

VOD 冶炼不锈钢工艺模型的研究

裴芬¹ 吴龙¹ 李士琦¹ 纪志军¹ 江国利^{1,2}

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 海城市东四型钢有限公司, 海城 114200)

摘要 以鞍钢重型机械公司 40 t VOD 冶炼 ZG06Cr13Ni4Mo 钢的生产实测数据为依据, 根据质量、能量守恒及热力学原理, 采用系统工程的分析方法, 从操作、化学反应、冶金计量和热化学计量 4 个层次剖析 VOD 冶炼过程, 建立了 VOD 冶炼不锈钢的工艺模型。该工艺模型包含冶金模型和热模型, 可以根据各输入物料的用量、成分与温度等输入值, 方便地求出各输出物料的收得量和成分等输出的预报值。VOD 生产结果表明, 该工艺模型能较准确地预报 VOD 精炼需氧量、终点钢水成分及温度等, 相对误差低于 5%。

关键词 VOD 不锈钢 工艺模型

A Study on Model of VOD Steelmaking Process for Stainless Steel

Pei Fen¹, Wu Long¹, Li Shiqi¹, Ji Zhijun¹ and Jiang Guoli^{1,2}

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Haicheng Dongsu Section Steel Co Ltd, Haicheng 114200)

Abstract Based on practical production data of steel ZG06Cr13Ni4Mo refining by 40 t VOD at Heavy-Duty Machinery Co, Ansteel, and according to conservation of energy and mass and principle of thermodynamics, a process model for steelmaking stainless steel with VOD has been established by using analysis method of system engineering and analyzing on VOD refining process with four level of operation, chemical reaction, metallurgy and thermo-chemical computation. The process model includes metallurgical model and thermal model, with input of variables including charging amount, ingredient and temperature of each material, the predicted data of output including yield and ingredient of each material can be obtained conveniently. Results of VOD production show that the VOD refining oxygen demand, end analysis and temperature of liquid can be predicted by the process model, its relative error is less than 5%.

Material Index VOD, Stainless Steel, Process Model

VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 真空吹氧脱碳法是目前世界范围内第 2 位的不锈钢冶炼手段, 可以冶炼超低碳、高难度、高纯度的不锈钢产品。VOD 法的优点是在真空条件下冶炼, 钢的纯净度高, 碳氮含量低, 一般 $(C+N) < 0.02\%$, 更适宜冶炼 C、N、O 含量极低的超纯不锈钢^[1,2]。

工艺模型的主要目的是比较整个冶炼过程中的物质和能量收入项和支出项, 为改进操作工艺制度, 确定合理的设计参数, 预测终点成分和温度, 提高冶炼技术经济指标提供定量依据。应当指出, 由于冶炼是复杂的高温物理化学过程, 加上测试手段有限, 目前尚难以做到精确检测和分析。

1 工艺模型的建立

1.1 建模的背景

国内外关于 VOD 过程模型研究大体上可分为 3 类: (1) 关于脱碳保铬热力学研究; (2) VOD 钢液流场研究; (3) VOD 钢水传质和反应动力学研究。

这些都属于应用理论研究范畴。

为开发具有自主知识产权的 VOD 冶炼不锈钢的控制技术, 北京科技大学与鞍钢重型机械公司合作, 以 40 t VOD 为工程基础, 研究和开发 VOD 冶炼 ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢的工艺模型, 为进一步发展 VOD 冶炼的程序控制、静态控制以至动态控制提供基础。

1.2 建模的理论基础

本研究构建 VOD 冶炼工艺模型的理论依据主要有:

(1) 质量守恒定律: 在任何冶金过程中, 不论发生何种变化, 其输入和输出的总质量保持不变。由于冶金反应是一种化学反应, 只涉及物料的转化而不涉及元素的变化, 所以在冶炼过程中, 不仅物质总量不变, 而且各元素即物质的分量也不变化。

(2) 能量守恒定律。即向系统输入的能量等于从系统输出的能量加上系统中存贮或反应产生的能

量,即是计算 VOD 冶炼能量平衡的热模型的基础。

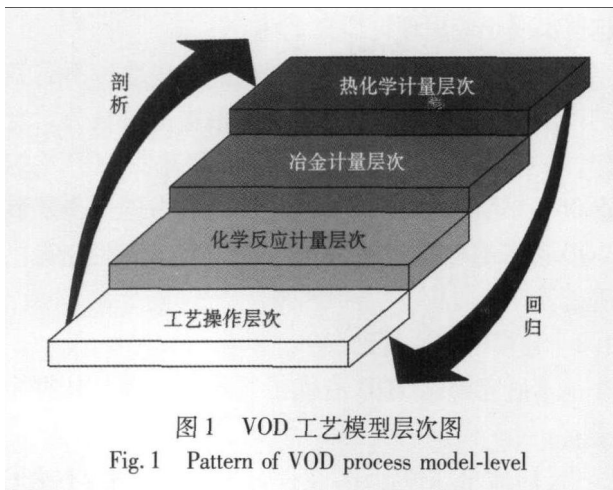
(3)冶金过程热力学。它给出了在一个冶金过程物质转化反应的方向和限度^[3]。

1.3 建模的方法

相比于转炉冶炼模型,VOD 冶炼工艺模型的难点为冶炼过程添加的合金种类多,参与化学反应的元素及组元较转炉过程复杂,增加模型建立的难度。

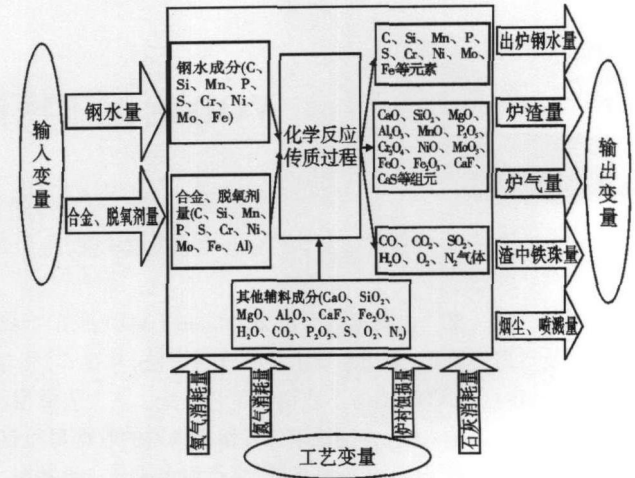
VOD 过程是高温、多相的冶金过程,在建立描述过程的工艺模型时,首先要确定系统模型中所涉及的变量。运用系统工程的分析方法,将系统从环境中分离出来,看作“黑箱”(指系统的输入和输出都是可以观测的,但系统的内部结构不知道或不可知)来研究其外部特性。因为“黑箱”形式的系统工程存在着经验性和盲目性等缺点,为了建立较精细的工艺模型,有必要将“黑箱”系统逐步“白箱化”。

就对 VOD 工艺过程的认识和模拟化而言,可有以下 4 个层次^[4](图 1):(1)物质转化的工艺操作层次,即实际生产中输入和输出的物料满足质量守恒。(2)冶金化学反应层次,即参加过程冶金反应的元素、组元在反应前后保持总量相等。(3)化学反应的计量层次,即冶金模型,是建立在化学反应方程式基础上的物质之间相互转化的定量关系。(4)过程伴随的热(能量)化学计量层次,即热模型,是能量守恒定律的具体应用。



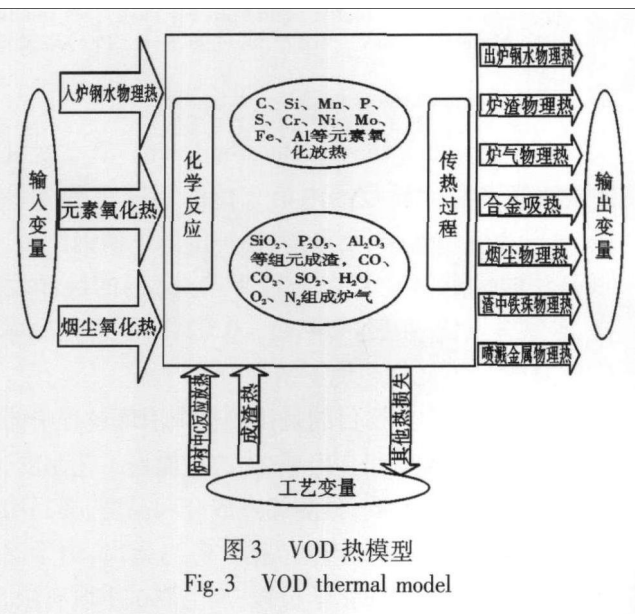
1.4 模型的结构

(1)冶金计量层次是 VOD 工艺过程的冶金模型,如图 2 所示。基于模型通用性的考虑,本冶金模型建立过程与以往的 VOD 冶炼模型不同,没有将各物料作为一个整体来进行计算,而是单独计算每一种元素(例如 O、Si、Cr 等元素)或组分(例如 CaO)的输入和输出,并得出相应的计算结果。这样,当 VOD 冶炼工艺条件发生变化时,只要调整相应的系



数就可定量计算出 VOD 冶炼过程的物料输出^[5]。

(2)热化学计量层次是 VOD 工艺过程的热模型,如图 3 所示。把整个冶金过程看作一个系统,向系统输入的能量等于从系统输出的能量加上系统中存贮和反应的能量。其中能量收入为一切进入系统的物理热与化学反应放热等;能量输出为渣钢的物理热、入炉炉料的吸热、热损失等。



2 模型参数的具体化

工艺模型可以表述为如下的数学形式^[6]:

$$Y = F(X, \Phi) \tag{1}$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ -模型的输入变量,包括 VOD 冶炼过程所有的输入物料(入炉钢水、合金、脱氧剂、氧气、氮气、石灰等)的加入量、成分以及温度等; $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p)$ -模型的参数,包括氧气

利用率,元素烧损率,炉衬蚀损率,喷溅率等; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ -模型的输出变量,包括 VOD 冶炼过程所有的输出物料(出炉钢水、炉渣、炉气、烟尘、渣中铁珠、喷溅等)的收得量、成分以及温度等。

根据测取的实际生产数据,即模型的输入变量 X 和输出变量 Y ,可以推算出使模型满足允许精度范围的中间变量 Φ_0 ,并经过反复验算,得到能够预报 VOD 生产的工艺模型:

$$Y = F(X, \Phi_0) \quad (2)$$

将 VOD 冶金模型和热模型由 Excel 形式予以软件化,命名为 VOD-Model 使用该模型输入 219 项输入变量(包括各物料的化学成分、质量与温度),可方便地求出 32 项输出变量,如钢液成分、温度等,可用于操作预报等。

3 模型的检验

测取 VOD 冶炼 ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢的 27 炉生产数据,冶炼钢种的成分及 VOD 的基本工艺参数如表 1 和表 2 所示。根据本工艺模型,分别就需氧量、冶炼终点的钢水成分及钢液温度进行预报计算,并与实际数据进行了对比,结果列于表 3 和表 4。

表 1 VOD 精炼 ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢的化学成分控制范围/%

Table 1 Controlled range of chemical composition of stainless steel ZG06Cr13Ni4Mo refining by VOD / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
国标 JB/T6405-1992	≤ 0.06	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.030	≤ 0.030	11.5 ~ 14.0	3.50 ~ 4.50	0.40 ~ 1.00	余量
内控	≤ 0.03	≤ 0.50	≤ 0.60	≤ 0.030	≤ 0.025	12.5 ~ 13.5	4.0 ~ 5.0	0.50 ~ 0.70	余量
范围	0.019 ~ 0.026	0.254 ~ 0.304	0.421 ~ 0.530	0.021 ~ 0.026	0.003 ~ 0.010	12.07 ~ 13.03	3.96 ~ 4.12	0.419 ~ 0.567	余量

表 2 VOD 的基本工艺参数

Table 2 Basic process parameters of VOD

钢水处理量/ t	冶炼周期/ min	吹氧真空度/ kPa	吹氩流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)
40	35	20	6~9

从表 3 和表 4 的预报值可以看出,钢水终点碳含量的相对误差为 4.54%,造成误差的原因可能有 3 点:(1)前后两组数据测取的日期相差较远,钢厂冶炼过程的实际操作可能有所不同,使钢水终点的碳含量不稳定;(2)加入的合金种类较多,热化学反应复杂,合金加入量和种类会影响钢液成分;(3)钢水成分的检测存在一定误差。其他项目的预测结果与实际相差不大。可见,使用本模型能够比较准确

表 3 钢水终点成分实测和预报结果对比 / %

Table 3 Comparison between liquid end analysis and predicted chemical composition / %

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
实测结果	0.018	0.298	0.458	12.301	3.891	0.495
预报结果	0.017	0.306	0.444	12.528	3.854	0.499
误差	-0.001	0.009	-0.014	0.227	-0.036	0.004
相对误差/%	-4.54	2.89	-3.15	1.84	-1.16	0.870

表 4 需氧量、终点钢水量和出钢温度的预报值和实测值对比
Table 4 Comparison between predicted value and measured value of oxygen demand, end liquid amount and temperature of liquid at tapping

项目	需氧量/ m^3	终点钢水量/kg	出钢温度/ $^{\circ}C$
实测结果	190.71	33 000.00	1 674.39
预报结果	189.25	33 034.32	1 673.97
误差	-1.46	34.32	-0.43
相对误差/%	-0.77	0.10	-0.03

地预测冶炼过程的需氧量、终点钢水量、钢水成分及出钢温度等,对实际生产过程有一定的指导作用。

4 结论

(1)根据大量实际生产数据和冶金原理,采用系统分析的方法,建立了描述 VOD 冶炼不锈钢全过程的工艺模型-VOD-Model,经过不断调整,得到较为合理的工艺参数。

(2)使用本工艺模型可以完成多种预报,如冶炼过程中的需氧量,终点钢水成分等,为实际生产的工艺操作提供一定的指导。在此模型的基础上,只需对部分参数进行相应的调整,就可以得到 VOD 冶炼一般钢种的工艺模型。

(3)此模型还需要进行不断调整,并结合实际生产过程,得到预报精度更为准确的 VOD 冶炼工艺模型。

国家科技支撑计划项目资助(2007BAF08B01-03)

参考文献

- Choulet R J, Masterson I E. Secondary Steelmaking in Stainless Steel Refining. Iron & Steelmaker, 1993, 20(5):45
- 张 鉴,蔡怀德. 不锈钢炉外精炼方法-VOD、VOD&LF 炉外精炼译文集. 北京:冶金工业出版社,1992
- 张家芸. 冶金物理化学. 北京:冶金工业出版社,2004
- 李士琦,高俊山,王 政. 冶金系统工程. 北京:冶金工业出版社,1992
- 李传薪. 钢铁厂设计原理. 北京:冶金工业出版社,1997
- 李士琦,江国利,路俊萍,等. AOD 冶炼不锈钢工艺模型的研究. 特殊钢,2009,30(1):29

裴 芬(1987-),女,硕士研究生,钢铁冶金工艺研究。

收稿日期:2010-04-15