

高炉回旋区数学模型研究*

郭术义^{1,2}, 陈举华¹

(1 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061; 2 济南钢铁集团总公司, 山东 济南 250101)

摘要: 回旋区是高炉的重要组成部分, 一直是高炉研究中的重点和难点问题。综述了多年来较有影响的高炉回旋区数学模型, 指出了数学模型的发展必将复杂化、全面的趋势。

关键词: 高炉; 回旋区; 数学模型

中图分类号: TF531 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620 (2004) 03-0049-02

Study on the Mathematic Model of Blast Furnace Raceway

GUO Shu-yi^{1,2}, CHEN Ju-hua¹

(1 School of Mechanical Engineering of Shandong University, Jinan 250061, China;

2 Jinan Iron and Steel Group, Jinan 250101, China)

Abstract: The blast furnace raceway is one of the most important parts in BF. The problem in it always exists as the key problem and the difficult problem. The influencing mathematic models to describe the BF raceway are summarized. The developmental trend of mathematic model, which will be more and more complicated and comprehensive, was indicated.

Keywords: blast furnace; raceway; mathematic model

1 前言

回旋区位于高炉的下部, 风口前缘回旋区的形成, 将直接影响高炉下部煤气流的分布、上部炉料的均衡下降以及整个高炉内的传质、传热过程。由于回旋区内气流与固体焦炭、液态炉料之间的机械力学过程、化学反应过程复杂, 目前还没有形成严格的风口回旋区理论。但随着近代计算机、数学计算技术的发展, 高炉冶炼理论的丰富以及检测仪器设备的完善, 已有一些理论分析和数学描述。本研究分析了关于高炉回旋区中一些典型的数学模型, 指出了各自的优缺点, 以期对深入发展高炉理论、高炉回旋区的数学模型、高炉回旋区的数值模拟等提供参考作用, 为提高对回旋区形成机理的认识提供积极的帮助。

2 数学模型分析

2.1 气、固相反应的数学模型

基于研究高炉铁水质量与回旋区内辐射强度的关系, 前苏联学者K. A. 舒米洛夫等人从研究回旋区内进行的化学燃烧反应出发, 提出回旋区内辐射强度与生铁中含硅量之间存在一定的统计关系, 建立了气、固相反应的数学模型。主要状态方程有:

燃烧反应的气相质量连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial \tau} = -\frac{1}{r_R^2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g r_R^2 u_{g,R} + \frac{2}{r} jc + jx) \quad (1)$$

焦炭中碳的连续性方程:

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} = -u_c \frac{\partial c_i}{\partial x} + \frac{2}{\rho_g r_R} jc(c_{ic} - c_i) + \frac{1}{\rho_g} (jx_i - c_i jx) \quad (2)$$

焦炭颗粒燃烧过程的传热方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [r_1 T_c(r, x, \tau)] = a_c \frac{\partial^2}{\partial r^2} [r T_c(r, x, \tau)] \quad (3)$$

煤气的热平衡方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (c_P T_g) = -u_R \frac{\partial}{\partial x} (c_P T_g) + \frac{2}{r_R \rho_g} jc(\bar{c}_P \bar{T}_g - c_P T_g) - \frac{c_P T_g}{\rho_g} jx + \frac{S}{\rho_g} a_T (T_c - T_g) + \frac{k_4}{\rho_g} f(c_1, c_2, \rho_g) q_4 \quad (4)$$

方程(1)~(4)中各符号的具体含义参见文献。该数学模型是一个半经验公式,通过求解这个数学模型可以确定出回旋区的辐射强度。风口辐射强度的变化,反映了回旋区内煤气与固液相进行热交换的状况,是高炉下部反应热浓度变化的指标。该数学模型可以很好地解决回旋区的辐射强度变化情况,依据该变化可以估计高炉炉缸内铁成分的变化,对生铁成分的估计具有一定的参考价值。

缺陷:该数学模型仅考虑了气体与焦炭之间的化学反应,没有涉及流固耦合等动力学行为。对回旋区内气体与焦炭的分布,如气体压力、速度、组分,焦炭颗粒运动速度、浓度等,无法进行量化分析。

2.2 多因素同时考虑的数学模型

为研究高炉回旋区内焦炭与煤气的动力学作用及化学作用对回旋区的影响,日本的烟野道春等人建立了同时考虑动量、热量、质量和化学反应等的数学模型。该模型首次将回旋区的焦炭作为拟流体处理,运用流体力学中的Navier-Stokes方程求解回旋区内焦炭颗粒和气体的运动情况,如速度场、压力场等。对回旋区的气体温度分布、煤气成分组成、分布采用焦炭与氧气产生化学反应的微分方程。

气体动量方程:

$$(\mathbf{v}_g \cdot \text{grad}) \mathbf{v}_g = -\frac{1}{\rho_g} \text{grad} P + \frac{\eta_g}{\rho_g} \nabla^2 \mathbf{v}_g + \frac{1}{\rho_g} \mathbf{f} \quad (5)$$

焦炭动量方程:

$$(\mathbf{v}_c \cdot \text{grad}) \mathbf{v}_c = \frac{\eta_c}{\rho_g} \nabla^2 \mathbf{v}_c - \frac{1}{\rho_c} \mathbf{f} + \mathbf{g} \quad (6)$$

气体连续性方程:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \rho_g \mathbf{v}_g) = 0 \quad (7)$$

焦炭连续性方程:

$$\operatorname{div}(\rho_c \mathbf{v}_c) = 0 \quad (8)$$

化学反应方程:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \rho_g \mathbf{v}_g \phi_n) + \frac{\eta_g}{\sigma_n} \nabla^2 \phi_n = -R_n \quad (9)$$

热平衡方程:

$$T_g = T_c = \frac{h_O + h_{CO_2} \phi_{CO_2} + h_{CO} \phi_{CO}}{c_{PN_2} \phi_{N_2} + c_{PO_2} \phi_{O_2} + c_{CO_2} \phi_{CO_2} + c_{PCO} \phi_{CO}} \quad (10)$$

方程(5)~(10)中各符号具体含义参见文献。通过求解方程(5)~(8)可以确定回旋区内的基本状况,如回旋区的空间位置、大小,焦炭颗粒的速度、浓度、流线,气体的速度、压力和流线。方程(9)和(10)可以确定回旋区风口轴线上气体的摩尔分布和温度。改变入口参数可以很好的模拟不同条件下高炉回旋区的状态,对确定高炉的运行状况提供一定的参考价值。

该数学模型较为全面,其缺陷是没有考虑由于焦炭与煤气的燃烧而带来的温度场变化,只能是一个冷态数学模型。

2.3 基于燃烧和多相流理论的数学模型

该模型采用多相流原理,应用湍流流动动能,与湍流耗散率双方程来描述回旋区内气体运动,用简单化学反应模型来描述化学反应及温度分布。

控制方程通式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial}{\partial x_j} \Phi) + S \quad (11)$$

方程(11)中符号的具体涵义参见文献。方程中含有气体与颗粒的动量方程、能量方程、组分方程,湍流流动动能方程,湍流耗散率方程以及简单的化学反应方程,是一个典型的多相流方程。该方程比较全面地考虑了气体的湍流和颗粒扩散。数学分析之前必须事先确定回旋区的位置和大小。由于该数学模型考虑了气体的动量方程和发生化学反应而导致气体混合分数的变化波动、气体热焓以及气体的湍流特性,所以可以模拟出高炉回旋区内气体压力场、焦炭和气体速度场、浓度场、温度场、在不同位置的气体成分组分以及回旋区在不同条件下的变化。对高炉中广泛采用的富氧、喷煤、改变风口倾角等操作条件,也可以进行很好的模拟。模拟预报的结果和实测结果基本吻合。

不足之处:把焦炭进行流体处理,即认为焦炭与煤气的氧化还原反应是非常迅速的,是在瞬间完成的,忽略了焦炭颗粒的时间经历效应,即焦炭与气体的反应导致其质量的损失是时间的函数。文献的数学模型是模型的综合,但同时全面考虑了燃烧湍流对焦炭颗粒与气体的相互作用部分。

3 发展趋势

高炉的大型化必然导致高炉冶炼状况的复杂性，对高炉的数字化描述已成为必然发展趋势。描述高炉回旋区工作状态的数学模型也将会越来越复杂，从数学模型反映出的回旋区内特性也将越来越多。展望今后高炉回旋区数学模型，将会围绕以下几个方面发展：

(1) 多相流理论以其全面反映燃烧湍流特性在今后必将成为发展、研究的重点。由于焦炭颗粒与空气的反应非瞬间反应，反应面（又称火焰面）模型存在一定的缺陷，必须考虑颗粒的时间经历效应问题，充分考虑焦炭的熔损反应模型控制；还必须充分考虑颗粒轨道模型与多相流理论的结合。

(2) 考虑铁水与空气之间的流流耦合作用（动力学和能量交换），碳颗粒、炉渣与铁水之间的流固耦合问题，借助现代数学、计算机技术，将它们的成果，如计算机并行处理技术，用于多相流、流固耦合系统的研究中，探讨问题机理与本质，促进研究进展。

(3) 数学模型是在忽略部分因素的影响，经理想化高度抽象而成的，尚不完全符合实际情况。实验研究在高炉回旋区数学模型的验证、完善方面必将起着十分重要的作用。

(4) 多相流微分方程解析时会出现解的不稳定现象。借助混沌理论可以实现对燃烧湍流的控制，使其向更有利于高炉燃烧的方向发展。

[返回上页](#)