球团

高配比褐铁矿在线球磨矿在球团生产中的应用

刘 桐[1]，张俊杰[1]，贾来辉[1]，雷 杰[2a]，张巧玉[1]，刘胜歌[1]，王玉会[1]，龙红明[2]
（1. 中天钢铁集团(南通)有限公司,江苏 南通 216100;2. 安徽工业大学 a. 冶金工程学院;
b. 冶金工程与资源综合利用安徽省重点实验室,安徽 马鞍山 243002）

摘要:为拓宽带式焙烧机原料结构、降低球团生产成本,本文通过优化球团工艺路径,引入在线磨矿工艺将褐铁矿粉用于球团生产,并采用精矿搭配富矿粉的组合磨矿方式进行工业试验,充分利用精矿的粒度性能,提升矿粉的可磨性。试验结果表明:不同褐铁矿粉会对压滤过程产生影响,M、P粉矿搭配PC精矿的球团磨矿结构优于N、B粉矿;当褐铁矿粉配比为33%~35%时,生球的内返率随着粉矿用量的增加而小幅提升,膨润土的消耗量随着粉矿用量的增加而降低;褐铁矿粉的应用对球团抗压强度的影响不大,球团的还原性小幅提高,还原膨胀指数小幅降低;由于褐铁矿粉中含铝黏土在生球中起到黏结作用,褐铁矿粉的配入有助于膨润土用量的降低。生产实践表明,20% PC精矿+20% PM精矿+60% M粉矿的磨矿方案为最佳生产方案,球团中褐铁矿配比为33%,可实现零膨润土造球,并且年化效益约为1 093万元。

关键词:球团; 褐铁矿; 磨矿; 膨润土
中图分类号:TF046.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8764(2023)04-0052-07
doi:10.13403/j.sjqt.2023.04.054

Application of online ball grinding of high proportion limonite in pellet production

LIU Tong[1], ZHANG Junjie[1], JIA Laihui[1], LEI Jie[2a], ZHANG Qiaoyu[1],
LIU Shengge[1], WANG Yuhui[1], LONG Hongming[2]
(1. Zenith Steel Group(Nantong) Corporation, Nantong 216100, Jiangsu, China; 2. Anhui University of Technology
a. School of Metallurgical Engineering, b. Anhui Provincial Key Laboratory of Metallurgical Engineering and
Comprehensive Utilization of Resource, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: In order to expand the raw material structure of the belted burning machine and reduce the production cost of pellets, the particle size performance of the concentrate is made fully used and the grindability of mineral powder is improved by optimizing the pellets process path, introducing an online grinding process to use limonite powder for pellet production, and using the combined grinding method of concentrate and rich ore powder for industrial tests. The results show that different limonite powders will affect the filter press process, and the pellets grinding structure of M and P fine ores combined with PC concentrate is better than that of N and B fine ores. When the proportion of limonite powder is 33%~35%, the internal return rate of fresh pellets increases slightly with the increase of fine ore consumption, and the consumption of bentonite decreases with the increase of fine ore consumption. The application of limonite powder has little effect on the compressive strength of the pellets, the reducibility of the pellets is slightly improved, and the reduction expansion index is slightly reduced; because the aluminum-containing clay in the limonite powder plays a bonding role in

收稿日期: 2023-02-11; **修回日期**: 2023-04-17
基金项目: 安徽省杰出青年科学基金资助项目(2208085J19)
作者简介: 刘 桐(1990—),男,工程师,从事烧结球团工艺优化等方面的研究工作。
通信作者: 龙红明(1979—),男,教授,博士生导师,从事冶金烟气污染物减排、低碳炼铁等方面的研究。

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

the green pellets, the incorporation of limonite powder helps to reduce the amount of bentonite. Production practice shows that the grinding scheme of 20% PC concentrate + 20% PM concentrate + 60% M fine ore is the best production scheme, and the limonite proportion in the pellets is 33%, which can achieve zero bentonite pelletizing, and the annualized benefit is about 10.93 million yuan.

Key words: pellets; limonite; grinding; bentonite

球团矿具有铁品位高、有害元素少、形状规则、粒度均匀、冷态强度高、冶炼渣量少等优点。除此之外，相较于烧结工序，球团工序的能耗仅为前者的 50% 左右，烟气排放量只有 75% 左右，SO_2 和 NO_x 排放量分别只有 1/2 和 1/3，且其环保投入和运行成本都要低得多[1-3]。大力发展球团工艺、提高球团矿入炉比能有效缓解钢铁工业“双碳”目标压力。出于成球性的差异，长期以来行业内形成了“粉矿用于烧结，精矿用于球团”的造块基本原则。但是由于“精矿”价格普遍高于“粉矿”，部分企业为追求短期利益，甚至减少球团产能进而降低球团入炉比。因此，拓宽球团生产原料结构、降低球团生产成本是大力发展高配比球团进而降低碳排放的关键。

球团生产工艺的转变在一定程度上是为了满足设备大型化和日益增长的产量的需要，也是为了适应种类繁多且性能复杂的球团原料的需求，如镜铁矿、高硫磁铁精矿和针铁矿等[4-7]。此类原料大多具有成球性差[8-9]、难焙烧等共性难处理特点[10]，需要使用强化技术手段改善其成球性能、焙烧性能和冶金性能[11-16]。众多学者针对上述问题展开了研究，例如润磨工艺可以起到优化粒级和物料润湿的作用[17-21]，高压辊磨工艺有助于物料比表面积的提升[22-25]，但二者仍然仅限于成球性相对较差的铁精矿使用，难以从根本上拓宽球团原料结构。当原料粒度较粗时，如以烧结粉矿为原料，通常需要采用球磨得到细粒粉料后才能用于造球。

本文以拓宽球团原料结构、降低球团生产成本为目标，优化球团工艺路径，引入在线磨矿工艺将褐铁矿用于球团原料，铁矿粉经球磨、塔磨后、浓缩沉淀以及板框压滤后直接用于球团生产，并提出精矿搭配富矿粉的组合磨矿方式，利用精矿的粒度性能，带动矿粉可磨性提升。本文所述在线磨矿工艺在国内首次实现零膨润土造球，其球团的各项性能指标都满足高炉入炉要求。

1　试验原料与研究方法

1.1　试验原料

出于原料结构稳定和生产效率最大化考虑，本文所用的铁矿粉包括 4 种褐铁矿粉和 4 种铁精矿，其化学成分和粒度组成分别如表 1 ~ 3 所示。由表 1 可知：褐铁矿粉的品位为 61.00% ~ 63.00%，SiO_2 质量分数为 3.00% ~ 5.00%，但 Al_2O_3 质量分数达到了 1.56% ~ 2.32%，FeO 质量分数小于 1.00%，烧损都在 3.90% 以上，是典型的高铝褐铁矿。如果扣除烧损，则 4 种粉矿的品位可达 63.70% ~ 64.93%。铁精矿中除 PM 精矿外品位都在 64.00% 左右，SiO_2 质量分数稍高，在 5.50% 以上，H 精矿的 Al_2O_3 质量分数也较高，

表 1　褐铁矿粉和铁精矿的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical compositions and burning loss of limonite powder and iron concentrate　　%

矿粉类别	矿粉名称	TFe	FeO	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	S	P	K_2O	Na_2O	TiO_2	水分	烧损
褐铁矿粉	P 粉矿	62.14	0.50	0.05	0.12	2.19	3.67	0.02	0.10	0.01	0.03	—	8.44	5.77
	M 粉矿	61.30	0.51	0.03	0.11	2.32	4.56	0.03	0.08	0.01	0.03	—	8.28	6.14
	N 粉矿	62.58	0.45	0.07	0.16	2.25	4.24	0.01	0.09	0.02	0.03	—	7.50	4.16
	B 粉矿	62.68	0.61	0.05	0.09	1.56	4.83	0.01	0.07	0.02	0.03	—	8.71	3.90
铁精矿	PC 精矿	63.90	2.86	0.02	0.08	0.64	5.93	0.01	0.05	0.01	0.02	0.10	9.25	1.57
	PM 精矿	60.21	26.32	2.00	3.39	0.53	1.42	0.06	0.19	0.06	0.39	2.54	7.58	−0.46
	T 精矿	64.09	26.75	0.17	0.45	0.22	7.91	0.01	0.02	0.17	0.11	0.02	8.78	−1.76
	H 精矿	64.19	28.25	0.61	0.50	1.50	5.45	0.09	0.01	0.20	0.35	0.27	9.02	−2.28

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

表2 褐铁矿粉的粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size compositions of limonite powder %

矿粉名称	>10.00 mm	(8.00,10.00] mm	(6.30,8.00] mm	(4.00,6.30] mm	(2.00,4.00] mm	(1.00,2.00] mm	(0.50,1.00] mm	(0.25,0.50] mm	≤0.25 mm
P粉矿	2.28	9.12	23.15	4.06	19.23	9.12	3.99	8.19	20.86
M粉矿	2.75	7.53	10.61	8.87	19.88	15.06	11.27	11.47	12.56
N粉矿	1.65	6.68	16.17	11.00	24.31	13.10	7.45	8.67	10.97
B粉矿	3.57	5.78	16.61	9.88	26.89	14.25	5.93	7.53	9.56

表3 铁精矿的粒度组成(质量分数)

Table 3 Particle size compositions of iron concentrate %

矿粉名称	>74 μm	(44,74] μm	≤44 μm	≤74 μm
PC精矿	41.39	16.18	42.43	58.61
PM精矿	40.63	9.70	49.67	59.37
T精矿	1.02	4.27	94.71	98.98
H精矿	4.44	10.06	85.50	95.56

达到1.50%；PC精矿的FeO质量分数为2.86%，为赤铁精矿，其余3种均为磁铁精矿；PM精矿品位仅为60.21%，CaO、MgO、TiO_2质量分数分别达到2.00%、3.39%、2.54%，H精矿的碱金属质量分数较高，在生产中都要严格控制使用。

由表2、3可知，4种褐铁矿粉的粒度都较粗，>0.50 mm粒级占比为80.00%以上，无法直接用于球团生产。H、T精粉的<74.00 μm粒级占比达到95.00%以上，完全满足球团要求，但PC、PM精矿的<74.00 μm粒级占比仅在59.00%左右，成球性较差。

1.2 研究方法

1.2.1 磨矿原料结构优化

通过粒度组成分析，PC、PM精矿和P、M、N以及B粉矿必须经过磨矿至一定细度后方能用于造球。设计试验方案如表4所示。由表4可知，以纯PC精矿为基准，分别以70%的PC精矿搭配30%的4种褐铁矿粉，标记为A_1~A_4，开展单种矿粉湿式磨矿—压滤—干燥工业试验，每个试验方案连续生产7 d，在出料线皮带取压滤样品。基于单种矿粉磨矿试验结果，设计多种矿粉组合磨矿工业试验，标记为B_1~B_3。试验流程如图1所示，主要工艺流程包括球磨/塔磨+旋流分级+絮凝剂沉淀+板框压滤脱水干燥：铁矿粉按照预定配比混合后，进入球磨机，矿浆质量分数控制为60%~65%；矿浆经旋流器分级后，≤74 μm物料直接进入塔磨或者浓缩池，>74 μm物料再次返回球磨机，直至进入浓缩池矿浆≤74 μm粒级占比达到85%以上；矿浆经浓缩池沉淀后，泵送至板框压滤干燥，形成自产精粉，与直配磁精粉按照预定配比进行造球。

其中，制约球团磨矿产量的关键因素在于板框压滤阶段，压滤脱水干燥过程时间周期越短，相应的球团磨矿产量越高，同时板框压滤后自产精粉水分应控制在10%以内，才能满足造球要求。因此，本文设计精粉搭配富矿粉的组合磨矿方式。

1.2.2 球团生产工艺参数

按照自产精粉、H精矿、T精矿配比为55:25:20进行球团生产工业试验，试验期间带焙机上料

表4 在线磨矿配矿方案(质量分数)

Table 4 Blending schemes of online grinding %

矿粉名称	基准	A_1	A_2	A_3	A_4	B_1	B_2	B_3
PC精矿	100	70	70	70	70	20	29	30
PM精矿	0	0	0	0	0	20	6	0
P粉矿	0	30	0	0	0	0	0	37
M粉矿	0	0	30	0	0	60	65	33
N粉矿	0	0	0	30	0	0	0	0
B粉矿	0	0	0	0	30	0	0	0

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

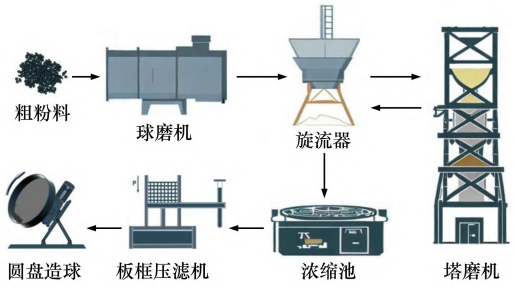


图 1　磨矿工艺流程

Fig. 1　The grinding process of ore materials

量稳定为 250 t/h。在圆辊筛取生球样品，按照标准方法检测生球的落下强度和抗压强度。300 万吨带式焙烧机生产工艺参数如表 5 所示，其中，铺底料厚度为 100 mm，生球料层厚度为 350 mm。

2　结果与讨论

2.1　磨矿结构优化工业试验

单种矿粉湿式磨矿—压滤—干燥工业试验，以 70% PC 精矿搭配 30% 的 4 种褐铁矿粉，磨矿过程主要工艺参数如表 6 中 A_1 ~ A_4 所示。由表 6 可知，添加 30% 的褐铁矿粉后，物料的可磨性变化不大，≤74 μm 粒级占比基本保持不变，A_1、A_2 工况略有下降，A_3、A_4 工况小幅上升。A_1、A_2 工况的压滤进矿和压滤干燥时间较基准条件缩短 1.76 min，磨矿效率提升。因此，自产精粉的产量由 4 169 t/d 增加至 4 405、4 298 t/d。A_3、A_4 工况的压滤进矿和压滤干燥时间较基准条件分别上升了 3.17、3.41 min，压滤较为困难，造成自产精粉产量分别下降 26.0%、23.5%。通过现场调研发现，造成磨矿产量下降的主要原因在于两个方面：A_3、A_4 工况在板框压滤环节易出现滤板堵塞现象；A_3、A_4 磨矿结构压滤难度高于 A_1、A_2，板框压滤后滤饼水分经常出现超出 11% 的现象，超出了适宜的造球水分，并造成压滤时间延长，不利于生产稳定。

表 5　带式焙烧机生产参数

Table 5　Production parameters of belt roaster

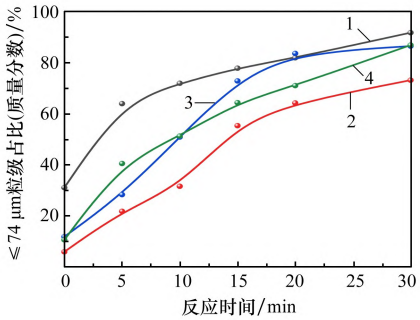
料层厚度/mm	鼓风干燥段		抽风干燥段		预热段		焙烧段		均热段	
	温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min
450	219	5	378	5	890	7.5	1 240	10	1 000	2.5

表 6　磨矿结构优化试验参数及结果

Table 6　Parameters and results of grinding structure optimization test

项目	搅拌槽质量分数/%	≤74 μm 粒级占比/%	压滤进矿时间/min	压滤干燥时间/min	自产精粉产量/(t·d^{-1})
基准	61.30	91	5.51	4.5	4 169
A_1	62.62	90	4.25	4.0	4 405
A_2	63.05	90	4.27	4.0	4 298
A_3	65.05	92	7.58	5.6	3 083
A_4	63.56	92	7.62	5.8	3 189
B_1	62.30	92	4.57	4.0	4 213
B_2	61.65	90	4.98	4.0	3 582
B_3	64.30	87	4.12	4.0	4 432

对单种粉矿进行磨矿试验，试验结果如图 2 所示。由图 2 可知，4 种粉矿的可磨性由高到低排序为：N 粉矿≈B 粉矿 > P 粉矿 > M 粉矿。由此推断，压滤难易程度与矿粉的可磨性有关，以 PC 精矿搭配可磨性相对较差的 P、M 粉矿反而有利于压滤脱水效率的提升。综合而言，M、P 粉矿搭配 PC 精矿的球团磨矿结构较 N、B 粉矿适宜。



1—N 粉矿；2—M 粉矿；3—B 粉矿；4—P 粉矿。

图 2　单种粉矿磨矿试验结果

Fig. 2　Experimental results of grinding with single ore materials

基于单种矿粉组合 PC 精矿磨矿的工业试验，优选出 M、P 粉矿。为进一步降低原料成本，提高褐铁矿粉的用量，设计多种矿粉磨矿结构，结果如表 6 中 B_1 ~ B_3 所示。B_1 ~ B_3 工况的粉矿配比分别达到 60%、65%、70%，PM 精矿的粒度组成

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

与PC精矿相差不大，对试验结果影响不大。相较基准条件，B_1、B_2工况≤74 μm粒级占比变化不大，分别为92%、90%，但B_3工况≤74 μm粒级占比仅为87%，可见磨矿最终粒度与粉矿添加量负相关。由于粒度相对较粗，B_3工况的压滤进矿和压滤干燥时间是所有方案中最短的，较基准条件缩短1.89 min，对应的自产精粉产量也处于最高水平，达到4 432 t/d。B_1工况的压滤进矿和压滤干燥时间较基准条件缩短1.44 min，自产精粉产量小幅上升至4 213 t/d，B_2工况虽然压滤进矿和压滤干燥时间较基准条件缩短1.03 min，但自产精粉产量降低至3 582 t/d。

综合而言，B_1工况无论是粒度组成还是磨矿效率都是3种方案中最佳，当然粉矿添加量也在3种方案中最低。

2.2 对球团生产指标的影响

不同磨矿原料结构下的球团质量指标、膨润土消耗如表7所示。实际生产中，以生球落下强度大于6.0次/(0.5 m)作为球团考核标准。此时基准条件下，膨润土消耗量为18.1 kg/t，引入30%褐铁矿粉在线磨矿系统后，膨润土消耗有不同程度的下降，但是生球内返率有小幅上升，说明粉矿的应用会小幅降低生球耐磨指数。其中，A_1、A_2工况膨润土消耗量分别下降至8.9、4.2 kg/t，且落下强度提升至7.0次/(0.5 m)；A_3、A_4工况落下强度与基准条件持平，膨润土消耗量分别下降至10.3、14.6 kg/t。相较基准条件，方案A_1~A_4的抗压强度出现不同幅度的降低，分析原因认为，褐铁矿作为高结晶水矿在200~500 ℃时发生结晶水脱附，使球团矿内部孔隙度增大，进而导致球团抗压强度的降低[5-7]，同时球团的还原性小幅提高至61.85%~63.58%，还原膨胀指数也有小幅度降低，但考虑到基准条件的还原膨胀指数本身较小，其对生产的影响忽略不计。

采用多种矿粉磨矿结构(B_1~B_3)后，生球内返率较基准条件和A_1~A_4进一步小幅上升至11.80%~13.50%，且粉矿配比越高生球内返率越高。但随着粉矿配比的提高，生球落下强度出现不同程度的提升，落下强度分别达到6.5、6.8、6.6次/(0.5 m)，且膨润土消耗量出现大幅下降，尤其值得注意的是B_1、B_2工况膨润土消耗量为零。即粉矿的配入有助于生球落下强度的提升和膨润土用量的降低，甚至实现零膨润土造球。分析原因认为，褐铁矿粉中的Al_2O_3质量分数均在1.56%以上，特别是M、P粉矿的Al_2O_3质量分数分别达到2.32%、2.19%，含铝黏土在生球中起到黏结作用，能够部分甚至全部替代膨润土作为黏结剂，进而大幅降低膨润土用量。B_1~B_3工况的抗压强度相较基准条件基本变化不大，但是褐铁矿粉配比的增加会小幅降低抗压强度。与A_1~A_4工况类似，球团的还原性小幅提高和还原膨胀指数小幅度降低。

此外，由表7可知，基准条件下球团生产成本为1100.93元/t，A_1~A_3、B_3工况的球团成本

表7 不同磨矿方案部分球团指标和球团生产成本

Table 7 Partial pelletizing indexes and production costs of different grinding schemes

项目	生球			成品球		球团生产成本/(元·t^{-1})	膨润土消耗量/(kg·t^{-1})	还原度指数/%	还原膨胀指数/%
	水分/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	内返率/%	w(FeO)/%	抗压强度/(N·P^{-1})				
基准	9.58	6.0	9.36	0.59	2 600	1 100.93	18.1	60.12	13.20
A_1	9.32	7.0	10.38	0.73	2 523	1 100.00	8.9	63.58	10.33
A_2	9.60	7.0	9.26	0.71	2 558	1 095.26	4.2	62.35	10.21
A_3	10.10	6.0	11.10	0.75	2 453	1 106.77	10.3	62.96	11.86
A_4	9.91	6.0	12.50	0.64	2 448	1 096.05	14.6	61.85	12.05
B_1	9.31	6.5	11.80	0.93	2 686	1 086.94	0.0	61.26	9.80
B_2	9.82	6.8	13.18	0.92	2 546	1 088.13	0.0	63.50	10.80
B_3	9.75	6.6	13.50	1.04	2 520	1 095.06	4.9	63.07	8.73

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

优势不大，甚至出现了上升的情况（如 A_3）。B_1、B_2 工况的球团生产成本较基准条件分别降低了 13.99、12.80 元/t，优势较大。所有方案的利用系数相差不大，但 B_3 工况的成品率有较大幅度的下降。通过综合评估可知，B_1、B_2 工况无论是磨矿效果、磨矿效率以及生产成本都是所有方案中最低的。

生产实践表明，通过在线磨矿工艺的引入和磨矿原料结构的优化，实现了褐铁粉矿在球团配料结构中的超高配比应用（33%），年化效益约为 1 093 万元。

3　结　论

（1）M、P 粉矿搭配 PC 精矿的球团磨矿结构较 N、B 粉矿适宜，随着粉矿配比的升高，物料的≤74 μm 粒级占比逐渐下降，20% PC 精矿 + 20% PM 精矿 + 60% M 粉矿的磨矿方案无论是粒度组成还是磨矿效率都是 3 种方案中最佳。

（2）将褐铁矿粉用于球团生产，生球内返率随着粉矿用量的增加而小幅提升，膨润土消耗量随着粉矿用量的增加而大幅降低，褐铁矿粉的应用对抗压强度影响不大，球团的还原性小幅提高和还原膨胀指数小幅度降低，粉矿的应用会小幅降低生球耐磨指数。

（3）由于褐铁矿粉中含铝黏土在生球中起到黏结作用，粉矿的配入有助于膨润土用量的降低。

（4）生产实践表明，通过在线磨矿工艺的引入和磨矿原料结构的优化，褐铁粉矿在球团配料结构中的配比达到 33%，实现了零膨润土造球的突破，年化效益约为 1 093 万元。

参考文献：

[1] 许满兴，张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团，2017，42(2)：25－30.
XU Manxing，ZHANG Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century[J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(2)：25－30.

[2] 王海风，裴元东，张春霞，等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁，2016，51(1)：1－7.
WANG Haifeng，PEI Yuandong，ZHANG Chunxia，et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry[J]. Iron and Steel，2016，51(1)：1－7.

[3] 刘臣，叶恒棣，魏进超，等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]. 烧结球团，2021，46(6)：1－7；26.
LIU Chen，YE Hengdi，WEI Jinchao，et al. An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：1－7；26.

[4] 贺新亮，孙广伟，王晶. 球团生产中配加镜铁矿的实践[J]. 烧结球团，2014，39(5)：35－38.
HE Xinliang，SUN Guangwei，WANG Jing. Practice of adding specularite in pellet production[J]. Sintering and Pelletizing，2014，39(5)：35－38.

[5] 李慧春，沈忠，梁秀艳. 镜铁矿粉矿回转窑磁化焙烧－磁选试验研究[J]. 矿冶工程，2021，41(6)：89－92.
LI Huichun，SHEN Zhong，LIANG Xiuyan. Rotary kiln magnetic roasting and magnetic separation test of powdery specularite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2021，41(6)：89－92.

[6] 杨大兵，张攀，李乾坤等. 内蒙古某高硫高碱度磁铁精矿球团焙烧脱硫机理研究[J]. 烧结球团，2016，41(2)：41－46.
YANG Dabing，ZHANG Pan，LI Qiankun，et al. Study on pellet induration desulphurization mechanism of high sulphur and high basicity magnetite concentrate from inner Mongolia[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(2)：41－46.

[7] 张攀，杨大兵，李乾坤，等. 内蒙古某高硫高碱度磁铁精矿球团焙烧工艺研究[J]. 矿产综合利用，2017，208(6)：44－49.
ZHANG Pan，YANG Dabing，LI Qiankun，et al. Research on pellets roasting process for a high-sulphur and high-basicity magnetite concentrate from inner Mongolia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2017，208(6)：44－49.

[8] 胡志清，潘建，朱德庆，等. 铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J]. 烧结球团，2013，38(4)：42－45；49.
HU Zhiqing，PAN Jian，ZHU Deqing，et al. Raw material characteristics of iron ore concentrate and its influence on balling performance[J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(4)：42－45；49.

[9] 朱德庆，徐梦杰，潘建，等. 改善超细铁精矿成球性能

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

的实验研究[J]. 钢铁研究学报,2017,29(9):704 - 710.
ZHU Deqing, XU Mengjie, Pan Jian, et al. Experimental research to improve ball ability of ultrafine concentrate [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(9): 704 - 710.

[10] 张道远. MHA 黏结剂在镜铁矿氧化球团制备中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
ZHANG Daoyuan. Research on application of MHA binder in oxidized pellet preparation from specularite concentrates[D]. Changsha: Central South University, 2011.

[11] 朱德庆,陈栋,潘建. 高压辊磨和润磨预处理强化硫酸渣球团对比研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(7):1825 - 1832.
ZHU Deqing, CHEN Dong, PAN Jian. Comparison of pretreating pyrite cinder by high pressure roller grinding with damp milling to improve pelletization[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(7): 1825 - 1832.

[12] 朱德庆,黄伟群,杨聪聪,等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团,2017,42(3):42 - 48.
ZHU Deqing, HUANG Weiqun, YANG Congcong, et al. Technical progress in iron ore pelletization[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(3): 42 - 48.

[13] CHEN Feng, GUO Yufeng, JIANG Tao, et al. Effects of high pressure roller grinding on size distribution of vanadium-titanium magnetite concentrate particles and improvement of green pellet strength[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2017, 24(3): 266 - 272.

[14] 范建军,杨礼元,蔡湄夏,等. 润磨预处理对改善 MgO 球团矿预热焙烧性能的影响[J]. 钢铁, 2012, 47(11):21 - 26.
FAN Jianjun, YANG Liyuan, CAI Meixia, et al. Effect of damp milling on improvement of preheating and roasting properties for magnesia pellets[J]. Iron and Steel, 2012, 47(11): 21 - 26.

[15] 范建军,郭宇峰,臧龙,等. 高压辊磨对赤铁矿粉球团矿焙烧性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2016,28(4):16 - 20.
FAN Jianjun, GUO Yufeng, ZANG Long, et al. Effect of high pressure grinding roller on hematite pellet properties [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(4): 16 - 20.

[16] 余正伟,刘在春,王荣林,等. 马钢球团配用黏性姑精矿实验研究[J]. 钢铁研究学报,2020,32(8):705 - 713.
YU Z W, LIU Z C, WANG R L, et al. Experimental study on use of viscous Gushan concentrate in pelletizing of Masteel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(8): 705 - 713.

[17] 朱贺民,夏征宇,刘英才. 马钢球团润磨工艺试验研究[J]. 钢铁研究,2009,37(1):16 - 19.
ZHU Hemin, XIA Zhengyu, LIU Yingcai. Experiment on damp milling process parameters of pelletizing in Masteel [J]. Research on Iron&Steel, 2009, 37(1): 16 - 19.

[18] 周晓青. 润磨强化硫酸渣制备氧化球团的技术及机理研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
ZHOU Xiaoqing. Study on the technology and mechanism of preparing oxidized pellets from moistened and strengthened sulfuric acid slag[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[19] 白国华,周晓青,范晓慧,等. 润磨强化硫酸渣制备氧化球团的技术及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1509 - 1515.
BAI Guohua, ZHOU Xiaoqing, FAN Xiaohui, et al. Enhancing technology and mechanism of oxidized pellet prepared from pyrite cinder by moisture grinding[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(6): 1509 - 1515.

[20] 徐佳鑫,杨大兵. 润磨对程潮铁矿成球过程影响的研究[J]. 矿业工程,2014,12(2):27 - 31.
XU Jiaxin, YANG Dabing. Study of the Influence of damp milling to the pelletizing process of Chengchao iron ore [J]. Mining Engineering, 2014, 12(2): 27 - 31.

[21] 刘承鑫,余俊杰,张泽强,等. 润磨对人工磁铁精矿球团性能的影响[J]. 钢铁,2018,53(1):17 - 23.
LIU Chengxin, YU Junjie, ZHANG Zeqiang, et al. Influence of damp milling on properties of artificial magnetite pellets[J]. Iron and Steel, 2018, 53(1): 17 - 23.

[22] 朱德庆,唐艳云,VINICIUS M,等. 高压辊磨预处理强化巴西镜铁矿球团[J]. 北京科技大学学报,2009,31(1):30 - 35.
ZHU Deqing, TANG Yanyun, VINICIUS M, et al. Improvement in pelletization of Brazilian specularite by high-pressure roller grinding[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 30 - 35.

(下转第 102 页)

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

[8] 王润博,张建良,王喆,等. 兰炭替代焦粉对烧结过程影响研究[J]. 钢铁钒钛,2015,36(2):6 - 11.
WANG Runbo,ZHANG Jianliang,WANG Zhe,et al. Influence of semicharcoal substituted for coke breeze on sintering performance[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2015,36(2):6 - 11.

[9] 延雨雨. 兰炭作为烧结燃料的应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
YAN Yuyu. Application of blue carbon as sintering fuel [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2016.

[10] HAN J,HUANG Z,QIN L,et al. Refused derived fuel from municipal solid waste used as an alternative fuel during the iron ore sinter process[J]. Journal of Cleaner Production,2021,278:123594.

[11] CHENG Z,YANG J,ZHOU L,et al. Sinter strength evaluation using process parameters under different conditions in iron ore sintering process[J]. Applied Thermal Engineering,2016,105:894 - 904.

[12] OOI T C,THOMPSON D,ANDERSON D R. The effect of charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants[J]. Combustion and Flame,2011,158(5):979 - 987.

[13] YANG W,CHOI S,CHOI E S,et al. Combustion characteristics in an iron ore sintering bed:evaluation of fuel substitution[J]. Combustion and Flame,2006,145(3):447 - 463.

[14] 王素平,毕学工,翁得明. 煤粉粒度组成对武钢烧结矿铁酸钙生成的影响[J]. 烧结球团,2008,33(2):4 - 7.
WANG Suping,BI Xuegong,WENG Deming,et al. Influence of fuel size on calcium ferrite generating during sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(2):4 - 7.

[15] 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):6 - 11.
WANG Yonghong,LIU Jianbo,ZHOU Junlan,et al. Study on influence of particle size of fuels on sintering indexes [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(3):6 - 11.

[16] 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):6 - 11.
LIU Shenhui,BAI Kaikai,NI Guihu,et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):6 - 11.

(上接第58页)

[23] 杜洪缙,朱德庆,杨聪聪,等. 高压辊磨和球磨预处理强化铬铁矿球团制备的研究[J]. 烧结球团,2013,38(6):33 - 37.
DU Hongjin,ZHU Deqing,YANG Congcong,et al. Study on high pressure roller grinding and ball milling pretreatment for intensification of chromite pellet preparation [J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(6):33 - 37.

[24] 李亚飞,杨涛,刘在春,等. 高压辊磨对含硫酸渣超细铁精粉生球性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2022,34(7):639 - 647.
LI Yafei,YANG Tao,LIU Zaichun,et al. Effect of high pressure roller grinding on green pellets properties of ultra-fine iron concentrate containing pyrite cinder[J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(7):639 - 647.

[25] FAN Jianjun,QIU Guanzhou,JIANG Tao,et al. Mechanism of high pressure roll grinding on compression strength of oxidized hematite pellets[J]. Journal of Central South University,2012(19):2611 - 2619.

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