

基于白云鄂博铁精矿制备球团矿的优化配矿研究

何晓义¹, 郑占斌¹, 付国伟², 刘曙光³, 付利俊¹, 田守阳³

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢炼铁厂, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 针对白云鄂博铁精矿 K、Na、F、S 等有害元素含量高, 导致生产的球团矿强度低、还原膨胀率高等问题, 开展了配矿结构对球团矿质量影响规律的研究。研究表明, 配加低硫低碱金属含量的高硅赤铁矿、高镁磁铁矿能够促进球团矿充分氧化, 提高球团矿抗压强度, 抑制球团矿还原膨胀。采用 52% 白云鄂博铁精矿 + 32% 高硅低硫磁铁矿 + 8% 高硅赤铁矿 + 8% 高硅高镁磁铁矿的优化配矿方案可显著提高球团矿抗压强度至 2 380 N, 还原膨胀率降至 13.2%, 为使用白云鄂博铁精矿制备高质量球团矿提供了理论支撑与技术路径。

关键词: 白云鄂博铁精矿; 球团矿; 优化配矿; 成球性能; 还原膨胀

中图分类号: TF046

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)05-0018-06

Research on Optimizing Ore Proportioning for Preparing Pellet Based on Iron Ore Concentrate of Bayan Obo

He Xiaoyi¹, Zheng Zhanbin¹, Fu Guowei², Liu Shuguang³, Fu Lijun¹, Tian Shouyang³

1. Manufacturing Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Rare Earth Steel Iron-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, the study on effect laws of ore proportioning structure on quality of pellet is carried out aiming at such problems as low strength and high reduction swelling rate of manufactured pellet caused by high contents of such harmful elements as K, Na, F and S in iron ore concentrate of Bayan Obo. The study results showed that the pellet could be promoted to be fully oxidized, compressive strength of pellet could be improved and reduction swelling of pellet could be restrained by adding high silicon hematite and high magnesium magnetite with low contents of sulfur and alkali metal. The compressive strength of pellet could be significantly increased to 2 380 N and reduction swelling rate could be reduced to 13.2% with the scheme of optimizing ore proportioning that 52% iron ore concentrate of Bayan Obo + 32% high silicon and low sulfur magnetite concentrate + 8% high silicon hematite concentrate + 8% high silicon high magnesium magnetite con-

concentrate, which could provide the theoretical support and technical path for preparing high quality pellet with iron ore concentrate of Bayan Obo.

Key words: iron ore concentrate of Bayan Obo; pellet; optimize ore proportioning; capacity of pelletization; reduction swelling

白云鄂博矿在全球矿产资源中占据重要地位,其特殊性主要体现在多金属共生,稀土资源丰富,成矿机理复杂,有害元素含量高。目前采用细磨、磁选、浮选多种选矿工艺联合将铁、稀土、萤石等有价元素分离富集,制备铁精矿、稀土精矿、萤石精矿。白云鄂博铁精矿具有铁品位高、 SiO_2 含量低、粒度细、含 K、Na、F、S 等有害元素、比表面积小等特点。上述特点导致其在制备球团矿时存在诸多问题,如成球性能差,膨润土单耗高,球团矿抗压强度低,还原膨胀率高^[1],质量指标与行业先进水平存在较大差距。因此对白云鄂博铁精矿制备球团矿优化配矿进行深入研究,对于提高球团矿质量、降低生产成本、实现资源的高效利用具有重要意义。本文通过系统的试验研究,探索白云鄂博铁精矿优化配矿的最佳方案,以实现提高球团矿质量的目标。

1 白云鄂博铁精矿的理化性质分析

白云鄂博铁精矿主要矿物为磁铁矿、赤铁矿,同时含有一定量的稀土矿物(氟碳铈矿、独居石)、萤石等矿物。使用白云鄂博铁精矿制备球团矿有以下特点:

(1)白云鄂博铁精矿碱金属和 F 含量较高,这些杂质在球团生产过程中的高温预热焙烧阶段易形

成低熔点化合物,球团矿易形成致密的外壳,从而影响氧向球团矿内部扩散,内部磁铁矿得不到充分氧化,产生“黑心球”,球团矿 FeO 含量偏高,抗压强度较低。

(2)白云鄂博铁精矿铁品位高,达到 64.8% ~ 67.0%,S 含量较高。一方面 S 氧化生成 SO_2 ,增加了球团矿孔隙,另一方面 S 和 O 的亲合力大于和 Fe 的亲合力,有阻碍磁铁矿氧化的作用。

(3)白云鄂博铁精矿 CaO、MgO 含量高, SiO_2 含量较低,导致制备的球团矿碱度高。随着球团矿碱度的提高, Ca^{2+} 在 FeO 晶格中固溶体增加,还原过程中 Fe^{2+} 的扩散通道增加,加之碱金属的还原催化作用,导致大量铁晶须形成,提高了球团矿的还原膨胀率^[2]。

(4)白云鄂博铁精矿粒度较细, -0.074 mm 粒级占比在 90% 左右,比表面积仅为 $950 \text{ cm}^2/\text{g}$,成球性差,为提高生球质量,需提高膨润土的配比,导致膨润土单耗高。

目前供球团使用的白云鄂博铁精矿有 3 种,分别是白云鄂博矿选区通过矿浆管道输送到厂区的铁精矿、包钢厂区选区生产的铁精矿、巴润选区生产的铁精矿。在此编号为精矿 1[#]、精矿 2[#]、精矿 3[#]。表 1 为白云鄂博铁精矿的化学成分。

表 1 白云鄂博铁精矿化学成分及烧损(质量分数)

矿种	TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	ZnO	K_2O	Na_2O	F	S	P	Ig
精矿 1 [#]	66.60	26.85	1.32	2.44	0.488	0.127	0.025	0.063	0.201	0.567	0.68	0.061	0.97
精矿 2 [#]	66.60	29.61	1.41	1.63	0.889	0.138	0.032	0.105	0.084	0.323	0.930	0.054	1.52
精矿 3 [#]	64.80	28.10	2.12	1.42	1.560	0.105	0.028	0.103	0.046	0.132	1.035	0.056	1.10

2 试验原料及试验方案

2.1 试验原料

以 52% 白云鄂博铁精矿 + 48% 区内铁精矿生产球团矿,球团矿抗压强度可达到 2 200 N,还原膨胀率低于 18%,这一质量指标远低于行业先进水平。为提高球团矿质量,开展了优化造球参数、热工制度等技术攻关,均未取得明显效果。为此开展了

配加与白云鄂博铁精矿具有互补特性的铁精矿配矿研究,解决球团矿氧化不充分与还原膨胀率高的问题。选取 4 种不同特性铁精矿替代区内铁精矿进行优化配矿试验,探索配加高硅、低硫、赤铁矿、含镁铁精矿对球团矿质量的影响规律。

试验所用原料化学成分及 -0.074 mm 占比如表 2 所示。精矿 QN 为资源量较多的区内铁精矿,精矿 NF 为低硅低硫磁铁矿,精矿 ZL 为高硅低硫

磁铁精矿,精矿 BX 为高硅低硫赤铁精矿,精矿 GM 为高硅高镁低硫磁铁精矿。

表 2 试验铁精矿化学成分及 -0.074 mm 占比(质量分数)

矿种	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	F	S	Ig	-0.074 mm 占比
精矿 QN	66.95	28.70	0.658	4.04	0.506	0.759	0.071	0.047	0.006	0.355	-1.26	78
精矿 NF	61.54	27.16	1.150	2.17	1.570	0.496	0.070	0.014		0.068	-1.32	80
精矿 ZL	64.80	27.30	0.181	8.21	0.264	0.427	0.054	0.071	0.02	0.076	-1.78	80
精矿 BX	60.74	<0.5	<0.10	10.28	0.043	0.984	0.01	0.02	<0.05	0.005 1	1.82	80
精矿 GM	52.50	20.66	1.110	10.46	11.34	1.09	0.069	0.017	0.545	0.147	-0.98	80

2.2 试验方案

置为基准,分别以 5%、10% 试验铁精矿替代区内铁精矿 QN,具体方案见表 3。
以 52% 白云鄂博铁精矿 + 48% 精矿 QN 铁料配

表 3 配矿试验各方案配料比(质量分数)

方案	精矿 1 [#]	精矿 2 [#]	区内精矿 QN	低硅低硫磁铁精矿 NF	高硅低硫磁铁精矿 ZL	高硅低硫赤铁精矿 BX	高硅高镁磁铁精矿 MG	膨润土(外配)
基准	32	20	48					2.5
1 [#]	32	20	43	5				2.5
2 [#]	32	20	38	10				2.5
3 [#]	32	20	43		5			2.5
4 [#]	32	20	38		10			2.5
5 [#]	32	20	43			5		2.5
6 [#]	32	20	38			10		2.5
7 [#]	32	20	43				5	2.5
8 [#]	32	20	38				10	2.5

3 试验及结果分析

按照试验方案在实验室圆盘造球机制备生球,检测生球落下强度、抗压强度、爆裂温度,如表 4 所示。

3.1 生球性能

表 4 各试验方案生球性能

试验方案	替代区内铁精矿	落下强度/次	生球抗压强度/N	爆裂温度/℃
基准		5.35	9.8	>550
1 [#]	5% 低硅低硫磁铁精矿 NF	5.20	12.8	>550
2 [#]	10% 低硅低硫磁铁精矿 NF	5.25	11.4	>550
3 [#]	5% 高硅低硫磁铁精矿 ZL	5.25	10.1	>550
4 [#]	10% 高硅低硫磁铁精矿 ZL	5.20	11.8	>550
5 [#]	5% 高硅低硫赤铁精矿 BX	5.40	13.6	>550
6 [#]	10% 高硅低硫赤铁精矿 BX	5.45	13.1	>550
7 [#]	5% 高硅高镁磁铁精矿 GM	7.70	10.7	>550
8 [#]	10% 高硅高镁磁铁精矿 GM	8.10	11.6	>550

由表4可知,在相同膨润土配比条件下,配加5%~10%试验铁精矿替代区内铁精矿,1[#]—6[#]试验方案生球落下强度稳定;7[#]、8[#]试验方案生球落下强度明显提高。1[#]—8[#]试验方案生球抗压强度较基准方案均有所提高;生球爆裂温度均高于550℃。各试验方案生球性能均能够满足生球质量要求。试验结果表明在膨润土配比固定的条件下配加试验铁精矿GM能够显著提高生球落下强度。

将精矿GM试样制成粉末油浸薄片及光片进行XRD和显微镜综合鉴定,该精矿主要由磁铁矿和少量脉石矿物构成,磁铁矿晶粒粗大,基本能连成片,构成宏观的块状构造,未发现黄铁矿、赤铁矿等其他

铁矿物,脉石矿物中硅、镁主要以斜绿泥石 $\{Mg_5Al[(Si,Al)_4O_{10}](OH)_8\}$ 赋存。斜绿泥石在造球过程中具有较好的粘结性,在保证生球落下强度一定的条件下可降低膨润土单耗。

3.2 焙烧试验及分析

将制备好的生球放入马弗炉中进行焙烧试验。焙烧制度为干燥温度控制在180℃,预热温度控制在800℃,焙烧时间为10min,焙烧炉焙烧温度控制在1200℃、1220℃及1260℃。将焙烧后球团矿冷却至室温,测定球团矿的抗压强度,选取同一方案中抗压强度最高的试样检测还原膨胀率,检测结果如表5所示。

表5 各试验方案成品球性能

试验方案	替代区内精矿	不同焙烧温度下抗压强度/N			还原膨胀率/%
		1 200 ℃	1 220 ℃	1 260 ℃	
基准		2 250	2 190	1 640	17.6
1 [#]	5% 低硅低硫磁铁矿 NF	2 254	2 206	1 780	15.1
2 [#]	10% 低硅低硫磁铁矿 NF	2 264	2 236	1 980	16.7
3 [#]	5% 高硅低硫磁铁矿 ZL	2 340	2 317	2 287	15.5
4 [#]	10% 高硅低硫磁铁矿 ZL	2 388	2 366	2 310	13.1
5 [#]	5% 高硅低硫赤铁矿 BX	2 502	2 588	2 498	14.4
6 [#]	10% 高硅低硫赤铁矿 BX	2 657	2 660	2 688	13.5
7 [#]	5% 高硅高镁磁铁矿 GM	2 246	2 345	2 315	13.8
8 [#]	10% 高硅高镁磁铁矿 GM	2 210	2 336	2 423	12.0

由表5试验数据可见,基准方案制备的球团矿,抗压强度低,还原膨胀率较高。随着焙烧温度提高,球团矿抗压强度呈降低趋势。只有在较低的焙烧温度下才能保证球团矿抗压强度达到质量要求。

使用5%~10%低硅低硫磁铁矿NF替代区内铁精矿,球团矿抗压强度较基准方案略有提高,随着焙烧温度提高球团矿抗压强度变化趋势与基准方案相同;还原膨胀率略有降低。配加低硅低硫磁铁矿对球团矿质量改善效果不明显。

使用5%~10%高硅低硫磁铁矿ZL替代区内铁精矿,在焙烧温度为1200℃、1220℃条件下球团矿抗压强度高于2300N,还原膨胀率降低至13.1%~15.5%之间。配加高硅低硫磁铁矿能够改善球团矿质量。

使用5%~10%高硅低硫赤铁矿BX替代区内铁精矿,不同焙烧温度条件下球团矿抗压强度均

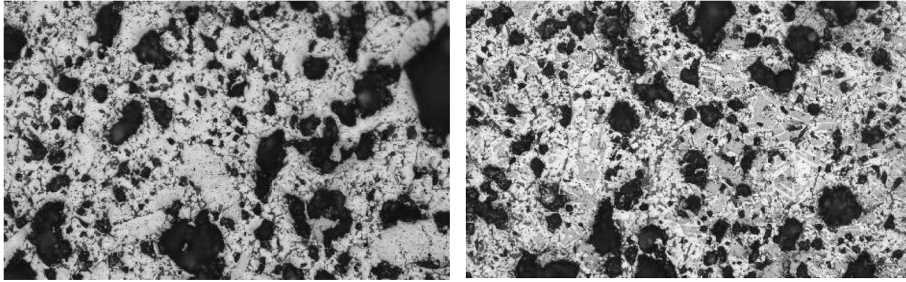
显著提高,在2498~2688N之间,还原膨胀率降低至13.5%~14.4%之间;配加10%高硅低硫赤铁矿BX,随着焙烧温度的提高,球团矿抗压强度呈升高趋势。

使用5%~10%高硅高镁低硫磁铁矿GM替代区内铁精矿,球团矿抗压强度在焙烧温度为1220℃、1260℃时较基准方案提高。球团矿还原膨胀率显著降低,在12.0%~13.8%之间。主要原因是配加高硅高镁低硫磁铁矿提高了球团矿SiO₂含量,降低了球团矿碱度,提高了球团矿MgO含量。适量的MgO含量可以促进球团矿中高熔点的镁铁矿和铁酸镁等矿物生成,这些矿物有助于提高球团矿的强度和抑制球团矿的还原膨胀^[3]。

综上分析,最有利于提高球团矿抗压强度的矿种为高硅赤铁矿,最有利于改善球团矿还原膨胀率的矿种为高硅高镁磁铁矿。

对基准及配加 5% ~ 10% 高硅赤铁精矿试验方案制备的球团矿进行矿物组成分析,其岩相照片如图 1、图 2、图 3 所示。由图 1、图 2、图 3 可见,在 1 260 °C 焙烧条件下,基准方案制备的球团矿液相发育,边缘有少量未氧化的磁铁矿,中心有大量未氧

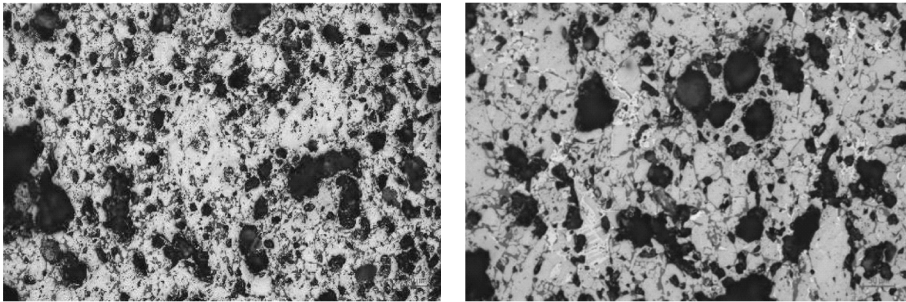
化磁铁矿;配加 5% 高硅赤铁精矿,球团矿边缘氧化充分,中心有少量未氧化的磁铁矿,液相有一定程度发育;配加 10% 高硅赤铁精矿,球团矿边缘及中心均充分氧化。



(a) 边缘

(b) 中心

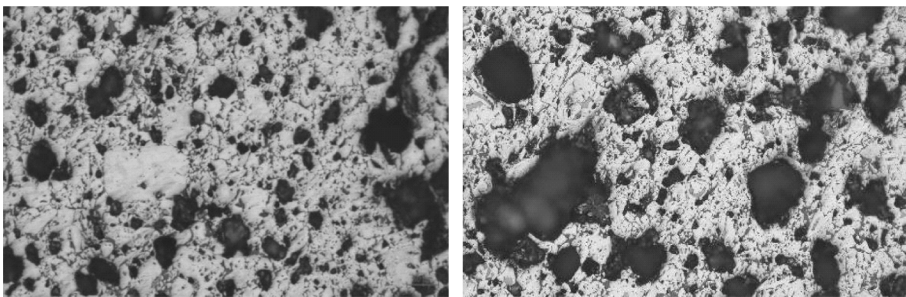
图 1 基准方案球团矿矿物组成及结构



(a) 边缘

(b) 中心

图 2 配加 5% 高硅赤铁精矿球团矿矿物组成及结构



(a) 边缘

(b) 中心

图 3 配加 10% 高硅赤铁精矿球团矿矿物组成及结构

3.3 优化配矿方案

根据试验结果,综合考虑资源量及配矿成本,优化配矿方案为白云鄂博铁精矿配比为 52%,高硅低硫磁铁矿配比为 32%,高硅赤铁精矿配比为 8%,

高硅高镁磁铁矿精矿为 8%,外配膨润土 2.3%,焙烧温度控制在 1 260 °C。对优化后的试验方案在实验室进行造球和焙烧试验,检测生球落下强度为 6 次,生球抗压强度为 12.0 N,球团矿抗压强度为

2 380 N,还原膨胀率为 13.2%。

4 工业试验

根据实验室研究结果,在某钢铁公司 624 m² 带式机生产线,以 52% 白云鄂博铁精矿 + 48% 区内

精矿为基准,分别进行配加 10% 磨选巴西混合粉矿(高硅赤铁矿)制备的铁精矿 BX 替代区内铁精矿和配加 5% 磨选高硅高镁磁铁精矿 GM 替代区内铁精矿工业试验。试验结果如表 6 所示。

表 6 工业试验成品球性能

试验阶段	化学成分(质量分数)/%			碱度	球团矿性能		
	TFe	FeO	SiO ₂		转鼓强度/%	抗压强度/N	还原膨胀率/%
基准	63.88	1.61	4.49	0.29	95.45	2 211	17.5
配加 10% 精矿 BX	63.63	1.07	4.59	0.28	96.44	2 383	16.5
配加 5% 精矿 GM	63.73	1.03	5.10	0.18	95.46	2 307	15.7

配加磨选巴西混合粉矿(高硅赤铁矿)制备的铁精矿进行工业试验,膨润土配比保持不变,焙烧温度控制在 1 260 ℃,与基准方案比,成品球团矿 FeO 含量下降 0.54 个百分点,还原膨胀率降低 1.0 个百分点,抗压强度提高 172 N,转鼓强度提高 0.99 个百分点。配加磨选高硅高镁磁铁精矿进行工业试验,膨润土配比降低 0.3 个百分点,焙烧温度控制在 1 260 ℃,与基准方案比,成品球团矿抗压强度提高 96 N,转鼓强度提高 0.01 个百分点,还原膨胀率降低 1.8 个百分点。工业试验结果与实验室优化配矿研究结果基本一致。因高硅高镁磁铁精矿市场价格低于区内铁精矿,配加高硅高镁磁铁精矿可提高球团矿质量,同时降低配矿成本。

5 结论

(1) 实验室研究结果表明,配加 5% ~ 10% 高硅低硫赤铁精矿 BX,球团矿抗压强度显著提高,达到 2 498 ~ 2 688 N,促进了球团充分氧化,减少了未氧化磁铁矿导致“黑心球”的形成。配加 5% ~ 10% 高硅高镁磁铁精矿 GM,有效抑制了球团矿的还原膨胀,还原膨胀率降至 12.0% ~ 13.8%,MgO 提高促

进了高熔点矿物镁铁矿、铁酸镁生成,降低了球团矿碱度,阻断了铁晶须生长通道。

(2) 综合实验室与工业试验结果,确定了最优生产方案为 52% 白云鄂博铁精矿 + 32% 高硅低硫磁铁精矿 + 8% 高硅赤铁精矿 + 8% 高硅高镁磁铁精矿,外配膨润土 2.3%,焙烧温度为 1 260 ℃。

(3) 通过系统性优化配矿,突破了使用白云鄂博铁精矿制备球团矿的质量瓶颈,为白云鄂博铁精矿的高效利用提供了可工业化推广的技术路径。今后可进一步探索多矿种协同配矿的精细化调控机制。

参 考 文 献

- [1] 傅菊英,朱德庆. 铁矿氧化球团基本原理、工艺及设备[M]. 长沙:中南大学出版社,2005.
- [2] 柴轶凡,樊英杰,高兴,等. 碱度对白云鄂博矿球团还原膨胀性能的影响[J]. 钢铁,2023,58(1):13-21.
- [3] 杨佳龙,张海军,姜涛,等. MgO、F、碱金属对球团矿相组成的影响[J]. 钢铁,2022,57(4):34-40.