

K-OBM-S 转炉冶炼不锈钢过程的数学模拟和应用

董艳伍¹ 姜周华¹ 龚伟¹ 李建民² 尝天印² 王彦明² 刘卫东²

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 太原钢铁集团有限责任公司, 太原 030003)

摘 要 K-OBM-S 转炉是以铁水和电弧炉预熔钢液为原料冶炼不锈钢的精炼设备。以转炉冶炼普碳钢的顶吹模型和 AOD 法冶炼不锈钢模型为基础, 建立了适用于 80 t K-OBM-S 转炉冶炼不锈钢的数学模型。对第二步冶炼 2Cr13 型不锈钢和第三步冶炼 0Cr18Ni9 型不锈钢的过程验证结果表明, 大部分终点碳含量的误差 $\leq \pm 0.03\%$, 终点铬含量误差 $\leq \pm 0.3\%$, 110 炉 0Cr18Ni9 钢目标碳(0.10% ~ 0.25%)命中率为 95.6%, 终点目标铬(17.1% ~ 17.6%)的命中率为 85.2%。

关键词 K-OBM-S 转炉 不锈钢冶炼 数学模拟

Mathematical Modeling of K-OBM-S Converter Melting Process for Steelmaking of Stainless Steel

Dong Yanwu¹, Jiang Zhouhua¹, Gong Wei¹, Li Jianmin², Chang Tianyin², Wang Yanming² and Liu Weidong²

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;

2 Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract K-OBM-S converter is a refining unit for steelmaking of stainless steel by charging hot metal and EAF pre-melting molten steel. Based on model of top-blown oxygen in converter for plain carbon steel melting and model of AOD process for stainless steel melting, a mathematical modeling of a 80 t K-OBM-S converter for steelmaking of stainless steel has been established. The verified results of steelmaking 2Cr13 stainless steel by duplex route and steelmaking 0Cr18Ni9 stainless steel by triplex route showed that the error of end-point carbon was mostly $\leq \pm 0.03\%$ and the error of end-point chromium was $\leq \pm 0.3\%$, the percentage of hits for end-point aim carbon (0.10% ~ 0.25%) for 110 heats 0Cr18Ni9 steel was 95.6% and for end-point chromium (17.1% ~ 17.6%) was 85.2%.

Material Index K-OBM-S Converter, Steelmaking of Stainless Steel, Mathematical Modeling

K-OBM-S 可以使用预处理铁水为原料进行不锈钢冶炼, 由于冶炼时外加冷料较多, 因此采用顶枪二次燃烧以及加入固体焦炭进行热量补偿等技术。风眼保护采用丙烷气, 最大限度地降低氧枪烧损, 既可以冶炼不锈钢, 又可以冶炼普碳钢^[1,2]; 喷吹法^[3]铁水预处理技术, 解决了长期以来不锈钢冶炼的脱磷问题。在模型建立过程中, 充分考虑了转炉冶炼不锈钢所具有的特点。

描述不锈钢冶炼过程的数学模型较多^[4-8], 但对 K-OBM-S 转炉冶炼不锈钢过程进行描述的数学模型还未见到过报道。本实验以 AOD 冶炼不锈钢的数学模型^[8]和转炉机理模型^[9]为基础, 建立了 K-OBM-S 转炉冶炼不锈钢的数学模型。

1 基本假设

本模型的建立是基于以下假设的基础上:

(1) 本模型假设化学反应在以下 3 个区域发生: ① M-G Zone 即顶吹氧气射流所产生的冲击坑

气液界面, ② M-S Zone 即转炉内的渣金界面, ③ 钢液内部气液界面反应;

(2) 氧气同时氧化钢中的 C、Cr、Si、Mn 和 Fe, 生成的 FeO 可作为氧化剂;

(3) 各氧化-还原反应在钢液/熔渣/气泡界面同时进行, 并在竞争中达到平衡;

(4) 吹入熔池未被吸收的氧气将溢出熔池, 不溶于钢液;

(5) 在高碳含量下碳元素的氧化速率主要与供氧量有关, 在低碳含量下受碳在钢液内传质控制;

(6) 精炼过程中熔池的成分和温度呈均匀分布;

(7) 忽略熔池中其它元素的耗氧量;

(8) 忽略乳化液滴内的反应。

2 反应速率方程

体系内的反应主要考虑 3 个区域: 冲击坑气

液界面的反应、钢液内部气液界面反应以及钢渣液面的反应。通过一系列的推导过程,最终可以得到 K-OBM-S 转炉采用顶底复吹,高碳含量时,钢液中各元素变化速率和钢液总量变化速率可表示为:

$$\frac{d[\%C]}{dt} = -\frac{2\eta_1 S_T M_C \times 100}{22\ 400 W_m} \sigma_{Cr} - \frac{2\eta_2 S_L M_C \times 100}{22\ 400 W_m} \sigma_{CrL} \quad (1)$$

$$\frac{d[\%Cr]}{dt} = -\frac{2\eta_1 S_T M_{Cr} \times 100}{22\ 400 W_m \times 1.5} \sigma_{CrT} - \frac{2\eta_2 S_L M_{Cr} \times 100}{22\ 400 W_m \times 1.5} \sigma_{CrL} - \left(A_{m} k_m \rho_m (C_{Cr}^b - C_{Cr}^*) + \frac{dW_m}{dt} C_{Cr}^b \right) \times M_{Cr} \times 100 / W_m \quad (2)$$

$$\frac{d[\%Si]}{dt} = -\frac{2\eta_1 S_T M_{Si} \times 100}{22\ 400 W_m \times 2} \sigma_{SiT} - \frac{2\eta_2 S_L M_{Si} \times 100}{22\ 400 W_m \times 2} \sigma_{SiL} \quad (3)$$

$$\frac{d[\%Mn]}{dt} = -\frac{2\eta_1 S_T M_{Mn} \times 100}{22\ 400 W_m} \sigma_{MnT} - \frac{2\eta_2 S_L M_{Mn} \times 100}{22\ 400 W_m} \sigma_{MnL} - \left(A_{m} k_m \rho_m (C_{Mn}^b - C_{Mn}^*) + \frac{dW_m}{dt} C_{Mn}^b \right) \times M_{Mn} \times 100 / W_m \quad (4)$$

$$\frac{d[\%Fe]}{dt} = -\frac{2\eta_2 S_L M_{Fe} \times 100}{22\ 400 W_m} \sigma_{FeL} - \left(A_{m} k_m \rho_m (C_{Fe}^b - C_{Fe}^*) + \frac{dW_m}{dt} C_{Fe}^b \right) \times M_{Fe} \times 100 / W_m \quad (5)$$

$$\frac{dW_m}{dt} = -\frac{d[\%C] W_m M_C}{100} - \frac{d[\%Cr] W_m M_{Cr}}{100} - \frac{d[\%Si] W_m M_{Si}}{100} - \frac{d[\%Mn] W_m M_{Mn}}{100} - \frac{d[\%Fe] W_m M_{Fe}}{100} + \frac{dW_{\lambda}}{dt} \quad (6)$$

式中: η_1 -氧的利用系数; S_T -单位时间内底枪供氧量/ $m^3 \cdot s^{-1}$; S_L -单位时间内由冲击坑界面进入熔池的气体量/ $m^3 \cdot s^{-1}$; M_i -钢液中各种元素的摩尔质量/ $kg \cdot mol^{-1}$; W_{λ} -合金加入量/ kg ; W_m -钢液重量/ kg ; σ_{SiL} -顶枪氧的分配系数/%; σ_{SiT} -底枪氧的分配系数/%; A_m -渣-金界面的面积/ m^2 ; k_m -分别为金属侧和熔渣侧的传质系数/ $m \cdot s^{-1}$; C_i^b -钢液中元素 i 的本体浓度/ $mol \cdot kg^{-1}$; C_i^* -界面含量/ $mol \cdot kg^{-1}$ 。

在低碳含量时则停用顶枪,单独使用底枪吹炼,同时不断加大惰性气体的吹入量,以降低 P_{CO} , 达到降碳保铌的目的,这时速率方程为:

$$-W_m \frac{d[\%C]}{dt} = A_m \rho_m k_c ([\%C] - [\%C]_e) \quad (7)$$

$$-W_m \frac{d[\%Cr]}{dt} = 100 M_{Cr} \frac{2\eta_1 S_T}{22\ 400} \sigma_{CrT} - \frac{2M_{Cr} W_m}{3M_C} \left(-\frac{d[\%C]}{dt} \right) \quad (8)$$

式中: $[\%C]$ 、 $[\%C]_e$ -分别是钢液内和渣-金反应界面处的碳浓度/%, $[\%C]_e$ 计算公式为:

$$[\%C]_e = \frac{P_{CO}}{f_c} \left(\frac{a_{[Cr]}^2}{a_{(C_2O_3)} K_{C-Cr}} \right)^{1/3} \quad (9)$$

式中: P_{CO} -CO 的无量纲分压力; f_c -钢中 c 组分的

亨利活度系数。

3 渣相变化

$$\frac{dW_{(C_2O_3)}}{dt} = \frac{d[\%Cr]}{dt} \frac{W_m M_{C_2O_3}}{100 M_{Cr}} \quad (10)$$

$$\frac{dW_{(SiO_2)}}{dt} = \frac{d[\%Si]}{dt} \frac{W_m M_{SiO_2}}{100 M_{Si}} \quad (11)$$

$$\frac{dW_{(MnO)}}{dt} = \frac{d[\%Mn]}{dt} \frac{W_m M_{MnO}}{100 M_{Mn}} \quad (12)$$

$$\frac{dW_{(FeO)}}{dt} = \frac{d[\%Fe]}{dt} \frac{W_m M_{FeO}}{100 M_{Fe}} \quad (13)$$

$$\frac{dW_S}{dt} = \frac{dW_{(C_2O_3)}}{dt} + \frac{dW_{(SiO_2)}}{dt} + \frac{dW_{(MnO)}}{dt} + \frac{dW_{(FeO)}}{dt} + \frac{dW_{(slag)}}{dt} \quad (14)$$

式中: $W_{(i)}$ -渣中组元的重量/ kg ; $W_{(slag)}$ -外加渣料重量/ kg 。

4 氧的分配系数的确定

4.1 底枪供氧在各元素间的分配率

如何有效地正确计算氧在钢液各元素间分配率问题一直是一个难点,许多学者对其进行过研究^[4,5],但还没有取得共识。文献[10]提出了氧在各元素间的分配率正比于其氧化反应 Gibbs 自由能的方法,本模型底吹部分就采用这种方法进行计算。由于顶吹和底吹在供气方向上、气体流量上、产生的流场等都是不同的,因此本模型分开进行考虑。

$$\sigma_{Cr} = \Delta G_C / (\Delta G_C + \Delta G_{Cr}/3 + \Delta G_{Si}/2 + \Delta G_{Mn}) \quad (15)$$

$$\sigma_{CrT} = (\Delta G_{Cr}/3) / (\Delta G_C + \Delta G_{Cr}/3 + \Delta G_{Si}/2 + \Delta G_{Mn}) \quad (16)$$

$$\sigma_{SiT} = (\Delta G_{Si}/2) / (\Delta G_C + \Delta G_{Cr}/3 + \Delta G_{Si}/2 + \Delta G_{Mn}) \quad (17)$$

$$\sigma_{MnT} = \Delta G_{Mn} / (\Delta G_C + \Delta G_{Cr}/3 + \Delta G_{Si}/2 + \Delta G_{Mn}) \quad (18)$$

4.2 顶枪供氧在各元素间的分配率

气液反应各元素间氧分配系数可用下式计算:

$$\sigma_{iL} = \frac{k_i C_{[i]}^b C_{[O]}^b}{\sum_i k_i C_{[i]}^b C_{[O]}^b} = \frac{k_i C_{[i]}^b}{\sum_i k_i C_{[i]}^b} \quad (i = C, Si, Cr, Fe, Mn) \quad (19)$$

本文中给出模型的部分主要公式,模型具体的建立过程请参考文献[11]。

5 模型应用结果

5.1 模型计算结果与验证

太钢 K-OBM-S 转炉容量 80 t, 总高 7 500 mm, 直径 5 510 mm。

K-OBM-S 转炉可以根据不同钢种要求进行一步法、二步法、三步法冶炼不锈钢。由于近期没有应用一步法进行不锈钢冶炼, 因此没有一步法生产的数据资料可以利用。由于碳和铬是不锈钢中最重要的元素, 因此重点对其进行了计算。图 1

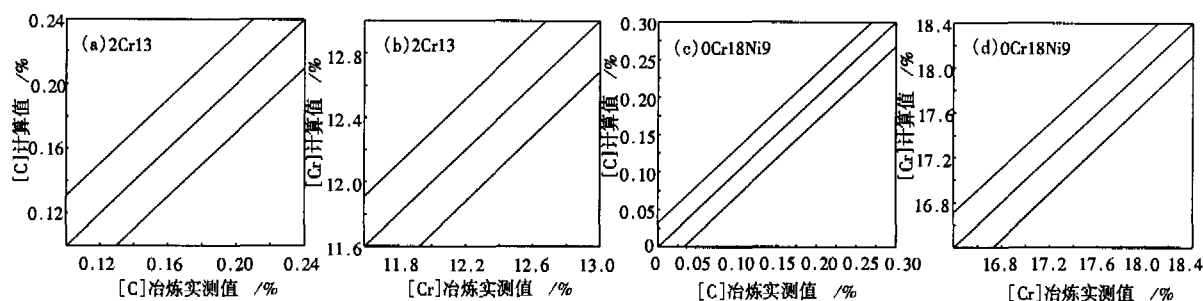


图 1 模型计算值和冶炼测量值对比:(a、b)二步法冶炼 2Cr13 不锈钢;(c、d)三步法冶炼 0Cr18Ni9 不锈钢

Fig. 1 Comparison of model calculated value and measured value during steelmaking: (a, b) 2Cr13 stainless steel melted by duplex route; (c, d) 0Cr18Ni9 stainless steel melted by triplex route

图 1(c)、(d)是对三步法生产的 115 炉 0Cr18Ni9 钢的碳和铬含量的验证曲线, 虽有个别炉次偏差相对较大, 但其中大部分终点碳含量误差都在 $\pm 0.03\%$ 范围之内, 终点铬含量误差大部分都在 $\pm 0.3\%$ 范围内。按照终点成分控制范围的要求, 终点碳含量在控制目标 (0.10% ~ 0.25%) 的炉次为 110 炉, 终点目标命中率为 95.6%, 铬含量在终点控制目标 (17.1% ~ 17.6%) 的炉次为 98 炉, 合格率为 85.2%。

从图 1 的验证结果可以看出, 有一些炉次的模型计算结果与实际冶炼结果偏差相对较大, 分析其原因主要有以下两点:

(1) 计算时所用的加料数据都是由高位料仓加入, 而在实际操作过程中还有一些炉料(如镍板)是由外部料槽加入, 这些数据资料没有完全统计到数据库中, 因此无法利用;

(2) 模型本身有些参数的选取不一定十分合适, 如 CO 二次燃烧率, 在本模型中是参考普通转炉冶炼时的参数。这在以后的工作中还会继续修正和完善。

5.2 加料制度对冶炼结果影响的研究

K-OBM-S 转炉入炉前不锈钢母液成分、原有

(a)(b)是二步法生产不锈钢碳和铬的验证图, 选用的钢种为 2Cr13, 共有 35 炉数据, 其中碳含量模型计算结果与实际冶炼结果之绝对误差, 满足误差范围 ($\pm 0.03\%$) 的炉次为 23 炉 (占 65.7%), 铬含量满足误差范围 ($\pm 0.3\%$) 为 29 炉 (占 82.9%)。由于在冶炼过程中不方便取过程数据, 因此只有最终结果的数值。其中温度的数值也只有计算值, 没有现场数据, 因此没有对模型计算的温度数据进行校核和验证。

表 1 不锈钢母液和精炼终点钢水成分和重量

Table 1 Chemical compositions and weight of parent hot metal and refining end-point molten stainless steel

| 工艺 | 成分/% | | | | 钢水重量/ t |
|------|-------|-------|-------|-------|------------|
| | C | Cr | Si | Mn | |
| 母液 | 3.834 | 7.76 | - | 0.088 | 52.3 |
| 原有工艺 | 0.189 | 17.41 | 0.174 | 1.298 | 73.6 |
| 调整工艺 | 0.180 | 17.48 | 0.151 | 1.304 | 72.6 |

工艺与调整后工艺精炼终点钢水主要成分和钢水重量见表 1。

在不改变原有供气制度的前提下, 对原有的加料制度进行了调整, 用以研究加料制度对实际冶炼过程的影响。所研究炉号为 2078, 其原有加料制度和调整后的加料制度配料参数如表 2 所示。

原有工艺与调整后工艺的碳含量、铬含量以及温度的变化曲线如图 2 所示。原有工艺的终点温度为 1 645 $^{\circ}\text{C}$, 而调整工艺后终点温度为 1 636 $^{\circ}\text{C}$, 相差较小, 都在出钢控制温度的范围之内。

表 3 为三步法冶炼 0Cr18Ni9 的目标范围和内控目标, 由于采用三步法冶炼, 因此, 其工艺目标范围较宽。

从表 1 分析结果可以看出, 原有工艺与调整

表 2 原有工艺和调整工艺加料参数对比/kg

Table 2 Comparison of charging parameters between original and improved process /kg

| 时间/min | 工艺 | 石灰 | Dolo-MgO | HC-FeCr | HC-MnFe | Ni-ckle | Four-spar | FeSi | FeNi |
|--------|-----|-------|----------|---------|---------|---------|-----------|-------|-------|
| 0 | 原 | 1 052 | 1 500 | - | - | - | - | - | - |
| | 调 | 600 | 600 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 原 | - | 479 | 7 024 | - | - | - | - | - |
| | 调 | - | 479 | 2 000 | - | - | - | - | - |
| 13 | 原 | 1 079 | - | - | 1 253 | - | - | - | - |
| | 调 | 1 079 | - | 3 000 | 1 253 | - | - | - | - |
| 15 | 原 | 1 063 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 调 | 1 063 | - | 2 024 | - | - | - | - | - |
| 16 | 原/调 | - | - | 5 232 | - | - | - | - | - |
| | 原 | 531 | - | - | - | - | - | - | - |
| 17 | 原 | 531 | 900 | - | - | - | - | - | - |
| | 调 | 531 | 900 | - | - | - | - | - | - |
| 20 | 原/调 | - | - | - | - | 2 007 | - | - | 998 |
| | 原 | - | - | - | - | 397 | - | - | 2 800 |
| 21 | 原 | - | - | - | - | 307 | - | - | 2 800 |
| | 调 | 952 | - | - | - | - | - | - | - |
| 25 | 原/调 | 517 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 原/调 | 541 | - | - | - | - | - | - | - |
| 30 | 原 | 1 050 | - | - | - | - | 190 | 1 705 | - |
| | 调 | 550 | - | - | - | - | 190 | 1 705 | - |
| 31 | 原/调 | 541 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 原/调 | - | - | - | - | - | - | 103 | - |
| 42 | 原/调 | - | - | 123 | - | 406 | - | - | - |

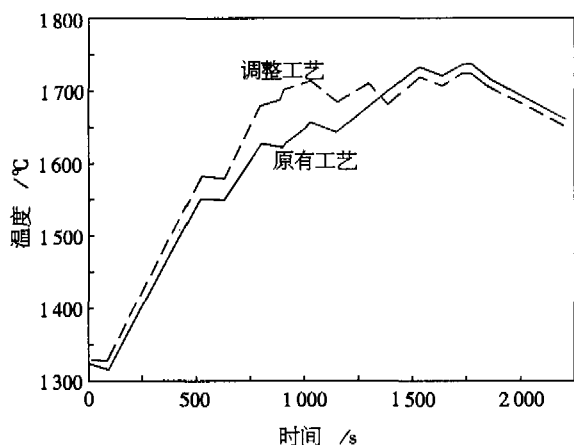


图 2 原有工艺与调整工艺的温度变化曲线

Fig.2 Curves of temperature change in original and improved process

表 3 三步法冶炼 0Cr18Ni9 不锈钢工艺要求成分范围和内控目标成分/%

Table 3 Requirement and control aim of chemical composition of 0Cr18Ni9 stainless steel melted by triplex route/%

| 项目 | C | Cr | Si | Mn |
|------|----------|-----------|---------|---------|
| 目标范围 | 0.1~0.25 | 17.1~17.6 | 0.1~0.2 | 1.0~1.8 |
| 内控目标 | 0.18 | 17.4 | 0.18 | 1.2 |

工艺的终点主要成分都达到了目标成分的要求。碳和铬含量变化曲线由于加料制度的调整出现了

一些变化,而终点成分基本相同。温度曲线变化则比较明显(图 2),熔炼初期由于调整工艺加入渣量较少,所以温度上升比原有工艺要快一些。从全过程来看,调整后工艺的温度波动较小,而原工艺的温度波动较大,可见调整工艺比原有工艺更有利于温度的控制,也有利于降碳保铬和保护炉衬。

6 结论

(1) 针对太钢 K-OBM-S 冶炼不锈钢工艺所建立的数学模型计算结果与实际冶炼结果基本相符,模型具有较高的可信度。

(2) 从模型结果来看,将转炉冶炼普碳钢的顶枪模型与 AOD 冶炼不锈钢的底吹模型的结合是比较合理的,结合后的模型适合于 K-OBM-S 冶炼不锈钢过程的描述。

(3) 应用该模型可以描述实际冶炼过程的变化趋势和规律,并且可以预报各点的瞬时冶炼结果。

(4) 通过加料制度对温度控制的影响来看,冶炼初期不适宜加入太多的渣料,选择合理的时机加入后续低温合金和渣料,这样才能有利于温度的稳定,为降碳保铬创造合适的温度环境。

参考文献

- 1 Fritz E. 不锈钢生产技术的发展趋势. 钢铁, 2003, 38(5): 67
- 2 Anon. K-OBM-S a Single Vessel Process for the Production of Stainless Steel. Steel Times, 1996(8): 267
- 3 郝培荣, 赵红梅, 马青. 顶底复合吹炼转炉冶炼不锈钢. 山西冶金, 1998(3): 26
- 4 Deb Roy T, Robertson D G C. Mathematical Model for Stainless Steelmaking, Ironmaking and Steelmaking, 1978, 17(5): 198
- 5 Fruehan R J. Reaction Model for the AOD Process, Ironmaking and Steelmaking, 1976, 3(3): 153
- 6 Gömerup M, Sjöberg P. AOD/CLU Process Modeling: Optimum Mixed Reductants Addition, Ironmaking and Steelmaking, 1999, 26(1): 58
- 7 Asai S, Szekely J. Decarburization of Stainless Steel, Met. Trans., 1974, 5(3): 651
- 8 魏季和, 朱德平. 不锈钢 AOD 精炼过程数学模拟: 过程数学模型. 2001 中国钢铁年会论文集(上卷), 2001: 604
- 9 鞭严, 大規滿, 浅井滋生. LD 转炉の脱碳反应と伝熱解析. 鉄と鋼, 1967, 53(3): 424
- 10 Wei Jihe, Zhu Deping. Mathematical Modeling for AOD Refining Process of Stainless Steel, 2001 Steelmaking Conference Proceedings, 2001: 645
- 11 董艳伍. K-OBM-S 转炉法冶炼不锈钢数学模拟. 沈阳: 东北大学, 2004

董艳伍(1978-), 男, 博士研究生。从事不锈钢精炼和电渣冶金方面的研究。

收稿日期: 2005-10-12