

# 试论大容量循环床锅炉的设计

李 军 温 龙 (西安交通大学)

[摘要] 本文结合50 MW(e)循环床锅炉的方案设计, 在进行大量计算的基础上讨论了大容量循环床锅炉设计的一些特点及主要设计参数的选择原则。通过分析比较, 提出了我国50 MW(e)循环床锅炉选型设想, 以供我国开发、研制大容量循环床锅炉参考。

关键词 循环床锅炉 循环倍率 方案设计

## 1 前 言

循环床燃烧具有燃烧效率高、负荷调节性能好、燃料适应性广, 易于容量大型化及污染物排放低等特点, 被认为是电站锅炉和工业锅炉中最具竞争力的燃烧方式之一。目前, 国外已有二十多个厂家生产这种锅炉, 有代表性的是西德Lwrgi公司的Lwrgi型锅炉、芬兰Ahlstrom公司的Pyroflow锅炉、西德Babcock公司的Circofluid锅炉及美国Battele实验室的MSFBC锅炉。国内目前也有数台容量不大的循环床锅炉投入试运行。在我国还有许多技术问题急待解决。为此,

根据国内外循环床锅炉设计和运行的经验及资料, 以高硫烟煤和煤矸石为设计煤种进行了Lurgi型、Pyroflow型、Circofluid型50 MW(e)循环床锅炉的方案设计。通过大量的计算以企探求循环床锅炉设计的一般规律及主要设计参数的选择原则, 给出我国50 MW(e)循环床锅炉选择设想, 以供我国研制开发大容量循环床锅炉参考。

## 2 方案设计

设计煤种为高硫烟煤和煤矸石, 其应用基成分列于表1。

表 1 设计煤种的成分

	$C^v$	$H^v$	$O^v$	$N^v$	$S^v$	$A^v$	$W^v$	$V^v$	$Q_{dw}^v$ (kJ/kg)
高硫烟煤	49.97	3.53	4.82	0.72	4.70	30.26	6.0	35.21	20 793
煤矸石	25.64	1.85	4.31	0.37	0.77	55.55	11.51	41.75	8 721

对表1中的两种燃料, 我们都分别作了三种炉型的设计。为便于分析比较, 三种循环床锅炉都采用相同的锅炉参数, 锅炉额定蒸发量  $D=61 \text{ kg/s}$ , 过热蒸汽压力  $P_{gr}=10.0 \text{ MPa}$ , 过热蒸汽温度  $t_{gr}=540 \text{ }^\circ\text{C}$ , 给

水温度  $t_{gs}=230 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图1中(a)、(b)、(c)分别是燃用高硫烟煤的Lurgi型、Pyroflow型、Circofluid型循环床锅炉的整体布置简图, 表2给出了三种炉子的设计性能指标及数据。

收稿日期 1991-01-03 修改定稿 1991-04-06

本文联系人 李军 男 35 西安交通大学能源系锅炉教研室 710049

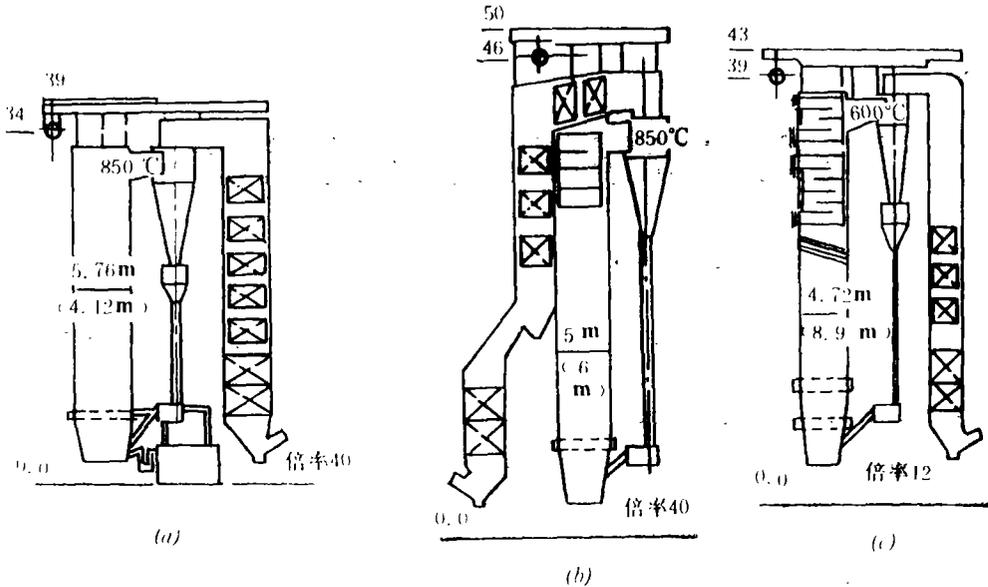


图 1 三种类型的50 MW(e)循环床锅炉

表 2 三种循环床锅炉设计性能指标

项 目	单 位	Lbrgi型	Pyroflow型	Circofluib型
循 环 倍 率	—	40	40	12
密相区流化速度	m/s	5.2	6.5	4.7
稀相区流化速度	m/s	7.3	6.7	5.3
炉膛出口过量空气系数	—	1.15	1.15	1.2
一二次风比例	—	50/50	50/50	60/40
热空气温度	°C	200	200	200
排 烟 温 度	°C	130	130	140
炉 温	°C	870	870	850
回 料 温 度	°C	600	870	600
炉膛容积热负荷	MW/m <sup>3</sup>	0.23	0.15	0.17
炉膛截面热负荷	MW/m <sup>2</sup>	5.47	5.18	3.8
受 热 面	m <sup>2</sup>	12 266	14 010	13 707
设计 效 率	—	91	90	91
旋风分离器	直径(m)×只数	5×2	5×2	4×2
锅筒标 高	m	33	46	39
占 地 面 积	m <sup>2</sup>	16×28	22×17	20×19

### 3 循环燃烧系统的设计

循环床锅炉的燃烧系统包括：炉膛、分

离器、回料器、布风装置及外置式热交换器（仅Lurgi炉有）。布风装置和鼓泡床锅炉

无异、本文不作讨论、

### 3.1 炉膛

同煤粉炉相比,循环床锅炉的炉膛设计要简单些,这是因为,循环床锅炉对燃料广泛的适应性使得其炉膛尺寸对燃料种类和品质不象煤粉炉那样敏感。另外,为实现最有利的脱硫条件,循环床锅炉一般运行于850℃的床温下,此温度远低于煤灰的熔化温度,故无需虑及结渣问题。所以,炉膛设计的基本原则是满足燃烧和吸热的要求。

循环床锅炉并不要求所有送入的燃料在一次通过炉膛时就实现完全的燃烧。而一次性通过炉膛的只是那些小于分离器临界分离直径的煤粒,炉膛高度至少应能保证这些颗粒在炉内有足够的停留时间以完成燃烧过程。通过计算说明,对较大容量的锅炉此条件是很容易满足的。当然这仅是确定炉膛高度的一个很粗略的指标,如果考虑到同时进行的脱硫过程,则炉膛高度还应满足燃烧烟气在炉内有足够的停留时间以完成SO<sub>2</sub>的吸收过程。显然,采用较高运行速度的高倍率炉则需较高的炉膛。

炉膛横断面积主要取决于所选定的流化气流速,同时还应保证断面热负荷在合适的范围。根据国外资料<sup>[1]</sup>,循环床锅炉的断面热负荷推荐按3—6 MW/m<sup>2</sup>选取。煤粉炉由于要考虑组织炉内合适的空气动力场对炉膛形状有一定要求,循环床锅炉则无此要求,故原则上讲,炉膛可以设计正方形,矩形或圆形。但矩形炉膛似乎更好,一方面,在横断面积一定时,这样可布置较多的炉膛受热面;另一方面,矩形断面也便于旋风分离及对流烟井的布置,对于大容量的锅炉这一点特别重要。

炉膛设计的另一个重要任务就是合理地布置受热面 and 进行正确的传热计算。循环床锅炉炉内蒸发受热面一般采用膜式水冷壁,整个炉膛可以是全冷却或部分冷却,取决于燃料种类和循环床锅炉炉型。从大多数的设计看,一般倾向于在二次风喷口之下不布置

受热面或在该区域的水冷壁管上敷盖绝热层,这样既可减轻存在于还原燃烧区同时也是高固体粒子浓度区的水冷壁管的腐蚀和磨损,同时又可保证燃烧的稳定性,这一点对劣质燃料尤其必要。在我们的设计中,燃用高硫烟煤的Pyroflow型、Circofluid型均采用全水冷结构,且为满足吸热需要,炉膛上部还分别布置了辐射屏式受热面或对流过热受热面。而Lurgi型及燃用煤矸石的设计则仅在二次风喷口之上布置水冷壁。

循环床锅炉炉内的燃烧和传热工况既不同于常规煤粉炉,也有别于鼓泡床锅炉,故在进行炉膛传热计算时,沿用现有的计算标准方法是不合适的。一种简单的处理方法是,炉膛传热一揽子按对流换热处理,根据工业设备上实验测得的总传热系数按传热公式计算炉内所需受热面积,而炉膛换热量是通过建立炉内热平衡得到的:

$$Q_{abf} = (Q_{fu} + Q_{ha} + Q_{ash'}) - (Q_{LZ} + Q_{Losf} + Q_{fg} + Q_{ash''}) \quad (1)$$

显然,炉膛传热计算的准确性很大程度上取决于传热系数的取值。尽管已知由于高浓度含灰气流的强烈冲刷,循环床炉内受热面的总传热系数很高,但能用于工程计算的传热系数的计算公式仍很不充分,还有待于深入的理论探讨和广泛的试验研究。

### 3.2 分离器

目前,国内外现有循环床锅炉绝大多数都采用旋风分离器,旋风分离器设计的主要考虑之一是进口气流速度的选择,它可以通过技术经济比较得出,通常按18—25 m/s选取。高倍率炉由于烟气中较大的团体粒子浓度宜取下限;低倍率炉则可取得高一些。另外,分离器的设计还应使其临界分离直径与炉高、煤粒炉内停留时间及燃烬时间相对应,以保证一定的燃烧效率和循环物料量。

按照上述原则,在我们的方案设计中,低倍率的Circofluid炉需配置两个内径4 m

的旋风分离器,而高倍率的 Lurgi 炉和 Pyroflow 炉分离器的内径是5 m,加上防磨层和绝热层,分离器的尺寸还是相当大的。庞大的分离器不但导致其床身和支承构架金属耗量上升使造价提高,而且也使锅炉的热惯性剧增,负荷变化率下降。对更大容量的锅炉,这个问题会更加突出。为此,在这次选型设计中,参考国外有关设计,作了工作在850℃、600℃的冷却式旋风分离器设计的尝试。这种分离器是用省煤器或过热器管子围绕而成,采用强制流动以保证冷却需要和布置上方便。管圈见火侧焊销钉敷以防磨耐火涂层,背火侧加绝热层,最外层是碳素钢外壳。计算表明,当分离器进口烟气温度为850℃,速度为22 m/s时,烟气在筒内温降为3—5℃,无论是用水冷还是汽冷,分离器金属外壳表面温度均低于60℃。我们认为,在大容量循环床开发研制中采用冷却式旋风分离器对于解决由于容量增大而带来的制造、安装诸方面的问题是一有效的途径。

### 3.3 回料器

由于要长期工作于较高温度条件下,循环床锅炉基本上都采用非机械式回料器。此类回料器是靠充气实现物料的输送和流量控制,无机械运动部件、结构简单,操作灵活,调节范围广。按结构特点,非机械式回料器又有“L”型、“J”型、“U”型之分。目前应用最广泛的是“U”型,我们设计的三种锅炉皆采用这种回料器。

回料器要把分离下来的物料送入压力相对较高的炉膛内,回料压力的建立是与连接分离器和回料器的立管内料柱的高度密切相关的。炉膛、分离器及回料器的压降在回路设计时均已为定值,所以回路的封闭链设在立管。它的设计必须满足循环回路的要求,即立管直径的选取要保证循环系统能满足锅炉设计所要求的回料量;立管高度要能提供足够的有效压头以克服循环回路的流动阻

力。计算说明,对于较大容量的锅炉,立管的最小高度是很容易满足的,而小容量的锅炉,有时布置上会发生困难。

### 3.4 外置式热交换器

附设外置式热交换器是 Lurgi 型循环床锅炉的一大特点。在 Lurgi 炉中,旋风分离器分离下的灰,一部分经回料器直接返回炉膛,另一部分则进入外置式热交换器,将热量传给受热面和流化空气,本身被冷却后再返回炉膛。利用外置式热交换器可方便有效地实现炉内温度控制,运行中可通过调整外置式热交换器中的吸热量以使锅炉负荷变化时炉内温度基本保持恒定,这对于在整个锅炉负荷下保证最佳的燃烧和脱硫是特别重要的。

外置式热交换器一般设计成多室流化床,在不同的室内布置不同用途的受热面——蒸发受热面,过热受热面或省煤器。外置式热交换器设计的主要考虑是流化气速的选取和通过床的固体流率的确定。由于在小粒子床中传热系数对流化气速非常敏感,故流化气速的选取将直接影响床内换热特性因而影响受热面的布置;另一方面,流化气速也决定了单位热交换器面积预热的二次空气量。如果主要考虑传热性能,则热交换器中的流化气速一般取0.5 m/s左右,通过热交换器固体流率的确定则是一个复杂的优化问题,设计时要结合循环倍率,回灰温度的选取及锅炉整体部置进行反复的技术经济比较。

## 4 基本参数的选择

### 4.1 流化气速

流化气速是循环床锅炉设计中需选取的一个重要参数。选用较高的流化气速可使得炉膛断面减小因而锅炉更紧凑;但另一方面,高气速会导致受热面磨损,且当循环倍率一定时,为保持一定的燃烧效率需要更高

的炉膛,这意味着较高的制造成本和增加风机电耗。此外,为使得炉膛上部保持一定的颗粒浓度,高气速相应地需要较高的循环倍率,例如高倍率的Lurgi型和Pyroflow型炉流化速度一般在6—9 m/s,而低倍率的Circofluid型则采用较低的流化气速(3—4.5 m/s)。

循环床锅炉之所以相异于带飞灰再循环的常规鼓泡床锅炉,最根本的一点就是二者运行于截然不同的流态之下。循环床锅炉采用较高的空截面气速、运行于湍流床或快速床状态。此时的空截面气速大于绝大部分床料所对应的临界带出速度,这些颗粒均能被气流抬起并在炉膛中加速运动。因而气固混合物充满整个炉膛,燃烧和脱硫过程是在整个炉膛高度上进行的,使得其具有许多鼓泡床锅炉所不曾有的特点。所以,循环床空截面气速的下限应保证床层处于所希望的流态:湍流床或快速床。国内目前的循环床锅炉大都运行在较低的空截面气速下,个别炉子性能欠佳的原因就在于:从流态的观点看,其实只是带飞灰再循环的常规流化床锅炉而已。

对于建立湍流床或快速床所需的最小空截面气速,迄今为止还没有较可靠的关联式可用于工程计算。但借助于试验,这些速度的确定并不困难。由Lurgi公司Reh给出的流态变化图<sup>[2]</sup>借助无因次特性参数表示过程的分区,根据选定的参数(如固体物料粒径、流化气速、气固密度、床温)可校核床层状态,可供我们设计时参考。

#### 4.2 循环倍率

循环倍率定义为:单位时间内循环物料量与单位时间锅炉给煤量之比。它是循环床锅炉设计和运行的重要参数之一。循环倍率的大小,在一定程度上反映了燃料和脱硫剂颗粒在炉内循环的次数和总计停留时间,因而将直接影响锅炉的燃烧效率及脱硫剂的利用率;当流化气速一定时循环倍率的大小

决定了炉内烟气流中固体颗粒的浓度,无疑这将对炉内传热、气固流动阻力、受热面的磨损及分离器的工作条件产生重要的影响。

研究结果说明,循环倍率对上述诸因素的影响并非同向,高的循环倍率虽有利于燃烧和脱硫效率的提高,有利于炉内传热的强化,但伴之而来的受热面磨损加剧、气固流动阻力变大,因而锅炉自身能耗加大,分离器工作条件恶化等问题也不容忽视,故循环倍率的选择是一个技术经济问题。

多年来,设计人员试图找到一定量计算循环倍率的公式,但由于影响因素太多,看来找到一简单的计算公式并非易事。尽管如此,根据实验室和工业实验的结果利用计算机优选循环倍率却是可能的。需要指出的是,从近年发表的资料及部分来华讲学专家的介绍,在循环床锅炉设计中,人们已不象早期那样采用很高的倍率(如早期的Lurgi炉倍率为60—90,Pyroflow炉为80—150),而趋向于选用较低的倍率。

#### 4.3 回灰温度

回灰温度选择的重要性主要在于它对热量分配的影响。如忽略从分离器到回料入口这个区段的散热损失,三种炉子的热流分配如图2所示。由于Pyroflow炉, $Q'_{ash} = Q''_{ash}$ ,故循环灰量及其热量对于炉膛的热量平衡不产生影响。而Lurgi炉和Circofluid炉则因外置式热交换器或炉膛上方对流区的存在,总是有 $Q'_{ash} < Q''_{ash}$ 。显然,回灰温度直接影响热量在炉膛和外置式热交换器或炉膛上方对流区段的分配,因而影响整个锅炉受热面的布置及结构。在设计中,我们对如图1(c)所示的Circofluid炉作了不同回灰温度下的热量分配计算,计算的主要结果示于图3。尽管不同回灰温度下热量分配的一些规律系针对Circofluid炉计算所得,但考虑到Lurgi炉只不过是以外置式热交换器替代了Circofluid炉上方的对流区段,故回灰温度对热量分配的影响有共同之处。

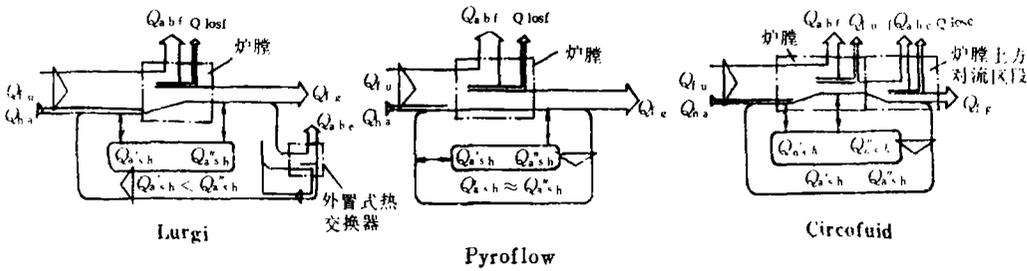


图2 三种炉型锅炉的热量分配

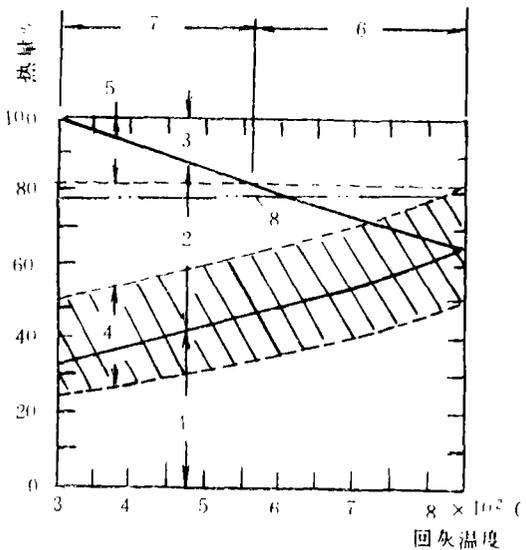


图3 锅炉的热量分配与回灰温度的关系

循环灰实际上是载热体，故回灰温度对热量分配的影响又因循环倍率及燃料的不同而异。设计时应根据锅炉燃料，结合循环倍率的选取对回灰温度进行优化。我们的计算说明，对燃用高硫煤的 Circofluid 炉，循环倍率在 10 左右、回灰温度为 600℃ 时，可得 50 MW(e) 循环床锅炉的较佳结构。

### 5 比较及建议

对如图 1 所示的高硫煤为燃料的三种类型的循环床锅炉的设计方案，我们还进行了锅炉受热面金属耗量、烟风阻力，钢构架金属耗量等方面的比较计算。锅炉参数及主要设计性能指标如第二部分所述，计算结果列于表 3。

表 3 50 MW(e) 不同炉型循环床锅炉比较

项目	承压受热面金属耗量			空气预热器 金属耗量	受热面总 金属耗量	钢构架 金属耗量	占地 面积	烟风阻力		
	蒸发受热面	过热器	省煤器					烟道	一次风道	二次风道
Lurgi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pyroflow	0.96	1.2	1.07	1.18	1.14	1.30	0.78	1.02	1.26	1.06
Circofluid	1.32	0.87	1.28	0.98	1.11	1.14	0.714	1.08	0.63	0.54

从表 3 可知，在锅炉自身能耗、占地面积方面，低倍率炉为佳；而在受热面金属及构架钢耗方面，Lurgi 炉最少，Circofluid 炉次之，Pyroflow 最多。如果同时考虑制造工艺的繁复程度及运行控制的难易程度等，低倍率的 Circofluid 炉乃具较强竞争力。所以，我们认为：

1. 我国开发研制 50 MW(e) 循环床锅

炉宜选择低循环倍率的 Circofluid 炉型；

2. 对于 Circofluid 炉，循环倍率取 10—12，回灰温度为 600℃，过热器分两级分别布置在分离器前后，可获得较佳结构。

西安交通大学九〇届锅炉专业毕业生袁长政、冯波、南向东、马斌等十七位同学为本文完成了大量繁复的计算，作者在此向他们表示衷心地感谢。

## 符 号

$Q_{abf}$ 、 $Q_{abc}$  分别为炉膛及对流段工质吸热, kJ/kg;  
 $Q'_{ash}$ 、 $Q''_{ash}$  分别为循环灰带入与带出热, kJ/kg;  
 $Q_{Lz}$  冷渣带出炉膛热量, kJ/kg;  
 $Q_{fg}$  烟气焓, kJ/kg;  
 $Q_{fu}$  燃料热量, kJ/kg;  
 $Q_{ka}$  热空气带入热量, kJ/kg;  
 $Q_{losf}$ 、 $Q_{losc}$  分别为炉膛与对流段热损失, kJ/kg;

## 参 考 文 献

- 1 Basu. Design Considerations for circulating fluidized bed combustors. Journal of the institute of energy, 1986, 59(441), 179
- 2 西安热工所. 西德杜伊斯堡第一热电厂95.8 MW(e)循环流化床发电机组设计及运行. 1987
- 3 徐通模等. 锅炉燃烧设备. 西安交通大学出版社, 1990
- 4 刘焕彩. 流化床锅炉原理与设计. 华中理工大学出版社, 1988

(孙显辉 编辑)

## On the Design of Large-Capacity CFB Boilers

Li Jun, Wen Long

(Xi'an Jiaotong University)

## Abstract

In connection with the conceptual design of 50 MW(e) CFB boilers this paper discusses the design considerations of the circulation combustion system and the determination of key design parameters of such CFB boilers. On the basis of analysis and comparisons the authors have proposed a conceptual design for the 50 MW(e) CFB boilers, which can be helpful in the development and manufacture of large-capacity CFB boilers in China.

**Key words:** CFB boiler, circulation ratio, conceptual design

## 简讯

## 锅筒式锅炉可调的给水调节系统

据“Теплоэнергетика” 1990年11月号报道, 苏联全苏热工研究所(ВТИ)已研制成一种电站用锅筒式锅炉可调的给水调节系统。

该系统的目标是不仅完成在所调节负荷范围内, 而且还完成启动时给水自动控制的全套任务。除了保持水位以外, 这些任务还包括保护省煤器管子在启动初始阶段不致过热、保持给水调节阀的压降、对接入的并联给水电泵自动加载、使并联工作的给水电泵配合给水流量协调工作等。

文章还预见到提高液位调节器工作可靠性和质量的一些措施。

(吉桂明 供稿)