

烧结用硼镁精粉的研究及工业应用

刘建波, 张俊杰, 王博文, 刘 艺, 江银伟, 韩浩哲

(中天钢铁集团 南通有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要: 为了更好地利用低价的硼镁铁矿资源, 提高烧结原料供应的稳定性, 本文对硼镁精粉的烧结性能进行配矿试样研究。研究表明: 在现有的烧结原料和工艺情况下, 当硼镁精粉配加质量分数由4%提升到8%时, 有利于改善烧结过程透气性, 烧结矿低温还原粉化指数(>3.15 mm)呈下降趋势, 还原性呈略微上升, 转鼓强度有所下降, 烧结矿粒级呈现下降的趋势, 综合炉料的软熔滴落性能变差; 在硼镁精粉配加质量分数 $\leq 6\%$ 的情况下, 能满足高炉生产指标要求。配加6%的硼镁精粉后, 工业应用结果显示: 烧结负压整体有所下降且相对较为平稳, 烧结矿转鼓强度有所下降, 从冶金性能指标上看, 配加硼镁精粉后还原性略微增加, 低温还原粉化指数(>3.15 mm)由74.19%降至69.28%。该烧结矿应用于高炉生产后出现风量变化不大, 压差略有上升, 高炉其它指标保持良好, 后续可持续配入, 作为降本增效的手段。

关键词: 烧结; 硼镁精粉; 冶金性能; 转鼓强度; 熔滴性能; 降本增效

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0054-07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.007

Research and industrial application of boron magnesium concentrate powder for sintering

LIU Jianbo, ZHANG Junjie, WANG Bowen, LIU Yi, JIANG Yinwei, HAN Haozhe

(Zenith Steel Group(Nantong) Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China)

Abstract: In order to make better use of low-cost boro-magnesium ore resources and improve the stability of supplying the sintering raw materials, some ore blending samples for the sintering performance of boron magnesium concentrate powder are studied. The results show that, under the existing sintering raw materials and processes, when the mass fraction of boron magnesium concentrate powder is increased from 4% to 8%, it is helpful to improving the air permeability of the sintering process, the low-temperature reduction pulverization index(>3.15 mm) of sintered ore shows a downward trend, the reducing property increases slightly, the drum strength decreases, the sinter particle size shows a downward trend too, and the soft melt dripping performance of the comprehensive charge deteriorates. When the mass fraction of boron magnesium concentrate powder is $\leq 6\%$, it can meet the requirements of blast furnace production index. After adding 6% boron magnesium concentrate powder, the industrial application results show that, the overall negative pressure of sintering decreases and keeps relatively stable, the strength of the sinter drum decreases; while, from the perspective of metallurgical performance index, the reducibility increases slightly after adding boron magnesium concentrate powder, and the low-temperature reduction pulverization index(>3.15 mm) decreases from 74.19% to 69.28%. After this sintered ore is used for blast furnace production, the air volume does not change much, the pressure difference increases slightly and the other indicators of the blast furnace remains well. The following continuous allocation can be used as a means to reduce costs and increase efficiency.

收稿日期: 2024-08-15; 修回日期: 2024-10-21

作者简介: 刘建波(1985—)男, 高级工程师, 从事烧结技术研究和管理工作。

通信作者: 王博文(1987—)男, 工程师, 从事烧结技术研究。

Key words: sintering; boron magnesium concentrate powder; metallurgical properties; drum strength; droplet properties; reduce costs and increase efficiency

烧结矿作为国内高炉主要入炉原料之一, 约占总炉料的75%左右^[1]。近年来, 由于钢铁行业竞争日趋激烈, 主流矿粉品质呈现出劣化趋势, 业界极力寻找新的铁矿资源来保障烧结原料供应稳定。

硼镁铁矿作为一种低价的烧结物料, 逐渐引起了钢铁行业的注意。由于硼镁铁矿矿物构造多样且复杂, 共生关系密切, 结晶粒度细而不均等原因, 使其具有较高的处理难度^[2-5]。所以, 将硼镁铁矿资源中的有价元素充分利用, 探索新的硼镁铁矿有价元素的综合利用技术, 对钢铁行业降本增效具有重要意义。针对硼镁精粉的使用, 国内一些企业及高校进行其在球团生产中配加的研究, 研究发现球团配加硼镁精粉后导致球团矿的还原性大幅度降低, 影响高炉炉内软熔滴落带的变化, 证明在球团中配加硼镁精粉不可行。还有一些企业进行了硼镁精矿在烧结生产的试验, 邢钢在烧结中使用硼镁精粉后, 900℃还原度指数提高7.24%, 500℃还原粉化率降低7.74%^[10]。首钢在烧结中配加3%硼镁精粉后, 烧结利用系数由1.60 t/(m²·h)提高到1.62 t/(m²·h), 转鼓强度提高2.22%, 500℃还原粉化率由58.80%上升至60.29%^[11]。

为更好地将硼镁精粉用于烧结生产, 本文根据现场配矿结构, 组织开展烧结杯试验、探究硼

镁精粉对烧结矿质量和冶金性能指标的影响, 以寻找到合适的硼镁精粉搭配方案, 达到工业生产降本增效的目的。

1 原料与方法

1.1 试验原料

试验所用的原料有褐铁矿、半褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿、固废(均为质化料), 所用熔剂主要为生石灰、白云石、石灰石; 烧结固体燃料为焦炭。各原料主要化学成分见表1。

由表1可知: 硼镁精粉属于磁铁矿, 其最大的表征是硼和镁含量高, MgO、B₂O₃质量分数分别为10.54%、5.18%; 全铁质量分数较低, 为54.51%。本次试验, 使用硼镁精粉等比例替代全铁质量分数分别为62.14%、61.30%的矿粉P和矿粉M, 替代占比为4%~8%。烧结矿中MgO质量分数通过配加白云石进行调整, 按2.3%控制, 碱度控制在2.1。

特别值得注意的是, 虽然硼镁精粉的全铁品位远低于其它矿粉, 但是其SiO₂质量分数只有3.97%, 同时含有10.5%的MgO, 在替代其它矿粉的同时, 可以减少白云石的使用量。

1.2 试验方案及工艺参数

试验采用∅300 mm×800 mm烧结杯模拟实际烧结工艺条件, 工艺参数如表2所示。试验时,

表1 试验原料主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of raw materials

矿物类别	物料名称	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	水分	烧损
褐铁矿	矿粉F	59.01	5.63	0.03	0.09	2.60	0.00	8.77	8.07
	矿粉K	58.76	5.57	0.10	0.27	2.80	0.00	5.50	0.00
半褐铁矿	矿粉P	62.14	3.67	0.05	0.12	2.19	0.00	8.44	5.77
	矿粉M	61.30	4.56	0.03	0.11	2.32	0.00	8.28	6.14
	矿粉G	60.69	4.98	0.06	0.12	3.23	0.00	7.79	5.38
赤铁矿	矿粉B	62.68	4.52	0.05	0.09	1.56	0.00	8.71	3.90
	矿粉N	62.58	4.24	0.07	0.16	2.25	0.00	7.50	4.16
	矿粉Y	57.00	7.00	0.13	0.19	5.50	0.00	10.00	3.86
磁铁矿	矿粉MK	63.62	9.22	0.22	0.54	0.72	0.00	2.26	-0.32
	硼镁精粉	54.51	3.97	0.25	10.54	0.33	5.18	9.76	2.96
固废	均质化料	46.17	5.0	6.75	1.68	2.89	0.00	7.74	3.00

表 2 试验参数

Table 2 Experimental parameters

料层厚度/mm	杯体直径/mm	点火负压/kPa	烧结负压/kPa	点火温度/°C	一混时间/min	二混时间/min	铺底料/kg
800	300	-7	-12	1 050	5	5	3.5

烧结废气温度达最高点开始下降时为烧结终点温度。烧结完成后,对烧结矿取样做落下试验,高度为 2 m,让烧结矿落下 2 次,接着进行筛分,以 >5 mm 作为成品矿,并按照《高炉和直接还原给料用铁矿石转鼓和耐磨指数测定》(ISO 3271—2015)等比例称量粒度在 [40,25) mm、[25,16) mm、[16,10] mm 烧结矿 15 kg,在内径为 1 000 mm,内宽为 500 mm 的转鼓中转动 200 转后,用孔宽为 6.3 mm 的方孔筛进行筛分,对 >6.3 mm 进行称重并计算转鼓指数;最后按照《铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)和《铁矿石 还原性的测定方法》(GB/T 13241—2017)测定烧结矿低温粉化指数和还原性指数。

试验具体配矿比例如表 3 所示,结合表 1,根据硼镁精粉的全铁含量较低, MgO 含量和 B₂O₃ 含

量高的特征,试验中,同时结合铁矿粉液相流动性和同化性^[12-13],使用硼镁精粉替换矿粉 M、矿粉 P,替换比例分别为 4%,6%,8%,碱度通过生石灰控制在 2.1, MgO 通过白云石控制在 2.3%,开展研究。

2 试验结果与分析

2.1 烧结指标

不同配矿方案烧结指标和混合料粒度组成分别见表 4、5。由表 4、5 可知,随着硼镁精粉替代比例的增加,烧结速度和利用系数呈上升趋势,烧结速度由 17.67 mm/min 上升到 18.80 mm/min,利用系数由 1.28 t/(m²·min) 上升到 1.40 t/(m²·min),说明硼镁精粉替代比例增加更有利于改善烧结过程透气性。此外,混合料的粒度整体得到了改善,平均粒径增大,更有利于烧结矿的制粒效果的提升。

表 3 试验配矿方案(质量分数)

Table 3 Experimental ore blending scheme

%

配矿方案	硼镁精粉	矿粉 M	矿粉 P	矿粉 M	矿粉 N	矿粉 Y	矿粉 MK	均质化料
1	4	20	14	22	18	7	10	5
2	6	20	13	20	18	8	10	5
3	8	20	13	18	18	8	10	5

表 4 不同配矿方案烧结指标

Table 4 Sintering indicators for different ore blending schemes

配矿方案	烧结速度/(mm·min ⁻¹)	终点温度/°C	固体燃料消耗/(kg·t ⁻¹)	利用系数(t·m ⁻² ·min ⁻¹)	转鼓强度/%
1	17.67	591.40	55.34	1.28	78.43
2	17.57	629.80	57.34	1.28	78.00
3	18.80	554.80	56.19	1.40	77.68

表 5 不同配矿方案混合料粒度组成

Table 5 Particle size composition of mixed materials in different ore blending schemes

配矿方案	混合料的粒度组成(湿)(质量分数)/%						平均粒径/mm
	>10 mm	(8,10] mm	(5,8] mm	(3,5] mm	[1,3] mm	<1 mm	
1	8.15	13.93	53.92	18.33	5.67	0	6.42
2	8.37	13.58	55.06	17.67	5.32	0	6.45
3	9.13	14.06	54.14	18.12	4.55	0	6.51

此外, 随着硼镁精粉使用比例增加, 转鼓强度由 78.43% 下降至 77.68%, 其主要原因是由于 B_2O_3 熔点低, 在烧结过程中可与许多氧化物形成低熔点化合物, 易于形成液相^[14]。负压抽风条件下, 高温冷却速度快, 液相析出的矿物来不及结晶或者结晶不完全, 易形成脆性大的玻璃质, 同时由于流动性的增强, 烧结矿的黏结相变薄, 易形成薄壁状的烧结矿, 从而导致转鼓强度下降。

2.2 烧结矿冶金性能与粒度

不同配矿方案烧结矿低温粉化与还原性指标如表 6 所示, 烧结矿矿相结构如图 1 所示, 粒度分布如表 7 所示。

表 6 不同配矿方案烧结矿低温还原粉化与还原性指标(质量分数)

Table 6 Low temperature reduction pulverization and reducibility indicators of sintered ore with different ore blending schemes %

配矿方案	低温还原粉化指数			还原性
	>6.3 mm	>3.15 mm	<0.5 mm	
1	54.71	73.45	7.22	75.02
2	51.80	72.18	8.55	75.13
3	45.03	69.92	7.59	75.49

由表 6 可以看出, 随着硼镁精粉的增加, 还原性略微增加, 由 75.02% 上升至 75.49%, 上升了 0.47%; 低温还原粉化指数(>3.15mm)呈下降

趋势, 由 73.45% 下降至 69.92%, 下降了 3.53%。可见, 在硼镁精粉配加质量分数为 4% 和 6% 时, 烧结矿还原性和低温还原粉化指标可满足高炉生产需要。

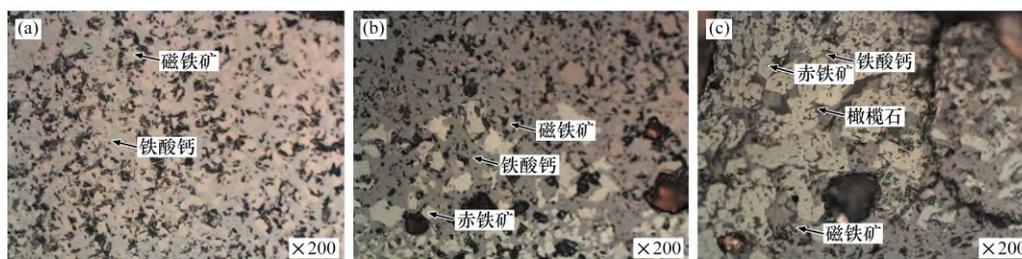
由图 1 可知, 随着硼镁精粉配加比例的增加, 烧结矿孔隙与裂缝增加, 在机械力作用下碎裂粉化概率加大, 将导致低温还原粉化出现明显的下降。这主要是因为随着硼镁精粉配加比例的提升, 液相大量析出, 导致铁氧化物的大量包裹, Fe_2O_3 的结晶体增加, 由赤铁矿(方晶系六方晶格)变成磁铁矿(等轴晶系立方晶格), 还原造成了晶格的扭曲, 产生极大的内应力所致。

由表 7 可以看出, 使用硼镁精粉替代矿粉 M、矿粉 P, 随着配加硼镁精粉比例的增加, <5 mm 的粒级呈现上升趋势, 成品矿中 [10, 5] mm 粒级也有不同程度的上升。

2.3 综合炉料熔滴性能

不同配矿方案综合炉料熔滴性能如表 8 所示。其中, 综合炉料配比为 72% 烧结矿 + 16% 球团矿 + 12% 块矿。

由表 8 可知, 硼镁精粉的加入对综合炉料的熔滴性能影响较大, 加入硼镁精粉后, 随着烧结矿硼镁精粉使用比例的提升, 软熔层的厚度逐渐加大, 由 22.58 mm 提升至 23.94 mm, 软熔温度区间变大, 由 366 °C 增加到 382 °C, 压差由



(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3

图 1 不同配矿方案烧结矿矿相

Fig. 1 Sintered ore phases under different ore blending schemes

表 7 不同配矿方案烧结矿粒度分布(质量分数)

Table 7 Particle size distribution of sintered under different ore blending schemes %

配矿方案	>40 mm	[40, 25) mm	[25, 16) mm	[16, 10) mm	[10, 5] mm	<5 mm
1	8.74	26.30	28.32	18.73	17.92	14.88
2	10.13	23.69	26.71	20.95	18.51	15.16
3	9.17	25.86	26.56	20.24	18.17	15.41

表 8 不同配矿方案综合炉料熔滴性能

Table 8 Comprehensive droplet performance of furnace materials with different ore blending schemes

配矿方案	软化开始/°C	软化终了/°C	软化区间/°C	熔融开始温度/°C	熔融终了温度/°C	熔融区间/°C	ΔP_m /kPa	软熔层厚/mm	$S/(kPa \cdot ^\circ C)$
1	1 019	1 137	118.0	1 206.5	1 385	178.5	9.42	22.58	930.1
2	1 020	1 154	134.0	1 195.0	1 376	181.0	10.67	22.73	1 083.9
3	1 004	1 177	173.0	1 207.0	1 386	179.0	11.96	23.94	1 130.2

9.42 kPa提升至 11.96 kPa。这主要是因为硼镁精粉含有大量的硼和镁，在烧结矿中硼可以提高镁的活性，使得大量的镁进入正硅酸钙晶格，生成钙镁橄榄石，其熔点较高，在高温下会保持稳定的物理状态，影响熔滴的流动性和黏度。因此，过高的硼镁精粉使用比例会导致高炉下部压差增大，影响高炉顺行。因此，加入硼镁精粉的比例应不超过 6%。

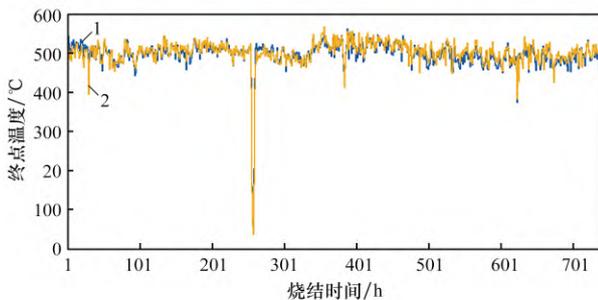
3 工业生产应用

以上试验研究表明，当硼镁精粉配加比例 $\leq 6\%$ 时，烧结矿的转鼓强度、冶金性能、粒度组成、熔滴性能可以满足高炉生产的需要，在此研究的基础上，本文进一步开展了烧结配加硼镁精粉的工业应用。

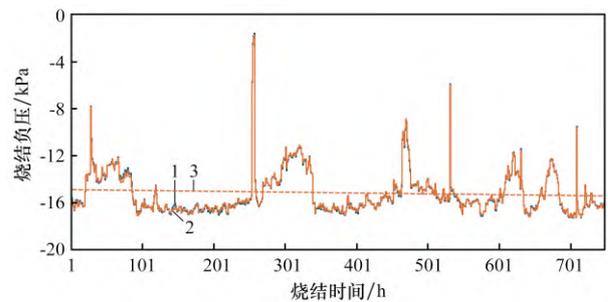
3.1 烧结生产应用

烧结配加硼镁精粉的工业应用在中天钢铁两台 330 m² 烧结机上进行，配加硼镁精粉质量分数为 6%。

配加硼镁精粉前后的终点温度和烧结负压分布如图 2、3 所示。由图 2、3 可知，配加硼铁精粉后终点温度基本无变化，烧结机风箱终点温度



1—20# 风箱南侧；2—20# 风箱北侧。

图 2 330 m² 烧结机配加硼镁精粉前后终点温度变化曲线Fig. 2 End point temperature change curve of 330 m² sintering machine before and after adding boron magnesium powder

1—总管负压(北)；2—总管负压(南)；

3—线性[总管负压(南)]。

图 3 330 m² 烧结机配加硼镁精粉前后烧结负压变化曲线Fig. 3 Negative pressure variation curve of 330 m² sintering machine before and after adding boron magnesium powder

普遍在 470 ~ 530 °C 之间；从烧结负压曲线上看，配加硼铁精粉后负压整体略有下降，但相对较为平稳。

表 9 为配加硼镁精粉前后实际生产烧结矿转鼓强度、低温还原粉化和还原性指数平均值。由表 9 可知，配加硼镁精粉前转鼓强度为 78.47%，工业生产后为 78.14%，配用硼铁精粉后转鼓指数有所下滑；配加硼铁精粉后还原性略微增加，低温还原粉化指数 (> 3.15 mm) 由 74.19% 降至 69.28%。总体来看，硼镁精粉工业应用结果与铁前配矿实验室试验结论基本一致。

表 9 330 m² 烧结机配加硼镁精粉前后指标(质量分数)Table 9 Index of 330 m² sintering machine before and after adding boron magnesium powder %

项目	转鼓强度	还原性指数	低温还原粉化指数
试验前	78.47	77.19	74.19
试验后	78.14	77.82	69.28

3.2 高炉生产应用

高炉配加硼镁精粉烧结矿的工业生产主要应用于中天钢铁(南通) 1# 2 400 m³ 高炉、2# 2 400 m³ 高炉、3# 2 300 m³ 高炉，表 10 ~ 12 分别为三个高炉配

加硼镁精粉烧结矿前后粒级变化结果。由表 10~12 可知, 1[#]、2[#]、3[#]高炉 [5, 10] mm 比例前后对比分别增加 0.35%、0.8%、1.04%, 整体粒度大小均有所下降。

表 10 1[#]2 400 m³ 高炉配加硼镁精粉烧结矿前后粒级变化结果(质量分数)

Table 10 Results of particle size changes before and after adding boron magnesium fine powder sintering ore to 1[#]2 400 m³ blast furnace %

项目	>40 mm	[40, 25) mm	[25, 10) mm	[10, 5] mm	<5 mm
使用前	6.87	17.55	49.93	24.23	1.42
使用后	7.39	17.59	48.64	24.58	1.66

表 11 2[#]2 400 m³ 高炉配加硼镁精粉烧结矿前后粒级变化结果(质量分数)

Table 11 Results of particle size changes before and after adding boron magnesium fine powder sintering ore to 2[#] 2 400 m³ blast furnace %

项目	>40 mm	[40, 25) mm	[25, 10) mm	[10, 5] mm	<5 mm
使用前	8.80	18.24	48.46	23.31	1.19
使用后	9.30	18.15	46.61	24.11	1.33

表 12 3[#]2 300 m³ 高炉配加硼镁精粉烧结矿前后粒级变化结果(质量分数)

Table 12 Results of particle size changes before and after adding boron magnesium fine powder sintering ore to 3[#] 2 300 m³ blast furnace %

项目	>40 mm	[40, 25) mm	[25, 10) mm	[10, 5] mm	<5 mm
使用前	8.93	20.49	47.04	22.45	1.09
使用后	8.73	19.79	46.84	23.49	1.15

硼镁精粉烧结矿使用期间三座高炉并未出现大幅度的渣皮脱落现象, 相应的高炉风量与压差变化分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可知, 三个高炉因烧结矿粒度下降均出现负压略有上升的情况。高炉风量整体变化不大, 其它指标保持良好。因此, 在烧结矿原有硼镁精粉配加比例不变的前提下, 后续高炉生产中可持续配入该烧结矿实现降本增效。

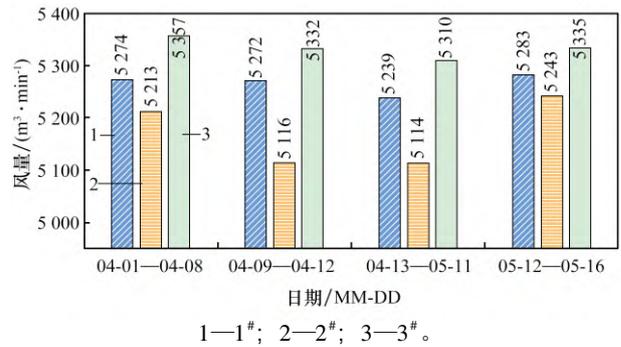


图 4 高炉配加硼镁精粉烧结矿前后高炉风量变化

Fig. 4 Changes in blast furnace airflow before and after adding boron magnesium fine powder sintering ore to blast furnace

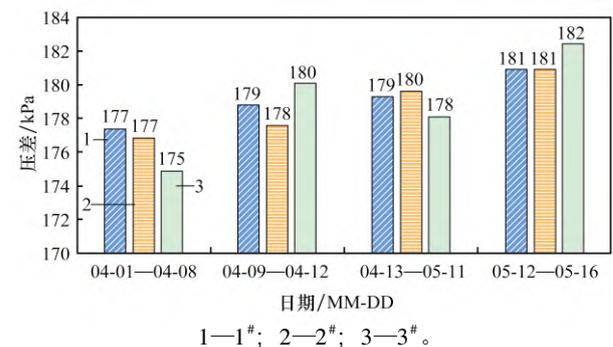


图 5 高炉配加硼镁精粉烧结矿前后高炉压差变化

Fig. 5 Changes in blast furnace pressure difference before and after adding boron magnesium fine powder sintering ore to blast furnace

4 结 论

(1) 硼镁精粉使用比例由 4% 提升到 8%, 烧结速度和利用系数呈上升趋势, 有利于改善烧结过程透气性; 转鼓强度有所下降, 低温还原粉化指数 (>3.15 mm) 呈下降趋势, 由 73.45% 下降至 69.92%, 下降了 3.53%; 还原性呈略微上升, 由 75.02% 上升至 75.49%, 上升了 0.47%; 烧结矿粒级呈现下降的趋势, 综合炉料熔滴性能特征值逐渐变差, 软熔滴落区间变宽, 软熔层厚变厚。硼镁精粉配加比例 ≤ 6% 的情况下, 烧结矿的转鼓强度、冶金性能、粒度组成、熔滴性能可以满足高炉生产的需要。

(2) 工业生产配加 6% 的硼镁精粉用于烧结生产, 终点温度变化不大; 烧结负压整体略有下降但相对较为平稳; 转鼓强度有所下降, 配加硼镁精粉前转鼓强度为 78.47%, 工业生产后为 78.14%;

配加硼铁精粉后还原性略微增加,而低温还原粉化指数($>3.15\text{ mm}$)由 74.19% 降至 69.28%。

(3) 硼镁精粉烧结矿应用于高炉生产后,高炉整体粒度大小有所下降,出现压差略有上升的情况。高炉风量整体变化不大,高炉其它指标保持良好,炉况良好。在烧结矿原有硼镁精粉配加比例不变的前提下,高炉生产中可持续配入该烧结矿使用,作为降本增效手段。

参考文献:

- [1] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社, 2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.
- [2] 张显鹏,郎建峰,崔传孟,等. 低品位硼铁矿在高炉冶炼过程中的综合利用[J]. 钢铁,1995,30(12):9-11.
ZHANG Xianpeng, LANG Jianfeng, CUI Chuanmeng, et al. Comprehensive utilization of low grade ludwigite ore with blast furnace smelting [J]. Iron & Steel, 1995, 30(12):9-11.
- [3] 郑学家. 硼铁矿加工[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
ZHENG Xuejia. Boron iron ore processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press 2009.
- [4] 余建文,高鹏,祝昕冉,等. 含硼铁精矿综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用,2014(6):1-5.
YU Jianwen, GAO Peng, ZHU Xinran, et al. New advances of study on comprehensive utilization of boron-bearing iron concentrate [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources 2014(6):1-5.
- [5] 曲洪祥,郭伟静,张永,等. 辽东地区硼矿床成因探讨与硼矿远景区预测[J]. 地质与资源,2005,14(2):132-138.
QU Hongxiang, GUO Weijing, ZHANG Yong, et al. Genesis study and prospective prediction for boron deposits in eastern Liaoning [J]. Journal of Precious Metallic Geology 2005, 14(2):132-138.
- [6] 黄桂香,甄彩玲,张举成,等. 配加硼镁铁矿生产镁质球团的工业试验研究[J]. 烧结球团,2016,41(6):48-52.
HUANG Guixiang, ZHEN Cailing, ZHANG Jucheng, et al. Industrial test research of magnesia pellet production with addition of boric magnesium iron concentrate [J]. Sintering and Pelletizing 2016, 41(6):48-52.
- [7] 王广,薛庆国,王静松. 硼铁精矿含碳球团还原过程强化[J]. 烧结球团,2016,41(6):31-37.
WANG Guang, XUE Qingguo, WANG Jingsong. Strengthening the reduction process of carbon-containing pellet of boron-bearing iron concentrate [J]. Sintering and Pelletizing 2016, 41(6):31-37.
- [8] 付小佼,储满生. 含硼铁精矿用于巴润精矿氧化球团生产的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(1):52-56.
FU Xiaojiao, CHU Mansheng. Experimental study on preparation of oxidized barun iron ore pellets with boron-bearing iron concentrate addition [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science) 2015, 36(1):52-56.
- [9] 田筠清,青格勒,张彦,等. 含硼矿粉制备球团矿的特点及应用方法[J]. 中国冶金,2020,30(4):18-22.
TIAN Yunqing, QING Gele, ZHANG Yan, et al. Characteristics of pellet preparation with boron-containing concentrate and application method [J]. China Metallurgy, 2020, 30(4):18-22.
- [10] 王远利. 配加硼铁矿粉是改善烧结矿质量的有效措施[J]. 山西冶金,1994,17(2):25-27.
WANG Yuanli. Adding boron-iron ore powder is an effective measure to improve sinter quality [J]. Shanxi Metallurgy, 1994, 17(2):25-27.
- [11] 王春来,潘文,辛越,等. 硼镁铁精粉的烧结性能试验及工业应用[J]. 烧结球团,2024,49(1):72-79.
WANG Chunlai, PAN Wen, XIN Yue, et al. Sintering character test and industrial application of ludwigite powder [J]. Sintering and Pelletizing 2024, 49(1):72-79.
- [12] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):254-257.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3):254-257.
- [13] 吴胜利,裴元东,陈辉,等. 铁矿粉烧结液相流动性评价[J]. 北京科技大学学报,2008,30(10):1095-1100.
WU Shengli, PEI Yuandong, CHEN Hui, et al. Evaluation of iron ore powder sintering liquid phase flowability [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(10):1095-1100.

(下转第 125 页)

- Experimental research on carbothermal reduction of converter fly ash [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(6): 76–83.
- [12] MATSUKEVICH I, KULINICH N, ROMANOVSKI V. Direct reduced iron and zinc recovery from electric arc furnace dust [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 2022 97(12): 3453–3458.
- [13] 刘纲, 干勇, 李士琦, 等. 高炉含锌粉尘还原性影响因素分析[J]. *中国冶金* 2019 29(10): 20–25.
LIU Gang, GAN Yong, LI Shiqi, et al. Analysis of reducing factors of zinc-bearing blast furnace dust [J]. *China Metallurgy* 2019 29(10): 20–25.
- [14] 陈栋. 含多金属硫酸渣制备预还原球团工艺及机理研究[D]. 长沙: 中南大学 2012.
CHEN Dong. Study on the preparation process and mechanism of pre-reduced pellets from multi-metal sulfate slag [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [15] 胡佩伟, 胡超, 胡兵, 等. 钒钛磁铁海砂矿还原过程有价元素变化规律的研究[J]. *钢铁钒钛* 2021 42(5): 10–17.
HU Peiwei, HU Chao, HU Bing, et al. Study on the regulation mechanism of valuable elements in the reduction process of vanadium-titanium magnetite marine placer [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium* 2021 42(5): 10–17.
- [16] 李洋, 张建良, 袁骥, 等. 铁酸锌碳热还原动力学及反应机理[J]. *工程科学学报* 2023 45(1): 82–90.
LI Yang, ZHANG Jianliang, YUAN Xiang, et al. Kinetics and reduction mechanism of non-isothermal analysis carbothermal reduction of zinc ferrite [J]. *Chinese Journal of Engineering* 2023 45(1): 82–90.
- [17] 柴志鹏, 丁学勇, 居天华, 等. 含碳球团气固协同还原特点及动力学研究[J]. *材料与冶金学报*, 2021, 20(4): 239–245.
CHAI Zhipeng, DING Xueyong, JU Tianhua, et al. Study on the characteristics and kinetics of gas-solid reduction of iron ore-coal composite pellets [J]. *Journal of Materials and Metallurgy* 2021 20(4): 239–245.
- [18] CHAI Y F, FAN Y J, LI Z C, et al. Kinetics of reduction in stages of pellets prepared from the Bayan Obo iron ore concentrate [J]. *ACS Omega* 2022 7(9): 7759–7768.
- [19] 明守禄, 张芳, 彭军, 等. 氧化铁皮非等温碳热还原动力学研究[J]. *粉末冶金工业* 2023 33(5): 17–24.
MING Shoulu, ZHANG Fang, PENG Jun, et al. Study on the kinetics of non-isothermal carbon thermal reduction of iron oxide sheet [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2023, 33(5): 17–24.

(上接第 60 页)

WU Shengli, PEI Yuandong, CHEN Hui, et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ore in sintering [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008 30(10): 1095–1100.

- [14] 郝德胜. 含硼复合添加剂对烧结矿性能和烧结的影响[D]. 沈阳: 东北大学 2008: 15.
HAO Desheng. Study on the experiment and mechanism of boracic complex additive to the sinter [D]. Shenyang: Northeastern University 2008: 15.

(上接第 94 页)

- [26] RUSSELL B C, TORRALBA A, MURPHY K P, et al. LabelMe: A database and web-based tool for image annotation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008 77(1): 157–173.
- [27] ABRÀMOFF M D, MAGALHÃES P J, Ram S J. Image processing with Image J [J]. *Biophotonics international*, 2004 11(7): 36–42.
- [28] PAN S J, YANG Q. A survey on transfer learning [J]. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 2010 22(10): 1345–1359.