

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENGJIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

循环流化床燃烧锅炉

冯俊凯 岳光溪 吕俊复 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

普通高等教育

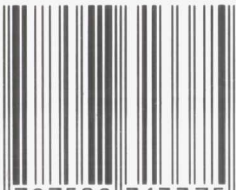


“十五”

规划教材

PUTONG
GAODENGJIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

ISBN 7-5083-1337-2



9 787508 313375 >

ISBN 7-5083-1337-2

定价： 20.00 元

TK229.6

F470

华北水利水电学院图书馆



208583059

普通高等教育



“十五”

规划教材

PUTONG

GAODENGJIAOYU

SHIWU

GUIHUA JIAOCAI

循环流化床燃烧锅炉

冯俊凯 岳光溪 吕俊复 主编

赵长遂 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

858305

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”规划教材。

本书主要包括循环流化床燃烧锅炉概述,循环流化床燃烧中气固两相流的基本理论,循环流化床锅炉中的传热、传质及燃烧,循环流化床锅炉的污染控制,循环流化床锅炉的数学模型,循环流化床锅炉动态模型及仿真,循环流化床燃烧设备的设计与运行和循环流化床锅炉的安装及运行等内容。

本书论述深入浅出,图文并茂,内容选取具有较强的针对性和实用性,便于读者学习和参考。

本书主要作为热能与动力工程及相关专业的教材,也可作为专科、高职及函授教材和该专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床燃烧锅炉/冯俊凯,岳光溪,吕俊复主编.北京:
中国电力出版社,2003
普通高等教育“十五”规划教材
ISBN 7-5083-1337-2

I.循... II.①冯...②岳...③吕... III.流化床-循环
锅炉-高等学校-教材 IV.TK229.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第073590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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003年11月第一版 2003年11月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 13.25印张 309千字
印数0001—3000册 定价20.00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

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有

本学科(专业)的特色,而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同,同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审,推荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222)

中国电力教育协会

二〇〇二年八月

前言

我国是世界上最大的产煤与耗煤国家。在我国，煤主要是用作燃料燃烧。煤在燃烧过程中会排放出大量的灰渣、粉尘、二氧化硫和氮的氧化物等污染物，严重影响生态环境。因此在用煤作为主要燃料时，实现其高效、低污染的燃烧是有非常重要意义的。

循环流化床燃烧技术是 20 世纪 70 年代发展起来的清洁煤燃烧技术，是解决燃烧煤而产生的污染问题的主要方法之一。此外，循环流化床燃烧还有对不同性质的燃煤适应性强，适于烧低质煤等特点。在煤含硫量高时，还可以在燃煤中加入石灰石，在燃烧中低成本地脱硫，而不必加设投资巨大的烟气脱硫设备。在循环流化床燃烧中，燃烧温度低，空气又分级送入，燃烧中所产生的氮的氧化物很低，煤燃烧后所余下的灰渣活性强，便于生产水泥，用来综合利用。它是没有废弃物的燃烧方法。由于它有这些优点，近 20 年来得到迅速的发展。我国在这项技术的利用和发展中，在燃烧机理、设计准则、调试运行技术等方面，都累积了大量的理论和运行经验。所设计制造的这种锅炉，已经从示范设备发展为成熟的产品。我国 220t/h 及以下容量的这种锅炉已经成为成熟的产品，现在正在进行 410~480t/h 的这种锅炉的示范工程。国外已经在运行的单机容量达 300MW，若干台 200~300MW 的循环流化床燃烧锅炉正在运行或建设中。

我国是世界上最早进行流化床技术研究开发的国家之一，20 世纪 80 年代就开始了循环流化床燃烧技术的研究。经过近 20 年的艰苦努力，开发出多种类型的、具有中国特色的循环流化床锅炉。据不完全统计，截至 2000 年底，已经投运和正在建设的循环流化床锅炉达 830 台左右。本书编者经过长期的实践摸索和深入的实验研究，积累了丰富的经验，已经基本上全面地掌握了这项技术。为促进循环流化床燃烧技术的发展，特组织起来编写了本书。

本书全面介绍了循环流化床燃烧技术的基本理论，介绍了国际上循环流化床锅炉的最新发展动态，总结了这种锅炉的结构、布置方式、设计和计算方法以及安全运行的方法等。

本书由冯俊凯、岳光溪、吕俊复主编，赵长遂主审。各章编写人如下：第一章：毛健雄、吕俊复；第二章：齐茂展、李广海；第三章：岳光溪、吕俊复；第四章：黄信仪、刘青；第五章、第六章：李政、倪维斗；第七章：吕俊复、毛健雄；第八章：岳光溪、吕俊复。最后由吕俊复、张建胜对全稿进行了校对和整理，王昕、高强参与处理修

改部分插图。

书中引用了大量的文献资料，并且得到有关锅炉公司的大力支持，由于篇幅所限，未能一一列出，谨在此向有关作者和单位致以衷心的感谢。

由于本书的编写人员较多，错误或遗漏在所难免，敬请读者给予批评、指正。

编者

2003年6月于清华园

目 录

序 前言

第一章 循环流化床燃烧锅炉概述	1
第一节 循环流化床燃烧技术	1
第二节 循环流化床燃烧技术的基本工作原理	8
第三节 循环流化床燃烧技术的发展历史及现状	14
第四节 循环流化床燃烧技术的发展前景	17
第五节 我国循环流化床燃烧技术的发展	22
第二章 循环流化床燃烧中气固两相流的基本理论	24
第一节 流态化理论	24
第二节 循环流化床中气固两相流的流动	39
第三节 气固两相流中的气固分离	46
第三章 循环流化床锅炉中的传热、传质及燃烧	57
第一节 循环流化床锅炉的物料平衡理论	57
第二节 循环流化床燃烧室受热面换热系数的试验研究	59
第三节 循环流化床锅炉传热计算	63
第四节 循环流化床燃烧份额分布	69
第五节 气固分离器	78
第六节 循环流化床锅炉设计基础	80
第四章 循环流化床锅炉的污染控制	85
第一节 循环流化床燃烧中脱硫的机理	85
第二节 循环流化床锅炉脱硫剂的研制及实践	91
第三节 脱硫灰渣的综合利用	102
第四节 循环流化床锅炉中氮氧化物的生成与控制	103

第五章 循环流化床锅炉的数学模型	112
第一节 概述	112
第二节 循环流化床燃烧系统建模的特殊性及对策	113
第三节 循环流化床数学模型的任务和基本原理	114
第四节 小室模型简介	115
第五节 循环流化床主体模型	116
第六节 循环流化床子模型	120
第七节 循环流化床主体模型的求解	130
第八节 循环流化床数学模型的整体结构及流程	133
第九节 循环流化床数学模型的功能	133
第六章 循环流化床锅炉动态模型及仿真	136
第一节 动态与静态数学模型的对比	136
第二节 循环流化床动态过程分析	137
第三节 正常运行工况下的动态数学模型	138
第四节 用于仿真培训装置研制的全工况数学模型研究	139
第五节 循环流化床动态数学模型计算结果示例	141
第七章 循环流化床燃烧设备的设计与运行	144
第一节 循环流化床锅炉的基本结构	144
第二节 大容量循环流化床锅炉实践	165
第八章 循环流化床锅炉的安装及运行	173
第一节 循环流化床锅炉的安装要求	173
第二节 循环流化床锅炉冷态特性试验	176
第三节 循环流化床锅炉的点火	183
第四节 循环流化床锅炉的运行操作	186
第五节 循环流化床锅炉辅助设备	191
第六节 循环流化床锅炉热平衡测试	194
第七节 循环流化床锅炉运行事故分析	197
参考文献	202

第一章

循环流化床燃烧锅炉概述

第一节 循环流化床燃烧技术

一、能源与环境

我国是世界上最大的发展中国家，同时也是世界上最大的煤生产与消耗国。煤在我国一次能源构成中占据着绝对主要的地位，见表 1-1。由于自然条件的限制和历史发展的原因，据预测，这种状况在相当长的时期内不会有实质性改变。

表 1-1 中国一次能源消费构成统计和预测

年份	消费总量 (Mt 标准煤)	煤 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	水电 (%)	核能 (%)	新能源 (%)
1980	602.75	71.9	21.2	2.9	4.0	—	—
1990	987.03	76.2	16.6	2.1	5.1	—	—
2000	1502.0	71.2	19.8	3.0	4.2	1.8	—
2030	3075.0	65.0	8.0	5.0	7.5	11.0	3.5

与其他一次能源（如石油、天然气、水力、地热、太阳能等）相比，煤是一种较“脏”的燃料。煤在燃烧过程中将产生大量的灰渣、粉尘、废水、 SO_2 、 NO_x 等废弃物，见表 1-2，如未能妥善处理，将会严重干扰生态环境，甚至造成永久性的破坏，进而危害人类自身的生存和发展。

表 1-2 燃料为天然气、石油和煤的典型 100MWe 锅炉主要污染物比较 (t/a)

污染物	粉尘	SO _x	NO _x	CO	CH _x
天然气	46	12	12080	—	—
石油	73	52660	217000	8	67
煤炭	449	139250	20880	210	520

改革开放 20 多年来,我国经济高速发展,能源工业前进的步伐更快些。但在人民生活水平日益提高的同时,环境污染亦达到了惊人的程度,生态环境严重恶化。我国的 SO₂ 排放量居世界第一,酸雨区域已经蔓延到 40% 的国土面积,多数大城市的空气总悬浮颗粒浓度超过世界卫生组织标准的十几倍甚至几十倍。

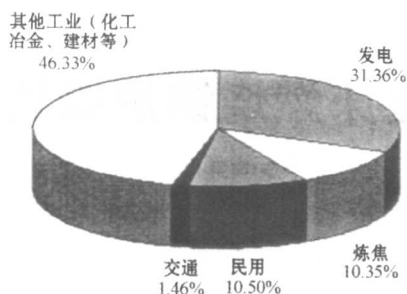


图 1-1 1999 年我国煤炭消费结构

导致我国环境恶化的诸多因素中,煤的利用不当首当其冲。在我国,煤主要用作燃料,见图 1-1,且多是未经洗选、分级等初级加工的原煤。与发达国家相比,我国现有各类电站锅炉和工业锅炉在效率和排放上差距相当大,它们是环境污染的主要根源之一。我国燃煤效率低、污染重的另一个重要原因在于大量小型低效率燃煤锅炉的存在。为了解决这些工业和民用小型锅炉的“多、散、乱、差”,建设一批区域性集中供热、供汽的清洁热电厂是十分必要的。利用先进技术建设高参数、大容量的清洁燃煤(热)电厂,

不但可以显著降低废弃物排放、满足充足的电力供应,还可以大量减少煤在工业和民用方面的消耗,从而为保护环境作出更大贡献。目前,环境保护已成为世人的共识,在中国也开始广受关注、深入人心。可持续发展是我国的基本国策,我们必须在保护环境、改善环境的条件下让煤继续为我国的发展提供动力,依靠科学和技术,实现煤利用的高效和清洁。

二、清洁煤燃烧技术——循环流化床燃烧技术

煤炭利用和环境污染其实并非必然关联。国内外多年的工业应用和科学研究表明,在一定的经济技术条件下,煤的高效、清洁利用完全可以实现。

燃料一般都含有硫分,我国的煤炭平均含硫量为 0.9%。但硫在煤中的分布在空间上极不均匀,其大致的趋势是南高北低、深层煤含硫高而浅层煤含硫低。

为降低燃煤造成的 SO₂ 排放量,国家环保局制定和修订了一系列的法规和标准,如 1997 年 1 月 1 日实施的新修订的《火电厂大气污染排放控制的标准》就规定了 SO₂ 的最高排放标准,见表 1-3。依据该标准,燃用含硫量超过 1% 的燃料的新建锅炉必须

表 1-3 我国 SO₂ 最高允许排放浓度

燃料含硫量	≤1.0 %	>1.0 %
最高限值 (mg/Nm ³)	2100	1200

安装脱硫装置才能达标。一般而言,燃煤脱硫技术可分为三大类:燃烧前处理、燃烧过程中处理和燃烧后处理。其中燃烧前处理包括动力煤洗选加工、型煤加工、水煤浆技术等。应用范围较广的是动力煤洗选加工,它主要指通过动力煤的洗选和加工来降低煤中的灰分和硫分。洗选一般采用物理方法。这种技术对煤里面的有机硫没有处理能力。同时这种技术不是

彻底的脱硫，而是煤中的硫分在商品煤和选后洗中煤、洗矸中的再分配。如果洗中煤、洗矸又被用来燃烧，那么依然会造成 SO_2 污染问题。燃烧后脱硫技术（烟气脱硫技术）是目前世界上控制燃煤排放 SO_2 应用最广泛的技术，但采用该技术的投资和运行费用均比较高。燃烧过程中的脱硫技术主要是煤气化联合循环和流化床燃烧技术。在煤气化联合循环系统中，煤先在气化炉中生成燃料气之后送入燃气轮机系统燃烧。气化过程中，煤中的硫分通过与脱硫剂反应而被固定下来。但是煤气化联合循环投资很大且技术复杂，所以在我国的应用将是一个长期的过程。流化床燃烧技术包括鼓泡流化床锅炉、常压循环流化床锅炉和加压流化床联合循环。流化床中煤和石灰石一起给入炉膛，燃烧后煤中的硫生成 SO_2 ，在燃烧过程中与脱硫剂反应而被固定，脱硫系统简单。在燃料适应性、燃烧效率等方面，循环流化床燃烧技术比鼓泡流化床向前推进了一步，在 Ca/S 比为 2 左右时就可以达到 85% ~ 90% 的脱硫效率，因而是一种很有前途的技术。

这些高效清洁燃煤发电技术目前在国际上已投入使用或已基本成熟。从技术完备性和经济适用性角度来看，煤气化联合循环和加压流化床联合循环近期都不可能在我国投入大规模工业应用；煤粉炉加烟气脱硫在技术上最为成熟，国际上应用最广，但由于净化技术成本过高，在我国作商业性推广面临一些现实的困难；相比之下，循环流化床燃烧技术基本成熟，制造和运行成本都比较低，在保证高效燃烧的基础上能显著降低废弃物排放，可以满足目前世界上最严格的环保标准。表 1-4 给出了各技术的投资、运行费用、技术现状的比较。从初投资、运行成本、技术的可靠性及系统的复杂程度综合来看，循环流化床炉内脱硫是一个良好的选择。

表 1-4 典型脱硫技术的比较

过程	技术措施	脱硫效率 (%)	运行费用 (元/ tSO_2)	寿命 (a)	总投资 (元/ tSO_2)	存在问题
燃前	洗选脱硫	30 ~ 40	400	20	560.5	洗出物处理
	民用型煤	40 ~ 50	1600	15	2009	脱硫效率低
	工业型煤	50 ~ 70	3200	15	3843	成本及质量
燃中	循环床脱硫	85 ~ 90	500	20	1241	技术及管理
燃后	湿法烟气脱硫	90 ~ 95	1100 ~ 1600	20	1700 ~ 2200	成本高

应用于发电领域的常压循环流化床燃烧技术始于 20 世纪 70 年代末。作为一项高效、低成本的清洁燃烧技术，它具有以下优点：

- (1) 燃烧效率高，接近或达到同容量煤粉炉的效率水平；
- (2) 燃料适应性强，不仅可以燃用烟煤等优质煤，而且可燃用各种劣质燃料，如褐煤、贫煤、洗中煤、泥煤、矸石、石油焦、油页岩、废木屑，甚至工业废弃物和城市垃圾等；
- (3) 负荷调节比宽，在 25% 额定负荷下仍能稳定燃烧；
- (4) 负荷调节方便快捷，负荷连续变化速率可达 (7% ~ 12%) /min；
- (5) 污染物排放少，低温燃烧及分级送风使 NO_x 生成量少，可用石灰石作脱硫添加剂，低成本实现炉内脱硫；
- (6) 灰渣便于综合利用。

上述诸多优点使得循环流化床燃烧技术特别适合我国的国情。近 20 年来，世界各国有

很多科研机构和制造厂商致力于循环流化床锅炉的开发研究，共同的努力使此项技术日臻成熟和完善。迄今，美国的FW、芬兰的Ahlstrom（已并入FW）、德国的Lurgi、瑞典的ABB和法国的Stein等公司都能提供商品化的功率为100MWe以上的全套大型循环流化床锅炉发电设备。法国Provence于1995年建成投运了世界上蒸发量最大的250MWe循环流化床锅炉，许多公司还完成了容量等级更高的循环流化床锅炉的设计。

图1-2示意了一个典型的循环流化床锅炉系统。

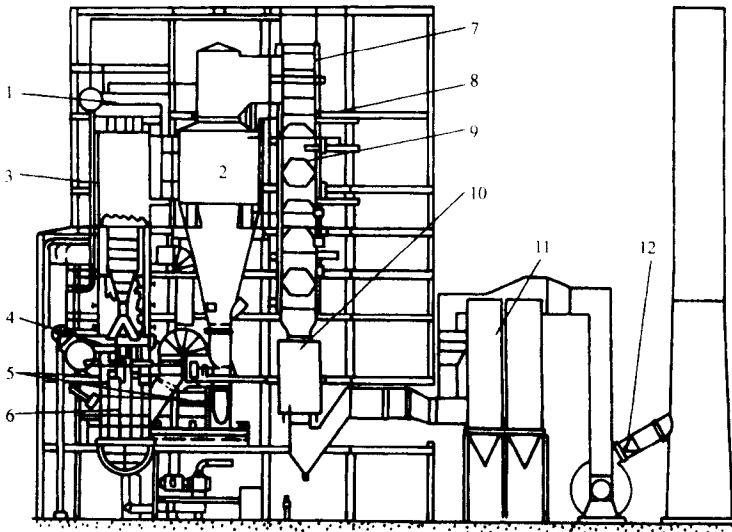


图 1-2 循环流化床锅炉系统示意图

1—汽包；2—旋风分离器；3—燃烧室水冷壁；4—重力式给煤系统；5—外置沸腾床热交换器；6—燃烧室底部耐火衬；7—尾部烟道；8—过热器；9—省煤器；10—管式空气预热器；11—布袋除尘器；12—引风机

我国于20世纪80年代中期开始投入力量积极从事循环流化床燃烧技术的研究开发，虽然起步较晚，但进步很快。清华大学、中科院热物理所等科研院所与国内锅炉生产厂家合作，在燃烧、传热、流态化、气固分离、脱硫、灰渣处理等方面完成了大量卓有成效的理论和实验研究工作。目前，国产蒸发量20.83kg/s及以下容量等级的小型循环流化床锅炉已在国内大面积工业推广，实现了商品化；36.11kg/s等级的循环流化床锅炉已有数台运行；61.11kg/s的循环流化床锅炉正在陆续投运；116.67kg/s再热循环流化床锅炉已完成设计并通过了技术鉴定；国产135MW再热循环流化床锅炉已有多台投入运行；更大容量的循环流化床锅炉设计正在积极酝酿和筹划中。引进技术或设备的61.11kg/s以上容量的循环流化床锅炉已有50余台，正在进行300MWe循环流化床锅炉技术和设备引进工作。

三、流化床燃烧技术的发展历程

在煤燃烧技术发展的历史上，流化床燃烧是近40多年来发展起来的最新的燃烧技术。自工业革命以来，随着工业的发展，各种不同的煤燃烧技术的开发和发展均有其当时的时代背景。在19世纪80年代，随着蒸汽机的发明，开发出了固定床层燃技术，至今，我国工业

锅炉的绝大多数仍然是层燃锅炉。至 20 世纪 30 年代, 层燃技术已不能满足电力工业对更大容量、更高效率的燃煤锅炉的需求, 从而开发出了煤粉燃烧技术。60 多年来, 煤粉燃烧技术已得到了长足的发展, 现在仍然是统治着全世界燃煤发电厂的燃烧方式。煤粉炉不但可以燃烧各种不同的煤种, 并能达到 90% 以上的锅炉效率, 煤粉炉的单机最大容量已达 1300MWe。煤粉炉可设计成超临界蒸汽参数的机组, 并实现了运行操作的全部自动化。

至 20 世纪中期, 工业的迅速发展, 包括大量燃煤锅炉在内的工业过程产生了严重的污染问题, 迫切要求发展洁净煤技术, 包括煤的清洁燃烧技术。在这一历史背景下, 除了对煤粉炉开发了许多在炉内和烟气中降低污染物排放的技术外, 在 60 年代末至 70 年代初期, 流化床煤燃烧技术应运而生。在流化床煤燃烧技术开发的初期, 主要是发展了鼓泡流化床技术。在鼓泡流化床技术的基础上, 在 70 年代末期, 开发出了循环流化床燃烧技术。由于鼓泡流化床锅炉和循环流化床锅炉都是以流态化原理进行工作的, 所以它们都属于流化床。

我国是国际上最早开展流化床燃烧技术研究开发的国家之一。自从 1965 年建成第一台燃烧油页岩的工业鼓泡流化床锅炉以来, 流化床煤燃烧技术很快在全国得到推广。现在全国已有 3500 余台鼓泡流化床锅炉在运行, 数量位居世界之首。80 年代以后, 我国开始循环流化床燃烧技术研制以后, 发展迅速。据不完全统计, 截至 2000 年底, 已有 830 余台循环流化床锅炉投入运行, 但大多数为容量在 20.83~61.11kg/s 以下的中小型锅炉。

世界上作为一种先进的清洁煤燃烧技术, 流化床锅炉技术 20 多年来得到了很大的发展。现在, 容量为 350MWe 的世界上最大的鼓泡流化床锅炉已在日本建成投产。在循环流化床锅炉的国际市场上, 已售出的循环流化床锅炉 (不包括中国生产的循环流化床锅炉) 已超过 450 台, 其中容量超过 200MWe 的循环流化床锅炉为 12 台以上, 有 6 台已投入运行。两台当前最大的 300MWe 容量的循环流化床锅炉于 2002 年在美国佛罗里达州的 JEA 电厂投入运行。容量为 600MWe 的循环流化床锅炉的设计也已完成。这些说明了循环流化床锅炉已开始进入大容量燃煤电站锅炉的领域。

四、循环流化床燃烧技术的特点

流化床煤燃烧技术在较短的时间内能得到迅速的发展和应, 是因为它具有某些层燃和煤粉燃烧等常规燃煤技术所不具备的特点。表 1-5 为层燃、煤粉燃烧和流化床燃烧等燃烧方式燃烧特性的比较, 从中可以看出, 流化床燃烧有别于其他两种燃烧方式的最突出的特点是: 燃烧温度低, 停留时间长, 以及湍流混合强烈, 这些特点给流化床燃烧带来一系列优点。

表 1-5 不同煤燃烧方式的燃烧特性比较

燃烧特性	层燃	煤粉燃烧	鼓泡流化床锅炉	循环流化床锅炉
燃烧温度 (°C)	1100~1300	1200~1500	850~950	850~900
燃料尺寸 (mm)	0~50	0~0.2	0~12	0~8
截面烟气流速 (m/s)	2.5~3	4.5~9	1~3	4.5~6.5
燃料停留时间 (s)	~1000	2~3	~5000	~5000
燃料升温速度 (°C/s)	1	10~10 ⁴	10~10 ³	10~10 ³
挥发分燃尽时间 (s)	100	<0.1	10~50	10~50
焦炭燃尽时间 (s)	1000	~1	100~500	100~500
混合强度	差	差	强	强
燃烧过程控制因素	扩散控制	扩散控制为主	动力控制为主	动力-扩散控制

(一) 低温燃烧

流化床燃烧和层燃及煤粉燃烧很不相同,任何时候其炉内都需有大量的高温惰性物料(如灰、石灰石或沙子等)的储备,这些惰性物料占全部炉内固体物料的97%~98%,即任何时候炉内固体可燃物的份额不超过全部床料的2%~3%,因此,即使在燃烧温度仅为850~900℃的情况,在有足够的氧的条件下,任何固体燃料都能被燃尽,再加上燃料在炉内很长的停留时间及床内强烈的湍流混合,这些足以保证在850~900℃的低温条件下流化床锅炉能稳定和高效地燃烧任何燃料。

(二) 极好的燃料适应性

由于流化床锅炉具有上述低温燃烧的特点,具有极好的燃料适应性,几乎对于任何燃料,都可以设计出燃烧这种燃料的流化床锅炉,并保证燃烧过程的稳定和很高的燃烧效率;对于已经存在的流化床锅炉,燃料性质在相当大的范围内变化,锅炉仍能保证稳定燃烧。至今,已成功地在流化床锅炉上燃烧过的燃料包括一切种类的煤,其中有高灰分高水分的褐煤,低挥发分的无烟煤,各种煤的煤矸石、洗矸、洗煤泥浆,石煤,各种石油焦,油页岩,泥煤,城市垃圾,油污泥,废轮胎,农林业生物质废料(如树皮、木屑、稻壳、甘蔗渣)等。它也可用于燃烧各种液体和气体燃料,各种燃料既可以单独燃烧也可以混烧,这是任何其他燃烧方式不能与之相比的。

(三) 低的污染物排放

流化床锅炉低温燃烧的特点,有效地抑制了热力型 NO_x 的生成,而通过采用分级燃烧又可控制燃料型 NO_x 的排放,因而,流化床锅炉 NO_x 的生成量仅为煤粉炉的1/4~1/3,可以将鼓泡流化床锅炉的 NO_x 排放值控制在小于0.03%~0.04%,将循环流化床锅炉的 NO_x 排放值控制在0.01%~0.02%。此外,如果在燃烧过程中直接向炉内加入石灰石或白云石,由于850~900℃的燃烧温度正是石灰(CaO)和二氧化硫(SO_2)反应的最佳脱硫温度,因此,根据煤中的含硫量,向流化床锅炉炉膛内投入适量的石灰石,就可以达到90%左右的脱硫效率。所以,流化床是一种经济有效的低污染煤燃烧技术,这也是它在全世界受到重视并发展很快的最根本原因。

(四) 燃烧强度大

由于流化床燃烧过程中强烈的湍流混合,并且循环流化床锅炉的燃烧是在整个炉膛空间内完成,这大大地提高了其燃烧强度,提高了单位炉膛体积的出力,减小了炉膛的截面积和体积。循环流化床锅炉的体积可以做得比常规锅炉的小。

(五) 床内传热能力强

流化床内高强度的传热特性可节省炉内受热面的金属消耗量。对鼓泡流化床锅炉,床内气固两相混合物对床内埋管的传热系数可达233~326W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$),循环流化床锅炉炉膛内气固两相混合物对水冷壁的传热系数在250~100W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$)的范围内。

(六) 负荷调节性能好

由于炉内大量热床料的储备,使流化床锅炉具有良好的负荷调节性能,负荷调节幅度大,在低达25%额定负荷下也能保持稳定燃烧。

(七) 易于操作和维护

由于燃烧温度低，灰渣不会软化和黏结，因而不存在炉内结渣的问题，炉膛内不需布置吹灰器。较低的炉膛温度使炉内受热面热流率较低，减少了发生传热危机而爆管的机会。燃烧的腐蚀作用也较层燃炉和煤粉炉小。这些都使得流化床锅炉易于操作和维修。至于流化床锅炉易产生的磨损问题，可在易磨损部位采取诸如敷设防磨耐火材料涂层等一系列防磨措施，已经得到解决。

(八) 灰渣便于综合利用

低温燃烧所产生的灰渣具有较好的活性，而且其飞灰和底灰的含碳量低，通常低于4%~5%，可以用作制造水泥的掺合料或其他建筑材料的原料，有利于灰渣的综合利用。

但是，鼓泡流化床锅炉还存在以下的主要问题：

(1) 当燃用宽筛分的燃料（一般燃料的颗粒尺寸分布0~12mm）时，未燃尽细颗粒飞灰的飞出量大，尤其在燃烧低挥发分低反应活性的燃料时，会造成固体未完全损失增加，降低了燃烧效率。同时，飞灰排出量大还会造成尾部受热面的磨损，并要采用高效率的静电除尘器或袋式除尘器，否则锅炉飞灰排放浓度将难以达到环境保护标准的要求。

(2) 在向鼓泡流化床锅炉内直接加入石灰石脱硫时，由于在床内的停留时间短，石灰石的钙利用率低，要使脱硫效率达到90%以上，则脱硫所需的钙硫摩尔比Ca/S一般需在3左右，要消耗大量的石灰石。

(3) 鼓泡流化床锅炉的床内埋管及炉墙和尾部受热面的磨损问题还有待彻底解决。

(4) 按照鼓泡流化床锅炉的截面热负荷，每平方米的床面积可生产约0.5~1kg/s蒸汽，因此，随着锅炉容量的增加，床的截面积势必增加。例如，一台111.11kg/s的鼓泡流化床锅炉，其床面积将会达到100m²以上，这在布置上会带来很大的困难，从而会限制鼓泡床锅炉向大型化发展。

正是为了解决鼓泡流化床锅炉存在的上述问题，促使了循环流化床锅炉的发展。循环流化床锅炉不但具有鼓泡流化床锅炉的全部优点，而且基本上克服了鼓泡流化床锅炉的上述缺点，因而循环流化床技术成为当前流化床技术发展的主要方向。但是，循环流化床燃烧技术本身还存在以下的缺点：

(1) 循环流化床锅炉的气固分离和床料循环系统比较复杂，如旋风分离器尺寸庞大，造价较高，布风板及系统的阻力增加，锅炉自身电耗量大，约为机组发电量的7%左右，导致运行维修费用增加。

(2) 循环流化床的燃烧效率受燃烧温度的限制，一般要略低于煤粉炉，特别是对难燃煤种，飞灰含碳量偏高，影响了飞灰的综合利用。

(3) 由于床内流速相对较高，固体颗粒浓度大，为控制NO_x排放而采用分级燃烧以及循环流化床燃烧的内在规律，炉膛内存在还原性气氛区域，受热面的磨损与腐蚀问题仍要十分重视。

(4) 采用添加石灰石在炉内燃烧中脱硫，其脱硫效率低于湿法烟气脱硫，这对于达到发达国家更严格的SO₂排放标准仍存在问题。