

循环流化床锅炉运行与检修

(第二版)

吕俊复 岳光溪 张建胜 杨海瑞 等编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



循环流化床锅炉运行与检修

(第二版)

吕俊复 岳光溪 张建胜 杨海瑞 等编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

循环流化床燃烧技术是目前商业化程度最好的清洁煤燃烧技术之一, 20 年来得到了迅速发展, 开始广泛应用于工业锅炉、电站锅炉以及废弃物焚烧等。我国对该技术的研究开发起步较晚, 但进步很快, 220t/h 及以下容量的循环流化床锅炉已在国内大面积工业推广, 实现了商品化; 480t/h 的循环流化床锅炉已开始投入商业运行。200MWe 和 300MWe 循环流化床锅炉示范工程也正在积极策划之中。

本书由多年从事循环流化床燃烧技术的理论研究、技术开发、产品设计、运行调试等第一线工作的技术人员编写。本书是有关循环流化床锅炉原理、运行及维修方面的专著, 总结了循环流化床燃烧技术基本理论, 纠正了目前流行的一些错误的概念, 介绍了循环流化床锅炉的典型结构、特点、安装要求、运行技术和规程、调试经验、性能试验方法、检修与维护要点以及运行事故的处理等。本书既有基础理论, 又有实践经验, 深入浅出, 比较贴近实际, 通俗易懂。

本书适用于从事循环流化床锅炉的设计、制造、运行、安装、调试、维修和设计院的专业技术人员及管理人员, 也可供循环流化床锅炉基本理论研究的科研人员和动力工程专业师生学习、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

循环流化床锅炉运行与检修/吕俊复等编著. —2 版.

北京: 中国水利水电出版社, 2005

ISBN 7-5084-2986-9

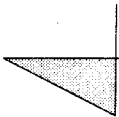
I. 循... II. 吕... III. ①流化床—循环锅炉—锅炉运行②流化床—循环锅炉—检修 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 053844 号

书 名	循环流化床锅炉运行与检修 (第二版)
作 者	吕俊复 岳光溪 张建胜 杨海瑞 等 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 28.25 印张 670 千字
版 次	2003 年 4 月第 1 版 2005 年 9 月第 2 版 2005 年 9 月第 3 次印刷
印 数	8201—13200 册
定 价	57.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



第二版序言

本书第一版于2002年7月脱稿，2003年4月出版，至今已经两年有余，其间2次印刷，发行近万册。出版以来，作者收到了很多读者的来信、电话，对书中的一些内容提出了很多建设性的意见和建议，希望能够详细介绍工程应用和发展前景。第一版脱稿后经过三年的发展，循环流化床燃烧技术有了长足的进步。鉴于这本书2次印刷后已经告罄，作者对原稿进行了进一步修改和完善，再版发行。

这本书是在第一版的基础上，删减了部分过于深奥的内容，增加了近三年来的最新发展。应部分读者的要求，增加了污染物排放、灰渣综合利用以及典型循环流化床锅炉的运行规程，强化了运行技术、调试经验和设备维护等内容，以期对循环流化床锅炉的经济、安全、稳定、长周期运行有所帮助。

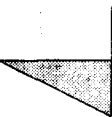
本书是由吕俊复、岳光溪、张建胜、杨海瑞等为主编写出来的，并组织了其他几位在我国循环流化床燃烧技术领域颇有造诣的工程技术人员共同编写，因此本书的特色是理论与实践紧密结合。作者多年来从事循环流化床燃烧技术的基础理论研究和技术开发，建立了一整套独特的循环流化床燃烧锅炉的设计理论体系和运行技术，获得了科技进步奖，这些工作部分地体现在本书中。必须提出，在这些研究工作中，还有在一起工作的其他同事也做出了贡献，并在本书编写过程中，提供和整理了部分资料，起到了比较重要的作用。

本书第一版出版以来，受到了读者的关注和欢迎。由于本书

的内容既有实际应用的具体内容和设计数据，也有深入的理论分析和试验方法的介绍等，因此本书不但对设计、运行、安装、调试、检修以及研究这种锅炉的人员是适用的，也适合作为高等院校的高年级学生的教材或参考读物。相信这本书再版，会在进一步推动和提高我国循环流化床燃烧技术方面起到重要的作用。

冯俊凯

2005年8月于清华园



第一版序言

这本书是以吕俊复、张建胜、岳光溪等为主而编写出来的。这几位主编是从20世纪90年代初就开始研究、开发循环流化床燃烧锅炉的设计和运行技术，而且还作了很多深入的实验、量测工作和理论分析研究工作。在此基础上开发出了有中国特色、有自己的知识产权的循环流化床燃烧技术。围绕紧凑、安全、可靠等方面，他们作了大量的研究和创新的工作，积累了丰富的经验，总结出了这种锅炉完整的理论体系，并经过不同容量、不同形式的循环流化床锅炉的实践验证。多年来，已经成功地从75t/h容量逐渐扩大到130t/h、220t/h、410t/h，而且继续向更大的容量发展。同时，我国的锅炉厂引进技术不断增加，大容量循环流化床锅炉迅速发展。对这些锅炉他们这几位作者也作了深入的分析 and 研究。此外，必须提出，在各种工作中，还有许多在一起工作的其他同事也参加了一些有关的研究工作，在编写过程中，提供和整理部分资料，起了比较重要的作用。

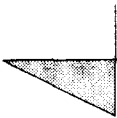
本书的编写人员在这种锅炉的设计、运行、安装、调试和理论研究方面累积了大量的数据和具体的经验。而且通过大量的测量、分析、研究累积了丰富的资料和理论研究成果，也累积了大量的安装运行的经验和可靠的设计软件。从另外一方面看，由于我国生产的煤炭中，有许多只适用于采用流化床燃烧的高灰份高硫份的低质煤，因此流化床燃烧方法在我国就采用得比较广泛。不过由于设计和运行这种锅炉的有些人员经验不足，或理论分析不够，使这些锅炉常遇到很多难以解决的问题。这些运行和设计

人员非常需要充实这方面的理论知识和实践经验。这也是本书所介绍的内容。因此，本书的出版问世，将会给从事这方面工作的人员提供较大的帮助，也可为他们深入思考有关问题提供指导。

由于本书的内容既有实际应用的具体内容和设计数据，也有深入的理论分析和试验方法的介绍等，因此本书不但对设计、运行、安装、调试、检修以及研究这种锅炉的人员是适用的，也适合作为高等院校的高年级学生的教材或参考读物。相信这本书的出版问世，将在推动和提高我国循环流化床燃烧技术方面起到重要的作用。

冯俊凯

2003年1月于清华园



第二版前言

能源与环境是目前我国的两个重大问题，而能源生产过程是环境污染的主要来源之一。我国是世界上最大的煤生产与消耗国，主要用作燃料，在我国一次能源构成中占据着绝对主要的地位；在可以预见的未来，煤炭仍将占到主导地位。煤在燃烧过程中将产生大量的灰渣、 SO_2 、 NO_x 等污染物，严重污染生态环境。因此煤的高效率低污染燃烧技术对于社会的可持续发展具有重要的意义。

从 20 世纪 60 年代开始，鼓泡流化床锅炉取得长足发展，应用范围从工业锅炉发展到电站锅炉。鼓泡流化床具有燃料适应性相对较广、能燃用高灰分低热值的劣质燃料、采用低温燃烧和炉内加石灰石的方法在燃烧过程中脱硫、灰渣有利于综合利用等优点，但也存在一些缺点，如密相区埋管受热面的磨损严重、固体未完全燃烧损失高、石灰石脱硫效率较低、稀相区受热面的使用效率差等。在鼓泡床的基础上发展起来的循环流化床燃烧技术不但具有鼓泡床的优点，而且其自身的特点使其克服了鼓泡床所固有的缺点。循环流化床大量的固体颗粒的循环，以及更为合理的热量释放分布使沿床高温分布趋于均匀，不再需要在密相区设置埋管。而且循环流化床采用了将从炉膛逸出的固体颗粒收集并循环的措施，床内强烈的气固混合提高了燃烧效率和脱硫剂的利用效率。循环流化床具有较高的燃烧强度，并且由于稀相区的固体浓度比鼓泡床得到了提高，大大增强了稀相区受热面的传热系数，提高了燃烧室的使用效率，更易于大型化。近年来，在垃圾焚烧、

生物质燃烧等方面得到应用。

我国于 20 世纪 80 年代开始了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。目前,200MWe 及以下容量的循环流化床锅炉已在国内大面积工业推广。引进技术促进了我国循环流化床燃烧技术的发展。据不完全统计,我国已经有 30 余台 135MWe 等级循环流化床锅炉在运行,百余台订货;300MWe 循环流化床锅炉已有 20 台订货,预计 2006 年可以陆续投入商业运行。超临界循环流化床锅炉示范工程也开始策划。

循环流化床燃烧技术是最近 20 多年来发展起来的清洁煤燃烧技术,也是目前商业化程度最好的清洁煤燃烧技术之一,发展迅速。在燃烧机理、设计准则、调试运行和检修维护等方面,已经积累了大量的经验。但作为一种新的燃烧方式,有关循环流化床的基本理论还不能很好地满足工程实践的需要,有关的设计方法和思想还不是十分明确,与循环流化床锅炉有关的运行和检修还没有统一的标准。

本书作者多年来一直从事循环流化床燃烧技术的理论研究、技术开发、产品设计、运行调试等工作,经过多年的实践,形成了完整的循环流化床燃烧技术理论体系和运行方法,并且经过了数百台循环流化床锅炉的实践验证。本书在总结循环流化床燃烧技术基本理论的基础上,介绍了典型的循环流化床锅炉的结构、特点、安装使用要求、点火、运行调试经验、试验方法、检修与维护要点以及运行事故的处理等。

全书共分十章:第一、二、三章讨论了循环流化床燃烧技术的特点、两相流动基础以及循环流化床燃烧技术的原理;第四章介绍了各种容量典型的循环流化床锅炉的结构及其性能;第五章研究了循环流化床锅炉的主要辅机要求以及典型的控制策略;第六章探讨了循环流化床锅炉的安装主要要求、烘煮炉的要点以及检修和维护的办法;第七章分析了循环流化床锅炉的运行技术,包括冷态试验、启动准备、点火、负荷调整等,并介绍了三个实例;第八章介绍了循环流化床锅炉的实验技术;第九章介绍了循环流化床锅炉的事故现象、原因及处理措施;第十章介绍了一些辅助系统的运行操作。

本书各章编著者如下:第一、三章由吕俊复、岳光溪、刘青、邢兴编著;第二章由张建胜、张守玉、杨海瑞编著;第四章由于龙、沈解忠、黄兴华、吕俊复编著;第五章由张彦军、薛雷、李政、张海编著;第六章由叶学军、张庆国、吕俊复编著;第七章由于龙、张庆国、薛雷、蒋文斌、苏俊、邢兴编著;第八章由刘青、吕俊复、张海、邢兴编著;第九章由杨海瑞、肖显斌、邢兴编著;第十章由张彦军、张庆国、刘爱成、余简文编著。全书由吕俊复、

杨海瑞、张建胜、邢兴进行了校对和整理。在编写过程中，得到王文选博士、王启民博士、王昕博士、王宇硕士、赵新木硕士、侯祥松博士、吴玉新博士、王明敏博士、李金平博士等的帮助。

像过去一样，本书引用了一些锅炉厂、设计院和研究单位的资料，在此表示感谢。

本书由哈尔滨锅炉厂的杨仲明、姜义道、四川锅炉厂的赵晓星、无锡锅炉厂的苏小平再次审阅。他们提出了许多宝贵的意见，使本书增色不少；冯俊凯教授再次为本书作序，在此表示衷心的感谢。

循环流化床燃烧技术的理论及其应用正在发展，限于作者的水平，书中错误和欠妥之处在所难免，热忱欢迎同行们批评指正。

作者

2005年8月于清华园

第一版前言

能源与环境是目前我国的两个重大问题，而能源生产过程是环境污染的主要来源之一。我国是世界上最大的煤生产与消耗国，主要用作燃料，在我国一次能源构成中占据着绝对主要的地位；在可以预见的未来，煤炭仍将占到主导地位。煤在燃烧过程中将产生大量的灰渣、 SO_2 、 NO_x 等污染物，严重污染生态环境。因此煤的高效率低污染燃烧技术对于社会的可持续发展具有重要的意义。

从20世纪60年代开始，鼓泡流化床锅炉取得长足发展，应用范围从工业锅炉发展到电站锅炉。鼓泡流化床具有燃料适应性相对较广、能燃用高灰份低热值的劣质燃料、采用低温燃烧和炉内加石灰石的方法在燃烧过程中脱硫、灰渣有利于综合利用等优点，但也存在一些缺点，如密相区埋管受热面的磨损严重、固体未完全燃烧损失高、石灰石脱硫效率较低、稀相区受热面的使用效率差等。利用鼓泡床的优点发展起来的循环流化床燃烧技术不但具有鼓泡床的优点，而且其自身的特点使其克服了鼓泡床所固有的缺点。循环流化床大量的固体颗粒的循环，以及更为合理的热量释放分布，使沿床高温分布趋于均匀，不再需要在密相区设置埋管。而且循环流化床采用了将从炉膛逸出的固体颗粒收集并循环的措施，床内强烈的气固混合提高了燃烧效率和脱硫剂的利用效率。循环流化床具有较高的燃烧强度，并且由于稀相区的固体浓度相比鼓泡床得到了提高，大大增强了稀相区受热面的传热系数，提高了燃烧室的使用效率，更易于大型化。近年来，在垃圾

焚烧、生物质燃烧等方面得到应用。

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。目前,220t/h 及以下容量的循环流化床锅炉已在国内大面积工业推广,实现了商品化;410t/h 的循环流化床锅炉已开始投入商业运行。同时,锅炉厂引进再热超高压循环流化床技术,已经有数十台订货,第一台已经投运;引进设备和技术的 300MWe 循环流化床锅炉的工作已经开展,同时,拥有自主知识产权的国产技术 200MWe 循环流化床锅炉示范工程也正在积极策划之中。

循环流化床燃烧技术是最近二十多年来发展起来的清洁煤燃烧技术,也是目前商业化程度最好的清洁煤燃烧技术之一,发展迅速。在燃烧机理、设计准则、调试运行和检修维护等方面,已经积累了大量的经验。但作为一种新的燃烧方式,有关循环流化床燃烧技术的基本理论还不能很好的满足工程实践的需要,有关的设计方法和思想还不是十分明确,与循环流化床锅炉有关的运行和检修还没有统一的标准。

本书作者多年来一直从事循环流化床燃烧技术的理论研究、技术开发、产品设计、运行调试等工作,经过多年的实践,形成了完整的循环流化床燃烧技术理论体系和运行方法,并且经过了上百台循环流化床锅炉的实践验证。本书在总结循环流化床燃烧技术基本理论的基础上,纠正了目前流行的一些错误概念,介绍了典型的循环流化床锅炉的结构、特点、安装使用要求、点火、运行调试经验、性能试验方法、检修与维护要点以及运行事故的处理等。本书共分九章,第一、二、三章讨论了循环流化床燃烧技术的特点、两相流动基础以及循环流化床燃烧技术的原理;第四章介绍了各种容量典型的循环流化床锅炉的结构及其性能;第五章研究了循环流化床锅炉的主要辅机要求以及典型的控制策略;第六章探讨了循环流化床锅炉的安装主要要求、烘煮炉的要点以及检修和维护的办法;第七章分析了循环流化床锅炉的运行技术,包括冷态试验、启动准备、点火、负荷调整等,并介绍了两个实例;第八章介绍了循环流化床锅炉的实验技术;第九章介绍了循环流化床锅炉的事故现象、原因及处理措施。

本书由吕俊复、张建胜、岳光溪教授共同主编。各章编者如下:第一、三章由吕俊复、岳光溪编写;第二章由张建胜、张守玉编写;第四章由于龙、沈解忠、黄兴华、吕俊复编写;第五章由张彦军、薛雷、李政、张建胜编写;第六章由叶学军、刘宝森、吕俊复编写;第七章由刘青、张建胜编写;第八章由于龙、蒋文斌、吕俊复编写;第九章由张彦军、张建胜编写。全书由吕

俊复、张建胜统稿。在编写过程中,得到郭庆杰博士、李登新博士、王文选博士、金晓钟博士、黎永博士、乔锐博士、王昕博士、任维博士、杨海瑞博士等的帮助。

本书由哈尔滨锅炉厂的杨仲明、姜义道,四川锅炉厂的赵晓星,无锡锅炉厂的苏小平审阅。他们提出了许多宝贵的意见,为本书增色不少;冯俊凯教授欣然为本书作序,在此表示衷心的感谢。

循环流化床燃烧技术的理论及其应用正在发展,限于作者的水平,书中错误和欠妥之处在所难免,热忱欢迎同行们批评指正。

作者

2003年1月于清华园

目 录

第二版序言
第一版序言
第二版前言
第一版前言

第一章

绪论	1
第一节 能源与环境	1
第二节 煤清洁燃烧和循环流化床燃烧技术	3
第三节 循环流化床锅炉和煤粉锅炉的比较	4
第四节 循环流化床燃烧技术的发展	8

第二章

气固两相流的基本理论	10
第一节 流态化理论	10
第二节 流化速度	14
第三节 床层压降和空隙率	22
第四节 颗粒种类与流态化形式	25
第五节 鼓泡流化床	27
第六节 湍流流化床	32
第七节 快速流化床	33
第八节 循环流化床中气固两相流的流动	35
第九节 气固两相流中的气固分离	40

第三章

循环流化床锅炉燃烧原理	50
第一节 概述	50
第二节 循环流化床的流动与混合	51
第三节 循环流化床锅炉的物料平衡	55
第四节 循环流化床锅炉的传热	63
第五节 循环流化床锅炉的燃烧	76

第六节	循环流化床锅炉的脱硫	90
第七节	循环流化床锅炉中氮氧化物的生成与控制	96
第八节	循环流化床锅炉灰渣综合利用	104
第九节	循环流化床锅炉的关键部件及设计准则	107

第四章

循环流化床锅炉典型结构	113
第一节 典型循环流化床燃烧技术	113
第二节 75t/h 循环流化床锅炉	135
第三节 130t/h 水冷方形分离循环流化床锅炉	141
第四节 220t/h 循环流化床锅炉	148
第五节 410t/h 高压循环流化床锅炉	161
第六节 440t/h 超高压一次再热循环流化床锅炉一	169
第七节 440t/h 超高压一次再热循环流化床锅炉二	180
第八节 480t/h 超高压一次再热循环流化床锅炉	185
第九节 200MWe 超高压一次再热循环流化床锅炉	188
第十节 300MWe 亚临界一次再热循环流化床锅炉	196
第十一节 600MWe 超临界循环流化床锅炉	201
第十二节 116MWe 循环流化床热水锅炉	205

第五章

循环流化床锅炉的辅助设备及自动控制	210
第一节 循环流化床锅炉燃烧辅助设备	210
第二节 石灰石输送系统	220
第三节 给煤设备及系统	221
第四节 风、烟系统	226
第五节 循环流化床锅炉冷渣器	229
第六节 循环流化床锅炉的联锁与控制	233
第七节 调节控制的策略和要求	238
第八节 特殊设备的控制要求	240
第九节 控制策略的注意事项	243

第六章

循环流化床锅炉的安装、检修与维护	245
第一节 循环流化床锅炉的安装	245
第二节 循环流化床锅炉烘煮炉	250
第三节 循环流化床锅炉的检修	254
第四节 循环流化床锅炉的维护	261

第七章	循环流化床锅炉的运行技术	268
	第一节 循环流化床锅炉冷态特性试验	268
	第二节 循环流化床锅炉启炉前的准备	272
	第三节 循环流化床锅炉的点火	274
	第四节 循环流化床锅炉的运行操作	278
	第五节 循环流化床锅炉的运行操作实例一	283
	第六节 循环流化床锅炉的运行操作实例二	307
	第七节 循环流化床锅炉的运行操作实例三	324
	第八节 循环流化床锅炉的运行操作实例四	342
第八章	循环流化床锅炉性能试验	366
	第一节 循环流化床锅炉热平衡测试	366
	第二节 温度测量	372
	第三节 压力测量	374
	第四节 流量测量	376
	第五节 循环流化床锅炉的实验技术	378
	第六节 循环流化床锅炉的现场测试技术	390
第九章	循环流化床锅炉运行事故分析与处理	396
	第一节 循环流化床锅炉运行事故	396
	第二节 事故处理规程	397
第十章	循环流化床锅炉辅助系统运行规程	414
	第一节 辅助机械试运行	414
	第二节 离心风机运行	415
	第三节 高压流化风机及冷渣器流化风机运行	419
	第四节 冷渣器的启停及维护	422
	第五节 压缩空气系统	423
	第六节 气力输灰输渣系统	426
参考文献		430

第一节 能源与环境

中国是目前世界上经济发展最快的国家之一，同时是世界上最大的产煤国，也是最大的煤消耗国。高速发展的经济必然意味着对能源需求的大量增加，图 1-1 是中国能源消费和国内生产总值（GDP）的增长率曲线，从图中可以看出，能源消费的增长和国内生

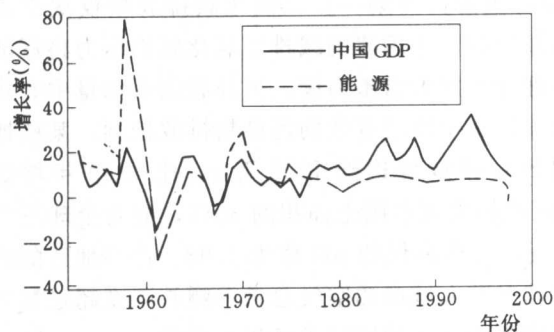


图 1-1 中国能源消费和 GDP 增长率曲线

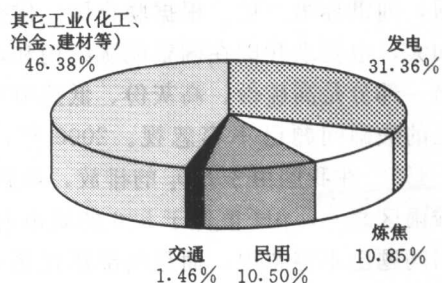


图 1-2 1999 年中国煤炭消费结构

产总值的增长具有同步关系。可以认为，国民经济的发展需要能源的支撑，能源是经济发展的动力，是国民经济的基础。煤在我国一次能源构成中占据着绝对主要的地位。煤炭工业是支撑我国国民经济发展的基础工业，据专家预测，在我国未来一次能源消费构成中煤炭仍将占到主导地位，即使到 2050 年，煤炭在我国一次能源消费结构中的比例也不会低于 35%。图 1-2 给出了 1999 年中国的煤炭消费结构。表 1-1 列出了 2050 年以前中国一次能源构成的预测情况。

表 1-1

中国煤炭占一次能源构成的比例

年份	煤炭 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	水能 (%)	核能 (%)	新能源 (%)
1985	72.8	20.9	2.0	4.3	—	—
2000	70	19.5	4.0	6.0	2	—
2050	60~70	5	5.0	6.0	10~20	5

但是，目前煤炭工业面临着诸多新的挑战。一是我国加入 WTO 后，资源将实现在全球范围内的有效配置，这对煤炭工业构成新的冲击。二是煤炭工业既是我国的基础工业，