

改善预热球团矿抗压强度的工艺优化^①

张国成^{1,2}, 罗果萍², 宋巍²

(1.包头师范学院 化学学院, 内蒙古 包头 014030; 2.内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为了改善预热球团矿的抗压强度, 结合生产实践经验, 模拟链篦机-回转窑工艺制度, 采用正交实验法分析了影响预热球团矿抗压强度的因素及工艺改进措施。结果表明, OA矿和OB矿粒度较细, -0.074 mm 粒级含量大于85%, 能满足造球粒度基本要求; 90%OA矿搭配10%OB矿时, 经过干燥、预热工艺段, 球团矿FeO含量可以从26%降低到4%以下, 氧化度大于85%; 提高预热球团矿抗压强度的适宜链篦机热工参数为: 鼓风干燥温度200℃、抽风干燥温度360℃、预热I段温度720℃、预热II段温度990℃, 此条件下预热球团矿抗压强度可达1056 N/球; 验证实验符合预期结果。

关键词: 配矿; 球团; 预热球团; 氧化度; 进口铁精矿; 抗压强度; 氧化效果; 工艺优化; 微观结构

中图分类号: TF046.4

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.020

文章编号: 0253-6099(2024)03-0091-06

Process Optimization for Improving Compressive Strength of Preheated Pellets

ZHANG Guocheng^{1,2}, LUO Guoping², SONG Wei²

(1. Faculty of Chemistry, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 2. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the experience from production practices, an orthogonal experiment was performed by simulating a grate-rotary kiln process to investigate factors affecting compressive strength of preheated pellets and also find measures to improve the process. It is found that both OA iron ore and OB iron ore are fine-grained, with -0.074 mm grain content greater than 85%, which meets the basic requirements for particle size in pelletizing process. With 90% OA iron ore blended with 10% OB iron ore, the obtained pellet after drying and preheating process can have FeO content reduced from 26% to less than 4%, with the oxidation degree greater than 85%. With the following optimal thermal parameters of chain grate, including a drying temperature of 200 °C for air blowing and a drying temperature of 360 °C for ventilation, 720 °C for I-stage preheating and 990 °C for II-stage preheating, the obtained preheated pellet can have a compressive strength of 1 056 N/pellet. It is verified that the experimental result is in accordance with the anticipation.

Key words: ore blending; pelletizing process; preheated pellets; oxidation degree; imported iron concentrate; compressive strength; oxidation effect; process optimization; microstructure

在双碳战略的大背景下, 钢铁行业必须低碳、绿色发展^[1-2], 球团矿在高炉炉料结构中的作用凸显, 配加比例也日渐提高, 在现代高炉冶炼中, 球团矿已经成为一种不可缺少的优质炉料^[3-4]。我国国内铁精矿产量不能满足球团矿的正常生产需求, 国内钢铁企业纷纷将眼光投向进口铁精矿, 尤其是沿海地区钢铁厂, 由于

具有得天独厚的运输优势, 利用进口铁精矿生产球团矿是实现企业降本增效的有效途径。

进口铁精矿一般铁品位高、有害杂质低, 有利于球团矿质量和性能改善。针对进口铁精矿在球团工艺的合理利用, 国内外学者进行了大量研究^[5-10]。已有研究表明, 不同种类的进口铁精矿, 基础理化

① 收稿日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51364030); 内蒙古自治区高等学校科研项目(NJZY23002); 包头师范学院高层次人才引进科研启动基金项目(BTTCRCQD2023-009); 内蒙古自治区自然科学基金(2024QN05033)

作者简介: 张国成(1986—), 男, 内蒙古包头人, 博士, 讲师, 主要从事烧结球团技术研究工作。E-mail: 644942242@qq.com

通信作者: 罗果萍(1964—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 主要从事钢铁冶金新理论新工艺研究。E-mail: luoguooping3@126.com

性能存在差异,导致其成球性能和预热焙烧性能表现出不同特性^[11-13],因此,与之相匹配的热工制度也不同。本文以某进口铁精矿为主要原料,模拟链篦机-回转窑工艺制度,探索改善预热球氧化效果的工艺措施,从而提高预热球团矿抗压强度,研究成果可为进口铁精矿在链篦机-回转窑工艺的合理利用提供理论依据。

1 试验原料与研究方法

1.1 原料基础理化性能

以S钢150万吨链篦机-回转窑所用铁精矿为主要试验原料,含铁原料有2种,分别为OA矿(来自澳大利亚)和OB矿(来自智利)。两种铁精矿主要化学成分见表1。膨润土化学成分见表2。

表2 膨润土理化性能与质量指标

化学成分(质量分数)/%						质量指标			
MgO	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	烧失	胶质价/(mL·g ⁻¹)	吸蓝量/[(g·(100g) ⁻¹]	膨胀容/(mL·g ⁻¹)	吸水率/%
2.54	5.44	0.65	52.36	12.92	11.82	5	26	6	158

OA矿和OB矿-0.074 mm 粒级含量均大于85%,能满足球团造球原料粒度基本要求。一般而言,对于同一种铁精矿,其粒度越细,比表面积越大;但对于不同铁精矿,并非粒度越细比表面积就越大,例如,OA矿比表面积为1268 cm²/g,OB矿比表面积仅900 cm²/g;OA矿比表面积大,具有较大的表面自由能,提高OA矿配比有利于改善制粒成球性能。

由表2可知,膨润土质量指标可基本满足造球性能要求。

1.2 实验步骤

1) 铁精矿预处理。造球前将实验用铁精矿在烘干箱内80℃条件下干燥,脱除水分,待烘干后用0.50 mm筛子筛除杂物颗粒;根据研究方案,将铁精矿和膨润土按照设计方案混匀。

2) 造球。在直径1.0 m、倾角45°、转速35 r/min的造球盘中造球,控制母球形成时间3 min,生球长大时间8 min,生球压实时间10 min,并以实际生产为参考,在造球过程中加入水分,加水过程依据“滴水成球、雾水长大、无水压实”的原则,水分加入量控制为7.0%~8.5%。

3) 质量检测。筛取10~12 mm合格粒度的生球进行性能(抗压强度、落下强度、爆裂温度)检测。

4) 模拟链篦机-回转窑实际生产工艺参数进行球团矿的干燥、预热、焙烧、冷却过程,并检测成品球团矿的质量指标。

表1 铁精矿化学成分(质量分数)

原料名称	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	S	P
OA	63.64	28.54	7.15	0.23	0.18	0.010	0.46	0.004	0.001
OB	66.18	28.06	2.94	0.50	0.94	0.244	0.85	0.024	0.005

由表1可知:①OB矿TFe品位较高,为66.18%,配加OB矿有利于提高球团矿TFe品位。②两种铁精矿FeO品位均大于20%,TFe/FeO比小于2.7,为原生磁铁矿。③SiO₂是高炉冶炼的有害成分,SiO₂含量高会增加球团矿渣量、降低TFe品位,一般国内酸性球团矿SiO₂含量应不超过6%,以实现高炉低渣量、低燃料比的冶炼效果^[14-15]。OB矿SiO₂含量较低,小于3%;而OA矿SiO₂含量大于7%,限制了其在球团工艺的大比例配加。

1.3 研究方案及控制条件

在实际生产中,链篦机预热球团矿“黑芯”结构现象出现较多,严重影响和制约着预热球团矿及成品球团矿抗压强度的提高^[15-17]。为了提高预热球团矿氧化度,减少预热球团矿“黑芯”夹层现象,按照90%OA+10%OB配置试验原料,探究改善预热球团矿氧化效果、提高预热球团矿抗压强度的工艺优化措施。根据链篦机热工参数实际可控范围,设计四因素三水平正交实验,实验方案见表3。

表3 链篦机热工参数四因素三水平正交实验方案

水平	因素			
	鼓风干燥 温度/℃	抽风干燥 温度/℃	预热I段 温度/℃	预热II段 温度/℃
1	150	300	660	910
2	200	330	690	950
3	250	360	720	990

为了模拟链篦机-回转窑实际工艺制度,根据链篦机长度及生产过程中的机速控制要求,设定鼓风干燥时间为4 min,抽风干燥时间为5 min,预热I段时间为5 min,预热II段时间为8 min;回转窑焙烧段温度为1270℃,焙烧时间为21 min。

2 试验结果及讨论

2.1 不同工艺制度下球团矿抗压强度

根据试验方案,调整链篦机干燥段、预热段温度,

以预热球团矿抗压强度为考核指标,开展不同链篦机热工制度的正交实验研究,结果见表4,方差分析结果见表5。

由表4可知,抽风干燥段球团矿抗压强度为40~50 N/球,氧化程度较低;经预热后,抗压强度显著提高

到827~1 138 N/球,焙烧后抗压强度可达2 600 N/球以上。保持较高的预热Ⅱ段温度,有利于提高预热球团矿抗压强度,当预热Ⅱ段温度提高到990 ℃时,不仅可以促进球团中磁铁矿颗粒氧化形成赤铁矿,而且有利于赤铁矿微晶的长大及连接。

表4 正交实验结果

试验编号	工艺参数/℃				球团矿抗压强度/(N·球 ⁻¹)		
	因素A (鼓风干燥温度)	因素B (抽风干燥温度)	因素C (预热Ⅰ段温度)	因素D (预热Ⅱ段温度)	抽风干燥段 球团矿	预热Ⅱ段 球团矿	焙烧段 球团矿
Y-1 [#]	150	300	660	910	46	827	2 948
Y-2 [#]	150	330	690	950	46	977	3 540
Y-3 [#]	150	360	720	990	50	1 109	3 317
Y-4 [#]	200	300	690	990	47	1 025	3 801
Y-5 [#]	200	330	720	910	41	1 050	2 822
Y-6 [#]	200	360	660	950	43	1 138	3 590
Y-7 [#]	250	300	720	950	44	939	3 035
Y-8 [#]	250	330	660	990	46	956	3 114
Y-9 [#]	250	360	690	910	45	946	2 639
因素水平 和	K ₁	2 913	2 791	2 921	2 823		
	K ₂	3 213	2 983	2 948	3 054		
	K ₃	2 841	3 193	3 098	3 090		
因素水平 均值	k ₁	971	930	974	941		
	k ₂	1 071	994	983	1 018		
	k ₃	947	1 064	1 033	1 030		
极差 R _j	124	134	59	89			

表5 正交实验方差分析结果

方差来源	自由度	偏差平方和	调整后 偏差平方和	均方	F	P
因素A	2	40 958	35 164	17 582	2.29	0.424
因素B	2	35 877	39 570	19 785	2.57	0.403
因素C	2	3 347	2 697	1 349	0.18	0.860
因素D	2	10 896	10 896	5 448	0.71	0.643
误差	1	7 688	7 688	7 688		
合计	9	98 766				

由极差分析结果可知, R_B>R_A>R_D>R_C,可知干燥段温度对预热球团矿抗压强度影响较大,预热段温度影响次之。这是由于采用较高的抽风干燥温度(360 ℃),可以使生球水分快速蒸发,避免经过温度较高的预热Ⅰ段时,由于生球内外温差高而使球团矿内部产生裂纹,从而影响预热球团矿抗压强度。可见,抽风干燥过程尤为重要,干燥段水分的快速脱除是预热段磁铁矿氧化和赤铁矿微晶固结的前提条件。

由表4可以确定实验因素的最优水平和最优水平组合:鼓风干燥温度200 ℃、抽风干燥温度360 ℃、预热Ⅰ段温度720 ℃、预热Ⅱ段温度990 ℃。

由表5可见,4个因素对预热球团矿抗压强度的

影响在95%的置信区间内均未表现出显著性,但可以通过比较P值的相对大小来判断各因素对指标影响的相对顺序为:因素B>因素A>因素D>因素C。这与极差分析结果一致。由此说明,抽风干燥温度影响最大,在实验条件下,确保较好的生球干燥效果是提高预热球团矿抗压强度的重要基础。

2.2 球团矿氧化度与抗压强度的关系

根据极差分析以及方差分析结果,可得4个因素的最优水平组合为A₂B₃C₃D₃,根据该优化热工制度开展了验证实验,验证实验所得试样(Y-验证试样)的性能如表6所示,球团矿FeO累计氧化度与抗压强度的关系如图1所示。

表6 验证实验结果

球团矿 处理工序	FeO 含量/%	FeO分步 氧化度/%	FeO累计 氧化度/%	抗压强度/ (N·球 ⁻¹)
鼓风干燥段	28.46	/	/	27
抽风干燥段	26.23	7.84	7.84	49
预热Ⅰ段	18.55	29.28	34.82	383
预热Ⅱ段	2.31	87.55	91.88	1 056
焙烧段	<0.50	78.35	98.24	3 514

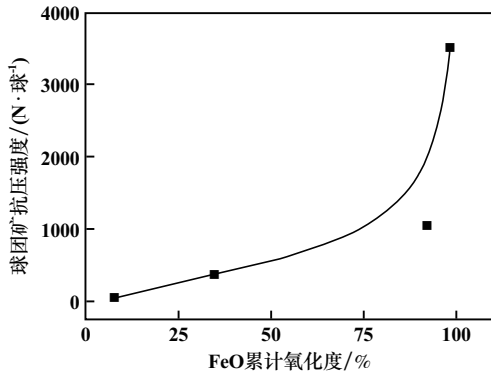


图1 球团矿 FeO 累计氧化度与抗压强度的关系图

FeO 分步氧化度 x_1 计算公式为:

$$x_1 = \left(1 - \frac{\text{下一步工艺段球团矿 } w(\text{FeO})}{\text{上一步工艺段球团矿 } w(\text{FeO})} \right) \times 100\% \quad (1)$$

FeO 累计氧化度 x_2 计算公式为:

$$x_2 = \left(1 - \frac{\text{下一步工艺段球团矿 } w(\text{FeO})}{\text{鼓风干燥工艺段球团矿 } w(\text{FeO})} \right) \times 100\% \quad (2)$$

由表6结果可得, Y-验证试样不仅预热Ⅱ段球团矿抗压强度较高,而且抽风干燥段和焙烧段球团矿的抗压强度也较为理想。这是由于随着工艺段的推进,球团矿氧化越来越充分,FeO含量逐步降低,抗压强度逐步提高。干燥段(包括鼓风干燥段和抽风干燥段)对球团矿氧化程度影响很小,主要作用是脱除生球中的水分。预热段对球团矿氧化程度影响较大,经过预热Ⅰ段后,球团矿FeO累计氧化度达到34.82%,FeO含量降至18.55%;经过预热Ⅱ段后,球团矿累计氧化度达到91.88%,FeO含量降至2.31%,抗压强度达到1056 N/球;经过焙烧段后,球团矿累计氧化度达到98.24%,FeO含量小于0.5%,赤铁矿微晶连接完成。由此说明,磁铁矿球团矿氧化过程由球团表面向内部推进,采用优化后的链篦机工艺参数可促进球团矿氧化推进过程,减少“黑芯”面积,提高球团矿氧化度,有利于球团矿Fe₂O₃微晶键形成,从而改善预热球团矿抗压强度。可见,球团矿中磁铁矿的氧化主要是在预热Ⅱ段完成,而赤铁矿的再结晶和晶桥固结主要是在焙烧段完成。由球团矿焙烧理论可知,预热段是发生Fe₃O₄氧化结晶的主要工艺段,比较预热Ⅰ段和预热Ⅱ段温度的影响可知,预热Ⅱ段对提高预热球团矿抗压强度的作用较为显著^[18-20]。

以FeO累计氧化度 x_2 为自变量,球团矿抗压强度Y为因变量,通过多项式拟合建立二者的关系,得到: $Y = 0.516 3x_2^2 - 28.395x_2 + 403.08$,由图1可知,FeO累计氧化度越高(“黑芯”结构越小),越有利于球团矿抗压强度的提高。

球团矿的“黑芯”结构对抗压强度影响较大,“黑芯”结构越大,球团矿内部氧化程度越低,抗压强度也越低。而影响“黑芯”结构的重要因素是抽风干燥段温度,直接因素是预热Ⅱ段温度,干燥是否充分关系“黑芯”结构的大小,也是提高预热球团矿抗压强度的重要基础,控制较高的抽风干燥温度和预热Ⅱ段温度,是保证球团矿消除“黑芯”结构、促进球团矿氧化进程和提高抗压强度的前提条件。球团矿中磁铁矿在干燥段便开始氧化,但氧化程度较低,氧化从颗粒的表层开始,由Fe₃O₄转变为Fe₂O₃,生成Fe₂O₃微晶,在相邻的颗粒接触处,新生的Fe₂O₃微晶具有高度迁移能力,促使它们结合在一起形成微晶键,即“晶桥”。经过干燥段,新生的微晶键已具有一定的强度,使球团矿形成具有一定硬度的外壳,继续推进到预热段,由于温度升高,氧化逐步由表及里推进,表层Fe₂O₃晶桥再结晶程度持续提高,使得球团矿晶桥强度升高。随着工艺段的推进,氧化继续向中心扩展,直到全部氧化为赤铁矿,经过高温焙烧后,赤铁矿微晶长大并重新结晶,使颗粒结合形成牢固的整体,抗压强度显著提高。

2.3 预热球团矿微观矿相结构

采用矿相显微镜观察Y-1[#]~Y-9[#]、Y-验证试样预热球团矿矿相结构,结果见图2~5。每个样品选取4个视域进行分析,其中(a)、(b)为预热球团矿中心氧化不完全区域,(c)、(d)为预热球团矿边缘氧化较完全区域;H表示赤铁矿,S表示硅酸盐,P表示孔洞,M表示磁铁矿。

分析图2~5可知,不同热工制度下的预热球团矿矿相结构共同特点是边缘主要形成较致密的赤铁矿连晶结构,而中心存在较松散的磁铁矿“黑芯”结构。Y-1[#]、Y-7[#]试样中有较多分散的脉石颗粒存在,阻碍了中心磁铁矿的连晶和边缘赤铁矿的连晶发育,故预热球团矿强度不高;Y-2[#]、Y-8[#]试样的中心和边缘孔隙均较发育,Y-9[#]试样中心孔隙粗大,故预热球团矿抗压强度也不高。脉石、气孔含量与分布也是影响预热球团矿抗压强度的重要因素,脉石和气孔少、分布均匀,对于预热球团矿中心磁铁矿连晶和边缘赤铁矿连晶的发展具有重要意义。优化条件下制得的Y-验证试样,预热球团矿中心区域未氧化的磁铁矿含量明显减少,新生氧化后的Fe₂O₃连晶增多,预热球团矿抗压强度提高;成品球团矿矿相结构“黑芯”消失,焙烧后矿相结构成为一个致密整体,磁铁矿氧化程度高,Fe₂O₃晶粒连接成片,FeO含量降到0.5%以下,焙烧性能好,抗压强度高。

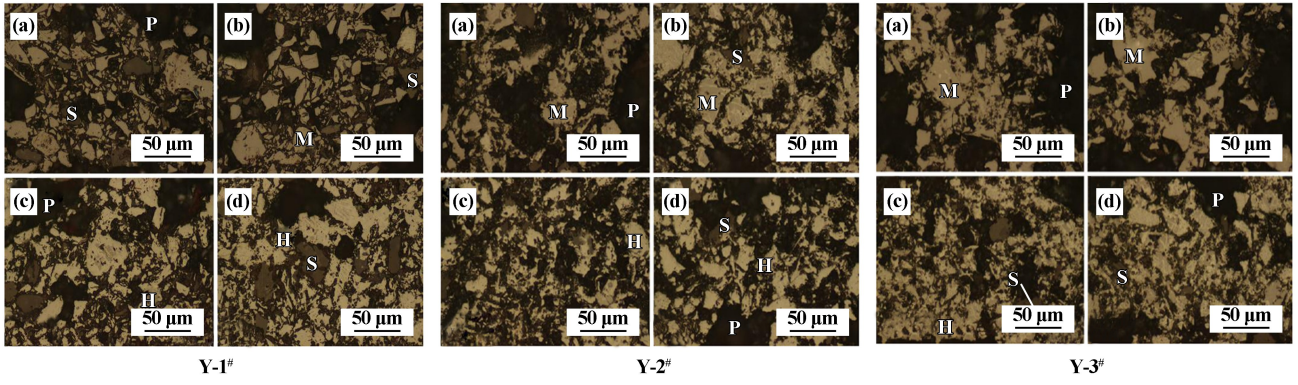


图2 Y-1[#]~Y-3[#]预热球团矿的显微矿相结构

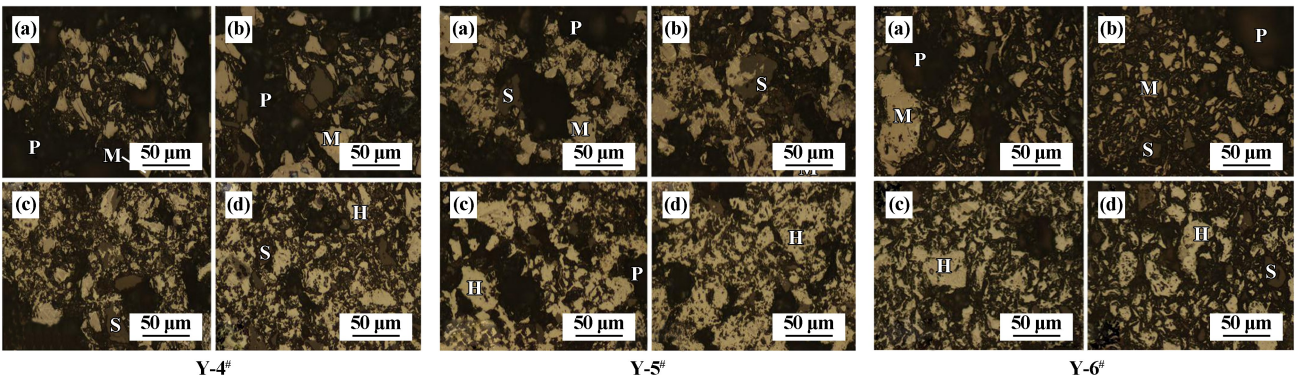


图3 Y-4[#]~Y-6[#]预热球团矿的显微矿相结构

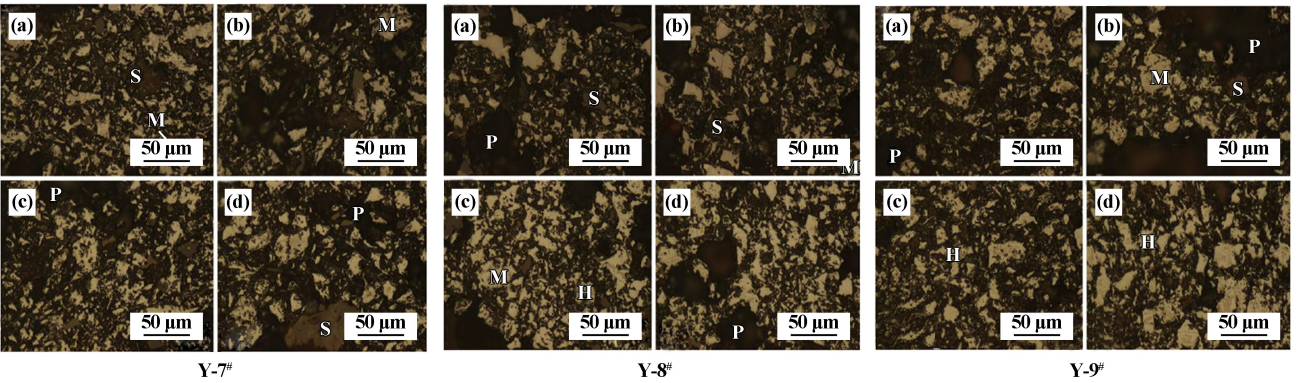


图4 Y-7[#]~Y-9[#]预热球团矿的显微矿相结构

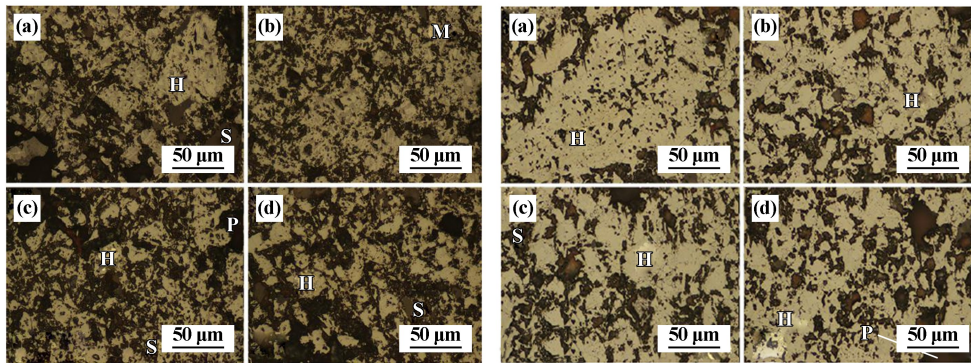


图5 Y-验证试样预热球团矿和成品球团矿显微矿相结构

3 结 论

1) OA 矿 SiO_2 含量较高,为 7.15%,在制作球团时不能大比例配加;OB 矿 TFe 品位(66.18%)较高, SiO_2 含量较低,用该矿制作球团,有利于提高 TFe 含量、降低 SiO_2 含量。OA 和 OB 矿粒度较细,-0.074 mm 粒级含量大于 85%,满足球团成球性能基本要求。

2) 随着链篦机-回转窑干燥、预热工艺段的推进,球团矿 FeO 含量降低,抗压强度提高,经过预热 II 段后,球团矿 FeO 含量降至 2.31%,累计氧化度达到 91.88%,抗压强度达到 1 056 N/球,此时球团矿的抗压强度归因于磁铁矿的氧化结晶和少量赤铁矿连晶。

3) 球团矿氧化效果越好,“黑芯”结构越小,越有利于提高抗压强度。

4) 提高预热球团矿抗压强度的关键因素是预热 II 段温度(990 ℃),基础因素是抽风干燥温度(360 ℃)。验证试验结果表明,预热球团矿 FeO 含量为 2.31%,抗压强度可达 1 056 N/球,验证试验结果符合预期结果。

参考文献:

- [1] 许满兴,张玉蓝. 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):25-37.
- [2] 王新东,金龙. 高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究[J]. 钢铁, 2021,56(5):7-16.
- [3] 田野,吕庆,刘小杰,等. PMC 精矿粉细磨粒度对球团矿质量的影响[J]. 矿冶工程, 2017,37(1):85-88.
- [4] 贾彦忠,张雨肖,胡长松,等. 配加菱铁矿生产球团矿的基础性能研究[J]. 矿冶工程, 2012(1):73-76.
- [5] De Moraes, Ribeiro. Brazilian iron ore and production of pellets[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2019,40(1):16-21.
- [6] DENG W, ZHANG L, CANG D. Study on distribution of sulfur element in blast furnace (BF) process with different pellet proportions[J]. Meta-

- lurgija, 2021,60(3-4):185-190.
- [7] 张国成,罗果萍,邬虎林,等. 配加蒙古精矿对球团矿性能的影响[J]. 中国冶金, 2019,29(11):24-30.
- [8] 马丽,青格勒,田筠清,等. 球团配加细磨麦克粉的试验研究[J]. 烧结球团, 2019,44(2):39-49.
- [9] 范建军,张文平,刘慈光,等. 预热焙烧参数对超细粒度磁铁矿粉球团性能的影响[J]. 钢铁, 2013,48(12):21-24.
- [10] 朱德庆,严欣程,潘建,等. 某高品位磁铁精矿球团预热-煤基直接还原研究[J]. 金属矿山, 2019(3):79-83.
- [11] 胡志清,潘建,朱德庆,等. 铁矿精矿原料特及其对成球性能的影响[J]. 烧结球团, 2013,38(4):42-49.
- [12] 罗果萍,张国成,刘吉涛,等. 提高链篦机-回转窑氧化球团预热球抗压强度的工艺优化[J]. 钢铁研究学报, 2013,25(12):14-22.
- [13] 卢建光,刘小杰,吕庆. PMC 矿粒度及球团预热、焙烧工艺参数的选择[J]. 钢铁, 2020,55(10):22-28.
- [14] Kotta A B, Narsimhachary D, Karak S K, et al. Studies on the mechanical and physical properties of hematite iron ore pellets prepared under different conditions[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020,73:2561-2575.
- [15] LU Jian guang, LAN Chen chen, LYU Qing, et al. Effects of SiO_2 on the preparation and metallurgical properties of acid oxidized pellets[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021,28(4):629-634.
- [16] 范晓慧,田志远,甘敏,等. 细粒磁铁精矿球团孔隙结构的优化研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(1):71-75.
- [17] 任杰,罗果萍,朱建国,等. 含铁添加剂代替膨润土对球团矿性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):106-111.
- [18] 潘建,马雯卓,朱德庆,等. Al_2O_3 对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021,33(10):1095-1105.
- [19] 张辉,李志斌,刘沛江,等. 鞍钢带式机球团生产中优化配矿的研究与应用[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):103-106.
- [20] 刘真真,孙体昌,余文,等. 粘结剂对某高铁尾矿含碳球团强度的影响[J]. 矿冶工程, 2013,33(6):84-87.

引用本文: 张国成,罗果萍,宋巍. 改善预热球团矿抗压强度的工艺优化[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):91-96.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部
2024年6月