

大型高炉布料模型的研究与应用

李壮年^{1,2},柳政根¹,储满生¹,陈树文²
(1. 东北大学 冶金学院,辽宁 沈阳 110819;2. 山西太钢不锈钢股份有限公司 炼铁厂,山西 太原 030003)

摘 要:以无料钟布料过程中物料运动机理为基础,改进了料流轨迹的修正方法,提出了料面形状计算的新方法.高炉布料模型在计算过程中考虑了炉料特性、焦炭塌落等对料面形状的影响,使计算结果更符合实际布料.结合生产实践需求,计算出了各种不同布料制度下炉料的料面形状、炉料径向分布、径向矿焦比等参数,提出了高炉区域焦炭负荷指数,更加直观、形象地对比各种布料制度.利用该模型可解答大型高炉生产上存在的问题,对高炉的实际生产提出了实用性建议,为高炉操作人员调整布料制度提供了理论指导.

关 键 词:大型高炉;布料模型;料流轨迹;料面形状;布料制度

中图分类号:TF 531 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)05-0658-05

Research and Application of Burden Charging Model for Large Blast Furnace

LI Zhuang-nian^{1,2}, LIU Zheng-gen¹, CHU Man-sheng¹, CHEN Shu-wen²
(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Ironmaking Plant, Shanxi Taigang Stainless Iron Shares Co., Ltd., Taiyuan 030003, China. Corresponding author: CHU Man-sheng, professor, E-mail: chums@smm.neu.edu.cn)

Abstract: A new method of calculating charging profile was proposed which based on the mechanism of material movement in the charging process and improved the correction method of material flow path. As the model takes into account the effects of charge characteristics, coke collapsing and other factors on the charging profile, it makes the simulation results more accurate in practice. When its setup combines with industrial conditions, the model can calculate the parameters of charging profile, radial distribution of material, radial O/C rate and etc. under different charging systems. The area coke load index of blast furnace (BF) has been defined which makes it more evident when comparing the difference of various charging system. Using the model, some existing problems in large BF could be solved and also the practical suggestion can be proposed for the actual production. The model could further provide theoretical guidance of adjusting charging system for BF operators.

Key words: large blast furnace; burden charging model; material flow path; charging profile; charging system

高炉布料始终是国内外学者的研究热点^[1-3],目前关于高炉布料的研究很多,其中有数值模拟^[4]、物理模拟^[5]、人工智能^[6]等,但是真正能够为生产提供指导作用的并不多.随着高炉大型化和高效化的发展,大型高炉的布料矩阵日益复杂,迫切需要开发对大型高炉布料操作有指导意义的布料模型.

传统的料面形状计算方法是将料面形状根据开炉料面或模型试验预设为几段料面曲线,但实际上料面形状是由炉料特性、落点的速度和位置等因素共同决定的,任何条件变化都会改变料面形状,而且对高炉有指导意义的是布料模型可以分析当炉料特性、落点位置等条件变化后料面形状如何变化以及预测对炉况的影响.

本模型以无料钟布料过程中物料运动机理为基础,改进了料流轨迹的修正方法,对料面形状计算方法进行了创新,利用高炉开炉实际测量数据对模型参数进行修正和验证,结合生产实践需求,计算出各种不同布料制度下炉料料面形状、炉料径向分布、径向矿焦比等参数^[7-8]。结合该模型计算结果可以解答大型高炉上存在的问题,帮助高炉操作者调整布料制度。

1 高炉布料模型

1.1 简介

模型计算时首先设定布料矩阵参数、原燃料参数和布料基础参数,将参数代入到料流轨迹方程,不同的物料或布料矩阵计算出不同的料流轨迹,计算出料流落点和速度,代入料面方程,得出料面形状,由料面形状可计算出径向炉料分布和径向焦炭负荷等。

在料流轨迹计算过程中,对物料和溜槽的碰撞系数和物料在溜槽上运动时的摩擦系数同时进行修正,考虑了煤气流对小粒级矿石的影响,以便

$$C_1 = \sqrt{2gl_0(\cos\alpha - \mu\sin\alpha) + 4\pi^2\omega^2l_0^2\sin\alpha(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) + C_0^2}, \tag{2}$$

$$L_x = \frac{mC_1^2\sin^2\alpha}{Q - P} \left\{ \sqrt{\frac{1}{\tan^2\alpha} + \frac{2(Q - P)}{mC_1^2\sin^2\alpha}} [l_0(1 - \cos\alpha) + h] - \frac{1}{\tan\alpha} \right\}, \tag{3}$$

$$n = \sqrt{l_0^2\sin^2\alpha + 2l_0\sin\alpha L_x + \left(1 + \frac{4\pi^2\omega^2l_0^2}{C_1^2}\right)L_x^2}. \tag{4}$$

式中 l_0 为溜槽长度, m; μ 为物料与溜槽的摩擦系数; C_0 、 C_1 分别为物料在溜槽上的初始速度和末端速度, m/s; Q 为物料重力, N; P 为煤气阻力, N; h 为物料落程, m; L_x 为物料在空区 x 方向运行距离, m; n 为堆尖距高炉中心线距离, m。

在高炉冶炼强度范围内,煤气阻力对炉料的影响主要是小于 5 mm 的矿石,模型对该类矿石采用公式(3)计算,其他物料计算时 P 取值为 0^[7]。

由实测可知,当溜槽倾角 α 小于一定程度,物料颗粒在溜槽表面上的运动不是紧贴表面的向下滑动,而是跳跃式前进。在此情况下,摩擦系数失去意义^[10]。通过分析开炉数据,当溜槽倾角小于一定角度后物料与溜槽的摩擦系数会大幅减小。本模型采用的修正方法是:溜槽倾角大于 31° 时取值为固定值(可根据开炉数据进行反推);溜槽倾角小于 31°,摩擦系数修正式为 $\mu = \mu_0 \cdot \alpha^{0.5}/100$ 。

通过反复对比开炉数据得出的这种修正方法的计算结果更符合物料实际运动轨迹,模型计算

计算出更精确的物料速度;计算料面形状时基于物料堆角形成过程,得出非线性方程,通过迭代计算出料面方程。

1.2 料流轨迹计算

料流阀处初始速度^[9]:

$$v_0 = \frac{G}{\pi(2A/L_x - D_i/2)^2}. \tag{1}$$

其中: G 为实测炉料出节流阀时的流量, m³/s; A 为节流阀投影面积, m²; L_x 为节流阀周边边长, m; D_i 为第 i 圈炉料平均粒径, m。

当下落的炉料与溜槽碰撞时,溜槽角度 α 不同,速度碰撞系数 λ_1 也不同,通过分析开炉料流轨迹可知当溜槽倾角小于一定角度后碰撞系数会增大。当溜槽倾角 α 大于 31° 时,焦炭碰撞系数取值 0.70,矿石碰撞系数取值 0.71^[9],计算结果与开炉数据吻合;当溜槽倾角小于 31° 时,料槽倾角越小,模型计算结果和开炉数据偏差越大。

本模型对碰撞系数进行了修正,其修正式为 $\lambda_1 = k \cdot \cos\alpha$,其中 k 为修正系数,取值 0.8 ~ 1.0。

物料在溜槽和空区运动轨迹计算过程^[7]:

出的物料运动速度也更为准确。

1.3 料面形状计算

根据能量守恒原理,在炉料运动形成堆角的过程中炉料颗粒初始的动能和势能转变为摩擦消耗的内能。假设 v_0 极小,接近等于 0 时,形成自然堆角 β ,此时达到能量平衡,即炉料颗粒的势能刚好转变为摩擦消耗的内能;而当 v_0 大于 0 时,根据能量守恒得出方程:

$$\tan\beta_1 = \tan\beta / \left(\frac{v_0^2}{2gh} + 1 \right). \tag{5}$$

式中 β_1 为新堆角; v_0 为物料沿自然堆角方向的速度, m/s; h 为物料运动垂直高度, m;

根据式(5)可知,高度为 h 处新形成的堆角和物料初始速度、自然堆角有关,速度越大,堆角 β_1 越小;自然堆角越大 β_1 越大。

以初始落点为坐标原点,水平方向为 X 轴,垂直方向为 Y 轴建立坐标系,可得

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\tan\beta}{\left(\frac{v_0^2}{2gy} + 1 \right)}. \tag{6}$$

通过积分计算可得

$$x=\frac{v_0}{2g\tan\beta}\ln(y+1)+\frac{y}{\tan\beta}.$$

(7)

在模型计算中,需要计算 x 处对应的 y 值,式(7)为非线性方程,计算时采用逼近法迭代运算.采用式(7)计算时,需确定 v_0 ,假设碰撞前炉料颗粒速度:水平方向 v_x ,垂直方向 v_y ;当炉料颗粒运动方向和堆角方向相同时,水平方向速度转变为沿自然堆角方向速度 $v_x\cdot\cos\beta$,垂直方向速度转变为沿自然堆角方向速度 $\lambda_1\cdot v_y\cdot\sin\beta$,其中 λ_1 为碰撞系数,碰撞后炉料颗粒速度:

$$v_0=v_x\cdot\cos\beta+\lambda_1\cdot v_y\cdot\sin\beta.$$

(8)

当炉料颗粒运动方向和堆角方向相反时,水平方向速度转变为沿自然堆角方向速度 0;垂直方向速度转变为沿自然堆角方向速度 $\lambda_1\cdot v_y\cdot\sin\beta$,碰撞后炉料颗粒速度:

$$v_0=\lambda_1\cdot v_y\cdot\sin\beta.$$

(9)

计算料面形状时采用逐步逼近的办法,首先计算该圈炉料体积,布料后料线上涨,料面方程也变化,根据料面高差计算炉料体积,随着料线上涨,炉料体积增大,直至等于该圈炉料体积,记录最终料线,即可确定布料后的料面方程.体积计算采用微分分割法,计算不同径向旋转后的体积.

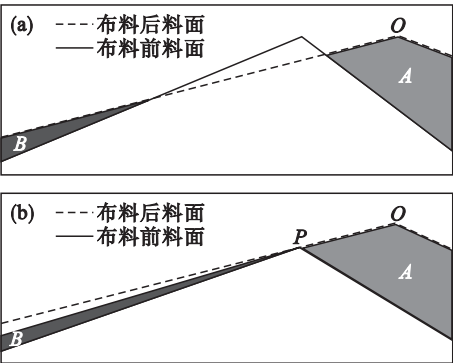


图 1 特殊料面形状
Fig. 1 Special charging profile
(a)—形状 1;(b)—形状 2.

计算时考虑了如图 1 所示的两种特殊料面形状,如图 1a 所示,在堆尖 O 处布料,实际只能布在 A 区域, B 区域炉料无法达到,通常矿石堆角小于焦炭堆角,该情况一般发生在焦炭料面上布矿石的时候;如图 1b 所示,炉料在 A 区域布满,新料面高于旧料面交界点 P ,炉料可以到达 B 区域.

此外,在距高炉中心线 0.5 m 范围内,结合开炉料面形状进行修正,修正为二次曲线.

焦炭塌落的影响需试验确定,相关研究表明实际焦炭堆角比被矿石冲击前形成的堆角要小.

$$\beta_1=\lambda_2\cdot\beta_0.$$

(10)

其中 β_1 为焦炭塌落后堆角; λ_2 为塌落系数; β_0 为焦炭自然堆角.

经模型计算可以得出每圈炉料的料面方程,每圈炉料在径向的料层厚度.

1.4 模型计算

模型计算时预先设定布料矩阵参数、原燃料参数和布料基础参数,如图 2 所示.其中矿石的布料矩阵设定方法是:首先,按次序设定矿石各圈的角度,如果设定值为 0 或空值时表示该圈不布料;其次,设定各圈矿石中各炉料的质量比例(布料角度右侧参数);再次,设定各炉料特性参数,包括堆角、堆密度、粒度、摩擦系数,在模型计算时采用加权平均法计算出各圈物料的相关参数;最后,核对布料模型基础参数,运行程序,即可计算出如图 2 左侧的料面形状.

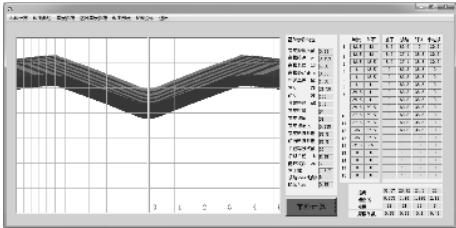


图 2 高炉布料模型程序画面
Fig. 2 BF burden charging model program

模型的初始料面是由设定的布料角度和料线处的料面方程直接计算得出,每罐料的料面计算流程图如图 3 所示.在此基础上得出的料面方程经 3~4 次循环计算后即可得到稳定的料面形状.

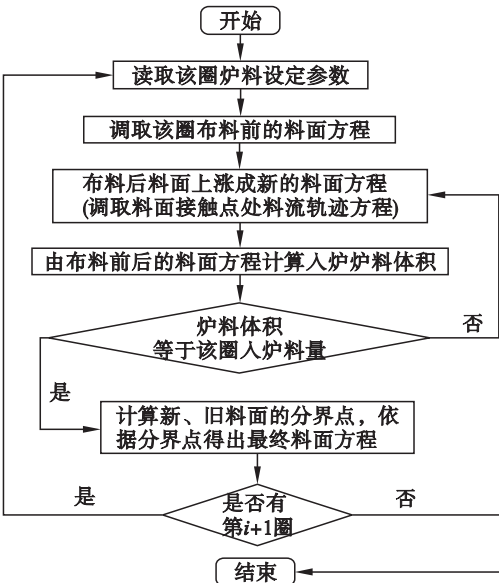


图 3 料面计算流程图
Fig. 3 Flow chart of charging profile calculation

根据计算得出的料面形状和各圈炉料径向厚度,可以计算出 径向焦炭负荷,区域焦炭负荷,径向炉料分布等结果,计算结果如图 4 所示.该模型也可以计算径向碱度,化学成分组成等.其中径向区域焦炭负荷是指将高炉从中心到边缘等距离分为 5 等份,分别计算出各区域的焦炭负荷,该结果可以直观地表示出高炉径向焦炭负荷情况.

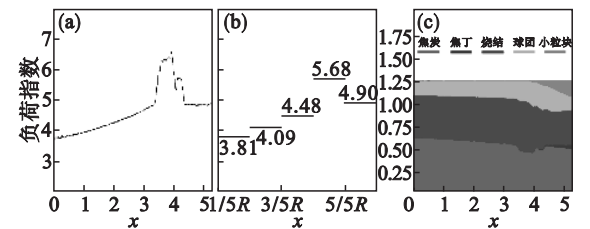


图 4 高炉布料模型计算结果

Fig. 4 Calculation results of BF burden charging model

(a)—径向焦炭负荷;(b)—区域焦炭负荷;
(c)—炉料分布.

2 布料模型在大型高炉上的应用

2.1 利用布料模型分析炉况波动机理

太钢 6[#]高炉为炉容 4 350 m³ 的大型高炉,自 2013 年 11 月开炉以来炉况稳定性较差,表现为风压波动大,下料崩滑尺多,热负荷波动频繁,炉况波动大时易冒管道,且炉况难以恢复.以 2014 年 4 月布料制度为例进行计算,布料制度如表 1 所示,模型计算结果如图 5 所示.可以看出,2014 年 4 月布料制度方面的特点是边缘负荷较轻,中心和次中心区域焦炭负荷均比边缘负荷重.这种布料制度导致边缘气流易发展,中心气流不足,边缘气流局部过剩时就会导致管道现象发生.

表 1 太钢 6[#]高炉 2014 年 4 月布料制度
Table 1 Charging system of TICOS 6th BF in April 2014

角度/(°)	41.5	40	38	36	34	31.5
PWC	3	3	3	2	2	1
PWO	3	3	2	2	2	1

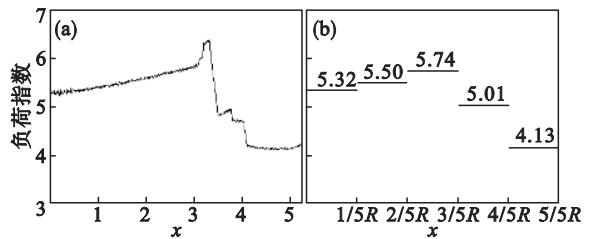


图 5 太钢 6[#]高炉 2014 年 4 月份布料模型计算结果

Fig. 5 Calculation results of BF charging model of TICOS 6[#] BF in April 2014

(a)—径向焦炭负荷;(b)—径向区域焦炭负荷.

6[#]高炉逐步加重边缘负荷,疏导中心气流,采用大风量活跃炉缸,匹配布料制度和送风制度,炉况逐步好转,经过不断探索,管道现象基本消除.以 2014 年 12 月布料制度进行计算,布料制度如表 2 所示,模型计算结果如图 6 所示.

表 2 太钢 6[#]高炉 2014 年 12 月布料制度
Table 2 Charging system of TICOS 6th BF in December 2014

角度/(°)	43	42.5	41	39.5	37.5	35	31.5
PWC	0	3	3	3	2	2	1
PWO	2	3	3	3	2	1	0

为了更形象地对比两种布料制度,分别计算了两种布料制度下的高炉区域焦炭负荷指数,如图 6 所示.高炉区域焦炭负荷指数是指各区域的焦炭负荷与总的焦炭负荷的比值.由图 6 可以直观地看出布料制度调整后的变化,可知 2014 年 12 月的布料制度更加合理.

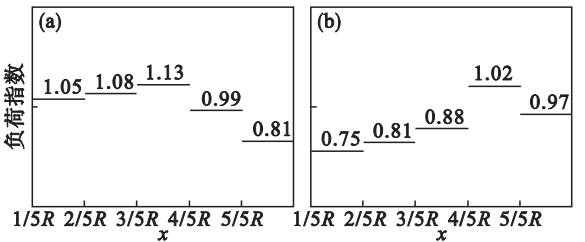


图 6 太钢 6[#]高炉区域焦炭负荷指数

Fig. 6 Area coke load index of TICOS 6[#] BF

(a)—2014 年 4 月;(b)—2014 年 12 月.

2.2 利用布料模型分析“平台+漏斗”布料机理

国内许多大型高炉都采用“平台+漏斗”布料模式,如何平衡“平台”和“漏斗”的大小一直是确定布料制度的难点.通过模型计算结果图 7 可以看出,矿石最后 1~2 圈的落点可以看作是“平台”和“漏斗”的分界点(图 7 中 M 点),是调整布料制度的关键点.太钢 6[#]高炉生产实践也表明,若炉况较差造成减风且风量不易恢复,去掉中心 1 圈矿石对疏松中心作用较大.在日常布料制度调剂中需要重点观察矿石最后 1~2 圈对炉况的影响,平衡“平台”和“漏斗”.

此外,焦炭最后 1~2 圈是保证中心气流的关键.如果矿石堆角小于焦炭堆角较多时(球团比例较多时),矿石很容易滚动至中心.为了保证中心气流,调整布料制度时,焦炭最后 1~2 圈的落点应更靠近中心(如图 N 点比 M 点更靠近中心),这也是高炉顺行的关键.

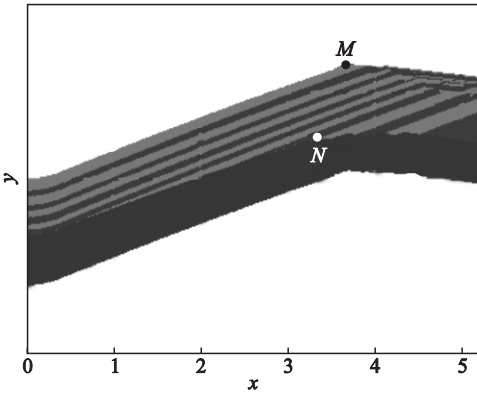


图 7 “平台 + 漏斗”布料模拟图

Fig. 7 ‘ Platform + Funnel ’ charging simulation diagram

3 结 论

- 1) 基于无料钟布料过程物料运动机理 ,改进了料流轨迹修正方法 ,创新了料面形状计算方法 ,获得了新的布料模型 ,同时利用高炉实际开炉数据对模型参数进行修正和验证.
- 2) 通过对物料堆角形成过程解析 ,得出新的料面方程 ,该方程具有通用性.
- 3) 模型在计算过程考虑了各种影响布料的因素 ,包括 :炉料特性对料面形状的影响 ,煤气流对小粒级矿的影响 ,焦炭塌落对料面的影响 ,使计算结果更符合实际高炉布料.
- 4) 利用该模型解答了大型高炉上存在的问题 ,根据生产实践提出实用性建议 ,提出了高炉区域焦炭负荷指数 ,更加直观、形象地对比各种布料制度 ,指导高炉操作人员调整布料制度 ,取得了很好的效果.

参考文献 :

[1] Shigeru U ,Shungo N ,Hiroshi N ,et al. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace [J]. *ISIJ International* 2010 ,50(7) :914 - 923.

[2] Yoshimasa K ,Takanobu I ,Tsutomu T. Two dimensional analysis on the formation process of burden distribution at blast furnace top [J]. *ISIJ International* , 1988 ,28(11) : 916 - 925.

[3] Teng Z ,Cheng S ,Du P ,et al. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace [J]. *International Journal of Minerals ,Metallurgy and Materials* , 2013 ,20(7) :620 - 625.

[4] 储满生 ,王宏涛 ,柳政根 ,等. 高炉炼铁过程数学模拟的研究进展 [J]. *钢铁* 2014 ,49(11) :1 - 8.
(Chu Man-sheng ,Wang Hong-tao ,Liu Zheng-gen ,et al. Research process on mathematical modeling of blast furnace ironmaking process [J]. *Iron and Steel* ,2014 ,49(11) : 1 - 8.)

[5] 李海峰 ,罗志国 ,张树才 ,等. 溜槽角度对混装布料过程的影响 [J]. *东北大学学报(自然科学版)* ,2012 ,33(5) : 681 - 684.
(Li Hai-feng ,Luo Zhi-guo ,Zhang Shu-cai ,et al. Effect of chute angle on process of mixing charging [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* ,2012 ,33(5) : 681 - 684.)

[6] Mats N ,Henrik S. Prediction of a blast furnace burden distribution variable [J]. *ISIJ International* ,1996 ,36(9) : 1142 - 1150.

[7] 刘云彩. 高炉布料规律 [M]. (第 4 版)北京 :冶金工业出版社 2012.
(Liu Yun-cai. Burden distribution in blast furnace [M]. 4th ed. Beijing :Metallurgy Industry Press 2012.)

[8] Radhakrishnan V R ,Maruthy R K. Mathematical model for predictive control of the bell-less top charging system of a blast furnace [J]. *Journal of Process Control* 2001 ,11(5) : 565 - 586.

[9] Bolshakov V I ,Semenov Y S ,Ivancha N G ,et al. Study of the flow of burden materials and their distribution on the furnace top of a modern blast furnace [J]. *Metallurgical and Mining Industry* 2012 ,4(3) :158 - 165.

[10] Park J ,Baek U ,Jang K ,et al. Development of the burden distribution and gas flow model in the blast furnace shaft [J]. *ISIJ International* , 2011 ,51(10) :1617 - 1623.