硼镁铁精粉的烧结性能试验及工业应用

王春来[1]，潘 文[2]，辛 越[1]，杨志宇[1]，贺道山[1]
（1. 首钢迁安钢铁有限责任公司，河北 唐山 064400；2. 首钢集团有限公司 a. 技术研究院；
b. 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室，北京 100043）

摘要：为了拓展可用铁矿资源的来源途径，本文对一种含硼、镁的铁矿资源（丹东硼镁铁精粉）的烧结性能进行试验研究，并开展相关工业应用试验。结果表明：硼镁铁精粉的同化性能与杨迪粉接近，液相流动性能与 PB 粉接近；在现有烧结原料和工艺条件下，硼镁铁精粉等比例替代地方磁精粉，有利于提高烧结矿的成品率，降低固体燃料消耗，改善烧结矿的低温还原粉化性能。该铁精粉配比低于 10% 对提高烧结机利用系数和烧结矿转鼓强度有利，高于 10% 对上述两个指标有负面影响。工业应用试验结果表明，配加 3% 的硼镁铁精粉后，烧结矿的全铁品位略有降低，烧结矿中 B_2O_3 质量分数增加，达到 0.56%；烧结矿的粒度组成得到优化，（5，10］mm 和≤5 mm 的粒级占比分别降低 0.79% 和 1.29%，＞40 mm 的粒级占比增加 3.01%；烧结机利用系数由 1.60 t/（m^2·h）提高到 1.62 t/（m^2·h），烧结矿转鼓强度提高 2.22 个百分点，低温还原粉化指数（＞3.15 mm）由 58.80% 上升至 60.29%，烧结矿产、质量指标均有明显改善。

关键词：硼；镁；铁精粉；烧结性能；同化性；液相流动性；低温还原粉化率
中图分类号：TF046.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764（2024）01－0072－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.010

Sintering character test and industrial application of ludwigite powder

WANG Chunlai[1]，PAN Wen[2]，XIN Yue[1]，YANG Zhiyu[1]，HE Daoshan[1]
（1. Shougang Qian'an Iron and Steel Co.，Ltd.，Tangshan 064400，Hebei，China；
2. Shougang Group Corporation a. Research Institute of Technology；b. Beijing Key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron & steel Production Technology，Beijing 100043，China）

Abstract：In order to expand the range of available iron ore resources，the sintering character of an iron ore resource containing boron and magnesium（Dandong ludwigite powder）are experimentally studied，and related industrial application tests are carried out. The results show that the assimilation performance of ludwigite powder is close to that of Yangdi powder，and the liquid phase fluidity is close to that of PB powder. Under the raw materials of existing sintering and process condition，ludwigite powder and other proportions replace local magnetic powder，which is conducive to improving the yield of sinter，reducing solid fuel consumption，and improving the low-temperature reduction and pulverization performance of sinter. The ratio of iron powder is less than 10%，which is beneficial to improve the utilization coefficient of sintering machine and the drum strength of sinter，and higher than 10%，which has a negative impact on the above two indicators. The results of industrial application test show that，after the addition of 3% ludwigite powder，the total iron grade of the sinter decreases slightly，and the B_2O_3 mass fraction in the sinter increases to 0.56%，the particle size composition of the sinter is optimized，the proportion of（5，10］mm and ≤5 mm decreases by 0.79% and 1.29%，respectively，and the proportion of ＞40 mm increases by 3.01%，and the utilization coefficient of the sintering machine increases from 1.60 t/（m^2·h）to 1.62 t/（m^2·h）. The drum strength of the sinter increases by 2.22%，and the low-temperature

收稿日期：2022－04－08；**修回日期：**2022－09－08
作者简介：王春来（1984—），男，工程师，从事烧结生产工艺技术及优化配矿方面的研究工作。

reduction pulverization index（ >3.15 mm）increases from 58.80% to 60.29%，and the sinter yield and quality indexes are significantly improved.

Key words：boron；magnesium；iron powder；sintering character；assimilability；liquid-phase fluidity；low temperature reduction pulverization rate

硼是元素周期表中第三主族元素，主要化合物有硼酸（H_3BO_3）、硼砂（$Na_2B_4O_7\cdot10H_2O$）、硼化钠（$NaBH_4$），其还以方硼石（$B_7ClMg_3O_{13}$）、白硼钙石（$4CaO\cdot5B_2O_3\cdot7H_2O$）、硼镁铁矿［$(Mg,Fe)_2Fe(BO_3)O_2$］等矿物形态存在于自然界中[1]。辽宁省丹东地区拥有丰富的硼镁铁矿资源[2]，其硼储量约占全国总储量的 58%。该地区拥有价值很高的大型硼矿床，硼镁铁矿提硼后的副产品硼镁铁精粉可作为含铁原料用于烧结或球团工艺[3]。硼作为结晶化学稳定剂中的典型元素，配入烧结工艺可使烧结矿中的各种矿物结构更稳定，其晶相在 900 ℃以内很难发生改变，从而可以降低烧结成矿结晶过程中的内应力。国内一些钢铁企业等进行了配加硼镁铁矿或硼泥的工业试验，如：鞍钢烧结配加硼矿粉后，烧结机机尾断面上的结块较大，台车之间的烧结矿呈不规则断面，且相互牵扯、大片脱落，烧结矿的转鼓指数提高 4.4 个百分点，粉末减少 4.00 ~ 10.50 个百分点，存放 10 d 基本不粉化，<5 mm 粒级占比不超过 5%；邢钢烧结矿的转鼓强度提高 1.30 ~ 2.00 个百分点，筛分指数下降 3.07 ~ 10.74 个百分点，10 ~ 25 mm 粒级占比提高 6.90 ~ 13.00 个百分点，<5 mm 粒级占比下降 3.87 ~ 15.24 个百分点，900 ℃还原度指数提高 7.24%，500 ℃还原粉化率降低 7.74%[4]。李永清[5]比较了含硼铁精矿、硼泥对球团矿的强度及还原性变化的影响，结果表明：当温度为 1 150、1 200 ℃时，含硼铁精矿焙烧球的强度分别为 1 513.3、4 500 N/P，硼泥焙烧球的强度分别为 1 133.3、3 013.3 N/P，其强度明显加大，还原性显著提高。由此可知，将硼镁铁精粉作为添加物时，球团工艺具有生球质量提高、焙烧温度降低、贮存时间延长等优点。

近年来，全球铁矿价格处于高位，钢铁企业降本增效压力巨大，多途径开发可用铁矿资源、保障原料供应稳定成为各钢铁企业的共识。硼镁铁精粉作为一种低价的特种铁矿资源，也逐渐引起钢铁企业的关注。为探索现有原（燃）料和工艺条件下硼镁铁精粉对烧结矿质量和烧结指标的影响，本文通过研究硼镁铁精粉的同化温度、液相流动性指数等参数，并开展烧结杯试验和工业应用试验，以期为高效利用硼镁铁精粉进行烧结生产提供参考。

1　试验原料和方法

1.1　试验原料

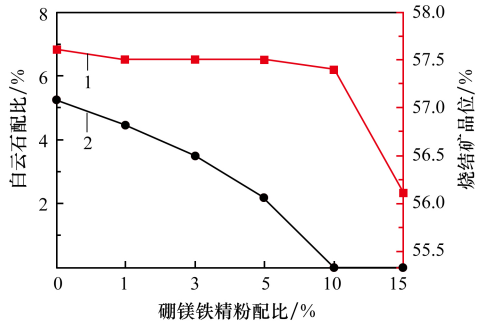
试验用硼镁铁精粉、PB 粉、杨迪粉、富矿粉 C、精矿粉 D（地方磁精粉）、含铁料 E 的化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：硼镁铁精粉属于磁铁精粉，其最大的特点是镁和硼含量高，MgO 和 B_2O_3 的质量分数分别为 12.86% 和 5.50%；全铁品位相对较低，为 52.21%。试验中，使用硼镁铁精粉等比例替代全铁品位为 65.24% 的精矿粉 D，最高替代占比为 10%。烧结矿中 MgO 质量分数通过配加白云石进行调整，按 2.0% ±0.05% 控制。

值得注意的是，虽然硼镁铁精粉的全铁品位远低于精矿粉 D，但是其 SiO_2 质量分数低于精矿粉 D，同时含有 12% 的 MgO，在替代精矿粉 D 的同时，可以减少白云石的用量。为了明确硼镁铁精粉配比对白云石配比和烧结矿品位的影响大小，本文建立烧结配料计算表（按照烧结矿生产所需的各种矿粉、熔剂、燃料的化学成分、烧损、配比来计算目标烧结矿化学成分的计算表格）来进行配料计算，将铁矿粉、硼镁铁精粉、白云石的化学成分等参数输入计算表，通过调整硼镁铁精粉（0 ~ 15%）和矿粉 D 的配比，同时保持目标烧结矿的化学成分不变，计算得到硼镁铁精粉对白云石配比和烧结矿品位的变化关系，结果如图 1 所示。由图 1 可知：当配比在 10% 以内时，硼镁铁精粉替代精矿粉 D 对烧结矿的铁品位没有负面影响；只有当配比超过 10% 时，硼镁铁精粉中的 MgO 完全取代白云石，才会使烧结矿的品位显著降低。

表 1 试验原料的化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and burning loss of raw materials %

物料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	B_2O_3	烧损
硼镁铁精粉	52.21	18.82	4.51	0.16	0.67	12.86	5.50	2.49
PB 粉	63.73	0.61	3.26	0.07	1.78	0.10	0.00	3.42
杨迪粉	57.58	0.22	4.36	0.00	1.22	0.07	0.00	11.21
富矿粉 C	66.45	1.36	1.53	0.02	0.90	0.07	0.00	1.27
精矿粉 D	65.24	26.87	6.33	0.44	1.10	0.46	0.00	-2.08
含铁料 E	56.68	6.79	5.24	8.76	1.68	1.94	0.00	0.19



1—烧结矿品位；2—白云石配比。

图 1 硼镁铁精粉配比对白云石用量和烧结矿品位的影响

Fig. 1 Effect of the ratio of boron magnesium iron concentrate on dolomite dosage and sinter grade

1.2 试验方法

1.2.1 烧结高温基础特性试验

铁矿粉的同化性和液相流动性分别由最低同化温度、液相流动性指数来表征。铁矿粉的同化温度越低，表明该矿粉的同化性越好，其在烧结矿过程中越容易与混合料中的熔剂发生反应，从而完成烧结液相的产生；液相流动性指数越大，表明该种矿粉在烧结过程中产生的液相流动性越好[6]。液相流动性的检测一般在 3 个温度值下进行，从而确定不同烧结阶段液相的流动性能好坏。本文利用红外烧结基础特性炉来考察硼镁铁精粉的同化性和液相流动性。

(1) 铁矿粉同化性试验方法[7]：将铁矿粉放入 105 ℃干燥箱中烘干 2 h，将烘干后的铁矿粉磨制成粒度 <0.015 mm 的铁矿粉末，然后使用压力模具将 0.8 g 的铁矿粉末制成直径为 8 mm 的小饼试样；另取 2.0 g 化学纯试剂 CaO，压制成直径为 25 mm 的薄片试样，然后将铁矿粉小饼试样置于 CaO 薄片试样之上，放入红外烧结基础特性炉中进行试验；采取烧结实际的升温速度制度对试样进行加热，当铁矿粉小饼与 CaO 小饼的接触面上生成略大于铁矿粉小饼 1 mm 的反应物时，定义此时的试验温度即为铁矿粉的同化温度。

(2) 铁矿粉液相流动性试验方法[8-9]：将铁矿粉放入 105 ℃干燥箱中烘干 2 h，将烘干后的铁矿粉磨制成粒度 <0.015 mm 的铁矿粉末，取 10 g 铁矿粉末与若干克(根据铁矿粉中 SiO_2 含量确定)化学纯试剂 CaO 充分混匀，设置混合后试样的二元碱度为 4.0；然后取 0.8 g 混匀试样，使用压力模具将其制成直径为 8 mm 的小饼试样(定义此时的小饼试样面积为 S_1，mm^2)，放入红外烧结基础特性炉中进行试验；采取烧结实际的升温速度制度对试样进行加热，当达到设定温度(1 250、1 280、1 310 ℃)后，停止加热并使试样迅速冷却；试验结束后取出烧结小饼，测定流动液相的垂直投影面积(S_2，mm^2)。液相流动性指数(ρ)按式(1)进行计算。

$$\rho = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \quad (1)$$

1.2.2 烧结杯试验

试验所用烧结杯的直径为 300 mm，料层厚度为 750 mm。烧结杯试验参数如表 2 所示。每组烧结试验结束后，计算各项技术经济指标，并按照《高炉和直接还原给料用铁矿石转鼓和磨损指数的测定》(ISO 3271—2007)、《高炉炉料用铁矿石低温还原粉化率的测定动态试验法》(GB/T 24204—2009)检测烧结矿的转鼓强度和低温还原粉化率。

2 试验结果与讨论

2.1 硼镁铁精粉的烧结高温基础特性

表 2　烧结杯试验主要参数

Table 2　Main parameters of sintering cup test

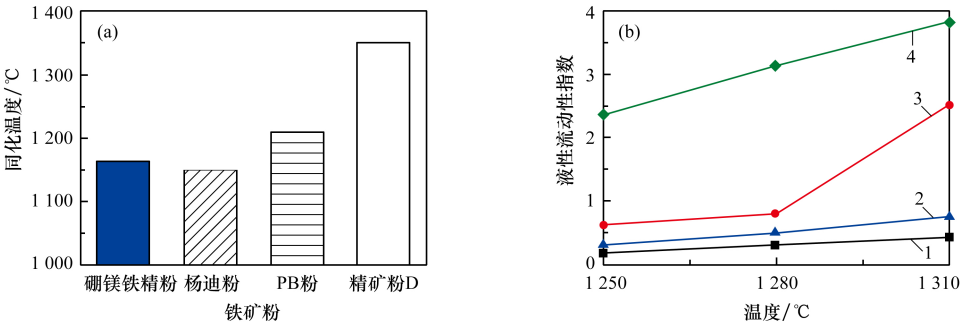
烧结杯直径/mm	铺底料/kg	点火温度/℃	烧结负压/kPa	料层厚度/mm
300	4	1 050	16	750
点火负压/kPa	点火时间/s	落下次数/[次·(4 m)$^{-1}$]	碱度	混合料水分/%
6	210	2	2.0 ± 0.05	7.0 ± 0.2

硼镁铁精粉和几种主流矿粉的同化性和液相流动性检测结果如图 2 所示。由图 2 可知：硼镁铁精粉的最低同化温度为 1 100 ℃左右，与同化性能最好的杨迪粉接近，明显优于精矿粉 D，其原因是硼镁铁精粉中 B_2O_3 易生成低熔点的矿物；从液相流动性来看，硼镁铁精粉处于较低水平，与 PB 粉接近，在 1 280 ℃以下时其与精矿粉 D 接近，在 1 310 ℃以下时明显低于精矿粉 D。总体来看，硼镁铁精粉属于同化性好、液相流动性稍差的铁矿粉，其高温烧结性能整体好于精矿粉 D。

2.2　硼镁铁精粉对烧结矿质量和烧结指标的影响

烧结配入硼镁铁精粉后，垂直烧结速度、烧结机利用系数、烧结矿成品率、工序固体燃料消耗变化如图 3 所示，烧结矿转鼓强度和粒度组成变化如图 4 所示。由图 3 可以看出，随着硼镁铁精粉的配入，垂直烧结速度和烧结机利用系数呈明显升高趋势，说明硼镁铁精粉相对铁精粉 D 更有利于改善烧结过程透气性，不过硼镁铁矿配入量大于 10% 后，烧结机利用系数有下降趋势。随着硼镁铁精粉配比的提高，烧结矿的成品率有明显增加，固体燃料消耗相应降低。

由图4(a)可以看出，烧结矿的转鼓强度变化趋势与烧结机利用系数类似，配比低于 10% 对提高烧结矿强度有利，超过10% 后烧结矿转鼓强度

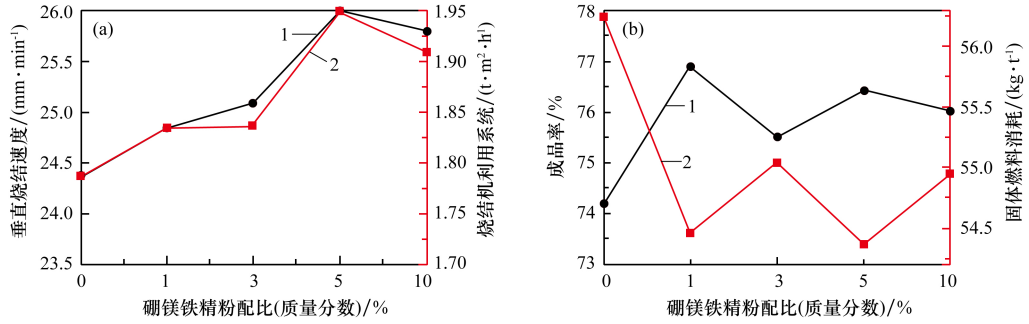


（a）同化温度；（b）液相流动性指数

1—硼镁铁精粉；2—PB 粉；3—精矿粉 D；4—杨迪粉。

图 2　硼镁铁精粉的同化性和液相流动性

Fig. 2　Assimilability and liquid phase fluidity of boron magnesium iron concentrate

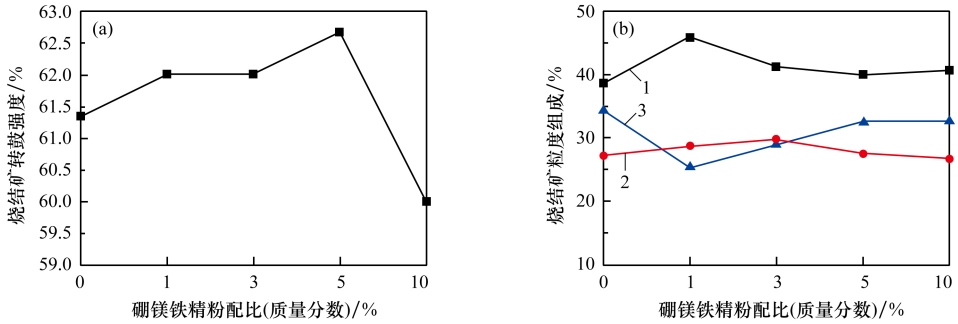


（a）垂直烧结速度、烧结机利用系数；（b）成品率、固体燃料消耗

1—成品率；2—固体燃料消耗。

图 3　硼镁铁精粉配比对烧结矿质量和烧结指标影响

Fig. 3　Effect of the ratio of boron magnesium iron concentrate on sinter quality and sintering index



（a）转鼓强度；（b）粒度组成

1—≥25 mm；2—[10,25）mm；3—[5,10）mm。

图 4 硼镁铁精粉配比对烧结矿转鼓强度和粒度组成的影响

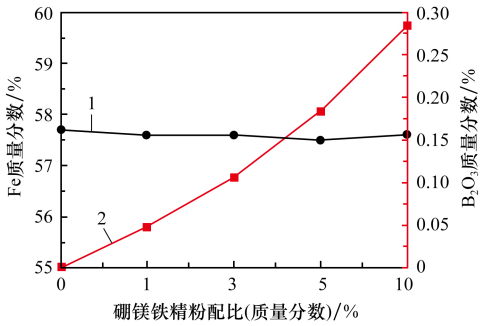
Fig. 4 Effect of the ratio of boron magnesium iron concentrate on drum strength and particle size composition of sinter

有恶化趋势。烧结过程配入硼镁铁精粉，使得烧结矿中含有一定量的 B_2O_3，由于 B^{3+} 半径小，高温熔解性能好，其在高温下可以进入各种矿物的晶格中，且 B_2O_3 具有较低熔点，它可以同许多氧化物形成固溶体，并降低其熔点，促进液相生成，因此它可以提高成品率，降低燃料消耗。另外，由于硼镁铁矿中 MgO 含量较高，可以代替一部分白云石，减少烧结过程中 CO_2 的排放，同时液相熔点降低，流动性增强，液相分布较均匀，减少烧结阻力，提高烧结速度，有助于烧结机利用系数的提高。硼镁铁精粉配比过高对改善利用系数和转鼓强度指标不利则可能与硼镁铁精粉的液相流动性偏低带来的负面影响有关。

由图 4(b)可知，配入硼镁铁精粉后，烧结矿中≥25 mm 粒级占比提高至基准以上，[10,25）mm 粒级占比降低至基准以下。分析原因认为，硼及氧化镁对各物相有稳定作用，以及硼加入后烧结矿的液相量增多且分布均匀，提高了烧结矿的强度。因此可以认为，B_2O_3 对改善烧结矿的粒度组成有利。

2.3 硼镁铁精粉对烧结矿化学成分的影响

烧结矿实际 Fe 和 B_2O_3 质量分数如图 5 所示。由图 5 可知：当硼镁铁精粉配比从 0 增加到 10% 时，烧结矿中 B_2O_3 质量分数从 0 提高到 0.27%。虽然硼镁铁精粉中 Fe 质量分数仅为 52%，明显低于替代矿种铁精粉 D 的 65%，但是从图 5 的烧结矿品位实际检测结果来看，硼镁铁精粉等比例替代铁精粉 D 后，烧结矿的 Fe 质量分数基本保持稳定，这与前述理论计算结果一致。从烧结矿 B_2O_3 质量分数变化情况看，随着硼镁铁精粉配比的提高，烧结矿中 B_2O_3 质量分数基本呈线性增加趋势，当硼镁铁精粉配比为 10% 时，烧结矿中 B_2O_3 的质量分数约为 0.28%。根据平衡计算，硼镁铁精粉中的硼大约有 50% 保留在了烧结矿中，另外 50% 在烧结过程中被脱除。



1—Fe 质量分数；2—B_2O_3 质量分数。

图 5 硼镁铁精粉配比对烧结矿铁品位和 B_2O_3 质量分数的影响

Fig. 5 Effect of the ratio of boron magnesium iron concentrate on mass fraction of Fe and B_2O_3 of sinter

2.4 硼镁铁精粉对烧结矿冶金性能的影响

烧结矿低温还原粉化指标的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知，配加硼镁铁精粉后，烧结矿的低温还原粉化率的改善趋势明显，由不配加时的 57.8% 提高到配加硼镁铁精粉 10% 时的 62.4%。

硼是结晶化学稳定剂中典型的元素之一，它抑制 β-硅酸二钙(β-2CaO·SiO_2，简称 β-C_2S)晶相转变的作用最强[10-11]。当硼元素质量分数超过 0.008% 时，烧结矿低温还原粉化现象可以显著改善[12]。同时，硼镁铁精粉中含有较多的 MgO，

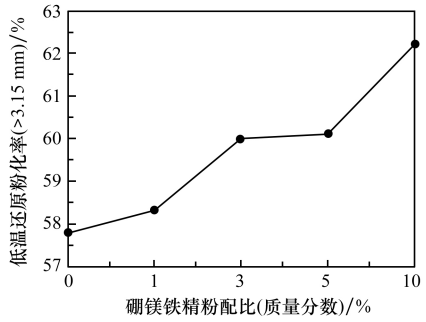


图 6　硼镁铁精粉配比对烧结矿低温还原粉化率（> 3.15 mm）的影响

Fig. 6　Effect of the ratio of boron magnesium iron concentrate on RDI(> 3.15 mm) of sinter

MgO 在烧结矿中形成镁橄榄石（$2MgO \cdot SiO_2$），钙镁橄榄石（$CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$）和镁黄长石（$2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$）等，可以减少或全部取代硅酸二钙（$2CaO \cdot SiO_2$）；MgO 还能固溶于 $2CaO \cdot SiO_2$ 中，起到抑制 β-C_2S 向 γ-C_2S 转变的作用。

烧结矿中的次生赤铁矿（Fe_2O_3）也存在相变应力，次生赤铁矿（Fe_2O_3）在还原为 Fe_3O_4 的过程中会引起晶体开裂，加剧烧结矿的低温粉化作用。研究表明，配加硼镁铁精粉后会使烧结矿中的次生赤铁矿（Fe_2O_3）含量减少。这是由于典型稳定剂硼元素各物相的稳定作用使次生赤铁矿（Fe_2O_3）生成量减少，同时 MgO 也能抑制次生赤铁矿（Fe_2O_3）的生成。烧结过程中MgO还可以与Fe_2O_3生成铁酸镁（$MgO \cdot Fe_2O_3$），从而减少赤铁矿（Fe_2O_3）的生成量，改善烧结矿的低温还原粉化性能。

3　工业应用试验

烧结配加硼镁铁精粉的工业试验在首钢某烧结机上进行。工业试验期间恰逢雨季，因此为保证上料顺利，将硼镁铁精粉与另外一种进口富矿粉按 1∶1比例混合后使用，试验过程中按照总配比为 6% 进行配加（即硼镁铁矿和进口富矿粉各占 3%）。

配加硼镁铁精粉工业试验期间烧结矿化学成分、粒度组成以及烧结技术经济指标变化情况如表 3、4 所示。由表 3 可知，配加 3% 硼镁铁精粉后，烧结矿全铁品位略有降低，FeO 质量分数略有升高，烧结矿中 B_2O_3 质量分数增加，达到 0.56%，其他成分变化不大，烧结矿碱度保持稳定。由表 4 可知，烧结矿粒度组成得到优化，[5,10) mm 和 < 5 mm 的粒级占比分别降低 0.79% 和 1.29%，≥40 mm 的粒级占比增加 3.01%。配加硼镁铁精粉后，烧结机利用系数由 1.60 t/(m^2·h) 提高到 1.62 t/(m^2·h)，烧结矿转鼓强度提高 2.22 个百分点，低温还原粉化指数（> 3.15 mm）由 58.80% 上升至 60.29%。总体来看，工业应用结果与实验室试验结论基本一致，烧结矿的产、质量指标均有明显改善。

表 3　配加硼镁铁精粉后烧结矿的化学成分和碱度变化

Table 3　Changes of chemical composition and basicity of sinter after adding boron magnesium iron concentrate

试验阶段	化学成分（质量分数）/%						*R*
	TFe	FeO	MgO	CaO	SiO_2	B_2O_3	
基准期	57.12	7.05	2.10	10.14	5.43	痕量	1.86
试验期	57.06	7.14	2.07	10.14	5.43	0.56	1.86
比较	−0.06	+0.09	−0.03	0	0	~ +0.56	0

表 4　配加硼镁铁精粉后烧结矿的粒度组成和技术指标变化

Table 4　Changes of particle size composition and technical indexes of sinter after adding boron magnesium iron concentrate

试验阶段	粒度组成（质量分数）/%						烧结机利用系数/（$t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$）	转鼓强度/%	低温还原粉化率/%
	≥40 mm	[25,40) mm	[16,25) mm	[10,16) mm	[5,10) mm	<5 mm			
基准期	9.50	22.84	20.93	20.44	18.56	7.72	1.600	86.68	58.80
试验期	12.51	22.54	16.27	24.48	17.77	6.43	1.621	88.90	60.29
比较	+3.01	−0.30	−4.66	+4.04	−0.79	−1.29	+0.021	+2.22	+1.49

4 结 论

（1）硼镁铁精粉是一种含硼、含镁的特种铁矿资源，其 B_2O_3 质量分数为5.5%左右，MgO质量分数为12%左右。该铁精粉的铁品位偏低，为52%左右，不过其含有一部分MgO，在实际使用过程中可同时替代含铁原料和含镁熔剂，在一定使用范围内使用对烧结矿的含铁品位不会带来负面影响。

（2）硼镁铁精粉高温烧结性能的特点是同化性好，液相流动性稍差；最低同化温度与杨迪粉接近，液相流动指数与PB粉接近。烧结杯试验结果表明，硼镁铁精粉等比例替代地方磁精粉有利于提高烧结矿成品率，降低固体燃料消耗，改善烧结矿低温还原粉化性能；其配比低于10%对提高烧结机利用系数和烧结矿转鼓强度有利，配比高于10%对上述两个指标均有负面影响。

（3）工业应用试验表明，配加3%硼镁铁精粉后，烧结矿的全铁品位略有降低，B_2O_3 质量分数增加，达到0.56%；烧结矿的粒度组成得到优化，(5,10] mm和≤5 mm的粒级占比分别降低0.79%和1.29%，>40 mm的粒级占比增加3.01%；烧结机利用系数由1.60 t/(m²·h)提高到1.62 t/(m²·h)，烧结矿转鼓强度提高2.22个百分点，低温还原粉化指数(>3.15 mm)由58.80%上升至60.29%，烧结矿产、质量指标均有明显改善。

参考文献：

[1] 李治杭,韩跃新. 我国硼铁矿综合开发利用现状及其进展[J]. 矿产综合利用,2015,35(2):22－25.
LI Zhihang, HAN Yuexin. Research progress on comprehensive on comprehensive exploitation and utilization status of paigeite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2015,35(2):22－25.

[2] 周洪博. 辽宁首钢硼铁矿业有限公司露天采场边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾学报,2017,33(1):70－74.
ZHOU Hongbo. The analysis on the slope stability of opencast mining by Liaoning Shougang boron iron Co.,Ltd(LSBI)[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation,2017,33(1):70－74.

[3] 余建文,高鹏,韩跃新. 含硼铁精矿工艺矿物学及其综合利用新技术[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(8):2785－2790.
YU Jianwen, GAO Peng, HAN Yuexin. Process mineralogy and new comprehensive utilization technology of boron-bearing iron concentrate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(8):2785－2790.

[4] 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 borite concentrate is an effective measure to Improve sinter quality[J]. Shanxi Metallurgy, 1994,17(2):25－27.

[5] 李永清. 三种含硼添加剂在烧结球团生产中的应用比较[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2004,20(1):31－33.
LI Yongqing. Comparison of three boron additives in sintering pellet production[J]. Journal of Kunming Metallurgy College,2004,20(1):31－33.

[6] 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 sintered basic properties of iron ore[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3):254－257.

[7] 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 liquid fluidity of iron ore fines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(10):1095－1100.

[8] 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. liquid fluidity of iron ore fines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3):291－293.

[9] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿粉与CaO同化能力的试验研究[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):258－261.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. Experimental study on assimilation ability of iron ore fines with CaO [J]. Journal of University of Science and Technology

Beijing,2002,24(3):258 – 261.

[10] 周东辉,孙挺,白丽群. 含硼添加剂改善烧结矿质量的实验研究[J]. 东北大学学报,2004,25(5):439 – 441.
ZHOU Donghui, SUN Ting, BAI Liqun. Experimental study on the improvement of sinter quality with boron additives[J]. Journal of Northeastern University,2004,25(5):439 – 441.

[11] 王英杰,高斌,韦火明,等. 硼粉对钒钛烧结矿质量影响的实验研究[C]//2012 年河北省炼铁技术暨学术年会论文集. 石家庄:河北省冶金学会,2012:63 – 65.
WANG Yingjie, GAO Bin, WEI Huoming, et al. Experimental study on the effect of boron concentrate on the quality of vanadium titanium sinter[C]//2012 Hebei Iron Making Technology and Academic Annual Conference Proceedings. Shijiazhuang:Hebei Metallurgical Society,2012:63 – 65.

[12] 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,2008:19 – 20.
HAO Desheng. Study on the experiment and mechanism of boracic complex additive to the sinter[D]. Shenyang: Northeastern University,2008:19 – 20.

(上接第 71 页)

[16] 陈霄,冯帅,刘小杰. 河钢烧结矿冶金性能和矿相的研究[J]. 四川冶金,2020,42(3):27 – 31.
CHEN Xiao, FENG Shuai, LIU Xiaojie. Study on the metallurgical properties and ore phases of HISCO sintered ore[J]. Sichuan Metallurgy,2020,42(3):27 – 31.

[17] 韩秀丽,司天航,刘盈盈,等. 不同含量 Al_2O_3 烧结矿矿相结构与 $RDI_{+3.15\ mm}$ 的定量关系[J]. 中国冶金,2022,32(2):34 – 38;59.
HAN Xiuli,SI Tianhang,LIU Yingying,et al. Quantitative relationship between the mineral phase structure and $RDI_{+3.15\ mm}$ for sintered ores with different Al_2O_3 contents [J]. China Metallurgy,2022,32(2):34 – 38;59.

[18] 承强,张建良,邵久刚,等. 炼钢污泥对烧结矿矿相结构及冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2020,45(2):61 – 66.
CENG Qiang,ZHANG Jianliang,SHAO Yonggang,et al. Effect of steel sludge on the phase structure and metallurgical properties of sintered ore[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):61 – 66.

[19] 孟凡俭,孙长余,李廷乐,等. 烧结矿中复合铁酸钙形成影响因素[J]. 钢铁,2018,53(7):16 – 23.
MENG Fanjian, SUN Changyu, LI Tingle, et al. Factors influencing the formation of complex calcium ferrate in sintered ore[J]. Iron & Steel,2018,53(7):16 – 23.

[20] 辛红艳,高艳甲,时国松. 碱度对烧结矿软熔性能的影响[J]. 河北联合大学学报(自然科学版),2012,34(3):1 – 3.
XIN Hongyan, GAO Yanjia, SHI Guosong. Effect of alkalinity on the soft fusion properties of sintered ore [J]. Journal of Hebei Union University(Natural Science Edition),2012,34(3):1 – 3.

[21] 李廷乐,孙长余,汪琦. $w(MgO)$ 和 $w(Al_2O_3)$ 对混合炉料软熔性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(4):12 – 18.
LI Tingle,SUN Changyu,WANG Qi. Effect of $w(MgO)$ and $w(Al_2O_3)$ on the soft melting properties of blended furnace charge[J]. Iron & Steel,2019,54(4):12 – 18.

2023 年度《烧结球团》优秀青年编委

《烧结球团》青年编委会是《烧结球团》编辑部的辅助办刊机构，在专家、作者、读者与编辑部之间发挥桥梁和纽带作用。青年编委会承担撰稿、组稿、审稿、专刊策划、宣传、学术会议等工作，协助编辑部不断提升期刊的学术水平和影响力。根据 2023 年度青年编委的投稿量、审稿量、年会参与以及期刊宣传等工作情况，评选出 12 位优秀青年编委。

2023 年度《烧结球团》优秀青年编委(按姓氏拼音排序)

春铁军　杜　胜　郭正启　季志云　刘卫星　魏汝飞　徐润生　杨本涛　杨聪聪　余正伟　周　密　周仙霖