

文章编号:1000-582X(2009)04-381-06

# 高炉内液体流动特征的数学描述

王成善<sup>1</sup>,肖兴国<sup>2</sup>,王文忠<sup>2</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:**高炉内液体流动现象的研究对高炉工艺的控制与开发、炼铁工艺模拟具有重要意义。针对液流由非润湿液滴组成、惯性力对运动影响可忽略、液流沿垂直于速度的方向散开等高炉内液体运动的特点,分别给予较合适的数学描述,建立了一个可预测高炉内液流分布和液体流动范围的数学模型。该数学模型数值求解网格尺度仅满足数值精度即可,不必和床层填充颗粒尺寸相一致。模型预测结果和实验数据有较好的一致性。高炉模拟中该模型是一个可供选择的模型。

**关键词:**炼铁;高炉;填充床;液体流动;数学模型

中图分类号:TF532

文献标志码:A

## A mathematical description of the liquid flows inside blast furnaces

WANG Cheng-shan<sup>1</sup>, XIAO Xing-guo<sup>2</sup>, WANG Wen-zhong<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, P. R. China)

**Abstract:** The knowledge of liquid flows in blast furnaces may play an important role in controlling the blast furnace process. Appropriate assumptions are given to represent the main characteristics of the liquid flow in blast furnaces, such as liquid streams being composed of un wetting liquid droplets, inertial force having little effect on the liquid flows, and mass exchange existing along the direction perpendicular to liquid flow. A mathematical model is built to predict the distribution of the liquid flow rate and the liquid flow range in packed beds. The scale of the numerical grid used to solve this model may not necessarily be reduced to the particle level. The predicted results of this model accord well with the observed data. This model is an alternative theory for the simulation of blast furnaces

**Key words:** iron making; blast furnace; packed bed; liquid flow; mathematical model

高炉内液体流动现象的研究可以为高炉炼铁工艺的开发和伴随开发的工艺模拟提供理论基础。对高炉内填充床中液体流动现象的模拟一直主要以势流模型和 N-S 方程等连续运动理论描述。但应用势流模型和 N-S 方程等连续运动理论模拟高炉床层内液体流动存在一定的局限性。这些理论方程的求解区域须是床层内液体的流动区域<sup>[1-2]</sup>,不是整个填充床层区域,这样才能获得较理想的模拟结果。换言

之,势流模型和 N-S 方程等连续运动理论不能预测液流在填充床层内流动扩展的范围。

针对连续运动模型的上述局限性,已有几个在高炉模拟中可替代连续运动理论的数学模型。力平衡模型<sup>[3-5]</sup>内容是气体对液滴的曳力、液滴重力、填充床对液滴的阻力三力平衡;它不能描述液流在填充床中由一点出发而散开的现象。随机分布模型<sup>[6-8]</sup>应用随机速度变量及其分布描述在填充床中

收稿日期:2009-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50704040)

作者简介:王成善(1972-),男,重庆大学博士,主要研究方向为钢铁冶金,(E-mail) wangchengshan@sina.com。

由一点出发而散开的液流。但该模型还未对液体引入填充床后的非稳态过程给出描述。另外,作为该模型参数的随机速度最大值是用实验曲线在某一点切线的斜率确定的,实验曲线在切点附近应该有较多的实验点,以确保用实验决定模型参数。但该模型在切点处只有1个实验点<sup>[7]</sup>,实验曲线上其它实验点对切点斜率几乎没有贡献。结构模型<sup>[9-12]</sup>考虑填充床的具体结构。目前,这类模型内容上一般都不全面,另外更重要的是,和这类模型耦合的传输方程的数值计算网格尺寸必须和床内填充颗粒尺寸相一致,阻碍了这类模型在工程上的应用<sup>[6]</sup>,至今未见这类模型在整个高炉规模上应用的例子。

笔者在力平衡模型基础上,给出一个能反映高炉内床层中液体流动特征,能描述由填充床内一点出发而散开的液流,能预测液体在床中扩展范围的数学模型。

## 1 数学模型

### 1.1 模型内容

由于高炉内熔融液体和焦炭颗粒的非润湿性,熔融液体以液滴的形式在焦炭床层中运动。在这种情况下,液体的运动状态用液体运动的实际速度  $\mathbf{u}_l = (u_{lx}, u_{ly})$ 、流动液体占床层的体积分数  $\epsilon_l$  和液滴直径  $d_l$  等变量体现。

高炉中单位床层体积内流动液体所受重力为

$$\mathbf{f}_g = \rho_l \epsilon_l \mathbf{g}, \quad (1)$$

式中,  $\rho_l$  是液体密度,  $\mathbf{g}$  是重力加速度。单位床层体积内,气体对流动液体(滴)的曳力为

$$\mathbf{f}_d = \frac{6\epsilon_l}{\pi d_l^3} \cdot C_d \cdot \left(\frac{\pi}{4} d_l^2\right) \cdot \left(\frac{1}{2} \rho_g |\mathbf{u}_g|\right) \cdot \mathbf{u}_g, \quad (2)$$

式中,  $C_d$  是曳力系数,  $\rho_g$ 、 $\mathbf{u}_g$  分别是气体密度和速度。由文献报导的实验知<sup>[3,13]</sup>:高炉内床层中,非润湿液滴的大小主要决定于床层填充结构,受气体和液体成分、粘度及在较宽范围内变化的气体流速和液体流量的影响可以不考虑

$$d_l = \frac{2}{3} \frac{\epsilon}{1-\epsilon} d_p, \quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  是床层空隙率,  $d_p$  是床层内颗粒直径。

一般地,填充床对流动液体的阻力可以写作<sup>[2-3,6]</sup>

$$\mathbf{f}_R = -R\mathbf{u}_l, \quad (4)$$

假设阻力系数  $R$  和流动液体的体积分数  $\epsilon_l$  成正比:  $R = k_R \epsilon_l$ , 上式写为

$$\mathbf{f}_R = -k_R \epsilon_l \mathbf{u}_l, \quad (5)$$

$$k_R = \frac{180(1-\epsilon)^2 \mu_l}{\epsilon^3 d_p^2}, \quad (6)$$

式(6)  $\mu_l$  中是液体粘度。

高炉内液体的运动特征之一是液体运动状态主要受液体重力和气体对液滴的曳力等体积力控制,惯性力的影响可忽略<sup>[2-4,6-8]</sup>,而且这些体积力和床层的阻力  $\mathbf{f}_R$  平衡,即

$$\mathbf{f}_g + \mathbf{f}_d + \mathbf{f}_R = \mathbf{0}, \quad (7)$$

将式(1)、(2)和(5)代入上式得

$$\mathbf{u}_l = \frac{\rho_l}{k_R} \mathbf{g} + \frac{6}{\pi d_l^3} \cdot \frac{C_d}{k_R} \cdot \left(\frac{\pi}{4} d_l^2\right) \cdot \left(\frac{1}{2} \rho_g |\mathbf{u}_g|\right) \cdot \mathbf{u}_g, \quad (8)$$

高炉内液体运动的另一特征是在填充床中由一点出发的液流会在一定范围散开(见图1(a))。此种现象说明伴随液体速度  $\mathbf{u}_l = (u_{lx}, u_{ly})$  向前输运液体的同时,由于填充床层的存在,沿垂直于液体速度的方向,向周围均匀地散开一部份液体。若伴随液体速度  $\mathbf{u}_l = (u_{lx}, u_{ly})$  输运液体量记为  $\mathbf{M} = (M_x, M_y)$ , 则

$$M_x = \rho_l \epsilon_l u_{lx}, \quad (9)$$

$$M_y = \rho_l \epsilon_l u_{ly}, \quad (10)$$

沿垂直于液体速度的方向,向周围均匀散开的液体量,在二维坐标中可用一对大小相同、方向相反且皆与  $\mathbf{u}_l$  垂直的向量表示(见图1(c));在图1(c)中将此两向量分别记为  $\mathbf{N} = (N_x, N_y)$  和  $-\mathbf{N} = (-N_x, -N_y)$ 。文中假设  $\mathbf{N}$  和  $-\mathbf{N}$  的大小为

$$|\mathbf{N}| = k \cdot \rho_l \epsilon_l |\mathbf{u}_l| = k \cdot \rho_l \epsilon_l \sqrt{u_{lx}^2 + u_{ly}^2}, \quad (11)$$

其中  $k$  是无量纲的模型参数,与  $\rho_l$ 、 $\epsilon_l$  和  $|\mathbf{u}_l|$  无关,主要决定于填充床层结构,可由实验确定。此假设来自以下分析:若处于床层同一位置的所有液滴的尺寸都相等的话,  $\epsilon_l$  代表了单位床层体积内液滴数量的多少,  $\epsilon_l |\mathbf{u}_l|$  代表了伴随  $\mathbf{u}_l$  输运液滴数量的多少,  $\epsilon_l |\mathbf{u}_l|$  越大,沿垂直于液体速度的方向,向周围散开液体量越多。

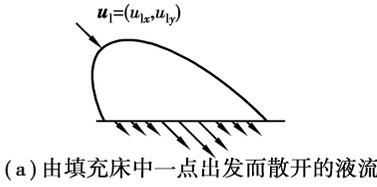
从图1(b)可看出:向量  $-\mathbf{N} = (-N_x, -N_y)$  和  $\mathbf{N} = (N_x, N_y)$  沿  $x$  轴的分向量分别是  $(|N_x|, 0)$  和  $(-|N_x|, 0)$ ; 沿  $y$  轴的分向量分别是  $(0, -|N_y|)$  和  $(0, |N_y|)$ , 而且

$$|N_x| = |\mathbf{N}| \cdot \frac{|u_{ly}|}{\sqrt{u_{lx}^2 + u_{ly}^2}} = k \cdot \epsilon_l \cdot \rho_l \cdot |u_{ly}|, \quad (12)$$

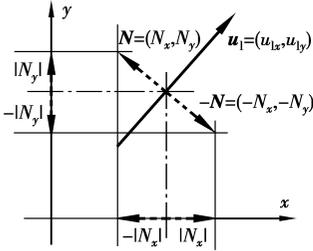
$$|N_y| = |\mathbf{N}| \cdot \frac{|u_{lx}|}{\sqrt{u_{lx}^2 + u_{ly}^2}} = k \cdot \epsilon_l \cdot \rho_l \cdot |u_{lx}|, \quad (13)$$

由于同一位置的  $\mathbf{N}$  和  $-\mathbf{N}$  两向量大小相等,方向相反,它们在  $x$  轴上的分量,大小也相等,方向也相反(见图1(b)),  $x=0$  处有指向  $x$  轴负方向的  $-|N_x|$  和指向  $x$  轴正方向的  $|N_x|$ ;  $x=0$  处有  $-|N_x|$  和  $|N_x|$ 。在  $x$  处,由填充床内液流沿垂直于液体速度的方向散开的作用而产生的,垂直于  $x$  轴的平面两侧的液体质量交换量  $n_x|_x$

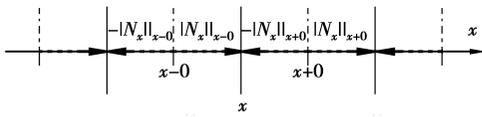
是  $x$  处平面左侧 ( $x-0$  处) 的指向  $x$  轴正方向的  $|N_x|_{x-0}$  及  $x$  处平面右侧 ( $x+0$  处) 的指向  $x$  轴负方向  $-|N_x|_{x+0}$  之和,即



(a) 由填充床中一点出发而散开的液流



(b) 沿垂直于液体速度方向,散开液体量的描述



(c) 向量  $-N$  和  $N$  沿  $x$  轴的分向量

图 1 液流沿垂直于液体速度的方向散开

$$n_x|_x = |N_x|_{x-0} - |N_x|_{x+0} = k\rho_l [(\epsilon_1 |u_{ly}|) |_{x-0} - (\epsilon_1 |u_{ly}|) |_{x+0}], \quad (14)$$

同样地

$$n_y|_y = k\rho_l [(\epsilon_1 |u_{lx}|) |_{y-0} - (\epsilon_1 |u_{lx}|) |_{y+0}], \quad (15)$$

由于液流沿垂直于液体速度的方向散开的作用,任一平面两侧产生质量交换;由于伴随液体速度的输运作用,任一平面两侧也产生质量交换。在图 2(a)中  $x-0$  侧液体经过  $x$  处平面流向  $x+0$ ,而  $x+0$  侧不流向  $x-0$  侧,伴随液体速度的输运作用产生的质量交换量,  $m_x|_x = M_x|_{x-0}$ ; 图 2(b)中  $x+0$  侧液体经过  $x$  处平面流向  $x-0$  侧,而  $x-0$  侧不流向  $x+0$  侧,  $m_x|_x = M_x|_{x+0} = -(-M_x|_{x+0})$ ; 图 2(c)中  $x-0$  侧液体经过  $x$  处平面流向  $x+0$ ,而  $x+0$  侧也经  $x$  处流向  $x-0$  侧,  $m_x|_x = M_x|_{x-0} + M_x|_{x+0} = M_x|_{x-0} - (-M_x|_{x+0})$ 。将以上 3 种情况写成统一形式

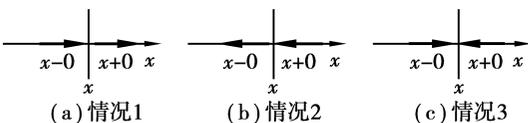


图 2 由伴随液体速度的输运作用而产生的、与  $x$  轴垂直的平面两侧的质量交换

$$m_x|_x = \max(M_x|_{x-0}, 0) - \max(-M_x|_{x+0}, 0), \quad (16)$$

同样地

$$m_y|_y = \max(M_y|_{y-0}, 0) - \max(-M_y|_{y+0}, 0), \quad (17)$$

如图 3 所示,在二维坐标系中选一微元体  $dx dy$ 。当坐标  $x$  变化到  $x+dx$  时,  $m_x|_x$  和  $n_x|_x$  变化到  $m_x|_{x+dx}$  和  $n_x|_{x+dx}$ ; 当坐标  $y$  变化到  $y+dy$  时,  $m_y|_y$  和  $n_y|_y$  变化到  $m_y|_{y+dy}$  和  $n_y|_{y+dy}$ 。由微元体质量守恒可得

$$\rho_l \frac{\partial \epsilon_1}{\partial t} + \frac{\partial (m_x|_x + n_x|_x)}{\partial x} + \frac{\partial (m_y|_y + n_y|_y)}{\partial y} = r, \quad (18)$$

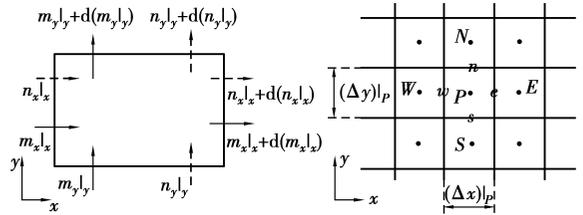


图 3 微元体  $dx dy$  图 4 控制容积  $(\Delta x)|_p \cdot (\Delta y)|_p$

### 1.2 模型解法

一般情况下,可用数值方法获得上述数学模型的解。为离散式(18),将其在图 4 中  $P$  控制容积  $[(\Delta x)|_p \cdot (\Delta y)|_p]$  内积分,变换成关于  $m_x|_e$ 、 $n_x|_e$ 、 $m_x|_w$ 、 $n_x|_w$ 、 $m_y|_n$ 、 $n_y|_n$ 、 $m_y|_s$  和  $n_y|_s$  的差分方程式界面  $e$ 、 $w$ 、 $n$  和  $s$  (见图 4)。利用式(14)、(15)、(16)和(17)确定  $m_x|_e$ 、 $n_x|_e$ 、 $m_x|_w$ 、 $n_x|_w$ 、 $m_y|_n$ 、 $n_y|_n$ 、 $m_y|_s$  和  $n_y|_s$  与  $P$ 、 $E$ 、 $W$ 、 $N$ 、 $S$  (见图 4) 等控制容积中心上  $\epsilon_1$ 、 $u_{lx}$  和  $u_{ly}$  的值的关系。利用这些关系式将差分方程式中的  $m_x|_e$ 、 $n_x|_e$ 、 $m_x|_w$ 、 $n_x|_w$ 、 $m_y|_n$ 、 $n_y|_n$ 、 $m_y|_s$  和  $n_y|_s$  替换出来,整理可得  $A_P \cdot \epsilon_1|_P = A_E \cdot \epsilon_1|_E + A_W \cdot \epsilon_1|_W + A_N \cdot \epsilon_1|_N + A_S \cdot \epsilon_1|_S + b$ , (19) 式中:

$$A_P = \frac{(\Delta x)|_p \cdot (\Delta y)|_p}{\Delta t} + |u_{lx}|_P \cdot (\Delta y)|_P + |u_{ly}|_P \cdot (\Delta x)|_P + 2k \cdot |u_{ly}|_P \cdot (\Delta y)|_P + 2k \cdot |u_{lx}|_P \cdot (\Delta x)|_P;$$

$$A_E = \max[-u_{lx}|_E, 0] \cdot (\Delta y)|_P + k \cdot |u_{ly}|_E \cdot (\Delta y)|_P;$$

$$A_W = \max(u_{lx}|_W, 0) \cdot (\Delta y)|_P + k \cdot |u_{ly}|_W \cdot (\Delta y)|_P;$$

$$A_N = \max[-u_{ly}|_N, 0] \cdot (\Delta x)|_P + k \cdot |u_{lx}|_N \cdot (\Delta x)|_P;$$

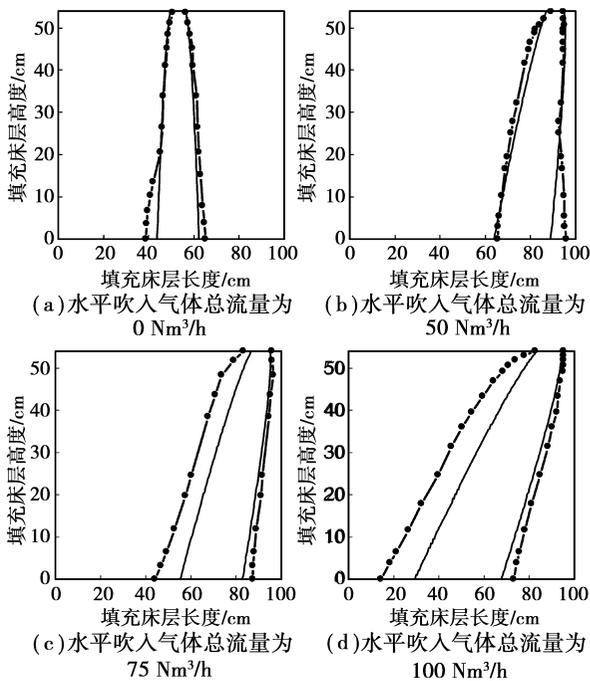
$$A_S = \max(u_{ly}|_S, 0) \cdot (\Delta x)|_P + k \cdot |u_{lx}|_S \cdot (\Delta x)|_P;$$

$$b = \frac{(\Delta x)|_p \cdot (\Delta y)|_p}{\Delta t} \cdot \epsilon_1|_P + \frac{r}{\rho_l} \cdot (\Delta x)|_p \cdot (\Delta y)|_p.$$

计算时先用式(8)计算每个控制容积中心上  $u_{lx}$  和  $u_{ly}$  的值;式(19)将控制容积中心  $P$  上的  $\epsilon_1|_P$  与周围控制容积中心上的  $\epsilon_1$  值关联起来。在计算区域每个控制容积中心都对应这样一个方程,所有方程联立求解就可给出每个容积中心  $i$  上  $\epsilon_1|_i$  值。

## 2 模型结果验证

应用模型对 OHNO<sup>[9]</sup> 的实验进行了模拟计算。实验测定装置是一个高度 54 cm, 长度 100 cm, 内部纵向宽度是 5 cm 的填充床。在床顶引入液流的同时, 床内沿水平方向均匀吹入气流。图 5 示出的是 OHNO 对床顶加入流量为 25 L · h<sup>-1</sup> 的液流在床层内扩展范围的实验测定结果和用模型对之预测的结果。模型计算时,  $k$  取 0.41; 曳力系数  $C_d = 0.44$ <sup>[9]</sup>; 据式(19)算出每位置的流动液体体积分率  $\epsilon_1$  与床层空隙率  $\epsilon$  相比是比较小的, 计算时没有考虑  $\epsilon_1$  对气体流动的影响, 床中气体运动速度用气体流量和床层空隙率求出。图 5 中模型预测的稳态的液体流动区域边界是液体流量为 10<sup>-5</sup> kg · cm<sup>-2</sup> · min<sup>-1</sup> 的等值线, 在此线包围的内部区域的液体总流量占入口总流量的 99.5% 以上。可以看出, 模型计算结果和实验结果有较好的一致性。在水平均匀气体流量增加时, 液体速度方向离开垂直方向增大, 增大了液体在床层内流动路径, 延长了液体在填充床内的停留时间, 从而液体扩展的范围加大。表明模型能预测液体在填充床中的流量分布和扩展范围。



注: ●— Ohno 实验值; — 本模型预测结果

液流入口总流量为 25 L/h.

图 5 填充床中液体流动区域的测定结果和模型计算结果

图 6 是利用模型对 SUGIYAMA 的实验<sup>[2]</sup> 进行模拟计算的结果, 给出了稳态下不同液体滴落高度  $h$  下, 液体流量分布实验结果和用模型预测结果。在利用模型计算时, 模型参数  $k$  的值取 1.61。某液体滴落高度  $h$  下, 模型计算曲线下面的面积等于滴落高度达到  $h$  的所有液流(或滴)的总流量, 由于液体流动的连续性, 图 6 中示出的几个滴落高度下计算曲线下面的面积是相等的, 都等于入口液流总流量。图中 SUGIYAMA 的实验值各点由初始在计算曲线上边逐渐过渡到后来在曲线下边, 这说明该实验值存在一定的系统误差。除去系统误差的影响, 模型计算结果和实验结果吻合是较好的。模型对 SUGIYAMA 的实验模拟计算时, 求解区域也是整个填充床区域。

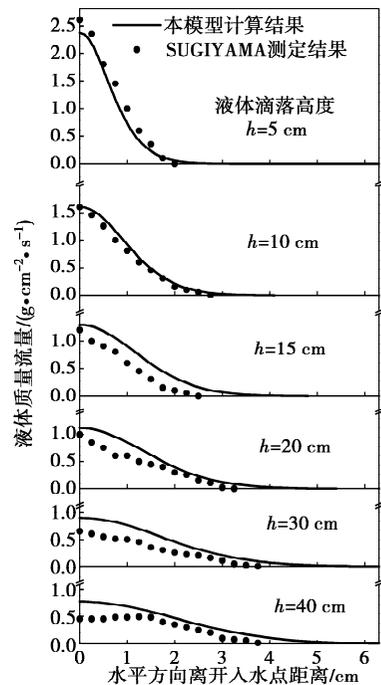


图 6 模型预测结果和 SUGIYAMA 实验结果对照

## 3 模型在高炉模拟中应用的前景

由于高炉工艺控制和开发的需要, 使用传输理论对高炉的数学模拟研究一直没有停歇过<sup>[1-2, 14-17]</sup>。对填充床内液体流动现象的模拟一直主要以势流模型和 N-S 方程等连续运动理论描述。主要是对它们和与它们耦合的传输方程有统一的逐渐成熟的数值方法, 且数值求解需要的网格尺度不必小到床层内填充粒子的大小, 只要满足数值精度即可。考虑填充床具体结构的数学模型不能满足上述条件, 同时模型内容存在一定的缺陷, 没有在高炉模拟中得到

应用。

图7是用文中的模型解出的7个“点”水源同时引入其中的二维填充床中液体流动区域(灰色填充区域)在引入后几个时刻的结果。液体流动区域边界线是液体流量为 $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 的等值线。连续运动模型求解此问题的步骤是在每个时刻先要测定有水区域然后将之作为模型求解区域求解。这相当于整个问题是测定出来的而不是用模型预测出来的。另外,连续运动理论的方程求解时,要求水区域的入口和出口有确定的位置和大小,仅对达到稳态的床层内液流分布,在流体流动区域内模拟。图7(e)的床层内液流分布已不随时间变化,床底部横断面上的液体总流量等于入口的总流量,连续运动理论在液体流动区域内对其模拟时,出口选20 cm长的床底部横断面;图7(d)的床层内液流分布没达到稳态,床底部横断面上的液体总流量为零,而且液体流动区域内任何断面上的总流量都不等于入口的总流量,连续运动理论对其模拟时,出口没法确定。应该说应用势流理论和N-S方程等连续运动理论是不能模拟高炉床层内液体运动的。文中的模型以整个填充床为求解区域,能把液体引入后液体流量在床内分布随时间变化预测出来。

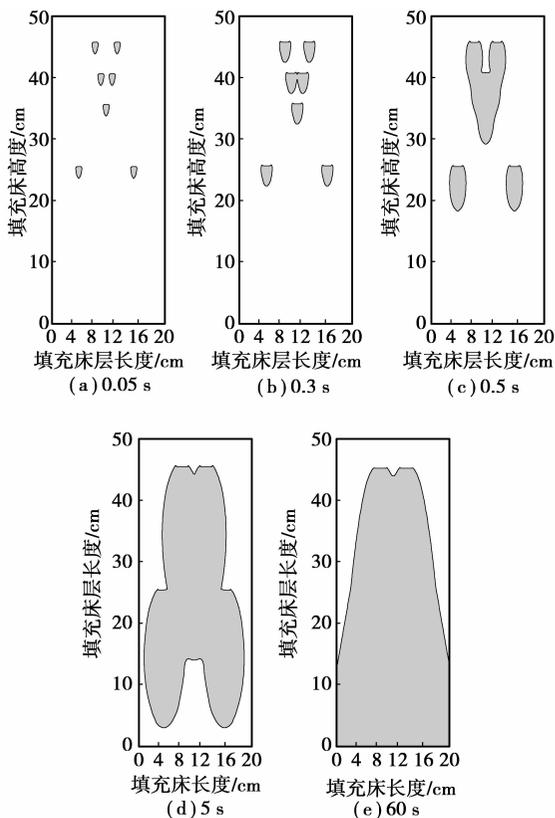


图7 模型预测的液体流动区域

随机分布模型也以整个填充床为求解区域,但模型到目前为止,并未涉及液体流动的具体速度,还没给出非稳态结果。在该模型中,随机速度变量分布的均值取为零,只用反映分布中数据分散程度的量(随机速度最大值)作为可调模型参数和实验数据拟合<sup>[6]</sup>。满足这样条件,不止笔者给出的分布。对于其他分布(例如均值为0正态分布)只要调整方差大小,也能给出和实验较相符的结果。在该模型所定义的液流分散角小于 $\frac{\pi}{4}$ ,而且液流仅受重力和来自床层的作用力时,该模型预测结果是液流沿铅垂线下<sup>[6]</sup>,这和填充床中由一点出发的液流会在一定范围散开事实不符。

## 4 结 论

1)提出了一个新的可描述高炉内床层中液体流动的数学模型。该数学模型具有以下特点:以整个填充床区域为求解区域;能和一般传输方程在同一网格下数值求解,数值网格尺度仅满足数值精度即可,不必和床层填充颗粒尺寸相一致;能给出非稳态下的结果。

2)模型预测结果和实验数据有较好的一致性。该模型能更好地预测液体在填充床中的流量分布和扩展范围,是一个可供选择的模型。

## 参考文献:

- [1] DONG X F, YU A B, YAGI J, et al. Modelling of multiphase flow in a blast furnace: recent developments and future work [J]. ISIJ International, 2007, 47(11): 1553-1570.
- [2] SUGIYAMA T, NAKAGAWA A, SHIBAIKE H, et al. Analysis on liquid flow in the dripping zone of blast furnace [J]. Tetsu-to-Hagané, 1987, 73(15): 242-249.
- [3] GUPTA G S, LITSTER J D, RUDOLPH V R, et al. Model studies of liquid flow in the blast furnace lower zone [J]. ISIJ International, 1996, 36(1): 32-39.
- [4] GUPTA G S, LITSTER J D, WHITE E T, et al. Nonwetting flow of a liquid through a packed bed with gas cross-flow [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1997, 28B(4): 597-604.
- [5] BANDO Y, HAYASHI S, MATSUBARA A, et al. Effects of packed structure and liquid properties on liquid flow behavior in lower part of blast furnace [J]. ISIJ International, 2005, 45(10): 1461-1465.
- [6] WANG G X, CHEW S J, YU A B, et al. Modeling the discontinuous liquid flow in a blast furnace [J].

- Metallurgical and Materials Transactions, 1997, 28B(2): 333-343.
- [7] WANG G X, LIU D Y, LITSTER J D, et al. Experimental and numerical simulation of discrete liquid flow in a packed bed [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(21-22): 4013-4019.
- [8] LIU D Y, WANG G X, LITSTER J D. Insaturated liquid percolation flow through nonwetted packed beds [J]. AIChE Journal, 2002, 48(5): 953-962.
- [9] OHNO Y, SCHNEIDER M. Effect of horizontal gas flow on liquid dropping flow in two-dimensional packed bed [J]. Tetsu-to-Hagané, 1988, 74(10): 35-42.
- [10] MATSU-URA M, OHNO Y. Modeling of gas and liquid flow in two dimensional packed bed and analysis of dropping zone in blast furnace [J]. Tetsu-to-Hagané, 1994, 80(12): 14-19.
- [11] WANG J, KAKAHASHI R, YAGI J. Simulation model of the gas-liquid flows in the packed bed [J]. Tetsu-to-Hagané, 1991, 77(10): 47-54.
- [12] ETO Y, TAKEDA K, MIYAGAWA S, et al. Experiments and simulation of the liquid flow in the dropping zone of a blast furnace [J]. ISIJ International, 1993, 33(6): 681-686.
- [13] LIU D Y, WANG G X, LITSTER J D. Experimental investigation of liquid flow shift due to gas cross flow in non-wetted packed beds [J]. ISIJ International, 2001, 41(1): 10-17.
- [14] CHUANG H C, KUO J H, HUANG C C, et al. Multi-phase flow simulations in direct iron ore smelting reduction process [J]. ISIJ International, 2006, 46(8): 1158-1164.
- [15] HUANG C E, DU S W, CHENG W T. Numerical investigation on hot metal flow in blast furnace hearth through CFD [J]. ISIJ International, 2008, 48(9): 1182-1187.
- [16] CHU MAN-SHENG, NOGAMI H, YAGI J. Numerical analysis on blast furnace performance under operation with top gas recycling and carbon composite agglomerates charging [J]. ISIJ International, 2004, 44(12): 2159-2167.
- [17] GUO B Y, MALDONADO D, ZULLI P, et al. CFD modelling of liquid metal flow and heat transfer in blast furnace hearth [J]. 2008, 48(12): 1676-1685.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 380 页)

- [14] 杨强, 吴中福, 余萍. 一种新型支持向量机[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005(2): 81-84.
- YANG QIANG, WU ZHONG-FU, YU PING. A sort of new SVM [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005(2), 81-84.

- [15] 朱凌云, 曹长修. 基于支持向量机的缺陷识别方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002(6): 42-45.
- ZHU LING-YUN, CAO CHANG-XIU. A novel method based on support vector machine for defect identification [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002(6): 42-45.

(编辑 陈移峰)