

# 气流床气化炉高熔点煤气化反应模拟

娄 彤, 张忠孝, 周志豪

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘 要:** 为描述高灰熔点煤在高温煤气化反应中的动力学行为, 考虑高温对煤气化过程的影响, 在修正随机孔模型基础上建立了简单的气流床气化炉模型, 并对出口合成气成分、碳转化率与停留时间, 颗粒粒径和气化温度的关系进行了预测。结果表明: 停留时间超过 1.5 s 后, 出口合成气组分即趋于稳定, 水煤气变换反应决定了出口的合成气组分; 碳转化率随着温度的上升而升高; 煤粉颗粒粒径小于 100  $\mu\text{m}$  后, 对气化反应速度影响不明显。

**关 键 词:** 煤气化; 动力学模型; 模拟; 高熔点煤; 气流床气化

中图分类号: TQ54 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.024

## 引 言

煤气化技术作为洁净煤技术的重要组成部分, 在近年来有着突飞猛进的发展, 而气流床气化技术以其高效, 高容量等优势, 成为煤气化的主流技术。气流床气化炉内的反应非常复杂, 已有不少学者采用实验或模拟的方法<sup>[1-4]</sup>, 对气化炉内部的规律进行探索性的研究, 并取得了一定的成果。小室模型被证明适用于气流床气化炉的气化过程模拟, 其中煤焦异相反应速率一般使用未反应缩核模型以及随机孔模型进行计算<sup>[5-9]</sup>。

针对占有我国大部分储量的高灰熔点煤, 上海交通大学、中国煤炭科学研究总院等单位正在积极设计新型的干排渣式气流床气化炉。现阶段研究普遍认为, 由于高灰熔点煤的煤阶较高, 气化活性偏低, 所以进行高灰熔点煤气化反应动力学的研究对研究气化反应机理及气化炉的设计与运行具有重要意义。气化炉实际运行过程可以分为挥发份析出、挥发份燃烧、焦炭燃烧与气化、焦炭的气化和水煤气平衡几个过程, 其中最关键的部分就是焦炭气化的

过程。目前, 针对中低温( $T < 1\ 400\ ^\circ\text{C}$ )的煤焦气化反应动力学已经基本成熟。而高温( $T > 1\ 400\ ^\circ\text{C}$ )的煤焦气化反应主要受扩散的影响, 此时煤焦颗粒形状、反应气体成分、反应气体分压、系统总压、边界层厚度等因素都会对扩散过程产生影响, 实验验证十分困难, 因此对外扩散过程的研究尚未形成统一的理论。本研究将针对高温下的煤焦气化反应动力学模型进行分析与验证, 并采用高温气化模型针对沉降式气流床气化炉进行模拟及讨论。

## 1 模型讨论

煤焦非均相反应速率控制区域示意图<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示。可将煤焦的整个反应过程按温度分为 3 个区域。在温度低时(约低于 1 100  $^\circ\text{C}$ ), 煤焦气化反应速度主要受到煤焦化学反应速度的控制, 此时反应处于动力控制区, 扩散对气化反应速度影响极小, 可以忽略不计。随着温度的升高, 煤焦与气化剂的反应速度逐渐升高, 这时气化反应处于孔扩散控制区。当温度增大到一定程度时, 气化反应速度受颗粒气膜(边界层)中的质量传递速度控制, 此时进入外扩散控制区, 物理扩散对气化反应速率的影响随着温度的升高而增大, 温度越高, 扩散在整个气化反应过程中起的作用越大。实际气化炉在高温、高压的环境下工作, 气化反应是在孔扩散控制区或者外扩散控制区内进行, 因此, 应同时考虑物理扩散和化学反应两种阻力对总反应速率的影响。

目前常用的包含孔扩散控制描述的理论有两种: 一种是 Wen 等人提出的缩核模型<sup>[11]</sup>, 该模型中灰层扩散系数为经验参数, 尚无更多相关文献进行讨论; 另外一种是 Bhatia 等人提出的随机孔模

收稿日期: 2014-01-16; 修订日期: 2014-05-13

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2013AA051101)

作者简介: 娄 彤(1987-), 男, 河南漯河人, 上海理工大学博士研究生。

型<sup>[12-13]</sup>。该模型通过引入孔隙结构参数成功地描述了气-固非均相反应中固体反应物孔结构的变化对反应速率的影响,是目前描述煤焦化反应的最成熟的模型,已得到大量实验验证。低灰熔点煤在高温气化过程中产生的熔渣会降低颗粒有效气化表面积,该表面积是随时间增加、随灰渣颗粒的熔融程度不断变化的,若灰渣颗粒发生熔融,要描述其反应速率,须对其气化反应速率进行修正。考虑了外扩散控制区及孔扩散控制区对反应速率的影响,采用高温修正的随机孔模型对高灰熔点煤气化反应速率进行描述。

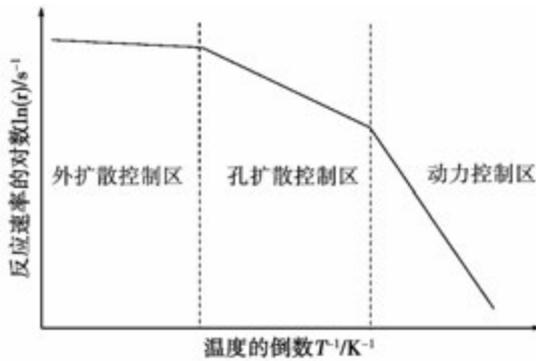


图 1 煤焦非均相反应速率控制区域图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Chart showing the zones with their non-homogeneous phase reaction speeds of coal coke being controlled<sup>[1]</sup>

### 1.1 动力控制区

随机孔模型在低温动力控制区的基本描述:

$$\frac{dx}{dt} = k_s(1-x) \sqrt{1-\psi(1-x)} \quad (1)$$

其中,

$$\psi = \frac{4\pi L_0(1-\varepsilon_0)}{s_0^2} \quad (2)$$

式中:  $x$ —碳转化率;  $\psi$ —颗粒结构尺寸, cm;  $L_0$ —颗粒初始内控总周长, cm;  $\varepsilon_0$ —孔隙度;  $s_0$ —初始反应的总表面积,  $\text{cm}^2$ 。

### 1.2 孔扩散控制区

通常引入内效率因子  $\eta$  对反应速率进行修正,来描述内扩散的机理影响。对内扩散系数的研究已经比较成熟,一般通过泰勒模数  $\varphi$  对内效率因子进行估算。对于球形颗粒:

$$\eta = f_c \frac{1}{\varphi} \left( \frac{1}{\tanh 3\varphi} - \frac{1}{3\varphi} \right) \quad (3)$$

Bishoff 提出了一个用于计算  $\varphi$  的一个表达式<sup>[14]</sup>:

$$\varphi = \frac{Lr(C_s)}{\sqrt{2}} \left[ \int_0^{C_s} D_{\text{eff}}(\alpha) r(\alpha) d\alpha \right]^{-1/2} \quad (4)$$

式中:  $L$ —特征长度, cm;  $C_s$ —外表面反应气体浓度;  $D_{\text{eff}}$ —有效扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。

用反应气体分压代替  $C_s$  后可以推导出。

$$\varphi = \frac{d}{6} \sqrt{\frac{\rho S r_{\text{int}}(n_i + 1)(RT/M_i)}{2D_{\text{eff}}P_{s,i}}} \quad (5)$$

式中:  $d$ —煤焦颗粒直径, cm;  $\rho$ —煤焦表观密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $S$ —单位质量煤焦表面积,  $\text{cm}^2/\text{g}$ ;  $D_{\text{eff}}$ —有效扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $P_{s,i}$ —煤焦表面气体压力, MPa。

有效扩散系数由分子扩散系数, 努森扩散系数, 颗粒孔隙率以及孔隙曲折因子计算:

$$D_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left( \frac{1}{D_c} + \frac{1}{D_{\text{kn}}} \right) \quad (6)$$

其中,

$$D_{\text{kn}} = 9.70 \times 10^3 a (T/M)^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $d_p$ —煤焦粒径, cm;  $D_c$ —容积扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $D_{\text{kn}}$ —努森扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $a$ —微孔平均半径, cm;  $M$ —扩散气体的分子量,  $\text{g}/\text{mol}$ 。

### 1.3 外扩散控制区

在该区域内,工质处于高温下,反应速率极快,任何反应气体只要到达煤焦颗粒外表面,就立即与固体反应而迅速耗尽,此时穿过边界层的外扩散速度决定了气化反应速度。外扩散速度不仅仅与气体的扩散系数  $D_i$  有关,还与浓度边界层的厚度有关。因此需要引入  $Sh$  (舍伍德数) 来进行计算。外扩散速率为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{dm_{c1}}{dt} = - \frac{vShM_c D_i}{RT_m d_p} A_p P_i \quad (8)$$

其  $Sh$  数由 CFD(计算流体动力学)模拟计算得出,计算较为繁琐。

Alexander 等人认为外扩散速度为<sup>[8]</sup>

$$r_{\text{obs}} = \frac{12N_i D_{M,i} M_i}{d^2 \rho RT} (P_{\text{bulk},i} - P_{s,i}) \quad (9)$$

式中:  $d$ —颗粒直径, cm;  $\rho$ —颗粒表观密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $D_{M,i}$ —气体分子扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ; 对于不同的反应,  $N_i$  取不同的值。

在外扩散控制区,由于颗粒表面反应速度极快,可以认为气膜压力为零,反应速率由边界层扩散速率决定,上海交通大学的张建等人认为忽略了边界

层效应和气体分子结构带来的扩散影响后<sup>[15-16]</sup>,其气膜扩散速率

$$k_d = \frac{ShM_c D_i}{2aRT_m} \quad (10)$$

其中对于单球传质有

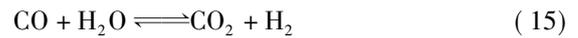
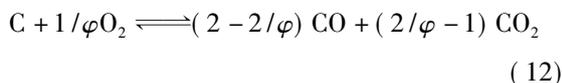
$$Sh = \frac{2ak_D}{D_{i,k}} = 2.0 + 0.6Sc^{1/3} Re_p^{1/2} \approx 2.0 \quad (11)$$

以上3种模型都能较为准确的计算出高温下外扩散的速度,而张建等人提出的模型在不失准确性的同时,具有计算简单的优点。因此本研究采用该模型建立一维沉降式气流床气化模型。

## 2 气化模拟

在实际的气流床气化炉内对高灰熔点煤进行气化实验存在过程复杂、代价高等问题,对整个气化过程进行模拟也十分困难:首先,由于其内部复杂的流场,导致内部的颗粒停留时间分布不均,给模拟计算带来了巨大的困难;其次,由于内部停留时间较长,碳转化率高,而且末尾煤气成分主要受水煤气变换反应的影响,导致用所有的煤焦气化反应模型来计算气化炉出口合成气组分都会得到相似的结果,给验证模型带来了巨大的困难。目前,实验室内研究气化反应速率的常用实验方式分为两种:热天平实验以及沉降式气流床气化炉实验。热天平实验一般达不到1500℃以上的温度,而且内部气流流动方式难以验证外扩散模型的准确性。对于沉降式气流床气化实验而言,不仅气化方式与实际气化炉类似,而且内部流场稳定,颗粒停留时间比较精确,因此计算结果具有相当的可信度与准确性,可以准确的反映出气化模型的准确度,国外也有学者采用此方法来验证模型的准确性<sup>[8]</sup>。

参考李政、乌晓江等人的思路对气化炉内的反应过程进行简化<sup>[5,17]</sup>,认为挥发分进入炉膛后瞬间析出、燃烧,并忽略微量煤粉燃烧与气化带来的温度变化,外部热源为沉降式气化炉外部电加热热源,温度为恒定。忽略掉对炉内各组分影响极小的反应(甲烷裂解反应,甲烷化反应等)。模型主要考虑的反应有:



其中异相反应模型采用随机孔模型,均相反应模型采用理想气体反应模型,水煤气变换反应有:

$$R = k_1 C_{CO} \cdot C_{H_2O} - k_2 C_{CO_2} C_{H_2} \quad (16)$$

式中:  $C_{CO}$ 、 $C_{H_2O}$ 、 $C_{CO_2}$ 、 $C_{H_2}$ —气化过程中气相中  $CO$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$  的浓度,  $mol/m^3$ 。

采用气相反应物分压幂函数形式将该气化炉模型推广至高压:

$$r = k_0 \exp(-E/RT) P_i^n \quad (17)$$

式中:  $P_i$ —反应气体分压, MPa;  $E$ —活化能, kJ/mol;  $n$ —常数,不同的煤取不同的值。

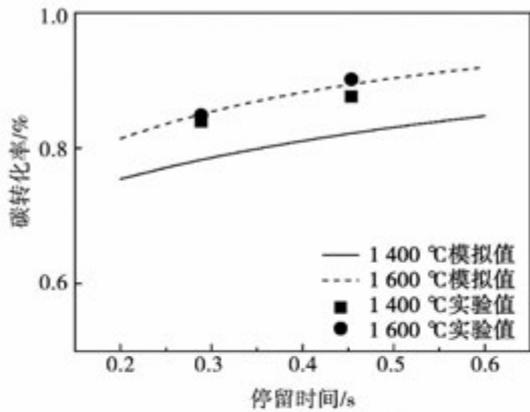
使用小室模型对沉降炉气化过程进行模拟,采用气化模型计算出各个小室的气化反应速率,根据质量平衡、元素平衡、各个小室的停留时间以及边界条件可计算出各个小室的出口参数,最后可得到气化炉出口处的各个参数。

## 3 结果与讨论

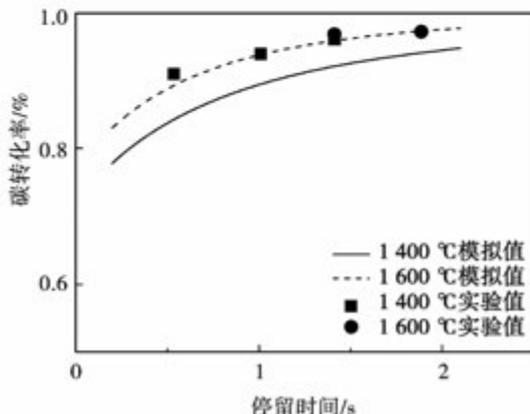
### 3.1 模型验证

采用文献[8]和文献[18]沉降式气流床气化实验数据进行验证,实验煤种分别为褐煤R以及淮南无烟煤。选取部分实验数据与模拟计算结果作对比来验证模型的准确性。

计算结果与实验值对比如图2、图3所示,模型计算结果与实验数据匹配良好。从图2中可以看出,温度越高,模拟结果的误差越小,在高温工况下,外扩散的影响最大,这说明外扩散模型具有准确性;在温度较低时,1400℃计算结果比实验结果偏低,这应该是由温度越高,挥发份析出的量越大,导致初始碳转化率越高而引起的,而模型并未考虑这个因素,而且将挥发份析出与燃烧的过程完全简化。从图3中可以看出, O/C 为 1.1 时,模型的误差最小,这应该是由模型假设了挥发份析出后瞬间进行燃烧反应,计算中只有少部分氧气与焦炭进行燃烧而引起的,实际上挥发份析出进行的燃烧反应是与焦炭与氧气的燃烧反应同步进行的。导致误差的原因还有外扩散模型将煤焦颗粒简化为球体、小室模型都进行了比较多的简化和模型的假设并非与实际完全相符。将图2与图3进行对比,可以看出褐煤R的气化反应速率快于淮南无烟煤的化学反应速率。



(a) 0.1 MPa时计算结果对比



(b) 0.5 MPa时计算结果对比

图 2 不同工况下褐煤模拟值与实验值对比图

Fig. 2 Chart showing a contrast between the simulation values and test ones of lignitous coal under various conditions

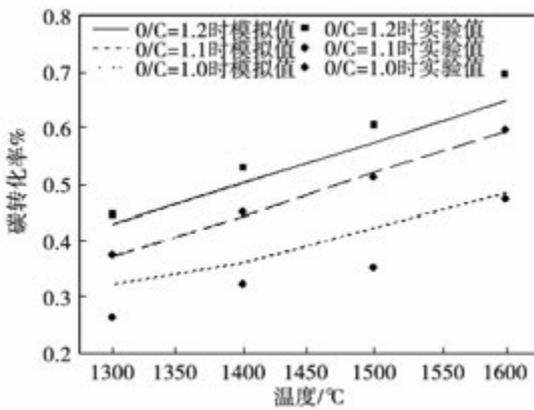


图 3 不同工况下淮南无烟煤模拟值与实验值对比图

Fig. 3 Simulation values and experiment values of the rate of huainan anthracite gasification reaction under different conditions

### 3.2 操作参数的影响分析

#### 3.2.1 停留时间对合成气组分的影响

在 6.5 MPa 压力下,氧碳比为 1,气化温度为 1 400 °C 时不同停留时间对反应气组份的影响如图 4 所示。CO 与 H<sub>2</sub> 体积含量随着停留时间的增加而增加,CO<sub>2</sub> 含量随着停留时间的增加而降低,炉内气体百分比在颗粒停留时间为 2 s 时基本稳定,这与文献 [19] 的结果吻合。炉膛 CO 的含量在停留时间约为 1.5 s 后略有下降,这说明此时 CO 的生成量比水煤气变换反应的消耗量少。虽然 2 s 后煤焦与 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的气化反应仍在进行,但是由于此时 CO<sub>2</sub> 已经极少,气化反应已经无法对出口合成气组分起到关键性的影响,水煤气变换反应决定了气化炉出口的合成气组分。平衡后 CO 含量约为 70%, H<sub>2</sub> 含量约为 30%, CO<sub>2</sub> 含量约为 1%。这与 Shell 气化炉在德国中试装置的出口合成气组份相接近 [20]。

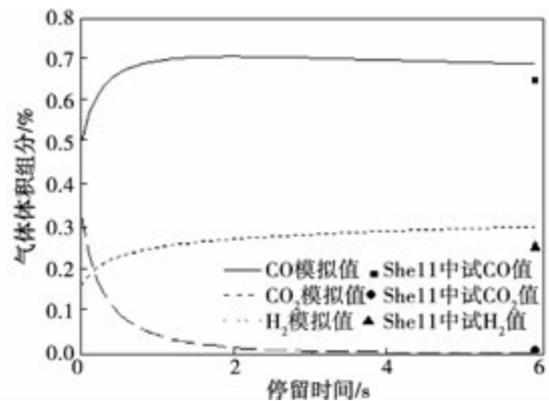


图 4 6.5 MPa, 1 400 °C, O/C = 1, 合成气组份随停留时间变化情况

Fig. 4 6.5 MPa, 1 400 °C, O/C = 1, the variations of the syngas components by residence time

#### 3.2.2 气化温度对碳转化率的影响

6.5 MPa 压力下,氧碳比为 1 时不同停留时间和气化温度对碳转化率的影响如图 5 所示,对于高灰熔点煤,温度对其整体气化反应速率影响巨大。温度越高,气化反应速率越高。对于针对高灰熔点煤的干排渣气流床气化炉而言,其内部气化温度较低,约为 1 400 °C,其气化反应速率低于炉内温度较高的液态排渣式气流床气化炉,为使碳转化率到较高值则必须增加炉内颗粒的停留时间,也即适当增加炉膛高度。模型的气化反应速率较低,这是由煤种导致的,对于该高灰熔点煤种,本身的气化活性

较低,导致整体反应速度偏低。

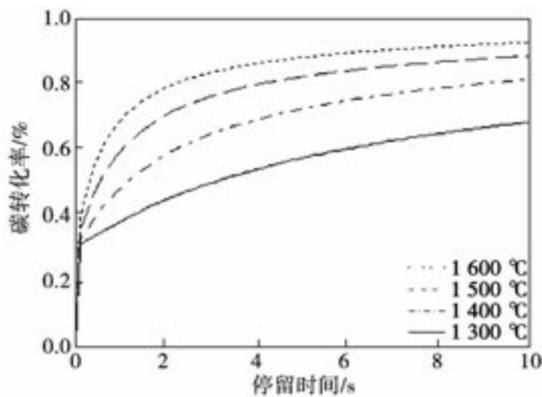


图5 6.5 MPa、O/C = 1 时停留时间及温度对碳转化率的影响

Fig. 5 6.5 MPa, O/C = 1, effect of residence time and temperature on the carbon conversion

### 3.2.3 颗粒粒径对碳转化率的影响

6.5 MPa 压力下,氧碳比为 1,气化温度为 1 400 °C 时不同粒径和停留时间对碳转化率的影响如图 6 所示。

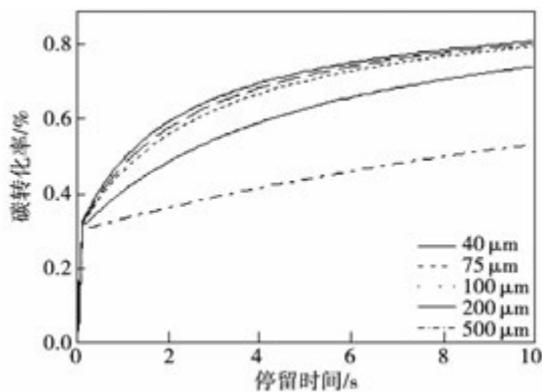


图6 6.5 MPa、1 400 °C 和 O/C = 1 时,停留时间及颗粒粒径对碳转化率的影响

Fig. 6 6.5 MPa, 1 400 °C, O/C = 1, effect of residence time and particle size on the syngas components

随着粒径的增加,气化反应速率逐渐降低,当颗粒粒径小于 100  $\mu\text{m}$  时,粒径对气化反应速率影响不大,在停留时间为 10 s 时碳转化率大约都为 80%。而当粒径为 200  $\mu\text{m}$  时,影响就比较显著,此时碳转化率在停留时间为 10 s 时大约为 70%,当粒径增加至 500  $\mu\text{m}$  时,碳转化率在停留时间为 10 s

时降低至 50% 左右。这一结论与吴诗勇的结论相同<sup>[21]</sup>,并且在宏观上体现了这一规律。因此实际的气化炉运行过程中,不必刻意的将煤粉磨细,只需要将煤粉磨至 100  $\mu\text{m}$  左右即可达到理想的运行效果。

## 3 结论

本研究对高温下高灰熔点煤气化反应动力学的模型作了讨论,在高温修正的随机孔模型基础上,通过对一维沉降式气流床气化炉实验进行模拟,验证了高灰熔点煤气化动力学模型,对干排渣式气流床气化炉的设计与运行提供了理论指导,并获得了以下结论:

(1) 气化反应速率随温度的升高而升高,由于干排渣式气流床气化炉的炉内温度偏低,可相应增加煤焦颗粒在炉内的停留时间以增加其碳转化率。

(2) 炉内气体各组分的体积百分比在 2 s 左右即达到一个较稳定的状态,只是此时碳转化率较低。决定出口合成气组分的是水煤气变换反应。

(3) 为有效提高气流床气化炉炉内气化速度,炉内的煤颗粒粒径达到 100  $\mu\text{m}$  即可,更小的粒径对于气化速度影响不大。

### 参考文献:

- [1] 梁万才,赵建涛,吴晋沪,等. 两段式气流床煤气化炉内气固流动数值模拟研究[J]. 燃料化学学报,2007,39(9): 994-1002.  
LIANG Wan-cai, ZHAO Jian-tao, WU Jin-hu, et al. Numerical simulation of the gas-solid flow in the two-stage entrained flow coal gasifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 39(9): 994-1002.
- [2] Neerav Abani, Ahmed F. Ghoniem. Large eddy simulations of coal gasification in an entrained flow gasifier[J]. Fuel, 2013, 104(1): 664-680.
- [3] Chih-Jung Chen, Chen-I. Huang, Wei-Hsin Chen. Numerical investigation on performance of coal gasification under various injection patterns in an entrained flow gasifier[J]. Applied Energy, 2012, 100(12): 218-228.
- [4] 吴玉新,张建胜,岳光溪,等. Texaco 气化炉混合过程及化学反应过程中的控制因素分析[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(4): 287-292.  
WU Yu-xin, ZHANG Jian-sheng, YUE Guang-xi, et al. Analysis of dominating process between mixing and reactions in a texaco coal gasifier[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009,

- 15(4): 287 - 292.
- [5] 李 政, 王天骄, 韩志明, 等. Texaco 煤气化炉数学模型的研究——建模部分 [J]. 动力工程学报, 2001, 21(2): 1161 - 1165.
- LI Zheng, WANG Tian-jiao, HAN Zhi-ming, et al. Study on mathematical model of texaco gasifier-modeling [J]. Power engineering, 2001, 21(2): 1161 - 1165.
- [6] 李 政, 王天骄, 韩志明, 等. Texaco 煤气化炉数学模型研究 (2) - 计算结果及分析 [J]. 动力工程. 2001, 21(4): 1316 - 1319.
- LI Zheng, WANG Tian-jiao, HAN Zhi-ming, et al. Study of mathematical model for texaco gasifier——calculation and analysis [J]. Power engineering, 2001, 21(4): 1316 - 1319.
- [7] 张林仙, 黄戒介, 房倚天, 等. 中国典型无烟煤焦水蒸气活化性及动力学研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3): 202 - 207.
- ZHANG Lin-xian, HUANG Jie-jie, FANG Yi-tian, et al. Study on reactivity of Chinese anthracite chars gasification Comparison of reactivity between steam and CO<sub>2</sub> gasification [J]. Combustion science and technology, 2005, 11(3): 202 - 207.
- [8] Alexander Tremel, Hartmut Spliethoff. Gasification kinetics during entrained flow gasification - Part III: Modeling and optimization of entrained flow gasifiers [J]. FUEL, 2013, 2(14): 1 - 13.
- [9] 李 超, 气流床气化炉内颗粒流动模拟及分区模型研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- LI Chao. Numerical study of particle flow behavior in entrained flow gasifier and development of a gasifier partition model [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [10] Walker P L. Gas Reaction of Carbon [J]. Adv. Catal, 1959, 11.
- [11] Wen C, Chaung T. Entrainment coal gasification modeling [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1979, 18(4): 684 - 695.
- [12] K, B. S. A random pore model for fluid-solid actions: I. Isothermal, kinetic control [J]. AIChE, 1980, 26(2): 379 - 385.
- [13] K, B. S. A random pore model for fluid-solid actions: II. Diffusion and Transport Effects [J]. AIChE, 1981, 27(2): 127 - 254.
- [14] Bischoff K B. Effectiveness factors for general reaction rate forms [J]. AIChE Journal. 1965, 11: 351 - 355.
- [15] 胡世磊, 张 健, 张忠孝, 等. 高灰熔点煤气化反应特性理论分析. 工程热物理学报 [J]. 2012(6): 1069 - 1072.
- HU Shi-Lei, ZHANG Jian, ZHANG Zhong-Xiao, et al. Theoretical analysis on gasification reaction characteristics of chinese coal of high ash fusion temperature [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012(6): 1069 - 1072.
- [16] 张 健, 章明川, 于 娟, 等. 考虑颗粒边界层气相反应的炭粒气化过程模型预报 [J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(1): 49 - 55.
- HU Shi-Lei, ZHANG Jian, ZHANG Zhong-Xiao, et al. Theoretical analysis on gasification reaction characteristics of chinese coal of high ash fusion temperature [J]. Journal of Engineering Thermophysics. 2012(6): 1069 - 1072.
- [17] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 高温加压气流床内生物质气化特性的实验研究 [J]. 动力工程学报, 2007, 27(4): 629 - 634.
- WU Xiao-jiang, ZHANG Zhong-xiao, PIAO Gui-lin, et al. Experimental study on biomass gasification characteristics in high-temperature pressurized entrained flow gasifiers [J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(4): 629 - 634.
- [18] 乌晓江, 张忠孝, 徐雪元, 等. 高灰熔点煤气化特性及灰渣熔融特性的研究 [J]. 动力工程学报, 2011, 31(7): 557 - 562.
- WU Xiao-jiang, ZHANG Zhong-xiao, XU Xue-yuan, et al. Experimental study on gasification and ash fusion characteristics of coal with high ash fusion temperatures [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(7): 557 - 562.
- [19] Caixia Chen, Masayuki Horio, Toshinori Kojima. Numerical simulation of entrained flow coal gasifier. Part I: modeling of coal gasification in an entrained flow gasifier [J]. Chemical Engineering Science, 2000, (55): 3861 - 389.
- [20] 于遵宏, 王辅臣. 煤炭气化技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- YU Zun-hong, WANG Fu-chen. Technology of Coal gasification [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [21] 吴诗勇. 不同煤焦的理化性质及高温气化反应特性研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2007.
- WU Shi-yong. Studies on physical and chemical property and gasification reaction characteristic of different coal chars at elevated temperatures [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2007.

( 陈 滨 编 辑 )

superheating degree of the wet steam at the inlet and in the meantime, to choose proper inlet conditions can avoid the formation of aerodynamic shock waves in the condensation zone. Doing so can not only decrease the energy loss in the flow and enhance the work-doing efficiency but also lessen and postpone the destruction of blades in the last stage to a certain extent. **Key Words:** steam turbine, wet steam, condensation flow, Laval nozzle

气流床气化炉高(灰)熔点煤气化反应模拟 = **Simulation of the High Ash Melting Point Coal Gasification Reaction in a Gas Flow Bed Gasifier** [刊, 汉] LOU Tong, ZHANG Zhong-xiao, ZHOU Zhi-hao (College of Environment and Architecture, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3). - 406 - 411

To depict the kinetic behavior of the coal gasification at a high temperature of domestically-originated coal with a high melting point, with the influence of the high temperature on the coal gasification process being taken into consideration and based on the corrected random pore model, established was a simplified model for gas flow gasifiers and predicted was the relationship among the syngas components at the outlet, carbon conversion rate, residence time, particle diameter and gasification temperature. It has been found that when the residence time has exceeded 1.5 seconds, the syngas components at the outlet will immediately tend to be stable. The water gas conversion reaction will determine the syngas components at the outlet. The carbon conversion rate will increase with an increase of the temperature. When the particle diameter of the pulverized coal has been less than 100  $\mu\text{m}$ , the influence on the gasification reaction speed will be not conspicuous. **Key Words:** coal gasification, kinetic model, simulation, coal with a high melting point, gasification in a gas flow bed

基于智能 PID 控制的燃气锅炉燃烧控制系统研究 = **Study of an Intelligent PID (Proportional, Integral and Differential) Control-based Combustion Control System for Gas-fired Boilers** [刊, 汉] GU Yang-yang, LI Lai-chun, ZHANG Shao-Juan (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3). - 412 - 416

With a gas-fired boiler combustion system serving as the object of study, the intelligent PID control algorithm was used to improve its control system. The fuzzy self-adaptive theory was used in combination with the BP neural network theory, genetic algorithm theory and PID control theory to design the control system. By using the software Matlab, a simulation and verification were performed respectively and a contrast with the simulation curves obtained