

沙钢 5800 m³ 高炉所用烧结矿 FeO 含量研究

邹志雄, 杜屏

(江苏省(沙钢)钢铁研究院, 江苏 苏州 215625)

摘要: 这是一篇冶金工程领域的文章。为给烧结矿 FeO 成分控制、质量优化提供理论依据, 考查了沙钢 5800 m³ 高炉所用烧结矿转鼓强度、低温还原粉化、中温还原性等冶金性能, 并通过统计数据分析探究了 FeO 含量对烧结矿冶金性能的影响以及影响 FeO 含量的因素, 结果表明: 基于沙钢现行原料质量、配矿结构以及工艺操作条件下: FeO 含量增加可提升烧结矿转鼓指数、RDI_{+3,15} 及 RI, 当 RI 大于 85% 时, FeO 含量才成为制约 RI 因素, FeO 含量适宜值为 9.5% 左右; R、SiO₂ 含量、精粉及燃料配比增加会导致 FeO 含量升高, 提升 MgO 含量, 负压会造成 FeO 含量下降; 数据分析表明: 控制 R 为 1.9, SiO₂、MgO 含量分别为 5.2%、1.8% 左右, 精粉配比在 11% 以内, 燃料配比在 4.5%~5% 之间, 负压为 16 KPa 以内, 可使烧结矿 FeO 含量均值维持在 9.5% 左右, 对应转鼓指数均值为 80% 左右, RDI_{+3,15}、RI 均值分别为 75%、80% 以上。

关键词: 冶金工程; FeO 含量; 烧结矿; 强度; 冶金性能; 影响因素

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.025

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)03-0161-06

引用格式: 邹志雄, 杜屏. 沙钢 5800 m³ 高炉所用烧结矿 FeO 含量研究[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 161-166.

ZOU Zhixiong, DU Ping. Research on FeO content of sinter used in Shagang's 5800 m³ blast furnace[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 161-166.

FeO 含量是烧结温度与气氛的直接反映^[1], 通常作为评价烧结生产的一项重要综合性指标。实践表明, FeO 含量不仅关系烧结矿性能^[2], 还对后续炼铁能耗有重要影响。故基于相对恒定的原燃料质量、结构及操作水平条件下, 确定适宜的 FeO 含量, 对于烧结、炼铁生产具有重要意义。

实际生产中, FeO 含量并非简单的元素迁移、叠加, 而是原料配比、理化反应、工艺操作层面上的综合作用结果。通过对沙钢 5800 m³ 高炉

所用烧结矿进行冶金性能测试, 并结合数据统计分析探究了 FeO 含量对烧结矿性能的影响以及影响 FeO 含量的因素, 以期对 FeO 成分控制、烧结矿质量优化以及炼铁节能降耗提供参考。

1 实验样品、方法

1.1 烧结配料结构

烧结混匀矿配料结构见表 1。

表 1 烧结混匀矿配料结构/%
Table 1 Distribution ratio of each group of sintering raw materials

巴西粉			澳洲粉				精粉				杂料	
卡粉	BRBF	S FHT	扬迪	纽曼	PB	哈扬	澳精	英美精	智利精	英美资源	氧化铁皮	返矿
7~25	7~25	0~5	20~36	6~29	6~33	10~14	5~11	7~8	0~8	7~8	0~5	5~10

由表 1 可知, 5800 m³ 高炉所用烧结配矿结构主要由巴西粉、澳洲粉、精粉及杂料组成。巴西

粉以卡粉、BRBF 为主, 该类矿石多为赤铁矿, 铁品位极高, 杂质少, 能有效降低脉石及有害元素

收稿日期: 2022-08-15

作者简介: 邹志雄(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事选-冶联合工艺技术研究。

含量，利于强化高炉冶炼；澳洲粉以杨迪、纽曼、PB 粉为主，该类矿石多为褐铁矿，可产生足够的液相量，颗粒较粗，能改善料层透气性，提升烧结生产效率；精粉以澳精、英美精粉为主，主要成分为磁铁矿，充当烧结骨架作用，能提高烧结矿入炉品位，平衡各类有害元素，满足高炉精料冶炼方针；杂料以氧化铁皮为主，未添加各类尘泥。

1.2 实验方法

采用 GB/T 13242—91《铁矿石低温粉化实验静态还原后使用冷转鼓方法》，GB/T13241—91《铁矿石的还原性测定方法》，GB/T 8209—87《烧结矿和球团矿转鼓指数和抗磨指数的方法》测试烧结矿冶金性能及强度，结果以 $RDI_{+3.15}$ 、RI 及 T 表示。

2 实验结果与分析

2.1 FeO 含量对烧结矿性能的影响

2.1.1 FeO 含量对 $RDI_{+3.15}$ 的影响

烧结生产中，FeO 含量直接关乎料层温度、还原、氧化气氛以及粘结相类别、强度，这都将影响烧结矿 $RDI_{+3.15}$ [3]、以 FeO 含量对 $RDI_{+3.15}$ 影响规律统计分析，结果见图 1。

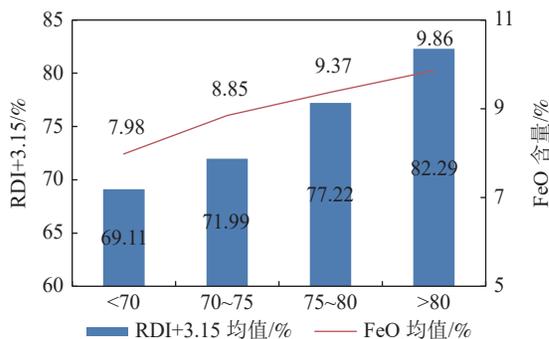


图 1 FeO 含量对 $RDI_{+3.15}$ 影响
Fig.1 Effect of FeO content on $RDI_{+3.15}$

由图 1 可知，烧结矿 $RDI_{+3.15}$ 由 69.11% 升至 82.29%，对应 FeO 含量由 7.98% 增至 9.86%，故可知 FeO 含量增加，有利于改善 $RDI_{+3.15}$ 。通常情况下，FeO 产生条件为高温、高还原性气氛，在此条件下，燃烧带料层温度高，这就会使铁矿石产生更多的液相，形成更多铁酸钙系列粘结相 [4]，同时更高的温度条件下，有利于各种高温液相反应的进行，从而使烧结矿结构变的致密，改善了 $RDI_{+3.15}$ ，但考虑到过高的 FeO 含量会使得烧结矿还原性变差，综合考虑，FeO 含量应控制在

10% 以内。

2.1.2 FeO 含量对 RI 的影响

铁矿石还原性能考查的是以间接还原方式夺取氧量的难易程度 [5]，FeO 含量直接影响烧结矿的还原性，FeO 含量对烧结矿还原性指数影响结果见图 2。

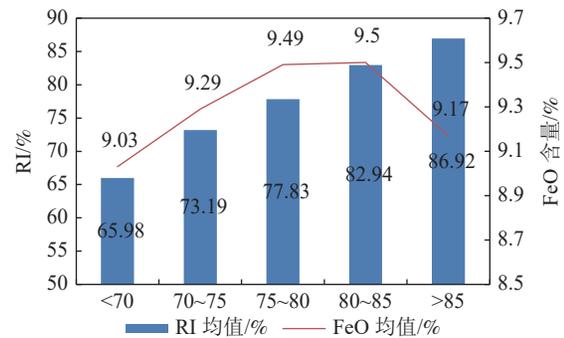


图 2 FeO 含量对 RI 影响
Fig.2 Effect of FeO content on RI

由图 2 可知，RI 由 65.98% 增至 82.94% 时，FeO 含量由 9.03% 增至 9.5%，RI 继续增至 86.92%，FeO 含量急剧降至 9.17%，由此可知，FeO 含量增加能够改善 RI，只当 RI 大于 85%，FeO 含量才成为制约 RI 的因素，因此并非 FeO 含量越低，还原性越好，而是有一个适宜的 FeO 含量，结合 FeO 含量与 $RDI_{+3.15}$ 的关系分析，可能是因为 FeO 含量增加改善了烧结矿结构，利于还原，而当 RI 超过 85% 后，FeO 才成为影响 RI 的主要因素，结合 $RDI_{+3.15}$ 分析，FeO 含量控制在 9.5%，可使 $RDI_{+3.15}$ 、RI 均值分别维持在 75%、80% 以上。

2.1.3 FeO 含量对转鼓指数的影响

烧结生产 FeO 含量直接关乎料层温度以及粘结相类别、强度，这都会影响烧结矿转鼓指数，FeO 含量对转鼓指数影响结果见图 3。

由图 3 可知，随着转鼓指数均值由 78.61% 增至 81.8%，FeO 含量由 9.41% 升至 9.73%，呈现出波浪式上升趋势，总体来看，FeO 含量增加可提升转鼓指数，这可能是因为 FeO 产生条件为高温、高还原性气氛，此条件下会使铁矿石产生更多的液相，形成更多铁酸钙系列粘结相，同时有利各种高温液相反应进行，使烧结矿结构变的致密，改善了烧结矿强度，FeO 含量波动式上升可能是因为转鼓强度不仅受 FeO 含量影响，还可能与配矿结构及其他因素有关，结合 $RDI_{+3.15}$ 、RI 分析，FeO 含量控制在 9.5% 左右时，可使 $RDI_{+3.15}$ 、RI 均值分别维持在 75%、80% 以上，转鼓指数均值维持在 80% 左右。



图3 FeO含量对转鼓指数影响
Fig.3 Effect of FeO content on drum index

2.2 化学成分对FeO含量影响

2.2.1 碱度对FeO含量的影响

碱度不仅对关乎高炉顺行^[6]，还对烧结矿的FeO含量有重要影响，碱度对烧结矿FeO含量影响结果见图4。

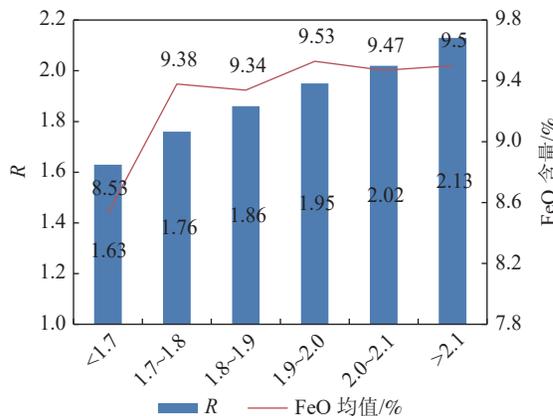


图4 碱度R对FeO含量影响
Fig.4 Effect of alkalinity on FeO content

由图4可知，当R均值由1.63增至1.76时，FeO含量均值由8.53%剧增至9.38%，继续增加R至1.95，FeO含量升至9.53%，当R超过2.0时，FeO含量变化不大，故可知提高R有利于FeO生成，而当R超过2.0后，FeO含量基本不变，这是因为提高R主要通过增加CaO含量实现，而CaO和SiO₂的亲合力强于和Fe₂O₃的亲合力，CaO含量提升后，容易跟SiO₂反应，顺带生成CaO_x·(FeO)_{2-x}·SiO₂、CaO·FeO·SiO₂，导致FeO含量上升，而当R超过2.0时，CaO含量相对过剩，故FeO含量变化不大。烧结矿碱度范围为1.9±0.1，FeO含量对应应在9.34%~9.53%之间，同时保证了烧结矿强度及冶金性能，这也从FeO层面上验证了高碱度烧结矿的优良性能。

2.2.2 SiO₂含量对FeO含量的影响

研究表明每降低烧结矿1%SiO₂含量，高炉渣量降低30 kg/t^[7]，同时SiO₂对FeO含量也有影响，SiO₂含量对FeO含量影响结果见图5。

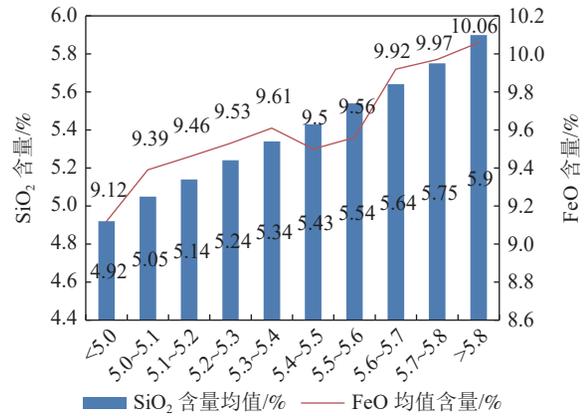


图5 SiO₂含量对FeO含量影响
Fig.5 Effect of SiO₂ content on FeO content

由图5可知，当SiO₂含量均值由4.92%增至5.9%时，对应FeO含量均值由9.12%增至10.06%，故可知SiO₂含量增加有利于FeO生成，这可能是由于烧结料层温度超过900℃时，SiO₂的存在可以加快Fe₃O₄还原成FeO的过程，形成硅酸铁系(FeO·SiO₂)、钙铁橄榄石体系(CaO·FeO·SiO₂)化合物，从而导致FeO含量上升，这两种体系都是高碱度烧结矿粘结相，对烧结矿固结有重要作用，但因其还原性差，且易形成宏观结构而影响强度，故不宜过度发展，结合数据分析，SiO₂含量控制在5.2%左右可保证FeO含量在9.5%左右。

2.2.3 MgO含量对FeO含量的影响

MgO加入烧结生产主要是为了改善高铝原料对高炉顺行方面的不利影响^[8]，同时MgO对FeO含量也有影响，MgO含量对FeO含量影响结果见图6。

由图6可知，MgO含量均值由1.62%增至1.98%时，对应FeO含量均值由9.55%降至9.12%，MgO含量超过1.85%时，FeO含量下降尤为明显。故可得MgO含量增加会抑制FeO生成，这是因为MgO属于高熔点化合物，其含量增加会导致烧结矿难熔物质增加，液相生成量减少，从而导致铁橄榄石、钙铁橄榄石体系粘结相量减少，故而FeO含量下降。单从FeO含量角度考虑，控制MgO含量在1.8%时，可使FeO含量均值维持在9.5%左右。

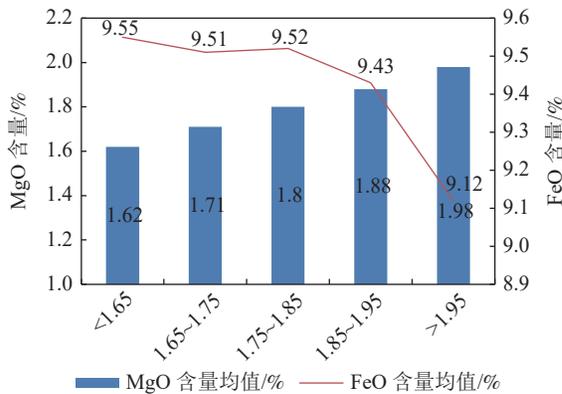


图6 MgO 含量对 FeO 含量影响
Fig.6 Effect of MgO content on FeO content

2.3 配料结构对 FeO 含量影响

2.3.1 精粉比对 FeO 含量的影响

精粉多为磁铁矿，在烧结过程充当骨架作用，其比对 FeO 含量有重要影响，精粉比对 FeO 含量影响结果见图 7。



图7 精粉比对 FeO 含量影响
Fig.7 Effect of fine powder ratio on FeO content

由图 7 可知，精粉用量由 5% 增至 11% 时，FeO 含量均值对应由 9.42% 升至 10%，故可知精粉配比增加会导致 FeO 含量上升，这可能是因一方面精粉主要为磁铁矿，FeO 质量分数理论值为 32.03%，配比增加直接导致 FeO 含量上升，另一方面精粉多为 -0.074 mm 的磁选粉，粒度极细，配比增加会恶化烧结料层透气性，使得还原性气氛增加，从而导致 FeO 含量上升。通常情况下，精粉用量主要由成本价格及配矿结构要求两方面确定，若单从 FeO 含量角度考虑的话，精粉用量应控制在 11% 以内，避免 FeO 含量过高。

2.3.2 燃料比对 FeO 含量的影响的影响

燃料配比直接关乎烧结过程的热量来源^[9]，是烧结各类物理、化学反应进行的基础，其比对 FeO 含量有重要影响，燃料比对 FeO 含量影响结果见图 8。

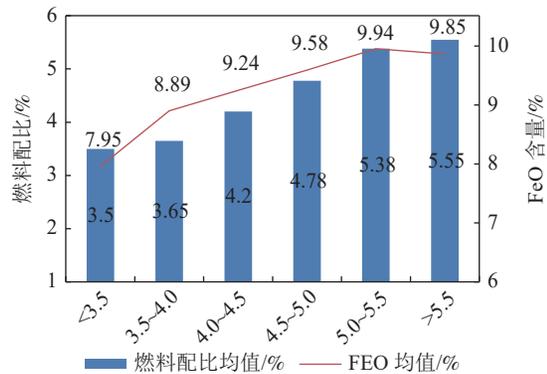


图8 燃料比对 FeO 含量影响
Fig.8 Effect of fuel powder ratio on FeO content

由图 8 可知，燃料配比由 3.5% 增至 5.55% 时，FeO 含量均值对应由 7.95% 升至 9.85%，故可知燃料配比增加会导致 FeO 含量上升，这可能是燃料配比增加，热量供应增加，烧结料层温度升高，还原性气氛增加，使得 FeO 含量上升，实际生产过程中，燃料配比主要是由配矿结构确定，若单从 FeO 含量角度考虑的话，燃料配比控制在 4.5%~5% 之间，FeO 含量对应在 9.58%，可得到较好的烧结矿性能指标。

2.4 操作因素对 FeO 含量影响

2.4.1 负压对 FeO 含量的影响

负压直接影响进入料层的空气流量，这关乎烧结速率、气氛，均对 FeO 含量有较大影响^[10]。负压对 FeO 含量影响结果见图 9。



图9 负压对 FeO 含量影响
Fig.9 Effect of fuel negative pressure on FeO content

由图 9 可知，负压均值由 10.03 kPa 增至 16.72 kPa 时，FeO 含量均值由 9.56% 降至 8.72%，负压在 13~16 KPa 时，FeO 含量异常上升，这可能是配矿结构改变或料层透气性差所致，整体来看，负压升高会导致 FeO 含量降低，这是因为烧结机负压直接关系进入烧结料层的空气流量，当负压增加时，进入料层空气流量加大，导致还原气氛降低，烧结时间变短，同时空气流量过大也

会带走烧结料层的部分热量，使得料层温度降低，不利于烧结各类高温反应的进行，使得FeO含量降低。结合数据分析，负压应控制在16 kPa以内，避免FeO含量过低，烧结矿性能指标变差。

2.5 烧结矿质量分析

烧结矿质量性能较优时的配矿参数及成分性能见表2、3。

表2 配矿结构及工艺参数

卡粉/%	BRBF/%	杨迪/%	纽曼/%	PB/%	精粉/%	燃料/%	负压/kPa
15	16	32	13	16	8	4.8	14

表3 烧结矿化学成分及冶金性能/%

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	TiO ₂	T _{Fe}	RDI _{+3.15}	RI	T
10.16	5.22	1.82	1.78	9.47	0.06	0.11	56.87	78.32	79.9	80.33

在配矿结构及工艺条件下，可得到铁品位56.87%，FeO含量9.47%的成品烧结矿，对应RDI_{+3.15}、RI、T分别为78.33%、79.9%、80.33%，从化学成分及冶金性能角度而言，基本符合大高炉冶炼要求。

3 结 论

(1) FeO含量增加可提升烧结矿转鼓指数以及RDI_{+3.15}，RI小于85%时，FeO含量增加可提升RI，RI大于85%时，FeO含量才成为制约RI因素；FeO含量适宜值为9.5%左右，对应转鼓指数均值为80%左右，RDI_{+3.15}、RI均值分别维持在75%、80%以上。

(2) R、SiO₂含量提升有利于CaO_x·(FeO)_{2-x}·SiO₂、CaO·FeO·SiO₂、FeO·SiO₂生成，导致FeO含量增加，MgO含量超过1.8%会造成液相量减少，FeO含量显著降低；精粉能通过自身带入FeO以及恶化料层透气性使FeO含量增加，燃料配比超过5.3%会使料层温度、还原气氛过高导致FeO含量增加；负压超过16 KPa会明显增加料层氧化气氛并带走过多热量，导致FeO含量剧降。

(3) 数据分析表明：控制R为1.9，SiO₂、MgO含量分别为5.2%、1.8%左右；精粉配比在11%以内，燃料配比在4.5%~5%之间；烧结负压在16 kPa以内，可使烧结矿FeO含量均值为保持在适宜值9.5%左右。

参考文献：

[1] 罗桂娟, 付志军, 张水菊. 铁料中氧化亚铁测定的影响因

素分析[J]. 化学分析计量, 2011, 20(5):86-88.

LUO G J, FU Z J, ZHANG S J. Analysis of factors affecting the determination of ferrous oxide in iron materials[J]. *Chemical Analysis and Metrology*, 2011, 20(5):86-88.

[2] 吉训生, 荆田田, 熊年昀. 烧结矿FeO含量预测研究[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(10):318-322.

JI X S, JING T T, XIONG N J. Research on the prediction of FeO content of sintered ore[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(10):318-322.

[3] 张朝晖, 徐凯强, 邢相栋, 等. 烧结矿低温还原粉化影响因素研究进展[J]. *钢铁研究学报*, 2021, 33(6):453-460.

ZHANG Z H, XU K Q, XING X D, et al. Progress in the study of factors affecting low-temperature reduction pulverization of sintered ore[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33(6):453-460.

[4] 秦鹏, 毛志祥, 李琳, 等. 烧结矿低温还原粉化(RDI)影响因素的研究[A]. 中国金属学会. 2012年全国炼铁生产学术会议暨炼铁学术年会文集(上)[C]. 中国金属学会: 中国金属学会, 2012: 9.

QIN P, MAO Z X, LI L, et al. Research on the influencing factors of low temperature reduction pulverization (RDI) of sintered ore[A]. China Society for Metals. 2012 National Conference on Ironmaking Production Technology and Ironmaking Academic Annual Meeting Proceedings (Upper)[C]. China Society for Metals: China Society for Metals, 2012: 9.

[5] 赵佐军. 基于六西格玛精益管理提高烧结矿还原性实践[J]. *烧结球团*, 2019, 44(5):32-37.

ZHAO Z J. Improvement of sinter ore reducibility practice based on Six Sigma lean management[J]. *Sinter Pellet*, 2019, 44(5):32-37.

[6] 刘丽娜. 碱度对石钢烧结矿相结构及冶金性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(3):125-129.

LIU L N. Influence of alkalinity on the phase structure and metallurgical properties of sinter ore from Shigang[J]. *Iron and Steel Vanadium and Titanium*, 2021, 42(3):125-129.

[7] 庞建明, 汪志全. SiO₂对烧结矿相组成的影响[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2005(4):338-340.

PANG J M, WANG Z Q. Effect of SiO₂ on the composition of sintered ore phase[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005(4):338-340.

[8] 贾树仟, 李建伟, 彭树成, 等. MgO含量对烧结矿性能的影响[J]. *河北冶金*, 2020(8):7-10+73.

JIA S Q, LI J W, PENG S C, et al. Effect of MgO content on

the properties of sintered ore[J]. Hebei Metallurgy, 2020(8):7-10+73.

[9] 王自学, 冯帅. 钒钛烧结矿性能及矿物组成和结构的研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):71-75.

WANG Z X, FENG S. Study on metallurgical properties and phase of vanadium titanium sinter[J]. [Multipurpose Utilization](#)

[of Mineral Resources](#), 2020(1):71-75.

[10] 孟利建, 董复明, 刘金涛, 等. 加拿大精粉的烧结性能研究[J]. 矿产综合利用, 2021(1):130-133.

MENG L J, DONG F M, LIU J T, et al. Experimental study on sintering of Canada iron ore fines[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(1):130-133.

Research on FeO Content of Sinter Used in Shagang's 5800 m³ Blast Furnace

ZOU Zhixiong, DU Ping

(Research Institute of Iron and Steel of Jiangsu Province (Shasteel), Suzhou 215625, Jiangsu, China)

Abstract: This is an article in the field of metallurgical engineering. To provide a theoretical basis for FeO composition control and quality optimization of sinter, the metallurgical properties of sinter ore used in 5800 m³ blast furnace of Shagang, such as drum strength, low-temperature reduction pulverization, medium-temperature reducibility were investigated. The effect of FeO content on the performance of sinter and the factors affecting FeO content were explored through statistical data analysis. The results show that based on Shagang's current raw material quality, ore blending structure and process operating conditions, the increase of FeO content can improve the drum index and RDI_{+3,15} of sinter. When RI is more than 85%, the FeO content becomes the limiting factor of RI, and the appropriate value of FeO content is about 9.5%. The increase of R, SiO₂ content, fine powder and fuel ratio will cause the increase of FeO content, MgO content and negative pressure will cause the decrease of FeO content. Data analysis shows if R is 1.9, the contents of SiO₂ and MgO are about 5.2% and 1.8%, respectively. The ratio of fine powder is less than 11%, the ratio of fuel is between 4.5 and 5%, and the negative pressure is below 16 KPa, the average FeO content of sinter is about 9.5%, the corresponding drum index is about 80%. The average values of RDI_{+3,15} and RI are above 75% and 80%, respectively.

Keywords: Metallurgical engineering; FeO content; Sinter; Strength; Metallurgical properties; Influencing factors