

# 对发展循环流化床锅炉的探讨

张子栋 吴文渊 鲍亦令 别如山 赵明泉

(哈尔滨工业大学)

[摘要] 循环倍率是循环流化床锅炉的重要设计参数,对锅炉的设计和运行都有很大的影响。本文探讨了循环物料的选择、燃烧效率、分离器分离效率、密相区受热面的布置、过热汽温等与循环倍率的关系,并提出了相应的建议。

关键词 循环流化床锅炉 循环倍率 低倍率 循环物料

分类号 TK229.66

纵观国内外循环流化床锅炉的发展可见,所使用的循环物料可分为两种:一种是以燃料中的灰粒作为循环物料,另一种是以脱硫剂—石灰石为主作为床料。前者主要用于含硫低而灰分高的燃料,包括燃用劣质燃料;后者主要用于高硫燃料以减少酸雨气体的排放量。由于用途不同,对循环流化床锅炉设计的指导思想应有所不同。如果以燃劣质燃料为主,采用燃料灰为循环物料应选用低循环倍率;如果以炉内脱硫为主,采用石灰石为主的循环物料,可选用高循环倍率。值得提出的是后者在技术、设备和运行上都有一定的特点,如以燃料灰作循环物料,而采用高循环倍率,可能会产生一系列难以解决的问题。

## 1 循环物料量的积累和维持

在锅炉设计时需预先设定循环倍率,锅炉运行时应根据设定的循环倍率维持烟气中一定的物料浓度,否则可能影响锅炉出力、汽

温、床温等参数,从而使锅炉达不到设计参数,甚至影响锅炉的安全运行。

如定义物料的循环量和随燃料进入炉内的不可燃固体物料量的比值为循环倍率,如以燃料中灰为循环物料,设循环流化床锅炉的循环倍率分别为50和5,那么达到正常的物料循环量,高倍率循环流化床锅炉循环物料量的积累时间为低倍率的10倍。何况燃料灰的抗磨性能远比脱硫剂—石灰石差,在高倍率状况下高速、高浓度运行,燃料灰很快变细,分离器捕不到而脱离循环,所以说高倍率循环流化床锅炉,如果仅以燃料灰为循环物料,烟气中的灰浓度很难积累和维持。如果以脱硫剂—石灰石为主作循环物料就不存在上述问题,但需设置庞大复杂的石灰石处理系统,包括制备、输送、存储等。如国内某台75 t/h高倍率循环流化床锅炉,只有当燃用的燃料灰分在45%以上,且3 mm以下的粒度组成占70%时,锅炉才能达到额定出力,否则就需要有另外的加灰系统,以稳定负荷。

收稿日期 1994 01 31

本文联系人 张子栋 男 58 副教授 150001 哈尔滨工业大学动力工程系

## 2 循环倍率和分离器分离效率

按前述的循环倍率的定义,设  $n$  为循环倍率,  $\eta_r$  为分离器的分离效率,则存在如下关联式:

$$n = \frac{1}{1 - \eta_r} \quad (1)$$

根据式(1)计算获得分离器分离效率与循环倍率的关系如表1。由表中数据可知:当  $\eta_r$  大于90%时,  $n$  随  $\eta_r$  的增加而急剧增加,而在低循环倍率( $n = 3$ 至8)时,  $\eta_r$  的变化对  $n$  的影响不大:

表1  $\eta_r$  与  $n$  的关系

分离效率 $\eta_r\%$	50	60	70	75	80	90	95	98	99	99.5
循环倍率 $n$	2	2.5	3.33	4	5	10	20	50	100	200

由理论分析和多年运行实践均证明飞灰颗粒中造成  $q_4$  损失的主要是含碳量大、重量份额最多的那部分中间大小的颗粒(粒径为0.15至0.35 mm),所以只需把这部分颗粒捕获参加循环便可有效地提高燃烧效率。根据已有的飞灰粒度组成数据,分离器的捕获效率约为60%时即可将大于0.15 mm的飞灰回收,因此低倍率循环流化床锅炉对分离器的  $\eta_r$  要求不高,一般可选用结构简单、体积小、布置在烟气温度较低烟道内的槽型分离器,从而使锅炉结构紧凑,而且分离器的材料也易解决。

由于  $n = 3$ 至8时,  $\eta_r$  的变化对  $n$  的影响不大,所以  $\eta_r$  对密、稀相区内传热的影响远小于高倍率循环流化床锅炉,故低倍率循环流化床锅炉的负荷相对稳定,对循环流量的控

制系统要求也相对较低。高倍率循环流化床锅炉的  $\eta_r$  变化对  $n$  的影响很大,而  $\eta_r$  又受灰粒尺寸分布、浓度、运行情况等影响,设计时很难正确估计这些情况,如运行时分离器的实际分离效率小于设计值,则将使循环量不足,锅炉因此而达不到出力。

## 3 循环倍率和燃烧效率

在循环流化床中,循环倍率是一个重要的特征参数,它对燃烧效率、脱硫率、传热系数、炉内温度、锅炉电耗、材料磨损、受热面布置等都有较大的影响。随循环倍率的增加,燃烧效率和脱硫率也增加,但循环倍率过高会带来不利的影响:(1)耗电量,高循环倍率需要流化速度高和高压头风机,增加了耗电量;(2)床内颗粒浓度很高会造成严重的局部磨损;(3)对分离器的结构与材料要求较高;(4)对飞灰循环控制系统要求严格。因此循环倍率的选取必须综合考虑其对各种因素的影响,合理的选择是应具有较高的燃烧效率和脱硫率,较低的电耗和磨损,即在保证燃烧效率和脱硫率的情况下取较低的循环倍率。实验结果表明,当循环倍率大于2.5后,增加循环倍率燃烧效率提高不明显,美国EPRI(电力动力研究所)的实验结果也表明,不论是床上给煤还床下给煤,燃烧效率都随循环倍率的增大而提高,但当循环倍率大于2.5后,燃烧效率将不随循环倍率的增加而发生显著的变化。这是因为流化床锅炉飞灰含碳量最高的粒径为0.15~0.35 mm的灰粒,只要将这部分颗粒用分离器捕捉下来参与循环,就可以明显地提高燃烧效率。较大的颗粒在密相区内有充分的停留时间使碳燃尽,较小的颗粒因在炉内的停留时间大于碳燃尽所需的时间,也可被燃尽。所以分离器没有必要捕捉小于0.15 mm的颗粒,否则只会

增加电耗、磨损。这时就可不必选用更高的循环倍率。下面一组数据也说明这个问题。

对褐煤: 扎赉诺尔褐煤:  $C_{ar}/A_{ar} = 2.035$ , 如燃烧效率  $\eta_r = 97\%$ , 分离器分离效率  $\eta_f = 0.8 \sim 0.9$ , 则循环倍率  $n = 2.94 \sim 4.93$ 。

对煤矸石: 株州煤矸石,  $C_{ar}/A_{ar} = 0.22$ ; 淮北煤矸石,  $C_{ar}/A_{ar} = 0.296$ , 如燃烧效率  $\eta_r = 92\%$ , 分离器分离效率  $\eta_f = 0.65 \sim 0.8$ , 则循环倍率  $n = 2.66 \sim 4.03$ 。

对无烟煤: I 类无烟煤:  $C_{ar}/A_{ar} = 1.65$ ; II 类无烟煤:  $C_{ar}/A_{ar} = 5.46$ ; III 类无烟煤:  $C_{ar}/A_{ar} = 3.45$ , 如燃烧效率  $\eta_r = 92\%$ , 分离器分离效率  $\eta_f = 0.65 \sim 0.8$ , 则循环倍率  $n = 3.34 \sim 6.26$ 。

综上所述, 设计低倍率循环流化床锅炉时, 一般可取循环倍率  $n = 3 \sim 5$ , 对难燃的无烟煤、贫煤可取  $n = 6 \sim 8$ 。

#### 4 密相区的埋管

对于灰粒作床料的流化床锅炉, 灰粒尺寸源于给煤的粒度。即使将风速提高到 6 m/s, 热态时也只能使粒径 1 mm 左右的粒子进入循环, 而较大粒子仍只能在床底部作鼓泡流化。有人认为, 循环流化床锅炉内不存在鼓泡流化状态, 只要存在鼓泡流化状态就不是循环流化床锅炉, 这种看法是错误的。我们在金州热电厂 75 t/h 次高压循环流化床锅炉设计方案论证会上已明确指出, 以灰粒作床料的循环流化床锅炉, 炉膛下部存在鼓泡流化区域, 1991 年美国出版的《循环流化床锅炉设计与运行》一书第二章(流体力学)中也指出: 循环流化床锅炉内床料粒子在不同的部位处于不同的流体力学区域, 二次风以上为快速流化区, 二次风以下为湍流或鼓泡流化区。可见, 不论是鼓泡流化床还是循环流化

床锅炉, 只要是使用宽筛分的物料作床料, 都存在分层流化现象。至于是否设置埋管, 决定于密相区内的放热量与吸热量的平衡温度, 如燃料挥发份高, 水分高或发热值低, 在炉内有可能不必设置埋管即可保证密相区温度不致过高。对燃煤粒度较大, 固定碳含量较高的煤在密相区可能要布置埋管。我国目前一些按高倍率循环流化床设计的锅炉, 采用的都是宽筛分的燃料灰作床料, 在密相区没有布置埋管。国内一些低倍率循环流化床锅炉, 也采用宽筛分的燃料灰作床料, 但密相区多数都布置了埋管。

燃料在密相区中放出的热量一部分被烟气带出炉膛, 其余部分应由床内布置的受热面吸收, 或由循环物料将其转送入炉膛上部, 由稀相区的受热面吸收。如放热量和吸热量不平衡, 则将引起炉温过高而结渣或炉温过低而熄火。如炉内不布置埋管, 密相区放出的热量主要靠循环物料带出, 如分离器直接布置在炉膛出口, 则回送的循环物料的温度比炉膛温度低得不多(一般约  $10 \sim 20^\circ\text{C}$ ), 因此必需有较大的循环物料流率才能足以控制密相区床温, 即必需采用较高的循环倍率。如以煤灰作床料, 很难达到高倍率, 如按高循环倍率设计, 可能因锅炉运行时密相区床温过高而限制给煤量的增加, 造成锅炉不易达到设计出力。如炉内布置埋管, 则密相区放出的热量可由埋管吸收一部分, 如分离器设在过热器中间或后面, 则分离下来的循环物料温度比炉膛温度低得多(一般低  $100 \sim 200^\circ\text{C}$ ), 单位重量循环物料的携热能力加大。因此, 从炉内放热条件看, 也可选用较低的循环倍率。

国外的设计者十分担心埋管的磨损问题, 实际上只要掌握了埋管的磨损规律, 合理设计布风板及埋管的结构, 磨损问题并非象传闻的那样可怕。我们设计的低倍率循环流化床锅炉埋管磨损均轻微。例如金州热电厂的 75 t/h 低倍率循环流化床锅炉, 运行 3000

小时后实测埋管磨损厚度不大于 0.1 mm,而且锅炉出力充足。

## 5 过热蒸汽温度

当分离器布置在过热器中间或以后时,由于循环流化床锅炉烟气中的飞灰浓度较高,无疑对过热蒸汽温度有较大影响。尤其高倍率循环流化床锅炉飞灰浓度更大,亦对过热汽温影响更大。烟气中的飞灰浓度决定循环倍率。当分离器结构一定时,分离效率决定于一系列运行因素,如负荷、飞灰粒度、浓度等,而这些因素是很难控制的,它们变化引起分离效率变化,从而引起循环倍率、飞灰浓度变化,最后引起过热蒸汽温度的变化。从表 1 可见低倍率时,分离器效率的变化引起循环倍率变化不大,也就是烟气中飞灰浓度变化不大,对汽温的影响不大;高倍率时分离器效率的变化,引起循环倍率很大的变化,也就是烟气中飞灰浓度有很大的变化,从而过热汽温将发生较大的变化。可见当分离器布置在过热器中间或以后时,循环倍率较低时过热汽温度容易控制。当然,如将分离器布置在过热器之前,这种影响会减小,但循环灰对床层

温度的调节作用会减弱。

## 6 结论

低倍率循环流化床锅炉燃烧效率可以满足燃用劣质燃料的要求,而且由于密相区布置有埋管受热面,分离器的分离效率对循环倍率的影响不大,故使低倍率循环流化床锅炉床层温度易于控制,过热汽温比较稳定,锅炉出力能达到设计要求。以燃料灰为循环物料的循环流化床锅炉宜采用低倍率循环流化床锅炉。如考虑脱硫,以填充剂石灰石为主要循环物料,这时就要求较高的分离器分离效率,宜采用高倍率循环流化床锅炉。

### 参 考 文 献

- 1 Probir Basu, Fraser S A. Circulating fluidized bed boilers design and operations. Butterworth—Heineman, 1991.
- 2 杨励丹. 建议发展低倍率循环流化床锅炉. 中国电工技术学会, 电工信息与建议, 1991, (1,2)
- 3 鲍亦令等. 低倍率循环流化床锅炉的研究与设计. 哈尔滨工业大学学报优秀论文集, 1990
- 4 杨励丹. 床料粒度及组成对循环流化床锅炉设计的影响. 全国循环流化床锅炉学术交流会论文集, 1993
- 5 张子栋等. 低倍率循环流化床锅炉槽型惯性分离器. 全国循环流化床锅炉学术交流会论文集, 1993

(李乡复 编辑)

(上接 154 页)

## 5 结论

以上几种稳燃装置已成功地应用于电厂,为电厂安全经济运行创造了良好的条件,但随着参与调峰机组容量的不断增大以及电厂燃用煤质多变等特点,必然会出现更多的问题,因此有必要进一步深入研究适用于电站锅炉的稳燃装置。由于我们对稳燃的基本理论已掌握,而且在稳燃技术上具有许

多先进手段,一定会研制出更好的稳燃装置,以满足电站锅炉稳定燃烧的需要。

### 参 考 文 献

- 1 陈迪训等. 在煤粉燃烧中强化高温烟气回流的研究与应用. 动力工程“无烟煤燃烧技术研讨会”. 1992, 芜湖
- 2 陈刚. 华中理工大学硕士论文. 1991 年
- 3 李佛金等. 海口电厂 2# 炉稳燃腔燃烧器热态试验报告. 1992.4

( ) *heat recovery boiler, regeneration restriction, simulation calculation, STIG cycle*

(151) **A Study on the Combustion Stability of Utility Boilers** ..... Chen Gang, Li Fekin, et al. (*Central China Polytechnical University*)

This paper gives a brief description of the theory of boiler combustion stability and presents several types of combustion stabilizing devices, among others, boundary jet-flow bluff-body combustion stabilizer, central return-flow combustion stabilizing device, inward/outward duplex return flow combustion stabilizer, intersection type high concentration pulverized coal burner. Their practical applications have shown that significant economic benefits have been attained as a result of their combustion stabilizing effect due to degreasing and also their enhanced combustion efficiency. **Key words:** *stable combustion, combustion theory, boiler*

(155) **An Exploratory study on the Development of Circulating Fluidized Bed Boilers** ..... Zhang Zidong, Wu Wenyuan, Bao Yilin, Bei Rushan, Zhao Mingquan (*Power Engineering Department of the Harbin Institute of Technology*)

Circulating ratio, as an important design parameter of CFG boilers, exercises a significant influence on boiler design and operation. In this paper the authors deal with the dependence of the circulation ratio on the following factors: the selection of circulating materials, combustion efficiency, separation efficiency of separators, the arrangement of heating surfaces in a dense phase region, superheated steam temperature, etc. In addition, some helpful suggestions concerning the above are also presented. **Key words:** *circulating fluidized boiler, circulating ratio, low circulating ratio, circulating materials*

(159) **Jet-flow Device—a Useful Tool for Enhancing Circulation Water Velocity in Natural Circulation Hot Water Boilers** ..... Zhu Qunyi, Zhang Peting, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Theoretical analysis and experimental study results are given of the performance of a jet-flow device employed in the circulating circuit of natural circulation hot water boiler. Presented in the paper is also a formula for calculating additional head  $\Delta P$  of the said circuit after the installation of a straight-tube nozzle and a conical one. **Key words:** *hot water boiler, jet-flow device, straight-tube nozzle, conical nozzle*

(163) **A Mathematical Model for the Optimized Design of Heat Pipe Air Preheater of a Utility Boiler** ..... Huang Xinyuan (*Power Engineering Department of Shandong Polytechnical University*)

This paper presents a mathematical model for the optimized design of the heat pipe air preheater of a utility boiler. The control condition of the preheater minimum tube wall temperature has been introduced into the constraint function vector. Some explanatory notes are given regarding the specific features of the method involving the use of optimization techniques during the design of the heat pipe air preheater. A specific calculation example is also presented. **Key words:** *utility boiler, heat pipe, air preheater, mathematical model*

(168) **A Study on the pressure Distribution in Headers of Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Horizontal Parallel Tube System** ..... Wu Dongyin (*Xi'an thermotechnical Institute*); Liu Zonghu (*Xi'an Communications University*)