

K-OBM-S 不锈钢冶炼最优配料的数学模型

徐芳泓¹ 龚伟² 姜周华²

(1 太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003; 2 东北大学材料与冶金学院,沈阳 110004)

摘要 用线性规划方法建立了太钢 K-OBM-S 法治炼不锈钢的配料模型。模型中包括 13 个决策变量,最低配料成本作为模型的目标函数,一组自变量的线性等式和不等式作为约束引入,采用单纯形法对该模型进行求解。计算结果表明,在给定条件下,按建立的数学模型对 SOCr18Ni9 不锈钢进行配料,可使吨钢总成本降低 10%。

关键词 不锈钢 K-OBM-S 工艺 模型 配料

Math Model for Optimum Charge Partition on Stainless Steel Smelting by K-OBM-S Process

Xu Fanghong¹, Gong Wei² and Jiang Zhouhua²

(1 Technology Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003;
2 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract A charge partition model for stainless steel smelting by K-OBM-S process at Taiyuan Steel has been established by a linear programming method including 13 decision variables in the model, minimum cost charge partition selected to be objective function and a set of linear equality and inequality about variable as restricted introduction, and to solve the problem of linear programming by Simplex Method. Calculated results showed that at given conditions, according to charge partition of stainless steel SOCr18Ni9 smelting by established math model, the total cost per ton steel decreased by 10%.

Material Index Stainless Steel, K-OBM-S Process, Model, Charge Partition

以三脱铁水为原料的 K-OBM-S 工艺是一种较新的不锈钢冶炼工艺,目前世界上只有 3 个工厂采用:日本的川崎、巴西的阿赛斯塔和中国的太原^[1,2]。

太钢的不锈钢生产线是以铁水为主原料,以公称容量 70 t K-OBM-S 为主体装备,以生产高质量铬不锈钢为主的不锈钢冶炼全新流程。K-OBM-S 平均冶炼周期为 53 min,炉龄最高达到 703 次,铬钢比例达到 58.9%,不锈钢的生产成本降低 10%。

1 模型基本假设和简化

在 K-OBM-S 工艺生产不锈钢过程中,不考虑劳动力、车间管理等人力资源成本;不考虑设备运行成本及设备折旧因素;不考虑生产率,即产量变化对成本的影响。因此,只考虑各种物料消耗(包括能耗)产生的成本。

2 线性规划法建立配料优化数学模型

以 1 000 kg 出钢量(即吨钢)生产成本进行计算。首先计算各种物料(能源)的吨钢消耗,若已知其单位价格,则可方便计算出单位生产成本。

2.1 决策变量

设需要配入的物料(包括气体)为 i ,共 n 个(即 $i = 1, 2, \dots, n$),每种物料(包括气体)的配入量 X_1 ,

X_2, \dots, X_m 是决策变量。

$$\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T \quad (1)$$

显然,决策变量满足非负条件。决策变量的 n 个自变量构成了 n 维欧几里德空间 E^n ,即 n 维空间中任一点对应着一组 $(i = 1, 2, \dots, n)$ 表示一种配料方案。

在该计算中的决策变量 X_i 共 13 个变量。其中 i 依次是:1- 三脱铁水;2- 电弧炉预熔液;3- HCFeCr;4- HCFeMn;5- Ni;6- FeNi;7- FeSi;8- 焦炭;9- 氧化期石灰;10- 还原期石灰;11- 轻烧镁球;12- 氧气;13- 氮气。

2.2 目标函数(Objective Function)

以配料成本最低为目标,即

$$Z_{\min} = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_mx_m = \sum_{j=1}^m c_jx_j \quad (2)$$

式中: Z - 配料总成本/元; c_j - 第 j 种入炉物料的价格/(元 · t⁻¹); x_j - j 种炉料的加入量(消耗量)/(kg · t⁻¹)。

2.3 约束条件

约束条件是为了一组自变量的线性等式或不等式,分别称之为等式约束(The Equality Constrains)

和不等式约束(The Inequality Constrains)^[3,4]。

(1)对钢水各元素目标成分的要求^[5]:

$$LL_i \leq \frac{R_i \cdot \sum_{j=1}^m F_{ij} X_j}{W_{unit}} \leq UL_i \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ 共 n 个不等式, $j = 1, 2, \dots, m$

式中: F_{ij} -第 j 种物料中元素 i 的含量/%; R_i -元素 i 的平均收得率/%; LL_i -元素 i 的成分下限/%; UL_i -元素 i 的成分上限/%; W_{unit} -单位钢水的质量,本计算即 1 000 kg。

(2)总的物料平衡

$$\sum_{i=1}^6 X_i \cdot R_{total} = W_{unit} \quad (4)$$

式中: R_{total} -炉料总的综合收得率/%。

(3)其它物料的加入量约束条件

$$\text{①吨钢 FeSi 加入量 } X_7 = \frac{\alpha}{2.8} \cdot X_{\Delta Cr} / [Si]_{FeSi} \quad (5)$$

式中: α -经验系数,通常 $\alpha = 1.7 \sim 2.0$; $X_{\Delta Cr}$ -氧化期吨钢铬元素的氧化量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); $[Si]$ -FeSi 中 Si 的含量/%。

$$\text{②吨钢氧气消耗量 } X_{12} = \frac{16}{12} \cdot \frac{X_C}{CRE} \quad (6)$$

式中: X_C -氧化期 C 的吨钢氧化量/kg; CRE -脱碳利用率/%;为简化计算取各期平均值, $CRE = 76\%$ 。

③关于 $X_{\Delta Cr}$ 的计算^[6]。假设脱碳后的 O_2 先全部氧化 Si, 然后剩余的 O_2 有 90% 用于氧化 Cr 和 Mn 元素。其中假设 Cr 和 Mn 之间 O_2 的分配比,按质量比例分配。所以有:

$$X_{\Delta Cr} = \frac{156}{64} \left[(1 - CRE) X_{12} - \frac{32}{28} X_{\Delta Si} \right] \cdot 0.9 \cdot Ratio_{Cr-Mn} \quad (7)$$

式中: $Ratio_{Cr-Mn}$ -Cr 和 Mn 之间 O_2 的分配比,即

$$Ratio_{Cr-Mn} = \frac{[Cr]_{steel} X_2 + [Cr]_{HCFeCr} X_3}{[Cr]_{steel} X_2 + [Cr]_{HCFeCr} X_3 + [Mn]_{hotmetal} X_1 + [Mn]_{steel} X_2 + [Mn]_{HCFeMn} X_4} \quad (8)$$

④氧化期石灰的吨钢加入量:

$$X_9 = \left(\frac{60}{28} \cdot B_{ox} X_{\Delta Si} \right) / ([CaO]_{lime} - B_{ox} [SiO_2]_{lime}) \quad (9)$$

式中: B_{ox} -氧化期炉渣碱度; $X_{\Delta Si}$ -氧化期吨钢元素 Si 的氧化量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); $[CaO]_{lime}$ -石灰中的 CaO 含量/%; $[SiO_2]_{lime}$ -石灰中 SiO_2 的含量/%。

⑤还原期石灰的加入量约束。

$$X_{10} = \left[\frac{60}{28} \cdot B_{RE} (X_7 - [Si]_{aimed} \cdot W_{unit}) \right] / ([CaO]_{lime} - B_{RE} [SiO_2]_{lime}) \quad (10)$$

式中: B_{RE} -还原期炉渣碱度; $[Si]_{aimed}$ -出钢钢水中元素 Si 的目标含量/%。

⑥轻烧镁球的加入量约束。为了简化计算,初步按石灰加入量的 20% 加入,即:

$$X_{11} = 0.2 (X_9 + X_{10}) \quad (11)$$

⑦焦炭消耗。加入焦炭的目的是补偿温度的不足。以氧化终点熔池温度的实际值 T_{bath-R} 与预先设定的目标温度 T_{bath-A} 的差值决定加入焦炭的数量。

$$T_{bath-R} = T_{bath,0} + \{ 34.60 X_8 [C]_{Coke} + 11.70 (1 - Z) X_{\Delta C} + 36.86 Z X_{\Delta C} + 34.38 X_{\Delta Si} + 17.72 X_{\Delta Mn} + 10.62 X_{\Delta Cr} + 5.17 X_{\Delta Fe} \} \times [1000 C_{p,m} / (1000 C_{p,m} + X_{slag} C_{p,s})] - (1929 X_9 + 2549 X_{11} + 1321 X_3 + 1059 X_4 + 515 X_5 + 1106 X_6 + 1169 X_{12} + 1873 X_{13}) / (1000 C_{p,m} + X_{slag} C_{p,s}) - q_{fb} / [W_{tapping} \times (1000 C_{p,m} + X_{slag} C_{p,s})] \quad (12)$$

式中: $T_{bath,0}$ -铁水或混合液的人炉初始温度/ $^{\circ}\text{C}$; $[C]_{Coke}$ -焦炭中的碳含量/%; Z -CO 燃烧生成 CO_2 的比率/%; $X_{\Delta Mn}$ -氧化期吨钢元素 Mn 的氧化量/kg; $X_{\Delta Fe}$ -氧化期吨钢元素铁的氧化量/kg; $C_{p,m}$ -不锈钢的平均热熔/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); X_{slag} -吨钢的炉渣量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); $C_{p,s}$ -炉渣的平均热熔/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); q_{fb} -炉体的散热量/kJ; $W_{tapping}$ -出钢量/t。

⑧氮气的吨钢使用(消耗)量。简化计算可以按氧气体积的 50% 计算(三步法),折算成质量,即:

$$X_{13} = 0.4375 \cdot X_{12} \quad (13)$$

(4)许用量约束。设定电弧炉预熔液的用量每炉不超过 20 t, 而且初步设定焦炭的使用量每炉不超过 2 000 kg, 即:

$$X_2 \leq 20000 / W_{tapping}; X_8 \leq 2000 / W_{tapping} \quad (14)$$

对于萤石的加入量,因为在氧化期不加萤石,所以不作为决策变量,简化计算石灰按 6% 配入:

$$X_{CaF_2} = 0.06 (X_9 + X_{10}) \quad (15)$$

模型共包括 13 个决策变量和 17 个约束条件。

3 模型求解和计算结果

上述模型中的目标函数和约束条件均为自变量的线性方程。目前,单纯形(Simplex Method)是公认的求解线性规划问题的有效方法,其基本思路是:现

寻求一个基本可行解,经过检验,如果不是最优解,则从这个基础可行解开始转换到另一个基础可行解,如果后者仍不是最优解,则重复上述步骤。通常将此过程称之为“迭代”,也就是说,从约束条件所确定区域的一个顶点移动到另一个顶点,目标函数的值逐渐减小(或增大),直到取得最小值(或最大值)为止。需要指出的是,利用单纯形法解线性规划问题时,可能会出现无解的情况,在程序中应该予以说明。

以钢种 S0Cr18Ni9 作为例子对模型结果进行了验证。该钢种为碳含量较低([C] ≤ 0.06%)、合金含量较高的铬镍钢,生产工艺流程采用三步法。即:

预处理铁水 } → K-OBM-S → 吹氩站 → VOD } → 浇注。
 电弧炉预熔液 } → VOD → LF }

模型计算条件见表 1 和表 2,表 3 为计算结果。

表 1 配料模型计算条件

Table 1 Calculation conditions for charge partition model

项目	成分/%		温度/ ℃	单价/ (元·t ⁻¹)	炉渣碱度	
	C	Cr			氧化期	还原期
三脱铁水	3.8	0	1 280	1 080	2.0	2.0
电弧炉预熔液	5.0	60	1 650	7 000	2.0	2.0

表 2 物料和气体的单价

Table 2 Unit price of raw materials and gas

物料	单价/(元·t ⁻¹)	气体	单价/(元·m ⁻³)
石灰	260	氧气	0.55
白云石	580	氮气	0.47
萤石	410	氩气	5.30
高碳铬铁	6 150		
高碳锰铁	7 570		
纯镍	100 280		
镍铁	32 000		
硅铁	6 040		
焦炭	540		

表 3 冶炼 S0Cr18Ni9 钢的配料模型计算结果

Table 3 Calculated results for steel S0Cr18Ni9 smelting by charge partition model

物料	计算结果		计算成本/ 元	比例/ %	实际结果		实际成本/ 元	比例/ %
	/(kg·t ⁻¹)	/(m ³ ·t ⁻¹)			/(kg·t ⁻¹)	/(m ³ ·t ⁻¹)		
三脱铁水	572.52		618.32	6.83	589.0		636.12	6.34
电弧炉预熔液	88.47		619.29	6.84	205.5		1 438.50	14.35
高碳铬铁	178.20		1 095.93	12.10	61.4		377.61	3.77
高碳锰铁	13.94		105.52	1.17	14.9		112.79	1.12
纯镍	0		0	0	43.8		4 392.26	43.80
镍铁	199.49		6 383.68	70.51	87.5		2 800.00	27.92
硅铁	22.64		136.74	1.51	27.4		165.50	1.65
石灰	94.81		24.65	0.27	89.9		23.37	0.23
轻烧白云石	18.94		10.99	0.12	43.5		25.23	0.25
萤石	5.69		2.33	0.03	12.0		4.92	0.05
焦炭	28.57		15.43	0.17				
氧气		52.05	28.63	0.32		59.3	32.62	0.33
氮气		26.02	12.23	0.14		39.5	18.57	0.19
成本/(元·t ⁻¹)			9 053.74	100.00			10 027.49	100.00

如表 3 的计算结果所示,吨钢的物料成本可以降低大约 974 元,比较计算结果和实际的结果可得:

(1) 电弧炉预熔液的消耗计算结果远低于实际的配入量,由于电弧炉预熔液的成本很高,因此降低其配入量势必会降低整个冶炼成本。

(2) 在结果中没有配入纯镍,而全部是镍铁。这是降低总成本的最重要原因。但是过多的镍配入会导致热量的损失增加。为了弥补热量的损失,必须加入 28.57 kg/t 的焦炭。

4 结论

在 20 t K-OBM-S 工艺冶炼 S0Cr18Ni9 钢的情况下,通过最优配料数学模型配料的吨钢计算成本较吨钢实际成本约降低 10%。

参考文献

- 1 赵发忠. 世界不锈钢的发展和我国不锈钢生产前景的分析. 特殊钢, 1996, 17(4): 30
- 2 汪学瑶. 世界不锈钢工艺技术和市场的现状与发展. 特殊钢, 1996, 17(5): 1
- 3 Luenberger D G. Introduction to Linear and Nonlinear Programming. Addison-Wesley Publishing Company, 1973
- 4 Noton M. Modern Control Engineering, Pergamon Press, 1972
- 5 张 鉴. 炉外精炼的理论与实践. 北京: 冶金工业出版社, 1993
- 6 Hilty D C, Taylor R W, Gillespie R H. Predicting Minimum Materials Cost for Stainless Steels. Journal of Metals, 1959, 7, 458

作者简介见本期 9 页

收稿日期: 2007-04-18