# 进口磁铁精矿球团配矿及工艺参数优化试验

王笑天[1]，柴轶凡[1]，罗果萍[1]，宋 巍[1]，张国成[2]，乔 波[1]
（1. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院，内蒙古 包头 014010；2. 包头师范学院 化学学院，内蒙古 包头 014010）

**摘要**：为提高球团矿质量和减少球团“黑芯”结构，确定合理的工艺制度和配矿方案，本文以进口铁精矿A、B、C、D为原料，根据单矿球团的基础特性采用50%的D矿+其它精矿进行配矿方案研究，并进行链算机—回转窑工艺参数优化。研究结果表明：精矿配矿方案中，50%D矿+40%C矿+10%B矿方案较合理；影响预热球团强度的温度排序为预热Ⅱ段温度>抽风干燥温度>预热Ⅰ段温度>鼓风干燥温度；鼓风干燥段、抽风干燥段、预热Ⅰ段和Ⅱ段温度分别为250、300、720、990 ℃条件下，预热球可充分氧化，链算机出口球团强度可达1 105 N/P；焙烧温度为1 270 ℃，焙烧时间为25 min条件下，回转窑出口球团强度可达3 710 N/P，球团可充分氧化。本文结论可为改善球团矿还原性能提供理论与技术支持，以发挥球团矿在高炉冶炼过程中的精料作用。

**关键词**：铁精矿；球团；链算机—回转窑；配矿；工艺参数优化
**中图分类号**：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-8764(2022)02-0016-08
**doi**：10.13403/j.sjqt.2022.02.019

## Optimization test on pellet distribution and process parameter of imported magnetite concentrate

**WANG Xiaotian**[1], **CHAI Yifan**[1], **LUO Guoping**[1], **SONG Wei**[1], **ZHANG Guocheng**[2], **QIAO Bo**[1]
(1. *School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Nei Mongol, China*; 2. *Department of Chemistry, Baotou Teachers' College, Baotou* 014010, *Nei Mongol, China*)

**Abstract**: In order to improve the quality of pellet and reduce the "black core" structure of pelletizing, and to determine a reasonable process system and ore proportioning scheme, the imported magnetite concentrates A, B, C and D are used as raw materials in this paper, and 50% D ore + other concentrates are adopted for the ore proportioning scheme study according to the basic characteristics of single ore pellets, and grate-kiln process parameters is optimized. The results show that: in the concentrate ore proportioning scheme, the scheme of 50% D ore + 40% C ore + 10% B ore is more reasonable; the temperature order that affects the strength of preheating pelletizing is preheating stage II temperature > extraction air drying temperature > preheating stage I temperature > exhaust drying temperature. Under the temperature of the exhaust drying section, the preheating stage I and II of 250, 300, 720 and 990 ℃ respectively, the preheating ball can be fully oxidized, and the pelletizing strength at the outlet of the grate can reach 1 105 N/P; when the roasting temperature is 1 270 ℃ and the roasts time is 25 min, the strength of the pelletizing at the outlet of the kiln can reach 3 710 N/P, and the pellets can be fully oxidized. The conclusion can provide a theoretical and technical support to improve the reduction property of pellet and play a role of pellet as a concentrate in the smelting process of blast furnace.

**Key words**: magnetite concentrate; pellet; grate-kiln; ore proportioning; optimization of process parameters

**收稿日期**：2021-08-03；**修回日期**：2021-08-25
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(51364030&51904161)；内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ19123)
**作者简介**：王笑天(1996—)，男，硕士研究生，从事球团矿配矿性能及工艺优化方面的研究。
**通讯作者**：罗果萍(1964—)，女，教授，博士生导师，从事钢铁冶金新工艺、新技术方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

烧结、球团矿是我国高炉炼铁的主要含铁原料。球团工艺相比烧结工艺，其产品具有含铁品位高、粒度均匀、强度高和还原性好等优点，且其工序能耗，粉尘、$SO_2$ 和 $NO_x$ 的排放量也显著低于烧结工艺。铁矿球团生产工艺符合当前愈来愈严格的环保管控要求，也是当今我国高炉炼铁实现低能源消耗、低温室效应、低污染物排放绿色制造的有效途径和必然趋势[1-2]。

链算机—回转窑作为球团生产的主要工艺之一，具有原料适应性强、生产能力大、工艺灵活的特点[3-4]。我国某钢铁公司以进口铁精矿 A、B、C、D 为主要原料，采用链算机—回转窑工艺生产氧化球团矿供高炉炼铁使用。由于球团配矿和工艺制度选取不够合理，该工艺生产的球团氧化不充分，容易产生“黑芯”结构，导致预热球和成品球的强度较低。为了保证铁矿粉的造球性能和生球质量，生产中工序操作人员被迫增加黏结剂用量，这导致球团矿品位降低、还原性变差。针对该问题，夏征宇等[5]通过配加 40% 赤铁精矿，在链算机—回转窑最佳工艺参数条件下，获得了冶金性能良好的成品球团矿；刘吉涛等[6]以大堆料、巴润精矿等为原料，采用正交试验方法来优化链算机工艺参数，得出最优工艺制度和合理配矿方案，提高了球团强度，抑制了回转窑结圈。

为此，本文对这 4 种进口铁精矿的基础特性进行系统研究，并在此基础上以预热球强度为考核指标就球团矿配矿结构与工艺参数进行优化，以期提升球团矿在高炉冶炼过程中的精料作用，并为改善球团矿还原性能提供理论与技术支持。

## 1　试验原料

### 1.1　铁矿粉化学成分

进口铁精矿 A、B、C、D 的化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，A、B、C、D 矿的 FeO 质量分数均大于 20%，$w(TFe)/w(FeO)$ 小于 2.7，属于原生磁铁矿；A、B 矿的 TFe 质量分数相近且较低，C 矿的 TFe 质量分数较高，为 66.18%，D 矿的 TFe 质量分数最高，为 70.01%；A、B 矿的 $SiO_2$ 质量分数相对较高，不利于球团性能和 TFe 质量分数的提高；D 矿含 S 量较高，S 的氧化会影响磁铁矿的氧化，对球团质量产生不利影响。

**表 1　含铁原料的主要化学成分(质量分数)**

**Table 1　Main chemical composition of iron materials**　　%

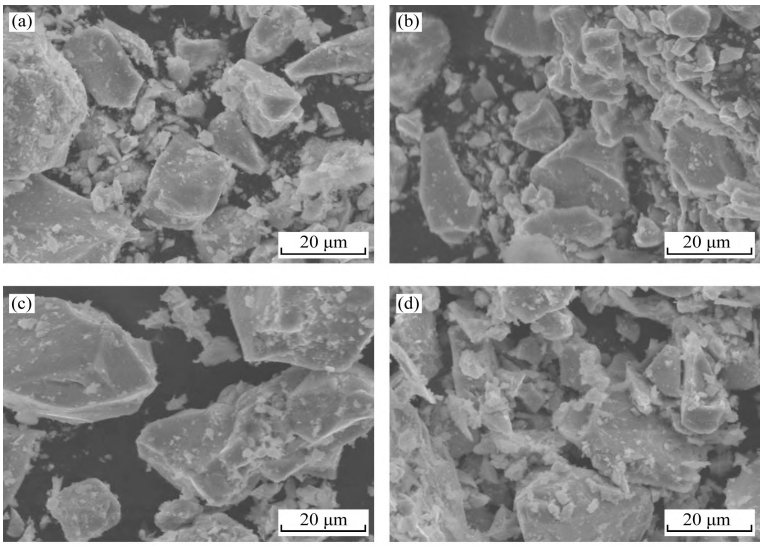
| 原料名称 | TFe | FeO | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | $TiO_2$ | MgO | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 矿 | 63.64 | 26.54 | 7.15 | 0.23 | 0.18 | 0.010 | 0.46 | 0.004 | 0.001 |
| B 矿 | 63.93 | 26.97 | 8.73 | 0.11 | 0.14 | 0.001 | 0.34 | 0.018 | 0.001 |
| C 矿 | 66.18 | 26.06 | 2.94 | 0.50 | 0.94 | 0.244 | 0.85 | 0.024 | 0.005 |
| D 矿 | 70.01 | 29.26 | 1.73 | 0.32 | 0.32 | 0.029 | 0.67 | 0.181 | 0.001 |

### 1.2　铁矿粉颗粒形貌及成球性能

铁精矿的微观形貌，特别是表面粗糙度对其成球性能的影响也比较大。本文采用德国 ZEISS-Sigma-300 扫描电镜对 4 种进口精矿粉的微观形貌进行观察，结果如图 1 所示。由图 1 可知：4 种铁精矿的颗粒形貌差异较大，A、B 矿多呈板片状和长条状，表面较光滑，粒度细而均匀，制粒成球性能较好；C 矿多呈板片状，表面致密而光滑，其大颗粒占比较高，微细颗粒较少，导致造球过程中颗粒孔隙的填充量降低，矿粉不易形成紧密堆积结构，制粒成球性能不佳；D 矿颗粒形状不规则，表面较粗糙，孔隙和缺陷较多，大颗粒表面黏附着微细颗粒及其聚集体，增加了铁精矿的比表面积，可改善其造球性能。

本文通过压滤法、容量法分别测量铁矿粉颗粒的最大分子水、最大毛细水，用以计算 4 种铁精矿的成球性指数，如表 2 所示。由表 2 可知，4 种铁精矿的成球性指数大小排序：D > A > B > C，A、B、C 矿的成球性指数为 0.35 ~ 0.60，均属于中等成球性能，D 矿的成球性指数为 0.60 ~ 0.80，属于良好成球性能。结合图 1

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net




(a)~(d) 分别对应A~D矿

**图1 铁精矿的颗粒形貌**

**Fig. 1 The morphology of iron concentrate particles**

微观形貌可知，D矿的形貌不规则、表面粗糙、孔隙和缺陷较多，显著增大了其比表面积，故其成球性较好。

**表2 铁精矿的成球性指数**

**Table 2 Static ballability index of iron concentrate**

| 原料名称 | 最大分子水(质量分数)/% | 最大毛细水(质量分数)/% | 成球性指数 |
|---|---|---|---|
| A矿 | 0.090 | 0.245 | 0.58 |
| B矿 | 0.079 | 0.223 | 0.55 |
| C矿 | 0.072 | 0.207 | 0.53 |
| D矿 | 0.088 | 0.203 | 0.76 |

## 2 试验方案

为保证球团矿的质量，确保进口铁精矿在高炉中发挥应有的作用，本文进行相关配矿和工艺参数优化研究。试验中，造球盘的直径为1 m，倾角为45°，转速为35 r/min，控制母球形成时间为3 min，生球长大时间为8 min，生球压实时间为10 min；模拟链算机—回转窑工艺参数进行球团的干燥、预热、焙烧和冷却[7]；试验完成后，检测生球强度、预热球强度、成品球质量和冶金性能等指标[8]。

### 2.1 配矿方案

在配矿时除了要考虑各单种铁精矿的成球性能和预热、焙烧性能等外，还要考虑铁精矿品位、原料成本等因素，实现优势互补的目的[9]。配矿方案遵循以下几点要求：A、B矿成球性能较好，价格相对较低，但品位较低，$SiO_2$质量分数高，为了保证球团矿的TFe和$SiO_2$质量分数，拟定其配比为10%~30%；C矿的TFe质量分数较高、$SiO_2$质量分数较低，但价格偏高、成球性能一般，为了提高球团矿的TFe质量分数，并兼顾球团质量和配矿成本，拟定其配比为10%~40%；D矿的TFe质量分数最高、$SiO_2$质量分数最低，价格高于A、B矿而略低于C矿，成球性能良好，但其含S量较高，为了保证球团矿TFe质量分数大于63%，拟定其配比为50%。具体配矿方案如表3所示。

**表3 4种进口铁精矿的试验配矿方案(质量分数) %**

**Table 3 Experimental ore matching schemes of 4 kinds of imported iron concentrate %**

| 试验编号 | 铁精矿配比 | | | | 黏结剂配比 | TFe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | | |
| 1# | 30 | — | 20 | 50 | 2.5 | 65.20 |
| 2# | — | 30 | 20 | 50 | 2.5 | 64.91 |
| 3# | 20 | — | 30 | 50 | 2.5 | 65.56 |
| 4# | — | 20 | 30 | 50 | 2.5 | 65.15 |
| 5# | 10 | — | 40 | 50 | 2.5 | 65.52 |
| 6# | — | 10 | 40 | 50 | 2.5 | 63.00 |

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 2.2　链算机工艺制度

根据某钢铁公司实际情况，设计四因素三水平正交试验进行链算机热工制度优化，考察温度和时间对球团预热Ⅱ段抗压强度的影响，以探明合理的工艺制度。具体工艺参数、正交试验因素和水平如表 4、5 所示。

**表 4　链算机—回转窑工艺参数**

**Table 4　Technological parameters of grate-kiln**

| 项目 | 鼓风干燥段 | 抽风干燥段 | 预热Ⅰ段 | 预热Ⅱ段 | 焙烧段 | 环冷Ⅰ段 | 环冷Ⅱ段 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 温度/℃ | 180 | 307 | 676 | 932 | 1 270 | 1 000 | 750 |
| 时间/min | 4 | 5 | 5 | 8 | 21 | 15 | 9 |

**表 5　链算机热工制度优化正交试验的因素和水平**

**Table 5　Factors and level of orthogonal experimental for thermal system optimization of chain grates**

| 水平 | 鼓风干燥温度(4 min)/℃ | 抽风干燥温度(5 min)/℃ | 预热Ⅰ段温度(5 min)/℃ | 预热Ⅱ段温度(8 min)/℃ | 焙烧温度(21 min)/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 150 | 300 | 660 | 910 | 1 270 |
| 2 | 200 | 330 | 690 | 950 | 1 270 |
| 3 | 250 | 360 | 720 | 990 | 1 270 |

### 2.3　回转窑焙烧制度

在优化配矿和链算机工艺制度的基础上，通过调整回转窑焙烧段工艺参数，改善球团矿氧化程度，消除“黑芯”结构。采取在焙烧温度为 1 250、1 270、1 290 ℃，焙烧时间为 20、25、30 min 下进行回转窑焙烧制度优化试验。

## 3　试验结果及分析

### 3.1　配矿方案优化

配矿方案优化试验结果如表 6 所示。由表 6 可知，6 种配矿方案生球水分质量分数约为 7%，生球落下强度均大于 4.5 次/(0.5 m)，预热球强度大多在 700 N/P 之上，成品球强度在 2 800 N/P 以上，符合高炉炼铁的要求。其中，1#、5#和 6#生球质量相对较优，落下强度约为 6 次/(0.5 m)，生球抗压强度约为 10 N/P。可见，在 50% D 矿与 40% C 矿中，配加 10% B 矿(6#方案)或 A 矿(5#方案)可以使混合矿粒度更加合理，改善制粒性能及生球强度，提高生球性能。而 6#方案的预热Ⅱ段球团抗压强度最高，为 967 N/P；成品球抗压强度较高，为 3 032 N/P；6#球团还原性最高，为 71%；还原膨胀性最低，为 5%；还原后抗压强度最高，为 1 466 N/P。

采用金相显微镜(放大 200 倍)对 6 组方案成品球的矿相结构进行观察，结果如图 2 所示。由图2可知，6组配矿方案中，6#方案的球团矿

**表 6　不同配矿方案下生球和成品球性能**

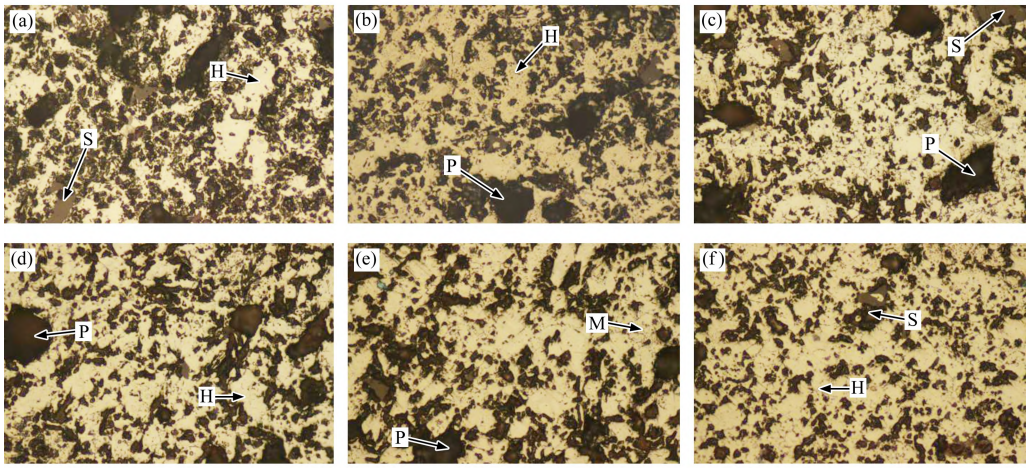
**Table 6　Properties of fresh pellets and finished pellets under different ore blending schemes**

| 试验编号 | 生球物理性能 | | | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) | | 还原性能 | | 还原后球团抗压强度/(N·P$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 水分(质量分数)/% | 落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$] | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) | 预热Ⅱ段球团 | 焙烧段球团 | 还原度指数/% | 还原膨胀率/% | |
| 1# | 6.8 | 6.0 | 10.2 | 697 | 3 709 | 71 | 16 | 901 |
| 2# | 7.0 | 5.2 | 8.6 | 781 | 3 968 | 67 | 13 | 1 082 |
| 3# | 6.9 | 4.6 | 8.2 | 709 | 3 800 | 68 | 12 | 1 128 |
| 4# | 7.1 | 4.5 | 6.4 | 708 | 3 562 | 71 | 13 | 955 |
| 5# | 7.2 | 6.2 | 10.0 | 784 | 2 847 | 67 | 14 | 988 |
| 6# | 7.1 | 5.6 | 9.4 | 967 | 3 032 | 71 | 5 | 1 466 |

注：生球爆裂温度和裂纹温度均大于 600 ℃；采用 GB/T 13241—2017、GB/T 13240—2018 方法分别检测球团矿的还原度指数和还原膨胀率。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的脉石质量分数较低，赤铁矿颗粒呈浑圆状，并连接成片，连晶程度较高，球团矿的结构较致密。这是因为在混合矿中，D矿的含S量较高，其在预热和焙烧过程容易产生气孔；而C矿的脉石质量分数较低，但$Al_2O_3$、$TiO_2$质量分数相对较高，在预热和焙烧过程中可以产生适量的液相；液相进入球团矿孔隙中，使预热球和成品球的结构合理化，使赤铁矿的连晶发展，孔隙率适中，孔隙分布均匀，结构较为稳定，进而提高球团矿强度，使球团抵抗还原过程中的体积膨胀的能力增强，所以该配矿结构下球团矿还原后强度最高。




(a)～(f) 分别对应1#～6#方案

H—赤铁矿($Fe_2O_3$)；S—硅酸盐；P—孔洞；M—磁铁矿。

**图2 成品球团矿的矿相显微结构**

**Fig. 2 Microstructure of finished pellets**

可见，将50% D矿、40% C矿以及10% B搭配使用，不仅可以提高球团矿品位、降低脉石质量分数，而且可以使混合料的成球性能、预热和焙烧性能得到全面提升，所以选择6#方案进行下一步链算机工艺参数优化试验。

### 3.2 链算机工艺参数优化

选取性能指标较优的6#配矿方案为原料，以预热二段球团抗压强度为考核指标，进行链算机工艺参数的四因素三水平正交试验，结果如表7、8所示。

**表7 链算机工艺参数优化正交试验结果**

**Table 7 Orthogonal experiment results of process parameters optimization of chain grates machine**

| 试验编号 | 温度/℃ | | | | | 预热Ⅱ段球团 | | 焙烧段球团 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 鼓风干燥段 | 抽风干燥段 | 预热Ⅰ段 | 预热Ⅱ段 | 焙烧段 | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) | FeO质量分数/% | 焙烧强度/(N·P$^{-1}$) | FeO质量分数/% |
| G-1# | 150 | 300 | 660 | 910 | 1 270 | 899 | 6.56 | 3 421 | <0.50 |
| G-2# | 150 | 330 | 690 | 950 | 1 270 | 577 | 6.03 | 3 472 | 1.96 |
| G-3# | 150 | 360 | 720 | 990 | 1 270 | 969 | 5.93 | 3 539 | <0.50 |
| G-4# | 200 | 300 | 690 | 990 | 1 270 | 982 | 5.22 | 3 583 | 1.10 |
| G-5# | 200 | 330 | 720 | 910 | 1 270 | 772 | 6.22 | 3 519 | 0.90 |
| G-6# | 200 | 360 | 660 | 950 | 1 270 | 726 | 7.32 | 2 110 | 0.96 |
| G-7# | 250 | 300 | 720 | 950 | 1 270 | 982 | 6.20 | 3 059 | 0.72 |
| G-8# | 250 | 330 | 660 | 990 | 1 270 | 1 033 | 2.98 | 3 846 | 0.54 |
| G-9# | 250 | 360 | 690 | 910 | 1 270 | 783 | 6.10 | 2 826 | <0.50 |
| G-10# | 250 | 300 | 720 | 990 | 1 270 | 1 105 | 3.26 | 3 340 | <0.50 |

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

**表 8　链算机工艺参数优化正交试验极差分析**

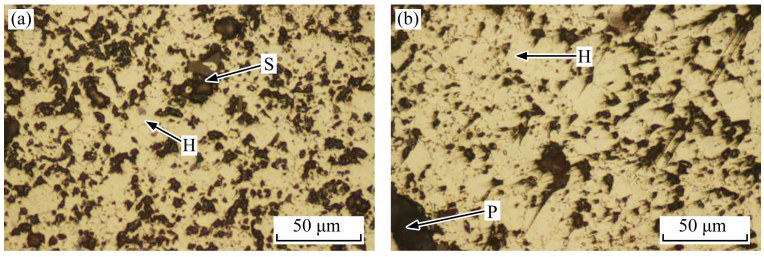
**Table 8　Range analysis of process parameters optimization orthogonal experiment of chain grates machine**

| 项目 | 符号 | 鼓风干燥段温度($E$) | 抽风干燥段温度($H$) | 预热Ⅰ段温度($I$) | 预热Ⅱ段温度($L$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 水平和 | $K_1$ | 2 445 | 2 863 | 2 658 | 2 454 |
| | $K_2$ | 2 480 | 2 382 | 2 342 | 2 285 |
| | $K_3$ | 2 798 | 2 478 | 2 723 | 2 984 |
| 水平均值 | $k_1$ | 815 | 954 | 886 | 818 |
| | $k_2$ | 827 | 794 | 781 | 762 |
| | $k_3$ | 933 | 826 | 908 | 995 |
| 极差 | $R_j$ | 118 | 160 | 127 | 233 |

注：极差反映了当前因素水平变化时，考核指标的变化；$R$ 越大，说明该因素对考核指标的影响越大，因素越重要[10]；$K$ 值大小反映了每个水平对试验指标大小的影响。

由表 8 可知：4 种因素对预热球强度影响排序：预热Ⅱ段温度 > 抽风干燥段温度 > 预热Ⅰ段温度 > 鼓风干燥段温度；在因素 $E$ 中，$k_3 > k_2 > k_1$，因此 $E_3$(250 ℃)对预热球强度的影响最大。同理，可得出试验因素的最优水平组合：$E_3$(250 ℃)$H_1$(300 ℃)$I_3$(720 ℃)$L_3$(990 ℃)。

链算机工艺参数优化前、后成品球的矿相显微结构和矿物组成如图 3 和表 9 所示。由图 3 和表 9 可知：经过优化后，球团孔洞略有增加，为 20.23%；硅酸盐质量分数减小，为 4.36%；磁铁矿质量分数减少，几乎为 0；赤铁矿质量分数增加了 5.17%；赤铁矿晶粒较粗大且相互连接成片，铁氧化物连晶结构更加致密。这是因为较高的鼓风干燥温度(250 ℃)可以加快水分蒸发和 S 的氧化，降低 S 氧化对磁铁矿氧化和赤铁矿连晶生长造成的不利影响；较低的抽风干燥温度(300 ℃)可延缓球团表面结壳过程，使球团内部水分和含 S 气体能够有效扩散和逸出；预热Ⅰ、Ⅱ段温度(分别为 720、990 ℃)的提高，不仅可以促进 $Fe_3O_4$ 氧化成 $Fe_2O_3$，还有利于 $Fe_2O_3$ 微晶的迁移和相互连接，使预热球抗压强度增加，也有利于球团焙烧时进一步氧化。




(a) 优化前；(b) 优化后

H—赤铁矿($Fe_2O_3$)；S—硅酸盐；P—孔洞。

**图 3　链算机工艺参数优化前、后成品球团矿的矿相显微结构**

**Fig. 3　Microstructure of finished pellets before and after optimization of grate process**

**表 9　球团矿的矿相组成(质量分数)**

**Table 9　Phase composition of pellets　%**

| 试验编号 | 孔洞 | 硅酸盐 | 磁铁矿 | 赤铁矿 |
|---|---|---|---|---|
| 6# | 17.92 | 10.48 | 1.44 | 70.16 |
| G-10# | 20.23 | 4.36 | 0.09 | 75.33 |

经正交试验极差分析可得出最佳工艺条件：鼓风干燥温度为 250 ℃，时间为 4 min；抽风干燥温度为 300 ℃，时间为 5 min；预热Ⅰ段温度为 720 ℃，时间为 5 min；预热Ⅱ段温度为 990 ℃，时间为 8 min。根据该最优水平组合开展验证试验 G-10#，由表 9 可知：G-10#预热球的抗压强度最高，为 1 105 N/P，FeO 质量分数为 3.26%；成品球的抗压强度较高，为 3 340 N/P，FeO 质量分数小于 0.5%，氧化充分，符合预期结果。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

### 3.3 回转窑工艺参数优化

选取综合性能较优的6#配矿方案为试验原料，按照优化后的链算机工艺参数进行干燥和预热，然后根据焙烧制度优化方案，进行不同温度和时间的球团焙烧性能试验，结果如表10所示。

**表10 不同焙烧制度下成品球团矿性能**

**Table 10 Properties of finished pellets under different roasting systems**

| 试验编号 | 焙烧温度/℃ | 焙烧时间/min | FeO质量分数/% | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| H-1# | 1 250 | 20 | 1.02 | 3 083 |
| H-2# | 1 250 | 20 | 0.94 | 3 332 |
| H-3# | 1 250 | 20 | <0.50 | 3 449 |
| H-4# | 1 270 | 25 | <0.50 | 3 440 |
| H-5# | 1 270 | 25 | <0.50 | 3 710 |
| H-6# | 1 270 | 25 | <0.50 | 3 896 |
| H-7# | 1 290 | 30 | <0.50 | 3 691 |
| H-8# | 1 290 | 30 | <0.50 | 3 913 |
| H-9# | 1 290 | 30 | <0.50 | 3 928 |

由表10可知：在不同的焙烧温度和时间条件下，球团矿的抗压强度均大于3 000 N/P；且随着焙烧温度由1 250 ℃升高至1 290 ℃，时间由20 min增加至30 min，球团矿的抗压强度逐步升高。这是因为在1 250～1 300 ℃时，随着焙烧温度的升高和时间的延长，磁铁矿氧化生成的赤铁矿微晶扩散长大，并产生再结晶和聚晶长大，使球团矿孔隙率下降，体积收缩，结构致密化，抗压强度提高。

此外，试验结果表明：球团矿的FeO质量分数除在1 250 ℃、时间小于25 min时部分大于0.50%外，其余焙烧制度下均小于0.5%。这是由于6#方案中含有50% D矿，含S量较高，S的氧化放热和含S气体的释放均对磁铁矿氧化和赤铁矿连晶发育造成了不利影响，所以要适当地提高焙烧温度和延长焙烧时间；同时鉴于节能降耗的需要，6#配矿方案合理的焙烧温度和时间为1 270 ℃、25 min，此时成品球的抗压强度为3 710 N/P。该方案能大大提高球团氧化程度，可增强球团抗压强度，符合要求。

## 4 结 论

（1）优化配矿试验表明，6#配矿方案(50% D矿+40% C矿+10% B矿)球团综合性能最优。生球落下强度为5.6次/(0.5 m)，生球抗压强度为9.4 N/P；预热Ⅱ段强度最高为967 N/P，成品球抗压强度较高为3032 N/P，球团矿还原度最高为71%，还原膨胀率最低为5%，球团矿还原后强度最高为1 466 N/P。

（2）对于6#配矿方案，链算机热工参数优化结果：鼓风干燥温度为250 ℃，抽风干燥温度为300 ℃，预热Ⅰ段温度为720 ℃，预热Ⅱ段温度为990 ℃，预热球抗压强度最高为1 105 N/P，FeO质量分数为3.26%，预热球氧化充分。

（3）对于6#配矿方案，按照优化的链算机工艺参数进行干燥和预热后，其回转窑工艺参数的优化结果：焙烧温度为1 270 ℃，焙烧时间为25 min，FeO质量分数小于0.50%，成品球抗压强度为3 710 N/P，球团矿氧化充分，消除了“黑芯”结构。

**参考文献：**

[1] 杨晓东,张丁辰,刘锟,等. 球团替代烧结:铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究:跨学科视野中的工程,2017,9(1):44-52.
YANG Xiaodong,ZHANG Dingchen,LIU Kun,et al. Substituted pellet for sintering:An importan approach of energy-saving,low-carbon and emission reduction before Ironmaking[J]. Journal of engineering studies,2017,9(1):44-52.

[2] 李胜杰,王雪峰,马辉,等. 安钢高炉使用高比例球团矿生产实践[J]. 炼铁,2020,39(6):11-14.
LI Shengjie,WANG Xuefeng,Ma Hiu,et al. Production practice of Anyang steel's BF with high pellet rate[J]. Iron making,2020,39(6):11-14.

[3] 张国成,白晓光,邬虎林,等. 钢渣脱硫剂用于湿法石灰石-石膏法脱硫工艺的试验研究[J]. 钢铁研究学报,2020,32(7):647-653.
ZHANG Guocheng,BAI Xiaoguang,WU Hulin,et al. Experimental study on desulfurization process of wet limestone-gypsum with steel slag desulfurizer[J]. Journal of iron and steel research,2020,32(7):647-653.

[4] 周晓军. 优化球团矿生产工艺参数的实践[J]. 钢铁研究,2017,45(6):10-14.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ZHOU Xiaojun. Practice of optimizing process parameters for pellet[J]. Research on Iron and Steel,2017,45(6):10 - 14.

[5] 夏征宇,刘自民,熊德怀. 马钢链算机—回转窑氧化球团实验研究[J]. 钢铁研究,2008,36(6):5 - 9.
XIA Zhengyu,LIU Zimin,XIONG Dehuai,et al. Experimental study on grate-kiln oxidized pelletizing process at Masteel[J]. Research on Iron and Steel,2008,36(6):5 - 9.

[6] 刘吉涛,张国成,罗果萍,等. 包钢球团合理配矿及链算机工艺制度的优化研究[J]. 烧结球团,2014,39(4):31 - 34.
LIU Jitao,ZHANG Guocheng,LUO Guoping,et al. Study on reasonable proportioning and process system optimization of travelling grate in Baotou Iron and Steel(Group)Co.[J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(4):31 - 34.

[7] 乔波,罗果萍,柴轶凡,等. 不同精矿制备球团矿预热焙烧性能对比分析[J]. 烧结球团,2021,46(2):50 - 56.
QIAO Bo,LUO Guoping,CHAI Yifan,et al. Comparison and analysis on preheating roasting performance of pellets prepared from different concentrates[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(2):50 - 56.

[8] YANG Congcong,ZHU Deqing,PAN Jian,et al. Some basic properties of granules from ore blends consisting of ultrafine magnetite and hematite ores[J]. International Journal of Minerals,Metallurgy and Materials,2019,26(8):953 - 962.

[9] 李晓波,李孟土,易陆杰,等. 湛江球团配矿结构分析[J]. 烧结球团,2018,43(4):49 - 53.
LI Xiaobo,Li Mengshi,YI Lujie,et al. Analysis of proportioning structure of Zhanjiang pelletizing plant[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):49 - 53.

[10] 罗果萍,张国成,刘吉涛,等. 提高链算机—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):13 - 16;22.
LUO Guoping,ZHANG Guocheng,LIU Jitao,et al. Process optimization for improving crushing strength of preheated pellets in grate-kiln oxidized pelletizing process[J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,25(12):13 - 16;22.

(上接第 15 页)

[10] 柳小波,张育维. 基于 U-Net 和 Res-Unet 模型的传送带矿石图像分割方法[J]. 东北大学学报,2019,40(11):1623 - 1629.
LIU Xiaobo,ZHANG Yuwei. Ore image segmentation method of conveyor belt based on U-Net and Res-Unet models[J]. Journal of Northeastern University,2019,40(11):1623 - 1629.

[11] DUAN J,LIU X,WU X,et al. Detection and segmentation of iron ore green pellets in images using lightweight U-net deep learning network[J]. Neural Computing and Applications,2019,32(3):1 - 16.

[12] 殷晓航,王永才,李德英. 基于 U-Net 结构改进的医学影像分割技术综述[J]. 软件学报,2021,32(2):519 - 550.
YIN Xiaohang,WANG Yongcai,LI Deying. Suvery of medical image segmentation technology based on U-Net structure improvement[J]. Journal of Software,2021,32(2):519 - 550.

[13] 王粉花,张强,黄超,等. 融合双流三维卷积和注意力机制的动态手势识别[J]. 电子与信息学报,2021,43(5):1389 - 1396.
WANG Fenhua,ZHANG Qiang,HUANG Chao,et al. Dynamic gesture recognition combining two-stream 3D convolution with attention mechanisms[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2021,43(5):1389 - 1396.

[14] WOO S,PARK J,LEE J Y,et al. CBAM:Convolutional block attention module[C]//Proceedings of the European conference on computer vision(ECCV). Munich:Springer,2018:3 - 19.

[15] 殷晓航,王永才,李德英. 基于 U-Net 结构改进的医学影像分割技术综述[J]. 软件学报,2021,32(2):519 - 550.
Yin X H,Wang Y C,Li D Y. Suvery of medical image segmentation technology based on U-Net structureimprovement[J]. Journal of Software,2021,32(2):519 - 550.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net