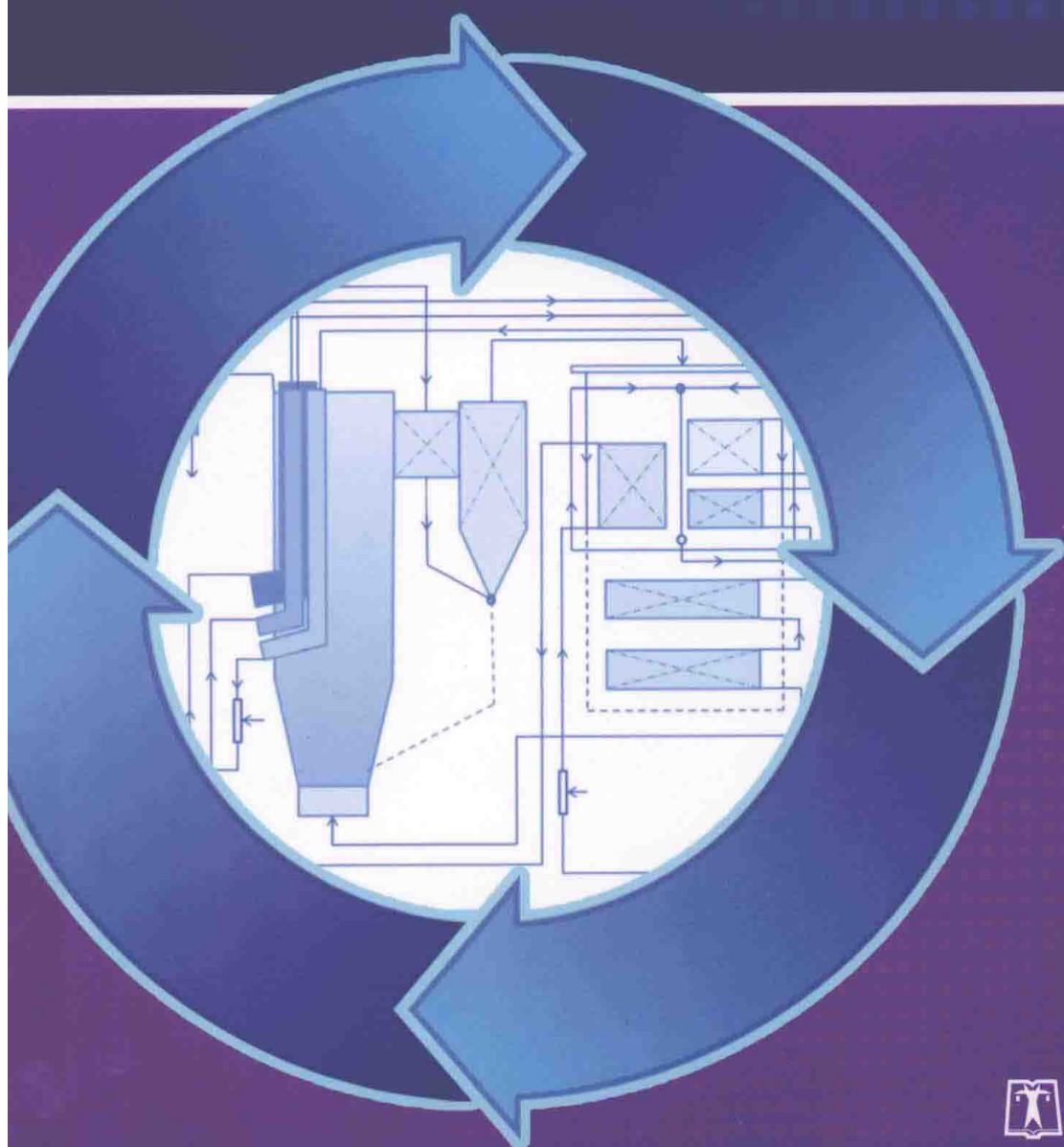


循环流化床锅炉 设备及运行

柴景起 主 编
孟祥泽 王建新 李兆民 马立民 副主编

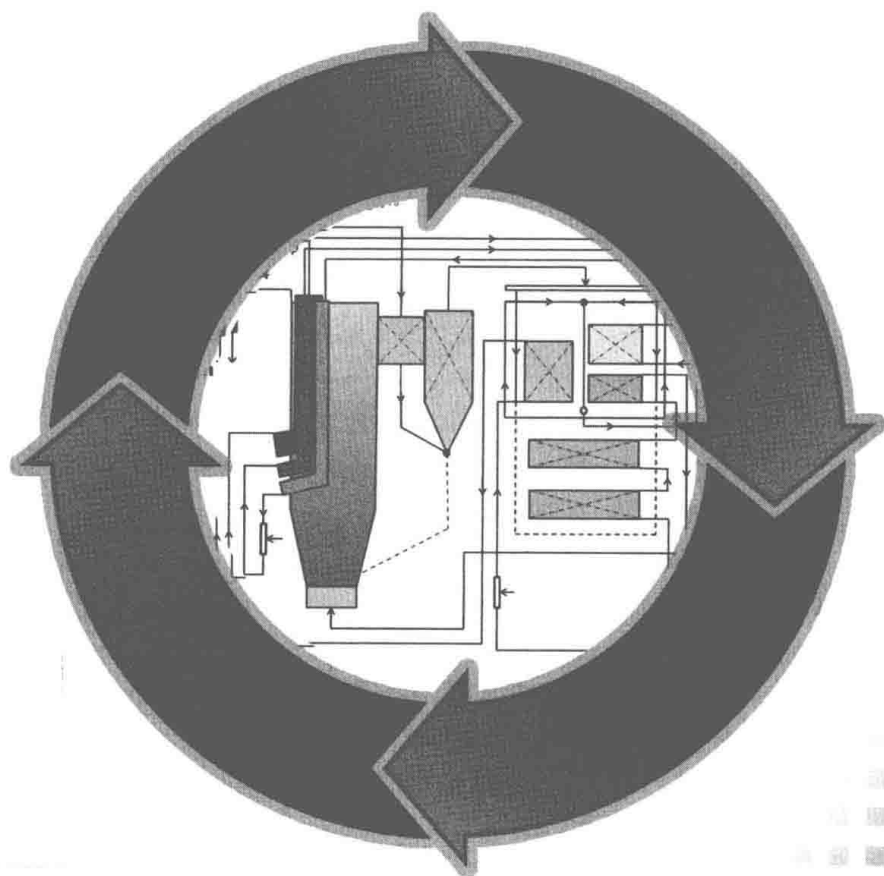


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

循环流化床锅炉 设备及运行

柴景起 主 编

孟祥泽 王建新 李兆民 马立民 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

循环流化床锅炉燃烧技术是目前商业化程度较高、应用前景较好的清洁煤燃烧技术。本书系统介绍了该技术涉及的相关知识,内容包括循环流化床锅炉原理,循环流化床锅炉设备介绍,循环流化床锅炉安装、检修与维护,循环流化床锅炉运行,锅炉事故分析与处理等。

本书适合于从事循环流化床锅炉运行、安装、检修及安全管理工作的技术人员、管理人员及技术工人使用,也可供能源与动力工程类专业的大中专院校师生学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

循环流化床锅炉设备及运行/柴景起主编. —北京: 中国电力出版社, 2018. 11
ISBN 978-7-5198-2598-0

I. ①循… II. ①柴… III. ①循环流化床锅炉-锅炉运行 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 254702 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 韩世韬 (010-63412373) 彭莉莉

责任校对: 黄 蓓 朱丽芳

装帧设计: 赵珊珊

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 12 月第一版

印 次: 2018 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 10.75

字 数: 235 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 48.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

能源与环境是目前我国面临的两个重大问题，而能源生产过程又是环境污染的主要来源之一。我国是世界上最大的煤炭生产与消耗国，煤炭在我国的一次能源构成中占据着主要的地位。煤炭在燃烧过程中将产生大量的 SO_2 、 NO_x 、灰渣等污染物，严重污染生态环境。因此煤炭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。

近年来，循环流化床锅炉以其洁净的燃烧技术在我国得到了长足的发展，呈方兴未艾之势。随着大容量循环流化床锅炉机组的投运，在安装和运行过程中也暴露出了一些问题。如何提高循环流化床锅炉的安装质量和运行维护的水平，确保机组能够长周期安全、稳定、高效运行是迫在眉睫的课题。

本书是作者多年来对循环流化床锅炉安装、检修、运行工作经验的总结，内容主要包括循环流化床锅炉原理，循环流化床锅炉设备介绍，循环流化床锅炉运行，循环流化床锅炉的安装、检修与维护，循环流化床锅炉事故分析与处理等。


本书由柴景起主编，孟祥泽、王建新、马立民、李兆民副主编，参加编写的还有王文斌、宋作印、孟令晋、鞠万坤、陈丽杰、李海、徐晓凯、岳文奇、宋朝辉。本书在编写过程中得到了中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司、华电淄博热电有限公司、华电莱州发电有限公司及神华神东电力山西河曲发电有限公司、山东电力工程咨询院有限公司等单位的大力支持并提供部分资料，在此表示感谢。

由于编者的水平有限，书中疏漏与不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者
2018年12月

前言

 第一章	循环流化床锅炉原理	1
第一节	循环流化床锅炉燃烧技术	1
第二节	循环流化床锅炉脱硫	4
第三节	循环流化床锅炉的基本结构及燃烧技术的应用发展	5
 第二章	循环流化床锅炉设备介绍	11
第一节	75t/h 循环流化床锅炉	11
第二节	130t/h 循环流化床锅炉	14
第三节	220t/h 循环流化床锅炉	15
第四节	410t/h 循环流化床锅炉	16
第五节	440t/h 循环流化床锅炉	19
第六节	670t/h 循环流化床锅炉	22
第七节	1150t/h 循环流化床锅炉	23
第八节	1900t/h 循环流化床锅炉	25
 第三章	循环流化床锅炉安装、检修与维护	28
第一节	循环流化床锅炉钢架安装	28
第二节	循环流化床锅炉承压设备安装	31
第三节	循环流化床锅炉其他设备（部件）安装	41
第四节	循环流化床锅炉烘炉	51
第五节	循环流化床锅炉检修	55
第六节	循环流化床锅炉维护	74
 第四章	循环流化床锅炉运行	77
第一节	循环流化床锅炉冷态特性试验	77
第二节	循环流化床锅炉启动前准备	80
第三节	循环流化床锅炉启动	83
第四节	循环流化床锅炉的运行操作	85

第五节 循环流化床锅炉运行操作实例（以某 350MW 机组为例）	91
 第五章 锅炉事故分析与处理	106
第一节 循环流化床锅炉设备事故分类	106
第二节 锅炉压力容器事故调查组织与分析方法	106
第三节 循环流化床锅炉运行常见事故	115
附录 A 中华人民共和国特种设备安全法	134
附录 B 电站锅炉事故应急救援预案	148
附录 C 某发电厂锅炉承压部件爆漏现场处置方案	162
参考文献	166

循环流化床锅炉原理

第一节 循环流化床锅炉燃烧技术

一、循环流化床锅炉的燃烧特点

循环流化床锅炉燃烧采用流态化燃烧方式，其主要特征是颗粒在离开炉膛出口以后，经旋风分离器收集，由返料器不断返回炉膛参加二次燃烧，因此循环流化床锅炉具有低温、强化燃烧的特点，床内温度为 850~950℃。

在循环流化床锅炉中，流化床本身是一个积累了大量灼热物料的蓄热容量很大的热源，有利于燃料的稳定、迅速着火燃烧，即使燃用低热值的燃料时，每秒钟新加入的燃料也远小于灼热床料的 1%。这些灼热床料大多为惰性物料，它们并不与新加入的燃料争夺氧气，却提供了一个丰富的热源，可将新加入的煤粒迅速加热，使其析出挥发分并稳定地着火燃烧。煤粒中的挥发分和固定碳燃烧后释放的热量，其中一部分用来加热床料，使炉内温度始终保持在一个稳定的水平。同时，一些未完全燃尽的颗粒随烟气被携带出炉膛，被旋风分离器收集，由返料器返回炉膛参加二次燃烧。所以，循环流化床锅炉对燃料的适应性强，不仅能烧优质燃料，也能烧劣质燃料，而且燃烧效率非常高，可达 98%。

循环流化床锅炉的优点：对燃料的适应性好；燃烧效率高；高效脱硫；氮氧化物（NO_x）排放低；燃烧强度高，炉膛截面积小；负荷调节范围大，负荷调节快；易于实现灰渣综合利用。

循环流化床锅炉的缺点：

- (1) 飞灰的再循环燃烧，一次风机压头高、电耗大。
- (2) 膜式水冷壁变节处和裸露在烟气中冲刷的耐火材料砌筑部件磨损大。
- (3) 高温分离器和返料器内有耐火材料，砌体冷热惯性大，给快速启停带来困难。
- (4) 循环流化床锅炉对燃煤粒度及分布要求较高。若燃料制备不完善，带来的普遍问题是：锅炉达不到设计出力、磨损严重、燃烧效率不高和运行可靠性差。

二、循环流化床锅炉的燃烧区域

循环流化床锅炉在使用二次风后，通常将其燃烧区域分为下部的密相区（二次风口以下）、上部的稀相区（二次风口以上）和高温气固分离器区及返料器区。

1. 密相区

在密相区内，由一次风将床料和加入的煤粒流化。一次风量为燃料燃烧所需风量的50%~60%。新鲜的燃料及从高温旋风分离器收集的未燃尽的焦炭被送入该区域，燃料的挥发分析出和部分燃烧也发生在该区域，必须保证该区域的温度和燃烧份额。因此，该区域通常设计成卫燃带结构，该区域水冷壁由耐火材料敷盖，既可减少水冷壁的吸热，又能防止水冷壁的腐蚀和磨损。

该区域燃烧气氛为欠氧状态，呈还原性气氛，其内部充满灼热的物料，是一个稳定的着火热源，也是一个贮存热量的热库。当锅炉负荷增加时，增加一、二次风的比例，可使其输送数量较大的高温物料到炉膛的上部区域燃烧，并参与热质交换，当锅炉负荷低不需要分级燃烧时，二次风也可以停掉。

2. 稀相区

炉膛上部为区域较大的悬浮段为稀相区，周围为膜式水冷壁结构。所有工况下，燃烧所需要的空气都会通过炉膛上部区域，被输送到上部区域的焦炭和一部分挥发分在这里以富氧状态燃烧。大多数燃烧发生在这个区域，上部稀相区比下部区域高得多，或者在中心区随颗粒团向下运动。这样焦炭颗粒在被夹带至炉膛出口以前已沿炉膛循环运动了多次，焦炭颗粒在炉膛内停留时间增加，有利于焦炭颗粒的燃烧。

3. 高温气固分离器区及返料器区

大量实践证明：被夹带出炉膛的未燃尽的焦炭进入覆盖有耐火混凝土的旋风分离器后，在其内停留时间很短，而且该处氧浓度很低，因而焦炭在分离器中的燃烧份额很小。当这部分颗粒被带入返料器后，向其内送入返料风，一部分CO和挥发分以及固定碳也在返料器区燃烧。

三、循环流化床锅炉的燃烧份额及一、二次风配比

1. 燃烧份额

燃烧份额的定义为每一燃烧区域中燃烧量占总燃烧量的比例。一般可用燃料在各燃烧区域内释放出的发热量占燃料总发热量的百分比来表示。

2. 影响燃烧份额的因素

(1) 煤种的影响。从表1-1可知，挥发分低的无烟煤及劣质煤的燃烧份额大，而挥发分高的煤，如褐煤，燃烧份额最小，即褐煤挥发分在密相床层析出后，一部分来不及在床层中燃烧，便被带往稀相层燃烧，因此其燃烧份额小。可见该推荐值主要考虑了挥发分对燃烧份额的影响。如果考虑试验粒径和粒径分布的影响，较小粒径的燃煤在密相层的燃烧份额还要乘以小于1的修正系数。

表 1-1 鼓泡流化床密相区燃烧份额推荐表

名 称	煤矸石	I类烟煤	褐煤	I类无烟煤
密相区燃烧份额 δ_d	0.85~0.95	0.75~0.85	0.7~0.8	0.95~1.0

由循环流化床中燃用焦炭和烟煤两种情况下燃烧室内燃烧份额沿床高的分布（见图

1-1) 可看出：焦炭在密相区中的燃烧份额明显高于相近试验条件下烟煤在密相区的燃烧份额，表明煤中的挥发分有很大一部分被带到了稀相区进行燃烧；循环流化床密相区的燃烧份额远低于相同燃烧条件下（温度，一、二次风比例）鼓泡床密相区的燃烧份额。

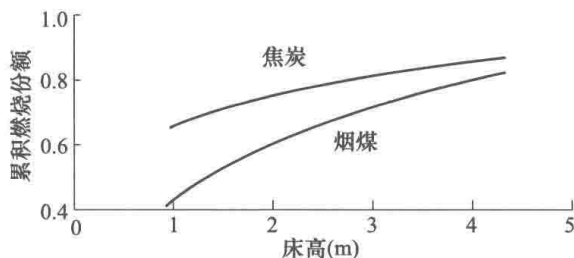


图 1-1 焦炭和烟煤两种情况下燃烧室内燃烧份额沿床高的分布

循环流化床锅炉密相区的燃烧份额比鼓泡床密相区燃烧份额低的原因如下：

1) 循环流化床气体流速较高，床料粒度又比鼓泡床细得多，这样扬析到稀相区的物料量增多，稀相区碳颗粒在床内占的比例会有所增加，结果引起稀相区的燃烧份额上升，稀相区碳颗粒燃烧量的增加反过来会使密相区的含碳量降低，从而降低了密相区的燃烧份额。

2) 循环流化床锅炉密相区燃烧处于一个很特殊的缺氧状态，虽然床中有大量的氧气存在，然而床内的 CO 浓度仍维持在很高的水平，如在密相区底部测得的氧气浓度在 13% 左右，而 CO 浓度高达近 2%，表明循环流化床锅炉密相区燃烧局部处于缺氧状态。密相区中氧化气氛和还原气氛更替的频率特别快。由于气固两相流的行为，循环流化床锅炉密相区存在着气泡相和乳化相，气体主要以气泡的方式通过床层，而固体颗粒主要存在于乳化相中。与鼓泡床相比较，由于循环流化床气泡流速较高固体颗粒粒度又比较细，气泡相和乳化相之间的传质阻力对燃烧的影响显得更为突出。一方面，氧气不能充分进入到乳化相中，限制了碳颗粒的燃烧反应，而且不完全燃烧的产物 CO 和煤颗粒释放出的挥发分也得不到充足的氧气供应；另一方面，乳化相中的不完全燃烧产物 CO 和释放出的挥发分不能很快地传到气泡相中，因而不能进一步反应完全。因此在密相区中虽然有氧气存在，碳颗粒的燃烧仍处于缺氧状态，密相区中会产生大量的 CO，这些 CO 将和一部分挥发分被带到稀相区燃烧。这是循环流化床锅炉密相床中燃烧份额远低于鼓泡床密相区燃烧份额的一个很重要的原因。

(2) 粒径和粒径分布的影响。在相同的流化速度下，粒径小的燃煤颗粒在密相区的燃烧份额会比较小。对于同样筛分范围的煤，由于细颗粒所占份额不同，燃烧份额也会不一样。当细粒份额增加时，被扬析到稀相区燃烧的煤颗粒份额增多，使密相区的燃烧份额减小。在循环流化床中，有许多国家采用窄筛分、小粒径的燃煤，在密相区的燃烧份额要小得多，在密相区没有布置埋管，并把水冷壁涂上耐磨层，只吸收少量热量也能维持密相区的热量平衡。

(3) 流化速度的影响。当密相层断面缩小，流化速度增加时，同样粒径的燃煤粒子的燃烧份额也会减小。当前有不少循环流化床锅炉为了减少煤料破碎的困难和降低成



本，采用宽筛分煤粒，国内一般用0~8mm或0~10mm的粒子。因此，在密相区选用较高的流化速度，使细粒被带往稀相区燃烧，从而使密相区燃烧份额降低，维持了密相区的热量平衡，并使放热和吸热分配趋于合理。

(4) 物料循环量的影响。当循环倍率提高时，一方面循环细颗粒对受热面的传热量及从密相区带走的热量增加，有利于密相区热量平衡；另一方面，细颗粒循环再燃的机会增加，使燃烧效率提高。

(5) 过量空气系数的影响。分析过量空气系数为1.05和1.15的工况下燃烧份额沿床高的分布情况。过量空气系数为1.15的工况下相对于过量空气系数为1.05的工况下，床内含碳量会有明显下降，扬析到过渡区的颗粒含碳量也会下降，因此在过渡区中燃烧量会下降。在稀相区的上部，过量空气系数为1.15的工况下氧气浓度比过量空气系数为1.05的工况下要高，虽然碳含量相对较低，燃烧份额在稀相区上部仍会有所增加。在密相区中，虽然过量空气系数为1.15的工况下密相区含碳量较空气系数为1.05的工况下要低，但密相区中的氧气浓度更高，在一定程度上氧气到达碳颗粒表面的机会要大，因此密相区中燃烧份额略有上升。

(6) 密相区床温的影响。密相区床温越高，床下部燃烧占的比重也就越大。这是由于床温越高，碳颗粒反应速率会越快，并且气体扩散速率也有所增加，这样有利于气体和固体的混合，因此密相区的燃烧份额会稍有上升。另外床温高了以后，挥发分的释放速度和反应速率会加快，因此在密相区上部和过渡区中燃烧份额会有明显增加。

3. 一、二次风的配比

在循环流化床锅炉中，一般将燃烧用空气分成一、二次风送入炉内，一、二次风比例的确定主要取决于以下几个因素：

(1) 一次风从密相区的布风板送入，一次风量应满足密相区燃料燃烧的需要，从良好的流化角度方面考虑，一次风比例相对大一些，根据密相区的燃烧份额搭配一次风量。

(2) 从减少 NO_x 的排放角度考虑，密相区的过量空气系数应接近于1，使密相区呈还原性气氛，二次风由侧墙送入，保证燃料完全燃烧，一次风的送入必须有充足的二次风分段送风燃烧。

综合以上因素：一次风比例占50%~60%；二次风比例占40%~50%。

当燃用挥发分低的劣质燃料时，采用较高的一次风率；当燃用挥发分高的燃料时，采用较低的一次风率。

第二节 循环流化床锅炉脱硫

不同的煤种，其含硫量差异很大，一般在0.1%~10%之间，并以三种形式存在于煤中，即黄铁矿、有机硫和磷酸盐硫。其中黄铁矿、有机硫是燃煤中 SO_2 的主要来源。

一、二氧化硫的生成

燃煤给入循环流化床锅炉后，其中的硫分（黄铁矿、有机硫）首先被氧化生成

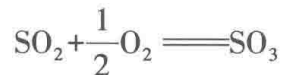
二氧化硫，其反应为



由于燃煤矿物质中含有 CaO 而具有自脱硫能力，能脱去部分的 SO₂，即



部分 SO₂ 还会反应生成 SO₃，即



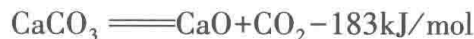
但是，由于 SO₃ 的生成在高温、高压下进行得更加活跃，一般情况下，在循环流化床中，由于反应温度较低（850℃左右），SO₃ 生成反应的反应速率很低，只有很小一部分的 SO₂ 转化成 SO₃。SO₂ 和 SO₃ 如果不经过处理直接排入大气，与空气中的水蒸气反应，就会形成酸雨。

二、二氧化硫的固定

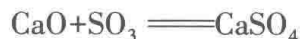
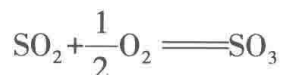
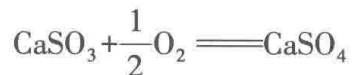
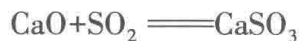
二氧化硫的固定是指将 SO₂ 由气态转入固态化合物中，从而达到脱除 SO₂ 的目的。

因为石灰石是世界上分布极广、蕴藏量极为丰富且价格相对低廉的矿物，所以循环流化床锅炉采用向炉内添加石灰石颗粒（也称脱硫剂）的方法来脱除 SO₂。

石灰石加入炉内后，首先发生煅烧反应，即



生成的 CaO 进一步与 SO₂ 反应，生成相对惰性和稳定的 CaSO₄ 固体，即



反应的第二途径，即经过 SO₃ 的反应，只是在有重金属盐作为催化剂时才发生反应。

第三节 循环流化床锅炉的基本结构及燃烧技术的应用发展

20 世纪中期，随着工业的迅速发展，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 60 年代末至 70 年代初期，流化床煤燃烧技术应运而生。

一、循环流化床锅炉的基本结构

图 1-2 为一燃煤循环流化床锅炉系统示意图。部分床料被烟气带出炉膛进入旋风分

分离器，在分离器中绝大部分固体颗粒被分离出来，通过返料器被送回炉膛下部，构成了床料的再循环回路。烟气则带着分离器不能分离的细颗粒飞灰进入尾部烟道，将热量传给尾部受热面后，经过除尘器由烟囱排入大气。循环流化床锅炉的一次风要克服布风板和床层的阻力，因此须和二次风系统分开，并采用高压的一次风机。为了减少漏风，一般循环流化床锅炉采用管式空气预热器。

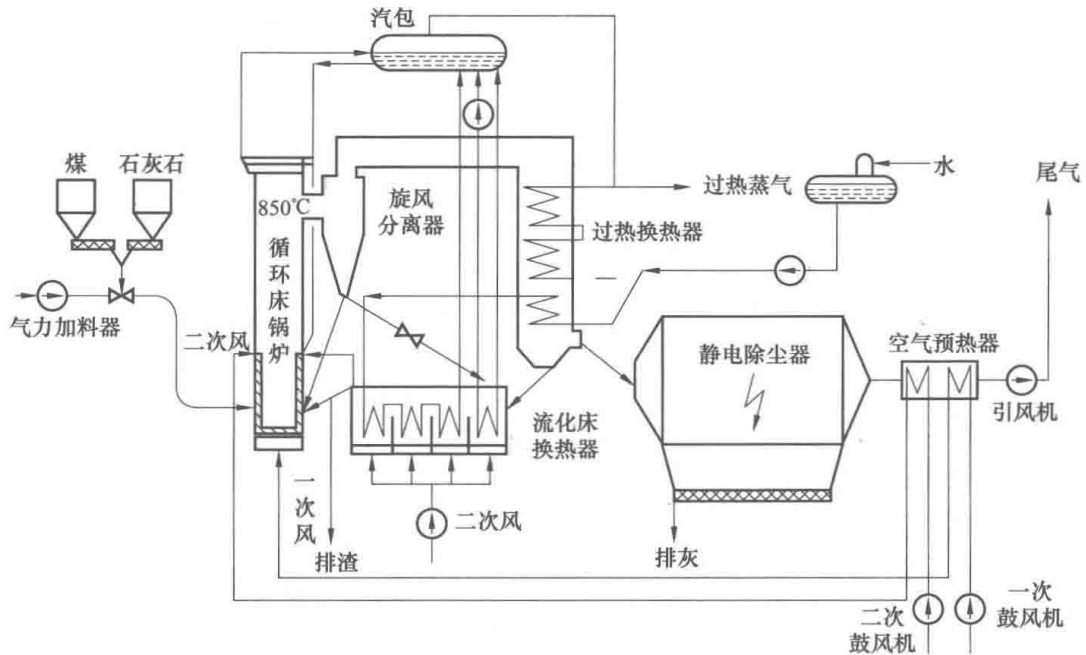


图 1-2 燃煤循环流化床锅炉系统示意图

循环流化床锅炉可分为两部分：

第一部分为物料循环回路，主要设备有炉膛（快速流化床）、高温旋风分离器、回料器等。燃料的燃烧主要在炉膛中完成，通常布置有水冷壁、屏式过热器。

第二部分为对流烟道。与煤粉炉相近，对流烟道中布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器，烟气的余热在对流烟道中被吸收。

循环流化床锅炉的燃烧和传热过程与煤粉炉完全不同，其固体床料的循环系统是常规燃煤锅炉所没有的，在结构上与常规燃煤锅炉的不同之处主要在于以下部件和系统：启动燃烧器、风箱和布风板、炉底灰排灰系统、给料系统、分离器、防磨耐火材料系统、炉膛、固体床料再循环回路上的换热器等。

二、循环流化床燃烧技术的应用发展

20 世纪 70 年代，德国鲁奇（Lurgi）公司第一个申请了循环流化床的专利权，并很快获得了应用。第一台较大容量的循环流化床锅炉于 1985 年 9 月 1 日在德国杜易斯堡第一热电厂投运，其容量为 95.8MW（270t/h）。经过一年多的调整、完善改造和试运行，显示了该技术的良好特性，既符合环境保护要求，又具有很高的经济性，被称为“清洁燃烧”的高新技术。美国 ABB-CE 公司引进 Lurgi 技术制造的两台 160MW 循环流化床锅炉机组安装于美国德克萨斯大林州 Waco 电厂，分别于 1990 年 9 月和 1991 年 10

月正式投入运行。芬兰奥斯龙公司是世界上循环流化床锅炉的最大供应商，市场份额达40%左右。

主循环回路是循环流化床锅炉的关键，其主要作用是将大量的高温固体物料从气流中分离出来，送回燃烧室，以维持燃烧室的稳定的流态化状态，保证燃料和脱硫剂多次循环、反复燃烧和反应，以提高燃烧效率和脱硫效率。主循环回路不仅直接影响整个循环流化床锅炉的总体设计、系统布置，而且与其运行性能有直接关系。分离器是主循环回路的主要部件，因而人们通常把分离器的形式、工作状态作为循环流化床锅炉的标志。

1. 经典的绝热旋风分离循环流化床燃烧技术

德国 Lurgi 公司较早地开发出了采用保温、耐火及防磨材料砌装成筒身的高温绝热式旋风分离器的循环流化床锅炉。分离器入口烟温在 850℃ 左右。Lurgi、芬兰奥斯龙 Ahlstrom 公司，以及由其技术转移的 Stein、ABB-CE、AEE、EVT 等公司设计制造的循环流化床锅炉均采用了此种形式。这种分离器具有相当好的分离性能，使用这种分离器的循环流化床锅炉具有较高的性能。据统计，目前国际上有 78% 的循环流化床锅炉采用了高温绝热旋风分离器（见图 1-3），但这种分离器也存在一些问题，主要是旋风筒体积庞大，因而钢耗较高，锅炉造价高，占地面积较大，旋风筒内衬耐火材料用量大，砌筑要求高；启动时间长、运行中易出现故障；密封和膨胀系统复杂；尤其是在燃用挥发分较低或活性较差的强后燃性煤种时，旋风筒内的燃烧导致分离后的物料温度上升。但这种技术的成熟程度比较高，积累了大量的经验。

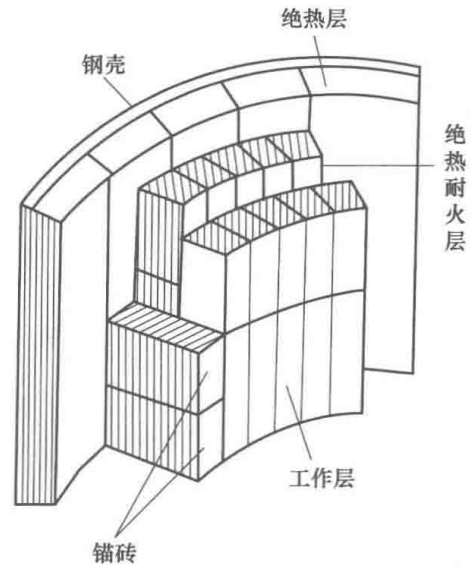


图 1-3 高温绝热旋风分离器的筒体结构

Circofluid 的中温分离技术在一定程度上缓解了高温旋风筒的问题。炉膛上部布置较多数量的受热面，降低了旋风筒入口烟气温度和体积，旋风筒的体积和重量有所减小，因此在一定程度上克服了绝热旋风筒技术的缺陷，提高了其运行可靠性。但该技术炉膛上部需要布置大量的受热面以降低炉膛出口烟气温度，需要采用塔式布置，炉膛较高，钢耗量大，锅炉造价有所提高。

2. 进化的冷却型旋风分离循环流化床燃烧技术

为保持绝热旋风筒循环流化床锅炉的优点，同时有效地克服该炉型的缺陷，Foster Wheeler 公司设计出了水（汽）冷旋风分离器，其结构见图 1-4。该分离器外壳由水冷或汽冷管弯制、焊装而成，取消绝热旋风筒的高温绝热层，代之以受热面制成的曲面，并在其内侧布满销钉，涂一层较薄厚度的高温耐磨浇注料。壳外侧覆以一定厚度的保温层，内侧只敷设一薄层防磨材料，见图 1-5。水（汽）冷旋风筒可吸收一部分热量，分离器内物料温度不会上升，甚至略有下降，较好地解决了旋风筒内侧防磨问题。该公司投运的循环流化床锅炉从未发生回料系统结焦的问题，也未发生旋风筒内磨损问题，充

分显了其优越性。但水（汽）冷旋风分离器的生产工艺复杂，制造成本较高。

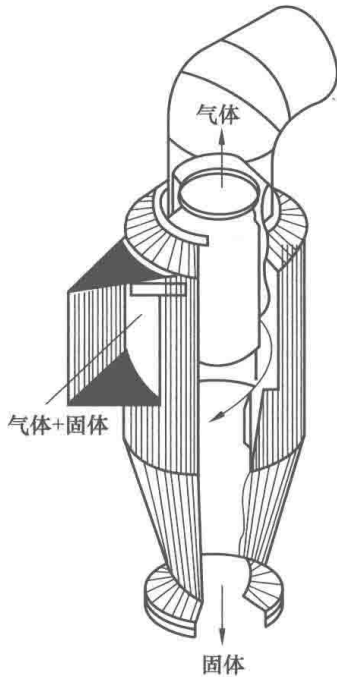


图 1-4 水（汽）冷旋风分离器筒体结构

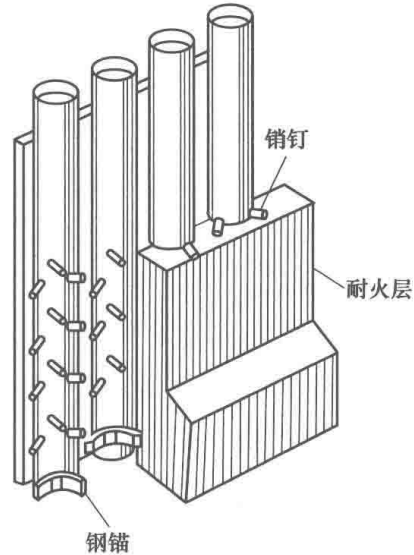


图 1-5 水（汽）冷旋风筒耐火材料示意图

3. 快速发展的紧凑型循环流化床燃烧技术

为克服汽冷旋风筒制造成本高的问题，Ahlstrom 公司创造性地提出了 Pyroflow Compact 设计构想。

Pyroflow Compact 循环流化床锅炉采用了其独特的专利技术——方形分离器，分离器的分离机理与圆形旋风筒本质上无差别，壳体仍采用 FW 式水（汽）冷管壁式，分离器

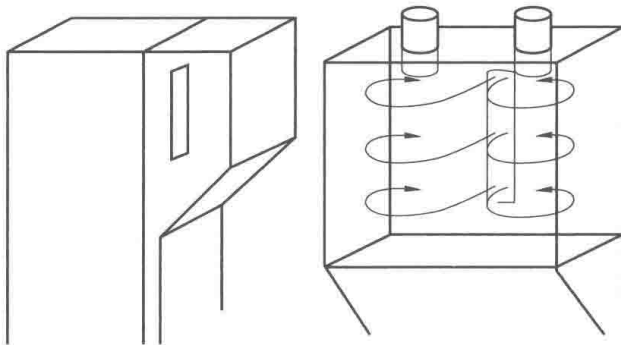


图 1-6 Pyroflow 紧凑型分离器示意图

的壁面作为炉膛壁面水循环系统的一部分，因此与炉膛之间免除了热膨胀节。同时方形分离器可紧贴炉膛布置，从而使整个循环流化床锅炉的体积大为减小，布置紧凑。此外，为防止磨损，方形分离器水冷表面敷设了一层薄的耐火层，使锅炉启动和冷却速率加快。图 1-6 是 Pyroflow 紧凑型分离器示意图。

水冷或汽冷的方形旋风分离器与不冷却的钢板卷成的旋风筒制造成本基本相当，考虑到前者所节省的大量保温和耐火材料，最终的实际成本有所下降。此外它还减少了散热损失，提高了锅炉效率。同时由于保温厚度的减少，可以提高启停速度，启停过程中床料的温升速率不再取决于耐火材料，而主要取决于水循环的安全性，使得启停时间大大缩短。

4. 循环流化床燃烧技术的发展前景

循环流化床锅炉制造家和研究机构都十分重视循环流化床锅炉的大型化。目前 300MW 等级循环流化床锅炉已经有几个示范工程。大容量、亚临界循环流化床锅炉技

术已趋于成熟，蒸汽参数为 18.3MPa 的 300MW 循环流化床锅炉和 600MW 超临界循环流化床锅炉现已投入运行。

20 世纪 80 年代末期，蒸汽循环的要求使最大的带有过热和单级再热的自然循环锅炉的运行压力提高到了 18.6MPa。从 90 年代初期至今，这一运行参数已被证明是可靠的。资料表明：9.81MPa、535℃ 的高压锅炉电站供电效率为 30.04%；12.7MPa、535℃ 的再热锅炉电站供电效率为 32.16%；16.3MPa、535/537℃ 的亚临界锅炉电站供电效率为 37.12%；24.3MPa、540/560℃ 的超临界锅炉电站供电效率为 40.95%。主蒸汽压力对供电效率有明显影响。大型电厂普遍采用的煤粉燃烧锅炉是沿着低压、高压、再热、亚临界、超临界这一条路发展起来的。由于循环流化床锅炉的低温燃烧，炉膛中的热流比传统炉膛低很多，这就使超临界直流循环流化床锅炉可以在相对低的质量流速和相对高的工质温度条件下工作。

循环流化床锅炉比煤粉炉更适合采用超临界参数。在循环流化床锅炉中，炉膛是唯一的蒸发器，没有水平管簇。炉膛的固有特点决定了它在超临界滑压运行中的显著优势。

循环流化床锅炉燃烧室的传热系数和温压较低，亦即低热流。对于同样的负荷，循环流化床锅炉的炉膛截面积接近于煤粉炉，但单位受热面积上的传热量较小。平均炉膛设计面积上的较低热量输入 (NHL/PA) 导致了低的热流。循环流化床锅炉和煤粉炉的平均 NHL/PA 分别为 $1.605 \times 10^6 \text{W/m}^2$ 和 $5.664 \times 10^6 \text{W/m}^2$ 。总的来说，循环流化床炉膛中的热流率要比煤粉炉中低得多。

由于流化床中气固两相流动对受热面的冲刷，使得水冷壁的粘污系数较小，沉积物非常少且分布均匀，炉墙清洁，水冷壁发生传热恶化的情况大幅减少。

循环流化床燃烧室中热流横向分布比较均匀，纵向上部比下部低，下部较高部位被耐火材料覆盖。最高热流出现在底部，并随着炉高增加而逐渐减小，而工质温度恰恰相反，最冷的工质恰好在最高热流处。这种特性使水冷壁面不至于超温，在循环流化床锅炉中发生传热恶化的几率比煤粉炉小得多。

循环流化床锅炉的负荷调节范围广。

循环流化床锅炉投资和运行费用适中。循环流化床锅炉的投资和运行费用略高于常规煤粉炉，但比配脱硫装置的煤粉炉低 15%~20%。循环流化床锅炉加石灰石在炉内脱硫即可达到 SO_x 国家排放标准，而煤粉炉要想达到 SO_x 国家排放标准还需加装脱硫设备，使供电煤耗增加。

NO_x 的排放：在煤粉炉中，火焰温度较高，导致 NO_x 的排放相对较高，即使采用性能较好的低 NO_x 燃烧器， NO_x 的排放要低于 300ppm 仍比较困难。由于循环流化床锅炉采用低温燃烧和分机送风，其 NO_x 的排放较小，一般为 200ppm 以下。

随着循环流化床锅炉大型化的发展和 250MW 再热循环流化床锅炉的顺利运行，国际上多家循环流化床发展商均展开了超临界循环流化床的研究。

5. 我国循环流化床燃烧技术的发展

在 20 世纪 80 年代初，国家科委首次对煤的流化床燃烧技术进行了深入的研究，随



后对循环流化床锅炉与相关产品进行了深入的研发。1984年，国内2.8MW的热功率循环流化床燃烧试验诞生，它说明流化床燃烧技术从冷态实验与理论研究转向热态。从80年代中期开始，大多数中小型锅炉制造厂开始与研究院所建立合作关系，对循环流化床锅炉实施项目研发，到90年代中期，已经有200多台75t/h的循环流化床锅炉进入运行状态。

在90年代中期，国内锅炉制造厂先后引进了一大批先进的技术，220t/h循环流化床锅炉进入国内市场，机组中的中等技术含量循环流化床锅炉让国内循环流化床锅炉技术得到了整体改善，同时也在商业市场上获得了很好的位置。在这过程中，四川白马电厂成功投运了410t/h高温高压循环流化床锅炉，这对国内循环流化床锅炉的发展起到了很大作用。90年代末期，中国开始重视环境问题，同时电力工业也对产业结构进行了协调，整体上开始倾向于对老旧机组进行改造，以促进循环流化床锅炉技术的应用，这为循环流化床锅炉迎来了新的发展机遇，在国家政策的资助下，国内大型锅炉制造厂实施了600MW的超临界循环流化床锅炉前期准备工作。2009年1月，由西安热工研究院与哈尔滨锅炉厂联合开发的330MW循环流化床锅炉在江西投入正式运行，锅炉具有流化均匀、床体稳定、床温和汽温调节特性良好，各项性能参数达到设计值。表明我国已完整地掌握了大型循环流化床锅炉的核心技术。2013年4月14日，由东方锅炉厂设计开发的600MW超临界循环流化床锅炉在四川白马电厂成功投运，该锅炉蒸汽参数为：主蒸汽压力25.4MPa、主蒸汽温度571℃、再热蒸汽温度569℃。白马电厂600MW超临界循环流化床锅炉的成功投产标志着我国已具备大型超临界循环流化床锅炉的设计、制造、安装、调试、运行等各方面技术。

循环流化床锅炉技术已经成为商业化典型的清洁煤技术，在整个发展中循环流化床锅炉将朝着大型化、大容量、高参数、模块化的发展方向。

循环流化床锅炉设备介绍

第一节 75t/h 循环流化床锅炉

一、75t/h 水冷方形分离循环流化床锅炉简介

锅炉采用单汽包横置式自然循环，Ⅱ型布置，自炉前向炉后依次布置燃烧室、分离器、尾部烟道。根据燃料的成分差异以及脱硫要求，燃烧室设计工作温度不同，在870~950℃之间。炉膛由膜式水冷壁构成，截面积为18~19m²，燃烧室净高为20~23m，炉膛下部前后墙收缩成锥形炉底，前墙水冷壁延伸成水冷布风板，并与两侧水冷壁共同形成水冷风室。布风板水冷壁的鳍片上安装风帽。燃烧室下部水冷壁焊有密度较大的销钉，敷设较薄的高温耐磨材料。炉膛出口布置两个膜式水冷壁构成的方形分离器，分离器前墙与燃烧室后墙共用，分离器入口加速段由燃烧室后墙弯制形成；分离器后墙同时作为尾部竖井的前包墙，该屏水冷壁向下收缩成料斗，向上的一部分直接引出吊挂，另一部分向前并穿越燃烧室后墙分别构成分离器顶棚和燃烧室顶棚。燃烧室后墙、分离器两侧墙水冷壁向上延伸，与分离器的顶棚、汽冷顶棚包墙构成分离器出口区，尾部竖井汽冷包墙和分离器后墙围成膜式壁包墙，分离器、转向室与尾部包墙结合成为一体。省煤器之前的所有炉墙均为膜式壁结构，采用吊挂处理；省煤器之后为轻型护板炉墙，采用支撑结构。高温过热器布置在燃烧室上部，低温过热器布置在尾部汽冷包墙内。锅炉采用钢架结构，由前向后共计三排柱。

锅炉燃烧所需空气分别由一、二次风机提供，炉内燃烧产生的大量烟气携带物料经分离器的入口加速段加速进入分离器，将烟气和物料分离。物料经料斗、料腿、J型阀再返回炉膛；烟气自中心筒进入分离器出口区，流经转向室，进入尾部烟道。尾部烟道自向而下依次布置低温过热器、省煤器、二次风空气预热器。低温过热器位于包墙内，为光管错列布置；省煤器采取两级布置，高温段为顺列鳍片管，低温段为错列光管；空气预热器为立管式、卧管式或热管式。为减少磨损，在控制烟速的同时加防磨盖板、压板及防磨瓦，对局部也作了相应的处理。

锅炉给水经省煤器加热后进入汽包；汽包内的饱和水经集中下降管、分配管分别进入燃烧室水冷壁和分离器水冷壁下集箱，加热蒸发后流入上集箱，然后进入汽包；饱和蒸汽流经顶棚管、后包墙管、侧包墙管，进入低温过热器，由低温过热器加热后进入减温器调节汽温，然后经高温过热器加热到额定蒸汽温度，进入集汽集箱至主汽阀。