

循环流化床锅炉的循环倍率

陆慧林 鲍亦令 张子栋 吴文渊

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 循环倍率是循环流化床锅炉设计和运行控制的重要参数之一。本文对循环倍率与燃烧效率、循环倍率与密相区床温特性的关系进行了讨论。

关键词 循环流化床 循环倍率 敏感性循环倍率 燃烧效率

1 前言

循环流化燃烧方式作为一种煤的“清洁燃烧”技术,近几年来得到迅速发展。从循环流化床锅炉炉膛内气固两相的宏观结构看,沿炉膛高度存在着颗粒浓度较大的密相区和浓度较小的稀相区。随着循环物料量等参数变化,稀相区颗粒浓度分布随之变化,显然稀相区内颗粒的燃烧和传热特性也随之变化。因此,循环物料量或循环倍率是锅炉设计和运行控制参数之一。纵观国外循环流化床锅炉的发展,尽管近几年文献中报道的循环倍率呈减小趋势,但循环倍率仍较大,一般在10左右。我们应该看到,国外循环流化床锅炉所用的床料主要是脱硫剂,石灰石的平均粒径在200 μm 左右,该粒径下的旋风筒分离器分级效率可达98%以上。因此循环倍率达10左右是可以实现的,但此时循环物料量主

要是脱硫剂。国内循环流化床锅炉所用燃料大多数是劣质材料,颗粒粒度筛分范围宽,平均粒径在1.5~2.5 mm。根据L. Rrh流化图,当该粒径的物料流化速度在3~5 m/s时,其流动处于鼓泡流化状态,粒径小于1000 μm 以下的颗粒可作为循环物料。即给煤中的部分大颗粒将在密相区内燃烧,可作为循环物料,细颗粒在稀相区内燃烧。因此,提高锅炉燃烧效率的关键是如何降低在稀相区内燃烧的这部分颗粒的含碳量,亦即在设计时如何选取循环倍率。显然,当实际运行控制的循环倍率与设计值相差较大时,将会影响锅炉出力 and 正常运行。

作者认为选用循环倍率应该着重考虑三者关系:(1)循环倍率与燃烧效率;(2)循环倍率与分离器分离特性;(3)循环倍率与床温特性。对于第二个问题,作者已在文献〔1〕、〔2〕中进行了讨论。本文将讨论另外二者关系。

收稿日期:1992-07-08

本文联系人:陆慧林 男 35岁 副教授 150006 哈尔滨工业大学热能动力工程教研室

2 循环倍率与燃烧效率

显然,循环倍率愈大,燃烧效率愈高,但输送循环物料所需功增大。对一定的煤种,颗粒燃烧时受各种因素的制约。初始时随循环倍率增加,燃烧效率增加;当循环倍率达到某值后(该值称为敏感性循环倍率),再继续增加循环倍率,燃烧效率提高幅度不大。因此从提高燃烧效率角度,选取循环倍率略大于敏感性循环倍率即可。

为讨论方便,作如下假设:(1)稀相区内颗粒燃烧为碳粒燃烧,颗粒为球形(2)沿稀相区高度温度分布均匀;(3)返料点位于稀相区入口,不考虑循环颗粒温升所需的时间;(4)

分离器排放灰颗粒粒度分布特性与循环物料粒度分布相同,颗粒燃烧过程以及在回料系统流动过程中粒径不变。

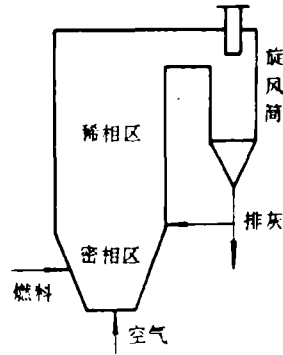


图1 循环流化床锅炉

如图1所示,设分离器分级效率为 $\eta_r(d)$,则粒径为 d 的颗粒在稀相区内循环 n 次后的颗粒浓度为

$$\mu_{x,n}(d) = \mu_0(d) [1 + \eta_r(d) \cdot p(d) + \eta_r^2(d) \cdot p^2(d) + \dots + \eta_r^n(d) \cdot p^n(d)] \quad (1)$$

和在稀相区出口平均碳量

$$C_{x,n}(d) = C_0(d) (1 - \eta_{r,1}(d)) \cdot [1 + (1 - \eta_{r,2}(d)) \cdot \eta_r(d) \cdot p(d) + \prod_{i=2}^3 (1 - \eta_{r,i}(d)) \cdot \eta_r^2(d) \cdot p^2(d) + \dots + \prod_{i=2}^{n+1} (1 - \eta_{r,i}(d)) \cdot \eta_r^n(d) \cdot p^n(d)] \cdot [\mu_0(d) \cdot (1 + \eta_r(d) \cdot p(d) + \eta_r^2(d) \cdot p^2(d) + \dots + \eta_r^n(d) \cdot p^n(d))]^{-1} \quad (2)$$

及颗粒重量份额

$$\Delta X_{x,n}(d) = \frac{\mu_{x,n}(d)}{\mu_x} \quad (3)$$

循环倍率 R 定义为:

$$R = \frac{\mu_x}{\mu_0} \quad (4)$$

则稀相区出口平均含碳量

$$C_x = \sum_{j=1}^n \Delta X_{x,n}(d_j) \cdot C_{r,n}(d_j) \quad (5)$$

和由分离器出口排出的碳损失

$$q_c = a_1 \cdot C_x \frac{328.6 \cdot A'}{Q_{aw}'} \quad (6)$$

在稀相区的碳粒的燃烧速率按下式计算:

$$\frac{dm(d)}{dt} = \pi d^2 \left[\frac{1}{\Phi K_a} + \frac{d(d-d')}{\Phi d' De} + \left(\frac{d}{d'} \right)^2 \frac{1}{K_s} \right]^{-1} \cdot C_\infty \quad (7)$$

式中化学反应速率 K_s 和扩散常数 K_a 分别满足阿累尼乌斯定律和雪伍德数:

$$K_s = A \cdot \exp(-E/R'T) \quad (8)$$

$$K_d = \frac{D_0 \cdot sh}{d} \quad (9)$$

颗粒质量 $m(d) = \rho_c \cdot \frac{\pi}{\sigma} \cdot d^3$, 代入式(7)整理得:

$$\frac{d(d)}{dt} = \frac{2}{\rho_c} \left[\frac{1}{\Phi K_d} + \frac{d(d-d')}{\Phi \cdot d' De} + \left(\frac{d}{d'}\right)^2 \frac{1}{K_s} \right]_{-1} \cdot C_\infty \quad (10)$$

粒燃烧效率 $\eta_{r,i}(d)$

$$\eta_{r,i} \otimes (d) = \frac{C_i(d) - C_{i-1}(d)}{C_i(d)} \quad (11)$$

按式(1)~(11)可确定循环倍率与燃烧效率等参数的变化关系。以某 75 t/h 低倍率循环流化床锅炉为例。该锅炉稀相区高度为 8.5 m, 烟气平均速度 4.1 m/s, 平均烟温为 894℃。设计燃料特性如表 1 所示。图 2 表示颗粒含碳量 $C(d)$ 与循环倍率的变化关系。由图可见, 随着循环倍率增加, 开始时颗粒含碳量下降很快, 当循环倍率增加到某一值后, 再继续增大循环倍率, 颗粒含碳量变化很小。图 3 表示稀相区出口颗粒平均含碳量与循环倍率的变化关系。由图可见, 随着循环倍率增加, 开始时平均含碳量显著下降, 但当循环倍率达某一值后, 再继续增大循环倍率, 平均含碳量变化很小。推论之: 旋风筒出口排出的颗

粒碳损失 q_i 具有相同的变化趋势, 如图 4 所示。随着循环倍率增加, 开始时颗粒碳损失下降很快, 但当循环倍率达某一值后, 碳损失随着循环倍率增加变化很小。

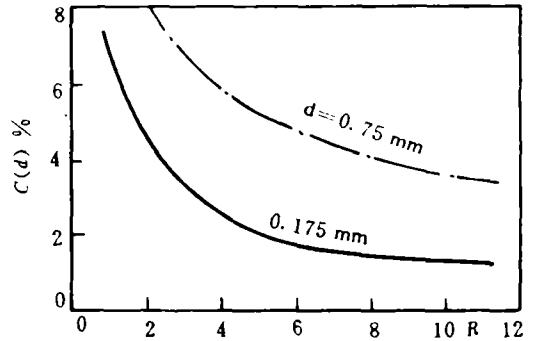


图 2 颗粒含碳量与循环倍率的关系

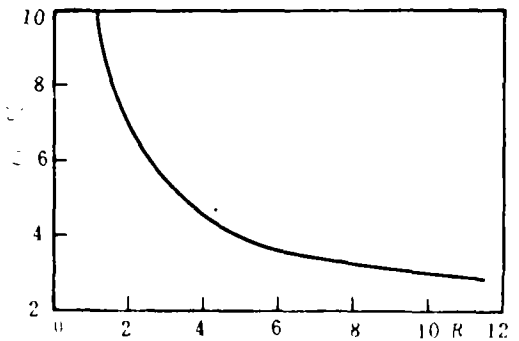


图 3 稀相区出口平均含碳量与循环倍率的变化

表 1 燃料特性

碳 C ^v	氢 H ^v	氧 O ^v	氮 N ^v	硫 S ^v	灰份 A ^v	水份 W ^v	发热值 Q _{d,w} ^v
25.33%	2.23%	5.41%	0.66%	0.26	44.75	21.36	10031kJ/kg

计算结果表明, 对于不同的燃料, 稀相区出口颗粒平均含碳量, 旋风筒出口排出的颗粒碳损失随循环倍率变化均呈上述变化趋势。即, 当循环倍率较大时, 燃烧效率提高并不显著。图 5 表示变化率 $-dq_i/dR$ 随循环倍率 R 的变化, 由图可见, 当循环倍率小于敏感

性循环倍率 R_s 时, 随循环倍率增大, 变化率 $-dq_i/dR$ 显著地减小; 而当循环倍率大于 R_s 后, 变化率下降较小。对本例计算, 敏感性循环倍率约 4。因此, 选取循环倍率略大于敏感性循环倍率即可。

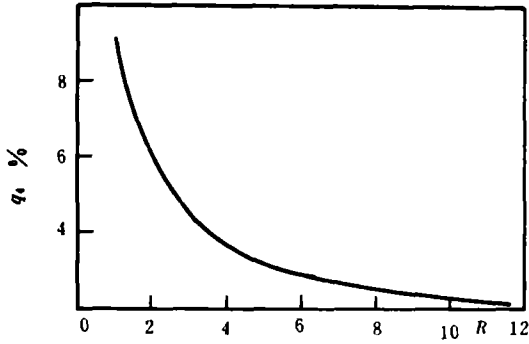


图4 旋风筒出口碳损失与循环倍率

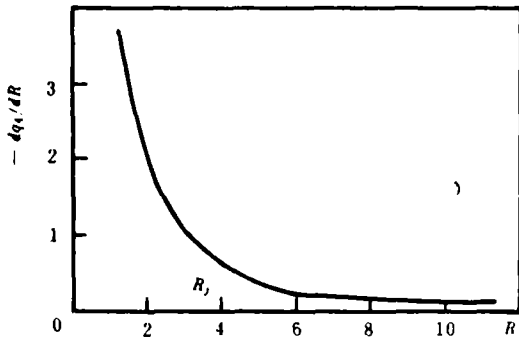


图5 变化速率对循环倍率的关系

3 循环倍率与床温特性

送入炉内的燃料,部分在密相区内燃烧。当循环物料送入密相区时,保证密相区具有所需的温度的循环倍率可以根据密相区热平衡确定。

密相区燃料燃烧释放出的热量是:

$$Q_c = B_f \cdot \delta \cdot Q_{fw} \quad (12)$$

循环灰带入密相区热量:

$$Q_h = R \cdot a_f B_f A^V \cdot I_h \quad (13)$$

和流化介质带入的热量:

$$Q_k = \alpha_m \cdot B_f \cdot I_k^0 \quad (14)$$

由密相区带走的热量有:高温烟气带走的热量:

$$Q_y = B_f \cdot I_m \quad (15)$$

若在密相区布置受热面时,该受热面吸收的热量:

$$Q_n = K \cdot H_m (\theta_m - t_g) \quad (16)$$

和从密相区排出的高温灰物理热 Q_{6m} 、可燃气体带出的热量 Q_{3m} 、密相区散热量 Q_{5m} 等,热平衡方程可表示为:

$$B_f \delta Q_{fw}^y + R a_f B_f A^V I_h + \alpha_m B_f I_k^0 = B_f I_m + K H_m (\theta_m - t_g) + Q_{5m} + Q_{6m} + Q_{3m} + Q_{4m} \quad (17)$$

整理得:

$$R = \frac{100 - q_4}{a_f A^V I_h} \left[\frac{K H_m (\theta_m - t_g)}{\varphi B_f} + \frac{100 - q_{4m} + q_{4h} I_m - d_m I_k^0 - Q_{fw}^y \frac{\delta(100 - q_3 - q_4) - q_{6m}}{100 - q_4}}{100 - q_4} \right] \quad (18)$$

当密相区无受热面时:

$$R = \frac{100 - q_4}{a_f A^V I_h} \left[\frac{100 - q_{4m} + q_{4h} I_m - d_m I_k^0 - Q_{fw}^y \frac{\delta(100 - q_3 - q_4) - q_{6m}}{100 - q_4}}{100 - q_4} \right] \quad (19)$$

按表1燃料特性计算,并取锅炉固体未完全燃烧损失 $q_4 = 4.3\%$,气体未完全燃烧

损失 $q_3 = 0.8\%$,飞灰份额 $a_f = 0.5$,循环灰温度为 540°C 和热风温度 100°C 。

图 6 表示密相区无受热面即 $H_m = 0$ 时床温 θ_m 随循环倍率变化关系。由图可见,当燃料在密相区燃烧份额一定时,随循环倍率增加,密相区床温显著下降。这种密相区床温随循环倍率的变化特性,对于具有较高自控调节手段的循环流化床锅炉来说,无疑这种特性是它的优点。显然,可以通过改变循环倍率,改变密相区床温,推测改变了稀相区温度和传热特性,从而可灵活地实现锅炉负荷的调整。但对于自控调节手段相对较差的流化床锅炉,这种特性成为锅炉的不足之处。显然当锅炉负荷发生变化时,需要改变循环倍率,此时床温会发生显著变化,当自控调节手段较差如采用手动操作时,往往会发生床温升高引起结焦或者床温降低引起灭火,影响了锅炉正常运行。

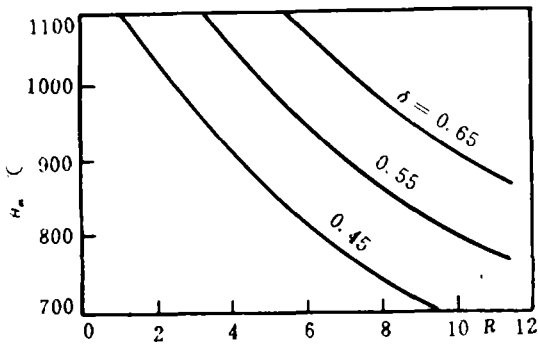


图 6 密相区床温与循环倍率的变化

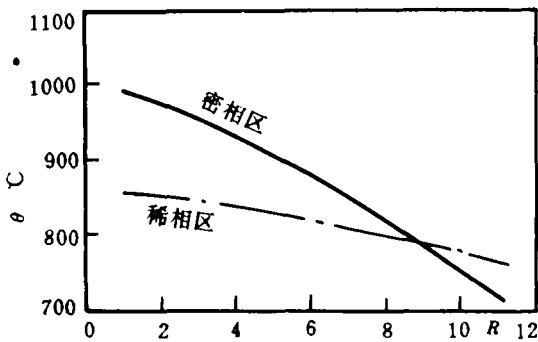


图 7 温度与循环倍率的变化

图 7 表示密相区布置一定数量受热面后密相区床温随循环倍率的变化曲线。由图可见,随循环倍率变化,密相区床温也随之改变。但与图 6 相比,随循环倍率变化而引起密相区床温变化的幅度要小,也就是说当密相区布置了受热面后,循环倍率变化对床温影响程度减小。图中同时给出稀相区出口温度的变化。由图可见,稀相区出口温度随循环倍率变化影响较小。这种密相区床温随循环倍率变化的特性,增大了锅炉适应负荷变化、锅炉运行状况改变等的能力。但是在锅炉设计时,应该采取一定措施,减轻密相区受热面的磨损。

4 结论

1、循环倍率对燃烧效率的影响过程中存在着—敏感性循环倍率。当循环倍率小于敏感性循环倍率,随循环倍率增加,燃烧效率将显著增加。

2、循环倍率对床温特性有显著地影响。保证密相区所需的床温的循环倍率按本文式(18)或(19)计算。

符 号 表

- A — 频率因子
- C — 颗粒含碳量
- a_f — 飞灰份额
- C_∞ — 氧浓度
- B_f — 计算燃料消耗量, kg/h
- d — 颗粒直径, m
- d' — 去掉灰壳后的颗粒直径, m
- D_e — 有效扩散系数, m^2/s
- D_{O_2} — 氧气扩散系数, m^2/s
- E — 活化能, J/mol
- H_m — 密相区受热面 m^2

I_h — 循环灰焓 kJ/kg
 I_a^0 — 热空气焓 kJ/kg
 I_m — 密相区烟气焓, kJ/kg
 K — 密相区受热面传热系数, W/(m²·C)
 Q_{fw} — 燃料发热值 kJ/kg
 R — 循环倍率; R — 气体常数, J/(k·mol)
 q_{6m} — 密相区灰渣物理热损失, %
 T — 温度, C
 t_f — 工质温度, C
 ρ_c — 碳密度, kg/m³
 Φ — 化学反应当量因子
 μ — 颗粒浓度, kg/kg;

δ — 密相区燃烧份额
 φ — 保热系数
 α_m — 密相区空气过量系数
 θ_m — 密相区床温, C

参 考 文 献

- 1 Lu Huilin, Bao Yilin, Yang Lidan. Design of CFB boiler with Low Circulating Ratio. 第二届煤燃烧国际会议, 1991
- 2 鲍亦令, 陆慧林, 杨励丹. 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, 1990, P53-57

高 效 小 型 径 流 式 涡 轮

据“Gas Turbine World”1992年7-8号报道, 荷兰 Optimal Radial Turbine B. V. 公司在 1992年6月于 Cologne 市举行的国际燃气轮机会议和展览上展示了该公司研制的 OPRA 系列径流式涡轮, 这是一族紧凑高效小功率多用途机组, 可供固定式和推进应用, 用于船舶推进、公共汽车、卡车或带拖车的牵引车。

新设计的主要特点是全部使用径流式部件。OPRA 设计的主要目的是使小型燃气轮机的热效率接近大型燃机的效率。采取的措施是(1)使用不要求转子冷却但能承受比轴

流式涡轮更高燃气初温的高速径向内流式涡轮;(2)使用以不同速度工作的2个转子以便优化部件的效率;(3)得到比普通小型燃气轮机大一倍的压比。所有4型 OPRA 机组均使用相同的核心模块, 它包含1个单级径流式压气机、1个环形燃烧室和1个单级径流式涡轮。燃烧室是二级贫燃、充分预混式的, 绕腔室成螺旋形流动而不是轴向或径向的, 其有害排放极少。四型机组示于下表, 其中 OPRA 500S 为双转子简单循环机组、OPRA 500C 为装有中间冷却器的机组、OPRA 500R 为装有回热器的机组。

参数	OPRA 250S	OPRA 500S	OPRA 500C	OPRA 500R
功率(KW)	254	478	677	639
质量流量(kg/s)	19	2.36	2.36	2.36
压比	7.20	14.55	14.33	14.33
排气温度(C)	602	477	482	276
轴效率(%)	24.0	29.0	30.6	39.5

(吉桂明 供稿)

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1993 Vol. 8 No. 3

CONTENTS

- (57) **Design of the Combustion Equipment and System for Daya Bay Nuclear Power Station Preoperational Test Boilers**.....Li Zongxi (*Harbin Marine Boiler & turbine Research Institute*)

A brief account is given of the design highlights of the combustion equipment and system for Daya Bay Nuclear Power Station preoperational test boilers. The said equipment and system has met the operation requirements of the boilers under various load conditions. **Key words:** *boiler, burner, air register, oil jet atomizer, relay, efficiency, characteristics*

- (63) **Numerical Simulation of an Isothermal Flow Field in the Isothermal Furnace of a Tangential-fired Boiler**.....Guo Hongsheng (*Xian Communications University*)

By the use of SIMPLE algorithm a numerical simulation has been conducted of the three-dimensional isothermal flow field in a tangential-fired boiler furnace model. The difference scheme is of an involution one with a calculation net of $19 \times 17 \times 16$ being adopted. Presented in the paper are the speed profile and turbulent flow kinetic energy profile of several sections with the actual inscribed circle dimension within the furnace being shown. The calculation results have been found to be qualitatively rational and the inscribed circle size is in quite good agreement with the actual conditions. **Key words:** *boiler furnace, isothermal flow field, numerical simulation*

- (69) **On the Recycling Ratio of Circulating Fluidized Bed Boilers**.....Lu Huilin, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Recycling ratio is one of the major parameters for the design and operating adjustment of circulating fluidized bed boilers. This paper presents the variation of the recycling ratio with the boiler combustion efficiency and dense-phase zone bed temperature characteristics. The conception of a sensitive recycling ration is proposed with the basic principles governing its selection being discussed. **Key words:** *recycling ratio circulating fluidized bed, sensitive recycling ratio, combustion efficiency*

- (75) **The development and application of oil-gas mixed combustion technology for Model AWD turning cup combustion equipment**.....Liu Yi (*Jiang Xi Sea-going Instrument Factory*)