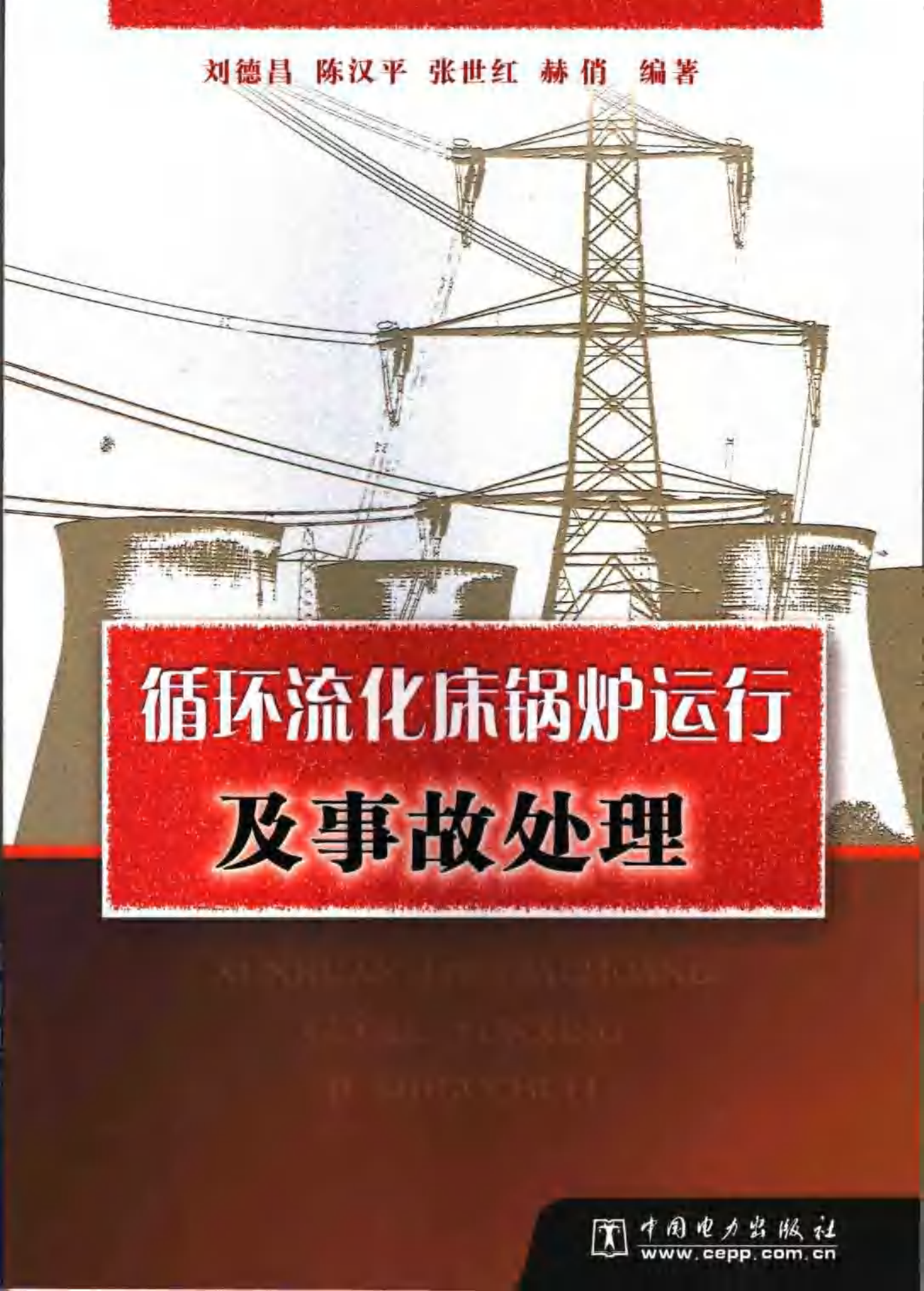


刘德昌 陈汉平 张世红 赫俏 编著



循环流化床锅炉运行 及事故处理



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

循环流化床锅炉运行 及事故处理

刘德昌 陈汉平 张世红 赫 俏 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书的中心内容是循环流化床锅炉的运行问题及处理。全书共 15 章：绪论，循环流化床流体动力特性，流化床燃烧，循环流化床传热，流化床燃烧对气体污染排放物的控制，我国几种典型的循环流化床燃烧锅炉，循环流化床锅炉金属受热面的磨损及预防措施，循环流化床锅炉耐火耐磨材料及相关问题，循环流化床锅炉风帽的漏渣及防磨措施，循环流化床锅炉的燃烧事故及预防，提高循环流化床锅炉燃烧效率及降低灰、渣含碳量的措施，循环流化床锅炉燃煤粒径保证，循环流化床锅炉灰渣冷却装置，循环流化床锅炉运行中的其他问题及处理以及循环流化床锅炉改造实例。重点介绍循环流化床锅炉运行中的常见问题、相应的处理方法和措施。有理论、有实践、有解决问题的实例。

本书对从事电厂锅炉运行操作管理工作的工程技术人员，对从事循环流化床锅炉设计、制造、安装及调试工作的工程技术人员，对大专院校、科研单位从事循环流化床锅炉科研和教学的广大人员，均有参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

循环流化床锅炉运行及事故处理/刘德昌等编著. —北京：
中国电力出版社，2006

ISBN 7-5083-4055-8

I. 循... II. 刘... III. ①流化床-循环锅炉-锅炉运行
②流化床-循环锅炉-锅炉事故-处理 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 001225 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

*

2006 年 4 月第一版 2006 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 21.25 印张 519 千字

印数 0001—3000 册 定价 33.00 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)

前言

循环流化床锅炉具有对燃料适应性特别好、燃烧效率高、气体污染物排放低、负荷调节范围大和灰渣可综合利用等优点,近20年来,特别是近4年来在我国得到了突飞猛进的发展。目前,我国在役的10t/h以上蒸发量的循环流化床锅炉近3000台,35t/h以上的有2000余台,220~480t/h的近260台。300MW、蒸发量为1025t/h的大型循环流化床锅炉正在安装过程中,2006年年内可投入运行。我国循环流化床锅炉的总台数、总蒸发量为世界第一。

随着循环流化床锅炉的迅猛发展,积累了丰富的设计、制造、安装、调试和运行经验,但也暴露了一些问题。最主要的问题为:锅炉受热面的磨损、爆管;耐火防磨内衬磨损、开裂、脱落;风帽漏渣和磨损;冷渣器的结渣和堵塞;燃煤粒径的保证;飞灰含碳量高;燃烧熄火、结渣和爆炸;给煤堵、卡,过热器超温,负荷调节等。这些问题是发展中的问题,通过实践和总结是不难解决的。本书正是在总结循环流化床锅炉运行中的一些常见问题的基础上,提出了可行的解决和预防措施。对工作在循环流化床锅炉领域的广大工程技术管理人员、教学科研人员和相关专业的大专院校师生均有参考价值。

本书有理论知识、实践经验,还有解决问题的实例,对工程的实际指导意义很强。

本书由华中科技大学刘德昌、陈汉平、张世红、赫俏主编。各章编写人员如下:第一章、第三章、第五章、第七章~第十一章、第十四章、第十五章第七节由刘德昌编写,第二章、第十三章由陈汉平编写,第三章、第十五章由张世红编写,第四章、第六章、第十二章由赫俏编写。王贤华、王战民参与编写了第三章。阎润生参与编写了第七章~第九章。最后由刘德昌对全书进行了统稿工作。

书中引用了大量的文献资料,并且得到了有关大学、锅炉制造厂家、耐火材料研究院和热电公司的大力支持,由于篇幅有限,未能一一列出,谨在此向有关单位和人员致以衷心的感谢。

作者还要感谢华中科技大学煤燃烧国家重点实验室王贤华博士研究生、杨国来博士研究生和唐汝江硕士研究生,他们为编写此书收集和整理了大量资料,并提供了许多帮助。

限于水平,疏漏与不足之处在所难免,敬请读者给予批评、指正。

编者

2005年5月于华中科技大学校园

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 我国的能源形势和环境污染	1
第二节 循环流化床燃烧锅炉组成	3
第三节 循环流化床锅炉的优缺点	6
第四节 发展循环流化床锅炉的意义	9
第五节 世界上大型循环流化床锅炉的发展	10
第六节 循环流化床锅炉的运行问题	19
第二章 循环流化床流体动力特性	21
第一节 流态化过程的基本原理	21
第二节 固体颗粒的物理特性	29
第三节 流化床流体动力特性参数	35
第四节 循环流化床锅炉炉内的气固流动	47
第五节 循环流化床的下部流动特性	51
第六节 循环流化床的上部流动特性	56
第三章 流化床燃烧	64
第一节 流化床燃烧的着火优势	64
第二节 流化床中煤粒的燃烧过程及成灰特性	65
第三节 流化床中碳粒的燃尽时间及其影响因素	68
第四节 循环流化床内不同尺寸焦炭颗粒的燃烧行为和燃烧特性	70
第五节 循环流化床燃烧与沿燃烧室高度方向的温度分布	71
第四章 循环流化床传热	74
第一节 传热的基本概念	74
第二节 循环流化床锅炉燃烧室的传热机理	76
第三节 影响循环流化床燃烧室传热的主要因素	79
第四节 循环流化床锅炉燃烧室内传热系数的试验测定	88
第五章 流化床燃烧对气体污染排放物的控制	90
第一节 流化床燃烧过程中生成的气体污染物质及其对人类和环境的危害	90
第二节 SO_2 的生成和流化床燃烧脱硫	92
第三节 流化床燃烧过程中 NO_x 的生成机理及其控制措施	98
第四节 循环流化床燃煤中 N_2O 的生成机理	107
第五节 循环流化床煤燃烧中氮氧化物排放的影响因素	109
第六节 控制 N_2O 排放的措施	114

第六章 我国几种典型的循环流化床燃烧锅炉	117
第一节 上排气高温旋风分离器循环流化床锅炉	117
第二节 下排气中温旋风分离器循环流化床锅炉	120
第三节 方形水冷分离器循环流化床锅炉	124
第四节 Circofluid 循环流化床锅炉	126
第五节 高坝电厂引进 410t/h 循环流化床锅炉	127
第六节 分宜发电厂国产 410t/h 循环流化床锅炉	131
第七节 440t/h 超高压中间再过热循环流化床锅炉	133
第八节 白马电厂引进 Lurgi 型 300MW 亚临界中间再过热循环流化床锅炉	141
第七章 循环流化床锅炉金属受热面的磨损及防磨措施	143
第一节 概述	143
第二节 影响循环流化床锅炉受热面磨蚀的主要因素	143
第三节 循环流化床锅炉金属受热面的磨损机理	146
第四节 循环流化床锅炉燃烧室内各部位受热面的磨损	147
第五节 循环流化床锅炉对流受热面的磨损	153
第八章 循环流化床锅炉耐火耐磨材料及相关问题	156
第一节 耐火耐磨材料的分类	156
第二节 耐火材料用主要原料	158
第三节 耐火耐磨材料的主要制品	164
第四节 耐火耐磨材料的性能	166
第五节 提高耐火浇注料耐磨性和热震稳定性的主要措施	172
第六节 循环流化床锅炉新型耐火浇注料、可塑料、保温浇注料	175
第七节 循环流化床锅炉燃烧系统耐火防磨层使用部位、 运行工况及对材料的要求	183
第八节 循环流化床锅炉耐火防磨层运行中的主要问题及预防	184
第九节 循环流化床锅炉耐火材料的行业标准	185
第十节 循环流化床锅炉耐火耐磨材料的施工和材料选择	187
第十一节 循环流化床锅炉烘炉和点火启动对耐火层的保护	191
第九章 循环流化床锅炉风帽的漏渣及防磨措施	194
第一节 循环流化床锅炉布风装置的组成、作用及要求	194
第二节 循环流化床锅炉风帽的类型及结构特点	194
第三节 风帽小孔速度与布风装置阻力	197
第四节 布风装置的阻力特性曲线	198
第五节 循环流化床锅炉布风装置漏渣分析	199
第六节 武汉石油化工厂 75t/h 烧石油焦循环流化床锅炉 布风装置的改造	199
第七节 风帽的磨损及预防措施	201
第十章 循环流化床锅炉的燃烧事故及预防	203
第一节 循环流化床锅炉常发生的燃烧事故	203
第二节 循环流化床燃烧熄火	203

第三节	循环流化床燃烧结渣	205
第四节	循环流化床锅炉其他区域结渣	207
第五节	循环流化床燃烧爆炸事故	210
第十一章	提高循环流化床锅炉燃烧效率及降低灰渣含碳量的措施	214
第一节	影响循环流化床锅炉燃烧效率的因素	214
第二节	床底渣含碳量高的原因及降低措施	217
第三节	循环流化床锅炉飞灰含碳量高的原因	219
第四节	降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的措施	221
第十二章	循环流化床锅炉燃煤粒径保证	230
第一节	煤的种类对燃煤粒径的影响	230
第二节	循环流化床锅炉炉型对燃煤粒度的要求	230
第三节	燃煤粒径变化对循环流化床锅炉运行的影响	235
第四节	燃煤制备设备的选择和制备系统的设计	238
第十三章	循环流化床锅炉灰渣冷却装置	245
第一节	循环流化床锅炉的灰渣特性	245
第二节	冷渣器的分类与特点	249
第三节	流化床式冷渣器	252
第四节	滚筒式冷渣器	256
第五节	水冷绞龙冷渣器	259
第六节	其他类型的冷渣器	263
第七节	冷渣器的设计与选用	269
第八节	除灰除渣系统	272
第九节	冷渣器及冷渣系统的问题与改进	275
第十四章	循环流化床锅炉运行中的其他问题及处理	283
第一节	煤斗堵煤问题及解决措施	283
第二节	落煤管旋转给料阀堵卡的问题及解决措施	287
第三节	过热器超温、低温和爆管问题及处理措施	287
第四节	循环流化床锅炉负荷调节问题	290
第五节	循环流化床锅炉的点火与节油问题	294
第六节	循环流化床锅炉灰渣系统	298
第七节	循环流化床锅炉炉内加石灰石脱硫对锅炉设计和运行的影响	301
第十五章	循环流化床锅炉改造实例	304
第一节	概述	304
第二节	循环流化床锅炉的完善化改造	305
第三节	煤粉锅炉改为循环流化床锅炉	313
第四节	链条锅炉改为循环流化床锅炉	321
第五节	燃油锅炉改为循环流化床锅炉	322
第六节	用循环流化床燃烧技术改造锅炉时应注意的问题	324
第七节	国外采用循环流化床技术改造旧锅炉, 减少 NO_x 、 SO_x 排放量实例	326
参考文献		329

第一节 我国的能源形势和环境污染

一、我国的能源资源状况

我国的能源资源状况为：煤炭资源的可开采储量为 1145 亿 t，居世界第三位（美国煤炭资源的可开采储量为 2410 亿 t，居世界第一位，原独联体国家煤炭资源的可开采储量为 2405 亿 t，居世界第二位）；水电资源可供开发的储量为 3.79 亿 kW，占世界第一位；已探明的核能资源储量相当于 15.75 亿 t 标准煤。我国人均能源资源占有量只有世界人均占有量的 1/2，只有美国人均能源资源占有量的 1/10，我国是一个能源资源贫乏的国家。

我国能源资源中以煤炭资源最为丰富，在化石燃料构成中，煤炭资源占 95.4%，石油占 3.3%，天然气占 1.3%。按人口平均计算，我国人均煤炭资源占有量只有 233.4t，而美国人均煤炭资源占有量为 1045t，前苏联人均煤炭资源占有量为 1846t，世界人均煤炭资源占有量为 312.7t。我国人均煤炭资源占有量比世界人均煤炭资源占有量少 79.3t。从人均煤炭资源占有量来看，我国也是一个煤炭资源十分贫乏的国家。节约能源资源、造福子孙后代是摆在能源工作者面前的迫切任务。

美国能源资源十分丰富，但他们的能源政策是尽量少开发利用本国化石燃料资源，多使用中东地区的石油能源资源。

根据我国能源资源贫乏的实际情况，保护和节约能源资源应成为我国的基本国策；破坏和浪费能源资源的情况应该严格禁止。

二、我国化石燃料的生产情况

2003 年我国煤炭生产量突破 15 亿 t。2002 年我国原油产量达到 1.689 亿 t，石油消费量达 2.457 亿 t，进口石油 1.004 亿 t。2002 年我国天然气产量达到 326 亿 m³。由此看出，我国是以煤炭作为主要能源的国家。

三、我国煤炭燃料的消费和使用情况

利用煤炭的大户主要是电站锅炉、工业和取暖锅炉。前者的消费近几年来一般占 35% 左右，2003 年电站锅炉耗煤量为 5 亿 t 左右；后者的消费一般为 40% 左右，2003 年工业及取暖锅炉耗煤量为 6 亿 t 左右。除电站锅炉热效率达到 90% 左右外，工业锅炉和取暖锅炉平均热效率仅有 60% 左右。

电站锅炉的热效率比工业、取暖锅炉高 30%，但 1kW·h 电的发电煤耗比发达国家还高许多。2000 年我国 1kW·h 电的煤耗为 367g 标准煤，而同期世界上发达国家 1kW·h 电的煤耗为 330g 标准煤。2000 年我国火力发电量为 11079 亿 kW·h。按此发电量计算，一年多耗标准煤近 4100 万 t。工业、取暖锅炉热效率与世界上发达国家的差距更大，浪费煤炭的情况更严重。如果我们的电站锅炉发电煤耗和工业、取暖锅炉的热效率能达到世界上发达国家的水平，一年可少消费 1 亿多吨标准煤。

目前我国人均能源消耗量不到世界人均能源消耗量的一半,不到美国人均能源消耗量的1/14。如果我们今后要达到世界上中等发达国家水平,不提高煤炭燃料的利用效率,其后果是极其可怕的。

四、燃煤对大气带来的污染

煤燃烧后产生的烟尘、 SO_2 、 NO_x 、 N_2O 、 CO 、 C_xH_y 及 CO_2 等气体对大气环境造成了严重污染。排到大气中的70%的烟尘,90%的 SO_2 、70%的 NO_x 、71%的 CO 、43%的 C_xH_y 和85%的 CO_2 均来自于煤的燃烧。2003年煤燃烧排放的烟尘大约为735万t,排放的 SO_2 大约为1943万t。

大型火力发电厂采取静电除尘器,除尘效率达98%~99%,在控制烟尘排放方面取得了较好的成绩。但是,静电除尘器难以除去烟气中 $5\mu\text{m}$ 以下的烟尘。人们吸入这样的烟尘之后,对人的身体健康危害极大。

我国燃煤中低硫优质煤只占17%,中硫煤占58%,高硫煤占25%。中、高硫煤生成的 SO_2 对大气造成了严重污染。 SO_2 是一种无色有臭味的窒息性气体,对人体健康危害极大,对动植物的生长和金属结构件的腐蚀也带来严重影响。



图1-1 1998年酸雨形势图

1998年全国16位知名的酸雨问题专家提交的《中国酸雨问题专家报告》中指出:中国pH值小于5.6(通常作为酸雨的判断标准)的降水面积在近8年中大大增加,从175万 km^2 扩大到280万 km^2 。专家报告还指出:中国的酸雨主要由燃煤排放的 SO_2 引起。图1-1表示了1998年我国酸雨控制区、频繁酸雨区和主要的 SO_2 排放点的分布。从图中可以看出,酸雨控制区面积已达11.4%,频繁酸雨区面积已达40%,且酸雨严重地区已从北向南转移。据统计,全国因酸雨

污染带来的经济损失多达1100多亿元。脱除燃煤 SO_2 对大气的污染费用较高,如利用国外技术及设备,湿式石灰石/石灰—石膏法脱硫,平均费用为1000~1200元/kW,一个300MW机组的烟气脱硫装置的投资为3亿~3.6亿元。利用国产化设备脱硫平均投资可控制在700元/kW,一台300MW火电机组湿式石灰石/石灰—石膏法脱硫装置需投资2.1亿元。经济上的困难是制约我国酸雨治理和燃煤烟气脱硫的主要问题。 SO_2 的污染和酸雨问题还有进一步恶化的趋势。

NO 、 NO_2 等氮氧化物总称 NO_x 。煤燃烧过程中氮氧化物的生成量与燃烧装置、燃烧温度和过量空气系数等有关。在通常的燃烧工况下,煤燃烧生成的 NO 占90%以上, NO_2 占5%~10%。

排入大气中的 NO 会被迅速氧化成为 NO_2 。 NO_2 经紫外线照射并与气态碳氢化合物接触即生成一种浅蓝色光化学烟雾。光化学烟雾对人的眼、鼻、心、肺及造血组织等均有强烈的刺激和损害作用。氮氧化物在大气中的浓度大于 0.05mg/L 时,会对人体产生危害作用。

大气中的 NO_x 会形成 HNO_3 ,即硝酸雾,也是生成酸雨的一个方面。目前,我国的酸雨还是属于硫酸型。但随着大量燃煤电站的发展和汽车数量的增加,它们的排气中的 NO_x 对硝酸雨的贡献会加大。硫酸型酸雨和硝酸型酸雨的共同作用,将使我国的酸雨控制问题变得

更加严峻。对燃煤电站烟气中 NO_x 脱除的技术难度比脱除 SO_2 更大,投资比脱除 SO_2 更高。

N_2O 也是一种氮氧化物,是在煤低温燃烧下生成的一种有害气体,俗称笑气。 N_2O 如同 NO_x 、 CO_2 气体一样,是一种温室效应气体。目前,大气中 N_2O 的浓度比 CO_2 小得多,但它吸收红外线的能力是 CO_2 的 100 倍以上。如果 N_2O 以目前年增 0.18% ~ 0.26% 的速度增加,50 年之后, N_2O 的温室效应将会等于 CO_2 的温室效应。

N_2O 还是一种破坏大气中臭氧层的气体。 N_2O 在大气同温层与臭氧反应生成 NO ,消耗了臭氧。臭氧层有很强的吸收太阳光中紫外线的能力,减少了紫外线光对人类的照射,保护了人类的安全。研究表明:同温层中臭氧每减少 1%,人类皮肤癌患者将会增加 3%。美国环保局估计,由于臭氧层的破坏,下一个 50 年,美国死于皮肤癌的人数将增加 20 万。

循环流化床燃烧属低温燃烧,当燃烧温度低于 750°C 之后,生成的 N_2O 较多。从控制 N_2O 的排放浓度来看,循环流化床锅炉燃烧温度以控制在 $850 \sim 900^\circ\text{C}$ 为宜。

CO_2 是一种主要的温室效应气体,它主要来自于化石燃料的燃烧。我国发电锅炉和工业、取暖锅炉主要以煤作为燃料, CO_2 的排放主要来自于煤的燃烧。目前我国 CO_2 的排放量占世界总排放量的 11.8%,为世界第二位,仅次于美国。对我国 CO_2 排放量的控制主要靠改变能源生产结构,增加水电、核电的发电量,利用生物质燃料和各种可再生能源,逐步减少化石燃料的利用。另外,发展清洁煤燃烧技术,以减少单位发电量和单位供热量 CO_2 的排放量。脱除 CO_2 的各种新技术的研究在美国等发达国家进行。华中科技大学煤燃烧国家重点实验室也在进行增氧和 CO_2 循环燃烧处理 CO_2 的技术基础研究。研究发现: CO_2 的浓缩处理对降低 SO_2 和 NO_x 的排放十分有利。对 CO_2 的排放控制研究还处在探索研究阶段,要走的路还很长,其技术难度和耗资与脱除 SO_2 和 NO_x 相比更大。

燃煤过程中生成的碳氢化合物——烷烃、烯烃、芳烃及多环芳烃等有机化合物,以及含有苯及苯的同系物——甲苯、二甲苯、三甲苯的有机化合物,和含有茈、蒽等多环芳烃有机化合物等是强致癌物质,对这些致癌物质的排放控制目前还是难题。

煤燃烧过程中微量重金属的排放控制也越来越受到人们的重视。煤中一般含有 Hg 、 Pb 、 Cr 、 As 等微量重金属元素。这些微量重金属元素在煤燃烧过程中随着粉尘和炉渣排入大气中。这些微量重金属附在 $0.01 \sim 10\mu\text{m}$ 的微细烟尘上,通过人的呼吸系统吸收,对身心健康带来危害。另外,通过雨水侵入水源中同样对人类健康带来损害。这些微量重金属元素排放对人类和生物的危害还未被人们认识和重视。

煤燃烧给我国生产了主要的能源,带来了社会的全面发展。但是煤燃烧产生的各种污染物质严重地破坏了我国的环境质量,对人类和动植物的生存带来了负面影响。发展清洁煤燃烧技术,减轻对大气环境的影响和损害,是 21 世纪面临的重大环境工程问题之一,是摆在煤燃烧工作者和环境保护工作者面前的重大课题,要求我们共同来承担。

第二节 循环流化床燃烧锅炉组成

循环流化床燃烧的基本原理是燃料在流化状态下进行燃烧。一般粗粒子在燃烧室下部燃烧,较细的粒子在燃烧室上部燃烧。被吹出燃烧室的细粒子经分离器收集下来之后,通过返料器送回燃烧室实现循环燃烧。

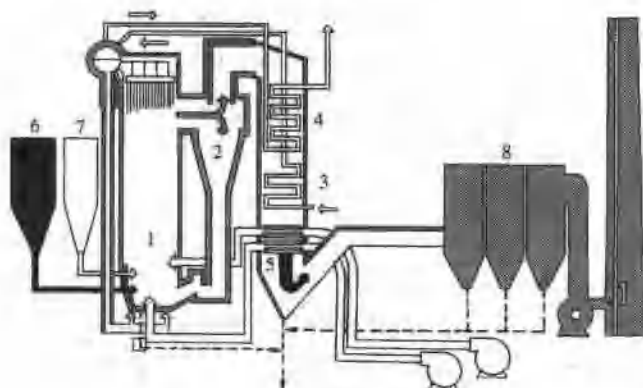


图 1-2 循环流化床锅炉

1—燃烧室；2—高温旋风分离器；3—省煤器；4—过热器；5—空气预热器；6—煤仓；7—石灰石仓；8—电除尘器

燃料在燃烧系统内完成燃烧及大部分热量传递。布风装置有水冷型和非水冷型两种。风帽型式有许多种，不同的锅炉制造厂采用不同形式的风帽。

二、燃烧室

循环流化床锅炉燃烧室以二次风口为界分为两个区：二次风口以下为大粒子为主的还原气氛燃烧区，二次风口以上为小粒子为主的氧化气氛燃烧区。燃烧室下部布置有加煤口、返料口、人孔门及各种观测孔。燃烧室各面布置有受热面，在大型高压循环流化床锅炉燃烧室内还布置有附加受热面（没有外部流化床热交换器的循环流化床锅炉）。燃料的燃烧过程、石灰石的脱硫过程、 NO_x 和 N_2O 的生成及分解过程主要在燃烧室内完成；床料和受热面之间的传热过程大部分也在燃烧室内完成。燃烧室既是一个流化设备，燃烧设备，热交换设备，也是一个脱硫，脱硝设备。燃烧室是流化床锅炉的主体，对燃烧室流化速度的选取和高度的确定是燃烧室设计中最重要的问题。

三、飞灰分离收集装置

循环流化床锅炉飞灰分离收集装置是循环流化床燃烧系统的关键部件之一，是循环流化床锅炉的心脏。飞灰分离收集装置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、燃烧特性，对飞灰循环流量、燃烧效率和飞灰含碳量，对锅炉出力 and 蒸汽参数，对石灰石的利用率和脱硫效率，对负荷的调节范围和锅炉启动所需的时间，对受热面的磨损，对锅炉散热损失和维修费用等均有重要影响。

循环流化床锅炉燃烧系统一般由布风装置、燃烧室、飞灰分离收集装置及返料装置组成，如图 1-2 所示。有的循环流化床锅炉还带有外部流化床热交换器，如图 1-3 所示。燃料在燃烧系统内完成燃烧及大部分热量传递。

一、布风装置

布风装置主要由风室、布风板和风帽等组成。它的主要作用是支承床料并均匀分配进入燃烧室的流化空气，保证良好的床料流化质量。另外，还要防止床料漏入风室。布风装置有水冷型和非水冷型两种。风帽型式有许多种，不同的锅炉制造厂采用不同形式的风帽。

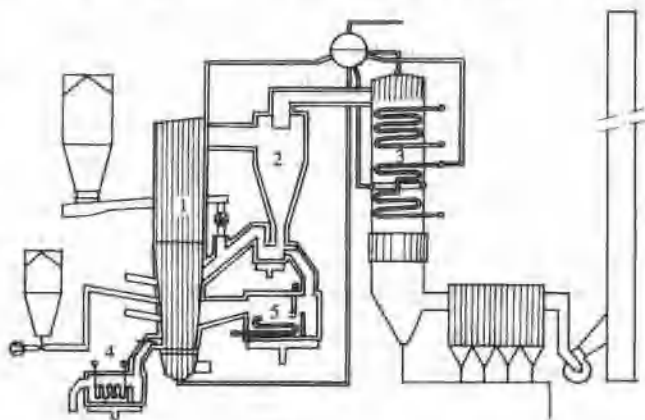


图 1-3 带外部流化床热交换器的循环流化床锅炉

1—燃烧室；2—高温分离器；3—尾部烟道；4—冷渣器；5—外部流化床热交换器

国外普遍采用的飞灰分离收集装置是高温耐火材料内砌的旋风分离器、水冷或汽冷旋风分离器。国内除采用上述旋风分离器之外,华中科技大学发明的下排气中温旋风分离器,清华大学研制的方形水冷分离器,东北电力学院研发的炉内卧式旋风分离器也得到了较好的应用。某些惯性分离器,如槽形分离器、带落灰腔的分离器在小型循环流化床锅炉上也有应用。

从分离效率上来看上排气高温旋风分离器收集效率高,下排气旋风分离器、方形水冷旋风分离器次之,各种惯性形式的分离器最低。惯性分离器一般与其他分离器组合成复合式分离器,很少单独采用。

提高循环流化床锅炉分离器的收集效率,特别是开发 600MW 飞灰分离收集装置,是循环流化床锅炉发展过程中被普遍重视的研究课题。

对飞灰分离收集装置的基本要求是分离效率高,阻力损失小,体积小,质量轻,耐磨性能好,便于维修且维修费用低,启动性能好。

四、飞灰回送装置

飞灰回送装置也是循环流化床锅炉的重要部件之一。它的作用是将分离器收集下来的飞灰可控地送入燃烧室内,实现循环燃烧。

对飞灰回送器的基本要求:有自动调节送灰量的功能,即来灰多,送入多;来灰少,送入少。维持料腿中料柱在一定高度波动,防止回送装置被吹空,也不产生收集飞灰自流现象。飞灰回送装置内不发生超温结渣,飞灰不漏入送灰器的风室。

飞灰回送装置既是一个飞灰回送器,也是一个锁气器。如果这两者中任何一个失常,飞灰循环燃烧过程就建立不起来,锅炉变成了一个鼓泡床锅炉。锅炉达不到设计蒸发量,锅炉燃烧效率大大降低。

我国循环流化床锅炉采用的飞灰回送器品种多,但基本都属于流化密封送灰器类型。

五、外部流化床热交换器

循环流化床锅炉有两大类型:一种是采用外部流化床热交换器的循环流化床锅炉,如德国鲁奇型,如图 1-3 所示;另一种是不带外部流化床热交换器的循环流化床锅炉,如奥斯龙型,如图 1-2 所示。

从图 1-2 可以看出:奥斯龙循环流化床燃烧系统由布风装置、燃烧室、高温旋风分离器、飞灰回送装置组成。对高压、大型循环流化床锅炉燃烧室内布置有附加受热面。

从图 1-3 可以看出:鲁奇型循环流化床燃烧系统与奥斯龙型相比,增加了一个外部流化床热交换器。燃烧室内没有布置附加受热面。分离器收集下来的飞灰分两支,一支直接从返料器送入燃烧室内循环燃烧,另一支经控制进入外部流化床热交换器,将其冷却到 500℃ 左右,然后通过送灰器送入燃烧室内循环燃烧。

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。它的作用是解决高压大型循环流化床锅炉燃烧室包覆面上受热面布置不下的问题。外部流化床热交换器内有几个区,不同区内布置有蒸发受热面、过热器和再热器受热面。外部流化床热交换器的流化速度为 0.3~0.45m/s,床料与埋管之间的传热系数高,为 398~568W/(m²·℃),床料对埋管的磨损小。另外,外部流化床热交换器的采用为燃烧室温度,过热蒸汽、再热蒸汽温度的调节提供了很好的手段。外部流化床热交换器的采用加大了锅炉的负荷调节范围和对燃料的适应性。带外部流化床热交换器的循环流化床锅炉的缺点(与不带外部流化床热交换器的奥斯龙

型循环流化床锅炉相比)是系统、设备及整体布置比较复杂,锅炉造价比较高。

目前我国除引进的 300MW 循环流化床锅炉采用带外部流化床热交换器之外,其他 50~135MW 循环流化床锅炉均为不带外部流化床热交换器的奥斯龙型。

第三节 循环流化床锅炉的优缺点

循环流化床锅炉是在鼓泡流化床锅炉基础上发展起来的,它克服了鼓泡流化床锅炉燃烧效率不高(烧 0~10mm 煤)的缺点。人们普遍认为:循环流化床锅炉在烧高硫燃料、劣质燃料和各种固体、液体和气体废弃物方面与其他燃烧方式的锅炉(如煤粉锅炉、链条锅炉)相比有绝对的优势。

一、循环流化床锅炉的优点

(1) 对燃料的适应性特别好。飞灰循环量大小的改变可调节燃烧室内的吸热份额和燃烧室的温度。外部流化床热交换器的采用对燃烧室内吸热份额和燃烧室内燃烧温度的调节范围更大。这使得循环流化床锅炉对燃料的适应性特别好。循环流化床燃烧方式可烧优质燃料,也可烧各种劣质燃料。只要燃料燃烧放出的热量能够将燃料本身和燃烧所需的空气加热到稳定燃烧所需的温度(850~900℃),这种燃料就能在循环床内稳定燃烧(床内不布置受热面)。循环流化床锅炉用来烧各种劣质燃料是特别适宜的。

(2) 燃料的着火条件特别优越。流化床的床料量很大,床料温度为 850~950℃,床料中 95% 以上为惰性物质,5% 左右是可燃物质。一般每分钟新加入的燃料只占床料量的 1%~0.20% (取决于煤的热值)。大量惰性热床料不与新加入的燃料争夺氧气,却为加热新燃料提供了丰富的热量,使燃料迅速加热,析出挥发分并着火燃烧。因此,流化床燃烧对难燃燃料(低挥发分无烟煤、石油焦)的着火不存在任何困难。这就是循环流化床锅炉既能烧易着火燃料又能烧难着火燃料的原因。

(3) 燃烧效率高。对常规工业锅炉和煤粉锅炉,若燃烧煤种偏离设计煤种,其燃烧效率不高,一般为 85%~90%。循环流化床锅炉采用飞灰循环燃烧,烧劣质燃料和优质燃料时,燃烧效率能达到 95%~99%,可与煤粉锅炉竞争。

(4) 热强度大。由于飞灰循环燃烧和流化速度比常规流化床燃烧锅炉高,燃烧比较均匀地发生在整个燃烧室高度内,沿燃烧室高度方向燃烧温度相差不大。从而提高了循环流化床锅炉的截面热强度和容积热强度。常规流化床锅炉燃烧室截面热强度为 1~3MW/m²,而循环流化床锅炉为 3~8MW/m²。常规流化床锅炉燃烧室容积热强度为 0.1~0.2MW/m³,而循环流化床锅炉燃烧室容积热强度为 0.16~0.32MW/m³。

(5) 脱硫效果好。由于燃烧温度可控制在最佳脱硫温度及石灰石或氧化钙与 SO₂ 的循环反应,当钙硫比为 1.5~2.0 时,脱硫效率可达 85%~95%。而常规流化床,由于没有脱硫剂的循环反应,钙硫比为 3~4 时,脱硫效率才能达到 85%~95%。后者的石灰石消耗量增加一倍多。与煤粉锅炉燃烧方式相比,循环流化床锅炉烧高硫煤有绝对的优势。

(6) 脱 NO_x 效果好。由于循环流化床锅炉采用分级燃烧,并将燃烧温度控制在 850~900℃ 范围内,只有燃料中的氮转化成 NO_x,空气中的氮不会生成 NO_x。故循环流化床锅炉 NO_x 的排放浓度低,体积分数一般为 (100~200) × 10⁻⁶ (100~200ppm)。而煤粉燃烧锅炉 NO_x 的体积分数为 (500~600) × 10⁻⁶ (500~600ppm)。要从烟气中脱除 NO_x,在技术难度

和费用方面比脱除 SO_2 还要大得多。循环流化床锅炉 NO_x 排放量能达到环境排放标准, 使它与煤粉燃烧锅炉竞争时有绝对的优势。

(7) 负荷调节范围大, 调节性能好。循环流化床锅炉由于采用飞灰循环燃烧和外部流化床热交换器, 锅炉负荷能在 25% ~ 100% 之间变化。负荷变化速率为每分钟 5% ~ 10%。当负荷变化时, 只需调节给煤量、给风量和床料量就可满足负荷的变化。当负荷低于 30% 时, 视情况是否需要切断飞灰循环燃烧系统。常规流化床锅炉大负荷的变化需采取分床压火技术。对煤粉锅炉, 低负荷时需要采用燃油助燃。这一优点使循环流化床锅炉作为电网中的调峰机组, 作为热负荷变化大的热电联产机组和供热工业锅炉是特别适宜的。

(8) 给煤点数量少。循环流化床锅炉由于燃烧室下部粒子浓度比常规流化床锅炉低, 粒子横向混合特性比较好, 给煤点数量比常规流化床锅炉少。130t/h 的常规流化床锅炉有 6 个给煤点, 而 410t/h 的循环流化床锅炉只有 4 个给煤点。给煤点数量的减少简化了给煤装置的布置, 为流化床锅炉的大型化创造了有利条件。

(9) 灰渣能综合利用。循环流化床锅炉床渣的含碳量一般为 1% ~ 3%, 飞灰含碳量为 4% ~ 15%。大型循环流化床锅炉由于燃烧室高度高, 飞灰含碳量较低。中小型循环流化床锅炉由于燃烧室高度低, 飞灰含碳量较高。飞灰和床渣含碳量低, 灰渣综合利用程度就高。循环流化床锅炉燃烧温度为 850 ~ 950℃, 与煤粉燃烧锅炉相比, 属低温燃烧。低温燃烧下的灰渣活性好, 可直接作为水泥掺合料, 如美国夏威夷的 100MW 循环流化床锅炉的灰渣 100% 地被综合利用, 成为灰渣零排放的锅炉。

(10) 无埋管磨损。循环流化床锅炉燃烧室为全膜式水冷壁结构, 取消了埋管受热面, 从而消除了泡床锅炉埋管磨损问题。

(11) 一种很有前途的清洁煤燃烧技术。循环流化床燃烧技术是介于层燃燃烧与煤粉悬浮燃烧之间的一种燃烧技术, 在锅炉结构设计、制造工艺方面与煤粉燃烧锅炉有许多近似之处。正压流化床锅炉和整体煤气化联合循环发电, 其发电效率较高, 但整体结构较复杂, 投资大。而循环流化床锅炉结构相对较简单, 投资也比较小。所以它的商业化和大型化与上述的两种先进清洁煤燃烧技术相比有很大的优势。

(12) 改造煤粉锅炉的优势。我国旧煤粉锅炉一般来说设备陈旧、运行事故多、运行费用高, 对煤种适应性差, 不能烧劣质煤, 无脱硫、脱 NO_x 装置, SO_2 和 NO_x 的排放对大气带来严重污染。20 世纪 60 年代投运的煤粉锅已超龄。我国大多旧煤粉锅炉为 Π 型布置。循环流化床锅炉的整体布置与煤粉锅炉相近, 考虑到烧高硫燃料, 并使 SO_2 和 NO_x 排放达到国家环境排放标准, 用循环流化床燃烧技术改造煤粉锅炉, 无论从技术上、经济上, 还是环境上来看, 都不愧为最佳选择方案。世界上的发达国家, 如美国、法国发展循环流化床锅炉的历史, 就是用循环流化床技术在老电厂中改造旧锅炉的历史。

二、循环流化床锅炉的缺点

任何事物都是一分为二的, 有优点, 也有缺点。这些年来的发展和实践表明循环流化床锅炉也有某些缺点。有的缺点是发展中的, 经过不断努力和实践可以完善和克服; 有的缺点是该技术本身所固有的, 难以克服。

(1) 一次风机压头较鼓泡床锅炉高, 电耗大。循环流化床锅炉取消了埋管, 运行时的料层比鼓泡床锅炉高, 一次风机压头高。另外, 还有送灰风机、二次风机, 有的还有冷渣器风机。一般循环流化床锅炉电厂的厂用电比煤粉锅炉高 4% ~ 5%。

(2) 燃烧室下部膜式壁与耐火防磨层交界处的磨损严重。循环流化床锅炉无埋管磨损问题,但是如果耐火防磨层与膜式壁交界处的结构处理不好,带来的交界处管壁的磨损比鼓泡床锅炉的埋管磨损更难处理。

(3) 耐火耐磨层磨损、开裂和脱落。循环流化床锅炉使用耐火材料的部位和数量比其他形式的锅炉多许多。由于耐火耐磨材料选择不当,或施工工艺不合理,或烘炉和点火启动过程中温控不好,升温、降温过快,导致耐火材料内衬中蒸发的水气不能及时排出,或耐火内衬中热应力过大,而造成耐火内衬破裂和脱落。燃烧室内耐火防磨隔热层脱落,将破坏流化工况,造成床料结渣。分离器内耐火防磨层脱落,将堵塞返料系统,造成飞灰不能循环燃烧,循环流化床锅炉变成鼓泡床锅炉,蒸发量急剧下降。返料器内耐火隔热层脱落,同样造成返料器内结渣,返料器不能正常运行,严重影响锅炉的正常运行,造成蒸发量下降,飞灰含碳量增加,锅炉燃烧效率下降。料腿和返料管内耐火隔热层脱落,堵塞管道,同样破坏飞灰循环燃烧效果。

(4) 点火启动时间长。循环流化床锅炉点火启动过程除受汽包升温速率的影响外,还受耐火防磨层内衬温升和能承受的热应力的限制。升温太快,耐火层内(特别是高温绝热旋风分离器耐火防磨层内)热应力超过允许热应力而破裂。所以,对循环流化床锅炉点火启动时间和升温速率有严格要求。对高温绝热旋风筒分离器的循环流化床锅炉,从冷态启动到带满负荷的时间控制在12~16h。对汽冷旋风筒分离器循环流化床锅炉,从冷态启动到带满负荷的时间控制在6~8h。

(5) 对燃煤粒径要求严格。一般鼓泡床锅炉燃煤粒径范围为0~10mm,平均粒径为5mm左右,对粒径的分布要求不严。循环流化床锅炉燃煤粒径范围要求在0~8mm,平均粒径为2.5~3.5mm,对煤粒径的分布有一定的要求。如果达不到要求,将带来许多不良后果:锅炉达不到设计蒸发量,飞灰含量高,尾部受热面磨损严重。

(6) N_2O 生成量较高。与高温煤粉燃烧过程相比,循环流化床燃烧温度较低, NO_x 生成量较小,但 N_2O 生成量较大。 N_2O 是一种强温室效应气体,对大气臭氧层有破坏作用,导致直射到地球上的紫外线强度增加,引发皮肤癌。

(7) 锅炉尾部受热面磨损。循环流化床锅炉的飞灰份额比煤粉锅炉小,但飞灰的粒径比煤粉锅炉的大许多。如果锅炉尾部受热面的气流速度选择偏高,将使过热器受热面和省煤器受热面磨损严重。

(8) 风帽磨损。风帽使用寿命不长主要由于床料对风帽的横向冲刷引起。解决风帽的磨损问题,主要靠提高风帽材质的抗磨性能实现。

(9) 运行维护费用较高。循环流化床锅炉本体,包括耐火防磨层、金属受热面和风帽磨损比较严重,加上煤破碎机磨损亦十分严重,导致循环流化床锅炉的日常维修费用较高。

(10) 循环流化床锅炉累计连续运行小时数不长。由于循环流化床锅炉本体和辅机事故比煤粉锅炉多,它的连续累计运行时间目前比煤粉锅炉短。

(11) 循环流化床锅炉的厂用电比率比煤粉炉高。

(12) 循环流化床锅炉本体金属消耗量比煤粉锅炉大,造价比较高。

(13) 循环流化床锅炉的辅机配套还存在一些问题,由于辅机故障引起锅炉停炉的比率较高。

(14) 中小型循环流化床锅炉飞灰含碳量还比较高,提高分离器的分离效率,降低飞灰

含碳量,是值得进一步研究的问题。

总之,目前循环流化床锅炉运行中的问题与煤粉燃烧锅炉相比要多,它的连续运行小时数比煤粉锅炉短。

第四节 发展循环流化床锅炉的意义

我国是一个以煤为主要能源的国家,煤在一次能源结构中约占 75%。煤的燃烧带来了严重的污染。循环流化床锅炉具有高效、低污染的特点,近些年来在世界上和我国得到了迅速的发展。结合我国国情发展循环流化床锅炉,其意义更为重大。

一、节约煤炭资源

我国有 50 多万台工业及取暖锅炉,它们的燃烧效率比世界先进水平低 5%~10%。发展先进的循环流化床锅炉取代落后的链条燃煤锅炉,对节约煤炭资源有重要的意义。

二、利用劣质煤燃料

我国煤炭的质量差异随地区变化大,南方劣质煤多,北方积累的洗煤矸石也很多。发展循环流化床燃烧锅炉,因地制宜地利用这些劣质煤无疑有十分重要的意义。

三、清洁能源

我国煤炭资源中高硫煤占 25%,中硫煤占 58%。用循环流化床锅炉能实现床内加钙脱硫,发展循环流化床锅炉,利用高硫煤,减少 SO_2 对大气的污染,对我国有特别重要的意义。

我国 NO_x 总排放量中的 70%来自于煤的燃烧。循环流化床锅炉的分级和低温燃烧能使 NO_x 的排放浓度达到环保要求。发展循环流化床锅炉,控制 NO_x 的排放,对减少酸雨危害和光化学烟雾危害有十分重要的意义。

我国 CO_2 总排放量中的 85%来自于煤的燃烧。 CO_2 排放总量占世界 CO_2 排放总量的 11.8%,仅次于美国,居世界第二位。研究报告指出:由于 CO_2 等气体的温室效应,地球的海平面在过去 100 年中升高了 14cm。专家估计:如果现在地球变暖的趋势不加控制,到 2100 年,地球海平面将升高 1m。这将威胁沿海几亿人口的居住问题,如孟加拉国领土的 15%将被海水淹没,埃及 12%~15%的可耕地将变成海洋。总之,这一情况对世界上许多岛国的影响是十分严重的。就我国来说,将涉及到上海等沿海大中城市的淹没问题。

循环流化床燃烧首先采用床内加钙脱硫,然后再用湿法脱除烟气中的残余 SO_2 。烟气中 SO_2 含量极微的情况下,用压力为 $3.535 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的蒸汽轰击烟气能回收 CO_2 ,使其压缩和液化,最后通过过滤达到食用等级的质量,以液体和干冰的形式出售。不纯的干冰也可采取其他储存方式。

循环流化床燃烧锅炉与其他燃烧方式的锅炉相比,它燃煤带来的有害气体对大气的污染要小得多,这无疑对保护生态环境有重要的意义。

四、灰渣综合利用,保护耕地面积

大量灰渣排放要占用土地,且带来二次污染。我国人均可耕地面积只有 1000 m^2 ,远远低于世界人均可耕地面积 3100 m^2 。2002 年仅全国电厂灰场就占用了近 $27 \times 10^7 \text{ m}^2$ 可耕地。随着电力工业的发展,灰场占地面积每年以 10% 的幅度增加。流化床燃烧产生的灰渣含碳量低、活性好,可以做水泥掺合料和建筑材料。发展循环流化床锅炉,减少灰渣排放占用耕

田,对保护我国土地资源可起到一定作用。

五、改善电网调峰能力

我国燃煤锅炉机组发电占总发电量的 70% ~ 75%。煤粉锅炉机组调负荷的性能较差。一般当负荷低于 50% ~ 70% 时,需要投油枪助燃。因油价格高,故运行成本高。循环流化床锅炉的优点之一是负荷调节范围大 (25% ~ 100%)。增加电网中循环流化床锅炉机组的发电量,对改善电网的调峰能力是有好处的。循环流化床锅炉还可压火备用,这对一些周末停产的企业是特别适宜的。

六、用循环流化床燃烧技术改造旧锅炉意义重大

我国 20 世纪 60 年代投运的煤粉锅炉燃烧工况恶化,对大气污染严重,已到退役年龄。用循环流化床燃烧技术改造旧煤粉锅炉,延长服役期,技术上是可行的,经济上是有利的 (只有新建电厂投资的 60% 左右),环保上能达到国家对有害气体的排放标准。

我国 125MW 以下的煤粉锅炉机组装机容量约为 80GW,这个容量为美国的 4 倍。美国为了证实循环流化床锅炉对燃料的适应性和它的环境性能,80 年代美国能源部实施了三个煤粉锅炉改循环流化床锅炉的示范工程。法国紧跟美国,在 90 年代也实施了两个煤粉锅炉改循环流化床锅炉示范工程。这些工程都取得了成功。

美国能源部资助的 20 世纪清洁煤计划示范工程之一——JEA (Jacksonville Electric Authority) 大型循环流化床锅炉改造工程,是将 Northside 发电厂两台电功率为 275MW 的燃油燃气锅炉改造成纯烧石油焦、煤或煤与石油焦混烧的循环流化床锅炉。改造后的锅炉电功率为 297.5MW。这两台锅炉都于 2002 年投产发电。

目前世界上除美国、法国外,波兰、乌克兰等国都在利用美国、法国的循环流化床燃烧技术对他们的旧锅炉进行改造,并且取得了成功。

我国是一个发展中国家,资金不足,电力紧缺。在新建电厂的同时,不可忽视对旧锅炉的改造。美国、法国、波兰和乌克兰等国用循环流化床燃烧技术改造旧锅炉的经验值得我们学习。

第五节 世界上大型循环流化床锅炉的发展

循环流化床锅炉具有煤种适应性强、燃烧效率高、环境性能好、负荷调节范围大和灰渣综合利用等优点,近十年来在工业锅炉、电站锅炉、旧锅炉改造和燃烧各种固体废弃物等领域得到迅速的发展。世界上 100 ~ 300MW 级的各种类型的大型循环流化床锅炉有 100 多台在运行中,600MW 循环流化床锅炉的方案设计已完成。可以预计,循环流化床锅炉将以它的高性能和对环境友好,与常规煤粉锅炉展开激烈竞争。特别在烧中、高硫煤时,循环流化床锅炉有绝对的优势。

近几年来,循环流化床锅炉的发展出现了竞争十分激烈的局面:法国 GEC - Alstom 吞并了美国 ABB - CE 公司,美国 F&W 公司吞并了 Ahlstrom Pyropower 公司。吞并之后,两种流派的循环流化床燃烧技术互相渗透,互相结合,加速了大型循环流化床锅炉的发展。

现在世界上大型循环流化床锅炉的发展落到了美国 F&W 公司,法国 GEC - Alstom 公司和中国三大锅炉厂——哈尔滨锅炉厂有限责任公司、东方锅炉厂和上海锅炉厂的身上。下面分别介绍他们大型循环流化床锅炉的发展。