



## 程潮铁精矿制备氢基还原用氧化球团可行性研究

李国全<sup>1</sup>, 郑子康<sup>2</sup>, 刘曙<sup>1</sup>, 陈铁军<sup>2</sup>, 周晓军<sup>1</sup>, 周仙霖<sup>2</sup>, 万军营<sup>2</sup>

(1. 武钢资源集团程潮矿业有限公司,湖北鄂州 436000;2. 武汉科技大学资源与环境工程学院,湖北武汉 430081)

**摘要:**为了探讨程潮铁精矿生产氢基竖炉用高品位氧化球团的可行性,本文分别以品位为66.14%的程潮普通铁精矿和品位为69.51%的高品位铁精矿为原料,研究黏结剂配比、造球水分对生球指标的影响以及预热焙烧制度对成品球质量的影响,并对高品位成品球团进行氢基还原特性检测。结果表明:高品位球团生球强度指标优于普通球团,但普通成品球团强度总体上优于高品位成品球团,且焙烧温度和时间低于高品位球团;在膨润土用量为1.1%、预热温度为975℃、预热时间为9 min、焙烧温度为1250℃、焙烧时间为18 min的条件下,高品位成品球团抗压强度为3186.8 N/P。同时,扩试结果表明:当配加0.8%印度膨润土时,成品球团抗压强度为3458 N/P,铁品位为67.56%,SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数分别为1.82%和1.03%,还原度指数为8.44,950℃的还原膨胀指数为14.7%,>6.3 mm和<3.2 mm低湿还原粉化指数分别为83.5%和9.4%,黏结指数为0,满足HYL法氢基竖炉还原用氧化球团还原性能要求,为程潮铁精矿生产氢基直接还原用高品位氧化球团提供了技术依据。

**关键词:**程潮铁精矿;高品位球团矿;氢基还原;冶金性能

中图分类号:TF046.6

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)02-0046-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.024

## Feasibility research on preparation of oxidation pellets for hydrogen-based reduction from Chengchao iron concentrate

LI Guoquan<sup>1</sup>, ZHENG Zikang<sup>2</sup>, LIU Shu<sup>1</sup>, CHEN Tiejun<sup>2</sup>, ZHOU Xiaojun<sup>1</sup>,  
ZHOU Xianlin<sup>2</sup>, WAN Junying<sup>2</sup>

(1. WISCO Resources Group Chengchao Mining Company Limited, Ezhou 436000, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of producing high-grade oxidized pellets for hydrogen-based shaft furnace from Chengchao iron concentrate, Chengchao ordinary iron concentrate with a grade of 66.14% and a high-grade iron concentrate with a grade of 69.51% are used as raw materials to study the effects of binder ratio, pelletizing moisture on fresh pellet indexes and the influence of preheating roasting system on the quality of finished pellets, and the hydrogen-based reduction characteristics of high-grade finished pellets are detected. The results show that the strength index of high-grade pellets is better than that of ordinary pellets, but the strength of ordinary finished pellets is generally better than that of high-grade finished pellets, and the roasting temperature and time of ordinary finished pellets are lower than those of high-grade pellets. The compressive strength of high-grade finished pellets is 3186.8 N/P under the conditions of bentonite dosage of 1.1%, preheating temperature of 975℃, preheating time of 9 min, roasting temperature of 1250℃ and roasting time of 18 min. At the same time, the expansion results show that when 0.8% Indian bentonite is added, the compressive

收稿日期:2024-06-27;修回日期:2025-01-18

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022014);中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202107)

作者简介:李国全(1978—),男,工程师,从事球团生产技术管理工作。

通信作者:周仙霖(1986—),男,博士,副教授,从事铁矿低碳造块新技术和冶金固废高效资源化利用等研究。

strength of the finished pellets is 3 458 N/P, the iron grade is 67.56%, the mass fractions of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  are 1.82% and 1.03%, respectively, the reduction index is 8.44, the reduction expansion index is 14.7% at 950 °C, the reduction pulverization index of >6.3 mm and <3.2 mm are 83.5% and 9.4%, respectively, and the adhesion index is 0. It meets the requirements of oxidation pellet reduction performance for hydrogen-based shaft furnace reduction by HYL method, and provides a technical basis for the production of high-grade oxidation pellets for hydrogen-based direct reduction in Chengchao iron concentrate.

**Key words:** Chengchao iron ore concentrate; high-grade pellets; hydrogen-based reduction; metallurgical properties

2020年9月,我国提出“双碳”战略目标,致力于为全球低碳绿色发展提供中国方案。基于国家政策引导,中国宝武提出碳达峰、碳中和目标,从富氢碳循环高炉工艺和氢基竖炉工艺两条主要的工艺路线加上碳资源综合利用以及电加热等碳中和技术路线,力争早日实现“双碳”目标<sup>[1]</sup>。目前,许多研究表明了氢基竖炉工艺的可行性,但同时也发现了氢基竖炉工艺存在的问题,其中原料是影响氢基竖炉工艺稳定性的重要因素之一<sup>[1-3]</sup>。

全国烧结球团信息网统计了2023年国内46家球团厂成品球团TFe及 $\text{SiO}_2$ 含量,铁品位大多数为62%~63%,平均TFe质量分数为62.47%,其中最高为65.64%,平均 $\text{SiO}_2$ 质量分数为6%,其中最低为2.28%,最高为8.97%,国内球团厂生产的成品球团大多达不到氢基竖炉的原料要求,只能依赖于进口。近些年来,高炉冶炼炉料已经由原来的以高碱度烧结矿为主的炉料结构,向逐步增加高品质球团矿入炉配比的炉料结构方向发展<sup>[4-5]</sup>。高品质氧化球团矿应用到高炉冶炼中可起到增产节焦、改善炼铁技术经济指标、降低生铁成本、提高经济效益的作用,是一种优质的冶金炉料<sup>[6]</sup>。而氢基竖炉工艺的主要原料是高品质氧化球团矿,高品质氧化球团相较于普通球团需要更高的铁品位,一般要求大于67%,以及更好的还原度、还原膨胀指数和还原粉化率等冶金性能<sup>[2-3]</sup>。针对高品质球团的制备研究,中南大学研究了以高品质赤铁矿为原料且采用带式焙烧机制备气基直接还原用氧化球团技术<sup>[7]</sup>;东北大学则基于国内铁精矿条件,进行了气基竖炉专用氧化球团制备及其冶金性能优化研究。发现通过优化控制添加剂使用、改善干燥预热及氧化焙烧工艺参数,可获得冶金性能优良的气基竖炉直接还原专

用氧化球团<sup>[8-9]</sup>,但具体的制备参数并未报道。

程潮铁精矿具有品位较高、有用矿物嵌布粒度较粗的特点,具备制备高品质铁精矿的条件<sup>[10]</sup>。因此,本研究以程潮普通铁精矿和再磨再选后得到的TFe品位为69.51%的高品位铁精矿为原料,进行造球工艺参数优化,旨在考察其制备合格氢基还原用高品质氧化球团的可行性,并将其与程潮矿普通球团生产工艺参数进行对比,得到的生产参数和冶金性能结果可用于指导生产现场改造,同时也为国内其他单位生产氢基竖炉用高品质球团提供参考和借鉴。

## 1 原料性能及研究方法

### 1.1 原料性能

试验所使用的原料为程潮普通铁精矿和经再磨再选后得到的高纯铁精矿,铁精矿的主要化学成分和相关物理性能如表1、2所示。由表1、2可知,普通铁精矿全铁品位为66.45%, $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{MgO})$ 分别为3.45%、1.56%、1.41%、1.08%,硫和磷含量较低;高品位铁精矿全铁品位为69.51%, $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{MgO})$ 分别为1.77%、0.48%、1.01%、0.47%,硫和磷含量较低,高品位铁精矿杂质含量较低,化学组成满足制备高品质氧化球团所需铁精矿的要求。普通铁精矿<0.074 mm的质量分数为84.96%,<0.043 mm的质量分数为55.43%,比表面积达到1 379  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,普通铁精矿成球性指数为0.35,具有中等成球性。高品位铁精矿<0.074 mm的质量分数为99.65%,<0.043 mm的质量分数为90.73%,比表面积达到2 766  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,高品位铁精矿成球性指数为0.57,成球性优于普通铁精矿。

试验采用印度膨润土为黏结剂,膨润土的主

表 1 铁精矿主要化学成分与烧损(质量分数)

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

| 铁精矿种类 | TFe   | FeO   | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | SiO <sub>2</sub> | S     | P     | 烧损    |
|-------|-------|-------|------|--------------------------------|------|------------------|-------|-------|-------|
| 普通    | 66.45 | 26.42 | 1.56 | 1.41                           | 1.08 | 3.45             | 0.380 | 0.027 | -1.53 |
| 高品位   | 69.51 | 26.46 | 0.48 | 1.01                           | 0.47 | 1.77             | 0.073 | 0.006 | -2.69 |

表 2 铁精矿物理性能

Table 2 Physical properties of iron concentrate

| 铁精矿种类 | <0.074 mm 粒级占比<br>(质量分数)/% | <0.043 mm 粒级占比<br>(质量分数)/% | 最大<br>毛细水/% | 最大<br>分子水/% | 静态成球性<br>指数(K) | 比表面积/<br>(cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) |
|-------|----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|----------------|--|
| 普通    | 84.96                      | 55.43                      | 15.85       | 4.90        | 0.35           | 1 379  |
| 高品位   | 99.65                      | 90.73                      | 25.37       | 9.20        | 0.57           | 2 766  |

要化学成分和物理性能如表 3、4 所示。由表 3、4 可知, 印度膨润土  $w(\text{SiO}_2)$  和  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  分别为 49.63% 和 13.63%, 吸水率、膨胀容和吸蓝量分别达到 632.80%、68.00 mL/g 和 39.68 g/(100 g); 膨润土 <0.074 mm 粒级质量分数为 98.33%, 粒度较细。整体上膨润土质量较优, 符合造球用黏结剂的指标。

表 3 膨润土主要化学成分与烧损(质量分数)

Table 3 Main chemical compositions and losses on ignition of bentonite

| TFe   | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | 烧损    |
|-------|------------------|------|------|--------------------------------|------------------|-------------------|-------|
| 10.54 | 49.63            | 1.82 | 2.50 | 13.63                          | 0.22             | 3.37              | 11.10 |

表 4 膨润土物理性能

Table 4 Physical properties of bentonite

| <0.074 mm<br>粒级占比<br>(质量分<br>数)/% | 水含量<br>(质量分<br>数)/% | 吸水<br>率/% | 膨胀容/<br>(mL·g <sup>-1</sup> ) | 吸蓝量/<br>[g·(100 g) <sup>-1</sup> ] |
|-----------------------------------|---------------------|-----------|-------------------------------|------------------------------------|
| 98.33                             | 11.80               | 632.8     | 68.0                          | 39.68                              |

## 1.2 研究方法

试验流程包括配料、混匀、造球、干燥、预热和焙烧等几个环节。生球制备采用圆盘造球机, 其直径为 800 mm, 转速为 20 r/min, 倾角为 47°。球团预热、焙烧小型试验在卧式管炉中进行, 试验过程中充分干燥后进行预热、焙烧、均热以及冷却等步骤。在小型试验研究的基础上, 进行球团干燥、预热、焙烧扩大试验, 采用试验室气基带式球团模拟试验装置进行(设备原理示意图 1 所示), 通过调节热风温度、气体流速和风向、抽风负压等工艺参数, 可实现模拟带式焙烧工艺的

鼓风干燥、抽风干燥、预热、焙烧、冷却。在鼓风阶段时, 开启下点火器, 打开 2# 和 3# 阀门, 关闭 1# 和 4# 阀门, 热风由下至上流经料层; 在抽风阶段时, 开启上点火器, 打开 1# 和 4# 阀门, 关闭 2# 和 3# 阀门, 热风由上至下流经料层。

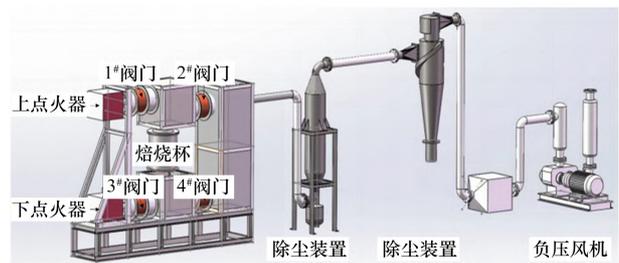


图 1 球团焙烧扩大试验系统

Fig. 1 Expanded test system of pellet roasting

将制备好的成品氧化球团进行氢基直接还原试验, 并按照 HYL 法气基还原冶金性能检测标准为对比<sup>[1]</sup>, 检测球团矿的还原度指数(RI), 还原膨胀指数(RSI)等。

## 2 试验结果与讨论

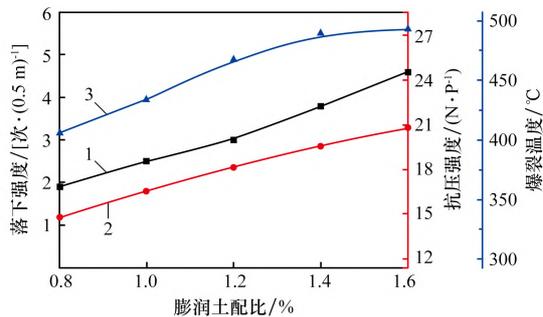
### 2.1 膨润土用量对生球性能的影响

不同膨润土配比条件下, 高品位成品球团的理论 TFe 品位如表 5 所示。由表 5 可知, 当膨润土配比高于 1.2% 时, 高品位球团的理论铁品位将低于 67%, 因此, 膨润土配比控制在 0.3% ~ 1.2%, 普通铁精矿的成球性相对较低, 在造球过程中膨润土配比控制在 0.8% ~ 1.6%。试验中固定造球时间为 12 min, 生球水分保持在 8.0% 左右, 考察了膨润土用量对生球性能的影响, 试验结果见图 2、3。

表5 不同膨润土配比条件下高品位成品球团理论 TFe 品位(质量分数)

Table 5 Theoretical TFe grade of high grade finished pellet under different bentonite ratio conditions

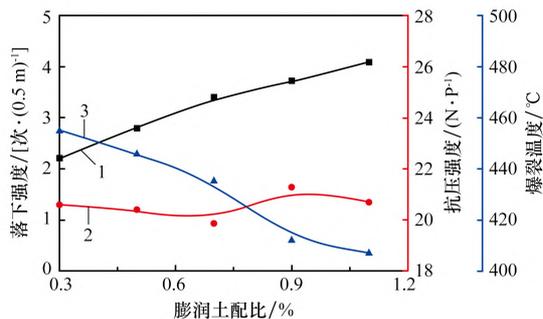
| 配比     | 0.3   | 0.4   | 0.5   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1.0   | 1.1   | 1.2   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| w(TFe) | 67.48 | 67.43 | 67.38 | 67.34 | 67.29 | 67.24 | 67.19 | 67.15 | 67.10 | 67.05 |



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

图2 膨润土用量对普通球团生球性能的影响

Fig. 2 Effect of bentonite dosage on the performance of ordinary pellets



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

图3 膨润土用量对高品位球团生球性能的影响

Fig. 3 Effect of bentonite dosage on the performance of high-grade pellets

由图2可知,普通球团生球落下强度、抗压强度和爆裂温度随着膨润土用量的增加而升高。在膨润土配比为1.6%时,生球落下强度能够达到4.6次/(0.5 m),抗压强度达到20.8 N/P,爆裂温度达到493℃。由图3可知,高品位球团生球落下强度随着膨润土用量的增加而升高,但是抗压强度和爆裂温度逐渐降低,在膨润土配比为1.1%时,生球的落下强度能够达到4.1次/(0.5 m)以上,抗压强度达到20.7 N/P,爆裂温度达到407℃;对比生球指标,高品位球团的生球落下强度优于普通球团,可以在相对较低的膨润土用量的条件下达到指标要求。但是抗压强度和爆裂温度指标相对较低,可能是由于高品位球团的原料为高品位铁精矿,原料的成球性能较好,且粒度更细,比

表面积大幅度超过普通铁精矿,有利于提高球团的生球落下强度,但会使得生球过于致密,且高品位球团生球的适宜水分也高于普通球团,综合导致生球的爆裂温度偏低。

## 2.2 造球水分对生球性能的影响

在普通球团的膨润土用量为1.6%,高品位球团的膨润土用量为1.1%的造球条件下,考察了造球水分对生球性能的影响,试验结果见表6。

表6 造球水分对生球性能的影响

Table 6 Effect of balling moisture on the performance of green pellets

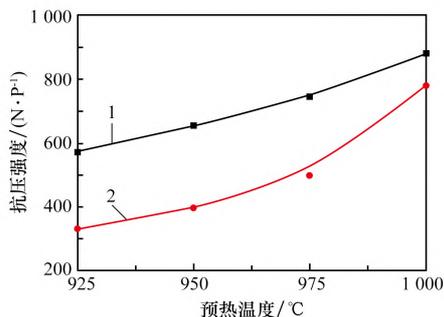
| 球团矿种类 | 生球水分(质量分数)/% | 落下强度/[次·(0.5 m) <sup>-1</sup> ] | 抗压强度/[N·P <sup>-1</sup> ] | 爆裂温度/℃ |
|-------|--------------|---------------------------------|---------------------------|--------|
| 普通球团  | 7.5          | 3.2                             | 18.6                      | 497    |
|       | 8.0          | 4.3                             | 19.6                      | 515    |
|       | 8.5          | 5.5                             | 20.8                      | 485    |
| 高品位球团 | 7.5          | 2.5                             | 16.7                      | 428    |
|       | 8.5          | 4.2                             | 19.4                      | 410    |
|       | 9.5          | 4.7                             | 18.8                      | 376    |

由表6可知,适当提高生球水分能够增强生球性能。当普通球团的生球水分为8.0%时,落下强度为4.3次/(0.5 m),抗压强度为19.6 N/P,爆裂温度为515℃。当高品位球团生球水分为8.5%时,落下强度为4.2次/(0.5 m),抗压强度为19.4 N/P,爆裂温度为410℃。高品位球团的生球适宜水分高于普通球团,这是由于高品位铁精矿的最大毛细水和最大分子水含量大于普通铁精矿,导致球团内部的水分含量较高。随着水分的提升,生球落下强度和抗压强度均有提升,爆裂温度略微下降,适当的造球水分能够提升生球强度及圆盘造球机造球效率,同时会影响后续生球干燥制度<sup>[11]</sup>。

## 2.3 预热条件对预热球强度的影响

在预热时间为12 min条件下,考察预热温度对两种球团预热球抗压强度的影响,试验结果如图4所示。从图4可知,随着预热温度提高,两

种球团的预热球抗压强度都显著提高,普通球团在预热温度为 925 °C 时达到 573.6 N/P,高品位球团在预热温度为 975 °C 时达到 498.6 N/P,能够满足球团生产工艺的生产要求。

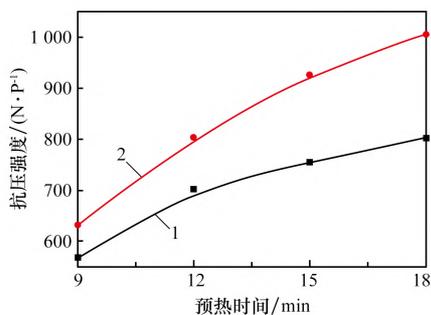


1—普通球团; 2—高品位球团。

图 4 预热温度对预热球团抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of the preheating temperature on the compressive strength of the preheated pellets

在普通球团预热温度为 925 °C,高品位球团预热温度为 975 °C 的条件下,考察预热时间对两种球团预热球抗压强度的影响,试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,两种球团矿的预热球抗压强度均随预热时间的延长而增大。随着预热时间的延长,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 氧化程度越来越高,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 再结晶从只有些许颗粒过度到部分互联,球团矿的抗压强度也越来越高。即随着预热时间的延长,预热球强度提高,其主要原因可能是由于球团矿中赤铁矿相逐渐增多,分布也更加均匀,预热球的抗压强度也逐步提高<sup>[12]</sup>。根据试验结果,确定普通球团最佳的预热时间为 12 min,预热球抗压强度可达 703.2 N/P;高品位球团最佳的预热时间为 9 min,其预热球抗压强度可达 631.01 N/P。



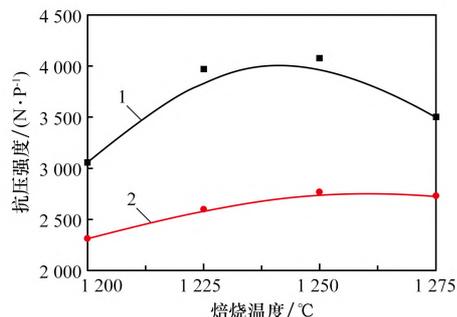
1—普通球团; 2—高品位球团。

图 5 预热时间对预热球团抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of the preheating time on the compressive strength of the preheated pellets

## 2.4 焙烧条件对成品球团强度的影响

在上述最佳预热温度与预热时间条件下,固定焙烧时间为 12 min,考察焙烧温度对两种成品球团抗压强度的影响,试验结果如图 6 所示。



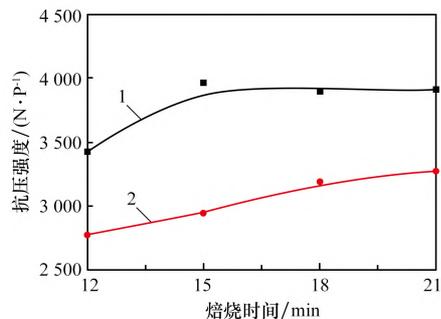
1—普通球团; 2—高品位球团。

图 6 焙烧温度对成品球团抗压强度的影响

Fig. 6 Influence of roasting temperature against compressive strength

由图 6 可知,随着焙烧温度提高,成品球团的抗压强度先增大后减小,这是由于焙烧温度过高,导致球团内产生部分低熔点物质,影响了成品球团的抗压强度;普通成品球团在焙烧温度为 1225 °C 时抗压强度达到 3964.7 N/P,高品位成品球团的抗压强度在 1250 °C 时抗压强度达到 2767.27 N/P。因此,生产应在满足抗压强度的前提下,尽量降低焙烧温度,以改善球团矿的冶金性能<sup>[13-14]</sup>。

在普通成品球团焙烧温度为 1225 °C,高品位成品球团焙烧温度为 1250 °C 的条件下,考察焙烧时间对两种成品球团抗压强度的影响,结果如图 7 所示。



1—普通球团; 2—高品位球团。

图 7 焙烧时间对成品球团抗压强度的影响

Fig. 7 Influence of roasting time against compressive strength

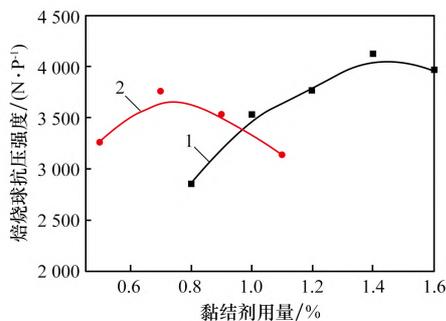
由图 7 可知,焙烧时间的增加有利于焙烧球抗

压强度的提高,延长时间可以强化磁铁矿氧化以及赤铁矿晶粒再结晶,提高球团强度。普通球团在焙烧时间为12 min的条件下,成品球抗压强度达到3 426.5 N/P,高品位球团在焙烧时间为12 min的条件下,成品球抗压强度达到3 186.8 N/P,满足氧化球团生产要求。

上述试验结果表明:普通球团在预热温度为925 ℃、预热时间为12 min、焙烧温度为1 225 ℃、焙烧时间为12 min的条件下,成品球抗压强度为3 426.5 N/P。高品位球团在预热温度为975 ℃、预热时间为9 min、焙烧温度为1 250 ℃、焙烧时间为18 min的条件下,成品球抗压强度为3 186.8 N/P。高品位铁精矿的焙烧温度和时间要高于普通球团,这是由于高品位球团矿中的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等杂质成分含量较少,在焙烧过程中与铁氧化物反应生成低熔点液相量也会减少,这会导致球团固结强度降低。因此,试验中提高焙烧温度,延长焙烧时间,有利于促进固相固结反应,提高成品球团抗压强度。

## 2.5 膨润土用量对成品球团强度的影响

在上述最佳预热焙烧条件下,探究膨润土用量对两种成品球团抗压强度的影响,结果如图8所示。由图8可知,随着膨润土用量的增加,成品球团的抗压强度先升高后下降,这主要是由于膨润土中的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等成分与铁氧化物反应促进了低熔点液相生成,有利于球团内部固相扩散,促进赤铁矿再结晶和连晶作用,但当膨润土用量过多时,球团在焙烧时就会有过多的液相生成,反而会导致抗压强度降低<sup>[15]</sup>。当膨润土用量为



1—普通球团; 2—高品位球团。

图8 复合膨润土用量对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 8 Effect of the amount of compound bentonite on the compressive strength of roasted pellets

1.4%时,普通成品球团的抗压强度为4 121.3 N/P,当膨润土用量为1.6%时,普通成品球团的抗压强度为3 964.7 N/P;当膨润土用量为0.7%时,高品位成品球团的抗压强度为3 753 N/P,当膨润土用量为1.1%时,高品位成品球团的抗压强度为3 137 N/P。对比结果可知,普通成品球团强度总体上优于高品位成品球团。

## 2.6 预热焙烧扩大试验验证

基于参数优化试验结果,造球扩大试验采用自动造球盘进行造球,在造球过程中发现,高品位铁精矿采用自动造球盘进行大批量造球时,没有像实验室小规模造球时出现的母球相互粘连问题,因此生球强度优于实验室小规模造球的生球强度。为了保证高品位铁精矿制备的生球强度和焙烧球团的TFe品位指标,决定在印度膨润土配比为0.8%条件下,进行连续自动造球;而普通铁精矿在实验室小规模造球时,没有出现相互粘连的问题,因此连续造球扩大试验时仍然采用1.6%的膨润土配比。

连续造球预热焙烧扩大试验结果表明:普通铁精矿最终可获得落下强度为4.5次/(0.5 m)、抗压强度为19.6 N/P、爆裂温度为557 ℃的合格生球,生球在干燥温度为300 ℃、干燥时间为15 min、预热温度为950 ℃、预热时间为12 min、焙烧温度为1 225 ℃、焙烧时间为12 min的条件下,进行了预热焙烧扩大试验,经焙烧后可获得抗压强度为3 867 N/P的成品球团;高品位铁精矿最终可获得落下强度为4.2次/(0.5 m)、抗压强度为20.3 N/P、爆裂温度为395 ℃的合格生球,生球在干燥温度为300 ℃、干燥时间为15 min、预热温度为975 ℃、预热时间为9 min、焙烧温度为1 250 ℃、焙烧时间为18 min的条件下,进行了预热焙烧扩大试验,经焙烧后可获得抗压强度为3 458 N/P的成品球团。采用程潮高品位铁精矿制备高品位球团生产工艺参数与普通球团有较大区别,但仍然能够通过现有生产工艺和设备进行生产。

成品球团矿主要化学成分如表7所示。由表7可知,普通球团矿的铁品位仅为65.14%, $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数分别为3.76%和1.75%,酸性氧化

表 7 成品球团矿主要化学成分(质量分数)

Table 7 Main chemical compositions of roasted pellets

%

| 球团矿种类   | TFe   | FeO  | CaO  | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S     | P     |
|---------|-------|------|------|------|------------------|--------------------------------|-------|-------|
| 普通铁精矿球团 | 65.14 | 0.63 | 1.20 | 0.92 | 3.76             | 1.75                           | 0.002 | 0.025 |
| 高纯铁精矿球团 | 67.56 | 0.89 | 0.51 | 0.62 | 1.82             | 1.03                           | 0.006 | 0.004 |

物超过 5%；高品位球团矿的铁品位达 67.56%，SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数分别为 1.82% 和 1.03%，酸性氧化物 <3%，满足 HYL 法氢基竖炉还原用氧化球团成分指标要求<sup>[2]</sup>。

高品位球团的氢还原特性分析结果如表 8 所示。由表 8 可知，高品位球团矿的还原度指数为 8.44，950 °C 的还原膨胀指数为 14.7%，>6.3 mm、<3.2 mm 低温还原粉化指数分别为 83.5% 和 9.40%，黏结指数为 0，满足 HYL 法氢基竖炉还原用氧化球团还原性能要求。

表 8 成品球团 HYL 法氢基还原特性指标结果

Table 8 HYL process hydrogen-based reduction characteristic index results of roasted pellets

| 还原度<br>指数 | 还原膨胀<br>指数/% | 低温还原粉化指数/% |         | 黏结<br>指数 |
|-----------|--------------|------------|---------|----------|
|           |              | >6.3 mm    | <3.2 mm |          |
| 8.44      | 14.7         | 83.5       | 9.4     | 0        |

### 3 结论

(1) 在膨润土用量为 1.1%，预热温度为 975 °C、预热时间为 9 min、焙烧温度为 1 250 °C、焙烧时间为 18 min 的条件下，可获得成品球抗压强度为 3 186.8 N/P 的高品位球团；高品位球团生球强度指标优于普通球团，但普通成品球团强度总体上优于高品位成品球团，且焙烧温度和时间低于高品位球团。

(2) 在配加 0.8% 印度膨润土时，经预热焙烧扩大试验可获得抗压强度为 3 458 N/P、铁品位为 67.56%、SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数分别为 1.82% 和 1.03%、还原度指数为 8.44、950 °C 的还原膨胀指数为 14.7%、>6.3 mm 和 <3.2 mm 低温还原粉化指数分别为 83.5% 和 9.40%、黏结指数为 0 的高品位成品球团，满足 HYL 法氢基竖炉还原用氧化球团还原性能要求。

(3) 采用程潮高品位铁精矿可制备出满足氢基竖炉还原用高品位氧化球团，且高品位球团生

产工艺参数与普通球团有较大区别，但仍然能够通过现有生产工艺和设备进行生产，可为国内铁精矿生产高品位球团矿的工艺调整提供指导。

### 参考文献:

- [1] 朱彤,李建. 铁矿石氢还原行为研究[J]. 钢铁, 2024,59(9):84-90.  
ZHU Tong, LI Jian. Study on hydrogen reduction behavior of iron ore[J]. Iron and Steel, 2024, 59(9): 84-90.
- [2] 李峰,储满生,唐珏,等. 中国氢冶金工艺现状、挑战及发展对策[J]. 前瞻科技, 2024,3(4):44-57.  
LI Feng, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current status, challenges, and development strategies of hydrogen metallurgy technologies in China[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(4): 44-57.
- [3] 蒋历俊,张涛,郑军,等. 气基竖炉直接还原工艺发展现状及展望[J]. 烧结球团, 2024,49(3):18-24.  
JIANG Lijun, ZHANG Tao, ZHENG Jun, et al. Development status and prospect on direct reduction process of gas-based shaft furnace. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(3): 18-24.
- [4] 邢奕,张文伯,苏伟,等. 中国钢铁行业超低排放之路[J]. 工程科学学报, 2021,43(1):1-9.  
XING Yi, ZHANG Wenbo, SU Wei, et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 1-9.
- [5] 毛庆武,章启夫,李欣,等. 特大型高炉使用高比例球团矿技术研究及应用[J]. 炼铁, 2020,39(6):1-6.  
MAO Qingwu, ZHANG Qifu, LI Xin, et al. Study and application of high pellet rate technology in super-large sized BF[J]. Ironmaking, 2020, 39(6): 1-6.
- [6] 王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理, 2018(9):53-58.  
WANG Weixing. Enhancing pellet ratio in blast furnace charge for energy saving and emission reduction[J]. China Steel Focus, 2018(9): 53-58.
- [7] 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 and Steel,2024,59(5):45-55.
- [8] TANG J, CHU M S, LI F, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(6):713-723.
- [9] 唐珏, 储满生, 李峰, 等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金, 2020(8):1-6.
- TANG Jue, CHU Mansheng, LI Feng, et al. Development status and future trend of hydrogen metallurgy in China [J]. Hebei Metallurgy, 2020(8):1-6.
- [10] 周仙霖, 郑子康, 万军营, 等. 程潮铁精矿带式磁选提质试验研究[J]. 金属矿山, 2024(7):81-86.
- ZHOU Xianlin, ZHENG Zikang, WAN Junying, et al. Experimental study on upgrading of Chengchao iron concentrate by belt magnetic separation[J]. Metal Mine, 2024(7):81-86.
- [11] 陈铁军, 张一敏, 杨仕勇. 程潮铁精矿添加新型 wkd 系列粘结剂的氧化球团性能研究[J]. 烧结球团, 2002, 27(4):7-10.
- CHEN Tiejun, ZHANG Yimin, YANG Shiyong. Study of the properties of oxide pellets from Chenchao iron ore concentrates with the addition of wkd binders[J]. Sintering and Pelletizing, 2002, 27(4):7-10.
- [12] 陈耀明, 张元波. 氧化球团矿结晶规律的研究[J]. 钢铁研究, 2005, 33(3):10-12.
- CHEN Yaoming, ZHANG Yuanbo. Study on crystallization rule of oxidized pellet[J]. Research on Iron and Steel, 2005, 33(3):10-12.
- [13] 夏雷阁, 苏步新, 李新宇, 等. 焙烧温度与球团矿强度和还原性的关系[J]. 烧结球团, 2014, 39(1):21-24.
- XIA Leige, SU Buxin, LI Xinyu, et al. Relationship of firing temperature to pellet strength and reducibility[J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(1):21-24.
- [14] 刘凯, 陈树军, 吕庆. 预热焙烧对球团矿抗压强度影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(3):636-639.
- LIU Kai, CHEN Shujun, LÜ Qing. Effects of preheating roasting on compressive strength of pellets [J]. Foundry Technology, 2017, 38(3):636-639.
- [15] 韩风光, 杨涛, 赵贺喜, 等. 复合粘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.

## 广告目次

|          |                  |          |                  |
|----------|------------------|----------|------------------|
| 封面       | 湖南中冶长天重工科技有限公司   | 前彩 18-19 | 湖南中冶长天重工科技有限公司   |
| 封二       | 襄阳中和机电技术有限公司     | 前彩 20-21 | 北京顺泰克科技有限公司      |
| 封三       | 第二十三届中国国际冶金工业展览会 | 前彩 22-23 | 唐山助纳炉料有限公司       |
| 封底       | 河北同冶冶金科技有限责任公司   | 前彩 24    | 焦作市迈科冶金机械有限公司    |
| 前彩 1     | 湖南宏德陶瓷科技有限公司     | 前彩 25    | 成都利君实业股份有限公司     |
| 前彩 2-3   | 鞍山市昱昊机械设备有限公司    | 前彩 26-27 | 湖南中冶长天节能环保技术有限公司 |
| 前彩 4-5   | 湖南德尚源耐磨工业有限公司    | 前彩 28-29 | 北京金都泰拓冶金技术研究有限公司 |
| 前彩 6     | 秦皇岛秦冶重工有限公司      | 前彩 30    | 沈阳华泽单齿辊破碎机制造有限公司 |
| 前彩 7     | 秦冶工程技术(北京)有限责任公司 | 前彩 31    | 江阴市创裕机械有限公司      |
| 前彩 8     | 长沙天为华信环保装备有限公司   | 前彩 32    | 江苏鑫华能环保工程股份有限公司  |
| 前彩 9     | 罗迪格(北京)机械设备有限公司  | 前彩 33    | 厦门川亿机械设备有限公司     |
| 前彩 10-11 | 中冶长天(长沙)智能科技有限公司 | 前彩 34    | 湖南长重机器股份有限公司     |
| 前彩 12-13 | 朝阳重型机器有限公司       | 后彩 1     | 中冶长天炉窑工程技术公司     |
| 前彩 14-15 | 北京艾瑞机械有限公司       | 后彩 2     | 爱立许集团(中国)有限公司    |
| 前彩 16    | 南京三埃工控有限公司       | 后彩 3     | 鞍山市明阳金属材料有限公司    |
| 前彩 17    | 平罗县国宁活性炭有限公司     | 后彩 4     | 湖北中船气体有限公司       |