

基于床层下降的链条炉数值模型与计算

张 品 杜海亮 王 苑 罗永浩
(上海交通大学 热能工程研究所, 上海 200240)

摘 要: 建立了考虑床层下降的链条锅炉二维稳态层燃数值模型, 通过求解床层高度控制方程得到床层高度沿炉排前方向变化的分布, 利用动网格技术实现床层高度的下降。对比层燃模型和单元体炉实验结果, 实验测得燃烧后床层高度为 30 mm, 改进后模型预测值为 26.9 mm, 表明改进后的模型可以更准确地预测床层高度、床层燃烧温度、气体产物分布, 提高了层燃数值模型的计算精度。

关 键 词: 链条炉; 层燃; 数值模拟; 床层下降

中图分类号: TK229. 6; O242 文献标识码: A

符号说明

- ρ ——气相或固相密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 u ——气相或固相速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 C_p ——比热/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
 D_c ——炉膛边界区域特征长度/ m
 h ——床层高度/ m
 R ——反应速率/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
 H ——焓/ J
 m ——颗粒质量/ kg
 M ——组分源相/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
 S ——质量源相/ m^{-1}
 T ——反应温度/ K
 d ——颗粒直径/ m
 v ——球壳体积/ m^3
 Y ——质量分数
 λ_{eff} ——固体有效导热率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
 k_r ——动力燃烧速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_m ——气膜扩散速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_{ash} ——灰层扩散速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 $C_{w,s}$ ——固体表面的水汽密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 $C_{w,g}$ ——气相中水汽密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 D_m ——表面传质系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 α ——每摩尔氧气消耗的焦炭摩尔量
 M_{char} ——焦炭分子量
 M_{O_2} ——氧气分子量
 σ ——斯蒂芬孙-玻尔兹曼常数
下标
 g ——气相 n ——表层球壳
 i ——固相组分 s ——固相
 j —— x, y, z 三个方向 vol ——挥发分

引 言

现有燃煤链条锅炉效率比较低, 平均在 65% 左右, 具有 10% ~ 15% 的节能潜力^[1~2], 主要原因包括设备较为落后、煤种与设计、运行参数不匹配、司炉工运行水平低等, 因此建立燃煤链条锅炉层燃模型是指导链条锅炉设计和优化运行, 以提高其效率的重要手段。层燃过程中会发生一系列复杂的物理化学过程, 其中床层高度也会随着燃烧的进行发生改变, 为了更加准确地模拟实际链条炉中床层高度随反应下降的特性, 就需要建立床层高度控制方程, 准确模拟链条炉中床层的燃烧特性。

目前, 建立的层燃数值模型中, 相关研究者均采用一维非稳态的方法来模拟二维的床层的燃烧过程^[3~5], 均考虑了床层高度随反应的变化。Yang 利用数值模型模拟城市垃圾在固定床上的燃烧^[6], 并分析了一次风的流量、颗粒大小和燃料中水分的含量对引燃、燃烧速率、床层表面气体组成的影响。这些模型均采用一维的非稳态模型来模拟二维的床层燃烧, 二维模型通常认为床层高度不变, 这与实际情况差别较大。为了模拟出链条炉中炉拱对床层的辐射以及对炉内气流场、温度场的影响, 就必须建立二维的层燃数值模型, 本研究开发了二维稳态数值模型来模拟链条锅炉的层燃过程^[7~8], 模型实现了对煤层和炉膛的气体组分、温度、速度等的初步计算。在此基础上进一步考虑了床层下降对链条炉燃烧的影响, 通过求解床层高度控制方程得到床层高度沿炉排变化的分布, 将改进的模拟结果与单元体炉的实验结果进行验证。

1 链条锅炉层燃模型

链条炉层燃模型包括床层燃烧和炉膛燃烧两部分。床层燃烧模型主要描述床层中气相和固相的守

收稿日期: 2011 - 07 - 14; 修订日期: 2011 - 11 - 03

作者简介: 张 品 (1988 -), 男, 江苏靖江人, 上海交通大学博士研究生。

恒关系和质量、能量交换以及表征气体和煤燃烧过程 如水分析出、挥发分析出和焦炭燃烧。

1.1 固相控制方程

固相是床层建模的重点,固相质量和组分(水分、挥发分和焦炭)守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s u_{j,s}) = -S_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s u_{j,s} Y_{i,s}) = -M_{i,s} \quad (2)$$

式中: $M_{i,s}$ 分别对应由于水分析出、挥发分析出和焦炭燃烧失去的质量; S_s 是 3 个组分失去的质量之和。能量守恒方程基于大颗粒煤燃烧的特点,建立了考虑颗粒内部温度梯度的离散模型。将颗粒划分为十层,颗粒表层球壳的能量守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s v_n u_s \bar{C}_{p,n} T_n) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{s,eff} \frac{\partial T_n}{\partial x_j} \right) =$$

$$Q_{rad,ss} - Q_{cond} - Q_{conv} - Q_{rad,sg} - H_s + Q_{ss} \quad (3)$$

方程右侧源相包括固相之间辐射换热量、表面球壳传导给次表面球壳的热量、气固对流换热量、气固辐射换热量、固体析出气体进入气相的携出焓以及固体燃烧异相反应进入固相的热量。内层球壳考虑导热作为唯一源相。

1.2 气相、固相物理化学过程模型

煤燃烧的物理化学过程主要分为 3 个过程,即水分析出、挥发分析出与燃烧,焦炭燃烧与气化。

1.2.1 水分析出

水分蒸发是煤燃烧的第一步,其过程可分为两个步骤。物理分析可知,在环境温度小于 100 °C 时,受到传质控制,当环境温度大于 100 °C 时,吸收的热量直接使得水分蒸发,因此水分蒸发速率表述为:

$$R_{water} = \begin{cases} S \cdot D_m (C_{w,s} - C_{w,g}) & T_n < 100 \text{ } ^\circ\text{C} \\ Q/H_{evp} & T_n \geq 100 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

1.2.2 挥发分析出与燃烧

挥发分析出速率 R_{vol} 根据一阶反应来计算:

$$R_{vol} = A \exp \left(-\frac{E}{RT_s} \right) \rho_s Y_{vol} \quad (5)$$

其中 A 和 E 分别代表挥发分析出的指前因子和活化能,数值由热重分析得到。

挥发分析出后的燃烧速率受反应速率和气体混合速率的影响,表示为 $R = \min(R_{lam}, R_{min})$,其中 R_{lam} 为层流反应速率, R_{min} 为气体混合速率^[9]。

1.2.3 焦炭燃烧子模型

焦炭燃烧是煤燃烧过程中的主要部分。基于缩核模型,焦炭的反应活性主要取决于化学反应速率、

气膜扩散速率和灰层扩散速率^[10],即:

$$R = \frac{M_{char} \alpha S}{M_{O_2}} \rho_{O_2} Y_{O_2} \frac{1}{k_r^{-1} + k_m^{-1} + k_{ash}^{-1}} \quad (6)$$

1.3 床层高度控制方程

取沿炉排方向 x 处的一个床层高度为 h 的窄片,推导示意图如图 1 所示。

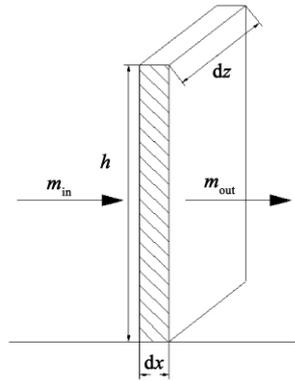


图 1 床层高度控制方程推导图

Fig. 1 Illustration showing the derivation of the bed height control equation

其左端进入的固体质量为:

$$m_{in} = \rho_s U_{x,s} (h \cdot dz) \quad (7)$$

右端带出的固体质量为:

$$m_{out} = m_{in} + \frac{\partial m_{in}}{\partial x} dx = \rho_s U_{x,s} (h \cdot dz) + \frac{\partial}{\partial x} [\rho_s U_{x,s} (h \cdot dz)] dx \quad (8)$$

该窄片内的固体由于化学反应而获得的质量源项为:

$$S = - \int_0^h \left(\sum_{i=1}^3 R_{i,s} dx \cdot dz \right) dy \quad (9)$$

根据质量守恒 $m_{out} - m_{in} = S$ 得到:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_s U_{x,s} h) = - \int_0^h \left(\sum_{i=1}^3 R_{i,s} \right) dy \quad (10)$$

结合固相连续方程: $\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_s U_{j,s}) = - \sum_{i=1}^3 R_{i,s}$, 展开并简化得到:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_s U_{x,s} h) = \int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial y} (\rho_s U_{y,s}) \right] dy = \int_0^h d(\rho_s U_{y,s}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_s U_{x,s} h) = \rho_s U_{y,s} |_{y=h} \quad (12)$$

式(12)即为与固相竖直方向速度建立关联的床层高度控制方程。通过求解床层高度的控制方程,可以得到每一步迭代结束后其床层高度随炉排前进方向的分布。

炉膛燃烧采用了 $k-\varepsilon$ 模型描述气相湍流运动; 采用 $P-1$ 模型描述气相辐射; 采用有限速率/涡扩散模型描述气相燃烧。床层和炉膛之间通过辐射换热和对流换热耦合计算。详细模型描述参见文献 [7]。

2 单元体炉实验

为了对模型进行验证, 搭建了层燃单元体炉实验台。二维稳态模型用欧拉法描述链条锅炉燃烧特征, 单元体用拉格朗日法描述链条锅炉燃烧特征, 两者相互对应。

层燃单元体炉实验台由 3 部分组成: (1) 单元体炉实验主体; (2) 数据采集装置; (3) 风机装置。层燃单元体炉如图 2 所示。炉体分上下两部分。单元体炉下部放置煤床, 长、宽、高均 20 cm。设置 4 个抽气孔, 最上部用于抽取床层表面烟气成份, 其余 3 个分别用于测量床层表面温度、床层中间温度。空气由罗兹风机通过流量计控制自下方送入单元体炉。煤床上方相隔一段距离是电加热装置和隔热板。待电加热装置将上方封闭空间加热至一定温度后, 抽离隔热板, 高温辐射作用引燃煤层, 这种设计可以模拟实际链条锅炉中煤层进入炉膛后受到高温炉拱辐射的引燃状况。

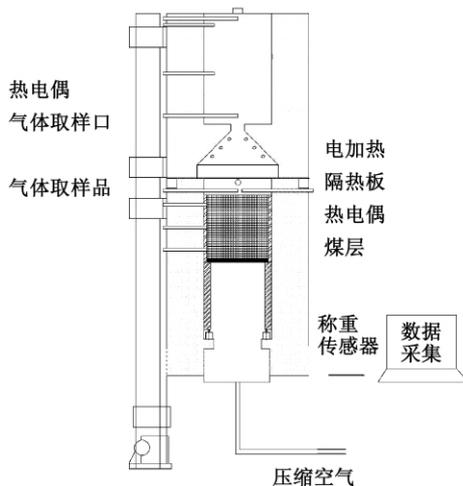


图 2 层燃单元体炉示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a laminar combustion unit boiler

实验采用武汉四方光电科技有限公司生产的红外烟气分析仪 GASBOARD - 3100 系列对床层表面

CH_4 , H_2 , CO , CO_2 和 O_2 5 种气体组分进行在线连续测量。该仪器基于电化学和气体对红外光吸收的朗伯-比尔定律, 测量精度为 $< 2\%$ FS。床层不同高度的温度通过插入煤层的(铂铑) PtRh/Pt 热电偶进行测量。

选择神木烟煤进行实验, 其成份分析如表 1 所示。

表 1 神木煤的工业分析

Tab. 1 Industrial analysis of Shenmu-originated coal

煤种	工业分析/%				元素分析/%					热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	S_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$Q_{\text{net, ar}}$
神木	12.13	8.80	28.26	50.81	63.80	4.27	0.21	1.32	9.47	24.21

实验前对原煤进行筛选, 选取 10 ~ 20 mm 的颗粒进行实验, 煤层厚度为 0.1 m。将煤放入单元体炉的煤床中, 在煤层上方空间开始电加热并通过隔热板与煤层分隔, 待其温度加热到 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上后, 抽离隔热板, 使煤层受到高温辐射引燃, 同时记录床层表面气体组分以及不同高度的温度数据。取过量空气系数为 2, 按照煤完全燃烬所需的时间 70 min 进行配风, 其配风方式如图 3 所示。

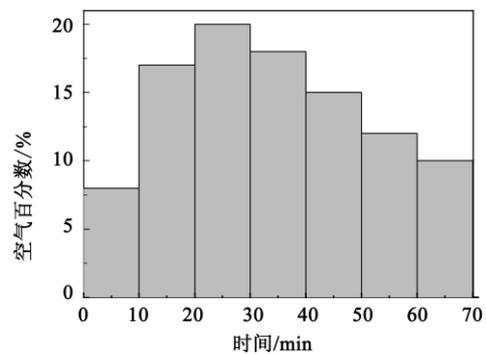


图 3 神木烟煤的配风方式

Fig. 3 Air distribution mode of Shenmu-originated bituminous coal

3 结果和讨论

在层燃单元体炉实验的工况下, 对神木烟煤进行模拟。粒径取实验平均值 15 mm。神木煤的反应工况与实验值相同; 炉排速度根据实验的燃烬时间计算, 为 0.00143 m/s; 配风方式前述所示。床层不下降和床层下降的计算结果与实验测试的床层表面气体分布、表面温度和床层中部 0.03 m 处温度对比如图 4 所示。

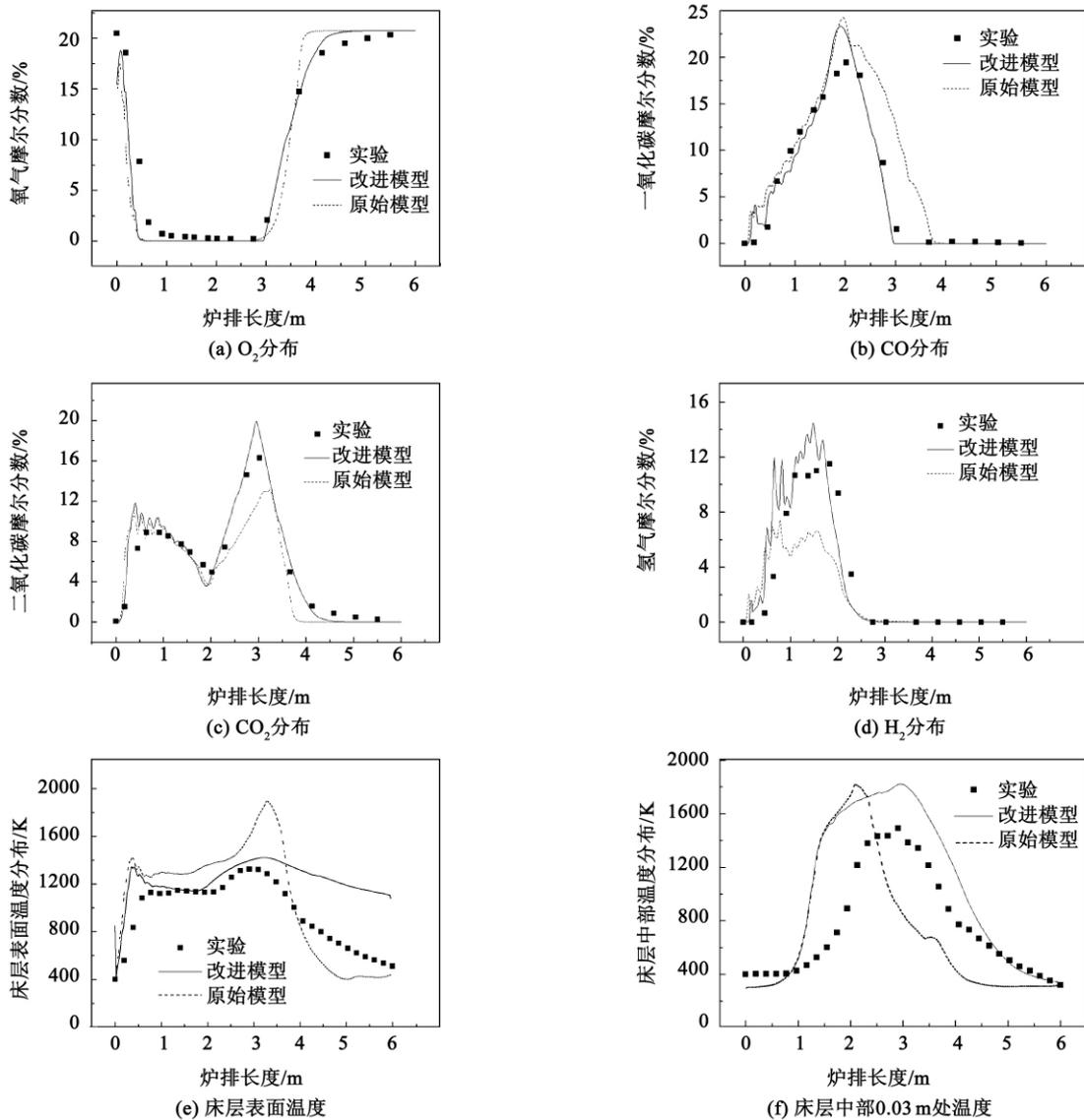


图 4 改进前后床层表面温度、气体分布和床层中部温度的模拟结果与实验结果对比

Fig. 4 Contrast of the simulated results and the test ones of the bed surface temperature gas distribution and temperature in the middle of the bed before and after the improvement

层燃模型计算得到的床层表面的组分浓度分布符合层燃理论中气体分布特征: 二氧化碳曲线有两个峰, 中间部分呈马鞍形下陷, 对应床层燃烧最剧烈的区域; 一氧化碳曲线有一个峰, 处于二氧化碳曲线最小值的垂直线上; 氧气曲线的最小值也在此处。

通过表面气氛的对比结果表明: 相对于未考虑床层下降的模型而言, 考虑床层下降的模型能更好地描述煤层的燃烧过程。引燃区, 两个模型和实验对比比较吻合, 但是到了后部, 差别逐渐增大。这是由于, 在引燃区, 大部分煤颗粒还没完全燃烧, 颗粒直径没有发生太大的变化, 孔隙率变化不是很大, 仍然是初始孔隙率, 两个模拟结果相差不是很大。

但是, 随着反应的进行, 煤颗粒越来越小, 考虑床层下降的模型, 由于孔隙率假设不变, 其床层高度随反应的进行下降, 而原始模型中, 床层高度不变, 其孔隙率随着反应的进行逐渐增大。根据多孔介质的气相动量方程, 改进模型中, 多孔介质中床层阻力引起的动量损失相对原始模型较大, 床层下部的空气难以穿透床层, 气固对流换热小, 床层的保温效果好, 尾部氧量的回升较为缓慢。

对比表面温度和煤层中部温度, 在床层燃烧前部, 改进前后模型相差并不大, 这是因为在引燃区, 颗粒没有完全燃烧, 煤层孔隙率变化不大, 传热传质过程相差不大; 随着反应进行, 床层孔隙率增大, 气

体穿过床层阻力减小,床层中氧气浓度增大,煤在短时间内迅速燃烧,燃烬时间缩短,高温区提前。由图中可以发现,模拟的床层温度略高于实验床层温度,这可能是由于以下原因造成:(1)模型认为焦炭在整个反应的指前因子和活化能不发生变化,但实际上随着反应经历高温过程,焦炭晶格发生变化,反应活性下降^[11],模型预测的反应速率略高于实际情况,反应放热高于实验,所以温度高;(2)模型不考虑漏煤和飞灰含碳损失,导致模型和实验进煤量边界条件相同时,实际参与床层燃烧的煤量不同;(3)实验中的少许漏风会使炉膛温度降低,而模型中则不考虑漏风。

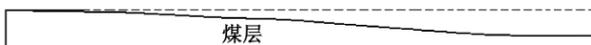


图 5 改进前后模型预测的床层高度变化

Fig. 5 Change in the bed height predicted by using the model before and after the improvement

图 5 为改进前后模型预测的床层高度对比,虚线为改进前模型预测的床层高度,由于模型没有考虑床层高度的变化,随着反应的进行床层高度没有发生变化;实线为改进后模型预测的床层高度分布,模型预测燃烧后床层高度为 26.9 mm,单元体炉实验测得燃烧后床层高度为 30.0 mm。模型预测和实验还存在误差,主要可能是由于模型假设床层孔隙率不随反应的进行而发生变化,但是实际反应过程中可能发生灰熔融和结焦,燃烧后期孔隙率发生变化。

4 结 论

建立了二维稳态层燃数值模型,通过求解床层高度控制方程得到床层高度沿炉排前进方向变化的分布,利用动网格技术实现床层高度的下降。为了校核层燃模型计算结果搭建了层燃单元体炉实验台,通过对比单元体炉实验与模拟的床层高度、灰渣含碳量、床层表面气体氛围和温度可以发现:

(1) 考虑床层下降的二维稳态层燃模型能更好地模拟煤层在链条上的燃烧过程。实验测得燃烧后床层高度为 30.0 mm,改进后模型预测为 26.9 mm。实验测得燃烧后的灰渣含碳量是 7.39%,改进前后灰渣含碳量分别为 11.51% 和 7.21%。改进的模型能更加准确的模拟实际链条炉中床层随反应下降和

床层的燃烧特性。

(2) 利用改进的工业锅炉层燃模型对实际锅炉进行建模和数值计算,能更好的指导工业锅炉设计和改造,提高其运行效率,减少污染物排放。

参考文献:

[1] 李俊东,韩殿营,李耀荣,等.在用燃煤链条炉排锅炉的节能改造[J].工业锅炉,2010(2):20-24.
LI Jun-dong, HAN Dian-ying, LI Yao-rong, et al. Energy-saving modification of a coal-fired boiler with a chain stoker currently being used [J]. Industrial Boiler, 2010, 2: 20-24.

[2] 何心良.我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨[J].工业锅炉,2010(3):1-8.
HE Xin-liang. Exploratory study of the status quo concerning the use of industrial boilers in China and energy-saving and emissions reduction countermeasures [J]. Industrial Boiler, 2010, 3: 1-8.

[3] Kaer S K. Numerical modelling of a straw-fired grate boiler [J]. Fuel, 2004, 83(9): 1183-1190.

[4] Zhou H, Jensen A D, Glarborg P, et al. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed [J]. Fuel, 2005, 84(4): 389-403.

[5] Wurzenberger J C, Wallner S, Raupenstrauch H, et al. Thermal conversion of biomass: comprehensive reactor and particle modeling [J]. AIChE Journal, 2002, 48(10): 2398-2411.

[6] Yang Y B, Sharifi V N, Swithenbank J. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds [J]. Fuel, 2004, 83: 1553-1562.

[7] 季俊杰.燃煤链条锅炉燃烧的数值建模及配风与炉拱的优化设计[D].上海:上海交通大学,2008.
JI Jun-jie. Numerical modeling of the combustion in a coal-fired chaingrate boiler and optimized design of its air distribution and furnace arc [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.

[8] 王苑,张品,林鹏云,等.链条炉飞灰沉积的数值模型与计算[J].热能动力工程,2011,26(2):207-211.
WANG Yuan, ZHANG Pin, LIN Peng-yun, et al. Numerical model for flying ash deposition in a chain grate boiler and calculation [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(2): 207-211.

[9] 赵坚行.燃烧的数值模拟[M].北京:科学出版社,2002.
ZHAO Jian-xing. Combustion numerical simulation [M]. Beijing, Science Press, 2002.

[10] 斯穆特 L D,史密斯 P J.煤的燃烧与气化[M].傅维标,译.北京:科学出版社,1992.
Smute L D, Smith P J. Coal combustion and gasification [M]. Translated by: FU Wei-biao. Beijing: Science Press, 1992.

[11] 林鹏云,王苑,张品,等.典型烟煤热解焦炭结构特性的实验研究[J].煤炭转化,2010(3):68-71.
LIN Peng-yun, WANG Yuan, ZHANG Pin, et al. Experimental study of structural characteristics of pyrolytic coal coke of typical bituminous coal [J]. Coal Transformation, 2010(3): 68-71.

(陈滨 编辑)

基于床层下降的链条炉数值模型与计算 = **Numerical Model and Calculation of a Chain-grate Stoker Based on a Descending of the Bed** [刊 汉]ZHANG Pin ,DU Hai-liang ,WANG Yuan ,LUO Yong-hao (Thermal Energy Engineering Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 324 ~ 328

A grate-firing model for chain grate stokers is an effective means for studying the mechanism governing the grate combustion. On this basis ,established was a two-dimensional steady-state grate-firing numerical model for chain grate stokers with a descending of the bed being considered. By seeking a solution to the bed height control equation ,obtained was the distribution of the bed heights varied along the going-forward direction of the chain grate. By utilizing the moving grid technology ,the descending of the bed was realized. Through a comparison of the results obtained by using the grate-firing model and those obtained from a test of a unit body boiler ,the bed height measured during the test after the combustion was 30 mm while the predicted value by using the model in question after an improvement was 26.9 mm ,indicating that the improved model can predict more accurately the bed height ,bed combustion temperature and distribution of the gas product ,thus ,enhancing the calculation precision by using the grate-firing numerical model. **Key words:** chain grate stoker ,grate firing ,numerical simulation ,bed descending

固气比对超浓相煤粉气力输送流型影响的模拟 = **Simulation of the Influence of the Solid/gas Ratio on the Super-dense Phase Pulverized Coal Pneumatic Transmission Flow Pattern** [刊 汉]PENG Xiao-min ,ZHU Li-ping ,YUAN Zhu-lin (College of Energy Source and Environment ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 329 ~ 335

In the light of the critical problems existing in the current dense phase pneumatic transmission numerical simulation process ,presented was a mathematical model depicting the influence of the interaction inside the solid phase on the movement of the particles. The model in question was based on the discretion particle model ,enabling it to simulate both sparse phase particle movement of a suspended flow and the super-dense phase gas-solid two phase flow when a build-up takes place inside tubes. By utilizing the mathematical model thus established ,the high pressure super-dense phase pulverized coal pneumatic transmission particle flow process was numerically simulated and the simulated results revealed the typical flow pattern characteristics of a slug flow and sand hill flow etc. and the evolution law of their flow patterns with the solid/gas ratio. Moreover ,the simulated results were verified in combination with the test. The fluctuation nature of the slug flow during a transmission process in pipelines is relatively conspicuous and the fluctuation frequency tends to be converted to a high frequency. The average slug flow length will increase with an increase of the solid/gas ratio of the feed. **Key words:** super dense gas-solid two-phase flow ,flow pattern ,solid/gas ratio ,particle movement ,transmission