**铁前综合配料优化系统研究与应用**

**刘璐新[[1]](#footnote-0) 施灿涛**

2017年1~8月中国粗钢产量为56640.5万吨，同比增长5.6%。然而钢铁企业销售利润率不高，今年1~7月份钢协会员企业虽然实现了707亿元的收入，但销售利润率却只有3.4%，相比工业企业6%的平均销售利润率偏低。因此钢铁行业除了不断发力供给侧改革外，还需在企业内部深挖降本空间，提高企业销售利润率。在钢铁企业成本构成方面，铁区的成本占总成本的70%~80%[1]。而在炼铁过程中，烧结配料及高炉配料方案的优劣很大程度上决定着铁水成本的高低，因此一个满足冶炼性能要求且性价比高的烧结配料和高炉配料方案能够为钢铁企业带来巨大的降本效益。

**一、铁区配料现状**

铁区配料主要包括烧结配料及高炉配料两个方面。烧结配料计算根据原料的物理化学特性、供应量及烧结矿的铁品位、碱度及其他成分要求，按照物质守恒原理建立烧结配料模型，通过计算确定合适的原料配比[2]；高炉配料计算根据原燃辅料的物理化学特性、供应量、冶炼参数等条件确定单位生铁的焦炭、矿石、熔剂消耗和配比。

**（一）配料计算方式**

目前钢铁企业使用的配料计算方式主要有手工计算、EXCEL计算和配料软件计算三种方式。其计算逻辑为正向试算并不断与预期目标对比修正，当试算结果如碱度、铝硅比、铁品位、单位成本等指标在允许范围内，则认为该配料方案为可行方案。一般钢铁企业内部专门设立配料小组，小组成员综合考虑原料市场预期价格、库存量、产能计划、工艺要求等因素试算出几套配料方案并反复微调验证，直至小组一致认同该方案成本最低且可行。然而以套用公式试算验证的计算方式存在计算次数多、效率低下、结果非优等问题，往往消耗配料小组大量时间而配料结果却不是数学意义上的最优方案。

**（二）配料应用场景**

一般钢铁企业制定月、周、日三个维度的配料计划：依据产能计划制定月度配比计划，依据月度配比计划及库存制定周采购计划，根据炉况、原料质检成分、库存情况制定日配料计划，各个维度的配料计划的侧重点有所不同。以月、周维度的配料计划以成本最低为侧重点，在满足冶金性能的要求下尽可能制定成本最低的配比计划，保障采购成本最低；以日为维度的配料计划则更多以质量稳定为侧重点，在可用的库存原料情况下保障高炉稳定顺行。在人员使用方面，制定月、周配料计划一般为配料小组及采购部门，而日配料则多为铁前现场技术人员，由于职能、人员、经验技术、考虑侧重点等的不同，往往导致原料采购与铁区生产需求产生矛盾，出现原料采购成本降低但铁水成本升高的现象，无法实现全局的成本最优。

**二、铁前综合配料优化系统**

铁前综合配料优化系统通过运筹学算法，综合考虑烧结、高炉工序生产的工艺要求，在满足化学成分约束、物料守恒、热平衡等条件下，基于市场上各原材料的可获得性与性价比，以采购成本最小或质量最优等多种可选择的优化目标，计算得出各个原材料配比与需求量。

（一）**铁前综合配料优化系统功能描述**

（1）正向计算对比分析：将传统的EXCEL配料公式系统化、便捷化，支持不同配比计划指标对比，效益分析。该功能除了满足正常配比方案的微调需求外，同时也正向验证优化方案的正确性。

（2）烧结采购配料：用于制定月、周配比计划，最大限度获取市场原料种类、价格、成本信息，寻求最优采购品种及采购量。在具体应用中可基于不同场景使用不同的约束组合。

1）给定烧结产出，求成本最低的配比计划：依据市场可获得的原料、成分及价格获得最优采购方案。

2）给定烧结产出，在一定成本内质量最优：在限定采购成本的前提下获取烧结品位最优的采购计划。

3）给定烧结产出，优先使用库存下成本最低：考虑库存情况下，系统在指定某一种或几种原料耗用量的前提下获得最优采购方案。

4）给定烧结产出在指定品位下成本最低：考虑铁区生产的稳定性，指定某品位的前提下获得最优配比的采购方案。

（3）烧结变料：为保证高炉稳定顺行，考虑原料库存量及成分约束，在给定的碱度条件下，制定质量最优的变料计划。

（4）高炉配料：在满足炉渣碱度、四元碱度及铁水成分约束的条件下，制定合理的原料、焦、煤配比计划，使得炉渣流动性良好、熔化温度较低、稳定性良好、铁水成分稳定，铁水成本最低[3]。在具体应用中同样具备多种约束组合，可在给定品位、给定某一种或几种原料的最大最小使用量等约束下获得最优高炉配比计划。

（5）“烧结—高炉”一体化配料：烧结矿占入炉料的质量分数约为50%~90%，因此“烧结—高炉”一体化配料能够最大限度地优化铁区成本。系统在设定的经验系数基础上，综合考虑烧结成分约束及高炉约束，将非线性约束转化为线性约束，构建线性规划模型，利用运筹学算法求出铁水成本最低的最优烧结、高炉配比方案。

（二）**烧结配料优化模型**

**1．符号定义**

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 含义 |
|  | 第种原材料，为所有原材料的集合 |
|  | 为所有化学成分的集合 |
|  | 料的化学成分的含量，例如时，表示料的铁含量 |
|  | 料的价格 |
|  | 料的水分含量 |
|  | 料的烧损值 |
|  | 成分的控制下限 |
|  | 成分的控制上限 |
|  | 烧成矿碱度的控制下限 |
|  | 烧成矿碱度的控制上限 |
|  | 料的湿配比例（%） |
|  | 料的干配比例（%） |
|  | 料的烧成比例（%） |
|  | 料的干基单耗 |
|  | 料的单成本 |
| C | 常数，经验值设定 |

**2．目标函数**

依据不同的场景应用，烧结配料主要有以下两个优化目标。

（1）成本最优。由于原料品位不同、化学成分不同，价格各异，最优的配比应使所有采购原料的总成本最低。



（2）质量最优。在满足成分、成本等约束的前提下铁品位尽可能高。



**3．约束条件**

（1）烧成矿的碱度需在其控制范围之内。

≤≤

该方程为非线性方程，转为两个线性方程：

≤0

≥0

（2）烧成矿的每种成分的含量需在其控制范围之内。

≤≤且

（3）每种料的烧成配比/消耗量需要在控制范围之内。

≤≤，

（4）配比之和为1。



（5）配比大于等于0。

≥0

除约束之外，还需要考虑烧结矿的核心指标计算公式及转换关系，方便求解验证及转换：

（1）湿基配比、干基配比和烧成配比之间的换算关系：



（2）料的单耗：



（3）烧成矿预期成分(%)，即单位质量的烧成矿中含该成分的质量，以为例：



（4） 干基烧成率，即总产出量/总干基投入量：



（二）**高炉配料优化模型**

**1．符号定义**

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 含义 |
|  | 第种原材料，为所有原材料的集合 |
|  | 为所有化学成分的集合 |
|  | 料的化学成分的含量，例如时，表示料的铁含量 |
|  | 料的价格 |
|  | 炉渣碱度的控制下限 |
|  | 炉渣碱度的控制上限 |
|  | 炉渣碱度的控制下限 |
|  | 炉渣碱度的控制上限 |
|  | 碱负荷（K+Na）的控制上限 |
|  | 铅（Pb）负荷的控制上限 |
|  | 锌（Zn）负荷的控制上限 |
|  | 钛（Ti）负荷的控制上限 |
|  | 含铁料的干基配比比例（%） |
|  | 焦炭的干基配比比例（%） |
|  | 煤的干基配比比例（%） |
|  | 成分的控制下限 |
|  | 成分的控制上限 |
|  | 料的单耗 |
| C | 常数，经验值设定 |
| TFe | 铁品位 |
| TSi | 当前炉温下理论铁水中的含硅量，经验值初始设定 |

**2．目标函数**



表示单批原料成本最低，通常自产烧结矿单价较低，通过提高烧结矿的使用比例来实现，对于库存量使用及某种物料的偏好可通过原料使用量约束来实现。

**3．约束条件**

（1）实际操作中会依据炉况、库存等情况指定某种料的配比/消耗量在某个控制范围之内。

≤≤≤≤≤≤,

（2）碱（K+Na）负荷需在其控制范围之内。

0≤≤

（3）铅（Pb）负荷需在其控制范围之内。

0≤≤

（4）锌（Zn）负荷需在其控制范围之内。

0≤≤

（5）钛（Ti）负荷需在其控制范围之内。

0≤≤

（6）炉渣二元碱度是判断炉渣流动性的重要指标[4]，需要在其控制范围之内。

≤≤

转换成线性方程为：

≤0，

≥0。

（7）炉渣四元碱度是判断炉渣流动性的另一个重要指标，当原料中铝含量波动较大时该指标更为关键，需要在其控制范围之内。

≤≤转换为线性方程为：

≤0≥0 （8）含铁料，焦，煤料各配比之和为1。







（9）配比大于等于0。

≥0

（三）“**烧结—高炉”一体化优化模型**

“烧结—高炉”一体化优化模型综合烧结配料优化模型及高炉配料优化模型，将带烧结配比参数的烧成矿预期成分带入到高炉优化模型中，构建一体化的线性规划方程。在实现过程中需要充分罗列烧结、高炉配料中的约束条件，在系统初始化时需要给定焦比、煤比、理论铁量、原料偏好、禁混物料等设置。系统设计流程如下图所示。

无解

修正约束

存在最优解

开始

烧结/高炉初始化设定

烧结/高炉配料约束

烧结/高炉物料选择

优化计算

结束

正向验证计算

图1 烧结-高炉一体化模型设计流程

**（四）系统实现**

在系统设计方面为用户提供可配置的参数化界面，针对不同钢厂的工艺要求设置特定的经验参数，相对于传统配料方式，铁前综合配料优化系统具有以下优势：

（1）可同时用于指导采购及生产。不同的使用人员可在相同的配料计算逻辑下，按照各自侧重点的不同调整约束参数及目标，得出满足质量要求成本最低的配比方案。

（2）计算效率高。相对于配料小组1~2天的计算时间，系统能在1~5秒内给出最优结果，若无解也有详细的操作提示以改进。

（3）配料技术门槛降低。系统充分结合经验丰富的配料专家经验及企业的工艺要求，只需设定目标值以及物料即可得出最优配比结果。

（4）铁区全局成本最低。系统同时考虑烧结配料成本及高炉配料成本，解决烧结成本最低但炼铁成本不一定最低的问题，实现炼铁成本全局最低。

**三、系统实施效果及意义**

铁前综合配料优化系统综合考虑采购及生产需求，有效解决铁区采购生产矛盾；同时提供多种功能组合，满足原料采购、烧结生产、高炉生产等不同用户的需求，实现铁区成本的全局最优化。经济效益方面，以某钢厂300万吨产能计算，相对于传统EXCEL计算方式，在同样指标约束下，铁前综合配料系统单月节省烧结矿成本30元/吨，年降本达2亿元。

**参考文献：**

[1] 苏步新,张建良,闫炳基,胡正文,邵久刚,国宏伟.高炉炉料结构优化研究现状及展望[C]. 2012年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会文集(上)，2012:459

[2] 龙红明,赵刚,王平,夏序河,钱立新,胡贺亚.基于铁水总成本最低的炼铁配料计算模型开发[C]. 2014年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集(上)，2014:615~616

[3] 桂海东.基于线性规划的高炉配料系统的研究与实现[D].复旦大学,2012.

[4] 吴胜利,韩宏亮,徐少兵,牛兵,高炉优化配料数学模型的研究[J].钢铁，2007,(9),19-23

1. 作者简介：刘璐新，冶金工业规划研究院工业智能研究中心，工程师；施灿涛，冶金工业规划研究院。 [↑](#footnote-ref-0)