

半焦气力输送模型及在煤拔头中试装置中的应用

赵广播, 赵丹妮, 秦 明, 王文宇

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对半焦气力输送系统建立了一维数学模型, 考虑了半焦气力输送中的固体颗粒运动、气固间的对流和辐射换热、半焦中残余挥发分的析出和燃烧、焦炭的燃烧、焦炭表面 CO₂ 的还原以及气相中 CO 的燃烧等过程。介绍了煤拔头中试装置及其系统构成, 并用建立的模型对其物料输配系统进行数值模拟, 得到半焦输送过程中的截面气固平均速度、沿程压力损失、气固两相温度等参数, 为中试的进行提供指导。计算表明, 在半焦气力输送过程中可忽略焦炭的燃烧, 而挥发分的燃烧会导致气体温度由 180 °C 升至 800 °C; 气体速度增加, 使压力损失增加, 同时会引起管道磨损严重, 因此中试装置中宜采用变管径的输送方法。

关 键 词: 煤拔头; 半焦; 气力输送; 数值模拟

中图分类号: TK227.2 文献标识码: A

引 言

煤炭拔头, 指在常压、中低温、无催化剂和氢气

的条件下, 结合循环流化床技术, 用温和热解的方式提取煤中的气体、液体燃料和精细化学品, 并借此工艺脱硫脱硝, 从而实现油、煤气、热和电的多联产^[1]。

图 1 为煤拔头中试装置系统流程图, 该系统由 5 个部分构成: (1) 锅炉主机系统: 为煤拔头的快速加热提供热介质, 并燃烧半焦; (2) 快速加热、分离系统: 热介质与煤颗粒在该系统中均匀混合并快速进行热质交换, 产生气体状态的焦油、水蒸气和煤气。同时将固体颗粒和气体状态的“产品”在极短时间内分离; (3) 快速冷却系统: 将系统(2)分离出的气体“产品”在极短时间内冷却到常温以阻止其进一步的聚合反应; (4) 物料输配系统: 系统(2)分离出的固体物料, 由该系统送回到系统(1)中, 以保持系统整体的物料平衡; (5) 控制与测量系统: 控制以上各系统的正常运转; 测量系统的运行参数、系统中关键设备的各项参数指标。

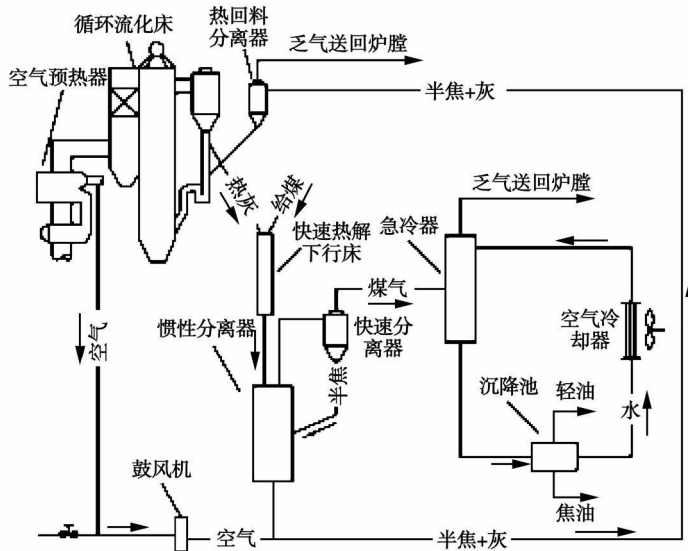


图 1 煤拔头中试装置系统流程图

收稿日期: 2007-05-23; 修订日期: 2007-07-02

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2006AA05Z312); 黑龙江省科技计划基金资助项目(GA06A306)

作者简介: 赵广播(1962-)男, 黑龙江拜泉人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师。

在物料输配系统中,由气体所输送的半焦为 650 °C,超过着火温度^[2],在气力输送过程中可能燃烧放出热量,不仅造成热量损失,且可能使系统温度过高影响安全运行。因此对半焦输送过程进行分析,对中试装置的顺利运行有重要意义。

1 半焦输送一维数学模型

为建立气力输送的数学模型,假定:(1)输送处于稳态;(2)热灰和半焦之间没有作用力;(3)物料为球形颗粒,密度、粒径均匀;(4)输送管截面处颗粒分布均匀,气流速度均匀;(5)管道绝热,忽略颗粒之间的导热。图2为任取的一个输送管体积单元,可建立如下方程。

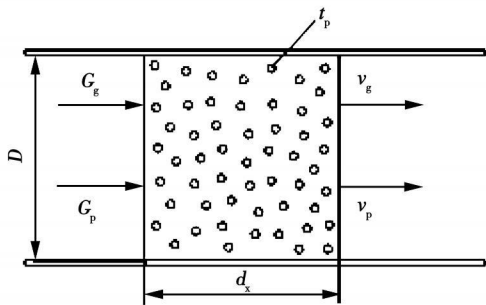


图2 输送管的体积单元

1.1 颗粒相动量方程

$$\text{水平管: } \rho_p v_p \frac{dv_p}{dx} = F_s - \frac{F_p}{(1-\epsilon)} \quad (1)$$

$$\text{垂直管: } \rho_p v_p \frac{dv_p}{dx} = F_s - \frac{F_p}{(1-\epsilon)} - \rho_p g$$

式中: ρ_p —固体密度, kg/m³; v_p —固体速度, m/s; ϵ —空隙率, $\epsilon = 1 - 4G_p / (\pi D^2 \rho_p v_p)$ 。

对于球形颗粒,气固阻力 F_s 用 Arostoopour 和 Gidaspow 提出的表达式计算^[3]:

$$F_s = \frac{3}{4} C_{Ds} \frac{\rho_g (v_g - v_p) |v_g - v_p|}{d_p \epsilon^{2.7}}$$

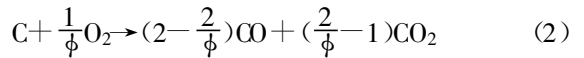
式中: C_{Ds} —气固阻力因数; ρ_g —气体密度, kg/m³; d_p —颗粒直径, m; Re_s —物料表面的气固相对雷诺数, $Re_s = [\epsilon d_p |v_g - v_p| \rho_g] / \mu_g$; F_p —单位体积内颗粒与管壁的摩擦力,用 Fanning 公式表示, $F_p = f_p \rho_p (1 - \epsilon) v_p^2 / (2/D)$; 其中, f_p —摩擦因数,由 Leung 和 Wiles 关系式给出^[4], $f_p = 0.2 / v$; G_p —固体输送量, kg/s; D —输送管直径, m。

1.2 燃烧反应模型

采用等径核模型,既考虑燃烧过程的焦炭直径减小,又加入了灰层阻力因素,认为一氧化碳和二氧化

化碳都是一次产物;产生的一氧化碳离开焦炭颗粒表面在床内燃烧;采用傅维标等人提出的通用规律考虑煤种对焦炭燃烧动力学速率的影响^[5]。

焦炭颗粒的燃烧反应为:



式中: ϕ —机械因子,它决定 CO 和 CO₂ 之间的平衡。

焦炭燃烧由动力学控制、灰层扩散传质阻力和气体中氧气扩散阻力控制:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_c} + \frac{(d_{p,a} - d_{p,c}) d_{p,c}}{De Nu_{p,a}} + \frac{d_{p,c}^2}{D_{\infty} Nu_{p,a}} \quad (3)$$

式中: D_{∞} —氧的扩散系数, m²/s; De —氧气在灰壳中的扩散系数, $De = \epsilon_k D_{\infty}$, ϵ_k —灰壳孔隙率,可认为 $\epsilon_k = 1 - x_A$, x_A —焦炭粒子的灰分质量分数; $d_{p,a}$ 、 $d_{p,c}$ —灰球直径和焦炭内核直径; k_c —动力反应系数; β_c —化学反应当量比; Nu —努塞尔数。

挥发分的释放采用煤粒热解通用模型^[6],在计算中还考虑了气相中 CO 的燃烧和 CO₂ 的还原。

1.3 压力损失模型

采用气力输送压降模型中最常用的附加压降模型,按下述原则处理^[7]:(1)将颗粒群的运动视为与一般流体一样的特殊流体在管道中运动,有摩擦阻力和局部阻力,所引起的附加压力损失,服从达西公式及局部损失一般公式;(2)两相流的总压力损失,为气流的各项压力损失与颗粒群运动附加的各项压力损失之和。则总的压力损失:

$$\Delta p = \Delta p_{ma} + \Delta p_{mf} + \Delta p_{st} + \Delta p_{mi}$$

式中: Δp_{ma} —加速压力损失; Δp_{mf} —摩擦压力损失; Δp_{st} —悬浮压力损失; Δp_{mi} —局部压力损失。

2 模型求解

计算过程中采用变步长办法,步长由计算机根据各个参量在输送管道不同位置的变化情况自行控制。根据欧拉法,挥发分析出的单元计算公式可以表示为:

$$V_{n+1} = V_n + B \Delta x_1$$

式中: B —因数, $B = (dV/dx)_n$, 则 Δx_1 可以确定为 $\Delta x_1 = C / |B|$, 其中 C 为较小的设定值。这样,无论 V 沿管长方向变化率大或小,均能保证 V 的值收敛。同样,由其它参量的单元计算公式可以确定出一组 Δx 值,为保证计算精度还需给定控制步长,取它们的最小值作为选定步长。

将整理后得到的微分方程组用标准 Runge—Kutta 法求解。终点由管长来控制。

3 模型应用

3.1 煤拔头中试装置半焦气力输送系统

图3为煤拔头中试试验装置半焦输送系统布置简图,惯性分离装置分离下的固体颗粒物料,通过旋转卸料器,连续的送入到文丘里引射器中,罗茨鼓风机产生的高压空气将这部分半焦和灰以气力输送的形式通过管道送到热回料旋风分离器,分离后固体物料送到循环流化床料腿的下部以保持床内物料平衡,乏气通过二次风口喷入炉膛。本文的计算区域为图中所示的水平段1、2,垂直段以及弯管1、2。

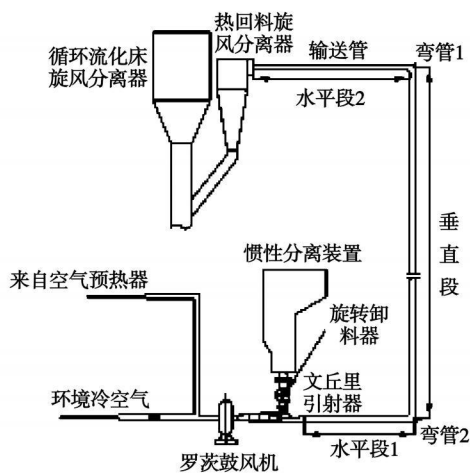


图3 半焦回输系统布置图

表1 气力输送参数

固体物料量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$		固体密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$		料气比	d_p /mm	管径 D /m	管线布置/m		
半焦	灰	半焦	灰				水平段1	垂直段	水平段2
1 043	16 500	862	1 500	6	0.28	0.18	3.6	14.3	5.6

当时 $x=0$ 时, $v_{p,c} = v_{p,a} = 0.5 \text{ m/s}$, $t_{p,a} = t_{p,c} = t_{p0} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_g = t_{g0} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = p_0 = 130 \text{ kPa}$ 。

半焦气力输送各主要参数如表1所示。

计算用煤种为霍林河褐煤,原煤与热解半焦的工业分析和元素分析如表2和表3所示。

3.3 两相运动和压降

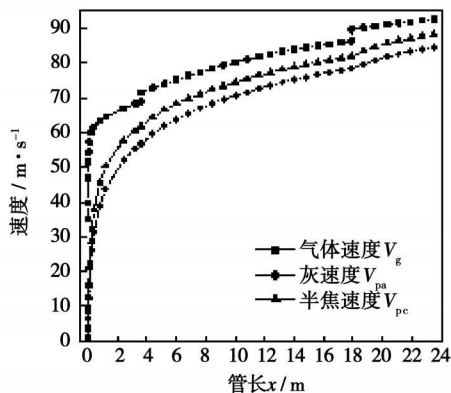
表2 原煤的工业分析和元素分析^[2]

M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}	S_{daf}
6.0	24.3	36.2	33.5	71.6	5.5	1.9	19.5	1.5

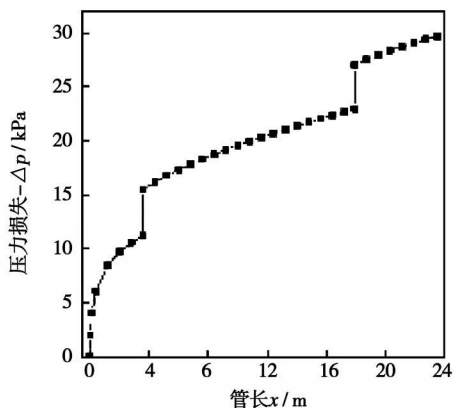
表3 褐煤半焦的组成^[2]

V_d	A_d	FC_d	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}	S_{daf}	$Q_{gr,v,daf}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
15.9	39.6	44.5	84.1	3.4	2.1	9.3	1.1	33.3

从图4中可以看出,固体进入气力输送管道时速度几乎为零,固气速度相差很大,固体被迅速加速到与气体速度相当,加速区在 $x < 5 \text{ m}$ 内。到气力输送出口处,固气速度比几乎为1,由于循环灰的密度较高,所以循环灰速度略小于半焦速度。随着管道的长度增加,气体速度不断增加,出口处气体速度高达 90 m/s 以上,如此高的速度将导致较大的压损和管道磨损。从图4中可以看出,加速段加速压损占了一定的比例,后期压损基本与管长成正比增加,总压力损失约为 30 kPa ,总压损较高。



(a) 速度沿管长的变化



(b) 压降沿管长的变化

图4 两相运动速度和沿程压降

3.4 燃烧反应情况

图 5 为气力输送过程中的燃烧反应结果, 从图中可以看出, 由于半焦温度不高, 焦炭燃烧反应进行很慢, 且在输送管道中的停留时间较短 (大约为 0.3 s), 所以焦炭的燃尽率仅为 0.55% 左右, 因此在进行系统热量和质量恒算时, 可不考虑固定碳的燃烧。但由于挥发分的燃烧温度较低, 在输送过程中不断热解并燃烧, 所以挥发分的燃烧将是影响输送管内温度的主要因素。

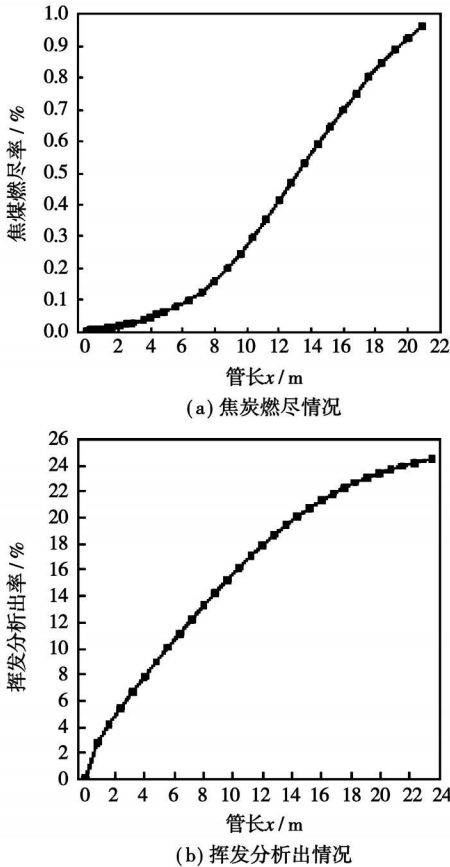


图 5 气力输送过程中的燃烧反应情况

图 6 为气体质量分数沿管长的变化。在输送过程中, 半焦中剩余挥发分不断析出并反应, CO_2 的含量不断增加, 出口处为 17%, H_2O 的质量分数约为 4%。而出口处 O_2 质量分数为 6% 左右。CO 含量非常少。

3.5 气固温度变化

图 7 为管内固体和气体温度的变化。气体温度经过 2 个升温阶段, $x < 1 \text{ m}$ 时, 气体温度由 180°C 急升到 600°C 左右, 该阶段热量主要来自于气体与半焦和循环灰的对流与辐射换热。 $x > 1 \text{ m}$ 后, 气体温度缓慢上升到将近 800°C , 该阶段热量主要来自于挥发分的燃烧放热。半焦温度上升的热量来自于

气体的换热和自身缓慢的化学反应, 由于焦炭燃烧反应的存在, 后期半焦温度会略高于气体温度。循环灰温度上升主要依赖于与气体的换热, 所以循环灰温度明显较气体和半焦温度低。

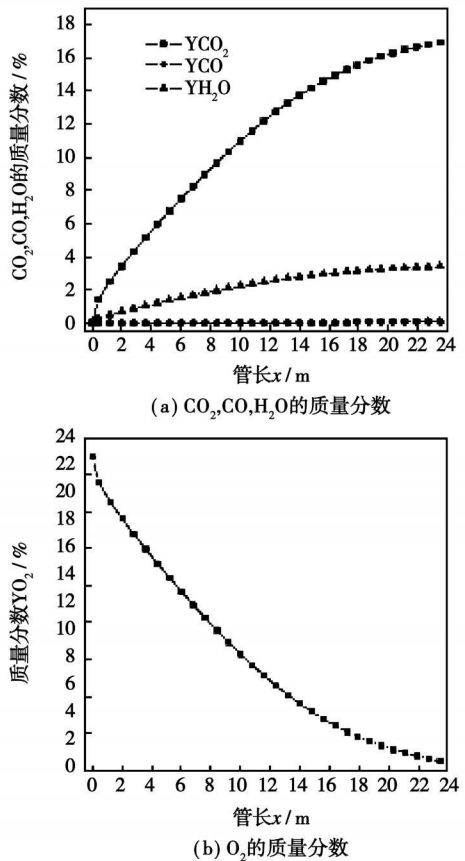


图 6 气体质量分数沿管长的变化

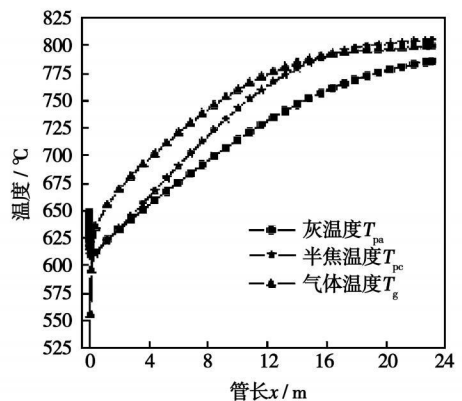


图 7 气固温度沿管长的变化

4 结 论

- (1) 考虑了半焦气力输送中的固体颗粒运动、半焦中残余挥发分的析出和燃烧、焦炭的燃烧、半焦

表面 CO_2 的还原以及气相中 CO 的燃烧等过程,建立了煤拔头半焦和循环灰载体的气力输送一维数学模型。

(2) 将模型应用于带煤拔头的 35 t/h 循环流化床中试装置, 计算结果表明, 在半焦气力输送过程中焦炭燃尽率约为 0.55%, 可忽略焦炭的燃烧, 半焦中残余挥发分的继续析出和燃烧是影响气力输送过程温度的最主要因素。与固相换热和挥发分的燃烧导致管内气体温度由 180 °C 上升到 800 °C, 温度上升导致气体速度过大, 使得沿程压力损失高达 1.2 kPa/m, 也将造成管道磨损严重, 因此在中试装置试验中宜采用变管径的输送方法。

(3) 本文通过建立数学模型, 采用数值模拟的方法对半焦的气力输送进行预测, 对中试装置的设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] 姚建中, 郭慕孙. 煤炭拔头提取液体燃料新工艺[J]. 化学进展, 1995, 7(3): 205-208.
- [2] 王杰广, 吕雪松, 姚建中, 等. 下行床煤拔头工艺的产品率分布和液体组成[J]. 过程工程学报, 2005, 5(3): 241-245.
- [3] ARASTOPOUR H, GIDASPOW D. Vertical pneumatic conveying using four hydrodynamic models[J]. Ind Chem Fundam, 1979, 18(2): 123-130.
- [4] LEUNG L S, WILES R J. A quantitative design procedure for vertical pneumatic conveying systems[J]. Ind Eng Chem Process Des Develop, 1976, 15(4): 552-557.
- [5] 傅维标. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] 傅维标, 卫景彬, 韩洪樵, 等. 煤粒热解通用模型[J]. 中国科学, 1988, 12: 1283-1290.
- [7] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(编辑 滨)

能源利用

鞍山钢铁厂建造高炉煤气发电装置

据《Gas Turbine World》2007年7~8月号报道, MHI(三菱重工)已完成了用于鞍山钢铁厂的 3 000 MW 单轴烧 BFG(高炉煤气)联合循环发电系统的交货。

基于其 M701S(F)先进燃气轮机设计的 MHI 动力核心是在商业运行中最大等级的烧 BFG 联合循环结构。

MHI 提供用于动力机组部分的主要部件, 鞍山钢铁厂提供冷凝器和所有底部设备, 包括余热锅炉。

新装置捕获高炉部分中产生的过剩的煤气, 将其能量转换成高效的电力生产, 同时也减少了钢厂的排放。

由于鞍山冬季月平均温度低于 -15.7 °C, 该动力装置配备有加热燃气轮机空气进气的蒸汽系统。

该加热系统在寒冷期间将防止压气机喘振并消除燃烧扰动。

这是 MHI 将 M701S(F)技术应用于中国的第一个烧高炉煤气的联合循环装置。鞍山钢铁厂目前正在营口地区的工厂建造基于 MHI 的 M701S(DA)燃气轮机的高炉煤气发电装置。

(吉桂明 供稿)

flecting in-furnace combustion conditions were obtained by utilizing computer-based image processing technology. The detection tests of in-furnace radiant energy characteristics were carried out at two stable loads, 300 MW and 250 MW, featuring oxygen-content variation conditions. The test results show that there exists a good negative correlation between the radiant energy and oxygen-content signal with the absolute value of the negative correlation coefficient at a low load being higher than 0.9. The change of radiant-energy signal emerged in advance of that of the oxygen content with the time in advance being 30 to 40 seconds. **Key words:** coal-fired boiler, radiant energy, variable oxygen content, characteristic detection, correlation analysis

渐近线型污垢生长的参数特性及测量方法 = **Parameter Characteristics and Measurement Method for Asymptotic Type Fouling Growth** [刊, 汉] / LENG Xue-li, TIAN Mao-cheng, PAN Ji-hong, FAN Ming-xiu (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 278 ~ 279

In the light of the specific features of asymptotic type functions, analyzed were the characteristics governing the time constant of asymptotic type fouling growth and the fouling heat-resistance asymptotic value. It is noted that the fouling time constant is in inverse proportion to the logarithm of the ratio of the fouling growth rates obtained from two measurements, and in direct proportion to the time interval of two measurements. The fouling heat-resistance asymptotic value can be expressed by the fouling heat-resistance and fouling growth rate obtained by the second-time measurement and the fouling growth rate obtained by the first-time measurement. The method under discussion can be used to obtain the time constant and heat-resistance asymptotic value of the asymptotic type fouling in its growth process, thus saving experiment time. It is an improvement on the heat-resistance method for measuring fouling growth process and at the same time is suitable for the forecast of asymptotic type fouling growth process. **Key words:** fouling parameter, measurement method, forecast method

半焦气力输送模型及在煤拔头中试装置中的应用 = **A Semi-coke Pneumatic Transmission Model and its Applications in a Coal-topping Pilot Plant** [刊, 汉] / ZHAO Guang-bo, ZHAO Dan-ni, QIN Ming, WANG Wen-yu (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 280 ~ 284

A one-dimensional mathematical model was established for a semi-coke pneumatic transmission system. In this connection, a variety of semi-coke pneumatic transmission processes were taken into account. They include: solid particle movement, convection and radiation heat exchange between gas and solid, precipitation and combustion of residual volatile component in semi-coke, combustion of coke, reduction of CO₂ on the coke surface and combustion of CO in gas phase etc. The pilot plant of coal topping and its systematic configuration were described, and the model thus established was used to numerically simulate the material transmission and distribution system. A variety of parameters in the semi-coke transmission process were obtained, including sectional gas-solid average speed, en route pressure loss and gas-solid two-phase temperature etc., providing guidance for the running of the pilot plant. The calculation results show that in the semi-coke pneumatic transmission process, the combustion of coke can be neglected. The combustion of volatile component can lead to an increase of gas temperature from 180 °C to 800 °C. An increase of gas speed will increase the pressure loss. In the meanwhile, it can also result in a serious wear and tear of pipes. Hence, a variable tube-diameter transmission method is recommended for the pilot-plant test. **Key words:** coal topping, semi-coke, pneumatic transmission, numerical simulation

炉管泄漏的声学特性研究 = **A Study of Acoustic Characteristics of Leakage from Boiler Tubes** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-dong (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206), CHEN Dong-hui (Clyde Beigemann Huatong Material Handling Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100035), DU Yun-gui (CPI Yuanda Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 400060) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 285 ~ 287