

链条炉分层燃烧的数值模型与计算

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: 针对分层燃烧的特点在单粒径模型基础上建立了双粒径链条锅炉层燃模型 ,并在实际锅炉上进行实验验证 ,双粒径模型能更好地模拟安装分层煤斗后煤层的燃烧特性。利用改进后的双粒径模型来模拟普通煤斗和分层煤斗的进煤方式对燃烧的影响 ,结果表明: 双粒径模型能很好地模拟出大、小颗粒同时存在时床层的燃烧特性 ,分层堆叠的方式有利于煤层的引燃并加强燃尽 ,分层燃烧的灰渣含碳量是 9.54% ,混合燃烧的灰渣含碳量是 15.81%。

关 键 词: 链条炉; 分层燃烧; 层燃模型; 双粒径模型

中图分类号: TK224. 1: O242 文献标识码: A

符号说明

- ρ ——气相或固相密度 kg/m^3
 - ε ——孔隙率
 - U ——气相或固相速度 m/s
 - S ——质量源相 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
 - Y ——质量分数
 - $D_{g, \text{eff}}$ ——气相有效扩散系数 m^2/s
 - M ——组分源相 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
 - C_p ——比热 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 - λ_{eff} ——固体有效导热率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 - D_m ——气膜扩散速率 μ/s
 - T ——反应温度 K
 - H ——焓 J
 - Q ——热量交换量 J
 - R ——反应速率 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
 - d ——颗粒直径 μm
 - m ——颗粒质量 kg
 - v ——球壳体积 μm^3
 - k_r ——动力燃烧速率 μ/s
 - f ——颗粒体积占网格体积的比例
 - V ——网格体积 μm^3
 - V' ——大小颗粒体积之和, m^3
 - r ——球体半径 μm
- 下标
- g——气相
 - s——固相
 - i——固相组分
 - j——xy 二个方向

- L——大颗粒
- S——小颗粒
- rad——辐射
- conv——对流
- cond——导热

引 言

我国的能源结构中 ,煤是主要的化石能源 ,2010 年煤炭占能源消费总量的比重为 76.5%^[1]。燃煤工业锅炉是我国主要煤炭利用方式之一^[2]。现有燃煤链条锅炉效率比较低 ,平均实际运行效率在 70% 左右 ,具有 10% ~ 15% 的节能潜力^[3]。

链条炉运行时 ,普通煤斗给煤通常存在以下问题: (1) 进入炉中的煤层比较密实; (2) 煤层都是由大小颗粒不等的煤粒混合在一起构成; (3) 煤经过输煤装置送至储煤仓时 ,块状煤易向两侧滚动 ,常造成两侧块煤多而中部细碎煤粒较多。上述问题造成煤层密实、孔隙小、通风不均匀 ,机械不完全燃烧损失大 ,锅炉效率低。国内企业对在用的工业锅炉加装了分层煤斗 ,得到很好的节煤效果 ,但很少有从理论对分层给煤方式对床层燃烧的影响进行深入的分析。

为了研究给煤方式对燃烧的影响 ,需要借助层燃数值模型 ,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 ,Yang、Thunman 和 Ling 等人基于层燃模型考虑了不同颗粒大小的生物质和垃圾对燃烧的影响^[4-6] ,没有考虑大小颗粒同时存在时对燃烧的影响。上海交通大学季俊杰开发了二维稳态单粒径的层燃数值模型来模拟链条锅炉的层燃过程^[7-8] ,模型使用的颗粒粒径是所有粒径的加权平均 ,在整体特性上可以反映出相同进煤量的实际颗粒燃烧过程 ,但主要还是反映中等颗粒的燃烧特性 ,无法模拟使用分层煤斗后 ,大小颗粒分

收稿日期: 2012 - 04 - 01; 修订日期: 2012 - 05 - 07

基金项目: 上海市科委科技攻关项目(10D20510400)

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

层堆叠的燃烧机理。

本研究在前人研究的基础上开发了双粒径模型,用于模拟大小颗粒分层燃烧,并在实际锅炉上进行实验验证。用双粒径模型来模拟普通煤斗和分层煤斗的进煤方式对燃烧的影响。

2 双粒径层燃数值模型的建立

链条炉层燃模型包括床层固相燃烧和炉膛气相燃烧两部分,其中床层燃烧是建模的重点^[7]。

图 1 显示了由单粒径模型到双粒径混合分布模型再到双粒径分层分布模型的床层颗粒建模过程。双粒径模型基于单粒径模型,炉膛以及床层和炉膛耦合的建模不变,仅对于床层模型根据双粒径的特点进行建模,重点在于:分别对大、小颗粒建立固相守恒方程;使用单粒径的物理、化学子模型,模型参数针对大小颗粒不同而变化;最后通过边界条件实现颗粒的分层分布。

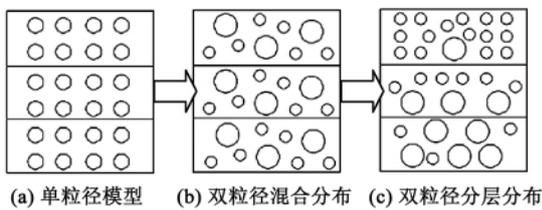


图 1 双粒径模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a dual particulate diameter model

模型假设如下:

- (1) 大、小两种颗粒粒径模拟分层燃烧;
- (2) 大颗粒质量分数沿床层高度由大到小线性分布,小颗粒质量分数沿床层高度由小到大线性分布,床层孔隙率沿床层高度由大到小线性分布;
- (3) 床层高度不变。

2.1 床层控制方程

在床层高度不变也即网格体积不变的情况下,颗粒质量的减少可以用床层孔隙率的变化表征。因此,首先推导大小颗粒瞬时质量分数与孔隙率的关系。网格中大颗粒的孔隙率 $\varepsilon_L = 1 - V_L/V$,小颗粒的孔隙率 $\varepsilon_S = 1 - V_S/V$,床层孔隙率 $\varepsilon = 1 - V'/V$,因为 $(V_L + V_S)/V = (1 - \varepsilon_L) + (1 - \varepsilon_S) = V'/V = 1 - \varepsilon$,因此 $\varepsilon = \varepsilon_L + \varepsilon_S - 1$ 。又因为 $V_L/V_S = f_L/f_S = (1 - \varepsilon_L)/(1 - \varepsilon_S)$,所以 $f_L = (1 - \varepsilon_L)/(1 - \varepsilon)$, $f_S = (1 -$

$\varepsilon_S)/(1 - \varepsilon)$ 。

床层气相控制方程与单颗粒的类似,不同之处在于控制方程来自固相的源项包括了大、小颗粒两部分:

连续方程:

$$\frac{\partial(\rho_g U_{jg})}{\partial x_j} = S_{sL} + S_{sS} \tag{1}$$

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g U_{jg} Y_{ig}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g D_{g,eff} \frac{\partial Y_{ig}}{\partial x_j}) = M_{ig} + M_{i,sL} + M_{i,sS} \tag{2}$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_g \bar{C}_{pg} U_{jg} T_g) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda_{g,eff} \frac{\partial T_g}{\partial x_j}) = Q_g + Q_{convL} + Q_{convS} + Q_{rad,sgL} + Q_{rad,sgS} + H_{sL} + H_{sS} + Q_{sgL} + Q_{sgS} \tag{3}$$

床层固相控制方程需要分别针对大、小颗粒列出两套控制方程,以大颗粒为例:

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s U_{jsL}) = -S_{sL} \tag{4}$$

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s U_{jsL} Y_{isL}) = -M_{isL} \tag{5}$$

中间球壳的离散化能量控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s r_{iL}^2 U_{chain} \bar{C}_{p,iL} T_{iL}) = \frac{\lambda_{i+1L} r_{i+1L}^2 - \lambda_{i-1L} r_{i-1L}^2}{2 \Delta r_L} \frac{T_{i+1L} - T_{i-1L}}{2 \Delta r_L} + \lambda_{iL} r_{iL}^2 \frac{T_{i+1L} - 2T_{iL} + T_{i-1L}}{\Delta r_L^2} \quad (1 \leq i \leq n-1) \tag{6}$$

最内层球壳能量控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s U_{chain} \bar{C}_{p,0L} T_{0L}) = q_0 \tag{7}$$

最外层球壳能量控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_s v_{nL} U_{s,jL} \bar{C}_{p,nL} T_{nL}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda_{s,effL} \frac{\partial T_{nL}}{\partial x_j}) = Q_{rad,ssL} + Q_{condL} - Q_{convL} - Q_{rad,sgL} - H_{sL} + Q_{ssL} \tag{8}$$

分层燃烧时的边界条件主要描述进煤颗粒的分布特征以及床层孔隙率的分布的特征。分层煤斗使床层形成如图 1(c) 中的分布,因此假设床层孔隙率沿床层高度由大到小线性分布,大颗粒质量分数沿床层高度由大到小线性分布,小颗粒质量分数沿床层高度由小到大线性分布。

3 实验验证与建模

为了对模型进行验证,应用改进后的双颗粒模型和改进前的单颗粒模型进行计算,并将模型预测结果和上海某机器制造厂一台已安装分层煤斗的 20 t/h 链条锅炉进行对比分析。

选定该锅炉进行测试,锅炉燃用动力 2 号煤,其工业分析如表 1 所示。链条炉排长 6 m,具有 7 个风仓,水平双侧进风,在煤层表面测量烟气中 O_2 、 CO_2 、 CO 浓度。测量设备如图 2 所示,在各测点伸入水冷采样钢管,后接 JCP-SL96 烟气预处理器,对烟气进行脱水、降温、过滤使湿热的烟气变为干燥、常温的烟气;烟气经过预处理后送入 GasBoard-3150 气体分析仪进行检测。

表 1 动力 2 号煤的工业分析

Tab. 1 Industrial analysis of 2# power coal

煤种	工业分析 /% (ar)				热值 / $MJ \cdot kg^{-1}$ $Q_{net,ar}$
	M	A	V	FC	
动力 2 号	9.54	23.16	23.1	44.2	20.42

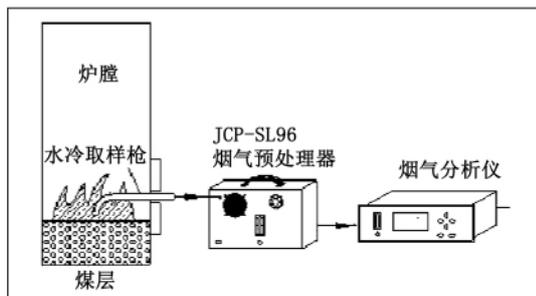


图 2 现场实验测试设备图

Fig. 2 Drawing of on-the-spot test facility

炉体建模如图 3 所示,炉排长度为 6 m,共计 33 494 个网格,最下部设置为空气入口边界条件,最右边为灰出口边界条件,最左边为煤入口边界,锅炉右上角为炉膛压力出口。模型计算煤种采用实际锅炉所燃用的动力 2 号煤。边界条件参数采用实际锅炉运行参数:床层厚度 0.1 m,过量空气系数 2,炉排速度按煤从煤斗落到炉排上到最后落入灰斗的时间 50 min: 选取 0.002 m/s。

双粒径分层燃烧模型边界条件满足:对实际锅炉燃用的煤颗粒进行粒径筛分,大颗粒粒径取大块颗粒的平均值 0.03 m,小颗粒粒径取小块颗粒的平

均值 0.01 m,煤入口大颗粒的质量分数由下至上从 0.8 到 0.2 线性变化;小颗粒的质量分数由下至上从 0.2 到 0.8 线性变化;床层初始孔隙率由下至上从 0.25 到 0.15 线性变化。单粒径模型颗粒粒径取平均值 0.02 m,床层孔隙率取 0.2。

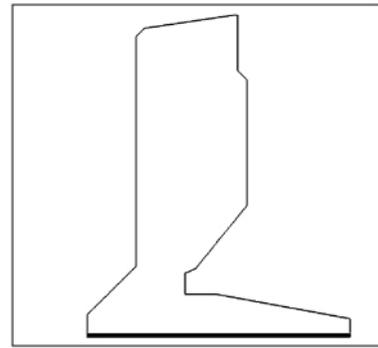


图 3 某用户的链条锅炉实炉建模

Fig. 3 Modeling of a real chain grate boiler for a client

双粒径模型和单粒径模型计算的床层表面 O_2 、 CO_2 、 CO 摩尔分数分布如图 4 所示。通过表面气氛的对比结果表明:相对于单粒径模型,改进后的双粒径模型由于存在大、小两种粒径,更能模拟实际锅炉采用分层煤斗的燃烧情况,模型的计算结果能更好的描述煤层的燃烧结果。如图 4 所示,单粒径模型整个燃烧过程都比双粒径缓慢。图 4(a) 中的氧气浓度分布,双粒径的计算结果在床层前部引燃提前是小颗粒煤引燃的特征,而床层后部氧气回升缓慢是大颗粒煤燃尽的特征;单粒径模型由于采用大小颗粒的平均粒径,前部引燃比双粒径模型缓慢,后部燃尽也比双粒径模型缓慢,这是由于单粒径模型反映的是中等颗粒的燃烧特性。图 4(b) 可以看出双粒径模型 CO_2 的两个最高峰都较单粒径提前,说明双粒径模型能更好模拟出大小颗粒同时存在时,床层燃烧的特性。

4 结果和讨论

为了研究不同的给煤方式对燃烧的影响,应用改进后的双粒径模型对煤颗粒堆叠方式不同时的燃烧情况进行模拟,分析分层煤斗的给煤方式优于普通煤斗的原因。分层燃烧边界条件仍采用前面中提到的边界条件。混合燃烧的边界条件为:煤入口大颗粒进煤量和小颗粒进煤量各占 50%,床层孔隙率均为 0.2。

大小颗粒分层分布和混合分布的床层表面的 O_2 、 CO_2 、 CO 摩尔分数和床层中间的温度分布如图 5 所示。图 5(a) 中的氧气浓度分布,在床层前部引燃提前是小颗粒煤引燃的特征,而床层后部氧气回升缓慢是大颗粒煤燃尽的特征。图 5(b) 可以看出分层燃烧 CO_2 的两个最高峰都较混合燃烧提前,说明分层燃烧比混合燃烧提前燃尽。分析图 5(d) 为床层中部温度对比,由于分层燃烧提前引燃,床层中部最高温度也较混合燃烧提前,且最高温度持续时间更久。

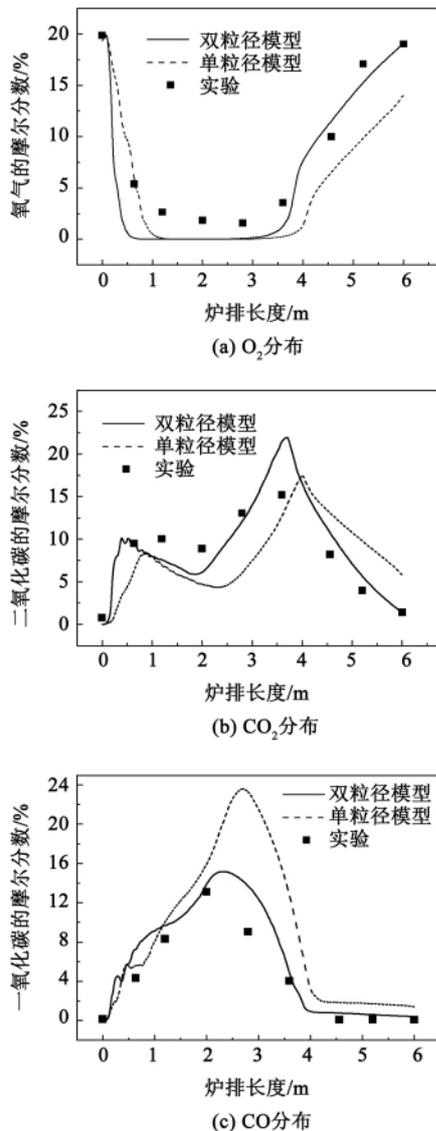


图 4 模型改进前后计算结果和实际锅炉床层表面的气体分布对比

Fig. 4 Comparison of the gas distribution of the calculation results and on the real surface of the bed of a boiler before and after the improvement of the model

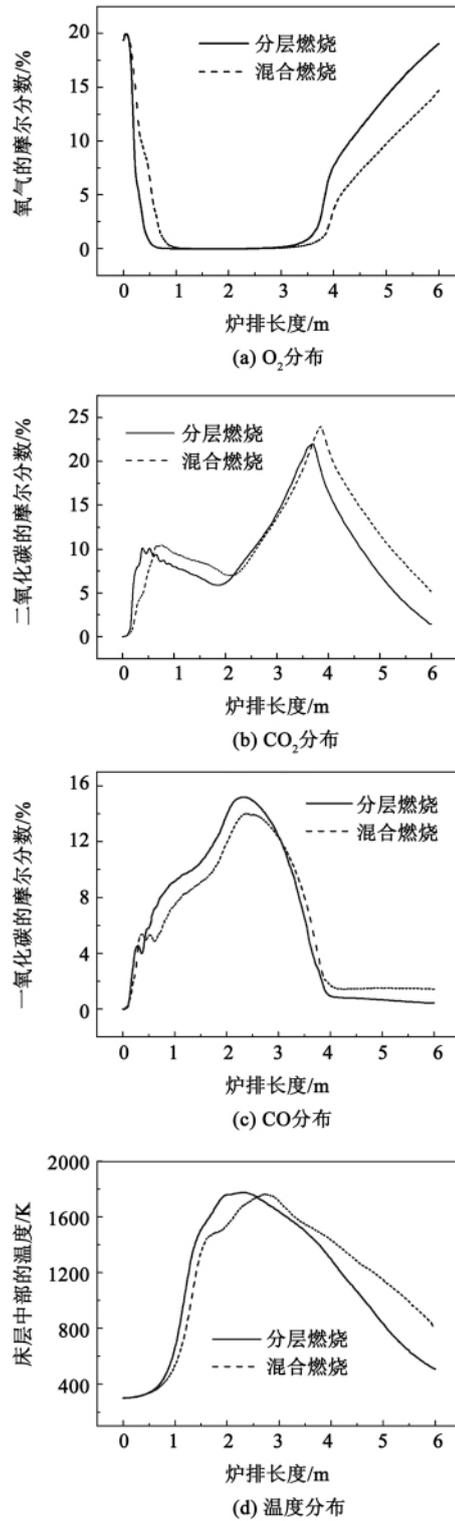


图 5 不同堆叠方式下的气体分布和温度分布
Fig. 5 Gas and temperature distribution under various stacking modes

图 6 可以清楚的说明分层的颗粒分布方式对颗粒反应活性的影响。

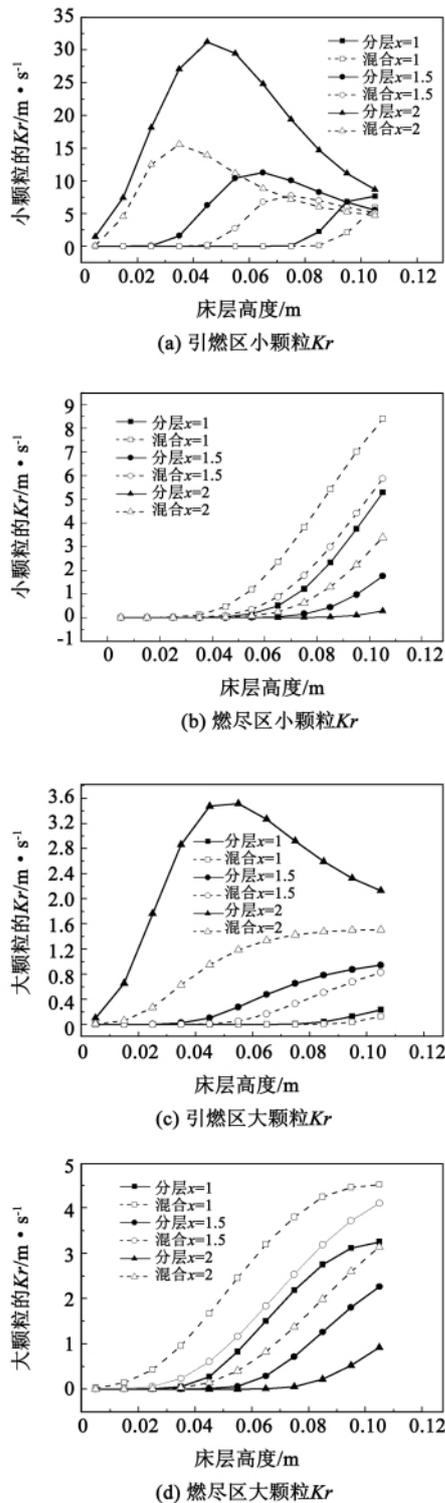


图 6 不同堆叠方式下大小颗粒化学反应速率系数 K_r 在引燃区和燃尽区的分布

Fig. 6 Large and small particle chemical reaction rate coefficient K_r distribution in the ignition and burn-out zone under various stacking modes

K_r 表征颗粒反应活性, 其表达式是以温度为变

量的阿累尼乌斯公式: $K_r = AT_s \exp(-\frac{E}{RT_s})$ 。图 6 中图 (a) 和图 (b) 是小颗粒在引燃区和燃尽区分层和混合分布的 K_r 对比图; 图 6 (c) 和图 (d) 是大颗粒在引燃区和燃尽区的分层和混合分布 K_r 的对比图。对比图 6 (a) 与图 6 (c), 小颗粒在引燃区的反应速率大于大颗粒, 对比图 6 (b) 与图 6 (d), 小颗粒在燃尽区的反应速率大于大颗粒, 且引燃区比燃尽区更加明显。因为引燃区小颗粒的温度升高更快, 燃尽区小颗粒燃尽率更高。图 6 (a) 是小颗粒在引燃区沿炉排方向 $x = 1 \text{ m}$, $x = 1.5 \text{ m}$ 和 $x = 2 \text{ m}$ 3 个位置沿床层高度的不同分布方式对比图。两种分布方式的床层表面的颗粒温度相差不大, 但热量向下传递过程中, 分层方式由于其小颗粒集中, 温度升高快, 因此热量传递快, 同一位置分层方式的 K_r 大于混合方式。换一角度, 如图 6 (a), 分析沿床层高度, 例如 $y = 0.06 \text{ m}$, 沿炉排运动的小颗粒, 在从距离煤闸门 1 m 运动至距煤闸门 2 m 处时 K_r 的变化, 分层方式小颗粒温度升高更快, K_r 变化更大。在燃尽区, 大、小颗粒的 K_r 也符合分层大于混合的规律。因为混合燃烧比分层方式引燃迟, 混合燃烧方式的 K_r 小不是因为混合方式的燃尽率更高, 而是分层使燃尽区的氧气和颗粒, 尤其是大颗粒接触更充分, 燃烧速率因此略高, 放热略多, 反过来进一步影响 K_r 增大。

分析分层堆叠方式和混合堆叠方式对燃烧的影响, 前者的优势在于:

(1) 提前引燃。分层的引燃区, 煤层上部小颗粒煤集中。颗粒表面吸收炉膛辐射后, 颗粒内部导热快, 升温快, 因此床层上部整体温度水平更高, 引燃更快。

(2) 加强燃尽。分层堆叠方式的燃尽区, 大颗粒煤多数位于床层底部, 且孔隙率较大, 因此和氧气接触更加充分。因为在燃尽区域, 未燃尽的主要是大颗粒, 因此分层使大颗粒位于底部可以加强燃尽。两种工况中, 小颗粒的灰渣含碳量均在 $3\% \sim 4\%$, 也可以看出, 未燃尽的主要是大颗粒。

5 结 论

针对分层燃烧的特点在单粒径模型基础上建立了二维稳态双粒径链条锅炉层燃模型, 并将模型的计算结果和实际 20 t/h 采用分层煤斗的锅炉进行对比验证, 双粒径模型能更好模拟大小颗粒同时存在时煤层的燃烧特性。并基于改进的双粒径模型,

对不同煤粒堆叠方式对床层燃烧的影响进行理论分析和比较 结果表明:

(1) 双粒径模型能模拟出大、小颗粒同时存在时床层的燃烧特性,从理论上分析了分层煤斗燃烧方式优于普通煤斗的原因。

(2) 与分层堆叠方式相比混合堆叠方式的优势在于:提前引燃和加强燃尽。提前引燃得益于小颗粒在床层上部的聚集,小颗粒吸热升温快,整体温度高;加强燃尽得益于大颗粒在床层底部接触氧气充分,反应速率提高,带动燃尽区温度提高,加强燃尽。分层燃烧的灰渣含碳量是 9.54%,混合燃烧的灰渣含碳量是 15.81%。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2011 [M]. 北京: 中国统计出版社 2011.
China National Statistics Bureau. China statistical yearbook-2011 [M]. Beijing: China Statistics Press 2011.

[2] 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 reconstruction of coal-fired chain grate boilers currently in operation [J]. Industrial Boiler 2010(2): 20-24.

[3] 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. Current status of the use of industrial boilers in China and exploratory study of the countermeasures for energy saving and emissions reduction [J]. Industrial Boiler 2010(3): 1-8.

[4] Yang Y B, Ryu C, Khor A et al. Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed[J]. Fuel 2005 84:2026-2038.

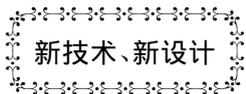
[5] Thunman H, Leckner B. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed[J]. Proceedings of the Combustion Institute 2005 30:2939-2946.

[6] Tao L, Zhao G, Sun R et al. Combustion characteristics of particles of hazardous solid waste mixtures in a fixed bed [J]. Journal of Hazardous Materials 2010 181:305-314.

[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 chain grate boiler and optimized design of the air distribution and furnace arch [M]. 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 calculating fly-ash deposition in a chain grate stoker [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 2011 26(2): 207-211.

(陈 滨 编辑)



蒸汽锅炉锅筒内形成裂纹的原因

据《Электрические станции》2011年9月刊报道,俄罗斯雅洛斯拉夫斯基第3热电站一台 TGM-84 锅炉的锅筒于 2005 年 5 月发生灾难性损坏。修理时,完成了下降管所有接头的更换。

分析了蒸汽锅炉锅筒下降管管口区域内出现裂纹的原因,并给出了预防措施。

为防止蒸汽锅炉锅筒形成裂纹,必须采取如下措施:

- (1) 确定锅筒许用应力所限定的下降管内锅水温度与锅筒底部温度之差,并用工艺方法保证遵守该温度差。
- (2) 保证在涡轮发电机组负荷改变时自动调节锅炉后蒸汽的压力。
- (3) 锅炉停炉时,必须停止蒸汽过热器排污,以消除该工况下的热力冲击。

(吉桂明 摘译)

the Inner Mongolia-originated coal was 769 mg/m^3 and that from the Huainan-originated coal was 695 mg/m^3 . In the meantime, the dual-peak variation law governing the precipitation of NO_x from the coal bed surface under different air distribution modes was obtained, offering a theoretical basis for operation of practical industrial boilers at low NO_x emissions. **Key words:** laminar combustion boiler, NO_x , air distribution mode, experimental study

链条炉分层燃烧的数值模型与计算 = **Numerical Model and Calculation of the Stratified Combustion in a Chain Stoker** [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. - 2013, 28(1). - 93 ~ 98

In the light of the specific features of the stratified combustion, on the basis of a single particle diameter model, established was a dual particle diameter model for the stratified combustion of a chain stoker and verified through a test in a practical boiler. The dual particle diameter model can better simulate the combustion characteristics of the coal bed after a stratified coal bunker has been additionally installed. By utilizing the improved dual particle diameter model, the influence of the coal feed modes by a commonly used coal bunker and a stratified coal bunker on the combustion was simulated. It has been found that the dual particle diameter model can simulate very well the combustion characteristics of the coal bed when large and small particles of coal are present simultaneously. The stratified stacking mode is conducive to the ignition of coal bed and the promotion of the burn-out of coal. The content of carbon in ash and slag during stratified combustion is 9.54% while that during blended combustion is 15.81%. **Key words:** chain stoker, laminar combustion, stratified combustion, numerical simulation

基于变热量等效热降的混合发电系统通用矩阵模型 = **General-purpose Matrix Model for Hybrid Power Generation Systems Based on a Variable Heat Quantity Equivalent Heat Drop** [刊, 汉] YE Xue-min, LI Chun-xi (College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), QI Cheng (Northwest Electric Power Designing Institute, Xi'an, China, Post Code: 710075) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(1). - 99 ~ 104

On the basis of a constant heat quantity equivalent heat drop method, established was a variable heat quantity equivalent heat drop general-purpose matrix model for hybrid power generation systems. With a 600 MW unit integrated in a hybrid power generation system serving as an example, by using the general purpose matrix model, the thermal cost-effectiveness of the unit in a hybrid power generation system was calculated with the advantages of the hybrid power generation system being analyzed. The research results show that the system efficiency, coal quantity saved and carbon dioxide emissions reduced are closely related to the location acted by the auxiliary heat source system and the flow distribution coefficient. When the auxiliary heat source system acts on the high pressure stage heaters, the energy saving potential and the economic benefit of the system are as a whole better than those when it acts on the low pressure stage heaters. When the auxiliary heat source system acts on various low pressure stage heaters, the steam extraction efficiencies of various high pressure stages and the deaerator stage will be improved. **Key words:** variable heat quantity equivalent heat drop, hybrid power generation, matrix model, thermal cost-effectiveness