的集成，也是全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网为我国循环流化床行业做的一件好事。

防磨耐火材料是传统炉窑的重要组成部分，金属喷涂也是早已应用在机械、发动机等行业的成熟技术。然而，循环流化床燃烧技术的发展给无机防磨和金属喷涂提供了新的挑战和发展空间。如何用已有的经验解决循环流化床的防磨问题，我国的材料工业已实践了二十余年，本书可以说是对此所作的总结。我国发展循环流化床技术初期，对循环流化床燃烧室下部和旋风分离器内部基本上借用了传统的浇注料工艺。按照当时的认识，循环流化床的温度和磨损条件均未达到冶金行业的苛刻程度，直接利用冶金行业的耐火防磨材料应该没有问题。然而事实正好相反，直接使用冶金行业的耐火防磨材料在循环流化床条件下并不完全成功。同样利用已有的耐磨金属喷涂技术处理水冷壁与防磨层交界区也存在一定问题。因此，我们在过去的 20 年中发展了一系列适应于循环流化床的耐火防磨材料，不但满足了我国循环流化床的需求，而且已经用于引进循环流化床锅炉，甚至出口到国外，使用效果和现场服务得到了高度评价。

另外值得一提的是，循环流化床防磨问题是循环流化床锅炉本体设计与材料科学相结合的多学科问题。目前，我国锅炉制造行业对于防磨设计已经积累了相当的经验，本书对此也有介绍。当然，近期我国研究单位提出除了防磨设计、防磨材料之外，对如何从循环流化床流态设计角度减少水冷壁磨损提出了新的见解。这是防磨问题的重要发展动向，相信在我国循环流化床技术持续发展的基础上，本书将会在再版中予以完善。

岳光溪

清华大学热能工程系

2007 年 12 月 25 日



前言

preface

目前,我国已经成为世界上循环流化床锅炉机组数量最多、总容量最大、发展速度最快的国家。我国已有近 3000 台,总装机容量近 4000 万 kW 的循环流化床锅炉机组投入运行。其中,300MW 级循环流化床锅炉机组已投运 10 台,在建和订货的也超过了 40 台;此外,我国 600MW 超临界 CFB 锅炉研制项目进展顺利。

CFB 锅炉机组运行过程中,由于金属材料磨损和耐火耐磨材料脱落等原因造成的机组停机占到停机次数的 40%,全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网组织专家编写了这本针对磨损和防磨的参考书,目的是为从事循环流化床锅炉设计、安装、调试、运行、检修人员以及相关辅机设备技术人员提供参考。

本书由西安热工研究院孙献斌教授编写第一章,华北电力大学齐纪渝教授编写第二章,北京廊桥表面技术发展有限公司贾永昌教授编写第三章,洛阳耐火材料研究院石干教授级高级工程师编写第四章,哈尔滨锅炉厂史然峰编写第五章。全书由华中科技大学刘德昌教授主审,清华大学岳光溪教授为本书题写序言;全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网李建锋对全稿进行了校对和整理。

上海锅炉厂有限公司陈松业高级工程师、北京通达耐火技术公司张海波工程师等提供了技术资料。

本书编写过程中得到了全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网秘书长郝继红的关心和大力支持,全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网作为得到国家发改委支持和批文的行业组织,将组织专家编写有关循环流化床锅炉机组技术系列教材与参考书,积极开展技术服务等工作,为我国循环流化床锅炉机组技术的发展作出贡献。

全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网

2008 年 1 月于北京

目 录

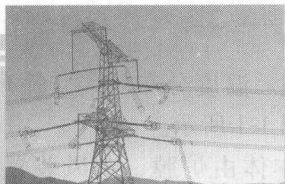


contents

序言

前言

第一章 循环流化床锅炉基本原理	1
第一节 概论	1
第二节 循环流化床锅炉原理及结构	1
第三节 流动特性	8
第四节 传热特性	21
第五节 燃烧特性	25
第六节 脱硫和氮氧化物 (NO_x) 排放特性	30
第二章 材料的磨损与防磨	38
第一节 金属磨损的基础知识	38
第二节 磨料磨损	55
第三章 循环流化床锅炉金属磨损件的防磨技术	76
第一节 表面工程技术及其分类	76
第二节 热喷涂技术	78
第三节 循环流化床锅炉的磨损分析	87
第四节 循环流化床锅炉的磨损部位及对防磨技术的要求	90
第五节 各种防磨方法的评估及涂层材料的优化	91
第四章 循环流化床锅炉用非金属耐磨材料	98
第一节 耐火材料概论	98
第二节 循环流化床锅炉用耐磨耐火材料	115
第三节 循环流化床锅炉耐磨材料及标准	125
第四节 非金属耐磨耐火材料施工工艺、养护与烘炉	134
第五章 循环流化床锅炉金属件和耐火材料的磨损及预防	149
第一节 循环流化床锅炉各部位的磨损	149
第二节 影响循环流化床锅炉受热面磨损的各种因素	156
第三节 循环流化床锅炉受热面的防磨	160
附录 A 耐火材料常温耐磨性试验方法 (GB/T 18301—2001)	164
附录 B 有关不定形耐火材料试验方法和施工性能试验方法标准名录	168
参考文献	169



第一章

循环流化床锅炉基本原理

第一节 概 论

循环流化床(CFB)锅炉是近三十余年来发展起来的一种新型洁净煤燃烧技术,在此期间,CFB锅炉技术得到了迅速发展,其工程应用已由小型CFB锅炉发展到300MW的电站级CFB锅炉。

CFB锅炉的应用始于20世纪70年代末80年代初。1979年,芬兰奥斯龙(Ahlstrom)公司开发的世界首台20t/h商用循环流化床锅炉投入运行。1982年,德国鲁奇(Lurgi)公司开发的世界首台用于发电与供热的循环流化床锅炉(热功率84MW)建成投运。目前,世界上容量为100~300MW的循环流化床电站锅炉已有近百台投入运行,其中容量最大的是由美国福斯特·惠勒公司制造、安装在美国Jacksonville电厂的2×300MW CFB锅炉(906/806 t/h, 17.2/3.8 MPa, 540/540℃),于2003年7月投入运行。该锅炉由于良好的运行性能和环保性能获得了2003年度由美国《Power》杂志颁发的“最佳电站奖”。

我国CFB锅炉技术的开发研究起步较晚,但发展迅速。自1989年11月国内第一台35t/h CFB锅炉投运以来,至今已有2000多台CFB锅炉投入商业运行。西安热工研究院、中科院工程热物理所、清华大学、华中科技大学等国内研究院所和高等院校与各锅炉制造厂家先后开发出20、35、65、75、130、220t/h的中、小型CFB锅炉。国内自主知识产权的410t/h循环流化床锅炉于2003年6月在江西分宜发电厂成功投运,由西安热工研究院和哈尔滨锅炉厂合作研制的国产670t/h CFB锅炉也正在江西分宜发电厂安装。

目前,国外大型CFB锅炉技术已基本成熟,并向超临界参数发展。ALSTOM和FW公司已提出600MW方案设计和概念设计。FW公司还于2003年获得了世界上首台460MW超临界CFB锅炉的订货,它将建于波兰南部的Lagisza,预计2009年投运。

国内引进的首台100MW CFB锅炉于1996年在四川内江高坝发电厂成功投运,促进了我国CFB锅炉的技术进步。目前,通过引进国外技术和国内自行开发研制,我国已有五十余台100~150MW CFB锅炉投入运行,引进技术的300MW CFB锅炉工程项目也正在进之中。

在循环流化床锅炉大型化的开发研究方面,国内与国外先进技术仍有一定差距。但在国家有关部门的支持下,国内技术已取得长足的进步。针对分宜发电厂工程煤质特点的国产330MW CFB锅炉已经开工建设。消化吸收引进技术,加强自主研制,提高自主创新能力,减少对国外技术的依赖,是我国CFB锅炉技术发展的方向。

第二节 循环流化床锅炉原理及结构

CFB锅炉燃用的固体燃料和石灰石脱硫剂在炉膛内以一种特殊的气固流动方式(流态化)运动,离开炉膛的颗粒被分离并送回炉膛循环燃烧。炉膛内固体颗粒的浓度高,燃烧、

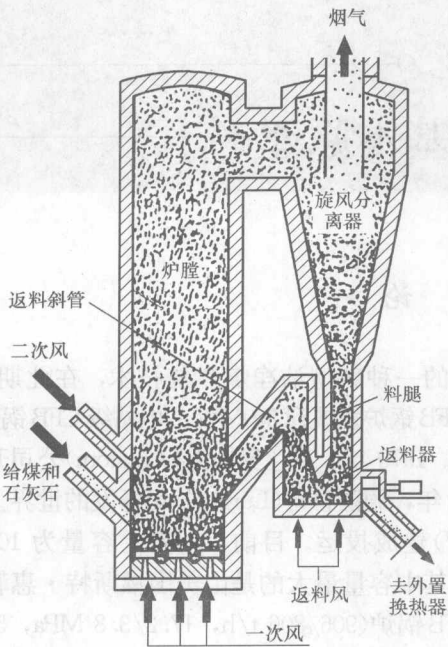


图 1-1 循环流化床锅炉原理示意

传质、传热剧烈，温度分布均匀。循环流化床锅炉原理示意如图 1-1 所示。

CFB 锅炉本体由炉膛、布风装置、分离器、回料阀、尾部烟道及外置换热器组成。其中炉膛由膜式水冷壁构成，底部为布风板。炉膛下部锥段用耐磨耐火材料覆盖，并依燃烧工艺要求开设二次风口、循环灰回灰口、排渣口及点火启动燃烧器等孔口。上部直段炉膛四周为膜式水冷壁受热面。炉膛出口与循环灰分离器入口相连，分离器出口与布置有过热器、省煤器和空气预热器等对流受热面的尾部烟道相连接。为平衡炉膛换热热量，可在炉膛内或灰循环回路中另布置部分受热面。炉膛下部设置底渣冷却系统。

为提高燃烧效率，有时采用飞灰再循环燃烧技术，将尾部除尘器收集的飞灰气力回送至炉膛底部复燃。

炉膛出口处、分离器及回料系统内壁面等易磨损部位覆盖耐磨耐火材料。

一次风(流化风)经过风室由炉膛底部穿过开孔的布风装置送入炉膛，布风板上安装有风帽。炉膛内粒度为 0~8mm 左右的固体颗粒(燃料、石灰石、砂粒等)被流化风流化呈流体的特性并充满整个炉膛，较细的颗粒被气流夹带飞出炉膛由旋风分离器分离收集，并通过分离器下面的立管与回料器送回炉膛循环燃烧，烟气和未被分离器捕集的细小颗粒排入尾部烟道，尾部烟道和除尘器等与常规煤粉炉相似。

典型 CFB 锅炉系统流程如图 1-2 所示。

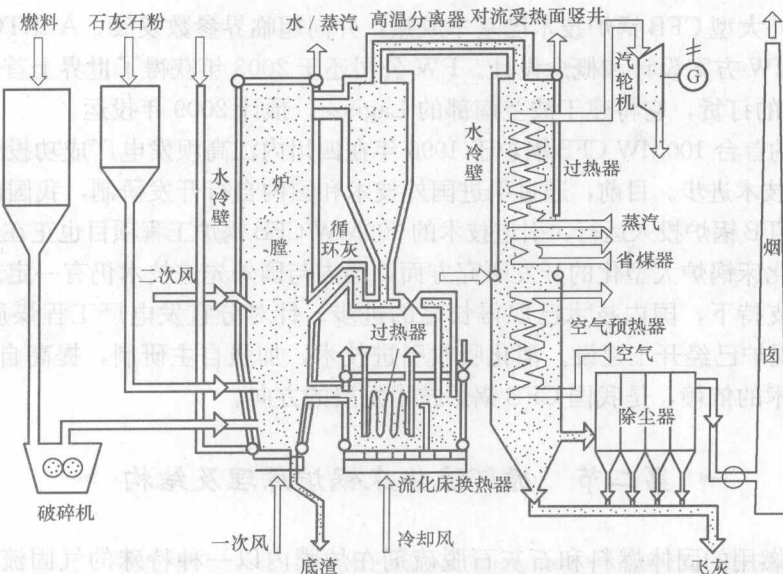


图 1-2 带有外置换热器的鲁奇 (Lurgi) 型 CFB 锅炉系统流程

作为典型示例，图 1-3 所示为美国 Jacksonville 电厂 300MW CFB 锅炉三维视图，图 1-4 所示为四川白马示范电站引进的 300MW CFB 锅炉三维视图。

CFB 锅炉特有的部件主要有布风装置、分离器、回料控制器以及外置换热器等。

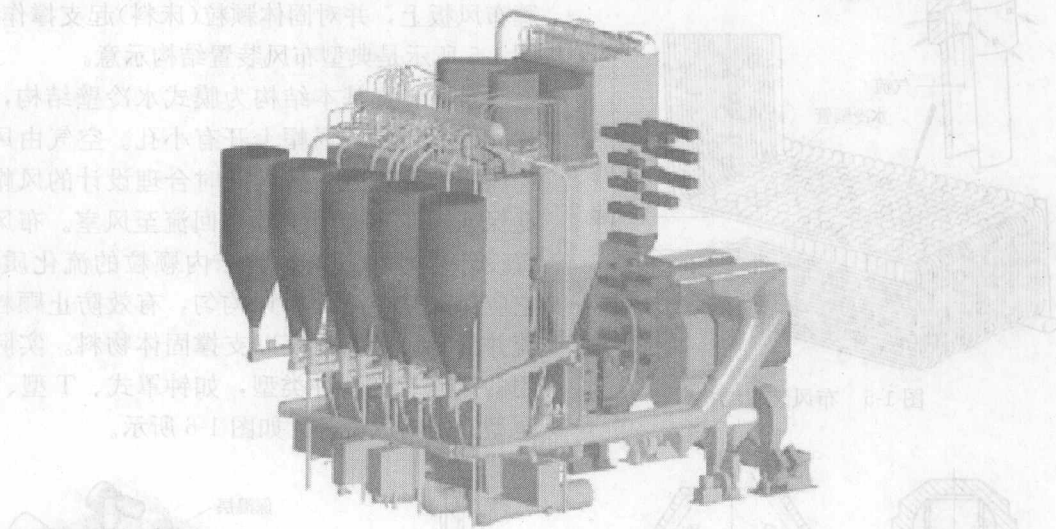


图 1-3 美国 Jacksonville 电厂 300MW CFB 锅炉

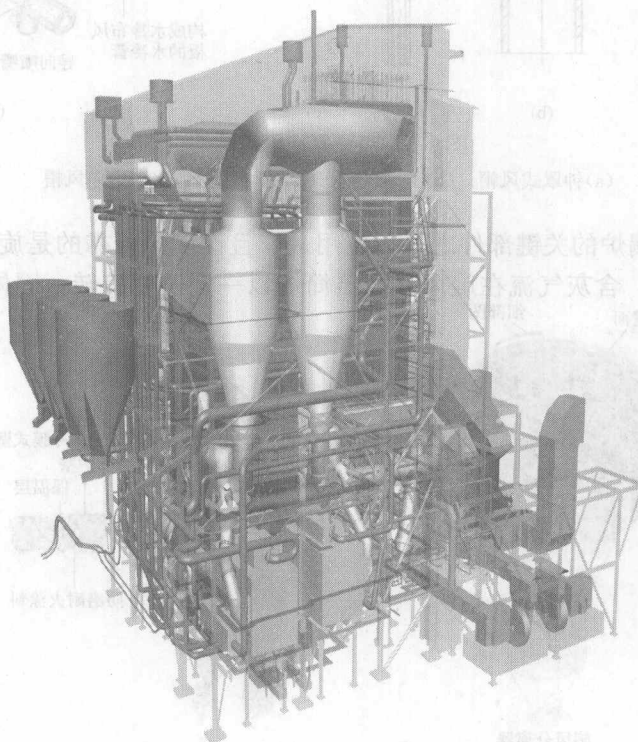


图 1-4 白马示范电站 300MW CFB 锅炉

一、布风装置

布风板位于炉膛底部，将风室与炉膛隔开，它一方面保证一次风穿过布风板进入炉膛将颗粒均匀流化，另一方面将固体颗粒限制在炉膛布风板上，并对固体颗粒(床料)起支撑作用。图 1-5 所示是典型布风装置结构示意图。

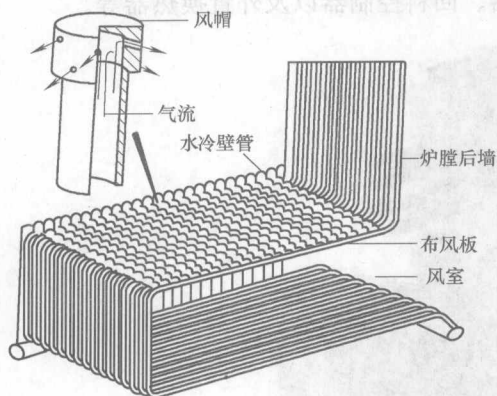


图 1-5 布风装置结构

布风装置基本结构为膜式水冷壁结构，鳍片上设有风帽，风帽上开有小孔。空气由风室经风帽小孔进入炉膛，同时合理设计的风帽小孔保证颗粒不会由炉膛内回流至风室。布风装置设计得好坏直接影响床内颗粒的流化质量，它应保证整个床面布风均匀，有效防止颗粒回流并且有一定的强度以支撑固体物料。实际采用的风帽有许多种类型，如钟罩式、T 型、猪尾型、定向风帽等，如图 1-6 所示。

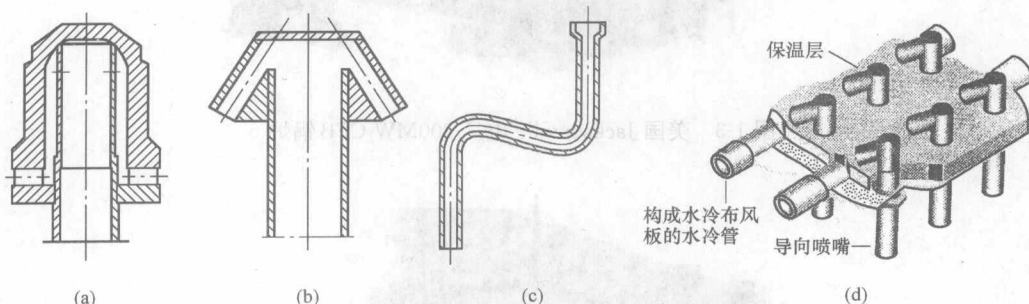


图 1-6 四种典型风帽结构

(a) 钟罩式风帽；(b) T 型风帽；(c) 猪尾型风帽；(d) 定向风帽

二、分离器

分离器是 CFB 锅炉的关键部件之一，应用最广且性能最可靠的是旋风分离器。旋风分离器的结构见图 1-7，含灰气流在旋风分离器筒内以一定速度旋转，固体颗粒由于惯性大，

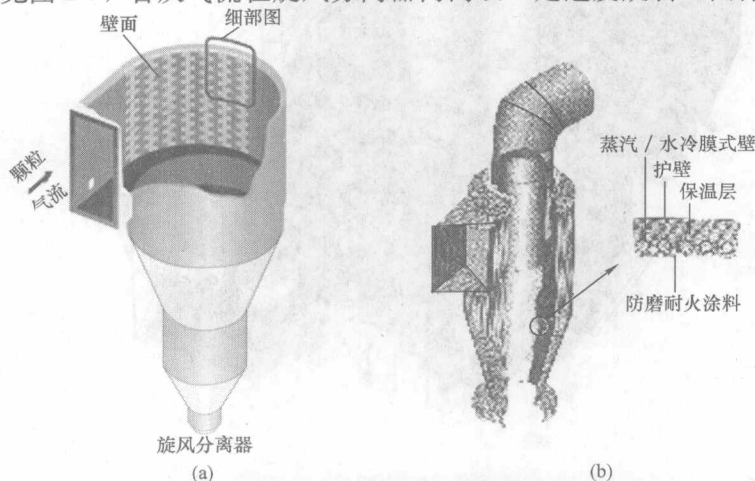


图 1-7 两种典型旋风分离器

(a) 绝热型；(b) 汽冷型

逐渐贴近壁面并向下呈螺旋运动而被分离下来，空气和无法分离下来的细小颗粒($<20\mu\text{m}$)由中心筒排出。旋风分离器性能的好坏直接影响 CFB 锅炉的燃烧与脱硫效率，要获得良好的运行性能，其分离效率应在 99% 以上。根据旋风分离器的工作温度，可以将其分为高温分离型($800\sim 900^{\circ}\text{C}$)和中温分离型($400\sim 600^{\circ}\text{C}$)；根据冷却方式的不同，可分为水冷式、汽冷式以及内砌耐火衬里的绝热式等类型。

除了旋风分离器以外，还有许多其他类型的分离装置，如 U 型槽、百叶窗等，它们主要是利用惯性原理进行气固分离。与旋风分离器相比，这些分离器一般结构简单，布置容易，但分离效率较低，只适用于小型 CFB 锅炉。

三、回料控制器

回料控制器简称回料器，是将分离器分离下来的固体颗粒送回炉膛的装置。回料器的结构形式有 U 型和 J 型等，目前应用最广的是 U 型回料器，其具体结构如图 1-8 所示。

回料器相当于一小型鼓泡流化床，固体颗粒由立管进入回料器，返料风将固体颗粒流化并经返料斜管溢流进炉膛，由分离器分离下来的固体颗粒不断进行补充，从而构成 CFB 锅炉固体颗粒的循环回路。

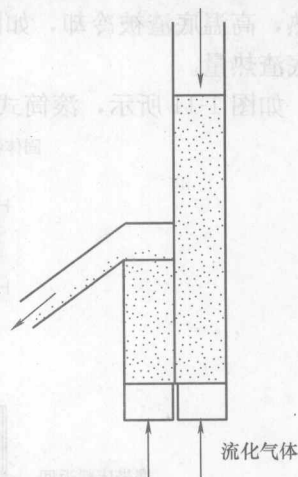


图 1-8 U 型回料控制器

四、外置换热器

外置换热器(External Heat Exchanger, EHE)是布置在 CFB 锅炉灰循环回路上的一种热交换器，简称外置床。外置床的功能是将循环灰载有的一部分热量传递给一组或数组受热面，兼有循环灰回送功能。它通常由一个灰分配室和一个或若干个布置有浸埋受热面管束的床室组成，这些管束按灰的温度不同可以是过热器、再热器或蒸发受热面，外置换热器典型结构见图 1-9。其工作原理是在回料阀下部布置机械锥形阀，通过锥形阀控制进入外置床的循环物料的流量。

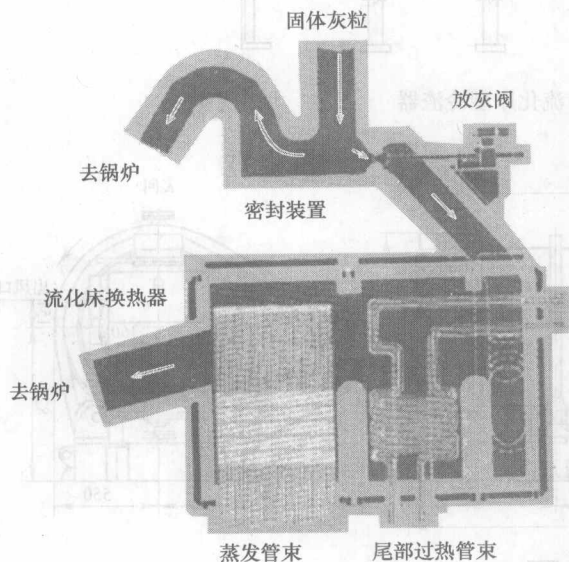


图 1-9 外置换热器

大型 CFB 锅炉一般带有外置热交换器。外置换热器主要用于控制床温，但它并非 CFB 锅炉的必备部件。Lurgi 型 CFB 锅炉和 Pyroflow 型 CFB 锅炉的主要区别在于 Lurgi 型带有外置热交换器，而 Pyroflow 型则没有，其床温的

控制是通过调节给煤与供风，以控制床内燃烧份额和颗粒浓度实现的。

五、冷渣器及其他部件

CFB 锅炉冷渣器的作用是将炉膛排出的高温渣冷却到 150°C 以下，以满足后续输渣设备工作温度的要求。冷渣器的主要形式有流化床型冷渣器和滚筒式冷渣器。

流化床型冷渣器原理是将冷空气通过高压风机输送到冷渣器的风室，然后均匀地穿过布风板，与布风板上的热灰渣接触。在流态化的状态下，冷空气与热灰渣进行换热，冷空气被加热，高温底渣被冷却，如图 1-10 所示。另外，冷渣器内布置水冷受热面，能更有效地利用底渣热量。

如图 1-11 所示，滚筒式冷渣器采用旋转筒体内的冷却水冷却筒体内的高温渣，由于隔

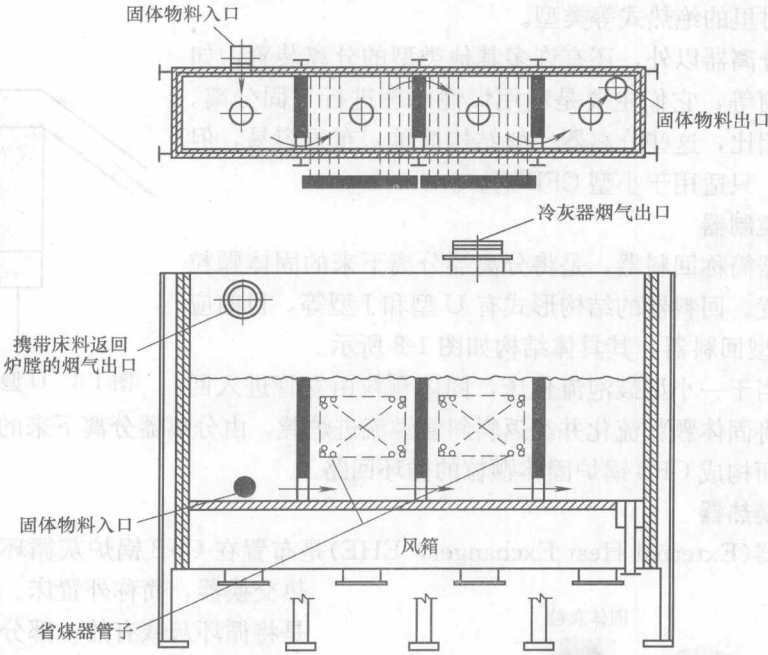


图 1-10 流化床型冷渣器

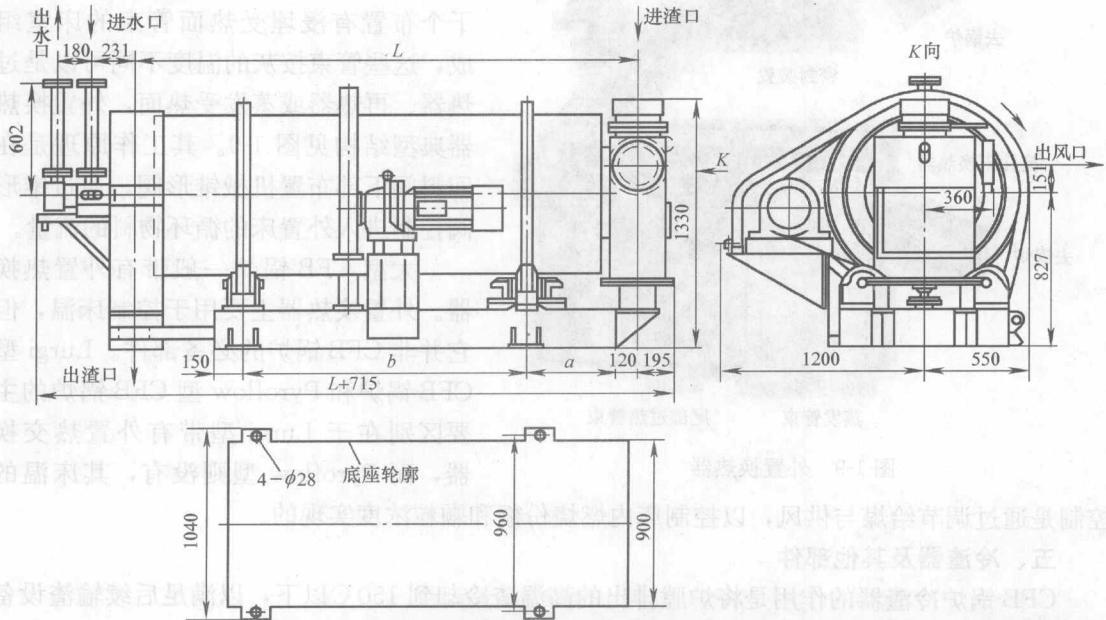


图 1-11 滚筒式冷渣器

了一层筒体，因此属于间接接触传热冷却方式，具有系统结构和运行控制简单、对底渣粒度的适应性较好、磨损轻、运行维护工作量小等优点。

CFB 锅炉的其他部件及系统还包括底渣输送系统、煤与石灰石制备系统等。

六、CFB 锅炉炉型

CFB 锅炉的炉型可根据分离器与炉膛的相对位置分为 M 型和 H 型两种炉型，如图 1-12 所示，M 型锅炉的分离器布置在炉膛和尾部烟道之间，H 型锅炉的分离器布置在炉膛两侧。典型的 M 型 CFB 锅炉总图如图 1-13 所示。

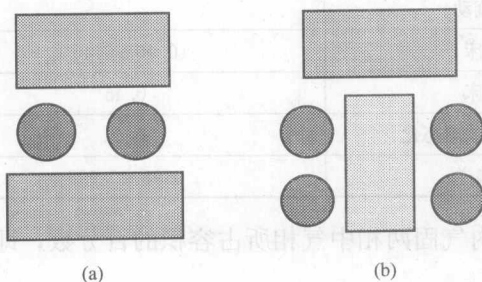


图 1-12 CFB 锅炉炉型
(a) M 型；(b) H 型

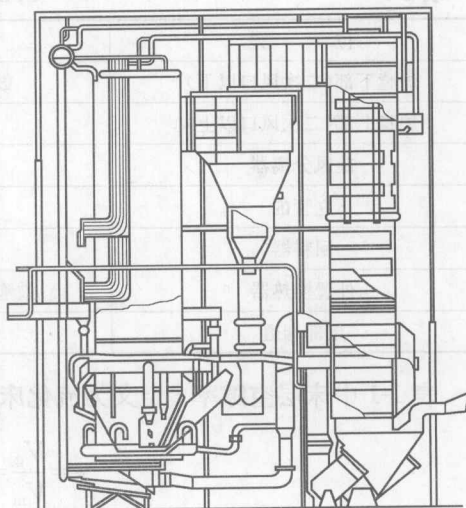


图 1-13 典型的 M 型 CFB 锅炉总图

图 1-14 所示为 1996 年 4 月投入运行的法国 Gardanne 电站 250MW CFB 锅炉，是当时世界上容量最大的 CFB 锅炉，该锅炉为典型的 H 型布置方式。

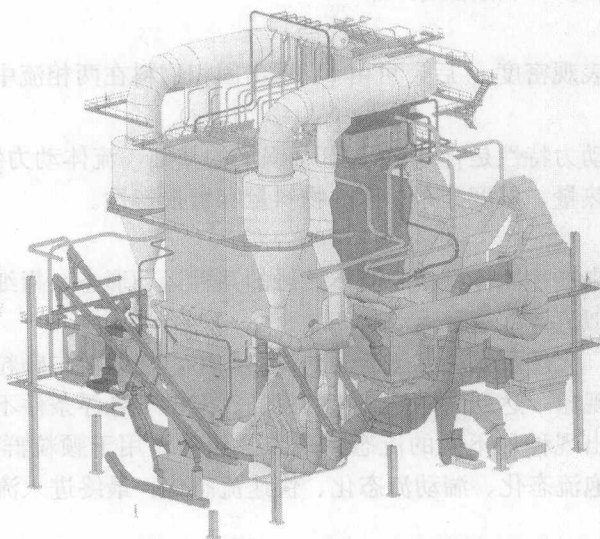


图 1-14 法国 Gardanne 电站 250MW CFB 锅炉

第三节 流动特性

在 CFB 锅炉中, 高温循环物料在循环回路中循环, 并把煤燃烧放出的热量带给受热面和离开炉膛的烟气。总体而言, CFB 锅炉是一个气固流动床加一个循环系统, 在 CFB 锅炉的不同区域, 固体颗粒处于不同的流动状态, 见表 1-1。

表 1-1 CFB 锅炉的流动状态

位 置	流 态	床层空隙率 ϵ
炉膛下部(二次风口以下)	鼓泡床或湍流床	0.45, 0.65~0.75
炉膛上部(二次风口以上)	快速床	0.75~0.95
旋风分离器	旋涡流动	
立管内	移动床	0.40~0.45
回料器	鼓泡床	0.45
外置换热器	鼓泡床或散式流态化	0.45
尾部烟道	气力输送	0.98~0.998

表 1-1 中床层空隙率 ϵ 定义为流化床床层内气固两相中气相所占容积的百分数, 即

$$\epsilon = \frac{V_g}{V_m} = \frac{V_m - V_p}{V_m} = 1 - C_v \quad (1-1)$$

式中 V_g ——气相所占的体积, m^3 ;

V_p ——固相物料所占的体积, m^3 ;

V_m ——气固两相流所占的体积, m^3 ;

C_v ——固相物料在两相流体中的体积浓度。

式(1-1)可改写成式(1-2)的形式, 即

$$C_v = 1 - \epsilon \quad (1-2)$$

知道固相物料的表观密度 ρ_p 后, 可由 C_v 求出固相物料在两相流中的浓度 C_p 为

$$C_p = \rho_p C_v = \rho_p (1 - \epsilon) \quad (1-3)$$

良好的综合流体动力特性是合理设计 CFB 锅炉的基础, 流体动力特性决定着 CFB 锅炉的辅机电耗、床内吸热量、温度分布、床内物料量和磨损特性。

一、流态化原理

流态化一词是用来描述固体颗粒与流体接触的某种运动形态, 指细颗粒通过与气体或液体的接触而转变成类似流体的一种运动状态。

在流态化技术中, 大量颗粒悬浮于运动的流体之中, 使颗粒与颗粒之间脱离接触, 从而消除颗粒间的内摩擦现象, 达到固体流态化的目的。但由于悬浮条件不同, 使得固体颗粒悬浮的状态也不同, 即出现种种不同的流态化现象。随着作用于颗粒群的流体流速的逐步增加, 流态化将历经鼓泡流态化、湍动流态化、快速流态化, 最终进入流化稀相输送状态。

1. 固定床

由一定量的固体颗粒组成的床层静止于一个多孔板(布风板)上, 气体通过布风板上行,

这种床层称为固定床。在移动的固定床中, 固体颗粒相对于壁面移动, 如在 CFB 锅炉的立管中, 但无论在何种情况下, 在固定床中固体颗粒之间无相对运动。

如果固定床的静止料层厚度为 h_0 , 如图 1-15(a) 所示, 当气流从布风板穿过, 速度由小到大逐渐变化时, 最初固体颗粒不发生任何运动。气流穿过颗粒孔隙时, 将产生一定的压力损失, 它随气流速度的增加而增大, 单位床层高度的压力损失 $\Delta p/L$ 与气流速度 u 之间的关系为

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \frac{\mu u}{(\varphi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_g u^2}{(\varphi_s d_p)^2} \quad (1-4)$$

式中 ϵ ——床层空隙率;

u ——气流表观速度(空塔速度), m/s;

μ ——气体动力黏性系数, Pa·s;

φ_s ——颗粒的球形度;

d_p ——颗粒直径, m;

ρ_g ——气体密度, kg/m³。

2. 初始流态化

如果固定床的气流速度逐渐增加, 根据式(1-4), 气流压降会连续上升, 直到气流速度达到一个临界值——最小流化速度 u_{mf} 时, 颗粒的状态发生了质的变化, 即流态化出现。这时可以观察到, 固体颗粒层体积发生膨胀, 被气流悬浮起来, 并上下翻腾运动, 如图 1-15(b) 所示。此时, 固定床转化为初始流态化状态, 如图 1-16 所示, 在该状态下, 气固两相混合物呈流体的性质:

(1) 在任一高度的静压近似等于此高度上单位截面固体颗粒的质量, 与液体类似, 有 $p = \rho_{sp} g h$, $\Delta p = \rho_{sp} g \Delta h$, 其中 ρ_{sp} 为床层密度, 单位为 kg/m³。

(2) 无论床层如何倾斜, 床表面保持水平, 床层的形状也保持容器的形状。

(3) 密度高于床层密度的物体会下沉, 密度小的物体会上浮。

(4) 床内颗粒混合良好, 当加热床层时, 整个床层内温度基本均匀。

(5) 床内固体颗粒可以像液体一样, 从底部或侧面的孔口中排出。

初始流态化时, 固体颗粒的总质量与作用在这些颗粒上的曳力和浮力之和相等, 床层压降全部转化为气体对固体颗粒的曳力和浮力, 因此有

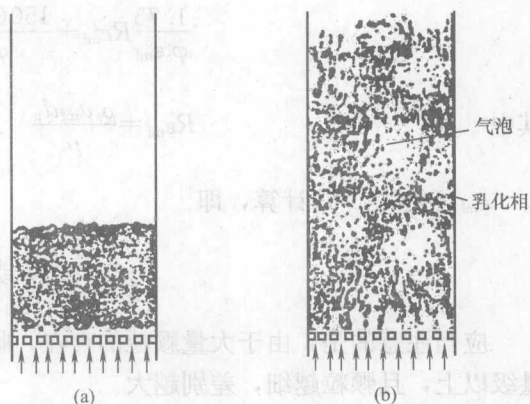


图 1-15 床层未流化及流化时的状态

(a) $u < u_{mf}$, 未流化; (b) $u \geq u_{mf}$, 流化

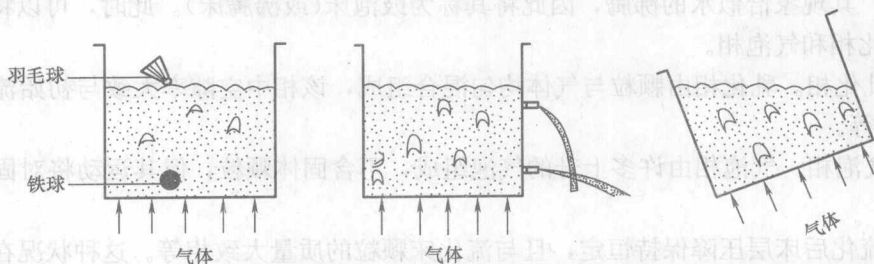


图 1-16 流化床所具有的流体一切属性的示意

$$\frac{\Delta p}{L} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (1-5)$$

式中 $\frac{\Delta p}{L}$ ——单位床层高度的压降, Pa/m;

ϵ_{mf} ——初始流态化时的床层孔隙率;

ρ_s ——固体颗粒的真实密度, kg/m³;

ρ_g ——气体的真实密度, kg/m³。

联立式(1-4)与式(1-5)有

$$\frac{1.75}{\varphi_s \epsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\varphi_s^2 \epsilon_{mf}^3} Re_{mf} = Ar_{mf} \quad (1-6)$$

其中

$$Re_{mf} = \frac{\rho_s u_{mf} d_p}{\mu} \quad Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2}$$

ϵ_{mf} 可由式(1-7)计算, 即

$$\frac{1}{\varphi_s \epsilon_{mf}^3} \approx 14 \quad \text{或} \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\varphi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \approx 11 \quad (1-7)$$

应当注意的是, 由于大量颗粒的存在, 临界流化速度 u_{mf} 比颗粒终端沉降速度小一个数量级以上, 且颗粒越细, 差别越大。

临界流态化速度 u_{mf} 不仅是床层由固定床向流化床转变的标志性参数, 而且对于实际 CFB 锅炉的运行也有意义: 在实际运行中, 必须保证流化风速在 u_{mf} 以上, 否则会因床层不流化而结渣。

对于宽筛分颗粒, 临界流化速度 u_{mf} 可用式(1-8)计算, 即

$$u_{mf} = 0.294 \times \frac{d_p^{0.584}}{\gamma_g^{0.056}} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p} \right)^{0.528} \quad (1-8)$$

式中 d_p ——颗粒的平均粒径, m;

γ_g ——气体运动黏度, m²/s;

ρ_p ——固体颗粒的表观密度, kg/m³;

ρ_g ——气体的密度, kg/m³。

3. 鼓泡床

流化风速继续上升, 床内将出现越来越多的气泡, 气泡不断上升、合并、破裂, 对床层产生搅动, 其现象恰似水的沸腾, 因此将其称为鼓泡床(或沸腾床)。此时, 可以将床层分为两相: 乳化相和气泡相。

(1) 乳化相。乳化相由颗粒与气体均匀混合组成, 该相中空隙率大致与初始流化时的空隙率 ϵ_{mf} 相等。

(2) 气泡相。气泡相由许多上升的气泡组成, 不含固体颗粒, 但其运动将对固体颗粒产生影响。

床层流化后床层压降保持恒定, 且与流化床颗粒的质量大致相等。这种状况在整个鼓泡床及湍流床状态下都将维持不变, 如图 1-17 所示。与此对应, 床层密度随流化风速的变化