



## 无黏结剂球团矿低成本生产关键技术应用

胡守景<sup>1</sup>, 秦立浩<sup>1</sup>, 姚永宽<sup>1</sup>, 高式林<sup>1</sup>, 方 磊<sup>1</sup>, 朱德庆<sup>2</sup>,  
杜 刚<sup>3</sup>, 邓 睿<sup>4</sup>, 赵建明<sup>5</sup>, 李宝忠<sup>6</sup>

(1. 南京钢铁集团有限公司 江苏 南京 214000; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院 湖南 长沙 410083;  
3. 大冶集团有限公司 江苏 南京 211112; 4. 中钢设备有限公司 北京 100080; 5. 成都利君实业股份有限公司,  
四川 成都 610045; 6. 河钢乐亭钢铁有限公司 河北 唐山 063600)

**摘要:** 南钢带式焙烧机球团生产线首创的  $4 \times 10^6$  t/a 规模的立式干法磨矿系统于 2023 年 11 月投入运行, 烧结粗粉经过干法磨矿后, 成球性、球团焙烧性能等均得到显著改善。此外, 在干法磨矿的基础上, 通过优化配矿和球团焙烧制度, 改善生球热稳定性, 生产出  $w(\text{TFe})$  为 63.5%、 $w(\text{SiO}_2)$  为 4.7%、碱度为 0.15、抗压强度维持在 2 500 N/P 以上, 冶金性能优异 [还原度为 80%、低温还原粉化指数 ( $> 3.15$  mm) 为 96%、还原膨胀指数为 18%] 的优质球团矿, 实现了酸性球团矿无黏结剂生产的关键技术开发和应用。该技术成功应用, 可降低黏结剂成本 6 400 万元/a, 同时使球团铁品位成本低于烧结矿 1.83 元/t, 创造了显著的经济效益。

**关键词:** 带式焙烧机; 立式干法磨矿; 球团矿; 黏结剂

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0061-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.008

### Key technology and application for low-cost production of binder-free pellets

HU Shoujing<sup>1</sup>, QIN Lihao<sup>1</sup>, YAO Yongkuan<sup>1</sup>, GAO Shilin<sup>1</sup>, FANG Lei<sup>1</sup>, ZHU Deqing<sup>2</sup>,  
DU Gang<sup>3</sup>, DENG Rui<sup>4</sup>, ZHAO Jianming<sup>5</sup>, LI Baozhong<sup>6</sup>

(1. Nanjing Steel Group Co., Ltd., Nanjing 214000, Jiangsu, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Mountop Group Co., Ltd., Nanjing 211112, Jiangsu, China;  
4. Sinosteel Equipment Co., Ltd., Beijing 100080, China; 5. Chengdu Leejun Industrial Co., Ltd., Chengdu 610045,  
Sichuan, China; 6. HBIS Laoting Steel Co., Ltd., Tangshan 063600, Hebei, China)

**Abstract:** The  $4 \times 10^6$  t/a vertical dry grinding system, pioneered by Nanjing Steel Group's straight grate pellet production line, is put into operation in November 2023. After dry grinding, the ball formation and pellet roasting performance of the sintered coarse powder are significantly improved. In addition, on the basis of dry grinding, by optimizing the ore blending and pellet roasting system and improving the thermal stability of the green pellet, the high-quality pellets are produced, which have a  $w(\text{TFe})$  of 63.5%, a  $w(\text{SiO}_2)$  of 4.7%, a basicity of 0.15, a compressive strength of over 2 500 N/P, and excellent metallurgical properties [reduction degree 80%, low-temperature reduction pulverization index ( $> 3.15$  mm) 96%, and reduction expansion index 18%], and realize the development and application of key technologies for the binder-free production of acidic pellets. The successful application of this technology can reduce the binder cost by 64 million yuan per year and at the same time make the iron grade cost of pellets 1.83 yuan/t lower than that of pellet, creating significant economic benefits.

**Key words:** straight grate; vertical dry grinding; pellet; binder

收稿日期: 2024-11-22; 修回日期: 2025-01-13

基金项目: 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202216)

作者简介: 胡守景(1982—), 男, 高级工程师, 从事球团技术、生产管理等方面的工作。

通信作者: 朱德庆(1964—), 男, 博士, 教授, 从事烧结球团、低碳与氢冶金、固废资源化等基础理论与工艺研究。

球团具有粒度均匀、机械强度高、冶金性能好、生产能耗和污染物排放相对较低等优点,是当今高炉冶炼和直接还原工艺必要的优质低碳炉料之一。随着“双碳”目标的提出,国内高炉炉料结构中球团比例必将持续增加<sup>[1-4]</sup>。球团矿需求量的增加,也必然对球团矿质量如铁品位、硅含量等提出更高要求。当前,由于优质铁矿和膨润土资源的日益短缺,导致国内球团生产的膨润土消耗远高于国外水平,不仅造成了生产成本的增加<sup>[5-7]</sup>,还进一步降低了球团质量。拓宽球团原料范围、减少膨润土消耗、提高球团质量、降低生产成本是促进“烧结转球团”、提高高炉球团入炉比例,支撑我国球团行业高质量发展的重要举措之一。

近年来,国内带式焙烧工艺的快速发展为拓宽球团原料结构、应用高比例赤-褐铁矿创造了有利条件<sup>[8-9]</sup>。刘胜歌等<sup>[10]</sup>开展高比例赤-褐铁矿湿法磨矿制备碱性球团的生产实践,在赤-褐铁矿质量分数为 45%、膨润土配加质量分数为 0.4% 原料条件下研究表明,生产碱性球团的最佳钙质熔剂为消石灰,其可以显著提高球团抗压强度到 2 500 N/P 以上,还原性平均可达 70% 以上。杨聪聪等<sup>[11]</sup>开展了某进口赤-褐铁矿磨矿特性及其氧化球团制备行为研究,研究表明,含褐铁矿易磨铁矿石可通过与亲水性差的硬质铁矿搭配磨矿的方式改善其沉降和过滤性能,易磨赤-褐铁矿粉质量分数配比超过 20% 后,随着使用比例增加,球团孔隙率呈增加趋势,需要提高预热焙烧温度以获得合格的球团强度。温宝良等<sup>[12]</sup>研究了碱度对高硅超细铁精矿球团矿固结行为和还原特

性的影响,研究表明,随着碱度的增加,该球团矿抗压强度先增加后降低,孔隙率先降低后增加,当碱度为 0.06~0.73 时,球团矿的抗压强度均大于 4 000 N/P,在碱度为 0.24 时球团矿抗压强度最高,孔隙率也最低。韦东等<sup>[13]</sup>开展了膨润土对球团性能研究工业试验,研究表明,通过对常规膨润土进行复合改性,膨润土使用量由 26 kg/t 降低至 18 kg/t,生球落下强度大于 4.2 次/(0.5 m),成品球平均抗压强度为 2 506 N/P。此外,降低膨润土用量后,武钢成品球团矿铁品位升高约 0.3%,经济效益十分明显。

南钢 4 × 10<sup>6</sup> t/a 带式焙烧机生产线投产后,成功开发了行业首台套干法立式磨矿工艺。该工艺利用干磨后矿粉比表面积高、湿容量大、成球性好的特性,取代球团用常规黏结剂(膨润土),实现无黏结剂球团生产。本文针对南钢带式焙烧机原料立式干磨预活化、优化配矿和带式焙烧机热工制度优化进行了研究,形成以镜铁矿粉、褐铁矿粉等非主流难焙烧铁矿为主要原料的无黏结剂优质球团低碳绿色低碳低成本生产成套关键技术。

## 1 研究方法

### 1.1 原料条件

南钢球团现场所用原料品种多达 20 余种,其典型原料结构:经济矿种、磁铁矿、高硫矿、杂料、烧结粗粉配入的质量分数分别为 50%、20%、7%、3%、20%。其中,烧结粗粉需通过立式干磨工艺进行预处理至粒度 < 0.074 mm 质量分数达 80% 以上。部分原料主要化学成分见表 1,烧结粗粉粒度组成见表 2。

表 1 原料主要化学成份及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of raw materials

%

原料	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	P	烧损
A	65.80	26.60	3.60	0.90	0.700	0.80	0.198	0.020	0.050	-1.50
B	61.00	6.30	5.60	0.52	0.260	2.40	0.728	0.330	0.075	2.36
C	58.80	0.00	6.30	2.33	1.410	0.98	0.120	1.550	0.050	1.70
D	46.90	3.80	5.80	6.90	1.700	3.00	0.177	0.250	0.070	0.00
E	66.20	3.50	4.80	0.20	0.200	0.40	0.204	0.140	0.090	0.21
F	56.21	0.11	3.15	0.05	0.154	6.90	0.302	0.071	0.074	9.30
G	48.90	7.80	1.90	0.20	0.500	9.20	0.331	0.230	0.010	12.70

注: A 为磁铁矿, B 为经济矿, C 为高硫品种, D 为除尘灰, E-G 为烧结粉,典型的镜、褐铁矿,为主要磨矿品种。

表 2 铁精矿粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size composition of iron ore powder

铁精矿	>8 mm	(5, 8] mm	(3, 5] mm	(1, 3] mm	<1 mm	>0.50 mm	(0.150, 0.500] mm	(0.074, 0.150] mm	(0.045, 0.074] mm	(0.038, 0.045] mm	<0.098 mm
F	11.31	24.83	15.05	24.06	24.75	—	—	—	—	—	—
G	9.83	14.89	15.89	26.45	32.94	—	—	—	—	—	—
E	—	—	—	—	—	22.46	52.27	13.55	9.45	0.38	1.89

由表 2 可以看出: 相比于球团精矿, F、G 的粒度较粗, <1 mm 质量分数分别仅为 24.75% 和 32.94%; E 矿虽然粒度较细, 但 <0.074 mm 质量分数仅为 10% 左右, 因而必须经细磨预处理。

1.2 原料预处理及球团工艺

1.2.1 干法立式磨矿工艺

立式辊磨干法磨矿工艺集破碎、粉磨、烘干、选粉为一体, 具有电耗低、密封性能好、噪音低、可露天布置、占地面积小、流程简单等特点。相比现有传统湿式磨矿—沉降—过滤系统, 粗铁矿粉立式干磨工艺有效回避了软质铁矿细磨后难沉降、难过滤的技术难题, 拓宽了铁矿粉资源选择范围, 同时也避免了磨矿对水资源消耗和水体污染的问题。

该工艺的具体流程: 预配料仓底部的圆盘给料机、计量皮带机将铁矿石(烧结粗粉) 输送至磨机, 合格的铁矿石粉通过空气斜槽、斗提机输送至成品仓储存, 再经过成品仓底的叶轮给料机、密闭计量皮带秤、加湿机后和其它原料一起输送至混合机进行混匀, 见图 1。

1.2.2 球团工艺

从南钢的原料结构看, 赤、褐、镜铁矿比例高, 属难焙烧品种, 焙烧工艺要求高。而带式焙烧机工艺因生球在烘干、焙烧、冷却过程处于静

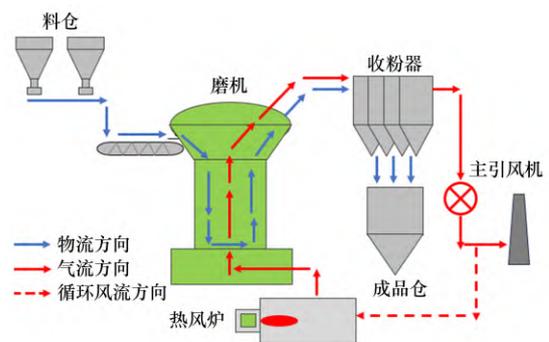


图 1 立式干法磨矿工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of dry grinding process

止状态, 不会产生回转窑结圈现象(链算机一回转窑), 且生球烘干、焙烧、冷却等参数可灵活调整, 具备适应不同物料条件的先天优势。南钢带球产线自投产以来, 通过不断尝试优化原料结构和焙烧制度, 较好地掌握了不同物料条件下带式焙烧机球团生产关键技术。具体球团工艺流程如图 2 所示。

1.3 配料方案

兼顾原料成本、过程控制要求以及成品球团矿质量, 无黏结剂球团矿生产关键技术的原料配方采用铁精粉和磨粉的配矿组合方案。其中磨粉的配矿方案采用烧结粗粉 E、F 和 G 按照 3:4:3 比例混合磨矿, 磨后成品粒度 <0.074 mm 控制要求 >80%, 磨矿配料方案如表 3 所示。球团原料

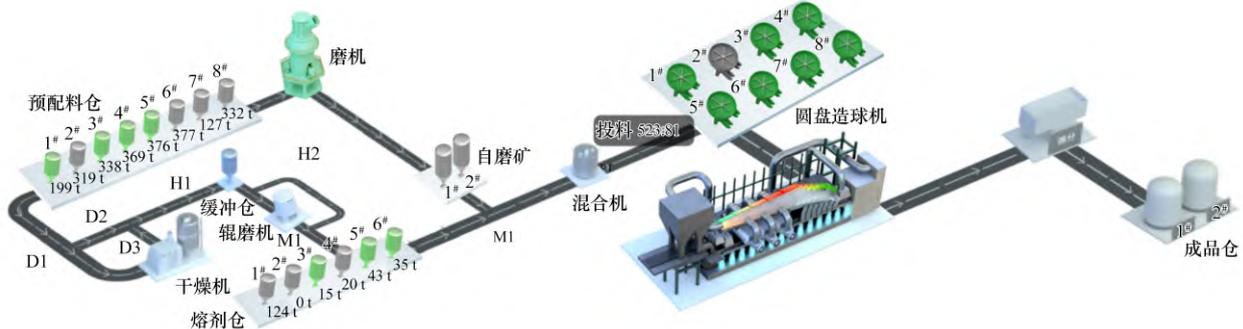


图 2 南钢带式焙烧机球团生产工艺流程

Fig. 2 Schematic diagram of straight grate pelletizing process

配矿方案如表 4 所示,其中基准配比配加膨润土,配比 1 和配比 2 不配加膨润土。

表 3 磨矿配料方案与烧损(质量分数)

原料	比例	TFe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	烧损
E	30	66.20	4.80	0.40	1.87	0.21
F	40	56.21	3.15	6.90	13.20	9.30
G	30	48.90	1.90	9.20	26.80	12.70
配矿成分(理论)	100	57.01	3.27	5.64	13.88	7.59

表 4 球团矿配料方案(质量分数)

配矿方案	精粉 A	精粉 B	精粉 C	杂料 D	磨后粉	膨润土
基准	40	40	10	3	0	1.5
配比 1	30	45	7	3	15	0
配比 2	20	50	7	3	20	0

#### 1.4 焙烧热工制度

为了确保在生球完整的前提下提高干燥效率,

故控制合理的干燥温度和速度尤为重要,其次,考虑球团原料因含有褐铁矿而有较高的烧损,故在实际生产中适度提高了预热温度,而焙烧温度根据成品球团的抗压强度在 1 200 ~ 1 245 °C 范围内进行动态调整,具体的带式焙烧机设备和热工参数分别见表 5 和表 6。

## 2 结果及机理分析

### 2.1 干法磨矿结果及预活化机理分析

烧结粗粉(E、F、G 按质量比 3:4:3 配矿)和干法磨矿后,得到的磨后粉化学成分和粒度如表 7 所示。由表 7 可知,磨矿后, <0.074 mm 质量分数为 80%~86%,水分为 0.5%~0.7%,烧损为 5.87%~6.45%。因磨矿烟气入口温度在 400 ~ 500 °C 区间,在此温度下,可脱除褐铁矿的部分结晶水。

表 8 对比了干磨前后混合料及造球混合料的比表面积和静态成球性,图 3 为干磨后混合料及造球混合料的激光粒度分析结果。结合表 8 与图 3

表 5 带式焙烧机设备参数

Table 5 Equipment parameters of straight grate

项目	鼓干	抽干	预热段	焙烧段	均热段	一冷	二冷	总计
风箱/个	2	2	2.5	5.5	1.5	5.5	2	21
面积/m <sup>2</sup>	48	48	60	132	36	132	8	504

表 6 带式焙烧机操作主要热工参数

Table 6 Main thermal parameters of straight grate

项目	鼓干段	抽干段	预热段	焙烧段	均热段	一冷段	二冷段
炉罩温度	85 ~ 115	330 ~ 350	500 ~ 950	1 080 ~ 1 245	950 ~ 1 050	960 ~ 620	230 ~ 400
风箱温度	180 ~ 280	90 ~ 120	90 ~ 140	200 ~ 600	420 ~ 530	—	—

表 7 磨后粉理化特性(质量分数)

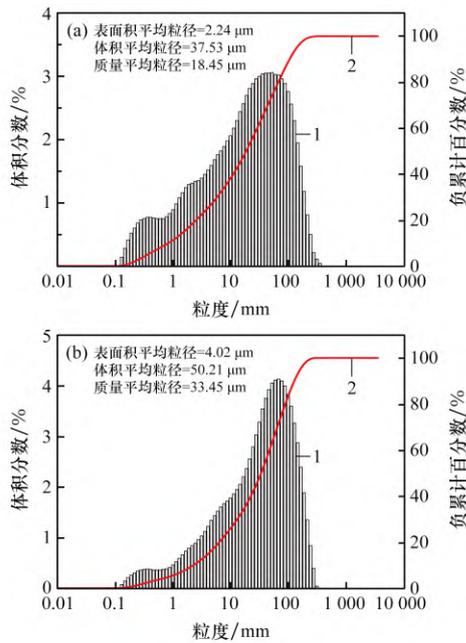
Table 7 Physical and chemical properties of ore ground powder after grinding

TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P	TiO <sub>2</sub>	<0.074 mm	水分	烧损
58.06	0.29	3.33	0.05	0.35	4.71	0.082	0.036 5	0.275	82	0.6	6.23

表 8 铁矿粉干磨前后的物理性质变化

Table 8 Changes in physical properties of iron ore powder before and after dry ore grinding

样品	堆密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	勃氏比表面积/ (cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	BET 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	最大 分子水/%	最大 毛细水/%	静态成球性 指数(K)
干磨前混合矿	1.52	—	—	5.05	21.73	0.30
干磨后混合矿	1.19	3 106	25.92	10.22	24.13	0.73
造球混合料	1.70	1 627	5.42	6.40	22.12	0.41



(a) 干磨粉; (b) 造球混合料  
1—体积分数; 2—负累积百分数。

图3 干磨后矿粉及造球混合料的激光粒度分析

Fig. 3 Laser particle size analysis of ore dry grinding and pelletizing mixture

可知,通过立式干磨后,粗矿粉粒度明显变细,平均粒径仅为 $18.45\ \mu\text{m}$ ,比表面积高达 $3\ 106\ \text{cm}^2/\text{g}$ ,显著提高了铁矿颗粒的表面活性和表面能;其次,干磨后矿粉的粒度分布宽,这有利于实现铁矿颗粒的紧密堆积,从而改善成球性,提高生球强度,获得良好的生球质量。

铁矿粉组合立式辊磨前后的微观颗粒形貌如图4所示。由图4可知,经过辊磨后混合矿的粒度明显变小,原先光滑致密的颗粒表面逐渐向不规则、粗糙多孔的细颗粒转变,且无定形化程度明显提高,表明部分机械能以颗粒表面能的形式得以储存,这些特性对于后续生球制备和改善球团焙烧性能具有重要的促进作用。

## 2.2 生球指标及机理分析

实验室对单品种铁矿粉及其组合配矿方案的造球性能和爆裂温度进行了研究,结果如表9所示。由表9可知,不同铁矿的造球性能及生球热稳定性具有明显差异。其中,A的生球落下强度超过 $20\ \text{次}/(0.5\ \text{m})$ ,但B和C低于 $4\ \text{次}/(0.5\ \text{m})$ ,尤其C的生球强度最差。铁矿中除A的生球爆裂温度低于 $300\ ^\circ\text{C}$ 外,其余均超过了 $390\ ^\circ\text{C}$ ,虽然

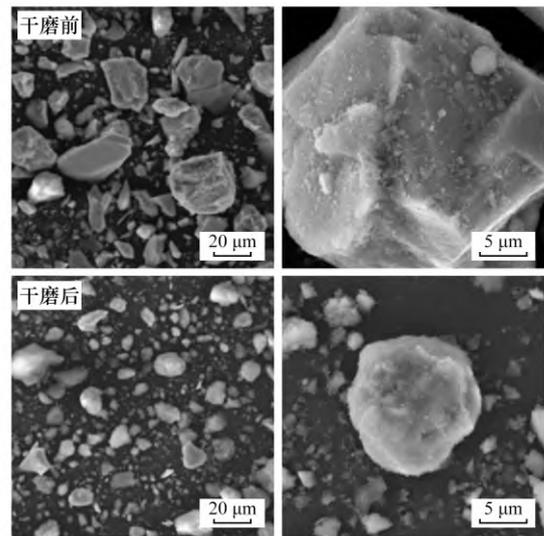


图4 铁矿粉组合立式辊磨前后微观颗粒形貌

Fig. 4 Microscopic particle morphology before and after vertical roller grinding of iron ore powder combination

表9 单矿及配矿条件下的生球性能指标

Table 9 Performance indicators of green pellets under single ore and ore blending conditions

原料	膨润土用量/%		生球性能		
	水分/%	水分/%	落下强度/ [次·(0.5 m) <sup>-1</sup> ]	抗压强度/ (N·P <sup>-1</sup> )	爆裂温 度/°C
A	1.5	9.77	22.6	23.2	280
B	1.5	8.54	3.3	23.1	410
C	1.5	17.02	1.7	9.3	600
W	1.5	10.29	21.0	24.7	390
	0	8.95	5.4	21.0	300

注:W配矿方案中,原料C、B、G、E、D质量分数分别为42%、22%、15%、11%、10%;D粗矿粉磨矿细度 $<0.074\ \text{mm}$ 质量分数为85%。A和B铁精矿为原始粒度;固定造球时间为12 min。

A的单矿造球性能良好,但A矿的爆裂温度低,需搭配其他品种矿调节爆裂温度。

不同配矿方案的生球性能指标如表10所示。由表10可知,对比基准配比,配比1生球的落下强度和爆裂温度均出现下降现象,湿返料高;配比2进一步提高磨后粉配比后,混合料成球性得到改善,生球落下强度有明显提升,但随着褐铁矿配比同步上升,爆裂温度较基准配比明显下降,这意味着实际生产过程中,可通过调整生球烘干参数,适当降低干燥风温、延长干燥时间、提高

风量,以强化烘干效果,达到生产要求。通过表 9 和表 10 数据对比可知,W、配比 1 和配比 2 的生球指标正好验证了基于单矿成球性优劣进行优化配矿的有效性。

表 10 不同配矿方案的生球性能指标

Table 10 Performance indicators of green pellets for different ore blending schemes

配矿方案	水分(质量分数)/%	生球落下强度/[次·(0.5 m) <sup>-1</sup> ]	爆裂温度/°C	湿返料率/%
基准	10.83	6	410	20
配比 1	10.80	5	350	28
配比 2	9.81	6	330	22

### 2.3 球团质量指标及焙烧机理分析

3 种配料方案的生球经过焙烧后,成品球团的化学成分、抗压强度和冶金性能如表 11 所示,球团矿光学显微矿相结构分析如图 5 所示。由表 11 可知,与基准相比,配比 1 和配比 2 的球团矿抗压强度及冶金性能指标都达到了优质球团矿的指标。其中,球团抗压强度先上升后下降的原因:配比 1 较基准配比,球团矿孔隙率降低从而抗压强度升高,配比 2 较配比 1 碱度下降,液相生成量减少,孔隙率小幅上升,抗压强度下行。

此外,结合图 5 分析可知,3 种配矿方案焙烧后的球团矿赤铁矿连晶较好,球团致密。

表 11 球团矿的化学成分 抗压强度与冶金性能

Table 11 Chemical composition, compressive strength and metallurgical properties of pellets

配矿方案	化学成分(质量分数)/%			$R^2$	抗压强度/(N·P <sup>-1</sup> )	冶金性能			
	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO			还原度	低温还原粉化指数(>3.15 mm)/%	还原膨胀指数/%	孔隙率/%
基准	63.27	5.56	0.93	0.17	2 983	76.83	96.32	17.34	22.15
配比 1	63.02	4.82	1.11	0.23	3 127	81.87	96.58	16.61	20.36
配比 2	62.90	4.99	1.00	0.20	2 591	82.27	93.11	17.39	20.84

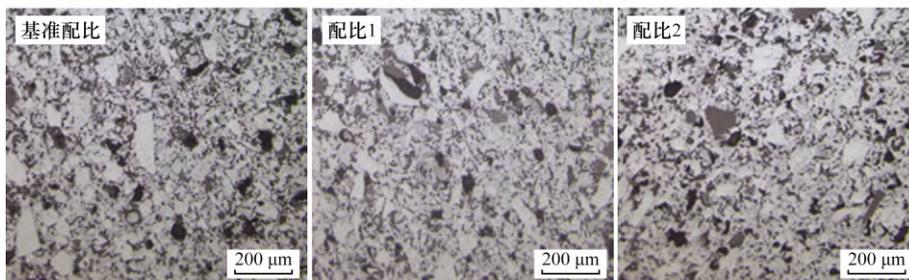


图 5 不同配矿方案球团矿的微观结构

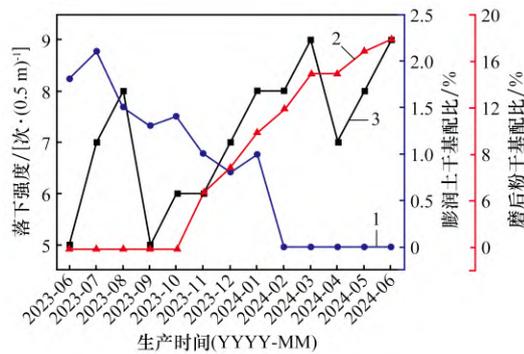
Fig. 5 Microstructure of fired pellet made from different ore blends

## 3 技术应用及效益分析

### 3.1 技术应用情况

利用立式干磨后矿粉比表面积高、粒度组成宽、湿容量大、成球性好的特性,取代球团用常规黏结剂(膨润土),实现无黏结剂球团生产。图 6 所示为磨后粉配加比例、膨润土用量及生球落下强度的变化趋势。由图 6 分析可知,投产初期(2023 年 6 月—11 月)的膨润土用量较高,配入质量分数达到了 2.0%~2.5%;通过优化配矿及进入生产平稳期(2023 年 12 月—2024 年 1 月)后,膨润土用量降低到了 1.0%左右,生球强度反而逐步改善;而当干磨系统稳定运行后(2024 年 2 月以来),膨润土用量进一步减少为 0,生球落下强度仍维持在 6 次/(0.5 m)以上,实现了高比例干磨褐/赤铁矿无黏结剂球团生产。

针对该无黏结剂球团生产,同步进行了带式焙烧机工艺热工制度的优化:①采取低温长时间干燥,鼓风干燥段风温由 200~280 °C 降至 200~240 °C,干燥时间由 4.6 min 提高至 5.0 min,以防止生球热稳定性下降而发生爆裂和粉化;②提高了预热温度,预热段炉膛温度由 500~750 °C 提升至 750~950 °C,确保高硫高结晶水球团在预热段充分完成了硫和结晶水的脱除,避免了其对后



1—膨润土干基配比; 2—磨后粉干基配比;  
3—生球落下强度。

图6 不同生产阶段磨后粉配加比例,膨润土用量及生球落下强度变化

Fig. 6 Changes in the proportion of dry ground fines, bentonite dosage, and the strength of green balls at different production stage

续球团氧化和焙烧固结产生的不利影响; ③ 延长焙烧时间, 促进球团固结, 通过热工制度调整, 生球焙烧时间延长 1.1 min。焙烧热工制度优化前后对比见表 12。基于上述技术措施, 在磁铁矿比例不高于 20%、镜铁矿和褐铁矿等难焙烧铁矿配比不低于 40% 的条件下, 生产出了  $w(\text{TFe})$  为 62%~64%、 $w(\text{FeO})$  为 0.5%、 $w(\text{SiO}_2)$  为 4.0%~6.5%、S 质量分数低于 0.01% 和二元碱度低于 0.3, 平均抗压强度为 2 500 N/P, 具有良好的冶

表 12 带式焙烧机热工制度

Table 12 Thermal system of traveling grate

阶段	热工条件	热工制度优化前	热工制度优化后
鼓干段	温度/°C	200~280	200~240
	时间/min	4.6	5.0
抽干段	温度/°C	350~360	350~370
	时间/min	4.6	5.0
预热段	温度/°C	500~750	750~950
	时间/min	5.8	6.3
焙烧段	温度/°C	1 200~1 260	1 200~1 250
	时间/min	12.7	13.8
均热段	温度/°C	950~1 050	980~1 050
	时间/min	3.5	3.8
一冷段	温度/°C	840~920	850~920
	时间/min	12.7	13.8
二冷段	温度/°C	220~320	220~320
	时间/min	4.6	5.0

金性能 [还原度为 80%、低温还原粉化指数 ( $> 3.15 \text{ mm}$ ) 为 96%、还原膨胀指数为 18%] 的优质球团矿。

### 3.2 经济效益分析

本项目成功实现了在赤铁矿比例不低于 70% 条件下, 无黏结剂优质球团矿的稳定生产。其产品铁品位的生产成本与常规烧结矿相比低 1.83 元/t, 全年节省膨润土消耗 8 万 t, 折合成本约 6 400 万元。同时, 考虑到高炉用料酸碱平衡, 亦带动烧结工序熔剂成本的下降及高炉入炉品位的提升, 对铁前工序降本贡献较大, 具有较好的经济前景。

## 4 结论

(1) 立式辊磨工艺将含水量高、热敏性强的褐铁矿部分转化为细粒赤铁矿, 辊磨处理后的干磨粉平均粒径仅为  $18.45 \mu\text{m}$ , 比表面积高达  $3 106 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、粒度组成宽、湿容量大、成球性好, 可取代球团用常规黏结剂(膨润土)。

(2) 通过原料立式干磨预活化、优化配矿和带式焙烧机热工制度, 确保在磁铁矿比例不高于 20%、镜铁矿和褐铁矿等难焙烧铁矿配比不低于 40% 的条件下仍可生产出  $w(\text{TFe})$  为 62%~64%、 $w(\text{FeO})$  为 0.5%、 $w(\text{SiO}_2)$  为 4.0%~6.5%、S 质量分数低于 0.01% 和二元碱度低于 0.3, 平均抗压强度为 2 500 N/P, 且具有良好的冶金性能 [还原度为 80%、低温还原粉化指数 ( $> 3.15 \text{ mm}$ ) 为 96%、还原膨胀指数为 18%] 的优质球团矿, 形成了以镜铁矿粉、褐铁矿粉等非主流难焙烧铁矿为主要原料的无黏结剂优质球团矿低成本生产成套关键技术。

(3) 针对无黏结剂、结晶水含量高、难焙烧球团, 带式焙烧机可采取低温长时间干燥、提高预热段炉膛温度以及延长焙烧时间的焙烧热工制度制备优质球团矿。

### 参考文献:

- [1] 胡守景, 王业飞, 秦立浩. 带式球团配加含铁含碳除尘灰生产实践[C]//中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集. 重庆: 中国金属学会, 2023: 61-65.  
HU Shoujing, WANG Yefei, QIN Lihao. Production practice of straight grate with iron and carbon containing

- dust removal ash[C]//Chinese Society for Metals Proceedings of the 14th China Iron and Steel Annual Conference. Chongqing: Chinese Society for metals ,2023: 61 - 65.
- [2] 余海钊 , 廖继勇 , 范晓慧 . 带式焙烧机球团技术的应用及研究进展[J]. 烧结球团 2020 45(4) : 47 - 54.  
YU Haizhao , LIAO Jiyong , FAN Xiaohui. Application and research progress of pelletizing technology of belt roaster [J]. Sintering and Pelletizing 2020 45(4) : 47 - 54.
- [3] 刘山平 , 马磊 , 宋云锋 , 等 . 带式焙烧机球团原料预处理工艺优化[J]. 钢铁 2023 58(6) : 36 - 44.  
LIU Shanping , MA Lei , SONG Yunfeng , et al. Optimization of pretreatment process of pelletizing raw materials in belt roasters [J]. Iron & Steel 2023 58(6) : 36 - 44.
- [4] 韩风光 , 杨涛 , 赵贺喜 , 等 . 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理[J]. 工程科学学报 2023 45(9) : 1450 - 1458.  
HAN Fengguang , YANG Tao , ZHAO Hexi , et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets [J]. Chinese Journal of Engineering 2023 45(9) : 1450 - 1458.
- [5] 侯明洲 . 复合黏结剂改善含锌尘泥团块性能的研究[D]. 长沙: 中南大学 2022.  
HOU Mingzhou. Study on the improvement of properties of zinc-containing dust sludge briquettes with composite binders [D]. Changsha: Central South University 2022.
- [6] 范建军 , 郭宇峰 , 王帅 , 等 . 碱度对球团矿抗压强度及矿物组成的影响[J]. 钢铁研究学报 2024 36(9) : 1183 - 1193.  
FAN Jianjun , GUO Yufeng , WANG Shuai , et al. Effect of basicity on compression strength and mineral composition of iron ore pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research 2024 36(9) : 1183 - 1193.
- [7] 卢昊鹏 , 袁朝新 , 孙贯永 . 黏结剂对含碳球团强度影响的试验研究及机理分析[J]. 烧结球团 2023 , 48(5) : 79 - 85.  
LU Haopeng , YUAN Chaoxin , SUN Guanyong. Experimental research and mechanism analysis on effect of adhesive for strength of carbon-containing pellets [J]. Sintering and Pelletizing 2023 48(5) : 79 - 85.
- [8] 王英春 , 胡启晨 . 熔剂性球团低温还原粉化问题解析[J]. 烧结球团 2024 49(4) : 70 - 76.  
WANG Yingchun , HU Qichen. Analysis of low temperature reduction pulverization of fluxed pellets [J]. Sintering and Pelletizing 2024 49(4) : 70 - 76.
- [9] 智谦 , 张福明 , 韩志国 , 等 . 带式焙烧机均匀布料研究与应用[J]. 烧结球团 2024 49(4) : 57 - 62.  
ZHI Qian , ZHANG Fuming , HAN Zhiguo , et al. Research and application on uniform distribution of straight grate [J]. Sintering and Pelletizing 2024 49(4) : 57 - 62.
- [10] 刘胜歌 , 张俊杰 , 张巧玉 , 等 . 高比例赤褐铁矿碱性球团实践应用与研究[C]//中国金属学会 . 第十四届中国钢铁年会论文集 . 重庆: 中国金属学会 , 2023: 56 - 60.  
LIU Shengge , ZHANG Junjie , ZHANG Qiaoyu , et al. Practical application and research of high proportion hematite alkaline pellets [C]//Chinese Society for Metals Proceedings of the 14th China Iron and Steel Annual Conference. Chongqing: Chinese Society for metals , 2023: 56 - 60.
- [11] 杨聪聪 , 曲士娟 , 梁海源 , 等 . 某进口赤 - 褐铁矿磨矿特性及其氧化球团制备行为[J]. 钢铁研究学报 , 2024 36(9) : 1152 - 1162.  
YANG Congcong , QU Shijuan , LIANG Haiyuan , et al. Grinding characteristics of an imported hematite-limonite and its oxidized pellet preparation behavior [J]. Journal of Iron and Steel Research 2024 36(9) : 1152 - 1162.
- [12] 温宝良 , 范子豪 , 李家新 , 等 . 高硅超细铁精矿熔剂性球团矿固结行为及还原特性[J/OL]. 钢铁 , 2024 - 01 - 16(2024 - 01 - 12) . <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GANT20240111001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
WEN Baoliang , FAN Zihao , LI Jiixin , et al. Consolidation behavior and reduction characteristics of flux pellets of high silicon ultrafine iron concentrate [J/OL]. Iron & Steel , 2024 - 01 - 16(2024 - 01 - 12) . <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GANT20240111001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [13] 韦东 , 胡钺 , 胡梦杰 , 等 . 不同种类膨润土对球团性能影响的试验与应用[J]. 烧结球团 2023 48(2) : 52 - 60.  
WEI Dong , HU Yue , HU Mengjie , et al. Experiment and application of effect of different types of bentonite on performance of pellets [J]. Sintering and Pelletizing , 2023 48(2) : 52 - 60.