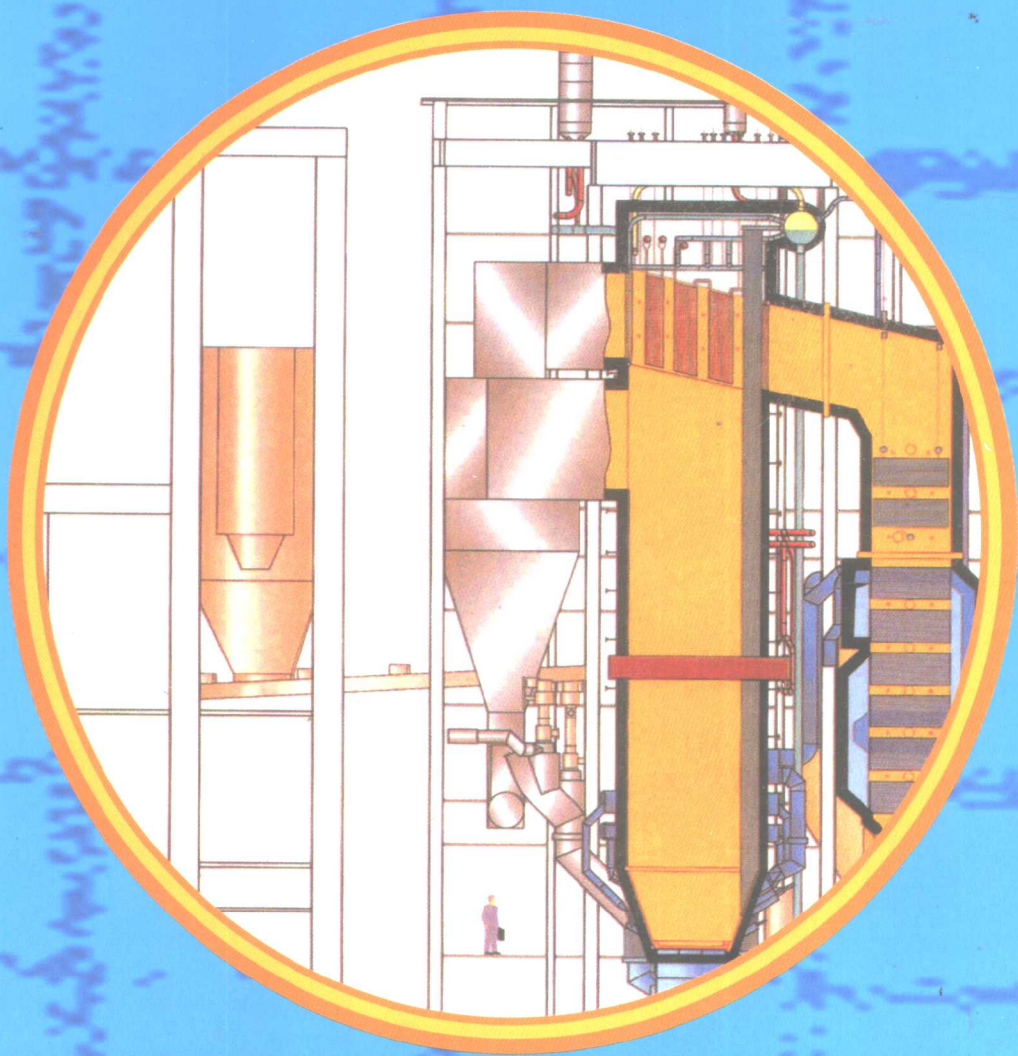




锅炉改造技术

华中理工大学 刘德昌 陈汉平 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

TK229.6

内 容 提 要

本书介绍了锅炉本体及其辅助设备的改造技术。全书共 11 章：绪论，煤粉锅炉改循环流化床锅炉，煤粉锅炉的改造与调整，工业锅炉改流化床锅炉，国外电站锅炉改流化床锅炉，SHL6.5-25 链条锅炉改流化床锅炉热力计算示范，流化床锅炉的简易计算，锅炉控制的更新改造，锅炉除尘设备改造，锅炉脱硫技术改造，锅炉机组风机和改造。

全书主要内容是介绍锅炉的清洁燃烧，提高锅炉运行的经济性、可靠性等核心内容。本书可供火电厂及从事锅炉设计制造、运行、试验研究方面的工程技术人员阅读参考，也可用作高等学校热能工程、工程热物理、采暖通风专业学生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉改造技术/刘德昌，陈汉平主编. —北京：中国电力出版社，2000

ISBN 7-5083-0449-7

I. 锅… II. ①刘…②陈… III. 燃煤锅炉-技术改造
IV. TK229.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 53042 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>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 2 月第一版 2001 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 11.25 印张 253 千字

印数 0001—4000 册 定价 18.00 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

我国的能源现阶段仍以煤为主。锅炉燃煤会对大气带来污染，现酸雨和粉尘对大气的污染日渐严重，因此，清洁煤燃烧技术和提高煤的燃烧效率越来越受到重视。本书共 11 章，内容涉及到锅炉清洁、高效燃烧。本书总结了国内外锅炉本体及辅机改造的成果，具有很高实用价值。

本书由华中理工大学刘德昌（编写第一、五、七章）和陈汉平（编写第二、九章）主编，陈刚（编写第三章）、林志杰（编写第四章）、周怀春（编写第八章）、陆继东（编写第十章）、吴季兰（编写第十一章）、黄琳（编写第六章）参编，刘德昌统稿。

本书由东北电力学院孙键教授审阅，他对完善本书书稿作出了有益贡献，在此深表感谢。

由于水平所限，书中缺点和错误难免，欢迎批评指正。

编者

2000 年 3 月



前 言

第一章 绪 论

第一节 我国的能源资源状况·····	1
第二节 煤炭在我国能源中的地位及分布·····	1
第三节 我国煤炭资源的利用效率·····	1
第四节 燃煤对大气带来的污染·····	2
第五节 我国中小型电站锅炉、工业锅炉和窑炉的现状·····	4
第六节 锅炉改造的意义·····	6
参考文献·····	7

第二章 煤粉锅炉改循环流化床锅炉

第一节 我国中小容量煤粉锅炉的现状及其改造方向·····	8
第二节 煤粉锅炉改造的方式 ·····	10
第三节 循环流化床锅炉的炉型与煤粉锅炉的改造 ·····	11
第四节 下排气旋风分离器循环流化床燃烧技术改造 75t/h 电站煤粉锅炉方案设计 ·····	21
第五节 锅炉改造的技术经济分析 ·····	25
参考文献 ·····	25

第三章 煤粉锅炉的改造与调整

第一节 煤粉燃烧的特点 ·····	27
第二节 煤粉锅炉常见问题及分析 ·····	30
第三节 应用稳燃腔煤粉燃烧器改造锅炉 ·····	33
第四节 应用其它先进煤粉燃烧技术改造锅炉 ·····	37
第五节 煤粉锅炉调整试验 ·····	42
第六节 热管在电站锅炉空气预热器中的应用 ·····	45
参考文献 ·····	46

第四章 工业锅炉改流化床锅炉

第一节 工业锅炉改流化床锅炉的发展 ·····	47
-------------------------	----

第二节 工业锅炉改流化床锅炉应注意的几个问题 48

第三节 工业锅炉改流化床锅炉的设计参数选取及某些部件结构 50

第四节 工业锅炉改流化床锅炉举例 53

参考文献 57

第五章 国外电站锅炉改流化床锅炉

第一节 前言 58

第二节 用流化床锅炉取代旧电站锅炉 58

第三节 对旧电站锅炉的翻新改造 63

第四节 改旧煤粉锅炉为带埋管的流化床锅炉 67

第五节 电站锅炉增容升级改造 69

参考文献 70

第六章 SHL6.5-25 链条锅炉改流化床锅炉热力计算示范

第一节 概述 72

第二节 热力计算示范 72

参考文献 84

第七章 流化床锅炉的简易计算

第一节 理论空气量和理论烟气量近似计算 85

第二节 烟气焓的估算 85

第三节 锅炉热效率和煤耗量的估算 86

第四节 锅炉小时空气量、烟气量估算及风机选择 87

第五节 布风板面积和受热面的估算 88

第六节 锅炉烟、风道气体流速及截面积的估算 89

参考文献 89

第八章 锅炉控制的更新改造

第一节 锅炉基本控制理论 90

第二节 工业锅炉控制系统 93

第三节 电站锅炉监测与控制 97

第四节 循环流化床锅炉控制 103

参考文献 108

第九章 锅炉除尘设备改造

第一节 除尘设备的种类、性能与选用 110

第二节 旋风水膜除尘器改造 115

第三节 电除尘器改造 125

参考文献 133

第十章 锅炉脱硫技术改造

第一节 前言 135

第二节 炉内喷钙脱硫 136

第三节 干法烟气脱硫 138

第四节 湿法烟气脱硫 142

参考文献 144

第十一章 锅炉机组风机改造

第一节 概述 145

第二节 锅炉机组用风机 152

第三节 风机的磨损及防磨技术 157

第四节 风机的振动及防止方法 164

第五节 风机的选择 171

参考文献 173

绪 论

第一节 我国的能源资源状况

我国的能源资源丰富，其中煤炭资源的经济可开采储量为 622 亿 t，居世界第三位（美国煤炭资源的经济可开采储量占世界第一位，原独联体国家的煤炭资源经济可开采储量占世界第二位）；我国的水力资源可供开发的储量达 3.79 亿 kW，占世界第一位；我国已探明的核能资源储量相当于 15.75 亿 t 标准煤。但人均能源资源占有量只有世界人均占有量的 1/2，只有美国人均占有量的 1/10。

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%。但按人口平均计算，我国人均煤炭能源资源占有量只有 233.4t，而美国人均煤炭能源资源占有量为 1045t，前苏联人均煤炭能源资源占有量为 1846t。世界人均煤炭能源占有量为 312.7t。我国人均煤炭能源资源占有量比世界人均煤炭能源资源占有量少 78.3t。从人均能源资源占有量和人均煤炭能源资源占有量来看，我国是一个能源资源十分贫乏的国家。节约能源资源，造福子孙后代显得十分突出。美国能源资源十分丰富，但其能源政策是：尽量烧中东地区的石油，尽量少开发煤炭，少作燃料使用。煤是许多化工产品的原料，作为燃料烧掉实在可惜。保护和节约我国能源资源应提到各级政府的重要议事日程上来。破坏和浪费我国能源资源的情况应该严格禁止。

第二节 煤炭在我国能源中的地位及分布

煤炭是我国的主要能源资源。在我国的能源生产结构中，从 1995 年到 1999 年煤炭能源占据了 75% 左右。这一结构在短期内还不可能有很大变化。我国的水力资源、核能资源均不缺乏，但由于初投资与发展以煤能源为主的电力工业相比要高出许多，因此，受财力的限制，我国电力工业大的结构调整还须要一些时间。

我国煤炭资源的分布特点是，煤炭资源的储藏量为 32000 亿 t，已探明的储量为 9968 亿 t，可供开采的储量为 2578 亿 t。东北、华北、西北地区煤的储藏量多，煤的灰分、硫分低，热值高，煤质好。华东、华南、西南地区煤的储藏量较少，煤的灰分、硫分高，热值低、煤质较差。煤炭资源的这一特点决定了我国将长期存在北煤南运的形势。

第三节 我国煤炭资源的利用效率

如前所述，我国人均煤炭能源资源占有量低于世界人均煤炭资源占有量。是一个煤炭

能源资源十分有限的国家。但我国煤炭的利用效率与世界发达国家相比差距很大，煤炭能源资源的浪费却十分严重。

据统计，我国煤炭用于锅炉生产蒸汽发电的约占 31.5%，用于工业锅炉和窑炉的约占 40%，民用煤约占 20%，其它占 7.5%。除电站锅炉热效率平均达到 90% 左右外，其它工业锅炉、窑炉、民用炉灶的热效率均十分低下。工业锅炉平均热效率为 60% 左右。工业窑炉平均热效率为 20% ~ 30%。民用炉灶的热效率平均只有 15% ~ 30%。这样低的热效率意味着大量煤的浪费，并给环境带来了严重污染。

电站锅炉的热效率比工业锅炉、窑炉和民用炉灶要高得多，但与世界上发达国家相比差距仍很大。我国 1980 年的发电标准煤耗是 448g/(kW·h)，1990 年是 427g/(kW·h)，预计到 2000 年为 367g/(kW·h)，而目前世界上发达国家的发电标准煤耗为 330g/(kW·h)。也就是说我们国家发 1 度电要多耗 37g 标准煤。按年发电量 1120 亿 kW·h 计算，1 年多耗标准煤 4.144×10^6 t。

第四节 燃煤对大气带来的污染

煤燃烧后从烟囱中排出的粉尘、SO₂、NO_x、CO、C_xH_y、CO₂ 等气体对大气环境造成了严重污染和破坏。排放到大气环境中 70% 的粉尘，90% 的 SO₂，70% 的 NO_x，71% CO，43% C_xH_y 和 85% 的 CO₂ 来自于煤的燃烧。据统计，1990 年燃煤向大气中排放了 8.2×10^6 t 粉尘， 13.5×10^6 tSO₂， 2.7×10^6 tNO_x 和 47.9×10^6 tCO₂，对大气环境带来了相当严重的污染。

粉尘按粒径大小分为降尘和飘尘两种。直径为 10μm 以上的称为降尘，小于 10μm 的称为飘尘。影响人体健康的主要是飘尘。

我国煤炭储藏量中含硫在 2% 以上的高硫煤占 25% 左右。燃煤产生的 SO₂ 对大气的污染十分严重。二氧化硫是一种无色有臭味的窒息性气体，对人体健康危害很大，会引发各种恶性疾病。多年的监测和研究表明，我国酸雨污染的范围已从西南局部地区扩大到长江以南大部分城市和乡镇，并有进一步向北发展的趋势。由 16 位全国知名的酸雨问题专家提交的《中国酸雨问题专家报告》中说，中国的 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 km² 扩大到 280 万 km²。1986 年 pH 值低于 4.5 的重酸雨区仅为重庆、贵阳等城市，而到 1993 年已扩大到川、贵、湘、鄂、赣、桂、粤、闽、浙等省。专家报告指出：中国的酸雨主要是由于燃烧煤排放的二氧化硫所引起的。到 1998 年我国酸雨污染的情况变得更加严重，图 1-1 表示了酸雨控制区、频繁酸雨区和主要 SO₂ 的排放点。从图看出，酸雨控制区已达 11.4%，酸雨面积区已达 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。目前我国对治理 SO₂ 污染还缺乏价廉、有效的技术并存在财政上的困难，因此酸雨的污染还有进一步恶化的趋势。

氮氧化物（NO，NO₂）总称 NO_x。氮氧化物主要来自于煤炭的高温燃烧和其它化石燃

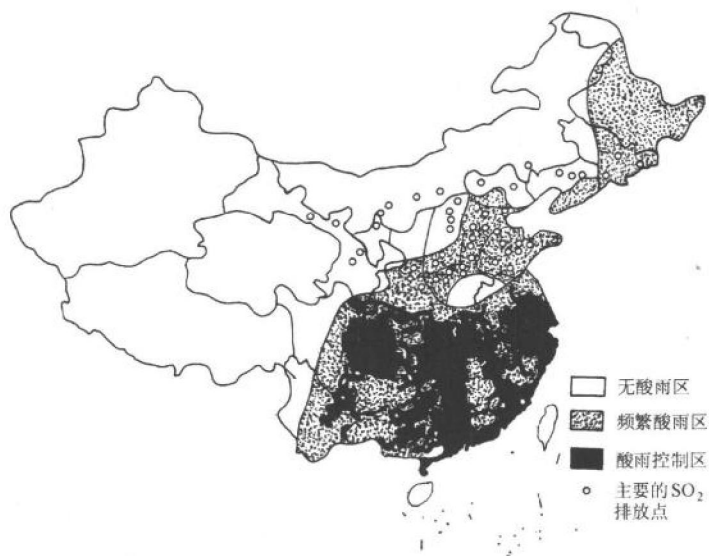


图 1-1 1998 年酸雨形势图

料的高温燃烧。目前，我国的酸雨还是属于硫酸型，但随着汽车数量的增加和燃煤电站的发展， NO_x 对酸雨的作用会越来越大。另外， NO_x 与 C_xH_y 化合物在强烈阳光作用下生成一种浅蓝色光化学烟雾，对人体健康产生极大的危害。对燃烧化石燃料烟气中 NO_x 的脱除，其技术难度比清除 SO_x 要大，其费用比清除 SO_x 更高。

N_2O 也是一种氮氧化物，它是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。在大气中 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 以目前的年增 0.18% ~ 0.26% 的速度增加，过 50 年之后， N_2O 的温室效应就会等于 CO_2 的温室效应。

N_2O 还是一种破坏大气圈中臭氧层的气体。 N_2O 在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光的能力，从而阻止了紫外线光对人类的照射，保护了人类的安全。研究表明，同温层中臭氧层每减少 1%，人类皮肤癌患者可增加 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将增加 20 万。

CO_2 是一种最主要的温室效应气体，它主要来自于化石燃料的燃烧。我国动力工业主要是以煤作为燃料。所以，在我国 CO_2 主要来自于煤的燃烧。目前，我国 CO_2 的排放量占世界第二位，为 11.8%，仅次于美国。对 CO_2 的排放控制主要是改变能源生产结构，大力发展水电、核电，利用生物质燃料和各种新能源，减少化石燃料发电。另外，发展先进的清洁煤燃烧技术，如整体煤气化联合循环发电，燃料电池联合循环发电，加压循环流化床联合循环发电等方式，可以减少单位发电量的 CO_2 排放量。目前，正在研究的热门课题，纯氧、 CO_2 循环燃烧发电浓缩处理 CO_2 的新技术，有望实现对 CO_2 的处理。该技术

的发展对 SO_x 和 NO_x 的排放控制也十分有利。对 CO_2 的排放控制还处在认识和探索研究阶段，要走的路还很长。其技术难度和耗资与脱除 SO_x 和 NO_x 相比更巨大。

碳氮化合物——烷烃、烯烃和芳烃、多环芳烃有机化合物来自于化石燃料的燃烧；另外，含有苯及苯的同系物——甲苯、二甲苯、三甲苯的有机化合物及其含有茈、蒽等多环芳烃也主要来自于化石燃料的燃烧。这些碳氢化合物排入大气中，严重污染环境，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元素的排放也会对环境带来污染。原煤中一般均含有微量重金属元素，如 Hg、Cd、pb、Cr、As 等。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环境中，因而对大气环境带来危害。这些微量重金属是附在 $0.01 \sim 10\mu\text{m}$ 的微细粉尘上，通过人的呼吸系统吸收，对身心健康造成危害；另外是通过雨水侵入水源对人类健康带来损害。这些微量重金属对人类和生物的危害还未被人们认识和重视。但人们已认识到心血管病，癌症与日益恶化的环境有关联。

发展洁净煤燃烧技术，减少、控制燃煤过程中的污染排放物，保护地球的生态环境，保护人类和动植物的正常生存，是 21 世纪的重要环境工程。要求世界上每个人来共同承担。

第五节 我国中小型电站锅炉、工业锅炉和窑炉的现状

一、我国中小型电站锅炉现状

我国 125MW 以下的电站锅炉称为中小型电站锅炉。这些锅炉大多是在改革开放前投入运行的，这些锅炉大多数为煤粉燃烧锅炉。这些锅炉的共同点如下。

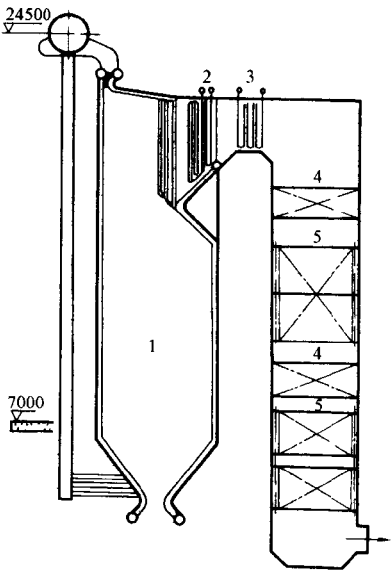


图 1-2 75t/h 煤粉锅炉示意图

1—燃烧室；2—高温过热器；3—低温过热器；
4—省煤器；5—空气预热器

(1) 锅炉的整体布置形式为典型的 II 形布置。锅炉的水平烟道将燃烧室和尾部烟道连成一体，形成一个像俄文字母 II 的形式。图 1-2 表示了 75t/h 煤粉锅炉的整体布置。从图 1-2 可看出：炉膛由下部冷灰斗和上部燃烧室组成。冷灰斗上部燃烧室四角布置有切向煤粉燃烧器。水平烟道内通常布置有高温过热器和低温过热器。尾部烟道内布置高温省煤器、高温空气预热器、低温省煤器和低温空气预热器。对高参数的 220t/h 煤粉锅炉，燃烧室顶部布置有屏式过热器。对 125MW 机组的煤粉锅炉，为了提高电厂的发电效率，在尾部烟道内，还布置有蒸汽再热器。

(2) 这些锅炉未设计烟气脱硫装置。含硫煤燃烧时生成的 SO_x 全部直接排入大气，是我国酸雨的重要来源之一。

(3) 这些锅炉大都采用水膜除尘器, 有的采用多管旋风子除尘器, 除尘效率低。

(4) 煤粉燃烧属高温燃烧, 燃烧过程中生成的氮氧化物 (NO_x) 高, 达到 $600 \sim 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

(5) 由于细粉分离器和尾部烟气除尘器效率低, 排粉风机和引风机磨损严重, 这些风机叶轮更换频繁。

(6) 锅炉燃烧自动控制水平低, 加上设备老化, 燃烧效率降低, 维修工作量大, 运行费用高, 发电成本高, 电厂经济效益差。

(7) 锅炉燃用偏离设计煤种时, 带负荷能力差, 燃烧效率降低。

(8) 锅炉负荷的调节范围不大, 当负荷低于 70% 的设计负荷时, 为了维持稳定燃烧, 需要投油助燃, 提高了运行费用。

为了增加煤粉锅炉对燃料的适应范围, 提高燃烧效率, 扩大负荷的调节范围, 提高燃烧的自动监测和控制水平, 减少粉尘和有害气体对大气的污染, 提高运行的可靠性, 对锅炉燃烧器、锅炉本体及主要辅机进行改造, 延长锅炉的服役期是十分必要的。

二、我国工业锅炉和生活锅炉现状

据统计, 至 1998 年末我国共有总数达 50.12 万台的工业锅炉生产蒸汽满足各种生产工艺过程的用热要求。此外, 也有相当数量的锅炉用来生产蒸汽和热水满足采暖、空调和生活用热的需要。

电站锅炉和工业锅炉各消耗我国煤产量的 1/3 左右, 是主要的用煤设备。

工业和生活锅炉的共同特点如下:

(1) 大多数为链条锅炉和固定炉排锅炉, 生产饱和蒸汽或热水。其炉型有快装型、组装型和散装型。

(2) 这些锅炉均要烧优质煤, 对煤种的适应性差。

(3) 锅炉燃烧效率比煤粉锅炉要低 10 个百分点以上。锅炉热效率只有 65% 左右。

(4) 多数采用水膜除尘和旋风子除尘, 除尘效率低。

(5) 均无烟气脱硫、脱硝装置。

(6) 这些锅炉容量小, 自动化、机械化水平低, 劳动强度大。

为了节约煤炭资源, 提高燃烧效率, 改善对煤种的适应性和减少粉尘和有害气体对大气的污染, 维持一个人类较为清洁的生存环境, 对工业锅炉和生活锅炉进行改造亦是刻不容缓的任务。

对这部分锅炉的改造方向有三: ①在城区宜改成燃油、燃气锅炉; ②在郊区和城镇宜改成流化床锅炉; ③对煤源比较固定的锅炉宜对燃烧设备进行改造, 采用飞灰复燃和对除尘设备进行升级改造, 如采用电除尘或布袋除尘等。

三、我国工业窑炉的现状

我国的工业窑炉涉及很多行业。窑炉形式也是变化很大。这些窑炉的燃烧效率和热利用率比工业锅炉还低。其除尘设备更是简陋, 粉尘和有害气体对大气的污染更加严重。

就水泥行业来说，用来生产高温烟气干燥水泥物料的手烧煤炉和竖井磨煤粉炉，每个水泥厂有 1~3 台。这些炉均要烧优质煤，热利用率不到 40%，劳动强度大，粉尘和有害气体排放对大气的污染最为严重。

针对不同窑炉的具体情况，应采取不同的改造方案，以达到提高热利用率，减少污染，降低劳动强度的目的。

手烧煤炉和竖井磨煤粉炉高温烟气炉改成流化床高温烟气炉就是流化床燃烧技术发展方向之一。

第六节 锅炉改造的意义

改造锅炉的意义就在于如何利用好我国的煤炭资源，并满足生产蒸汽用于发电和供热的要求，同时尽量减少粉尘和有害气体对大气的污染。其主要作用如下：

(1) 提高对煤种的适应性。我国各地煤的质量相差较大，供应锅炉的煤的种类和质量多变，改造锅炉的目的之一是提高对煤种的适应性，扩大对煤种的使用范围。

(2) 提高燃烧设备的燃烧效率和锅炉的热效率。300MW 机组锅炉的热效率能达到 90% 以上，中小型电站煤粉锅炉的热效率由于设备老化，其热效率为 85% 左右。工业锅炉蒸发量从 0.5t/h 到 130t/h 有十几个等级，其平均锅炉热效率大约为 60%。工业窑炉的品种繁多，其平均热效率为 25%。与工业发达国家相比其热效率低 10~15 个百分点。改造锅炉的目的之二是提高其热效率，节约煤炭。

(3) 减少 SO_x 的排放。我国煤炭产量的 25% 是含硫量超过 2% 的高硫煤。据全国 50 个大中型煤粉锅炉发电厂的统计，其中 90% 的电厂， SO_2 的排放量超过 $860\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。改造锅炉使之在燃烧过程中实现脱硫是目的之三。

(4) 控制 NO_x 的排放。煤粉燃烧、链条炉燃烧均属高温燃烧， NO_x 的排放量高。通过对燃烧器的改造和分级燃烧，降低 NO_x 的排放量，减少硝酸酸雨威胁，这是锅炉改造目的之四。

(5) 提高锅炉的调峰能力。随着社会的发展与进步，三班连续生产的工厂减少，无论是电负荷、还是热负荷都存在一个调峰问题。锅炉改造将有利于扩大锅炉的负荷调节范围。

(6) 有利灰渣的综合利用。锅炉改造之后，燃烧效率提高，灰渣含碳量降低，且是干灰渣，有利于灰渣的综合利用。

(7) 延长超龄锅炉的服役期。电厂中汽轮发电机组和有些辅助设备的服役期长于锅炉设备。锅炉设备经改造之后，电厂的服役期也可再延长 20 年到 30 年，这比新建电厂要经济得多。一般这种改造恢复 1kW 装机容量的投资只有新建电厂的 25%~60%。这对我们这样一个发展中国家（资金短缺），改造锅炉，延长服役期意义重大，这是我们锅炉改造目的之七。

(8) 发展洁净煤燃烧技术。锅炉改造与发展先进的燃煤联合循环发电相结合是我们未来的希望，也是我们改造锅炉的最终的目的。

综上所述，改造锅炉有利于扩大对煤种变化的适应性，有利于提高燃烧效率，有利于减少粉尘和有害气体对大气的污染，有利于扩大对负荷的调节范围，有利于灰渣的综合利用，有利于延长电厂的服役期。有关锅炉领域的科学工作者和工程技术人员为锅炉改造应该作出我们的贡献。

参 考 文 献

- [1] 刘德昌主编. 流化床燃烧技术的工业应用. 北京: 中国电力出版社, 1999
- [2] 刘德昌, 阎维平主编. 流化床燃烧技术. 北京: 中国电力出版社, 1998
- [3] 郑楚光主编. 洁净煤技术. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- [4] 毛健雄, 毛健全, 赵树民编著. 煤的清洁燃烧. 北京: 科学出版社, 1998

煤粉锅炉改循环流化床锅炉

循环流化床燃烧是一种清洁、高效煤燃烧技术，近十多年来在国内外得到了迅速发展。采用循环流化床燃烧技术改造电站煤粉锅炉是目前国际上循环流化床燃烧技术应用发展的方向之一，受到世界主要发达国家的重视。

美国、法国、日本等国开发流化床锅炉从改造老电站锅炉入手，不仅成功地解决了这些锅炉机组设备老化、技术落后、经济效益差、污染严重等问题，而且还大大加速了流化床锅炉的发展。如法国在 Gardanne 电厂 250MW 机组煤粉锅炉改造中采用了循环流化床锅炉，已成为目前世界上运行中的最大循环流化床锅炉。该工程对老电站锅炉的技术改造起到了很好的示范作用，并为循环流化床锅炉的进一步发展奠定了基础。波兰和乌克兰为了使电站锅炉能烧本国劣质煤并减少对大气带来的严重污染，分别与美国 FW 和 B&W 锅炉公司合作，用循环流化床燃烧技术对电站煤粉锅炉进行改造。已完成的改造工程表明：采用循环流化床燃烧技术改造电站老煤粉锅炉有巨大的社会效益、经济效益和环境效益。我国能源结构以煤为主，锅炉燃烧效率不高，燃煤带来的污染十分严重，其情况与波兰、乌克兰十分相似。我国目前电力建设发展较快，资金比较缺乏，因此学习国外经验，采用循环流化床燃烧技术改造电厂老煤粉锅炉，其经济效益、环境效益和社会效益更为显著。

本章将在介绍我国中小型电厂煤粉锅炉基本情况的基础上，详细介绍煤粉锅炉改造中的有关技术问题，包括改造的形式、采用的技术与炉型等。并结合下排气旋风分离器循环流化床锅炉改造煤粉锅炉的设计方案作具体的介绍，最后讨论锅炉改造的技术经济分析。

第一节 我国中小容量煤粉锅炉的现状及其改造方向

我国 50~70 年代投运的 125MW 以下的发电机组总装机容量大约为 80GW。在这 80GW 装机容量中，高压机组容量约为 60GW，中低压机组容量约为 20GW。其新配锅炉绝大多数为煤粉锅炉。此外，各工矿企业的自备电厂、供热供汽动力站中，还有大量的中小容量煤粉锅炉。特别是在 50~60 年代建设的一些中小型电厂中，锅炉机组已超过规定运行年限，设备老化、煤耗高、效率低、污染严重，对其进行技术改造已势在必行。

一、旧煤粉锅炉的运行现状

- (1) 设备陈旧、技术落后，运行事故多、可用率低，检修、维护费用高，亏损严重。
- (2) 锅炉热效率低、煤耗高，对煤种适应性差，不能烧劣质煤，难以适应煤种多变的要求。
- (3) 大多采用收尘效率不高的水膜除尘器，烟囱冒黑烟、浓烟，排烟中的粉尘对大气

污染十分严重。1990 年排入大气的 1300 万 t 粉尘中, 820 万 t 来自于煤的燃烧, 占 63%。

(4) 燃烧器技术性能差, 无 NO_x 排放控制手段, 致使燃烧产物中 NO_x 的排放浓度为发达国家的 4 ~ 5 倍。1990 年排入大气的 400 万 t NO_x 中, 270 万 t 来自于煤的燃烧, 占 67.5%, 给大气环境带来了严重的污染。

(5) 均无烟气脱硫装置, 煤中的含硫经燃烧后全部排入大气。1990 年排入大气中的 SO_2 达 1500 万 t, 其中 1350 万 t 来自于煤的燃烧, 占 84.9%。无控制的 SO_2 的排放已严重污染了大气环境。现在我国 pH 值小于 5.6 (通常作为酸雨的判断标准) 的降雨面积在近 8 年中大大增加, 从 175 万 km^2 扩大到 280 万 km^2 , 占我国国土面积的 29%。

(6) 锅炉难以在低负荷下稳定运行, 负荷可变化范围小, 调峰能力差, 不能适应大范围的调峰要求。

(7) 灰、渣含碳量高, 综合利用程度低, 要求不断扩大灰渣场, 占用土地面积多。

二、我国面临的电力生产形势

我国目前一次能源消耗中煤炭占 75% 左右, 且今后还有上升的趋势, 其中 84% 直接用于燃烧。由于燃烧效率低、煤种适应性差, 并缺乏有效的污染物控制技术, 不仅造成了能源的很大浪费, 还严重污染了环境。

我国电力生产以火电为主, 约占全国发电量的 80% 左右。其中 90% 为燃煤发电机组。用于发电的煤炭, 约占全国煤炭总产量的 $\frac{1}{3}$, 燃煤电厂已成为全国主要的工业污染源之一。随着我国经济的迅速发展, 对能源的需求量不断增加, 大型燃煤发电机组每年以 9 ~ 12GW 的速度增长。与煤燃烧相关的环境污染问题将越来越严重。同时, 我国电力生产与消费的发展也不平衡, 白天与黑夜的峰谷差也越来越大, 劣质煤仍将大量被利用。因此, 对燃煤发电机组技术性能的要求越来越高。这种局面在短期内不可能改变。

在这种形势下, 我国加快了对循环流化床锅炉的开发, 同时也引进了数台 50 ~ 100MW 的循环流化床锅炉。这些锅炉由于种种原因还存在一些问题。引进一台循环流化床锅炉与将一台同容量的旧煤粉锅炉改造成循环流化床锅炉相比, 前者投资要翻两番。在我国电力短缺和资金不足的情况下, 在新建大型电厂的同时, 绝不能忽视对这 80GW 机组的旧煤粉锅炉进行改造。

三、旧煤粉锅炉的改造方向

根据我国目前电力工业发展的技术政策, 火电建设以 300MW、600MW 大容量机组为主; 对现有的 60GW 的高压机组, 应有针对性地进行改造, 以降低煤耗, 减少污染; 同时淘汰一批超期服役的中、低压机组, 或改造成供热机组。实行“以大代小”, “以新代旧”的技术改造, 或利用原厂址, 兴建大型电厂; 或改造成热电厂, 实现集中供热, 替代小锅炉房, 提高效率, 减少污染。这种技术改造的方针对于彻底解决我国能源利用率低下, 污染物排放控制不力等问题有其合理性。但在实际操作中, 目前我国电厂对超龄煤粉锅炉的处理是退役、报废; 新增电力靠建新厂和电厂扩建来解决。而新建或扩建电厂的投资为旧

锅炉改造延役工程的两倍。因此，这对我国这样一个发展中国家来说是十分不适宜的，已严重束缚了利用循环流化床燃烧技术来改造旧煤粉锅炉。

循环流化床燃烧技术已是商业化的燃烧技术，具有高效、低污染、燃料适应性强等优点。如果用这种技术来改造旧煤粉锅炉，则可达到节约资金、减少污染、增容和延长电厂使用寿命的目的，国外已有不少成功的经验可以借鉴。因此，将旧煤粉锅炉改造成循环流化床锅炉应作为主要改造方向。

第二节 煤粉锅炉改造的方式

利用循环流化床燃烧技术改造旧煤粉锅炉，主要有两种方式，一是更换式改造，二是翻新式改造。

更换式改造以拆除原煤粉锅炉，另建新循环流化床锅炉为特征。如果场地允许，可先在旧煤粉锅炉旁建造全新的循环流化床锅炉，然后再拆除旧煤粉锅炉，即先建后拆。也可以先拆后建，即先拆除旧煤粉锅炉，仅利用其厂址、厂房及部分钢架，建造新的循环流化床锅炉。通常，这种更换式改造工作量较大，投资较高，建设周期也较长。当然，如果是先建后拆，在新建循环流化床锅炉的同时，旧煤粉锅炉能继续运行，发电或供热创收，待循环流化床锅炉建成后再拆除旧煤粉锅炉，则可在很大程度上弥补上述不足。例如法国 Emile Huchet 电厂 125MW 旧煤粉锅炉就是采取这种先建后拆的方式改造为循环流化床锅炉的。由于是新建循环流化床锅炉，可以不受原煤粉锅炉的限制，从而最大限度地发挥循环流化床燃烧技术的优势，实现最佳设计，技术性能有可靠的保证。

翻新式改造则不仅利用了原厂址、厂房，还结合原煤粉锅炉的结构，尽可能地利用了原煤粉锅炉的锅筒、联箱、各部分受热面等（经大修或检验确认还可以利用的前提下），在原煤粉锅炉的基础上，将其改造成循环流化床锅炉。因此，具有改造工作量较小，投资较省，改造周期较短等优点。但由于受原煤粉锅炉结构的限制，通常难以实现循环流化床锅炉的最佳设计。但只要周密考虑、精心设计，仍能在总体性能上体现循环流化床燃烧技术的优越性，满足用户提高锅炉效率、燃用劣质燃料、降低运行成本、减少污染物排放等方面的要求。

采取何种改造方式，不仅是个技术问题，同时也是个经济问题，应作全面的技术经济比较、方案论证，择优选定。对于我们这样一个发展中国家，由于资金比较缺乏，一般情况下，采取翻新式改造更为适宜。

国外旧煤粉锅炉改造为循环流化床锅炉一般多采用更换式改造，并已成为循环流化床锅炉应用发展之源。国内目前也有一些旧煤粉锅炉改造为循环流化床锅炉。一般多采用翻新式改造。但对于超龄煤粉锅炉，如果锅炉本身已无多大利用价值，也可考虑采用更换式改造。

对于更换式改造，相当于新建一台循环流化床锅炉，通常可将更换改造与增容结合起来，实现“以大代小”。例如，美国 Nucla 电厂原为中参数电厂，亏损严重，被迫进行更换式增容改造。拆除原有三台陈旧落后的中参数链条锅炉，利用其厂房场地新建一台

420t/h 高压循环流化床锅炉，新装一台 75MW 的高压抽汽式汽轮发电机组。原有三台 12MW 的中压汽轮机组保留，利用高压汽轮机的抽汽推动原有三台 12MW 中压汽轮机发电。使汽轮机热耗降低了 15%。可燃用劣质煤，燃料费用降低了 30%，电厂服役期延长 30 年。改造投资只有新建电厂的一半，经济效益十分显著。而对于翻新式改造，对扩容问题则应作周密考虑。一般受原锅炉结构、钢架和受热面等的限制，通常不宜片面追求扩大蒸发量，否则会带来对流受热面较为严重的磨损。

无论是更换改造还是翻新改造，对电厂原有汽轮发电机组、锅炉岛辅助设备、热力系统及设备、水处理系统及设备、烟囱和煤场等均应予以充分利用。有些要作相应的更新，有些需进行整修，特别是对多年运行中发生的故障情况要进行统计、分析，作出技术改造方案，进行相应的整改，以提高机组的可用率。

将旧煤粉锅炉翻新改造为循环流化床锅炉是一个复杂的系统工程。由于每台锅炉的规格型号不同，其钢架结构、受热面的布置、汽水流程等都有其特殊之处。同时因运行时间、燃用煤种的不同，受热面的寿命也不一定相同，这样往往使具体改造方案有所不同，改造工程的难易程度也相差很大。目前国内外都有一些成功的改造工程，其经验可以借鉴，但却不能照搬，而应根据实际情况，制定合理的改造方案，进行翻新改造。

在我国，采用循环流化床燃烧技术改造旧煤粉锅炉，具有广阔的市场和显著的效益。归纳起来有如下几个方面：一是许多电厂煤粉锅炉已超龄或即将超龄，而汽轮发电机组及其辅助系统和设备经整修后还能运行 25~30 年。采用循环流化床燃烧技术将煤粉锅炉改造为循环流化床锅炉能使电厂延长服役期 25~30 年，而投资成本只有新建电厂的 40%~60%。若是将煤粉锅炉翻新改造为循环流化床锅炉，其投资仅为新建循环流化床锅炉的一半左右，在经济上很有吸引力和竞争力。二是这些煤粉锅炉均没有配备烟气脱硫设备，SO₂ 排放严重超标。若加装烟气脱硫设备不仅造价高，更无安装场地。采用循环流化床燃烧技术将其改造成循环流化床锅炉，能经济、有效地解决 SO₂ 排放的问题。三是煤粉锅炉对煤种的适应性差，只能烧好煤，不能烧劣质煤，经济效益差，亏损比较严重。而用循环流化床锅炉进行改造后，则较易于解决这一问题，可以烧当地劣质煤，节省燃料费用。四是旧煤粉锅炉都没有安装脱硝设备，NO_x 的排放严重超标。若加装脱硝设备无论从技术上还是经济上都是不可取的，改为循环流化床锅炉则在很大程度上解决了 NO_x 对大气的污染问题。此外，循环流化床锅炉能大大提高机组的调峰能力，可在很大范围内（通常为 30%~110% 额定负荷）适应负荷的变化。此外灰渣便于综合利用，也是很有意义的一个方面。

第三节 循环流化床锅炉的炉型与煤粉锅炉的改造

作为一种新型煤燃烧技术，循环流化床燃烧自问世以来，以其特有的优点，得到了异常迅速的发展。在经历了一个不断发展和完善的过程后，出现了多种炉型和技术流派，并各有特色。可供选择的成熟技术和典型炉型很多，了解它们的特点，对于选择合适的炉型及技术，进行煤粉锅炉的改造是十分必要的。