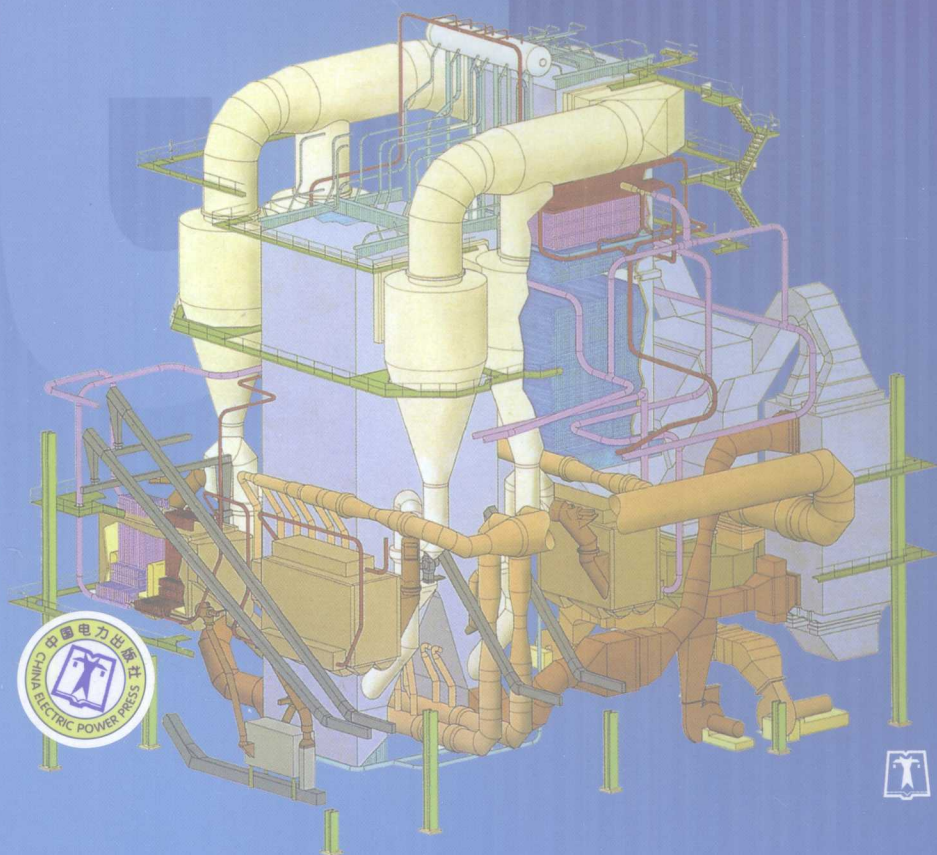


大型循环流化床锅炉技术

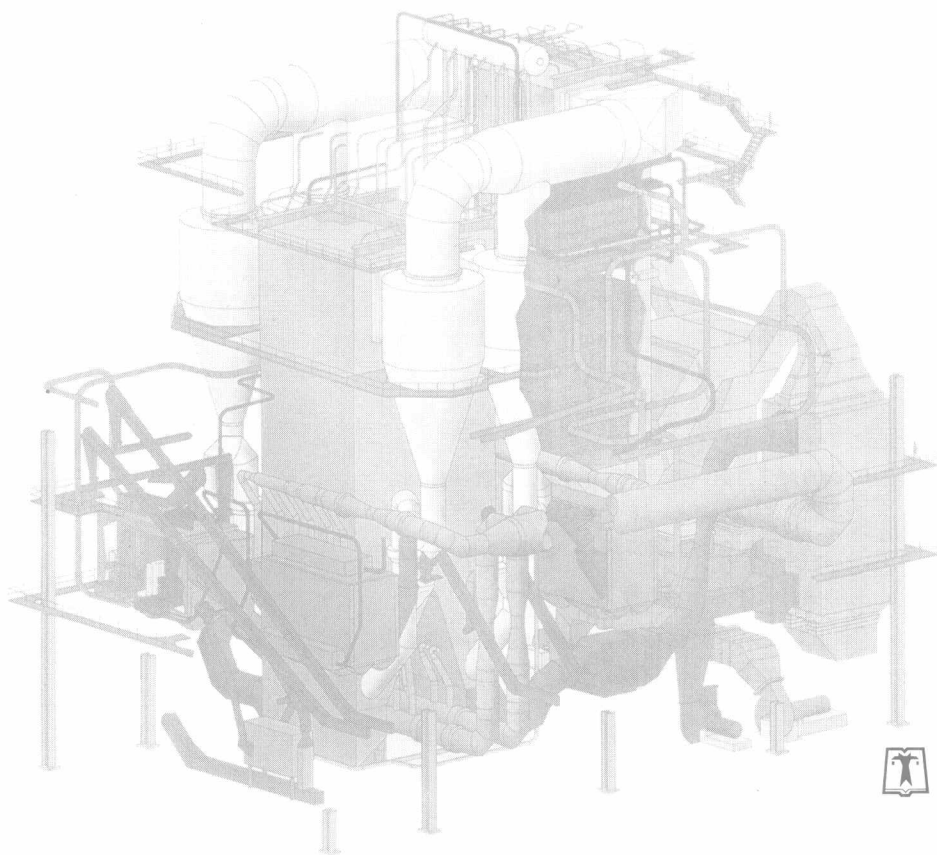
蒋敏华 肖平 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

大型循环流化床锅炉技术

蒋敏华 肖平 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

循环流化床 (CFB) 锅炉技术是一种较为成熟的清洁燃烧技术, 与常规燃烧方式相比, 具有很多优点, 在世界范围得到了迅速的发展和广泛的应用, 是常规煤粉锅炉技术十分重要和有益的补充。本书在介绍循环流化床基本原理的基础上, 对 CFB 锅炉关键部件、设计计算方法、辅助系统及关键辅机设备选型设计、CFB 锅炉的运行与试验技术等进行了较为详细的介绍, 同时, 对大型 CFB 锅炉技术流派及其特点、我国 CFB 锅炉的发展现状, 特别是超临界 CFB 锅炉的情况进行了介绍, 最后, 展望了 CFB 锅炉未来在我国的发展。

本书既可作为 CFB 锅炉领域技术人员和科研人员的工作参考用书, 也可作为有关管理者的参考读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型循环流化床锅炉技术/蒋敏华, 肖平编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8553-2

I. 大… II. ①蒋…②肖… III. 流化床-循环锅炉 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 030356 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

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.5 印张 769 千字

印数 0001—3000 册 定价 58.00 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

积跬步以至千里

——西安热工研究院循环流化床专业发展纪实
(代序)

30年岁月流转，30年弹指一挥间，一幅波澜壮阔的历史画卷，祖国的山山水水，每一座城市，每一个村寨，都在发生着巨变。对于位于古都西安、有着厚重历史积淀的西安热工研究院（简称西安热工院），也许其循环流化床专业的发展，最能生动地折射出改革开放30年给科技战线带来的巨变。

1. 创立

踏着时光的脚步向前追溯，西安热工院流化床部的历史正好发端于30年前。

1979年，西安热工研究所锅炉室成立低质煤组，成为热工院循环流化床部的前身，当时主要是从事第一代流化床锅炉——沸腾炉相关技术的研究。1996年热工研究所更名为热工研究院，锅炉室更名为锅炉与环保研究所，低质煤组更名为流化床室。

20世纪80年代初，经历文革10年的磨难，电力科研战线已是满目疮痍，百废待兴。那时的热工院人，缺少科研设施、经费及资料，但他们绝不缺乏刻苦钻研、勇攀高峰的精神，他们渴望通过加倍的努力，找回“文革”中失落的10年。

那时，在低质煤组聚集起了以袁颖、还博文等为核心的中年技术骨干和以蒋敏华、张敏、徐正泉等为代表的朝气蓬勃的年轻一辈技术人员。他们开始研究流化床锅炉的技术基础，并探讨如何使流化床技术为电力生产服务等基本问题，虽然初级，却有着奠基和方向的意义。借助“沸腾炉燃料破碎—干燥—气力分选系统”和“半工业性流化床燃烧试验台试验研究”等国家科技攻关课题的支持，他们开始白手起家，建立起了热工院第一批流化床试验台。

以现在的技术眼光来看，那些试验设施是有些简陋、初级，甚至有些设想与设计也并不完全正确。但正是这一系列的实践和试验，逐步形成了流化床部的技术基础，并逐步使热工院成为流化床锅炉科研开发的一支重要技术力量。

今天，当新老热工院流化床人聚首时，往往还会回忆起20世纪80年代初期在徐州贾旺电厂进行试验台建设和相关技术攻关的情景。那时，大家扎根现场，往往一待就是两三个月。白天进行试验，晚上处理数据，夜深了躺在木板床上还在反复讨论技术问题。也许，正是从那时起，热工院的流化床技术开始日渐积累并不断推陈出新，流化床人踏实勤奋、勤于思考、勇于探索的作风也开始一代代传承。今天，当年流化床的普通一兵，已经成长为流化床技术领域的学者、权威，成为引领一个部门、单位发展的指挥者，“勤于学、慎于思、勇于行、乐于果”也已经上升成为热工院员工的人生理念。

2. 发展

20世纪80年代末90年代初，第一代流化床锅炉（沸腾炉）技术开始向第二代流化床——循环流化床（CFB）锅炉技术发展。流化床部技术人员准确把握到了这一最新技术发展的脉搏。

1993年初,流化床部建成了 1MW_{th} CFB燃烧试验台,使试验研发手段有了根本性提高。该试验台燃烧室高度达 23m ,与大型CFB锅炉的燃烧室高度接近,是世界上最高的CFB试验台。该试验台建成以来,进行了近80个工程(主要是10万kW机组等级以上)、100余种燃料和石灰石的工程试烧脱硫性能试验,其试验结果在首台引进10万kW CFB锅炉(内江高坝)、首台自主研发国产10万kW CFB锅炉(江西分宜)、首台自主研发国产20万kW CFB锅炉(江西分宜)、首台引进技术生产30万kW CFB锅炉(内江白马)等重要工程中得到了很好的应用,为我国CFB锅炉的技术进步起到了十分重要的作用。

为了保证试验的及时和准确,在起步阶段试验人员常吃住在试验台,通宵达旦地开展工作。不懈的追求与刻苦钻研,使得技术人员对CFB锅炉技术的理解和认识逐渐加深,他们开始把目光瞄准自主知识产权大型CFB锅炉的研制这一富于挑战的方向。

当时,国内自主设计的CFB锅炉最大容量仅为 1.2万kW (75t/h),而国外已经开始研发 25万kW CFB锅炉,我国和国际先进水平差距明显。

结合多年的科研和现场实践经验,1996年,在没有国家和上级单位科研经费资助的条件下,流化床部利用与锅炉制造企业之间的横向技术合作,开始进行具有自主知识产权的 5万kW CFB锅炉研制。

2000年6月,由西安热工院研制的国内首台具有自主知识产权的 5万kW CFB锅炉在山西振兴电厂成功投运,标志着西安热工院在CFB锅炉大型化研发方面开始走在国内前列。

3. 腾飞

5万kW CFB锅炉自主研发的成功,极大地鼓舞了科研人员的士气,也为CFB锅炉技术向电力工业应用迈进奠定了坚实的基础。

在 10万kW CFB锅炉的研制中,以蒋敏华、李光华等为主要负责人的研发团队,以实现CFB锅炉大型化为目标,在国内首次提出和采用“H”型锅炉整体布置型式和大锥段炉膛结构的设计思路,并提出了我国电厂CFB锅炉“ 10万kW 级 $\rightarrow 20\text{万kW}$ 级 $\rightarrow 30\text{万kW}$ 级 $\rightarrow 60\text{万kW}$ 级”的大型化计划路线图,该计划路线图在此后的研发中得到成功执行,起到了重要的引领作用。

2003年6月19日,由西安热工院和哈尔滨锅炉厂合作开发研制的自主知识产权的首台国产 10万kW CFB锅炉通过96h试运行,顺利投入商业运行,研制工作取得了圆满成功。

机组投运后显示了良好的运行性能,性能考核试验主要指标完全达到设计值。以此项目申报的“自主知识产权的 10万kW CFB锅炉研制及示范”项目获得2004年度中国电力科学技术一等奖。通过项目的实施,流化床部开发了CFB锅炉热力计算程序,建立了传热计算模型,拥有了迴流式风帽、排渣控制冷却器、分级可调灰渣控制阀等8项专利技术,形成了自主知识产权的CFB锅炉设计、制造的核心技术。以长期试验台研究和 10万kW CFB锅炉研制为主要内容申报的“循环流化床(CFB)锅炉关键技术的自主研发及应用”项目获得2006年度国家科学技术进步二等奖。

在成功开发 10万kW CFB锅炉的基础上,流化床部瞄准了下一个目标—— 20万kW 级CFB锅炉的研制。2003年2月,在“十五”国家重大装备研制项目的支持下,开始了 20万kW 级CFB锅炉自主研发技术的攻关。

大型CFB锅炉采用外置床是必然的选择。国外在 20万kW 以下容量等级CFB锅炉中已经较多采用了外置换热器,技术比较成熟。而我国中小机组上投入使用的CFB锅炉技术,都是不带外置床的技术,因此,外置床的研制,是大型CFB锅炉研制的关键。

为此，流化床部开发了外置床专利技术——紧凑式分流回灰换热器（Compact ash-flow splitting Heat Exchanger, CHE）。但是，将这一重大原创性技术直接应用于 20 万 kW CFB 锅炉工业装置，存在着极大的技术风险，一旦失败，后果不堪设想。为此，热工院在冷态试验研究的基础上，投资数百万元新建了 4MW 循环流化床燃烧试验台，对该型外置床的结构和控制方式进行了试验优化，对其性能进行了详细的热态试验验证。

2006 年 5 月，该项目的示范工程，国内首台 21 万 kW CFB 锅炉进入启动调试阶段。然而迎接研制人员的是挫折和挑战。试运行期间，虽然外置床能够很好地满足运行控制要求，但在机组进入正常运行状态后，有时甚至已经稳定运行 10 多天后，在运行人员没有特别留意的阶段，相继发生了三次分离器及回料阀结焦事故。其中最严重的一次，使分离器下的立管和回料阀中积满了焦块，导致锅炉机组被迫停机，而这在其他 CFB 锅炉运行中都极为少见。由于外置床直接与分离器、回料阀相连，是否是外置床的性能导致了结焦，这令相关技术人员心中充满了疑惑。

一次次细致的现场勘察，一次次深入的事故分析与激烈讨论，终于发现了根本问题，原来是包括回料阀在内的外置床中，控制风量给入的风帽内，由于某些意外原因填塞了大量的保温棉，堵塞了流化风的给入。问题处理后机组迅速进入稳定运行状态。

2006 年 7 月 7 日 16 时 30 分，首台自主研发的国产 21 万 kW CFB 锅炉机组顺利通过 96h 试运行，标志着研制工作取得了圆满成功。

自主研发的国产 21 万 kW CFB 锅炉机组的成功投运，是我国大型 CFB 锅炉技术自主研发里程碑式的重要成就，标志着我国大型循环流化床锅炉开发和设计制造技术整体达到了国际水平，也为我国自主研发更大容量等级的 CFB 锅炉奠定了十分坚实的技术基础，值得每一位参与者骄傲。

4. 超越

当前，世界上在运的最大容量 CFB 锅炉为 30 万 kW。早日研制出 30 万 kW 甚至更大容量的 CFB 锅炉机组，使我国 CFB 锅炉自主研发水平达到甚至超过国际先进水平，成为流化床部全体技术人员殚精竭虑、梦寐以求的目标。

2005 年，流化床部顺利完成了自主知识产权的国产 30 万 kW 级 CFB 锅炉设计方案，并通过了中国电机工程学会组织的专家评审。2006 年 11 月 16 日，首台自主研发的国产 33 万 kW CFB 锅炉机组在中电投集团江西分宜电厂正式开工建设。2009 年 1 月 7 日 12 时 19 分，该 33 万 kW CFB 锅炉顺利通过 168h 试运行，机组最大出力达到 34.8 万 kW，试运期间平均负荷率为 93%，各项技术经济指标达到设计值，成为目前世界上已投运的单机容量最大的 CFB 锅炉机组。

首台国产 33 万 kW CFB 锅炉的成功投入运行，标志着我国完整地掌握了大型 CFB 锅炉的核心技术，步入世界 CFB 锅炉技术的先进行列。

国产 33 万 kW CFB 锅炉的成功研制和运行所取得的经验，为我国下一步研制自主品牌的 60 万 kW 超临界 CFB 锅炉，建设国产 60 万 kW 超临界 CFB 锅炉示范工程奠定了坚实基础。

与此同时，在科技部十一五国家科技支撑计划“超临界循环流化床项目”的支持下，西安热工院正在积极进行超临界 60 万 kW CFB 锅炉的研究工作。

这些任务的顺利实施，标志着几代西安热工院流化床人为之努力奋斗的超越国外大型 CFB 锅炉技术的梦想正在成为现实。

5. 硕果

30年的辛勤耕耘，结出了令人欣喜的丰硕果实。

据不完全统计，30年来，西安热工院流化床专业共获得国家科技进步二等奖1项、获得省部级一等奖3项、二等奖4项，获得院级科技进步奖35项，其中一等奖8项，二等奖9项。获得国家专利近20项。

在这些工作中，流化床部创造了CFB锅炉技术领域的多项国内乃至世界第一：

(1) 研制成功了国内首台具有自主知识产权的5万kW CFB锅炉。

(2) 研制成功了国内首台具有自主知识产权的10万kW CFB锅炉。

(3) 研制成功了首台具有自主知识产权的21万kW CFB锅炉，并被列入“2007年度全国电力企业新纪录”。

(4) 研制成功了世界上首台以气动方式控制的紧凑式分流回灰换热器。

(5) 研制了首台具有自主知识产权的33万kW CFB锅炉，是世界上在运单机容量最大的CFB锅炉机组。

(6) 研制了世界上渣处理能力最大的CFB锅炉配套流化床式底渣冷却器。

(7) 研发了CFB锅炉炉内水冷壁防磨装置专利技术，并在世界上首次成功应用于13.5万kW和30万kW CFB锅炉，很大程度上解决了CFB锅炉炉内水冷壁防磨技术难题。

“不积跬步，无以至千里；不积小流，无以成江海。”曾经的汗水与荣耀让人追思，美好的未来引人遐想。30年，创业的艰辛与成功的喜悦点滴在心头。每一个参与者，都往往会情不自禁地徜徉于对过去日子的回忆中，为流化床部所取得的每一个成就而自豪，为能有幸成为这段历史的一部分而感到由衷的骄傲。

《大型循环流化床锅炉技术》一书的编写和出版，也许可以作为这一切最好的纪念。

本书在对循环流化床基本原理介绍的基础上，对CFB锅炉关键部件、设计计算方法、辅助系统及关键辅机设备选型设计、CFB锅炉的运行与试验技术等进行了较为详细的介绍，同时，对大型CFB锅炉技术流派及其特点、我国CFB锅炉的发展现状，特别是超临界CFB锅炉的情况进行介绍，最后，展望了CFB锅炉未来在我国的发展。

本书既可作为CFB锅炉领域技术人员的参考用书，也可作为有关管理人员的参考读物。本书的撰写力求深入浅出，尽量避免过多繁琐的理论描述、抽象模型和计算公式，以求易于阅读，并能够更好地面向CFB锅炉设计和运行一线技术人员。

本书的主要编写人员为蒋敏华和肖平，郭涛（第一章）、李志伟（第二章）、时正海、马丽锦（第三章）、高洪培、李强（第四章）、江建忠、徐正泉（第五章）、韩应（第八章）等人参与了相关章节的资料收集和撰稿，江建忠、李强参与了书稿的文字核定和编辑工作。

本书的编写者虽然只是上述有限的数人，但内容却包含了更多曾经和正在从事这一工作的热工院人的智慧和经验，特别是孙献斌、张敏、王鹏利、王海涛等人，因此本书的成稿也有他们的一份重要贡献，另外，本书也引用了国内外同行的许多研究成果和资料数据，有些可能疏漏未能在参考文献中注录，在此深表感谢并致歉意。

由于时间仓促，限于编者水平，疏漏甚至错误之处在所难免，恳请读者不吝批评指正。

编者

2009年2月于西安热工院

目 录

◎ 大型循环流化床锅炉技术

积跬步以至千里（代序）

第一章 绪论	1
第一节 CFB 锅炉基本概念	2
第二节 循环流化床一些基本名称术语	3
第三节 CFB 锅炉系统及其组成	6
第四节 循环流化床技术的特点	13
第二章 CFB 锅炉基本原理	18
第一节 固体颗粒的特性	18
第二节 流态化基本原理	23
第三节 传热特性	46
第四节 燃烧特性	56
第五节 CFB 锅炉脱硫与氮氧化物 (NO _x) 排放控制	67
第六节 灰渣特性及灰渣的综合利用	91
第三章 CFB 锅炉本体设计及其关键部件	102
第一节 CFB 锅炉本体设计概述	102
第二节 CFB 锅炉燃烧产物与热平衡计算	104
第三节 炉膛设计	108
第四节 分离器的设计	119
第五节 回料阀设计	130
第六节 外置式换热器的设计	134
第七节 尾部受热面设计	142
第四章 CFB 锅炉运行与试验技术	149
第一节 CFB 锅炉冷态试验	149
第二节 CFB 锅炉点火启动与停运	156
第三节 CFB 锅炉运行调节、燃烧调整与性能试验	171
第五章 CFB 锅炉辅助系统及关键辅机	229
第一节 燃煤制备系统与破碎、筛分设备	229
第二节 石灰石制备输送系统与设备	249

第三节	冷渣器与底渣处理系统·····	256
第四节	烟风系统与风机·····	270
第五节	除尘系统·····	292
第六节	自动控制系统·····	299
第六章	CFB 锅炉的磨损防治与耐磨耐火材料的选取 ·····	307
第一节	CFB 锅炉受热面的磨损与防治 ·····	307
第二节	CFB 锅炉耐磨耐火材料选择和设计 ·····	318
第七章	大型 CFB 锅炉的发展、主要炉型与技术特点 ·····	336
第一节	国外 CFB 锅炉的主要技术流派与发展 ·····	336
第二节	国内大型 CFB 锅炉技术发展状况 ·····	365
第三节	国内 100MW 等级 CFB 锅炉技术特点 ·····	374
第四节	国内 200MW 等级 CFB 锅炉技术特点 ·····	401
第五节	300MW CFB 锅炉技术特点 ·····	411
第八章	超临界 CFB 锅炉与 CFB 锅炉发展展望 ·····	433
第一节	超临界与超临界锅炉·····	433
第二节	超临界 CFB 锅炉技术 ·····	444
第三节	CFB 锅炉发展展望 ·····	466
参考文献 ·····		473

绪 论

循环流化床 (CFB) 锅炉技术是一种较为成熟的清洁燃烧技术。与常规燃烧方式相比, CFB 锅炉具有很多优点。CFB 锅炉通过直接向炉内添加石灰石, 可有效脱除 90% 甚至更多的 SO_2 , 技术与工艺流程相对简单, 投资费用也较低; CFB 锅炉采用较低的燃烧温度 ($850\sim 920^\circ\text{C}$) 和空气分级燃烧, 其 NO_x 排放浓度很低 ($<250\text{mg}/\text{m}^3$), 只有煤粉锅炉的 1/4, 不需要设置额外的脱硝设备就能实现低 NO_x 排放, 可以满足现行国家环保标准的要求; CFB 锅炉具有极佳的燃料适应性, 几乎可以设计燃用任何化石燃料; CFB 锅炉具有很好的调峰能力, 可以在 30% 额定负荷下不投油稳定燃烧; CFB 锅炉灰渣活性较好, 可以作为建筑填充材料、路基和水泥生产原料等。

由于 CFB 锅炉的诸多优点, CFB 锅炉技术在世界范围正在得到迅速的发展。国外 CFB 锅炉的主要炉型有 Lurgi 型、Pyroflow 型及 FW 型, 其中, Pyroflow 型不采用外置热交换器而在炉内布置屏式受热面, Lurgi 型及 FW 型均采用外置热交换器 (EHE 或 INTREX), FW 型同时采用汽冷旋风分离器。虽然各技术流派各有特点, 但相互融合、技术趋同的趋势十分明显。

目前, 国外 300MW 级 CFB 锅炉的技术已经比较成熟, 2002 年底投运的美国 Florida 州 JEA 北方电站 $2\times 300\text{MW}$ CFB 锅炉 (美国 FW 公司制造, FW 型), 是目前世界上在运最大容量等级 (300MW) CFB 锅炉中最早投运的两台机组。波兰 Lagisza 电站正在建设的 460MW 超临界 CFB 锅炉, 是世界首台在建的超临界 CFB 锅炉, 预计于 2008 年下半年投入商业运行 (实际上由于各种原因, 至本书成稿时, 该机组仍未运行)。

在我国, 各大锅炉制造企业采用引进技术及消化吸收生产的 100MW 及 135MW 等级 CFB 锅炉已有 200 余台投入运行。我国通过技贸结合方式从国外引进 300MW 级 CFB 锅炉技术生产的首台 300MW CFB 锅炉 (四川白马电厂) 已于 2006 年 4 月通过 168h 试运行。目前投运的该型 300MW CFB 锅炉已有十余台。

我国 CFB 锅炉的自主研制起步于 20 世纪 80 年代末。经过“八五”、“九五”、“十五”攻关, 我国已具备自主设计制造 50、100、200MW 和 300MW 等级 CFB 锅炉的能力和业绩。其中, 由西安热工研究院开发、哈尔滨锅炉厂有限责任公司制造的首台 210MW CFB 锅炉已于 2006 年 7 月投入运行, 首台 330MW CFB 锅炉也于 2009 年 1 月投入运行。在国家有关部委的主持下, 我国超临界 600MW 级 CFB 锅炉自主研制工作也正在积极进行中。

基于我国煤炭资源的特点, 我国应重点发展大型高效煤粉锅炉, 并以 CFB 锅炉作为必要的补充。对于优质的动力用煤, 采用大型超超临界煤粉锅炉并配备烟气脱硫脱硝装置, 是目前最为高效、环保和经济的选项。在我国, 高灰分劣质燃料、低挥发分无烟煤、低灰熔点

易结渣煤约占发电用煤的 25% 以上, CFB 锅炉则是高效、环保、经济地利用这些燃料的合理选择。同时 CFB 锅炉能燃用常规煤粉锅炉无法燃烧的劣质燃料(包括洗中煤、煤矸石、石油焦、垃圾等)。因此, CFB 锅炉发电技术是适合我国资源特点的一种选择, 且目前技术已经比较成熟, 投资成本也较低。为满足煤炭资源高效利用和环境保护的要求, 我国目前 CFB 锅炉技术发展的主要方向, 一是实现 CFB 锅炉的大型化, 二是进一步提高 CFB 锅炉运行的安全性、经济性和环保性能。

本书将在对循环流化床基本原理介绍的基础上, 对 CFB 锅炉关键部件、设计计算方法、辅助系统及关键辅机设备选型设计、CFB 锅炉的运行与试验技术等进行了较为详细的介绍, 同时, 对大型 CFB 锅炉技术流派及其特点、我国 CFB 锅炉的发展现状特别是超临界 CFB 锅炉的情况进行介绍, 最后, 展望 CFB 锅炉未来在我国的发展。



第一节 CFB 锅炉基本概念

锅炉是将燃料的化学能转换为热能的装置。锅炉的燃料通常包括天然气、石油、煤炭、垃圾等。但我们通常所说的燃料主要是指化石燃料, 是天然气、石油、煤炭的统称。虽然原子能已经得到广泛应用, 可再生能源如水能、太阳能、风能、潮汐能等也日益得到更多的利用, 现代社会利用的主要能源依然是化石能源。我国化石能源的构成具有富煤、贫油和少气的特点, 因此我国供热和发电锅炉的燃料主要是煤炭。

锅炉通过燃烧将煤的化学能转换为热能。锅炉燃烧的方式可以分为层燃、煤粉燃烧和流化床燃烧三种方式, 相应的锅炉称为层燃炉、煤粉炉和流化床炉。

层燃炉是最原始的燃烧方式, 以往家庭使用的煤球炉和蜂窝煤炉就是采用层燃方式, 手烧炉采用的也是层燃方式。现代工业上使用的层燃炉多采用可移动的炉排(如链条炉), 以达到连续燃烧、自动控制的目的。层燃炉所采用的是所谓的固定床燃烧方式, 也就是经过破碎的煤铺摊在炉排上, 在炉排之下向上鼓入燃烧用的空气, 实现煤的燃烧。燃煤在炉排上相对炉排是固定不动的(燃料随炉排向前一起移动)。由于固定床燃烧方式燃料热量的释放集中, 炉排在机械设计上也受到限制, 层燃炉的容量一般都较小, 蒸发量通常不超过 130t/h。由于燃烧过程难于组织, 以及由于炉排设计不善或煤粒过细造成漏煤等原因, 层燃炉的炉渣和飞灰中的未燃尽炭含量较高, 燃烧效率较低, 通常都低于 90%。层燃锅炉的热效率一般都低于 80%。

现代工业中使用最广的是煤粉炉。煤在燃烧前被磨制成粒度很细的煤粉, 随空气喷入炉膛后, 在气力输送的状态下实现燃烧。煤粉炉可以设计成很大的容量, 目前国内也已经实现与 1000MW 发电机组相配套。并且, 煤粉锅炉的燃烧效率和热效率均很高, 其燃烧效率可高达 99%, 锅炉热效率高的可以达到 94%。但煤粉炉对煤质的要求较高, 在燃用难燃煤种时, 煤粉的燃烧稳定性下降甚至难以维持, 导致煤粉炉的运行性能大大下降, 甚至难以运行。此外, 通常情况下, 由于燃烧温度高, 煤粉炉的 NO_x 排放较高, 尤其是在燃用低挥发分煤种时。同时, 煤粉炉也难以实现炉内高效脱硫。采用尾部烟气脱硫 (FGD) 和尾部烟气脱硝 (SNCR 或 SCR), 会大大增加煤粉炉的建设投资和运行成本。

CFB 锅炉炉膛内气固两相流所采用的流态介乎层燃炉与煤粉炉之间, 即流态介于固定床与气力输送状态之间。循环流化床的英文名称为 Circulating Fluidized Bed, 英文缩写为 CFB。CFB 锅炉是炉膛内的气固两相流流态主要为鼓泡床、湍流床和快速床等流化床状态并

具有物料外循环流动特征的一种具体锅炉形式。

图 1-1 简要地示出了 CFB 锅炉的工作过程。

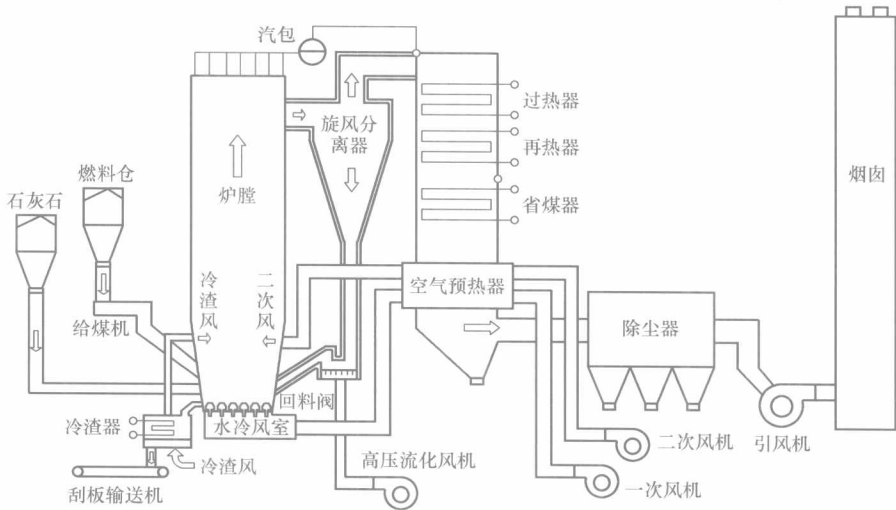


图 1-1 CFB 锅炉工作过程

燃料（煤）及脱硫剂（石灰石）经破碎至合适粒度后，由给煤机和石灰石给料机从燃烧室适当位置给入，与燃烧室内炽热沸腾的物料混合，被迅速加热，燃料迅速着火燃烧，石灰石则经煅烧分解与燃料燃烧生成的 SO_2 反应生成 CaSO_4 ，从而起到脱硫作用。为了有利于脱硫反应进行，燃烧室温度通常控制在 $850\sim 920^\circ\text{C}$ 。

在较高气流速度的作用下，燃烧充满整个炉膛并剧烈掺混。有大量固体颗粒会随烟气被携带出燃烧室，经旋风分离器分离后，再次送回流化床燃烧室继续参与燃烧；有的 CFB 锅炉还带有外置热交换器（即外置床），部分分离下来的颗粒会首先送至外置床，在外置床中与受热面进行热交换，被冷却至 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 后，再送回燃烧室循环燃烧。由旋风分离器排出的夹带细微尘粒的高温烟气，在尾部烟道与对流受热面换热后，由布袋除尘器或静电除尘器除去粉尘微粒，洁净烟气由烟囱排出。

第二节 循环流化床一些基本名称术语

为了方便理解下文即将介绍的 CFB 锅炉基本原理，这里首先介绍与 CFB 锅炉技术相关的一些基本名称术语。

1. 床料

锅炉启动前，铺设在布风板上一定厚度、有一定粒度要求的固体颗粒，称作床料，也称为点火底料。床料一般为底渣或者砂子。锅炉不同，床料的成分、颗粒粒径及其分布特性也有差别。静止床料层的厚度一般为 $600\sim 1000\text{mm}$ 。

2. 物料

锅炉运行过程中，在炉膛及循环系统（分离器、立管、回料系统等）内燃烧或载热的固体颗粒，统称为物料。它既包含床料成分，也包含新给入的燃料、脱硫剂及脱硫产物、燃料燃烧生成的灰渣等。分离器分离下来通过回料系统返送回炉膛的这部分物料称为循环物料。

3. 堆积密度和颗粒密度

将固体颗粒不加约束地自然堆放时单位体积的颗粒质量称为颗粒的堆积密度，用 ρ_d 来表示，单位为 kg/m^3 ；单个颗粒的质量与其体积的比值称为颗粒密度或真实密度，用 ρ_p 表示，单位为 kg/m^3 ，煤的真实密度约为 $1300 \sim 1700 \text{kg}/\text{m}^3$ ，灰的真实密度约为 $2300 \sim 2500 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

4. 物料循环倍率

物料循环倍率是单位时间内循环流化床循环物料量与入炉煤量的比值，也就是由分离器捕捉下来并返回回炉膛的物料量与新给入的燃料量之比，即

$$R = \frac{G_c}{B} \quad (1-1)$$

式中： G_c 为循环物料的质量流率， kg/s ； B 为给煤的质量流率， kg/s 。循环倍率表示了循环流化床中循环物料量的相对大小。 R 值越大，表示单位时间内物料在床内的循环次数越多。煤粒的燃尽与循环倍率有关，通常 R 值大会有利于燃尽。同时， R 值增大通常会有利于炉内受热面的吸热。但当 R 值增加到一定程度后，对改善煤的燃尽就没有什么显著作用了。并且，过高的循环倍率将导致过高的通风阻力从而导致过高的风机电耗，还会带来更大的磨损。

5. 颗粒平均粒径

颗粒的平均粒径有多种。对于单颗粒，由于颗粒形状不是标准的球体形状，根据体积相同、表面积相同或表面一体积比相同等，可以分别确定体积平均直径、表面积平均直径和表面一体积平均直径。对于颗粒群，通过一系列标准筛孔尺寸的筛子筛分，可以测定出颗粒群粒径的大小分布和组成特性。简单地说，燃料筛分是指燃料颗粒粒径大小的分布范围。如果颗粒粒径粗细范围较大，称为宽筛分；颗粒粒径粗细范围较小，称为窄筛分。可由筛分将颗粒能通过的最小方形筛孔宽度确定为颗粒的筛分尺寸，以此表征颗粒的粒度。

对于宽筛分的颗粒群，工程上一般由筛分确定固体颗粒的粒度分布，并由此确定颗粒群的平均直径。主要有质量平均直径、比表面积平均粒径等。工程应用中还常常用颗粒的中位径（即 50% 质量比的颗粒通过筛孔的直径，用 d_{50} 表示）来衡量宽筛分颗粒群的粗细程度。

CFB 锅炉中，粒度由粗到细分别为：底渣、入炉煤、循环灰、入炉石灰石、飞灰等。同时，同一样品的中位径、质量平均粒径、比表面积平均粒径值采用不同的计算方法得出的数值差别也非常大。

6. 床内固体物料浓度

床内固体物料浓度定义为床内单位体积内颗粒的质量，也称为床层密度 ρ_b ，单位为 kg/m^3 ，即

$$\rho_b = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中： m 为床内体积为 V (m^3) 的空间里所含颗粒的总质量， kg 。床层密度表示了床内固体颗粒的浓度情况，通常可以由测量床层两点之间的压差方便得到。

应当注意的是，在循环流化床中，会遇到三个与固体颗粒相关的密度，即床层密度、固体颗粒的真实密度与堆积密度。后两者分别为颗粒绝对密实状态下物质的密度 (ρ_p) 和自然堆积状态下的密度 (ρ_d ，即 ρ_{b0} ，又称容克)。

7. 空隙率

床料或物料自然堆放时，在堆积总体积为 V_m 的颗粒中，颗粒间的空隙占总体积的份额

称为空隙率,也可称为固定床空隙率,用 ϵ_0 表示。CFB锅炉所有物料堆积时的固定床空隙率通常为0.4~0.5,亦即堆积的物料中,40%~50%的体积份额被空气所占据。

若空隙与颗粒所占的体积份额分别为 V_g 和 V_p ,则有 $\epsilon_0 = \frac{V_g}{V_g + V_p}$,容易得出: $\epsilon_0 = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$ 。

在颗粒浓度很高的流化床气固两相流系统中,常以床层空隙率或流化床空隙率 ϵ 表示气相所占的体积 V_g 与两相流体总体积 V_m 之比,即 $\epsilon = \frac{V_g}{V_m}$ 。

8. 密相区

在流化床锅炉炉膛下部,颗粒浓度较大,一般称为密相区。密相区内沿高度方向颗粒浓度逐渐降低。CFB锅炉中,一般定义密相区低于二次风喷口高度,密相区的空隙率为0.7左右。

9. 稀相区

在流化床锅炉炉膛上部,气流中粒子浓度较低,空隙率为0.85~0.99,称为稀相区。稀相区内颗粒浓度比较均匀,沿炉膛高度颗粒浓度变化比较缓慢。CFB锅炉中,一般定义锅炉中部直段500mm以上为稀相区。

10. 过渡区

事实上,密相区至稀相区的转变是逐渐发生的。在密相区和稀相区之间,颗粒浓度处于沿高度方向快速变化过程中,存在比较大的扬析与夹带现象,称为过渡区。

11. 床层差压

床层差压(实际中通常简称为床压)是炉内物料流化状态下形成的密相区静压差,它直接反映了炉内密相区物料若处于堆积状态的高度情况,亦即反映了密相区物料总量,具体是指布风板出口静压与稀相区入口静压之差。一定的物料量(料层高度)在流化状态下对应一定的床层差压,CFB锅炉实际运行中床层差压为6~12kPa左右。

12. 炉膛差压

炉膛差压是指稀相区的入口静压与炉膛出口静压的差压,主要由这一区域中存在的颗粒形成,因此它是表征炉膛稀相区颗粒浓度的重要物理量。CFB锅炉因燃料和运行状态不同,炉膛稀相区颗粒浓度可能有较大的差异,相应的炉膛差压可能在0.2~2.5kPa之间变化。

实际工作中床压测量有时取布风板出口静压与稀相区出口静压之差,所测量数值实际上是床层差压和炉膛差压之和,反应炉膛内总物料量的情况。

13. 流化速度

流化速度一般是指假设床内没有床料时空气通过炉膛的名义速度,因此也叫空塔速度或表观速度。用 u_0 表示,单位为m/s,即

$$u_0 = \frac{Q}{A} \quad (1-3)$$

式中: Q 为空气或烟气体积流量, m^3/s ; A 为炉膛截面积, m^2 。

由于实际运行时床内具有一定的固体颗粒,且各个区域固体颗粒浓度各不相同,它们会占去部分的空气流通面积。因此,空气或烟气的实际流通面积小于床面积 A 且随时发生着变化,流化速度也因此小于气流穿过床层时的实际速度。但是,引入这一假想的速度,对

于定量表征床内流动的强弱，对于不同流化床流态的比较，仍然是非常方便和有效的。可以说流化速度是流化床最重要的特征速度。

14. 临界流化速度

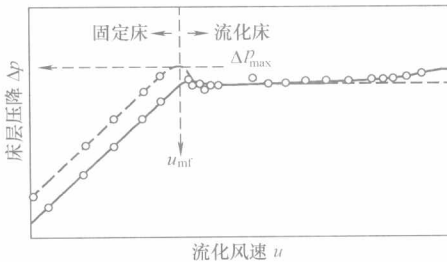


图 1-2 均匀筛分颗粒床层压降与流化风速的关系

对于由固体颗粒组成的床层中，随着流化风速的增加，床层压降成正比增加，但是当流化风速增加到一定值时，床层压降达到最大值，如果继续增大流化风速，床层压降几乎不变，如图 1-2 所示。对应于 Δp_{\max} 的流化风速即为临界流化风速，也叫最小流化速度，用 u_{mf} 表示，单位为 m/s。临界流化速度是使颗粒床层从静止状态转变为流态化时按布风板面积计算的气流速度。CFB 锅炉正常运行所需的流化风速一般是 3~5 倍的临界流化速度。

15. 颗粒终端速度 u_t

固体颗粒在静止空气中作初速度为零的自由落体运动时，由于重力作用，下降速度逐渐增大，速度越大，阻力也越大。当速度增加到某一数值时，颗粒受到的阻力、重力和浮力将达到平衡，也即空气对颗粒的阻力等于颗粒的浮重，颗粒将以等速度向下运动，这个速度称为颗粒的终端速度，也叫沉降速度（或终端沉降速度）。终端速度是颗粒重要的特征速度之一。

16. 断面固体流率 G_s

断面固体流率定义为单位时间内通过床层某一断面单位面积的固体物料量，用 G_s 表示，单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，即

$$G_s = \frac{G}{A} \quad (1-4)$$

式中： G 为固体物料质量流率， kg/s ； A 为床层截面积， m^2 。

17. 固气比 M

固气比定义为通过单位床截面的固体质量流率与气体质量流率之比，即

$$M = \frac{G_s}{\rho_g u_0} \quad (1-5)$$

式中： G_s 为断面固体流率， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； ρ_g 为气体密度， kg/m^3 ； u_0 为气体流速， m/s 。

进一步推导可以得出

$$M = \frac{G_s}{\rho_g u_0} = \frac{G}{A \rho_g u_0} = \frac{G}{G_g} \quad (1-6)$$

式中： G 为固体颗粒断面总质量流率， kg/s ； G_g 为气体断面总质量流率， kg/s 。

第三节 CFB 锅炉系统及其组成

CFB 锅炉系统主要包括锅炉本体系统和锅炉辅助系统两部分。锅炉本体系统又包括燃烧系统与汽水系统等。锅炉辅助系统包括煤与石灰石系统、烟风系统、灰渣处理系统、点火系统、锅炉控制系统等。图 1-3 所示为 CFB 锅炉系统及其组成示意图。

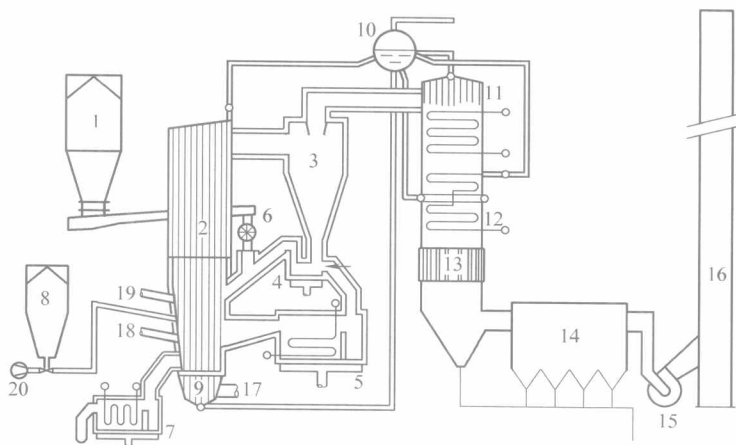


图 1-3 CFB 锅炉系统及其组成示意

- 1—煤仓；2—炉膛；3—分离器尾部烟道；4—回料阀；5—外置式热交换器；6—给煤机；7—冷渣器；8—石灰石仓；
9—流化风室；10—汽包；11—对流过热器；12—省煤器；13—空气预热器；14—电除尘器；15—引风机；
16—烟囱；17—一次风；18—下二次风；19—上二次风；20—石灰石风机

一、CFB 锅炉燃烧系统

CFB 锅炉燃烧系统即指所谓的“炉”，主要由炉膛（流化床燃烧室）、分离器、回料阀和外置换热器（大部分小容量 CFB 锅炉没有该设备）、空气预热器等组成。它的任务是使燃料在炉内进行良好的燃烧，放出热量，供受热面吸收。这里仅简单介绍 CFB 锅炉燃烧系统比较特别的部分。

1. 炉膛

炉膛也叫流化床燃烧室，是供燃料燃烧的地方。它是由炉墙和水冷壁所围成封闭空间，燃料在其内呈现流化状态燃烧。炉膛包括下部锥段和上部直段两部分，从其中气固两相流的流态上可以分为密相区、过渡区和稀相区。炉膛是流化床燃烧系统的主体，完成大约 50% 燃料释热量的传递吸收过程。它既是一个燃烧设备，也是一个热交换器和脱硫、脱氮装置，集流化、燃烧、传热与脱硫、脱硝反应过程于一体。

炉膛四周通常由膜式水冷壁围成（小容量 CFB 锅炉有的采用光管重型炉墙结构）。炉膛底部是布风板，布风板上嵌有大量的风帽，风帽上开有许多小孔。布风板下面是风室。布风板及风帽一方面保证一次风穿过布风板进入炉膛对炉内物料进行均匀流化，另一方面将固体颗粒限制在炉膛布风板以上，将物料与风室内的洁净空气分隔开来，并对固体颗粒（床内物料）起支撑作用。图 1-4 所示是典型的布风板结构图。

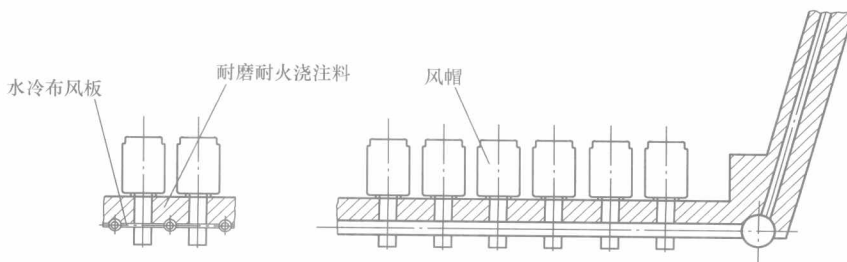


图 1-4 水冷布风板

风帽是保证床内物料正常流化和隔绝固体颗粒向风室倒流的关键部件，主要通过特殊的风帽及风帽小孔结构设计来实现。布风板及风帽设计的好坏直接影响床内颗粒的流化情况，它应当有一定的阻力以保证整个床面流化的均匀，同时应尽量控制阻力不致过大以减小阻力损失。同时，风帽设计还需要特别强调防止炉膛内向风室的漏渣问题。以满足风帽的基本功能为出发点，实际采用的风帽有多种形式，如钟罩型、蘑菇型、猪尾型、T型、Γ型定向风帽等，目前应用最广泛、效果相对较好的是钟罩型风帽（参见图 1-5，钟罩型风帽具体结构形式及尺寸还有许多差别和变化）。

大型 CFB 锅炉布风板及其下的风室往往由水冷壁管弯制而成，形成水冷风室和水冷布风板结构，以防止其高温变形（尤其是采用床下点火方式时），如图 1-6 所示。

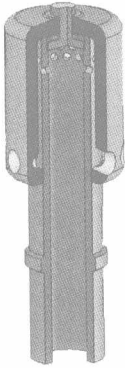


图 1-5 钟罩式风帽

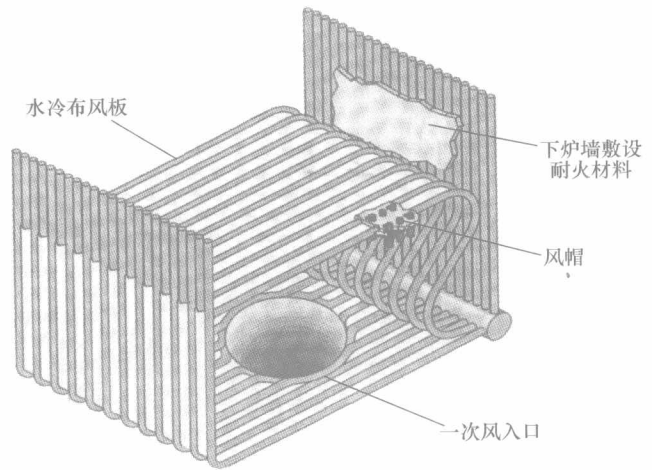


图 1-6 大型 CFB 锅炉布风板及风室结构

炉膛内燃料的燃烧以二次风入口为界分为两个区。二次风入口以下为还原气氛燃烧区，二次风入口以上为氧化气氛燃烧区。燃料的燃烧过程、脱硫过程、 NO_x 和 N_2O 的生成及分解过程主要在燃烧室内完成。炉膛下部锥段以下及炉内其他易磨损部位敷设有耐火浇筑料，以保护受热面。

炉膛上部一般悬挂有部分受热面（水冷屏、过热屏、再热屏），也有采用其他结构的受热面形式（ Ω 管、分隔墙）等，以吸收炉膛内燃烧释放的部分热量。

2. 分离器

分离器有多种形式，常见的是高温绝热旋风分离器及汽（水）冷旋风分离器。它将被烟气从炉膛带出的相对较大粒度颗粒分离下来，并通过回料系统将其送回炉膛继续燃烧。

分离器是循环流化床燃烧系统的关键部件之一。它的形式决定了燃烧系统和锅炉整体布置的形式和紧凑性，其性能对燃烧室的空气动力特性、传热特性、物料循环、燃烧效率、石灰石的脱硫效率和利用率、锅炉出力和蒸汽参数都有重大影响，对锅炉启动时间、散热损失、投资与维护费用等也有影响。

国内外目前普遍采用的分离器主要是高温耐火材料内砌的绝热旋风分离器和汽水冷旋风分离器。旋风分离器分离效率高，但燃烧系统布置欠紧凑，阻力相对较大。早期 CFB 锅炉发展中曾出现过各种形式的惯性分离器，如百叶窗分离器、U 型分离器、异型惯性分离器等。但实践证明，惯性分离器虽然具有阻力小、燃烧系统布置紧凑的优点，但由于分离效率