DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.022

# 高纯生铁冶炼配料成本优化

杨卫轩[1],王玉英[1],杨　凯[2],薛佳奇[2],赵俊学[2]
(1. 西安建筑科技大学 理学院,陕西 西安 710055;2. 西安建筑科技大学 冶金学院,陕西 西安 710055)

**摘　要**:利用最优化原理和计算机技术,综合考虑工艺要求,建立高纯生铁冶炼配料成本优化模型。应用该模型可使冶炼高纯生铁的配料每吨节省 50 元以上,有助于企业积极应对激烈的市场竞争以及严峻的生存压力。

**关键词**:高纯生铁;配料;成本;优化

**中图分类号**: TF542　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)09-0973-04

## Optimization of Ingredients Smelting Cost of High-purity Pig Iron

YANG Weixuan[1], WANG Yuying[1], YANG Kai[2], XUE Jiaqi[2], ZHAO Junxue[2]
(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Metallurgy, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract**: Based on the optimization principle and computer technology, the cost optimization model of high purity pig iron smelting was established. The application of this model can save more than 50 yuan per ton of raw materials for smelting high purity pig iron, which is helpful for enterprises to actively cope with the fierce market competition and severe survival pressure.

**Key words**: high-purity pig iron; ingredients; cost; optimization

企业在生产过程中,需要在相同的生产条件下获得最高利润。近几年,由于钢铁行业产能过剩的问题导致钢铁行业的利润空间变的越来越小,为应对激烈的市场竞争以及严峻的生存压力,需要在保证产品质量的前提下进一步降低生产成本。根据以往生产数据可见,山西某集团铸造有限公司还有降低生产成本的空间,有必要进一步细化管理,提高资源利用率,根据现有的资源条件和变化的市场价格,及时、合理、系统地优化生产原料配比,进而提高企业生产效益。

## 1　生产工艺要求

由于高纯生铁含有多种化学成分,其冶炼工艺比较复杂,要求也比较严格。为生产合格的高纯生铁,需要确保其化学成分符合规定要求,高纯生铁主要化学成分的具体要求见表 1, 还需要确保炉渣中 Mg 元素含量不超过 12%,Al 元素含量不超过 20%,炉渣碱度在 1.13~1.18 范围内。

在高炉冶炼时,所用配料中不同化学成分的收得率不同,根据企业实际生产经验,各化学成分的具体收得率见表 2。

## 2　原料条件及基本数据

高纯生铁冶炼时所用原料较多, 常选用 3~4 种矿石、球团矿、各种碱石和多种燃料。矿石不能直接入炉,需要制作成烧结矿入炉,烧结矿具体要求见表 3。2# 炉所用原料为例,将入炉原料的化学成分列于表 4。

## 3　高纯生铁冶炼配料成本优化数学模型

高纯生铁冶炼配料成本优化是指在目前生产技术与资源条件下,根据出铁量、入炉配料成分要求、炉渣成分要求及工艺要求,利用最优化原理,优化生产原料配比,降低人工选料配料计算的因素影响,进而获得最佳的配料方式和对应的最低总成本。

### 3.1　配料中化学成分的符号表示

在企业实际生产中,入炉原料的种类、价格,产品的工艺要求往往会随市场变化有所调整, 为了保证配料成本优化模型计算机程序的通用性, 因此将入炉原料所含的化学成分用符号表示,见表 5。

### 3.2　目标函数

高纯生铁冶炼配料成本分为矿石成本和燃料成本,其中燃料成本可以通过矿石成本计算得到。因此优化模型以所配各种矿石的总成本最低值为目标函数[1],即:

**收稿日期**:2019-04-09
**作者简介**:杨卫轩(1992- ),陕西岐山人,硕士生.研究方向:数据挖掘研究.电话:18395448968,
E-mail:xq520xl@sina.com

表 1 高纯生铁的化学成分 $w$(%)
Tab.1 Chemical composition of high-purity pig iron

| C | Si | Mn | P | S | Ti | V | Cr | As | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ≥3.3 | ≤0.4 | ≤0.05 | ≤0.02 | ≤0.015 | ≤0.01 | ≤0.015 | ≤0.015 | ≤0.002 | ≤0.001 |

表 2 配料中化学成分收得率
Tab.2 Chemical composition yield in the ingredients

| 元素名 | Si | Mn | P | S | Ti | V | Cr | As | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 收得率(%) | 6.40 | 81.81 | 92.94 | 2.86 | 27.40 | 56.34 | 36.50 | 18.75 | 7.59 |
| 去除率(%) | 93.60 | 18.19 | 7.06 | 97.14 | 72.60 | 43.66 | 63.50 | 81.25 | 92.41 |

表 3 烧结矿的工艺要求
Tab.3 Process requirements for sinter

| 项目 | 品位(%) | Si(%) | Mg(%) | K(%) | 碱度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 要求 | 50 | 4.9~5.6 | 2.1~2.3 | 0.085 | 1.7~1.9 |

$$\min f(y)=\sum_{i=1}^{n} P_i Y_i,\ i=1, 2, \cdots, 9 \tag{1}$$

式中，$P_i$ 第 $i$ 种配料价格（元/kg），$Y_i$ 第 $i$ 种配料用量(kg)。

### 3.3 约束条件

为了满足生产工艺要求和原料条件，从而建立一系列的线性方程。

烧结矿中 Si 含量的约束方程：

$$4.9 \leqslant \frac{a_1}{y_1+y_3+y_4+y_5+y_6+y_8+y_9} \leqslant 5.6 \tag{2}$$

烧结矿中 Mg 含量的约束方程：

$$2.1 \leqslant \frac{a_4}{y_1+y_3+y_4+y_5+y_6+y_8+y_9} \leqslant 2.3 \tag{3}$$

烧结矿中 K 含量的约束方程：

$$\frac{a_{13}}{y_1+y_3+y_4+y_5+y_6+y_8+y_9} \leqslant 0.085 \tag{4}$$

烧结矿碱度的约束方程：

$$1.7 \leqslant \frac{a_3}{a_1} \leqslant 1.9 \tag{5}$$

烧结矿品位的约束方程：

$$\frac{a_0}{y_1+y_3+y_4+y_5+y_6+y_8+y_9} \geqslant 0.5 \tag{6}$$

出铁量的约束方程：

$$a_0=\sum_{i=1}^{9} \frac{a_{i0}}{100} y_i \geqslant 950 \tag{7}$$

炉渣碱度的约束方程：

$$1.13 \leqslant \frac{a_3+a_4}{0.936\times a_1+a_2+0.070\,6\times\frac{a_6}{0.473}} \leqslant 1.18 \tag{8}$$

炉渣中 Al 元素含量的约束方程：

$$\frac{a_2}{0.936\times a_1+a_2+a_3+a_4+0.070\,6\times\frac{a_6}{0.473}} \leqslant 0.2 \tag{9}$$

炉渣中 Mg 元素含量的约束方程：

$$\frac{a_2}{0.936\times a_1+a_2+a_3+a_4+0.070\,6\times\frac{a_6}{0.473}} \leqslant 0.12 \tag{10}$$

铁液中各元素质量百分数计算需要将元素氧化物折算为单质计算，即：

表 4 配料用基本数据
Tab.4 Basic data for ingredients

| 原料名 | 化学成分 $w$(%) | | | | | | | | | | | | | | 价格 | 用量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | MnO | P | $TiO_2$ | $V_2O_5$ | Cr | Pb | As | S | K | | |
| 石灰 | 0 | 2.91 | 0 | 77.9 | 4.7 | 0 | 0.024 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $p_1$ | $y_1$ |
| 球团矿 | 60 | 11.41 | 0.72 | 0.7 | 0.73 | 0.07 | 0.028 | 0.069 | 0.013 | 0.01 | 0.027 | 0.007 | 0.01 | 0 | $p_2$ | $y_2$ |
| A 矿 | 64.77 | 8.52 | 0.18 | 0.17 | 0.42 | 0.031 | 0.01 | 0.015 | 0.013 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.03 | 0.018 | $p_3$ | $y_3$ |
| B 矿 | 65.93 | 2.85 | 0.25 | 1.09 | 1.4 | 0.108 | 0.006 | 0.032 | 0.026 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 2 | 0.114 | $p_4$ | $y_4$ |
| C 矿 | 64.47 | 8.95 | 0.20 | 0.16 | 0.35 | 0.026 | 0.01 | 0.015 | 0.013 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.03 | 0.008 | $p_5$ | $y_5$ |
| D 矿 | 65.73 | 2.98 | 0.29 | 1.27 | 1.64 | 0.109 | 0.006 | 0.033 | 0.028 | 0 | 0 | 0 | 2.69 | 0 | $p_6$ | $y_6$ |
| 高钙石 | 0 | 1.5 | 0 | 49.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $p_7$ | $y_7$ |
| 石灰石 | 0 | 2 | 0.2 | 50 | 0.4 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $p_8$ | $y_8$ |
| 白云石 | 0 | 2 | 0.38 | 33 | 18.5 | 0 | 0.015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0 | $p_9$ | $y_9$ |
| 焦炭 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.017 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.64 | 0 | $p_{10}$ | $y_{10}$ |
| 洗煤 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.029 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0 | $p_{11}$ | $y_{11}$ |
| 烟煤 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.688 | 0 | $p_{12}$ | $y_{12}$ |
| 焦粉 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.58 | 0 | $p_{13}$ | $y_{13}$ |
| 焦沫 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.034 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.43 | 0 | $p_{14}$ | $y_{14}$ |
| | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ | $a_6$ | $a_7$ | $a_8$ | $a_9$ | $a_{10}$ | $a_{11}$ | $a_{12}$ | $a_{13}$ | $p$ | $y$ |

表 5 配料化学成分代表符号表

Tab. 5 ingredient chemical composition representative symbol table

| 原料名 | 化学成分 $w$(%) | | | | | | | | | | | | | | 价格 | 用量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | MnO | P | $TiO_2$ | $V_2O_5$ | Cr | Pb | As | S | K | | |
| 石灰 | $a_{10}$ | a11 | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{1,13}$ | $p_1$ | $y_1$ |
| 球团矿 | $a_{20}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{2,13}$ | $p_2$ | $y_2$ |
| A 矿 | $a_{30}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{3,13}$ | $p_3$ | $y_3$ |
| B 矿 | $a_{40}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{4,13}$ | $p_4$ | $y_4$ |
| C 矿 | $a_{50}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{5,13}$ | $p_5$ | $y_5$ |
| D 矿 | $a_{60}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{6,13}$ | $p_6$ | $y_6$ |
| 高钙石 | $a_{70}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{7,13}$ | $p_7$ | $y_7$ |
| 石灰石 | $a_{80}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{8,13}$ | $p_8$ | $y_8$ |
| 白云石 | $a_{90}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{9,13}$ | $p_9$ | $y_9$ |
| 焦炭 | $a_{10,0}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{10,13}$ | $p_{10}$ | $y_{10}$ |
| 洗煤 | $a_{11,0}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{11,13}$ | $p_{11}$ | $y_{11}$ |
| 烟煤 | $a_{12,0}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{12,13}$ | $p_{12}$ | $y_{12}$ |
| 焦粉 | $a_{13,0}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{13,13}$ | $p_{13}$ | $y_{13}$ |
| 焦沫 | $a_{14,0}$ | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | … | $a_{14,13}$ | $p_{14}$ | $y_{14}$ |
| | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ | $a_6$ | $a_7$ | $a_8$ | $a_9$ | $a_{10}$ | $a_{11}$ | $a_{12}$ | $a_{13}$ | $p$ | $y$ |

注：上表中，$a_j=\sum_{i=1,i\neq 2,7}^{9}\frac{a_{i,j}}{100}y_i, j=0,1,\cdots,13$

铁液中 Si 含量的约束方程：

$$0\leqslant 6.4\%\times 0.467\times a_1\leqslant 4 \tag{11}$$

铁液中 Mn 含量的约束方程：

$$0\leqslant 81.81\%\times 0.775\times a_5\leqslant 0.5 \tag{12}$$

铁液中 P 含量的约束方程：

$$0\leqslant 92.94\%\times a_6\leqslant 0.3 \tag{13}$$

铁液中 Ti 含量的约束方程：

$$0\leqslant 27.4\%\times 0.6\times a_7\leqslant 0.1 \tag{14}$$

铁液中 V 含量的约束方程：

$$0\leqslant 56.34\%\times 0.56\times a_8\leqslant 0.15 \tag{15}$$

铁液中 Cr 含量的约束方程：

$$0\leqslant 36.5\%\times a_9\leqslant 0.15 \tag{16}$$

铁液中 Pb 含量的约束方程：

$$0\leqslant 7.59\%\times a_{10}\leqslant 0.01 \tag{17}$$

铁液中 As 含量的约束方程：

$$0\leqslant 18.75\%\times a_{11}\leqslant 0.02 \tag{18}$$

铁液中 S 含量的约束方程：

$$0\leqslant 2.86\%\times a_1\leqslant 0.2 \tag{19}$$

## 4 燃料成本

通过第三节的模型求解出矿石用量，计算相应的燃料用量，具体计算如下：

(1)焦炭用量：

$$y_{10}=y_0\times(1+2\times\frac{K-Q}{100}) \tag{20}$$

式中，$y_0$ 为现行焦比，$K$ 为现行工艺制度下的铁矿石综合品位，$Q$ 为新配矿比下铁矿石的综合品位：

$$Q=\frac{a_{30}y_3+a_{40}y_4+a_{50}y_5+a_{60}y_6}{y_1+y_3+y_4+y_5+y_6+y_8+y_9} \tag{21}$$

(2)煤粉用量(80%洗煤 +20%烟煤)为(采用企业现行用量要求)：

$$0.8\times y_{11}+0.2\times y_{12} \tag{22}$$

(3)焦粉用量：$y_{13}$(采用企业现行用量要求)。

(4)焦沫用量：

$$y_{14}=(y_3+y_4+y_5+y_6)\times 0.06 \tag{23}$$

## 5 总成本

冶炼总成本由冶炼所用矿石成本和燃料成本两部分构成，计算如下：

$$F(y)=f(y)+\sum_{i=10}^{14}p_iy_i \tag{24}$$

## 6 模型优化结果及其结果分析

根据上述优化模型，利用 Matlab 软件编写高纯生铁冶炼最低成本配料程序[2]。其配料化学成分统计数据见表 3，煤粉用量、焦粉用量采用企业现行用量要求。输入预期的出铁量、原料价格和各种化学成分要求等参数，运行程序计算得到各种原料用量与所用矿成本、燃料成本及配料总成本。Matlab 计算结果见图 1。

现将经过实际生产检验的人工配料和模型优化配料的结果进行对比，见表 6。

由上表可以得知，模型优化配料和人工配料相比，每吨入炉原料可节省 52.75 元。可见，上述模型

```
************************铁水中各元素含量*************************
Si含量：3.3521；   Mn含量：0.5；       P含量：0.28779；        Ti含量：0.052374
V含量：0.076087；  Cr含量：0.016025；  Pb含量：0.0051916；      As含量：0.005626
S含量：0.02882；   碱度：1.35；        炉渣Al含量：0.018812；   炉渣Mg含量：0.12
出铁量：950
************************烧结矿各成分含量*************************
烧结Fe：0.52391；      烧结SiO2：0.055731；      烧结Al2O3：0.0024353
烧结CaO：0.089832；    烧结MgO：0.021；          烧结MnO：0.0004916
烧结P：0.00011998；    烧结TiO2：0.00018207；    烧结V2O5：0.00015575
烧结Cr：1.3986e-05；   烧结Pb：9.3239e-06；      烧结As：9.3239e-06
烧结S：0.00095548；    烧结K：3.7296e-05；       烧结矿碱度：1.6119
烧结质量：1781.217
************************原料的用量*************************
球团矿：220.7993；     A矿：0；      B矿：0
C矿：727.4625；    D矿：530.2378；          石灰：0
高钙石：0；    石灰石：190.4749；    白云石：112.2424
焦炭：380.5783；   洗煤：120；       烟煤：30
焦粉：10；    焦末：75.462
************************成本*************************
所用矿成本：972.3788；       燃料成本：989.7416；       总成本：1962.1204
```

图 1 计算结果

Fig.1 Calculation results

计算得到的最低成本配料方式是合理的、可靠的。

## 7 结语

通过山西某集团铸造有限公司的现行工艺要求建立的成本优化模型，经过企业的实际生产数据验证了模型的可行性，应用该模型可以有效地帮助企业，根据现有的资源条件和变化的市场价格，及时、合理、系统地优化生产原料配比，进而挖掘企业最大效益。

**表6 配料成本对比**

**Tab.6 Comparison of ingredients cost**

| 比较对象 | 人工配料 | 模型优化配料 |
|---|---|---|
| 铁液总量 /kg | 1 000 | 1 000 |
| 入炉原料总量 /kg | 2 395 | 2 398 |
| 所用矿成本 / 元 | 1 065 | 972.38 |
| 燃料成本 / 元 | 1 021 | 989.74 |
| 入炉原料总成本 / 元 | 2 086 | 1 962.12 |
| 每吨入炉原料成本 / 元 | 870.98 | 818.23 |
| 铁液化学成分 | 合格 | 合格 |

**参考文献：**

[1] 王玉英. 优化与决策[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2014.

[2] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,2014.

## 消失模铸造专家刘立中“坐堂”
## ——《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”告读者

刘立中先生，通过自主研发出独具特色的消失模铸造设备，并成功生产出精美铸件，自成体系。获得 30 多项国家发明专利，成为国内最早一批投身消失模铸造的专家，著有《消失模铸造工艺学》一书(2019 年 5 月 20 日化工出版社出版)，系其亲身历经 30 多年现场实践经验的总结和理论的升华。被叶升平教授称作国内“消失模铸造第一人”。

《消失模铸造工艺学》提出的“消失模铸造流场、热场、负压场三场理论”、“消失模铸造浇注系统直浇道细，横浇道粗，内浇道短的设计原则”、“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”的新理论，均属首创。为验证和推广这些新理论，自 2000 年起，先后举办 14 届刘立中先生主讲的“消失模铸造专题讲座”，反响热烈。业界知名专家——魏兵教授对此书评价，认为“每一项技术和观点都是从实践中来，又应用到实践中去，反复验证，不断完善，属完全的创新成果”。国内多家铸造企业应用“三场理论”取得了明显提高铸件合格率、明显提高金属液利用率、明显提高员工劳动效率，进而提高铸造企业经济效益的成果。

“消失模铸造三场理论”、特别是“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”解决了困扰消失模铸造的泡沫模型导致的缺陷，打开了消失模铸造工艺通向铸钢件，特别是低碳钢和不锈钢铸件的大门，也打开了对消失模铸造的理解还处于混沌状态的企业通往成功之路的大门。毫不夸张地讲，挽救了多家处于倒闭边缘的消失模铸造厂。

2019 年 6 月，应《铸造技术》杂志邀请，与刘立中先生联手，《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”，从专家的角度，“坐堂”解难答疑，回应业界同仁有关消失模铸造理论与实践各方面的咨询。

此举，势必为推动中国铸造业发展、尤其是消失模铸造技术的进步做出独特之贡献。欢迎业界同仁参与。