

# 基于气基直接还原工艺的球团配矿研究及性能评价

李晓兵<sup>1,2</sup>, 路 鹏<sup>2</sup>, 林 林<sup>1</sup>, 唐 珏<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100000; 2. 河钢张宣高科科技有限责任公司, 河北 张家口 075000;  
3. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 发展气基直接还原工艺可促进企业能源结构转型。为了保障该工艺的顺利实施, 本文采用焦炉煤气作为还原介质, 开展球团优化配矿研究。研究4种铁精粉基础性能, 优选3种铁精粉进行单种矿的造球、焙烧试验。综合铁精粉成分、基础性能及单烧球团抗压强度, 制定优化了5种配矿方案, 并对各球团矿冶金性能进行了综合评价。结果表明, 60%山西+10%内蒙+30%河北配矿方案性能最优。因此, 采用该配矿结构的球团矿和直接还原所用球团进行竖炉投笼对比试验。试验结果表明, 该配矿结构球团矿金属化率、碳含量、粒级指标均符合直接还原铁产品要求, 可以满足气基直接还原工艺的需求, 证实优化配矿和球团冶金性能综合评价方法的可靠性, 为推动我国焦炉煤气零重整直接还原工艺发展奠定了理论基础。

**关键词:** 气基竖炉; 直接还原; 球团矿; 优化配矿; 冶金性能

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0078-07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.010

## Research and performance evaluation of pellet ore proportioning based on gas-based direct reduction process

LI Xiaobing<sup>1,2</sup>, LU Peng<sup>2</sup>, LIN Lin<sup>1</sup>, TANG Jue<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100000, China; 2. HBIS Zhangxuan High-tech Technology Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 3. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract:** The development of gas-based direct reduction process can promote the transformation of enterprise energy structure. In order to ensure the smooth implementation of the gas-based direct reduction process, coke oven gas is used as the reduction medium to carry out the research on optimized ore proportioning of pellet. The basic properties of 4 kinds of fine powder are studied, and 3 kinds of fine powder are selected for pelletizing and roasting tests of single ore. Based on the composition, basic properties and compressive strength of single-fired pellets of fine powder, 5 ore proportioning schemes are formulated and optimized to comprehensively evaluate the metallurgical properties of pellets. The results show that the 60% Shanxi + 10% Inner Mongolia + 30% Hebei ore proportioning scheme has the best performance, so the pellets with the ore proportioning structure and the pellets used for direct reduction are used for the shaft furnace cage comparison test, and the test results show that the metallization rate, carbon content and size fraction indexes are meet the requirements of direct reduced iron product. The results also show that the proportioning scheme can meet the needs of the gas-based direct reduction process, and the reliability of the comprehensive evaluation method for optimizing ore blending and pellets metallurgical properties are confirmed, which lays a theoretical foundation for promoting the development of zero reforming

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 河北省战略性技术专项资助项目(23314601L)

作者简介: 李晓兵(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事氢冶金方面的研究工作。

通信作者: 林 林(1968—), 男, 教授, 从事氢冶金、热能等方面研究工作。

direct reduction process of coke oven gas in China.

**Key words:** gas-based shaft furnace; direct restore; pellets; optimized ore proportioning; metallurgical properties

随着全球对气候变化问题的持续关注, 钢铁行业低碳转型发展迫在眉睫。由于相比于高炉—转炉长流程, 同等产能的直接还原 DRI—电炉炼钢短流程减少 CO<sub>2</sub> 排放 65%~70%, SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和烟尘排放分别减少 30%、70% 和 80% 以上, 全球钢铁生产大国采用商品级直接还原球团生产 DRI 的需求持续增长<sup>[1]</sup>。目前世界上直接还原球团主要由欧洲、中东、北非等地供应, 国外多数采用赤铁矿生产直接还原球团, 预计到 2030 年全球直接还原用球团的需求量将达到 7 185 万 t<sup>[2-3]</sup>。

国内气基直接还原技术发展缓慢, 主要受制于能源结构(以固体能源为主)和高品位铁精粉缺乏。王兆才<sup>[4]</sup>使用国内自产的三种铁精粉单独焙烧制备球团矿, 其还原性指数、低温还原粉化等冶金性能指标满足气基竖炉要求。球团中配加少量 CaO、SiO<sub>2</sub> 以及 MgO, 形成稳定的晶体结构, 降低还原膨胀性能; 加入 0.6% 硼镁复合添加剂后, 可以显著降低球团矿还原膨胀率, 提高还原后强度。潘建等<sup>[5]</sup>以 71.68% 超高铁品位的磁铁矿精粉, 制备碱度为 0.09、0.40 两种直接还原球团矿, 其还原性指数随着还原温度提高而显著提高, 温度每增加 50 °C, 还原性提高 26%; 随着还原时间延长, 还原膨胀指数呈现先增加后降低的变化规律。从目前的研究来看, 使用单一矿种制备球团矿, 难以充分发挥矿种的优势, 对于矿种选择存在局限性, 而且从经营角度考虑, 过分的依赖某一矿

种, 不利于降低成本, 难以开发新的铁矿资源。

本文采用国内铁矿粉资源, 开展基础理论及优化配矿研究, 利用铁矿粉的不同特性优势互补原则, 优化配矿制备气基竖炉球团, 同时基于气基竖炉还原气氛进行球团性能综合评价, 并进行了工业投笼试验, 以期为更好的利用铁矿粉资源, 生产气基竖炉球团开拓新思路。

## 1 试验原料和方法

### 1.1 试验原料

试验用原料主要为 4 种国内铁精粉、膨润土。4 种铁精粉产地分别为山西、内蒙古、辽宁、河北(文中分别用产地代表铁精粉种类), 主要化学成分及粒度见表 1, 膨润土性能分析见表 2。由表 1 可知, 4 种铁精粉  $w(\text{TFe})$  为 68.25%~69.50%,  $w(\text{SiO}_2)$  为 1.28%~3.80%。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 铁精粉连晶强度测试

连晶性能是指铁矿粉靠晶键连接获得强度的能力。以连晶强度大小表示铁矿粉连晶性能高低。具体检测方法及温度见表 3<sup>[6-10]</sup>, 连晶强度测试示意如图 1 所示。

#### 1.2.2 铁精粉圆形度测试

对于铁精粉而言, 颗粒的圆形度是最重要的性质指标之一。圆形度越高, 说明铁矿粉颗粒更接近于球形, 其表面较为圆滑, 铁矿粉颗粒间的

表 1 铁精粉主要化学成分及主要粒度分布(质量分数)

铁精粉种类	TFe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P	<0.074 mm
山西	69.51	28.67	0.33	1.28	0.26	0.45	0.020	<0.01	94.5
内蒙古	69.50	30.14	0.46	1.45	0.50	0.40	0.854	<0.01	88.0
辽宁	68.25	29.21	0.33	3.80	0.32	0.14	0.002	<0.01	84.9
河北	69.20	28.99	0.55	1.42	0.94	0.29	0.146	<0.01	92.6

表 2 膨润土性能分析

Table 2 Performance analysis of bentonite

膨胀容 / (mL·g <sup>-1</sup> )	胶质价 / [mL·(15 g) <sup>-1</sup> ]	质量分数 / %	
		<0.074 mm	水分
35	400	97	11

表 3 连晶强度测试的温度控制

Table 3 Temperature control of the continuous crystal strength test

温度/℃	室温~600	600~1 000	1 000~1 150	1 150~1 280	1 280~恒温	1 280~1 150	1 150~1 000	1 000~室温
时间/min	4.0	1.0	1.5	1.0	4.0	2.0	1.5	自然降温
气氛	空气	氮气	氮气	氮气	氮气	空气	空气	空气

接触面积较小,不利于矿粉间黏结成球,反之则利于造球。试验采用动态图像颗粒分析仪系统<sup>[11]</sup>,具体操作流程如图 2 所示。

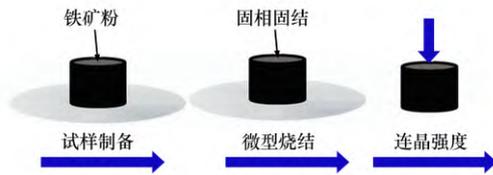


图 1 连晶强度测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the continuous crystal strength test

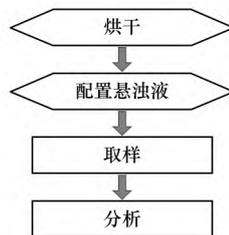


图 2 铁精粉圆形度测试流程

Fig. 2 Testing process for circularity of iron concentrate powder

### 1.2.3 生球制备和焙烧

生球制备流程主要包括干燥、配料、混料、制备生球 4 个步骤,其中干燥采用电热鼓风干燥箱设置 105 ℃ 进行干燥,混料采用全方位行星球磨机,造球盘直径为 1 000 mm,边高为 250 mm,倾角为 45°,生球制备包括母球形成、母球长大和生球压实三个阶段,时间控制在 30 min。生球工艺经过干燥、预热、氧化焙烧、冷却四个步骤。干燥使用电热鼓风干燥箱,烘干温度为 105 ℃,时间为 5 h。使用马弗炉进行预热、焙烧,之后冷却至室温。另外,整个生球氧化焙烧过程中,采用空气泵向马弗炉内鼓入空气,以保证炉内充足的氧化性气氛。流程温度控制见表 4。

### 1.2.4 球团矿冶金性能测试

为了更科学地评价球团矿对直接还原工艺的适用性,测定其还原性指数、还原膨胀指数、低温还原粉化以及黏结性检测方法可参考文献 [12-13],

表 4 干燥和焙烧温度控制

Table 4 Temperature control of drying and roasting

项目	温度/℃	时间/min
干燥阶段	105	300
预热阶段	室温~900	—
	900	10
焙烧阶段	900~1 250	—
	1 250	30
均热、冷却阶段	1 250~900	20
	900~室温	自然降温

设定的气体成分及温度接近直接还原工艺,具体的成分以及温度见表 5。

表 5 测定球团矿冶金性能的气体成分和温度

Table 5 Gas composition and temperature for the determination of metallurgical properties of pellets

指标	温度/℃	体积分数/%			
		H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
还原度指数	950	65	8	4	23
还原膨胀指数	950	65	8	4	23
黏结指数	950	65	8	4	23
低温还原粉化指数	500	65	8	4	23

常规的冶金性能检测参考国标,在此不赘述,重点阐述黏结指数,该指标是评判球团能否在竖炉内顺行的关键指标,黏结指数越小,说明球团在竖炉内发生黏结的几率越小,可以保证竖炉正常生产。其检测方法:升温步骤与还原性指数相同,待温度升高至试验温度并稳定后,开始通入还原气体 10 L/min,并模拟料柱压力,在炉料料面上部施加荷载压力;达到还原终点后,关闭还原气,卸掉荷载压力,通入 8 L/min 的氮气冷却至室温。黏结指数计算解释见图 3。

黏结指数( $\delta_{st}$ ) 计算如式(1):

$$\delta_{st} = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\delta_{st}$ 为黏结指数%; $S_1$ 为试样落下 20 次后

仍黏结的质量比与落下次数的积分;  $S_2$  为试样落下 20 次后未黏结的质量比与落下次数的积分。

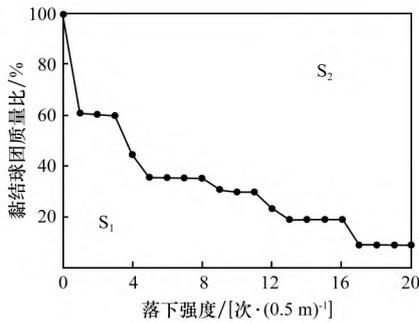


图 3 黏结指数计算示意

Fig. 3 Schematic diagram of the calculation results of the bonding index

## 2 试验结果与分析

### 2.1 矿粉的基础性能及评价

#### 2.1.1 4 种铁精粉连晶强度评价

4 种铁精粉的连晶强度测定结果见表 6。由表 6 可知, 山西铁精粉的连晶强度最高, 达到 765 N, 因此增加其配比可以改善球团矿的强度; 辽宁铁精粉的连晶强度最低, 仅为 183 N, 使用该矿种将导致球团矿的抗压强度低, 因此在配矿方案选择时放弃使用该矿种; 内蒙古、河北铁精粉的连晶强度相当, 但是河北的硫含量较高, 硫和氧的亲合力大于铁和氧的亲合力, 如果配加量高, 会影响球团矿中  $Fe_3O_4$  的氧化<sup>[14]</sup>, 导致球团矿亚铁含量升高, 同时精粉硫含量高, 会增加脱硫系统的负荷, 兼顾两者因素, 配矿时考虑可以适当配加河北铁精粉配比, 替代部分内蒙铁精粉。

表 6 4 种铁精粉连晶强度

铁精粉种类	山西	内蒙	辽宁	河北
连晶强度	765	439	183	455

#### 2.1.2 4 种铁精粉圆形成度评价

4 种铁精粉的圆形成度数据见表 7。由表 7 可知, 辽宁铁精粉的颗粒平均圆形成度最小, 为 78.5%, 圆形成度大于 70% 的质量分数最少, 为 70.43%, 该铁精粉圆形成度最低, 说明该铁精粉颗粒粗糙, 成球性优于其他三种铁精粉。山西、河北铁精粉的平均圆形成度均为 78.7%。其中, 山西

铁精粉的圆形成度大于 70% 质量分数最多, 达到了 70.95%, 说明山西铁精粉的颗粒表面较为圆滑, 不利于成球, 成球性较差, 生产操作中需要增加膨润土配比, 或者适量增加水分来改善成球效果。在配矿结构调整时, 如混合精矿的成球性不好, 可以适当增加圆形成度低的其他铁精粉来改善成球效果。

表 7 4 种铁精粉圆形成度及圆形成度 >70% 质量分数

Table 7 Degree of circularity and >70% mass fraction for four kinds of iron concentrate powder

铁精粉种类	山西	内蒙古	辽宁	河北
圆形成度	0.787	0.786	0.785	0.787
>70% 质量分数	70.95	70.86	70.43	70.78

综合 4 种矿粉的连晶强度与圆形成度的基础性能, 得到辽宁铁精粉的连晶强度偏低, 同时考虑该铁精粉成本和运距不占优势, 因此暂不考虑作为备选资源, 后续造球、配矿不使用该矿种。

### 2.2 单种矿生球质量及焙烧球团矿指标评价

#### 2.2.1 单种铁精粉的生球质量评价

在膨润土配比为 1.1% 条件下, 山西、内蒙古、河北三种铁精粉的生球质量评价见表 8。由表 8 可知, 其中河北铁精粉的生球质量最好, 落下次数为 6.4 次/(0.5 m), 其次是山西铁精粉, 内蒙古铁精粉的生球质量最差, 落下次数为 5.7 次/(0.5 m), 抗压强度为 9.94 N/P。

表 8 铁精粉的生球质量

Table 8 Quality of green balls from iron concentrate powder

铁精粉种类	落下强度/[次·(0.5 m)⁻¹]	抗压强度/(N·P⁻¹)	水分(质量分数)/%
山西	5.9	10.62	7.00
内蒙古	5.7	9.94	6.70
河北	6.4	10.74	7.21

综合评价单一铁精粉的生球质量, 河北铁精粉的抗压强度和落下次数最优, 在生产时, 当球团的硫负荷满足时, 可以适当增加河北铁精粉的配比, 改善生球的抗压强度, 以减少生球返料的量, 提高链算机的机头球强度, 减少机头球爆裂, 延长回转窑的结圈周期。

#### 2.2.2 焙烧球团矿质量评价

三种铁精粉球团分别在 1 225、1 250、1 275 °C

焙烧温度下, 焙烧 30 min, 得到的球团矿抗压强度检测结果见表 9。由表 9 可知, 随着焙烧温度升高, 三种球团矿的抗压强度均呈升高趋势。在 1 225 °C 焙烧温度条件下, 山西铁精粉的抗压强度最好, 达到 2 963 N/P, 内蒙古铁精粉抗压强度最低, 为 2 595 N/P。在 1 250、1 275 °C 焙烧温度条件下, 山西铁精粉的抗压强度最好, 内蒙古抗压强度最低。但三种铁精粉的抗压强度均可以达到 2 300 N/P 以上, 单独使用其中任意铁精粉生产球团矿, 抗压强度均可以满足需求。配矿结构中, 如果球团矿抗压强度低, 可以选择增加山西铁精粉比例的方案, 提高球团矿的抗压强度。

表 9 不同焙烧温度下球团矿抗压强度

铁精粉种类	1 225 °C	1 250 °C	1 275 °C
山西	2 963	3 417	3 704
内蒙古	2 595	3 254	3 482
河北	2 677	3 376	3 614

### 2.3 5 种铁精粉优化配矿方案

山西铁精粉各项性能(铁品位、连晶强度、单烧球团抗压强度)较优, 配矿时可以适当增加其比例; 内蒙古铁精粉中硫含量较高, 考虑脱硫系统的硫负荷以及球团矿氧化, 配矿时适当降低其比例; 河北铁精粉较其他两种矿粉铁品位稍低, 配矿时需综合考虑其低硫和低品位的特性。按照混合料铁品位越高越好、控制内蒙古铁精粉比例、硫含量尽量低, 共设计 5 个配矿方案, 具体见表 10。

表 10 铁精粉配矿方案(质量分数)

配矿方案	山西铁精粉	内蒙古铁精粉	河北铁精粉
方案 1	85	0	15
方案 2	80	10	10
方案 3	60	10	30
方案 4	40	10	50
方案 5	85	15	0

基于不同铁精粉的特点, 综合考虑经济性, 方案 1, 方案 5 相互替换内蒙古、河北铁精粉; 方案 2、方案 3、方案 4 通过增加河北铁精粉, 降低

山西铁精粉, 研究球团矿质量的变化规律。

### 2.3.1 优化配矿后焙烧球团矿质量评价

在焙烧温度为 1 250 °C, 焙烧时间为 30 min 条件下, 各配矿方案球团矿抗压强度见表 11。由表 11 可知, 方案 1 的抗压强度最高, 达到 3 432 N/P, 方案 2 抗压强度次之, 方案 4 的抗压强度最低, 为 3 208 N/P。5 个配矿方案的球团矿抗压强度均大于 3 200 N/P, 可以满足生产要求。因此, 在生产过程中, 在保证球团矿抗压强度大于 2 300 N/P 的前提下, 可以适当降低焙烧温度, 降低球团工序的能源消耗和工序成本。

表 11 球团矿抗压强度

Table 11 Compressive strength of pellet

配矿方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
抗压强度/(N·P <sup>-1</sup> )	3 432	3 401	3 366	3 208	3 394

### 2.3.2 优化配矿后球团矿冶金性能评价

气基竖炉所使用的球团矿不仅要求有良好的抗压强度, 同时要求好的冶金性能。气基直接还原技术要求: 还原性指数  $\geq 4\%$ , 还原膨胀指数  $\leq 15\%$ , 低温还原粉化指数 [ $> 6.30 \text{ mm}$ ]  $\geq 80\%$ , ( $< 3.15 \text{ mm}$ )  $\leq 10\%$ 。5 个配矿方案的球团矿冶金性能指标见表 12。

由表 12 分析可知各配矿方案的冶金性能特点: ① 方案 1 的还原膨胀指数为 6.39%, 黏结指数为 65.74%, 这两项指标比其他方案差, 特别是黏结指数较高, 生产过程容易出现黏结现象, 影响生产顺行, 涂覆水泥可以缓解黏结现象。另外还原性指数低于要求指标, 因此该方案不可行; ② 方案 2 的低温还原粉化指数最好, 产生的粉化的比例较低, 但是还原后强度仅为 746.8 N/P, 该指标较差, 运输过程中容易产生粉末, 成品率降低, 可能影响下游电炉工序的收得率; ③ 方案 3 的还原性指数、还原膨胀指数适中, 黏结指数较优, 还原后强度最好, 说明其还原后的强度较好, 可以抗击运输过程的粉化问题, 综合性能较好, 各项指标均满足要求; ④ 方案 4 的还原性指数为 4.377%, 球团矿还原效果最好, 在相同金属化率条件下, 有利于提高产量, 黏结指数最优, 有利于保障竖炉排料顺畅, 还原后强度稍低, 为 810.9 N/P。但考虑产品运输过程中的粉末以及下

表 12 球团矿冶金性能  
Table 12 Metallurgical properties of pellets

配矿方案	还原性指数 / %	还原膨胀指数 / %	低温还原粉化指数			
			> 6.30 mm	< 3.15 mm	黏结指数 / %	还原强度 / (N·P <sup>-1</sup> )
方案 1	3.923	6.39	96.31	3.09	65.74	978.3
方案 2	4.278	5.58	97.51	2.49	38.50	746.8
方案 3	4.348	5.41	96.32	3.68	32.92	1 078.8
方案 4	4.377	5.20	95.56	4.44	17.58	810.9
方案 5	4.019	4.67	95.10	4.90	34.76	1 045.7

游的收得率,则需要慎重选择,可以作为备选方案;⑤方案5的还原性指数较差,还原膨胀指数最低,为4.67%,还原后强度较优,较方案1升高67.4 N/P,黏结指数降低,说明使用河北铁精粉替代内蒙古铁精粉,可以改善球团矿的指标。

此外,对比方案2、3、4可知,随着河北铁精粉配比增加,山西铁精粉配比降低,球团矿还原性、还原膨胀率、黏结指数呈降低趋势,但是还原后强度先升高后降低。

综合各指标评价,方案3综合性能好,因此采用此方案进行工业投笼试验。

#### 2.4 工业投笼试验数据分析

为了验证优选的配矿方案3是否可以满足大规模生产需求,将方案3球团和参考球团在气基竖炉内进行投笼试验,即与正常生产的参数工况一样。试验数据见表13。由表13可知,方案3球团与参考球团相比,其还原后金属化率低1.2个百分点,但是也达到了直接还原用球团一级品的要求(金属化率>94%为一级品),>6.30 mm的质量分数高14.28个百分点,说明该方案的直接还原球团粒级优于参考样品,3.15~6.30 mm粒级的质量分数低9.54个百分点,<3.15 mm粒级质量分数低4.71个百分点。因此总体评价,方案3生产的球团矿满足气基直接还原工艺的需求。

表 13 投笼试验数据

Table 13 Data of the cage test

项目	金属化率 / %	C 质量分数 / %	粒度占比(质量分数) 5%		
			> 6.30 mm	[6.30, 3.15] mm	< 3.15 mm
参考球团	95.7	5.1	77.96	15.65	6.39
方案3球团	94.5	4.7	92.24	6.11	1.68
对比	-1.2	-0.4	14.28	-9.54	-4.71

### 3 结 论

(1) 通过对4种铁精粉的连晶强度、圆形体、造球等性能测试。山西铁精粉的连晶强度最高,生产过程中可以增加其配比来改善球团矿的强度,但是成球性较差。辽宁铁精粉的连晶强度最低,仅为183 N,使用该矿种将导致球团矿的抗压强度低,因此在配矿方案选择时放弃使用该矿种。内蒙古、河北铁精粉的连晶强度相当,但是河北铁精粉的硫含量较高,硫和氧的亲合力大于铁和氧的亲合力,配比高会影响球团矿中Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的氧化。

(2) 从4种铁精粉中优选3种铁精粉,依据其基础性能的特性,制定了5种配矿试验方案,在1 250 °C焙烧温度,其抗压强度均可达到3 200 N/P以上,满足竖炉需求。其中,方案3(结构60%山西+10%内蒙古+30%河北)还原性指数、还原膨胀指数、黏结指数等综合指标较好,投笼试验中,其还原球团金属化率达到94.5%、碳质量分数为4.7%,<3.15 mm质量分数为1.68%,综合指标优于参考还原球团,满足直接还原球团的要求。

(3) 文中涉及的系统配矿及评价方法,优选了适合于生产直接还原球团的原料以及焙烧参数,可供直接还原工厂推广应用。

## 参考文献:

- [1] 应自伟,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析[J]. 河北冶金, 2019(6):1-7.  
YING Ziwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process [J]. Hebei Metallurgy, 2019 (6):1-7.
- [2] 刘西琨,金锋,付艳鹏,等. 气基直接还原铁还原气生产技术研究[J]. 山西冶金, 2023, 46(8):109-112.  
LIU Xikun, JIN Feng, FU Yanpeng, et al. Study of production technology of reducing gas for gas-based direct reduced iron process [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(8):109-112.
- [3] 杨婷,孙继青. 世界直接还原铁市场现状及前景[J]. 冶金信息导刊, 2006(4):6-8.  
YANG Ting, SUN Jiqing. Market analysis and prospect of DRI in the world [J]. Metallurgical Information Review, 2006(4):6-8.
- [4] 王兆才. 煤制气-气基竖炉直接还原工艺的基础研究[D]. 沈阳:东北大学, 2013.  
WANG Zhaocai. Fundamental study on process of coal gasification-gas based shaft furnace direct reduction [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [5] 潘建,朱德庆,韩基祥,等. 磁铁矿氧化球团富氢气基直接还原的特性研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(1):48-57.  
PAN Jian, ZHU Deqing, HAN Jixiang, et al. Study on hydrogen-rich gas-based direct reduction of oxide pellets made by magnetite concentrate [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1):48-57.
- [6] 王耀祖,刘征建,张建良,等. 一种铁矿粉连晶性能的评价及测量方法:CN113405872A [P]. 2021-06-17.  
WANG Yaozu, LIU Zhengjian, ZHANG Jianliang, et al. Evaluation and measurement method of continuous crystallization performance of iron ore powder: CN113405872A [P]. 2021-06-17.
- [7] 王兆才,储满生,唐珏,等. 还原气氛和脉石成分对氧化球团还原膨胀的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(1):94-97.  
WANG Zhaocai, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Effects of reducing atmosphere and gangue composition on reduction swelling of oxidized pellets [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(1):94-97.
- [8] 王金,郭正启,朱德庆,等. 高品位赤铁矿带式焙烧机制备气基直接还原用氧化球团技术[J]. 钢铁, 2024, 59(5):45-55.  
WANG Jin, GUO Zhengqi, ZHU Deqing, et al. Technology of gas-based direct reduction of oxidized pellets with high grade hematite concentrates by travel grate process [J]. Iron & Steel, 2024, 59(5):45-55.
- [9] 潘禹竹. 基于烧结基础特性的铁矿粉烧结优化配矿研究[D]. 沈阳:东北大学, 2020.  
PAN Yuzhu. Research on optimization of iron ore blending based on basic sintering characteristics [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [10] 尚策,周明顺,翟立委,等. 鞍钢铁矿石烧结基础性能研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(8):1139-1142.  
SHANG Ce, ZHOU Mingshun, ZHAI Liwei, et al. Study on basic sintering properties of iron ores in Ansteel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(8):1139-1142.
- [11] 唐珏,张勇,储满生,等. 以高铬型钒钛磁铁矿制备氧化球团[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(4):545-550.  
TANG Jue, ZHANG Yong, CHU Mansheng, et al. Preparation of oxidized pellets with high chromium vanadium-titanium magnetite [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(4):545-550.
- [12] 吕庆,田野,刘小杰,等. 添加不同配比的铜尾矿 PMC 应用于球团制备的研究[J]. 矿产综合利用, 2018, 4(2):86-90.  
LÜ Qing, TIAN Ye, LIU Xiaojie, et al. Research on the application of copper tailings PMC with different proportions in pellet preparation [J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2018, 4(2):86-90.
- [13] 郭宇峰,刘阔,刘雅婧,等. 铁矿球团还原膨胀机理及影响因素的研究进展[J]. 钢铁, 2021, 56(4):9-15.  
GUO Yufeng, LIU Kuo, LIU Yajing, et al. Research progress on reduction swelling mechanism and influencing factors of iron ore pellets [J]. Iron & Steel, 2021, 56(4):9-15.
- [14] 李晓兵. 宣钢球团矿质量攻关[J]. 烧结球团, 2016, 41(3):39-41.  
LI Xiaobing. Research on improvement of Xuanhua Steel pellet quality [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(3):39-41.