红土镍矿双层配碳烧结性能及烟气污染物排放的变化

曹 文，陈铁军，周仙霖，胡梦杰，孙冰洁，段国庆，李 昊
（武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 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）

摘要： 为开发利用储量丰富、价格低廉的红土镍矿，本文在不提高总配碳量的条件下，通过改变上下料层混合料中固体燃料的占比，进行红土镍矿双层配碳烧结试验，研究新工艺的烧结性能及其对混合料制粒性能的影响，并分析烧结烟气中污染物的变化规律。结果表明：双层配碳烧结可使上下料层热量分布更均匀，降低下料层的过熔现象，改善制粒效果，增强烧结过程料层透气性，使无烟煤燃烧更加充分，并大幅提高烧结性能；与基准试验相比，两组试验烧结矿的成品率分别提高 7.99% 和 10.40%，转鼓强度分别提高 6.77% 和 5.34%，利用系数分别提高 0.29、0.20 t/(m²·h)，固体燃料消耗分别降低 15.80、22.59 kg/t，烧结矿性能均有大幅度提高；双层配碳烧结有助于减少污染物排放，其中 NO_x 和 SO_2 排放量均减少 31.14% 和 61.35%，有利于环境保护。

关键词： 红土镍矿；烧结；双层配碳烧结；烟气；污染物
中图分类号： TF046.4；X701.7 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0033－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.020

Changes in double-layer sintering performance and flue gas pollutant emission of laterite nickel ore

CAO Wen，CHEN Tiejun，ZHOU Xianlin，HU Mengjie，SUN Bingjie，DUAN Guoqing，LI Hao
（Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering；b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources，Wuhan 430081，Hubei，China）

Abstract: In order to develop and utilize laterite nickel ore with abundant reserves and low price，by changing the proportion of solid fuel in the upper and lower layer compound，the double-layer sintering test of laterite nickel ore is carried out without increasing the total carbon distribution，the sintering performance of the new process and its influence on the granulation performance of the mixture are studied，and the change law of pollutants in the sintering flue gas is analyzed. The results show that double-layer sintering can make the heat distribution of the upper and lower material layers more uniform，reduce the overmelting phenomenon of the lower material layer，improve the granulation effect，enhance the air permeability of the material layer in the sintering process，make the anthracite combustion more sufficient，and greatly improve the sintering performance. Compared with the benchmark test，the yield of the two groups of experimental sinter is increased by 7.99% and 10.40%，respectively，the tumbler strength is increased by 6.77% and 5.34%，respectively，the utilization coefficient is increased by 0.29 and 0.20 t/(m²·h)，respectively，the solid fuel consumption is decreased by 15.80 and 22.59 kg/t，respectively，and the sinter performance is greatly improved. Double-layer sintering helps to reduce

收稿日期： 2021－11－17；**修回日期：** 2021－12－24
基金项目： 武汉科技大学大学生创新创业训练计划项目(201810488037)
作者简介： 曹 文(1999—)，男，从事铁矿烧结烟气污染物减排方面的研究。
通信作者： 陈铁军(1973—)，男，教授，博士生导师，从事铁矿造块与直接还原、复杂难选铁矿分选、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

pollutant emissions, among which NO_x and SO_2 emissions are reduced by 31.14% and 61.35%, which is conducive to environmental protection.

Key words: laterite nickel ore; sintering; double-layer sintering; flue gas; pollutant

随着硫化镍矿资源的枯竭以及不锈钢市场需求的持续增长，储量丰富、价格低廉的红土镍矿正在被大力开发利用[1]。红土镍矿按照矿床开采类型可分为褐铁矿型、过渡型以及腐殖土型，其中褐铁矿型占红土镍矿总储量的60%以上[2]。目前，红土镍矿火法冶炼镍铁合金主要包括回转窑粒铁工艺、RKEF工艺及烧结—高炉工艺，其中，回转窑粒铁工艺和RKEF工艺适合处理高镍型红土镍矿，但这两种工艺在处理低镍褐铁矿型红土镍矿时存在电能消耗和生产成本较大的问题，其在工业生产中很少被采用[3]。此外，由于镍矿资源匮乏，我国每年需要进口大量的红土镍矿，但国外对高品位红土镍矿进行了严格的出口限制，导致我国进口的红土镍矿多为低镍褐铁矿型。在目前煤炭储量尚能满足工业发展的条件下，烧结—高炉工艺能够以较低的生产成本处理低镍褐铁矿型红土镍矿，在不锈钢冶炼行业得到广泛的应用和推广[4-5]。

目前，红土镍矿烧结成为行业热点，科研人员进行了大量研究，但由于该矿自身性质与普通铁矿大不相同，其自由水(>20%)和结晶水(>12%)质量分数远高于普通铁矿，造成该矿在脱水过程中会消耗大量的热量[6]，因此其固体燃料消耗远高于普通铁矿烧结。同时红土镍矿的高水分会加重料层过湿现象，易造成烧结矿欠烧，导致出现料层透气性差、烧结矿强度低等问题[7-8]。以广西某180 m^2烧结厂烧结机为例，其料层厚度为850 mm，相较于传统烧结48 kg/t的固体燃料消耗水平，褐铁矿型红土镍矿烧结的固体燃料消耗为140~160 kg/t；此外，其利用系数约为1.0 t/(m^2·h)，烧结矿转鼓强度、成品率均仅为传统烧结的50%左右，烧结内返矿量和高炉返矿量巨大。通过增加配碳量可以显著提高红土镍矿烧结产品的强度，但增加配碳量会提高固体燃料消耗，且易造成烧结矿FeO质量分数高、还原性差等问题[9]。

针对上述问题，在不提高总配碳量的条件下，双层配碳烧结被认为是一种行之有效的方法[10-11]。相对于单层均匀配碳，双层配碳条件下烧结机的热效率更高，床层温度和物料熔化分数沿料层高度方向的分布更加均匀，同时烧结性能大幅提高[12]。为此，本文通过改变上下料层混匀料中固体燃料的占比，进行红土镍矿双层配碳烧结试验，研究新工艺的烧结性能及其对混合料制粒性能的影响，并分析烧结烟气中污染物的变化规律，以期达到减少烧结过程固体燃料消耗，提高烧结矿强度的目的。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用原料取自广西某公司，包括高炉返矿、内返矿、重力除尘灰、烧结除尘灰、无烟煤、生石灰，各原料的主要化学成分和烧损如表1所示。由表1可知：红土镍矿的铁品位为46.69%，镍品位为0.79%，烧损高达14.69%，是典型的高铁低镍型红土镍矿，即褐铁矿型红土镍矿；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。无烟煤的工业分析中，固定碳质量分数为77.32%，灰分及挥发分分别为15.19%和7.49%。

原料粒度组成如表2所示。由表2可知：在制粒过程中，物料的粒度通常分为核颗粒(1~3 mm)、中间颗粒(1~0.5 mm)及黏附粉(<0.5 mm)，而红土镍矿1~3 mm粒级占比达39.07%，其核颗粒较多，使其具有较好的成球性[13]；高炉返矿的平均粒度为3.20 mm，能够满足烧结生产对返矿的要求；内返矿、高炉重力灰、烧结除尘灰的平均粒度分别为1.31、1.37、0.10 mm，具有粒度均较细、亲水性差、难制粒等特点，会对料层透气性产生不良影响；燃料和熔剂小于3 mm粒级占比为85%以上，均能满足一般烧结对粒度的要求。

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

表 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 test raw materials　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Ni	Cr_2O_3	P	S	水分	烧损
红土镍矿	46.69	0.38	5.84	0.50	3.10	5.78	0.79	3.71	0.002	0.150	24.60	14.69
高炉返矿	44.26	29.93	6.83	8.05	2.45	4.92	0.84	3.76	0.002	0.290	4.46	1.87
内返矿	46.90	23.47	6.26	8.71	2.38	6.41	0.82	2.49	0.005	0.240	0.30	2.51
重力除尘灰	14.52	4.06	8.10	4.26	2.14	4.63	0.19	1.67	0.011	0.230	7.88	46.74
烧结除尘灰	45.09	22.58	6.67	8.25	1.62	8.00	0.75	2.38	0.041	0.590	0.12	3.12
无烟煤	0.44	—	6.39	0.55	0.13	4.67	—	—	0.020	0.064	4.95	86.70
生石灰	0.06	—	1.51	79.56	1.67	0.50	—	—	0.002	0.075	—	16.44

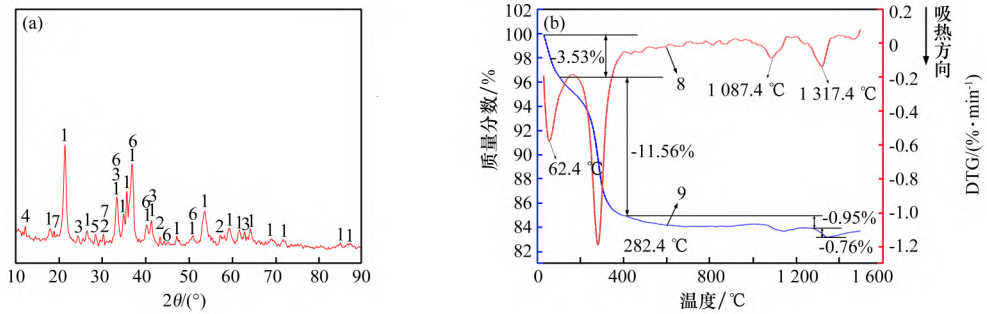
表 2　试验原料的粒度分析

Table 2　Particle size analysis of test raw materials

原料名称	粒度组成(质量分数)/%								平均粒度/mm
	>8 mm	(5,8] mm	(3,5] mm	(1,3] mm	(0.5,1] mm	(0.355,5] mm	(0.175,0.355] mm	≤0.175 mm	
红土镍矿	2.93	5.46	9.95	39.07	18.14	10.32	6.36	7.77	1.96
高炉返矿	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

红土镍矿的 XRD、TG-DTG 分析如图 1 所示。图 1 中：X 射线衍射仪衍射光源为 Cu 靶，扫描速度为 5 (°)/min；热分析仪保护气体为空气，升温速度为 10 ℃/min，温度测量范围为 30 ~ 1 500 ℃。

由图 1(a) 可知：红土镍矿的主要矿物为针铁矿，包含少量的磁铁矿、绿铬矿、利蛇纹石、鳞石英、一水硬铝石及镍铁尖晶石。由图 1(b) 可知：DTG 曲线上出现 4 个主要的吸热峰，第一个吸热峰出现在 62.4 ℃，主要是由烘干后红土镍矿所含少量自由水的脱除引起的，该吸热峰对应的自由水脱除引起的失重约为 3.53%；另外 3 个吸热峰分别出现在 282.4、1 087.4℃ 以及 1 317.4 ℃，引起的失重分别为 11.56%、0.95% 及 0.76%。结合矿物热分析图谱认为，这3个吸热



(a) XRD；(b) TG-DTG

1—针铁矿 [FeO(OH)]；2—磁铁矿(Fe_3O_4)；3—绿铬矿(Cr_2O_3)；4—利蛇纹石 [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$]；5—鳞石英(SiO_2)；6—一水硬铝石 [$Al(OH)_3$]；7—镍铁尖晶石($NiFe_2O_4$)；8—DTG 曲线；9—TG 曲线。

图 1　红土镍矿的 XRD 和 TG-DTG 分析

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

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

峰是由羟基的脱除所引起的。由此可知，该红土镍矿中羟基质量分数高达 13.27%，羟基开始脱除温度为 282.4 ℃，羟基完全脱除温度为 1 317.4 ℃。

1.2 试验方法

本文采用烧结杯进行双层配碳烧结试验，试验过程示意如图 2 所示。试验原料为实际烧结生产中的湿基配比，试验参数如表 3 所示。

试验配矿方案分为基准以及方案 A、B。所有试验方案中，高炉返矿、重力除尘灰、烧结除尘灰、无烟煤、红土镍矿、生石灰、内返矿的配比分别设定为 17.0%、2.3%、2.0%、7.2%、63.0%、7.3%、8.0%，混合料水分控制为 18.5%，无烟煤配入总量保持不变。基准方案中，烧结上、下料层均匀配入7.2% 无烟煤；方案A中，上料层配入 9.2% 无烟煤，下料层配入 5.2% 无烟煤；方案 B 中，上料层配入 8.2% 无烟煤，下料层配入 6.2% 无烟煤。

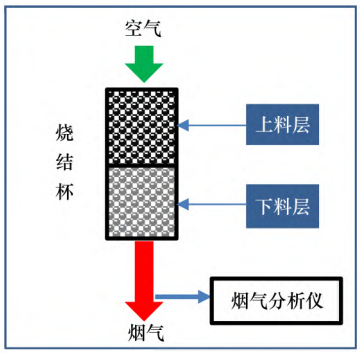


图 2 双层配碳烧结试验过程示意

Fig. 2 Test process schematic diagram of double-layer sintering with different coke content

表 3 烧结杯试验参数

Table 3 Parameters of sinter pot test

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

试验采用德国 MRU 公司的 OPTIMA7 便携式烟气分析仪测定烧结烟气的成分。试验结束后，以单齿辊破碎机破碎烧结矿，将烧结矿在 2 m 高度连续落下 4 次；筛分分级后，设定粒度大于 5 mm 的部分为成品矿，粒度小于 5 mm 的部分为烧结内返矿。试验采用料层透气性指数、烧结矿成品率和转鼓强度、烧结机利用系数、工序固体燃料消耗及返矿平衡系数等指标评价红土镍矿烧结性能，相关计算方法如下。

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

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。

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

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。

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

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

$$K=\frac{m_1/1\ 000}{S\times t} \tag{4}$$

式中：K 为利用系数，$t/(m^2\cdot h)$；S 为有效抽风面积，m^2；t 为烧结时间，h。

$$G=\frac{m_4}{m_1/1\ 000} \tag{5}$$

式中：G 为固体燃料消耗，kg/t；m_4 为装入烧结杯的固体燃料质量，kg。

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

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。

2 结果与讨论

2.1 双层配碳烧结对混合料制粒和烧结性能的影响

2.1.1 对混合料制粒性能的影响

基准和双层配碳烧结试验时，混合料的粒度组成、平均粒度以及依据式(1)计算的透气性指数如表 4 所示。由表 4 可知，双层配碳烧结条件下，混合料的透气性指数优于基准试验，混合料平均粒度也大于基准试验。这是由于在试验过程中，

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

双层配碳烧结时混合料上下层分别制粒，圆筒混合机的填充率低于基准试验，制粒效果有所改善。研究表明，制粒性能改善后，料层透气性增强，无烟煤与空气的接触几率增大，无烟煤燃烧更加充分，有助于强化红土镍矿烧结[14]。

表 4　混合料粒度组成及透气性

Table 4　Particle size composition and air permeability of mixture

项目	粒度组成(质量分数)/%							平均粒度/mm	透气性指数/JPU
	>8 mm	(5,8] mm	(3,5] mm	(1,3] mm	(0.5,1] mm	≤0.5 mm	>3 mm		
基准试验	12.22	13.73	28.83	43.82	1.28	0.12	54.78	4.18	0.233
试验 A 上料层	6.11	30.12	49.03	13.54	1.20	0	85.26	4.83	0.336
试验 A 下料层	9.48	43.38	38.69	7.58	0.87	0	91.55	5.50	0.385
试验 B 上料层	3.74	41.62	46.42	7.61	0.61	0	91.78	5.10	0.400
试验 B 下料层	4.81	26.64	41.43	25.83	1.29	0	72.88	4.41	0.336

2.1.2　对烧结性能的影响

红土镍矿双层配碳烧结技术经济指标如表 5 所示。结合表 4、5 可知：与基准试验相比，料层透气性的改善，为无烟煤的燃烧提供了更好的燃烧环境，使得试验 A、B 的烧结性能均大幅提高。其中，试验 A、B 成品率分别提高 7.99%、10.40%，转鼓强度分别提高 6.77%、5.34%，垂直烧结速度分别提高 11.37、6.36 mm/min，利用系数分别提高 0.29、0.20 t/(m^2·h)，固体燃料消耗分别降低 15.8、22.59 kg/t。综合考虑烧结技术经济指标，试验 B 明显优于试验 A。

烧结料层自动蓄热作用会导致上下料层热量不均，双层配碳烧结弥补了上部料层热量的不足，使料层上下层的热量分布更加均匀，有利于提高成品率[15]；同时，双层配碳烧结减弱了下层的过熔现象，有利于改善料层透气性，提高燃料的燃烧效率，使得烧结成矿固结条件大幅改善[12]。烧结过程中，料层气流阻力减小，无烟煤的燃烧速度会加快，燃烧带的移动速率也会加快。试验 A 上料层的无烟煤质量分数较高，其燃烧更充分，故其利用系数较大；同时，燃烧带移动速率的加快导致燃烧前沿速度快于传热前沿速度，料层高温维持时间缩短，烧结矿矿化时间缩短，因而烧结矿的成品率降低，固体燃料消耗增大。

表 5　烧结技术经济指标

Table 5　Technical and economic indexes of sintering

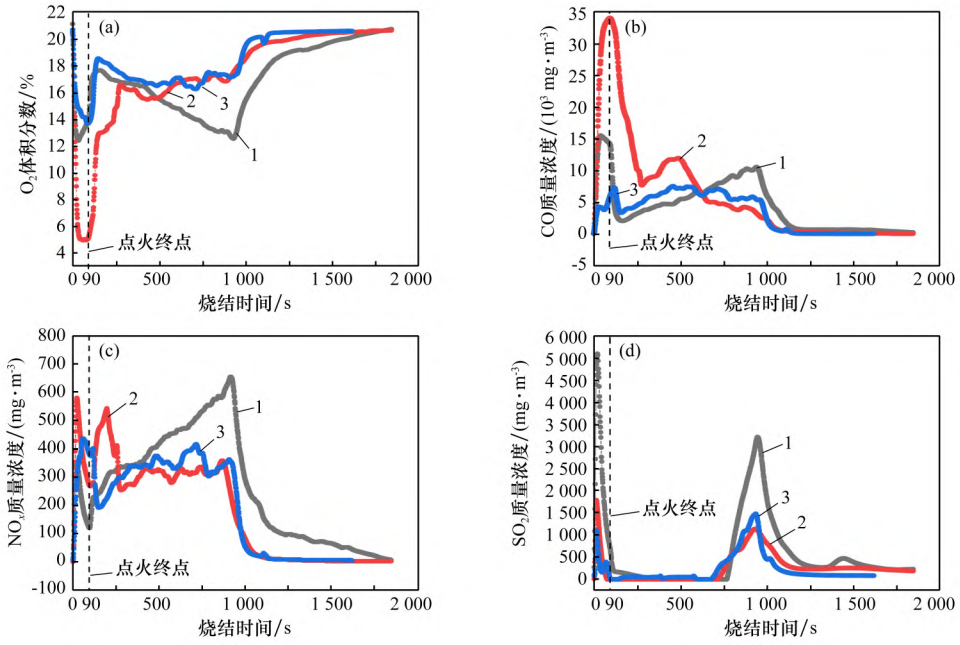
项目	质量分数/%		垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	返矿平衡值
	成品率	转鼓强度				
基准试验	68.69	51.73	24.44	0.77	147.10	0.97
试验 A	76.68	58.50	35.81	1.06	131.26	0.76
试验 B	79.09	57.07	30.80	0.97	124.51	0.71

注：返矿平衡值为烧结杯产生的返矿与混合料配入的返矿的质量比。

2.2　双层配碳烧结对烟气污染物排放的影响

双层配碳烧结烟气主要污染物排放情况如图 3 所示。由图 3 可知，与基准试验相比，试验 A、B 烟气中 O_2、CO、NO_x 和 SO_2 的变化趋势大致相似。当烧结时间达到 90 s 时，由于液化石油气和无烟煤的燃烧，烟气含 O_2 量显著降低，而其他气体则相反。随着烧结的进行，试验 A、B 中烟气含 O_2 量迅速增加，然后保持相对稳定，基准试验的烟气含 O_2 量呈现下降趋势。这是由于基准试验烧结料层的透气性指数低于试验 A、B，过湿带和燃烧带相较于双层配碳烧结更厚。随着烧结过程的进行，烟气的含 O_2 量先降至最低值，然后又上升到 21% 的正常水平。值得注意的是，在烧结中后期，试验 A、B 中烟气含 O_2 量始终高于基准试验。这是由于双层配碳烧结的上层配碳量高、下层配碳量低，下层的过熔现象减弱，烧结料层的动力学条件改善，使得料层的高温透气性得到变好，有利于料层烟气含 O_2 量的提高。

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



(a) O_2; (b) CO; (c) NO_x; (d) SO_2

1—基准试验; 2—试验 A; 3—试验 B。

图 3 红土镍矿双层配碳烧结后烟气主要污染物排放情况

Fig. 3 Emission behavior of main flue gas pollutants after double-layer sintering of laterite nickel ore

点火结束后，CO 质量浓度呈先缓慢升高，达到峰值后迅速降低; NO_x质量浓度在较长时间内处于较高值，然后迅速降低; SO_2 质量浓度在较长时间内基本为零，到烧结后期迅速升高，达到峰值迅速下降。试验 A 上料层由于无烟煤质量分数较高，其在烧结过程中会造成 NO_x质量浓度较高; 但就 NO_x排放总量而言，相较于基准试验，试验 A、B 分别减少了 31.10%、31.14%。试验 A、B 的 SO_2 排放质量浓度峰值和排放总量均大幅低于基准试验，排放总量分别减少了 54.45%、61.35%。且试验 B 的排放总量明显少于试验 A。

3 结 论

(1) 基准试验条件下红土镍矿烧结混合料的料层透气性差，垂直烧结速度慢，仅可获得成品率为 68.69%、转鼓强度为 51.73% 的烧结矿，固体燃料消耗高达 147.10 kg/t。

(2) 与基准试验相比，双层配碳烧结使上下料层热量分布更均匀，降低了下层过熔现象，改善了烧结过程料层透气性，烧结性能大幅提高，试验 B 的成品率提高了 10.40%，转鼓强度提高了 5.34%，利用系数提高了 0.20 t/(m^2·h)，固体燃料消耗降低了 22.59 kg/t。

(3) 双层配碳烧结有助于污染物减排，试验 B 条件下 NO_x和 SO_2 排放量分别减少 31.14% 和 61.35%。

参考文献:

[1] YOSHITOMO O, TORU O. Current status of resources and supply-demand of nickel, and outlook of hydrometallurgical processes for nickel laterite ore [J]. Journal of MMIJ, 2014, 130(4): 93 – 103.

[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 D Q, TIAN H Y PAN J, 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] 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 – 93.
WU B Q, QI Y H, ZHOU H M, et al. Status and progress in pyrometallurgy processes of a laterite nickel ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020,

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

223(3):78 – 93.

[4] GAO L H. Separation and recovery of iron and nickel from low-grade laterite nickel ore using reduction roasting at rotary kiln followed by magnetic separation technique [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2019, 36(2): 375 – 384.

[5] 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.
LI G H, JIANG T, LUO J, et al. New technology of ferronickel smelting from laterite ore [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.

[6] 吕学伟，白晨光，张立峰，等. 印度尼西亚红土镍矿脱水 – 烧结机理 [J]. 钢铁，2008，43(12): 13 – 18.
LÜ X W, BAI C G, ZHANG L F, et al. Dehydration and sintering mechanism of Indonesian nickeliferous laterite [J]. Iron and Steel, 2008, 43(12): 13 – 18.

[7] 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 – 31.
PAN L T, YANG J, XU Y B. Industrial test of laterite nickel ore sintering proportioned with additives [J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(2): 25 – 31.

[8] 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 Deqin, 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.

[9] 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 behavior and process optimization of nickel laterite based of limonitic style [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[10] CHENG Z L, FU P, GUO Z G. CFD prediction of heat/mass transfer in multi-layer sintering process assisted with gaseous fuel injection [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 128, 105654.

[11] KISHALAY M, NILOY K N. Analysis of two-layer sintering process for different bed heights by genetic algorithm [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 63 – 68.

[12] 张斌，周子民，李茂. 双层配碳烧结过程的传热传质分析 [J]. 化工学报，2017，68(5): 1811 – 1822.
ZHANG B, ZHOU J M, LI M. Analysis of heat and mass transfer in two-layer sintering process [J]. CIESC Journal, 2017, 68(5): 1811 – 1822.

[13] ZHU D Q, SHI B, PAN J, et al. Effect of pre-briquetting on the granulation of sinter mixture containing high proportion of specularite concentrate [J]. Powder Technology, 2018(331): 250 – 257.

[14] 胡梦杰，陈铁军，潘料庭等. 分流制粒协同燃料分加强化红土镍矿烧结试验 [J]. 钢铁，2022，57(6): 12 – 21.
HU M J, CHEN T J, PAN L T, et al. Experiment on strengthening sintering performance of lateritenickel ore by separated granulating and separate fuel adding [J]. Iron and Steel, 2022, 57(6): 12 – 21.

[15] FEOKTISTOV A V, ODINTSOV A A. Making more efficient use of solid fuel in two-layer sintering [J]. Metallurgist, 2014, 58(5): 469 – 477.

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