红土镍矿烧结工艺优化试验研究

胡梦杰[1,2]，陈铁军[1,2]，潘料庭[3]，周仙霖[1,2]，孙化国[3]，刘佳文[1,2]，罗艳红[1,2]

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点试验室，湖北 武汉 430081；3. 广西北港新材料有限公司，广西 北海 536000)

摘要：为了改善红土镍矿烧结性能，本文在分析红土镍矿物化性能的基础上，研究水分、无烟煤配比、碱度、布料方式、无烟煤粒度对烧结性能的影响，对优化前、后的烧结各项指标进行对比分析，并从工艺矿物学揭示相关优化机理。结果表明：当混合料水分为 18.5%、无烟煤配比为 7.2%、碱度为 1.6，采用偏析布料以及无烟煤粒度为 1～5 mm 时，烧结矿的转鼓强度为 58.02%，成品率为 75.06%，烧结机利用系数为 0.91 t/(m²·h)，固体燃料消耗为 131.74 kg/t。工艺矿物学研究表明：优化后烧结矿的微观结构由大孔薄壁结构转化为大孔厚壁结构，其铁尖晶石由片状转化为粒状，且其晶粒相互连通，微观结构更为紧密，强度得到大幅提高。

关键词：红土镍矿；烧结；偏析布料；无烟煤粒级

中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0009－09

doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.048

Research on optimization experiment of sintering process of laterite nickel ore

HU Mengjie[1,2], CHEN Tiejun[1,2], PAN Liaoting[3], ZHOU Xianlin[1,2], SUN Huaguo[3], LIU Jiawen[1,2], LUO Yanhong[1,2]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 2. *Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 3. *Guangxi Beigang New Materials Co., Ltd., Beihai* 536000, *Guangxi, China*)

Abstract: In order to improve the sintering performance of laterite nickel ore, based on the analysis of the mineralization properties of laterite nickel ore, the effects of moisture, anthracite ratio, alkalinity, burden distribution mode and anthracite size on sintering performance are studied, the sintering indexes before and after optimization are compared and analyzed, and the relevant optimization mechanism is revealed from process mineralogy. The results show that when the mixture moisture is 18.5%, the proportion of anthracite is 7.2%, and the alkalinity is 1.6; when the segregation of burden distribution and anthracite size of 1 to 5 mm are adopted, the drum strength of the sinter is 58.02%, the yield rate is 75.06%, the utilization coefficient of the sintering machine is 0.91 t/(m²·h), and the solid fuel consumption is 131.74 kg/t. Process mineralogy studies show that the optimized microstructure of sinter is transformed from a macroporous thin-walled structure to a macroporous thick-walled structure; while hercynite is transformed from flaky to granular, the hercynite grains are interconnected, the microstructure is more compact, and the strength is greatly improved.

Key words: laterite nickel ore; sintering; segregation of burden distribution; anthracite size

收稿日期：2021－07－28；**修回日期**：2021－10－17

基金项目：湖北省教育厅科学研究计划资助项目(Q20191110)；中冶长天基础研究基金资助项目(2020JCYJ06)

作者简介：胡梦杰(1994—)，男，硕士研究生，从事铁矿烧结工艺优化方面的研究。

通信作者：周仙霖(1986—)，男，博士，讲师，从事铁矿造块与直接还原、二次资源综合利用等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随着硫化镍矿资源枯竭以及不锈钢需求不断增加，储量丰富的红土镍矿受到广泛关注，利用红土镍矿冶炼镍铁成为不锈钢工业的重要发展趋势[1]。目前，红土镍矿火法冶炼工艺主要包括回转窑粒铁工艺、RKEF 工艺及烧结—高炉工艺[2]，其中回转窑粒铁工艺和 RKEF 工艺适合处理高镍型红土镍矿，而烧结—高炉工艺虽然能够处理低镍型红土镍矿，但存在烧结能源消耗高、烧结矿成品率低、产量小等问题[3-4]。

为了改善红土镍矿烧结性能，国内外科研工作者进行了大量研究。郭恩光[5]研究表明，褐铁矿型红土镍矿由于结晶水质量分数高，导致烧结过程存在透气性差、能源消耗高、成品率低等问题，通过增加配碳量可提高成品率和强度，但同时也造成了烧结矿 FeO 质量分数严重过高、还原性极差等问题；朱德庆等[6]采用废弃块矿作为铺底料，能有效改善料层透气性，大幅提高红土镍矿烧结性能；潘建等[7]在点火后对烧结料层施加一个持续的压力场，使得烧结矿更加致密化，显著提高了红土镍矿烧结性能。研究表明：低碱度条件下液相量生成有限，高碱度条件下铁尖晶石与液相之间固结减弱，均不利于红土镍矿烧结[8]；采用热废气循环烧结工艺后，烧结热力学条件改善，红土镍矿烧结性能得到提高[9]。目前红土镍矿烧结已成为研究热点，但由于红土镍矿的结晶水和游离水质量分数高，仍然存在烧结矿强度低、产量低及燃料消耗高等问题，其工艺优势还没有充分展开。

本文在分析红土镍矿物化性能的基础上，研究水分、无烟煤配比、碱度、布料方式以及无烟煤粒度对烧结性能的影响，通过与基准期的工艺指标、矿相显微结构对比，揭示烧结矿优化前、后相关机理。

1 原料性能及研究方法

1.1 原料性能

试验所用原料取自某钢铁公司，其中：红土镍矿取自圆筒烘干机出口物料，但其水分质量分数仍高达 24.60%；其他原料均从配料仓获取。各原料化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：红土镍矿铁品位为 46.69%，Ni 品位为 0.79%，是典型的“高铁低镍”型红土镍矿，其烧损高达 14.69%，而高烧损可能对烧结造成不良影响[10]。其他含铁原料包括高返矿、内返矿、重力除尘灰、烧结除尘灰。燃料采用无烟煤，其固定碳质量分数为 77.32%，灰分及挥发分分别为 15.19% 和 7.49%；熔剂采用生石灰，其 CaO 质量分数为 79.56%，可满足烧结生产要求。

表 1 试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

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

原料名称	水分	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Ni	Cr_2O_3	P	S	烧损
红土镍矿	24.60	46.69	0.38	5.84	0.50	3.10	5.78	0.79	3.71	0.002	0.15	14.69
高返矿	4.46	44.26	29.93	6.83	8.05	2.45	4.92	0.84	3.76	0.002	0.29	1.87
内返矿	0.30	46.90	23.47	6.26	8.71	2.38	6.41	0.82	2.49	0.005	0.24	2.51
重力除尘灰	7.88	14.52	4.06	8.10	4.26	2.14	4.63	0.19	1.67	0.011	0.23	46.74
烧结除尘灰	0.12	45.09	22.58	6.67	8.25	1.62	8.00	0.75	2.38	0.041	0.59	3.12
无烟煤	4.95	0.44	—	6.39	0.55	0.13	4.67	—	—	0.020	0.064	86.70
生石灰	—	0.06	—	1.51	79.56	1.67	0.50	—	—	0.002	0.075	16.44

红土镍矿破碎前、后粒度组成如表 2 所示。由表 2 可知：破碎前其 +10 mm 粒级占比达 12.36%，而较多粗颗粒可能导致烧结成型条件变坏[11]；此外，粗颗粒容易产生自然偏析，破坏料层气流均匀性[12]，因此，本文对 +10 mm 的红土镍矿进行破碎。其他原料粒度组成如表 3 所示。由表 3 可知：高返平均粒度为 3.20 mm，能够满足烧结生产要求；其他含铁原料、燃料和熔剂的 −3 mm 粒级占比达 85% 以上，均能满足烧结对粒度的要求。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　红土镍矿粒度组成(质量分数)

Table 2　Size distributions of laterite nickel ore　%

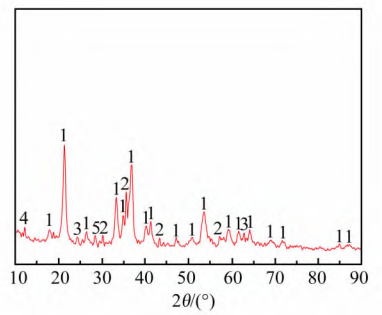
项目	粒度组成/%								平均粒度/mm
	+10 mm	10 ~ 5 mm	5 ~ 3 mm	3 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.355 mm	0.355 ~ 0.175 mm	-0.175 mm	
破碎前	12.36	12.49	4.64	28.96	18.75	10.32	5.78	6.70	4.41
破碎后	—	7.59	9.95	39.07	18.14	11.16	6.36	7.73	1.96

表 3　其他试验原料粒度组成(质量分数)

Table 3　Size distributions of other raw materials　%

原料名称	粒度组成/%								平均粒度/mm
	+8 mm	8 ~ 5 mm	5 ~ 3 mm	3 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.355 mm	0.355 ~ 0.175 mm	-0.175 mm	
高返矿	4.88	10.21	32.07	33.83	6.13	4.23	3.64	5.01	3.20
内返矿	—	—	4.82	43.73	18.97	14.99	10.38	7.11	1.31
重力除尘灰	4.86	3.55	5.51	6.42	4.99	10.18	23.57	40.92	1.37
烧结除尘灰	—	—	—	—	—	—	4.71	95.29	0.10
无烟煤	—	3.39	6.02	20.82	18.12	19.10	16.16	16.39	1.15
生石灰	—	—	6.52	16.75	8.26	7.98	8.38	52.11	0.76

红土镍矿 XRD 衍射分析如图 1 所示。由图 1 可知：其主要矿物为针铁矿，以及少量的磁铁矿、赤铁矿、镍蛇纹石和鳞石英。



1—针铁矿[FeO(OH)]；2—磁铁矿[Fe_3O_4]；3—赤铁矿[Fe_2O_3]；4—镍蛇纹石[$(Ni, Mg)_3Si_2O(OH)_4$]；5—鳞石英[SiO_2]。

图 1　红土镍矿 XRD 衍射分析

Fig. 1　X-ray diffraction pattern analysis of laterite nickel ore

1.2　研究方法

试验基准配矿方案采用生产方案，如表 4 所示。烧结杯试验参数如表 5 所示。烧结杯试验常规布料是将混合料直接倒入烧结杯中；偏析布料是采用孔径为 5 mm 筛子对混合料进行筛分，将筛上混合料铺在烧结杯下层，筛下混合料铺在烧结杯上层。试验所用不同粒级无烟煤由无烟煤筛分获得。

烧结杯试验结束后，采用单齿辊破碎机对烧结矿进行破碎，以 2 m 高度连续落下 4 次，经筛分分级，粒度大于 5 mm 部分为成品矿，粒度小于 5 mm 部分为返矿。测定及计算烧结相关评价指标，包括料层透气性指数、成品率、转鼓强度、利用系数、固体燃料消耗及返矿平衡系数，相关计算方法如下。

料层透气性指数按式(1)计算：

$$P = \frac{Q}{F}\left(\frac{h}{\Delta p}\right)^{0.6} \tag{1}$$

式中：P 为料层透气性指数，JPU；Q 为通过料层的风量，m^3/min；F 为抽风面积，m^2；h 为料层高度，m；Δp 为料层的压力降，Pa。

成品率按式(2)计算：

$$F = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：F 为成品率，%；m_1 为落下 4 次后大于 5 mm的烧结矿质量，kg；m_0 为烧结矿总质量，kg。

转鼓强度按式(3)计算：

$$T = \frac{m_2}{m_3} \times 100\% \tag{3}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：T 为转鼓强度，%；m_2 为转鼓后 +6.3 mm 部分质量，kg；m_3 为入鼓试样质量，kg。

利用系数按式(4)计算：

$$K=\frac{m_1}{S\times t} \tag{4}$$

式中：K 为利用系数，t/(m^2·h)；m_1 为落下 4 次后大于 5 mm 的烧结矿质量，t；S 为有效抽风面积，m^2；t 为烧结时间，h。

固体燃料消耗按式(5)计算：

$$G=\frac{m_4}{m_1} \tag{5}$$

式中：G 为固体燃料消耗，kg/t；m_1 为落下 4 次后大于 5 mm 的烧结矿质量，t；m_4 为装入烧结杯的固体燃料质量，kg。

返矿平衡系数按式(6)计算：

$$B=\frac{R_A}{R_E} \tag{6}$$

式中：B 为返矿平衡系数；R_A 为落下 4 次后小于 5 mm 烧结矿的质量，kg；R_E 为配入到烧结混合料中的返矿质量，kg。

同时，依据 BS ISO 4695—2007、GB/T 24235—2009 标准测定烧结矿的冶金性能。借助 SmartLab SE 型 X 射线衍射仪、ZEISS AxioLab. A1 金相显微镜以及 FEI Nova Nano 400 场发射扫描电镜对烧结矿进行工艺矿物学分析，以揭示其相关优化机理。

表 4 基准配矿方案(质量分数)

Table 4 Basic batching scheme %

高返矿	重力除尘灰	烧结除尘灰	无烟煤	红土镍矿	生石灰	内返矿
17.0	2.3	2.0	5.2	63.0	3.3	8.0

表 5 烧结杯试验参数

Table 5 sintering pot test 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/℃	加水方式	一混时间/min	二混时间/min
770	250	5	10	1 100	二混加水	3	6

2 结果与讨论

2.1 水分的影响

水分对烧结性能的影响如图 2 所示。由图 2 可知，随着水分质量分数增加，成品率先提高后降低，转鼓强度先提高后降低，利用系数持续增大，固体燃料消耗先降低后升高。水分对粒度组成、透光性及垂直烧结速度的影响如图 3 所示。由图 3 可知：当水分质量分数为 18.5% 时，能够取得较好的烧结性能；当水分质量分数从 17.5% 增加到 18.5%，料层透气性得到改善，有利于提高料层氧位，从而提高烧结性能[13]；当水分质量分数从 18.5% 增加到 19.5%，料层透气性显著提高，垂直烧结速度大幅加快，但过快的烧结速度容易导致烧结矿矿化时间缩短，同时水分会加重料层过湿，热量损失增大，使烧结矿强度降低[14]。

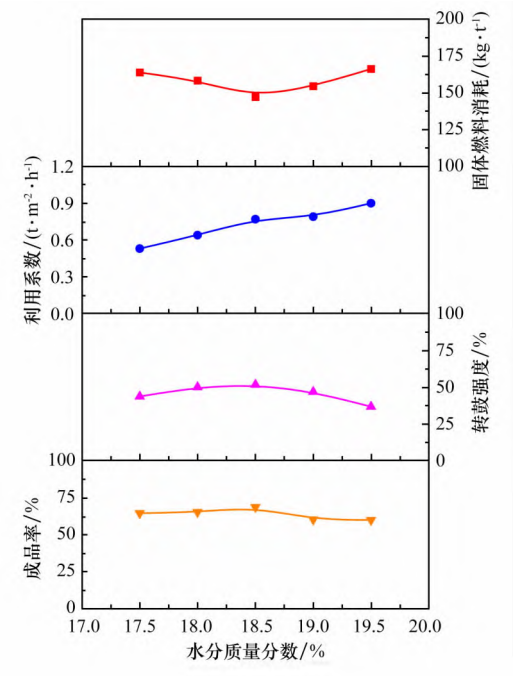


图 2 水分对烧结性能的影响

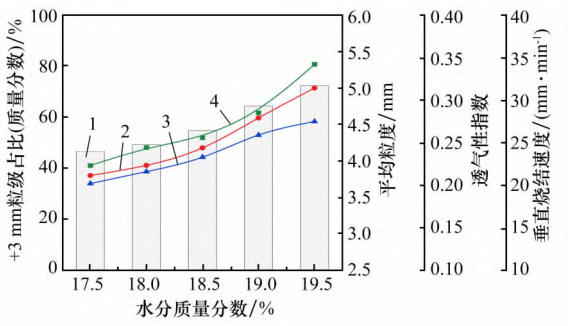
Fig. 2 Effect of moisture on the sintering performance

(注：全粒级无烟煤配比为 7.2%，碱度为 1.6，采用常规方式布料)

2.2 无烟煤的影响

无烟煤配比对烧结性能的影响如图4所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



1—+3 mm 粒级占比(质量分数)/%；2—平均粒度/mm；3—透气性指数；4—垂直烧结速度/(mm·min^{-1})。

图 3　水分对粒度组成、透气性及垂直烧结速度的影响

Fig. 3　Effect of moisture on particle size composition, permeability and vertical sintering speed

(注：全粒级无烟煤配比为 7.2%，碱度为 1.6，采用常规方式布料)

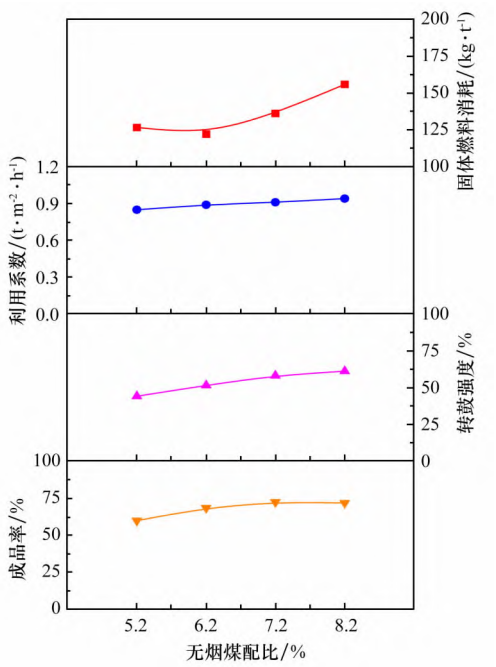
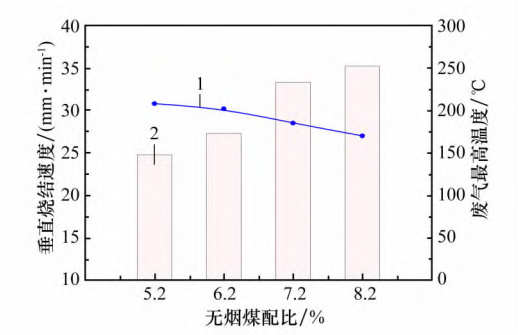


图 4　无烟煤配比对烧结性能的影响

Fig. 4　Effect of anthracite ratio on the sintering performance

(注：混合料水分质量分数为 18.5%，碱度为 1.6，采用全粒级无烟煤、偏析布料)

由图 4 可知，随着无烟煤配比的增加，成品率先提高后略微降低，转鼓强度持续提高，利用系数持续增大，固体燃料消耗先降低后显著升高。无烟煤配比对垂直烧结速度及废气最高温度的影响如图 5 所示。由图 5 可知，废气最高温度随无烟煤配比增加而升高，垂直烧结速度随无烟煤配比增加而减慢。无烟煤配比对返矿平衡系数的影响如表 6 所示。由表 6 可知，随着无烟煤配比的提高，返矿平衡系数持续减小。当无烟煤配比由 5.2% 增加到 7.2% 时，烧结产生的热量增多，烧结矿固结条件大幅改善，有利于提高烧结矿强度[15]；当无烟煤配比由 7.2% 提高到 8.2% 时，转鼓强度和成品率提高不明显，但固体燃料消耗大幅升高，主要原因是无烟煤配比增加会恶化料层高温透气性，不利于烧结过程。



1—垂直烧结速度/(mm·min^{-1})；2—废气最高温度/℃。

图 5　无烟煤配比对垂直烧结速度及废气最高温度的影响

Fig. 5　Effect of anthracite ratio on vertical sintering speed and maximum temperature of exhaust gas

(注：混合料水分质量分数为 18.5%，碱度为 1.6，采用全粒级无烟煤、偏析布料)

表 6　无烟煤配比对返矿平衡系数的影响

Table 6　The effect of anthracite ratio on the balance coefficient of the return ore

无烟煤配比/%	5.2	6.2	7.2	8.2
返矿平衡系数	1.21	1.01	0.88	0.82

注：混合料水分质量分数为 18.5%，碱度为 1.6，采用全粒级无烟煤、偏析布料。

2.3　碱度的影响

碱度对烧结性能的影响如图 6 所示。由图 6 可知，随着碱度的增加，成品率先提高后趋于稳定，转鼓强度先提高后趋于稳定，利用系数先增加后略微减小，固体燃料消耗持续降低。分析原因认为，碱度增加有利于低熔点液相和铁酸钙生成[16]，从而改善烧结矿固结条件，但碱度过高时容易生成大孔薄壁结构[17]，从而影响烧结性能。

2.4　布料方式的影响

两种布料方式对烧结性能的影响如图7所

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

示。由图 7 可知，偏析布料的烧结性能均优于常规布料。布料方式对料层透气性、垂直烧结速度的影响及上下层碳质量分数分布如表 7 所示。由表 7 可知，与常规布料相比，偏析布料的料层透气性指数更高，其垂直烧结速度更快，且上层碳质量分数更高。分析原因认为，偏析布料实现了混合料粗细粒级分层布料，能够改善料层透气性，提高料层氧位，改善燃料燃烧效率[18]；同时，偏析布料料层上部平均含碳量更高，烧结自动蓄热作用使上下层热量趋于一致，烧结过程更加均匀，有利于提高烧结性能[19]。

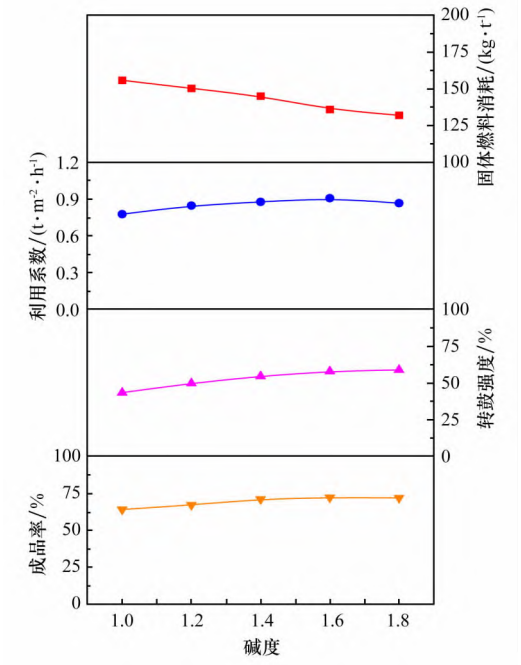


图 6 碱度对烧结性能的影响

Fig. 6 Effect of basicity on the sintering performance

(注：全粒级无烟煤粉配比为 7.2%，混合料水分质量分数为 18.5%，采用偏析布料)

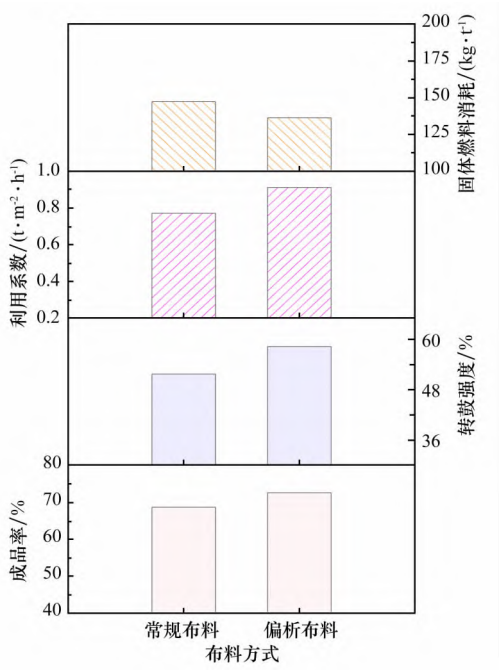


图 7 布料方式对烧结性能的影响

Fig. 7 Effect of distribution mode on sintering performance

(注：全粒级无烟煤粉配比为 7.2%，混合料水分质量分数为 18.5%，碱度为 1.6)

表 7 布料方式对料层透气性、垂直烧结速度的影响及上下层碳质量分数分布

Table 7 Effect of distribution mode on permeability of sinter layers, vertical sintering speed and distribution of carbon content in upper and lower layers

项目	透气性指数	垂直烧结速度/(mm·min⁻¹)	上层碳平均质量分数/%	下层碳平均质量分数/%
常规布料	0.233	24.84	5.28	5.28
偏析布料	0.281	28.52	9.91	5.04

注：全粒级无烟煤粉配比为 7.2%，混合料水分质量分数为 18.5%，碱度为 1.6。

2.5 无烟煤粒级的影响

不同粒级无烟煤对烧结矿性能影响如图 8 所示。由图 8 可知，随着无烟煤粒级由 0 ~ 3 mm 提高到 3 ~ 5 mm，成品率和转鼓强度逐渐提高，利用系数先增大后减小，固体燃料消耗先降低后略微升高。分析原因认为，无烟煤粒度越粗，烧结矿化时间延迟，有利于烧结矿固结[20]。无烟煤粒度过细时难以形成高温区域，不利于烧结矿固结；无烟煤粒度过粗时，料层中碳的分布点变少，且布料时粗颗粒煤粉易于偏析在料层下部，燃烧带变厚，导致料层高温透气性变差，烧结矿的性能指标下降[21]。无烟煤粒级在 1 ~ 5 mm 时，工艺能够得到较好的烧结性能。

3 烧结工艺及性能对比

烧结工艺优化参数、优化前后烧结技术经

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

济指标分别如表 8、9 所示。由表 8、9 可知：

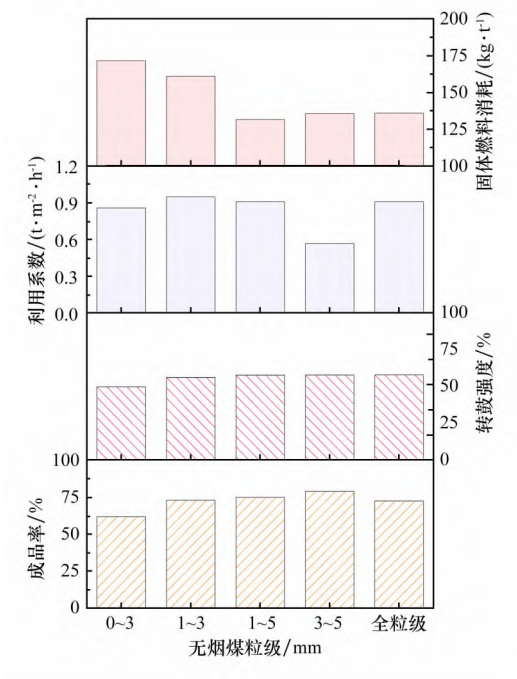


图 8　无烟煤粒级对烧结性能的影响

Fig. 8　Effect of anthracite particle size on sintering performance

(注：无烟煤粉配比为 7.2%，混合料水分质量分数为 18.5%，碱度为 1.6，采用偏析布料)

通过烧结工艺参数优化，烧结技术经济指标大幅提高，成品率由 67.48% 提高到 75.06%，转鼓强度由 38.2% 提高到 58.02%，垂直烧结速度由 22.99 mm/min 提高到 27.02 mm/min，利用系数由 0.81 t/(m²·h) 增加到 0.91 t/(m²·h)；但固体燃料消耗由 116.91 kg/t 升高到 131.74 kg/t，返矿平衡系数由 1.18 下降到 0.86。烧结矿的冶金性能如表 10 所示。由表 10 可知：还原度指数变化不大；优化后的低温还原粉化率中，$RDI_{+6.3\ mm}$ 和 $RDI_{+3.15\ mm}$ 均超过 90.00%，$RDI_{-0.5\ mm}$ 均低于 1.00%，冶金性能优异，能够满足高炉生产要求。烧结矿化学成分如表 11 所示。由表 11 可知：工艺优化后，碱度由 1.0 升高到 1.6，其他成分变化不大。

表 8　优化前后烧结工艺参数

Table 8　Sintering process parameters before and after optimization

项目	无烟煤配比/%	水分/%	碱度	无烟煤粒级	布料方式
优化前	5.2	18.5	1.0	全粒级	常规布料
优化后	7.2	18.5	1.6	1~5 mm	偏析布料

表 9　烧结技术经济指标

Table 9　Technical and economic indexes of sintering

项目	成品率/%	转鼓强度/%	垂直烧结速度/(mm·min⁻¹)	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)	返矿平衡系数
优化前	67.48	38.20	22.99	0.81	116.91	1.18
优化后	75.06	58.02	27.02	0.91	131.74	0.86

表 10　烧结矿的冶金性能

Table 10　Metallurgical performance of sintering ore　　%

项目	还原度指数	低温还原粉化率		
		$RDI_{+6.3\ mm}$	$RDI_{+3.15\ mm}$	$RDI_{-0.5\ mm}$
优化前	78.52	89.89	97.97	0.38
优化后	77.19	97.55	98.53	0.17

表 11　烧结矿主要化学成分和碱度

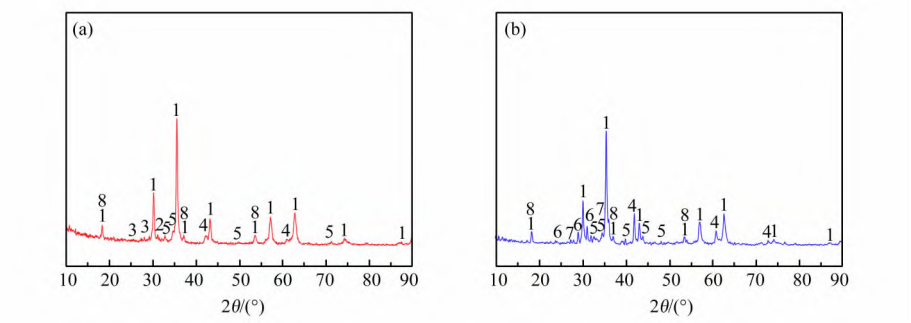
Table 11　Main chemical composition and basicity of sintering ore　　%

项目	化学成分(质量分数)/%								碱度
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Ni	Cr_2O_3	
优化前	46.96	19.26	6.97	7.12	3.17	6.52	0.82	3.76	1.0
优化后	46.23	21.57	7.02	11.25	3.01	6.21	0.81	3.57	1.6

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 烧结矿工艺矿物学分析

烧结矿 XRD 分析和微观结构如图 9、10 所示，烧结矿具体矿物组成如表 12 所示。由图 9、10 和表 12 可知：与基准期相比，优化后烧结矿由大孔薄壁结构转化为大孔厚壁结构，铁尖晶石由片状转化为粒状，铁尖晶石晶粒之间相互连通，晶粒由分散变成紧密连结状态，烧结矿



(a) 优化前；(b) 优化后

1—镁铝铁尖晶石 [(Mg，Fe)(Al，Fe)$_2$O$_4$]；2—钙镁橄榄石 [CaO·MgO·SiO$_2$]；3—钙铁橄榄石 [CaO·FeO·SiO$_2$]；4—铁橄榄石 [FeO·2SiO$_2$]；5—复合铁酸钙 [SFCA]；6—镁黄长石 [Ca$_2$MgSi$_2$O$_7$]；7—钙铁镁辉石 [Ca(Fe，Mg)Si$_2$O$_6$]；8—镁铬铁尖晶石 [(Mg，Fe)(Cr，Fe)$_2$O$_4$]。

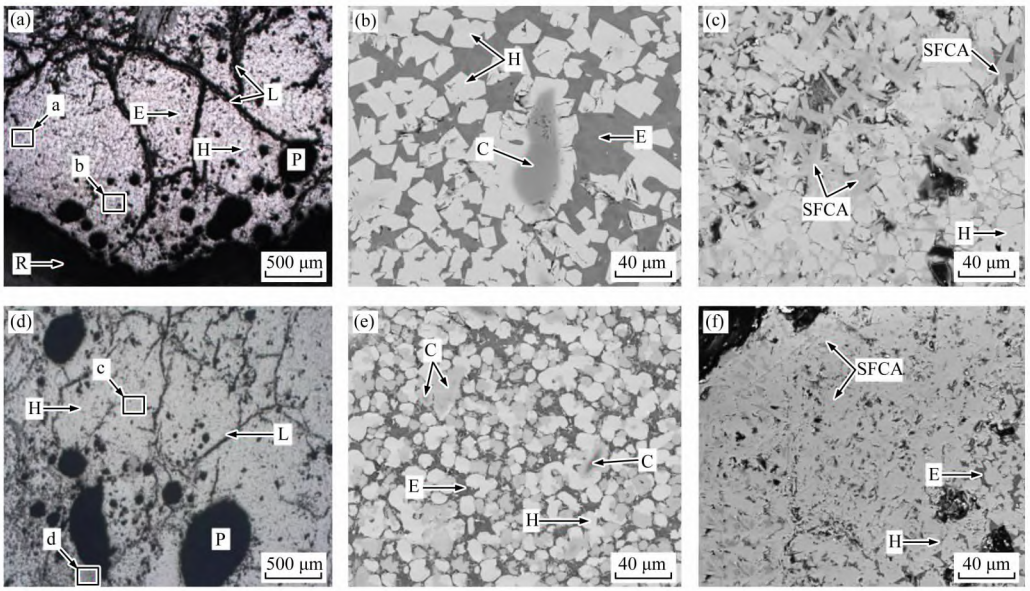
图 9 烧结矿的 XRD 衍射分析

Fig. 9 X-ray diffraction pattern analysis of sintering ore

表 12 烧结矿矿物组成(质量分数)

Table 12 Mineral composition of sintering ore %

项目	镁铝铁尖晶石	镁铬铁尖晶石	钙镁橄榄石	钙铁橄榄石	铁橄榄石	SFCA	钙镁黄长石	钙镁铁辉石
优化前	71.23	5.43	4.94	4.37	4.46	9.57	0	0
优化后	67.85	4.91	0	0	6.67	11.92	4.51	4.14



(a) 优化前烧结矿金相照片；(b)、(c) 分别为图 (a) 中 a、b 区域的 SEM 照片；(d) 优化后烧结矿金相照片；(e)、(f) 分别为图 (d) 中 c、d 区域的 SEM 照片

P—孔洞；L—裂纹；R—树脂；H—镁铝铁尖晶石；C—镁铁铬尖晶石；E—硅酸盐相；SFCA—复合铁酸钙。

图 10 烧结矿微观结构

Fig. 10 Microstructure of sintering ore

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

微观结构明显改善；黏结相中钙镁橄榄石和钙铁橄榄石减少，SFCA、钙镁黄长石及钙铁镁辉石增多，烧结矿矿物组成得到改善，促进了烧结矿强度提高。

5　结　论

(1) 试验所用红土镍矿水分质量分数高达 24.60%，其铁品位为 46.69%，Ni 品位为 0.79%，是典型的“高铁低镍”型红土镍矿，其烧损高达 14.69%；红土镍矿主要矿物为针铁矿，以及少量的磁铁矿、赤铁矿、镍蛇纹石和鳞石英。

(2) 在碱度为 1.6，无烟煤配比为 7.2%，水分质量分数为 18.5%，无烟煤粒级为 1 ~ 5 mm，布料方式为偏析布料的优化工艺条件下，烧结性能大幅提高，转鼓强度为 58.02%，成品率为 75.06%，固体燃料消耗为 131.74 kg/t，利用系数为 0.91 t/(m^2·h)。

(3) 优化后烧结矿由大孔薄壁结构转化为大孔厚壁结构，铁尖晶石晶粒相互连通，颗粒由分散变成了紧密连结的状态，烧结矿的微观结构明显改善；黏结相中钙镁橄榄石和钙铁橄榄石减少，SFCA、钙镁黄长石及钙铁镁辉石增多，烧结矿的固结条件得到改善，促进了烧结矿强度提高。

参考文献:

[1] 武兵强，齐渊洪，周和敏，等. 红土镍矿火法冶炼工艺现状及进展[J]. 矿产综合利用，2020，223(3)：78－83；93.
WU Bingqiang，QI Yuanhong，ZHOU Hemin，et al. Status and progress in pyrometallurgy processes of a laterite nickel ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2020，223(3)：78－83；93.

[2] 朱德庆，田宏宇，潘建，等. 低品位红土镍矿综合利用现状及进展[J]. 钢铁研究学报，2020，32(5)：351－362.
ZHU Deqing，TIAN Hongyu，PAN Jian，et al. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore[J]. Journal of Iron and Steel Research，2020，32(5)：351－362.

[3] 李光辉，姜涛，罗骏，等. 红土镍矿冶炼镍铁新技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2018：12－16.
LI Guanghui，JIANG Tao，LUO Jun，et al. New technology of ferronickel smelting from laterite ore[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2018：12－16.

[4] 潘料庭，杨静，许严邦. 红土镍矿烧结配加添加剂的工业试验[J]. 烧结球团，2013，38(2)：25－27；31.
PAN Liaoting，YANG Jing，XU Yanban. Industrial test of laterite nickel ore sintering proportioned with additives[J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(2)：25－27；31.

[5] 郭恩光. 褐铁矿型红土镍矿烧结行为研究及工艺优化[D]. 重庆：重庆大学，2014.
GUO Enguang. Sintering behaviour and process optimization of nickel laterite based of limonitic style[D]. Chongqing：Chongqing University，2014.

[6] 朱德庆，薛钰霄，潘建，等. 废弃块矿作铺底料强化红土矿烧结工艺及机制[J]. 钢铁研究学报，2020，32(7)：591－600.
ZHU Deqing，XUE Yuxiao，PAN Jian，et al. Sintering performance and mechanism of limonite laterite strengthened by using waste lump ore as hearth layer[J]. Journal of Iron and Steel Research，2020，32(7)：591－600.

[7] 潘建，薛钰霄，朱德庆，等. 加压致密化技术强化褐铁矿型红土镍矿烧结工艺及机理研究[C]//2020 年 APOL 镍与不锈钢产业链年会会刊. 上海：亚洲与太平洋地区红土镍矿合作组织，2020：62－72.
PAN Jian，XUE Yuxiao，ZHU Deqing，et al. Study on sintering process and Mechanism of limonite laterite nickel ore strengthened by pressure densification technology[C]//Proceedings of APOL Nickel and stainless steel Industry Chain Annual Conference 2020. Shanghai：Asia and Pacific region laterite nickel Mining Cooperation Organization，2020：62－72.

[8] ZHU Deqing，XUE Yuxiao，Pan Jian，et al. An investigation into the distinctive sintering performance and consolidation mechanism of limonitic laterite ore[J]. Powder Technology，2020(367)：616－631.

[9] ZHU Deqing，Xue Yuxiao，Pan Jian，et al. Co-benefits of CO_2 emission reduction and sintering performance improvement of limonitic laterite via hot exhaust-gas recirculation sintering[J]. Powder Technology，2020(373)：727－740.

[10] 毛林猛，陈军，李轶，等. 褐铁矿烧结存在的问题及对策[J]. 云南冶金，2019，48(6)：89－94.
MAO Linmen，CHEN Jun，LI Yi，et al. The existing problems and countermeasures of limonite sintering[J]. Yunnan Metallurgy，2019，48(6)：89－94.

[11] 武轶，李骞，熊德怀，等. 进口粉矿粒度变化对其烧结性能的影响[J]. 钢铁研究，2012，40(2)：1－3；11.
WU Yi，LI Sai，XIONG Dehuai，et al. Effect of particle size change on sintering properties of imported fine ore[J]. Research on Iron and Steel，2012，40(2)：1－3；11.

(下转第 32 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(3):7 – 11.

[12] 张俊,严定鎏,齐渊洪,等. 钢铁冶炼渣的处理利用难点分析[J]. 钢铁,2020,55(1):1 – 5.
ZHANG Jun, YAN Dingliu, QI Yuanhong, et al. Difficulty analysis on treatment and utilization of iron and steel smelting slag[J]. Iron and Steel,2020,55(1):1 – 5.

[13] 戎玉萍,何小平,蔡湄夏,等. 太钢转炉钢渣用于烧结的试验研究[J]. 钢铁,2001(6):1 – 4.
RONG Yuping,HE Xiaoping,CAI Meixia,et al. Study on reasonable utilization of converter slag at TISC[J]. Iron and Steel,2001(6):1 – 4.

[14] 左君,严丽君,杨秀琴,等. 响应曲面法优化超细氧化亚铜光催化降解对硝基苯酚[J]. 北京科技大学学报,2010,32(8):1045 – 1052.
ZUO Jun,YAN Lijun,YANG Xiuqin,et al. Photocatalytic degradation optimization of p-nitrophenol liquid by using ultrafine cuprous oxide with response surface methodology[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(8):1045 – 1052.

[15] 杨双平,张攀辉,郭拴全,等. 响应曲面法优化内配兰炭赤铁矿球团焙烧工艺[J]. 钢铁,2017,52(1):13 – 18.
YANG Shuangping,ZHANG Panhui,GUO Shuanquan,et al. Roasting technology of semicoke-burdened hematite pellets optimized by response surface methodology[J]. Iron and Steel, 2017,52(1):13 – 18.

[16] 王永良,肖力,付国燕,等. 响应曲面法优化 Na_2S-NaOH 体系浸出硫酸烧渣中的砷[J]. 工程科学学报,2018,40(9):1036 – 1042.
WANG Yongliang,XIAO Li,FU Guoyan,et al. Arsenic removal from pyrite cinders in Na_2S-NaOH solution with parameters optimized using the response surface methodology[J]. Journal of Engineering Science,2018,40(9):1036 – 1042.

[17] 杨双平,曹栓伟,贺峰. 响应曲面法优化红土镍矿富集镍[J]. 钢铁研究学报,2019,31(10):897 – 903.
YANG Shuangping, CAO Shuanwei, HE Feng. Optimizing process of extracting nickel from laterite nickel based on response surface methodology[J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(10):897 – 903.

(上接第17页)

[12] 郑呈祥. 混匀铁料粒度组成对烧结生产的影响研究[J]. 南方金属,2020,233(2):39 – 42;46.
ZHENG Chengxiang. Effect of grain size composiition of mixed iron-contained materials on sintering[J]. Southern Metals, 2020,233(2):39 – 42,46.

[13] 冯根生,吴胜利,赵佐军. 改善厚料层烧结热态透气性的研究[J]. 烧结球团,2011,36(1):1 – 5.
FENG Gensheng, WU Shengli, ZHAO Zuojun. Research on improving hot permeability of deep bed sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(1):1 – 5.

[14] TODA H, KATO K. Theoretical investigation of sintering process[J]. Ironmaking and Steelmaking,1991,18(2):89 – 95.

[15] 贵永亮,刘连继,肖洪,等. 固体燃料种类和配比对烧结矿质量的影响[J]. 中国冶金,2014,24(5):5 – 8.
GUI Yongliang,LIU Lianji,XIAO Hong,et al. Effect of solid fuel type and proportion on quality of sinter[J]. China Metallurgy,2014,24(5):5 – 8.

[16] 张国成,罗果萍,柴轶凡,等. 碱度对烧结矿液相形成性能和微观结构特性的影响[J]. 钢铁研究学报,2021,33(7):584 – 592.
ZHANG Guocheng,LUO Guoping,CHAI Yifan,et al. Effect of basicity on liquid phase formation properties and microstructure of sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021, 33(7):584 – 592.

[17] 刘衍辉,吕学伟,陈攀,等. 镍铬复合烧结矿制备工艺与固结机理[J]. 钢铁研究学报,2016,28(3):19 – 28.
LIU Yanhui,LYU Xuewei,CHEN Pan,et al. Preparation and consolidation mechanism for nikel-chromium composite sinters[J]. Journal of Iron and Steel Research,2016,28(3):19 – 28.

[18] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature filed of sintering bed[D]. Changsha: Central South University,2012.

[19] 王艳玲. 浅析偏析布料对烧结的影响[J]. 包钢科技,2002,28(3):4 – 6.
WANG Yanling. Analysis of the effect of segregation on sintering[J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group) Corporation,2002,28(3):4 – 6.

[20] 王永红,刘建波,周俊兰,等. 燃料粒度对烧结指标的影响研究[J]. 烧结球团,2018,43(3):37 – 42.
WANG Yonghong,LIU Jianbo,ZHOU Junlan,et al. Study on influence of particle size of fuels on sintering indexes[J]. Ironmaking and Steelmaking,2018,43(3):37 – 42.

[21] 刘桑辉,白凯凯,倪桂虎,等. 燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):17 – 22.
LIU Shenhui,BAI Kaikai,NI Guihu,et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Ironmaking and Steelmaking,2019,44(6):17 – 22.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net