高配比磁铁精粉制粒和烧结性能优化

周 卫[1]，朱德庆[2]，杨聪聪[2]，潘 建[2]，王 欣[2a]
（1. 中钢设备有限公司，北京，100080；2. 中南大学 a. 资源加工与生物工程学院；
b. 低碳与氢冶金研究中心，湖南 长沙，410083）

摘要：针对某内陆型钢铁厂进行高比例磁铁精矿（混匀矿中占比≥85%）烧结时出现的制粒效果差、烧结矿产、质量低和固体燃料消耗高等问题，为确定下一步工程技改方向，本文开展系统的烧结杯试验以揭示高配比磁铁精粉的烧结特性，探究精矿预润湿、生石灰用量、磁铁精粉配比、碱度、料层高度等因素对烧结性能及成品矿冶金性能的影响规律。结果表明：采用精矿预润湿技术和配加适量生石灰对于协同强化高配比铁精矿制粒具有促进作用，在相同制粒水分条件下，将混合铁精矿初始水分 3.0% 预润湿至 7.8%，同时配加 5.5% 生石灰，制粒所得混合料的透气性指数（JPU）由 14.1 大幅提高到 41.7；在混合料透气性得到保证的前提下，进一步提高碱度和料层厚度能显著改善烧结矿产、质量指标，且烧结矿各冶金性能指标均能满足高炉冶炼要求。本文研究成果将为现场技术改造和生产提供重要的理论依据和技术指导。

关键词：磁铁精粉；烧结；制粒；透气性；冶金性能
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）01－0056－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.008

Optimization of granulation and sintering performance of high-ratio magnet concentrate

ZHOU Wei[1], ZHU Deqing[2], YANG Congcong[2], PAN Jian[2], WANG Xin[2a]
（1. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China;
2. Central South University a. School of Minerals Processing and Bioengineering; b. Research Center for Low Carbon and Hydrogen Metallurgy, Changsha 410083, Hunan, China）

Abstract: In view of such problems as poor granulation effect, low quality of sintering ores and high solid fuel consumption when sintering a high-ratio magnetite concentrate (85% of mixed ore) in an inland steel mill, in order to determine the direction of the next engineering technological transformation, a systematic laboratory sintering cup test is carried out to reveal the sintering characteristics of high-ratio magnet concentrate, and to explore the influence rule of such factors as concentrate pre-wetting, quicklime dosage, magnet concentrate ratio, alkalinity, and material layer height on the sintering performance and metallurgical performance of the finished ore. The results show that the pre-wetting technology of concentrate and the addition of an appropriate amount of quicklime can promote the high-ratio iron concentrate granulation of synergistic strengthening, under the same granulation moisture conditions, the initial moisture of the mixed iron concentrate is pre-wetted from 3.0% to 7.8%, and 5.5% quicklime is added at the same time, and the air permeability index (JPU) of the granulated mixture is greatly increased from 14.1 to 41.7. On the premise that the air permeability of the mixture is guaranteed, further increasing the alkalinity and layer height can significantly improve the specification of

收稿日期：2022－12－08；**修回日期**：2023－01－08
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目（52004339）
作者简介：周 卫（1979—），男，高级工程师，从事烧结工艺和智能控制方面的研究工作。
通信作者：杨聪聪（1989—），男，博士，副教授，从事烧结球团、低碳与氢冶金、固废资源化等基础理论与工艺研究。

sintering ores，and the metallurgical performance indexes of sinter can meet the requirements of blast furnace smelting. The results will provide important theoretical basis and technical guidance for on-site technical transformation and production.

Key words：magnet concentrate；sintering；granulation；air permeability；metallurgical performance

铁矿是钢铁冶炼的核心原料，其成本约占钢铁总成本的 40%～50%，其质量是决定高炉能否“高效、节能、减排、长寿”的关键因素之一[1]。出于降低成本以及资源供应条件等方面的考量，部分内陆地区钢铁企业仍主要采用自产的铁精粉进行烧结生产，例如我国太钢、八钢、酒钢等钢铁企业烧结原料中自产精矿占比均达到 70% 以上[2-3]。此外，随着全球优质铁矿资源的日益枯竭，由中低品位铁矿细磨深选得到的铁精矿可能作为烧结原料，而使得烧结原料向细粒化发展，因此如何强化高比例细粒铁矿制粒和烧结过程是今后的研究重点方向之一[4-5]。

由于铁精粉粒度较小，高比例铁精矿制粒过程中使用的黏附粉过多时，会造成制粒性能下降，料层透气性恶化，进而影响烧结矿的产量和质量，增加固体能源消耗，也引起碳排放和气体污染物排放量的增加[4]。为改善烧结料层透气性，国内外学者提出了强力混合、添加黏结剂、分流制粒等技术手段来强化高比例铁精矿的制粒过程[6-7]。例如，在传统两段圆筒混合工艺之前加设强力混合机进行强化混匀和制粒，则制粒后混合料的脱粉率降低 6.12%，料层透气性指数提升 13.2%[3]；配加 0.7% 复合黏结剂进行强化制粒，烧结机利用系数提高 5.5%[8]；对采用分流制粒方式对高配比镜铁矿精粉烧结工艺进行强化，烧结料层透气性显著提高，烧结矿产量提高 18.8%[9]。由此可见，强化制粒是促进高配比铁精矿烧结过程提质、降耗、减排的主要手段。

某内陆型钢厂以高比例磁铁精矿（混匀矿中占比≥85%）为原料，在实际生产中出现制粒效果差（混合料 <3 mm 粒级质量分数不足 50%）、烧结矿产质量低等问题。由于料层透气性差，烧结料层高度仅能达到 500 mm，同时利用系数为 1.05 t/(m^2·h)，固体燃料消耗高达 70 kg/t，严重制约烧结生产的提产、降耗、增效。针对上述问题，本文立足现场原料条件和烧结工艺参数，通过烧结杯试验对高配比磁铁精粉的烧结特性进行研究，探究精矿预润湿、生石灰用量、磁铁精粉配比、碱度、料层厚度等因素对烧结性能及成品矿冶金性能的影响，提出高比例磁铁精矿烧结的优化技术和适宜工艺参数，以期为烧结生产提供理论参考。

1　试验原料与研究方法

1.1　试验原料

试验所用原料主要有两种磁铁精粉（SKC 和 MHC）、两种粗铁矿粉（MHF 和 BKF）、石灰石、生石灰和焦粉，均由某内陆型钢厂提供，其主要化学成分和粒度组成分别如表 1～3 所示。由表 1 可知，SKC 和 MHC 均为典型的磁铁精矿，铁品位均在 64% 以上，但 MHC 的 SiO_2 质量分数明显高于 SKC。相比而言，两种粗粉矿 MHF 和 BKF 均为低品位铁矿，全铁品位分别仅有 50.02% 和 42.73%；其中，MHF 是一种高硅粉矿，SiO_2 质量分数高达 15.30%，BKF 则是一种高镁铁矿，MgO 质量分数高达 16.58%；而且，MHF 和 BKF 的烧损均较高，分别达到了 5.66% 和 7.62%。由于两种粗矿粉的脉石质量分数高，其配比宜控制在较低范围内。此外，SKC、MHF 和 BKF 的硫质量分数均偏高，用于烧结时会增加烟气中的 SO_2 质量分数；SKC、MHC 和 BKF 的碱金属质量分数偏高，会对后续高炉冶炼带来一定的不利影响。

由表 2、3 可看出：两种磁铁精粉的粒度较小，<0.045 mm 粒级质量分数大于 75%；而 MHF 和 BKF 为典型烧结粉矿，>3.00 mm 粒级质量分数分别达到 52.19% 和 36.45%。因此，配加一定比例的 MHF 和 BKF 有利于改善铁精矿的制粒性能。

通常认为，磁铁矿（Fe_3O_4）需先氧化为赤铁矿（Fe_2O_3）后方能与 CaO 生成铁酸钙液相。因而，磁铁精矿的高温氧化特性很大程度上影响着烧结过程铁酸钙的生成速率和数量[11]。图 1 所示为 MHC 和 BKC 在室温约为 1 000 ℃、升温速率为 10 ℃/min和空气气氛条件下非等温氧化得到的热

表 1 原料化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of raw materials %

原料名称	TFe	FeO	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P	S	K_2O	Na_2O	烧损
SKC	65.56	28.65	0.94	0.86	1.340	4.08	0.018	0.180	0.14	0.21	-2.49
MHC	64.26	25.21	0.34	0.30	0.100	8.54	0.010	0.012	0.21	0.08	-2.14
MHF	50.02	6.08	3.42	0.50	1.800	15.30	0.024	0.421	0.08	0.04	5.66
BKF	42.73	2.66	2.38	16.58	2.020	6.83	0.014	0.116	0.51	0.04	7.62
石灰石	0.13	0	50.70	4.48	0.043	0.16	0.006	0.023	0.01	0.05	43.45
生石灰	0.21	0.02	85.75	2.61	0.190	2.29	0.007	0.099	0.03	0.09	10.05
焦粉	0.92	—	0.90	0.31	2.520	6.43	0.046	0.160	0.26	0.22	87.01

表 2 两种磁铁精粉的粒度组成(质量分数)

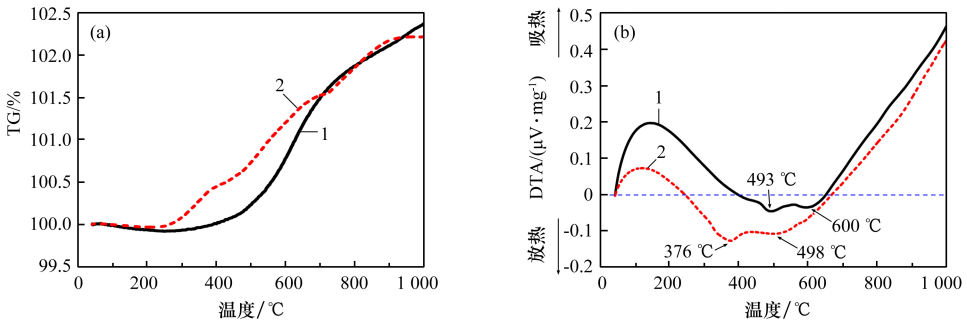
Table 2 Size distribution of two kinds of magnetite concentrates %

原料名称	[0.150,0.250) mm	[0.074,0.150) mm	[0.045,0.074) mm	[0.038,0.045) mm	<0.038 mm
SKC	0.43	3.33	17.33	26.17	52.74
MHC	0.10	0.67	10.07	17.83	71.33

表 3 其他原料的粒度组成(质量分数)

Table 2 Size distribution of other raw materials %

原料名称	≥8.00 mm	[6.30,8.00) mm	[5.00,6.30) mm	[3.00,5.00) mm	[1.00,3.00) mm	[0.50,1.00) mm	[0.25,0.50) mm	<0.25 mm
MHF	11.85	14.44	6.61	19.29	21.48	7.84	7.48	11.01
BKF	9.32	10.15	4.14	12.84	15.77	6.02	6.61	35.15
石灰石	0	0	0	2.01	31.79	17.36	14.94	33.90
生石灰	0	0	0	0	0	0	0	100.00
焦粉	0	0	0.36	4.68	26.55	24.95	23.79	19.67



(a) TG; (b) DTA

1—SKC; 2—MHC。

图 1 两种磁铁精粉的热重 - 差热(TG-DTA)分析曲线

Fig. 1 TG-DTA analysis of two kinds of magnetite concentrates

重 - 差热(TG-DSC)分析曲线。SKC 和 MHC 氧化增重分别从 400 ℃和 260 ℃开始，并同时放出热量；随着温度的升高，两者在差热曲线均存在两处放热峰，可能分别对应磁铁矿颗粒表面和内部发生的氧化反应，同时伴随着质量的持续增加。另需注意到，两种精矿出现放热峰对应的温度不同，其中 SKC 分别为 493 ℃和 600 ℃，MHC 分别为 376 ℃和 498 ℃，表明前者的氧化速率比后者慢；但从热重曲线来看，两者在 700 ~ 900 ℃的氧化速率接近，最终在 1 000 ℃时增重分别达 2.3% 和 2.2%，折算氧化度分别为 74.21% 和 78.90%。造成两种磁铁精矿氧化反应开始温度及峰值温度

不同的原因之一是 MHC 与 SKC 的粒度组成不同，前者明显比后者细，因而具有较高的高温反应性；另一方面，可能是因为 SKC 的硫含量较 MHC 高，硫化物低温下分解限制了磁铁矿的氧化。

1.2　研究方法

烧结杯试验主要包括配料、混匀、制粒、烧结、成品检测等环节。烧结试验的配矿基本条件如表 4 所示。石灰石配比根据烧结矿碱度计算确定(碱度设为 1.65 ~ 2.00)，生石灰配比为 2.0% ~ 2.5%，自然 MgO 质量分数为 1.4% ~ 1.7%，内返矿配比为 30%。配矿、加水混合和制粒过程均按相应方案进行，混合和制粒均采用内径为 600 mm、长 1 000 mm 的圆筒混合机，控制混合机填充率为 10%，转速为 16 r/min，制粒时间为 5 min。

表 4　烧结试验配矿基本条件

Table 4　Ore blends for sintering tests

配矿方案	SKC	MHC	MHF	BKF
A	69.3	10.7	14.0	6.0
B	78.0	12.0	7.0	3.0
C	86.7	13.3	0	0

烧结试验在直径为 200 mm 的烧结杯中进行，料层厚度可在 500 ~ 800 mm 范围内调整，铺底料厚度约为 50 mm。具体试验条件：点火温度为 1 100 ℃、点火时间为 1.5 min、点火负压为 6 kPa，烧结负压为 12 kPa；到达烧结终点以后，将抽风负压调整至 6 kPa，冷却 5 min 后将烧结矿卸出在空气中自然冷却。通过分别优化焦粉用量和烧结水分，在各自适宜烧结条件和返矿平衡(返矿平衡系数为 1 ± 0.05)的条件下考察预润湿、磁铁精粉配比、碱度以及料层厚度对高比例磁铁精矿制粒和烧结过程的影响。

混合料的透气性采用日本透气性指数阻力(japanese permeability units，JPU)来评价。烧结过程评价指标包括垂直烧结速度(FFS)、利用系数、成品率、固体燃料消耗和成品烧结矿转鼓强度，具体测定方法在部分参考文献已有报道[10]。成品烧结矿经破碎、缩分和取样后进行化学成分和光学显微矿相分析，并按照《铁矿石还原性的测定方法》(GB/T 13241)和《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)测定其还原度和低温还原粉化率。

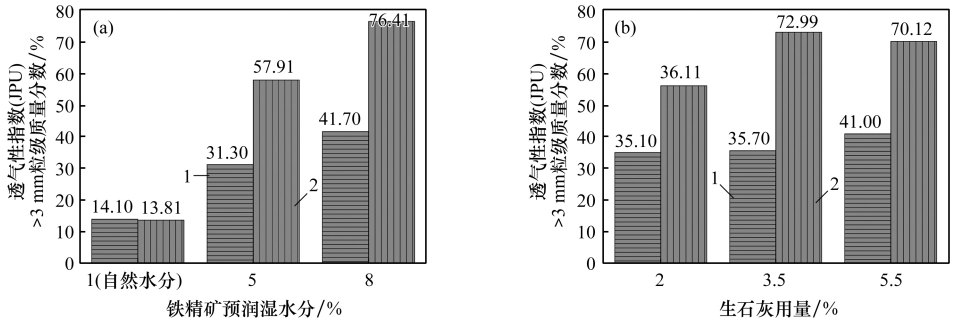
2　结果与分析

2.1　精矿预润湿和生石灰用量的影响

由于原始水分质量分数均较低（≤3%），研究涉及的烧结用铁精矿在实际生产中并未进行预先润湿，而是采用传统二段圆筒混合工艺，在一混加水混匀、二混制粒。但铁精矿粒度小、制粒效率低和混合料透气性差，成为制约高比例铁精矿烧结生产的主要因素。在混合制粒过程中，水分难以在短时间内将矿粉表面润湿、铺展并均匀分散，因而黏附粉之间无法形成有效的毛细引力促使制粒小球长大，因而矿粉的制粒强度差且脱粉严重。因此，针对方案 B，分别考察精矿预润湿和生石灰用量对其制粒和烧结性能的影响。

在生石灰用量为 5.5%、制粒水分质量分数为 7.8% 条件下，将铁精矿预润湿至不同水分质量分数时混合料的透气性指数和 >3 mm 粒级质量分数的变化如图 2(a)所示。由图 2(a)可知：尽管制粒水分质量分数保持不变，但随着精矿预润湿水分的增加，混合料透气性指数(JPU)由 14.1 显著增加至 41.7，>3 mm 粒级质量分数则由 13.81% 增加到 76.41%，表明预润湿后铁精矿颗粒在进入圆筒混合机后能快速黏附到粗颗粒上长大，提高制粒效率。图 2(b)则为在精矿预润湿水分质量分数为 8%、制粒水分质量分数为 7.8% 条件下，生石灰用量对混合料透气性指数和 >3 mm 粒级质量分数的影响。由图 2(b)可知：在精矿预润湿至水分质量分数为 8% 的前提下，提高生石灰用量也能使混合料透气性指数(JPU)由 35.1 增至 41.7，>3 mm 粒级质量分数则由 56.11% 提高到 76.41%，这得益于生石灰消化形成的 $Ca(OH)_2$ 起到黏结剂作用改善了铁精矿制粒效果。

在混合料水分质量分数为 7.8%、二元碱度为 1.65、料层厚度为 550 mm 的条件下，进一步对精矿预润湿水分和生石灰用量对烧结产、质量的影响进行研究，结果如表 5 所示。由表 5 可知，精矿预润湿程度和生石灰用量的增加，能显著改善烧结矿的产、质量指标，同时降低固体燃料消耗。尤其是随着精矿预润湿水分质量分数由1% 增加



（a）铁精矿预润湿水分；（b）生石灰用量

1—透气性指数；2—>3 mm 粒级质量分数。

图 2 精矿预润湿水分和生石灰用量对方案 B 混合料透气性和 >3 mm 粒级质量分数的影响

Fig. 2 Effect of pre-wetting and burnt lime dosage on the permeability and the mass fraction of particles with particle size >3 mm of sinter mix for blend B

表 5 精矿预润湿和生石灰用量对方案 B 烧结性能的影响

Table 5 Effect of pre-wetting and burnt lime dosage on the sintering performance of blend B

精矿预润湿水分/%	生石灰用量/%	焦粉用量/%	垂直烧结速度/($mm\cdot min^{-1}$)	转鼓强度(>6.3 mm)/%	利用系数/($t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$)	固体燃料消耗/($kg\cdot t^{-1}$)
1	5.5	3.4	14.18	30.14	0.45	119.09
5	5.5	3.4	18.66	51.60	1.47	64.76
8	5.5	3.4	20.75	54.67	1.60	51.17
8	2.0	3.5	21.43	52.80	1.55	54.54
8	3.5	3.5	21.24	53.07	1.57	52.98
8	5.5	3.4	20.75	54.67	1.60	51.17

到 8% 时，烧结矿的转鼓强度由 30.14% 增加到 54.67%，利用系数由 0.45 $t/(m^2\cdot h)$ 提高到 1.60 $t/(m^2\cdot h)$，固体燃料消耗则相应从 119.09 kg/t 减少到 51.17 kg/t，这主要得益于混合料透气性的明显改善，从而料层中氧位提高，促进了磁铁矿氧化和铁酸钙黏结相的生成。

由上述结果可见，精矿预润湿和提高生石灰用量是协同强化高比例磁铁精矿制粒和烧结性能的重要技术。

2.2 磁铁精矿配比的影响

在铁精矿预润湿水分质量分数为 8%、生石灰用量为 5.5%，混合料水分质量分数为 7.8%、二元碱度为 1.65、烧结料层厚度为 550 mm 条件下，对比不同配比(磁铁精矿配比为 80%~100%)的烧结性能，结果如表 6 所示。由表 6 可知，当磁铁精粉配比由 100% 降低到 80% 时，即粗矿粉配比由 0% 增至 20%，混合料透气性改善，烧结矿转鼓强度先由 53.73% 轻微提高到 54.67% 后又降低至 51.60%，利用系数由 1.65 $t/(m^2\cdot h)$ 减少到 1.45 $t/(m^2\cdot h)$，固体燃料消耗则先由 49.53 kg/t 升高至 51.17 kg/t 后减少至 49.91 kg/t。由此可知，配加一定比例的粗矿粉有助于增大核颗粒与黏附粉的比值，改善烧结料层透气性，对烧结提质、增产以及降耗是有利的[11-12]。

表 6 磁铁精矿比例对烧结性能的影响

Table 6 Effect of ratio of magnetite concentrates on sintering performance

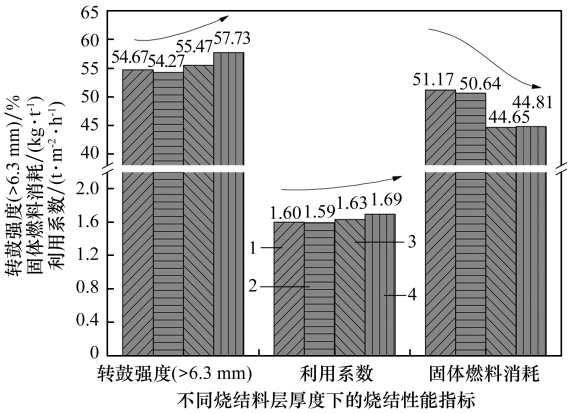
磁铁精矿配比/%	焦粉用量/%	透气性指数(JPU)	垂直烧结速度/($mm\cdot min^{-1}$)	转鼓强度(>6.3 mm)/%	利用系数/($t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$)	固体燃料消耗/($kg\cdot t^{-1}$)
80(方案 A)	3.3	48.5	21.21	53.73	1.65	49.53
90(方案 B)	3.4	41.7	20.75	54.67	1.60	51.17
100(方案 C)	3.4	38.9	18.38	51.60	1.45	49.91

2.3　二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]的影响

针对方案 B，在铁精矿预润湿水分质量分数为 8%、生石灰用量为 5.5%，混合料水分质量分数为 7.8%、烧结料层厚度为 550 mm 的条件下，研究二元碱度对其烧结性能的影响，结果如表 7 所示。由表 7 可知，当二元碱度由 1.65 提高到 2.00 时，烧结矿转鼓强度由 54.67% 提高到 60.13%，利用系数由 1.60 t/(m^2·h)增加到 1.74 t/(m^2·h)，固体燃料消耗由 51.17 kg/t 减少到 47.29 kg/t。这是因为，在料层氧位得到保证的前提下，提高碱度有助于促进 CaO 与磁铁矿氧化生成的 Fe_2O_3 反应生成铁酸钙系黏结相，抑制硅酸盐黏结相体系发展，提高成品烧结矿的转鼓强度和产量；此外液相生成温度的降低也有助于减少所需燃料用量，降低固体燃料消耗[13-14]。

2.4　料层厚度的影响

厚料层烧结技术有利于充分利用料层底部蓄热强化烧结矿固结，对提高烧结矿的产量、降低能源消耗具有重要的作用[15-16]。上述试验表明，通过优化混合料二元碱度和原矿水分预润湿量等措施可显著强化制粒，因而在保证料层透气性的基础上可进一步提高料层厚度。针对方案 B，在二元碱度为 1.65、铁精矿预润湿水分质量分数为 8% 的条件下研究不同料层厚度对烧结性能的影响，结果如图 3 所示。由图 3 可知，当料层厚度从 550 mm 增加至 750 mm 时，在相应最佳烧结条件下，适宜的焦粉用量可由 3.4% 降低至 3.0%，而烧结矿转鼓强度由 54.67% 增加到 57.73%；固体燃料消耗由 51.17 kg/t 减少至 44.81 kg/t；利用系数由 1.60 t/(m^2·h)增加到 1.69 t/(m^2·h)。由此可见，在混合料透气性良好的情况下，料层厚度提高到 750 mm，烧结矿产、质量指标明显改善。即对于高比例精矿而言，只要保证料层透气性，同样可通过厚料层烧结改善烧结矿产、质量指标。



料层厚度/mm：1—550；2—600；3—650；4—750。

图 3　料层厚度对方案 B 烧结性能的影响

Fig. 3　Effect of sinter bed height on sintering performance of Blend B

2.5　成品烧结矿性能分析

2.5.1　化学成分

不同试验条件下，成品烧结矿的化学成分如表 8 所示。由表 8 可知：所有基准方案(碱度为 1.65)的成品烧结矿的全铁品位和 SiO_2 质量分数分别为 58.0%~58.5% 和 5.2%~5.5%，S、P 等杂质质量分数均较低。随着磁铁精粉配比的增加，烧结矿的 Fe 品位逐渐增加，SiO_2、MgO、Al_2O_3 等质量分数逐渐降低，对烧结矿提铁降硅有利。从烧结矿的 FeO 质量分数来看，随着碱度或料层厚度的增加，烧结矿的 FeO 质量分数呈下降趋势，从 13.24% 下降到 10.74%。这是因为增加碱度或料层厚度时，烧结所需适宜固体燃料配比有所降低，烧结料层氧化性气氛增强的缘故。

2.5.2　冶金性能

图 4 对比了不同条件下所得成品烧结矿的还原性和低温还原粉化性能。由图 4 可知：对于 1#~3#样品，当磁铁精矿配比由 80% 增加为 100% 时，还原度指数有轻微下降，低温还原粉化率

表 7　二元碱度对方案 B 烧结性能的影响

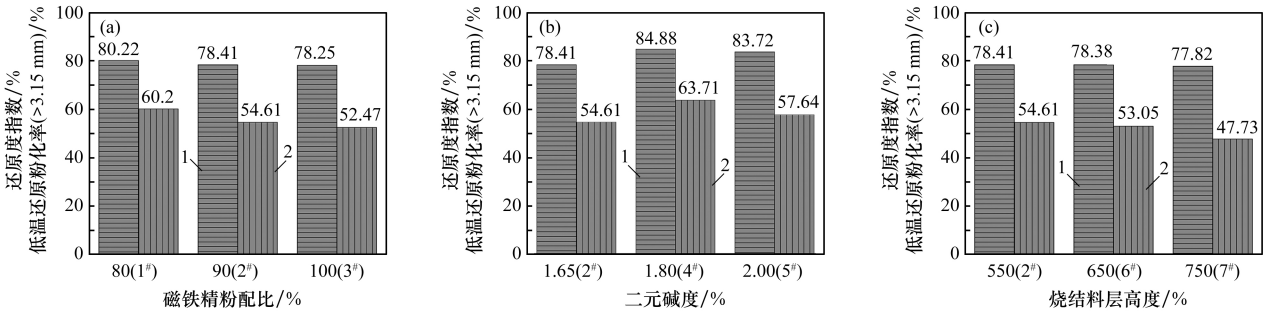
Table 7　Effect of binary on sintering performance of blend B

二元碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]	焦粉用量/%	透气性指数(JPU)	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	转鼓强度(>6.3 mm)/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})
1.65	3.4	41.7	20.75	54.67	1.60	51.17
1.80	3.2	47.0	21.61	55.33	1.66	48.37
2.00	3.0	50.9	23.64	60.13	1.74	47.29

表 8 不同试验条件下成品烧结矿的化学成分

Table 8 Chemical composition of sinter products under different test conditions

样品编号	试验方案	料层厚度/mm	碱度	化学成分(质量分数)/%							
				TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S
1#	A	550	1.65	59.31	11.91	5.07	8.18	1.15	1.24	0.022	0.017
2#	B	550	1.65	57.99	13.24	5.50	8.90	1.44	1.25	0.021	0.018
3#	C	550	1.65	57.03	10.86	5.90	10.02	1.67	1.27	0.017	0.023
4#	B	550	1.80	57.28	12.76	5.53	9.98	1.48	1.32	0.023	0.023
5#	B	550	2.00	56.92	10.74	5.28	10.64	1.56	1.30	0.022	0.028
6#	B	650	1.65	58.01	13.43	5.55	9.27	1.42	1.31	0.023	0.017
7#	B	750	1.65	58.32	11.09	5.49	8.81	1.50	1.25	0.021	0.013



(a) 磁铁精粉配比；(b) 二元碱度；(c) 烧结料层厚度

1—还原度指数；2—低温还原粉化率。

图 4 不同烧结条件下所得成品烧结矿的还原度及低温还原粉化率(>3.15 mm)对比

Fig. 4 Comparison of RI and RDI(>3.15) mm of sinter products obtained under different sintering conditions

(>3.15 mm)则由 60.20% 下降至 52.47%，表明磁铁矿比例增加对成品烧结矿冶金性能不利；反之，结合表 1 中原料成分可知，提高粗矿粉尤其高镁 BKF 配比时，成品烧结矿中 MgO 质量分数随之增大，有利于稳定磁铁矿晶格，抑制磁铁矿氧化和骸晶状赤铁矿的生成，从而改善烧结矿的低温还原粉化性能[17-18]。

对比 2#、4#、5#样品的冶金性能可知，提高碱度显著改善成品烧结矿还原性和低温还原粉化性能。当烧结矿碱度由 1.65 增加到 2.0 时，烧结矿还原度指数提高了 5 个百分点以上，低温还原粉化率(>3.15 mm)增加 3~9 个百分点，这主要是因为随着碱度的升高，烧结矿的铁酸钙生成量增加，能够显著改善烧结矿的强度和还原性能[17-18]。

而由 2#、6#、7#样品的冶金性能结果可知，当烧结的料层厚度从 550 mm 提高至 750 mm 时，烧结矿的还原度指数变化不大，而还原粉化性整体不太理想(<55%)，且呈明显变差趋势。这是因为，随着料层厚度的提高，所需焦粉用量减少，烧结料层中氧位增强，成品烧结矿 FeO 质量分数降低，赤铁矿生成量增加，而赤铁矿被 CO 还原成磁铁矿过程中发生明显体积膨胀而使烧结矿内应力明显增大，导致烧结矿结构破坏、低温还原粉化率下降。

2.5.3 矿相分析

将 2#(方案 B、550 mm 料层厚度、1.65 碱度)、5#(方案 B、550 mm 料层厚度、2.00 碱度)和 7#(方案 B、750 mm 料层厚度、1.65 碱度)成品烧结矿制成的光片置于光学显微镜下观察，分析其物相组成和微观结构，结果如表 9 和图 5 所示。

从 1#成品烧结矿的微观结构来看，在烧结过程中，方案 B(磁铁矿 90%)的磁铁精粉并没有完全被氧化，烧结矿中铁酸钙和硅酸盐(玻璃相)两种黏结相体系同时存在，烧结矿结构和强度除靠铁酸钙与磁铁矿交织连接外，还依赖于磁铁矿颗粒之间的扩散黏结以及硅酸盐相黏结[4,19]。提高

表 9　成品烧结矿中各主要物相占比(质量分数)

Table 9　Phase composition of sinter products　%

样品编号	试验方案	料层厚度/mm	碱度	磁铁矿	铁酸钙	赤铁矿	玻璃相
2#	B	550	1.65	48	24	14	14
5#	B	550	2.00	46	33	11	10
7#	B	750	1.65	43	28	16	13

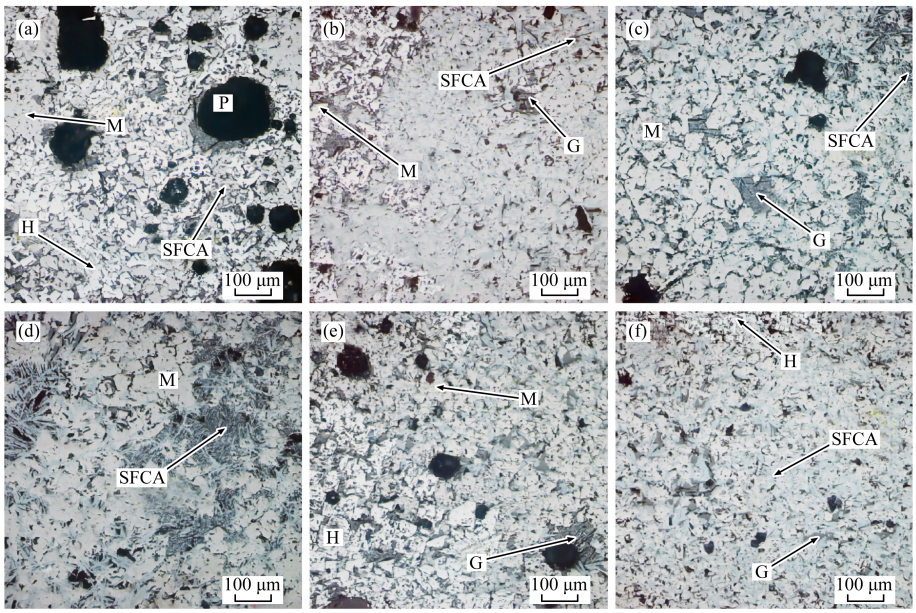
二元碱度有助于促进烧结液相黏结相尤其是针状铁酸钙的生成，是提高碱度后烧结矿转鼓强度和还原性明显提升的重要原因。相比而言，提高烧结料层厚度有利于改善料层的蓄热作用，提高下层烧结温度，减少燃料用量的同时提高料层氧位，促进铁酸钙生成[20]，通过 7#与 1#烧结矿的微观结构对比可知，提高料层厚度后赤铁矿和铁酸钙含量均有所提高，从而使烧结矿转鼓强度得到改善；但另一方面，提高料层厚度对减少玻璃相含量影响不大，说明二元碱度时是决定烧结矿物相组成和性质的最主要因素。

3　结　论

（1）精矿预润湿和提高生石灰用量具有协同强化高比例磁铁精矿制粒和烧结性能的作用。配加 5.5% 的生石灰，将原矿水分预润湿至 7.8% 左右时，烧结料层的透气性显著改善，烧结矿的转鼓强度由 30.14% 增加到 54.67%，利用系数由 0.45 t/(m^2·h^1)提高到 1.60 t/(m^2·h^1)，固体燃料消耗则相应从 119.09 kg/t 减少到 51.17 kg/t。

（2）在确保料层透气性良好的前提下，提高碱度和料层厚度均能显著改善高比例磁铁精矿的烧结性能。当二元碱度由 1.65 提高到 2.00 时，烧结矿转鼓强度提高 9.99%，固体燃料消耗降低 7.58%，利用系数提升 8.75%；当烧结料层高度由 550 mm 提高至 750 mm 时，烧结矿转鼓强度提高 5.60%，固体燃料消耗减少 12.43%，利用系数提高 5.63%。

（3）就烧结矿还原性和低温还原粉化性而言，提高烧结矿二元碱度有利于促进烧结矿中铁酸钙的生成，抑制硅酸盐玻璃相体系的发展，从而显著改善烧结矿的还原性能；提高料层厚度虽能通过减少燃料用量在一定程度上促进赤铁矿和铁酸钙生成，但对玻璃相生成的抑制作用较有限，导致烧结矿的低温还原粉化性有所变差。



(a)、(b)：试验方案 B(550 mm 料层厚度，1.65 碱度)；(c)、(d)：试验方案 B(550 mm 料层厚度，2.00 碱度)；(e)、(f)：试验方案 B(750 mm 料层厚度，1.65 碱度)

H—赤铁矿；M—磁铁矿；SFCA—复合铁酸钙；G—玻璃相；P—孔隙。

图 5　成品烧结矿的主要物相和微观结构

Fig. 5　Main mineral phases and microstructure of sinter products

参考文献:

[1] 冯根生. 我国铁矿粉烧结技术发展思路及措施[J]. 山东冶金,2013,35(3):1-6.
FENG G S. Development ideas and measures of iron ore powder sintering technology in China[J]. Shandong Metallurgy,2013,35(3):1-6.

[2] SHI B J,ZHU D Q,PAN J,et al. Combined effect of MgO and basicity varied by different dolomite and burnt lime addition on sintering performance of magnetite concentrates [J]. Iron & Steelmaking,2020,47(5):567-573.

[3] 范晓慧,张一雄,季志云,等. 强力混合对高比例精矿烧结的影响及机制[J]. 钢铁研究学报,2021,33(1):25-31.
FAN X H, ZHANG Y X, JI Z Y, et al. Effect and mechanism of strong mixing on sintering of high proportion concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research,201,33(1):25-31.

[4] HAN H L, LU L M. Recent advances in sintering with high proportions of magnetite concentrates [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(4):217-230.

[5] 周明顺,王义栋,赵东明,等. 高配比磁铁精矿烧结技术的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(5):1-9.
ZHOU M S, WANG Y D, ZHAO D M, et al. Research progress on sintering technology of high ratio magnetite concentrate[J]. Iron & Steel,2020,55(5):1-9.

[6] YANG C C, ZHU D Q, PAN J, et al. Influence of the magnetite concentrate properties on sintering performance of magnetite-hematite-goethite iron ore blends and sinter quality[C]//Iron Ore 2019 Conference. Perth:Australasian Institute of Mining and Metallurgy,2019:182-186.

[7] IWAMI Y, YAMAMOTO T, OYAMA N, et al. Improvement of sinter productivity by control of magnetite ore segregation in sintering bed[J]. ISIJ International, 2018,58(12):2200-2209.

[8] 何木光,蒋大军,杜斯宏,等. 高钛型钒钛磁铁矿烧结技术进步[J]. 钢铁钒钛,2013,34(4):47-51.
HE M G,JIANG D J,DU S H,et al. Sintering technology progress of high titanium vanadium titanium magnetite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2013,34(4):47-51.

[9] 朱德庆,郭正启,潘建,等. 分流制粒强化巴西某镜铁矿的烧结性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(11):3719-3726.
ZHU D Q, GUO Z Q, PAN J, et al. Flow pelletizing strengthens the sintering properties of a specularite in Brazil[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2014,45(11):3719-3726.

[10] 师本敬. 预压成型强化细粒镜铁矿粉烧结工艺与机理研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
SHI B J. Technology and mechanism of improving sintering performance of fine-graded specularite by pre-briquetting[D]. Changsha:Central South University, 2014.

[11] YANG L X, MATTHEWS E. Oxidation and sintering of magnetite ore under oxidising conditions[J]. ISIJ International,2007,37(9):854-861.

[12] YANG C C, ZHU D Q, PAN J, et al. Some basic properties of granules from ore blends consisting of ultrafine magnetite and hematite ores[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2019, 26(8):953-962.

[13] 张建良,刘东辉,刘浩,等. 核矿石对低钛型钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响[J]. 钢铁,2017,52(9):16-21;26.
ZHANG J L,LIU D H,LIU H,et al. Effect of nuclear ore on granulation by sintering of low-titanium vanadium titanium magnet powder[J]. Iron & Steel,2017,52(9):16-21;26.

[14] 贺淑珍. 进一步提高细精矿烧结料层厚度的试验[J]. 中国冶金,2016,26(9):6-11.
HE S Z. Test for further increasing the thickness of fine concentrate sinter layer[J]. China Metallurgy, 2016, 26(9):6-11.

[15] 吴胜利,陈东峰,赵成显,等. 提高厚料层烧结燃料燃烧性的试验研究[J]. 钢铁,2010,45(11):16-21.
WU S L, CHEN D F, ZHAO C X, et al. Experimental study on improving combustion performance of sintered fuel with thick layer[J]. Iron & Steel,2010,45(11):16-21.

[16] ZHANG M M, ANDRADE M W. Effect of MgO and basicity on microstructure and metallurgical properties of iron ore sinter[J]. Characterization of Minerals Metals & Materials,2016:167-174.

[17] 李建,毛晓明,朱德庆. 影响八钢烧结矿还原性能的因素分析[J]. 烧结球团,2018,43(2):20-24.

(下转第112页)

55 – 58.

[7] 孙普. 烧结脱硫废水处理工艺的改进及优化[J]. 南方金属,2016,209(2):45 – 48.
SUN Pu. Optimization of treatment process for FGD waste water of sintering at SGIS[J]. Southern Metal, 2016, 209(2):45 – 48.

[8] 张梅,付志刚,吴滨,等. 钢铁冶金烧结机头电除尘灰中氯化钾的回收[J]. 过程工程学报,2014,14(6):979 – 983.
ZHANG Mei, FU Zhigang, WU Bin, et al. Recovery of potassium chloride from sintering EAF dust[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(6): 979 – 983.

[9] 乔波波,康安. 氢氧化钙脱硫剂在烧结烟气湿法脱硫中的应用[C]//钢铁流程绿色制造与创新技术交流会论文集. 天水:钢铁研究总院,2018.
QIAO Bobo, KANG An. Application for desulfurizer of calcium hydroxide in wet desulphurization for sintering flue gas[C]//Proceedings of Green Manufacturing and Innovative Technology Exchange Conference on Steel Process. Tianshui: Central Iron and Steel Research Institute,2018.

[10] 李志峰,林七女,董晓春,等. 烧结机头除尘灰生产氯化钾的应用研究[J]. 中国资源综合利用,2010,28(2):13 – 15.
LI Zhifeng, LIN Qinv, DONG Xiaochun, et al. Research and application of KCl production in sintering head removed dust[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2010,28(2):13 – 15.

[11] 蒋雨露,魏愈宋,刘真,等. 含重金属烧结机机头灰的综合利用研究[J]. 烧结球团,2020,45(3):59 – 64.
JIANG Yulu, WEI Yusong, LIU Zhen, et al. Research on comprehensive utilization of sinter ash containing heavy metals of sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(3):59 – 64.

[12] 于蒙. 高盐废水浓缩结晶回用工艺技术[J]. 山东化工,2019,48(13):242;246.
YU Meng. Technology of concentration and crystallization recycling of high-salt wastewater[J]. Shandong Chemical Industry,2019,48(13):242,246.

[13] 张益魁,王建业. 光卤石矿中氯化钾和氯化钠分离工艺的试验研究[J]. 海湖盐与化工,1994(5):1 – 5.
ZHANG Yikui, WANG Jianye. Experimental study on the separation process of potassium chloride and sodium chloride in carnallite ore[J]. Sea-Lake Salt and Chemical Industry,1994(5):1 – 5.

(上接第64页)

LI J, MAO X M, ZHU D Q. Analysis of factors affecting the reduction performance of sintering ore from Bayi steel [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(2): 20 – 24.

[18] YANG L X, MATTHEWS E. Sintering reactions of magnetite concentrates under various atmospheres[J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1057 – 1065.

[19] WANG J K, MA P N, MENG H X, et al. Investigation on the evolution characteristics of bed porous structure during iron ore sintering[J]. Particuology, 2022, 74: 35 – 37.

[20] JI M T, LUO J W, ZHOU H. Experimental study on melt and flow characteristics and pore structure of iron ore [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 264: 118185.

(上接第92页)

[15] 甘德清,韩亮,刘志义,等. 尾砂粒级组成对充填体强度特性影响的试验研究[J]. 化工矿物与加工,2017,46(4):57 – 61.
GAN Deqing, HAN Liang, LIU Zhiyi, et al. Experimental study on influence of tailing size composition on strength characteristics of backfill[J]. Chemical minerals and processing, 2017, 46(4): 57 – 61.

[16] 彭浩. 基于骨料级配优化的混凝土配合比设计方法研究[D]. 北京:北京建筑大学,2014.
PENG Hao. Research on concrete Proportion design method based on aggregate Gradation optimization[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.

[17] 陈忠达,袁万杰,郑启东. 级配理论应用研究[J]. 重庆交通学院学报. 2007,29(9):111 – 114.
CHEN Zhongda, YUAN Wanjie, ZHENG Qidong. Application of gradation theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 29(9): 111 – 114.