

高炉炉料运动过程数学模型的建立及其数值模拟*

程素森 薛庆国

(北京科技大学冶金学院, 北京 100083)

摘要 建立了高炉炉料一维非线性动力学数学模型, 通过对其进行归一化处理, 得到了反映煤气粘性力、炉墙摩擦力、渣水及铁水浮力等对炉料运动影响的6个准数. 用该简化模型可得到与其它模型相同的结果. 应用该模型计算了不同孔隙度炉料相应的临界煤气流速和临界压力. 研究了实际煤气流速与临界煤气流速之差对炉料运动过程的影响, 给出了控制炉料稳定顺行的煤气流速.

关键词 高炉, 数学模型, 孔隙度, 临界煤气流速, 临界压力

中图分类号 TF537, O242

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(1999)04-0407-10

ESTABLISHMENT OF MATHEMATICAL MODEL AND SIMULATION OF BLAST FURNACE BURDEN MOVEMENT PROCESS

CHENG Susen XUE Qingguo

School of Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: CHENG Susen, associate professor, Tel: (010)62332266

Manuscript received 1998-08-28, in revised form 1998-12-24

ABSTRACT A 1-D mathematical model of movement process of blast furnace burden was established and through its normalization six dimensionless numbers which reveal action of gas viscous drag, wall friction, buoyancy of slag and hot metal on movement of burden were obtained. The conclusion obtained by the simplified model is consistent with that by other models. The critical gas stream speed and critical pressure of some kinds of voidage burden were simulated, and the influence of difference between operational gas stream velocity and critical gas flow velocity on the movement of blast furnace burden was also studied. The gas stream speed for controlling stable smooth movement of blast furnace burden are demonstrated.

KEY WORDS blast furnace, mathematical model, voidage, critical gas stream speed, critical pressure

符号说明

A	高炉横截面积, m^2
a_0, a_1, a_2, a_3	方程中的系数
c_1, c_2	比例系数
D	高炉炉身直径, m
g	重力加速度, m/s^2
H	料柱高度, m
l_1, l_2	铁水、渣水深度, m
L_c	准数, 重力与惯性力的比
L_d	准数, 煤气粘性力与炉料惯性力的比
L_e	准数, 炉墙摩擦力与煤气粘性力的比
LF_1	准数, 单位体积铁水浮力与单位体积炉料重力的比
LF_2	准数, 单位体积渣液浮力与单位体积炉料重力的比
m	料柱质量, kg
m_g	料柱重力

p_{cr}	炉料的临界压力, Pa
Re	准数, Reynolds 数, 煤气惯性力与煤气粘性力的比
S	炉料的比表面积, m^{-1}
T	一批炉料从炉喉到风口区所需时间, s
t	料柱运动时间, s
u	位移, $u = x/H$
v, v_0, v_{cr}	实际、空炉及临界煤气流速, m/s
v_b, v_{b0}	料柱下降速度及初始下降速度, m/s
x	料柱的位移, m
Δp_g	高为 H 的料柱的压差, Pa
ϵ, ϵ_c	炉料及死焦柱的孔隙度
$\gamma_c, \gamma_1, \gamma_s, \gamma_b$	焦炭的堆比重, 以及铁水、渣液、炉料的比重, N/m^3
μ	煤气粘度, $kg/(m \cdot s)$
μ_w	单位面积炉墙的摩擦系数, $N \cdot s/m^3$
ρ_1, ρ_2	煤气、炉料密度, kg/m^3
τ	时间比值, $\tau = t/T$

* 国家“九五”重大科技攻关项目 97-225-02 资助

收到初稿日期: 1998-08-28, 收到修改稿日期: 1998-12-24

作者简介: 程素森, 男, 1964年生, 副教授, 博士后

高炉内液态和固态炉料与煤气逆流运动的非线性动力学规律对高炉内热交换和以 CO 传递为主的传质过程有重

要影响. 因而是支配高炉稳定顺行、化学能及煤气热能利用的基本规律. 它是实现高炉全面自动化的重要基础之一.

高炉长寿高效的一个基本前提是: 高炉在操作过程中要保持稳定顺行, 即在操作过程中不发生悬料和崩料. 杨永宜等^[1,2]利用修正的 Janssen 公式讨论了高炉悬料的力学机理; 刘云彩^[3]通过建立数学模型探讨了炉缸上推力对高炉进程的影响; 刘述临^[4]、杨天钧^[5]等利用 Ergun 方程探讨了流体通过炉料层的阻损.

高炉炉料的孔隙度是影响高炉炉料稳定顺行的一个重要参数. 到目前为止, 很少见到高炉炉料运动速度与上述参数之间的定量化报道. Ergun 公式只是给出了炉料孔隙度与单位体积料柱压差之间的关系式, 从中难以得到孔隙度、煤气流速等参数对高炉炉料运动速度的定量化描述.

本文将高炉料柱的运动简化为一维的向下运动, 并考虑其受到炉墙摩擦力、渣铁水的浮力、煤气流的浮力及料柱本身的重力作用, 建立了高炉炉料一维非线性动力学模型. 对该模型的数值模拟揭示出炉料及煤气的物性参数、煤气流速对高炉炉料运动稳定性的影响.

1 高炉炉料运动的一维非线性数学模型的建立

1.1 假设条件

(1) 料柱内无化学反应; (2) 料柱内孔隙度均匀; (3) 固体料柱做一维运动; (4) 炉墙壁面摩擦力系数相同; (5) 料柱内煤气流密度均匀; (6) 料柱内炉料密度均匀; (7) 料柱内的压力损失满足 Ergun 公式.

1.2 数学模型的建立

依据 Newton 第二定律, 有

$$\frac{d[A\rho_2(H-x)(dx/dt)]}{dt} = A(H-x)\rho_2g - (H-x)A \cdot \left[4.2\mu S^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} (dx/dt - v) + 0.292\rho_1 S \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} (v - \frac{dx}{dt})^2 \right] - \mu_w [\pi D(H-x)] \frac{dx}{dt} - A \left\{ l_1 [(1-\varepsilon_c)\gamma_1 - \gamma_c] + l_s [(1-\varepsilon_c)\gamma_s - \gamma_c] \right\} \quad (1)$$

其中, $l_1 = c_1 x A \rho_2 / (A \gamma_1)$, $l_s = c_2 x A \rho_2 / (A \gamma_s)$. 式(1)是一非线性常微分方程, 难以求出其解析解.

2 方程的归一化及 6 个准数的导出

令 $u = x/H$, $\tau = t/T$. 由于 $v = v_0/\varepsilon$, 经归一化处理, 式(1)变为

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} = a_0 + a_1 \frac{u}{(1-u)} + a_2 \frac{du}{d\tau} + (a_3 + \frac{1}{1-u}) \left(\frac{du}{d\tau} \right)^2 \quad (2)$$

式中

$$a_0 = L_c - \frac{1}{\varepsilon^3} L_d (0.0292 Re + 4.2) \quad (3)$$

$$a_1 = -(L_{F1} + L_{F2}) \quad (4)$$

$$a_2 = -\frac{1}{\varepsilon^2} L_d (4.2 + 0.584 Re + \varepsilon^2 L_e) \quad (5)$$

$$a_3 = -0.292 \frac{1}{\varepsilon} Re L_d \quad (6)$$

其中, 重力与惯性力的比

$$L_c = \frac{g}{H/T^2} \quad (7)$$

煤气粘性力与炉料惯性力的比

$$L_d = T\mu \frac{[S(1-\varepsilon)]^2}{\rho_2} = \frac{[(\mu v_0)/H]H^2}{[H/(S(1-\varepsilon))]^2 \rho_2 (v_0/T)} \quad (8)$$

炉墙摩擦力与煤气粘性力的比

$$L_e = \frac{\mu_w v_0 (\pi D H)}{[S(1-\varepsilon)]^2 A} / \left(\frac{\mu v_0}{H} H^2 \right) \quad (9)$$

单位体积铁水浮力与单位体积炉料重力的比

$$L_{F1} = \frac{(1-\varepsilon_c)\gamma_1 - \gamma_c}{\rho_2 H/T^2} \quad (10)$$

单位体积渣液浮力与单位体积炉料重力的比

$$L_{F2} = \frac{(1-\varepsilon_c)\gamma_s - \gamma_c}{\rho_2 H/T^2} \quad (11)$$

煤气惯性力与煤气粘性力的比 (即 Reynolds)

$$Re = \frac{\rho_1 (-v_0)^2 A}{[\mu(-v_0)/H][HS(1-\varepsilon)]A} \quad (12)$$

准数 L_c , L_d , L_e , L_{F1} , L_{F2} 和 Re 表征了煤气的粘性力、炉料惯性力、炉墙摩擦力及渣铁水浮力对炉料稳定顺行的综合影响, 且为无量纲数, 为进行相似实验提供了依据.

3 与前人工作的比较

为与前人工作^[2]进行比较, 以验证本文模型, 忽略式(1)中料柱下降速度 v_b 对料柱质量 m 的影响, 忽略煤气流速和渣、铁水浮力对料柱重力 m_g 影响, 则式(1)变为

$$m \frac{dv_b}{dt} = m_g - \frac{1}{4} \pi D^2 \Delta p_g - \mu_w (\pi D H) v_b \quad (13)$$

解该方程得

$$v_b = D(\gamma_b - \Delta p_g/H) (1 - e^{-\pi \mu_w t D H/m}) / (4\mu_w) + v_{b0} H e^{-\pi \mu_w t D H/m} \quad (14)$$

式中, $v_b = H(dx/dt)$.

图1给出了 v_b 随炉料比重与料柱压力之差的变化.

当 $\gamma_b < (\Delta p_g/H)$ 时, 式(14)右边第一项为负, 此时若第一项绝对值超过第二项时, $v_b < 0$, 即发生悬料, 炉料运动失去稳定性, 此结果同文献^[2]. 式(14)将料柱的比重及压差与炉料运动速度联系起来, 得到的结果更直观明了.

4 临界煤气流速及临界压力

临界煤气流速是指使得高炉炉料不再运动时的煤气流速. 若实际煤气流速 v 大于临界煤气流速 v_{cr} 则发

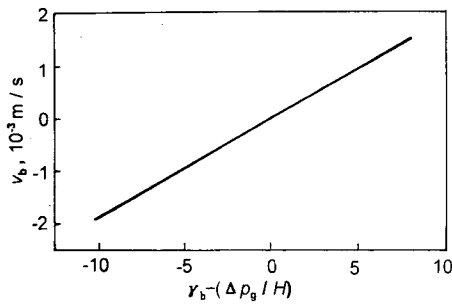


图 1 炉料下降速度 v_b 随 $\gamma_b - (\Delta p_g/H)$ 的变化
Fig.1 Burden velocity v_b vs $\gamma_b - (\Delta p_g/H)$

生悬料, 若 v 小于 v_{cr} 则炉料稳定顺行或发生崩料. 这决定于 v 与 v_{cr} 差异的大小, 这种差异将导致炉料运动行为发生根本性的变化.

由 v_{cr} 的概念可令式 (2) 中的 $du/d\tau = 0$ 及 $u=0$, 得 $a_0=0$. 由式 (2) 一式 (12) 得

$$v_{cr} = \{4.2\mu[S(1-\epsilon)]^2 - [(4.2\mu)^2(S(1-\mu))^4 + 1.168\epsilon^3 \cdot g\rho_1\rho_2S(1-\epsilon)(0.455 + 0.64\epsilon_c)]\} / [0.584\rho_1S(1-\epsilon)] \quad (15)$$

从式 (15) 可见, 煤气流的临界速度 v_{cr} 与煤气的粘度 μ , 炉料的比表面积 S , 死料柱的孔隙度 ϵ_c , 煤气及炉料的密度 ρ_1 和 ρ_2 有关.

5 数学模型的数值模拟及结果分析

取炉料运动的初始速度 $v_{b0} = 0.001$ m/s, 应用 Runge-Kutta 法 [6] 解式 (1).

图 2 给出了不同孔隙度 ϵ 的炉料对应的临界煤气流速速度 v_{cr} 及临界压力 p_{cr} . 当 $v=v_{cr}$ 时, 单位体积料柱所受的压力称为临界压力 p_{cr} . 从图可以看到, v_{cr} 随着 ϵ 的增加而增加; 当 ϵ 接近零时, v_{cr} 也接近零. ϵ 的变化将引起 p_{cr} 较大的变化. 由此可见, 当炉料透气性很差时, 为了保证炉料运动的稳定顺行, 操作将会变得十分困难, 极易发生悬料. 相反则容易出现崩料.

图 3 给出了炉料孔隙度 ϵ 分别为 0.25, 0.35, 0.55 及 0.65 时, 炉内煤气流速速度 v 分别比相应的临界煤气流速速度

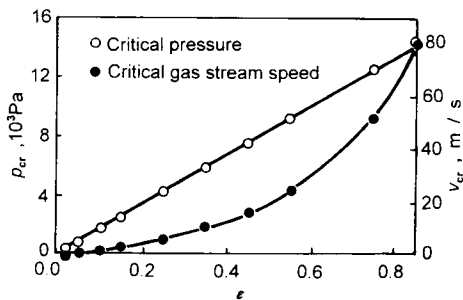


图 2 不同孔隙度 ϵ 时炉料的临界压力 p_{cr} 和临界煤气流速速度 v_{cr}
Fig.2 p_{cr} and v_{cr} vs voidage ϵ

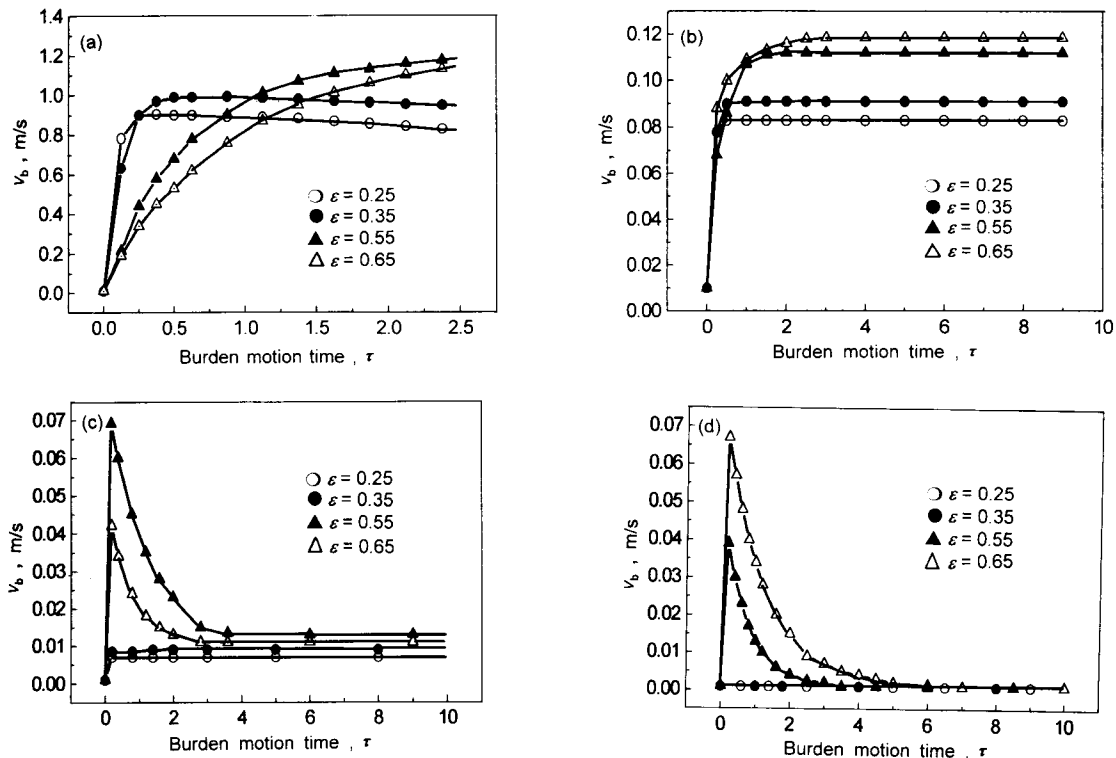


图 3 不同煤气流速速度对不同孔隙度炉料运动状态的影响

Fig.3 Effect of the different gas stream speeds on the movement state of the different voidages of burden
(a) $v=v_{cr}(1-0.1)$ (b) $v=v_{cr}(1-0.01)$ (c) $v=v_{cr}(1-0.001)$ (d) $v=v_{cr}(1-0.00001)$

v_{cr} 小十分之一、百分之一、千分之一及十万分之一时, 料柱下降速度 v_b 的变化情况.

从图 3 可以看到, 炉内煤气流速度 v 与相应的临界煤气流速度 v_{cr} 的差异将决定炉料的运动状态. 当 $v = v_{cr}(1-0.1)$ (图 3a), $v = v_{cr}(1-0.01)$ (图 3b) 及 $v = v_{cr}(1-0.001)$ (图 3c) 时, v_b 已远远超过炉料的正常下降速度, 此时炉料运动失去稳定性并导致崩料发生. 当 $v = v_{cr}(1-0.00001)$ (图 3d) 时, 较大 ε (ε 为 0.55, 0.65) 的炉料初始时刻速度波动较大, 而较小 ε (ε 为 0.25, 0.35) 的炉料基本不波动且基本稳定在炉料正常运动速度范围内, 这说明合适的孔隙度的炉料及合适的炉内煤气流速度 (鼓风量) 是保证炉料稳定顺行的必要条件.

6 结论

(1) 建立了描述高炉炉料运动状态的数学模型, 在简化的情况下所得结果与前人结果一致.

(2) 临界煤气流速度及临界压力随炉料孔隙度的减小而减小. 为了保证高炉炉料运动的稳定顺行, 必须选择合适的鼓风量及有合适孔隙度的炉料.

(3) 运用本模型, 可以计算出保证高炉炉料稳定顺行的实际煤气流速度, 对实现高炉自动化具有重要意义.

参考文献

- [1] Yang Y Y, Zhu Y K. *Acta Metall Sin*, 1965; 8: 157
(杨永宜, 朱永康. 金属学报, 1965; 8: 157)
- [2] Yang Y Y. *The Collection of Yang Y Y*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1997: 188
(杨永宜. 杨永宜论文集. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 188)
- [3] Liu Y C. *Iron Steel*, 1995; 12: 1
(刘云彩. 钢铁, 1995; 12: 1)
- [4] Liu S L. *Unit Design for Metallurgical Process*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988: 19
(刘述临. 冶金过程单元设计. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 19)
- [5] Qin M S, Yang T J. *The Analysis and Modeling of Iron-making Process*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1991: 50
(秦民生, 杨天钧. 炼铁过程的解析与模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 50)
- [6] Editorial Board for Mathematical Manual. *Mathematical Manual*. Beijing: Advanced Education Press, 1979: 687
(数学手册编辑委员会. 数学手册. 北京: 高等教育出版社, 1979: 687)