

# 循环流化床锅炉炉膛横向温度非均匀性模型研究

胡 南<sup>1</sup>, 徐 梦<sup>1</sup>, 杨海瑞<sup>2</sup>, 吕俊复<sup>2</sup>, 张 戟<sup>3</sup>

(1. 长春工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

**摘 要:**随着循环流化床锅炉不断向大型化高参数发展, 炉膛截面在尺度上已远超过化工领域的循环流化床反应装置, 炉膛内运行参数的横向非均匀性问题愈发突出, 尤其是横向温度偏差问题, 严重影响锅炉汽水系统安全和高效运行。针对 300 MW 亚临界三分离器循环流化床锅炉燃烧系统建立二维整体小室模型, 模型以分离器为回路单元将截面划分为 3 个并联的小室, 包括炉内气固流动模型、密相区气固横向扩散模型、稀相区气固横向扩散模型、燃烧模型及传热模型等子模型。模型计算和实炉测试结果显示, 炉膛宽度方向的温度分布存在明显的不均匀性, 炉膛中间小室温度高于炉膛两侧小室, 并且温度偏差沿床高方向一直存在。稀相区扩散系数的取值对温度横向分布有明显影响, 根据模型计算和测试数据结果比较分析, 稀相区的扩散系数取值应在  $0.006 \sim 0.010 \text{ m}^2/\text{s}$ 。密相区颗粒横向混合扩散作用强烈, 改变各个给煤点给煤量分配时, 局部浓度变化很快被强烈的横向混合扩散作用消除, 因此炉膛横向温度分布受给煤量分布变化的影响较小, 与测试结果一致。导致炉膛温度偏差的主要原因是两侧小室内水冷壁面积比中间小室多, 使两侧小室温度偏低, 通过调整炉内屏式受热面的布置位置, 可有效改善温度分布不均的问题。

**关键词:**循环流化床; 锅炉; 燃烧模型; 温度分布; 扩散系数

**中图分类号:**TK224 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2019)02-0102-06

## Modeling study on lateral temperature non-uniformity in CFB boiler furnace

HU Nan<sup>1</sup>, XU Meng<sup>1</sup>, YANG Hairui<sup>2</sup>, LYU Junfu<sup>2</sup>, ZHANG Ji<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:** With the large-scale development of CFB boilers, the furnace cross-section has far exceeded the CFB reactor in the chemical industry. The lateral non-uniformity of boiler operating parameters, especially temperature, seriously affects the safety and efficient operation of boilers. Accordingly, a two-dimensional cell model is established for the combustion system of a 300 MW CFB boiler. The model divides the cross-section into three parallel cells. The model includes gas-solid fluidization model, lateral dispersion model, combustion model and heat transfer model. The calculation and test results show that the temperature distribution in the width direction is obvious non-uniform. The temperature of the intermediate circuit is higher than that of the sides. The dispersion coefficient of dilute region has a significant influence on the lateral temperature distribution. According to the model calculation and test data, the dispersion coefficient of dilute region should be in the range of  $0.006 \sim 0.010 \text{ m}^2/\text{s}$ . In the dense bed, the lateral dispersion of particles is severe. When the coal flowrate of each coal feeding point is changed, the local concentration of coal is quickly eliminated by lateral mixing and dispersion. Therefore, the lateral temperature distribution of the furnace is less affected by the change of coal feeding distribution. The key point for the temperature deviation is that the water wall area of each cell on sides is larger than that of the middle one. By adjusting the arrangement of the screen heating surface in the furnace, the problem of uneven temperature distribution can be effectively improved.

**Key words:** circulating fluidized bed; boiler; combustion model; temperature distribution; dispersion coefficient

## 0 引 言

循环流化床(CFB)锅炉具有燃料适用范围广、

低成本干法燃烧中脱硫、低氮氧化物排放的优点, 是商业化发展最好的洁净煤燃烧技术之一<sup>[1-2]</sup>。更大容量、更高参数、更好的经济性以及更低的污染物排

收稿日期: 2018-12-13; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18121311

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600201); 吉林省产业技术研究与开发专项资助项目(2019C056-3)

作者简介: 胡 南(1985—), 男, 吉林长春人, 高级工程师, 从事循环流化床燃烧技术研究。E-mail: hn04@tsinghua.org.cn

引用格式: 胡南, 徐梦, 杨海瑞, 等. 循环流化床锅炉炉膛横向温度非均匀性模型研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 102-107.

HU Nan, XU Meng, YANG Hairui, et al. Modeling study on lateral temperature non-uniformity in CFB boiler furnace[J].

Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 102-107.



移动阅读

放是 CFB 锅炉的主要发展方向<sup>[3-5]</sup>。随着 CFB 锅炉大型化发展,炉膛横截面积已远超出化工领域的 CFB 反应器,截面方向上参数非均匀性问题日益受到关注<sup>[6-8]</sup>,其中温度分布的非均匀性问题直接关系到炉膛换热效率和汽水系统的安全,对锅炉设计、运行稳定性和高效性都带来很大挑战。Zhang 等<sup>[9]</sup>对国内 2 台 300 MW 的 CFB 锅炉进行测试,测量了沿炉膛周向传热系数的分布、热边界层、压力边界层及床截面平均物料浓度沿炉膛高度的分布。结果显示,在不同运行工况下,炉膛内均存在明显的横向温度偏差和热流密度偏差,在锅炉热负荷下降时,温度和热流密度横向偏差更加严重。李金晶等<sup>[10]</sup>在 300 MW 的 CFB 锅炉上同样发现沿横向炉膛中间床温明显高于两侧,在高负荷工况下,给煤方式对床温调节作用有限。

CFB 锅炉炉膛内局部温度主要由受热面吸热负荷、内部气固对流产生的能量运输及气固在局部反应放热决定,局部反应放热受焦炭、可燃气体及氧气浓度的影响,而可燃气体固组分受气固横向扩散能力的影响。因此,CFB 锅炉炉膛内的温度均匀性是气固流动、受热面布置、气固横向扩散等综合因素的结果。要深入分析炉膛温度分布,需综合考虑以上因素,建立相应的整体模型。按照流体动力学建模机理,可将 CFB 锅炉模型分为基于微观守恒方程的 CFD 模型和基于试验的半关联性质的经验模型。CFD 模型主要用于气固流动的研究,综合考虑气固对流和扩散、燃烧及传热的燃烧系统模型,以比较成熟的小室模型为主。所谓小室模型,就是沿固体和气体的主要流动方向将燃烧系统划分为一系列小空间,并对各小空间建立质量及能量平衡方程<sup>[11]</sup>。杨海瑞、李少华等<sup>[12-13]</sup>建立了基于宽筛分和床料“年龄”分档的 CFB 锅炉一维燃烧模型,可预测燃烧系统各环节的粒度分布以及炉膛内不同粒径颗粒的停留时间分布,使一维小室模型成为目前对于 CFB 燃烧系统性能分析和预测的功能最强大的模型之一。目前国内外很多 CFB 锅炉仿真软件均基于小室模型。小室模型仅用于 CFB 锅炉的一维建模,尚无法分析 CFB 锅炉的横向参数偏差。本文基于流态化相关基础理论,以及近年来对大型 CFB 锅炉的研究成果和运行经验,建立了 CFB 锅炉的燃烧系统二维小室模型,充分考虑了横向气固流动偏差、气固混合和扩散、质量传递以及能量传递,并通过模型结果分析了温差产生的原因。

## 1 模型建立

### 1.1 概述

建模对象为国内某 300 MW 亚临界循环流化床锅炉。该锅炉为单汽包自然循环、一次中间再热、平衡通风、前墙给料的循环流化床锅炉。炉膛为单炉膛结构,截面为 8.4 m×28.3 m,炉膛高度为 38.9 m,布风板深 4.0 m,下部收缩段高度为 9.9 m。炉膛内布置屏式蒸发受热面、屏式过热器以及屏式再热器。3 台汽冷式旋风分离器下部各布置一台回料器。锅炉的主要技术参数见表 1。锅炉四壁整体布置水冷壁,下部收缩段的水冷壁涂有耐火材料。上部挂 2 片水冷蒸发屏、6 片屏式过热器、6 片屏式再热器。

表 1 锅炉主要参数

Table 1 Main parameters of the boiler

参数	数值
过热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 025
过热蒸汽温度/℃	540
过热蒸汽出口压力/MPa	17.45
给水温度/℃	282.1
再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	844.87
再热蒸汽出口温度/℃	540
再热蒸汽出口压力/MPa	3.485
再热蒸汽进口压力/MPa	3.665
再热蒸汽进口温度/℃	323.8

锅炉燃料为无烟煤,低位发热量 12 101 kJ/kg,给煤量 255.6 t/h。表 2 为给煤煤质分析。总风量为 980 550 Nm<sup>3</sup>/h,其中一次风率为 51%,下二次风 15%,上二次风 32%,其余为返料风和播煤风。热一次风温度均为 220 ℃,热二次风温度为 240 ℃。

表 2 给煤煤质分析

Table 2 Quality analysis of feeding coal %

$w(C_{ar})$	$w(H_{ar})$	$w(O_{ar})$	$w(N_{ar})$	$w(S_{ar})$	$M_{ar}$	$A_{ar}$	$V_{daf}$
35.51	0.63	3.13	0.45	1.04	6.12	53.12	7.66

模型将炉膛水平方向分成 3 个小室,沿炉膛高度方向划分若干小室,每一列小室对应一个分离器和返料器,构成一个循环回路。相邻小室之间有物质和能量的交换。分别将 3 个分离器对应的回路定义为:回路 1、回路 2、回路 3,如图 1 所示。

### 1.2 气固流动模型

CFB 锅炉内的颗粒具有较宽的粒度筛分,CFB 锅炉炉膛内的气固流动是由底部较大颗粒组成的鼓泡床和上部较小颗粒组成的快速床叠加的流化状态<sup>[14]</sup>。炉膛内的气固流动特性受风速、床料量、粒

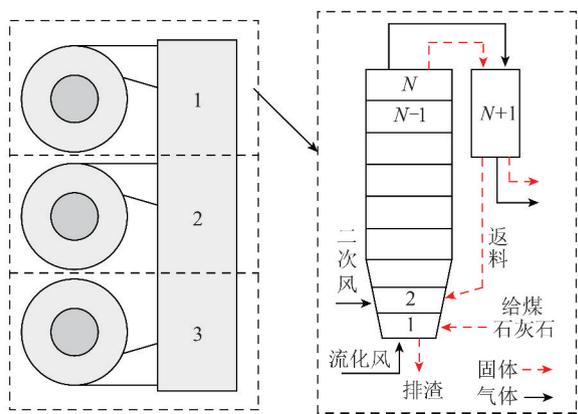


图1 二维小室模型结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of 2-D cell model

度和密度等因素影响。本模型中,假设密相区的颗粒浓度沿高度不变,稀相区颗粒浓度沿高度以指数速度衰减,在足够高的位置为饱和携带浓度<sup>[12,14]</sup>。

$$\varepsilon_k(h) = \varepsilon_{\infty,k} - (\varepsilon_{\infty,k} - \varepsilon_{\text{den},k}) \times \exp[-\alpha_k(h - H_{\text{den}})] \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_k$ 为粒径为 $k$ 颗粒的空隙率; $h$ 为高度; $\varepsilon_{\infty,k}$ 为饱和携带空隙率; $\varepsilon_{\text{den},k}$ 为密相区空隙率; $H_{\text{den}}$ 为密相区高度; $\alpha_k$ 为衰减常数,与风速和颗粒物性有关<sup>[16]</sup>。

图2为质量平衡示意,下标 up、down、h 分别表示向上、向下和水平方向流动。每个小室内的物料均满足质量守恒定律,向上颗粒流率由式(2)<sup>[12]</sup>计算。

$$W_{\text{up}}^{i,j} = A(1 - \varepsilon_h) \rho_s \left( \frac{U_g}{\varepsilon_h} - U_l \right) \quad (2)$$

其中, $A$ 为小室截面积; $\varepsilon_h$ 为高 $h$ 处的空隙率; $\rho_s$ 为床料密度; $U_g$ 为流化风速; $U_l$ 为颗粒终端沉降速度。在横向小室存在压差时,会产生横向气体流动 $W_h$ (采用文献[15]方法计算)。

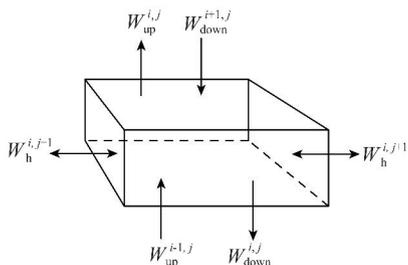


图2 质量平衡示意

Fig. 2 Mass balance in each cell

### 1.3 气固扩散模型

气固横向传质的另一种机理是由于湍动产生气体和固体的横向混合(mixing)与扩散(dispersion)。颗粒和气体混合与扩散问题,是CFB基础研究的重要方向之一。学者们进行了大量试验研究和理论分

析,建立了描述这一问题的基本数学模型。从颗粒浓度的角度来讲,底部密相区( $\sim 0.1$ )和上部稀相区( $\sim 0.002$ )颗粒体积浓度有数量级的差异<sup>[14]</sup>,因此产生径向扩散的机理和特性也不同。

密相区内固体扩散的速率 $\dot{m}_d$ 与浓度梯度成正比,因此将扩散过程描述为

$$\dot{m}_d = -\rho_s D_x \frac{dC}{dx} \quad (3)$$

其中, $D_x$ 为横向扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $C$ 为某组分体积分数, $\text{m}^{-3}$ 。关于 $D_x$ 定量化研究<sup>[17-19]</sup>很多,但扩散系数受床高、流化风速和颗粒性质影响,由于条件差异, $D_x$ 结果分布在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ ,存在数量级差异。气体在密相区的流动通常被认为是形成流动通路,因此横向混合很微弱,在模型中忽略密相区的气体扩散作用。

稀相区的气体扩散,是由于气体湍动引起的。前人研究表明,稀相区扩散系数取值应在 $0.001 \sim 0.006 \text{m}^2/\text{s}$ <sup>[20-21]</sup>。对于大型CFB锅炉建模中的取值,后文将通过实际锅炉的测温结果进一步讨论。稀相区固体扩散主要是由于气体湍动携带造成的,可认为固体扩散系数的值与气体扩散系数相等<sup>[22]</sup>,因此本模型中稀相区气体和固体的扩散使用同一扩散系数描述。

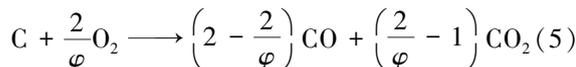
### 1.4 燃烧模型

煤颗粒进入CFB锅炉后,通常会经历升温烘干、挥发分析出及燃烧、膨胀、一次爆裂和焦炭燃烧、二次爆裂和磨损等过程<sup>[4]</sup>。本文采用简化的挥发分析出模型,假设挥发分析出产物中包括 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$ ,挥发分燃烧包括 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 的燃烧。假设不同粒径煤颗粒的挥发分释放规律和该粒径的煤颗粒沿炉膛高度的分布规律相同,即

$$\text{Vol}_p(h,k) = V_p f(h,k) \quad (4)$$

其中, $\text{Vol}_p(h,k)$ 为粒径为 $k$ 的颗粒在炉膛高度 $h$ 处析出的某种挥发分产物的质量; $V_p$ 为某种挥发分产物的总质量; $f(h,k)$ 为粒径为 $k$ 的颗粒沿炉膛高度的质量分布,可以根据质量平衡计算得到。此外,假设挥发分全部在炉膛内燃烧。

焦炭燃烧模型中,假设焦炭颗粒不含灰,且没有内部微孔,则焦炭燃烧反应方程为



其中, $\varphi$ 为机械因子。焦炭燃烧反应速率 $k_c$ 同时受化学反应和氧气扩散的控制,氧气的扩散受风速、温度、浓度、扩散系数等影响。对于直径为 $d_c$ 的焦炭颗粒,燃烧反应速率为

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{k_s} + \frac{d_c}{\varphi Sh D_g} \quad (6)$$

式中,  $D_g$  为氧气扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $k_s$  为化学反应速率,  $\text{s}^{-1}$ , 取决于煤种和温度等;  $Sh$  为舍伍德数。

### 1.5 传热模型

CFB 炉内传热通常由 3 部分组成, 即颗粒对流传热、气体对流传热、辐射传热<sup>[23]</sup>。本模型在计算局部换热系数  $K$  时分别考虑床层热阻  $1/\alpha_{\text{bed}}$ 、工质热阻  $1/\alpha_f$ 、管道金属热阻  $\delta/\lambda$  以及由壁面污染和附加耐火层产生的热阻  $\varepsilon_{\text{ad}}$ 。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{\text{bed}}} + \frac{1}{\alpha_f} + \frac{\delta}{\lambda} + \varepsilon_{\text{ad}} \quad (7)$$

其中, 床向水冷壁的换热由辐射换热和对流换热 2 部分组成, 换热系数受炉膛温度、固体颗粒浓度的影响, 具体计算方法可参考文献<sup>[24]</sup>。

## 2 模型计算结果

计算条件为给煤和给风在 3 个回路中均匀分配, 选取稀相区横向扩散系数为  $0.006 \text{ m}^2/\text{s}$ 。图 3 为通过模型预测的炉膛内压力分布和空隙率分布。与实际锅炉的测量结果对比发现, 压力分布吻合较好。CFB 锅炉“密相区”的高度非常低, 随高度增加, 空隙率迅速增大, 10 m 以上空隙率不再变化。

图 4 为温度沿炉膛高度分布的计算结果, 可知, 炉膛中间回路的温度明显高于两侧回路。在高度方向, 炉膛温度在布风板 10 ~ 20 m 达到最大值, 这是因为在炉膛底部, 由于一、二次风温度远低于炉膛温度, 同时颗粒在炉膛底部燃烧不充分, 导致炉膛温度降低。在炉膛上部, 由于较下部额外布置较多的换热屏, 换热量加大, 因此温度略降低。

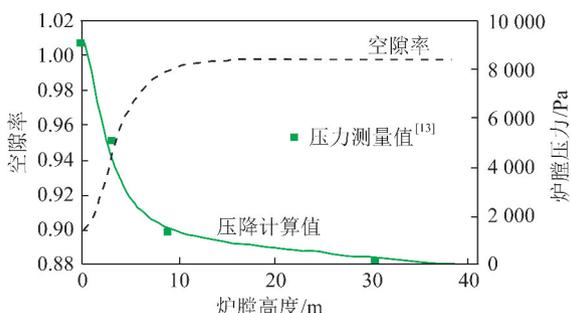


图 3 炉膛压降和空隙率计算与测量结果

Fig. 3 Calculation and experimental results of pressure drop and voidage along the furnace

## 3 炉膛内温度分布影响因素

### 3.1 稀相区扩散能力对炉温分布的影响

稀相区横向气固混合与扩散决定气固流动的横

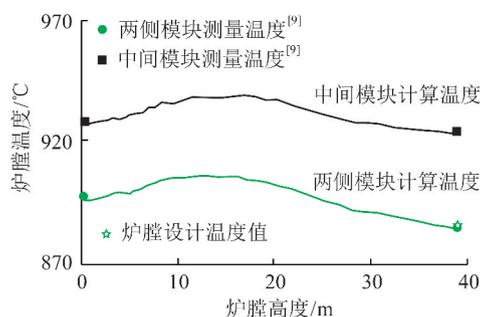


图 4 炉膛温度分布计算与测量结果

Fig. 4 Calculation and experimental results of temperature distribution

向传热传质能力, 因此对于温度分布的均匀性具有重要影响。图 5 为稀相区扩散系数对分离器入口烟温的影响, 在计算中通过改变扩散系数发现, 当扩散系数  $< 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$  时, 温差达到  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 取值不合理; 当扩散系数  $> 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$  时, 温度趋于均匀; 扩散系数在  $0.001 \sim 0.010 \text{ m}^2/\text{s}$  时, 横向温差随扩散系数变化明显。杨建华<sup>[21]</sup>研究表明床径较小时, 床径对横向气体扩散影响大, 扩散能力随床径增加呈线性增加。当床径达到一定尺寸后, 对扩散影响迅速减弱<sup>[18]</sup>。试验室对于气体扩散系数的研究通常在床径为 1 m 量级的试验台进行, 此时炉膛内部湍流尺度小, 横向扩散能力相对较低; 而实际锅炉的床径量级在 10 m 以上, 此时炉膛内湍流尺度增加, 因此扩散系数需合理增大。结合图 4、5 计算结果, 稀相区的扩散系数取值在  $0.006 \sim 0.010 \text{ m}^2/\text{s}$  时, 计算结果较合理。

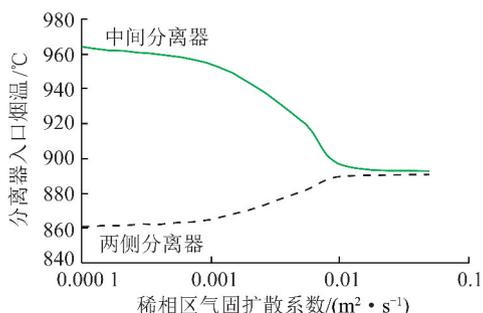


图 5 稀相区扩散系数对分离器入口烟温的影响

Fig. 5 Effect of dispersion coefficient on flue gas temperature

### 3.2 密相区扩散及给煤点布置的影响

锅炉在前墙布风板上高 1 m 的位置布置 8 个给煤点。锅炉运行中, 发现床温呈明显的中间高两边低趋势, 关闭中间给煤点, 结果发现中间温度偏高的现象未明显改善。可能是由于炉膛两侧水冷壁将颗粒冷却, 而大量被冷却的颗粒返混进入密相区, 导致密相区两侧床温较中间低。

模型中稀相区扩散系数为  $0.006 \text{ m}^2/\text{s}$ , 取密相

区扩散系数为  $0.5$ 、 $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$ , 分别计算 3 个回路均匀给煤以及在同样的给煤总量条件下, 只有回路 1 和 3 给煤时 3 个回路的床温分布, 如图 6 所示。

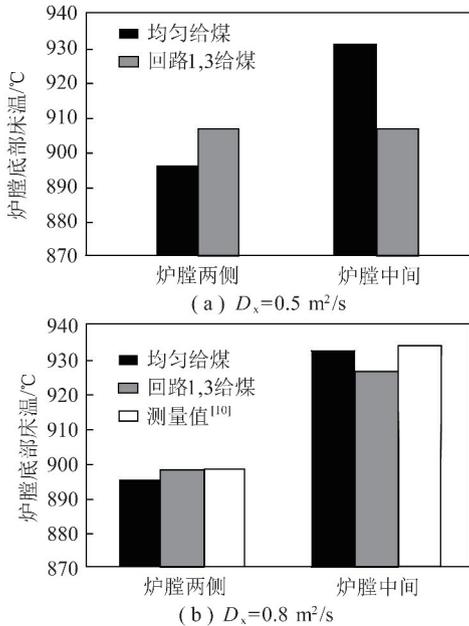


图 6 不同给煤条件下炉膛底部床温分布

Fig. 6 Bed temperature distribution under different coal feeding position

从图 6(a) 可知,  $D_x = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  时, 改变给煤方式后, 床温的不均匀性得到改善。这是由于两侧回路多加的煤粉未扩散到炉膛中间前已燃烧并放出大量的热, 导致两侧温度升高, 中间温度降低。但扩散系数增加到  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$  后, 由于横向混合加强, 由给煤方式变化产生的温度变化较小, 如图 6(b) 所示。本模型中选择  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$  更为接近实际情况。文献 [22] 认为扩散系数在  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  时, 与本模型推断的结果在同一量级, 但相比其他试验结果大很多, 这一方面是由于试验台尺寸限制, 另一方面因为扩散试验大多选择温差示踪法 (如干冰颗粒、热颗粒等), 并需在较低风速下进行, 密相区高度也远低于大型循环流化床锅炉内的高度。

### 3.3 受热面布置的影响

对于实际 300 MW 锅炉, 若按照模型中的回路划分方法, 则炉膛两侧的水冷壁受热面面积比中间水冷壁受热面面积多 15% ~ 30%, 影响了热负荷的均匀性。此外, 2 块宽 3.65 m、高 21 m 的水冷蒸发屏, 分别布置在接近炉膛宽度的三等分点处, 即 3 个回路连接处。在建模中考虑 3 种不同的水冷蒸发屏布置方式: 方案 A, 将 2 个蒸发屏分别布置在回路 1 和回路 3 内, 全部从这 2 个回路中吸收热量; 方案 B, 将 2 个蒸发屏布置在回路交界处, 即分别从 2 个

回路中吸收热量, 这也是实际炉膛的布置方式; 方案 C, 将 2 块水冷屏全部布置在回路 2 内, 热量全部从回路 2 中吸收。对于 3 种不同方案, 中间回路的蒸发受热面吸热面积与两侧回路的比值分别为 0.55、0.85、1.22。图 7 为计算的炉膛出口温度, 密相区和稀相区扩散系数分别取  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$  和  $0.006 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

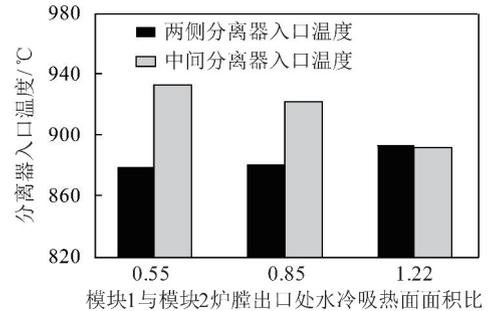


图 7 不同水冷屏布置条件下分离器入口烟温分布

Fig. 7 Temperature distribution under different arrangement of panel heating surface

理论上, 受热面布置对温度的影响决定于横向扩散能力, 横向扩散能力强, 扩散导致的传热和传质作用会减弱由受热面布置带来的温差。从计算结果看, 在给定的扩散系数下, 受热面布置对横向温度分布影响明显, 即实际的扩散能力不足以消除受热面布置带来的温差。

## 4 结 论

1) 建立针对大型 CFB 锅炉的半经验整体模型, 包括炉内气固两相流动、燃烧、传热、密相区和稀相区横向扩散等子模型。模型将炉膛按分离器个数划分面积相等的回路, 考虑回路间气固流动偏差、气固混合和扩散、质量传递以及能量传递。利用该模型计算了某 300 MW 循环流化床锅炉。

2) 利用在实际锅炉测得的数据, 并通过该模型进一步分析了大型 CFB 锅炉炉膛内横向温度偏差的原因, 包括气固扩散能力、受热面布置以及给煤点布置等的影响。认为循环流化床锅炉稀相区气固横向扩散能力有限, 受热面布置不均是导致炉膛上部偏差的主要原因; 在密相区颗粒横向混合扩散能力很强, 在一定程度上消除了给煤不均带来的影响。

3) 通过实际锅炉运行结果及模型分析认为, 对于大型 CFB 锅炉, 由于炉膛截面、床层高度均远大于实验室研究的相应尺度, 因此横向气固扩散系数的取值大于文献中试验研究结果。

### 参考文献 (References):

[1] 岳光溪, 吕俊复, 徐鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状 & 前景分

- 析[J]. 中国电力,2016,49(1):1-13.
- YUE Guangxi,LYU Junfu,XU Peng,et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Electric Power,2016,49(1):1-13.
- [2] 张建春,黄逸群,张曼,等. 煤矸石燃烧过程模型及其在CFB锅炉设计中的应用[J]. 洁净煤技术,2018,24(1):115-120.
- ZHANG Jianchun,HUANG Yiqun,ZHANG Man,et al. Combustion process model of gangue and its application in the design of a circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology,2018,24(1):115-120.
- [3] 宋畅,吕俊复,杨海瑞,等. 超临界及超超临界循环流化床锅炉技术研究与应用[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):338-347.
- SONG Chang,LYU Junfu,YANG Hairui,et al. Research and application of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler Technology[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(2):338-347.
- [4] 柯希玮,蔡润夏,杨海瑞,等. 循环流化床燃烧的NO<sub>x</sub>生成与超低排放[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):390-396.
- KE Xiwei,CAI Runxia,YANG Hairui,et al. Formation and ultra-low emission of NO<sub>x</sub> for circulating fluidized bed combustion[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(2):390-396.
- [5] LIU Xuemin,ZHANG Man,LYU Junfu,et al. Effect of furnace pressure drop on heat transfer in a 135 MW CFB boiler[J]. Powder Technology,2015,284:19-24.
- [6] 胡南,循环流化床锅炉燃烧系统非均匀性问题的模型研究[D]. 北京:清华大学,2013.
- [7] 胡南,李金晶,刘雪敏,等. 大型CFB锅炉床压横向波动的机制研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(20):1-7.
- HU Nan,LI Jinjing,LIU Xuemin,et al. Mechanism study of lateral bed pressure wave of large scale CFB boilers[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(20):1-7.
- [8] 宗琛. 600 MW超临界循环流化床锅炉给煤均匀性研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [9] ZHANG Pan,LYU Junfu,YANG Hairui,et al. Heat transfer coefficient distribution in the furnace of a 300MWe CFB boiler[C]// Proceeding of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Berlin:Springer Berlin Heidelberg,2009.
- [10] 李金晶,龚鹏,吕俊复,等. 给煤对大型CFB锅炉床温均匀性的影响[J]. 热能动力工程,2012,27(1):76-80.
- LI Jinjing,GONG Peng,LYU Junfu,et al. Influence of the coal feed on the bed temperature uniformity of a large-sized CFB boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2012,27(1):76-80.
- [11] WEISS V,FETT F N,HELMRICH H,et al. Mathematical modeling of circulating fluidized bed reactors by reference to solids decomposition reaction and coal combustion[J]. Chemical Engineering and Processing,1987,22(2):79-90.
- [12] 杨海瑞. 循环流化床锅炉物料平衡研究[D]. 北京:清华大学,2003.
- [13] 李少华. 循环流化床锅炉分离器后燃问题研究[D]. 北京:清华大学,2009.
- [14] 胡南,王巍,姚宣,等. 38 m/54 m高循环流化床床内流体动力特性研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(29):7-12.
- HU Nan,WANG Wei,YAO Xuan,et al. Study on gas-solids flow properties in the 38 m/54 m riser of circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(29):7-12.
- [15] YANG H,YUE G,XIAO X,et al. 1D modeling on the material balance in CFB boiler[J]. Chemical Engineering Science,2005,60(20):5603-5611.
- [16] 李金晶,胡南,姚宣,等. 裤衩腿型循环流化床炉膛的翻床实验[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):54-59.
- LI Jinjing,HU Na,YAO Xuan,et al. Experimental study of the bed Inventory overturn in pant-legs furnace of CFB boiler[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2011,40(1):54-59.
- [17] PHILIPP S,JOACHIM W. Solids mixing in the bottom zone of a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology,2001,120(1):21-33.
- [18] 刘道银,陈晓平,唐智,等. 侧面进料在循环流化床密相区混合特性的试验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(3):529-532.
- LIU Daoyin,CHEN Xiaoping,TANG Zhi,et al. Experimental study on the mixing of particles feeding into the Bottom zone of a CFB[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2009,30(3):529-532.
- [19] 胡南,郭兆君,杨海瑞,等. CFB锅炉炉膛内颗粒横向扩散系数研究[J]. 动力工程学报,2016,36(3):168-171.
- HU Nan,GUO Zhaojun,YANG Hairui,et al. Experimental study on lateral dispersion coefficient of solid particles in a CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2016,36(3):168-171.
- [20] NAMKUNG W,KIM S. Radial gas mixing in a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology,2000,113(1):23-29.
- [21] 杨建华. 循环流化床内气体扩散及二次风射流规律研究[D]. 北京:清华大学,2008.
- [22] LUECKE K,HARTGE EU,WERTHER J. A 3D model of combustion in large-scale circulating fluidized bed boilers. [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering,2004,2:1-49.
- [23] 刘鸿,周克毅,徐啸虎,等. 循环流化床炉内传热特性分析[J]. 中国电机工程学报,2004,25(6):215-217.
- LIU Hong,ZHOU Keyi,XU Xiaohu,et al. The heat transfer characteristics of circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2004,25(6):215-217.
- [24] 吕俊复,张建胜,岳光溪,等. 循环流化床锅炉燃烧室受热面传热系数计算方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(2):94-97,101.
- LYU Junfu,ZHANG Jiansheng,YUE Guangxi,et al. Heat transfer coefficient calculational method for a heater in a circulating fluidized bed furnace[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology),2000,40(2):94-97,101.