

循环流化床锅炉的设计与运行

〔加〕 P.巴苏 S.A.弗雷泽 著

岑可法 倪明江 骆仲浚 池涌
方梦祥 李绚天 程乐鸣 等译

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

循环流化床锅炉技术是近十几年来迅速发展起来的一项高效清洁煤转化利用技术。国际上这项技术在电站锅炉、工业锅炉和废弃物处理利用等领域都已得到广泛的应用，国内研究开发和应用也是方兴未艾。

本书是国际上循环流化床锅炉技术方面的第一本专著。它是作者根据自己长期从事循环流化床锅炉技术研究开发的经验，并在广泛搜集各国有关资料的基础上撰写而成的。本书从燃烧、流体动力学、传热、环保等角度出发，对循环流化床锅炉各个部件和过程进行了系统的阐述。书中结合国外循环流化床锅炉的设计运行经验，对循环流化床锅炉的布风装置、炉膛、固体物料分离装置、固体物料回送装置的设计进行了讨论。本书的特点是内容丰富、新颖，图文并茂，基础理论和工程应用结合紧密，理论部分力求简明、系统，应用部分则精心选择典型的实例。

本书可供从事循环流化床锅炉和热能动力的研究、设计、运行和管理人员参考，也可作为高等院校有关专业研究生、大学生的教材和教学参考书。

Prabir Basu Scott A. Fraser

CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILERS

DESIGN AND OPERATIONS

Butterworth-Heinemann, 1991

循环流化床锅炉的设计与运行

[加] P. 巴苏 S. A. 弗雷泽 著

岑可法 倪明江 骆仲决 池 涌

方梦祥 李绚天 程乐鸣 等 译

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

北京市怀柔黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1994 年 1 月第 一 版 开本：850×1168 1/32
1994 年 1 月第一次印刷 印张：10 7/8 插页：2
印数：1—1 600 字数：280 000

ISBN 7-03-003926-2/TK·10

定价：16.80 元

译者的话

循环流化床燃烧技术是一项新兴的燃煤技术。循环流化床锅炉具有燃料适应性广、燃烧效率高、氮氧化物排放低、负荷调节比大和负荷调节快等突出优点。自循环流化床燃烧技术出现以来的短短十几年中，循环流化床锅炉已在世界范围内得到广泛的应用，大容量的循环流化床电站锅炉也已被发电行业所接受，这在世界发电技术的发展历史上也是一个飞跃。

国内循环流化床燃烧技术的研究开发是从80年代开始的。历年来经过大专院校、科研单位、锅炉制造厂家和锅炉用户的共同努力，相继开发出具有不同特色的循环流化床锅炉。目前循环流化床锅炉技术正处在快速发展的阶段。

浙江大学与加拿大新斯科舍工业大学从1986年开始，在加拿大国际发展署（CIDA）的资助下联合开发循环流化床锅炉技术。1991年5月，浙江大学和新斯科舍工业大学在杭州举办了有国内工业界、大专院校和科研院所的100多位代表参加的循环流化床锅炉短期讲习班。《循环流化床锅炉的设计与运行》一书的初稿正是当时短习班的讲稿之一。此后该书由美国的巴特沃思-海涅曼（Butterworth Heinemann）出版社正式出版。

P. 巴苏（Prabir Basu）是加拿大新斯科舍工业大学机械系教授。他多年来从事循环流化床锅炉的研究开发、项目评估工作，以及国际循环流化床技术学术交流的组织和宣传工作，与学术界和工业界都有广泛密切的联系。本书及本书的初稿曾先后在美国、加拿大、意大利、中国和印度等国家的循环流化床锅炉讲习班上使用过。本书的另一位作者S.A. 弗雷泽（Scott A. Fraser）是加拿大新斯科舍电力公司的高级工程师，他自始至终参加了加拿大新斯科省阿科尼角电厂165MW发电量的循环流化床锅炉发

电机组的全部工作（该循环流化床锅炉为目前世界上最大容量的循环流化床锅炉之一），在循环流化床锅炉技术领域内有丰富的经验。

本书的主要特点是从基础理论出发，结合实际对循环流化床锅炉的主要过程和部件的原理及设计进行较系统的阐述，因此可以说本书既有一定的理论水平，又密切联系实际，特别是书中搜集了世界上各主要循环流化床锅炉制造厂家的大量技术资料，无论对从事循环流化床锅炉设计制造和运行的技术人员，还是对从事循环流化床锅炉研究开发的科研工作者来说，都具有很高的参考价值。此外，本书也可作为相关专业的研究生、大学生的教材和教学参考书。

本书的英文版发行之后，作者 P. 巴苏就与我们接触，希望将本书翻译成中文在中国出版，这样可使国内有更多的读者受益。

本书的翻译工作由浙江大学热能工程研究所循环流化床研究小组完成，参加翻译的人员有岑可法教授、倪明江教授、骆仲决副教授、池涌博士、方梦祥博士、李绚天博士、程乐鸣工程师、陈飞工程师和高翔硕士，西安热工研究所的叶善佩工程师也参加了本书第十章的翻译工作。我们希望通过《循环流化床锅炉的设计与运行》一书中译本的出版，对推动我国循环流化床锅炉技术的发展作出一些贡献。

最后，我们非常感谢巴苏教授，因为在翻译过程中他与我们进行了多次讨论，并对原书作了修改、补充，这些修改和补充在中文版中都已体现出来；感谢巴特沃思-海涅曼出版社允许我们翻译出版这本书，并免收版权税；衷心感谢科学出版社接受中译本的出版，特别要感谢责任编辑陈文芳副编审，没有她的帮助，中译本是不可能这么快出版的。

岑可法

1993年6月于浙江大学求是园

中文版序

1991年5月,我们在杭州浙江大学举办了一个有许多中国能源界的工程师和研究人员参加的循环流化床锅炉短期讲习班,其中部分参加者对英语的掌握不够熟练,因此虽然配备了翻译,但还是不能满足素质良好的中国工程师们掌握和应用循环流化床锅炉技术的热切要求.以煤为原料的动力需求的增长和环境保护意识的增强,使得循环流化床技术变得比以往更有吸引力,尤其在中国更是如此.通过从国内外吸收尽可能多的信息,中国的一些锅炉制造厂家已经开始发展循环流化床锅炉技术.也正是在这个时候,《循环流化床锅炉的设计与运行》这本专著由美国的巴特沃思-海涅曼出版社出版了.本书是目前循环流化床锅炉这个发展很快的领域内的第一本专著,一经出版就在世界各地拥有许多读者.浙江大学热能工程研究所也与作者接触商讨本书的中译本和翻译版权事宜.由于还没有循环流化床锅炉方面的中文专业书,从而限制了许多中国的锅炉设计工程师和运行人员更好地直接接触西方的循环流化床锅炉技术,因此翻译出版本书中文版的建议很快得到了各方良好的反应.

岑可法教授及其研究小组承当了这项繁杂的翻译任务.由于循环流化床锅炉在世界范围内都是一个崭新的领域,许多专业术语都还没有得到公认.以“床”这个词为例,一些专家认为在循环流化床技术中固体颗粒沿着炉膛不断运动,因而应使用“悬浮”这个词来代替“床”.由此可以设想,因为必须用合适的中文术语与英文版相对应,翻译者的困难是很大的.浙江大学循环流化床技术专家们的出色工作,使得本书的中译本在学术上更为完整.本书英文版的第一版有些打印错误,在翻译过程中都已得到改正,同时也增加了一些新的资料和内容,一些图表也作了更新,这样

本书的中文版就更合时宜了。

本书的合著者 S.A. 弗雷泽先生和巴特沃思-海涅曼出版社同意将本书的翻译出版权让予中国的科学出版社。通过新斯科舍大学和浙江大学之间的一个合作项目，加拿大国际发展署支持了本书的翻译出版。作者希望通过本书的出版，能对中国工业界发展优良环保性能的高效燃煤技术提供一些帮助，即使这种帮助是微弱的，作者也已感到欣慰。

P. 巴苏

1992 年 9 月

目 录

译者的话	(v)
中文版序	(vii)
序	(ix)
第一章 绪论	(1)
1-1 什么是循环流化床锅炉	(5)
1-2 循环流化床锅炉的特点	(7)
1-3 各种技术的比较	(12)
第二章 流体动力特性	(17)
2-1 流态化区域	(18)
2-2 快速流化床	(28)
2-3 快速流化床的结构	(36)
2-4 气固混合	(44)
第三章 传热	(50)
3-1 气体与固体颗粒间的传热	(51)
3-2 床层与水冷壁间的传热	(56)
3-3 外置式流化床换热器	(72)
3-4 快速床内埋管的传热	(75)
3-5 传热与低负荷运行	(76)
第四章 燃烧	(87)
4-1 煤燃烧的各个阶段	(87)
4-2 循环流化床锅炉的燃烧过程	(103)
4-3 循环流化床锅炉燃烧室的设计和模化	(110)
第五章 烟气污染物的排放	(118)
5-1 空气污染	(119)
5-2 二氧化硫的排放	(123)

5-3	氮氧化物的排放	(142)
5-4	一氧化二氮的排放	(146)
5-5	一氧化碳的排放	(147)
第六章	设计应考虑的问题	(153)
6-1	化学平衡计算	(153)
6-2	热量和质量的平衡	(154)
6-3	炉膛的设计	(163)
6-4	受热面设计	(174)
6-5	循环流化床锅炉热力设计范例	(180)
第七章	气固分离器	(188)
7-1	旋风分离器	(189)
7-2	惯性分离器	(204)
第八章	循环流化床部件的设计	(216)
8-1	非机械阀的类型	(216)
8-2	L 阀的设计	(219)
8-3	密闭输送回路的设计	(223)
8-4	布风板	(226)
第九章	固体灰渣的处理	(236)
9-1	固体灰渣的特性	(236)
9-2	灰渣的利用	(243)
9-3	灰渣的处理	(248)
第十章	材料问题	(258)
10-1	选择材料的原则	(258)
10-2	常用材料	(265)
10-3	改进设计	(268)
附录 I	固体颗粒的特性	(273)
附录 II	化学当量计算	(284)
附录 III	简化脱硫模型	(293)
附录 IV	设计数据表	(296)
	表 IV.1 物理常数	(296)

表 IV.2 筛子系列.....	(296)
表 IV.3 在锅炉中的常用速度.....	(299)
表 IV.4 流化床中的转化速度.....	(300)
表 IV.5 理想气体的比热随温度的变化关系.....	(301)
表 IV.6 O_2-N_2 和 CO_2-N_2 在常压下的二元扩散系数...	(302)
表 IV.7 换算因子.....	(302)
表 IV.8 空气的性质.....	(319)
索引.....	(320)

第一章 绪 论

1921年12月16日,德国人弗里茨·温克勒(Fritz Winkler)的一个小试验标志着现代技术中非常重要的一章——流态化工艺的开始。温克勒的试验是这样进行的:将燃烧产生的烟气引入一装有焦炭颗粒的炉室的炉底,温克勒观察到固体颗粒因受气体的阻力而被提升,整个颗粒系统看起来就像沸腾的液体(Squires, 1983)。

虽然有人会说流态化现象在此之前已被许多人观察到,但发明我们今天在包括燃烧在内的数十种工艺所应用的鼓泡流化床过程(见2.1节)的荣誉还是应该归于温克勒。温克勒不仅观察了流态化现象,还进行了测试,并且登记了专利,建造了一截面积为 12m^2 的商用流化床。这样规模的流化床即使用现代的标准看也是相当大的。

在鼓泡流化床中燃烧煤的想法可能在许多发明家和科学家的头脑中闪现过,但对此发展推动最大的要数道格拉斯·埃利奥特(Douglass Elliott)。本世纪60年代初,埃利奥特认识到了在燃煤流化床中加入浸没受热面来产生水蒸气的种种优点,他与英国煤炭利用研究协会(British Coal Utilization Research Association)和英国煤炭署(National Coal Board)一起致力于开发用流化床产生蒸汽的技术。紧接着埃利奥特的开创性工作就是在马奇伍德中央发电研究所(Central Electricity Generation Laboratory at Marchwood)开始了一项积极发展流化床燃烧技术的项目。

与此同时,鼓泡流化床锅炉的发展计划也在美国和中国进行。不过由于缺乏史料,美国和中国的流化床锅炉发展过程就不能在本书中得以反映。在英国、美国和中国早期工作的基础上,目前

已发展出多种型式的商用化鼓泡流化床锅炉。

新一代流化床锅炉——循环流化床锅炉（见 1-1 节）的出现则相当有趣（图 1.1 为循环流化床锅炉的照片）。1938 年麻省理工学院的 Warren Lewis 和 Edwin Gilliland 在为流化催化裂化过程设想一种合适的气固接触工艺时发现了一种新的气固工艺。有趣的是他们发明了快速流态化工艺（见 2-2 节）而当时却不知道温克勒至少在 17 年之前就有过类似的流化床发明（Squires, 1986）。

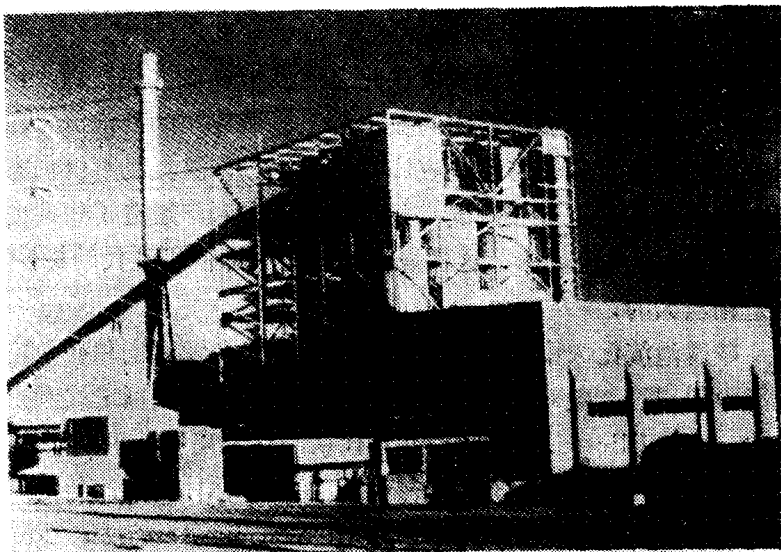


图 1.1 循环流化床锅炉的照片
[引自 Pyropower Corporation]

虽然循环流化床工艺在石油化学工业上得到了广泛的应用，但在很长一段时间内它并没有被直接应用于煤的燃烧来产生蒸汽。鲁奇（Lurgi）公司是许多独立从事循环流化床研究的单位中的一个，它们认识到了快速流态化为细颗粒固体在高气速下的操作提供了很好的技术。根据其在 Metallgesellschaft 研究所的实验室规模研究结果，鲁奇公司发展了一种铝煅烧工艺，于本世纪

60年代在吕能 (Luenen) 的维雷纳特铝厂日处理量为 24 t 的中试厂上进行试验, 并于 70 年代在吕能建造了日处理量为 500t 的商用装置。

煅烧是个吸热过程, 在循环流化床煅烧炉中油或气的燃烧必须以分级燃烧形式进行。热量在多级流化床冷却器中通过废气与新鲜物料的换热得到回收。采用循环流化床可使煅烧温度在许可范围内得到均匀的控制, 正是这个特点使得许多循环流化床煅烧炉很快地投入商业使用 (Reh, 1986)。水泥烧成熟料过程中的预煅烧阶段是个高度吸热过程, 拉弗拉奇-克雷索特劳拉 (Lafrage, Creusot Loire Enterprises) 公司和鲁奇公司采用了燃用高灰煤或油页岩的循环流化床预煅烧炉来提供热量 (如图 1.2), 这也是对劣质煤循环流化床燃烧进行实证 (Kuhle, 1984)。第一台专门设计用于生产蒸汽和供热的循环流化床锅炉于 1982 年在吕能的维雷纳特铝厂建成。这台循环流化床锅炉燃用劣质煤矸石并加石灰石脱硫以满足德国的排放标准, 其容量为 84 MW, 其中 9 MW 用于发电, 31 MW 用于产生蒸汽, 44 MW 用于生产熔盐。由此可看

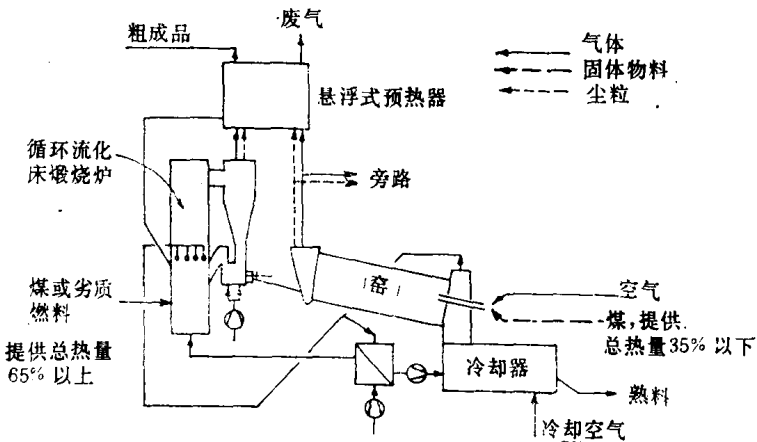


图 1.2 制水泥用的循环流化床预煅烧炉

[引自 Reh, L. (1986). *Circulating Fluidized Bed Technology*, P. Basu, ed., Pergamon Press.]

出，鲁奇公司循环流化床燃烧技术的发展遵循了一条自然发展的过程。

芬兰的阿斯龙 (Ahlstrom) 公司对于循环流化床炉锅的开发则是以 60 年代末期对鼓泡流化床锅炉的发展而开始的,为了提高鼓泡流化床淤泥焚烧炉的性能,阿斯龙公司对流化床空截面气速为 3m/s 时采用高温旋风分离器来实现细粉的再循环进行了试验,尽管颗粒的夹带很严重,试验表明燃料的燃烧得到了改善。

根据在汉斯阿斯龙实验室 (Hans Ahlstrom Lab.) 的一系列试验研究,阿斯龙公司在芬兰的皮拉瓦 (Pihlava) 建造了第一台商用循环流化床炉锅。这台锅炉的热功率为 15MW,由燃油锅炉改造而成,燃料由昂贵的油改成了泥煤。阿斯龙公司初期制造的循环流化床锅炉主要是燃用多种燃料或劣质燃料的,如树皮、泥煤和木材废料等,以后制造的循环流化床锅炉则为专用燃煤炉。阿斯龙公司设计的循环流化床锅炉 (见图 1.3) 和鲁奇公司发展的循环流化床锅炉 (见图 3.1) 的主要区别在于,后者有外置热

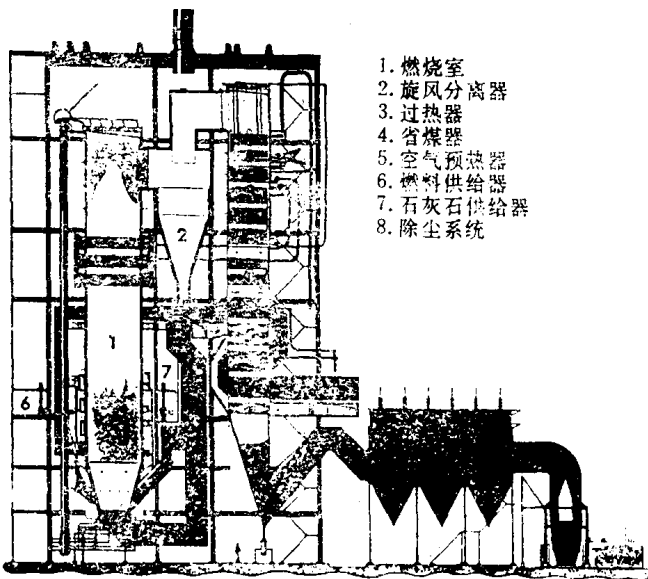


图 1.3 循环流化床锅炉示意图

交换器而前者没有，阿斯龙公司循环流化床锅炉的传热全部是在炉膛受热面完成的。

早期从事循环流化床开发工作的还有美国的巴特利实验室 (Battelle Memorial Laboratory)。在巴特利循环流化床锅炉的燃烧室中，燃料和石灰石被送入运行在高截面风速的粒度均匀的惰性粗颗粒组成的湍流床中，被夹带的固体颗粒（飞灰、未燃烬的炭、石灰石）通过高温旋风分离器和外部热交换器送回主床。第一台商用循环流化床锅炉建于 1981 年，每小时生产蒸汽 23t。与鲁奇公司和阿斯龙公司的设计不同，巴特利循环流化床锅炉的燃烧室运行在非常高的截面风速下。巴特利循环流化床锅炉又称为多固体颗粒循环流化床锅炉。

1-1 什么是循环流化床锅炉？

“循环流化床锅炉是一种燃用化石燃料来生产蒸汽的一种装置。锅炉的炉膛运行在一种特殊的流体动力特性下：细颗粒 (Geldart 的 A 类颗粒或 B 类颗粒¹⁾) 被以超过平均粒径颗粒终端速度的风速输送通过炉膛，同时又有足够的颗粒返混以保证炉膛内的温度分布均匀”。

离开炉膛的大部分颗粒，由气固分离装置所捕集并以足够高的速率从靠近炉膛底部的回送口再循环送入炉膛，使炉膛内的颗粒返混维持在最低程度。图 1.3 为循环流化床锅炉的示意图。燃烧一次风（风量通常小于化学当量值）通过布风装置送入炉膛，二次风则在布风装置以上的一定高度从侧墙送入炉膛。燃料在炉膛中燃烧产生热量，这些热量一部分由布置在炉膛内的水冷或蒸汽冷却受热面所吸收，余下部分则被称为尾部受热面的对流受热面所吸收。

通常被称为快速流态化或稀相返混的特殊流体动力特性的形

1) Geldart 的颗粒分类参见附录 I。

成，对循环流化床是非常关键的。风速、再循环速率、颗粒特性、物料量和系统几何形状的特殊组合，就可以产生特殊的流体动力特性。在这种流体动力特性下，固体物料被速度大于单颗粒的终端速度（参见附录 I.1）的气流所流化，同时在这种流体动力特性下，固体物料并不像在垂直气力输送系统中立即被气流所夹带，相反地物料以颗粒团的形式上下运动、产生高度的返混。这种细长的颗粒团既向上运动、向周围运动，也向下运动。颗粒团不断

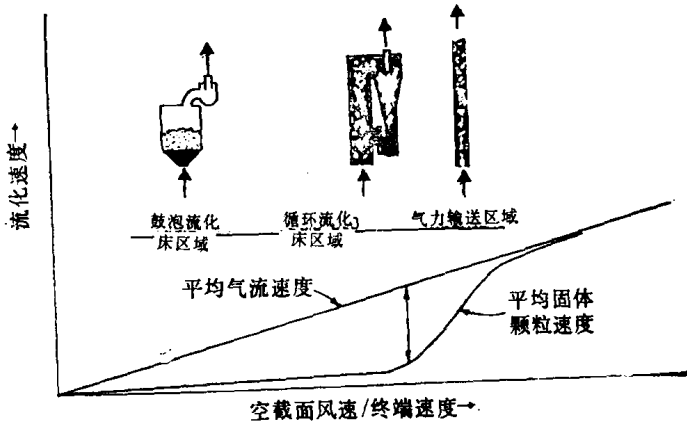


图 1.4 不同燃烧方式锅炉设计特性的比较

表 1.1 循环流化床锅炉与其它形式锅炉的比较

特 性	炉排燃烧	鼓 泡 床	循 环 床	煤粉炉
床高或燃料				
燃烧区高度(m)	0.2	1—2	15—40	27—45
截面风速(m/s)	1.2	1.5—2.5	4—8	4—6
过量空气(%)	20—30	20—25	10—20	15—30
截面热负荷(MW/m ²)	0.5—1.5	0.5—1.5	3—5	4—6
煤的粒度(mm)	6—32	6 以下	6 以下	0.1 以下
负荷调节比例	4:1	3:1	3—4:1	
燃烧效率(%)	85—90	90—96	95—99	99
NO _x 排放(ppm)	400—600	300—400	50—200	400—600
炉内脱硫效率(%)		80—90	80—90	低

地形成、解体又重新形成。这种特殊的流体动力特性也可携带一定数量其终端速度远大于截面平均风速的大颗粒物料，这种气固运动方式产生了大的气固滑移速度。上述特性使循环流化床锅炉区别于其他形式的锅炉，图 1.4 和表 1.1 给出了各种形式锅炉的比较。

1-2 循环流化床锅炉的特点

循环流化床锅炉的炉膛中有一定量的固体颗粒，这些颗粒的粒度通常在 0.1—0.3mm 范围内。这些固体颗粒包括：

- (1) 砂或砾石（燃用木屑等低灰燃料时）。
- (2) 新鲜的或反应过的石灰石（燃用高硫煤或需要脱硫时）。
- (3) 煤灰（燃用高灰或中灰煤而不需要脱硫时）。

有时床料也可以是组合物料。燃料的粒度（特别对于低灰燃料）并不一定对床料的粒度起控制作用，这是因为在循环流化床锅炉中燃料只占床料总量的很小一部分（1—3%）。

1-2-1 循环流化床锅炉概述

循环流化床锅炉可分为两部分，第一部分由以下组成：

- (1) 炉膛或快速流化床。
- (2) 气固分离设备（旋风分离器或惯性分离器）。
- (3) 固体物料再循环设备。
- (4) 外置热交换器（有的循环流化床锅炉中没有该设备）。

上述部件形成了一个固体物料循环回路，燃料在其中燃烧。与煤粉炉一样，循环流化床锅炉的炉膛通常布置有水冷管，燃烧所产生热量的一部分就由这些水冷管所吸收。第二部分就是对流烟道。对流烟道布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器，烟气的余热就在对流烟道中被吸收。循环流化床锅炉较次要的部件还有排渣设备和颗粒分级设备。

锅炉炉膛的下部截面积较小并通常是渐扩的，这样即使对于