烧结

高比例褐铁矿烧结过程优化及降耗技术

居鹤鸣[1]，方 磊[1]，胥海林[1]，项思敏[2]，姜文政[2]，钟 强[2]
（1. 南京南钢产业发展有限公司，江苏 南京 211500；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：为解决高比例褐铁矿烧结过程中产量低、强度差以及固体燃料消耗高等问题，本文围绕热工制度与燃料结构协同优化开展研究，系统考察点火时间、保温时间、燃料用量及粒度组成对烧结指标的影响，并采用 XRD、光学显微镜等检测手段分析烧结矿的矿物组成和微观结构。研究结果表明：在混合料水分质量分数为 7.3%、无烟煤配比为 5.42%、点火时间为 90 s 和保温时间为 90 s 的条件下，烧结矿成品率、转鼓强度、烧结机利用系数和固体燃料消耗分别为 73.44%、68.85%、1.477 t/(m²·h) 和 67.01 kg/t。在此基础上，调整燃料粒度组成，适当降低≤0.5 mm和 >5 mm 粒级占比，设置 3～5、1～3 mm 和 0.5～1 mm 粒级占比分别为 47.86%、43.13% 和 9.01%，使固体燃料消耗进一步降低至 66.09 kg/t，较优化前降低 3.09 kg/t。烧结矿铁品位达到 57.2%，主要矿物相为磁铁矿、赤铁矿、铁酸钙与硅酸盐；针状铁酸钙呈交织状发育，使磁铁矿、赤铁矿及硅酸盐等物相紧密黏结成牢固整体；烧结矿微观结构致密均匀，力学性能得到有效改善。本文研究结果可为高比例褐铁矿的低碳高效烧结提供技术参考。

关键词：高比例褐铁矿；铁矿烧结；粒度组成；固体燃料消耗；燃料结构
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0037－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.027

Sintering process optimization and consumption reduction technology for a high proportion of limonite

JU Heming[1], FANG Lei[1], XU Hailin[1], XIANG Simin[2], JIANG Wenzheng[2], ZHONG Qiang[2]
(1. Nanjing Nangang Industry Development Co., Ltd., Nanjing 211500, Jiangsu, China;
2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to solve such problems as low yield, poor strength and high solid fuel consumption in the sintering process for a high proportion of limonite, a research on the collaborative optimization of thermal system and fuel structure is carried out, the effects of ignition time, holding time, fuel dosage and particle size composition on the sintering indexes are systematically investigated, XRD, optical microscopy and other detection methods are used to analyze the mineral composition and microstructure of the sinter. The results show that the yield of sinter, drum strength, utilization coefficient of sintering machine and solid fuel consumption are 73.44%, 68.85%, 1.477 t/(m²·h) and 67.01 kg/t, respectively, under the conditions of moisture content of the mixture of 7.3%, anthracite ratio of 5.42%, ignition time of 90 s and holding time of 90 s. On this basis, the fuel particle size composition is adjusted, and the proportion of ≤0.5 mm and >5 mm particle size is appropriately reduced, and the proportion of 3～5, 1～3 mm and 0.5～1 mm particle size is set to 47.86%, 43.13% and 9.01%, respectively, so that the solid fuel consumption is further reduced to 66.09 kg/t, which is 3.09 kg/t lower than before optimization. The iron grade of the sinter reaches 57.2%, and the main mineral facies are

收稿日期：2025－10－13；**修回日期**：2025－12－05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274290)
作者简介：居鹤鸣(1976—)，男，高级工程师，从事烧结球团工艺技术方面的研究工作。
通信作者：钟 强(1986—)，男，博士，副教授，从事钢铁冶金、二次资源综合利用等方面的研究。

magnetite, hematite, calcium ferrite and silicate. The needle-like calcium ferrite develops in an interlaced manner, tightly bonding magnetite, hematite and silicate into a solid whole. The microstructure of the sinter is dense and uniform, and the mechanical properties are effectively improved. The results can provide a technical reference for low-carbon and efficient sintering of high-proportion limonite.

Key words: high proportion of limonite; iron ore sintering; particle size composition; solid fuel consumption; fuel structure

钢铁行业作为国民经济的重要支柱产业，其持续发展对国家经济的稳定增长具有重要意义。目前，我国已成为全球最大的钢铁生产国和消费国。2024 年，我国粗钢产量达到 10.05 亿吨，占世界粗钢产量的 53.9%[1-3]。我国钢铁行业以高炉—转炉长流程为主要生产模式。烧结矿作为高炉炼铁的主要炉料，其质量直接影响高炉冶炼效率和生产成本，而烧结矿质量主要取决于含铁原料的品质[4-5]。高质量烧结矿对于提升高炉冶炼效能、降低生产成本及改善最终产品质量至关重要。在“双碳”目标引领下，烧结技术正朝着降低固体燃料消耗与工序能耗、增加料层厚度并优化其透气性的方向持续发展[6-9]。

近年来，随着钢铁工业的快速发展，我国优质铁矿资源日益匮乏，导致高品位铁矿价格持续上涨。因此，寻找可替代高品位铁矿且具有成本优势的含铁原料已成为行业发展的迫切需求。褐铁矿具有储量丰富、可开采量高、价格低廉的优势。在烧结工艺中，合理提高褐铁矿配比可显著降低烧结生产成本[10-14]。褐铁矿并非单一矿物，而是以针铁矿为主，辅以水针铁矿、纤铁矿、赤铁矿等含水氧化铁矿物的天然混合物。在烧结过程中，结晶水分解吸热，消耗部分热量。结晶水分解后形成大量孔洞，为气体传输提供了通道，导致烧结矿矿化时间缩短、质量劣化[15-19]。同时，褐铁矿同化温度较低，易导致烧结矿局部熔融。烧结过程中，颗粒内部尚未充分致密化即被液相包围，致使烧结料层透气性恶化、成品率下降[20-24]。另外，褐铁矿烧结时适宜的水分质量分数较赤铁矿烧结高 30%~40%，水分在烧结料层中迁移也会消耗热量，导致烧结生产能源消耗提高。高比例褐铁矿烧结时(褐铁矿配比大于 50%)，烧结料层温度降低且高温保持时间缩短，形成结构疏松、高孔隙率的烧结矿，致使其强度下降[25-27]。因此，高比例褐铁矿烧结面临烧结矿强度降低、成品率下降及固体燃料消耗升高等挑战。

本文旨在解决高比例褐铁矿烧结中固体燃料消耗偏高的问题，通过优化烧结混合料中水分、燃料配比及燃料偏析等工艺参数，实现固体燃料消耗的有效降低；此外，通过研究成品烧结矿的性能，系统对比基准条件与优化工艺条件下烧结矿的质量与冶金性能，为进一步提升高比例褐铁矿生产烧结矿的质量及降低固体燃料消耗提供理论依据与技术支撑。

1 原料性能与试验方法

1.1 试验原料

试验所用含铁物料的化学成分及配矿方案如表 1 所示。由表 1 可见，不同原料的 TFe 质量分数差异较大，其中 PB 粉、麦克粉、巴西卡粉和龙桥精粉的 TFe 质量分数 >60%。试验中，含铁原料和白云石(混匀矿中占比为 8.2%)混合后作为混匀矿，混匀矿配比为 85.9%，石灰石、生石灰、无烟煤配比分别为 3.7%、5.0%、5.42%。根据配矿方案可知，含铁原料中褐铁矿配比高达 75%。

试验所用固体燃料为无烟煤，其工业分析、灰分化学成分如表 2 所示。由表 2 可见，该燃料具有高固定碳(80.78%)、低挥发分(6.66%)和中等灰分(12.56%)的典型特征。高固定碳含量保证了充足的热量供应和较长的燃烧持续时间，有利于维持烧结料层温度并延长高温保持时间，这对于补偿褐铁矿结晶水分解吸热、改善烧结矿致密化具有积极作用。然而，低挥发分导致着火困难、燃烧速度缓慢，需要通过延长点火时间(90 s)和优化燃料粒度配比来改善燃烧效率。此外，12.56%的灰分质量分数使得燃料中惰性物质含量较高，降低了燃料的有效热值，这也是固体燃料消耗偏高的重要原因之一。

表 1　含铁原料的主要化学成分及配比(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and ratio of iron containing raw materials　　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S	烧损	配比
PB 粉	61.82	0.40	3.07	0.09	0.09	1.99	0.01	0.13	0.11	0.01	5.56	15.5
麦克粉	60.11	0.43	4.56	0.08	0.07	2.50	0.02	0.12	0.08	0.02	6.44	10.0
巴西卡粉	63.74	0.47	2.93	0.08	0.06	1.96	0.02	0.12	0.07	0.01	3.22	12.0
巴混粉	57.12	0.76	12.73	0.08	0.08	1.56	0.02	0.12	0.09	0.01	2.90	8.0
火箭粉	58.06	0.30	6.01	0.10	0.07	2.78	0.02	0.14	0.09	0.02	7.55	10.0
阿特粉	56.39	0.05	6.88	0.13	0.06	2.32	0.05	0.13	0.11	0.01	8.95	10.0
罗布河粉	56.02	0.16	4.48	0.16	0.12	2.53	0.02	0.13	0.04	0.01	12.19	15.0
龙桥精粉	63.82	6.59	3.40	0.22	0.17	1.09	0.03	0.15	0.08	0.02	2.55	8.0
钢渣	41.08	38.46	9.32	31.30	5.67	1.26	0.01	0.15	0.96	0.05	−5.89	0.8
杂料	47.02	24.67	6.38	14.55	3.03	1.94	0.15	0.18	0.32	0.20	2.18	2.5

试验所用熔剂的主要化学成分如表 3 所示。由表 3 可见，生石灰 CaO 质量分数为 90.48%，在所用熔剂中较低，其烧损达到了 5.51%，Al_2O_3、SiO_2 质量分数分别为 1.11%、1.48%，其杂质含量偏高；石灰石中 CaO、SiO_2 质量分数分别为 53.84%、2.08%，基本满足烧结要求；白云石中 CaO、MgO、Al_2O_3、SiO_2 质量分数分别为 27.79%、21.07%、0.15%、2.37%，其他成分含量较少。

表 2　无烟煤工业分析和灰分主要化学成分(质量分数)

Table 2　Industrial analysis and main chemical composition of ash in anthracite　　%

固定碳	挥发分	灰分	灰分主要化学成分			
			SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO
80.78	6.66	12.56	45.66	5.13	32.79	1.06

表 3　熔剂的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 3　Main chemical composition and loss on ignition of fluxes　　%

原料种类	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S	SiO_2	烧损
生石灰	90.48	0.72	1.11	0.017 0	0.049 0	1.48	5.51
石灰石	53.84	0.32	0.94	0.009 6	0.003 3	2.08	41.70
白云石	27.79	21.07	0.15	0.006 1	0.002 0	2.37	44.40

1.2　试验方案

烧结试验中，控制烧结矿碱度为 2.0，石灰石和生石灰配比分别为 3.7% 和 5%，混匀矿配比为 85.9%。烧结试验步骤：首先根据质量配料法和配料表配料，依次混匀后加入生石灰和水消化 5 min，消化后进行二次混匀，然后进入圆筒混合机制粒。试验采用的圆筒混合机尺寸为∅600 mm × 1 200 mm。按照规定时间与转速，喷加适量的水，进行制粒 5 min。混合料经过制粒后装入烧结杯中，烧结铺底料厚度为 20 mm，烧结料层厚度为 880 mm。布料后采用天然气点火，点火温度为 1 100 ℃，点火负压为 5 kPa，保温温度为 900 ~ 1 100 ℃。点火及保温过程完成后，将烧结负压调至 10 kPa 开始抽风烧结，直至烧结完毕。具体工艺流程如图 1 所示。

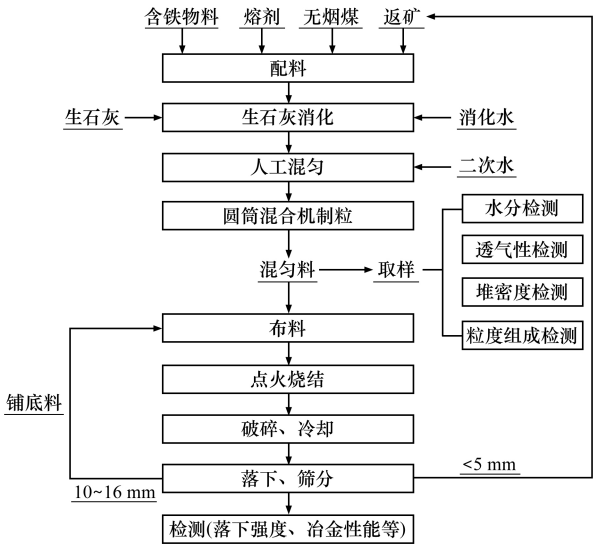


图 1　烧结工艺流程

Fig. 1　Proces flow digram of sintering process

2　结果与讨论

2.1　混合料水分的影响

固定无烟煤配比为 5.42%、点火时间为 60 s，

研究混合料水分对烧结指标的影响。具体的烧结矿质量指标如表4所示。由表4可知，当混合料水分质量分数由7.0%提高至7.4%时，混合料平均粒度由3.33 mm提高至4.60 mm，制粒效果改善，烧结速度也由17.86 mm/min提高至20.36 mm/min，固体燃料消耗由69.16 kg/t降低到最低值67.95 kg/t(7.3%水分)时略有回升，但是烧结矿成品率由72.50%降低至70.93%。褐铁矿粉湿容量大，使得混合料的适宜水分提高，因此需提高混合料中水分添加量，从而改善混合料的制粒性能和料层的透气性。但当混合料水分过高时，烧结温度降低、高温保持时间缩短、矿化反应不完全，最终形成强度差、孔隙率高的烧结矿，成品率随之下降。综合考虑各种烧结指标，混合料适宜的水分应为7.3%左右，此时烧结矿转鼓强度最高，达到67.50%，烧结矿固体燃料消耗量最低，仅为67.95 kg/t。

表4 混合料水分对烧结指标的影响

Table 4 Influence of mixture moisture on sintering index

水分质量分数/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	烧结机利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
7.0	17.86	72.50	67.09	69.16	1.123
7.2	18.83	72.56	67.36	68.27	1.218
7.3	20.05	72.40	67.50	67.95	1.288
7.4	20.36	70.93	66.06	68.42	1.218

2.2 燃料配比的影响

鉴于褐铁矿具有高结晶水、低同化温度等特殊的物理化学性质，其在烧结过程中易引发热量失衡、料层透气性恶化及铁矿相矿化困难等问题，因此需要调整烧结过程中的燃料配比。通过固定混合料水分为7.3%、点火时间为60 s的条件，研究无烟煤配比对各项关键烧结指标的影响。试验结果如表5所示。由表5可见，随着无烟煤配比的提高，烧结速度由18.13 mm/min提高至21.60 mm/min，烧结矿成品率由67.45%提高至72.47%，转鼓强度先由65.13%提高至67.15%后下降至67.06%。这是由于燃料配比过高会生成过量液相，导致烧结矿强度变差。烧结机利用系数从1.065 t/(m^2·h)提升到1.389 t/(m^2·h)，但是固体燃料消耗从58.81 kg/t增大到73.31 kg/t，这导致固体燃料用量显著增加，烧结生产成本提高。综合考虑，适宜的无烟煤配比为5.42%左右。

表5 无烟煤配比对烧结指标的影响

Table 5 Influence of anthracite ratio on sintering index

无烟煤配比/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	烧结机利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
4.52	18.13	67.45	65.13	58.81	1.065
4.82	19.25	69.06	65.82	64.05	1.209
5.12	19.13	71.01	67.15	67.05	1.172
5.42	20.05	72.40	67.50	67.95	1.288
5.72	21.60	72.47	67.06	73.31	1.389

2.3 点火制度的影响

2.3.1 点火时间

为使褐铁矿内部的结晶水分解，保证烧结矿强度，可适当提高点火温度或者延长点火时间，以弥补烧结矿表面热量不足，同时为料层内部提供更多的热量，从而提高烧结矿强度，并提高烧结机利用系数，降低烧结过程中的固体燃料消耗。固定混合料水分为7.3%左右、无烟煤配比为5.42%，研究点火时间对烧结指标的影响。试验结果如表6所示。由表6可见，当点火时间从60 s适度延长至90 s时，充分的热量渗透促进料层下部燃料的引燃与烧结反应的进行，从而使烧结速度与转鼓强度分别提升至20.61 mm/min与67.82%，同时固体燃料消耗降至67.62 kg/t。然而，当点火时间进一步延长至120 s，可能导致表层过熔，恶化料层透气性，致使烧结速度回落至20.19 mm/min，转鼓强度亦降至67.65%。由此可知，适度延长点火时间有助于燃料充分燃烧和烧结矿液相充分发展，从而改善烧结速度与强度，但过度延长则可能导致表层过熔、透气性变差，反而使烧结指标变差。综合而言，适当延长点火时间有利于烧结，在点

表6 点火时间对烧结指标的影响

Table 6 Influence of ignition time on sintering index

点火时间/s	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	烧结机利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
60	20.05	72.40	67.50	67.95	1.288
90	20.61	72.72	67.82	67.62	1.342
120	20.19	72.31	67.65	67.87	1.295

火时间为 90 s 时，固体燃料消耗最低。

2.3.2　保温时间

点火后表层烧结矿直接接触冷空气，会导致反应不够充分，从而使烧结矿强度和成品率下降。固定混合料水分 7.3% 左右、无烟煤配比为 5.42%、点火时间为 90 s，研究保温时间对烧结指标的影响。试验结果如表 7 所示。保温时间通过影响燃料着火充分性、料层温度场均匀性、结晶水分解过程平稳性和高温区特征，对高比例褐铁矿烧结过程产生显著影响。由表 7 所知，随着保温时间增加，烧结速度提高，当保温时间由 60 s 提高到 120 s 时，烧结速度由 20.13 mm/min 提高至 22.04 mm/min，成品率由 72.99% 提高到 73.54%，转鼓强度由 68.55% 提升到 69.01%，利用系数由 1.276 t/(m²·h)提升到 1.477 t/(m²·h)，并且固体燃料消耗由 67.37 kg/t 降低至 67.08 kg/t。在保温时间 90 s 时，固体燃料消耗量最低，烧结矿成品率、转鼓强度均较高。因此，采取 90 s 的保温措施，可明显提高烧结矿产、质量，降低烧结固体燃料消耗。

表 7　保温时间对烧结指标的影响

Table 7　Influence of holding time on sintering index

保温时间/s	烧结速度/(mm·min⁻¹)	成品率/%	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)	烧结机利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)
0	20.61	72.72	67.82	67.62	1.342
60	20.13	72.99	68.55	67.37	1.276
90	20.63	73.44	68.85	67.01	1.375
120	22.04	73.54	69.01	67.08	1.477

2.4　燃料粒度的影响

燃烧效率及燃烧区间是影响烧结固体燃料消耗与热量分布的重要影响因素，而燃料粒度是影响混合料燃烧的重要因素。为了探究燃料粒度分布对烧结指标的影响，固定无烟煤配比为 5.42%、水分质量分数为 7.3% 左右、点火温度为 1 100 ℃、点火时间为 90 s，保温时间为 90 s，研究无烟煤粒度分布对烧结混合料制粒性能及烧结矿产、质量指标的影响。粒度组成方案如表 8 所示，不同无烟煤粒度组成方案对烧结指标的影响如表 9 所示。

由表 8、9 可知，无烟煤的粒度组成对烧结指标具有显著影响。降低无烟煤中≤0.5 mm 粒级的占比，并相应增加(3,5] mm 粒级的占比，有利于降低固体燃料消耗、提高成品率。与基准相比，方案 1 和方案 3 的成品率均有所提高，分别达到 73.60% 和 74.18%，固体燃料消耗则分别降低了 0.54 kg/t 和 0.43 kg/t。值得注意的是，方案 2 完全去除了≤0.5 mm 和 >5 mm 粒级，其固体燃料消耗较基准降低 0.92 kg/t。综合而言，适当降低无烟煤中≤0.5 mm 和 >5 mm 粒级的占比，可显著降低烧结固体燃料消耗，实现烧结矿质量指标与生产效率指标的协同优化。

3　烧结矿产品性能

不同试验条件下烧结产品主要化学成分检测结果如表 10 所示。与基准相比，优化条件下(混合料水分为 7.3%、无烟煤用量为 5.42%、点火时间为 90 s、保温时间为 90 s 以及燃料粒度采用方案 2)，固体燃料消耗降低，高比例褐铁矿烧结矿的化学成分显著改善，其中铁品位提高 0.66%，脉石成分降低(尤其是 Al_2O_3 质量分数大幅降低 25%)，有害元素 S、P 略有降低。这些变化的核心机制是燃料灰分带入量减少和燃烧效率提高，前者直接减少了 SiO_2、Al_2O_3 等脉石含量，后者通过改善温度场和还原气氛，促进了矿化反应和杂质挥发。总体而言，燃料粒度优化不仅实现了固体燃料消耗的降低，更通过化学成分的系统改善，

表 8　粒度组成方案(质量分数)

Table 8　Grain size composition scheme　　%

方案名称	>8 mm	(5,8] mm	(3,5] mm	(1,3] mm	(0.5,1] mm	≤0.5 mm
基准	0.17	8.33	13.37	43.13	9.01	25.99
方案 1	0.17	8.33	39.36	43.13	9.01	0
方案 2	0	0	47.86	43.13	9.01	0
方案 3	0.17	8.33	26.37	43.13	9.01	12.99

表 9 无烟煤粒度对烧结指标的影响

Table 9 Influence of anthracite particle size on sintering index

方案名称	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	烧结机利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
基准	20.63	73.44	68.85	67.01	1.375
方案 1	20.99	73.60	68.55	66.47	1.295
方案 2	22.67	73.63	68.90	66.09	1.449
方案 3	21.91	74.18	67.95	66.58	1.482

提升了烧结矿的整体质量，为高比例褐铁矿烧结工艺的可持续发展提供了重要的技术支撑。

将不同试验条件下的烧结矿进行 X 射线衍射分析，如图 2 所示。由图 2 可见，虽然烧结条件有所变化，但是所得成品烧结矿中主要物相基本不变，主要物相包括赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙和硅酸盐。不同烧结矿中的物相差异主要表现为磁铁矿与赤铁矿峰高度的差异，这印证了烧结矿中 FeO 含量的变化规律。在不同倍数下采用光学显微镜对两种试验条件下的烧结矿进行矿相结构观察和分析，结果如图 3 所示。由图 3 可见，基准条件下烧结矿孔洞较多，内部结构疏松，导致烧结矿强度较差，磁铁矿含量较高，这与 XRD 分析结果一致。优化条件下烧结矿内部结构均匀致密，含铁矿物与铁酸钙等黏结相在结晶过程中相互之间彼此发展，形成交织结构，使得烧结矿强度升高。

4 结 论

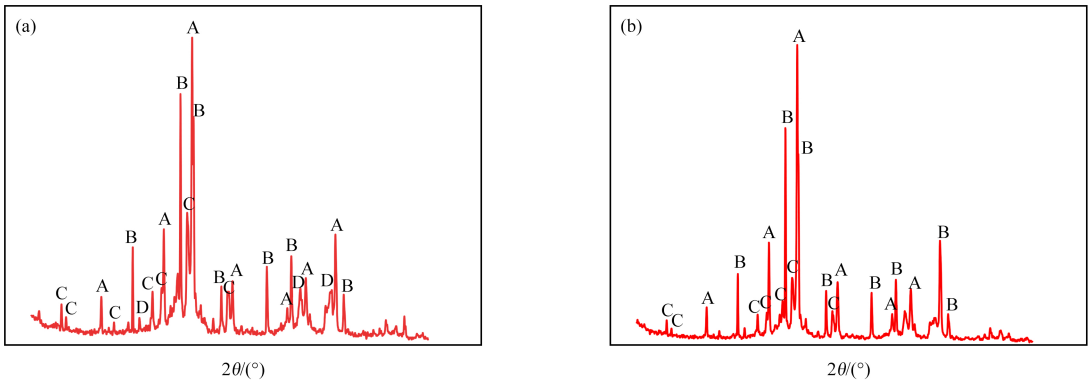
（1）对于高比例褐铁矿烧结，在混合料水分为 7.3%、无烟煤配比为 5.42%、点火时间为 90 s 和保温时间为 90 s 条件下，烧结矿成品率、转鼓强度、利用系数和固体燃料消耗分别为 73.44%，68.85%、1.375 t/(m^2·h) 和 67.01 kg/t。调整燃料结构，适当降低≤0.5 mm 和 >5 mm 无烟煤配比，各项烧结指标均有不同程度提高，特别是利用系数提高至 1.449 t/(m^2·h)，固体燃料消耗降低至 66.09 kg/t。

（2）基准和燃料粒度优化后，得到的烧结矿铁品位均在 57% 以上，FeO 质量分数大于 9.0%，主要物相均为磁铁矿、赤铁矿、铁酸钙与硅酸盐，燃料粒度优化后获得的烧结矿结构致密均匀，针状铁酸钙以交织状将各矿物黏结成牢固整体。

表 10 不同试验条件烧结矿的主要化学成分(质量分数)

Table 10 Main chemical composition of sinters under different test conditions %

项目	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	S	P
基准条件	57.20	9.25	5.12	10.17	2.19	2.76	0.031	0.034	0.02	0.087
优化条件	57.86	9.55	5.04	9.77	1.86	2.07	0.036	0.032	0.019	0.083

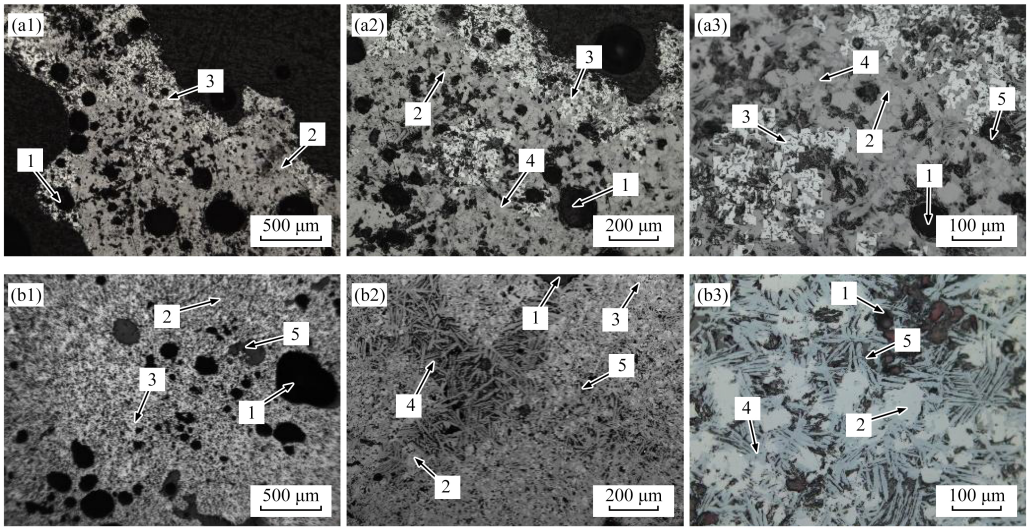


（a）基准条件；（b）优化条件

A—Fe_3O_4；B—Fe_2O_3；C—SFCA(钙铝硅复合铁酸盐)；D—$CaSiO_3$。

图 2 不同烧结条件烧结矿物相组成分析

Fig. 2 Analysis of phase composition of sintered minerals under different sintering conditions



（a1）、（a2）、（a3）基准条件；（b1）、（b2）、（b3）优化条件

1—孔洞；2—磁铁矿；3—赤铁矿；4—SFCA；5—硅酸盐（灰色阴影）。

图 3　不同烧结条件烧结矿微观结构

Fig. 3　Microstructure of sinter under different sintering conditions

参考文献：

[1] MA Y H, ZHANG Y, ZHONG Q, et al. A clean and carbon-reducing pre-granulation process for enhanced muddy iron concentrate and dust sintering: Parameters optimization and deep mechanism analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 520: 146077.

[2] 钟强，项思敏，姜文政，等. 硼泥资源化利用研究进展[J]. 中南大学学报（自然科学版），2025，56（2）：409－424.
ZHONG Qiang, XIANG Simin, JIANG Wenzheng, et al. Research progress on resource utilization of boron mud [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(2): 409－424.

[3] 李光辉，程德，刘会波，等. 复合造块法高效处置含碳钢铁尘泥研究[J]. 中南大学学报（自然科学版），2023，54（9）：3394－3401.
LI Guanghui, CHENG De, LIU Huibo, et al. Study on clean disposition of carbon-bearing steel dusts by composite agglomeration process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(9): 3394－3401.

[4] 杨永斌，张健，钟强，等. 预处理强化赤铁矿熔剂性球团制备性能的研究[J]. 矿冶工程，2019，39（4）：83－88.
YANG Yongbin, ZHANG Jian, ZHONG Qiang, et al. Effect of pretreatment on the ballability of hematite in preparation of a fluxed pellet[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(4): 83－88.

[5] 刘佳文，陈铁军，周仙霖，等. 烧结料层透气性影响因素及其改善措施解析[J]. 钢铁研究学报，2024，36（7）：817－826.
LIU Jiawen, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, et al. Analysis of influencing factors and improving measures of permeability of sinter layer[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(7): 817－826.

[6] 徐良平，阳习端，赵玉潮，等. 基于工业生产料层解析的超高料层低碳烧结技术[J]. 钢铁研究学报，2025，37（3）：317－325.
XU Liangping, YANG Xiduan, ZHAO Yuchao, et al. Low-carbon super-high bed sintering for iron ores based on industrial sintering bed analysis[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2025, 37(3): 317－325.

[7] XU L P, WU J T, ZHONG Q, et al. Novel mode for mineralization and its sintering performance of vanadiferous titanomagnetites[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 2934－2947.

[8] 刘杰，周明顺，刘会波，等. 超高料层双层烧结富氧强化及烟气排放行为研究[J]. 中南大学学报（自然科学版），2024，55（3）：851－859.
LIU Jie, ZHOU Mingshun, LIU Huibo, et al. Study of flue gas emission behavior and oxygen-enriched intensification of double-layer sintering with ultra-high bed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),

2024,55(3):851 – 859.

[9] ZHONG Q, JIANG W Z, GAO W, et al. Pre-reduction sintering process with flue gas recirculation for reduction alkalis harm and flue gas emission[J]. Journal of Central South University,2025,32(1):106 – 121.

[10] 周峰,欧文斌,陈艳. 高比例褐铁矿烧结生产实践[J]. 冶金与材料,2024,16(8):109 – 111.
ZHOU Feng, OU Wenbin, CHEN Yan. Sintering practice of high proportion limonite[J]. Metallurgical and Materials,2024,16(8):109 – 111.

[11] 朱传敏. 高褐铁矿配比下提高烧结矿质量指标[J]. 冶金自动化,2024,48(增刊1):292 – 297.
ZHU Chuanmin. Improvement in quality and quantity indices of sinter with high proportion of limonite[J]. Metallurgical Industry Automation,2024,48(S1):292 – 297.

[12] LIU D H, LIU H, ZHANG J L, et al. Basic characteristics of Australian iron ore concentrate and its effects on sinter properties during the high-limonite sintering process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials,2017,24(9):991 – 998.

[13] ZHU J, WU S L, FAN J X, et al. Effect of the separation of large limonite ore particles in the granulation process of sinter raw materials[J]. ISIJ International, 2013, 53(9):1529 – 1537.

[14] 黄伟青,张旭孝,刘燕霞,等. 褐铁矿在烧结中的高效使用技术[J]. 钢铁研究学报,2016,28(7):13 – 19.
HUANG Weiqing, ZHANG Xuxiao, LIU Yanxia, et al. High effective utilization technology of limonite in sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research,2016, 28(7):13 – 19.

[15] 穆固天,李强,郑志强,等. 提高褐铁矿配比的烧结生产实践[J]. 金属材料与冶金工程,2023,51(2):36 – 41.
MU Gutian, LI Qiang, ZHENG Zhiqiang, et al. Sintering production practice of increasing the ratio of limonite [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering,2023, 51(2):36 – 41.

[16] XUE Y X, ZHU D Q, PAN J, et al. Distinct difference in high-temperature characteristics between limonitic nickel laterite and ordinary limonite[J]. ISIJ International, 2022,62(1):29 – 37.

[17] 高晓永. 褐铁矿在包钢烧结中的应用技术开发[D]. 包头:内蒙古科技大学,2021.
GAO Xiaoyong. Application technology development of limonite in sintering of Baogang[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2021.

[18] 吴洪义,夏志坚,陈晓光. 高褐铁矿的烧结试验研究及生产实践[J]. 烧结球团,2018,43(4):17 – 21.
WU Hongyi, XIA Zhijian, CHEN Xiaoguang. Experimental study and production practice of high proportion limonite sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 17 – 21.

[19] HE H S, LÜ X F, WANG J F. Characteristics evaluation and high effective utilization of limonite ores in sintering process[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38(5):2271 – 2283.

[20] LIANG Z K, CHEN J, HUANG Z C, et al. Characteristics and sintering mechanisms of iron ores with a high proportion of high-Al_2O_3 limonite[J]. ACS Omega, 2023,8(18):15951 – 15959.

[21] 黄柱成,易凌云,胡兵,等. 高配比褐铁矿的烧结配矿试验研究[J]. 钢铁,2012,47(5):9 – 13.
HUANG Zhucheng, YI Lingyun, HU Bing, et al. Experimental investigation on sintering with high ratio of limonite[J]. Iron and Steel,2012,47(5):9 – 13.

[22] 陈付振,孙俊波. 国内褐铁矿烧结技术发展现状及影响因素分析[J]. 鞍钢技术,2015(4):8 – 12.
CHEN Fuzhen, SUN Junbo. Current development situation on technology for limonite-sintering at home and analysis on its influence factors[J]. Angang Technology, 2015 (4):8 – 12.

[23] 林恩玉. 高配比褐铁矿烧结工艺优化试验研究[J]. 烧结球团,2020,45(2):15 – 20.
LIN Enyu. Experimental study on sintering process optimization of high ratio limonites[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):15 – 20.

[24] WU S L, ZHANG G L. Liquid absorbability of iron ores and large limonite particle divided adding technology in the sintering process[J]. Steel Research International, 2015,86(9):1014 – 1021.

[25] 赵长奕,白晓光,付国伟. 包钢烧结配加高硅熔剂性褐铁矿的试验研究[J]. 包钢科技,2022,48(1):22 – 26.
ZHAO Changyi, BAI Xiaoguang, FU Guowei. Experimental study on adding high silicon fluxed limonite into sintering of Baotou steel[J]. Science & Technology of Baotou Steel,2022,48(1):22 – 26. (下转第82页)

Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(10): 2905 – 2912.

[7] 王兆才,储满生,唐珏,等. 还原气氛和脉石成分对氧化球团还原膨胀的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(1):94 – 97;102.
WANG Zhaocai, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Effects of reducing atmosphere and gangue composition on reduction swelling of oxidized pellets[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2012,33(1): 94 – 97,102.

[8] 刘安康,罗果萍,王永斌,等. 钾钠氟对赤铁矿球团还原膨胀性能的影响[J]. 内蒙古科技大学学报,2016,35(2):113 – 116.
LIU Ankang, LUO Guoping, WANG Yongbin, et al. The influence of K, Na and F on reduction swelling of hematite pellets[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology,2016,35(2):113 – 116.

[9] 沈茂森,吕志义,康文革,等. 白云鄂博铁球团矿异常还原膨胀的机理[J]. 中国冶金,2021,31(3):17 – 21;29.
SHEN Maosen, LÜ Zhiyi, KANG Wenge, et al. Abnormal reduction swelling mechanisms of pellets from Bayan Obo iron ore[J]. China Metallurgy, 2021, 31(3): 17 – 21; 29.

[10] 赵路遥,田筠清,赵满祥,等. 球团矿还原膨胀率影响因素分析[J]. 中国冶金,2023,33(10):60 – 64.
ZHAO Luyao, TIAN Yunqing, ZHAO Manxiang, et al. Analysis on influencing factors of reduction swelling index of pellets[J]. China Metallurgy, 2023, 33(10): 60 – 64.

[11] 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,1997.
FU Juying, JIANG Tao, ZHU Deqing. Sintering and pelletizing science[M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1997.

[12] 赵志龙,唐惠庆,郭占成. CO 气氛下 CaO 对铁晶须生长影响的原位观察和机理研究[J]. 北京科技大学学报,2011,33(7):817 – 822.
ZHAO Zhilong, TANG Huiqing, GUO Zhancheng. In situ observation and mechanism research of the influence of CaO on the growth of iron whiskers under CO atmosphere [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2011,33(7):817 – 822.

[13] 皮晓东,孙权,罗果萍,等. 球团矿还原膨胀机理研究概况[J]. 烧结球团,2017,42(4):28 – 34.
PI Xiaodong, SUN Quan, LUO Guoping, et al. Research review on reduction expansion mechanism of pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(4):28 – 34.

[14] 高强健,沈峰满,郑海燕,等. MgO 对铁矿球团还原冶金性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2014,35(12):1742 – 1745.
GAO Qiangjian, SHEN Fengman, ZHENG Haiyan, et al. Investigation on effect of MgO on reduction metallurgical properties of iron ore pellet[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(12): 1742 – 1745.

[15] 周明顺,沈峰满,翟立委,等. MgO 添加方式对改善球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2012,47(4):14 – 18.
ZHOU Mingshun, SHEN Fengman, ZHAI Liwei, et al. Influences of MgO adding method on improving metallurgical properties of pellet[J]. Iron and Steel, 2012,47(4):14 – 18.

(上接第 44 页)

[26] 侯雯希,梁斌珺. 褐铁矿的烧结特性试验研究[J]. 中国金属通报,2022(5):14 – 17.
HOU Wenxi, LIANG Binjun. Experimental study on sintering characteristics of limonite[J]. China Metal Bulletin,2022(5):14 – 17.

[27] YAN H L, ZHOU X L, GAO L, et al. Prediction of compressive strength of biomass-humic acid limonite pellets using artificial neural network model[J]. Materials,2023,16(14):5184.