

# 高硅型含铁锰矿石氢基矿相转化分选试验

张淑敏<sup>1,3,4</sup>, 董再蒸<sup>1,3,4</sup>, 温国栋<sup>1,3</sup>, 袁帅<sup>1,2,3,4</sup>, 李艳军<sup>1,3,4</sup>

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628;
3. 难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819;
4. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD951.1; TD951.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0060-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.006

**摘要** 锰铁矿石是锰、铁冶炼的重要原料, 由于类质同象及微细粒嵌布等因素影响, 锰与铁难以实现高效分离并综合利用。针对高硅型含铁锰矿石, 制定了氢基矿相转化-磁选工艺流程, 并考察了焙烧温度、焙烧时间、还原气体浓度及总气量对锰铁分离及二价锰转化率效果的影响。试验结果表明, 在磨矿细度为 $-0.074\text{ mm}$  占比 72%、焙烧温度  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、气体体积比  $v(\text{CO}):v(\text{H}_2)=1:3$ 、还原气体浓度 50%、总气量  $600\text{ mL/min}$ 、焙烧时间 40 min、磁选磁场强度  $1\ 070\text{ Oe}$  的条件下, 可获得全锰品位 31.00%、回收率 91.01%、二价锰转化率 91.29% 的锰精矿及铁品位 28.50%、回收率 50.63% 的铁精矿。化学成分分析、XRD 分析、SEM-EDS 分析结果均表明锰矿物与铁矿物实现了有效的分离。

**关键词** 锰铁矿石; 氢基矿相转化; 磁选; 锰铁分离; 悬浮磁化焙烧

## 引言

锰是钢铁工业生产中重要合金元素和炼钢脱硫剂、脱氧剂, 在国民经济生产中有重要的支撑地位<sup>[1]</sup>。矿石中的锰主要以软锰矿、硬锰矿及含锰碳酸盐的形式存在, 由于我国合金钢、金属锰和锰系合金的产量常年居世界首位, 新能源电池、电子产业所需电解级二氧化锰、四氧化三锰用量与日俱增。我国富锰矿石资源占比低且可采储量日渐枯竭, 所以高效综合利用贫锰矿和含铁锰矿石具有重要理论和实际意义<sup>[2]</sup>。由于含铁锰矿中锰、铁矿物共生关系密切, 铁锰常见类质同象, 铁锰之间嵌布粒度微细使得二者分选难度大<sup>[3]</sup>。

东北大学提出的“氢基矿相转化”新技术可实现锰铁矿石等难选铁矿石的低碳清洁高效开发利用, 与传统煤基还原技术相比具有低碳环保、能耗低、反应温度低、传热效率高、产品质量均匀等优点<sup>[4-7]</sup>。该技术以氢气与一氧化碳体积分数比大于 1.5 的富氢气体或体积分数大于 55% 的氢气作为还原剂, 在悬浮态下将锰铁矿石中弱磁性的赤铁矿转变为强磁性的磁铁矿, 将高价态的锰矿物转变为低价态弱磁性的活

性锰矿物<sup>[8-10]</sup>。经磁选分离后, 铁精矿和锰精矿分别被富集到磁性产品和非磁性产品中, 不仅提高了资源利用效率实现全组分利用<sup>[11]</sup>, 还从源头上降低磁化焙烧过程中的碳排放<sup>[12]</sup>。

本研究采用氢基矿相转化-弱磁分离技术从高硅型含铁锰矿石中回收铁矿物和锰矿物。在对高硅型含铁锰矿石进行工艺矿物学研究的基础上, 对影响氢基矿相转化效果的主要工艺参数进行了优化。通过化学多元素分析、化学物相分析、XRD 分析和 SEM-EDS 分析技术研究了铁锰定向迁移机制, 实现了铁锰矿物高温还原过程的异步转化和同步分离, 为高硅型含铁锰矿石高效综合利用提供了新思路。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验原料

原矿化学多元素分析结果如表 1 所示。从表中可知, 原矿为典型高硅低铁型锰矿石, 原矿 TMn 含量为 24.50%, 其中  $\text{Mn}^{2+}$  含量为 0.62%; TFe 含量为 9.27%; 主要杂质成分为  $\text{SiO}_2$ , 含量为 34.35%; 有害元素 P、S 含量较低, 含量分别为 0.26%、0.007%。

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174240); 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金项目(BGRIMM-KJSKL-2023-15)

作者简介: 张淑敏(1965—), 女, 高级实验师, 主要从事复杂矿产资源高效利用技术研究。

通信作者: 董再蒸(1984—), 男, 高级实验师, 主要从事复杂矿产资源高效利用技术研究。

表 1 锰铁矿石化学成分分析(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the ferromanganese ores (mass fraction)

成分	TMn	Mn <sup>2+</sup>	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	S	烧失
含量	24.50	0.62	9.27	<0.10	34.35	6.17	0.14	0.40	0.26	0.007	10.04

原矿工艺矿物学研究表明, 矿石中金属矿物含量高, 锰矿物主要为硬锰矿和软锰矿, 其次为少量褐锰矿和其它锰矿物, 铁矿物主要为褐铁矿, 脉石矿物主要有石英和黏土矿物, 还含有少量长石、绿泥石、白云母、绢云母、碳酸盐矿物和高岭石等。矿石中硬锰

矿与其他锰矿物之间的嵌布关系十分密切, 可一起回收(图 1a)。但是褐铁矿与锰矿物之间嵌布关系密切, 彼此相互交代, 相互包裹, 锰矿物与铁矿物难以完全解离(图 1b), 所以以常规选矿方法难以实现铁锰的有效分离。

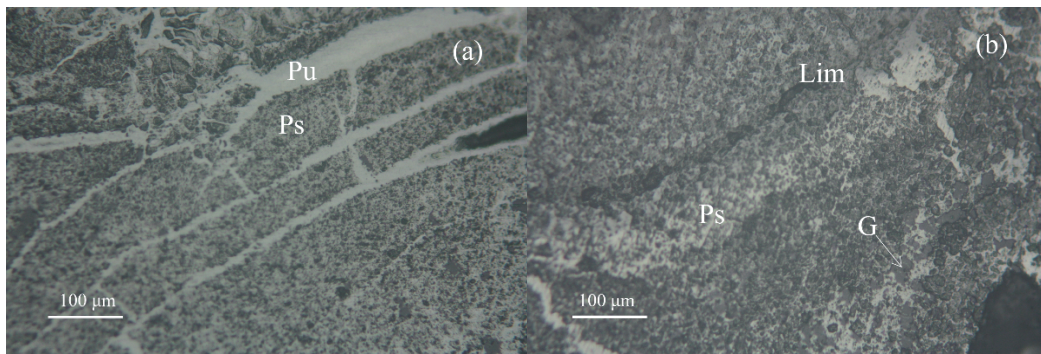


图 1 硬锰矿 (Ps)、软锰矿 (Pu)、褐铁矿 (Lim) 与脉石 (G) 间复杂共生关系照片

Fig. 1 Microscopic photos of complex intercalation relationship among pyrolusite (Ps), pyrolusite (Pu), limonite (Lim) and gangue (G)

### 1.2 试验装置和方法

图 2 为试验所用的氢基矿相转化系统示意图。试验装置主要由供气系统、焙烧炉系统、气体流量控制系统和磁选系统 4 部分组成。试验具体操作步骤如下: 启动焙烧炉, 待温度达到预设温度并保持稳定后, 将一定质量的试样放入石英管中, 迅速通入氮气

使管中的空气排尽。通入一定比例的 H<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub> 气体的混合气体, 计时进行磁化焙烧。当焙烧结束, 关闭还原气气体通道, 通氮气置换后将石英管从焙烧炉中取出, 倒出焙烧产品并进行水淬降温。将焙烧产品过滤烘干后分取出一定质量给入磁选管进行弱磁选, 弱磁选的磁场强度为 1 070 Oe, 磁选过后得到磁性产品(铁精矿)和非磁性产品(锰精矿)。

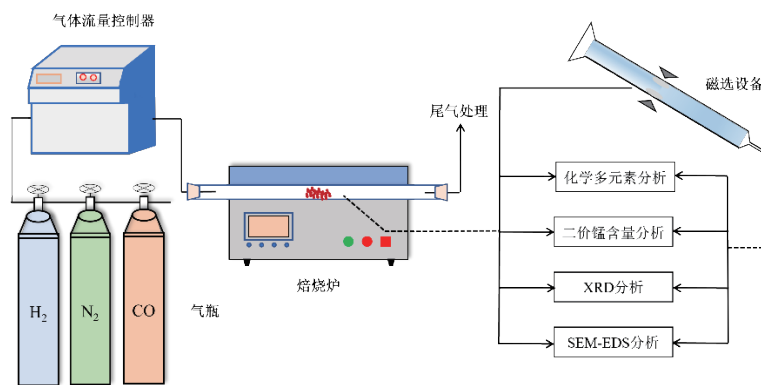


图 2 氢基矿相转化装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hydrogen based phase transformation device

由于二价锰是电解锰及电池生产的重要原料, 所以二价锰转化率是评判锰精矿在下游产业利用价值的主要指标, 也是体现氢基矿相效果的重要依据。本试验分别考察焙烧温度、焙烧时间、还原气浓度和总气量对磁选产品金属含量、金属回收率及锰转化率的影响, 分析分选产品的化学组成及矿物性质, 以此来

判断锰铁矿石氢基矿相转化效果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焙烧温度的影响

焙烧温度是影响焙烧产品指标的关键因素之一,

为了考察焙烧温度对焙烧效果的影响,因此进行焙烧温度条件试验。固定条件为:原矿磨至-0.074 mm 占比 72%,焙烧时间 30 min、总气量 600 mL/min、还原气

体积浓度 60%、气体体积比  $v(\text{CO}) : v(\text{H}_2)=1 : 3$ 、磁场强度 1 070 Oe。焙烧温度条件分别为 500 °C、540 °C、580 °C、620 °C、660 °C 和 700 °C。试验结果如图 3 所示。

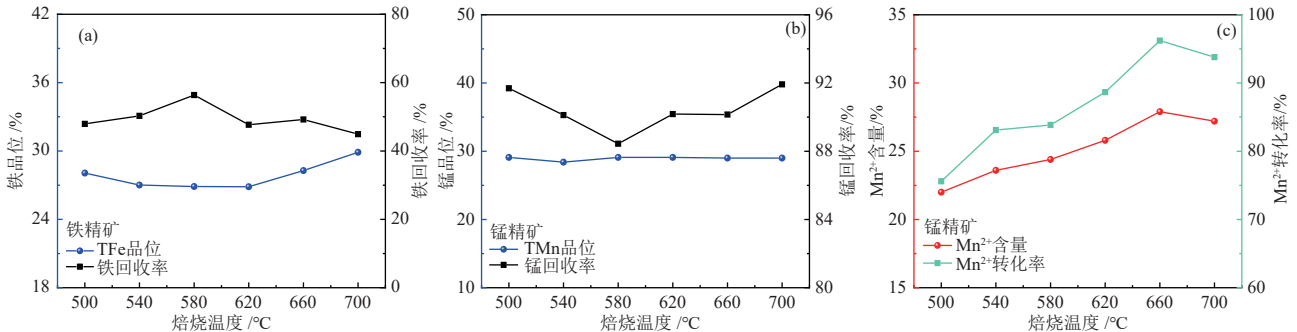


图 3 焙烧温度对氢基矿相转化的影响  
Fig. 3 Effect of roasting temperature on the hydrogen based phase transformation process

由图 3 可知随着焙烧温度的增长,锰和铁的还原程度增加,锰精矿的锰品位基本保持稳定,当焙烧温度从 500 °C 增加为 660 °C 时,  $\text{Mn}^{2+}$  含量从 22.00% 提高到 27.90%,  $\text{Mn}^{2+}$  转化率由 75.60% 增至 96.21%, 进一步提高温度至 700 °C,  $\text{Mn}^{2+}$  含量降至 27.20%,  $\text{Mn}^{2+}$  转化率降至 93.79%。当焙烧温度从 500 °C 增加为 620 °C 时,铁精矿的铁品位由 28.06% 减少到 26.86%, 继续提高温度至 700 °C, 铁品位增至 29.89%。为保证锰精矿锰品位及  $\text{Mn}^{2+}$  转化率, 确定适宜的焙烧温度为 660 °C,

此时锰精矿锰品位为 27.90%,  $\text{Mn}^{2+}$  转化率为 96.21%。

### 2.2 焙烧时间的影响

焙烧时间是影响矿石磁化焙烧效果的重要因素之一。在原矿磨至-0.074mm 占比 72%, 焙烧温度 660 °C、总气量 600 mL/min、还原气体积浓度 60%、气体体积比  $v(\text{CO}) : v(\text{H}_2)=1 : 3$ 、磁场强度 1 070 Oe 条件下, 考察还原时间为 10 min、20 min、30 min、40 min、50 min 对分选指标的影响。焙烧时间对铁锰矿氢基矿相转化指标影响如图 4 所示。

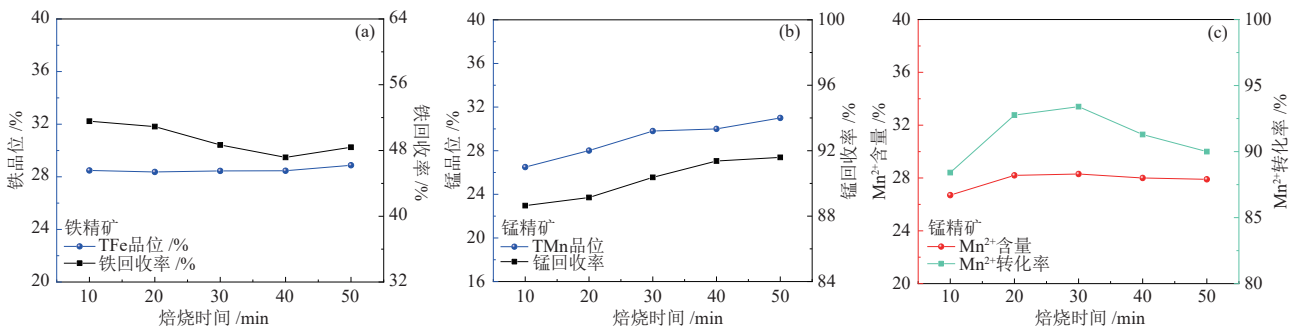


图 4 焙烧时间对氢基矿相转化的影响  
Fig. 4 Effect of roasting time on the hydrogen based phase transformation process

由图 4 可知,随着焙烧时间延长,铁和锰的还原程度加深,锰精矿中锰品位、 $\text{Mn}^{2+}$  含量和锰回收率呈逐渐升高的趋势,铁精矿中铁品位也整体呈现上升趋势。当还原时间由 10 min 增加至 20 min 时,锰精矿中  $\text{Mn}^{2+}$  含量由 24.80% 升高至 24.60%;  $\text{Mn}^{2+}$  转化率由 93.58% 小幅提高至 94.62%。进一步延长还原时间至 50 min, 锰精矿  $\text{Mn}^{2+}$  含量提高至 27.90%, 但  $\text{Mn}^{2+}$  转化率下降至 90.00%。为保证锰精矿锰品位及  $\text{Mn}^{2+}$  转化率, 确定适宜的还原时间为 40 min, 此时锰精矿锰品位为 27.40%,  $\text{Mn}^{2+}$  转化率为 91.33%。

### 2.3 还原气浓度的影响

还原气浓度对磁化焙烧效果影响显著。因此,开展了还原气浓度条件试验。固定试验条件为:原矿磨至-0.074 mm 占比 72%, 焙烧温度 660 °C、总气量 600 mL/min、焙烧时间 40 min、气体体积比  $v(\text{CO}) : v(\text{H}_2)=1 : 3$ 、磁场强度 1 070 Oe。还原气体积浓度分别为 20%、30%、40%、50%、60%。试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知,随着还原气浓度的增长,锰的还原程度有较明显提高。锰精矿的锰品位和锰回收率在小范围内波动,铁精矿的铁品位及回收率变化并不明

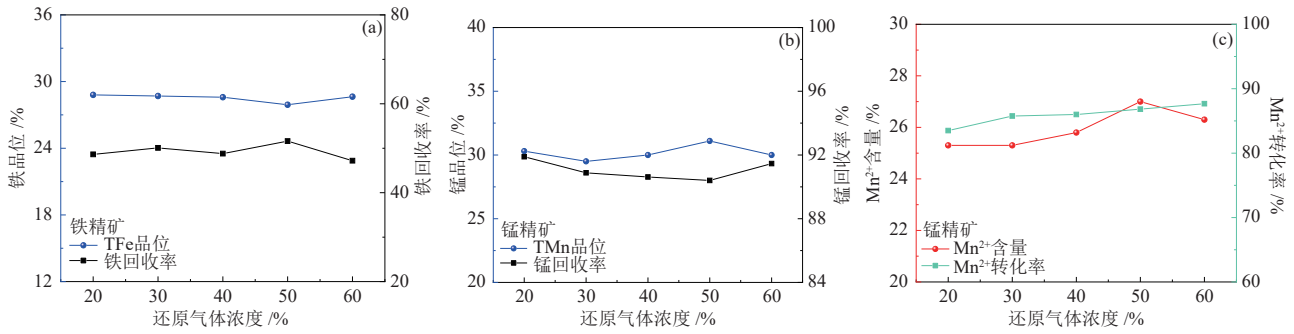


图 5 还原气体浓度对氢基矿相转化的影响  
Fig. 5 Effect of reductive gas concentration on the hydrogen based phase transformation process

显。当还原气体浓度从 20% 增加到 50% 时, 锰精矿锰含量由 30.30% 升至 31.10%, Mn<sup>2+</sup>转化率由 83.50% 增加到 91.64%, 继续提高还原气体浓度至 60%, 锰含量降至 30.00%, Mn<sup>2+</sup>转化率降至 91.00%。因此确定适宜的还原气体浓度为 50%。

### 2.4 总气量的影响

焙烧采用的还原剂为 CO 和 H<sub>2</sub>, 还原剂用量对还

原速率影响显著。为了考察还原剂用量对焙烧效果的影响, 进行总气量条件试验。固定试验条件为: 原矿磨至 -0.074mm 占比 72%, 焙烧温度 660 °C、气体体积比  $v(\text{CO}) : v(\text{H}_2) = 1 : 3$ 、还原气体浓度 50%、焙烧时间 40 min、磁场强度 1 070 Oe。总气量分别为 300 mL/min、400 mL/min、500 mL/min、600 mL/min、700 mL/min。试验结果如图 6 所示。

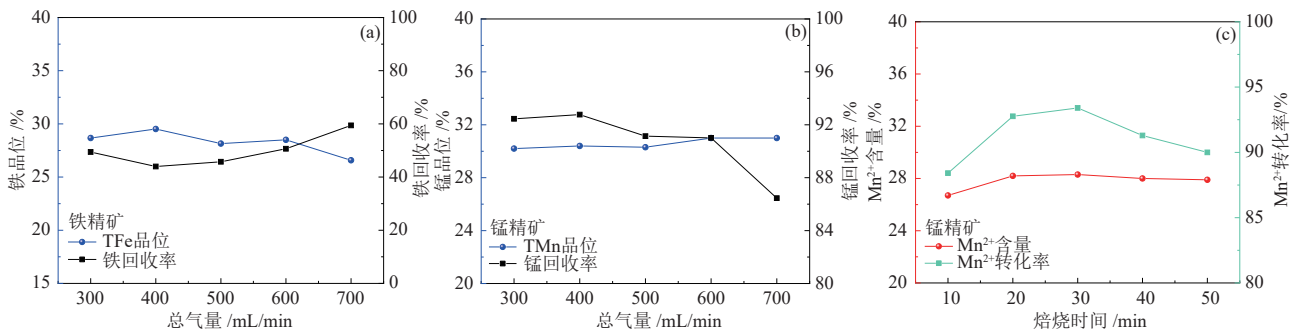


图 6 总气量对氢基矿相转化的影响  
Fig. 6 Effect of total gas-flow rate on the hydrogen based phase transformation process

由图 6 可知适当增加还原剂用量可提高锰精矿的锰品位和 Mn<sup>2+</sup>转化率, 但总气量过大会恶化选别指标。和。当总气量从 300 mL/min 增加为 500 mL/min 时, 锰精矿中 Mn<sup>2+</sup>含量由 26.70% 增至 28.30%, Mn<sup>2+</sup>转化率由 88.41% 增至 93.40%, 进一步增大总气量, Mn<sup>2+</sup>含量降至 27.90%, Mn<sup>2+</sup>转化率降至 90.00%。当总气量从 300 mL/min 增加为 400 mL/min 时, 铁精矿的铁品位由 28.67% 升至 29.52%, 铁回收率由 49.41% 降至 43.96%。当总气量增加到 700 mL/min 时, 铁品位减至 26.58%, 回收率则升至 59.42%。为保证锰精矿锰品位及 Mn<sup>2+</sup>转化率, 确定适宜的总气量为 600 mL/min, 此时锰精矿锰品位为 31.00%, Mn<sup>2+</sup>转化率为 91.29%。

氢基矿相转化条件试验结果表明, 在磨矿细度为 -0.074mm 占比 72%、焙烧温度 660 °C、气体体积比  $v(\text{CO}) : v(\text{H}_2) = 1 : 3$ 、还原气体浓度 50%、总气量 600 mL/min、焙烧时间 40 min、磁选磁场强度 1 070 Oe 的条件下, 可获得全锰品位 31.00%、回收率 91.01%、二价锰转化率 91.29% 的锰精矿及铁品位 28.50%、回

收率 50.63% 的铁精矿。

### 2.5 产品性质分析

#### 2.5.1 试验产品化学组成分析

为查明焙烧产品的物质组成, 首先对其进行化学多元素分析, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 矿相转化产品中 TFe 含量为 10.32%, FeO 含量为 11.06%, 较原矿有明显提高; TMn 含量为 27.00%, 其中 Mn<sup>2+</sup>含量为 25.7%。锰精矿中 TMn 含量为 31.00%, 其中 Mn<sup>2+</sup>含量为 28.3%; TFe 和 FeO 含量分别为 5.50%、0.93%; 主要杂质成分 SiO<sub>2</sub> 含量 40.55%。铁精矿铁品位为 28.50%, FeO 含量为 32.82%; TMn 含量为 16.20%; 主要杂质成分 SiO<sub>2</sub> 含量 32.58%; 有害元素 P、S 含量分别为 0.69%、0.016%。分析结果表明, 铁矿物和锰矿物被分别富集到了磁选精矿(铁精矿)和磁选尾矿(锰精矿)中。

表 2 氢基矿相转化与磁选试验产品的化学成分分析(质量分数)

Table 2 Chemical compositions of the roasted and magnetic separation products (mass fraction)

产品名称	TMn	Mn <sup>2+</sup>	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	S
矿相转化产品	27.00	25.7	10.32	11.06	37.95	7.77	0.20	0.35	0.31	0.008
磁选精矿	16.20	15.6	28.50	32.82	32.58	8.89	0.24	0.43	0.69	0.016
磁选尾矿	31.00	28.3	5.50	0.93	40.55	6.58	0.25	0.30	0.19	0.009

### 2.5.2 试验产品矿物组成分析

为进一步探明焙烧产品的矿物组成,对其进行了XRD衍射分析,结果如图7所示,图中自下而上分别为原矿、矿相转化产品、磁选精矿和磁选尾矿的分析谱图。由图7可知,原矿中主要矿物为石英,主要锰矿物为软锰矿,还有少量针铁矿存在;焙烧产品中主要铁矿物为磁铁矿和金属铁,锰矿物为方锰矿,脉石矿物为石英。说明大部分弱磁性铁矿物经悬浮磁化焙烧后已转化为强磁性铁矿物,软锰矿经还原焙烧后转化为方锰矿;铁精矿中主要铁矿物为磁铁矿,还有少量金属铁存在;锰精矿中主要锰矿物为方锰矿,脉石矿物为石英。

### 2.5.3 试验产品的扫描电镜分析

为了确定氢基矿相转化过程中矿石微观结构和矿物组成的变化,利用SEM-EDS对优化条件下获得的磁精矿和磁尾矿进行了分析。磁选精矿和尾矿的点扫描和线扫描结果如图8所示。点扫描(图8 a-1、

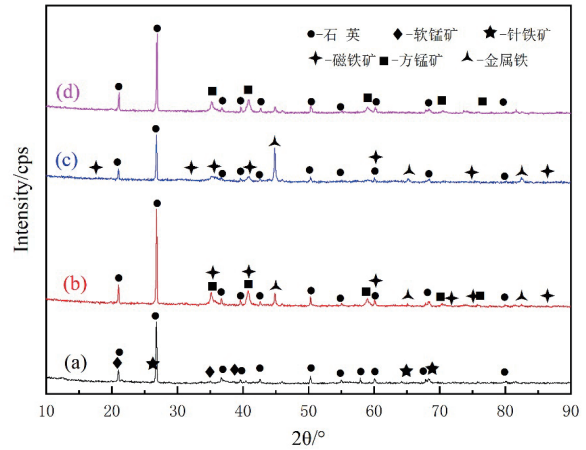


图7 不同选别阶段产品的XRD分析谱图(a:原矿;b:矿相转化产品;c:磁选精矿;d:磁选尾矿)

Fig. 7 XRD patterns at different stages (a: Raw ore; b: Mineral phase conversion products; c: Magnetic separation concentrate; d: Magnetic separation tailings)

b-1)表明磁选精矿中的主要有用元素是铁元素占35.55%,锰元素占3.05%;而选尾矿中的主要有用元素

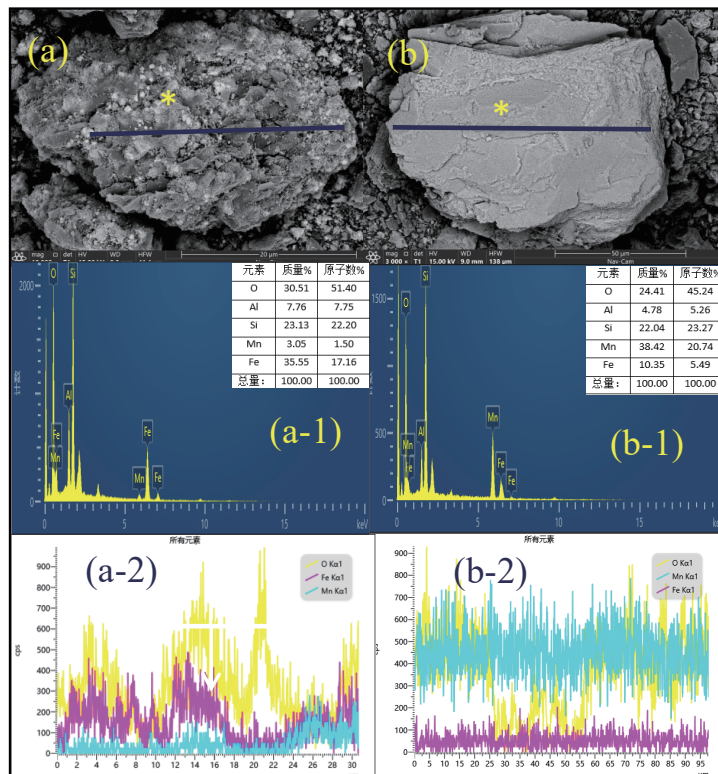


图8 磁选精矿(a)和磁选尾矿(b)的扫描电镜点扫描和线扫描分析结果

Fig. 8 The point and line scanning maps of magnetic concentrate (a) and magnetic tailings (b)

是铁元素占 10.35%, 锰元素占 38.42%。线扫描显示磁选精矿(图 8 a-2)中铁元素的光谱强度为 210 cps, 而锰的平均能谱强度元素仅为 70 cps; 磁选尾矿(图 8 b-2)中的锰元素平均能谱强度为 450 cps, 而铁元素的平均能谱强度仅为 50 cps。点扫描和线扫描分析证实铁元素主要富集在磁选精矿中, 而锰元素主要集中在磁选尾矿中。

### 3 结论

1) 高硅型含铁锰矿石氢基矿相转化分选试验结果表明, 在磨矿细度为 $-0.074\text{ mm}$ 占比 72%、焙烧温度 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、气体体积比 $\text{CO}:\text{H}_2=1:3$ 、还原气体积浓度 50%、总气量 $600\text{ mL/min}$ 、焙烧时间 $40\text{ min}$ 、磁选磁场强度 $1\ 070\text{ Oe}$ 的条件下, 可获得全锰品位 31.00%、回收率 91.01%、二价锰转化率 91.29%的锰精矿及铁品位 28.50%、回收率 50.63%的铁精矿。

2) 经过氢基矿相转化工艺, 原矿中的主要金属矿物褐铁矿、软锰矿转化为磁铁矿、金属铁和方锰矿。铁矿物和锰矿物因存在明显的磁性差异而用通过磁选实现高效分离。

3) 通过控制氢基矿相转化工艺条件, 锰精矿中二价锰转化率为 91.29%, 较原矿中二价锰分布率 2.53%有显著地提高。锰矿物定向转化为二价锰使得其更易于浸出提取, 提高资源利用效益。

4) 氢基矿相转化技术为高硅型含铁锰矿石的清洁高效利用提供了新方法, 有望实现铁锰矿物高温还原过程的异步转化和同步分离, 达到“源头减量、高效转化、精准回收”的目标, 实现巨大的经济效益和社会效益。

### 参考文献:

- [1] 刘陟娜, 许虹, 王秋舒, 等. 中国锰矿供需现状及可持续发展建议[J]. 资源与产业, 2015, 17(6): 38-43.  
LIU Z N, XU H, WANG Q S, et al. China's manganese supply-demand actuality and its sustainable development[J]. Resources & Industries, 2015, 17(6): 38-43.
- [2] 刘鹏飞, 袁帅, 李艳军, 等. 含铁锰矿石资源概述及开发利用研究现状[J]. 中国锰业, 2021, 39(1): 5-12.
- LIU P F, YUAN S, LI Y J, et al. A research status of development and utilization of iron-bearing manganese ore resources[J]. Chinese manganese industry, 2021, 39(1): 5-12.
- [3] 谢丹丹, 童雄, 张洪花, 等. 铁锰矿的选矿工艺及其研究进展[J]. 中国锰业, 2016, 34(2): 4-7.  
XIE D D, TONG X, ZHANG H H, et al. Research development and beneficiation technology of Ferro-Mn ore[J]. Chinese manganese industry, 2016, 34(2): 4-7.
- [4] 韩跃新, 张琦, 李艳军, 等. 海南石碌铁矿石氢基矿相转化新技术研究及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3): 537-543.  
HAN Y X, ZHANG Q, LI Y J, et al. Research and application of a new hydrogen-based phase transformation technology for Hainan-Shilu iron ore[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(3): 537-543.
- [5] TANG Z D, ZHANG Q, SUN Y S, et al. Pilot-scale extraction of iron from flotation tailings via suspension magnetization roasting in a mixture of CO and H<sub>2</sub> followed by magnetic separation[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 172: 105680.
- [6] TANG Z D, ZHANG Q, SUN Y S, et al. Pilot-scale extraction of iron from flotation tailings via suspension magnetization roasting in a mixture of CO and H<sub>2</sub> followed by magnetic separation, Resources, Conservation and Recycling, 2021, 172: 105680.
- [7] CAO Y, SUN Y S, GAO P, et al. Mechanism for suspension magnetization roasting of iron ore using straw-type biomass reductant[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(6): 1075-1083.
- [8] LIU B B, ZHANG Y B, SU Z J, et al. A study on the carbonization and alloying process of MnO<sub>2</sub> by methane-hydrogen gas mixture in the presence of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Powder Technology, 2018, 325, 271-279.
- [9] YUAN S, ZHOU W T, HAN Y X, et al. Individual enrichment of manganese and iron from complex refractory ferromanganese ore by suspension magnetization roasting and magnetic separation[J]. Powder Technology, 2020, 373, 689-701.
- [10] YUAN S, ZHOU W T, HAN Y X, et al. Separation of manganese and iron for low-grade ferromanganese ore via fluidization magnetization roasting and magnetic separation technology[J]. Minerals Engineering, 2020, 152, 106359.
- [11] YUAN S, ZHOU W T, HAN Y X, et al. An innovative technology for full component recovery of iron and manganese from low grade iron-bearing manganese ore[J]. Powder Technology, 2020, 373, 73-81.
- [12] CAO Y, SUN Y S, GAO P, et al. Mechanism for suspension magnetization roasting of iron ore using straw-type biomass reductant, International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(6): 1075-1083.

## Hydrogen Based Phase Transformation Separation of High Silicon Ferromanganese Ores

ZHANG Shumin<sup>1,3,4</sup>, DONG Zaizheng<sup>1,3,4</sup>, WEN Guodong<sup>1,3</sup>, YUAN Shuai<sup>1,2,3,4</sup>, LI Yanjun<sup>1,3,4</sup>

1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing 102628, China;

3. National-local Joint Engineering Research Center of High-efficient Exploitation Technology for Refractory Iron Ore Resources, Shenyang 110819, China;

4. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China

**Abstract:** Ferromanganese ore is an important raw material for manganese and iron beneficiation and smelting. It is difficult to separate manganese and iron efficiently due to factors such as isomorphism and fine particle embedding. The technological process of hydrogen based mineral phase transformation magnetic separation was established for high silicon ferromanganese ores, and the effects of roasting temperature, roasting time, reduction gas concentration and total gas volume on the separation of ferromanganese and the conversion rate of manganese divalent were investigated. The experimental results show that under the conditions of grinding fineness of  $-0.074$  mm accounting for 72%, roasting temperature of  $660$  °C, gas volume ratio  $\text{CO}:\text{H}_2=1:3$ , reducing gas volume concentration of 50%, total gas volume of 600 mL/min, roasting time of 40 minutes, magnetic separation magnetic field strength of 1 070 Oe, a manganese concentrate with a total manganese grade of 31.00%, a recovery rate of 91.01%, a divalent manganese conversion rate of 91.29%, and an iron concentrate with an iron grade of 28.50% and a recovery rate of 50.63% can be obtained. The results of chemical composition analysis, XRD analysis and SEM-EDS analysis show that manganese minerals and iron minerals have been effectively separated.

**Keywords:** ferromanganese ore; hydrogen based mineral phase transformation; magnetic separation; separation of manganese and iron; suspension magnetization roasting

引用格式: 张淑敏, 董再蒸, 温国栋, 袁帅, 李艳军. 高硅型含铁锰矿石氢基矿相转化分选试验[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 60-66.

ZHANG Shumin, DONG Zaizheng, WEN Guodong, YUAN Shuai, LI Yanjun. Hydrogen based phase transformation separation of high silicon ferromanganese ores[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 60-66.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)



### 作者简介:

张淑敏(1965—),女,辽宁建平人,东北大学高级实验师。主要从事矿物加工实验教学、科学研究方向为复杂难选铁矿、铁锰矿、石煤钒矿、金矿等矿石的悬浮焙烧高效分选。曾参加科技部国家“863”项目1项,国家自然科学基金项目2项,国家重点研发项目1项,横向科研课题数十项,实践经验丰富。获冶金部科技进步一等奖1项,国家经济贸易科学技术进步二等奖1项。



### 通信作者简介:

董再蒸(1984—),男,辽宁铁岭人,博士,高级实验师。从事矿物加工专业实验教学和矿物分析检测工作,承担复杂难选矿物资源高效综合利用前期研发试验项目。主要研究方向为金属矿物化学氧化预处理、难选金矿石非氰浸出及高效浮选药剂研制与应用。作为主要成员参与了多项国家自然科学基金项目,获授权发明专利1项,获省学术成果奖2项,参编学术专著2部,在 Journal of Luminescence, Minerals Engineering、分析化学、光谱学与光谱分析、东北大学学报等知名期刊发表学术论文近20篇。