烧结铁矿粉高温特性研究及过程耦合配矿评价模型的应用

戚义龙[1]，余正伟[2]，吴宏亮[1]，龙红明[2]，樊晶莹[1]，于 敬[1]，王 军[1]
(1. 马鞍山钢铁股份有限公司 炼铁总厂，安徽 马鞍山 243000；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002)

摘要： 针对马钢烧结配矿与生产实绩存在阶段耦合性偏弱以及缺乏对使用效果科学评价方法等问题，通过采用 $n(Fe_2O_3)/n(CaO)$ 法（*N* 值法）对马钢常用铁矿粉的高温特性进行测定研究。研究结果表明：以 *N* 值法测定的高温参数优化现行的铁矿石高温特性烧结配矿软件，同时通过以烧结过程负压、固体燃料消耗以及成品率特征指标建立配矿评价预测模型，构建综合特征指数（*S*）及各因子对特征指数影响显著性 *T* 值，可适时指导烧结配矿及烧结过程操作参数在工艺允许范围内优化调整，对烧结生产及配矿的实效形成一定的支撑。

关键词： 烧结；铁矿粉；高温特性；配矿；评价模型；过程耦合
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)03－0009－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.032

Research on high temperature properties of sintering iron ore powder and application of assessment model in ore blending based on process coupling

QI Yilong[1], YU Zhengwei[2], WU Hongliang[1], LONG Hongming[2],
FAN Jingying[1], YU Jing[1], WANG Jun[1]
(1. *The iron-making general plant, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan* 243000, *Anhui, China*;
2. *School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 243002, *Anhui, China*)

Abstract: In view of the problems of weak coupling in certain stage between sintering ore blending and production performance as well as the lack of scientific evaluation method for the use effect of Masteel Iron & Steel, the high temperature characteristic of common iron ore powder used in Masteel Iron & Steel is studied based on $n(Fe_2O_3)/n(CaO)$ method (*N*-value method). The results show that, using the high temperature parameter determined by *N*-value method to optimize the current sintering and ore blending software with high temperature characteristics of iron ore, establishing the ore blending assessment prediction model based on the negative pressure of the sintering process, solid fuel consumption, and yield characteristics index, and constructing a comprehensive characteristic index (*S*) and the *T* value of significance of the influence of each factor on the characteristic index, which can guide the optimization and adjustion of sintering ore blending and sintering process operation parameters within the process allowance, and form a certain support for the actual effect of sintering production and ore blending.

Key words: sintering; iron ore power; high temperature property; ore blending; assessment model; process coupling

现行的烧结优化配矿技术，多以吴胜利等[1-3]提出的基于铁矿石高温特性互补配矿技术为基础，其为探究烧结机理及配矿过程建立了表征和测度指标，具有重要的应用价值和指

收稿日期： 2020－03－24；**修回日期：** 2021－04－14
基金项目： 国家自然科学资金资助项目(U1860113)
作者简介： 戚义龙(1970—)，男，高级工程师，从事烧结工艺技术管理工作。
通讯作者： 余正伟(1984—)，男，博士，讲师，从事铁矿粉造块节能环保技术和复杂资源综合利用方面的研究。

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

导意义。但大多以预测的产、质量指标为参考，辅以专家知识或实验经验，获得较优的配矿方案，未能充分考虑铁矿石烧结性能与实际烧结过程控制参数之间的内在规律耦合[4]；由于存在各指标参数和各单种矿的性能叠加与混匀矿的性能非等同性，即综合后的矿系性能指标具有非线性，尤其在配矿矿种较多时，难以形成定量描述和判断方案的优劣[5]。而传统的铁矿粉高温性能测定方法是基于固定碱度[$R = w(CaO)/w(SiO_2)$]控制CaO的加入量(以下简称R值法)，其由于铁矿粉SiO_2质量分数差异等因素的影响，其评价结论往往与实际生产存在一定的差异[6]。龙红明等[6-7]提出固定Fe_2O_3和CaO物质的量比[$n(Fe_2O_3)/n(CaO)$]的方式控制CaO加入量的方法(以下简称N值法)来测定铁矿粉的高温性能，其评价结果对实际烧结生产更具指导意义。

马钢在传统配矿基础上，通过量化铁矿粉液相流动性指数、铁酸钙生成能力、黏结相强度等指标与烧结矿产、质量间的相互关系，开发了烧结配矿智能优化应用软件，以指导铁矿石烧结优化配矿[8]，对烧结矿质量的稳定及高炉顺行起到了较好的促进作用。由于其采用R值法测定的铁矿粉高温性能，往往出现指导结果与实际烧结指标不能完全对应的情况，同时对影响烧结指标的配矿因素无法实现具体的判定和优化调整。本文采用N值法对马钢烧结铁矿粉的高温性能进行测定研究，并以此参数优化配矿软件，同时建立基于烧结过程耦合的配矿运行实绩评价模型，用于实时指导配矿及烧结过程参数的优化调整。

1 常用铁矿粉高温特性研究

铁矿粉液相流动性(Liquid Phase Fluidity，LPF)以及铁酸钙生成能力(Capacity of Calcium Ferrite Formation，CCFF)作为铁矿石烧结性能的主要评价指标[2-3]，在烧结优化配矿领域得到了较广泛的应用[9-10]。本文采用N值法对马钢常用的铁矿粉的液相流动性指数及铁酸钙生成能力进行测定研究，并与R值法测定结果进行比较，且以实际生产时指标进行实效评价。

1.1 试验原料与方法

研究采用的原料包括Fe_2O_3化学纯试剂(质量分数≥99%)、SiO_2(质量分数≥99%)和CaO(质量分数≥98%)，以及马钢常用的主要铁矿粉，其化学成分如表1所示。

表1 马钢典型单种铁矿粉化学成分

Table 1 Main chemical compositions of typical iron ore powder

铁矿粉种类	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	FeO	其他	LOI
卡粉	65.00	1.63	0.01	1.32	0.13	0.74	31.17	2.56
PB粉	61.21	3.76	0.04	2.27	0.14	0.97	31.61	5.57
纽曼	61.70	4.53	0.11	2.41	0.16	0.45	30.64	3.72
巴粉	62.13	6.11	0.08	1.90	0.07	1.08	28.63	2.70
扬基	58.01	4.79	0.05	1.51	0.08	0.46	35.10	10.25
SSFT粉	62.39	7.54	0.12	0.80	0.22	1.18	27.75	2.32
MAC粉	60.66	4.19	0.02	2.22	0.10	0.27	32.54	6.44
姑精	57.10	11.70	1.28	1.26	0.35	1.11	27.20	2.12

具体测定方法：① 将铁矿粉试样细磨至0.074 mm以下；② 根据铁矿粉中$w(SiO_2)$固定R以及固定$n(Fe_2O_3)/n(CaO)$来加入CaO试剂；③ 称取(0.80±0.01) g混匀试样原料，在10 MPa压力下压制成直径为8 mm的圆柱体试样；④ 将试样置至微型烧结实验装置中，按图1所示的温度及试验气氛进行焙烧实验；⑤ 根据“基于流动面积测定法”计算LPF指数，对烧结后的小饼试样进行磨样，在矿相显微镜下观察试样的铁酸钙生成情况以获得CCFF指数。

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

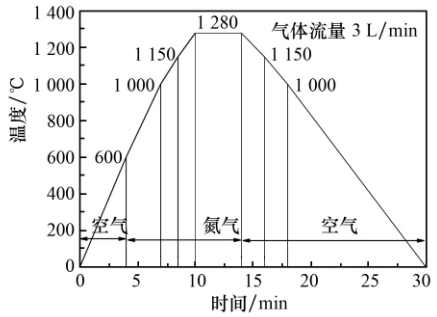
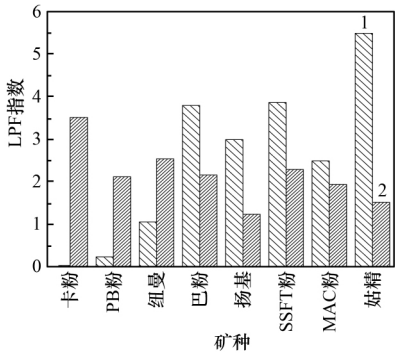


图 1　温度与气氛控制制度

Fig. 1　Temperature and atmosphere control system

1.2　*R* 值法和 *N* 值法测定铁矿粉 LPF 及 CCFF 比较研究

将上述铁矿粉分别以 *R* 值法（$R=4.0$）和 *N* 值法［$n(Fe_2O_3)/n(CaO)=1.5$］对铁矿粉的 LPF 进行测定，其结果如图 2 所示。由图 1 可知：采用 *R* 值法测得姑精的 LPF 为 5.47，而卡粉仅为 0.03，马钢常用铁矿粉 LPF 从小到大的顺序：卡粉 < PB 粉 < 纽曼 < MAC < 扬基 < 巴粉 < SSFT < 姑精；采用 *N* 值法测得姑精的 LPF 仅为 1.51，卡粉的对应为 3.50，马钢常用铁矿粉 LPF 从小到大的顺序：扬基 < 姑精 < MAC < PB 粉 < 巴粉 < SSFT < 纽曼 < 卡粉。

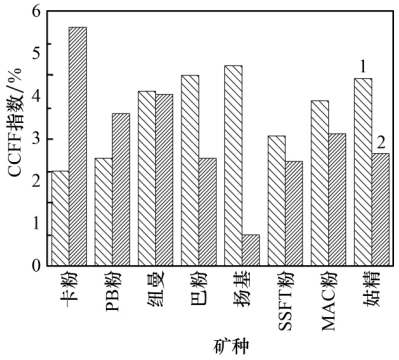


1—$w(CaO)/w(SiO_2)=4.0$；2—$n(Fe_2O_3)/n(CaO)=1.5$。

图 2　*R* 值法和 *N* 值法测定 LPF 结果对比

Fig. 2　Comparison of LPF between *R*-value method and *N*-value method

以 *R* 值法（$R=2.0$）和 *N* 值法［$n(Fe_2O_3)/n(CaO)=3.0$］对上述铁矿粉的 CCFF 进行测定，其结果如图 3 所示。由图 3 可知：采用 *R* 值法测得姑精的 CCFF 为 59%，而卡粉的仅为 30%，马钢常用铁矿粉 CCFF 从小到大的顺序：卡粉 < PB 粉 < SSFT < MAC < 纽曼 < 姑精 < 巴粉 < 扬基。采用 *N* 值法测得姑精的 CCFF 仅为 35.5%，而卡粉的 CCFF 为 75%，马钢常用铁矿粉 CCFF 从小到大的顺序：扬基 < SSFT < 巴粉 < 姑精 < MAC < PB 粉 < 纽曼 < 卡粉。



1—$w(CaO)/w(SiO_2)=4.0$；2—$n(Fe_2O_3)/n(CaO)=1.5$。

图 3　*R* 值法和 *N* 值法测定 CCFF 结果对比

Fig. 3　Comparison of CCFF results of *R*-value method and *N*-value method

以上结果表明：采用 *R* 值法测得铁矿粉的 LPF、CCFF 与 SiO_2 质量分数存在比较显著的线性正相关关系，不能完全反应矿石的烧结性能。采用 *N* 值法测得铁矿粉的 LPF、CCFF 与实际生产中铁矿粉的烧结性能相关性更好。

1.3　*R* 值法和 *N* 值法测定铁矿粉 LPF 指数与烧结矿转鼓指数对应研究

分别将 *R* 值法和 *N* 值法测定的铁矿粉 LPF 指数代入铁矿石高温特性烧结配矿软件，计算得到各堆配矿结构的综合 LPF 指数，与使用各堆生产时所对应烧结矿的转鼓指数进行对应分析，其结果见图 4。由图 4 可以看出：烧结矿转鼓值在 *R* 值法测定下与 LPF 关系相对较弱，其拟合度（r^2）值为 0.187 4，且未能完整有效地反映出 LPF 指数高低对烧结矿转鼓的影响；*N* 值法的结果显示两者之间的对应关系较为显著，其拟合度（r^2）值为 0.396 7，明显高于 *R* 值法，且能反映出两者之间客观的内在规律。

2　基于烧结过程耦合的配矿运行实绩评价模型及应用

以上述 *N* 值法测定的高温性能参数优化铁矿石高温特性烧结配矿系统，可在一定程度上消弱基于 *R* 值法的结果与实际生产的偏差。但

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

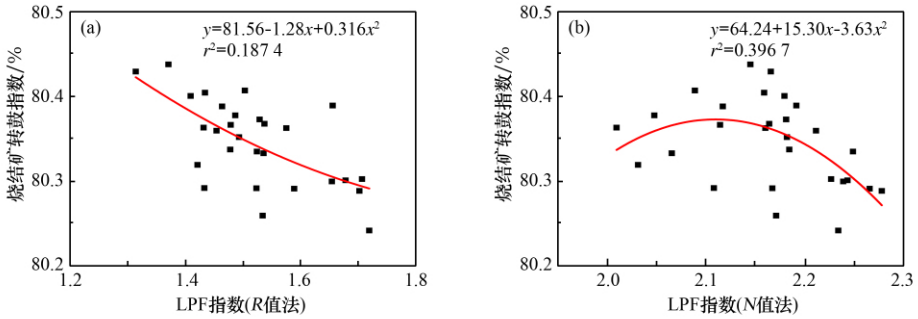


图 4 LPF 指数(*R* 值法与 *N* 值法)与烧结矿转鼓指数的关系

Fig. 4 Relationship between LPF and sinter tumble index (*R*-value method and *N*-value method)

由于实际生产中烧结过程的温度水平、熔剂种类及高温特性的差异、烧结料层孔隙度、烧结矿质量控制基数等均会对配矿的实绩效果产生影响[11-16]，故在此基础上建立了基于烧结过程耦合的配矿运行实绩评价模型，以实际生产指标来对烧结配矿效果进行实绩评价，其技术方案如图 5 所示。

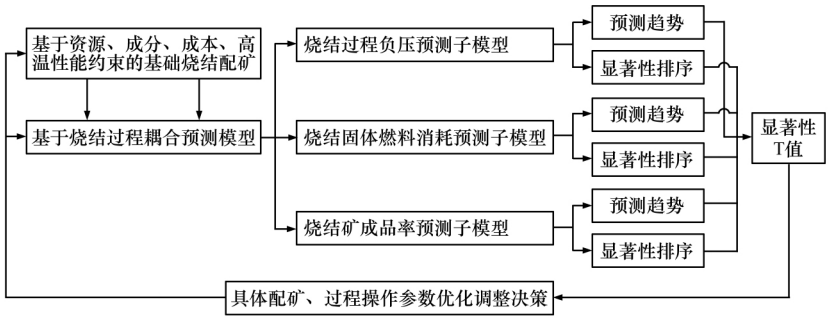


图 5 具体技术方案

Fig. 5 Specific technical scheme

2.1 评价模型构建

将烧结过程负压、固体燃料消耗以及成品率设置为烧结运行实绩评价特征指标。并按式(1)、(2)构建综合特征指数(*S*)以及各影响因子对 *S* 的影响显著性 *T* 值。

$$S = \sum_{i=1}^{3} Q_i \times \frac{F_i}{M_i} \tag{1}$$

$$T_j = \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{m} Q_i \times V_{ij} \times Y_{ij} \tag{2}$$

式中：*S* 为综合特征指数；Q_i 为第 *i* 个特征参数得分的权重；F_i 为各特征参数实际值；M_i 为各特征参数目标值；T_j 为影响显著性综合值；V_{ij}表示第 *j* 个影响因子对第 *i* 个特征参数影响的 VIP 值；Y_{ij}表示 V_{ij}值的正负相关性，若 V_{ij}值为正相关，则取值为 1，若 V_{ij}值为负相关，则取值为 −1。*m* 为影响因子的样本总数。

将上述特征指标与混匀矿配矿参数、成分、烧结生产负荷及过程操作控制参数等变量，通过偏最小二乘法分析优化软件建立实时多元回归自动定量预测模型[17]。模型能够自动进行更新迭代计算和预测；同时显示预测趋势及 *T* 值排序。

2.2 烧结负压预测子模型

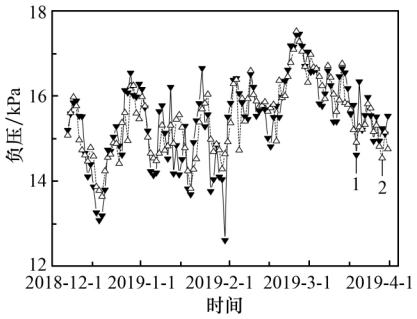
烧结过程负压的影响因素主要有混匀矿粒级组成数据、混匀矿配矿结构及高温性能参数、混合料水份值、烧结矿成分(SiO_2、MgO、Al_2O_3、FeO、*R* 等)控制参数、料温检测值、生灰及返矿的配比、料层厚度检测值、压料厚度值、燃料平均粒级等，根据这些因素建立预测模型。图 6 为实际烧结负压均值与预测烧结负压趋势。由图 6 可知：烧结实际负压与预测负压吻合性较强，其预测 ±5% 的命中率达 95% 左右。图 7 为各影响因子对负压影响的显著性指标值即 VIP 值，其中卡粉、巴粉、SSFT

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

粉及混合料水份值对烧结负压的影响较为显著；而污矿比例、环境温度以及烧结矿 R 对负压的影响则相对较小。

2.3　烧结固体燃料消耗预测子模型

烧结固体燃料消耗各变量因素影响源数据：混匀矿配矿结构数据及粒级组成、一混及二混水份值、烧结矿成分控制参数、料温检测值、烧结负压、烧结机速、生灰及熔剂配比、返矿及含碳辅料配比、氧化铁皮配比、料层厚度检测值、压料厚度值、燃料平均粒级、混匀矿原始 FeO 质量分数、点火煤气消耗等，根据这些因素建立预测模型。图 8、9 分别为预测烧结固体燃料消耗趋势各影响因子的VIP值。由图8、9 可知：该模型预测 ±5% 的命中率达 88% 左右。



1—实际负压；2—预测负压。

图 6　烧结实际负压与预测负压趋势

Fig. 6　Actual and predicted negative pressure trend of sintering

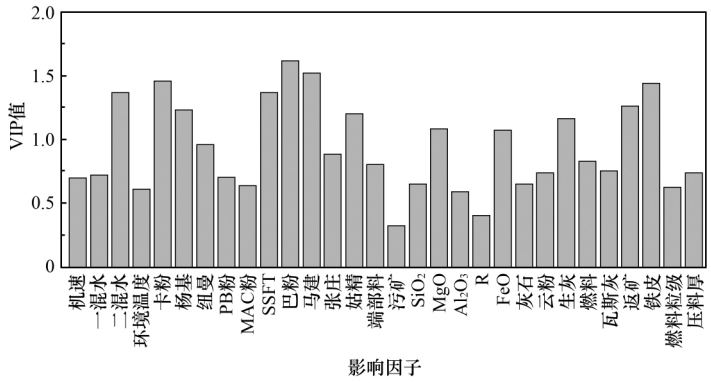
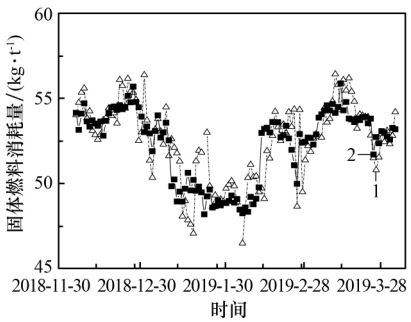


图 7　各影响因子显著性指标

Fig. 7　Significance index of each influencing factor



1—实际；2—预测。

图 8　烧结固体燃料消耗实际值与预测值对比

Fig. 8　Comparison of actual and predicted solid fuel consumption

2.4　烧结矿成品率预测子模型

同样采用与固体燃料消耗一致的各变量因素源数据进行烧结矿成品率预测，其结果见图 10、11。由图 10、11 可知：该模型其预测 ±5% 的命中率达 91% 左右。

2.5　评价模型的实绩应用

2019 年 3 月初实际生产中出现烧结负压持续偏高，成品率下降较为明显，固体燃料消耗耗量呈上升趋势。运用评价模型对相应的参数及指标进行评价，其结果见表 2。

由表 2 可看出：依据模型评价结果可辨析具体的配矿以及过程控制参数的影响程度，并根据结果对影响显著的因素在允许的范围内进行干涉性调整，使其对应特征指标 6 趋于正常收敛。具体的配矿参数改进：① 适当减配马建精(非常用矿种)，限制马建与巴混最大使用比例，对卡粉、扬基配比作适当增减调整；② 污矿的配入比例可维持在 1.5%～2.5% 水平；③ 保持当前的 Al_2O_3 水平。过程操作参数的改进：① 适当降低料层厚度20～30 mm，压入厚度可在

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

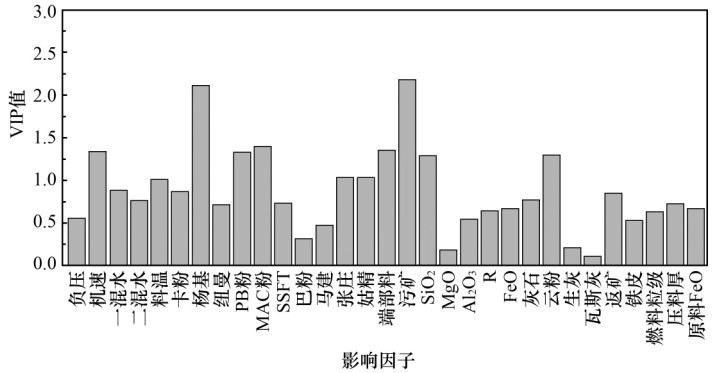
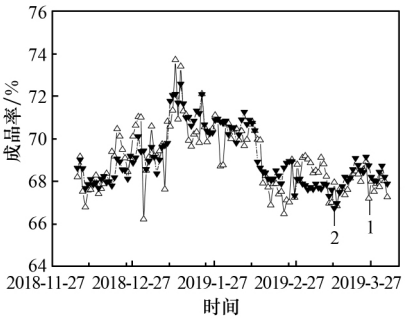


图9 各影响因子显著性指标

Fig. 9 Significance index of each influencing factor



1—实际；2—预测。

图10 烧结矿实际成品率与预测成品率趋势

Fig. 10 Actual and predicted yield rate trend of sintering

原基础上减持8～10 mm；② 严格控制机速、MgO的上限水平；③ 适度增加一混水份值、降低二混后水份值；④ 燃料平均粒级适度提高至1.80～1.90 mm。

3 基于高温配矿系统及实绩评价模型支撑下的烧结指标

随着各因子参数的扩充和生产数据累积，模型迭代运算的结果更加精准，现场可依据模型预测的结果，对配矿参数以及过程控制参数在工艺、资源、成本允许的范围内进行精细调整，从而实现配矿与烧结过程控制实绩的耦合。同时，该系统结合900 mm超厚料层综合操作技术配合运用，可对烧结综合指标提升形成一定的支撑(见表3)。

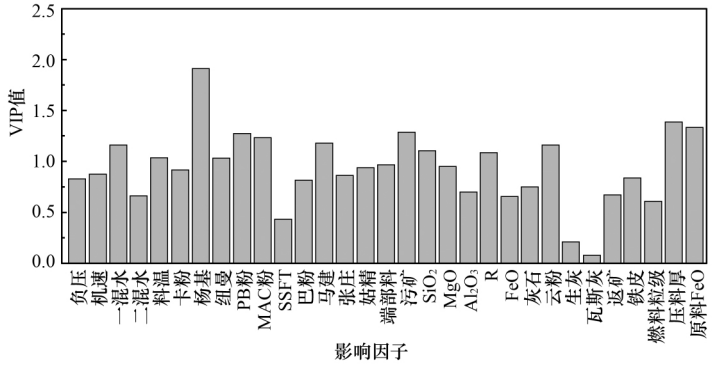


图11 各影响因子显著性指标

Fig. 11 Significance index of each influencing factor

表2 模型预测结果及烧结操作应对

Table 2 Model prediction results and operation response

S值偏离度/%	对应各特征指标的影响因子排序			T_j值排序
	负压	成品率	固体燃料消耗	
65	巴粉、马建、层厚、水分值	扬基、马建、一混水分、污矿、压料厚	污矿、扬基、Al_2O_3、机速	马建、污矿、层厚及压料、水分

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

表 3　2015—2019 年烧结生产相关指标

Table 3　Relevant indexes of sintering production(2015—2019)

时间/年	料层厚度/mm	质量分数/%				R	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	吨矿成本降低值/元
		转鼓指数	总返矿比	返粉率	TFe			
2015	897	78.89	25.56	12.52	56.82	1.99	53.13	11.98
2016	910	79.68	24.52	12.34	57.18	1.98	52.14	1.57
2017	930	80.62	24.87	11.41	57.32	2.00	51.81	27.98
2018	932	80.48	24.87	11.00	57.50	2.01	51.27	21.89
2019	945	80.69	25.28	11.22	57.44	2.02	49.80	15.13

4　结　语

(1) 与 R 值法比较，采用 N 值法测得马钢常用铁矿粉 LPF 递增的顺序：扬基 < 姑精 < MAC < PB 粉 < 巴粉 < SSFT < 纽曼 < 卡粉；CCFF 递增顺序：扬基 < SSFT < 巴粉 < 姑精 < MAC < PB 粉 < 纽曼 < 卡粉，且其结果与烧结生产实际情况的关联性更强。并可以 N 值法测定结果对现行基于铁矿粉高温性能的烧结配矿智能优化应用软件进行优化。

(2) 通过基于烧结过程耦合的配矿运行实绩评价模型的开发，以烧结过程负压、固体燃料消耗以及成品率特征指标建立评价预测模型，实现了对烧结配矿实绩的有效评价，可适时指导烧结配矿及烧结过程操作参数在工艺允许范围内进行优化调整，调整指向性较为突出，可支撑烧结生产指标的提升与配矿的实效。

参考文献:

[1] 吴胜利，杜建新，马洪斌，等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报，2005，27(3)：291－293.
WU Shengli，DU Jianxin，MA Hongbin，et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2005，27(3)：291－293.

[2] 吴胜利，戴宇明，DAUTER O，等. 基于铁矿粉高温特性互补的烧结优化配矿[J]. 北京科技大学学报，2010，32(6)：719－724.
WU Shengli，DAI Yuming，DAUTER O，et al. Optimization of ore blending during sintering based on complementation of high temperature properties [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2010，32(6)：719－724.

[3] 阎丽娟，吴胜利，尤艺，等. 各种铁矿粉的液相流动性及其互补配矿方法的研究[J]. 烧结球团，2013，38(6)：1－5.
YAN Lijuan，WU Shengli，YOU Yi，et al. Study on liquid phase fluidity of iron ores and its complementary ore proportioning [J]. Sintering and pelletizing，2013，38(6)：1－5.

[4] 范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京：机械工业出版社，2013：48－70.
FAN Xiaohui. Principle and technology of iron ore matching for sintering [M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2013：48－70.

[5] 李军，刘代飞，史先菊，等. 铁矿烧结配矿模式研究进展[J]. 钢铁，2018，53(1)：8－16.
LI Jun，LIU Daifei，SHI Xianju，et al. Progress of iron ore matching patterns in sinter process [J]. Iron and Steel，2018，53(1)：8－16.

[6] 龙红明，钱立新，春铁军，等. 基于 $n(Fe_2O_3)/n(CaO)$ 的铁矿粉烧结液相流动性测定方法[J]. 中南大学学报，2018，49(7)：1605－1611.
LONG Hongming，QIAN Lixin，CHUN Tiejun，et al. Determination method of iron ore liquid phase fluidity index during sintering based on $n(Fe_2O_3)/n(CaO)$ [J]. Journal of Central South University，2018，49(7)：1605－1611.

[7] YU Zhengwei，QIAN Lixin，ZHANG Jianliang，et al. Determination method of high-temperature characteristics of iron-ore sintering based on $n(Fe_2O_3)/n(CaO)$ [J]. Iron Steel Res. Int. 2019，26：1257－1264.

[8] 常建，苏步新，张建良，等. 基于铁矿粉高温特性的烧结优化配料模型[J]. 烧结球团，2011，36(5)：12－14.
CHANG Jian，SU Buxin，ZHANG Jianliang，et al. Sintering proportioning optimization model based on high temperature properties of iron ore fines [J]. Sintering and pelletizing，2011，36(5)：12－14.

[9] 袁晓丽，范晓慧，万新，等. 烧结优化配矿模型的设计与软件开发[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2009，40(6)：1476－1481.
YUAN Xiaoli，FAN Xiaohui，WAN Xin，et al. Design and development of optimizing iron ores matching model and software [J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2009，40(6)：1476－1481.

(下转第 21 页)

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

Electronics，2018，65(5)：4392 – 4400.

[7] 王森，伍星，张印辉，等. 基于深度学习的全卷积网络图像裂纹检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2018，30(5)：859 – 867.
WANG Sen，WU Xing，ZHANG Yinhui，et al. Image crack detection with fully convolutional network based on deep learning [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics，2018，30(5)：859 – 867.

[8] MAEDA Hiroya，SEKIMOTO Yoshihide，SETO Toshikazu，et al. Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images [J]. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering，2018，33(12)：1127 – 1141.

[9] 李良福，马卫飞，李丽，等. 基于深度学习的桥梁裂缝检测算法研究[J]. 自动化学报，45(9)，2019：859 – 867.
LI Liangfu，MA Weifei，LI Li，et al. Research on detection algorithm for bridge cracks based on deep learning [J]. Acta Automatica Sinica，45(9)，2019：859 – 867.

[10] 尹学，李绍铭，闫成忍. 基于 GA-PSO-BP 神经网络的烧结终点预测模型[J]. 烧结球团，2020，45(6)：35 – 39.
YIN Xue，LI Shaoming，YAN Chengren. Prediction model of BTP based on GA-PSO-BP neural network [J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(6)：35 – 39.

[11] 王月明，李真如，翟容清，等. 基于 LSD 算法的链算机台车侧板偏移检测[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(8)：1 – 11.
WANG Yueming，LI Zhenru，ZHAI Rongqing，et al. Side plate offset detection of grate trolley based on LSD algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress，2021，58(8)：1 – 11.

[12] 吴海滨，杨西男，张乐文，等. 一种烧结矿质量判定系统的开发及应用[J]. 烧结球团，2018，43(4)：6 – 11.
WU Haibin，YANG Xinan，ZHANG Lewen，et al. Development and application of a sinter quality assessment system [J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(4)：6 – 11.

(上接第 15 页)

[10] YAN Bingji，ZHANG Jianliang，GUO Hongwei，et al. High-temperature performance prediction of iron ore fines and the ore-blending programming problem in sintering [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy，and Materials，2014，21(8)：741 – 747.

[11] 吴胜利，苏博，齐渊洪，等. 铁矿粉液相流动性的主要液相生成特征因素解析[J]. 工程科学学报，2018，40(3)：321 – 329.
WU Shengli，SU Bo，QI Yuanhong，et al. Major melt formation characteristic factor analysis of iron ore liquid phase fluidity during the sintering process [J]. Chinese Journal of Engineering，2018，40(3)：321 – 329.

[12] 亢庆锋，张建良，刘征建，等. 烧结熔剂活性度及高温液相行为研究[J]. 钢铁研究，2017，45(4)：8 – 12.
KANG Qingfeng，ZHANG Jianliang，LIU Zhengjian，et al. Research on activity and high temperature liquid phase behavior of sinter fluxes [J]. Research on Iron & Steel，2017，45(4)：8 – 12.

[13] 邓涛，曹雪洋，王建超，等. MgO 和 Al_2O_3 对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 中国冶金，2015，25(10)：33 – 37.
DENG Tao，CAO Xueyang，WANG Jianchao，et al. Effect of MgO and Al_2O_3 on liquid phase formation in the sintering process of iron ore powder [J]. China Metallurgy，2015，25(10)：33 – 37.

[14] 李金莲，任伟，童晓宇，等. 铁矿石的非等温烧结综合特性及其评价方法[J]. 烧结球团，2015，40(6)：11 – 14；22.
LI Jinlian，REN Wei，TONG Xiaoyu，et al. Non-isothermal comprehensive sintering characteristics of iron ore fines and its evaluation method [J]. Sintering and pelletizing，2015，40(6)：11 – 14；22.

[15] 李和平，吴胜利，苏博，等. SiO_2 质量分数对铁矿粉液相特性及固结强度的影响[J]. 烧结球团，2019，44(5)：23 – 28.
LI Heping，WU Shengli，SU Bo，et al. Effect of SiO_2 mass fraction on liquid phase characteristic and concretion strength of iron ore powder [J]. Sintering and pelletizing，2019，44(5)：23 – 28.

[16] 张文兴，黄苑龄，张周位，等. 烧结矿的矿物组成和气孔特征对黏结相强度的影响[J]. 现代矿业，2018，591(7)：118 – 121.
ZHANG Wenxing，HUANG Yuanling，ZHANG Zhouwei，et al. Influence of sintering mineral composition and stomata characteristics on bonding phase strength [J]. Modern Mining，2018，591(7)：118 – 121.

[17] 王慧文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，1999：20 – 65.
WANG Huiwen. Partial least squares regression method and applications [M]. Beijing：National Defense Industry Press 1999：20 – 65.

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