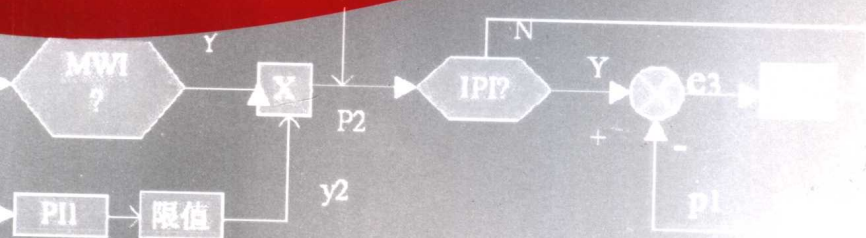


循环流化床

锅炉机组控制系统

调试及运行技术

李彦 彭钢 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

循环流化床锅炉机组控制系统 调试及运行技术

主编 李彦 彭钢

参编 高志存 于朝晖 赵志军



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本书介绍了循环流化床机组的发展历程,阐述了大中型循环流化床机组控制系统设备选型和构成,深入研究了 MCS、SCS、FSSS、DAS、DEH 等功能子系统的设计结构和工作原理,对大中型循环流化床机组控制系统的验收、调试、系统投入等问题进行了全方位讲解,给出了大中型循环流化床机组控制系统运行维护与检修的原则、内容、方法和质量标准。

本书涵盖了大中型循环流化床机组控制系统技术工作的整个流程和全部工作内容,讲解深入浅出,实用性强,尤其适合于大中型循环流化床机组的现场工程技术人员和管理人员使用,也可作为在校大中专学生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

循环流化床锅炉机组控制系统调试及运行技术/李彦, 彭钢主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6066-9

I. 循… II. ①李…②彭… III. ①流化床-循环锅炉-控制系统-调试②流化床-循环锅炉-锅炉运行 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 144709 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 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 392 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.00 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



循环流化床锅炉以其燃料适应范围广、炉内脱硫、低 NO_x 排放、燃烧效率高、负荷调节比大、灰渣综合利用等优点成为当前清洁煤燃烧技术的主要发展方向。随着循环流化床锅炉技术的不断成熟,该技术日益受到国家和各大发电企业的重视,“十一五”期间,电站建设仍然以火力发电为主,发展循环流化床机组为国家政策所鼓励。2005 年 12 月 21 日,国务院发布了《促进产业结构调整暂行规定》,同时,国家发展和改革委员会配套发布了《产业结构调整指导目录》,其中明确提出鼓励发展 300MW 及以上循环流化床、增压流化床、整体煤气化联合循环发电等洁净煤发电。在国家政策调控和日益严格的环保法规及标准的控制下,各大发电企业纷纷采用循环流化床锅炉,建成了一大批循环流化床机组。随着 2006 年我国首台 200、300MW 循环流化床机组的相继投产,循环流化床机组的应用又掀起了一个新的高潮。

河北省电力研究院作为电网、电厂的技术服务单位,早在 20 世纪 90 年代末就已开始了循环流化床机组应用的研究工作,进入 21 世纪后,我院为配合保定热电厂技改工程 2 台 450t/h 循环流化床锅炉(配 2 台 125MW 机组)和石家庄热电厂技改工程 4 台 410t/h 循环流化床锅炉(配 2 台 200MW)机组的建设,开展了大规模的调研和研究工作,为搞好循环流化床机组调试作了充分准备。2003 年底,我院负责调试的 6 台循环流化床机组相继投产运行,我院工程技术人员也相应转到了循环流化床机组生产技术服务工作上。在机组调试和生产服务过程中,我院技术人员积累了丰富的循环流化床机组工作经验,循环流化床机组调试技术成为了我院的核心技术。随后我院负责完成了内蒙古准能矿电有限责任公司的 2 台 480t/h 循环流化床锅炉(配 2 台 150MW 机组)的调试工作,现今神华集团的内蒙古神东电力煤制油工程自备发电厂 3 台 410t/h 循环流化床(配 2 台 100MW 机组)的调试工作正在紧张的进行中。循环流化床机组的应用方兴未艾,循环流化床机组的调试和生产服务工作大有可为。

我院工程技术人员应中国电力出版社之约编写的《循环流化床锅炉机组控制系统调试及运行技术》一书全面系统地总结了循环流化床机组控制系统的工作经验,相信它的问世定会促进循环流化床机组控制系统技术的进一步发展。

河北省电力研究院 院长 党委书记 苑立国

2007 年 3 月



随着国家环保政策的逐步严格和国民环保意识的日益提高,清洁煤燃烧技术尤其是循环流化床锅炉(CFBB)技术得到了迅速发展。我国已有 2000 多台不同蒸发量的循环流化床锅炉投入商业运行,总装机容量达 25GW,其中大中型 CFB 机组(50~135MW)已有上百台在运行。2006 年,我国第一台引进型 300MW CFB 机组、第一台国产 200MW CFB 机组、第一台国产 300MW CFB 机组的相继投产,更是拉开了发电企业 CFB 机组建设的新高潮。

随着 CFB 机组在数量上和容量上的不断发展,与之相适应的大容量 CFB 机组的自动控制问题也成为业内的热点问题。然而循环流化床机组在我国应用只有十来年的历史,机组本体资料文献缺乏,循环流化床机组控制系统方面的资料更是凤毛麟角。

本书涵盖了大中型循环流化床机组控制系统技术工作的整个流程和全部工作内容,全书共分七章,介绍了循环流化床机组的发展历程,对大中型循环流化床机组控制系统设备选型和构成进行了阐述,深入研究了 MCS、SCS、FSSS、DAS、DEH 等功能子系统的设计结构和工作原理,对大中型循环流化床机组控制系统的验收、调试、系统投入等问题进行了全方位讲解,给出了大中型循环流化床机组控制系统运行维护与检修的原则、内容、方法和质量标准。李彦同志编写了第一、二章,并对全书进行了统稿与审定;彭钢同志编写了第三、四章,并参与了审稿;高志存同志编写了第五章;于朝晖同志编写了第六章;赵志军同志编写了第七章。编写组的五位成员均参加过多台 450t/h CFB 锅炉机组控制系统的验收、调试、性能试验和生产服务工作,在工作中积累了一定的 CFB 机组控制系统工作经验。但由于 CFB 机组控制系统技术是一门新技术,它不仅要求熟悉 CFB 机组本体的工艺过程,而且还要求精通分散控制系统技术和仪表检测技术,鉴于编者能力所限,书中难免出现纰漏,请读者见谅并多提宝贵意见。

在写作过程中,我们从资料文献中借鉴了许多热控界同行关于 CFB 机组控制系统的工作经验和研究成果,在此一并表示感谢;同时,还要感谢在写作过程中为我们提供帮助的河北省电力研究院的同事们,更要感谢河北省电力研究院为我们提供了参与 CFB 机组控制系统验收、调试、性能试验和生产服务的工作机会,让我们比其他的同行有更早的机会接触 CFB 机组控制系统并积累了经验;最后,感谢家人对我们工作的全力支持。

编者

2007 年 3 月



目 录

序

前言

第一章 循环流化床机组的发展历程	1
第一节 概述.....	1
第二节 循环流化床机组的发展历史和类型.....	1
第三节 我国循环流化床机组的应用情况与发展趋势.....	7
第二章 大中型循环流化床机组控制系统设备	16
第一节 机组控制系统设备选型	16
第二节 机组仪表与控制系统构成和技术要求	21
第三节 机组仪表与控制系统的出厂测试和验收	37
第四节 机组控制设备的运行维护与检修	44
第三章 机组数据采集系统	57
第一节 数据采集系统的组成和结构	57
第二节 数据采集系统的功能	58
第三节 数据采集系统的主要测点及其分布	66
第四节 数据采集系统显示画面的结构、内容及操作方式	69
第五节 数据采集系统的调试与投运	73
第六节 数据采集系统的运行维护与检修	77
第七节 循环流化床机组数据采集系统实例	81
第四章 机组模拟量控制系统 (MCS)	87
第一节 协调控制系统 (CCS) 设计结构和工作原理	87
第二节 各闭环子控制系统	96
第三节 系统调试与投运	104
第四节 系统的运行维护与检修.....	105
第五节 循环流化床机组模拟量控制系统实例.....	117
第五章 锅炉安全监控系统 (FSSS)	122
第一节 系统设计结构.....	122
第二节 系统工作原理.....	131
第三节 系统调试与投运.....	161
第四节 系统的运行维护与检修.....	163
第六章 机组程序控制系统 (SCS)	172
第一节 系统设计结构.....	172

第二节	系统工作原理	175
第三节	系统调试与投运	207
第四节	系统的运行维护与检修	210
第七章	汽轮机数字电液控制系统 (DEH)	213
第一节	概述	213
第二节	系统设计结构	215
第三节	系统工作原理	219
第四节	系统调试与投运	235
第五节	系统的运行维护与检修	243
附录	热控装置“三率”统计计算办法	248
参考文献		249

第一章



循环流化床机组的发展历程

第一节 概 述

能源与环境是当今社会发展的两大主题，人类要发展，提高生活质量，必须依靠能源。当今的清洁能源是电力，而获取电力的方式通常有三种：燃煤或燃油（气）火力发电、建坝水力发电或核聚变发电。不论是火力发电、水力发电还是核发电，都不可避免地对环境产生不良影响：火力发电在燃烧煤或油或气的过程中，排放出的二氧化硫、氮氧化物等有害气体对环境造成污染；水力发电拦水建坝对自然景观和生态环境会造成影响；核发电一旦泄漏造成的后果不堪设想。获取足够能源和享受良好的环境是社会发展中的一对矛盾，一直困扰着人们。人们把解决这一矛盾的方法寄托在技术的发展上。三种发电方式中，火力发电所引发的污染问题受到了足够的重视，人们致力于研究清洁煤燃烧技术，在众多清洁煤燃烧技术中，流化床燃烧技术是一种颇受人们重视的清洁煤燃烧技术。

第二节 循环流化床机组的发展历史和类型

一、循环流化床机组的发展历程

流化床燃烧技术的商业化应用可追溯到 1921 年，在这一年美国的 Fritz Winkler 发明了第一台流化床燃烧器，并因此获得了专利。当时这一燃烧器被人们称为 Winkler 煤气发生器，直到 20 世纪 40 年代才用“流态化”这一术语来描述其工艺过程。第二次世界大战期间，德国曾使用这种装置生产供应合成汽油使用的原粒，50 年代流化床燃烧技术开始应用到煤的燃烧上，由此流化床燃烧技术得到了进一步发展，到了 60 年代人们逐渐发现在应用流化床燃烧高硫煤时加入石灰石，有固硫能力，可减少硫化物排放，起到防止空气污染的作用。人们迅速研究出了鼓泡流化床技术，生产出了鼓泡流化床锅炉，这种锅炉主要用于高硫煤燃烧，提高了燃烧效率、一定程度上控制了污染排放，迅速得到了应用。以我国为例，到 1980 年，我国鼓泡流化床燃烧锅炉的容量覆盖了 6~130t/h，投运台数达到 4000 台。随着鼓泡流化床锅炉的应用和研究的深入，人们发现鼓泡流化床锅炉在进一步有效控制污染排放和大型化方面受到了限制，于是人们把目光转向了循环流化床（CFB）燃烧技术。

进入 20 世纪 70 年代后，英、美和欧洲的一些国家如芬兰、瑞典和联邦德国在鼓泡流化床技术基础上，开始研究和设计循环流化床。循环流化床锅炉设计的关键是流化床的主循环回路，其主要作用是将大量的高温固体物料从气流中分离出来，送回燃烧室，维持燃烧室稳定的流态化状态，保证燃料和脱硫剂（石灰石）多次循环、反复燃烧和反应，以提高燃烧效率和脱硫效率。在整个主循环回路工作过程中，分离器是工作的核心部件，其作用是完成含尘气流的气固分离，并把收集下来的物料回送至炉膛，实现灰平衡及热平衡，保证炉内燃烧的稳定与高效。

在开发循环流化床商业化应用中，最先取得成效的是芬兰的奥斯龙（Ahlstrom）公司。

该公司于 1979 年在芬兰的 Pihlava 完成了一台燃油锅炉的改造, 把其改造成世界上第一台商业循环流化床锅炉, 燃用木材废料, 容量为 20t/h。1981 年该公司又在芬兰的 Kauttra 完成了一台容量为 90t/h 的燃煤循环流化床锅炉的商业投运。德国的鲁奇 (Lurgi) 公司不甘落后, 于 1982 年在德国的 Leunen 投运了一台燃料为洗煤厂尾料的循环流化床锅炉 (84MW)。几乎同时, 瑞典的 Gotaverken 公司交付了它的首台商业化燃用褐煤循环流化床锅炉 (28MW), 两台锅炉均取得了较好的运行业绩, 大大刺激了循环流化床的商业化应用和发展。许多锅炉厂纷纷投入资金和人力, 开发用于发电或供热的循环流化床锅炉, 促进循环流化床锅炉向着大型化的方向发展, 50、100、135、150、200、250、300、460MW 等级的循环流化床锅炉相继研制成功并投产运行。

从 1979 年在芬兰的 Pihlava 建成的世界上第一台商业循环流化床锅炉开始至今, 近 30 年间, 循环流化床锅炉技术经历了三代的发展。循环流化床技术的关键设备是床料分离器, 因此人们以分离器的差异来划分循环流化床的代际。

第一代循环流化床锅炉主要采用的是旋风筒式分离器, 它分为以厚的耐火材料为衬里的绝热型和用蒸汽或水进行冷却的吸热型两大类。这种分离器存在的主要问题是旋风筒体积庞大, 因而钢耗较高, 锅炉造价高, 占地较大; 旋风筒内衬厚、耐火材料及砌筑要求高、用量大、费用高, 启动时间长、运行中易出现故障; 密封和膨胀系统复杂; 尤其是在燃用挥发分较低或活性较差的强后燃性煤种时, 旋风筒内的燃烧导致分离的物料温度上升, 引起旋风筒内或回料腿回料阀内的超温。

第二代循环流化床锅炉为带有矩形旋风分离器的紧凑型循环流化床锅炉, 它由福斯特惠勒公司在 20 世纪 90 年代初开发。矩形旋风分离器外壳由水冷或汽冷管弯制、焊装而成, 取消绝热旋风筒的高温绝热层, 代之以受热面制成的曲面, 并在内侧布满销钉, 涂一层较薄的高温耐磨浇注料。壳外侧覆以一定厚度的保温层, 水 (汽) 冷旋风筒可吸收一部分热量, 分离器内物料温度不会上升, 甚至略有下降, 同时较好地解决了旋风筒内侧防磨问题。这一代循环流化床锅炉保留了第一代循环流化床锅炉的优点, 有效地克服了其缺陷。但这种分离器自身也有问题, 主要是制造工艺相对复杂, 生产成本较高, 使其商业竞争力下降。同时, 为各部件的热膨胀而设置的大型膨胀节成为该炉型最薄弱的环节, 损坏事故频繁发生。

第三代循环流化床锅炉采用了方型分离器, 这种分离器的壁面是炉膛壁面水循环系统的一部分, 因此与炉膛之间免除热膨胀节。同时方型分离器可紧贴炉膛布置从而使整个循环床锅炉的体积大为减少, 布置紧凑。借鉴汽冷旋风筒成功的防磨经验, 方型分离器水冷表面敷设了一层薄的耐火层, 分离器成为受热面的一部分, 为锅炉快速启停提供了条件。现今的循环流化床锅炉已发展到大容量、高参数时代。在此发展进程中, 较为突出的有两家公司, 一家是法国通用电气阿尔斯通斯坦因工业公司, 其采用鲁奇循环流化床工艺设计、制造的 250MW 循环流化床锅炉于 1995 年 11 月在法国普罗旺斯 (Provence) 电站投入商业运行。此锅炉的成功投运是大型循环流化床锅炉发展史上的一个里程碑。它不仅解决了循环流化床锅炉大型化过程中的很多技术问题, 更重要的是, 它为用户和制造商进一步开展循环流化床锅炉大型化工作增加了信心; 另一家公司是美国福斯特惠勒 (FW) 公司, 其在循环流化床锅炉大型化方面建树颇丰, 建立了多个循环流化床锅炉技术发展的里程碑, 在 20 世纪 90 年代, 该公司开发出了 250MW 的超高压参数等级的循环流化床锅炉技术, 并在 90 年代末和 21 世纪初在波兰 Bogatynia 的 Turow 电厂建成了 6 台 235~262MW 燃煤的循环流化床锅炉

(1~3号炉 235MW, 4~6号 262MW), 2002年5月和7月又在美国佛罗里达州 Jacksonville 的 JEA 电厂建成了2台 300MW 可 100%燃烧煤/石油焦的循环流化床锅炉, 见图 1-1; 同时, 该公司又开发出了超临界循环流化床直流锅炉技术, 完成了多台不同容量燃烧不同煤种的超临界循环流化床锅炉的概念设计, 并于 2002 年获得了波兰的 PKE 电力公司 Lagisza 电厂一台容量为 460MW 的超临界循环流化床直流锅炉的供货合同, 此台锅炉是世界上第一台商业化超临界循环流化床锅炉, 此台锅炉的布置图见 1-2, 2005 年底该锅炉的设计工作已经全部完成, 它实现了循环流化床锅炉技术从亚临界参数到超临界参数的飞跃, 循环流化床锅炉技术又向前迈进了一大步。

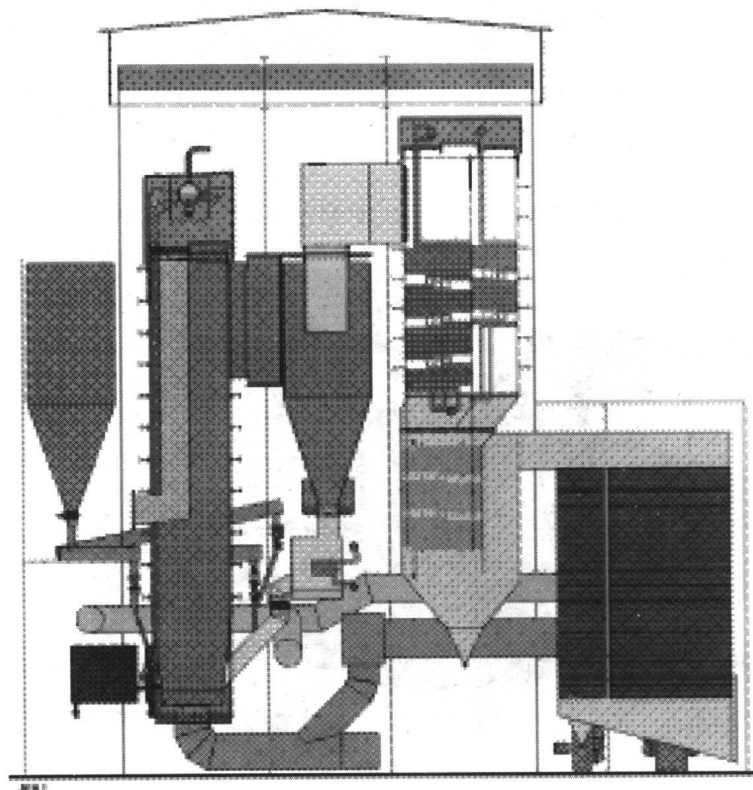


图 1-1 美国 JEA 电厂 2×300MW 循环流化床锅炉

大型超临界循环流化床锅炉有效结合了循环流化床锅炉和超临界锅炉的优点, 既可实现低成本污染控制, 又提高了锅炉蒸汽的压力和温度, 保证了锅炉的高效率。研究表明, 采用超临界蒸汽参数的循环流化床锅炉的发电热效率可以达到 43.2%, 这和传统的燃气蒸汽联合循环发电热效率相比已毫不逊色, 但其成本却大大降低, 因此大型超临界循环流化床锅炉有着一一般锅炉无法比拟的优势, 受到了世界各国能源部门和各大电力公司的关注。美国能源部资助 FW 公司开展了 600MW 等级超临界参数的循环流化床锅炉的研究开发, 主要是 600MW/31.1MPa/593℃/593℃和 600MW/37.5MPa/700℃/700℃两种炉型; 法国电力公司也委托 FW 公司进行其 600MW 超临界直流锅炉的设计研究, 锅炉的主蒸汽参数为 31MPa、593℃, 此台锅炉的布置图见图 1-3; 西班牙的 Endesa Generacion 电力公司、FW 的芬兰公司及芬兰、德国、希腊和西班牙的共六家公司, 已开始了 800MW 的循环流化床锅炉合作研

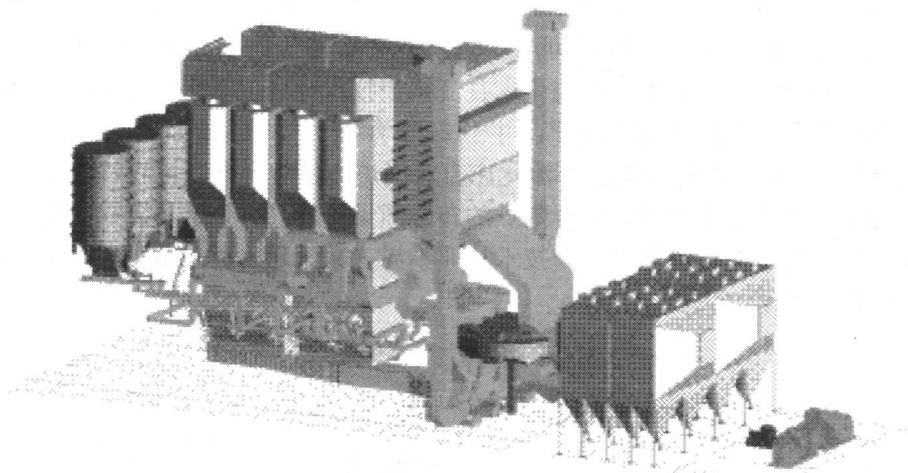


图 1-2 波兰 PKE 电厂的 460MW 超临界直流锅炉

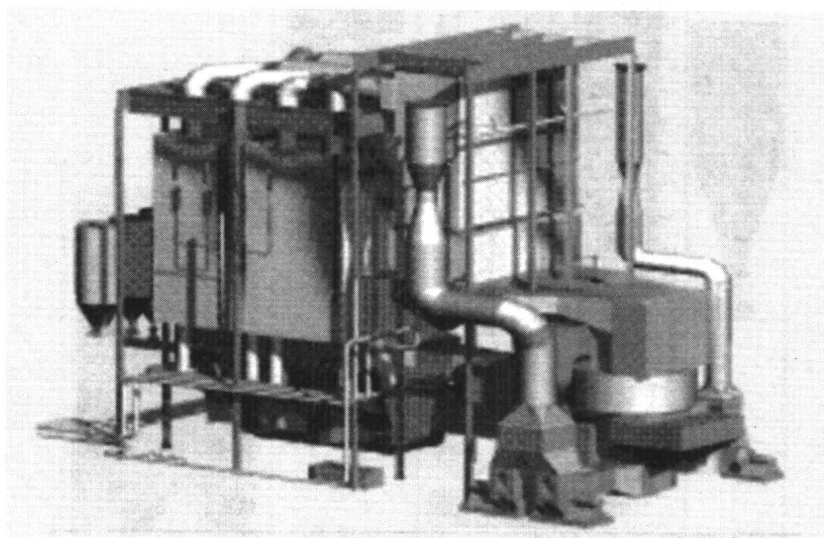


图 1-3 福斯特惠勒公司为法国电力公司研究设计的 600MW 超临界直流锅炉

究，此锅炉的运行参数为 $30.9\text{MPa}/604^{\circ}\text{C}/621^{\circ}\text{C}$ ；在这种需求形势下，有实力的循环流化床锅炉厂商也加快了自己开发研究超临界循环流化床锅炉的步伐，ABB-CE 公司正在着力于主参数为 $25\text{MPa}/569^{\circ}\text{C}$ 的 420MW 等级超临界循环流化床锅炉的设计研究；阿尔斯通公司 (Alstom) 目前已完成了 600MW 超临界循环流化床锅炉的设计，并准备由法国电力公司实施其示范工程。

二、循环流化床锅炉的类型

世界上比较知名的循环流化床锅炉厂商有芬兰的奥斯龙 (Ahlstrom) 公司 (1995 年已被美国福斯特惠勒公司兼并)、德国的鲁奇 (Lurgi) 公司、美国的福斯特惠勒 (Foster Wheeler) 公司、法国的 Stein 公司、美国的 ABB-CE 公司、德国的 Babcock 公司等。这些

厂商生产的循环流化床锅炉各有特点,各厂商在发展循环流化床锅炉的过程中,在技术上相互借鉴,相互融合,不断改进技术,至今循环流化床锅炉基本上形成了四大技术流派:芬兰奥斯龙公司的 Pyroflow 型 CFBB、美国福斯特惠勒公司的自有型 CFBB、德国鲁奇公司的 CFBB 和德国 Babcock 公司的 Circofluid 型 CFBB。

Pyroflow 型 CFBB 锅炉结构系统相对简单而耐用,占地少。上部有膜式水冷壁,下部还原区敷设耐水材料,采用绝热高温型旋风分离器,膜式壁炉膛内布置抗磨的 Ω 管屏或翼墙式受热面。回灰系统采用分叉式自平衡 U 型回料阀,部分冷烟气再循环,炉底送入一次风,浓相层上方送入二次风。一次风率为 40%~70%。通过调节炉内的一、二次风比例进行床温控制和过热汽温粗调。循环倍率高,可燃用多种燃料,从挥发分几乎为零的石油焦,到灰分超过 65% 的油页岩、无烟煤、废木材、泥煤、褐煤、石煤、烟煤、高硫煤工业废料等。

FW 自有型 CFBB 采用汽冷高温型旋风分离器,整体式 INTREX 换热器,目前单炉的最大容量等级为 120MW,由美国 FW 公司制造。

鲁奇公司的 Lurgi 型 CFBB 的炉膛布置了膜式水冷壁受热面,采用工作温度与炉膛燃烧温度(约 870℃)相近的高温型旋风分离器,循环灰回路上有一个可以选择的外置换热器(EHE),关键部件为控制 EHE 进灰量的锥型阀。EHE 分别设置蒸发受热面和再热器,把燃烧和传热过程分开调节。改变送入的高温循环物料量和风量即可控制吸热量和再热汽温。此种炉型把热炉膛作为燃料燃烧的场所,仅在上部布置少量屏式热面。炉温通过改变循环物料中“冷”、“热”两种物料的比例来保持 $850 \pm (10 \sim 20)^\circ\text{C}$,对脱硫非常有利。流速高、循环倍率高,床内气固两相混合密度大,炉内静压降大,旋风分离器阻力也大,使机组自身耗电比 Pyroflow 炉型高 15%。可燃用烟煤、褐煤、无烟煤、次烟煤、高硫煤、木质废料、洗煤尾料等燃料。

德国 Babcock 公司的 Circofluid 型 CFBB 炉膛运行气速相对较低,半塔式布置,炉膛上部布置过热器和高温省煤器受热面,炉膛出口温度约为 450℃,因而采用体积较小,耐温及防磨要求较低的中温型旋风分离器。这种中温型旋风分离器在一定程度上缓解了高温旋风筒的问题,炉膛上部布置较多数量的受热面,降低了旋风筒入口烟气温度和体积,旋风筒的体积和质量有所减小,因此相当程度上克服了绝热旋风筒技术的缺陷,使其运行可靠性高。但炉膛上部布置有过热器和高温省煤器等,需要采用塔式布置,炉膛较高,钢耗量大,锅炉造价高。同时,CO 排放及检修问题在一定程度上限制了该技术的发展。

三、循环流化床锅炉的基本工作原理和结构

不同厂家的循环流化床锅炉具有不同的特点,但它们的基本工作原理和结构大致相同。基本原理是床料(如煤)在床上以流化状态进行燃烧,较大颗粒的床料在燃烧室下部燃烧,细粒床料在燃烧室上部燃烧,被吹出的细粒床料由分离器收集后,再次送回床内循环燃烧。循环流化床锅炉与常规锅炉的主要不同点在于燃烧系统,循环流化床锅炉燃烧系统主要由流化床燃烧室、飞灰分离装置、飞灰回送器组成,见图 1-4。有的循环流化床锅炉还另设有外部流化床热交换器。燃料在燃烧系统内完成燃烧和大部分热量传递过程。

1. 流化床燃烧室

流化床燃烧室是流化床燃烧系统的主体,以二次风入口为界分为两个区。二次风入口以下称为密相区,为大粒子还原气氛燃烧区;二次风入口以上称为稀相区,为小粒子氧化气氛

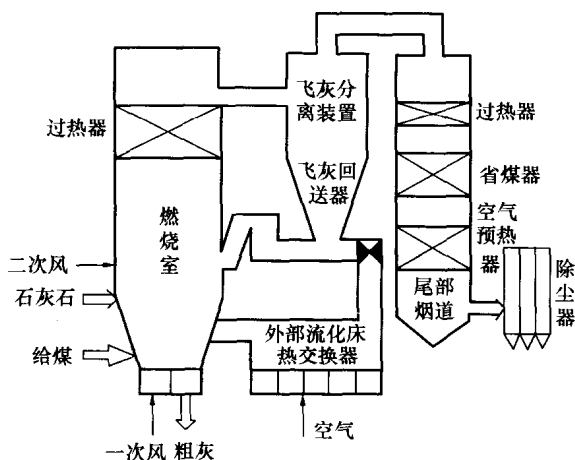


图 1-4 循环流化床锅炉系统结构

汽参数、石灰石的脱硫效率和利用率、负荷的调节范围和锅炉启动所需时间及散热损失、维修费用等均有重要影响。

3. 飞灰回送器

飞灰回送器是 CFB 锅炉飞灰回燃的重要部件之一。它的正常运行对燃烧过程的可控性、锅炉的负荷调节性能起决定性作用。它将分离器收集下来的飞灰送回流化床循环燃烧,又保证流化床高温烟气不短路流入飞灰分离器装置。如果这两个作用失常,飞灰的循环燃烧过程建立不起来,锅炉的燃烧效率将大为降低,燃烧室内的燃烧工况将变差,锅炉将达不到设计蒸发量。

4. 外部流化床热交换装置

德国 Lurgi 型、美国 FW 型和 ABB-CE 型 CFB 燃烧系统均设有外部流化床热交换器。芬兰奥斯龙型和我国的系统均没有采用外部流化床热交换器。外部流化床热交换器的作用是使分离下来的飞灰部分或全部（取决于锅炉的运行工况和蒸汽参数）通过它冷却到 500℃ 左右，然后通过飞灰回送器送至床内再燃烧。外部流化床热交换器内的流化速度是 0.3~0.45m/s，布置的受热面有省煤器、蒸发器、过热器、再热器等。外部流化床热交换器实质上是一个细粒子鼓泡流化床热交换器，具有传热系数高、磨损小的优点，解决了大型 CFB 锅炉内受热面布置不下等许多问题，但它的采用使整个燃烧系统更加复杂。

四、CFB 锅炉的特点

1. 优点

(1) 燃料的适应性好。由于采用流态化和再循环床式燃烧, 炉内循环物料量大, 蓄热量大, 燃料易着火, 只要燃料的热值大于把燃料本身和燃烧所需空气加热到稳定燃烧温度所需的热量, 这种燃料就能在 CFB 内稳定燃烧, 不需要使用辅助燃料助燃, 可以达到很高的燃烧效率。因此这种炉型能适应无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤、泥煤、煤矸石、石油焦、纸渣、木屑、垃圾等几乎所有的固体燃料。CFB 锅炉能烧优质燃料, 也能烧劣质燃料, 这对一些燃料来源、种类和质量多变的锅炉用户来源, 是十分适宜的。

(2) 燃烧效率高。由于炉内颗粒的内外循环延长了颗粒在炉内的停留时间, 且颗粒与气体的相对运动速度大, 可获得较好的传热传质效果, 即使部分负荷时, 燃烧效率也较高。

燃烧区。燃料的燃烧过程、脱硫过程、NO 和 NO₂ 的生成及分解过程主要在燃烧室内完成。燃烧室内布置有受热面，它完成大约 50% 燃料释放热量的传递过程。流化床燃烧室既是一个燃烧设备、热交换器，也是一个脱硫、脱氮装置，集流化过程、燃烧、传热与脱硫、脱硝反应于一体。

2. 飞灰分离装置

飞灰分离装置是循环流化床锅炉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。它的性能对燃烧室的气动力特性、传热特性、飞灰循环、燃烧效率、锅炉出力、蒸

(3) 低污染排放。燃烧的同时完成炉内脱硫、脱氮,以低成本实现低污染排放。由于 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ 的燃烧温度是以石灰石作为脱硫剂的脱硫反应的最佳温度区段,在燃烧时向炉内加入适量的石灰石,能得到 $90\%\sim 97\%$ 以上的 SO_2 的脱硫率;同时,由于床温低于 900°C ,一、二次风分级燃烧,这既保证充分燃烧,又形成局部还原区,有效地抑制 NO_x 的生成, NO_x 的排放浓度标准状态下可低于 $200\sim 250\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(4) 操作灵活,易于调峰。当负荷变化时,只需调节给煤量和流化速度就可满足负荷的变化。由于 CFB 锅炉蓄热量大,炉内存有大量 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ 的固体颗粒,燃料在炉内处于强烈紊流燃烧状态,燃烧稳定。一般不投油最低稳燃负荷可达 $30\%\sim 35\%$ 。一般情况下,CFB 锅炉的热负荷变化范围为 $100\%\sim 25\%$,变化速率为 $5\%\sim 10\%$ 。

(5) 易于灰渣的综合利用。CFB 锅炉燃烧过程属于低温燃烧,炉内的优良燃烧条件使得锅炉的灰渣未经高温熔融过程,属于低温烧透,含碳量低,活性好,便于利用。灰渣常见用途有制作水泥、建筑用烧结砖、陶粒、农业用灰、园艺栽培等。

(6) 投资和运行费用适中。CFB 锅炉的投资和运行费用略高于常规煤粉锅炉,但比配置脱硫装置的煤粉炉低 $15\%\sim 20\%$ 。

(7) 节省土地和水资源。由于 CFB 锅炉脱硫脱硝均在炉内进行,不需要另建烟气净化装置,因而用地和耗水较少。

2. 缺点

(1) 飞灰的再循环燃烧,一次风机风压高,耗电量大。另外还有一次风机、二次风机、播煤风机、点火增压风机和送灰风机之分,布置复杂。

(2) 膜式水冷壁的变截面处和裸露在烟气冲刷中的耐火材料砌筑部件易磨损。

(3) 高温分离器和飞灰回送器有笨重的耐火材料内砌体,冷热惯性大,给支撑和快速启停带来困难。

(4) 由于 CFB 锅炉是新事物,各方面发展仍不完善。如自动调节控制特性、风机系统配套、灰渣综合利用等仍需进一步研究。

第三节 我国循环流化床机组的应用情况与发展趋势

当前,我国正处于一个经济快速发展的时期,工业化进程加快,对能源的需求迅速增加。由于我国有相当丰富的煤炭资源,加上经济发展等方面的条件制约,在能源开发中基本上形成了以煤为主的格局。目前我国每年煤炭消费量约 12 亿 t,其中 80% 通过燃烧被利用。我国煤炭资源的一个重要特点是高硫煤占相当大比例,含硫量大于 1% 的高硫煤占总储存量的 25% 以上。燃用这样的煤发电排放物自然会在一定程度上给大气造成污染。为解决这一问题,我国科技工作者做了大量工作,研究和应用流化床是解决污染问题的重要措施之一。

早在 20 世纪 60 年代开发出的鼓泡流化床得到了大量推广和应用,形成了一定规模,并取得了较好的效果。进入 80 年代后,随着我国改革开放的发展,我国科技工作者得以及时了解国际先进技术,循环流化床燃烧技术在减少污染物排放方面的优势引起了国家和广大科技工作者的关注,遂开始了这方面的研究。1981 年国家科学技术委员会下达的“煤流化床燃烧技术的研究”课题启动了我国循环流化床技术研究工作。

最先进入这一研究领域的是我国一些高等学府和研究机构,如清华大学、浙江大学、华

中理工大学和中国科学院工程热物理研究所。清华大学 1983 年就开始了循环流化床的研究开发工作；中国科学院工程热物理研究所在 1984 年建成了热功率为 2.8MW 的循环流化床燃烧试验装置，并联合河南开封锅炉厂（现为开封得胜锅炉股份有限公司）开展了循环流化床锅炉产品的开发工作，1986 年研制出了我国第一台 10t/h 循环流化床锅炉，于 1987 年在开封中药制药厂经调整试运行后通过了省部级鉴定，该锅炉开创了我国循环流化床锅炉产品生产的先河，填补了国内空白；随后 1988 年济南锅炉厂生产出的 35t/h 循环流化床电站锅炉在山东明水热电厂投产，发电功率为 6MW；1989 年辽宁省内的鞍山第二热电厂、大连金州热电厂和锦西热电厂分别安装投产一台 75t/h CFB 锅炉，这三台锅炉分别由三个锅炉厂制造生产，均是我国 75t/h CFB 锅炉试点工程，这些试点工程为循环流化床电站锅炉的开发和推广应用积累了经验。

进入 20 世纪 90 年代后，各锅炉厂相继推出了自己开发生产的 65、75t/h 循环流化床锅炉，如北京巴威公司的 BWB-75/5.29-M 锅炉、杭州锅炉厂的 NG-65/3.82-M 锅炉、四川锅炉厂 CG-75/5.29-M 锅炉、济南锅炉厂的 YG-75/5.29-M 锅炉。这些锅炉受到了热电厂的欢迎，1991 年间先后在各地的热电厂投产运行，循环流化床锅炉得到了推广应用。到 90 年代中期，投产的 75t/h 以下循环流化床锅炉的数量已达到了 200 余台。这些循环流化床锅炉在运行中暴露出很多问题，主要问题是出力不足、主蒸汽温度低、磨损严重、自动化水平低、

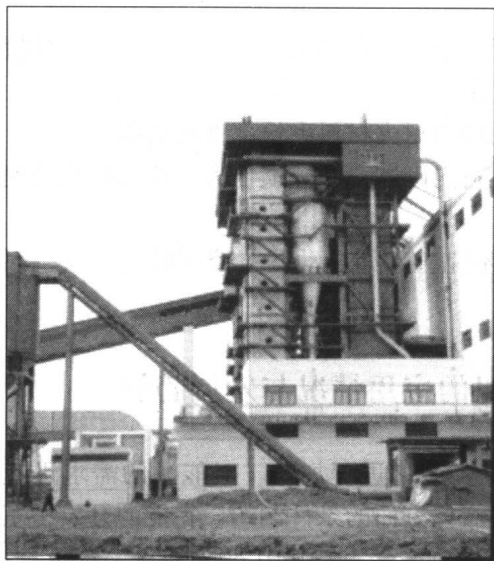


图 1-5 75t/h 循环流化床锅炉

配套辅机故障率高等。进入“九五”后，针对循环流化床锅炉运行中存在的问题，重点组织了 75t/h 循环流化床锅炉的完善化工作。通过完善化工程，75t/h 循环流化床锅炉存在的主要问题基本得到了解决，机组可用率得到了提高，75t/h 循环流化床锅炉（见图 1-5）进一步得到了应用。到 2002 年，全国已有 500 多台 75t/h 循环流化床锅炉在运行，每年燃用低热值劣质煤（煤矸石、泥煤等）400 万 t，大大节省了能源，改善了环境，取得了显著的经济和社会效益。

在 75t/h 循环流化床锅炉开发并得到应用的同时，用户提出了对大容量循环流化床机组的需求，各锅炉厂积极响应，纷纷开始对 130t/h（25MW）、220t/h（50MW）循环流化床锅炉的开发研制工作。不同的锅炉厂在不

同容量的锅炉中采取了不同的开发研制路径。我国三大锅炉厂〔上海锅炉厂有限公司（简称上海锅炉厂）、哈尔滨锅炉厂有限责任公司（简称哈尔滨锅炉厂）、东方锅炉（集团）股份有限公司（简称东方锅炉厂）〕在 220t/h 循环流化床锅炉上均采用了从国外引进技术与国外合作生产循环流化床锅炉的模式。如哈尔滨锅炉厂 1992 年就从美国引进了 220t/h（50MW）循环流化床锅炉的生产技术，采用这种方式，加速了开发进程，迅速推出了产品，哈尔滨锅炉厂生产出的国内第一台 220t/h 循环流化床锅炉于 1995 年在大连化学公司自备热电厂投运。随后，东方锅炉厂生产的 220t/h 循环流化床锅炉于 1996 年在浙江宁波中华纸业公司投

产运行。哈尔滨锅炉厂生产一台 220t/h 循环流化床锅炉于 1997 年在浙江杭州协联热电有限公司投产运行。上海锅炉厂生产的重庆爱溪电厂 220t/h 循环流化床锅炉也很快投入了运行。在 130t/h (25MW) 循环流化床锅炉上,一些锅炉厂采取了自主开发的模式,需要的时间较长一些,但具有自主知识产权。四川锅炉厂与清华大学合作开发,2000 年 12 月 25 日其第一台燃用柳江煤矿劣质煤的 130t/h (25MW) 循环流化床锅炉在秦皇岛北山发电厂投运,如图 1-6 所示。同期,上海锅炉厂与中国科学院工程热物理研究所共同研制成功的一台燃用劣质煤的 130t/h (25MW) 循环流化床锅炉在甘肃窑街煤电公司投入运行。130、220t/h (50MW) 这样中容量的循环流化床锅炉较小容量的循环流化床锅炉有明显的优势,对 130、220t/h 循环流化床锅炉进行测算(按年运行 5000h、脱硫效率 80%),每台锅炉每年可分别燃用劣质煤 12 万、19 万 t;减排二氧化硫 2784、4560t;节约脱硫费用分别为 222 万、364 万元;而且减少了大量劣质煤的占地问题,受到了用户的青睐,为发展大容量循环流化床锅炉奠定了技术基础。

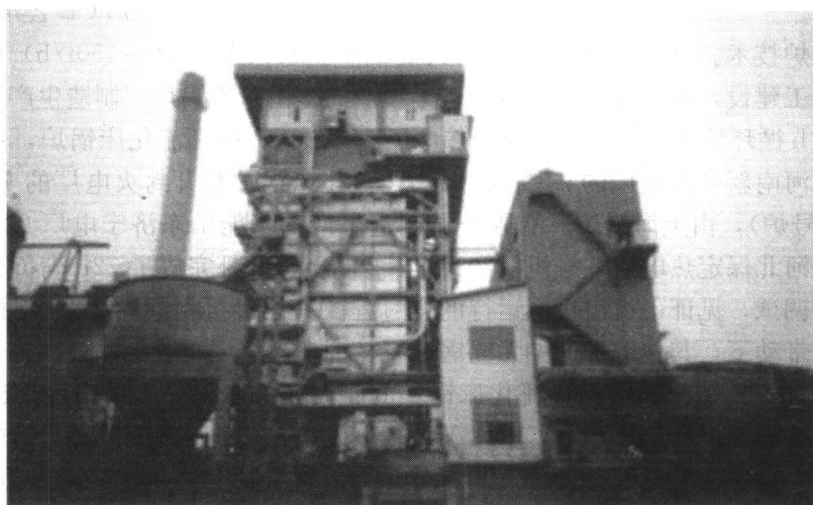


图 1-6 秦皇岛北山发电厂 130t/h (25MW) 循环流化床锅炉

我国第一座大型 100MW 循环流化床锅炉示范电站是四川内江白马发电总厂的高坝电厂,如图 1-7 所示,于 1994 年 8 月 18 日正式开工建设,装有从芬兰奥斯龙公司引进的一台 410t (100MW) 具有世界先进水平的 Pyroflow 型循环流化床锅炉机组,该机组于 1996 年 5 月 18 日首次试投煤运行。1996 年 6 月 26 日 23:05 通过了 72h 连续运行,同年 9 月移交试生产。经长时间的运行调整,机组脱硫效率达到 90% 以上,而且还可在炉内实现脱硝。1998 年 1 月此机组进行了性能考核验收,各项环保指标均达到或超过国家标准,其中锅炉热效率为 90.8% (设计值为 90.7%),标准体积烟气中排放 SO_2 的质量浓度为 $684\text{mg}/\text{m}^3$,脱硫效率达到 91%, NO_x 、粉尘等的排放量均小于设计值。自 1996 年投运以来,该机组总体运行情况良好,循环流化床锅炉高效低排放的特点、良好的调峰性能和稳定的低负荷运行能力得到了充分的体现,对我国循环流化床锅炉产业的发展起到了积极的示范和推动作用,此循环流化床锅炉示范电站的成功投运拉开了我国应用大容量 (100~150MW) 循环流化床锅炉的序幕。

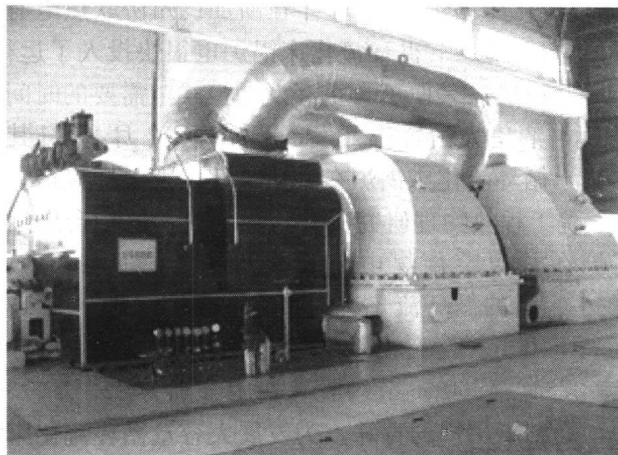


图 1-7 我国第一台 100MW 循环流化床机组（高坝发电厂）

东方锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂纷纷开始了 100~135MW (410~450t/h) 循环流化床锅炉的开发研制，为了尽快形成生产力，三家锅炉厂最初采用了从国外引进先进技术的方式，东方锅炉厂先是引进了福斯特惠勒公司 100MW 高温高压循环流化床锅炉技术，之后又在此基础上开发了 135MW 超高压中间再热循环流化床锅炉技术；哈尔滨锅炉厂引进了德国 EVT 公司（现阿尔斯通公司德国部）的 135MW 循环流化床锅炉技术；上海锅炉厂引进了阿尔斯通公司美国部（原 ABB-CE 公司）的 135MW

循环流化床锅炉技术。进入 21 世纪后，一大批 100~135MW (410~450t/h) 循环流化床电站项目相继开工建设，在这批工程项目中较早投产的是由东方锅炉厂制造生产的河北保定热电厂 2×450t/h 循环流化床锅炉和石家庄热电厂 4×410t/h 循环流化床锅炉，由哈尔滨锅炉厂制造生产的河南新乡火电厂的 2×440t/h 循环流化床锅炉和开封火电厂的 440t/h 循环流化床锅炉（2 号炉），由上海锅炉厂有限公司制造生产的华能山东济宁电厂 2×440t/h 循环流化床锅炉。河北保定热电厂 8 号机投产最早，2002 年 12 月完成了 72h 满负荷试运行，笔者参与工程的调试，见证了机组投产运行的全过程。其他机组相继在 2003 年投产运行。在三大锅炉厂的带动下，其他锅炉厂如无锡锅炉厂、济南锅炉厂、武汉锅炉厂等也迅速开展了 100~135MW 超高压中间再热循环流化床锅炉的研制和生产工作，并很快推出了产品，在循环流化床电站市场上开展了角逐。以武汉锅炉厂为例，其为徐州姁城电力有限责任公司生产的两台 135MW 机组配套了 440t/h 超高压中间再热循环流化床锅炉，两台机组于 2004 年 2 月 28 日开工建设，分别于 2005 年 7 月 11 日和 9 月 16 日顺利完成 168h 满负荷试运行，并移交电厂转入商业运行。

在采用引进技术生产的循环流化床锅炉相继开工建设的同时，各锅炉厂和国内相关的研究机构也开展了具有自主知识产权的 100~135MW 循环流化床锅炉研究和制造工作。国家电力公司西安热工研究院、四川电力试验研究院等国内科研单位对高坝电厂引进的 100MW CFB 锅炉进行了系统的消化吸收试验研究工作，取得了大量的研究成果，并在研究分析国外 34 台 100MW 以上 CFB 锅炉技术特性的基础上，先后完成“消化吸收内江电厂 100MW CFB 锅炉技术的试验研究”和“100MW CFB 锅炉机组系统、辅机及配套系统的开发研制”两个课题、共计约 60 万字的技术研究报告。这些研究报告推动了我国 CFB 锅炉技术进步，为国产 CFB 锅炉及辅助配套系统设备的研制提供了可以应用的大量技术数据和技术资料，为大型 CFB 电站锅炉的产业化发展和实际应用打下了坚实的基础。通过一系列 CFB 电站锅炉的研究、改造、调试、性能考核及多项试验研究工作，国家电力公司西安热工研究院基本掌握了 100~135MW 循环流化床锅炉技术，该院与哈尔滨锅炉厂合作联合开发，成功制造出了国内第一台具有自主知识产权的 100MW 循环流化床锅炉，该机组于 2003 年 6 月在江