doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.029

# 低品位磁赤混合铁矿石矿相转化高效分选技术研究

梁小军[1],唐 昊[2],苏洪洋[1],刘云朋[1],张小龙[3],雷泽锐[3],李艳军[3]

(1. 凌钢股份北票保国铁矿有限公司,辽宁 朝阳 122104;
2. 鞍钢集团矿业设计研究院有限公司,辽宁 鞍山 114002;
3. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819)

**摘 要**:针对保国铁矿低品位磁赤混合铁矿石原工艺存在的铁精矿品位低、铁回收率低等问题,本文采用预富集—矿相转化—磨矿—磁选高效分选技术,在磨矿细度-0.074 mm粒级含量占50%、弱磁选场强1 000 Oe、强磁选场强7 000 Oe条件下进行预富集,然后在温度为540 ℃、时间为30 min、还原气体浓度为30%、还原气体种类为CO:$H_2$=2:1、总气量为600 mL/min条件下进行矿相转化,最后经磨矿细度-0.074 mm粒级含量占80%、磁选场强1 800 Oe的磨矿—磁选处理,获得磁选精矿TFe品位为63.28%、铁回收率为82.50%的选别指标,较原工艺分别提高4.78和26.76个百分点。XRD分析表明,赤铁矿经矿相转化后基本转化为磁铁矿,过还原会生成FeO导致铁回收率下降。该工艺显著优于原工艺,为低品位难选铁矿石的高效低碳利用提供了技术支撑。

**关键词**:低品位磁赤混合铁矿石;预富集;矿相转化;磁选;高效利用

**中图分类号**:TD951 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)08-0325-11

## Study on the Efficient Separation of Mixed Magnetite-Hematite Low-grade Ore via Mineral Phase Transformation

Liang Xiaojun[1], Tang Hao[2], Su Hongyang[1], Liu Yunpeng[1], Zhang Xiaolong[3], Lei Zerui[3], Li Yanjun[3]

(1. Baoguo Iron Mine, Lingyuan Iron & Steel Co., Ltd., Chaoyang 122102, Liaoning, China;
2. Anshan Iron and Steel Group Mining Design and Research Institute, Anshan 114002, Liaoning, China;
3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract**: Aiming at the problems of low iron concentrate grade and low iron recovery in the original process for treating mixed magnetite-hematite low-grade ore from Baoguo Iron Mine, this paper adopted an efficient separation technology consisting of pre-concentration, mineral phase transformation, grinding and magnetic separation. Pre-concentration was carried out under the conditions of grinding fineness of 50% passing 0.074 mm, low-intensity magnetic separation field intensity of 1 000 Oe, and high-intensity magnetic separation field intensity of 7 000 Oe. Subsequently, mineral phase transformation was conducted at a temperature of 540 ℃ for 30 min with a reducing gas concentration of 30% (CO:$H_2$=2:1) and a total gas flow rate of 600 mL/min. Finally, the product was subjected to grinding and magnetic separation with a grinding fineness of 80% passing 0.074 mm and a magnetic separation field intensity of 1 800 Oe, yielding a magnetic concentrate with a TFe grade of 63.28% and an iron recovery of 82.50%, which were 4.78 and 26.76 percentage points higher than those of the original process, respectively. XRD analysis showed that hematite was essentially transformed into magnetite after mineral phase transformation, while excessive reduction generated FeO, leading to a decrease in iron recovery. This process is significantly superior to the original process and provides technical support for the efficient and low-carbon utilization

**收稿日期**:2026-05-21
**基金项目**:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1003406)
**作者简介**:梁小军(1978—),男,江西新余人,本科,高级工程师,主要研究方向为铁矿采选工艺优化。
**通信作者**:张小龙(1991—),男,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要从事难选矿产资源绿色开发利用研究工作。

of low-grade refractory iron ore.

**Key words**: mixed magnetite-hematite low-grade ore; pre-concentration; mineral phase transformation; magnetic separation; efficient utilization

## 0 引言

我国是全球最大的钢铁生产国，钢铁行业正处于深度调整与低碳转型的关键阶段[1]。据世界钢协数据，2025年我国粗钢产量达到9.61亿t，占全球产量的51.9%，以1 t粗钢的$CO_2$排放约1.8 t计[2]，钢铁行业$CO_2$排放量约17.3亿t，占我国全年总碳排放量的13.3%。在此背景下，实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和的国家战略目标，对钢铁及铁矿石加工技术提出了革命性要求[3]。

我国复杂难选铁矿资源超过了200亿t，呈组成复杂、微细粒、低品位的特点[4]，成分以赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿为主[5]。处理该类型铁矿石主要采用“干抛—阶段磨矿—阶段磁选—反浮选”“阶段磨矿、粗细分选、重选—弱磁—强磁—反浮选技术”“磨矿—脉动高梯度磁选粗选—粗精矿再磨—脉动高梯度磁选精选”等联合选别工艺[6-7]。青海某难选铁矿石通过四段磨矿，最终在磨矿细度−0.025 mm含量占95.15%的条件下，获得了含TFe品位为64.10%、铁回收率为70.45%的优质铁精矿[8]。近年来，新技术的应用与发展，显著提升了矿产资源利用效率，东北大学在悬浮磁化焙烧技术[9]与装备基础上成功开发了难选铁矿石氢基矿相转化(HMPT)技术[10-11]，在减少$CO_2$排放方面展现出更为显著的优势，已实现工业化生产[12]。Li等[13]采用HMPT处理海南石碌难选铁矿石，XRD结果表明赤铁矿转变为磁铁矿，最佳工艺条件下避免了过还原，铁精矿品位提高约5%，铁回收率提高30%，实现了高效且清洁回收。在矿相转化前实施预富集，可抛除脉石、提升入料品位，降低还原剂消耗与热负荷，保障转化过程的经济性与稳定性。郭磊等[14]以白云鄂博中贫氧化矿为对象，经“磨矿—弱磁—强磁”预富集后再实施“矿相转化—磁选”，获得铁品位为65.26%、铁回收率为89.02%的指标。Zhang等[15]发现，矿物相转化通过改变矿石磁性、放大矿物间力学差异并促使结构松散化，使研磨产品中0.038～0.074 mm粒级含量提高3.04%，显著改善了铁矿石的研磨特性，实现了铁矿物的高效解离与回收。

本文以保国铁矿低品位磁赤混合铁矿石为原料，采用原工艺流程仅能获得精矿TFe品位为58.50%、铁回收率为55.74%的选别指标。针对原工艺选别指标偏低、资源浪费严重的问题，本研究采用预富集—矿相转化—磨矿—磁选高效分选技术，对影响选别指标的主要工艺参数进行了优化，实现了低品位磁赤混合铁矿石中铁矿物的高效分选回收，为难选铁矿资源的开发利用提供借鉴。

## 1 试验原料和试验装置

### 1.1 试验原料

本研究的低品位磁赤混合铁矿石来自保国铁矿，矿物组成复杂、嵌布粒度细，分选难度极大，属典型鞍山式沉积变质型难处理铁矿[16]。原矿的化学成分、铁化学物相分析、矿物含量(BPMA统计)及粒度组成见表1～4。

由表1可知，样品TFe品位为20.68%，其中FeO占6.63%。由表2可知，样品中铁主要以赤褐铁矿的形式存在，铁分布率为41.53%。

由表3可知，矿石中主要铁矿物的含量分别为磁铁矿6.51%、赤铁矿12.54%、菱铁矿12.91%，主要脉石矿物石英含量为35.08%，次要脉石矿物为钠长石、钾长石、云母、铁白云石等，含量分别为8.65%、7.46%、3.14%、2.38%。

由表4可知，磁、赤铁矿在−0.074+0.038 mm

**表1 低品位磁赤混合铁矿石化学成分分析结果**

**Table 1 Analysis results of chemical composition of low grade mixed magnetite-hematite ore** /%

| 成分 | TFe | FeO | MFe | S | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | P | K | $Na_2O$ | 烧失 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 20.68 | 6.63 | 0.83 | 0.146 | 45.75 | 6.63 | 3.31 | 2.46 | 0.105 | 1.27 | 1.02 | 8.42 |

**表2 低品位磁赤混合铁矿石铁化学物相分析结果**

**Table 2 Results of chemical iron phase analysis of low grade mixed magnetite-hematite ore** /%

| 铁物相 | 磁性铁矿物中铁 | 碳酸铁矿物中铁 | 赤褐铁矿中铁 | 硫化铁矿物中铁 | 硅酸铁矿物中铁 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 5.49 | 5.78 | 8.59 | 0.14 | 0.68 | 20.68 |
| 分布率 | 26.55 | 27.95 | 41.53 | 0.68 | 3.29 | 100.0 |

**表 3　低品位磁赤混合铁矿石矿物含量的 BPMA 统计结果**

**Table 3　BPMA statistical results of mineral content of low grade mixed magnetite-hematite ore**　/%

| 矿物名称 | 含量 | 矿物名称 | 含量 | 矿物名称 | 含量 |
|---|---|---|---|---|---|
| 磁铁矿 | 6.51 | 钠长石 | 8.65 | 角闪石 | 1.03 |
| 赤铁矿 | 12.54 | 钾长石 | 7.46 | 石榴石 | 0.99 |
| 菱铁矿 | 12.91 | 云母 | 3.14 | 硅灰石 | 0.77 |
| 钛铁矿 | 1.06 | 铁白云石 | 2.38 | 钙长石 | 0.63 |
| 褐铁矿 | 0.33 | 绿泥石 | 2.05 | 磷灰石 | 0.58 |
| 黄铁矿 | 0.06 | 辉石 | 1.31 | 独居石 | 0.03 |
| 磁黄铁矿 | 0.01 | 方解石 | 1.27 | 其他 | 0.20 |
| 石英 | 35.08 | 高岭石 | 1.04 | 合计 | 100.0 |

**表 4　低品位磁赤混合铁矿石粒度组成结果**

**Table 4　Particle size composition of low grade mixed magnetite-hematite ore**　/%

| 粒级/mm | 磁、赤铁矿 | | 菱铁矿 | | 石英 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 分布率 | 负累计 | 分布率 | 负累计 | 分布率 | 负累计 |
| +0.10 | 14.36 | 100.0 | 8.83 | 100.0 | 28.74 | 100.0 |
| −0.10+0.074 | 13.37 | 85.64 | 9.52 | 91.17 | 27.42 | 71.26 |
| −0.074+0.038 | 24.60 | 72.27 | 21.03 | 81.65 | 26.87 | 43.84 |
| −0.038+0.010 | 37.55 | 47.67 | 48.00 | 60.62 | 15.62 | 16.97 |
| −0.010 | 10.12 | 10.12 | 12.62 | 12.62 | 1.35 | 1.35 |

粒级中负累积分布率为72.27%，主要呈细粒嵌布；菱铁矿在−0.074+0.038 mm粒级中负累积分布率分别为81.65%，以细粒-微细粒嵌布为主；石英在+0.10、−0.10+0.074、−0.074+0.038 mm粒级中分布率分别为28.74%、27.42%、26.87%，主要呈粗粒产出。铁矿物与脉石矿物粒度差异显著，适宜采用阶段磨矿—阶段抛尾工艺。

原矿的X射线衍射分析、SEM图像结果分别如图1、图2所示。由图1可知，样品主要含铁矿物为赤铁矿，其次为菱铁矿和磁铁矿，主要脉石矿物为石英。由图2可知，磁铁矿、赤铁矿内部被菱铁矿、石英等沿裂隙充填，形成大量相互交叉的网格状细脉，脉宽多在10 μm左右，即使细磨也难以完全解离。

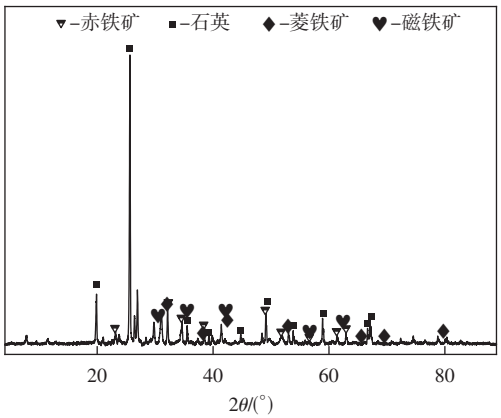



**图 1　低品位磁赤混合铁矿石的 XRD 图谱**

**Fig. 1　XRD diffraction pattern of low grade mixed magnetite-hematite ore**

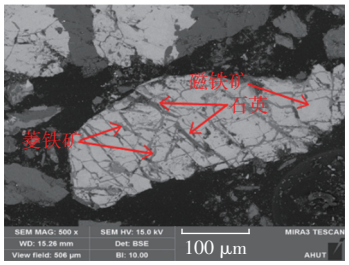



**图 2　低品位磁赤混合铁矿石的 SEM 图像**

**Fig. 2　SEM image of low grade mixed magnetite-hematite ore**

### 1.2　试验方法

试验可划分为三个部分：预富集试验、矿相转化试验、磨矿—磁选试验，试验工艺流程如图3所示。

原矿由混合铁矿石经对辊破碎机(XPSF-0400×250，武汉探矿机械厂)初步破碎至−2 mm后，给入锥形球磨机(XMQ-Φ240×90，武汉探矿机械厂)进行磨矿，磨矿产品经鼓形湿法弱磁选机(XCRS-Φ400×300，武汉探矿机械厂)弱磁选和立式感应湿式强磁选机(LGS-EX，沈阳隆基电磁科技股份有限公司)强磁选，确定适宜的磨矿细度和强磁选磁场强度，得到预富集混磁精矿和尾矿。随后开展矿相转化试验，先将竖式悬浮焙烧炉(OTF1200X，合肥科晶科技有限公司)升温至预设温度，同时通入$N_2$排尽体系内空气；将30 g预富集混磁精矿置于炉内多孔石英板上，在$N_2$气氛下预热3 min，然后按设定条件通入还原气体($H_2$、CO混合气)进行矿相转化。分别开展矿相转化温度、矿相转化时间、还原气体浓度、还原气体种

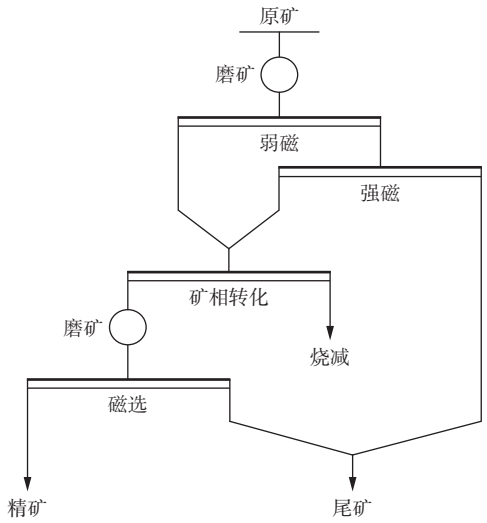



**图 3 磁赤混合矿预富集—矿相转化—磁选工艺流程图**

**Fig. 3 Flowsheet of pre-enrichment − mineral phase transformation-magnetic separation for mixed magnetite-hematite ore**

类及总气量等条件试验。还原结束后停止加热，在 $N_2$ 保护下冷却至室温，得到矿相转化产品。将 22 g 矿相转化产品用三辊四筒棒磨机(XMB-70，武汉探矿机械厂)研磨至指定细度，再采用磁选管(XCSG-120，武汉探矿机械厂)在不同磁场强度下进行磁选分离，分别开展磨矿—磁选的磨矿细度、磁选场强条件试验，得到的磁选精矿即为全流程的精矿产品，而磁选尾矿与预富集尾矿在分别完成产品分析后，可进一步合并为综合尾矿产品。

按照式(1)[17]计算产品的铁回收率：

$$\varepsilon=\frac{\alpha\times\gamma}{\beta}\times100\% \tag{1}$$

式中，$\alpha$、$\beta$ 分别为精矿样品、原矿样品的铁品位，%；$\gamma$ 分别为精矿的产率，%；$\varepsilon$ 为产品的铁回收率，%。

按照式(2)[18]计算还原气体的浓度：

$$C_r=\frac{Q_{CO}+Q_{H_2}}{Q_{CO}+Q_{H_2}+Q_{N_2}}\times100\% \tag{2}$$

式中，$Q_{H_2}$、$Q_{CO}$ 和 $Q_{N_2}$ 分别为 $H_2$、CO 和 $N_2$ 在单位时间内的气体流量，mL/min；$C_r$ 为还原气体的浓度，%。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 预富集试验

2.1.1 预富集磨矿细度条件试验

在弱磁选磁场强度为 1 000 Oe、强磁选磁场强度为 7 000 Oe 的条件下，考察预富集磨矿细度对混磁精矿选别指标的影响，结果如图 4 所示。

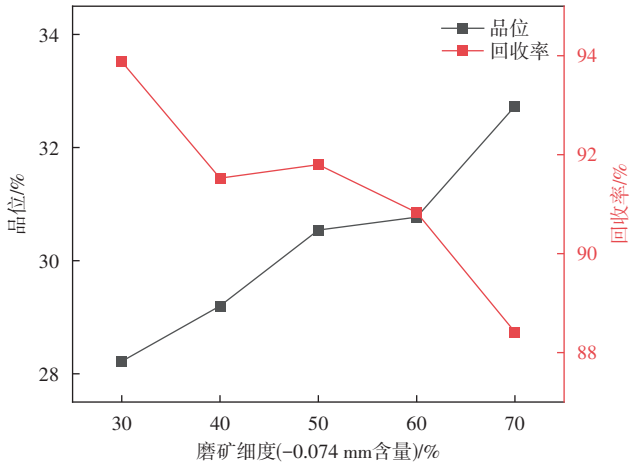



**图 4 预富集磨矿细度对混磁精矿选别指标的影响**

**Fig. 4 Effects of grinding fineness on the indicators of pre-enrichment mixed magnetic concentrate**

由图 4 可知，当 −0.074 mm 粒级含量由 30% 增至 70% 时，预富集混磁精矿铁品位由 28.22% 升至 32.73%，铁回收率由 93.88% 降至 88.41%。综合考虑，确定最佳的预富集磨矿细度为 −0.074 mm 粒级含量占 50%。

2.1.2 预富集强磁选场强条件试验

在磨矿细度 −0.074 mm 粒级含量占 50%、弱磁选磁场强度 1 000 Oe 的条件下，考察预富集强磁选场强对混磁精矿选别指标的影响，结果如图 5 所示。

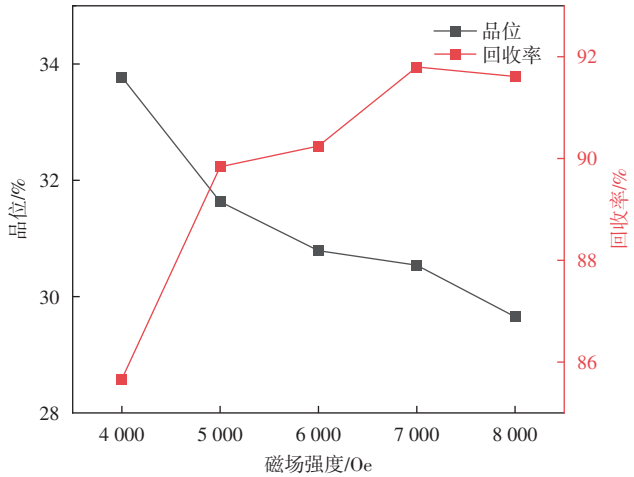



**图 5 预富集强磁选磁场强度对混磁精矿选别指标的影响**

**Fig. 5 Effects of magnetic field strength in high-intensity magnetic separation on the indicators of pre-enrichment mixed magnetic concentrate**

由图 5 可知，随着强磁选场强增加，精矿品位由 33.77% 降至 29.65%，铁回收率由 85.67% 升至 91.61%。综合考虑，确定最佳的预富集强磁选磁场强度为 7 000 Oe。

预富集试验结果表明，预富集采用“一段磨矿—弱磁—强磁”工艺流程，最佳工艺参数为磨矿细度为 −0.074 mm 粒级含量占 50%，弱磁磁选场强为 1 000 Oe，强磁磁选场强为 7 000 Oe”，获得了预富集混磁精矿产率为 62.16%，TFe 品位 30.54%，铁回收率 91.80%，抛尾产率为 37.84%，尾矿 TFe 品位为 4.48% 的选别指标。

### 2.2　矿相转化—磨矿—磁选试验

在预富集试验确定的最佳工艺条件下制备混磁精矿，先进行矿相转化试验，获得的矿相转化产品在磨矿细度 −0.074 mm 粒级含量占 75%、磁选场强为 1 800 Oe 条件下进行磨矿—磁选处理获得磁选精矿和尾矿，分别考察矿相转化温度、转化时间、还原气体浓度、还原气体种类、总气量条件对磁选精矿选别指标的影响；随后在矿相转化试验确定的最佳工艺参数下制备矿相转化产品，进行磨矿—磁选试验，获得磁选精矿和尾矿，考察磨矿细度、磁选场强条件对磁选精矿选别指标的影响。

#### 2.2.1　矿相转化温度条件试验

在矿相转化时间 30 min、还原气体浓度 30%、还原气体种类 $CO:H_2=2:1$、总气量 600 mL/min 条件下，考察不同矿相转化温度条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如图 6 所示。

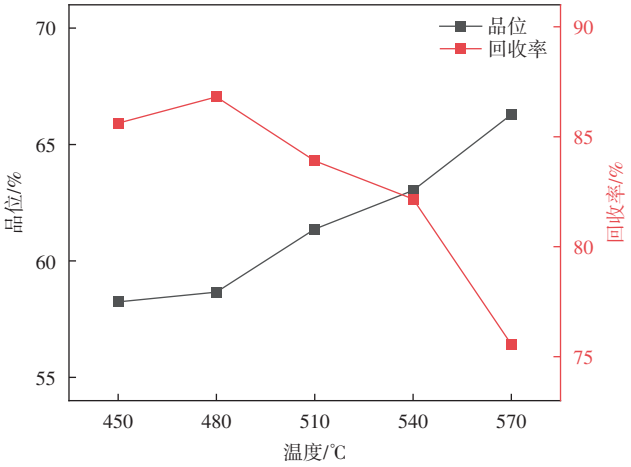



**图 6　矿相转化温度对磁选精矿选别指标的影响**

**Fig. 6　Effects of mineral phase transformation temperature on the indicators of magnetic concentrate**

由图 6 可知，矿相转化温度由 450 ℃升至 570 ℃时，精矿品位由 58.24% 升至 66.29%，铁回收率先升后降，从 85.62% 下降至 75.56%。综合考虑，确定最佳的矿相转化温度为 540 ℃。

#### 2.2.2　矿相转化时间条件试验

在矿相转化温度 540 ℃、还原气体浓度 30%、还原气体种类 $CO:H_2=2:1$、总气量 600 mL/min 条件下，考察不同矿相转化时间条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如图 7 所示。

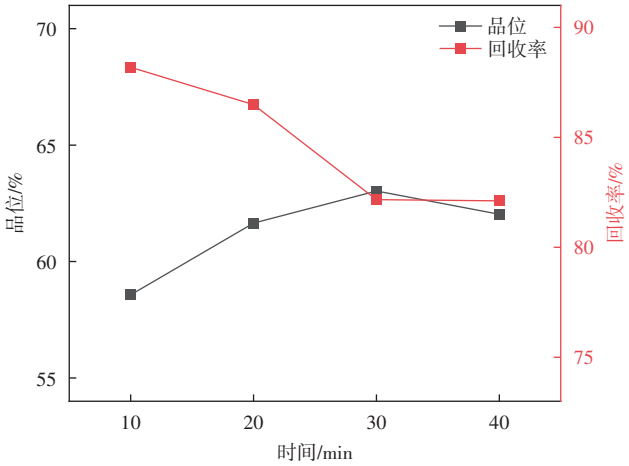



**图 7　矿相转化时间对磁选精矿选别指标的影响**

**Fig. 7　Effects of mineral phase transformation time on the indicators of magnetic concentrate**

由图 7 可知，矿相转化时间从 10 min 增至 40 min，品位由 58.57% 升至 63.13%，铁回收率由 88.19% 降至 82.11%。综合考虑，确定最佳的矿相转化时间为 30 min。

#### 2.2.3　还原气体浓度条件试验

在矿相转化温度 540 ℃、时间 30 min、还原气体种类 $CO:H_2=2:1$、总气量 600 mL/min 条件下，考察不同还原气体浓度条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如图 8 所示。

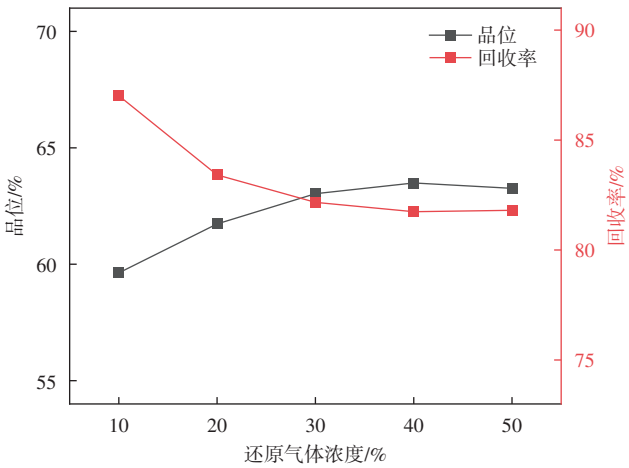



**图 8　还原气体浓度对磁选精矿选别指标的影响**

**Fig. 8　Effects of reducing gas concentration on the indicators of magnetic concentrate**

由图 8 可知，还原气体浓度从 10% 增加至 50%，品位由 59.63% 升至 63.26%，铁回收率由 87.02% 降至 81.80%。综合考虑，确定最佳的还原气体浓度为 30%。

2.2.4 还原气体种类条件试验

在矿相转化温度 540 ℃、转化时间 30 min、还原气体浓度 30%、总气量 600 mL/min 的条件下，考察不同还原气体种类条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如表 5 所示。

**表 5 还原气体种类对磁选精矿选别指标的影响**

**Table 5 Effects of reducing gas species on the indicators of magnetic concentrate** /%

| $CO:H_2$ | 产品名称 | 产率 | TFe 品位 | 铁回收率 |
|---|---|---|---|---|
| 2:1 | 焙烧原矿 | 100.0 | 31.63 | 100.0 |
| | 磁选精矿 | 41.22 | 63.03 | 82.17 |
| | 磁选尾矿 | 58.78 | 9.59 | 17.83 |
| | 合计 | 100.0 | 31.62 | 100.0 |
| 1:3 | 焙烧原矿 | 100.0 | 32.03 | 100.0 |
| | 磁选精矿 | 42.00 | 62.87 | 83.83 |
| | 磁选尾矿 | 58.00 | 8.78 | 16.17 |
| | 合计 | 100.0 | 31.50 | 100.0 |

由表 5 可知，还原气体种类为 $CO:H_2=2:1$ 时的多项选别指标略优，结合现场实际情况，确定最佳还原气体种类为 $CO:H_2=2:1$。

2.2.5 总气量条件试验

在矿相转化温度 540 ℃、转化时间 30 min、还原气体浓度 30%、还原气体种类 $CO:H_2=2:1$ 的条件下，考察不同总气量条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如图 9 所示。

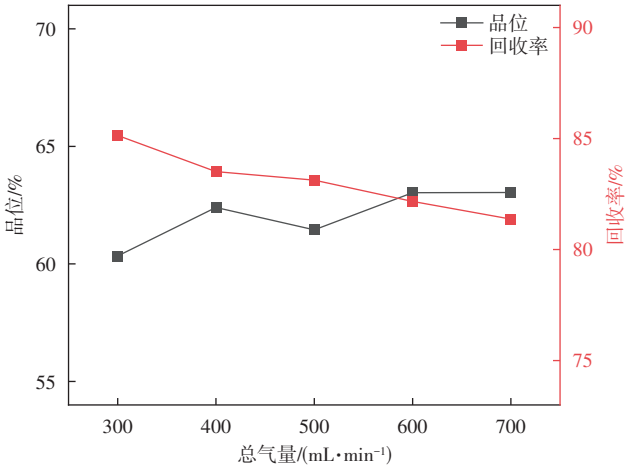



**图 9 总气量对磁选精矿选别指标的影响**

**Fig. 9 Effects of total gas flow rate on the indicators of magnetic concentrate**

由图 9 可知，随总气量增加，品位先降后升、铁回收率下降。综合考虑，确定最佳的总气量为 600 mL/min。

2.2.6 磨矿细度条件试验

矿相转化的最佳工艺参数为矿相转化温度 540 ℃，转化时间 30 min，还原气体浓度 30%，还原气体种类 $CO:H_2=2:1$，总气量为 600 mL/min。在磁选场强 1 800 Oe、选别时间 5 min 的条件下，考察不同磨矿细度条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如图 10 所示。

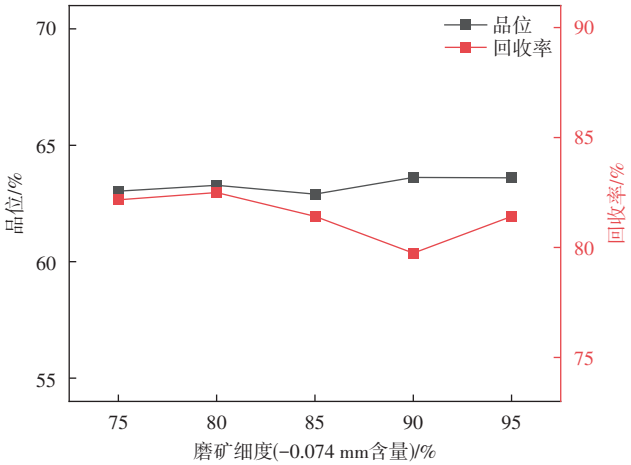



**图 10 磨矿细度对磁选精矿选别指标的影响**

**Fig. 10 Effects of grinding fineness on the indicators of magnetic concentrate**

由图 10 可知，当 −0.074 mm 含量从 75% 增加至 95% 时，品位在 63.62% 以下波动，铁回收率在 79.74% 至 82.30% 之间。综合考虑，确定适宜的磨矿细度为 −0.074 mm 粒级含量为 80%。

2.2.7 磁选场强条件试验

在磨矿细度 −0.074 mm 占 80%、选别时间 5 min 的条件下，考察不同磁选场强条件对磁选精矿选别指标的影响，结果如图 11 所示。

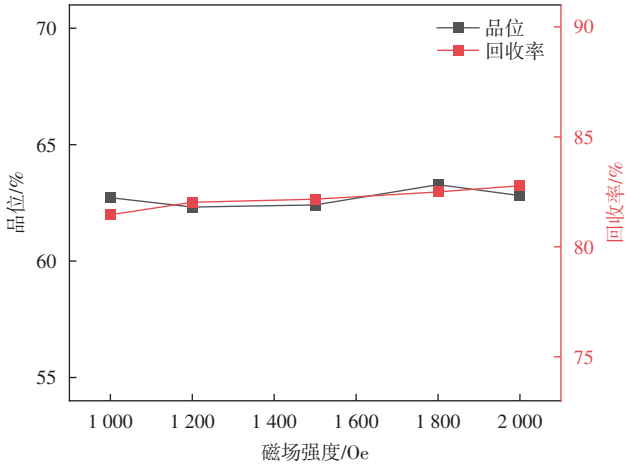



**图 11 磁场强度对磁选精矿选别指标的影响**

**Fig. 11 Effects of magnetic field strength on the indicators of magnetic concentrate**

由图 11 可知，磁场强度对精矿铁品位、铁回收率影响不明显，铁回收率整体在 81.46%～82.78% 范围内波动变化，铁品位整体在 62.32%～63.28% 范围内

波动变化。综合考虑，确定磁场强度为1 800 Oe。

磨矿—磁选试验结果表明，最佳工艺参数为矿相转化产品磨矿细度－0.074 mm粒级含量占80%，磁场强度为1 800 Oe”。综上，采用预富集—矿相转化—磨矿—磁选高效分选技术处理保国铁矿低品位磁赤混合铁矿石，在最佳工艺参数条件下，可获得磁选精矿产率为41.22%、铁品位为63.28%、铁回收率为82.50%，磁选尾矿铁品位为9.42%的选别指标。

### 2.3　试验产品分析

#### 2.3.1　化学成分分析

对获得的预富集混磁精矿、预富集强磁尾矿、矿相转化产品、磁选精矿和磁选尾矿进行化学成分和铁化学物相分析，结果分别见表6和表7。

由表6化学成分分析结果可知，经过两段磁选工艺，预富集混磁精矿TFe品位较原矿显著提高，有用铁矿物得到了有效富集；预富集强磁尾矿TFe品位较低，$SiO_2$含量较高，表明大部分脉石已被抛除。矿相转化产品FeO含量明显升高，说明赤褐铁矿在还原气氛下已部分转化为磁铁矿。磁选精矿TFe品位达到63.13%，主要杂质$SiO_2$和$Al_2O_3$含量显著降低，有害元素硫含量较低，表明通过矿相转化—磁选工艺可获得合格铁精矿。磁选尾矿铁品位较高，仍存在一定铁损失。

由表7的铁化学物相分析结果可知，预富集混磁精矿中铁主要以赤褐铁矿、磁铁矿和碳酸铁形式存在。预富集强磁尾矿中铁损失主要集中在菱铁矿和赤褐铁矿。矿相转化产品中磁性铁矿物分布率大幅提升，赤褐铁矿和碳酸铁分布率显著下降，表明矿相转化后大部分铁矿物已成功转化为磁性铁矿物。磁选精矿中磁性铁矿物分布率高达97.84%，说明磁选分离效果良好。磁选尾矿中铁主要以赤褐铁矿形式存在，少量铁矿物因解离不充分或包裹而损失。

综合表6、7结果，原矿经预富集—矿相转化—磨矿—磁选全流程处理后，铁矿物由以赤褐铁矿、碳酸铁为主转变为以磁铁矿为主，实现了铁矿物的精准相转化与高效分离。

#### 2.3.2　XRD分析

对预富集混磁精矿、预富集强磁尾矿、矿相转化产品、磁选精矿及磁选尾矿进行XRD分析，结果如图12所示。由图12可知，预富集混磁精矿中主要铁矿物为赤铁矿，另含少量磁铁矿和菱铁矿，脉石矿物以石英为主。预富集强磁尾矿中主要矿物为石英，表明预富集工艺有效抛除了大部分脉石，有用铁矿物得到了初步富集。矿相转化产品中主要铁矿物为磁铁矿，赤铁矿特征峰基本消失，脉石矿物仍以石英为主。

结合表7可知，经矿相转化后，原料中的赤铁矿及菱铁矿几乎完全被还原为磁铁矿，实现了铁矿物的精准相转化。磁选精矿中主要铁矿物为磁铁矿，石英特征峰显著减弱，表明磁选过程有效分离了磁铁矿与脉石矿物，有用铁矿物得到了高效富集。磁选尾矿中主要矿物为石英，仅含少量磁铁矿，说明铁矿物损失较小。结合图12的XRD分析结果，预富集混磁精矿中赤铁矿特征峰明显，经

**表6　试验产品化学成分分析结果**

**Table 6　Analysis results of chemical composition of experimental products**　/%

| 产品名称 | TFe | FeO | MFe | S | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | P | K | $Na_2O$ | 烧失 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 预富集混磁精矿 | 30.54 | 9.39 | 0.86 | 0.074 | 36.21 | 4.98 | 3.51 | 2.96 | 0.066 | 1.12 | 0.86 | 9.63 |
| 预富集强磁尾矿 | 4.48 | 2.35 | 0.25 | 0.088 | 70.47 | 9.48 | 2.83 | 1.38 | 0.149 | 1.98 | 1.43 | 4.36 |
| 矿相转化产品 | 31.63 | 20.89 | 1.55 | 0.105 | 40.94 | 5.52 | 3.93 | 3.30 | 0.170 | 1.27 | 0.770 | 1.09 |
| 磁选精矿 | 63.13 | 34.38 | 2.80 | 0.075 | 10.67 | 1.40 | 1.20 | 1.74 | 0.080 | 0.230 | 0.180 | 0.02 |
| 磁选尾矿 | 9.52 | 6.27 | 0.31 | 0.064 | 61.32 | 8.24 | 5.43 | 4.18 | 0.220 | 1.92 | 1.26 | — |

**表7　试验产品铁化学物相分析结果**

**Table 7　Chemical iron phase analysis results of experimental products**　/%

| 铁物相 | | 磁性铁矿物中铁 | 碳酸铁矿物中铁 | 赤褐铁矿中铁 | 硫化铁矿物中铁 | 硅酸铁矿物中铁 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 预富集混磁精矿 | 含量 | 10.85 | 7.45 | 11.07 | 0.53 | 0.64 | 30.54 |
| | 分布率 | 35.52 | 24.39 | 36.25 | 1.74 | 2.10 | 100.0 |
| 预富集强磁尾矿 | 含量 | 0.09 | 1.97 | 1.92 | 0.18 | 0.32 | 4.48 |
| | 分布率 | 2.01 | 43.97 | 42.86 | 4.02 | 7.14 | 100.0 |
| 矿相转化产品 | 含量 | 26.50 | 1.10 | 3.38 | 0.06 | 0.59 | 31.63 |
| | 分布率 | 83.77 | 3.48 | 10.69 | 0.19 | 1.87 | 100.0 |
| 磁选精矿 | 含量 | 61.77 | 0.2 | 0.98 | 0.03 | 0.15 | 63.13 |
| | 分布率 | 97.84 | 0.32 | 1.55 | 0.05 | 0.24 | 100.0 |
| 磁选尾矿 | 含量 | 1.46 | 1.37 | 5.63 | 0.10 | 0.96 | 9.52 |
| | 分布率 | 15.34 | 14.39 | 59.14 | 1.05 | 10.08 | 100.0 |

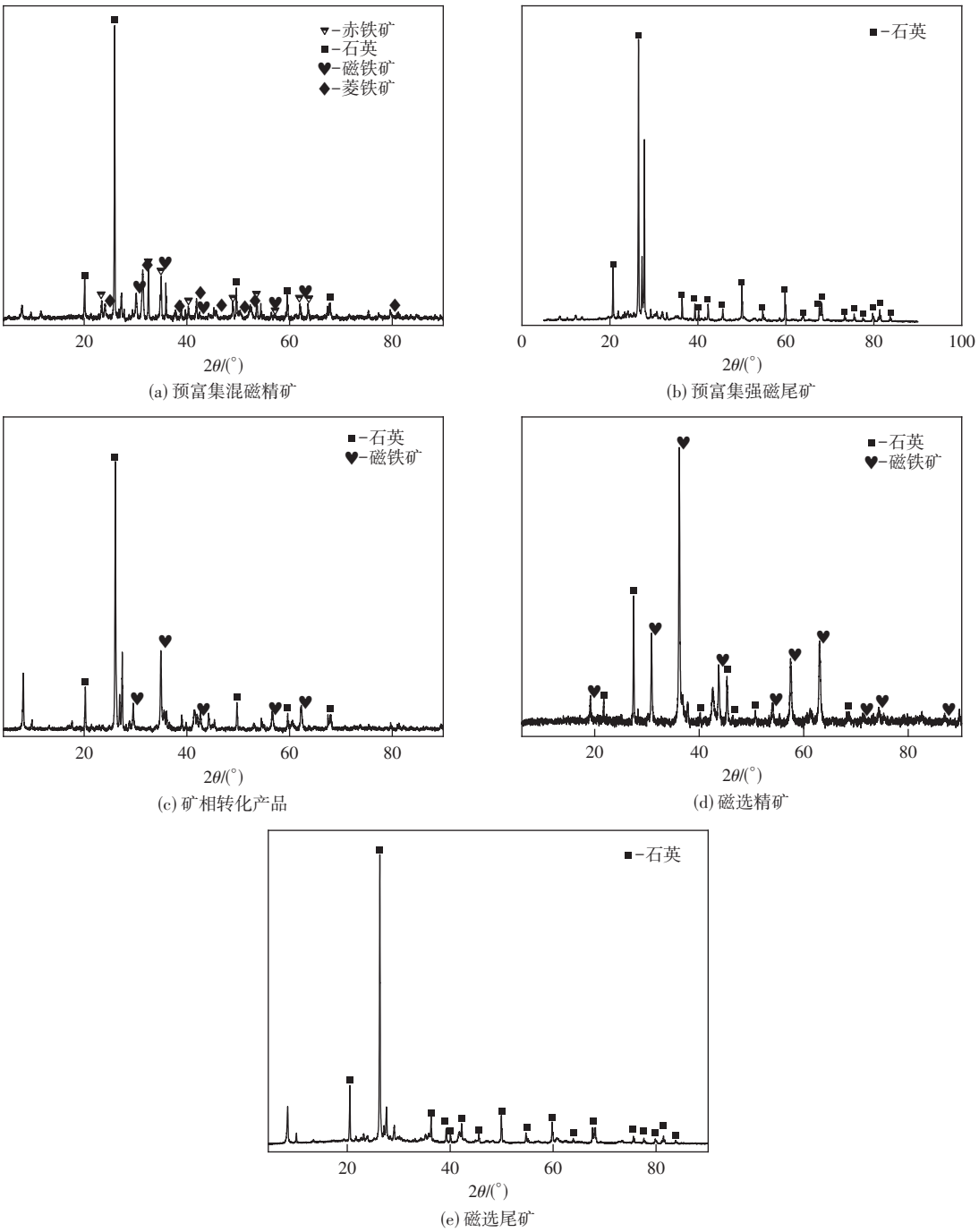



**图12 试验产品的XRD图谱**

**Fig. 12 XRD diffraction pattern of experimental products**

矿相转化后，赤铁矿特征峰基本消失，磁铁矿特征峰显著增强，表明赤铁矿已基本转化为磁铁矿。同时，由表6铁化学物相分析结果，转化产品中FeO含量较预富集混磁精矿显著升高，进一步佐证了还原反应的发生。转化后矿物磁性显著增强，为磁选高效分离奠定了物相基础[18]。

在矿相转化试验过程中，工艺参数对转化效果具有显著影响。随着矿相转化温度的升高，精矿铁品位变化幅度较小，但铁回收率及产率先升后降，说明适宜的温度有利于还原反应正向进行，而过高的温度则促进了副反应的发生，易造成磁铁矿的过还原[17]。随着还原气体浓度的增加，磁选精矿铁品位逐步提升，但铁回收率及产率呈下降趋势，表明过高的还原气体浓度也会导致过还原产生弱磁性的FeO[19]。

2.3.3 粒度组成分析

对预富集混磁精矿、磁选精矿及磁选尾矿进行粒度组成分析，结果如表8所示。

**表8　试验产品粒度组成分析结果**

**Table 8　Analysis results of particle size composition of experimental products**

| 粒级/mm | 预富集混磁精矿 | | | 磁选精矿 | | | 磁选尾矿 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 产率/% | TFe品位/% | Fe分布率/% | 产率/% | TFe品位/% | Fe分布率/% | 产率/% | TFe品位/% | Fe分布率/% |
| +0.074 | 35.62 | 27.77 | 32.28 | 30.39 | 56.29 | 26.98 | 25.87 | 6.49 | 17.51 |
| −0.074+0.045 | 42.19 | 30.98 | 42.82 | 20.86 | 65.45 | 21.65 | 22.09 | 7.08 | 16.35 |
| −0.045+0.038 | 14.43 | 33.70 | 15.97 | 6.36 | 65.76 | 6.64 | 8.76 | 7.79 | 7.15 |
| −0.038 | 7.76 | 34.99 | 8.93 | 42.39 | 66.49 | 44.73 | 43.28 | 12.93 | 58.99 |
| 合计 | 100.0 | 30.54 | 100.0 | 100.0 | 63.13 | 100.0 | 100.0 | 9.52 | 100.0 |

由表8可知，预富集混磁精矿中，+0.074 mm粒级产率为35.62%，铁品位27.77%，铁分布率32.28%；−0.038 mm粒级产率为7.76%，铁品位34.99%，铁分布率8.93%。随着粒级变细，铁品位逐渐升高，表明铁矿物在细粒级中得到了有效富集。磁选精矿中，+0.074 mm粒级产率为30.39%，铁品位56.29%；−0.038 mm粒级产率为42.39%，铁品位66.49%，铁分布率44.73%。磁选精矿主要集中在细粒级，铁品位较高，有用铁矿物得到了良好分离。磁选尾矿中，+0.074 mm粒级产率为25.87%，铁品位6.49%；−0.038 mm粒级产率为43.28%，铁品位12.93%，铁分布率58.99%。尾矿中铁品位随粒级变细而升高，细粒级中铁损失较为明显，可能与部分铁矿物未充分解离有关。因此，在矿相转化过程中，需严格控制还原气体浓度与矿相转化温度等关键参数，以避免过还原，确保赤铁矿精准转化为磁铁矿。

结合表8粒度组成分析结果，矿相转化产品及磁选精矿均呈现粒度越细、铁品位越高的趋势，表明细磨有利于磁铁矿与石英的单体解离，进而提高磁选分离效果。采用预富集—矿相转化—磨矿—磁选工艺处理低品位磁赤混合铁矿石，在理论上是可行的，在技术上通过优化关键参数可实现铁矿物由赤铁矿向磁铁矿的精准相转化与高效分离。预富集混磁精矿、磁选精矿及磁选尾矿均呈现粒度越细、铁品位越高的趋势，表明铁矿物主要富集于细粒级，有进一步控制磨矿细度以提高铁回收率的潜力。

## 3　结论

1）保国铁矿低品位磁赤混合铁矿石原矿TFe品位20.68%，铁主要以赤褐铁矿和磁铁矿形式存在，脉石矿物主要为石英。

2）保国铁矿低品位磁赤混合铁矿石采用“一段磨矿—弱磁选—强磁选”工艺，在磨矿细度−0.074 mm粒级含量占50%、弱磁选场强1 000 Oe、强磁选场强7 000 Oe条件下进行预富集，获得TFe品位为30.54%、铁回收率为91.80%的预富集混磁精矿。以此混磁精矿为原料，在矿相转化温度540 ℃、时间30 min、还原气体浓度30%、还原气体种类$CO:H_2=2:1$、总气量600 mL/min条件下，得到磁选精矿TFe品位为63.03%、铁回收率为82.17%；进一步优化磨矿细度至−0.074 mm粒级含量占80%、磁选场强1 800 Oe后，精矿TFe品位提升至63.28%、铁回收率为82.50%，较原工艺选矿指标（TFe品位58.50%、铁回收率55.74%）分别提高4.78和26.76个百分点。

3）XRD、化学成分及粒度分析结果均表明，预富集混磁精矿经矿相转化后，赤铁矿基本转化为磁铁矿，磁性铁分布率由35.52%提升至83.77%，FeO含量显著升高；磁选精矿中磁性铁分布率高达97.84%，尾矿中铁主要以赤褐铁矿形式损失（59.14%）。各产品均呈现粒度越细、铁品位越高的趋势，细粒级（−0.038 mm）是铁的主要富集区间。

4）过还原会生成弱磁性FeO，导致铁回收率下降；此外，尾矿中的细粒级（−0.038 mm）铁品位随粒度变细而升高，铁损失明显，这主要与铁矿物未充分解离有关。

参考文献

[1] 张松波，张磊，蔡启端，等. 中国钢铁工业演化和铁矿石供需展望[J]. 中国矿业，2025，34(2)：204-211.
Zhang Songbo，Zhang Lei，Cai Qiduan，et al. China's iron and steel industry evolution and iron ore supply and demand outlook[J]. China Mining Magazine，2025，34(2)：204-211.

[2] 韩星，张彩东，李兰杰，等. 氢基竖炉直接还原技术研究现状及展望[J]. 河北冶金，2024(4)：1-5，11.
Han Xing，Zhang Caidong，Li Lanjie，et al. Research status and prospects of hydrogen based vertical furnace direct reduction technology[J]. Hebei Metallurgy，2024(4)：1-5，11.

[3] Wang Yaxin, Liu Jun, Tang Xiaolong, et al. Decarbonization pathways of China′s iron and steel industry toward carbon neutrality[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 194: 106994. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106994.

[4] 张铃, 路永森, 薛晨, 等. 中国贫细杂难选铁矿分选技术研究进展[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 13-17, 32.
Zhang Ling, Lu Yongsen, Xue Chen, et al. Research progress on separation technology of lean and fine refractory iron ore in China[J]. Modern Mining, 2024, 40(3): 13-17, 32.

[5] 陈岗, 侯翠丽, 朱蕊欣, 等. 低品位复杂难选铁矿磁化焙烧技术研究进展[J]. 山东冶金, 2025, 47(3): 27-30.
Chen Gang, Hou Cuili, Zhu Ruixin, et al. Research progress on magnetization roasting technology of low-grade complex and refractory iron ore[J]. Shandong Metallurgy, 2025, 47(3): 27-30.

[6] 韩跃新, 张小龙, 高鹏, 等. 中国铁矿石选矿技术发展与展望[J]. 金属矿山, 2024, 53(2): 1-24.
Han Yuexin, Zhang Xiaolong, Gao Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024, 53(2): 1-24.

[7] 李琛, 王大骞, 洪森, 等. 四川某低品位弱磁性铁矿脉动高梯度磁选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(8): 93-98.
Li Chen, Wang Daqian, Hong Sen, et al. Experimental study on pulsating high gradient magnetic separation of a low-grade weakly magnetic iron ore in Sichuan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(8): 93-98.

[8] 罗云波, 肖金雄, 石云良, 等. 青海某低品位难选铁矿选矿试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(5): 28-35.
Luo Yunbo, Xiao Jinxiong, Shi Yunliang, et al. Experimental study on beneficiation of a low-grade refractory iron ore in Qinghai Province[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(5): 28-35.

[9] Zhang Xiaolong, Han Yuexin, Sun Yongsheng, et al. Innovative utilization of refractory iron ore via suspension magnetization roasting: a pilot-scale study[J]. Powder Technology, 2019, 352: 16-24.

[10] 郭风芳, 韩跃新, 张琦, 等. 海南石碌铁矿石氢基矿相转化: 磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2024, 53(2): 152-156.
Guo Fengfang, Han Yuexin, Zhang Qi, et al. Experimental study on hydrogen-based mineral phase transformation followed by magnetic separation of iron ore from Shilu, Hainan[J]. Metal Mine, 2024, 53(2): 152-156.

[11] 赵平, 高鹏, 刘杰, 等. 氢基矿相转化对铌铁矿浮选行为的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 110-117.
Zhao Ping, Gao Peng, Liu Jie, et al. Influence of hydrogen mineral phase transformation on flotation behavior of niobite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(5): 110-117.

[12] Zhao Lingbo, Zhao Bing, Gao Peng, et al. Study on hydrogen reduction behavior of Hainan hematite: kinetic and microstructural evolution from a green resource processing perspective[J]. Minerals Engineering, 2025, 234: 109769. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109769.

[13] Li Wenbo, Wang Hanyu, Han Yuexin, et al. A zero-carbon emission approach for the reduction of refractory iron ores: mineral phase, magnetic property and surface transformation in hydrogen system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 89: 531-540.

[14] 郭磊, 陈宏超, 高鹏, 等. 白云鄂博中贫氧化矿预富集: 氢基矿相转化试验研究[J]. 金属矿山, 2023, 52(6): 96-100.
Guo Lei, Chen Hongchao, Gao Peng, et al. Study on pre-concentration and hydrogen-based phase transformation technology for medium-low grade oxidized ore of Bayan Obo[J]. Metal Mine, 2023, 52(6): 96-100.

[15] Zhang Xiaolong, Ge Wencheng, Gao Peng, et al. Effect of hydrogen mineral phase transformation on grinding characteristics of refractory iron ore[J]. Powder Technology, 2025, 453: 120701. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120701.

[16] Cheng Zhonghang, Zhu Dianbing, Dai Shujuan, et al. An experimental research on cationic reverse flotation of Anshan-type iron ores[J]. Materials Science Forum, 2020, 980: 359-367.

[17] 曹一斐, 祝昕冉, 孙永升, 等. 难选褐铁矿磁化焙烧空气冷却技术研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(7): 240-248.
Cao Yifei, Zhu Xinran, Sun Yongsheng, et al. Study on air cooling process for limonite magnetization roasting[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 240-248.

[18] 宋紫欣, 谢海云, 祁磊, 等. 悬浮磁化焙烧—磁选法高效

利用铁尾矿[J]. 矿物学报，2024，44(4)：559-569.
Song Zixin，Xie Haiyun，Qi Lei，et al. Efficient utilization of iron tailings by using the suspension magnetization roasting-magnetic separation method[J]. Acta Mineralogica Sinica，2024，44(4)：559-569.
[19] Sun Yongsheng，Zhang Xiaolong，Han Yuexin，et al. A new approach for recovering iron from iron ore tailings using suspension magnetization roasting：a pilot-scale study[J]. Powder Technology，2020，361：571-580.

（本文编辑 汪东芳）

**【缅怀寄语】**

每当提起矿物加工，我总会想起孙传尧院士的《我与矿物加工》，它如一曲不朽长歌，久久萦绕耳畔、镌刻于心。当年有幸聆听这场报告，先生真挚朴实的分享，至今仍不断感染、激励着我。

孙院士求学于东北大学选矿专业，一生情系母校、心系学科发展，始终牵挂我校矿物加工专业的建设与成长。作为学界泰斗，他扎根矿物加工领域数十年，攻坚克难、开拓创新，攻克多项复杂矿产选矿技术难题，以深厚学识夯实行业根基，用科研担当助推学科发展。

每次与孙院士接触，我都能深切感受到他温润谦和的长者风范。他十分关心青年学者成长，毫无保留地分享治学经验与科研感悟，耐心点拨、倾力帮扶，为青年教师厘清治学方向，坚定大家育人与科研的初心。

先生之风，山高水长。如今前辈虽逝，精神永存。我们必将传承孙院士严谨治学、潜心钻研、立德树人的崇高精神，深耕矿物加工教学科研一线，薪火相传、笃行不怠，不负先生殷切期许，为保障国家矿产资源安全贡献力量。

——张小龙