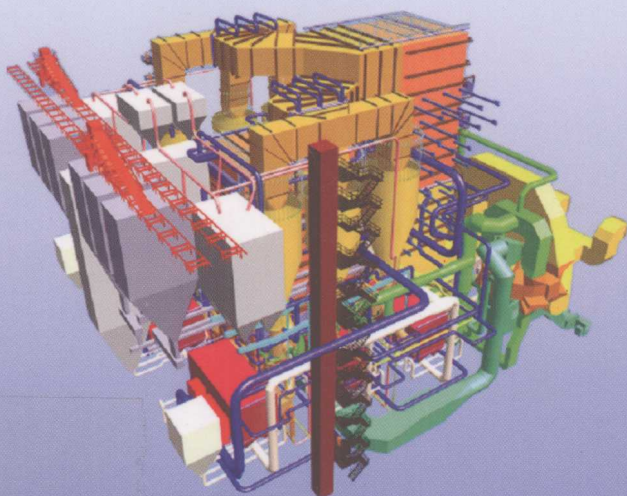


工业企业节能减排技术丛书

大型循环流化床锅炉 及其化石燃料燃烧

刘柏谦 王立刚 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

工业锅炉节能减排关键技术

大型循环流化床锅炉 及其化石燃料燃烧

孙明强 王立明 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS

工业企业节能减排技术 丛书

大型循环流化床锅炉及其 化石燃料燃烧

刘柏谦 王立刚 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 简 介

本书以近年来循环流化床锅炉发展为主线,介绍了大型循环流化床锅炉中发生的燃烧、传热、颗粒运动等基本现象和近年来的研究成果。围绕这些基本现象,探讨了大型循环流化床锅炉设计思想和主要结构(如炉膛、高温气固分离器、冷渣器、汽水系统和烟风系统、布风板和风帽)的设计。介绍了国内外主要锅炉厂商大型循环流化床锅炉产品特点、国内外超临界大型循环流化床锅炉的技术特点。另外,本书还比较全面地介绍了几种常见化石燃料的流化床燃烧特性。

本书可供电厂技术人员和科研人员阅读,也可供热能专业研究人员和在校师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

大型循环流化床锅炉及其化石燃料燃烧/刘柏谦,王立刚编著. —北京:冶金工业出版社,2009.1

(工业企业节能减排技术丛书)

ISBN 978-7-5024-4756-4

I. 大… II. ①刘… ②王… III. 流化床-循环锅炉-锅炉燃烧 IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 202561 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 王楠 美术编辑 张媛媛 版式设计 张青

责任校对 白迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4756-4

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 1 月第 1 版,2009 年 1 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32,9 印张;238 千字;276 页;1-2000 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

出版者的话

近年来，我国经济快速增长，各项建设取得了巨大成就，但经济发展与资源、环境的矛盾却日趋尖锐。

国家“十一五”规划纲要提出，到2010年我国万元GDP能耗降低20%左右、主要污染物排放减少10%，并将其列为重要的约束性指标。为了国民经济的可持续发展和社会和谐，国家对实现节能减排目标的决心和工作力度前所未有。

实现节能减排目标面临的形势虽然十分严峻，但通过各行各业的努力，节能减排及其技术研发工作也取得了积极进展，为了总结经验，交流技术，推动节能减排技术的进步，冶金工业出版社将有重点地组织有实践经验的专家、技术人员，将其取得的最新科技成果及时归纳总结，撰写成著作，编入《工业企业节能减排丛书》陆续出版。同时，这也是让更多的科技工作者共享研究成果，记录我国工业企业节能减排技术的发展历程。

希望广大读者对本丛书的编辑出版多提宝贵意见，并欢迎有关专家踊跃参与编撰工作。

2008年4月

前 言

流化床是一个发生剧烈化学反应的化工反应器，用来烧煤发电发挥了这种装置可以实现低温度燃烧、混合强烈等优点，以及由此形成的燃料适应性好、环境友好等特点。

中国开发使用流化床燃烧技术是以劣质煤利用为目的开始的，相应的理论与技术的研究工作也几乎都是围绕着提高燃烧效率或锅炉效率进行的。后来由于环境要求越来越严格，转而将环境相关的研究纳入流化床燃烧技术的研究，同时也开始考虑流化床如何在电力行业发挥作用。从1964年中国第一台流化床锅炉投入运行，中国流化床燃烧技术已经走过近半个世纪的里程，虽然这中间包括了“文化大革命”的十年，但由于流化床燃烧技术能烧各种劣质煤，那段时间尚处于小容量的鼓泡床阶段，技术上还是有较大进步的。

中国循环流化床锅炉从35t/h容量起步，在很短时间内就完成了100(75)t/h级、200(220)t/h级、400(410~430)t/h级、700(670~690)t/h级、1000t/h级的快速发展，2000t/h级超临界机组正在攻关设计。无论锅炉容量还是锅炉数量，中国都走在世界前列，成为循环流化床燃烧技术发展的新策源地。

2007年底在海口召开的第一届全国循环流化床燃烧技术会议，对大型循环流化床理论和技术的发展做了一个比较全面的盘点，对循环流化床燃烧技术的近期发展给出了明确的观点。本书中很多内容源于此次会议和循环流化床协作网年会资料，作者对中国循环流化床协作网和被引用资料的作者表示诚挚谢意。

· II · 前 言

清华大学吕俊复教授在百忙中仔细阅读了书稿并提出了很多中肯的意见，特致真挚谢意。

由于循环流化床燃烧技术处于渐趋成熟的发展期，新思想和新技术源流宽阔，加之作者水平有限，挂一漏万在所难免，恳请读者不吝赐教。

编 者

2008 年 8 月 31 日

目 录

1 固体燃料流化床燃烧的基本原理	1
1.1 流态化现象和流化床燃烧	1
1.1.1 流态化现象	1
1.1.2 Geldart 的颗粒分类	5
1.1.3 燃煤循环流化床锅炉	6
1.2 循环流化床基本理论	15
1.2.1 快速流态化现象	15
1.2.2 循环流化床锅炉中的物料平衡	17
1.2.3 循环流化床锅炉的流化状态确定——定态设计	20
1.3 循环流化床锅炉中的颗粒运动和燃烧	21
1.3.1 循环流化床中的颗粒运动	22
1.3.2 循环流化床中颗粒取样结果	27
1.3.3 床存量	32
1.4 循环流化床中的传热	38
1.4.1 循环流化床锅炉传热系数的实际测量结果	38
1.4.2 循环流化床锅炉传热设计理论	54
1.4.3 炉内对流换热系数的直接测量	57
1.4.4 炉内平均悬浮密度和辐射换热系数的 直接测量	59
1.4.5 炉内传热量计算	65
2 循环流化床锅炉关键结构	69
2.1 炉膛	69
2.1.1 循环流化床锅炉炉膛的主要几何特点	70
2.1.2 我国主要锅炉厂商生产的循环流化床炉型	73
2.2 高温气固分离器	75
2.2.1 离心分离原理	76

2.2.2	分离效率和分离器阻力	76
2.2.3	圆筒形高温旋风气固分离器	80
2.2.4	方形高温气固旋风分离器	82
2.2.5	旋风分离器设计	83
2.2.6	分离器的试验研究	85
2.3	冷渣器	91
2.3.1	冷渣器研究方法	91
2.3.2	冷渣器的分类	94
2.3.3	冷渣器选型	101
2.3.4	大型循环流化床锅炉的冷渣器	102
2.3.5	大型循环流化床锅炉的热灰换热器	106
2.4	汽水系统和烟风系统	109
2.4.1	汽水系统	109
2.4.2	烟风系统	119
2.5	布风板和风帽	124
2.5.1	经典的圆柱形风帽	125
2.5.2	定向风帽	126
2.5.3	钟罩型风帽	129
2.5.4	布风板	130
3	超临界循环流化床锅炉	135
3.1	循环流化床锅炉比煤粉炉更适合于超临界参数的原因	135
3.2	超临界循环流化床锅炉(SCCFBB)设计	136
3.2.1	大容量循环流化床锅炉的实现	137
3.2.2	材料发展与研究	142
3.3	中国几种超临界循环流化床锅炉简介	144
3.3.1	浙江大学 600MW CFB 锅炉设计方案	144
3.3.2	清华大学 600MW 超临界 CFB 锅炉设计方案	151
3.3.3	中国科学院工程热物理研究所 600MW 超临界 CFB 锅炉设计方案	157

3.3.4 西安热工研究院 600MW 超临界 CFB 锅炉设计 方案	162
4 循环流化床锅炉的化石燃料燃烧	164
4.1 燃料对循环流化床运行的影响	165
4.1.1 燃煤颗粒度对锅炉运行的影响	166
4.1.2 燃煤颗粒度对飞灰含碳量的影响	170
4.1.3 不同粒度下底渣和飞灰的粒径分布	176
4.2 煤矸石的流化床燃烧	179
4.2.1 煤矸石的分类	180
4.2.2 煤矸石的性质	180
4.2.3 煤矸石的流化床燃烧特性	182
4.2.4 掺烧煤矸石应注意的问题	183
4.2.5 煤矸石循环流化床锅炉运行实绩	185
4.2.6 大型煤矸石循环流化床锅炉可能出现的问题	187
4.3 洗煤泥的流化床燃烧	189
4.3.1 煤水混合物燃烧技术特点	190
4.3.2 济三电厂 135MW 洗煤泥机组简介	191
4.3.3 洗煤泥流化床燃烧存在的问题及解决措施	193
4.3.4 洗煤泥循环流化床锅炉介绍	196
4.4 石油焦的流化床燃烧	205
4.4.1 石油焦的流化床燃烧特性	205
4.4.2 石油焦循环流化床锅炉设计	211
4.4.3 燃烧石油焦循环流化床锅炉的工业经验	213
4.5 油页岩的流化床燃烧	225
4.5.1 油页岩的分布	225
4.5.2 油页岩的化学成分	225
4.5.3 油页岩的干馏及其动力学	229
4.5.4 油页岩燃烧	233
4.5.5 油页岩循环流化床燃烧技术	259
参考文献	269

1 固体燃料流化床燃烧的基本原理

1.1 流态化现象和流化床燃烧

1.1.1 流态化现象

流化床是一种发生流态化现象的装置，英文是 Fluidized Bed。流态化现象是粉体颗粒群在流体作用下，颗粒群呈现的上下翻滚现象。由于这种现象看起来很像煮粥时翻沸的粥汤，很多人曾将流化床锅炉叫做“沸腾炉”。

流化床具有十分优秀的反应性能，流化床运行时，所有颗粒都有机会与流体全面接触。此外，流化床还具有与流体一样的流动特点。如可以像水槽中的水一样，当流化床器壁上出现开口时，流化颗粒像液体一样向外溢流；如果运行风速适当，流化床会始终保持一个比较平整的“床面”，即使流化床发生倾斜，床面也始终保持水平。流态化现象如图 1-1 所示。

要想让流化床流化起来，需要提供足够量的流体（对流化床锅炉而言是空气）。所谓足够量的空气包括了最小流化风量、

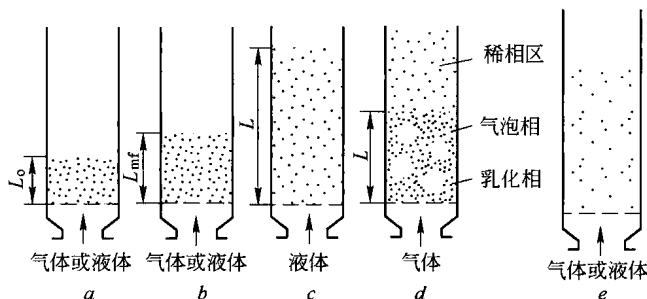


图 1-1 流态化现象

L_0 —静止床高； L_{mf} —最小流化床高； L —流化床高

最小鼓泡风量、正常流化风量、快速流化风量，这些风量都对应着各自的流速，因而有最小流化风速（也叫临界流化风速）、最小鼓泡风速、（正常）流化风速等概念。其中最小流化风速是至关重要的指标，低于这个速度流化床无法运行。尽管可以近似计算，但无论在实验室还是实际锅炉上，最小流化速度都可以用速度-压力降曲线确定。即在给定的流化床上，测量不同风量（速）下的流化床总压力降，总压力降减去布风板压力降就是流化床自身的压力降。而这条速度-压力降曲线的转折点就是最小流化速度（见图 1-2）。

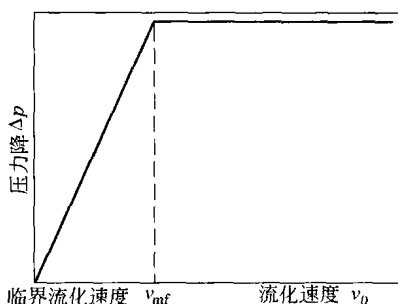


图 1-2 确定临界流化速度的速度-压力降曲线

确定临界流化速度的计算公式很多，比较典型的有经典的 Ergun 方程、Wen & Yu 方程，我国使用较多的是热力计算标准中浙江大学提供的计算公式。表 1-1 给出了一些流化特征速度的计算公式。

表 1-1 一些重要的流化特征速度常用公式

序号	表 达 式	说 明
1	$\frac{\Delta p}{h} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu v}{(\varphi d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho v^2}{(\varphi d_p)}$	
2	$v_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1$	$C_1 = \frac{42.857(1-\varepsilon_{mf})}{\varphi}, C_2 = \frac{\varphi \varepsilon_{mf}^2}{1.75}$

续表 1-1

序号	表 达 式	说 明
3	$Re = 0.0885 Ar^{0.528}$	$Ar = (2 \sim 700) \times 10^4$
4	$\Delta p_b = h_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g$	
5	$v_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_p^2}{1 - \varepsilon_{mf}}$	$Re_{mf} < 20$
6	$v_{mf} = \sqrt{\frac{d_p (\rho_p - \rho_g) g}{1.75 \rho_g} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_p}{\nu}}$	$Re_{mf} > 1000$
7	$v_{mf} = 0.294 \frac{d_p^{0.548}}{\nu^{0.056}} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.528}$	$Ar = (2 \sim 700) \times 10^4$
8	$v_{jx} = \frac{Ar}{18 + 0.61 \sqrt{Ar}} \left(\frac{\nu}{d_{pj}} \right)$	颗粒被大量带出鼓泡床的速度
9	$v_{max} = 0.07 \sqrt{gD} + v_{mf}$	鼓泡床不产生腾涌(一种不良流化现象)的最大速度
10	$v_t = 1.74 \sqrt{\frac{d_p (\rho_p - \rho_g) g}{k_2 \rho_g}}$	$k_2 = 5.31 - 4.88 \varphi$
11	$v_t = k_1 \frac{(\rho_p - \rho_g) g d_p^2}{18\mu}$	$k_1 = 0.8341 g \varphi_p / 0.065$

注：表中

Ar —阿基密度数； C —常数； d —直径； D —流化床当量直径； g —重力加速度； h —床高； Re —雷诺数； v —速度； Δp —床层压降； μ —流体动力黏度； ε —床层孔隙率； φ —颗粒球形度； ρ —密度； ν —流体运动黏度。

下标符号

b —流化床； g —气体； jx —极限； max —最大； mf —临界； p —颗粒； pj —平均； t —颗粒终端。

高洪培(2007)介绍了一台循环流化床上不同颗粒尺寸流化试验结果(见图 1-3)，可见底料尺寸大小对流态化的影响十

分明显。

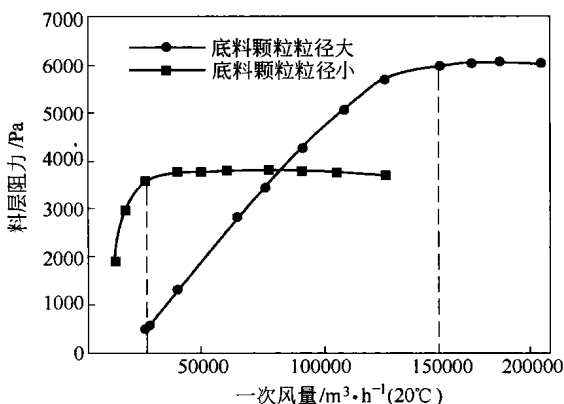


图 1-3 颗粒度对料层阻力的影响

燃煤循环流化床锅炉对燃料粒度要求严格，这一点与燃煤鼓泡流化床不同。高洪培（2007）介绍了燃烧烟煤和无烟煤的循环流化床锅炉的入炉燃料尺寸分布（见图 1-4）。

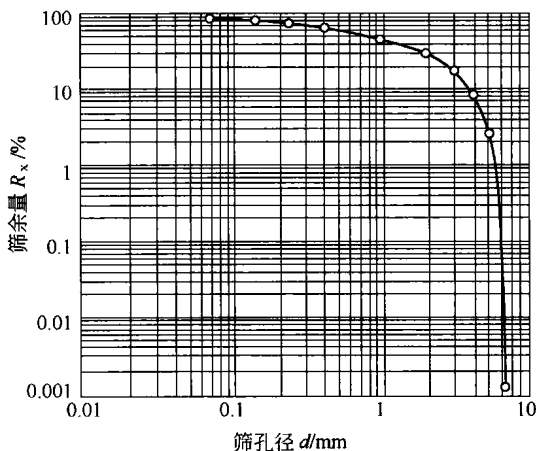


图 1-4 循环流化床锅炉入炉燃料尺寸分布

流化床是一种应用十分广泛的装置。除了煤燃烧之外，冶金

焙烧、化工反应、粮食干燥、蔬菜速冻等各种行业都在利用流化床进行流体与粉体颗粒群全面接触，快速完成预定过程。从单个设备容量看，利用流化床或流态化原理最好的应该是燃煤发电的循环流化床锅炉。

1.1.2 Geldart 的颗粒分类

Geldart 根据常温常压下对一些典型固体颗粒的气固流态化特性的分析，提出了一种颗粒分类方法。该法根据颗粒直径、颗粒密度与流化气体密度之差将颗粒分作 A、B、C 和 D 四类，如图 1-5 所示。

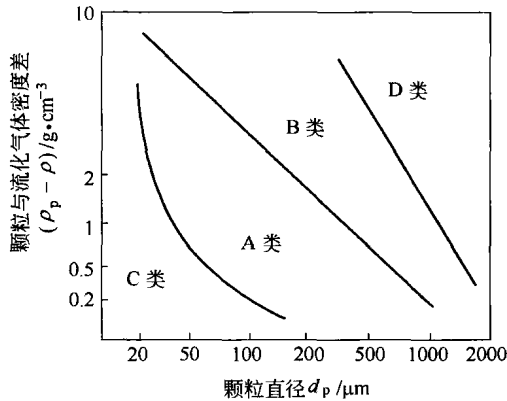


图 1-5 Geldart 的颗粒分类

Geldart 将这些颗粒分别称为充气、砂状、黏性和喷流颗粒，并将各类颗粒流动特性描述为：

A 类颗粒，具有较小的粒径和密度（一般小于 1.4g/cm^3 ），床层产生气泡前先膨胀，存在均一流化区，且膨胀比较大。突然关闭气源，床层塌落缓慢，一般在 $0.3 \sim 0.6\text{cm/s}$ 之间，与气体在致密相中表观气速相当，气泡上升速度远大于致密相中气体速度。粒径分布越大或平均粒径越小，则平均气泡径越小，且存在最大气泡径。

B 类颗粒，平均粒径 $40 \sim 500\mu\text{m}$ ，密度 $1.4 \sim 4\text{g/cm}^3$ ，与 A

类颗粒不同,当表观流速稍大于起始流化速度,床层即产生气泡,床层膨胀比小,床层塌落速度快,气泡上升速度与致密相中气体上升速度相当,气泡大小与颗粒大小无关。

C类颗粒,平均粒径小于 $30\mu\text{m}$,由于这类粒子颗粒极细,晶格缺陷较大,因此粒子间引力较大,或者是由于静电力或粒子较湿,使粒子间吸附力大于流体作用于粒子上的力,易于结块,在通常条件下很难流化,床层节涌和沟流严重。

D类颗粒,这类颗粒粒径和密度比B类颗粒更大,因此起始流化速度更大,床层内气泡上升速度比致密相中气体速度小,所以致密相中气体可以从气泡底部流入而从顶部流出。这类颗粒一般不能稳定流化,只能喷动流化。

Geldart 分类方法简单明了,非常实用。但有时根据该分类图查得的某种物料的流化特性却与 Geldart 所描述的流化特性不同,即在A类与B类,A类与C类,B类与D类分界处有重叠,这是由于 Geldart 划分物料仅仅根据粉粒体的平均粒径和密度,有时这两项指标不能完全表征所有物料的流化特性,而且 Geldart 也没有考虑流体性质对流化特性的影响,因此它仅仅适用于空气或与空气性质相近的气体。

1.1.3 燃煤循环流化床锅炉

除掉一些特定过程(如燃煤流化床焙烧)外,燃煤流化床主要是指燃煤流化床锅炉。从燃煤流化床锅炉出现到现在,已经发展出几代装置。第一代流化床锅炉被称作“鼓泡流化床(Bubbling Fluidized Bed)”锅炉。鼓泡流化床的操作速度较低,冷态条件下可以清晰地感觉到或看到有气泡穿过流化床。第二代流化床锅炉通常指常压循环流化床(Circulating Fluidized Bed, CFB)锅炉。发展出第二代流化床主要是通过技术改进(结构的改进和操作方式的改进)来提高流化床锅炉的性能。结构改进主要显示在燃烧过程和燃烧组织等方面。在锅炉炉膛外设置一个或多个气固分离机构,将离开炉膛的烟气中

的固体颗粒绝大部分收集起来回输到炉膛，这样不仅可以延长没有烧透的颗粒的燃烧停留时间以提高燃烧效率（进而提高了锅炉效率），更重要的是可以调整炉膛温度，是个一举多得的改进措施。类似的改进还有二次风设置、受热面布置、炉膛几何改进等。操作方式的改变主要是提高操作速度。风速提高以后，带来了一系列好处，如燃烧强度提高、脱硫效率提高、燃烧效率提高以及其他一些次要的优点。虽然从第一代流化床锅炉到第二代流化床锅炉，在技术上获得了很大好处，但由此带来的一些有待克服的困难和技术障碍也是明显的。由于运行风速提高，首当其冲的是金属和耐火材料的磨损；其次是相互连接的部位采用多种材料，这些不同种类的材料具有不同的膨胀系数，造成物料循环回路接口处不同材料的膨胀差异，进而导致物料漏泄。

除此之外，流化床燃烧自身的一些优缺点仍然十分明显。如流化床燃烧温度低，通常不超过 1100°C ，正常条件下为 $850 \sim 950^{\circ}\text{C}$ ，流化空气中的氮气不参加生成氮氧化合物的化学反应，这是流化床锅炉与煤粉锅炉、各种层燃锅炉相比的重要优点。另外，流化床锅炉可以直接向流化床内添加脱硫剂脱硫，而煤粉锅炉和层燃锅炉虽然也可以向炉内添加脱硫剂，但脱硫效果不可以与流化床锅炉相比。流化床锅炉具有广泛煤种适应性，劣质煤发热量低到 2930kJ/kg (700kcal/kg) 也可以在流化床燃用。

第三代流化床锅炉是增压燃烧的循环流化床锅炉或增压燃烧的鼓泡流化床锅炉，统称作增压流化床 (Pressurized Fluidized Bed) 锅炉。

Joris Koornneef 等 (2007) 对比了鼓泡流化床和循环流化床锅炉的设计参数 (见表 1-2)，其中包括了床温、颗粒尺寸、运行风速、颗粒循环、颗粒浓度、石灰石颗粒度、平均蒸汽参数 (流量、温度和压力)。

影响循环流化床锅炉设计的主要因素和参数包括环境要求、