

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 t SO₂， 2.7×10^6 t NO_x 和 47.9×10^6 t CO₂，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

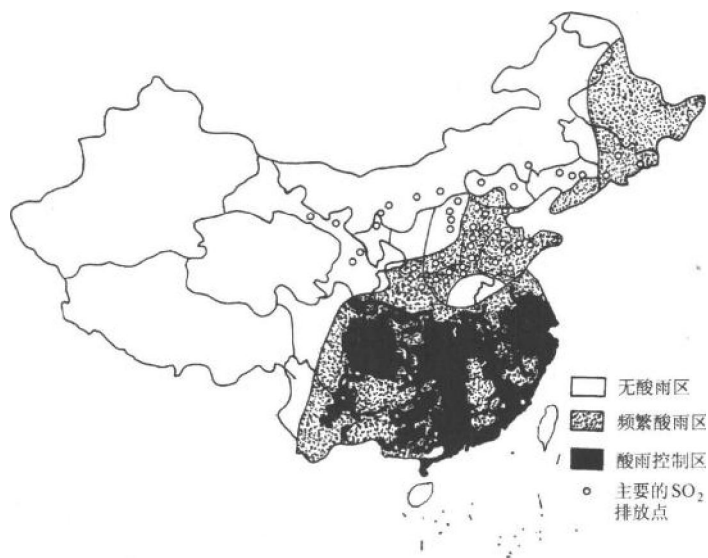


图 1-1 1998 年酸雨形势图

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。

碳氢化合物——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萘、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。

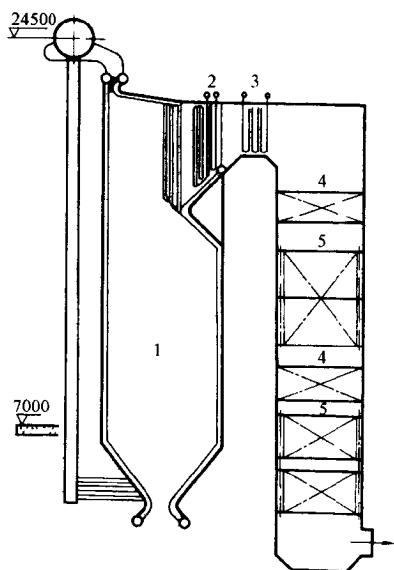


图 1-2 75t/h 煤粉锅炉示意图

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 Π 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 Π 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_2 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，对增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。

一、循环流化床锅炉的典型炉型

随着循环流化床锅炉的迅速发展，至今已形成了多种技术流派，出现了多种炉型，其容量已覆盖了大中小型电站锅炉和工业锅炉。从总体上来看，循环流化床锅炉一般是由燃烧室、分离装置、回料装置、对流受热面及外部流化床热交换器（即 EHE，有的炉型无 EHE）等主要部件构成，其最主要的区别在于外部流化床热交换器的布置与否以及分离器的型式与位置。

通常，可将循环流化床锅炉按是否采用外部流化床热交换器分为两大类，按分离器的型式分为旋风分离、惯性分离和组合分离三种型式。按分离器的布置位置或工作温度分为高温、中温和低温三种类型。也有的按流速（流型）或飞灰携带率来进行分类，可分为高携带率、中携带率和低携带率三大类。或更通俗地按循环倍率分为高循环倍率、中循环倍率和低循环倍率三大类。以上这些涉及到具体数值的高、中、低分类，并没有确切的界限，很多都是相比较而言的。一般认为：按烟气进口温度，高温分离为 800 左右，中温分离为 600℃左右，低温分离为 300 左右。高携带率不低于 5kg/kg，中携带率为 1~5kg/kg，低携带率为低于 1kg/kg。高循环倍率为大于 20，低循环倍率为 5 以下，5~20 之间则为中循环倍率。

1. 国外循环流化床锅炉的两大类型和六种典型炉型

国外两大类型循环流化床锅炉，一类是带外部流化床热交换器，另一类是不带外部流化床热交换器。

带外部流化床热交换器的循环流化床锅炉有三种典型炉型：即 Lurgi 型，FW 型（具有整体化流化床热交换器）和 ABB-CE 型（具有 Flextech 技术）。这三种循环流化床锅炉的共同特点是采用了高温旋风分离器（其中 FW 型为蒸汽冷却型，其余为绝热型）和各具特色的外部流化床热交换器。它们的优点是：对燃料的适应性强、负荷调节范围大、燃烧效率高、石灰石利用率高、大型化中易于解决燃烧室内受热面布置的困难、对床温和蒸汽温度的控制灵活。其缺点主要是燃烧系统较复杂，锅炉造价较高。

不带外部流化床热交换器的循环流化床锅炉主要有三种形式：Pyroflow 型、Circofluid 型和 B&W 型。Pyroflow 型采用高温旋风分离器，Circofluid 型采用中温旋风分离器，B&W 型采用高温槽钢惯性分离器和低温多管旋风子分离器的两级组合式分离装置。它们的突出优点在于燃烧系统比较简单，锅炉造价比较低，而对燃料的适应性、负荷调节范围、燃烧效率、石灰石利用率以及对床温和蒸汽温度的控制等方面也比较好。但与带外部流化床热交换器的循环流化床锅炉相比有一定的差距。在大型锅炉中还需采取特别措施来解决燃烧室受热面布置不下的问题。

2. 我国的三种典型循环流化床锅炉

近十年来我国循环流化床锅炉的发展取得了明显的成效，目前已形成了具有中国特色的三种典型循环流化床锅炉，其技术已不断完善，在性能与价格上很有优势，应用比较广泛。这三种典型炉型是清华大学与四川锅炉厂开发的异形水冷分离器循环流化床锅炉，中国科学院工程热物理所与无锡锅炉厂、杭州锅炉厂等开发的百叶窗与旋风子两级分离器循

环流化床锅炉，华中理工大学与武昌锅炉容器厂开发的下排气旋风分离器循环流化床锅炉。这三种锅炉的共同特点是没有采用外部流化床热交换器，也没有采用国外普遍应用的高温上排气旋风分离器，而使用了各具特点的分离器，使得锅炉结构紧凑、并呈典型的“Π”形布置。现分别简介如下：

(1) 异形水冷分离器循环流化床锅炉

图 2-1 为这种循环流化床锅炉的示意图。其主要特点是采用了异形水冷分离器，分离器与炉膛整装成一体，构成了“Π”形整体布置。锅炉采用单锅筒，横置式，自然循环，膜式壁炉膛，前吊后支。分离器为高温型，由膜式壁构成，结构简单。内涂一薄层耐磨浇注料，克服了高温绝热型旋风分离器因可燃物再燃烧引起的结渣和启动时间长等弊端。分离器与炉膛组成一个整体，通过水冷壁上集箱悬吊在顶板梁上，较好地解决了膨胀密封问题。这种异形分离器截面形状为方形，进口采用了独特的加速段结构，有效地提高了分离性能。这种型式的锅炉结构紧凑，整体膨胀性能好，分离器的分离效率较高，运行性能好。

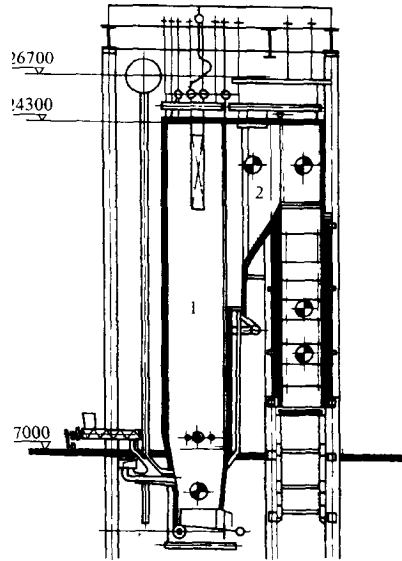


图 2-1 异形水冷分离器循环流化床锅炉
1—炉膛；2—异形水冷分离器

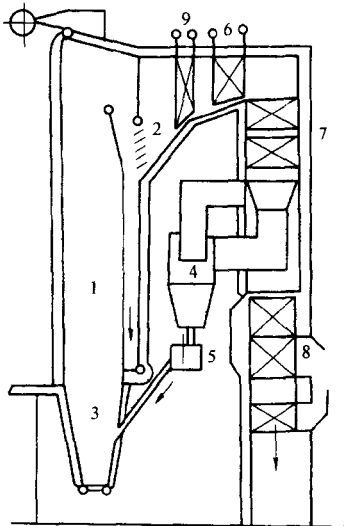


图 2-2 百叶窗与旋风子两级分离器循环流化床锅炉

1—炉膛；2—百叶窗；3—密相区；4—旋风子；5—返料器；6—低温过热器；7—省煤器；8—空预器；9—高温过热器

(2) 百叶窗与旋风子两级分离器循环流化床锅炉

这种型式的锅炉如图 2-2 所示。其主要特点是采用了两级分离器串联布置。第一级分离采用高温百叶窗惯性分离器，布置在燃烧室出口，主要分离较粗的颗粒物。第二级采用低温旋风子分离器，布置在省煤器后，主要分离较细的颗粒物，从而形成了两级循环燃烧。这种型式的锅炉保持了“Π”形的整体布置，结构也较紧凑，启动时间短。但锅炉系统相对较复杂，有百叶窗磨损问题。另外，大型化有困难。

(3) 下排气旋风分离器循环流化床锅炉

图 2-3 为这种型式循环流化床锅炉的示意图。其主要特点是采用了华中理工大学的专利技术——下排气旋风分离器。这种分离器布置在锅炉水平烟道与尾部竖井烟道相连接的转向室处，将水平烟道与尾部烟道融为一体，使锅炉布置紧凑、系统简单、保持了整套锅炉“Π”形布置的结构特点。

这种型式的锅炉多采用中温分离，过热器布置在

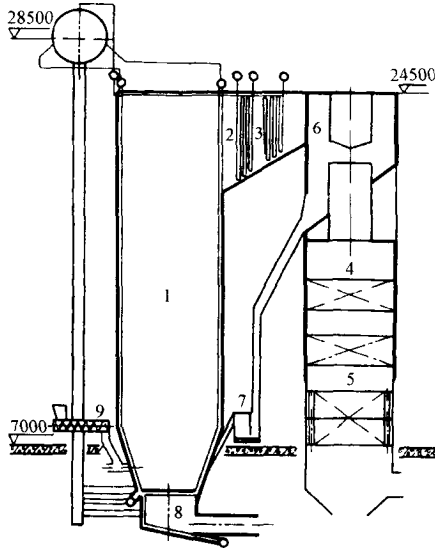


图 2-3 下排气旋风分离器循环流化床锅炉
 1—炉膛；2—高温过热器；3—低温过热器；
 4—省煤器；5—空预器；6—下排气旋风分离器；
 7—返料器；8—水冷风室；9—给煤装置

分离器之前，过热器实际上起到了外部流化床热交换器的部分作用。其优点是：简化了锅炉结构，降低了锅炉造价；一般都不存在分离器内再燃烧和结渣问题，增加了锅炉运行的安全可靠；不需要厚的高温绝热材料，重量轻，大大缩短了启动时间；由于烟气温度较低，烟气黏度降低且筒体直径减小，分离效率可显著提高；由于采用了独特的分离器结构，分离器具有分离效率高、压力损失较小的特点；对中参数锅炉，分离器内壁用耐磨耐火材料内砌，运行维护简单、可靠；对高参数锅炉，分离器采取与水平及尾部烟道包覆受热面整装并与炉膛形成一体，对大型化和整体膨胀性能更有优越性。

这种型式的循环流化床锅炉对于改造旧煤粉锅炉（一般均为“Π”形布置）特别适宜，具有改造工作量小、工期短、费用低、效益好等显著优势。

除了以上三种具有中国特色的典型循环流化床锅炉外，国内还有中国科学院工程热物理研究所与济南锅炉厂开发的高温旋风分离器循环流化床锅炉，哈尔滨工业大学与北京 B&W 锅炉公司开发的槽形分离器循环流化床锅炉，东方锅炉厂引进 FW 技术生产的汽冷旋风分离器循环流化床锅炉，以及哈尔滨锅炉厂引进 Pyroflow 技术生产的高温旋风分离器循环流化床锅炉等。另外，浙江大学与杭州锅炉厂也开发了下排气旋风分离器循环流化床锅炉。

限于篇幅，这里不能详细介绍国内外循环流化床锅炉的情况，有关内容可查阅参考文献 [2]。

二、循环流化床锅炉的炉型选择

目前国内外循环流化床锅炉有多种炉型可供煤粉锅炉改造时选择。比较而言，国外循环流化床锅炉发展较早，技术相对较成熟，制造水平也较高，性能应有可靠保证。但从国外引进的几台循环流化床锅炉的运行情况来看，都或多或少存在一些问题。实际上国外循环流化床燃烧技术也存在一个适应我国煤种及运行条件的过程。就其性能与价格比来看，一般也不适合于我国改造旧煤粉锅炉。国内生产的许多型式的循环流化床锅炉，整体性能较发展初期有很大的提高，技术也渐趋成熟，特别是在性能价格比上优势明显，比较适合于解决改造旧煤粉锅炉时的资金问题，可以作为改造旧煤粉锅炉的首选。

我国的循环流化床锅炉，无论是自行设计、生产的具有中国特色的循环流化床锅炉，还是引进技术生产的循环流化床锅炉，为适应我国国情，简化锅炉系统，100MW 及以下机组循环流化床锅炉均未采用外部流化床热交换器（浙江大学开发的 75t/h 带外部流化床

热交换器的循环流化床锅炉，主要是为大型化发展而考虑的），主要不同是在他们的关键技术——飞灰分离，各具特色。

作为循环流化床锅炉的关键部件，飞灰分离装置的性能直接影响到锅炉的安全和经济运行。循环流化床锅炉的燃烧室内空气动力特性、传热特性、循环倍率、燃烧效率、锅炉出力和蒸汽参数、石灰石的脱硫效率和利用率，负荷的调节范围和锅炉的启停性能、散热损失和运行费用等均与分离器的性能密切相关。分离器的结构型式和布置位置，决定了循环流化床锅炉的整体布置型式与紧凑性，成为区别循环流化床锅炉技术流派或炉型的重要标志之一。因此，炉型的选择，实际上可以归结为对分离装置的选择，这个问题将在后面进行详细探讨。

选择炉型，必须要考虑燃用煤种及容量大小。例如，对于难燃煤种，采用高温分离，燃烧效率更高。对于低热值煤种，循环倍率不宜太高。对于 35t/h 容量级，采取床内布置埋管的鼓泡流化床带低倍率飞灰循环，在锅炉的可靠性和经济性方面很有竞争力。对于 130t/h 及以上容量级则不宜布置床内埋管。对于 65t/h 及 75t/h 容量级，是否布置埋管，应视煤种及燃煤筛分特性等实际情况而定。

对于煤粉锅炉的更换式改造，目前国内可供选择的技术较成熟的循环流化床锅炉炉型主要有：下排气旋风分离器型，异形水冷分离器型，百叶窗及旋风子两级分离器型，以及高温汽冷或绝热旋风分离器型等。其中，高温汽冷旋风分离器型因分离器制造成本高，对中参数锅炉并不适宜，可用于高参数锅炉。

对于煤粉锅炉的翻新式改造，采用何种炉型，首先要考虑的是分离器的问题。受煤粉锅炉结构及场地的限制，采用的飞灰分离器必须具有结构紧凑，便于布置的特点，以便能在有限的空间内布置分离器。因此，常规的高温旋风分离器因其体积庞大、布置困难不适宜煤粉锅炉的翻新改造。而一些惯性分离器虽然在结构、布置上能满足要求，但单级惯性分离器因其有限的分离效率难以满足锅炉性能设计的要求，而必须采用两级或多级分离器，这样又往往会使锅炉系统更为复杂，也不可取。当然，对于两级或多级分离器型，若能简化前级飞灰分离及回送系统（如美国 B&W 型将第一级槽钢分离器布置在炉膛出口内，分离的物料直接落回炉内，第二级槽钢分离器布置在炉膛出口外，利用颗粒输送料斗使物料依靠重力落入炉内），这些设计均取消了常规的外部回料装置，从而简化了物料循环系统，使锅炉系统简化，也应视为一种适宜的炉型。

根据对煤粉锅炉翻新改造为循环流化床锅炉的研究与设计，我们认为：采用方形水冷分离器型和下排气旋风分离器型循环流化床燃烧技术是比较适宜的，能够满足锅炉翻新改造对分离器的型式、布置和性能等方面的要求。下面将分别介绍这两种炉型的翻新改造设计方案并进行方案比较。

三、煤粉锅炉翻新改造方案及其比较

用循环流化床燃烧技术对煤粉锅炉进行翻新式改造，应遵循“因炉制宜”的原则，在保证改造效果要求的前提下，尽可能减少改造工作量，以进一步提高经济性。能利用的钢架、受热面等尽可能利用。一般的改造内容如下：增加一套飞灰分离与回送的循环系统；

将原炉下部改造为循环流化床浓相区并增加布风系统；各受热面进行适当调整；用高压风机替代原鼓风机；对容量较大的锅炉还应增设二次风机；改造原煤粉制备系统以满足循环流化床锅炉对燃煤粒度的要求等。

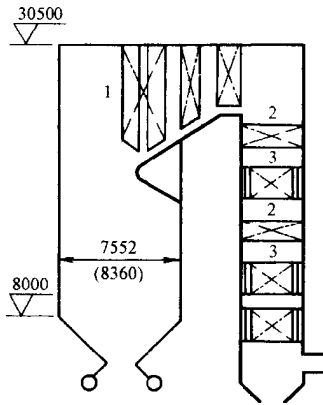


图 2-4 220t/h 煤粉锅炉
1—屏式过热器；2—省煤器
3—空气预热器

鉴于旧煤粉锅炉电厂中，220t/h 煤粉锅炉数量较多，结构布置上也具有代表性，特对一台典型的“Π”型布置 220t/h 煤粉锅炉的翻新改造进行方案介绍。其改造思路 and 具体方案，对其它容量的煤粉锅炉也有参考价值。

该煤粉锅炉为武汉锅炉厂生产的 WG-220/100 型单汽包自然循环锅炉。锅炉主要参数为：额定蒸发量 220t/h，过热蒸汽温度 540℃，过热蒸汽压力 9.8MPa (100kgf/cm²)，给水温度 215℃，排烟温度 150℃，热空气温度 330℃，煤耗 36.1t/h，热效率 87%。煤质特性如下：碳 46.55%，氢 3.06%，氧 6.11%，氮 0.86%，硫 0.94%，灰 33.48%，水 9.00%，挥发分 22.14%，低位发热量 17665kJ/kg (以上除挥发分为干燥无灰基外，均为收到基)。锅炉结构如图 2-4 所示。

锅炉采取前吊后支全钢架“Π”型结构。炉膛为矩形，断面为 7552mm × 8360mm，由膜式水冷壁构成。后墙水冷壁在上部弯曲成折焰角，折焰角上布置屏式过热器，随后依次布置高温过热器和低温过热器。尾部竖井烟道分别布置高温省煤器、高温空气预热器、低温省煤器和低温空气预热器。炉膛下部布置四角直流燃烧器，底部为冷灰斗。

改造要求维持原蒸汽参数和蒸发量不变，锅炉热效率不低于 87%，并能燃用劣质煤，锅炉烟气排放达环保标准要求。

根据原锅炉的特点和改造要求，采用了高温方形水冷分离器和中温旋风分离器两套方案进行改造设计，并进行方案比较以供选择确定。

1. 采用高温方形水冷分离器的改造方案

该方案基本上保持原锅炉的基本结构，钢架和总体尺寸不变，如图 2-5 所示。在炉膛出口和尾部竖井烟道之间增设两个方形水冷旋风分离器，分离器由四面水冷壁构成。烟气从炉膛出来后进入方形水冷分离器进行分离，然后经上排气管进入分离器上部联通烟箱后再流进尾部竖井烟道。分离下的颗粒则经流化密封送灰器返回炉膛，形成飞灰循环燃烧系统。

在该方案中，进入分离器的烟气温度为 850 左右，属高温分离。分离器内膜式壁上焊有销钉，涂上一层耐磨浇注料以防磨损。原折焰角取消，原水平烟道内的屏

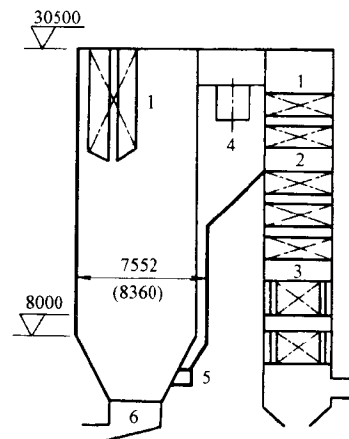
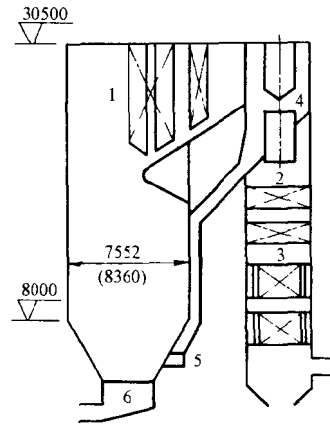


图 2-5 方形水冷分离器改造方案
1—过热器 2—省煤器 3—空气预热器；
4—方形水冷分离器 5—返料器 6—风室

式过热器及高温过热器移至炉膛上部，低温过热器移至尾部竖井烟道上部，尾部受热面进行调整。增加省煤器受热面，取消高温空气预热器。由于改造为循环流化床燃烧方式后，炉内温度水平较原煤粉燃烧方式低，因此为确保蒸发量，炉膛内受热面要增加，过热器受热面也作了相应调整。具体数值见表 2-1。其它方面的改造与前面介绍的一般改造内容相同。

2. 采用中温下排气旋风分离器的改造方案

采用中温下排气旋风分离器的改造方案如图 2-6 所示。该方案比前一个改造方案的改造工作量更小。原煤粉锅炉的基本结构、钢架和总体尺寸、炉膛上部及过热器等都维持不变。主要是在水平烟道和尾部竖井烟道之间的转向室布置了中温下排气旋风分离器。分离器可以为绝热型，也可以是冷却型。烟气从炉膛出来后先流经过热器，再进入分离器进行分离，然后从下排气管直接进入尾部竖井烟道。分离下来的颗粒物在流化密封送灰器的作用下返回炉膛，形成飞灰循环燃烧系统。



在该方案中，进入分离器的烟气温度为 600 左右，属中温分离，具有许多优点。采用绝热型分离器时，内砌耐磨耐火砖。采用冷却型分离器时，分离器由膜式壁构成方形，壁上焊有销钉，涂上一层耐磨浇注料。耐磨及保温等问题都较容易解决。由于处理烟气温度降低，烟气体积下降，分离器尺寸相对较小，结构更紧凑，烟气流向也顺应了原锅炉的方式，布置上更为合理。

图 2-6 下排气旋风分离器改造方案
1—屏式过热器 2—省煤器 3—空气预热器；
4—下排气旋风分离器；5—返料器；
6—风室

其余的一些改造主要在尾部烟道。高温空气预热器拆除，高温省煤器下移，多余的空间便于分离器的布置。受热面布置的方式变化不大，主要是适当调整受热面积。具体数据见表 2-1。其它方面的改造，如密相区、布风系统等则与前面介绍的方案相同。

表 2-1 受热面的变化及钢耗

项 目		煤粉锅炉	采用方形水冷分离器		采用下排气旋风分离器	
炉膛温度 (°C)		1143	900	950	900	950
受 热 面 积	炉 膛 (%)	100	+ 36	+ 23	+ 52	+ 25
	过热器 (%)	100	- 4	- 10	+ 20	0
	省煤器 (%)	100	+ 44	+ 48	+ 30	+ 65
	空预器 (%)	100	- 50	- 50	- 50	- 50
钢材消耗量 (%)		100	+ 10	+ 9.7	+ 6.9	+ 5.5

3. 两种改造方案的比较与分析

根据对以上两种改造方案进行的热力计算，锅炉各部分受热面的变化情况以及相应的钢材消耗量汇总于表 2-1。