“烧结－球团－高炉”联动配矿模型设计

张中中[1,2]，甘牧原[1,2]，吴丹伟[1,2]，春铁军[3]
（1. 柳州钢铁股份有限公司，广西 柳州 545002；2. 广西钢铁集团有限公司，广西 防城港 538002；
3. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要： 烧结、球团、炼铁等工序的配矿会直接影响其过程操作、产品质量，乃至高炉冶炼的顺行与否。传统的烧结、球团和炼铁配矿相对简易，存在预测不准、优化周期过长、无法全流程计算等缺点。本文通过结合高炉生产需求综合考虑，建立“烧结－球团－高炉”联动配矿模型，提供了一种全面地、基于铁水成本最低或效益最优的配矿方法，打破了现有的烧结、球团、炼铁孤立核算，且过份强调局部降成本而忽视整体的现状。实践证明：该模型可以在保证铁水质量的同时，有效地降低铁水生产的综合成本。

关键词： 烧结；球团；炼铁；配矿模型设计；综合成本
中图分类号： TF046.4；TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)03－0022－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.034

"Sintering－pelletizing－ironmaking" model design of linkage ore blending

ZHANG Zhongzhong[1,2], GAN Muyuan[1,2], WU Danwei[1,2], CHUN Tiejun[3]
(1. *Liuzhou Iron and Steel Co., Ltd., Liuzhou* 545002, *Guangxi, China*; 2. *Guangxi Iron & Steel Group Co., Ltd., Fangchenggang* 538002, *Guangxi, China*; 3. *School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 243002, *Anhui, China*)

Abstract: The ore blending of sintering, pelletizing and ironmaking processes will directly affect its technological process, product quality, and even whether the blast furnace smelting goes smoothly or not. Traditional sintering, pelletizing and ironmaking ore blending are relatively simple with such disadvantages as inaccurate prediction, too long optimization cycle, and out of the whole process calculation. Based on the comprehensive consideration of blast furnace production requirements, a "sintering-pelletizing-ironmakinge" model design of linkage ore blending is established, which can provide a comprehensive ore blending method based on the optimal cost of molten iron, and which have broken the existing status quo of accounting sintering, pelletizing, and ironmaking in isolation, overemphasizing partial cost reduction and ignoring the overall cost reduction. Practice has proved that this model can effectively reduce the overall cost of molten iron production while ensure the quality of molten iron, and avoid the occurrence of mass excess.

Key words: sintering; pelletizing; ironmaking; model design of ore blending; orerall cost

烧结、球团、炼铁的配矿会直接影响其工艺过程、产品质量和生产成本。传统的配矿方法相对简易，一般仅基于原料物化性能、过程经验和原料价格等。范晓慧等[1]指出目前常规烧结配矿方法存在工作量大、周期性长、外延性差等问题，特别是对于没有稳定原料结构的企业，因原料结构变化快，按传统的配矿模式，优化周期无法满足生产需求。同时现有的配矿

收稿日期：2020－07－15；修回日期：2021－01－15
基金项目：柳州市科技研发计划资助项目(2017BC30102)
作者简介：张中中(1978—)，男，高级工程师，从事烧结球团研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模式没有针对铁水总成本进行整体优化，烧结、球团、炼铁等工序虽然个别工序成本有所下降，但铁水总成本的优化并不明显，甚至时有上升，未能达到铁水总成本的最优。近年来，行业内人士通过对矿物微观、冶金和铁矿基础特性的深入研究发现，在原料物化性能相近的情况下，矿物微观、冶金和铁矿基础特性也会呈现很大的差异，要对原料进行科学准确的评价，还应结合这些指标，进行多维度的综合评价[2-5]。龙红明等[7-11]研究提出了建立铁矿性能综合评价体系和铁前配矿一体化的思路。本文结合前人的研究，着眼于高炉生产需求，综合考虑铁水总成本的优化，进一步提出“烧结 – 球团 – 高炉”联动配矿模型，而不是孤立的进行烧结、球团或炼铁的工序成本优化，最终要从整体上降低铁水总成本，以达到铁水总成本的最低或效益最优。

1　单种铁矿评价模型

1.1　单种铁矿模型的原理及建立

对单种铁矿进行评价时不能只简单地比较其物化性能，而应基于物化、矿物微观组成、铁矿基础特性[11]、单烧性能和原料单价等方面综合考虑，同时对各指标选择科学的、可以量化的评价标准，并根据历史研究数据设计权重分配(图 1)进行综合评价，建立单种铁矿评价数据库，同时保持动态更新，以为联动配矿模型提供基础数据[6]。

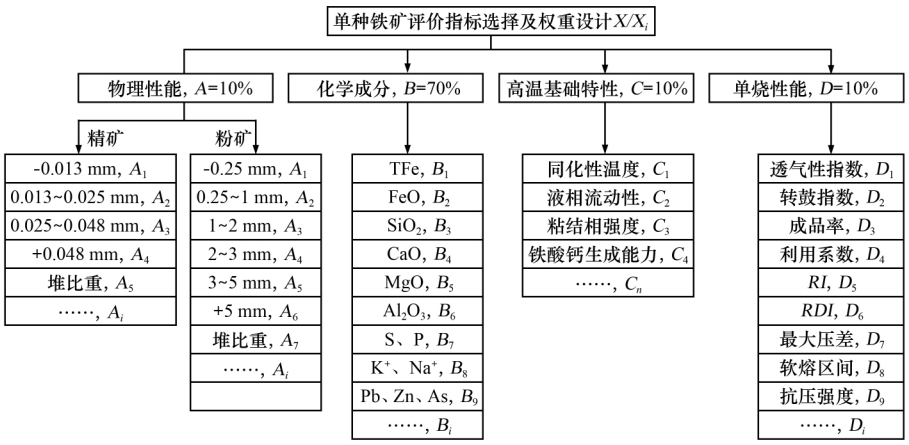


图 1　单种铁矿评价指标权重分配示意

Fig. 1　Weight distribution diagram of single iron ore evaluation index

(注: 图中“X/X_i”中的“X($X=A$、B、C 或 D)”代表各项指标权重分配，“X_i”代表各二级项指标权重分配; 单钟铁矿权重最终总分 = $\sum X = \sum X_i$。图中权重分配仅为示例)

以粉矿物理性能为例，物理性能权重占单种矿评价总权重的 10%，即 $\sum A_i = 10\%$，而粉矿在烧结制粒过程中，粒径大于等于 1 mm 的为成核颗粒，小于等于 0.25 mm 的为黏附细粒，0.25 ~ 1 mm 的为中间粒级，其既不能做为制粒核心，又难以黏附于其它颗粒周围，可考虑增加其权重分配。0.25 ~ 1 mm 为中间粒级分配权重占物理性能权重的 50%。根据历史实验研究结果设计其单项权重分配 A'_2(表 1)。进而可以拟合得出式(1)。由式(1)可知: 当某种粉矿若 0.25 ~ 1 mm 粒级占比为 15% 时，则 $A_2 = 40\%$; 当其为 25% 时，则 $A_2 = 22.5\%$。

表 1　粉矿 0.25 ~ 1 mm 粒级权重分配表

Table 1　Granular weight distribution table of powder mine 0.25 ~ 1 mm　%

0.25 ~ 1 mm 粒级($L_{0.25\sim1\ mm}$)占比/%	10	20	40
子项权重 A'_2/%	100	60	0
子项权重占物理性能的权重 A_2/%	50	30	0

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$A_2=\begin{cases}1 & (L_{0.25\sim1\ mm}\leqslant10\%)\\ (-4L_{0.25\sim1\ mm}+1.4) & (L_{0.25\sim1\ mm}=10\%\sim20\%)\\ (-3L_{0.25\sim1\ mm}+1.2) & (L_{0.25\sim1\ mm}=20\%\sim40\%)\\ 0 & (L_{0.25\sim1\ mm}\geqslant40\%)\end{cases}\times50\% \quad (1)$$

此外，其余指标的最终得分 X_i（$X=A$、B、C 或 D），均以历史实验研究结果按此评价，设置权重原始分配后拟合公式而得。其中权重分配可根据数据积累不断调整优化，同时修正拟合公式，且数据库应按烧结、球团不同的用途分别建立，选择不同的指标和权重分配。同种精矿在烧结和球团库中的评价过程和结果不同。

1.2 模型应用实例

根据上述模型设计软件，在生产实际中进行评价，设南非库伯矿为基准矿，可从上述几个维度综合评价所有矿种，并进行性能排序（图 1），基于多维度的科学型的排序结果，明显要优于仅基于物化性能的简单型排序结果，其可以更客观地反映铁矿石的综合烧结性能，从而可提供更为可靠的采购单价建议。



图 2 单种铁矿评价模型应用实例

Fig. 2 Application example diagram of single iron ore evaluation model

2 “烧结 – 球团 – 高炉”联动配矿模型设计

目前应用最为广泛的优化模型算法主要有蒙特卡洛法、遗传算法、线性规划法。蒙特卡洛法求解效率低，不提倡使用。对于大规模复杂问题，当约束条件重要程度不同时，遗传算法能有效地解决问题，而关系简单、规模较小的模型，线性规划法更方便易用、反应迅速且求解精度高，适用于烧结、球团配矿这种小规模的最优化求解问题。利用线性规划法建立数学模型，在多个约束条件下求出目标函数的最优解，将其应用于配矿问题，即为线性规划配矿算法。因其可以直接预算出成品矿的化学成分，所以也称作“一步计算法”。该算法一般包括决策变量、目标函数、约束条件 3 个方面[1,7,11]。

确定烧结、球团配矿算法后，进而建立“烧结 – 球团 – 高炉”联动配矿模型，根据高炉

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

需求设置烧结、球团成品矿，以及原料(含块矿、熔剂、燃料等)约束条件，得到满足铁水质量要求的解或解集，然后进行铁水总成本计算，最终得到烧结、球团的优化配矿方案。

2.1　烧结配矿模型的原理及建立

烧结配矿要求满足原料成本最低、原料配比适当(需根据储量及性能调节)、烧结过程性能优良、烧结成品矿物理、化学及冶金性能优良等条件，其中原料成本最易量化，满足线性关系要求，因此以原料配比为决策变量，以原料成本为目标函数，以其他指标为约束条件处理。

2.1.1　决策变量

烧结生产中原料化学成分一般为干料成分，因此将生产 1 t 烧结矿所需干料单耗 x_i 作为决策变量，i 取值从 1 到 n，$X=(x_1,x_2,\cdots\cdots,x_i)^{\mathrm{T}}X\in R_i$。

2.1.2　目标函数

以烧结矿最终成本最低为目标函数，设 P_i 为第 i 种原料的价格，其中第 i 种原料的成本 $C_i=P_i\times x_i$，总成本 $C=\sum C_i=\sum P_i\times x_i$，目标函数则为 $\mathrm{Min}C=\sum C_i=\sum P_i\times x_i$。

2.1.3　约束条件

(1) 化学成分约束：烧结矿主要控制成分有 TFe、SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3、S、P、碱金属等，配比应首要满足烧结矿成分要求。

(2) 碱度约束。

(3) 其他约束：各原料在烧结后的烧成比之和应等于 1，还要满足最大供应量的约束；同时根据高炉需求，必要时需进行镁铝比、铝硅比等其它条件的约束。

2.2　烧结配矿模型设计

2.2.1　烧结配矿模型的原理及建立

首先根据单种铁矿评价模型，基于铁矿化学、物理、烧结基础性能及单烧性能建立铁矿数据库。其次制定烧结配矿模型，根据约束条件进行寻优计算，约束条件分定配比法和定成分法(图 3)。

约束条件的确定取决于：① 原料约束：包括原料的采购、价格、库存、性能及各生产线之间的平衡；② 烧结工艺约束：如返矿、除尘灰、铁精粉等配用量的约束，以及理论及实践经验对原料配用量的限制；③ 高炉生产要求。高炉对烧结矿的产、质量等指标要求，包括化学成分、物理及冶金性能等。

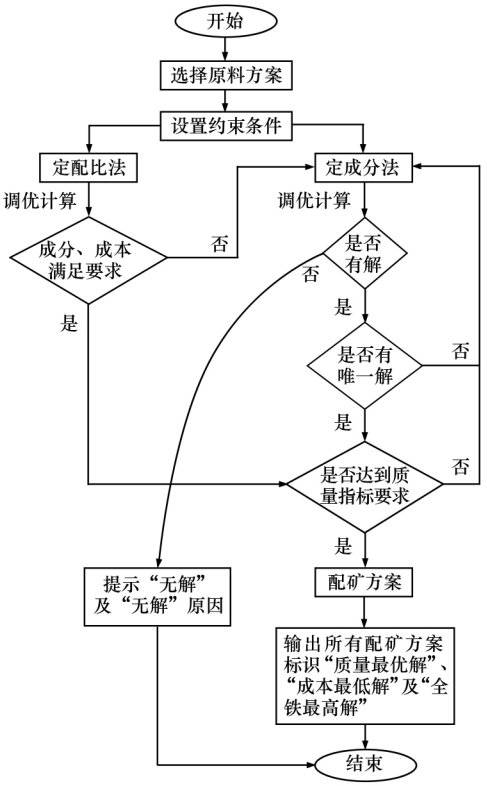


图 3　烧结配矿模型结构

Fig. 3　Structure diagram of sinter blending model

约束条件还应包括调优计算原则：成本最低、全铁最高。

定配比法(一个或多个定配比)根据给定原料单耗计算配比、成分、成本。如成分出格或成本过高，则转向定成分法(一个或多个定成分)继续优化；如成分、成本满足要求，则转向质量指标判定，未达标则转向定成分法继续优化，达标则完成计算。定成分法根据给定烧结矿化学成分(固定值或范围值)对各原料配比范围进行调优计算：如“有解”则循环比较所有解，直至得到要求范围内的最优解或解集；如“无解”则中止退出，修改约束条件重新进行调优计算。本文按同样的思路，选择不同的指标和权重分配进行球团配矿模型设计。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2.2 模型应用实例

烧结配矿模型选择参配矿种之后，输入约束条件，可自动计算成本最低或品位最高的解（图 4），应用中根据采购、库存、品位、成本等因素综合考虑，不断调优；无解时应适当放宽约束条件。



图 4 烧结配矿模型应用实例

Fig. 4 Application example diagram of sinter blending model

2.3 联动配矿模型设计

2.3.1 联动配矿模型的原理及建立

在高炉冶炼中，各种含铁炉料的性能决定了炉况和焦比、铁水质量和成本，对有多种含铁炉料可选的情况下，如何科学的选择炉料结构和配比，取得最优的性价比，是控制成本、保证质量的重点。为此以铁水含硅量、炉渣碱度等指标为目标参数，建立基于铁水总成本最低的烧结配矿模型体系，在所有配矿方案解中寻找“铁水成本最低解”，以达到综合冶炼效益最优的目的[11]。

模型以炼铁物料平衡计算为核心，通过计算，首先保证炉料结构与工艺要求相符，在此基础上满足原料成本的准确预测、适当的原料配比(根据库存、性能调节)、准确的铁水成分(包括碱金属、铅锌负荷等)及炉渣碱度、镁铝比及铝硅比等要求，最终进行铁水原料成本最低寻优。

(1) 建立联动模型。建立高炉配矿模型，由烧结、球团配矿计算和高炉配矿计算模块组成，三者根据工艺要求、约束条件相互联动。

(2) 设置约束条件。根据炉渣碱度等指标对烧结、球团成品矿，以及各种入炉原料的约束条件进行设置，进而根据烧结、球团配料计算模块，得到烧结、球团各种原料的约束条件。

(3) 铁水成本计算。计算方法如下。

$$Z = \sum_{i=1}^{n} C_i X_i \tag{5}$$

式中：Z 为吨铁成本，元/$t_{铁水}$；X_i 为原料 i 的用量，$t/t_{铁水}$；C_i 为原料 i 的价格，元/t。

例：$Z=\{(\Sigma X_i \times J_i + \Sigma M_i \times L_i) + (\Sigma Y_i \times K_i) \times W_2 + F \times E + \Sigma P_i \times C_i\} + \Sigma R_i \times D_i + G + T - H$

式中：X_i 为烧结粉矿用量，$t/t_{铁水}$；J_i 为烧结粉矿价格，元/t；M_i 为烧结熔剂用量，$t/t_{铁水}$；L_i 为烧结熔剂价格，元/t；Y_i 为球团精粉用量，$t/t_{铁水}$；K_i 为球团精粉价格，元/t；F 为膨润土用量，$t/t_{铁水}$；E 为膨润土配比价格，元/t；P_i

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为入炉块用量，$t/t_{铁水}$；C_i 为入炉块矿价格，元/t；R_i 为吨铁燃料用量，$t/t_{铁水}$；D_i 为燃料价格，元/t；Z 为各因素影响铁水成本的修正值，元/$t_{铁水}$；G 为吨铁固定费用，元/$t_{铁水}$；H 为吨铁副产品回收成本，元/$t_{铁水}$；T 为铁水成本，元/t。

高炉配矿模型与烧结、球团配矿模型联动设计，三者通过编程实现自动计算，通过输入高炉对原料条件、质量要求的约束，烧结、球团原料及块矿的库存和供应情况，自动向单种铁矿数据库中取值，首先得到烧结、球团优化配矿的解集，再与高炉配矿模型联动，最终计算导出符合质量要求的成本最优解或解集。

2.3.2　模型应用实例

以高炉的约束条件为主，以炼铁平衡计算为核心，编程实现烧结、球团、高炉联动计算，以铁水总成本最低为目标，可以迅速导出符合质量要求的成本最优解。在某钢厂应用实例中(图 5)，应用联动配矿模型寻优，可以迅速的解出对铁水总成本的最优解，在烧结成本略有上升、球团成本不变时，铁水总成本可降低 12.21 元/t。

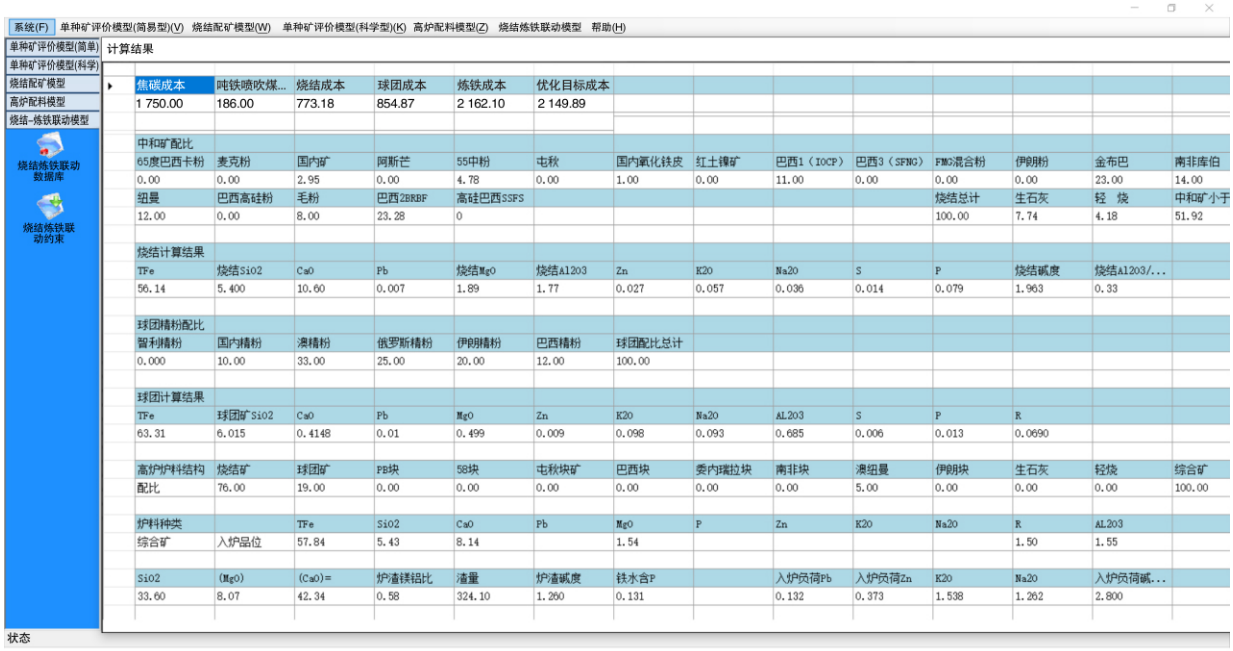


图 5　联动配矿模型应用实例

Fig. 5　Application example diagram of linkage ore blending model

3　结　论

“烧结 – 球团 – 高炉”联动配矿模型可以提供一种全面的、基于铁水总成本最优的配矿方法，打破了现有的烧结、球团、炼铁孤立优化，其过份强调局部降成本而忽视整体提效益的现状，同时也避免了烧结、球团生产的局部质量过剩的情况。该模型充分的考虑了铁矿市场资源的采购情况和库存情况、铁矿烧结基础性能搭配互补、铁矿冶金性能平衡、高炉对有害元素的负荷及各铁矿的性价比互补等因素，可以有效地指导铁水总成本的优化，从而为铁矿采购提供重要的参考和技术支持。

参考文献:

[1] 范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社,2013.
FAN Xiaohui. Principle and technology of optimizing ore blending in iron ore sintering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2013.

[2] 谢运强,张中中,王子宏,等. 某钢铁企业常用铁矿粉烧结基础性能及优化配矿[J]. 中国冶金,2018,28(3):9 – 15.
XIE Yunqiang, ZHANG Zhongzhong, WANG Zihong, et al. Basic sintering properties and optimal ore blending of iron ore fines commonly used in an iron and steel enterprise [J]. Metallurgy of China,2018,28(3):9 – 15.

(下转第 71 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] UEDA Shigeru，YANAGIVA Kazunari，WATANBE Kentaro，et al. Reaction Model and Reduction Behavior of Carbon Iron Ore Composite in Blast Furnace [J]. ISIJ International，2009，49(6)：827－836.

[8] VLADIMIR Strezov. Iron ore reduction using sawdust: Experimental analysis and kinetic modelling [J]. Renewable Energy，2005，31(12)：1892－1905.

[9] 罗思义，周扬民，仪垂杰，等. 生物质合成气直接还原铁矿－生物质复合球团炼铁 [J]. 北京科技大学学报，2013，35(7)：856－861.
LUO S Y，ZHOU Y M，YI C J et al. Direct reduction of iron ore and biomass pellets by biomass syngas [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2013，35(7)：856－861.

[10] 韩宏亮，苑鹏，段东平，等. 生物质用于转底炉直接还原工艺研究 [J]. 重庆大学学报，2015，38(5)：164－170.
HAN H L，YUAN P，DUAN D P et al. Study on direct reduction process of biomass in rotary bottom furnace [J]. Journal of Chongqing University，2015，38(5)：164－170.

[11] 唐惠庆，范立强，马龙，等. 生物质用于鲕状高磷铁矿除磷 [J]. 北京科技大学学报，2014，36(7)：867－874.
TANG H Q，FAN L Q，MA L et al. Biomass for dephosphorization of oolitic high phosphorus iron ore [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2014，36(7)：867－874.

[12] 易凌云，黄柱成，姜涛，等. 生物质炭用于铁精矿球团还原过程中黏结的抑制 [J]. 中南大学学报，2017，48(12)：3141－3146.
YI L Y，HUANG Z C，JIANG T，et al. Biochar is used to inhibit the bonding of iron concentrate pellets in the process of reduction [J]. Journal of Central South University，2017，48(12)：3141－3146.

[13] 郭万军，张海峰，葛晖骏，等. 基于铁矿石载氧体的生物质化学链气化机理研究 [J]. 热科学与技术，2016，15(3)：249－258.
GUO W J，ZHANG H F，GE H J，et al. Mechanism of chemical chain gasification of biomass based on iron ore oxygen carrier [J]. Thermal Science and Technology，2016，15(3)：249－258.

(上接第 27 页)

[3] 谢运强，张中中，莫龙桂，等. 铁矿粉烧结基础性能与转鼓指数关系研究 [J]. 烧结球团，2017，42(6)：34－38.
XIE Yunqiang，ZHANG Zhongzhong，MO Longgui，et al. Study on the relationship between basic sintering properties of iron ore powder and drum index [J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(6)：34－38.

[4] 王峰，向家发，郭宇峰，等. 基于铁矿粉基础工艺性能的烧结优化配矿方法研究进展 [J]. 钢铁研究学报，2020，32(2)：89－95.
WANG Feng，XIANG Jiafa，GUO Yufeng，et al. Research progress of sintering optimization method based on basic process properties of iron ore powder [J]. Journal of iron and steel research，2020，32(2)：89－95.

[5] 贺真. 基于铁矿粉烧结基础特性的优化配矿研究 [D]. 长沙：中南大学，2014.
HE Zhen. Research on optimal ore blending based on basic sintering characteristics of iron ore powder [D]. Changshang：Central South University，2014.

[6] 王子宏，潘晶，唐志宏. 柳钢铁矿石采购和生产评价体系的研发和应用 [J]. 炼铁，2015，34(6)：51－55.
WANG Zihong，PAN Jing，TANG Zhihong. R & D and application of iron ore procurement and production evaluation system in Liugang [J]. Ironmaking，2015，34(6)：51－55.

[7] 许满兴. 优化高炉炼铁原料采购与烧结高炉配矿一体化的思路和方法 [J]. 烧结球团，2016，41(5)：1－7.
XU Manxing. Ideas and methods for optimizing the integration of raw material procurement for blast furnace ironmaking and ore blending for sintering blast furnace [J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(5)：1－7.

[8] 邵慧君. 基于组合模型的烧结矿质量预测系统研究与应用 [D]. 武汉：武汉科技大学，2019.
SHAO Huijun. Research and application of sinter quality prediction system based on combination model [D]. Wuhan：Wuhan University of science and technology，2019.

[9] 李勇波，陈令坤，肖志新，等. 鄂州球团矿的冶金性能及炉料结构研究 [J]. 烧结球团，2012，37(5)：45－47；50.
LI Yongbo，CHEN Lingkun，XIAO Zhixin，et al. Study on metallurgical properties and burden structure of Ezhou pellets [J]. Sintering pellets，2012，37(5)：45－47；50.

[10] 路要通，陈振旺，许世强. 信钢高炉低成本炉料结构的实践 [J]. 烧结球团，2010，35(1)：52－55.
LU Yaotong，CHEN Zhenwang，XU Shiqiang. Practice of low cost burden structure of blast furnace in Xingang [J]. Sintering pellet，2010，35(1)：52－55.

[11] 龙红明，夏序河，王平，等. 单种铁矿性能评价体系的设计与开发 [J]. 钢铁研究学报，2015，27(8)：7－10.
LONG Hongming，XIA Xuhe，WANG Ping，et al. Design and development of performance evaluation system for single iron ore [J]. Journal of iron and steel research，2015，27(8)：7－10.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net