

## AOD 冶炼不锈钢工艺模型的研究

李士琦<sup>1</sup> 江国利<sup>1,2</sup> 路俊萍<sup>1</sup> 林纲<sup>3</sup>

(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;

3 艾克罗盖普(北京)国际投资咨询有限公司,北京 100070)

**摘要** 以45 t AOD-L冶炼304不锈钢的实际生产数据为依据,根据系统模化、质量、能量守恒及热力学原理,建立了AOD冶炼奥氏体不锈钢的工艺模型(AOD M&H),包含操作、化学反应、冶金计量和热化学计量4个层次,共涉及469个变量。使用该模型进行模拟,由139项输入变量,包括各物料的用量、成分和温度,可方便地求出39项输出变量,如钢液成分、温度等。应用结果表明,冶炼过程中各阶段的钢液碳含量与温度的预报值和实测值的相对误差 $\leq 11.1\%$ 。

**关键词** 不锈钢冶炼 AOD 工艺模型

## A Study on Model of Steelmaking Process for Stainless Steel by AOD

Li Shiqi<sup>1</sup>, Jiang Guoli<sup>1,2</sup>, Lu Junping<sup>1</sup> and Lin Gang<sup>3</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Haicheng Dongsi Section Steel Co Ltd, Haicheng 114200;

3 IkeLuoGap (Beijing) International Investment Advisory Co Ltd, Beijing 100070)

**Abstract** Based on practical production data of steelmaking process for 304 stainless steel by a 45 t AOD-L unit, according to system modeling, conservation of mass and energy, and thermodynamic principle, a processing model (AOD M&H) for austenite stainless steel steelmaking by AOD process has been established including four levels; operation, chemical reaction, metallurgy and energy computation with 469 variables. With 139 input variables including amount, ingredient and temperature of each material, the 39 output variables such as chemical composition and temperature of liquid steel etc. can be calculated by the model. Application results showed that the relative error of carbon content and temperature of liquid steel in each phase of steelmaking process between calculated and measured value was  $\leq 11.1\%$ .

**Material Index** Stainless Steelmaking, AOD, Process Model

由于AOD精炼工艺的显著优点使其迅速成为不锈钢生产的主要方法,其产量已占世界不锈钢总产量的75%左右<sup>[1,2]</sup>。

本文以钢厂45 t AOD-L冶炼奥氏体典型钢种304不锈钢的大量实际生产数据为依据,研究可用于一般的AOD冶炼奥氏体不锈钢的过程工艺模型。

### 1 模型设计及建模原理

#### 1.1 模型设计

本工艺模型的构建流程见图1。首先运用系统工程的思想,将系统看作“黑箱”,从环境中分离出来研究其外部特性,这样系统的输入和输出都是可观测的,然后逐渐“白箱化”,进而研究系统的内部结构,减少经验性和盲目性,建立精细工艺模型<sup>[3]</sup>。

#### 1.2 建模原理

构建AOD冶炼工艺模型的理论依据为:

(1)质量守恒定理。由于冶金反应是一种化学反应,仅涉及物料的转化而不涉及元素的变化,即在冶炼过程中,物质总量守恒且各元素即物质的分量也守恒。

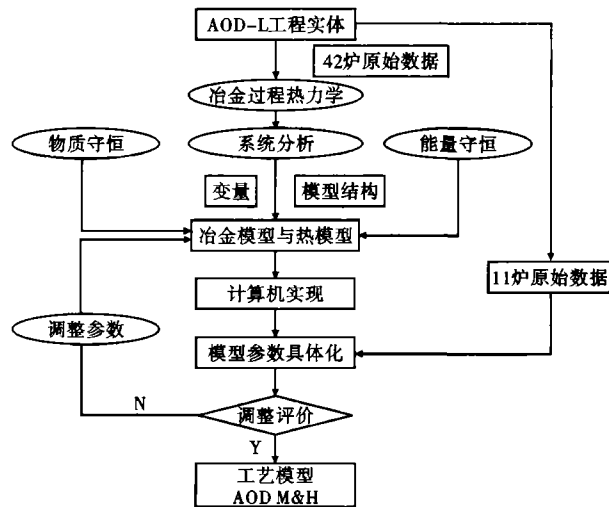


图1 AOD工艺模型构建流程图

Fig. 1 Flow sheet of AOD process model structure

(2)能量守恒定理。在冶炼过程中,总的能量输出等于能量输入。

(3)冶金过程热力学原理<sup>[4]</sup>。AOD冶炼不锈钢的全过程都应满足脱碳保铬的热力学条件。

### 2 建模依据

计取连续冶炼的 53 炉(二步法)生产数据,每个炉次原始记录 172 项,其它基本数据 180 项,总计原始数据 18 656 个。

使用国际通用商业软件 SPSS 对全部数据进行认真的统计分析得出,这些数据均符合正态分布,且其偏度与峰度在允许范围内。据此,认为该批数据可用于数学模型的具体化和模型的检验。

### 3 工艺模型-AOD M&H

#### 3.1 冶炼工艺模型的变量、结构和算法

影响 AOD 工艺过程的因素有输入变量、输出变量、设备参数和工艺参数 4 大类。其中设备参数相对稳定,其余各变量又可以分为物料指标变量、能量指标变量两种。

将 AOD 精炼过程分成操作、化学反应、冶金计量和能量计量 4 个层次,如图 2 所示

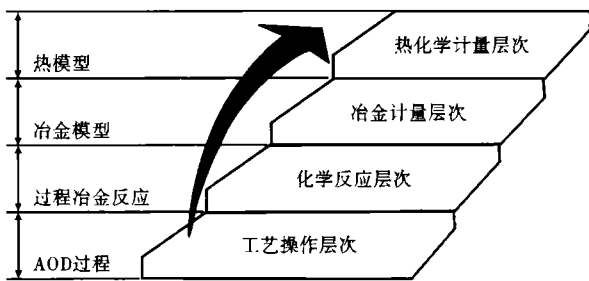


图 2 AOD 工艺模型层次图  
Fig. 2 Pattern of AOD process model-level

其中,工艺操作层次包含 132 个物料输入变量(包括初炼钢液、造渣料、铁合金、工艺气体、蚀损炉衬耐火材料、废钢等入炉料的质量和化学组成等)和 13 个物料输出变量(包括出钢量、渣量、烟气量、粉尘量、喷溅量等);7 个能量输入变量(包括入炉料的温度、元素氧化和成渣反应的化学热等能量贡献),26 个能量输出变量(包括终点钢液、炉渣、烟气、粉尘、喷溅等带走的物理热,以及炉料升温、吸热反应等能量输出)。

化学反应层次包含 13 个化学反应式,6 个反应热效应计算式。

冶金计量层次是 AOD 工艺过

程的冶金模型<sup>5</sup>,包含中间变量 248 个,工艺参数 19 个,如图 3 所示;其特点为:基于模型通用性的考虑,本冶金模型与以往的 AOD 冶炼模型不同,没有将各物料作为一个整体来进行计算,而是采用将每一种元素(例如 O、Si、Cr 等元素)或组分(例如 CaO)单独计算其来源和流向,并得出相应的计算结果。这样,模型输出为各单项物料的平衡值,当 AOD 冶炼工艺条件发生变化时,只要调整相应的比例系数就可定量计算出 AOD 冶炼过程的物料输出。

热化学计量层次是 AOD 工艺过程的热模型<sup>15</sup>,包含中间变量 24 个,如图 4 所示。把整个炉子看作一个系统,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起来的能量,它是计算热模型,即 AOD 冶炼能量平衡的基础。其中能量输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。

将 AOD 冶金模型和热模型以电子数据表 Excel 形式予以软件化,使用该模型输入 139 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 39 项输出变量,如钢液成分、温度等,可用作操作预报等。

#### 3.2 模型参数具体化

本研究依据大量实际生产数据使模型参数具体化,确定相关工艺参数的数值,经多次反复验算使误差降低,保证了模型对冶炼过程中各阶段的适应性,即分别依据开吹-脱碳 4 期末、脱碳 4 期末-还原期末、还原期末-冶炼终点 3 个阶段的实际工况,进行

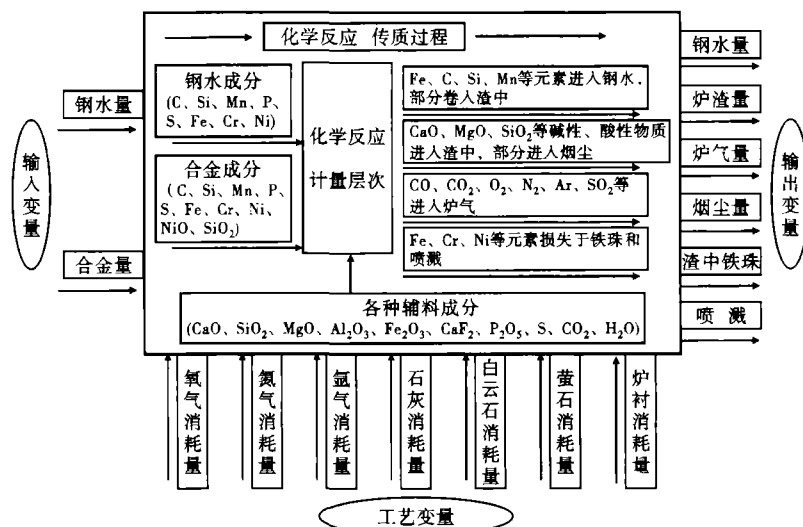


图 3 AOD 冶金模型  
Fig. 3 AOD metallurgical model

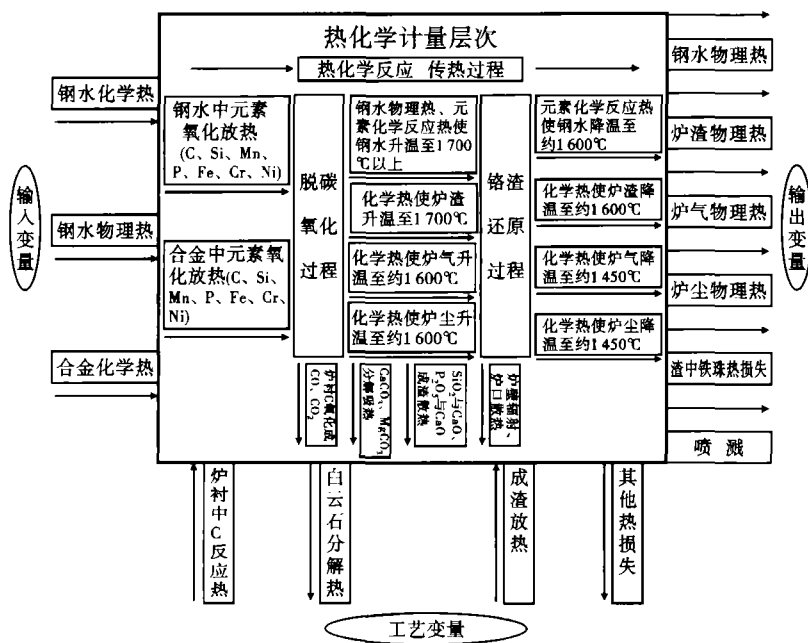


图 4 AOD 热模型  
Fig. 4 AOD thermal model

调整,确定各阶段模型的参数。最终得到能描述 45 t AOD-L 冶炼 304 不锈钢的全过程工艺模型,记为

AOD M&H (AOD Metal and Heat Model)。在该模型的基础上,只需对部分参数进行相应的调整,就可以改造一般的 AOD 冶炼 304 不锈钢的冶炼模型。工艺模型可概述为:

$$Y = F(X)$$

式中: X- 输入变量; Y- 输出变量。

#### 4 模型的检验

##### 4.1 钢中碳含量与温度的预报结果

用本过程工艺模型对钢厂 11 炉生产数据,分别就脱碳 4 期末、还原期末、冶炼终点各工况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验算,结果列于表 1。

##### 4.2 预报误差来源分析讨论

预报误差主要来源有以下几个方面:

(1) 现场使用热电偶人工测量温度,热电偶在

表 1 各工况钢液碳含量、温度实测值和计算值对比

Table 1 Comparison of carbon content and temperature of liquid steel in each phase between measured and calculated value

项目	脱碳 4 期末				还原末期				冶炼终点			
	[C]/%	相对误差/%	温度/℃	相对误差/%	[C]/%	相对误差/%	温度/℃	相对误差/%	[C]/%	相对误差/%	温度/℃	相对误差/%
实测值	0.138		1 707		0.042		1 644		0.043		1 592	
计算值	0.125	9.4	1 624	4.9	0.041	2.4	1 524	7.3	0.044	-2.3	1 415	11.1

炉内的位置对温度的测量有很大影响。

(2) 加入的合金种类较多,热化学反应复杂,各类合金加入次序也会影响钢液温度。

(3) 模型参数设置对成分与温度预报有影响。

#### 5 结论

(1) 根据大量实际生产数据和基本原理,建立了描述 AOD 冶炼奥氏体不锈钢全过程的工艺模型——AOD M&H,较为准确地定量描述了物料向成品钢液转化及伴随的能量特性以及各元素质量和能量的流向等。

(2) 使用该工艺模型可以完成多种预报,如过程中各工况钢液成分的变化、温度的变化等。在该模型的基础上,只需对部分参数进行相应的调整,就可以改造一般的 AOD 冶炼 304 不锈钢的冶炼模型。

本模型可作为进一步开发、建立通用的 AOD-L 过程工艺静态控制和动态控制的基础。

(3) 预报精度尚有待提高,这表明本文研究所得到的工艺模型尚有进一步改进的余地。

#### 参考文献

- 1 Choulet R J, Masterson I E. Secondary Steelmaking in Stainless Steel Refining. Iron & Steelmaker, 1993, 20(5): 45
- 2 吴燕萍. AOD 设备及工艺设计特点. 中国冶金, 2007(4): 11
- 3 李士琦, 高俊山, 王政. 冶金系统工程. 北京: 冶金工业出版社, 1992
- 4 张家芸. 冶金物理化学. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- 5 李传薪. 钢铁厂设计原理. 北京: 冶金工业出版社, 1997

李士琦 (1942-), 男, 教授, 《特殊钢》编委, 钢铁冶金研究。

收稿日期: 2008-07-09