某进口镜铁精矿的配矿及冶金性能试验研究

刘 震[1]，蒋丽荣[2]，文小平[3]，周荣宝[4]，李义民[4]
（1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2. 广西柳州钢铁集团有限公司，广西 柳州 545002；
3. 湘潭钢铁集团有限公司，湖南 湘潭 411101；4. 江苏永联钢铁集团有限公司，江苏 张家港 215628）

摘要： 某进口镜铁精矿铁品位高达65%以上，产量稳定、有害杂质低、性价比高，如能大量利用可缓解优质铁精粉短缺的压力。为此，本文以我国钢铁企业中常见的烧结配矿方案，开展该矿的配矿及冶金性能试验的研究。试验结果表明：在常规的配矿方案中，此镜铁精矿配入10%～26%，烧结性能和冶金性能均良好；当该精粉取代10%的同类型常用进口精粉时，烧结机利用系数由1.37 t/(m²·h)大幅提高至1.47 t/(m²·h)，转鼓强度由62.67%增加至63.47%；若该精粉配入26%，取代进口精粉和巴西某粗粉时，其利用系数基本保持不变，但转鼓强度大幅增加至67%左右，可显著改善烧结矿的强度。对不同配矿成品烧结矿的冶金性能进行分析，结果表明其还原度(*RI*)和还原粉化($RDI_{+3.15\ mm}$)分别为78%和63%左右，均能满足高炉冶炼需求。在烧结工业试验中，生产数据表明配加10%的该镜铁精矿可大幅降低烧结生产的混匀矿成本，且可显著改善450 m²烧结机的生产效果。

关键词： 镜铁矿；烧结；冶金性能；配矿
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0034－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.082

Experimental research on ore blending and metallurgical properties of an imported specularite concentrate

LIU Zhen[1], JIANG Lirong[2], WEN Xiaoping[3], ZHOU Rongbao[4], LI Yimin[4]
(1. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 2. *Guangxi Liuzhou Iron & Steel Co., Ltd., Liuzhou* 545002, *Guangxi, China*; 3. *Xiangtan Iron and Steel Group Co., Ltd., Xiangtan* 411101, *Hunan, China*; 4. *Jiangsu Yonglian Iron and Steel Group Co., Ltd., Zhangjiagang* 215628, *Jiangsu, China*)

Abstract: An imported specularite concentrate has an iron grade of more than 65%, stable output, low harmful impurities, and high cost performance. If it can be used in large quantities, it can alleviate the pressure of shortage of high-quality iron powder. For this reason, the common sintering ore blending scheme is used in China's iron and steel enterprises to carry out the research on the ore blending and metallurgical performance research of the ore. The results show that in the conventional ore blending scheme, the specularite concentrates is blended with 10%～26%, and the sintering performance and metallurgical properties are good; when the refined powder replaces 10% of the same type of commonly used imported refined powder, the sintering machine utilization factor is greatly increased from 1.37 t/(m²·h) to 1.47 t/(m²·h), and the drum strength is increased from 62.67% to 63.47%; when the refined powder is blended with 26% to replace imported refined powder and a certain coarse powder from Brazil, its utilization factor remains basically unchanged, but the drum strength is greatly increased to about 67%, which can significantly improve the strength of sinter. Analysis of the metallurgical properties of the finished sinter with different blends shows that the

收稿日期： 2020－10－21；**修回日期：** 2021－05－18
基金项目： 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5726)
作者简介： 刘 震(1997—)，男，硕士研究生，从事烧结高温基础特性方面的研究。
通讯作者： 蒋丽荣(1988—)，男，工程师，从事铁矿烧结、球团方面的技术工作。

中国知网 https://www.cnki.net

degrees of reduction(*RI*) and reduction pulverization ($RDI_{+3.15\ mm}$) are respectively about 78% and 63%, both of which can meet the demand of blast furnace smelting. In the sintering industry test, the production data shows that adding 10% of the specularite concentrate can greatly reduce the blending ore cost of sintering production, and the production improvement effect of the 450 m^2 sintering machine is more significant.

Key words: specularite; sintering; metallurgical properties; ore blending

随着我国粗钢产量的持续增长，钢铁工业对铁矿的需求量也逐步增加。2019 年我国铁矿石的进口量高达 10.38 亿吨，约占总需求量的 75%[1-2]。与此同时，世界高品质铁矿资源特别是铁品位高、杂质少的优质铁矿石越来越稀缺，这无疑给钢铁行业带来了新的挑战[3]。因此，开发新的铁矿资源变得越来越重要。Tacora 精矿(铁精矿 T) 产自加拿大东部的 Scully 矿山，属于一种镜铁矿，铁品位高达 65% 以上，有害杂质低。该矿区资源储量巨大，年产量为 650 万吨左右，可开采 26 a，并且很多区域还在勘探之中。该精矿性价比高，如果能大量利用则可以缓解目前所面临的压力。镜铁矿作为一种常见的铁矿资源，对于烧结生产来说优、缺点并存，一方面其铁品位高、杂质少、价格低，是优秀的炼铁原料，但另一方面其亲水性、成球性和高温反应能力较差。该矿在制粒过程中颗粒之间难以黏附形成制粒小球，在烧结过程中又难以生成低熔点化合物和液相，过多配用将会导致烧结料层透气性变差，烧结矿产、质量下降[4-5]。为了提高镜铁矿的使用配比，一般可以对其进行预处理以提高亲水性和成球性，并通过添加黏结剂方式改善其成球性[6-7]，或者与褐铁矿搭配使用来改善烧结原料结构[8]。

本文结合国内某钢铁厂的原料特点，进行不同配比铁精矿 T 的烧结试验，研究该镜铁精矿的烧结和冶金性能，以期可为指导合理利用该矿提供依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

除铁精矿 T 外，其他含铁物料(A 为加拿大精矿，B 为国内精矿，C 和 D 为澳洲常见粉矿，E 和 F 为巴西粉矿，G 为南非常见粉矿) 、熔剂和焦粉均来自国内某钢铁厂。各原料的化学成分和粒度组成分别如表 1、2 所示。由表 1、2 可知: 铁精矿 T 的铁品位超过 65%，有害元素如 S、P 质量分数极低，含锰量较高，为 1.49%; 铁精矿 T 的粒度主要集中在 0.25 ~ 0.5 mm 和 0.074 ~ 0.15 mm。从化学成分和粒度组成上看，铁精矿 T 的性质类似于铁精矿 A，其是一种优质的烧结精粉。

表 1　试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and loss on ignition of the raw materials　　%

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Mn	K_2O	Na_2O	S	P	烧损
铁精矿 T	65.89	2.74	0.058	0.180	0.043	1.490	0.023 0	0.015	0.005 6	0.007 4	0.710
铁精矿 A	65.24	4.59	0.490	0.190	0.450	0.120	0.007 9	0.012	0.004 5	0.008 8	1.550
铁精矿 B	63.34	3.92	1.110	0.890	0.860	0.530	0.043 0	0.034	0.150 0	0.200 0	0.001
铁精矿 C	57.24	5.20	0.140	2.330	0.100	0.770	0.034 0	0.033	0.031 0	0.064 0	8.250
铁精矿 D	60.50	3.37	0.120	2.500	0.090	0.220	0.017 0	0.022	0.020 0	0.085 0	6.100
铁精矿 E	64.50	1.55	0.100	1.530	0.120	0.110	0.012 0	0.015	0.007 0	0.049 0	3.070
铁精矿 F	61.02	6.97	0.100	1.500	0.180	0.220	0.024 0	0.041	0.015 0	0.024 0	3.440
铁精矿 G	63.10	6.43	0.310	1.700	0.070	0.038	0.200 0	0.038	0.031 0	0.051 0	0.860
石灰石	0.25	0.73	31.070	0.003	20.930	—	—	—	0.006 3	0.005 3	46.070
生石灰	0.96	5.39	77.550	0.280	3.830	—	—	—	0.094 0	0.011 0	9.220
白云石	0.27	1.56	52.550	0.130	1.500	—	—	—	0.009 7	0.003 7	42.310
焦粉	—	6.63	1.910	3.930	0.810	—	—	—	—	—	81.800

中国知网　https://www.cnki.net

表2 试验原料的粒度组成(质量分数)

Table 2 Size distribution of the raw materials %

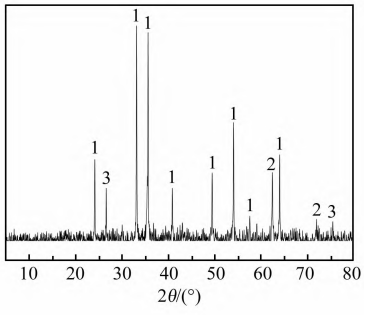
原料名称	+6.3 mm	5.0 ~ 6.3 mm	3.0 ~ 5.0 mm	1.0 ~ 3.0 mm	0.5 ~ 1.0 mm	0.25 ~ 0.50 mm	0.125 ~ 0.25 mm	0.074 ~ 0.125 mm	-0.074 mm
铁精矿 T	0.00	0.00	0.00	2.10	10.69	30.33	5.86	48.44	2.58
铁精矿 A	0.00	0.00	0.00	3.31	8.85	25.18	6.79	53.21	2.66
铁精矿 B	0.00	0.00	0.95	8.87	23.63	35.97	6.36	22.26	1.96
铁精矿 C	19.02	14.86	23.95	23.83	6.02	6.87	0.61	3.18	1.66
铁精矿 D	7.84	11.68	29.94	19.51	8.26	10.25	2.41	8.52	1.59
铁精矿 E	16.93	5.09	21.89	12.49	18.22	10.39	5.79	6.88	2.32
铁精矿 F	18.70	9.39	14.96	27.13	6.22	5.52	6.47	9.53	2.08
铁精矿 G	5.47	17.25	45.05	24.50	4.21	0.12	0.63	0.75	2.02
石灰石	0.00	0.24	25.30	27.93	13.80	12.64	3.15	15.33	1.61
生石灰	0.00	0.00	0.20	41.57	20.60	17.22	2.11	17.20	1.10
白云石	7.37	2.06	17.31	40.80	11.65	12.35	2.44	4.53	1.49
焦粉	0.56	3.31	8.09	22.42	20.28	19.92	4.09	20.51	0.82

表3 铁精矿的表面性能

Table 3 The surface properties of iron ore

原料名称	最大分子水/%	最大毛细水/%	静态成球性指数	堆密度/(g·cm^{-3})	真密度/(g·cm^{-3})
铁精矿 T	1.54	8.51	0.22	2.65	4.81
铁精矿 A	0.96	11.66	0.09	2.57	4.96

铁精矿 T 的 XRD 图谱、矿物组成和铁物相分析如图 1 和表 4、5 所示。由图 1 和表 4、5 可知：铁精矿 T 的主要物相为赤铁矿(假象赤铁和镜铁矿)、磁铁矿和石英；该矿中的铁主要赋存于赤铁矿中，占比高达 89.6%。该精矿中镜铁矿的嵌布特征如图 2 所示。由图 2 可知：铁精矿 T 中镜铁矿的形态呈现较为规则的板片状，部分呈单体状态产出，有的镜铁矿则与磁铁矿、假象赤铁矿、氧化锰矿物和石英等毗连镶嵌，



1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—石英。

图1 铁精矿 T 的 XRD 分析

Fig. 1 XRD patterns of T iron ore concentrate

表4 铁精矿 T 的主要矿物组成(质量分数)

Table 4 The mineral composition of T iron ore concentrate %

磁铁矿	假象赤铁矿	镜铁矿	褐铁矿	氧化锰矿物	石英	其他
8.4	30.8	51.6	4.7	1.5	2.8	0.2

表5 铁精矿 T 中铁的物相分析(质量分数)

Table 5 The phase analysis of iron of T iron ore concentrate %

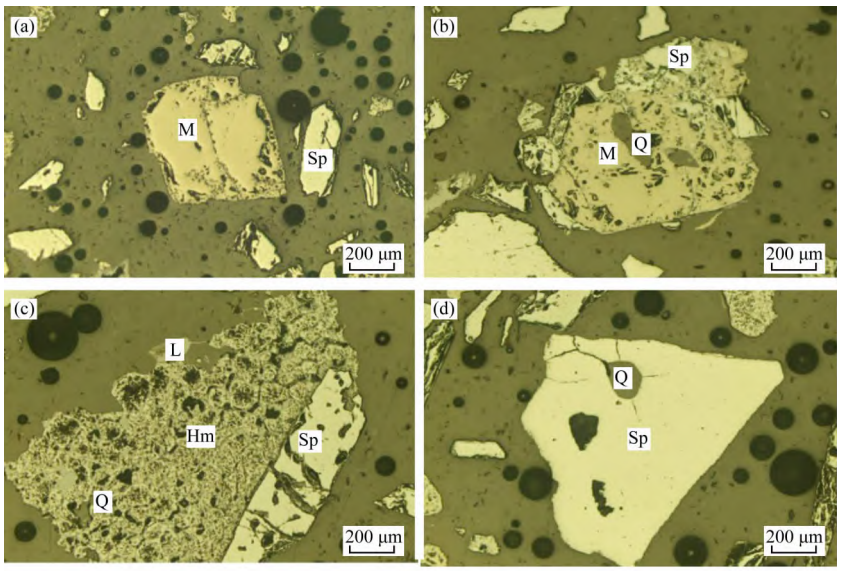
项目	磁铁矿	假象赤铁矿	硫化铁	赤铁矿	铁橄榄石	菱铁矿
w(Fe)	3.69	1.83	0.017	59.03	1.24	0.08
占比	5.60	2.78	0.030	89.59	1.88	0.12

在部分镜铁矿晶粒中同样也常包含微细的粒状石英而构成铁矿物的富连生体。

1.2 配矿方案

试验配矿方案如表 6 所示。方案 1、2 主要是铁精矿 T 取代同类型的加拿大铁精矿 A，替代占比分别为 5% 和 10%；方案 3 是在方案 2 的基础上，取代5% 的巴西粉矿E；方案4是部

中国知网 https://www.cnki.net



(a) 单粒磁铁矿与镜铁矿；(b) 镜铁矿沿磁铁矿边缘嵌布；(c) 镜铁矿与假象赤铁矿边缘嵌布；(d) 镜铁矿与微粒级石英构成铁的富连生体

Sp—镜铁矿；M—磁铁矿；Q—石英；L—褐铁矿；Hm—假象赤铁矿；黑色—孔洞。

图 2　样品中镜铁矿的嵌布特征

Fig. 2　Specularite embedded state in samples

表 6　试验配矿方案(质量分数)

Table 6　Blending scheme of the test　　%

方案名称	铁精矿 T	铁精矿 A	铁精矿 B	铁精矿 C	铁精矿 D	铁精矿 E	铁精矿 F	铁精矿 G
基准	0	10	7	28	22	14	13	6
方案 1	5	5	7	28	22	14	13	6
方案 2	10	—	7	28	22	14	13	6
方案 3	15	—	7	28	22	9	13	6
方案 4	20	—	5	28	22	6	13	6
方案 5	26	—	5	28	22	—	13	6

分取代粉矿 E 和国内精矿 B；方案 5 则是 26% 的铁精矿 T 完全取代铁精矿 A、E。

1.3　试验方法

试验中的混匀、配料、制粒、烧结、成品检测等环节在中试规模的设备中进行。圆筒混合机尺寸为 600 mm × 1 400 mm，转速为 30 r/min，制粒时间为 3.5 min；烧结点火时间为 1.5 min，点火负压为 6 kPa，点火温度为 (1 100 ± 50) ℃；烧结杯尺寸为 185 mm × 700 mm，烧结负压为 12 kPa，铺底料厚度为 30 mm，料层厚度为 700 mm；冷却时间为 5 min，冷却负压为 5 kPa。分别按 ISO 3271—1975、GB 13242—2017、GB 13241—2017 检测成品烧结矿的转鼓强度、还原度(RI)和低温还原粉化率($RDI_{+3.15\ mm}$)等冶金性能。在某钢铁厂 300、450 m^2 烧结机上进行工业试验，并将获得的烧结矿应用于高炉生产。

2　结果与讨论

2.1　优化工艺参数及技术指标

针对表 6 列出的典型配矿方案，进行烧结试验，在保证返矿平衡为 0.95 ~ 1.05 的情况下，优化烧结焦比和水分。在该最优试验参数下进行烧结杯试验，得到烧结矿的技术指标如表 7 所示。

由表 7 可知，随着铁精矿 A 逐渐被铁精矿 T 代替，烧结机利用系数有所提升。当铁精矿 T 的配比提高至 10% 时，利用系数提高到 1.47

中国知网　https://www.cnki.net

t/(m²·h)，这是因为铁精矿T的静态成球性比铁精矿A要好，制粒效果更强，烧结速度更快。方案3是在方案2的基础上，继续取代5%的铁矿巴西粉矿E，当烧结速度为24.29 mm/min时，利用系数可显著提高至1.56 t/(m²·h)，这表明少量替换铁精矿T能改善原料的透气性。方案5则是26%的铁精矿T完全取代铁精矿A、E，该方案下烧结机利用系数、固体燃料消耗和基准相差不大，但是烧结矿的转鼓强度则显著从62.67%提高至67.47%。这是因为铁精矿E对比铁精矿T而言，结晶水质量分数高，烧损大，降低了烧结矿的质量。

表7 不同方案下最佳工艺参数及优化后的技术指标

Table 7 The optimum parameter and optimized techmical indexes of different schemes

方案名称	焦比/%	水分/%	烧结速度/(mm·min⁻¹)	成品率/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	转鼓强度(+6.3 mm)/%	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)
基准	3.90	7.5	21.94	67.76	1.37	62.67	60.39
方案1	3.80	7.0	22.67	67.46	1.42	61.73	60.85
方案2	3.90	7.0	22.67	69.03	1.47	63.47	62.22
方案3	3.90	7.5	24.29	68.38	1.56	61.73	62.85
方案4	3.75	7.0	22.30	67.74	1.34	62.93	60.30
方案5	3.90	7.5	21.54	69.27	1.36	67.47	60.66

因此，从烧结效果来看，铁精矿T完全取代同类型进口铁精矿是可行的，且烧结机利用系数有所提高；同时，其配入量达26%，部分取代巴西粗粉时，烧结矿的转鼓强度可以得到大幅度改善。

2.2 烧结矿化学成分及粒度组成

6种配比的烧结矿的化学成分、粒度组成如表8、9所示。由表8可知，所有化学成分均达到配料设计的要求，完全满足高炉冶炼的需求；其中，S、P等有害杂质的质量分数低，FeO质量分数在7%左右，较为适宜[11]。由表9可知：基准方案中5~10 mm粒级占比为35.34%，而方案1的5~10 mm粒级占比有所增加，而其他方案5~10 mm粒级占比均与基准方案差不

表8 烧结矿的主要化学成分(质量分数)

Table 8 Main chemical composition of sinter %

方案名称	Fe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	S	P	K_2O	MnO	Na_2O
基准	57.27	7.79	9.20	4.75	1.76	1.68	0.013	0.072	0.069	0.26	0.097
方案1	58.28	6.94	8.58	4.33	1.78	1.62	0.012	0.069	0.074	0.29	0.140
方案2	57.21	7.05	9.23	4.93	1.83	1.77	0.011	0.054	0.077	0.31	0.110
方案3	57.69	7.93	9.56	4.89	1.81	1.84	0.015	0.072	0.055	0.37	0.093
方案4	57.34	7.63	9.23	4.80	1.73	1.71	0.016	0.068	0.057	0.40	0.096
方案5	57.55	6.54	8.65	4.97	1.76	1.73	0.013	0.059	0.057	0.43	0.088

表9 烧结矿的粒度组成(质量分数)

Table 9 Size distribution of sinter %

方案名称	+40 mm	40~25 mm	25~16 mm	16~10 mm	10~5 mm
基准	4.52	17.73	18.83	23.58	35.34
方案1	1.63	11.42	18.37	27.79	40.79
方案2	1.10	14.27	24.07	29.58	30.98
方案3	4.80	12.13	21.24	26.53	35.30
方案4	4.86	16.35	22.07	24.59	32.13
方案5	3.67	23.06	16.31	21.54	35.42

中国知网 https://www.cnki.net

多，甚至有所降低，这对提高高炉的料柱透气性具有良好的作用[12-13]。

2.3　烧结矿的冶金性能

烧结矿的还原度和还原粉化指数如表 10 所示。由表 10 可知：配入了铁精矿 T 后，烧结矿的还原度均在 78% 左右，对比基准略有降低，但是影响不大；还原粉化指数为60%～66%，除方案 2 外，还原粉化指数与基准指标相当。总体来看，配入铁精矿 T 后，冶金性能略有降低，但是均在优质烧结矿的指标范围内[14]。

表 10　烧结矿的冶金性能(质量分数)

Table 10　Metallurgical properties of sinter　%

方案名称	*RI*	$RDI_{+6.3\ mm}$	$RDI_{+3.15\ mm}$	$RDI_{-0.5\ mm}$
基准	79.14	25.21	65.76	6.20
方案 1	78.22	21.76	62.19	7.57
方案 2	77.68	16.13	60.04	9.08
方案 3	78.53	20.46	66.29	5.17
方案 4	78.84	22.34	63.65	6.23
方案 5	79.95	22.24	63.03	6.63

2.4　烧结矿矿物组成及微观结构

2.4.1　矿物组成

经光学显微镜鉴定后，得到烧结矿主要矿物组成结果如表 11 所示。由表 11 可知：烧结矿主要矿物为赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)、复合铁酸钙(SFCA)，包含少量橄榄石($CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$)、铁酸镁($MgO \cdot Fe_2O_3$)、硅酸钙($2CaO \cdot SiO_2$)及玻璃质等。对于基准、方案 1、方案 3 及方案 5，铁酸钙质量分数为 34%、37%、36% 和 39%，其余两个配比的铁酸钙质量分数有所降低。一般而言，铁酸钙的质量分数能够加强烧结矿内部固结能力。方案 5 尤其是方案 2，其铁酸钙质量分数为 30%，且赤铁矿质量分数偏高，这可能是导致其还原粉化较差的内在原因[15-16]。

表 11　烧结矿的矿物组成(质量分数)

Table 11　Mineral composition of sinter　%

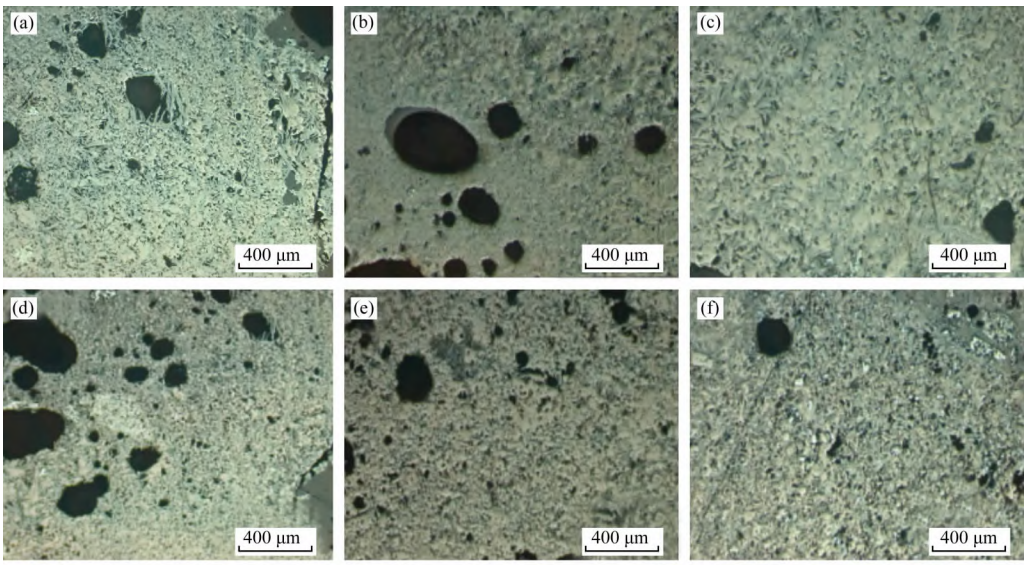
方案名称	赤铁矿	磁铁矿	铁酸钙	橄榄石	铁酸镁	硅酸钙	玻璃质及其它
基准	23	26	34	7	2	2	6
方案 1	22	22	37	8	1	2	8
方案 2	26	25	30	6	1	2	10
方案 3	23	23	36	10	1	2	5
方案 4	21	26	34	9	2	3	5
方案 5	27	21	39	6	2	1	4

2.4.2　微观结构

烧结矿内的孔隙结构与铁酸钙在烧结矿中的分布情况如图 3、4 所示。由图 3、4 可以看出，不同的方案配比导致烧结矿的微观结构产生了差异。从孔隙率上来看：方案 1 与方案 3 的孔隙率偏大，且以大孔为主，属于多孔薄壁结构，这样的结构会使得烧结矿脆性增加，烧结矿强度降低；基准、方案 4 与方案 5 的孔隙以小孔为主，孔隙率小，对烧结矿整体强度影响不大；方案 2 的孔隙率偏小，结构较于其他方案最为致密，所以其烧结矿强度高，但是过于致密的结构不利于烧结矿的还原，会导致烧结矿还原性能恶化(通过表 10 可以看到，方案 2 烧结矿的还原性与还原粉化率(+3.15 mm)最差，分别为 77.68% 和 60.04%)。

从铁酸钙结晶分布情况上来看，各个方案的主要矿相都以磁铁矿与铁酸钙的交织结构为主，这样的组织结构具有较高的强度[17]。从硅酸盐的分布情况来看，在基准、方案 1 和方案 3 的硅酸盐一般与铁酸钙交织形成共晶结构，因为硅酸盐自身强度低，导致这样的共晶结构强度低，会影响其烧结矿强度；方案 2 与方案 5 的硅酸盐存在于交织结构中，方案 5 的硅酸盐质量分数较少，多以细颗粒存在；方案 4 的硅酸盐一般存在玻璃质和孔隙周围，对烧结矿强度影响小。从赤铁矿的存在状态上来看，方案 2 和方案 5 含有较多的赤铁矿，赤铁矿在还原时体积膨胀，产生应力使得烧结矿结构破碎，

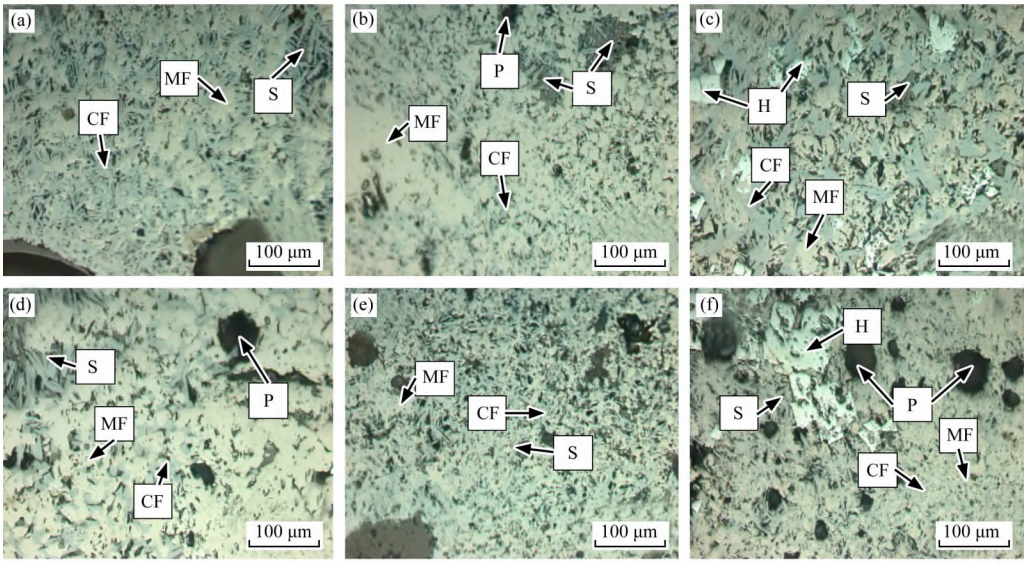
中国知网　https://www.cnki.net



(a) 基准; (b) 方案1; (c) 方案2; (d) 方案3; (e) 方案4; (f) 方案5

图3 烧结矿内部孔隙结构(反光50倍)

Fig. 3 Pore structure inside sinter(50 times reflection)



(a) 基准; (b) 方案1; (c) 方案2; (d) 方案3; (e) 方案4; (f) 方案5

H—赤铁矿; MF—磁铁矿; CF—铁酸钙; S—硅酸盐; P—孔洞。

图4 烧结矿铁酸钙结晶分布状况(反光200倍)

Fig. 4 Distribution of calcium ferrite in sinter(200 times reflection)

但方案5中存在分布均匀的小孔隙，能减小还原膨胀所引起的破碎，降低还原粉化率。总体上，不同方案烧结矿的矿相分析结果与其实际实验数据基本一致。

3 工业试验及高炉生产结果

分别在某钢铁厂300、450 m^2 烧结机上进行配加铁精矿T的工业试验，结果如表12所示。由表12可知：对于300 m^2 烧结机，在配入7%和13%铁精矿T后，与基准期相比，烧结矿转鼓强度和利用系数基本持平，整体烧结性能相差不大，扣除燃耗增加的成本后混匀矿成本有所降低；对于450 m^2 烧结机，在配入10%铁精矿T后，与基准期相比，烧结矿转鼓

中国知网 https://www.cnki.net

强度基本无变化，利用系数大幅改善，由 0.95 t/(m²·h) 增至 1.23 t/(m²·h)，整体烧结性能有所改善，扣除燃耗增加的成本后混匀矿成本降低了 16.39 元/t。

上述研究结果表明，相对于 300 m² 烧结机，450 m² 烧结机的生产改善效果更为显著；在不同精矿配比中，配加 10% 铁精矿 T 可大幅降低混匀矿成本。

表 12　工业试验结果

Table 12　The production data of sintering industry

烧结机面积/m²	配矿方案	转鼓强度/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	成品率/%	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)	混匀矿成本/(元·t⁻¹)	节约成本/(元·t⁻¹)
300	5% 卡拉拉精矿(基准)	77.75	1.39	80.50	50.23	691.60	—
	7% 铁精矿 T	77.13	1.40	80.50	50.89	686.87	4.14
	13% 铁精矿 T	77.33	1.40	80.50	54.32	679.84	8.14
450	5% 卡拉拉精矿(基准)	77.68	0.95	80.30	46.35	691.65	—
	10% 铁精矿 T	77.88	1.23	80.50	49.75	672.25	16.39

4　结　论

(1) 铁精矿 T 铁品位超过 65%，SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数分别为 2.74% 和 0.18%，有害元素如 S、P 质量分数极低，仅为 0.005 6% 和 0.007 4%，是一种良好的烧结精粉。工艺矿物学研究表明：铁矿 T 中含有 51.6% 的精铁矿。

(2) 由于铁矿 T 的成球性较好，能够改善制粒效果，在取代铁矿 A 和部分铁矿 E 时，利用系数最高可以提高至 1.56 t/(m²·h)。而且铁矿 T 的结晶水低，烧损低，能够改善成品矿质量，当配入 26% 的铁矿 T 时，转鼓强度则从 62.67% 显著提高至 67.47%。

(3) 针对国内钢厂典型的配矿方案，配入 10%~26% 的铁矿 T，能改善烧结机利用系数，提高强度，降低能耗，并且能得到冶金性能良好的成品烧结矿。

(4) 工业试验结果表明，配加铁矿 T 可降低烧结生产的混匀矿成本并改善整体烧结性能，当铁矿 T 配比为 10% 时成本最低，450 m² 烧结机的生产改善效果对比 300 m² 烧结机更好，证实了铁矿 T 可广泛应用于实际烧结生产。

参考文献：

[1] 陈亮亮，刘养洁. 世界铁矿资源分布对我国钢铁工业发展的影响[J]. 经济研究导刊，2010，79(5)：35－36.
CHEN Liangliang，LIU Yangjie. The distribution of the world´s iron ore resources of the impact of the development of China´s iron and steel industry [J]. Economic Research Guide，2010，79(5)：35－36.

[2] 王颖. 我国铁矿资源形势分析与其可持续供给的策略[J]. 金属矿山，2008(1)：12－14.
WANG Yin. Analysis of China´s iron resource situation and strategy of its sustainable supply [J]. Metal Mine，2008(1)：12－14.

[3] ZHAO Feng，YUE Qiang，HE Junhao，et al. Quantifying China´s iron in-use stock and its driving factors analysis [J]. Journal of Environmental Management，2020，274(15)：111220.

[4] 张泾生. 我国铁矿资源开发利用现状及发展趋势[J]. 钢铁，2007，42(2)：1－6.
ZHANG Jingsheng. Status and trend of exploitation and utilization of iron ore resources in China [J]. Iron and Steel，2007，42(2)：1－6.

[5] SUBHNIT K. Roy，DEEPAK Nayak，SWAGAT S. Rath. A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation [J]. Powder Technology，2020，367：796－808.

[6] 胡洵璞，刘敏媛. 高品位巴西铁精矿粉在烧结生产中的应用研究[J]. 钢铁研究学报，2010，38(2)：17－19.
HU Xunpu，LIU Minyuan. Application research on a high grade brazilian concentrates in sintering process [J]. Journal of Iron and Steel Research，2010，38(2)：17－19.

[7] HSIEH L. Effect of raw material composition on the sintering properties [J]. ISIJ International，2005，45(5)：551－559.

[8] 潘建，师本敬，朱德庆，等. 加拿大某精矿高配比烧结特性[J]. 钢铁，2014，49(9)：21－28.
PAN Jian，SHI Benjin，ZHU Deqing，et al. High proportion sintering performance of Canadian iron concentrate [J]. Iron

中国知网　https://www.cnki.net

and Steel,2014,49(9):21 – 28.

[9] 李孟土,李晓波,朱德庆,等. 高配比镜铁矿粉混合料烧结性能改善[J]. 钢铁研究学报,2018,30(1):14 – 20.
LI Mengtu,LI Xiaobo,ZHU Deqing,et al. Improvement of sintering performance of sinter mixtures containing high ratio of specularite fines [J]. Journal of Iron and Steel Research,2018,30(1):14 – 20.

[10] 陈伟,高丙寅,杨玉兵,等. 镜铁矿烧结性能试验研究[J]. 河南冶金,2012,20(3):6 – 8;21.
CHEN Wei,GAO Bingyin,YANG Yubing,et al. Improvement of sintering performance of high proportion Specularite powder mixture [J]. Henan Metallurgy,2012,20(3):6 – 8;21.

[11] 黄伟青,胡启晨,胡宾生,等. 烧结矿 FeO 含量的研究[J]. 矿冶,2017,26(2):46 – 51.
HUANG Weiqing,HU Qichen,HU Binsheng,et al. Research on FeO content of sinter [J]. Mining and Metallurgy,2017,26(2):46 – 51.

[12] LIU X,QIU G,CAI R,et al. Effects of Al_2O_3/SiO_2 ratio on mineralizing laws for low-temperature sintering [J]. Iron and Steel,2001,36(3):5 – 8.

[13] CLOUT J M F,MANUEL J R. Fundamental investigations of differences in bonding mechanisms in iron ore sinter formed from magnetite concentrates and hematite ores [J]. Powder Technology,2003,130(1 – 3):393 – 399.

[14] 傅菊英,姜涛,朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1996:38;130 – 135.
FU Juyin,JIANG Tao,ZHU Deqin. Sintering and pelletizing [M]. Changsha:Central South University of Technology Press,1996:38;130 – 135.

[15] 刘东辉,吕庆,孙艳芹,等. 铁矿粉基础特性对烧结矿性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2013,25(11):29 – 34.
LIU Donghui,LÜ Qing,SUN Yanqin,et al. Effect of basic characteristics of iron ores on properties of sinter [J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,25(11):29 – 34.

[16] YANG Songtao,ZHOU Mi,JIANG Tao,et al. Effect of basicity on sintering behavior of low-titanium vanadium-titanium magnetite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(6):2087 – 2094.

[17] 陈耀铭,陈锐. 烧结球团微观结构[M]. 长沙:中南大学出版社,2011:69 – 95.
CHEN Yaoming,CHEN Rui. Microstructure of sintered pellets [M]. Changsha:Central South University Press,2011:69 – 95.

(上接第19页)

[14] 李海英,张春奇,刘东. 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 团聚除尘技术的研究进展[J]. 环境工程,2018,36(9):93 – 98;143.
LI H Y,ZHANG C Q,LIU D. Research progress of $PM_{2.5}$ agglomeration and removal technology [J]. Environmental Engineering,2018,36(9):93 – 98;143.

[15] ZHANG J P,XU D C,REN J X. Modeling and simulation of $PM_{2.5}$ collection efficiency in a wire-plate ESP subjected to magnetic field and diffusion charging [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy,2015,34(3):697 – 702.

[16] 李永兵,曾珠,李兵磊. 线板式静电除尘器数学模型的建立及数值仿真[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2017,29(1):28 – 32.
LI Y B,ZENG Z,LI B L. Establishment and numerical simulation of mathematical model of wire-plate electrostatic precipitator [J]. Journal of Henan University of Engineering(Natural Science Edition),2017,29(1):28 – 32.

[17] 张玉才,李咸伟,俞勇梅,等. 静电除尘灰及脱硫灰对烧结烟气中二噁英的吸附作用[J]. 烧结球团,2017,42(1):50 – 53.
ZHANG Y C,LI X W,YU Y M,et al. Absorbability of sintering dust and desulphurized ash on the dioxins in the sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(1):50 – 53.

[18] 温祖文,田蒙奎,陶文亮. 无机陶瓷膜除尘器内部流场的数值模拟[J]. 环境科学与技术,2018,41(3):193 – 197.
WEN Z W,TIAN M K,TAO W L. Numerical simulation of internal flow field in inorganic ceramic membrane dust collector [J]. Environmental Science & Technology,2018,41(3):193 – 197.

[19] ISLAMOV R S. Influence of gas velocity on the particle collection and reentrainment in an air-cleaning electrostatic precipitator [J]. Aerosol Science & Technology,2018,52(12):1415 – 1428.

[20] WANG C,XIE Z Q,XU B G,et al. Experimental study on EHD flow transition in a small scale wire-plate ESP [J]. Measurement Science Review,2016,16(3):134 – 141.

[21] 王利. 新型极板对微细粉尘收集效果的实验研究[D]. 保定:河北大学,2016.
WANG L. The experimental study on collection effect of fine dust for a novel plate [D]. Baoding:Hebei University,2016.

中国知网 https://www.cnki.net