褐铁矿型红土镍矿烧结生产流程分析

刘佳文[1,2]，陈铁军[1,2]，潘料庭[3]，周仙霖[1,2]，黄学忠[3]，孙化国[3]
（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. 北港新材料有限公司，广西 北海 536000）

摘要： 为了更好地探明褐铁矿型红土镍矿烧结时出现的燃耗高、转鼓强度差等问题产生的原因，本文对该矿烧结生产过程进行了分析。结果表明：红土镍矿干燥前后平均水分高（分别为 32% 和 26%）、燃料破碎后过细（－0.5 mm 粒级质量分数平均值接近 50%）是造成烧结燃耗高的主要原因；制粒效果有限（混合料制粒前后粒度组成基本一致），烧结过程中燃烧带过宽（可达 200 mm 以上）导致烧结料层上层与中层转鼓强度不一致（分别约为 44% 和 54%），且该矿含硅、镁高，其烧结成矿的主要物相为铁尖晶石类矿物是造成转鼓强度差的主要原因。

关键词： 褐铁矿型红土镍矿；烧结；制粒；固结机理；红土镍矿
中图分类号： TF046.4　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764（2022）05－0001－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.063

Analysis on sintering production process of limonite-type laterite nickel ore

LIU Jiawen[1,2], CHEN Tiejun[1,2], PAN Liaoting[3], ZHOU Xianlin[1,2], HUANG Xuezhong[3], SUN Huaguo[3]
(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. *Beibu Gulf New Materials Co., Ltd., Beihai* 536000, *Guangxi, China*)

Abstract: In order to better find out the causes of high fuel consumption and poor drum strength in sintering of limonite-type laterite nickel ore, the sintering production process is analyzed. The results show that the average moisture content of laterite nickel ore before and after drying is high (32% and 26% respectively), and the too fine fuel after crushing (the average mass fraction of －0.5 mm particle size is close to 50%) is the main reason for the high sintering fuel consumption. The granulation effect is limited (the particle size composition of the mixture is basically the same before and after granulation). During sintering, the burning band is too wide (more than 200 mm), which leads to the inconsistent drum strength of the upper layer and the middle layer of the sinter bed (about 44% and 54% respectively). The ore contains high silicon and magnesium, and the main phase of its metallogenic sinter ore is chrysomelane mineral, which is the main reason for the poor drum strength.

Key words: limonite-type laterite nickel ore; sintering; granulation; consolidation mechanism; laterite nickel ore

如今世界经济迅猛发展，对金属镍的需求量也在加速增长。随着世界范围内的不锈钢生产与消费的逐年增加，以及硫化镍矿资源的日渐枯竭，储量丰富、采矿成本低、便于外运的红土镍矿的开发利用变得尤为重要[1]。

利用红土镍矿冶炼镍铁的方法主要有回转窑－电炉法（RKEF）和烧结高炉法[2-3]。其中，烧结高炉法为中国因地制宜所发展出来的技术，

收稿日期：2021－10－27；修回日期：2022－01－17
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLCF202107）；湖北省重点研发计划项目（2022BCA062）
作者简介：刘佳文（1998—），男，硕士研究生，从事烧结球团方面的研究。
通信作者：陈铁军（1973—），男，教授，从事烧结球团方面的研究。

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

充分利用了正常冶炼所淘汰的小型高炉，其利用铁品位高，镍品位低的褐铁矿型红土镍矿冶炼镍铁合金，有效地降低了不锈钢的冶炼成本[4-7]。

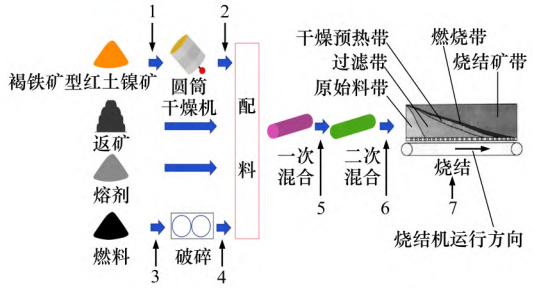
褐铁矿型红土镍矿烧结冶炼不锈钢工艺过程中的烧结性能较差，影响企业生产顺行。这主要因为：一方面，该矿含有大量的结晶水，不易脱出，烧损大、燃耗高，烧结矿整体疏松多孔，强度较差[8]；另一方面，该矿含硅、镁、铝都很高，使得其在烧结过程中不易生成低熔点的液相黏结固体颗粒[9]，从而进一步地影响了烧结矿强度[10-12]。含硅量高会导致烧结黏结相矿物劣化，生成大量硅酸盐和铁橄榄石类矿物，烧结液相流动性降低[13]。除此之外，台车上物料的分布状态也不可避免的对该烧结矿的产、质量产生影响，如物料的偏析状态等，会对烧结过程中的反应以及烧结矿本身产生影响[14]。

因此，为了在烧结生产中更好的使用褐铁矿型红土镍矿，本文以广西北港新材料有限公司180 m^2烧结机为分析研究对象，对该矿烧结生产过程的各个工序进行深入分析，总结该矿烧结本身存在的及烧结生产流程中出现的问题，并提出相应的改进建议。

1 研究方法

1.1 烧结生产流程

图1为广西北港新材料烧结生产过程流程及取样示意。由图1可知：燃料经破碎送往配料室；石灰窑生产的石灰通过管道输送运至配料室旁，送入配料仓中，高炉返矿、冷筛返矿、除尘灰分别经过矿槽、皮带、输送管道送入配料仓中；配料物料经一次混匀工序的加水混匀后，进入到制粒阶段，辅以蒸汽预热以提高其制粒效果。



1—干燥前取样；2—干燥后取样；3—燃料破碎前取样；4—燃料破碎后取样；5—一次混合后取样；6—二次混合后取样；7—烧结取样。

图1 烧结生产过程流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of sintering production process

1.2 取样及分析测试方法

1.2.1 原料水分测试

图1中，取样点1、2是对干燥线干燥前后的褐铁矿型红土镍矿进行取样，每天取样一次，连续取3 d，单次单点取样量不低于5 kg，取样后以密封袋保持水分。所取得样品统一在120 ℃干燥8 h以上，至质量稳定，再次称重，根据质量差计算水分质量分数。取三天平均值为最终结果。

1.2.2 原料粒度筛析

图1中，取样点3、4是对烧结现场所使用的燃料，即无烟煤和焦粉，在破碎前后进行取样，每天取样一次，取样3 d，单点单次取样不少于5 kg。对所取得的燃料称重后在120 ℃烘箱内干燥至质量均匀无变化后取出进行筛分。

图1中，取样点5、6是对烧结生产线的一混后和二混后进行分别取样、密封，单次单点取样不少于10 kg，对所取得的混匀后物料全部进行筛分，筛分粒级为0.5、1、3、5、8、10、13 mm。筛分完成后对-3、3~5、5~8、8 mm进行元素偏析研究。取三天平均值为最终结果。

1.2.3 烧结台车剖析

180 m^2烧结机台车设计尺寸为3 m×1 m×1 m，依照台车尺寸，原始烧结料厚为750~800 mm，烧结后混匀料有一定程度的收缩，收缩后烧结矿料厚约为600~700 mm。本次烧结分析方案：将烧结矿纵向分为三层，对每一层均匀取20 kg左右的烧结矿，并对烧结矿进行筛分，筛分粒度取40、25、16、10、5 mm。样品按照国标GB/T 24531—2009[15]进行烧结矿转鼓强度测定。同时借助SE型X射线衍射仪、A1金相显微镜和场发射扫描电镜对烧结矿进行工艺矿物学分析。

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

2　结果及分析

2.1　原料分析

烧结过程中主要使用的原料包括菲律宾进口的红土镍矿、自产生石灰、无烟煤、焦粉、烧结除尘灰、重力除尘灰等，原料的主要化学成分见表 1。由表 1 可知，红土镍矿铁品位为 51.58% 左右，含硅量为 3% 以上，含镍量为 0.76%，属于褐铁矿型红土镍矿。取样当日的烧结混匀料配比见表 2，红土镍矿原矿 X 射线衍射分析如图 3 所示。

表 1　原料主要化学成分(质量分数)

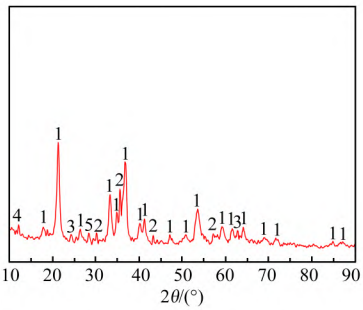
Table 1　Main chemical composition of raw materials　　%

原料	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Ni	Cr_2O_3	P	S	LOI
红土镍矿	51.58	—	3.35	—	—	6.38	0.76	—	0.007	0.141	14.92
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	46.74
氧化铁皮	60.56	11.67	1.25	0.10	0.01	0.37	1.27	15.80	0.010	0.006	−2.53
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	3.12
无烟煤	0.44	—	6.39	0.55	0.13	4.67	—	—	0.020	0.064	86.70
焦粉	0.67	—	5.51	0.57	0.13	4.12	—	—	0.018	0.061	87.08
生石灰	—	—	—	87.63	3.42	—	—	—	—	—	—

表 2　烧结混合料配比(湿基,质量分数)

Table 2　The ratio of sinter mixture　　%

高返	重力除尘灰	烧结除尘灰	无烟煤	红土矿	生石灰	内返
16.87	2.28	1.98	5.16	62.50	3.27	7.94



1—针铁矿；2—磁铁矿；3—赤铁矿；4—镍蛇纹石；5—鳞石英。

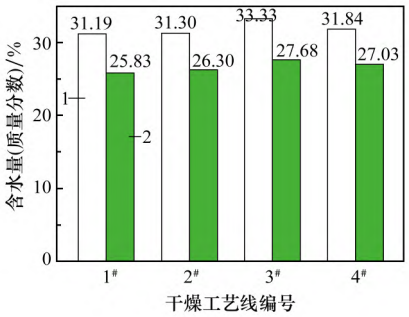
图 2　褐铁矿型红土镍矿原矿的 X 射线衍射

Fig. 2　X-ray diffraction pattern of limonite laterite nickel ore

由图 2 可知，原矿中主要物相为针铁矿、磁铁矿、赤铁矿和鳞石英。铝主要富集于硬质或黏土状针铁矿中，镁主要赋存于镍蛇纹石中，而硅主要赋存于镍蛇纹石和鳞石英中。可见，褐铁矿型红土镍矿中铝、硅、镁的赋存状态与常规铁矿石有着很大不同。

2.2　混合料干燥效果分析

在常规烧结原料铁粉矿中，磁铁矿以及赤铁矿含水量一般不超过 5%，褐铁矿一般低于 11%[16]。混合料干燥前后取样水分如图 3 所示。由图 3 可知，与常规烧结原料相比，褐铁矿型红土镍矿含水量更高，黏性更强，其干燥前后平均水分质量分数仅从 32% 降低至 26%，依然远高于常规铁粉矿。原料水分过高会压缩后续混匀制粒过程的加水空间，影响混合料制粒效果。



1—干燥前；2—干燥后。

图 3　干燥前后水分变化

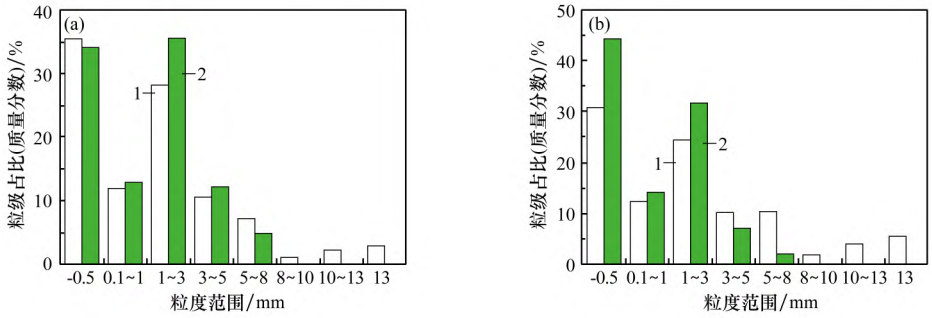
Fig. 3　The change of moisture before and after drying

2.3　混合料燃料粒度组成

无烟煤和焦粉破碎前后粒度组成如图 4 所示。由图 4 可知，烧结燃料中 −0.5 mm 所占的质量分数最高可接近 50%，1～3 mm 粒级质量分数低于 45%，这将导致燃烧速度过快，影响烧结

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

燃烧带最高温度[17]。在褐铁矿烧结研究中，将燃料 -0.5 mm 粒级质量分数从 57% 降低至 30%，可以降低燃料消耗，提高烧结矿产量和强度[18]。



1—破碎前；2—破碎后。

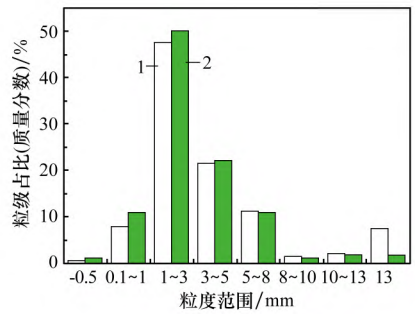
(a) 无烟煤；(b) 焦粉

图 4 燃料破碎前后粒度组成变化趋势

Fig. 4 Variation trend of particle size composition before and after fuel crushing

2.4 混合料制粒效果分析

180 m^2 烧结机的制粒前后物料的粒度组成如图 6 所示。由图 6 可知，1 ~ 3 mm 粒级质量分数最高可达 57.46%，粒度组成符合烧结生产需求。但同一批次制粒前后物料粒级占比基本一致，证明在混匀制粒过程中，二次混合机的制粒效果没有得到体现，制粒效果差。针对红土镍矿烧结生产过程制粒效果差的问题，实验室研究制粒水分和时间、圆筒混合机转速及润湿时间对制粒时间的影响，强化红土镍矿的烧结效果[19]。



1—一混后；2—二混后。

图 5 混匀制粒后粒度组成变化趋势

Fig. 5 Variation trend of particle size composition of mixture after blending and granulation

2.5 烧结料层分析

如图 6 所示的烧结台车料层断面中，基于料层厚度自上而下依次：上层为烧结矿带，中层为燃烧带，下层为干燥预热带、过湿带和原始料层带。自烧结料层表面至底部，料层高度实测为 600 ~ 700 mm。其中，燃料带厚度约占整体料层厚度 1/3，达 200 mm 以上。将燃烧带自然冷却后分别测定上层和中层烧结矿的转鼓指数，结果如表 3 所示。由表 3 可知，烧结矿分层转鼓指数符合料层蓄热规律，褐铁矿型红土镍矿烧结料层的中层转鼓指数高于上层部分转鼓指数 10%，但最高也仅为 54.67%，远低于常规铁矿烧结矿的转鼓指数。具体料层细节如图 7 所示。



图 6 180 m^2 烧结机烧结台车断面

Fig. 6 Cross section of 180 m^2 sintering pallet of sintering machine

表 3 烧结料层分层转鼓指数(质量分数)

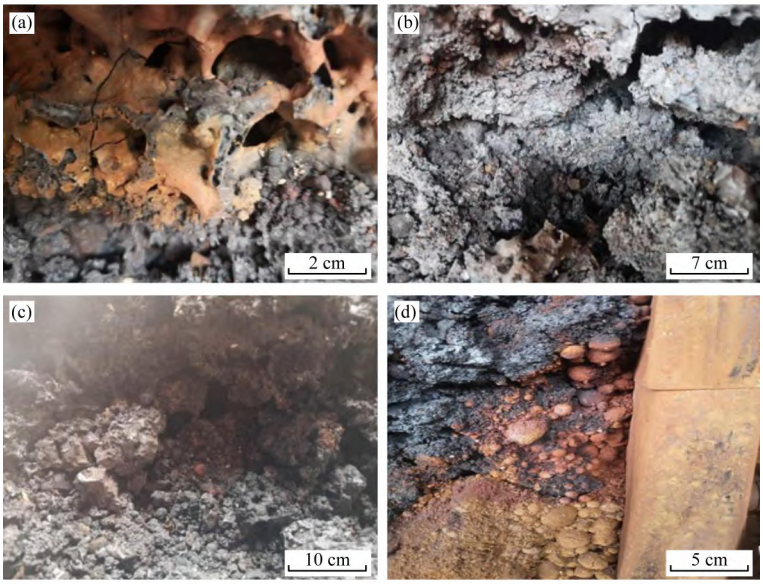
Table 3 Drum index of sinter at different layer %

上部	中部
44.67	54.67

由图 7 可知：褐铁矿型红土镍矿烧结料层存在大孔薄壁、边缘效应严重、夹生料等问题，使得烧结过程中烧结矿烧结不完全，具体表现为烧结成矿有大量肉眼可见的空洞、裂缝[图 7(a)、(b)]；有较多欠烧的较大粒度红土

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

镍矿团块夹杂其中[7(c)、(d)]。这也表明在红土镍矿烧结过程中，整体的液相量不足，且液相强度不高，极大地影响了烧结顺行，降低了烧结矿的产、质量，不利于生产的经济性。

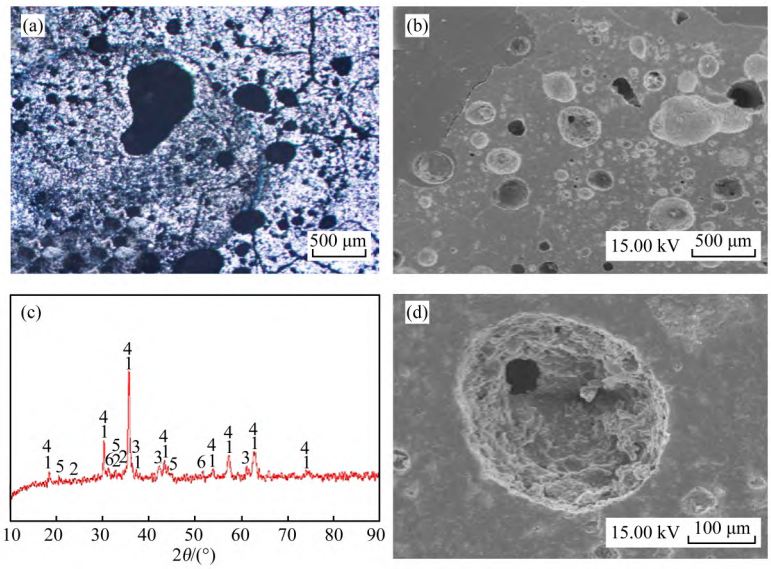


(a) 烧结矿裂缝；(b) 烧结矿空洞；(c) 烧结矿整体欠烧；(d) 烧结矿边缘欠烧

图 7　烧结料层部分细节

Fig. 7　Partial details of sinter layer

对烧结料层上层和中层的烧结矿进行微观结构分析，结果分别如图 8、9 所示。由图 8、9 可看出，在微观形貌上中层烧结矿较上层烧结矿结构更加完整，中层烧结矿孔隙率低于上层烧结矿。结合 SEM 分析，中层烧结矿颗粒粒径相对较大，有明显的交织熔蚀状态，液相能够更好地润湿难熔矿物，在孔洞边缘有较少的针状和片状结构，但不足以连接固相提高强度。



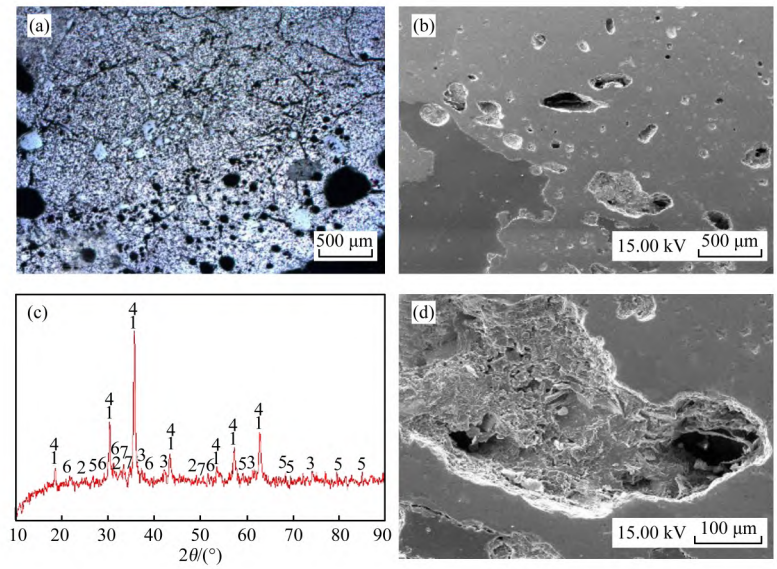
1—磁铁矿；2—赤铁矿；3—方铁矿；4—镁铁尖晶石；5—镁橄榄石；6—钙镁方长石。

(a) 光学显微镜镜下图；(b) 100 倍电子显微镜镜下图；(c) XRD 物相图谱；(d) 500 倍电子显微镜镜下图

图 8　上层分区烧结矿物相

Fig. 8　Phase diagram of sintered minerals in upper layer

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



1—磁铁矿；2—赤铁矿；3—方铁矿；4—镁铁尖晶石；5—镁橄榄石；6—钙镁方长石；7—钙镁橄榄石。

(a) 光学显微镜镜下图；(b) 100倍电子显微镜镜下图；(c) XRD物相图谱；(d) 500倍电子显微镜镜下图

图9 中层分区烧结矿物相

Fig. 9 Phase diagram of sintered minerals in middle layer

此外，由图8、9可知：随着反应的进行，由中层到上层，钙镁方长石开始向橄榄石转变，而橄榄石相开始向尖晶石和磁铁矿转变，说明反应进行过程中，橄榄石和尖晶石矿物作为主要黏结相存在于烧结矿中[20]。结合表4所示的现场烧结矿主要化学组成可知，烧结矿中FeO质量分数高达19.28%，SiO_2质量分数为8.29%，烧结矿二元碱度为1.17，不利于铁酸钙黏结相的生成。与常规铁矿烧结矿以铁酸钙系为主要黏结相有很大区别，从而导致褐铁矿型红土镍矿烧结矿的转鼓强度差。

表4 烧结矿主要化学组成(质量分数)

Table 4 Main chemical composition of sinter %

TFe	FeO	NiO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
40.14	19.28	1.07	8.29	4.58	9.74	4.13

3 结 论

(1) 褐铁矿型红土镍矿的干燥效果不佳，干燥后的水分仍远高于常规铁矿水分乃至于褐铁矿水分；且破碎后的燃料平均粒度过细，-0.5 mm粒级占比达50%以上，影响烧结燃烧带最高温度。

(2) 褐铁矿型红土镍矿混合料制粒前后物料粒级占比基本一致，制粒效果差。

(3) 褐铁矿型红土镍矿烧结过程存在有物料烧结效果不佳，烧结料层边缘效应严重，孔洞较多，燃烧带较宽等情况。其烧结矿主要以橄榄石和尖晶石矿物作为黏结相，转鼓强度差。

参考文献:

[1] 常龙娇,伞欣悦,梁栋,等. 镍矿冶金技术研究现状[J]. 矿冶,2020,29(5):63-68.
CHANG L J,SAN X Y,LIANG D,et al. Research status of laterite nickel ore metallurgy technology[J]. Mining & Metallurgy,2020,29(5):63-68.

[2] ECKELMAN M J. Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry[J]. Resources Conservation & Recycling,2010,54(4):256-266.

[3] MOSKALYK R R,ALFANTAZI A M. Nickel laterite processing and electrowinning practice[J]. Minerals Engineering,2002,15(8):593-605.

[4] LIU P,LI B,CHENG S,et al. Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving[J]. Applied Thermal Engineering,2016,109:542-559.

[5] MUDD G M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites[J]. Ore Geology Reviews,2010,38(1-2):9-26.

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

[6] TSUJI H. Behavior of reduction and growth of metal in smelting of saprolite Ni-ore in a rotary kiln for production of ferro-nickel alloy [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan,2012,52(6):1000 - 1009.

[7] TIAN H,PAN J,ZHU D,et al. Improved beneficiation of nickel and iron from a low-grade saprolite laterite by addition of limonitic laterite ore and $CaCO_3$ [J]. Journal of Materials Research and Technology,2020,9(2):2578 - 2589.

[8] SAITO Y,KAWAHIRA K,YOSHIKAWA N,et al. Dehydration behavior of goethite blended with graphite by microwave heating [J]. ISIJ International,2011,51(6):878 - 883.

[9] LV X,BAI C,DENG Q,et al. Behavior of liquid phase formation during iron ores sintering [J]. ISIJ International,2011,51(5):722 - 727.

[10] PANYCHEV A A. Potential for the use of low-grade limonite ores from dumps [J]. Metallurgist,2006,50(1 - 2):45 - 48.

[11] KAWAGU T,USUI T. Summarized achievements of the porous meso-mosaic texture sinter research project [J]. ISIJ International,2005,45(4):414 - 426.

[12] 武铁，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.
WU Y,LI Q,XIONG D H,et al. Influence of size changes of imported ore fines on sintering properties [J]. Steel Research,2012,40(2):1 - 3.

[13] 苏立新，吴胜利，翟晓波，等. 巴西某高硅铁矿粉对烧结黏结相流动性及劣质矿物的影响 [J]. 中国冶金，2020,30(1):18 - 25.
SU L X,WU S L,QU X B,et al. Influence of a high-silicon iron ore powder in Brazil on the fluidity of sintered binder phase and inferior minerals [J]. China Metallurgy,2020,30(1):18 - 25.

[14] 赵志星，安钢，裴元东，等. 京唐大型烧结机料层结构物件参数和混合料性能测定 [C]//2012 年全国炼铁生产技术会议暨炼铁年会文集. 无锡：中国金属学会，2012:720 - 727.
ZHAO Z X,AN G,PEI Y D,et al. Jingtang large-scale sintering machine material layer structure object parameters and mixture performance measurement [C]//2012 National Iron-making Production Technology Conference and Ironmaking Annual Conference Proceedings. Wuxi: The Chinese Society for Metals,2012:720 - 727.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 高炉和直接还原用铁矿石转鼓和耐磨指数的测定：GB/T 24531—2009 [S].
General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration of China. Determination of drum and wear resistance index of iron ore for blast furnace and direct reduction: GB/T 24531 - 2009 [S].

[16] 李冀鲁. 热风辅助微波干燥过程褐铁矿湿分迁移特性研究 [D]. 北京：北京交通大学，2021.
LI J L. Moisture migration characteristics of limonite during hot air-assisted microwave drying [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2021.

[17] 刘燊辉，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 S H,BAI K K,NI G H,et al. Study on the effect of fuel particle size on iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):17 - 22.

[18] 刘正平，马金明，高瑞芳，等. 褐铁矿烧结研究与生产 [J]. 钢铁，2005,40(2):19 - 23.
LIU Z P,MA J M,GAO R F,et al. Research and production of limonite sintering [J]. Iron and Steel,2005,40(2):19 - 23.

[19] 张思平，王兆才，胡梦杰，等. 强化红土镍矿烧结料层透气性工艺研究 [J]. 烧结球团，2022,47(2):52 - 60.
ZHANG S P,WANG Z C,HU M J,et al. Research on technology of strengthening permeability of laterites sinter bed [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):52 - 60.

[20] 刘佳文，陈铁军，周仙霖，等. 基于无碳烧结的褐铁矿型红土镍矿固结机理研究 [J]. 烧结球团，2022,47(3):1 - 7.
LIU J W,CHEN T J,ZHOU X L,et al. Research on consolidation mechanism of limonite-type laterite nickel ore based on carbon-free sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):1 - 7.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。

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