# 固废制备高炉冷固结球团矿技术

李保海[1]，杨 涛[2]
（1. 首钢股份公司 迁安钢铁公司，河北 迁安 064400 2. 首钢集团有限公司 技术研究院，北京 100043）

**摘要：**为了提高钢厂含铁固废的回收利用率及降低 $CO_2$ 排放，本文研究了含铁尘泥、高炉返矿和钢渣粉等物料通过冷固结方式制备成高炉用球团矿技术。试验结果表明：30% 高炉返矿 +10% 含铁尘泥 +60% 钢渣粉，配加 5% 黏结剂 A 时，常温干燥冷固结球团（成形压力为 5 MP）矿 4 d 后抗压强度可达到 2 500 N/P 以上；80 ℃干燥 180 min冷固球团矿抗压强度可达到 2 300 N/P；且两种干燥球团 的低温还原粉化指数、转鼓指数、还原膨胀率和还原度指标也可以达到铁矿球团物理特性和冶金性能技术指标要求。

**关键词：**冷固球团矿；黏结剂；抗压强度；冶金性能；高炉冶炼
**中图分类号：**TF046.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000 - 8764(2024)03 - 0074 - 07
**doi：**10.13403/j.sjqt.2024.03.044

# Technology of preparing cold-solidified pellets of blast furnace from solid waste

LI Baohai[1], YANG Tao[2]
(1. Shougang Qian'an Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 064400, Heibei, China; 2. Research Institute of Technology, Shougang Group Corporation, Beijng 100043, China)

**Abstract**: In order to improve the recycling rate of iron-containing solid waste and reduce $CO_2$ emissions in steel mills, the technology of preparing blast furnace pellets from such materials as iron-containing dust sludge, BF return fines and steel slag powder by cold consolidation manner is studied. The results show that, when 30% BF return fines +10% iron-bearing dust sludge +60% steel slag powder and 5% adhesive A are added, the compressive strength of dry and cold-consolidated pellets (forming pressure of 5 MP) can reach more than 2 500 N/P after drying at room temperature for 4 days; the compressive strength of cold-solidified pellets can reach 2 300 N/P after drying at 80 ℃ for 180 min, and the low-temperature reduction pulverization index, drum index, reduction expansion rate and compression set indexes of the two dried pellets can also meet the physical properties and metallurgical performance technical indexes of iron ore pellets.

**Key words**: cold-solidified pellets; adhesive; compressive strength; metallurgical properties; blast furnace smelting

目前，高炉主要炉料为烧结矿、球团矿和块矿，烧结矿和球团矿都需要焦粉或焦炉煤气等化石燃料经高温焙烧生产，生产过程中排放大量 $CO_2$。据统计，生产 1 t 烧结矿排放约 190 ~ 230 kg 的 $CO_2$，生产 1 t 球团矿约排放 60 ~ 90 kg 的 $CO_2$[1-3]。冷固球团技术作为一种在低温下借助于黏结剂进行固结的铁矿石球团法[4]，如果可以用于铁矿粉或固废等含铁物料的固结，并用于高炉炼铁，则可以大大降低炉料制备过程 $CO_2$ 的排放，具有较好的减碳效果。

国外钢铁厂早期冷固球团矿开发报道较多。日本名古屋钢铁厂于 1978 年、君津钢铁厂于 1989 年先后进行冷固球团生产实践，向高炉中配加冷固球团最高允许量达 20%；NRS 公司在高炉内使

**收稿日期：**2023 - 03 - 28；**修回日期：**2023 - 07 - 31
**作者简介：**李保海（1973 - ），男，工程师，从事钢铁生产技术管理方面工作。
**通信作者：**杨 涛（1983—），男，高级工程师，从事球团工艺研究。

用冷固球团的最高比例为 12%；瑞典 SSAB 厂使用冷固球团配比在 80 kg/t 没有引起高炉炉尘增加[5]。

国内高炉研究使用冷固球团主要集中在 90 年代。1990 年—1992 年，宣钢在 300 $m^3$ 高炉配加铁精矿冷固球（10%～20%）进行工业试验，干球强度为1 822 N/P，低温还原粉化指数（<0.5 mm）为 10.2%[6]。1992 年，2672 厂在 100 $m^3$ 高炉配加铁精矿冷固球团 20%，干球强度为 1 230 N/P[7]。2011 年，攀钢 1 350 $m^3$ 高炉配加 2% 冷固球团取代块矿，抗压强度为2 132 N/P，低温还原粉化指数（>3.15 mm）为 5.96%[8]。2017 年，汉钢 450 $m^3$ 高炉使用烧结返矿冷压球团，抗压强度为1 967 N/P[9]。

可见，虽然目前国内外均有将冷固球团应用于高炉的研究，但目前主要是应用于小型高炉，且冷压球团强度有限。因此，要实现含铁固废冷固球团在大中型高炉中的利用，需要保证冷固球团具有较高的抗压强度和优异的冶金性能指标。本文利用高炉返矿、钢渣粉及含铁尘泥等钢厂固废，以及研制的复合黏结剂，研究制备高强度和良好冶金性能冷固结球团的可行性，为含铁固废制备高炉用冷固球团提供指导。

## 1　试验原料

### 1.1　化学成分

试验所用原料主要包括高炉返矿、钢渣粉和含铁尘泥，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可以看出，原料中的铁含量比较高。

试验所用的黏结剂为研制的复合黏结剂 A，其由有机黏结剂和无机黏结剂组成，2 h 吸水率为 380%，主要成分见表 2。

### 1.2　粒度组成

粒度组成是原料特性的一个重要方面，也是影响造球的主要因素之一[10]，试验中所用的 3 种含铁固废原料粒度组成如表 3 所示。

由表 3 可见，高炉返矿粒度较粗，其中 >2.5 mm、[2.5,0.9）mm 粒度质量分数分别为 43.62%、35.40%；钢渣粉粒度相对高炉返矿小，其中 >2.5 mm、[2.5,0.9）mm 粒度质量分数分别为 27.58%、31.86%，[0.9,0.4）mm 粒度质量分数为 25.11%；含铁尘泥粒度较细，大部分集中在 <0.075 mm 粒度，质量分数为 54.02%。

由粉体压力成型原理可知[11]，粗颗粒在造球过程中起到“骨架”和“球核”的作用，能促进母球形成和生球强度的提高。而小的微细颗粒由于表面能大，属于黏结性颗粒，能显著提高生球强度，但小粒径颗粒过多，大粒径颗粒难以有效构建块体的骨架结构，将会影响球团的强度。

### 1.3　颗粒微观形貌特征

造球过程中，原料的颗粒形状和形貌决定了颗粒间接触面积的大小及紧密程度，这不仅影响

**表 1　原料主要化学成分（质量分数）**

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

| 名称 | TFe | $SiO_2$ | CaO | FeO | $Al_2O_3$ | MgO | $K_2O$ | $Na_2O$ | 烧损 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高炉返矿 | 53.87 | 5.76 | 8.91 | 4.03 | 2.11 | 1.20 | 0.074 | 0.048 | -0.23 |
| 钢渣粉 | 84.62 | 2.86 | 6.97 | 5.82 | 0.34 | 1.20 | 0.010 | 0.010 | -4.18 |
| 含铁尘泥 | 51.05 | 4.74 | 15.75 | 3.88 | 1.04 | 4.59 | 0.250 | 0.420 | -1.61 |

**表 2　黏结剂 A 主要化学成分（质量分数）**

**Table 2　Mach chemical composition of adhesives A**　　%

| $Al_2O_3$ | C | H | CaO | MgO | P | S | $SiO_2$ | 烧损 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17.67 | 4.72 | 0.76 | 23.74 | 3.10 | 0.032 | 2.85 | 29.56 | 12.24 |

**表 3　原料粒度组成（质量分数）**

**Table3　Particle size composition of raw materials**　　%

| 原料 | >2.5 mm | [2.5,0.9）mm | [0.9,0.4）mm | [0.4,0.106）mm | [0.106,0.075] mm | <0.075 mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 高炉返矿 | 43.62 | 35.40 | 13.84 | 4.13 | 2.32 | 0.69 |
| 钢渣粉 | 27.58 | 31.86 | 25.11 | 10.83 | 2.09 | 2.53 |
| 含铁尘泥 | 0.78 | 4.21 | 7.48 | 15.41 | 18.1 | 54.02 |

成球性，也对成球强度产生很大影响。颗粒呈矩形或多角形，表面光滑，接触面积小，成球性差[12]。3 种原料微观颗粒形貌见图 1。

由图 1 可以明显看出：高炉返矿的颗粒不规则，多呈片状或多角形，表面致密光滑；钢渣粉的颗粒形状呈多角状且表面粗糙；含铁尘泥的颗粒形状呈球形或多角形，表面粗糙，细小颗粒较多。高炉返矿颗粒表面光滑，不利于成球性，颗粒间的接触面积小，摩擦力也小，生球强度差；而钢渣粉和含铁尘泥表面粗糙摩擦力大，同时具有较大的表面积，颗粒之间接触面积大，成球性能好。

## 2 试验方法

### 2.1 试验内容

#### 2.1.1 不同原料配比试验

由于高炉返矿、钢渣粉、含铁尘泥 3 种原料粒度和表面特征的差异，考察 3 种原料不同配比对冷固球团强度的影响。试验选用黏结剂 A，添加比例为 5%。压球的成形压力为 5 MPa，制得的冷固球团矿在 80 ℃下干燥 180 min 后，进行抗压强度测定。

第一组试验固定含铁尘泥的配比为 10%，调整高炉返矿和钢渣粉的配比，考察冷固球团抗压强度的变化。

第二组试验固定高炉返矿配比为 30%，调整钢渣粉和含铁尘泥的配比，考察冷固球团抗压强度变化。

#### 2.1.2 不同干燥条件试验

干燥是影响冷固球团强度的因素之一。干燥方式按温度的不同可分为常温干燥和高温干燥两种。一般常温干燥所需时间长，能耗低；高温干燥所需时间短，能耗高[13,14]。

为研究干燥条件对冷固球团强度的影响，对常温干燥和加热干燥两种干燥方式下获得的冷固球团进行抗压强度测定，选择冷固球团原料质量分数为 30% 高炉返矿 + 10% 含铁尘泥 + 60% 钢渣粉。

### 2.2 冷固球团性能的测试方法

冷固球团的抗压强度和落下强度测试方式参照球团矿的质量检测方法进行[17]。

冷固球团的还原膨胀率、低温还原粉化率和热爆裂指标的测定方法分别参照国标 GB/T 13240—2018、GB/T 31923.2—2015、GB/T 10322.6—2022 标准进行。

## 3 结果及分析

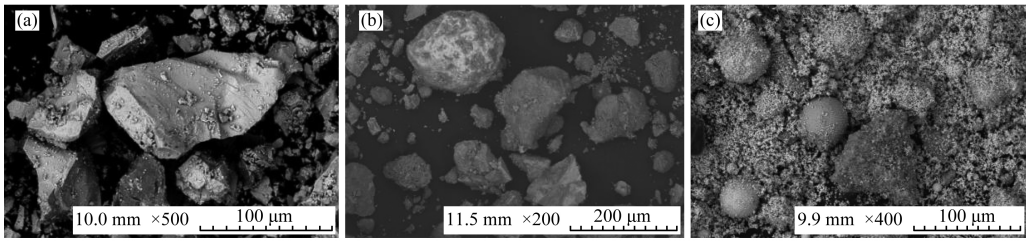
### 3.1 高炉返矿和钢渣粉配比变化对冷固结球团矿强度的影响

固定含铁尘泥的配比，改变高炉返矿和钢渣粉的配比，试验原料的配比变化和相应的冷固球团抗压强度结果如表 4 所示。

**表 4 不同高炉返矿和钢渣粉配比下冷固球团抗压强度变化**

**Table 4 Compressive strength of cold-solidified pellets under different ratios of blast furnace return and ball milling iron powder**

| 方案 | 质量分数/% | | | | 抗压强度/($N \cdot P^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 高炉返矿 | 钢渣粉 | 含铁尘泥 | 黏结剂 A | |
| 1 | 10 | 80 | 10 | 5 | 2 505 |
| 2 | 20 | 70 | 10 | 5 | 2 477 |
| 3 | 30 | 60 | 10 | 5 | 2 300 |
| 4 | 40 | 50 | 10 | 5 | 2 102 |
| 5 | 50 | 40 | 10 | 5 | 1 899 |




（a）高炉返矿；（b）钢渣粉；（c）含铁尘泥

**图 1 3 种原料微观颗粒形貌**

**Fig. 1 Microscopic particle morphology of three raw materials**

由表 4 可以看出：当高炉返矿、钢渣粉配加质量分数分别为 10%、80% 时，冷固球团的抗压强度可达到 2 505 N/P；当高炉返矿质量分数提高至 20%、钢渣粉质量分数降为 70% 时，抗压强度略有下降；当高炉返矿质量分数提高至 30%、钢渣粉质量分数降为 60% 时，冷固球团的抗压强度下降为 2 300 N/P；当高炉返矿质量分数为 50%、钢渣粉质量分数降为 40% 时，冷固球团抗压强度低于于 2 000 N/P。这主要是因为一方面，随着混合原料中粗粒度的高炉返矿比例的升高，粒度较细的钢渣粉比例的降低，造成球团内部小粒度颗粒含量不足，大颗粒形成的球团骨架结构空隙不能被小颗粒充分填充，导致冷固球团强度的降低[13]；另一方面，高炉返矿颗粒表面光滑，颗粒间的接触面积小，不利于成球，随着配加比例的增加，会降低冷固球团的成球性，影响球团强度。因此，选择方案 3 时，冷固球团抗压强度可以基本满足使用要求。

### 3.2　钢渣粉和含铁尘泥比例对冷固结球团矿强度的影响

含铁尘泥粒度较细，添加一定比例的含铁尘泥有利于提高混合原料的整体细度。固定高炉返矿配比，不同含铁尘泥和钢渣粉配比下冷固球团抗压强度变化见表 5。

**表 5　不同含铁尘泥和钢渣粉配比下冷固球团抗压强度变化**

**Table 5　Compressive strength of cold-solidified pellets under different proportions of iron-containing dust and iron powder**

| 方案 | 质量分数/% | | | | 抗压强度/（N·P$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|
| | 高炉返矿 | 钢渣粉 | 含铁尘泥 | 黏结剂 | |
| 1 | 30 | 60 | 10 | 5 | 2 300 |
| 2 | 30 | 50 | 20 | 5 | 2 480 |
| 3 | 30 | 40 | 30 | 5 | 2 522 |
| 4 | 30 | 30 | 40 | 5 | 2 578 |
| 5 | 30 | 20 | 50 | 5 | 2 602 |

由表 5 可以看出，随着混合原料中含铁尘泥配比的升高，钢渣粉配比的降低，冷固球团的抗压强度出现升高。当钢渣粉质量分数为 40%、含铁尘泥质量分数为 30% 时，冷固球团的抗压强度可达到 2 522 N/P；随着钢渣粉配比进一步降低，含铁尘泥配比进一步升高，冷固球团抗压强度进一步升高，但升高幅度不大。由颗粒致密堆积理论可知，随着小粒径颗粒的逐渐增多，颗粒之间相互接触的比表面积就越大，颗粒间的空隙就越少，矿粉颗粒形成的堆积体内，球团强度逐渐提高[13]。但小粒径颗粒增加到一定程度后，由于大粒径颗粒难以有效构建块体的骨架结构，此时外界压力和黏结剂的吸附力成为颗粒间结合的主要驱动，从而影响球团强度进一步提高。

### 3.3　干燥条件对冷固球团强度的影响

对常温干燥和加热干燥两种干燥方式下获得的冷固球团进行抗压强度测定，结果分别如图 2、3 所示。

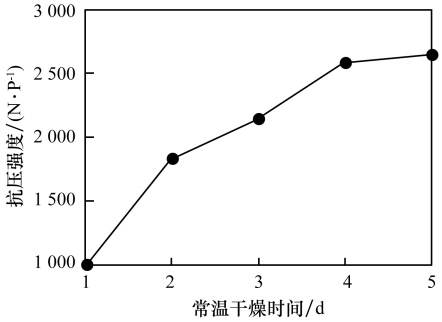
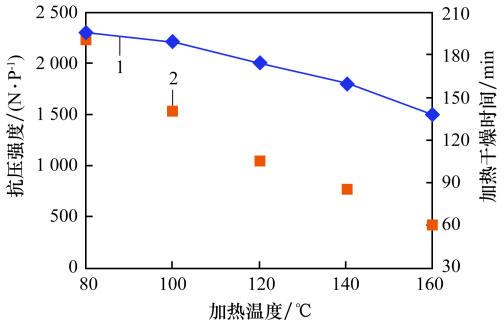



**图 2　常温干燥条件下冷固球团的强度**

**Fig. 2　Strength of cold-solidified pellets at room temperature**




1—强度；2—时间。

**图 3　不同干燥温度下冷固球团的强度**

**Fig. 3　Strength of cold-solidified pellets at different drying temperatures**

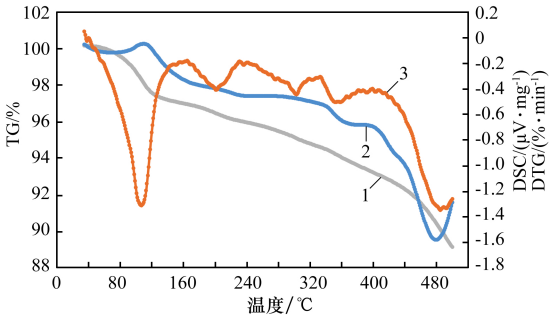
由图 2 可以看出，在常温条件下干燥固结时，1 d 后冷固球团的抗压强度达到 1 000 N/P，2 d 后冷固球团强度的抗压强度接近 2 000 N/P，4 d 后冷固球团的抗压强度超过 2 500 N/P。在常温条件下干燥，冷固球团矿的强度升高的幅度较慢，但固结效果较好，4 d 后可以得到较高的强度。

由图 3 可以看出：加热温度低，需要的干燥

时间长；加热温度高，需要的干燥时间短。在 80 ℃下加热干燥 180 min，冷固球团矿的抗压强度可以达到 2 300 N/P；随着干燥温度的增加，干燥所需的时间缩短，冷固球团强度出现下降的趋势；当干燥温度高于 100 ℃后，随着温度的升高，抗压强度下降速度明显增大。在 160 ℃下干燥后，冷固球团强度仅有 1 500 N/P 左右。可见，干燥温度的升高，提高了干燥效率，但冷固球团强度会有明显降低。

### 3.4 黏结剂性能分析

黏结剂性能对于保持冷固球团高温强度尤其重要[15-16]。为了研究加热条件对黏结剂 A 性能的影响，进而分析加热干燥下冷固结球团强度的变化，对黏结剂 A 进行空气气氛条件下，加热至 500 ℃的热相变和热失重分析，结果如图 4 所示。




1—TG；2—DSC；3—DTG。

**图 4 黏结剂 A 的热相变和热失重分析结果**

**Fig. 4 Thermal phase transition and thermogravimetric analysis results of adhesive A**

由图 4 可以看出，随着温度的增加，黏结剂 A 开始产生失重，同时也开始热反应，在 106.7 ℃时，DTG 曲线达到峰值，失重速率达到一个最大值点，此时热反应也结束。之后，随着温度的增加，黏结剂 A 的热失重和热反应继续发生。这表明在加热升温过程中，黏结剂中有成分发生了相变反应，导致热失重增加，这将影响黏结剂性能。因此，在 80、100、120、140、160 ℃温度下干燥时，随着温度的增加，黏结剂中的成分不断发生热反应，热失重也持续增加，使黏结剂性能降低，冷固球团强度也随之降低。

### 3.5 冷固球团矿的性能分析

将质量分数为 30% 高炉返矿 +10% 含铁尘泥 +60% 钢渣粉的混合原料，黏结剂 A 配比 5%，压球的成形压力为 5 MPa，制得的冷固球团分别在常温下干燥 5 d 和在 80 ℃干燥 180 min 后，进行转鼓指数、低温还原粉化指数和还原膨胀率等冶金性能试验研究，结果见表 6。

从表 6 可以看出，在常温下干燥 5 d，冷固球团的抗压强度和低温还原粉化指数要优于在 80 ℃下干燥 180 min 的冷固球团指标。

冷固球团性能分析参考铁矿球团物理特性技术指标、冶金性能技术指标(2011)[17]，见表 7。方案 1 冷固球团抗压强度可以达到铁矿球团物理特性二级品标准，方案 2 抗压强度可以达到铁矿球团物理特性一级品标准；方案1和2转鼓指数

**表 6 冷固球团冶金性能试验**

**Table 6 Metallurgical properties of cold-solidified pellets**

| 方案 | 干燥条件 | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) | 转鼓指数/% | 低温还原粉化指数/% | | | 还原膨胀率/% | 还原度% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | >6.3 mm | >3.15 mm | <0.5 mm | | |
| 1 | 80 ℃ 180 min | 2 300 | 96.34 | 67.57 | 68.90 | 12.22 | 1.20 | 94.20 |
| 2 | 常温 5 d | 2 642 | 97.03 | 72.94 | 78.02 | 8.33 | 1.03 | 93.58 |

**表 7 铁矿球团物理特性技术指标、冶金性能技术指标(2011)[17]**

**Table 7 Technical indicators of physical properties and metallurgical performance of iron ore pellets(2011)**

| 项目名称 | 品级 | 物理特性 | | 冶金性能(质量分数)/% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) | 转鼓强度(+6.3 mm)/% | 还原膨胀指数 | 还原度指数 | 低温还原粉化指数(>3.15 mm) |
| 指标 | 一级 | ≥2 500 | ≥92.0 | ≤15.0 | ≥75.0 | ≥75.0 |
| | 二级 | ≥2 300 | ≥90.0 | ≤20.0 | ≥70.0 | ≥70.0 |
| | 三级 | ≥2 000 | ≥86.0 | ≤22.0 | ≥65.0 | ≥65.0 |

均可以达到铁矿球团物理特性一级品标准。方案 1 的冷固球团低温还原粉化指数( >3.15 mm)达到铁矿球团冶金性能三级品标准，方案 2 达到一级品标准；方案 1 和 2 的还原膨胀率、还原度均达到铁矿球团冶金性能一级品标准。

## 4　结　论

（1）高炉返矿粒度较粗，颗粒表面光滑，不利于成球，随着其配比增加，冷固球团的抗压强度出现明显下降；含铁尘泥粒度较细，颗粒表面粗糙，利于成球，配比增加有助于冷固球团抗压强度的提高；钢渣粉粒度介于高炉返矿和含铁尘泥之间，颗粒表面也较粗糙，也有助于冷固球团抗压强度的提高。

（2）在原料配比为 30% 高炉返矿 +10% 含铁尘泥 +60% 钢渣粉，压制的冷固球团矿在常温下干燥 4 d 后抗压强度超过 2 500 N/P；在 80、100、120、140 、160 ℃下加热干燥，冷固球团矿的抗压强度随着干燥温度的升高而降低；且常温干燥 5 d，获得的冷固球团物理特性和冶金性能要优于在 80 ℃下干燥 180 min 获得的冷固球团。

## 参考文献：


[1] 许满兴. 中国高炉炉料结构的进步与发展[J]. 烧结球团,2001,26(2):6 – 10.
Xu Manxing. Improvement and development of blast furnace burden design in China[J]. Sintering and Pelleting,2001,26(2):6 – 10.

[2] 上官方钦,张春霞,胡长庆,等. 中国钢铁工业的 $CO_2$ 排放估算[J]. 中国冶金,2010,20(5):37 – 42.
SHANGGUAN Fangqin, ZHANG Chunxia, HU Changqing, et al. Estimation of $CO_2$ emission in Chinese steel industry[J]. China Metallurgy,2010,20(5):37 – 42.

[3] 刘含笑,吴黎明,赵琳,等. 钢铁行业 $CO_2$ 排放特征及治理技术分析[J]. 烧结球团,2022,47(1):38 – 47.
LIU Hanxiao, WU Liming, ZHAO Lin, et al. Analysis on $CO_2$ emission characteristics and treatment technologies in iron and stell industry[J]. Sintering and Pelleting, 2022,47(1):38 – 47.

[4] 张光荣. 转炉污泥制作冷固球团的应用研究[J]. 钢铁,2005,40(8):76 – 79.
ZHANG Guangrong. Study on using OG sludge for cold-hardened pellets[J]. Iron and Steel,2005,40(8):76 – 79.

[5] 沈宗斌,沙永志. 钢铁粉尘冷固结球团工艺研究[J]. 钢铁,2003,38(12):1 – 5.
SHEN Zongbin, SHA Yongzhi. Studies on cold bonded briquettes technology of dust from stell industry[J]. Iron and Steel,2003,38(12):1 – 5.

[6] 李清湧,鲁逢霖. 粉状物料冷固结球团试验研究[J]. 甘肃冶金,1999(1):12 – 16.
LI Qingyong, LU Fenglin. Experimental study on cold solidification pellet of powdered materials[J]. Gansu Metallurgy,1999(1):12 – 16.

[7] 吕彦,安维新,刘明忠. 冷球团矿高炉冶炼工业试验[J]. 河北冶金,1993(2):15 – 19.
LU Yan, AN Weixin, LIU Mingzhong. Industrial test of blast furnace smelting for cold solidified pellets[J]. Hebei Metallurgy,1993(2):15 – 19.

[8] 杨兴熬,杜炽,张义贤. 攀钢 4# 高炉配加冷固球团工业试验实践[J]. 四川冶金,2011,33(5):22 – 24.
YANG Xing'ao, DU Chi, ZHANG Yixian. Industry study of the additional cold sonsolidation pellets at panzhihua 4# blast furance[J]. Sichuan Metallurgy,2011,33(5): 22 – 24.

[9] 严礼祥. 烧结返矿冷压成球入炉的可行性分析[J]. 冶金管理,2020(11):9 – 10.
YAN Lixiang. Feasibility analysis of sintering return ore cold pressing into balls and feeding them into the furnace [J]. China Steel Focus,2020(11):9 – 10.

[10] 胡志清,潘建,朱德庆,等. 铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J]. 烧结球团,2013,38(4):42 – 45;49.
HU Zhiqing, PAN Jian, ZHU Deqing. Raw material characteristics of iron ore concentrate and its influence on balling performance[J]. Sintering and Pelleting, 2013, 38(4):42 – 45;49.

[11] 叶菁. 粉体科学与工程基础[M]. 长沙:科学出版社,2009.
YE Jing. Fundamentals of powder science and technology [M]. Changsha:Science Press,2009.

[12] 侯通. 铁精矿成球性能的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
HOU Tong. Studies on fundamental of ballability of iron concentrtes[D]. Changsha: Central South University,

2010.

[13] 张福顺,赵增武,冯乃祥,等. 铁铌共生矿冷固结含碳球团成型工艺研究[J]. 烧结球团,2012,37(1):42 – 45.
ZHANG Fushun, ZHAO Zengwu, FENG Naixiang, et al. Study on shaping technology of carbon-containing cld-bound pellet of Fe-Nb associated ores[J]. Sintering and Pelleting,2012,37(1):42 – 45.

[14] 甘胤,王吉坤,包崇军,等. 冷压球团技术在冶金中的研究进展[J]. 矿产综合利用,2014(1):10 – 15.
GAN Yin, WANG Jikun, BAO Chongjun. Research progress of cold-pressing pelletizing technology in metallurgy[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2014(1):10 – 15.

[15] 刘征建,王榕榕,刘依然,等. 冷固结球团用地聚合物黏结剂制备参数优化[J]. 钢铁,2019,54(2):15 – 19.
LIU Zhengjian, WANG Rongrong, LIU Yiran, et al. Preparation parameters optimization of geopolymer binder for cold-bonded pellets[J]. Iron and Steel,2019,54(2):15 – 19.

[16] 王榕榕,张建良,刘征建,等. 新型黏结剂强化冷固结球团的作用机理[J]. 钢铁,2017,52(11):9 – 14.
WANG Rongrong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Hardening behavior and mechanism of a new type of binder on cold-bonded pellets[J]. Iron and Steel, 2017,52(11):9 – 14.

[17] 张汉泉. 烧结球团理论与工艺[M]北京:化学工业出版社,2018:272.
ZHANG Hanquan. Theory and technology of singtering and pelletizing[M] Beijing: Chemical Industry Press, 2018:272.

(上接第39页)

[15] 陈伟,邢建民,王凯. 澳大利亚FMG粉矿烧结性能的实验研究[J]. 金属世界,2007(2):26 – 27.
CHEN Wei, XING Jianmin, WANG Kai. Experimental study of sinter about Australian FMG fine ore[J]. Metal World,2007(2):26 – 27.

[16] 赵晓文,李荣玲. FMG粉烧结性能研究[J]. 河北冶金,2010(1):30 – 31.
ZHAO Xiaowen, LI Rongling. Research on sintering property of FMG powder[J]. HEBEI Metallurgy, 2010(1):30 – 31.

[17] 刘振林,杨金福,冯根生,等. 高配比褐铁矿的烧结试验研究[J]. 钢铁,2004,39(12):9 – 13.
LIU Zhenlin, YANG Jinfu, FENG Gensheng, et al. Study on sintering test with high ratio of limonite[J]. Iron and Steel,2004,39(12):9 – 13.

(上接第47页)

WANG Zhaocai, ZHOU Zhian, HU Bing, et al. Wind-oxygen balance model of flue gas circulation in sintering [J]. Iron and Steel,2015,50(12):53 – 59.

[12] 赵晓东,王天明,王萌,等. 离心变频风机并联运行的失速特性分析[J]. 现代电力,2013,30(2):48 – 52.
ZHAO Xiaodong, WANG Tianming, WANG Meng, et al. Stalling characteristics analysis of centrifugal frequency conversion fan in parallel system[J]. Modern Electric Power,2013,30(2):48 – 52.

[13] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of iron and steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.