

# 预处理强化赤铁矿熔剂性球团制备性能的研究<sup>①</sup>

杨永斌, 张健, 钟强, 李骞, 姜涛

(中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:**为了解决赤铁矿球团制备性能较差的问题,研究了原料预处理改善 Minas 赤铁精矿熔剂性球团制备性能的效果。研究结果表明,Minas 赤铁矿颗粒表面光滑平整、粒度细且均匀、缺乏合理的粗细搭配且微细粒级含量少等特点是其造球性能偏弱的主要原因。原料预处理不仅强化了 Minas 赤铁精矿的造球性能,而且显著改善了球团焙烧性能:球磨 12 min 和高压辊磨 2 次可使生球落下强度从 3.9 次/0.5 m 分别提高到 6.0 次/0.5 m 和 6.4 次/0.5 m;高压辊磨预处理时,1 220 °C 下焙烧 12 min 球团强度可达到 2 500 N/球以上,而球磨和高压辊磨联合预处理时则达到了更高的 3 227 N/球。

**关键词:**球团;赤铁矿;预处理;造球性能;焙烧性能

中图分类号:TF046

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2019.04.020

文章编号:0253-6099(2019)04-0083-06

## Effect of Pretreatment on the Ballability of Hematite in Preparation of a Fluxed Pellet

YANG Yong-bin, ZHANG Jian, ZHONG Qiang, LI Qian, JIANG Tao

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** In view of the poor ballability of hematite in preparation of fluxed pellets, the Minas hematite concentrate was pretreated for improving its ballability. Researches show that Minas hematite has a smooth surface with uniform fine particle size distribution and with few ultrafine particles, indicating an unbalanced proportion of coarser and finer particles, which are the principal factors contributing to its poor ballability. It is found that the pretreatment can improve not only the ballability of Minas hematite concentrate, but also the roasting performance of prepared pellet. In the research, after the Minas hematite concentrate was pretreated by ball milling for 12 min or high pressure roller grinding for 2 times, the prepared green pellet had the drop number increased from 3.9 times/0.5 m to 6.0 times/0.5 m and 6.4 times/0.5 m respectively. After the pretreatment with high pressure roller grinding, the pellet roasted at 1 220 °C for 12 min had the compression strength of 2 500 N/pellet, and with the combined pretreatment of ball milling and high pressure roller grinding resulted in the compression strength of the pellets up to 3 227 N/pellet.

**Key words:** pellet; hematite; pretreatment; ballability; roasting performance

当今全球铁矿资源市场竞争激烈<sup>[1-2]</sup>,随着我国钢铁工业的快速发展,国内磁铁精矿资源供应严重不足,为此,从 2000 年起大量高品位进口赤铁矿被用于球团生产<sup>[3-5]</sup>。但是,赤铁矿生产球团时存在的造球性能差、焙烧温度高且范围狭窄等问题,限制了其在球团生产中的使用。为了增加进口赤铁矿的使用量,提高球团生产的产质量,普遍采用预处理的方法强化赤铁矿的球团制备性能<sup>[6-7]</sup>。

分别如表 1 和图 1 所示。由表 1 可知,该矿铁品位高(67.15%)、SiO<sub>2</sub> 含量低(2.01%),是较好的高铁低硅炼铁原料。其较高的 MgO 含量(0.740%)有利于抑制球团的还原膨胀<sup>[8-9]</sup>。由图 1 可知,该原料中的铁主要以 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 形式存在,硅主要以 SiO<sub>2</sub> 形式存在,属于

表 1 Minas 铁精矿的化学组成(质量分数)/%

TFe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>
67.15	—	96.00	2.01	0.43	0.30	0.740	0.14	0.073
K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Pb	Zn	As	P	S	LOI	
0.038	0.060	0.009 9	0.014 0	0.012	0.033	0.014	0.10	

## 1 实验

### 1.1 原料性质

本试验所用 Minas 铁精矿化学成分和 XRD 图谱

① 收稿日期:2019-02-19

作者简介:杨永斌(1969-),男,江西萍乡人,教授,博士,主要研究方向为铁矿石烧结球团与直接还原、资源的综合利用、难处理金银矿的高效分离及提取。

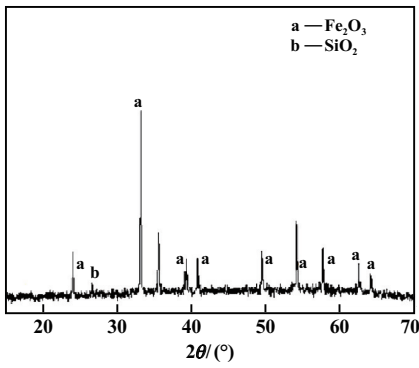


图1 Minas铁精矿的XRD图谱

典型的赤铁矿,且物相结构简单。该矿  $\text{SiO}_2$  含量低且赤铁矿有预热、焙烧温度高的特点,适用于生产熔剂性球团矿<sup>[9]</sup>,既可缓解赤铁矿球团焙烧温度高的问题,又可避免液相量过多的问题。

试验采用的膨润土和碱性添加剂石灰石的物理化学性质如表2、表3所示。2种物料粒度均控制在 $-0.074\text{ mm}$ 。

表2 膨润土的物理性能

2 h 吸水率 /%	胶质价(5 g) /%	膨胀容 / $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	吸蓝量 / $[\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}]$	蒙脱石含量 /%
314.7	100	69.6	47.8	108.1

表3 膨润土和石灰石的化学组成(质量分数)/%

原料种类	TFe	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$
膨润土	12.72	40.43	15.26	1.84	2.10	0.094
石灰石	0.10	0.66	0.05	51.72	3.19	—

原料种类	$\text{Na}_2\text{O}$	P	S	Mn	LOI
膨润土	2.02	0.042	0.040	0.18	15.11
石灰石	—	微量	0.04	—	43.76

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 原料物理化学性能检测

采用湿式筛分检测粒度组成、DBT-127型勃氏透气比表面积仪检测比表面积、滤压法检测最大分子水、容量法检测最大毛细水、容量瓶法检测真密度、ESEM法分析颗粒形貌。

### 1.2.2 原料预处理实验

球磨实验采用湿式球磨,用于Minas铁精矿进行单矿预处理实验。球磨机型号为XMQ $\Phi 350\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ ,每次磨矿量为4 kg,矿浆浓度为60%。磨矿后矿浆采用DL-5C多用真空过滤机进行过滤,过滤介质为500目(0.025 mm)尼龙布。过滤后湿饼采用恒温烘箱干燥至水分含量5.0%~6.0%,干燥温度100℃。

高压辊磨用于混合料进行预处理实验。高压辊磨

机规格为 $\Phi 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ ,压力为60 kN/m。因实验室高压辊磨机压力较小,因而采用多次重复辊磨模拟工业生产效果,以辊磨次数与粒度组成、比表面积的对对应关系对辊磨预处理效果进行表征。

### 1.2.3 球团实验

造球实验在圆盘造球机上进行,其主要技术参数为:直径1000 mm,转速25 r/min,边高150 mm,倾角47°。造好的生球经过人工筛分,将直径约为12 mm的生球作为合格生球。混合料中Minas赤铁精矿和智利磁铁精矿的配比为7:3,混合料水分为6.5%,碱度为0.65。每次试验混合料用量为4 kg,生球水分在8.8%左右,造球时间为12 min,在实验设定的膨润土用量条件下进行造球实验。生球的干燥以及落下强度、抗压强度和爆裂温度的检测参考文献[4]进行。

生球干燥后,依次进行球团的预热和焙烧实验。预热、焙烧实验,以及预热球、焙烧球的抗压强度检测参考文献[4]进行。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 Minas铁精矿的物理化学性质

Minas铁精矿的粒度组成见表4。由表4可知,Minas铁精矿的 $-0.074\text{ mm}$  粒级含量达到86.94%,比表面积达到1679  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,两项数据均表明该矿在粒度组成上可以满足铁精矿造球的要求<sup>[10]</sup>。

表4 Minas铁精矿物料性质

粒度组成/%					比表面积 / $(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
+0.15 mm	0.10~0.15 mm	0.10~0.074 mm	0.074~0.045 mm	-0.045 mm	
4.01	4.68	4.37	18.80	68.14	1679

图2是Minas铁精矿的ESEM电镜扫描结果。Minas铁精矿的颗粒形状主要呈条块状和粒状,少数呈片状。尽管整体细粒级含量多,但颗粒粒度较均匀,各颗粒大小接近,且微细粒级含量很少,在粒度组成上没有合理的粗细搭配;另一方面,颗粒表面光滑平整,

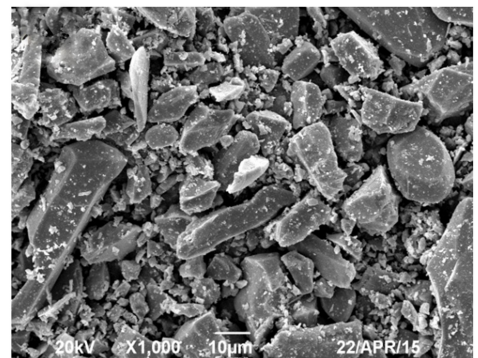


图2 Minas铁精矿ESEM图谱

这不利于水分和粘结剂与颗粒表面的相互作用。颗粒形貌的这些特性会严重影响该矿的造球性能<sup>[10]</sup>。

表5是 Minas 铁精矿的物理性质和成球性能。由表5可知,该矿的静态成球性指数只有0.35,属于中等偏弱。因此,尽管该矿-0.074 mm 粒级含量满足造球要求,但其成球性仍然不够理想,其原因除了颗粒表面活性低、亲水性弱以外,还与颗粒粒度均匀、表面光滑平整和微细粒级少的颗粒形貌特性关系密切。因此,为了改善该矿的成球性能,有必要在造球前进行原料预处理。

表5 Minas 铁精矿的物理性能与静态成球性能

堆密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	真密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率 /%	最大分子水 /%
1.89	4.89	61.35	4.1
最大毛细水 /%	毛细水迁移速度 /(mm·min <sup>-1</sup> )	成球性能 指数	评价
15.8	3.42	0.35	中等偏弱

### 2.2 预处理对粒度组成的影响

分别对 Minas 铁精矿进行球磨和对混合料进行高压辊磨处理,2种预处理方法对粒度组成和比表面积的影响分别如图3和图4所示。结果表明,2种预处理方法均可有效改变粒度特性,增加细粒级含量和比表面积。由图3可知,在20 min 范围内,随着磨矿时间延长,-0.074 mm、-0.045 mm 粒级含量持续增加,

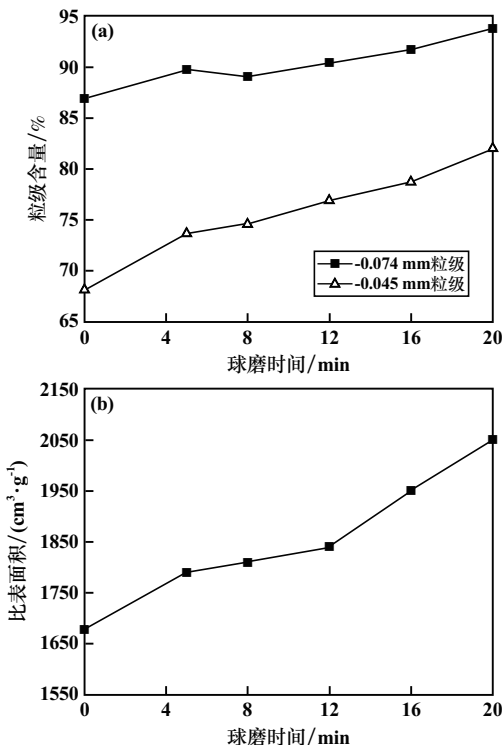


图3 球磨时间对 Minas 铁精矿粒度组成和比表面积的影响

(a) 粒级含量; (b) 比表面积

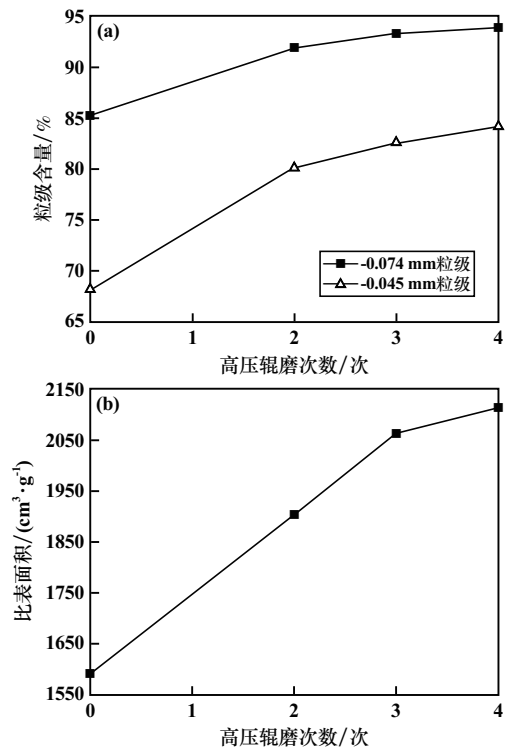


图4 高压辊磨次数对混合料粒度组成和比表面积的影响

(a) 粒级含量; (b) 比表面积

比表面积则以较大的幅度持续提高。由图4可知,高压辊磨预处理时,随着辊磨次数增加,-0.074 mm、-0.045 mm 粒级含量和比表面积均有增加,且辊磨4次时,-0.074 mm 粒级含量与球磨20 min 时相当,但-0.045 mm 粒级含量和比表面积则明显比球磨20 min 时高。高压辊磨3次以后比表面积变化幅度有所减小。因此,与球磨相比,高压辊磨对于提高微细粒级含量和比表面积更具优势,这与高压辊磨的作用机制有关。高压辊磨的工作原理是将物料颗粒进行强制性层压粉碎,相比于球磨,高压辊磨具有“多碎少磨”的特点,矿粒新生表面的质点活性更高<sup>[11-12]</sup>。

### 2.3 原料预处理对生球性能的影响

#### 2.3.1 球磨对生球性能的影响

对 Minas 铁精矿进行单独球磨预处理后,与智利磁铁精矿配成混合料,在膨润土用量1.1%的条件下进行造球试验,考查 Minas 铁精矿球磨预处理时间对混合料造球性能的影响,结果见图5。结果表明,原料未预处理时,生球落强度较低,只有3.9次/0.5 m,随着球磨时间增加,生球落下强度明显提高,球磨12 min 时生球落强度提高到6.0次/0.5 m 以上,可满足大型球团厂的生产要求。生球爆裂温度则随着球磨预处理时间延长而有所下降,但在球磨时间从12 min 增加到20 min 时,下降趋势变得平缓,维持在415℃左右。因此,球磨预处理可有效改善 Minas 铁精矿的生球性能。

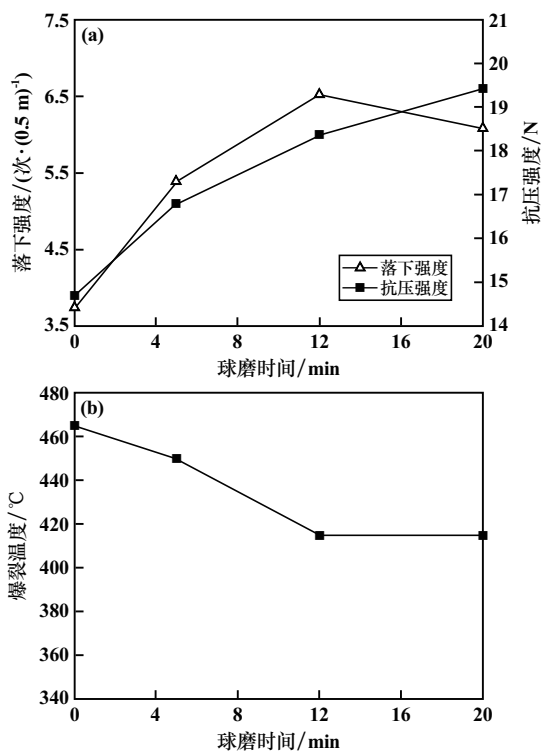


图5 球磨时间对生球性能的影响

(a) 造球性能; (b) 爆裂温度

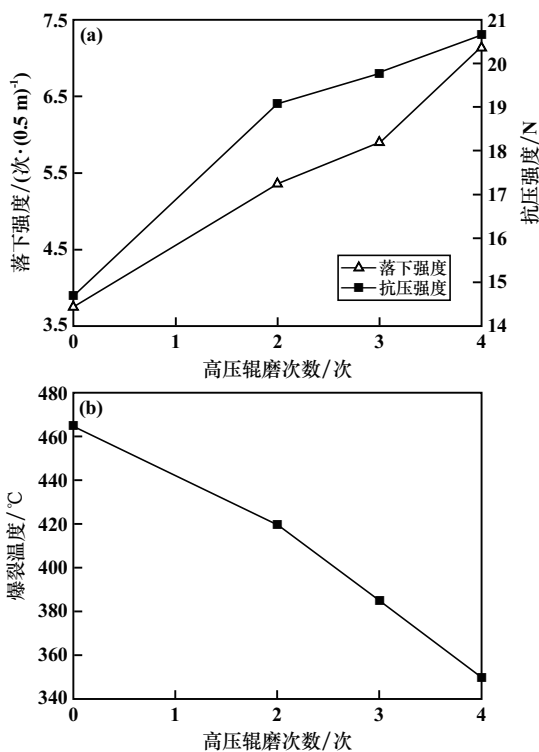


图6 高压辊磨次数对生球性能的影响

(a) 造球性能; (b) 爆裂温度

经过膨润土用量优化后,选择的最佳造球工艺参数为:球磨时间 12 min,膨润土用量 1.1%。对应的生球性能为:落下强度 6.0 次/0.5 m,抗压强度 19.29 N/球,爆裂温度 415 °C。

### 2.3.2 高压辊磨对生球性能的影响

将 Minas 铁精矿与智利磁铁精矿配成混合料,进行高压辊磨预处理,然后加入膨润土并混匀润湿后用于造球。在膨润土用量 1.1% 的条件下进行造球试验,考查高压辊磨对混合料造球性能的影响,结果如图 6 所示。结果表明,随着辊磨次数增加,生球落下强度和抗压强度明显提高,但爆裂温度则持续下降。辊磨 2 次时生球落下强度达到 6.4 次/0.5 m,对应爆裂温度为 420 °C,满足大型球团厂的生产要求。辊磨次数超过 2 次时,爆裂温度低于 400 °C,球团生产中容易出现干燥爆裂。

与球磨相比,高压辊磨预处理对造球性能的改善效果更为明显。生球落下强度在球磨时间 12~20 min 范围内为 6.0~6.6 次/0.5 m,而在高压辊磨 2~4 次范围内为 6.4~7.3 次/0.5 m,这说明高压辊磨微细粒级含量高且比表面积大的作用特点对改善 Minas 铁精矿造球性能更为有效。但是,也正是因为高压辊磨时微细粒级含量增加更多,使生球的爆裂温度降低更多。如前所述,球磨时间超过 12 min 后,生球爆裂温度基

本维持稳定;而高压辊磨达到 4 次时,生球爆裂温度降至 350 °C,而且还有进一步下降的趋势。

经过膨润土用量优化后,选择的最佳造球工艺参数为:高压辊磨次数 3 次,膨润土用量 0.9%。对应的生球性能为:落下强度 6.3 次/0.5 m,抗压强度 24.44 N/球,爆裂温度 403 °C。

### 2.4 原料预处理对球团预热的影响

分别在 Minas 铁精矿球磨预处理和混合料高压辊磨预处理时进行球团预热试验,考查预处理对球团预热的影响。试验条件分别为:对 Minas 铁精矿单独球磨 12 min 后与智利磁铁精矿配成混合料,在膨润土用量 1.1% 的条件下造球,球团预热试验结果如表 6 所示;将 Minas 铁精矿与智利磁铁精矿配成混合料,高压辊磨 3 次后,在膨润土用量 0.9% 的条件下造球,球团预热试验结果如表 7 所示。

表6 球磨预处理时预热制度对预热球抗压强度的影响

预热温度/°C	预热时间/min	预热球抗压强度/N
1 000	10	838
1 000	12	864
1 050	10	948
1 050	12	952
1 100	10	940
1 100	12	1 188
1 100	14	1 251

表7 高压辊磨预处理时预热制度对预热球抗压强度的影响

预热温度/℃	预热时间/min	预热球抗压强度/N
1 000	10	564
1 050	10	748
1 050	12	766
1 080	10	1 089
1 080	12	1 231
1 100	10	1 297

由表6和表7可知,2种预处理方法对球团预热效果的影响略有差异。球磨预处理时,预热制度要在温度1 100℃、球磨时间12 min条件下,才能达到大型链篦机-回转窑球团生产要求的高于1 000 N/球的预热球强度。高压辊磨处理时,预热制度在温度1 080℃、辊磨时间10 min时达到1 000 N/球以上的预热球强度,条件要求略低于球磨预处理的球团。此外,2种预处理方法制得的预热球抗压强度都随着预热温度增加而提高,但高压辊磨时预热球抗压强度提高更为显著。高压辊磨时不仅微细粒级含量高,而且能一定程度地提高表面质点活性,而这两方面因素都有利于改善球团预热性能。

球磨预处理时选择的最佳预热制度为:预热温度1 100℃、预热时间14 min,对应的预热球抗压强度为1 251 N/球。高压辊磨预处理时选择的最佳预热制度为:预热温度1 100℃、预热时间10 min,对应的预热球抗压强度为1 297 N/球。

### 2.5 原料预处理对焙烧的影响

将Minas铁精矿与智利磁铁精矿配成混合料,高压辊磨3次后,在膨润土用量0.9%的条件下造球,球团在1 100℃下预热10 min后进行焙烧试验,考查高压辊磨预处理对球团焙烧性能的影响,结果如表8所示。结果表明,原料经过高压辊磨预处理后,球团焙烧性能显著改善,有效地解决了Minas赤铁矿球团焙烧温度高的问题<sup>[13]</sup>。在焙烧温度1 220℃、时间12 min时,球团强度就达到2 500 N/球以上;随着焙烧温度提高,球团强度显著提高,1 240℃和1 260℃时球团强度分别提高到3 542 N/球和4 463 N/球。

表8 高压辊磨后焙烧制度对焙烧球强度的影响

焙烧温度/℃	焙烧时间/min	焙烧球抗压强度/N
1 220	12	2 516
1 240	12	3 542
1 240	15	3 698
1 260	12	4 463

高压辊磨预处理球团选择的最佳焙烧制度为:焙烧温度1 260℃、焙烧时间12 min,对应的球团抗压强

度为4 463 N/球。

在上述基础上,进一步进行了联合预处理球团的焙烧试验,即Minas铁精矿球磨12 min后与智利磁铁精矿按7:3的比例配成混合料后再进行3次高压辊磨处理。膨润土用量为0.9%,预热温度为1 100℃,预热时间为10 min。试验结果如表9所示。结果表明,原料经过联合预处理后,焙烧球团强度在单纯高压辊磨预处理的基础上有了进一步提高。球团强度在1 220℃下焙烧时达到3 227 N/球,而在1 240℃和1 260℃焙烧时分别达到4 848 N/球和5 243 N/球。

表9 联合预处理后焙烧制度对焙烧球强度的影响

焙烧温度/℃	焙烧时间/min	焙烧球抗压强度/N
1 220	12	3 227
1 240	9	4 273
1 240	12	4 848
1 260	12	5 243

球磨和高压辊磨联合预处理时选择的最佳焙烧制度为:焙烧温度1 260℃、焙烧时间12 min,对应的球团抗压强度为5 243 N/球。

综上所述,混合料预处理对于球团预热和焙烧性能都有改善作用,一方面是因为增加了比表面积,且高压辊磨时还提高了表面质点的活性;另一方面则是改善了造球性能。造球性能的改善使颗粒之间的位移阻力降低,颗粒位移能力增强,有利于促进生球的致密化,增加生球内颗粒间的接触面,为后续的球团预热和焙烧过程的固结反应创造更充分的接触条件,因而促进了球团的固结,提高了球团强度。

## 3 结 论

1) Minas赤铁矿精矿颗粒表面光滑平整、粒度细且较均匀、缺乏合理的粗细搭配且微细粒级含量少等特点是其造球性能偏弱的主要原因。

2) 球磨预处理和高压辊磨预处理都能有效降低Minas赤铁矿的粒度,增大比表面积,而高压辊磨更具优势。

3) 原料预处理后Minas赤铁矿的造球性能明显改善,球磨12 min和高压辊磨2次可使生球落下强度从3.9次/0.5 m分别提高到6.0次/0.5 m和6.4次/0.5 m。其中高压辊磨预处理时生球落下强度提高空间更大,但辊磨次数增加时爆裂温度降低更多。

4) 除了改善造球性能以外,原料预处理还可显著改善球团的焙烧性能。高压辊磨预处理时,1 220℃下焙烧12 min抗压强度可达到2 500 N/球以上,而球磨和高压辊磨联合预处理时同样焙烧条件下抗压强度达

到了3 227 N/球。原因是预处理提高了颗粒的表面活性并促进了球团内颗粒间的充分接触。

### 参考文献:

- [1] Wu J X, Yang J, Ma L W, et al. A system analysis of the development strategy of iron ore in China[J]. Resources Policy, 2016,48:32-40.
- [2] Hao X Q, An H Z, Sun X Q, et al. The import competition relationship and intensity in the international iron[J]. Resources Policy, 2018,57:45-54.
- [3] 沈文俊. 燃料与熔剂在巴西赤铁矿氧化球团中的行为及机理研究[D]. 长沙:中南大学资源加工与生物工程学院, 2011.
- [4] 李慧敏. 含硼复合添加剂强化巴西赤铁矿球团的制备及机理研究[D]. 长沙:中南大学资源加工与生物工程学院, 2009.
- [5] 温力士. 强化巴西赤铁矿链篦机-回转窑球团焙烧技术及其在中国的工业应用[D]. 长沙:中南大学资源加工与生物工程学院, 2012.
- [6] 席玉明. 润磨预处理改善赤铁矿粉球团矿性能的研究[J]. 矿冶

工程, 2012,32(4):73-76.

- [7] 焦国帅, 巨建涛, 马杰, 等. 磨矿方式对赤铁矿球团预热焙烧性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2017,38(3):100-105.
- [8] 张金良. 熔剂性赤铁矿球团焙烧特性及高炉还原行为研究[D]. 长沙:中南大学资源加工与生物工程学院, 2012.
- [9] Srinivas D, Tamal K G, Amitabh S, et al. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011,99:43-53.
- [10] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社, 2014.
- [11] 李云龙, 王淀佐, 黄圣生, 等. 高压料层粉碎理论的应用[J]. 中国陶瓷工业, 2004,11(2):29-32.
- [12] 张严冰, 袁亦扬, 周全. 高压辊磨机粉碎铁矿精矿试验研究[J]. 烧结球团, 2005,30(3):14-17.
- [13] 朱德庆, 师本敬, 潘建, 等. Minas Rio 赤铁精粉球团制备特性研究[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集Ⅲ. 北京:冶金工业出版社, 2015.

引用本文: 杨永斌, 张健, 钟强, 等. 预处理强化赤铁矿熔剂性球团制备性能的研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(4):83-88.

(上接第82页)

### 参考文献:

- [1] 谭柱中. 2013年中国电解金属锰工业回顾和展望[J]. 中国锰业, 2014,32(3):1-4.
- [2] 向杰, 陈建平, 张莹. 中国锰矿资源现状与潜力分析[J]. 地质学刊, 2013,37(3):382-386.
- [3] Ning duan, Wang Fan, Zhou Changbo, et al. Analysis of pollution materials generated from electrolytic manganese industries in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010,54(8):506-511.
- [4] Ning Duan, Zhing Dan, Wang Fan, et al. Electrolytic manganese metal industry experience based China's new model for cleaner production promotion[J]. Journal of Cleaner Production, 2011,19(17):2082-2087.
- [5] 杨超. 湿法炼锰过程中镁锰分离的研究[D]. 长沙:中南大学化

学化工学院, 2012.

- [6] 朱建平. 电解金属锰生产过程中各因素对电耗的影响[J]. 中国锰业, 1999,17(3):32-35.
- [7] 杨远平, 龙小东, 何柳群. 电解金属锰液中镁离子富集平衡及其结晶分析[J]. 中国锰业, 2016,34(3):82-84.
- [8] 皮露, 何克杰, 罗炎, 等. 萃取分离电解锰阳极液中锰、镁离子试验研究[J]. 湿法冶金, 2015,34(3):229-232.
- [9] 刘洪刚, 朱国才. 溶剂萃取法脱除锰矿浸出液中钙镁的研究[J]. 中国锰业, 2008,26(1):34-37.
- [10] 袁明亮, 邱冠周. 硫酸锰溶液结晶分离硫酸镁的水系相图原理[J]. 中南工业大学学报, 2000,31(3):212-214.
- [11] 耿叶静, 刘静, 周娥, 等. 富镁软锰矿中镁的预脱除实验研究[J]. 中国锰业, 2012,30(2):29-32.

引用本文: 李重洋, 钱振, 时启龙, 等. 含镁三元系锰电解液理化性能研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(4):79-82.