巴西铁精矿开路预磨—造球试验研究

王中才[1]，张汉泉[2]

(1. 武钢资源集团有限公司，湖北 武汉 430080；2. 武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉 430205)

摘要： 为了更好地利用巴西粗矿作为造球原料，本文研究了巴西粗矿的可磨度、磨矿条件以及造球指标。结果表明：巴西粗矿属于易磨矿，采用 MQY4385 湿式溢流型球磨机，磨机利用系数为 $q_{-0.074\ mm}$ = 1.03 t/(m³·h)。当给矿量为 70.00～100.00 t/h，磨矿质量分数为 52.46%～58.49% 时，磨矿产品 −0.074 mm 质量分数均大于 75%，具有良好成球性；巴西粗矿预磨后单独造球，可以获得较好的生球指标；大冶铁精矿配加 20% 巴西粗过滤精矿所造生球的落下强度为 3.7 次/(0.5 m)，抗压强度为 11.05 N/P，生球水分为 6.62%，提高了大冶铁精矿单独造球时的生球指标。

关键词： 巴西粗精矿；开路磨矿；造球；生球指标

中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0047－06

doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.070

Experimental research on open-circuit pre-grinding and pelletizing of iron ore concentrates in Brazil

WANG Zhongcai[1], ZHANG Hanquan[2]

(1. *WISCO*, *Wuhan* 430080, *Hubei*, *China*; 2. *School of Resources & Safety Engineering*, *Wuhan Institute of Technology*, *Wuhan* 430205, *Hubei*, *China*)

Abstract: In order to make better use of Brazilian coarse concentrate as raw material for pelletizing, the grindability, grinding conditions and pelletizing index of Brazilian coarse concentrate are studied. The results show that Brazil coarse concentrate is easy to be ground, using MQY4385 wet overflow ball mill, the mill utilization factor $q_{-0.074\ mm}$ = 1.03 t/(m³·h). When the feeding capacity is 70.00～100.00 t/h, and the mass fraction of grinding ore is 52.46%～58.49%, all mass fractions of −0.074 mm of grinding products are greater than 75% with good spheronization, After the pre-grinding of Brazilian coarse concentrate, the balling is made separately, and a better green pellet index can be obtained. The falling strength of the pellets produced by Daye iron ore concentrate with 20% Brazilian crude filtered concentrate is 3.7 times/(0.5 m), the compressive strength is 11.05 N/P, and the moisture of the green pellets is 6.62%, which improved the green pellets index of Daye iron ore concentrate when pelletizing alone.

Key words: coarse concentrate in Brazil; open-circuit grinding; pelletizing; green pellet index

铁精矿进入钢铁冶炼前，通常需要进行造球，以保证冶炼过程的透气性及杂质的易分离，而铁精矿粒度大小对造球质量影响较大[1-2]。国内铁矿品位通常较低，需经过选矿处理，处理后的铁精矿产品粒度较细，可直接用于造球[3-4]。相较国内矿而言，巴西、澳大利亚等国外铁矿品位较高，有害元素含有量低，通常不需要选别即可用于高炉冶炼，统称高品位块矿，但高炉在使用这些块矿的过程中，仍然有冶金性能不佳，某些地区块矿含硅量偏高等问题[5-6]。随着国内高品质铁矿资源的逐渐匮乏，以及选矿成本的升高，越来越多的钢铁企业将目光投向国外高品位

收稿日期： 2021－12－13；**修回日期：** 2022－05－17

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51474161)

作者简介： 王中才(1980—)，男，工程师，从事矿物加工与环境保护方面的研究。

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

铁矿，但这部分铁矿粒度较粗，不适合直接作为造球原料使用，需要进行细磨处理[7-8]

随着我国钢铁行业的发展，自产优质铁精矿已远远不能满足球团生产的需求，国内部分钢厂在保证球团质量的前提下，为了降低原料成本，采购部分巴西粗矿与国内铁精矿混合造球使用[9]。根据球团生产的工业要求，原料 -0.074 mm 占比一般在 75% 以上[10]，而进口的巴西粗矿，其粒度特征更适宜于作为烧结原料，若作为球团原料则不满足粒度要求，需要进一步细磨处理。因此，本文在研究巴西粗矿物理性质的基础上，对其开展了预磨矿处理以及造球试验研究，以期对该矿更好地开展工业应用提供理论支持。

1 原料性能与试验方法

1.1 原料性能

巴西粗矿的多元素分析、铁物相分析分别见表 1 和表 2。由表 1 可知，巴西粗矿含铁品位为 59.25%，As、S、Al_2O_3 等杂质质量分数低。由表 2 可知，巴西粗矿中铁主要以 Fe_2O_3 的形式存在，占比达 51.59%；其次为难溶的 $FeSiO_3$，占比为 39.41%；而磁性铁和 FeS 占比较少。

表 1 巴西粗矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of Brazil coarse concentrate %

TFe	As	S	Al_2O_3	SiO_2
59.25	0.004 7	0.015	1.93	9.39

表 2 巴西粗矿物相分析

Table 2 The mineral phase analysis of Brazil coarse concentrate

项目	MFe	$FeCO_3$	Fe_2O_3	FeS	难溶 $FeSiO_3$	TFe
铁质量分数/%	4.63	0.28	30.57	0.42	23.35	59.25
占比/%	7.81	0.47	51.59	0.71	39.41	100.00

巴西粗矿的粒度分析结果如图 1 所示，成球性指数如表 3 所示。由图 1 可以看出，矿样中大于 0.9 mm 粒级质量分数为 21.94%，-0.074 mm 粒级质量分数为 58.17%，表明样品粒度较粗，不适合直接用量造球，需细磨至适宜粒度后作为造球原料。且由表 3 可知，原料经过细磨后，当 -0.074 mm 粘级质量分数为 75% 时，其成球性指数(k)达到 0.64，根据苏联 B·M·维邱金50 年代提出的物料成球性指数判断其具有良好成球性[11]。

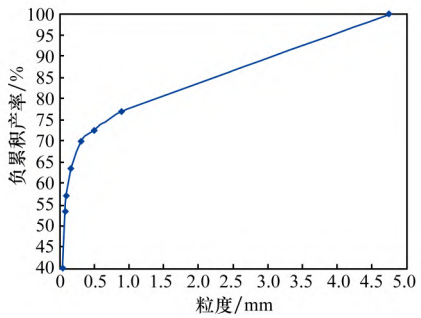


图 1 巴西粗矿粒度筛析曲线

Fig. 1 Sieving curve of particle size for Brazil coarse concentrate

表 3 巴西粗矿成球性能指数

Table 3 Pelletizing performance indexes of Brazil coarse concentrate

矿样名称	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	质量分数/%		成球性指数
		最大分子水	最大毛细水	
巴西粗矿(-0.074 mm 占 75%)	1 893	7.5151	19.22	0.64

注：成球性指数：$K = W_{最大分子水}/(W_{最大毛细水} - W_{最大分子水})$。

与巴西粗矿配矿造球的为国内大冶铁精矿，其主要化学成分见表 4。由表 4 可知，大冶铁精矿品位大于 66%，除 S 质量分数偏高外，其他杂质质量分数低，是较优质的铁精矿产品。造球过程中采用的膨润土主要物理性质见表 5。

1.2 试验方法

巴西粗矿磨矿试验采用 MQY4385 湿式溢流型球磨机，球磨机的粗颗粒粉料设计台时处理能

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

表 4　大冶铁精矿主要化学成分

Table 4　The main chemical composition of Daye iron concentrate

质量分数/%							−0.074 mm 占比	四元碱度
Fe	Cu	S	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2		
66.35	0.024	0.560	0.802	1.18	0.998	3.16	79.91	0.477

表 5　膨润土的物理性能

Table 5　Physical properties of bentonite

质量分数/%				膨胀容/(mL·g^{-1})	吸蓝量/[g·(100 g)$^{-1}$]
−0.074 mm 占比	含水量	吸水率	蒙脱石占比		
97.72	8.05	607.78	79.53	20.0	35.15

力为 94.70 t/h，采用一段开路磨矿—分级—过滤流程。

矿样相对可磨度测定采用 XMQ-67 型∅240 mm×90 mm 实验室球磨机，采用武钢金山店铁矿球磨给矿为标准样，开展两种矿样的相对可磨度测定试验，以确定磨机 MQY4385 的利用系数[12-13]。金山店铁矿一段球磨机为 MQG3660 格子型，实测台时处理能力为 109.60 t/h(以干重计)，以球磨排矿为磨矿产品，则 q_0 = 0.514 t/(m^3·h)。将标准样、巴西粗矿样分别筛取 −3～+0.15 mm 粒级，每次取该粒级 1 kg 矿样进行磨矿，再对磨矿产品进行 −0.074 mm 粒级筛析，计算新生 −0.074 mm 粒级质量分数，试验流程如图 2 所示。

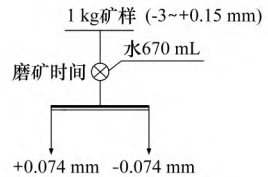


图 2　相对可磨度测定试验流程

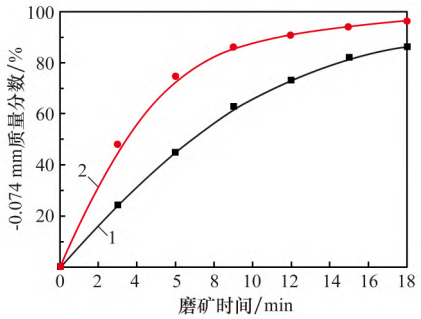
Fig. 2　Flow chart of relative grindability test

造球试验采用∅800 mm 无动力底刮刀圆盘造球机，边高 h = 210 mm，球盘倾角 α = 50°，圆盘转速为 27 r/min，造球时间为 15 min。造球完成后进行筛分，取 8～16 mm 粒径的生球测定其抗压强度、落下强度、爆裂温度和生球水分。试验造球每次配料以 2 kg 含铁原料为准，膨润土添加量为 2.0%。

2　磨矿结果及分析

2.1　相对可磨度测定

巴西粗矿相对可磨度测定结果见图 3。由图 3 可得，巴西粗矿随着磨矿时间的增加，−0.074 mm 粒度质量分数增加，且大于标准样新增的粒级质量分数。



1—标准样；2—巴西粗矿。

图 3　巴西粗矿相对可磨度测定结果

Fig. 3　The results of relative grindability test for Brazil coarse iron concentrate

按新生 −0.074 mm 粒级质量分数占 75% 计算，由矿石相对可磨度曲线计算巴西粗矿相对可磨度系数 K，见式(1)：

$$K_{(75\%-0.074\ \mathrm{mm})}=\frac{T_{\text{标准样}}}{T_{\text{巴西粗矿}}}=\frac{12.25\ \mathrm{min}}{6.10\ \mathrm{min}}=2.01 \tag{1}$$

式中：$T_{\text{标准样}}$、$T_{\text{巴西粗矿}}$分别为磨矿细度为标准样与巴西粗矿 −0.074 mm 在 75% 时需要的磨矿时间，由图 3 可知，其分别为 12.25 min 与 6.10 min。

由图示曲线及可磨度系数 K 计算可以得出，相比较金山店铁矿标准样，巴西粗矿样属于易磨矿样。金山店铁矿选厂一段球磨机的利用系数为(以球磨排矿为磨矿产品)：$q_{0.074\ \mathrm{mm}}$ = 0.514 t/(m^3·h)。从而可以确定处理巴西粗矿样的球

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

磨机利用系数以球磨排矿为磨矿产品，建议选用值：$q_{-0.074\ mm}=1.03\ t/(m^3\cdot h)$。

2.2 给矿量对细度的影响

磨机给矿量对最终产品细度影响较大，本节试验考察了给矿量对磨矿产品细度的影响。当磨矿质量分数为55%左右，当巴西粗矿给矿量分别为70.00、80.00、91.20、100.00 t/h时，磨矿细度结果见图4。

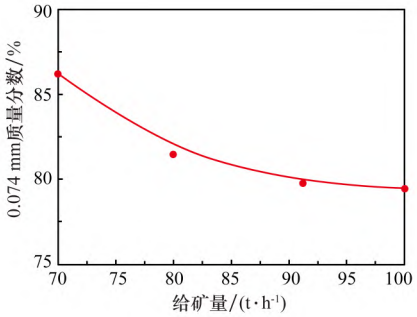


图4 巴西粗矿样磨矿给矿量对产品细度的影响

Fig. 4 The effect of feed on fineness of product for Brazil coarse concentrate

由图4可知，随着给矿量的增加，磨矿产品细度(以-0.074 mm质量分数计)随之下降，且在研究的给矿量范围内，磨矿产品-0.074 mm质量分数均大于75%。当巴西粗矿给矿量为100 t/h时，磨矿产品经过旋流器分离后，溢流产品细度为79.48%。结合表3，当巴西粗矿产品-0.074 mm质量分数达到75%时，其成球性指数良好。因此，在70~100 t/h给矿量范围内，经过磨矿后所得产品均具有良好的成球性。

2.3 磨矿质量分数对产品细度的影响

除了磨机给矿量外，磨矿质量分数对产品细度也有较大的影响。当巴西粗矿磨矿质量分数分别为52.46%，55.94%，57.47%和58.49%时，磨矿产品细度见图5。

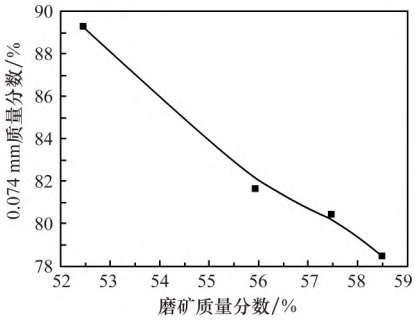


图5 巴西粗矿磨矿质量分数对产品细度的影响

Fig. 5 The effect of grinding mass fractions fineness of product for Brazil coarse concentrate

由图5可知，随着磨矿质量分数的增加，磨矿产品细度(以-0.074 mm质量分数计)近似呈直线下降。当磨矿质量分数为58.49%时，磨矿产品经过旋流器分离过滤后，产品细度为78.52%。在研究的磨矿质量分数范围内，磨矿产品-0.074 mm质量分数均大于75%。因此，在52.46%~58.49%给矿质量分数范围内，经过磨矿后所得产品具有良好的成球性。

2.4 磨矿产品成球性分析

当巴西粗矿给矿量为74 t/h，磨矿质量分数为52%时，所得到的磨矿产品成球性见表6。由表6可知，磨矿产品比表面积为2 132 cm^2/g，成球性指数为0.67，均大于磨矿细度-0.074 mm占比为75%时的指标，证明磨矿产品具有良好的成球性能。

表6 巴西粗矿预磨产品成球性分析

Table 6 Property analysis of pre-grinding products for Brazil coarse concentrate

比表面积/($cm^2\cdot g^{-1}$)	质量分数/%		密度/($t\cdot m^3$)	成球性指数
	最大分子水	最大毛细水		
2 132	7.562 4	18.77	4.339	0.67

3 造球试验结果及分析

3.1 巴西粗矿造球

巴西粗矿经过磨矿—分级—过滤后获得过滤铁精矿，其单独配加2.0%的膨润土进行4次造球试验，生球指标见表7。由表7可知，巴西粗矿过滤精矿添加2.0%膨润土时所造生球的落下强度为4.5次/(0.5 m)；抗压强度为11.11 N/P；这两项指标可以满足造球指标，且生球水分为7.70%。因此，可以看出，巴西粗矿预磨铁

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

表 7　巴西粗矿预磨—过滤铁精矿生球指标

Table 7　Green ball indexes of iron ore concen from pre-grinding-filtration of Brazil coarse concentrate

试验次数	生球水分（质量分数）/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})
1	7.80	3.9	10.39
2	8.12	4.8	11.23
3	7.14	4.1	11.07
4	7.76	5.2	11.75
平均	7.70	4.5	11.11

精矿单独造球可以获得满意的生球指标。

3.2　配矿造球

为了提高国内铁精矿生球质量，将巴西粗矿过滤铁精矿与大冶铁精矿进行配矿造球试验。大冶铁矿铁精矿配加巴粗过滤铁精矿的量分别为 0%、10% 和 20%；膨润土配比为 2.0%，生球指标见表 8。

由表 8 可知，大冶铁精矿单独所造生球的落下强度为 2.9 次/(0.5 m)，抗压强度为 9.61 N/P，生球落下强度、抗压强度均未达到球团生球质量要求，其生球易碎，会使返料比例升高。随着大冶铁精矿配加巴西粗矿过滤铁精矿量的增加，生球落下强度和抗压强度增加，生球水分先升高后下降。80% 大冶铁精矿配加 20% 巴西矿粗过滤精矿所造生球的落下强度为 3.7 次/(0.5 m)，抗压强度为 11.05 N/P，生球水分为 6.62%，可满足生产需求。

表 8　大冶铁精矿与巴西粗矿过滤铁精矿配矿造球生球指标

Table 8　Pelletization test of mixed raw material of Daye iron concentrate and iron concentrate from filtration of Brazil coarse concentrate

巴西粗矿过滤铁精矿配比（质量分数）/%	生球水分（质量分数）/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})
0	6.21	2.9	9.61
10	9.41	3.1	10.98
20	6.62	3.7	11.05

4　结　论

(1) 巴西粗矿属于易磨铁矿石；采用 MQY4385 湿式溢流型球磨机，在磨机利用系数为 $q_{-0.074\ mm}$ = 1.03 t/(m^3·h)，给矿量为 70.00 ~ 100.00 t/h，磨矿质量分数为 52.46%~58.49% 时，经过一段开路磨矿—分级—过滤脱水流程，可以实现产品粒度 −0.074 mm 质量分数大于 75%。

(2) 在膨润土用量为 2% 的条件下，巴西粗矿生球平均落下强度为 4.5 次/(0.5 m)，抗压强度为 11.11 N/P，生球水分为 7.70%。使用 20% 巴粗细磨精矿配加 80% 大冶铁精矿时，同样条件下，生球的落下强度为 3.7 次/(0.5 m)，抗压强度为 11.05 N/P，生球水分为 6.62%，生球指标较巴西粗矿预磨铁精矿单独造球时有较大提升。

参考文献：

[1] 周渝生，李文采，杜挺，等. 煤粉含碳球团炼铁半工业试验[J]. 钢铁研究学报，1992，4(3)：1−7.
ZHOU Yusheng，LI Wencai，DU Ting，et al. Semi-industrial tests of ironmaking by coal-based smelting reduction of carbon-bearing pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research，1992，4(3)：1−7.

[2] 王鑫杰，王炜，陈汝刚，等 钾对球团矿冶金性能的影响研究[J]. 烧结球团，2021，46(4)：44−49；91.
WANG Xinjie，WANG Wei，CHEN Rugang，et al. Research on effect of potassium on metallurgical properties of pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(4)：44−49；91.

[3] 张旺，李泽理，王琴. 某球团厂铁精矿磨矿及脱水系统技术研究[J]. 矿山机械，2020，48(3)：28−31.
ZHANG Wang，LI Zeli，WANG Qin. Technological research on iron concentrate grinding and dewatering system in a pellet plant[J]. Mining Machinery，2020，48(3)：28−31.

[4] 滕飞，曾志彦，郭培民，等. 一种含锰铁精矿球团性能试验研究[J]. 烧结球团，2021，46(5)：47−53.

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

TENG Fei, ZENG Zhiyan, GUO Peimin, et al. Experimental study on pellets performance of a kind of manganese-containing iron concentrate [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 47 – 53.

[5] 朱一民,王燕,张婧,等. 国外某悬浮焙烧—磁选高铝铁精矿降铝试验 [J]. 金属矿山,2019(8): 58 – 62.
ZHU Yimin, WANG Yan, ZHANG Jing, et al. Experiment on aluminum reduction of a suspension roasting magnetic separation high alumina iron concentrate abroad [J]. Metal mines, 2019(8): 58 – 62.

[6] 路明,于洪军,王兴锋,等. SiO_2 含量对铁矿球团性能影响的研究进展 [J]. 鞍钢技术,2022(4): 7 – 12.
LU Ming, YU Hongjun, WANG Xingfeng, et al. Research progress on the influence of SiO_2 content on the performance of iron ore pellets [J]. Angang Steel Technology, 2022(4): 7 – 12.

[7] 黄肖玲,代霞梅,纪国良,等. 基于“前港后厂”模式的进口铁矿石采购物流成本优化 [J]. 中国管理科学,2021, 29(8): 218 – 228.
HUANG Xiaoling, DAI Xiamei, JI Guoliang, et al. Logistics cost optimization of imported iron ore procurement based on the “front port and rear factory” model [J]. China Management Science, 2021, 29(8): 218 – 228.

[8] 邢伟,杨海龙,席振伟. 进口铁精矿细磨工艺技术研究 [J]. 矿业工程,2020,18(3): 43 – 46.
XING Wei, YANG Hailong, XI Zhenwei. Research on fine grinding technology of imported iron concentrate [J]. Mining Engineering, 2020, 18(3): 43 – 46.

[9] 王笑天,柴轶凡,罗果萍,等. 进口磁铁精矿球团配矿及工艺参数优化试验 [J]. 烧结球团,2022,(47): 16 – 23.
WANG Xiaotian, CHAI Yifan, LUO Guoping, et al. Ore blending and process parameter optimization test of imported magnetite concentrate pellets [J]. Sintering and pelletizing, 2022, 47(2): 16 – 23.

[10] 于洪军,路明,王兴锋,等. 铁矿粉粒度组成对球团矿性能影响的研究进展 [J]. 冶金能源,2022,41(1): 21 – 27.
YU Hongjun, LU Ming, WANG Xingfeng, et al. Research progress on the influence of particle size composition of iron ore fines on pellet properties [J]. Metallurgical Energy, 2022, 47(2): 21 – 27.

[11] 傅菊英. 含铁矿物成球性指数 K 的研究 [J]. 烧结球团, 1992,17(4): 4 – 7.
FU Juying. Study on ballability index K of iron ores [J]. Sintering and Pelletizing, 1992, 17(4): 34 – 38.

[12] 李光胜,徐超,朱幸福,等. 某矿山深部矿石球磨功指数和可磨度测定研究 [J]. 中国金属通报,2020(12): 293 – 294.
LI Guangsheng, XU Chao, ZHU Xingfu, et al. Study on determination of ball milling work index and grindability of deep ore in a mine [J]. China Metal Bulletin, 2020(12): 293 – 294.

[13] 许道刚,吕清纯,邹勤,等. 球磨机产能优化改造及应用 [J]. 中国钨业,2020,35(2): 36 – 39.
XU Daogang, LÜ Qingchun, ZOU Qin, et al. Optimization, transformation and application of ball mill capacity [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(2): 36 – 39.

(上接第46页)

CHANG Wei, LIU Honghui, JIANG Xuguang. Study on dechlorination and heavy metal leaching characteristics of MSWI fly ash during water-washing [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(3): 113 – 118.

[10] 郭莉. 基于过程强化的铜冶炼烟灰中砷选择性去除工艺及机理 [D]. 北京: 中国地质大学,2018: 32 – 36.
GUO Li. Technology and mechanism of arsenic selective leaching from copper smelter fly ash based on process intensification [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 32 – 36.

[11] SARKAR Santanu, SARKAR Supriya. Beneficiation of rejects slime of iron ore by means of sequential leaching [J]. Metallurgical Research & Technology, 2019, 116(2): 1 – 6.

[12] 刘敏媛,汤勇,吴云,等. 高压辊磨改善赤铁精性能研究 [J]. 矿业工程,2020,18(5): 54 – 57.
LIU Minyuan, TANG Yong, WU Yun, et al. Research on improving hematite concentrate performance by high pressure roller mill [J]. Mining Engineering, 2020, 18(5): 54 – 57.

[13] 闫天明,彭犇. 水洗除尘灰配入烧结对成矿性能的影响 [J]. 中国资源综合利用,2020,38(7): 29 – 32.
YAN Tianming, PENG Ben. Research on the influence of water washing dedusting ash combined with sintering process on metallogenic performance [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(7): 29 – 32.

[14] 侯静,吴恩辉,李军,等. 改性有机黏结剂对球团性能的影响分析 [J]. 烧结球团,2017,42(5): 35 – 38.
HOU Jing, WU Enhui, LI Jun, et al. Analysis of effect of modified organic binder on pelletizing properties [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(5): 35 – 38.

[15] 乔波,罗果萍,柴轶凡,等. 不同精矿制备球团矿预热焙烧性能对比分析 [J]. 烧结球团,2021,46(2): 50 – 56.
QIAO Bo, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Comparison and analysis on preheating roasting performance of pellets prepared from different concentrates [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 50 – 56.

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